CCD 测温中火焰温度与颜色的关系

黄希桥, 李前翔, 王苗苗, 冯翔洲, 郑龙席

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:介绍了彩色 CCD 与比色测温法的测温原理,在此基础上,制定了测温系统的实验方案——利用 CCD 高速摄像机、K 型热电偶、本生灯对扩散火焰的表面温度分布进行了实验研究。实验结果表明,当火焰温度上升时,火焰红色分量和绿色分量的灰度值都有所上升,而火焰红色分量灰度值的上升趋势明显大于绿色灰度值的上升趋势。同时,在测温公式中给出的修正值 K 却呈下降趋势。在分析了这些趋势后,用比色测温法对火焰温度场进行了测量,并与热电偶测量出的数值进行了对比。结果表明两者测量出的温度差少于 20 K。

关 键 词:CCD 相机;实验设计;像素点

中图分类号:TK311 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2017)03-0442-06

基于数字图像处理的燃烧诊断方法是一种优秀的非接触式测量方法,这种方法将彩色 CCD (charge-coupled devices,电荷耦合器件)、数字图像处理、比色测温法相结合,具有操作简单、便宜方便、可以实时测量与监控、效率高等优点,在现实生产与科研中得到了越来越广泛的应用。因此,探究 CCD 测温中火焰温度与颜色的关系对这种辐射方法的应用具有重要意义。

近年来,利用彩色 CCD 去测量和监测火焰温度的方法已经受到了越来越多的关注,国内外也先后展开了相关的研究。日本因其先进的电子技术及其对环保的强烈意识,最先在燃烧诊断中应用了数字图像处理技术。日本日立研究所的 Kurihara 等[1]研制出了火焰图像识别系统(FIRES,flame image recognition system),进行火焰的监控与识别。随后,该公司的 Shimoda 等[2]提出了基于双光谱的测温方法。法国的 Renier 等[3]通过 CCD 相机获得物体表面图像,随后通过黑体炉标定并利用辐射定律来得到辐射物体表面参数,同时,他们将滤光片加在 CCD 相机前用来提高系统的灵敏性并扩大测温范围。印度 Pune 大学的 Panditrao 等[4]通过对灯光的拍摄获得相机内部的红(red,R)、绿(green,G)、蓝(blue,B)的响应曲线,利用热电偶测量的温度与计算出来的温度比较,得出了不同算法之间的误差,并对冶炼金属进行的测量与误差进行评估。

清华大学的王补宣等[5]在 1989 年的工程热物理学报中首先提出了采用图像处理法结合热辐射理论、光度学来定量地测定发光火焰的温度。华中科技大学的周怀春等[6]利用热电偶来测量炉膛内具体某一点的温度,与此同时将单色滤光片加装在 CCD 相机前以得到单个波长下的火焰辐射照片,该方法能有效的得到火焰的二维温度场。西北工业大学的李汉舟等[7]利用摄像机和图像采集卡对高温黑体炉做了标定实验,并在煤炉上进行了实验,得到了较好的效果。浙江大学的黄群星等[8]对 CCD 测量的误差进行了理论分析,并在投影温度的基础上,对温度场进行三维的重建。通过摄像机和空间之间的位置关系,建立了截面温度场、投影温度场和三维温度场的测量模型。卫成业等[9-10]利用比色测温法测量了油煤混烧火炬的投影温度场并与双色高温计测得的温度进行比较,证明采用面阵 CCD 进行比色测温具有较高的精度,并且研究了三维截面温度场的测量,提出了简化后的实用模型,并且分析了传统的求解方法,给出了改进后的数学解法。东南大学的汪凤林等[11]研究了光谱成像法,通过高速分层摄像控制系统对发光体的不同断层进行聚焦摄像,获

收稿日期:2016-10-12 **基金项目**:国家自然科学基金(51476135)与航空科学基金(2015ZB53026)资助

作者简介:黄希桥(1973—),女,西北工业大学副教授,主要从事燃烧学研究。

得断层的图像,采用推向反演算法获得断层的原始图像,并采用彩色三基色测温法重建火焰的三维截面温度场,从而获得火焰的三维温度场。

上述研究都是对测温方法和结果的探究,以 CCD 芯片作为辐射能监测的传感器,以热辐射理论和图像处理的方法计算被测物的温度,计算过程多采用灰体假设并采用黑体炉标定。本文研究了基于彩色 CCD 相机的比色测温法在火焰温度测量上的应用,在本生灯上对扩散火焰进行了实时测量,找出了不同火焰温度所对应的颜色数值,对两者之间的关系进行了分析与解释。

1　测温原理

彩色 CCD 测温的过程就是 CCD 通过镜头将火焰的可见光信号收集起来并转换为电信号,通过内部转换后再输出为 R、G、B 三色光的光信号。利用已知的 R、G、B 分量,通过实验标定,就可以得到火焰的表面温度。在比色测温时,当被测温度小于 3 000 K 时,在可见光范围内,普朗克定律可由维恩位移定律取代

$$E_T(\lambda)=\varepsilon(\lambda,T)\frac{c_1\lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)}} \tag{1}$$

式中,$E_T(\lambda)$ 为物体的光谱辐射力,$\varepsilon(\lambda,T)$ 为物体在一定波长和温度下的辐射率;c_1 和 c_2 分别为第一、二辐射常数。在同一点下同时测量其发射出的波长为 λ_1 和 λ_2 所对应的单色辐射能 $E_T(\lambda_1)$ 和 $E_T(\lambda_2)$,求出两者的比值就可测量出该点的温度。这里选用波长 700 nm 的红色光和 546.1 nm 的绿色光来计算火焰的温度,公式如下

$$T=\frac{C_2\left(\frac{1}{\lambda_g}-\frac{1}{\lambda_r}\right)}{\ln\frac{E_T(\lambda_r)}{E_T(\lambda_g)}+\ln\frac{\varepsilon(\lambda_g,T)}{\varepsilon(\lambda_r,T)}+5\ln\frac{\lambda_r}{\lambda_g}} \tag{2}$$

式中,$\lambda_r=700$ nm,$\lambda_g=546.1$ nm 分别是红色光和绿色光的波长;$\varepsilon(\lambda_r,T)$、$\varepsilon(\lambda_g,T)$ 分别是物体红光和绿光在当前温度下的光谱发射率。

CCD 摄像机的工作波段主要在可见光范围内,即波长在 380~780 nm 内,CCD 摄像机每个像素点的输出灰度为

$$H=\frac{\pi}{4}\eta\mu t\left(\frac{2a}{f'}\right)^2\int_{3.8\times10^{-7}}^{7.8\times10^{-7}}K_T(\lambda)E_t(\lambda)h(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{3}$$

式中,η 为输出灰度与输出电流间的转换系数;μ 为光电转换系数;t 为曝光时间;a 为镜头的出射光瞳半径;f' 为镜头焦距;$K_T(\lambda)$ 为镜头的光学透过率;$h(\lambda)$ 为光谱响应函数,典型的彩色 CCD 相机的光谱响应函数(spectral response function,SRF)[12] 如图 1 所示。

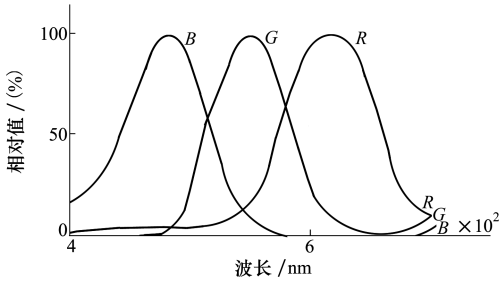


图 1　彩色 CCD 相机的光谱响应

镜头的光学透过率 $K_T(\lambda)$ 随波长变化较小,可以认为它为常数,由拉格朗日中值定理可得公式

$$\begin{aligned}H&=A\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_T(\lambda)h(\lambda)\mathrm{d}\lambda\\&=A(\lambda_2-\lambda_1)E_T(\xi)h(\xi),\xi\in(\lambda_1\sim\lambda_2)\end{aligned} \tag{4}$$

式中,$A=\frac{\pi}{4}\eta\mu t\left(\frac{2a}{f'}\right)^2K_t(\lambda)$,$\lambda_1=3.8\times10^{-7}$,$\lambda_2=7.8\times10^{-7}$。

令 $K_{\lambda_x}=\frac{A(\lambda_2-\lambda_1)}{E_T(\lambda_x)}$,$\lambda_x=\lambda_r,\lambda_g,\lambda_b$,代入(4)式,得红、绿、蓝的灰度值

$$\begin{aligned}R&=E_T(\lambda_r)K_{\lambda_r}E_T(\xi_1)h_r(\xi_1)=E_T(\lambda_r)K_r\\G&=E_T(\lambda_g)K_{\lambda g}E_T(\xi_2)h_g(\xi_2)=E_T(\lambda_g)K_g\\B&=E_T(\lambda_b)K_{\lambda b}E_T(\xi_3)h_g(\xi_3)=E_T(\lambda_b)K_b\end{aligned} \tag{5}$$

式中

$$\begin{aligned}K_r&=K_{\lambda_r}E_T(\xi_1)h_r(\xi_1)\\K_g&=K_{\lambda_g}E_T(\xi_2)h_g(\xi_2)\\K_b&=K_{\lambda_b}E_T(\xi_3)h_b(\xi_3)\end{aligned}$$

K_r、K_g、K_b 为 R、G、B 通道比例系数,由于被测火焰的辐射率是波长、温度以及燃料的函数,通常该函数是未知的,并且 CCD 相机的光谱响应函数也是未知的,故无法通过理论获得。

将(5)式代入公式(2)得到公式

$$T=\frac{C_2\left(\frac{1}{\lambda_g}-\frac{1}{\lambda_r}\right)}{\ln\frac{R}{G}+\ln\frac{K_g}{K_r}+\ln\frac{\varepsilon(\lambda_g,T)}{\varepsilon(\lambda_r,T)}+5\ln\frac{\lambda_r}{\lambda_g}} \tag{6}$$

令 $K = \ln \frac{K_g}{K_r} + \ln \frac{\varepsilon(\lambda_g, T)}{\varepsilon(\lambda_r, T)}$ 得

$$T = \frac{C_2\left(\frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r}\right)}{\ln \frac{R}{G} + K + 5\ln \frac{\lambda_r}{\lambda_g}} \tag{7}$$

K 值为一修正值,它与相机参数、曝光时间、被测物体的光谱发射率有关,当燃料、CCD 相机以及镜头等确定之后,K、R/G 与 T 一一对应,因此可以通过实验标定出 K 随温度变化的值。

2 实验装置及流程

CCD 温度测量实验系统由本生灯、高速摄像机、热电偶和计算机组成。可以同时进行燃烧、拍摄、测量、处理的步骤。装置示意图如图 2 所示:



图 2 实验装置图

其中,用于测量扩散火焰的本生灯系统由本生灯实验台、甲烷气瓶、甲烷流量计、甲烷压力表、双向开关、单向电磁阀组成。本文使用甲烷流量计的是由矽翔微机电系统有限公司的 MF4000 系列气体质量流量计,精度为(1.5+0.2FS)。本文所用的 CCD 相机为 Phantom V 7.2 高速摄像机。拍摄频率最高可以达到 160 000 Hz,最低拍摄频率为 100 Hz。曝光时间最高为 9 400 μs,最低为 2 μs。温度测量系统包括 K 型热电偶和二次仪表。因为 K 型热电偶主要是由镍铬——镍硅合金构成,具有热电动势大、灵敏度高、稳定性强等优点,测量范围可达 200 ~ 1 300℃,适用于液体蒸汽、气体介质以及固体。所以本实验中用 K 型热电偶测量扩散火焰表面温度。

在进行实验时,保持整个实验室处于无光黑暗的环境下,同时实验室应该保持相对封闭的环境。这样可以避免外界光线和气流对实验造成的影响。实验开始时,先调整镜头的焦距。在本生灯灯口上放置一个物体,将镜头对准该物体调整焦距,直至调出最清晰的图像为止。随后打开甲烷气罐总开关,通过甲烷流量计读出甲烷的流量,利用减压阀控制甲烷的流量,直到调节出稳定的火焰为止。待火焰稳定后,调整高速摄像机的拍照像素、尺寸、曝光时间、拍照频率、相应的调节镜头的光圈以达到最理想的效果。将热电偶放置于本生灯喷口外被测火焰位置处,在高速摄影能拍摄到火焰与热电偶的同时,使之在火焰之外拍摄到热电偶显示仪读数并确定热电偶显示仪不会影响火焰光谱。最后调整甲烷流量,改变火焰的温度与热电偶的位置,拍摄不同工况下的燃烧火焰图片。

3 实验结果与分析

文献[13]指出,选取的 2 个分量颜色的波长应该足够近才行,但为了保持测温公式的灵敏性,又不能取得过分接近。在拍摄处的图像中,火焰的 B 分量明显低于 R、G 分量。而读出图像的取值范围是[0,255],并且读出的数都是整数。当分量图的灰度过少时,内部读数的误差就会被放的更大。所以选取 R、G 分量用于测量计算最为合适。图 3 所示不同温度下的火焰照片的红色和绿色的灰度值,图 4 所示为 R/G 的值随温度 T 的变化曲线。

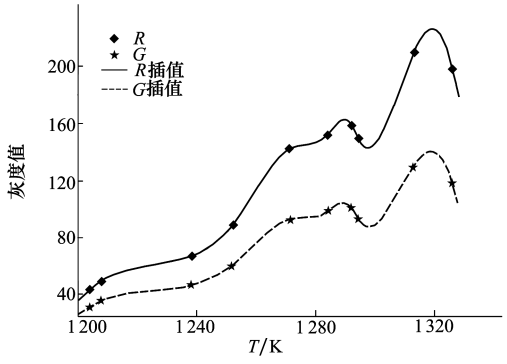


图 3 R、G 的灰度值与温度 T 的变化曲线

从图 3 中可以看出火焰的红色辐射亮度一直大于绿色辐射亮度。而且随着温度的增加,R、G 的值总体上也在不断增加,有时会有略微下滑,这是因为这时热电偶的采集点更靠近横向截面中心,因为在火焰内部中,越靠近中间处,其富油状态越严重,所以中间部分看起来较暗,所采集到的 R、G 值自然偏低。

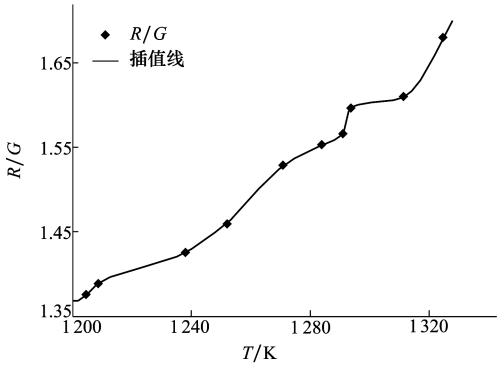


图 4　R/G 的值与温度 T 的变化曲线

从图 4 中可以看出,随着温度的增加,R/G 的值也在不断的增加。这就表明,随着温度的提升,红色辐射亮度的提升速率大于绿色辐射亮度的提升速率。之所以有这个现象,是因为用双色法来测量的温度实际上是火焰中碳颗粒的温度。颗粒和周围的燃气之间存在温度差异,这种差异取决于颗粒向燃气热辐射和燃气向颗粒热对流的热量之比。总体上,烟尘颗粒的尺寸越小,其温度就越接近燃气温度。根据 Lamdommatos 的研究结果[14],碳颗粒和它周围燃气之间的温度差异应当少于 10℃。根据维恩位移定律,粒子随着温度的增高,发射出的辐射波波长就越短,即可见光部分所占比重越多,被捕捉到的可见光就会越来越多。而在 540 nm 左右的绿色可见光成分虽然也在增加,但由于其本身的值较小,摄像机在灰度值较低区间变化的敏感性不如在灰度值相对较高区间的敏感性高,所以 G 的灰度值增幅低于 R 的灰度值增幅,即 R/G 的比值就越高。

4　测温结果

在本文中,将相机相应曲线和信号转换等因素带来的影响都归于测温公式中的 K 值,然后利用实验对 K 值进行标定。在标定出 K 值后,即可对火焰进行温度测量。由公式(7) 可知,每一个 K 值都对应了一个 R/G 的值。先在火焰中测量到一个温度 T,然后通过读出热电偶周围的平均 R,G 值,代入公式(7) 就可以得出其对应的 K 值。由于相机镜头的光谱响应曲线影响,在拍摄过程中也会有暗电流、噪音、外界光源等因素的影响,所以 K 的值不是一成不变的,它会随着温度 T 而变化。因此应该标定多个 K,并找出 K 与 R/G 的曲线关系,拟合后用 R/G 的值来代替 K。然后再代入(7) 式就可得知 T 与 R/G 的关系,从而求出 T 的值后给出火焰温度场。图 5 给出了 K 与 R/G 的关系,并进行线性拟合。

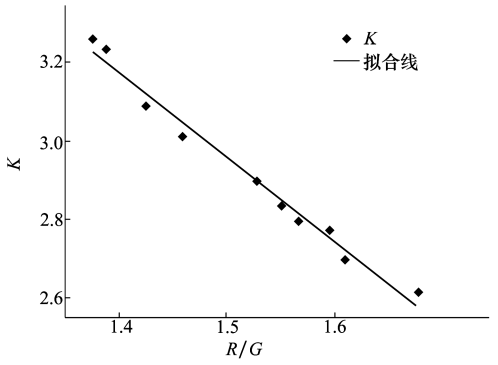


图 5　K 与 R/G 的线性拟合图

通过最小二乘法算出拟合公式 $K = 6.166 - 2.140R/G$,平方误差为 0.963 2。将这个关系代入公式(7) 即可求出图片中每一个像素点上所对应的温度。取十个不同温度下的像素点的 R、G 值来计算温度,将计算出来的温度与热电偶所测量出来的温度进行对比,结果如图 6 所示,从图 6 中可以看出,计算出来的温度与热电偶测量出的温度一般相差不过 20 K,相对误差一般不会超过 2%。在 1 230 ~ 1 320 K 区域之间,计算出来的温度误差相对较小。说明在当前设置(拍摄频率、曝光时间、光圈等)下,系统对这个区域的测温效果最好。当温度再降低时,一点小小的测量误差就会被放大,所以系统误差也会相应增大;当温度再增加时,CCD 单元朝着饱和的趋势走进,误差也会相应增大。所以不同设置有着不同的最佳测温区域。

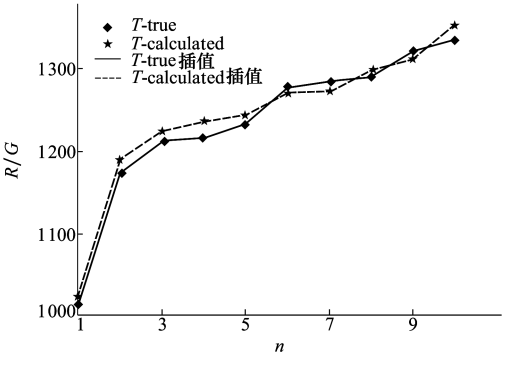
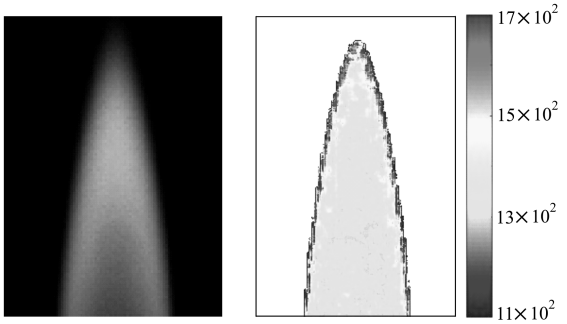


图 6　计算温度与真实温度间的对比图

图 7 为层流扩散火焰的顶部图像与温度场图像,从图中可看出,大部分火焰的温度处于 1 350 K

到 1 450 K 之间,这与热电偶所测量出的结果相吻合。外层火焰个别区域可以超过 1 500 K,而测量结果最高能达到 1 450 K。这是因为超过 1 500 K 以上的火焰区域过少,不能给热电偶足够的热量来显示达到 1 500 K 或热电偶没有移动到那些区域。整体



a) 火焰图像 b) 火焰温度场

图 7 层流扩散火焰顶部图像与温度场

来说计算结果与测量结果相差较小,一般在 35 K 以内。结果表明,用这种方法计算出来的真实温度相对误差不大,比较真实可信。

5 结 论

为了探究 CCD 测温中火焰温度与颜色的关系,本文在本生灯上对扩散火焰的表面温度进行了实验研究,得到了火焰颜色与温度的对应关系,并进行了对比分析,得出以下结论:

1) 在实验中,随着火焰温度的增高,其相对应的颜色分量 R、G 也各自增高。

2) 随着火焰温度的增高,R 增长的速率大于 G 增长的速率,即 R/G 的值不断增高。

3) 将火焰颜色与温度的对应关系进行拟合,代入测温公式测量对比后发现,计算出来的温度与热电偶测量出来的温度相差少于 20 K。

参考文献:

[1] Kurihara N, Nishikawa M, Watanabe A, et al. A Combustion Diagnosis Method for Pulverized Coal Boilers Using Flame-Image Recognition Technology[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1986 (2): 99-103

[2] Shimoda M, Sugano A, Kimura T, et al. Prediction Method of Unburnt Carbon for Coal Fired Utility Boiler Using Image Processing Technique of Combustion Flame[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1990, 5(4): 640-645

[3] Renier E, Meriaudeau F, Suzeau P, et al. CCD Temperature Imaging: Applications in Steel Industry[C]//Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996: 1295-1300

[4] Panditrao A M, Rege P P. Temperature Estimation of Visible Heat Sources by Digital Photography and Image Processing[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(5): 1167-1174

[5] 王补宣,李天铎. 图象处理技术用于发光火焰温度分布测量的研究[J]. 工程热物理学报, 1989, 10(4): 446-448
Wang Buxuan, Li Tianduo. The Study of Image Processing Technique Used for Luminous-Flame Temperature Distribution Measurement[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1989, 10(4): 446-448 (in Chinese)

[6] 周怀春,娄新生,肖教芳,等. 炉膛火焰温度场图象处理试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 295-300
Zhou Huaichun, Lou Xinsheng, Xiao Jiaofang, et al. Experimental Study on Image Processing of Flame Temperature Distribution in a Pilot-Scale Furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(5): 295-300 (in Chinese)

[7] 李汉舟,张敏贵,潘泉,等. 基于面阵 CCD 图像的温度场测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(6): 653-656
Li Hanzhou, Zhang Mingui, Pan Quan, et al. A Study of Temperature Measurement Based on Plane Surface Array CCD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(6): 653-656 (in Chinese)

[8] 黄群星,刘冬,王飞,等. 非对称碳氢扩散火焰内烟黑浓度与温度联合重建模型研究[J]. 物理学报, 2008, 57(12): 7928-7936
Huang Qunxing, Liu Dong, Wang Fei, et al. Soot Volume Fraction and Temperature Reconstruction Modelresearch for Asymmetric Diffusive C-H Flame[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(12): 7928-7936 (in Chinese)

[9] 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(Ⅰ)——二维投影温度场的测量[J]. 热能动力工程, 2002, 57(12): 58-61
Wei Chengye, Yan Jianhua, Shang Miner, et al. Measurements of Flame Temperature Distribution by the Use of a Colored Array CCD(Charge-coupled Device)(Ⅰ) the Measurement of a Two-dimensional Projection Temperature Field[J]. Thermal Power

Engineering, 2002, 57(12): 58-61 (in Chinese)

[10] 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(Ⅱ)——三维截面温度场的测量[J]. 热能动力工程, 2002, 17(98): 161-165
Wei Chengye, Yan Jianhua, Shang Miner, et al. Measurement of Flame Temperature Distribution Using Array CCD(Ⅱ)——Three dimensional Cross-section Temperature Field Measurement[J]. Thermal Power Engineering, 2002, 17(98): 161-165 (in Chinese)

[11] 汪凤林,王式民,陆勇. 光谱层析成像法重建温度场[J]. 安徽大学学报:自然科学版, 2001, 25(4): 56-61
Wang Fenglin, Wang Shimin, Lu Yong. Reconstruction Temperature Field by Spectrum Sectioning Tomography[J]. Journal of Anhui University: Natural Science Edition, 2002, 25(4): 56-61 (in Chinese)

[12] 周海叶,彭小奇,宋海鹰. 插值标定的 CCD 比色测温方法[J]. 能源技术, 2004, 25(3):93-95
Zhou Haiye, Peng Xiaoqi, Song Haiying. Colorimetric Temperature Measurement Method Using Charge Coupled Device and Calibrated by Data Interpolation[J]. Energy Technology, 2004, 25(3): 93-95 (in Chinese)

[13] 卫成业,李晓东,马增益,等. 高温火焰图像处理比色测温法的数值方法研究[J]. 燃烧科学与技术, 1998, 4(3): 307-311
Wei Chengye, Li Xiaodong, Ma Zengyi, et al. Research of the Numerical Method of the Colorimetric Temperature-Measurement Method Used in High Temperature Flame Image Process[J]. Journal of Combustion Science And Technology, 1998, 4(3): 307-311 (in Chinese)

[14] Ladommatos N, Zhao H. A Guide to Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in Diesel Engines Using the Two-Colormethod——Part 1: Principles[R]. SAE, 1994

The Relation of the Temperature and Color of the Flame of the CCD Temperature Measurement

Huang Xiqiao, Li Qianxiang, Wang Miaomiao, Feng Xiangzhou, Zheng Longxi

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This paper introduces the principle of temperature measurement of color CCD and two-color thermometry. Experiment scheme of the temperature measurement is designed. The CCD high-speed camera, thermoelectric couple of K type and Bunsen burner are utilized to measure the temperature of the surface of the diffusion flame. The results show that the gray levels of red component and the green component is both rise, while the increase tendency of the red component is more obvious. Besides, the correction factor K, given in the equation of the temperature measurement, is decreased. The temperature is also measured by two-color thermometry and the difference of the value measured by two different methods is less than 20 K.

Keywords: CCD camera; design of experiments; pixels