

冲击波作用下HMX晶体的细观响应

花成¹, 傅华², 田勇¹, 黄明¹, 戴斌¹

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 用折光匹配显微技术(OMS)、表观密度浮沉法(SFM)、微聚焦CT扫描表征了HMX晶体内部缺陷尺寸、数量。结果表明,D-HMX较普通HMX含有较大尺寸内部缺陷的数量较少,普通HMX含有大量 10^{-5}mm^3 以上缺陷,普通HMX和D-HMX晶体均含有大量 10^{-6}mm^3 量级以下缺陷。利用基于细观结构的冲击波效应数值模拟方法,研究了晶体内部缺陷尺寸对其冲击波温升效应的影响。模拟结果表明,在低压条件下,等效半径为 $20\sim 40\mu\text{m}$ 的内部缺陷在冲击波加载下温升较高,等效半径为 $10\sim 15\mu\text{m}$ 的内部缺陷温升相对较低。当冲击波压力增高至 5.8GPa ,等效半径为 $10\mu\text{m}$ 内部孔洞在冲击波作用下温升可达到 850K 以上,两者的冲击波感度接近。

关键词: 爆炸力学; 钝化HMX; 晶体缺陷; 缺陷尺寸; 细观数值模拟; 冲击波效应

中图分类号: TJ55; TQ564

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2010)03-0005-04

Meso-scale Response of HMX Crystal under the Shock Wave Effect

HUA Cheng¹, FU Hua², TIAN Yong¹, HUANG Ming¹, DAI Bin¹

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China;

2. Institute of Liquid Physics, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: The interior defects size and quantity of HMX had been studied and characterized by optical microscopy with matching refractive (OMS), sink and float method (SFM), and mirco-CT. The results indicated that the D-HMX contains less larger size internal defects than ordinary HMX. General HMX contains amounts of defects large than 10^{-5}mm^3 , both general HMX and D-HMX crystals contain a large number of defects small than 10^{-6}mm^3 . Take advantage of the shock wave effect numerical simulation methods based on meso-structure, the response of temperature effect of shock waves crystal aroused by interior defects size was studied. The simulation results show that at low-pressure conditions, the temperature rise of the internal defects with a radius of $20\sim 40\mu\text{m}$ is higher than that of the internal defects with radius of $10\sim 15\mu\text{m}$ under the same shock loading. When the shock wave pressure increased to 5.8GPa , the holes with an equivalent radius of $10\mu\text{m}$ can reach more than 850K under the shock wave effect, their shock sensitivity is close.

Key words: explosion mechanics; reduced sensitivity HMX; crystal defects; defect size; Meso-scale simulation; shock wave effect

引言

炸药的冲击波感度是炸药设计、使用过程关注的一项重要性能,国外内研究者针对炸药晶体粒度、形状、密度对炸药冲击波感度的影响已进行了大量研究工作^[1-4]。近年来国内外在晶体缺陷对炸药的冲击波安全性能的影响方面也进行了许多研究,从宏

观角度研究了炸药晶体间孔隙率与内部孔隙率对冲击波感度的影响^[5-6]。

本实验采用折光匹配显微方法(OMS)、表观密度浮沉法(SFM)、微聚焦CT扫描测试等方法,研究了HMX晶体内部缺陷;采用基于细观结构的冲击波效应数值模拟和模型配方冲击波感度实验,探讨了炸药晶体内部缺陷尺寸、数量对冲击波感度的影响,以期对HMX结晶工艺与冲击波感度之间的关

收稿日期:2009-11-26; 修回日期:2010-04-14

基金项目:国家自然科学基金(10972205/A020601,10902100);中国工程物理研究院学科发展基金(2008B0302028)

作者简介:花成(1967-),男,硕士,副研究员,从事含能材料安全性能测试研究工作。

系进行进一步研究。

1 晶体制备与微观结构表征

1.1 试验样品的制备

使用粒度范围为 40~200 μm 、纯度大于 99% 的 HMX 为原料,通过调节溶剂体系、温度、添加剂等,制备出纯度大于 99%、具有较高结晶品质的 HMX 晶体。通过筛选,晶体粒度范围为 30~150 μm ,命名为 D-HMX-1,普通 HMX 样品命名为 HMX-1。

使用北京桂光厂 JXF-H200 型光学显微镜,采用折光匹配显微 OMS 方法、表观密度浮沉测试 SFM 法、微聚焦 CT 扫描测量方法,分析、表征了以上两种不同结晶品质 HMX 晶体内部的缺陷。

1.2 结果与分析

1.2.1 晶体微观结构折光匹配显微分析

不同结晶工艺条件得到的 HMX 晶体缺陷有较大差别,图 1 为 HMX-1 和 D-HMX-1 晶体折光匹配显微(OMS)图。

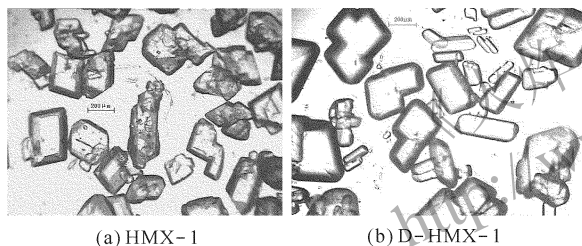


图 1 HMX-1 和 D-HMX-1 的折光匹配显微图

Fig. 1 The OMS figure of HMX-1 and D-HMX-1

从图 1 看出,与 HMX-1 晶体相比,D-HMX-1 采用优化的结晶工艺,晶体表面突出棱角减少,晶体含有较少的表面裂纹、空洞和溶剂等杂质。

1.2.2 晶体表观密度测试结果

选择质量浓度为 1.50~2.65 g/cm^3 的溴化锌水溶液,使用表观密度沉浮法测试试样的表观密度。表 1 为 HMX-1 和 D-HMX-1 的密度分布结果。结果表明,D-HMX-1 的平均表观密度为 1.9012 g/cm^3 ,内部孔隙率较 HMX-1 低。

表 1 由表观密度浮沉法得到的 HMX 晶体密度

Table 1 The consistency of HMX crystal by SFM

样品名称	$\rho_1/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\bar{\rho}_2/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho_3/\%$	$\epsilon/\%$
HMX-1	1.8969~1.8984	1.8979	99.62	0.38
D-HMX-1	1.9005~1.9017	1.9012	99.80	0.20

注: ρ_1 为表观密度; $\bar{\rho}_2$ 为平均表观密度; ρ_3 为相对密度; ϵ 为内部孔隙率。

1.2.3 晶体内部缺陷尺寸和数量

使用折光匹配显微方法定性地对晶体内部缺陷尺寸、数量进行分析、研究。作者曾利用 X 射线小角散射 SASX (Small Angle Scattering of Xray) 方法研究了几纳米至几百纳米尺度范围内 HMX-1 晶体、D-HMX-1 晶体内部的缺陷^[7]。为更加具体地了解晶体内部更大尺度缺陷的数量,利用微聚焦 CT 扫描方法测量微米以上尺度 HMX-1、D-HMX-1 晶体的内部缺陷。从 HMX-1 和 D-HMX-1 两种晶体中随机抽取相同体积的样品进行 CT 扫描测试研究,结果见图 2。

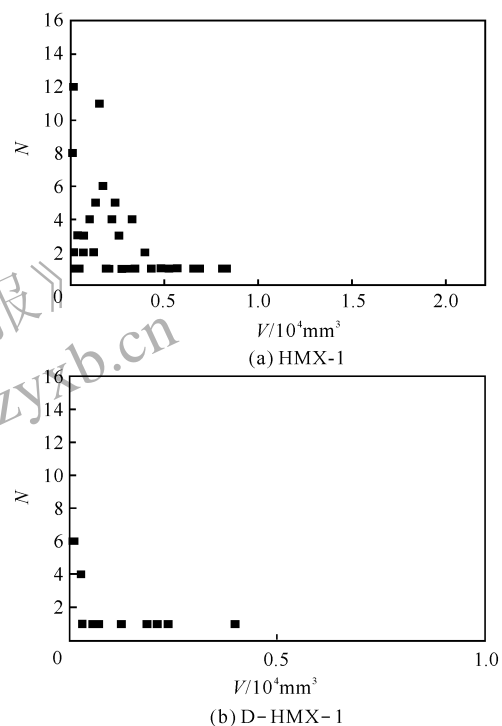


图 2 HMX-1 和 D-HMX-1 内部缺陷体积的数量

Fig. 2 Number of bulk defects in HMX-1 and D-HMX-1

微聚焦 CT 扫描测试结果表明,与 HMX-1 相比,D-HMX-1 晶体内部缺陷的尺寸及总体积相对较小,含有体积为 10^{-5}mm^3 及以上量级缺陷的数量较少;而 HMX-1 含有大量 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{mm}^3$ 量级缺陷。X 射线小角散射统计结果表明,将各缺陷体积按球形化计算得到的等效半径,HMX-1 晶体内部的等效半径为 30~40 μm 、即量级为 10^{-4}mm^3 的缺陷较多,D-HMX-1 晶体内部等效半径大于 20 μm 、即量级为 10^{-5}mm^3 的缺陷较少。与 HMX-1 相同,D-HMX-1 晶体内部也含有较多的等效半径约为 10 μm 的缺陷。因此得出,D-HMX-1 晶体内部缺陷的等效半径较 HMX-1 小,等效半径的分布较 HMX-1 向左偏移。

2 炸药晶体缺陷的冲击波响应

2.1 晶体缺陷冲击波响应的数值模拟

利用离散元法,研究了炸药晶体内部缺陷尺寸对冲击波效应的影响。计算模型将晶体内的孔洞简化为圆形,不考虑孔洞内气体的压缩加热与晶体熔化作用。受冲击作用的孔洞塌缩计算模型见图3, HMX晶体长 $100\mu\text{m}$,宽 $70\mu\text{m}$,半圆形孔洞半径为 R ,二维离散单元为圆盘形,总数目为12613个,圆半径 $0.4\mu\text{m}$ 。飞片以速度 v 冲击加载,材料为黄铜,厚度足以使孔洞受较长脉宽加载直至完全塌缩闭合,模型上下为滑移边界,其余为自由边界条件。

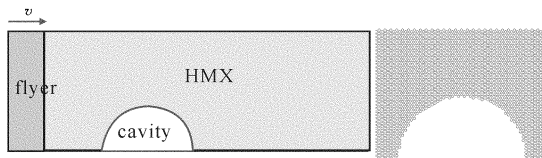
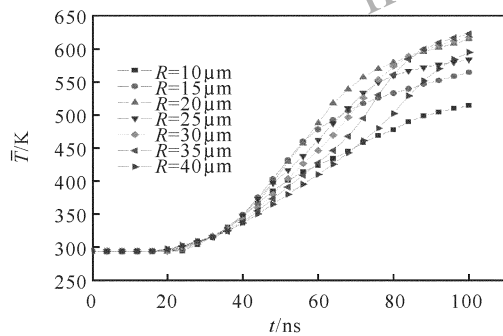


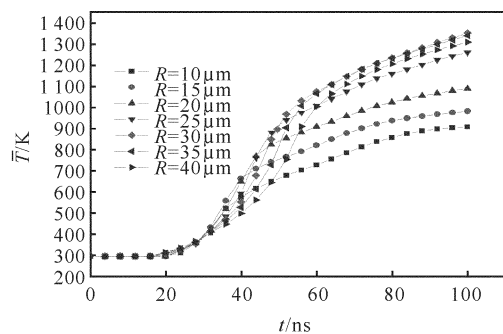
图3 计算模型以及孔洞周围区域离散单元

Fig. 3 Simulation model and discrete element around the cavity

模拟研究了等效半径 R 为 $10\sim 40\mu\text{m}$ 的HMX晶体内部缺陷在低压长脉冲条件下的温度时间历程,冲击波加载方式为飞片以 500m/s 的速度撞击试样、加载压力约为 2.9GPa 。图4(a)为HMX晶体内



(a) $v=500\text{m/s}$, $p_{\text{加载}}=2.9\text{GPa}$



(b) $v=800\text{m/s}$, $p_{\text{加载}}=5.8\text{GPa}$

图4 不同尺寸缺陷的冲击波温升曲线

Fig. 4 Temperature rise curve of different size defects

部缺陷在约 2.9GPa 冲击波作用下的温度时间历程数值模拟结果。模拟结果表明,在该条件下,等效半径 R 为 10 和 $15\mu\text{m}$ 的内部缺陷温升相对较低, 20 、 30 和 $40\mu\text{m}$ 的内部缺陷在冲击波加载下温升较高。为了研究冲击波加载压力升高后炸药晶体的冲击波响应,测试了冲击波加载压力约为 5.8GPa 条件下各尺寸晶体内部缺陷的冲击波温升效应。

图4(b)为HMX晶体在飞片以 800m/s 的速度撞击试样、加载压力约为 5.8GPa 的冲击波作用下的温度时间历程数值模拟计算结果。图4(b)表明,各尺寸缺陷温升效应均有所提高,半径为 10 和 $20\mu\text{m}$ 内部孔洞在冲击波作用下温升在 100ns 时达到 850K 以上。Borne L等的实验研究结果表明^[6],炸药晶体内部缺陷尺寸对炸药冲击波感度有较大影响,在低压条件下,含较大尺寸缺陷的炸药在冲击波加载下更易起爆、冲击波感度更高。

2.2 试验验证

分别用HMX-1、D-HMX-1制备PBX-1模型配方,并进行标准隔板试验,PBX-1试样尺寸为 $\Phi 20\text{mm}\times 20\text{mm}$ 、HMX质量分数 90% ,隔板材料为LY-12,主发药为 $\Phi 20\text{mm}\times 20\text{mm}$ JO-9159药柱,试验结果见表2;其中 L_{50} 表示炸药发生 50% 爆炸时的隔板厚度。

表2 HMX基PBX-1炸药的隔板试验结果

Table 2 The gap test results of PBX-1 used HMX-1 or D-HMX-1

主炸药	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_{\text{相对}}/\%$	L_{50}/mm
HMX-1	1.848	1.39	23.4
D-HMX-1	1.848	1.39	20.1

表2结果表明,D-HMX-1基PBX配方发生 50% 爆炸的隔板厚度 L_{50} 由 23.4mm 降为 20.1mm 。与HMX-1相比,D-HMX-1晶体内部缺陷尺寸总体相对较小、含有体积为 10^{-5}mm^3 及以上量级缺陷的数量也较少;而HMX-1含有大量 $10^{-5}\sim 10^{-4}\text{mm}^3$ 量级缺陷。X射线小角散射表明,HMX-1和D-HMX-1晶体均含有大量 10^{-7}mm^3 量级以下缺陷。孙锦山等学者曾使用ZDE程序研究了热点形成机理^[5],研究了冲击波与硝基甲烷中杂质、空穴的相互作用,结果表明,冲击波压力、杂质、空穴尺寸对热点形成过程有较大影响,杂质、空穴尺寸减小,热点温度与维持时间下降,在低压条件下,足够小的杂质对形成热点并无大的贡献。

对非均相炸药,冲击波对空穴弹塑性塌缩模型计算和晶体缺陷冲击波响应数值模拟结果表明,冲击波压力约为 $4\sim 6\text{GPa}$ 时,等效半径约为 $20\mu\text{m}$ 以上的缺陷易于形成高温“热点”群,炸药发生爆炸、爆轰的概率相对较高。在隔板试验等典型低压长脉冲条件下进

行 50% 爆炸概率临界隔板厚度检测时, D-HMX-1 基 PBX-1 炸药发生爆炸、爆轰的概率相对较低。

在低压冲击波作用下, 半径为 20~40 μm 缺陷的冲击波温升效应较强, 其冲击波感度较高。模拟结果还表明, 由于 HMX-1 和 D-HMX-1 晶体内部均含有数量较多的该尺寸缺陷, 均能产生大量温度较高的热点群, 导致爆轰时间接近, 缺陷数量、尺寸的影响降低, 这与缺陷表征以及隔板试验结果一致。

2.3 炸药晶体缺陷对温升效应的影响

模拟结果表明, 晶体内部等效半径 10、20 和 30 μm 的球形孔洞在冲击波作用下, 形成若干小的高温区域, 随着压力由 2.9 GPa 升高为 5.8 GPa, 温度均呈增高的趋势, 但各尺寸的冲击波温升效应有交错现象, 表明冲击波压力和缺陷尺寸共同影响孔洞的温升。当加载能量接近起爆阈值能量、热点温度和持续时间满足一定条件后, 炸药分解加速并引发爆炸或进一步成长为爆轰。

在冲击波作用下, 由于聚心作用, 孔洞型缺陷内流体的自由表面速度和温度进一步增加。直至空穴消失后, 有一个冲击波传到密实处, 同时传入较热流体中一个反射波, 产生更高的温度, 产生的热点大小接近原来空穴的尺寸。热点的形成与传播是决定炸药在冲击波作用下能否起爆的关键。晶体中缺陷的数量与尺寸对其在冲击波作用下产生热点的数量、热点的尺寸及热点能达到的最高温度有直接的影响。

3 结 论

(1) 与 HMX-1 相比, D-HMX-1 晶体内含有的尺寸较大缺陷的数量相对较少, 含有缺陷的尺度总体积相对也较小。

(2) 晶体内部缺陷冲击波效应的数值模拟表明, 晶体中缺陷的数量与尺寸对其在冲击波作用下产生热点的数量、尺寸及热点能达到的最高温度有直接影响。

(3) D-HMX-1 基 PBX 炸药比 HMX-1 基 PBX 炸药发生 50% 爆炸时的隔板厚度有所降低。

参考文献:

- [1] Conley P A. Microstructural effects in shock initiation [C] // Proceedings of the 11th Symposium (International) on Detonation [C]. Snowmass, CO, 1998: 768-780.
- [2] Vander S. Influence of RDX crystal shape on the sensitivity of PBXs [C] // Proc 9th International Detonation Symposium. Portland, Oregon, 1989: 83-88.
- [3] 章冠人. 凝聚炸药起爆动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [4] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [5] 孙锦山, 朱建士. 理论爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [6] Borne D. Influence of intrgranular cavities of RDX particle batches on the sensitivity of cast wax bonded explosives [C] // 10th International Detonation Symposium. Arlington: The Office of Naval Research, 1994: 286-293.
- [7] 花成, 黄明, 黄辉. RDX/HMX 炸药晶体内部缺陷表征与冲击波感度研究 [J]. 含能材料, 2010(2): 152-156. HUA Cheng, HUANG Ming, HUANG Hui. Intragranular defects of RDX/HMX and shock sensitivity [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010(2): 152-156.

北京理工大学“GTX 起爆药技术”通过科技成果鉴定

2010 年 5 月 15 日国家国防科技工业局在北京主持召开了北京理工大学“十一五”国防预研成果“GTX 起爆药技术”鉴定会。中国工程物理研究院董海山院士任鉴定委员会主任, 国家民用爆破器材产品质量监督检验中心蒋荣光研究员和兵器工业安全技术研究所魏新熙研高工任副主任, 来自火工品和民爆器材领域的科研和生产单位的 30 多位专家和代表听取了项目技术总结报告、委托检测报告、知识产权状况报告、查新报告、现场测试报告和用户使用情况报告, 对该成果进行了认真审查和评议, 一致同意该成果通过鉴定。认为该项目发明了高能环保型 GTX 起爆药及其晶形控制工艺技术, 形成了自主知识产权, 实现了起爆药向安全环保发展的技术突破, 研究成果总体技术达到了国际领先水平。该成果具有显著的社会效益和经济效益, 具有良好的推广应用前景。

(北京理工大学张同来教授供稿)