

文章编号: 1006-9941(2017)03-0253-04

火药燃烧宽波段热辐射温度测量方法研究

王艳平^{1,2}, 曾丹², 李素灵², 刘英², 张同来¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 兵器工业安全技术研究所, 北京 100053)

摘要: 为了准确测量火药燃烧时的高温瞬态火焰表面温度, 利用辐射测温理论提出了火药燃烧宽波段热辐射测温方法, 集成设计了高温瞬态温度测量系统, 并采用单基发射药自由场条件下的燃烧试验, 验证了高温瞬态温度测量系统的有效性和可靠性。结果表明, 自由场条件下 3m 处的单基发射药燃烧火焰表面温度在 1~10 kg 等 4 种不同药量下实测为 1500~1800 °C, 数据重复性较好, 且测量结果与理论计算一致。

关键词: 火药; 热辐射; 热通量传感器; 发射药; 燃烧温度

中图分类号: TJ55; O643.2

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.03.013

1 引言

近年来, 随着火药品种的发展和性能要求的不断提高, 针对火药燃烧及温度测量方法的研究受到广泛关注, 也成为含能材料及武器制造等领域的重点研究内容之一。鉴于火药燃烧过程是以热辐射为主的物理化学反应过程, 具有燃速快、温度高等特点, 目前燃烧温度测量技术主要有热电偶、光谱辐射和光学测温等方法^[1-4], 如 Klein、Aller 和萨赫等^[5] 研究提出了利用热电偶测温的方法测定固体推进剂稳态燃烧时燃烧区的温度分布; 李占英等^[6] 研究提出了多光谱辐射测温技术测量火工烟火药剂燃烧温度; 余斌等^[7] 利用光学瞬态高温计开展了发射药点火燃烧温度的试验研究。但是, 由于火药燃烧是高温瞬态的过程, 且有燃烧转爆轰的安全风险, 因此, 火药燃烧火焰温度测量技术发展受到诸多因素限制和困扰, 如热电偶法受到高熔点热电偶材料、热电偶测温响应时间较慢等因素影响的限制, 导致其有时不能捕捉到被测火药的燃烧温度; 光学测温法则因受高发射率波长的限制、以及难以测得温度分布规律、测试装置较复杂等诸多问题影响, 使其测定结果不准确^[8-9]。由此可知, 能否准确测量火药燃烧温度, 不仅直接影响火药及武器装备的设计和研

制, 更对火药生产与储存过程的安全风险评估具有重要意义。

为了准确测量火药高温瞬态的燃烧温度、研究其燃烧温度分布规律、不断提升燃烧温度测定准确性和技术水平, 利用热传感技术灵敏度高和响应时间短等优势, 研究提出了宽波段热辐射温度测量方法, 设计并研制了具有实际应用价值的燃烧火焰热辐射温度测量系统。同时, 通过测量不同质量条件下的单基发射药燃烧火焰表面温度, 验证了火焰宽波段热辐射温度测量系统的可行性、合理性和可靠性。这不仅丰富了火药燃烧温度测定方法, 也为火药燃烧性能及风险评估的研究奠定了技术基础。

2 宽波段热辐射温度测量原理与方法

2.1 测量基本原理

宽波段热辐射温度测量主要根据黑体辐射理论和辐射热传导原理^[10], 采用热传感器技术测量燃烧火焰表面在垂直方向的热辐射强度, 按照兰贝特定律(Lambert)和波尔兹曼定律^[9] 计算得出所测燃烧区的宽波段热辐射总量和燃烧区的温度。

2.2 测量方法研究

由于火药燃烧表面绝对对辐射强度测量较困难, 故采用与火药燃烧表面几何观察因素相同的参比黑体, 根据相同温度下火药燃烧表面与参比黑体单色辐射的关系(火焰表面视为朗伯源), 在忽略热对流和接触热传导的影响下, 结合测温装置的各参数值和测得的热辐射通量值, 即可计算燃烧火焰表面被测量区域的平

收稿日期: 2016-06-15; 修回日期: 2016-09-26

作者简介: 王艳平(1980-), 女, 博士研究生, 主要从事含能材料及安全技术研究。e-mail: gloria_716@163.com

通信联系人: 张同来(1960-), 男, 教授, 主要从事化学能源技术研究。e-mail: ztlbit@bit.edu.cn

均温度值。火药燃烧宽波段热辐射测温方法具体如图 1 所示。

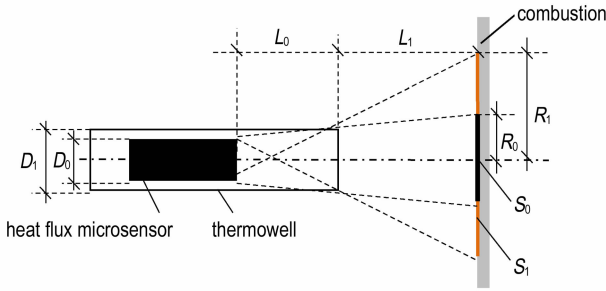


图 1 火药燃烧宽波段热辐射测温方法示意图
Fig. 1 Schematic diagram of broadband thermal radiation temperature measurement method for propellant combustion

图 1 中, S_0 、 S_1 为燃烧火焰表面被测量的区域; L_0 是传感器测量表面到套管口的距离, L_1 为测温套管口至火焰表面的距离; D_0 、 D_1 分别是传感器测量表面直径和套管内径。

在自由场测试条件下, 当 $R_1 \ll L_1$, 且 $D_1 - D_0 \ll L_0$ 时, 被测量的区域 S_0 、 S_1 的半径 R_0 、 R_1 远小于火焰半径, 则可近似将所测燃烧表面 S_0 、 S_1 视为平面, 如图 2 所示。

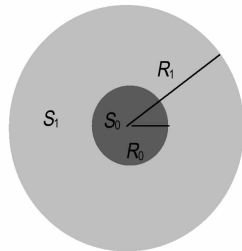


图 2 被测量区域燃烧表面平面图
Fig. 2 The combustion plan of measuring area

由火药燃烧表面几何观察图, 所测燃烧表面 S_0 、 S_1 的半径分别为:

$$R_0 = \frac{(D_1 - D_0)(L_0 + L_1)}{2L_0} + \frac{D_0}{2} \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{(D_1 + D_0)(L_0 + L_1)}{2L_0} - \frac{D_0}{2} \quad (2)$$

面积分别为:

$$S_0 = \pi R_0^2 \quad (3)$$

$$S_1 = \pi R_1^2 - \pi R_0^2 \quad (4)$$

式中, S_0 是热辐射能量传导到热通量传感器全部表面的区域, m^2 。

所测燃烧表面 S_1 呈带状区域, 其任何点的热辐射

能量传导到传感器局部表面, 且所处位置的半径越大, 传导到热通量传感器表面越小, 因此, 区域 S_1 面积可用等效面积来表示:

$$S'_1 = \rho S_1$$

利用几何假设法, 近似得到面积与角度的函数关系式:

$$S'_1 = \rho_0 S_1 \left(\cos\left(\frac{L_1}{L_1 + L_0}\right) \right)^2 \quad (5)$$

式中, ρ_0 为常数, 当测量精度要求不高时, 可将 $\rho = \rho_0$ 。根据斯特芬-波尔兹曼定律和兰贝特(Lambert)定律^[9], 单位微元的在半球空间的辐射力 E 为:

$$E = \sigma_0 T^4 = \frac{F}{S \times D^2}$$

式中, $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 为黑体辐射系数。 E 与热通量 F 有如下关系:

$$E = \frac{F}{S \times D^2}$$

式中, S 是辐射微元面积, m^2 , D 是辐射源在垂直方向距离, m , 由此可得:

$$T = \left(\frac{E}{\sigma_0}\right)^{1/4} = \left(\frac{F}{\sigma_0 \times S \times (L_1 + L_0)^2}\right)^{1/4} \text{ (K)} \quad (6)$$

式中, F 为热辐射通量值, 且设发射源与接收源热辐射通量值一致, $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$; $S = S_0 + S'_1$ 为被测区域等效面积, $L_1 + L_0$ 为热通量传感器测量表面到火焰的距离, m 。

综上, 宽波段热辐射温度测量方法是利用测温套管及热传感器的几何尺寸及角度关系, 确定了测温区域及热辐射接收条件, 在合理优化几何系数等影响因素下, 研究设计了燃烧火焰温度测量系统。

3 测量系统设计与调试

3.1 测量系统的设计

根据宽波段热辐射温度测量方法, 结合自由场条件下的火药燃烧情况, 利用自行研制的测温套管、HFM-6D/H 型热通量传感器 (Heat Flux Microsensor)、16 通道高速数据采集仪、放大器、计算机、同步控制系统和同轴电缆等仪器装置设计了温度测量系统, 具体如图 3 所示。

其中, 测温套管是整套测温系统的关键部件, 其内表面直径 $D_1 = 9.2 \text{ mm}$, 表面直径 $D_0 = 5.2 \text{ mm}$; HFM-6D/H 型热通量传感器是整套测温系统的核心, 其响应时间为 0.3 ms , 最低灵敏度 $8 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$; 传感器测量表面至套管口距离为 $L_0 = 95 \text{ mm}$, 套管口距火焰 $L_1 = 3 \text{ m}$; DH5960 型数据记录仪具有数据采集、记

录、分析功能,带宽为 1 MHz; AMP 6 型放大器最大电压增益 5000,最大带宽 1 MHz; 同步控制系统采用 12 V 断通式外触发,以保证温度测量系统的瞬态准确性。

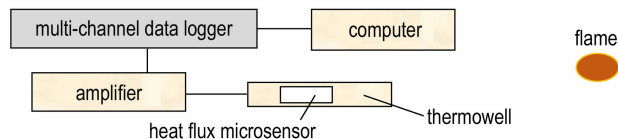


图 3 宽波段热辐射测温系统设计图

Fig. 3 Design of broadband thermal radiation temperature measurement system

3.2 测温系统的调试

根据火药燃烧过程以热辐射为主,利用标定的凹形镜面灯作为源,采用德国生产的超高速红外测温仪 (KLEIBER KMGA 740, 响应时间为 10 μs; 温度范围为 350 ~ 3500 K), 与宽波段热辐射测温系统进行实验室比对。由于这两套测温系统得到的测试结果都是标准源热辐射的等效温度,故可保证系统调试的合理性和可靠性。假设标准源发射率为 1, 对比分析宽波段热辐射测温系统和红外测温系统两套装置实验测得温度值。图 4 显示,两种测试方法结果基本一致,偏差率在 1.2% ~ 3.3% (以红外测温系统为基准), 达到了设计要求。根据结果,修正公式(5)中参数 ρ_0 值为 1。

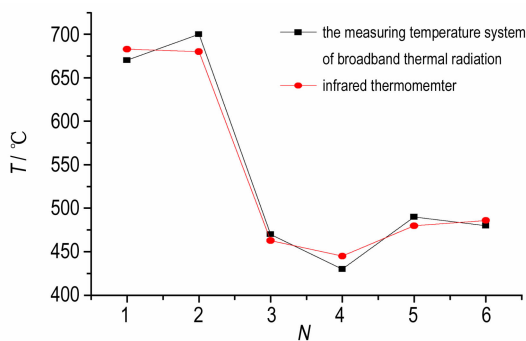


图 4 两套温度测量系统温度误差对比

Fig. 4 The diagram of two temperature measuring systems temperature error contrast

4 测试结果与分析

在自由场条件下测试单基发射药(配方: 硝化棉, 二苯胺乙醚和酒精等) 燃烧时的火焰表面温度, 宽波段热辐射测温系统布置于燃烧中心 3 m 处, 分别对 1, 3, 5, 10 kg 等 4 种药量进行测试, 每种药量进行 5 次温度测量取测量结果的平均值, 热通量测试波形典型

曲线如图 5 所示, 其中选取波峰值, 即每次试验热通量最大值。根据公式(6), 进行温度计算, 测试结果如表 1 所示。

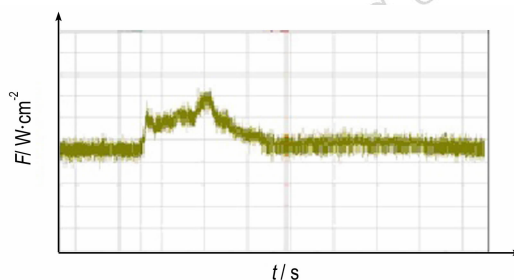


图 5 单基发射药热通量测试典型波形

Fig. 5 Thermal waveform of heat flux test for single-base propellant burning

从测试曲线看, 热通量值随着单基发射药的燃烧时间不断攀升, 当达到峰值后, 又快速下降并趋于基态, 且上升时间与下降时间大致相同。由此可知, 宽波段热辐射测温系统可清晰测出单基发射药的温度变化情况。

表 1 宽波段热辐射测温系统测量发射药火焰表面温度最大值

Table 1 The maximum values of the flame temperature of the measured burning propellant

dosage /kg	maximum temperature of single-base propellant flame/°C					average	std. dev.
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5		
1	1572	1554	1538	1556	1510	1546	21
3	1634	1738	1536	1550	1653	1622	73
5	1669	1584	1574	1600	1729	1631	59
10	1743	1740	1684	1801	1774	1748	39

由上可知, 不同药量的火焰表面温度, 随着药量不断增加, 温度值逐步增大, 说明宽波段热辐射测温系统能够准确反映温度变化, 宽波段热辐射测温方法与系统具有可行性; 相同药量的 5 次测量数据重复性较好, 且温度值波动范围控制在 7% 以内, 说明宽波段热辐射测温系统具有较好的稳定性和可靠性; 从测试数据的温度值看, 单基发射药燃烧火焰表面温度在自由场条件下在 1500 ~ 1800 °C, 温度数据与理论计算^[11]较吻合。

4 结论

(1) 宽波段热辐射温度测量方法是一种非接触式的高温瞬态测温法, 可测量波长从零到整个光谱范围

内的总辐射强度及温度,实现了近距离测量火药燃烧火焰温度的目标,从而为含能材料燃烧爆炸场热辐射测量及热毁伤效应研究提供了一种温度测量方法。

(2)宽波段热辐射温度测量方法在合理优化系数和忽略热对流等影响因素条件下,能够避免由于能量谱峰值波长随温度升高而蓝移造成的单波段(或2波段)测量不准确等问题,试验测量单基发射药燃烧温度为1500~1800℃,验证了温度测量系统能够稳定可靠地测试出重复性较好的数据,且整体系统(如热通量传感器)在测试中温升较小,具有测量温度范围宽、响应时间短、传输距离远、抗干扰能力强、可靠性高等特点,在瞬态高温测试领域具有明显的优势,具有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] 郭学永, 李斌, 王连炬, 等. 温压药剂的爆炸温度场测量及热辐射效应研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(5): 119-124.
GUO Xue-yong, LI Bin, WANG Lian-ju, et al. Measurement of blast temperature field and study of thermal radiation effect for thermo-baric explosive[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(5): 119-124.
- [2] 马红, 徐继东, 朱长春, 等. 密封容器内爆炸实验瞬态温度测试技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(5): 750-756.
MA Hong, XU Ji-dong, ZHU Chang-chun, et al. Transient temperature testing technology of explosion experiment in airtight container[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2014, 12(5): 750-756.
- [3] 李彦. 原子发射光谱双谱线法测量火药药剂燃烧温度[D]. 太原: 中北大学, 2015.
LI Yan. Flame Temperature Measurement of Pyrotechnics Using Atomic Emission Two-line Method[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [4] 季伟. 远距离宽范围温度信号测试技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
JI Wei. The study of wide range temperature signal remote measurement technique[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [5] 王伯羲, 冯增国, 杨荣杰. 火药燃烧理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
WANG Bo-xi, FENG Zeng-guo, YANG Rong-jie. Gunpowder combustion theory[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
- [6] 李占英, 席兰霞, 陈军, 等. 多光谱辐射测温技术测量火工烟火药剂燃烧温度[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8): 2062-2064.
LI Zhan-ying, XI Lan-xia, CHEN Jun, et al. Study on flame temperature measurement of pyrotechnics using multi-spectral thermometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(8): 2062-2064.
- [7] 余斌, 杜成中. 发射药点火燃烧测温技术探索研究[J]. 火炸药学报, 2001(2): 28-31.
YU Bin, DU Cheng-zhong. Study on the temperature determination technique for ignition and combustion of propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2001(2): 28-31.
- [8] 阿格拉沃尔. 高能材料(火药、炸药和烟火药)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
Jai Prakash Agrawal. High Energy Materials (Propellants, Explosives and Pyrotechnics)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [9] 张茹开. 爆炸瞬态温度测试方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
ZHANG Ru-kai. Research on explosion transient temperature measurement[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [10] 戴景民. 多光谱辐射测温理论与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
DAI Jing-min. Theory and practice of multi-spectral thermometry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [11] 廖静林, 江劲勇, 路桂娥, 等. 发射药的火焰燃烧温度计算与测定分析[J]. 含能材料, 2011, 19(1): 74-77.
LIAO Jing-lin, JIANG Jin-yong, LU Gui-e, et al. Calculation and measurement analysis of propellant burning temperature[J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(1): 74-77.

Research on Measurement Method of Propellant Combustion Temperature with Broadband Thermal Radiation

WANG Yan-ping^{1,2}, ZENG Dan², LI Su-ling², LIU Ying², ZHANG Tong-lai¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing 100081, China; 2. Safety Technology Research Institute of Ordnance Industry, Beijing 100053, China)

Abstract: In order to accurately measure the transient high temperature of propellant combustion, the measurement method of broadband thermal radiation temperature for propellant combustion was studied on the thermal radiation theory. The high temperature transient measurement system was integrated; the validity and reliability of the temperature measurement system were verified by single-base propellant combustion test under free-field conditions. Results show that the flame temperatures are between 1500 °C and 1800 °C when the samples of propellant are placed 3 m away, and the data are repeatable and coincide with theory.

Key words: propellant; thermal radiation; heat flux microsensors; single-base propellant; combustion temperature

CLC number: TJ55; O643.2

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.03.013