

文章编号:1000-582X(2005)10-0021-03

高炉风口回旋区断面温度场数值化研究与应用*

欧阳奇¹,张兴兰²,温良英¹,白晨光¹,董凌燕¹

(1.重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400030;2.重庆工学院计算机科学与工程学院,重庆 400050)

摘要:对风口回旋区内煤粉燃烧火焰断面温度场分布进行数值化研究,有助于诊断高炉风口回旋区煤粉的燃烧状态和了解炉缸的工作状况,同时可以指导改进氧煤燃烧器,改善氧煤燃烧工艺和高炉喷煤操作.采用非接触辐射测温理论和技术,建立了高炉风口回旋区断面图像的二基色(RG)信息与温度间的关系模型,进行了二维平面投影火焰温度场测量,并绘制了回旋区断面温度场等高线.试验结果表明:这种测温技术可行,与抽气式热电偶测量结果相比,准确度达98.09%.

关键词:高炉喷煤;辐射测温;炉缸工况;风口回旋区

中图分类号:TF321.6

文献标识码:A

高炉富氧喷煤是高炉炼铁节焦降耗、提高经济效益的重要措施.高炉风口煤粉燃烧火焰的温度场分布直接反映了煤粉在风口的燃烧状况和炉缸的煤气分布,因此,研究回旋区煤粉燃烧火焰断面的温度场分布,对于在线分析诊断高炉风口回旋区煤粉燃烧状态和研究炉缸煤气模式分布有着重要的意义.国内外过去大都采用热电偶直接测试风口回旋区温度,但水冷枪的插入势必影响焦炭的运动及温度分布,且测得的只是某一点的温度.随着非接触测温理论和技术的发展,各种接触式、非接触式风口测温手段都得到广泛应用^[1-3].20世纪80年代兴起的数字图像处理技术和计算机运算速度的提高,为火焰图像实时识别、在线诊断高炉风口回旋区煤粉燃烧状态和炉缸煤气分布创造了有利条件.近几年对基于数字图像处理的燃烧火焰检测的理论和实践应用已开始了探索性研究,在锅炉炉膛煤粉燃烧火焰处理和检测系统的研究已有一些报道^[4-5].但目前国内外用于高炉风口回旋区煤粉燃烧火焰图像只是处于图像监视阶段,没有作进一步深入的研究.

1 测温原理

电荷耦合器件(CCD)是20世纪70年代初发展起来的新型半导体器件,CCD的靶面上设置有条纹滤色器.通过条纹滤色器就可以将彩色景物分解成红(R)、绿(G)、蓝(B)3基色图像,R、G、B基色经过摄像器件分别转换成为相应的8 bit灰度级数字信号.彩色CCD条纹滤色器如图1所示.

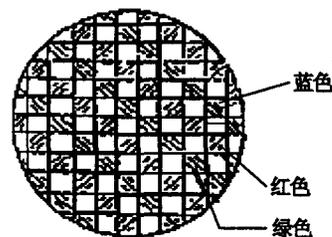


图1 彩色 CCD 条纹滤色器结构

彩色 CCD 摄像机依靠设置在面阵光电元件靶面的3种条纹滤波器,获得某图像点在可见光波长范围内(320~720 nm)的红色亮度值 L_r 、绿色亮度值 L_g 和蓝色亮度值 L_b .在一定的测试距离和光学系统中,有如下关系:

$$\begin{cases} L_r = \int_{320}^{720} E_T(\lambda) T_r(\lambda) d\lambda = K_R E_T(\lambda_R), \\ L_g = \int_{320}^{720} E_T(\lambda) T_g(\lambda) d\lambda = K_G E_T(\lambda_G), \\ L_b = \int_{320}^{720} E_T(\lambda) T_b(\lambda) d\lambda = K_B E_T(\lambda_B), \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $E_T(\lambda_R)$ 、 $E_T(\lambda_G)$ 、 $E_T(\lambda_B)$ 分别表示R、G、B单色辐射能; λ_R 、 λ_G 、 λ_B 分别表示图像R、G、B通道分光特性曲线峰值的波长; $T_r(\lambda)$ 、 $T_g(\lambda)$ 、 $T_b(\lambda)$ 分别表示光学测试系统的R、G、B通道的分光特性函数; K_R 、 K_G 、 K_B 分别表示R、G、B通道的增益系数,可通过试验标定得到^[6].

由CCD获得火焰图像信息后可利用火焰图像的双色亮度值计算温度场.双色法测温原理是基于维恩辐射定律.在煤粉燃烧火焰辐射的波长范围400~

* 收稿日期:2005-06-10

基金项目:国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助项目(50374085)

作者简介:欧阳奇(1971-),男,湖南隆回人,重庆大学讲师,博士研究生,从事钢铁冶金、计算机测控等方面的研究.

750 nm及温度范围 3 000 K 以下时,普朗克辐射定律可由维恩辐射定律取代^[7]:

$$E_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \varepsilon(\lambda, T), \quad (2)$$

式(2)中, $E_{\lambda}(T)$ 为火焰辐射能; $\varepsilon(\lambda, T)$ 为辐射率; λ 为波长; C_1 和 C_2 为常数,其中 $C_1 = 3.741\ 844 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, $C_2 = 0.014\ 388\ 33 \text{ m} \cdot \text{K}$.如果在波长 λ_1 和 λ_2 下同时测量由某点发出的单色辐射能 $E_{\lambda_1}(T)$ 和 $E_{\lambda_2}(T)$,则根据两者的比值得到温度 T ,关系式:

$$T_i = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{\ln \frac{E_{\lambda_1}(T)}{E_{\lambda_2}(T)} - \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}, \quad (3)$$

若 λ_1 和 λ_2 选取得比较靠近,则 $\varepsilon(\lambda_1, T) \approx \varepsilon(\lambda_2, T)$,则式(3)可以简化为:

$$T_i^s = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{\ln \frac{E_{\lambda_1}(T)}{E_{\lambda_2}(T)} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}. \quad (4)$$

彩色图像由 CCD 获取后,在计算机内是以像素为单位逐点存储的.每一像素点为 24 位,包含 8 位红色亮度值 L_r ,8 位绿色亮度值 L_g 和 8 位蓝色亮度值 L_b .一般认为,火焰的亮度与辐射能成正比,因此 2 种波长下的辐射能之比可由亮度之比来代替.但考虑到在从火焰本身到摄像机的光路系统中辐射能的流失和衰减,在将亮度之比来代替辐射能之比时,还需引入一个由 L_r, L_g, L_b 亮度值确定的修正系数 $\Phi(L_r, L_g, L_b)$,即:

$$\frac{E_{\lambda_1}(T)}{E_{\lambda_2}(T)} = \Phi(L_r, L_g, L_b) \frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}}, \quad (5)$$

式(5)中, $E_{\lambda_1}(T), E_{\lambda_2}(T)$,分别为波长 λ_1, λ_2 下的辐射能; $L_{\lambda_1}, L_{\lambda_2}$ 分别为波长 λ_1, λ_2 的亮度值; $\Phi(L_r, L_g, L_b)$ 是根据标准黑体标定的修正系数,由 L_r, L_g, L_b 亮度值和具体光路系统确定.将式(5)代入式(4),即可得出彩色 CCD 双色法的测温公式:

$$T_i = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{\ln \Phi(L_r, L_g, L_b) \frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}. \quad (6)$$

2 校验实验

从式(6)可知,修正系数 $\Phi(L_r, L_g, L_b)$ 需要试验标定确定.用彩色摄像机摄取火焰图像,将火焰视频信号通过同轴电缆送入图像采集卡采集火焰图像,并进行图像预处理.在火焰束不同部位用抽气式 S 分度热电偶进行温度测量,将热电偶微弱电信号送入 ADAM4018 温度采集模块,通过 ADAM4520 转换模块将 RS485 信号转换为 RS232 信号送入计算机 COM1 端口.在计算机图像采集与处理系统中完成图像的采集、处理和标定.实验装置构成如图 2 所示.

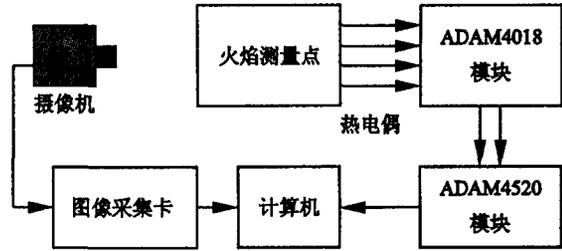


图2 标定与温度场分析系统构成图

3 实验结果分析

根据实验记录,标定修正系数 $\Phi(L_r, L_g, L_b)$,根据式(6)可以计算图像各点的辐射温度和截面二维温度场分布.采集高炉风口煤粉燃烧火焰断面图像并进行图像预处理,如图 3 所示.

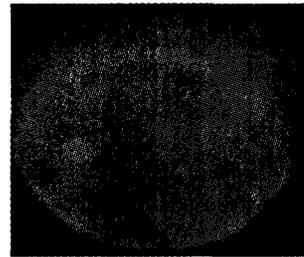


图3 预处理后的燃烧火焰图像

对煤粉燃烧火焰的不同位置进行温度测量,结果如表 1 所示.并根据式(6)计算对应测点的辐射温度,温度场分布如图 4 所示.

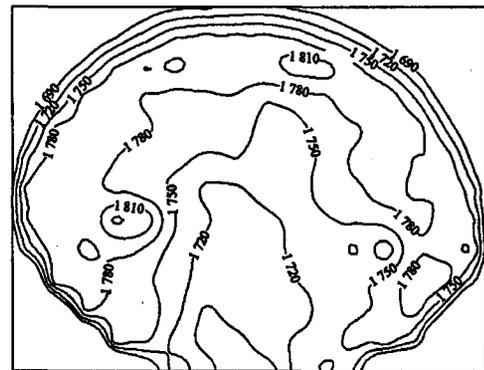


图4 燃烧火焰的温度场分布

表1 辐射测温与实测结果的比较

序号	横坐标 /像素点	纵坐标 /像素点	R /灰度级	G /灰度级	实测温度 /°C	辐射温度 /°C	相对误差 /%
1	653	572	255	132	1 497.4	1 494.7	0.18
2	758	695	255	165	1 598.3	1 578.6	1.23
3	794	619	255	133	1 658.6	1 650.8	0.47
4	862	990	255	210	1 750.3	1 747.5	0.16
5	1 465	1 062	255	166	1 654.2	1 663.5	0.56
6	740	580	255	183	1 580.5	1 570.5	0.63
7	1 492	1 090	255	126	1 420.4	1 398.6	1.53
8	1 369	1 031	223	102	1 320.3	1 345.6	1.91

从表1可以看出,通过火焰图像分析得到温度场,最大相对误差为1.91%,可知,用该方法进行辐射测温,与实测值相比,具有较高的精度.用标定的摄像系统,在重钢5#高炉风口窥视孔,摄取风口回旋区火焰图像,如图5所示.应用式(6)进行辐射测量,得到二维截面温度场分布,如图6所示.

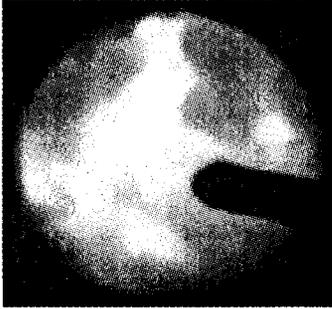


图5 重钢5#高炉风口回旋区图像

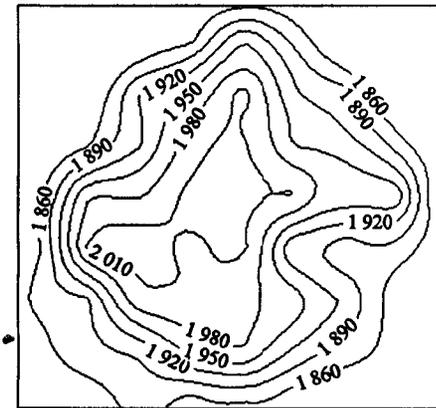


图6 重钢5#高炉风口回旋区温度场分布

4 结论

研究分析了高炉回旋区断面彩色图像2基色信息与温度之间的关系模型,该模型可在线测量高炉风口回旋区断面各点温度,并获得二维平面投影下的温度场分布.为诊断高炉风口回旋区煤粉燃烧状况、了解炉缸的工作状况、指导改进氧煤燃烧器、改善氧煤燃烧工艺和高炉喷煤操作提供了基础.

参考文献:

- [1] 葛玉荣,宋爱卿. 风口区燃烧温度及铁水温度连续测试[J]. 炼铁,1987,6(5):78-81.
- [2] PICARD M, USINOR I. Pulverized Coal Combustion in the Blast Furnace Using a 3D Numerical Simulation[A]. 2001 Iron-making Conference Processing[C]. Gyeongju: Korea Science and Technology Center, 2001. 229-239.
- [3] BIRK W, JOHANSSON A. Implementation and Industrial Experiences of Advanced Control and Monitoring in Coal Injection[J]. Control Engineering Practice,2000, (8):327-335.
- [4] 徐伟勇,余岳峰. 数字图像处理技术在火焰监测上的应用[J]. 中国电力,1994,10(11):41-43.
- [5] 徐伟勇,余岳峰. 采用传像光纤和数字图像处理技术检测燃烧火焰[J]. 动力工程,1999,19(1):45-47.
- [6] 卫成业,严建华,商敏儿,等. 利用面阵 CCD 进行火焰温度分布测量——二维投影温度场的测量[J]. 热能电力工程,2002,9(7):58-61.
- [7] 陈石. 双色法测试系统的标定及燃油炉火焰辐射的测量[J]. 燃烧科学与技术,1996,12(2):150-153.

Research and Application of Temperature-field Digitalizing of the Tuyere and Raceway Section in Blast Furnace

OUYANG Qi¹, ZHANG Xing-lan², WEN Liang-ying¹,
BAI Chen-guang¹, DONG Ling-yan¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Department of Computer Science and Engineering, Chongqing Poly Technic College, Chongqing 400050, China)

Abstract: It is useful for diagnosing coal combustion status and supervision running state to study on temperature-field of the tuyere and raceway in blast furnace, at the same time, it is also helpful for supervising the structure of oxygen and coal burning apparatus, improving coal combustion technology and coal injection operation. The model between red and green information of true color flame image and temperature is established and two dimension raceway section projection temperature-field are achieved by applying no-touch radiation temperature measurement theory and technology. It is proved with experimentation that the method is effective and feasible, and the testing precision can reach 98.09% compared to the testing result of thermocouple of taking out gas.

Key words: coal injection; radiation temperature measurement; crucible state; raceway and tuyere in blast furnace