

文章编号: 1672 - 9315(2005)04 - 0447 - 05

锅炉爆炸事故危害半径的近似计算*

牛国庆^{1,2}, 徐志胜¹, 王海娟²

(1. 中南大学 铁道校区防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075;
2. 河南理工大学 资源与材料工程系, 河南 焦作 454000)

摘要: 锅炉爆炸是十分严重的灾害性事故,它不仅会造成财产损失,还会导致人员伤亡。正确预测事故后果可以为事故的防范提供必要的帮助。文中介绍了用 TNT 当量法近似计算锅炉爆炸事故危害半径的原理、计算方法和程序,最后进行了实例计算。

关键词: 锅炉; 爆炸; TNT 当量法; 危害半径

中图分类号: TK 288 **文献标识码:** A

Approximate calculation of hazard radius of boiler explosion accident

NIU Guo-qing^{1,2}, XU Zhi-sheng¹, WANG Hai-juan²

(1. Disaster Prevention Science and Safety Technology Institute, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Dept. of Resource and Material Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Boiler explosion was very serious disaster. It brought about not only the loss of wealth but also casualty. Right prediction of its hazard radius could provide necessary helps for the prevention of accident. The principle, arithmetic and procedure of approximate calculating the hazard radius with TNT equivalent weight method were introduced. An example of calculation was executed in the end.

Key words: boiler; explosion; TNT equivalent weight method; hazard radius

0 引言

由于锅炉能生产水蒸汽和高温水,所以它是提供动力和热能的设备。随着生产的发展,锅炉设备日益广泛地应用于现代工业的各个部门,成为发展国民经济的重要热工设备之一^[1]。

锅炉既是工业中常见的设备,又是具有潜在爆炸危险的特殊设备。锅炉在正常运行时,系统中储存着大量的热能,它不仅承受高温高压,还要承受介质侵蚀和飞灰磨损,工作环境比较恶劣。万一由于某些原因促使储能意外释放,就会造成财产损失以至人员伤亡。近年来,我国锅炉爆炸的事故屡有发生,给经济建设和社会文明带来了较大影响。

1 锅炉爆炸机理

锅炉爆炸属物理性爆炸,是锅炉系统中储存的大量能量迅速释放,转化为机械能的现象^[2]。直接原因就是锅炉在运行过程中,由于受压元件的某些部位超过了材料的极限强度,薄弱处发生断裂,储存在锅炉中的饱和水蒸汽就会立即从破口处冲出来,瞬间锅内压力降至外界大气压力。由于气压骤减,使锅内一部分饱和水剧烈汽化、膨胀,造成压力再次升高,裂口进一步扩大。由于饱和水在瞬间完成膨胀,制止饱和水的迅速汽化十分困难,

* 收稿日期: 2005 - 01 - 05

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2001BA803B04); 湖南省科技厅项目(02SSY2002 - 6)

作者简介: 牛国庆(1968 -),男,河南安阳人,副教授,博士生,主要从事安全技术及工程教学与科研工作。

水蒸汽就像炸药爆炸时的气体急剧膨胀一样,形成强大的冲击波,具有极大的破坏力。

锅炉爆炸时所释放的能量除了很少一部分^[3](约3%~15%)消耗在撕裂钢板,将部分碎片以及与锅炉相连的汽管道、阀门和本体抛离原地外,其余大部分能量将以冲击波的形式作用于周围环境,造成建筑物的破坏及人员伤亡。

2 冲击波的破坏作用

冲击波是由压缩波迭加形成的,是波阵面以突跃形式在介质中传播的压缩波。当爆炸发生时,周围的空气受到冲击而发生扰动,状态(压力、密度、温度等)发生突跃变化,其传播速度大于扰动介质的声速。这种扰动在空气中传播就成为冲击波。在离爆破中心一定距离的地方,空气压力会随时间发生急剧变化。开始时,正压上升较快,接着又迅速衰减,在很短时间内正压降至负压。如此反复循环数次,压力渐次衰减下去。多数情况下,冲击波的伤害、破坏作用是由超压引起的。因此,超压准则认为,只要冲击波超压达到一定值时,便会对目标造成一定的伤害或破坏。不同的冲击波超压对周围的人和物的危害不同。一定超压的冲击波对人体的伤害和对建筑物的破坏作用见表1和表2。

表1 冲击波超压对人体的伤害作用^[3,4]
Tab.1 Overpressure's injury effect on human body

| 超压 P/MPa | 伤害作用 |
|-----------|-----------|
| 0.02~0.03 | 轻微损伤 |
| 0.03~0.05 | 损伤听觉器官或骨折 |
| 0.05~0.10 | 内脏严重损伤或死亡 |
| >0.10 | 大部分人员死亡 |

表2 冲击波超压对建筑的破坏作用^[3,4]
Tab.2 Overpressure's injury effect on building

| 超压 P/MPa | 伤害作用 |
|-------------|-----------------|
| 0.005~0.006 | 门、窗玻璃部分破碎 |
| 0.006~0.015 | 受压面的门窗玻璃大部分破碎 |
| 0.015~0.020 | 窗框损坏 |
| 0.020~0.030 | 墙裂缝 |
| 0.040~0.050 | 墙大裂缝,屋瓦掉下 |
| 0.060~0.070 | 木建筑厂房房柱折断,房架松动 |
| 0.070~0.100 | 墙倒塌 |
| 0.100~0.200 | 防震钢筋混凝土破坏,小房屋倒塌 |
| 0.200~0.300 | 大型钢结构破坏 |

3 锅炉爆炸的能量分析

整个锅炉系统中储存的能量包括两部分:一部分为高温、高压的干饱和蒸汽所具有的能量;另一部分为饱和水所具有的能量。

3.1 干饱和水蒸汽的爆炸能量

因干饱和水蒸汽爆炸时仅在瞬间发生泄压,来不及与外界发生热量交换,因此是一绝热膨胀过程,其爆炸能量为理想气体绝热膨胀所释放的能量,即^[2,3,5,6]

$$E_g = PV[1 - (0.1013/P)^{(k-1)/k}] \times 10^3 / (k-1) \quad (1)$$

式中 E_g 为气体的爆破能量, kJ; P 为容器内气体的绝对压力, MPa; V 为容器的容积, m^3 ; k 为气体的绝热指数, 即气体的定压比热与定容比热之比。

对于干饱和蒸汽($k = 1.135$), 则有

$$E_g = 7.4 PV[1 - (0.1013/P)^{0.119}] \times 10^3 \quad (2)$$

用上式计算有一定误差,由于它没有考虑蒸汽干度的变化和其他的一些影响。但它不用查明蒸汽热力性质而可以直接计算,对危险性评价可提供参考。

对于常用压力下的干饱和蒸汽的爆破能量可按下列经验公式近似计算^[2,3]

$$E_g = C_s V \quad (3)$$

式中 E_g 为水蒸汽的爆破能量, kJ; V 为水蒸汽的体积, m^3 ; C_s 为干饱和水蒸汽爆破能量系数, kJ/ m^3 。

表3 常用压力下干饱和水蒸汽爆破能量系数^[3]
Tab.3 Blasting energy coefficient of dry saturated vapor under commonly used pressure

| 表压力 P/MPa | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 1.3 | 2.5 | 3.0 |
|-----------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 爆破能量系数 | 4.37×10^2 | 8.31×10^2 | 1.5×10^3 | 2.75×10^3 | 6.24×10^3 | 7.77×10^3 |

各种常用压力下的干饱和水蒸汽爆破能量系数见表3。

3.2 高温饱和水的爆炸能量

锅炉破裂后,不仅气体要泄压膨胀,而且原来处于气液平衡的饱和液体在压力下降到大气压力时温度超过了大气压力下的沸点(也称过热),过热状态的水急剧蒸发沸腾,体积激烈膨胀而引发爆炸。因此,计算高温饱和水的爆炸能量包括了上述两部分爆炸能量,即^[2]

$$E_w = [(H_1 - H_2) - (s_1 - s_2) T_1] W \quad (4)$$

式中 E_w 为高温饱和水的爆破能量, kJ; H_1 为爆炸前压力和温度下饱和水的焓, kJ/kg; H_2 为在大气压力下饱和水的焓, kJ/kg; s_1 为爆炸前压力和温度下饱和水的熵, kJ/kg·°C; s_2 为在大气压力下饱和水的熵, kJ/kg·°C; T_1 为介质在大气压力下的沸点, kJ/kg·°C; W 为饱和水的质量, kg。

按(4)式计算,需要查较多参数。在实际应用时,饱和水的爆破能量可按下列经验公式近似计算^[2,3]

$$E_w = C_w V \quad (5)$$

式中 E_w 为饱和水容器的爆破能量, kJ; V 为容器内饱和水所占的容积, m³; C_w 为饱和水爆破能量系数, kJ/m³。常用压力下饱和水爆破能量系数见表4。

表4 常用压力下饱和水爆破能量系数^[3]
Tab.4 Blasting energy coefficient of saturated water under commonly used pressure

| 表压力 P /MPa | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 1.3 | 2.5 | 3.0 |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| C_w /kJ/m ³ | 2.38×10^4 | 3.25×10^4 | 4.56×10^4 | 6.35×10^4 | 9.56×10^4 | 1.06×10^4 |

4 冲击波超压的计算和锅炉爆炸事故危害半径的近似计算

4.1 冲击波超压的计算

由于锅炉爆炸时所产生的冲击波情况十分复杂,而且缺乏这方面系统的试验数据。目前对锅炉破裂爆炸所产生的冲击波超压一般都是根据同能量的梯恩梯(TNT)爆炸的试验数据按相似法则来确定^[4],即 TNT 当量法。

根据爆炸理论与试验,冲击波波阵面上的超压与产生冲击波的能量有关,同时也与距离爆炸中心的远近有关。冲击波的超压与爆炸中心距离的关系为^[7,8]

$$P = f \sqrt[3]{q} / R \quad (6)$$

式中 P 为冲击波波阵面上的超压, MPa; R 为距爆炸中心的距离, m; q 为爆炸时产生冲击波所消耗的能量, kg TNT。

关于对 TNT 爆炸冲击波超压的计算,文献[7][8]和其他的参考文献分别引用了不同的实验拟合表达式,而且相互之间有一定的偏差。

炸药爆炸实验数据^[8]表明,空气冲击波峰值超压 P 是 $\sqrt[3]{q}/R$ 的函数,不论 $\sqrt[3]{q}$ 和 R 为何值,只要 $\sqrt[3]{q}/R$ 相等,则超压 P 相等。

$$\text{即 } R/R_0 = \sqrt[3]{q/q_0} = \quad \text{则 } P = P_0 \quad (7)$$

式中 R 为目标与爆炸中心的实际距离, m; R_0 为目标与基准爆炸中心的相当距离, m; q_0 为基准爆炸能量, kg TNT; P 为目标处的超压, MPa; P_0 为基准目标处的超压, MPa; $\sqrt[3]{q/q_0}$ 为炸药爆炸试验的模拟比。

$$\text{上式也可写为 } P(R) = P_0(R/R_0) \quad (8)$$

利用式(8)就可以根据某些已知药量的试验所测得的超压来确定任意药量爆炸时在各种相应距离下的超压。

TNT 在无限空气介质中爆炸时,空气冲击波峰值超压计算式为^[9]

$$P = 2.006 \left[\frac{\sqrt[3]{q}}{R} \right] + 0.194 \left[\frac{\sqrt[3]{q}}{R} \right]^2 - 0.004 \left[\frac{\sqrt[3]{q}}{R} \right]^3 \quad (0.05 < \frac{R}{\sqrt[3]{q}} < 0.5) \quad (9)$$

$$P_0 = 0.067 \left[\frac{\sqrt[3]{q}}{R} \right] + 0.301 \left[\frac{\sqrt[3]{q}}{R} \right]^2 + 0.431 \left[\frac{\sqrt[3]{q}}{R} \right]^3 \quad (0.5 < \frac{R}{\sqrt[3]{q}} < 70.9)$$

表5是根据上式计算出的1000 kg TNT炸药在空气中爆炸所产生的冲击波超压。

表5 1 000 kg TNT炸药在空气中爆炸时所产生的冲击波超压
Tab.5 Blast wave's overpressure generated by 1 000 kg TNT blasting in atmosphere

| | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|---------|---------|-------|-------|---------|
| 距离 R_0 / m | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 |
| 超压 P_0 / MPa | 2.94 | 2.06 | 1.67 | 1.27 | 0.95 | 0.76 | 0.50 |
| 距离 R_0 / m | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| 超压 P_0 / MPa | 0.33 | 0.235 | 0.17 | 0.126 | 0.079 | 0.057 | 0.043 |
| 距离 R_0 / m | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 |
| 超压 P_0 / MPa | 0.033 | 0.027 | 0.023 5 | 0.020 5 | 0.018 | 0.016 | 0.014 3 |

4.2 锅炉爆炸事故危害半径的近似计算

- 1) 锅炉爆炸能量的计算:根据公式(3)(5)分别计算出干饱和蒸汽和饱和水的爆炸能量,锅炉总的爆炸能 E 为两者之和。
- 2) 将锅炉爆炸能量换算成 TNT 当量 q :因为 1 kg TNT 爆炸所放出的爆破能量为 4 230 ~ 4 836 kJ/kg,一般取 1 kg TNT 爆炸所放出的平均爆破能量为 4 500 kJ/kg^[3],故其关系为 $q = E/4 500$ 。
- 3) 根据公式(7) 求出爆炸的模拟比 λ 。
- 4) 求出 1 000 kg TNT 爆炸试验中的相当距离 $R_0 = R/\lambda$ 。
- 5) 根据 R_0 值在表 5 中找出距离在 R_0 处的超压 P_0 (中间值用插入法),此即所求距离为 R 处的超压。
- 6) 根据超压 P_0 值,从表 1,表 2 中找出对人员和建筑物的伤害、破坏作用。

5 锅炉爆炸事故危害半径近似计算实例

湖南某化工厂使用的锅炉型号为 DZL4 - 1.25 - A。它为化学反应提供必要的热源,其主要技术参数如下:蒸发量 4 t/h,额定工作压力 1.25 MPa,蒸汽温度 193.3℃,锅筒内径 1 500 mm,长度 4 500 mm(锅筒容积约 8 m³,另有集汽包容积约 2 m³,合计共 10 m³),锅壳设计压力 1.3 MPa。按正常情况下锅炉的锅筒内有 1/8 充满干饱和蒸汽^[10],7/8 为饱和水来模拟爆炸后果。

按上述步骤计算出的有关数值见表 6。

表6 锅炉爆炸事故危害半径近似计算结果表
Tab.6 Approximate result of hazard radius of boiler explosion accident

| 参数 | E / kJ | q / kg(TNT) | 死亡半径 / m | 重伤半径 / m | 轻伤半径 / m | |
|----|-------------------------|-----------------|------------|-------------|------------|------------|
| 结果 | 452.5 × 10 ³ | 100.6 | 0.46 | 10.3 | 15 | 24.8 |
| 参数 | 大型结构破坏半径 / m | 防震钢筋混凝土破坏半径 / m | 砖墙倒塌半径 / m | 木房柱折断半径 / m | 墙大裂缝半径 / m | 窗框损坏半径 / m |
| 结果 | 7.8 | 10.3 | 12.4 | 13.3 | 15.6 | 31.0 |

6 结 语

为了提高热机效率,动力锅炉所产生的蒸汽,其压力和温度都较高,且日趋向高温、高压和大容量发展^[1]。锅炉一旦爆炸将是十分严重的灾害性事故,因此,锅炉的设计、生产和使用单位应严格执行《压力容器安全技术监察规程》^[11]等国家有关规定,防止爆炸事故的发生。使用单位也可借助于事故危害半径的近似计算,合理地选择锅炉房的位置,以避开重要的设施、设备和居民居住区域;建于锅炉房之后的建筑物要尽量建在锅炉爆炸破坏半径之外,防患于未然;同时对于处于爆炸破坏范围内的已有设施,要根据设施的重要程度和潜在的破坏程度,采取适当的防护措施,以减小因爆炸带来的损失。

参考文献:

- [1] 奚士光,吴味隆,蒋君衍. 锅炉及锅炉房设备(第三版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1995.
- [2] 蔡凤英,谈宗山,孟 赫,等. 化工安全工程[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [3] 国家安全生产监督管理局. 安全评价[M]. 北京:煤炭工业出版社,2003.

- [4] 刘盛平,周 晔. 锅炉爆炸冲击波危害范围计算[J]. 地质勘探安全,1998,5(4):25 - 26.
- [5] 华自强. 工程热力学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,1986.
- [6] 冯维君. 锅炉爆炸事故原因分析与对策[J]. 中国锅炉压力容器安全,1999,15(3):43 - 45.
- [7] 陈网桦,果 宏,彭金华,等. 雷管空中爆炸场超压的近似估算[J]. 爆破器材,1998,27(1):1 - 3.
- [8] 居江宁. 巷道瓦斯爆炸冲击波峰值超压规律的研究[J]. 矿业科学技术,1996,24(3):55 - 57.
- [9] 段卓平,黄风雷. 地下弹药库爆炸产生的地面空气冲击波的估算与数值模拟[J]. 安全与环境学报,2001,1(4):45 - 49.
- [10] 冯维君. 锅炉爆炸事故原因分析与对策[J]. 中国锅炉压力容器安全,1999,15(3):43 - 45.
- [11] 国家质量技术监督局. 压力容器安全技术监察规程[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,1999.

(上接第 446 页)

6 结 论

1) 利用 ALOFT-FT 软件对可能发生的柴油泄漏火灾事故进行模拟是可行的,CO、SO₂、PM₁₀是模拟火灾烟气中的主要污染物,火灾烟气弥散 1.5 km,上升 300 m 后 PM₁₀的 1 h 平均浓度仍能保持在 0.25 mg/m³ 以上;而 SO₂ 和 CO 弥散浓度不会超过空气质量三级标准。

2) 在下风向 100 m,距地面 50 m 的范围内,PM₁₀局部浓度甚至超过 10 mg/m³,局部 SO₂ 浓度超过所规定的三级标准的浓度限值,即 1 h 平均 0.7 mg/m³;CO 浓度相对较小。在这一区域内的人员必须被疏散,应急救援人员必须佩带防护用具。

3) 模拟揭示了火灾烟气在浮力羽流区的分岔和奇异性,有助于准确、科学地预测油罐火灾烟气弥散规律及燃烧产物的分布特点;有助于确定火灾事故危险区域和疏散区域和制订火灾事故应急救援预案和灾后环境恢复工作方案,从而降低风险和减少人员伤亡及财产损失,促进安全生产和环境保护工作。

参考文献:

- [1] YANG Zhen-hong. Study on excavating diagnosis system of the grave dangerous sources[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003,22(4):509 - 511.
- [2] ZHOU Ci, YANG Zhen-hong. The numerical stimulation of the character of smoke floating in the high-rise buildings[J]. Journal of Technology University of the Project of Liaoning, 2003,(4):8 - 11.
- [3] YANG Zhen-hong. An expert system for risk assessment tools of construction projects[A]. International Symposium on Safety Science and Technology[C]. Beijing: Science Press,2002.
- [4] KEVIN B McGrattan,Howard R Baum, William D Walton, et al. Smokeplume trajectory from in situ burning of crude oil in alaska field experiments and modeling of complex terrain[R]. Maryland US: National Institute of Standards and Technology, 1995.
- [5] YANG Zhen-hong. Studies on the strategy and technology of risk foresight on urban public security[A]. International Symposium on Science and Technology[C]. Beijing: Science Press, 2004.
- [6] HUO Ran. The fire safety engineering summary in the buildings[M]. Hefei: China Science & Technology University Press, 1999.
- [7] HUANG Heng-dong. The fire safety summary in the high-rise buildings[M]. Chengdu: Sichuan Science & Technology University Press,1992.
- [8] NIU Yu-lan. The escape technology from the fire in the high-rise buildings[J]. Fire Control of Shandong, 1997,(9):32 - 33.