

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.06.11

弹药爆炸火焰温度多光谱测温技术研究

占春连¹, 韩军², 路绍军², 卢飞¹, 曹盼², 王佳²

(1. 中国兵器工业第 205 研究所, 陕西 西安 710065; 2. 西安工业大学, 陕西 西安 710021)

摘要: 辐射温度是表征辐射热源的核心参数, 要准确测试辐射温度首先须准确测试热辐射体的发射率。本文根据弹药爆炸时火焰辐射温度的特性和普朗克定律的适用性, 采用多光谱的方法对火焰光谱发射率进行拟合运算和绝对辐射定标, 研制了适合于弹药爆炸时火焰温度的多光谱测温设备, 并进行了现场测试和分析, 完成了火焰辐射温度的准确测试。

关键词: 多光谱; 辐射温度; 发射率

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)06-0048-05

Research on Multi-spectral Thermometry for the Flame Temperature Measurement of Ammunition Explosions

ZHAN chunlian¹, HAN Jun², LU Shaojun², LU Fei¹, CAO Pan², WANG Jia²

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The radiant temperature is one of the most critical parameters to show characteristic of radiant source. To accurately measure the radiant temperature, the emissivity of thermal radiator must be measured accurately. According to the characteristics of flame radiation temperature during ammunition explosion and Plank's law, multi-spectral thermometry is used in this paper to fit the emissivity of flame spectrum and calibrate the absolute radian. The equipment which is based on multi-spectral thermometry is developed to detect flame temperature during ammunition explosion. The on-site test and data analysis are done, and the accurate flame temperature is achieved by our equipment.

Key words: multi-spectral; radiant temperature; emissivity

0 引言

在辐射测温中普遍存在一个问题: 要准确测试热辐射体的辐射温度就必须准确测试热辐射体的表面发射率, 而物体的发射率不仅与材料有关, 而且还与波长、温度、表面状态等有关。以双色测温法为代表, 目前的测量方法都没有解决发射率的测量问题, 尤其在弹药行业。弹药爆炸时火焰的辐射温度是评价弹药毁伤效果和爆炸威力的核心参数, 由于爆炸具有强破坏、强电磁干扰、爆炸过程极短、温度高等特点, 导致爆炸时火焰的辐射温度是炸药行业中最难测量的物理量。

本文针对弹药爆炸时火焰温度测试的环境条件, 通过对多光谱测温方法的研究、通过对大口径光学系统、光纤分光模块、多通道光谱数据采集、辐射定标模块及测温软件等设计研究, 研制适合于爆炸火焰温度的多光谱测温系统, 实现火焰辐射温度的准确测试。

1 火焰辐射温度的测量方法

目前, 国内外对火焰辐射温度的测量方法主要采用非接触法。非接触测温法主要有总辐射法、亮温法、双色法、测温热像仪法、多波长法等。

1) 总辐射法

总辐射测温法是通过测量整个光谱范围内的总辐射功率来确定物体的温度, 理论上只要能测出全波长总辐射功率就可以测定物体的真实温度, 但是目前尚无对全波段有响应的探测器, 也没有能透过全波段的光学材料, 因此, 总辐射法很少被用于实际测温。

2) 亮温法

亮度测温法也称为单色温度计测温法, 是弹药领域中出现最早、结构最为简单的测试方法。一般由前端成像镜头、窄带干涉滤光片、探测器及测试软件等组成。其中, 窄带干涉滤光片需要与辐射体的辐射温度相匹配, 经过分光后只允许该特定波段通道的光能量照射进光电探测器, 整个探测原理类似光亮度测试

模式,因而被称为亮温法。该方法对于已知发射率的黑体或灰体也具有很高的测试精度。由于没有解决爆炸火焰辐射体发射率的准确测试问题,因此无法用于爆炸行业火焰辐射温度的测试。

3) 双色法

双色法是在高温计中设计两个光谱通道,通过对两个通道的光谱信息计算得出物体的温度。双色测温法根据普朗克定律,假定被测物体是灰体,即发射率在整个光谱范围内是平谱分布的,无突变、无畸变、也不受工作波长的影响,只与辐射体的温度有关。而炸药在爆炸时随时都在发生化学变化,其火焰的辐射温度及温场都在发生剧烈的突变。双色法是建立在发射率不变的基础上进行测试的。因此,不适合弹药爆炸时火焰辐射温度的准确测试。

4) 测温热像仪法

测温热像仪法是基于高分辨力、大视场、大面源红外成像器件而发展起来的测温设备,简单的红外测温仪一般由红外成像镜头、红外焦平面探测器及其驱动和采集电路、测试软件等组成,由于采用面阵红外成像器件可以给出辐射体辐射温度随空间位置的分布,因此常被应用于测试温场分布的热图像,尤其对研究炸药爆炸火团温度扩散方面具有其它测温法不可比拟的优势。但此方法测得的仍为物体的亮温,未解决发射率的准确测试问题,常常测试时需要预估发射率。另外红外热像仪由于其波段主要在红外光谱范围,更适合爆炸温度小于 1000 ℃ 的辐射温度测试。

5) 多光谱测温法

多光谱测温法是通过多个光谱通道同时采集弹药的光谱辐射信息,根据普朗克等辐射理论建立发射率、辐射温度与波长等之间数学模型及算法研究,从而实现火焰发射率和辐射温度的准确测试。具有测试精度高、测量范围大等特点。

国内对于多光谱高温计的研制始于上世纪 80 年代,国内相关单位研制 4 波长辐射测温仪、6 波长辐射高温计、棱镜分光式多波长辐射高温计等,并成功应用于火工烟火药剂燃烧的温度测量、航天发动机尾焰温度和发射率的同时测量等。

2 多光谱测温原理

多光谱测温方法是根据普朗克定律,采用多光谱的方法通过对爆炸物光谱发射率拟合运算以及绝对辐射定标来实现火焰温度的准确测试。

光谱发射率是指单波长下被测物与同温度下标准

黑体辐射功率的比值,表示为

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{L_i(\lambda, T)}{L_0(\lambda, T)} \quad (1)$$

式中: $L_0(\lambda, T)$ 为同温度标准黑体的光谱辐射亮度; $L_i(\lambda, T)$ 为温度为 T 的待测爆炸物光谱辐射亮度; $\varepsilon(\lambda, T)$ 为同温度待测炸药光谱发射率。炸药光谱发射率与波长之间具有一定的非线性关系,可采用常用的发射率模型表示为

$$\varepsilon(\lambda, T) = \exp(a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + \dots + a_m\lambda^m) \quad (2)$$

式中: $a_0, a_1, \dots, a_m$ 为光谱发射率拟合计算的系数。

按照普朗克公式,有

$$L_0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

$\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) \gg 1$ 时,近似公式为

$$L_0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad (4)$$

式中: c_1, c_2 分别为第一、第二辐射常数, $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$ 。

基于多波长测温原理,通过对标准黑体源标定获得多个通道的光谱响应度系数。当被测对象为标准黑体时,各通道的输出信号 $V_{ib}(\lambda)$ 为

$$V_{ib}(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \cdot R_i(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

根据积分中值定理,因为积分项连续,所以一定存在积分中值,使得

$$V_{ib}(\lambda) = K_i \cdot L_0(\lambda, T) \quad (6)$$

式中: K_i 为设备各通道的光谱响应函数; $L_0(\lambda, T)$ 为对应温度下每个通道峰值波长下的光谱辐射亮度; K_i 与温度 T 之间存在非线性函数关系。对于确定的光学系统、测试视场、滤波片、探测器及前置放大倍数, K_i 均是确定不变的量,也是辐射定标的关键,一般采用标准黑体标定获得。

当测爆炸辐射源时,根据标定得到的各通道光谱响应度系数以及探测系统得到的电压输出信号,即能获得爆炸辐射源的光谱辐射亮度。即当爆炸的火焰信号经过多光谱测温系统前部的成像镜头及一组滤光片后到达探测系统后,若多光谱测温系统某个 i 通道对应的输出信号 V_{ii} 为

$$V_{ii}(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_0(\lambda, T) \cdot R_i(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

根据第一积分中值定理,由于 $\varepsilon(\lambda, T)$ 连续,

$L_0(\lambda, T) \cdot R_i(\lambda)$ 可积, 且 $L_0(\lambda, T) > 0, R_i(\lambda) > 0$, 所以, $L_0(\lambda, T) \cdot R_i(\lambda)$ 在积分区间内不变号。因此, 在各滤波片带宽范围内, 至少存在一个点 λ_i' , 使得

$$V_{ii}(\lambda) = \varepsilon(\lambda_i', T) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0(\lambda, T) \cdot R_i(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

将公式(5)、公式(6)代入公式(8)可得

$$V_{ii}(\lambda) = \varepsilon(\lambda_i', T) \cdot K_i \cdot L_0(\lambda, T) \quad (9)$$

假设 $\varepsilon(\lambda, T)$ 在滤波片的带宽 $\Delta\lambda$ 内变化缓慢, 则可以看作一个常数, 因此对于每个通道, 可以认为 $\varepsilon(\lambda_i', T) = \varepsilon(\lambda_i, T)$, 因此, 有下列关系

$$V_{ii}(\lambda) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot K_i \cdot L_0(\lambda, T) \quad (10)$$

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{V_{ii}(\lambda)}{K_i \cdot L_0(\lambda, T)} \quad (11)$$

根据上述结果可联立方程组求解光谱发射率和爆炸温度。计算如下:

将式(2)带入式(11), 有

$$\begin{aligned} \exp(a_0 + a_1\lambda_i + a_2\lambda_i^2 + \dots + a_m\lambda_i^m) \\ = \frac{V_{ii}(\lambda)}{K_i \cdot L_0(\lambda, T)} \end{aligned} \quad (12)$$

将式(4)带入式(12), 两边取对数, 整理后有

$$\begin{aligned} a_0 + a_1\lambda_i + a_2\lambda_i^2 + \dots + a_m\lambda_i^m \\ = \ln \frac{\pi\lambda_i^5 \cdot V_{ii}(\lambda)}{c_1 \cdot K_i} + \frac{c_2}{\lambda_i T} \end{aligned} \quad (13)$$

在式(13)中, V_{ii} 为多光谱测温系统某个 i 通道某时刻 t 对应的输出信号; K_i 为对应 i 通道的光谱响应函数, 可通过标定获得, 为了计算方便, 定义常数项为

$$H_i(\lambda) = \ln \frac{\pi\lambda^5 \cdot V_{ii}(\lambda)}{c_1 \cdot K_i} \quad (14)$$

式(13)简化为

$$a_0 + a_1\lambda_i + a_2\lambda_i^2 + \dots + a_m\lambda_i^m = H_i(\lambda) + \frac{c_2}{\lambda_i T} \quad (15)$$

因此, 根据式(15)对应 n 个通道的中心波长有 n 个方程。

$$\begin{cases} a_0 + a_1\lambda_1 + a_2\lambda_1^2 + \dots + a_m\lambda_1^m = H_1(\lambda) + \frac{c_2}{\lambda_1 T} \\ a_0 + a_1\lambda_2 + a_2\lambda_2^2 + \dots + a_m\lambda_2^m = H_2(\lambda) + \frac{c_2}{\lambda_2 T} \\ \dots\dots\dots \\ a_0 + a_1\lambda_n + a_2\lambda_n^2 + \dots + a_m\lambda_n^m = H_n(\lambda) + \frac{c_2}{\lambda_n T} \end{cases} \quad (16)$$

未知数为 $a_0 \sim a_m$ 及温度 T , 一般情况取 $n \geq m+2$, 通过多光谱测温系统记录某时刻 t 时 n 通道的输出信号 V_{ii} , 求解方程组, 按照线性最小二乘法对多光谱测温的测量数据进行处理计算, 即可获得爆炸火焰某时刻 t 的真实温度 T , 将 $a_0 \sim a_m$ 带入式(2), 即可获得爆炸物的光谱发射率。

为了记录弹药爆炸过程中温度随时间的变化过程, 通过测量火焰各个时刻下的 V_{ii} , 分别带入计算即可获得温度 T 随时间变化曲线。

3 多光谱测温设备介绍

多光谱测温设备设计的原理见图1, 主要由大口径卡塞格林光学系统、光纤传输模块、多波长温度测量模块、CCD 温场图像采集模块、多路高速数据采集与触发系统模块及计算机测量软件等组成。

该设备通过大口径卡塞格林光学系统收集火焰燃烧时的光谱辐射信息, 采用分束镜将火焰燃烧时所发射出的光信号分为两部分, 其中一部分与集束光纤耦合, 成像在集束光纤的入口处, 另一部被成像在高分辨力面阵 CCD 接收面上; 多路光纤传输模块将卡塞格林光学系统收集的光谱信息分为多路传输至多波长温度测量模块中相对应的滤光片和探测器, 由多波长温度测量模块、多路高速数据采集与触发系统模块完成爆炸真实温度光信号采集与转换, CCD 图像采集模块主要完成火焰温场图像分布的采集与设备的调试, 最后, 经过计算机测量软件的数据处理与计算拟合, 给出火焰辐射温度的准确测试。

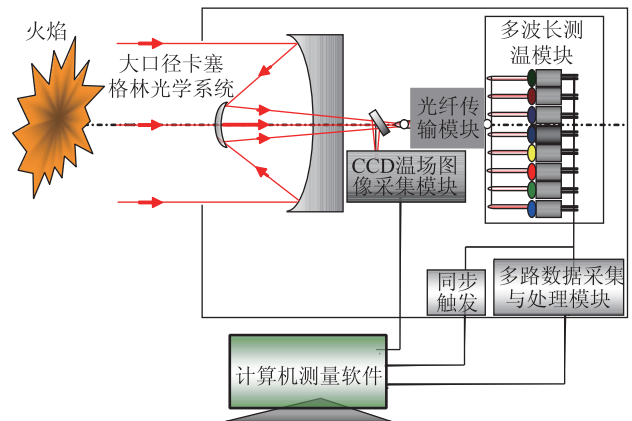


图1 多光谱测温设备测试原理框图

4 测试结果

利用本文的多光谱温度测试设备对某弹药爆炸过

程进行辐射温度测试，测试现场及爆炸瞬间的场景如图2，图3所示。



图2 测试现场



图3 爆炸瞬间的场景

图4是本设备所测试到的炸药爆炸辐射在各光谱通道的原始数据，完整记录了炸药爆炸过程中各通道的光谱辐射信号随爆炸时间的变化情况。

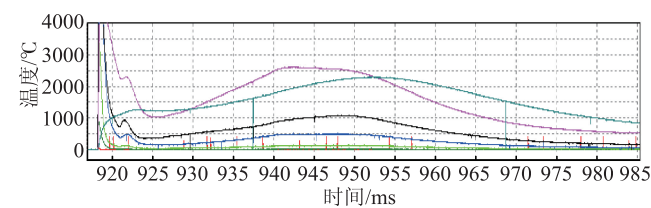


图4 炸药爆炸辐射信号的光谱响应曲线

图5通过大量的数据处理算法得到爆炸过程中温度随时间变化关系曲线。测试结果表明，该炸药爆炸最高温度达到8000℃，高温持续时间不足0.05ms。经分析对比，测试结果与该弹药的设计预期的温度很接近。

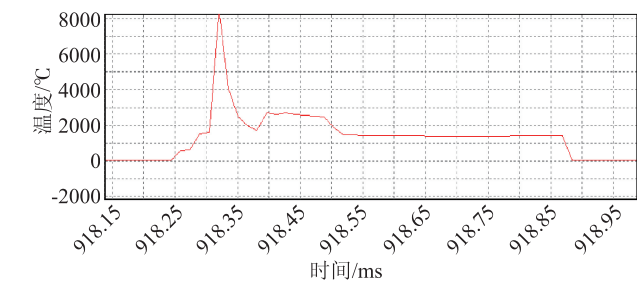


图5 炸药爆炸过程中温度随时间变化关系

5 讨论

1)测温范围

多光谱测温范围一般为1000~5000K，用维恩定律代替普朗克定律，在数学模型上，就决定了这种测温方法有一定的上限。当温度过高时，若 T 达到7000K，由近似计算相起的误差为1%；8000K时，误差约为2%；9000K时误差为3%。另外，高温时温度无法直接验证，只能采用绝对辐射定标及探测器线性进行标定，也带来了一定的误差。数学模型看，测量的温度没有下限，但爆炸行业的辐射温度很少低于1000K，当温度低于1000K时，峰值波长大于 $2.5\mu\text{m}$ ，进入中波红外波段，可采用非接触式测温。因此，可以认为多光谱测温的温度范围一般为1000~5000K。

2)光谱通道的设计

光谱通道的设计是多光谱测温设备硬件的核心，根据辐射定标的要求，其光谱通道越接近实际测试温度的峰值波长，测试精度越高。反之，误差越大。只有在峰值波长及其附近精细的光谱通道，其测温才能获得一定的测试精度。

3)发射率拟合运算

采用式(2)拟合运算，波长精度对发射率计算影响很大，因此光谱带宽越窄，测试精度越高，另外由于火焰的温度时时刻刻在发生变化，测试信号也会发生突变，因而会导致发射率计算崩溃。因此，实际测试时设备需要先存储测试的原始信号，通过软件对原始异常数据的筛选和判读完成火焰辐射温度的测试。

6 结论

本文论述了多光谱辐射测温法及研制的测温设备，并进行了现场测试和讨论分析，理论上说，多光谱测温设备几乎可以对任何辐射体的辐射温度进行测量，只要探测系统灵敏度和光谱匹配，测温无上限和下限。但是，实际测试中影响因素很多，需要考虑测温精度、测试的约束条件及被测对象的辐射特性等。因此，目前多光谱测试设备温度范围一般为1000~5000K。未来，随着光电测试技术的不断发展和完善，多光谱测温技术也会获得更高的测试精度。

参 考 文 献

[1] 孙崑. 爆炸火焰真温测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
[2] 占春连, 李燕梅, 刘建平, 等. 热辐射体真实温度的测试研究[J]. 应用光学, 2002, 23(6): 39-41, 44.

- [3] 郑锦坤, 白永林, 王博, 等. 炸药爆轰瞬时温度的实时测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(11): 3060-3063.
- [4] 李秀丽, 惠君明. 温压炸药的爆炸温度[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(5): 471-475.
- [5] 白永林, 任克惠, 欧阳嫔, 等. 炸药爆轰温度的瞬时光谱测量[J]. 光子学报, 2003, 32(7): 868-871.
- [6] 于常青, 闫军, 李家泽, 等. 炸药爆轰温度的光纤光谱测量方法[J]. 兵工学报, 2001, 22(1): 70-73.
- [7] Babdot J F. Detailed Analysis of the Integral Six-color Pyrometer [J]. High Temperatures-high pressures, 1990, 22: 409-424.
- [8] Khan M A, Allemand C, Eagar T W. Noncontact Temperature

Measurement. II. Least Squares Based Techniques[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(2): 403-409.

收稿日期: 2018-07-02

基金项目: 国家“十三五”技术基础项目(JSJL2016208B001)

作者简介



占连春(1969-), 女, 研究员, 1992 年至今一直从事国防研究工作。目前主要承担了大口径目标辐射特性现场校准技术研究、武器系统光学隐身校准技术研究等课题。

欢迎订阅《化学分析计量》

邮发代号 24-138

《化学分析计量》为国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版。国际刊号: ISSN 1008-6145, 国内刊号: CN37-1315/O6。《化学分析计量》是中国科技核心期刊、美国《化学文摘》(CA) 千种表收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊, 中国石油和化工行业优秀期刊、中国兵器工业优秀期刊、山东省优秀期刊。2018 年单价 15 元, 全年 90 元。您可通过邮局或银行汇款向《化学分析计量》杂志社办理订阅手续, 欲订阅过刊或合订本、合订本光盘的读者直接向杂志社订阅。

地址: 山东省济南市 108 信箱杂志社 邮编: 250031 电话: (0531) 85878132, 85878224, 85878148

E-mail: anameter@126.com 网址: www.cam1992.com

《化学分析计量》2018 年第 6 期目次

标准物质

特种铸造铝合金光谱分析用标准物质的研制

分析测试

微波三步提取-高效液相色谱-原子荧光法测定土壤中砷形态

还原分离-硫酸亚铁铵返滴定法测定碲化铜中碲

放射化学分析法测定水中⁶⁰Co

气相色谱法检测霜膏类化妆品中的芳香烃矿物油

气相色谱法测定常见饮料中 8 种邻苯二甲酸酯类化合物

电感耦合等离子体发射光谱法测定锡精矿中 10 种元素

高压密闭溶样-电感耦合等离子体质谱法测定土壤中有毒元素

离子色谱法快速测定土壤中的亚硝酸盐氮和硝酸盐氮

气相色谱法分析玫瑰花露水中香气成分及含量变化

离子交换色谱法测定西番莲中有机酸

高效液相色谱法同时测定柑普茶中橙皮苷和 6 种儿茶素

单波长色散 X 射线荧光光谱法测定高硫油品中微量氯

液液萃取-离子色谱法测定乏燃料后处理模拟料液中的叠氮酸

微波消解-火焰原子吸收光谱法测定土壤和沉积物中的重金属

气相色谱法测定木香中去氢木香内酯的含量

ICP-AES 法测定铁矿石中全铁、磁性铁、五氧化二铌、二氧化硅、氧化铈和磷

在线衍生-高效液相色谱法测定食品中的甲醛次硫酸氢钠

微波消解-双通道原子荧光光谱法同时测定土壤中的硒和锑

高效液相色谱法测定壳寡糖的含量

测汞仪固体直接进样测定土壤中总汞

氢化物发生-原子荧光光谱法测定高盐食品中的微量铅

傅立叶变换红外光谱法测定铝合金热轧乳液的有效成分

电感耦合等离子体原子发射光谱法测定水晶泥玩具中硼酸和硼酸盐

区带流动分析技术测定水中的氨氮

快速加热容量法测定土壤中有机质含量

计量技术

水分活度仪校准方法

实验室管理

分析化学领域中实验数据对专利申请创造性判断的影响

综述

检测苯氧羧酸类除草剂的样品前处理方法研究进展