

文章编号: 1006-9941(2008)04-0428-04

超细钝感 HMX 小尺寸沟槽装药爆轰波传播临界特性研究

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: 选用粒径为 587.3 nm 的 HMX, 以 LZ12 为基板材料设计不同沟槽尺寸, 采用精密压装法装药, 对超细化钝感 HMX 在小尺寸沟槽装药条件下的爆轰波传播临界特性进行了研究。结果表明, 在设计装药密度为 $1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 超细化钝感 HMX 沟槽装药直线传播的临界尺寸约为 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$, 极限尺寸为 $1.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$, 拐直角传播的临界尺寸为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。

关键词: 爆炸力学; 爆炸逻辑网络; 小尺寸装药; 临界尺寸; 超细钝感 HMX

中图分类号: TJ55; TJ410.6; O389

文献标识码: A

1 引言

爆炸逻辑网络要求在小尺寸条件下, 装药有良好的工艺特性, 既要保证爆轰波能稳定传播, 又要保证适度威力, 同时具备传爆药的安全性能。已有大量的研究证实^[1], 超细火工药剂与普通颗粒的火工药剂相比, 输出能量更高、机械感度降低、爆轰波传播更快更稳定、爆轰临界直径大幅度降低、装药强度提高。因此, 超细的火工药剂在爆炸逻辑网络、推进剂、激光起爆等诸多领域中都有重要的应用。张景林等人^[2-3]对细化炸药的感度特性进行了研究, 发现了亚微米炸药具有感度选择性, 在一般的摩擦、撞击条件下安全、钝感, 在特定激励作用下敏感的特点。樊武龙^[4]对细化 HMX 沟槽装药临界尺寸进行了试验研究, 在设计装药密度为 $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 给出了 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时该炸药的爆轰波侧向三通传播的临界尺寸。对于采用压装法装药的沟槽式爆炸逻辑网络而言, 该密度的沟槽装药结构强度低, 在爆轰传递过程中产生的应力波或冲击波有可能破坏邻近沟槽装药, 影响爆炸逻辑网络的作用可靠性。提高沟槽装药密度不但可以提高沟槽装药的结构强度, 而且还可以进一步减小沟槽的临界尺寸, 推进爆炸逻辑网络的小型化设计。

本工作在前人研究成果的基础上, 以 LZ12 为试验基板, 在设计装药密度为 $1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 对超细化 HMX 的爆轰波传播特性进行了系统研究。

2 装药工艺的选择与网络用药剂的确定

根据所使用炸药的不同, 沟槽式爆炸网络的装药方

法有多种, 如挤抹法、填充药条法、浇注法、丝网漏印法、精密压装法、真空镀膜法等^[5-7]。在以上几种方法中, 精密压装法使用造型粉装药, 能通过调节装药压力提高装药密度, 且装药均匀性好^[6], 因此本研究采用精密压装法装药。小尺寸沟槽装药爆轰波传播的临界尺寸与炸药的性质、约束材料的性质等有关, 为减小沟槽尺寸、提高沟槽装药爆轰波传播的可靠性, 本研究选用了超细化 HMX 作为主体炸药, 其平均粒径为 587.3 nm, 属于亚微米级炸药。先采用水悬浮法制备造型粉, 得到 HMX 含量为 96.00% ~ 96.50% 的超细化钝感 HMX, 作为本研究的网络装药, 对其爆轰波传播特性进行研究。

3 小尺寸沟槽装药爆轰波传播临界尺寸研究

3.1 直线沟槽装药临界尺寸与极限尺寸试验

爆轰波在炸药中能稳定传播的原因在于化学反应能供给能量, 维持爆轰波毫无衰减地传播下去。如果这个能量受到损失, 爆轰波就会因缺乏能量而衰减。对于 $d_c < d < d_L$ 的有限尺寸装药, 爆炸化学反应及爆轰波阵面如图 1 所示^[8]。图 1 中, 对圆形沟槽, 则 d 为沟槽直径, 对正方形沟槽, 为 d 沟槽的边长。

假设爆轰波反应区内完成化学反应所需的时间为 t_1 , 膨胀波从装药侧面到达轴线的的时间为 t_2 , 如图 1 中 2 区的虚线所示, 此时 $t_1 > t_2$, 反应区化学反应还未完, 膨胀波已经到达轴线处, 结果使得反应区支持爆轰波的有效能量减少, 整个波阵面的爆速低于极限爆速。装药尺寸越小, 反应区受膨胀波影响区域就越大, 爆速就越低, 当装药尺寸小于 d_c 时, 爆轰将熄灭, 这种现象就称为小尺寸装药的直径效应, d_c 称为小尺寸装药的临界尺寸。同理, 当装药尺寸 $d \geq d_L$ 时, 爆轰波反应区内完成化学反应所需的时间 t_1 小于膨胀波从装药侧

收稿日期: 2007-10-23; 修回日期: 2008-01-30

作者简介: 李晓刚(1979-), 男, 在读博士生, 主要从事新起爆技术研究。
e-mail: lxgzhy@126.com

面到达轴线的时 t_2 ,此时爆轰波反应区内的化学反应能提供足够的能量支持爆轰波,使爆轰波以恒定的速度传播, d_L 就称为小尺寸装药的极限尺寸。

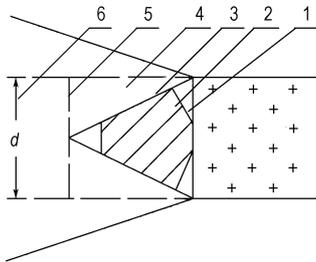


图 1 有限尺寸装药爆轰波阵面示意图

- 1—弯曲波阵面, 2—未受膨胀波影响的反应区,
- 3—径向稀疏波阵面, 4—受膨胀波影响的反应区,
- 5—CJ 面, 6—爆轰反应产物

Fig. 1 Sketch of detonation front of charge in limited size

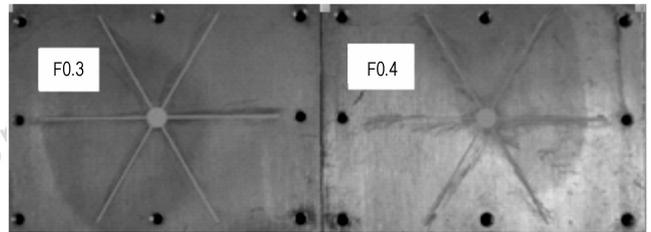
- 1—convex wavefront,
- 2—reaction district without impact of rarefaction wave,
- 3—radial rarefaction wavefront,
- 4—reaction district disturbed by rarefaction wave,
- 5—CJ interface, 6—products of detonation reaction

小尺寸装药的临界尺寸可通过测量爆轰波反应区厚度进行理论计算,也可以通过对小尺寸沟槽装药进行爆轰波传播试验得到。本试验采用了后一种方法,以 LZ12 为基板材料设计了沟槽尺寸分别为 0.6 mm × 0.6 mm、0.5 mm × 0.5 mm、0.4 mm × 0.4 mm、0.3 mm × 0.3 mm 的方形沟槽试验基板,对研究的炸药进行了直线装药的临界尺寸测试,其中沟槽装药的装药密度为 1.77 g · cm⁻³。试验基板的装药效果如图 2 所示。

将图 2 所示的试验基板按要求加盖板拧紧后在中心点用 LD-14B 雷管起爆,基板沟槽装药爆轰波传播效果图如图 3 所示。对试验结果进行统计分析就可以确定该炸药直线装药爆轰波传播的临界尺寸,数据统计结果见表 1。从表 1 可以看出,在保证装药密度稳定的前提下,沟槽尺寸大于 0.4 mm × 0.4 mm 时,均能实现爆轰波的稳定传播;而沟槽尺寸为 0.3 mm × 0.3 mm 时,爆轰波不能传播。由此可以得出,所研究的炸药爆轰波直线传播的临界尺寸为 $d_c \approx 0.4$ mm。

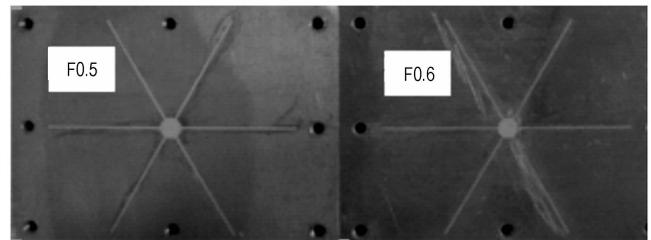
由极限尺寸的定义可知,保持沟槽装药爆速恒定不变的最小装药尺寸就是极限尺寸 d_L ,因此极限尺寸 d_L 一般是通过测定装药尺寸与装药爆速间的关系得到。为了确定所研究炸药在沟槽装药条件下的极限尺寸 d_L ,在前面研究结果的基础上设计加工了沟槽尺寸

分别为 0.8 mm × 0.8 mm、1.0 mm × 1.0 mm、1.2 mm × 1.2 mm、1.5 mm × 1.5 mm 的直线装药基板,设计平均装药密度为 $\rho = 1.77$ g · cm⁻³,采用薄膜探针法对其爆速进行了测量,结果见表 2。



a. 0.3 mm × 0.3 mm

b. 0.4 mm × 0.4 mm

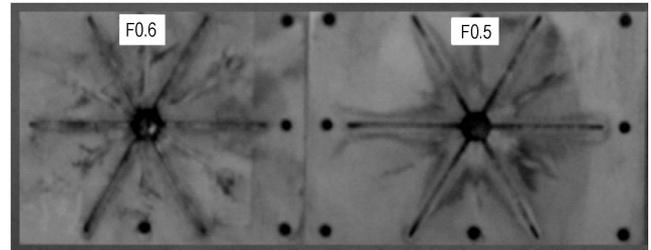


c. 0.5 mm × 0.5 mm

d. 0.6 mm × 0.6 mm

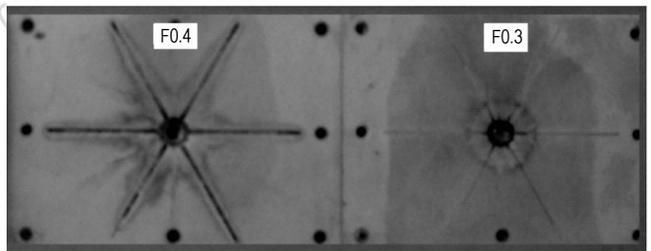
图 2 直线临界尺寸测试基板装药效果图

Fig. 2 Charge for testing linear critical size



a. 0.6 mm

b. 0.5 mm



c. 0.4 mm

d. 0.3 mm

图 3 直线临界尺寸测试基板爆轰试验效果图

Fig. 3 Effect chart of testing linear critical size

表 1 直线临界尺寸测试结果

Table 1 The testing results of linear critical size

constraint condition	size of charge /mm × mm	number of experiments	number of success	rate of success/%
LZ12	0.3 × 0.3	30	0	0
	0.4 × 0.4	30	30	100
	0.5 × 0.5	30	30	100
	0.6 × 0.6	30	30	100

表2 小尺寸直线装药爆速测试结果
Table 2 Testing results of detonation velocity
of linear limited charge

size of charge/mm × mm	number of experiments	$\bar{D}/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$
0.8 × 0.8	6	8.037
1.0 × 1.0	6	8.475
1.2 × 1.2	6	8.558
1.5 × 1.5	6	8.548

Note: \bar{D} , average value of detonation velocity.

从表2可以看出,随着沟槽尺寸增大,爆速增大,当沟槽尺寸大于1.2 mm × 1.2 mm时,爆速保持稳定不再增大,由此可以确定所研究炸药的沟槽装药极限尺寸为 $d_L = 1.2$ mm。

综合直线装药临界尺寸与极限尺寸的研究结果可以得出,对于所研究的超细 HMX 炸药,其小尺寸装药尺寸范围为 $0.4 \text{ mm} \leq d \leq 1.2 \text{ mm}$,在此装药范围内,装药爆速随着装药尺寸的增大而增大。

3.2 拐角装药爆轰波传播临界尺寸试验

当爆轰波从小尺寸装药向大尺寸装药传播时,由于离散而使爆轰波在部分区域内产生偏离正常爆轰的状态,在拐角处发生绕射,产生一个不稳定的爆轰区,这一区域内有不爆区和弱爆区,称拐角效应^[9]。参考直线装药临界尺寸与极限尺寸的研究结果,分别设计加工了沟槽尺寸为0.7 mm × 0.7 mm、0.6 mm × 0.6 mm、0.5 mm × 0.5 mm、0.4 mm × 0.4 mm的试验基板,在设计装药密度为 $1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的条件下研究其拐角装药爆轰波传播的临界尺寸,典型测定装置如图4所示。其中,每一块基板中含有18个拐角,沟槽间距最小为5 mm,最大为15 mm,最短直线沟槽长度为15 mm。

按所设计的约束条件及试验环境温度,分别用LD-14B雷管从输入端起爆测定装置,观察爆轰波在沟槽中的传播情况,试验装置爆炸效果图如图5、图6所示,试验结果见表3。

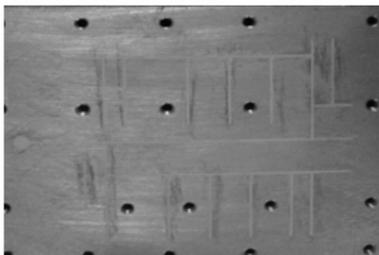


图4 小尺寸装药爆轰波拐角传播临界尺寸测定装置
Fig. 4 Testing device of critical size of convex charge

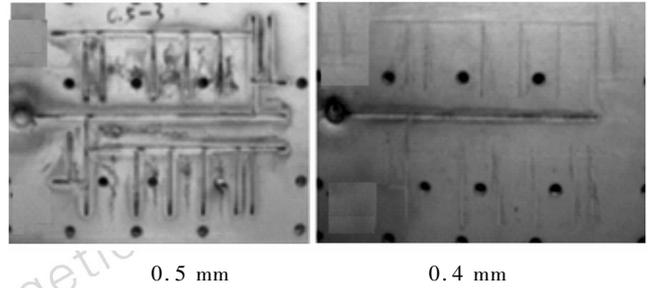


图5 全约束条件下试验基板爆炸效果图

Fig. 5 Experimental effect chart with complete constrain

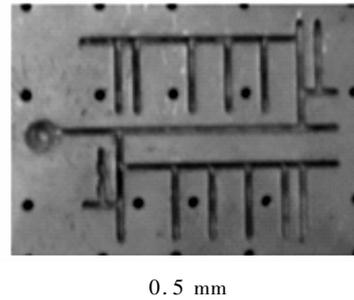


图6 无盖板约束试验基板爆炸效果图

Fig. 6 Experimental effect chart of non-constrain of cover

表3 爆炸逻辑网络沟槽拐角装药临界尺寸爆轰试验结果
Table 3 Testing results of critical size of convex charge

constrains condition	temperature /K	size of charge /mm × mm	number of right angle	number of success	rate of success/%
complete constrain	298	0.4 × 0.4	180	0	0
		0.5 × 0.5	180	180	100
		0.6 × 0.6	180	180	100
	218	0.7 × 0.7	180	180	100
		0.5 × 0.5	90	90	100
		0.6 × 0.6	90	90	100
non-constrain of cover	218	0.7 × 0.7	90	90	100
		0.5 × 0.5	90	90	100
		0.6 × 0.6	90	90	100

由表3可以得出,在装药密度为 $1.77 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,炸药在小尺寸沟槽装药条件下拐角传播的临界尺寸约为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。对比文献[4]的研究结果可以看出,对于超细化 HMX,装药密度对小尺寸装药爆轰波拐角传播的临界尺寸影响较大,提高装药密度,爆轰波传播的临界尺寸明显减小。从表3还可以看出,在常温无盖板约束条件下能够可靠传爆的沟槽装药,在低温无盖板约束条件下也能可靠传爆,说明环境温度、盖板约束条件对临界尺寸无显著影响,也表明超细化的药剂确实有助于改善小尺寸沟槽装药爆轰波传播特

性。因此,综合分析表3可以得出,在全约束条件下所研究的沟槽装药拐直角传播的临界尺寸不会大于 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,将该尺寸作为拐直角装药爆轰波传播的临界尺寸是合理的,可以以此沟槽尺寸为依据,采取裕度设计的方法设计爆炸逻辑网络。同时,也可以参考该研究结果,设计用于冲击波点火系统的无盖板约束同步起爆网络。

4 结 论

以 LZ12 为试验基板,对超细钝化 HMX 的爆轰波传播临界特性进行了系统的研究,得出了在设计装药密度为 $1.77\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,直线装药爆轰波传播的临界尺寸 d_c 约为 $0.4\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$,极限尺寸 d_L 为 $1.2\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$;拐直角装药爆轰波传播的临界尺寸为 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$;环境温度及盖板约束条件对所研究炸药的临界尺寸无显著影响,在沟槽尺寸 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 以上时,低温下无盖板约束时爆轰波也能稳定传播。可以利用以上研究结果,采取裕度设计的方法设计爆炸逻辑网络,在设计装药密度保持不变的条件下,沟槽尺寸为 $0.6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ 时就能满足要求,为爆炸逻辑网络的小型化设计,提高网络的作用可靠性提供了试验依据。其它微火工领域的爆炸序列设计、微型雷管设计等也可参考本研究结果进行设计。

参考文献:

- [1] 徐厚宝,盛涤伦. 火工药剂细化技术评价与展望[J]. 火工品, 2000(2): 39-43.
XU Hou-bao, SHENG Di-lun. Evaluation and prospect of the fining technology of loading materials for initiating explosive device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2000(2): 39-43.
- [2] 张景林,吕春玲,王晶禹,等. 亚微米炸药的感受度选择性[J]. 爆炸与冲击, 2004(1): 59-62.
ZHANG Jing-lin, Lü Chun-ling, WANG Jing-yu, et al. Selectivity of the sensitivity of the sub-micron explosive[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004(1): 59-62.
- [3] 吕春玲,张景林,王晶禹,等. 亚微米炸药的冲击起爆研究[J]. 含能材料, 2005, 13(5): 319-321.
Lü Chun-ling, ZHANG Jing-lin, WANG Jing-yu, et al. Selectivity of sub-micron explosive sensitivity to shock wave[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(5): 319-321.
- [4] 樊武龙,焦清介,温玉全. 低温下 HMX 混合炸药小尺寸传爆的可靠设计[J]. 火工品, 2004(4): 15-18.
FAN Wu-long, JIAO Qing-jie, WEN Yu-quan. Study on the characteristic of the detonation wave propagation of superfine HMX in channel at low-temperature[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2004(4): 15-18.
- [5] 吉利国,冯长根,蔡瑞娇,等. 沟槽式爆炸逻辑网络炸药技术的发展[J]. 火工品, 1996(4): 29-33.
JI Li-guo, FENG Chang-gen, CAI Rui-jiao, et al. Development of explosive technique for explosive logic network[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1996(4): 29-33.
- [6] 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]. *Acta Armamentarii*, 2006(3): 410-413.
- [7] 王晓丽,焦清介. 微/纳米含能薄膜材料的制备与应用研究[J]. 含能材料, 2006, 14(2): 129-141.
WANG Xiao-li, JIAO Qing-jie. Preparation and application of micron/nanometer energetic film materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(2): 129-141.
- [8] 孟宪昌,张俊秀著. 爆轰理论基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1988; 216-218.
- [9] 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, 1991.

Critical Characteristic of Detonation Propagation of Superfine Desensitized HMX Charge in 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 HMX explosive with particle size of 587.3 nm and precision press loading technique were selected, different sizes of channel were designed with LZ12. The detonation propagation critical characteristic of superfine desensitized HMX in channel was studied. The results show that the critical size of linear charge is $0.4\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$, the limit size of linear charge is $1.2\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$, and critical size of convex charge is $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, when the charge density is $1.77\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Key words: mechanics of explosion; explosive logic circuit; charge in channel; critical size; superfine desensitized HMX