

文章编号: 1006-9941(2010)05-0497-04

## RDX 与 D-RDX 基 PBX 炸药撞击安全性研究

花成<sup>1</sup>, 舒远杰<sup>1</sup>, 吴博<sup>1</sup>, 黄明<sup>1</sup>, 李涛<sup>2</sup>, 傅华<sup>2</sup>

(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:** 为深入研究撞击作用下 RDX/D-RDX 为基高聚物粘结炸药(PBX)的安全性差异, 利用 Hopkinson 实验原理, 参照撞击敏感度试验方法设计了一种能测试炸药试样在较高速度撞击下的动态力学变化历程及撞击安全性的试验方法。试验结果表明, 以 RDX/D-RDX 为基 PBX 炸药的撞击安全性和在撞击加载下的反射波幅值、脉宽有较大差异。运用 LS-DYNA 程序进行数值计算, 所得结果与实验结论基本相符。

**关键词:** 爆炸力学; 钝化 RDX(D-RDX); 晶体缺陷; 撞击敏感度; 冲击波敏感度

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.004

### 1 引言

通过优化结晶工艺, 利用 RDX 原料可以制备具有较好结晶质量, 含有更少晶体缺陷的炸药晶体(国际上称为 reduced sensitivity RDX, RS-RDX)。一些研究表明, RDX 与 RS-RDX 基热固 PBX 的冲击波敏感度有明显差异<sup>[1-2]</sup>, 因此, RS-RDX 的安全性能逐渐受到关注和重视。Ruth M. Doherty<sup>[3]</sup> 对 RDX、RS-RDX 炸药进行的撞击敏感度对比试验结果表明, 使用 BAM 摩擦试验装置、KAST 猛度计和 12 型测试仪器, 采用相关标准方法, 其撞击敏感度  $H_{50}$  值在统计意义上无显著差异。现有的炸药撞击敏感度测试方法, 单纯以炸药是否爆炸作为唯一的安全性判据, 不考虑和研究炸药在撞击作用下的引爆过程, 不能完全反映微观结构差异较大的炸药和具有不同结晶品质炸药的撞击安全性。为了深入了解 RS-RDX 与 RDX 基高聚物粘结炸药(PBX)在撞击作用下的响应行为, 本课题组设计了一种能测试炸药试样在撞击作用下力学变化过程的试验方法, 并对试验结果进行了分析。

收稿日期: 2010-06-21; 修回日期: 2010-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(10972205/A020601)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(2008B0302028)

作者简介: 花成(1967-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事含能材料结构、安全性能测试及研究。e-mail: huac1988@126.com

通讯联系人: 傅华, e-mail: fmyuhua@163.com

### 2 实验

#### 2.1 仪器与材料

实验仪器: 材料动态力学性能 Hopkinson 实验装置(中国工程物理研究院流体物理研究所); TDS 多通道高速数据采集仪(艾科瑞德)。

实验材料: RDX, 原料购自银光化工集团, 晶体密度范围  $1.788 \sim 1.793 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 选用适合溶剂, 调节温度和重结晶参数, 制备出具有较高结晶品质的 RDX, 中国工程物理研究院化工材料研究所将其命名为 D-RDX, 密度范围  $1.796 \sim 1.799 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

图 1 为 RDX 与 D-RDX 的折光匹配显微观察 OMS(optical microscopy)图。

从图 1 可以看出, D-RDX 样品较 RDX 样品含有更少的表面裂纹和晶体缺陷。

#### 2.2 实验方法

撞击安全性测试装置如图 2 所示。图 3 为炸药试样的装药装置图。使用 GJB772A-1997 方法 601.2 规定的  $\Phi 10_{-0.025}^{+0.020}$  mm 标准击柱, 内套筒外径为  $\Phi 20_{-0.01}^{+0.01}$  mm、内径  $\Phi 10_{+0.01}^{+0.01}$  mm, 外套筒内径  $\Phi 20_{+0.01}^{+0.01}$  mm, 外径  $\Phi 24_{+0.01}^{+0.01}$  mm。

在入射杆与透射杆之间装有炸药的气动撞击装置。试验时, 根据预设速度, 启动调节精密减压阀, 调节气罐的气压加速弹丸。弹丸加速后撞击入射杆, 入射杆撞击炸药, 最后由透射杆反映炸药响应程度。使用激光测速仪测试击锤的撞击速度, 利用多通道高速示波器测量、

分析在撞击过程中安装于输入杆、输出杆中的应变传感器的测试信号,以研究炸药试样的动态应力时间变化历程。同时观察分析试验后炸药试样分解、燃烧、爆炸等最终响应特征。

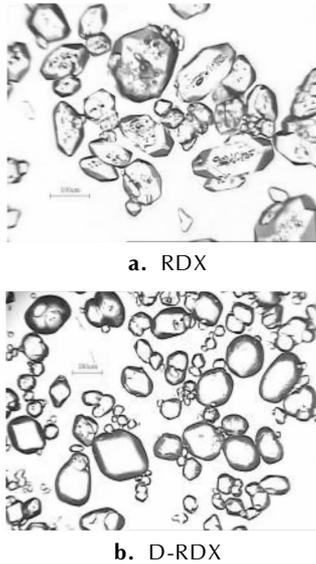


图1 RDX和D-RDX的OMS图  
Fig.1 OMS photographs of RDX and D-RDX

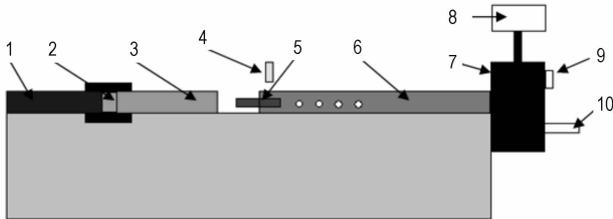


图2 撞击安全性装置试验原理图  
1—透射杆, 2—试样, 3—入射杆, 4—测速光电管, 5—弹丸, 6—加速腔, 7—储气罐, 8—压力表, 9—阀门, 10—空压机接口  
Fig.2 Schematic diagram of assembly for impact safety  
1—transmission pole, 2—explosive sample, 3—incident pole, 4—speed phototube, 5—pellet, 6—accelerating cavity, 7—gas tank, 8—pressure gauge, 9—valve, 10—compressor interface

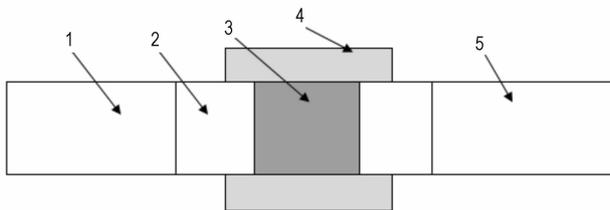


图3 装药装置示意图  
1—透射杆, 2—内套筒, 3—炸药试样, 4—外套筒, 5—入射杆  
Fig.3 Schematic diagram of charge assembly  
1—transmission pole, 2—inner sleeve, 3—explosive sample, 4—outer sleeve, 5—incident pole

### 3 结果与讨论

#### 3.1 实验条件

以RDX和D-RDX为原料,使用水悬浮法,制备PBX-RDX(RDX/聚丙烯酸酯96/4)和PBX-D-RDX(D-RDX/聚丙烯酸酯96/4)造型粉,将50mg PBX-RDX或PBX-D-RDX粉状炸药分别均匀地装于图3所示的装药装置中。将该装置装入套筒中并安装固定在透射杆与入射杆之间,装置安装好后,击柱与入射杆、透射杆保持紧密接触。利用升降法对实验所获得数据进行处理。

#### 3.2 实验结果与分析

以0.5kg的击锤,分别以10,12,16 m·s<sup>-1</sup>的撞击速度对PBX-RDX和PBX-D-RDX进行试验,试验结果见表1。PBX-D-RDX在撞击速度为16 m·s<sup>-1</sup>时做了两次实验。

表1 炸药撞击安全性试验结果

Table 1 Results for explosive impact safety tests

sample	impact velocity/m·s <sup>-1</sup>	results
PBX-RDX	10	explosion
PBX-RDX	12	no reaction
PBX-RDX	16	explosion
PBX-D-RDX	12	no reaction
PBX-D-RDX	16	conflagration
PBX-D-RDX	16	explosion

PBX-RDX、PBX-D-RDX样品在0.8MPa,撞击速度为16 m·s<sup>-1</sup>条件下的动态应力波形分别如图4和图5所示。图6则为未装炸药时,在0.8MPa,撞击速度为16 m·s<sup>-1</sup>时的动态应力波形。

分析图4~图6,可以看出,PBX-RDX炸药试样受撞击大约11.4~11.7ms时,输出杆中测试到一明显

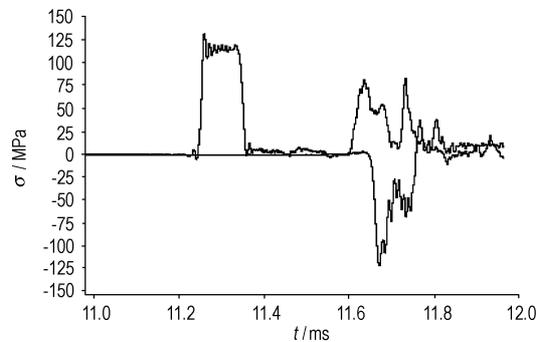


图4 PBX-RDX试样的动态应力波形  
Fig.4 Dynamic stress wave for PBX-RDX

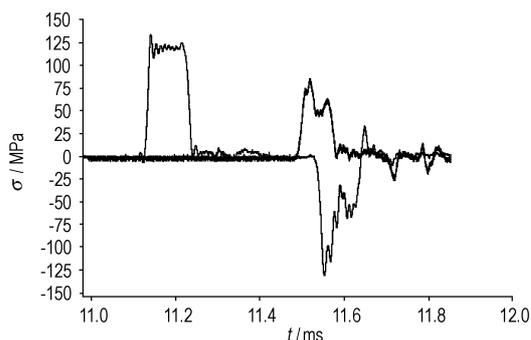


图 5 PBX-D-RDX 试样的动态应力波形

Fig. 5 Dynamic stress wave for PBX-D-RDX

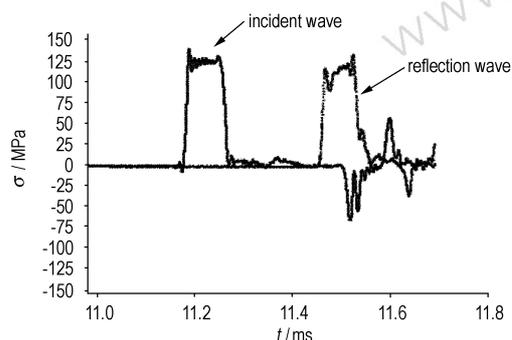


图 6 未装炸药时的动态应力波形

Fig. 6 Dynamic stress wave without explosive

的反射波,该反射波幅值高、脉宽较长,该反射波是由于炸药试样爆炸,向输出杆方向输入了一较强的爆炸波产生的。试验中同时观察发现 PBX-RDX 炸药试样发出明显的爆炸声。对比分析图 4、图 5 可以看出 PBX-D-RDX 炸药试样在该撞击条件下产生的反射波幅值、反射波脉宽与 PBX-RDX 相比有较大差异,与未装炸药试样时透射杆中的反射波形较为类似,同时试验中观察发现, PBX-D-RDX 试样只发生了较弱的爆炸反应,且未听到明显的爆炸声响。

对比图 4、图 5 还可以发现,进行 PBX-RDX 试样试验时,入射杆中产生入射波到透射杆产生反射波的时间差约为 4 ms,小于 PBX-D-RDX 试样的入射波与反射波时间差(4.5 ms),且反射波波形的幅值高、脉宽长,两种试样在撞击速度为  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  条件下均观察到试样的爆炸。

上述实验结果表明,虽然在该条件下,两种炸药均发生了爆炸,以传统撞击感度标准评价无明显差异,但是 PBX-D-RDX 炸药试样在撞击作用下反射波形的幅值高、脉宽长,即 PBX-RDX 炸药受撞击后更易起爆。

RDX 较 D-RDX 炸药晶体含有更多的内部和外部孔洞、裂纹,在撞击作用下更容易由于剪切作用和气泡

的绝热压缩产生温度更高、数量更多的“热点”,并由“热点”群的共同作用引发炸药的快速温升,炸药的热分解反应更易进行,随着产生热量和分解释放气体的增加,炸药热分解的自催化作用增强,热分解反应更易升级,导致到爆炸时间缩短。

### 3.3 数值模拟研究

运用 LS-DYNA 程序对上述实验进行了数值模拟,计算模型结构与图 3 相同, Hopkinson 铝杆密度为  $2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,杨氏模量为 71 GPa,泊松比为 0.3,单元类型为 PLANE182,炸药模型为考虑剪切强度的起爆模型,数值模拟结果如图 7 所示。从图 7 中可见,所得曲线波形与实验曲线波形(图 4 和图 5)基本相符。

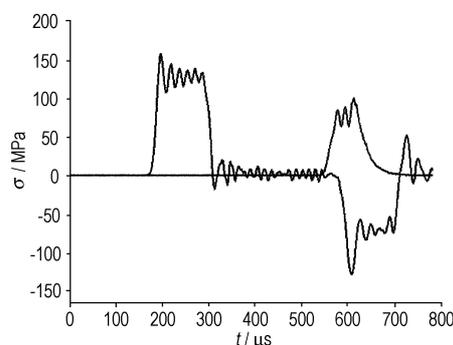


图 7 Hopkinson 铝杆动态应力波形模拟曲线

Fig. 7 Simulation curve of dynamic stress wave for Hopkinson aluminum pole

## 4 小 结

设计的撞击安全性试验结果表明, RDX 与 D-RDX 基 PBX 的撞击-引爆过程中的动态力学响应及炸药受撞击到爆炸时间有一定差异, PBX-RDX 受撞击后更易起爆。这进一步说明结晶品质较好的 D-RDX 的撞击安全性好于普通 RDX。初步表明,该方法完善后可以测试研究含有不同晶体缺陷炸药的撞击安全性。

**致谢:** 特别感谢炸药制备、缺陷表征和试验测试相关人员。特别感谢国防科技大学李俊玲的工作。

### 参考文献:

- [1] Conley P A. Microstructural effects in shock initiation [C] // Proceedings of the 11th Symposium (International) on Detonation, Snowmass, CO (United States), 1998: 768 - 780.
- [2] Van der steen. Influence of RDX crystal shape on the sensitivity of PBXs [C] // Proc. 9th International Detonation Symposium, Portland, Oregon, 1989: 83 - 88.
- [3] Ruth M Doherty. Relationship between RDX properties and sensitivity [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2008, 33 (1): 4 - 13.

- [4] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [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] 孙承纬, 卫玉章. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [7] GJB772A-1997 炸药试验方法[S]. 1997.
- [8] 封雪松, 赵省向, 李小平. 一种重结晶黑索今的冲击波感度研究[J]. 含能材料, 2007, 15(6): 581-583.
- FENG Xue-song, ZHAO Sheng-xiang, LI Xiao-ping. The shock sensitivity of a recrystallizing RDX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(6): 581-583.

## Impact Safety of PBX-based RDX/D-RDX

HUA Cheng<sup>1</sup>, SHU Yuan-jie<sup>1</sup>, WU Bo<sup>1</sup>, HUANG Ming<sup>1</sup>, LI Tao<sup>2</sup>, FU Hua<sup>2</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Liquid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** By using Hopkinson principle and impact sensitivity test method, an impact safety experiment was designed for studying the impact security diversity between PBX-based RDX and PBX-based reduced insensitive RDX (D-RDX) explosive, which can determine the dynamic change process and the impact sensitivity of explosive sample in the higher impact velocity. Results show that the impact safety of PBX-based RDX and PBX-based D-RDX explosive, the reflecting amplitude and pulse width after impact loading are quite different. The result of LS-DYNA numerical simulation are basically consistent with experimental results.

**Key words:** explosion mechanics; reduced insensitive RDX (D-RDX); crystal defect; impact sensitivity; shock wave sensitivity

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.004



读者·作者·编者

## 欢迎订阅 2011 年《化学推进剂与高分子材料》

《化学推进剂与高分子材料》是由黎明化工研究院主办, 中国聚氨酯工业协会、全国化学推进剂信息站协办的国内外公开发行的化工科技期刊, 是《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊, 《万方数据-数字化期刊群》全文收录期刊, 《中国核心期刊(遴选)数据库》来源期刊, 《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊。

本刊主要报道聚氨酯、胶黏剂、涂料、工程塑料等高分子材料, 化学推进剂原材料以及精细化工等相应专业研究论文、专论与综述、生产实践经验总结、新产品和新知识介绍、国内外科技信息及市场动态等。

本刊内容新颖, 信息量大, 印刷质量好, 在全国化工系统中有一定影响。在 1993, 1996, 2002 年全国石化系统化工期刊评比中连获优秀期刊奖。2006 年荣获第六届全国石油和化工行业优秀期刊(专业技术类)二等奖。

本刊为双月刊。国内刊号为 CN 41-1354/TQ, 国际刊号为 ISSN 1672-2191, 广告经营许可证号为 4103002000011。采用国际标准大 16 开, 由专业印刷厂精心承作。彩色封面印刷, 设计装潢精美, 正文内容及插页广告均用铜版纸。内地: 每期定价 15 元, 全年定价 90 元; 港澳台: 50 美元/年(400 港元/年); 国外: 60 美元/年。皆含邮资。国内读者可在全国各地邮局订阅(邮发代号 36-399), 也可通过银行或邮局汇款至本编辑部订阅, 同时本刊又参加了全国非邮发报刊联合发行等, 以方便单位和个人订阅。竭诚欢迎订阅者随时来电来函索取订单。

内容丰富

设计精良

印刷精美

发行广泛

真诚欢迎您订阅、投稿以及发布广告!

本刊地址: 河南省洛阳市王城大道 69 号(471000)

联系电话: 0379-62301694 62303751

传真: 0379-62307056

E-mail: lminfo2000@yahoo.com.cn

联系人: 徐梅青 王喜荣

户名: 黎明化工研究院

开户行: 建设银行洛阳西工支行

账号: 41001504110050004145