

文章编号: 1672-8785(2013)02-0044-05

锅炉炉墙耐火砖出现裂纹时的 红外温度场分析

周国强 杨立 范春利 刘莉莉 杨昆

(海军工程大学 405 教研室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 针对带有缺陷的炉膛试件的内部传热建立了三维物理和数学模型, 运用有限体积法研究了在不同方位进行缺陷检测时的表面温度分布及红外特征。计算分析表明, 耐火砖在炉膛保温效果方面起到主要作用。当耐火砖出现故障时, 外表面温度出现异常, 缺陷处的最高温度与正常工作时的温差随缺陷深度的增加近似呈指数关系。

关键词: 红外; 表面温度; 锅炉; 耐火砖; 裂纹

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.02.08

Infrared Temperature Field Analysis of Crack in Furnace Firebrick

ZHOU Guo-qiang, YANG Li, FAN Chun-li, LIU Li-li, YANG Kun

(Faculty 405 Naval University of Engineering, Hubei Wuhan 430033 China)

Abstract: Three-dimensional physical and mathematic models are established for the internal heat transfer in a defective furnace. The temperature distribution and infrared characteristics of the surface when the defect in a furnace is detected in different positions are studied. The analysis result shows that the firebricks play a major role in the thermal insulation of the furnace. When the firebricks break down, the temperature of the outer surface of the furnace is abnormal. In the position of the defect, the difference between the maximum temperature and the normal operation temperature increases exponentially with the defect depth.

Key words: infrared; surface temperature; furnace; firebrick; crack

0 引言

锅炉被广泛使用在动力、造纸、冶金和化工等领域。锅炉炉膛在高温、超高压、受烟气腐蚀及冲刷的恶劣环境中工作, 极易发生高温腐蚀和磨损。耐火砖出现裂纹后会严重影响其保温效果, 导致事故发生^[1]。例如, 2004 年杭州钢铁集团公司的转炉作业区发生重大炉壁穿透事故,

大量高温钢水泄漏, 造成了重大经济损失^[2]。

随着科技进步和社会发展, 工业生产中设备安全性和可靠性的要求也在不断提高。由于生产事故频发, 其造成的损失愈加严重, 对于设备状态的准确检测和诊断已变得愈加紧迫和重要^[3]。

近年来, 红外检测越来越体现出了其独特

收稿日期: 2012-12-05

作者简介: 周国强 (1987.9-), 男, 江西鄱阳人, 硕士生, 研究方向为传热传质热流体学及其应用。

E-mail: 826775194@qq.com

通讯作者简介: 杨立 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为传热传质热流体学、热物理测量技术和设备红外诊断技术。 E-mail: 435245071@qq.com

的优势: 非接触、效率高、大面积扫描、无有害射线和使用方便等。红外热像检测已经用于管道检测的各个方面: 管道漏泄及保温层的检测^[4], 高温压力管道内壁缺陷的检测^[5], 管道内壁水泥衬里局部脱落的检测^[6]等。本文基于锅炉炉膛耐火砖出现的裂纹进行数值计算, 获得锅炉炉膛出现缺陷时外表面的温度场及“热像特征”, 为炉膛耐火砖壁红外研究提供依据。

1 求解红外特征的数理模型

1.1 物理模型

本文研究对象为锅炉炉墙。某锅炉炉墙结构示意图如图1, 相关物性参数见表1。

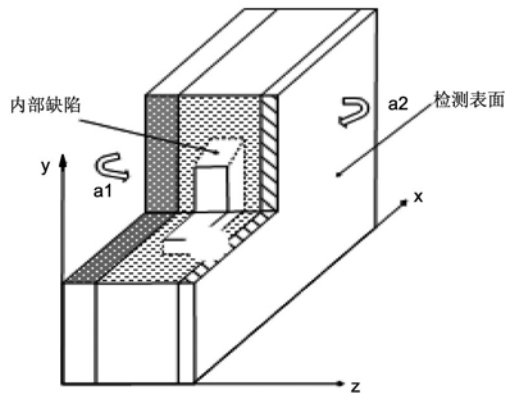


图1 某锅炉炉膛结构示意图

表1 某锅炉炉膛物性参数

名称	厚度 (mm)	导热系数 w/(m·K)	密度 kg/m	热容量 J/(kg·K)
耐火砖	100	0.058	2000	816
石棉板	5	0.111	770	816
碳钢板	5	41	7800	460

1.2 数学模型^[7]

本文选取长 L_x 、宽 L_y 、厚 L_z 分别为 1000 mm×1000 mm×110 mm 的炉墙作为研究对象, 设定炉墙故障起始位置的坐标为 $L_{dx}=500$ mm, $L_{dy}=500$ mm, $L_{dz}=0$ mm, 耐火砖破损尺寸为 dL_x 、 dL_y 、 dL_z (对应: 长、宽、厚)。描述炉墙的三维稳态导热微分方程为

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

边界条件:

$$x = 0, \frac{\partial t}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$x = L_x, \frac{\partial t}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$y = 0, \frac{\partial t}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$y = L_y, \frac{\partial t}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$z = 0, \alpha_1(t_{f1} - t) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \quad (6)$$

$$z = L_z, \alpha_2(t - t_{f2}) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \quad (7)$$

式中, α_1 、 α_2 分别为炉膛内和周围环境的对流换热系数, t_{f1} 、 t_{f2} 分别为炉膛内和周围环境的气体温度。

周围环境的空气对流换热系数的计算如下^[8]:

$$\alpha_2 = 1.163(10 + 6\sqrt{\nu}) \quad (8)$$

式中, ν 为风速。当风速 $\nu=1$ m/s 时, $\alpha_2=18.61$ 。

采用有限体积法对模型进行数值计算, 用三维网格系统来离散求解域。节点 P 有 6 个相邻节点, 分别位于东、西、南、北、上和下。e、w、s、n、t、b 分别代表控制容积的东侧、西侧、北侧、上侧和下侧边界表面。

按节点场变量值整理相关方程式, 可得

$$\alpha_P \varphi_P = \alpha_W \varphi_W + \alpha_E \varphi_E + \alpha_S \varphi_S + \alpha_N \varphi_N + \alpha_B \varphi_B + \alpha_T \varphi_T + S_\mu$$

$$\alpha_W = \frac{\Gamma_w A_w}{\delta x_{WP}}, \alpha_E = \frac{\Gamma_e A_e}{\delta x_{PE}}, \alpha_S = \frac{\Gamma_s A_s}{\delta x_{SP}}, \alpha_N = \frac{\Gamma_n A_n}{\delta x_{PN}}, \alpha_B = \frac{\Gamma_b A_b}{\delta x_{BP}}, \alpha_T = \frac{\Gamma_t A_t}{\delta x_{PT}} \quad (9)$$

$$\alpha_P = \alpha_W + \alpha_E + \alpha_S + \alpha_N + \alpha_B + \alpha_T - S_P$$

2 求解红外特征的数理模型

2.1 炉膛正常工作时的温度场

当炉膛耐火砖壁完好时,输入参数: $Ldx=0.5$, $Ldy=0.5$; $dLx=0.0$, $dLy=0.0$, $dLz=0.0$ 。经计算得到的结果如图 2、图 3、图 4 和图 5 所示。

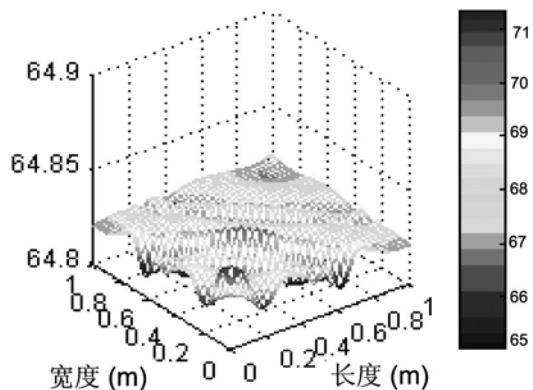


图 2 外表面温度分布图

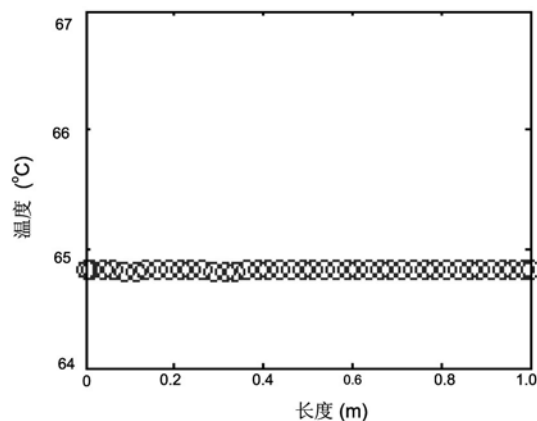


图 3 沿 X 方向的外表面温度分布图

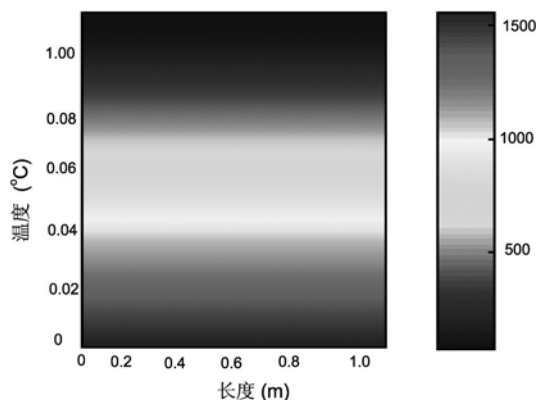


图 4 沿 $Ldy=0.5$ 时炉墙剖面温度分布图

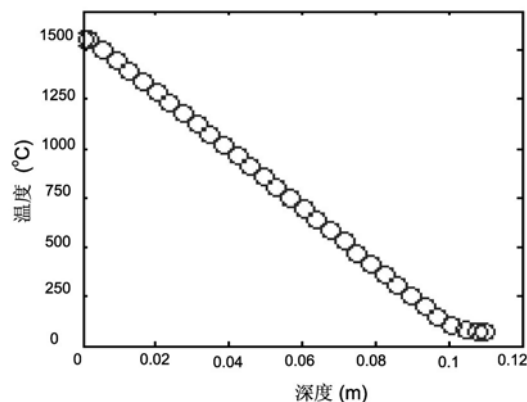


图 5 沿 Z 方向的温度分布图

由图 2 和图 3 分析可知,炉膛正常工作时,其外表面温度分布均匀,平均温度为 64.8°C 。由图 4 和图 5 分析可知,沿厚度方向,温度近似线性递减。耐火砖两侧温差达 1500°C ,而石棉板与钢板两侧温差小于 100°C ,这说明耐火砖层在保证炉膛保温效果方面起到主要作用。

2.2 炉膛耐火砖出现裂纹时的温度场

耐火砖出现裂纹时,假设裂纹的深度分别为 10 mm、25 mm、40 mm、55 mm、70 mm、85 mm 和 100 mm 六种情况。其中深度为 100 mm 时,耐火砖整块出现裂纹。

以裂纹深度 40 mm 为例,经计算得到的结果如图 6、图 7、图 8 和图 9 所示。

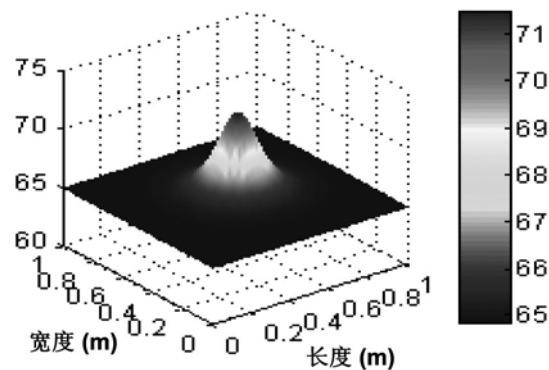


图 6 外表面温度分布图

由图 6 和图 7 可知,裂纹深度为 40 mm 时,故障处外表面出现明显热斑,最高温度达 71.2°C 。与无故障处温度相比,温度明显升高,温差达 6.4°C 。

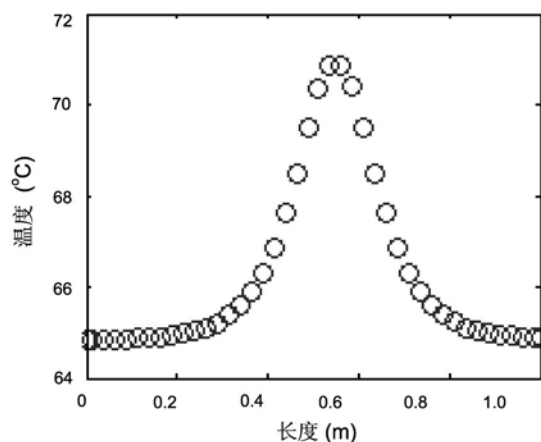


图 7 沿 X 方向的外表面温度分布图

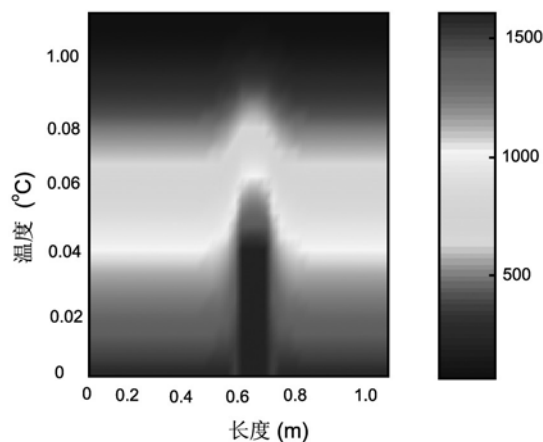
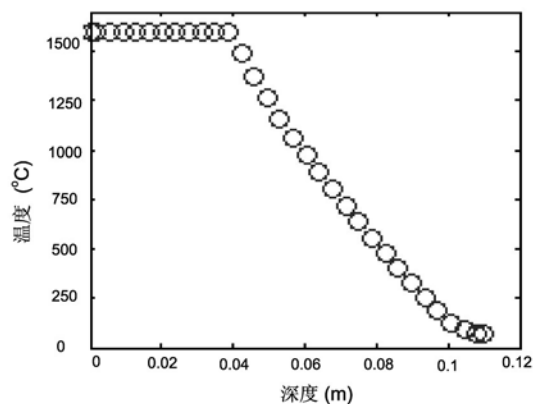
图 8 沿 $L_{dy}=0.5$ 时炉墙剖面温度分布图

图 9 沿 Z 方向的温度分布图

由图 8 和图 9 可知, 沿厚度方向, 出现裂纹空间的温度与炉内温度几乎相等, 温度达到 1600°C 。从裂纹深度 40 mm 处往外, 温度近似线性递减。耐火砖两侧温差达 1500°C 左右, 这说明故障处的耐火砖层在保证炉膛保温效果方

面仍能起到一定的作用。

3 计算结果分析

本文分别计算了六种深度的裂纹情况, 分析了故障处外表面温度与裂纹深度的关系, 结果如图 10 所示; 记录了裂纹深度、故障处外表面最高温度和正常工作处外表面温度 (见表 2)。

表 2 故障处裂纹程度与温差的关系图

裂纹深度 (z 的取值)	故障处外表 面最高温度	正常工作处 外表面温度	温差
10mm	65.3	64.8	0.5
25mm	67.7	64.8	2.9
40mm	71.2	64.8	6.4
55mm	78.1	64.8	13.3
70mm	90.0	64.8	25.2
85mm	116.8	64.8	52.0
100mm	262.3	64.8	197.5

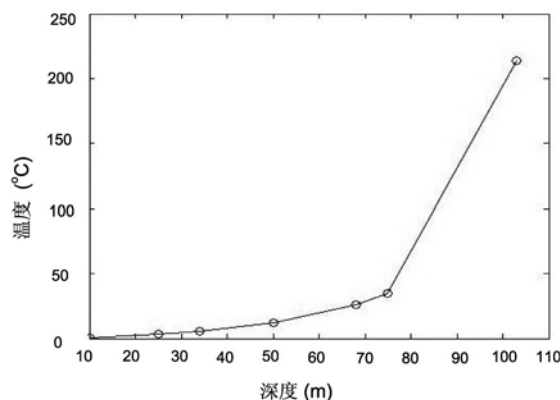


图 10 故障处外表面温度与裂纹深度的关系

由表 2 和图 10 可知, 耐火砖出现裂纹时, 故障处外表面温度随裂纹深度的增加而增加, 其外表面最高温度与正常工作处外表面温度的温差随裂纹深度的增加近似呈指数增长, 最大温差可达 197.5°C 。裂纹深度在 10 mm 以上, 表面最大温差达到 0.5°C , 高于热像仪的最小分辨温差 0.2°C , 红外成像仪可以感应出外表面温度的变化, 因而锅炉耐火砖的裂纹很在红外热像图中容易反映出来。

4 结论

本文通过有限体积法求解导热微分方程,研究了存在裂纹时锅炉炉墙外壁面的温度分布规律。经数值计算可知,耐火砖层在保证炉墙保温效果方面起到主要作用,故障处外表面温度随裂纹深度的增加而增加,外表面最高温度与正常工作时外表面温度的温差随故障深度的增加近似呈指数增长。

参考文献

- [1] 陈衡,侯敬善. 电力设备故障红外诊断[M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [2] 吴洪潭. 工业设备内壁缺陷形态仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 28(2):304-306.
- [3] 关荣华,曹春梅,陈衡. 工业设备内部缺陷的红外热诊断研究[J]. 激光与红外, 2001, 31(4):228-229.

(上接第 38 页)

最大值约为 10 mA,适用于小功率场合,并且非常适合驱动高电压小电流传感器。

4 结束语

本文对紫外火焰传感器的工作原理进行了阐述。针对该传感器的高驱动电压和小电流特点,设计了一种结构简单的高升压比高压驱动电路,并对该高压驱动电路的工作原理进行了分析。这种电路实现了从较低电压到高电压的高升压比变化,为火焰传感器在低压外供电源条件下的使用提供了所需的工作电压。该驱动电路可以通过调节输出采样电阻来改变输出电压,适用于驱动其他类型的光电传感器,因而具有广泛的应用范围。

参考文献

- [1] 陈其章. 用于火焰探测的紫外光敏管[J]. 传感技术学报, 1996, 1: 55-59.
- [2] 吴小田. 一种高升压比 DC/DC 变换器设计[D]. 杭州:浙江大学, 2012.

- [4] FAN C L, SUN F R, YANG L. Investigation on Non-destructive Evaluation of Pipelines Using Infrared Thermography [C]. Proc of the Joint 30th Int Conf on Infrared and Millimeter Waves and 13th Int Conf on Terahertz Electro, 2005:339-340.
- [5] 沈功田,李涛,姚泽华等. 高温压力管道红外热像检测技术[J]. 无损检测, 2002, 24(11): 473-477.
- [6] Reinhardt W W. Use of High Resolution Infrared Imaging to Evaluate Lining Damage in Concrete Lined Pipelines[C]. ASNT Fall Conf and Quality Testing Show, 1994:70-72.
- [7] 余佐平. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 第二版, 1984.
- [8] Inagaki T, Iwamoto T. On the NDT and E for the Diagnosis of Defects Using Infrared Thermography [J]. NDT and E International, 1999, 32(5):247-257.

- [3] Jun Wen, Taotao Jin, Keyue Smeddley. A New Interleaved Isolated Boost Converter for High Power Applications [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003, 18(1): 65-73.
- [4] Wuhua Li, Xiaodong Lv, Yan Deng, et al. A Review of Non-Isolated High Step-up DC/DC Converters in Renewable Energy Application [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(4): 364-369.
- [5] 黄晓玲. 紫外型火焰探测器的研制[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(10): 523-525.
- [6] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [7] 段为娟,朱忠尼. 带耦合电感的高升压比 boost 变换器的分析[J]. 开关电源技术, 2007, 7: 8-12.
- [8] Yungtaek Jang. New Two-Inductor Boost Converter with Auxiliary Transformer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(1): 169.
- [9] Sanjaya Maniktala 著. 王志强译. 精通开关电源设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 2008.
- [10] Abraham I P 著. 王志强译. 开关电源设计(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.