

基于三基色原理的火工品温度场测试方法研究

王馨晨¹, 张一中¹, 韦学勇¹, 赵玉龙¹, 张国栋¹, 张文超²

(1. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 鉴于纳米结构含能药剂在微尺度火工品中的广泛应用, 急需研究相应的微尺度燃烧温度场测试技术对药剂性能进行表征。现有的原子双谱线测温法受到药剂成分的限制, 比色测温法受药剂材料发射率影响较大, 而原子双谱线测温法和多光谱测温法则适用于点温度测试。本文提出了一种基于三基色原理的火工品温度场测试方法, 搭建了一套燃烧温度测试系统, 通过对燃烧剂的测量得到了燃烧剂实时燃烧温度。与红外热像仪的测量结果对比表明了该方法是有用的。

关键词: 三基色原理; 微尺度; 火工品; 燃烧温度场。

Research of temperature field measurement for explosive initiating device based on three primary colors method

Wang Xinchen¹, Zhang Yizhong¹, Wei Xueyong¹, Zhao Yulong¹, Zhang Guodong¹, Zhang Wenchao²

(1. The State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University Xi'an, 710049; 2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: As the nanostructure energetic material has been widely applied into micro explosive initiating devices, the measuring technology of micro-scale combustion temperature field is urgently needed to characterize the energetic material. Among the existing methods for temperature measurement, the double line method of atomic emission spectroscopy has restriction on the composition of initiating explosive materials, the colorimetric temperature measurement is greatly influenced by the emission rate of initiating explosive materials. In addition, the double

王馨晨, 2014 年于哈尔滨工程大学 (获得学士学位, 2019 年于西安交通大学获得硕士学位, 现为西安交通大学科研助理, 主要研究方向为火工品测试。E-mail: wangxinchen@stu.xjtu.edu.cn

韦学勇 (通信作者), 2002 年于长安大学获得学士学位, 2005 年于西安交通大学获得硕士学位, 2009 年于伯明翰大学获得博士学位, 现为西安交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为微纳传感与测试。E-mail: seanwei@mail.xjtu.edu.cn

张一中, 2018 年于东北大学获得学士学位, 现为西安交通大学硕士研究生, 主要研究方向为微尺度火工品温度测量。E-mail: zyz812@stu.xjtu.edu.cn

line method of atomic emission spectroscopy and multispectral thermometry are only suitable for point temperature measurement. This paper proposes a method for measurement of temperature field based on three primary colors. A testing setup was established. The experimental results agree well with that obtained from infrared thermal imager, and it indicated that the developed approach is applicable and effective to measure temperature field at microscale.

Keywords: Three primary colors method; Micro scale; Explosive initiating device; Combustion temperature field

火工品在使用时可以在较小的外界刺激能量作用下激发,产生燃烧或者爆炸,完成点火、传火、起爆、传爆、做工等功能,燃烧温度是表征火工品输出性能的一个非常重要的参数,它不仅可以表征火工品输出性能,还可以反过来为改善火工品提供一些实验依据。纳米技术的快速发展,为含能材料在燃烧、爆炸等方面的性能的提高提供了技术手段。材料的纳米化可以在很大程度上改善其熔点、燃烧温度等在内的多种热力学性能,有利于材料的快速分解和完全燃烧,从而提高其能量性能^[1]。众多研究表明:随着含能材料颗粒尺寸的减小,其性能将发生显著变化,如爆轰更接近于理想爆轰、爆炸时释放能量更完全、燃烧效率更高、爆轰波传播更快更稳定、爆轰临界直径降低等^[2]。这些性能的提高为微火工品的发展奠定了一定的基础。随着微火工品的发展,微尺度燃烧温度的测量是一个迫切需要解决的问题。

鉴于火工品输出性能测试的应用前景,对其燃烧温度的测试方法的研究是非常迫切的。一般火工品的燃烧温度达到几百度甚至达到两千多度,目前国内外火工品温度的测试方法主要为原子双谱线测温法、多光谱测温法和比色测温法。其中,原子双谱线测温法利用温标元素在高温下原子跃迁产生的两条特征谱线的强度进行测温,但是温标元素一般为Cu,这个性质使得测量对象受到限制;多光谱测温法利用多不同波长处的辐射强度处理得到发射率与波长之间的函数关系式。上述两种方法可对温度点进行测量,但是无法测量温度场。比色测温法假设测量对象为灰体,利用黑体辐射定律对两个波长处的辐射值进行比值计算,但是灰体假设会产生较大误差。基于图像传感器的测温方法由于其优点,成为了高温检测领域中的研究热点。CCD与CMOS传感器具有非接触,高灵敏度,信号失真小,工作稳定等优点,在高温检测领域得到了广泛的应用^[3-7]。该方法的基础是图像传感器所得到的图像包含亮度信息,色度信息以及被测物体辐射的信息。根据传感器相应波长带宽的规律,可以利用黑体标定消除其影响;根据被测物体发射率的规律,可以利用三基色减小误差。^[8]

1 三基色测温原理^[9-11]

热力学温度为T的非黑体的光谱辐射亮度可由普朗克公式得出

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon(\lambda, T)$ 为光谱发射率; C_1 为普朗克第一常数, $C_1 \approx 3.742 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$; C_2 为普朗克第二常数, $C_2 \approx 1.4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$; T 为温度, K; λ 为波长, m; $L(\lambda, T)$ 为光谱辐射亮度, $\text{W}/(\text{m}^3 \text{sr})$ 。

当时 $\lambda T \ll 1$, (1) 可简化为

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (2)$$

由非黑体的维恩公式可得非黑体的三基色测温公式:

$$\frac{1}{T} = \frac{\ln \frac{L(\lambda_1, T) \cdot L(\lambda_2, T)}{L(\lambda_2, T)^2} - \ln \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_2^2} - 5 \ln \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1 \cdot \lambda_3}}{C_2 \left(\frac{2}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_3} \right)} \quad (3)$$

图像传感器三基色值理论公式分别为:

$$R = \frac{\pi}{4} \eta \mu t \left(\frac{2a}{f'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) Y_r(\lambda) L_0(\lambda, T) d\lambda \quad (4)$$

$$G = \frac{\pi}{4} \eta \mu t \left(\frac{2a}{f'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) Y_g(\lambda) L_0(\lambda, T) d\lambda \quad (5)$$

$$B = \frac{\pi}{4} \eta \mu t \left(\frac{2a}{f'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) Y_b(\lambda) L_0(\lambda, T) d\lambda \quad (6)$$

式中: η 为电流与三基色值转换系数; μ ——光电转换系; t ——曝光时间, s; λ_1 、 λ_2 为 CMOS 传感器感光的波长上下限。

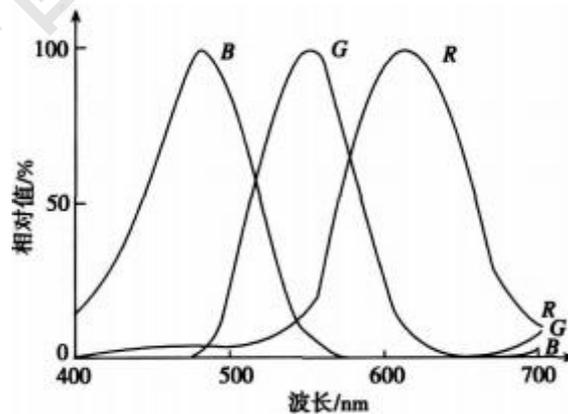


图1 CMOS光谱响应特性曲线^[10]

Fig.1 Spectral response characteristic curve of CMOS

近似认为物体的发射率在光学系统可以透过的热辐射的波长上下限 λ_1 、 λ_2 内成线性变化，即

$$\begin{aligned}\varepsilon(\lambda_g, T) &= \varepsilon(\lambda_r, T) + \Delta\varepsilon(\lambda_r, T) \\ &= \varepsilon(\lambda_b, T) - \Delta\varepsilon(\lambda_b, T)\end{aligned}\quad (7)$$

略去一阶和二阶微量可得：

$$\begin{aligned}\varepsilon^2(\lambda_g, T) &= \varepsilon(\lambda_r, T)\varepsilon(\lambda_b, T) - \varepsilon(\lambda_r, T)\Delta\varepsilon(\lambda_b, T) \\ &\quad - \Delta\varepsilon(\lambda_r, T)\varepsilon(\lambda_b, T) + \Delta\varepsilon(\lambda_r, T)\Delta\varepsilon(\lambda_b, T)\end{aligned}\quad (8)$$

假设图像传感器的光谱响应为理想冲击响应，则对上述公式使用拉格朗日中值定理简化为：

$$\begin{aligned}R &= A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) Y_r(\lambda) L_0(\lambda, T) d\lambda \\ &= A(\lambda_2 - \lambda_1) K_T(\lambda_\alpha) Y_r(\lambda_\alpha) L_0(\lambda_\alpha, T) \\ &= K_r L_0(\lambda_r, T)\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}G &= A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) Y_g(\lambda) L_0(\lambda, T) d\lambda \\ &= A(\lambda_2 - \lambda_1) K_T(\lambda_\beta) Y_g(\lambda_\beta) L_0(\lambda_\beta, T) \\ &= K_g L_0(\lambda_g, T)\end{aligned}\quad (10)$$

$$\begin{aligned}B &= A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) Y_b(\lambda) L_0(\lambda, T) d\lambda \\ &= A(\lambda_2 - \lambda_1) K_T(\lambda_\gamma) Y_b(\lambda_\gamma) L_0(\lambda_\gamma, T) \\ &= K_b L_0(\lambda_b, T)\end{aligned}\quad (11)$$

式中： K_r 、 K_g 、 K_b 为比例系数； λ_r 、 λ_g 、 λ_b 为三基色波长； $Y_r(\lambda_\alpha)$ 、 $Y_g(\lambda_\beta)$ 、 $Y_b(\lambda_\gamma)$ 为三基色波长响应函数在对应波长处的响应值； $A = \frac{\pi}{4} \eta \mu t \left(\frac{2a}{f'} \right)^2$ 。

由上述关系式可得基于图像传感器的三基色测温公式

$$\frac{1}{T} = \frac{\ln \frac{R \cdot B}{G^2} - \ln \frac{K_r \cdot K_b}{K_g^2} - 5 \ln \frac{\lambda_g^2}{\lambda_r \cdot \lambda_b}}{c_2 \left(\frac{2}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} - \frac{1}{\lambda_b} \right)}\quad (12)$$

由式(9)、(10)、(11)有^[6]：

$$\begin{aligned}K_r &= A(\lambda_2 - \lambda_1) K_T(\lambda_\alpha) Y_r(\lambda_\alpha) \frac{L_0(\lambda_\alpha, T)}{L_0(\lambda_r, T)} \\ &= A(\lambda_2 - \lambda_1) K_T(\lambda_\alpha) Y_r(\lambda_\alpha) \cdot \frac{\varepsilon(\lambda_\alpha, T)}{\varepsilon(\lambda_r, T)} \left(\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_r} \right)^{-5} e^{-\frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_\alpha} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}\end{aligned}\quad (13)$$

$$\begin{aligned}
K_g &= A(\lambda_2 - \lambda_1)K_T(\lambda_\beta)Y_g(\lambda_\beta)\frac{L_0(\lambda_\beta, T)}{L_0(\lambda_g, T)} \\
&= A(\lambda_2 - \lambda_1)K_T(\lambda_\beta)Y_g(\lambda_\beta) \cdot \frac{\varepsilon(\lambda_\beta, T)}{\varepsilon(\lambda_g, T)} \left(\frac{\lambda_\beta}{\lambda_g}\right)^{-5} e^{\frac{c_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_\beta} - \frac{1}{\lambda_g}\right)}
\end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
K_b &= A(\lambda_2 - \lambda_1)K_T(\lambda_\gamma)Y_b(\lambda_\alpha)\frac{L_0(\lambda_\gamma, T)}{L_0(\lambda_b, T)} \\
&= A(\lambda_2 - \lambda_1)K_T(\lambda_\gamma)Y_b(\lambda_\gamma) \cdot \frac{\varepsilon(\lambda_\gamma, T)}{\varepsilon(\lambda_b, T)} \left(\frac{\lambda_\gamma}{\lambda_b}\right)^{-5} e^{\frac{c_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_\gamma} - \frac{1}{\lambda_b}\right)}
\end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
\ln \frac{K_r \cdot K_b}{K_g^2} &= \ln \left(\frac{K_T(\lambda_\alpha)Y_r(\lambda_\alpha) \cdot K_T(\lambda_\gamma)Y_b(\lambda_\gamma)}{(K_T(\lambda_\beta)Y_g(\lambda_\beta))^2} \right) \\
&+ \ln \left(\frac{\varepsilon(\lambda_g, T)^2}{\varepsilon(\lambda_r, T) \cdot \varepsilon(\lambda_b, T)} \right) + \ln \left(\frac{\varepsilon(\lambda_\alpha, T) \cdot \varepsilon(\lambda_\gamma, T)}{\varepsilon(\lambda_\beta, T)^2} \right) \\
&- 5 \ln \left(\frac{\lambda_\alpha \lambda_\gamma \lambda_g^2}{\lambda_r \lambda_b \lambda_\beta^2} \right) - \frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_\alpha} - \frac{1}{\lambda_r} + \frac{1}{\lambda_\gamma} - \frac{1}{\lambda_b} + \frac{2}{\lambda_\beta} - \frac{2}{\lambda_g} \right)
\end{aligned} \quad (16)$$

令

$$\begin{aligned}
a &= \ln \left(\frac{K_T(\lambda_\alpha)Y_r(\lambda_\alpha) \cdot K_T(\lambda_\gamma)Y_b(\lambda_\gamma)}{(K_T(\lambda_\beta)Y_g(\lambda_\beta))^2} \right) \\
&- 5 \ln \left(\frac{\lambda_\alpha \lambda_\gamma \lambda_g^2}{\lambda_r \lambda_b \lambda_\beta^2} \right)
\end{aligned} \quad (17)$$

$$b = -C_2 \left(\frac{1}{\lambda_\alpha} - \frac{1}{\lambda_r} + \frac{1}{\lambda_\gamma} - \frac{1}{\lambda_b} + \frac{2}{\lambda_\beta} - \frac{2}{\lambda_g} \right) \quad (18)$$

可以得到

$$\begin{aligned}
\ln \frac{K_r \cdot K_b}{K_g^2} &= a + \frac{b}{T} + \ln \left(\frac{\varepsilon(\lambda_g, T)^2}{\varepsilon(\lambda_r, T) \cdot \varepsilon(\lambda_b, T)} \right) \\
&+ \ln \left(\frac{\varepsilon(\lambda_\alpha, T) \cdot \varepsilon(\lambda_\gamma, T)}{\varepsilon(\lambda_\beta, T)^2} \right)
\end{aligned} \quad (19)$$

带入三基色测温公式(12)得:

$$\begin{aligned}
\ln \frac{R \cdot B}{G^2} &= a + \frac{b}{T} + \ln \frac{\varepsilon(\lambda_g, T)^2}{\varepsilon(\lambda_r, T) \cdot \varepsilon(\lambda_b, T)} \\
&+ \ln \frac{\varepsilon(\lambda_\alpha, T) \cdot \varepsilon(\lambda_\gamma, T)}{\varepsilon(\lambda_\beta, T)^2} + \ln \frac{\varepsilon(\lambda_r, T) \cdot \varepsilon(\lambda_b, T)}{\varepsilon^2(\lambda_g, T)} \\
&- 5 \ln \frac{\lambda_r \cdot \lambda_b}{\lambda_g^2} + \left(\frac{2}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} - \frac{1}{\lambda_b} \right) \frac{c_2}{T}
\end{aligned} \quad (20)$$

最终得到三基色测温公式为

$$\frac{1}{T} = \frac{\ln \frac{R \cdot B}{G^2} + 5 \ln \frac{\lambda_r \cdot \lambda_b}{\lambda_g^2} - a}{C_2 \left(\frac{2}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} - \frac{1}{\lambda_b} \right) + b} \quad (21)$$

当 CMOS 图像传感器确定之后，其光谱响应特性也随之确定， λ_α 、 λ_β 、 λ_γ 、 $K_T(\lambda_\alpha)$ 、 $K_T(\lambda_\gamma)$ 、 $K_T(\lambda_\beta)$ 、 $Y_r(\lambda_\alpha)$ 、 $Y_b(\lambda_\gamma)$ 、 $Y_g(\lambda_\beta)$ 、 a 、 b 均为定值，仅与 CMOS 传感器的感光特性有关，可以用黑体炉实验标定。通过实验标定 a 、 b 就可由 CMOS 传感器输出的 R 、 G 、 B 信号算出温度 T 。

2 火工品测温系统的搭建

本文使用的测温系统如图2所示，整套测温系统由光学成像镜头、彩色CMOS相机、软件系统和计算机等几部分组成。[12-13]

所测温度场的尺寸以及温度场的空间分辨率由CMOS传感器的尺寸和成像镜头决定，时间响应由摄像机的帧率来决定。鉴于微尺度火工药剂的药量较小，测量药柱的直径在1mm以内，同时燃烧速度非常快，在测量微尺度火工药剂时需要对测温系统进行调整，选用放大倍率更大的镜头使温度场更加清晰，选用帧率更高的摄像机来保证可以采样到药剂燃烧的画面。

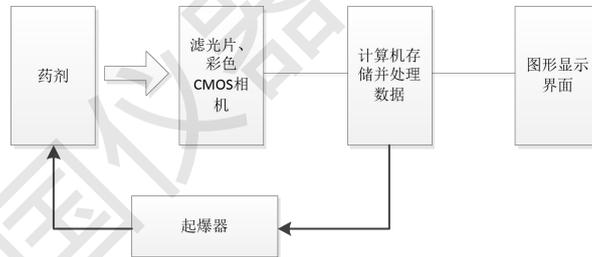


图2 测试系统结构原理图

Fig.2 Schematic of measurement system

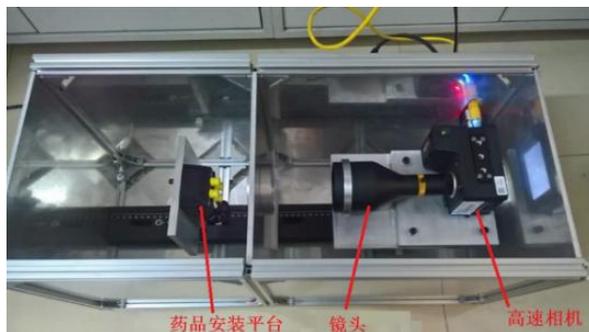


图3 测试系统实物图

Fig.3 picture of measurement system

3 实验结果与分析3.1 系统标定

利用式(21)进行计算时必须对 a , b 值进行标定。此处将温度与三基色值的关系简化为 $\frac{1}{T} = k \ln \frac{R \cdot B}{G^2} + b$ ，选择陕西省计量院的黑体炉内部热电偶温度计作为标定用测温仪表，并将其示值看作实际温度。

标定过程如下：

先设定黑体炉温度 T ，设置摄像机的光圈为 F4，曝光时间为 $300\mu\text{s}$ ，帧率为 10 帧/s，然后用摄像机对黑体炉的黑体腔口的图像进行采集，输入计算机进行储存。温度以 0.0833°C/s 的速度上升，每上升 10°C ，重复上述步骤，将图像内的 R、G、B 值分别进行平均，之后再间隔选取视频内的 10 帧图像进行平均。使用此三基色值作为标定值，对 $\ln \frac{R \cdot B}{G^2}$ 与 $\frac{1}{T}$ 之间的函数关系式进行拟合。

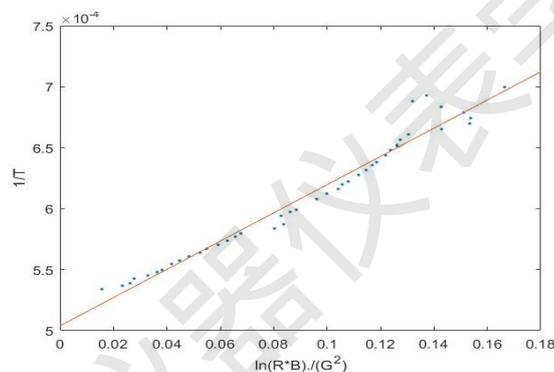


图3 黑体炉标定拟合图

Fig.3 fitting chart of blackbody furnace calibration

拟合得到曲线公式为

$$\frac{1}{T} = 2.623 \times 10^{-4} \ln \frac{R \cdot B}{G^2} + 5.707 \times 10^{-4}$$

3.2 药剂测量结果

在南京理工大学对一种燃烧剂的温度进行了测量，该燃烧剂被压制在铁质药柱中，燃烧后将外部铁质药柱加热到红热状态。测量过程中使用红外热像仪进行对照实验，图中紫色和红色曲线分别为红外热像仪测量得到的目标区域最高温度和平均温度的曲线，黄色和蓝色曲线分别为三基色测量系统测得的目标区域最高温度和平均温度曲线。

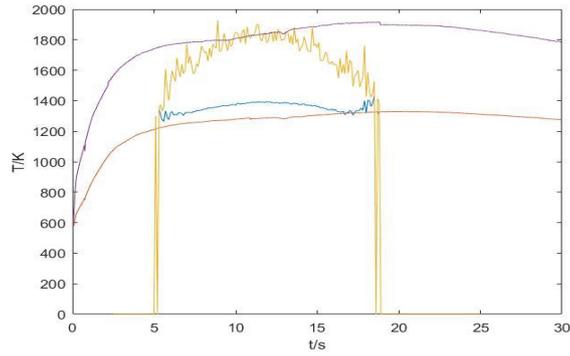


图4 第一次实验数据

Fig.4 data of first experiment

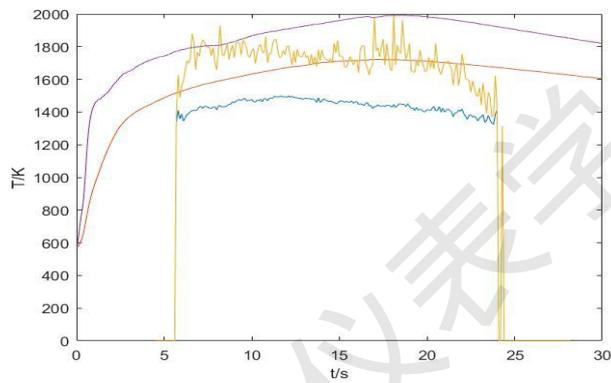


图5 第二次实验数据

Fig.5 data of second experiment

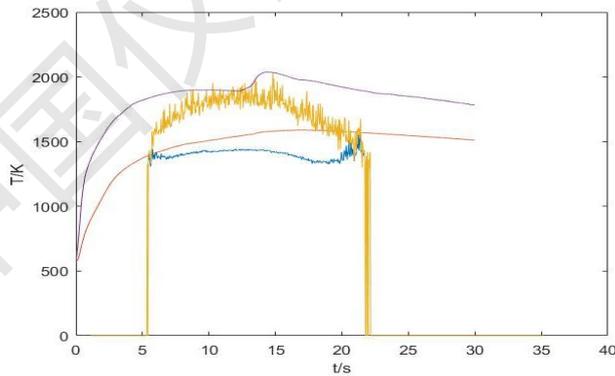


图6 第三次实验数据

Fig.6 data of third experiment

图4、图5、图6分别为第一、二、三次实验两种测温方法对照的实验数据。紫色曲线为红外热像仪三次实验测得的目标区域最高温度曲线，峰值分别为1917.1K、1992.3K、2038.2K。黄色曲线分别为三基色测温系统三次实验测得的目标区域最高温度曲线，峰值分别为1927.6K、1995.8K、2034.3K。红色曲线为红外热像仪三次实验测得的目标区域平均温度曲

线，峰值分别为1330.7K、1722.4K、1590.3K。蓝色曲线为三基色测温法三次实验测得的目标区域平均温度曲线，峰值分别为1432.9K、1497.9K、1445.1K。

图7所示为三基色测温法采集图像后处理得到的温度场分布图，图中像素越亮的点温度值越高。红外热像仪测温距离较远，需要从远处测量，三基色测温系统与红外热像仪分别从两侧拍摄药柱，测量的药柱部分不同，因此在平均温度上会有差异，在测量的最高温度上，可以看出两种测量方法得到的数据相差很小。

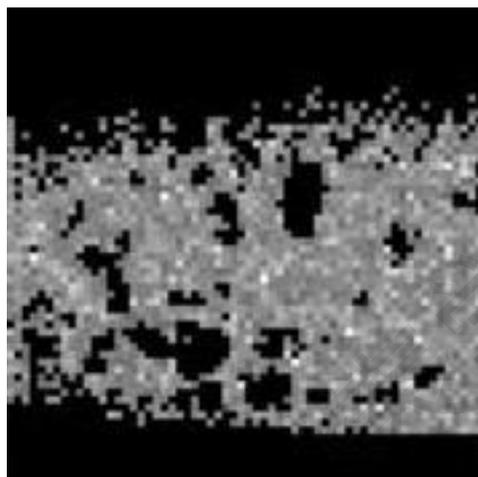


图7 温度场图像

Fig.7 image of temperature field

3.3 误差分析及讨论

在标定过程中对某一温度进行图像采集时，由于 CMOS 传感器本身工艺的影响，图像传感器的背景噪声，内部电路的电流噪声，不同的像素点对应的光谱响应特性的差异等会使得采集得到的图像 R、G、B 值并不稳定，需要对图像内所有像素点的三基色值进行平均。由此会产生误差，在标定时选择此温度下同一帧内的 R，G，B 值进行平均，减小像素随机误差带来的影响。

对黑体炉腔口图像进行采样时，采集了 7s 左右，黑体炉温度会有 0.58°C 的温度变化，此温度变化会使得标定产生误差。故在标定时，需要对每一帧图像内所有像素测量得到的温度进行平均，并对比每一帧图像对应的黑体炉温度 σ 。以 1607K 处的数据为例：

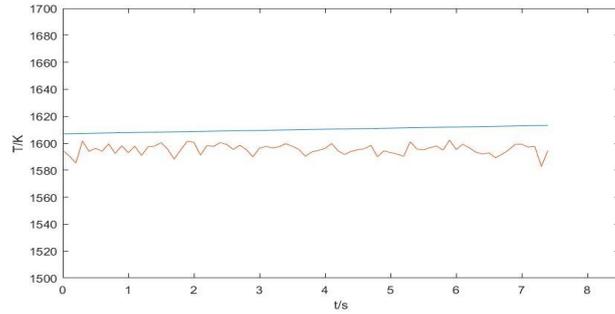


图8 1607K下各帧的黑体炉温度与测量温度图

Fig.8 diagram of blackbody and measurement temperature in 1607K

图8所示蓝色曲线为标定时黑体炉每一帧的温度，黄色曲线为计算得到的黑体炉温度，随着温度的小幅度升高，计算的温度变化影响不大，可以看出 CMOS 图像传感器测量时，黑体炉温度变化产生的误差很小，相较传感器标定时采集数据的波动可以忽略不计。同时可以看出标定采样时不同帧的平均温度之间随机误差经过图像内求平均之后偏差较小，使用较少的帧数图像即可完成某一温度的标定。

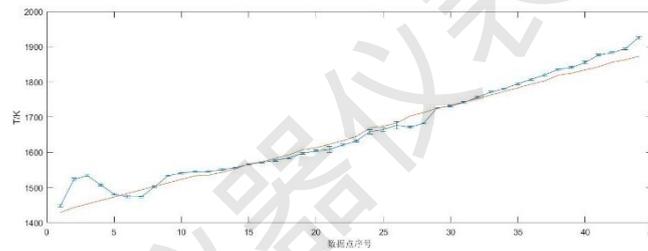


图9 黑体炉温度测量误差棒图与真值

Fig.9 temperature measurement error bar of blackbody furnace and truth-value

如图9所示，蓝色曲线为根据对黑体炉腔口测量得到的多帧温度误差棒图，红色曲线为黑体炉的真实温度。由于在温度较低时，黑体辐射短波长段能量太低，三基色测量值在1550K以下误差较大，在1550K以上的误差较小，不超过2%。同时可以看出在各个温度点，多帧采样对测量值的影响都很小。

在对燃烧剂测量过程中，燃烧剂温度较低时发射光谱中可见光的分量较小，无法检测到。因此，三基色测试系统无法对低温段进行测量。测量过程中，个别像素点R、G、B的随机误差较大，测量温度值偏差较大，在后续图像处理中，去掉这些误差较大的点。

利用CMOS传感器进行测温时，测温误差来源：一是黑体炉标定过程误差，标定误差包括黑体炉标定过程中的温度控制系统精度，CMOS传感器暗电流，热噪声等，二是被测物体发射率简化模型产生的误差。^[14-15]

4 结论

从红外热像仪和三基色测温系统对燃烧剂的温度测量结果可以看出,三基色测温法的准确性较高,与红外热像仪测得的最高温度相差不超过1%,且需要的光学系统比较简单。随着MEMS火工品的发展,微尺度火工品温度场的测量需求越来越大,本文提出的基于三基色原理火工品温度场测量方法为微尺度火工品燃烧温度场的测量提供了一种思路。

参考文献:

- [1] 杨毅,刘宏英,李凤生. 纳米含能材料应用技术进展[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2005(S3):392-396.
- [2] 曾贵玉. 微纳米含能材料研究进展[J]. 中国工程物理研究院科技年报, 2009(1):134-135.
- [3] 何邦全,姚春德,刘增勇,等. 三基色测温法在柴油机燃烧温度场测量中的应用研究[J]. 内燃机学报, 2001, 19(6):526-530.
- [4] 蔚红建,付小龙,李吉祯,等. 三基色测量法在S-GAP推进剂火焰温度分布中的应用[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(1):133-137.
- [5] 王补宣,李天铎,吴占松. 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, V10(4):446-448.
- [6] 董志峰,杨会甲,程辉,等. 热处理机械零件彩色图像三基色与温度的关系[J]. 测试技术学报, 2011, 25(4):351-355.
- [7] 张玉杰,吕岑. 基于彩色CCD炉膛火焰温度场测量方法研究[J]. 量子电子学报, 2004, 21(5):674-678.
- [8] 韩龙,卜树坡,赵杰,等. 三基色测温法在CCD图像传感器测温中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2011(4):122-123.
- [9] 徐宝昌,张丁元. 一种改进的比色测温方法研究[J]. 光电工程, 2011, 38(4):1-6.
- [10] 孙元,彭小奇,唐英. 基于彩色CCD的比色测温校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(1):49-54.
- [11] 彭小奇,周海叶,宋海鹰. CCD三色测温的插值修正方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8):166-169.
- [12] 彭小奇,孙元,唐英. 中性滤光片扩大CCD测温范围的研究[J]. 湖南工业大学学报, 2007(3):35-38.

- [13] 田启川, 潘泉, 赵春晖,等. 采用CCD图像传感器的测温方法及实验研究[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(1):68-70.
- [14] 符泰然, 杨臧健, 程晓舫. 基于彩色CCD测量火焰温度场的算法误差分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(2):81-86.
- [15] 夏守之, 郭焱. 应用CCD测量火焰温度精度问题的研究[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(3):118-121.

中国仪器仪表学会