

# 燃煤电厂烟囱内烟气温度分布计算

方立军, 尹荣荣, 高建强

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 烟囱是火电厂中的重要设备, 当烟囱内壁温度低于酸露点时, 烟气中的硫酸蒸汽会在壁面结露, 腐蚀壁面, 缩短烟囱寿命。通过计算烟囱内烟气的温度分布, 可确定烟气在烟囱内结露位置, 确定现场防腐方案。采用热平衡方法, 建立计算烟囱内烟气温度和内侧壁面温度的通用数学模型。针对某 CFB 电厂的套筒式烟囱, 应用该数学模型, 计算冬夏两季套筒式烟囱空气夹层温度沿烟囱高度的温度分布和不同负荷下烟囱内壁温分布, 并分析温度变化规律。计算结果与文献 [8] 中半经验计算式的结果和现场测量的结果吻合较好。

**关键词:** 烟囱; 温度分布; 数学模型; 套筒式烟囱; 夹层温度

中图分类号: TK223.28      文献标识码: A  
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.03.036

## 引言

烟气经过烟囱散热, 随烟囱高度的增加烟气温度逐渐降低。当烟囱内烟气温度或内侧壁面温度低于烟气露点时, 烟气中  $\text{SO}_3$  与水蒸汽结合生成的硫酸蒸汽就会结露, 形成硫酸液体, 腐蚀壁面。尤其是随着火电厂脱硫在我国的普遍实施, 虽然脱硫后烟气中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$  含量减少, 露点温度有所降低, 但烟气温度也降低且湿度增加, 烟气温度很有可能低于露点温度, 从而发生结露<sup>[1-4]</sup>。很多电厂都反映增加脱硫装置后烟囱壁面结露腐蚀情况变严重, 有的甚至可以在观察孔看到液体沿壁面向下流。所以研究烟囱内烟气和内侧壁面温度的分布, 了解烟气在烟囱何处发生蒸汽结露具有重要意义, 可以在该高度以上采取防腐措施, 在水蒸汽结露位置安装收集装置, 延长烟囱的使用寿命, 使机组安全有效运行。

目前, 国内外关于电厂烟囱内烟气温度分布的详细理论计算文献较少, 常见的关于烟囱内温度计算标准是 77 年前苏联提出的经验公式和清华大学使用的计算方法<sup>[5-7]</sup>, 主要考虑了烟气量和烟囱高度对烟气温降的影响。而实际烟气在烟囱内流动其

位能和动能都发生了变化, 烟气和环境的换热与烟囱结构、材料导热系数、烟气和环境温度、风速等多种因素有关, 当烟气结露时质量和能量守恒等式会发生变化。本研究针对烟囱内烟气温度的分布建立了数学模型, 计算了某套筒式烟囱内的温度分布, 套筒式烟囱的外筒主要用于承重, 不与腐蚀性烟气相接触, 内筒与烟气接触可以采用防腐措施减轻腐蚀。套筒式烟囱已经成为我国火电厂烟囱近年来的发展趋势, 所以以该类型烟囱为模型计算其温度分布并进行分析。

## 1 数学模型

烟囱内侧烟气的热量通过壁面传到周围环境, 如果采用套筒式烟囱, 排烟筒和外筒之间会有空气夹层, 夹层内空气为对流换热。烟囱内侧、外侧发生对流换热时要考虑辐射换热的影响, 换热系数为复合换热系数。对流换热系数与烟气和环境温度、风速等因素有关。

对模型做如下简化: (1) 烟气为稳定流动; (2) 烟囱进、出口烟气温度沿高度分布均匀, 且不考虑径向温度梯度; (3) 分段计算, 考虑到烟囱高度方向烟囱坡度、壁面材质和厚度的变化; (4) 假定每个计算段内换热系数、导热系数值恒定。烟囱模型如图 1 所示。

计算段内烟气系统质量和能量都守恒, 出口烟气流量  $G_2$  等于进口烟气流量  $G_1$  减去水蒸气凝结量  $M$ , 沿烟囱高度烟气的位能增加, 由于烟囱是上小下大的锥形, 所以沿烟囱高度烟气动能也会增加, 考虑系统与外界环境的换热, 从而可以列出能量方程式 (1)。当烟囱内不发生凝结时,  $M=0$ ,  $G_1=G_2=G$  代入式 (1) 进行化简得到计算段出口烟气温度计算式 (2)。

$$c \cdot (G_1 \cdot t_1 - G_2 \cdot t_2) = \pi d_m k \cdot (Z_2 - Z_1) \left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right)$$

收稿日期: 2014-03-03; 修订日期: 2014-05-19

作者简介: 方立军 (1971-), 男, 河南安阳人, 华北电力大学副教授。

$$-t_k) + g(G_2 \cdot Z_2 - G_1 \cdot Z_1) + \frac{1}{2}(G_2 \cdot v_2^2 - G_1 \cdot v_1^2) + M \cdot Q_{nj} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{[2c \cdot G - \pi d_m k \cdot \Delta Z] \cdot t_1 - 2G \cdot g \cdot L - G \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \pi d_m k \cdot \Delta Z \cdot t_k}{2c \cdot G + \pi d_m k \cdot \Delta Z} \quad (2)$$

式中:  $c$ —烟气的定压比热,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $t_1$ —计算段进口烟气温度,  $^\circ C$ ;  $t_2$ —计算段出口烟气温度,  $^\circ C$ ;  $t_k$ —周围环境温度,  $^\circ C$ ;  $G_1, G_2$ —计算段进口和出口烟气流量,  $kg/s$ ;  $M$ —蒸汽凝结量,  $kg/s$ ;  $Z_1, Z_2$ —计算段进口和出口烟气高度,  $m$ ;  $\Delta Z$ —计算段进出口烟囱高度差,  $m$ ;  $k$ —烟气与环境大气的换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $d_m$ —计算段烟囱平均直径,  $m$ ;  $v_1, v_2$ —计算段进口和出口烟气速度,  $m/s$ ;  $g$ —重力加速度, 取  $9.8 m/s^2$ ;  $Q_{nj}$ —水蒸气凝结吸热量,  $W$ 。

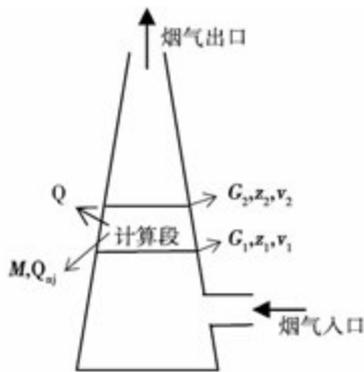


图 1 烟囱模型图

Fig. 1 Drawing of a model for smoke stacks

求出各段烟气温度后, 利用传热学知识求出烟囱各壁面材料的热阻, 进而利用圆柱环壁法求出各个材料的壁面温度。

## 2 计算示例与分析

### 2.1 研究对象

山西某 CFB 电厂的  $2 \times 300 MW$  机组, 共用 1 个钢筋混凝土套筒式烟囱, 每台 SG-1060/17.5-M 型锅炉的额定蒸发量为  $1060 t/h$ , 该厂采用自主设计的炉内投石灰石尾部喷氨深度脱硫来满足新的环保要求, 计算工况为满负荷时喷入浓度 5% 的氨水  $8.5 t/h$ , 烟囱入口烟气流量约为  $420 kg/s$ , 引风机出口温度约为  $130 ^\circ C$ 。烟囱主要参数如表 1

所示。

表 1 烟囱主要参数

Tab. 1 Main parameters of a smoke stack

参数	数值
有效烟囱高度/m	197.5
烟气入口外筒外半径/m	9.85
烟气入口内筒内半径/m	6.32
烟囱出口外筒外半径/m	4.65
烟囱出口内筒内半径/m	3.5
中间夹层的厚度/m	0.82-2
夏季/冬季空气平均温度/ $^\circ C$	25/-10
夏季/冬季空气换热系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	12/23

### 2.2 烟囱中烟气温度和内侧壁温度分布计算与分析

参考烟囱材料和坡度把烟囱分为 17 段分别进行计算, 按前苏联方法<sup>[8]</sup>计算该 CFB 锅炉此脱硫工况下, 烟气水露点和酸露点分别为  $49.5 ^\circ C$  和  $94.1 ^\circ C$ , 烟囱入口烟气温度  $130 ^\circ C$  远大于露点温度, 所以烟囱内不会发生结露,  $M=0$ 。计算满负荷下各计算段烟气和烟囱内壁面温度分布, 以及套筒式烟囱空气夹层的温度分布, 结果如图 2、图 3 所示。

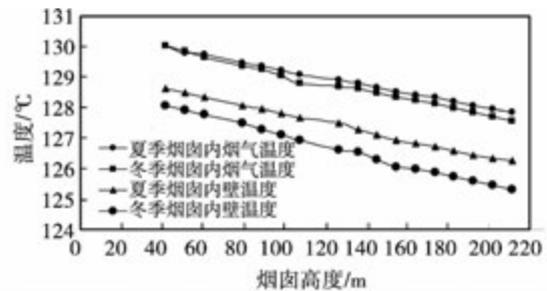


图 2 满负荷下烟囱内温度分布

Fig. 2 Distribution of temperatures in the chimney in the full load condition

按文献 [8] 求得烟囱出口烟气的温降为  $2.17 ^\circ C$ , 与本研究计算得到的夏季和冬季烟气的温降  $2.3 ^\circ C$ 、 $2.4 ^\circ C$  差别不大。假定材料和厚度不变的情况下去掉中间夹层变成单筒式烟囱, 计算得烟囱出口温降夏季  $2.4 ^\circ C$ , 冬季  $2.6 ^\circ C$ 。表明烟气在单筒烟囱与套筒式烟囱中的温降差不多, 而且套筒式烟囱又具有延长外承重筒的寿命、排烟筒防腐等优点, 体现了火电厂用套筒式烟囱逐渐代替单筒式烟囱的诸多优势。

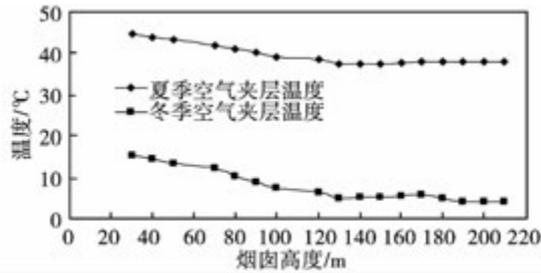


图3 满负荷下套筒式烟囱空气夹层温度分布  
Fig. 3 Distribution of temperatures in the air interlayer of the telescope-feed chimney in the full load condition

夹层温度随烟囱高度而发生变化,本例中由于内衬材料和内外筒坡度的变化而导致了夹层温度的变化趋势有一个波动。夏季夹层平均温度 $41.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冬季夹层平均温度 $9.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与《烟囱工程手册》中提到的假定夹层温度夏季取夏季最高温度在加上 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (本例中取夏季最高温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,所以对应的夹层温度 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),冬季取夹层温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,本研究计算的结果与其相差不大,而且从现场运行检查中也可知空气夹层的温度夏季平均在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冬季平均在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,计算结果与现场数据也较吻合,说明该计算模型较符合实际。由图3可以看出在内外筒坡度一定的条件下夹层温度随烟囱高度的增加而减小,冬季空气夹层内温度沿烟囱高度的变化较夏季大。

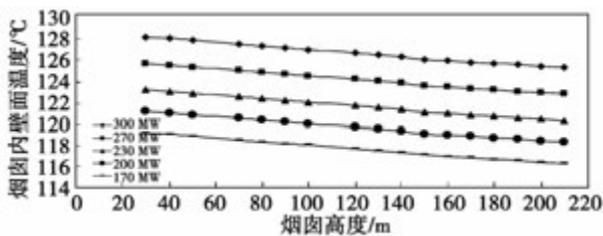


图4 不同负荷下冬季烟囱内壁温分布图  
Fig. 4 Distribution drawing of chimney inner wall temperature in winter under different load conditions

由图4可知,负荷变化即烟气量和烟囱进口温度变化时,烟囱壁面温度的变化幅度基本一致,但低负荷时进口烟气和烟囱内壁温都较低,壁面发生结露的可能性增加。而且负荷 $170\text{ MW}$ 时最低壁温 $116\text{ }^{\circ}\text{C}$ 较酸露点 $94.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高 $11.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,烟气中还可以投入更多的氨水,通过此方法可以计算出保证烟囱壁温高于露点时投入脱硫剂的最大量。当烟囱壁面温度低于 $94.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,运行人员就必须注意,采用相

应的防酸腐措施。

### 3 结论

(1) 介绍了烟囱内烟气温度和壁面温度分布的理论数学模型,运用该模型进行实例计算,计算结果与文献半经验公式和现场测量结果较吻合。由于材料导热系数随温度和湿度变化是一个范围值,对流换热系数取的是经验值,所以烟囱内烟气和内壁面温度的分布可能与真实值有差别,但该理论模型简单、适用范围广可以作为工程现场运行人员计算烟囱内烟气温度分布的参考。

(2) 利用该数学模型首次计算得套筒式烟囱内壁面和空气夹层的温度分布,求解套筒式烟囱夹层温度知,在内外筒坡度一定的条件下夹层温度随烟囱高度的增加而减小,冬季空气夹层内温度变化较夏季变化大。

(3) 计算分析得套筒式烟囱与单筒式烟囱内气温降差不多,而且套筒式烟囱由于其内外筒分开保证外面的承重筒不被腐蚀,排烟筒通过涂防腐材料可以延长内筒的寿命,套筒式烟囱作为近年来火电厂脱硫后烟囱防腐的一个重要方法,成为我国下一步烟囱改造和建造的必然趋势。

### 参考文献:

- [1] 陈彪,李彩华. 燃煤机组湿法烟气脱硫后烟囱的腐蚀与防腐问题探讨[J]. 电站系统工程,2007,23(6): 31-35.  
CHEN Biao, LI Yong-hua. Study on stack corrosion and anticorrosion after FGD for coal-fired units[J]. Power Systems Engineering, 2007, 23(6): 31-35.
- [2] 李文艳,王冀星,车建伟. 湿法脱硫烟气湿排问题分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(14): 36-40.  
LI Wen-yan, WANG Ji-xing, CHE Jian-wei. Analysis on corresponding problem of WFGD flue gas wet emission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 36-40.
- [3] S. Martine-Ramirez. Effect of different catalysts in  $\text{SO}_2$  oxidation over polymeric concrete[J]. Building and Environment, 2002(37): 1369-1371.
- [4] 冯云岗. 烟气脱硫改造后烟囱防腐的探讨[J]. 上海电力, 2008, 21(1): 39-41.  
FENG Yun-gang. Study on Preservative of the Chimney after Flue Gas Desulphurization[J]. Shanghai Electric Power, 2008, 21(1): 39-41.
- [5] 刘永久. 火电厂烟囱内烟气温降及饱和烟气的凝结水量计算[J]. 热力发电, 2008(2): 72-73.  
LIU Yong-jiu. Computing on condensation of water and temperatures drop of flue gas in the Chimney[J]. Thermal Power Generation, 2008, (2): 72-73.
- [6] 牛春良. 烟囱工程手册[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004: 10-16.  
NIU Chun-liang. Chimney Engineering Manual[M]. Beijing: China Planning Press, 2004: 10-16.
- [7] Jaworowski R J. Evaluation of methods for measurement of  $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$  in flue gas[J]. Air Poll Ass, 1979(29): 43-46.
- [8] Аэродинамический расчет котельных установок[M]. Энергия ленинград, 1977.

(丛敏 编辑)

the stator blades and making the installation angle of the stator blades to change step by step with the load. On this basis, a simulation platform for steam-turbine-driven forced draft fans was set up based on the APROS software, being capable of accurately simulating changes of various parameters of a forced draft fan in its practical operation process and a simulation was performed of the control strategies optimized by using the APROS simulation platform. It has been found that the optimized control strategies can effectively avoid the surge problem of the forced draft fan and enhance the operation safety of the unit. **Key Words:** steam-turbine-driven forced draft fan, control strategy, APROS

燃煤电厂烟囱内烟气温度分布计算 = **Calculation of the Temperature Distribution of Flue Gases in a Smoke Stack in a Power Plant** [刊, 汉] FANG Li-jun, YIN Rong-rong, GAO Jian-qiang ( College of Energy Source, Power and Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(3) . - 452 - 454

Smoke stacks are regarded as one of important equipment items in thermal power plants. When the temperature on the inner wall surface of the smoke stacks is lower than the dew point temperature of sulfuric acid, the sulfuric acid steam in the flue gases will dew on the wall surface to corrode it and shorten service life of the smoke stacks. Through calculating the temperature distribution of the flue gases inside a smoke stack, one can determine the dewing locations of flue gases inside the smoke stack and also finalize an on-the-spot corrosion and erosion version. By adopting the heat balance method, the authors established a general-purposed theoretical mathematical model for calculating the temperature of flue gases and the temperature on the wall surface inside the smoke stack. For a sleeve type smoke stack in a CFB power plant, the mathematical model in question was used to calculate the distribution of the temperature in the air interlayer of a sleeve type smoke stack in both winters and summers along the height of the smoke stack and that inside the wall surface of the smoke stack at various loads and analyze their variation regularities. The calculation results are in relatively good agreement with those calculated by using the semi-empirical calculation formulae and tested on the spot. **Key Words:** smoke stack, temperature distribution, mathematical model, sleeve type smoke stack, interlayer temperature

小型增压锅炉过热器性能评估方法研究 = **Study of the Method for Evaluating the Performance of a Small-sized Supercharged Boiler Superheater** [刊, 汉] CHI Miao ( International Exchange and Cooperation Division, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) , ZHANG Hong-yan, XIE Hai-tao, LI Yan-jun, ZHANG Guo-lei ( College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China,