

工业锅壳煤粉锅炉炉膛出口烟温计算方法研究

王晓雷, 仝胜录, 郭 治

(中国神华煤制油化工有限公司 北京研究院, 北京 100011)

摘要: 工业锅壳煤粉锅炉因其诸多优点, 得到广泛应用。炉膛出口烟气温度可以为锅炉的设计提供重要参考。为了优化锅炉设计, 分析了现有的烟温计算方法——73 标准和《燃油燃气锅炉》简化算法。并根据能量衡算及辐射、对流传热方程建立了一维稳态传热数学模型, 提出了具体的计算方法, 通过 10 t/h 示范锅炉的验证, 与已有的 2 种计算方法进行对比, 表明该方法计算简便、准确。但在实际运行中需要考虑水侧热阻的影响。

关键词: 一维稳态传热; 炉膛出口烟温; 辐射传热; 对流传热

中图分类号: TQ520.1; TD849

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2011)05-0059-03

近年来一种新型工业煤粉锅炉在中小型工业锅炉市场异军突起, 这类工业煤粉锅炉多采用火管锅壳式结构设计, 配以煤粉燃烧器、储供粉设备、高效布袋除尘器及自动控制系统, 具有燃烧效率高、节煤显著、自控水平高等特点。

炉膛出口烟温是此类锅炉结构设计的重要参数之一, 直接影响到锅炉对流受热面的布局确定、总面积等参数及传热计算的准确性。目前, 炉膛出口烟温的计算多采用前苏联《锅炉机组热力计算——标准方法》即 73 标准和《燃油燃气锅炉》简化算法计算。由于 73 标准是由相似论得出的半经验半理论公式, 参数多由电站锅炉回归获得, 应用于中小型工业锅炉计算会使结果偏高。另一种算法为《燃油燃气锅炉》中所提到的简化算法^[1], 此方法将辐射换热系数的经验值直接代入公式进行计算, 参数比较少, 计算简便^[2-3], 但由于燃料种类不同导致传热特性不同, 使得计算结果偏低。

为了较准确地计算工业锅壳煤粉锅炉炉膛出口烟温, 笔者建立一维稳态传热数学模型, 并给出了具体的计算方法。通过 10 t/h 锅炉的验证, 表明该方法计算简便, 计算结果优于 73 标准和《燃油燃气锅炉》中的简便算法, 该方法为此种锅炉的设计、不同负荷下锅炉运行参数分析提供较好的指导作用。

1 计算模型

对工业锅壳煤粉锅炉炉膛进行建模计算, 由于燃煤燃烧动力学不同, 因此其在炉内的传热特性不同, 为简化算法假定: ①煤在刚进入炉膛时就达到实际燃尽程度, 此时忽略向外的传热量, 即达到理论燃烧温度; ②烟气沿径向温度分布均匀, 向炉壁稳定传热, 温度仅沿轴向变化。炉膛截面图如图 1 所示。

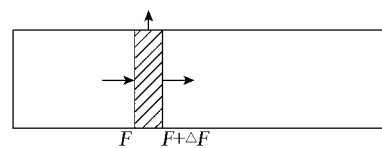


图 1 炉膛截面图

针对炉膛轴向的截面 $F \rightarrow F + \Delta F$ 微元,

$$Q_{\lambda} = BVCT_F$$

$$Q_{\text{出}} = BVCT_{F+\Delta F} + q\Delta F$$

根据能量衡算 $Q_{\lambda} = Q_{\text{出}}$ 推出:

$$q = -BVC \frac{dT}{dF} \quad (1)$$

式中 q ——单位面积上的热负荷 kW/m^2 ;

B ——燃煤量 kg/s ;

V ——烟气容积 m^3/kg ;

C ——烟气平均比热容 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

根据辐射、对流传热速率方程:

$$q = \sigma_b [T^4 - T_b^4] = \alpha_2 (T_b - T_0) \quad (2)$$

式中 σ_b ——综合黑体辐射常数 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

α_2 ——水侧对流传热系数;

T_b ——炉壁的绝对温度, K;

T_0 ——锅炉压力下对应的饱和水温度, K。

而 $\sigma_b = \sigma_0 \varepsilon_{xt}$

σ_0 ——黑体辐射常数 $5.67 \times 10^{-11} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

ε_{xt} ——系统黑度 $\varepsilon_{xt} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_y} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1}$ [4];

ε_y ——烟气黑度;

ε_b ——炉壁黑度。

根据公式(1),(2)推出式(3),炉膛辐射传热是以理论燃烧温度 T_a 为起点,将炉膛轴向无数个微元进行积分求得的总热量:

$$-\int_{T_a}^{T_l} \frac{dT}{T^4 - T_b^4} = \frac{\sigma_b F}{BVC} \quad (3)$$

式中 T_a ——理论燃烧温度, K;

T_l ——炉膛出口温度, K;

烟气对壁面的辐射传热系数为:

$$\alpha_f = \varepsilon_{xt} \sigma_0 \frac{T^4 - T_b^4}{T - T_b} \quad \text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (4)$$

α_2 的求取则根据文献[5]炉管水侧在正常运行工况下为沸腾状态,饱和水在管内呈核态沸腾时,传热系数主要取决于压力和热负荷,管内核态沸腾时的传热系数为:

$$\alpha_2 = 0.589 K_p^{0.314} q^{0.7} \quad (5)$$

式中 K_p ——考虑压力影响的准数 $K_p = \frac{10^4 P}{\sqrt{\sigma(\gamma' - \gamma'')}}$;

P ——锅内压力,即蒸汽压力, Pa;

q ——单位传热面上的平均热负荷, kW/m^2 ;

σ ——饱和水的表面张力, kg/m ;

$\gamma' - \gamma''$ ——压力为 P 时饱和水及饱和蒸汽的密度 kg/m^3 。

由于火管锅炉特点是“锅包炉”,即水包围着炉膛和烟管,水在管间沸腾,水容积比同吨位水管锅炉大很多,同时水的循环量较小,管间水侧流速较低,因此其传热系数在工程上大都采用大空间核沸腾的传热系数公式,即:

$$\alpha_2 = Aq^{0.7} \quad (6)$$

$$A = 0.513 \lambda \sqrt{\frac{\gamma' - \gamma''}{\sigma}} Pr^{0.35} \left[\frac{6.48P}{rv\gamma''(\gamma' - \gamma'')} \right]^{0.7} \quad (7)$$

λ ——饱和水的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

r ——汽化潜热, kJ/kg ;

ν ——饱和水的运动粘度, m^2/s 。

因此 $q = \sigma_b [T^4 - T_b^4] = Aq^{0.7} (T_b - T_0)$ (8)

则 $A(T_b - T_0) = [\sigma_b (T^4 - T_b^4)]^{0.3}$ (9)

2 计算方法

根据以上推导出的公式,具体计算步骤如图2所示。

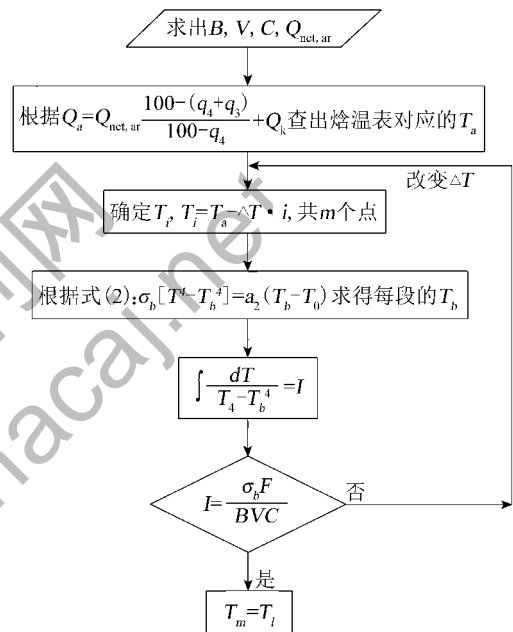


图2 炉膛出口烟温计算步骤

以 10 t/h 工业锅壳煤粉锅炉为例,按此方法计算得出:对流传热系数 $154.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;辐射传热系数 $153.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;总传热系数 $77.13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;炉膛出口烟温为 $948 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图3为 α_f/α_2 随温度变化曲线。由图3可知,每个温度间隔的辐射传热系数与对流传热系数比值的变化范围为 $0.58 \sim 0.78$ 。随着温度的降低,此比值呈正比减小,可见辐射传热系数与对流传热系数处在同一数量级,因此水侧对流传热的影响很大,不可忽略。

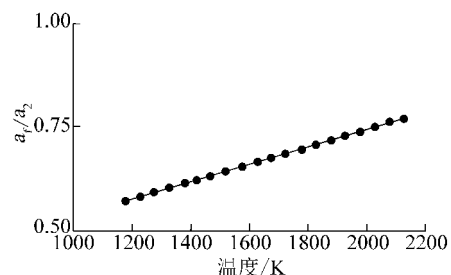


图3 α_f/α_2 随温度变化曲线

3种计算方法得出的炉膛出口烟气温度及实测值见表1。

表1 3种计算方法结果对比 $^{\circ}\text{C}$

项目	73 标准	《燃油燃气锅炉》 简化算法	新模型 计算结果	实测 值
炉膛出口烟气温度	1042	870	948	959

采用新模型计算的炉膛出口烟气温度与示范运行中的工业锅壳煤粉锅炉实测值最接近,而采用73标准计算的数值偏大,采用《燃油燃气锅炉》简化算法得出的数值则偏小。从公式(7)可看出,水侧对流传热系数与锅炉压力的0.7次方成正比。电站煤粉锅炉压力是工业锅壳煤粉锅炉压力的几百倍,其水侧核状沸腾传热系数比辐射传热系数大很多,热阻很小,可忽略不计。而中低压力工业锅炉尤其是供暖锅炉,通常运行压力为0.1~0.5 MPa,水侧对流传热对整个传热过程的影响很大。而采用《燃油燃气锅炉》简化算法,对辐射换热系数的取值存在较大误差,煤相比油、气的辐射传热不稳定性增强,燃煤种类不同,辐射换热系数变化范围较大。新模型计算方法综合考虑了炉内的辐射传热和水侧的对流传热,简单易行,计算准确,避免了直接计算中对炉膛平均温度的估算或求取。

采用新模型计算炉膛出口烟气温度也存在着一一定的误差,炉膛进口按理论燃烧温度计算,可能导致温差加大,计算传热量增加,炉膛出口温度偏低,但由于 q 较小,对水侧传热系数影响较小,主要是影响温差,可考虑在辐射传热中加一修正系数进行修正。此修正系数需要在今后工作中通过对不

同吨位示范运行的工业锅壳煤粉锅炉进行实测验证而求得。

3 结 论

(1)对现行的2种锅炉炉膛出口烟温计算方法进行分析研究,指出2种计算方法均不适用于新型工业锅壳煤粉锅炉。根据能量衡算及辐射、对流传热速率方程建立一维稳态数学模型进行积分、计算,并与另2种方法计算值对比,通过10 t/h锅壳煤粉锅炉的验证,新模型计算结果与实测值接近,从而得出一种新的工业锅壳煤粉锅炉炉膛出口烟温计算方法。

(2)工业锅壳煤粉锅炉由于压力低,辐射传热系数与对流传热系数数值处在同一数量级,水侧的热阻对整个传热过程的影响非常重要,因此计算时必须考虑它的影响。这是与电站煤粉锅炉炉膛出口烟温计算完全不同之处。

参考文献:

- [1] 赵钦新,惠世恩.燃油燃气锅炉[M].西安:西安交通大学出版社,2000.
- [2] 王建伟,赵然,沈胜强,等.锅壳式锅炉设计与计算问题分析[J].工业锅炉,2008(4):24-26.
- [3] 杨锦春.卧式内燃燃油燃气锅炉炉膛出口烟温计算公式探讨[J].工业锅炉,2004(2):21-22.
- [4] 林宗虎,徐通模.实用锅炉手册[M].北京:化学工业出版社,1999.
- [5] 《化学工程手册》编辑委员会.化学工程手册[M].北京:化学工业出版社,1989.

Calculation method of gas temperature at furnace outlet of industrial shell type pulverized-coal boiler

WANG Xiao-lei, TONG Sheng-lu, GUO Zhi

(Beijing Research Institute, China Shenhua Coal to Liquid and Chemical Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: Industrial shell type pulverized-coal boiler is widely used thanks to its lots of advantages. Gas temperature at furnace outlet can provide reference for the design of boiler. In order to optimize the design, analyze status gas temperature calculation methods, which are 73 standard and 《oil-fired and gas-fired boiler》simplified algorithm. The one-dimensional steady-state heat-transfer model is established based on the calculation of energy balance, radiative and convective heat transfer equation. Put forward specific calculation method, which is compared with above two methods, the practical production of 10 t/h industrial shell type pulverized-coal boiler proves that the results simply got by this method is accurate. The only one issue need to be concerned is that the influence of thermal resistance.

Key words: one-dimensional steady-state heat-transfer; gas temperature at furnace outlet; radiative heat; convective heat