

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.02.004

# CD-3 发射装药低易损性能试验研究<sup>\*</sup>

韩 冰 魏 伦 于慧芳 刘少武 姚月娟 马方生 王 锋  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了降低发射药的敏感性,以 Bu-NENA 为增塑剂,FOX-7 和 RDX 作为填充物研制了一种新型硝化棉(NC)基发射药(GD-3 发射药),对其装药进行了低易损性能测试研究。试验结果表明,GD-3 发射装药在慢速烤燃和快速烤燃、子弹撞击刺激源下发生了 V 类燃烧反应,在特定的空心装药射流刺激下发生了 III 类爆炸反应。GD-3 发射药在刺激源下易损性响应剧烈程度弱于硝基胍发射药和单基发射药,该新型装药符合低易损性弹药的性能评定要求。

[关键词] 应用化学;发射药;低易损性;性能测试

[分类号] TJ55;TQ562

## Experimental Study on Low Vulnerability of CD-3 Propellant Charge

HAN Bing, WEI Lun, YU Huifang, LIU Shaowu, YAO Yuejuan, MA Fangsheng, WANG Feng  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to reduce the sensitivity of gun propellants, a new kind of NC based gun propellant (GD-3 propellant) was developed with Bu-NENA as plasticizer and FOX-7 and RDX as energy additives. Low vulnerability test of its charge was carried out. Results show that combustion response V of GD-3 propellant charge occurs in slow cook-off test, fast cook-off test and bullet impact test, and explosive response III occurs in shaped charge jet impact test. Vulnerability response of the GD-3 propellant is the most insensitive under stimuli compared with that of nitro-guanidine propellant and single-based propellant. The new charge meets the performance evaluation demands of low vulnerability ammunition.

[KEYWORDS] applied chemistry; propellant; low vulnerability; performance test

### 引言

弹药易损性是弹药中的火炸药由于事故(碰撞)、严酷环境(火灾)或敌方的攻击(冲击波或高速破片)而发生意外反应的敏感程度和产生爆炸作用剧烈程度的综合性能<sup>[1-2]</sup>。为了适应现代战争环境及新型武器弹药的需求,研究人员通过多种途径进行了低易损弹药研制和易损性检测评估方面的工作<sup>[3-8]</sup>。发射药通常由硝化棉(NC)作为力学骨架,加以增塑剂、高能晶体炸药作为填充物,和其他功能助剂共同组成。为降低发射药的敏感性,需要采用比硝酸酯钝感的晶体含能化合物作为填充物,采用相对钝感的增塑剂替代硝化甘油(NG)。王锋等<sup>[9]</sup>研究了含 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)发

射药的低压燃烧性能及 FOX-7 用量对发射药常温力学性能的影响,发现随着 FOX-7 含量的增加,发射药抗冲击强度增大。赵本波等<sup>[10]</sup>使用 N-丁基硝氧乙基硝胺(Bu-NENA)全部替代 NG 制备的 Bu-NENA/NC 双基药相比 NG/NC 双基药,摩擦感度、撞击感度、挥发速率常数大幅降低,力学性能、热稳定性大幅提高。在易损性检测评估方面,国内主要依据美国 MIL—STD—2105D《非核弹药的危险性评估试验》和北约的 STANAG 4439《不敏感弹药的介绍、评估和试验政策》等<sup>[11-12]</sup>,建立了快速烤燃试验、慢速烤燃试验、子弹撞击试验、破片撞击试验、殉爆试验、射流撞击试验和热破片撞击试验等 7 种刺激源的低敏感试验手段,并形成了标准<sup>[13]</sup>。

本文中,以三基发射药配方为基础,采用钝感含能增塑剂 Bu-NENA 全部替代配方中 NG,采用 FOX-7

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-08-19  
第一作者:韩冰(1982-),男,副研究员,主要从事发射药装药应用技术研究。E-mail:daguai0622@163.com  
通信作者:魏伦(1982-),男,副研究员,从事发射药装药研究。E-mail:21700893@qq.com

替代配方中部分黑索今(RDX),制备了一种新型高能低易损发射药(GD-3 发射药),对其装药进行了快速烤燃、慢速烤燃、子弹撞击、射流撞击等易损性测试研究,并与单基发射药、硝基胍(NGu)发射药的易损性测试结果进行对比,以期为不敏感发射药及装药研究提供参考。

## 1 试验

### 1.1 发射药样品

GD-3 发射药、硝基胍发射药、单基发射药配方主要组成如表 1 所示。3 种发射药均以自由装填形式分别装入 $\varnothing 76\text{ mm}\times 274\text{ mm}$ 、壁厚为 4 mm 的 45 $^\circ$  钢壳中,两端用带螺纹的端盖密封,每发装药量为 1 000 g。每项平行试验 2 发。

表 1 发射药配方主要组成

Tab. 1 Main composition of propellant formula			
样品	黏结剂	增塑剂	固体填充物
单基发射药	NC		
硝基胍发射药	NC	NG	NGu
GD-3 发射药	NC	Bu-NENA	RDX + FOX-7

### 1.2 试验部分

#### 1.2.1 慢速烤燃试验

采用电阻加热套包裹样品壳体,将样品悬挂在距地面高 60 cm 处。烤燃试验箱按设定程序分段升温,在 0~60 $^\circ\text{C}$  内以 3 $^\circ\text{C}/\text{min}$  恒定升温,在 60 $^\circ\text{C}$  以上以 1 $^\circ\text{C}/\text{min}$  恒定升温,直至样品发生剧烈反应。测试样品烤燃全过程的温度曲线及反应后的冲击波压力,记录试验壳体破坏状况和见证板损坏情况。

#### 1.2.2 快速烤燃试验

模拟大火环境,将发射药样品置于 800 mm $\times$  800 mm $\times$  680 mm 的水油池正上方 420~450 mm 处,样品四周布置 4 路热电偶测温系统,将见证板放置在油池四周 1.0 m 处。引燃油池,同时使用高速摄影监视反应的全过程,记录试验壳体破坏状况和见证板损坏情况。

#### 1.2.3 子弹撞击试验

选用制式 12.7 mm 标准穿甲燃烧弹撞击样弹,枪口距离样弹 30 m,子弹撞击速度为(850 $\pm$ 20) m/s。见证板为 5 mm 厚 L 型 45 $^\circ$  钢板。至少试验 2 发装药,观察样品反应的猛烈程度。

#### 1.2.4 空心装药射流撞击试验

空心装药射流源为 $\varnothing 50\text{ mm}$  标准射流源。在样品底面放置 1 块 300 mm $\times$  300 mm $\times$  12 mm 的钢质

见证板。根据试验后见证板的凹痕判断样品反应程度,试验 2 次。

## 2 试验结果

### 2.1 慢速烤燃试验

图 1 为单基发射药、硝基胍发射药、GD-3 发射药装药慢速烤燃反应后的状态。表 2 列出了不同配方发射装药在慢速烤燃条件下的测试结果,其中的反应温度是指壳体发生破坏时所对应的温度。



图 1 慢烤反应后的状态

Fig. 1 Status after slow cook-off test

表 2 发射装药慢速烤燃试验结果

Tab. 2 Slow cook-off test results of gun propellant		
序号	样品	$t/^\circ\text{C}$
1 $^\#$	单基发射药	153.4
2 $^\#$	硝基胍发射药	161.9
3 $^\#$	GD-3 发射药	168.0

从图 1、表 2 可知:经过缓慢、有序加温后,单基发射药发生爆炸反应,仅收集到少量小块壳体碎片,见证板被壳体击中撕裂;硝基胍发射药在 161.9 $^\circ\text{C}$  发生爆燃反应,试验件壳体撕裂,收集到大块壳体碎片,见证板被壳体击中撕裂;GD-3 发射药在 168.0 $^\circ\text{C}$  发生燃烧反应,反应瞬间壳体一端端盖冲开,壳体完整,壳体内及周围有较多的剩药,试验响应温和。GD-3 发射药慢速烤燃的反应温度比单基发射药高出 14.6 $^\circ\text{C}$ ,比硝基胍发射药高出 6.1 $^\circ\text{C}$ ,说明 GD-3 发射药能经受住更高的烤燃温度,具有更好的耐热性和安全性。

### 2.2 快速烤燃试验

图 2 为单基发射药、硝基胍发射药、GD-3 发射药装药快速烤燃反应后的状态。

在快速烤燃刺激源作用下,能量水平最低的单基发射药发生了爆炸反应,堵头穿入沙堆,壳体残片收集不全,四周见证板都有不同程度的变形和穿孔。硝基胍发射药发生了燃烧反应,壳体一端端盖剪切,见证板有不规则穿孔。GD-3 发射药发生了燃烧反应,壳体仅一端薄弱处端盖剪切,壳体外观完整,但明显变粗,壳体内药粒发生的热分解燃烧反应形成的推力较小,喷射出的药粒在大火附近不完全燃烧,

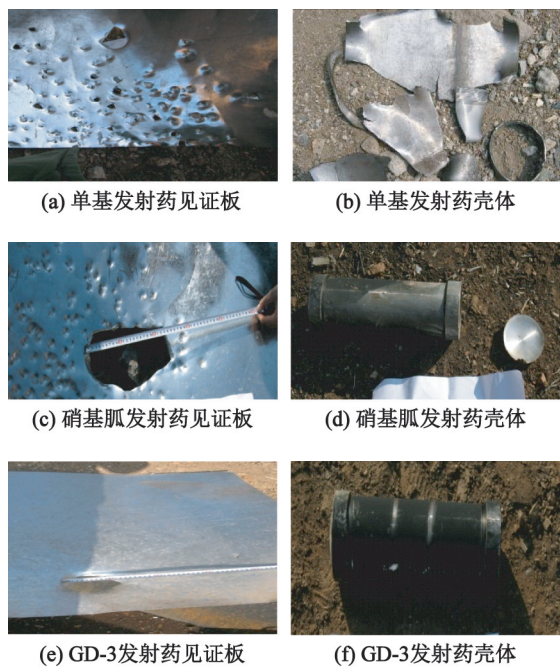


图 2 快速烤燃反应后的状态

Fig. 2 Status after fast cook-off test

四周见证板有轻微变形。

2.3 子弹撞击试验

将单基发射药、硝基胍发射药、GD-3 发射药 3 种发射药粒置于 45° 钢壳体内进行子弹撞击试验, 试验结果照片见图 3。

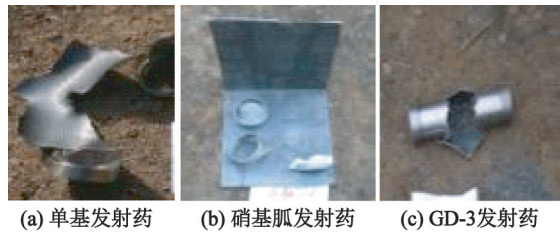


图 3 子弹撞击易损性试验结果

Fig. 3 Test results of bullet impact vulnerability

由图 3 看出: 单基发射药装药在受到子弹撞击时, 壳体大块撕裂, 药粒四散开来, 收集到极少量残药, 药粒大部分燃烧, 判定发生了爆炸反应; 硝基胍发射药装药受到子弹撞击时, 壳体残片收集不全, 药粒大部分燃烧, 试验现场飞散的药粒表面有燃烧痕迹, 见证板未明显变形, 判定发生了爆炸反应; 而 GD-3 发射药装药受到子弹撞击后飞散开, 能看到有火团飞出, 现场周围十几米范围内有未燃烧的完整药粒, 见证板完好, 没有受损变形, 判定发生了 V 类燃烧反应。

2.4 射流撞击试验

单基发射药、硝基胍发射药、GD-3 发射药 3 种发射药装药射流撞击试验结果照片见图 4。单基发

射药装药射流冲击后的见证板半球形弯曲, 中部凹坑深度约为 7~8 cm, 距爆心 1.5 m 范围内见到多个小钢片, 端盖方向距离爆心 1.0 m 处见到较大钢碎片, 试验现场未见到残药; 硝基胍发射药装药的见证板剪切穿出不规则圆孔, 有大面积灼烧痕迹, 现场见 2 cm<sup>2</sup> 左右碎铁片, 未见残药; GD-3 发射药装药的见证板发生变形, 试验地点没有形成大的爆坑, 在较远试验现场可捡到未燃的药粒, 说明高能物质没有完全耗尽。参照美军标 MIL—STD—2105D 危险性评估试验判据, 分析反应后装药壳体、见证板破坏等现象, 判定在特定的空心装药射流刺激下, GD-3 发射药装药、单基发射药装药发生了 III 类爆炸反应, 硝基胍发射药装药发生了 II 类部分爆轰反应。



图 4 发射装药射流撞击后的见证板

Fig. 4 Witness plates under shaped charge jet impact

3 分析与讨论

3.1 不同发射药的易损性响应试验结果比较

表 3 为发射装药易损性试验结果。表 3 中, VI 类为不反应; V 类为燃烧反应; IV 类为爆燃反应; III 类为爆炸反应; I、II 类为爆轰或部分爆轰。

表 3 发射装药易损性试验结果

Tab. 3 Test results of vulnerability of gun propellant charges

类型	慢速 烤燃	快速 烤燃	子弹 撞击	空心装药 射流撞击
单基发射药	III 类	III 类	III 类	III 类
硝基胍发射药	IV 类	V 类	III 类	II 类
GD-3 发射药	V 类	V 类	V 类	III 类
低易损弹药 可接受的 最大反应类型	V 类	V 类	V 类	III 类

从图 1 和表 3 可看出, 3 种发射装药在慢速烤燃下的反应程度由弱到强的排序为: GD-3 发射药、硝基胍发射药、单基发射药。

从图 2 和表 3 可以看出, 硝基胍发射药、GD-3 发射药在快速烤燃下都发生了 V 类燃烧反应, 但 GD-3 发射装药的见证板破坏程度较小, 说明 GD-3



发射药响应剧烈程度弱于硝基胍发射药。3 种发射装药在快速烤燃下反应程度由弱到强的排序为:GD-3 发射药、硝基胍发射药、单基发射药。3 种发射装药快速烤燃试验结果和慢速烤燃反应程度顺序一致,但响应结果相对温和。

从图 3 和表 3 发现,硝基胍发射药、单基发射药在子弹撞击下均发生 III 类爆炸反应,但硝基胍发射装药的壳体撕裂程度大于单基发射药装药,说明硝基胍发射药易损性响应剧烈程度强于单基发射药。3 种发射装药在子弹撞击下反应程度由弱到强的排序为:GD-3 发射药、单基发射药、硝基胍发射药。

空心装药射流撞击比子弹撞击刺激源更强,所以装药反应更剧烈。由图 4 和表 3 可看出,GD-3 发射装药、单基发射药装药在空心装药射流撞击发生了 III 类爆炸反应,但 GD-3 发射药的见证板发生破坏变形程度小于单基发射药,说明 GD-3 发射药易损性响应剧烈程度弱于单基发射药。3 种发射装药反应由弱到强的排序为:GD-3 发射药、单基发射药、硝基胍发射药。

按低易损弹药评价标准要求,烤燃试验和子弹撞击试验可接受的最大反应类型为 V 类燃烧反应,空心装药射流撞击试验可接受的最大反应类型为 III 类爆炸反应。GD-3 发射装药在慢速烤燃和快速烤燃、12.7 mm 子弹撞击刺激下发生了 V 类燃烧反应,在特定的空心装药射流刺激下发生了 III 类爆炸反应,符足低易损性弹药的性能评定要求。

3.2 配方组成对发射药易损性能的影响

发射药配方组分决定着发射药的性质。通常发射药中各组分在发射药中是独立存在的,仅是物理上的均匀混合。因此,发射药各组分的热、撞击、摩擦感度、分子结构都将直接或间接影响到发射药的易损性能。

表 4 是发射药各组分的感度数据。数据为美国 12 型撞击仪器(2.5 kg 落锤)测试结果;NG 撞击感度为 2.0 kg 落锤测试,每次试验中至少有 1 次爆炸时落高小于 15 cm。

Bu-NENA 是一种性能优良的新型含能增塑剂,FOX-7 是一种新型高能低敏感化合物,它们都具有较高的热稳定性和较低的撞击、摩擦感度,化学安定性好。同时,在 NC 体系中,Bu-NENA 的增塑能力和相容性优于其他常用增塑剂;FOX-7 分子中大量的硝基和氨基可以形成分子内及分子间氢键,也能够同 NC 分子上的羟基形成氢键,这种特殊的分子结构有利于 NC 分子链段的运动,增大发射药的抗冲强度<sup>[9]</sup>。因此,采用 Bu-NENA 替代 NG、FOX-7 替代

RDX,有利于提高发射药的热感度和机械感度等性能,改善发射药对刺激源的响应剧烈程度,降低发射药的易损性。

表 4 组分的感度数据

Tab.4 Sensitivity parameters of different components

组分	5 s 爆点/ ℃	撞击感度 $H_{50}$ /cm	摩擦感度 $P$ / %
NC	230	50	
NG	222	15	100
Bu-NENA		> 110	0
NGu	275	> 320	0
RDX	260	27	76
FOX-7	274	126	10

单基发射药的组分单一,其特征分子结构—O—NO<sub>2</sub>在所有火炸药组成化合物中最容易断链分解,使其从分解到发生反应会更快地积聚更大的能量。因此,单基药耐热性能较差,且反应最剧烈。从表 1 和表 4 可看出,硝基胍发射药除含有爆点与 NC 相当的 NG,还含有更高温度的 NGu,热分解反应较缓慢,因此其反应程度减弱,反应温度次之。和硝基胍发射药相比,GD-3 发射药配方除了含有钝感含能化合物 FOX-7 和 RDX 外,还含有比 NG 钝感的增塑剂 Bu-NENA,且 Bu-NENA 对 NC 有很好的溶解和增塑能力,降低了 NC 对热刺激的敏感性,因此和单基发射药、硝基胍发射药相比,GD-3 发射药耐热性能优越,反应程度最温和。

子弹和射流在穿透试样的过程中对发射药试样形成强烈的撞击和摩擦作用。在此作用下,火药发生燃烧(爆炸)的过程既取决于火药的力学性能,也取决于化学动力学性能。单基发射药的主要成分 NC 对摩擦、冲击极敏感,且燃点低,在空气中燃烧极迅速;因此,发射药装药壳体受到高速子弹撞击破裂瞬间,发射药药粒受到较高的温度流场和初始压力下的冲击和摩擦,形成热点,并迅速分解燃烧,发生剧烈的爆炸反应。硝基胍发射药是在双基药基础上加入了有机晶体炸药 NGu,这种非均质的复合结构比均质结构更易于产生裂纹、空隙、嵌入物等力学缺陷,力学性能较差,药体组织结构受到高速子弹撞击时非常容易破坏,从而增大了利于燃烧的表面积;且和单基药相比,发射药配方中除了含有 NC 成分外,还增加了摩擦感度、撞击感度都较高的组分 NG 和能量较高的组分 NGu,发射药能量水平增高,破坏力变大;因此,发生了剧烈的爆炸效应。GD-3 发射药由于主要组分 Bu-NENA 和 FOX-7 冲击感度较低,发射药的耐热性能和力学性能较好,在受到子弹

撞击和射流撞击时不会发生比单基发射药和硝基胍发射药更剧烈的反应。

## 4 结 论

1) 发射装药慢速烤燃、快速烤燃试验反应程度由弱到强的排序为:GD-3 发射药、硝基胍发射药、单基发射药;子弹撞击试验和空心装药射流撞击试验反应程度由弱到强的排序为:GD-3 发射药、单基发射药、硝基胍发射药。GD-3 发射药易损性响应剧烈程度弱于硝基胍发射药和单基发射药。

2) 采用相对钝感的增塑剂 Bu-NENA 替代 NG, 采用 FOX-7 替代部分 RDX 作为填充物, 有利于提高发射药的热感度和机械感度, 改善发射药对刺激源的响应剧烈程度;从而提高发射药的力学性能, 降低发射药的易损性。

3) GD-3 发射装药在慢速烤燃、快速烤燃以及 12.7 mm 子弹撞击刺激下发生了 V 类燃烧反应;在特定的空心装药射流刺激下发生了 III 类爆炸反应, 符合低易损性弹药的性能评定要求。

## 参 考 文 献

- [1] 董海山. 钝感弹药的由来及重要意义[J]. 含能材料, 2006, 14(5):321-322.
- [2] 智小琦, 胡双启, 王东青. 钝感弹药的发展与分析[J]. 中北大学学报, 2008, 29(3):236-238.  
ZHI X Q, HU S Q, WANG D Q. The development and analysis of insensitive ammunition[J]. Journal of North University of China, 2008, 29(3):236-238.
- [3] 赵玉清, 靳朝阳, 李建强, 等. 弹药低易损试验研究及射流源设计[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(9):25-30.  
ZHAO Y Q, JIN C Y, LI J Q, et al. Hazard assessment tests for munitions and design of shaped charge jet source[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(9):25-30.
- [4] 杨丽侠, 张邹邹, 刘来东. 发射装药热刺激下的易损性响应试验研究[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3):71-74.  
YANG L X, ZHANG Z Z, LIU L D. Experimental study on vulnerability response of propelling charge to thermal stimuli[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(3):71-74.
- [5] 张邹邹, 杨丽侠, 刘来东, 等. 子弹撞击对发射药易损性响应影响研究[J]. 含能材料, 2011, 19(6):715-719.  
ZHANG Z Z, YANG L X, LIU L D, et al. Vulnerable response of gun propellant by bullet impact test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(6):715-719.
- [6] 杨建, 贾宪振, 余然, 等. RDX 基发射药子弹撞击特性研究[J]. 火工品, 2011(5):14-17.  
YANG J, JIA X Z, YU R, et al. Research on the bullet impact characteristic of RDX base propellant[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2011(5):14-17.
- [7] 杨丽侠, 张玉成, 张邹邹, 等. 射流撞击下发射装药的易损性响应特性[J]. 火炸药学报, 2012, 35(2):74-77.  
YANG L X, ZHANG Y C, ZHANG Z Z, et al. Vulnerability response of propellant charges under shaped charge jet impact[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(2):74-77.
- [8] 张远波, 轩春雷, 刘波, 等. NC 基高能低敏感发射药的低温抗冲击强度[J]. 火炸药学报, 2015, 38(1):78-81.  
ZHANG Y B, XUAN C L, LIU B, et al. Low temperature impact strength of nitrocellulose based high energy-low vulnerability gun propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(1):78-81.
- [9] 王锋, 刘国涛, 张远波, 等. 含 FOX-7 发射药的低压燃烧性能及力学性能[J]. 含能材料, 2013, 21(4):522-526.  
WANG F, LIU G T, ZHANG Y B, et al. Combustion and mechanical performance of gun propellant containing FOX-7 at low pressure[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(4):522-526.
- [10] 赵本波, 夏敏, 黄家琪, 等. Bu-NENA/NC 低感度双基推进剂性能研究[J]. 含能材料, 2017, 25(10):794-798.  
ZHAO B B, XIA M, HUANG J Q, et al. Characterization of Bu-NENA/NC low sensitive double-base propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(10):794-798.
- [11] Hazard assessment tests for non-nuclear munitions; MIL—STD—2105D[S]. Washington D C, US: NPFC, 2011.
- [12] Policy for introduction and assessment of insensitive munitions; STANAG4439[S]. Brussels, Belgium: NATO, 2010.
- [13] 殷瑱, 闻泉, 王雨时, 等. 北约不敏感弹药标准试验方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(10):1-7.  
YIN Z, WEN Q, WANG Y S, et al. Standard experiment method of insensitive munition in NATO[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(10):1-7.