



现 | 代 | 生 | 产 | 安 | 全 | 技 | 术 | 丛 | 书 第二版

# 锅炉安全技术

GUOLU ANQUAN JISHU

第二版

崔政斌 吴进成 编著



化学工业出版社

本书是《现代生产安全技术丛书》(第二版)的一个分册。

锅炉是利用燃料能源的热能或工业生产中的余热,将工质加热到一定温度和压力的换热设备,在工业中具有十分重要的作用。同时,锅炉又是具有爆炸危险性的热力设备,生产过程中如果使用和管理不当常会导致恶性事故。

本书主要介绍了锅炉主要受压零件安全技术、锅炉安全运行与科学管理、锅炉的水处理、锅炉的检验方法、锅炉的维护与维修、锅炉事故预处理等。因锅炉在运行过程中发生的事故大多与水质有关,本书对锅炉的水处理做了着重介绍,这是本书的一大亮点。

本书可供工业锅炉运行人员、管理人员、维修人员在工作过程中使用,也可供有关院校的师生阅读。

#### 图书在版编目(CIP)数据

锅炉安全技术/崔政斌,吴进成编著. —2版. —北京:化学工业出版社,2009.2

(现代生产安全技术丛书,第二版)

ISBN 978-7-122-04165-4

I. 锅… II. ①崔…②吴… III. 锅炉-安全技术 IV. TK223.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第184816号

---

责任编辑:杜进祥 郭乃铎  
责任校对:宋 玮

文字编辑:林 丹  
装帧设计:关 飞

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

850mm×1168mm 1/32 印张9½ 字数263千字 2009年3月北京第2版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:24.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

我国有各种工业锅炉上百万台，对发展工业生产具有十分重要的作用。随着国民经济的迅速发展，人民生活的普遍提高，工业锅炉的使用越来越广泛，数量还在不断增加，工业锅炉的技术也有很大的进步。但在锅炉的设计、制造、安装、使用、检修、维护、改造等各个方面还存在一些问题。尤其是部分从事锅炉运行管理工作的人员和司炉人员素质还不高，表现在锅炉事故时有发生，特别是锅炉爆炸、爆管和缺水等恶性事故还不能根除，直接危及着生产及人身安全。从近几年来锅炉事故统计资料的分析可知，因运行、管理不当发生的锅炉重大事故占到 80% 以上，已成为引起锅炉事故的主要原因。

在经济上，锅炉的节能工作也是很有潜力的。如何安全地保持锅炉的稳定运行，仅从提高管理水平、改进操作等措施入手，锅炉的热效率就能提高 5%~10%，也就是说，保证锅炉的安全稳定运行，每年全国的工业锅炉就可节煤上千万吨，相当于一个特大型煤矿一年的产量，这是一笔非常重要的财富。

针对上述情况，在化学工业出版社《现代生产安全技术丛书》改版之际，我们编写了这本《锅炉安全技术》，扼要地介绍了工业锅炉管理工作中各个环节的技术措施，还总结了有关实用知识和管理经验，力求简练、深入浅出、通俗易懂。作为使用工业锅炉的管理人员、维修人员和司炉工的工作参考书，愿为工业锅炉的安全稳定运行尽一点微薄之力。

本书在编写过程中得到了化学工业出版社责任编辑和领导的悉心指导，在此一并致谢。

由于编写者水平有限，错误和不足之处在所难免，望读者朋友们批评指正。

**崔政斌 吴进成**

**2008年11月**

# 目 录

## 第一章 锅炉主要受压零件安全技术 1

第一节 ● 概述 .....	1
一、锅炉类型及蒸汽参数系列 .....	2
二、发展趋向 .....	5
第二节 ● 主要受压组件安全技术 .....	6
一、锅壳式锅炉的结构特点 .....	6
二、主要受压组件的安全技术要求 .....	7
三、水管锅炉各受压组件的安全技术要求 .....	9
四、对锅炉本体结构的基本安全技术要求 .....	16
第三节 ● 工业锅炉安全附件 .....	18
一、安全阀 .....	18
二、压力表的选用与装设 .....	31
三、水位表 .....	33
四、温度测量仪表 .....	39
五、排污阀 .....	41

## 第二章 锅炉安全运行与科学管理 45

第一节 ● 锅炉的启动 .....	45
一、点火前的检查 .....	45
二、点火前的准备 .....	47
三、点火、升压、暖管和并汽 .....	50
第二节 ● 锅炉运行中的监督调整与管理 .....	51
一、水位的调节 .....	52
二、汽压的调节 .....	53

三、汽温的调节 .....	54
四、排污 .....	55
五、吹灰 .....	56
六、水位表的冲洗 .....	57
<b>第三节 ● 停炉及停炉后的保养 .....</b>	<b>58</b>
一、压火停炉 .....	58
二、正常停炉 .....	59
三、紧急停炉 .....	60
四、停炉保养 .....	62

### 第三章 锅炉的水处理 66

<b>第一节 ● 概述 .....</b>	<b>66</b>
一、天然水中的杂质及其危害 .....	66
二、工业锅炉水质指标 .....	68
三、天然水及锅炉用水的分类 .....	72
四、工业锅炉水处理目的及选择水处理方式的基本原则 .....	74
<b>第二节 ● 工业锅炉水质标准 .....</b>	<b>75</b>
一、低压锅炉水质标准 .....	75
二、水质标准的制定 .....	77
<b>第三节 ● 工业锅炉用水的预处理 .....</b>	<b>80</b>
一、地表水的预处理 .....	80
二、自来水的预处理 .....	102
三、高硬度和高碱度水的预处理 .....	106
<b>第四节 ● 离子交换树脂及离子交换原理 .....</b>	<b>114</b>
一、离子交换树脂的分类 .....	115
二、离子交换树脂的物理性能 .....	117
三、离子交换树脂的化学性能 .....	119
四、离子交换器的工作过程 .....	124
<b>第五节 ● 软化及降碱联合处理系统 .....</b>	<b>131</b>
一、钠离子交换软化及药剂降碱联合处理系统 .....	131
二、H-Na 离子交换系统 .....	140
三、NH <sub>4</sub> -Na 离子交换系统 .....	149
四、Cl-Na 离子交换系统 .....	158

第六节 ● 各种软化、脱碱联合处理系统的比较 .....	163
第七节 ● 水的除盐处理 .....	166
一、水的化学除盐 .....	166
二、化学除盐系统 .....	168
三、化学除盐水质 .....	170
四、除盐系统的布置原则 .....	172
五、双层床除盐工艺 .....	173
第八节 ● 反渗透 .....	175
一、渗透和反渗透 .....	175
二、反渗透膜 .....	179
三、反渗透脱盐机理 .....	183
四、反渗透膜组件 .....	186
五、反渗透除盐系统 .....	189
第九节 ● 锅炉水质的监督与管理 .....	192
一、锅炉水质监督检验的内容 .....	192
二、水质管理工作中常见的问题和改进方法 .....	194

## 第四章 锅炉的检验方法 197

第一节 ● 常规检验 .....	197
一、外观检验 .....	198
二、锤击检验 .....	198
三、灯光检验 .....	199
四、拉线检查和直尺检查 .....	199
五、样板检查 .....	200
六、超声波测厚仪检查组件壁厚 .....	200
七、钻孔检查 .....	200
第二节 ● 无损探伤检验 .....	202
一、液体渗透探伤 .....	202
二、磁粉探伤 .....	205
三、射线探伤 .....	210
四、超声波探伤 .....	214
第三节 ● 水压试验 .....	220
一、水压试验的目的 .....	220

二、水压试验前的准备 .....	222
三、水压试验压力的规定，试验方法和合格标准 .....	222

## 第五章 锅炉的维护与修理 225

<b>第一节 ● 锅炉常见缺陷及产生的部位 .....</b>	<b>225</b>
一、腐蚀 .....	225
二、裂纹 .....	229
三、变形 .....	231
四、磨损 .....	231
五、渗漏 .....	232
六、钢材组织缺陷 .....	232
<b>第二节 ● 缺陷的检查 .....</b>	<b>233</b>
一、腐蚀的检查 .....	233
二、裂纹的检查 .....	234
三、变形的检查 .....	234
四、磨损的检查 .....	234
五、组织缺陷的检查 .....	234
<b>第三节 ● 缺陷的修理 .....</b>	<b>234</b>
一、腐蚀和磨损的修理 .....	234
二、裂纹的修理 .....	237
三、变形、鼓包的处理 .....	238
四、泄漏的处理 .....	240
<b>第四节 ● 对存在缺陷锅炉的处理原则 .....</b>	<b>240</b>
一、继续使用 .....	240
二、监护使用 .....	240
三、降压使用 .....	241
四、修理使用 .....	241
五、更换部件 .....	241
六、判废 .....	241
<b>第五节 ● 锅筒的检修 .....</b>	<b>241</b>
一、锅筒常见缺陷 .....	241
二、缺陷的检查 .....	242
三、缺陷的修理 .....	243



<b>第六节 ● 水冷壁管和对流管束的检修</b> .....	243
一、常见的缺陷 .....	243
二、缺陷的修理 .....	244
三、集箱的检修 .....	245
四、省煤器的检修 .....	245
五、过热器的检修 .....	247
六、空气预热器的检修 .....	248

## 第六章 锅炉事故与处理      250

<b>第一节 ● 锅炉事故处理的意义和分类</b> .....	250
一、锅炉事故的定义 .....	250
二、锅炉事故的分类 .....	250
三、锅炉事故处理的意义 .....	251
<b>第二节 ● 锅炉缺水事故</b> .....	251
一、锅炉缺水事故的现象 .....	251
二、锅炉缺水事故的原因 .....	252
三、锅炉缺水事故的处理 .....	252
四、锅炉缺水事故处理应注意的问题 .....	254
<b>第三节 ● 锅炉满水事故</b> .....	254
一、锅炉满水事故的现象 .....	254
二、锅炉满水事故的原因 .....	254
三、锅炉满水事故的处理 .....	255
四、锅炉满水事故处理应注意的问题 .....	255
<b>第四节 ● 锅炉超压事故</b> .....	256
一、锅炉超压事故的现象 .....	257
二、锅炉超压事故的原因 .....	257
三、锅炉超压事故的处理 .....	257
四、锅炉超压事故处理应注意的问题 .....	257
<b>第五节 ● 锅炉汽水共腾事故</b> .....	258
一、锅炉汽水共腾事故的现象 .....	258
二、锅炉汽水共腾事故的原因 .....	258
三、锅炉汽水共腾事故的处理 .....	259
<b>第六节 ● 锅炉爆管事故</b> .....	259

一、锅炉爆管事故的现象 .....	259
二、锅炉爆管事故的原因 .....	260
三、锅炉爆管事故的处理 .....	261
四、锅炉爆管事故处理应注意的问题 .....	261
<b>第七节 ● 锅炉过热器爆管事故 .....</b>	<b>261</b>
一、锅炉过热器爆管事故的现象 .....	262
二、锅炉过热器爆管事故的原因 .....	262
三、锅炉过热器爆管事故的处理 .....	263
<b>第八节 ● 锅炉省煤器管损坏事故 .....</b>	<b>263</b>
一、锅炉省煤器管损坏事故的现象 .....	263
二、锅炉省煤器管损坏的原因 .....	264
三、锅炉省煤器管损坏事故的处理 .....	264
<b>第九节 ● 锅炉燃烧室、烟道爆炸和尾部烟道燃烧事故 .....</b>	<b>265</b>
一、锅炉燃烧室、烟道爆炸和尾部烟道燃烧事故的现象 .....	265
二、锅炉燃烧室、烟道爆炸和尾部烟道燃烧事故的原因 .....	265
三、锅炉燃烧室、烟道爆炸和尾部烟道燃烧事故的处理 .....	266
<b>第十节 ● 锅炉的水冲击事故 .....</b>	<b>267</b>
一、蒸汽管道内的水冲击事故 .....	267
二、锅筒内的水冲击事故 .....	268
三、给水管道内的水冲击事故 .....	269
四、省煤器内的水冲击事故 .....	269
<b>第十一节 ● 典型事故案例分析 .....</b>	<b>270</b>
一、广西合山电厂锅炉下降管爆破 .....	270
二、上海大众汽车公司锅炉烧坏 .....	271
<b>附录一 ● 饱和水与干饱和水蒸气表（按温度排列） .....</b>	<b>273</b>
<b>附录二 ● 饱和水与干饱和水蒸气表（按压力排列） .....</b>	<b>275</b>
<b>附录三 ● 未饱和水与过热蒸汽表 .....</b>	<b>277</b>

# 第一章

## 锅炉主要受压零件安全技术

### 第一节 概 述

锅炉（蒸汽发生器）是利用燃料或其它能源，把工质（一般为净化的水）加热到一定参数（温度、压力）的换热设备。

通常把燃料的燃烧、放热、排渣等称为炉内过程，把工质的流动、传动、热化学等称为锅内过程。图 1-1 为燃烧煤粉的自然循环锅炉及其辅机工作原理图。

锅炉按用途可分为电站锅炉、工业锅炉和船舶锅炉，其工作原

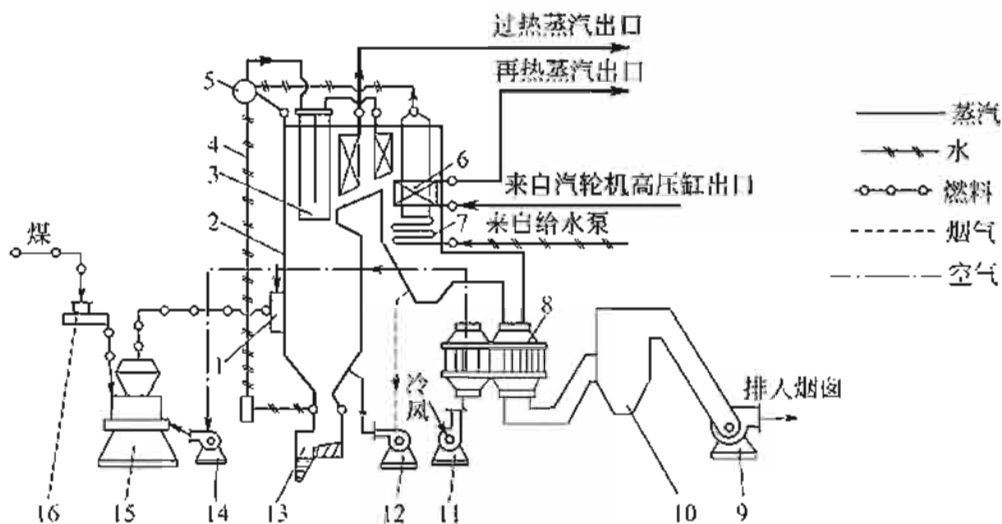


图 1-1 煤粉锅炉工作流程图

- 1—燃烧器；2—水冷壁；3—过热器；4—下降管；5—锅筒；6—再热器；7—省煤器；  
8—空气预热器；9—引风机；10—除尘器；11—送风机；12—再循环风机；  
13—排渣装置；14—吹风机；15—磨煤机；16—给煤机

理基本相同，但各具特点。各类锅炉的主要特点见表 1-1。

表 1-1 各类锅炉的主要特点

种 类	主要特点
电站锅炉	用于发电，一般采用高参数，火室燃烧，适用于各种燃烧，热效率较高
工业锅炉	蒸汽(或热水)直接用于工业生产和取暖等，一般采用低参数，火床燃烧，热效率较低
船舶锅炉	一般采用低、中参数，对体积、重量都有严格要求。炉膛容积热负荷高，水循环回路高度小，以燃油为主

## 一、锅炉类型及蒸汽参数系列

电站锅炉类型见表 1-2，电站锅炉蒸汽参数系列见表 1-3。

表 1-2 电站锅炉类型

分类方法	名 称	简要说明	
锅 内 过 程	按循 环方 式	自然循环锅筒锅炉	利用汽水重度差建立工质循环，只能应用在临界压力以下
		辅助循环锅筒锅炉	利用汽水重度差和循环泵的压头建立工质循环，只能应用在临界压力以下
		直流锅炉	水一次通过受热面变成蒸汽，用于高压以上
		复合循环锅炉	带循环泵的直流锅炉，适用于亚临界和超临界压力
	按锅 炉蒸 汽出 口压 力	中压锅炉(39atm)	一般采用自然循环，超高压及超高压以上时都带一次再热
		高压锅炉(100atm)	
		超高压锅炉(140atm)	
		亚临界压力锅炉 (170atm)	各种循环方式均可适用，技术经济比较确定。应注意防止膜态沸腾和高温腐蚀
		超临界压力锅炉 (>225atm)	采用直流和复合循环，应注意防止类膜态沸腾和高温腐蚀

续表

分类方法	名称	简要说明	
炉内过程	按所用燃料或能源	固体燃料锅炉	燃料成分和灰渣特性是影响锅炉设计的主要因素,国产锅炉以燃煤为主
		液体燃料锅炉	具有较高的炉膛容积热负荷和烟速,为防止低温腐蚀和堵灰,宜采用低氧燃烧并提高进风温度和排烟温度
		气体燃料锅炉	具有较高的炉膛容积热负荷和烟速,应注意防止燃烧器回火和爆炸
		余热锅炉	利用冶金、石油化学、水泥等工业的余热作热源。为了适应流程、信道形状和布置高度的限制,可采用辅助循环式直流
		原子能锅炉	利用核反应堆所释放热能的蒸汽发生器
		其它能源锅炉	利用地热、太阳能等的蒸汽发生器
	按燃烧方式	火床燃烧锅炉	主要用于工业锅炉
		火室燃烧锅炉	主要用于电站锅炉
		旋风炉 (分立式和卧式)	燃料和空气的相对速度大大提高,有利于强化燃烧。液态排渣
		沸腾燃烧锅炉	适用于烧低质煤,目前主要用于工业锅炉
	按排渣方式	固态排渣锅炉	是燃煤锅炉的主要排渣方式
		液态排渣锅炉	应注意防止析铁,炉膛高温腐蚀和产生 NO <sub>x</sub>
	按炉内烟气压力	负压锅炉	有送、引风机,平衡通风,是燃煤锅炉的主要形式
		微正压锅炉 (200~500mmH <sub>2</sub> O)	不需引风机,主要用于液体和气体燃料,炉墙密封要求高
增压锅炉(>3atm)		仅用于油、气燃料,配蒸汽-燃气联合循环	
布置形式	按炉型	倒 U 形适用于各种燃料,塔型适用于低质烟煤和褐煤,箱型适用于液体和气体燃料,D 形适用于低、中参数	
	按电站布置	露天、半露天、室内、地下、进洞 以室内或露天布置采用最为广泛	

注: 1atm=101325Pa, 1mmH<sub>2</sub>O=9.80665Pa。

表 1-3 我国电站锅炉蒸汽参数系列

蒸发量 (t/h)	出口蒸汽压力/atm				配凝汽式汽轮 发电机组功率 /MW
	39	100	140	170	
	出口蒸汽温度/℃				
	450	540	540/540 <sup>①</sup>		
35	○				6
65(75) <sup>②</sup>	○				12
130	○				25
220		○			50
410		○			100
400 <sup>③</sup>			○ <sup>③</sup>		125
670			○		200
1000 <sup>④</sup>				○ <sup>④</sup>	300
2050				○	600

① 分子为过热气温，分母为再热气温。

② 新设计采用 65t/h。

③ 现行产品采用 400t/h。

④ 现行产品采用 1000t/h，555/555℃。

工业锅炉类型见表 1-4；工业锅炉的蒸汽参数系列见表 1-5。

表 1-4 工业锅炉类型

分类方法	锅炉类型	
按锅炉类型	火管	立式弯水管(LS)、立式直水管(LS)、立式横水管(LH)、卧式内燃回火管(WN)等
	水管 <sup>①</sup>	单锅筒纵置式 <sup>②</sup> (DZ)、单锅筒横置式(DH)、单锅筒立置式(DL)、双锅筒纵置式(SZ)、双锅筒横置式(SH)、纵横锅筒式(ZH)、强制循环式(QX)
按燃烧设备	固定炉排(G)、活动手摇炉排(H)、链条炉排(L)、抛煤机(P)、倒转炉排抛煤机(D)、振动炉排(Z)、下饲式炉排(A)、往复推饲炉排(W)、沸腾炉(F)、半沸腾炉(B)、室燃炉(S)、旋风炉(X)	
按燃烧种类	无烟煤(W)、贫煤(P)、烟煤(A)、低质烟煤(L)、褐煤(H)、油(Y)、气(Q)、木柴(M)、甘蔗渣(G)、稻壳(D)、煤矸石(S)、特种燃料和余热锅炉	
按出厂型式	快煤(K)、组装、散装	
按供热工质	蒸汽、热水及其它工质	

① 快装式水管锅炉用 K 代替锅筒数量代号。

② 包括火管锅炉。

表 1-5 工业锅炉蒸汽参数系列

蒸发量 /(t/h)	出口蒸汽压力/atm						
	5	8	13			25	
	出口蒸汽温度/℃						
	饱和	饱和	饱和	250	350	饱和	400
0.2	○						
0.5	○	○					
1		○					
2		○	○			○	
4		○	○			○	
6(6.5) <sup>①</sup>		○	○	○	○	○	○
10			○	○	○	○	○
20			○	○	○	○	○
35			○	○	○	○	○
65(75) <sup>②</sup>			○				

① 新设计采用 6t/h。

② 新设计采用 65t/h。

## 二、发展趋向

### 1. 电子计算机辅助设计

由于电子计算机的广泛应用和测试技术的进步，可以对锅炉的燃烧、传热、流动、结构和材料强度、自动控制性能等方面进行大量的逻辑运算和综合分析，使锅炉的总体设计采用最佳方案。

### 2. 适应技术成套的要求

使机组在热力系统、燃料系统、厂房布置、自动控制、运行方式等方面能互相协调，统筹兼顾，体现系统分析的最佳化，取得最大的经济效果。

### 3. 自动化水平高

采用具有逻辑功能的数字控制计算机，使电站实现全自动化，为此，要求锅炉具有良好的自动控制性能，如动态特性等。

#### 4. 掌握低质燃料燃烧技术

特别是对大容量锅炉，要求着火和燃烧稳定，燃尽程度高，防止结渣、积灰，注意减少磨损。

#### 5. 防止振动、噪声和大气污染

锅炉中的振动和噪声主要为炉膛、受热面和烟风道中由燃烧或气流所激发的声学振动。大气污染主要为烟气中的  $\text{SO}_x$  和  $\text{NO}_x$ ，大容量锅炉在燃用高硫燃料时对此尤需注意。

#### 6. 努力贯彻产品的标准化、系列化和通用化

三化是扩大燃料适用范围，缩短设计和生产周期，加快企业建设速度，提高运行可靠性的有效措施。锅炉炉型的统一是三化设计的基础。

#### 7. 综合利用

燃用多灰分的低质燃料，应合理解决灰渣的综合利用问题，如利用灰渣生产建筑材料等。国内某些电厂已成功地利用掺燃磷矿石的方法，在液态排渣锅炉上同时获得磷肥。

## ◀ 第二节 主要受压组件安全技术 ▶

### 一、锅壳式锅炉的结构特点

锅壳式锅炉的汽水系统和风、烟、煤燃烧系统均被“包”在锅壳内部。凡属这一类的锅炉，均有以下共同的特点。

① 系统比较简单，一般没有砖砌炉墙及尾部受热面，主要受热面均属对流受热面。

② 锅壳式锅炉的锅壳不接触火焰；炉膛一般很矮小，水冷程度大，燃烧条件差。凡以煤作燃料的这类锅炉，均采用层燃燃烧方式。

③ 受热面小，蒸发量低，大多在 2t/h 左右。

④ 壳体直径大，开孔多，形状不规则，内部受热部分与不受热部分连接在一起，热膨冷缩程度不同，对安全生产不利。



## 二、主要受压组件的安全技术要求

锅壳式锅炉本体结构的受压组件，主要有锅壳、炉胆（受外压）、封头、管板和 U 形下脚圈等。

锅壳多是用钢板卷焊而成的。当锅壳内径大于 1000mm 时，锅壳筒体的取用壁厚应不小于 4mm。对锅壳作出最小壁厚的限制，主要是考虑制造时的工艺要求和使用中的稳定性要求。如果壁厚太薄，将给加工工艺带来一定困难，难以保证工艺质量，采用焊接时易于焊穿；管子与筒体采用胀接时，难以胀牢。

炉胆内径不应超过 1800mm，其取用壁厚应不小于 8mm，且不大于 22mm；当炉胆内径小于或等于 400mm 时，其取用壁厚应不小于 6mm。卧室内燃锅炉的回燃室，其壳板的取用壁厚不应小于 10mm，且不大于 35mm。对炉胆、回燃室的最大壁厚加以限制，是考虑到炉胆、回燃室受火焰或高温烟气加热，为了防止产生过大的温差应力，只有限制其最大壁厚。另外，炉胆的直径越大，其稳定性就越差；同时还要考虑燃烧器与炉胆匹配问题，以保证燃烧稳定。所以对炉胆直径必须加以限制。

卧式锅壳式锅炉平直炉胆的计算长度应不超过 2000mm，如炉胆两端与管板边对接连接时，平直炉胆的计算长度可放大至 3000mm。这是因为炉胆承受辐射热负荷最高，炉胆受热伸长量也最大。因此，将在炉胆与管板连接处产生附加弯曲应力。为了防止产生过大的弯曲应力，对平直炉胆的计算长度要加以限制。

锅壳和炉胆上焊缝的布置，锅壳筒体的不圆度 ( $D_{\max} - D_{\min}$ ) 和棱角度，炉胆筒体的棱角度和波形高度偏差等，都应符合有关标准、规范的要求。

管板、封头最好用整块钢板制成。如果采用拼接，拼接焊缝的数量应符合有关规定。拼接焊缝不得布置在板边圆弧上，并应避免通过板边孔口。

封头、管板、炉胆顶与圆筒形组件对接焊接时，板边弯曲起点至焊缝中心线的距离  $L$ ，应符合表 1-6 规定的数值。对球形封头，可取  $L=0$ 。规定直段距离的目的，一是为了防止焊接时产生的残余应力与其它附加应力（如板边起点附近的附加弯曲应力）叠加，

使焊缝处局部应力过高；二是为了加工与装配工艺的需要，如冲压成型后车削余量，装配定位等。因此，除了球形封头直段长度可以为零外，其它板边组件的板边起点至焊缝中心必须有一段直段。

表 1-6 板边弯曲起点至焊缝中心线距离

板边组件的壁厚 $t/\text{mm}$	距离 $L/\text{mm}$	板边组件的壁厚 $t/\text{mm}$	距离 $L/\text{mm}$
$t \leq 10$	$\geq 25$	$20 < t \leq 50$	$\geq 0.5t + 25$
$10 < t \leq 20$	$\geq t + 15$	$t > 50$	$\geq 50$

对于额定蒸汽压力小于或等于 1.6MPa 的卧式内燃锅壳式锅炉，炉胆与回燃室（湿背式）、炉胆与后管板（干背式）、炉胆与前管板（回燃式）的连接处（这些部位直接受到火焰的冲刷）不允许采用 T 形接头连接，如图 1-2，其管板与炉胆、锅壳可采用 T 形接头的对接连接，但必须符合下列要求：必须采用全焊透的接头形式，且坡口经机械加工；管板与锅壳、炉胆的连接焊缝应全部位于锅壳、炉胆的筒体上；T 形接头连接部位的焊缝厚度应不小于管板的壁厚且其焊缝背部能封焊的部件均应封焊，不能封焊的部件应采用氩弧焊打底，并保证焊透。

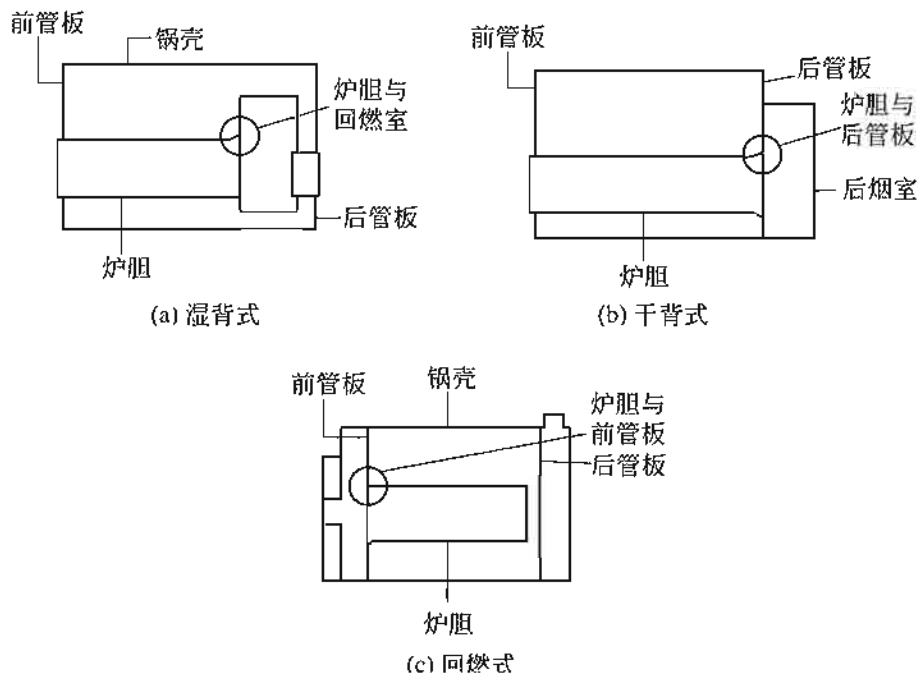


图 1-2 不允许采用 T 形接头连接的部位

U形下脚圈的拼接焊缝应按直径方向布置，两焊缝中心线间最短弧长必须大于300mm。

锅壳和炉胆上相邻两筒节的纵向焊缝，以及封头、管板炉胆顶和下脚圈的拼接焊缝与相邻筒节的纵向焊缝，都不应彼此相连，以保证焊接起弧与收弧处的焊接质量。另外，相邻纵向焊缝中心线间外圆弧长至少应为较厚钢板厚度的3倍，且不小于100mm。

锅壳、炉胆、回燃室的纵向和环向焊接，封头、管板、炉胆顶和下脚圈的拼接焊缝等，均应采用全焊透的对接焊接。

各受压组件上的焊接管孔、胀接管孔不得开在焊缝上。如结构设计不能避免时，在管孔周围60mm（如管孔直径大于60mm，则取孔径值）范围内的焊缝经射线探伤合格，且焊缝在管孔边缘上不存在夹渣，并对开孔部位的焊缝内外表面进行磨平和将受压部件整体热处理后，方可在环向焊缝上开胀接管孔。

锅壳内径大于1000mm的锅壳式锅炉，应在筒体或封头（管板）上开设人孔；锅壳内径为800~1000mm的锅壳式锅炉，至少应在筒体或封头（管板）上开设一个头孔。椭圆形人孔不应小于280mm×380mm；椭圆形头孔不得小于220mm×320mm，颈部或孔圈高度不应超过100mm，以保证检验人员头部伸入头孔后能转动自由。

### 三、水管锅炉各受压组件的安全技术要求

水管锅炉本体结构的主要受压组件有锅筒、集箱及各种受热面管子。水管锅炉的结构特点是炉膛置于筒体之外，“炉”不受“锅”的限制，可以满足燃烧及增加蒸发量的要求；锅筒一般不直接受热，水的预热、汽化及蒸汽过热在不同的受热面中完成，传热性能及安全性能都显著改善；受热面管子内部结垢难于清除，因而对水质要求较高，对运行操作管理的水平也要求较高。

#### 1. 锅筒

锅筒是锅炉最重要的一个部件。锅筒的功用有三：容纳一定的水量，使锅炉维持一定的水位，减少锅炉水位的气压的波动；与蒸发受热面管子构成循环回路，锅筒是循环流动的起始点和结束点；锅筒内有水与蒸汽的明确分界点，汽水混合物在锅筒中进行汽水分

离。锅筒外部或直接连接受热面管子，或通过连接管和集箱连接受热面管子；内部则装设各种内件，如配水装置、汽水分离装置、加药装置、排污装置等；锅炉主要的安全附件——安全阀、压力表、水位表等，也都装设在锅筒外部。

锅筒一般是卷焊结构，由钢板卷制焊接的圆筒体，两端焊上冲压成型的凸形封头。锅筒拼接时，筒体最短一节的长度不宜小于300mm；每节筒体上的纵向焊缝不得多于两条，且两条焊缝中心线间的弧长不应小于300mm；各节筒体的纵向焊缝，以及封头的拼接焊缝与相邻筒节的纵向焊缝均应互相错开，两焊缝中心线间外圆弧长不应小于较厚钢板厚度的3倍，且不小于100mm。封头应尽量用整块钢板制成，若必须拼接时，只允许用两块钢板拼成；拼接焊缝不应布置在人孔板边圆弧上。封头或锅筒对接处的圆柱部分长度，应符合表1-6规定的数值。

在任何情况下，锅筒筒体的取用壁厚不得小于6mm；当受热面管与锅筒采用胀连接时，锅筒筒体的取用壁厚不得小于12mm。

锅筒内径大于或等于800mm的水管锅炉，应在筒体或封头上开设人孔；锅筒内径小于800mm的水管锅炉，至少应在筒体或封头上开设一个头孔。

额定蒸汽压力大于或等于3.8MPa的锅炉，锅筒上应装膨胀指示器，以便能显示锅炉运行中锅筒的膨胀方向和膨胀位移，并能检查锅筒是否按设计预定方向膨胀。

## 2. 集箱

集箱也叫联箱，它不是一个独立的部件，而是水冷壁、省煤器、过热器等部件的组成部分，即分别有水冷壁集箱、省煤器集箱和过热器集箱等。集箱的作用汇集或者分配汽水工质，减少工质的输送连接管道，减少锅筒的开孔数，从而有利于提高锅筒的安全性能。在炉膛两侧墙靠近炉排处的水冷壁下集箱，其作用是防止炉排两侧面结焦，故称为防焦箱。

集箱实际上就是连接有很多受热面管子的粗直径管子，它由无缝钢管加工而成，两端焊接平封头（端盖）。箱体上开很多管孔，用以焊接或胀接管子。省煤器管及过热器管的两端都连接到集箱

上，水冷壁的下端连接到集箱上，上端既可以连接到集箱上，再由集箱引出少数管子接到上锅筒上，也可以将水冷壁管上端直接接到上锅筒上。

集箱拼接时，当集箱长度小于或等于 5m 时，环向焊缝数不应超过一条；长度大于 5m 但小于 10m 时，不应超过两条；长度大于 10m 时，不应超过三条。集箱上支吊装置的焊缝位置，应距拼接焊缝边缘 100mm 以上。

集箱和防焦箱上应开有手孔。手孔的短轴不得小于 80mm，颈部或孔圈高度不超过 65mm；当手孔的孔盖与孔圈采用非焊接连接时，应避免直接与火焰接触。否则，在火焰辐射热作用下，手孔盖受热后极易发生变形，同时孔盖与孔圈间的密封垫圈也极易老化，孔盖与管圈将失去严密性，发生泄漏事故。

在水管锅炉中，可有几个到几十个集箱。集箱在承压部件中的重要性仅次于锅筒，是安全监督检查的重点。

### 3. 水冷壁和对流管束

在水管锅炉的炉膛内，贴墙布置的立置单排并列管，叫水冷壁。水冷壁的作用是使管内流动的水吸收炉膛内火焰的高温辐射热而汽化，因而它也叫辐射蒸发受热面；其次，由于水冷壁布置在炉膛四周，把火焰与炉墙隔开，起到了冷却炉墙的作用。

水冷壁形状因炉膛的形状而异。水冷壁管子上端有的直接连接到锅筒上，有的通过集箱连接到锅筒上；水冷壁管子下端连接到下集箱上。下集箱与锅筒间用下降管构成循环回路，使水在水冷壁系统内不断循环流动。

根据相邻的单排水冷壁管间的关系，可把水冷壁分成光管水冷壁和鳍片管水冷壁（膜式壁）两种。光管水冷壁相邻的管子间有一定间隙，互不接触；鳍片管水冷壁相邻的管间用鳍片连接在一起（小型锅炉的鳍片是在相邻两根水冷壁管子间焊上一块扁钢条），使水冷壁管形成一个连续的金属壁面，完全隔绝了火焰与炉墙的接触，减少了炉膛的散热损失，提高了炉膛的密封性，易于保证炉膛的正压燃烧。

对于膜式水冷壁，鳍片与管子材料的膨胀系数应相近，以保证在相同的温度下，鳍片与管子膨胀量尽量一致，从而避免因相对膨

胀量过大而产生附加压力，防止鳍片将管子拉裂。鳍片管（或称作屏）的制造与检验应符合 JB/T5255《焊接鳍片管（屏）技术条件》，鳍片宽度应保证鳍片各部分在锅炉运行中的温度不超过所用材料的许用温度。如果鳍片过宽，水冷壁管中的汽水混合物对鳍片中间部位的冷却效果差，因冷却不良可能将鳍片烧坏。

对流管束是布置在炉膛出口之外对流烟道中的管群。烟气在管束外横向冲刷管束，主要以对流换热的方式将热量传给管束，使管束内的水不断汽化，因而对流管束是对流蒸发受热面。对流管束的两端分别焊接或胀接到上下锅筒上，水在管束内受热不同的管子中循环流动。

对流管束是低压水管锅炉的主要受热面之一。随着蒸汽压力的提高，水汽化时吸收的汽化潜热减少，所需蒸发受热面随之减少，可以少要或不要对流管束，中压以上锅炉没有对流管束。

#### 4. 省煤器

省煤器是锅炉为节省燃料而布置在尾部烟道中的辅助受热面。常用的省煤器有铸铁式省煤器和钢管式省煤器两种。铸铁式省煤器由许多带鳍片的铸铁直管组成，各管之间用弯头连接，给水在管内流动，烟气在管外冲刷，水被加热后由省煤器经管道送入锅筒。省煤器的鳍片有圆形及方形两种，带鳍片的目的是为了增大吸热表面。铸铁的耐磨性、耐腐蚀能力较强，在工业锅炉中，大都装设铸铁式省煤器，特别是对给水没有除氧设备的工业锅炉更为适宜。但铸铁性脆，不能承受振动和冲击，故不允许水在其中沸腾，一般规定它的出水温度应比锅筒内饱和温度低  $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，所以铸铁式省煤器也被称为非沸腾式省煤器或可分式省煤器。

装有可分式省煤器的锅炉，宜采用旁路烟道或其它有效措施，同时应装设旁通水路。可分式省煤器的布置如图 1-3。锅炉在启动升火过程中省煤器中的水基本是不流动的，水由于不动而冷却不足，出现汽化现象并发生水冲击。这时如果打开旁通烟道挡板 19，关闭主烟道挡板 3，烟气改由旁路烟道通过而不经过省煤器，就可以保护省煤器。锅炉运行中，铸铁式省煤器发生泄漏等故障的机会较多，当省煤器发生故障而又不能立即停炉检修时，可开启截门 11、9，关闭其它截门，给水不经省煤器直接进入锅筒，并可以在

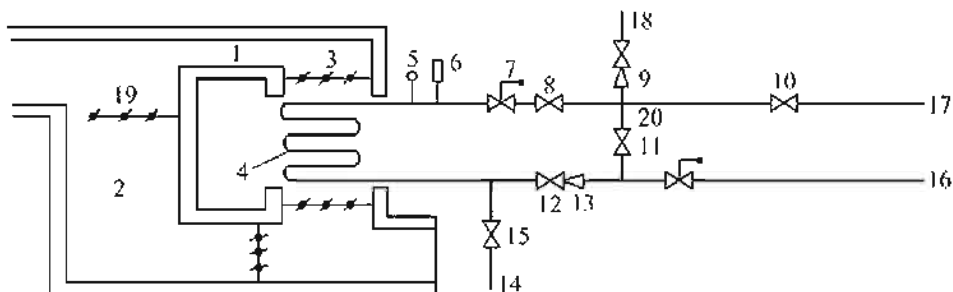


图 1-3 可分式省煤器的布置

- 1—水平烟道；2—旁通烟道；3—主烟道挡板；4—省煤器；5—压力表；6—温度计；  
7—安全阀；8,10~12,15—截止阀；9,13—逆止阀；14—放水管；16—进水管；  
17—流回水箱水管；18—锅炉进水管；19—旁通烟道挡板；20—旁通水路

锅炉运行中抢修省煤器。

铸铁式省煤器出口管路的逆止阀前，必须装设安全阀。安全阀的整定压力为装设地点工作压力的 1.1 倍，以防止超压运行或发生水冲击而损坏省煤器。通常还在省煤器进口管路的逆止阀前与给水泵之间也装设安全阀。这样可以避免突然受高压给水的冲击而损坏这段给水管路，同时对省煤器也能起到保护作用。

钢管式省煤器由许多平行的蛇形无缝钢管组成，蛇形管多交错排列，以增加传热效果。通常管外烟气自上而下流动，管内给水则自下而上曲折流动。各蛇形管的进、出端分别与进、出口集箱连接，一般采用焊接连接。进、出口集箱的布置在炉墙外面。

钢管式省煤器不仅可以将管内的水加热至饱和温度，还可以产生部分蒸汽。产生的蒸汽通常占总给水量的 10%~15%，最高可达 25%。所以，钢管式省煤器称作沸腾式省煤器或不可分式省煤器。

钢管式省煤器的管路连接系统与铸铁式省煤器的不同，它与锅筒（汽包）直接连接，其间不需要设置任何控制阀门。为了防止锅炉启动点火时将省煤器烧坏，应装设再循环管或采取其它措施，如图 1-4。锅炉启动时，为避免省煤器中的水由于不流动而使省煤器过热烧坏，可打开再循环阀门，使锅水在锅筒与省煤器之间形成自然循环，省煤器管壁即得到冷却。

钢管式省煤器可以承受较高的压力和振动，但耐腐蚀、耐磨损

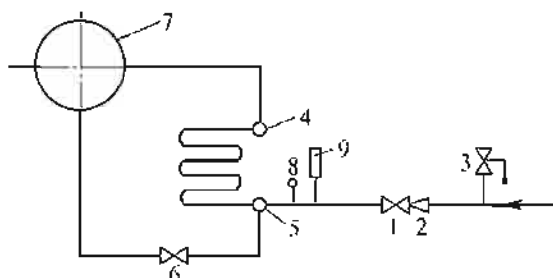


图 1-4 不可分式省煤器的管路连接系统

- 1—省煤器进口阀；2—逆止阀；3—安全阀；4—出口集箱；  
5—入口集箱；6—再循环阀；7—上锅筒；  
8—压力表；9—温度计

的性能较差，且蛇形管内部难于清洗。由于给水在省煤器内已部分蒸发，因此钢管式省煤器对水质要求较高，给水必须除氧。钢管式省煤器多用于中压及中压以上的锅炉。

### 5. 蒸汽过热器

蒸汽过热器的作用是在压力不变的情况下将饱和蒸汽继续加热到规定的过热温度，以满足生产工艺的需要。过热器是由一组弯成蛇形的无缝钢管和与之相连的进、出口集箱所组成的，进口集箱以管道与上锅筒相连，出口集箱以管道与锅炉分汽缸或主汽阀相连。过热器与集箱的连接，有胀接和焊接两种，目前大都采用焊接。采用胀接的，集箱上应开有手孔。用作过热器的无缝钢管，要根据蒸汽压力、蒸汽温度和过热器在炉膛或烟道内所处位置的温度来决定。

根据过热器蛇形管束的布置方式，过热器可分为垂直式和水平式两种。垂直式过热器的出口和水平式过热器的进口应有疏水阀，过热器的出口集箱上应装有压力表、安全阀，进出口集箱上应装有温度计。按照传热方式不同，过热器可分为对流式、辐射式和半辐射式三种。温度高时，以辐射传热为主；温度低时，以对流传热为主。对流式过热器置于炉膛出口以后的烟道内，靠烟气冲刷过热器管进行对流传热；辐射式过热器置于炉膛火焰温度高达 1000℃ 以上的炉膛上部，过热器主要吸收火焰的高温辐射热；半辐射式过热器装置在炉膛出口处，既依靠高温辐射获得热量，又依靠烟气对流



获得热量。由于过热器内部流通和加热的全部是蒸汽，蒸汽的对流换热能力较低，为防止管壁过热而损坏，又要保持有一定的换热温差，一般不把过热器布置在炉膛中，而是布置在炉膛出口的高温烟道内，流经过热器的烟气温度控制在  $800\sim 900^{\circ}\text{C}$  左右。工业锅炉的过热器多为对流式过热器，辐射式、半辐射式过热器多用于高参数、大容量的锅炉上。

为保证过热器在锅炉启动及甩负荷时有足够的冷却，应采取向空排汽、装设蒸汽旁通管路或限制烟温等措施。因此，过热器出口集箱上应装排汽阀；当锅炉同时装有过热器和再热器时，采取蒸汽旁通管路效果更好。图 1-5 为蒸汽旁通管路示意图。当锅炉启动或甩负荷时，关闭截门 8、9，开启截门 6、7、10，过热器中的蒸汽进入再热器，然后经截门 10 向空排气，使再热器得到冷却。

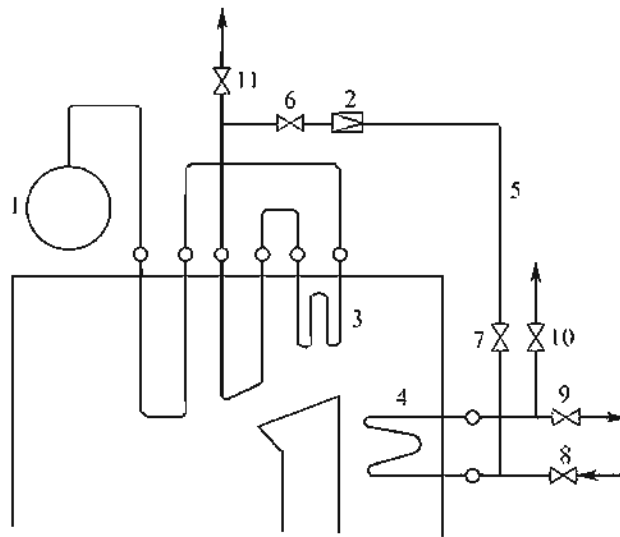


图 1-5 蒸汽旁路示意图

1—上锅筒；2—减压阀；3—过热器；4—再热器；  
5—蒸汽旁路；6~11—截止阀

## 6. 空气预热器

空气预热器是利用锅炉尾部烟气的余热来加热空气的一种换热设备，空气通过空气预热器，可升温至燃料燃烧所需要的温度。因此，空气预热器的作用一是降低了排烟温度，减小了排烟热损失；二是改善了燃料的着火条件，提高了燃烧效率。特别是对于燃用水

分和灰分较高的燃料，采用空气预热器尤为重要；室燃时，各种煤的燃烧都需要预热空气，有的甚至要求将空气预热到 400℃ 的高温。因此，在大、中型锅炉中都设置空气预热器。

空气预热器的种类很多，工业锅炉中通常采用的是管式空气预热器。它由许多竖列的有缝薄钢管制成，管子两端连接到上、下管板上，形成立方形管箱，再由若干管箱组合起来构成整个空气预热器。运行时，烟气由上至下从管内流过，空气则横向通过管间，冲刷外壁。

在设计制造管式空气预热器时，管板的尺寸应与烟道截面相配合，管子应平行分布，管子直径、节距、管数的选择，必须保证有适当的烟气流速。一般烟气流速控制在 10~14m/s。由于空气预热器通常都布置在省煤器之后的最后烟道里，处于烟温最低的区域，易产生结露腐蚀，特别是燃用含硫多的燃料，管壁腐蚀更为严重。此外，管壁结露还会引起积灰，使排烟阻力增大。

对于燃油锅炉，如果装有空气预热器，则尾部烟道应装设可靠的吹灰及灭火装置。因为在锅炉启动或调整燃烧时如果空气供应不充分或不及时，从油中蒸发出来的高分子烃在缺氧的情况下，来不及充分燃烧，就分解成直径小于 1 $\mu$ m 的炭黑被烟气带到尾部空气预热器，黏结在空气预热器上，如不及时处理，这些炭黑越积越厚，达到一定程度会自燃起火，造成尾部二次燃烧事故，烧毁空气预热器。尾部二次燃烧取决于三个因素：一是可燃物，二是足够的空气，三是适当的点燃温度。为防止燃油锅炉发生尾部二次燃烧事故，在烟道尾部必须装设吹灰及灭火装置。

#### 四、对锅炉本体结构的基本安全技术要求

锅炉的安全问题，涉及设计、制造、运行和检修等各个环节，从设计角度考虑其安全可靠，主要有以下几个方面：承压部件要有足够的强度且使结构各部分受力尽量均匀合理，减少应力集中；受热系统及部件的胀缩要不受限制；受热系统及部件要得到可靠的冷却。具体要求如下。

① 各部分在运行中应能按设计预定方向自由膨胀。锅炉在运行中，各个部件受到火焰或高温烟气的加热，将会产生两种情况的

膨胀，即受压部件与支架间，因温度不同引起的相对膨胀；受压部件之间，因温度不同引起的相对膨胀。当膨胀受阻，部件不能自由胀缩时，就会在受压部件中产生附加弯曲应力，使其工作条件更加恶劣。因此在锅炉设计时，必须考虑各部件的受热膨胀问题。例如，对于较长的受压部件（如较长的锅筒、集箱）要有活动支座；对于长的管子或管道要采用柔性结构（要有弯曲部分），禁止采用刚性结构；受压件伸入炉墙或穿过炉墙时，要留有伸缩缝。

② 保证各循环回路的水循环正常，所有受热面都应得到可靠的冷却。锅炉各受热面在锅炉运行时得到可靠的冷却是保证锅炉安全运行的一个重要问题。如果受热面冷却不够而导致过热，会使受热面材料力学性能下降，金相组织恶化，缩短使用寿命，甚至发生事故。受热面的冷却有两种方式：一是冷却介质要有足够的流速，以便及时将火侧（或烟气侧）传来的热量带走。对于自然循环的锅炉，水循环正常就可以保证蒸发受热面的冷却。对于过热器和省煤器等受热面的冷却，主要取决于介质的流速和介质分配的均匀性。二是火界低于水位，保证受热面始终处于水位之下，从而使受热面得到冷却。最高火界是指锅壳锅炉蒸发受热面上受火焰或高温烟气冲刷的水侧最高点。

③ 受压部件应有足够的强度。要保证受压部件具有足够的强度，就必须按照现行规范进行强度计算。锅炉受压部件的强度包括静强度和疲劳强度。我国《水管锅炉受压组件强度计算》(GB 9222—88)规定，对于频繁启动的工业锅炉，除按现行强度计算标准进行静强度计算外，还要进行疲劳校核。

④ 受压元、部件结构的形式、开孔和焊缝的布置应尽量避免或减少复合应力和应力集中。在锅炉结构上不可避免地存在一些局部应力较高或对部件的强度有所削弱的结构，如受压组件上的开孔接管、转角、焊缝等部件。由于结构的连续性遭到破坏，在这些部位，特别是孔的周边产生应力集中是不可避免的。为了防止开孔产生的附加应力与其它应力叠加，而产生更高的局部应力，必须对开孔的位置加以限制。同样，焊缝的布置也应有限定，以防止焊接残余应力与其它应力叠加。

⑤ 水冷壁炉膛的结构应有足够的承载能力。锅炉的炉膛结构应有足够的承载能力，特别是燃用煤粉、油、气的锅炉，这样一旦发生炉膛爆炸，可以减轻对炉膛的破坏程度。炉膛承载能力的大小，主要取决于锅炉钢架的尺寸，承载能力越高，钢架的尺寸越大，耗钢量上升，锅炉成本上升。

⑥ 炉墙应有良好的密封性。炉墙的密封性既是经济问题又是安全问题，特别是炉膛炉墙的密封，直接影响燃烧工况。燃烧工况的好坏，影响传热，而且还会导致炉膛内结焦、结渣。

⑦ 承重结构在承受设计载荷时，应具有足够的强度、刚度、稳定性及防腐蚀性。

⑧ 便于安装、运行操作、检修和清洗内部。为了达到这一要求，应合理地设置各种门孔、平台和扶手。

⑨ 燃煤粉的锅炉，其炉膛和燃烧器的结构及布置应与所设计的煤种相适应，并防止炉膛结焦或结渣。

炉膛结焦或结渣可能导致炉膛爆炸事故。例如，1993年3月10日，宁波市北仑港电厂的600MW机组锅炉，由于锅炉结构和燃烧器的配置与煤种不相匹配，使锅炉运行中炉膛大量结焦和结渣，发生炉膛爆炸事故。事故使设备遭到严重损坏，冷灰斗向炉后侧倾倒，大量的水冷壁管遭到严重破坏。事故后清出灰渣约500t，最大一块焦渣重达130t。

### ◀ 第三节 工业锅炉安全附件 ▶

工业锅炉安全附件，主要是指锅炉上使用的安全阀、压力表、水位计、温度测量仪表、排污阀等。其中安全阀、压力表和水位计被称为蒸汽锅炉的三大安全附件。热水锅炉也必须配备安全阀、压力表和温度测量仪表，才能保证其安全运行。

#### 一、安全阀

安全阀是锅炉设备中重要的附件之一，它能自动地将锅炉工作压力控制在预定的允许范围之内。

### 1. 安全阀的种类及特点

工业锅炉上通常装设的安全阀有三种：弹簧式安全阀、杠杆式安全阀和静重式安全阀。

(1) 弹簧式安全阀 弹簧式安全阀的结构如图 1-6 所示。它是利用介质压力和弹簧压力之间的压力差变化，达到自动开启和关闭的要求。锅炉正常工作时，弹簧压力大于作用在阀芯上的介质压力，将阀芯压紧在阀座上；当锅炉压力升高，使作用在阀芯上的介质压力超过弹簧的压力时，弹簧被压缩，阀杆带动阀芯上升，安全阀呈开启状态，介质从阀芯与阀座之间排出；当排汽使压力降到稍低于正常工作压力时，作用在阀芯上的介质压力小于弹簧的压力，弹簧即伸长，使阀芯紧压在阀座上，安全阀又呈关闭状态。

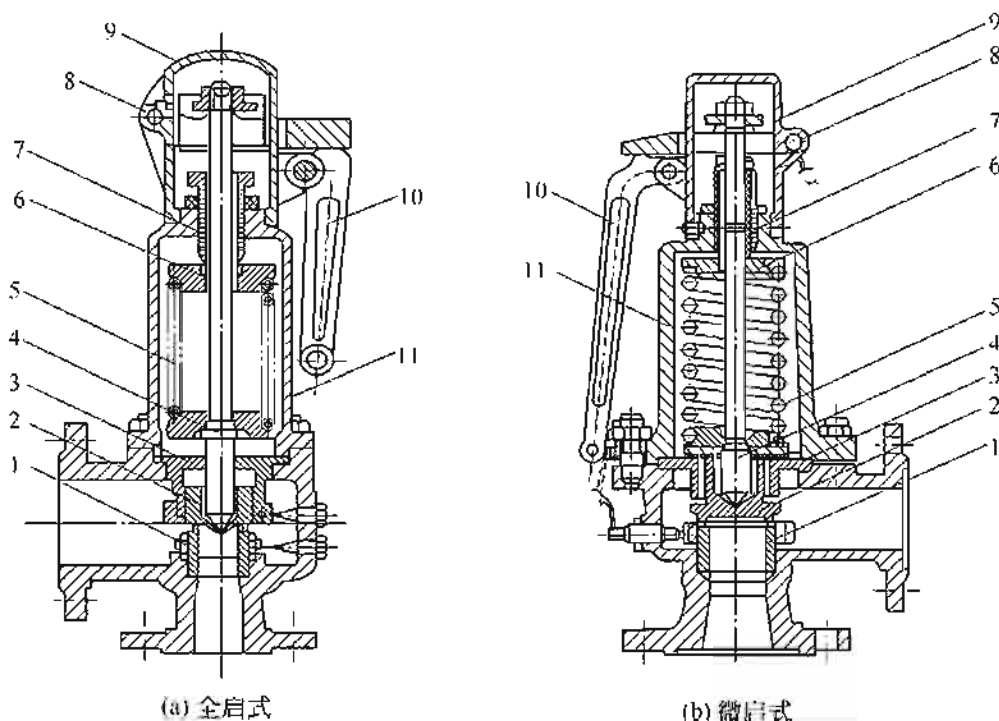


图 1-6 弹簧式安全阀

1—阀座；2—阀芯；3—阀盖；4—阀杆；5—弹簧；6—弹簧压盖；  
7—调整螺丝；8—销子；9—阀帽；10—手柄；11—阀体

弹簧式安全阀具有结构紧凑，灵敏轻便，能承受振动而不致泄漏的优点，是目前锅炉上使用的最为广泛的安全阀。但由于弹簧的

性能会随温度和时间等因素的影响而发生变化，使其可靠性较差，因此，在使用中必须定期对安全阀进行校验。

(2) 杠杆式安全阀 杠杆式安全阀的结构如图 1-7。它主要由阀门、阀座、阀芯、杠杆、导架和重锤等零件组成。杠杆式安全阀是利用重锤的重量，通过杠杆的力矩作用，将阀芯紧压在阀座上。当锅炉压力升高使介质作用在阀芯上压力超过了重锤通过杠杆作用在阀芯上部的压力时，则介质压力就会把阀芯顶起，介质便从开启处向外排出；当锅内介质压力降低到允许的工作压力时，阀芯又自动地压紧在阀座上，停止向外排出介质。

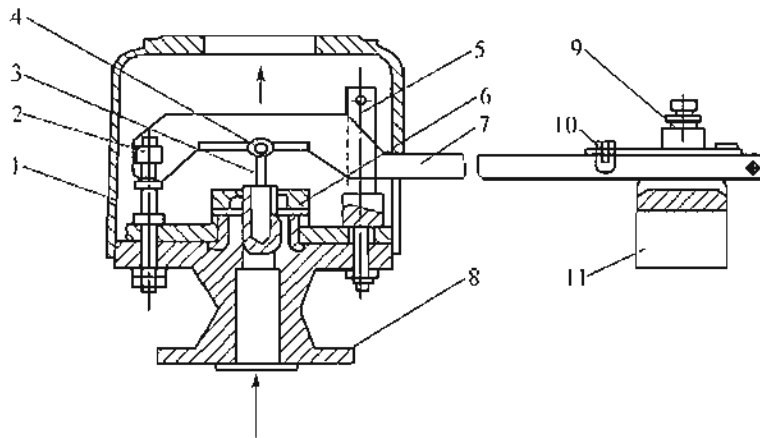


图 1-7 杠杆式安全阀

1—阀罩；2—支点；3—阀杆；4—力点；5—导架；6—阀芯；7—杠杆；  
8—阀座；9—固定螺栓；10—调整螺丝；11—重锤

杠杆式安全阀的优点是结构简单，调整方便，动作灵敏，准确可靠，而且特别适用于温度较高的场合。但与弹簧式安全阀相比，它的结构比较笨重，重锤与阀体的尺寸很不相称，单只安全阀的排气能力受到限制。

(3) 静重式安全阀 静重式安全阀的结构如图 1-8。它主要由阀体、阀座、阀芯、环状生铁盘、防飞螺丝和阀罩组成。静重式安全阀是利用加在套盘上的环状生铁盘的重量将阀芯压在阀座上，使锅炉介质压力保持在允许范围之内。当锅炉压力升高，使介质作用于阀芯的力大于生铁盘的总重量时，阀芯被顶起离开阀座，介质向外排泄降压；降压后，当介质作用于阀芯的力小于生铁盘的重量

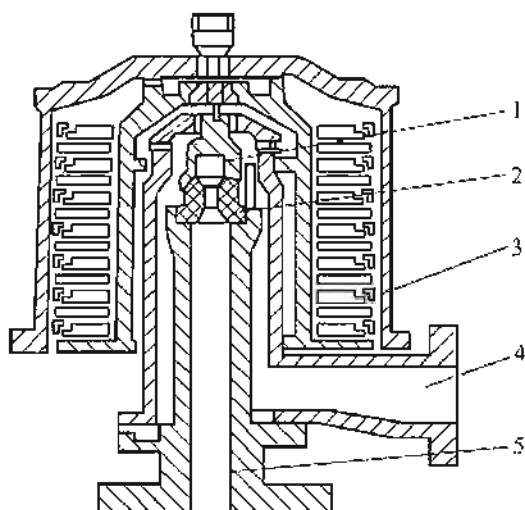


图 1-8 静重式安全阀

1—阀芯；2—阀座；3—生铁块；4—蒸汽出口；5—蒸汽进口

时，阀芯下压与阀座重新紧密结合，介质停止排泄保持一定压力。

静重式安全阀在压力较高的蒸汽锅炉上已很少应用，但在工作压力较低的热热水锅炉上还有应用。

## 2. 安全阀的排放量和整定压力

(1) 安全阀的排放量 安全阀必须有足够的排放能力，在开启排汽后才能起到降压作用。蒸汽安全阀排放量可按照下列方法之一进行计算。

① 按 GB12241《安全阀一般要求》中的公式进行计算。

a. 干饱和蒸汽（最小干度为 98% 的蒸汽）

压力小于或等于 11MPa 时： $W_{ts} = 5.25A p_d$

压力为 11~22MPa 时：

$$W_{ts} = 5.25A p_d [(27.644 p_d - 1000) / (33.242 p_d - 1061)]$$

b. 过热蒸汽（过热度大于 10℃ 的蒸汽）

压力小于或等于 11MPa 时： $W_{tsh} = 5.25A p_d K_{sh}$

压力为 11~22MPa 时：

$$W_{tsh} = 5.25A p_d K_{sh} [(27.644 p_d - 1000) / (33.242 p_d - 1061)] K_{sh}$$

式中  $W_{ts}$ ——饱和蒸汽理论排放量，kg/h；

$W_{tsh}$ ——过热蒸汽理论排放量，kg/h；

$A$ ——安全阀流道面积,  $\text{mm}^2$ ;  
 $p_d$ ——实际排放压力,  $\text{MPa}$  (绝对);  
 $K_{sh}$ ——过热修正系数。

$$\textcircled{2} \quad E = 0.235A(10.2p+1)K$$

式中  $E$ ——安全阀理论排放量,  $\text{kg/h}$ ;  
 $p$ ——安全阀入口处的蒸汽压力,  $\text{MPa}$  (表压);  
 $A$ ——安全阀的流道面积, 可用  $\pi d^2/4$  计算,  $\text{mm}^2$ ;  
 $d$ ——安全阀的流道直径,  $\text{mm}$ ;  
 $K$ ——安全阀入口处蒸汽比容修正系数。

$$K = K_p K_g$$

式中  $K_p$ ——压力修正系数;  
 $K_g$ ——过热修正系数。  
 $K$ 、 $K_p$ 、 $K_g$  按表 1-7 选用和计算。

表 1-7 安全阀入口处各修正系数

$p/\text{MPa}$		$K$	$K_p$	$K_g$	$K = K_p K_g$
$p \leq 12$	饱和	1	1	1	1
	过热	1	1	$\sqrt{V_b/V_g}^{\textcircled{1}}$	$\sqrt{V_b/V_g}^{\textcircled{1}}$
$p > 12$	饱和	$\sqrt{\frac{2.1}{(10.2p+1)V_b}}$	1	1	$\sqrt{\frac{2.1}{(10.2p+1)V_b}}$
	过热	$\sqrt{\frac{2.1}{(10.2p+1)V_b}}$	$\sqrt{V_b/V_g}^{\textcircled{1}}$	$\sqrt{V_b/V_g}^{\textcircled{1}}$	$\sqrt{\frac{2.1}{(10.2p+1)V_b}}$

$\textcircled{1}$   $\sqrt{V_b/V_g}$  亦可用  $\sqrt{1000/(1000+2.7T_g)}$  代替。

注:  $V_g$ —过热蒸汽比容,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $V_b$ —饱和蒸汽比容,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $T_g$ —过热度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

$\textcircled{3}$  按照安全阀制造单位提供的计算公式及数据计算。

(2) 安全阀的整定压力 安全阀整定压力是指按国家有关规程、标准规定或根据实际需要, 对安全阀应调整的开启压力。

安全阀应该在什么压力之下开启排汽, 是根据锅炉受压组件的承受能力规定的。一般来说, 在锅炉正常工作压力下安全阀应处于闭合状态, 当锅炉压力超过工作压力时安全阀才应开启排汽。但安全阀的整定压力不允许超过锅炉正常工作压力太多, 以保证锅炉受压组件有足够的裕度; 安全阀的整定压力也不应太接近锅炉正



常的工作压力以免安全阀频繁开启，影响锅炉的正常运行。

我国《蒸汽锅炉安全技术监察规程》规定，装设在锅筒和过热器上的安全阀整定压力应按表 1-8 的规定进行调整和校验。

表 1-8 锅筒和过热器安全阀的整定压力

额定蒸汽压力/MPa	安全阀的整定压力
$\leq 0.8$	工作压力+0.03MPa
	工作压力+0.05MPa
$0.8 < p \leq 5.9$	1.04 倍工作压力
	1.06 倍工作压力
$> 5.9$	1.05 倍工作压力
	1.08 倍工作压力

注：1. 锅炉上必须有一个安全阀，按表中较低的整定压力进行整定。对有过热器的锅炉，按较低整定压力进行整定安全阀，必须为过热器上的安全阀，以保证过热器上的安全阀先开启。

2. 表中的工作压力，对于脉冲式安全阀系指冲量接出地点的工作压力，对其它类型的安全阀系指安全阀装置地点的工作压力。

省煤器、再热器、直流锅炉启动分离器的安全阀的整定压力为装设地点工作压力的 1.1 倍。

热水锅炉上的安全阀应按制造厂的要求或按表 1-9 规定的安全阀整定压力进行调整和校验。

表 1-9 热水锅炉安全阀的整定压力

安全阀性质	安全阀的整定压力
控制安全阀	1.12 倍工作压力但不小于工作压力+0.07MPa
工作安全阀	1.14 倍工作压力但不小于工作压力+0.10MPa

注：1. 锅炉上必须有一个安全阀按表中较低的整定压力进行整定。

2. 这里的工作压力是指与安全阀直接连接部件的工作压力。

(3) 低于设计压力运行锅炉安全阀的整定问题 目前，国内一些单位购进的锅炉是在低于设计压力下运行的，大马拉小车的现象较为普遍，如一台额定蒸汽压力为 1.25MPa 的锅炉，实际生产需要的工作压力仅为 0.8MPa。这既浪费钢材和能源，也在安全上产

生一些问题。从安全阀排放量计算公式看出，当排放量  $E$  不变、压力  $p$  降低时，蒸汽最小流道截面积  $A$  必须增大，那么原设计所配的安全阀的流道截面可能满足不了排气量的要求。这种情况下，安全阀的排放能力要不要重新进行计算？安全阀进行整定时按哪个压力整定？在既不浪费国家财产又不危及安全运行的原则下，可以根据情况分别采取以下处理方法。

① 锅炉单台机组运行，且对蒸汽压力没有严格的要求时，安全阀的排放能力不必重新计算。因锅炉受压组件的壁厚是根据设计压力进行计算而选取的，工作压力低于设计压力，无疑提高了锅炉的安全裕度。安全阀的定压是按工作压力确定的，此时安全阀排放截面积可能不能满足在工作压力下的排放量，压力会有所升高，这是相对于工作压力的升高，当压力升高到设计压力时，安全阀的排放量又与压力相适应了。因此，在这种情况下，可以按设计压力对安全阀进行整定，也可以按实际工作压力对安全阀进行整定。

但对于因强度不够而降压使用的锅炉的安全阀，必须按经计算确定的允许工作压力重新计算排放面积，安全阀的整定必须按强度核准的压力进行。

② 使用单位对蒸汽压力有严格的限制，或锅炉与管网并联运行，且管网中蒸汽压力有限制。当所购锅炉的设计压力高于蒸汽母管中的压力而需要降压时，所配安全阀已不能满足排气量要求，必须重新计算排放量，增加安全阀的流通截面积，保证安全阀的排放量与锅炉工作压力相适应，避免锅炉蒸汽压力超过生产工艺或管网的压力值。在此情况下，对安全阀的整定应以工艺要求的压力或管网中的压力进行整定。

### 3. 安全阀的安全技术要求

安全阀出厂时，应标有金属铭牌。铭牌上应载明下列项目：

- ① 安全阀型号和产品编号；
- ② 制造厂名和出厂日期；
- ③ 公称压力，MPa；
- ④ 阀门流道直径和开启高度，mm；
- ⑤ 排量系数；
- ⑥ 压力等级级别。

每台锅炉至少应装设两个安全阀（不包括省煤器安全阀）。额定蒸发量小于或等于 0.5t/h 或额定蒸发量小于 4t/h 且装有可靠的超压连锁保护装置的锅炉，或额定热功率小于或等于 1.4MW 的锅炉，至少应装设一个安全阀。锅炉上设有水封式安全装置时，可以不装设安全阀。可分式省煤器出口处、蒸汽过热器出口处、再热器入口处和出口处以及直流锅炉的启动分离器，都必须装设安全阀。

锅筒（锅壳）上的安全阀和过热器上的安全阀的总排放量，必须大于锅炉额定蒸发量，并且在锅筒（锅壳）和过热器上所有安全阀开启后，锅炉（锅壳）内蒸汽压力不得超过设计时计算压力的 1.1 倍；过热器和再热器出口处安全阀的排放量应保证过热器和再热器有足够的冷却；直流锅炉启动分离器的安全阀排放量应大于锅炉启动时的产汽量；可分式省煤器安全阀的流道面积由锅炉设计单位确定。

对于额定蒸汽压力大于或等于 3.8MPa 的锅炉，安全阀的流道直径不应小于 25mm；对于额定蒸汽压力小于 3.8MPa 的锅炉，安全阀的流道直径不应小于 20mm。

几个安全阀如共同装置在一个与锅筒（锅壳）直接连接的短管上，短管的流通截面积应不小于所有安全阀流道面积之和。

安全阀应装设排气管，排气管应直通安全地点，并有足够的流通截面积，保证排气畅通。

安全阀排气管上如装有消音器，应有足够的流通截面积，以防止安全阀排放时所产生的背压过高，影响安全阀的正常动作及其排放量。消音板或其它组件的结构应避免因结垢而减少蒸汽流通截面。

安全阀必须有下列装置。

① 杠杆式安全阀应有防止重锤自行移动的装置和限制杠杆越出的导架。

② 弹簧式安全阀应有提升手把和防止随便拧动调整螺钉的装置。

③ 静重式安全阀应有防止重片飞脱的装置。

④ 控制式安全阀必须有可靠的动力源和电源：

a. 脉冲式安全阀的冲量接入导管上的阀门应保持全开并加

铅封；

- b. 用压缩气体控制的安全阀必须有可靠的气源和电源；
- c. 液压控制式安全阀必须有可靠的液压传送系统和电源；
- d. 电磁控制式安全阀必须有可靠的电源。

#### 4. 安全阀的选用与安装

##### (1) 安全阀的选用

① 阀型的选定 安全阀的工作特性取决于其结构形式。所以要根据不同的工作条件（压力参数），选择不同类型的安全阀。

弹簧式安全阀主要用于低压（压力不大于 2.5MPa）锅炉，考虑到弹簧的滞后作用，使安全阀的泄放率低于锅炉的产汽率，所以锅炉选用弹簧式安全阀应是全启式。杠杆式安全阀由于受到阀杆载荷不超过 7.4kN(750kgf) 和重锤质量不超过 75kg 的限制，一般多用于中压（压力为 2.9~4.9MPa）锅炉。对于高压及以上的锅炉，多采用控制式安全阀，如脉冲式、气动式、液动式和电磁式等。

额定蒸汽压力小于或等于 0.1MPa 锅炉可以采用静重式安全阀。静重式安全阀受到重锤重量的限制，但比较灵敏。

② 有关参数的确定 要根据不同的工作条件，选择不同参数的安全阀。其参数包括公称压力、弹簧工作压力范围、适用温度、公称通径等。

a. 公称压力 公称压力是指安全阀在规定的低于 200℃ 下的最高工作压力，它的代号为 PN。安全阀是按公称压力标准系列进行设计制造的，其公称压力系列为 1.0MPa、1.6MPa、4.0MPa、10.0MPa、16.0MPa、32.0MPa 几个挡。在选用安全阀时，根据锅炉工作压力、工作温度来决定。由于公称压力表示安全阀在常温状态下的最高许用压力，因此，锅炉选用安全阀时还应考虑高温下材料许用应力的降低。

b. 弹簧工作压力范围 弹簧工作压力范围是指安全阀整定压力的调整范围。安全阀的整定压力可以通过改变弹簧的预紧压缩量进行调节。但弹簧的调节范围是有限度的，超过了范围就要另换弹簧。因此，同一公称压力的安全阀，按弹簧的调整范围，划分为不同的工作压力等级，以适应不同的整定压力需要。所以，在确定了安全阀的公称压力以后，还应按整定压力选用适当级别的弹簧。

我国各安全阀制造厂根据工艺情况，各自有分级规定。有的通过试验论证，分得较细，对产品性能有较高的要求；有的工艺上做不到，分得较粗，但进行分级。考虑到弹簧使用日久后的锈蚀变细和制造厂在热处理中的氧化脱皮变细等因素，选用压力级时要偏向上限值，以免调节螺杆减小调节范围。表 1-10 为某种安全阀的分级范围。

表 1-10 弹簧式安全阀工作压力等级

公称压力 /MPa	弹簧工作压力级/MPa					
	1.0	0.06~0.1	0.1~0.16	0.16~0.25	0.25~0.4	0.4~0.6
1.6	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~1.0	1.0~1.3	1.3~1.6
4.0	1.3~1.6	1.6~2.0	2.0~2.5	2.5~3.2	3.2~4.0	
10.0	4.0~5.0	5.0~6.4	6.4~8.0	8.0~10.0		
16.0	10.0~13.0	13.0~16.0				
32.0	16.0~19.0	19.0~22.0	22.0~25.0	25.0~29.0	29.0~32.0	

c. 适用温度 适用温度是指安全阀能够胜任一定条件下工作的最高温度。实际上是指安全阀的弹簧、阀座和阀芯等设计的允许最高工作温度，一般分为如下几个挡：120℃、200℃、300℃、350℃、450℃、550℃、600℃。

d. 公称通径 安全阀规格是按进口通径划分，用代号 DN 表示。

安全阀的通径计算，是以阀座通道最小直径即流道直径来计算的，流道直径的代号为  $d_0$ 。安全阀的流道见图 1-9。为了保证安全阀在锅炉超压并排汽后，压力不再继续升高，要求安全阀的排放量必须大于锅炉额定蒸发量。这样，在锅炉蒸发量  $G$  已知的情况下，就可以确定安全阀需要的排放面积及流道直径。即：

$$E = 0.235A(10.2p + 1)K > G$$

$$A > G / [0.235(10.2p + 1)]$$

$$d_0 > \sqrt{4A/\pi}$$

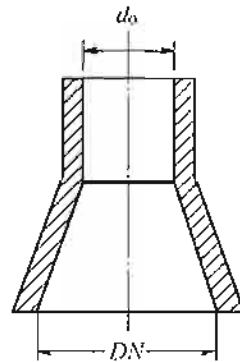


图 1-9 安全阀的流道

根据计算出的流道直径  $d_0$ ，按制造厂的产品样本选取稍大于流道直径又接近于计算值的某一公称通径  $DN$ ，或按表 1-11 选择安全阀的公称通径  $DN$ 。

表 1-11 全启式安全阀公称通径与流道直径

流道直径 $d_0$ /mm	公称通径 $DN$ /mm	32	40	50	80	100	150	200
公称压力/MPa								
1.6, 4.0, 6.4		20	25	32	50	65	100	125
10.0		20	25	32	40	50	80	
16.0, 32.0		15	20					

③ 安全阀型号的确定 根据公称压力、公称通径、结构形式、密封面材料等要素，参照《阀门型号编制方法》，从制造厂的产品样本中选择所需的最佳型号。

(2) 安全阀的安装 安全阀是否能正常工作与它的安装是否正确有很大关系。安全阀应该铅直安装，并应安装在锅筒（锅壳）、集箱的最高位置。在安全阀和锅筒（锅壳）之间或安全阀和集箱之间，不得装有取用蒸汽的出汽管和阀门，否则将会降低安全阀入口侧的蒸汽压力，影响安全阀在规定的压力下开启。

采用法兰连接的安全阀连接螺栓必须均匀地上紧，以防阀体承受附加应力，破坏阀零件的同心度；采用螺纹连接的弹簧式安全阀，其规格应符合 JB2202《弹簧式安全阀参数》的要求。此时，安全阀应与带有螺纹的短管相连接，而短管与锅筒（锅壳）或集箱的筒体应采用焊接连接。

安全阀的排汽管应直通安全地点，尽量避免曲折和转弯；排汽管要予以适当地固定，以防止因排汽振动而造成排汽管振动疲劳。为及时将排汽管内蒸汽凝结的水排出，以免发生水击现象，排汽管底部要装有接到安全地点的疏水管。在排汽管和疏水管上都不允许装设阀门。

如果排汽管露天布置而影响安全阀的正常动作，应在排气管管口加装防护罩。防护罩的安装应不妨碍安全阀的正常动作与维修；排汽管露天布置在较寒冷的地区，还应有防冻措施。

省煤器的安全阀应装排水管，并通至安全地点，在排水管上不允许装设阀门。

安全阀的安装位置还应该考虑便于它的日常检查、维护和检修。

### 5. 安全阀的校验、调整与维护

(1) 安全阀的校验与调整 安全阀的校验与调整的目的是保证它在锅炉运行中灵敏、可靠，在设置的整定压力下开启，在规定的启闭压差内回座，并具有良好的密封性能。我国《锅炉安全技术监察规程》规定，对于新安装锅炉的安全阀及检修后的安全阀，都应校验其整定压力和回座压力。控制式安全阀应分别进行控制回路可靠性检验和开启性能试验。在用锅炉的安全阀，每年至少要校验一次，校验的项目为整定压力、回座压力和密封性等。安全阀的校验一般应在锅炉运行状态下运行，如现场校验困难或对安全阀进行修理后可在安全阀校验台上进行，此时只对安全阀进行整定压力调整和密封性校验。

① 整定压力校验 安全阀的校验包括在设备上进行校验和从设备上拆下在校验装置上进行校验两种。在校验装置上进行常温校验可发现并处理安全阀的大部分技术和质量问题，但受气源条件的限制，尚不可能进行回座压力的测定。而安全阀在锅炉运行状态下进行校验时，校验的工况与锅炉运行下的工况一样，因此误差较小，而且可以校验回座压力。

校验装置由校验台、气源和管路等组成。校验台上，每个校验系统应装两块相同的压力表，其精度等级不应低于1级，最大量程为安全阀校验压力的1.5~3倍。

锅筒（锅壳）和过热器上的安全阀，应按有关规定的整定压力值进行调整和校验，省煤器上安全阀的整定压力为装设地点工作压力的1.1倍。

校验时，缓慢升高安全阀的进口压力，当进口压力达到整定压力的75%时，对于带有提升手把的弹簧式安全阀或杠杆式安全阀，可以适当进行手动试验，以检验安全阀动作的灵敏性。然后继续升高安全阀的进口压力，当达到整定压力的90%时，减缓升压速度，直至安全阀开启。如果安全阀开启压力不符合整定压力，应停止升

压，拆卸有关附件装置，进行调整。弹簧式安全阀的开启压力是靠拧动调整螺母调节弹簧预紧力来控制的。顺时针方向旋转调整螺母时，增加弹簧的预紧力，提高开启压力值；反之亦然。杠杆式安全阀的开启压力是通过调节重锤与杠杆支点间的距离来控制的。对于弹簧式安全阀，在旋转调整螺杆时，必须使校验介质的压力低于整定压力的90%，避免阀瓣随着旋转而损伤密封面。

经过调整和校验后的安全阀，应再次作升压试验，将压力升至整定压力，使其开启无误即可。

如果校验是在锅炉运行状态下进行的，在校验调整了整定压力之后，还应校验回座压力。安全阀启闭压差一般应为整定压力的4%~7%，最大不超过10%。校验过程中应注意安全，严防蒸汽喷出伤人。

② 密封性能试验 整定压力调整后，降低并调整安全阀的进口压力，使其在密封试验压力状态下保持一定的时间，进行密封性能试验。

安全阀的密封性能试验压力为90%整定压力，试验介质为饱和蒸汽。试验中，用目视或听音的方法检查阀的出口端，如在一定的时间内，未发现泄漏现象，则认为密封性能试验合格。

安全阀校验过程中，校验人员应及时做好记录，其中包括整定压力、回座压力、密封性等检验结果。校验记录存入锅炉技术档案。

校验合格的安全阀，在安装好有关附件装置后应进行铅封或加锁，铅封处应挂牌，标牌上要有校验单位名称、校验编号、所装设备登记号、整定压力和下次校验日期。

(2) 安全阀的维护 要使安全阀经常处于良好的状态，保持灵敏准确，必须在锅炉的运行过程中加强对它的维护和检查。

① 经常保持安全阀的清洁，防止阀体弹簧等被污垢粘满或被锈蚀，防止安全阀排气管被异物堵塞。

② 要经常检查安全阀的铅封是否完好，检查杠杆式安全阀的重锤是否松动、被移动以及另挂重物的现象。

③ 发现安全阀有渗漏迹象时，应及时进行更换或检修。禁止用增加载荷的方法（例如加大弹簧的压缩量或移动重锤、加挂重物



等) 减除阀的泄漏。

④ 为了防止安全阀的阀瓣和阀座被水垢、污物粘住或堵塞, 应定期对安全阀做手动的排放试验。试验时应缓慢操作, 轻松地将提升手把或重锤慢慢抬起, 听到阀内有蒸汽排出时, 慢慢放下。不允许将提升手把或重锤迅速提起又突然放下, 这样会使阀瓣在阀座上剧烈震动, 冲击损坏密封面。排放试验后, 如发现安全阀内有泄露的声音, 则可能是阀瓣倾斜, 可以将提升手把或重锤再次提起进行试验。

## 二、压力表的选用与装设

### 1. 压力表的选用

锅炉中应用的最为广泛的压力表是弹簧式压力表, 它具有结构简单、安装使用方便、准确可靠、测量范围大等优点。

选用压力表应注意以下问题。

(1) 压力表的精度 压力表的精度是以它的允许误差占表盘刻度极限值的百分数作为级别来表示的, 例如精度 1.5 级的压力表, 其允许误差为表盘刻度极限值的 1.5%。因此, 对压力表精度的要求实际上是对压力表误差的要求。精度级别一般都标在表盘上, 应根据被测介质的压力 and 实际工作需要选用。额定蒸汽压力小于 2.5MPa 的锅炉, 压力表的精度不应低于 2.5 级; 额定蒸汽压力大于或等于 2.5MPa 的锅炉, 压力表的精度不应低于 1.5 级。

(2) 压力表的量程 压力表的量程应与锅炉的工作压力相适应, 表盘刻度极限值应为工作压力的 1.5~3.0 倍, 最好选用 2 倍。如果选用量程过大的压力表, 将会影响压力读数的准确性; 而压力表的量程过小, 压力表刻度的极限值接近或等于锅炉的工作压力, 又会使弹簧弯管经常处于很大的变形状态下, 因而容易产生永久性变形, 引起压力表的误差增大。

(3) 压力表的表盘直径 压力表的表盘大小, 应保证司炉人员能清楚地看到压力指示值。压力表的安装位置距操作平台不超过 2m 时, 表盘直径不应小于 100mm; 当其间距离为 2~4m 时, 表盘直径不小于 150mm; 当其间距离超过 4m 时, 表盘直径应小于 200mm。

## 2. 压力表的装设

每台蒸汽锅炉必须装有与锅筒（锅壳）蒸汽空间直接相连接的压力表，还应在给水调节阀前、可分式省煤器出口、过热器出口和主汽阀之间装设压力表。

每台热水锅炉的进水阀出口和出水阀入口都应装设一个压力表；循环水泵的进水管和出水管上也应装压力表。

压力表应装设在便于观察和冲洗的位置，并应防止受到高温、冰冻和震动的影响。

为避免蒸汽直接进入压力表的弹簧管内，使弹簧受热变形；同时为减少因介质波动对压力表指示值的影响，压力表应有存水弯管。存水弯管用钢管时，其内径不应小于 10mm。

为了便于冲洗管路、卸换、校验，压力表和存水弯管之间应装设三通阀门。三通阀门通向位置及作用如图 1-10 所示。(a) 是压力表的工作状态，此时，锅炉内的介质通过存水弯管与压力表相通；(b) 表示将压力表卸下进行更换或修理时的状态，此时，压力表与大气相通，指针回到零位；(c) 表示冲洗存水弯管时的状态，此时，锅炉与大气相通，而与压力表隔断，存水弯管中的积水 and 污垢被锅炉中的高压介质吹出；(d) 表示存水弯管冲洗后进行存水的状态，此时，存水弯管与压力表和大气都隔断，锅炉内蒸汽或热水在弯管内冷凝积存；(e) 表示进行压力表校核时的状态，此时，在通大气一端的法兰上装一个经过校验的压力表，检查两个压

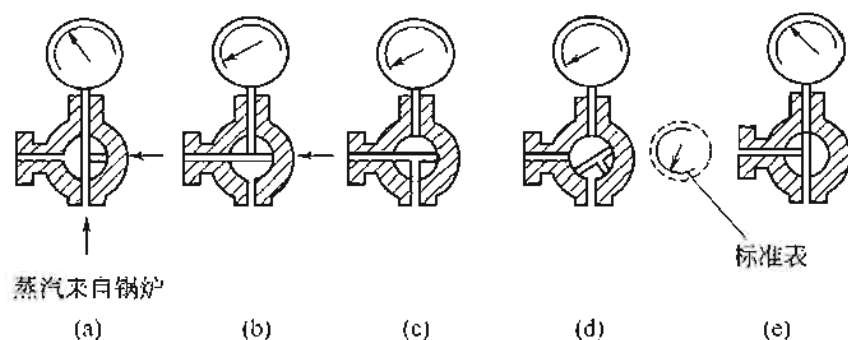


图 1-10 三通阀门的通向位置图

(a) 正常工作时的位置；(b) 压力表与大气相同的位置；(c) 冲洗存水弯管时的位置；(d) 让存水弯管内蓄积凝结水的位置；(e) 校正压力表时的位置

力表所指示的压力数值是否相同。

为了使司炉人员随时警惕锅炉发生超压事故，压力表在使用前，应在刻度盘上划红线明确指示出最高允许工作压力，但不应把红线涂画在表盘的玻璃上，以免玻璃转动，使工作压力的位置随之变化，造成事故。

### 3. 压力表的维护与校验

(1) 压力表的维护 要使压力表保持灵敏准确，除了合理选用和正确安装以外，在锅炉运行过程中还应加强对压力表的维护。

压力表应保持清洁，表盘上的玻璃应明亮清晰，使表盘内指针指示的压力值能清楚易见。

压力表的连接管要定期吹洗，以免堵塞。吹洗操作时，应缓慢地转动三通阀门，避免损坏压力表的机件。

经常检查压力表指针的转动和波动是否正常；检查压力表的连接管是否有漏水、漏气的现象，避免由于泄漏造成压力表的指示值低于锅炉的实际压力值。

如发现压力表存在下列情况之一时，应停止使用：

- a. 有限止钉的压力表在无压力时，指针转动后不能回到限止钉处；没有限止钉的压力表在无压力时，指针离零位的数值超过压力表规定的允许误差；
- b. 表面玻璃破碎或表盘刻度模糊不清；
- c. 封印损坏或超过校验有效期；
- d. 表内泄漏或指针跳动；
- e. 其它影响压力表准确指示的缺陷。

(2) 压力表的校验 压力表装用前应进行校验；装用后一般每半年至少校验一次。校验应符合国家计量部门的有关规定。压力表校验后应封印，并注明下次的校验日期。

在锅炉正常运行过程中，如发现压力指示值不正常或有其它可疑迹象，应立即检验校正。

## 三、水位表

水位表是用来显示锅筒（锅壳）内水位高低的仪表。锅炉操作

人员可以通过水位表观察并调节水位，防止发生锅炉缺水或满水事故，进而避免由水位不正常造成的受热面损坏及其它事故。因此，为了确保蒸汽锅炉的安全运行，每台蒸汽锅炉必须按规定装设灵敏可靠的水位表。

### 1. 水位表的形式及适用范围

水位表是按照连通器内液柱高度相等的原理而装设的。水位表的水连管和汽连管分别与锅筒的水空间和汽空间相连，水位表的锅筒构成连通器，水位表显示的水位即是锅筒内的水位。根据蒸汽锅炉工作压力的不同，水位表的结构形式有好多种。工业蒸汽锅炉上通常装设较多的是玻璃管式和玻璃板式两种。上锅筒位置较高的锅炉还应加装远程水位显示装置，目前使用的较多的远程水位显示装置是低地位水位表。

(1) 玻璃管式水位表 玻璃管式水位表的结构如图 1-11 所示。

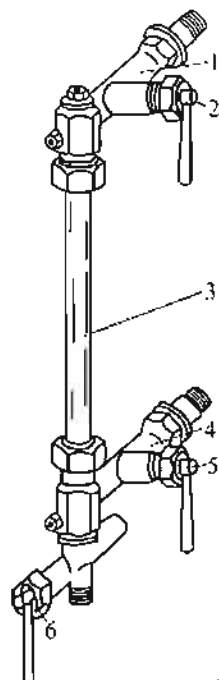


图 1-11 玻璃管式水位表

- 1—汽连管；2—汽旋塞；
- 3—玻璃管；4—水连管；
- 5—水旋塞；6—放水旋塞

它是由汽连管、汽旋塞、玻璃管、水连管、水旋塞和放水旋塞等部件组成的。因为玻璃管容易破碎，所以，玻璃管外应备有耐热的玻璃保护罩。

用于蒸汽锅炉上的玻璃管式水位表，玻璃管的公称通径有 15mm 和 20mm 两种。玻璃管式水位表与锅筒连接方式有丝扣和法兰连接两种。如用丝扣连接，则不应有渗漏，并保证玻璃管中心线与上下两只旋塞的中心线互成矩形，否则，玻璃管易破碎。

玻璃管式水位表结构简单，价格低廉，安装和拆换方便，但玻璃管的内压能力有限。因此，在工作压力小于 1.3MPa 的工业蒸汽锅炉上被广泛地应用。

(2) 玻璃板式水位表 玻璃板式水位表与玻璃管式水位表不同之处在于用玻璃板代替了玻璃管，并且有安装玻璃板的金属框盒。玻璃板位于金属框盒中间，以石

棉板垫密封，用螺丝压紧，使之不漏汽水。玻璃板是经过热处理的刚性玻璃，它具有高温下耐碱性腐蚀的性能；在内外温度不同的情况下，能承受弯曲应力。玻璃板上的纵向沟槽可以有效地防止玻璃板横向断裂，并有助于水位显示。

玻璃板式水位表与玻璃管式水位表相比，能耐更高的压力和温度，不易泄露，多用于中高压锅炉。为了使汽水分界线显示的更为清晰，我国 20 世纪 80 年代初在蒸汽锅炉上开始采用双色水位表。它是在玻璃板式水位表的基础上，应用光学彩色显示原理制成的。表内蒸汽部分显示为红色，锅水部分显示为绿色，汽水分界线十分清晰，无论是白天还是黑夜，都能看清水位，而且便于远距离监视。目前我国生产的双色水位表已经形成系列，有能满足不同压力、不同容量蒸汽锅炉配套使用的产品。

(3) 低地位水位表 有些蒸汽锅炉的水位表距离操作地面较远，操作人员在操作平台上观察水位比较困难。在这种情况下需要在操作平台上加装远程水位显示装置。低地位水位表就是使用得较为普遍的一种远程水位显示装置。

低地位水位表是通过将压力信号转换成水位信号而制成的，是一种二次仪表。它先通过冷凝器将水位转换为压差，然后用平衡这一压差的重液或轻液 U 形管内的液位差来显示水位。当利用密度比水大的带色液体来显示锅内水位时，称为重液式低地位水位表，其结构如图 1-12。用密度小于水的带色液体来显示锅内水位时，称为轻液式低地位水位表，其结构如图 1-13。

重液式低地位水位表与轻液式低地位水位表的工作原理相同，都是利用锅内水位波动引起液柱压力的变化来进行测量的。只是由于轻液是浮在水上面的，所以轻液式低地位水位表的 U 形管必须倒置。

重液式低地位水位表中的重液，通常采用四氯化碳、三氯甲烷、三溴甲烷或其它溶剂调制所需密度的液体。为了能清晰地分辨水位，可以在重液中加入可溶性染色颜料。轻液式低地位水位表中的轻液，一般是用机油、煤油和汽油按不同比例混合而成的，其密度约为  $0.7\sim 0.8\text{g}/\text{cm}^3$ 。

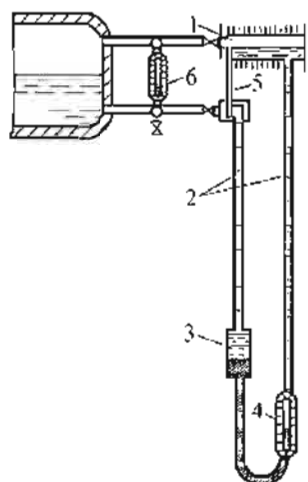


图 1-12 重液式低地位水位计

- 1—冷凝器；2—U形连通管；  
3—膨胀器；4—下部水位计；  
5—溢水管；6—上部水位计

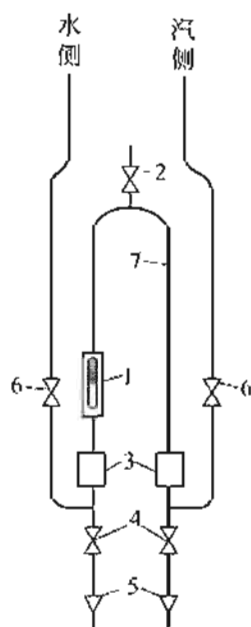


图 1-13 轻液式低地位水位表

- 1—水位表；2—空气阀；3—膨胀器；4—排污阀；5—漏斗；  
6—截止阀；7—U形管

## 2. 水位表的安全技术要求

每台锅炉至少应装两个彼此独立的水位表。但符合下列条件之一的锅炉，可只装一个直读式水位表。a. 额定蒸发量小于或等于 0.5t/h 的锅炉；b. 额定蒸发量小于或等于 2t/h 的锅炉，且装有一套可靠的水位示控装置的锅炉。

水位表的结构和装置应符合下列要求。

① 锅炉运行中能够吹洗和更换玻璃板（管）、云母片。为达到此要求，可在汽水连接管上装设阀门。

② 用两个及两个以上玻璃板或云母片组成一组的水位表，能够保证连续指示水位。

③ 水位表或水表柱的锅筒（锅壳）之间的汽水连接管内径不得小于 18mm，连接管长度大于 500mm 或有弯曲时，内径应适当放大。

④ 连接管应尽可能地短，以减小连接管的阻力。如连接管不

是水平布置时，汽连管中的凝结水应能自行流向水位表，水连管的水应能自行流向锅筒（锅壳），以防止形成假水位。其连接方式如图 1-14。从图中可以看出，当锅筒中的水位低于水连管的入水口时，水位表中的水可以自动流回锅筒；水位表中的凝结水或锅筒的水位高于汽连管的入口时，水可以流向水位表，再回流锅筒，从而防止假水位的出现。

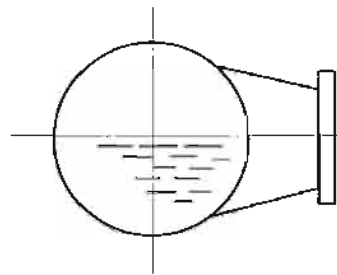


图 1-14 水位表连接管布置

在水位表与锅筒之间装有水表柱时，正确的安装如图 1-15 所示。即应使水表柱和锅筒之间的汽连管不低于水表柱和水位表之间的汽连管；水表柱与锅筒之间的水连管不高于水表柱和水位表之间的水连管。图 1-15 中 (a) 所示的连接形式可以使汽连管中的凝结水自动流向水位表，水位表中的水可以自动流向锅筒；(b) 所示  $B$  点高于  $B'$  点，当锅筒内水位下降到  $B$  点以下时，由于水位表内的水不能自行流回锅筒，因此水位表中所显示的水位仍在  $B$  点，形成假水位；(c) 所示  $A$  点低于  $A'$  点，当锅筒内水位高于  $A$  点时，由于汽连管的水不能自行流向水位表，因此水位表中仍有一部分蒸汽不能排出，它所显示的水位仍在  $A$  点，也形成了假水位。

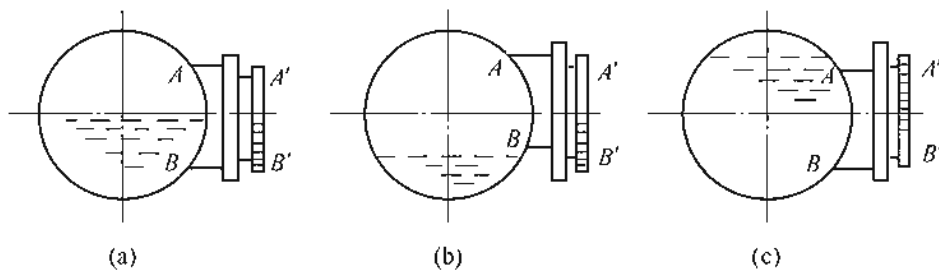


图 1-15 水位表与水表柱、锅筒连接形式

⑤ 阀门的流道直径及玻璃管的内径都不得小于 8mm。

水位表应装在便于观察的地方。水位表距离操作地面高于 6000mm 时，应加装远程水位显示装置。远程水位显示装置的信号不能取自一次仪表，以防由于一次信号发生问题，如出现假水位，而使远程显示的水位也是假水位。

用远程水位显示装置监视水位的锅炉，控制室内应有两个可靠的远程水位显示装置，同时运行中必须保证有一个直读式水位表正常工作，防止远程水位显示装置发生故障，造成控制室内装置显示的是假水位。

水位表要有下列标志和防护装置。

① 水位表应有指示最高、最低安全水位和正常水位的明显标志，以便操作人员监视水位的变化。最低安全水位比水位表下部可见边缘至少高 25mm。最高安全水位比水位表上部可见边缘至少低 20mm。对于锅壳式锅炉，水位表的下部可见边缘应比最高火界至少高 50mm。

② 为防止水位表损坏时伤人，玻璃管式水位表应有防护装置（如保护罩、快关阀、自动闭锁珠等），但不得妨碍观察真实水位。

③ 水位表应有放水阀门和接到安全地点的放水管，以便锅炉发生轻微满水时放水或进行水位表冲洗时之用。

为了便于水位表的冲洗和在锅炉运行状态下更换水位表的玻璃板（管）、云母片，在水位表（或水表柱）和锅筒（锅壳）之间的汽水连接管上，应装有阀门。阀门在锅炉运行中必须处于全开的位置。

### 3. 水位表的维护

锅炉运行过程中，应加强对水位表的维护，使之能准确可靠地显示锅筒内的水位。

① 经常保持水位表清洁明亮，使操作人员能清晰地观察到其显示的水位。

② 经常冲洗水位表。锅炉运行中，为了经常保持水位表灵敏可靠，应根据锅炉用水水质情况，确定每班冲洗水位表的次数。因为锅水中含有一些杂质和盐类，含有杂质及盐类的水或蒸汽进入水位表汽水连接管，如不及时将这些杂质和盐类冲洗掉，它们就会黏结和聚集在汽水连接管内壁上，逐渐使汽水连接管的流通截面积减小，使水位表不能真实反应锅筒内的水位。另外，在锅炉运行中，当发现水位表内水面静止不动时，应当及时冲洗水位表。因为锅炉正常运行时，锅筒内的水面总是不断地波动，因此水位表显示的水面也总是上下轻微的晃动。如果水位表内水面静止不动，则可能是



水旋塞或水连管被锅水中的杂质及盐类所堵塞而不畅通了。这时，因蒸汽的凝结会使水位表指示的水位虚假地上升，引起严重的后果。对装有水表柱的水位表，还应防止水表柱底部的水垢泥渣积存堵塞通路。

水位表的冲洗步骤是：先开启水位表下端的放水旋塞，使汽水连接管及玻璃板（管）同时冲洗；关闭水旋塞，单独冲洗汽旋塞、汽连管及玻璃板（管）；然后开启水旋塞，关闭汽旋塞，单独冲洗水旋塞和水连管；最后开启汽旋塞，关闭放水旋塞，并观察水位上升情况。若水位迅速上升，水位线与另一水位表一致，并有轻微波动，说明水位表良好。若水位上升迟缓，说明水旋塞或水连管还未冲洗通畅；如果水位上升后水位线高于另一只水位表的水位，则说明汽旋塞或汽连管可能堵塞，出现这两种情况，都应重新冲洗水位表。

在冲洗水位表时，不可将汽旋塞和水旋塞同时关闭，否则会使玻璃板（管）冷却，当再次进热水或蒸汽时，玻璃板（管）会因骤然受热而破裂。同时，冲洗水位表时，应均匀缓慢地操作，不要猛开猛关旋塞，防止玻璃板（管）破碎。

③ 水位表的汽旋塞、水旋塞和放水旋塞应保证严密不漏。运行中，如果汽旋塞漏汽，水位表显示的水位要比锅筒内的实际水位偏高；如果水旋塞漏水，水位表显示的水位则比锅筒内实际水位偏低。因此，发现水位表的汽旋塞、水旋塞泄漏时，应及时进行维修，以保证水位表所显示的水位的准确性。

#### 四、温度测量仪表

温度测量仪表用来测量与指示锅炉蒸汽、给水、空气、烟气等的温度，保证锅炉经济、安全地运行。

##### 1. 常用的测温仪表

锅炉上常用的测温仪表是玻璃管温度计和热电偶温度计。

(1) 玻璃管温度计 玻璃管温度计是根据液体的体积随温度变化而改变这一物理性质而制成的。玻璃管温度计所使用的工作液体通常有水银、酒精、甲苯和戊烷。使用的工作液体不同，测量温度的范围也不同。水银温度计的测量范围，通常在 $-50\sim 500^{\circ}\text{C}$ 之间。

如果在毛细管内充入高压氮气（或惰性气体），测温上限可达 550℃；用石英制成的玻璃管加压充氮后，测温上限可达 700℃。

测温范围在 500℃ 以下的水银温度计，适用于测量小型锅炉的汽水温度，或热工试验时用。

（2）热电偶温度计 热电偶温度计是利用两种不同金属导体的接点受热后产生热电势的原理制成的，它主要由热电偶、补偿导线和电气测量仪表三部分组成。

以一定材料制成的热电偶，热电势的大小取决于热电偶工作端与自由端之间的温度差。温差越大，热电势就越大，电气测量仪表的指示就越大。采用的热电偶不同，温度计测量的温度范围也不同。常用的普通铂铑-铂铑热电偶最高测量温度为 1600℃，普通铂铑-铂热电偶最高测量温度为 1400℃，普通镍铬-镍铬热电偶最高测量温度为 1100℃。

热电偶温度计灵敏度高，测量范围大，便于远距离测量和自动记录。它被广泛地用来测量锅炉蒸汽、烟气和水的温度。

## 2. 温度测量仪表的安装部位

为了防止锅炉各受热面的过热、腐蚀、减小温度应力，需要控制汽、水、烟气的温度。因此，在锅炉一些部位上应装设温度测量仪表。

《蒸汽锅炉安全技术监察规程》规定，为了测量下列温度，在锅炉的相应部位应装设温度测量仪表：

- ① 过热器出口、再热器进出口气温；
- ② 由几段平行管组组成的过热器的每组出口的气温；
- ③ 减温器前、后的气温；
- ④ 铸铁省煤器出口的水温；
- ⑤ 燃煤粉锅炉炉膛出口的烟温；
- ⑥ 再热气和过热器入口的烟温；
- ⑦ 空气预热器空气出口的气温；
- ⑧ 排烟处的烟温；
- ⑨ 燃油锅炉燃烧器的燃油入口油温；
- ⑩ 额定蒸汽压力大于或等于 9.8MPa 的锅炉的锅筒上、下壁温；

⑪ 额定蒸汽压力大于 9.8MPa 的锅炉的过热器、再热器蛇形管金属壁温；

⑫ 燃油锅炉空气预热器出口烟温。

有过热器的锅炉，还应装设过热蒸汽温度的记录仪表。

## 五、排污阀

为了排除沉积在锅筒和集箱底部的水垢、泥渣等沉淀物，以及降低锅水中的含盐量和碱度，必须用排污阀定期排污和连续排污；另外，锅炉煮炉以后或停炉时，以及出现满水情况，也可用排污阀来排放锅水。

### 1. 常用的排污阀

(1) 旋塞式排污阀 旋塞式排污阀的结构与旋塞的结构基本相同，见图 1-16，故又称为排污考克。它主要由塞体、塞芯和塞杆等部件组成。排污时，利用手柄将旋塞顶部的方头转动 90°角，通路即关闭。

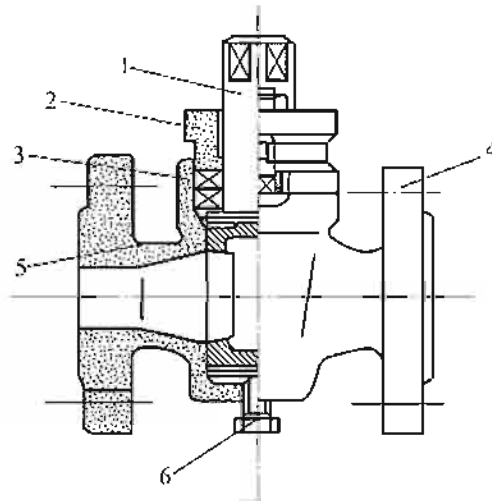


图 1-16 旋塞式排污阀

1—塞杆；2—盘根压盖；3—盘根；4—塞体；5—旋塞孔；6—顶螺丝

旋塞式排污阀属于快开式排污阀，结构简单，外形尺寸小，开启或关闭操作方便，但密封面易磨损。这种排污阀只用于低压小容量锅炉。

(2) 闸门式排污阀 闸门式排污阀有快开齿条式排污阀和快开摆动式排污阀。快开齿条式排污阀主要由闸门、弹簧、齿杆、小齿轮和阀体等部件组成，如图 1-17 所示。弹簧的作用是经常推压闸门，使闸门紧贴阀座，保持结合面严密不漏。操作齿条式排污阀，只要将它的手柄转动 180°角，即可达到迅速开启或关闭的目的。

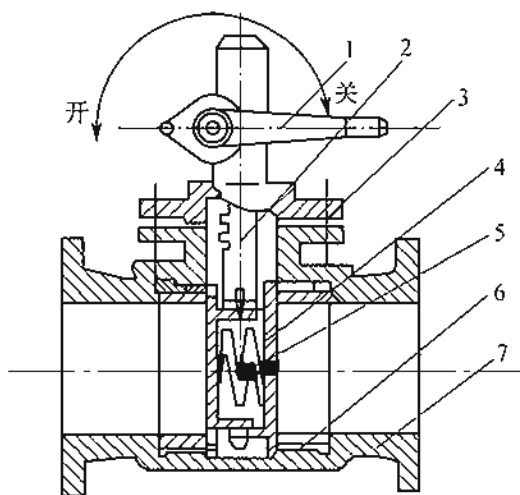


图 1-17 齿条闸门式排污阀

1—手柄；2—齿条；3—阀盖；4—闸板；5—弹簧；6—阀座；7—阀体

快开摆动式排污阀主要由阀体、闸门、传动轴和手柄组成。闸门由两个阀片组成，中间装有弹簧，以保证闸门与阀座的严密性。当转动手柄时，闸门可绕转动轴左右摆动，阀门即可开启或关闭。

(3) 慢开斜球形排污阀 这种排污阀的阀杆和阀芯相连，与通路形成一角度，其结构如图 1-18 所示。当旋转手柄将阀芯抬高后，介质基本上是直线流动，不但阻力小，而且不会积存污物，是一种性能较好的排污阀。

## 2. 排污阀的装设要求

(1) 排污阀安装、选用要求 为了达到排污的效果，在锅炉受压部件容易沉积盐类和泥渣的部位，如锅筒（锅壳）、立式锅炉的下脚圈、每组水冷壁下集箱的最低点，热水锅炉每个回路下集箱的最低点，都应装排污阀。

排污阀与锅筒、集箱、立式锅炉的下脚圈的连接处，不但会受

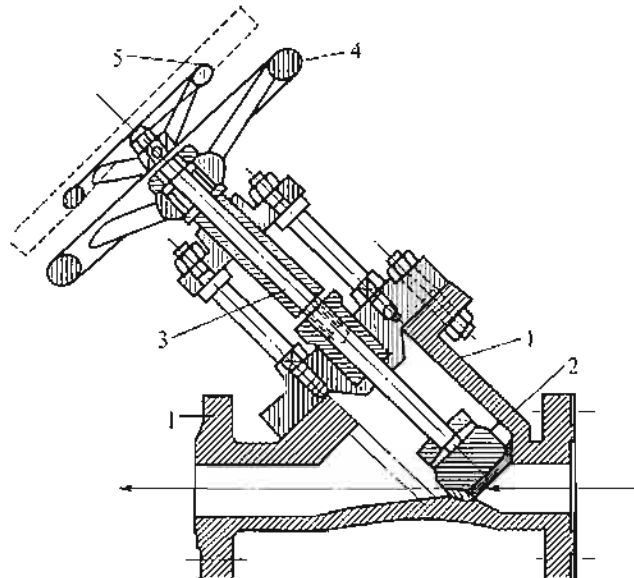


图 1-18 斜置球形截止阀

1—阀体；2—阀芯；3—阀杆；4—大手轮；5—小手轮

到浓缩锅水的腐蚀作用，而且在排污时会受到排污水的冲击。为了保证这些连接部位的严密性和牢固性，排污阀不应采用螺纹连接。

排污阀的公称通径为 20~65mm。对于卧式锅壳锅炉，由于锅壳的水容积较大，且这类锅炉对水质要求较低，所以锅壳底部沉积的泥渣较多，故锅壳上的排污阀的公称通径不得小于 40mm。

有过热器的锅炉，在上锅筒水位线附近一般应装设连续排污装置，以排除锅水中过剩的碱量、盐量和锅炉水表面的油脂和泡沫，改善蒸汽的品质。

排污阀的通道应尽量是直通的，以减小排污时的流通阻力。所以排污阀宜采用闸阀、扇形阀；如采用截止阀应采用斜截止阀。

过热器或再热器集箱的最低处，应装设放水阀，以及时排出冷凝水，防止发生水击现象。每组省煤器的最低处也应装设放水阀。

(2) 排污阀串联装设时的要求 为保证排污管道的严密性，额定蒸发量大于或等于 1t/h、额定蒸汽压力大于或等于 0.7MPa 的锅炉，以及额定出口热水温度高于或等于 120℃ 的热水锅炉，排污

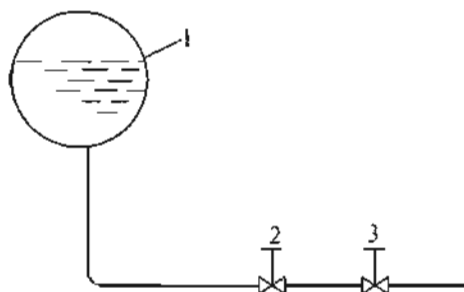


图 1-19 排污阀串联方式

1—锅筒；2—慢开阀；3—快开阀

管上应装两个串联的排污阀。其中一个应当是慢开式排污阀，另一个是快开式排污阀，并应固定其开启的先后顺序。图 1-19 为排污阀串联的形式。排污时先打开阀 2，再打开阀 3；排污结束时，先关闭 3，再关闭 2。这种操作顺序，使阀 2 总是处于常压下开关，不易磨损，且排污效果好，但阀 3 易于磨损。按这种方式串联，当阀 3 损坏后，可拆下来立即维修再装上。

好，但阀 3 易于磨损。按这种方式串联，当阀 3 损坏后，可拆下来立即维修再装上。

(3) 对排污管的要求 每台锅炉应装独立的排污管，排污管应尽量减少弯头，保证排污畅通并接到室外安全的地点或排污膨胀箱。采用有压力的排污膨胀箱时，排污箱上应装安全阀。

几台锅炉的定期排污合用一根总排污管时，不应有两台或两台以上锅炉同时排污，以防相互干扰，影响排污效果。

排污管与排污阀的连接，不应采用螺纹连接。

## 第二章

# 锅炉安全运行与科学管理

### 第一节 锅炉的启动

锅炉启动是指锅炉由非使用状态进入使用状态，一般包括冷态启动和热态启动两种。冷态启动指新装、改装、修理、停炉待用等锅炉的生火启动；热态启动指压火备用锅炉的启动。本章只介绍冷态启动。

锅炉启动过程，就是锅炉内各部件、组件、附件由冷态变为受热状态，由不承压变为承压的过程。由于锅炉是一个复杂的设备系统，它的正常运行包含着燃烧工质流动和传热等过程，因此启动一台锅炉要进行多项操作，要用较长的时间，需要各环节协同动作，逐步达到正常工作状态。

#### 一、点火前的检查

锅炉点火之前应进行全面的检查，并验收合格。检查的项目主要有以下几个方面。

① 对锅炉进行内外部检查，了解本锅炉的安装、大修、改装情况（包括图纸、检验、烘炉、煮炉、水压试验、安装修理质量、改装的形式和验收等情况）并查看《锅炉技术登记簿》和有关技术资料。

检查锅筒或锅壳、集箱是否有遗留的工具、工作服或其它杂物和炉管内是否有焊瘤、焊条头或杂物堵塞。

主汽管、给水管、排污管等管道上装置的盲板、堵头是否全部

拆除。人孔、手孔等盖板螺栓是否拧紧。

炉墙是否有裂纹、凸出，炉墙、烟道的膨胀缝是否完好，炉墙与锅筒的接触部位是否有足够的间隙和石棉填料，烟道、风道挡板是否良好。

炉门、灰门、防爆门能否关闭严密，吹灰器及吹灰孔是否良好。

有下列情况之一的锅炉，在点火前还应做超压水压试验检查：

- a. 新装、改装和移装后；
- b. 停止运行一年以上需要投入运行时；
- c. 受压组件经过重大修理或改造后；
- d. 运行期超过6年未做过超压水压试验的锅炉。

② 对主要安全附件，如水位表、高低水位报警器、压力表、安全阀要按国家有关部门颁发的《蒸汽锅炉安全技术监察规程》的有关安全技术要求进行彻底检查。凡不符合要求的，应经修复或更新后才能点火。

③ 检查过热器、省煤器、空气预热器、给风和排烟除尘系统、上煤、给煤及燃烧系统，以及热工和测量仪表等是否完好。所有电动机转向是否正确，在运转前应校验电动机绝缘状况。

④ 检查给水设备、汽水系统管道和各种阀门，并将阀门按表2-1调整到点火要求的位置。

表 2-1 阀门在点火前的正确位置

阀门名称	开关位置
压力表旋塞	开
空气阀或代替空气阀用的安全阀	开
水位表的放水旋塞	关
水位表的汽、水旋塞	开
主汽阀	关
排污阀	关
给水阀	关
尾部烟道挡板	开
带铸铁省煤器旁路烟道挡板	开
带铸铁省煤器正路烟道挡板	关
锅炉主蒸汽管路上的疏水门	开
过热器出口集箱的疏水阀	开



⑤ 锅炉上水之前应注视储水罐内的水源是否充足，上水温度一般宜在 40~50℃，最高不宜超过 70℃，避免因水温过高致使受压组件内外壁温差过大，引起的热应力使连接处（胀接、铆接）松弛。开始上水时，宜采用较小流量，上水速度不宜过快，一般对水管锅炉的上水时间，夏季不少于 1h，冬季不少于 2h。上水时要检查人孔盖、手孔盖、阀门等处是否有渗漏，如发现有渗漏，可适当拧紧螺栓，如仍有渗漏，则应停止上水，并将锅水放至适当的位置后，更换垫片进行修理，消除渗漏后继续上水，当水上至水位表最低安全水位线时，应停止上水，此时的底水位计、远传水位计、高低水位报警器均可开启，并检查一下是否漏水，还要试验其可靠性。

## 二、点火前的准备

### 1. 烘炉

新装、迁装、大修或长期停运的锅炉，其炉膛和烟道的炉墙非常潮湿，一旦与高温烟气接触，水分便急剧蒸发，使炉墙产生裂纹或变形，甚至倒塌。所以锅炉投运前，一定要对其进行缓慢的烘烤干燥，使炉墙内的水分慢慢地蒸发逸出。这种缓慢的干燥方法就是烘炉。

烘炉方法一般有火焰烘炉、蒸汽烘炉和热风烘炉三种。小型锅炉多采用燃料烘炉法，带有水冷壁、容量较大的锅炉，可采用蒸汽或热风烘炉。烘炉时间的长短与锅炉形式、容量大小、炉壁结构及干湿程度有关。一般工业锅炉烘炉时间为 3~15 天，其中，重型炉墙 7~15 天，块状锅炉、轻型炉墙为 3~7 天。若炉墙潮湿，气候寒冷，特别是雨水较多季节，烘炉时间还应适当延长。

#### (1) 烘炉操作

① 火焰烘炉 烘炉的最初 3 天，用木柴进行烘烤。木柴要堆放在炉排的中间，约占炉排面积的 1/2。点燃木柴后，采用小火烘烤。将烟道挡板开启约 1/6~1/5，进行自然通风，使烟气缓慢流动，维持锅水温度 70~80℃。3 天之后，可向燃烧的木柴上添加少量的煤，以逐渐取代木柴烘炉。此时适当开大烟道挡板，并开动引风机适当加强通风，锅内水温可以达到轻微沸腾。

烘炉过程中的温度上升速度，应按过热器后的烟温进行控制；无过热器的锅炉以第一道和第二道隔火墙之间的烟温进行控制。对重型炉墙，第一天温升不宜超过 50℃，以后每天温升不宜超过 20℃，烘炉后期的最高烟温不应超过 220℃。对于砖砌轻型锅炉，第一天温升不宜超过 80℃，以后每天温升不宜超过 25℃，后期烟温不宜高于 160℃。对耐热混凝土炉墙，烘炉温升每小时不应超过 10℃，后期烟温不应高于 160℃，在最高温度范围内，持续时间不应少于 1 昼夜。

② 蒸汽烘炉和热风烘炉 蒸汽烘炉时，采用 0.29~0.3MPa 的饱和蒸汽从水冷壁下集箱的排污阀处连续、均匀地进入锅炉，逐渐加热锅水，锅水温度控制在 90℃ 左右，水位保持正常。烘炉时，应开启各挡板、门，以排除炉墙蒸发出来的湿气。热风烘炉时，热风温度不应超过 200℃，温升速度用调节热风量来实现。

(2) 烘炉的合格标准 烘炉时，炉墙、炉拱不应出现裂缝、变形。同时还应达到下列规定之一，才为合格。

在炉膛两侧墙中部炉排上方 1.5~2.0m 处和过热器两侧墙中间，取耐火砖、红砖的丁字交叉缝处的灰浆样 50g，其含水率低于 2.5%。

炉膛两侧墙中部炉排上方 1.5~2.0m 处的红砖墙外表向内 10mm 处温度达到 50℃，并继续维持 48h。

(3) 烘炉注意事项 烘炉前做好烘炉的组织工作，并根据炉型结构和安装使用说明书制定烘炉的操作程序。

烘炉过程中，经常检查炉墙的烘干程度及炉墙各部分的变化，及时发现裂缝、变形和凹凸缺陷，监视膨胀指示器的指示值。

用蒸汽烘炉时，应加强自然通风，将各孔、门全部打开。

烘炉时，炉膛温度必须按烘炉升温规定的时间和温度掌握升温速度，不允许忽高忽低，更不允许中间中断；火焰应分布均匀，防止炉墙局部升温过快。

炉膛后期炉水允许有轻微沸腾，若沸腾较剧烈则应进行排汽，并及时补水。

## 2. 煮炉

煮炉的目的是为了清除锅炉在制造、运输、安装或修理过程中

受热面内侧产生的铁锈、油污和杂物等，以确保锅炉内部清洁。新装、迁装、大修或长期停用的锅炉在启动前必须进行煮炉。煮炉可以单独进行，也可在烘炉的后期同烘炉一道进行，以缩短时间和节省燃料。

(1) 煮炉前的检查 检查锅筒，集箱及管子的锈蚀情况，以此来确定煮炉的加药量和时间。

(2) 煮炉方法 煮炉时，一般在锅水中加入碱性药剂，如氢氧化钠 ( $\text{NaOH}$ )、磷酸三钠 ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) 或碳酸钠 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 等。将上述药物按配制比例进行溶解（每吨锅水中加入  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{NaOH}$  各 2~4kg），与锅水同时缓慢送入锅筒内，或用加药泵注入锅筒内；燃烧加热锅水至沸腾但不升压（蒸汽可通过空气阀或被抬起的安全阀排出），维持 10~12h；减弱燃烧，进行排污，并维持水位；再加强燃烧，使锅炉升压至 75% 的工作压力，运行 12~24h。如在较低的压力下煮炉，则应适当地延长煮炉时间；停炉自然冷却，待锅水温度降至 70℃ 以下即可排出，再用清水将锅内清洗干净。

(3) 煮炉的合格标准 经常煮炉和清洗过的锅炉，若锅筒和集箱内壁无油垢，擦去附着物后金属表面无锈斑，并呈现黑褐色的金属光泽为合格。

(4) 煮炉的注意事项 煮炉必须在烘炉将近结束，灰浆含水率在 10% 以下时开始进行。

煮炉过程中，蒸汽锅炉水位应保持在正常水位以上至最高水位之间；热水锅炉则保持锅内满水。水位下降时应及时补充软化水。有过热器的锅炉要注意防止药液进入过热器。

配制煮炉用药液时，工作人员应做好个人防护，以免被碱液灼伤。

煮炉时，应定期从锅筒和水冷壁下集箱取样分析，使锅水的碱度符合规定要求。

煮炉末期，当磷酸根含量变化不大，且逐渐趋于稳定时，煮炉可以结束。这时将炉膛余火熄灭，待炉水冷却后全部放掉，清除锅筒、集箱内的沉积物，冲洗锅内及与药物接触过的阀门等，检查排污阀和水位表有无堵塞。

### 三、点火、升压、暖管和并汽

#### 1. 点火、升压

锅炉点火前的准备工作完毕后，按规定的操作规程进行点火和升压。

锅炉点火之前必须打开所有烟道挡板及阀门，自然通风 15min 左右，如开动引风机进行机械通风，应打开炉膛门孔，一般应保持 5~10min，以排除烟道及炉膛内残剩的可燃气体。

锅炉点火应按不同的燃烧设备所规定的操作方法进行。层燃炉点火时，将左门打开，尾部烟道挡板开启 1/2，然后用木柴或其它易燃物引火，严禁用挥火性强烈的油类或易燃物引火。

点火后，当发现蒸汽从空气阀（或提升安全阀）内冒出时，即关闭空气阀（或将安全阀恢复原状）。同时，应密切注意锅炉的压力表，并适当开大烟道挡板，加强通风和火力，准备升压。

当汽压上升到 0.05~0.10MPa(0.5~1kgf/cm<sup>2</sup>) 时，应冲洗水位表。水位表冲洗完毕后，水位迅速回升，并有轻微波动，表明水位表工作正常；如果水位表上升很缓慢，表明水位表有堵塞现象，应重新清洗和检查。

当汽压上升到 0.10~0.15MPa(1~1.5kgf/cm<sup>2</sup>) 时，应冲洗压力表的存水弯管，防止因污垢堵塞而失灵。冲洗的方法是：将连接压力表的三通阀门转向通往大气位置，放出弯管中的存水，待见到蒸汽喷出时，再转回原来的位置。如在锅筒或锅壳上装有两块压力表，还要校对两块表指示的压力数值是否相同。

当汽压上升到 0.2~0.29MPa(2~3kgf/cm<sup>2</sup>) 时，应检查各连接处有无渗漏现象，螺丝杆因受热膨胀而伸长，可能使人孔盖、手孔盖及法兰松动，泄漏的要将螺栓拧紧一次，操作时应侧身，不宜用力过猛，禁止加长手柄，防止拧断螺栓。

当汽压上升至 0.29~0.39MPa(3~4kgf/cm<sup>2</sup>) 时，应试用给水设备和排污装置。在排污前应先向锅炉进水至最低安全水位以上，排污时应通知其它司炉工，防止排污后忘记关闭阀门，并应检查是否有漏水现象。

## 2. 暖管、并汽

当汽压上升到工作压力的 2/3 时，应进行暖管工作。暖管时应将疏水门全部打开，将管道内的残剩凝结水全部放净，以防止送汽时发生水击，损坏管道、法兰和阀门。暖管需要的时间，根据管道长度、直径、蒸汽温度、季节和环境温度而定，一般夏季在 30min 左右，冬季应适当延长。

几台锅炉向一蒸汽母管供汽时，必须进行并炉操作。在并炉前应先将主蒸汽管和蒸汽母管（冷态时）上的疏水门打开，排出凝结水。当锅炉的汽压低于运行系统的汽压 0.05~0.10MPa (0.5~1kgf/cm<sup>2</sup>) 时，缓慢将主汽阀开启 1/4 圈，接通锅炉与母管间的蒸汽管道，待锅炉的压力与母管中的压力相等时，再全部打开主汽阀。

供汽前应通知有关用汽部门做好准备工作。供汽后开启省煤器正路烟道挡板，关闭旁路烟道挡板，使省煤器开始工作，同时，各蒸汽管道上的疏水门应全部关闭，使锅炉处于正常供汽状态。

点火时，应注意炉膛温度，不可突然升高或忽高忽低，应使炉墙各部分缓慢加热和均匀膨胀。各受热面也应随着生火的进行逐渐被加热。由于锅炉在生火期内经受很大的温度变化，因此，不正确的生火将会造成锅炉寿命降低或个别部件损坏。根据运行经验，一般砖砌烟道的锅壳式锅炉冷炉生火时间为 5~6h，水管锅炉为 3~4h，快装锅炉 1~2h。对于有数个锅筒的水管锅炉，生火时应在下锅筒适当放水（一般半小时排污一次）并应补充给水，以促进上、下锅筒之间的水循环，减小温度差。

## 第二节 锅炉运行中的监督调整与管理

锅炉运行时，其负荷是经常变化的，锅炉的蒸发量随着负荷的变化而变化，适应负荷的要求。因此，在锅炉运行期间，必须对其进行一系列的调节，如对燃料量、空气量、给水量等作相应的改变，才能使锅炉的蒸发量与外界负荷相适应。否则，锅炉运行参数（汽压、汽温、水位等）就不能保持在规定的范围内。与此同时，

锅炉设备的完好程度，对锅炉运行的安全性和经济性影响很大。因此，对运行中的锅炉进行及时、准确的调节及进行严格、科学的管理，是保证锅炉安全、经济运行的必要手段。

## 一、水位的调节

水位的高低对锅炉的安全运行和生产工艺要求影响很大，在运行中应随时注视和调节锅炉的水位。水位的变化会引起汽压、汽温的波动。水位太高时会使蒸汽大量带水，降低蒸汽品质，并会在蒸汽管道内发生水冲击，甚至会发生满水事故。有蒸汽过热器时，则会使蒸汽中的盐碱物质附着在过热器中，甚至烧坏过热器。水位过低，则容易发生缺水事故，甚至严重缺水事故，造成被迫停炉。为此，必须加强对水位的监视和控制。锅炉在运行过程中，水位应保持在最低安全水位线和最高安全水位线之间，一般控制在水位表的一半左右。根据《规程》规定：蒸发量 $\geq 2\text{t/h}$ 的锅炉必须装设高低水位报警器，警报信号能区分高低水位，水位的变化实际上反映的是给水量和蒸发量之间的矛盾。当给水量小于蒸发量时，水位就下降；当给水量大于蒸发量时，水位就上升；给水量与蒸发量相等时，水位保持不变（这时，没有考虑排污、漏水、漏气等情况）。

负荷的变化，炉内燃烧工况的变化，必然导致蒸发量的变化，而维持锅炉的正常水位，就必须及时调节给水量，以适应蒸发量的变化。锅炉的给水方式和时间要适当，锅炉在运行中应尽可能做到均匀连续的给水，避免水位过低时大量给水，水位过高时又进行排污。因此，蒸汽负荷增加或水位下降时，就应及时开大给水调节阀，蒸汽负荷减少或水位上升时，及时关小给水调节阀。

目前，很多企业已使用了给水自动调节器，这对稳定水位安全运行，改善运行人员工作条件都有显著的作用。

实际运行中蒸汽负荷是有波动的，特别是在负荷变化比较大的情况下，锅炉往往会出现“假水位”。其现象是：当负荷突然大幅度增加时，水位很快上升，然后又很快下降；当负荷突然降低很快时，水位很快下降，然后，又很快上升。出现“假水位”的原因是：当负荷突然大幅度增加时，蒸发量不能很快跟上，汽压就会下降，锅水温度就会从原来压力下的饱和温度，降到新压力下的饱和

温度，此时，释放出大量的热量来蒸发锅水，使锅水的气泡大量产生，汽水混合物容积膨胀，水位升高。待大量气泡逸出水面时，锅水的气泡数量减少，蒸汽混合物容积减小，水位又下降。如果没有加大给水，那么蒸发量大于给水量，水位还要继续下降。因此，在负荷瞬间大幅度增加时，首先应保持稍低水位（不能低于最低安全水位线），同时，开大给水调节阀，加强给煤量和送风量。不能一见水位上升就马上关小给水调节阀，否则会在水位下降时，补不上水，造成缺水事故。

同样道理，在负荷很快下降时，经过了一个与上述相反的过程。即蒸汽压力上升，对应的饱和温度提高，用来增加新的饱和温度的吸热量增加，用于蒸发锅水的热量减小，蒸发量下降，锅水中气泡数量减少，汽水混合物容积减小，水位很快下降，这样就出现了“假水位”。随后，锅水温度已上升到新压力下的饱和温度，不再多吸收热量，水位又很快上升。如果没有减少给水，给水量大于蒸发量，水位就要继续上升。因此，在负荷瞬间大幅度降低时，首先应保持稍高水位（不能高于最高安全水位线），同时，关小给水调节阀，减小给煤量和送风量，不能一见水位下降就马上开大给水调节阀，否则会在水位上升时，大量给水，造成满水事故。

## 二、汽压的调节

锅炉运行时，应保持汽压稳定，锅炉的汽压不能低于规定的工作压力。否则，不能保证生产工艺要求的需要；同时，也不能超过规定的最高许可工作压力，不然将造成安全阀开启排汽而浪费能源，当安全阀发生意外故障时导致超压事故。

锅炉汽压的变化，实际上反映的是蒸发量与蒸汽负荷之间的矛盾。锅炉在运行时，蒸汽不断进入锅筒的蒸汽空间，另一方面蒸汽又不断离开锅筒，送向外界用户。当蒸发受热面流入锅筒的蒸汽量多于外界需求时，锅炉的汽压就会上升；反之，锅炉的汽压就下降。因此，控制锅炉的汽压实质上是对蒸发量的调节，而蒸发量的大小，决定于运行人员对燃烧的操作调整。

外界负荷、燃烧工况和锅内工作情况的变化，都会导致汽压的变化。保持汽压的相对稳定，主要靠司炉人员的责任心和技术的熟

练程度。燃烧调节根本问题是合理控制给煤量和送风量。不同的燃烧设备对燃烧的调节方法是不同的。手烧炉主要靠开、停鼓风机来增减燃烧程度；抛煤机炉主要靠抛煤量的大小来增减燃烧强度；链条炉主要靠炉排速度的快慢和煤层的厚薄增减燃烧强度。

保持锅炉汽压稳定的总原则是：当负荷增加，压力降低时，应适当增煤、增风、加强燃烧来提高锅炉的蒸发量；当负荷降低、压力升高时，应适当减煤、减风、减弱燃烧来降低锅炉的蒸发量。

根据燃烧的实际情况，悬浮燃烧蒸发量的变化速度要比层式燃烧反应的快。

### 三、汽温的调节

蒸汽温度在运行中应该控制在一定的范围内。对于无过热器的锅炉，其蒸汽温度的变化，主要反映在锅炉蒸汽压力值的变化及饱和蒸汽的温度上。对于有过热器的锅炉，过热蒸汽温度的变化，主要取决于过热器烟气侧的放热情况和蒸汽侧的吸热情况。

蒸汽温度偏低，会影响用户加热、干燥、蒸煮等工艺的经济性能。在蒸汽大量带水的情况下，还容易在过热器管内结存盐垢，烧坏过热器。同样，温度偏高，会导致管壁温度升高，在超过钢材允许最高温度以后，把过热器烧坏。一般带有过热器的工业锅炉，其汽温波动一般应为额定汽温 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

过热蒸汽温度的变化，实际上反映了过热器烟气侧的放热量和蒸汽侧蒸汽对热量吸收的变化。通过过热器的烟温升高、流速增大、流量增多都会导致汽温升高。例如：在负荷大量增加时，需要强化燃烧来保持汽压，燃烧后的烟气温度、流速都会增高。因而，过热蒸汽的温度就会上升。反之，负荷降低、燃烧减弱，烟温则会下降。同样，蒸汽侧吸热量的状况发生变化，气温也会发生变化。例如：水位过高时，蒸汽带水，工质吸收的热量相对减少了，过热蒸汽的温度就下降。相反，在同样燃烧条件下，蒸汽干度提高了，过热蒸汽温度上升。

带有蒸汽过热器的锅炉其汽温的调节一般有两种方法：中大型锅炉大都采用减温器来调节；一般工业锅炉是通过调节给煤量和送、引风量，改变燃烧来实现的。在汽温偏低的情况下，在操作上



可以采取加大引风或减少二次风等措施，使燃烧中心偏近炉膛出口，以提高炉膛出口的烟气温度来实现。汽温偏高时，可用相反的方法来调节。

## 四、排污

锅炉在运行中，进行必要的排污是至关重要的。排污的主要作用在于保持受热面水侧的清洁，排除锅内沉积物，以及避免锅水发生泡沫而影响蒸汽品质。排污分连续排污和定期排污两种。连续排污又称表面排污，是根据锅炉水质化验部门提供的水质情况进行调整。定期排污是根据操作规程，由运行人员定期进行，同时根据化验部门提供的水质情况调整排污量的大小。

### 1. 定期排污

定期排污的间隔时间和数量，主要取决于锅水的质量。一般排污量不超过给水量的5%。正常情况下，常控制在2%~3%，每班排两次为宜。在一台锅炉上，同时有几个排污系统时，必须对所有排污系统轮流进行排污，避免部分受热面堆积水垢或引起水循环破坏而发生事故。在两台锅炉以上，同时使用一根总排污管，而且每台锅炉的排污管又无逆止阀时，禁止两台锅炉同时排污。

(1) 排污操作 排污前应将锅筒水位保持在高于正常水位，并应注意到锅炉排污不会影响其它锅炉的运行和检修。排污阀装置见图1-19所示。操作方法有两种。

一种是：先开启快开阀3，然后再缓慢稍开慢开阀2，预热管道后再全开慢开阀进行排污。慢开阀不能突然开大，否则，会因管道受热太快，管内冷空气急骤膨胀而发生冲击，甚至震坏管道。排污结束后，先关闭慢开阀2，再关闭快开阀3。这种操作方法的优点是：可以减轻对快开阀的磨损，在两个阀之间不存有积水。缺点是：快开阀没有起到快开、快关作用，排污效果较差。

另一种是：开、关次序与上述次序相反。这种操作方法的优点是：排污效果较好。缺点是：快开阀磨损较严重，两个阀之间存有积水。为了防止下次排污产生水击现象，可在排污完毕后，再稍开快开阀，放尽积水后再关上。

(2) 操作时的注意问题 排污时，应将水位保持在高于正常水

位，且在低负荷时进行；排污时，应有人监护，以免排污阀开后忘关。

对于上述两种排污操作方法，应采取其中一种方法进行操作，以免两个排污阀都磨损。操作时先开启的阀门应全开，且关闭时后关；后开启的阀门，应先稍开进行暖管后再慢慢全开，而关闭时应先关。

开启阀门应用手轮或专用扳手，不可用其它加长手柄的方法开启阀门，以免损坏排污阀而出现不应有的事故。

水位不正常或发生事故时（满水除外）应立即停止排污。

排污阀应严密不漏。排污完毕，排污阀应关严，管内不能有水的流动声。巡回检查时，应用手触摸一下排污阀出口的引出管道，是否有异常情况。

## 2. 连续排污（又称表面排污）

连续排污的目的是将锅筒蒸发面以下 100~200mm 之间含盐浓度大的锅水，通过连续排污装置排出锅外，以降低锅水的含盐量。连续排污可提高蒸汽的品质和减少定期排污的排污率，因此蒸发量较高的锅炉都有连续排污装置。

为了提高锅炉的热效率，降低煤耗和改善给水的质量，可装设压力膨胀箱（又称扩容器），使排污水流入压力膨胀箱，使高压力的锅水经膨胀扩容后，产生出的低压二次蒸汽引入除氧器，对锅炉给水进行除氧，而排污水引流至地沟。

## 五、吹灰

锅炉受热面的火侧容易积存灰垢，特别是在对流烟道里的对流受热面上。受热面上的沉积灰垢增加热阻，从而降低了锅炉热效率。据测定，灰垢厚度达 1mm 时，要浪费燃料 10% 左右，严重的积灰堵塞烟道，使锅炉无法运行下去，从而被迫停炉停产。受热面积灰垢，还会加速管壁的腐蚀。总之，锅炉积灰将使锅炉的出力和热效率降低，受热面腐蚀加速。因此在运行中，加强对锅炉受热面的吹灰是极为必要的。吹灰的间隔时间根据炉型和煤质来确定，但在锅炉运行时，应一开始即正常投入吹灰装置，否则，如果受热面上已黏结成灰垢就不易清除。一般要求，火管锅炉最好每班不少于

一次，水管锅炉每班不少于两次。

### 1. 吹灰操作

吹灰前必须检查吹灰设备和阀门应无泄漏。并应暖管，以免水分进入烟道，使积灰黏结。

吹灰应按顺着烟气的流向逐级进行，即先吹水冷壁、再吹过热器、对流管束，然后吹省煤器、空气预热器，使积灰随烟气流经烟道，进入锅炉尾部的除尘器，而不致落在邻近的受热面上。

吹灰时应增大炉膛负压，一般保持在  $49\text{Pa}(5\text{mmH}_2\text{O})$ 。

有过热蒸汽时，应用过热蒸汽吹灰，当有压缩空气源时，最好用压缩空气吹灰，尤其是鳍片式铸铁省煤器管，不宜用饱和蒸汽吹灰。带有铸铁省煤器而且有旁路烟道的，在吹省煤器前的受热面时，应关闭省煤器烟道，开启旁路烟道。

吹灰完毕后，应关闭气阀，开启疏水阀，防止凝结水漏入而腐蚀受热面管道。同时恢复正常炉膛负压，开启省煤器烟道，关闭旁通烟道。

### 2. 吹灰注意事项

吹灰应在低负荷下顺烟气流向逐个进行，不应两个或几个吹灰器同时进行，以免压力下降过多。

气压下降过多，应停止吹灰。

吹灰时要注意安全，操作时应戴好手套、眼镜，人站在侧面操作。

## 六、水位表的冲洗

水位表是根据连通器原理制成的。所以，水位表内的水位实质上反映的是锅筒内的水位。当水位表的汽、水连接管堵塞时，水位表的水位就不能反应锅炉内的真实水位。有时水位表玻璃上沉积污垢时，运行人员往往会把污垢痕迹误认为水位。因此，锅炉在运行中要保持水位表汽、水连接管畅通和水位表玻璃清洁，就必须经常冲洗水位表。一般每班冲洗 2~3 次。

### 1. 操作程序

水位表冲洗示意图见图 2-1。开启放水旋塞 3，冲洗汽、水连

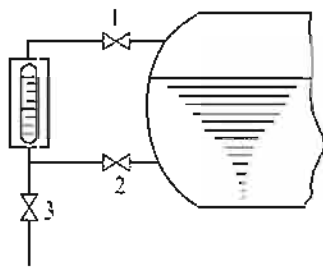


图 2-1 水位表冲洗示意图

1—汽旋塞；2—水旋塞；  
3—放水旋塞

接管和玻璃板（管）；关闭水旋塞 2，冲洗汽接管和玻璃板（管）；开启水旋塞 2，再关闭汽旋塞 1，冲洗水接管；开启汽旋塞 1，再关闭放水旋塞 3，冲洗后水位恢复正常并应有轻微波动。

## 2. 注意事项

- ① 冲洗水位表必须按程序进行。
- ② 冲洗水位时不能同时关闭汽、水旋塞，导致玻璃管冷却而造成再进汽水时，玻璃管因骤热而破裂。
- ③ 冲洗完毕后，如水位上升缓慢或无波动时，说明水位表仍有堵塞，应按上述程序重新冲洗，直至正常为止。
- ④ 冲洗水位表时，要戴好手套，脸不要正对水位表，以免玻璃板（管）破裂时伤人。

## ◀ 第三节 停炉及停炉后的保养 ▶

锅炉停炉分为：压火停炉（热备用停炉）、正压停炉（冷备用停炉）和紧急停炉（事故停炉）三种。前两种是按企业的生产调度在中断燃烧之前缓慢地降低负荷，直至使锅炉的负荷降到零为止。后一种是锅炉在工作条件下突然发生故障，紧急中断燃烧，使锅炉的负荷急剧地降低到零。

锅炉的压火停炉应采取措施保留储存在炉内的热量，不使锅炉迅速冷却。长期停炉时，锅炉要进行冷却，但应缓慢进行，防止锅炉冷却过快。紧急停炉往往使受热面损坏，为了防止事故的扩大应使锅炉迅速降温、降压。

锅炉停炉时的冷却时间与锅炉的大小、结构及砖墙的形式有关。一般中小型工业锅炉为 24h 左右，大型锅炉为 36~48h。

### 一、压火停炉

企业生产活动中，常会遇到短时间内不需要热负荷（一般不超

过12h)。为了避免时间和经济上的损失，保证在短时间内能很快带上负荷，停炉时必须维持炉中的红火和炉内的一定压力。这种热备用停炉称为压火停炉。

压火停炉的次数应尽量减少，否则将会缩短锅炉的使用寿命。

压火前，首先应减少风量和给煤量，逐渐降低负荷，同时向锅炉给水和排污，使水位高于正常水位线。在锅炉停止供气后，按时将给水由自动改为手动操作，并应停止风机，关闭主汽门，开启过热器疏水阀和省煤器的旁路烟道，关闭省煤器的正路烟道，同时进行压火操作。

压火分压满炉与压半炉两种。压满炉时，用湿煤将炉排上的燃煤完全压严，然后关闭风道挡板和灰门，并打开炉门，如能保证在压火期间不复燃，也可以关闭炉门。压半炉时，将煤扒到炉排前部或后部，使其聚集在此，然后用湿煤压严，关闭风道挡板和灰门，并打开炉门，如能保证在压灰期间不复燃，也可关闭炉门。

压火期间，司炉不得离开操作岗位，应经常检查锅炉内汽压，水位的变动情况；检查风道挡板、灰门是否关闭严密，防止压火的煤灭火和复燃。

当需要锅炉供汽扬火时，应先进行排污和进水，同时要清洗水位表，把炉排上的煤扒平，逐渐加上新煤，恢复正常燃烧。待汽压上升后，再及时进行暖管、并炉和供气工作。

## 二、正常停炉

正常停炉就是有计划性的停炉，经常是由于检修需要。正常停炉有以下几个步骤：停炉前的准备工作，锅炉灭火，降负荷，解列，冷却，放水和隔绝工作。

### 1. 停炉前的准备工作

停炉前应对锅炉设备的技术状况有所了解，根据锅炉的形式，参照日常的记录和观察，拟订检修项目（有些项目需待停炉检验后才能确定）。同时要做好煤斗存煤的处理工作，一般检修时间在一星期以上的，必须将原煤斗中的存煤用完，以免煤在煤斗中自燃。

## 2. 锅炉灭火

抛煤机锅炉抛完煤后，即可进行抛煤机运转。链条锅炉应关闭煤斗下部的弧形挡板，待余煤全部进入煤闸板后，放低煤闸板，并使其与煤排之间应留有 50mm 左右缝隙，保证空气流通来冷却煤闸板，以避免烧坏。

当煤全部离开煤闸板后 300~500mm 时，停止炉排转动，减少鼓风和引风，保持炉膛内适当负压，以冷却炉排。如能用灰渣铺在前部炉排至煤闸板之间隔热，则效果更好。

当炉排上没有火焰时，先停鼓风机，打开各级风门，再关闭引风机，稍开炉前的炉门，以自然通风的方式使炉排上的余煤燃尽。当煤燃尽后，重新转动炉排，将灰渣放尽，并继续空转炉排，直至炉排冷却为止。

## 3. 解列

从锅炉减弱燃烧开始，蒸汽负荷就逐渐降低，锅炉灭火时负荷进一步会降低并逐渐至零。此时，应关闭主汽阀，开启主蒸汽管道、过热器的疏水阀和省煤器的旁路烟道。

## 4. 冷却、放水

锅炉解列以后应缓慢降温，不能马上以送冷风和换水的方式进行冷却。只有停炉 6h 以后，才可开启烟道挡板进行通风和换水。以后，可根据情况每隔 2h 换一次水，使锅炉各部分温度均匀，锅水温度下降到 70℃ 以下时，可把全部锅水放尽。

## 5. 隔绝工作

锅炉冷却放水以后，应在蒸汽、给水、排污等管路中装置盲板与其它运行锅炉的连接系统隔离，盲板应有一定的强度，使其不被其它运行锅炉的压力顶开，保障检修人员的人身安全。

## 三、紧急停炉

紧急停炉：一般是锅炉发生了事故或有事故险肇时，为了避免事故的扩大而采取的紧急措施。紧急停炉时炉温、压力变化很大，所以必须采取一定的技术措施。

### 1. 紧急停炉的有关规定

- ① 锅炉水位降低到锅炉运行规程所规定的水位下极限以下时。
- ② 不断加大向锅炉给水及采取其它措施，但水位仍然下降。
- ③ 锅炉水位已升到运行规程所规定的水位上极限以上时。
- ④ 给水机械全部失效。
- ⑤ 水位表或安全阀全部失效。
- ⑥ 锅炉组件损坏，危及运行人员安全。
- ⑦ 燃烧设备损坏，炉墙倒塌或锅炉构架被烧红时，严重威胁锅炉安全运行。
- ⑧ 可分式省煤器没有旁路烟道，当给水不能通过省煤器时。
- ⑨ 其它异常运行情况，且超过安全运行允许范围。

### 2. 紧急停炉的处理

由于锅炉所发生事故的性质不同，紧急停炉的方式也有差异，有的需要很快的熄火，如缺水、满水事故；有的需要很快的冷却，如超压、过热器管爆破等事故。一般紧急停炉的方法如下。

① 首先停止给煤和送风，链条炉应关上弧形挡板，抛煤机炉停止抛煤机，并减弱引风，关小烟道挡板。

② 根据事故的性质，有的要放出炉膛内燃煤，有的并不要放掉燃煤。对于手摇活络炉排，应将燃煤直接摇入灰斗。对于链条炉，炉排应以最高速度将燃煤送入落灰斗。可用水浇灭或用砂土、湿炉灰压在燃煤上使火熄灭，但在任何情况下不得往炉膛里浇水来冷却锅炉。

③ 锅炉熄火后，应关闭主汽阀使主蒸汽管与蒸汽母管隔离，同时关闭引风机。视事故的性质，必要时可开启空气阀、安全阀和过热器疏水阀，迅速排放蒸汽，降低压力。

④ 开启省煤器旁路烟道，关闭正路烟道，并开大烟道挡板、灰门和炉门，促进空气流通，提高冷却速度。

⑤ 在紧急停炉时，如无缺水和满水现象，可以采用给水、排污的方式来加速冷却和降低锅炉压力。当水温降到 70℃ 以下时，方可把锅水放尽。

⑥ 如因锅炉缺水事故而紧急停炉时，严禁向锅炉给水，也不

能开启空气阀或提升安全阀等有关加强排气的调整工作，以防锅炉受到突然的温度或压力变化而将事故扩大。

⑦ 判明锅炉确系发生满水事故时，应立即停止给水，关小通风及烟道挡板，减弱燃烧，并开启排污阀放水，使水位适当降低；同时，开启主蒸汽管道、过热器、蒸汽母管和汽缸上的疏水门，防止蒸汽大量带水和管道内发生水冲击。

⑧ 锅炉在出现下列情况时，应马上报告领导和有关人员，然后再视损坏的部位和程度决定停炉时间。

铆缝、铆钉、胀接处发现渗漏时；

水冷壁管、对流管束、过热器管、省煤器管损坏泄漏时；

锅筒和锅壳上的人孔垫、集箱上的手孔垫破损，向外跑汽、水时；

在炉膛内与烟气接触的锅筒、集箱和管子上的绝热保温层脱落时；

锅炉严重结焦而难以维持正常运行时；

锅水与蒸汽品质严重低于标准，虽经采取措施，无法恢复正常时。

## 四、停炉保养

锅炉停炉后的保养，主要是为了防止锅炉腐蚀。锅炉停炉后的腐蚀往往比锅炉运行中的腐蚀更为严重。做好停炉保养工作，对防止和减缓锅炉的腐蚀，延长锅炉使用寿命具有重要意义。锅炉维护保养得好坏，还直接反映出锅炉使用单位的使用和管理水平。

锅炉停炉期间，造成腐蚀的主要原因是金属面的潮湿及空气的存在，因此，只要保持金属面干燥或金属面与空气（氧气）隔离，就能有效地防腐。常用的停炉保养方法有压力保养、干法保养、湿法保养和充气保养等。

### 1. 压力保养

压力保养适用于停炉不超过一周，热备用的锅炉。主要是防止空气的进入，使锅内不含氧。具体方法是，在锅炉保护过程终止之前使汽水系统灌满水，维持锅内余压为 0.05~0.1MPa，维持锅水温度稍高于 100℃。维持锅内压力和温度的措施是，通入其它锅炉



的蒸汽加热，或本炉间断生火加热。

## 2. 干法保养

干法保养是指在锅内及炉膛内放置干燥剂进行防护的方法。适用于长期停用的锅炉及季节使用的采暖锅炉。

采用干法保养时，停炉后把锅水放净，清除受热面上的水垢和烟灰，关闭蒸汽管道（热水锅炉应关闭进、出口循环水管）、给水管路上的阀门及排污管道上的阀门，打开人孔、手孔使锅筒、集箱自然干燥，并利用炉内余热或用木柴维持微火将锅炉本体烘干。锅炉烘干并冷却后，即可将准备好的放在托盘内的干燥剂放入锅筒、集箱内及炉排上，然后将人孔、手孔和与锅筒相连的阀门关闭严密。对有些密封不严的阀门，应加装堵板。

常用的干燥剂是吸湿能力很强的无水氯化钙、氧化钙（生石灰）和硅胶（硅胶应先在 $120\sim 140^{\circ}\text{C}$ 下进行干燥）。放入干燥剂的数量，可按锅内容积来计算。一般情况下，无水氯化钙按 $1.5\sim 2\text{kg}/\text{m}^3$ 放置；生石灰按 $2\sim 3\text{kg}/\text{m}^3$ 放置；硅胶按 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 放置。由于干燥剂吸潮后体积要膨胀，因此，干燥剂装入托盘内的高度不宜超过托盘高度的 $1/2$ 。装入的数量和位置应做好记录。

锅内放入干燥剂的一周后，应进行第一次检查。打开锅筒检查干燥剂是否已经吸湿而失效。如发现氯化钙或生石灰由块状变成粉状，硅胶的颜色发生改变，说明已潮解失效，应更换（生石灰更换）或烘干（无水氯化钙和硅胶加热到 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 烘干）后继续使用。以后每隔 $1\sim 2$ 个月检修一次。

用干法保养的锅炉，应十分注意与锅筒相通的各门、孔的严密性。锅炉在投入运行前，必须将锅内盛装的干燥剂取出。

## 3. 湿法保养

湿法保养是在汽水系统中灌注碱性溶液，利用碱液和金属作用生长的氧化物保护膜来防止锅炉金属的腐蚀。湿法保养适用于停炉不超过一个月的锅炉。

锅炉停炉后如采用湿法保养，应放净锅水，清除锅内各处的水垢、水渣、清扫受热面外侧的灰垢。然后关闭各处人孔、手孔、阀门，加入软化水至最低水位（热水锅炉应充满锅筒），用泵把配制

好的碱性防腐液注入锅内。开启给水阀向锅炉进水，直至汽水系统包括省煤器、过热器全部进满为止。关闭给水阀，用水泵使锅水进行循环，使碱液与锅水混合均匀并在各受热面系统内均匀分布。之后定期用微火烘炉，保持受热面外部干燥。定期开泵使锅水进行循环，并定期化验水的碱度，如碱度降低应适当补加碱液。

锅炉点火运行前，应将锅内所有溶液放出，备有储液池的，可放入储液池内以再利用。防腐液放出后，用洁净的水冲洗。如果需要紧急升炉，可放掉一半再补充软水，但这样做应在运行中增加排污次数，防止汽水沸腾。

采用湿法保养，冬季要注意防冻问题，特别是省煤器和管道部分。

碱性防腐液配制的方法有多种，常用的有以下三种。

(1) 碱液法 所用的碱为工业用氢氧化钠 ( $\text{NaOH}$ ) 或磷酸三钠 ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) 或二者混合使用。对于软化合格的水，按每吨水加氢氧化钠 5kg 或磷酸三钠 10kg，或将氢氧化钠 6kg 与磷酸三钠 1.5kg 的混合液用泵送入锅内，确认无空气，保持锅水  $\text{pH} > 10$ 。此法可用于相对较长时间的停炉。

(2) 混合液保护法 混合液由氢氧化钠、磷酸盐 ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 与亚硫酸钠三种化学药品混合而成，其配比是每吨水中加氢氧化钠 1kg，磷酸盐 0.1kg，亚硫酸钠 0.25kg。此法适用于容易排净积水的锅炉。

(3) 氨碱法 将氨水 ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) 配制成浓度约 0.8~1.0g/L 的稀氨液打入锅内并定期 (每隔 10 天左右) 循环氨液，使氨液浓度经常处于一致，利用纯化膜的形式。由于氨对铜有腐蚀作用，所以用此法时必须把与氨液有可能接触的铜件拆除或用盲板加以隔离。

#### 4. 充气保养

锅炉在清除水和烟灰并使受热面干燥后，从锅炉最高部位将氮气或氨气充入锅内，迫使重度较大的空气从锅炉低处排出，同时维持锅内一定压力 (一般为 0.05~0.1MPa)。氮气无腐蚀性且性质稳定，可以防止锅炉受热面金属腐蚀；氨气既可驱除氧气，又因其呈碱性反应，有利于防止腐蚀。因此，此种方法保养效果较好。充

气保养要求锅炉汽水系统具有好的严密性，保养中需要加强监督。

目前，又一种新的锅炉保养方法被大力推广和采用，这就是气相缓蚀法保养。它采用一种 TH-901 保护剂（缓蚀剂），放入需要长期停用的锅炉内，通过保护剂挥发的气体在锅内金属表面形成一层保护膜，从而达到防腐的目的。

TH-901 保护剂的使用方法是：将要长期停用的锅炉趁热排净锅水，打开人孔、手孔，按  $1\text{kg}/\text{m}^3$  空间量将 TH-901 保护剂放入托盘，并将托盘放入锅筒、集箱，也可将此保护剂直接撒入锅内，然后关闭人孔、手孔，使锅炉完全封闭。如果锅炉排水后，锅内积水过多，保护剂的用量可适当加大。锅炉重新启动时，不必清除保护剂，只需取出托盘即可。

## 第三章

# 锅炉的水处理

## 第一节 概 述

水是锅炉的主要工质之一，被誉为锅炉血液。水质处理在锅炉的安全经济运行中占有极其重要的地位。

在工业锅炉的运行中，由于水质不良受热面结垢的现象较为普遍，从而降低了锅炉热效率，增加了煤耗量。据初步估算，全国每年仅此一项浪费燃料高达一千万吨标准煤；水质不良还会引起蒸汽带水，降低蒸汽品质，并造成管道腐蚀。工业锅炉的腐蚀问题也十分严重，很多单位既没有除氧设备又未采取有效措施，有除氧器的，也往往由于管理不当、监督不严、效果很差，甚至把除氧器当作储水箱使用。以上问题造成锅炉使用寿命缩短，甚至经常发生爆管以致发生爆炸事故。据有关部门统计分析：工业锅炉水质事故，约占事故总数的40%~50%。

### 一、天然水中的杂质及其危害

天然水包括地表水（江、河、湖、海洋水）和地下水。水中即使经过净化处理，也含有各种各样的杂质。天然水中的杂质按其颗粒大小以及同水的混合（溶）状态的不同，大致可以分为三类。

#### 1. 悬浮物质

悬浮物质不溶于水，在水中呈悬浮状态，其颗粒较大，直径约在 $10^{-4}$ mm以上，使水发生浑浊现象。静置时，其中密度较大的

能自行下沉，密度小的则悬浮于水中或水面上。悬浮物质主要是泥、沙及动植物遗体腐败的产物等。

水中的悬浮杂质进入离子交换器，包裹在树脂颗粒的表面，会造成树脂污染，降低树脂的交换容量；悬浮杂质进入锅炉，还会产生沉积，降低传热效率并易引起汽水共腾。因此，在原水进入软化器之前，应该加以预处理，去除悬浮物质，以保证后阶段水处理工艺的正常运行。

## 2. 胶体物质

胶体物质是许多分子、离子的集合体，颗粒直径在  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  mm。由于胶体物质微粒往往带有同种电荷，互相排斥，静置时难以自行下沉。天然水中的胶体，主要由水中动植物的遗体腐烂生成的腐殖质之类有机胶体及无机胶体（铁、铝、硅的化合物）形成。

水中胶体物质进入锅炉，在锅内易形成坚硬且难以去除的水垢物质，同时还会引起锅水起泡，并随蒸汽带出，降低蒸汽品质。

## 3. 溶解物质

主要由钾、钠、钙、镁等矿物质盐类及气体（ $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $NH_3$ ）等组成。它们在水中以分子或离子状存在，其颗粒小于  $10^{-6}$  mm。

溶解物质进入锅内，引起锅炉结垢、腐蚀和蒸汽带水。

天然水中的悬浮物质、胶体物质，一般在进锅炉房之前，通过凝聚、澄清、过滤等加以去除。溶解物质一般只能用化学或电化学的方法去除。锅炉水处理是研究溶解物质去除的主要方法及机理。天然水中的杂质对锅炉的危害及去除方法见表 3-1。

表 3-1 天然水中的杂质对锅炉的危害及去除方法

分 类	主 要 成 分	对 锅 炉 危 害	去 除 方 法
悬浮物质	细菌、藻类及原生物、泥沙、黏土及其它不溶物质	污染树脂、锅内沉积和产生蒸汽带水	凝聚、澄清和过滤
胶体物质	溶胶，如硅酸及铁铝化合物；高分子化合物，如腐殖质	锅内结垢及锅水发泡	凝聚、澄清和过滤

续表

分 类	主要成分	对锅炉危害	去除方法
溶解物质	①盐类:钙、镁的重碳酸盐、碳酸盐、硫酸盐、氯化物等;钾、钠的重碳酸盐、碳酸盐、硫酸盐、氯化物、氯化物、铁盐及锰盐 ②气体:氧、二氧化碳、氨气、硫化氢	结垢 腐蚀 蒸汽带水	化学和电化学方法,如离子交换、石灰处理、电渗析、反渗透等 热力除气

## 二、工业锅炉水质指标

工业锅炉水质指标可反映水中杂质含量,评价和衡量锅炉用水的质量。工业锅炉常用的有以下几个主要水质指标:属日常运行控制项目的有硬度、碱度、氯离子、pH值、溶解氧、磷酸根等;只作定期检查项目的有悬浮物、溶解固形物、含油量、相对碱度等。

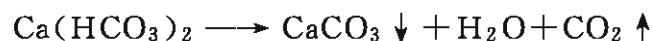
### 1. 硬度 (常用符号 $H$ 表示)

硬度是指水中钙、镁盐类的总含量。由于钙、镁盐类的不同,以及这些盐类在加热时发生的变化不同,硬度又分为以下几种。

(1) 暂时硬度 简称暂硬,又称碳酸盐硬度,常用  $H_t$  表示。

暂硬指溶于水中的重碳酸钙  $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]$ 、重碳酸镁  $[\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2]$  以及钙、镁的碳酸盐所形成的硬度,但由于天然水中钙、镁的碳酸盐含量很少,所以可以近似地把碳酸盐硬度看作钙、镁的重碳酸盐含量。

重碳酸钙、镁因为在加热至沸腾时会发生分解,析出沉淀,硬度也随之消失,所以,碳酸盐硬度,亦称暂时硬度,反应式如下:



(2) 永久硬度 简称永硬,又称非碳酸盐硬度,常用  $H_{ft}$  表示。

永硬指水中钙、镁的非碳酸盐,如氯化物、硫酸盐、硅酸盐 ( $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{MgSiO}_3$ ) 等含量之和,这些盐类加热至沸腾时,不会立即析出沉淀,只有在水分不断

蒸发，盐类浓缩，当对应浓度达到过饱和时，才会析出沉淀，所以称之为永久硬度。

### (3) 总硬度 ( $H$ )

总硬度 = 暂硬 + 永硬 = 碳酸盐硬度 + 非碳酸盐硬度

即：
$$H = H_t + H_{ft}$$

(4) 负硬度 ( $H_f$ ) 负硬度是由于水中（主要是地下深井水）的碱金属碳酸盐、重碳酸盐及氢氧化物存在所引起的。此种水碱度大于硬度，亦即  $\text{HCO}_3^- > (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ ，水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  全部以重碳酸盐形式存在，所以水中仅有暂硬，没有永硬。过剩的  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  结合，它能抵消一部分总硬度。

通常我们把总碱度大于总硬度的那一部分称为负硬。

(5) 硬度单位 我国低压锅炉水质标准使用的单位是： $\text{mmol/L}$  或  $\mu\text{mol/L}$ 。

它们之间的换算单位是： $1\text{mmol/L} = 1000\mu\text{mol/L}$

目前国际上各国使用的硬度单位及它们之间的换算关系，如表 3-2 所列。

表 3-2 硬度单位的换算

硬度单位	mmol/L	德国度	法国度	英国度	美国度
mmol/L	1	2.804	5.004	3.5031	50.044
德国度	0.3566	1	1.7847	1.2493	17.847
法国度	0.1998	0.5603	1	0.7	10.0
英国度	0.2855	0.8004	1.4286	1	14.288
美国度	0.01998	0.0560	0.1	0.07	1

注：德国度—1 度相当于 1L 水中含 10mg CaO；法国度—1 度相当于 1L 水中含 10mg  $\text{CaCO}_3$ ；英国度—1 度相当于 0.7L 水中含 10mg  $\text{CaCO}_3$ ；美国度—1 度相当于 2L 水中含 1mg  $\text{CaCO}_3$ 。

## 2. 碱度（常用符号 $A$ 表示）

碱度是指水中能够接受氢离子的物质总含量，即表示水中  $\text{OH}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  以及其它一些弱酸性盐类的总含量。因为这些物质在水溶液中呈碱性，可以用强酸中和，所以总称碱度。天

然水（地表水、地下水）碱度主要由  $\text{HCO}_3^-$  的盐类所组成，所以对于硬度大于碱度的非碱性天然水，暂硬 $\approx$ 碱度。锅炉水根据压力的不同， $\text{HCO}_3^-$  分解成不同比例的  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{OH}^-$ 。水中碱度分为以下几种。

(1) *P* 碱度（即酚酞碱度）以酚酞作指示剂，以强酸（HCl 或  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ）滴定，溶液由红色变为无色，根据所消耗的标准酸量计算所得的碱度，称为 *P* 碱度。滴定终点时  $\text{pH}=8.2$ 。

(2) *M* 碱度（即甲基橙碱度）用甲基橙作指示剂，用强酸滴定，溶液由橘黄变为橙红，所消耗的标准酸液总量，计算所得的碱度，称为 *M* 碱度。所以 *M* 碱度又称为全碱度。滴定终点时  $\text{pH}=4.4$ 。

(3) 碱度单位 同硬度。

(4)  $\text{OH}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  存在引起水中碱度的形式

$\text{OH}^-$  单独存在，此时水中仅有 *P* 碱度， $P=M$ ；

$\text{OH}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  共同存在，此时  $2P=M$ ；

$\text{CO}_3^{2-}$  共同存在，此时  $2P=M$ ；

$\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  共同存在，此时  $2P<M$ ；

$\text{HCO}_3^-$  单独存在，此时  $P=0$ ；

$\text{OH}^-$  与  $\text{HCO}_3^-$  不能同时存在。

以上关系，如表 3-3 所列。

表 3-3 水中碱度与碱性离子存在的关系

碱度关系 离子含量	$P=M$	$2P>M$	$2P=M$	$2P<M$	$P=0$
$\text{OH}^-$	P	$2P-M$	0	0	0
$\text{CO}_3^{2-}$	0	$2(M-P)$	$2(M-P)$	2P	0
$\text{HCO}_3^-$	0	0	0	$M-2P$	M
碱性离子存在的形式	$\text{OH}^-$ 单独存在	$\text{OH}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 共同存在	$\text{CO}_3^{2-}$ 单独存在	$\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 共同存在	$\text{HCO}_3^-$ 单独存在

### 3. 悬浮物

亦称悬浮固形物，是指经某种过滤材料（工业锅炉水质分析中



规定用 G<sub>4</sub> 玻璃过滤器或铺有 5mm 厚石棉层的古氏坩埚过滤器) 分离出来的, 不溶于水的固形物, 它是以 1L 水样中所含悬浮物的质量 (mg) 来表示的, 单位 mg/L。

#### 4. 溶解固形物 (简称溶固)

指分离出悬浮物后的滤液, 经蒸发、干燥后所得的残渣, 它表示溶于水中各种盐类的总含量, 单位 mg/L。

通常把悬浮物和溶解固形物的总和称为全固形物。

#### 5. 氯离子 (用 Cl<sup>-</sup> 表示)

指水中氯化物的含量, 单位 mg/L。

氯化物是含盐量的主要成分, 对水质影响极大, 因此对氯离子的监测十分必要。

对于水质稳定的天然水, 水中溶解固形物与氯离子的含量的比值接近常数。由于溶解固形物的测定比较麻烦, 只能作定期监测, 所以我们可以把溶固-氯离子的含量对应关系绘制曲线, 从而由测得的氯离子含量, 查出相应的溶固含量, 可以说氯离子是溶固的间接监测指标。

应当指出, 溶固与氯离子的对应关系不是一成不变的, 所以应当不定期的对关系曲线加以校核, 尤其是在水质发生变化时, 更应如此。

#### 6. pH 值

pH 值的意义是溶液中氢离子浓度的负对数, 即  $\text{pH} = -\lg\text{H}^+$ , 它是表示水的酸碱性及其强弱程度的指标。

pH=7, 溶液呈中性;

pH<7, 溶液呈酸性, 而且 pH 值越小, 酸性越强;

pH>7, 溶液呈碱性, 而且 pH 值越大, 碱性越强;

天然水中 pH=6~8.5, 锅水、给水 pH 值必须大于 7。

#### 7. 溶解氧 (O<sub>2</sub>)

指水中溶解的氧气含量。溶解氧是引起锅炉金属腐蚀的主要因素。单位 mg/L。

#### 8. 磷酸根 (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)

一般天然水中不含 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, 当采用锅内加药处理, 或虽有锅

外处理，但为了消除给水残余硬度和防止苛性脆化而进行锅内校正处理（增加锅水含盐量，降低相对碱度）时，往往向锅内投加一定数量的磷酸盐，加入量应根据  $\text{PO}_4^{3-}$  的大小加以调整。单位  $\text{mg/L}$ 。

### 9. 含油量

一般天然水中的含油量是很少的，但在给水输送过程中，如水泵、阀门带入，或回水回到系统受到油类污染，也易带入油类。油进入锅内，易结生油垢。油垢的热导率极小，且难以消除，因此把含油量列入定期检测指标。单位  $\text{mg/L}$ 。

### 10. 相对碱度

主要是指锅水中游离的  $\text{NaOH}$  含量与溶解固形物的比值。

$$\text{相对碱度} = \text{游离 NaOH} / \text{溶解固形物}$$

它是防止发生苛性脆化而规定的一个技术指标，我国规定小于 0.2，这是一个经验数据，尚无严格的理论依据。

所谓游离的  $\text{NaOH}$ ，是指根据锅水中所含  $\text{OH}^-$  折算成  $\text{NaOH}$ 。

当锅水中仅有  $P$  碱度时，即仅有  $\text{OH}^-$  碱度，游离  $\text{NaOH} = P \times 40 (\text{mg/L})$ ；

当锅水中  $2P > M$  时，即  $\text{OH}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  共同存在，游离  $\text{NaOH} = (2P - M) \times 40 (\text{mg/L})$ 。

## 三、天然水及锅炉用水的分类

### 1. 天然水分类

#### (1) 按含盐量分

低含盐量水——含盐量在  $200 \text{mg/L}$  以下；

中含盐量水——含盐量在  $200 \sim 500 \text{mg/L}$ ；

较高含盐量水——含盐量在  $500 \sim 1000 \text{mg/L}$ 。

高含盐量水——含盐量在  $1000 \text{mg/L}$  以上。

我国江、河水属于低含盐量水的约占一半以上，其它大都是中等含盐量水。地下水大都属于中等含盐量水。高含盐量水，一般不宜直接用于工业锅炉。

## (2) 按硬度分

低硬度水——硬度在 1.0mmol/L 以下；

一般硬度水——硬度在 1.0~3.5mmol/L；

较高硬度水——硬度在 3.5~6.0mmol/L；

高硬度水——硬度在 6.0~9.0mmol/L；

极高硬度水——硬度在 9.0mmol/L 以上。

我国江、河水的硬度，东南沿海一带大都小于 1.0mmol/L，为低硬水区，越向西北硬度越大，最大可达 3~6mmol/L，甚至更高；东北地区由北向南硬度增大，松花江及其以北的河水硬度，可低至 0.5~1.0mmol/L。

## (3) 按硬度和碱度的关系分

碱性水——总碱度大于总硬度 ( $A > H$ )，水中含有重碳酸钾钠，硬度全为暂硬，无永硬，为负硬水，即  $\text{HCO}_3^- > (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ ；

非碱性水——总硬度大于总碱度 ( $H > A$ )，暂硬 = 碱度 ( $H_t = A$ )，永硬 = 总硬 = 碱度 ( $H_{ft} = H - A$ )；

碳酸盐水——暂硬大于永硬 ( $H_t > H_{ft}$ )，即  $\text{HCO}_3^- > (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ ；

非碳酸盐水——暂硬小于永硬 ( $H_t < H_{ft}$ )，即  $\text{HCO}_3^- < (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 。

## 2. 锅炉用水分类

(1) 原水 指锅炉的水源水，亦称生水。原水主要来自江水、河水、井水、自来水。

(2) 给水 经过适当的处理（预处理、锅外化学或电化学等处理），直接进入锅炉作为工质使用的水，称为给水。给水通常由补给水和生产、取暖和汽轮机凝结水混合而成。

(3) 回水 蒸汽或热水的热量利用之后，其凝结水或低温水回收循环利用，称为回水。备有背压机组或凝汽式汽轮机组的单位，凝结水也称回水或复水。提高给水中回水比例，可改善锅炉用水质量，减少制作补给水的工作量和成本，同时还可以利用部分余热。回水系统应尽量防止污染。

(4) 补给水 锅炉在运行过程中，由于取样、泄漏以及回水污染等要损失一部分水，或者蒸汽直接用于加热，无回水回收时，必须不断补充符合水质标准要求的水，这部分水称为补给水。当无回水回收回用时，补给水量等于给水量。补给水一般就是软化水。

(5) 锅水 运行中的锅炉锅筒、集箱、水冷壁管、对流管内流动的水，称为锅炉水，简称锅水。

(6) 排污水 为了降低锅水中的含盐碱量和排除水渣类沉积物，必须从上锅筒水面处和下锅筒或下集箱底部排放掉一部分锅水，这部分锅水称为排污水。排污水分连续排污水和定期排污水。

(7) 冷却水 锅炉运行中，为了降低某些设备部件的温度，或将取样水（汽）冷却至室温下，往往需要冷水（一般都是用走水）进行间接热交换加以冷却，这部分水称之为冷却水。

(8) 蒸汽取样水 为了监督蒸汽品质，需要将饱和蒸汽和过热蒸汽，经取样管、取样器（冷却水间接冷却）采集，对冷却至室温下的蒸汽水样进行化验分析，该水样称为蒸汽取样水。

#### 四、工业锅炉水处理目的及选择水处理方式的基本原则

锅炉水的优劣将直接关系到节约燃料、节约用水、节约运行及管理费用，关系到蒸汽品质、锅炉及汽轮机使用寿命，也是关系到职工人身安全的一件大事。因此，必须引起高度重视。

在锅炉水处理工作中，提倡在技术可靠、经济合理的前提下，坚持因炉、因水、因地制宜的原则，适当选择行之有效的水处理方式，以达到工业锅炉水处理“三保证、三防止”的目的。

① 保证低硬度，防止或减少锅内水垢和水渣的生成，做到无垢滞垢运行。

② 保证锅水维持一定碱度，以防止锅炉腐蚀，同时，也要避免碱度过高，以防止发生苛性脆化，碱性腐蚀及蒸汽带水。

③ 保证低含盐量，防止蒸汽带水和汽水共腾现象发生，减少锅炉排污。

## ◀ 第二节 工业锅炉水质标准 ▶

### 一、低压锅炉水质标准

为了保证低压锅炉的安全经济运行，1996年我国重新修订颁发了GB1576—1996《低压锅炉水质》。此标准适用于额定蒸汽压力小于等于2.5MPa的固定式蒸汽锅炉，也适用于额定热功率大于等于0.1MW、额定出水压力大于等于0.1MPa的固定式热水锅炉，其具体规定如下。

蒸汽锅炉的给水应采用锅外化学水处理。额定蒸发量小于等于2t/h且额定蒸汽压力小于等于1.0MPa的蒸汽锅炉也可采用锅内加药处理。但必须对锅炉的结垢、腐蚀和水质加强监督，认真做好加药、排污和清洗工作。锅炉额定蒸发量小于等于6t/h时，给水应除氧；额定蒸发量小于6t/h的锅炉如发现局部腐蚀时，应采用除氧措施。

热水锅炉给水应进行锅外处理，对于额定功率小于2.8MW的热水锅炉可采用锅内加药处理，但必须对锅炉的结垢、腐蚀和水质加强监督，认真做好加药工作。锅炉额定功率大于等于4.2MW时，给水应除氧；额定功率小于4.2MW的锅炉应尽量除氧。

① 蒸汽锅炉采用锅内加药水处理时，水质应符合表3-4的规定。

表3-4 蒸汽锅炉锅内加药处理的水质标准

项 目	给 水	锅 水
悬浮物/(mg/L)	≤20	—
总硬度/(mmol/L) <sup>①</sup>	≤4	—
总碱度/(mmol/L) <sup>②</sup>	—	8~26
pH(25℃)	≥7	10~12
溶解固形物/(mg/L) <sup>③</sup>	—	<5000

① 硬度 (mmol/L) 的基本单元为  $C(1/2Ca^{2+} \cdot 1/2Mg^{2+})$ ，下同。

② 碱度 (mmol/L) 的基本单元为  $C(OH^{-}、HCO_3^{-}、1/2CO_3^{2-})$ ，下同。

③ 如测定溶解固形物有困难时，可采用测定氯离子 ( $Cl^{-}$ ) 的方法来间接控制，但溶解固形物与氯离子 ( $Cl^{-}$ ) 的比值关系应根据试验确定，并应定期复试和修正此比值关系。

② 蒸汽锅炉采用锅外加药水处理时,水质应符合表 3-5 的规定。

表 3-5 蒸汽锅炉锅外水处理的水质标准

项 目		给 水			锅 水		
		$\leq 1.0$	$1.0 < p$ $\leq 1.6$	$1.6 < p$ $\leq 2.5$	$\leq 1.0$	$1.0 < p$ $\leq 1.6$	$1.6 < p$ $\leq 2.5$
额定蒸汽压力/MPa		$\leq 1.0$	$1.0 < p$ $\leq 1.6$	$1.6 < p$ $\leq 2.5$	$\leq 1.0$	$1.0 < p$ $\leq 1.6$	$1.6 < p$ $\leq 2.5$
悬浮物/(mg/L)		$\leq 5$	$\leq 5$	$\leq 5$	—	—	—
总硬度/(mmol/L)		$\leq 0.03$	$\leq 0.03$	$\leq 0.03$	—	—	—
总碱度 /(mmol/L)	无过热器	—	—	—	6~26	6~24	6~16
	有过热器	—	—	—	—	$\leq 14$	$\leq 12$
pH(25℃)		$\geq 7$	$\geq 7$	$\geq 7$	10~12	10~12	10~12
溶解氧/(mg/L)		$\leq 0.1$	$\leq 0.1$	$\leq 0.05$	—	—	—
溶解固形物 /(mg/L)	无过热器	—	—	—	<4000	<3500	<3000
	有过热器	—	—	—	—	<3000	<2500
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /(mg/L)		—	—	—	—	10~30	10~30
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /(mg/L)		—	—	—	—	10~30	10~30
相对碱度		—	—	—	—	<0.2	<0.2
含油量/(mg/L)		$\leq 2$	$\leq 2$	$\leq 2$	—	—	—

注:当锅炉额定蒸发量大于等于 6t/h 时应除氧,额定小于 6t/h 的锅炉如发现局部腐蚀时,应采取除氧措施,对于供汽轮机用汽的锅炉给水含氧量应小于等于 0.05mg/L。

③ 热水锅炉的水质标准应符合表 3-6 的规定。

表 3-6 热水锅炉的水质标准

项 目	锅内加药处理		锅外化学处理	
	给 水	锅 水	给 水	锅 水
悬浮物/(mg/L)	—	$\leq 5$	—	—
总硬度/(mmol/L)	$\leq 4$	—	$\leq 0.6$	—
pH(25℃) <sup>①</sup>	$\geq 7$	10~12	$\geq 7$	10~12
溶解氧/(mg/L)	—	—	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$
含油量/(mg/L)	$\leq 2$	—	$\leq 2$	—

① 通过补加药剂使锅水 pH 值控制在 10~12。

④ 余热锅炉的水质指标应符合同类型、同参数锅炉的水质要求。

## 二、水质标准的制定

水质标准是水质指标要求达到的合格范围。锅炉用水必须达到一定的标准，才能避免锅炉在运行过程中出现结垢、腐蚀及汽水共腾等现象。但要使锅炉用水的各项指标达到一定的标准，就必须对锅炉用水进行必要的技术处理，这就要投入一定的人力、物力和财力。而且标准规定的越严，水处理就越彻底，这种投入也就越大。因此，对锅炉用水各项指标的规定和限制，并不是越严格越好，而是在保证锅炉安全经济运行的前提下，越经济、越实用越好。鉴于这种情况，将各项水质标准制定的依据和意义介绍如下。

### 1. 悬浮物的标准

因为水中悬浮物会影响锅内加药处理的效果，又因为原水经澄清后，一般悬浮物含量约在 20mg/L 以下，所以规定锅内加药处理时，悬浮物含量小于等于 20mg/L。锅外化学处理时，由于悬浮物会影响离子交换器的正常运行，因此，为防止悬浮物对交换器的污染，水质标准规定悬浮物含量小于等于 5mg/L。一般来说，原水通过沉淀、过滤的方法，其悬浮物的含量可以达到此标准要求。

### 2. 硬度标准

锅内加药处理时，在给水硬度为 4mmol/L 的时候，可以达到防垢的效果。只要能切实加强管理和对水质的监督，认真做好加药、排污和清洗工作，就能使锅炉生长的水垢厚度控制在 1mm/a 以下。而如果将此值提高，即放宽给水硬度，则所需加入锅内的药剂量增加很大，从而使锅水的总溶解固形物大量增加，势必提高锅炉的排污率，这对锅炉的安全和经济运行是不利的。

采用锅外化学处理时，给水总硬度指标限制在小于等于 0.03mmol/L。一方面考虑到给水硬度达到此标准，能保证热强度最大的受热面生长的水垢厚度不超过 0.5mm/a；另一方面，我国现在普遍采用的锅外化学处理方法是离子交换方法，一般情况下，经离子交换处理后水的硬度在 0.03mmol/L 以下。另外，国际上对

该项指标的要求越来越严，其目的是尽量降低锅炉给水的残余硬度，我国在向国际标准靠近和尽可能降低锅炉给水残余硬度以利于不结生水垢的原则下，将给水硬度规定为此值。

### 3. pH 值标准

给水 pH 值高一些（如  $\text{pH} > 9$ ），在溶解氧很低的条件下，对给水管道和设备的防腐是非常有利的。但提高 pH 值要采取加药措施，这样就增加了低压锅炉水处理的复杂性。另外，考虑到我国各种水源的 pH 值一般都大于或等于 7，所以规定给水的 pH 值大于等于 7。

### 4. 溶解氧标准

溶解氧会造成给水管道和锅炉本体的腐蚀，特别是对于无垢的锅炉或是在锅炉清除水垢后，腐蚀问题就更为突出。所以，为了防止氧腐蚀，就必须控制给水的含氧量。

氧腐蚀是随着锅炉参数的升高而加剧的，而且蒸发量越大，单位水容积越小，在相同的时间内，金属表面接触的溶解氧也越多，所以规定蒸发量大于等于 6t/h 的锅炉必须除氧，且蒸汽压力小于 2.5MPa 而大于 1.6MPa 的锅炉，给水溶解氧应  $\leq 0.05\text{mg/L}$ 。一般采用热力除氧即可达到要求。

对于热水锅炉，虽然锅炉参数较低，但因补给水量大，带入锅内的溶解氧量也大，对高温热水锅炉会引起严重腐蚀，所以热水锅炉额定功率大于等于 4.2MW 时，给水应除氧。对于采用锅外化学处理的热水锅炉，溶解氧的含量不超过 0.1mg/L。

### 5. 锅水 pH 值和总碱度标准

锅水 pH 值和碱度对锅炉设备的结垢、腐蚀和蒸发品质均有重大的影响。pH 值对腐蚀的影响更大、更直接。当锅水 pH 值小于 7 时，水呈碱性，会对金属形成酸性腐蚀；当 pH 值过大，超过 12 时，水呈强碱性，会对金属形成碱性腐蚀；当 pH 值为 10~12 时，水的碱性适度，与水接触的钢材表面会形成一层氧化保护膜，阻止腐蚀的继续发生。而且，在这样的碱性水溶液中， $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  会呈现为疏松的水渣状，便于排出清除。因而要求锅水的 pH 值保持在 10~12 范围之内。



碱度过高易引起锅炉设备的碱性腐蚀和苛性脆化，并且易使锅炉水起泡及汽水共腾，恶化蒸汽品质，因而要对锅水总碱度进行控制。当锅水碱度过低，则易使锅炉结生水垢，不利于锅炉的安全运行。因此，锅水的碱度指标不能过高，也不能过低，必须慎重考虑，适当的给予规定具体指标。

由于锅水中的碱度成分能防止锅炉设备结生坚硬的硅酸盐水垢和因给水的残余硬度引起的水垢，因此，锅水必须含有一定的碱度成分，才有利于锅炉设备的运行。试验表明，当锅水碱度低于6mmol/L时，锅水对锅炉设备阻垢率急剧下降，当锅水碱度在8mmol/L以上时，锅水碱度的继续升高对锅炉设备的阻垢率几乎没有影响。因此，水质标准对锅水碱度下限值定位6mmol/L。

锅水碱度上限值的规定是为了防止锅炉设备发生碱性腐蚀、苛性脆化和汽水共腾，保证蒸汽品质。上限值定得太低，会使锅炉的排污量增大。考虑到额定工作压力  $p \leq 1.0\text{MPa}$  的锅炉均是小型低压锅炉，用户对锅炉的蒸汽品质要求不高，主要用于生活和一般性加热物体，且大多不是连续运行的，故这一压力级别的锅炉，锅水总碱度指标的上限为26mmol/L。由于锅炉的工作压力越高，水中的碳酸盐分解率越高，锅水总碱度指标值也就相应降低，因此，对于锅炉工作压力  $p$  为  $1.0\text{MPa} < p \leq 1.6\text{MPa}$  和  $1.6\text{MPa} < p \leq 2.5\text{MPa}$  的无过热器锅炉，锅水总碱度上限分别定位24mmol/L和16mmol/L。有过热器的锅炉，蒸汽主要是用于发电机组或特殊用户。为防止蒸汽品质恶化导致蒸汽轮机叶片结盐垢而造成事故，应严格控制这类有过热器锅炉的锅水碱度上限值。

## 6. 锅水溶解固形物标准

当锅水含盐量达到某一极限时，锅水就会形成很厚的泡沫层，即所谓汽水共腾，造成蒸汽带水量急剧增加，蒸汽品质急剧恶化，必须将锅水的含盐量控制在临界含盐量以下。同时，对溶解固形物指标的控制还应考虑到排污量的问题，在保证蒸汽品质、安全运行的前提下，尽可能使锅炉的排污损失较小。

## 7. 相对碱度标准

相对碱度的规定是着眼于防止苛性脆化的。GBJ1576—1996

所规定的相对碱度不大于 0.2，是基于实际经验和借鉴国外的标准。

### 8. 含油量标准

给水含油量高时，会造成汽水共腾，影响蒸汽品质；也会使锅内形成热导率很小的带油质的水垢。所以，必须控制给水的含油量。

## ◀ 第三节 工业锅炉用水的预处理 ▶

锅炉补给水在进行离子交换软化或除盐之前，需预先将水中影响离子交换过程或有害于离子交换剂的杂质除掉。这种水处理工艺，通常称为预处理。

### 一、地表水的预处理

地表水预处理的目的是，主要是除掉水中的悬浮杂质。因为这些杂质一旦进入离子交换器内，不仅使树脂层的阻力增大，而且容易被吸附在树脂表面影响交换能力。地表水的预处理通常采用混凝、沉淀（澄清）和过滤。

#### 1. 混凝

(1) 胶体的稳定性 水中的悬浮物和胶体杂质，它们的粒径不同，沉降速度相差很大。表 3-7 列出水温在 10℃ 时，颗粒密度在 2.65g/m<sup>3</sup> 时，不同粒径的悬浮颗粒在静水中的沉降速度。

表 3-7 不同颗粒悬浮物在静水中沉降 1m 所需时间

颗粒直径 /mm	颗粒种类	沉降 1m 所需时间	颗粒直径 /mm	颗粒种类	沉降 1m 所需时间
1.0	粗砂	10s	0.001	细菌	5 天
0.1	细沙	2min	0.0001	黏土	2 年
0.01	泥沙	2h	0.00001	胶粒	210 年

从表 3-7 中可以看出，悬浮在水中的杂质沉降速度随着颗粒的粒径变化并非呈线性关系。大颗粒悬浮物在重力作用下容易产生沉

淀，而粒径微小的悬浮物以及胶体杂质却能在水中长期保持分散悬浮状态。这种保持悬浮状态的特性称为胶体的稳定性。

微小悬浮物和胶体颗粒具有稳定性的主要原因有三。

① 微粒的布朗运动 分散在水中的各种固体颗粒，随时受到分子热运动的撞击。对于大颗粒悬浮物如沙粒来说，每一颗粒在各方向受到水分子的同时撞击，所受到的撞击力基本达到平衡，相互抵消，且因颗粒质量大，故能在重力作用下自然下沉。而颗粒极小的悬浮物和胶体杂质，受到水分子的撞击次数较少，各方面撞击不平衡，且因微粒质量甚小，重力影响甚微，致使微粒在水中作无规则的高速运动，并趋于均匀分散状态，这种运动即为“布朗运动”。布朗运动是天然水中微粒稳定性的因素之一。

如果水中不存在妨碍颗粒相互接触的因素，则布朗运动又提供了颗粒在无规则运动中相互碰撞接触的机会。一般规律是，颗粒愈小，表面吸附能力愈强，一旦碰撞接触，各微粒必将彼此吸附聚结，以致颗粒逐渐变大，最终使布朗运动消失而导致重力沉淀。这时布朗运动又是微粒分散不稳定因素之一。问题在于原水中胶体颗粒虽然作布朗运动，但彼此无法接触，妨碍它们相互接触的因素是带有同性电荷胶体颗粒间的静电斥力。

② 微粒间的静电斥力 天然水中的胶体颗粒大多属于负电荷胶体（如黏土类胶体）。胶体的核心是由众多分子形成的集合体，称为胶核。胶核的表面分布着相同电荷的离子，称为电位离子。它是由组成胶核物质的电离作用或吸附溶液中某种离子而形成的。胶核表面的电位离子，通过静电作用，吸引溶液中带相反电荷的离子，称为反离子。距离胶核较近的反离子，静电吸引力较强，这一区域称为反离子的吸附层；距离胶核较远的反离子，静电吸引力较弱，这一区域称为反离子的扩散层，见图3-1。胶体颗粒在溶液中运动时，吸

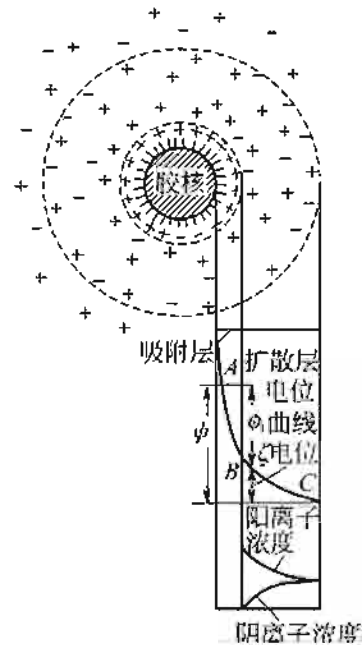


图 3-1 胶体结构示意图

附层内的反离子随胶核一起运动，而扩散层中反离子却滞后一段距离，因此在吸附层和扩散层之间就产生一个滑动分界面，称为滑动面，这就是胶体带电的原因。

胶核表面电位离子所形成的电位为总电位 ( $\psi$ )。滑动面的电位为动电电位，通常称为  $\zeta$  电位，它表明胶体带电的本性。 $\zeta$  电位愈高，胶体颗粒间的静电斥力愈大，愈难以集结成大颗粒，胶体就愈稳定。因而， $\zeta$  电位是衡量胶体稳定性的一个重要指标。

③ 微粒的水化作用 由于胶体带有电荷，水分子具有极性，所以水分子便定向地吸引到胶体颗粒的周围，形成一层水膜，称为水化膜。水化膜同样能阻止微粒间相互接触，所以水化作用也是胶体稳定性的原因之一。不过，水化膜是伴随胶体带电而产生的，一旦胶体  $\zeta$  电位消除或减弱，水化膜作用也会消除或减弱。

胶体和悬浮物之间没有一个明显的界限，悬浮物颗粒愈小，胶体性质就愈明显。所以，在水的预处理中将微小悬浮物与胶体一起讨论。

(2) 混凝机理 消除或减弱胶体稳定性的作用称为胶体脱稳。脱稳的胶体能够聚结成较大的颗粒，而迅速地与水分离开来。通常认为胶体脱稳是由于以下三方面的作用。

① 反离子的压缩作用 向水中加入某种电解质，由于电解质电离出大量的反离子或电解质水解形成带有相反电荷的聚合物，对水中胶体的扩散层产生压缩作用，如图 3-2。金属离子或水解聚合

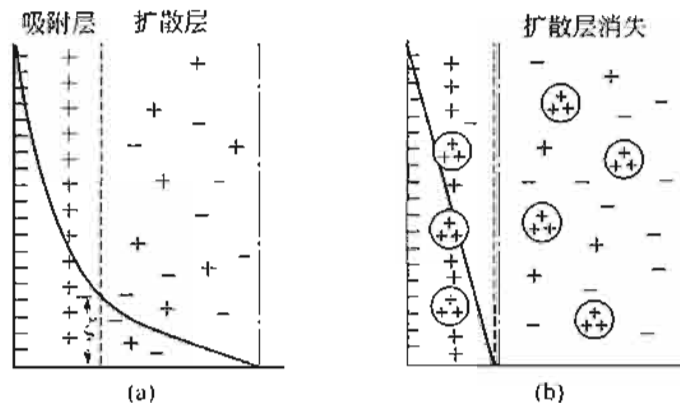


图 3-2 反离子对胶体扩散层的压缩作用

(a) 胶体表面  $\zeta$  电位的形成；(b) 高价

金属离子对扩散层的压缩

物所带电荷愈高，这种压缩作用愈强烈，致使一部分反离子压缩到胶体的吸附层中去，结果，胶体的扩散层变薄， $\zeta$  电位降低甚至趋于零，微粒间的静电斥力随之减弱或消除。此时，当胶体颗粒相互接触时就很容易通过吸附作用聚结成颗粒，这种过程通常称为“凝聚”。

② 胶体吸附和混凝剂的架桥作用 向水中投加一定量的高分子物质或高价金属盐类（能水解生成高聚物），这类物质呈线型结构，并在溶液中伸展成链状。胶体微粒容易吸附在高分子的连接部位，通过高分子物质把水中悬浮微粒连接在一起，这种作用形象地称为“吸附架桥”作用。由于悬浮微粒的吸附和高分子物质的架桥作用，破坏了胶体的稳定性，逐渐形成棉絮状的沉淀物，俗称矾花，该过程通常称为“絮凝”。如图 3-3 所示。

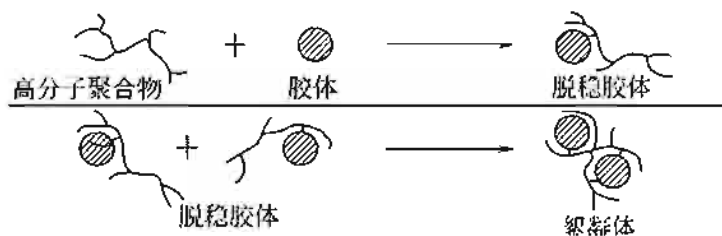


图 3-3 高分子聚合物的吸附架桥作用

胶体脱稳过程往往是凝聚作用和絮凝作用同时发生的，所以总称为“混凝”。具有混凝作用的药剂称为混凝剂。

③ 沉淀物的网捕作用 当水中的悬浮物和胶体杂质含量很少时，即所谓低浊度水，投加的混凝剂与悬浮微粒接触机会很小，这样就难以通过反离子的压缩和混凝剂的吸附架桥作用使胶体达到脱稳的目的，因此需要投加大量的混凝剂，以其自身相互混凝形成絮状沉淀物，在沉降过程中将悬浮于水中少量微粒吸附携带下去，见图 3-4。此过程称为沉淀物的网捕作用。

(3)  $Al(III)$  的混凝作用  $Al(III)$  是表示三价铝的化合物，常用作混凝剂的有硫酸铝  $Al_2(SO_4)_3$ ，它通过以下反应过程起着混凝作用。

① 电离出高价反离子 将  $Al_2(SO_4)_3$  投加到水中时，首先电离成离子

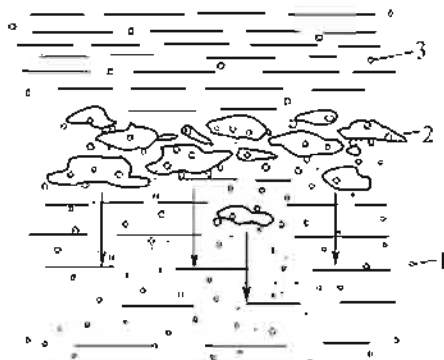
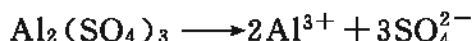


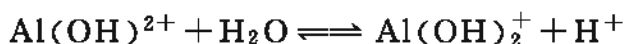
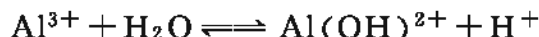
图 3-4 絮状沉淀物的网捕作用

1—原水中悬浮微粒；2—絮状沉淀物；3—残留悬浮微粒

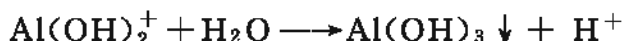


$\text{Al}^{3+}$ 是属于高价反离子，它对胶体的扩散层有着强烈的压缩作用，但在实际应用中，由于投加量很小，并且  $\text{Al}^{3+}$  很容易发生水解反应，所以这种作用表现甚微。

② 水解成絮状 当溶液的  $\text{pH} > 4$  时， $\text{Al}^{3+}$  逐级地发生下列水解反应

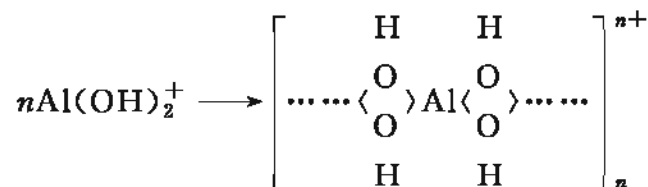


当  $\text{pH} = 7 \sim 8$  范围时， $\text{Al}^{3+}$  可以达到完全水解



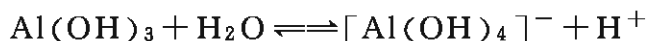
在  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  投加到足够量的情况下， $\text{Al}(\text{OH})_3$  便自相凝聚成絮状沉淀物，它在沉降过程中，对悬浮于水中的微粒起到网捕作用。

③ 缩聚成高聚物  $\text{Al}^{3+}$  的初级水解产物—— $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$  和  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  中的羟基  $\text{OH}^-$  具有桥键的性质，通过桥键作用水解产物之间可发生缩聚反应



这种缩聚产物是线型结构带有高电荷的高聚物，它对水中的胶体微粒既可起着压缩扩散层作用，又可起着吸附架桥作用。

当  $\text{pH} > 8.5$  时, 由于  $\text{Al}(\text{OH})_3$  是典型的两性氢氧化物, 它进一步水解成可溶性的带负电荷的化合物



在这种情况下,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  的混凝效果就会明显变差。

综上所述, 对混凝剂  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  来说, 当  $\text{pH} = 7 \sim 8$  时, 称为中性点, 在中性点范围内, 水解产物是以絮状氢氧化铝沉淀为主要成分, 在投加量足够大时, 由形成的絮状沉淀物对水中的悬浮微粒起着网捕作用;  $\text{pH}$  值在中性点以上时, 由于  $\text{Al}^{3+}$  水解成带负电荷的聚合物, 促使水中带负电荷的胶体进一步稳定, 因此不会发挥混凝作用;  $\text{pH}$  值在中性点以下时, 主要水解成带电荷的聚合物, 它可同时起到压缩扩散层和吸附架桥作用, 只是在不同  $\text{pH}$  值条件下, 两种作用各有侧重而已。水的  $\text{pH}$  值远小于中性点时, 压缩扩散层作用为主, 吸附架桥作用居次。 $\text{pH}$  值接近于中性点以下时, 则以吸附架桥作用为主, 压缩扩散层作用居次。实践证明前者混凝效果并不理想, 而后者混凝效果较好。由此可见, 混凝剂经电离、水解和缩聚反应, 所形成带正电荷的高聚物在混凝过程中所起的作用是相当重要的。

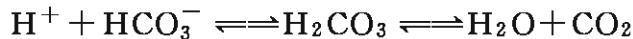
(4) 影响混凝的因素 影响混凝效果的因素较多, 诸如水温、水中杂质成分、水力条件等。这里仅简要介绍几项主要影响因素。

① 水温的影响 水温对混凝效果有明显的影响。因水温低时, 混凝剂所形成的絮凝体非常缓慢而且结构松散、颗粒细小。其原因主要有以下两点: 一是无机盐类混凝剂水解为吸热反应, 水温低时, 无机盐混凝剂水解困难, 特别是硫酸铝, 当水温低于  $5^\circ\text{C}$  时, 水解速度极其缓慢; 二是低温水, 水的黏度大, 水中杂质微粒布朗运动强度减弱, 彼此碰撞机会减少, 不利于胶体脱稳和相互凝聚。同时水的黏度大时, 水流阻力增大, 影响絮凝体的成长。

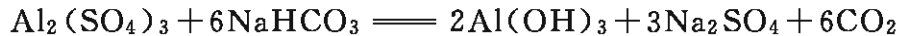
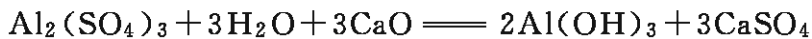
为提高低温水的混凝效果, 常用的办法是增加混凝剂的投加量和投加高分子助凝剂。但这种办法不仅增加制水成本和操作麻烦, 而且仍不能获得理想效果。

② 水的碱度和  $\text{pH}$  值的影响 从硫酸铝的水解反应式可以看

出，水解过程中不断产生的  $H^+$  必将导致水的 pH 值的下降。要使 pH 值保持在适宜的范围以内，应有碱性物质与之中和。天然水中均含有一定碱度（通常是  $HCO_3^-$  碱度），它对 pH 值有缓冲作用。



当原水碱度相当时，pH 值略有下降，不致影响混凝效果。当原水碱度不足或混凝剂投加量甚高时，水的 pH 值将大幅度下降，以致下降到远离中性点以下。为了维持水的最佳 pH 值，此时需投加石灰或重碳酸钠等碱性物质进行调整，其反应如下：



碱性物质投加量一般是通过混凝试验来确定的，也可按下式进行初步估算，再通过试验来决定。

$$[CaO] = [D] - [A] + a$$

式中  $[CaO]$ ——纯石灰 CaO 投加量，mmol/L；

$[D]$ ——混凝剂投加量，mmol/L；

$[A]$ ——原水碱度，mmol/L；

$a$ ——剩余碱度，一般取 0.5~1.0mmol/L。

③ 水的浊度影响 原水浊度对混凝效果和混凝剂的投加量都有较大影响。图 3-5 所示为原水浊度与混凝剂投加量的关系。

对于低浊度水 ( $S_1$ )，由于悬浮物的含量很少，依靠投加少量混凝剂与悬浮微粒之间相互接触，难以达到混凝目的，所以，必须投加大量的混凝剂，形成絮凝体沉淀物，对悬浮微粒进行网捕。即使这样，混凝效果仍不理想。这是混凝处理普遍存在的问题。

对于中等浊度水 ( $S_2$ )，投加混凝剂后，可能出现两个混凝区域，即低投加量混凝区和高投加量混凝区。低投加量混凝区是水中悬浮微粒与混凝剂同时参与了混凝过程，即发生吸附架桥作用，所以混凝剂的投加量明显降低，并且混凝效果良好。但对于中等浊度的水，要十分注意控制混凝剂的投加量，如果投加过量，会适得其反，使胶体由原来带负电荷转变为带正电荷（称超荷状态），已脱稳的胶体又重新获得稳定（称胶体再稳），混凝效果急剧变坏。高



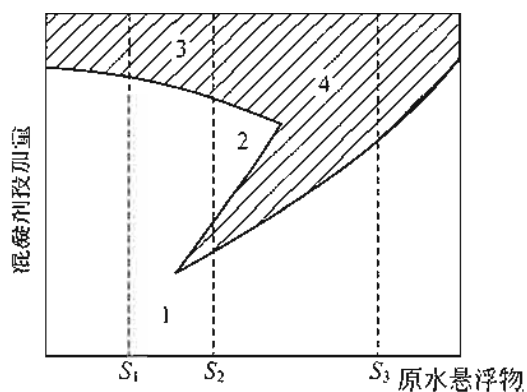


图 3-5 原水悬浮物含量与混凝剂投加量的关系

1—胶体稳定区；2—胶体再稳区；3—网捕作用区；4—吸附架桥作用区；  
 $S_1$ —低浊度水，悬浮物<math>50 \text{ mg/L}</math>;  $S_2$ —中浊度水，悬浮物=
 $S_3$ —高浊度水，悬浮物>

投加量混凝区，其混凝作用与低浊度水的混凝作用相同，是混凝剂自身形成絮凝体，对悬浮微粒产生网捕作用。

对于高浊度水 ( $S_3$ )，混凝剂主要是起吸附架桥作用，但随着水中悬浮物含量的增加，相应增大混凝剂的投加量，才能达到完全混凝的目的。

(5) 常用的混凝剂 混凝剂的种类很多，现将生产上常用的混凝剂及其最佳 pH 值范围、投药量范围和使用情况，列于表 3-8 中。

表 3-8 常用混凝剂及应用介绍

名称	分子式	投药量范围/(mg/L)	最佳 pH 值范围	使用情况
硫酸铝	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	5~50	除浊度 3~6 除色度 5~6	①混凝效果好 ②最佳 pH 值范围窄 ③适用于水温为 20~40℃
聚合铝 (碱式氯化铝)	$[\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}]_m$ 简写 PAC	2~20	5~9	①投药量少,混凝效果好 ②水温对混凝效果影响不大 ③对处理水的 pH 值改变不大 ④适用于高浊度水混凝速度快 ⑤配合投加少量硫酸铝,可提高混凝效果

续表

名称	分子式	投药量范围/(mg/L)	最佳 pH 值范围	使用情况
硫酸亚铁 (氯矾)	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	6~60	8.5~11.0	①絮凝体形成快,较稳定,沉淀时间短 ②水温对混凝效果影响较小 ③适应于碱度和硬度均高的水 ④pH<9.5时水中有剩余铁 ⑤腐蚀性较强
氯化铁	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	4~40	8.5~11.0	①絮凝体较坚固沉淀性能好 ②易溶解,易混合,渣滓少 ③适于处理高浊度水,处理低浊度水时效果不显著 ④腐蚀性较强

(6) 助凝剂 助凝剂是为提高混凝效果而投加的辅助药剂。助凝剂的种类较多,现将常用的助凝剂以及它们在混凝过程中所起的作用归纳于表 3-9 中。

表 3-9 助凝剂的名称及作用

助凝作用	名称	分子式	使用情况
pH 值调整剂	石灰 纯碱	$\text{CaO}$ $\text{Na}_2\text{CO}_3$	原水碱度不足时需辅加石灰或纯碱进行调整
氧化剂	氯 漂白粉	$\text{Cl}_2$ $\text{CaOCl}_2$	①破坏原水中有有机物,提高混凝效果 ②用 $\text{FeSO}_4$ 作混凝剂时,将 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化成 $\text{Fe}^{3+}$ ,促进混凝作用
絮凝体加固剂	水玻璃 (泡花碱)	$\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$	①加固絮凝体的强度,增大其比重 ②适用于 $\text{Al}(\text{III})$ 、 $\text{Fe}(\text{II})$ 同时使用,可缩短混凝沉淀时间节省混凝剂用量 ③原水浊度低或水温较低( $14^\circ\text{C}$ 以下)的情况下使用,效果显著 ④水玻璃在投加前必须用硫酸活化,其加注点必须在混凝剂加注点之前
高分子吸附剂	聚丙烯酰胺	$\left[ \begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \\ \text{CONH}_2 \end{array} \right]_n$ 又名三号絮凝剂,简写 PAM	①处理高浊度水(含砂量 $10 \sim 15\text{kg}/\text{m}^3$ )时,效果显著,既可保证水质,又可减少混凝剂用量 ②与常用混凝剂配合使用时,应视原水浊度按一定顺序先后投加,以发挥两种药剂的最大效果 ③水解体的效果比未水解好

在混凝过程中辅加助凝剂，将会明显改善混凝效果，并能减少混凝剂的投加量，缩短混凝时间。助凝剂的投加量以及与混凝剂的配比关系需通过试验来确定。

(7) 不同水质混凝时应采取的措施 综上所述，混凝效果与混凝剂的种类和投加量、原水的碱度和浊度以及辅加助凝剂的情况有着密切关系。所以在生产中，应针对不同的水质，采取不同的混凝措施。表 3-10 简要介绍了不同水质应采取的混凝措施。

表 3-10 不同水质应采取的混凝措施

原水水质	混凝剂	助凝剂	说 明
高浊度、高碱度水	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ $\text{FeSO}_4$ $\text{FeCl}_3$		这种水质需要混凝剂的剂量大，混凝剂水解产生的 $\text{H}^+$ 有足够的碱度中和，所以在混凝过程中，水能保持最佳 pH 值
高浊度、低碱度水	PAC $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ $\text{FeCl}_3$ $\text{FeSO}_4$	①CaO 或 $\text{NaHCO}_3$ ②PAM	①用 PAC 时，投药量较少，原水碱度消耗小 ②用铝盐或铁盐时，为保持水的最佳 pH 值，必须辅助碱性物质助凝剂 ③为了提高混凝效果及减少混凝剂的投加量，可同时辅加助凝剂 PAM
中等浊度、低碱度水	PAC $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$		这是比较容易进行混凝处理的天然水，只需要确定混凝剂的最佳药量，其它条件无需考虑。由于水的碱度较低，可以保证 pH 值接近在中性点以下，能够充分发挥混凝剂的吸附架桥作用
中等浊度、高碱度水	PAC $\text{FeSO}_4$ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	这种水质进行混凝处理时，不仅需要确定混凝剂的最佳剂量，并且要考虑降低水的碱度，尤其采用硫酸铝为混凝剂时需用硫酸来降低碱度
中等浊度、高有机物水	$\text{FeSO}_4$ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Cl}_2$	水中有机物较多时，不仅增大混凝剂的耗量，而且影响混凝效果。因此需用氧化剂作助凝剂来破坏有机物
低浊度、高碱度水	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$		这种水可采用两种混凝措施：一是增大混凝剂的投加量，使之生成絮凝状，对悬浮微粒进行沉淀网捕；另一是向水中投加黏土，提高原水的浊度，此时混凝是以吸附架桥为主，可减少混凝剂的投药量以改善混凝效果
低浊度、低碱度水	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	CaO 或水玻璃	这是最难进行混凝处理的水质，单纯使用硫酸铝是不能奏效的，一般可同时投加黏土和碱性物质或投加水玻璃来提高混凝效果

(8) 混凝过程的水力条件 混凝是通过混凝剂与分散在水中的微粒相互接触来实现的。这种接触单纯依靠分子的扩散或微粒的布朗运动,不仅需要较长时间,而且混凝效果很差。这就必须改善水流状态,促使颗粒迅速接触及形成的絮凝体迅速长大。所以,混凝过程的水力条件也是影响混凝效果的重要因素。

根据水力条件,可将混凝过程分为混合和反应两个阶段。

① 混合阶段 在剧烈搅动的水流中,使混凝剂能迅速均匀地扩散,为混凝剂的水解、缩聚反应以及胶体脱稳创造有利条件,与此同时,絮凝体开始形成。这些过程都是在瞬间发生的,甚至在几十秒钟内即可完成,一般不超过 2min。

混合方式可采用将混凝剂加至水泵吸水管中或水泵吸水井内,通过水泵叶轮的转动达到混凝效果。或将药剂加入水管内使之混合。

② 反应阶段 这并不是指发生了某些化学反应,而是指与药剂充分混合的原水,开始以较大的反应流速,使水中的胶体颗粒继续发生碰撞吸附;再以较小的反应流速,使脱稳的胶体形成具有良好沉淀性能的絮凝体,并且随着反应流速逐渐减慢,絮凝体逐渐长大,沉降速度逐渐加快。反应阶段的时间一般不超过 30min。反应阶段的水流速度不能太快,否则,容易使已经形成的絮凝体被打碎,造成胶体再稳,混凝效果变坏。为了达到水流速度先快后慢的目的,反应设备通常设计成不等距的隔板反应池,使水多次回转流动,以此来延长反应时间和逐渐降低流速;或设计成锥体涡流式反应池,锥体截面由小到大,水流速度逐渐减慢,以达到反应阶段的水力要求。

在生产上,反应池与沉淀池相毗连或与沉淀池合建。

## 2. 沉淀和澄清

经混凝处理的原水,其中微小悬浮物和胶体杂质被聚集成较大的固体颗粒,这些固体颗粒依靠重力作用从水中分离出来的过程称为沉淀。进行沉淀分离的设备称为沉淀池。

新形成的沉淀泥渣具有较大的表面积和吸附活性,所以称为活性泥渣。活性泥渣对水中尚未脱稳的胶体或微小悬浮物仍有良好的吸附作用,产生所谓“二次混凝”,这种作用称为接触混凝。根据

这一原理，利用活性泥渣与混凝处理后的水进一步接触，使未聚结成较大颗粒的悬浮杂质与活性泥渣发生接触混凝，从而加快沉淀物与水分离的速度。该过程称为澄清，这种设备称为澄清池。

实质上，当水中悬浮物沉淀出来后，水就得到澄清，所以沉淀和澄清是同一现象的两种说法。这里是借以区别沉淀方式的不同。

(1) 沉淀池 沉淀池的类型较多，现介绍两种常用的沉淀池——平流沉淀池和斜管（板）沉淀池。

① 平流沉淀池 平流沉淀池的构造如图 3-6 所示。

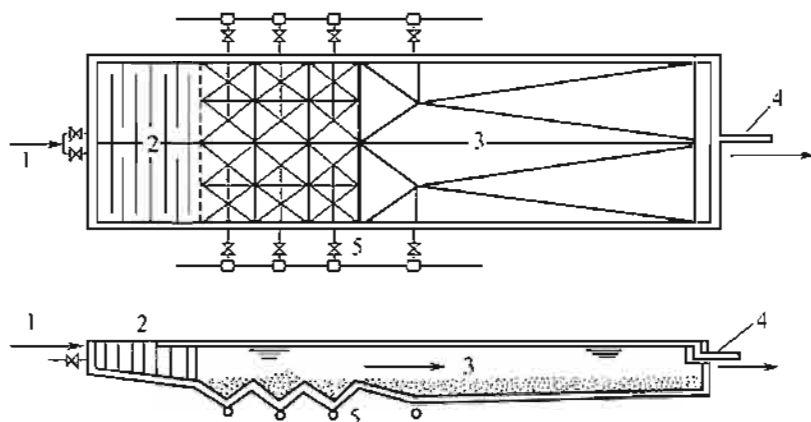


图 3-6 平流沉淀池的构造

1—投加混凝剂的原水；2—隔板反应池；  
3—沉淀池；4—出水管；5—排泥渣管

平流沉淀池可进行自然沉淀或混凝沉淀。这种沉淀池构造简单，管理方便，既可构筑于地面也可构筑于地下，它不仅适用于大型水处理厂，而且对用水量较小的工业锅炉水处理也是可取的。

平流沉淀池的长宽比应不小于 4 : 1，长深比应不小于 10 : 1，沉淀池数或沉淀池内分格数一般不少于两个。对于原水悬浮物含量终年降低，一段时期内经常低于 30mg/L，也可用一个沉淀池，但要设超越管。池深一般为 2m 左右，超高为 0.3~0.5m。

有混凝处理沉淀池，池内水流的平均流速为 5~20mm/s，无混凝处理沉淀池（自然沉淀池），池内水流的平均流速一般不超过 3mm/s。水在沉淀池内停留时间应根据原水水质和沉淀后的水质要求，通过试验或参照相似地区的沉淀资料确定，一般采用 1.0~

2.0h。当处理低温、低浊度水或高浊度水时，沉淀时间应适当增加。混凝沉淀时，出水悬浮物含量一般不超过 20mg/L。

沉淀池进水端用穿孔花墙配水时，花墙距进水端池壁的距离应不小于 1~2m，在沉泥面以上 0.3~0.5m 处至池底部分的花墙不设孔眼。采用吸泥机吸泥时，池底为平坡；采用人工停池排泥时，纵坡度一般为 0.02，横坡度为 0.05。

冬季防冻，可利用冰盖或加盖板，有条件时也可利用废热防冻。

平流沉淀池沉淀效果的好坏，除受反应阶段影响以外，还与池中水流平均流速、沉淀时间、凝聚颗粒的沉降速度、进出口布置形式及排泥效果等因素有关。所以，平流沉淀池的尺寸可按以下各式进行计算。

池长：
$$L=3.6vT(\text{m})$$

池平面积：
$$F=\frac{QT}{H}(\text{m}^2)$$

池宽：
$$B=\sqrt{\frac{F}{\beta}}(\text{m})$$

式中  $v$ ——池内平均水平流速，mm/s；

$T$ ——沉淀时间，h；

$Q$ ——设计水量， $\text{m}^3/\text{h}$ ；

$H$ ——有效池深，m；

$\beta$ ——池长宽比；

3.6——由 mm/s 换成 m/h 的换算系数。

② 斜管（板）沉淀池 这种沉淀池是基于浅池理论发展起来的新型沉淀池，它可通过图 3-7 的试验来说明沉淀原理。将盛有悬浮液的试管放置不同角度，观察固体颗粒在相同时间的沉淀情况，

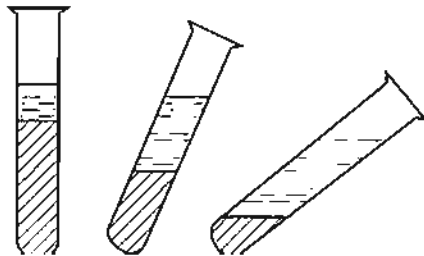


图 3-7 不同角度试管内的悬浮物沉淀情况

可以看到，试管的倾斜角愈大沉降愈快。这是由于试管的倾角愈大，就等于将沉淀深度变浅，即在容积不变情况下，增大沉淀容器的面积，这不仅缩短了颗粒沉淀到底部的时间，同时也提高了沉淀效率。

斜管（板）沉淀池就是根据这一原理，在沉淀区域设置许多密集的斜管或斜板，水中悬浮杂质的沉降过程在斜管或斜板内进行，见图 3-8。

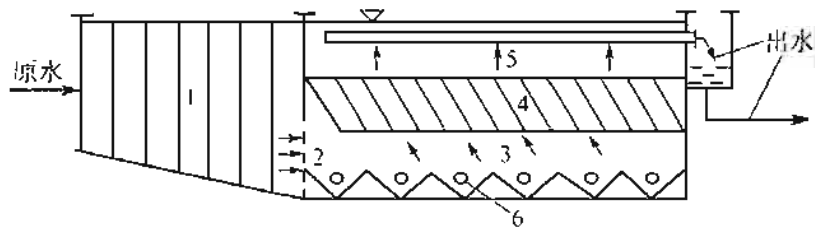


图 3-8 斜管（板）沉淀池的造图

1—反应区；2—穿孔花墙；3—布水区；4—斜管（板）；  
5—清水区；6—排泥区

斜管（板）断面一般采用蜂窝六角形或矩形和正方形，用酚醛树脂浸泡的牛皮纸制成蜂窝斜管；或用硬聚氯乙烯塑料片，热压成型。

斜管（板）长度一般为 80~100cm，水平倾角常采用 60°。

斜管（板）上部的清水区高度，一般在 0.8~1.0m；下部的布水区高度一般为 1.2m 左右。

斜管（板）沉淀池的运行过程为，水沿斜管（板）向上流动，分离出来的泥渣在重力作用下，从斜管（板）内下滑至池底。这种沉淀池可按设计构筑，也可在原有平流式沉淀池或澄清池（见下段）内加装斜管（板）。这样可以提高沉淀效率 50%~60%，在同一面积上的处理能力可提高 3~5 倍。

(2) 澄清池 澄清池的特点有二：一是利用活性泥渣与原水进行接触混凝；二是将反应池和沉淀池统一在一个设备内。因此，可充分地发挥混凝剂的作用和提高单位容积的产水能力。澄清池具有生产能力高，沉淀效果好等优点，但管理较复杂。当制水量、原水水质、水温及混凝剂等因素变化时，对净化效果的影响较显著。

澄清池一般采用钢筋混凝土结构，但也有用砖石砌筑，小型水池可采用钢板制作。

澄清池按泥渣的工作情况可分为悬浮泥渣（泥渣过滤）型和循环泥渣（泥渣回流）型两种形式。

悬浮泥渣型澄清池的工作过程是，原水与混凝剂混合后，由下向上通过处于悬浮状态的泥渣层，该悬浮泥渣层如同栅栏，截留进水中的悬浮杂质并发生接触混凝，从而可提高水的上升流速和产水量。

循环泥渣型澄清池的工作过程是，泥渣在一定范围内循环利用，在循环过程中，活性泥渣不断与原水中的悬浮微粒发生接触混凝作用，加速沉淀物的分离速度。

下面介绍适于小型水处理的两种澄清池。

① 悬浮澄清池 这种澄清池的结构如图 3-9 所示。澄清池的主体是用钢板焊成的圆筒，通过制成不等径的圆台体和圆柱体来改变水力条件，在体内形成混合区、反应区、过渡区和出水区等区域。

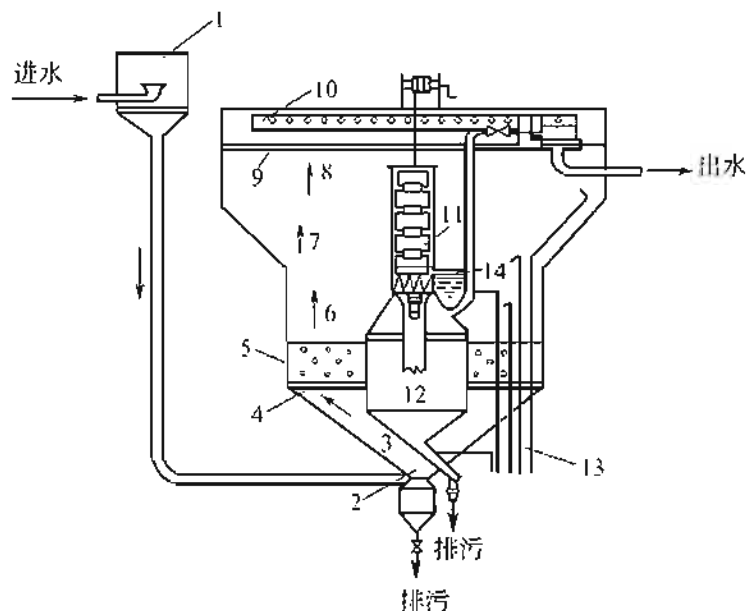


图 3-9 悬浮澄清池构造图

1—空气分离器；2—喷嘴；3—混凝区；4—水平隔板；5—垂直隔板；

6—反应区；7—过渡区；8—出水区；9—水栅；10—集水槽；

11—排泥系统；12—泥渣浓缩器；

13—采样管；14—可动罩子



悬浮澄清池的工作过程：原水首先进入澄清池的空气分离器，水在这里由于流速变慢和流动方向的改变，使溶解的空气逸出，防止空气泡在澄清池内上浮时，扰乱悬浮泥渣层；除去了空气的水，通过喷嘴沿切线方向喷入澄清池下部的混合区；在高于进水口100~200mm处加入石灰乳、混凝剂溶液以及助凝剂，加药管的管头沿澄清池的径向装入；水流经混合区先后通过一块水平多空隔板和几块垂直多孔隔板进入反应区。这些多空隔板可使水和药剂得到进一步的混合。另外，水平多孔隔板用以防止混合区内出现直接向上的水流，以保持其下面的水呈旋转状态，垂直多孔隔板则用来消除水的旋转动能；在反应区内，混凝剂继续产生吸附架桥作用，絮凝体不断长大。但该区截面较小，水的流速较快，所以，不但新形成的泥渣不能在此停留，也可以阻止泥渣中失去了活性的泥渣下沉；反应区以上是过渡区，其截面由下向上逐渐扩大，水在这里的流速逐渐降低，所形成的泥渣便悬浮在这一区域，泥渣和水开始得到分离；水继续上流进入出水区，该区截面最大，水的流速很慢，从而保证了水和泥渣的彻底分离；在出水区上部设有用来保持出水均匀的水栅和集水槽，清水由集水槽引出。

澄清池中央设有垂直圆筒形排泥系统，用以集取过剩的泥渣。沿着此排泥系统的高度开有许多层方形孔，最底层方形孔位于反应区上部，以便排除聚集在这里的衰老泥渣。此种排泥系统可以起自动调节泥渣层的作用，因为泥渣层低时起实际作用的排泥方形孔就减少，反之就增多；由排泥系统集取的泥渣，流入泥渣浓缩室中，在这里依靠水流速度的减慢与水分离。澄清出的水由导管送至集水槽，浓缩后的泥渣由排污管排走。澄清池下部积存的泥渣可由底部泥渣室排走。

虽然这种设备占有面积小，但构筑物高，运行管理和操作不方便。

② 水力循环澄清池 这种澄清池的结构如图 3-10 所示。原水从池底进入，混凝剂可加至进水管道中或水泵的吸水侧，与原水混合，混合后的水经喷嘴喷入喇叭口，由于水的流速增高，所以在此区域形成负压，池中大量泥渣回流进来。这些回流泥渣与原水在喉管内剧烈混合，达到悬浮颗粒与活性泥渣接触混凝的目的；从喉管

出来的水进入第一反应室，该室呈锥形，水的流速逐渐减慢，有利于絮凝体不断长大；水流至澄清池顶部折回第二反应室，在此完成接触混凝过程，然后进入分离室，使水和泥渣分离；清水向上经环形集水槽引出，泥渣少部分进入泥渣浓缩室，大部分又被吸入喉管重新循环，如此周而复始。

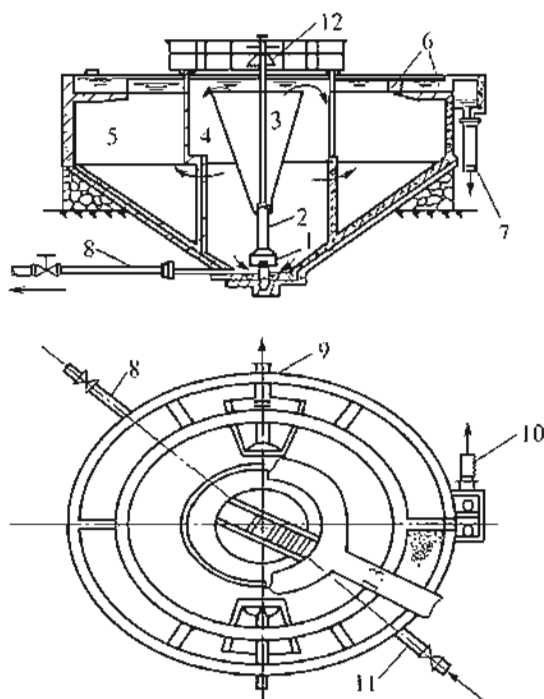


图 3-10 水力循环澄清池结构图

- 1—喷嘴；2—喉管；3—第一反应室；4—第二反应室；  
 5—分离室；6—环形集水槽；7—出水管；8—放空管；9—排  
 泥管；10—溢流管；11—进水管；12—喉管  
 升降装置；13—过道

水力循环澄清池要求进入悬浮物小于  $3000\text{mg/L}$ ，短时间允许达  $5000\text{mg/L}$ 。一般设计回流量采用进水流量的  $2\sim 4$  倍。为了适应原水水质的变化和调节回流量与进水量之比，需通过池顶的升降阀来调节喉管与喷嘴的距离。

这种澄清池的结构简单，无需机械设备，池体可用钢筋混凝土筑成，所以坚固耐用，维修量少，管理方便。但投药量较大，对水质、水温变化适应性差。为了提高这种设备的沉淀效率，通常在分

离室内加装斜管（板）。

### 3. 过滤

原水经混凝沉淀处理后，虽然大部分悬浮杂质已被除掉，但仍残留少量细小的悬浮颗粒，为去除这部分杂质，需要采用过滤装置。

#### (1) 过滤过程

① 过滤 过滤是把浊度较高的水，通过一定厚度的粒状或非粒状材料，而有效地除去悬浮杂质使水澄清的过程。这种过滤材料简称为滤料；由滤料堆积起来的过滤层简称为滤层；起过滤作用的设备称为过滤器或过滤池。

当滤层中截留的悬浮杂质较多时，滤层的孔隙被堵塞，水流阻力增大，过滤速度（简称滤速）减慢，于是过滤被迫停止。为恢复过滤能力，需用清水自下而上冲洗滤料，该过程称为反洗。反洗后过滤器连续运行的时间称为过滤周期。

② 滤料 常用的滤料有石英砂和无烟煤。此外，还有去除水中某种杂质的专用滤料，如为去除地下水中的铁，采用锰砂作滤料；为去除水中的臭味和游离性余氯等，采用活性炭作滤料。

滤料粒径的大小和均匀程度对过滤效果影响极大。滤料的粒径通常选用 0.5~1.2mm，滤料的均匀程度用不均匀系数  $K_{80}$  表示。 $K_{80}$  是指在一定粒径范围的滤料，按重量计，能通过 80% 滤料的筛孔孔径  $d_{80}$  与能通过 10% 滤料的筛孔孔径  $d_{10}$  之比，即：

$$K_{80} = \frac{d_{80}}{d_{10}}$$

不均匀系数愈大，表示滤料粗细颗粒尺寸相差愈大。滤料粒径愈不均匀，对过滤和冲洗都愈不利。

③ 滤层 滤层由滤料堆积而成。滤层的高度和孔隙率对过滤效率有较大的影响。孔隙率是指滤层中的空隙体积与滤层总体积的比值。孔隙率与滤料的粒径和不均匀系数有关，粒径愈小或不均匀系数愈大，孔隙率就愈小。滤层的孔隙率太大时，过滤器的截污能力变差；孔隙率太小时，滤层的水流阻力增大。在实际应用中，石英砂滤料的孔隙率约为 0.4，无烟煤滤料的孔隙率约为 0.5。

滤层的过滤过程并不是简单的拦截悬浮颗粒的过程，其作用机理类似于悬浮泥渣型澄清池，滤料也具有表面活性作用，悬浮杂质在水力作用下靠近滤料表面时就发生接触混凝。由于滤层中的滤料比澄清池中悬浮泥渣排列的更紧密，水在滤层孔隙中曲折流动时，悬浮杂质与滤料具有更多的接触机会，所以除浊作用更彻底。

滤层在反冲洗过程中，滤料反复地浮起和下沉，结果粒径大的滤料沉积在底部，粒径小的滤料分布在上层，这种现象称为水力筛分。由于水力筛分作用，滤层由上至下沿过滤水流方向，滤料粒径由小到大排列，如图 3-11(a) 所示。粒径小的上层，孔隙率小，截留悬浮杂质能力强。在实际过滤中，几乎有 60% 的悬浮杂质是由表面 4~5cm 以内的滤层去除的，因此造成滤层中杂质分布极不均匀，使整个滤层中的滤料不能较充分地发挥作用，并且造成水流阻力大，过滤周期短等后果。

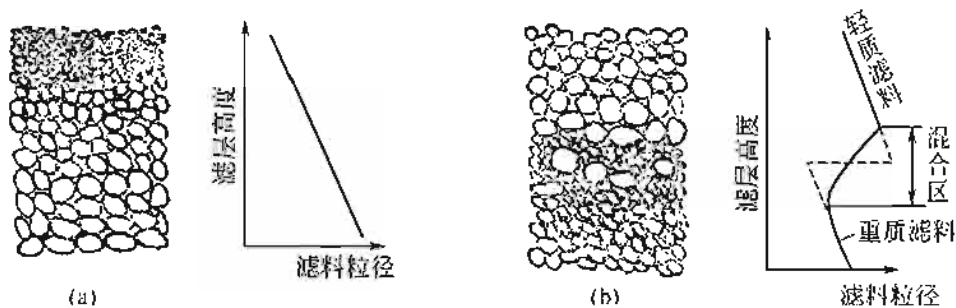


图 3-11 单层滤料及双层滤料反冲洗后滤层状态的示意图

(a) 单层滤料滤层剖面；(b) 双层滤料滤层剖面

为了提高过滤效率，目前普遍采用所谓“逆粒度”过滤，就是滤料粒径沿水流方向由大到小排列的过滤方式。图 3-11(b) 所示，为两种不同粒径不同材料组成的双层滤料，上层是采用密度小粒径大的轻质滤料；下层是采用密度大粒径小的重质滤料。由于两种滤料的密度差，经反冲洗之后，轻质滤料仍然保持在上层，粒径小的重质滤料保持在下层，中间为两种滤料的混合区。这就能够较大地发挥滤层中各部分滤料的截污作用，从而提高了过滤效率。当前普遍采用的双层滤料由石英砂和无烟煤所组成，它们的主要指标列于表 3-11 中。

表 3-11 无烟煤、石英砂双层滤料主要指标

滤料名称	粒径/mm	不均匀系数 $K_{80}$	滤层厚度/mm	滤速/(m/h)
无烟煤	0.8~2.0	1.3~1.8	300~600	12~16
石英砂	0.4~0.8	1.2~1.6	150~300	

④ 过滤效率 滤层的过滤效率通常是用除浊率  $\lambda$  和泥渣容量  $W$  来衡量。除浊率可由下式计算：

$$\lambda = \frac{C_{\lambda} - C_{\text{出}}}{C_{\lambda}} \times 100\%$$

式中  $C_{\lambda}$ 、 $C_{\text{出}}$ ——过滤设备入口和出口悬浮物的含量，mg/L。

泥渣容量是指在一个过滤周期内，单位体积的滤层中所截留悬浮杂质的重量，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$  或  $\text{g}/\text{cm}^3$ ，可由下式计算：

$$W = \frac{(C_{\lambda} - C_{\text{出}})q}{V}$$

式中  $W$ ——滤层泥渣容量， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$q$ ——过滤周期产水量， $\text{m}^3$ ；

$V$ ——滤层中滤料总体积， $\text{m}^3$ ；

其它符号同前。

滤层的泥渣容量除了与滤料的粒径和不均匀系数有关外，还与原水的预处理方式有关。表 3-12 所列是粒径为 0.5~1.0mm 的石英砂滤料，在采用不同预处理方式的情况下，滤层的泥渣容量。

由表 3-12 可见，原水经混凝处理后会明显地提高滤层的过滤效率。

表 3-12 采用不同预处理方式时滤层的泥渣容量

原水处理方式	滤层泥渣容量/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
未经处理	0.5~1
石灰处理	1.5~2.0
混凝处理	2.5~3.0

(2) 过滤设备 过滤设备的类型较多，这里只介绍目前较普遍应用的压力式机械过滤器和重力式无阀滤池。

① 机械过滤器 机械过滤器的过滤水是经泵的升压后通过滤层，所以又称压力式过滤器。按进水方式，可分为单流式机械过滤

器和双流式机械过滤器；按滤料装填情况，又可分为单层滤料机械过滤器和双层滤料机械过滤器。

单流式机械过滤器是工业锅炉水处理中一种常用的过滤设备，其构造如图 3-12 所示。

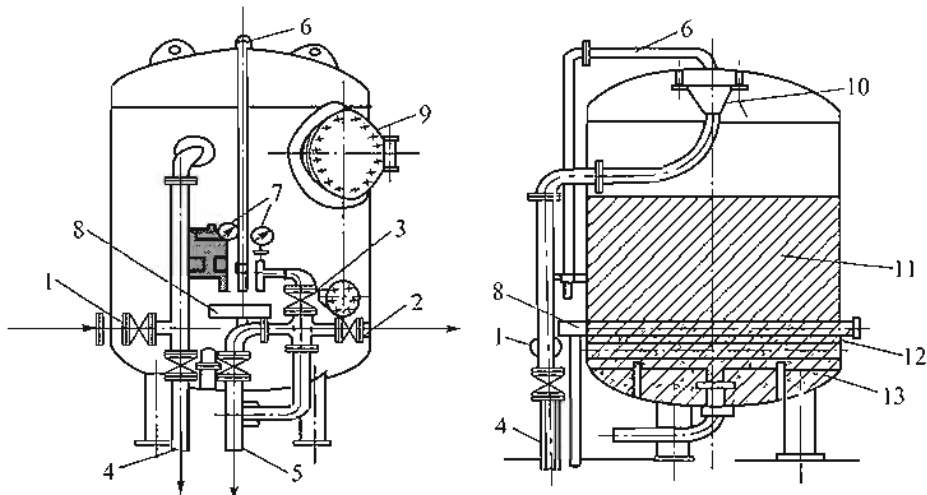


图 3-12 单流式机械过滤器构造图

1—进水管；2—出水管；3—反洗水管；4—反洗排水管；5—正洗排水管；  
6—排空气管；7—进、出水压力表；8—水槽；9—人孔门；10—进水  
漏斗；11—滤层；12—压缩空气管；13—排水装置

这种过滤器由钢板制成，由于工作时承受一定压力，两端装有封头。过滤时，具有一定压力的水经上部漏斗形的配水装置均匀地分配至过滤器内，并以一定的滤速通过滤层，最后经排水装置流出。排水装置的作用是：在过滤时汇集清水并阻止滤料被水带出；反冲洗时使冲洗水沿过滤器截面均匀分配。

在过滤过程中，由于滤层内截留的悬浮杂质不断地增多，孔隙率不断减小，水流阻力会逐渐增大，出水量也会随之降低，当装设在过滤器体外进出口的压力表压差达到一定数值时，应停止运行，进行反冲洗。

反冲洗水由过滤器下部进入，通过滤层，从上部漏斗排出。在压力水流冲击下，滤料成沸腾状态，滤层体积胀大；由于水力冲刷和滤料间的相互摩擦，吸附在滤料表面的泥渣被冲洗掉，从而使过滤器恢复过滤性能。反洗的强度用滤层的膨胀高度来监督，其膨胀

率应为原滤层的 25% 以上。如果反洗强度过大，容易将滤料冲走；反洗的强度太低，附着在滤料表面的泥渣不能被彻底洗净，长期如此运行的话，存留的滤层中的泥渣容易将滤料黏结在一起，形成泥球或泥饼，致使过滤器产生偏流和阻力增大现象，而严重影响过滤效率。为了达到彻底反洗的目的，通常在反洗时通入压缩空气进行擦洗，并使滤层的膨胀率达到 30%~50%。

单层滤料单流式机械过滤器，容易改造成双层滤料过滤器，只要将原滤层减少 300~500mm，补装适当粒径的无烟煤（如原滤料是无烟煤就补加石英砂）即可。

单流式机械过滤器出水悬浮物一般在 5mg/L 以下；进水悬浮物在选用双层滤料时，要求在 100mg/L 以下，选用单层滤料时，要求在 15~20mg/L 以下。滤速为 10m/h 左右。

机械过滤器占地面积小，过滤速度快，常与离子交换软化器串联使用，将其应用在工业锅炉水处理上是非常方便的。

② 无阀滤池 无阀滤池有压力式和重力式两种。图 3-13 为重力式无阀滤池结构图，它是因没有阀门而得名。

重力式无阀滤池的运行状态见图 3-13(a)，从澄清池来的水经

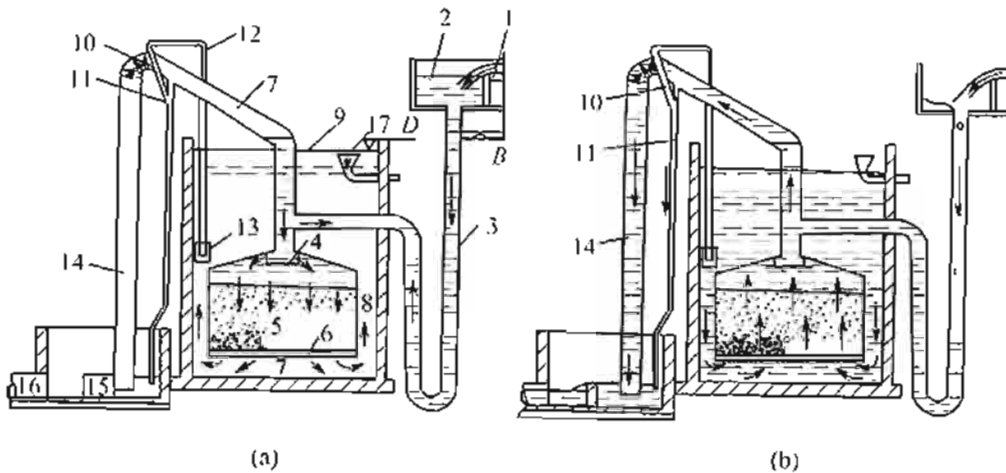


图 3-13 无阀滤池结构图

(a) 运行状态；(b) 反洗状态

- 1—分配堰；2—进水槽；3—进水 U 形管；4—挡板；5—滤层；6—排水装置；  
7—集水区；8—连通管；9—反洗水箱；10—抽水管；11—虹吸辅助管；  
12—虹吸破坏管；13—虹吸破坏斗；14—虹吸下降管；  
15—水封井；16—下水道；17—出水管

分配堰跌入进水槽，流经 U 形进水管及进水挡板后进入滤池，通过滤层和排水装置汇集到集水区，然后经连通管上升到清水箱，再经漏斗形出水管引至清水池。

滤池的反洗过程见图 3-13(b)。滤池在运行中，滤层不断截留悬浮物，阻力逐渐增大，滤速随之减慢。由于滤池的进水量不变，因而使虹吸上升管内的水位不断升高。当水位达到虹吸辅助管口时，水便从此管中急剧下落，并将虹吸管内的空气抽走，使管内形成真空，这时，虹吸上升管的水位升高。同时，虹吸下降管将水封井中的水吸上至一定高度。当上升管中的水越过虹吸管顶端弯管而下落时，与下降管中上升水柱汇成一股水流，快速冲出管口，便形成虹吸。虹吸开始后，由于滤层上部压力骤降，促使水箱内的水循着过滤时的相反方向进入虹吸管，滤层因而受到反冲洗。冲洗废液由水封井排入下水道。

在反冲洗过程中，水箱内的水位逐渐下降。当水位下降到虹吸破坏斗以下时，虹吸破坏管把斗中的水吸完，管内与大气相通，虹吸被破坏，反洗结束，又重新开始过滤。

无阀滤池的结构简单，造价较低，运行管理方便。但其滤层处于封闭结构中，进出滤料困难；虹吸管较高，因此增加建筑高度。

## 二、自来水的预处理

自来水是经过混凝、沉淀和过滤等一系列处理的水，所以浊度较低，一般都在 5 度以下。这种水无需再进行除浊处理。但自来水与天然水不同之处是含有游离氯，这是由于自来水厂为了消灭水中的细菌等微生物，防治疾病传播，而进行加氯消毒。自来水中的加氯量分为需氯量和余氯两部分，需氯量是指用于杀死细菌和氧化有机物等所消耗的部分；另外，为了抑制水中残存细菌的再度繁殖，在自来水管网中尚需维持少量剩余氯，通常称为游离性余氯。我国生活饮用水标准中规定出厂水游离性余氯为 0.5~1.0mg/L；管网末端为 0.05~0.1mg/L。

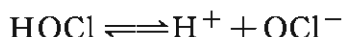
### 1. 游离性余氯的性质

水中游离性余氯，实质上并不都以溶解氯分子的形态存在，溶解氯大约有 1/3 发生水解反应，生成次氯酸 HOCl





次氯酸是一种弱酸，当  $\text{pH} > 6.5$  时，一部分电离成次氯酸根



所以，剩余氯在水中存在状态主要是次氯酸、次氯酸根和一部分游离氯  $\text{Cl}_2$ 。

漂白粉  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  是用氯气与消石灰作用而制得的，同样发生水解反应生成次氯酸



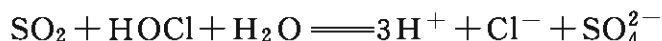
次氯酸具有很强的氧化性，它不仅能够破坏水中的有机物和杀死病原微生物，而且也能破坏离子交换树脂的结构，使其强度变差，容易破碎。所以，用自来水作为锅炉补给水的水源时，在离子交换软化之前，需将水中的游离性余氯去除，尤其是距离自来水厂较近时，更是十分必要。

## 2. 除氧方法

通常采用的除氧方法有化学还原法和活性炭脱氯法，现简要介绍如下。

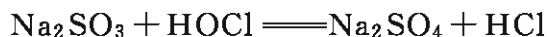
(1) 化学还原法 化学还原法是向含有余氯的水中投加一定量的还原剂，使之发生脱氯反应。常用的还原剂有二氧化硫  $\text{SO}_2$  和亚硫酸钠  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 。

二氧化硫的脱氯反应为：

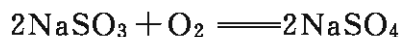


此反应几乎在瞬间完成，所以脱氯效果较好。但反映结果由弱酸转变成强酸，会使水的  $\text{pH}$  值有所降低。

亚硫酸钠的脱氧反应为：



由于亚硫酸钠具有较强的还原性，它不仅能与次氯酸迅速反应，而且还能与水中的溶解氧发生反应。



所以，用亚硫酸钠处理自来水，会起到脱氯和除氧的双重效果。

亚硫酸钠的加药量可以按下式估算：

$$[\text{Na}_2\text{SO}_3] = 63\alpha \left( \frac{[\text{O}]}{8} + \frac{[\text{Cl}_2]}{71} \right)$$

式中  $[\text{Na}_2\text{SO}_3]$ ——需投加纯净的亚硫酸钠量，mg/L；

$\alpha$ ——投药系数，可选取 2~3；

$[\text{O}]$ ——水中溶解氧的浓度；

$[\text{Cl}_2]$ ——水中余氯含量；

63、8、71——分别表示  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 、O、 $\text{Cl}_2$  的摩尔质量。

亚硫酸钠的加药方式，可采用泵前加药，也可采用如图 3-14 所示的孔板加药，用转子流量计控制加药量。

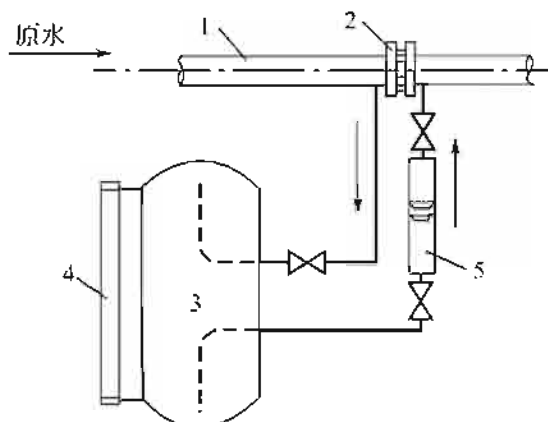


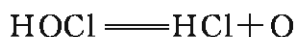
图 3-14 排挤式孔板加药装置

1—原水管；2—孔板；3—排挤式加药缶；4—液面计；5—转子流量计

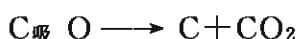
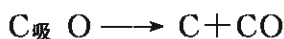
这种方法具有设备简单、操作方便、用时可达到脱氯和除氧的目的。但由于采用原水顶压加药，容易造成加药过程中浓度不均匀；另外，会增加水中的含盐量。

(2) 活性炭脱氯法 活性炭是用木炭、煤、果核和果壳等为原 料，经高温炭化和活化而制得的。它具有很大的表面积，1g 活性 炭竟有  $800\sim 2000\text{m}^2$ ，这是由于活性炭内部是由相互连通的许多毛 细管形成的，因此吸附能力很强。活性炭不仅能够去除游离性余 氯，同时也能去除水中臭味、色度及有机物等。

经研究证明：活性炭脱氯作用并非是单纯的吸附过程，同时在其表面发生了一系列的化学反应。当含有余氯的水通过活性炭滤层时，首先是次氯酸被吸附在活性炭的表面上，然后立即分解成氯化氢和原子氧，其反应如下：



原子氧与碳原子由吸附状态迅速地转变成化合状态



由上述反应可见，活性炭脱氯并不存在吸附饱和问题，只是损失少量的碳而已，因此，活性炭用于脱氯时可以运行相当长的时间。例如，用  $19.6\text{m}^3$  的粒状活性炭滤料处理含余氯量为  $4\text{mg/L}$  的自来水时，可连续制取  $264.95 \times 10^4\text{m}^3$  的余氯量小于  $0.01\text{mg/L}$  的水。在相同条件下，处理含氯量  $2\text{mg/L}$  的水时，其寿命可延长至 6 年左右。

活性炭的生产厂家有上海活性炭厂，其活性炭采用活性炭粉压制成型；北京活性炭厂，其活性炭用椰子壳炭化制成；通化活性炭厂，其活性炭用山核桃皮烧制。从水溶性和脱氯效果来看，后两种活性炭性能较好。

活性炭过滤装置通常采用单流式机械过滤器。过滤器的人口可直接与自来水管连接，当自来水的压力不足时，可装设水箱用泵输送；过滤器和离子交换软化器串联运行。

过滤器内活性炭滤层高度一般为  $1.0 \sim 1.5\text{m}$ 。如果脱氯和除浊同时进行，过滤速度一般采用  $6 \sim 12\text{m/h}$ ；单纯用于脱氯可采用  $40 \sim 50\text{m/h}$ 。当活性炭过滤器截留悬浮物较多，致使水流阻力增大或出水水质恶化时，应进行反冲洗。反冲洗方法与普通滤池相同，滤层的膨胀率为  $10\% \sim 15\%$ 。

活性炭过滤不仅具有脱氯作用，同时也能滤除自来水中残留的悬浮物，所以使用这种过滤器会收到一举两得的效果。表 3-13 所列为某电厂采用通化市活性炭厂生产的山核桃皮活性炭进行脱氯和除浊的实验数据。

表 3-13 活性炭脱氯和除浊效果

水质 项目	入口水			出口水		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均
余氯/(mg/L)	9	0.8	2.1	0.4	<0.01	0.02
悬浮物/(mg/L)	15	5	8	8	0.6	0.9

活性炭用于除臭、除色度或有机物时，其吸附能力在使用一定时期后便衰竭了，为恢复吸附活性，需进行再生。失效的活性炭再生方法较多，通常采用热力再生法，即将活性炭在 500~1000℃ 的高温条件下，使吸附在活性炭表面的有机物分解成 CO<sub>2</sub> 和水；也可以用高压蒸汽吹洗或用 NaOH 溶液进行再生。

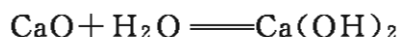
活性炭脱氯是一种简单、经济，行之有效的方法，所以得到普遍的应用。

### 三、高硬度和高碱度水的预处理

低压锅炉水质标准规定，总硬度大于 3.5mmol/L 的水，一般不宜于作立式水管锅炉、立式火管锅炉及卧式内燃锅炉的给水。总硬度过高的水用离子交换方法也难以达到软化水要求，并且经济性明显降低。碱性过高的水，也不能直接作为锅炉的补给水。所以，对于这种水质在送入锅炉或进行离子交换软化之前，宜采用化学方法进行预处理。例如，硬度或碱度均高的水，宜采用石灰处理方法；硬度高、碱度低的水，宜于采用石灰、纯碱处理方法。

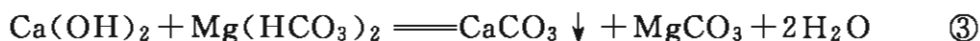
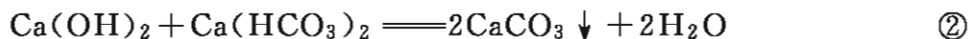
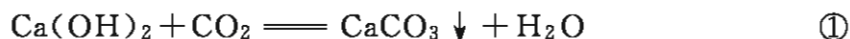
#### 1. 石灰处理方法

(1) 反应原理 石灰处理的药剂是生石灰 CaO，通过加水消化后制成消石灰 Ca(OH)<sub>2</sub>，也称熟石灰。其反应如下：



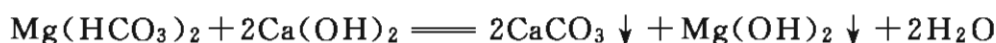
投加时可配制一定浓度的石灰乳液。

消石灰与水中二氧化碳和碳酸盐发生反应，生成难溶化合物沉淀析出，反应式如下：



对于硬度大于碱度的水，当投加消石灰量与水中的二氧化碳和碱度 (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 等物质的量时，水中的 pH 值只能提高到 9 左右，在该条件下 CO<sub>2</sub> 和 Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 都可以生成碳酸钙的沉淀从水中析出。因 MgCO<sub>3</sub> 的溶解度较大，仍然以 Mg<sup>2+</sup> 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 存在于溶液

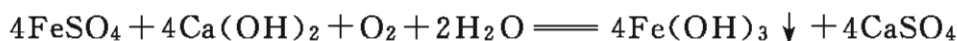
中，欲去掉镁的碳酸盐硬度，还需再多加与  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  等物质的量的石灰，使水的 pH 值提高到 10.8 以上，才能使  $\text{Mg}^{2+}$  生成难溶解的氢氧化镁沉淀析出。所以去除 1mmol/L 的  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ，需消耗 2mmol/L 的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。将③、④两式相加可以写出如下反应式：



除上述反应外，石灰还可以与水中的  $\text{Fe}^{2+}$  及硅化物发生反应：  
 $4\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2 + 8\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + 8\text{CaCO}_3 \downarrow + 6\text{H}_2\text{O}$



如果在石灰处理的同时，投加硫酸亚铁混凝剂时，也需等物质的量的石灰进行碱化，反应如下：



由反应式可以看出，反应结果是使水等物质的量的增加了钙的非碳酸盐硬度。

石灰处理并不能去除水中的非碳酸盐硬度和负硬度。如：



从上列各式可知，经石灰处理后，对于镁的非碳酸盐硬度只是等物质的量转变为钙的非碳酸盐硬度，即硬度不变；而  $\text{NaHCO}_3$  等物质的量的转变成  $\text{NaOH}$ ，即碱度不变。

(2) 石灰加药量计算 根据化学反应的物质的量关系，可归纳出石灰的消耗量为：

- 1mmol/L 的  $\text{CO}_2$  消耗 1mmol/L 的  $\text{CaO}$ ；
- 1mmol/L 的  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  消耗 1mmol/L 的  $\text{CaO}$ ；
- 1mmol/L 的  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  消耗 2mmol/L 的  $\text{CaO}$ 。

因此，可列出下式来估算石灰用量：

$$[\text{CaO}] = \frac{28}{\epsilon_1} \{ [\text{CO}_2] + [\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2] + 2[\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2] + a \}$$

式中  $[\text{CaO}]$ ——需投加工业石灰量，mg/L；  
 $[\text{CO}_2]$ 、 $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]$ 、 $[\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2]$ ——分别表示各物质在水中的浓度，mmol/L；

$a$ ——石灰过剩量（一般为0.2~0.4mmol/L）；

$\epsilon_1$ ——工业石灰纯度，%；

28——CaO的摩尔质量。

(3) 石灰处理后的水质变化 经石灰处理后，水中碳酸盐硬度大部分被除掉，根据加药量和水温的不同残留碳酸盐硬度可减少到0.4~0.8mmol/L；残余碱度降到0.3~1.2mmol/L；有机物去除率为25%左右；硅化物降低30%~35%；铁的残留量小于0.1mg/L。

水中残留的总硬度可由下式计算：

$$H_{\text{残}} = H_{\text{非}} + H_{\text{残炭}} + D$$

式中  $H_{\text{残}}$ ——石灰处理后水中残留的总硬度，mmol/L；

$H_{\text{非}}$ ——原水中非碳酸盐硬度，mmol/L；

$H_{\text{残炭}}$ ——石灰处理后残留的碳酸盐硬度（0.4~0.8mmol/L）；

$D$ ——混凝剂  $\text{FeSO}_4$  投加量，mmol/L（不投加混凝剂时此项略去）。

石灰处理后，由于碳酸盐硬度降低，去除了部分有机物和硅化物，所以相应减少了原水中的溶解固形物。

(4) 石灰处理系统 在石灰处理过程中，所生成的两种主要沉淀物  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，在性质上有很大差别。 $\text{CaCO}_3$  致密、密度大、沉淀速度快； $\text{Mg}(\text{OH})_2$  疏松、包含水分较多、密度小、成絮凝状。所以，在石灰处理工艺中，根据生成沉淀物的主体成分可采用不同的石灰处理系统。

① 澄清池石灰处理系统 在石灰处理时，生成的沉淀物中含有较多的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，或同时进行混凝处理生成絮状沉淀物，则多采用图3-15所示的澄清池石灰处理系统。水和生石灰在消石灰槽中消化后，石灰浆流入机械搅拌槽内；加水配制成一定浓度的石灰乳，为防止石灰的沉降，需用电动搅拌机不断地进行搅拌；为防止石灰乳中的颗粒被带走，需设置捕砂器，石灰乳经捕砂器后由活塞加药泵送入澄清池。

② 涡流反应器石灰处理系统 这种系统适用于钙硬度较大、镁硬度不超过总硬度的20%和悬浮物不大的水。

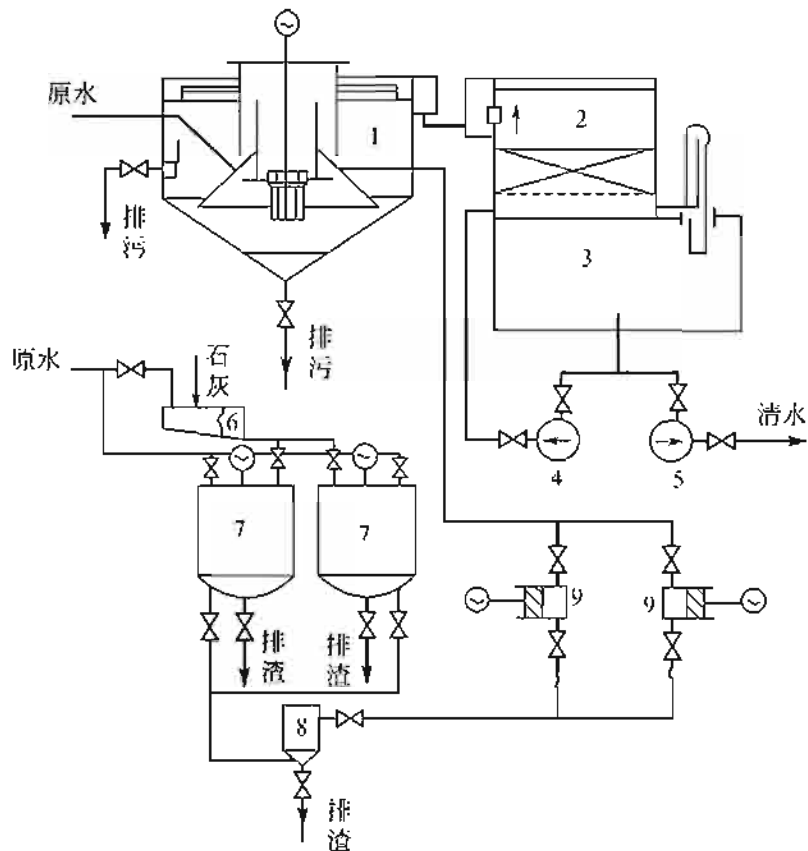


图 3-15 石灰处理系统

- 1—机械搅拌澄清池；2—过滤池；3—水箱；4—反洗水泵；  
5—清水泵；6—消石灰机；7—电动搅拌石灰浆槽；  
8—补砂器；9—加药泵

涡流反应器是由钢板制成的锥形设备，如图 3-16 所示。水和石灰乳由底部沿切线方向进入设备体内，因水的喷射速度较高，产生强烈的涡流旋转上升，与注入的石灰乳充分混合并迅速发生反应，生成碳酸钙沉淀。先期形成的沉淀物为结晶核心，悬浮在设备的下半部，后期生成的碳酸钙与结晶核心接触逐渐长大成球形颗粒从水中分离出来。由于沉淀物形成致密的结晶体，防止高度分散性泥渣的产生，从而加快了沉淀物的分离速度。所以，涡流反应器的容积小，出水能力较高。但这种设备不能将镁硬度沉淀出来，反应生成的氢氧化镁以悬浮状态被水冲走；也不能同时进行混凝处理。

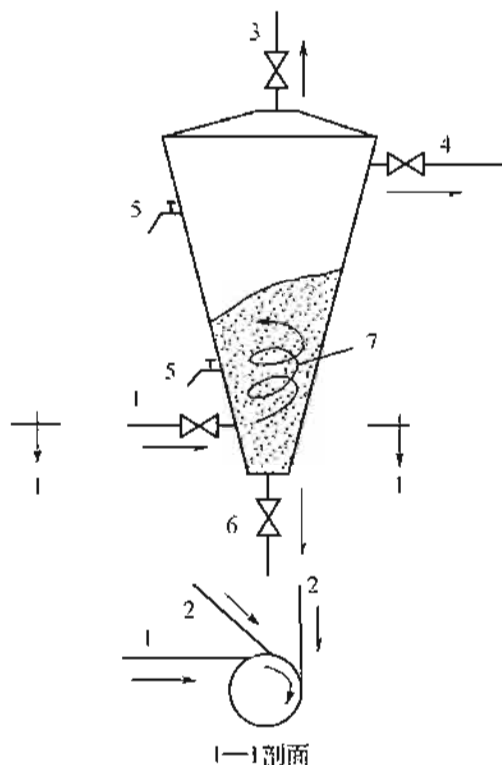


图 3-16 涡流反应器

1—进水；2—进石灰乳；3—排气；4—出水；  
5—取样；6—排渣；7—结晶核心

涡流反应器开始使用时，为加速沉淀物的结晶形成，可在设备内装入一些粒径为 0.1~0.5mm 的石英砂或大理石碎块，作为反应生成物的结晶核心。进入正常运行后，就不需要添加任何接触物料。沉淀在涡流反应器下部的大颗粒碳酸钙通过排渣管定期排出体外。

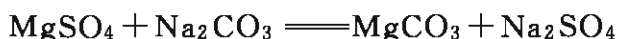
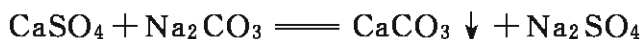
涡流反应器的设计和运行的主要数据为：a. 原水进口流速为 3~5m/s；b. 锥角为 15°~20°；c. 锥角处上升流速为 0.8~1.0 m/s；d. 反应器上部流速为 4~6mm/s；e. 反应器的容积，按停留时间 10~15min 考虑。

## 2. 石灰、纯碱处理

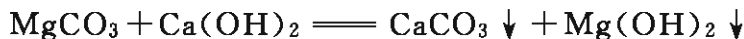
(1) 反应原理 原水的硬度高而碱度较低时，除采用石灰处理去除碳酸盐硬度外，通常还用纯碱  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ （俗称苏打）来去除非



碳酸盐硬度。这种处理方法是向水中同时投加石灰和纯碱，所以称为石灰、纯碱处理。石灰主要与水中的  $\text{CO}_2$  和碳酸盐硬度反应，纯碱与非碳酸盐硬度发生如下化学反应：



反应生成的  $\text{MgCO}_3$  进一步与石灰反应生成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  沉淀。



### (2) 加药量的计算

石灰用量 (mg/L) 估算：

$$[\text{CaO}] = \frac{28}{\epsilon_1} \{ [\text{CO}_2] + A_{\text{总}} + H_{\text{Mg}} + a \}$$

纯碱用量 (mg/L) 的估算：

$$[\text{Na}_2\text{CO}_3] = \frac{53}{\epsilon_2} (H_{\text{非}} + \beta)$$

式中  $A_{\text{总}}$ ——原水总碱度，mmol/L；

$H_{\text{Mg}}$ ——原水镁硬度，mmol/L；

$[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ ——纯碱投加量，mg/L；

$H_{\text{非}}$ ——原水非碳酸盐硬度，mmol/L；

$\beta$ ——纯碱过剩量（一般取 1.0~1.4mmol/L）；

53—— $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的摩尔质量；

$\epsilon_2$ ——工业纯碱的纯度；

其它符号同前。

石灰和纯碱的投加量，除上述计算方法外，还可以采用监测处理后出水的总硬度  $H$ 、酚酞碱度  $P$  和总碱度  $A$  之间的关系来调整加药量。例如，当石灰、纯碱采用热法处理时，石灰的投加量按下式控制：

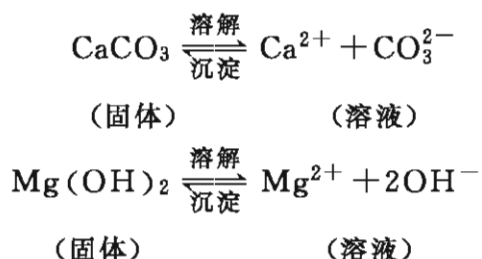
$$2P - A = 0.1 \sim 0.3 (\text{mmol/L})$$

纯碱投加量按下式控制：

$$A - H = 0.4 \sim 0.8 (\text{mmol/L})$$

### (3) 石灰、纯碱法的软化极限 石灰、纯碱处理是使原水中

Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 等硬度成分，通过化学反应生成 CaCO<sub>3</sub> 和 Mg(OH)<sub>2</sub> 难溶化合物。但任何难溶化合物的沉淀与溶解都是一个可逆过程，即：



当达到溶解平衡时，溶液中的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 OH<sup>-</sup> 便保持相对稳定的含量。根据平衡移动原理，增加纯碱的投药量（即 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 浓度增加），可以使钙硬度降低；增加石灰的投药量（即 OH<sup>-</sup> 浓度增加），则可降低镁硬度。表 3-14 是一种原水应用不同药剂剂量进行软化的结果。

表 3-14 石灰、纯碱法不同加药量的软化结果

顺序号	I	II	III	IV
项 目	原水水质	石灰法处理后水质	石灰、纯碱法处理后水质	石灰、纯碱法处理后水质
总硬度/(mmol/L)	3.2	1.6	1.38	1.04
H <sub>Ca</sub> /(mmol/L)	2.2	0.7	0.48	0.48
H <sub>Mg</sub> /(mmol/L)	1.0	0.9	0.9	0.56
酚酞碱度(P)/(mmol/L)	0	0.35	0.44	1.20
总碱度(A)/(mmol/L)	2.6	1.0	1.22	1.64
pH	7~8	8.3~9.5	8.3~9.5	>10
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/(mmol/L)	1.0	1.0	1.0	1.0
[Cl <sup>-</sup> ]/(mmol/L)	1.0	1.0	1.0	1.0
投加石灰量/(mmol/L)	0	1.96	1.96	3.12
投加纯碱量/(mmol/L)	0	0	0.44	1.28

I是原水水质，水中的总硬度大于碱度（H<sub>总</sub> > A<sub>总</sub>），含有非碳酸盐硬度。II是只投加 1.96mmol/L 的石灰后，水质变化情况：H<sub>Ca</sub> 降至 0.7mmol/L，H<sub>Mg</sub> 去除 10%。因酚酞碱度 P=0.35mmol/L，所以水中剩余的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 为 2P=0.7mmol/L 与 H<sub>Ca</sub> 相等。剩余的为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为 A-2P=0.3mmol/L，即原水中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 有 2.3mmol/L 转

化为  $\text{CO}_3^{2-}$ ，其中有 1.6mmol/L 的  $\text{CO}_3^{2-}$  已形成沉淀化合物析出。水中  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  等离子则未发生变化。Ⅲ是投加 1.96mmol/L 的石灰又同时投加 0.44mmol/L 的纯碱，这时，由于水中存在较多的  $\text{CO}_3^{2-}$ ，故可使残留的钙硬化进一步降低，但因  $\text{OH}^-$  的浓度基本不变，所以镁硬度未改变。Ⅳ是石灰和纯碱的投加量都增加很多时，由于水中  $\text{OH}^-$  有明显增多，使更多的镁硬度  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  形态沉淀，因大量石灰中  $\text{Ca}^{2+}$  消耗了  $\text{CO}_3^{2-}$ ，结果水中的  $\text{CO}_3^{2-}$  并没有明显增加，加之  $\text{CaCO}_3$  有形成过饱和溶液倾向，所以钙硬度的残留量基本不变。

从表 3-14 中可以看出， $\text{CaCO}_3$  沉淀析出最佳 pH 值约在 8.3~9.5 之间，而  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  沉淀析出的最佳 pH 值是在 10.3 以上。

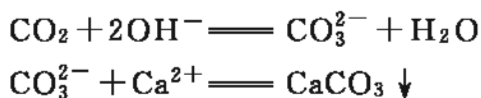
石灰、纯碱软化水的残留硬度除与加药量和 pH 值有关外，还受温度影响较大。因为  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  和  $\text{CaCO}_3$  的溶解度随温度的升高而降低，所以在不同温度下进行石灰、纯碱处理，残留硬度相差较大见表 3-15。根据操作温度的不同，石灰、纯碱处理可分为冷法、温法和热法三种。冷法操作温度与原水温度相同；热法软化操作温度为 100℃ 或更高一些；而温法软化的操作温度介于冷法和热法之间，一般在 50℃ 左右。采用石灰、纯碱处理原水时，用冷法软化出水硬度一般为 1~1.6mmol/L；温法为 0.6~1.2mmol/L；热法为 0.1~0.4mmol/L。但是无论哪一种方法，由于药品纯度、操作方法和设备结构等影响，实际上出水硬度都比上述数值略高一些。

表 3-15 石灰、纯碱法在不同温度下的软化结果

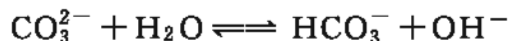
顺序号	I	II	III	IV	V
软化法	原水水质	冷石灰 软化法	热石灰 软化法	冷石灰、 纯碱软化法	热石灰、 纯碱软化法
总硬度/(mmol/L)	5	1.9	0.4	1.6	0.24
$H_{\text{Ca}}$ /(mmol/L)	3	0.7	0.3	0.7	0.16
$H_{\text{Mg}}$ /(mmol/L)	2	1.2	0.1	0.9	0.03
酚酞碱度/(mmol/L)	0	0.44	0.36	0.74	0.36
总碱度/(mmol/L)	3	0.7	0.5	1.1	0.5
pH	7.5	10.3	10.4	10.6	10.4

(4) 石灰、纯碱处理水的酸化 在石灰或石灰、纯碱处理过程中，为了较彻底地除掉镁硬化，需多投加石灰，因此，致使水中的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{OH}^-$  含量明显的增加。这不仅使水的软化效果受到影响，而且导致  $\text{OH}^-$  碱度的增加。在这种情况下，可采用下列两种方法进行再处理。

通过二氧化碳气进行酸化：



在用  $\text{CO}_2$  酸化时，应保持水的 pH 值不能低于 10，否则大量的  $\text{CO}_3^{2-}$  会转化为  $\text{HCO}_3^-$ ：

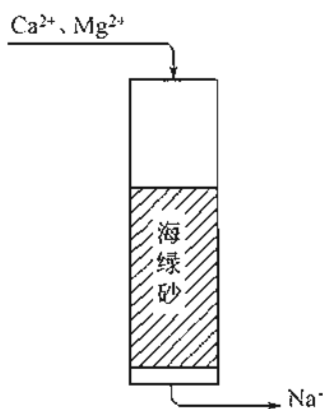


因此，过量的  $\text{Ca}^{2+}$  不能如愿地沉淀下来。

采用部分原水混合法可以将  $\text{Ca}^{2+}$  沉淀下来。这种方法是 60%~90% 的原水通过石灰或石灰、纯碱处理，而将另一部分原水 (10%~40%) 与软化处理后的水进行混合，也可达到中和过量碱度及降低硬度的目的。

#### ◀ 第四节 离子交换树脂及离子交换原理 ▶

我们通过下面的实验来说明离子交换的概念。如图 3-17 所示，将含有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的水（硬水），通过天然的海绿砂滤层之后，



滤出水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量极低，而产生了等物质的量的  $\text{Na}^+$ ，从而使水得到软化。这样，通过像海绿砂一类的物质，结合了水中的某种离子，而释放出另一种离子的过程，称为离子交换作用（或称离子交换反应）。

具有离子交换作用的物质，称为离子交换剂。普遍应用于水处理的离子交换剂有磺化煤和人工合成的离子交换树脂。磺化煤是用发烟硫酸（或浓硫酸）

图 3-17 离子交换反应示意图

与烟煤反应而制得的，由于它的化学稳定性和机械强度较差，离子交换能力也较低，目前已逐渐被离子交换树脂所代替。在此，主要介绍离子交换树脂的结构、性能和交换机理。

## 一、离子交换树脂的分类

### 1. 离子交换树脂的类型

离子交换树脂根据交换基团的性质不同，可分为两大类：凡与溶液中阳离子进行交换反应的树脂，称为阳离子交换树脂，阳离子交换树脂可电离的反离子是氢离子及金属离子；凡与溶液中的阴离子进行交换反应的树脂，称为阴离子交换树脂，阴离子交换树脂可电离的反离子是氢氧根离子和酸根离子。离子交换树脂同低分子酸碱一样，根据它们的电离度不同又将阳离子交换树脂分为强酸性树脂和弱酸性树脂；阴离子交换树脂分为强碱性树脂和弱碱性树脂。表 3-16 中归纳了离子交换树脂的类别。

表 3-16 离子交换树脂的类别

树脂名称	交换基团		酸碱性
	化学式	名称	
阳离子交换树脂	$-\text{SO}_3^- \text{H}^+$	磺酸基	强酸性
	$-\text{COO}^- \text{H}^+$	羧酸基	弱酸性
阴离子交换树脂	$\text{N}^+ \text{OH}^-$	季铵基	强碱性
	$\equiv\text{NH}^+ \text{OH}^-$	叔胺基	弱碱性
	$-\text{NH}_2^+ \text{OH}^-$	仲胺基	
	$-\text{NH}_3^+ \text{OH}^-$	伯胺基	

此外，还可以根据交换基团中的反离子不同，将离子交换树脂冠以相应的名称，例如，氢型树脂  $-\text{SO}_3\text{H}$ ，钠型树脂  $-\text{SO}_3\text{Na}$ ，钙型树脂  $-(\text{SO}_3)_2\text{Ca}$ ，氢氧型树脂  $\text{NOH}$ ，氯型树脂  $\text{NCl}$ 。离子交换树脂由钠型变成氢型或者由氯型变成氢氧型称为树脂转型。

### 2. 离子交换树脂的孔型

离子交换树脂由于制造工艺的不同，使树脂内部形成不同的孔型结构。常见的产品有凝胶型树脂和大孔型树脂两种。

(1) 凝胶型树脂 这种树脂是均相高分子凝胶结构，所以统称凝胶型树脂。它所形成的球体内部，由单体聚合成的链状大分子在交联剂的连接下，组成了空间结构。这种结构好似排布错乱的蜂巢，存在着纵横交错的“巷道”。离子交换基团就分布在巷道的各个部位，如图 3-18 所示。由巷道所构成的空隙，并非我们想象的毛细孔，而是化学结构的空隙，所以称为化学孔或凝胶孔。其孔径的大小与树脂的交联度和膨胀程度有关。交联度愈大，孔径就愈小。当树脂处于水合状态时，大分子链舒伸，链间距离增大，凝胶孔就扩大；树脂干燥失水时，凝胶孔就缩小。反离子的性质、溶液的浓度及 pH 值的变化都会引起凝胶孔径的改变。

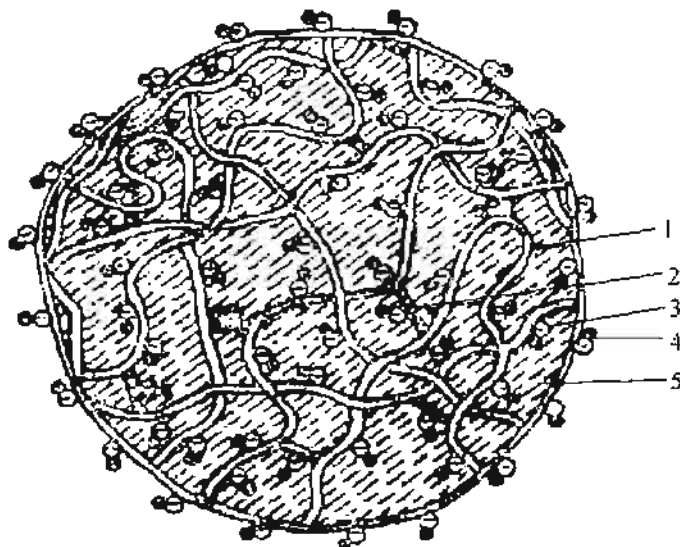


图 3-18 凝胶型离子交换树脂微观结构示意图

1—聚苯乙烯链；2—二乙烯苯交联；3—固定离子，  
如  $\text{SO}_3^-$ ；4—可交换的反离子，如  $\text{H}^+$ 、  
 $\text{Na}^+$ ；5—树脂内的结合水

凝胶孔的特点是孔径极小，一般在  $30\text{\AA}$  ( $1\text{\AA} = 0.1\text{nm}$ ) 以下。它只能通过直径很小的离子，对于直径较大的分子则容易堵塞孔道而影响树脂的交换能力。

(2) 大孔型树脂 这种树脂在制造过程中，由于加入了制孔剂，因而形成大量的毛细孔道，所以称为大孔型树脂。在大孔树脂的球体中高分子的凝胶骨架被毛细孔道分割成非均相凝胶结构，它

同时存在着凝胶孔和毛细孔，如图3-19所示。其中毛细孔的体积一般为0.5mL(孔)/g(树脂)左右，孔径从几十到上万埃，比表面积从每克几到几百平方米。由于这样的结构，可以使直径较大的分子通行无阻，所以用它去除水中高分子有机物具有良好的效果。

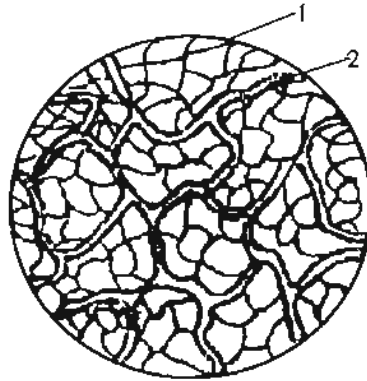


图3-19 大孔型树脂结构示意图

1—凝胶孔；2—毛细孔

大孔型树脂由于空隙占据一定的空间，骨架的实体部分就相对减少，离子交换基团含量也相应减少，所以交换能力比凝胶型树脂低。大孔型树脂的吸附力强，与交换的离子结合较牢固，不容易充分恢复交换能力。另外，目前这种树脂售价较高，所以在应用上受到限制。

## 二、离子交换树脂的物理性能

### 1. 形状

离子交换树脂都制成球形，因为球形的通水性能好，即水流阻力小；在一定的容积内球形树脂的装载量最大。出厂的树脂一般要求圆球率大于90%。

### 2. 粒度

粒度是表示离子交换树脂的粒径范围和不均匀程度。粒度小的树脂交换能力大，但树脂层的水流阻力也大；而粒度大的树脂水流阻力小，交换能力也小。出厂树脂的粒径一般在0.3~1.2mm范围（相当于50~16目）。

### 3. 颜色

离子交换树脂的颜色从乳白、浅黄、深黄至深褐色等多种。即或同一型号的树脂其颜色也不相同，所以从树脂的颜色是不可能分辨树脂型号的。树脂的颜色并不影响树脂的使用，所以在选购树脂时不需考虑颜色。但树脂在使用中如果颜色改变，则可能是树脂受到污染。

凝胶型树脂呈透明或半透明状态；大孔型树脂由于毛细孔道对光的折射，呈不透明状态。

#### 4. 含水率

由图 3-17 中可以看出，在离子交换树脂骨架的空间都充满水，其中的含水量与树脂重量的百分比，称为含水率。

$$\text{含水率} = \frac{\text{湿树脂重} - \text{干树脂重}}{\text{湿树脂重}} \times 100\%$$

树脂的含水率与交联度有密切关系，其交联度愈低，含水率就愈大。例如，树脂的交联度为 1%~2% 时，含水率可达 80% 以上。这样的树脂就会像胶水那样，不能保持一定的形状。锅炉水处理应用的树脂的交联度在 7% 左右，含水率为 45%~55%。对于凝胶型树脂，其含水率可反映树脂的孔隙率，即含水率愈大，树脂的孔隙率就愈大。

树脂在使用过程中，如果含水率发生变化，说明树脂的结构可能遭到破坏。

#### 5. 溶胀性

干树脂浸泡于水中时，体积胀大，成为湿树脂；湿树脂转型例如由钠型转换为氢型时，体积也有变化。树脂的这种性质称为溶胀性。前一种所发生的体积变化称为绝对溶胀度，这是由于树脂内部的反离子浓度大，与树脂接触的水中反离子浓度很小，在树脂的内外存在浓度差，而产生了渗透压，使水通过树脂表面向内部渗透，从而使树脂的体积膨胀起来，直至渗透压力与树脂分子间的交联拉力平衡时，这种溶胀现象才停止。后一种所发生的体积变化，称为相对溶胀度。这是由于离子的水合作用所致，因为不同的离子其水合半径也不相同，所以树脂的体积也随之改变。

树脂的溶胀性与树脂的交联度、交换基团的电离度、水合离子半径及水溶液中反离子浓度等因素有关。树脂的交联度愈小或交换基团电离度愈大或水合离子半径愈大，则溶胀度就愈大；溶液中反离子浓度增大（电解质浓度增大），渗透压就降低，则溶胀度减小。例如，强酸性阳离子交换树脂由 Na 型转变成 H 型时，体积增加 5% 以上；强碱性阴离子交换树脂由 Cl 型转变成 OH 型时，体积增



大 10% 左右；弱酸性丙烯酸系阳离子交换树脂由 H 型转变成 Na 型时，体积增大 150%~190%。

## 6. 密度

树脂的密度，根据含水情况可分为干态密度和湿态密度（简称湿密度），前项指标实用意义不大，所以不常应用；根据树脂层的体积是否包括树脂颗粒之间的空隙，又可分为真密度和视密度。具有实际意义的指标是树脂的湿真密度和湿视密度。

(1) 湿真密度 它是指树脂溶胀后的质量与其本身所占的真实体积（不包括树脂之间的空隙）之比。

$$\text{湿真密度} = \frac{\text{湿树脂质量}}{\text{湿树脂的真实体积}} (\text{g/mL})$$

(2) 湿视密度 它是指树脂溶胀后的质量与其堆积体积（包括树脂颗粒之间的空隙）之比，也称为堆积密度。

$$\text{湿视密度} = \frac{\text{湿树脂质量}}{\text{湿树脂的堆积体积}} (\text{g/mL})$$

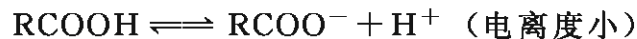
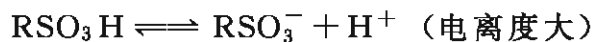
树脂的湿真密度对树脂层的反洗强度、膨胀率及混合床和双层床树脂的分层是一项重要的参考指标。而树脂的湿视密度则用来计算离子交换器所需装填湿树脂的质量。

离子交换树脂主要物理性能见表 3-17。

## 三、离子交换树脂的化学性能

### 1. 离子交换树脂的酸碱性

离子交换树脂是一种高分子电解质，它们在水溶液中都能发生电离。例如，酸性阳离子交换树脂的水溶液中的电离：



碱性阴离子交换树脂在水溶液中的电离：



上述电离过程，可使水溶液呈酸性或碱性。由于离子交换树脂所带的交换基团不同，它们的酸、碱性强弱也有差别。图 3-20 所示为不同类型的离子交换树脂，用酸或碱滴定时，水溶液的 pH 变

化曲线，称 pH 平衡滴定曲线。

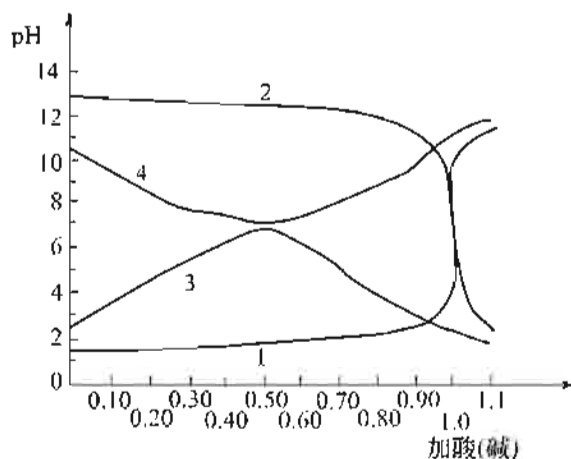


图 3-20 不同类型离子交换树脂的 pH 滴定曲线

1—强酸性树脂；2—强碱性树脂；3—弱酸性树脂；4—弱碱性树脂

通常把强酸性或强碱性树脂又称为强型树脂；弱酸性和弱碱性树脂统称为弱型树脂。表 3-17 中列出的不同类型离子交换树脂能有效进行离子交换反应的 pH 值范围。

表 3-17 常用离子交换树脂基本性能

形态	凝胶性				大孔型				
	型号	001×7	111	201×7	301	D001	D111	D201	D301
颜色	淡黄至金黄色透明	乳白色透明	淡黄至金黄色透明	透明淡黄色	灰褐色深褐色不透明	白色不透明	白色至淡黄色不透明	乳白色不透明	
全交换容量/(mmol/g)	4.2~4.5	9.0~10.0	3.0~4.0	5~9	4.0	9.0	3.0	≥4.0	
工作交换容量/(mmol/mL)	1.5~2.0	2.0~3.5	1.0~1.2	1.0~2.0	1.0~1.4	2.0	0.5	0.9~1.1	
湿真密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.2~1.3	1.1~1.2	1.0~1.1	1.0~1.1	1.23~1.27	1.17~1.19	1.05~1.10	1.05~1.07	
湿视密度/(g/cm <sup>3</sup> )	0.75~0.85	0.70~0.80	0.65~0.75	0.65~0.75	0.80~0.85	0.70~0.85	0.65~0.75	0.65~0.70	
含水率/%	40~50	40~60	40~50	40~60	50~55	40~45	50~60	55~65	

续表

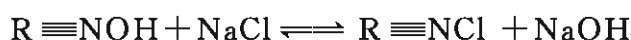
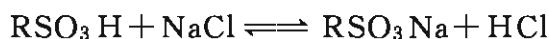
形态	凝胶性				大孔型			
型号	001×7	111	201×7	301	D001	D111	D201	D301
溶胀率/%	Na→H +1.8~ 7.5	H→Na +100~ 190	Cl→OH +5~ 15	OH→Cl +12~ 20	Na→H +5		Cl→OH +15	OH→Cl +45
允许 pH 值	0~ 14	6~ 14	0~ 12	0~ 7	0~ 14	6~ 14	0~ 14	0~ 7
允许温度/℃	120	120	60~ 100	80~ 100	150	100	60~ 80	100
价格/(元/kg)	4	40	11.5	24				

## 2. 离子交换树脂的交换反应

离子交换树脂的交换基团不同，能有效进行交换反应的能力也不相同。下面介绍强型树脂和弱型树脂可能发生的几种反应。

### (1) 强型树脂的交换反应

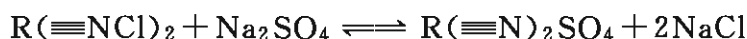
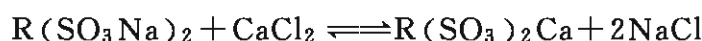
中性盐分解反应



中和反应

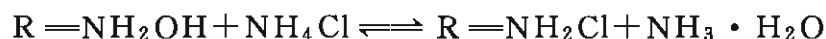
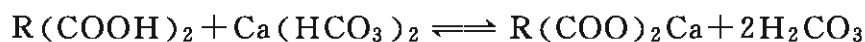


复分解反应

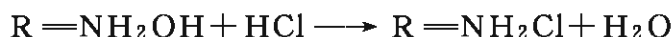
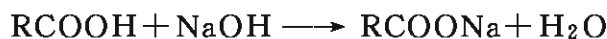


(2) 弱型树脂的反应 这类树脂没有分解中性盐反应的能力。原因是弱酸性树脂只能在  $\text{pH} > 6$  的条件下发生交换反应；弱碱性树脂只能在  $\text{pH} > 7$  时才能发生交换反应。由中性盐分解反应式可以看出，中性盐分解反应后生成强酸或强碱，结果都不可能达到上述反应条件。但弱型树脂可以进行以下反应：

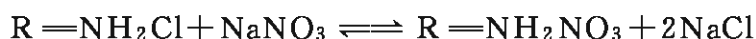
非中性盐分解反应：



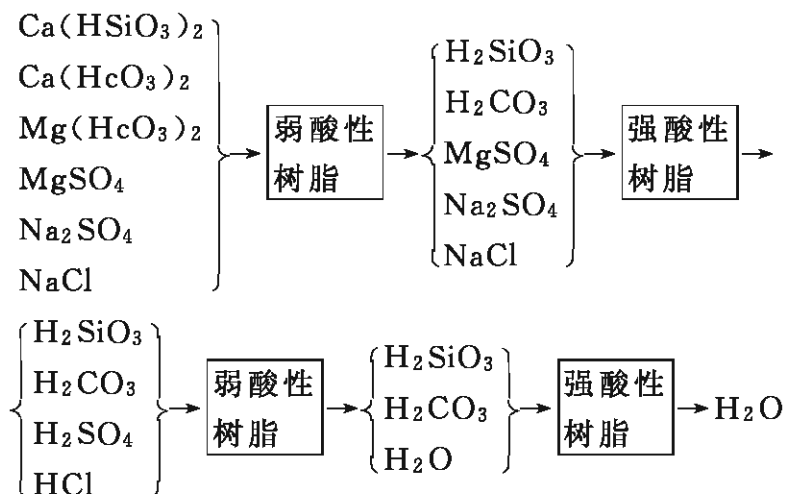
强酸或强碱中和反应：



复分解反应：



例如，水溶液中的假想化合物有  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$  和  $\text{NaCl}$ ，将这种水依次通过弱型树脂和强型树脂时，反应结果如下。



如果将上列离子交换树脂的次序颠倒的话，弱型树脂则不发生交换反应。

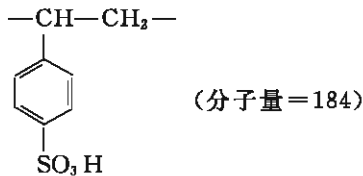
### 3. 离子交换树脂的交换容量

离子交换反应中，相互交换的离子的量符合等物质的量定律，就是离子交换树脂所结合的离子和释放的离子的物质的量相等。因此，离子交换树脂的交换能力，通常用单位质量或单位体积的树脂所能交换离子的物质的量来表示，称为交换容量。交换容量是离子交换树脂最重要的性能指标。由于树脂的交换容量常随进行离子交换反应的条件不同而改变，因此交换容量有全交换容量、工作交换容量和再生交换容量之分。

(1) 全交换容量 表示离子交换树脂的交换基团全部起交换反应时的交换能力。它反映树脂交换基团的总数。单位通常用

mmol/g 来表示。

全交换容量可用化学分析方法测定，也可通过树脂的结构式从理论上进行计算。例如，



就是说，每 184g 的树脂中含有可交换的  $\text{H}^+$  为 1g， $\text{H}^+$  的物质的量为 1mol，当不考虑交联剂时，则每克树脂所具有的交换容量为：

$$\frac{1}{184} = 0.0054 \text{ mol/g} = 5.4 \text{ mmol/g}$$

扣除交联剂所占的量（交联度为 7%），则全交换容量为：

$$5.4 \times (1 - 7\%) = 5.0 (\text{mmol/g})$$

国产 001×7 阳离子交换树脂的全交换容量均规定为  $\geq 4.5 \text{ mmol/g}$ ，所以计算值与实际测定值大致相符。

全交换容量与树脂的种类和交联度有关，交联度愈大，全交换容量愈低。同类树脂交联度相等时，全交换容量基本是一个常数。因全交换容量反映了离子交换树脂的化学结构特点，所以在实验研究中，它是比较重要的。而在实际使用时，工作交换容量更有意义。但全交换容量与工作交换容量之间没有固定的比例关系，因此不能以全交换容量去推算工作交换容量。

(2) 工作交换容量 表示离子交换树脂在一定工作条件下所具有的交换能力。由于离子交换树脂是装在容器内的，在湿态下工作，工作交换容量通常用单位体积的湿树脂所能交换离子的物质的量来表示，单位 mmol/mL（湿树脂）或 mol/m<sup>3</sup>（湿树脂）。

工作交换容量不仅受树脂结构的影响，还受溶液的组成、流速、温度、交换终点的控制以及再生剂和再生条件等因素的影响。因此，工作交换容量是离子交换树脂实际交换能力的量度。它可在模拟离子交换树脂实际工作条件下测得。在表示树脂工作交换容量时，必须指明工作条件、再生条件和终点控制标准。显然，工作交换容量不可能是一个常数，并且在不同的条件下其数值可能相差很大。但在实际应用中，工作交换容量是树脂一项最重要的技术指标。

#### 四、离子交换器的工作过程

在实际水处理过程中，都是将离子交换树脂装填在圆柱形的设备中，形成一定厚度的滤层原水以一定的流速通过树脂层，进行动态交换，这种水处理设备称为离子交换器。如果用于软化水处理，则称为离子交换软化器。离子交换器的工作包括运行和再生两个过程，并且这两个过程是循环进行的。图 3-21 所示为钠离子交换软化器的工作过程。

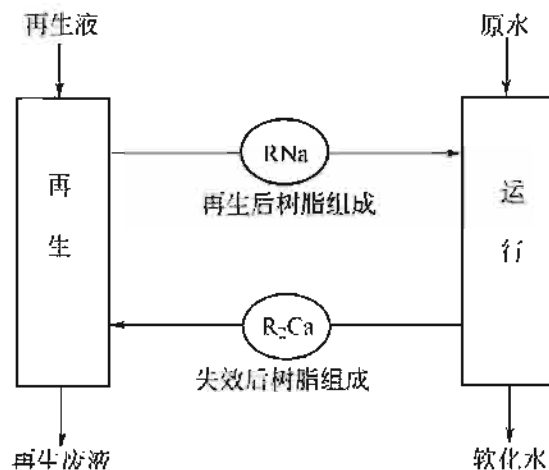


图 3-21 钠离子交换软化器的工作过程

离子交换器的运行和再生是同一离子交换反应的相反过程。

(1) 交换带的形成 在装有钠型树脂的交换器中，自上而下的通过含有  $\text{Ca}^{2+}$  的水时，树脂层的变化可分为三个阶段。

① 运行初期阶段 溶液一接触树脂，就开始发生离子交换反应。随着水的流动，溶液的组成和树脂的组成不断发生改变，即树脂愈往上层  $\text{Ca}^{2+}$  浓度愈大，水愈往下流  $\text{Ca}^{2+}$  浓度愈小。当水流至一定深度时，离子交换反应达到平衡，树脂及溶液中反离子浓度就不再改变了。这时，从树脂上层交换反应开始至下层交换平衡为止，形成了一定高度的离子交换反应区域，称为交换带。如果把交换带中树脂的组成作出曲线，纵坐标为树脂层高度，横坐标为树脂的组成，以 % 表示，则交换带的树脂组成曲线如图 3-22 上部所示。不难理解，在通水初期，由于离子交换反应刚刚开始，交换带尚未

定型，经一段时间后才形成一定高度的离子交换带。

② 运行中期阶段 随着离子交换反应继续进行，离子交换带逐渐向上交换器下部移动，这样的交换器内的树脂层就形成了三个区域：交换带以上的树脂层，都为  $\text{Ca}^{2+}$  所饱和，已失去了交换能力，所以称为“失效层”；交换带以下的树脂层，是与水保持交换平衡状态，可以看作无离子交换反应，所以称为“未交换层”；在离子交换器内，真正起着交换反应的仅仅是交换带，所以称为“工作层”。交换带的宽度可以理解为处于动态的工作层厚度图 3-23。由此看来，离子交换器的运行就是工作层不断下移过程，因此工作层又称为过渡层。

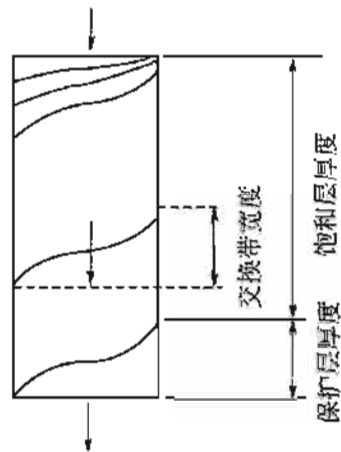


图 3-22 树脂层的交换带形成及移动过程示意图

交换带的宽度可以理解为处于动态的工作层厚度图 3-23。由此看来，离子交换器的运行就是工作层不断下移过程，因此工作层又称为过渡层。

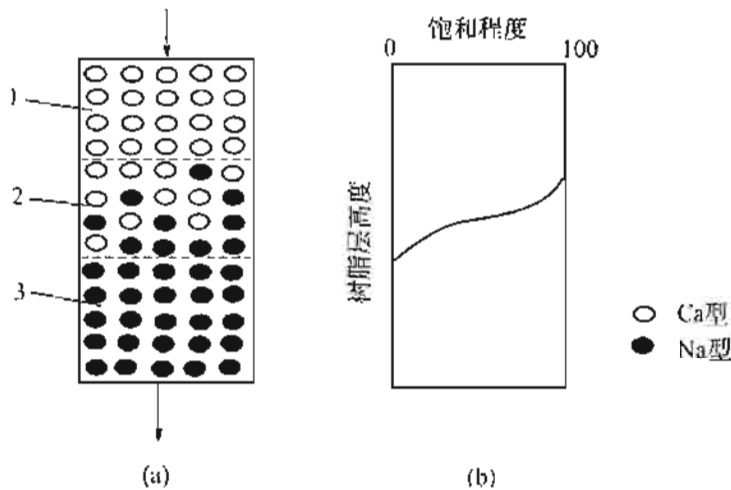


图 3-23 交换期内树脂状态示意图

(a) 树脂状态；(b) 树脂饱和曲线

1—失效层；2—工作层；3—未交换层

③ 运行末期阶段 在离子交换器运行正常情况下，工作层的厚度基本保持不变，而失效层不断增大，未交换层不断缩小，当交换带的下端到达树脂层的底部时， $\text{Ca}^{2+}$  开始漏泄。如果继续运行

时，出水中的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度逐渐增加，当树脂层中交换带完全消失时，出水的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度与进水相等，交换器内的树脂全部处于失效状态。

在实际操作中，工作层降到交换器底部，微量  $\text{Ca}^{2+}$  开始穿透时，经检查发现后就可及时停止工作，避免出水水质的突然恶化，所以此时的工作层又称为保护层。

应当指出，只有离子选择性系数大于 1 时，在树脂层中才能形成交换带。强行树脂失效后与再生剂的反离子的交换反应，离子选择性系数几乎都小于 1，所以再生过程就没有一定的交换带。

(2) 水质变化曲线 综上所述，离子交换器的运行过程经历了交换带的形成、移动及消失三个阶段。图 3-24 所示为交换器运行出水水质变化曲线。A 点至 B 点是交换器运行的初期和中期阶段出水水质，水中的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度几乎接近于零，且水质稳定；B 点是  $\text{Ca}^{2+}$  的穿透点，此时即达到交换运动的终点；如果继续通水运行，水中的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度很快增加，直至与进水中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度相等时为止。所以，BC 线段为交换器运行末期水质变化曲线，由 B 点至 F 点距离称为运行曲线的“拖尾”，它间接反映了交换带的宽度。图中 ABDE 的面积相当于交换器内树脂的工作交换容量；如果树脂全部得到再生，面积 ABCDE 就相当于全交换容量，两面积之比则为交换器树脂的利用率。

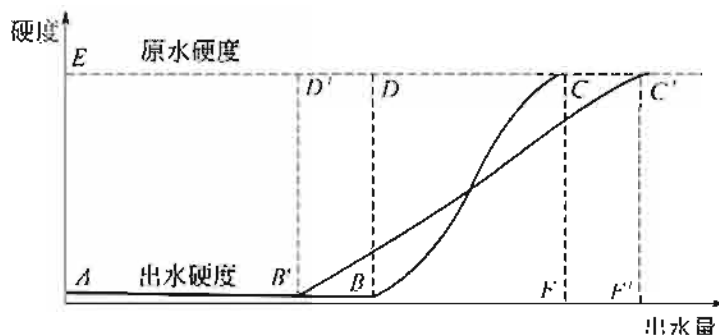


图 3-24 交换器运行出水水质变化曲线

交换带的宽度是评价交换器运行效果的重要指标。交换带越宽， $\text{Ca}^{2+}$  穿透越早，曲线拖尾越长（图 3-24  $B'C'$ ），树脂的工作交换容量越低。



(3) 影响交换带宽度的因素 影响交换带宽度的因素主要有离子交换树脂的性能、离子交换器的结构和运行操作条件。例如，树脂的选择性系数越大，交换带宽度越小；树脂的粒径越小，交换带宽度越小；树脂的交联度越大，交换带就越宽等，都属于树脂性能对交换带的影响。但在实际应用中，采用树脂的型号都是一定的，所以这些因素在运行正常情况下已不再改变，真正影响交换带宽度的是操作条件和设备结构的问题。

① 流速的影响 离子交换器的运行涉及两个方面的速度。一方面是随水流到达交换带的离子数量，即离子供给速度，它是处理水的流量和离子浓度的乘积；另一方面是离子交换速度，它是由树脂的膜扩散速度和孔道扩散速度决定的。可以设想，如果流经树脂层的水流速度比较慢，离子供给速度就可能低于或接近于离子交换速度，这时到达交换带的反离子都可以及时地进行交换，树脂同溶液总是处于实际平衡状态，于是，交换带的宽度将降低到最窄范围。当溶液的流速增大，离子供给速度也随之增大，达到一定程度后就会超过离子交换速度。这时，到达某树脂层的离子不能够及时交换，没来得及交换的离子将越过次层而进入下一层或更深一层，这样就出现了一定宽度的交换带。显然，离子供给速度超过离子交换速度越多，交换带就越宽。

流速增加会使离子供给速度增大，是使交换带变宽的因素。但是，水流速度的增加也会使树脂颗粒周围的水膜变薄，从而提高膜扩散速度，这又是使交换带变窄的因素。由此看来，关于流速的影响是一个复杂的综合性问题，最好是在实践中通过实验加以解决。对于磺化煤离子交换器，水流速度的增大可以使其交换容量呈线性关系降低（见表 3-18）。对于强酸性和强碱性树脂，在一般水处理的稀溶液中工作时，其孔道扩散比膜扩散迅速，即交换速度由膜扩散决定。在这种情况下增加流速，离子供给速度虽然增大，同时由于水膜厚度变薄离子交换速度也相应增大，所以对交换带宽度无显著影响，如果水流速度提高到 60m/h 以上时，交换带明显变宽，工作交换容量开始出现明显降低。对于弱酸性或弱碱性树脂，其离子交换速度较慢并且由孔道扩散速度决定，对离子供给速度的变化比较敏感，所以流速增大时，交换带会随之变宽，工作交换容量将明显降低。

表 3-18 流速与交换容量关系

流速/(m/h)	所能达到的工作交换容量/%
5	100
40	90
70	82

② 浓度的影响 水中的离子浓度对树脂中交换带宽度的影响也同样存在着两个方面的问题：一是离子浓度增大时，就相当于离子供给速度增加，将会出现交换带变宽；另一方面是溶液浓度增大，造成树脂表面的水膜两侧反离子浓度差增大，而使膜扩散速度增大，即相当于增大了离子交换速度，又可促使交换带变窄。所以，溶液浓度的变化对交换带的影响也是一个综合性的问题。在实际运行中，处理水的浓度往往是一定的，且变化不大，只有根据溶液浓度调整水流速度，以此来改变离子的供给速度。例如，浓度大的水质，为使交换带不要明显变宽，就要把流速调整小一些。反之，浓度小的水质，流速可以高一些。

交换气的运行流速除了受溶液浓度影响之外，还应考虑交换器结构性能及运行方式，树脂层高度及压力损失，树脂的机械强度及受压而造成破碎的限制等因素的影响。

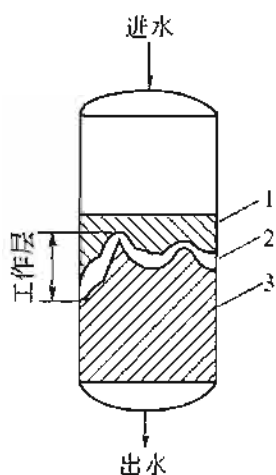


图 3-25 交换器过水断面不均匀时交换带变化状况

1—失效层；2—交换带；  
3—未交换层

③ 树脂粒度的影响 笼统地说，树脂颗粒大，交换带宽，树脂颗粒小，交换带窄，这是不够确切的。因为树脂颗粒的均匀程度（即不均匀系数）对交换带的影响则是更为重要的因素。树脂颗粒的不均匀系数较大时，就会使溶液在树脂层的同一断面上（称过水断面）分布不均匀，即流速不均匀。流速大的区域交换带急剧加宽，流速小的区域交换带很窄，这就造成了交换带宽度参差不齐，表现在工作层不在同一个水平面上（图 3-25），实质上就等于增加了工作层的厚度。

尤其是树脂层中存在有较多的破碎

树脂，而且这部分树脂由于反洗操作的水分筛分作用，迁移到树脂层的顶部时，水流阻力将明显增大。为保证交换器的出水量，势必增加运行压力，由此而引起树脂的机械变形，使树脂层的通水性变差，过水断面流速极不均匀，甚至会发生大量的水流从某一局部区域流过，这种现象称为“沟流”。结果，交换带被破坏，工作层被扰乱，致使  $\text{Ca}^{2+}$  过早的穿透。

④ 离子交换设备结构影响 离子交换器的进水装置和排水装置的布水均匀性，对交换带的宽度有直接影响。不难理解，由于离子交换器在设计或安装中的欠缺造成布水不均匀时，必然引起过水断面的流速不均匀，即发生所谓偏流现象，结果使树脂的工作层偏斜，交换带变宽。

(4) 离子交换器的吸着和排代规律 前面讨论的是溶液中只有一种离子时，在交换器中简单地交换过程。当溶液中含有多种离子通过交换器的树脂层时，其交换过程就比较复杂。例如，水溶液中含有  $\text{Fe}^{3+}$  为  $0.5\text{mmol/L}$ ， $\text{Ca}^{2+}$  为  $1.5\text{mmol/L}$ ， $\text{Na}^+$  为  $1.0\text{mmol/L}$ ，由上向下通过 H 型树脂层时，各种离子的吸着和排代规律如下。

① 吸着规律 如图 3-26 所示。

被吸着的离子在树脂层中分布，是按其被离子交换剂吸着能力的大小，沿水流方向依次分布的。最上部是吸着能力最大的离子，最下部为吸着能力最小的离子。

离子被吸着能力差异愈大，在树脂层中的分层愈明显。

被树脂吸着能力差异不大的离子在交换器中分层不明显。例如，对  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ，因为它们的选择性差别较小，所以在同一层中两种离子都被吸着，只是在此层的上部 Ca 型树脂较多，下部 Mg 型树脂较多而已。

在实际运行的离子交换器中，由于树脂层再生条件的差异和过水断面流速不均匀等因素的影响，各层的断面并非平行，而是相互

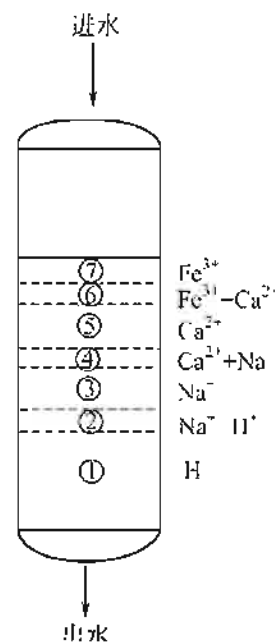


图 3-26 离子交换树脂层的吸着规律

交错的。所以，这一离子吸着顺序只是大致符合上述规律。

由图 3-25 可以看出，进行多种离子交换的树脂层，存在着多个交换带。如  $\text{Fe}^{3+}$  与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Na}^+$  及  $\text{Na}^+$  与  $\text{H}^+$  等交换带。如果交换器以控制漏  $\text{Na}^+$  为终点时，保护层就相当于  $\text{Na}^+$  与  $\text{H}^+$  交换带的宽度；若以控制漏  $\text{Ca}^{2+}$  为终点时，保护层就是  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Na}^+$  交换带的宽度。

② 排代规律 为了便于说明，将交换器内的树脂层形态划分为七个区域，即①~⑦区。根据离子交换等物质的量进行的原则，交换器运行时，出水水质变化曲线如图 3-27 所示。

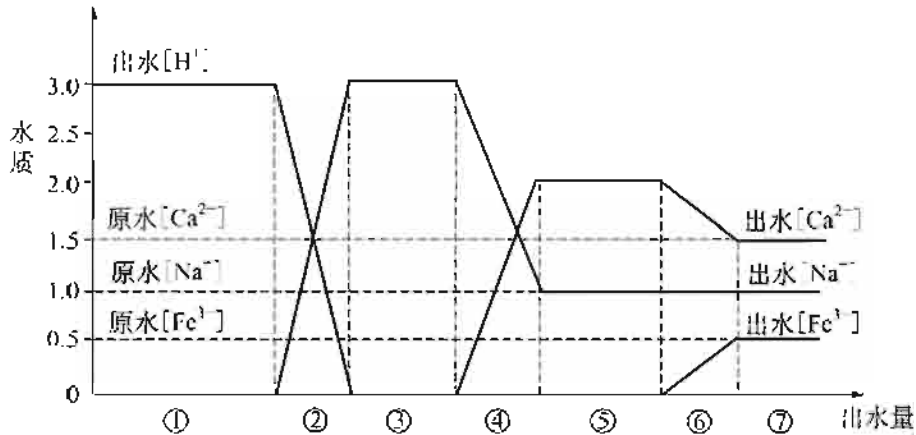


图 3-27 交换器出水离子排代理想曲线

当交换器底部的树脂为①区形态时，交换器出水中的阳离子只有  $\text{H}^+$ ，如果不考虑它与水中  $\text{HCO}_3^-$  的反应，则  $\text{H}^+$  浓度应等于进水各阳离子浓度之和，即  $3.0\text{mmol/L}$ 。

当交换器底部的树脂为②区形态时，出水开始漏  $\text{Na}^+$ ，其浓度逐渐升高，同时， $\text{H}^+$  浓度随之下落。

交换器继续运行，当③区到达底部时，就相当于  $\text{Na}$  型树脂的交换反应，出水中以不含有  $\text{H}^+$ ， $\text{Na}^+$  浓度增大到最大限度，其含量等于进水的  $\text{Na}^+$  浓度（ $\text{Na}^+$  在此种情况不能进行交换反应）及与  $\text{Na}$  型树脂进行交换的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  浓度之和，即为  $3.0\text{mmol/L}$ 。

当交换器底部的树脂为④区形态时， $\text{Ca}^{2+}$  开始穿透其浓度逐渐升高，同时， $\text{Na}^+$  浓度随之降低。

当交换器底部的树脂为⑤区形态时，就相当于  $\text{Ca}$  型树脂，它

只能与  $\text{Fe}^{3+}$  发生交换反应，所以，出水的  $\text{Na}^+$  浓度与进水相等， $\text{Ca}^{2+}$  上升到最大值，其浓度等于进水中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度与  $\text{Fe}^{3+}$  交换下来的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度之和，即为  $2\text{mmol/L}$ 。

以此类推，当运行至⑦区时，交换器内的树脂已全部转变成 Fe 型，此时对进行中的任何阳离子都没有交换作用，所以出水中的阳离子种类及含量与进水相同。

## ◀ 第五节 软化及降碱联合处理系统 ▶

钠离子交换法只能除掉原水中的硬度成分 ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )，不能除掉原水中的碱度成分 ( $\text{HCO}_3^-$ )。碱度成分进入锅炉内，在高温下发生分解和水解反应，致使锅水中游离  $\text{OH}^-$  碱度增加，蒸汽中  $\text{CO}_2$  浓度增加。其危害是：①增高锅水的相对碱度；②污染蒸汽；③增大排污率；④造成蒸汽和冷凝水系统的酸腐蚀和锅水系统的碱腐蚀。所以，对于碱度较高（高于  $2\text{mmol/L}$ ）的原水，不仅要进行软化处理，而且要进行降低碱度处理，通常把这种处理系统称为联合处理系统。

### 一、钠离子交换软化及药剂降碱联合处理系统

#### 1. 钠离子交换加酸系统

(1) 钠离子软化加酸原理 经钠离子交换后的软化水，原水中的碳酸盐硬度转化为重碳酸钠  $\text{NaHCO}_3$ ，向软化水中加入适当量的酸（通常用硫酸），便发生如下中和反应：



这一反应称为软化水的酸化。酸化后生成的二氧化碳，可经除二氧化碳器除去。为保持炉水碱度控制在规定的范围，酸化时不能将水中的碱度除尽，在没有准确酸计量装置时，需保留  $1.0\sim 1.4\text{mmol/L}$  的残留碱度，这主要是防止出水呈酸性，如有准确的酸计量装置时，出水碱度可降至  $0.5\sim 0.8\text{mmol/L}$ 。

(2) 钠离子交换加酸系统 钠离子交换加酸系统如图 3-28 所示。该系统的特点是：

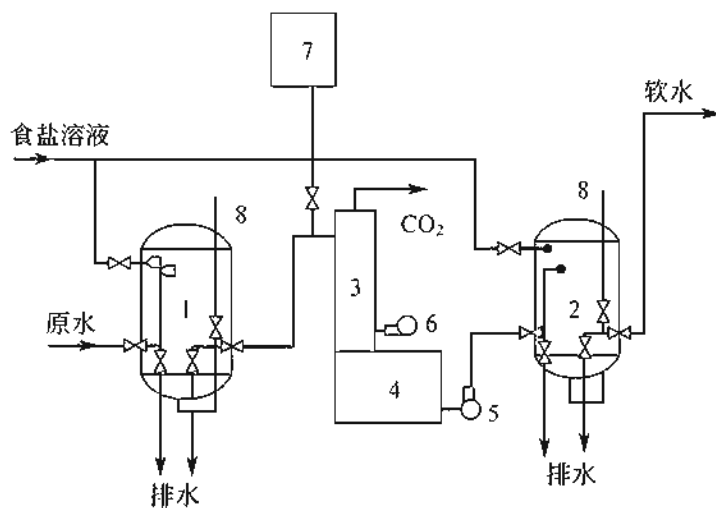


图 3-28 钠离子交换加酸系统

- 1—一级钠离子交换器；2—二级钠离子交换器；3—除二氧化碳气；  
4—中间水箱；5—中间水泵；6—鼓风机；  
7—加酸装置；8—反洗水管

设备较简单，占地面积小，因而初投资较低；

原水的中性盐含量有所增加，对保持炉水相对碱度有利，但对碳钢防腐蚀不利；

可以达到降低锅炉排污率和提高蒸汽品质的目的；

运行控制较困难，操作稍有疏忽，即有加酸过量的危险；

加酸系统的管道及设备腐蚀较为严重。

这种系统适用于原水碳酸盐硬度较大，且处理后水中溶解固形物在锅炉水质要求的允许范围内，而不使锅炉排污量太大。

(3) 加酸量的计算 中和碱度成分的加酸量是由原水碱度及要求保留碱度来确定的，当硫酸的浓度为 100% 时，可按下式计算：

$$G_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 49(A - A_{\text{残}})$$

式中  $G_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  —— 每立方米水硫酸加入量， $\text{g}/\text{m}^3$ ；

$A$  —— 原水碱度， $\text{mmol}/\text{L}$ ；

$A_{\text{残}}$  —— 软水残留碱度， $\text{mmol}/\text{L}$ ，此值参考本节加酸原理中所提出的数值；

49 —— 硫酸的摩尔质量。

酸化处理时，通常是加入一定浓度的稀硫酸，并且其加酸量不是用重量计而是体积计，所以，稀硫酸加入量可按下式计算：

$$V_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{100G_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{Cd}$$

式中  $G_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ ——每立方米水稀硫酸加入量， $\text{mg}/\text{m}^3$ ；  
 $C$ ——稀硫酸的浓度，%；  
 $d$ ——稀硫酸密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ ，见表 3-19。

表 3-19 稀硫酸的浓度中和碱量的关系

中和碱量 ( $A-A_{\text{残}}$ )/(mmol/L)	需配置稀硫酸浓度 /%	密度 /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
<1.0	4	1.025
1.0~2.0	5	1.032
2.0~3.0	6	1.038
3.0~4.0	7	1.045
4.0~5.0	8	1.052
>5.0	10	1.066

在实际应用中，稀硫酸的浓度要配制适当，浓度过高，加酸量不易控制，浓度过低，会增大加酸设备，所以稀硫酸的浓度应由中和水中的碱量来确定，见表 3-19。

(4) 加酸系统 常用的加酸系统有以下几种。

① 直接滴加 对于处理水量较小的系统，可采用直接滴加法，如图 3-29 所示。

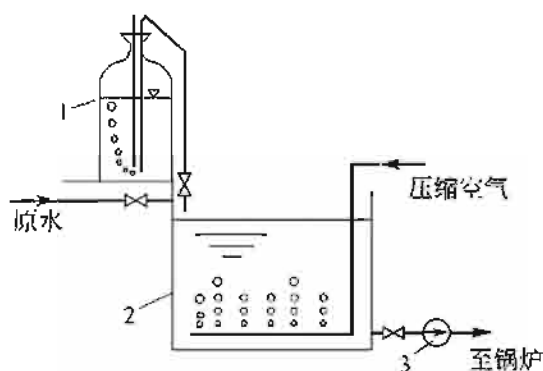


图 3-29 直接滴加法加酸系统

1—定量加酸瓶；2—水箱；3—给水泵

采用此法时，最好设两个水池或水箱，水池和水箱应防腐，如刷环氧树脂或衬玻璃钢。在水池和水箱中应设搅拌装置如机械搅拌

或压缩空气搅拌，最用好压缩空气搅拌，这样可以除去加酸后生成的二氧化碳，一般如能鼓气 30min 就可以省去除二氧化碳器。具体操作方法为，首先根据水池或水箱内的水容积，按计算将酸加入一个水池中，通入压缩空气鼓气一定时间后，测定水的残留碱度，合格后可送入锅炉。再在另一水池进行同样加酸处理，两池交替使用，即可达到符合要求的水质。

② 压力式计算系统 图 3-30 所示为节流孔板、排挤罐加酸系统。其原理是将浓硫酸在稀释箱 1 内稀释到规定浓度，然后放入计量器 2 中（计量器是装入槽中的），由于软化水管道上节流孔板造成的压差，使一部分水流入计量器，此时，将酸挤出，加入软化水中。加酸量的大小由转子流量计 3 来控制调节，而浮子液面计用来测量计量器（水槽）中的液位。为了增加调节范围和加酸运行稳定，增设孔板 5 作为二次调节，这样使运行更加平稳。

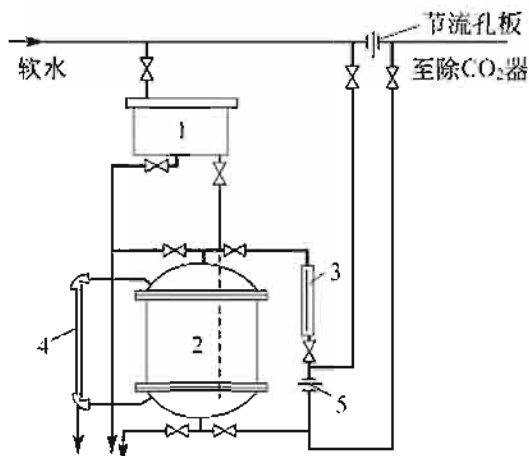


图 3-30 节流孔板、排挤罐加酸系统

1—硫酸稀释箱；2—计量器；3—转子流量计；  
4—浮子液面计；5—孔板

③ 橡皮袋排挤式计量系统 如图 3-31 所示为节流孔板、橡皮袋排挤式加酸系统。其原理为在两个压力罐 2 内装有容积相同的橡皮袋，经稀释的硫酸从硫酸稀释箱 1 直接进入橡皮袋中，加酸时，压力水从橡皮袋（装有计量器）上部进入，压挤橡皮袋，将稀释酸不断地加入软化水中。转子流量计 3 用来调节橡皮袋中的加酸量。这样使硫酸不直接与挤压水接触，因此计量较准确，运行也较为平稳。



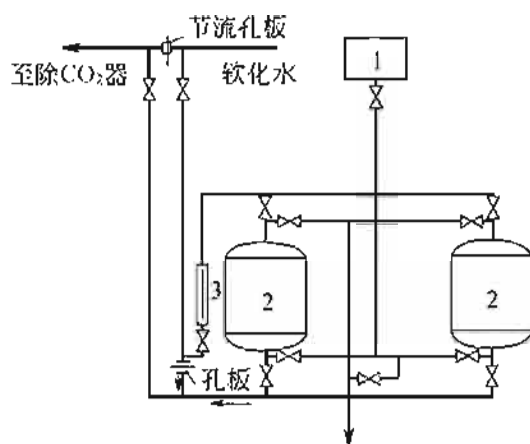


图 3-31 节流孔板、橡皮袋排挤式加酸系统

1—硫酸稀释箱；2—压力罐；3—转子流量计

④ 喷射器加酸系统 如图 3-32 所示。将硫酸在稀释箱 1 中稀释到 4%~10% 的浓度，然后由喷射器 2 造成抽力将酸送入软化水中。此系统设备简单，占地面积少，但喷射器制造要求精确，材料要选择合适。运行时，为便于调整，应尽量保持稀酸浓度、喷射水量、喷射器进口压力及喷射器出水背压的稳定。

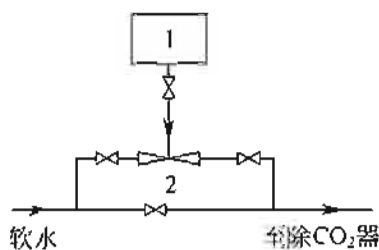


图 3-32 喷射器加酸系统

1—硫酸稀释箱；2—硫酸喷射器

⑤ 计量泵加酸系统 如图 3-33 所示。在稀释酸箱 6 内配制一定浓度的稀硫酸，由计量泵送入软化

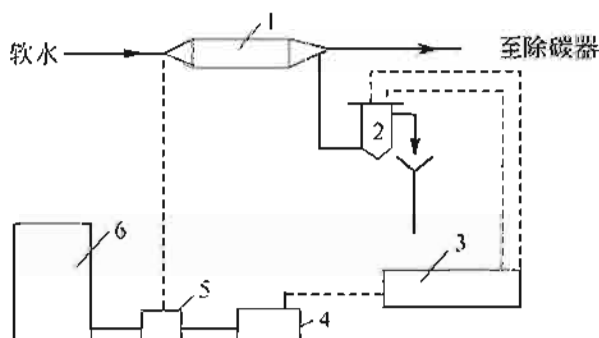


图 3-33 计量泵加酸系统

1—管式压力混合器；2—pH 值测量电极；3—自动调节装置；  
4—直流电机；5—计量泵；6—稀释酸溶液箱

水中，经混合器（见图 3-34）将软化水和硫酸混合均匀，用工业酸度计来监督混合器出水的 pH 值，同时通过转换器的自动调节装置控制计量泵的直流电机的转速，来自动调节加药量。因此这种加酸方法比较准确和安全。pH 值与碱度的关系可参考表 3-20。

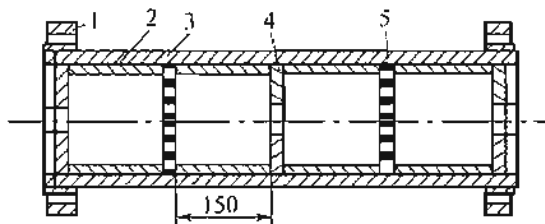


图 3-34 管式压力混合器

1—平法兰；2—外套管；3—内套管；  
4—单孔夹板；5—多孔夹板

表 3-20 加酸时碱度和 pH 值的关系

残留碱度/(mmol/L)	pH 值
0	4.5
0.2	5.77
0.4	6.25
0.6	6.62
0.8	7.11

混合器通常采用管式压力混合器，其结构如图 3-34 所示。由外套管和带有隔板的内套管组成，其管径为软化水管管径 2 倍左右，混合气中多孔夹板开孔总面积应与软化水管截面积相等，单孔夹板开孔总面积为软化水管的截面积的 1/2。

## 2. 石灰-钠离子交换系统

经过石灰处理后，水中残留碱度一般在 0.8~1.2mmol/L，残留硬度是原水中非碳酸盐硬度和残留碱度之和。

石灰处理不能除掉原水中的负硬度，原因是石灰与负硬度成分发生如下反应：



结果，原水中的重碳酸钠等物质的量的转换为碳酸钠，水中的负硬度没有变化。因此，对于负硬度较大的原水不适宜采用石灰处理。

(1) 石灰-钠离子交换系统 石灰处理，除去原水中大部分碱度和部分硬度后，经过沉淀和过滤除去沉淀物，再进入钠离子交换器如图 3-35 所示，除去水中的硬度，这就是石灰-钠离子交换系统。所以，这种方法是沉淀软化法和离子交换软化法联合应用的一种水处理方法。

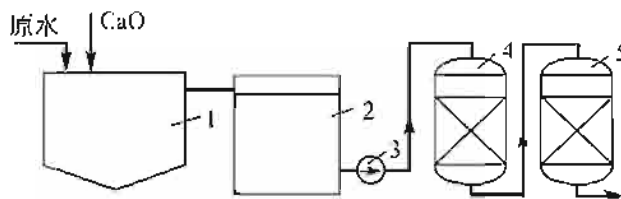


图 3-35 石灰-钠离子交换系统

1—沉淀池；2—水箱；3—水泵；4—机械  
过滤器；5—钠离子交换器

(2) 石灰-钠离子交换法的特点 一般采用建筑用石灰，原料易取，价格便宜，制水成本低，经济性好。

不仅能降低原水碱度，而且能除去部分硬度，可以减轻钠离子交换器负担。

对于含铁较高的地下水，石灰处理有利于除铁。

建筑用石灰纯度低（一般为 30%~40%，极少超过 60%），因而增加劳动强度，并易使管道和设备发生堵塞。

石灰处理系统按正规设计，设备比较庞大，系统比较复杂，占地面积较大。

### (3) 简易石灰处理系统

① 设备及系统 对于处理水量较小的单位，可采用如图 3-36 所示的简易石灰处理系统。

本系统只设置两个钢筋混凝土的构筑物，作为反应池兼沉淀池，其中一个池子运行时，另一个池子进行石灰沉淀处理。在每个池子的上方各设置一个带有多孔的塑料筛筒或铁丝筛筐，筒和筐内盛装石灰并与进水管相连，在池子的下部设有排泥渣管系，池子的出水管设置在锥形壁上方，以防出水时携带沉渣。

② 沉淀池的操作 当 2# 池开始运行，将 1# 池内沉渣排出成为空池，称取需要量的石灰装入塑料筒和铁丝筐内，开启进水门，

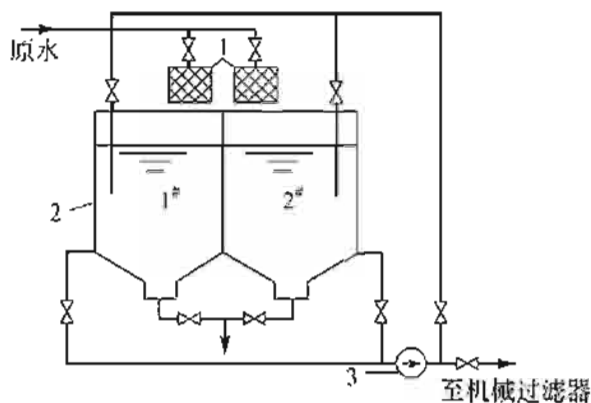


图 3-36 简易石灰处理系统

1—盛石灰塑料管；2—石灰反应、沉淀池；3—水泵

水与石灰乳一起进入水池，至一定水位，关闭进水门，开动循环门，使池中水循环数分钟，以保证混合均匀，然后静止沉淀，当达到规定的沉淀时间时，2#池中水已用完，开启1#池出水门继续运行，2#池重复上述操作。

③ 沉淀池的容积 沉淀池的容积可由下式确定：

$$V = QT$$

式中  $V$ ——沉淀池的容积， $m^3$ ；

$Q$ ——供水量， $m^3/h$ ；

$T$ ——水在沉淀池中停留时间， $h$ ，水不加温时，可选4h，北方地区冬季需选5h。

(4) 石灰加药量的计算 在实际应用中，石灰处理通常有两种控制方式，一种为碳酸盐控制方式，即控制石灰处理后的水中无 $OH^-$ 和 $HCO_3^-$ ，只有 $CO_3^{2-}$ 。就是控制出水碱度 $2P=A$ 。采用此种控制方式，析出的沉淀中主要为 $CaCO_3$ ，只有很小部分为 $Mg(OH)_2$ 。所以此法适于钙的碳酸盐硬度较大，而镁硬度较小的水质。按此方式控制时，石灰的加入量可按下式计算：

$$[CaO] = 28 \{ [CO_2] + [Ca(HCO_3)_2] + 2[Mg(HCO_3)_2] \}$$

式中

$[CaO]$ ——石灰加入量， $g/m^3$ ；

28——CaO的摩尔质量；

$[CO_2]$ 、 $[Ca(HCO_3)_2]$ 、 $[Mg(HCO_3)_2]$ ——水中游离二氧化碳、重碳酸钙、重碳酸镁的含量， $mmol/L$ 。

另一种控制方式为氢氧根控制，即保持处理后的水中有一定的过剩石灰量。这种控制方式适于镁硬度较大的水质，石灰的加入量可按下式计算：

$$[\text{CaO}] = 28 \{ [\text{CO}_2] + A + H_{\text{Mg}} + \beta \}$$

式中  $A$ ——原水的碱度，mmol/L；

$H_{\text{Mg}}$ ——原水的镁硬度，mmol/L；

$\beta$ ——石灰的过剩量，mmol/L，一般取 0.1~0.2mmol/L。

(5) 石灰用量的调整 计算的石灰剂量为理论计量。实际运行中，还应根据石灰处理后水的分析结果进行调整，以确定石灰的有效剂量。例如，计算的石灰剂量为 4mmol/L，石灰处理方式为氢氧根控制方式（即控制出水  $\text{OH}^-$  为 0.1~0.2mmol/L），如果测得石灰处理后的水中  $\text{OH}^-$  为 0.1~0.2mmol/L，则理论剂量即为有效剂量，就是 4mmol/L，否则应进行调整。如测得处理后水中的  $\text{OH}^-$  为 0.6mmol/L，则有效剂量应按下式调整：

$$\text{有效剂量} = \text{理论剂量} - (0.6 - 0.2) = 4 - 0.4 = 3.6 \text{mmol/L}$$

如测得处理后水中的  $\text{OH}^- = 0$ ， $\text{HCO}_3^- = 0.3 \text{mmol/L}$ ，则有效剂量应按下式调整：

$$\text{有效剂量} = \text{理论剂量} + (0.3 + 0.2) = 4 + 0.5 = 4.5 \text{mmol/L}$$

实际运行中，应按沉淀池出水水质分析结果及时调整石灰投加量。并且随时监督出水的浑浊度，依此来调整处理水在池中停留时间。

(6) 石灰纯度的测定 石灰纯度一般可用下述方式进行测定。

精确称取试样 1.4g，以煮沸过的蒸馏水溶解于 1000mg 容量瓶中，当水加至 2/3 体积时，充分搅动 30~40min，然后稀释至刻度，充分混匀后放置 30min，迅速过滤，开始的滤液不要，然后取滤液 50mL 于锥形瓶中，加两滴酚酞指示剂，以 0.1mol/L 硫酸滴定至红色消失，再以甲基橙为指示剂，继续滴定至橙色。

计算：

$$w_{\text{CaO}}(\%) = \frac{(P-M)f \times 1000 \times 2.8}{50 \times 1.4 \times 1000} \times 100\% = (P-M)f \times 4\%$$

式中  $P$ ——以酚酞指示剂时消耗 0.1mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  的体积，mL；

$M$ ——以甲基橙为指示剂时消耗 0.1mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  的体

积, mL;

$f$ —0.1mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  的活度系数, 可取 0.7;

1.4—试样重, g;

2.8—1/10  $\text{CaO}$  的摩尔质量。

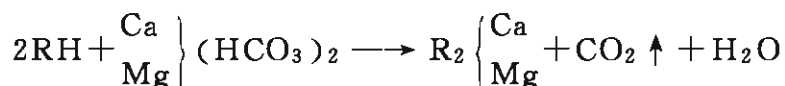
## 二、H-Na 离子交换系统

### 1. H-Na 离子交换原理

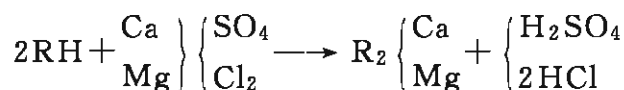
H-Na 离子交换法, 是一部分原水经过强酸性 H 型离子交换树脂, 另一部分原水经过 Na 离子交换树脂, 两部分水经过离子交换反应后混合在一起, 以达到除硬和降碱的目的。

(1) 氢离子交换反应 原水经过强酸性 H 型离子交换树脂时, 发生如下交换反应。

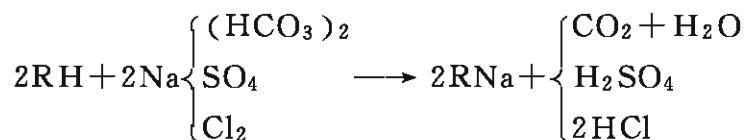
与碳酸盐硬度的交换反应:



与非碳酸盐硬度的交换反应:



与钠盐进行交换反应:



由上列反应可知, 强酸性 H 型树脂可以与水中各种阳离子发生交换反应, 生成等物质的量的  $\text{H}^+$ 。一部分  $\text{H}^+$  与原水碱度成分发生中和反应生成二氧化碳气体, 另一部分  $\text{H}^+$  是以强酸形态存在于水中。所以, H 离子交换器出水呈碱性, 这样就不能直接作为锅炉的给水, 必须与其它方法配合使用。如果与 Na 离子交换法配合使用, 其酸性水即可以中和 Na 离子交换器的碱度成分, 这就是 H-Na 离子交换软化脱碱的原理, 见图 3-37。

(2) 氢离子交换出水水质变化 当含有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  等阳离子的天然水流经氢离子交换器时, 由于强酸树脂对水中离子选择性顺序为  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{H}^+$ , 所以出水中

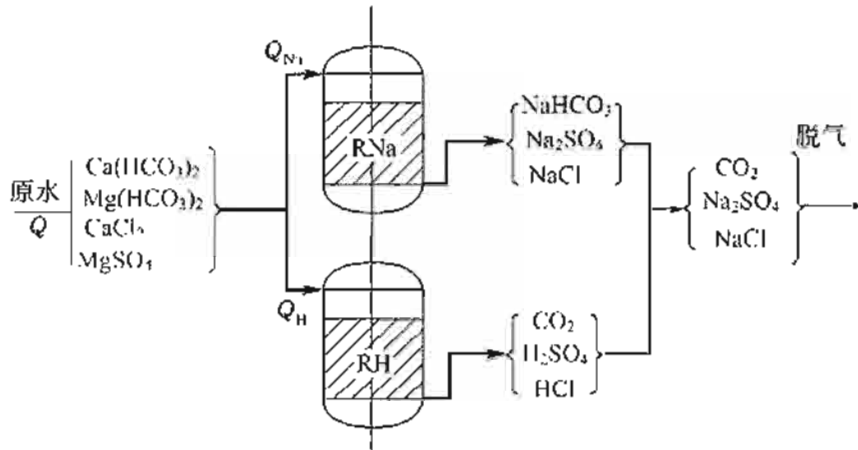


图 3-37 H-Na 并联离子交换软化脱碱过程示意图

离子排代顺序为  $H^+$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$ 。例如原水硬度为  $3\text{mmol/L}$ ，碱度为  $3\text{mmol/L}$ ， $K^+ + Na^+$  含量为  $2\text{mmol/L}$ ，则氢离子交换器出水水质变化如图 3-38 所示。

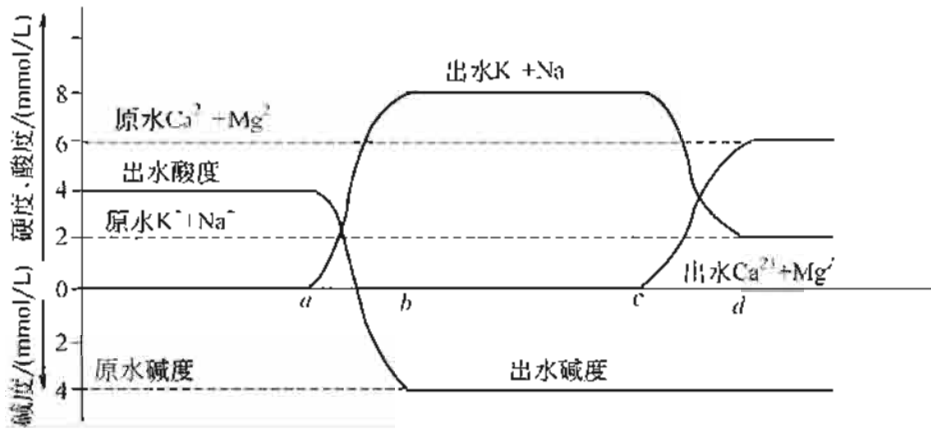


图 3-38 氢离子交换器出水水质曲线

运行开始时，原水中所有阳离子均被树脂上的  $H^+$  所交换，出水酸度保持定值，即水中阳离子总含量与碱度之差，与原水中  $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$  含量相当。从  $a$  点开始  $Na^+$  漏出，其含量迅速上升，与此同时出水酸度开始急剧下降，这是由于有  $Na$  型树脂参加交换反应。当运行至  $b$  点时， $H$  型树脂的交换反应已全部被  $Na$  型树脂交换反应所代替，所以出水已无酸度， $Na^+$  含量达到最高值为原水  $Na^+$  含量的硬度之和，即水中的阳离子全部是  $Na^+$ ，出水碱度等

于原水碱度，此时的交换作用等于钠离子交换器。运行至  $c$  点时，硬度开始穿透，与此同时，出水  $\text{Na}^+$  含量从最高值开始下降，当到达  $d$  点出水硬度接近于原水硬度，出水  $\text{Na}^+$  含量也接近于原水  $\text{Na}^+$  含量，整个树脂层的交换能力几乎完全耗尽。由此可见，在  $\text{H}$  离子交换过程中，根据原水水质与处理要求，对交换器失效点的要求应有所不同，在水的降碱软化系统中， $\text{H}$  离子交换器运行终点应以漏  $\text{Na}^+$  控制，而在软化系统中，也可以考虑以控制漏硬度作为交换器的运行终点。

## 2. $\text{H}-\text{Na}$ 离子交换系统

$\text{H}-\text{Na}$  离子交换系统包括  $\text{H}$  离子交换和  $\text{Na}$  离子交换两个过程。按  $\text{H}$  离子交换设备和  $\text{Na}$  离子交换设备的连接方式，可分为并联和串联两种系统。在串联系统中，又可分为强酸树脂  $\text{H}-\text{Na}$  串联系统和弱酸树脂  $\text{H}-\text{Na}$  串联系统，现分别介绍如下。

(1)  $\text{H}-\text{Na}$  并联离子交换系统  $\text{H}-\text{Na}$  并联离子交换系统如图 3-39 所示。

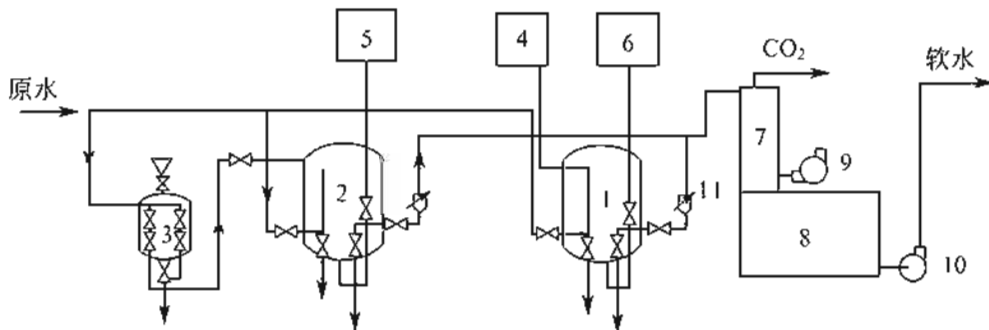


图 3-39  $\text{H}-\text{Na}$  并联离子交换系统

1—氢离子交换器；2—钠离子交换器；3—盐溶解器；4—稀酸溶液箱；5,6—反洗水箱；7—除  $\text{CO}_2$  器；8—中间水箱；9—离心鼓风机；10—中间水泵；11—水流量表

$\text{H}-\text{Na}$  并联离子交换法的运行过程是：原水经分配装置，一部分流经  $\text{Na}$  离子交换器，另一部分流经  $\text{H}$  离子交换器，前者出水碱度不变，后者出水呈酸性，这两股出水经混合器（参看图 3-39）进行中和反应，再进入除二氧化碳器除去二氧化碳，即可作为锅炉的补给水。

$\text{H}-\text{Na}$  并联运行的关键是原水的分配比例，原水的分配与原水水质及其处理要求有关。如  $\text{H}$  离子交换器运行终点是以漏  $\text{Na}^+$  为



控制标准，则整个运行期间出水呈酸性，其酸度等于原水强酸根（ $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 等）的摩尔浓度。考虑到混合后的软化水应保持一定量的残留碱度，原水分配可按下式计算：

$$Q_{\text{H}}([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-]) = Q_{\text{Na}}A - QA_{\text{残}}$$

式中

$Q$ ——处理水总量， $\text{m}^3/\text{h}$ ；

$Q_{\text{H}}$ 、 $Q_{\text{Na}}$ ——进入 H 离子交换器和 Na 离子交换器的水量， $\text{m}^3/\text{h}$ ；

$([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-])$ ——原水中硫酸根和氯根含量之和， $\text{mmol/L}$ ；

$A$ ——原水碱度或碳酸盐硬度， $\text{mmol/L}$ ；

$A_{\text{残}}$ ——混合后软化水的残留碱度， $\text{mmol/L}$ ，一般取  $0.5 \sim 1.0 \text{mmol/L}$ 。

因  $Q_{\text{Na}} = Q - Q_{\text{H}}$  代入上式移项后，得

$$Q_{\text{H}} = - \frac{A - A_{\text{残}}}{A + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-]} Q$$

$$Q_{\text{Na}} = \frac{[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-] + A_{\text{残}}}{A + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-]} Q$$

按此公式，根据不同水质的水量配比可归纳成表 3-21。

表 3-21 不同水质时，H-Na 离子交换系统水量配比表

原水 $[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-]$ / $(\text{mmol/L})$	原水碱度/ $(\text{mmol/L})$					
	A=1	A=2	A=3	A=4	A=5	A=6
	进入 H 离子交换器水量配比/%					
0.3	38		71			
0.5	33	60	62.5	77	81.8	84.6
1.0	25	50	55.5	70	75	78.6
1.5	20	43	50	63.6	69.2	73.3
2.0	16.7	37.5	45.5	58.3	64.3	68.8
2.5	14.3	33	41.6	53.8	60	64.7
3.0	12.5	30	38.5	50	56.3	61.1
3.5	11	27	35.7	46.7	52.9	57.9
4.0	10	25	33.3	43.8	50	55
4.5		23	31.3	41.2	47.4	52.4
5.0		21.4	29.4	38.9	45	50
5.5			27.7	36.3	42.9	47.8
6.0				35	40.9	45.8
6.5				33.3	39.1	44
7.0				31.8	37.5	42.3

H-Na 并联运行，一般是 H 离子交换器控制漏钠为运行终点，Na 离子交换器控制漏硬度为运行终点。如果 H 离子交换器也以漏硬度为运行终点时，则必须增大 H 离子交换器的分配水量，使初期出水经混合后仍呈碱性，当 H 离子交换全部转变成钠离子交换时，其剩余酸才能与混合后的碱度成分发生中和作用，这样不仅给后续设备，如除二氧化碳器、管道、软化水箱、水泵等在防腐方面增加负担，而且要求软化水箱有足够的容积，以保证运行初期的酸性水和运行末期含碱度成分的水完全中和，即使如此，也很难做到混合均匀，难免供应酸性水。所以这种运行方式是不可取的。

(2) H-Na 串联离子交换系统 H-Na 串联离子交换系统如图 3-40 所示。原水一部分 ( $Q_H$ ) 流经氢离子交换器，其出水与另一部分原水 ( $Q-Q_H$ ) 混合，进行中和反应，进入除二氧化碳器脱气，然后流入中间水箱，再由泵打入 Na 离子交换器软化。原水分配比例的计算方法与 H-Na 并联的计算方法相同。

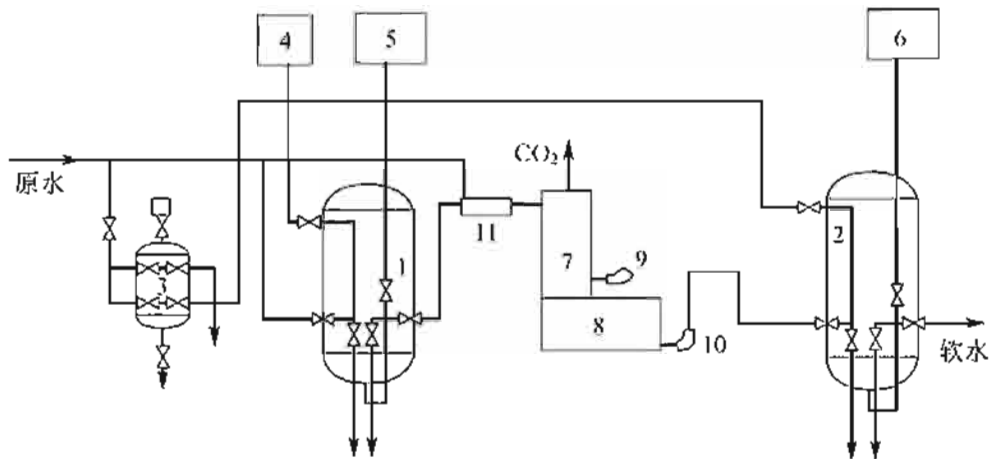


图 3-40 H-Na 串联离子交换系统

- 1—氢离子交换器；2—钠离子交换器；3—盐溶解器；4—稀酸箱；  
5,6—反洗水箱；7—除 CO<sub>2</sub> 器；8—中间水箱；  
9—离心鼓风机；10—中间水泵；11—混合器

H-Na 串联离子交换系统适用于硬度较高的水质，因为原水与 H 离子交换出水混合后，总硬度相应的降低了（见表 3-22），这种水再经过 Na 离子交换，即可减轻离子交换器的负担，并且又能提

高软化水的质量。该系统一般都在 Na 离子交换器前面设置除二氧化碳器，这是因为，如果让含有大量碳酸的水经过 Na 离子交换器，会因下述反应使水中又出现碱度成分：

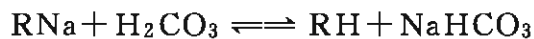


表 3-22 H-Na 串联混合水硬度系统

原水硬度/(mmol/L)	5									
进入 H 交换器水量配比/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
未经 H 交换器水量配比/%	90	80	70	60	50	40	30	20	10	
混合水硬度/(mmol/L)	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	
原水硬度/(mmol/L)	6									
进入 H 交换器水量配比/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
未经 H 交换器水量配比/%	90	80	70	60	50	40	30	20	10	
混合水硬度/(mmol/L)	5.4	4.8	4.2	3.6	3.0	2.4	1.8	1.2	0.6	
原水硬度/(mmol/L)	7									
进入 H 交换器水量配比/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
未经 H 交换器水量配比/%	90	80	70	60	50	40	30	20	10	
混合水硬度/(mmol/L)	6.3	5.6	4.9	4.2	3.5	2.8	2.1	1.4	0.7	
原水硬度/(mmol/L)	8									
进入 H 交换器水量配比/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
未经 H 交换器水量配比/%	90	80	70	60	50	40	30	20	10	
混合水硬度/(mmol/L)	7.2	6.4	5.6	4.8	4.0	3.2	2.4	1.6	0.8	

综上所述可知，H-Na 并联系统与 H-Na 串联系统的不同点在于，前者只有一部分原水经过 Na 离子交换处理，而后者则是全部原水都经过 Na 离子交换处理。因此就系统而言，并联系统比较紧凑，Na 离子交换器较小，能够节省一些投资，但从运行来看，串联系统比较安全可靠，更适合处理高硬度的水。

经过 H-Na 离子交换器处理，蒸发残渣可降低 1/3 左右，能满足低压锅炉对水质要求。为防止酸性软化水腐蚀锅炉及管道，应特别注意保持出水有一定的剩余碱度。此外，根据原水硬度和对水质要求，必要时也可设置第二级 Na 离子交换器。

### 3. 弱酸树脂 H-Na 串联离子交换系统

(1) 弱酸树脂 H-Na 串联离子交换原理 该系统的离子交换过程如图 3-41 所示。

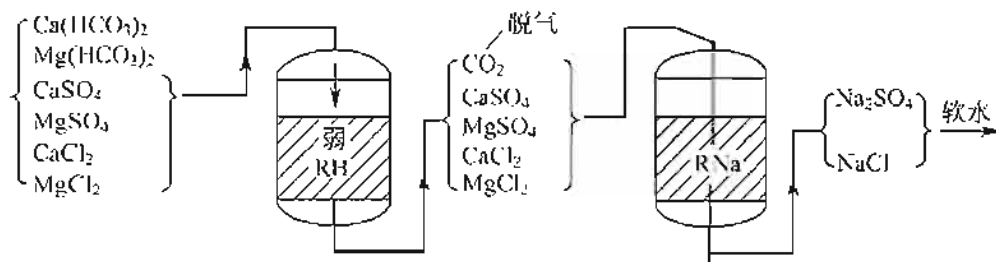
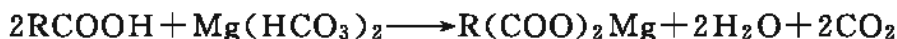
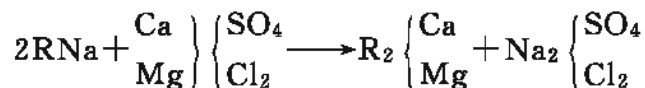


图 3-41 弱酸树脂 H-Na 串联离子交换软化脱碱过程示意图

原水首先经过弱酸性 H 型离子交换树脂进行交换反应，除掉水中的碳酸盐硬度，并将碱度转变成二氧化碳。其反应如下：



出水经除二氧化碳器脱气后，再经由强酸性 Na 型离子交换树脂进行交换，除掉水中的非碳酸硬度



在运行过程中，弱酸性 H 离子交换器出水需控制一定的碱度漏过量，使每周期出水的平均残留碱度保持在 0.5mmol/L 左右，以保持炉水碱度在规定范围内。

(2) 弱酸树脂 H-Na 串联离子交换系统 弱酸树脂 H-Na 串联离子交换系统如图 3-42 所示。

该系统与 H-Na 离子交换系统相比较，省掉了原水分配装置和原水与软化水混合装置，所以设备简单，布置紧凑。在运行时，由于没有强酸性物质生成，可不必担心送出酸性软化水，所以操作简便，运行安全可靠。这是一种较为理想的降碱软化系统，但美中不足的是目前弱酸性树脂的价格较高，致使初投资增大。

### 4. 部分 H 离子交换系统

(1) 部分 H 离子交换原理 部分 H 离子交换法适于碱度大

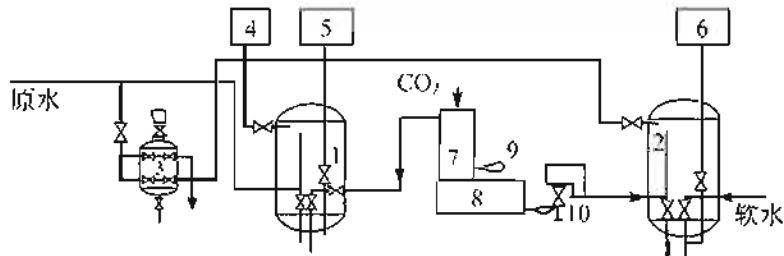


图 3-42 弱酸树脂 H-Na 串联离子交换系统

1—弱酸氢离子交换器；2—钠离子交换器；3—盐溶解器；4—稀硫酸箱；5,6—反洗水箱；7—除 CO<sub>2</sub> 器；8—中间水箱；9—离心鼓风机；10—中间水泵

于硬度的所谓负硬水，这种方法也是属于锅外和锅内相结合的水处理方法。其处理过程是：将一部分原水经过 H 离子交换器，使水中的阳离子发生离子交换反应，除去硬度、碱度和钠离子，生成相应的二氧化碳和酸度，再与另一部分原水相混合，除掉水中多余的碱度，然后经除二氧化碳器脱气，即可作为锅炉给水。为了保持给水中有一定的残留碱度，在运行中应控制给水的碱度略大于硬度，因此，混合后给水中的硬度全部是碳酸盐硬度，进入锅内便发生分解而自行软化，以达到防垢和降低锅炉排污率的目的。

(2) 部分 H 离子交换系统 部分 H 离子交换系统如图 3-43 所示。

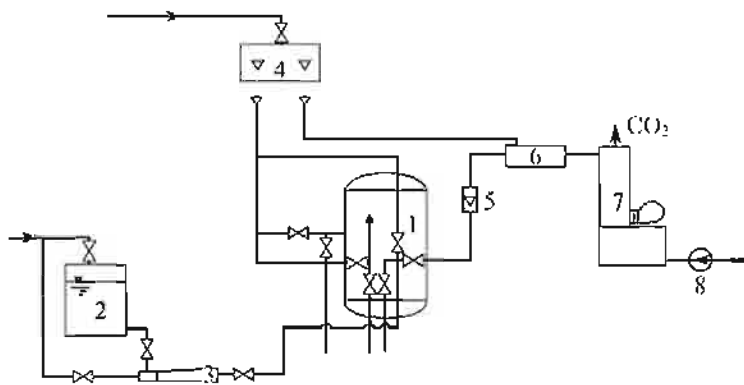


图 3-43 部分 H 离子交换系统

1—H 离子交换器；2—酸计量箱；3—喷射泵；4—原水分配器；  
5—转子流量计；6—混合器；7—除二氧化碳器；8—给水泵

由图 3-43 可知，该系统与 Na 离子交换系统相似，只是增加除二氧化碳设备。

对于低压小容量锅炉，采用部分氢离子交换法时，交换器可用有机玻璃或硬质塑料制造，这样防腐问题容易解决。

(3) 部分 H 离子交换原水配比 当 H 离子交换器控制出水漏  $\text{Na}^+$  为运行终点时，则可列出如下碱量平衡关系式（蒸汽带走的碱量可忽略）：

$$XC = (1 - X)(A - H) - PA_0 \quad ①$$

H 离子交换 软化硬度后所 排污带走  
器出水酸度 剩余的碱量 的碱量

式中 X——进入氢离子交换器的水量占总水量的百分率；

C——氢离子交换器出水酸度（即原水中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  等含量），mmol/L；

A——原水碱度，mmol/L；

H——原水硬度，mmol/L；

P——锅炉排污率；

$A_0$ ——炉水碱度，mmol/L。

整理上式后得：

$$X = -\frac{A - H - PA_0}{A - H + C} \times 100\% \quad ②$$

混合后补给水的硬度  $H_{\text{给}}$  可由下式计算：

$$H_{\text{给}} = (1 - X)H \quad ③$$

经过计算，如在给定排污率条件下，处理后给水硬度不大于 3.5mmol/L，即可采用部分 H 离子交换法。

(4) 部分 H 离子交换原水配比的调整 在补给水率为 100% 的情况下，根据计算，混合后水的硬度大于 3.5mmol/L，因不符合给水要求，则需要调整进入 H 离子交换器的水量配比和锅炉的排污率。计算方法：首先根据给水硬度小于 3.5mmol/L 的要求，求出应进入 H 离子交换器的水量配比，由③式整理得出：

$$X = \frac{H - H_{\text{给}}}{H} \times 100\% \quad ④$$

然后，将 X 代入①式求出排污率：

$$P = \frac{A - H - X(A - H + C)}{A_0} \times 100\%$$

(5) 部分 H 离子交换适用范围及优缺点 适用于工作压力小

于 1.3MPa (13kgf/cm<sup>2</sup>) 的低压锅炉。

适用水质为  $\frac{\text{硬度}}{\text{碱度}} < 1$  并且  $\frac{\text{碱度}}{\text{酸度}} > 1$ 。

补给水率为 100% 时，混合后水的硬度  $< 3.5\text{mmol/L}$ 。

部分 H 离子交换最大的优点就是节省再生用酸量，而且运行比较安全，这是因为用这种方法处理后的给水碱度仍然较高，一般不会因控制不好而使水呈酸性，引起腐蚀。此法的缺点是，处理后给水的硬度较高，不适宜于压力较高的锅炉应用；离子交换系统和再生系统需注意防腐蚀。

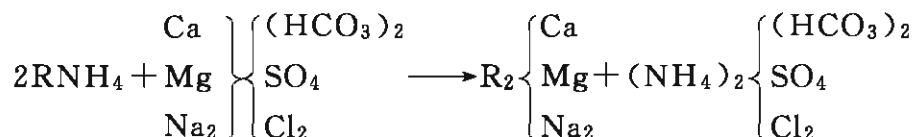
### 三、NH<sub>4</sub>-Na 离子交换系统

#### 1. NH<sub>4</sub>-Na 离子交换法原理

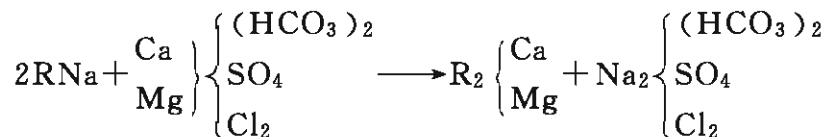
##### (1) NH<sub>4</sub>-Na 离子交换反应

NH<sub>4</sub>-Na 离子交换法是使一部分原水经过 NH<sub>4</sub> 型树脂，另一部分原水经过 Na 型树脂发生交换反应，其反应式可综合表示如下。

NH<sub>4</sub> 型树脂的交换反应

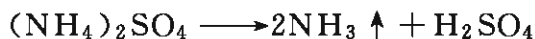


Na 型树脂的交换反应



由上述反应可以看出，经 NH<sub>4</sub>-Na 离子交换后，出水是由铵盐和钠盐两部分组成的，这种水送入锅炉后，在高温下，又发生如下化学反应。

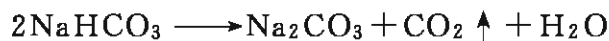
##### ① NH<sub>4</sub> 盐的分解反应



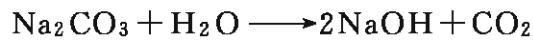
上式说明，锅内重碳酸钠分解为氨气和二氧化碳气，被蒸汽带

走，这部分碱度基本上被除掉。氯化铵和硫酸铵除分解成氨气随蒸汽跑掉以外，还生成盐酸和硫酸存在于锅水中，在运行中利用这部分酸来中和锅水中过高的碱度成分。

②  $\text{NaHCO}_3$  的化学反应  $\text{NaHCO}_3$  在锅内可发生以下两种反应。一是分解反应：

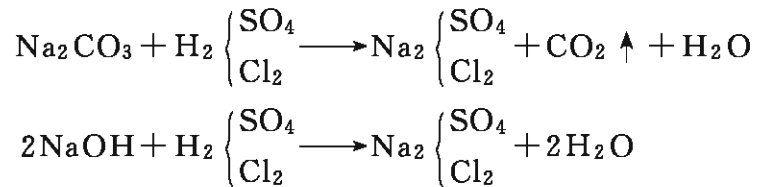


二是部分  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的水解反应：



反应结果生成  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaOH}$  两种碱性物质。

③ 酸碱中和反应 由铵盐分解反应生成的  $\text{HCl}$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$  和重碳酸钠反应生成的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaOH}$  在锅水中又进一步发生中和反应：



以上就是  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法软化和除碱原理，或者说这是锅外除硬、锅内降碱的方法。这种方法如果运用得当，完全可以除去给水硬度和降低锅水碱度，以达到防垢和降低锅炉排污率的目的。

(2)  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换特点  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换与  $\text{H-Na}$  离子交换相比较，有以下的特点。

$\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换的除碱作用是在锅内发挥出来的，而  $\text{H-Na}$  离子交换的除碱作用是在锅外离子交换反应过程中完成的。所以， $\text{H-Na}$  离子交换法较  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换便于直观控制。

由于  $\text{NH}_4$  离子交换水只有在受热后才呈现酸性，而且不用酸再生，与  $\text{H}$  离子交换法相比可省去麻烦的酸系统，而交换器和管道也无需采用防腐措施，这就更容易为低压小容量锅炉所采用。

经  $\text{NH}_4$  离子交换后的水不会产生游离二氧化碳，只有进入锅炉后才分解出二氧化碳，所以，水处理系统不必设除二氧化碳器，因而简化了系统和设备。

在锅炉内产生的氨气随同蒸汽一起送到用汽单位和车间，除制



药和食品工业外，对其它单位产品质量无影响。

在蒸汽中有氨气和氧气同时存在时，对铜件和铝件有腐蚀作用，因此在生产中应引起注意。

## 2. $\text{NH}_4\text{-Na}$ 离子交换系统

$\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统有综合、并联和串联三种。串联在实际操作中有困难，不易控制，因而一般多采用综合和并联两种。

(1) 综合  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统 综合  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法，是在同一交换器内既有  $\text{NH}_4$  型树脂又有  $\text{Na}$  型树脂，对进入原水的硬度成分  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  同时进行交换反应，以达到锅外软水和锅内降碱的目的。其系统如图 3-44 所示。

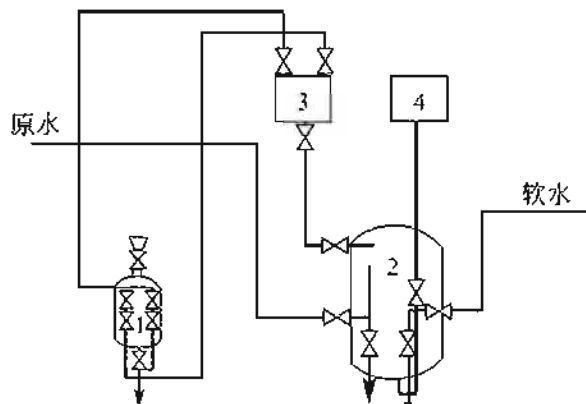


图 3-44 综合  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统

1—硫酸铵和食盐溶解器；2— $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换器；  
3—硫酸铵和食盐混合稀溶液箱；4—反洗水箱

该系统与单极  $\text{Na}$  离子交换器及系统完全相同，只是再生液由硫酸铵（或氯化铵）和氯化钠两种药剂组成，再生后使交换期内的离子交换树脂按一定比例转变成  $\text{NH}_4$  型和  $\text{Na}$  型树脂。对已设置单极  $\text{Na}$  离子交换器系统的单位如需要改成综合  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换工艺时，只要改变再生液成分即可达到。

(2) 并联  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统 并联  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法，是将两台并联离子交换器中的树脂，分别转变成  $\text{NH}_4$  型和  $\text{Na}$  型，原水按比例经过两台交换器，最后将出水混合送至给水箱。其系统如图 3-45 所示。

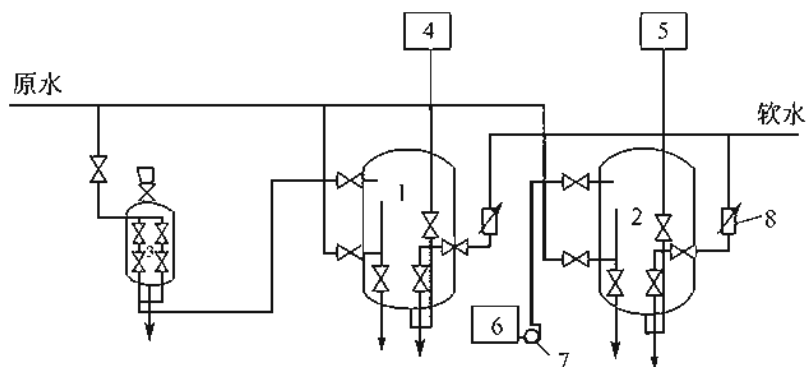


图 3-45 并联  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统

1—钠离子交换器；2—铵离子交换器；3—盐溶液器；4,5—反洗水箱；6—稀铵溶液箱；7—铵液泵；8—水流量表

这种系统需根据原水水质情况，调节进入 Na 离子交换器和  $\text{NH}_4$  离子交换器水量的比例，以此来控制锅水的碱度。硫酸铵和食盐溶液的配制以及废液回收等，均需在各自的设备内进行。因此，该系统比较复杂，设备较多，操作也比综合法麻烦。

### 3. $\text{NH}_4\text{-Na}$ 离子交换法原水或再生液配比计算

从  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换反应过程可知， $\text{NH}_4$  离子交换后的水与 Na 离子交换后的水要保持适当的比例，如果  $\text{NH}_4$  离子交换后水所占比例过小，锅水碱度降不下来，如果  $\text{NH}_4$  离子交换水所占比例过大，锅水会呈碱性，容易造成锅炉腐蚀。因此，保持两者适当比例是很重要的。并联  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法是通过原水的配比来实现的；而综合  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法则是通过再生液的配比来实现的。

(1) 并联  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法原水配比的计算 我们已经知道， $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换水，只有在锅炉中才会出现碱度降低，而在软化水中不能直接测定出来，通常是根据锅水的碱度降低值来推算软化水的残留碱度，所以把它称为计算残留碱度。为了保持锅水不呈碱性， $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换后的软水就需要保持一定的计算残留碱度。这样，在考虑两者出水的比例关系时，应使经  $\text{NH}_4$  离子交换在锅内分解所产生的酸中和了经 Na 离子交换所存留的碱以后，所剩的碱度应等于计算残留碱度。因此可列出如下碱量平衡式：

$$(1-X)A - XC = A_{\text{并}}$$

经 Na 离子    经 NH<sub>4</sub> 离子    计算  
 交换保留    交换分解    残留  
 的碱量       成的酸量    碱度

式中 X——进入铵离子交换器的水量占总水量的百分率；

A——原水碱度，mmol/L；

C——原水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup> 等含量，mmol/L；

A<sub>并</sub>——计算残留碱度，mmol/L，此值对综合 NH<sub>4</sub>-Na 离子交换，一般取 0.5~1.0mmol/L，对并联 NH<sub>4</sub>-Na 离子交换，一般取 0.3~0.5mmol/L。

整理上式得：

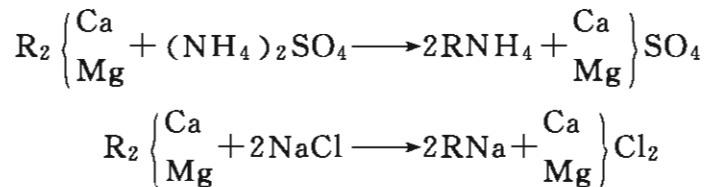
$$X = \frac{A - A_{\text{并}}}{A + C} \times 100\%$$

当原水 H>A 而无负硬度时，上式可以写成如下公式：

$$X = \frac{H_{\text{硬}} - A_{\text{并}}}{H_{\text{硬}} + C} \times 100\%$$

(2) 综合 NH<sub>4</sub>-Na 离子交换法再生液配比的计算 综合 NH<sub>4</sub>-Na 离子交换法，硫酸铵和氯化钠混合再生液配比的计算方法，在一些资料中已有介绍，但普遍存在以下两个问题：①计算过程麻烦，误差较大；②计算对象是以磺化煤为交换剂，但目前普遍采用离子交换树脂，因此计算偏差较大。建议可采用如下的计算方法。

① 理论根据 综合 NH<sub>4</sub>-Na 离子交换器失效后，树脂绝大部分都转变成 Ca 型和 Mg 型，用硫酸铵和食盐的混合液再生时，发生如下交换反应：



值得指出的是，用 NH<sub>4</sub> 盐和 Na 盐同时再生离子交换树脂时，并非一部分树脂转变成 NH<sub>4</sub> 型，另一部分转变成 Na 型，因为每一粒树脂都带有若干交换基团，这样，在每一粒树脂中既有 NH<sub>4</sub>

成分又有 Na 成分，所以，无法区分哪一部分是  $\text{NH}_4$  型树脂哪一部分是 Na 型树脂。

综合  $\text{NH}_4$ -Na 离子交换法的再生过程，是溶液中  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Na}^+$  和树脂中 Ca、Mg 离子进行的交换反应。所以，影响树脂再生比例的有以下两个因素：再生液中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{Na}^+$  的浓度；树脂对  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{Na}^+$  的选择性系数。

已知有关的离子选择性系数为：

$$K_{\text{H}}^{\text{Na}} = 2.0, K_{\text{H}}^{\text{NH}_4} = 3.0$$

$$K_{\text{H}}^{\text{Mg}} = 26, K_{\text{H}}^{\text{Ca}} = 42$$

从上列选择性系数的相对值可以说明， $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$  与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  相比，选择性系数值的级差相差悬殊，与此相比， $\text{Na}^+$  和  $\text{NH}_4^+$  的选择性系数值的级差已不明显。可以认为树脂对  $\text{Na}^+$  和  $\text{NH}_4^+$  的吸着能力几乎相等，因此，可以说只有  $\text{Na}^+$  和  $\text{NH}_4^+$  的浓度是影响树脂再生比例的重要因素。

② 混合再生液配比的计算 在并联  $\text{NH}_4$ -Na 离子交换系统中，X 是指经  $\text{NH}_4$  型离子交换水占总水量的百分率；在综合  $\text{NH}_4$ -Na 离子交换法中，X 是表明  $\text{NH}_4$  树脂占整个树脂的百分率，称为铵离子交换度，用  $a_{\text{NH}_4}$  表示，即：

$$a_{\text{NH}_4} = \frac{A - A_{\text{H}}}{A + C} \times 100\%$$

由此可以求出 Na 离子的交换度  $a_{\text{Na}}$ ：

$$a_{\text{Na}} = 1 - a_{\text{NH}_4}$$

交换度实质上就是某一型树脂的工作交换容量，占交换器内整个树脂工作交换容量的百分率。例如， $\text{NH}_4$  离子交换度  $a_{\text{NH}_4} = 60\%$  时，则说明树脂的工作交换容量有 60% 属  $\text{NH}_4$  树脂交换反应，40% 属 Na 树脂交换反应。

树脂工作交换容量  $E_1$  的单位是  $\text{mol}/\text{m}^3$  树脂，已知  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  的摩尔质量为 66，NaCl 的摩尔质量为 58.5，在某一交换度下，可求出理论耗盐量。

$$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \text{ 理论耗量} = \frac{E_{\text{IaNH}_4} \times 66}{1000}$$

$$\text{NaCl 理论耗量} = \frac{E_{\text{IaNa}} \times 58.5}{1000}$$

如果两种盐类再生比耗都取 2h, 则可求出它们的实际耗量 (即再生水平, kg/m<sup>3</sup> 树脂)。

$$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \text{ 实际耗量} = \frac{a \times 66 \times E_{\text{IaNH}_4}}{1000}$$

$$\text{NaCl 实际耗量} = \frac{2 \times 58.5 \times E_{\text{IaNa}}}{1000}$$

最后, 根据交换器内树脂的体积  $V$  即可计算出每次再生时硫酸铵和食盐的用量  $G$ (kg):

$$G_{\text{NH}_4} = \frac{132VE_{\text{IaNH}_4}}{1000}$$

$$G_{\text{Na}} = \frac{117VE_{\text{IaNa}}}{1000}$$

同理, 如果用氯化铵作再生剂时:

$$G_{\text{NH}_4\text{Cl}} = \frac{107VE_{\text{IaNH}_4}}{1000}$$

式中  $G_{\text{NH}_4}$ 、 $G_{\text{Na}}$ 、 $G_{\text{NH}_4\text{Cl}}$ ——再生一次  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换器时, 硫酸铵、氯化钠、氯化铵的用量, kg。

#### 4. $\text{NH}_4\text{-Na}$ 离子交换法再生液的配制及再生工艺

(1) 再生液的浓度 铵盐再生剂, 一般多采用硫酸铵, 这是因为硫酸铵货源充足, 价格便宜, 但再生时, 由于大量的  $\text{SO}_4^{2-}$  与再生出来的  $\text{Ca}^{2+}$  容易在树脂层中形成  $\text{CaSO}_4$  沉淀, 妨碍交换器的工作, 因此硫酸铵溶液应配制较低的浓度。

对并联  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统, 用硫酸铵作再生剂时, 其含量不应超过 3% (一般为 2%~3%), 再生流速不低于 10m/h。用氯化铵作再生剂时, 其含量一般采用 5%~10%, 因再生产物为溶解度较大的氯化钙, 故对再生流速无特殊要求。对食盐再生剂的要求, 相同于单极 Na 离子再生工艺。

对综合  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统，混合再生溶液中，硫酸铵的含量也不应超过 3%（一般为 2.5%~3.0%），此时混合溶液中食盐的含量为  $\frac{G_{\text{Na}}}{G_{\text{NH}_4}} \times (2.5\% \sim 3.0\%)$ 。为了保证较准确的再生液含量，宜先将再生液配好后，再送入交换器。

(2) 配制铵盐溶液注意事项 硫酸铵不能和食盐一起在盐溶解器中配制，因为盐溶解器开始出来的溶液是先浓后稀，不能保证硫酸铵溶液开始含量小于 3%。

硫酸铵和氯化铵都是强酸、弱碱形成的盐，它们的溶液呈微酸性，所以铵盐溶液箱应采取防腐措施（如涂环氧树脂漆），或在使用前略加碱化，每千克硫酸铵可添加 3g 氢氧化钠，使溶液的 pH 值大于 7。

(3)  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法的再生工艺  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统的再生工艺与 Na 离子交换基本相同，其中包括进再生液、置换和正洗。关于正洗终点，对于综合  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换器，仍可使用氯根和硬度来控制；对于并联系统  $\text{NH}_4$  离子交换器，可按清洗水量和定性测定清洗排水的硫酸根来控制。定性测定硫酸根的方法：用锥形瓶接取一定量的排水水样，滴加用盐酸酸化的 5% 氯化钡溶液，当清水排水的浑浊度与原水相近时，即正洗终点。也可用测定正洗排水的含氮量来确定正洗终点。

### 5. $\text{NH}_4\text{-Na}$ 离子交换系统运行控制

$\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统在运行中控制出水水质的指标通常有硬度、残留碱度和含氮量。硬度测定方法我们已作了介绍，现将残留碱度和含氮量测定方法介绍如下。

(1) 残留碱度的测定 取综合系统出水或并联系统混合水 100mL，将水样煮沸 30min（浓缩 2~3 倍）冷却，用蒸馏水稀释至原体积，加入 2 滴甲基红-亚甲基蓝指示剂，用 0.1mol/L 硫酸标准溶液滴定至终点，即可求得水的残留碱度，此值应符合要求，否则应作相应调整。

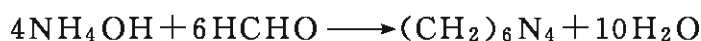
(2) 含氮量的测定 综合系统出水或并联系统混合水的含氮量可按下式估算：

$$[\text{NH}_3] = \sum K a_{\text{NH}_4} \times 17$$

式中  $[\text{NH}_3]$ ——估算出水含氨量, mg/L;  
 $\sum K$ ——原水中总阳子含量, mmol/L;  
 $a_{\text{NH}_4}$ ——铵离子交换度;  
 17—— $\text{NH}_3$  的摩尔质量。

由于  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换时, 软化水中的含氨量较高, 用比色法测定需多倍稀释, 因此操作比较麻烦, 误差也比较大。现介绍一个高含氨量的试验方法。

① 原理 水中的铵盐与滴加的氢氧化钠反应, 生成氢氧化铵  $\text{NH}_4\text{OH}$ , 再将  $\text{NH}_4\text{OH}$  与甲醛溶液反应生成六亚甲基四胺 (乌洛托平), 至水中全部铵盐作用结束时, 一滴过剩的  $\text{NaOH}$  则使溶液的 pH 值升高, 酚酞呈现红色, 即达到终点, 根据  $\text{NaOH}$  的耗量, 计算水中含氨量, 其化学反应式如下:



② 试剂 甲醛溶液 (36%); 0.1mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液; 0.1mol/L 或 0.02mol/L 的  $\text{NaOH}$  溶液; 酚酞指示剂。

③ 试验步骤 量取水样 100mL, 置于 250mL 锥形瓶中, 加入 2~3 滴酚酞指示剂, 如呈现红色, 应使用 0.1mol/L 的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中和至红色消失后, 再用 0.1mol/L 或 0.02mol/L 的  $\text{NaOH}$  滴定至微红色为止。

加入 2~5mL 甲醛溶液 (依水中含氨量而定, 含氨量愈大, 加入甲醛溶液愈多), 再用 0.1mol/L 或 0.02mol/L 的  $\text{NaOH}$  滴定至微红色, 记录加入甲醛溶液后所消耗的  $\text{NaOH}$  溶液体积 (mL)。

$$[\text{NH}_3] = \frac{NV \times 17 \times 1000}{\text{水样体积}}$$

式中  $N$ —— $\text{NaOH}$  标准溶液的浓度, mol/L;  
 $V$ ——消耗  $\text{NaOH}$  溶液量, mL。

④ 注意事项 在滴定时, 应注意空气中二氧化碳的影响。中和时应准确掌握终点。此法适用于水样中含氨量大于 5mg/L 的测定, 如水样中含氨量小于 5mg/L 时, 应使用纳氏试剂比色

法测定。

### 6. $\text{NH}_4\text{-Na}$ 离子交换法适用范围

(1)  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统选择 在  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法中, 采用何种系统 (综合或并联) 与原水水质有关, 一般可按表 3-23 进行选择。

表 3-23  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统选择

序号	原水水质	综合法	并联法
1	$\text{NH}_4$ 离子交换度 $a_{\text{NH}_4}/\%$	40~90	<40 或 85~90
2	$\text{Na}^+$ 含量占阳离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ ) 总量的百分率/ $\%$	<25	>25
3	$\text{Na}^+$ 含量占总硬度的百分率/ $\%$	30~35	30~35
4	当水质要求允许软化水的残留碱度 $> 0.5\text{mmol/L}$ 时, $H_{\text{残}}/H/\%$	>80	

对于综合  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法, 如果原水中钠离子含量太高 ( $[\text{Na}^+]/\Sigma K > 25\%$  时), 由于钠离子的干扰作用, 会降低交换剂的交换容量, 并使出水中  $\text{NH}_4^+$  浓度不稳定, 出水水质较难控制。当要求  $\text{NH}_4^+$  交换度大于 85% 时, 会因水质、再生剂用量及再生溶液浓度发生波动, 引起出水加热后呈酸性反应; 当  $\text{NH}_4^+$  交换度小于 40% 时, 会产生每周期出水  $\text{NH}_4^+$  浓度不均匀。因此在这种水质条件下, 只好采用并联  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法。

另外,  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换法, 一般适用于工作压力小于 1.3MPa (13kgf/cm<sup>2</sup>) 的小型锅炉。

(2) 综合  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换适用水质范围 为了使用方便起见, 根据计算结果, 将综合  $\text{NH}_4\text{-Na}$  离子交换系统实用的水质范围列于表 3-24 中。

## 四、 $\text{Cl-Na}$ 离子交换系统

### 1. $\text{Cl-Na}$ 离子交换法原理

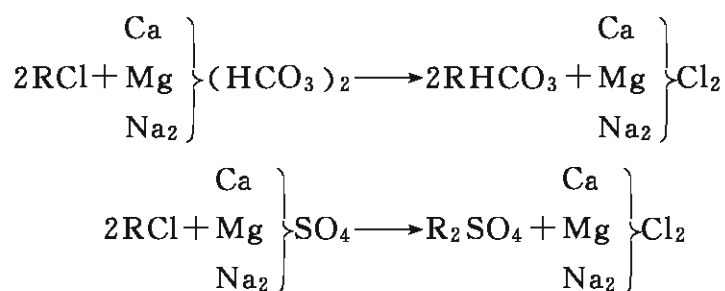
$\text{Cl-Na}$  离子交换法, 是将原水先后经过强酸性 Na 型树脂和强碱性 Cl 型树脂, 使水得到软化和脱碱。如果原水首先经过 Cl 型树脂, 然后经过 Na 型树脂时, 则发生如下离子交换反应。



表 3-24 综合 NH<sub>4</sub>-Na 离子交换系统适用水质范围

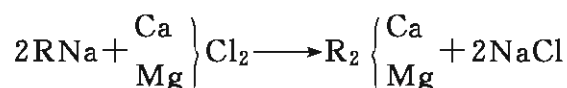
原水[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]+[Cl <sup>-</sup> ] (mmol/L)	原水碱度/(mmol/L)						
	2	2.5	3	4	5	6	7
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 交换度(a <sub>NH<sub>4</sub></sub> )						
0	50	60	67	75	80	83	86
0.2	45						
0.5	40	50	57	67	73	77	80
0.8	36						
1.0	33	43	50	60	67	71	75
1.5		38	44	55	62	67	71
2.0			40	50	57	63	67
2.5			36	46	53	59	63
3.0				43	50	56	60
3.5				40	47	53	57
4.0				38	44	50	55
4.5					42	48	52
5.0					40	45	50
5.5						43	48
6.0						42	46
6.5							44
7.0							43

(1) Cl 型树脂交换反应 Cl 型树脂可以与水中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等阳离子发生如下交换反应：



由上述反应可知，原水经过 Cl 型离子交换后，水中的阴离子几乎都转变成 Cl<sup>-</sup>，因此也就除掉了碱度。

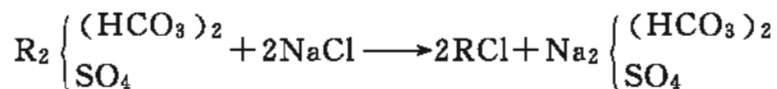
(2) Na 型树脂交换反应 经 Cl 型树脂交换后，水中的硬度成分都是氯化物，与 Na 型树脂发生如下交换反应：



因此使水得到软化。

由上述反应原理可以看出，Cl-Na 离子交换法与前面介绍的 H-Na 法和 NH<sub>4</sub>-Na 法的根本区别是，在脱碱原理上不同。Cl-Na 法是通过离子交换反应直接达到脱碱的目的；H-Na 法和 NH<sub>4</sub>-Na 法是经离子交换后，通过酸、碱中和反应（H-Na 法是在锅外进行酸、碱中和，NH<sub>4</sub>-Na 法是在锅内进行酸、碱中和）而达到脱碱的目的。

(3) Cl-Na 离子交换树脂的再生 Cl 型树脂和 Na 型树脂运行失效后，所用的再生剂都是食盐溶液。Na 型树脂的再生反应已作了介绍，失效的 Cl 型树脂再生时，离子交换反应如下：



由于 Cl-Na 离子交换法使用相同的再生剂，因而简化了再生设备及系统。

## 2. Cl-Na 离子交换系统

Cl-Na 离子交换系统都是以串联方式运行，所以不存在原水分配比例问题。在实际应用中，该法有双床式和双层床式两种系统。

(1) 双床式离子交换系统 Cl-Na 双床式离子交换系统是由阳离子交换器和阴离子交换器互相串联所组成的系统。根据设备排列次序的不同，又分为如图 3-46 所示的两种运行方式。

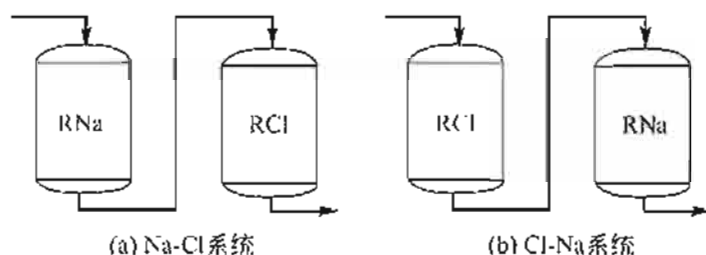


图 3-46 离子交换系统

这种系统与二级钠离子交换系统基本相同，只是交换期内装填不同类型的树脂而已。实践证明，Cl-Na 交换器的布置次序对水处理的效果影响不大，但因阳树脂的抗污染能力较强，通常布置在前边。

## (2) 双层床式离子交换系统

① 双层床的结构及系统 Cl-Na 双层床式离子交换法，是将强酸性阴树脂和强酸性阳树脂装填在同一台交换器中，由于阴树脂和阳树脂的湿真密度不同，在交换器内，阴树脂集中在上层，阳树脂集中在下层。

双层床交换器的结构与逆流再生交换器的结构相似，只是中间排水装置设置在阴、阳树脂的分界面部位，另外再生剂分别在上、下两个方向进入交换器内。其设备结构的系统如图 3-47 所示。

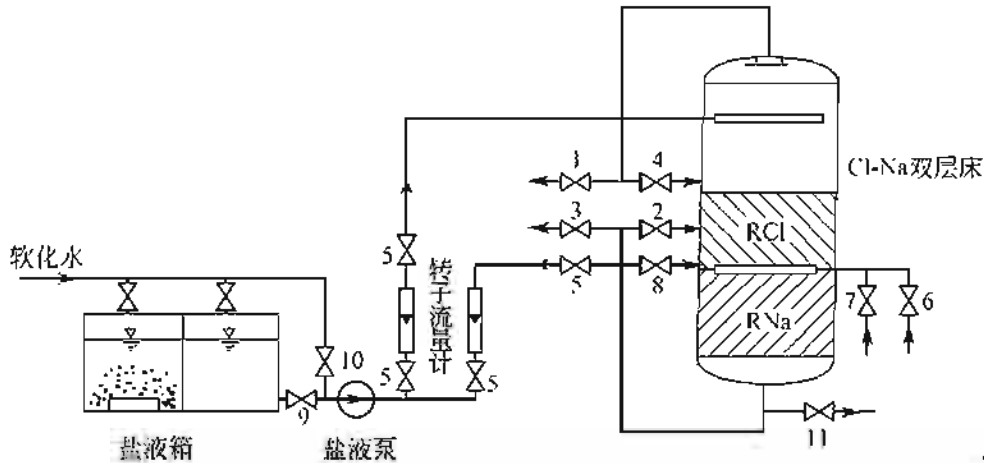


图 3-47 Cl-Na 双层床离子交换系统

- 1—运行进水；2—运行出水；3—定期反洗进水；4—定期反洗，阴树脂反洗排水；  
5—再生液进水；6—阴树脂反洗进水；7—再生废液排出；8—正洗排水；  
9—再生液出口；10—进置换水；11—疏水、取样

该系统结构比较简单，操作方便，占地面积小，适合于低压锅炉给水的软化和降碱处理。

② 双层床的再生 Cl-Na 双层床再生时，再生液从交换器的顶部和底部同时进入体内，再生废液由中间排水装置排出。为控制两个方向再生液的流量，最好在各自的管道上装设一台转子流量计。这种再生方式的特点是，阴树脂属于顺流再生，阳树脂属于逆流再生，这就是利用提高阳树脂软化水的能力，并且不会发生树脂乱层问题。

再生时，由于上层阴树脂排放出大量的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$ ，而下层阳树脂排放出大量的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ，两股再生废液在中间排水装置处相遇时，容易生成  $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{CaCO}_3$  和  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  等化合物的沉淀，所以排放废液的流速不能太慢，以免沉积物堵留在管道上，当发现中间排水装置出水不通畅时，向该装置中通入少量的盐酸，即可消除。

③ 双层床的运行 Cl-Na 双层床的运行过程是原水从上部进入交换器，通过阴树脂层、阳树脂层的排水装置，由底部流出。交换器运行终点由出水的硬度和碱度两项指标来控制。每周期进行小反洗，小反洗水从中间排水装置进入，只反洗阴树脂层。定期进行大反洗。

④ 双层床的树脂体积比 双层床中阴树脂的体积由原水的碱度和阴树脂的工作交换容量来确定，其计算公式如下：

$$V_{\text{阴}} = -\frac{(A - A_{\text{残}})}{E_{\text{阴}}} T_{\text{运}} Q$$

式中  $V_{\text{阴}}$ ——强碱性阴树脂的体积， $\text{m}^3$ ；

$A$ ——原水碱度， $\text{mmol/L}$ ；

$A_{\text{残}}$ ——软化水中平均残留碱度，一般取  $0.5 \sim 1.0 \text{mmol/L}$ ；

$E_{\text{阴}}$ ——强碱性阴树脂的工作交换容量，一般取  $200 \sim 300 \text{mol/m}^3$  树脂；

$T_{\text{运}}$ ——交换器的运行周期， $\text{h}$ ；

$Q$ ——交换器的出水量， $\text{m}^3/\text{h}$ 。

阳树脂的体积是由原水的硬度和阳树脂的工作交换容量来确定，其计算公式如下：

$$V_{\text{阳}} = \frac{(H - H_{\text{残}})}{E_{\text{阳}}} T_{\text{运}} Q$$

式中  $V_{\text{阳}}$ ——强碱性阴树脂的体积， $\text{m}^3$ ；

$H$ ——原水碱度， $\text{mmol/L}$ ；

$H_{\text{残}}$ ——软化水中残留硬度， $\text{mmol/L}$ ；

$E_{\text{阳}}$ ——强碱性阴树脂的工作交换容量，一般取  $600 \sim 800 \text{mol/m}^3$  树脂；

其它符号同前。

由于阴、阳树脂在同一交换器内进行交换反应，所以两种树脂的运行周期和出水量相等，则根据上两式可计算出阴、阳树脂的体积比：

$$\frac{V_{\text{阴}}}{V_{\text{阳}}} = \frac{E_{\text{阳}}(A - A_{\text{残}})}{E_{\text{阴}}(H - H_{\text{残}})}$$

因为树脂的体积  $V$  等于交换器的截面积  $F$  和树脂层高度之积，即  $V = Fh$ ，而且阴、阳树脂装填在同一交换器内，具有相等的截面积，所以，双层床的阴、阳树脂体积之比等于它们的高度之比，即

$$\frac{V_{\text{阴}}}{V_{\text{阳}}} = \frac{h_{\text{阴}}}{h_{\text{阳}}} = \frac{E_{\text{阳}}(A - A_{\text{残}})}{E_{\text{阴}}(H - H_{\text{残}})}$$

在设计 Cl-Na 双层床离子交换系统时，要根据树脂的体积和运行流速选择交换器的直径。一般要求阴、阳树脂层高度各不小于 600mm，树脂层的总高度不应小于 2.5m，运行流速不大于 20m/h。

### 3. Cl-Na 离子交换法的优缺点

Cl-Na 离子交换系统与 H-Na 和  $\text{NH}_4$ -Na 离子交换系统相比较，具有以下优点：

- ① 原水不需按比例分配，因此系统简单，操作方便；
- ② 不需增加再生设备和再生剂品种，再生系统简单；
- ③ 不需设置除二氧化碳器，可以节省投资。

该法不足之处是：Cl 型阴离子交换树脂对  $\text{HCO}_3^-$  的交换能力较弱（因为阴树脂对  $\text{Cl}^-$  选择系数大于  $\text{HCO}_3^-$  的选择系数），工作交换容量较低，所以阴树脂的需要量较大。目前阴树脂的价格几乎是阳树脂的 3~4 倍，使投资明显增大。但从全面经济比较来看，由于 Cl-Na 系统减少了许多附属设备，因此初投资不会增加很多。

## ◀ 第六节 各种软化、脱碱联合处理系统的比较 ▶

各种软化、脱碱联合处理方法的优缺点及适用范围见表 3-25。

表 3-25 各种软化、脱碱联合处理方法的优缺点及适用范围

序号	方 法	优 点	缺 点	适 用 范 围
1	Na 离子交换加酸	①可降低碱度,减小锅炉排污率 ②设备简单,投资少	①不易控制稳定,最好安装连续式酸度计控制 ②处理水含盐量增加 ③加酸后设备及管道腐蚀较严重	①原水碱度大,特别是对有负硬度的水 ②含盐量增高后,不致恶化蒸汽品质或引起锅炉排污量超过标准时
2	石灰、Na 离子交换	①可降低碱度 ②可以除去碳酸盐硬度,减轻 Na 离子交换器的负担 ③石灰原料易得,价格便宜	①石灰处理系统设备较复杂 ②石灰纯度低,劳动强度大 ③石灰浆液与空气接触易形成酸钙硬块	高硬度和高碱度的天然水
3	部分 H 离子交换	①设备简单 ②在降低给水硬度同时并能降低锅炉排污率 ③再生时用酸量较少 ④运行比较安全	①适应水质范围小 ②锅内形成泥渣较多	①低压无水冷壁锅炉 ②原水碱度较高的负硬水 $\frac{\text{硬度}}{\text{碱度}} < 1$ 并且 $\frac{\text{碱度}}{\text{酸度}} > 1$
4	H-Na 并联离子交换	①处理后的残留碱度较小 ②可随原水水源变化而调整,因此周期出水水质较稳定	①需采取耐酸防腐措施 ②系统比较复杂 ③需安装在线酸度计,连续监督两种水的混合比例	①原水中 $[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-] = 3 \sim 4 \text{mmol/L}$ ②当 $H_{\text{混}} < 3.6 \text{mmol/L}$ $\frac{H_{\text{混}}}{H} \geq 0.5$ ③ $\text{Na}^+$ 含量为 $1 \sim 2 \text{mmol/L}$
5	H-Na 串联离子交换	①出水水质较 H-Na 并联稳定 ②由于进入 Na 离子交换器的混合水硬度降低,有利于提高水质	①需采取耐酸防腐措施 ②混合水全部进入 Na 离子交换器,致使设备增大	含盐量及硬度较高的水 ①原水中 $[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-] = 3 \sim 4 \text{mmol/L}$ ②当 $H_{\text{混}} > 3.6 \text{mmol/L}$ $\frac{H_{\text{混}}}{H} \leq 0.5$

续表

序号	方法	优点	缺点	适用范围
6	弱酸 H-Na 离子交换	<ul style="list-style-type: none"> <li>①弱酸树脂易再生,酸耗小</li> <li>②原水不需按比例分配,系统简单运行稳定安全</li> <li>③酸性树脂的工作交换容量较高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①弱酸树脂价格较高</li> <li>②全部处理水都经过 H、Na 离子交换,使设备增大</li> </ul>	原水碳酸盐硬度 > 1mmol/L $\frac{H_{\text{总}}}{H} > 0.5$
7	并联 NH <sub>4</sub> -Na 离子交换	<ul style="list-style-type: none"> <li>①无酸类再生系统,交换器及管道无需采取严格防腐措施</li> <li>②水处理系统不必设置除二氧化碳器,简化了系统和设备</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①需严格控制原水分配比例,给操作带来麻烦</li> <li>②不能直接监督出水残留碱度</li> <li>③在氨气和氧气共存的情况下,易腐蚀铜和铝部件</li> </ul>	原水水质: $\frac{[\text{Na}^+]}{\text{总阳离子含量}} > 25\%$ $\frac{[\text{Na}^+]}{H} = 30\% \sim 35\%$
8	综合 NH <sub>4</sub> -Na 离子交换	<ul style="list-style-type: none"> <li>①设备及系统最为简单,操作方便占地面积小</li> <li>②同并联 NH<sub>4</sub>-Na 法</li> <li>③便于单极 Na 离子交换改成此法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①需严格控制再生剂的配比</li> <li>②运行监督及终点控制较复杂</li> <li>③同并联 NH<sub>4</sub>-Na 法</li> </ul>	原水水质: $\frac{[\text{Na}^+]}{\text{总阳离子含量}} < 25\%$ $\frac{[\text{Na}^+]}{H} = 30\% \sim 35\%$ $\frac{H_{\text{总}}}{H} > 80\%$
9	Cl-Na 双床式离子交换	<ul style="list-style-type: none"> <li>①原水不需要按比例分配,操作方便</li> <li>②阴、阳树脂都使用食盐再生,再生系统简单,腐蚀性很小</li> <li>③省去了原水分配器、出水器和除二氧化碳器,所以系统简单</li> <li>④在整个运行过程中没有酸性物质出现,无需采取防酸措施,并且运行安全可靠</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①阴树脂的交换容量低,且价格高</li> <li>②阴、阳交换器不能串联再生,否则易产生大量钙、镁盐沉淀,影响再生剂的充分利用</li> <li>③原水碱度愈高需阴树脂愈多,因此不适用于碱度太高的水质</li> <li>④水中的阴离子几乎都转变成 Cl<sup>-</sup>,在含盐量高时,容易破坏铜铁表面的氧化膜</li> </ul>	①原水水质: $\frac{H}{A} > 1$ $\frac{[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-]}{\text{总阳离子含量}} = 60\% \sim 70\%$ ②运行流速不大于 20m/h ③工作压力较高的水管锅炉

## 第七节 水的除盐处理

我们已经知道，水的软化处理仅仅是除掉水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ；而水的除盐处理则是除掉水中溶解的盐类。目前国内已经应用的除盐工艺有以下几种类型：化学除盐——离子交换法；电力除盐——电渗析法；压力除盐——反渗透法；热力除盐——蒸馏法。

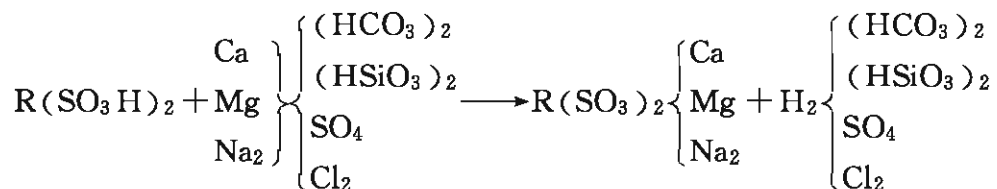
### 一、水的化学除盐

化学除盐是应用离子交换反应的原理进行除盐。用这种方法制取的水称为除盐水。

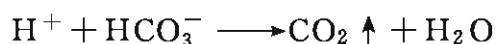
化学除盐工艺通常应用于高压以上的电站锅炉补给水处理，对于中低压锅炉除了特殊要求（如除  $\text{SiO}_2$ ）外很少采用，但在实验室中通常采用这种方法制备比蒸馏水纯度还高的除盐水。因此，对该法加以简单的介绍。

化学除盐工艺过程，是将原水通过 H 型阳离子交换器（也称阳床）和 OH 型阴离子交换器（也称阴床），经过离子交换反应，将水中的阴、阳离子除掉，从而制得高纯水。

(1) 阳床离子交换反应 阳床一般采用强酸性阳离子交换树脂  $\text{RSO}_3\text{H}$  作为交换剂，它只能与水中的阳离子发生如下的交换反应：



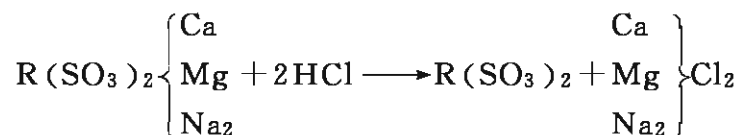
从上述反应可知，原水经阳床发生交换反应之后，出水是酸性水，即水中的阳离子几乎都等物质的量的转变成氢离子。此时  $\text{HCO}_3^-$  已分解成为二氧化碳，即



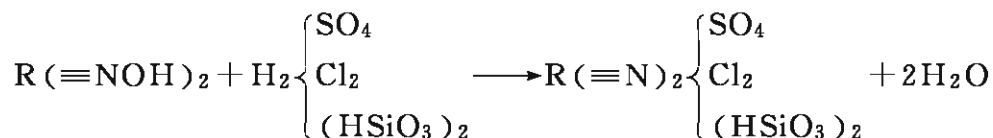
可由除碳器将二氧化碳除掉。



阳床失效后，一般是用一定浓度的盐酸或硫酸进行再生，其反应式如下：

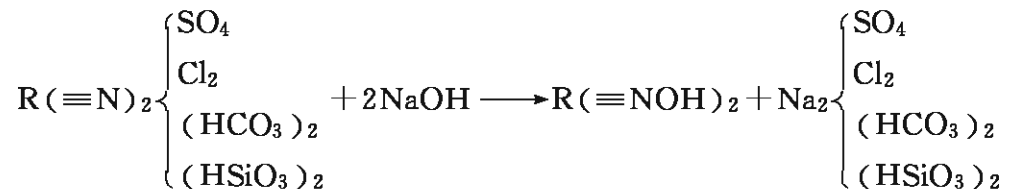


(2) 阴床离子交换反应 阴床一般采用强碱性阴离子交换树脂  $R(\equiv\text{NOH})_2$  作为交换剂，在除盐工艺中，它与阳床出水中的阴离子发生如下交换反应：



由此可知，经阳、阴床交换后的水，基本上除掉了全部阳、阴离子，所以，阴床出水是纯度很高的水，这就是化学除盐处理。

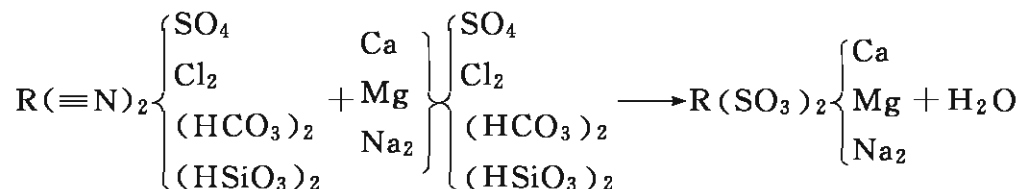
阴床运行失效后一般是采用 5%~8% 的氢氧化钠溶液进行再生，其反应综合式如下：



阴、阳离子交换器的结构与前面介绍的离子交换软化器基本相同，并且也有顺流再生和逆流再生之分。

(3) 混合床离子交换反应 混合床简称为混床，它是将阴、阳离子交换树脂放在同一交换器内，直接进行化学除盐的设备。

① 混床除盐原理 在混床中，由于阴、阳树脂是均匀混合的，所以在运行时，水中的阴、阳离子几乎是同时发生交换反应，其反应综合式如下：



由上式可以看出，经 H 型阳树脂交换反应生成的  $\text{H}^+$  和经 OH 型阴树脂交换反应生成的  $\text{OH}^-$ ，在交换器内立即得到中和，不存在反离

子干扰，因此，离子交换反应进行得十分彻底，出水纯度很高。

② 混床再生 混床的再生方法是利用阴、阳树脂的湿真密度差异，用水力反洗方法将两种树脂分开，然后用酸和碱分别进行再生。再生结束后，用除盐水进行清洗至合格，用压缩空气将两种树脂混合均匀，即可投入运行。

③ 混床结构及操作程序 混床结构及阀门、管系如图 3-48 所示。混床操作程序参见表 3-26。

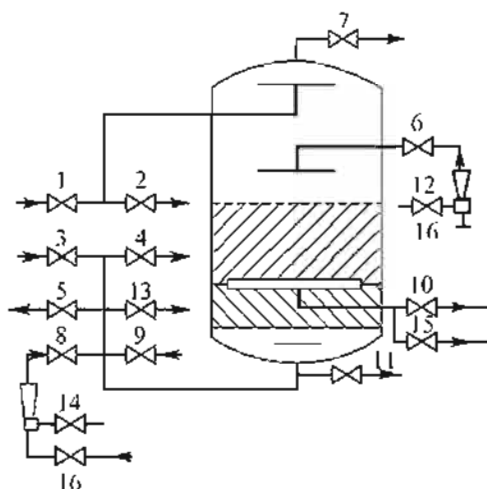


图 3-48 混合床阀门管系

- 1—运行进水；2—反洗排水；3—反洗进水；4—运行出水；5—正洗排水；6—进碱度；7—放空气；8—进酸液；9—进压缩空气；10—中间装置排水；11—取样、疏水；12—NaOH 入口；13—正洗水回收；14—盐酸或硫酸入口；15—再生液回收及正洗水回收；16—喷射器进水

由于混床再生操作比较麻烦，对于含盐量较高的水质不能直接采用混床进行除盐。在实际除盐系统中，一般是将混床置于阳、阴床之后，用于深度除盐。

## 二、化学除盐系统

### 1. 一级复床系统

该系统是化学除盐工艺中最简单的系统。这就是原水经阳、阴树脂一次交换，称为一级交换；其交换过程是由阳床和阴床来完成的，称为复床。所以，将这种系统称为一级复床系统，如图 3-49 所示。

表 3-26 混合床操作程序

序号	操作程序	阀门启闭														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	运行	○			○											
2	停运							×								
3	反洗分层		○	○				×								
4	沉降					×		×				×				
5	进碱预喷射						○		○		○					
6	阴树脂再生						○		○		○		○			
7'	碱回收						○		○		○					○
7	阴树脂置换						○		○		○					
8	阴树脂正洗	○							○		○					
8'	阴树脂正洗水回收	○							○		○					○
9	进酸预喷射	○							○		○					
10	阳树脂再生	○							○		○					
11'	酸回收	○							○		○					○
11	阳树脂置换	○							○		○					
12	阳树脂正洗	○							○		○					
13	正洗	○				○										
14	放水					○		○								
15	树脂混合					○		○		○						
16	急速排水					○		○								
17	进水排气	○						○								
18	最终正洗															
19	正洗水回收	○												○		
20	正洗结束投入运行	○			○											

注：○—开，×—调节。

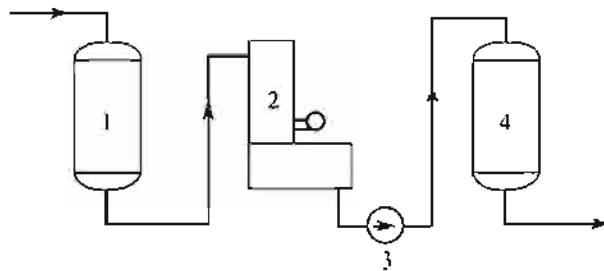


图 3-49 一级复床除盐系统

1—阳床；2—除二氧化碳器；3—中间水泵；4—阴床

由图可以看出，该系统是由阴、阳两床和除二氧化碳器所组成的，因此又称为二床三塔系统。

在处理水量较大的情况下，往往需设置若干个阳床和阴床。根据阳床和阴床的管道连接形式的不同，又可分为两种系统：一是一台阳床对应一台阴床，以串联方式进行运行，称为单元制系统；另一是各种阳床出水都送入一条管道（称母管）内，然后通过母管分别送至各个阴床，称为母管制系统。

## 2. 一级复床加混床系统

对于水质要求较高的单位，例如，高压以上锅炉的发电厂、电子工业及化验室用水等，通常采用一级复床加混床系统，如图3-50所示。该系统也称为三床四塔除盐系统。

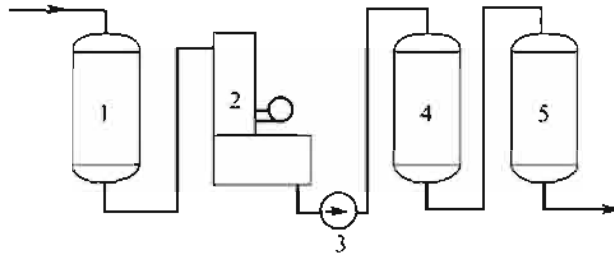


图 3-50 一级复床加混床系统

1—阳床；2—除二氧化碳器；3—中间水泵；4—阴床；5—混床

## 三、化学除盐水质

### 1. 阳床出水水质

阳床在运行过程中，根据强酸性阳树脂对水中各种阳离子的选择顺序，在交换器内的树脂层中，存在着如图 3-51 所示的排布规律。

从图中可以看出，阳床出水离子排代顺序是： $H^+ \rightarrow Na^+ \rightarrow Mg^{2+} \rightarrow Ca^{2+}$ 。因此，阳床出水水质可用图 3-52 的流出曲线来表明。

由曲线可知，阳床在运行阶段，出水硬度几乎等于零， $Na^+$ 含量也很小（一般小于  $1mg/L$ ）。失效时，出水中首先是  $Na^+$ 含量增加，与此同时酸度降低。监督阳床失效终点通常是用专门的仪表——阳床终点计，也可以用测定出水的含钠量进行监督。但很少用测定酸度的方法，因为这种方法灵敏度低，且易受原水水质变化的影响。

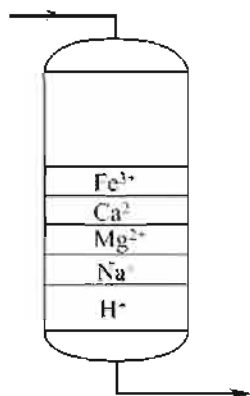


图 3-51 阳床树脂层中阳离子排布规律

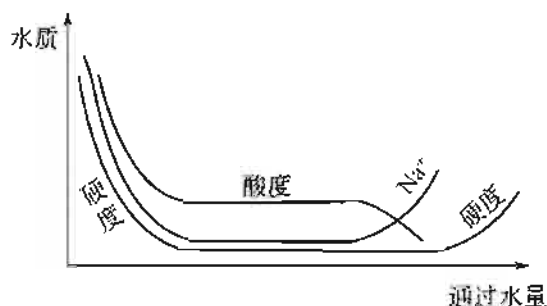


图 3-52 阳床出水水质变化曲线

## 2. 阴床出水水质

根据强碱性阴树脂对水中各种阴离子选择顺序，阴床内树脂层的离子分布情况如图 3-53 所示。

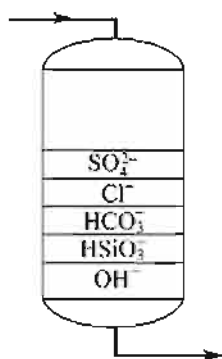


图 3-53 阴床树脂层中阴离子排布规律

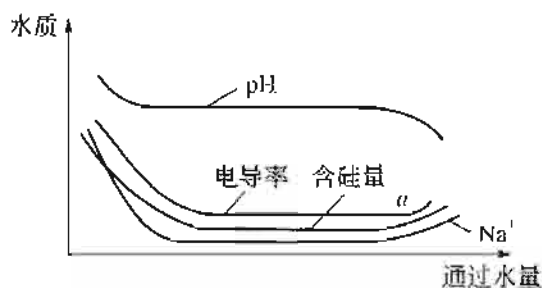


图 3-54 阴床出水水质变化曲线

阴床出水水质流出曲线如图 3-54 所示。从图中可以看出，在一级复床运行阶段，阴床出水水质比较稳定。一般是电导率  $< 5\mu\text{S}/\text{cm}$ ； $[\text{SiO}_2] < 0.1\text{mg}/\text{L}$ 。

阴床失效时，首先是出水  $\text{SiO}_2$  含量增加，此时出水的电导率有一个瞬间下降阶段，这是因为漏过的  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  与阳床漏过微量的钠离子发生反应，生成电导率更低的  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 。当阴床出水出现  $\text{Cl}^-$ ，即有  $\text{HCl}$  漏过时，则电导率急剧增加，pH 值开始降低。因此，在一级复床除盐系统中，如果阴床失效而阳床未失效，则该系

统出水为酸性；反之，阳床先失效而阴床未失效，则出水为碱性。

阴床的失效终点，一般是用测定阴床出水的电导率或  $\text{SiO}_2$  含量来监督。

### 3. 混床出水水质

一级复床加混床除盐系统，出水水质的主要指标如下：电导率 ( $25^\circ\text{C}$ )  $< 0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ ；二氧化硅含量  $< 20\mu\text{g}/\text{L}$ 。

## 四、除盐系统的布置原则

### 1. 除盐系统的布置原则

(1) 阳床设置在除盐系统的前边 其原因是：强型阳树脂的交换容量几乎是强型阴树脂交换容量的 3 倍左右，在交换过程中，水中的阳离子逐渐被  $\text{H}^+$  所代替， $\text{H}^+$  浓度不断增大。在离子交换平衡过程中，反离子干扰作用加强，由于阳树脂的交换容量大，所以抗反离子干扰能力强。

如果阴床在前边，在离子交换过程中，有可能生成  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  和  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  等沉淀，附着在树脂的表面上，使其遭受污染。

(2) 阴床要设置在阳床后面 其原因是：使进入阴床的水呈酸性，可使阴树脂交换出来的  $\text{OH}^-$  能立即被中和成  $\text{H}_2\text{O}$ ，减少了反离子的干扰作用，使阴离子交换反应能够较彻底的进行。

对除去水中的碳酸、硅酸等弱酸十分有利。

(3) 混床一般设置在一级复床的后边 其作用是：提高制水纯度。

如果阴、阳床失效而监督不及时，容易发生短时间出水水质恶化现象，混床设置对出水水质可以起到保护作用。

(4) 除二氧化碳器设置在强碱性阴床之前 原因是：除去  $\text{CO}_2$  即是除去了  $\text{HCO}_3^-$ ，可以减轻阴床的负担。

### 2. 化学除盐设备对进水水质的要求

(1) 水的浊度 对于顺流再生设备，要求进水浊度  $< 5\text{mgSiO}_2/\text{L}$ ；对于对流再生设备（包括逆流再生固定床和浮床），要求进水浊度  $< 2\text{mgSiO}_2/\text{L}$ 。

(2) 残余活性氯 为防止造成阳离子交换树脂的损坏，要求

$[\text{Cl}_2] < 0.1 \text{mg/L}$ 。

(3) 耗氧量 为了防止有机物对凝胶型强碱性阴树脂的污染，要求耗氧量  $< 5 \text{mgO}_2/\text{L}$ 。

(4) 含铁量 为防止离子交换树脂的铁污染，一级除盐系统进水的含盐量要求在  $0.3 \text{mgFe/L}$  以下，混床进水的含铁量要求在  $0.1 \text{mgFe/L}$  以下。

## 五、双层床除盐工艺

双层床是我国近年来发展起来的新型离子交换设备，经许多单位的运行实践证明，只要在适合的水质范围内，都会取得很好的除盐效果和经济效果。

### 1. 双层床的特点

(1) 双层床树脂的组成 双层床是由弱型树脂和强型树脂所组成的离子交换设备。由于强、弱型树脂密度不同，弱型树脂分布在上层，强型树脂分布在下层，如图 3-55 所示。

由弱型阳树脂和强型阳树脂组成的双层床称为阳双层床；由弱型阴树脂和强型阴树脂组成的双层床称为阴双层床。

值得指出的是，双层床与前面提到的混合床是截然不同的两种设备。混床是由阴、阳两种树脂均匀混合的除盐设备；双层床是由强、弱型同类树脂相互分层，用来去除水中的阳离子或阴离子的设备。

(2) 双层床的结构 在交换器内，如果强型和弱型树脂依靠密度差而分层的就称为双层床；如果在强型和弱型树脂之间用装有排水帽的隔板隔开，则称为双室双层床。

(3) 双层床的运行与再生 双层床在运行时，水由交换器的上部进入，从下部引出，即被交换的水先流经弱型树脂，后流经强型

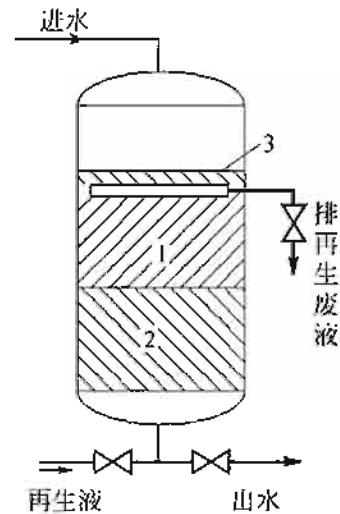


图 3-55 双层床的构造示意图

1—弱型树脂；2—强型树脂；

3—压脂层

树脂；再生时，再生液由交换器的下部进入，从中间排水装置排除，即先再生强型树脂，后再生弱型树脂。

## 2. 双层床的原理

对于离子交换工艺的经济效益来说，主要是提高离子交换树脂的工作交换容量和降低再生比耗。我们前面所介绍的离子交换设备，即使是对流再生工艺，强酸性阳树脂的全交换容量仅仅利用了50%左右，而强碱性阴树脂只利用了全交换容量25%左右。若再提高强型树脂的工作交换容量，就必须增加再生剂的耗量，这样，不但在经济上不合理，而且由于酸、碱排放量增加对环境的污染也十分严重。

由于弱型树脂具有较高的工作交换容量（为强型树脂的2~3倍）和较低的再生比耗，所以将弱型树脂和强型树脂联合应用，在除盐工艺上会发挥明显的经济效益。

在离子交换树脂的介绍中已经知道，弱型树脂用酸、碱再生时，再生度高，但在运行时失效度低；强型树脂恰好相反，其再生度低而失效度高。双层床正是扬长避短地利用了强、弱型树脂的上述性能。当强、弱型两种树脂以对流方式联合应用时，被交换的水首先接触弱型树脂，使其失效度得到提高；再生时，再生液首先接触强型树脂，使其再生度得到提高。因此，在经济再生比耗下，既发挥了弱型树脂高交换容量的特点，又提高了强型树脂的工作交换容量和出水的质量。阴、阳离子交换工艺技术指标参见表3-27和表3-28。

表 3-27 阳离子交换工艺技术指标

阳离子交换工艺	工作交换容量 /(mmol/L 树脂)	再生比耗	出水 Na <sup>+</sup> / (μg/L)
顺流再生	800 左右	>2	50~500
逆流再生	1000 左右	1.4~1.8	20~200
双层床	1300~1700	1.0~1.2	10~50

表 3-28 阴离子交换工艺技术指标

阴离子交换工艺	工作交换容量 /(mmol/L 树脂)	再生比耗	出水 SiO <sub>2</sub> / (μg/L)
顺流再生	200~400	2~3	<100
逆流再生	300~400	1.5~2	<30
双层床	600~900	1.0~1.2	<20



### 3. 双层床的适用范围及优缺点

#### (1) 双层床的适用范围

阳双层床适用的水质范围：阳床进口水， $H_{\text{硬}}/\Sigma_{\text{阳}}=0.48\sim 0.85$ （摩尔浓度之比）。

阴双层床适用的水质范围：阴床进口水， $[\text{SiO}_2]/([\text{SO}_4^{2-}]+[\text{Cl}^-])<0.97$ （摩尔浓度之比）。我国绝大部分水质都小于此值，因此都可以采用阴双层床工艺。

双层床的树脂层高：强、弱型树脂总层高一般为 2m，强型和弱型树脂的层高不应低于 0.6m。

双层床的运行流速：一般为 20m/h 左右。

(2) 双层床优缺点 双层床与单用强型树脂除盐工艺相比具有以下优点。

适用于含盐量较高的水质，单用强型树脂时仅适用于含盐量在 500mg/L 以下的水质，而双层床除盐工艺即使原水的含盐量在 500mg/L 以上，也能够保证出水水质。

树脂的平均工作交换容量高，交换器周期制水量大。

再生剂利用率高，再生比耗小，制水成本低。

排放废酸、碱量很低，容易进行废液处理，对环境污染小。

双层床的缺点是：

强型和弱型树脂的交界面容易相互混杂，弱型树脂易黏结，影响树脂的交换能力；

双室双层床阻力较大，树脂反洗比较麻烦。

## ◀ 第八节 反渗透 ▶

### 一、渗透和反渗透

#### 1. 渗透现象及渗透压

将一个盛水容器用一种特殊性能的膜隔开，该膜只允许水透过而不允许溶质透过，所以称为半透膜。在膜的一侧注入稀溶液，而在膜的另一侧注入浓溶液，将这两种溶液置于大气压力下，并且处

于相同水平面上，通过观察就可以发现，稀溶液一侧的液面逐渐下降，而浓溶液一侧的液面则逐渐升高，说明稀溶液中的水自发地通过半透膜流入浓溶液中去，这种现象称为渗透。经过一段时间，两液面便停留至一定高度，此时，浓溶液和稀溶液的液面高度差称为渗透压，如图 3-56(a)、(b) 所示。

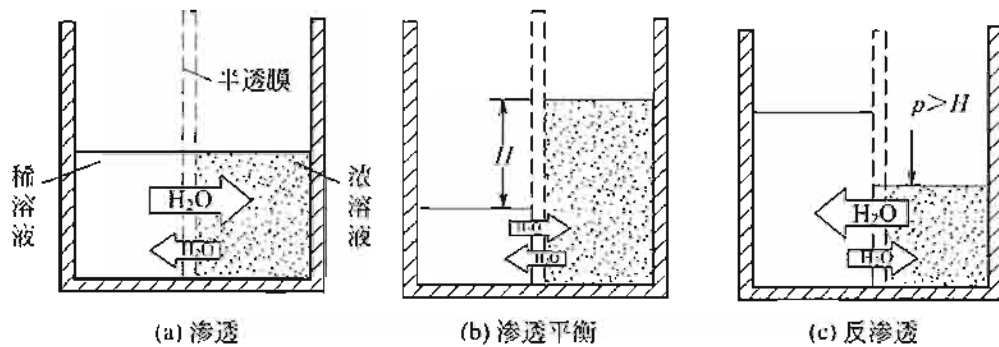


图 3-56 渗透和反渗透示意图

渗透压可根据溶液的蒸气压力下降或冰点降低所测得的数据来计算，也可以直接测定阻止溶剂通过膜流动所需施加的压力。表 3-29 列出不同盐度的海水的渗透压数值。

表 3-29 不同盐度海水的渗透压

盐度/%	氯度/%	渗透压力/atm	盐度/%	氯度/%	渗透压力/atm
27.11	15	19.55	32.52	18	23.66
28.91	16	20.91	34.33	19	25.06
30.72	17	22.29	36.13	20	26.47

## 2. 反渗透和反渗透压

溶剂通过半透膜渗透是一个可逆过程，渗透的推动力是膜两侧溶液的浓度差。渗透开始时，稀溶液中溶剂的渗透速度大于浓溶液侧的溶剂渗透速度，因此，稀溶液的液面不断下降；浓溶液的液面不断上升。在渗透过程中，由于膜两侧溶剂量量的变化，则稀溶液逐渐被浓缩，浓溶液逐渐被稀释，膜两侧的浓度差随之逐渐减小。同时，由于膜两侧液面变化的结果，使压力差逐渐增加，当压力差所产生的推动力与浓度差所产生推动力相等时，膜两侧溶剂的渗透速度也就相等，此时渗透达到平衡，见图 3-56(b) 所示。

如果向浓溶液一侧的液面上施加压力  $p$ ，且大于渗透压力  $H$  时，则浓溶液一侧溶剂渗透速度就要大于稀溶液侧溶剂的渗透速度，结果浓溶液的液面下降，稀溶液的液面升高。这种在外加压力作用下，浓溶液中的溶剂通过半透膜向稀溶液中渗透的现象，称为反渗透。达到反渗透所需的压力  $p$  称为反渗透压，图 3-56(c) 所示。

在渗透和反渗透过程中，溶剂迁移的推动力有两个因素，即浓度差和压力差。浓度差是渗透的主要推动力；压力差是反渗透的主要推动力。所以，膜两侧的浓度差愈大，要达到反渗透的目的所需施加的压力就愈大。为了不致需要很高的压力来克服此种反方向的浓度差作用，反渗透原水的浓度不宜过高。

### 3. 反渗透效率

反渗透效率可以用半透膜的透水量和膜对溶质的排除率两项指标来衡量。

(1) 透水量 半透膜的透水量是指水透过膜的迁移量，它与施加的压力成正比，而与膜的厚度成反比。对于一定厚度的膜，透水量可简化为下式表示：

$$q_1 = A(\Delta p - \Delta H)$$

式中  $q_1$ ——半透膜的透水量， $g/(s \cdot cm^2)$ ；

$\Delta p$ ——膜两侧的净压力差；

$\Delta H$ ——膜两侧的渗透压力差；

$A$ ——水的渗透系数，其值与膜的成分、类型、制造工艺等有关。

半透膜也可透过少量的溶质，其扩散的推动力主要是浓度差，所以，溶质在膜中的迁移量（及透盐量）与膜两侧的浓度差有关，外加压力对其影响很小。严格说来，水中不同组分的溶质其迁移量是不同的，所谓透盐量是指水中某一组分而言，而不是指所有的盐类。膜的透盐量可用下式表示：

$$q_2 = B\Delta C_i$$

式中  $q_2$ ——半透膜的透盐量， $g/(s \cdot cm^2)$ ；

$\Delta C_i$ ——膜两侧溶质中  $i$  组分的浓度差；

$B$ ——溶质的渗透系数。

在一般情况下，由水的渗透系数  $A$  和溶质的渗透系数  $B$ ，就可以完成确定膜在反渗透过程中的特性。

由上两式可以看出，透水量的大小，取决于膜两侧的净压力差；而透盐量的大小，取决于膜两侧的浓度差。因此，随着进水压力的提高，通过膜的水流量也增加，而溶质的透过量，几乎与压力无关，基本保持不变，这就相应地降低了淡水中的含盐量，因此，只要增加净的推动压力，反渗透制水的数量和质量均可提高。在不改变施加压力的条件下，反渗透出水的质质量将因进水的溶质浓度逐渐增加而变坏。这是由于浓度差增大导致渗透压力增大的结果。

(2) 排除率 在反渗透过程中，膜对溶质具有较强的排斥作用。对于不同组分的溶质其排斥作用也不相同。膜对溶质的排斥程度一般用排除率  $R$  表示。排除率的含义是：某组分的溶质在膜两侧的浓度差与浓溶液中该组分浓度的比值。即

$$R = \frac{\Delta C_i}{C_i}$$

式中  $R$ ——半透膜对溶质的排除率；

$\Delta C_i$ ——膜两侧  $i$  组分的溶质浓度差；

$C_i$ ——浓溶液中  $i$  组分的浓度。

对于只有一种盐类为主的浓溶液， $R$  可代表除盐率。

膜对溶质的排除率，可以用溶质的渗透系数  $B$  和水的渗透系数  $A$  之间比值的数学式来表示：

$$\frac{1-R}{R} = \frac{BC'_{H_2O}}{A(\Delta p - \Delta H)}$$

或

$$R = \left[ 1 + \frac{BC'_{H_2O}}{A(\Delta p - \Delta H)} \right]^{-1}$$

式中  $C'_{H_2O}$ ——渗透水的浓度；

其它符号同前。

由上式可见，膜对溶质的排除率是随压力的增加而增大的。

水和溶质的迁移量同压力的关系以及溶质的排除率同压力的关系见图 3-57(a)、(b) 所示。

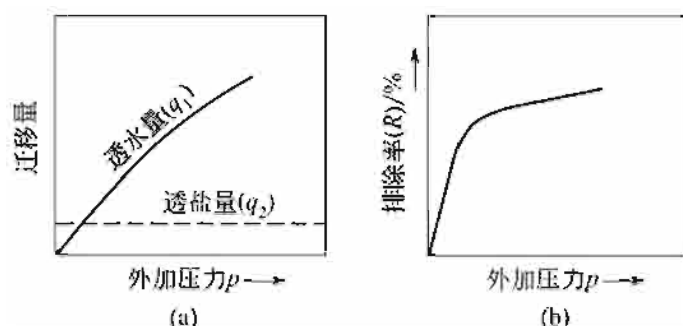


图 3-57 压力与反渗透效率的关系图

## 二、反渗透膜

### 1. 反渗透膜的种类

反渗透膜就是一种半透膜，但并不是任何半透膜都可以作为反渗透膜，因而反渗透工艺要求它必须具备下列性能：

- 单位膜面积的透水量大，脱盐率高；
- 机械强度高，多孔支撑层的压实作用小；
- 化学稳定性好，耐酸、耐碱和耐微生物侵袭；
- 结构均匀，使用寿命长，性能衰降小；
- 制膜容易，价格便宜，原料易得。

具有这些性能的半透膜是不可能从天然材料中找到的，必须用人工合成方法制得。

目前，人工合成的反渗透膜的种类较多，但得到广泛应用的膜有醋酸纤维素膜和芳香聚酰胺中空纤维膜。

(1) 醋酸纤维素膜（简称 CA 膜） 这种膜是以醋酸纤维素为原料，具有实用价值的纤维素膜，是由极薄致密的表皮层和多孔性支撑层复合的非对称性结构。其表皮层的厚度约  $0.25\mu\text{m}$ ，膜总厚度约为  $100\mu\text{m}$ 。在表皮层中由于发孔剂的作用，形成极多的微孔，孔径约为几百纳米，支撑层是由硝酸纤维素和醋酸纤维素制成的，其中孔多、孔径大（约为几万纳米）。其不对称结构如图 3-58 所示。

在反渗透制水时，盐水必须先经表皮层才能起到分离盐分的作用。这种非对称性结构的膜，具有透水量、除盐率高的特点。表皮层愈薄，透水量就愈大，所以近来研制成功一种复合型超薄膜（膜

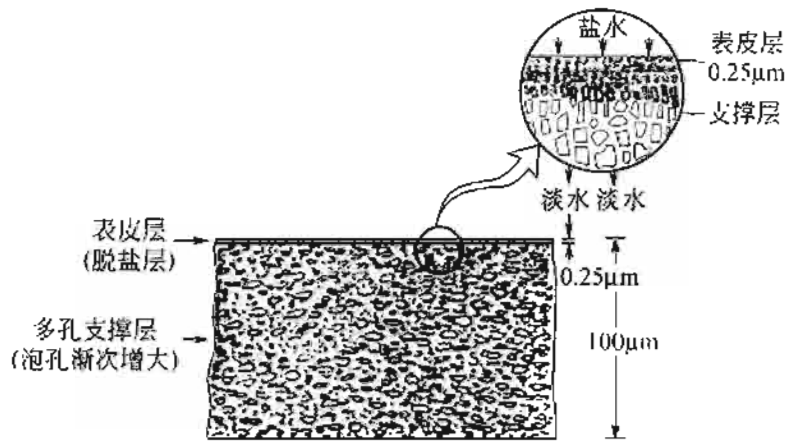


图 3-58 醋酸纤维素膜截面示意图

厚约为  $0.04\mu\text{m}$ )。这种膜在  $100\text{atm}$  下处理海水时, 通过一次反渗透即能制取饮用水, 且透水性能长期稳定在  $1\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{日})$ , 脱盐率在  $99.5\%$  左右, 水回收率  $>50\%$ 。

(2) 芳香聚酰胺膜 用芳香聚酰胺主要是制取中空纤维膜。其

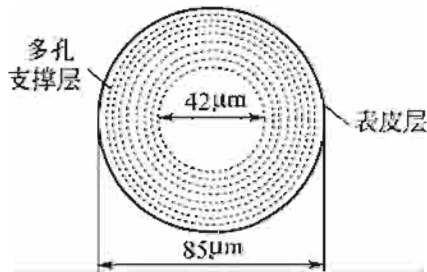


图 3-59 芳香聚酰胺中空纤维膜截面示意图

外径一般在  $30\sim 150\mu\text{m}$  之间, 有足以承受反渗透操作压力的壁厚 (一般为  $7\sim 40\mu\text{m}$ )。中空纤维的外径与内径之比为  $2:1$ , 实际上是一种厚壁圆柱体, 如图 3-59 所示。

中空纤维膜由溶液纺丝法制取。由于这种膜制成极细的中空纤维状, 所以体积小、膜面积大。它还具有良好的透水性能、较高的脱盐率、较强的机械强度、化学稳定性好、耐压实、能在 pH 值  $4\sim 10$  范围用, 长期使用范围为  $\text{pH}=5\sim 9$ 。由它制成的反渗透器具有体积小、产水量大的优点, 因此发展很快。

## 2. 反渗透膜的特征

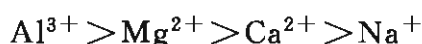
通过实验证实, 反渗透膜对于溶液中不同组分溶质的排除作用具有较高的选择性。表 3-30 列出了醋酸纤维素膜对溶液中不同组分的溶质排除率。

表 3-30 醋酸纤维素膜对不同溶质的排除率

溶质组分	排除率/%			溶质组分	排除率/%		
	最大	最小	平均		最大	最小	平均
Ca <sup>2+</sup>	99.7	96.3	>99	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			80~98
Mg <sup>2+</sup>	99.9	93	>99	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	约 100	99+	>99
Na <sup>+</sup>	97	88		Cl <sup>-</sup>	97	86	
K <sup>+</sup>	97	83		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	86	58	
Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	约 100	99.9	约 100	F <sup>-</sup>	98	88	
Mn <sup>2+</sup>	约 100		约 100	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	约 100		>99
Al <sup>3+</sup>	99.9	97.3	>99	SiO <sub>2</sub> (pH=5)	95	80	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	95	77					

根据实验结果反渗透膜除盐效果，可以总结出如下几点规律。

- ① 有机物比无机物易分离。
- ② 电解质比非电解质易分离。
- ③ 电荷高的电解质比电荷低的电解质易分离，其排除顺序为：



- ④ 无机离子的水合半径越大越易分离，例如：



- ⑤ 硝酸盐、氰化物、硫化物等比氯离子难以分离。
  - ⑥ 非电解质分子量越大越易分离。
  - ⑦ 气体容易透过膜，例如氨、氯、二氧化碳、氧等很难分离。
- 产生上述规律的原因，将在反渗透膜除盐机理中加以说明。

### 3. 影响反渗透膜性能的因素

(1) pH 值的影响 pH 值对反渗透膜的影响主要有以下两方面。一是影响膜的化学稳定性，尤其是醋酸纤维膜，当 pH > 7 时，容易产生水解，使其遭到破坏。二是防止某些溶解物质在膜表面沉积结垢而堵塞膜孔。在通常情况下，醋酸纤维素膜适用工作的 pH 值范围为 3~7，芳香聚酰胺长期工作适用范围为 pH = 5~9。

(2) 操作压力的影响 反渗过程中，透水量随操作压力的提高而增加。但提高压力又会使膜受到压实的作用，而导致透水量的下降，这对醋酸纤维膜最为显著。因此，应根据各种膜的性能、原

水的浓度和水的回收率等来考虑反渗透操作压力。例如，原水含盐量为 1088mg/L，制水量为 39t/h，脱盐率 > 90%，采用芳香聚酰胺中空纤维膜的反渗透装置。给水压力为 1.8MPa (18kgf/cm<sup>2</sup>) 时，水的回收率为 75%；给水压力为 2MPa (20kgf/cm<sup>2</sup>) 时，水的回收率为 85%。

(3) 温度的影响 由于水的黏度随温度升高而减小，所以，膜的透水量随水温度升高而增加。但温度过高时，会加速膜的水解。一般高分子有机膜由于温度升高而软化，已被压实。因此，这种膜的工作温度应控制在 20~30℃ 左右。

(4) 浓差极化的影响 在反渗透过程中，由于水不断地透过膜，引起膜表面溶液浓度的升高，从膜表面到溶液之间形成了浓度差。引起膜表面的盐类向外扩散这种现象称为浓差极化。

膜表面出现浓差极化后，会引起下列一些危害：

局部区域的渗透压力增加，导致有效推动力的降低，这就要求用提高进水压力方法来抵消这个影响；

渗透压力增加，就必须增加膜的透盐量，因而使制取水中溶质浓度增加；

膜表面上出现某些有害物质的浓缩，加快了膜变质的速度；

加快了浓水中溶解的盐类在膜表面沉析速度，降低了水的回收率。

为了避免发生浓差极化现象，须使进水的流动保持紊流状态，即提高进水流速，以防止膜表面浓度的增加。

#### 4. 反渗透膜的保护和清洗

由于天然水中一般都含有悬浮物胶体颗粒及微生物、有机物等杂质，这种水不能直接进行反渗透工艺处理，必须先经过严格的预处理，如混凝、澄清、普通过滤、活性炭过滤、精密过滤等。为了防止膜的水解和表面结垢，还需调节进水的 pH 值至 5.5~6.5。

经长期使用后，膜表面易被一层沉淀物覆盖而结垢，膜孔被堵塞，透水量下降。因此必须定期清洗膜面。通常采用稀盐酸 (pH = 2~3) 冲洗，或用各种络合剂，如柠檬酸、过硼酸钠、亚硫酸氢钠、六偏磷酸钠等防止铁、锰盐以及硫酸钙垢的形成。



### 三、反渗透脱盐机理

到目前为止，对反渗透膜除盐机理有多种解释。前面我们曾用溶液扩散机理，将膜的透水率及透盐率分别用简单的、独立的表达式进行了说明。下面将目前较为流行的几种机理加以定性的描述。

#### 1. 氢键理论

醋酸纤维素膜是一种具有高度有序矩阵结构的聚合物，它具有与水或醇等极性分子溶剂形成氢键的能力，如图 3-60 所示。

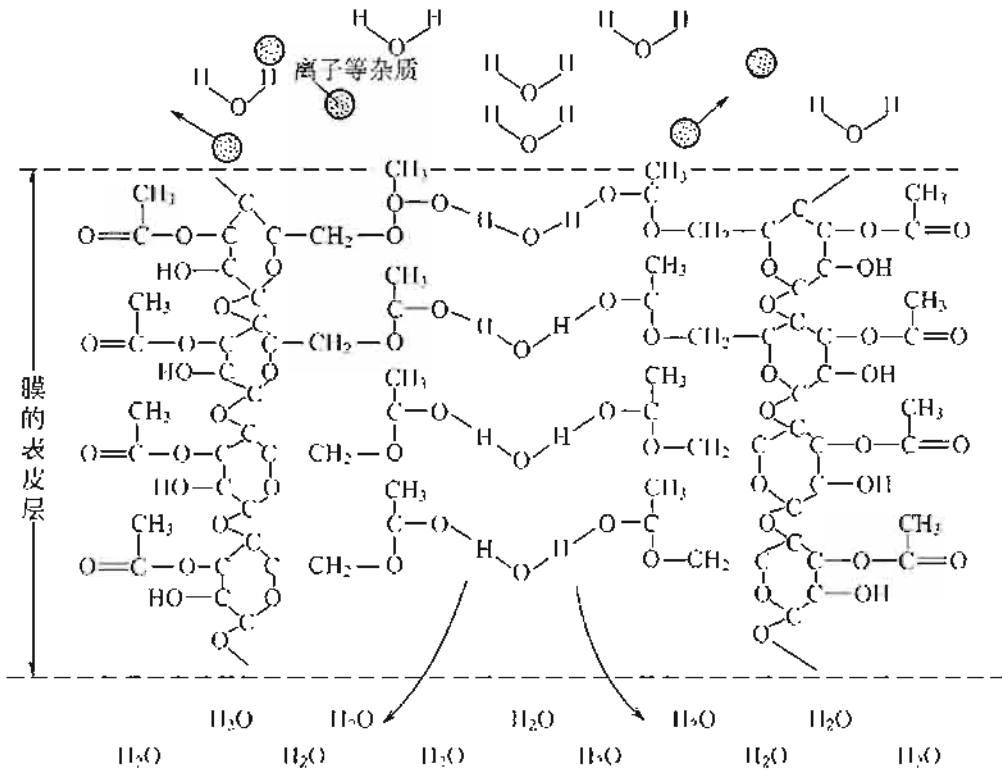


图 3-60 水在醋酸纤维素膜中的传递

浓盐溶液的水分子能与醋酸纤维素膜上的羟基形成氢键。在反渗透压力为推动力的作用下，以氢键结合进入醋酸纤维素膜的水分子，能够由第一个氢键断裂而转移到另一个位置，形成另一个氢键。这些水分子通过一连串的形成氢键和断裂氢键而不断位移，直至离开膜的表皮层而进入孔形支撑层后，就很快源源不断地流

出来。

这种理论只能说明膜的半渗透性，但不足之处是未能说明膜的选择透过性。

## 2. 选择吸附-毛细管流动机理

当盐的水溶液与多孔的反渗透膜表面接触时，膜对水及溶质的不同组分具有不同的吸附势，最容易被膜表面吸附的是纯溶剂水，在界面形成纯水层，次之是低价离子，高价离子最不易被吸附。在反渗透压力推动下，通过膜毛细管的作用，首先流出纯水，膜界面纯水层连续的形成和流出，结果不断的制出淡水。

图 3-61 所示的反渗透膜对含有不同组分的溶质水溶液所表现的选择透过性。

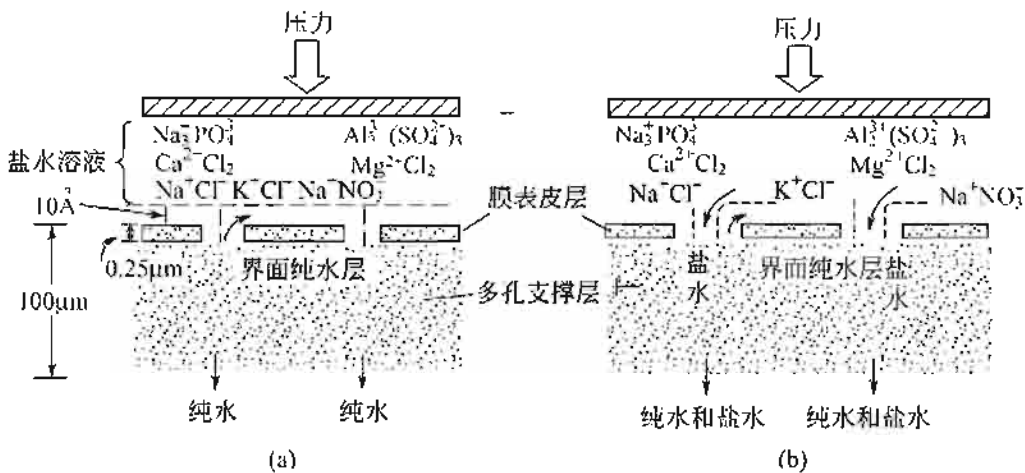


图 3-61 选择吸附-毛细管流动脱盐机理示意图

该理论认为，在醋酸纤维素膜的表皮层上布满了许多极细的孔隙，由于醋酸纤维素的亲水性，它能在膜的表面选择吸附一层水分子，约有两个水分子的厚度，为  $0.001\mu\text{m}$ 。盐类溶质被排挤，化合价愈高的离子被排挤的愈远。当膜的孔隙为纯水层厚度的 2 倍时（即  $0.002\mu\text{m}$ ），称为膜的临界孔径。在临界孔径范围内，孔隙周围的水分子在反渗透压力的推动下，通过膜的表皮层孔隙流出来，因此达到脱盐目的，如图 3-61(a) 所示。当孔隙大于临界孔径时，溶液中的溶质就开始漏过，如图 3-61(b) 所示。其中一价离子透过较多，二价离子次之，三价离子一般漏过。

### 3. 反渗透膜的筛分理论

反渗透膜对有机物的排出，多用膜的筛分理论描述。这与有机物的分子量相差悬殊和有机物的水溶液存在的形态有关，如图3-62所示。由于有机物倾向于降低溶液与膜之间的界面张力，所以膜的表面对于有机物没有排斥作用，一些小分子有机物（相对分子质量 $<100$ ）最容易聚集在膜的表面上，因而很容易通过膜的孔隙。相对分子质量在 $100\sim 200$ 之间的有机物，能被脱出一部分，相对分子质量在 $200$ 以上的有机物，基本上全部能够排除。

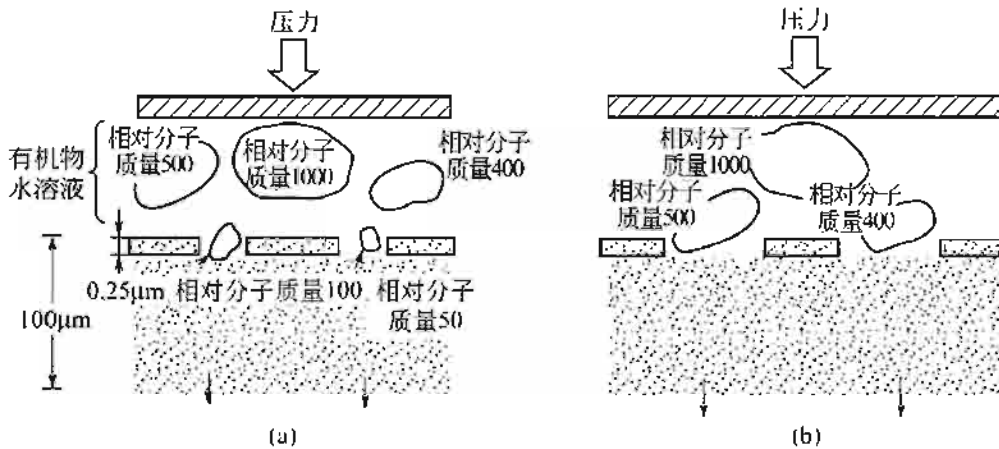


图 3-62 有机物通过膜孔的示意图

(a) 水和小分子量的有机物；(b) 水和较大分子量有机物

孔径较大的膜，不但不能排除分子量较大的有机物，而且对水溶液中其它溶质也不再具有选择透过性，这种筛分作用一般是属于超过滤范围，这种膜就不能称为反渗透膜，而是称为超滤膜。

值得提出的是，反渗透与超过滤有着本质上的不同。它们之间的主要区别有以下几点。

一般过滤中的渗透压力很小，而在反渗过程中渗透压力却起到重要作用。

在反渗过程中，因为溶剂的流失必然增高溶液的渗透压力，所以，在膜的表面不会形成固态截留物，而过滤却是如此。

过滤过程主要是对水中杂质起着接触混凝和机械阻留作用，而反渗透的半透性不仅如此，还有较为复杂的理化作用。过滤分离的对象主要是水中的悬浮物和某些胶体，反渗透分离的对象则主要是

溶液中的离子。图 3-63 表明了反渗透过程和过滤过程所能分离粒子大小的范围。

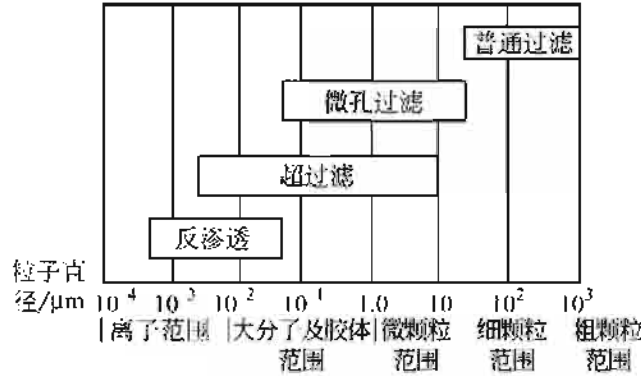


图 3-63 反渗透和过滤分离颗粒范围

#### 四、反渗透膜组件

反渗透膜不能直接用来制取淡水，还必须以膜为主要部分形成组件（或称滤元）。膜的透水量与膜的面积成正比，所以膜组件在可能的范围内，膜的充填密度应该尽量的大，而在设计上应让原水与膜表面充分地接触，在这点上，膜组件的形式往往类似于蒸发器传热面的形式。

目前在水处理上应用较多的膜组件有螺旋卷式和中空纤维式。

##### 1. 螺旋卷式

螺旋卷式膜组成是在两层反渗透膜之间夹入一层多孔支撑材料，并将膜的三面密封，使浓溶液与透过膜的淡水隔开。在膜的下面铺上一层进水的隔网，如图 3-64 所示。然后沿着钻有孔眼的中心管卷绕。这一依次叠好的多层组装（膜/多孔支撑材料/膜/进盐水液隔网），就形成一个卷式反渗透膜组件。这种膜组件填充密封约 830~1660m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>。

将卷式膜组件装入圆筒形的耐压容器内，进水（盐水）是通过隔网的空间沿着膜表面流动，在此过程中，水就透过膜经过多孔支撑层螺旋形地流向中心管，然后导出系统外。将多个卷式膜组件串联起来，便组成螺旋卷式反渗透器。

中心管（淡水收集管）可采用不锈钢管、聚氯乙烯管或其它材料。多孔支撑层可采用涤纶织物等材料。进水隔网可采用聚丙烯单

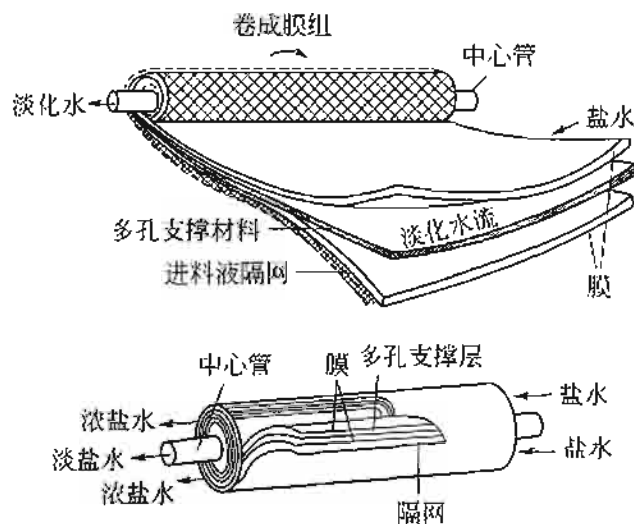


图 3-64 螺旋卷式反渗透膜组成

丝编织网等材料。

膜的长度愈长，产水量就愈大。但过长的膜，透过水必须流经很长的多孔支撑层，然后到达中心管，水流阻力就会增加很大。因此，通常在一个膜组件内采用几组膜，即几组依次叠好的多层材料一起卷绕在一个中心管上。这样既可以增加膜的装载面积，又能降低透过水的阻力。

螺旋卷式反渗透器的优点是：单位体积内膜装载面积大，结构紧凑、占地面积小。缺点是：容易堵塞，清洗困难。因此，对原水的预处理要求严格。

## 2. 中空纤维式

中空纤维是一种比头发丝还要细的空心纤维管，用它装制成的膜组件构造类似 U 形管式热交换器。由数百万根中空纤维绕成 U 形有顺序并均匀地排列在一根多孔的配水管周围。U 形的开口端用环氧树脂浇铸在一起，并用激光切割成平滑的断面，使空心纤维的端头全部且均匀地分布在这一断面上。另一端也用环氧树脂黏结固定，以防止纤维束的偏移。然后把它装入一个由环氧玻璃钢制成的筒形承压容器内，在开口的管板一端依次装上多孔垫板和出入口端板，用丁钠橡胶制的 O 形密封环加以密封，即组成了中空纤维式反渗透组件，如图 3-65 所示。

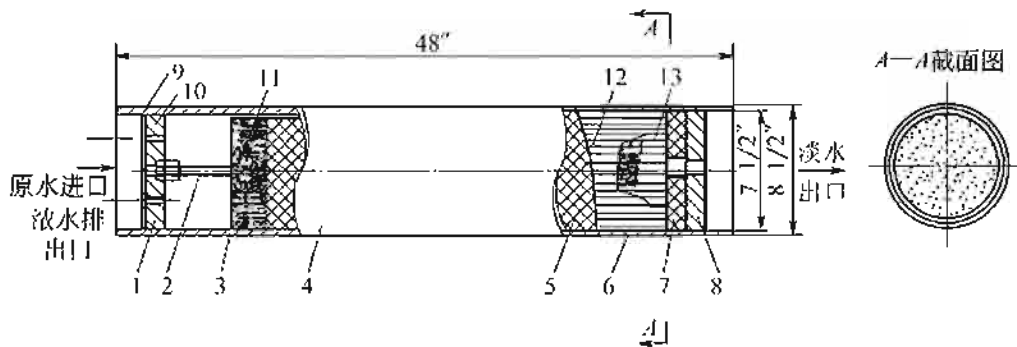


图 3-65 中空纤维膜组件结构图

(1"=0.0254m)

- 1—入孔隔板；2—供水管；3—环氧树脂板；4—环氧玻璃钢外壳；5—软塑料网；  
6—定位套筒；7—多孔滤纸；8—出口隔板；9—卡板环；10—O形密封圈；  
11—中心进水分散管；12—空心纤维束；13—环氧树脂管板

高压给水通过中心多孔分配管，以辐射方式将水流散布于中心纤维的外壁，水穿过膜流入纤维管内，通过出水管板汇集于出口，再通过水管将淡水导出，如图 3-66 所示。

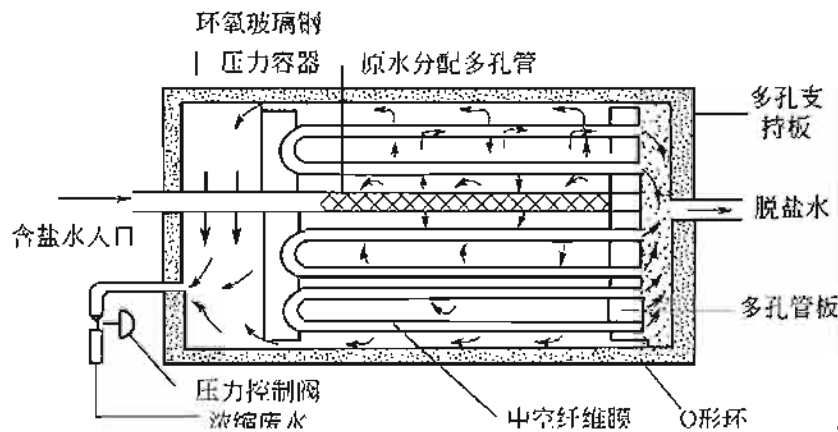


图 3-66 中空纤维膜组件制水过程示意图

例如，美国杜邦公司生产的 B-9 型中空纤维式膜组件，内装中空纤维丝 350 万~400 万根，中空纤维外径为  $84\mu\text{m}$ ，内径为  $42\mu\text{m}$ ，材质为芳香聚酰胺。它具有极薄而致密的表皮层，约  $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$  厚。由于纤维壁厚、它与直径的比例又大，且呈圆筒形，所以，在高压下操作具有足够的强度而不被压扁，在膜组件内无需

外加其它支撑物。这样，使中空纤维膜在有限空间内，有着足够大的填充密度。

中空纤维式反渗透器的优点是：装置紧凑、工作效率高，操作压力在 28atm 时，脱盐率为 90%；操作压力为 56atm 时，其脱盐率可达到 98.5%。它是目前效率最好的反渗透器。其缺点是与螺旋卷式反渗透器相同，即膜孔容易堵塞，清洗困难，因此对预处理要求非常严。B-9 型反渗透器对进水的的水质要求如下：①污染指数（是水中悬浮物量及颗粒大小的指标）<3；②浊度<0.3 度；③全铁<0.1mg/L；④悬浮固体为 0；⑤色度清；⑥游离氯<0.1mg/L。

### 3. 各种反渗透器主要性能比较

表 3-31 列出在原水水质为氯化钠含量 500mg/L、除盐率 92%~96% 的情况下，各种反渗透器的主要性能和单位体积的产水量。

表 3-31 各种反渗透器单位体积产水量

形 式	单位体积内 内膜装载面积 /(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	操作压力 /(kgf/cm <sup>2</sup> )	透水量 /[m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·r)]	单位体积产水量 /[m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·r)]
板框式	493	56	1.02	500
管式(外径 12.7mm)	330	56	1.02	336
螺旋卷式	660	56	1.02	673
中空纤维式	9200	28	0.073	673

注：1kgf/cm<sup>2</sup> = 98.0665kPa。

## 五、反渗透除盐系统

### 1. 反渗透除盐流程

原水通过反渗透装置后，生产出两种水，一种是净化水简称淡水；另一种是浓缩水简称为浓水。如果淡水是由一次反渗透制成的，这种系统就称为一级反渗透系统，如图 3-67(a) 所示。

如果将一级反渗透制出的淡水再次经反渗透装置净化，称为多级反渗透系统。图 3-67(b) 为一级反渗透系统。

若将一级反渗透排出的浓水再次经反渗透装置净化，称为多段

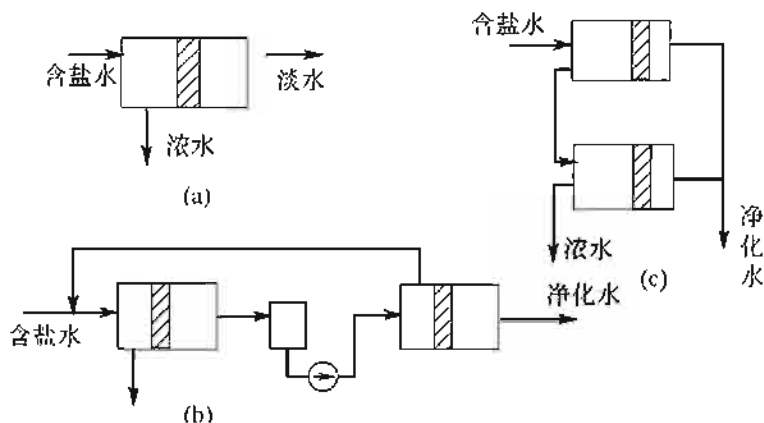


图 3-67 反渗透工艺流程

(a) 一级反渗透系统；(b) 二级反渗透系统；(c) 一级二段反渗透系统

反渗透系统。图 3-67(c) 所示为一级二段反渗透系统。

为了提高淡水的水质，常采用多级系统；而为了提高水的回收率，则常采用多端系统。

一级反渗透系统，工艺流程比较简单，设备少，运行成本低，这是该法的优点，但易产生浓差极化和膜被压实等不利后果。二级反渗透系统，可允许一级除盐率较低（90%左右），在经过第二次反渗透即可达到水质要求标准。由于第二级反渗透装置的操作压力较低，所以在设备材料上的要求没有一级那样严格。但该系统需要经过二次反渗透操作，故能量消耗较大。

## 2. 反渗透除盐系统实例

图 3-68 所示为我国某海滨电厂补给水预处理加 B-9 型反渗透装置系统简图。



图 3-68 补给水预处理加 B-9 型反渗透装置系统简图

该系统用来作为离子交换除盐的预除盐处理设备。共三套反渗透装置，每套由 34 根 B-9 型膜组件组成，按一级二段布置，一段 23 根组件，二段 11 根组件。运行工艺条件为：进水压力 2.8MPa (28kgf/cm<sup>2</sup>)；进水温度 20℃，最高 35℃；产水量初投时 48t/h，



三年后 36t/h；水回收率为一段 60%，二段 40%，总计为 75%；脱盐率 > 90%。

在相同原水水质情况下参见表 3-32，采用三种不同的除盐方式：①二级除盐；②电渗析加一级除盐；③反渗透加一级除盐。对比试验结果列于表 3-33 中。

表 3-32 某地下水水质指标

项目	含盐量 /(10 <sup>-6</sup> mg/L)	Na <sup>+</sup> /(10 <sup>-6</sup> mg/L)	Ca <sup>2+</sup> /(10 <sup>-6</sup> mol/L)	Mg <sup>2+</sup> /(10 <sup>-6</sup> mol/L)	Fe <sup>3+</sup> /(10 <sup>-9</sup> mg/L)	Cl <sup>-</sup> /(10 <sup>-6</sup> mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(10 <sup>-6</sup> mg/L)	SiO <sub>2</sub> /(10 <sup>-6</sup> mg/L)	碱度 /(10 <sup>-6</sup> mol/L)	pH	导电度 (μS/cm)
水质指标	1088	165	0.6	0.6	98	288	220	12.4	4.7	8.34	1730

表 3-33 各除盐系统比较

运行方式	阳 床				阴 床	
	周期治水 时间/h	入口水电导 度/(μS/cm)	碱度/(10 <sup>-6</sup> mol/L)	出水含 Na <sup>+</sup> /(10 <sup>-9</sup> mg/L)	周期治水 时间/h	出水电导 度/(μS/cm)
二级除盐	6~10	1600	12.6~13.0	750~1700	12~17	27~32
电渗-除盐	16~20	400~600	—	340~1060	16~18	6.6~12
反渗透-除盐	70~100	160~180	1.3~1.4	100~250	70~100	1.4~5.4

由表 3-33 可以看出，对于高含盐量水，在离子交换装置前，采用反渗透系统进行预除盐有着较大的优越性。

### 3. 反渗透技术的优点

反渗透技术在 20 世纪 50 年代才开始研究，到 60 年代制成具有工业价值的反渗透膜。1971 年开始有工业性反渗透装置在电厂投入运行。现在反渗透法进行水处理工艺遍及于美国、日本、法国、意大利等国家。我国于 20 世纪 70 年代末开始引进反渗透装置应用于发电厂的水处理，目前我国对于反渗透膜正在积极应用中。

反渗透法除盐与其它除盐方法（如蒸馏法、电渗析法等）相比，具有消耗能量少（见表 3-34）、体积小、设备简单、操作方便，单位体积产水量高，在工艺流程中相态不变，不需要辅加化学药剂，对环境无污染合适于大小规模生产等优点。

表 3-34 海水淡化所需能量

淡化方法	消耗能量 (kV·h/m <sup>3</sup> )	淡化方法	消耗能量 (kV·h/m <sup>3</sup> )
理论值	1.13	电渗析法	15~25
反渗透法	5.2	溶剂萃取法	31.4
丁烷间接冷冻法	11.3	多级闪蒸发	91.5

反渗透的应用从海水淡化开始，发展到硬水软化、制取高纯水、工业废水处理和回收金属盐类，维生素、抗菌素、生物碱、激素等的浓缩，细菌、病毒等分离，果汁、牛乳、咖啡、糖浆、茶等的浓缩以及宇宙航行生活废水的处理和回用等许多方面。

由于反渗透技术应用广泛，优点多，而且近年来随着反渗透膜质量的不断提高，反渗透装置不断改进，已受到各方面重视，可以预计，反渗透技术对于工业锅炉水处理，将有更广泛的发展前景。

## ◀ 第九节 锅炉水质的监督与管理 ▶

### 一、锅炉水质监督检验的内容

#### 1. 设计和制造锅炉时应考虑锅炉水质问题

设计和制造锅炉的单位，必须根据炉型的特点、工作压力和蒸发量大小，考虑对水质的具体要求。对额定蒸发量 $\geq 1\text{t/h}$ 的蒸汽锅炉或额定热功率 $\geq 0.7\text{MW}$ 的热水锅炉应设置取水样的装置；对蒸汽品质有要求时，还应有蒸汽取样装置。考虑到我国中小型锅炉多为水管或锅壳式锅炉，水处理条件有的还不够好，所以设计锅炉时，还要保证锅炉的清扫和排污。

#### 2. 设计锅炉房和安装锅炉时要考虑水源处理

设计锅炉房时，应因炉、因水提出行之有效的锅炉水处理设计方案，包括水处理方案、主要设备选型及系统。锅炉水处理方法和系统的选择，应能保证锅炉无垢或微垢运行，且无严重腐蚀。设计锅炉房时，还应考虑凝结回水和排污水余热利用问题。

### 3. 锅炉运行中的水质监督检验

对运行锅炉的水质进行监督是水质监督的重点。这种监督包括锅炉运行中的监督检验和停炉检验。

(1) 检查锅炉房水质管理制度 水质管理制度的检查应主要检查以水处理岗位责任制为主的有关制度，包括操作规程、排污制度、交接班制度、安全卫生制度以及运行中水处理药品消耗指标等。

(2) 检查锅炉水质标准 使用锅炉的单位应根据国家低压锅炉水质标准，结合本单位的实际情况（锅炉水源水质、炉型、水处理方法及蒸汽品质的要求等），确定本单位锅炉的水质标准，包括给水、锅水、软水、凝结回水等具体标准。

(3) 经常查看锅炉水处理运行记录 使用锅炉的单位应定期对锅炉的原水、给水、锅水的水质及蒸汽品质进行分析。每次化验分析的时间、项目、数据及采用的相应措施，应详细填写在水处理运行记录中，在水处理运行记录中，就可以查看、分析、判断锅炉内部受热面结垢、腐蚀等情况，了解给水硬度、锅水碱度和 pH 值是否符合标准，并通过给水和锅炉含氧化物的比例关系，推测经常排污的情况。

### 4. 进行内部检查

锅炉内部停炉检查及检修时，应到现场了解锅内结垢及腐蚀情况，认真做好必要的记录和水垢、腐蚀产物的收集和分析工作。对于一些结水垢的锅炉，采用酸洗等方法除垢后，为检查金属表面的情况，往往除垢后要进行内部检查；若采用栲胶等方法除垢，有时也要通过内部检查，查看有无老垢松落、堵塞管子。

### 5. 对水处理人员进行培训考核

加强对水处理人员的培训、考核是提高他们业务水平、保证水处理效果的重要手段。对考核不合格的要停止其水处理工作，直到合格为止。

锅炉水质监督检验的目的是发现水处理工作中存在问题，采取措施进行改进，以提高水处理的效果。因此，通过对锅炉水质的监督检验和对水处理效果的分析，应及时提出改进意见。检验中通过

对结垢情况的观察、对腐蚀情况的观察以及对锅炉因水处理不良引起锅炉事故的分析，提出相应的预防措施。

首先，根据锅炉结生水垢的情况，检验及改进水处理工作。对于锅炉最大允许水垢厚度，一般水管锅炉或带水冷壁管的锅炉，水垢厚度不应超过 0.5mm，火管锅炉不超过 1.5mm。所以，如果结垢太厚或者比上一运行周期的厚度增加，则应查找水处理工作中的问题。如水处理方法与水源水质是否相适应，药剂品种和用量是否得当，加药是否均匀、及时，排污是否达到规定要求等。发现问题一定要查清原因，提出改进措施。

其次，根据锅炉的腐蚀情况，发现水处理的问题。必须认真分析水源情况和使用条件，弄清腐蚀的主要原因，及时采取预防措施。

另外，对由于水处理不良造成的锅炉事故要进行分析，按照“四不放过”的原则处理事故，吸取教训，提出改进水处理工作的措施。

## 二、水质管理工作中常见的问题和改进方法

### 1. 部分锅炉使用单位至今还没有进行水质处理

蒸发量小于 2t/h 的蒸汽锅炉和大多数热水锅炉的使用单位，由于对水处理没有高度重视，加之缺乏水处理知识，有的甚至用酸洗来代替水处理，造成这些锅炉损坏严重，寿命短。

为此，必须充分认识水处理工作的重要性，对水处理工作的各个环节应制定出相应的管理办法，凡涉及水处理的设计、安装、检验、运行、管理等各个环节的工作人员都应对此高度重视。

### 2. 不能正确采用有效的水处理方法

目前，中小型锅炉的水处理方法，除了净化装置和一些特殊处理（如除氧）外，一般蒸发量大于 2t/h 的锅炉应尽量采用锅外化学水处理，选择相配套的水处理设备；蒸发量小于 2t/h 的锅炉则可采用锅内加药水处理。无论采用哪种方法，都应注意药剂的选用，根据水源水质和锅炉结构，合理选用药剂。为保证药剂的用量及配比合适，以达到最佳的水处理效果，可先做试验，总结经验，找出规律，再正式投入使用。凡使用锅内加药处理方法的，必须坚持对锅水的日常化验分析，这项工作做不好，往往会使锅水碱度得

不到保证，达不到水处理的效果。

### 3. 水质监督检查力度不够，监督管理制度不严

在锅炉验收中只检查有无水处理设备，而不检查该设备是否能用、质量如何；在定期检验中也不检查水处理的记录情况是否符合国家标准；至于水处理措施是否得当，运行是否经济有效，设备是否正常，系统是否合理等更是无人问津，其结果是锅炉腐蚀结垢的现象年年检查，年年发生。

锅炉使用单位，有些虽然搞了水处理，但没有制定有效可行的水处理工作规章制度，或对水质监督管理制度贯彻不严，如没有本单位的水质标准，化验控制项目不全；投药没有规律，药量从不计算，不对水处理效果定期检验，水处理的记录不全，甚至有虚假记载；水处理化验员未经培训和考核等。

### 4. 有些水处理人员基本素质差

有些水处理人员不懂水处理知识，有的用炉单位不重视水处理人员的培训。锅炉水处理工作的好坏与水处理的管理和操作人员素质有很大关系。因此，使用单位应把水处理管理工作的重点放到抓人员的培训上，加强水处理知识的普及教育，以提高操作管理人员的素质。

### 5. 水处理中的一些具体问题

(1) 离子交换水处理常见的问题 铁制软化罐内部没做处理，致使铁离子污染树脂。由于水中的氧会腐蚀罐体，使铁离子进入水中，离子交换树脂与铁离子结合，造成树脂软水周期很快缩短，出水量减少。所以对铁制软化罐，必须对内壁采取必要的处理，防止铁离子污染树脂。

软化罐中的排水帽损坏，造成罐内树脂流失，甚至使树脂进入锅内。

使用地表水作为水源时，未对给水进行过滤处理，使软化罐中的树脂被泥沙淤塞不起作用。

树脂的使用和保管不当，造成树脂氧化中毒，使其失去部分或全部的交换能力。

(2) 化验试剂不标准或失效造成化验误差大 水质化验的正确性对保证水处理的效果有着重要的作用。由于目前水处理药剂销售

市场异常活跃，有些单位购买了失效的或不标准的化验试剂，造成化验结果存在误差。

(3) 取样点、时间或化验次数还需合理安排 水质化验中软水的取样不能只从离子交换器出口一个地方取，而必须增加软水池水的取样，以化验软水池里软水的残余硬度。因为有的软水池池壁为硅酸盐水泥，长期储备软水，会造成软水硬度回升；其次软水池是露天、池盖不严、雨水渗入；另外凝结水的回收未经处理，其中含有铁杂质和油污等。由此可见，软水池的软水残余硬度必须化验，要定期从软水池里或锅炉进水泵出口取样。

实验和运行实践证明，离子交换器在软水运行中，树脂交换能力下降到最后是一个突变，软水中钙、镁离子上升的速度很快。因此，水处理化验人员应按时取水样化验，最好 2h 化验一次。在快接近一个交换周期时，最好 1h 化验一次。

(4) 排污控制不当 锅水水质几个主要项目（总碱度、pH 值、溶解固形物）的达标（上限）主要通过及时适量地排污，特别是表面排污来控制。要使排污适当，必须通过水质化验掌握锅水质量，确定排污率，并推算出排污阀门每次开启的时间。一般把锅水控制在标准的上限，可使排污率达到较小值。通常排污有以下三种情况。

对于具有底部定期排污和表面连续排污两种装置的锅炉，底排每班至少一次，分析总碱度、pH 值、溶解固形物（或氧离子），与标准相对照，如某项超标（上限）则适当加大表排阀门开度（或补以底排），再取样、分析、对照，直至各项合格。

对于具有底部定期排污和表面定期排污两种装置的锅炉，底排每班至少一次。每隔 2~4h 取锅水样一次进行分析、对照，如某项超标，则开启表排阀门一段时间（或补以底排），再取样、分析、对照，直至各项合格。

对于只有底部排污而无表面排污装置的锅炉，方法同上。不同的是，需表排时以底排代替，且检测项目和分析次数较少。

水处理是保证锅炉安全经济运行的重要措施，为此要认真做好锅炉用水的水处理工作，使锅炉用水达到国家标准。锅炉运行中，司炉工人要按时按量做好排污工作，水处理人员要按规定搞好水质的监督化验，控制锅水的碱度、pH 值。

## 第四章

# 锅炉的检验方法

锅炉在制造、安装、修理、改造和运行过程中，锅炉受压组件的基本金属都可能出现缺陷、损坏和变质老化，都必须进行检验，才能及时发现隐患，采取必要的措施，保证锅炉的安全运行。

### 第一节 常规检验

常规检验是最基本的检验方法。对锅炉整体的内外部，首先要进行一次基本检验，在这个基础上才能确定是否需要某些部位采用探伤仪器或其它手段进行较仔细的检查。常规检验是锅炉检验工作的基本功，因此要求检验人员要有较丰富的经验和分析判断的能力。

检验人员在检验锅炉时，应备下列工具：

0.25~0.5kg 重的尖头检验锤一把；

155mm 钢尺一根；

长度 2m 的钢卷尺一个；

长 310~500mm 直钢尺一根；

5~20 倍放大镜和反光镜各一个；

130mm 内、外卡钳一副；

自制圆弧小样板一套和曲线软尺一根；

记录用工具及本人防护用品的准备，有条件时准备超声波测厚仪一台。

## 一、外观检验

检查锅炉整体和各受压组件的结构是否合理，受压组件金属表面及接缝存在什么缺陷。如腐蚀、磨损、明显的裂纹或起槽、变形、拉撑及连接缝有无断裂，铆缝有无裂缝，铆钉头有无脱落或焊缝表面缺陷状况等。另外，检查时怀疑某处有发生裂纹的可能而凭视觉又检查不出来，则可用浓度为10%的硝酸溶液将可疑的地方侵蚀、擦净，然后用放大镜观察，以判断是否产生裂纹。对有水垢脏物黏附的钢板进行检查时，可用检验锤尖端将水垢、铁锈敲掉，擦净后仔细检查。

## 二、锤击检验

检查时用检验锤敲击受压组件的被检部位，以听觉配合手感觉、视觉来判断有无缺陷的检验方法。正确掌握这个方法，做到判断正确的程度，是反应锅炉检验员的基本功是否扎实的一个方面。

所用的检验锤重量为0.25~0.5kg，一头是平圆头，另一头是尖端，用坚固的木料做手柄，在靠近锤头部分的手柄，车出细颈，这样在使用时，手柄就富有弹性，以增加手感回弹力的大小来判断检验情况。

① 用锤击法检验锅筒、炉胆、管板、大横水管等受压组件时，听锤击发出的声音和检验锤回弹的程度判断被检查组件的情况。若被检验组件发出清脆和单纯的声音，这是钢板状况良好的象征；如声音发闷、浊声，说明钢板可能有夹灰、夹层或金属表面已经严重腐蚀，或金属表面已经结了很厚的水垢；如发生沙啦沙啦的声音，说明钢板已产生裂纹。

② 用锤击法检查铆钉和短拉撑质量时，需配合触觉。如用左手食指压在铆钉头一侧，右手用检验锤斜敲铆钉头的另一侧，如左手食指感到震动，则表示铆钉已松动。对短拉撑敲击时，如拉撑已折断，则锤头回弹力明显的减弱。用检验锤敲击铆钉，或短拉撑的头部声音发闷，则铆钉和短拉撑已有裂纹或折断。如锤击时发现铆钉头脱落，则必须对残钉及其折断头部进行详细检查，查明脱头原因。



③ 检验锤的尖头主要用来敲除钢板表面的水垢等脏物，使金属露出本色，便于检查表面缺陷。

### 三、灯光检验

可检查锅筒、炉胆、集箱和管子等不均匀的腐蚀、变形和较粗的裂纹等。一般使用手电筒检查，因为它可以聚成平行光束，而不宜采用手灯。用手电筒沿着金属表面照射，最好是逆光观察，被腐蚀的地方，在灯光下呈黑色斑坑；若有变形，则鼓凸部分被照亮，而凹瘪处是黑暗的；若金属表面有较粗裂纹，则在灯光下便显示出一条黑色线条。

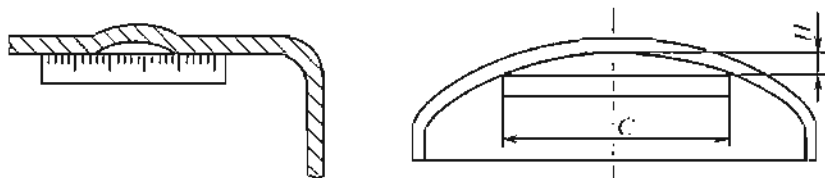
当检查部位狭窄（如集箱内壁），无法靠近直接检查时，可借助反光镜或窥视镜检查。窥视镜有长短两种。短的 1m 左右，长的可根据需要连接到 7~8m 长。窥视镜头部有一凸镜光源，将被检部位照明并放大，杆内有光导纤维，将被检部位的光线传递到观察部位进行观察。

### 四、拉线检查和直尺检查

拉线检查用于检查锅筒、集箱或炉管的弯曲变形程度，一般在变形较长部分的测量。

直尺检查法，是用平直的钢尺搁置在腐蚀或凹瘪处，以测出其局部腐蚀或凹瘪（或鼓包）深度，如图 4-1(a) 所示。直尺还可用来测量扁球形封头的内曲率半径  $R$ ，测量方法见图 4-1(b) 所示。测量后可用下式求出  $R$  值。

$$R = \frac{H}{2} + \frac{C^2}{8H}$$



(a) 检查腐蚀、鼓包或凹瘪的深度

(b) 测量扁球形封头的曲率半径

图 4-1 直尺检查的应用

## 五、样板检查

借助事先按一定尺寸做成的各种圆弧样板，检验和测量受压组件的有关部位的加工尺寸是否符合规定要求，如用样板对扁球形封头板边小圆弧或管板板边圆弧等处尺寸的检查。

对于锅炉在使用过程中组件发生变形（如鼓包），但程度较轻，暂不需要修复时，可在现场做一个与变形形状相吻合的样板，并在测量处打上记号，在今后检验时核对该处变形是否继续发展。为防止样板变形，这个样板应采用 0.5~0.8mm 镀锌铁皮制作。

## 六、超声波测厚仪检查组件壁厚

对于使用年久或保养不良腐蚀严重的锅炉，应对其受压组件进行测厚检查，以确定其实际厚度。这个壁厚可用超声波测厚仪测量，也是常规检验中常用的一种测量方法。

超声波测厚仪是利用声波振荡的原理来测量被测物厚度的。常用的国产测厚仪有 CCH-5 型、CCH-10 型等数种型号，前者测厚范围在 2~50mm，读数为指针式显示；后者测厚范围为 1.5~99.9mm，读数为数码管直接显示厚度数值，精度为±0.1mm。用超声波测厚时，要把被测物表面清理干净并磨光，再用探头（换能器）在标准试块上先校验仪表的正确性，然后在被测物表面的测点涂甘油或黄油等作为偶合剂，当探头与被测物表面紧贴并稍加移动时，即可读出被测物的实际壁厚。

用超声波测厚仪测量组件的壁厚时，有时会遇到这样的情况：在一个小范围内，几个测点的厚度显示不一样，而且厚度差别很大，此时在被测物的背面相同位置也用测厚仪测量厚度，发现两厚度相加后与实板厚度相近似。出现这种现象的原因主要是原件金属有夹层，该组件在高温区工作就要查明其夹层面积大小、深浅程度和有无变形，以便决定是否需要采取措施。

## 七、钻孔检查

钻孔检查，可测量受压组件的残余厚度和检查裂纹，夹层的深度及发展长度。

现在超声波测厚仪和探伤仪的应用已很广泛，因此对锅炉受压组件的测厚或探伤不必采用钻孔法。但是测厚仪或探伤仪的探头与组件接触的平面要求光滑和平整，尤其是探伤仪的探头在组件上移动范围较大，这在腐蚀严重的区域加工磨光有困难，特别在圆弧半径小的部位。为了测定被腐蚀金属的残余厚度以及检查裂纹或夹层的深度和发展长度情况，都可以用钻孔检查的方法。

### 1. 测量组件的厚度

(1) 选择钻孔位置 应力争进行钻孔。因此，要求在腐蚀最严重的部位进行钻孔测厚。在进行外观检查时就应掌握严重腐蚀的部位，以确定其钻孔位置。

(2) 钻孔直径 为便于钻孔检查后修复方便，以及用手电钻便于操作的原因，钻孔直径一般以 6~8mm 为宜。

(3) 测量方法 用回形铁丝插入孔内配合直尺进行测量，也可用测厚卡测厚。

### 2. 对裂纹或夹层的深度和发展长度的测量

可先在缺陷处钻一个直径为 12~13mm、深 2~3mm 的孔，在孔边缘用纱布磨光后，用浓度为 10% 的硝酸酸洗后用放大镜检查，如果裂纹或夹层与金属表面基本上是平行的，在金属表面且不深的地方扩展并且已穿越试钻孔以外，则可顺着裂纹或夹层延伸方向距试钻孔 50~100mm 处再钻一孔，钻孔的深度与裂纹或夹层的深度相适应，孔的边缘仍应磨光和酸洗，再用放大镜检查，如仍在金属表面不深的地方或者与金属表面平行发展很可能是钢板夹层的缺陷，这时必须找到其终点，将其铲除掉。如果缺陷与金属表面成 90° 角的方向继续扩展到金属深处，钻孔的深度应深入到缺陷的尽头，而这个缺陷很可能是裂纹，必要时把钢板钻透，并继续隔一定的距离（如 100mm）钻孔检查，直到把裂纹的终点找出来。当钢板较厚，裂纹较深时，为检查清楚，可将钻孔直径适当放大。

### 3. 补孔的方法

当钻孔检查结束后，如裂纹较浅或是表面夹层，则将缺陷消除

后钢板残余厚度较大，无需修理时，只将钻孔用电焊焊堵即可恢复运行。如果孔径小，钻孔深时，坡口可开大些，如孔口钻透钢板，则可在汽水侧单面焊补即可。

## ◀ 第二节 无损探伤检验 ▶

无损探伤检验是在不破坏被检物的前提下，借助仪器设备或其它有效措施检验锅炉受压组件和焊接缝的表面及内部缺陷的方法。目前应用最广泛的无损探伤方法有液体渗透探伤、磁粉探伤检验、射线探伤和超声波探伤四种。

### 一、液体渗透探伤

液体渗透探伤的方法是把渗透性较强的液体喷涂在需检验的受压组件的局部表面上，使渗透液渗透到缺陷中去，然后再涂上显示剂，利用液体毛细管作用的物理现象，使渗透到缺陷中去的液体在显示剂上显示出缺陷的形状相似的图案，以达到检验目的。

这种探伤方法只对被检物表面缺陷或内部缺陷已发展外露时检查才有效，而且仅需一次探伤在被检物表面上不同方向的线性缺陷能同时显示出来。

#### 1. 煤油白粉法

先将需要检查的部位用砂纸打磨光洁，用浓度10%的硝酸溶液侵蚀，待干后涂以煤油，经一段时间（约25~30min）后，把残余煤油用纱布擦净，用毛刷均匀地抹上薄薄的一层白粉，待白粉干后，用检验锤在被检处背面与裂纹对应位置上轻轻敲击，如果钢板上有裂纹，则渗入裂纹的煤油就会在白粉上显示出裂纹的轮廓来。如果怀疑裂纹可能穿透成裂缝，按照上述方法，在被检处一侧抹煤油白粉，另一侧同样抹上白粉，当敲击震动后在抹粉的两侧同时会显示出裂缝的轮廓来。

煤油白粉法的灵敏度较低，细微裂纹不易显示出来。这种检查方法比较落后，但无需特殊物品，在条件比较差的场合仍可应用。

有条件时可采用着色探伤法。

## 2. 着色探伤法

着色探伤的原理同煤油白粉法相似，它是把一种渗透力较强的液体（渗透液）涂抹在被检物的表面上，使渗透液渗透到缺陷的裂隙中去，然后擦去金属表面的残余液体，并喷或涂以显示剂。由于毛细管作用，渗入缝隙中的渗透液又会渗到显示剂上来，把用肉眼难以发现的缺陷形状清晰地显示出来。

它的灵敏度较高，用于金属表面缺陷的检查方法极为有效，这种方法能显示最小缺陷尺寸的大小与探伤剂的性能，与操作方法以及试件表面的光洁度有关，一般宽度为 0.01mm，最小缺陷深度为 0.02mm。

(1) 渗透液和显示剂 渗透液和显示剂的来源有两种：一种是根据配方自己配制，另一种是市场成品，购入后可直接应用。

红色渗透液的配制：70ml 煤油、20ml 苯、10ml 甲基苯，再加 0.9~1g 苏丹Ⅲ号。

紫色渗透液的配制：60ml 煤油、25ml 苯、10ml 油酸、10ml 甲基苯，再加 1.2g 油溶青莲。

以上两种渗透液任选一种。

显示剂配方：70ml 克罗甸、20ml 苯、10ml 丙酮，再加 5g 氧化锌溶液。

近年来研制成功的 SM-1 型着色探伤液系低毒型的，由渗透液 (PP-1)、溶剂清洗液 (RP-1)、显示剂 (PB-1) 组成，装成喷灌型成套出售。表 4-1 是 SM-1 型着色探伤液组分。表 4-2 是 PP-1 渗透液的性能。

表 4-1 SM-1 型低毒（无毒）型着色探伤液组分

探 伤 液	渗 透 液(PP-1)	显 示 剂(PB-1)
组 分	芳香族醇 甲基溶纤剂 O II-10 乳化剂 醇溶性红颜色	锌氧粉 脂肪族酮 醇 O II-4 乳化剂

表 4-2 PP-1 渗透液主要性能

性 能	测 试 值	性 能	测 试 值
表面张力(20℃)/(N/m)	31.9×10 <sup>5</sup>	清洗性	好
黏度(20℃)/mPa·s	7.04	毒性大小	无毒性发现
相对密度	1.05	含氯量	无
临界厚度	0.12	pH 值	3.5~7.5

喷罐的外壳采用马口铁卷焊成铝合金预制成型。在喷罐封装探伤液的同时，按一定比例封装入液化气体（常用的是液化石油气、液化氟里昂等）作为喷雾剂。使用时，把罐帽打开，往下按动按钮时，液化气在常温下汽化产生压力从喷嘴中喷出，同时把探伤液也喷出罐外。因此，使用很方便，不需要涂制。

(2) 探伤方法 首先把被检部位表面的尘土、油污、水垢、铁锈、漆皮、焊渣等全部清理干净，在清理时可用汽油或丙酮（注意防火）等溶剂擦拭。待表面干燥后，将渗透液用毛笔或毛刷涂抹（或直接喷涂）在表面上，为使渗透液能很好地渗入到细微的缺陷内部，要反复多涂抹几次（最好采用浸浴法，但这在锅炉上是难以做到的），渗透时间最短不少于 30min，若温度低于 20℃时，应适当延长。渗透液经过充分渗透后，把残留在金属表面上的渗透液用浸有汽油或煤油的干净纱布擦尽，对比较光滑的表面只用干纱布擦拭即可。最后涂制或喷刷一层显示剂，待显示剂自然干燥后或用热风吹干后，仔细观察显示剂上是否有着色渗透液渗出，即可确定被检物表面有无裂纹等缺陷存在。

(3) 注意事项 渗透时间不能太短，应根据被检查对象、渗透液的种类及缺陷的性质而定，一般应不少于 30min。显示剂干燥后要立即进行检查，最迟不超过 30min，以免渗透液在显示剂中扩散蔓延，致使缺陷形状和尺寸难以确定。

自制的渗透液和显示剂中都含有易燃有毒的挥发性液体，在使用时，注意防火、通风和人身保护。

使用成品液体渗透探伤的喷罐时，应注意如下几点。

喷嘴与受检部位表面应保持一定距离，若太近则由于液体刚喷出时气流集中呈液滴状而还未成雾状，对受检部位喷撒探伤液会产生不均的现象。一般场合应距离金属表面 300mm 左右。

因为喷罐内充装有液化气，因此喷罐内的压力与外界温度成正比，温度越高喷罐内的压力也越高（见图 4-2）。所以喷罐不能放在靠近火源、热源处，以免受热后罐内压力过高引起喷罐爆炸。

用尽后，应将空罐破坏后抛弃。

使用时切忌火种，以免引起火灾。

如因温度过低而喷罐喷雾性能下降时，可在 30℃ 的温水中浸泡加温，禁止直接用明火烘烤。

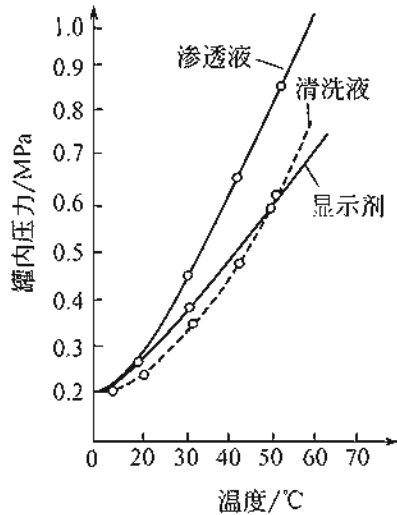


图 4-2 喷罐内压力与温度的关系

### 3. 荧光探伤法

荧光探伤法的原理与着色探伤法相似，不同的是利用荧光物质的发光来显示被检物的缺陷。即将荧光物吸附到缺陷中去，然后借助紫外线、光源进行照射，在紫外线的激发下，缺陷处就会发出荧光而将缺陷暴露出来。

荧光探伤法比着色探伤法的灵敏度要高一些，但需要紫外线光源，故在锅炉检验中很少采用。

## 二、磁粉探伤

磁粉探伤法适用于能磁化材料的表面微小裂纹或距表面不很深的各种缺陷的检查。

### 1. 工作原理

在铁磁金属工件上外加一个磁场，若工件质量完好时，磁力线在工件内是直线进行的。由于铁磁材料的导磁能力要比其它物质（如空气、非金属夹杂物）的导磁能力强得多，因而当工件有裂纹、气孔或非金属夹杂物等缺陷存在时，则将阻碍磁力线通过，也就是阻碍增大而产生磁力线弯曲的现象。当缺陷位于金属表面或近表面时，则磁力线不但会在金属内部产生弯曲，而且还会有一部分磁力线绕过缺陷暴露在空气中，产生所谓漏磁现象，见图 4-3。这种漏

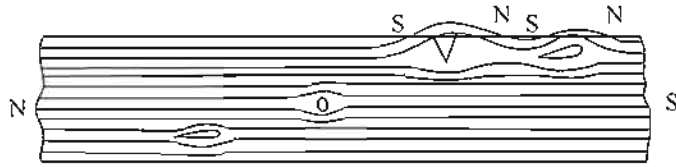


图 4-3 磁力线在工件中的分布情况

磁就在工件表面上产生一对 S-N 极的局部漏磁场，图 4-4(a) 是表面裂纹所形成的漏磁场和图 4-4(b) 是近表面裂纹（或其它缺陷）所形成的漏磁场，这个漏磁场便能吸附磁导率大于空气的铁磁粉，因而受检部位的缺陷便会显示出来，根据磁粉吸附分布和描绘的形状，就可判断缺陷的所在位置和大小。图 4-4(c) 为内部裂纹所造成的磁力线弯曲，在工件表面不发生漏磁场，因此不吸附铁磁粉，故对内部缺陷用磁粉探伤无法检查出来。当工件内部或近表面缺陷的方向与磁力线平行，则有可能根本不阻挡磁力线的正常分布，见图 4-4(d)，在工件表面就无法形成漏磁场。由此可见，当缺陷的方向完全垂直于磁力线方向时，则能最有效地阻挡磁力线通过，随着角度的减小而明显的下降。

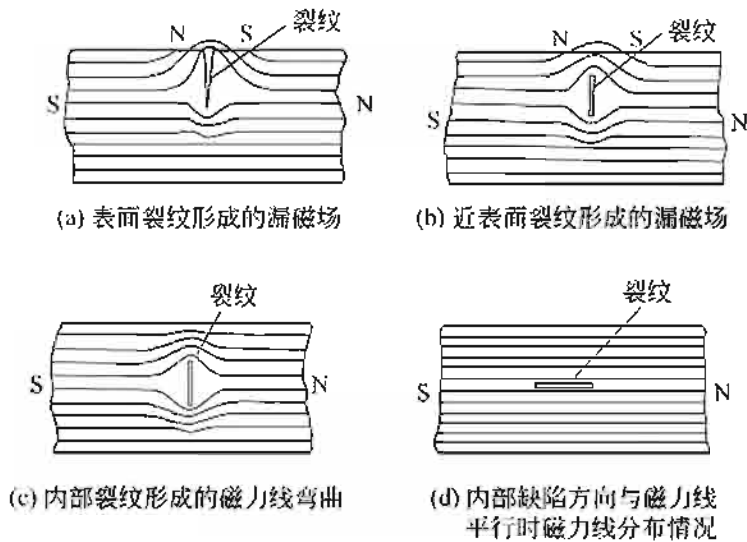


图 4-4 漏磁场形成及磁力线弯曲

## 2. 磁粉探伤的灵敏度

磁粉探伤法的灵敏度与磁化方法、电流大小、电流性质（交流



电或直流电)、磁场场度、缺陷埋藏深度、磁粉颗粒大小及使用磁粉的干粉法或湿粉法等因素有关。

图 4-5 表明了不同磁粉探伤方法的检验灵敏度与缺陷的深度的比较。除交流电磁化法对表面缺陷较灵敏外，直流电比交流电、干粉法比湿粉法灵敏度都要高些。例如：用干粉法检查埋藏深度为 1mm 的缺陷需用 200A 的直流电，可是在同样情况下用交流电则要 1000A，两者相差 5 倍。这主要是交流电有集肤效应，故不易查出金属内部缺陷。还有在同样情况下，用湿粉法时直流电需要 360A 的电流，而用交流电则需要 1600A 的电流。

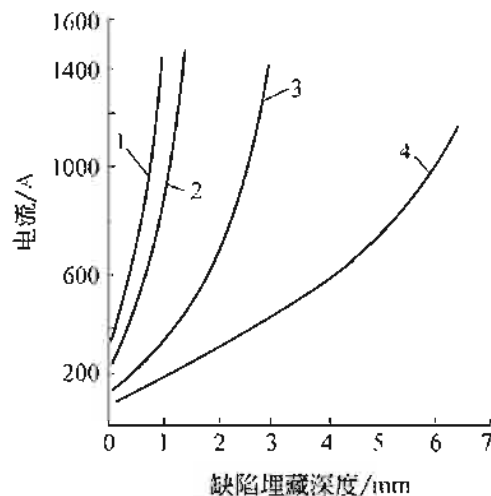


图 4-5 磁粉探伤灵敏度比较

1—用交流电，湿法；2—用交流电，干法；  
3—用直流电，湿法；4—用直流电，干法

磁粉探伤的灵敏度与磁场强度有关，据实验证明，磁场强度越大越好。

当冲磁到 100~200G 时，可以发现较大的裂纹，但对带有弧度边缘的发纹及斑痕则不能显示。

当冲磁到 300~500G 时，磁粉聚集在斑痕及较深的发纹上，但不能稳定地聚集在较细的发纹上。

当冲磁到 1000G 时，能发现到不很深的小裂纹。

当冲磁到 1500G 时，可以发现金属表面 1~3mm 以下的发纹。随着缺陷向金属内部深入，磁粉探伤的灵敏度大大降低，离金

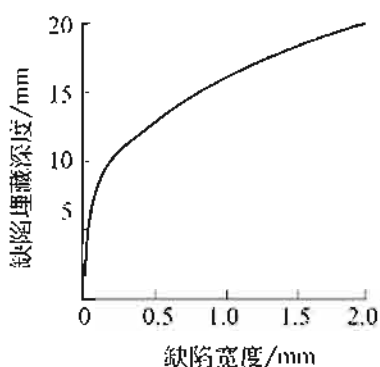


图 4-6 缺陷的显现可能性与其埋藏深度的关系

属表面 15mm 的缺陷，只有当其裂纹等缺陷的宽度不小于 0.8mm 时，才能被发现，在同样条件下，宽度较小的缺陷就完全检查不出来，如图 4-6 所示。因此，磁粉探伤法检验金属内部缺陷的有效程度远不如其它探伤检查方法，但对检查金属表面缺陷，却是最好的方法之一。

磁粉探伤法在检查平整、光亮的金属表面时的灵敏度比粗糙表面时的

要高。

### 3. 磁粉探伤方法

根据磁粉探伤灵敏度的关系，以检查金属表面缺陷为主的特点，一般采用交流电磁化湿粉法的探伤方法。

在探伤前，对受检部位的金属表面用钢丝刷和纱布擦拭，将水垢和铁锈等污物全部清理干净，直到露出金属光泽。

(1) 磁化方法 锅炉受压组件的外形和横截面都比较大，要使受检部位得到足够的磁场强度，因此不宜在它上面整个套上磁化线圈或直接通电磁化的方法。

#### (2) 磁粉和磁悬液的制备

① 磁粉的制备 按磁粉配置方法的不同，分为干粉法和湿粉法两种。

干法磁粉是在干磁粉探伤中所使用的磁粉，它是依靠空气的浮力散布于工件表面上而被漏磁场吸附显示缺陷的磁痕。干法磁粉的颗粒度一般比较大，其平均直径在  $60\sim 100\mu\text{m}$  之间。这是因为干法磁粉在使用时，若颗粒度过小，容易飞扬而不能均匀地散布于工件面上，所以要求磁粉的颗粒度要大一些。

湿法磁粉一般都用液体（水或油）作为媒剂配制成磁悬液后使用。为了减少磁粉在磁悬液中的沉淀，所以湿法磁粉颗粒要求小，其粒度在  $5\sim 10\mu\text{m}$  之间，大于  $50\mu\text{m}$  的不宜使用。磁粉通常使用黑磁粉 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、红磁粉 ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) 两种。近几年来已开始把磁粉探伤技术和荧光技术相结合，研制了性能优良的荧光磁粉，但在

探伤时需要紫外线灯照射，故在锅炉检验中不使用。

② 磁悬液的制备 磁悬液按所使用的媒剂不同可分成水基和油基磁悬液两种。

水基磁悬液的配方（黑磁粉）为，一般先把磁粉配制成磁粉膏，然后再用水配制成磁悬液。这是因为容易把磁粉和水混合，使磁粉浓度均匀。

油酸（50℃）	300mL
氢氧化钠溶液（12%）	300mL
水玻璃	50mL
亚硝酸钠	4g
硼砂	20g
磁粉（Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ）	400g

配制时，先把油酸加热至50℃，然后缓慢地加入氢氧化钠溶液并边添加边搅拌，使其均匀地产生皂化反应成糊状的皂化体，再按配方顺序逐一添加药品，搅拌均匀，配制成磁粉膏。在使用时，按下述配比成水基磁悬液：

磁粉膏	60~80g
水（60℃）	1000mL

当偶尔使用磁粉探伤时，也可按下述方法配制磁悬液。取15~20g脂肪皂或香皂在少量温水中溶化，搅拌成皂液，然后将60~80g磁粉（Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>）加入搅拌成糊状，搅拌均匀后投入1000mL温水中，再经搅拌即可。

油基磁悬液配方（黑磁粉）：

煤油	1000mL
磁粉（Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ）	60~75g

油基磁悬液在配制时，只要把磁粉均匀地调配在煤油或变压器油中，并经搅拌即成。配制前若磁粉结块，应事先将其捣碎过筛后再称重配制。

（3）磁粉探伤质量判别 受检部位被磁化后，即可喷散磁悬液，如受检部位的表面或近表面有裂纹等缺陷，则磁粉在缺陷处聚集成一定的图像，显示出缺陷的分布状况，对于表面缺陷可借助放大镜进行判断缺陷的性质。但对近表面的内部缺陷只能判定缺陷位

置，对其缺陷性质和深度却难以判定，对这样的缺陷可用射线和超声波探伤配合检查，以确定缺陷的性质。

### 三、射线探伤

射线探伤有：X射线、 $\gamma$ 射线和其它多种高能射线。这类射线是通过一种特殊的设备，发射出一种对物体具有特大穿透能力并和照相胶片发生感光作用的不可见的射线，这种射线还能使某些化学元素和化合物发生荧光。在工业锅炉上常用X射线检验焊缝的质量。

#### 1. X射线

为获得X射线，通常采用一种特殊的电子管——X射线管，参见图4-7所示。

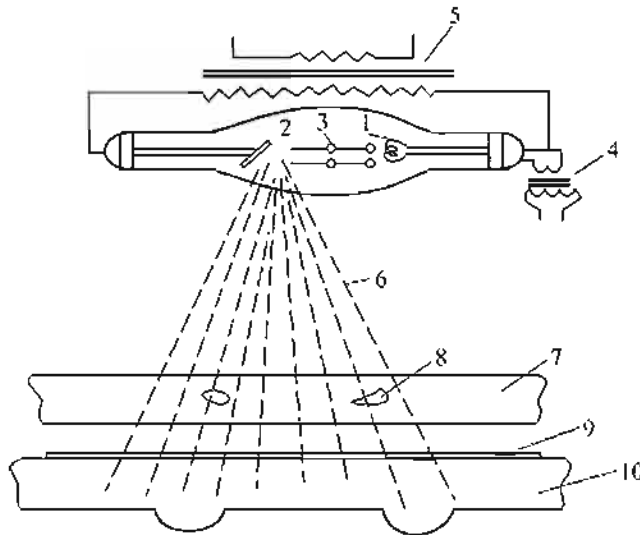


图4-7 X射线管的示意图

1—阴极；2—阳极；3—电子；4—灯丝变压器；5—高压变压器；6—X射线；  
7—受检工件；8—缺陷；9—照相底片；10—屏蔽板

这种管子是一个高度真空的玻璃管，内有两个封焊的电极——阴极和阳极，其中炽热的用钨丝做成螺旋形的阴极就叫做电子源。阴极线圈以3~4A电流来加热灯丝，当灯丝白炽时，即能发射电子。第二个电极即为阳极，一般都做成水或油冷却的空心铜柱形状，在铜柱的一端封焊一个特殊的钨板（靶），阴极射出的电子就

在这个靶面上被阻止。

为了给电子必要的速度并使其在运动中保持一定的方向，在 X 射线管的两端电极上加以高电压（甚至超过 200kV），在此高电压所产生的强有力的电场中，电子被加速到极大的速度。高速运动的电子碰到阳靶的时候，就被急速的阻止，于是就失去了它们的功能。电子失去的功能绝大部分转变为热能。使阳极靶的温度升高，只有极少一部分（约 1%）动能转变为能穿透物体的射线，即 X 射线。

工业 X 射线探伤中广泛使用的 X 射线机主要有便携式和移动式两种。锅炉制造单位一般使用移动式 X 射线机为主，而检验单位则以便携式为主。

## 2. $\gamma$ 射线

有些化学元素称为放射性元素，它们的原子核在自然裂变时能放射出各种射线，这些射线在电场的作用下，会发生不同的情况见图 4-8。有的射线在电场中向阴极方向偏移，表示它由带正电

的微粒组成，这种射线称为  $\alpha$  射线。有的射线在电场中向阳极方向偏移，表明它们由带负电的微粒组成，这种射线称为  $\beta$  射线。还有一种射线在电场中不发生偏转，由此可见，它是不带电荷的，是一种电磁辐射，这种射线称为  $\gamma$  射线。

这三种射线都能穿透一定厚度的物体， $\gamma$  射线的穿透能力最大，能透过 300mm 厚的钢材； $\beta$  射线次之，能穿透 1.7mm 的铝板； $\alpha$  射线最弱。因此，通常均采用  $\gamma$  射线为探伤的射线源。

在工业探伤工作中，最常用的人工放射性同位素是钴  $60(^{60}\text{Co})$ ，其半衰期为 5.3 年，可用于透视厚度为 60~150mm 的钢材，最大厚度可达 300mm。

## 3. 射线探伤

(1) 射线探伤的应用原理 当 X 射线或  $\gamma$  射线照射受检物，如在受检物后面放置感光胶片，则射线透过工件时，由于工件的厚

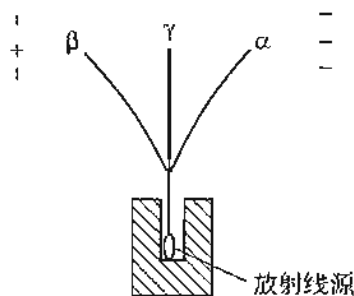


图 4-8 各种射线在电场中发生偏移的情况

度和密度不同，对射线的衰减就不同，到达感光胶片上的射线强度也不同，因此对胶片上的感光物质的感应程度也不相同。如果射线透过较厚或密度较大的工件，则它的射线能量的衰减就越大，到达胶片上的射线强度就弱，胶片的感光程度也较小，胶片经过显影后得到的黑色度就越浅。反之，黑色度就较深。依据这种胶片上的黑色度深浅不同的形状可以判断和鉴定受检物体内部的质量状况。

在操作时，为了得到清晰度好，质量较高的照相底片和为了加快底片的感光速度，缩短曝光时间，在透视时往往加一种所谓增感屏，国内一般采用两种增感屏，即荧光增感屏和铅箔增感屏。荧光增感屏增感效果好，但映摄得的射线照相底片清晰度较差；而铅箔增感屏虽能得到较好的清晰度，但增感效果较差。

#### (2) 焊缝缺陷在射线探伤底片上的特征

① 裂纹 焊缝中的裂纹在焊缝金属和焊缝的热影响区均可产生。焊接头内的裂纹在底片上显示与射线方向关系很大，当射线方向和裂纹的裂向重合时，裂纹在底片上显示的最清楚，否则，裂纹就较难显示出来，当裂纹宽度大时还可显示出来，但宽度狭窄细小就无法显示了。

裂纹在底片上的特征是略带曲折或弯曲的黑色细纹，当裂纹较深时，有时也有直线状的细纹，显示影像的轮廓分明，中部较宽色较深，两端尖细色较浅淡，最后消失，裂纹中不大有分枝出现。

② 未焊透 焊缝中的未焊透在底片上的显示与坡口形式、接头形式、焊接层次和焊条性质有关。因此，未焊透在焊缝中出现的位置有根部未焊透、焊层间未焊透和坡口边缘未焊透等情况。根部未焊透在底片上呈直线状连续的或断续的黑线条，宽度一般与坡口间隙一致，黑度不太均匀，外形较清晰，若是V形坡口单面焊接或未开坡口的对接焊缝中，裂纹位于焊缝宽度方向的中间。一般层间未焊透在底片上成不规则的形状，有的呈条形、有的呈块状在焊缝的任意部位都可能出现。这种缺陷一般都有夹渣，当有夹渣存在时，底片中这个部位黑度较深。坡口边缘未焊透一般在底片上呈长条状黑色线条，黑色不均匀，通常是断续分布，并偏离焊缝中线。

③ 未溶合 未溶合一般出现在坡口边缘上，这种缺陷只有在射线方向与坡口边缘平行时才能显示，若不重合时，缺陷的影像是

模糊不清的。

④ 气孔 气孔一般呈球状或椭球状，也有呈密集状和链状出现的。手工电弧焊缝中的气孔，在底片显示出圆形或椭圆形的黑点，其中心处黑色较深，并均匀地向外缘变浅，边缘轮廓不太分明。气孔在焊缝中分布不均匀，有密集分布的，也有稀疏的或单个的，这类气孔常产生于手工焊的焊缝中。链状分布并在一条直线上的链状气孔，常见于自动焊缝中。

⑤ 夹渣 多呈现为不同形状。点状夹渣有单独点状独立存在或呈链状分布的链状夹渣。其外形不规则，带有棱角，黑度较均匀。条状夹渣呈宽而短的粗线条状，但宽度不一、形状不规则，黑度有深有浅，变化没有规律。

上述缺陷有时在一张底片上会同时存在，或有两种缺陷同时存在或仅一种缺陷单独存在。

### (3) 射线探伤照片的灵敏度和几何不清晰度

① 灵敏度 灵敏度是指照相底片上能发现在工件中沿射线穿透方向上的最小缺陷尺寸，这种为绝对灵敏度。若将该缺陷的尺寸用占射线穿透工作厚度的百分比表示，则称为相对灵敏度。射线探伤照片上的灵敏度通常采用相对灵敏度表示。

若以  $T$  表示在透照方向上的工件厚度， $S$  为透照方向上缺陷的尺寸，则射线照相的灵敏度  $G$  为：

$$G = S/T \times 100\%$$

采用这种方法来表示灵敏度是很困难的，因为在射线探伤过程中是无法事先知道缺陷的  $S$  值的，所以射线探伤是在感光胶片上采用图像质量指示器来确定射线探伤灵敏度的，这个图像质量指示器称为“透度计”。在射线探伤时采用“透度计”有两个目的：在已知的射线探伤工艺条件下，在照相底片上显示出人工缺陷计算出相对灵敏度；监视射线探伤的质量。

② 几何不清晰度 从图 4-9(a) 中，射线源的焦点假定是点火源时，则在感光胶片上所获得的工件缺陷影像有最好的清晰度，这时感光胶片上的黑色度将由  $D_2$  急剧过渡到  $D_1$ 。但在实际应用中，射线源的焦点尺寸虽然是比较小的，但还是有一定的尺寸，不能把它视作为点火源看待，如图 4-9(b) 所示。那么，在感光胶片上得

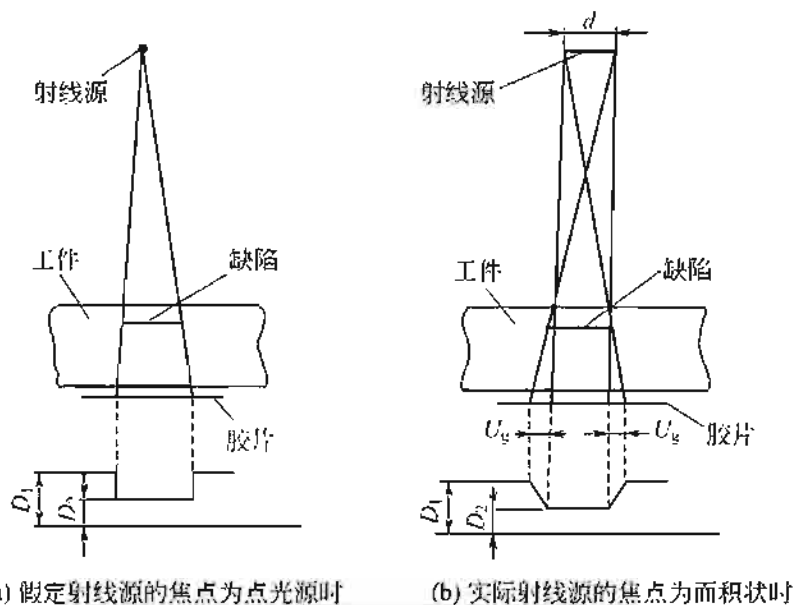


图 4-9 产生几何不清晰度的原理

不到最清晰的图像，工件的缺陷反映到感光胶片上，除了产生黑色度  $D_2$  的本影外还得到了宽度为  $U_g$  的半影，使得黑化度由  $D_2$  逐渐过渡到  $D_1$ ，因而使缺陷影像被放大且又轮廓模糊。

由于任何射线源都不是点火源，总有一定大小的截面，其尺寸的大小取决于设备特性，且是不可改变的因素，因此在图 4-9(b) 中具有直径为  $d$  的射线源所发生的，通过工件中的缺陷边缘而投射在感光胶片上时，必然产生扩大的半影  $U_g$ ，此  $U_g$  的宽度称为几何不清晰度。

由此可见，几何不清晰度越小，感光胶片上缺陷图像越清晰，缺陷尺寸越接近于工件缺陷的实际尺寸时，缺陷失真度则越小，否则则相反。

#### 四、超声波探伤

超声波是一种频率高于 20000Hz 的振动波（人的听觉能够听到的声音频率为 16~20000Hz，称为声波），超声波具有穿透大多数材料（包括金属钢材）的能力，而且由一个截面进入另一个截面时，在界面发生反射波。故利用这些特性通过超声波探伤仪在荧光屏上显示出脉冲波形的特性和变化，根据这些脉冲波形的特性，来



检查材料存在缺陷的位置和缺陷的大小。金属材料超声波探伤的常用频率为 1~5MHz。

### 1. 超声波探伤原理和基本探伤方法

超声波探伤设备由超声波探伤仪和探头（声电换能器）两部分组成，中间由金属导线连接。

超声波探伤仪的显示形式有多种，根据《蒸汽锅炉安全技术监察规程》的规定，超声波探伤仪应符合国家标准《A 型脉冲反射式超声波探伤技术条件》，故一般均采用便携式 A 型脉冲波探伤仪。A 型脉冲波探伤仪的指示特点是，根据示波荧光屏中时间扫描基线上的信号来判断工件内部缺陷存在与否及存在的情况的。但所显示的波形不能反映缺陷的性质。它又分为检波型（A<sub>DC</sub>型）和不检波型（A<sub>AC</sub>型）两种，这两种机型在探伤时，在荧光屏上显示图形如图 4-10 所示。

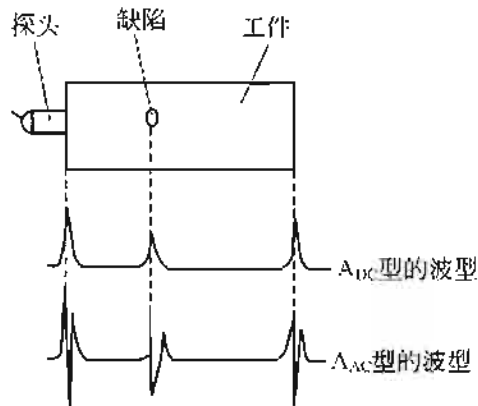


图 4-10 A<sub>DC</sub>和 A<sub>AC</sub>型机在荧光屏上显示的图形

A 型脉冲波探伤仪探伤原理如图 4-11 所示。它由同步触发电路、时间扫描电路、高频脉冲发射电路和接收放大电路等组成。当电源接通后，同步触发电路产生两路同步触发信号：一路触发时间扫描电路工作，产生的锯齿波电压作用到示波管上，使示波管产生扫描线；另一路信号触发高频脉冲发射电路，使之产生高频脉冲信号，由高频脉冲信号作用到探头产生超声波。

探伤时，超声波通过工件表面的耦合剂将超声波传入工件，超声波在工件里传播，遇到工件内部的缺陷和工件的底面声波就反射

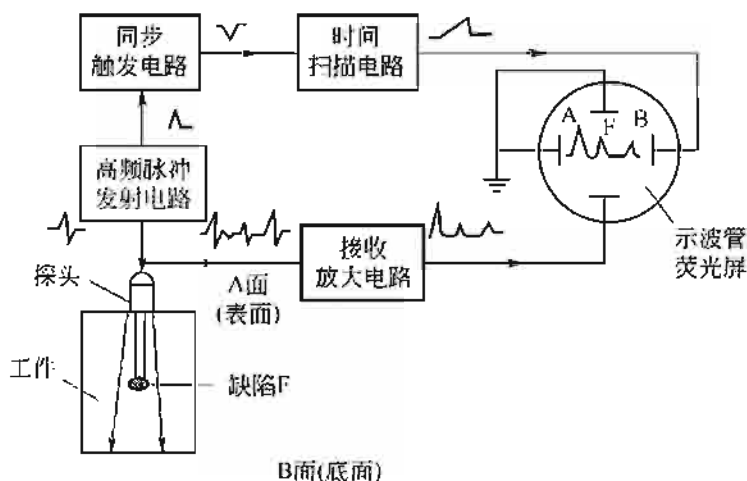


图 4-11 A 型探伤仪原理图

回到探头，由探头将超声波转变成电信号，并传至接收放大电路中，经检波后在示波管荧光屏的扫描线上出现表面反射波（始波）A、缺陷反射波 F 和底面反射波 B。通过 A 和 F 之间的距离便可决定缺陷离工作表面的位置，同时通过 F 的波形高度亦可决定其缺陷的大小。

## 2. 确定缺陷位置、缺陷尺寸的基本方法和缺陷波形特性的简介

经过超声波探伤发现工件内存在缺陷时，需要对缺陷的位置、缺陷的大小及缺陷的性质进行分析、计算和判断。由于通过探伤仪检测，直观性差，因此应有专职人员来做这项工作，而且专职人员必须经过专门培训和持有锅炉压力容器安全监察机构的认可证书，方可做这项工作。其原因是判断的准确与否对锅炉的安全运行有很大关系。这里对锅炉在超声波探伤时对缺陷判断的方法概括地介绍一下。

### (1) 缺陷位置的确定

① 纵波探伤法（直探头探伤）用直探头探伤时所发现的缺陷位置就在探头下面，因此缺陷埋藏深度等于声波，自工件表面到缺陷的波程 S 即：

$$h_{\text{伤}} = S$$

一般用固定标尺法来计算缺陷的埋藏深度。固定标尺是指荧光

屏窗口设置的刻度标尺，用此标尺来反映始波与缺陷波、始波与底波之间的关系测定，如图 4-12 所示。

$$h_{\text{伤}} = \frac{HS_{\text{伤屏}}}{S_{\text{底屏}}}$$

式中  $h_{\text{伤}}$ ——缺陷距离工件受检面的深度，mm；

$H$ ——工件厚度，mm；

$S_{\text{伤屏}}$ ——缺陷波在荧光屏标尺上的位置；

$S_{\text{底屏}}$ ——底波在荧光屏标尺上的位置。

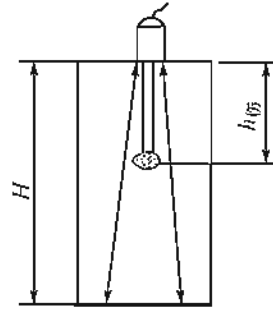
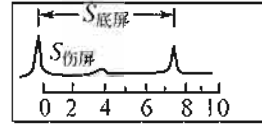


图 4-12 直探头用固定标尺测定缺陷波深度

② 横波探伤法（斜探头探伤）用斜探头探伤时，所发现的缺陷位置在探头前方的下面，如图 4-13 所示。

$$h_{\text{伤}} = S_{\text{伤}} \cos \gamma$$

式中  $h_{\text{伤}}$ ——缺陷距离工件受检面的深度；

$\gamma$ ——斜探头的射角；

$S_{\text{伤}}$ ——缺陷波程。

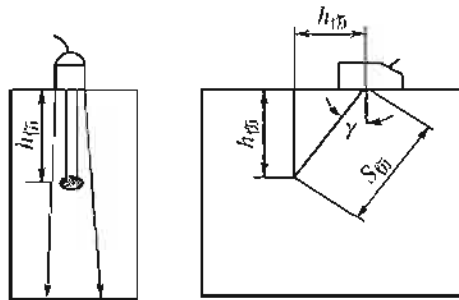


图 4-13 缺陷埋藏深度与斜探头所在位置的关系

用斜探头探伤测定工作缺陷深度的基本计算方法。采用斜探头测定缺陷埋藏深度比用直探头要复杂一些。

(2) 缺陷尺寸的确定 在超声波探伤中，实际上测得的缺陷尺寸总是与实际缺陷的真实尺寸有一定的误差。

① 当量高度法 此法用于缺陷反射面大于声束截面的情况。声束对一定尺寸、形状和方向的物体的反射本领是一样的。利用这

一点，事先做成一批试块，在试块上做成不同大小形状的人工缺陷，然后在同样测试条件下，工件内缺陷声束的反射量等于试块中某一人工缺陷的反射量时，则这个声束反射量的大小称为工件的缺陷当量，便可知工件缺陷的大小相当于试块中某一人工缺陷的大小。

② 脉冲半高度法（半波高度法） 此法适用于工件缺陷面积比在该深度下的声束截面大，而且探头移动时缺陷波高度变化不大的情况，见图 4-14 所示。

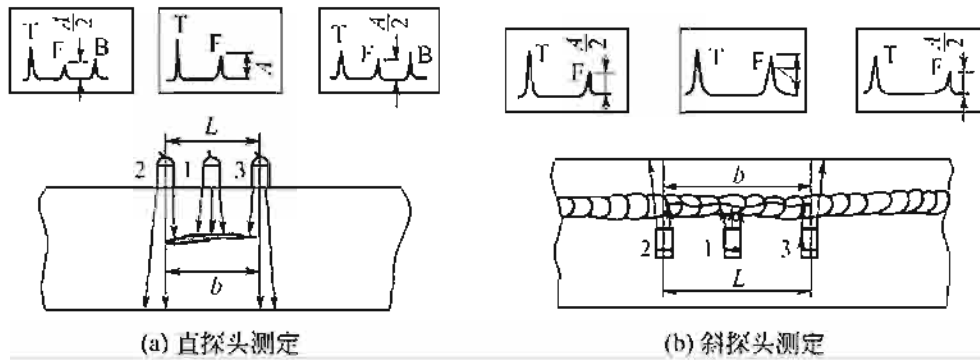


图 4-14 脉冲半高度法测定缺陷大小

使用此法时，先测出工件缺陷对声束全反射的高度  $A$ （探头在图 4-14 的 1 位置），然后将探头作左右或前后移动，使缺陷波的高度降为  $1/2A$ ，即声束中心刚到缺陷的边缘（探头在图 4-14 的 2、3 位置），则此时工件缺陷的长度  $b$  与探头移动的距离  $L$  相等，这个探头移动的距离  $L$  即为工件缺陷的长度。

若测工件中深度方向的缺陷大小，可用斜探头测定，见图 4-15 所示。

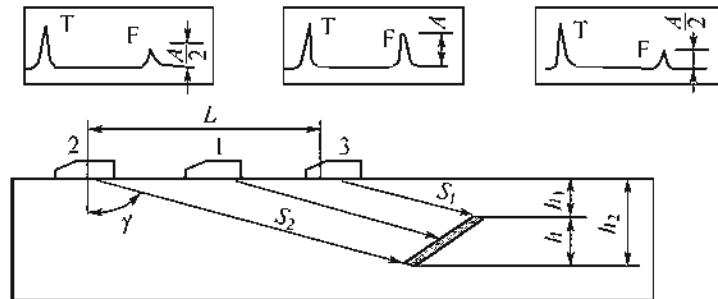


图 4-15 脉冲半高度法测定工件中缺陷深度方向的大小

$$h = h_2 - h_1 = (S_2 - S_1) \cos \gamma = L \cos \gamma$$

式中  $h$ ——工件中深度方向的缺陷尺寸，mm；  
 $h_2$ ——缺陷始端距离工件受检面的深度，mm；  
 $h_1$ ——缺陷终端距离工件受检面的深度，mm；  
 $S_2$ ——缺陷始端波程，mm；  
 $S_1$ ——缺陷终端波程，mm；  
 $\gamma$ ——斜探头的入射角；  
 $L$ ——探头在工件上移动的距离，mm。

用脉冲半高法测出的缺陷大小一般比实际尺寸要大一些。

③ 脉冲消失法（全波消失法） 此法适用于工件缺陷面积在深度下的声束面积大，且当探头移动时，缺陷波高度变化很大，很难找出固定的最高反射波的情况。典型的缺陷如气孔群和夹渣群，见图 4-16 所示。

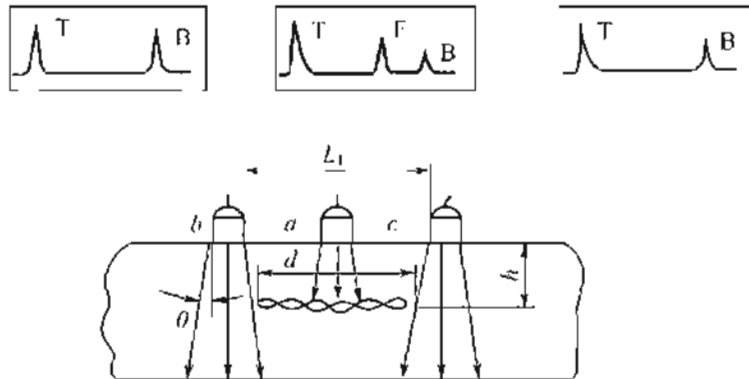


图 4-16 脉冲消失法测定缺陷大小

当在工件上的  $a$  处发现缺陷时（探头在图 4-16 的  $a$  处），将探头作左右或前后移动，找出缺陷波消失的位置（探头在图 4-16 的  $b$ 、 $c$  处），然后记下  $bc$  间的距离，则缺陷的尺寸为：

$$d = L_1 - 2h \tan \theta$$

式中  $L_1$ ——当缺陷波消失时两探头位置边缘间的距离，mm；  
 $h$ ——缺陷距离工作受检面的深度，mm；  
 $\theta$ ——声束的半扩散角。

### (3) 各种缺陷的波形特征

① 气孔 气孔的形状基本呈球状、椭球状，手工电弧焊气孔多数是分散的密集气孔，自动焊气孔多数是成串或上冒的链状气

孔。气孔对超声波反射不大，因此在荧光屏上单独出现一个尖波，波形也较单纯。密集气孔出现数个此起彼伏的缺陷波，而链状气孔则不断出现缺陷波。单个气孔的波形如图 4-17(a) 所示。

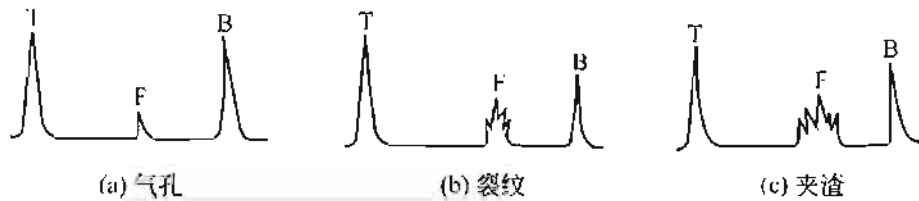


图 4-17 各种缺陷的波形

② 裂纹 裂纹的反射面积较气孔的大，用斜探头探伤时荧光屏上往往出现锯齿形较多的光波，见图 4-17(b) 所示。若此时沿缺陷长度方向平行移动，波形中锯齿变化很大，波高也有些变化，当探头平移一段距离后，波高才逐渐降至消失。

③ 夹渣 夹渣的形状多样，有点状、块状、条状，少数呈片状，且外形不规则，表面粗糙，故其波形是由高低不同的小波合并的，波根也较宽，见图 4-17(c)。当探头沿缺陷平行移动时，条状夹渣的波形会连续出现，而块状夹渣在较大的范围内都有缺陷波出现。

④ 未焊透 未焊透的波形基本上和裂纹的波形相似，不同的是没有向裂纹那样多的锯齿。当未焊透伴随着有夹渣缺陷时，与裂纹的波形区别才较明显，因为这时兼有夹渣的波纹。在探伤时，当斜探头沿着缺陷平行移动时，在较长的范围内存在缺陷波。当探头垂直焊缝移动时，缺陷波消失的快慢与未焊透深度有关，波形消失慢，未焊透深度较大，反之，则深度较小。

⑤ 未融合 未融合多出现在母材与焊缝的交界处，其波形基本上与未焊透相似，但缺陷范围小。

### ◀ 第三节 水压试验 ▶

#### 一、水压试验的目的

锅炉在制造、安装、修理、改造和运行等各个环节的检验中，

水压试验是重要的检验手段之一，但是它不是锅炉检验的唯一手段，它既不能代替别的检验方法，更不能用水压试验的方法来确定锅炉的工作压力。水压试验的目的是检查锅炉受压组件的严密性和耐压强度，但主要是检验其严密性。

### 1. 检查严密性

主要是检查锅炉的接缝、管子胀口、焊缝、人孔、手孔及法兰等连接是否严密。

锅炉的焊缝在水压试验时，如果发现渗漏，则说明焊缝有穿透性缺陷，这是非常危险的，必须查明原因，予以处理修复。

管子的焊口在水压试验时发现渗漏必须修复。

对于老旧锅炉的铆缝和铆钉，水压试验时发现渗漏，必须找出渗漏原因（包括渗漏时间的长短和铆焊所处的位置及水处理后锅炉化验记录），检查后如不是苛性脆化，可用捻缝的办法处理使之严密不漏。如确定是苛性脆化，则不能用简单的捻缝方法处理，应慎重处理，如割除铆缝部位改为焊缝连接，老旧锅炉没有修理价值的则应报废。

新安装的锅炉，其管子胀口在水压试验时发生渗漏，可在降压放水后采取补胀措施，对于胀接过重的管子则应换管。对于老旧锅炉，应分析其渗漏原因，必要时作无损探伤检查，方能确定其修复方法。

### 2. 检查耐压强度

经过检验合格的工业锅炉，其主要受压组件不会发现强度上的问题，因为在正确的水压试验压力下的应力比材料的屈服强度低，所以用水压试验检验耐压强度不是主要的。对运行时间较长的锅炉和停炉保养不良的锅炉，在不易检验到的部位（如管束），由于腐蚀和其它原因，用水压试验来检验耐压强度有一定的作用。

水压试验应是在锅炉受压部件进行强度计算的基础上进行的，而不是盲目确定水压试验压力的，错误地用水压试验的压力来决定锅炉的工作压力是非常危险的。如锅炉结构不合理、焊缝内部存在严重缺陷，但在水压试验时不一定马上被破坏，原因是试验时间不可能太长和试验是在冷态下进行的，但试验可能使缺陷加速损坏。

这类锅炉投入运行后，由于在热态下结构不合理等原因所形成的缺陷就暴露出来，并得到发展而突然损坏（或爆炸）。在大量的爆炸事故中发现，很多自制的或非锅炉制造定点单位生产的结构不合理的锅炉，在使用前大都进行了水压试验，这些锅炉在水压试验后没有明显的损坏，但在运行后发生了不少的爆炸事故，有时甚至在热态试炉时就发生了爆炸。

盲目地提高水压试验压力也是不允许的，因为水压试验压力过高，某些组件所产生的应力超过了材料的屈服强度，会发生塑性变形造成损伤，甚至会造成损坏。

## 二、水压试验前的准备

新制造的锅炉、修理和改造的锅炉，其锅炉和锅炉受压组件的水压试验，应在无损探伤检验及有关检验项目合格后进行。对需要进行热处理的锅炉受压部件和组件，则应在热处理后进行水压试验。

安装中的锅炉，应在锅炉部件和组件安装完毕后，炉墙砌筑前进行水压试验。在水压试验前不应涂刷油漆和覆盖绝热保温材料，以便在试验中观察和处理修复缺陷。

对在用锅炉进行水压试验前，应做好下列准备工作。

① 清除锅炉受压元、部件上的水垢及烟灰。

② 附件经检修后，各类阀件的阀座与阀芯应仔细研磨，装在锅炉上一起经受水压试验，并要求在水压试验时保持不渗漏。但对弹簧式安全阀应拆除加强板，或在安全阀与管座之间加装盲板，以避免水压试验压力过高而损坏弹簧。杠杆式安全阀的重锤应往外移。

## 三、水压试验压力的规定、试验方法和合格标准

### 1. 水压试验压力的规定

新安装（包括旧炉移装）受压元件经重大修理或改造后进行水压试验以及在用锅炉的定期检验中需要进行水压试验时，其试验压力均按表 4-3 及表 4-4 的规定进行。

对制造、重大修理和改造中的锅炉受压部件和组件进行的单独



水压试验时，压力按表 4-3 及表 4-4 选择。

表 4-3 锅炉的水压试验压力

名 称	锅筒工作压力 $p$ /MPa(kgf/cm <sup>2</sup> )	试验压力/MPa(kgf/cm <sup>2</sup> )
锅炉本体	<0.59(6)	1.5 $p$ 但不小于 0.2(2)
	0.59(6)~1.18(12)	$p+0.29(3)$
	>1.18(12)	1.25 $p$
过热器	任何压力	与锅炉试验压力相同
可分式省煤器	任何压力	1.25+0.49(5)

表 4-4 锅炉组件水压试验压力

名 称	组件工作压力 $p_1$	水压试验压力 $p_s$
集箱		1.5 $p_1$
管子		2 $p_1$
省煤器铸件		2 $p_1$
其它受压元件		2.5 $p_1$

## 2. 水压试验

(1) 水压试验的准备工作 试验时，应装两只校验合格的压力表，其量程最好是试验压力的 2 倍。一只装在手压泵的出口，另一只安装在锅筒上，并以这只表作为试验压力的依据。

水压试验时，周围空气温度应高于 5℃，否则应有防冻措施。试验用水的水温一般为 20~70℃，水温过低容易在锅炉受压组件表面结露，难以区别渗漏情况；水温也不宜过高，以防止引起汽化和产生过大的温度应力，并且如有渗漏时，水容易蒸发掉而不容易观察到渗漏处。水压试验结束后暂不投入运行时，应把锅水全部放尽，这在气温较低（尤其是北方地区）时尤应注意，以避免锅水结冰和腐蚀而损坏锅炉。

锅炉顶部应装放气阀，以便将锅内的空气随着锅水的灌入而排放出去。有时，小型锅炉没有设放气阀，则可利用装在锅炉最高位置的阀门放气（如安全阀、主汽阀等）。

锅炉受压元、部件在进行单独水压试验时，应有专门的工夹具

和塞子，最好应准备水压试验台进行此项工作。

(2) 水压试验 试验时，水压应缓慢升降。当水压上升到工作压力时，应暂停升压，进行初步检查（管子水压试验时，无需暂停升压），若无漏水或异常现象时，再升压到试验压力，焊接的锅炉应在试验压力下保持 5min，铆接的锅炉应在试验压力下保持 20min（管子水压试验时，允许保持 10~20s）。然后降到工作压力，再进行仔细检查。检查期间，压力应保持不变（不得以水泵维持压力）。

### 3. 水压试验合格标准

符合下列条件，即认为合格：

- ① 在受压组件金属壁和焊缝上没有水珠和水雾；
- ② 铆缝和胀口及附件密封处，在降到工作压力后不漏水；
- ③ 水压试验后，用肉眼观察，没有发现残余变形。

当试验不合格，对于有渗漏部位的缺陷允许返修。返修后应重新进行水压试验。

### 4. 水压试验的注意事项

① 试验前，检查人员应将需要检查的部位事先列出需检项目、画出受检组件草图，以备试验时记录和防止漏检。

② 水压试验应在白天进行，便于观察和检查。

③ 当水压试验时发现渗漏，应当使表压力降到零后方能修理，禁止带压修理。

④ 对制造、重大修理和改造中的锅炉受压部件和组件，移装时的原部位及部、元件损坏而重新制作的受压元、部件以及省煤器铸件，应单独进行水压试验。待锅炉组装后再作整体水压试验。

⑤ 锅炉水压试验后，应拆除所有管座上的盲板和墙板。

⑥ 锅炉水压试验时，要求用手压泵升压，不应用电动或气动锅炉给水泵升压。因这类泵流量大，升压快，很不易控制，很容易使压力超过规定值而损坏锅炉。

⑦ 水压试验必须用水进行，严禁用气压试验来代替水压试验。

⑧ 水压试验压力，必须按照规定执行，不准任意提高试验压力。

⑨ 水压试验结束应有记录备查，并有检验人员签字和注明检验日期。

## 第五章

# 锅炉的维护与修理

### 第一节 锅炉常见缺陷及产生的部位

#### 一、腐蚀

腐蚀是锅炉在使用过程中最容易产生的一种缺陷，对锅炉的安全运行危害极大。锅炉运行中受压组件的内、外壁均会发生腐蚀。内壁着水的一侧，由于水垢，高盐度的锅水及高温蒸汽和氧、二氧化碳的作用，使金属被腐蚀；受压组件着火、烟气的一侧，由于烟气、空气、炉灰及水蒸气、渗漏的水滴等作用，也使其发生严重腐蚀。受压组件的腐蚀有多种形式，其产生的部位也有所不同。

##### 1. 大气腐蚀

确切地说，大气腐蚀是湿气腐蚀，即在空气潮湿及器壁不洁的条件下，空气中的氧通过器壁上的水膜与金属发生电化学腐蚀。试验表明，干燥的空气对碳钢等铁合金一般是无腐蚀作用的，潮湿到一定程度（相对湿度超过60%）的空气才能腐蚀钢材，器壁及空气的污染则有加快腐蚀的作用。

锅炉的大气腐蚀多产生于经常处于潮湿场合的部件及易于积水分或湿气的部位。如锅炉停炉后，没有采取可靠的防腐措施，只是将锅水一放了之，结果立式锅炉炉胆下脚圈处和卧式锅炉的锅壳底部。水管锅炉下锅筒底部和集箱最低部位锅水没排干净，积水处的金属产生腐蚀；由于停炉后炉膛和烟道内没作清扫，没有放吸湿剂，湿气顺着砖墙渗透到与锅炉受压组件接触处，腐蚀锅炉金属。如果耐火砖是酸性的，锅炉金属与其接触处腐蚀将会更严重。

由于器壁局部漏汽、漏水或潮湿造成的腐蚀，则产生于锅炉的门孔、法兰及其它活动连接、胀口、铆缝等易于出现“跑、冒、滴、漏”之处。

## 2. 低温腐蚀

低温腐蚀是烟气腐蚀的一种，实质上是硫酸造成的酸性腐蚀。燃料中的可燃硫燃烧后，生成二氧化硫及少量的三氧化硫，成为烟气的一部分。试验表明，烟气中的二氧化硫对金属不会产生明显的腐蚀，三氧化硫含量虽然极微，但由于它与烟气中的水蒸气结合形成硫酸蒸气，会显著提高烟气的露点温度，使烟气在烟道内流动降温达到露点温度，在烟道内的低温受热面上凝结结露，造成腐蚀和堵灰。

低温硫腐蚀经常发生在水管锅炉的省煤器和空气预热器的烟气侧。经验表明，对于链条炉和抛煤机炉，燃料含硫量  $S^y \geq 1.5\%$  时，即会产生明显的低温硫腐蚀；对于煤粉炉，当燃料含硫量  $S^y = 1.5\% \sim 3\%$  时，如不采取措施，就会有较明显的堵灰和腐蚀；当  $S^y > 3\%$  时，产生严重腐蚀，锅炉因预热器严重堵灰而被迫低负荷运行，也会因腐蚀泄漏而造成大量漏风。

## 3. 氧腐蚀

氧腐蚀指溶于水中的氧气与盛水设备金属壁面作用所发生的电化学反应。当未经除氧的水送入锅炉时，就会在锅炉的部分部件中发生氧腐蚀。

有省煤器的锅炉，氧腐蚀主要发生在给水管道和省煤器中；没有省煤器的小型锅炉，其锅筒和水冷壁会发生氧腐蚀。停用后未进行保养的锅炉，也可能产生严重的氧腐蚀。

氧腐蚀是局部腐蚀，被腐蚀处呈点状，称为溃疡腐蚀。严重的形成深孔或穿孔，危及部件的正常运行。

如果给水中同时存在氧和二氧化碳时（水中二氧化碳有的是给水中原来溶解的，有的是软水剂进入锅炉后，碳酸钠在高温、高压下水解而来的），金属被腐蚀的情况会更严重。这是因为氧腐蚀的初步产物氢氧化亚铁先与二氧化碳作用，生成溶于水的重碳酸亚铁，使金属表面没有腐蚀产物；当水中还有氧气存在时，再氧化生

成氢氧化铁，加快了腐蚀速度。因此，这种腐蚀特征往往是金属表面没有腐蚀产物，而是呈或大或小的溃疡状态。

#### 4. 垢下腐蚀

当锅炉受热面上有沉积物以后，不但会使金属壁过热而造成损坏，而且会造成腐蚀，即所谓的垢下腐蚀。垢下腐蚀的情况有以下几种。

① 垢内的氧化物与金属壁之间的电化学腐蚀 当受热面表面的沉积物中含有氧化铁和氧化铜等杂质时，氧化物成为阴极，使金属壁的铁离子不断溶于锅水。这种腐蚀一般发生在向火侧的水冷壁管内壁。

② 碱性腐蚀 由于沉积物的导电性差，沉积物下部的金属壁温升高，使沉积物与金属表面之间的锅水浓缩，当锅水中含有游离的氢氧化钠，沉积物下的锅水 pH 值升高到大于 13 时，金属壁的氧化保护膜被氢氧化钠溶解，使腐蚀加剧，结果在金属表面产生凹凸不平的腐蚀坑，坑上有疏松的腐蚀产物。腐蚀发生到一定程度，出现渗漏，甚至发生爆管事故。

③ 酸性腐蚀 如果钠离子软化水中的管道渗漏，或洗水流入软水池，都会使锅水中含有大量的氯化镁和氯化钙，使锅水的 pH 值下降，对钢材产生酸腐蚀，并且使氢离子积聚。如果受热表面有坚硬、致密的水垢存在，氢不能扩散到汽水混合物中，而渗入钢材中，与碳钢中的渗碳体发生反应，结果造成碳钢脱碳，同时生成的甲烷在金属内部产生压力，使金属组织发生变化，产生微小晶间裂纹，使金属变脆而在运行中破裂。在中、高压锅炉上容易发生这种爆管事故。

#### 5. 应力腐蚀

锅炉受压组件在腐蚀介质和应力的共同作用下所引起的破裂损坏，称为应力腐蚀。其表现形式为腐蚀和裂纹共同出现。应力腐蚀常常导致突发性的脆性破坏，造成严重后果，因而值得高度重视。

苛性脆化是应力腐蚀中遭受碱性腐蚀的一种特殊情况，即锅水中含有一定浓度的氢氧化钠，在温度较高的特定环境下，会使碳钢和合金钢产生应力腐蚀，这种现象也称碱脆。

钢的碱脆一般要同时具备三个条件：较高的温度，高的碱浓度

和拉伸应力，尤其是不均匀的拉伸应力最容易引起碱脆。在锅炉受压组件的某些部位，具备发生碱脆的三个条件。锅炉用水经过水处理后，一般都含有过剩的碱（氢氧化钠），虽然在正常情况下，锅中碱的浓度会被调节到使它对钢不产生腐蚀，但在局部地方常常因氢氧化钠富集而使水的碱浓度增大。例如，在盐的沉积物及多孔性氧化皮的下面以及蒸发速率高的地方，更常见的是漏缝处。因为在铆接及法兰连接处如果有细小缝隙，在毛细作用下，吸入一些锅水，在高温下被蒸发，这样不断吸入、蒸发，使水中的游离氢氧化钠残存在缝隙之中，最后达到发生碱脆所需要的浓度。至于不均匀的拉伸应力，在锅炉的承压部件中是普遍存在的，例如开孔周围、封头过渡区等，特别是在铆接缝的捻缝处以及受力不均匀的法兰连接处，局部应力可能更大。

苛性脆化是一种电化学腐蚀，其腐蚀产物呈灰白色、白色或黄白色。由于苛性脆化裂纹发展初期，金属无明显的异常现象，人们很难发现；而且裂纹的扩展与时间不成比例，裂纹扩展至断裂往往是在很短时间内发生的，所以苛性脆化是一种危险的缺陷。

## 6. 疲劳腐蚀

疲劳腐蚀是交变拉伸应力与腐蚀性介质共同作用引起的腐蚀。它与应力腐蚀的主要区别在于应力是否呈周期性变化，所以疲劳腐蚀也称交变应力腐蚀。

容易发生疲劳腐蚀的部位是焊缝、开孔及结构不连续等高应力部位及温度经常变化而部件受热变形受到限制的部位。例如，卧式锅炉炉胆板边圆弧处，由于炉胆热胀冷缩而产生交变应力，加上锅水侵蚀，致使出现起槽腐蚀；与锅筒相连接的给水管道和定期排污管道，由于经常的温度变化而引起交变热应力，在腐蚀性介质的作用下，会产生腐蚀性热疲劳。特别是易引起应力集中的表面缺陷（如裂痕、缺口、腐蚀坑等）处更易发生疲劳腐蚀。

## 7. 氢脆和氢腐蚀

氢在钢中的富集而使钢材变脆的现象称为氢脆，当氢渗入金属，与金属内渗碳体发生化学反应，使金属脱碳，生成甲烷，使晶粒边缘受到巨大压力，导致晶格组织产生永久破裂，这种金属组织

和成分发生变化的氢脆就是氢腐蚀。钢的氢脆是否产生，主要取决于氢的压力、温度、作用时间和钢的化学组成。

氢脆裂纹本质上属于应力腐蚀裂纹，但它与其它腐蚀裂纹有本质区别。其它腐蚀裂纹腐蚀产物为固体或液体，在裂纹中或裂纹断口上有腐蚀产物的痕迹；而氢脆的腐蚀产物是氢气，氢腐蚀物的腐蚀产物是甲烷，它们均是气体，不附着在断口表面上，因而能保持金属光泽。此外，其它腐蚀裂纹均起源于金属表面，由表面向内扩展；而氢脆裂纹，特别是氢腐蚀裂纹，通常是从金属内部开始、垂直于应力方向，向裂纹两端发展，裂纹两侧有明显的脱碳现象。

氢脆及氢腐蚀一般产生于过热器、蒸汽管道等高温部件上。此外，水冷壁管和对流管束，如果水循环出现故障，如管子倾斜角度太小，出现汽水分层或局部地方整体不能畅通，也会产生氢脆。由于氢脆及氢腐蚀是一种钢材内部性能及组织变化的缺陷，难以检查发现，对设备的安全运行具有很大威胁，因此在运行监督中必须充分引起注意。

## 二、裂纹

裂纹是锅炉承压部件上常见的缺陷之一。裂纹常常导致部件爆炸或爆破，如引起炉管爆炸甚至锅筒爆炸事故。锅炉承压部件的裂纹，按其产生的原因可以分为原材料裂纹、焊接裂纹、过载裂纹、疲劳裂纹、热应力裂纹、蠕变裂纹、腐蚀裂纹等。不同裂纹产生的部位不同，并具有不同的形貌。

### 1. 原材料裂纹、焊接裂纹

原材料裂纹、焊接裂纹、热处理裂纹等，按通常技术要求是不允许带到运行使用中去的。运行中发现的这类裂纹，大都是原材料、焊接和热处理中的微细裂纹在运行条件下发展扩大的结果，也有个别属制造质量控制不严而漏检的裂纹。一般情况下，原材料裂纹比较少见，而焊缝部位在运行中则易出现裂纹。焊缝裂纹既与焊缝本身的原始缺陷有关，也和各种外部运行因素有关。

### 2. 过载裂纹

过载裂纹是外加载荷超过了金属的强度极限而产生的裂纹，常

发生在部件受力最大部位或应力集中部位，如锅壳上没有加强的大孔边缘，管孔之间的孔桥区、板边转角圆弧处，部件表面弧坑等局部结构不连续处。由于裂纹主要由过大的机械应力引起，所以裂纹细长、尖锐、无分枝或分枝很少。

### 3. 疲劳裂纹

疲劳裂纹是因为结构或材料缺陷造成局部应力过高，经过反复的加载卸载或压力波动之后产生的裂纹。常见的疲劳裂纹有机械疲劳裂纹和热疲劳裂纹。

承压部件的机械疲劳绝大多数属于金属的低周疲劳，其特点是承受较高的交变压力而产生交变的次数并不需要太高，一般在  $10^3 \sim 10^5$  次之间。因此低周疲劳发生在较高局部应力的地方。在承压部件的接管、开孔、转角及其它几何形状不连续的地方、在焊缝附近、在钢板存有缺陷的地方等，都有不同程度的应力集中，有些地方的局部应力往往要比设计应力大几倍。这些较高的局部应力如果仅仅是几次的作用，并不会造成部件的破裂。但是如果反复出现应力波动，都会使受力最大的晶粒产生塑性变形并逐渐发展成微小的裂纹。随着应力的周期性变化，裂纹即逐渐扩展，最后导致部件破裂。

热疲劳裂纹是在交变热应力反复作用下产生的裂纹，多发生在温度经常波动的部件上。如锅筒进水管孔附近，角板拉撑的焊脚处，大型锅炉的喷水减温器上，小型锅炉的炉门圈或炉胆上，水循环出现汽水分离的汽水分界面处。典型的热疲劳裂纹宏观形状为龟裂状，裂纹的扩展极不规则，呈跳跃式，有时会产生分枝和二次裂纹。温度越高，裂纹条数越多，可发展为热疲劳裂纹网络。

### 4. 蠕变裂纹

蠕变裂纹是在金属发生蠕变过程中产生的裂纹，多发生在锅炉过热器、蒸汽管道、水冷壁等高温部件中，往往出现于金属表面或受力最大处，呈短细状的裂口，沿管子或筒体轴线分布，并伴随着部件的蠕胀变粗。

### 5. 热应力裂纹

热应力裂纹是因过大的热应力造成的裂纹，常发生在刚性连接



的热部件上，如不同长度的管子刚性夹持在一起，异种钢焊接在一起等情况下容易产生这种裂纹。

### 三、变形

变形是指锅炉承压部件发生改变结构尺寸或形状的塑性变形。部件发生变形以后，改变了原有的结构形状，在变形部位造成结构不连续的应力集中，而且变形往往伴随着其它缺陷，如壁厚拉薄、裂纹、金属组织变化等。因而，变形如得不到及时妥善的处理，常会造成非常严重的后果。

锅炉部件的变形通常有以下几种：超压引起的变形、超温引起的变形及其它原因引起的变形等。

超压变形是指受压组件在正常工作温度下，因为锅炉内工作压力超过金属材料的屈服极限而发生的变形。这种情况一般发生在受压组件结构不合理的地方及壁厚过分减薄处。如锅筒发生大面积的片状腐蚀，壁厚显著减薄，在内压作用下会发生鼓包或鼓起变形；锅壳式锅炉炉胆，承受外压，超压时失稳而向火侧内陷。

过热变形是指受压组件局部承受高温，引起过热，过热部位金属材料强度迅速降低，以致在正常工作压力下形成塑性变形。过热变形一般是由于缺水，水循环不良和结垢严重造成的。常见的情况有：由于水质不好内部结垢或排污不畅内部沉着泥渣，直接受热的锅筒或锅壳往往会过热鼓包；由于缺水、水垢过多或管子倾斜角度不够造成汽水分层等，使水冷壁顶棚管过热变形直至下塌；由于缺水，水垢过多或水循环破坏而使炉膛两侧水冷壁管变形、鼓包；因结垢或缺水过热，卧式内燃锅炉炉胆高温处凹陷变形；由于水质不好或排污不合理，使快装锅炉锅壳底部堆积泥渣过多而鼓包，对于立式锅炉，可引起炉胆和横水管鼓包。

其它原因引起的变形，包括锅炉各部件受热不均，材质夹层而造成的变形，或是在加工、安装过程中引起的局部的凸起和凹陷等。

### 四、磨损

锅炉部件的磨损常见的是冲刷磨损，即带有固体颗粒的烟气流经受热面时，对受热面产生的磨损。磨损会减少部件的壁厚和有效

承压面积，导致部件发生破裂事故。

锅炉受压面磨损的原因一般有三种：机械磨损、吹灰磨损和烟气磨损。机械磨损一般发生在立式锅炉炉门圈，或卧式内燃锅炉炉胆下圈。这是由于人工加煤和拨火时，灰耙或炉钩来回移动造成的磨损。吹灰磨损是锅炉吹灰器位置调整不当，蒸汽或压缩空气正好对着管子，长期下去，造成受热面管子严重磨损。烟气磨损是金属受热面受到烟气中灰粒高速度冲刷的磨损，常发生在局部烟气流速偏高部位，如省煤器与炉墙之间形成“烟气走廊”之处，空气预热器管端烟气出口之处，对流管束析烟墙局部损坏出现烟气外露之处等。

影响烟气磨损的因素很多，如受热面的布置形式、燃料的种类、运行参数、烟气中固体颗粒的大小、飞灰的浓度、烟气的流速等，尤其是烟气的流速对受热面磨损的影响甚大。所以控制烟气的流速，可有效地降低烟气对受热面管子的磨损。

## 五、渗漏

锅炉受压组件的连接处以及门、孔处，由于种种原因，常会出现渗漏情况。渗漏不但浪费热能，还会导致渗漏处的腐蚀损坏。发生渗漏的常见部位如下。

① 人孔、手孔、检查孔处，主要是制造质量低劣、垫料不严、孔盖没有拧紧或孔与盖配合不好所致。

② 法兰连接处。造成渗漏的原因是垫料不平整；法兰制造质量差，法兰面偏斜，接触面不平；法兰没有拧紧等。

③ 铆缝、焊缝处。由于铆接质量不好或铆接处过热，使铆钉和铆缝发生松动；由于焊接质量不好，焊缝处有砂眼和裂纹。

④ 管孔胀接处。由于胀接质量不好或胀口松动，缺水最容易造成大面积胀口渗漏。

⑤ 各种阀门的泄漏。主要是由于阀门的填料不良；阀芯和阀座之间有杂物或磨损，密封不严而渗漏。

⑥ 水位表旋塞的渗漏。这是因为旋塞填料不良而造成的。

## 六、钢材组织缺陷

钢材组织缺陷是指钢材金相组织在一定条件下发生了具有危险

性的变化，也常叫作组织恶化。焊接中的过烧、疏松等属于组织缺陷，运行中的腐蚀，严重变形也往往伴随着有组织缺陷，如钢材脆化、过烧、脱碳等。组织缺陷造成钢材性能的显著降低，但单纯的组织缺陷是在金属组织内部发生和发展的，在外观上常常没有征兆，难于发现和防范，因而具有很大的危险性。

### 1. 珠光体球化

锅炉承压部件常用的各种碳素及低合金钢大都是珠光体钢，其正常组织是由珠光体晶粒与铁素体晶粒组成的。在长期高温长期作用下，珠光体中的片状渗碳体逐渐自行转变成球状，并逐渐由小球聚集成大球团的现象，叫珠光体球化。

珠光体球化会使钢材的常温强度及高温强度显著降低，所以，常会造成锅炉高温部件的损坏。低碳钢及低合金钢都会在长期高温下产生珠光体球化，其中低碳钢球化趋势尤为显著。因此，对于使用期限超过数千小时的高温高压锅炉，在检验中必须注意这个问题。

### 2. 石墨化

石墨化是低碳钢在长期高温下发生的危险的组织变化，是钢中渗碳体在长期高温作用下自行分解的一种现象，也称为析墨现象。石墨的强度极低，石墨的存在相当于在金属内部产生了空穴。在空穴周围形成了复杂的受力状态，并出现应力集中现象，使金属发生脆化。石墨化使钢材的常温及高温强度下降，冲击韧性下降更甚，当石墨呈链状分布于晶界时尤为危险。

石墨化现象只出现在高温下，对于碳钢约在 450℃ 以上。细晶粒钢及有冷加工硬化的钢都较易产生石墨化，而且石墨化最容易发生在焊接热影响区，在该部位造成脆裂。

## ◀ 第二节 缺陷的检查 ▶

### 一、腐蚀的检查

锅炉部件内外壁腐蚀的检查一般是直观检查，检查时，要充分

考虑到部件可能产生的各种形式的腐蚀及可能发生腐蚀的部位，对容易产生腐蚀的部位进行重点检查。当发现均匀腐蚀及局部腐蚀时，应对被腐蚀的部位的剩余壁厚测定。

应力腐蚀及疲劳腐蚀，一般难于通过直观检查发现。对于运行条件有可能引起这类腐蚀的部件，必要时作金相检验、化学成分分析和硬度测定。

## 二、裂纹的检查

检查裂纹的主要方法是直观检查和无损探伤。往往是先通过直观检查发现裂纹迹象或可疑线索，再借助无损探伤手段加以确定。

检查裂纹的重点部位是焊接及热影响区、开孔边缘、结构形状或尺寸变化部位等。

## 三、变形的检查

变形一般也是通过直观检查发现。严重的局部凹陷、鼓包、管子塌陷通过肉眼观察是不难发现的。严重的整体膨胀变形也可以通过直观检查发现；不太严重的变形可以通过平直尺、样板等进行检查。

## 四、磨损的检查

磨损的检查基本与腐蚀检查相同。

## 五、组织缺陷的检查

当怀疑操作条件有可能造成部件产生组织缺陷时，可以通过化学成分分析，金相分析及力学性能试验检查确定。

# ◀ 第三节 缺陷的修理 ▶

## 一、腐蚀和磨损的修理

### 1. 不作修理的情况

受压组件均匀腐蚀、磨损量符合下列情况之一且剩余壁厚满足

运行压力下的强度要求时，可不修理，监督使用。

① 双面对接焊锅筒的筒体部分，在焊缝和管孔区外，壁厚减薄量小于 20%；在焊缝和管孔区内，壁厚减薄量小于 15%。

② 椭球形封头，在过渡圆弧部分以外，壁厚减薄量小于 25%；过渡圆弧部分壁厚减薄量小于 15%。

③ 管板管孔区壁厚减薄量小于 25%；管板管边壁厚减薄量小于 15%。

④ 炉胆壁厚减薄量小于 20%。

⑤ 水管、烟管壁厚减薄量小于 1.5mm。

⑥ 局部腐蚀面积如小于或等于相当于直径 350mm 圆面积时。

## 2. 堆焊修理

受压组件腐蚀、磨损的程度在下列范围内，允许用堆焊方法修理。

① 受压组件剩余壁厚大于或等于原来壁厚的 60%，且面积小于或等于 350mm<sup>2</sup>。

② 任何深度的个别腐蚀凹坑，当直径小于或等于 40mm，且相邻两凹坑距离大于或等于 120mm 时。

在进行堆焊时，应注意以下几点：

堆焊前必须将金属表面的油污、铁锈、水垢等污物清理干净；

堆焊面积较大时，应分区堆焊，以避免由于热量过于集中产生变形和裂纹；

当管板腐蚀较深，需作多层熔焊时，每层高度不要超过 3mm，上下两层的焊道方向互成一定的角度，并注意不要在各堆焊区的分界处产生过深的凹坑；

堆焊后应清理焊缝表面的熔渣和毛刺。对于炉胆腐蚀的堆焊，焊后应将高出板面的焊缝铲平、磨光。

③ 挖补修理或更换组件。对于上述情况以外的严重腐蚀和磨损应采取挖补和更换处理。

挖补处理，即挖除组件包括缺陷部分的钢板，然后用相同材料和厚度的钢板，补焊在被挖之处。进行挖补处理时，应注意以下几点。

查明锅炉原来材料，合理选用挖补材料。对于没有任何原始资

料，材质不明的锅炉，要通过材料的化学成分分析和力学性能试验，确定材料的性能。挖补所用的新材料，应不低于原组件的性能，并应按照有关规定，对材料进行验收和复验。如对挖补材料有特殊的要求，应在修复方案中加以说明。

补板的形状一般为圆形、椭圆形、矩形等。矩形的四个角必须是圆弧过渡，圆角半径不小于 100mm。补板的长和宽应不小于 250mm。

焊接时要根据不同的施焊位置，选择相应的坡口形式。如适合俯焊的地方，可采用 V 形坡口；适合横向焊接的地方，可采用 Y 形坡口。焊接时，要保证两条纵焊缝之间距离符合有关技术规范的要求。

挖补的焊接操作必须由持证焊工承担。焊接时，周围温度不应低于 0℃；焊缝尽量采用双面焊；进行下一层焊接前，必须清除前层焊缝的熔渣；受压组件（锅炉钢管的对接连接除外）不得采用气焊焊接。

焊接的装配不准强行组装。补板与主板施焊前的装配，常采用的方法是将对齐，点焊几处固定补板位置。这种方法往往会因焊缝处的收缩而将点焊拉破，若未被发现，会使焊缝处留下缺陷。较好的方法是在主板两侧的焊缝边缘上焊上若干个角铁，将补板卡住而不焊死，然后分段按次序焊接，如图 5-1。对于圆弧形的筒底，可用两块与圆筒内径相同的弧形装合板，在圆筒内部与补板点焊几处，然后焊接。

挖补往往带来新的缺陷及残余应力，所以必须注意挖补件的材

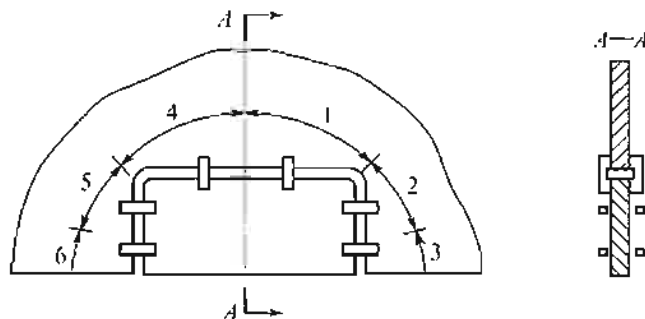


图 5-1 角铁装配

1~6—弧形装板的位置

料、结构、焊缝形式及焊接质量，焊后应进行局部清除应力处理。

锅炉中最常更换的原件是各种受热面管子。除管子外、管板、炉胆等组件外，如缺陷过于严重，挖补范围超过组件结构尺寸一半以上，也应将整个组件割除更换。

## 二、裂纹的修理

锅炉受压组件上不允许存在任何裂纹，如发现裂纹，应查明裂纹的性质、深度和长度，分析产生裂纹的原因，进行不同的处理。

### 1. 打磨修理

对于不太严重的表面裂纹，可直接将裂纹打磨掉。然后圆滑过渡，而不需要补焊。如表面裂纹深度不超过钢板的负偏差，裂纹部位钢板厚度不小于强度计算所确定的最小允许值，可将裂纹部位进行平滑打磨。

### 2. 补焊修理

焊缝上的裂纹允许剔除后补焊；焊缝以外的裂纹的深度超过钢板负偏差，或裂纹部位钢板的厚度小于强度计算所确定的最小允许值，但条数不多，且不聚集在一起，间距大于 50mm，总长度不超过本节筒身长度的 50% 时，允许在裂纹处开坡口补焊；炉胆或封头板边圆弧的环向裂纹，其长度小于周长的 25% 时，或立式锅炉喉管纵向裂纹总长小于喉管长度的 50% 时，也可将裂纹剔除后开坡口补焊。

铲除裂纹的具体作法是：先在裂纹两端 50mm 处各钻一个“截止孔”，其深度与裂纹一致；然后在两孔间用风铲将裂纹铲除干净，并将铲槽修成周围圆滑过渡的 U 形或 V 形坡口，再进行补焊。

### 3. 挖补修理或更换筒节

对于下列情况的裂纹，不能进行补焊修理，而必须挖补修理或更换筒节。

① 焊缝以外的裂纹（如火管锅炉锅壳上的纵向裂纹），深度超过钢板的负偏差，长度超过本节筒身长度的 50%；炉胆、封头板边处的环向裂纹其长度大于周长的 25% 时，不宜补焊应作挖补修理或更换。

② 苛性脆化造成的晶界裂纹一律不能补焊，必须挖补或更换。

③ 管板上孔间存在下面几种裂纹不能补焊：呈封闭状的裂纹；从管孔向外呈辐射状的裂纹；连续穿过四个以上孔带的裂纹；在孔带最短一排穿过两个孔带的裂纹；在孔带最外一排且向外延伸的裂纹。

④ 水管、烟道胀接处管端有环形裂纹，必须更换管子。

⑤ 立式锅炉唯管有环形裂纹，或纵向裂纹总长超过唯管长度的 50% 时，应更换唯管。

### 三、变形、鼓包的处理

#### 1. 不作修理的情况

锅炉受压组件的变形在下列范围内，可不作处理，在运行压力下监督使用。

① 非因材质原因而在锅筒筒体、炉胆发生鼓包，在鼓包处未发现有裂纹，过烧，受火面鼓包高度不超过筒体直径的 1.5%、非受火面不超过 2% 且不超过 2mm 时，采取必要措施（如彻底清除水垢），可不修理。

② 管板局部鼓包，高度不超过管板直径的 2% 且小于 25mm，在排除钢板质量问题和其它缺陷情况下，可不作修理。

③ 受热面管（如水冷壁管、对流管、过热器管、烟管等）的局部鼓包，如高度小于 3mm 且没有裂纹和严重过热等缺陷，可暂不修理。

④ 管子允许胀粗的限度：过热器管（碳钢）不大于管径的 3.5%，其它管子不大于 5%。

⑤ 直管弯曲度不超过管长的 2%，且最大不超过管子内径的 90%，可继续使用。

#### 2. 复位修理

① 非因材质原因而在锅筒筒体、炉胆发生鼓包，在鼓包处未发现裂纹、过烧，受火面鼓包高度超过筒体直径的 1.5%，非受火面超过 2%，且鼓包的钢板减薄量小于原板厚的 20%，可用加热法将鼓包顶回。

② 管板局部鼓包，高度超过管板直径的 2%，在排除钢板质量



问题和其它缺陷的情况下，应用加热法顶回。

进行顶回修理时，应注意以下几点。

热顶时，加热温度在 600℃左右。加热要均匀，焊枪要来回移动防止局部过热烧损。

从变形边缘向内，逐步加热，逐步用千斤顶加压胎具，直至恢复原状为止。

### 3. 挖补修理或更换

① 因材质原因造成受压组件鼓包时，必须进行更换。

② 锅筒筒体、炉胆发生鼓包，鼓包高度超过上述规定，且鼓包处钢板减薄量超过了原板厚的 20%，或鼓包处有裂纹、过烧等严重缺陷时，必须进行挖补修理。更严重者应更换筒体。

③ 受热面管子的局部鼓包，若高度超过 3mm，或有裂纹、严重过热等缺陷，应切换管段或挖补修理。

④ 管子胀粗变形，碳钢过热器管超过管子内径的 3.5%，合金钢过热器管超过管子内径的 2.5%，其它管子（水冷壁管、对流管、烟管等）超过 5%应切换损坏的管段。

⑤ 直管弯曲度超过管长的 2%，或弯曲处有裂纹、过烧等其它严重缺陷时，应换管。

更换管子时应注意以下几点。

在抽出破损的管子时，注意不能使锅筒或管板钢板损坏。抽出与管孔焊接的管子，可用气割割除；抽出与管孔胀接的管子，可用凿子产出喇叭口，然后用尖头的凿子将管子劈开。大型水管锅炉，可利用气割在靠近锅筒处将管子切断，然后用风铲将残余管头去掉。

割换的管段长度不能小于 300mm，焊缝距锅筒与集箱表面以及距管子弯曲处与支架边缘的距离，不少于 50mm。几排管子同时更换，其焊缝不应在同一水平线上。

管子对接时，其边缘偏差值（错边量）不得超过管子壁厚的 15%加 1mm。

在管板上焊接烟管时，若换管量很大，甚至是全部换管，可由上至下、由左至右一排一排地进行。同一排管子，应分两次焊接，即每次焊接时要跳开一个管子。

当个别管子损坏而又因生产急迫无法割补时，可以先将破损的管子从端头堵死，等大修时再换。

采用胀接更换管子时，如果锅筒或管板上的管孔因为以前胀管已有扩大，在管孔间隙满足工作压力的条件下，可将管头镦粗或管孔内加铜衬圈后再进行胀接。

#### 四、泄漏的处理

① 发现泄漏时，应检查其附近有无腐蚀，若泄漏处被保温层覆盖，应拆除保温层。

② 水管、烟管胀接处的泄露，补胀后仍泄漏者，应更换补管或采用管段封焊。

### ◀ 第四节 对存在缺陷锅炉的处理原则 ▶

发现锅炉存在缺陷后，应根据锅炉参数、容量、工作条件、设计性能和制造质量情况及缺陷性质、部件、严重程度，进行综合分析，采取正确的处理措施。一般来说，对在用锅炉存在的缺陷，应以锅炉是否符合使用为基本标准，分析缺陷是否影响锅炉安全可靠地使用到下一个检查周期，以决定对缺陷如何处理。

在对锅炉缺陷处理时，要具体问题具体分析处理，既考虑安全可靠，又考虑经济合理。对中压以上的锅炉，发现缺陷必须从严掌握，慎重对待。

对存在缺陷的工地锅炉，可分别按下列几种情况进行处理。

#### 一、继续使用

如果缺陷不太严重，如分散的坑点腐蚀、不太严重的局部腐蚀和磨损、高度较小的鼓包等，其存在不会危及锅炉安全运行时，可不作处理，锅炉在原运行条件下继续使用。

#### 二、监护使用

在具有使用价值的锅炉上，发现有严重而又难于消除的裂纹，

经省级安检部门同意，通过严格科学的安全评定，可对锅炉监护使用。

### 三、降压使用

对于腐蚀剩余厚度（扣除至下一次检验期的腐蚀量）小于设计计算壁厚，轻微的晶间腐蚀或疲劳腐蚀及一部分打磨过的裂纹等情况，可考虑降压使用。降压的幅度可通过强度核算确定。

### 四、修理使用

根据缺陷的类型、产生的部位及其严重程度，可采用打磨、修补、挖补等不同的修理方法。修补或挖补后的部件能否承受原设计的温度或压力，必须重新进行计算核定。

### 五、更换部件

锅炉中的各种受热面管子，当蠕变胀粗到一定程度或严重腐蚀、磨损及存在裂纹时，即应局部或整根更换管子。

### 六、判废

对于缺陷严重，难于修复或确无修复价值或修复后仍难以保证安全使用的锅炉，经论证可判废或限期判废。判废后的锅炉不得再承压使用。

对于强度不够，结构不合理，用材不当等带有先天缺陷的锅炉，如无有效的处置措施，不能再继续使用。

## ◀ 第五节 锅筒的检修 ▶

### 一、锅筒常见缺陷

锅筒是锅炉的主要部件，由锅壳和封头组成。由于锅壳上有较多管孔，附加应力较大；同时，锅筒壁较厚，在运行状态下会产生温差，引起热应力。锅筒容易产生的缺陷有腐蚀、裂纹、鼓包和弯

曲等。

### 1. 腐蚀

上锅筒和下锅筒的内部都会因为水质不良，含盐量高以及没有进行除氧处理，而产生氧腐蚀和电化学腐蚀。没有省煤器的锅炉，锅内氧腐蚀更为突出。电化学腐蚀一般发生在封头板边处和应力集中的部位，腐蚀呈不规则形状的深坑，为溃疡性腐蚀。

锅筒外表面与炉墙接触处也会发生腐蚀，尤其在下锅筒支承处，由于支座处没有烟气通过，地面及空气潮湿，在支承面上引起腐蚀。如果长期停炉而又保养不善，锅筒外表面在烟灰和潮气的侵蚀下，腐蚀也会发生。

### 2. 裂纹

裂纹主要发生在两个部位。一是锅筒封头板边内外表面。这主要是制造时过烧，使钢材性能变坏，或者加工时温度过低及封头板边圆弧半径太小，使板边处存在较大应力所造成。二是锅筒孔带处。这是由于胀接不当，如过胀使管孔应力过大，或者胀接次数过多，产生硬化；或由于胀口长期渗漏，在管子和孔管之间形成高碱度的渗迹，而产生苛性脆化裂纹。

### 3. 变形

上锅筒暴露在炉膛顶部的部分，直接受辐射热，会因结生水垢或缺水造成过热而出现鼓包。下锅筒在锅炉点火升压时，由于上下两部分温差大，伸缩不同而发生弯曲变形。

## 二、缺陷的检查

锅筒内空间窄小，部件拥挤，是检修条件最困难的地方。检修前要准备的工具，包括手锤、钢丝刷、扫帚、锉刀、扳手、刮刀、活扳手、手电筒、放大镜、棉纱及吹灰用的胶皮管等。

锅筒打开后，根据情况用钢丝刷或机械清除水渣，但要注意不能把内壁黑红色的保护膜清扫掉。管子焊缝处胀接处要清理干净，用肉眼或放大镜查看焊缝、胀口处有无裂纹等缺陷，孔带区有无裂纹等。如果锅筒内部装置已经大部分拆除，即可用放大镜检查内壁有无裂纹，焊缝有无缺陷。对于腐蚀的缺陷，要测量其深度。此

外，还要检查汽水分离器孔板上的小孔是否畅通，检查水位表管、安全阀接管、给水管、排污管、下降管口有无裂纹、堵塞现象。

### 三、缺陷的修理

对于锅筒内外表面的斑点腐蚀，可进行焊补；严重的大片腐蚀，应进行挖补。

锅筒封头板边内外表面裂纹，裂纹长度不超过它所在的圆圈长度20%~25%时，可采用焊补的修理方法，严重时应进行挖补或更换封头；对于锅筒孔间的裂纹，应根据裂纹的数量和位置分别采取焊补、挖补和更换处理。如裂纹超过两个管孔以上时，应挖补。

一般的变形可不作修理：鼓包高度超过筒体直径的1.5%，但鼓包处钢板减薄量小于原板厚的20%，或鼓包处无裂纹、过烧等严重缺陷，可采用顶回的方法修复。由于鼓包部位在锅筒的底部，所以挖补时可使用装合板对补板和主板进行装配焊接。

## ◀ 第六节 水冷壁管和对流管束的检修 ▶

### 一、常见的缺陷

#### 1. 腐蚀与磨损

造成管子腐蚀的原因是：由于水质不良、管内结生水垢，形成垢下腐蚀，严重时可能穿孔。这种情况以左右两侧水冷壁管较为严重；水冷壁管的下部接触到灰渣，使管子外部腐蚀；胀口渗漏或产生裂纹，容易引起管头腐蚀；尾部对流管束在锅炉给水没有除氧的情况下，最容易产生氧腐蚀，严重时将管子烂穿。

管子的磨损主要是飞灰冲刷造成的，尤其是在烟气流速大的地方，管壁的磨损更为严重；另外，吹灰不当，吹灰器正对管子吹，也会使管壁磨损。

#### 2. 胀口渗漏或产生裂纹

由于胀管工艺不良，如过胀、胀偏、多次胀管、胀管率不够等，或运行中经常的轻微缺水或结生水垢，使管子过热而造成的。

### 3. 鼓包或变形

这种缺陷主要发生在水冷壁管上。由于管内结垢，水循环不良而鼓包。如果管内水垢由于热负荷变化而脱落，就可能造成管子堵塞，产生水循环故障而鼓包。弯水管锅炉后面几排对流管束的上半段常因水循环不良而过热鼓包。

### 4. 管子弯曲

管子由于缺水结生水垢或不能自由伸胀而发生弯曲变形。尤其是锅炉顶棚管，位于炉膛顶部，锅炉缺水首先使它处于干烧状态，最易引起过热变形，甚至出现塌陷。

## 二、缺陷的修理

水冷壁管产生腐蚀或磨损时，对于便于修理的管子，可以局部割换和换新；对于严重腐蚀、烂穿而又无法抽割的管子，可以闷死暂时维持使用，等检修时再更换。具体做法是：较细的管子可用塞头从管子端头堵死，但应注意在闷死之前，在严重腐蚀的管壁上凿一个小孔，以防爆炸；较大的管子，可将闷头做成两部分，一部分是圆柱形的连接管，另一部分是球形封头，将圆柱胀好，再将封头焊上。对流管束中的管子，在决定换管前要研究其换管的可能性，是否可以先抽割靠管束的几根，更换内束，再恢复边上几根。割取旧管时，可在离开锅筒壁 80~150mm 的地方，用气割将两头割断，剩余的管头可用锤子、凿子砸扁后取出。

管子胀口渗漏，一般可用补胀方法修理，缺陷严重的需换管。

对于管子的鼓包变形，如果鼓包较小，可用氧气或酒精喷灯将鼓包处加热，再用锤子将它敲到与管子平齐，若不能达到平齐，可以在损伤处堆焊一层厚度为 2~3mm 的金属层。在进行修理之前，应用木塞将管子一头堵住，以免冷空气进入管子而使管子迅速冷却；如果鼓包较大，则应该将鼓包的一段管子切除，另接一段新管子。

顶棚管的弯曲变形，如果变性不大，覆盖在顶棚管上的砖墙没有产生严重裂缝，可以暂时不修理；如果顶棚上的砖块跌落，说明棚管已经发生严重变形，此时应拆开炉顶专拱，检查顶棚管的损坏程度。顶棚管烧坏塌陷，若与锅筒连接端有 200~300mm 一段没

有弯曲，管端也没有松动渗漏现象，即使弯曲变形达到 300mm，也可将其校正；若管子外表面有严重烧伤氧化脱皮的现象，加之管头严重渗漏，则应将损坏的管子换新。

### 三、集箱的检修

#### 1. 常见缺陷

(1) 腐蚀 长期停用的锅炉，下集箱与砖墙接触处易受潮气作用而腐蚀；集箱端部也常因手孔盖渗漏而腐蚀。

(2) 裂纹变形或鼓包 作为防焦箱的下集箱，处在炉膛内温度很高的地方，由于水循环不良或内部结生水垢引起过热而发生裂纹、鼓包或弯曲变形。如上升管和下降管装在下集箱中间，两端为死水不参加循环，水受热后蒸发，产生的蒸汽不能及时排出，使集箱端部过热而鼓包或产生裂纹，如图 5-2，下降管接在下锅筒底部，下锅筒内聚集的水垢、泥渣等都吸入防焦箱内，使防焦箱结垢、过热而产生鼓包或裂纹。

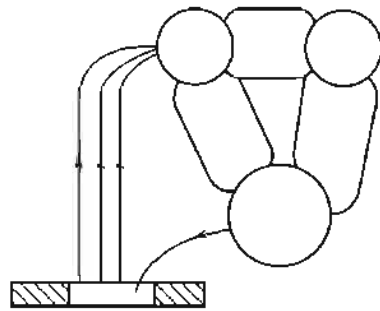


图 5-2 三锅筒弯水管锅炉  
防焦箱两侧死水区

对于下集箱轻微的腐蚀，可以采用堆焊修理；腐蚀严重时，应挖补或更换。

#### 2. 缺陷的修理

下集箱由于过热产生裂纹，可以补焊。如果补焊次数很多，焊疤密布，可以将左右两个下集箱互换使用，使其没有裂纹的一面朝向炉膛。

下集箱产生鼓包或者某一段变形严重，可以将此段割换。如果影响炉排运转时，则应换新。

### 四、省煤器的检修

#### 1. 常见的缺陷

(1) 铸铁省煤器管裂纹 这是由于省煤器铸造质量不好，如存在砂眼等；锅炉间断上水，使省煤器管壁温度在很大的范围内频繁

波动；排烟温度偏高，使省煤器内汽化，产生水击，使管子发生裂纹或破裂；管子受飞灰的磨损，管壁减薄，承压能力下降。

(2) 钢管式省煤器磨损和腐蚀 钢管式省煤器的耐磨损和耐腐蚀性能较铸铁省煤器差，因此省煤器的外壁容易被飞灰磨损，特别是加大引风和鼓风时，或是沸腾燃烧时，磨损就更严重。另外，若排烟温度过低，烟气中的二氧化硫和三氧化硫与水汽作用，在管外壁形成亚硫酸和硫酸，腐蚀钢管。省煤器内壁的腐蚀是由于给水未除氧或除氧不良，使水中的氧气在省煤器内受热后析出而造成氧腐蚀。

## 2. 缺陷的检查

对省煤器的检查可分为以下几个步骤。

(1) 清扫积灰 锅炉停止运行后，省煤器部位外壁积有大量煤灰，需要压缩空气吹扫。在吹扫时，应启动引风机，使炉内保持负压。

(2) 检查飞灰磨损情况 检查飞灰磨损必须一根根管子从上层

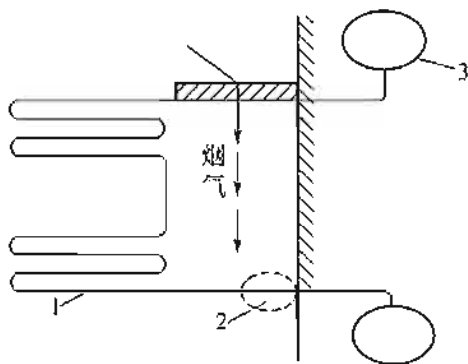


图 5-3 集箱连接处的易磨损部位

1—蛇形管；2—磨损部位；3—集箱

到下层，尤其对上面一至四层进行全面检查。经验说明，一般飞灰磨损较为严重的部位是：每个管圈的第一、二、三层；集箱连接的管段（见图 5-3），因为该处的烟气通道较大，流动阻力很小，使飞灰集中磨损；管卡子附近和后墙部位。

(3) 检查结垢和腐蚀 根据化学监督要求，选择省煤器

的某些局部有代表性的管段，进行割管检查，以判断管子内部是否有结垢或腐蚀现象。割管部位一般为省煤器高温段出口，因为这部分管子中的给水已接近沸腾状态，含盐和含氧很容易在此处析出，而造成结垢和腐蚀。

## 3. 缺陷的修理

轻微腐蚀或磨损，可继续使用；严重腐蚀和磨损，应更换管子。因为烟灰磨损主要发生在烟气流入的一面，所以为了节省修理



费用，可将钢管省煤器拆开，把管子翻转 180°，即把原来逆着烟气并已磨损的一面变成背着烟气流向，以延长钢管省煤器的使用寿命。对于腐蚀或磨损较严重的铸铁省煤器，为了缩短修理时间，可在损坏的管子中穿入一根钢管，在两头焊上法兰，填上垫料与弯头法兰连接，维持临时运行，待锅炉检修时更换。

钢管式省煤器钢管被磨损最厉害的是顺着烟气的头三排管子，可在这些管子上安装防护罩加以防护。防护罩应安装在钢管转弯处的内侧或外侧，从烟气流动的一面保护弯头。

对于与集箱连接处管段的飞灰集中磨损，一旦发现时，应加装挡灰板。

## 五、过热器的检修

### 1. 常见缺陷

过热器一般布置在辐射区内或第一烟道处，温度在 900～1000℃ 以上，管子内是饱和蒸汽，导热情况不如水管，容易过热而发生鼓包变形，甚至会爆管。

对于设置在辐射区的过热器，大都在 1000～1300℃ 的高温区，如果锅水碱度过高，含盐量大，或者锅筒内汽水分离不好，蒸汽大量带水，都会造成过热器管内结垢，使过热器过热；锅炉运行中，火位长期调整不好，使火焰延长到过热器处，或由于炉膛内结焦，造成热偏差，也会使过热器高温蠕变，产生变形。

设置在烟道内的对流过热器，工作在平均壁温为 800～950℃ 的高温烟气里，过热、蠕胀、爆管是对流过热器烧坏的常见情况，另外，对于固定排渣锅炉，由于烟气的高速流动并含有大量灰粒，会对过热器管子造成严重磨损。

### 2. 缺陷的检查

辐射过热器一般布置在炉膛后墙折焰角以上部位，检查时先搭好安全、可靠的脚手架。为了能更准确地查明过热器管的缺陷状况，必须先清除过热器表面的积灰和焦渣。然后重点检查容易磨损的部位，如过热器下端折焰角紧贴的部分。发现蠕胀的管子，可用游标卡尺测量。测量时选择有代表性的管段（如热负荷大的向火侧），从而判断管材的过热变形程度。

对流过热器应重点检查其飞灰磨损情况。一般情况下，容易磨损的部位如图 5-4 所示。对发生蠕胀的应进行测量。

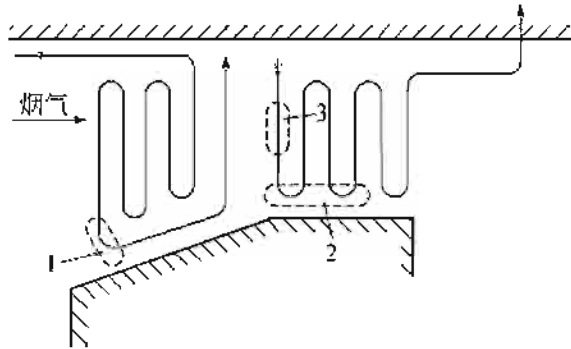


图 5-4 对流过热器飞灰磨损部位

1—烟道转弯处的下部；2—水平烟道的下部；3—水平烟道流通面积缩小后的第一排垂直管段

### 3. 缺陷修理

过热器轻微变形可不作修理，当管子（碳钢）胀粗程度大于管径的 3.5%，应切换损坏的管段。对磨损严重（磨损深度为管子壁厚的 1/4）的管子应更换。

对于出口集箱上管孔之间的个别裂缝，可以焊补；裂纹较多，就应该将集箱割换一段或整个更换。

为了防止过热器蛇形管的个别管子弯头排列不整齐，常装一种耐热生铁铸造的梳形卡子，其安装部位是在管子的下弯头处。由于加了梳形卡子的地方挡住一部分烟道，使烟气流速在卡子间隙中急剧提高，飞灰的磨损加快，因此对这些地方应特别注意检查。

## 六、空气预热器的检修

### 1. 常见缺陷

(1) 飞灰磨损致使管子穿孔 煤粉炉，特别是多灰分的固态排渣锅炉，对空气预热器管子常常引起严重磨损，并可能导致 1.5mm 厚度的管子穿孔。穿孔的部位都集中在离管口 20~30mm 处。从圆圈方向看，所有管子的穿孔都集中在几个方向，比较有规律。

(2) 管孔堵塞 运行中的空气预热器，常常发生大片管子堵

死，从而减少热交换面积，增加烟气流动阻力。引起堵塞的原因主要是省煤器漏水，使预热器烟气侧附着一层水膜，灰粒和水膜混为泥糊状，极易把管孔堵死。

(3) 腐蚀穿孔 锅炉运行中鼓、引风调节不当，使烟气温度低于露点，在管壁积灰处产生酸性腐蚀。这种腐蚀在管子四周是均匀分布的，不但造成穿孔，而且会造成管子的破裂。

## 2. 缺陷的修理

对于飞灰磨损，可采用加装防磨套管的方法来防止。如果大量管子磨损穿孔，则必须在大修中更换整组的空气预热器管箱。

由于管孔堵塞，使管内造成积灰，甚至整个管段都堵满积灰时，只有用很长的钢筋棍从预热器下部朝上捅管子，使灰粒掉落。如果灰堵不很严重，可采用 0.6~0.8MPa 的干燥压缩空气来吹灰。当一组管箱的管孔有 2/3 以上被堵时，应更换新管箱。

少数管子腐蚀破裂，可以用堵板将上下管板的管孔焊死，防止漏风即可；如果管子损坏的根数在 5% 以上，应更换。

## 第六章

# 锅炉事故与处理

### 第一节 锅炉事故处理的意义和分类

#### 一、锅炉事故的定义

锅炉在运行和试运行时，锅炉本体（指给水阀、主汽阀、排污阀以里，包括各种阀门、仪表）、燃烧室、主烟道或构架，发生异常，造成人身、设备两个方面中，有一个以上方面受到损失的事件，叫做锅炉事故。

锅炉在运行和试运行时，由于自然灾害原因，如地震等造成事故的，叫做特殊情况锅炉事故。

锅炉在运行和试运行时，由于附属设备，如燃烧装置，鼓、引风机，给水泵或水处理设备等，发生异常，但经过及时处理后，又恢复了正常运行的，叫做锅炉故障，不算作锅炉事故。

锅炉正常停用后，做定期或非定期检验时，发现锅炉有损坏，如锅炉整体受压部件有裂纹、渗漏、变形，燃烧室砌体开裂、耐火材料脱落，烟道损坏、构架变形等。这些损坏有可能不是锅炉事故造成的，也可能是锅炉事故造成的，但当时并没有造成锅炉被迫停炉，一般不算作锅炉事故，称其为锅炉损坏。

#### 二、锅炉事故的分类

##### 1. 锅炉爆炸事故

锅炉受压部件在使用或试压时发生破裂，使压力瞬时降至等于外界大气压力的事故，称为锅炉爆炸事故。

## 2. 锅炉重大事故

锅炉在使用或试压时，由于受压部件严重损坏（如变形、渗漏等）、附件损坏和炉膛爆炸等，造成被迫停止运行，必须进行修理的事故，称为锅炉重大事故。

## 3. 锅炉一般事故

锅炉发生事故后，设备损坏程度不严重，不需要停止运行修理的事故，称为锅炉一般事故。

# 三、锅炉事故处理的意义

锅炉由“锅”与“炉”两部分组成，“锅”是工质通过受热面吸热的部分，“炉”是燃料经过燃烧由化学能转变为热能的部分，“锅”与“炉”是一个整体，这个整体叫做锅炉设备。工业锅炉承受高温、高压、介质侵蚀，经常在启动、停炉及负荷频繁波动情况下工作，当管理不良时，有发生事故的危險性。锅炉事故是锅炉设备中存在不安全因素的最高表现，是没有做好锅炉安全工作的结果，锅炉事故常常会造成重大的人身伤亡和经济损失。锅炉事故的调查是为了分析发生事故的原因，研究发生事故的规律，从而采取有效的防范措施，防止锅炉事故的再次发生，是保障人民生命安全和防止国家财产损失的一项重要工作。

## ◀ 第二节 锅炉缺水事故 ▶

### 一、锅炉缺水事故的现象

- ① 水位表内的水位低于水位下极限或者不见水位。
- ② 低地位水位计指示负值增大。
- ③ 双色水位计成全红色。
- ④ 水位警报器发出声响和低水位信号灯发亮。
- ⑤ 有过热器的锅炉，过热蒸汽温度升高。
- ⑥ 锅炉排烟温度升高，有钢制烟箱的锅炉，钢制烟箱变形，甚至出现暗红色。

⑦ 给水量不正常地小于蒸汽流量。

⑧ 严重缺水时，可以在锅炉近旁嗅到焦味。

⑨ 有水冷壁管的锅炉，可以从火孔内见到水冷壁管烧红。如果发生爆管时，能听到管子爆破声和蒸汽喷射声，此时给水量会大于蒸汽流量。

⑩ 炉胆燃烧的锅炉，能从炉门或看火孔内见到炉胆变形等。

## 二、锅炉缺水事故的原因

① 运行人员违反劳动纪律，在班上睡觉或打瞌睡，任意离开操作岗位或做与操作无关的事。运行人员在操作锅炉时注意力不集中，疏忽大意，不精心监视水位，当锅炉负荷增大时，没有及时加大给水量。

② 运行人员操作技术水平低，误判断、误操作、错把缺水当作满水。

③ 水位表，水位表汽水连管，水位表各个旋塞，水表柱结构不合理，造成假水位。

④ 水位表照明不良，造成观察水位不清楚。

⑤ 高低水位警报器失灵，不报警或误报警。

⑥ 双色水位计失灵。

⑦ 有给水自动调节器的锅炉，给水自动调节器失灵。

⑧ 锅炉给水阀或给水逆止阀故障。

⑨ 锅炉排污管道、排污阀泄露。在排污操作时，没有及时关闭，关严排污阀。排污阀芯内有异物卡住，无法关严。

⑩ 采用集中给水的锅炉房，一根给水管供给多台锅炉使用时，由于给水系统和操作制度上存在问题，发生各锅炉之间“抢水”现象，造成锅炉供水不足。

⑪ 给水泵发生故障，给水管道渗漏，给水压力下降。

⑫ 炉管或省煤器管破裂或大量漏水。

⑬ 软水罐出口阀门误关闭，软水箱无水。

⑭ 水源故障等。

## 三、锅炉缺水事故的处理

当锅炉上所有直观水位表内看不见水位时，须立即停炉，关闭

蒸汽阀和给水阀，并按下述方法处理。

① 对可以进行“叫水”操作的锅炉，作“叫水”操作。“叫水”操作是判断锅炉内缺水程度的一种方法，它只适用于锅炉水位表的通水孔高于锅炉受热面最高火界和水容量较大的锅炉。对水位表的通水孔低于锅炉受热面最高火界和水容量小的锅炉，不能采用“叫水”操作，否则会延误对锅炉缺水事故处理的时间，使事故扩大。

a. “叫水”操作的方法

先开启水位表的放水旋塞。

后关闭水位表的汽旋塞。

再关闭水位表的放水旋塞，一关一开重复几次，此时注意水位表内是否出现了水位。

最后开启汽旋塞，关闭放水旋塞。

“叫水”操作的要点是不要拧动水位表的水旋塞。

b. “叫水”操作的原理 先开启水位表的放水旋塞是为了冲洗水位表，后关闭水位表的汽旋塞是使水位表与锅炉的气接管切断，此时水位表的水旋塞并没有关闭，与锅炉的水接管畅通。当再打开放水旋塞时，水位表与大气接触，水位表内的压力很快下降。当关闭放水旋塞一瞬间，水位表内的压力与锅炉内的压力不平衡，就会发生自动平衡的现象。同时，水位表内得到冷却，蒸汽发生凝结，造成“真空”现象。此时，如果锅炉内的水位在水位表水接管口附近时，会把水带入水位表，说明锅炉内缺水程度并不十分严重。如果锅炉内的水位在水位表水接管口以下时，不可能把水带入水位表内，说明锅炉内的缺水程度比较严重。

② 可以进行“叫水”操作的锅炉，经“叫水”后水位表中出现水位时，可以缓慢的开启锅炉给水阀，当水位恢复正常后（注意不要把水上过头），启动锅炉的燃烧设备继续投入使用。如果缓慢开启锅炉给水阀时，锅内有强烈的响声或加大给水时仍不见水位升上来，则绝不可启动锅炉的燃烧设备，必须停炉待检查。

③ 可以进行“叫水”操作的锅炉，经“叫水”后水位表中不出现水位时，严格禁止向锅炉内上水，必须紧急停炉。

④ 不允许进行“叫水”操作的锅炉，应紧急停炉。

#### 四、锅炉缺水事故处理应注意的问题

① 一旦发现锅炉缺水，无论什么情况，先立即暂时停炉，然后再作种种处理。

② 必须注意防止把缺水事故当作满水事故来处理。区别缺水还是满水的方法如下：

检查水表上所有旋塞的位置是否正常；

开启水位表上的放水旋塞，如只见到有蒸汽冒出是缺水；如有水、汽冒出，并水量较大，是满水。

③ 要教育司炉工严禁采用多次间断给水，每次少量上水的方法来掩盖锅炉缺水事故，这种做法是危险的。

### ◀ 第三节 锅炉满水事故 ▶

#### 一、锅炉满水事故的现象

- ① 水位表内的水位高于水位上极限或看不见水位。
- ② 低地位水位计指示正值增大。
- ③ 双色水位计呈全绿色。
- ④ 水位警报器发出声响和高水位信号灯亮。
- ⑤ 有过热气的锅炉过热蒸汽温度下降。
- ⑥ 蒸汽含水量增大。
- ⑦ 给水量不正常地大于蒸汽量。
- ⑧ 由于饱和蒸汽中带水量增大，集汽包（分汽包）中大量存水，疏水器则剧烈动作。
- ⑨ 严重满水时，蒸汽管道内发生水冲击，引起管道剧烈振动，法兰接口处冒出蒸汽。
- ⑩ 严重满水时，锅筒上的安全阀冒出水 and 汽等。

#### 二、锅炉满水事故的原因

- ① 运行人员违反劳动纪律，在班上睡觉或打瞌睡，任意离开



工作岗位或做与操作无关的事。运行人员在操作锅炉时注意力不集中，疏忽大意，不精心监视水位，当锅炉负荷降低时没有及时减少给水量。

② 运行人员操作水平低，造成误判断或误操作。

③ 水位表、水位表汽水连管、水位表各个旋塞、水位表柱结构不合理，造成假水位、水位表照明不良，造成观察水位不清楚。

④ 水位表的放水旋塞或水旋塞漏水，使水位指示不正确，造成假水位。

⑤ 高低水位警报器失灵，不报警或误报警。

⑥ 双色水位计失灵。

⑦ 有给水自动调节器的锅炉，给水自动调节器失灵。

⑧ 给水调节阀渗漏。

⑨ 给水压力突然升高等。

### 三、锅炉满水事故的处理

当锅炉上所有直观水位表内看不见水位时，须立即停炉，关闭给水阀和主汽阀，并按下述方法处理。

① 打开水位表的放水旋塞，当水位表中出现水位并很快下降，是轻度满水，看不见水位只看到气泡，是严重满水。

② 有省煤器的锅炉开启省煤器的再循环管阀门。

③ 打开排污阀，使锅炉放水，这里必须严格注意水位表，当水位表中出现水位而降到正常水位时，要立即关闭排污阀。

④ 经锅炉放水操作后，如果锅内还有压力，应进行一次冲洗水位表操作，如果锅内无压力，对水位表作一次放水试验。

⑤ 检查锅炉给水系统是否正常，如果有异常情况，必须排污后才启动锅炉恢复运行。

⑥ 必要时开启过热器和蒸汽管道上的疏水阀，进行疏水。

### 四、锅炉满水事故处理应注意的问题

① 目前运行的锅炉，大部分都没有装设双色水位计，而采用玻璃板（管）水位表，这种水位表当锅炉发生严重缺水和满水时，都看不到水位，因此对缺少实际经验的司炉工，常常误将缺水当作

满水或把满水当作缺水来处理，使事故扩大。在这种情况下，要教育司炉工立即开启水位表的放水旋塞，若有水、汽喷出，而且水量比较多时，是满水事故。

② 锅炉上装有高低水位报警器，有利于司炉工正确判断锅炉内缺水还是满水。但有时司炉工不采用勤上水，每次上水量小，保持水位表内水位波动小的操作方法，而是采取上水次数少，每次上水量大，使水位表内水位波动大的操作方法。因此，一旦司炉工不注意，高低水位报警器就发生信号，为了不使报警器“吵人”，人为地把声信号裂解，只留光信号。当司炉工打瞌睡或精神不集中时，没有看到光信号，就会失去声信号对司炉工的警告作用。

## ◀ 第四节 锅炉超压事故 ▶

锅炉超压事故，是指锅炉在运行中，锅内的压力超过最高许可工作压力而危及锅炉安全运行的事故。

最高许可工作压力有两种含义：一种是锅炉的设计压力，另一种是因锅炉有缺陷而降压使用的压力。

锅炉使用压力要低于锅炉最高许可工作压力（大部分工业锅炉是这种情况），一旦发生锅内压力超过使用压力时，有可能发生超压事故，也有可能不发生超压事故。当运行人员发现锅内压力超过使用压力时应立即采取适当的措施，使锅内的压力低于最高许可工作压力，那就是没有构成锅炉超压事故。如果运行人员没有采取措施或采取的措施不适当，使锅内的压力超过最高许可工作压力，那就发生了锅炉超压事故。

锅炉使用压力等于或略低于锅炉最高许可工作压力时，一旦发生锅内压力超过使用压力时，就有可能发生锅炉超压事故。

锅炉使用压力较大的低于锅炉最高许可工作压力，但锅炉外的管道或用热设备等的强度都是按锅炉使用压力设计的，又没有装设相适应的减压阀等措施，一旦发生锅内压力超过使用压力时，锅炉本体不一定会发生事故，但这些管道或用热设备等会发生事故，这需要引起高度注意。

锅炉超压事故是危险性比较大的事故之一，常常是锅炉爆炸的直接原因。

## 一、锅炉超压事故的现象

- ① 气压急剧上升，超过许可工作压力，安全阀动作。
- ② 超压报警仪表动作，发出警告信号。
- ③ 蒸汽流量减少，蒸汽温度升高等。

## 二、锅炉超压事故的原因

- ① 用汽设备发生故障而突然停止用汽。
- ② 锅炉房与用汽部门缺乏联系制度或信号装置，用汽下降时，不能把信息及时反映到锅炉房内。
- ③ 司炉工人的责任心不强，失职或误操作。
- ④ 安全阀失灵或失调。
- ⑤ 压力表指示不正确。
- ⑥ 超压报警仪表失灵。
- ⑦ 启动锅炉后主汽阀没有打开。
- ⑧ 锅炉因有缺陷而降压使用时，但安全阀排气截面积没有重新计算而更换安全阀等。

## 三、锅炉超压事故处理

- ① 保持水位表内水位正常。
- ② 减弱燃烧。
- ③ 如果安全阀失灵而不能自动排气时，可以人工启动安全阀排气，或者打开锅炉上的放空阀，使锅炉逐渐降压。
- ④ 进行给水和排污，降低锅内温度。
- ⑤ 检查锅炉超压原因和本体有无损坏后，再决定停炉或恢复运行。

## 四、锅炉超压事故处理应注意的问题

- ① 锅炉发生超压时，严禁降压速度过快，甚至很快将锅内压力降至零。

② 锅炉超压事故消除后，必须对锅炉进行严格的检查，如果有变形、渗漏等，要慎重处理。

## 第五节 锅炉汽水共腾事故

锅炉汽水共腾事故，是指锅炉在运行中，锅内的汽、水不进行完善的分离，大量锅水随蒸汽带出而危及锅炉安全运行的事故。

锅炉的汽水共腾，也是一种多发性的锅炉事故。但是工业用汽的特点是用汽量大，用汽时间集中，但对蒸汽的品质（带水量）要求不高，加上一般性汽水共腾事故所造成的后果并不十分严重，常常不被人们引起重视，草草处理后也就不报告了，以致使一般性汽水共腾事故发展成严重汽水共腾事故。

严重汽水共腾事故，是造成蒸汽管道水冲击，法兰接口渗漏，管道焊缝震裂，管子夹松动，管道上阀门盖打出等事故的直接原因。

### 一、锅炉汽水共腾事故的现象

① 水位表内的水位急剧波动，没有明显的水位线，有时看不清真实的水位线。

② 蒸汽中的含盐量增大。

③ 有过热器的锅炉过热蒸汽温度急剧下降。

④ 蒸汽大量带水，严重时在蒸汽管道内发生水冲击，造成法兰接口处冒蒸汽。

⑤ 有集气包的锅炉，集气包上的疏水器剧烈动作等。

### 二、锅炉汽水共腾事故的原因

① 锅水的含盐量（以氯根和碱度为主）和悬浮物过高。

② 没有或不进行表面排污。定期排污不进行或间隔时间过长，排污量过少。

③ 并炉时开启主汽阀过快。

④ 单台运行锅炉升压后，开启主汽阀过快。

- ⑤ 锅炉负荷增加过急。
- ⑥ 锅炉严重超负荷使用。
- ⑦ 锅炉突然严重渗漏等。

### 三、锅炉汽水共腾事故的处理

- ① 减弱燃烧，减少锅炉蒸发量，关小主汽阀，降低负荷。
- ② 完全开启上锅筒的表面排污阀。如有必要，适当开启下锅筒的定期排污阀，同时加强给水，注意保持正常水位。
- ③ 采用锅内投药水处理的锅炉，应停止投药。
- ④ 开启过热器，蒸汽管道和集气包等处的疏水阀门进行疏水。
- ⑤ 通知水质化验人员作锅水和蒸汽含水量测定。
- ⑥ 通知用汽部门减少用汽量。
- ⑦ 在水位未稳定、锅水水质未达到规定前，不要增加负荷及减少排污量。
- ⑧ 事故消除后，应冲洗水位表。

## 第六节 锅炉爆管事故

锅炉爆管事故，是指锅炉在运行中炉管发生破裂的事故。

在锅炉的运行事故中，锅炉爆管事故比较多，也比较普遍。主要是炉管的受热强度高，管壁比较薄，一旦有故障，对事故的敏感性强。锅炉爆管事故是危险性比较大的事故之一，常常是锅炉缺水、燃烧室内火焰和燃料喷出、锅炉急剧降压的直接原因。

### 一、锅炉爆管事故的现象

- ① 爆管不严重时，可以听到汽水喷射响声，严重爆管时，有显著的爆破声。
- ② 负压燃烧的锅炉，燃烧室内由负压变成正压，严重时，从孔门向外喷出炉烟和蒸汽。
- ③ 锅炉水位和蒸汽压力迅速降低。
- ④ 给水量不正常地大于蒸汽流量。

- ⑤ 排烟温度降低，烟气颜色变成灰白色或白色。
- ⑥ 炉内火焰发暗，燃烧不稳定，甚至灭火。
- ⑦ 灰渣斗内有湿灰，甚至向外流出水汽。
- ⑧ 引风机负荷增大电流增高等。

## 二、锅炉爆管事故的原因

- ① 锅炉给水质量不良，无水处理或水处理方法不正确，水质监督不严格，没有按规定进行排污，使管子内结水垢或腐蚀。
- ② 锅炉在安装或检修时，杂物掉落在管子内，造成管子内堵塞，使水循环不良或完全破坏。
- ③ 管子内水垢脱落“搭桥”，造成水循环不良。
- ④ 锅炉水位过低或严重缺水破坏水循环，造成局部管壁温度过高，鼓包变形而爆破。
- ⑤ 锅炉设计、制造、安装质量不良，造成水循环不良。
- ⑥ 管子材质不良或有严重缺陷。
- ⑦ 燃油或粉煤的锅炉，由于喷燃器角度没调整好，使局部炉管热量集中或严重磨损。
- ⑧ 升火，停炉或清炉操作方法不正确，使炉管经常受到冷风吹袭，管子热胀冷缩过快或频繁，产生有害的应力。
- ⑨ 焦渣粘积在炉管上没有及时清除，使炉管受热不均匀，严重时，破坏锅炉水循环。
- ⑩ 吹灰器的吹灰管位置不当，吹灰孔正对炉管，由于长期使用，将炉管吹损。
- ⑪ 抛煤机燃烧或煤粉燃烧锅炉，由于烟气中含灰量很大，将炉管严重磨损。
- ⑫ 烟道、燃烧室隔火墙（板）损坏，使烟气走短路，造成局部炉管的热量集中烧坏和磨损。
- ⑬ 层燃锅炉经常压火，使炉顶管子外壁产生硫腐蚀损坏。
- ⑭ 给水温度过低，锅内给水管位置不正确，给水集中进入局部炉管，使这部分炉管温度变化大而且频繁，产生有害应力，造成胀接口渗漏，严重时在管头产生环形裂纹。
- ⑮ 有的锅炉给水除“硬”比较好，但不进行除氧，使锅水流

速较低的炉管，在水侧产生严重的氧腐蚀穿孔。对锅水碱度较高的锅炉，氧腐蚀更为严重等。

### 三、锅炉爆管事故的处理

① 炉管破裂泄露不严重，能保持锅炉水位，故障不会迅速扩大时，可以短时间内降低负荷运行，等备用炉启动运行后再停炉。

② 严重爆管，必须采取紧急停炉措施。

a. 停止供给燃料。

b. 停止鼓风机运行，保持引风机不停（或保留一台不停），以排除炉内的烟气和蒸汽。

c. 关闭主蒸汽阀。

d. 在运行锅炉给水的情况下，若水位表内不见水位时，应停止给水。

e. 燃烧室内烟气和蒸汽消除后，可以停止引风机运行。

### 四、锅炉爆管事故处理应注意的问题

① 对能保持锅炉水位的，可以短时间内减负荷运行，等备用炉启动后再作停炉处理。如果备用炉迟迟不能立即投入使用，而且听到炉内响声增大，见到漏水增大时，不能等备用炉启动后再停炉，应立即停炉。

② 如果锅炉房内多台锅炉共享一根蒸汽母管和给水母管时，要严格注意保证正常运行锅炉的安全使用。防止事故锅炉的主蒸汽阀和给水阀关闭不及时而影响正常锅炉的运行。

## 第七节 锅炉过热器爆管事故

锅炉水冷壁管和对流管内的工质是水或蒸汽混合物，在正常情况下，管壁的工作温度比较低。过热器内的工质是饱和蒸汽和过热蒸汽，即使在正常情况下，管壁的工作温度也比较高。因此，过热器管要比水冷壁管和对流管的事故敏感性高。根据实践检验，对装有过热器的锅炉要比无过热器锅炉的管理更为严格和复杂，否则，

经常会发生过热器爆管事故。

## 一、锅炉过热器爆管事故的现象

- ① 过热器部位有蒸汽喷射声音。
- ② 蒸汽流量不正常地小于给水量。
- ③ 损坏严重时，锅炉蒸汽压力下降。
- ④ 负压燃烧的锅炉，燃烧室的负压不正常地减小，严重时变成正压，从孔门向外喷出烟气和蒸汽。
- ⑤ 过热器后的烟气温度降低或过热器前后烟气温度差增大。锅炉排烟温度下降，烟气颜色变成灰白色。
- ⑥ 过热蒸汽温度发生变化。
- ⑦ 引风机负荷增大，电流增高等。

## 二、锅炉过热器爆管事故的原因

- ① 锅炉给水质量不良，水质监督不严格，经常高水位运行，汽水分离装置不良等，造成饱和蒸汽带水量过大，使过热器管内结水垢。
- ② 燃烧不正常，火焰偏斜或延伸至对流管与过热器处，致使过热器处烟温过高。
- ③ 过热器处烟气偏流，使局部过热器管热量集中，造成过热烧坏。
- ④ 过热器管严重腐蚀损坏。
- ⑤ 过热器管材质不良，有严重缺陷。
- ⑥ 过热器管内有杂物堵塞。
- ⑦ 在锅炉点火升压过程中，过热器管中流通的蒸汽量不足，引起过热。
- ⑧ 过热器结构不合理，蒸汽分配不均匀，受热面积过大，蒸汽在管内的流速过低，造成局部过热器管壁温度过高。
- ⑨ 过热器上的安全阀开启截面积不足，当锅炉超压时，流经过热器的蒸汽量不足以冷却过热器管，造成过热。
- ⑩ 过热器安全阀定压值错误或失灵，当锅炉超压时迟于锅筒上安全阀开启或根本不开启。
- ⑪ 吹灰器安装不正确或吹灰蒸汽压力过高，吹损过热器管。
- ⑫ 过热器管被飞灰磨损。



⑬ 高温过热器应采用合金钢管，但误用碳素钢管。

⑭ 减温器通水量过大，表面式减温器管泄漏，在过热器蛇形管内产生水塞，混合式减温器套管移位，致使蒸汽分布不均匀而引起局部过热。

⑮ 过热器管长期处在高温下使用，管材发生蠕变等。

### 三、锅炉过热器爆管事故的处理

① 过热器轻微泄漏时，可适当降低锅炉蒸发量，在短时间内继续运行，此时应经常检查泄露情况，并尽快启动备用锅炉，当备用锅炉启动后再停炉。如备用锅炉迟迟不能启动而故障加剧时，则应尽快停炉。

② 过热器管损坏严重时，必须及时停炉，防止从损坏的过热器管中喷出的蒸汽吹损邻近的过热器管，使事故扩大。

③ 停炉后关闭主蒸汽阀门和给水阀门，保持引风机（或一台）继续运转，以排除炉内的烟气和蒸汽。

## ◀ 第八节 锅炉省煤器管损坏事故 ▶

装有省煤器的锅炉，可以降低锅炉的排烟温度和提高进水温度，对节约能源和改善锅内过程有一定作用。因此，省煤器在工业锅炉上的采用很普遍。省煤器的工作温度一般比较低，但在锅炉运行事故中，省煤器管的损坏事故仍然比较多，因为现用的工业锅炉大部分没有采用除氧水，使省煤器管内壁受到氧腐蚀。省煤器管的外壁受到烟气中的硫腐蚀。同时，省煤器管内的动压力和静压头要比锅筒或炉管高，采用间断给水的锅炉，省煤器的压力波动比较频繁，因此省煤器管容易发生损坏。

### 一、锅炉省煤器管损坏事故的现象

- ① 锅炉水位下降。
- ② 给水量不正常地大于蒸汽流量。
- ③ 省煤器部位有泄漏声。

④ 从省煤器烟道不严密处向外冒气，严重时，省煤器下部灰斗中出现湿灰，甚至见到有水流出。

⑤ 省煤器处烟气温度下降，省煤器两端的烟气温度差增大，烟囱中出现灰白色或白色烟气。

⑥ 烟气阻力增加，引风机电流增大等。

## 二、锅炉省煤器管损坏的原因

① 锅炉给水没有作除氧处理或除氧处理没有达到标准，造成对省煤器管内壁氧腐蚀。对铸铁省煤器管，由于耐腐蚀，因此氧腐蚀不十分严重。对钢管省煤器管，由于不耐腐蚀，因此氧腐蚀十分严重，有的只使用几个月就被腐蚀穿孔。

② 由于过分追求降低排烟温度，使省煤器处烟道内的烟气温度低于露点，造成烟气中的二氧化硫与水分生成硫酸和亚硫酸，造成省煤器管外壁腐蚀。与上述同样原因，对钢管式省煤器管的硫腐蚀要比铸铁式省煤器管严重。

③ 省煤器管子外壁被飞灰磨损，尤其是煤粉锅炉和抛煤机锅炉比较严重。

④ 对间断给水的锅炉，省煤器的温度和压力变化比较频繁，使省煤器管忽冷忽热，容易造成损坏。

⑤ 无旁路烟道的省煤器，在生火时，没有接通再循环管或再循环管有故障，使省煤器管过热损坏。

⑥ 省煤器管子被杂物堵塞引起管子过热。

⑦ 省煤器的制造、安装、修理质量差，管子材质有严重缺陷等。

## 三、锅炉省煤器管损坏事故的处理

① 对可分式省煤器，首先开启旁路烟道门，然后关闭主烟道门（注意先后次序不能颠倒）。此时，省煤器的烟气通路和烟气流隔绝，再关闭省煤器的进出口阀门，用锅炉的旁路给水管道直接上水，锅炉可能保持运行。

② 可分式省煤器损坏后，可以进行不停炉修理，但必须注意安全。首先是主烟道的烟道门要严密（大部分锅炉不严密），省煤器的进出口阀门也要严密，当省煤器与锅炉给水系统列解后，要保

证能向锅炉内可靠地供水。不能保证做到以上安全工作的，应采取紧急停炉措施。

③ 对不可分式省煤器，能在增加锅炉给水量保持水位的情况下，适当降低锅炉的蒸发量，并尽快启动备用锅炉投入运行或增强其它运行锅炉的蒸发量后，再停止使用。如果不能保持水位的，应立即紧急停炉。

④ 对不可分式省煤器损坏后，可以暂时运行的锅炉，一旦发现水位迅速降低则必须立即紧急停炉。此时，不关闭引风机或保留一台继续运行，以排除烟道内的蒸汽和烟气。

⑤ 对不可分式省煤器损坏后，可以暂时运行的锅炉，要关闭锅炉上所有的放水阀门，禁止开启省煤器与锅筒间的再循环管上的阀门。

## ◀ 第九节 锅炉燃烧室、烟道爆炸和尾部烟道燃烧事故 ▶

### 一、锅炉燃烧室、烟道爆炸和尾部烟道燃烧事故的现象

① 锅炉排烟温度剧烈增高。

② 有空气预热器的锅炉热风温度不正常地升高。

③ 烟道及燃烧室内的负压剧烈变化，严重时变成正压，向燃烧室外喷出火焰。

④ 烟囱冒出浓烈黑烟，严重时见烟囱冒出火星、火焰。

⑤ 锅炉防爆门的动作，并伴有沉闷的响声。

⑥ 锅炉尾部烟道燃烧严重时，将尾部受热面钢材烧毁，在灰斗等处见到熔化的铁水流出。

⑦ 锅炉发生燃烧室或烟道严重爆炸时防爆门全部冲开损坏，炉墙砌体炸飞、倒塌、炉顶掀开、炉内的燃料、烟尘喷出。爆炸时的冲击波将锅炉房炸坏，甚至引起锅炉房着火等。

### 二、锅炉燃烧室、烟道爆炸和尾部烟道燃烧事故的原因

① 锅炉燃烧室、烟道内积灰煤粉，油雾和气体燃料与空气形

成爆炸性混合物，遇到明火引起燃爆。

② 燃烧室内燃料与风量调整不当，风量不足或配风不合理，使煤粉、燃油或可燃气体未能完全燃烧，随烟气带入烟道内，一旦具备燃烧条件，引起燃烧。

③ 喷燃气运行不正常，煤粉自流或煤粉过粗，使未完全燃烧的煤粉进入烟道。

④ 油枪雾化不良，严重漏油或油枪头脱落。

⑤ 锅炉长时间低负荷运行，炉温过低和烟气流速过低，烟道内积存大量可燃物。

⑥ 燃料油不纯，油水分离装置失效，燃料油中大量带水，造成燃烧不正常，甚至灭火，使喷入燃烧室的燃料没有完全燃烧，积存在燃烧室或烟道内，一旦条件具备，引起燃烧室或烟道爆炸。

⑦ 燃油锅炉的尾部烟道，长期不进行检查清理有大量油垢积存而没有发现。

⑧ 悬浮物燃烧锅炉停炉后，没有对燃烧室和烟道进行彻底的通风，积存爆炸性气体混合物。

⑨ 对煤粉、油或气体作燃料的锅炉，风机电源跳闸时，没有装设自动切断燃料供应的连锁装置。

⑩ 在锅炉上没有装上点火过程控制系统和灭火保护装置，司炉工在点火时，没有按照先通风，再点火，最后供燃料的操作程序启动锅炉。当锅炉没有点燃时，没有排除燃烧室的烟道内可燃气体的情况下再次点火。

⑪ 锅炉烟道内的烟道门开关不可靠，在锅炉运行时，由于震动等原因突然自行关闭，使燃烧室内的烟气不能排出，引起燃烧室或进风道爆炸等。

### 三、锅炉燃烧室、烟道爆炸和尾部烟道燃烧事故的处理

① 如果发现烟气温度不正常地升高时，应首先立即查明原因，并校验仪表指示的准确性，然后采取下列措施。

a. 加强燃烧调整，解决不正常的燃烧方式。

b. 对受热面进行吹灰。

② 如果燃料在烟道内发生再燃烧，排烟温度超过所规定的数

值时，应按下列方法处理。

- a. 立即停炉（省煤器须通水冷却）。
- b. 关闭送风系统、燃烧室、烟道的所有门孔，严禁通风。
- c. 投入灭火装置，或利用油枪向燃烧室喷入蒸汽。
- d. 当排烟温度接近喷入蒸汽温度后，稳定 1h 以上，方可打开检查门孔检查。
- e. 在确认无火焰后，可启动引风机，逐渐开启烟道门。通风 5~10min，再根据具体情况，决定重新点火或停炉。

③ 严格按照悬浮燃烧锅炉的点火操作顺序进行点火。如果一次点火没有成功，必须重新按照点火操作顺序进行第二次点火。严禁当燃料已喷入燃烧室内没有点燃时，不进行强烈通风排除炉内爆炸性气体混合物而进行再次点火。

④ 对锅炉燃烧室或烟道严重爆炸事故，按锅炉爆炸事故处理。即抢救伤亡人员→切断电源、燃料源、气源、水源→灭火→保护事故现场→向上级报告和组织事故调查。

## ◀ 第十节 锅炉的水冲击事故 ▶

蒸汽与低温水的温度差较大，当蒸汽遇到水或水遇到蒸汽时，会发生剧烈的热交换，使部分蒸汽体积突然缩小造成局部真空，会在有限的容积内，发生汽水冲击。管道内有水有汽时，由于两相的流速不一致，产生汽阻，也会发生水冲击。在蒸汽管道、给水管、锅筒、省煤器内发生水冲击时，产生强烈的声响和震动，使管子固定支架松动，管子法兰口泄漏管子焊缝开裂，管子上阀门盖打出等。严重时还会造成锅炉震动，甚至引起锅炉房震动等，严重影响锅炉的安全运行。

### 一、蒸汽管道内的水冲击事故

#### 1. 蒸汽管道内水冲击事故的原因

- ① 在输送蒸汽前，没有对蒸汽管道进行暖管疏水或疏水不彻底。
- ② 锅炉高水位运行，增加负荷过急，锅炉满水或汽水共腾等，

使饱和蒸汽大量带水，将锅水带入蒸汽管道内。

③ 蒸汽管道设计不合理，不能很好疏水，或输水装置不合理，造成不能及时排除管道内的凝结水。

④ 锅炉点火后投入运行时，开启主汽阀过快或过大等。

## 2. 蒸汽管道内水冲击事故的处理

① 单台锅炉运行在开启主汽阀时，如果发现蒸汽管道内有水冲击声，应停止供汽；多台锅炉运行在并列时，如果发现蒸汽管道内有水冲击声，应停止并列。

② 蒸汽管道内发生水冲击，必须进行疏水和暖管。

③ 没有过热气的锅炉，在锅炉点火时，必须开启过热器集箱上的疏水阀门。

④ 属于蒸汽带水量过大而造成蒸汽管道内水冲击的，除加强对管道疏水外，还应注意以下事故：

锅炉水位不能过高，保持正常水位；

锅炉是否有汽水共腾或满水事故；

锅炉不能超出额定负荷过多；

锅炉内汽水分离器是否有故障。

⑤ 对蒸汽管道上的支架、法兰、焊缝接口及管道上所有的阀门进行检查，如有严重损坏，应进行修理或更换。

## 二、锅筒内的水冲击事故

### 1. 锅筒内的水冲击事故的原因

① 锅筒内水位太低，使给水管暴露在蒸汽空间。

② 锅筒内给水管在蒸汽空间部位的管子腐蚀穿孔、法兰泄漏、焊缝渗漏等，使给水直接喷入蒸汽空间或蒸汽穿入给水管内。

③ 锅筒内给水槽高于最低水位的锅炉，由于给水槽渗漏而不能充满水，使给水槽内的给水管直接与蒸汽接触。

④ 下锅筒有蒸汽加热器的锅炉，蒸汽加热器管连接法兰松动，或安装位置错误等。

### 2. 锅筒内水冲击事故的处理

① 锅筒内水位偏低时，应适当提高水位。

② 锅炉点火时，因使用蒸汽加热不当而产生水冲击时，应适当关小加热蒸汽阀门或暂时停止加热。

③ 提高进水温度，适当降低进水压力，使进水均匀平稳。

④ 采取以上措施后，当锅炉给水时，锅筒内仍发生水冲击声，并有严重的震动，应紧急停炉，待检查。

### 三、给水管道内的水冲击事故

#### 1. 给水管道内水冲击事故的原因

① 给水管道内压力或温度剧烈变化或给水流量过大。

② 给水管道内有空气或蒸汽。

③ 给水管道上的逆止阀动作不正常，引起给水压力波动。

④ 给水泵运行不正常等。

#### 2. 给水管道内水冲击事故的处理

① 当给水管道发生水冲击时，可适当关小给水阀门，若还不能消除时，则改用备用给水管道供水。如果无备用给水管道或其它措施又无效时，应停炉。

② 如果是锅炉给水阀门后的给水管道发生水冲击，可以关闭给水阀门，开启省煤器与锅筒的再循环管阀门，而后再缓慢开启给水阀门来消除给水管道内的水冲击。

③ 开启给水管道上的空气阀，排除给水管道内的空气或蒸汽。

④ 检查给水管道上的逆止阀和给水泵是否正常。

⑤ 保持给水压力和温度的稳定。

### 四、省煤器内的水冲击事故

#### 1. 省煤器内的水冲击事故的原因

① 锅炉生火时未排尽省煤器内的空气。

② 省煤器进水口管道上的逆止阀动作不正常，给水时会引起跳动。

③ 非沸腾式省煤器内的给水发生汽化，尤其是无旁路烟道的锅炉，在点火时容易发生汽化。

④ 省煤器集箱内有隔水板的锅炉，隔水板脱落或严重渗漏，严重破坏了省煤器内水的流动工况，引起剧烈的水、汽冲击等。

## 2. 省煤器内的水冲击事故的处理

① 非沸腾式省煤器在生火时发生水冲击，应适当延长生火时间，并增加上水与放水的次数，保证省煤器出口水温达到规定要求。

② 开启省煤器集箱上的空气阀，排尽内部的空气。

③ 检查省煤器进水口管道上的逆止阀，如发现不正常，应进行修理或更换。

④ 省煤器集箱内有隔水板的锅炉，如发生水冲击时，先降低锅炉的负荷，然后用表面测温仪器，测量省煤器露在烟道外的各管组管端的温度，如果发生各管组之间温度提升的幅度不正常，就可以找到省煤器集箱内隔水板脱落或严重渗漏的部位，从而作停炉修理准备。

## ◀ 第十一节 典型事故案例分析 ▶

### 一、广西合山电厂锅炉下降管爆破

#### 1. 事故概况及经过

1988年1月1日16时20分，广西合山电厂一号锅炉（蒸发量为130t/h）在检修后启动过程中，当调试安全阀时，锅筒四根下降管位于斜顶棚上部的管段突然发生爆破，大量高温汽水喷出，将炉顶上部四周的炉墙炉板冲开，站在锅筒平台出口处的徒工黄××被烫立即死亡，钟××被气浪从26m平台推落到7m运转层平台上摔跌，烫伤严重，技术员蒋××从炉顶29.5m处跳下，掉在厂房外离地3m高的风道上，伤势严重。此外，还有四人被烫伤。

事故后检查发现，从锅筒右起第二排前、后，第三排前、后共四根下降管爆破口是从锅筒管接头焊口下10多毫米处将下降管撕开，从此处至前墙直管段部分约3m多处，有的弯成几段，有的碎裂成几块、飞至12m远处，各碎片均密布很多腐蚀坑，有的碎片已腐蚀穿孔，有的碎片有深浅不一的龟背纹状腐蚀沟。管子内表面焊纹可见，未见有腐蚀现象。



## 2. 事故原因分析

① 对安全生产不严。这起事故是由于锅炉下降管外壁大面积腐蚀，管壁减薄造成的。该炉 1983 年 6 月 23 日、1984 年 5 月 24 日曾经在 7m 标高和 4m 标高处发生过下降管爆管事故，原因都是腐蚀严重，管壁减薄。但没有引起足够的重视，只检查 9m 以下下降管，忽视了对整个下降管的全面检查。

② 由于燃用劣质煤，锅炉燃烧不稳定，经常正压运行，炉型密封性差，炉顶及炉板内积灰严重，使这部分管子长期淹没在煤灰中，加之南方气候潮湿，停炉期间煤灰吸湿严重，加速了管子的腐蚀。

③ 该锅炉投运以来，只做比工作压力稍高一点的水压试验，未按规程要求定期做超压水压试验，使存在的隐患未能及时发现。在做水压试验时，均未打开炉板检查，因而已腐蚀穿孔的管子也未能发现。

## 3. 防止同类事故的措施

① 要在检查过程中，贯彻“安全第一，预防为主”的方针，全面检查管子的各个部位特别是腐蚀较严重的部位，及时采取措施消除。

② 要加强使用管理，杜绝影响管子腐蚀的各种因素如积灰、潮湿等。

## 二、上海大众汽车公司锅炉烧坏

### 1. 事故概况及经过

1990 年 12 月 24 日上午，上海大众汽车有限公司，一台 DZL10-1.27-A II 角管式蒸汽锅炉在运行过程中发生严重缺水事故，造成省煤器钢管、后部蒸发管全部烧断熔化，后部十几根模式蒸发管烧穿烧熔，炉膛、烟道内的模式水冷壁管自下集箱往上约 400mm 以上部分全部过热呈青黑色并伴有程度不同的变形，中间集箱因过热而弯曲，炉顶局部沉降，后炉顶冲开 3500mm 长、100mm 宽的天窗，进水管严重弯曲变形，后拱管支承头烧断。

事故当天上午，司炉工一人同时操作两台 10t/h 锅炉。上午

11时15分工长在操作室发现仪表显示异常，B炉（事故炉）炉膛温度比A炉高。此时，鼓风机开度为30%，引风机开度为100%左右，而炉膛却显示正压。当对异常情况进行查找原因时，B炉发生“嘭”的一声，从炉门、煤闸门向外喷火，立即采用了紧急停炉措施，迅速将炉排上的煤走完。

## 2. 事故原因分析

① 锅炉的给水自动控制失灵，采用手动操作时误关了水泵。事故发生后经过现场检查、试验发现，给水阀处于100%全开位置，给水管路无堵塞现象，给水泵启、停正常。在发生事故前，司炉确有启、停给水泵的操作，同时省煤器管全部烧熔，因而可断定是因误操作关闭了给水泵。

② 锅炉电接点水位失灵，事故发生时仍显高水位，是造成司炉工误操作的原因之一。

③ 司炉工缺乏操作经验和工作责任心，对锅炉控制仪表上出现的异常情况未采取相应措施。并且在已知水位记录表关闭的情况下，未采取相应的加强措施。

④ 水处理操作人员水平低，水质严重污染未能及时发现。经了解，水表柱是不冲洗的，水表柱内有泥浆水垢。从而导致电接点水位计失灵、出现假水位。

⑤ 锅炉处于调试阶段，未能将锅炉自动控制系统全面调试到正常工作状态，影响了锅炉的安全运行。

## 3. 防止同类事故的措施

① 建立健全必要的规章制度，并认真贯彻执行。

② 对司炉进行培训考核，提高司炉人员素质。

③ 安全附件和自动控制系统在运行时，应始终保持灵敏，可靠状态。

附录一 饱和水与干饱和水蒸气表 (按温度排列)

温度 $t$ /°C	压力 $p$ /MPa	比 容		焓		汽化 潜热 $r$ /(kJ/kg)	熵	
		液体 $v'$ /(m <sup>3</sup> /kg)	蒸汽 $v''$ /(m <sup>3</sup> /kg)	液体 $h'$ /(kJ/kg)	蒸汽 $h''$ /(kJ/ kg)		液体 $s'$ /[kJ/(kg· K)]	蒸汽 $s''$ /[kJ/ (kg·K)]
0	0.0006108	0.0010002	206.321	-0.04	2501.0	2501.0	-0.0002	9.1565
0.01	0.0006112	0.00100022	206.175	0.000614	2501.0	2501.0	0.0000	9.1562
1	0.0006566	0.0010001	192.611	4.17	2502.8	2498.6	0.0152	9.1298
2	0.0007054	0.0010001	179.935	8.39	2504.7	2496.3	0.0306	9.1035
4	0.0008129	0.0010000	157.267	16.80	2508.3	2491.5	0.0611	9.0514
6	0.0009346	0.0010000	137.768	25.21	2512.0	2486.8	0.0913	9.0003
8	0.0010721	0.0010001	120.952	33.60	2515.7	2482.1	0.1213	8.9501
10	0.0012271	0.0010003	106.419	41.99	2519.4	2477.4	0.1510	8.9009
12	0.0014015	0.0010004	93.828	50.38	2523.0	2472.6	0.1805	8.8525
14	0.0015974	0.0010007	82.893	58.75	2526.7	2467.9	0.2098	8.8050
16	0.0018170	0.0010010	73.376	67.13	2530.4	2463.3	0.2388	8.7583
18	0.0020626	0.0010013	65.080	75.50	2534.0	2458.5	0.2677	8.7125
20	0.0023368	0.0010017	57.833	83.86	2537.7	2453.8	0.2963	8.6674
22	0.0026424	0.0010022	51.488	92.22	2541.4	2449.2	0.3247	8.6232
24	0.0029824	0.0010026	45.923	100.59	2545.0	2444.4	0.3530	8.5797
26	0.0033600	0.0010032	41.031	108.95	2548.6	2439.6	0.3810	8.5370
28	0.0037785	0.0010037	36.726	117.31	2552.3	2435.0	0.4088	8.4950
30	0.0042417	0.0010043	32.929	125.66	2555.9	2430.2	0.4365	8.4537
35	0.0056217	0.0010060	25.246	146.56	2565.0	2418.4	0.5049	8.3536
40	0.0073749	0.0010078	19.548	167.45	2574.0	2406.5	0.5721	8.2576
45	0.0095817	0.0010099	15.278	188.35	2582.9	2394.5	0.6383	8.1655
50	0.012335	0.0010121	12.048	209.26	2591.8	2382.5	0.7035	8.0771
55	0.015740	0.0010145	9.5812	230.17	2600.7	2370.5	0.7677	7.9922
60	0.019919	0.0010171	7.6807	251.09	2609.5	2358.4	0.8310	7.9106
65	0.025008	0.0010199	6.2042	272.02	2618.2	2346.2	0.8933	7.8320
70	0.031161	0.0010228	5.0479	292.97	2626.8	2333.8	0.9548	7.7565
75	0.038548	0.0010259	4.1356	313.94	2635.3	2321.4	1.0154	7.6837
80	0.047359	0.0010292	3.4104	334.92	2648.8	2308.9	1.0752	7.6135
85	0.057803	0.0010326	2.8300	355.92	2652.1	2296.2	1.1343	7.5459
90	0.070108	0.0010361	2.3624	376.94	2660.3	2283.4	1.1925	7.4805

续表

温度 $t$ /°C	压力 $p$ /MPa	比 容		焓		汽化 潜热 $r$ /(kJ/kg)	熵	
		液体 $v'$ /(m <sup>3</sup> /kg)	蒸汽 $v''$ /(m <sup>3</sup> /kg)	液体 $h'$ /(kJ/kg)	蒸汽 $h''$ /(kJ/ kg)		液体 $s'$ /[kJ/(kg· K)]	蒸汽 $s''$ /[kJ/ (kg·K)]
95	0.084525	0.0010398	1.9832	397.99	2668.4	2270.4	1.2500	7.4174
100	0.101325	0.0010437	1.6738	419.06	2676.3	2257.2	1.3069	7.3564
110	0.14326	0.0010519	1.2106	461.32	2691.8	2230.5	1.4185	7.2402
120	0.19854	0.0010606	0.89202	503.7	2706.6	2202.9	1.5276	7.1410
130	0.27012	0.0010700	0.66851	546.3	2720.7	2174.4	1.6344	7.0281
140	0.36136	0.0010801	0.50875	589.1	2734.0	2144.9	1.7390	6.9307
150	0.47597	0.0010908	0.39261	632.2	2746.3	2114.1	1.8416	6.8381
160	0.61804	0.0011022	0.30685	675.5	2757.7	2082.2	1.9425	6.7498
170	0.79202	0.0011145	0.24259	719.1	2768.0	2048.9	2.0416	6.6652
180	1.0027	0.0011275	0.19381	763.1	2777.1	2014.0	2.1393	6.5838
190	1.2552	0.0011415	0.15631	807.5	2784.9	1977.4	2.2356	6.5052
200	1.5551	0.0011565	0.12714	852.4	2791.4	1939.0	2.3307	6.4289
210	1.9079	0.0011726	0.10422	897.8	2796.4	1898.6	2.4247	6.3546
220	2.3201	0.0011900	0.08602	943.7	2799.9	1856.2	2.5178	6.2819
230	2.7979	0.0012087	0.07143	990.3	2801.7	1811.4	2.6102	6.2104
240	3.3480	0.0012291	0.05964	1037.6	2801.6	1764.0	2.7021	6.1397
250	3.9776	0.0012513	0.05002	1085.8	2799.5	1713.7	2.7936	6.0693
260	4.6940	0.0012756	0.04212	1135.0	2795.2	1660.2	2.8850	5.9989
270	5.5051	0.0013025	0.03557	1185.1	2788.3	1602.9	2.9766	5.9278
280	6.4191	0.0013324	0.03010	1237.0	2778.6	1541.6	3.0687	5.8555
290	7.4448	0.0013659	0.02551	1290.3	2765.4	1475.1	3.1616	5.7811
300	8.5917	0.0014041	0.02162	1345.4	2748.4	1403.0	3.2559	5.7038
310	9.8697	0.0014480	0.01829	1402.9	2726.8	1323.9	3.3522	5.6224
320	11.290	0.0014995	0.01544	1463.9	2699.6	1236.2	3.4513	5.5356
330	12.865	0.0015614	0.01296	1527.5	2665.5	1138.0	3.5546	5.4414
340	14.608	0.0016390	0.01078	1596.8	2622.3	1025.5	3.6638	5.3363
350	16.537	0.0017407	0.008822	1672.9	2566.1	893.2	3.7816	5.2149
360	18.674	0.0018930	0.006970	1763.1	2485.7	722.6	3.9189	5.0603
370	21.053	0.002231	0.004958	1896.2	2335.7	439.5	4.1198	4.8031
372	21.562	0.002392	0.004432	1943.0	2280.1	338.1	4.1891	4.7130
374	22.084	0.002834	0.003482	2039.2	2150.7	111.5	4.3374	4.5096

注：临界参数  $t_c = 374.12^\circ\text{C}$ ,  $p_c = 22.115\text{MPa}$ ,  $v_c = 0.003147\text{m}^3/\text{kg}$ ,  $h_c = 2095.2\text{kJ}/\text{kg}$ ,  $s_c = 4.4237\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

附录二 饱和水与干饱和水蒸气表 (按压力排列)

压力 $p$ /MPa	温度 $t$ /°C	比 容		焓		汽化 潜热 $r$ /(kJ/kg)	熵	
		液体 $v'$ /(m <sup>3</sup> /kg)	蒸汽 $v''$ /(m <sup>3</sup> /kg)	液体 $h'$ /(kJ/kg)	蒸汽 $h''$ /(kJ/ kg)		液体 $s'$ /[kJ/(kg· K)]	蒸汽 $s''$ /[kJ/ (kg·K)]
0.0010	6.982	0.0010001	129.208	29.33	2513.8	2484.5	0.1060	8.9756
0.0020	17.511	0.0010012	67.006	73.45	2533.2	2459.8	0.2606	8.7236
0.0030	24.098	0.0010027	45.668	101.00	2545.2	2444.2	0.3543	8.5776
0.0040	28.981	0.0010040	34.803	121.41	2554.1	2432.7	0.4224	8.4747
0.0050	32.90	0.0010052	28.195	137.77	2561.2	2423.4	0.4762	8.3952
0.0060	36.18	0.0010064	23.742	151.50	2567.1	2415.6	0.5209	8.3305
0.0070	39.02	0.0010074	20.532	163.38	2572.2	2408.8	0.5591	8.2760
0.0080	41.53	0.0010084	18.106	173.87	2576.7	2402.8	0.5926	8.2289
0.0090	43.79	0.0010094	16.206	183.28	2580.8	2397.5	0.6224	8.1875
0.010	45.33	0.0010102	14.676	191.84	2584.4	2392.6	0.6493	8.1505
0.015	54.00	0.0010140	10.025	225.98	2598.9	2372.9	0.7549	8.0089
0.020	60.09	0.0010172	7.6515	251.46	2609.6	2358.1	0.8321	7.9092
0.025	64.99	0.0010199	6.2060	271.99	2618.1	2346.1	0.8932	7.8321
0.030	69.12	0.0010223	5.2308	289.31	2625.3	2336.0	0.9441	7.7695
0.040	75.89	0.0010265	3.9949	317.65	2636.8	2319.2	1.0261	7.6711
0.050	81.35	0.0010301	3.2415	340.57	2646.0	2305.4	1.0912	7.5951
0.060	85.95	0.0010333	2.7329	359.93	2653.6	2293.7	1.1454	7.5332
0.070	89.96	0.0010361	2.3658	376.77	2660.2	2283.4	1.1921	7.4811
0.080	93.51	0.0010387	2.0879	391.72	2666.0	2274.3	1.2330	7.4360
0.090	96.71	0.0010412	1.8701	405.21	2671.1	2265.9	1.2696	7.3963
0.10	99.63	0.0010434	1.6946	417.51	2675.7	2258.2	1.3027	7.3608
0.12	104.81	0.0010476	1.4289	439.36	2683.8	2244.4	1.3609	7.2996
0.14	109.32	0.0010513	1.2370	458.42	2690.8	2232.4	1.4109	7.2480
0.16	113.32	0.0010547	1.0917	475.38	2696.8	2221.4	1.4550	7.2032
0.18	116.93	0.0010579	0.97775	490.70	2702.1	2211.4	1.4944	7.1638
0.20	120.23	0.0010608	0.88592	504.7	2706.9	2202.2	1.5301	7.1286
0.30	133.54	0.0010735	0.60586	561.4	2725.5	2164.1	1.6717	6.9930
0.40	143.62	0.0010839	0.46242	604.7	2738.5	2133.8	1.7764	6.8966
0.50	151.85	0.0010928	0.37481	640.1	2748.5	2108.4	1.8604	6.8215
0.60	158.84	0.0011009	0.31556	670.4	2756.4	2086.0	1.9308	6.7598
0.70	164.96	0.0011082	0.27274	697.1	2762.9	2065.8	1.9918	6.7074

续表

压力 $p$ /MPa	温度 $t$ /°C	比 容		焓		汽化 潜热 $r$ /(kJ/kg)	熵	
		液体 $v'$ /(m <sup>3</sup> /kg)	蒸汽 $v''$ /(m <sup>3</sup> /kg)	液体 $h'$ /(kJ/kg)	蒸汽 $h''$ /(kJ/ kg)		液体 $s'$ /[kJ/(kg· K)]	蒸汽 $s''$ /[kJ/ (kg·K)]
0.80	170.42	0.0011150	0.24030	720.9	2768.4	2047.5	2.0457	6.6618
0.90	175.36	0.0011213	0.21484	742.6	2773.0	2030.4	2.0941	6.6212
1.00	179.88	0.0011274	0.19430	762.6	2777.0	2014.4	2.1382	6.5817
1.10	184.06	0.0011331	0.17739	781.1	2780.4	1999.3	2.1780	6.5516
1.20	187.96	0.0011386	0.16320	798.4	2783.4	1985.0	2.2160	6.5210
1.30	191.60	0.0011438	0.15112	814.7	2786.0	1971.3	2.2509	6.4927
1.40	195.04	0.0011489	0.14072	830.1	2788.4	1958.3	2.2836	6.4665
1.50	198.28	0.0011538	0.13165	844.7	2790.4	1945.7	2.3144	6.4418
1.60	201.37	0.0011586	0.12368	858.6	2792.2	1933.6	2.3436	6.4187
1.70	204.30	0.0011633	0.11661	871.8	2793.8	1922.0	2.3712	6.3967
1.80	207.10	0.0011678	0.11031	884.6	2795.1	1910.5	2.3976	6.3759
1.90	209.79	0.0011722	0.10464	896.8	2796.4	1899.6	2.4227	6.3561
2.00	212.37	0.0011766	0.09953	908.6	2797.4	1888.8	2.4468	6.3373
2.50	223.94	0.0011972	0.07990	962.0	2800.8	1838.8	2.5543	6.2536
3.00	233.84	0.0012163	0.06662	1008.4	2801.9	1793.5	2.6455	6.1832
3.50	242.54	0.0012345	0.05702	1049.8	2801.3	1751.5	2.7253	6.1218
4.00	250.33	0.0012521	0.04974	1087.5	2799.4	1711.9	2.7967	6.0670
4.50	257.41	0.0012691	0.04402	1122.2	2796.5	1674.3	2.8614	6.0171
5.00	263.92	0.0012858	0.03941	1154.6	2792.8	1638.2	2.9209	5.9712
6.00	275.56	0.0013187	0.03241	1213.9	2783.3	1569.4	3.0277	5.8878
7.00	285.80	0.0013514	0.02734	1267.7	2771.4	1503.7	3.1225	5.8126
8.00	294.98	0.0013843	0.02349	1317.5	2757.5	1440.0	3.2083	5.7430
9.00	303.31	0.0014179	0.02046	1364.2	2741.8	1377.6	3.2875	5.6773
10.0	310.96	0.0014526	0.01800	1408.6	2724.4	1315.8	3.3616	5.6143
12.0	324.64	0.0015267	0.01425	1492.6	2684.8	1192.2	3.4986	5.4930
14.0	336.63	0.0016104	0.01149	1572.8	2638.3	1065.5	3.6262	5.3737
16.0	347.32	0.0017101	0.009330	1651.5	2582.7	931.2	3.7486	5.2496
18.0	356.96	0.0018380	0.007534	1733.4	2514.4	781.0	3.8739	5.1135
20.0	365.71	0.002038	0.005873	1828.8	2413.8	585.0	4.0181	4.9338
22.0	373.68	0.002675	0.003757	2007.7	2192.5	184.8	4.2891	4.5748

### 附录三 未饱和水与过热蒸汽表

$p$	0.001MPa				0.001MPa				0.001MPa			
	$t_s=6.982^\circ\text{C}$				$t_s=32.90^\circ\text{C}$				$t_s=45.83^\circ\text{C}$			
饱和参数	$v'=0.0010001\text{m}^3/\text{kg}, v''=129.208\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=29.33\text{kJ}/\text{kg}, h''=2513.8\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=0.1060\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=8.9756\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$				$v'=0.0010052\text{m}^3/\text{kg}, v''=28.196\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=137.77\text{kJ}/\text{kg}, h''=2561.2\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=0.4762\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=8.3952\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$				$v'=0.0010102\text{m}^3/\text{kg}, v''=14.676\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=191.8\text{kJ}/\text{kg}, h''=2584.4\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=0.6493\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=8.1505\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$			
$t$ / $^\circ\text{C}$	$v$ / $(\text{m}^3/\text{kg})$	$h$ / $(\text{kJ}/\text{kg})$	$s$ / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$v$ / $(\text{m}^3/\text{kg})$	$h$ / $(\text{kJ}/\text{kg})$	$s$ / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$v$ / $(\text{m}^3/\text{kg})$	$h$ / $(\text{kJ}/\text{kg})$	$s$ / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$v$ / $(\text{m}^3/\text{kg})$	$h$ / $(\text{kJ}/\text{kg})$	$s$ / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
0	0.001002	-0.0412	0.000154	0.0010002	0.0	-0.0001	0.0010002	0.0	-0.0001	0.0010002	0.0	-0.0001
20	135.23	2538.1	9.0604	0.0010017	83.9	0.2963	0.0010017	83.9	0.2963	0.0010017	83.9	0.2963
40	144.47	2575.5	9.1837	28.86	2574.6	8.4385	28.86	2574.6	8.4385	0.0010078	167.4	0.5721
50	149.09	2594.2	9.2426	29.78	2593.4	8.4977	29.78	2593.4	8.4977	14.87	2592.3	8.1752
60	153.71	2613.0	9.2997	30.71	2612.3	8.5552	30.71	2612.3	8.5552	15.34	2611.3	8.2381
80	162.95	2650.6	9.4093	32.57	2650.0	8.6652	32.57	2650.0	8.6652	16.27	2649.3	8.3437
100	172.19	2688.3	9.5132	34.42	2687.9	8.7695	34.42	2687.9	8.7695	17.20	2687.2	8.4484
120	181.42	2726.2	9.6122	36.27	2725.9	8.8687	36.27	2725.9	8.8687	18.12	2725.4	8.5479
140	190.66	2764.3	9.7066	38.12	2764.0	8.9633	38.12	2764.0	8.9633	19.05	2763.6	8.6427
150	195.27	2703.4	9.7523	39.04	2783.0	9.0091	39.04	2783.0	9.0091	19.51	2782.8	8.6885
160	199.89	2802.6	9.7971	39.97	2802.3	9.0539	39.97	2802.3	9.0539	19.98	2802.0	8.7334
180	209.12	2841.0	9.8839	41.81	2840.8	9.1408	41.81	2840.8	9.1408	20.90	2840.6	8.8204
200	218.35	2379.6	9.9672	43.66	2879.5	9.2244	43.66	2879.5	9.2244	21.82	2870.3	8.9041
250	241.43	2977.4	10.1636	48.28	2977.3	9.4207	48.28	2977.3	9.4207	24.14	2977.1	9.1006
300	264.51	3076.5	10.3446	52.90	3076.4	9.6017	52.90	3076.4	9.6017	26.44	3076.3	9.2817
350	287.58	3177.2	10.5130	57.51	3177.1	9.7702	57.51	3177.1	9.7702	28.75	3177.0	9.4502
400	310.66	3279.5	10.6709	62.13	3279.4	9.9280	62.13	3279.4	9.9280	31.06	3270.4	9.6081
450	333.74	3388.4	10.819	66.74	3383.3	10.077	66.74	3383.3	10.077	33.37	3383.4	9.7570
500	356.81	3489.0	10.960	71.36	3480.0	10.218	71.36	3480.0	10.218	35.68	3488.9	9.8982
600	402.96	3705.3	11.224	80.59	3705.3	10.481	80.59	3705.3	10.481	40.29	3705.2	10.161

续表

$p$	0.1MPa				0.5MPa				1.0MPa			
	$t_s=99.63^\circ\text{C}$				$t_s=151.85^\circ\text{C}$				$t_s=45.83^\circ\text{C}$			
饱和参数	$v'=0.0010434\text{m}^3/\text{kg}, v''=1.6946\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=417.51\text{kJ}/\text{kg}, h''=2675.7\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=1.3027\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=7.3608\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$				$v'=0.0010928\text{m}^3/\text{kg}, v''=0.37481\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=640.1\text{kJ}/\text{kg}, h''=2748.5\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=1.8604\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=6.8215\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$				$v'=0.0011274\text{m}^3/\text{kg}, v''=0.19430\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=762.6\text{kJ}/\text{kg}, h''=2777.0\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=2.1382\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=6.5847\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$			
$t$ / $^\circ\text{C}$	$v$ / $(\text{m}^3/\text{kg})$	$h$ / $(\text{kJ}/\text{kg})$	$s$ / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$v$ / $(\text{m}^3/\text{kg})$	$h$ / $(\text{kJ}/\text{kg})$	$s$ / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$v$ / $(\text{m}^3/\text{kg})$	$h$ / $(\text{kJ}/\text{kg})$	$s$ / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$v$ / $(\text{m}^3/\text{kg})$	$h$ / $(\text{kJ}/\text{kg})$	$s$ / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
0	0.0010002	0.1	-0.0001	0.0010000	0.5	-0.0001	0.0009997	1.0	-0.0001	0.0009997	1.0	-0.0001
20	0.0010017	84.0	0.2963	0.0010015	84.3	0.2962	0.0010013	84.8	0.2961	0.0010013	84.8	0.2961
40	0.0010078	167.5	0.5721	0.0010076	167.9	0.5719	0.0010074	168.3	0.5717	0.0010074	168.3	0.5717
50	0.0010121	209.3	0.7035	0.0010119	209.7	0.7033	0.0010117	210.1	0.7030	0.0010117	210.1	0.7030
60	0.0010171	251.2	0.8309	0.0010169	251.5	0.8307	0.0010167	251.9	0.8305	0.0010167	251.9	0.8305
80	0.0010292	335.0	1.0752	0.0010290	335.3	1.0750	0.0010287	335.7	1.0746	0.0010287	335.7	1.0746
100	1.696	2676.5	7.3628	0.0010435	419.4	1.3066	0.0010432	419.7	1.3062	0.0010432	419.7	1.3062
120	1.793	2716.8	7.4681	0.0010605	503.9	1.5273	0.0010602	504.3	1.5269	0.0010602	504.3	1.5269
140	1.889	2756.6	7.5669	0.0010800	589.2	1.7388	0.0010796	589.5	1.7383	0.0010796	589.5	1.7383
150	1.937	2776.4	7.6143	0.0010908	632.2	1.8416	0.0010904	632.5	1.8410	0.0010904	632.5	1.8410
160	1.984	2796.2	7.6605	0.3836	2767.4	6.8653	0.0011019	675.7	1.9420	0.0011019	675.7	1.9420
180	2.078	2835.7	7.7496	0.4045	2812.1	6.9664	0.1944	2777.3	6.5854	0.1944	2777.3	6.5854
200	2.172	2875.2	7.8348	0.4249	2855.4	7.0603	0.2059	2827.5	6.6940	0.2059	2827.5	6.6940
250	2.406	2974.2	8.0337	0.4744	2960.7	7.2716	0.2327	2942.8	6.9256	0.2327	2942.8	6.9256
300	2.639	3074.1	8.2162	0.5226	3064.2	7.4605	0.2580	3051.3	7.1239	0.2580	3051.3	7.1239
350	2.871	3175.3	8.3854	0.5701	3167.5	7.6334	0.2825	3157.7	7.3018	0.2825	3157.7	7.3018
400	3.103	3278.0	8.5439	0.6172	3271.8	7.7944	0.3066	3264.0	7.4606	0.3066	3264.0	7.4606
450	3.334	3382.2	8.6932	0.6641	3377.0	7.9452	0.3304	3370.7	7.6188	0.3304	3370.7	7.6188
500	3.565	3487.9	8.8346	0.7109	3483.6	8.0877	0.3540	3478.3	7.7627	0.3540	3478.3	7.7627
600	4.028	3704.5	9.0979	0.8040	3701.4	8.3525	0.4010	3697.4	8.0292	0.4010	3697.4	8.0292



续表

$p$	2MPa			3MPa			4MPa		
	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]
饱和 参数	$t_s=212.37^\circ\text{C}$ $v'=0.0011766\text{m}^3/\text{kg}, v''=0.09953\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=908.6\text{kJ}/\text{kg}, h''=2797.4\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=2.4468\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=6.3373\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$			$t_s=233.84^\circ\text{C}$ $v'=0.0012163\text{m}^3/\text{kg}, v''=0.06662\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=1008.4\text{kJ}/\text{kg}, h''=2801.9\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=2.6455\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=6.01832\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$			$t_s=250.33^\circ\text{C}$ $v'=0.0012521\text{m}^3/\text{kg}, v''=0.4974\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=1087.5\text{kJ}/\text{kg}, h''=2799.4\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=2.7967\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=6.0670\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$		
$t$ /°C	0	2.0	0.000	0.0009987	3.0	0.0001	0.0009982	4.0	0.0002
	20	85.7	0.2959	0.0010004	86.7	0.2957	0.0009999	87.0	0.2955
	40	169.2	0.5713	0.0010065	170.1	0.5709	0.0010060	171.0	0.5706
	50	211.0	0.7026	0.0010108	211.8	0.7021	0.0010103	212.7	0.7016
	60	252.7	0.8299	0.0010158	253.6	0.8294	0.0010153	254.4	0.8288
	80	336.5	1.0740	0.0010278	337.3	1.0733	0.0010273	338.1	1.0726
	100	420.5	1.3054	0.0010422	421.2	1.3046	0.0010417	422.0	1.3038
	120	505.0	1.5260	0.0010590	505.7	1.5250	0.0010584	506.4	1.5242
	140	590.2	1.7373	0.0010783	590.8	1.7362	0.0010777	591.5	1.7352
	150	633.1	1.8399	0.0010890	633.7	1.8388	0.0010883	634.3	1.8377
	160	676.3	1.9408	0.0011005	676.9	1.9396	0.0010997	677.5	1.9385
	180	763.6	2.1379	0.0011258	764.1	2.1366	0.0011249	764.6	2.1352
	200	852.6	2.3300	0.0011550	850.3	2.3284	0.0011540	853.4	2.3268
	250	1115	6.5460	0.07058	2855.2	6.2867	0.0012512	1085.8	2.7936
	300	1255	6.7679	0.08116	2994.2	6.5408	0.05885	2961.5	6.3634
	350	1386	6.9574	0.09053	3115.7	6.7443	0.06645	3093.1	6.5838
	400	1512	7.1285	0.09933	3231.6	6.9231	0.07339	3214.5	6.7713
	450	1635	7.2855	0.1078	3344.4	7.0847	0.07999	3330.7	6.9379
	500	1756	7.4323	0.1161	3456.4	7.2345	0.08638	3445.2	7.0909
	600	1995	7.7024	0.1324	3681.5	7.5084	0.09879	3673.4	7.3686

续表

$p$	5MPa				6MPa				7MPa						
	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$t_s$ /°C	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$t_s$ /°C	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$t_s$ /°C			
饱和 参数	$v' = 0.0012858 \text{ m}^3/\text{kg}$ , $h' = 1154.6 \text{ kJ/kg}$ , $h'' = 2792.8 \text{ kJ/kg}$ , $s' = 2.9209 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , $s'' = 5.9712 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$v' = 0.0013187 \text{ m}^3/\text{kg}$ , $h' = 1213.9 \text{ kJ/kg}$ , $h'' = 2783.3 \text{ kJ/kg}$ , $s' = 3.0277 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , $s'' = 5.8878 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$v' = 0.0013514 \text{ m}^3/\text{kg}$ , $h' = 1267.7 \text{ kJ/kg}$ , $h'' = 2771.4 \text{ kJ/kg}$ , $s' = 3.1225 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , $s'' = 5.8126 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$t_s = 263.92^\circ\text{C}$	$t_s = 275.56^\circ\text{C}$	$t_s = 285.80^\circ\text{C}$									
$t$ /°C	0 20 40 50 60 80 100 120 140 150 160 180 200 250 300 350 400 450 500 600	5.1 88.6 171.9 213.6 255.3 338.8 422.7 507.1 592.1 635.0 678.0 765.2 853.8 1085.8 2925.4 3069.2 3196.9 3316.8 3433.8 3665.4	0.0002 0.2952 0.5702 0.7012 0.8283 1.0720 1.3030 1.5232 1.7342 1.8366 1.9373 2.1339 2.3252 2.7911 6.2104 6.4513 6.6486 6.8204 6.9768 7.2586		0.0002 0.000995 0.0010056 0.0010099 0.0010149 0.0010268 0.0010412 0.0010579 0.0010771 0.0010877 0.0010990 0.0011241 0.0011530 0.0012494 0.04532 0.05194 0.05780 0.06327 0.06853 0.07864	5.1 88.6 171.9 213.6 255.3 338.8 422.7 507.1 592.1 635.0 678.0 765.2 853.8 1085.8 2925.4 3069.2 3196.9 3316.8 3433.8 3665.4		0.0002 0.000995 0.0010056 0.0010099 0.0010149 0.0010268 0.0010412 0.0010579 0.0010771 0.0010877 0.0010990 0.0011241 0.0011530 0.0012494 0.04532 0.05194 0.05780 0.06327 0.06853 0.07864	6.1 89.5 172.7 214.4 256.1 339.6 423.5 507.8 592.8 635.6 678.6 765.7 854.2 1085.8 2885.0 3043.9 3178.6 3302.6 3422.2 3657.2		0.0003 0.2951 0.5698 0.7007 0.8278 1.0713 1.3023 1.5224 1.7332 1.8355 1.9361 2.1325 2.3237 2.7887 6.0693 6.3356 6.5438 6.7214 6.8814 7.1673		0.0003 0.2951 0.5698 0.7007 0.8278 1.0713 1.3023 1.5224 1.7332 1.8355 1.9361 2.1325 2.3237 2.7887 6.0693 6.3356 6.5438 6.7214 6.8814 7.1673		0.0004 0.2948 0.5694 0.7003 0.8273 1.0707 1.3015 1.5215 1.7321 1.8344 1.9350 2.1312 2.3222 2.7864 5.9322 6.2306 6.4511 6.6350 6.7988 7.0890

续表

$p$	8MPa				9MPa				10MPa			
	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]
饱和 参数	$t_s=294.98^\circ\text{C}$ $v'=0.0013843\text{m}^3/\text{kg}, v''=0.02349\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=1317.5\text{kJ}/\text{kg}, h''=2757.5\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=3.2083\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=5.7430\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$				$t_s=303.31^\circ\text{C}$ $v'=0.0014179\text{m}^3/\text{kg}, v''=0.02046\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=1364.2\text{kJ}/\text{kg}, h''=2741.8\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=3.2875\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=5.6773\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$				$t_s=310.96^\circ\text{C}$ $v'=0.0014526\text{m}^3/\text{kg}, v''=0.01800\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=1408.6\text{kJ}/\text{kg}, h''=2724.4\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=3.3616\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}), s''=5.6143\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$			
$t$ /°C	0	8.1	0.0004	0.0009962	8.1	0.0004	0.0009958	9.1	0.0005	0.0009953	10.1	0.0005
	20	79.4	0.2946	0.0009981	79.4	0.2946	0.0009977	92.3	0.2944	0.0009972	93.2	0.2942
	40	174.5	0.5690	0.0010043	174.5	0.5690	0.0010038	175.4	0.5686	0.0010034	176.3	0.5682
	50	216.5	0.6998	0.0010086	216.5	0.6998	0.0010081	217.0	0.6993	0.0010077	217.8	0.6989
	60	257.8	0.8267	0.0010135	257.8	0.8267	0.0010131	258.6	0.8262	0.0010126	259.4	0.8257
	80	341.2	1.0700	0.0010254	341.2	1.0700	0.0010249	342.0	1.0694	0.0010244	342.8	1.0687
	100	425.0	1.3007	0.0010396	425.0	1.3007	0.0010391	425.8	1.3000	0.0010386	426.5	1.2992
	120	509.2	1.5206	0.0010562	509.2	1.5206	0.0010556	509.9	1.5197	0.0010551	510.6	1.5188
	140	594.1	1.7311	0.0010752	594.1	1.7311	0.0010745	594.7	1.7301	0.0010739	595.4	1.7291
	150	636.8	1.8334	0.0010856	636.8	1.8334	0.0010850	637.5	1.8323	0.0010843	638.1	1.8312
	160	679.8	1.9338	0.0010968	679.8	1.9338	0.0010961	680.4	1.9326	0.0010954	681.0	1.9315
	180	766.7	2.1299	0.0011216	766.7	2.1299	0.0011207	767.2	2.1286	0.0011199	767.8	2.1272
	200	855.1	2.3207	0.0011500	855.1	2.3207	0.0011490	855.5	2.3191	0.0011480	855.9	2.3176
	250	1085.8	2.7840	0.0012440	1085.8	2.7840	0.0012423	1085.9	2.7817	0.0012406	1085.9	2.7794
	300	2785.5	5.7918	0.02425	2785.5	5.7918	0.0014022	1344.9	3.2539	0.0013978	1343.7	3.2494
	350	2988.3	6.1324	0.02995	2988.3	6.1324	0.02579	2957.5	6.0383	0.02242	2924.2	5.9464
	400	3140.1	6.3670	0.03431	3140.1	6.3670	0.02993	3119.7	6.2891	0.02641	3098.5	6.2158
	450	3273.1	6.5577	0.03815	3273.1	6.5577	0.03348	3257.9	6.4872	0.02974	3242.2	6.4220
	500	3398.5	6.7254	0.04172	3398.5	6.7254	0.03675	3386.4	6.6592	0.03277	3374.1	6.5984
	600	3640.7	7.0201	0.04841	3640.7	7.0201	0.04281	3632.4	6.9585	0.03833	3624.0	6.9025

续表

$p$	15MPa				20MPa				30MPa			
	$v$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$v'$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$v''$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]	$v'''$ /(m <sup>3</sup> /kg)	$h$ /(kJ/kg)	$s$ /[kJ/(kg·K)]
饱和 参数	$t_s=342.12^\circ\text{C}$ $v'=0.0016580\text{m}^3/\text{kg}$ , $v''=0.01035\text{m}^3/\text{kg}$ $h'=1612.2\text{kJ}/\text{kg}$ , $h''=2611.6\text{kJ}/\text{kg}$ $s'=3.6877\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , $s''=5.3122\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$											
$t$ /°C	0	15.1	0.0007	0.0009904	20.1	0.008	0.0009857	30.0	0.0008	0.0009857	30.0	0.0008
	20	97.9	0.2930	0.0009929	102.5	0.2919	0.0009886	000.7	0.2919	0.0009886	000.7	0.2895
	40	180.7	0.5662	0.0009992	185.1	0.5643	0.0009950	193.8	0.5643	0.0009950	193.8	0.5604
	50	222.1	0.6966	0.0010034	226.4	0.6943	0.0009993	235.0	0.6943	0.0009993	235.0	0.6897
	60	263.6	0.8230	0.0010083	267.8	0.8204	0.0010041	276.1	0.8204	0.0010041	276.1	0.8153
	80	346.8	1.0655	0.0010199	350.8	1.0623	0.0010155	358.7	1.0623	0.0010155	358.7	1.0560
	100	430.3	1.2954	0.0010337	434.0	1.2916	0.0010289	441.6	1.2916	0.0010289	441.6	1.2843
	120	514.2	1.5144	0.0010496	517.7	1.5101	0.0010445	524.9	1.5101	0.0010445	524.9	1.5017
	140	598.7	1.7241	0.0010679	602.0	1.7192	0.0010621	608.7	1.7192	0.0010621	608.7	1.7097
	150	641.3	1.8259	0.0010779	644.4	1.8207	0.0010718	650.9	1.8207	0.0010718	650.9	1.8105
	160	684.0	1.9258	0.0010886	687.1	1.9203	0.0010821	693.3	1.9203	0.0010821	693.3	1.9095
	180	770.4	2.1208	0.0011120	773.1	2.1145	0.0011046	778.7	2.1145	0.0011046	778.7	2.1022
	200	858.1	2.3102	0.0011387	860.4	2.3030	0.0011300	865.2	2.3030	0.0011300	865.2	2.2891
	250	1086.2	2.7682	0.0012247	1086.8	2.7575	0.0012107	1088.5	2.7575	0.0012107	1088.5	2.7375
	300	1338.6	3.2284	0.0013606	1334.6	3.2095	0.0013315	1329.0	3.2095	0.0013315	1329.0	3.1763
	350	2693.8	5.4450	0.001666	1648.4	3.7327	0.001554	1611.3	3.7327	0.001554	1611.3	3.6475
	400	2977.6	5.8851	0.009952	2820.1	5.5578	0.002806	2159.1	5.5578	0.002806	2159.1	4.4854
	450	3158.2	6.1443	0.01270	3062.4	5.9061	0.006730	2823.1	5.9061	0.006730	2823.1	5.4458
	500	3309.7	6.3471	0.01477	3240.2	6.1440	0.008679	3083.9	6.1440	0.008679	3083.9	5.7954
	600	3581.2	6.6776	0.01816	3536.9	6.5055	0.01144	3444.2	6.5055	0.01144	3444.2	0.2351

## 参 考 文 献

- [1] GB/T1921—2004 工业蒸汽锅炉参数系列.
- [2] GB/T10180—2003 工业锅炉热工性能试验规程.
- [3] GB/T13311—1991 锅炉受压组件焊接接头机械性能试验方法.
- [4] 冯肇瑞, 杨有启主编. 化工安全技术. 北京: 化学工业出版社, 1993.
- [5] 罗云主编. 注册安全工程师手册. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] 特种设备安全监察条例. 2003年3月11日国务院令 第373号公布.
- [7] 刘积贤编. 工业锅炉安全技术. 北京: 化学工业出版社, 1993.
- [8] 蒸汽锅炉安全技术监察规程 [劳动部 劳部发(1996) 276号].
- [9] 热水锅炉安全技术监察规程 [劳动部 劳锅发(1997) 74号].
- [10] 锅炉产品安全质量监督检验规则 [国家质量监督检验检疫总局 国质检(2001) 37号].
- [11] 王玉元主编. 安全工程师手册. 成都: 四川科技出版社, 1995.