

电站锅炉炉膛传热数值计算方法的研究

——反应器网络综合模型

韩小海 章明川

(电力部热工研究院)

[摘要] 文中介绍一种适合于工程应用的电站锅炉炉膛三维传热值计算的反应器网络综合模型;编制了煤粉炉膛三维综合燃烧——传热过程计算程序;通过若干不同设计和运行工况的计算,显示和验证了模型的基本功能,并得到了一些有意义的结论。

关键词 炉膛传热 数学模型 煤粉燃烧 反应器网络

分类号 TK224.12 TP301.6

0 前言

随着人们对大型电站锅炉运行的经济性和安全性以及污染物质排放量的要求不断提高,迫切需提高炉膛传热计算精度以及更详细地了解炉内工况。数学模化计算方法是解决这一问题的良好途径。电站锅炉炉内同时进行着流动、燃烧及辐射传热三大复杂的物理化学过程,模拟计算必须同时考虑这三大过程,才能达到较高的准确性和实用性。

辐射传热具有相对成熟的数学模型,包括经典区域法, Monte-Carlo法,离散传递法以及通量法等,本文作者提出一种称为“假想面有效辐射分析法”模型^[1],该方法证明能为灰体系统提供满足工程应用的数学描述和计算精度,并具有方法简明,计算量小的优点。

关于煤粉燃烧过程和燃烧模型,包括热

解、挥发份燃烧及焦炭燃烧,国内外都进行了大量的理论和实验研究。应用这些研究结果,在流场已知的情况下即可计算出炉内发热率分布。但由于流动模型的不成熟以及方法复杂程度的限制,流场计算要达到工程应用的程度还有较大距离。这一点也是综合传热过程计算的主要困难。

本文的直接目标是解决炉内传热问题,为此,对炉内流动过程作了一种简化处理,应用了化学反应工程上的反应器模型方法。对于两种理想化的极端情况——柱塞流反应器(PFR)和均匀混合反应器(WSR),都有完整的理论处理方法。而一个复杂的真实反应器,可以通过测定其停留时间分布(RTD),用两种简单反应器的某种组合——反应器网络来模拟。反应器模型方法虽然不能给出流动场的细节,但许多研究者的工作表明,将其用于描述燃烧室总体性能,计算诸如燃烧效率,温度场及浓度场分布等是非常有效的^[2,3]。

1 炉内宏观流动的简化反应器网络模型

两种典型的理想反应器 PFR和 WSR具有截然不同的 RTD特性,其 RTD函数分别为:

$$F(t) = \begin{cases} 0 & t < \bar{t} \\ 1 & t \geq \bar{t} \end{cases} \quad (1)$$

$$F(t) = 1 - \exp(-t/\bar{t}) \quad (2)$$

$F(t)$ 为停留时间小于 t 的流体份额, \bar{t} 为平均停留时间。一个真实反应器的 RTD特性则可以通过示踪实验测得

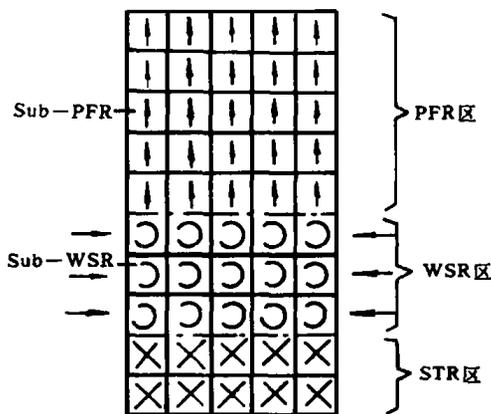


图 1 炉膛模拟反应器网络示意图

分析认为,对于实际电站炉膛内部的宏观流动及相应的燃烧过程,可以用 WSR和 PFR的串联网络进行总体描述。在燃烧器区域,气流的冲撞、卷吸、点燃膨胀以及旋转火焰的形成,都引起该区域迅速强烈的湍流混合,从而具有 WSR的流动特性。燃烧器区域上方,烟气大尺寸湍动迅速减弱,返混基本消失,整体气流趋于均匀平稳,可用柱塞流动简化描述。冷灰斗部分可近似当作反应器死滞区 (STR),不参与流动和燃烧。炉膛内 STR、WSR、PFR三部分的确切比例则由 RTD 的实测结果计算得到。简化的方形炉膛划分区

域后形成的反应器网络如图 所示

2 炉膛综合燃烧传热模型

2.1 煤粉燃烧模型

本文所建立的反应器网络燃烧模型主要包括如下几个部分计算模型:

2.1.1 煤粉粒径分布与气流停留时间确定

原始煤粉粒度假设服从 Rosin-Ramm-ler 分布。子反应器中流体的停留时间由 RTD 函数确定。计算模型中需将煤粉粒径和停留时间分成若干离散组份。原始煤粉在经过 WSR 的燃烧后将有新的粒径分布,因此,在进入 PFR 计算之前,需重新进行粒径分组。

2.1.2 煤粉颗粒升温速率计算

煤粉颗粒的升温速率是其热解过程的影响因素之一。在均匀混合流的特定条件下,由颗粒能量平衡方程得到的瞬时升温速率为:

$$dT_p/dt = 6X_e(T_c^4 - T_p^4)/(d_c d) \quad (3)$$

式中: T_R 、 T_C 分别为颗粒及环境气体温度, d 为颗粒粒径。

2.1.3 煤粉热解计算及挥发份燃烧

本文采用 Anthony 提出的活化能服从正态分布的无穷级平行反应热解模型:^[4]

$$V = V_\infty \left[1 - \int_0^\infty \exp\left(-\int_0^t K(E) dt\right) F(E) dE \right] \quad (4)$$

$$F(E) = \frac{1}{2\sigma c} \cdot \exp\left[-(E - E_0)^2 / 2\sigma^2\right] \quad (5)$$

$$K(E) = K_0 \exp(-E/RT_p) \quad (6)$$

式中 K 、 V_∞ 分别为 t 时刻挥发份释放率和最大释放率, $F(E)$ 、 $K(E)$ 分别为活化能为 E 的热解反应的概率密度和速度系数

分析认为,本模型中可以忽略挥发份的燃尽时间。但由于挥发份的释放和燃烧过程要阻碍氧气向颗粒的扩散,所以本文假定当

热解过程基本完成后,焦炭燃烧才开始进行。

2.1.4 焦炭颗粒燃烧计算

在炉膛温度条件下,忽略颗粒表面灰层影响,得到焦炭颗粒燃烧基本方程:

$$q = K P_{O_2} \quad (7)$$

$$K = 1 / (1 / K_s + 1 / K_D) \quad (8)$$

$$K_s = K_0 \exp(-E / RT_F) \quad (9)$$

$$K_D = 24bD / (R' T_{Md}) \quad (10)$$

q 为颗粒单位表面积碳消耗率, K_s K_D K 分别为表面反应速度系数,扩散反应速度系数和总体反应速度系数。颗粒温度 T_F 由颗粒与环境气体的热平衡关系确定。

2.1.5 反应器(区域)中的煤粉燃烧计算

煤粉在反应器中的挥发份释放量和焦炭消耗量分别等于各种粒径、各种停留时间煤粉热解量和焦炭消耗量之和:

$$Mv = \sum_i \sum_j (V_{ij} R_i F_j) \quad (11)$$

$$Mc = \sum_i \sum_j (U_{ij} R_i F_j) \quad (12)$$

式中 V U 分别为煤粉热解率和焦炭燃尽率, i, j 分别表示粒径组和停留时间组序数, ij 表示粒径在第 i 组停留时间在第 j 组的煤粉组。 R_i F_j 分别为第 i 组和第 j 组煤粉的质量份额。 V_{ij} 按式(4)~(6)计算, U_{ij} 由下式计算(恒密度燃烧方式):

$$U_{ij} = 1 - [1 - 2K_i P_{O_2} T_{ij} / (dd_i)]^3 \quad (13)$$

式中 t_{ij} 为 ij 组份焦炭的净燃烧反应时间。

2.1.6 烟气介质的辐射减弱系数

本模型中根据煤粉燃烧计算所得到的固体颗粒群浓度和三原子气体浓度计算炉内烟气的减弱系数分布。

2.2 假想面有效辐射分析法辐射传热模型

如图 2 所示, (A) (B) (C) (D) (E) 为气体区域。假定通过区域假想边界的辐射热流具有漫分布特性, 则 (A) 领域中真实边界面 S 和假想边界面 l 的有效辐射(向区域内

侧) 分别用下式表示:

$$J_{S(A)} = X E_{BS} + (1 - X) \left[E \overline{SS}_{iS(A)} J_{i(A)} + \overline{GS}_{S(A)} E_{BG(A)} \right] \quad (14)$$

$$J_{l(A)} = \sum_{K=B, C, D, E} \frac{E \overline{SS}_{il(K)} J_{i(K)} + \overline{GS}_{l(K)} E_{BG(K)}}{E} \quad (15)$$

式中下标 i 表示体域各边界面, $J_{i(K)}$ 为某 K 域中边界面 i 的有效辐射, E_{BS} 为表面 S 的黑体辐射强度, $E_{BG(K)}$ 为某 K 域介质的黑体辐射强度, $\overline{SS}_{il(K)}$ 为某 K 域的边界面 i 对 l 面的直接交换面积, $\overline{GS}_{l(K)}$ 为某 K 域介质对 l 面的直接交换面积, X 为壁面黑度。

对所有区域的真实和假想边界面都可分别列出类似式(14)和式(15)的方程式, 组成封闭的方程组。用迭代法可求出在一定温度分布下各区域边界面的有效辐射值。然后用下式分别计算各面积区域和体积区域的辐射换热热量:

$$Q_{RS} = \frac{X}{1 - X} (J_S - e T_s^4) \quad (16)$$

$$Q_{GS} = \frac{1}{V} \sum_i \left[\overline{GS}_i (T_i - e T_g^4) \right] \quad (17)$$

式中下标 S G 分别表示面域和体域, \overline{GS}_i 为体域介质对其边界面 i 的直接交换面积, T_s T_g 分别为壁面温度和气体温度, V 为体域体积。

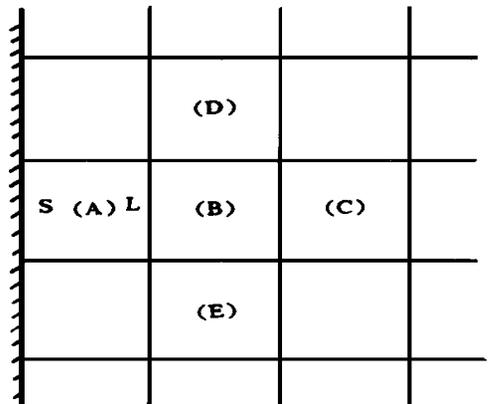


图 2 假想面有效辐射分析辐射传热

最后, 将所求有关各项代入壁面区域和

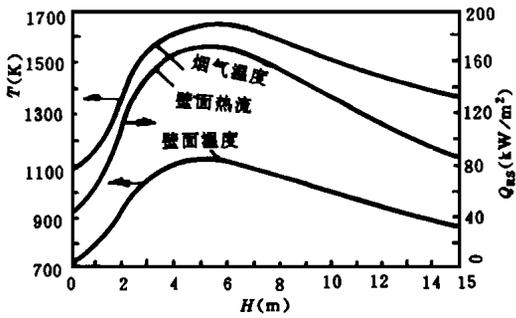


图 3 烟气温度、壁面温度
壁面热流沿炉膛高度分布

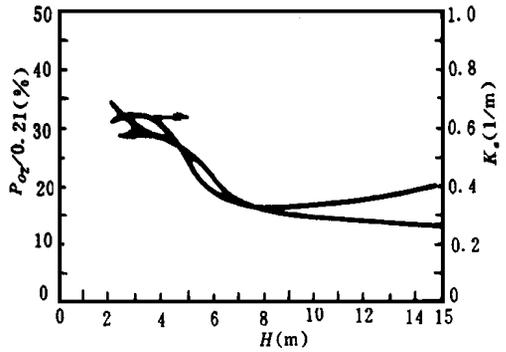


图 5 氧气分压及减弱系数沿炉膛高度分布

体积区域的热平衡方程,用迭代法联解各区域热平衡方程组成的方程组,可得到炉内温度场和壁面热流场。计算中还得到燃尽率、减弱系数及氧分压等参数的炉内分布。

3 计算结果分析及结论

本文以简化的方形炉膛 (7m×6m×15m)为对象,在不同燃料特性及炉膛设计和运行参数条件下,进行了若干工况的计算。图3~图5是计算结果的一个例子,其网格划分为7×6×15,STR/WSR/PFR比例为2/3/1

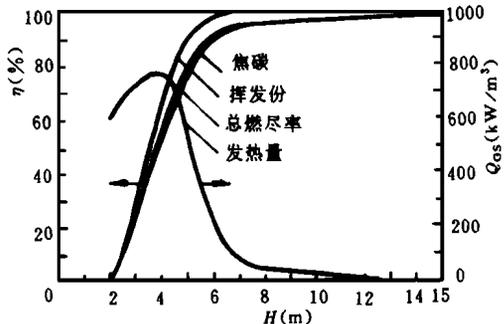


图 4 燃尽率和燃烧发热量沿炉膛温度分布

10,容积热负荷为 186 kW/m³,燃用典型贫煤。图6和图7为燃用煤种对炉内工况的影响。可以看到,设计燃用贫煤的炉膛,改烧烟煤时

燃烧和传热效率略有提高,而改烧无烟煤时炉内工况急剧恶化, q₄损失和炉膛出口温度大幅度提高,燃烧和传热都明显变差。

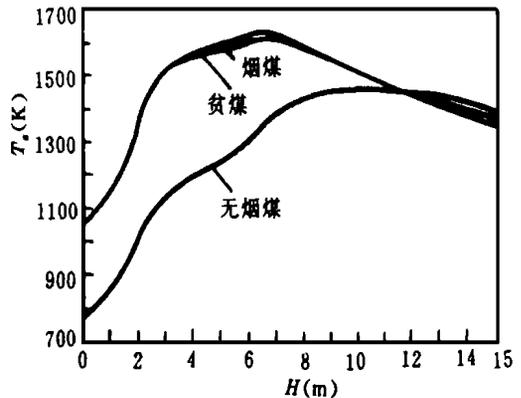


图 6 煤种对炉内温度分布的影响

图8给出了在燃用无烟煤的条件下,WSR部分比例变化对炉膛性能的影响。可以看到,只有在一定的WSR比例范围内,炉膛的燃烧及传热效率才能同时达到最佳,可见该比例是炉膛设计的一个重要特性参数。

此外,关于过剩空气系数、煤粉粒度及分散性指数、壁面热阻、进口风温等运行参数以及炉膛形状和加设卫燃带对炉内工况的影响,本模型的预报与理论分析及现场实际运行经验均符合良好。

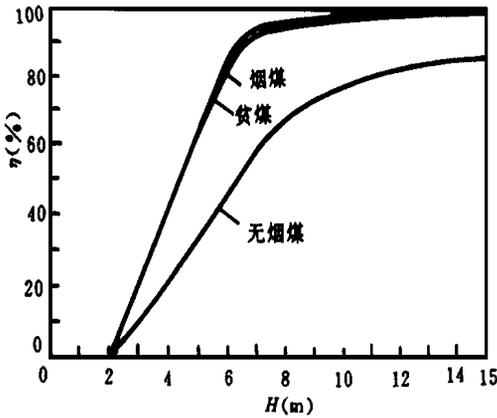


图 7 煤种对炉内燃尽率分布的影响

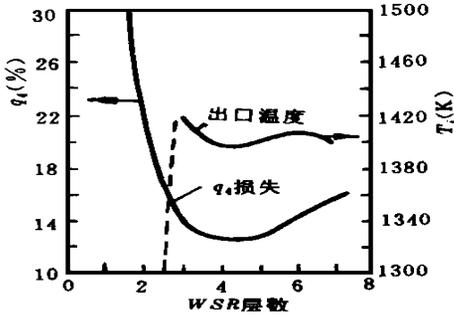


图 8 WSR层数对炉膛 q_1 损失和出口温度的影响(无烟煤)

总之,应用本文建立的反应器网络燃烧传热综合模型,计算可给出包括烟气温度、壁面温度、壁面热流、煤粉燃尽率、氧气分压、烟气减弱系数等参数的炉内分布或沿程变化等炉内工况信息。模型功能及所给出的初步计算结果令人满意。

参考文献

- 1 赵宗让,章明川.三维辐射传热计算的假想边界面有效辐射分析法模型.工程热物理第六届年会论文,1988
- 2 Beer. The effect of the residence time distribution on the performance and efficiency of combustion. The 10th Symp. (Inter) on Combust. 1985
- 3 Poll. Combustor Modelling. The Second Symp (Inter) on Air Breath Engin. 1974
- 4 Anthony, at al. Rapid devolatilization of pulverized coal, The 15th Symp (Inter) on Combust. 1975

作者简介 韩小海 1966年生,工学硕士,工程师。1985年毕业于西安交通大学锅炉专业。1993~1999年期间在联邦德国斯图加特大学进修学习。主要从事燃烧过程数值模拟计算研究和电站锅炉燃烧及相关技术的工程应用工作。通讯处:71003西安市兴庆路80号 (复 编)

工程消息

我国又建燃机电站

据“Gas Turbine World”1997年5-6月号报道,中国石油技术开发公司正在车尔勒市为塔里木石油化工厂建造一套110 MW联合循环装置。库尔勒市位于新疆中部。

GEC Alstom已接受了全额超过2100万英镑的订单,设计并建造标准化的“VEGA”206联合循环电站。设备包括2台Frameb型燃气轮发电机组,2台余热锅炉,1台TM2型汽轮发电机组、辅助设备和电站配电控制系统。

库尔勒市燃机电站计划于1998年10月投入正式的联合循环运行。

位于四川成都的中美合作成都爱华燃气轮机电力公司计划在今年下半年运行1台额定功率为50 MW的FT8双联机组,作为调峰电站向当地电网供电。该燃气轮机将以馏出油作为燃料。

(思娟 供稿)

zhang (Central China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. 01998, 13(1). - 19~ 22

Through a simple "input-output" relationship the ascertainment of pulverized coal flow flame stability is attempted. With the selected "input" parameter serving as the initial condition of a primary air operating regime the ascertainment criteria are made forthright and rational. A heat balance model based on the use of a return flow zone lumped parameter method has been established in order to solve for the primary air pulverized coal concentration, air speed and air temperature essential for the assurance of flame stability. The reliability of the model is verified by employing the hot-state experimental results of a single angle pulverized coal boiler. **Key words** flame stability, ascertainment criteria, model of lumped parameter method

几种常见锅炉事故的机理分析 = (An Analysis of the Underlying Causes for Several Kinds of Common Boiler Failures) [刊, 中] / Kuang Pingjian, Wu Qingyu, Gao Yukuan (Boiler & Pressure Vessel Inspection under the Harbin Municipal Labor Bureau) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 28~ 13

电站锅炉炉膛传热数值计算方法的研究 = (The Study of Furnace Heat Transfer Numerical Calculation Methods for Utility Boilers) [刊, 中] / Han Xiaohai, Zhang Mingchuan (Thermotechnical Institute under the Ministry of Electrical Power) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6). - 23~ 27
The present paper deals with a reactor network comprehensive model for the engineering use-oriented three-dimensional heat transfer numerical calculation of utility boiler furnaces. Prepared are three-dimensional comprehensive combustion-heat transfer process computational programs for pulverized-coal furnaces. Through the calculation of several different design and operating conditions the basic functions of the model are displayed and verified with some meaningful conclusions being obtained. **Key words** furnace heat transfer, mathematical model, pulverized coal combustion, reactor network

大型中温热管性能的试验研究 = (Experimental Study of the Performance of Large-sized Medium-temperature Heat Pipes) [刊, 中] / Yao Shouguang, Peng Dongsheng, Zhu Deshu (East China Shipbuilding Institute), Zhang Jianxun, Zhang Shuzhao, Mei Guozhong (Heat Pipe Research Institute of Jiangsu Xin Yuan Group Co.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6). - 32~ 36

Performance tests have been carried out with respect to some large-sized medium-temperature heat pipes filled with two kinds of new working mediums. On the basis of an analysis of the test data compared are the start-up and heat transfer characteristics of these two types of heat pipes. It has been found that in the medium-temperature range of 250~ 400°C there exists a marked difference in heat transfer performance between the heat pipes filled with these two different types of working mediums.

Key Words medium-temperature, heat pipe, performance

某大型综合补给船的自动电站系统 = (The Automated Power Station System of a Large-sized Comprehensive Replenishment Ship) [刊, 中] / Zheng Ziqian, Li Qiao (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 37~ 39

This paper deals with the basic configuration and functions of an automated power station system for a large-sized comprehensive replenishment ship. **Key words** automated power station, replenishment ship

1021 t/h 煤粉锅炉高温炉管改造方案设计 = (Modification Design of High-temperature Boiler Flue Gas Tubes for a 1021 t/h Pulverized Coal-fired Boiler) [刊, 中] / Xing Changwen (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 40~ 42

Based on the technical scheme design of high-temperature flue gas tubes of a 1021 t/h pulverized coal-fired utility boiler the author gives an analysis of the causes of the cited boiler tube failures during boiler operation.