

# 铸装TNT炸药未反应冲击 Hugoniot 关系的测量

吴国栋 张振宇

(1982年7月3日收到)

本文利用锰铜压力计技术, 高速转镜狭缝扫描技术测量了铸装TNT炸药未反应的冲击 Hugoniot 关系。该方法的优点是简单、易于实现。测试精度和楔形实验法相近。对于铸装TNT ( $\rho_0 = 1.60\text{g}/\text{cm}^3$ ) 的未反应冲击 Hugoniot 关系为:

$$U = 2.70 + 1.38u \quad (U > 4.08\text{mm}/\mu\text{s})$$

$$U = 2.26 + 1.82u \quad (U < 4.08\text{mm}/\mu\text{s})$$

## 前 言

研究炸药冲击引爆机理及数值模拟炸药内冲击波演变为爆轰波的过程, 炸药的未反应冲击 Hugoniot 曲线是必不可少的。

测量惰性材料 Hugoniot 曲线通常用的方法是测量飞片速度和待测样品内的冲击波速度。但对于有可能反应的炸药样品, 就不能完全按照惰性材料的方法来进行测量。目前, 在国外主要用楔形实验法<sup>(1)</sup>和隔板实验<sup>(2)</sup>来测量固体炸药的冲击 Hugoniot 曲线。楔形法是把炸药样品制成楔形并和主发药系统紧贴。它利用阻抗匹配法求得界面上的粒子速度。该方法的优点是可以同时研究炸药的持续脉冲冲击引爆特性。但是楔形炸药加工精度要求较高(楔形表面要成为一个反射镜面), 由光测底片求斜率的方法确定炸药内冲击波速度误差较大, 并且每发实验只能测一对数据。

隔板实验也是通过改变主发药和被发药之间衰减层厚度使得被测样品内的冲击波有不同的压力。它的优点是实验装置较简单, 但是入射压力随板厚的变化关系必须是已知的。由于入射波是三角脉冲, 故该关系的精度较低。它由阻抗匹配法求得其余参量。

除此之外, 还有用电磁法<sup>(3)</sup>测量固体炸药的冲击 Hugoniot 曲线。该方法的优点是可以直接测量粒子速度, 但它的实验装置较小, 同一发实验只能取一对 Hugoniot 数据。

### 实验装置和测试技术

本实验所用的装置如图1所示。为了提高测试精度，减少飞片撞击平面度引起的误差，平面波发生器用直径为20mm的透镜。改变主药柱的成份和衰减层(黄铜块)尺寸,就能使飞片获得不同的速度,从而在飞片和被发炸药样品的撞击面上产生不同的压力。冲击波到达飞片自由面,反射中心稀疏波后,铝飞片才和衰减层脱开。飞片撞击平面度较好,在 $\phi = 100mm$ 内约为 $0.1\mu s$ 。黄铜块赶上铝飞片时间约大于 $1\mu s$ ,故黄铜块已不致影响测试结果。

被测炸药样品1的表面粘附锰铜压力计,压力计的阻值为 $0.2\Omega$ ,绝缘层的总厚度为 $0.14mm$ 。测试线路为恒流线路,测得的铝飞片撞击TNT炸药样品的界面压力的典型结果见图2。波形a和b分别是铝飞片以 $1.27mm/\mu s$ 和 $1.45mm/\mu s$ 的速度撞击TNT所得的锰铜计电压波形,可处理得出界面压力波形。它们的V值分别为 $1.2V, 0.8V$ 。灵敏度为 $0.5V/div$ 、扫速 $0.5\mu s/div$ 。

由于铸装TNT薄片能透光,我们将被测炸药样品7、光探板和光导索(由塑料光导索做成)的输出端放置在高速相机的狭缝线上。这

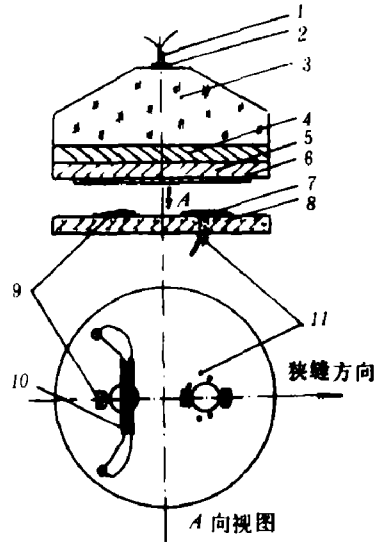


图1 实验装置示意图

- 1.雷管 2.传爆药柱 3.平面波透镜 4.主药柱
- 5.衰减层 6.铝飞片( $\phi 170 \times 2.0$ )
- 7.实验样品(TNT,  $\rho_0 = 1.600 \pm 0.005g/cm^3$ )
- 8.透明有机玻璃底板。
- 9.光探板 10. Mn·Cu压力计 11.光导索

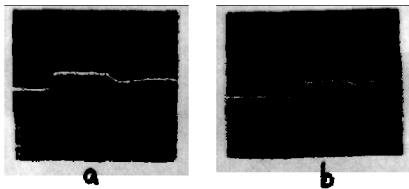


图2 Mn·Cu压力计测得界面压力波形

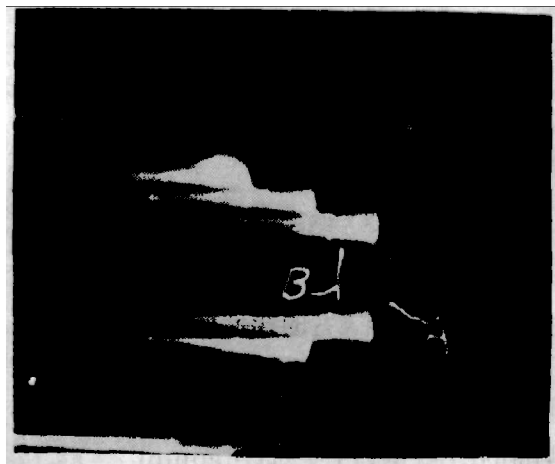


图3 铝飞片撞击样品时的光测波形。飞片速度为 $1.27mm/\mu s$

样,就能由飞片撞击TNT炸药面的光波形(图3中A线)和冲击波出TNT炸药下表面的

光波形(图 3 中  $B$  线)测得炸药内冲击波传播速度  $U_i$ 。由飞片到达各光导索(及光探板)之间的时间差(图 3 中  $c$  光点)就可以求出飞片撞击被发药时的速度。实验数据和测量结果详见表 1。

因为由飞片速度  $w$  和  $U_i$  可以求出炸药内冲击波的其余参量。因此,在我们的每发实验中可以得到两组相互独立的数据,它们不但可以用来相互检验。而且提高了所得 Hugoniot 曲线的精度。

我们利用电探针技术(压通式)测量了炸药内的冲击波速度。实验结果表明,这种铜箔压通式(中间隔一层  $0.01\text{mm}$  的聚酯薄膜)技术不能用于炸药未反应 Hugoniot 关系的测量。在低压下测量  $1\mu\text{s}$  左右的时间间隔的散度可达  $0.5\mu\text{s}$  之多。

锰铜压力计的压阻系数是采用文献<sup>(7)</sup>的结果

$$P(\text{GPa}) = 0.60 + 30.86 \left( \frac{\Delta V}{V_0} \right) + 21.16 \left( \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2 - 6.61 \left( \frac{\Delta V}{V} \right)^3$$

### 实验结果和分析

在飞片撞击被发药后,在被发药和飞片中各传入一个冲击波。因为铝飞片的冲击 Hugoniot 关系已知,故测得飞片撞击速度  $w$  及炸药内的冲击波速度  $U_i$  以后,由界面连续条件和动量方程,就可以求得界面压力  $P$  和粒子速度  $u$ :

$$P = \rho_{of} \cdot U_i \cdot (w - u) \quad (1)$$

$$P = \rho_{oi} \cdot U_i \cdot u \quad (2)$$

$$U_i = C_{of} + \lambda_f (w - u) \quad (3)$$

$$\therefore u = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AE}}{2A} \quad (4)$$

式中:  $A = \lambda_f \rho_{of}$

$$B = -[2\rho_{of}\lambda_f w + \rho_{of}C_{of} + \rho_{oi}U_i]$$

$$E = \rho_{of}w[C_{of} + \lambda_f w]$$

$\rho_{of}$ 、 $\rho_{oi}$  分别为飞片、炸药的初始密度;  $C_{of}$ 、 $\lambda_f$  为铝飞片的线性 Hugoniot 关系的常数 ( $C_{of} = 5.25\text{mm}/\mu\text{s}$ ,  $\lambda_f = 1.38$ )。于是由关系式 (4) 和测量的  $U_i$  就得到了一对 Hugoniot 关系的数据。

如果测得界面压力  $P$ 、 $U_i$ , 由关系式 (2) 就可以求得  $u$ , 这样

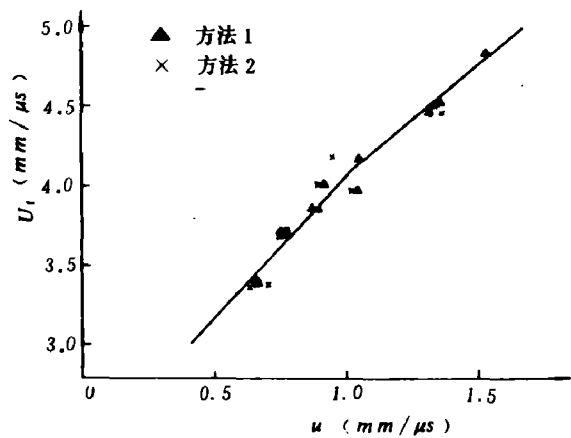


图 4 利用本文的方法测得的 TNT ( $\rho = 1.60\text{g}/\text{cm}^3$ ) Hugoniot 关系

表 1 实验数据和测试结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
主发药成份	/	/	/	/	/	/	$\frac{\text{TNT}}{\text{RDX}} = \frac{40}{60}$	$\frac{\text{TNT}}{\text{RDX}} = \frac{40}{60}$	PBX-HMX	PBX-HMX	PBX-HMX
主发药厚度	mm	mm	mm	mm	mm	mm	10.03	9.97	10.02	10.06	10.06
减压器材料	Foam H <sub>2</sub>	Foam H <sub>2</sub>	PMMA H <sub>2</sub>	PMMA H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
减压器厚度	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
样品厚度	3.33	3.33	3.29	3.30	3.29	3.31	3.32	3.31	3.28	3.31	3.34
飞行空腔	9.64	9.71	9.67	9.65	9.69	9.88	9.71	9.72	9.69	9.69	9.63
飞片速度	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs
冲击波速度	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs	mm/μs
撞击面压力	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
	3.78	3.50	4.55	4.51	5.66	5.45	6.79	6.25	9.71	9.60	/

表 2 Hugoniot 数据

方法	序号	序 号											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	U <sub>i</sub>	mm/μs	3.39	3.40	3.69	3.70	4.03	3.86	3.97	4.17	4.45	4.51	4.84
	u <sub>tt</sub>	mm/μs	0.65	0.65	0.75	0.75	0.90	0.93	1.04	1.03	1.31	1.34	1.52
	P <sub>tt</sub>	GPa	3.55	3.53	4.45	4.43	5.83	5.75	6.59	6.88	9.32	9.65	11.76
2	U <sub>i</sub>	mm/μs	3.39	3.40	3.69	3.70	4.03	3.86	3.97	4.17	4.45	4.51	/
	u <sub>tt</sub>	mm/μs	0.70	0.64	0.77	0.76	0.83	0.88	1.01	0.94	1.36	1.33	/
	P	GPa	3.78	3.50	4.55	4.51	5.66	5.45	6.79	6.25	9.71	9.60	/
2	t <sub>s</sub>	μs	0.98	0.98	0.89	0.89	0.82	0.86	0.84	0.79	0.74	0.73	0.69
	t <sub>st</sub>	μs	0.50	0.50	0.42	0.41	0.34	0.38	0.36	0.31	0.26	0.25	0.21

就得到了另一对数据。

我们将上述两种方法获得的铸装 TNT 炸药的 Hugoniot 数据列于图 4 中, 它们能分段拟合成直线<sup>(1)</sup>:

$$U_i = 2.70 \pm 0.25 + (1.38 \pm 0.21)u \quad (5)$$

$$U_i \geq 4.08 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

$$\sigma(U_i) = 0.21 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

$$U_i = 2.26 \pm 0.18 + (1.82 \pm 0.22)u \quad (6)$$

$$U_i < 4.08 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

$$\sigma(U_i) = 0.12 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

$U_i$  和  $u$  的单位为:  $\text{mm}/\mu\text{s}$ 。

因为铸装 TNT 炸药的爆速  $D_{cJ} = 6.90 \text{ mm}/\mu\text{s}$ <sup>(4)</sup>。因此在  $h$  厚度内冲击波传播时间与爆轰波在这段距离内传播时间之差  $t_{\text{过}}$  为:

$$t_{\text{过}} = t_h - \frac{h}{D_{cJ}} \quad (7)$$

式中  $t_h$  为冲击波在  $h$  厚度内的传播时间。实验结果列于图 5。它们能拟合成 (图 5 中曲线 1):

$$\log t_{\text{过}} = -0.690 \log P - 1.1192 \quad (8)$$

为了和这个结果比较, 我们利用厚飞片撞击引爆 TNT 楔形炸药。由测得的该炸药为非均匀引爆特性的引爆延迟距离  $X_i$ 、过传播时间  $t_{\text{过}}$  (冲击波、爆轰波传播的时间与纯粹是爆轰波在这段距离内传播时间之差) 和冲击波初始压力  $P$  的关系 (图 5 中曲线 2):

$$\log X_i = -0.7275 \log P + 1.3172 \quad (9)$$

$$\log t_{\text{过}} = -0.6556 \log P - 0.3168 \quad (10)$$

比较后说明, 采用薄片炸药测量炸药的过传播时间和压力的关系与用厚炸药测量有一定的差别。这主要是由于在薄片炸药内传播的冲击波基本上不受炸药化学反应的影响; 而在厚炸药内, 传播一段距离后的冲击波明显受到炸药化学反应的影响, 使得冲击波速度增加, 故在厚炸药内的过传播时间要比薄炸药来得小。

Дремун<sup>(8)</sup>等人的电磁法测量结果表明, 冲击波进入炸药内  $3 \text{ mm}$  的冲击波速度和冲击波进入时的速度几乎相等, 并以该厚度内的平均冲击波速度代替初始冲击波速度。为此, 我们把本实验测得的撞击面处的压力波形近似地看为  $3 \text{ mm}$  处的压力剖面。故由我们实验测得的

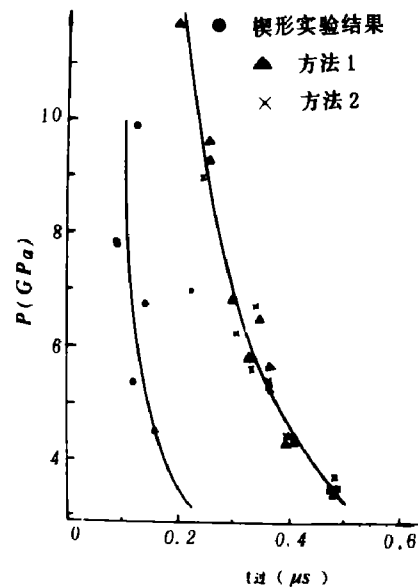


图 5 测得的  $t_{\text{过}} \sim P$  关系图

撞击面压力剖面来近似地判断在 3 mm 厚度内,冲击波速度是否受到化学反应的影响。由图 2 中(b)的压力波形可见, TNT 炸药在约为 6.3 GPa 冲击波作用下,在 0.3 μs 以后才出现很缓慢的化学反应。因此,利用锰铜压力计测得的波形可合理地选择炸药厚度,以便较好地测量该厚度内不受反应影响的冲击波速度。

由于我们实验中所测得的三个参量  $P$ 、 $w$ 、 $U_i$  中的任意二个进行组合都可以求出冲击波后的其余参量,但发现由  $P$ 、 $w$  求出  $U_i$  和  $u$  时,其值在其余二种方法求得的冲击 Hugoniot 曲线附近散度较大。由误差传播理论<sup>[5]</sup>计算了上述三种方法的粒子速度、冲击波速度的标准误差。计算表明:用  $U_i$ 、 $w$  (方法 1) 以及  $P$ 、 $U_i$  (方法 2) 求粒子速度  $u$ ,其误差传播都控制在测量精度范围内,而用  $P$ 、 $w$  (方法 3) 求  $u$  和  $U_i$  可以将测量误差放大两倍多。因此在实验中没有用方法 3。

把我们的测量精度与国外楔形实验法测量 TNT 炸药的冲击 Hugoniot 关系的精度进行比较(见表 3)。比较后可见,我们的方法与楔形实验研究结果的精度是差不多的。

表 3  $U_i = C_0 + \lambda u$

炸 药	$C_0$	$\sigma_{C_0}$	$\lambda$	$\sigma_\lambda$	$\sigma_u$
铸装 TNT	2.28	0.18	1.82	0.22	0.12 $U_i < 4.08$
$\rho_0 = 1.60 \text{ g/cm}^3$	2.70	0.25	1.38	0.21	0.12 $U_i > 4.08$
铸装 TNT <sup>(6)</sup>	2.274	/	2.652		0.65 $U_i < 3.7$
$\rho_0 = 1.62 \text{ g/cm}^3$	2.987	/	1.363		0.124 $U_i > 3.7$
铸装 TNT <sup>(1)</sup>	2.109	0.222	2.337	0.313	低压
$\rho_0 = 1.635 \text{ g/cm}^3$	2.974	0.199	1.555	0.132	高压

## 结 论

通过对上述实验结果的分析我们可以得出以下几点看法:

1. 测量炸药内的冲击波速度  $U_i$  和压力  $P$ ; 或测量  $U_i$  和飞片速度  $w$  都能很好地确定炸药的未反应冲击 Hugoniot 关系。

2. 利用高速转镜测量炸药薄片内的冲击波速度和用光导索(或光探板)测量飞片速度(或用锰铜压力计测量压力)来确定炸药的未反应冲击 Hugoniot 关系和楔形法测量精度大致相同。而本方法炸药样品加工简单、容易实现。由于本实验采用飞片撞击法,故上述计算是严格成立的。而楔形实验法用阻抗匹配来计算其余参量时用衰减层的冲击 Hugoniot 镜像反射线近似代替衰减层的反射稀疏波(或二次冲击线)。

潘建民付研究员、曹世勤付研究员对本文提出不少宝贵意见,参加过本实验工作的还有:池家春、姚炳铃、丁伯南、孙珠妹、庄丽娟、马冰、常红、罗小林,在此表示衷心感谢!

## 参 考 文 献

- [1] *LASL. Explosive Property Data*, (1980).  
 [2] Roth, J., *5th Inter. Symp. on Deto.*, (1970).  
 [3] Dremin, A. N. et al., *PB 180145*, (1967).  
 [4] Dobratz, B. M. et al., *UCRL-51319* (1974).  
 [5] 肖明跃编著, 实验误差估计和数据处理。  
 [6] Boyle, V. M., et al., *5th Inter. Symp. on Deto.*, (1970).  
 [7] 池家春等, 爆炸与冲击, 3(3), (1983), 75。  
 [8] Дрем ин, А. Н. И Др., "Ветонационны е волны в конденсированных средах" (1970).

## MEASUREMENT OF UNREACTED SHOCK HUGONIOT OF CAST TNT

Wu Godong Zhang Zhenyu

### Abstract

We have measured the unreacted shock Hugoniot of cast TNT by the techniques of manganin gauge and streak camera. The advantage of this method is that the experimental systems are simpler. For cast TNT ( $\rho_0 = 1.60 \text{ g/cm}^3$ ), the unreacted shock Hugoniot obtained is as  $U_i = 2.70 + 1.38u$  ( $U_i > 4.08 \text{ mm}/\mu\text{s}$ );  $U_i = 2.26 + 1.82u$  ( $U_i < 4.08 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ). The accuracy of the result is similar to that in the wedge method.

## 材料对快速加热的动响应

李清源 赵瑞安

(1983年3月9日收到)

本文讨论了固体材料在快速加热下的状态方程, 论述了固体在快速加热条件下热击波的产生、传播以及力学破坏, 并用一维流体——弹塑性模型模拟了快速加热下组合板中热击波的产生、传播、相互干扰及断裂破坏。

### 一、引 言

材料在快速加热下的瞬态行为越来越受到人们的重视。除了熟知的高速撞击这种机械方