

文章编号: 1006-9941(2010)04-0405-04

# 多光谱辐射测温法应用于测定火工烟火药剂燃烧温度

李占英, 席兰霞, 刘举鹏, 郭崇星, 刘春建, 刘欢杨

(中国兵器工业第 213 研究所, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 分析了火工烟火药剂燃烧辐射特性,在此基础上进行了多光谱辐射测温法测定火工烟火药剂燃烧温度的可行性分析,并研制了具有 12 个测试通道的多光谱辐射测温系统。采用以色列 CI Systems SR-20-33 型号黑体炉(温度精度为  $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )验证了所研制的多光谱辐射测温系统的测温正确性以及稳定性。以某型号电点火具装药为例,应用该测温系统测量了其输出火焰燃烧温度。

**关键词:** 物理化学; 火工烟火药剂; 燃烧温度; 多光谱辐射测温法

**中图分类号:** TJ55; TJ450.6; O64

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.011

## 1 引言

火工烟火药剂输出火焰的燃烧温度是评定火工烟火药剂输出性能的一个重要指标,火工烟火药剂燃烧火焰温度的测量对火工药剂性能的研究和新型火工药剂产品的研发具有重要的指导意义。

火焰温度测量方法有两大类:接触式测温法和非接触式测温法。在火工烟火药剂燃烧火焰测温领域,主要应用的接触式测温法为热电偶测温法,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响应较慢<sup>[1]</sup>,不能捕捉到毫秒级烟火药剂燃烧温度,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;主要应用的非接触式测温法为红外热成像法,由于该方法需假定被测火工烟火药剂燃烧火焰的光谱发射率的值,而被测火焰的发射率难以确定,致使得不到被测目标真温,给总体论证研究和产品设计带来很大困难。因此,选择合适的测温方法对火工烟火药剂燃烧火焰温度进行测定显得十分重要。

近年来,随着光电子技术的提高和进步,多光谱辐射测温法得到了长足的发展,该方法具有测温时间响应快、不破坏被测火焰流场、适用于高温测量被测目标真温等优点,已成功应用于冶金、金属锻造等领域,正在向航空、航天、兵器等领域发展<sup>[2]</sup>。国际上对多光

谱辐射法的研究始于 20 世纪 20 年代,从最初的比色高温计<sup>[3]</sup>到 4 波长高温计<sup>[4]</sup>到 6 波长高温计<sup>[5]</sup>到 35 波长高温计<sup>[6]</sup>,人们对多光谱辐射测温法的研究还在继续。金钊<sup>[7]</sup>、范传新<sup>[8-9]</sup>等人应用多光谱辐射测温法对固体推进剂羽焰温度进行了探索性研究,由于固体推进剂的组成与火工烟火药剂的组成相似,故多光谱辐射测温法应用于固体推进剂羽焰温度的测量研究为该方法应用于火工烟火药剂燃烧温度的测定提供了参考和借鉴。

本文针对火工烟火药剂这一特殊测试对象,对多光谱辐射测温法测定火工烟火药剂燃烧温度的可行性进行了研究和探讨,并应用该方法测量了火工烟火药剂的燃烧温度。

## 2 火工烟火药剂燃烧火焰辐射特性

火工烟火药剂主要由氧化剂、可燃剂、粘合剂组成,是易燃易爆的多组分混合物,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密切相关。

火工烟火药剂燃烧火焰分还原层、完全燃烧层、热辐射层、氧气层和烟层等。带还原性介质的负氧平衡烟火药燃烧时,还原层显著增大,氧化层非常狭小,并且直接贴近在同样相当狭小的完全燃烧层上。燃烧火焰的温度层分布表现为,火焰内部的还原层内温度最低,因而此处主要是分子发光;贴近火焰表面附近温度较高,此处产生燃尽的反应生成物。还原层内因为温度较低,只能起到将反应物质解离为原子,但通常不能激发这些原子产生

收稿日期: 2009-12-18; 修回日期: 2010-02-05

基金项目: 武器装备预研基金资助项目(9140C3701140803)

作者简介: 李占英(1984-),女,在读硕士研究生,主要从事火工品测试技术的研究。e-mail: lizhanying031@163.com

原子辐射。对于完全氧平衡(零氧或正氧平衡)的烟火药的燃烧火焰结构来说,其还原层显著变小,还原层内的温度最高,因而此处可能产生原子辐射,即还原生成的元素的原子和尚未来得及参与反应的原子都可能产生原子辐射。离反应较远的火焰部分内以及温度较低的火焰部分内,燃烧生成物产生分子辐射。上述两种情况,火焰外围燃烧层都因由空气流入氧而具有氧化性能。外围燃烧层内产生辐射的物质即为已冷却的固体反应生成物,因此该层为热辐射层<sup>[10]</sup>。

火工烟火药剂燃烧火焰辐射与固体表面热辐射不同,它不仅包括药剂组分的热辐射,而且可能有化学发光,发光的主要载体为灼热的固体或液体颗粒和气体。当化学反应直接产生可辐射的受激态的原子或分子时,火焰的这种发光被称为化学发光。对于火焰辐射在多大程度上是由热激发产生的,在多大程度上又是由化学发光形成的,即化学发光到底对火焰温度贡献有多大,对于这个问题目前还没有确切的说法,一般认为,在高温火焰中,以热辐射为主;而在温度较低的接近燃烧反应临界状态的火焰中,反应区会因化学发光而增加辐射。

火工烟火药剂燃烧火焰在可见光和近红外区域都有很强的热辐射。由于不同物质的发射率特性不同,而且影响发射率变化的因素有很多,所以特别是对于烟火药剂这样的多种类、多组分的特殊辐射体来说,其燃烧火焰在不同波长下的发射率和发射率变化差异会很大。因此,在测量烟火药剂燃烧火焰温度时,要选择燃烧火焰辐射的发射物质尽可能少的光谱区间,以减小由发射率的变化对真温造成的影响。

为了更好地测量火工烟火药剂燃烧温度,本研究对火工烟火药剂燃烧辐射特性进行了测定与分析。首先采用瞬态光谱辐射仪对 A、B、C 三种型号烟火点火药装药、A、B 两种型号电点火具装药、某点火器装药、某点火药及黑火药共八种常用火工烟火药剂输出火焰的燃烧辐射特性进行了测定(光纤传光,测试高度为 2 cm)。其中,某电点火具装药、某点火药及黑火药的燃烧辐射特性曲线如图 1 所示(篇幅限制,只列举三幅)。

由图 1 可见,火工烟火药剂燃烧过程复杂,辐射主要部分为连续谱,伴随有特征谱出现,在 760 ~ 780 nm 处特征谱分布较为密集。其他几种药剂燃烧辐射特性曲线也表明,多种火工烟火药剂燃烧火焰辐射的特征谱多集中在 760 ~ 780 nm。

火工烟火药剂燃烧辐射特性的测试与分析为多光谱辐射测温法在火工烟火药剂燃烧温度测定方面的应用以及后续多光谱辐射测温系统工作波长的设计提供了依据。

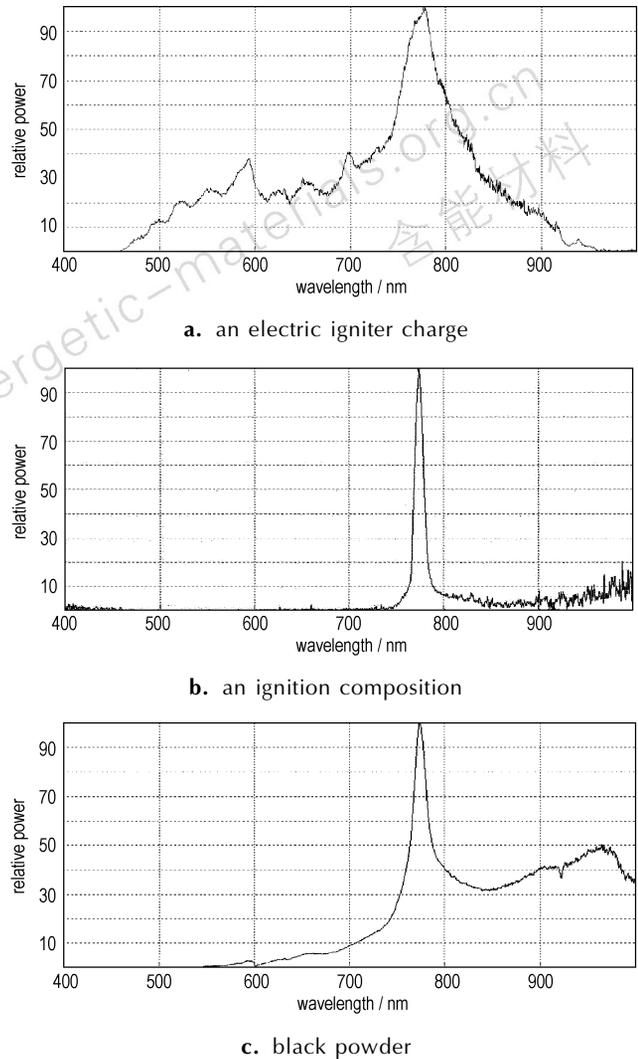


图 1 火工烟火药剂燃烧辐射特性曲线

Fig. 1 Emission curves of pyrotechnic composition

### 3 多光谱辐射测温法应用于测定火工烟火药剂燃烧温度的可行性分析

多光谱辐射测温法<sup>[11]</sup>遵循 Plank 定律,若多波长高温计有  $n$  个测试通道,则第  $i$  个测试通道的输出信号  $V_i$  可表示为:

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

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;  $\varepsilon(\lambda_i, T)$  是温度为  $T$  的目标光谱发射率;  $\lambda_i$  是第  $i$  个测试通道的有效工作波长。

多光谱辐射测温法利用目标多个光谱下的辐射亮度测量信息,经过数据处理得到被测目标的真温而非

视在温度(亮度温度、颜色温度等)。

从前文对火工烟火药剂燃烧辐射特性的分析可知,火工烟火药剂燃烧火焰辐射主要为热辐射,多光谱辐射测温法遵循 Planck 定律,表明该方法适用于辐射特性为热辐射的被测目标的温度测定。综合分析可知,在研究火工烟火药剂燃烧辐射特性的基础上,多光谱辐射测温法有望解决火工烟火药剂输出火焰燃烧温度的测定问题。为此本文在基于火工烟火药剂燃烧辐射特性的基础上,设计了多光谱辐射测温系统。

#### 4 多光谱辐射测温系统的设计与研制

结合火工烟火药剂燃烧辐射特性,本课题组研制了多光谱辐射测温系统,系统的测温范围为 1100 ~ 3000 K,采集速度为单通道 100 kHz。该系统通过处理两个不同温度处的测量数据来获取被测目标的真温,其硬件系统组成为光学系统、电路系统以及数据采集系统,系统结构框图如图 2 所示。

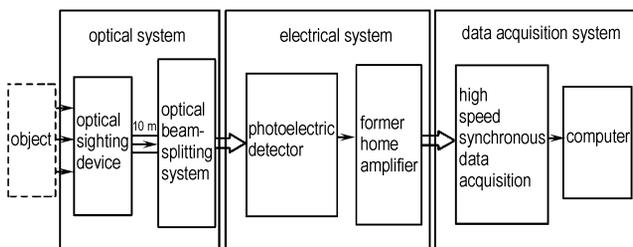


图 2 多光谱辐射测温系统

Fig. 2 Multi-spectral thermometer system

为了保证分光光路远离火工烟火药剂作用现场,避免光路发生位移,影响系统性能,设计光学瞄准头与分光系统分离开来,两部分之间用光纤传光;设计多光谱辐射测温系统具有 12 个测试通道,用以测定被测火工烟火药剂燃烧火焰位于不同波长处的辐射信息,由于多光谱辐射测温法遵循 Planck 定律,此定律描述黑体热辐射随温度的变化情况,热辐射光谱是连续的,在应用多光谱辐射测温法测试时应尽量避开特征谱的影响,减小对测试结果造成的误差,因此测试通道的工作波长应避开 760 ~ 780 nm 特征谱分布密集谱段,目的在于减小火工烟火药剂辐射的特征谱信息对测试结果的影响,系统的测温范围为 1100 ~ 3000 K,结合维恩位移定律<sup>[12]</sup>  $\lambda_m \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ,分别将 1100 K 与 3000 K 带入上式,得到最佳的工作波长为 0.97 ~ 2.63  $\mu\text{m}$ ,应用于本系统的光电探测器在

0.4 ~ 1.1  $\mu\text{m}$  有较好的光谱响应。各个测试通道的有效工作波长见表 1。测温系统采样速率为 100 kHz/通道,可满足对快速作用过程的火工烟火药剂燃烧过程中辐射信息的测量;真温计算方法采用基于二次测量的数据处理方法,该方法通过处理两个不同温度处的测量数据求取被测目标的真实温度。

表 1 各个测试通道的有效波长

Table 1 The effective wavelength of each testing channel

No.	$\lambda / \text{nm}$	No.	$\lambda / \text{nm}$
1	1081	7	640
2	1004	8	614
3	924	9	592
4	858	10	572
5	792	11	551
6	669	12	522

#### 5 实验

##### 5.1 验证实验与分析

笔者采用以色列 CI Systems SR-20-33 型号黑体炉(温度精度为  $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ )验证了本工作研制的多光谱辐射测温系统测试结果的可靠性、正确性及系统的稳定性。设置黑体炉温度为 1100  $^\circ\text{C}$ ,即 1373 K,测试距离为 1 m,应用多光谱辐射测温系统对黑体炉温度进行三次测试,测试结果见表 2。由表 2 的三次温度测量值与黑体炉设定温度值可知,温度差值最大为 25 K,测试最大相对误差为 1.82%。

表 2 多光谱辐射测温系统验证的实验结果

Table 2 Experimental results verified by multi-spectral thermometer system

black body setting temperature /K	testing temperature /K	temperature difference /K	relative error /%
1373	1391	18	1.31
1373	1386	13	0.95
1373	1398	25	1.82

这表明,所研制的多光谱辐射测温系统对黑体炉温度的测定结果表明该测温系统具有较好的测温稳定性以及实验重复性,测试结果可靠,这为后续应用该多光谱辐射测温系统测量火工烟火药剂的燃烧温度奠定了基础。

##### 5.2 测试实验与分析

以某型号电点火具装药为例,应用所研制的多光

谱辐射测温系统测量其燃烧火焰温度。测试高度为 2 cm; 测试距离为 4 m。测得的该电点火具装药燃烧火焰真温曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出, 实验测得最大燃烧温度为 2740 K, 药剂作用时间为毫秒级。这说明, 所研制的多光谱辐射测温系统能够应用于测定作用时间为毫秒级的火工烟火药剂输出火焰的燃烧温度。

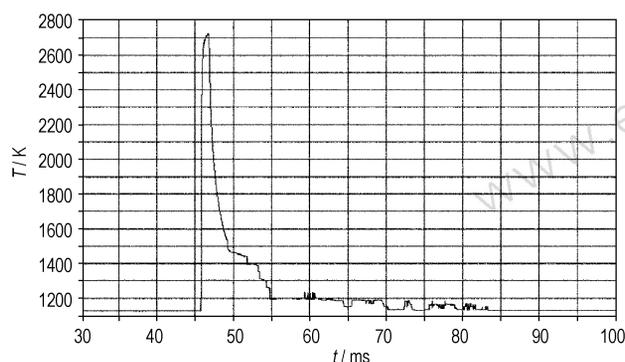


图 3 某型号电点火具装药燃烧火焰真温曲线

Fig. 3 Flame temperature curve of a type of electric igniter

## 6 结 论

火工烟火药剂的燃烧过程具有反应过程复杂, 燃烧过程快速等特点, 本文通过对火工烟火药剂燃烧辐射特性的分析, 将多光谱辐射测温法应用于火工烟火药剂燃烧温度的测定, 实验表明, 测试结果具有较高的可靠性及正确性, 通过选择高速率的数据采集卡多光谱辐射测温法能够实现快速作用过程的火工烟火药剂燃烧温度的测定。多光谱辐射测温法在火工烟火药剂燃烧温度测定方面的应用, 为进一步完善火工烟火药剂输出性能参数以及新型火工药剂产品的研制提供了技术支持。

## Flame Temperature Measurement of Pyrotechnic Composition Using Multi-spectral Thermometry

LI Zhan-ying, XI Lan-xia, LIU Ju-peng, GUO Chong-xing, LIU Chun-jian, LIU Huan-yang

(The 213th Research Institute of China Ordnance Industry, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** The combustion characteristics of pyrotechnic composition was studied. The feasibility of using multi-spectral thermometry to test the flame temperature of pyrotechnic composition was analyzed. The multi-spectral thermometer system with twelve testing channels was developed. The correctness and the stability of the multi-spectral thermometer system were verified using the Israel CI systems SR-20-33 black body which temperature precision is  $\pm 3$  °C. The flame temperatures of a type of electric igniters were tested using the multi-spectral thermometer system.

**Key words:** physical chemistry; pyrotechnic composition; flame temperature; multi-spectral thermometry

**CLC number:** TJ55; TJ450.6; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.011

## 参考文献:

- [1] Atsushi Ishihara. An evaluation in temperature measurement of the burning surface by a thermocouple[R]. AIAA 2001-3578.
- [2] 戴景民. 辐射测温的发展现状与展望[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(3): 1-7.  
DAI Jing-min. Survey of radiation thermometry[J]. *Techniques of Automation & Applications*, 2004, 23(3): 1-7.
- [3] Pyatt E C. Some consideration of the errors of brightness and two-colour types of spectral radiation pyrometer[J]. *J Appl Phys*, 1954, 5: 264-268.
- [4] Svet D Y, Sayapina V J, Levchuk V V, et al. Optical photoelectric pyrometer for measuring the true temperature of metals by radiation[J]. *High Temp High Press*, 1979, 11: 117-118.
- [5] Gardner J L, Jones T P, Davies M R. A six-wavelength pyrometer[J]. *High Temp High Press*, 1981, 13: 459-466.
- [6] Coppa P, Dai J M, Ruffino G. The transient regime of a multi-wavelength pyrometer[J]. *Int J Thermophys*, 1993, 14(3): 599-608.
- [7] 金钊, 萧鹏, 戴景民. 固体推进剂火箭发动机羽焰温度诊断的遗传算法研究[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(3): 213-216.  
JIN Zhao, XIAO Peng, DAI Jing-min. Research on genetic algorithm for plume temperature of solid propellant rocket engine[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2006, 12(3): 213-216.
- [8] 范传新. 固体火箭羽焰的辐射特性及其温度测量技术评述[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(3): 238-242.  
FAN Chuan-xin. Review on radiation characteristics and temperature measurement techniques for exhaust flames of solid rockets[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2004, 27(3): 238-242.
- [9] 范传新, 王鹏. 固体火箭发动机羽焰测温方法研究[J]. 宇航计测技术, 2006, 26(4): 18-22.  
FAN Chuan-xin, WANG Peng. A study on measurement method of exhaust flames temperature for solid propellant rocket engine[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2006, 26(4): 18-22.
- [10] 潘功配. 高等烟火学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- [11] 辛春锁, 戴景民, 王英力. 光纤式 20 波长辐射高温计的研制[J]. 红外技术, 2008, 30(1): 47-50.  
XIN Chun-suo, DAI Jing-min, WANG Ying-li. Development of optical fiber twenty-spectral radiation pyrometer[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(1): 47-50.
- [12] D P Dewettit, G D Nutter. Theory and Practice of Radiation Thermometry[M]. John Wiley & Sons, Inc. 1988: 99-102.