

文章编号: 1006-9941(2009)03-0312-05

超细钝感 HMX 小尺寸弯曲装药爆速亏损研究

李晓刚¹, 温玉全¹, 焦清介¹, 贾宁博²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安 710061)

摘要:为了研究超细化钝感 HMX 在小尺寸弯曲装药条件下的爆速亏损现象,从理论上推导了爆速亏损与装药曲率半径的关系式,并通过试验分别测定了在沟槽尺寸为 0.6 mm × 0.6 mm、0.8 mm × 0.8 mm 时的弯曲装药爆速亏损,利用最小二乘法确定了两种尺寸下爆速亏损与装药曲率半径的半经验关系式分别为 $\bar{D}|_{d=0.6} = \frac{D|_{d=0.6}}{D_j} \cdot \frac{0.753}{Rd^{0.6}}$ 、 $\bar{D}|_{d=0.8} = \frac{D|_{d=0.8}}{D_j} \cdot \frac{0.734}{Rd^{0.6}}$ 。研究表明,弯曲装药爆速亏损的经验表达式和半经验表达式能较好地吻合。

关键词:爆炸力学;小尺寸弯曲装药;爆速亏损;超细钝感 HMX

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.03.015

1 引 言

从小尺寸直线装药爆速与装药尺寸关系看,在小尺寸装药条件下,由于侧向稀疏波的作用,存在直径效应现象,直线装药爆速小于理想爆速^[1-8]。只有当装药尺寸大于某一值时,其爆速才接近理想爆速。而在小尺寸拐角装药时,由于拐角效应而使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现象。对弯曲装药的爆轰波传播爆速是否低于直线装药爆速的问题,王树山^[9]以某型硅橡胶炸药为研究对象,设计了不同曲率半径的装药基板,通过爆速测试,研究了曲率半径对装药爆速的影响。发现当装药的曲率半径小于某值时,弯曲装药爆速小于直线装药的爆速,并根据研究结果将小尺寸直线装药爆速与弯曲装药爆速之差与直线装药爆速的比值定义为爆速亏损,用最小二乘法对试验数据进行处理给出了爆速亏损与装药曲率半径的关系,但该关系式没有明确的物理意义。

在上述研究成果的基础上,本文根据小尺寸弯曲装药爆轰波传播的物理模型,建立了弯曲装药爆速亏损的相关数学表达式。同时,结合超细钝感 HMX 在爆炸网络及微尺度装药火工品中的应用,研究了其在小尺寸弯曲装药中的爆速亏损现象,为该炸药在爆炸网络及微型火工品中的应用提供参考。

2 小尺寸弯曲装药爆速亏损现象物理模型与数学方程

弯曲装药的爆轰波传播,其传播方向根据装药边界或装药形状时刻在变化,其实质仍属于爆轰波的绕射问题。因此对于圆弧装药的稳定爆轰,可抽象为爆轰波的连续拐角绕射,圆弧装药爆轰波传播的物理模型如图 1 所示。假设爆轰波在单位时间 δ_t 内传播单位弧长 δ_s 由 A 到达 B 位置,相当于通过小尺寸装药拐过角度 $\delta_\theta = \delta_s/R$, R 为装药的曲率半径。由拐角效应现象可知,爆轰波通过装药拐角,拐角扰动使拐角附近的爆速低于该尺寸下的直线爆速。所以,圆弧装药的爆速低于直线装药的爆速,即存在爆速亏损现象。

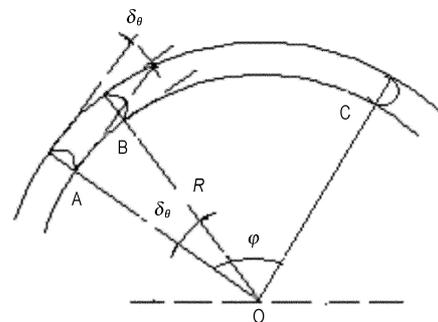


图 1 弯曲装药爆轰波传播物理模型

Fig. 1 Model of detonation wave propagating in curve channel

结合上述分析,将弯曲装药微元化为无限多个连续的拐角,可将弯曲装药爆轰波传播问题转换为爆轰波沿拐角传播的问题,从而实现弯曲装药爆速亏损的理论计算。设圆弧装药爆速为 D^* ,在 \widehat{AC} 间的传播时间为:

收稿日期:2008-08-26;修回日期:2008-12-03

作者简介:李晓刚(1979-),男,博士生,主要从事新起爆技术的研究。

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

$$t = \frac{\widehat{AC}}{D^*} = \frac{R\varphi}{D^*} \quad (1)$$

将 \widehat{AC} 分为 N 份, 则 $\varphi = N\alpha_N$, 每份弧长用弦长取代, 每段弦线对应的圆心角为 α_N , 则爆轰波沿弦传播时间为:

$$t' = \frac{NR\sin\alpha_N}{D} + N(\delta t)_N = \frac{\varphi R\sin\alpha_N}{D\alpha_N} + \frac{\varphi}{\alpha_N}(\delta t)_N \quad (2)$$

其中, D 为直线爆速, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; $(\delta t)_N$ 为拐角延迟时间, 其理论表达式为^[10]:

$$(\delta t)_N = \frac{\Delta}{D_j} \left(\frac{\Delta}{d}\right)^m \cdot \frac{b\alpha_N}{(\alpha_c - \alpha_N)^n} = \frac{k_0}{d^m} \cdot \frac{\alpha_N}{(\alpha_c - \alpha_N)^n} \quad (3)$$

式中, Δ 为反应区特征厚度, mm ; D_j 为 C-J 爆速, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; α_N 为拐角角度; α_c 为临界拐角角度; b 、 m 、 n 为待定系数; d 为装药尺寸, mm ; $k_0 = \frac{\Delta^{m+1}b}{D_j}$ 为与装药尺寸及炸药性质有关的参数。

当 $N \rightarrow \infty$ 时, $\alpha_N \rightarrow 0$, $t' = t$ 。将式(3)代入式(2), 分别对式(1)和式(2)右侧求极限, 并建立等式, 得:

$$\frac{D}{D^*} = 1 + \frac{k_0 D}{R d^m \alpha_c^n} \quad (4)$$

若用 ΔD 表示相同装药尺寸下直线爆速与弯曲装药爆速之差, 则 $D^* = D - \Delta D$ 为该装药尺寸下弯曲装药的平均爆速, 经泰勒展开并剔除高阶项, 得:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{k_0 D}{R d^m \alpha_c^n} = \frac{b}{\alpha_c^n} \frac{D}{D_j} \frac{\Delta}{R} \left(\frac{\Delta}{d}\right)^m \quad (5)$$

令 $\bar{D} = \frac{\Delta D}{D}$ 为爆速亏损, 上式即为爆速亏损的数学表达式, 该式表明爆速亏损 \bar{D} 与 $\frac{D}{D_j} \frac{\Delta}{R} \left(\frac{\Delta}{d}\right)^m$ 成比例, 其中 $\frac{\Delta}{d}$ 是爆轰反应区尺度与沟槽尺度之比, $\frac{\Delta}{R}$ 是爆轰反应区尺度与圆弧曲率半径之比, $\frac{D}{D_j}$ 是尺度 d 直线沟槽装药的爆速与 C-J 爆速之比。上式可进一步简化为:

$$\bar{D} = \frac{D}{D_j} \frac{k}{R d^m} \quad (6)$$

根据拐角延迟时间的研究结果^[10], 式(6)中 $m = 0.6$ 。比例系数为 $k = \frac{b}{\alpha_c^n} \Delta^{m+1}$, 该系数可通过测定不同曲率条件下的爆速, 并对测试结果进行线性回归而得到。该式的物理意义为: \bar{D} 与 R 成反比; 当 $R \rightarrow \infty$ 时, $\bar{D} = 0$, 即 $D^* = D$ ($\because \bar{D} = \frac{D - D^*}{D}$), 为直线爆轰; 当 $R \rightarrow 0$ 时, $\bar{D} \rightarrow \infty$, $D^* \rightarrow 0$, 理论上不能传爆。

3 小尺寸弯曲装药爆速亏损试验研究

3.1 测试件的设计与装药

理论研究表明, 炸药性质不同、约束材料及约束条件不同, 爆轰延迟时间不同, 其爆速亏损也应不同, 因此研究中选定 HMX 含量为 96.00% ~ 96.50% 的超细化钝感 HMX 为沟槽装药, HMX 的平均粒径为 587.3 nm。采用精密压装法^[11], 设计平均装药密度为 $1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 基板材料选定为 LZ12。为了分析所研究的传爆药在小尺寸条件下的爆速亏损现象及其变化规律, 研究中分别设计加工了沟槽尺寸为 $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 、 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$, 弯曲曲率半径分别为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm 的试验基板, 基板平均装药密度为 $1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 基板装药效果图如图 2 所示。

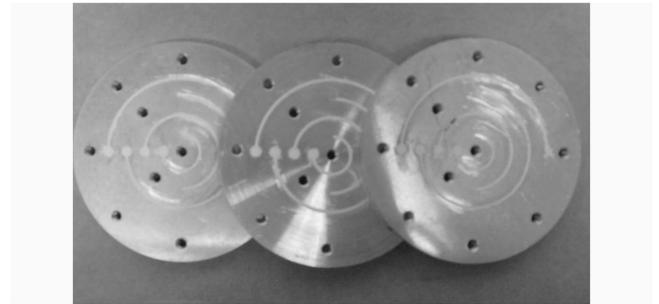


图 2 弯曲装药基板压装效果图

Fig. 2 Photograph of base plate charged in curve channel

3.2 弯曲装药爆速亏损的测试原理

弯曲装药爆轰延迟时间测试原理与直线装药爆速测试原理相同^[10,12], 采用薄膜探针法测量。在小尺寸装药条件下, 由于爆轰波阵面不是平面, 而是弯曲的曲面, 如图 3 所示。图中 d 是装药尺寸, r 是爆轰波阵面的曲率半径, α 为距轴线 x 处的夹角, D 为轴线爆速, D_x 为距轴线 x 处的爆速。从图 3 可以看出, 装药尺寸越小, 爆轰波阵面的曲率半径将越小, 距离轴线 x 处爆速 D_x 与轴线上的爆速 D 偏差也将越大。

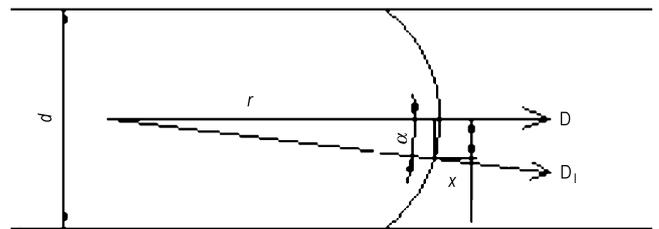


图 3 小尺寸装药弯曲波阵面示意图

Fig. 3 Sketch map of wavefront in limited channel

按爆轰稳定传播的条件,由几何关系可得出:

$$D_x = D \cos \alpha = D \left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right)^{1/2} \quad (7)$$

由(7)式可知,在进行小尺寸装药爆速测定时,传感器的安装将对测试精度产生影响,应将薄膜探针安装在沟槽的中心位置。在每个测试件的沟槽中安装两个薄膜电极传感器,每个传感器包含两对电极,图4中1、2、3、4分别表示四对电极的切口,同一传感器上两组对电极切口中心的直线距离为3 mm,根据爆轰波通过该对传感器间的时间及两传感器间的弧线距离 l 可计算爆速,传感器安装后的测试件如图4所示。

3.3 弯曲装药爆速亏损的测试结果与分析

测定某曲率半径下弯曲装药的爆速时,用电雷管在相应的输入点起爆网络装药,通过 VXI 测控系统记录薄膜电极各采样点导通的时间,并对测试结果进行计算,所得弯曲装药爆速见表1。

表1中 D_1 为测试点1、2间爆轰波沿弧线传播的平均速度; D_2 为测试点3、4间爆轰波沿弧线传播的平均速度; D^* 为同一装药尺寸同一曲率下多组测试件所得 D_1 与 D_2 的均值,视为该装药条件下弯曲装药

的平均爆速。由文献[13]中公式(9)计算得沟槽尺寸为 $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 时,该装药密度下直线装药的爆速为 $D = 7.49 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$,在装药尺寸为 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 时直线装药爆速为 $D = 8.31 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。从表1可以看出,各种条件下所测爆速均小于同一装药尺寸下的直线装药爆速,说明弯曲装药确实存在爆速亏损现象。且装药尺寸越小,曲率半径越小,爆速亏损越大。根据爆速亏损的定义,对表1中的数据进行处理,分别得到不同装药尺寸下不同装药曲率半径所对应的爆速亏损 \bar{D} (见表2)。

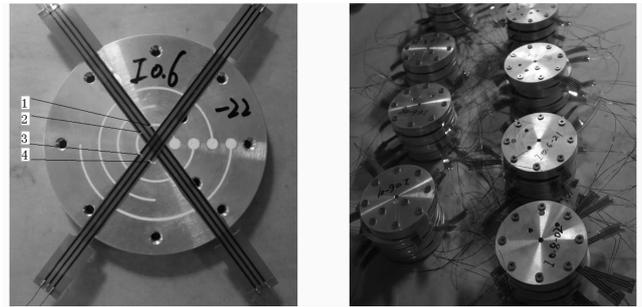


图4 弯曲装药爆速亏损测试件

Fig.4 Testing devices of detonation velocity deficits in curve charged

表1 设计平均装药密度为 $1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时弯曲装药爆速计算结果

Table 1 Results of detonation velocity deficits in curve charged under density of $1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

$d/\text{mm} \times \text{mm}$	R/mm	No.	$\Delta t_{12}/\mu\text{s}$	$\Delta t_{34}/\mu\text{s}$	l/mm	$D_1/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$D_2/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$D^*/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$
0.6 × 0.6	5	1	0.514	0.472	3.047	5.925	6.451	6.146
		3	0.481	0.501	3.047	6.339	6.081	
		4	0.490	0.520	3.047	6.218	5.862	
	10	5	0.471	0.419	3.011	6.396	7.182	6.772
		6	0.442	0.449	3.011	6.809	6.700	
		7	0.455	0.435	3.011	6.624	6.918	
	15	8	0.431	0.417	3.005	6.967	7.201	6.912
		11	0.423	0.434	3.005	7.105	6.919	
		12	0.444	0.462	3.005	6.770	6.509	
	20	14	0.404	0.397	3.003	7.433	7.564	7.440
		15	0.410	0.403	3.003	7.324	7.452	
		16	0.407	0.401	3.003	7.378	7.489	
0.8 × 0.8	5	17	0.478	0.465	3.047	6.374	6.553	7.138
		18	0.385	0.390	3.047	7.914	7.812	
		20	0.445	0.416	3.047	6.847	7.325	
	10	21	0.410	0.407	3.011	7.344	7.398	7.384
		23	0.436	0.386	3.011	6.906	7.801	
		26	0.413	0.398	3.011	7.291	7.565	
	15	27	0.400	0.387	3.005	7.513	7.765	7.775
		28	0.376	0.386	3.005	7.992	7.785	
		29	0.392	0.379	3.005	7.666	7.929	
	20	31	0.399	0.387	3.003	7.526	7.760	7.831
		32	0.371	0.377	3.003	8.094	7.966	
		33	0.385	0.383	3.003	7.800	7.841	

表 2 不同装药尺寸不同曲率半径下的爆速亏损

Table 2 Detonation velocity deficits under different channel sizes and corner radius

$d/\text{mm} \times \text{mm}$	R/mm	$D^*/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$D/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	\bar{D}
0.6 × 0.6	5	6.146		0.226
	10	6.772		0.112
	15	6.912	7.49	0.090
	20	7.440		0.012
	∞	7.532		0
0.8 × 0.8	5	7.138		0.126
	10	7.384		0.088
	15	7.775	8.31	0.034
	20	7.831		0.026
	∞	8.037		0

将表 2 的数据结合式(6)进行最小二乘法运算, 可以分别求出在装药尺寸为 0.6 mm × 0.6 mm、0.8 mm × 0.8 mm 时, 待定系数分别为 $k = 0.753$ 、 $k' = 0.734$, 由此可以得到在两种装药尺寸条件下的弯曲装药爆速亏损半经验关系式。

在装药尺寸为 0.6 mm × 0.6 mm 时的半经验关系式为:

$$\bar{D}|_{d=0.6} = \frac{D|_{d=0.6}}{D_j} \cdot \frac{0.753}{Rd^{0.6}} \quad (8)$$

在装药尺寸为 0.8 mm × 0.8 mm 时的半经验关系式为:

$$\bar{D}|_{d=0.8} = \frac{D|_{d=0.8}}{D_j} \cdot \frac{0.734}{Rd^{0.6}} \quad (9)$$

同时利用表 2 中爆速亏损与曲率半径之间关系, 经回归分析, 还可得到爆速亏损与装药曲率半径之间关系的经验表达式。

在装药尺寸为 0.6 mm × 0.6 mm 时的经验关系式为:

$$\bar{D} = 0.944 \frac{1}{R} - 0.007 \quad (\text{相关系数为 } 0.922) \quad (10)$$

在装药尺寸为 0.8 mm × 0.8 mm 时的经验关系式为:

$$\bar{D} = 0.685 \frac{1}{R} - 0.017 \quad (\text{相关系数为 } 0.899) \quad (11)$$

分别将爆速亏损与曲率半径之间关系的测试数据与由半经验关系式得到的计算数据作图, 就可以得到装药曲率半径的倒数与爆速亏损之间的关系图, 如图 5、图 6 所示。

对比图 5 和图 6 中的测试和计算结果曲线可以看出, 二者均为线性关系, 且变化趋势基本相同。因此, 本研究中提出的爆速亏损与装药曲率半径之间的理论关系是合理的。

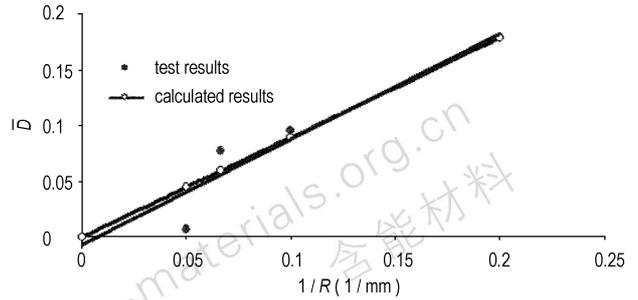


图 5 装药尺寸为 0.6 mm × 0.6 mm 时爆速亏损与装药曲率半径之间的关系

Fig. 5 Relationship between detonation velocity deficits and corner radius under the channel size of 0.6 mm × 0.6 mm

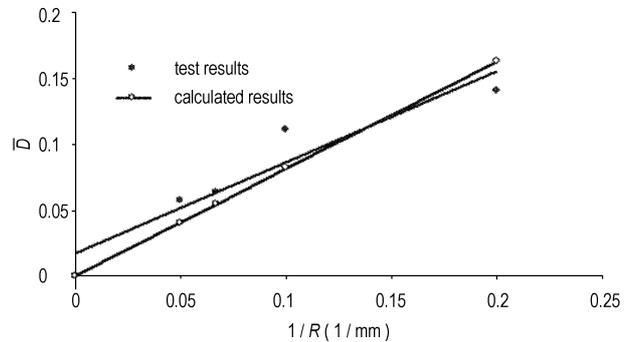


图 6 装药尺寸为 0.8 mm × 0.8 mm 时爆速亏损与装药曲率半径之间的关系

Fig. 6 Relationship between detonation velocity deficits and corner radius under the channel size of 0.8 mm × 0.8 mm

4 结论

(1) 通过理论分析与实验研究, 分别给出了超细钝化 HMX 在装药尺寸为 0.6 mm × 0.6 mm、0.8 mm × 0.8 mm 时, 平均装药密度为 $\rho = 1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的弯曲装药爆速亏损与曲率半径间的经验及半经验表达式。

(2) 对比两种沟槽尺寸下爆速亏损的研究结果可以看出, 随着装药曲率半径和装药尺寸增大, 爆速亏损减小, 爆速亏损和装药曲率的倒数成线性关系。

(3) 所给出的小尺寸弯曲装药爆速亏损半经验表达式有明确的物理意义, 当装药曲率半径增大到一定值时, 爆速亏损可以忽略不计, 近似为直线装药; 在装药曲率半径小于某一值时, 将会出现熄爆现象, 满足小尺寸弯曲装药爆速亏损现象的边界条件。

参考文献:

[1] Jones E, Mitchell D. Spread of detonation in high explosive [J]. *Nature*, 1948, 161: 98.
 [2] Herzberg G, Walker G R. Initiation of high explosive [J]. *Nature*, 1948, 161: 647.
 [3] Cox M, Campell A W. Corner-turning in TATB [C] // 7th Symp. on

- Detonation, Annapolis, USA, 1981(6): 624 – 633.
- [4] Bonthux F. Diverging detonation in RDX and PENT base-cured PBX [C]//7th Symp. on Detonation, Annapolis, USA, 1981(6): 408 – 415.
- [5] Held M. Corner-turning distance and rotation radius [J]. *Prop Exp Pyro*, 1989, 14: 153 – 162.
- [6] Camperl A W. The M-3 corner-turning test [R]. LA-VR-88-457, 1988.
- [7] Mader C L. Numerical modeling of detonation [M]. Berlely: University of California Press, 1978.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 李晓刚. 多选任意输出爆炸逻辑网络技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学博士学位论文, 2009.
- LI Xiao-gang. Study on the technique of explosive logic circuit of optional output [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009.
- [11] 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.
- [12] 黄正平. 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.

Detonation Velocity Deficits of Superfine Desensitized HMX Charged in Curve Limited Channel

LI Xiao-gang¹, WEN Yu-quan¹, JIAO Qing-jie¹, JIA Ning-bo²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to study the detonation velocity deficits of superfine desensitized HMX in curve channel, the relation formula between detonation velocity deficits and corner radius were deduced. The detonation velocity deficits of the HMX charged in curve channel were measured when channel sizes were 0.6 mm × 0.6 mm and 0.8 mm × 0.8 mm, and the relation formula $\bar{D}|_{d=0.6} = \frac{D|_{d=0.6}}{D_j} \cdot \frac{0.753}{Rd^{0.6}}$ and $\bar{D}|_{d=0.8} = \frac{D|_{d=0.8}}{D_j} \cdot \frac{0.734}{Rd^{0.6}}$ were obtained by using the least squares technique. Results show that the empirical formulation is in a good agreement with the semi-empirical formulation.

Key words: explosion mechanics; curved charge in limited channel; detonation velocity deficit; superfine insensitive HMX



《含能材料》编辑部开通远程稿件处理系统

本刊自 2009 年 1 月起正式开通远程稿件处理系统, 欢迎大家登陆本刊网站 (www.energetic-materials.org.cn) 进行在线投稿, 今后本刊将不再接受纸版打印稿和 E-mail 电子版投稿。对于 2008 年尚未发表的稿件本刊将继续采用电子邮件的方式与作者联系。

目前, 系统还处于试运行阶段, 如在投稿或审稿过程中遇到任何问题请及时与编辑部联系 (E-mail: hnc101@caep.ac.cn; Tel: 0816-2485362), 以便系统更好地为您提供服务。本刊同时欢迎广大作者、读者注册后通过系统的互动管理或电子邮件、电话对本系统提出意见与建议。