

文章编号: 1006-9941(2008)05-0621-04

超细钝感 HMX 小尺寸拐角装药爆轰延迟时间研究

李晓刚, 焦清介, 温玉全

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了研究超细钝感 HMX 在小尺寸拐角装药条件下的爆轰延迟现象, 对影响爆轰延迟时间的因素进行了分析, 采用量纲分析法给出了拐角延迟时间的理论表达式; 测定了沟槽尺寸为 $0.8\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ 、 $0.6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ 的拐角装药爆轰延迟时间。结果表明, 在相同的拐角角度下, $d=0.6\text{ mm}$ 时拐角装药爆轰延迟时间更长, $\alpha=2\pi/3$ 时还出现熄爆。以理论表达式和测试结果为基础, 采用最小二乘法原理得出了待定系数 k 与 m 分别为 365.8 和 4.75, 得到了拐角延迟时间与拐角角度关系的半经验关系式。

关键词: 爆炸力学; 小尺寸拐角装药; 爆轰延迟时间; 超细钝感 HMX

中图分类号: TJ410.6; O389

文献标识码: A

1 引言

在小尺寸装药条件下爆轰波沿拐角传播时, 存在拐角效应现象^[1-6], 爆轰波在拐角处绕射传播速度低于沿直线传播时的速度, 使得爆轰波沿拐角传播的时间比沿直线长, 这种现象称为拐角装药爆轰时间延迟。研究小尺寸沟槽装药爆轰延迟时间, 可以为同步起爆网络设计及爆轰波输出时间同步性分析提供理论依据, 为同步起爆网络的设计提供参考。为提高网络的爆轰波输出同步性, 应在沟槽尺寸、拐角角度设计时尽量减小拐角装药爆轰延迟时间。王树山^[7]通过高速摄影实验, 对某挠性炸药的小尺寸拐角装药爆轰波传播特性进行了研究, 证实了拐角效应的存在, 并通过对不同拐角角度、不同装药尺寸下爆轰波传播时间的测量, 给出了所研究炸药的爆轰延迟时间与拐角角度的经验关系式。魏继锋^[8]用 LSDYNA-3D 程序对三种常见的拐角装药的爆轰波传播特性进行了数值模拟, 展示了爆轰波因拐角处爆轰波传播面积的变化而产生的衰减-增长过程, 得到了拐角处低压爆轰区的尺寸。从已有的小尺寸拐角装药爆轰延迟时间研究的文献资料看, 多是通过实验研究建立经验关系式, 缺少理论支持, 关系式的物理意义不明确。

本文根据拐角效应理论, 分析了小尺寸沟槽装药时, 拐角装药爆轰延迟时间的影响因素, 采用量纲分析法推导了小尺寸拐角装药爆轰延迟时间与拐角角度和装药尺寸之间的理论关系。同时, 结合超细钝感

HMX 在爆炸网络及微火工技术中的应用, 设计了拐角装药爆轰延迟时间测试装置, 测定了在不同装药尺寸下, 超细钝感 HMX 的拐角装药爆轰延迟时间, 将理论研究和试验数据相结合, 研究了小尺寸拐角装药爆轰延迟时间与拐角角度之间的关系。

2 小尺寸拐角装药爆轰延迟现象物理模型与数学方程

小尺寸拐角装药爆轰延迟时间现象的理论基础就是小尺寸装药的拐角效应现象, 爆轰波在通过拐角时, 存在一段非稳态爆轰区或引爆点偏离拐角点的延迟引爆现象, 由此造成爆轰波延迟传播。非稳态爆轰区越长, 爆轰延迟时间越长。因此, 小尺寸拐角装药爆轰延迟现象的物理模型与拐角效应现象的物理模型相同, 如图 1 所示, 其中 d^* 与 r^* 分别为不爆区的高度和宽度, 不爆区与弱爆区的总宽度就是延迟引爆距离。

爆轰波从直线向拐角传播方向示意图如图 2 所示。图 2 中, 若爆轰波从 A 点输入, 在 $OC=OB$ 情况下, 爆轰波沿拐角传播时间 t_{OB} 大于沿直线传播的时间 t_{OC} , 亦即 $t_{AOB} > t_{AOC}$, $\delta_t = t_{AOB} - t_{AOC}$ 称为延迟时间, δ_t 是表达延迟现象的特征量, 称为拐角装药爆轰延迟时间, 单位为 ns。

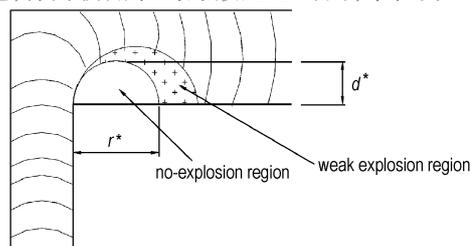


图 1 拐角效应物理模型

Fig. 1 Model of corner effect

收稿日期: 2008-04-03; 修回日期: 2008-07-21

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(51339030203)

作者简介: 李晓刚(1979-), 男, 在读博士, 主要从事新起爆技术研究。

通讯联系人: 温玉全(1965-), 男, 副教授。e-mail: wyquan@bit.edu.cn

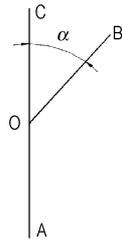


图2 小尺寸装药爆轰波拐角传播示意图

Fig. 2 Corner propagation of detonation wave in limited channel

对小尺寸装药拐角效应现象进行分析,认为影响拐角装药爆轰延迟时间的主要因素为:(1)爆炸网络基板的几何及性能参数,包括沟槽宽深 d 、沟槽形变系数 λ 、拐角角度 α (弧度制);(2)沟槽装药的性能参数,包括装药密度 ρ 、爆速 D 、爆轰产物膨胀系数 β 。

结合图1所示的拐角效应的物理模型,可知拐角装药的尺寸越小,爆轰波通过拐角绕射并趋于稳定所经历的弱爆区会越长,拐角爆轰延迟时间越长。当 d 小于临界尺寸 d_{cc} 时,拐角爆轰延迟时间将趋近无穷大,出现熄爆;当 d 大于极限尺寸 d_L 时,不产生爆轰延迟现象。因此, d 的取值范围为 $d_{cc} \leq d \leq d_L$ 。

当爆轰波经拐角发生绕射时,其爆轰延迟时间 δ_i 可表述为:

$$\delta_i = f(d, \lambda; \rho, D, \beta; \alpha) \quad (1)$$

同一装药工艺下,同一装药密度下的 β, λ 可视为常量,取 d, ρ, D 为基本参量,对式(1)进行无量纲化可得:

$$\delta_i = \frac{d}{D} \lambda \beta f(\alpha) \quad (2)$$

依据无量纲理化原理,设 $f(\alpha) = \left(\frac{\alpha}{A+B\alpha}\right)^n + C$

根据边界条件可知: $\alpha = 0$ 时, $f(\alpha) = 0$,推出 $C = 0$; $\alpha \rightarrow \pi$ 时, $f(\alpha) \rightarrow \infty$,即 $\lim_{\alpha \rightarrow \pi} (A+B\alpha)^n = 0$,推出 $A = -B\pi$ 。

由此得

$$f(\alpha) = \left(\frac{\alpha}{B(\alpha - \pi)}\right)^n = \left(\frac{m\alpha}{\pi - \alpha}\right)^n \quad (3)$$

分析文献[7]可知,随着装药尺寸的减小,拐角延迟时间随拐角角度的变化率增大,尺寸越小,拐角角度对延迟时间的影响权重越大,因此将 n 看作是 d 的函数更合理,即设定 $n = f(d)$,则由式(2)、(3)得:

$$\delta_i = \frac{d}{D} \lambda \beta \left(\frac{m\alpha}{\pi - \alpha}\right)^{f(d)} \quad (4)$$

令 $k = \lambda\beta$,则上式简化为:

$$\delta_i = k \frac{d}{D} \left(\frac{m\alpha}{\pi - \alpha}\right)^{f(d)} \quad d_{cc} \leq d \leq d_L; 0 \leq \alpha < \pi \quad (5)$$

式(5)就是拐角延迟时间的理论表达式, k, m 与 $f(d)$ 为待定系数。分别测量不同沟槽尺寸、不同拐角下的爆轰延迟时间,并对试验数据进行分析处理,就能得到 $\delta_i \sim d \sim \alpha$ 三者之间的半经验关系式。

3 小尺寸拐角装药爆轰延迟时间的试验研究

采用薄膜探针法测量拐角装药爆轰延迟时间^[9],探针安装原理如图3所示。试验中采用5个探针,探针1作为触发探针,2~5作为测试探针,探针2、4与3、5分别安装在以拐角中心为圆心的两个同心圆弧上。试验基板起爆后,第一个探针接通,触发测试仪记时,当爆轰波传播到探针2,3,4,5时,各传感器分别记录下爆轰波到达的时间,即 t_2, t_3, t_4, t_5 。分别对所记录的时间按 $\delta_{i24} = t_4 - t_2, \delta_{i35} = t_5 - t_3$ 进行处理,就可以得到爆轰波通过拐角时的延迟时间。

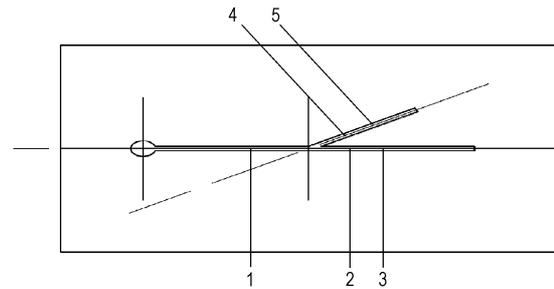


图3 拐角装药爆轰延迟测试原理

1—触发探针, 2,3,4,5—测试探针

Fig. 3 Testing principle of detonation delay of corner charge

1—touching probe, 2,3,4,5—testing probe

在本研究中,基板材料为LZ12,采用HMX含量为96.00%~96.50%的超细钝感HMX为沟槽装药,HMX的平均粒径为587.3 nm,装药方法为精密压装^[10]。在沟槽尺寸为 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$,平均装药密度为 $1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,装药爆速 $D = 8.04 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。研究中设计加工了沟槽尺寸为 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$,拐角角度分别为 $\pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3$ 的拐角试验基板,测定拐角装药爆轰延迟时间。基板装药效果图如图4所示。

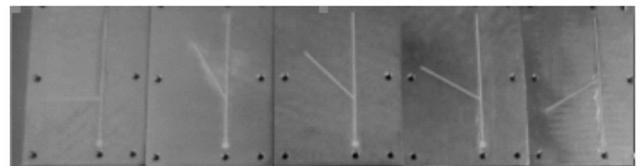


图4 基板沟槽装药效果图

Fig. 4 Experimental effect drawing of charge in base channel

按图 3 所示的原理安装薄膜电极传感器,进行拐角装药爆轰延迟时间测试,安装薄膜电极传感器后的基板如图 5 所示。基板沟槽尺寸为 0.8 mm × 0.8 mm 时,拐角装药爆轰延迟时间测试结果见表 1。其中,采取了从示波器直接读取直线和拐角间爆轰波传播时间差的方法确定拐角装药爆轰延迟时间 $\delta_{t_{24}}$ 、 $\delta_{t_{35}}$ 。

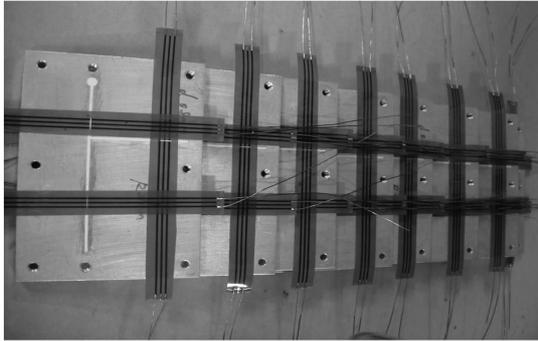


图 5 薄膜电极传感器装配图
Fig.5 Testing device of thin film sensor

表 1 沟槽尺寸为 0.8 mm × 0.8 mm 时拐角装药爆轰延迟时间
Table 1 Delay time of detonation wave of corner charge in 0.8 mm × 0.8 mm channel

α	$\delta_{t_{24}}/\text{ns}$	$\delta_{t_{35}}/\text{ns}$	δ_t/ns	$\delta_{t,0.8}/\text{ns}$
$\pi/6$	20.13	48.75	34.44	37.60
	50.92	39.51	45.22	
	44.74	21.56	33.15	
$\pi/4$	44.60	63.52	54.06	41.46
	65.11	21.10	43.11	
	40.15	14.25	27.20	
$\pi/3$	55.01	52.14	53.58	50.56
	46.27	50.13	48.20	
	45.54	54.26	49.90	
$\pi/2$	120.00	112.50	116.20	88.77
	70.41	72.95	71.68	
	75.35	81.44	78.40	
$2\pi/3$	130.23	156.10	143.20	105.7
	81.05	112.10	96.59	
	71.45	83.14	77.30	

从表 1 可以看出,随着拐角角度的增大,爆轰波拐角延迟时间增大。将装药尺寸 $d = 0.8 \text{ mm}$,爆速 $D = 8.04 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 及表 1 中的数据代入式(5),依据最小二乘法原理进行拟合,得到 k 、 m 和 n ,分别为: $k = 365.8$ 、 $m = 4.75$ 、 $n = 0.49$ 。即得到沟槽尺寸为 0.8 mm × 0.8 mm 时拐角装药爆轰延迟时间与拐角角度关系的半经验关系式:

$$\delta_{t,0.8} = 365.8 \frac{0.8}{8.04} \left(\frac{4.75\alpha}{\pi-\alpha} \right)^{0.49} = 78.1 \left(\frac{\alpha}{\pi-\alpha} \right)^{0.49} \quad (6)$$

依据式(6)就可以计算不同拐角角度下,小尺寸

沟槽装药的爆轰延迟时间,如图 6 所示,利用此半经验关系式计算出的拐角延迟时间与试验结果基本一致。

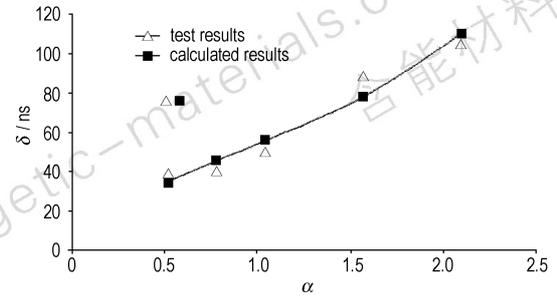


图 6 沟槽尺寸为 0.8 mm × 0.8 mm 时拐角装药爆轰延迟时间与拐角角度的关系图

Fig.6 Relationship between delay time of detonation wave of corner charge and corner angle in 0.8 mm × 0.8 mm channel

为了验证此研究方法及拟合过程所得参数的合理性,还采用相同的装药条件研究了装药尺寸为 $d = 0.6 \text{ mm}$ 时,拐角装药爆轰延迟时间与拐角角度的关系。分别将 $d = 0.6 \text{ mm}$ 、拐角装药爆轰延迟时间测试结果、爆速 $D = 7.532 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 、利用表 1 数据计算的 $k = 365.8$ 和 $m = 4.75$ 分别代入式(5),根据最小二乘法原理得 $n = 0.81$,由此得:

$$\delta_{t,0.6} = 102.95 \left(\frac{\alpha}{\pi-\alpha} \right)^{0.81} \quad (7)$$

$d = 0.6 \text{ mm}$ 时,拐角装药爆轰延迟时间测试结果及由式(7)得出的计算结果见表 2。

表 2 沟槽尺寸为 0.6 mm × 0.6 mm 时拐角装药爆轰延迟时间
Table 2 Delay time of detonation wave of corner charge in 0.6 mm × 0.6 mm channel

α	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$
testing results/ns	44.24	55.45	104.30	detonation failure
calculation results/ns	42.28	58.72	102.95	180.49

对比表 1 和表 2 的测试结果可知,在相同的拐角角度下,与沟槽尺寸 $d = 0.8 \text{ mm}$ 相比, $d = 0.6 \text{ mm}$ 时拐角装药爆轰延迟时间更长,在 $\alpha = 2\pi/3$ 时还出现熄爆,此结果与小尺寸装药爆轰波传播特性相符。

对比表 2 中的计算结果和测试结果可以看出,两组数据偏差很小,说明本研究的分析过程及所得半经验公式是合理的。同时,对比式(6)和式(7)还能看出 n 随着 d 的改变而改变,说明 n 将看作 d 的函数,设 $n = f(d)$ 是合理的。

4 结论

(1) 采用量纲分析法,对小尺寸拐角装药爆轰延迟时间进行了研究,给出了小尺寸拐角装药爆轰延迟时间的理论关系式。

(2) 结合试验研究,给出了沟槽尺寸为 $0.8\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ 、 $0.6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ 时所研究炸药的拐角装药爆轰延迟时间与拐角角度的半经验关系式,该半经验关系式有明确的物理意义,能够反映拐角角度及装药尺寸对爆轰延迟时间的影响,对指导工程设计有指导意义。

参考文献:

- [1] Mader C L. Numerical Modeling of Detonation[M]. Berlely: University of California Press,1978.
- [2] Cox M, Campell A W. Corner-turning in TATB[C] // 7th Symp. on Detonation, Annapolis, USA, 1981(6): 624 - 633.
- [3] Camperll A W. The M-3 corner-turning test[R]. LA-VR-88-457, 1988.
- [4] Held M. Corner-turning distance and rotation radius[J]. *Prop Exp Pyro*, 1989, 14: 153 - 162.
- [5] 刘举鹏. 爆轰波拐角绕射现象机理及应用研究[D]. 北京: 北京理工大学博士学位论文, 1991.
LIU Ju-peng. Studies and application of the detonation wave turning around a corner [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1991.
- [6] 李生才, 冯长根, 赵同虎. 拐角角度对爆轰波拐角效应的影响[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 289 - 294.
LI Sheng-cai, FENG Chang-gen, ZHAO Tong-hu. The influence of the angle of convex corner on the effect of detonation waves[J]. *Chinese Journal of Explosion and shock waves (Baozha yu Chongji)*, 1999, 19(4): 289 - 294.
- [7] 王树山. 爆轰波非常规传播现象及其应用研究[D]. 北京: 北京理工大学博士学位论文, 1995.
WANG Shu-shan. Study on phenomena and application of detonation abnormal propagation[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1995.
- [8] 焦清介, 魏继锋, 周钢, 等. 爆轰波拐角传播三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 534 - 538.
JIAO Qing-jie, WEI Ji-feng, ZHOU Gang, et al. Three dimensional numerical simulation of detonation wave propagation on corner-turning [J]. *Chinese Journal of Explosion and Shock Waves (Baozha yu Chongji)*, 2003, 23(6): 534 - 538.
- [9] 黄正平著. 爆炸与冲击电测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
HUANG Zheng-ping. Electric measurement technical of detonation and impact[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- [10] 温玉全, 焦清介. 同步起爆网络精密压装装药技术研究[J]. 兵工学报, 2006(3): 410 - 413.
WEN Yu-quan, JIAO Qing-jie. A study on the precision press loading technique of a synchronous multi-point explosive circuit[J]. *Chinese Journal of Acta Armamentarii (Binggong Xuebao)*, 2006(3): 410 - 413.

Delay Time of Detonation Wave of Superfine Insensitive HMX Charged in Limited Corner Channel

LI Xiao-gang, JIAO Qing-jie, WEN Yu-quan

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The factors influencing delay time of detonation wave of superfine insensitive HMX in limited corner channel were analyzed. The dimension analysis method was adopted to induce the theory formula, and the delay time was tested by valid experiments in the limited corner of $0.8\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ and $0.6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ channel. Results show that the delay time of detonation wave is longer in the channel $d = 0.6\text{ mm}$ than $d = 0.8\text{ mm}$ with similar corner, and the propagation of detonation wave will be failure when $\alpha = 2\pi/3$. Based on the theory formula and the testing results, the semi-experimental equation is given by Least Square Method, and the undetermined coefficients k and m are 365.8 and 4.75.

Key words: mechanics of explosion; charge in limited corner channel; delay time of detonation wave; superfine insensitive HMX