

文章编号: 1006-9941(2010)05-0487-05

RDX 晶体特性对冲击感度的影响规律

李洪珍, 康彬, 李金山, 徐容, 黄明, 卢校军, 张勇

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用标准隔板和落锤撞击试验方法分别研究了 RDX 的晶体内部空隙(用晶体表观密度表征)、颗粒度和形貌对包括冲击波感度和撞击感度在内的冲击感度的影响规律。冲击波感度测试采用隔板试验, 药柱配方为 RDX/食用油(质量比为 76/24), 药柱采用液体填充方式制备。隔板试验研究表明: 随着 RDX 晶体表观密度在 $1.7961 \sim 1.7983 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 范围内增加, 炸药配方的冲击波感度降低, 隔板厚度从 14 mm 降到 12.2 mm, 晶体表观密度与隔板厚度基本成线性关系; 当晶体表观密度为 $1.7976 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 在 $50 \sim 600 \mu\text{m}$ 粒度范围内, 随着颗粒度的增加, RDX 炸药配方的冲击波感度降低, 隔板厚度从 13.5 mm 降到 12.3 mm; 当晶体表观密度和颗粒度相近时, 晶体颗粒的外观形貌对炸药冲击波感度影响不大。落锤撞击试验表明: RDX 颗粒度对撞击感度影响较大, 当平均颗粒直径在 $16.7 \sim 337.9 \mu\text{m}$ 范围时, 随着粒径的增加, 特性落高从 75 cm 降到 35.8 cm, 颗粒越大撞击感度越高; 当颗粒度相近时, 在 $1.7961 \sim 1.7983 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 范围内, RDX 晶体表观密度对撞击感度几乎无影响。

关键词: 爆炸力学; RDX; 晶体特性; 冲击感度; 撞击感度

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.002

1 引言

炸药感度不仅受炸药化学性质的影响, 而且与晶体特性密切相关, 其中晶体特性如材料纯度、颗粒内部空洞的微观结构、颗粒表面缺陷、颗粒大小及分布、颗粒形状和表面光滑度对感度影响非常显著。近年来, 炸药晶体特性与感度的关系一直是含能材料工作者比较关注的问题。早期, 法国科学家 Moulard 等人研究了以黑索今(RDX)为基的 PBX 感度与 RDX 颗粒大小、形状、光滑度以及颗粒内部空隙的关系^[1-5]。特别是 20 世纪 90 年代, 法国火炸药公司(SNPE)通过适当的工艺对普通 RDX 晶体品质进行改进可获得降感黑索今(I-RDX), 应用 I-RDX 可使热固性高聚物黏结炸药(PBX)的冲击波感度降低 30% 以上^[6]。随后, 美、英、德、荷、澳、挪威等国家经过研究, 也相继得到了这种冲击波感度大幅度降低的 RDX, 分别命名为 reduced sensitivity RDX (RS-RDX) 或 Grade A RDX 或 Type I RDX^[7-10]。后来研究发现, 通过对普通 HMX 的晶体改性, 获得的 I-HMX 的冲击波感度也大

幅度降低。近期, 封雪松^[11]、花成^[12]等人也研究了 RDX 和 HMX 晶体形貌和内部缺陷与冲击波感度的关系。大家普遍认为: 炸药冲击波感度的变化与炸药晶体特性密切相关, 但在冲击波感度试验中, 影响感度的因素不仅包括炸药的晶体特性, 还与黏结剂、药柱的成型方式等有关, 要表征晶体特性与冲击波感度的定性关系还比较困难。

为排除炸药颗粒间的空隙、黏结剂等对冲击波感度的影响, 研究晶体内部空穴微观结构(用晶体表观密度定量表征)、颗粒大小等晶体特性与冲击波感度的定性关系, 本实验通过结晶技术制备不同晶体品质的 RDX 样品, 选用 RDX/食用油(质量比为 76/24)配方, 药柱制备采用液体填充方式, 系统研究了晶体表观密度、颗粒大小、外观形貌对以 RDX 为基的炸药配方冲击波感度的影响; 另外, 采用落锤撞击试验研究了颗粒大小和晶体表观密度与 RDX 单质炸药撞击感度的关系。最终获得了在不同冲击作用下 RDX 晶体特性对包括冲击波感度和撞击感度在内的冲击感度的影响规律。

2 实验部分

2.1 RDX 样品的制备

采用重结晶方法制备了晶体表观密度分别为 1.7939,

收稿日期: 2010-06-09; 修回日期: 2010-07-09

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(No. 613830102)

作者简介: 李洪珍(1971-), 女, 副研究员, 硕士, 主要从事炸药合成与结晶。e-mail: happyhongzhen@163.com

1.7961, 1.7968, 1.7971, 1.7979, 1.7983 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 六种样品, 对应代号为 RDX-1 到 RDX-6; 然后分别筛分出 50 ~ 180 μm , 250 ~ 320 μm 和 420 ~ 600 μm 三个粒度级别的样品; 对粒度为 250 ~ 320 μm , 晶体表观密度为 1.7939 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 RDX-1-B 部分样品采用溶剂侵蚀方法

进行球形化处理, 获得球形化 RDX (代号 RDX-1-B-Q); 将晶体表观密度为 1.7968 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 RDX-3 样品通过球磨和筛分分为 5 个样品, 平均粒径分别为 16.7, 71.3, 128.6, 228, 337.9 μm , 对应的代号分别是 RDX-3-I, RDX-3-II, RDX-3-III, RDX-3-IV 和 RDX-3-V, 具体见表 1。

表 1 RDX 样品的晶体表观密度和粒度参数

Table 1 Crystal apparent density and particle size of RDX samples

sample code	crystal apparent density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$						
	1.7939	1.7961	1.7968	1.7971	1.7979	1.7983	
	RDX-1	RDX-2	RDX-3	RDX-4	RDX-5	RDX-6	
particle size distribution/ μm	50 ~ 180	RDX-1-A	RDX-2-A	RDX-3-A	RDX-4-A	RDX-5-A	RDX-6-A
	250 ~ 320	RDX-1-B					
	250 ~ 320	RDX-1-B-Q	RDX-2-B	RDX-3-B	RDX-4-B	RDX-5-B	RDX-6-B
	420 ~ 600	RDX-1-C	RDX-2-C	RDX-3-C	RDX-4-C	RDX-5-C	RDX-6-C

2.2 感度测试

撞击感度试验按照 GJB772A - 1997 方法 601.1 和 601.2 测试。爆炸概率测试条件: 落锤质量 5 kg, 药量 50 mg, 落高 25 cm, 室温 14 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 57%; 特性落高的测试条件: 落锤质量 2 kg, 药量 30 mg, 室温 24 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 67%。

冲击波感度试验按 GJB772A - 1997 方法 605.1 冲击波感度卡片式隔板法进行。实验所用主发药柱均采用 $\Phi 20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的 JO-9159 药柱, 药柱密度为 $(1.860 \pm 0.002) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。被发药柱配方为 RDX/食用油 (质量比为 76/24), 药柱制备采用液体填充方式: 采用内径为 $\Phi 20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 钢套筒, 套筒底部粘接上一层滤网, 然后用 RDX 样品颗粒填充套

筒, 使得各个套筒内的样品量接近, 最后用食用油浸润填充, 药柱密度为 $(1.460 \pm 0.002) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

3 结果与分析

3.1 RDX 的晶体表观密度与空隙率

采用密度梯度仪测量 RDX 样品的晶体表观密度, 通过对晶体表观密度的测量, 采用式 (1) 可以计算出晶体的空隙率, RDX 的理论晶体密度采用 $1.8060 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。密度测试数据和空隙率计算结果见表 2。

$$\delta = (\rho_{\text{理论值}} - \rho_{\text{表观密度}}) / \rho_{\text{理论值}} \times 100\% \quad (1)$$

从表 2 可以看出, 随着晶体平均表观密度的增大, 颗粒内部空隙率降低, 晶体表观密度分布区间呈变窄趋势, 晶体品质越好。

表 2 RDX 的晶体表观密度和空隙率

Table 2 Crystal apparent density and rate of internal porosity of RDX samples

items	crystal apparent density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	rate of internal porosity/%	distribution area of crystal apparent density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	width of crystal apparent density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
RDX-1	1.7939	0.67	1.7893 ~ 1.7974	0.0081
RDX-2	1.7961	0.55	1.7896 ~ 1.7987	0.0091
RDX-3	1.7968	0.51	1.7913 ~ 1.7987	0.0074
RDX-4	1.7971	0.49	1.7939 ~ 1.7979	0.0040
RDX-5	1.7979	0.45	1.7922 ~ 1.7987	0.0065
RDX-6	1.7983	0.43	1.7948 ~ 1.7988	0.0040

3.2 RDX 的晶体特性与撞击感度的关系

3.2.1 RDX 晶体表观密度与撞击感度的关系

把具有不同晶体表观密度, 粒度分布均为 50 ~ 180 μm 五个样品 RDX-2-A 到 RDX-6-A 进行撞击感度测试, 结果见表 3。

由表 3 可知, RDX 单质炸药撞击感度与晶体表观密度无明显关联。根据 Bowden 的热点学说, 由撞击能转化而成的热能并非均匀分布在整个炸药体系, 而是集中在某些局部区域, 这些局部区域的温度迅速升高至爆发点而引发整个炸药体系发生爆炸。在本试验

条件下,炸药样品在试验套筒内呈自然堆积状态,炸药晶体间必然包含了很多空气孔穴,该空穴尺度远大于由于晶体表观密度不同所体现的颗粒内部空穴的尺度。因此对于颗粒大小相近的 RDX,颗粒间的空穴基本相似,因此其撞击感度与颗粒表观密度几乎无关联。

表 3 RDX 晶体表观密度对撞击感度的影响

Table 3 Effect of RDX crystal apparent density on impact sensitivity

items	crystal apparent density /g · cm ⁻³	impact sensitivity /%	H ₅₀ /cm (hammer, 2 kg)
RDX-2-A	1.7961	20	43.8
RDX-3-A	1.7968	12	29.3
RDX-4-A	1.7971	72	45.1
RDX-5-A	1.7979	44	32.9
RDX-6-A	1.7983	12	32.9

3.2.2 RDX 颗粒度与撞击感度的关系

把晶体表观密度均为 1.7968 g · cm⁻³,颗粒度不同的五个样品从 RDX-3-I 到 RDX-3-V 进行撞击感度测试,结果见表 4。

表 4 RDX 颗粒度对撞击感度的影响

Table 4 Effect of RDX particle average size on impact sensitivity

items	crystal apparent density /g · cm ⁻³	particle average size /μm	H ₅₀ /cm (hammer, 2 kg)
RDX-3-I	1.7968	16.7	75
RDX-3-II	1.7968	71.3	72.9
RDX-3-III	1.7968	128.6	66.2
RDX-3-IV	1.7968	228.0	64.9
RDX-3-V	1.7968	337.9	35.8

由表 4 可知,对于晶体表观密度相同的 RDX 样品,随着颗粒的增大,撞击感度也随之升高。这是因为在本试验条件下,炸药样品在套筒内同样呈自然堆积状态,炸药晶体间必然存在很多空气孔穴。显然,随着粒度的增大,孔穴率和孔穴半径也随之增大,从而在撞击作用下因孔穴绝热压缩形成热点的机率也相应增加,因此粒度较大的样品表现出较高的撞击感度。另外,从晶体的微观结构分析,按照晶体结晶学原理,炸药晶体是一种向三维空间无限伸展的具有一定对称性的周期性点阵。然而,几乎在所有炸药晶体的内部都存在位错等重要一维晶体缺陷,常表现为一细长的管状区域,其长度方向的尺寸可达晶体宏观尺寸。在撞击作用下,炸药晶体内的位错将发生快速运动,对晶体点阵形成强烈扰动,导致晶体内形成一细长的剪切带,在剪切带内将发生强烈的塑性变形,从而产生

热点,随着位错的不断运动,剪切带内的热量将逐渐增大,当热量达到一定程度时,便会导致炸药晶体发生反应。一般情况下,位错一旦发生运动,便会继续下去,直到晶体的边界。随着晶体尺寸的增大,位错在晶体内所经历的平均位移增大,使剪切带中因塑性变形产生的热量增多,更容易引起炸药晶体发生反应。因此从晶体微观结构分析,撞击感度也是随炸药粒度的增大而增加。

3.3 RDX 的晶体特性对冲击波感度的影响规律

3.3.1 RDX 晶体表观密度对冲击波感度的影响

将粒度在 50 ~ 180 μm 范围内,晶体表观密度不同的三个 RDX 样品用油填充方式制成药柱进行隔板实验,结果见表 5。

表 5 RDX 晶体表观密度对冲击波感度的影响

Table 5 Effect of RDX crystal apparent density on shock sensitivity

items	crystal apparent density /g · cm ⁻³	rate of internal porosity /%	50% gap thickness /mm
RDX-2-A	1.7961	0.55	14.0
RDX-4-A	1.7971	0.49	13.0
RDX-6-A	1.7983	0.43	12.2

从表 5 可以看出,随着 RDX 晶体表观密度的增加即晶体内部空隙率的降低,冲击波感度相应降低。根据热爆炸理论:在冲击波作用下,由气泡形成的热点,要比纯炸药形成的热点容易起爆;炸药空隙度愈大,炸药中所含气泡数也越多,则其起爆的热点数也越多,故炸药也越容易被起爆。由于 RDX 颗粒被油填充颗粒间几乎不存在孔穴,因此热点的形成基本在颗粒内部。随着 RDX 晶体表观密度的增加,颗粒内部的孔穴减少,当受到冲击时,形成的热点就更少,因此冲击波感度相应降低。RDX 晶体表观密度与冲击波感度基本成线性关系(见图 1)。

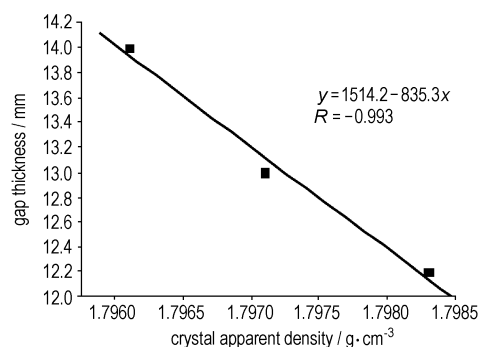


图 1 RDX 晶体表观密度与冲击波感度的关系

Fig. 1 Curve of crystal apparent density vs gap thickness

3.3.2 RDX 颗粒度对冲击波感度的影响

将晶体表观密度均为 $1.7979 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 粒度不同的三种 RDX 样品用油填充方式制成药柱进行隔板试验, 结果见表 6。

表 6 RDX 颗粒大小和分布对冲击波感度的影响

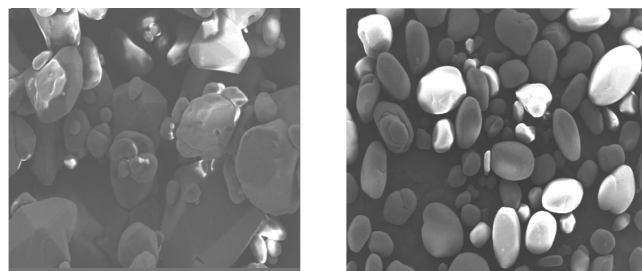
Table 6 Effect of RDX particle size and distribution on shock sensitivity

items	particle size/ μm	50% gap thickness/mm
RDX-5-A	50 ~ 180	13.5
RDX-5-B	250 ~ 420	13.0
RDX-5-C	420 ~ 600	12.3

从表 6 可以看出, 在一定粒度范围内, 随着颗粒度的增加, RDX 炸药配方的冲击波感度降低。这是因为: 颗粒间的空穴已被油填充, 只有颗粒内部的孔穴起作用, 当晶体的表观密度相同时, 其内部空隙率也相等, 那么晶体颗粒越大, 孔穴的半径越大, 其内部的孔穴数量就越少, 相应热点数也就越少, 炸药就越难起爆。故 RDX 炸药配方随其粒度的减小, 其冲击波感度逐渐增加。

3.3.3 RDX 颗粒形貌对冲击波感度的影响

采用溶剂侵蚀方法对普通 RDX-1-B (图 2a) 进行球形化处理, 筛分, 得到无明显棱角, 表面光滑, 形状接近球形的 RDX-1-B-Q (图 2b)。用油填充方式制成药柱进行隔板试验, 结果见表 7。



a. RDX-1-B

b. RDX-1-B-Q

图 2 RDX 颗粒形貌 SEM 图

Fig. 2 SEM photographs of RDX

表 7 RDX 颗粒形貌对冲击波感度的影响

Table 7 Effect of RDX particle shape on shock sensitivity

items	crystal apparent density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	particle size/ μm	50% gap thickness/mm
RDX-1-B	1.7939	250 ~ 320	14.0
RDX-1-B-Q	1.7939	250 ~ 320	14.0

从表 7 可知, RDX 颗粒形貌对炸药冲击波感度几乎无影响。这是因为: 当 RDX 晶体表观密度、粒度等

基本相同时, 其内部的孔穴数量基本相同, 可能形成的热点数也基本一致, 其冲击波感度也应相同, 而与颗粒形貌无关。同时该试验也表明: 用液体填充装药可以充分表征晶体自身的状态对冲击波感度的影响, 排除了颗粒间的空隙、颗粒形貌以及黏结剂等影响。

4 结论

(1) 用液体填充装药方法制备药柱可以较准确表征炸药颗粒晶体特性对冲击波感度的影响规律。

(2) RDX 晶体表观密度和粒度是影响冲击波感度的两个主要晶体特性。晶体表观密度对冲击波感度影响最大, 在 $1.7961 \sim 1.7983 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 范围内, 晶体表观密度越大, 冲击波感度越低; 炸药颗粒度对冲击波感度的影响次之, 在 $50 \sim 600 \mu\text{m}$ 范围内, 颗粒越大, 冲击波感度越低; 而颗粒形貌对冲击波感度几乎无影响。

(3) RDX 颗粒大小对撞击感度影响较大, 在 $16.7 \sim 337.9 \mu\text{m}$ 范围内, 随着颗粒度的增大, 撞击感度增加; 晶体表观密度对撞击感度几乎无影响。

致谢: 感谢化工材料研究所安全与可靠性研究室韩勇、张艳丽等全部感度组测试人员以及材料化学研究室的姜燕等同志为本论文的完成所提供的帮助。

参考文献:

- [1] Moulard H, Kury J W, Delclos A. The effect of RDX particle size on the shock sensitivity of cast PBX formulations [C] // Proceedings Eighth Symposium (International) on Detonation, Albuquerque, New Mexico, USA, 1985: 902 - 913.
- [2] Moulard H. Particular aspect of the explosive particle size effect on shock sensitivity of cast PBX formulation [C] // Proceedings Ninth Symposium (international) on Detonation, Portland, Oregon, USA, 1989: 18 - 24.
- [3] Vander steen A C, Verbeek H J, Meulenbrugge J J. Influence of RDX crystal shape on the shock sensitivity of PBXs [C] // Proceedings Ninth Symposium (international) on Detonation, Portland, Oregon, USA, 1989: 83 - 88.
- [4] Borne L. Influence of intragranular cavities of RDX particle batches on the sensitivity of cast wax bonded explosives [C] // Proceedings Tenth international Detonation Symposium, Boston, Massachusetts, USA, 1993: 286 - 293.
- [5] Baillou F, Dartyge J M, Spycykerelle C. Influence of crystal defects on sensitivity of explosives [C] // Proceedings Tenth international Detonation Symposium, Boston, Massachusetts, USA, 1993: 816 - 823.
- [6] Freche A, Aviles J, Donnio L, Spycykerelle C. Insensitive RDX (I-RDX) [C] // 2000 Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, San Antonio, TX, USA, 2000.
- [7] Sjoberg P, Hytti H, Strandberg R, et al. PBX with insensitive RDX - A new EIDS substance for underwater use [C] // 33rd International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, June 25 - 28, 2002, p16/1.
- [8] Halvorsen T. Improved RDX, properties and processability [C] // 33rd International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, June 25 - 28, 2002, p93/1.

- [9] Lochert I J, Dexter R M, Hamshere B L. Evaluation of Australian RDX in PBXN-109 [R]. Defense Science and Technology Organisation, Edinburgh, SA, Australia, DSTO-TN-0440, 2002.
- [10] Lochert I J, Franson M D, Hamshere B L. Reduced sensitivity RDX (RS-RDX) part I: Literature review and DSTO evaluation [R]. DSTO-TR-1447, 2003.
- [11] 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): 581-582.
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): 581-582.
- [12] 花成, 黄明, 黄辉, 等. 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, 18(2): 152-156.
HUA Cheng, HUANG Ming, HUANG Hui, et al. Intragranular defects and shock sensitivity of RDX/HMX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(2): 152-156.

Effects of RDX Crystal Characteristics on Shock Sensitivities

LI Hong-zhen, KANG Bin, LI Jin-shan, XU Rong, HUANG Ming, LU Xiao-jun, ZHANG Yong

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Effects of RDX crystal characteristics including crystal internal porosity, particle size and distribution on shock sensitivities were studied by applying a method that RDX particles immersed in rap oil which excluded effects on shock sensitivity of binder/crystal interface, binder porosity and crystal shape. The shock initiation threshold of RDX/rap oil (mass ratio 76/24) composition was determined with gap test where RDX was recrystallized to various qualities. Results show that the gap thickness decreases from 14.0 mm to 12.2 mm when the crystal apparent density increases from $1.7961 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ to $1.7983 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, and gap thickness decreases from 13.5 mm to 12.3 mm with increasing of particle size at the range of 50-600 μm , and this shows that crystal apparent density and particle size are two important factors affecting shock sensitivity. Impact sensitivity of RDX powder by drop weight apparatus was also studied. The test shows that drop weight impact sensitivity decreases from 75 cm to 35.8 cm evidently when particle average size increases from 16.7 μm to 337.9 μm , and does not almost vary while crystal apparent density changing at $1.7961-1.7983 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, which demonstrates that particle size is the important factor affecting impact sensitivity.

Key words: explosion mechanics; RDX; crystal characteristics; shock sensitivity; impact sensitivity

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.002