

猛炸药 RHT-901和钝感炸药 IHE-2 的爆轰波直角绕射

赵同虎 韩立石 何智

(中物院流体物理研究所, 冲击波物理和爆轰物理实验室, 成都 610003)

摘要 采用高速转镜分幅相机和电探针技术研究了猛炸药 RHT-901和钝感炸药 IHE-2的爆轰波直角绕射图像和不同位置上的爆轰波传播时间。从研究得出, 两种炸药都在拐角顶点附近绕射, 爆轰波传播时间增长, 爆速变小。但是两种炸药绕射爆轰波的状态不一样, 钝感炸药 IHE-2中爆轰波绕过直角时, 在拐角顶点附近约10mm 范围内炸药未完全反应, 猛炸药 RHT-901中爆轰波绕过直角时未出现类似现象。两者相比, 钝感炸药中绕射爆轰波速度变化大, 波阵面曲率半径小, 而猛炸药的绕射爆轰波速度变化小, 波阵面曲率半径大。这说明炸药的爆轰波绕射与炸药的冲击感度、反应区宽度有关。

关键词 绕射 感度 反应区

中图法分类号 O381

1 引言

绕射是经常遇到的爆轰波传播现象, 爆轰波绕射研究对于学术探讨和实际应用都很有意义, 但由于从实验上观察比较困难, 因此用实验方法研究爆轰波绕射现象比较少。1964年, Venable^[1]用脉冲 X 射线照相技术研究了 B 炸药中爆轰波对 45°, 60° 铝块的绕射; 1976年, Dick^[2]用脉冲 X 射线技术研究了裸露的钝感炸药 X-0219 和 X-0290 中的爆轰波直角绕射; 1986年, Gibb^[3]用高速转镜照相技术研究了内直角、外圆弧和内、外圆弧有机玻璃容器内硝基甲烷的爆轰波绕射。我们^[4]用高速转镜分幅照相和扫描照相技术研究了硝基甲烷中爆轰波对不同拐角的绕射。但由于在这些研究中所使用的炸药不同, 条件不同, 因此实验结果有一定的局限性, 不能为我们提供凝聚炸药爆轰波绕射的规律性认识。为此我们研究了猛炸药和钝感炸药的爆轰波绕射, 研究了边界约束材料和拐角大小对猛炸药爆轰波绕射的影响。已发表了边界约束材料对爆轰波绕射影响的研究结果^[5]。本文报道我们应用高速分幅照相和电探针技术对猛炸药 RHT-901 (RDX/TNT=60/40) 和钝感炸药 IHE-2 (TATB/Binder=95/5) 爆轰波直角绕射的研究结果。

2 实验装置和测试技术

2.1 测量炸药爆轰波绕射图像的实验装置和测试技术

赵同虎: 男, 1939年生, 高级工程师。

1998-06-24收到原稿, 1998-07-16收到修改稿。

图 1 是测量两种炸药爆轰波绕射图像的实验装置示意图。

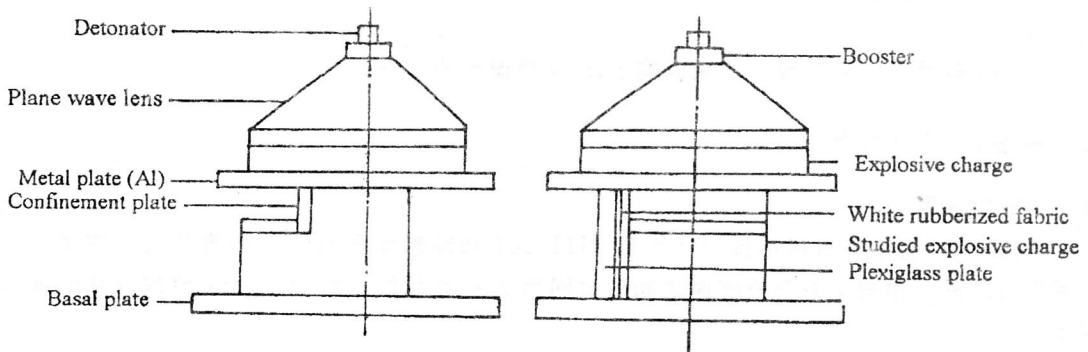


图 1 分幅照相用的实验装置示意图

Fig. 1 Test setup diagram for framing photograph

被研究炸药分别为 RHT-901 和 IHE-2。RHT-901 的密度 $\rho=1.71\text{g/cm}^3$ ，正常爆速 $D_j=7.86\text{km/s}$ ，多方指数 $\gamma=2.78$ ，临界起爆压力为 $5.6\text{GPa}^{[6]}$ ，反应区宽度为 0.2mm 。IHE-2 的密度 $\rho=1.888\text{g/cm}^3$ ， $D_j=7.70\text{km/s}$ ， $\gamma=2.95$ ，临界起爆压力为 $9\text{GPa}^{[7]}$ ，反应区宽度为 2mm 。

在对 RHT-901 进行的绕爆实验中，平面波透镜和铝板间的炸药柱为 RHT-901。对 IHE-2 进行的绕爆实验中，平面波透镜和铝板间的炸药柱为 JO-9159 (HMX/粘结剂/钝感剂 = 95/4.3/0.7)。

拐角处的约束板为 5mm 厚的钢。装药前面紧贴 15mm 厚的透光有机玻璃。装药和有机玻璃板间还夹了一层白胶布。有机玻璃板一方面作为测试窗口，另一方面用来减少侧面稀疏对爆轰波的影响。

用 FJZ-250 型高速转镜分幅相机拍摄爆轰波绕射图像。

2.2 测量绕射区不同位置爆轰波传播时间的实验装置和测试方法

测量从拐角顶点到绕射区不同位置的爆轰波传播时间所采用的实验装置如图 2 所示。

被研究炸药装药仍为台阶状。下面一层装药加工成一腰为柱面圆弧、另一腰为和底面成直角的倒梯形台，对于 RHT-901 采用的圆弧半径为 $R=34\text{mm}$ ，对于 IHE-2 采用的圆弧半径分别为 $R=30\text{mm}$ 和 $R=46\text{mm}$ 两种。拐角处的约束板仍为 5mm 厚的钢。

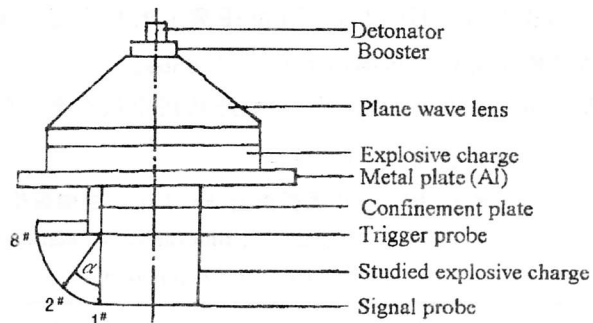


图 2 电探针测试用实验装置示意图

Fig. 2 Test setup diagram for electronic probe measuring

在装药拐角顶点处安装铜箔式电离探针，作为测试的触发探针。在装药底面中部(装置的

对称轴)附近安装 3 根同轴电离探针,测试下面一层被研究炸药中正常爆轰的传播时间 t_0 。在圆弧段每隔一定的角度安装一根同轴电离探针,测量从拐角顶点到圆弧不同位置的爆轰传播时间 t 。

用 32 路时间间隔测量仪记录时间 t_0, t , 仪器误差为 $\pm 5\text{ns}$ 。

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

用高速转镜分幅照相拍摄的猛炸药 RHT-901 和钝感炸药 IHE-2 的直角绕爆图像示于图 3 和图 4。图 3 和图 4 中两波阵面之间的时间为 $2\mu\text{s}$, 点划线为按 Huygens 原理计算的爆轰波阵面。

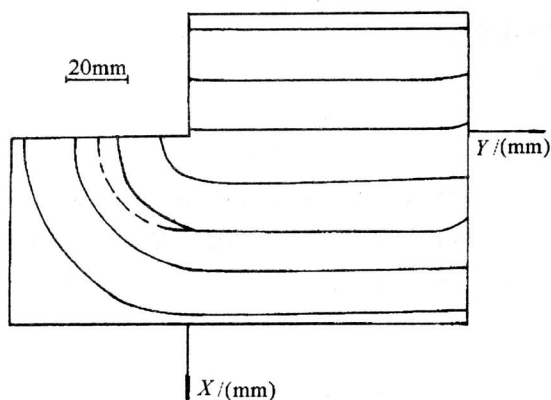


图 3 RHT-901 的爆轰波绕射图像

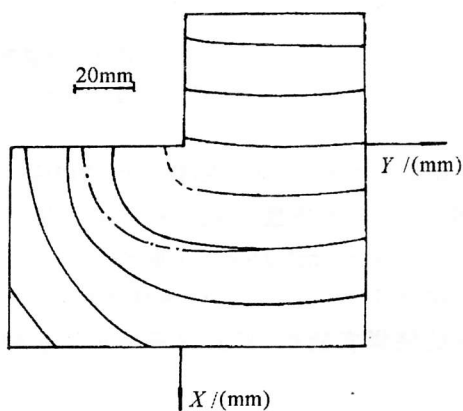


图 4 IHE-2 的爆轰波绕射图像

Fig. 3 Diffractive pattern of detonation in RHT-901 Fig. 4 Diffractive pattern of detonation in IHE-2

按图 2 装置,用电探针技术测量的 RHT-901 炸药在 34mm 距离上正常爆轰的平均传播时间 \bar{t}_0 为 $4.39\mu\text{s}$; IHE-2 在 30mm 距离上的平均正常爆轰传播时间 \bar{t}_0 为 $3.93\mu\text{s}$, 在 46mm 距离上的平均正常爆轰传播时间 \bar{t}_0 为 $5.96\mu\text{s}$ 。

表 1 和表 2 分别列出了两种炸药从拐角顶点至圆弧面不同位置的爆轰传播时间 t 、平均爆速 $\bar{D} = R/t$ 和延迟时间 $\Delta t = t - \bar{t}_0$ 。

表 1 RHT-901 圆弧面上 ($R=34\text{mm}$) 的爆轰传播时间, 平均爆速和延迟时间

Table 1 Propagation time, mean detonation velocity and delay time of the diffractive detonation at $R=34\text{mm}$ in RHT-901

Parameter	Angle $\alpha/(\circ)$								
	0	11	22	33	44	55	66	77	88
$t/(\mu\text{s})$	4.42	4.48	4.51	4.54	4.56	4.59	4.60	4.63	4.66
$\bar{D}/(\text{km/s})$	7.69	7.59	7.54	7.49	7.46	7.41	7.39	7.34	7.30
$\Delta t/(\mu\text{s})$	0.03	0.09	0.12	0.15	0.17	0.20	0.21	0.24	0.27

表 2 IHE-2 圆弧面上的爆轰传播时间、平均爆速和延迟时间

Table 2 Propagation time, mean detonation velocity and delay time in IHE-2

R/(mm)	Parameter	Angle $\alpha/(^\circ)$								
		0	10.5	21.0	31.5	42.0	52.5	63.0	73.5	84.0
30	$t/(\mu\text{s})$	4.06	4.18	4.21	4.25	4.28	4.32	4.37	4.41	4.48
	$\bar{D}/(\text{km/s})$	7.39	7.18	7.13	7.06	7.01	6.94	6.87	6.80	6.70
	$\Delta t/(\mu\text{s})$	0.13	0.25	0.28	0.32	0.34	0.39	0.45	0.48	0.55
46	$t/(\mu\text{s})$	6.14	6.23	6.29	6.34	6.46	6.45	6.49	6.58	6.75
	$\bar{D}/(\text{km/s})$	7.49	7.38	7.31	7.26	7.12	7.13	7.09	6.99	6.82
	$\Delta t/(\mu\text{s})$	0.18	0.27	0.33	0.38	0.50	0.49	0.53	0.58	0.79

3.2 实验结果分析

(1) 从图 3 和图 4 看出,两种炸药中的爆轰波都绕射到约束板,绕射波阵面都以接近 90° 的角度和固壁相交,但两种炸药的绕射波图像不完全一样。在 IHE-2 中,拐角处出现 10mm 左右的波形淡区(图中虚线表示),而在 RHT-901 中,拐角处未出现波形淡区,说明虽然两种炸药在拐角处都起爆了,但两种炸药的反应程度不一样,爆轰强弱不同。

(2) 从表 1 和表 2 看出,两种炸药中从拐角顶点到各测试点的爆轰传播时间 t 都大于同发实验中同样距离上的正常爆轰的传播时间 \bar{t}_0 ,而且随着角度 α 的增加传播时间增长。从表 1、表 2 中还看到,从拐角到测试位置的平均速度 \bar{D} 小于正常爆速 D_j 。说明两种炸药中绕射爆轰波速度都小于正常爆速,而且随着角度 α 的增加而减小。

将表 1、表 2 中的延迟时间 Δt 和角度 α 的关系绘于图 5。从图 5 可看出,IHE-2 的两条 α - Δt 曲线都比 RHT-901 的 α - Δt 曲线上升快,这说明当角度 α 增加时,IHE-2 的绕射爆轰波速度比 RHT-901 绕射爆轰波速度减小得快。

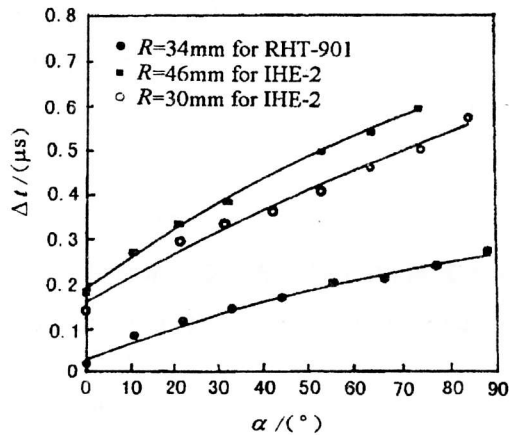


图 5 延迟时间 Δt 随角度 α 的变化

Fig. 5 Delay time Δt vs angle α

表 3 RHT-901 和 IHE-2 中绕射爆轰波阵面平均曲率半径

Table 3 The mean curvature radius of the diffractive detonation wave front in the RHT-901 and the IHE-2

Parameter	RHT-901				Parameter	IHE-2		
$d/(\text{mm})$	15.0	30.2	43.0	59.0	$d/(\text{mm})$	17.0	42.5	64.0
$r/(\text{mm})$	20.8	33.7	47.0	65.0	$r/(\text{mm})$	11.5	37.5	58.5

(3) 由图 3 和图 4 测量的两种炸药从拐角顶点到绕射波阵面的竖直距离 d 和波阵面平均曲率半径 r 列于表 3。从表 3 看到 RHT-901 的每条绕射爆轰波阵面曲率半径 r 大于距离 d ,

IHE-2 绕射爆轰波曲率半径 r 小于距离 d 。由此可推出在同一距离 d 上, RHT-901 绕射爆轰波阵面的曲率半径大于 IHE-2 的曲率半径, 说明猛炸药绕射爆轰波阵面曲率半径大, 钝感炸药绕射爆轰波阵面曲率半径小。

4 讨 论

爆轰波绕射的实质是由于在爆轰波传播过程中, 炸药面积突然扩张, 从拐角顶点来的中心稀疏波以有限的速度向内传播。在稀疏波经过的地方, 爆轰产物的粒子速度、温度受到扰动, 反应区的状态也受到影响。

50 年代由 Whitham 等人建立的 Whitham 理论^[8], 有效地解决了冲击波绕射、反射、稳定性以及各种复杂的冲击波相互作用问题, 也有人用 Whitham 理论估算爆轰波绕射、反射的问题。我们把爆轰波看做强冲击波, 用 Whitham 理论估算绕射波初始参数, 再结合炸药的其他参数讨论冲击感度对爆轰波绕射的影响。

如果把爆轰波近似看做强冲击波, 即不考虑反应区的问题, 按照 Whitham 理论, 绕射波的形状由下面方程描述

$$X = D_j t [(n+1)/n]^{1/2} \exp(\theta/n^{1/2}) \sin(\arctan n^{1/2} - \theta) \quad (1)$$

$$Y = D_j t [(n+1)/n]^{1/2} \exp(\theta/n^{1/2}) \cos(\arctan n^{1/2} - \theta) \quad (2)$$

式中:

$$n = 2/k(\infty) \quad (3)$$

$$k(\infty) = 2 \left[\left(1 + \sqrt{\frac{2}{r(r+1)}} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{2(r-1)}{r}} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

θ 为参数角, 对于爆轰波绕射 θ 取负值。

由(1), (2), (3)式可得出, 在 $\alpha = \arctan n^{1/2} - \theta$ 方向上, 初始绕射冲击波的速度为

$$D = \frac{d\sqrt{x^2 + y^2}}{dt} = D_j \left(\frac{n+1}{n} \right)^{1/2} \exp(\theta/n^{1/2}) \quad (5)$$

RHT-901(Com. B)的冲击雨贡纽关系^[9]为

$$D = 2.31 + 2.50u_p \quad (6)$$

IHE-2(X-0290)的冲击雨贡纽关系^[9]为

$$D = 2.4 + 2.50u_p \quad (7)$$

炸药中的冲击压力 p 为

$$p = \rho_0 D u_p \quad (8)$$

式中 u_p 为炸药的粒子速度, 单位为 km/s。

由(5), (6), (8)式和(5), (7), (8)式联立求得两种炸药中的初始绕射冲击波在不同方向上的参数(D, p), 估算结果列于表 4。从表 4 看出, 对两种炸药估算的绕射冲击波速度都随着角度的增加而减小, 而且估算的两种炸药在同一位置的绕射波参数相差不大。由前述知 RHT-901 的临界起爆压力为 5.6 GPa, 对照表 4 中数据得, 在 $\alpha < 50^\circ$ 的方向上, RHT-901 能起爆。IHE-2 的临界起爆压力为 9 GPa, 对照表 4 中数据得, 在 $\alpha < 35^\circ$ 方向上, IHE-2 能起爆。即由于两种炸药的冲击感度不同, 拐角附近炸药能起爆的范围不同, 说明冲击感度是影响两种炸药爆轰波绕射状态的重要原因。

钝感炸药 IHE-2 和猛炸药 RHT-901 爆轰波绕射不同的另一个原因是反应区宽度的影响。IHE-2 反应区宽(2mm),而 RHT-901 反应区窄(0.2mm),因此拐角处的中心稀疏波对 IHE-2 反应区的参数影响大,而对 RHT-901 反应区的参数影响小,由于爆轰波绕过拐角时稀疏波使 IHE-2 的反应区压力、温度降得多,反应速率低、反应慢,因此在某些条件下,炸药不能完全反应,甚至熄爆。

表4 估算的两种炸药中绕射波参数

Table 4 Estimated parameter of diffractive wave in two explosives

Explosive	Parameter	Angle $\alpha/(^\circ)$									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	
RHT-901	$\bar{D}/(\text{km/s})$	6.15	5.60	5.10	4.65	4.23	3.85	3.51	3.20	2.91	
	$p/(\text{GPa})$	16.20	12.60	9.76	7.44	5.57	4.08	2.91	1.94	1.20	
IHE-2	$\bar{D}/(\text{km/s})$	6.09	5.54	5.04	4.59	4.18	3.80	3.46	3.15	2.86	
	$p/(\text{GPa})$	17.00	13.10	10.10	7.59	6.17	4.02	2.77	1.78	1.00	

上述分析说明,冲击感度、反应区宽度不同是造成两种炸药爆轰波绕射不同的原因。需要说明的是,由于在 Whitham 理论上估算绕射波的速度、压力时,是将爆轰波按冲击波近似处理,没有考虑炸药反应产生的高温、高压可激发相邻炸药起爆,也没有考虑钢固壁对爆轰波绕射的加强作用^[5],因此估算的结果和实验结果相差较大,但估算结果定性地说明了冲击感度对爆轰波绕射的影响。

参 考 文 献

- 1 Venable D. PHERMEX. Physics Today, 1964, 17: 19~22
- 2 Dick R D. Insensitive Explosive Studies Using PHERMEX. In: Bryant E L, ed. Proceedings of the Radiography Sym. Texas: Houston, 1976. 176
- 3 Gibb A W. Experimental Study of Corner-Turning in Nitrimethane. PB90-221409, 1986
- 4 赵同虎, 于川, 韩立石, 等. 硝基甲烷中爆轰波绕射的实验研究和数值模拟. 爆炸与冲击, 1994, 14(2): 165~170
- 5 李生才, 赵同虎, 冯长根. 约束条件对注装 TNT 中拐角效应的影响. 高压物理学报, 1998, 12(2): 156~159
- 6 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学. 北京: 国防工业出版社, 1991. 269
- 7 李良忠, 刘文翰, 于川, 等. 钝感炸药 IHE-2 冲击引爆性能. 见: 爆炸力学专业委员会. 第四届全国爆轰学术会议论文集(上). 河北, 山海关, 1994. 2~6
- 8 Whitham G B. A New Approach to Problems of Shock Dynamics. J Fluid Mech 1957, (5): 146~171
- 9 Mader C L. Numerical Modeling of Detonation. Berkely, California: University of California Press, 1979

THE RECTANGULAR DIFFRACTION OF DETONATION WAVE IN THE HIGH EXPLOSIVE RHT-901 AND THE INSENSITIVE HIGH EXPLOSIVE IHE-2

Zhao Tonghu, Han Lishi, He Zhi

*(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,
Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 523, Chengdu 610003)*

ABSTRACT The patterns of rectangular diffraction of detonation in the high explosive RHT-901 and the insensitive high explosive IHE-2 have been measured with the rotating-mirror framing camera and the coaxial ionization probes techniques. Results show that (1) the reaction is incomplete near the convex angle in IHE-2; (2) the radius of the curvature of the diffractive detonation wave front in RHT-901 is larger than that in IHE-2 and (3) the diffraction of the detonation has relation with the width of reaction zone and the sensitivity of the explosive.

KEY WORDS diffraction, sensitivity, reaction zone.