

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.06.001

# 高品质 RDX 的抗压性能研究\*

陈世雄<sup>①</sup> 钱 华<sup>①</sup> 芮久后<sup>②</sup> 刘大斌<sup>①</sup>

<sup>①</sup>南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

<sup>②</sup>北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室(北京,100081)

**[摘 要]** 研究了压药过程是否会破坏高品质黑索今(H-RDX)的完整性,导致 H-RDX 失去低感度优势。通过扫描电镜和激光粒度仪对单个 H-RDX 颗粒、H-RDX 和 H-RDX 造型粉在压制前、后的表面形貌和粒度进行了表征,测试了压制前、后的撞击、摩擦和冲击波感度,并与普通 RDX 进行比较。研究表明:40 MPa 压药压力已经引起了 H-RDX、普通 RDX 及造型粉颗粒的碎裂和损伤。H-RDX 的抗压性能比普通 RDX 更好,虽然压药过程会破坏 H-RDX 和普通 RDX 颗粒的完整性,但 H-RDX 依旧能保持安全性能优势,且经过包覆后,安全性能可以进一步提升。单个 H-RDX 颗粒的耐压压力(不低于 400 MPa)远高于单个普通 RDX 颗粒(小于 40 MPa);H-RDX 及 H-RDX 造型粉在颗粒集体中的碎裂程度也分别低于普通 RDX 25% 和 65% 以上。经过压制后,H-RDX 比普通 RDX 的撞击感度低 50%,摩擦感度低 25%。H-RDX 造型粉压制的高聚物黏结炸药(PBX)的冲击波感度低于普通 RDX 基 PBX。压制后与压制前相比,H-RDX 的撞击感度降低 50%,摩擦感度升高 17%,冲击波感度增加 16%;而使用黏合剂包覆后,冲击波感度可降低约 29%。

**[关键词]** 高品质 RDX;压药;抗压性能;机械感度;冲击波感度

**[分类号]** TJ55;O381

## Research on the Compressive Performance of H-RDX

CHEN Shixiong<sup>①</sup>, QIAN Hua<sup>①</sup>, RUI Jiuhou<sup>②</sup>, LIU Dabin<sup>①</sup>

<sup>①</sup>School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

<sup>②</sup>State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

**[ABSTRACT]** It was investigated that whether the pressing process would disrupt the integrity of high-quality RDX (H-RDX), thereby leading to its loss of low sensitivity advantage. The surface morphology and particle size of individual H-RDX particles, H-RDX and H-RDX molding powders before and after compaction were characterized using SEM and laser particle size analyzer. Their impact sensitivity, friction sensitivity, and shock wave sensitivity before and after compaction were tested and compared with conventional RDX. The results show that a pressure of 40 MPa has already caused particle fragmentation and damage in H-RDX, conventional RDX, and their molding powder. Compression resistance of H-RDX is better than that of conventional RDX. Although the compaction process would damage the integrity of H-RDX and conventional RDX particles, H-RDX could still maintain its safety performance advantage. The safety performance of H-RDX after coating can be further improved. The compressive strength of a single H-RDX particle (no less than 400 MPa) is much higher than that of a single conventional RDX particle (less than 40 MPa). The degree of fragmentation of H-RDX and its molding powder in particle aggregates is also lower than that of conventional RDX by 25% and more than 65%, respectively. After compaction, the impact sensitivity and the friction sensitivity of H-RDX are 50% and 25% lower than those of conventional RDX, respectively. The shock wave sensitivity of polymer bonded explosive (PBX) pressed with H-RDX molding powder is lower than that of conventional RDX-based PBX. After compaction, the impact sensitivity of pure H-RDX decreases by 50%, the friction sensitivity increases by 17%, and the shock wave sensitivity increases by 16%. After coating with adhesive, the shock wave sensitivity of H-RDX could reduce by about 29%.

**[KEYWORDS]** H-RDX; pressing; compressive resistance; mechanical sensitivity; shock wave sensitivity

\* 收稿日期:2023-04-07

第一作者:陈世雄(1989-),男,博士研究生,主要从事高能炸药制备及应用研究。E-mail:shixiong\_chen@126.com

通信作者:刘大斌(1963-),男,教授,博导,主要从事装药技术研究。E-mail:dabinl63@vip.sina.com

## 0 引言

随着现代战争对弹药战场生存能力的要求不断提高,低易损弹药的需求日益增加。为实现弹药低易损化,需要降低装药的感度。其中,改善单质炸药的晶体品质、减少晶体缺陷成为重要的技术途径之一<sup>[1]</sup>。因此,各国在改善黑索今(RDX)晶体品质方面开展了大量研究<sup>[2-3]</sup>,成功制备出高品质 RDX(简称 H-RDX)<sup>[4-5]</sup>。研究表明,H-RDX 颗粒密实,晶体缺陷少,表面光滑,具有低机械感度和低冲击波感度的特点<sup>[3,6]</sup>。H-RDX 应用于熔铸炸药和浇注炸药,颗粒完整性得到很好的保持,也证实了 H-RDX 低冲击波感度的优势<sup>[7-8]</sup>。然而,压装药的压药过程可能会破坏 H-RDX 颗粒的完整性,导致 H-RDX 失去原有的安全性能优势。因此,需开展 H-RDX 的抗压性能研究。

基于粉末材料压制过程中颗粒间的相互力学作用,压缩刚度法将炸药压制过程分为 3 个阶段:初始流动填隙重排阶段、中间互相挤压破碎阶段和后期压实阶段<sup>[9-10]</sup>。本文中,根据该原理重点考察了 H-RDX 在压制过程中第二阶段的破碎情况,以及由此带来的感度变化,为 H-RDX 在压装高聚物黏结炸药(PBX)中的应用提供技术支持。

## 1 试验部分

### 1.1 试验设计

首先,控制压药压力(简称压力),分别对 H-RDX、普通 RDX、H-RDX 造型粉、普通 RDX 造型粉、单个 H-RDX 颗粒和单个普通 RDX 颗粒在钢模中进行压制。然后,用适当的方法分散药柱,获得压制后的 RDX 颗粒。随后,利用扫描电镜(SEM)对比分析压制前、后 RDX 的形貌,并对是否碎裂进行定性分析。同时,使用激光粒度仪测试压制前、后 RDX 的粒度分布变化。最后,测试压制前、后 RDX 的机械感度和冲击波感度,并与碎裂程度进行关联。

### 1.2 原料及样品制备

H-RDX,70~100 目和 10~40 目,密度 1.798 g/cm<sup>3</sup>,中国兵器工业集团第 375 厂;普通 RDX,70~100 目和 10~40 目,密度 1.781 g/cm<sup>3</sup>,甘肃银光化学工业集团有限公司;氟橡胶,FKM DS2603,山东华夏神舟新材料有限公司;乙酸乙酯、硬脂酸,分析纯;三醋酸纤维树脂片,厚度 0.193 mm。

按照质量比  $m(\text{RDX}) : m(\text{黏结剂}) : m(\text{钝感剂}) = 94.5 : 5.0 : 0.5$ ,采用溶液水悬浮法制备 H-RDX 基造型粉和普通 RDX 基造型粉<sup>[6,11]</sup>。采用不同压力将 70~100 目的 RDX 及造型粉压制成  $\phi 10$  mm 和  $\phi 25$  mm 的白品(纯 RDX)药柱和高聚物黏结炸药(PBX)药柱。将 10~40 目的单个 RDX 颗粒用石蜡包覆后,采用不同压力压制成  $\phi 10$  mm 的单个 RDX 颗粒/石蜡药柱,以测试无颗粒间挤压状况的单个 RDX 颗粒的耐压压力(压制过程中使得 RDX 颗粒不碎裂的最大压力)。

### 1.3 压后 RDX 颗粒的获取方法

设计了不同的分散方法,以获得具有较好分散性的压后 RDX 颗粒。

白品药柱使用机械分散法:将白品药柱在饱和 RDX 水溶液中浸泡并掰开成小块;再用玻璃棒轻轻搅拌,将 RDX 分散成颗粒状;最后,抽滤、烘干和过 70 目筛,获得完全分散的 RDX 颗粒。

PBX 药柱采用 GJB 772A—1997<sup>[12]</sup>方法 107.1 中的溶剂萃取法进行分散:用 RDX 的乙酸乙酯饱和溶液浸泡 PBX 药柱,并轻轻搅拌分散;然后,用乙酸乙酯饱和溶液洗涤 2 次;最终,烘干滤杯中的剩余物并过 70 目筛,获得压后的 RDX 颗粒。

对于单个 RDX 颗粒/石蜡药柱:首先,经过加热融化,初步去除药柱中的石蜡;然后,通过萃取法进一步去除 RDX 表层的石蜡,得到比较纯净的压后 RDX 颗粒。

### 1.4 测试方法

分别采用 Quanta FEG250 扫描电镜和 Master-size 3000 激光粒度仪对样品的形貌和粒度分布进行表征。采用《关于危险货物运输的建议书 试验和标准手册》<sup>[13]</sup>试验 3(a)(ii)和试验 3(b)(i)的方法测试撞击感度和摩擦感度。采用 GJB 772A—1997<sup>[12]</sup>方法 605.1 卡片式隔板的试验条件和二分法<sup>[14]</sup>测试样品的冲击波感度:以  $N$  片隔板时 3 发中至少有 1 发爆炸、 $(N+10)$  片隔板时 3 发全部不爆炸为判据,用二分法缩小至 10 片隔板时出现稳定的相反结果,则冲击波临界起爆隔板数量

$$G_{50} = \frac{N + (N + 10)}{2} = N + 5. \quad (1)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 H-RDX 的抗压性能

#### 2.1.1 压力对 H-RDX 形貌的影响

图 1 为用 SEM 表征的经 0、40、200 MPa 和 320

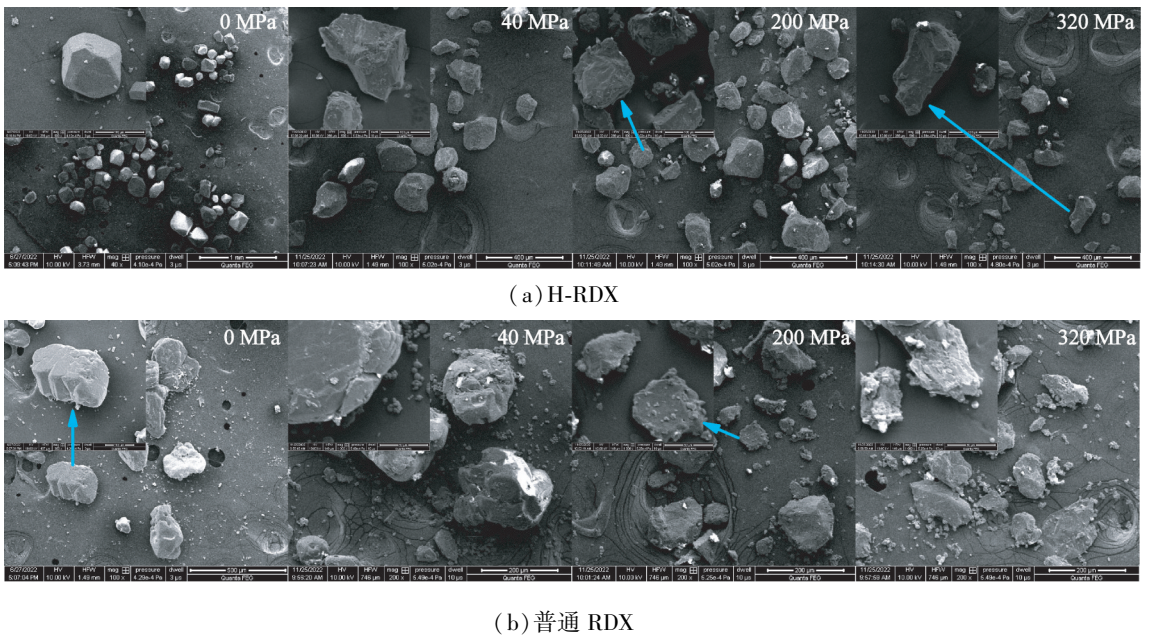


图 1 不同压力压制后 H-RDX 和普通 RDX 的形貌  
Fig. 1 Morphology of H-RDX and conventional RDX under different pressures

MPa 压力压制后的 RDX 颗粒, 从而探究不同压力下 H-RDX 和普通 RDX 的碎裂特性。

由图 1 可见, H-RDX 原料晶体呈规则多面体状, 表面平整。40 MPa 压制后的 H-RDX 颗粒边缘有凹陷和断裂痕迹, 已经发生碎裂。200 MPa 压制后的 H-RDX 颗粒断面上有层纹和凸起或凹陷, 碎裂加剧。320 MPa 压制后的 H-RDX 颗粒已完全碎裂, 碎裂颗粒形态不规则, 断面上片层堆叠, 有即将脱落的小颗粒, 边缘呈锯齿状。

普通 RDX 原料是形状不规则的颗粒, 表面局部有凹坑或凸起。40 MPa 压力下, 普通 RDX 颗粒形状大多保持完整, 但边缘出现裂纹, 说明已经损伤。压力为 200 MPa 时, 普通 RDX 几乎完全碎裂, 大部分呈片状, 断裂线条明显。320 MPa 压力下, 普通 RDX 已完全碎裂, 碎粒有锥角且断面纹理清晰。

综上所述, 40 MPa 压力已经引起了 H-RDX 和普通 RDX 颗粒的损伤和碎裂; 随着压力增加, 晶体完整度降低, 碎裂程度加剧。

### 2.1.2 压力对 H-RDX 颗粒粒径的影响

为进一步定量研究压力对 H-RDX 在颗粒集合体中碎裂程度的影响规律, 采用激光粒度仪测试了不同压力压制后颗粒的粒径分布, 结果见图 2。

由图 2 可知: 与未压制相比, 经过 40 MPa 以上压力压制后, H-RDX 颗粒粒径小于  $60 \mu\text{m}$  (远小于原料  $D_{10}$  粒径  $127 \mu\text{m}$ ) 分布明显增加; 普通 RDX 颗粒粒径小于  $90 \mu\text{m}$  (远小于原料  $D_{10}$  粒径  $162 \mu\text{m}$ ) 分布也明显增加。小粒径颗粒数量的大幅增加意味

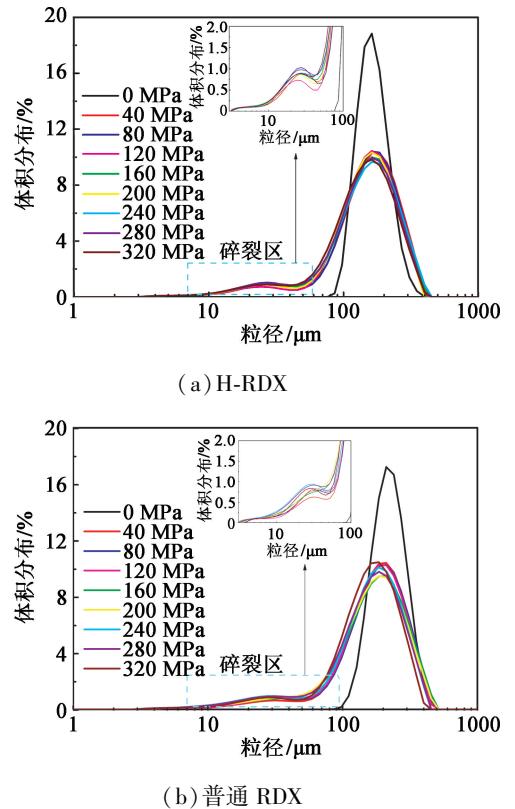


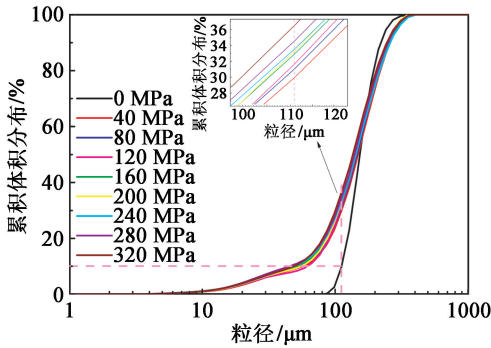
图 2 不同压力压制后 RDX 的粒径分布  
Fig. 2 Particle size distribution of RDX after compression under different pressures

着 H-RDX 和普通 RDX 已经碎裂, 这与形貌观察结果吻合。这些小粒径颗粒是 RDX 晶体颗粒碎裂产生的, 称该小粒径范围为碎裂区。

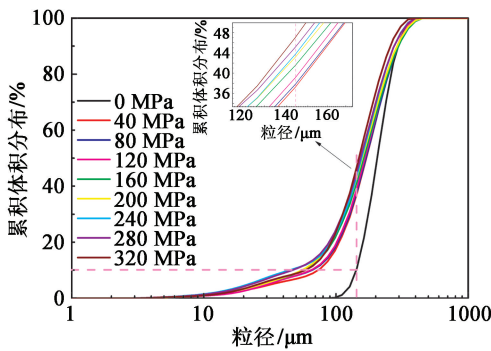
虽然经不同压力压制后的 RDX 颗粒尺寸分布

和组成相似,但仍然可以从碎裂区曲线中观察到一些细微的差异。

为了更细致地研究碎裂程度,设计了一种基于小颗粒增量的碎裂增量表达方法。假定粒径小于压制前 RDX 晶体  $D_{10}$  的颗粒为小颗粒。压制前,小颗粒的累积体积分布为 10%; 压制后的小颗粒累积体积分布为  $X\%$ 。则碎裂小颗粒的增量为  $(X-10)\%$ , 以小颗粒的增量来评估碎裂程度。根据该方法绘制不同压力压制的 H-RDX 和普通 RDX 的累积体积分布-粒径曲线,在  $Y$  轴累积体积分布为 10% 处绘制垂线与 0 MPa 曲线相交,然后通过该交点绘制  $X$  轴垂线,与不同曲线相交,如图 3 所示。最后,读取压制前  $D_{10}$  粒径的颗粒对应的压后颗粒的累积体积分布  $X\%$ , 计算各个压力压制后的 RDX 小颗粒增量。见表 1。



(a) H-RDX



(b) 普通 RDX

图 3 不同压力压制后 RDX 颗粒的累积体积分布

Fig. 3 Cumulative volume distribution of RDX after compression under different pressures

由表 1 可知,40 MPa 压力已经引起了 H-RDX 和普通 RDX 颗粒的损伤和碎裂。在超过 40 MPa 的相同压力下,H-RDX 碎裂小颗粒的数量比普通 RDX 降低了 25% 以上,表明 H-RDX 比普通 RDX 更难被压碎,所以 H-RDX 在颗粒集合体中的抗压性能更好。可能是由于 H-RDX 内部缺陷较少,颗粒密实度高,凝聚强度更高。此外,随着压力的增加,小颗粒

表 1 不同压力压制后的 RDX 小颗粒增量

Tab. 1 Increment of small RDX particles under different pressures

压力/ MPa	$X$		小颗粒增量/%	
	H-RDX	普通 RDX	H-RDX	普通 RDX
0	10.0	10.0	0	0
40	29.8	37.2	19.8	27.2
80	30.9	37.8	20.9	27.8
120	31.5	39.1	21.5	29.1
160	32.8	41.5	22.8	31.5
200	33.1	43.2	23.1	33.2
240	33.4	43.7	23.4	33.7
280	34.4	45.1	24.4	35.1
320	36.4	47.1	26.4	37.1

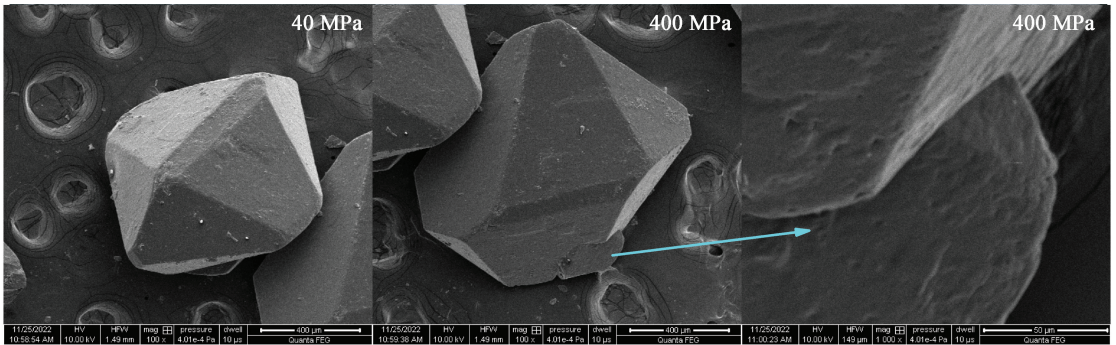
增量变大,碎裂程度加剧,但增幅变小。

## 2.2 单个 H-RDX 颗粒的抗压性能

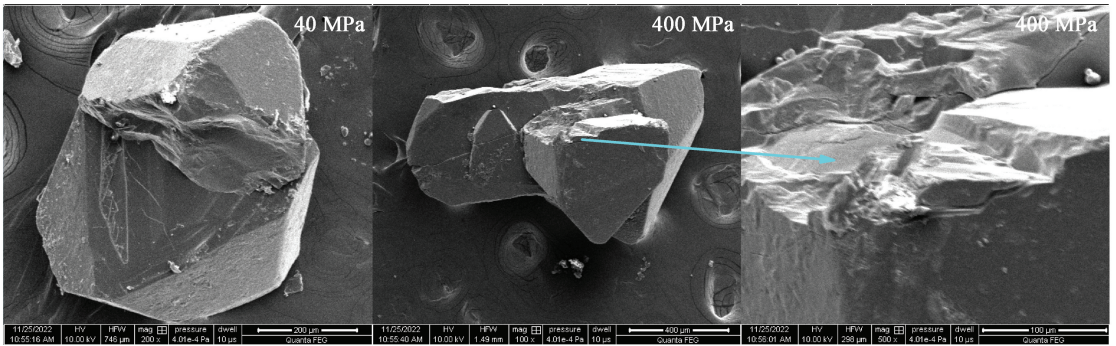
选取 40 MPa 和 400 MPa 压力分别压制了 3 组粒径相近的单个 H-RDX 颗粒/石蜡药柱和单个普通 RDX 颗粒/石蜡药柱;然后,分离获取压后 RDX 颗粒;最后,利用 SEM 观察压后 RDX 颗粒的形貌。典型的 1 组结果如图 4 所示。需要说明的是,使用 SEM 表征需要进行喷金处理,且拍照过程的强辐射会损伤 RDX 颗粒。所以,SEM 扫描后的 RDX 颗粒不能再次用于制备药柱。因此,对单个 RDX 颗粒的压前形貌不再表征,而是结合图 1 中 H-RDX 和普通 RDX 原料形貌特征进行判断。

观察图 4(a) 可知,经 40 MPa 和 400 MPa 压制后,单个 H-RDX 颗粒呈规则多面体状,表面无明显裂纹或碎裂特征。需要说明的是,400 MPa 压制后的 H-RDX 右下角凸起是原始颗粒就存在的,并非碎裂引起。单个普通 RDX 颗粒经 40 MPa 压制后,表面存在局部碎裂;经 400 MPa 压制后,出现明显碎裂纹理和贯穿性裂纹。可见,单个 H-RDX 颗粒能耐 400 MPa 压力而不碎,而单个普通 RDX 颗粒只需 40 MPa 压力就会损伤。纳米压痕法测得 RDX 的屈服应力为 465 MPa<sup>[15]</sup>,与本研究方法对于 H-RDX 颗粒的测试结果吻合,可能是因为作为纳米压痕法样品的 RDX 大单晶是高质量的 RDX 单晶体,属于 H-RDX 的一种。纳米压痕法无法表征单个普通 RDX 颗粒的耐压强度,本研究方法却可以对普通 RDX 颗粒进行表征。因此,该石蜡传力并表征压后形貌的方法有望成为纳米压痕法在表征单个含能颗粒强度方面的有益补充。

总之,单个 H-RDX 颗粒的抗压性能比单个普通 RDX 颗粒更好,且单个 H-RDX 颗粒的耐压压力比



(a) H-RDX 颗粒



(b) 普通 RDX 颗粒

图 4 H-RDX 颗粒和普通 RDX 颗粒经不同压力压制后的形貌

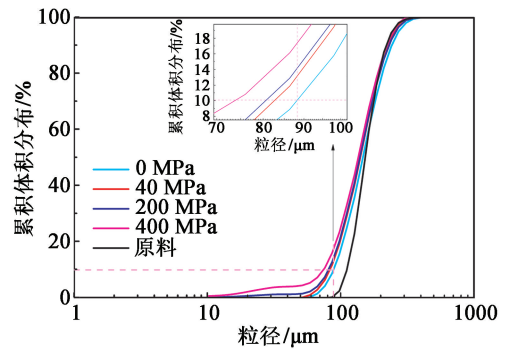
Fig. 4 Morphology of the H-RDX particle and the conventional RDX particle after compression under different pressures

H-RDX 在颗粒集合体中的耐压压力更高。

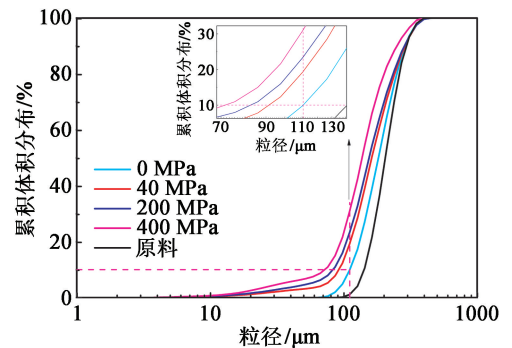
### 2.3 H-RDX 造型粉颗粒的抗压性能

采用 40、200 MPa 和 400 MPa 压力分别对 RDX 造型粉进行压制。然后,通过 SEM 和激光粒度仪对压制前、后的颗粒形貌和尺寸进行表征。发现 RDX 造型粉的碎裂规律与 RDX 一致;但由于是定性表征,无法与 RDX 的碎裂程度进行对比,故不再赘述。为量化碎裂程度,根据粒径分布数据,利用碎裂增量表达方法绘制了不同压力压制后造型粉中 H-RDX 和普通 RDX 的累积体积分布-粒径曲线,如图 5 所示。通过读取未经压制(0 MPa)的造型粉中 RDX 晶体  $D_{10}$  粒径对应的压后 RDX 颗粒的累积体积分布  $X\%$ ,可以得出 RDX 小颗粒增量,结果见表 2。

图 5 显示,未经压制的造型粉中,RDX 颗粒累积体积分布曲线在原料曲线上方,表明包覆造型后 RDX 粒径明显变小。可能是由于水悬浮法制备造型粉过程中的机械搅拌和重结晶造成的。结合表 2 可知,造型粉中,H-RDX 和普通 RDX 在 40 MPa 以上压力下产生了 RDX 小颗粒,且随着压力增加,小颗粒数量增加,碎裂程度加剧。在相同压力下,造型粉中 H-RDX 碎裂小颗粒的数量比普通 RDX 降低了 65% 以上,说明 H-RDX 造型粉的抗压性能远高于普通 RDX 造型粉。此外,与表 1 相比,经过压制后,造



(a) H-RDX



(b) 普通 RDX

图 5 不同压力下造型粉中 RDX 的累积体积分布  
Fig. 5 Cumulative volume distribution of RDX in molding powder under different pressures

表 2 不同压力下造型粉中 RDX 小颗粒的增量

Tab. 2 Increment of small RDX particles in molding powder at different pressures

压力/ MPa	X		小颗粒增量/%	
	H-RDX	普通 RDX	H-RDX	普通 RDX
0	10.0	10.0	0	0
40	13.0	19.4	3.0	9.4
200	14.1	23.4	4.1	13.4
400	17.3	31.0	7.3	21.0

型粉中 H-RDX 的碎裂程度比白品 H-RDX 要明显下降。在 40 MPa 的压力下,降低了 16.8%,降幅高达 85%;在 200 MPa 压力下,降低了 19.0%,降幅达到 82%。这说明黏合剂在 H-RDX 的压制过程中具有润滑作用、缓冲吸能作用和互相黏附的骨架作用,从而提高了 H-RDX 造型粉的抗压性能。

综上所述,H-RDX 相较于普通 RDX 总是具有更高的抗压性能,并且经过黏合剂包覆造型后,抗压性能得到了进一步提高。

## 2.4 H-RDX 压制后的感度变化规律

### 2.4.1 机械感度

根据《关于危险货物运输的建议书 试验和标准手册》<sup>[13]</sup>中试验 3(a)(ii)和试验 3(b)(i)的方法分别测试了 H-RDX、普通 RDX 经不同压力压制后的临界撞击能量  $E_{c,i}$  和压制前、后的临界摩擦力  $F_c$ 。结果如表 3 和表 4 所示。

根据表 3 可知,压制后的 H-RDX 和普通 RDX 的临界撞击能量比压制前分别增加了 2.5 J 和 5.0 J,表明撞击感度下降。多项研究表明,硝胺类含能晶体的粒径越小,越难形成活性中心,进而越难形成优先点火的起爆点,导致撞击感度越低<sup>[16]</sup>。压制过程中,晶体结构一般从内部缺陷等脆弱处开始受到

表 3 H-RDX 和普通 RDX 经不同压力压制后的临界撞击能量

Tab. 3  $E_{c,i}$  of H-RDX and conventional RDX after compression under different pressures

样品	压力/MPa	$E_{c,i}/J$
普通 RDX	0	7.5
	40	10.0
	120	10.0
	320	10.0
H-RDX	0	10.0
	40	15.0
	120	15.0
	320	15.0

表 4 H-RDX 和普通 RDX 在压制前、后的临界摩擦力

Tab. 4  $F_c$  of H-RDX and conventional RDX before and after compression

样品	压力/MPa	$F_c/N$
普通 RDX	0	144
	120	96
H-RDX	0	144
	120	120

破坏,使得 RDX 粒径变小,内部缺陷减少,颗粒更密实,减少了颗粒内部的应力集中和能量积聚,从而降低了撞击感度。同时,在 40 ~ 320 MPa 的压力范围内,H-RDX 的临界撞击能量都是 15.0 J,撞击感度完全相同;普通 RDX 的的临界撞击能量都是 10.0 J,撞击感度也完全相同。这一结果表明,压力的增加对撞击感度影响不明显,可能是由于碎裂后 RDX 颗粒的粒径分布相近所致。然而,相比普通 RDX,H-RDX 具有更高的密度和更少的缺陷,即使经过压碎处理,H-RDX 的撞击感度仍然比普通 RDX 低,这表明 H-RDX 具有更优异的撞击感度性能。

由表 4 可知,H-RDX 和普通 RDX 经过压制后的临界摩擦力均比压制前低。这是由于颗粒碎裂后形成了较多的棱角,增加了摩擦系数,使得热能积累更快,导致炸药颗粒局部的升温更大,引发进一步反应。压制后,H-RDX 的临界摩擦力比普通 RDX 提高了 25%,可能是因为 H-RDX 碎裂小颗粒数量较普通 RDX 少 26%,从而降低了摩擦系数,进而导致摩擦感度降低。

在压制前,H-RDX 的撞击感度比普通 RDX 低,这与采用特性落高法测得的撞击感度结果一致<sup>[6]</sup>;H-RDX 的摩擦感度与普通 RDX 相同。在压制后,H-RDX 的撞击感度与摩擦感度均比普通 RDX 低。因此,经过压制后,H-RDX 比普通 RDX 具有更低的机械感度,保持住了低机械感度的优势。这可能是由于 H-RDX 内部缺陷或空穴更少,晶体更加致密,在受到机械刺激时更难产生热点所致。

### 2.4.2 冲击波感度

为进一步研究压力对 H-RDX 冲击波感度的影响,测试了  $\phi 25$  mm 的 H-RDX 的原料(0 MPa)、白品药柱(100 MPa)和造型粉压装 PBX 药柱(200 MPa)的冲击波感度,并与普通 RDX 的原料(0 MPa)及造型粉压装 PBX 药柱(200 MPa)进行对比,结果如表 5 和图 6 所示。表 5 中, $G_{150}$ 为隔板厚度。

由表 5 可知:与 H-RDX 原料相比,H-RDX 白品

表 5 H-RDX 在压制前、后的冲击波敏感度

Tab.5 Shock wave sensitivity of H-RDX before and after compression

样品	$G_{50}/\text{片}$	$G_{150}/\text{mm}$
原料	435	82.65
白品药柱	505	95.95
PBX 药柱	305	58.90

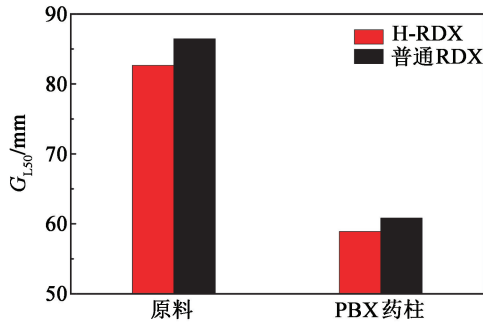


图 6 H-RDX 和普通 RDX 在压制前、后的冲击波敏感度对比

Fig.6 Comparison of shock wave sensitivity of H-RDX and conventional RDX before and after compression

药柱压制后,隔板厚度增加 16%;而 H-RDX 造型粉压制后,隔板厚度却降低 29%。压后 H-RDX 的冲击波敏感度增加,是因为颗粒碎裂会产生更多缺陷和孔隙,增加了药柱内部的缺陷,更容易形成热点。但是,使用包覆材料(如 FKM DS2603)可以在 H-RDX 表面形成保护性薄膜,降低碎裂小颗粒的数量,从而减少热点形成,使 H-RDX 基 PBX 药柱的冲击波敏感度大幅降低。观察图 6 可知,H-RDX 的冲击波敏感度比普通 RDX 低,且将造型粉压装成 PBX 药柱后仍能保持低冲击波敏感度的优势。这可能是因为 H-RDX 晶界和孔隙更少,冲击波敏感度更低,同时抗压性能更好,压药过程损伤小,进而有利于降低压装 PBX 药柱的冲击波敏感度。

## 2.5 讨论

H-RDX 的压制是一个复杂的过程。单个 H-RDX 颗粒在压制时,可以承受较高的压力而不碎裂,得益于颗粒内部缺陷少,更加致密。H-RDX 在颗粒集合体中压制成药柱时,40 MPa 压力下就出现了明显碎裂,比单个 H-RDX 颗粒的耐受压力大幅降低。这是由于颗粒间相互作用,硬对硬接触,挤压破碎;随着压力增大,药柱体积变小,密度增大,H-RDX 颗粒碎裂程度加剧;但是加剧速度变缓,正好与压缩刚度法的第二阶段和第三阶段吻合<sup>[9]</sup>。H-RDX 经包覆造型再压制时,首先,黏结剂降低了 H-RDX 颗粒间的硬对硬接触,促进了颗粒的滑动和重

排;其次,黏结剂在一定压力下会互相融合、黏附,形成网状立体骨架,分担来自压杆的压力,对内部颗粒形成保护作用,因此碎裂程度明显下降。H-RDX 经过压制后,颗粒碎裂,粒度明显减小,从而达到撞击敏感度降低的效果。但是碎裂的颗粒产生了锯齿状边缘和凹凸不平的表面,引起了颗粒间摩擦系数增大,导致了升温更快,摩擦敏感度升高。正是这种碎裂带来的药柱内部缺陷增加,使得热点更容易形成,导致了冲击波敏感度升高。但 H-RDX 经过包覆后,压制时碎裂程度明显下降,且药柱内黏结剂形成骨架,起到分散和吸收冲击波能量的作用,因此,可以有效降低冲击波敏感度。

## 3 结论

1)40 MPa 压力已经引起了 H-RDX、普通 RDX、H-RDX 造型粉和普通 RDX 造型粉的损伤和碎裂。压力越大,颗粒碎裂程度越严重。

2)H-RDX 的抗压性能比普通 RDX 更优异:单个 H-RDX 颗粒可抗 400 MPa 压力不碎裂,而单个普通 RDX 颗粒在 40 MPa 压力下已经损伤;H-RDX 及 H-RDX 造型粉在颗粒集合体中的碎裂程度分别低于普通 RDX 25% 和 65% 以上。

3)包覆可以有效提高 RDX 的抗压性能。H-RDX 经黏合剂 FKM DS2603 包覆后,抗压性能大幅提升,碎裂程度下降约 80%,PBX 药柱冲击波敏感度可降低约 30%。

4)压制使得 H-RDX 白品药柱的摩擦敏感度和冲击波敏感度升高,撞击敏感度降低。但经过压制后,H-RDX 依旧比普通 RDX 具有更低的机械敏感度;H-RDX 造型粉压成 PBX 后也比普通 RDX 基 PBX 冲击波敏感度更低。因此,虽然超过 40 MPa 压力的压药过程会破坏 H-RDX 和普通 RDX 颗粒的完整性,但 H-RDX 凭借更好的抗压性能,保持了安全性能上的优势。

5)基于粒径累积体积分布原理提出的碎裂增量表达方法能有效量化含能晶体颗粒碎裂程度;提出的石蜡传力并表征压后形貌的方法可作为评估单个含能颗粒强度的有效手段。

## 参考文献

- [1] 聂福德. 高品质炸药晶体研究[J]. 含能材料, 2010, 18(5): 481-482.  
NIE F D. Reduced sensitivity explosive crystals [J].

- Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(5): 481-482.
- [2] SPYCKERELLE C, ECK G, SJÖBERG P, et al. Reduced sensitivity RDX obtained from Bachmann RDX [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2008, 33(1): 14-19.
- [3] 黄明, 李洪珍, 徐容, 等. 降感黑索今研究[J]. 含能材料, 2006, 14(6): 492.  
HUANG M, LI H Z, XU R, et al. Particle qualities of D-RDX [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(6): 492.
- [4] 芮久后, 赵雪. 高致密球形黑索今晶体的制备和性能[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 41-44.  
RUI J H, ZHAO X. A study on preparation and properties of high density RDX crystal [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1): 41-44.
- [5] 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, FENG S S. Recrystallization method for preparation of spherical RDX [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(1): 5-7.
- [6] CHEN S X, QIAN H, LIU B X, et al. The effect of high-quality RDX on the safety and mechanical properties of pressed PBX [J]. Materials, 2022, 15(3): 1185.
- [7] 赵雪, 芮久后, 冯顺山. RDX 颗粒形态对 RDX 基熔铸炸药性能的影响[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 714-716.  
ZHAO X, RUI J H, FENG S S. Effects of RDX physical morphology on properties of RDX base melt-cast explosive [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(5): 714-716.
- [8] 秦金凤, 赵雪, 钱华, 等. 高致密球形黑索今晶体结构对高聚物粘结炸药安全性能的影响[J]. 兵工学报, 2020, 41(3): 481-487.  
QIN J F, ZHAO X, QIAN H, et al. Effect of crystal structure of high density spherical RDX on safety performance of PBX [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(3): 481-487.
- [9] 李明, 温茂萍, 黄明, 等. 压缩刚度法评价含能晶体颗粒的凝聚强度[J]. 含能材料, 2007, 15(3): 244-247.  
LI M, WEN M P, HUANG M, et al. Evaluation of coherence strength of energetic crystalline granules by compressive stiffness method [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(3): 244-247.
- [10] 李明, 黄明, 徐瑞娟, 等. RDX 晶体颗粒聚集体压缩刚度曲线的振荡分析[J]. 含能材料, 2010, 18(5): 483-486.  
LI M, HUANG M, XU R J, et al. Fluctuation analysis of compression curves of RDX crystalline ensembles [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(5): 483-486.
- [11] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 204-219.
- [12] 中国兵器工业总公司. 炸药试验方法: GJB 772A—1997 [S]. 1997.  
NORINCO(G). Explosive test method: GJB 772A—1997 [S]. 1997.
- [13] UN. Recommendations on the transport of dangerous goods: manual of tests and criteria [M]. UN, 2019.
- [14] 姜洪伟. 高致密球形 RDX 基浇注炸药性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.  
JIANG H W. Study on the properties of high density spherical RDX-based cast explosives [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2020.
- [15] 李明, 陈天娜, 庞海燕, 等. RDX 晶体的破碎与细观断裂行为[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 200-204.  
LI M, CHEN T N, PANG H Y, et al. Ruptures and mesoscale fracture behaviors of RDX crystals [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(2): 200-204.
- [16] 吕春玲, 张景林. 粒度对 HMX 撞击感度的影响[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 472-474.  
LÜ C L, ZHANG J L. Influence of particle size on the impact sensitivity of HMX [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(5): 472-474.