

文章编号: 1006-9941(2011)02-0204-05

## 温压炸药爆炸过程的瞬态温度

仲倩, 王伯良, 王凤丹, 惠君明

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了更好地测量炸药爆炸过程瞬时高温, 在原子发射光谱理论的基础上, 研制了一套瞬态多谱线测温系统, 系统的时间分辨率可达微秒级。通过对三种配方温压炸药爆炸过程的实时测量, 获得了其温度随时间分布的曲线。曲线的两个峰值如实反映了温压炸药爆炸过程中最初无氧燃烧反应和后续有氧燃烧反应。多组实验结果表明, 多谱线测试系统相对偏差低于 2.6%, 重复性较好, 可以部分消除双谱线法中因所选谱线组不同而引起的计算结果的不确定性。

**关键词:** 分析化学; 温压炸药; 瞬态高温; 多谱线测温

**中图分类号:** TJ55; O657.31

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.018

### 1 引言

温压炸药是以高温和持续超压毁伤的一类炸药, 兼有高爆炸药和燃料空气炸药的特点, 它含有铝、硼等高能添加剂, 当这些粉末在空气中散开后, 能与空气中氧气反应, 释放大能量, 大大地增强温压炸药的热效应和冲击波效应, 成为目前的研究热点<sup>[1]</sup>。但是, 对温压炸药的爆炸瞬态高温进行直接实验测定仍然很困难, 这是由于爆炸过程中达到最高温度的时间短, 爆炸的破坏性强, 一般的测温方法都难以精确测量。

为解决这一难题, 人们采用了多种测温方法, 主要集中于黑体辐射测温法, 如全辐射法、亮度法、比色测温法等, 其理论基础是将炸药爆炸过程简单地看作黑体或灰体, 但炸药爆炸过程是一个非常复杂的过程, 与黑体偏离较大, 难以满足对爆温精确测量的要求。

随着测温技术的发展, 南京理工大学现代光谱研究室<sup>[2-4]</sup>在原子光谱理论的基础上, 提出了原子发射光谱双谱线测温法。该方法选择 Cu I 510.5 nm 和 Cu I 521.8 nm 两条间隔非常小的谱线进行光谱测量, 建立了全部由实测参量组成的测温系统和计算方法, 该方法消除了比色光谱测温法中存在的光谱辐射

率影响, 显著地减小了测量误差。

本文在原子发射光谱双谱线测温法的基础上, 建立了一套应用光学纤维传输光信号的多谱线连续测温系统。利用该套测温系统对几种温压炸药的爆炸过程进行了实时测量, 获得了温压炸药瞬态高温随时间分布的曲线, 并对测试结果进行了分析讨论。

### 2 测温原理

由原子光谱学理论<sup>[5]</sup>, 可推出同种原子的两条谱线的强度比为:

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} \quad (1)$$

式中,  $I_{\lambda_1}$  和  $I_{\lambda_2}$  分别是两条波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的相对光谱强度;  $A_1$  和  $A_2$  分别为两条谱线的跃迁几率;  $g_1$  和  $g_2$  分别为两条谱线激发态的统计权重;  $E_1$  和  $E_2$  分别为两条谱线的激发电位;  $k$  为 Boltzmann 常数;  $T$  为激发温度。

从式(1)可得到用两条原子谱线计算温度的基本公式, 考虑到整套系统的光传递因素, 需乘上一个系数  $C$  加以校正, 则多谱线测温系统的温度计算基本公式如下:

$$T = C \frac{1}{k} \frac{E_2 - E_1}{\ln \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} - \ln \left( \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \right)} \quad (2)$$

本研究建立的瞬态温度测试系统, 选择 6 条铜原子谱线波长, 通过相隔较近的两两谱线组合, 按式(2)求得三个温度值, 再根据式(3)求得炸药爆炸瞬间火球温度。

收稿日期: 2010-05-21; 修回日期: 2010-07-05

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金

作者简介: 仲倩(1981-), 女, 在读博士研究生, 从事炸药爆炸参数测试及毁伤评估研究。e-mail: zhxwgjd@126.com

通讯作者: 王伯良(1964-), 男, 教授, 从事爆炸理论及其应用研究。e-mail: bolianwang@163.com

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (3)$$

式中,  $T_i$  为每两条原子谱线计算得到的温度值, K;  $\bar{T}$  为 3 组谱线平均温度值, K;  $n$  为选择谱线组数, 本套测试系统中  $n=3$ 。

### 3 实验

#### 3.1 实验装置设计

爆炸后高温气体辐射的光信号经由光学系统, 聚焦在传输光纤的入射端口, 然后由一进六出的传输光纤将接收到的光分成六束光, 传到铜原子滤波片和光电倍增管组成的特殊光电转换系统, 转换为电压信号, 然后传入数据采集系统, 进行数据的记录和光谱信号处理, 图 1 为该套测试系统的原理图。

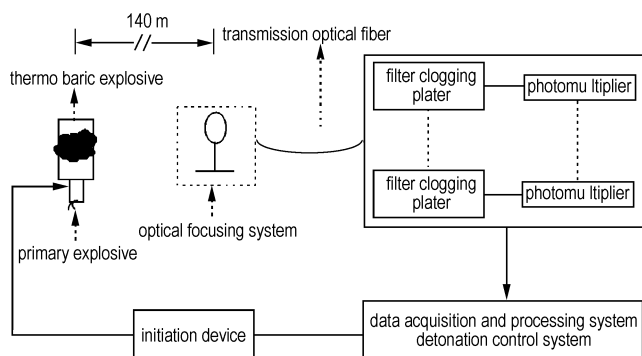


图 1 温度测试系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature measurement system

系统采用光学聚焦系统收集光信号, 并用光纤进行光的传输, 使得远距离遥测成为可能, 而且由于待测炸药的装药量比较大, 爆炸云团直径最大可达 10 m, 故将爆炸温度测量系统安置在距爆炸云团中心约 140 m 处的掩体内, 调整光路使试验弹弹心、望远镜和石英光纤的入射端口在同一光轴上。

选用的光电倍增管具有较高的时间分辨率(纳秒级), 可以满足数据采集系统微秒级别的要求, 铜原子光谱线波长分别为 510.5, 515.3, 521.8, 529.2, 570.0, 578.2 nm。

#### 3.2 实验条件及样品

爆炸实验选择在空旷的野外靶场进行, 实验时温压炸药实验装置放在距离地面 1 m 的支架上, 在距爆心 150 m 左右的掩体内安放多谱线测温系统。

实验采用的温压炸药及 8701 和 TNT 均为圆柱形轴对称结构, 其主要参数如下:

温压炸药, 薄型钢壳体,  $\Phi 225 \text{ mm} \times 540 \text{ mm}$ , 温压药剂 27 kg, 中心起爆药为 3 kg 的 8701; 包含配方 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>, 并对 1<sup>#</sup> 进行三组平行试验 T-1、T-2、T-3, 2<sup>#</sup> 进行三组平行试验 T-4、T-5、T-6, 3<sup>#</sup> 进行两组平行试验 T-7、T-8; 配方 TNT 和 8701 为  $\Phi 290 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , 药量均为 30 kg, 熔铸装药的裸药柱。其中 TNT 和 8701, 用来标定公式(2)中的系数 C, 并用于调节光路对焦系统。

同时为保证炸药爆炸后能够产生 Cu 原子发射谱线, 在制备温压炸药时加入微量 Cu 粉(所加入的 Cu 元素剂量很小, 不足以影响药剂性能); 由于采用的 TNT 是成型药柱, 因此 Cu 粉被涂抹在药柱表面。

#### 3.3 实验结果

利用上述多谱线测温系统, 对几种不同配方的温压炸药爆炸过程进行了实时测量, 测得了一系列电压  $U$  随时间  $t$  变化曲线, 图 2 为 3<sup>#</sup> 配方温压炸药的典型曲线。

每两通道之间电压比值即为相应 Cu 谱线的光谱强度之比。

图 3 则为 3<sup>#</sup> 配方温压炸药温度  $T$  随时间  $t$  的变化曲线, 其中三条不同虚线表示的是将所测得的每两组谱线的光谱强度值代入式(2)进行处理得到的温度随时间变化的关系曲线, 而其中实线表示的是将每两组谱线处理得到的温度值代入式(3)处理得到的平均温度随时间变化的关系曲线。

由图 3 可知, 对于 3<sup>#</sup>, 每两条谱线组合测试得到的温度分别为 2610 K、2490 K 和 2620 K, 根据公式(3)可得 3<sup>#</sup> 的瞬态高温为 2573 K, 此即温压药剂爆炸反应过程中的无氧燃烧阶段对应的瞬态高温值, 此阶段是指药剂在中心起爆药爆轰波的作用下被抛射出弹体, 同时引爆药剂中的高能炸药组分, 则燃料粒子在无外界氧气参与下发生快速燃烧反应, 可持续数百微妙。此后, 燃料粒子在爆轰波驱动下向四周飞散, 药剂中的氧化剂发生分解反应, 吸收部分热量, 在炸药爆炸后大概 150  $\mu\text{s}$  左右, 温度开始逐渐下降, 但由于氧化剂的分解产物以及在此过程中保持的高温高压环境为铝粉的点火和反应提供了条件, 因此出现了温压炸药的后续有氧燃烧反应, 出现了第二个温度峰值, 由图 3 可知, 其温度大概在 2000 K 左右, 随后温度缓慢下降, 后续燃烧反应延缓了温度的迅速下降, 将温度维持在 1600~2100 K 左右, 时间持续了大概 1100  $\mu\text{s}$ , 再后由于光谱信号逐渐减弱、破片等因素的影响出现了大量的噪声杂波信号。

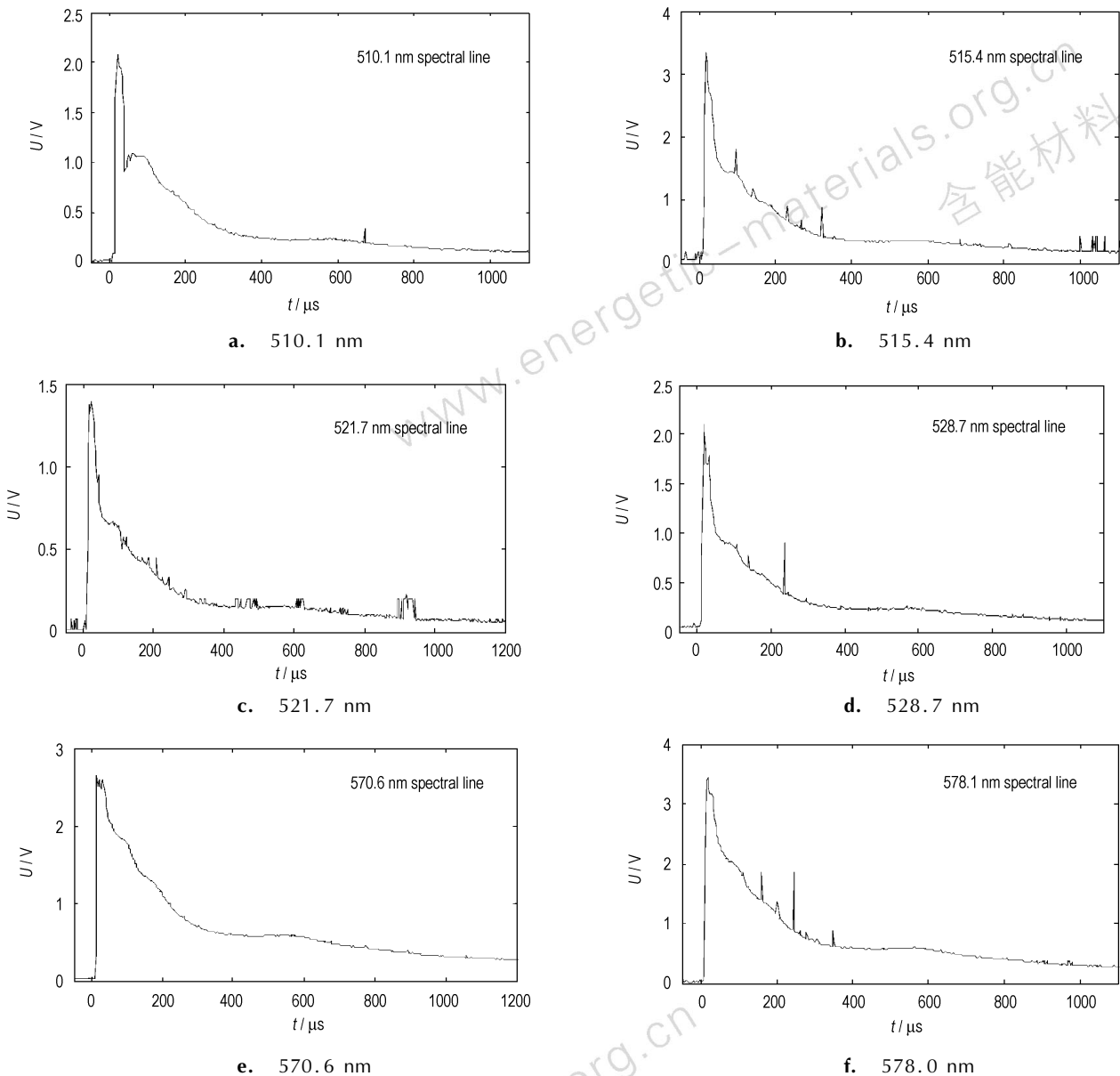


图2 同谱线所对应的电压随时间变化曲线

Fig. 2  $U-t$  curves of different spectral lines

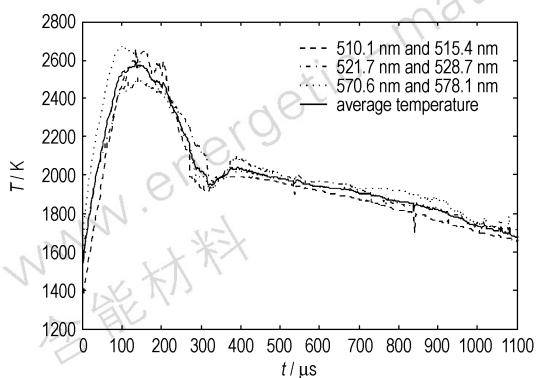


图3 不同谱线组合后的温度随时间变化曲线

Fig. 3  $T-t$  curves of different spectral line association

本次实验所测得的数据见表1。

从炸药配方的角度来分析: 1<sup>#</sup>配方温压炸药的瞬态高温在 2400 ~ 2550 K 之间; 2<sup>#</sup>配方温压炸药的瞬态高温在 2000 ~ 2200 K 之间; 3<sup>#</sup>配方温压炸药的瞬态高温在 2500 ~ 2600 K 之间. 运用数理统计的方法对测试结果进行偏差分析, 结果列于表2. 从表2分析结果来看, 相同配方的温压炸药体系, 其瞬态高温值相差不大, 相对偏差低于 2.6%, 说明该系统测试过程有较好的稳定性, 适合测量温压炸药爆炸瞬间所产生的瞬态高温。

为了更好说明该套测温系统的可靠性, 表3对比分析了双谱线法与多谱线法测温结果的相对误差。

表1 温压炸药温度测试结果

Table 1 Experimental results of temperature of thermobaric explosive

formula	test number	T/K			average
		test value of the first and second spectral line	test value of the third and fourth spectral line	test value of the fifth and sixth spectral line	
1 <sup>#</sup>	T-1	2432	2478	2641	2517
1 <sup>#</sup>	T-2	2654	2396	2234	2428
1 <sup>#</sup>	T-3	2571	2389	2429	2463
2 <sup>#</sup>	T-4	2048	2225	2066	2113
2 <sup>#</sup>	T-5	1986	2168	1903	2019
2 <sup>#</sup>	T-6	2142	1957	2042	2047
3 <sup>#</sup>	T-7	2610	2490	2620	2573
3 <sup>#</sup>	T-8	2486	2478	2701	2555

表2 平行测试实验的数理统计分析结果

Table 2 Mathematical statistics analysis of parallel test

statistical analysis	T-1、T-2、T-3			T-4、T-5、T-6			T-7、T-8	
	test times	3			3			2
average/K	2469			2060			2564	
standard deviation/K	45			48			13	
relative standard deviation/%	1.82			2.33			0.51	
relative deviation/%	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8
	1.94	-1.66	-0.24	2.57	-1.99	-0.06	0.35	-0.35

表3 双谱线测温误差分析

Table 3 Error analysis of double line of atomic emission spectroscopy

test number	multi-spectral line/K	spectral line of the first and second		spectral line of the third and fourth		spectral line of the fifth and sixth	
		test result/K	error/%	test result/K	error/%	test result/K	error/%
T-2	2428	2654	10.9	2396	-2.9	2234	-8.0
T-5	2019	1986	-1.7	2168	7.4	1903	-5.7
T-8	2555	2486	-2.8	2478	-3.0	2701	5.7

从表3可以看出,用原子光谱双谱线法测量炸药温度时,任意两条谱线组合测温,都会出现不规律的偏差,最大偏差达到了10%,这是因谱线选取不同而造成的系统的不确定性和测试结果的误差。应用多谱线测温法,则可大大降低由于这些不确定性所造成的误差。

## 4 结论

(1) 所测得的温度变化过程反映出温压炸药多阶段爆炸特性。温压炸药爆炸后得到两个明显的温度峰值,分别对应于温压炸药爆炸反应初期的无氧燃烧反应和利用空气中氧气的后续有氧燃烧反应两个阶段。

(2) 测试数据表明,系统的相对偏差低于2.6%,测试结果具有较好的重复性,该套测温系统可应用于炸药爆炸瞬态高温的测量。

(3) 通过误差分析可知,多谱线测温系统可以部

分地消除双谱线法中因所选谱线组不同而引起的不确定性,为温压炸药的热辐射毁伤效应评估研究提供了更可靠的温度测量手段。

### 参考文献:

- [1] 李秀丽,惠君明,张琳. 光谱法遥感测定温压炸药爆炸温度的研究[J]. 弹道学报,2008,20(2): 91-94.  
LI Xiu-li, HUI Jun-ming, ZHANG Lin. Explosion temperature measurement of thermobaric explosive by remote sensing spectroscopic method[J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(2): 91-94.
- [2] 周新利,李燕,刘祖亮,等. 炸药爆轰瞬态温度的光谱法测定[J]. 光谱学与光谱分析,2003,23(5): 982-983.  
ZHOU Xin-li, LI Yan, LIU Zu-liang, et al. Transient detonation temperature measurement of explosive using spectroscopic method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, 23(5): 982-983.
- [3] 杨栋,王俊德,赵宝昌,等. 原子发射光谱双谱线法测量固体火箭发动机内燃气温度[J]. 光谱学与光谱分析,2002,22(2): 307-310.  
YANG Dong, WANG Jun-de, ZHAO Bao-chang, et al. Combustion

tion gas temperature measurement in the chamber of solid rocket motor by double line of atomic emission spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 22(2): 307-310.

[4] 刘大斌, 杨栋, 蒋荣光, 等. 导爆管起爆瞬态电火花温度的光谱法测定[J]. *光谱学与光谱学分析*, 2002, 24(8): 670-672.

LIU Da-bin, YANG Dong, JIANG Rong-guang, et al. Spectroscopic

ic determination of the dynamic electrical spark temperature of nonel tube igniter[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 24(8): 670-672.

[5] 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.

## Explosion Temperature of Thermobaric Explosive

ZHONG Qian, WANG Bo-liang, WANG Feng-dan, HUI Jun-ming

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A multi-wavelength temperature-measuring system based on the atomic emission spectroscopy was used to measure the transient high temperature during the explosion process of thermo-baric explosive (TBE). The time resolution of the measurement system could achieve  $\mu\text{s}$  scale. By measuring the explosion temperature of TBEs, the curves of temperature vs time were obtained. There are two temperature peaks corresponding to the oxygen-free reaction and oxygen reaction phases of TBE explosion process, respectively. Results show that the relative error of measured temperature is less than 2.6%, showing a good repeatability. Compared with the double line of atomic emission spectroscopy, the multi-wavelength temperature-measuring system can minimize the errors resulting from the selection of spectral lines.

**Key words:** analytical chemistry; thermo-baric explosive; transient high temperature; multi-wavelength temperature-measuring

**CLC number:** TJ55; O657.31

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.018



## 2011 中国材料研讨会

为庆祝中国材料研究学会成立 20 周年、展示我国材料界近年来取得的科研成果、促进我国材料相关领域的科技交流和合作,中国材料研究学会将于 2011 年 5 月 17-20 日在北京举办"2011 北京材料周",主题为"新材料创造美好生活"。活动内容包括学会成立 20 周年纪念庆典、2011 年中国材料研讨会、中国新材料成果展览、新材料/新工艺/新设备博览会及材料科普展示等活动。

"2011 中国材料研讨会"于 2011 年 5 月 17-20 日在北京奥林匹克公园的国家会议中心举行,共设 22 个分会场,将邀请 4-5 位国内、外知名材料科学家作大会特邀报告。会议论文涉及太阳能光伏、光热转换材料及其技术,储能材料和燃料电池,热电材料与应用,绿色建筑材料,生态环境材料,光催化材料及在能源与环境中的应用,电子材料,多铁性材料,磁性材料,半导体照明材料等多个方面。

联系人: 马晓梅 电话: 010-68710443 传真: 010-68722033 E-mail: maxm1213@163.com

会议网页: <http://www.c-mrsmeeting.com/hywj/材料研讨会/jianjie/index.asp>