

炉内煤粉燃烧一维数学模型及其仿真

张腾飞, 罗 锐, 任挺进, 杨献勇

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘 要: 为了准确计算炉内煤粉的燃尽率, 从研究煤粉粒子的燃烧机理入手, 以炉膛内最复杂的燃烧器区域的煤粉燃烧过程为研究对象, 通过合理简化煤粉中挥发分和焦炭的燃烧过程, 建立了炉内煤粉燃烧沿高度方向上的一维宏观模型, 在模型中考虑了煤粉燃烧过程中氧含量的变化, 以单个煤粉颗粒燃烧的等密度模型为基础, 通过多种煤粉粒径的燃烧过程反映煤粉燃烧的整体过程, 推导出计算炉内煤粉燃尽率的显示公式, 满足了实时仿真计算的要求。计算结果与实测数据和现有的文献相符, 并对结果进行了分析。

关 键 词: 煤粉燃烧; 等密度模型; 宏观模型; 实时仿真

中图分类号: TK22; O643 文献标识码: A

1 前 言

为了计算炉膛内的辐射传热量, 首先必须弄清楚煤粉在炉膛内的化学反应释热量, 这就需要建立煤粉燃烧过程的数学模型, 比较精确地估算出煤粉的燃尽率。同时煤粉的燃尽率也是反映锅炉运行状况的一个经济指标, 运行中可以通过改变空气燃料比来改变煤粉燃烧状况。但是到目前为止, 在锅炉的设计过程中关于煤粉燃尽率这一项的数值往往还是根据经验数值进行人为地假定, 因而不能很好地反映锅炉运行参数的改变所引起的煤粉燃尽率的变化。

文献[1]给出了单个煤粉粒子运动的动量微分方程、传热的能量微分方程, 以及煤的裂解方程和焦炭的燃烧方程, 此种方法从煤燃烧的微观机理入手, 考虑的因素过多, 对于锅炉设计和仿真计算很不实用。文献[2]也是从单个煤粉粒子的微观状况入手, 对于煤的裂解给出了双挥发反应的模型, 煤粒子燃烧过程中认为是等密度变直径的, 或者是等直径变密度的, 还给出了粒子的运动方程。文献[3]研究了工业锅炉煤粉燃烧过程的微观模型, 通过煤粉燃烧

模型的求解来预测锅炉内碳的未燃尽量。文献[4]采用了多组不同原始尺寸的煤粉粒子的燃烧状况来反映炉膛内整个煤粉的燃烧过程。文献[5]只给出了传热模型, 直接回避了炉内煤粉燃尽率的计算问题。本文以上述文献为基础, 将煤粉燃烧过程适当地简化, 考虑了煤粉燃烧过程中的氧含量变化, 以单粒径煤粉粒子燃烧的等密度模型为基础, 推导出炉膛任一区域内煤粉燃尽率计算的一维集总参数模型, 该模型与传热模型相结合, 可以实现在无人工干预的条件下根据锅炉的运行参数自动计算出煤粉的燃尽率和燃烧放热量, 满足锅炉设计计算和实时仿真计算的需要。

2 数学模型

磨煤机磨制出来的煤粉粒径大小不一, 在这种不均匀粒径悬浮颗粒群中, 不同粒径组分的燃尽速率是不相同的。然而不可能将颗粒群中的某一粒度组分完全独立出来, 因为能提供给这一组分煤粉的氧气浓度取决于整个颗粒群的燃尽程度。为此, 必须同时考虑悬浮颗粒群中各个粒度组分的燃烧情况。在这以某一粒度直径的煤粉颗粒为例建立燃烧模型。实际的煤粉燃烧过程十分复杂, 必须作一些简化假设:

(1) 煤粉从燃烧器进入炉膛后发生快速热分解, 所有挥发分全部逸出并瞬时燃尽, 同时焦炭颗粒开始燃烧, 挥发分逸出时粒子的直径不发生变化;

(2) 焦炭的异相反应采用生成 CO_2 的整体效应, 其反应速度同时受动力燃烧和扩散燃烧共同控制;

(3) 焦炭粒子在运动、燃烧过程中密度保持不变, 焦炭粒子取为球形, 焦炭质量的损失反映为球形粒子尺寸的减小, 即所谓的等密度模型。

收稿日期: 2002-11-10; 修订日期: 2003-02-18

基金项目: 美国 TRAX 公司研究—Fossil Boiler Heat Transfer Formulation 基金资助项目 (RP0302-01)

作者简介: 张腾飞 (1978—), 男, 江西赣州人, 清华大学硕士研究生。

由假设式(1)可知, 煤粉燃烧过程主要取决于焦炭粒子的燃烧情况。由假设(2)描述焦炭粒子的燃烧速度:

$$K = \frac{\beta \cdot C}{(1/k_s) + (1/k_d)} \quad (1)$$

$$k_s = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

$$k_d = \frac{D \cdot Nu}{\delta} \quad (3)$$

式中: K 为焦炭粒子外表面的反应速度; β 为反应中焦炭消耗量与氧气消耗量的比值, 在完全生成 CO_2 的反应中, $\beta = 0.375$; C 为氧气浓度; k_s 为动力燃烧速度; k_d 为扩散燃烧速度; k_0 为频率因子; E 为焦炭氧化的活化能; R 为气体常数; T 为气流温度; D 为氧的扩散系数; Nu 为 Nusselt 数, 在认为焦炭粒子跟空气之间相对运动速度很小时可取为 2; δ 为某一组分焦炭粒子的直径。

燃烧过程中氧浓度 C 的关系式:

$$C = C_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{\alpha_{\text{ch}} - \eta_{\text{ch}}}{\alpha_{\text{ch}}} \quad (4)$$

式中: C_0 为焦炭燃烧初始氧浓度; T_0 为燃烧初始气流温度; T 为气流温度; α_{ch} 为燃烧开始时焦炭燃烧的过量空气系数; η_{ch} 为各个尺度焦炭粒子从初始时刻到该时刻的总燃尽率。

第 j 组粒径焦炭的燃烧率的变化速度为:

$$\frac{d\eta_{\text{ch},j}}{dt} = K \cdot A_j \quad (5)$$

式中: $\eta_{\text{ch},j}$ 为第 j 组焦炭粒子的燃尽率; A_j 为第 j 组粒径焦炭的总反应表面积。焦炭的总燃尽率有:

$$\eta_{\text{ch}} = \sum \eta_{\text{ch},j} \cdot m_j \quad (6)$$

其中: m_j 为第 j 组粒径焦炭的质量百分率。将式(1)~式(4)代入式(5)得:

$$\frac{d\eta_{\text{ch},j}}{dt} = \frac{2.25 C_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{(\alpha_{\text{ch}} - \eta_{\text{ch}})}{\alpha_{\text{ch}}} \cdot (1 - \eta_{\text{ch},j})}{\left(\frac{\hat{\varrho}_{j,0} \cdot \sqrt[3]{1 - \eta_{\text{ch},j}}}{2D} + \frac{1}{k_s}\right) \cdot \hat{\varrho}_{j,0} \cdot \sqrt[3]{1 - \eta_{\text{ch},j}} \cdot \rho_{\text{ch}}} \quad (7)$$

式中: $\hat{\varrho}_{j,0}$ 为第 j 组焦炭粒子燃烧初始时的粒径; ρ_{ch} 为焦炭粒子的密度。若认为 $\eta_{\text{ch},j}$ 的变化对 η_{ch} 的影响很小, 则可将上式积分:

$$\eta_{\text{ch},j} = 1 - \left[\frac{2D}{\hat{\varrho}_{j,0}} \times \left(\frac{\hat{\varrho}_{j,0} + \frac{\hat{\varrho}_{j,0}^2}{2D}}{k_s} - \frac{0.7 \hat{\varrho}_{j,0} \cdot C_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{\alpha_{\text{ch}} - \eta_{\text{ch}}}{\alpha_{\text{ch}}}}{\rho_{\text{ch}} \cdot D} \right) \right] \times$$

$$t - \frac{2D}{k_s \cdot \hat{\varrho}_{j,0}} \quad (8)$$

而焦炭粒子的燃尽时间为:

$$t_{\text{ch},j,\text{max}} = \frac{\rho_{\text{ch}}}{0.375 C_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{\alpha_{\text{ch}} - \eta_{\text{ch}}}{\alpha_{\text{ch}}}} \times \left(\frac{\hat{\varrho}_{j,0}}{2k_s} + \frac{\hat{\varrho}_{j,0}^2}{8D} \right) \quad (9)$$

考虑到煤粉挥发分进入炉内后瞬时燃尽, 因而炉内煤粉的燃尽率为:

$$\eta_c = 1 - (1 - \eta_{\text{ch}}) \cdot \frac{100 - V_{\text{ad}} - M_{\text{ar}}}{100} \quad (10)$$

式中: $\frac{100 - V_{\text{ad}} - M_{\text{ar}}}{100}$ 为煤粉中焦炭含量与煤粉质量的比值; V_{ad} 为煤粉中的挥发分含量; M_{ar} 为煤粉中的水分含量。

根据文献[6], 式(2)可由下式代替:

$$k_s = k_0 \cdot \exp\left[\frac{-E}{RT_{\text{ch}}} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{ch}}}{T_0}\right)\right] \quad (11)$$

其中: T_{ch} 为焦炭粒子的表面温度; k_0 可取为 100 m/s; T_0 为 2 600 K。根据文献[2] 氧的扩散系数近似为:

$$D = 2 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{T_g + T_{\text{ch}}}{2 \times 273.16}\right)^{1.75} \quad (12)$$

式中: T_g 为气流温度。由燃烧器进入锅炉的煤粉粒子粒径认为符合 Rosin-Rammler 关系式:

$$R(\delta) = 100 \cdot \exp\left[-\left(\frac{\delta}{\hat{\varrho}_c}\right)^n\right] \% \quad (13)$$

式中: $R(\delta)$ 为粒径大于 δ 的煤粉颗粒质量百分数; $\hat{\varrho}_c$ 为煤粉的特征粒径; n 为煤粉的均匀性指数, 取决于煤种磨煤机和分离器的结构, 由文献[7] 知, $n = 0.8 \sim 1.3$ 。

需要强调的是, 由式(7)可以看出, 煤粉的燃尽率跟炉内的温度是息息相关的, 温度会影响煤粉的燃尽率, 而由煤粉燃尽率所决定的燃烧释热量又影响炉内温度的分布。因而在模型求解时, 煤粉的燃烧模型需要跟炉内的传热模型联立起来, 在确定炉内的温度分布以后, 才能准确估算煤粉燃尽率。

3 计算实例

运用本模型对某电站 DG1025/18.3- II 4 型锅炉进行了模拟计算。该锅炉是亚临界自然循环汽包炉, 单炉膛、一次中间再热、平衡通风、悬吊露天布置、固态排渣、中间储仓式制粉系统、热风送粉; 燃烧器为直流四角布置、双切圆反向燃烧, 切圆直径为

Φ500 和 Φ700, 燃烧器分两组, 下面一组共有 7 层喷嘴, 上面一组共有 8 层喷嘴。锅炉主要结构尺寸见图 1。

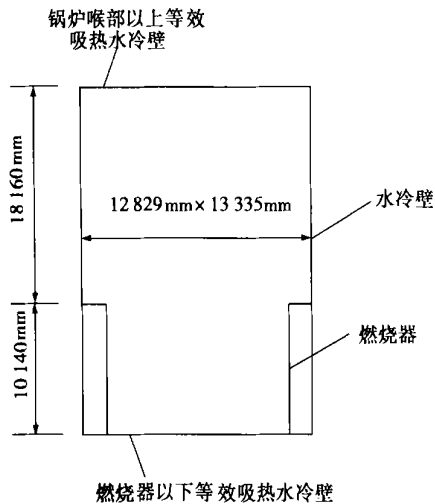


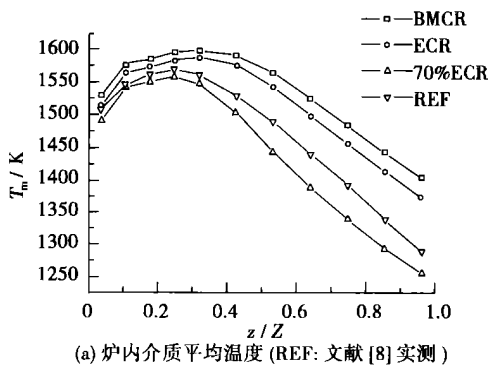
图 1 DG1025/18.3-II4 型锅炉模型主要结构尺寸

计算时, 燃烧器区域等分成 5 个区, 燃烧器以上区域等分成 6 个分区。煤粉粒子按照 Rosin-Rammler 关系式分成 16 组不同粒径, 最小粒径为 10 μm, 最大粒径为 160 μm, 煤粉均匀性指数取为 1.1, 特征粒径为 50.284 μm。焦炭氧化的活化能取为 90 kJ/mol, 焦炭的密度取为 1500 kg/m³。表 1 给出了锅炉在最大负荷 (BMCR)、额定负荷 (ECR) 和 70% 额定负荷 (70% ECR) 下的给煤量和送风量, 在 70% ECR 下, 燃烧器区域第 5 分区内的燃烧器被关掉, 因而该分区内的煤粉流量和空气流量为零。

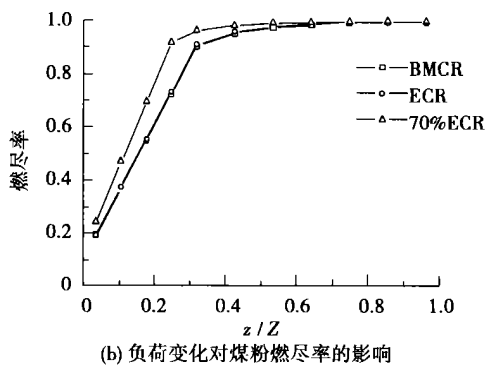
表 1 DG1025/18.3-II 型锅炉在不同负荷下的运行参数

区域编号	新燃料量 / kg·s ⁻¹			新空气量 / kg·s ⁻¹			
	BMCR	ECR	70% ECR	BMCR	ECR	70% ECR	
燃烧器	1.2, 3.4	8.208 34	7.412 22	6.485 70	①. 666 61	62.909 73	55.046 01
区域	5	8.208 34	7.412 22	0	①. 666 61	62.909 73	0

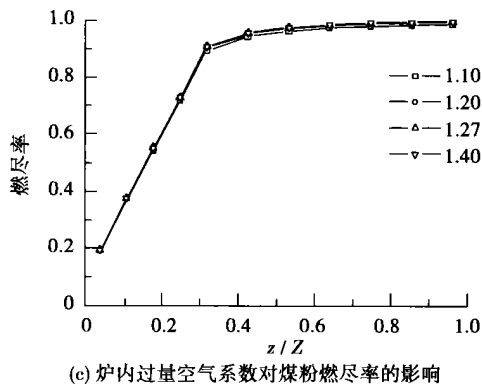
图 2 给出炉内煤粉燃烧沿炉膛高度方向上的仿真计算结果。需要说明的是, 图 2(a) 中的介质温度是炉膛横截面的平均温度, 这个温度不是炉膛中心线的温度, 而是整个截面的集总温度, (a) 中曲线是本模型与传热模型联立计算的结果, 曲线 REF 是文献 [8] 给出的 HG-670/140-6 型锅炉实测温度曲线, 可以看出实测曲线与 70% ECR 下的温度曲线比较接近, 而且炉内介质的温度随着负荷的减小而降低。



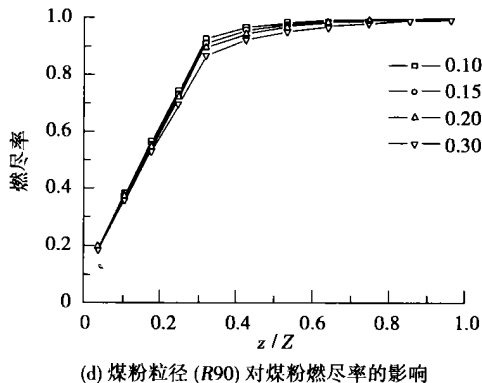
(a) 炉内介质平均温度 (REF: 文献 [8] 实测)



(b) 负荷变化对煤粉燃尽率的影响



(c) 炉内过量空气系数对煤粉燃尽率的影响



(d) 煤粉粒径 (R90) 对煤粉燃尽率的影响

图 2 煤粉燃烧仿真结果

图2(b)给出的是锅炉在三种负荷下的煤粉燃尽率,计算时炉内过量空气系数取1.27, R_{90} (煤粉颗粒大于90 μm 的百分比)取为15%。可以看出, BMCR与 ECR下的煤粉燃尽率变化不大,当锅炉以70% ECR运行时,由于第五层的燃烧器被关掉,火焰中心位置下移而且整个炉内介质温度下降,但介质在炉内的停留时间变长,燃烧反而更完全。

图2(c)给出了 ECR 负荷下,炉内过量空气系数对煤粉燃尽率的影响, R_{90} 取为15%。可以看出过量空气系数由1.1增加为1.4,顶部的煤粉燃尽率由0.986 95增加到0.998 52,煤粉燃尽率的增加并不明显,这是因为过量空气系数的增加虽然使氧浓度增加了,但是炉内烟气的流速也增大了,因而炉内介质温度下降,而且由于烟气流速的增加,焦炭颗粒在炉内的停留时间也缩短了。

图2(d)给出了 ECR 负荷下煤粉粒径对煤粉燃尽率的影响,炉内过量空气系数取为1.27。 R_{90} 是反映煤粉大颗粒百分比的参数,由于煤粉大颗粒的燃尽时间比较长,当 R_{90} 增大时,在相对高度达到0.85以前煤粉燃尽率较小,但随着燃烧时间的增加,大颗粒煤粉相继燃尽,到达炉膛顶部时的总燃尽率也相差不多。

表2给出了文献[9]中的燃料燃尽率经验数值,通过与图2(b)、(c)、(d)比较以及从图2(a)求解出的温度场来看,本模型的计算结果具有比较好的精度。

表2 沿炉膛高度的燃料燃尽率

燃料	相对高度		
	0.40	0.50	1.00
烟煤	0.96~0.98	0.98~0.99	0.98~0.995

4 结 论

(1) 本模型从煤粉粒子燃烧的宏观机理入手,

避开了繁琐的粒子运动微分方程,通过对燃烧过程的适当简化,给出了计算煤粉燃尽率的显式方程。

(2) 煤粉的燃烧速度主要取决于燃烧时的介质温度,氧气浓度以及初始粒径尺寸和焦炭的活化。

(3) 该模型编制的计算程序可用于各种电站煤粉锅炉的燃烧计算,可通过改变进入炉膛的燃料量和空气量来模拟锅炉在不同运行负荷下的燃烧过程。

在此感谢清华能源仿真公司的陈泽荣老师提供的工程资料和解答具体的工程实际问题。

参考文献:

- [1] FAN JIANREN, QIAN LIGENG, MA YINLIANG, *et al.* Computational modeling of pulverized coal combustion processes in tangentially fired furnaces [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2001, 81: 261-269.
- [2] 任安禄, 谢定国. 切圆燃烧锅炉内煤粉燃烧过程的数值模拟—等密度模型和等直径模型[J]. *力学学报*, 1994, 26(3): 356-367.
- [3] FIVELAND W A, JAMALUDDIN A S. An efficient method for predicting unburned carbon in boilers [J]. *Combustion Science and Technology*, 1992, 81: 147-167.
- [4] 董 芑, 洪 梅, 秦裕琨. 大型煤粉锅炉炉膛传热工程化三维数值计算方法及其应用[J]. *动力工程*, 2000, 20(2): 606-610.
- [5] 陈立甲, 王子才, 朱群益. 电站锅炉燃烧系统仿真模型的建立[J]. *热能动力工程*, 2001, 16(3): 308-310.
- [6] 周力行, 陈文芳, 林文漪. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [7] 林宗虎, 徐通模. 实用锅炉手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [8] 秦裕琨. 炉内传热[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [9] 韩小海, 赵宗让, 章明川. 电站锅炉炉膛传热过程数学模型及模拟计算[J]. *中国电机工程学报*, 1997, 17(1): 18-22.
- [10] 韩才元, 徐明厚. 煤粉燃烧[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

(渠 源 编辑)

欢 渡 国 庆 佳 节

变频调速技术的发展及其在电力系统中的应用 = **Development of Frequency Conversion-based Speed Governing Technology and Its Application in Electric Power Systems** [刊, 汉] / ZHANG Cheng-hui, CHENG Jin, XIA Dong-wei, et al (Institute of Control Science & Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 439 ~ 444

An overview of the development history and present status of frequency conversion-based speed governing technology is given from the standpoint of the use of electric power semiconductors, control technology and main circuit topology structures, etc. The main control techniques of the above-cited speed governing method are concisely described. An analysis is given of the development dynamics of high-voltage frequency conversion-based speed governing technology with the technical features of its several schemes now in use being compared. On the basis of the above the development tendency of the speed governing technology under discussion is outlined. In conclusion, its application aimed at energy conservation, technology and control performance enhancement is described. **Key words:** frequency conversion-based speed governing technology, vector control, AC motor, PWM (pulse width modification) technology, electric power system

煤粉燃烧一维温度分布可视化模拟研究 = **Simulation Study on the Visualization of One-dimensional Temperature Profiles in a Pulverized Coal-fired Boiler Furnace** [刊, 汉] / LI Li, JIANG Zhi-wei, LOU Chun, et al (State Key Laboratory on Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 445 ~ 449

Infrared thermal image devices currently available can only provide accumulative temperature images of a flame during the monitoring of the latter without the ability to present any information concerning the inner temperature distribution of the flame. Under certain conditions the local combustion process specific to a pulverized coal-fired boiler furnace can be approximated to a one-dimensional object. By using two probes for taking the picture of flame images respectively from two openings on a furnace wall and through the adoption of image processing techniques and radiation transmission principles a one-dimensional temperature distribution can be reconstructed between the two probes. With respect to two kinds of typical temperature profile and by the use of two kinds of flame monitoring mode a simulation study for each kind was respectively conducted. The simulation results indicate that a good reproduction effect of the temperature profiles can be achieved if flame detectors are mounted at an appropriate picture-taking angle, thus testifying to the significant usefulness of the method proposed by the authors. **Key words:** pulverized coal combustion, reconstruction of a temperature field, flame image processing

炉内煤粉燃烧一维数学模型及其仿真 = **One-dimensional Mathematical Model and Relevant Simulation for Pulverized Coal Combustion in a Boiler Furnace** [刊, 汉] / ZHANG Teng-fei, LUO Rui, REN Ting-jin, et al (Thermal Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 450 ~ 453

The combustion mechanism of pulverized coal particles was studied with pulverized-coal burning process in the most complex combustion zone of a furnace serving an object of research. On this basis a one-dimensional macroscopic model featuring pulverized coal combustion along the furnace height was set up to accurately calculate the burn-off rate of the pulverized coal in the furnace. Through a rational simplification of the combustion process of volatile matter and coke in the pulverized coal the model has taken into account the variation of oxygen content during the pulverized-coal combustion. With the iso-density model of a single pulverized-coal particle combustion serving as a basis an integral process of pulverized coal combustion is reflected through the combustion process of pulverized coal of various particle diameters. Thus, a formula for calculating the burn-off rate of pulverized coal in a furnace has been developed, meeting the requirements of real-time simulation computations. The results of simulation calculations are analyzed and found to be in good agreement with measured data and those given in current literature. **Key words:** pulverized coal combustion, isodensity model, macroscopic model, real-time simulation

气固两相透平内颗粒湍流扩散的 Lagrange 数值模拟 = **Lagrangian Numerical Simulation of Particle Turbulent**