

文章编号: 1006-9941(2006)04-0297-05

用于热毁伤效应评估的单色高温计的研制及应用

谢立军^{1,2}, 周凯元¹, 刘庚冉¹, 杨志¹

(1. 中国科学技术大学 力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027; 2. 75130 部队, 广西 贵港 537103)

摘要: 研制了一种用于评估炸药热毁伤效应的单色高温计。由单色高温计与热电偶测温对比实验可知, 在单色测温中爆炸产物可近似看作黑体处理, 其误差率为 6.2%。运用该单色高温计对 TNT 爆炸产物温度进行实验测量, 所得的热毁伤效应曲线较完整地反映了爆炸产物扩散过程中温度随时间的变化情况, 其峰值温度为 3167.15 K。

关键词: 爆炸力学; 单色高温计; 爆炸产物; 热毁伤

中图分类号: O389; TJ55

文献标识码: A

1 引言

炸药热毁伤效应是指炸药爆炸释放出来的热对目标的毁伤效应, 它不仅与爆炸产物的温度有关, 还与爆炸产物扩散过程中温度的变化和持续时间有关。由于炸药爆炸具有巨大的破坏性, 传统接触式测温方法不能应用于爆炸产物温度测量。近年来, 随着辐射测温理论的发展, 国内外学者在辐射测温这一领域作了许多有益的尝试和探索^[1-9]。然而, 由于受到一定条件的制约, 现有的测温系统仅能测量炸药爆炸产物的平均温度或某一瞬时的温度, 不能完整反映爆炸产物扩散过程中温度的变化情况。本文介绍的单色高温计, 采用高速动态数据采集系统即时采集炸药爆炸产物的实时温度数据, 所得热毁伤效应曲线可完整描述扩散过程中产物温度随时间的变化情况。

2 单色高温计的工作原理

单色高温计是以 Planck 辐射理论为基础, 将待测光源的辐射亮度与标准光源的辐射亮度进行比较, 从而测得待测光源温度的一种光学仪器。

按照经典辐射理论, 理想黑体光谱辐射亮度由 Planck 公式^[10]描述为

$$L(\lambda, T) = \pi^{-1} c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1} \quad (1)$$

式中, $L(\lambda, T)$ 为光谱辐射亮度, $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$; λ 为波长, μm ; T 为绝对温度, K; 第一辐射常数 $c_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 (W \cdot \mu m^4/m^2)$; 第二辐射常

数 $c_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 (\mu m \cdot K)$ 。若 $c_2/\lambda T > 2.5$ 时, 则式(1)可用 Wien 公式^[10]近似, 即

$$L(\lambda, T) = \pi^{-1} c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T)]^{-1} \quad (2)$$

对于非黑体, 光谱辐射亮度^[10]可表示为

$$l(\lambda, T) = \varepsilon L(\lambda, T) \quad (3)$$

式中, ε 为非黑体的光谱发射率, 它取决于波长、温度及非黑体表面状态。

目标光源的光辐射经单色高温计透镜组、单色滤光片, 在光电探测器上形成一定带宽的狭窄谱带, 该谱带所对应的输出电(压)信号 h ^[11]为:

$$h = K(\lambda) \varepsilon L(\lambda, T) = K(\lambda) \varepsilon \pi^{-1} c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T)]^{-1} \quad (4)$$

式中, $K(\lambda)$ 为单色高温计的系统常数, 可由标定给出, 工作波长 λ 、第一辐射常数 c_1 和第二辐射常数 c_2 皆为已知, 因此, 只需知道待测目标的光谱发射率 ε , 由输出电(压)信号 h , 即可确定被测对象的温度 T 。

单色高温计工作原理框图如图 1 所示。由光传来的待测目标的辐射能由透镜汇聚在单色滤光片上, 经单色滤光片滤光, 将一定带宽的狭窄谱带投射在光电探测器的感光头上, 光电探测器输出的电信号经放大电路及 A/D 转换器后, 送至动态数据处理系统, 得到电压信号, 再经温度转换, 在显示器上显示出温度随时间变化的曲线。

3 主要技术性能指标

单色高温计由光学系统、光电探测器、信号放大器及信号处理、显示输出等部分组成, 其所达到的技术指标可概括为: 工作波长为 $(1.06 \pm 0.05) \mu m$; 温度测量范围为 $1273.15 \sim 3273.15 K$; 响应时间为 $100 \mu s$; 高温计输出负载电阻为 200Ω , 与动态数据采集系统

收稿日期: 2006-01-10; 修回日期: 2006-04-08

作者简介: 谢立军(1974-), 男, 硕士研究生, 研究方向为气体爆轰与工业安全。e-mail: xlj@mail.ustc.edu.cn

通讯联系人: 周凯元(1945-), 男, 正研高工, 主要研究方向为气体爆轰与工业安全。e-mail: zhouky@ustc.edu.cn

连接。响应时间表示红外测温仪对被测温度变化的反应速度,定义为达到最后读数的95%能量所需要的时间,它与光电探测器、信号处理电路及显示系统的时间常数有关。

测温时,被测目标面积应充满测温仪视场。一般被测目标尺寸应超过视场大小的50%为好。当目标尺寸小于视场时,背景辐射就会进入测温仪而干扰测温读数,造成误差。

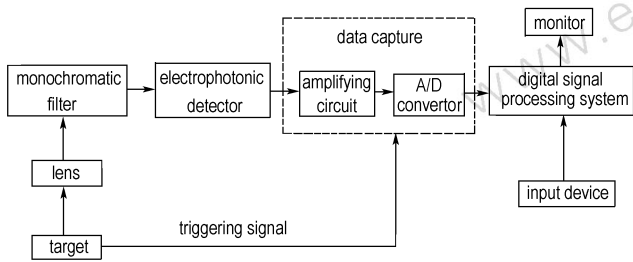


图1 单色高温计工作原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of a single-wavelength pyrometer

4 单色高温计的标定及误差分析

4.1 单色高温计的标定

单色高温计测温前需利用标准光源标定,以确定其系统常数 $K(\lambda)$ 。当光电探测器接受到的光功率处在其线性范围时,电(压)信号幅度与输入高温计的辐射亮度成正比。

$$h_0 = K(\lambda) \varepsilon L(\lambda, T_0) \quad (5)$$

式中, $K(\lambda)$ 为单色高温计系统常数; T_0 为标准光源的绝对温度; ε 为标准光源的发射率,这里将标准光源看成黑体, ε 取1; λ 为单色高温计的工作波长,当给定 T_0 后,由采集到的电(压)信号幅度 h_0 即可求得单色高温计的系统常数 $K(\lambda)$ 。

由一个标准温度点标定的 $K(\lambda)$ 值往往不够精确,若待测温度与标定温度相差较大,则会产生较大误差。通常采用测温范围内的多个标准温度点进行标定,然后运用式(6)^[5]对标定结果进行拟合,以确定 $K(\lambda)$ 值。

$$K(\lambda) = \frac{\sum_{j=1}^m h_{0j} L(\lambda, T_{0j})}{\varepsilon \cdot \sum_{j=1}^m L^2(\lambda, T_{0j})} \quad (6)$$

式中, j 为标定的温度点序号, m 为标定的温度点数。

4.2 发射率分析

发射率是指物体在指定温度的辐射量与同温度黑体的相应辐射量的比值。在辐射测温中,由于所测目标通常为非黑体,因此,辐射测温需考虑发射率的影响。在炸药爆炸产物扩散过程中,爆炸产物发射率受波长、温度影响,一般情况下是未知的,也是变化的。为检验气态爆炸产物发射率对测温的影响,我们设计了一组单色高温计与热电偶的对比测温实验,实验装置如图2所示。氧炔焰焊枪水平固定在支架上,铂铑热电偶测点固定在喷嘴正上方12 cm处。单色高温计镜头距喷嘴200 cm,与铂铑热电偶测点同高,且镜头中心线穿过测点。因铂铑热电偶温度反应时间远大于单色高温计的响应时间,实验时,先将热电偶探头置于喷嘴上方12 cm处的外焰位置,待热电偶温度稳定后,再触发单色高温计,以实现两种测温手段同步。

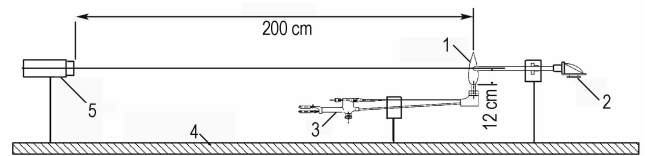


图2 氧炔焰温度测量装置略图

1—氧炔焰, 2—热电偶, 3—气焊枪,
4—地面, 5—单色高温计,

Fig. 2 Sketch of the device of measuring flame temperature

1—oxyacetylene flame, 2—thermocouple, 3—gas jet,
4—ground, 5—single-wavelength pyrometer

图3为两次实验中单色高温计测得的温度曲线,反映氧炔焰温度随时间的变化。由于铂铑热电偶响应较慢,不便同单色高温计测得的温度值进行比较,因此,将单色高温计所测温度作平均后在图中用水平虚线表示,以方便比较。

表1为两种测温手段测得的氧炔焰温度。第一次实验中,热电偶测得的氧炔焰温度为1440.15 K;单色高温计测得的氧炔焰最高温度为1678.25 K,其平均温度为1530.09 K,比相同条件下热电偶测得的温度高6.2%。第二次实验中,热电偶测得的氧炔焰温度为1525.15 K;单色高温计测得的氧炔焰最高温度为1673.45 K,其平均温度为1532.91 K,比相同条件下热电偶测得的温度高0.5%。由实验结果可知,两种测温手段测得的结果比较接近。因此,利用单色高温计测量爆炸产物温度时,可忽略爆炸产物发射率的影响,将爆炸产物作为黑体处理。

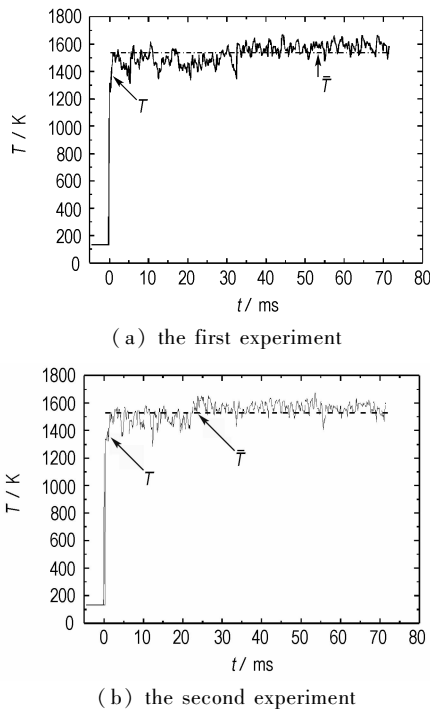


图 3 单色高温计测量氧炔火焰温度曲线
Fig. 3 Curves of flame temperature measured by single-wavelength pyrometer

表 1 单色高温计与热电偶测温比较
Table 1 Flame temperature measured by pyrometer and thermocouple K

serial number	pyrometer		thermocouple
	maximum value	average value	
1	1678.25	1530.09	1440.15
2	1673.45	1532.91	1525.15

4.3 误差讨论

物体的光谱辐射亮度与某一温度黑体的光谱辐射亮度相等时,称该黑体的温度为物体的亮温。依此定义,由式(2)、(3)可导出物体的真温 T 与亮温 T_L 之间的关系

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_L} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon \quad (7)$$

由式(7)可导出:

$$T_L = (1/T - \lambda \ln \varepsilon / c_2)^{-1} \leq T \quad (8)$$

亮温与真温的相对误差为

$$\frac{\Delta T_L}{T_L} = \frac{T - T_L}{T_L} = - \frac{\lambda T}{c_2} \ln \varepsilon \quad (9)$$

由式(9)可知,单色高温计的测温准确度与待测目标发射率的大小有关。影响发射率的因素很多,也很复杂,它不仅与温度、波长有关,而且还与待测目标

的物性有关。故不同待测目标的发射率可能有很大的差别。即使采用现场标定的方法,由于标定时的条件与现场测试条件存在差异,且标定至多只能在有限的几个温度点上进行,因此,发射率真实值 ε 与实际取值的差值 $\Delta \varepsilon$ 总是存在的。为确定 $\Delta \varepsilon$ 给单色高温计测温带来的误差 ΔT ,可对式(7)两边求微分。在 $|\Delta \varepsilon|$ 很小时,可以利用微分 dT 近似地代替增量 ΔT ,即

$$\Delta T \approx dT = - \frac{\lambda}{c_2} T^2 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \quad (10)$$

若被测目标温度 $T = 1500$ K,发射率 ε 相对于实际取值有 1% 的变化,由式(10)可算出,当 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 时, $\Delta T = 1.66$ K; 若被测目标温度 $T = 3000$ K,发射率 ε 相对于实际取值有 1% 的变化,由式(10)可算出 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 时, $\Delta T = 6.64$ K。

5 TNT 热毁伤效应测量与结果分析

实验装置如图 4 所示,将 1800 g TNT 装药置于离地面 36 cm 的平台上,单色高温计距离装药 20 m,镜头中心线与装药中心同高且穿过装药中心。

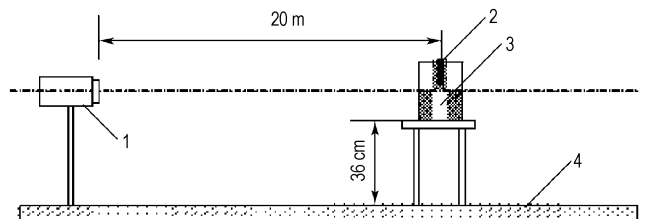


图 4 1800 g TNT 爆炸产物温度测量装置图

1—单色高温计, 2—雷管, 3—TNT 装药, 4—地面
Fig. 4 Sketch of measuring device for the temperature of explosion products of 1800 g TNT
1—pyrometer, 2—detonator, 3—TNT explosive, 4—ground

TNT 装药采用 8 号雷管起爆后,爆炸产物的光辐射进入高温计主体,并经光电二极管转换为电信号,触发动态数据采集系统,至此,数采系统开始动态采集由爆炸产物光辐射转换来的电信号并换算成温度。

图 5 给出了 TNT 爆炸产物扩散过程中温度随时间变化的热毁伤效应曲线。当雷管引爆 TNT 装药后,爆轰波在装药内迅速沿径向和轴向两个方向传播。爆轰波在装药内部传播时,由于装药不透光,爆轰波光辐射不能被高温计采集到。只有当爆轰波传至装药与空气的界面以后,火焰产生的光辐射才能被高温计采集到。爆轰波穿越炸药与空气的界面后,其前驱冲击波继续向外传播,冲击波波后的高温高压产物紧随

其后急剧向外飞散,随着产物区体积的迅速膨胀,产物温度也急剧下降。虽然爆轰波穿出界面的瞬间温度极高,但高温持续时间非常短,爆轰波所包围的区域也很小,因此其对炸药的热毁伤效应贡献很难评价。在图5中第一个温度峰值也并非爆轰波恰好传播到界面时的温度,因为该单色高温计的响应时间仅能达到100 μs ,而整个爆轰波存在时间也仅为几微秒。但该温度峰值应该能够代表产物扩散过程中记录到的最高温度值。图5给出的TNT爆炸实验温度曲线上,第一个温度峰值为3167.15 K,与文献[11]给出TNT爆温实测值3010 K比较接近。曲线在3 ms处温度突然下降,结合高速摄影的图像分析,可以清晰地看到,这是由于地面反射而引起的爆炸产物的振荡,火球偏离爆心向上运动,使光辐射不能进入高温计而导致曲线突然下降,但随后周围热的产物介质又迅速补充到空位区,使得曲线又恢复到高温位置。

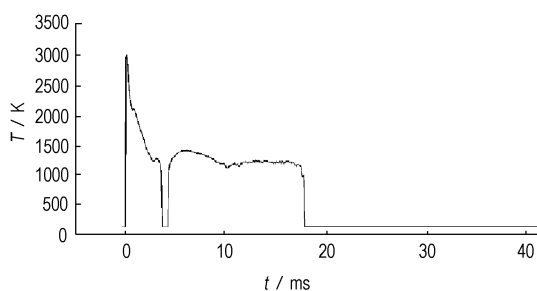


图5 1800 g TNT热毁伤效应曲线

Fig. 5 Curve of the effect of thermal damage of 1800 g TNT

6 结束语

(1) 所研制的单色高温计可以用于测量爆炸产物扩散过程中温度随时间的变化情况,因此,单色高温计的研制,不但可以评估炸药热毁伤效应,也是测量爆炸产物扩散过程中状态变化的一种新的实验手段。

(2) 通常情况下,单色高温计测量的是目标的亮温,真温需通过发射率来修正。由单色高温计与热电偶的测温对比实验可知,炸药的爆炸产物可近似作为黑体处理,其误差率为6.2%。

(3) 从理论上讲,辐射高温计的量程是没有上限的,因此,高温计的测温范围仍可向高端扩展,只要继续作高温端标定,即可测更高的温度;单色高温计的采集速度也可以随采集、存贮技术的进步不断提高。

参考文献:

- [1] Kenneth L Cashdollar. Three-wavelength pyrometer for measuring flame temperatures[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(15): 2595 - 2597.
- [2] Kenneth L Cashdollar, Martin Hertzberg. Infrared pyrometers for measuring dust explosion temperatures[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(1): 82 - 86.
- [3] Tarasov M D, Tolshmyakov A I, Kuanetzov F O, et al. Denonation and shock wave front temperature measurement by two-wave pyrometer based on fiber optics[A]. Dennis L Paisley, Alan M Frank. 22nd International Congress on High-Speed Photography and Photonics [C], 1997, 2869: 899 - 892.
- [4] Xianchu H, Chengbung H. The measurement of detonation temperature of condensed explosives with two colour-optical fiber pyrometer[A]. Proc of English Symposium (International) on Detonation [C], 1995. 322 - 329.
- [5] 王朝贵, 余泉有, 谭显祥, 等. 六通道瞬态光学高温计[J]. *光电工程*, 1996, 21(增): 46 - 49.
WANG Chao-gui, YU Quan-you, TAN Xian-xiang, et al. Six channel instantaneous optical pyrometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1996, 21 (Supplement): 46 - 49.
- [6] 袁宝慧, 田清政, 邹文豪, 等. 炸药爆温的光纤测温法测量[J]. *光子学报*, 1998, 27(6): 563 - 567.
YUAN Bao-hui, TIAN Qing-zheng, ZOU Wen-hao, et al. The detonation temperature measurement by optic fiber measuring technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(6): 563 - 567.
- [7] 许学忠, 卫海鹰, 肖昌炎, 等. 一次起爆燃料云雾爆轰的热辐射[J]. *火工品*, 1999, 24(2): 14 - 17.
XU Xue-zhong, WEI Hai-ying, XIAO Chang-yan, et al. The thermal radiation of fuel-air mixtures with single-event ignition [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1999, 24(2): 14 - 17.
- [8] 颜华. 比色/单色两用式光纤辐射温度计的研制[J]. *沈阳工业大学学报*, 1996, 18(4): 6 - 10.
YAN Hua. Development of the radiation thermometer of optical fibre with the function of monochromatic pyrometer and color comparator pyrometer [J]. *Journal of Shenyang Polytechnic University*, 1996, 18(4): 6 - 10.
- [9] 李佳, 庞其昌, 任克惠, 等. 瞬时光谱爆温测量系统[J]. *光子学报*, 2000, 29(10): 937 - 941.
LI Jia, PANG Qi-chang, REN Ke-hui, et al. Transient multi-wavelength detonation temperature measuring system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(10): 937 - 941.
- [10] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 第一版. 西安: 西安电子科技大学, 2004.
- [11] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用编写组. 爆炸及其作用(上册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.

Development and Application of Single-wavelength Pyrometer Used for Evaluating the Effects of Thermal Damage

XIE Li-jun^{1,2}, ZHOU Kai-yuan¹, LIU Geng-ran¹, YANG Zhi¹

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Unit 75130 of the Chinese People's Liberation Army, Guigang 537103, China)

Abstract: A single-wavelength pyrometer used for evaluating the effects of thermal damage was developed, which offered a new method to describe the temperature changes of explosive products during the course of the explosion. The temperature of oxyacetylene flame was simultaneously measured by the pyrometer and a thermocouple. And the measurement error of the single-wavelength pyrometer is only 6.2%. The results indicate that the emissivity has little effect on temperature measurement of the oxyacetylene flame by the pyrometer. The pyrometer was also used to measure explosive products temperature of TNT. The curve of thermal damage of TNT was obtained, which shows the temperature changes of the explosive products of TNT, and the peak temperature of the curve is 3167.15 K.

Key words: explosion mechanics; single-wavelength pyrometer; explosive product; thermal damage

(上接 293 页)

Prediction of Enthalpy of Formation for Polynitro Compounds by Using Molecular Subgraph

SHAO Ke¹, TIAN De-yu¹, LIU Jian-hong¹, HONG Wei-liang¹,

ZHAO Feng-qi², LUO Zhong-kuan¹, CHEN Li¹, ZHAO Qi¹

(1. Normal College, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The enthalpies of formation for polynitro compounds were predicted by using the molecular structure descriptors (MSD). With the different groups of polynitro compound molecules acting as descriptor codes (i. e. molecular subgraphs), multiple linear regression equation was established, of which the correlation coefficient is 0.9980. Most of the relative errors of the calculated values are within 10%. It can be seen that the calculated values of the enthalpies of formation are in good agreement with the experimental values.

Key words: physical chemistry; molecular subgraph; enthalpy of formation; polynitro compound; multiple linear regression; molecular structure descriptor (MSD)

(上接 296 页)

Matching Relation Between Artificial Viscosity and Mesh Size in Numerical Modeling of Detonation of Insensitive High Explosives

HUANG Yong, PAN Hao, HU Xiao-mian

(National Key Laboratory of Computational Physics, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: In numerical modeling of the plane detonation wave, the state behind steady detonation must be in agreement with the Chapman-Jouguet theory. The modified JWL equation of states (EOS) of the products and Hybrid reaction model are used to obtain the matching relation between artificial viscosity and mesh size of PBX9502 of insensitive high explosives and are compared with other reaction models. When this condition is satisfied, the detonation velocity and the state of sound speed point including pressure, density and internal energy can be in agreement with the C-J theory. These variables are independent of mesh size. Thus the mesh size can be larger, and the matching relation can be used in practice.

Key words: explosion mechanics; insensitive high explosive; artificial viscosity; mesh size