

固体炸药爆轰温度的实验研究

韩成邦 史慧生 康淑芳

(西安近代化学研究所)

摘要 用光电比色高温计测定了固体炸药 TNT、Tetryl、PETN 的爆轰温度及爆轰前沿和透明液体相互作用后的爆轰产物的温度。为了讨论实验误差, 还研究了爆轰温度随密度的变化以及不同透明液体对爆温测量的影响。

关键词 爆轰温度, 光电比色高温计, 固体炸药。

1. 前言

为了充分利用炸药的能量, 更合理地研究和使用炸药, 准确地知道爆轰参数(速度、压力、温度)的数值及其变化是十分重要的, 尤其在研究高能炸药的起爆机理和化学反应时, 温度显得更为重要。目前, 爆轰速度和压力的测试精度分别达到了1%和5%以内, 但温度仍为难以测定的参数。在炸药的实际应用中, 为了更好地控制、利用炸药的性能, 准确地测定爆轰温度值是十分必要的。然而, 爆轰温度测定值非常缺乏, 许多炸药(包括常用炸药)还没有实验值。这对我们深入爆轰过程的研究、合理地使用炸药是很不利的。

近来的研究表明, 在爆轰研究中用光学技术测量爆轰温度是可靠的^[1]。凝聚炸药的爆温首先由Gibson等人^[2]用现代光电技术测得。近来又有许多人进行了炸药爆轰温度的测量^[3]^[4]^[5]^[6]。方法是假定爆轰产物处于热平衡状态下, 由爆轰波阵面热辐射的测量值, 根据黑体辐射定律来确定温度值^[7]。

由于液体炸药有较好的均匀性与透光性, 以往的测温工作大多是围绕着液体炸药进行的。固体炸药透光性差, 加上药柱中气泡形成的局部“热点”, 界面阻抗失配及表面空气冲击波等诸因素的影响, 使精确测量爆轰温度变得非常困难。

2. 实验方法和结果

我们用光电比色法测量了固体炸药的爆轰温度。实验装置如图(1)所示。光导纤维的一端插入透明液体中, 接受和传导光辐射。在分光器中爆轰光辐射被分解成二束狭光谱带的光束, 经光电倍增管进行光电转换后的信号由示波器记录。测量原理和计算方法参看文献^[8]

我们采用的光导纤维是激光通信用的GI型光导纤维, 芯径为70 μm, 数值孔径0.18。分光器由场镜、分光镜、滤光片等组成。光纤出射端位于场镜焦点处, 场镜将光纤以一定锥角出射的光束变成近似平行的光束, 以利于光电倍增管有效地接受辐射能量。分光镜系截止型干涉滤光片, 与主光轴呈45°放置, 所用分光镜透过短波长的光而垂直于主光轴反射长波长的光。干涉滤光片进一步在这二束连续光中滤出一定带宽的狭光谱带的光, 所用滤光片的半宽度 < 15 nm。根据测量范围和比色测温灵敏度的要求来选择2个波带, 我们选用的滤

光片的中心波长分别为 488 nm 和 694 nm。GDB 423 型光电倍增管用来做光电转换元

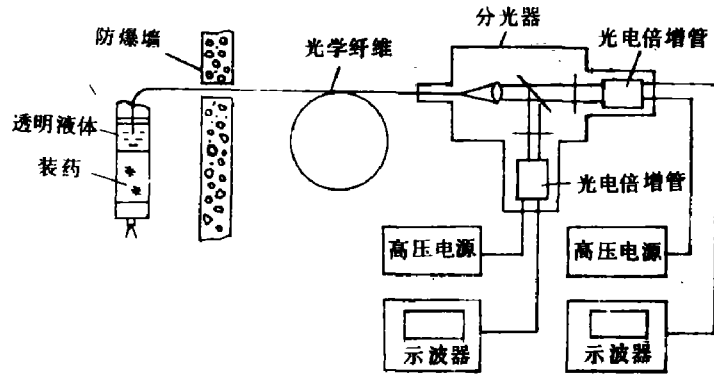
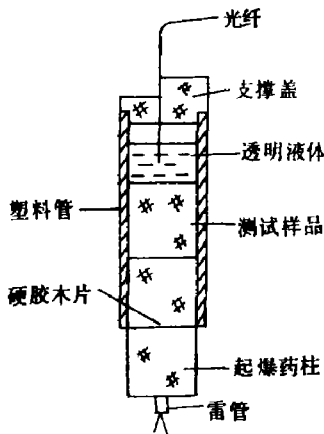


图1 瞬时光电比色测温装置

件，经过负载电阻得到的信号电压用 Tek 466 示波器记录。整个系统在实验前用标准温度灯标定。装药结构和典型的示波记录如图2所示。实验样品是 TNT、Tetryl 和 PETN。它



(a) 装药结构图



垂直 10 mV/div 水平 0.1 μs/div
λ = 694 nm λ = 488 nm

(b) 典型的 TNT 样品 (ρ₀ = 1.55) 的示波器记录图片

图2 装药结构和典型的示波记录

们被装在硬塑料管子内。管内径为 30 mm, 15 mm 两种, 管长 100 mm, 管壁厚 2 mm。管的一端用 0.5 mm 厚的胶木片封死, 下接起爆药柱。管内装试验样品, 药柱厚 60 ~ 80 mm, 上边注满透明液体。这既能排除炸药表面的空气, 又能改善匹配条件。光纤插入透明液体中, 整个系统采用光信号内触发。

图(2) b 显示了典型的 TNT 示波底片。从底片上可以看出, 当爆轰波前沿接近透明液体的时候, 有光信号出现。光信号转换成的电信号(在光电倍增管内)触发了示波器, 整个系统开始记录。在 0.2 ~ 0.3 μs 内, 随着被未反应炸药吸收辐射的减少, 辐射强度急剧增加。当爆轰波前沿与透明液体作用时, 辐射达到了最大值。TNT 爆轰前沿与透明液体相互作用后爆轰产物的温度历史如图 3 所示。这里, 在高能炸药爆轰波的作用下, 热点形成和持续时间应为 0.1 μs 左右, 而稀疏波引起的温度下降则主要由药柱尺寸与装药条件来决定。

高能炸药中爆轰的传播可以用二维拉格朗日流体力学计算程序, 用 Forest Fire 点火模

型来模拟。如果爆轰产物的行为用KHT状态方程来描述，就得到了图3中的虚线^[1]。我们用 $\rho_0 = 1.50 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 的 TNT 药柱做实验，将结果与 Kato 的结果相比，发现它们符合得很好。通过整理实验结果，可以得到 TNT 爆轰前沿温度为 $3700 \pm 100 \text{ K}$ 。它与各种状态方程计算的 C-J 温度的比较如图4所示。同样的，Tetryl ($\rho_0 = 1.62 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$) 和 PETN

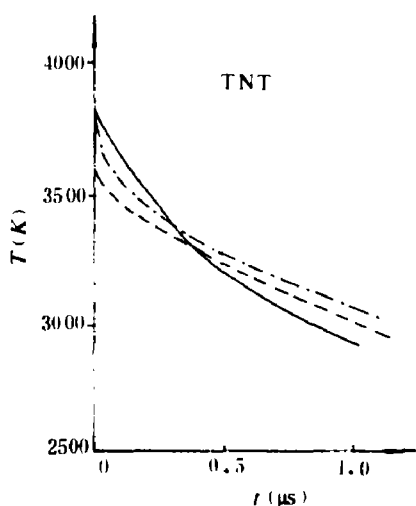


图3 TNT 爆轰产物温度测量值和计算值随时间的变化
—测量值 ---计算值
- · - Kato 的结果

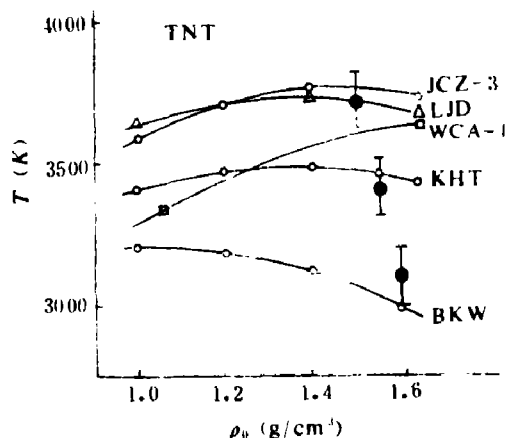


图4 TNT C-J 温度计算值和测量值的比较

($\rho_0 = 1.62 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$) 的爆轰产物的温度历史也被测到了，它们与计算值的比较分别如图5、图6所示。

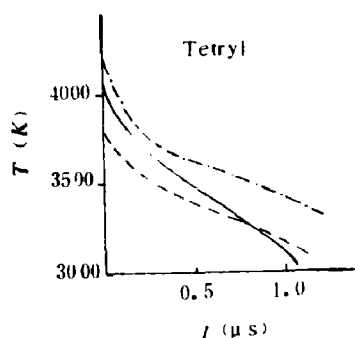


图5 Tetryl 爆轰产物温度计算值和测量值随时间的变化
—测量值 ---计算值
- · - Kato 的结果

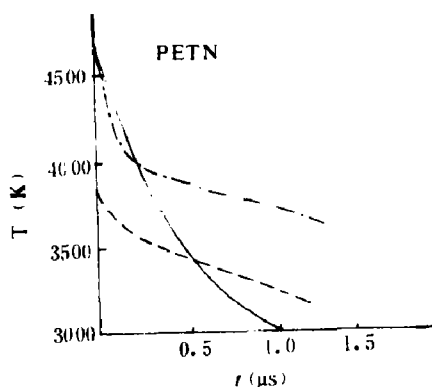


图6 PETN 爆轰产物温度计算值和测量值随时间的变化
—测量值 ---计算值
- · - Kato 的结果

通过处理实验结果, Tetryl 和 PETN 的爆轰前沿温度分别是 $4000 \pm 150 \text{ K}$, $4500 \pm 150 \text{ K}$ 。它们与状态方程算出的 C-J 温度的比较如图 7、图 8 所示。

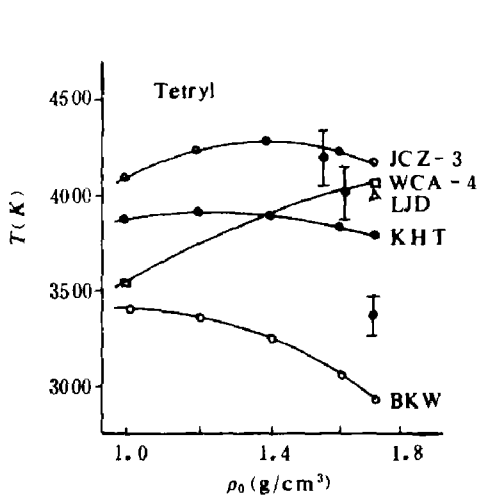


图 7 Tetryl C-J 温度计算值与测量值的比较

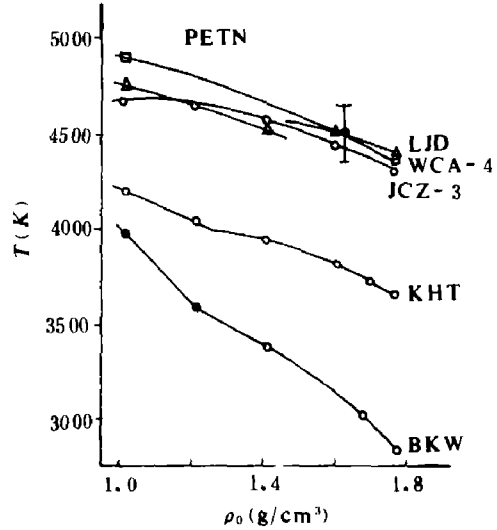


图 8 PETN C-J 温度计算值与测量值的比较

3. 测量结果的分析

(1) 装药密度的影响

我们进行了不同密度的药柱的爆温测试, 其结果如图 9、图 10 所示。

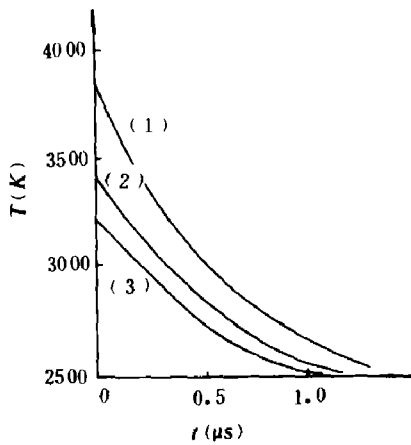


图 9 不同密度的 TNT 爆轰产物的温度随时间的变化

- (1) $\rho_0 = 1.49 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$
- (2) $\rho_0 = 1.55 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$
- (3) $\rho_0 = 1.60 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$

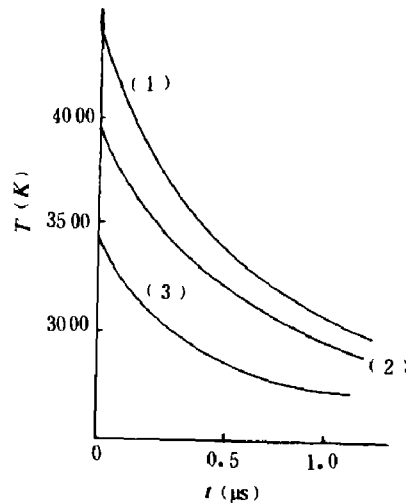


图 10 不同密度的 Tetryl 爆轰产物的温度随时间的变化

- (1) $\rho_0 = 1.55 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$
- (2) $\rho_0 = 1.62 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$
- (3) $\rho_0 = 1.69 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$

从图中可以看出: 不同密度的药柱其峰值温度是明显不同的, 密度越大、温度越低; 随

着时间的发展，它们有靠拢的趋势。通过处理实验结果，可以得到 TNT ($\rho_1 = 1.55 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$) ($\rho_2 = 1.60 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$) 的爆轰波前沿温度分别为 $3400 \pm 100 \text{ K}$ 和 $3100 \pm 100 \text{ K}$ ；Tetryl ($\rho_1 = 1.55 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$) ($\rho_2 = 1.69 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$) 的爆轰波的前沿温度分别为 $4200 \pm 150 \text{ K}$ 和 $3350 \pm 100 \text{ K}$ ，它们也被标在图4和图7上。

(2) 透明液体的影响

透明液体与炸药爆轰产物阻抗失配将给测量的真实性带来多大影响，透明液体能维持多久才有雾气出现而影响测试，这些都是难以回答的问题。为此，我们选用三种不同的透明液体：水 $\rho_0 = 1.00 \text{ g/cm}^3$, $n = 1.33$ ，甘油 $\rho_0 = 1.26 \text{ g/cm}^3$, $n = 1.46$ 和溴仿 $\rho_0 = 2.49 \text{ g/cm}^3$, $n = 1.59$ 。用条件相同的样品进行测试，(TNT $\rho_0 = 1.55 \text{ g/cm}^3$, Tetryl $\rho_0 = 1.64 \text{ g/cm}^3$) 测得的结果如图11、图12所示。

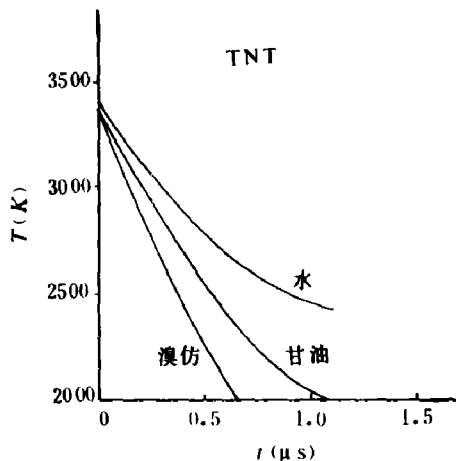


图11 通过三种液体得到的 TNT 爆轰产物的温度随时间的变化

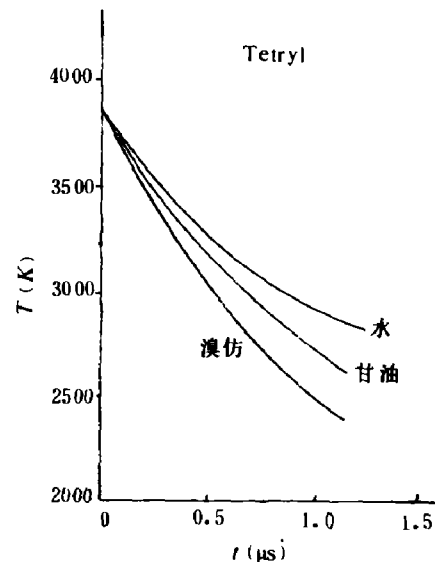


图12 通过三种液体得到的 Tetryl 爆轰产物的温度随时间的变化

根据经典理论，水和炸药爆轰产物阻抗失配严重，因此当爆轰波到达两者内界面时，稀疏波传入爆轰产物会影响反应区内的化学过程；而溴仿和炸药爆轰产物的阻抗接近，反射波不会很强，两者的测试结果应有差别。但从我们的实验结果看来，尽管三者性质有着明显的差别，但它们对尖峰温度测量值的影响是在实验误差范围内的。只是在 $0.5 \mu\text{s}$ 以后，三者的结果才有显著的不同，水的测量曲线变缓、而溴仿的曲线斜率几乎不变。分析这些结果，我们认为可能是以下几个原因造成的：首先是爆轰波 Von-Neumann 峰的存在，无法做到完全匹配，反射波总是存在的；其次是我们测试系统频响低（示波器 100 MHz ，整个系统 70 MHz 左右），速度跟不上；另外也可能是反射波对爆轰峰值温度影响不大。

由于三种介质有着不同的折射率，我们用实验用的 694 nm 和 488 nm 的光检验了它们在测量范围内的吸收系数，没有发现它们有明显的波长效应。鉴于这种情况，如无特殊需要，我们都是选用水来做透明液体进行爆温测试的。

4. 结语

用光电比色法测定炸药的爆轰温度,是近年来国外流行的方法。我们用这种方法和光纤技术相结合,测定了固体炸药 TNT、Tetryl 和 PETN 的爆轰温度以及爆轰前沿和水相互作用后爆轰产物的温度历史。我们的测量值和数值计算的结果比较接近。此外,我们还研究了炸药爆轰温度随密度的变化以及透明液体对温度测试的影响,以期得到更真实的结果。

由于条件有限,我们的工作还是很初步的。固体炸药爆轰温度的测试,还存在着很多问题:如固体炸药爆轰光辐射的性质是否符合黑体或灰体:“热点”的干扰怎样估计才合适:界面的阻抗失配会给温度测试造成多大误差:……这些问题的研究还有待今后的工作。

参 考 文 献

- [1] Kato, Y. et al., *8th int. Symp. on Detonation* (1985), 314.
- [2] Gibson, F.C. et al., *J. Appl. Phys.*, **29** (1958), 628.
- [3] Persson, P.A., Sjolén, T., *5th int. Symp. on Detonation* (1972), 153.
- [4] Urtiew, P.A., *UCRL-76516* (1975).
- [5] Burton, J.T.A. et al., *7th int. Symp. on Detonation* (1983), 700.
- [6] Kato, Y. et al., *7th int. Symp. on Detonation* (1981), 403.
- [7] 谭显祥, *爆炸与冲击*, **3**, (7) (1987), 279.
- [8] He Xianchu et al., *8th int. Symp. on Detonation* (1985), 322.

EXPERIMENTAL STUDIES ON DETONATION TEMPERATURE OF SOLID HIGH EXPLOSIVES

Han Chengbang Shi Huisheng Kang Shufang

(*Xian Modern Chemistry Research Institute*)

ABSTRACT Detonation temperature of solid high explosives (TNT, Tetryl, and PETN) and temperature history of detonation products after interaction between the detonation front and the transparent liquid were measured with a transient optical-electrical two-colour pyrometer combined with optical-fibers. In order to estimate the accuracy of the results, the relationship between detonation temperature and density, and effects of several different transparent liquids on the temperature measurement were studied.

KEY WORDS detonation temperature, optical-electrical two-colour pyrometer, solid high explosive.