

文章编号: 1006-9941(2010)04-0397-05

硝胺粒度及类型对 BAMO-AMMO 基 ETPE 发射药燃烧性能的影响

赵 瑛, 杨丽侠, 刘 毅, 赵宏立, 靳建伟, 刘来东, 赵宝明, 张邹邹

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 通过密闭爆发器实验研究了硝胺粒度及类型对 BAMO-AMMO 基发射药燃烧性能的影响规律。结果表明, 在 50 ~ 260 MPa 范围内, BAMO-AMMO 基发射药燃速压力指数较高, 约 1.2; 在 75 ~ 175 MPa 和 175 ~ 260 MPa 的压力区间, 压力指数存在转折, 从 1.2 下降到 1; RDX 粒度越大, BAMO-AMMO 基发射药燃速和压力指数越大; 通过 RDX 粒度的级配或两种氧化剂 (RDX 和 HMX) 混合使用可以提高 BAMO-AMMO 基发射药在中高压段 (75 ~ 260 MPa) 的燃速, 也可降低此压力范围内的燃速压力指数, 但不显著; 氧化剂类型 (RDX, HMX) 不同的 BAMO-AMMO 基发射药相比, 以 HMX 为氧化剂的样品燃速较低, 压力指数较高。

关键词: 物理化学; 聚双叠氮甲基-氧杂环丁烷 (BAMO); 聚叠氮甲基-甲基氧杂环丁烷 (AMMO); 发射药; 燃烧性能; 燃速; 燃速压力指数
中图分类号: TJ55; O64 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.009

1 引 言

采用含能热塑性弹性体 (energetic thermoplastic elastomer, ETPE) 作发射药的粘结剂是目前高能低敏感发射药发展和应用的方向^[1-4]。ETPE 分子由结构相似、互溶的软硬嵌段组成, 将其加热至硬段熔点以上时, 弹性体具有低的熔体粘度, 适合添加高含量固体颗粒。Poly(BAMO-AMMO) 是 1989 年美国海军聚硫橡胶公司以聚双叠氮甲基-氧杂环丁烷 (BAMO) 和聚叠氮甲基-甲基氧杂环丁烷 (AMMO) 作为嵌段合成的新型含能粘结剂^[5], 属叠氮类聚醚型含能热塑性弹性体材料, 具有含氮量高、能量水平高、性能调节范围较广等优点, 是比较理想的用作发射药粘结剂系统的含能热塑性弹性体材料, 也是研究最为广泛的新型含能粘结剂^[6-8]。

目前国内以 BAMO-AMMO 为粘结剂, 组配高能量密度的固体组分 (如 RDX、HMX 和 CL-20 等) 制备高能量新型发射药的研究十分活跃。宋秀铎^[9] 等对 BAMO-AMMO 与 RDX、HMX、CL-20 等固体组分进行了相容性研究, 结果显示 BAMO-AMMO 与上述几种材料相容; 赵晓梅^[10] 对 ETPE 发射药的点火性能进行了研究, 为解决 ETPE 发射药难点火、点火延迟期的问题提供了一条有效的技术途径——等离子点火。

收稿日期: 2009-10-26; 修回日期: 2009-12-17

基金项目: 火炸药燃烧国防科技重点实验室基金 (9140C3502040802)

作者简介: 赵瑛 (1981 -), 女, 硕士研究生, 主要从事发射药性能测试及评估研究。e-mail: 18winter@163.com

由于 ETPE 发射药配方体系与常规 NC 基发射药差异较大, 国内以 BAMO-AMMO 为粘结剂的发射药配方正处于探索阶段, 但对燃烧性能的研究文献报道较少。为此, 本实验设计制备了以 Poly(BAMO-AMMO) 为粘结剂, RDX、HMX 为氧化剂的五种 ETPE 发射药样品, 通过密闭爆发器试验研究了 BAMO-AMMO 基发射药燃烧特性, 讨论分析了 RDX 粒度和氧化剂类型对其燃烧性能的影响规律。

2 实验部分

2.1 主要原料

BAMO-AMMO, 西安近代化学研究所制备, 纯度为 99.5% (液相色谱法), 数均相对分子质量 25000, 玻璃化温度 $-28.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 常温抗拉强度 4.0 ~ 5.3 MPa, 常温延伸率 336% ~ 680%; RDX (B 级粒度 $d_{50} = 300\text{ }\mu\text{m}$, H 级粒度 $d_{50} = 45\text{ }\mu\text{m}$), 工业纯, 兰州白银银光化学材料厂; HMX, 粒度 $d_{50} = 125\text{ }\mu\text{m}$, 工业纯, 八〇五厂。

2.2 配方工艺

实验设计了五种 BAMO-AMMO 基 ETPE 发射药体系, 含 75% 的高含量固体含能物质 (RDX 或 HMX)。该体系工艺区别于硝化棉 (NC) 基的发射药体系: 采用溶剂法捏合制备得到均匀的药团, 使固体颗粒与粘结剂均匀分散。常规 NC 基发射药捏合完直接压伸, 该新型的粘结剂体系本身较为粘稠, 捏合过程中有空气进入药团, 配方中大量固体颗粒易在彼此之间形成间隙或堆积, 因此, 需对捏合好的药团进行内部气泡驱除, 改善固

体颗粒分布的微结构,使之致密,再将其压伸成型,切成长度 40 mm 的 18/1 单孔管状药药条,配方见表 1。

表 1 BAMO-AMMO 基 ETPE 发射药设计配方

Table 1 Formulations of ETPE propellant (TPEP) containing BAMO-AMMO

No.	solid composition/%	particle diameter / μm	BAMO-AMMO /%	others /%
TPEP-1	75RDX	300 μm	22.5	2.5
TPEP-2	75RDX	300 μm : 45 μm = 2 : 3	22.5	2.5
TPEP-3	75RDX	45 μm	22.5	2.5
TPEP-4	60RDX + 15HMX	45 μm , 125 μm	22.5	2.5
TPEP-5	75HMX	125 μm	22.5	2.5

2.3 燃烧性能实验

在密闭爆发器容积为 112.32 mL、常温 25 $^{\circ}\text{C}$ 、装填密度 (Δ) 0.2 g \cdot cm $^{-3}$ 、传感器型号 kistler6215, 灵敏度: -1.488 pc/MPa。在点火药 2 $^{\#}$ NC、药量 1.1 g, 点火压力 10 MPa 的条件下, 测得 TPEP 的 p - t 曲线, 并根据药型尺寸, 经过数据处理得到 u - p 曲线。

3 结果与讨论

3.1 RDX 粒度对 BAMO-AMMO 基发射药燃烧性能的影响

图 1 是三种粒度不同的样品密闭爆发器试验的 p - t 曲线。从 p - t 曲线可以看出, RDX 粒度级配的样品 TPEP-2 压力上升速率较快, 达到最大压力的时间最短, 即燃烧时间较短。TPEP-1, TPEP-2 相比较, RDX 粒度较大的 TPEP-1 压力上升至最大压力的时间较短, 燃烧较快。说明 RDX 粒度不同, 样品燃速不同, RDX 粒度大的样品燃速较高, 与大粒度的 RDX 对发射药样品能提高燃速^[11-12] 结论一致。 u - p 曲线也证明了这一点 (见图 2)。三种样品在不同压力下的燃速见表 2。

由图 2 及表 2 可知, 随着压力的增加, 三个样品燃速呈指数式增加。在低压 10 ~ 75 MPa 范围内, 三个样品的燃速基本一致, 曲线近似重合; 75 ~ 260 MPa 压强范围内, TPEP-2 的 u - p 曲线位于 TPEP-1, TPEP-3 的上方, 对应同一压力点下, 燃速最大, 且在高压下燃速提高越明显, 其原因可能为^[13-14] TPEP-2 采用粗颗粒度的黑索今搭配, 细颗粒的 RDX 所占比例较大 (60%), 使得大量的细颗粒 RDX 填充在粗颗粒 RDX 周围, 增大了大颗粒周围的支撑点, 改善了发射药的内部微观组织结构, 在燃烧过程中, 随着压力的增大, 药体燃烧表面变化较大, 因而燃速较高, 这也表明通过对

RDX 的合理级配可以提高 ETPE 发射药在中高压下的燃速, 即对该药有较好的燃速调节作用; 在 75 ~ 260 MPa 压力区间, TPEP-3 与 TPEP-1 比较, 相同压力下, RDX 粒度较大的样品 TPEP-1 的燃速高于 TPEP-3, 分析其原因^[14] RDX 是熔融后分解, RDX 粒径越大, 在低压下的热分解速率较慢, 而吸热熔融后随着燃烧的进行, 压力增加, 热分解速度加快, 高压下的热分解变得较为剧烈, RDX 可能出现爆燃现象, 与燃烧开始阶段相比, 分解放热明显增加, 使药体的整个燃烧表面凹凸程度增加, 反应速度加快, 因而燃速较高; 而小粒度 RDX, 比表面积较大, 起始阶段, 熔融吸热多, 随着压力的变化药体燃烧的比表面比较平缓, 特别是高压范围内, 其比表面变化速率较小, 故燃速较低。

燃速压力指数 n 是表征火药燃烧性能的重要参数, 压力指数大小反映了发射药燃速对压力变化的敏感程度。为了深入分析 RDX 粒度对 BAMO-AMMO 基发射药在不同压力段的影响程度, 对含有不同粒度 RDX 的三个样品的 u - p 曲线利用最小二乘法进行分段指数式 ($y = a \cdot x^b$) 拟合, 得到四个压力段的燃速压力指数 n , 燃速系数 μ 及整个压力区间 50 ~ 260 MPa 范围内的燃速压力方程, 结果见表 3。

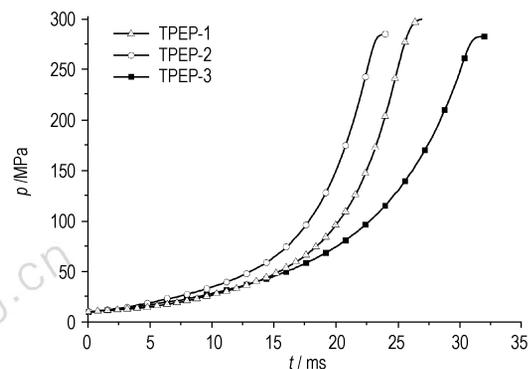


图 1 RDX 粒度不同的 TPEP 样品 p - t 曲线

Fig. 1 p - t curves of TPEP with different particle sizes RDX

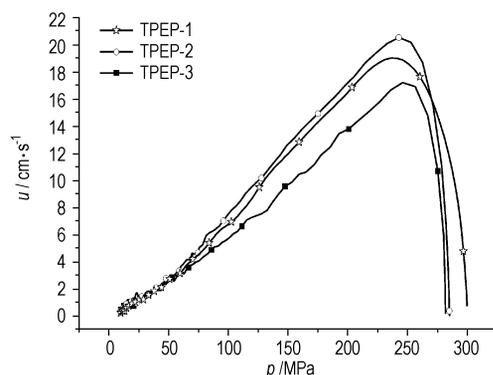


图 2 RDX 粒度不同的 TPEP 样品 u - p 曲线

Fig. 2 u - p curves of TPEP with different particle sizes RDX

表 2 RDX 粒度不同的发射药样品在不同压力点的燃速

Table 2 Burning-rate of TPEP with different particle sizes RDX at different pressures $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

samples	75 MPa	100 MPa	125 MPa	150 MPa	175 MPa	200 MPa	220 MPa	250 MPa	260 MPa
TPEP-1	4.539	6.714	9.243	11.754	12.514	14.623	16.099	18.129	17.634
TPEP-2	5.053	7.529	9.944	12.672	14.937	17.206	19.125	20.343	19.0696
TPEP-3	4.089	5.799	7.472	9.624	11.708	13.811	15.323	17.096	15.785

表 3 RDX 粒度不同的发射药样品在不同压力范围内拟合数据

Table 3 Regress data of TPEP containing different particle diameters RDX at different pressure intervals

propellant	parameter	pressure/MPa				p_m /MPa	$u = \mu p^n$ (50 ~ 260 MPa)
		10 ~ 75	75 ~ 175	175 ~ 260	50 ~ 260		
TPEP-1	μ	0.0203	0.0129	0.0613	0.0193	299.75	$u = 0.0193p^{1.275}$
	n	1.2450	1.361	1.0562	1.2750		
TPEP-2	μ	0.0324	0.0212	0.0850	0.0306	285.39	$u = 0.0306p^{1.192}$
	n	1.1450	1.2740	1.0019	1.1920		
TPEP-3	μ	0.0539	0.0202	0.0512	0.0227	281.79	$u = 0.0227p^{1.205}$
	n	0.9910	1.2280	1.0544	1.2050		

Note: μ is burning rate coefficient, n is pressure exponent, p_m is maximum pressure. The correlation coefficient of data processing are all over 0.99.

从表 3 的数据分析可得, RDX 粒度不同的 BAMO-AMMO 基发射药在不同压力区间的压力指数均大于 1, 燃速随着压力的增加较敏感。在 10 ~ 75 MPa 低压范围内, 燃烧受点火过程影响, 需建立平衡过程, 因此, 通常爆发器的低压段不能反映发射药的燃烧状态; 在 175 ~ 260 MPa 高压范围内, 三个样品的压力指数 n 均小于 75 ~ 175 MPa 范围内的压力指数, 从 1.25 左右下降到接近 1, 在高压下有下降的趋势, 压力指数存在转折; 在 175 ~ 260 MPa 和 50 ~ 260 MPa 两个压力区间, TPEP-2 压力指数 n 最小; 在整个压力段 50 ~ 260 MPa, 三个样品燃速压力指数均较高, 在 1.2 左右, 压力指数的排序为 $n(\text{TPEP-2}) < n(\text{TPEP-3}) < n(\text{TPEP-1})$, 分析可能原因为 RDX 粒度越大, 随着燃烧的进行, 压力升高, 气相化学反应加快, 一方面传导给燃面的热量增加, 燃面随着压力的变化速率较大, 另一方面气相热反馈增加, 燃速变化较快, 故压力指数 n 越大, 因此减小 RDX 粒度, 可降低 ETPE 发射药的燃速压力指数, 但对燃速的影响不能忽略。

3.2 硝酸类型(氧化剂)对 BAMO-AMMO 基发射药燃烧性能的影响

发射药的燃速主要取决于发射药凝聚相反应放出的热量与气相反应的热反馈, 这两部分热量又与发射药的主组分有关。BAMO-AMMO 基发射药中固体组分即氧化剂的比例高达 75%, 因此有必要深入分析氧化剂类型对 BAMO-AMMO 基发射药燃烧性能的影响。在试验配方中, 选取了一组以 RDX、HMX 以及

RDX 与 HMX 混合物为氧化剂的样品作为研究对象, 并将密闭爆发器实验的 $p-t$ 曲线以及 $u-p$ 曲线进行对比分析, 分别见图 3 和图 4。

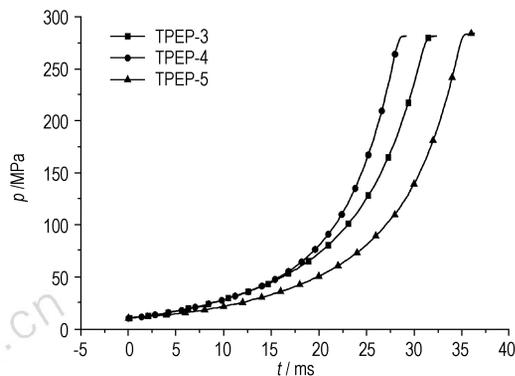


图 3 不同氧化剂 TPEP 样品的 $p-t$ 曲线

Fig. 3 $p-t$ curves of TPEP containing different solid oxidizers

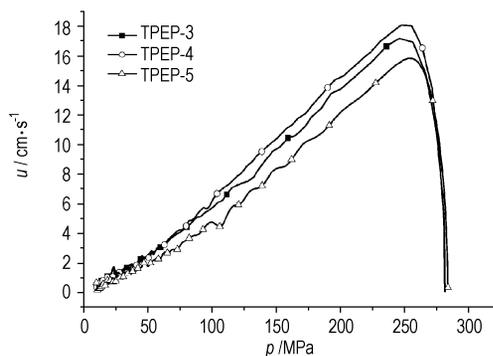


图 4 不同氧化剂的 TPEP 样品 $u-p$ 曲线

Fig. 4 $u-p$ curves of TPEP containing different solid oxidizers

由图3可见,当配方中氧化剂含量相同,类型不同时,以RDX、HMX混合物作为氧化剂的样品TPEP-4压力上升速度最快,上升至最大压力的时间最短;TPEP-3与TPEP-5相比,以RDX为氧化剂的样品TPEP-3压力上升速度较快,燃烧时间较短。

图4和表4分别为TPEP-3,4,5的 $u-p$ 曲线及75~260 MPa压力范围内部分压力点对应的燃速列表。

从图4及表4可以看出,氧化剂种类不同的三个样品燃速随着压力的增加呈指数式增加。在75~260 MPa压力区间,对应同一压力点,燃速的大小排序为: $u(\text{TPEP-4}) > u(\text{TPEP-3}) > u(\text{TPEP-5})$ 。其原因可能为^[14-15]:发射药表面处 NO_2 气体浓度是影响发射药燃速的重要因素,从热分析角度,由于HMX的存在使RDX熔点从205.0℃降至191.3℃,RDX组分熔融过程对HMX/RDX混合体系的影响很大,RDX的分解产物尤其是气相产物 NO_2 促进了HMX的分解,因此,随着燃烧的进行,在压力的作用下,分解气相产物中大量的活性组分 NO_2 对凝聚相有催化作用,出现了二次分解放热,使药体表面很快达到反应温度,反应速度加快,燃速较高;HMX和RDX的混合,氧化剂粒径不同,使发射药的微观组织结构得到了进一步改善,燃面随着压力的增大变化加快,因而燃速较高。

对图4中的 $u-p$ 曲线利用最小二乘法进行分段指数式($y = a \cdot x^b$)拟合,得到四个压力段的燃速压力指数 n 及燃速系数 μ 及整个压力区间50~260 MPa范围内的燃速压力方程,见表5。由表5可知,氧化剂类型不同的BAMO-AMMO基发射药的在不同压力区间

燃速压力指数均较高,大于1;在75~175 MPa和175~260 MPa的压力区间,压力指数从1.2以上下降到1左右,存在转折;在175~260 MPa高压区间,TPEP-4的压力指数最小,但与TPEP-3在相同压力段的压力指数 n 接近,说明通过RDX与HMX的复配,BAMO-AMMO基发射药的燃速压力指数有所下降,但不明显。而TPEP-5在不同压力段的压力指数均高于TPEP-3,TPEP-4,且对应燃速最低,原因为HMX的熔点(278℃)较RDX(205℃)高且分解活化能较高^[16]。

3.3 BAMO-AMMO基发射药燃速压力指数变化规律

从表3和表5可以看出,在75~175 MPa,175~260 MPa的压力区间,BAMO-AMMO基发射药样品的燃速压力指数大致出现从大于1.2到1的一个下降过程,存在转折;50~260 MPa之间,改变RDX粒度和固体组分类型对BAMO-AMMO基发射药的燃速压力指数影响较小,不同样品的压力指数较高且相近,均在1.2左右,其原因以BAMO-AMMO为粘结剂的ETPE发射药中,由于硝胺含量高达75%,所以燃烧过程主要由硝胺组分控制,燃速受压力的影响程度较大,压力指数较高。

4 结论

(1) BAMO-AMMO基发射药固体组分(RDX或HMX)含量高达75%,燃速随着压力的增加较敏感,整个压力段50~260 MPa燃速压力指数较高,在1.2左右;在75~175 MPa和175~260 MPa压力区间,燃速压力指数随着压力的增加减小,压力指数大致从大于1.2下降到1左右,存在转折。

表4 不同氧化剂的TPEP样品在不同压力点的燃速

samples	cm · s ⁻¹								
	75 MPa	100 MPa	125 MPa	150 MPa	175 MPa	200 MPa	220 MPa	250 MPa	260 MPa
TPEP-3	4.089	5.799	7.472	9.624	11.708	13.811	15.323	17.096	15.785
TPEP-4	4.216	6.309	8.532	10.372	12.343	14.322	15.952	18.025	17.161
TPEP-5	3.197	4.407	5.687	8.771	10.289	11.991	13.499	15.857	15.569

表5 不同氧化剂的TPEP样品在不同压力范围内的拟合数据

propellant	parameter	pressure/MPa				p_m /MPa	$u = \mu p^n$ (50~260 MPa)
		10~75	75~175	175~260	50~260		
TPEP-3	μ	0.0539	0.0202	0.0517	0.0227	281.79	$u = 0.0227 p^{1.205}$
	n	0.991	1.228	1.0544	1.205		
TPEP-4	μ	0.0289	0.0182	0.0634	0.0241	281.36	$u = 0.0241 p^{1.205}$
	n	1.144	1.267	1.0247	1.205		
TPEP-5	μ	0.0253	0.00741	0.0149	0.00925	284.31	$u = 0.00925 p^{1.352}$
	n	1.114	1.398	1.263	1.353		

Note: μ is burning rate coefficient, n is pressure exponent, p_m is maximum pressure. The correlation coefficient of data processing are all over 0.99.

(2) RDX 粒度越大, BAMO-AMMO 基发射药燃速越大, 压力指数 n 越大。

(3) 通过 RDX 粒度的级配和 RDX 与 HMX 混合使用可以提高 BAMO-AMMO 基发射药在中高压段 (75 ~ 260 MPa) 的燃速, 且随着压力的增加, 燃速提高明显, 但对此压力范围内的燃速压力指数影响较小。

(4) 氧化剂类型 (RDX, HMX) 不同的 BAMO-AMMO 基发射药相比, 以 HMX 为氧化剂样品燃速较低, 压力指数较高。

参考文献:

[1] Sanghavi R R, Kamale P J, Shaikh M A R, et al. Glycidyl azide polymer-based enhanced energy LOVA gun propellant [J]. *Defence Science Journal*, 2006, 56(3): 407-416.

[2] Robert B Wardle, W Wayne Edwards, Jerald C Hinshaw, et al. Polyoxetane thermoplastic elastomers as gun propellant binders [C] // 6th International Gun Propellant Symposium, Parsippany, NJ, November, 1994.

[3] 徐复铭. 21 世纪发射药发展: 低敏感高能发射药(1)——新材料和新实验技术[J]. *南京理工大学学报*, 2003(5): 2-5. XU Fu-ming. Advanced gun propellants of the 21st century: Insensitive high energy propellants (1)——new materials and experimental technology [J]. *Journal of Nanjing University of Science And Technology (Natural Science)*, 2003(5): 2-5.

[4] 何利民, 萧忠良, 张续柱, 等. 国外火药含能粘结剂研究动态[J]. *含能材料*, 2003, 11(2): 99-102. HE Li-min, 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, 11(2): 99-102.

[5] 陆安舫. 美国 LOVA 发射药发展概况[J]. *火炸药学报*, 1996, 16(4): 37-39. LU An-fang. The development profile of LOVA gun propellant in

USA [J]. *Chinese Journal Of Explosives & Propellants*, 1996, 16(4): 37-39.

[6] Advanced gun propellants. Advanced energetic materials, committee on advanced energetic materials and manufacturing technologies, National Research Council [R]. 2004.

[7] Miyazaki T, Kubota N. Energetics of BAMO [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1992, 17: 5-9.

[8] Sanghavi R R, Kamale P J, Shaikh M AR, et al. HMX based enhanced energy LOVA gun propellant [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 14(3): 532-534.

[9] 宋秀铎, 赵凤起, 王江宁, 等. BAMO-AMMO 的热行为及其含能组分的相容性[J]. *火炸药学报*, 2008, 31(3): 76-77. SONG Xiu-duo, ZHAO Feng-qi, WANG Jiang-ning, et al. Thermal behaviors of BAMO-AMMO and its compatibility with some energetic materials [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2008, 31(3): 76-77.

[10] 赵晓梅. ETPE 发射药点火燃烧特性及影响因素研究 [D]. 西安: 西安近代化学研究所, 2009.

[11] 殷雅侠, 徐赛龙, 王端, 等. 一种新型 LOVA 发射药点火性能的研究 [J]. *火炸药学报*, 2002, 2(1): 9-10. YIN Ya-xia, XU Sai-long, WANG Duan, et al. The study on ignition performance of a novel LOVA propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 2(1): 9-10.

[12] 廖昕. 低易损发射药性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2003.

[13] 宋小兰, 宋崇伟, 郭效德, 等. 制备工艺对 HMX 机械感度和热分解特性的影响 [J]. *含能材料*, 2008, 16(2): 700-701. SONG Xiao-lan, AN Chong-wei, GUO Xiao-de, et al. Effect of preparation methods on mechanical sensitivity and thermal decomposition of HMX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2): 700-701.

[14] 王泽山. 火炸药理论与实践 [M]. 北京: 中国北方工业化学总公司, 2001: 368-371.

[15] 刘子如. 含能材料热分析 [M]. 北京: 北京国防工业出版社, 2008: 73-75.

[16] 王伯羲, 冯增国, 杨荣杰. 火药燃烧理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997: 309-316.

Effect of Particle Size and Types of Nitramine on Combustion Performance of ETPE Gun Propellants Based on BAMO-AMMO

ZHAO Ying, YANG Li-xia, LIU Yi, ZHAO Hong-li, JIN Jian-wei, LIU Lai-dong, ZHAO Bao-ming, ZHANG Zou-zou
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Effect of particle size and types of nitramine on combustion performance of energetic thermoplastic elastomer (ETPE) gun propellants based on BAMO-AMMO were studied by closed bomb test. Results show that the pressure exponent of ETPE gun propellant is about 1.2 under 50-260 MPa, while the pressure exponent turns down from 1.2 to 1 as the pressure range changes from 75-175 MPa to 175-260 MPa. Burning rate and pressure exponent of the ETPE gun propellant increases with increasing of the particle size of RDX. It is also found that the grain size matching of RDX or mixed oxidizer containing RDX and HMX can increase the burning rate of the ETPE gun propellant and unconspicuously decrease the pressure exponent at 75-260 MPa. The sample of ETPE gun propellant using HMX as oxidizer has lower burning rate and higher pressure exponent than the sample of ETPE gun propellant using RDX as oxidizer.

Key words: physical chemistry; 3,3-bis(azidomethyl) oxetane (BAMO); 3-azidomethyl-3-methyloxetane (AMMO); gun propellant; combustion performance; burning rate; pressure exponent

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.009