

文章编号:1006-9941(2023)02-0152-08

GAP/NC基发射药的不敏感性能

宋育芳¹,肖乐勤¹,李纯志²,唐方圆²,龙义强²,周伟良¹

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 泸州北方化学有限公司, 四川 泸州 646605)

摘要: 低敏感发射药的研究对于提高武器系统的生存能力和安全性能有重要的意义。以硝化棉(NC)和低感聚叠氮缩水甘油醚(GAP)为黏结剂、低感N-丁基硝氧乙基酰胺(Bu-NENA)为含能增塑剂、黑索今(RDX)为高能填料,石墨为导热助剂,制备了一种发射药(IM发射药)。对其理化、燃烧、力学和感度性能进行研究,通过慢速烤燃、快速烤燃、子弹撞击、破片撞击以及殉爆试验对该IM发射药的不敏感性能进行评估。结果表明,该IM发射药在定容燃烧下燃烧过程稳定,实测火药力为 $1050\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,理论爆温为 2677 K ; $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 下抗冲击强度和抗压强度分别为 $8.2\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 131.5 MPa ;与太根发射药的感度相比($H_{50}=16.33\text{ cm}$, $P=100\%$, $V_{50}=2.02\text{ kV}$),IM发射药的撞击($H_{50}=62.62\text{ cm}$)、摩擦($P=28\%$)和静电感度($V_{50}=1.95\text{ kV}$)有明显降低;IM发射药在慢速烤燃、快速烤燃、子弹撞击、破片撞击以及殉爆试验中均未发生爆燃或爆炸,只发生燃烧反应,具有良好的不敏感性。

关键词: 发射药;低敏感;感度;力学性能;燃烧

中图分类号: Tj55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021301

0 引言

随着武器装备系统的高速发展,残酷的战争环境对武器弹药的安全性要求越来越高^[1-2]。常规弹药储存于坦克、战车或舰船的密闭弹药仓时,作为弹药的主要组成部分,发射药容易在外界能量的刺激下发生剧烈反应,给舰船、坦克的安全造成十分严重的威胁^[3]。低敏感发射药在受到外界的加热、撞击等刺激时,能够表现出良好的稳定性,大大降低了意外刺激条件下的人员伤亡和财产损失,因此低敏感发射药的发展和应用对当前武器发展具有重大意义。

早期的低敏感发射药一般以惰性黏结剂为基(醋酸丁酸纤维素(CAB),醋酸纤维素(EA)等),通过添加大量高能固体填料来实现能量与安全的平衡^[4],这类发射药通常存在能量水平低、力学性能差等问题^[5]。随着低敏感发射药的发展,一些含能热塑性弹性体(聚

叠氮缩水甘油醚(GAP),3,3-二叠氮甲基氧杂环丁烷-四氢呋喃共聚醚(PBT)等)由于其良好的安定性和较高的生成焓被越来越多的研究者使用^[6-7],并加入到发射药中,用于改善发射药的安定性和力学强度等。GAP是叠氮黏结剂中研究最早也最为成熟的一种,与硝化棉(NC)、黑索今(RDX)等混合有较好的相容性,同时可以改善NC的安定性。郭茂林等^[6]研究了聚叠氮缩水甘油醚型含能热塑性弹性体(GAP-ETPE)改性单基发射药的热行为及力学性能,结果表明,随着GAP-EPTP含量增加,改性单基药的热安定性逐渐提高,当GAP-EPTP含量为30%时,发射药的低温抗冲击强度提升大于160%;吴艳光等^[8]制备了一种新型GAP-改性硝化纤维素粉末,研究表明其塑化性能优异,有利于发射药的加工制备,并且由于GAP的加入,GAP-改性硝化纤维素粉末撞击感度降低,力学性能大幅提升。

N-丁基硝氧乙基酰胺(Bu-NENA)是一种性能优良的新型液体含能增塑剂,分子结构中既有链节较长的正丁基,又有硝胺($-\text{N}-\text{NO}_2$)和硝酸酯($-\text{O}-\text{NO}_2$)等能量基团,对硝化棉有良好的增塑作用,具有能量高、感度低、化学安定性好的优点^[9]。近期研究表明,Bu-NENA对硝化棉的增塑作用优于硝化甘油,有利于发

收稿日期:2021-11-13;修回日期:2021-12-19

网络出版日期:2022-07-22

作者简介:宋育芳(1992-),女,博士研究生,主要从事不敏感含能材料的研究。e-mail:syf@njust.edu.cn

通信联系人:周伟良(1963-),男,研究员,主要从事推进剂及发射药的研究。e-mail:wzlh@njust.edu.cn

引用本文:宋育芳,肖乐勤,李纯志,等. GAP/NC基发射药的不敏感性能[J]. 含能材料,2023,31(2):152-159.

SONG Yu-fang, XIAO Le-qin, LI Chun-zhi, et al. Insensitivity Performance of GAP/NC-based Gun Propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao),2023,31(2):152-159.

射药的加工制备,用 Bu-NENA 取代硝化甘油加入 NC 基推进剂中,特性落高 H_{50} 从 8.1 cm 增加到 27.1 cm,静电感度由 94% 降至 18%^[10]。

根据热点理论^[11-12],含能材料内部含有杂质、空穴、晶界等缺陷时,在其受到外界刺激后,缺陷处易形成局部高温区域,产生热点。当热量累积到一定程度,容易导致含能材料整体发生快速分解反应,造成严重的后果,因此需要尽量避免热点的产生。石墨是发射药中常用的光泽剂,通常外加在药粒表面用于增加药粒的流散性、光泽性和导电性。同时石墨具有良好的导热性,如果将适量石墨作为降感剂加入发射药配方,则良好的导热性有利于发射药内部热量的快速传导,缓解内部热量累积,避免发射药局部温度过高,有利于防止或减少热点的形成。

综上所述,本研究选择以 NC 和 GAP 为黏结剂,以 Bu-NENA 为增塑剂,添加高能填料 RDX 以及导热助剂石墨,制备一种低敏发射药(IM 发射药)。通过撞击感度、摩擦感度和静电火花感度研究 IM 发射药的安全性,进一步通过慢速烤燃、快速烤燃、子弹撞击、破片撞击以及殉爆试验,对 IM 发射药的不敏感性能进行评估,为低敏发射药的研究提供参考。

1 实验部分

1.1 试剂原料

NC(含氮量 12.8%)、RDX(粒径约 45 μm),泸州北方化学工业有限公司;GAP(羟值 24.07 mg KOH/g,分子量 4500),Bu-NENA,纯度 99%,黎明化工研究设计院有限责任公司;乙酸乙酯,工业用品;制式太根发射药(质量分数:硝化三乙二醇 10%,硝化甘油 20%,NC(含氮量 12.6%)70%),石墨(粒径 $\leq 150 \mu\text{m}$),二号中定剂,泸州北方化学工业有限公司。

1.2 发射药制备

IM 发射药的配方(质量分数)为 NC 55%~60%,RDX 18%~20%,GAP 8%~10%,Bu-NENA 8%~10%,石墨 0.5%~1%,二号中定剂 0.5%~1%。

采用半溶剂法制备发射药,溶剂为乙酸乙酯,溶棉比为 0.5,为了使药料更好地混合,采用干/湿料混加的方式进行加料。将 RDX 和 Bu-NENA 吸收于 NC 中,压制成 NC/RDX/Bu-NENA 药片,称量好的药片作为干料待用;将 GAP 和石墨分别加入称量好的乙酸乙酯中搅拌均匀,制备成液体料;干料和液体料分次加入胶化机中,胶化过程正转 10 min,反转 5 min,依次交替共

2 h。胶化好的药团经过压药、切药、烘干等制备工艺后得到 IM 发射药(见图 1)。制备的 IM 发射药药形为花边 18/19,弧厚 1.8 mm。

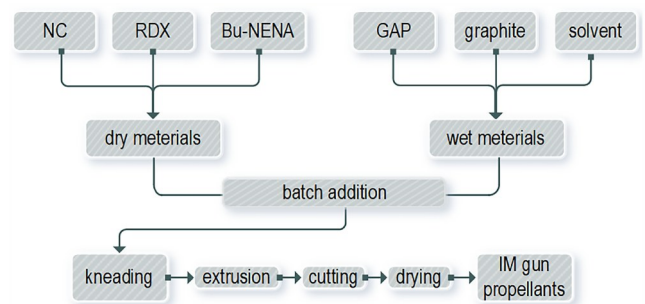


图 1 IM 发射药制备流程图

Fig.1 Flow chart of the preparation of IM gun propellants

1.3 理化、燃烧与力学性能

理化性能:根据 GJB 770B-2005 中的方法 401.1, 103.1 以及 104.2 分别测试发射药的密度、水分和残溶。

燃烧性能:密闭爆发器容积 98.12 cm^3 ,点火药为 2[#]硝化棉,点火压力 10 MPa,装填密度为 0.12 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 0.2 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,试验温度为常温。

力学性能:采用 ZWJ-0351 型简支梁冲击试验机和 CMT-4304 型电子万能试验机分别测试发射药的抗冲击强度和抗压强度。根据 GJB 770-2005 规定,制备长度为 60 mm 的单孔管状药用于冲击试验,制备长径比 1:1 的管状药用于抗压试验,分别在低温(-40 $^{\circ}\text{C}$)、常温(20 $^{\circ}\text{C}$)和高温(50 $^{\circ}\text{C}$)下保温 1 h 后进行试验。

1.4 感度性能

撞击感度:根据 GJB770B-2005 方法 601.2,采用 WL-1 型立式落锤仪测试 IM 发射药的撞击感度。落锤重量 2 kg,样品质量 30 mg,温度(20 \pm 1) $^{\circ}\text{C}$,撞击感度以 50% 爆炸特性落高 H_{50} (cm) 表示。

摩擦感度:采用 MGY-1 摆式摩擦感度仪,参照 GJB770B-2005 方法 602.1 测试样品的爆炸百分数。摆角为(66 \pm 1) $^{\circ}$,正压力为(2.45 \pm 0.01) MPa,每发实验药量为(25 \pm 1) mg,摩擦感度以样品爆炸概率 P (%) 表示。

静电火花感度:参照 GJB5891.27-2006 方法 6.1,采用 JGY-50 型静电火花感度仪进行测试。电容 2.2 pF,针距 1.2 mm,装药量 25 mg,温度 20 $^{\circ}\text{C}$,湿度 $< 60\%$,测试结果以样品 50% 发火电压 V_{50} (kV) 表示。

1.5 不敏感性能

为了研究 IM 发射药的不敏感性能,参考美国《非核弹药的危险性评估试验标准》MIL-STD-2105D 以及国内相关研究^[13-14],对制备的 IM 发射药进行慢速烤

燃、快速烤燃、子弹撞击、破片撞击和殉爆试验,通过测试弹损坏状态、见证板破损状态、样品残余状态等方面综合评价IM发射药的不敏感性。

1.5.1 泄压测试弹

采用一种带泄压部件的测试弹考核研制发射药的不敏感特性,详细描述见文献[15]。泄压测试弹材质为45#钢,尺寸为 $\Phi 60\text{ mm}\times 240\text{ mm}$,壁厚3 mm,结构如图2所示,具体包括:顶盖、泄压部件、扩径环(安装泄压部件)、筒体和底盖。测试弹顶端安装有5 MPa的泄压部件^[13],上下端盖通过螺纹连接。装药方式为自由装填,装填密度为 $0.86\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,装药量586 g。

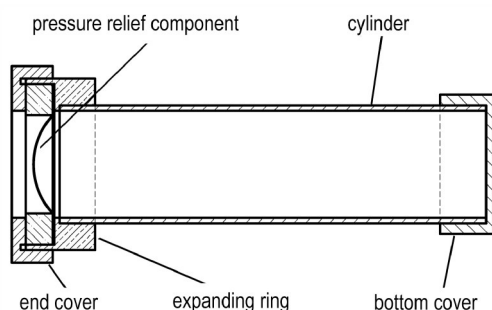


图2 泄压测试弹结构示意图

Fig.2 Structure schematic diagram of pressure relief cook-off bomb

1.5.2 慢速烤燃

慢烤试验采用烘箱进行加热。测试弹两侧固定两根热电偶测量壳体温度,上方安装一根热电偶测量环境温度,测试弹底部放置见证板,由垫圈支撑,整个装置放在烘箱中部。升温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,从室温开始加热,直至样品发生反应,试验结束后收集现场破片,通过壳体变形程度、破碎状态及见证板状态来衡量样品的响应程度。

1.5.3 快速烤燃

燃烧池尺寸为 $1500\text{ mm}\times 1500\text{ mm}$,燃烧架为 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$,燃烧架距离燃烧池高度为500 mm,燃油为工业煤油。试验过程中测试弹放置在燃烧架中部,使用铁丝固定,利用热电偶测量壳体温度,并用相机监测反应过程。试验过程中平均火焰温度在 $600\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。

1.5.4 子弹撞击

子弹撞击试验由12.7 mm弹道枪射击12.7 mm标准穿甲燃烧弹径向撞击样弹,子弹撞击速度为 $(850\pm 20)\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对整个过程进行录像监控。

1.5.5 破片撞击

采用25 mm火炮发射 $\Phi 12.7\text{ mm}$ 的破片撞击样

品构件,破片质量为18.6 g,破片速度为 $(1830\pm 60)\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对整个过程进行录像监控。

1.5.6 殉爆试验

殉爆试验装置由主发弹、被发弹、起爆药以及见证板组成。试验中用160 g Pentolite药柱引爆主发弹,主发弹与被发弹零距离接触,底部放置一块3 mm厚的见证板,被发弹顶端不封口。主发弹引爆后产生的冲击波作用于被发弹,通过观测被发弹和见证板的状态,判断发射药响应程度。

2 结果与讨论

2.1 理化、燃烧与力学性能

2.1.1 理化性能

根据GJB 770B-2005中的方法401.1,103.1以及104.2对IM发射药的密度、水分和残溶进行了测定,测得IM发射药的密度为 $1.54\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,水分含量0.54%,残溶为1.22%。

2.1.2 燃烧性能

稳定而有规律的燃烧是发射药应用于武器装药的先决条件,本研究采用密闭爆发器考察IM发射药的燃烧性能,结果如表1和图3所示。 $0.12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 装填密

表1 IM发射药密闭爆发器结果

Table 1 Closed bomb results of IM gun propellants

Δ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	t_m /ms	p_m /MPa	n	p /MPa	f / $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	T /K	α / $\text{dm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
0.12	33.2	129	0.7241	20-110	1050	2677	1.03
0.20	23.0	241	1.017	70-180			

Note: Δ is the loading density. t_m is the time to reach the maximum pressure. p_m is the maximum pressure. n is the burning rate pressure index. p is the pressure range. f is the impetus. T is theoretical explosion temperature. α is the covolume.

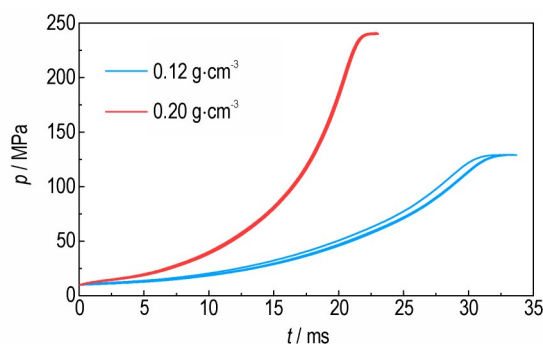


图3 不同装填密度的IM发射药密闭爆发器试验曲线

Fig.3 Closed bomb test curves of IM gun propellants with different loading density

度下,IM 发射药的最大压力 p_m 为 129 MPa,对应的燃烧时间 t_m 为 33.2 ms,在 20~110 MPa 压力范围内,燃速压力指数 n 为 0.7241;0.2 g·cm⁻³ 装填密度下,最大压力 p_m 为 241 MPa,对应的燃烧时间 t_m 为 23.0 ms,在 70~180 MPa 压力范围内,燃速压力指数 n 为 1.017。

密闭爆发器试验结果表明 IM 发射药燃烧过程稳定,火药力和余容分别为 1050 kJ·kg⁻¹ 和 1.03 dm³·kg⁻¹,理论计算爆温为 2677 K。

2.1.3 力学性能

制备的 IM 发射药的力学性能测试结果见表 2。由表 2 可知,IM 发射药在 -40, 20 °C 及 50 °C 下的抗冲击强度分别为 8.19, 11.12, 13.97 kJ·m⁻²,抗压强度分别为 131.51, 82.45, 58.22 MPa。随着温度升高,IM 发射药的抗冲击强度有所提升,抗压强度逐渐降低。与文献[16]和文献[17]中的低易损发射药相比,IM 发射药的抗冲击强度和抗压强度有显著提升;相比文献[18]中 RDX 等高能硝胺发射药,IM 发射药的低温力学性能较好,抗压强度明显提升;与文献[19]中的单基药相比,IM 发射药的抗冲击强度与单基药基本相当,抗压强度明显提升。

表 2 不同发射药力学性能

Table 2 Mechanical properties of different gun propellants

samples	T /°C	α_k /kJ·m ⁻²	σ_m /MPa
IM gun propellants	-40	8.2	131.5
	20	11.1	82.5
	50	14.0	58.2
LOVA ^[16]	-40	1.46	-
	50	-	24.2
LOVA ^[17]	-40	0.94	-
	50	-	13.5
high energy nitramine gun propellants ^[18] (nitroglycerin(NG)、RDX、 nitroguanidine(NGu))	-40	4.5	99.2
	20	11.7	24.8
	50	21.1	15.8
single-base gun propellants ^[19]	-40	7.1	99.2
	20	9.9	67.0
	50	10.9	37.6

Note: α_k is impact strength. σ_m is compress strength.

IM 发射药配方中,GAP 分子结构含有的一N₃ 和 Bu-NENA 含有的一N—NO₂ 和一O—NO₂ 等能量基团,可以为发射药提供部分能量,一定程度上能够降低配方中固体填料的添加量,这有利于提升发射药的力学性能。除此之外,GAP 对 NC 有良好的增韧作用,

Bu-NENA 对 NC 有良好的增塑作用,二者的引入有效改善了硝化棉大分子的溶塑特性,而 Bu-NENA 较低的玻璃化温度(<-80 °C)^[20] 也有利于提高发射药的低温力学性能。

2.2 感度性能

撞击、摩擦和静电感度反映发射药在不同场景和刺激下的安全性,可以作为不敏感测试验证的一种补充。考察了研制的 IM 发射药与泸州北方化学有限公司提供的制式太根发射药的撞击、摩擦和静电感度,结果见表 3。

太根发射药的特性落高 H_{50} 为 16.33 cm,摩擦感度达到 100%, V_{50} 约为 2 kV。相同测试条件下,IM 发射药的 H_{50} 为 62.62 cm,摩擦感度为 28%, V_{50} 约为 2 kV。相比太根发射药,IM 发射药的撞击感度和摩擦感度明显降低,静电感度略有降低。IM 发射药中主要的降感组分为 GAP 和 Bu-NENA,GAP 具有机械感度低、热稳定性好等优点,能与硝酸酯增塑剂混合并降低硝酸酯的撞击感度^[21]。Bu-NENA 的热化学稳定性好,感度低,其撞击感度明显低于太根等含能增塑剂^[22],加入发射药中可以降低发射药的感度^[20]。

表 3 IM 发射药与太根发射药感度测试结果

Table 3 Sensitivity test results of IM gun propellants and TEGN gun propellants

sensitivity	H_{50} /cm	P /%	V_{50} /kV	
			+	-
IM gun propellants	62.62	28	2.02	2.23
TEGN gun propellants	16.33	100	1.95	2.17

Note: H_{50} is the characteristic drop height. P is friction sensitivity. V_{50} is electrostatic sensitivity.

2.3 不敏感性能

2.3.1 慢速烤燃

多孔粒状发射药与致密的炸药相比,在慢速烤燃测试中的传热特性相差很大,被点燃后的燃烧面积大,容易导致燃烧转爆轰,因此发射药慢烤试验中的响应程度是不敏感性能评价中的关键项目。图 4 为所研制 IM 发射药慢烤试验后壳体、见证板及残药状态。图 4a 显示试验后测试壳体完整,没有破损变形,底部见证板有凹痕,仅发生微变形(图 4b)。壳体和见证板的完整程度说明 IM 发射药燃烧过程中没有强烈的压力释放,所以未对壳体和见证板造成严重损坏。慢烤后剩余大量残药(图 4c),表明慢烤过程中发射药冲破壳体顶部泄压片,壳体泄压之后,燃烧反应迅速停止,剩余药粒

在受到撞击、挤压、摩擦、加热等刺激后有变形或破损。慢速烤燃试验过程利用热电偶进行两点测温,从图5温度曲线可以看出,point 1和point 2测试温度基本一致,经过172.4 min的缓慢程序加热后,IM发射药在181 °C发生反应。根据壳体和见证板损坏情况以及剩余残药判断,IM发射药在慢烤试验中发生燃烧反应。



图4 IM发射药慢烤试验结果

Fig.4 Slow cook-off test results of IM gun propellants

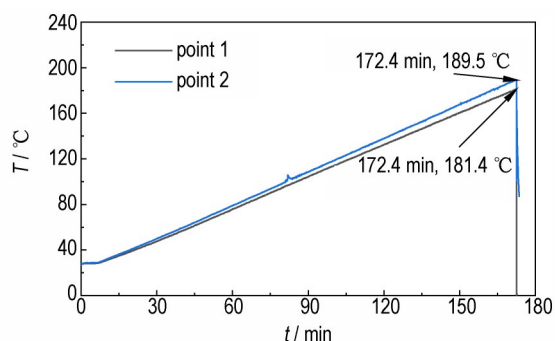


图5 IM发射药慢烤温度曲线

Fig.5 Slow cook-off test temperature curves of IM gun propellants

2.3.2 快速烤燃

快烤试验是模拟战场中在明火等快速升温情况下弹药的响应程度,研制发射药的快烤试验过程及结果

如图6所示。结合录像资料观察,点火120 s后,测试弹泄压片破开,残片飞出(图6a),随后样品继续燃烧(图6b)。试验结束后观察装药壳体,发现壳体构件完整,外观无破损变形(图6c),快烤装置保持完整,甚至没有破坏固定壳体的细铁丝,说明反应过程温和不剧烈,没有强压力释放。测试弹在快速升温条件下,通过传导和辐射的传热方式,将热量传给发射药,同时发射药以热传导的方式将表层的热量传递到内部,在发射药中形成一定的温度梯度,并在发射药自身产生热积累和自加热现象^[23],当部分发射药达到分解温度时开始分解。在此期间,壳体内部聚集大量分解气体产物,在局部形成高温高压区,相应处的发射药分解速率较其他处更快,达到一定程度后,燃气冲破壳体泄压片后泄压,发生燃烧反应。从试验现象可以判断,IM发射药在快烤试验中发生燃烧反应。

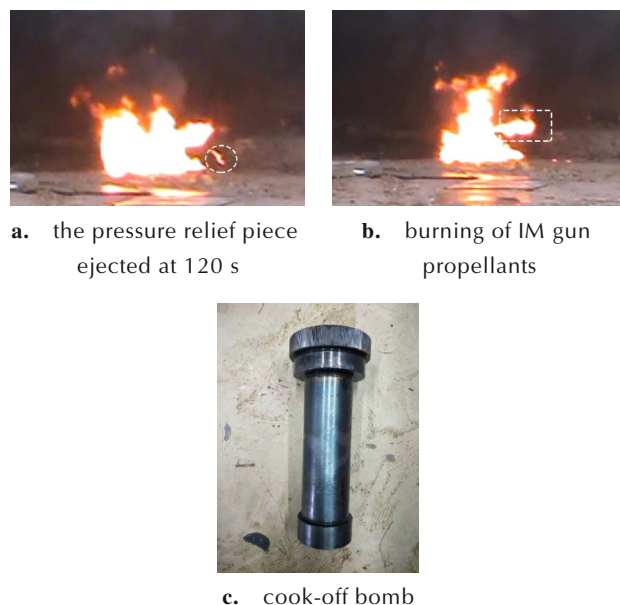


图6 IM发射药快烤试验结果

Fig.6 Fast cook-off test results of IM gun propellants

2.3.3 子弹撞击

子弹撞击试验是模拟发射药在战场环境中受到意外子弹撞击的响应程度,本研究采用12.7 mm穿甲弹撞击发射药样弹的径向中部位置,结果见图7。结合录像资料,子弹射击后测试弹倒地,之后未产生任何现象(无冒烟或火光)(图7a)。试验后观察现场,除了子弹穿孔产生的破洞外,测试弹壳体基本保持完整,壳体内部及周围存在大量未燃烧残药,底部见证板无明显变形,仅有轻微凹痕(图7b)。根据上述试验现象判断,IM发射药在子弹撞击试验中发生燃烧反应。



a. the state after the cook-off bomb and witness plate fell to the ground
b. cook-off bomb and witness plate

图7 IM发射药子弹撞击试验结果

Fig.7 Bullet impact test results of IM gun propellants

在枪弹的高速撞击及摩擦等因素作用下,部分机械能迅速转化为热能,IM发射药药粒受到冲击和摩擦作用,并迅速分解燃烧,燃烧过程较温和,未见药粒喷射,也没有发生进一步的剧烈反应。

2.3.4 破片撞击

和慢烤刺激类似,发射药受高速破片撞击后,瞬间大量发射药药粒被点燃,容易导致燃烧转爆轰,本研究采用12.7 mm锥形破片撞击发射药样弹的径向中部位置,试验结果如图8所示。从图8看出,壳体背部筒体破裂,见证板发生变形,并有轻微凹痕。结合录像资料分析,破片撞击样弹瞬间,撞击位置出现明亮火光,随后火光消失,壳体受击倒地发生破裂,药粒四散,试验现场再未观察到冒烟或火光,试验结束后收集到大量残药。由上述现象分析,破片撞击测试弹后,药粒受到高速破片的冲击和摩擦作用,局部温度快速升高并分解燃烧,壳体破裂后,壳体内部压力降低,热传递作用减弱,因此局部燃烧反应在未传播之前迅速停止。



图8 IM发射药破片撞击试验结果

Fig.8 Fragment impact test results of IM gun propellants

根据壳体破裂情况以及剩余残药,判断IM发射药在破片撞击试验中发生局部燃烧反应。

2.3.5 殉爆试验

殉爆试验是模拟弹药在受到冲击波、热力结合等刺激下的响应程度,本研究采用主发弹与被发弹零距离放置,先由雷管引爆传爆药柱,进而引爆主发弹。图9为IM发射药殉爆试验结果,从图9中可以观察到试验后被发弹、见证板以及剩余残药的状态。被发弹在受到主发弹爆炸后产生的冲击波、爆炸产物以及高速碎片等刺激下,壳体底部发生变形,其余完好无破裂;见证板在主发弹和被发弹的强剪切力作用下破裂,板上留下2个部分剪切的圆孔,但并未形成穿孔;试验后收集到部分剩余残药,主发弹壳体碎片未收集。从被发弹仅变形无破裂、见证板未穿孔以及收集到部分残药的试验结果,判断Bu-NC/RDX发射药在殉爆试验中发生燃烧反应。



a. cook-off bomb

b. witness plate



c. residue of gun propellant grains

图9 IM发射药殉爆试验结果

Fig.9 Sympathetic detonation test results of IM gun propellants

3 结论

(1)以NC和GAP为黏结剂,Bu-NENA为增塑剂,RDX为高能填料,石墨为导热助剂制备了IM发射药;GAP和Bu-NENA的引入改善了硝化棉大分子的溶塑

特性,IM发射药-40℃下抗冲击强度和抗压强度分别为 $8.2\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 131.5 MPa ;实测IM发射药的火药力为 $1050\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,理论爆温为 2677 K 。

(2)低感组分GAP和Bu-NENA有利于降低IM发射药的感度,IM发射药的特性落高 H_{50} 为 62.62 cm ,摩擦感度为28%,与太根发射药相比,感度大幅降低。

(3)IM发射药在慢烤、快烤、子弹撞击、破片撞击和殉爆试验中未发生爆燃或爆炸,在慢烤、快烤、以及殉爆试验中发生燃烧反应,在子弹撞击试验和破片撞击试验中的响应程度低于燃烧反应。以上结果表明,IM发射药具有良好的不敏感性,是一种有应用前景的低敏感发射药。

参考文献:

- [1] COURTY L, GILLARD P, EHRHARDT J, et al. Experimental determination of ignition and combustion characteristics of insensitive gun propellants based on RDX and nitrocellulose[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 229: 111402.
- [2] 肖忠良, 梁昊. 关于低敏感发射药与装药技术的思考与建议[J]. 含能材料, 2019, 27(11): 894-896.
XIAO Zhong-liang, LIANG Hao. Thoughts and suggestions on insensitive propellant and charge technology[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(11): 894-896.
- [3] 徐复铭. 21世纪先进发射药(2): 低敏感高能发射药——新配方、装药、点火和理论模拟技术[J]. 火炸药学报, 2003, 26(4): 1-4, 22.
XU Fu-ming. The insensitive high energy propellants in 21th century[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(4): 1-4, 22.
- [4] 张朝阳. 含能材料能量-安全性间矛盾及低感高能材料发展策略[J]. 含能材料, 2018(1): 2-10.
ZHANG Chao-yang. On the energy & safety contradiction of energetic materials and the strategy for developing low-sensitive high-energetic materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018(1): 2-10.
- [5] 何利明, 肖忠良, 张续柱, 等. 国外火药含能粘结剂研究动态[J]. 含能材料, 2003(2): 99-102.
HE Li-ming, XIAO Zhong-liang, ZHANG Xu-zhu, et al. The research and development on energetic binders for propellants abroad [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003(2): 99-102.
- [6] 郭茂林, 马忠亮, 何利明, 等. GAP基热塑性弹性体改性单基发射药的热行为及力学性能[J]. 含能材料, 2017, 25(3): 198-202.
GUO Mao-lin, MA Zhong-liang, HE Li-ming, et al. Thermal behavior and mechanical property of GAP-base energetic thermoplastic elastomer modified single-base propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(3): 198-202.
- [7] 郑启龙, 田书春, 周伟良, 等. GAP基聚氨酯包覆单基发射药能量与燃烧性能[J]. 含能材料, 2016(8): 787-792.
ZHENG Qi-long, TIAN Shu-chun, ZHOU Wei-liang, et al. Energy and combustion properties of the GAP-base polyurethane coated single-base propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016(8): 787-792.
- [8] WU Y, LUO Y, GE Z. Properties and application of a novel type of glycidyl azide polymer (GAP)-modified nitrocellulose powders [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(1): 67-73.
- [9] ZHAO B, ZHANG T, WANG Z, et al. Kinetics of Bu-NENA evaporation from Bu-NENA/NC propellant determined by isothermal thermogravimetry [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(3): 253-259.
- [10] QI X, LI H, ZHAO Y, et al. Comparison of the structural and physical properties of nitrocellulose plasticized by N-butyl-N-(2-nitroxy-ethyl) nitramine and nitroglycerin: computational simulation and experimental studies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 362: 303-310.
- [11] FIELD J E. Hot spot ignition mechanisms for explosives [J]. *Accounts of Chemical Research*, 1992(25): 489-496.
- [12] 钟凯, 刘建, 王林元, 等. 含能材料中“热点”的理论模拟研究进展[J]. 含能材料, 2018(1): 11-20.
ZHONG Kai, LIU Jian, WANG Lin-yuan, et al. Issue of 'hot-spot' in energetic materials: Recent progresses of modeling and calculations [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018(1): 11-20.
- [13] 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, (3): 71-74.
YANG Li-xia, ZHANG Zou-zou, LIU Lai-dong. Experimental study on vulnerability response of propelling charge to thermal stimuli [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2008, (3): 71-74.
- [14] 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(6): 715-719.
ZHANG Zou-zou, YANG Li-xia, LIU Lai-dong, et al. Vulnerable response of gun propellant by bullet impact test [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011(6): 715-719.
- [15] 宋育芳, 肖乐勤, 李纯志, 等. 基于可控泄压法研究发射药装药对慢速烤燃响应的影响[J]. 火炸药学报, 2021, 44(4): 543-548.
SONG Yu-fang, XIAO Le-qin, LI Chun-zhi, et al. The effect of gun propellant charge on slow cook-off response based on controlled pressure relief method [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(4): 543-548.
- [16] 廖昕, 黄振亚, 杨文宝, 等. 高能低易损性发射药试验研究[J]. 火炸药学报, 2001, (4): 8-9.
LIAO Xin, HUANG Zhen-ya, YANG Wen-bao, et al. Study on high-energy LOVA propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, (4): 8-9.
- [17] 廖昕, 杨文宝, 黄振亚, 等. 低易损发射药配方用粘结剂与力学性能关系探索研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(4): 36-38.
LIAO Xin, YANG Wen-bao, HUANG Zhen-ya, et al. Study on the mechanical properties with the inert binders of LOVA propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, 24(4): 36-38.
- [18] YANG J, SHU A, MA F, et al. Effect of GAP on the mechanical and combustion performance of high energy nitramine gun propellant [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 37: 83-86.
- [19] 喻艾萍, 徐滨, 王彬彬, 等. 三元混合溶剂对高氮含量单基发射药性能的影响[J]. 含能材料, 2020, 28(3): 235-241.

- Al Yu-ping, XU Bin, WANG Bin-bin, et al. Effect of ternary mixed solvents on the single-based propellants with high nitrogen content[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Han-neng Cailiao)*, 2020, 28(3): 235-241.
- [20] 王连心, 薛金强, 何伟国, 等. BuNENA 含能增塑剂的性能及应用[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2014, 12(1): 1-22.
- WANG Lian-xin, XUE Jin-qiang, HE Wei-guo, et al. Performance and application of Bu-NENA energetic plasticizer[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2014, 12(1): 1-22.
- [21] 陈建宇, 徐更光. GAP应用研究进展[J]. *兵工自动化*, 2015, 34(4): 67-70.
- CHEN Jian-yu, XU Geng-guang. Research on GAP application[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2015, 34(4): 67-70.
- [22] 鲍冠苓, 沈琼华, 李遵来. 羟乙基丁硝酸酯增塑剂的性能研究[J]. *兵工学报*, 1995, (2): 43-44.
- BAO Guan-ling, SHEN Qiong-hua, LI Zun-lai. Study on properties of Bu-NENA plasticizer[J]. *Acta Armamentarii*, 1995, (2): 43-44.
- [23] 罗丹. 带壳装药在快烤刺激下的响应规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- LUO Dan. Research on the response law of shelled charges to the stimulus of fast cook-off[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

Insensitivity Performance of GAP/NC-based Gun Propellants

SONG Yu-fang¹, XIAO Le-qin¹, LI Chun-zhi², TANG Fang-yuan², LONG Yi-qiang², ZHOU Wei-liang¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Luzhou North Chemical Industries Co., Ltd., Luzhou 646605, China)

Abstract: The research on low-sensitivity gun propellants has a vital impact on the survivability and safety performance of weapon system. Gun propellant (IM) with nitrocellulose (NC) and glycidyl azide polymer (GAP) as binder was prepared. N-butyl-N-nitramine (Bu-NENA) was used as low sensitive energetic plasticizer, hexogen (RDX) was used as high-energy filler and graphite as additive of thermal conductive. The physicochemical, combustion, mechanical, and sensitivity properties of the IM gun propellant were studied, and the insensitivity properties were further studied by slow cook-off, fast cook-off, bullet impact, fragment impact and sympathetic detonation tests. Results showed that the gun propellant had stable combustion performance, and the impetus was $1050 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Theoretical explosion temperature was 2677 K. The impact strength and the compressive strength were $8.2 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ and 131.5 MPa at $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively. The sensitivity of the gun propellant ($H_{50}=62.62 \text{ cm}$, $P=28\%$, $V_{50}=1.95 \text{ kV}$) was greatly reduced compared with TEGN gun propellants ($H_{50}=16.33 \text{ cm}$, $P=100\%$, $V_{50}=2.02 \text{ kV}$). Moreover, only combustion reactions were observed in slow cook-off, fast cook-off, bullet impact, fragment impact and sympathetic detonation tests. It demonstrated that the prepared gun propellants possessed good low vulnerability characteristics.

Key words: gun propellants; low-sensitivity; sensitivity; mechanical properties; combustion

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021301

(责编: 王馨逸)