

# 污水再生处理微滤-反渗透工艺药剂使用及费用分析

汤芳<sup>1</sup>,孙迎雪<sup>1,2</sup>,石晔<sup>3</sup>,李旭<sup>3</sup>,胡洪营<sup>1,4\*</sup> (1.清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084; 2.北京工商大学化学与环境工程学院,北京 100045; 3.北京博大水务有限公司,北京 100176; 4.清华大学深圳研究生院,国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室,广东 深圳 518055)

**摘要:** 在微滤/超滤-反渗透(MF/UF-RO)工艺运行过程中,需要投加多种药剂,以保障反渗透系统的正常运行.系统分析了北京市某再生水厂 MF-RO 工艺的药剂使用情况.结果表明,该 MF-RO 工艺投加了杀菌剂、阻垢剂、还原剂、非氧化性杀菌剂、中和剂、清洗剂等,在产水量约为 7000m<sup>3</sup>/d 时,药剂总投加量为 3347.3kg/周,每吨产水的平均耗药量为 68.32g/m<sup>3</sup>.该厂每周药剂总费用约为 19,120 元,每吨产水的药剂成本为 39.02 分/t,其中阻垢剂费用占药剂成本的比例最大,达 47.44%.

**关键词:** 污水再生利用; 微滤-反渗透工艺; 药剂; 药剂投加量; 药剂成本

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2012)09-1613-07

## Chemicals consumption and cost analysis of a microfiltration-reverse osmosis process for wastewater reclamation.

TANG Fang<sup>1</sup>, SUN Ying-xue<sup>1,2</sup>, SHI Ye<sup>3</sup>, LI Xu<sup>3</sup>, HU Hong-ying<sup>1,4\*</sup> (1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100045, China; 3. Beijing Boda Water Limited Company, Beijing 100176, China; 4. State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China). *China Environmental Science*, 2012,32(9): 1613~1619

**Abstract:** In order to achieve a good performance of a reverse osmosis (RO) system for wastewater reclamation, many kinds of chemical reagents are used in microfiltration(MF)/ultrafiltration (UF)-RO process. The chemical reagents used for a MF-RO process in a wastewater reclamation plant in Beijing were evaluated. Disinfectant, antiscalant, reductant, non-oxidizing biocides, neutralizer and cleaning reagents were used in this plant. The production amount of reclaimed water of the plant was about 7000m<sup>3</sup>/d. The dosage of total reagents was 3347.3kg per week and the average dosage of reagents was 68.32g per ton permeate. The total cost of the reagents was about 19,120 RMB per week and the cost of reagents was 0.39 RMB per ton permeate. Cost of antiscalant accounted for 47.44% of the total cost of reagents.

**Key words:** wastewater reclamation; microfiltration-reverse osmosis process; chemical reagents; dosage of chemical reagents; cost of chemical reagents

目前我国面临的资源型缺水和水质型缺水问题日渐突出,水资源短缺已经成为社会可持续发展的制约因素之一.污水再生利用是解决水资源短缺的重要的、不可或缺的措施,也是一条成本低、见效快的解决缺水问题的有效途径<sup>[1]</sup>.目前,高水质要求用户对再生水的需求不断增加,微滤/超滤(MF/UF)与反渗透(RO)组合而成的双膜过滤工艺在污水再生处理领域正逐渐得到应用<sup>[2-3]</sup>.

反渗透膜孔径范围一般为 0.1~1nm,可去除离子和小分子有机物.微滤(MF)孔径范围为

0.02~10 $\mu$ m,超滤(UF)孔径范围是 1nm~0.02 $\mu$ m,可以有效去除水中的悬浮物、胶体和病原菌,是可靠的反渗透预处理方法<sup>[4]</sup>.但在 MF/UF-RO 工艺运行过程中,需要投加多种药剂,如混凝剂、杀菌剂、阻垢剂等,以改善进水水质,避免膜受到微生物、物理或化学损伤,保证膜过滤系统的正常运

收稿日期: 2012-01-12

基金项目: 国家杰出青年科学基金(50825801);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07302002)

\* 责任作者, 教授, hyhu@tsinghua.edu.cn

行及出水水质<sup>[5-7]</sup>.

本文系统考察了北京市某再生水厂 MF-RO 工艺的药剂使用情况,分析了污水再生处理的药剂投加量和药剂成本,以期为 MF-RO 工艺的运行优化及节能降耗提供参考.

### 1 工艺概况

该再生水厂主体采用 MF-RO 工艺,工艺流程如图 1 所示,微滤膜和反渗透膜的主要技术参数如表 1 所示.进水水源为城市污水处理厂二级出水,进水水质及出水水质如表 2 所示<sup>[8]</sup>.该厂设计处理水量为 31 000m<sup>3</sup>/d,产水量为 21 000m<sup>3</sup>/d,

于 2008 年 7 月投产,生产的再生水通过再生水配套管网输送给工业企业.

### 2 化学药剂及其作用

膜过滤工艺常见的化学药剂包括混凝剂、絮凝剂、氧化剂、杀菌剂、软化剂、酸化剂、阻垢剂、还原剂、清洗剂等.该厂根据进水水质,选择性地使用杀菌剂、阻垢剂、还原剂、非氧化性杀菌剂、中和剂等药剂,并定期、不定期使用清洗剂对膜进行清洗,药剂投加点如图 1 所示,药剂的组分、投加、成本等情况见表 3 和表 4.

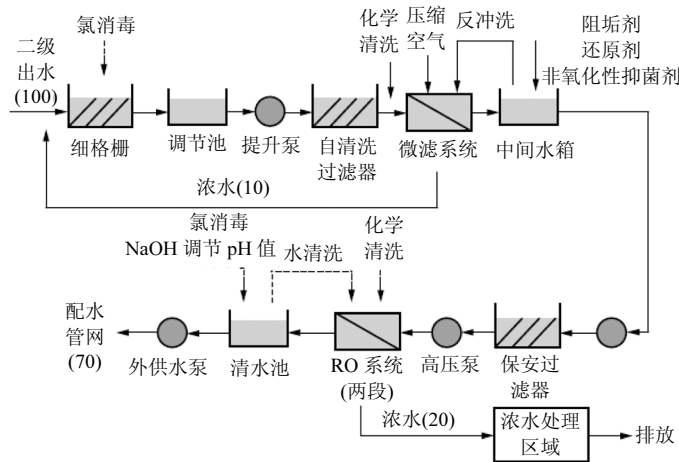


图 1 北京市某再生水厂工艺流程

Fig.1 Schematic diagram of the MF-RO process in a wastewater reclamation plant in Beijing

括号内数据为水量百分比

#### 2.1 杀菌剂

进水预氯化可以抑制微生物繁殖,控制生物膜的形成,保护膜免受微生物及部分有机物的污染,同时也可以氧化进水中的锰和铁等<sup>[7]</sup>.氯消毒杀菌效果稳定,价格低廉,使用方便,所以该厂选用有效氯浓度 8%~10%的次氯酸钠(NaClO)溶液作为杀菌剂.目前确定的进水加药浓度为 17mg/L,即有效氯浓度为 1.36~1.70mg Cl<sub>2</sub>/L,水体在进入微滤膜前,有效氯浓度已降低至 0.5mg Cl<sub>2</sub>/L 以下,工艺沿程有效氯的消耗量较大.

在出水口向反渗透产水持续投加 2.7mg/L 的杀菌剂,以保证再生水管网末端余氯量≥0.2mg

Cl<sub>2</sub>/L,抑制微生物滋生,提高水质稳定性.

表 1 微滤膜和反渗透膜系统技术参数

Table 1 Parameters of the microfiltration and reverse osmosis membranes

技术参数	微滤膜	反渗透膜
膜材质	聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜	交联芳香族聚酰胺复合膜
有效膜面积(m <sup>2</sup> )	50	34
膜通量[L/(m <sup>2</sup> ·h)]	40~100	17~24
过滤精度(nm)	100	0.1
回收率(%)	90	50(单段),75(总)

表2 北京市某再生水厂 MF-RO 工艺进水、出水水质  
Table 2 Influent and effluent water quality of the MF-RO process

项 目	进水水质(mg/L)	出水水质 (mg/L)	去除率(%)
COD <sub>Cr</sub>	≤100	<15	85
BOD <sub>5</sub>	≤10	<3	70
SS	≤30	<1	97
NH <sub>3</sub> -N(以 N 计)	≤5	<2.5	50
总氮(以 N 计)	≤15	<5	67
总磷(以 P 计)	≤5	<0.5	90
TDS	1000	<150	85
色度	≤30	<5	83
粪大肠杆菌数	≤1000 个/L	不可检出	100

注:COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、SS、氨氮、总氮、总磷等水质指标的监测方法均参照《水和废水监测分析方法(第四版)》<sup>[9]</sup>

2.2 阻垢剂

控制膜结垢的关键是调节进水 pH 值和投

加阻垢剂<sup>[10]</sup>.污水处理厂二级出水中含有一定浓度的溶解性总固体(TDS),易在膜表面形成难溶盐,如碳酸钙、硫酸钙、硫酸钡、硫酸锶和二氧化硅等<sup>[10]</sup>.同时,污水中还含有溶解性的污水有机物质(EfOM),包括多糖、蛋白质、氨基酸、核酸、腐殖酸、富里酸、有机酸和细胞组分等.由于 EfOM 分子量小,可以通过超滤或微滤等预处理到达反渗透系统,造成反渗透膜结垢,水中的钙离子 Ca<sup>2+</sup>也可以与 EfOM 组分形成复合物,使膜结垢现象更为严重<sup>[11]</sup>.酸化可以防止钙盐和碳酸盐结垢,一般将 pH 值调节到 6.9 左右即可<sup>[7]</sup>.阻垢剂可以破坏盐晶体的晶格结构,并通过堵塞晶体的生长点来防止晶体生长<sup>[12]</sup>.常用的反渗透阻垢剂包括有机膦酸(盐)类、聚羧酸类、无机聚磷酸盐类、聚天冬氨酸类、聚环氧琥珀酸类等<sup>[13]</sup>.

表3 某再生水厂 MF-RO 工艺药剂(除清洗剂外)的使用情况

Table 3 Chemical reagents (except cleaning reagents) used in the MF-RO process

药剂种类	组分/组成	投加方式	投加浓度(mg/L)	投加量(kg/周)	吨水耗药量*(g/m <sup>3</sup> )	单价(元/kg)	药剂成本(分/m <sup>3</sup> )
进水杀菌剂	NaClO	持续	17	1190	24.30	2.70	6.56
出水杀菌剂	NaClO	持续	2.7	132.2	2.70	2.70	0.73
阻垢剂	有机膦酸	持续	3	189	3.86	48.00	18.51
还原剂	98%NaHSO <sub>3</sub>	持续	3	189	3.86	3.55	1.37
中和剂	45%NaOH	持续	20	980	20.00	2.80	5.60
非氧化性抑菌剂	异噻唑啉酮	每周 1 次冲击式	160	120	2.45	11.00	2.69
合计				2800.2	57.16		35.46

注\*:吨水耗药量是指每生产一吨水需投加的所有药剂的总量.该厂目前产水量为7000t/d,表格中数据计算均以此为准

表4 北京某再生水厂 MF-RO 工艺清洗剂的使用情况

Table 4 Cleaning reagents used in the MF-RO process

清洗方式	频率	清洗剂主要成分	投加量(kg/次)	吨水耗药量(g/m <sup>3</sup> )	单价(元/kg)	药剂成本(分/m <sup>3</sup> )	
微滤 EFM	每周	2% NaOH	355.6	7.26	2.8	2.03	
	1 次	900mg Cl <sub>2</sub> /L	90	1.84	2.7	0.50	
微滤 CIP	半年	碱洗	2% NaOH	355.6	0.28	2.8	0.08
			3000mg Cl <sub>2</sub> /L	300	0.23	2.7	0.06
	1 次	酸洗	1%HCl	258.1	0.20	1.5	0.03
反渗透 CIP	2~3 月	碱洗	2% NaOH	444.5	0.71	2.8	0.20
			1.5%EDTA	150	0.24	25.0	0.60
	1 次	酸洗	0.025%SDBS	2.5	0.00	5.0	0.00
		1% HCl	258.1	0.41	1.5	0.06	
合计				11.16		3.56	

注:EFM为强化通量维持,CIP为在线清洗,EDTA为乙二胺四乙酸,SDBS为十二烷基苯磺酸钠;产水量按7000m<sup>3</sup>/d计算;反渗透CIP清洗按3个月周期折算其成本

该厂所使用的阻垢剂主要成分为有机膦羧酸(PBTCA)。PBTCA含磷量低,具有膦酸和羧酸的结构特性,不需要对进水进行酸化前处理,且阻垢性能优于常见的有机膦酸类,在高温、高硬度、高碱度等恶劣条件下,仍表现出较好的阻垢性能。该厂通过在中间水箱持续投加 3mg/L 阻垢剂,以防止膜结垢现象出现,保证膜正常运行。

### 2.3 还原剂

氧化性物质会对反渗透膜造成不可逆转的化学损伤,所以需要在污水进入反渗透系统前,使用还原剂去除水中具有氧化作用的物质<sup>[7]</sup>。

该厂在进水口投加了具有强氧化性的杀菌剂,所以一定要投加还原剂以还原去除残存的杀菌剂,防止其损伤反渗透膜。该厂还原剂选用浓度为 98%的亚硫酸氢钠( $\text{NaHSO}_3$ )溶液,在中间水箱持续投加,投加量视水中余氯量而定。目前正常运行时的还原剂投加浓度为 3mg/L。

### 2.4 非氧化性抑菌剂

还原剂的投加保护了反渗透膜免受氧化性物质的损伤,但反渗透系统进水中氧化性物质含量的降低,易使微生物在中间水箱到反渗透系统阶段的装置中滋生。因此,需要定期投加非氧化性抑菌剂,以达到抑制和杀灭微生物的目的。

该厂在中间水箱处投加非氧化性抑菌剂,主要成分为异噻唑啉酮。异噻唑啉酮是通过破坏细菌蛋白质结构而起杀菌作用的,具有高效、低毒、易降解等优点,目前成为广泛使用的非氧化性抑菌剂。该厂每周冲击性投加约 120kg 药剂,投加过程污水中非氧化性抑菌剂浓度约为 160mg/L,时长约为 2h。

### 2.5 中和剂

由于反渗透产水偏酸性,pH 值主要在 5.5~6 的范围内,为了提高水质稳定性,该厂在清水池投加中和剂,中和剂是浓度为 45%的氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )溶液,投加浓度约为 20mg/L,调节再生水 pH 6.4~6.6。

### 2.6 清洗剂

微滤膜的清洗维护主要包括 3 个环节:①气水反冲洗,微滤系统运行周期由正常过滤(1670s)、气水反冲洗(90s)、正冲洗(60s)3 个阶段

组成;②强化通量维持(EFM),每周 1 次;③在线清洗(CIP),微滤系统的跨膜压差大于 0.3MPa 或连续运行 2~3 个月时需进行一次在线清洗。

EFM 清洗剂为  $\text{NaClO}$  和  $\text{NaOH}$  的混合液,有效氯浓度为 900mg  $\text{Cl}_2/\text{L}$ ,pH 11~12.8m<sup>3</sup>清洗剂在微滤系统中循环约 40min,之后用清水漂洗 8min,然后用微滤产水进行气水反洗和微滤进水快冲,系统即进入正常过滤状态。

该厂微滤膜污染并不严重,截止目前均为半年进行一次 CIP 在线清洗。CIP 在线清洗包括酸洗和碱洗。酸洗以去除无机盐污染物为主,碱洗对有机污染物的去除较为有效。碱洗时,配制 2% $\text{NaOH}$  和有效氯浓度为 3000mg  $\text{Cl}_2/\text{L}$  的清洗剂,8m<sup>3</sup>的清洗剂在微滤系统中循环 12h。碱洗后,用清水漂洗 20min,开始酸洗。酸洗药液为 8m<sup>3</sup>浓度 1%的  $\text{HCl}$  溶液,由 31%的  $\text{HCl}$  溶液稀释即可,酸洗时间亦为 12h。

反渗透系统每天需进行一次停机产水冲洗,运行一段时间后需要进行 CIP 在线清洗,以保证出水水质。一般需要 CIP 在线清洗的情况有以下几种:①在正常给水压力下,产水量较正常值下降 10%~15%;②为维持正常产水量,经温度校正后给水压力增加 10%~15%;③透盐率增加 10%~15%;④系统各段间的压差明显增加<sup>[14]</sup>。该厂根据各段压差不定期进行化学清洗,大约 2~3 个月一次。

反渗透 CIP 清洗药剂可选用乙二胺四乙酸(EDTA)、十二烷基磺酸钠(SDS)、 $\text{NaCl}$  等。EDTA、SDS、 $\text{NaCl}$  等与  $\text{NaOH}$  联用可以强化清洗效果,因为碱性环境下膜表面的污垢层易松弛,所以 2 种或更多种清洗剂顺序联用或混合使用,可以在降低清洗剂的总消耗量的同时,达到更佳的清洗效果<sup>[15]</sup>。该厂使用的 10m<sup>3</sup>清洗剂中含 1.5%EDTA、0.025%十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和 2%  $\text{NaOH}$ ,碱洗后仍用 8m<sup>3</sup>浓度 1%的  $\text{HCl}$  溶液进行酸洗。

## 3 药剂投加量

药剂的设计投加量和吨水耗药量如表 3 和表 4 所示。由于膜的过滤作用,工艺沿程水量是变化的(图 1),所以计算设计投加量时应注意药剂投

加点的水量.

目前,该厂药剂设计总投加量为 3347.3kg/周,包括清洗剂 547.1 kg/周.若按处理水量 10000m<sup>3</sup>/d 计算,平均耗药量为 47.82g/m<sup>3</sup>;若按产水量 7000m<sup>3</sup>/d 计算,平均耗药量为 68.32g/m<sup>3</sup>.由于该工艺的回收率为 70%,即产水量是处理水量的 70%,所以本文中关于吨水耗药量和药剂成本的计算,均以产水量作为标准.产水量的吨水耗药量和药剂成本乘以 70%即为相应的处理水量的吨水耗药量和药剂成本.

几种药剂占吨水耗药量的比例如图 2 所示,进水杀菌剂和中和剂的投加量较大,分别为 24.30,20.00g/m<sup>3</sup>,占吨水耗药量的 35.56% 和 29.27%.

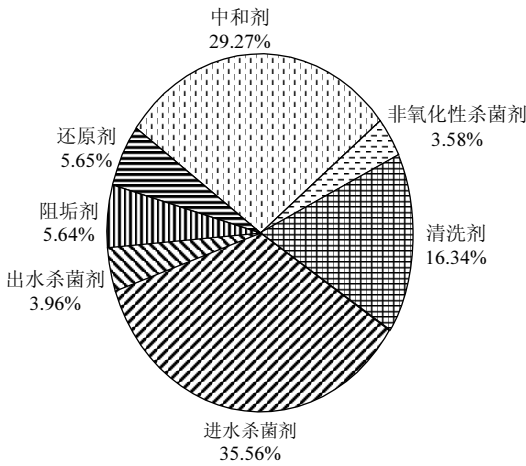


图 2 各种药剂占吨水耗药量的比例

Fig.2 Ratio of each chemical reagent in total amount of chemical reagents used in the MF-RO process

2011 年 3~11 月药剂的实际投加量如图 3 所示,6~11 月药剂的实际投加量和吨水耗药量统计结果如表 5 所示.药剂总投加量为 2340.07~3809.49kg/周,吨水耗药量为 47.76~77.74g/m<sup>3</sup>,实际值波动较大,主要是因为 NaClO 溶液和 NaOH 溶液的投加量变化较大.

NaClO 溶液的投加量在所有药剂中最大,NaClO 溶液的设计总投加量为 1390.9kg/周,包括进水杀菌剂、出水杀菌剂和微滤膜 EFM 清洗时 NaClO 溶液的投加量.NaClO 溶液实际投加

量变化大是因为杀菌剂的投加量需要根据水质进行调节,该厂在 2011 年 3~5 月间进水杀菌剂投加量较少,约为 500kg/周,杀菌效果始终未达到理想状态,于是该厂在 6 月份尝试提高杀菌剂投加量,6~11 月期间 NaClO 药剂的实际投加量范围是 1303.33~1954.45kg/周,达到了较好的杀菌效果.

NaOH 溶液的投加量也较大,需要投加 NaOH 的情况较多,包括中和剂、微滤膜 EFM 清洗、微滤膜和反渗透膜 CIP 在线清洗等.NaOH 溶液的设计总投加量为 1335.6kg/周.6~11 月期间 NaOH 溶液的实际投加量范围是 538.51~1337.88kg/周,较设计值低,且波动较大,这主要是因为作为中和剂 NaOH 的投加量变化所导致的,中和剂的投加量需根据实际水质而定,调节再生水 pH 至 6.4~6.6 即可.

还原剂、阻垢剂和非氧化性杀菌剂的设计投加量分别为 210,210,120kg/周,实际投加量与设计值相当.

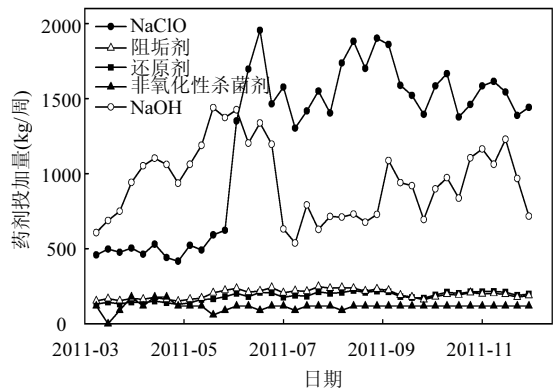


图 3 2011 年 3~11 月药剂投加量

Fig.3 Dosage of chemical reagents in the MF-RO process  
产水量 5000~7000m<sup>3</sup>/d

### 4 药剂费用

药剂费用如表 3 和表 4 所示.将所有药剂成本相加得每吨产水的药剂成本为 39.02 分/m<sup>3</sup>,每周药剂总费用约为 19,120 元/周.2011 年 6~11 月药剂的实际费用为 17,243.45~21,248.68 元/周,药剂成本为 35.19~43.36 分/m<sup>3</sup>,如表 5 所示.

表5 某再生水厂MF-RO工艺药剂实际投加量及费用(2011年6~11月数据)

Table 5 Dosage and cost of chemical reagents used in the MF-RO process

药剂种类	实际投加量 (kg/周)	吨水耗药量 (g/m <sup>3</sup> )	实际费用 (元/周)	药剂成本 (分/m <sup>3</sup> )
NaClO	1303.33~1954.45	26.60~39.89	3518.99~5277.02	7.18~10.77
阻垢剂	159.70~248.87	3.26~5.08	7665.60~11945.76	15.64~24.38
还原剂	171.11~222.41	3.49~4.54	628.46~789.56	1.28~1.61
非氧化性杀菌剂	89.25~119.00	1.82~2.43	981.75~1309.00	2.00~2.67
NaOH	538.51~1337.88	10.99~27.30	1507.83~3746.06	3.08~7.65
合计	2340.07~3809.49	47.76~77.74	17,243.45~21,248.68	35.19~43.36

注:6~11月吨水耗药量和药剂成本按产水量为7000m<sup>3</sup>/d计算

由图4可见,阻垢剂成本18.51分/m<sup>3</sup>所占比例最高,占药剂总成本的47.44%,阻垢剂投加量虽少,仅占吨水耗药量的5.64%,但单价高达48元/kg.杀菌剂成本所占比例也较高,进水杀菌剂和出水杀菌剂的比例分别为16.81%和1.87%,所以杀菌剂所占比例为18.68%,其单价为2.7元/kg,但由于其投加大,使得成本比例提高.

清洗剂成本占药剂成本的9.11%,这主要是因为微滤膜EFM清洗频率较高,每周1次,导致成本增加,且所用NaOH溶液的量较大.微滤膜和反渗透膜的CIP在线清洗频率低,一次清洗费用摊销在半年或3个月的产水量中,所以占清洗剂成本比例很低.

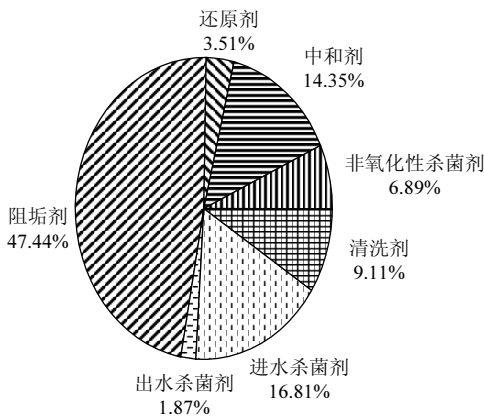


图4 各种药剂占药剂成本的比例

Fig.4 Ratio of chemical reagents in reagents cost per ton permeat

用均保持在每周万元左右,是最主要的药剂费用组成,所以在生产运行过程中应注意阻垢剂的节约使用.其次是NaClO和NaOH溶液,由于其投加大导致费用较高,为2000~4000元/周.非氧化性杀菌剂和还原剂费用较低且稳定,均低于2000元/周.

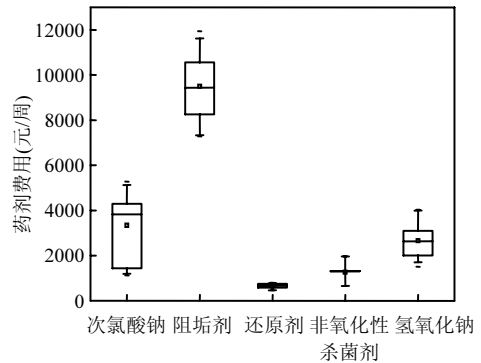


图5 2011年3~11月药剂费用

Fig.5 Cost of chemical reagents in the MF-RO process  
产水量5000~7000m<sup>3</sup>/d

### 5 结语

该再生水厂MF-RO工艺投加了杀菌剂、阻垢剂、还原剂、非氧化性杀菌剂、中和剂、清洗剂等,在产水量约为7000m<sup>3</sup>/d时,药剂设计总投加量为3347.3kg/周,每吨产水的平均耗药量为68.32g/m<sup>3</sup>,其中进水杀菌剂和中和剂投加大,分别占吨水耗药量的35.56%和29.27%.2011年6~11月药剂的实际投加量为2340.07~3809.49kg/周,吨水耗药量为47.76~77.74g/m<sup>3</sup>,其

2011年3~11月药剂的实际费用如图5所示.阻垢剂的费用明显高于其他药剂,3~11月间总费

中 NaClO 溶液和 NaOH 溶液的投加量变化较大。

该厂每周药剂总费用约为 19,120 元/周,每吨产水的药剂成本为 39.02 分/m<sup>3</sup>,其中阻垢剂费用占 47.44%,成为药剂成本中比例最大的组成部分。如何降低药剂使用量和成本,还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 胡洪营,吴乾元,黄晶晶,等.再生水水质安全评价与保障原理 [M]. 北京:科学出版社,2011.
- [2] Dialynas E, Mantzavinos D, Diamadopoulos E. Advanced treatment of the reverse osmosis concentrate produced during reclamation of municipal wastewater [J]. *Water Research*, 2008, 42(18):4603-4608.
- [3] Xu P, Bellona C, Drewes J E. Fouling of nanofiltration and reverse osmosis membranes during municipal wastewater reclamation: Membrane autopsy results from pilot-scale investigations [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 353(1/2):111-121.
- [4] Tam L S, Tang T W, Lau G N, et al. A pilot study for wastewater reclamation and reuse with MBR/RO and MF/RO systems [J]. *Desalination*, 2007, 202(1-3):106-113.
- [5] Edzwald J K, Haarhoff J. Seawater pretreatment for reverse osmosis: Chemistry, contaminants, and coagulation [J]. *Water Research*, 2011, 45(17):5428-5440.
- [6] Gabelich C J, Rahardianto A, Northrup R, et al. Process evaluation of intermediate chemical demineralization for water recovery enhancement in production-scale brackish water desalting [J]. *Desalination*, 2011, 272(1-3):36-45.
- [7] Hafsi M, Khaoua A, Abdellah S B, et al. Effects of the chemical injection points in pre-treatment on reverse osmosis (RO) plant performance [J]. *Desalination*, 2004, 167(1-3):209-216.
- [8] 许波,卓仪若,胡杰,等.“MF+RO”双膜法工艺在再生水工程中的应用——以北京经济技术开发区为例 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(1):432-433.
- [9] 国家环境保护部《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法 [M]. 4 版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [10] Greenlee L F, Testa F, Lawler D F, et al. The effect of antiscalant addition on calcium carbonate precipitation for a simplified synthetic brackish water reverse osmosis concentrate [J]. *Water Research*, 2010, 44(9):2957-2969.
- [11] Ang W S, Tiraferri A, Chen K L, et al. Fouling and cleaning of RO membranes fouled by mixtures of organic foulants simulating wastewater effluent [J]. *Journal of Membrane Science*, 2011a, 376(1/2):196-206.
- [12] Lin Y P, Singer P C. Inhibition of calcite crystal growth by polyphosphates [J]. *Water Research*, 2005, 39(19):4835-4843.
- [13] 刘栋良. 反渗透系统中 CaSO<sub>4</sub> 结垢和阻垢动态研究 [M]. 上海:上海交通大学,2008.
- [14] 曹路,黄慧群,张诚义,等.反渗透膜的污染及其化学清洗 [J]. *清洗世界*, 2006, 22(8):9-13.
- [15] Ang W S, Yip N Y, Tiraferri A, et al. Chemical cleaning of RO membranes fouled by wastewater effluent: Achieving higher efficiency with dual-step cleaning [J]. *Journal of Membrane Science*, 2011b, 382(1/2):100-106.

**作者简介:** 汤 芳(1989-),女,内蒙古通辽人,清华大学硕士研究生,主要研究方向为污水再生处理理论与技术研究.发表论文 1 篇。

## 人类活动致非洲企鹅数锐减: 数量只有 80 年前的 2.5%

南非水利与环境事务部发布的最新报告显示,由于受人类活动干扰,非洲企鹅数量正急剧下降,国际自然保护联盟已将非洲企鹅列为濒危物种.非洲企鹅又名南非斑点环企鹅,主要居住在非洲西南海域的岛屿上。

报告说,上世纪 20 年代,生活在非洲各国的非洲企鹅共有 100 多万对,其中多数在南非,但到了上世纪 50 年代,这一数字下降到 14.7 万对,到 2009 年,已锐减至 2.5 万对.也就是说,目前的数量只有 80 年前的 2.5%,而这一下降状况还在持续中。

报告还说,造成非洲企鹅数量锐减的原因主要包括人类大量掠取企鹅产下的蛋,对企鹅栖息环境的破坏以及海水污染等。

报告提出,有关当局如果不采取强有力的保护措施,非洲企鹅或许会在不久的将来彻底消失。