

## 多光谱辐射测温技术测量火工烟火药剂燃烧温度

李占英<sup>1</sup>, 席兰霞<sup>1</sup>, 陈军<sup>2</sup>, 郭崇星<sup>1</sup>, 刘春建<sup>1</sup>, 刘欢杨<sup>1</sup>

1. 中国兵器工业第213研究所, 陕西 西安 710061
2. 西安电机研究所, 陕西 西安 710077

**摘要** 利用瞬态光谱辐射仪分析了火工烟火药剂燃烧火焰辐射光谱分布, 介绍了多光谱辐射测温技术的工作原理。结合火工烟火药剂燃烧火焰特征光谱分布状况设计研制了具有12个工作通道的多光谱辐射测温系统, 测试者可根据被测火焰光谱辐射分布状况选择合适的工作通道进行分析计算。该系统由光学部分, 电路部分, 数据采集部分及数据处理部分组成。文章以黑火药为例, 应用该系统对其燃烧火焰的辐射能量进行了测定, 经过迭代计算后给出黑火药燃烧温度随时间的变化曲线。实验证明, 在分析被测火焰特征光谱分布的前提下, 选择合适的光谱工作通道, 多光谱辐射测温系统能够很好地应用于火工烟火药剂燃烧温度的测定, 为火工烟火药剂燃烧输出特性的研究奠定了基础。

**关键词** 多光谱辐射测温系统; 火工烟火药剂; 燃烧温度

**中图分类号:** TJ450.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)08-2062-03

### 引言

瞬态测温一直是测试技术中受多方关注的一个分支。例如, 在火炸药爆轰机理研究、弹箭发射的燃气流场研究、火炮膛和身管的烧蚀研究中, 其爆轰温度、燃气流温度和膛内温度数据都是极其重要和关键的指标, 都需进行可靠的测温技术和测试方法研究。测温研究在火工烟火药剂测试领域也非常重要。

目前, 主要采用的是热电偶测温法测量火工烟火药剂的燃烧火焰温度, 但由于烟火药剂的燃烧是高温、高速的过程, 再加上高熔点热电偶材料难以寻求以及热电偶测温反应时间较慢<sup>[1]</sup>, 导致有时不能捕捉到被测烟火药剂燃烧温度, 致使在火工品的制造和研究设计中需要的温度数据无法提供, 这就给总体论证研究和产品设计带来很大困难, 不利于火工药剂性能的研究和新型火工药剂产品的研发, 也造成人力物力不必要的浪费和损失。

本文在多光谱辐射测温技术的基础上, 针对火工烟火药剂燃烧火焰这一特殊辐射体, 研制了12波长多光谱辐射测温系统, 将多光谱辐射测温技术应用于火工烟火药剂燃烧温度的测量。实验证明, 该多光谱辐射测温系统能够很好地应用于火工烟火药剂燃烧温度的测定, 为火工烟火药剂燃烧输出特性的研究奠定了基础。

### 1 火工烟火药剂燃烧火焰辐射光谱分析

所有火焰都可以分为两大部分<sup>[2]</sup>: 发光火焰和透明火焰, 发光火焰辐射连续的光谱, 而透明火焰只在一些特征谱带上有较强的辐射。火工烟火药剂的燃烧火焰为发光火焰。

烟火药是多组分的机械混合物, 是一种非均匀体系, 它的燃烧不同于普通可燃物或均质火药, 它有自己的特征。烟火药的燃烧过程是一个复杂的传质、传热等物理及化学反应过程, 这个过程与烟火药的组成和燃烧条件有密切的关系。

作者采用瞬态光谱辐射仪对几种火工烟火药剂的燃烧辐射光谱进行了测定, 该瞬态光谱辐射仪可测量 $\mu\text{s}$ 量级的瞬态光源和稳态光源的光谱、色度等光学参数。

瞬态光谱辐射仪指标为光谱范围350~950 nm, 波长分辨率 $\leq 2$  nm。应用瞬态光谱辐射仪对火工烟火药剂燃烧特性测试结果如图1(图1包括3个分图, 文中只列出其中的1个, 其他2个没有列出)所示, 图中横轴为波长, 纵轴为相对能量。

从光谱图中我们可清晰地看到, 火工烟火药剂的燃烧化学反应过程复杂, 主要部分为连续谱带, 燃烧过程中伴有特征谱出现。火工烟火药剂的燃烧过程以热辐射为主, 从图1中可以看出, 在760~780 nm波段特征谱分布较为密集。火工烟火药剂燃烧辐射特性的分析研究为多光谱辐射测温系统

收稿日期: 2009-09-29, 修订日期: 2009-12-28

基金项目: 武器装备预研基金项目(9140C3701140803)资助

作者简介: 李占英, 女, 1984年生, 中国兵器工业第213研究所读硕士研究生 e-mail: lizhanying031@163.com

测试通道的设定做好了铺垫。

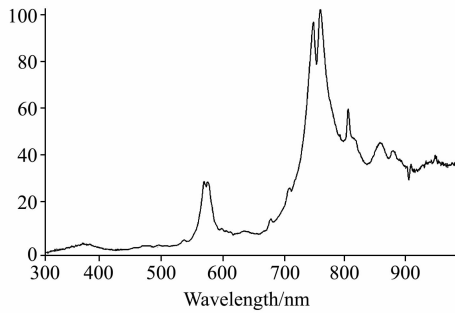


Fig. 1 Emission curves of pyrotechnic's burning flame

### 2 多光谱辐射测温技术原理及测温系统介绍

多光谱辐射测温技术,即在一个仪器中制成多个光谱通道,利用多个光谱的物体辐射能量测量信息,尝试通过适当的数据处理得到物体的温度和材料光谱发射率。多光谱辐射测温技术遵循 Planck 定律,如果多光谱辐射测温系统有  $n$  个光谱工作通道<sup>[3-5]</sup>,则仪器在第  $i$  个工作波长时的输出信号可表示为

$$V_i = A_{\lambda_i} \times \epsilon(\lambda_i, T) \times \lambda_i^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_i T}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中  $A_{\lambda_i}$  是只与波长有关而与温度无关的检定常数,它与该波长下探测器的光谱响应率、光学元件透过率、几何尺寸以及第一辐射常数有关;  $\epsilon(\lambda_i, T)$  是温度为  $T$  的目标光谱发射率;  $\lambda_i$  是第  $i$  个有效工作波长。由多光谱辐射测温技术原理可知,多光谱辐射测温技术测量的是火焰连续光谱辐射的能量,在应用该技术测量火焰温度时,应选择火焰连续谱带的波段进行分析,避开特征谱段。

多光谱辐射测温系统分为光学部分、电路部分、数据采集部分以及数据处理部分,如图 2 所示。该系统设有 12 个光谱工作通道,单通道采样频率为  $100 \text{ kHz} \cdot \text{s}^{-1}$ ,测试者可根据被测目标光谱分布状况选择合适的光谱工作通道进行分析。

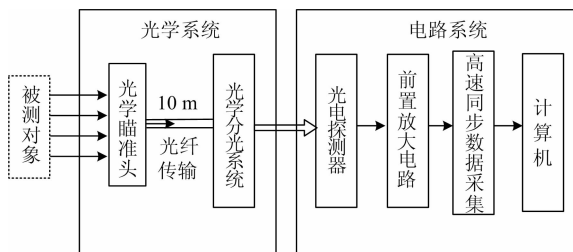


Fig. 2 Multi-spectral thermometer system

### 3 实验

应用多光谱辐射测温系统对多种火工烟火药剂燃烧温度进行了测定,取得了较好的测试曲线和测试结果,下面以黑火药为例:

(1)利用瞬态光谱辐射仪分析黑火药燃烧辐射光谱特性,如图 3 所示,黑火药燃烧火焰特征谱出现在 773 nm 处,由于

多光谱辐射测温系统的 12 个光谱工作通道的有效工作波长均未处于 773 nm,应用该系统测量黑火药燃烧温度时 12 个通道可全部用来分析其辐射能量。

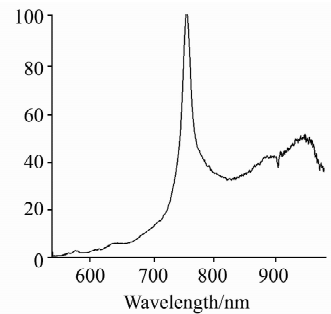


Fig. 3 Emission curves of black powder burning flame

(2)取 6 g 黑火药散装于药盒中,用导火索将其引燃,测得的 12 个通道的辐射能量曲线以及亮温曲线分别见图 4 和图 5。

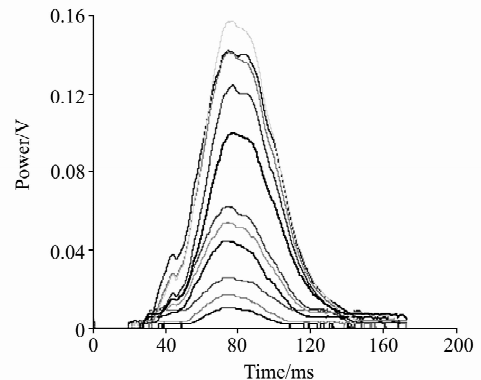


Fig. 4 Emission power of black powder

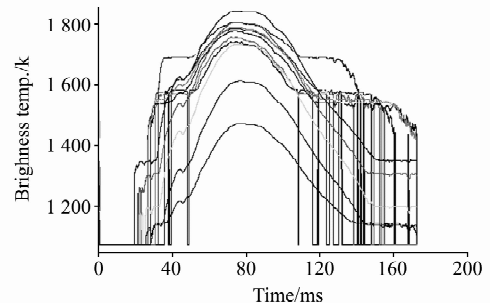


Fig. 5 Brightness temperature of black powder

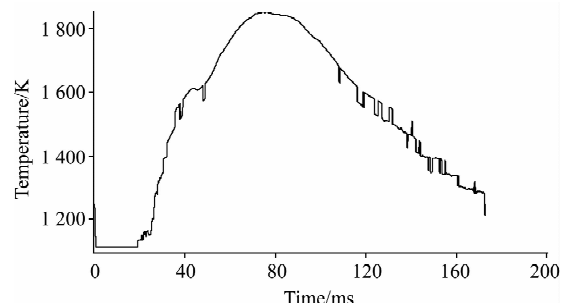


Fig. 6 Flame temperature of black powder

由发射率与温度的关系  $\epsilon_i = \epsilon_i^0 [1 + k(T - T_0)]$  ( $T_0$  为某个初始温度,  $\epsilon_i^0$  为波长为  $\lambda_i$ , 温度为  $T_0$  时的光谱发射率) 以及输出能量与温度的关系  $\frac{V_i}{V_i'} = \epsilon(\lambda_i, T) \cdot e^{\frac{-c_2}{\lambda_i T}} \cdot e^{\frac{c_2}{\lambda_i T'}} [4]$  ( $\epsilon(\lambda_i, T)$  为温度为  $T$  的目标光谱发射率;  $\lambda_i$  为第  $i$  个有效工作波长;  $T'$  为黑体参考温度), 经多次迭代计算, 得到黑火药燃烧温度随时间的变化曲线, 如图 6 所示。

## 4 结 论

多光谱辐射测温系统利用多个具有高采样频率的光谱工

作通道接收目标的辐射能量, 可以很好地对火工烟火药剂燃烧温度进行测量。多光谱辐射测温技术的特点是, 在不干扰火焰温度场的情况下, 对燃烧的火焰辐射能量进行连续不间断的测定。多次实验表明, 该方法是一种具有高灵敏度、高稳定性的测温方法。

多光谱辐射测温技术在火工烟火药剂燃烧火焰温度测量方面的应用, 解决了高温、快速反应过程的火工烟火药剂燃烧温度的测量难题, 为火工烟火药剂燃烧输出特性的研究及其新型配方的研制提供了技术支持。

## 参 考 文 献

- [1] Atsushi Ishihara. An Evaluation in Temperature Measurement of the Burning Surface by a Thermocouple. AIAA 2001-3578.
- [2] DAI Jing-min, SUN Xiao-gang(戴景民, 孙晓刚). Theory and Application of Multi-Spectral Radiation Thermometry(多光谱辐射测温理论与应用). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2002.
- [3] JIN Zhao, XIAO Peng, DAI Jing-min(金 钊, 萧 鹏, 戴景民). Journal of Combustion Science and Technology(燃烧科学与技术), 2006, 12(3): 213.
- [4] SUN Xiao-gang, YUAN Gui-bin, LIN Ke-feng, et al(孙晓刚, 原桂彬, 林科锋, 等). J. Tsinghua University (Science and Technology)(清华大学学报·自然科学版), 2005, 45(7): 999.
- [5] FAN Chuan-xin, WANG Peng(范传新, 王 鹏). J. of Astronautic Metrology and Measurement(宇航计测技术), 2006, 26(4): 18.

# Study on Flame Temperature Measurement of Pyrotechnics Using Multi-Spectral Thermometer

LI Zhan-ying<sup>1</sup>, XI Lan-xia<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>2</sup>, GUO Chong-xing<sup>1</sup>, LIU Chun-jian<sup>1</sup>, LIU Huan-yang<sup>1</sup>

1. The 213th Research Institute of China Ordnance Industry, Xi'an 710061, China
2. Research Institute of Xi'an Micromotor, Xi'an 710077, China

**Abstract** The radiation spectrum of pyrotechnics' burning flame was analyzed using transient spectrum radiometer. The working principle of multi-spectral thermometry was described. Combined with the radiation spectrum of pyrotechnics' burning flame, the multi-spectral thermometer system was designed which had twelve working channels. The tester can choose the right working channels to calculate according to the radiation spectrum of the flame to be tested. The system is composed by optics part, electronic part, data acquisition part and data processing part. In this paper, the emissive power of black powder's flame has been tested using the multi-spectral thermometer system. The burning flame temperature-time curve was showed after iteration calculation. Experiments indicate that the multi-spectral thermometer system can be well used to measure the flame temperature of pyrotechnics based on analyzing the emissive power when choosing the right working channels. This method lays a foundation for the research of combustion output characteristics of pyrotechnics.

**Keywords** Multi-spectral pyrometer system; Pyrotechnics; Burning flame temperature

(Received Sep. 29, 2009; accepted Dec. 28, 2009)