

文章编号: 1003-1480 (2009) 05-0054-03

火工烟火药剂燃烧火焰多光谱辐射测温技术研究

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: 为了准确测量火工烟火药剂的燃烧火焰温度, 根据多光谱辐射测温技术的工作原理研制了多光谱高温计; 基于二次测量的数据处理方法, 得到了燃烧火焰的真实温度。以黑火药为例, 采用多光谱高温计对其燃烧火焰的辐射能量进行了测定, 应用二次测量法对测得的数据进行迭代计算, 从而得到黑火药燃烧温度。实验表明, 该多光谱高温计能够很好地应用于火工烟火药剂燃烧温度的测定, 且具有高稳定性。为火工烟火药剂燃烧特性的研究奠定了基础。

关键词: 火工烟火药剂; 多光谱高温计; 火焰温度; 黑火药

中图分类号: TJ450.6 文献标识码: A

Study on Flame Temperature Measurement of Pyrotechnic Composition Using Multi-spectral Thermometer

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)

Abstract: In order to solve the problem of flame temperature measurement of pyrotechnic composition, the principle of work of multi-spectral pyrometer and the data processing method based on second measurement are described in this paper, and the multi-spectral thermometer is produced. Take the black powder for example, the multi-spectral thermometer is used to test the radiation energy of it. And the data processing method based on second measurement is used to calculate the data to get the true temperature of black powder. Tests and studies show that the multi-spectral thermometer can be well used to measure the flame temperature of pyrotechnics, and it has high stability. This study lays a foundation for the research on combustion characteristics of pyrotechnic composition.

Key words: Pyrotechnic composition; Multi-spectral pyrometer; Flame temperature; Black powder

瞬态测温作为一种测试技术在武器装备研究中有重要应用。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的指标, 为得到这些数据都需进行可靠的温度测试。测温研究在火工烟火药剂测试领域也必不可少。

目前, 主要采用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一个高温、高速的过程, 加之高熔点热电偶材料难以寻求且

热电偶测温反应较慢, 导致有时不能捕捉到被测烟火药剂燃烧温度, 致使需要的温度数据无法提供, 给总体论证研究和产品设计带来很大困难, 也造成不必要的人力物力损失。

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, 研制了多光谱高温计。实验证明, 该多光谱高温计能够很好地进行火工烟火药剂燃烧温度的测定, 为火工烟火药剂燃烧特性的研究奠定了基础。

收稿日期: 2009-08-31

作者简介: 李占英 (1984-), 女, 在读硕士研究生, 从事火工品测试技术研究。

基金项目: 武器装备预研基金资助项目。

1 测温原理

多光谱辐射测温法是在1个仪器中制成多个光谱通道,利用多个光谱的物体辐射亮度测量信息,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。多光谱辐射测温法的原理如下^[1],如果多波长高温计有 n 个通道,则仪器在第 i 个工作波长时的输出信号可表示为:

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

式(1)中: A_{λ_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; λ_i 是第 i 个有效工作波长; c_2 是普朗克第二辐射常数。由于发射率与环境因素及目标源的物理特性等因素有关,同一种物质在不同波长处会有不同的发射率,所以正确处理发射率的问题是温度测量的关键。

2 多光谱高温计

2.1 多光谱高温计硬件系统

多光谱高温计分为光学部分、电路部分、数据采集部分以及数据处理部分,图1为高温计的系统框图。该多光谱高温计设有12个工作通道,单通道采样频率为100kHz/通道。

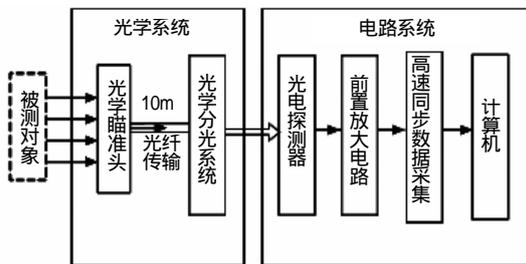


图1 多光谱测温系统框图

Fig.1 System of multi-spectral pyrometer

多光谱高温计亮温方程标定采用整百度标定法,亮温是指若实际物体在某一波长下的光谱辐射亮度与绝对黑体在同一波长下的光谱辐射亮度相等,则黑体温度称为测试对象的亮度温度,标定方程如式(2)

$$\ln Q = A + \frac{B}{T_b} + \frac{C}{T_b^2} \quad (2)$$

式(2)中: $Q = V_i / V_0$, V_i 为各通道测量电压值, V_0 为各个通道的最大测量电压值, T_b 为亮温, A 、 B 、 C 为标定方程系数。应用最小二乘法拟合标定方程,建立电压与亮温一一对应的关系,标定曲线如图2所示。

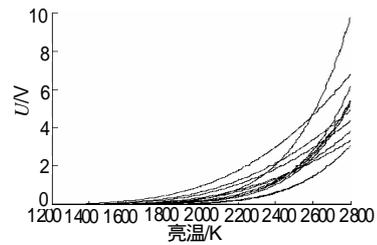


图2 亮温标定曲线

Fig.2 Calibration curve of bright temperature

使用 WDG30 型光栅式单色仪对多光谱高温计进行有效工作波长的标定,结果见表1。

表1 各个工作通道的有效波长

Tab.1 Effective wavelength of each testing channel

通道编号	1	2	3	4	5	6
峰值波长/nm	1 081	1 004	924	858	792	669
通道编号	7	8	9	10	11	12
峰值波长/nm	640	614	592	572	551	522

2.2 数据处理

影响多波长测温精度的关键之一是对发射率的处理。本文选定基于二次测量^[2]的数据处理方法,即通过处理两个不同温度处的测量数据来求取被测目标的真温及光谱发射率,该方法对发射率与波长之间的函数关系不做任何限制,但要求发射率在所选定的波长处与温度有近似相同的线性关系,如式(3)所示:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^0 [1 + k(T - T_0)] \quad (3)$$

式(3)中: T_0 为某个初始温度; ε_i^0 为波长为 λ_i 、温度 T_0 时的光谱发射率。

对于实际物体来说,发射率随温度变化是客观存在的,所以上述假设在一定温区、一定波长范围内是普遍成立的。

多波长温度计第 i 个通道的输出信号 V_i 如式(1)所示,在定点黑体参考温度 T' 下,第 i 个通道的输出信号 V_i' 为:

$$V_i' = A_{\lambda_i} \cdot \lambda_i^{-5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda_i T'}} \quad \text{此时 } \varepsilon(\lambda_i, T) = 1.0 \quad (4)$$

由式(1)和式(4)可得:

$$\frac{V_i}{V_i'} = \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda_i T}} \cdot e^{\frac{c_2}{\lambda_i T'}} \quad (5)$$

记 V_i^1 为第1个温度下、第 i 个通道的输出信号， T_0 为第1个温度的估计值，则第1个温度下、第 i 个波长处发射率的估计值 ε_i^0 可根据式(5)得：

$$\varepsilon_i^0 = \frac{V_i^1}{V_i} \cdot \exp\left(\frac{c_2}{\lambda_i T_0}\right) \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_i T}\right) \quad (6)$$

选择 $\varepsilon > 0$ ， $h > 0$ ， $M > 0$ ：

$$\varepsilon_i^1 \in (\varepsilon_i^0 - \varepsilon, \varepsilon_i^0 + \varepsilon)$$

$T \in (T_0 - M, T_0 + M)$ ， $k \in (-h, h)$ ，则第2个温度 T 处的发射率模型为：

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^1 [1 + k(T - T_0)] \quad (7)$$

由于对不同的 i 可求出不同的 T ，故用 T_i^2 表示第2个温度下 i 处的计算温度值，则由式(4)可得：

$$T_i^2 = \frac{1}{\frac{1}{T} + \frac{\lambda_i}{c_2} \ln \frac{\varepsilon_i \cdot V_i^1}{V_i^2}} \quad (8)$$

式(8)中： V_i^2 为第2个温度下，第 i 个通道的输出信号。则根据 T_i^2 的方差极小化准则，即：

$$\min F = \sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^n (T_i^l - E(T_i))^2 \quad (9)$$

$$\text{式(9)中：} \quad E(T_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i^l$$

由式(7)和式(8)可得：

$$T_i^2 = \frac{1}{\frac{1}{T} + \frac{\lambda_i}{c_2} \ln \frac{\varepsilon_i^1 [1 + k(T_i - T_0)] \cdot V_i^1}{V_i^2}} \quad (10)$$

式(10)是关于 T_i^2 的方程，可通过迭代法求解。

根据 T 与 T_0 的差值关系以及方差极小化准则确定最佳 k 值，由式(7)可计算出火焰发射率 $\varepsilon(\lambda_i, T)$ 的变化情况，又有第 i 个通道测得的亮温 T_b 与目标真温 T 的关系为：

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b} = \frac{\lambda_i}{c_2} \ln \varepsilon(\lambda_i, T) \quad (11)$$

进而计算得到真温随时间的变化关系。

3 实验

应用多光谱高温计对多种火工烟火药剂燃烧温

度进行了测定。以黑火药为例，实验中称取6g黑火药，将其散装于药盒中，用导火索将其引燃，测试距离为4m，用多光谱高温计瞄准被测黑火药试样进行测试。重复测试3次，真温计算结果如图3所示。

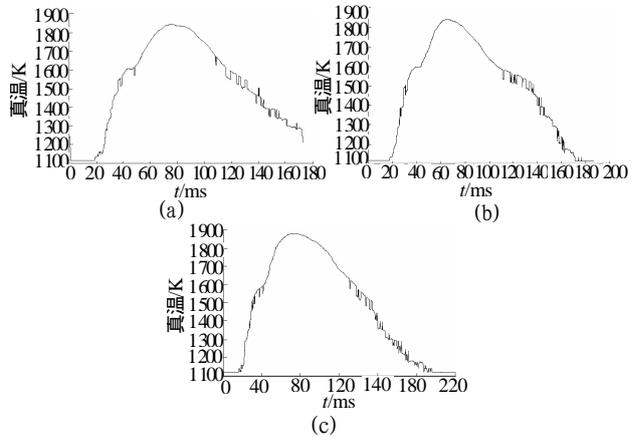


图3 黑火药燃烧真温曲线

Fig.3 Flame temperature curves of black powder

从图3中分析可知，3次试验真温计算最大值分别为1829K、1843K、1880K，且3次试验真温曲线趋势相同。实验结果表明，该多光谱高温计具有较高的测试稳定性和重复性。

4 结论

多次实验证明，多光谱高温计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，能够很好地用来测量火工烟火药剂燃烧火焰的温度，且具有较高的稳定性。

多光谱辐射测温技术在火工烟火药剂燃烧火焰温度测量中的应用，解决了传统测试方法数据易丢失的问题，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] 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.
- [2] 戴景民, 孙晓刚, 等. 多光谱辐射测温理论与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.