

文章编号: 1006-9941(2016)10-0960-05

五种常用单质炸药对 FOX-7 晶型转变的影响

黄靖伦¹, 周 诚², 张丽媛¹, 王伯周², 马 卿¹, 李祥志²

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 将 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)与环三亚甲基三硝胺(RDX)、1,3,5-三氨基-2,4,6-三硝基苯(TATB)、1-氧-2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪(LLM-105)、环四亚甲基四硝胺(HMX)和六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)五种常用单质炸药分别以质量比为 1:1 混合,获得五种含 FOX-7 的混合炸药。采用变温 X-射线粉末衍射技术,研究了温度对混合炸药中 FOX-7 晶型转变的影响。升温过程,在 105~125 °C,五种混合炸药中 FOX-7 都发生了 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变;当继续升温时,HMX/FOX-7、LLM-105/FOX-7 混合炸药中 FOX-7 并未发生 $\beta \rightarrow \gamma$ 晶型转变过程;降温过程中,RDX/FOX-7 和 CL-20/FOX-7 混合炸药中 FOX-7 没有发生 $\gamma \rightarrow \beta$ 晶型转变,而是直接发生 $\gamma \rightarrow \alpha$ 晶型转变;而 FOX-7 在其它三种混合炸药中的降温过程晶型转变与升温过程晶型转变是可逆的,即在降温过程发生从 $\gamma \rightarrow \beta$ 或 $\beta \rightarrow \alpha$ 的晶型转变。

关键词: 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7); 混合炸药; 晶型转变

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.10.006

1 引言

含能化合物的多晶型现象非常普遍,不同晶型有其特有的形态和晶体特性,而这种形态与晶体特性的差异往往对产品的物理化学性质和爆轰性能产生重要影响^[1-3]。如奥克托今(HMX)在常温常压下有 α 、 β 、 γ 和 δ 四种晶型,其中 β -晶型密度和能量最高且最钝感,是炸药配方中的理想晶型^[4-6];六硝基六氮杂异伍兹烷(HNIW,CL-20)在常温常压下主要存在 α 、 β 、 γ 和 ε 四种晶型,其中 ε -晶型的密度最大,理论密度可达 $2.04 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,热稳定性最好,感度最低,爆轰性能最好,综合性能优异,最具应用价值^[7-11]。各种晶型均有一定的稳定条件,不同晶型可以通过改变温度而得到,或在一定的溶剂内经过一定时间发生相互转变,因此,含能化合物的晶型转变研究是一项重要课题,是决定其应用领域的关键因素。

1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)是一种新型高能钝感炸药,具有密度大、能量高、感度低、热稳定性和化学稳定性好等特点,综合性能优异,其合成方法、热性能和晶体形貌研究是近年来含能材料领域研究的热点之一^[12-18]。Latypov^[13]课题组研究发现

FOX-7 有 α 、 β 、 γ 和 δ 四种晶型,常温常压下存在的为 α 晶型,随着温度的变化,四种晶型可以相互转变;Bemm^[19]和 Kempa^[20]等研究人员利用 X-射线粉末衍射技术(XRD)深入研究了 FOX-7 四种晶型的晶型转变温度和转变规律,但只停留在单一 FOX 组分的晶型变化,而 FOX-7 在混合炸药中的晶型与单一组分晶型的转变是否一致,目前未见文献报道。

因此,为了掌握 FOX-7 在混合炸药中的晶型变化规律,为其在武器中的进一步应用奠定基础,本研究将混合炸药中常用的五种高能单质炸药 RDX、HMX、CL-20、TATB 和 LLM-105 分别与 FOX-7 单质炸药按质量比 1:1 均匀混合,采用等静压法将混合炸药分别压制成 $\Phi 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的药柱,获得五种含 FOX-7 的混合炸药(FOX-7/RDX、FOX-7/HMX、FOX-7/CL-20、FOX-7/TATB 和 FOX-7/LLM-105)药柱,利用变温 X-射线粉末衍射技术,测试了从 30 °C → 高温 → 30 °C 的一个升温降温循环过程中,单质炸药 FOX-7 及其在五种混合炸药中衍射信号的变化情况,得到了各晶型转变温度和晶型变化规律,为 FOX-7 在混合炸药中的应用提供了技术支撑。

2 实验部分

2.1 试剂

FOX-7(纯度为 99.0%)、TATB(纯度为 98.0%)、

收稿日期: 2016-01-07; 修回日期: 2016-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(21172203)

作者简介: 黄靖伦(1974-),男,副研究员,主要从事含能材料合成与性能研究。e-mail: jinglunhuang@caep.cn; jinglunhuang@163.com

LLM-105(纯度为 99.0%),中国工程物理研究院化工材料研究所;RDX(纯度为 99.0%)、HMX(纯度为 98.0%)、CL-20(纯度为 99.0%),兵器 805 厂;试验用水为蒸馏水(自制)。

2.2 样品制备

以水为溶剂,将 FOX-7 单质炸药分别与 RDX、HMX、CL-20、TATB 和 LLM-105 五种典型单质炸药按照质量比为 1:1 比例进行充分混合,然后进行过滤、洗涤、烘干,得到混合炸药样品。再采用等静压法将混合炸药样品压制成 $\phi 10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的药柱,得到待测试样品药柱。

2.3 仪器及测试条件

XRD 衍射数据采用德国 Bruker 公司 X-射线粉末衍射仪,使用万特探测器,中低温样品台,管电压为 40 kV,管电流为 40 mA;扫描范围为 $5^\circ \sim 60^\circ$,步长为 0.02° ,每步时间为 0.1 s;温度测试晶型变化范围: $30 \sim 185^\circ\text{C}$ 。

3 结果与讨论

3.1 FOX-7 的晶型变化

FOX-7 随温度变化的 XRD 图谱如图 1 所示。

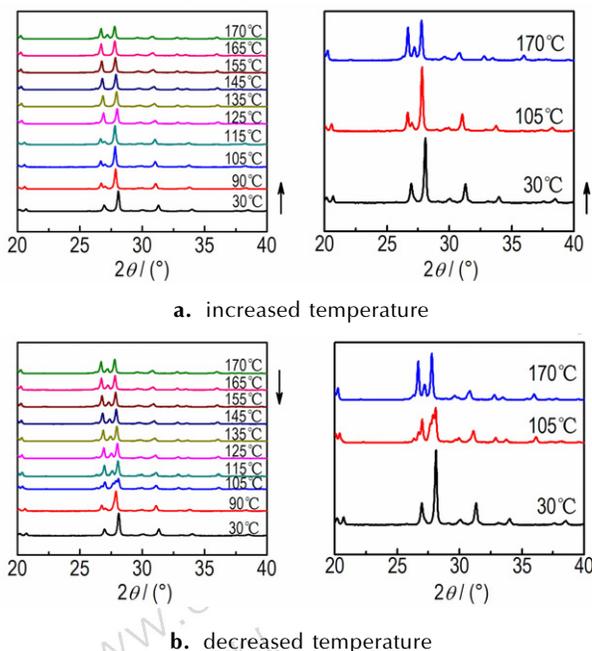


图 1 升温 and 降温过程中 FOX-7 的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of FOX-7 in increased and decreased temperature process

从图 1 中可以看出:在升温过程中(图 1a),XRD 图谱中的 2θ 值在 27° 处衍射信号从明显的一高一低

的双峰开始裂变为多重峰,说明 FOX-7 在 105°C 开始从 α 相转变为 β 相,当温度升到 125°C 时,多重峰逐渐变为大小和高度相似的双峰,说明从 α 相完全转变为 β 相;当温度升高到 170°C 时,在双峰之间明显出现了一个小峰,变成了三个峰,说明从 β 相转变为 γ 相。在降温过程(图 1b),当温度降到 105°C 时, 2θ 值在 27° 处的三个峰变为两个峰,说明 FOX-7 从 γ 相转变为 β 相。当温度继续降到 25°C 时,又变为初始的一高一低的单峰,说明从 β 相转变为 α 相。

3.2 FOX-7/RDX 混合炸药的晶型变化

FOX-7/RDX 混合炸药随温度变化的 XRD 图谱如图 2 所示。在升温过程中(图 2a),当温度从 30°C 升高至 105°C 时, 2θ 值在 27° 处的衍射信号从双峰开始裂变为多重峰,表明 FOX-7/RDX 混合炸药中 FOX-7 已经发生晶型转变;继续升温,中间峰衍射信号逐渐增强,两侧小峰衍射信号逐渐减弱,至 125°C ,在 2θ 值 27° 处形成一个新主衍射峰,这表明 FOX-7/RDX 混合炸药 FOX-7 已经完成了第一次晶型转变过程,即 $\alpha \rightarrow \beta$ 相。当升温至 155°C ,在 2θ 值 27° 处的小峰的衍射信号逐渐增强,升至 170°C 时, 2θ 值在 27° 处的峰裂变为三个明显的单峰,表明 FOX-7/RDX 混合炸药中 FOX-7 发生了第二次晶型转变,即 $\beta \rightarrow \gamma$ 相,这与 FOX-7 单质炸药第二次晶型转变温度相似。

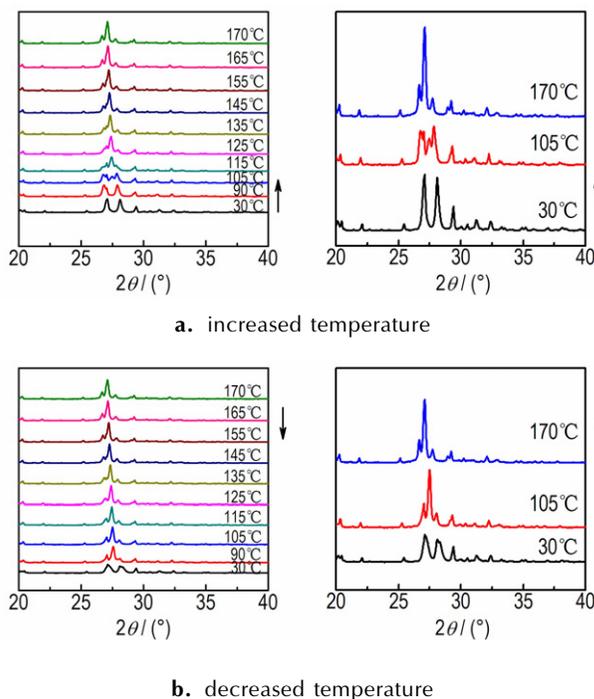


图 2 升温 and 降温过程中 FOX-7/RDX 混合炸药的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of FOX-7/RDX composite explosive in increased and decreased temperature process

在降温过程中(图 2b),当温度从 170 °C 降至 105 °C 时,FOX-7/RDX 混合炸药的衍射峰信号基本没有变化,说明没有发生晶型转变;当继续降温至 30 °C 时, 2θ 值在 27° 处的峰形由变为明显相似的双峰,这表明 FOX-7/RDX 混合炸药在降温过程未经 $\gamma \rightarrow \beta$ 晶型转变,直接由 γ 相转变为 α 相。

3.3 FOX-7/TATB 混合炸药的晶型变化

FOX-7/TATB 混合炸药随温度变化的 XRD 图谱如图 3 所示。升温过程中(图 3a),当温度从 30 °C 升至 115 °C 时, 2θ 值在 27° 的衍射信号开始发生变化,由规则的双峰信号变为不规则的多重峰,表明 FOX-7/TATB 混合炸药中 FOX-7 开始发生晶型转变,至 125 °C,完成第一次晶型转变过程,即 $\alpha \rightarrow \beta$ 相。当温度升至 155 °C 时, 2θ 值在 27° 处双峰的衍射信号强度发生了变化,表明开始了第二次晶型转变,至 170 °C,已完全转变为 γ 相。降温过程中(图 3b),当温度从 170 °C 降到 105 °C 时, 2θ 值在 27° 处的衍射信号已发生明显变化,由 $\gamma \rightarrow \beta$ 相;继续降温至 30 °C 时,FOX-7 晶型又转变为 α 相。这表明 FOX-7/TATB 混合炸药在降温过程中 FOX-7 晶型转变是一个可逆过程。

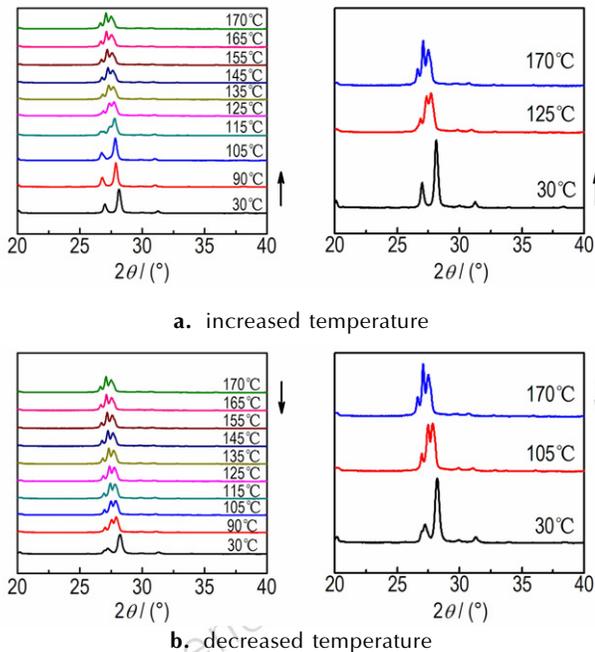


图 3 升温 and 降温过程中 FOX-7/TATB 混合炸药的 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of FOX-7/TATB composite explosive in increased and decreased temperature process

3.4 FOX-7/LLM-105 混合炸药的晶型变化

FOX-7/LLM-105 混合炸药随温度变化的 XRD 图谱分别如图 4 所示。升温过程中(图 4a),当温度从 30 °C 升至 105 °C 时, 2θ 值在 27° 的衍射信号开始发生

变化,至 120 °C,完成第一次晶型转变过程,即 $\alpha \rightarrow \beta$ 相;当温度升至 170 °C 时,FOX-7/LLM-105 混合炸药中 FOX-7 的衍射信号并未发生改变,这可能是 LLM-105 中的氨基与 FOX-7 中的硝基存在一定的氢键影响了 FOX-7 的晶型转变过程。在降温过程中(图 4b),当温度从 170 °C 降到 105 °C 时, 2θ 值在 27° 处没有发生变化,表明 FOX-7/LLM-105 混合炸药中 FOX-7 晶型基本没有发生变化,当温度进一步降低到 30 °C 时,FOX-7 又从 β 相转变为 α 相。

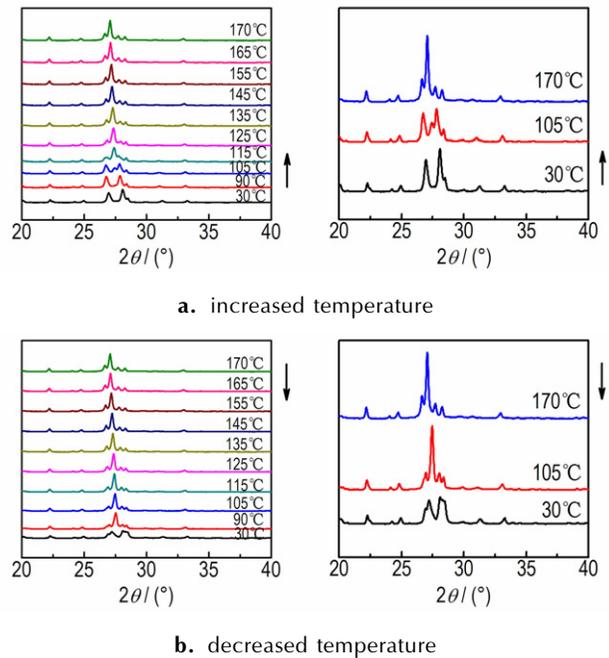


图 4 升温 and 降温过程中 FOX-7/LLM-105 混合炸药的 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of FOX-7/LLM-105 composite explosive in increased and decreased temperature process

3.5 FOX-7/HMX 混合炸药的晶型变化

FOX-7/HMX 混合炸药随温度变化的 XRD 图谱如图 5 所示。升温过程中(图 5a),当温度从 30 °C 升高至 104 °C 时, 2θ 值在 27° 处的衍射信号从规则的双峰开始变为多重峰,表明 FOX-7/HMX 混合炸药中 FOX-7 已经发生晶型转变;继续升温,中间峰衍射信号逐渐增强,两侧小峰衍射信号逐渐减弱,至 120 °C,在 2θ 值 27° 处形成一个类似塔形新主衍射峰,这表明 FOX-7/HMX 混合炸药已经完成了第一次晶型转变过程,即 $\alpha \rightarrow \beta$ 相。当升温至 180 °C,在 2θ 值 27° 处的衍射信号基本没有发生变化,表明 FOX-7/HMX 混合炸药没有发生第二次晶型转变。

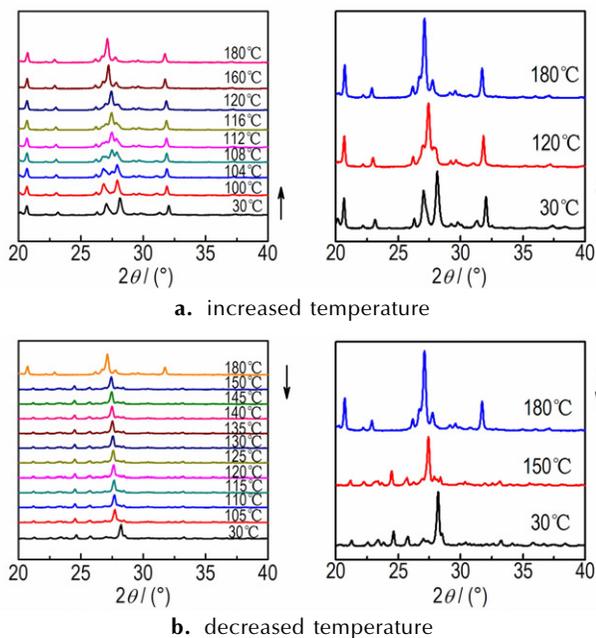


图 5 升温和降温过程中 FOX-7/HMX 混合炸药的 XRD 图谱
Fig.5 XRD patterns of FOX-7/HMX composite explosive in increased and decreased temperature process

从图 5 中可知,当温度从 180 °C 降至 150 °C 时,在 2θ 值在 27° 处的衍射峰发生了变化,由多重峰变为明显的单峰,并且 2θ 值在 21° 处和 32° 处的衍射峰信号消失。这表明在降温过程中 FOX-7/HMX 混合炸药中 FOX-7 晶型于 160 °C 时发生了 β→α 晶型转变,当温度进一步降低到 30 °C 时,衍射信号没有发生变化。

3.6 FOX-7/CL-20 混合炸药的晶型变化

FOX-7/CL-20 混合炸药随温度变化的 XRD 图谱如图 6 所示。升温过程中(图 6a),当温度从 30 °C 升至 105 °C 时,2θ 值在 27° 的衍射信号由双峰开始裂变为三重峰,表明 FOX-7/CL-20 混合炸药中 FOX-7 已经发生晶型转变,升温至 120 °C,两侧小峰减弱,形成中间峰为主的衍射信号,完成了第一次晶型转变过程,即 α→β 相。当温度升至 150 °C 时,2θ 值在 27° 两侧小峰的衍射信号增强,并且 2θ 值在 31° 小峰逐渐减弱,说明已经开始了晶型转变,当温度升至 185 °C,2θ 值在 31° 小峰消失,说明 FOX-7/CL-20 混合炸药中 FOX-7 完成第二次晶型转变过程,即 β→γ 相。

从图 6b 可知,当温度从 185 °C 降至 120 °C 时,衍射峰在 2θ 值在 27° 处基本没有发生变化,表明在该温度范围内 FOX-7/CL-20 混合炸药中 FOX-7 没有晶型变化;当温度进一步降至 30 °C 时,出现了与 FOX-7 在常温下 α 相类似的两个明显单峰,说明混合物中 FOX-7 晶型没有经过 β 相的转变,直接从 γ 相转变为 α 相。

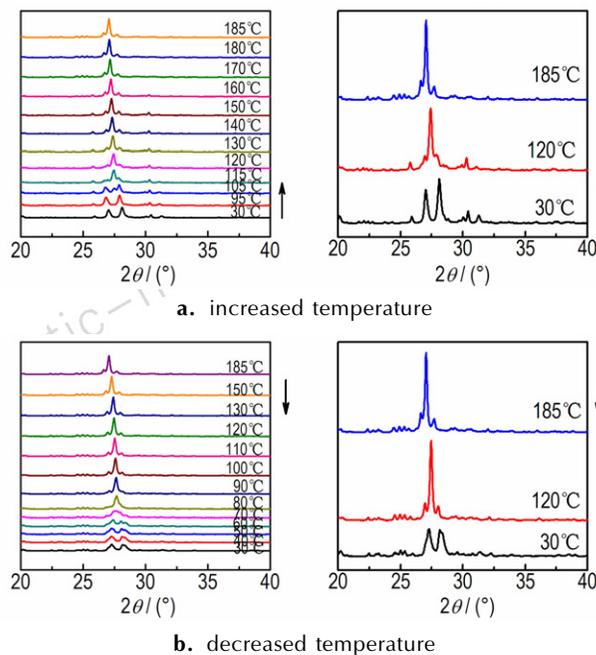


图 6 升温和降温过程中 FOX-7/CL-20 混合炸药的 XRD 图谱
Fig.6 XRD patterns of FOX-7/CL-20 composite explosive in increased and decreased temperature process

4 结论

(1) 在升温过程中,五种混合炸药中 FOX-7 的第一个晶型转变均发生在 105 ~ 125 °C,由 α 相全部转为 β 相;继续升温过程中,混合炸药 FOX-7/RDX、FOX-7/CL-20、FOX-7/TATB 中 FOX-7 的晶型从 β 转变为 γ 相;而在混合炸药 FOX-7/HMX、FOX-7/LLM-105 中 FOX-7 未发生 β→γ 相的第二次晶型转变过程。

(2) 在降温过程中,混合炸药 FOX-7/RDX、FOX-7/CL-20 中 FOX-7 没有发生 γ→β 晶型转变,而是直接发生 γ→α 晶型转变;其余三种混合炸药中的 FOX-7 晶型转变与升温过程中的晶型转变是可逆的,即 LLM-105/FOX-7 和 HMX/FOX-7 中 FOX-7 发生 β→α 晶型转变,而 TATB/FOX-7 中 FOX-7 的则发生 γ→β→α 晶型转变。

(3) 获得了 FOX-7 晶型转变温度和晶型变化规律,加入其它单质炸药,在 100 °C 下对 FOX-7 的晶型转变和晶型不会产生任何影响,为 FOX-7 在炸药中的进一步应用提供了技术支撑。

参考文献:

[1] 舒远杰,武宗凯,刘宁,等. 晶形控制及形成共晶: 含能材料改性研究的重要途径[J]. 火炸药学报, 2015, 38(5): 1-9.
SHU Yuan-jie, WU Zong-kai, LIU Ning, et al. Crystal control

- and cocrystal formation: important route of modification research of energetic materials[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2015, 38(5): 1-9.
- [2] 孙荣康, 任特生, 高怀琳. 猛炸药的化学与工艺学(上册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 2-5.
- [3] 欧育湘. 炸药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 210-218.
- [4] 段晓惠, 卫春雪, 裴重华, 等. HMX 晶体形貌预测[J]. 含能材料, 2009, 17(6): 654-659.
DUAN Xiao-hui, WEI Chun-xue, PEI Chong-hua, et al. Prediction of crystal morphology of HMX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 654-659.
- [5] 尚菲菲, 张景林. 溶剂及两种超临界工艺对 HMX 形貌和晶型的影响[J]. 火工品, 2014(1): 16-21.
SHANG Fei-fei, ZHANG Jing-lin. Effect of solvent on particle morphology and crystal phase in recrystallization of HMX by different supercritical carbon dioxide as antisolvent[J]. *Intiators & Pyrotechnics*, 2014(1): 16-21.
- [6] 薛超, 孙杰, 宋功保, 等. HMX 的 $\beta \rightarrow \delta$ 晶型转变研究进展[J]. 含能材料, 2008, 18(6): 753-757.
XUE Chao, SUN Jie, SONG Gong-bao, et al. Review on $\beta \rightarrow \delta$ phase transition of HMX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 18(6): 753-757.
- [7] 庞思平, 申帆帆, 吕其浩, 等. 六硝基六氮杂异伍兹烷合成工艺研究进展[J]. 兵工学报, 2014, 35(5): 725-732.
PANG Si-ping, SHEN Fan-fan, LÜ PENG-hao, et al. Research progress in synthesis of hexanitrohexaazaisowurtzitane[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(5): 725-732.
- [8] 李洪珍, 周小清, 王述存, 等. HNIW 在乙酸乙酯-正庚烷溶剂体系中的结晶机制研究[J]. 含能材料, 2012, 20(1): 30-34.
LI Hong-zhen, ZHOU Xiao-qing, WANG Shu-cun, et al. Crystallization mechanism of ϵ -HNIW in ethyl acetate/*n*-heptane solution[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(1): 30-34.
- [9] 徐金江, 孙杰, 周克恩, 等. CL-20 重结晶过程中的晶型转变研究进展[J]. 含能材料, 2012, 20(2): 248-255.
XU Jin-jiang, SUN Jie, ZHOU Ke-en, et al. Review on polymorphic transformation in CL-20 recrystallization[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(2): 248-255.
- [10] 宋振伟, 严启龙, 李笑江, 等. 溶剂中 ϵ -CL-20 的晶型变化[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 648-653.
SONG Zhen-wei, YAN Qi-long, LI Xiao-jiang, et al. Crystal transition of ϵ -CL-20 in different solvent[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(6): 648-653.
- [11] 朱康, 李国平, 罗运军. 超临界 CO₂ 反溶剂法制备 CL-20 超细微粒[J]. 含能材料, 2012, 20(4): 445-449.
ZHU Kang, LI Guo-ping, LUO Yun-jun. Preparation of ultrafine CL-20 by supercritical CO₂ anti-solvent method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(4): 445-449.
- [12] Östmark H, Langlet A, Bergman H, et al. FOX-7—A new explosive with low sensitivity and high performance [C] // 11th Symposium on Detonations, USA, 1998.
- [13] Latypov N V, Bergman J, Langlet A, et al. Synthesis and reaction of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene[J]. *Tetrahedron*, 1998, 54: 11525-11536.
- [14] 蔡华强, 舒远杰, 郁卫飞, 等. FOX-7 的合成和反应机理研究[J]. 化学学报, 2004, 62(3): 295-301.
CAI Hua-qiang, SHU Yuan-jie, YU Wei-fei, et al. Study on synthesis of FOX-7 and its reaction mechanism [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2004, 62(3): 295-301.
- [15] 王锡杰, 周诚, 王伯周, 等. 高收率合成 DADE 的新方法[J]. 火炸药学报, 2005, 28(1): 61-62.
WANG Xi-jie, ZHOU Cheng, WANG Bo-zhou, et al. An improved synthetic method of DADE with high yield[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2005, 28(1): 61-62.
- [16] 丁厚锰, 叶志文, 吕春绪. 有机酸优化 FOX-7 的合成[J]. 含能材料, 2012, 20(1): 1-4.
DING Hou-meng, YE Zhi-wen, LÜ Chun-xu. Synthetic improvement of FOX-7 with organic acid[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(1): 1-4.
- [17] 周诚, 黄新萍, 周彦水, 等. FOX-7 的晶体结构和热分解特性[J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 60-63.
ZHOU Cheng, HUANG Xin-ping, ZHOU Yan-shui, et al. Crystal structure and thermal decomposition of FOX-7 [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2007, 30(1): 60-63.
- [18] 任晓婷, 叶丹阳, 丁宁, 等. 溶剂效应对 FOX-7 晶体形貌影响的分子动力学模拟研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 272-278.
REN Xiao-ting, YE Dan-yang, DING Ning, et al. A molecular dynamics simulation of solvent effects on the crystal morphology of FOX-7 [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(2): 272-278.
- [19] Bemm U, Eriksson L. Phase transitions in FOX-7 [C] // Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, Bordeaux, 2001.
- [20] Kempa P B, Herrmann M, Molina F J, et al. Phase transitions of FOX-7 studied by X-ray diffraction and thermal analysis [C] // 35th International Annual Conference, ICT, Karlsruhe, 2004.

Effects of Five Kinds of Commonly Used Single-compound Explosives on Crystal Phase Transformation of FOX-7

HUANG Jing-lun¹, ZHOU Cheng², ZHANG Li-yuan¹, WANG Bo-zhou², MA Qing¹, LI Xiang-zhi²

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Five kinds of composite explosives containing 1,1-diamino-2,2-dinitroethene (FOX-7) were prepared by mixing FOX-7 with five kinds of commonly used single-compound explosives, cyclotrimethylenetrinitramine (RDX), triaminotrinitrobenzene (TATB), 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105), cyclotetramethylene tetranitramine (HMX), hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20) in the mass ratio of 1 : 1 respectively. Effect of temperature on the crystal phase transformation of FOX-7 in the composite explosives were studied by a variable X-ray powder diffraction technique. In the process of temperature increasing, the $\alpha \rightarrow \beta$ crystal phase transformation of FOX-7 in five kinds of composite explosives occurs at 105-125 °C. The $\beta \rightarrow \gamma$ crystal phase transformation of FOX-7 in FOX-7/HMX and FOX-7/LLM-105 composite explosives does not occur. In the process of temperature decreasing, the $\gamma \rightarrow \alpha$ crystal phase transformation of FOX-7 in FOX-7/RDX composite explosive occurs directly. The crystal phase transformation of FOX-7 in other three kinds of composite explosives is reversible in the cooling and heating process, i. e. in the cooling process, the crystal phase transformation occurs from γ or β to α .

Key words: 1,1-diamino-2,2-dinitroethene (FOX-7); explosive mixture; crystal phase transformation

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.10.006