

# 铸装TNT炸药表面热点温度的测量

高文 王贵朝 章冠人

(西南流体物理研究所)

**摘要** 非均匀炸药冲击起爆的热点理论一直是爆轰物理中,人们普遍关心的课题之一。本文对热点温度实验测量工作进行了尝试,叙述了用多通道光学高温计测量非均匀炸药表面热点温度的原理及方法。用实验方法得到在3.44 GPa左右的冲击压力下,铸装TNT炸药表面热点温度约为3640 K。

**关键词** 冲击引爆 热点 多通道光学高温计

## 一、引言

对冲击引爆中的热点假说,科学工作者已经进行了大量的工作。在热点形成的机理、反应从热点向周围蔓延的途经、热点反应的数值模拟等方面开展了很多研究。但到目前为止,我们几乎没有看到论述如何用实验方法测量热点温度的文章,因此,用实验对非均匀炸药内热点温度进行测量,成为我们关心的课题。

非均匀炸药的冲击起爆是一个高温、高压和高速的过程。由于冲击波的巨大破坏效应,使大多数接触式的温度测量方法在这种场合下无法应用。本文采用多通道光学高温计,以闪光辐射的方法对炸药表面热点温度进行了测量。

目前普遍认为非均匀炸药相对均匀炸药有较大冲击感度的原因是:起爆冲击波先是非均匀炸药内产生大量热点,然后因这些热点的作用使冲击波快速发展为爆轰波。因为炸药热点尺寸在 $10^{-3}$  cm量级内,其位置和分布是随意的,形成过程也很复杂,这些难以确定的因素给热点温度的实验测量带来极大的困难。

我们在实验中发现,压力为几吉帕的冲击波与薄的铸装TNT炸药片相互作用,当冲击波出炸药片自由面时,在其自由面上有一个短的脉冲辐射。通过对这个脉冲信号的分析,我们认为它就是炸药表面热点的辐射,并根据信号计算出炸药片底面热点的平均温度。对此,将在本文下边进行论述。

## 二、实验原理及方法

实验样品如图1所示。样品为一厚度0.3 cm的铸装TNT炸药片,当冲击波对样品作用后,在其内部将形成大量热点,实验用光纤接收样品底面热点的辐射,以光学纤维作为光路,将热点的辐射信号从被测样品传出,再用光电倍增管将光信号转换为电信号,在示波器上将其显示,并记录下来。然后与标准辐射源通过同样实验系统所产生的信号加以比较,由已知标准源的有关参数求热点的温度。

根据普朗克辐射定律,黑体的辐射亮度为

1988年10月26日收到原稿,12月14日收到修改稿。

$$J(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

式中  $c_1$ 、 $c_2$  为常数,  $\lambda$  为黑体辐射波长,  $T$  为黑体辐射的绝对温度。

对于实际物体, 其辐射亮度为

$$j(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot J(\lambda, T) \quad (2)$$

式中  $\varepsilon(\lambda, T)$  为单色辐射能力系数或称发射率。选择适当的条件, 使光电倍增管工作在其特性曲线的线性范围内, 则示波器上的信号幅度与辐射物体的辐射亮度成正比, 即

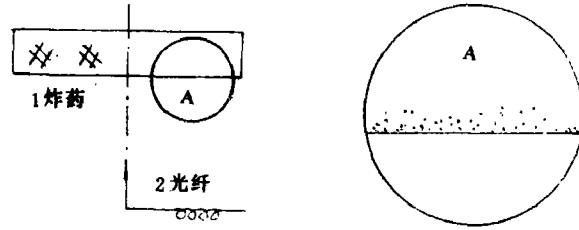


图1 TNT样品示意图

Fig.1 Schematic of the cast TNT sample

(1) Explosive (2) Optical fiber

$$h(\lambda) = \alpha \cdot k(\lambda) \cdot j(\lambda, T) \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为单位面积上热点所占面积,  $k(\lambda)$  对特定实验系统为一常数。为了定量了解实验系统的特性, 需要用标准光源对实验系统进行标定。以角标 (0) 表示标定值, 则

$$h_0(\lambda) = k_0(\lambda) \cdot j_0(\lambda, T_0) \quad (4)$$

由 (3) 式、(4) 式以及 (1) 式, 得到

$$\varepsilon = \frac{k_0(\lambda)}{\alpha k(\lambda)} \cdot \varepsilon_0 \frac{e^{c_2/\lambda T} - 1}{e^{c_2/\lambda T_0} - 1} \cdot \frac{h(\lambda)}{h_0(\lambda)} \quad (5)$$

式中  $\varepsilon_0$ ,  $T_0$  分别为标准光源的发射率和温度。实验采用多通道测量方法<sup>[1]</sup>, 通过对测量点两个以上不同波长的一组数据拟合得到辐射的温度。由 (2) 式列出综合测量温度的条件方程式

$$\begin{cases} \varepsilon \cdot J(\lambda_1, T) - j_1(\lambda_1, T) + v_1 = 0 \\ \varepsilon \cdot J(\lambda_2, T) - j_2(\lambda_2, T) + v_2 = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \varepsilon \cdot J(\lambda_n, T) - j_n(\lambda_n, T) + v_n = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中  $n$  为多通道测量的总通道数,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  为各个工作波长,  $j_1, j_2, \dots, j_n$  为由实验测量结果根据 (5) 式得到的辐射强度,  $v_1, v_2, \dots, v_n$  为条件方程式的残余误差。

根据综合测量原理, 温度的最可信赖值是使条件方程式(6)中的残余误差平方和最小, 由此推得

$$\frac{\sum_{i=1}^n j_i \cdot J(\lambda_i, T)}{\sum_{i=1}^n J^2(\lambda_i, T)} - \frac{\sum_{i=1}^n j_i \cdot J(\lambda_i, T) [e^{c_2/\lambda_i T} / (e^{c_2/\lambda_i T} - 1)] \cdot \frac{1}{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^n J^2(\lambda_i, T) [e^{c_2/\lambda_i T} / (e^{c_2/\lambda_i T} - 1)] \cdot \frac{1}{\lambda_i}} = 0 \quad (7)$$

根据 (7) 式, 可以求得温度  $T$ 。

### 三、实验结果

实验当冲击波到达样品底面时, 示波器上得到的热点辐射的典型信号如图2所示, 其冲击波压力为3.436 GPa。信号的波形为冲击波到达样品底面后形成的辐射, 它和锰铜计在该处的信号时间上也是吻合的。用公式(7)对波形的各次测量进行了计算, 计算结果示于表1。

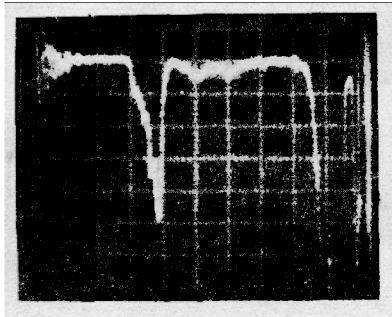


图2 热点温度测量的典型信号

Fig. 2 Typical signal of the measured temperature of the hot spots

表1 从测量数据计算的温度结果  
Table 1 Temperatures calculated from experiment data

实验号	$T(K)$	$\epsilon$
87-12-10	3314	0.0159
87-12-15	3998	0.0052
88-2-1	3534	0.0324
88-1-21	3281	0.0240
88-2-2	4084	0.0089

平均温度

$$\bar{T} = 3642 \text{ K}$$

从信号的波形和温度计算结果来看, 信号所反映的确实是热辐射, 其温度是经过校准的, 因而也是可靠的, 虽然有一定的误差。但这个热辐射温度的机制、是否是铸装TNT炸药表面热点的温度等问题, 只能应用反证法说明。首先, 我们认为所测得的辐射温度可能由下列几种原因造成: (1) 铸装TNT炸药冲击波后的温度; (2) 冲击波出TNT自由面后, 形成空气冲击波所产生的温度和 (3) 铸装TNT炸药表面的空气隙受冲击波压缩后的温度, 也就是所谓表面热点的温度。这几种因素, 经过分析, 我们认为第1和第2两种可能性可以排除。这主要因为TNT中的冲击波只有3.436 GPa, 根据文献(2)中的计算数据, 在铸装TNT中冲击波后的温度不会超过400 K, 另外如炸药已经起爆, 其爆温也仅为3010 K<sup>[7]</sup>, 所以第1种可能性是不存在的。对第2种可能性, 我们根据冲击波出自由面后, 粒子速度连续的条件, 求得空气冲击波后的声速  $c = 0.769 \text{ km/s}$ , 然后应用  $T = c^2 / \gamma R$ , 并设空气为理想气体<sup>[4]</sup>,  $\gamma = 1.402$ ,  $R = 2.869 \times 10^6 \text{ cm}^2 / \text{s}^2 \cdot \text{K}$ , 求得空气冲击波的温度  $T = 1470 \text{ K}$  (这个温度也可以从文献(5)得到证实), 这远小于所测得的平均温度, 因而可以肯定它不是由空气冲击波造成的。从波形上也可说明这个问题, 实验时, 光纤端面距爆炸样品底面至少为0.7 cm, 因此空气冲击波从形成后至少要经几个微秒方能达光纤, 使光纤破坏。在这个时间范围内, 被冲击的空气层厚度逐渐变厚, 其辐射亮度也应逐渐加强, 但从信号看在1  $\mu\text{s}$ 左右就突然下降, 这与空气冲击波的辐射特点是不相同的。这一点更加肯定地说明所测得的温度不是由空气冲击波产生的。对于第3种可能性, 我们认为铸装TNT炸药透明性差, 光纤接收到的辐射信号不可能是由于炸药内部的空气隙的辐射, 而只能是来自表面半封闭的空气隙或炸药表面的凹凸不平所产生。当冲击波作用时, 这些半封闭的空气隙还会发生会聚作用,

可以证明由于这些会聚作用,使气隙内的会聚空气冲击波发生了加强,其波速大约和炸药内的冲击波速度相等<sup>[6]</sup>。在压力为3.436 GPa时,炸药内的冲击波速度为3.41 km/s,因而这些半封闭空气隙内的空气冲击波速度也等于3.41 km/s,用上面算温度的方法,计算得到 $T \approx 4100$  K,这个温度与我们测量到的温度近似一致。由上面的分析,我们可以认为所测得的温度是炸药表面半封闭空气隙内的会聚温度,当然这个温度是许多半封闭空气隙的平均温度。

由于表面热点的观察,可以帮助我们了解炸药内部热点形成的情况,本工作可以说对热点形成的机制有了进一步的了解。目前提供给我们关于热点温度的资料很少,看到的文献仅有C. L. Mader的工作<sup>[3]</sup>,通过数值计算得到硝基甲烷内,半径为0.02 cm的空穴和8.5 GPa的冲击波作用,所形成的热点温度最高达4000 K。

本文没有对热点产生的机制、热点温度等问题进行讨论。在实验中发现的高温脉冲辐射现象,我们认为只能用表面热点来解释。

本工作的参加者还有吕秀生、姚炳林、徐立功、王 龙、李春放以及余泉有等同志,谢盘海同志参加了部分问题的讨论,作者在此表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 王贵朝等, 高压物理学报, 2 (3) (1988), 277.
- [2] 章冠人, 爆炸与冲击, 2 (3) (1982), 51.
- [3] Mader, C. L., Numerical Modeling of Detonation, University of California Press (1979).
- [4] Thompson Philip A., Compressible Fluid Dynamics, McGraw-Hill, 1972.
- [5] Я. В. 泽尔道维奇等著, 激波的高温流体动力学现象物理学, 科学出版社 (1980).
- [6] 高 文, 研究生毕业论文, 西南流体物理研究所研究生部 (1988), 成都.
- [7] 北京工业学院八系, 爆炸及其作用, 国防工业出版社 (1979).

## MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE OF SURFACE HOT SPOTS IN CAST TNT

Gao Wen, Wang Guichao, Zhang Guanren

(Southwest Institute of Fluid Physics)

**ABSTRACT** The theory of hot spot formation in detonation is a very interesting topic. There are enormous articles discussing about the mechanism of hot spot formation, criterion of initiation and numerical modelling etc. Meanwhile, we have not see any paper published about the experimental measurement of the temperature of hot spot. In this paper, the principle and method of measuring the temperature of surface hot spots in cast TNT after shock loading are described. The measured average surface hot spot temperature is

$$\bar{T} = 3642.2 \text{ K}$$

This temperature is higher than that behind the shock wave in the explosive (400K) or

the air shock wave  $\sim 1300\text{K}$  in front of the explosive. We calculated that the temperature of the shocked air in the half-closed cavity on the surface was  $4100\text{K}$  which was approximately in accord with the measured value, so we conclude that it is the average temperature of surface hot spots.

**KEY WORDS** shock initiation, Hot spot, Multi-channel optical pyrometer.