

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.06.002

RDX 和 HMX 机械刺激临界反应阈值试验研究*

吴星亮^① 王红松^② 李文海^③ 徐飞扬^① 蒋宇轩^① 徐 森^①
刘大斌^① 刘 英^③ 蔡 佩^④ 成文峰^④

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)
②南京海关危险货物与包装中心(江苏常州,213022)
③中国兵器工业火炸药工程与安全技术研究院(北京,100053)
④江西省赣华安全科技有限公司(江西南昌,330001)

[摘 要] 为了研究 RDX 和 HMX 在机械刺激下的临界反应阈值以及丙酮重结晶工艺对它们的影响,采用 BAM 撞击感度仪和摩擦感度仪测试了不同温度条件下的临界撞击能量和临界摩擦力。结果显示,80、60、40 ℃ 和 25 ℃ 下,RDX 的临界撞击能量分别为 5.0、7.5、7.5、7.5 J,HMX 的分别为 4.0、4.0、5.0、5.0 J;RDX 的临界摩擦力分别为 120、120、128、144 N,HMX 的分别为 108、108、108、120 N。丙酮重结晶后,RDX 在 25 ℃ 的临界撞击能量和临界摩擦力分别为 5.0 J、128 N;HMX 在 80、60、40 ℃ 和 25 ℃ 下的临界撞击能量均为 7.5 J,临界摩擦力分别为 108、108、120、128 N。撞击感和摩擦感度的结果表明:在 25~80 ℃ 范围内,RDX 和 HMX 的机械感度随着温度的提高呈下降趋势,重结晶工艺对 RDX 和 HMX 的机械感度存在着一定的影响。

[关键词] 含能材料;撞击感度;摩擦感度;安全性

[分类号] TQ560.7

Experimental Study on Critical Response Threshold of RDX and HMX under Mechanical Stimulation

WU Xingliang^①, WANG Hongsong^②, LI Wenhai^③, XU Feiyang^①, JIANG Yuxuan^①, XU Sen^①,
LIU Dabin^①, LIU Ying^③, CAI Pei^④, CHENG Wenfeng^④

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)
②Nanjing Customs Testing Center for Dangerous Goods and Packaging (Jiangsu Changzhou, 213022)
③Institute of Explosive Engineering and Safety Technology, China North Industries Group Co., Ltd. (Beijing, 100053)
④Jiangxi Ganhua Security Technology Co., Ltd. (Jiangxi Nanchang, 330001)

[ABSTRACT] To study critical response threshold of RDX and HMX under mechanical stimulation and their variations under the influence of acetone recrystallization process, BAM fallhammer and BAM friction apparatus were used to test the critical impact energy and critical friction at different temperatures. Results show that, at 80, 60, 40 ℃ and 25 ℃, critical impact energies of RDX are 5.0, 7.5, 7.5, 7.5 J, and those of HMX are 4.0, 4.0, 5.0, 5.0 J, respectively. Critical frictions of RDX are 120, 120, 128, 144 N, and those of HMX are 108, 108, 108, 120 N, respectively. After acetone recrystallization, critical impact energy and the critical friction of RDX at 25 ℃ are 5.0 J and 128 N, respectively. Critical impact energies of HMX at 80, 60, 40 ℃ and 25 ℃ are 7.5 J, and critical frictional forces are 108, 108, 120 N and 128 N, respectively. Results of impact sensitivity and friction sensitivity indicate that the overall mechanical sensitivities of RDX and HMX show a downward trend with increasing temperature in the range of 25-80 ℃, and the recrystallization process has a certain influence on the mechanical sensitivity of RDX and HMX.

[KEYWORDS] energetic materials; impact sensitivity; friction sensitivity; safety

* 收稿日期:2020-04-28
第一作者:吴星亮(1994-),男,博士,主要从事炸药性能及炸药爆炸输出特性研究。E-mail:wuxingliang94@163.com
通信作者:徐森(1981-),男,副教授,硕士,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:xusen@njust.edu.cn

引言

机械刺激是引发含能材料意外事故的重要因素之一,而对应的机械感度则决定了含能材料能否安全使用。在含能材料研发、生产和使用过程中,其环境会发生不同程度的变化,如温度、湿度变化等。这些因素会导致含能材料的机械感度发生改变,影响含能材料的实际应用安全性。因此,研究含能材料在不同温度条件下的机械刺激临界反应阈值,对含能材料的使用及运输生产过程中安全性评估具有重要意义。

目前,国内外主要研究了粒度、含湿量、制备工艺、包覆材料等对含能材料机械感度的影响^[1-8]。An 等^[9]研究了纳米 CL-20/HMX 共晶炸药的机械感度,结果显示,共晶物的感度比纯 HMX 显著降低。Xie 等^[10]将 FOX-7 掺入到 NEPE 推进剂中,并对其敏感性和稳定性进行了研究,结果表明,添加 FOX-7 可以显著改善 NEPE 的感度和稳定性。刘玉存等^[11]的研究表明,随着 RDX 粒度的减小,其撞击感度和摩擦感度均随之降低。赵雪等^[12]采用环己酮重结晶法制备了球形 RDX,其撞击感度和摩擦感度均略有降低。张么玄等^[13]研究了含湿量对 RDX 的机械感度的影响,结果表明,RDX 的机械感度与含湿量呈负相关。

国内外关于温度对含能材料机械感度的研究鲜有报道,而含能材料在实际应用和生产过程中,温度的改变是不可避免的。在研究机械感度的试验方法上,国内爆炸品行业采用前苏联的撞击和摩擦感度试验方法,试验标准为 GJB772A—1997^[14],具体试验方法为爆炸概率法和特性落高法^[15]。尽管现有的机械感度试验方法能够确定不同含能材料机械感度的相对关系,但无法获得含能材料在机械刺激下的临界反应能量,这也导致现有的含能材料感度特性数据无法为爆炸品安全生产提供直接的数据支撑。而国外学者通过 BAM 撞击感度仪和摩擦感度仪来获得含能材料在机械刺激下的临界反应能量。Ahmed 等^[16]研究了 GAP 对 RDX、HMX 和 CL-20 稳定性和爆炸特性的影响,结果显示,GAP 能在一定程度上降低 HMX 和 CL-20 的感度,但含 HMX 和 CL-20 的 PBX 炸药的撞击感度仍然小于 10 J。相关研究^[17-18]表明,通过溶剂重结晶 RDX 和 HMX 能改变它们的晶体形状,改善含能材料的机械感度。如丙酮溶液重结晶后^[17],HMX 由亚稳态的 α 晶型(斜方体)转变为稳定的 β 晶型(单斜晶体)。

以 RDX 和 HMX 为研究对象,通过 BAM 撞击感度仪和摩擦感度仪获取不同温度下 RDX 和 HMX 的临界反应能量。同时,由于丙酮具有沸点低、能耗低、来源丰富等优点^[19],以丙酮为重结晶溶剂,探索丙酮重结晶工艺对相应温度下 RDX 和 HMX 临界反应能量的影响。为 RDX 基和 HMX 基混合炸药的生产、储运、使用和处置过程的相关技术参数的设定提供直接的数据支撑。

1 试验样品及装置

1.1 试验样品

针对广泛使用的单质炸药 RDX 和 HMX,选择常见的 V 类 RDX 和 II 类 HMX 作为研究对象。试验样品的信息见表 1。

表 1 试验样品
Tab. 1 Test samples

| 样品 | 组分 | 分类 | 密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 粒度/ μm |
|----------------|-----|--------|--------------------------------------------|----------------------|
| 1 [#] | RDX | 用丙酮重结晶 | 1.82 | 15 ~ 60 |
| 2 [#] | RDX | RDX-V | 1.81 | 5 ~ 45 |
| 3 [#] | HMX | HMX-II | 1.83 | 20 ~ 50 |
| 4 [#] | HMX | 用丙酮重结晶 | 1.85 | 35 ~ 65 |

样品 1[#]和样品 4[#]是通过丙酮重结晶后获得的,生产工艺流程如图 1 所示。称取适量的 RDX-V 或 HMX-II,加入丙酮并加热搅拌,使 RDX 或 HMX 充分溶解形成溶液,趁热过滤一次去除杂质,继续加热搅拌。然后降低温度并增加搅拌速率,生成晶体,过滤,固体烘干,得到重结晶后的 RDX 或 HMX。

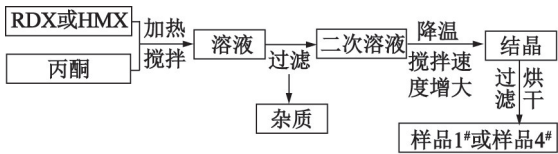


图 1 RDX 或 HMX 重结晶工艺流程

Fig. 1 Technological flow chart of RDX or HMX

将样品装配在试验器具中,并放置于温度为 25、40、60 ℃ 和 80 ℃ 的真空烘箱中,保温 3 h 备用。

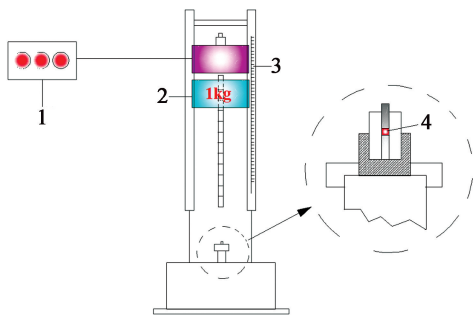
1.2 试验装置

1.2.1 撞击感度试验

采用德国 BAM 撞击感度仪,开展样品的临界撞击能量试验,装置示意图见图 2。

1.2.2 摩擦感度试验

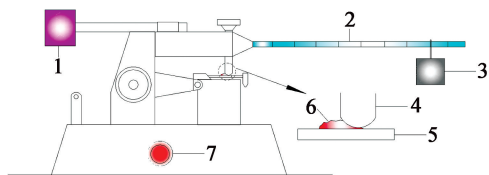
采用德国 BAM 摩擦感度仪,开展样品的临界摩擦力试验,装置示意图见图 3。



1 – 开关;2 – 落锤;3 – 分度尺;4 – 样品。

图2 BAM 撞击感度仪示意图

Fig.2 Schematic diagram of BAM impact sensitivity instrument



1 – 平衡砝码;2 – 荷重臂;3 – 荷重;4 – 瓷棒;
5 – 瓷板;6 – 样品;7 – 开关。

图3 BAM 摩擦感度仪示意图

Fig.3 Schematic diagram of BAM friction sensitivity instrument

1.2.3 试验方法

样品在每个试验条件下最多开展 6 发重复试验。如果发生爆炸或燃烧反应(即为“+”反应),则相应降低能量刺激水平(即更换试验条件),重新开展试验;如果样品在连续 6 发试验中都没有剧烈反应(即为“-”反应),则相应提高能量刺激水平,重新开展试验;直至得到样品的临界撞击能量。

样品的临界撞击能量计算如下:

$$E_i = w \cdot h \cdot 10。$$
(1)

式中: E_i 为样品的撞击能量,J; w 为落锤的质量,kg; h 为落锤的高度,cm。

$$E_{c,i} = E_{i1} > E_{i2}。$$
(2)

式中: $E_{c,i}$ 为样品的临界撞击能量,J; E_{i1} 为在特定条件下进行的最多 6 次试验中,样品发生爆炸或燃烧时的撞击能量,J; E_{i2} 为与 E_{i1} 相邻的撞击能量,且样品在 6 次试验中未发生燃烧或爆炸,J。

样品的临界摩擦力计算如下:

$$F = w_1。$$
(3)

式中: F 为样品的摩擦力,N; w_1 为荷重,N。

$$F_c = F_1 > F_2。$$
(4)

式中: F_c 为样品的临界摩擦力,N; F_1 为一定条件下进行的最多 6 次摩擦试验中,样品发生爆炸或燃烧的摩擦力,N; F_2 为与 F_1 相邻的摩擦力,且样品在 6

次试验中未发生燃烧或爆炸,N。

2 结果与讨论

2.1 临界撞击能量的试验结果与分析

由表 2 可知,在 4 J 撞击能量作用下,样品 1[#]在连续 6 发试验中均未发生燃烧和爆炸反应;在 5 J 撞击能量作用下,3 发试验中有 1 发发生了“+”反应;结果显示,样品 1[#]的临界撞击能量为 5 J,这与文献[1]中的标准值一致,表明试验装置具有一定的准确性。

表 2 RDX 的临界撞击能量试验结果

Tab.2 Test results of critical impact energy of RDX

| 样品 | 试验条件 | | | 结果 | $E_i /$ J | $E_{c,i} /$ J |
|----------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----|--------------|------------------|
| | $T / ^\circ\text{C}$ | w / kg | h / cm | | | |
| 1 [#] | 25 | 1 | 50 | 1/3 | 5.0 | 5.0 |
| | | 1 | 40 | 0/6 | 4.0 | |
| | | 1 | 40 | 0/6 | 4.0 | |
| | | 1 | 50 | 0/6 | 5.0 | |
| | | 5 | 20 | 1/2 | 10.0 | |
| | | 5 | 30 | 1/1 | 15.0 | |
| | 25 | 5 | 15 | 1/1 | 7.5 | 7.5 |
| | | 5 | 20 | 1/4 | 10.0 | |
| | | 5 | 15 | 1/2 | 7.5 | |
| 2 [#] | 40 | 1 | 50 | 0/6 | 5.0 | 7.5 |
| | | 1 | 40 | 0/6 | 4.0 | |
| | | 1 | 50 | 0/6 | 5.0 | |
| | 60 | 5 | 15 | 1/1 | 7.5 | 7.5 |
| | | 5 | 15 | 1/3 | 7.5 | |
| | 80 | 1 | 50 | 1/3 | 5.0 | 5.0 |
| | | 1 | 40 | 0/6 | 4.0 | |

由表 2 可知,样品 2[#]在 80、60、40 ℃ 和 25 ℃ 下的临界撞击能量分别为 5.0、7.5、7.5 J 和 7.5 J。当样品温度在 25 ~ 60 ℃ 之间,样品 2[#]的临界能量均为 7.5 J;当温度升到 80 ℃ 时,样品 2[#]的临界撞击能量降为 5.0 J;表明样品 2[#]在高温条件下对撞击刺激更敏感。对比样品 1[#]和样品 2[#]在 25 ℃ 条件下的试验结果,样品 1[#]的临界撞击能量更低、更敏感,说明用丙酮重结晶工艺处理 RDX,不利于提高 RDX 的临界撞击能量,反而会增加 RDX 的撞击感度。

样品 3[#]的试验结果如表 3 所示。HMX 在 80、60、40 ℃ 和 25 ℃ 下的临界撞击能量分别为 4.0、4.0、5.0 J 和 5.0 J,表明随着 HMX 温度的升高,样品对撞击刺激更敏感,临界撞击能量下降。对比样品 2[#]和样品 3[#]的试验结果可以发现,HMX 的临界机械撞击能量比 RDX 低,说明 HMX 对机械撞击刺激比 RDX 更敏感。

表 3 HMX 的临界撞击能量试验结果

Tab.3 Test results of critical impact energy of HMX

| 样品 | 试验条件 | | | 结果 | E_i/J | $E_{c,i}/\text{J}$ |
|----------------|--------------------|---------------|---------------|-----|----------------|--------------------|
| | $T/^\circ\text{C}$ | w/kg | h/cm | | | |
| 3 [#] | 25 | 5 | 20 | 1/1 | 10.0 | 5.0 |
| | | 5 | 15 | 1/1 | 7.5 | |
| | | 1 | 50 | 1/3 | 5.0 | |
| | | 1 | 40 | 0/6 | 4.0 | |
| | 40 | 1 | 40 | 0/6 | 4.0 | 5.0 |
| | | 1 | 50 | 2/6 | 5.0 | |
| | 60 | 1 | 40 | 1/1 | 4.0 | 4.0 |
| | | 1 | 30 | 0/6 | 3.0 | |
| 4 [#] | 80 | 1 | 30 | 0/6 | 3.0 | 4.0 |
| | | 1 | 40 | 1/6 | 4.0 | |
| | | 1 | 50 | 1/1 | 5.0 | |
| | 25 | 1 | 50 | 0/6 | 5.0 | 7.5 |
| | | 5 | 15 | 1/1 | 7.5 | |
| | 40 | 1 | 50 | 0/6 | 5.0 | 7.5 |
| | | 5 | 15 | 1/1 | 7.5 | |
| | 60 | 5 | 15 | 1/1 | 7.5 | 7.5 |
| | | 1 | 50 | 0/6 | 5.0 | |
| | 80 | 1 | 50 | 0/6 | 5.0 | 7.5 |
| | | 5 | 15 | 1/1 | 7.5 | |

样品 4[#]是用丙酮重结晶的 HMX。由表 3 可知,样品 4[#]在 80、60、40 ℃ 和 25 ℃ 下的临界撞击能量均为 7.5 J,由此可见,在 25 ~ 80 ℃ 范围内,样品温度对当前重结晶工艺处理的 HMX 临界撞击能量无显著影响。对比样品 3[#]和样品 4[#]的试验结果,可以发现,重结晶后的 HMX 临界撞击能量显著提高,说明重结晶工艺有利于降低 HMX 的撞击感度,这与 RDX 的特性不同。

2.2 临界摩擦力的试验结果与分析

表 4 为 RDX 样品在不同温度下的临界摩擦力试验结果。表 4 表明,样品 1[#]在 120 N 的摩擦作用下,未发生“+”反应;在 128 N 的试验条件下,发生了“+”反应;即样品 1[#]的临界摩擦力为 128 N,这与文献[1]中给出的标准参考值完全一致,验证了试验系统的准确性。

在 80、60、40 ℃ 和 25 ℃ 下,样品 2[#]的临界摩擦力分别为 120、120、128 N 和 144 N。样品 2[#]的临界摩擦力随着样品温度升高而下降,表明在高温条件下,样品 2[#]的摩擦感度会升高。对比样品 1[#]和样品 2[#]在 25 ℃ 条件下的结果可以发现,丙酮重结晶后的 RDX 临界摩擦力降低了,说明重结晶工艺处理不利于降低 RDX 的摩擦感度。

表 5 为 HMX 样品在不同温度下的临界摩擦力试验结果。表 5 中,在 80、60、40 ℃ 和 25 ℃ 下样品

表 4 RDX 的临界摩擦力试验结果

Tab.4 Test results of critical friction of RDX

| 样品 | 试验条件 | | 结果 | F_c/N |
|----------------|--------------------|----------------|-----|----------------|
| | $T/^\circ\text{C}$ | w_1/N | | |
| 1 [#] | 25 | 120 | 0/6 | 128 |
| | | 128 | 1/1 | |
| | | 144 | 1/4 | |
| | | 128 | 1/2 | |
| | 25 | 128 | 0/6 | 144 |
| | | 160 | 1/1 | |
| | | 144 | 1/4 | |
| | | 144 | 1/4 | |
| 2 [#] | 40 | 160 | 1/5 | 128 |
| | | 144 | 1/6 | |
| | | 128 | 1/3 | |
| | | 120 | 0/6 | |
| | 60 | 128 | 1/2 | 120 |
| | | 120 | 2/3 | |
| | | 112 | 0/6 | |
| | | 112 | 0/6 | |
| | 80 | 112 | 0/6 | 120 |
| | | 120 | 1/3 | |
| | | 128 | 1/1 | |
| | | 128 | 1/1 | |

表 5 HMX 的临界摩擦力试验结果

Tab.5 Test results of critical friction of HMX

| 样品 | 试验条件 | | 结果 | F_c/N |
|----------------|--------------------|----------------|-----|----------------|
| | $T/^\circ\text{C}$ | w_1/N | | |
| 3 [#] | 25 | 120 | 1/3 | 120 |
| | | 112 | 0/6 | |
| | | 144 | 1/1 | |
| | | 120 | 1/1 | |
| | 40 | 112 | 1/1 | 108 |
| | | 108 | 1/3 | |
| | | 96 | 0/6 | |
| | | 96 | 0/6 | |
| | 60 | 108 | 1/1 | 108 |
| | | 108 | 1/1 | |
| | | 108 | 1/6 | |
| | | 112 | 1/3 | |
| 4 [#] | 25 | 120 | 0/6 | 128 |
| | | 128 | 1/2 | |
| | | 144 | 1/1 | |
| | | 144 | 1/1 | |
| | 40 | 160 | 1/2 | 120 |
| | | 144 | 1/1 | |
| | | 128 | 1/4 | |
| | | 120 | 1/2 | |
| | 60 | 112 | 0/6 | 108 |
| | | 112 | 1/6 | |
| | | 108 | 1/2 | |
| | | 96 | 0/6 | |
| | 80 | 96 | 0/6 | 108 |
| | | 108 | 1/5 | |

3#的临界摩擦力分别为 108、108、108 N 和 120 N。在 40 ~ 80 ℃ 范围,样品 3#的临界摩擦力相同,但都比 25 ℃ 时较低,表明温度对 HMX 具有一定的影响。对比样品 2#和样品 3#的试验结果可知,样品 2#的临界摩擦力相对较高,HMX 对机械摩擦刺激比 RDX 更敏感。

样品 4#在 80、60、40 ℃ 和 25 ℃ 下的临界摩擦力分别为 108、108、120 N 和 128 N。对比样品 3#和样品 4#的结果可以发现,样品 4#在 25 ℃ 和 40 ℃ 下的临界摩擦力相对较高,说明重结晶工艺有利于降低 HMX 在该温度下的摩擦感度。

3 结论

1)在 25 ~ 80 ℃ 范围内,RDX 和 HMX 的临界机械撞击能量分别为 5.0~7.5 J 和 4.0~5.0 J,RDX 和 HMX 的临界机械摩擦力分别为 120~144 N 和 108~120 N;随着温度的提高,RDX 和 HMX 的机械感度呈下降趋势,但温度对 HMX 的撞击感度影响较小。

2)重结晶工艺对 RDX 和 HMX 的机械感度存在着一定的影响。丙酮重结晶工艺在一定程度上能够提高 HMX 的临界撞击能量,并在 25~40 ℃ 范围内提高 HMX 的临界摩擦力,重结晶后的 HMX 机械感度有所降低;而丙酮重结晶工艺对 RDX 机械感度的改进无显著效果。

参 考 文 献

[1] TANG Y X, GAO H X, MITCHELL L A, et al. Enhancing energetic properties and sensitivity by incorporating amino and nitramino groups into a 1, 2, 4-oxadiazole building block[J]. *Angewandte Chemie*, 2016, 55(3): 1147-1150.

[2] KLAPÖTKE T M, KRUMM B, PFLÜGER C. Isolation of a moderately stable but sensitive zwitterionic diazonium tetrazolyl-1, 2, 3-triazolate[J]. *The Journal of Organic Chemistry*, 2016, 81(14): 6123-6127.

[3] GRUHNE M S, LOMMEL M, WURZENBERGER M H H, et al. OZM ball drop impact tester (BIT-132) vs. BAM standard method: a comparative investigation[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(1): 147-153.

[4] HE G S, YANG Z J, ZHOU X Y, et al. Polymer bonded explosives (PBXs) with reduced thermal stress and sensitivity by thermal conductivity enhancement with graphene nanoplatelets[J]. *Composites Science and Technology*,

2016, 131: 22-31.

[5] ZEMAN S, JUNGOVÁ M. Sensitivity and performance of energetic materials[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(3): 426-451.

[6] 金韶华, 王伟, 松全才. 含能材料机械撞击感度判据的认识和发展[J]. *爆破器材*, 2006, 35(6): 11-14.

JING S H, WANG W, SONG Q C. Understanding and development of criteria of impact sensitivity of energetic materials[J]. *Explosive Materials*, 2006, 35(6): 11-14.

[7] 周群, 王伯周, 周诚, 等. 球形化 NTO 晶体的制备及机械感度研究[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2019, 17(2): 23-26.

ZHOU Q, WANG B Z, ZHOU C, et al. Study on preparation of spherical NTO crystal and mechanical sensitivity[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2019, 17(2): 23-26.

[8] 张正中, 唐秋凡, 邓重清, 等. 不同粒度及包覆改性高氯酸铵的热分解性能和安全性能研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(5): 160-163.

ZHANG Z Z, TAN Q F, DENG C Q, et al. Study on thermal decomposition and safety property of AP with different granularity and coating modification[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(5): 160-163.

[9] AN C W, LI H Q, YE B Y, et al. Nano-CL-20/HMX cocrystal explosive for significantly reduced mechanical sensitivity[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2017, 2017: 3791320.

[10] XIE W X, ZHAO Y, ZHANG W, et al. Sensitivity and stability improvements of nepe propellants by inclusion of FOX-7[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2018, 43(3): 308-314.

[11] 刘玉存, 王建华, 安崇伟, 等. RDX 粒度对机械感度的影响[J]. *火炸药学报*, 2004, 27(2): 7-9.

LIU Y C, WANG J H, AN C W, et al. Effect of particle size of RDX on mechanical sensitivity[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2004, 27(2): 7-9.

[12] 赵雪, 芮久后, 冯顺山. 重结晶法制备球形化 RDX[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(1): 5-7.

ZHAO X, RUI J H, FEN S S. Recrystallization method for preparation of spherical RDX[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*. 2011, 31(1): 5-7.

[13] 张么玄, 杨毅, 陈松, 等. 含湿量对 RDX 的机械感度和热分解特性的影响[J]. *兵工自动化*, 2017(7): 5-8.

ZHANG Y X, YANG Y, CHEN S, et al. Effect of moisture content on mechanical sensitivity and thermal decomposition of RDX[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2017(7): 5-8.

