

文章编号: 1001-1455(2007)06-0562-05

# HMX 粒度与爆轰波传播性能的关系研究\*

刘玉存, 王建华, 陆春荣, 刘登程, 于雁武  
(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 采用楔形装药, 用临界截面厚度来表征爆轰波传播特性, 分别对两种密度条件下 HMX 粒度对其自身和以 HMX 为主体的混合炸药 HMX/F<sub>2641</sub> ( $\omega_{\text{HMX}}/\omega_{\text{F}_{2641}} = 95:5$ ) 爆轰波传播性能的影响作了实验研究。结果表明: HMX 粒度对爆轰波传播特性有显著的影响, 随着 HMX 粒度的减小, 临界截面厚度变小, 即爆轰波传播性能增强; 同一 HMX 粒度下, HMX/F<sub>2641</sub> 爆轰波传播性能优于 HMX; 装药密度的增加有利于爆轰波传递。

**关键词:** 爆炸力学; 临界厚度; 粒度; HMX; 爆轰波

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 130 · 3510

**文献标志码:** A

## 1 引言

20 世纪 90 年代初, 随着超细材料科学技术的迅速发展, 小颗粒材料的许多不同于大颗粒材料的优良性能逐渐被揭示和认识。在含能材料研究领域, 人们已经初步证明超细炸药具有爆速高、爆轰稳定、能量释放更加迅速、完全等优良性能<sup>[1]</sup>。为了解决小尺寸装药起爆和传爆的可靠性, 人们试图通过改变其装药的性能以提高起爆、传爆能力, 但这种性能改善的前提是不降低其安全性。目前一个有效的途径是通过改变炸药的粒度, 即采用超细化炸药作为小型化火工品的装药。与之相应的炸药粒度对起爆、传爆能力的影响研究就显得非常迫切。

炸药爆轰波传播能力的表征方法很多, 常见的圆杆形和锥形装药用临界直径来表征, 有关矩形截面装药的临界尺寸报道的不很多。其中影响炸药临界直径的因素是多方面的, 国外已报道的相关研究主要集中于炸药种类、密度、约束条件等对临界直径的影响, 而且主要侧重于不同炸药的临界直径的横向比较<sup>[2-5]</sup>。J. B. Bdzil 等<sup>[6]</sup>测量了 PBX-9502 四种不同直径的圆柱装药中爆轰波的波形, 进行直径效应的研究。O. E. Petel 等<sup>[7]</sup>通过对硝基甲烷等均质炸药和非均质炸药的临界直径和临界厚度的比率研究, 对比分析了均质炸药与非均质炸药爆轰传播失效机理。R. S. Terry 等<sup>[8]</sup>采用铅笔形装药, 即以大的直径端面后以一定的坡度成锥形装药, 来测试爆轰失败的边界角。杨斌林等<sup>[9]</sup>对 RDX 的粒度对爆轰传播性能进行了研究。本文中研究炸药粒度、密度、粘结剂对其临界截面的影响, 实验采用楔形的矩形截面装药, 用临界截面的厚度来表征爆轰波的传播特性。

## 2 实验部分

### 2.1 HMX 的粒度分级

HMX 粒度分级采用水筛法, 利用高压水流的冲击作用, 使炸药分别通过泰勒标准筛, 取相邻两筛的中间物及 500 目筛的筛下物, 得到如下五个粒度范围的样品: 88~150  $\mu\text{m}$ 、65~88  $\mu\text{m}$ 、40~65  $\mu\text{m}$ 、30~40  $\mu\text{m}$ 、<30  $\mu\text{m}$ 。为了验证粒度分级范围, 采用 OMEC 激光粒度仪分别对粒径进行验证测定, 图 1 是粒径为 30~40  $\mu\text{m}$  范围 HMX 的粒径分布图。

制备 1~2  $\mu\text{m}$  的样品采用重结晶喷射细化法, 即采取喷射分散混合的方法将炸药溶液与非炸药溶

\* 收稿日期: 2006-05-29; 修回日期: 2007-01-09

作者简介: 刘玉存(1961—), 男, 教授, 博士生导师。

液混合起来。具体作法是：采用喷射细化装置使炸药射流与非溶剂射流平行同轴射入一容器中，非溶剂射流在压力作用下与炸药接触时呈散射状且不产生层流。通过强烈搅拌两种射流，在溶液中即可形成球形细化颗粒。

2.2 HMX/F<sub>2641</sub> 制备

传爆药常采用塑性粘结炸药来提高炸药的装药性能和安全性能，HMX/F<sub>2641</sub> ( $w_{HMX}/w_{F_{2641}} = 95 : 5$ ) 是对进行粒度分级后的 HMX 采用水悬浮方法包覆氟橡胶添加剂制备而得。

2.3 爆轰性能测试

炸药的爆轰传播能力采用爆轰临界直径来表征，传统的测试方法有炸痕法和爆速测定法，装药方式主要采取圆柱形药柱和楔形药柱。考虑到 HMX 等炸药的临界直径非常小，超细处理的 HMX 甚至在 0.5mm 以下仍然能够稳定传播，因此要压制成圆柱形药柱就非常困难，在实际中是不可行的。为了解决此问题，先后设计了不同的试验装置，如阶梯式<sup>[10]</sup>、楔形等，最终经过对比，采取长通道楔形槽内直接压药的方式，如图 2 所示。装药宽度定为 3 mm，起爆端截面厚度为 5 mm 和 3 mm，长度 180 mm，同时采取分段装药以解决装药密度均匀性问题。从楔形槽内装药较厚的一端用雷管直接起爆，然后由炸痕判定爆轰熄灭的位置，计算出对应的药柱厚度，称为临界厚度，用于相对比较其爆轰传播能力的大小。

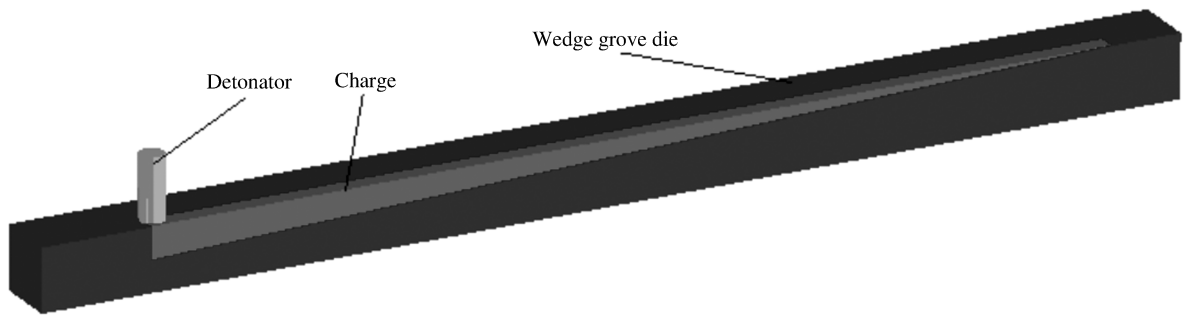


图 2 实验装置剖面示意图

Fig. 2 Section plan schematic of experimental facility

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

试验装药为 HMX，密度  $\rho = 1.000 \text{ g/cm}^3$ ，为 HMX 晶体理论密度的 52%。楔形装药引爆端最大截面厚度 5 mm，装药宽度 3 mm。试验结果如表 1 所示，图 3 是两种粒度下 HMX 爆轰对楔形槽的作用变化。图中所标注粒径为炸药粒径中值。

试验装药密度  $\rho = 1.719 \text{ g/cm}^3$  的 HMX 粒度对其临界截面的影响如表 1 所示，楔形装药引爆端最大截面厚度 3 mm，装药宽度 3 mm。

表 1 HMX 粒度对其临界厚度的影响

Table 1 Effect of HMX particle size on its critical thickness

$d_p/\mu\text{m}$	$h_{cr}/\text{mm}$	
	$\rho=1.000 \text{ g/cm}^3$	$\rho=1.719 \text{ g/cm}^3$
1~2	0.25	0.25
$\leq 30$	0.35	0.33
30~40		0.42
40~64	0.79	0.50
64~94	0.91	0.58
94~124		0.66

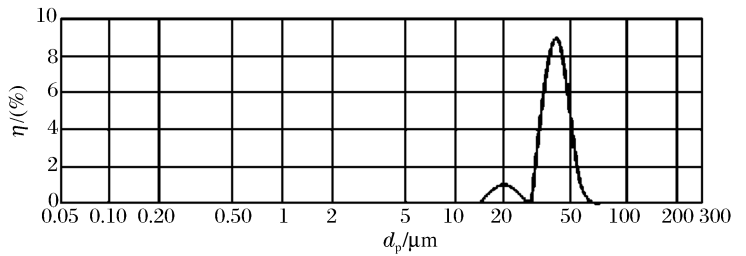


图 1 HMX 的粒径 (30~40  $\mu\text{m}$ ) 分布图

Fig. 1 The particle size distribution of HMX(30~40  $\mu\text{m}$ )

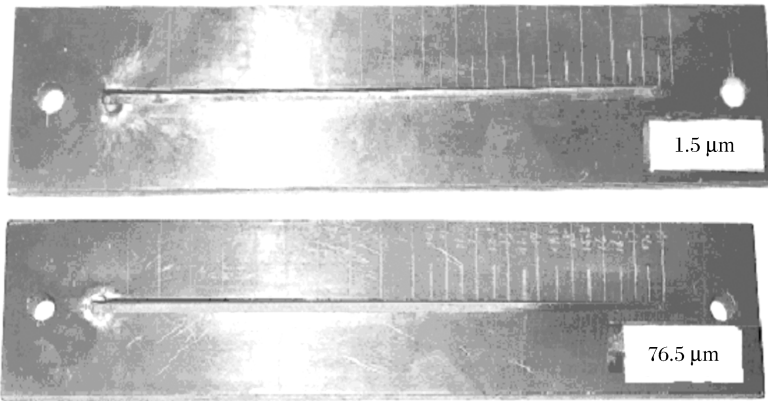


图 3 不同粒度下 HMX 爆轰传播实验结果( $\rho=1.000 \text{ g/cm}^3$ )

Fig. 3 The experimental result for critical thickness of different particle size of HMX

主体炸药 HMX 粒度对混合炸药 HMX/F<sub>2641</sub> 的临界截面厚度的影响结果如表 2 所示,装药密度  $\rho$  分别为  $1.762 \text{ g/cm}^3$  和  $1.706 \text{ g/cm}^3$ ,为试验装药理论密度的 93% 和 90%。楔形装药引爆截面的最大厚度为 3 mm,装药宽度 3 mm。图 4 是两种 HMX 粒度下 HMX/F<sub>2641</sub> 爆轰对楔形槽的作用变化。图中所标注的粒径为炸药粒径中值。

表 2 HMX 粒度对 HMX/F<sub>2641</sub> 临界厚度的影响

Table 2 Effect of HMX particle size on critical thickness of HMX/F<sub>2641</sub>

$d_p/\mu\text{m}$	$h_{cr}/\text{mm}$	
	$\rho=1.762 \text{ g/cm}^3$	$\rho=1.706 \text{ g/cm}^3$
1~2	0.11	
$\leq 30$	0.23	0.26
30~40		0.35
40~64	0.31	0.41
64~94	0.38	0.56
94~124		0.63

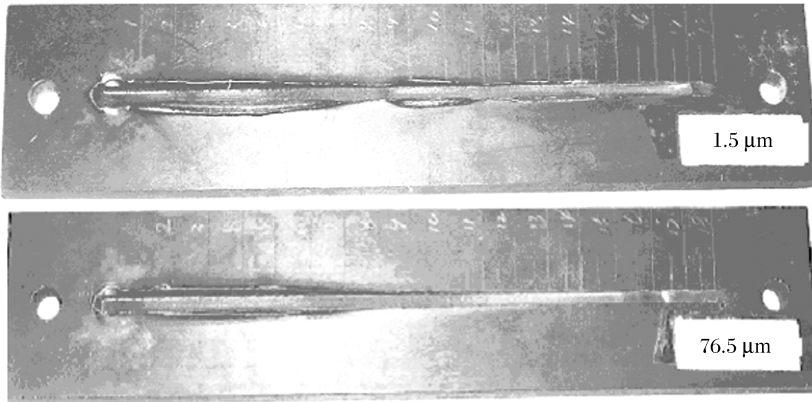


图 4 不同粒度 HMX 下 HMX/F<sub>2641</sub> 爆轰传播实验结果( $\rho=1.762 \text{ g/cm}^3$ )

Fig. 4 The experimental result for critical thickness of HMX/F<sub>2641</sub> at different particle size of HMX

### 3.2 实验结果分析

试验结果表明:不论 HMX 粒度对其自身还是对以 HMX 为主体的混合炸药 HMX/F<sub>2641</sub> 的临界厚度的影响,临界厚度随炸药粒度减小而减小,即爆轰传播能力随粒度减小而增强;炸药粒度对临界厚度的影响程度与装药密度有关,装药密度增大,炸药粒度对临界厚度的影响程度减小。主要因为实验用压装炸药为非均质炸药,爆轰时多是按表面反应机理进行的。当受到冲击压缩时,炸药颗粒之间的摩擦和变形,炸药中所含气泡的绝热压缩以及流向颗粒之间的的气态反应产物等都使颗粒以及气泡接触表面处炸药的局部温度升高。从而在炸药颗粒表面首先发生高速的化学反应,而后以一定的速度向颗粒内部扩展。因此可以按照层燃烧的规律来分析表面反应的过程,从而研究反应区的一些特性。

根据燃速与压力的关系有

$$u = kp$$

燃速与比表面积的关系有

$$\frac{dx}{d\tau} = \rho k S_p$$

式中:  $u$  为炸药颗粒燃烧的线速度;  $p$  为压力;  $dx/d\tau$  为炸药颗粒燃烧的质量速度;  $\rho$  为炸药颗粒的密度;  $S$  为炸药颗粒燃烧的表面积;  $k$  是常数。球形颗粒的比表面积与其直径的关系为

$$S_w = \frac{6}{2\rho r}$$

式中:  $S_w$  为质量比表面积;  $r$  为颗粒的半径;  $\rho$  为颗粒密度。从上式可以看出: 由于颗粒小的炸药的化学反应区的宽度也相应的减小, 爆轰区内完成化学反应所需的时间减少。而侧向膨胀波由装药侧面到达装药轴线的由炸药的装药直径决定。在一定的压药条件下, 炸药颗粒的比表面积与颗粒的直径成反比。因此在同样的装药密度下, 炸药的颗粒愈细, 其颗粒的比表面积愈大。根据燃速与比表面积之间的关系, 可知比表面积越大, 体积燃烧速率越快, 化学反应区变窄, 侧向能量损失减小, 爆轰波更容易传递, 爆速增大。可以看出: 炸药颗粒尺寸愈小, 临界直径愈小。因为颗粒愈小, 爆轰反应进行得愈快, 化学反应区内完成反应所经历的时间愈短, 反应区宽度变窄, 径向膨胀所引起的能量损失相对减小, 所以爆轰容易传播, 导致临界直径减小。

按爆轰理论认为, 粘结剂的加入会降低炸药的爆轰传播性能, 但本试验条件下, 粘结剂  $F_{2641}$  的加入并没有降低炸药的爆轰波的传播性能, 即 HMX/ $F_{2641}$  比纯的 HMX 的爆轰波传播能力强。分析其原因主要是因为  $F_{2641}$  是偏二氟乙烯与全氟丙烯共聚物, 这种含氟高分子高聚物粘结剂密度较高, 对 HMX 具有良好的润湿性、良好的包覆作用和粘结作用, 可以参加混合炸药的爆炸反应, 提高炸药的能量, 加快化学反应速度, 化学反应区变窄, 受空气稀疏波的影响较小, 爆轰容易传播, 所以比同一粒度下未包裹  $F_{2641}$  的装药的临界厚度小; 实验装药的冲击起爆属于热点起爆机理, 固体炸药中存在一定的气泡、杂质和间隙, 冲击加载往往在这些区域附近形成局部高温, 而高温的产生是由于冲击波多次反射与碰撞、空穴塌陷形成射流、马赫反射等。局部热点以高速燃烧的形式向外传播, 冲击波后紧跟一个有热点形成的燃烧波, 它不断地加强前导冲击波, 使其强度不断提高, 最后发展成爆轰波。HMX/ $F_{2641}$  是塑性粘结炸药, 炸药成型性较好, 炸药空穴较均匀, 而纯的 HMX 颗粒炸药流散性强、压药成型较差, 虽颗粒堆积形成热点的概率多, 但装药边界处的空穴多数与空气相连, 即热点形成绝热条件的概率小, 热点达不到足够高的温度引发化学反应。不利于爆轰的传播, 所以临界厚度较大。同时也说明了在高聚物粘结炸药的研制中, 使用性能优良的粘结剂对提高炸药的综合性能起着重要作用, 使炸药保持有较高的爆炸能量, 同时具有优良的安全性。

装药的临界厚度随装药的密度的增加而减少, 这是因为装药密度增加、反应区中压力与温度升高、化学速率加快的缘故。炸药装药密度对临界直径的影响主要取决于炸药爆轰化学反应机理, 纯的 HMX 爆轰反应机理与 HMX/ $F_{2641}$  混合炸药相比, 整体反应机理的主导地位较多, 需要的爆速较大, 因而临界厚度也大。

## 4 结 论

通过对 HMX 粒度对装药爆轰传播的实验研究可得到如下的结论:

- (1) HMX 的粒度对其临界厚度具有比较显著的影响。颗粒粒度大的 HMX 临界厚度比较大; 粒度小的 HMX 临界厚度小, 即爆轰传播能力随粒度减小而增强。
- (2) HMX 的临界厚度受装药的密度影响, 装药密度越大, 临界厚度越小; 同时炸药粒度对临界厚度的影响程度与装药密度有关, 装药密度增大, 炸药粒度对临界厚度的影响程度减小。
- (3) 粘结剂的加入并不能显著降低纯 HMX 的爆轰传播性能。

## 参考文献:

- [1] 陆春荣. 炸药粒度对传爆药爆轰波传播性能的影响研究[D]. 太原:中北大学, 2004.
- [2] Tarver C M, Hallquist J O. Modeling two-dimensional shock initiation and detonation wave phenomena in PBX9404 and LX-17[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Detonation. Annapolis, Maryland, 1981:488-497.
- [3] Gois J C, Campos J, Menddes R. Extinction and Initiation of Detonation of NM-PMMA-GMB Mixtures[C]//Shock Compression of Condensed Matter. 1996:370;827-830.
- [4] Khasainov B A, Ermolaev B S, Presles H N. Effect of Glass Microballoons on Shock Wave Sensitivity and Detonation Critical Diameter of Condensed Explosives[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Detonation. Boston, Massachusetts, 1993:749-757.
- [5] Kusakabe M, Fujiwara S. Effects of Liquid Diluents on Detonation Propagation in Nitromethane[C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Detonation. Coronado, California, 1976:133-143.
- [6] Bdzil J B, Davis W C. Detonation shock dynamics (DSD) calibration for PBX 9502[C]//Proceedings of 10th International Symposium on Detonation. Boston, Massachusetts, 1993:146-149.
- [7] Petel O E, David M. Comparison of the detonation Failure Mechanism in Homogeneous and Heterogeneous explosives[C]//Proceedings of the 13th International Symposium on Detonation. Virginia, Norfolk, 2006.
- [8] Terry R S, Larry G H. The dynamics of detonation failure in conical PBX9502 charges[C]//Proceedings of the 13th International Symposium on Detonation. Virginia, Norfolk, 2006.
- [9] 杨斌林, 陈荣义, 曹晓宏. RDX 炸药粒度对其爆轰性能的影响[J]. 火工品, 2004, (3):50-52;56.  
YANG Bin-lin, CHEN Rong-yi, CAO Xiao-hong. Influence of particle size of RDX on the detonation properties [J]. Initiator & Pyrotechnics, 2004, (3):50-52;56.
- [10] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1993:134-139.

## Influences of particle size of HMX on detonation waves propagation of HMX and HMX/F<sub>2641</sub>

LIU Yu-cun<sup>\*</sup>, WANG Jian-hua, LU Chun-rong, LIU Deng-cheng, YU Yan-wu  
(College of Chemical Engineering and Environment, North University of China,  
Taiyuan 030051, Shanxi, China)

**Abstract:** By adopting wedge-shaped charge and using critical thickness to characterize detonation waves propagation, a experimental study was carried out to explore influences of particle size of HMX on detonation waves propagation of HMX and HMX/F<sub>2641</sub> at the two different densities of HMX. Experimental results show as follows: (1) Decrease in size of HMX particle results in diminution of critical thickness, namely enhancement of detonation wave propagation capability; (2) HMX/F<sub>2641</sub> excels HMX in detonation wave propagation capability at the same size of HMX particle; (3) Increase of charge density is advantageous to detonation waves propagation.

**Key words:** mechanics of explosion; critical thickness; particle size; HMX; detonation wave

<sup>\*</sup> Corresponding author: LIU Yu-cun  
E-mail address: wjh522996@sohu.com  
Telephone: 86-351-3922141