

烟气循环流化床床内温度的红外热诊断研究

曹春梅, 赵毅, 许佩瑶
(华北电力大学, 河北 保定 071003)

摘要: 烟气循环流化床床内温度对烟气同时脱硫脱硝的进程和效率起着至关重要的作用, 利用红外热诊断技术方法, 建立了基于流化床外表面红外测温结果的床内热烟气温度的双层红外热诊断理论模型及不确定度分析模型。

关键词: 红外热诊断; 烟气循环流化床; 床内温度

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Infrared Thermodiagnosis of the Temperature in a Flue Gas Circulating Bed

CAO Chun-mei, ZHAO Yi, XU Pei-yao
(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The temperature in a flue gas circulating bed is important when experiment and mechanism on simultaneous desulfurization and denitrification from flue gas are studied. Making use of infrared thermodiagnosis, a theory model is established based on the infrared temperature measuring.

Key words: infrared thermodiagnosis; flue gas circulating bed; temperature

1 引言

燃煤排放的高温热烟气(120 ~ 210℃)中含有大量 NO_x 和 SO_x 等的有害物质,须经脱硫脱硝后才能排入大气中。在烟气循环流化床上进行模拟烟气的脱硫脱硝实验时,烟气温度对床内脱硫脱硝反应的进程和效率起着至关重要的作用^[1-2],因此在脱硫脱硝过程中及时在线监测床内烟气温度量值是十分必要的。红外测温是一种基于红外辐射原理而形成的非接触式测温技术,而红外热诊断则是基于热传导反问题求解的由表及里、由外而内的诊断技术^[3]。利用该技术结合相应导热反问题的求解可由烟气循环流化床反应器外壁面温度反推出其内部烟气温度,进而对床内脱硫脱硝反应进行实时监测

和控制。由于烟气循环流化床一般是由主体材料外覆保温材料构成的筒状设备,因而这实际上构成了双层筒状结构设备的红外热诊断问题。

2 烟气循环流化床反应器简化模型

实验用烟气循环流化床反应器主体内直径为250mm,厚为2cm,高为4100mm,表面包裹一层5cm厚的保温材料,其简化的横截面俯视图为图1所示的双层圆筒结构。该结构几何条件和换热条件如

基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划项目(No. 07786720D)资助。

作者简介: 曹春梅(1965-),女,教授,在读博士,从事物理教学工作,主要研究方向为红外热诊断在工程实际上的应用和大气污染控制。E-mail: caochunmeihd@sohu.com

收稿日期: 2007-11-26

下:结构由内层和外层构成,其中, S_1, S_2 和 S_3 为双层圆筒结构由内而外的三个分界面,其半径分别为 r_1, r_2 和 r_3 。根据实际的工况, S_3 面与温度为 T_∞ 的周围环境自然对流换热,换热系数恒定为 h_2 ,并且该面温度可由红外扫描测温获得。 S_2 面为双层结构内外层之间的交界面,设其接触热阻为 $\frac{1}{h_1}$ 。 S_1 面是直接与热烟气接触的内表面,假定其具有恒定的温度 T_0 ,忽略烟气与该面的对流辐射换热,则该温度是需及时在线实时监测的烟气温度。 S_1 和 S_2 之间构成内层,其热传导系数为 k_1 ,温度场为 T_1 , S_2 和 S_3 之间构成外层,其热传导系数为 k_2 ,温度场为 T_2 。

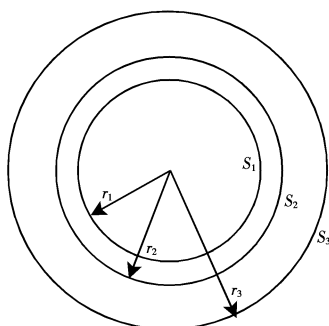


图1 烟气循环流化床反应器简化的横截面俯视图

3 基本原理

根据实验用烟气循环流化床反应器主体直径与高的比例关系,可忽略床内热烟气的轴向导热和温度变化,并假定内外层材料的物性各向同性不随时间变化,且内部无热沉积,热烟气流动为稳态无湍流时,则内外层结构温度场的描述方程为一维稳态拉普拉斯方程。

3.1 外层结构的温度场 T_2

为了在线实时获得床内热烟气的温度 T_0 ,首先利用已知的边界条件,求解外层结构的温度场 T_2 。采用柱坐标系,外层结构温度场 T_2 满足下列方程和定解条件:

$$\text{控制方程: } \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T_2}{\partial \rho} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\text{定解条件: } -k_2 \frac{\partial T_2}{\partial \rho} = h_2 (T_2 - T_\infty) \quad (2)$$

$$\rho = r_3 \quad (S_3 \text{ 面与环境之间的对流换热条件})$$

$$T_2 = T'_2 \quad \rho = r_3 \quad (S_3 \text{ 面附加的红外测温条件}) \quad (3)$$

$$-k_{21} \frac{\partial T_2}{\partial \rho} = h_1 (T_1 - T_2) \quad \rho = r_2 \quad (4)$$

其中, k_{21} 为双层结构内外层之间交界面上的导热系数,该值的合理选择基于两种材料交界面处热流量的关系,采用文献[4]推荐使用的两种不同材料导热系数 k_1 和 k_2 的调和平均值作为二者交界面处的

近似值,即取 $k_{21} = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}$ 。式(1)的通解为:

$$T_2 = A + B \ln \rho$$

结合定解条件(2)和(3)解出:

$$A = T'_2 + Bi_2 (T'_2 - T_\infty) \ln r_3$$

$$B = -Bi_2 (T'_2 - T_\infty)$$

式中, $Bi_2 = \frac{r_3 h_2}{k_2}$ 称为毕渥数。则外层的温度场表示为:

$$T_2(\rho) = T'_2 + Bi_2 (T'_2 - T_\infty) \ln \frac{r_3}{\rho} \quad (5)$$

取 $\rho = r_2$,可得外层内表面的温度为:

$$T_2(r_2) = T'_2 + Bi_2 (T'_2 - T_\infty) \ln \frac{r_3}{r_2} \quad (6)$$

而外层内表面的温度梯度为:

$$\left. \frac{\partial T_2(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=r_2} = \frac{-Bi_2 (T'_2 - T_\infty)}{r_2} \quad (7)$$

结合式(4)得到:

$$T_1(r_2) = \frac{k_{21} \partial T_2(r_2)}{h_1 \partial \rho} + T_2(r_2) \quad (8)$$

即为内层外表面的边界条件。

3.2 内层结构的温度场 T_1

柱坐标系下,内层结构温度场 T_1 满足下列方程和定解条件:

$$\text{控制方程: } \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T_1}{\partial \rho} \right) = 0 \quad (9)$$

$$\text{边界条件: } -k_{21} \frac{\partial T_1}{\partial \rho} = h_1 (T_1 - T_2) \quad \rho = r_2 \quad (10)$$

$$T_1(r_2) = -\frac{k_{21} \partial T_2(r_2)}{h_1 \partial \rho} + T_2(r_2) \quad \rho = r_2 \quad (11)$$

式(9)的通解为:

$$A_1 = A' + B' \ln \rho \quad (12)$$

结合定解条件(10)和(11)解出

$$A' = T'_2 + Bi_2(T'_2 - T_\infty) \ln r_3 + \frac{k_{21}Bi_2(T'_2 - T_\infty)}{h_1r_2}$$

$$B' = -Bi_2(T'_2 - T_\infty)$$

则内层的温度场为:

$$T_1(\rho) = T'_2 + Bi_2(T'_2 - T_\infty) \ln \frac{r_3}{\rho} + \frac{k_{21}Bi_2(T'_2 - T_\infty)}{h_1r_2} \quad (13)$$

取 $\rho = r_1$, 可得内层内表面的温度为:

$$T_1(r_1) = T'_2 + Bi_2(T'_2 - T_\infty) \ln \frac{r_3}{r_1} + \frac{k_{21}Bi_2(T'_2 - T_\infty)}{h_1r_2} \quad (14)$$

在热烟气与内层内表面恒温的条件下, 式(14)即给出了热烟气的温度, 显然在烟气循环流化床反应器几何参数和物性恒定的情况下, 这一温度仅取决于外层外表面 S_3 的温度 T'_2 , 亦即 S_3 面附加的红外扫描测温条件。因此给定环境温度和材料物性及几何尺寸, 基于红外热诊断技术, 根据外表面的红外测温结果, 可对双层筒状设备如烟气循环流化床反应器内热烟气温度进行实时在线监测。

3.3 内层内表面温度 $T_1(r_1)$ 的不确定度分析

当流化床保温层外表面进行红外扫描测温时, 考虑到存在一定的测量误差和仪器误差, 总的误差影响用不确定度 $\Delta T'_2$ 表示, 则由式(14)可知, 表面温度的不确定性引起的内层内表面温度的不确定度为:

$$\Delta T'_1(r_1) = (1 + Bi_2 \ln \frac{r_3}{r_1} + \frac{k_{21}Bi_2}{h_1r_2}) \Delta T'_2 \quad (15)$$

二者成线性正比关系, $\Delta T'_1(r_1)$ 相对于 $\Delta T'_2$ 产生了放大增值, 这是所不希望的, 和需尽量消除或减小的。由式(15)可知, 双层结构相对于单层结构^[5]增加了 $\Delta T'_1(r_1)$ 的放大增值量 $\frac{k_{21}Bi_2}{h_1r_2} \Delta T'_2$, 减小这一量值除了考虑文献[5]提到的优化方法外, 由于该量与内外层交界面间的接触热阻 $\frac{1}{h_1}$ 成反比, 故可在内层外壁涂敷一薄层(不计厚度)与内层或外层材料接触热阻较大的物质, 再外包保温材料, 可起到减小 $\Delta T'_1(r_1)$ 增值的作用。

4 结 论

红外热诊断技术在生产实践和科学研究中已彰显出其优势和进一步发展趋势^[6~9], 但该领域的基础理论研究仍较落后, 成为制约红外热诊断技术水平迅速发展的主要原因之一。文章根据实验用烟气循环流化床实际的工况建立了反应器的双层简化几何模型和条件模型, 给出了热烟气与内层内表面等温条件下, 基于外表面红外测温结果的热烟气温度的红外热诊断理论模型, 对于实时在线监测床内化学反应, 及时了解床内脱硫脱硝进程并进行控制提供了依据, 同时将已深入讨论的单层模型的红外热诊断问题发展为更接近实际的双层模型的红外热诊断, 开拓了红外热诊断技术的应用范围和前景, 有利于促进红外技术的快速发展。

参考文献:

- [1] 赵毅, 许佩瑶, 孙小军, 等. 烟气循环流化床同时脱硫脱硝试验及机理研究[J]. 中国科学: B 辑, 2006, 36(5): 439 - 448.
- [2] Zhaoyi, Xupeiyao, Sunxiaojun, et al. Experimental and mechanism study on simultaneous desulfurization and denitrification from flue gas using a flue gascirculating bed [J]. Science in China Ser. B, 2007, 50(1): 135 - 144.
- [3] 陈衡, 侯善敬. 电力设备故障红外诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 367 - 400.
- [4] 帕坦卡, S V. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政, 译. 北京: 科学出版社, 1984: 46 - 67.
- [5] 张成义, 陶纯堪, 李传起, 等. 红外测温法确定圆柱内壁温度的误差分析和优化研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(7): 656 - 660.
- [6] 仲跻生, 陈大喜, 张立华. 加热炉炉管的红外热像监测方法研究[J]. 激光与红外, 2003, 33(1): 54 - 56.
- [7] 曹春梅, 张晓宏, 陈衡. 基于红外测温的方形热设备内壁温度的推算[J]. 激光与红外, 2004, 34(1): 30 - 31.
- [8] 范春利, 孙丰瑞, 杨立管. 壁减薄的红外检测方法研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(6): 452 - 454.
- [9] 曹春梅. 圆筒内壁热流密度和对流换热系数的红外热诊断研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(7): 658 - 660.