

燃用磷酸的锅炉膜式水冷壁破坏分析

肖立川¹, 王政伟¹, 薛国新²

(1. 江苏工业学院 机械工程系, 江苏 常州 213016; 2. 江苏工业学院 计算机科学系, 江苏 常州 213016)

摘 要: 热法磷酸余热利用具有极大的经济价值与社会效益, 采用余热锅炉蒸汽利用的关键问题是膜式水冷壁翅片中的温度分布问题, 本文对燃磷锅炉中不规则水冷壁膜的温度分布进行了分析计算, 计算结果与实际破坏情况相符。指出了燃磷锅炉设计的关键问题和方法。

关 键 词: 余热利用; 燃磷锅炉; 水冷壁; 破坏分析

中图分类号: TK229.92 文献标识码: A

1 引 言

磷酸是重要的化学和化肥工业的原料, 我国每年消耗的磷酸达 2000×10^4 t。目前大部分磷酸是以黄磷为原料, 通过热法磷酸的工艺完成的。其工艺过程是将黄磷先加热成液体, 通过喷嘴喷入磷燃烧塔进行燃烧生成 P_2O_5 气体, P_2O_5 气体再在同一塔或另一塔内与稀磷酸或水进行化合, 生成高浓度的磷酸, 如图 1 所示。

每 1 kg 磷与空气燃烧生成 2.4×10^4 kJ 的热量, 这些产生的热量习惯上都是通过塔外的水冷夹套里的循环水带走的, 这不但造成了大量的热能浪费, 污染了环境, 而且还需要一个较大的循环水塔或循环水池将冷却水冷却后循环使用, 这又要消耗一部分冷却水。

在传统的磷酸生产工艺中, 热能之所以难以利用是因为磷酸对钢材有严重的腐蚀作用。为了减轻腐蚀, 一般燃烧塔的材料都是由 316 L 不锈钢制成的, 但磷酸对 316 L 不锈钢仍具有腐蚀作用, 而腐蚀的速度与温度成正比。在一般情况下, 为保证材料不受腐蚀, 要求酸温小于 80°C , 水温小于 50°C , 因此这部分由水或酸带走的热量就难以利用。而另一方面, 在工艺中为保证黄磷的流动和雾化, 要求将固态黄磷加热到处于液态状态下一定的温度, 就需要

单独设置锅炉房产生的蒸汽来加热黄磷。这样在磷酸生产过程中, 一方面需要使用外界的能量, 而另一方面工艺产生的大量的热量又要通过大量的冷却水来排除。如果设法将工艺产生的热量通过余热锅炉产生蒸汽为工艺自己所利用, 就可以将原有的锅炉停用, 不但可以大大减少能源的消耗, 还可以减少循环水的消耗及运行费用, 这就大大地提高了经济效益和环境效益。

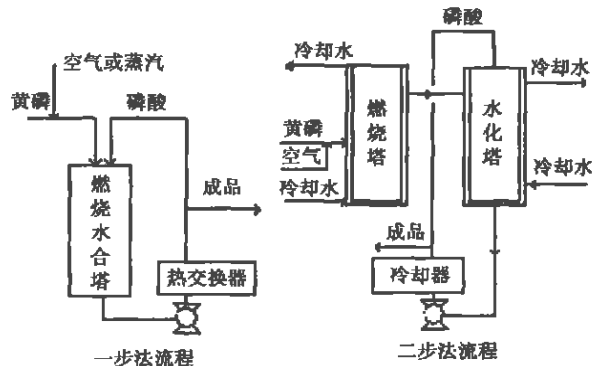


图 1 热法磷酸生产的原则性流程图

为了尽可能完全的利用热能, 并且考虑到所设计的锅炉要有很好的密封性和良好的水循环, 我们设计了带有余热回收的磷燃烧锅炉。锅炉整体为圆柱型, 上、下联箱为环型, 下降管外置, 上升水冷壁在炉内连接上、下环型联箱, 采用膜式水冷壁结构, 不仅解决了炉子的密封问题, 而且还大大地提高了水冷程度, 提高了余热的利用率。锅炉的汽包高位布置, 环型上联箱用管子与之相连, 下部连接下降管, 形成了较好的水循环。

2 不规则区域膜式水冷壁热传导问题的求解

本燃磷余热锅炉设计的主要难点是 316 L 钢材的腐蚀问题。余热回收以后, 钢材的工作温度提高了, 由于磷酸对钢材有严重的腐蚀作用, 并且腐蚀的速度随着温度的升高而愈加严重。采用余热利用后, 壁面的冷却温度由原有的 50 °C 左右上升到相应蒸汽压力的饱和温度以上, 因此所设计锅炉的压力不能太高。所产生的蒸汽只用来代替原有工艺所需要的 3~5 大气压的饱和蒸汽, 其壁面的冷却温度为 120~150 °C, 但这是水冷壁系统的最低温度, 而温度最高部位是在膜式水冷壁的翅片中心, 特别是在喷嘴附近, 在那里为了布置喷嘴, 水冷壁管不得不避开它, 由于加工工艺的限制, 出现了面积较大和离水冷壁较远的不规则区域。在这不规则区域的中心部位温度最高, 因而腐蚀就最严重, 如图 2 所示, 因此, 计算膜式水冷壁的温度分布具有极为重要的意义。



图 2 喷嘴附近膜式水冷壁的腐蚀情况

导热偏微分方程为:

$$\begin{cases} c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q^B, & \text{在区域 } V \text{ 内} \\ k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_S = q^S + h(T_e - T), & \text{在边界 } S \text{ 上} \end{cases} \quad (1)$$

其中: T —温度; $k = k(T)$ —导热系数; $c = c(T)$ —比热; $q^B = q^B(x, t)$ —单位体积的热量输入速度; $q^S = q^S(x, t)$ —边界热流输入; T_e —边界环境温度; h —边界的热交换系数; t —时间。

对于图 1 所示的膜式水冷壁:

$$q^B = H^{\circ} (T_{\text{炉}} - T) \quad (2)$$

其中: $T_{\text{炉}}$ —炉膛温度; H —传热系数。也可根据炉膛内燃料焓的释放速度估算 q^B 。对于图 2 所示的膜式水冷壁, 边界 S 被分为两类边界, 分别称之为第一类边界 S_1 和第二类边界 S_2 。在第一类边界 S_1 上, 项 $h(T_e - T)$ 不用考虑, 但 q^S 被表示为:

$$q^S = k' \frac{\partial T'}{\partial n} \Big|_{S_1} \quad (3)$$

其中: n' —与边界外法线方向相反的方向; k' —区域 V 边界之外区域 V' 的导热系数; T' —边界之外区域 V' 内的温度。而在第二类边界 S_2 上, q^S 被当作零, 项 $h(T_e - T)$ 中的 T_e 则为水冷壁内部的水温。第一类边界被简化为一系列外部狭长条形区域的端部。对于每一个狭长条形区域 Γ_i , 其温度求解可以简化为一维导热问题, 但需将它与区域 V 接壤的端部温度随时间的变化关系当作已知。由此可见, 各 Γ_i 内的一维热传导问题与区域 V 中的温度求解问题是相互耦合的。为此, 采用如下解耦方法进行数值求解。

采用迭代法。先预设一个连续的温度分布状态, 根据预设的温度分布, 求出各 Γ_i 与区域 V 接壤的端部的温度梯度 $\left(\frac{\partial T}{\partial l} \right)^{(i)}$ 。参见式 (3), 对区域 V 而言, 它与 Γ_i 接壤处在单位时间内的热量逃逸速度为被取作为:

$$-k_0 \left(\frac{\partial T}{\partial l} \right)^{(i)} \quad (4)$$

l 的正方向被当作为沿着背向区域 V 沿 Γ_i 而离区域 V 远去的方向。

这里系数:

$$k_0 = k_0(T_w, k') \quad (5)$$

其中: k' — Γ_i 一维导热问题的热传导系数; T_w —水冷壁内部水温。 $k_0(T_w, k')$ 之值可通过分析 Γ_i 端部热量的平衡条件而得到。

采用有限元方法分别按序求解区域 V 和各 Γ_i 中的温度。在用有限元方法求得了区域 V 中的温度分布后, 用它去替换预设的温度分布值, 并求出它与各 Γ_i 接壤处的边界外法线上的温度梯度, 由此就得到了各 Γ_i 的端部的温度边界条件。紧接着对各 Γ_i 用一维有限元方法求解温度分布, 并用计算所得的温度值替代预设的温度分布值。至此, 完成了一次迭代计算。

重复上述迭代过程, 直至相邻两次的温度分布的差异小于指定数值为止。根据计算的结果显示的温度分布如图 3 所示, 其形状与图 2 腐蚀情况的照片

极为相似。

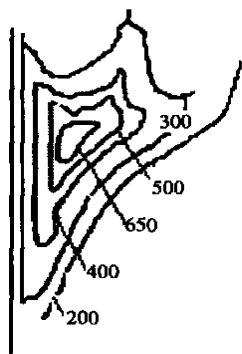


图3 喷嘴附近膜式水冷壁的温度分布示意图

3 翅片温度分析和结论

翅片的温度主要受到炉内热辐射强度 q (kW/m^2)、水汽系统的压力 P (MPa)、离水冷壁管的距离 L (mm) 和翅片本身的热扩散率 a 的影响, 在一定的燃磷锅炉内, 当燃磷量增加时, 且翅片离水冷壁管的距离越远, 翅片的温度就越高, 经初步计算, 当炉内的热流密度为 $100 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时, 翅片温度和距离的关系大约为 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$ 左右。如果翅片材料为 316L 不锈钢的话, 其允许的温度为 $620 \text{ }^\circ\text{C}$, 而长期工作温度在 $550 \text{ }^\circ\text{C}$, 在不考虑炉内气体对金属材料腐蚀的情况下, 翅片宽度通常不应超过 50 mm 。

事实上, 在燃磷锅炉的运行过程中, 黄磷与空气燃烧后产生的 P_2O_5 气体与空气带来的水蒸气结合成聚磷酸化合物, 并凝结固化在温度较低的金属壁面上, 起到保护金属壁面不受高温 P_2O_5 气体强烈的腐蚀作用, 当金属的表面温度越低, 保护层越厚, 起到的保护作用越强。经测试保护层聚磷酸化合物是一种复杂的化合物, 没有固定的熔点, 根据静态测试其主要成分的熔点为 $490 \text{ }^\circ\text{C}$, $590 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始挥发, $633 \text{ }^\circ\text{C}$ 完全挥发。另外在炉内燃烧枪附近, 由于燃烧气体的强烈扰动, 对壁面上的保护层产生冲刷作用, 使保护层减薄和不稳定, 因此, 为了使金属材料不受 P_2O_5 高温气体的腐蚀, 应将金属表面的温度控制在比聚磷酸化合物的软化温度低 $50 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同样在这种条件下, 经初步计算, 翅片宽度通常不超过 25 mm 。而图 2 照片所示的热法磷酸燃烧炉, 在燃烧枪的附近最大的翅片距离管壁已达 35 mm , 可见翅片中心部位的温度已经超过了保护层聚磷酸化合物的软化温度, 这就是翅片中心的金属壁面在很短的

时间内腐蚀穿孔的主要原因, 而且, 当金属壁面有一点腐蚀穿孔, 就会引起加速腐蚀过程, 最终使翅片大面积破坏。

从以上的分析看出, 为了确保燃磷锅炉安全可靠地运行, 可以采取以下措施:

(1) 合理布置燃烧枪的位置, 使炉内的热流密度尽可能均匀分布, 这样可整体提高燃烧炉的体积热负荷, 节约金属材料, 降低燃烧炉的造价。同时避免局部热负荷过高, 使局部金属材料的温度过高而腐蚀破坏。

(2) 尽可能采用短的翅片, 在许可的条件下, 可采用密集管, 这样使金属表面的温度更接近汽水系统的饱和温度, 相应地可提高汽水系统的压力, 能产生压力更高的蒸汽, 使热利用率更高。

(3) 保证管内有良好的水循环, 使受热面得到可靠的冷却。尽可能降低对流换热热阻, 使金属壁面的温度更接近汽水的饱和温度, 使运行更安全可靠, 还能延长燃烧炉的寿命。

(4) 在燃磷锅炉的一些特殊部位或热负荷特别高的部位, 应采取可靠的冷却措施, 使金属材料的温度降到允许的温度范围 ($390 \sim 440 \text{ }^\circ\text{C}$) 内。

(5) 在运行过程中, 要保持平缓的负荷变化, 不能超负荷运行。

综上所述, 热法磷酸余热利用具有极大的经济价值与社会效益, 采用燃磷锅炉产生蒸汽并加以利用的关键问题是受热面的腐蚀问题, 而防止受热面腐蚀的有效措施是控制受热面及翅片中的温度分布问题。为防止翅片的中心超温, 在设计中应尽量减少翅片的宽度, 同时要详细的计算使翅片中心的温度在允许的范围。对于喷嘴附近的特殊区域的水冷壁, 可以采取局部水冷, 把翅片中心的温度降下来, 以确保燃磷锅炉的安全可靠长期运行。

参考文献:

- [1] 李志宏, 刘文铁, 刘石. 膜式水冷壁壁温影响因素的数值分析[J]. 热能动力工程, 2003, 18(2): 174-176.
- [2] 梅毅, 宋耀祖, 杨亚斌, 等. 黄磷燃烧热能的回收与利用综述[J]. 磷肥与复肥, 2002, 17(4): 45-48.
- [3] 杨强生, 浦保荣. 高等传热学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.
- [4] 肖立川, 薛国新. 锅炉汽包壁温仿真计算方法[J]. 江苏石油化工学院学报, 2002, 14(3): 43-45.

(何静芳 编辑)

600 MW 汽轮发电机组轴系非线性动力学响应分析 = **An Analysis of the Nonlinear Dynamic Response of a 600MW Turbogenerator Shafting** [刊, 汉] / JIAO Ying-hou, CHEN Zhao-bo, QU Xiu-quan (College of Mechanical & Electrical Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), JING Jian-ping (National Key Laboratory of Vibration, Shock & Noise under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 178 ~ 181

By employing a finite element method with equal-parameter elements a nonlinear dynamics model was set up for the shafting of a Chinese-made 600MW Turbogenerator. With the use of a finite element analysis program ADINA an analysis and a calculation were conducted of the nonlinear dynamics response of the 600MW turbogenerator shafting. During the calculation, by way of the user interface provided by the program ADINA the nonlinear oil-film force of the journal bearing has been taken into account and compared with the nonlinear dynamics analysis and calculation results. The results of the calculation indicate that the use of the program ADINA in conjunction with a nonlinear dynamics theory is essential and feasible for the nonlinear dynamics analysis and calculation of the shafting of large-sized turbogenerators, thus providing a solid basis for the nonlinear dynamics stability analysis and optimal design of the shafting of specific large-sized units.

Key words: nonlinearity, rotor, bearing, ADINA

高温状态下锅水 pH 值的变化特征研究 = **A Study of the Variation Features of the pH value of Boiler Water under a High-temperature State** [刊, 汉] / ZHU Zhi-ping, HUANG Ke-long (Chemical Engineering Institute under the Zhongnan University, Changsha, China, Post Code: 410083), ZHANG Ling, WANG Hong-mei (Department of Chemical & Environmental Engineering, Changsha, China, Post Code: 410077) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 182 ~ 185

It is worth while paying due attention to the variation of boiler water pH value under a high-temperature state. On the basis of the dissociation equilibrium constant of related materials at a high temperature the independently existing pH value at a temperature of 25 °C ~ 300 °C was calculated for water, Na_3PO_4 , NH_3 and NaOH . Also calculated was the boiler water pH value at the typical condition of equilibrium phosphate treatment (EPT). In addition, the calculation results are shown graphically. Meanwhile, the impact of the presence of acidic foreign matter, such as H_2CO_3 and CH_3COOH on the pH value of boiler water was calculated and analyzed. In conclusion, the above calculation results were briefly analyzed and discussed. **Key words:** boiler, boiler water, equilibrium constant, pH value, equilibrium phosphate treatment

燃用磷酸的锅炉膜式水冷壁破坏分析 = **An Analysis Concerning the Destruction of the Membrane Wall of a Phosphoric Acid-fired Boiler** [刊, 汉] / XIAO Li-chuan, WANG Zheng-wei (Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnical Institute, Changzhou, China, Post Code: 213016), XUE Guo-xin (Department of Computer Science, Jiangsu Polytechnical Institute, Changzhou, China, Post Code: 213016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 186 ~ 188

The waste heat utilization of phosphoric acid in a heat recovery boiler can bring about tremendous economic and social benefits. The key problem involved in this utilization consists in the distribution of temperature in the fins of a membrane water-wall. The authors have carried out analyses and calculations of the irregular temperature distribution in the water-wall membrane of a phosphoric acid-fired boiler. The results of the calculation are in agreement with the actual destruction situation. The key issues and method for the design of a phosphoric acid-fired boiler are presented. **Key words:** waste heat utilization, phosphoric acid-fired boiler, water wall, destruction analysis