

## 瞬态光谱法测量环氧丙烷爆轰温度

李迎<sup>1</sup>, 李萍<sup>1, 2\*</sup>, 肖海波<sup>1</sup>, 胡栋<sup>2, 3</sup>, 袁长迎<sup>2, 4</sup>

- 1 四川大学原子与分子物理研究所, 四川 成都 610065
- 2 四川大学高温高压物理研究所, 四川 成都 610065
- 3 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900
- 4 西南科技大学物理系, 四川 绵阳 621002

**摘要** 采用具有像增强功能的光谱探测器——增强型电荷耦合器件 ICCD 和 DG535 同步控制器, 应用激波管技术和光纤光谱方法, 由压力传感器监测爆燃转爆轰的过程, 在解决了同步控制, 防止误触发等问题后, 从爆炸激波管的侧窗拍摄到了环氧丙烷由爆燃转变为爆轰时刻的曝光时间为  $2 \mu\text{s}$ , 分辨率达到  $0.2 \text{ nm}$  的瞬态发射光谱。对所测光谱进行强度定标后, 可直接得到环氧丙烷爆轰时刻的热辐射背景, 用黑体辐射公式按照最小二乘法原则对其进行拟合, 得到了环氧丙烷的爆轰温度为  $2416 \text{ K}$ 。此爆轰温度的获得, 为进一步分析环氧丙烷爆燃转爆轰过程的微观机理提供了实验数据。

**关键词** 爆轰温度; 瞬态发射光谱; 增强型电荷耦合器件; 环氧丙烷

中图分类号: O433.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0593(2008)03-0490-04

### 引言

爆轰温度是炸药爆轰理论以及爆轰产物状态方程形式中最敏感的参数之一。爆轰温度的直接测量, 既可验证在研究高温高压下材料性质时所选物态方程的正确性, 又能深入认识在爆轰波的冲击下爆轰物质的各种转换状态和一系列反应过程。含能材料是制备现代武器的关键材料, 对其爆轰温度的准确测量, 对研究制备新型武器战斗部、火炸药、弹丸和火工品等有非常重要的意义。

由于爆轰过程持续时间短、温度高、破坏性强, 用传统的测温方式(如钠谱线翻转法<sup>[1]</sup>)难以测量。目前对爆轰温度的测量主要应用辐射测量方法, 其原理是通过记录爆轰过程中所产生的热辐射来确定其温度。辐射测温具有实时、高分辨等特点, 从而成为爆轰测温最有效的手段<sup>[2]</sup>。

本实验室已对环氧丙烷爆燃转爆轰过程的光辐射特性、反应主要产物等进行了研究<sup>[3-5]</sup>。本文则用光谱方法, 结合辐射度学原理对环氧丙烷爆轰时刻的爆轰温度进行了测量: 采用具有像增强功能的光谱探测器—增强型电荷耦合器件(intensified charge coupled device, ICCD)和 DG535 同步控制器, 应用激波管技术和光纤瞬态光谱方法, 拍摄到了环氧丙烷由爆燃转变为爆轰(DDT)时刻的瞬态发射光谱, 将所测光

谱进行强度定标后可得到热辐射背景, 对此用黑体辐射公式按照最小二乘法原则进行拟合<sup>[6]</sup>, 得到了环氧丙烷的爆轰温度。

### 1 测温原理

黑体热辐射度遵循普朗克定律

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

其中  $E_b(\lambda, T)$  是黑体辐射度;  $c_1$  是 Planck 第一常数( $2\pi^5 hc^2 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ );  $c_2$  是 Planck 第二常数( $hc/k = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{K}$ );  $\lambda$  为辐射波长;  $T$  为黑体绝对温度。

爆轰波传播速度非常快, 而化学反应区很薄, 只有零点几个 mm 到 1 mm 左右, 可以认为化学反应区是一个等容绝热的微腔, 相当于一个微小的人造黑体<sup>[7]</sup>。爆轰波掠过时爆轰产物的温度为该黑体的温度。将普朗克公式中的  $T$  作为参变量, 用普朗克公式拟合环氧丙烷爆轰时刻的辐射光谱, 得到的温度为环氧丙烷在所测条件下达到爆轰时的温度。

### 2 实验装置

如图 1 所示, 实验装置主要包括爆炸激波管(长 4.0 m,

收稿日期: 2006-11-13, 修订日期: 2007-03-06

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目(10176020)资助

作者简介: 李迎, 1982年生, 四川大学原子与分子物理研究所硕士研究生 \* 通讯联系人, e-mail: lpsun@163.com

内径 0.1 m); Spectra Pro 275 光谱仪(美国 Acton Research Corp.); ICCD 探测器(PF Max 1024RB 美国 Princeton Instruments); DG535 四通道数字延迟发生器; 多道数据采集与分析系统。

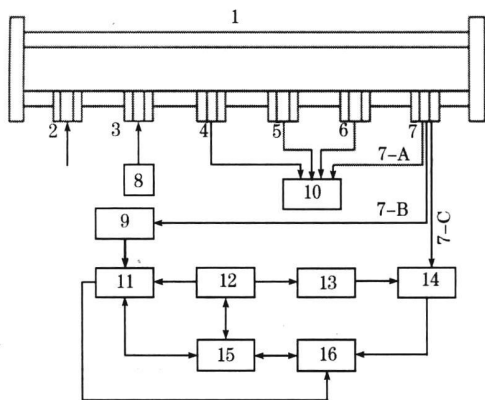


Fig 1 Schematic diagram of the experimental setup

1: 爆炸激波管; 2: 样品注入口; 3: 点火窗口; 4~7: 压力传感器; 8: 点火装置; 9: 光电转换器; 10: 数据采集与分析系统; 11: DG535 数字延迟发生器; 12: 装有 Win Spec/32 处理软件的计算机; 13: 光谱仪控制器; 14: 光谱仪; 15: ST-133 控制器; 16: PF-MAX ICCD 探测器

### 3 实验方法

按照图 1 所示, 环氧丙烷由窗口 2 加入爆炸激波管, 环氧丙烷与氧气混合后的初始压力为 0.014 MPa, 用高压火花放电装置 8 引燃气产生爆燃, 环氧丙烷气体由爆燃转变为爆轰的过程在窗口 4~7 用压力传感器监测; 光触发信号从窗口 7 由光纤 7-B 引出至光电转换器 9, 光电转换器输出的电信号再去触发 DG535, 由 DG535 在设定的延迟时间后开启 ICCD 快门; 在激波管窗口 7 由光纤 7-C 引出被测光信号, 信号经光谱仪色散后到达探测器被采集, 经计算机处理后得到爆轰光谱。为得到爆轰过程的真实瞬态发射光谱, 主要解决了以下几个问题。

(1) 测试系统的同步控制与防止误触发问题。通过对侧窗进行改造, 使在同一测量窗口能并列或前后间距 2 mm 内同时插入触发光纤和信号光纤, 这可使触发光信号和被测光信号间的时间差很小, 易于用 DG535 控制同步; 把触发光纤始端嵌入了一遮光细镍管 6 cm 深处, 并沿垂直于爆轰波传播方向插入激波管, 爆轰波未到达测量窗口时光纤内没有光传播, 只有当火焰阵面经过测量侧窗并正对触发光纤时才能导出触发光信号, 这就有效地防止了提前触发; 为防止干扰信号引起的误触发, 在拍摄过程中同时还用示波器监测开门时间。

(2) 光谱相对强度定标问题。ICCD 探测器某一位置记录的谱线强度(即累积的光电子计数), 除了取决于入射光对应该处的单色发射本领外, 还取决于探测系统的响应, 包括光纤、光谱仪及 ICCD 的单色响应。为了进行光谱强度定量分析, 必须对光谱测量系统的响应进行标定, 即先确定测试系统的光谱响应函数。为此, 采用了 LHT75 型溴钨灯光源室

做为标准光源, 经中国测试技术研究院对其进行强度标定, 给出了标准光源光谱功率分布  $P(\lambda)$ 。每次实测光谱前, 在测量系统取定的测试参数下, 首先对标准光源进行测量, 其光谱为  $F(\lambda)$ , 则仪器的响应函数  $K(\lambda) = F(\lambda)/P(\lambda)$ 。对实验测得的光谱  $F_1(\lambda)$ , 经校正后的光谱为  $P_1(\lambda) = F_1(\lambda)/K(\lambda)$ 。

(3) 提高信噪比问题。拍摄过程中所摄光谱的信噪比对光谱分析很重要。实验中主要通过降低探测器的温度, 减小暗电流来提高信噪比。此外实验中选用芯径较大,  $\Phi$  为 0.6 mm 的石英光纤以增加光通量, 并且对光纤端面进行抛光处理, 以最大限度地减少光损失。

### 4 实验结果与讨论

实验中, 由压力传感器如图 1 所示在爆炸激波管 4~7 窗口监视环氧丙烷爆燃转爆轰的过程。由监测结果知, 在本实验条件下, 从窗口 6 到 7 爆炸压力已突跃式地成数量级增大, 当火焰阵面到达窗口 7 时, 火焰阵面已经追赶上了前驱冲击波阵面, 两者合二为一, 此时气体已从爆燃状态转变为爆轰状态。

在爆炸激波管第 7 窗口实时拍摄到的环氧丙烷达到爆轰时刻的瞬态发射光谱见图 2。由图 2 可以看出, 在 300~900 nm 范围内, 环氧丙烷的爆轰发射光谱形成了较强的、连续的热辐射背景, 而分子振转带状谱和原子线状谱则叠加于此连续热辐射背景之上。但是如图 3 示: 当温度小于 3000 K 时, 黑体辐射曲线在可见光区域呈上升趋势, 而图 2 所示却是先上升后下降与之不符, 这是由于在采集过程中测量系统对不同波长的响应差别造成的, 必须对所测光谱进行强度校正。

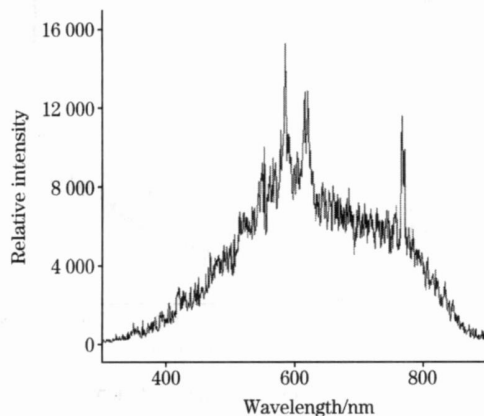


Fig 2 Emission spectrum acquired from window 7 with gate width= 2  $\mu$ s, gain= 228, spectrograph slit= 25  $\mu$ m and grating of 150  $g \cdot mm^{-1}$

光谱测试系统的响应函数如图 4 所示。图中可以看出 ICCD 噪声尖峰的影响, 特别是在短波段一侧, 该处附近标准光源的辐射度很小, 测量时由于 ICCD 噪声的存在使得该处附近的响应函数出现大幅度的震荡。因此在短波长一侧强度定标结果的精确度较低, 数据处理时要滤掉此高频部分。

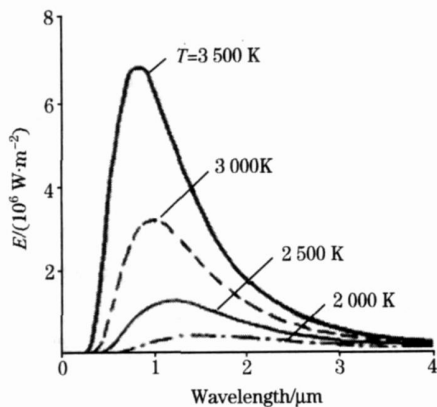


Fig. 3 Curves of blackbody radiation

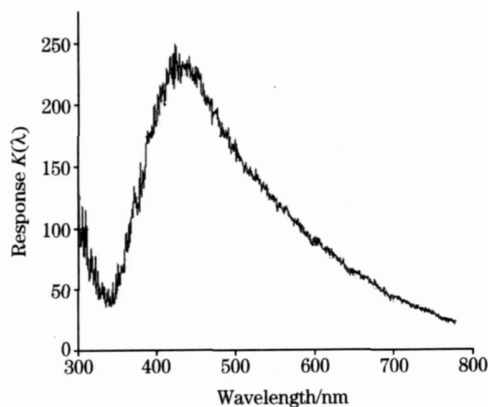


Fig. 4 Modification function

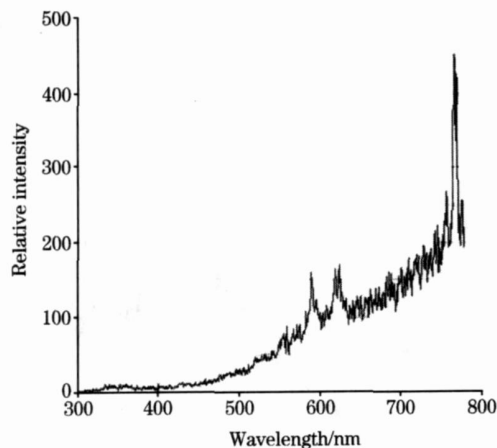


Fig. 5 Corrected spectral curve

图 5 为图 2 光谱校正结果。根据普朗克公式, 对已校正过的爆轰光谱图 5 进行拟合, 结果如图 6 所示, 拟合曲线跟校正后的爆轰光谱吻合得很好, 由此得出环氧丙烷在所测条件下的爆轰温度为 2 416 K。

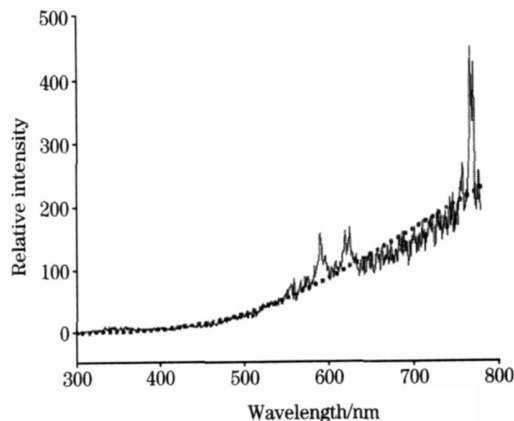


Fig 6 Corrected spectral curve and fitting curve

$$\text{Equation: } y = c_1 / \lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]; T = 2\,416.072\,83$$

实验采集到的光谱中包含线状和带状谱成分, 这些谱线是爆轰过程中一些中间产物<sup>[4, 5]</sup>的发射光谱, 为消除线谱影响, 先对实测光谱进行平滑处理, 滤掉高频的测量噪声和线谱部分, 再用普朗克公式拟合平滑曲线, 这样得到的温度更接近实际的爆轰温度。

目前在爆轰和冲击温度的测量中, 辐射高温计技术应用较多<sup>[8-10]</sup>, 它是从有限个通道(如 6 个)测得爆轰或冲击压缩物质发出的辐射谱强度, 通过普朗克黑体或灰体辐射公式拟合出温度。因辐射高温计技术中, 每个通道所测的波长范围较宽, 为 10 nm, 故通道所测的谱强度是这个波长范围内的平均值, 会偏离所测波长值处的真实谱强度; 如果某个通道的测量波长范围恰好包括了爆轰或冲击压缩光谱中某个原子或分子的特征辐射强线, 此通道的测量值将偏离普朗克曲线, 所以用辐射高温计技术拟合出的温度可能会有较大误差。而瞬态光谱法则是“无限”多个通道, 所测光谱经定标后可直接得到热辐射背景, 如图 6 所示, 对此用黑体辐射公式拟合温度时, 因看得见曲线, 误差会小得多。

瞬态光谱测量法的优点是能直接测得连续的热辐射背景, 看得见曲线; 而辐射高温计的优点是能测得谱强度随时间的变化。如果将两者的优点结合起来应用于爆轰或冲击温度的测量, 将会得到更准确的结果。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] ZHOU Xue tie, LI Yan, LIU Da bin, et al(周学铁, 李 燕, 刘大斌, 等). Explosive Materials(爆破器材), 2003, 32(6): 8.
- [ 2 ] YU AN Bao hui, ZHU Ming wu, ZOU Wei hao, et al(袁宝慧, 朱明武, 邹文豪, 等). Chinese Journal of Explosives & Propellants(炸药学报), 1999, 22: 49.
- [ 3 ] LI Ping, HU Dong, YUAN Chang ying, et al(李 萍, 胡 栋, 袁长迎, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(12): 1916.
- [ 4 ] LI Ping, YU AN Chang ying, HU Dong, et al(李 萍, 袁长迎, 胡 栋, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(7): 784.
- [ 5 ] LI Ping, HU Dong, YUAN Chang ying, et al(李 萍, 胡 栋, 袁长迎, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(9): 1569.
- [ 6 ] ZHANG Yur hua, XI M ei cheng, CHEN Chang song(张韵华, 奚梅成, 陈长松). Numerical Value Calculation Method and Algorithm(数值计算方法和算法). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2000. 59.
- [ 7 ] YU Chang qing, YAN Jun, LIU Jie, et al(于常青, 阎 军, 刘 杰, 等). Journal of Beijing Institute of Technology(北京理工大学学报), 2000, 20(6): 664.
- [ 8 ] LU O Jiao ming(罗教明). Chinese Journal of High Pressure Physics(高压物理学报), 1997, 11(1): 39.
- [ 9 ] JING Fu qian(经福谦). Introduction to Experimental Equations of State(实验物态方程导引). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1999. 299.
- [ 10 ] HONG Yar ji, YAO Hong lin(洪延姬, 姚宏林). Journal of Institute of Command and Technology(指挥技术学院学报), 2001, 12(1): 88.

## Detonation Temperature Measurement of Epoxypropane Using Instantaneous Spectrum Method

LI Ying<sup>1</sup>, LI Ping<sup>1, 2\*</sup>, XIAO Hai bo<sup>1</sup>, HU Dong<sup>2, 3</sup>, YUAN Chang ying<sup>2, 4</sup>

1. Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China
2. Institute of High Temperature and High Pressure Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China
3. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China
4. Physics Department, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, China

**Abstract** After solving the problems of synchronization of the measuring system and the avoidance of false trigger signal, the instantaneous emission spectrum of epoxypropane with an exposure time of 2  $\mu$ s and a resolution of 0.2 nm was acquired from a side window of a shock tube at the very moment when the epoxypropane transformed from deflagration to detonation. The measuring system consists of an advanced intensified charge coupled device spectroscopic detector, a digital delay generator DG535, an explosion shock tube and optical fibers. The DDT process was monitored by pressure transducers. After correcting the intensity of the spectrum obtained, the background curve of the heat radiation intensity of the detonation was given immediately. The detonation temperature of 2416 K for epoxypropane was derived from fitting the curve with Planck blackbody formula by least squares principle. The detonation temperature of epoxypropane can provide an experimental datum for analyzing the microscopic mechanism of DDT process.

**Keywords** Detonation temperature; Instantaneous emission spectrum; Intensified charge coupled device; Epoxypropane

(Received Nov. 13, 2006; accepted Mar. 6, 2007)

\* Corresponding author