

# RDX 粒度对某高能硝胺发射药燃烧性能的影响

豆松松, 曹永杰, 张明安, 聂奎, 张薇薇, 章旺

(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

**摘要:** 为了研究黑索金 (RDX) 粒度对某高能硝胺发射药 (NP) 常、高、低温燃烧性能的影响, 在 NP 发射药配方的基础上, 加入超细 RDX 和普通 RDX, 其平均粒径 ( $D_{50}$ ) 分别为 6  $\mu\text{m}$  和 40  $\mu\text{m}$ , 制备得到新型高能硝胺发射药 NPH。通过密闭爆发器试验, 对比分析 NP 和 NPH 发射药在常、高、低温条件下燃烧性能的变化规律。高能硝胺发射药中, RDX 的质量分数为 10% 时, 2 种粒度的 RDX 都降低了 NP 发射药的初始燃气生成猛度, 但超细 RDX 能够有效降低 NP 发射药的侵蚀燃烧效应。普通 RDX 降低了 NP 发射药稳定燃烧段的燃气生成猛度、燃烧渐增性, 导致发射药燃烧性能变差。超细 RDX 降低了稳定燃烧段高温燃气生成猛度, 提高了低温燃气生成猛度, 这有利于减小发射装药温度系数。2 种粒度的 RDX 均提高了 NP 发射药的结构稳定性, 延缓了药粒分裂, NPH 发射药的燃烧分裂点由 NP 发射药的 0.77 提高至 0.83。温度变化对发射药燃烧分裂点的影响很小, 可以忽略。

**关键词:** 超细 RDX; 高能发射药; 火药燃气生成猛度; 燃烧性能

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)03-0052-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.03.008

## RDX Particle Size on Combustion Performance of a High-Energy Nitramine Propellant

*DOU Song-song, CAO Yong-jie, ZAHNG Ming-an, NIE Kui, ZHANG Wei-wei, ZHANG Wang*

(Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, China)

**ABSTRACT:** To study the effect of RDX particle size on the normal, high and low temperature combustion performance of a high energy propellant (NP), a new high-energy nitramine propellant NPH was prepared by adding ultrafine RDX and ordinary RDX, with average particle size ( $D_{50}$ ) of 6  $\mu\text{m}$  and 40  $\mu\text{m}$  respectively on the basis of NP propellant formulation. The combustion properties of NP propellant and NPH propellant under normal, high and low temperature conditions were compared and analyzed through a closed bomb test. The results show that when the content of RDX in high-energy nitramine propellant is 10%, both particle size of RDX can reduce the initial gas generation intensity of NP propellant, but ultrafine RDX can effectively reduce the erosive combustion effect of NP propellant. Ordinary RDX reduces the intensity of gas generation and the gradual increase of combustion in the stable combustion section of NP propellant, which leads to the deterioration of propellant combustion performance. Ultrafine RDX reduces the intensity of high temperature gas generation in stable combustion section while increasing it at low temperature, which is beneficial to reduce the temperature coefficient of the propellant charge. Both particle sizes of RDX improve the structural stability of NP propellant and delays the splitting of propellant particles. The com-

收稿日期: 2022-02-16; 修订日期: 2022-03-04

Received: 2022-02-16; Revised: 2022-03-04

作者简介: 豆松松 (1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为内弹道与装药技术。

**Biography:** DOU Song-song (1988—), Male, Master, Engineer, Research focus: interior ballistics and charge technology.

引文格式: 豆松松, 曹永杰, 张明安, 等. RDX 粒度对某高能硝胺发射药燃烧性能的影响[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 052-057.

DOU Song-song, CAO Yong-jie, ZAHNG Ming-an, et al. RDX Particle Size on Combustion Performance of a High-Energy Nitramine Propellant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(3): 052-057.

bustion split point of NPH propellant is higher than that of NP propellant from 0.77 to 0.83. The influence of temperature change on the combustion decomposition point of propellant is negligible. The research can provide a reference for the formulation design and optimization of high-energy nitramine propellant containing RDX.

**KEY WORDS:** ultrafine RDX; high-energy propellant; propellant gas generation intensity; combustion performance

随着装甲防护能力不断增强,高膛压火炮用高初速、高炮口动能弹药对发射药能量水平提出了越来越高的要求。为提高发射药的含能、燃烧性能及力学性能,国内外开展了许多研究。目前,主要通过添加黑索金<sup>[1-2]</sup>(RDX)、奥克托今<sup>[3-4]</sup>(HMX)等高能组分提高火药能量,但固体组分的加入会对发射药的燃烧性能<sup>[5-9]</sup>和力学性能产生较大的影响<sup>[10-12]</sup>,对火炮发射安全性<sup>[13-16]</sup>带来隐患。

对于含高能固体组分的新型高能发射药,国内外学者已开展了大量的研究工作。Pillai 等<sup>[17]</sup>系统性地研究了超细 RDX 对 LOVA 发射药燃速和弹道性能的影响,分析发现,RDX 粒度与发射药的燃速呈线性关系,粒径为 4.5~6 μm 的 RDX 最适合用于 LOVA 发射药,能够显著影响弹药弹道性能。Tomoki 等<sup>[18]</sup>研究发现,随着 HMX 粒径的增大和含量的降低,压力指数不断升高,小粒度 HMX 有助于发射药燃烧稳定。张冬梅等<sup>[19]</sup>利用高压差示扫描量热法测试了含 RDX 高能硝胺发射药的热分解行为,发现配方中 NC/NG(硝化棉/硝化甘油)和 RDX 之间的热分解反应动力学存在动力学补偿效应。付有等<sup>[20]</sup>在改性单基发射药中加入不同粒径、不同质量分数的 RDX,通过燃烧性能试验,发现 RDX 熔融吸热导致 RDX 改性单基发射药的初始燃速降低,RDX 粒径和含量对发射药燃速有不同的影响。石先锐等<sup>[21]</sup>在单基药配方中添加了 30%(质量分数)的高能固体组分,以 30 mm 高压模拟炮为试验平台,通过射击试验同样发现 RDX 的加入降低了发射药的起始燃气生成猛度,减缓了初始阶段膛内压力波动,增加了膛内燃烧的稳定性。赵毅等<sup>[22]</sup>研究发现,RDX 与基药间的界面张力较小,两者之间具有较好的相容性,能够提高基药的力学性能。周敬等<sup>[23]</sup>利用落锤撞击试验对某 19 孔高能发射药进行了力学性能研究,发现药粒强度存在各向异性,轴向强度大于径向强度。杨建兴等<sup>[24]</sup>通过对含不同粒径 RDX 的高能硝胺发射药进行低温撞击试验发现,RDX 粒径越小,发射药力学性能越好。通过燃烧性能试验发现,RDX 粒径较小时,发射药燃烧稳定。

随着国内超细 RDX 制备工艺的不断改进,极大地推动了高能硝胺发射药的进步,但对其高、低温燃烧性能的研究报道较少。为进一步深入了解 RDX 粒度变化对高能硝胺发射药不同温度条件下燃烧性能的影响,本研究制备了含超细 RDX 和普通 RDX 的高能硝胺发射药,分析了 RDX 粒度变化对某高能发射药常、高、低温燃烧性能变化规律的影响,为改善高

膛压火炮用发射药性能提供参考。

## 1 试验

### 1.1 样品

试验中使用的基药为某混合硝酸酯发射药 NP,在其配方的基础上,添加 10%(质量分数)的 RDX,组成新型高能发射药 NPH。NP 及 NPH 发射药均由泸州北方化学工业有限公司提供。NP 发射药试验编号 N1。RDX 的平均粒径  $D_{50}$  取 6、40 μm,分别称超细 RDX 和普通 RDX,对应发射药试验编号为 N2, N3。为了减小药形参数对燃烧性能的影响,试验使用的 3 种发射药弧厚相同。

### 1.2 密闭爆发器试验

密闭爆发器内膛容积为 101.6 cm<sup>3</sup>,点火药为 2 号 NC,药量为 1.03 g,点火压力为 11.76 MPa,发射药装填密度为 0.36 g/cm<sup>3</sup>。药形为花边形 19 孔,孔径为 0.40 mm,长度为 13.5 mm。按照常温(20 ℃)、高温(50 ℃)、低温(-40 ℃),对发射药样品进行保温 12 h 处理。

## 2 结果与分析

在常、高、低温条件下,3 种发射药密闭爆发器试验的  $P-t$  曲线、 $\Gamma-\psi$  曲线及  $dP/dt-\psi$  曲线如图 1 所示,发射药燃烧特征量的主要参数见表 1。其中, $\Gamma$  为发射药燃气生成猛度; $\Gamma_0$  为发射药燃气生成猛度初值; $\Gamma_{\max}$  为稳定燃烧段发射药燃气生成猛度最大值; $\psi$  为发射药已燃百分比; $\psi_c$  为发射药实际燃烧分裂点对应的已燃百分比; $dP/dt$  为发射药在密闭爆发器内的燃烧升压速率; $t_k$  为达到最大压力对应的时间。为了排除点火过程不一致对压力的影响,从 15 MPa 开始对实测的压力数据进行分析。

### 2.1 RDX 对 NP 发射药常温燃烧性能的影响

结合表 1、图 1a、b 可以看出,常温条件下,初始燃烧阶段 N2、N3 发射药压力曲线均处于 N1 发射药下方,N2、N3 发射药燃气生成猛度也都出现了明显的下降。分析原因是,由于 N2、N3 发射药中所含 RDX 熔融吸热<sup>[20]</sup>,使得发射药燃速减小,燃气生成速率下降。这说明 RDX 能够降低 NP 发射药常温条件下初始燃气生成猛度。随着发射药表面温度逐渐升

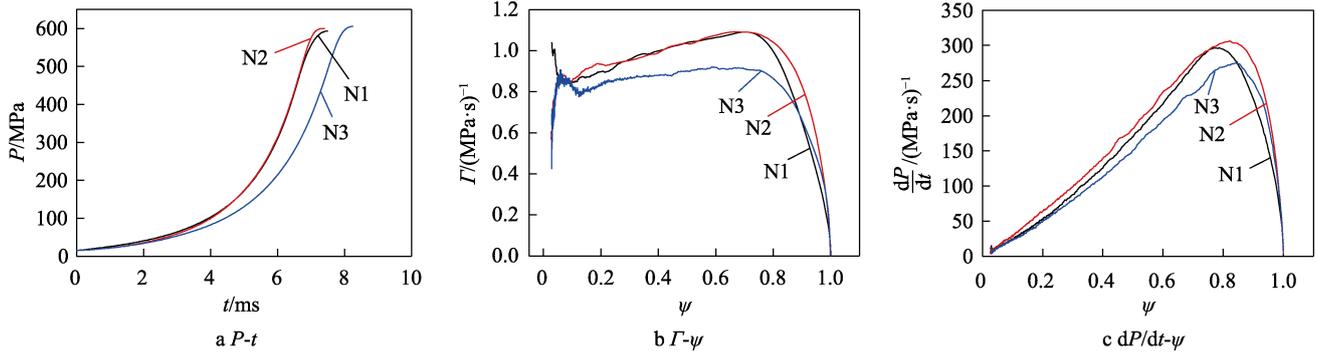


图1 常温条件下3种发射药的燃烧性能曲线

Fig.1 Combustion performance curves of three kinds of propellants at normal temperature

表1 不同温度条件下3种发射药的燃烧特征量参数

Tab.1 Combustion characteristic parameters of three kinds of propellants at different temperatures

$\theta/^\circ\text{C}$	Sample	$\Gamma_0/(\text{MPa}\cdot\text{s})^{-1}$	$\Gamma_{\max}/(\text{MPa}\cdot\text{s})^{-1}$	$\psi_c$	$t_k/\text{ms}$
20	N1	1.04	1.09	0.78	7.32
	N2	0.51	1.09	0.83	7.48
	N3	0.43	0.92	0.84	8.25
50	N1	1.31	1.11	0.78	6.91
	N2	0.68	1.15	0.83	7.23
	N3	0.51	0.98	0.84	8.15
-40	N1	0.85	1.01	0.77	7.27
	N2	0.49	1.02	0.82	7.71
	N3	0.48	0.93	0.83	8.29

高,热分解速率不断加强,3种发射药均出现不同程度的侵蚀燃烧效应<sup>[25]</sup>,具体表现为 $\Gamma-\psi$ 曲线初始段的渐减性燃烧。其中,N3发射药侵蚀燃烧表现最为明显,燃气生成猛度由最大值 $0.92/(\text{MPa}\cdot\text{s})$ 下降至侵蚀燃烧结束时的 $0.78/(\text{MPa}\cdot\text{s})$ ,且其侵蚀燃烧存在的时间也最长。分析认为是由于较大颗粒的RDX与基药的粘结性较差,导致发射药侵蚀燃烧较强。对比N1发射药,N2发射药侵蚀燃烧不明显,燃烧渐增性较强。说明超细RDX不仅降低了NP发射药的侵蚀燃烧,而且提高了其燃烧渐增性,改善了NP发射药常温初始段的燃烧性能。

稳定燃烧阶段,N1、N2发射药燃烧性能相近,燃烧渐增性、燃气生成猛度差别不大。但与N2发射药相比,N3发射药燃气生成猛度出现明显下降,燃烧渐增性也较差。说明超细RDX型NPH发射药能够保持与NP发射药相近的燃烧性能,但随着RDX粒度增大,NPH发射药燃烧性能降低。

结合表1、图1b、c可见,在发射药燃烧末期,药粒开始分裂,燃气生成猛度开始迅速下降。按照几何燃烧定律进行计算,3种发射药的理论燃烧分裂点为 $\psi=0.94$ 。由于实际燃烧不同程度地偏离几何燃烧定律所假定的条件,造成发射药在理论燃烧分裂点之前就已经开始分裂<sup>[26]</sup>。N1发射药的实际燃烧分裂点

为0.78,N2、N3发射药的实际燃烧分裂点相近,约为0.83,说明RDX提高了NP发射药的结构稳定性,延缓了药粒分裂。由图1b可见,药粒分裂后,超细RDX型NPH发射药的燃气生成猛度比另外2种发射药燃气生成猛度都大。因此,在相同的装药结构中,采用N2发射药的装药结构燃烧后期的燃气生成率更大,弹道效率更高。

## 2.2 RDX对NP发射药高温燃烧性能的影响

高温条件下,3种发射药的压力上升速率出现明显差异,如图1a所示。N1发射药压力上升速率最快,N2发射药次之,N3发射药最慢。这说明高温条件下NP发射药燃烧剧烈,但RDX的加入降低了NP发射药的燃速。随着RDX粒度的增加,发射药的燃速变慢。由图2b可以看出,高温燃烧初期,N2、N3发射药燃气生成猛度同样出现明显下降,而N1发射药燃气生成猛度 $\Gamma_0$ 达到 $1.31/(\text{MPa}\cdot\text{s})$ ,是N2、N3发射药的2~3倍。说明RDX能够有效降低NP发射药高温条件下初始燃气生成猛度。同时,N2发射药侵蚀燃烧基本消失,燃气生成猛度平稳上升,燃烧渐增性较好。说明超细RDX有效降低了NP发射药高温燃烧初期的侵蚀燃烧效应,显著改善了发射药的高温燃烧性能。

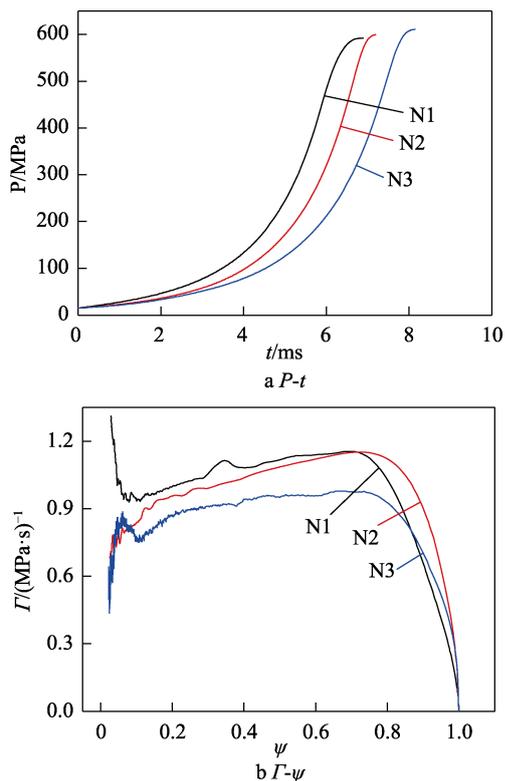


图 2 高温条件下 3 种发射药的燃烧性能曲线

Fig.2 Combustion performance curves of three kinds of propellants at high temperature

稳定燃烧段, 含 RDX 的 N2、N3 发射药的燃气生成猛度较不含 RDX 的 N1 发射药均出现明显的下降, 下降幅度分别在 3%、14% 左右。这说明 RDX 降低了 NP 发射药在高温条件下的燃气生成猛度。这对改善发射装药高温温度系数有益。分析认为, 由于随着 RDX 粒度的增加, RDX 颗粒熔融吸热时间变长, 延缓了火药燃气的释放速率, 从而导致升压速率降低。

由表 1 可见, 高温条件下, 含 RDX 的 N2、N3 发射药的燃烧分裂点较不含 RDX 的 N1 发射药同样出现延迟现象, 说明高温条件下 RDX 依旧能够提高 NP 发射药的结构稳定性。同时, 3 种发射药各自的燃烧分裂点较常温变化不大, 说明温度升高对药粒分裂点变化的影响不大。发射药燃烧末期, 含超细 RDX 的 N2 发射药在燃烧分裂点之后同样表现出较高的燃气生成猛度, 说明高温条件下, N2 发射药燃烧末期依然能够提高发射装药的燃气做功效率。

### 2.3 RDX 对 NP 发射药低温燃烧性能的影响

结合表 1、图 3a 可以看出, 低温条件下, 3 种发射药的压力上升速率出现了较大变化。初始阶段, N1、N2 发射药的升压速率相近, N3 发射药较低。在  $t=3$  ms 之后, N2 发射药压力曲线已经明显高于 N1 发射药, 说明该时刻之后, N2 发射药的燃速逐渐高于 N1 发射药。N3 发射药在压力曲线上升过程中一直

处于其他 2 种发射药的下方。同时, 从图 3b 可见, N2 发射药燃烧初期的燃气生成猛度较另外 2 种发射药更大。出现这种现象的原因是, 由于超细 RDX 改善了 NP 发射药低温条件下的燃烧性能, 提高了低温燃速, 这有利于提高火炮的低温弹道性能。由图 3b 可见, 低温条件下, 3 种发射药的侵蚀燃烧效应都出现了明显的降低, 但 N1 发射药相较 N2、N3 发射药侵蚀燃烧依旧较强。

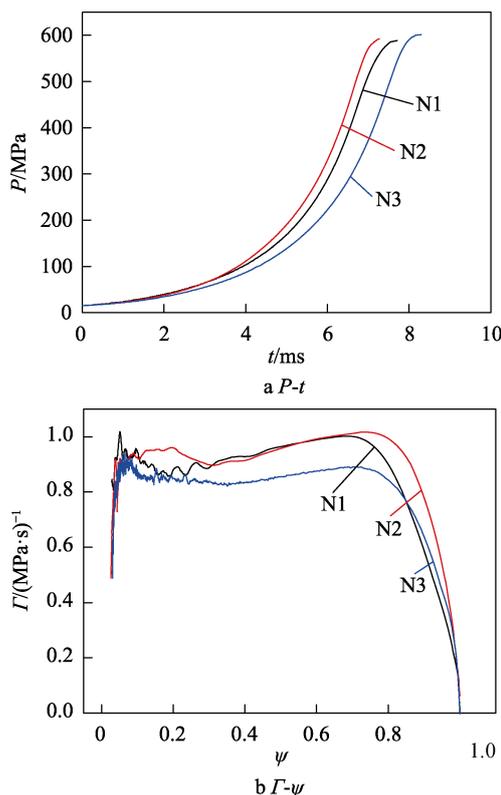


图 3 低温条件下 3 种发射药的燃烧性能曲线

Fig.3 Combustion performance curves of three kinds of propellants at low temperature

发射药燃烧中期, N1、N2 发射药的燃气生成猛度差别不大, 说明二者的燃烧性能相近。N3 发射药的燃气生成猛度下降了 10% 左右, 说明普通 RDX 同样降低了 NP 发射药的低温燃烧性能, 这对发射装药低温弹道性能不利。

由表 1、图 3b 可以看出, 低温条件下, 3 种发射药的燃烧分裂点相较常温、高温变化不明显。这说明低温条件下 RDX 同样能够提高 NP 发射药的结构稳定性, 且温度变化对 NP、NPH 发射药燃烧分裂点的影响不大。同时, 含超细 RDX 的 N2 发射药在燃烧末期同样表现出较高的燃气生成猛度, 说明其低温燃烧改善效果依然存在。

## 3 结论

在某高能硝胺发射药中, RDX 的质量分数为 10%

时, RDX 粒度变化对发射药常、高、低温燃烧性能产生以下影响:

1) 2 种粒度的 RDX 都降低了 NP 发射药初始燃烧段的燃气生成猛度, 超细 RDX 能够降低 NP 发射药的侵蚀燃烧效应, 高温条件下, 侵蚀燃烧基本消失。

2) 普通 RDX 降低了 NP 发射药稳定燃烧段的燃气生成猛度、燃烧渐增性, 导致发射药燃烧性能变差; 超细 RDX 对 NP 发射药常温稳定燃烧段燃烧性能影响不大, 却降低了高温燃气生成猛度, 提高了低温燃气生成猛度, 这对减小发射装药温度系数非常有益。

3) 2 种粒度的 RDX 均提高了 NP 发射药的结构稳定性, 延缓了药粒分裂。NP 发射药的燃烧分裂点约为 0.77, NPH 发射药的燃烧分裂点约为 0.83, 延缓了 8%。超细 RDX 改善了 NP 发射药分裂后的燃烧性能。温度变化对发射药燃烧分裂点影响很小, 可以忽略。

#### 参考文献:

- [1] 黄振亚, 廖昕. 高能硝胺发射药在高膛压火炮上的使用安全性[J]. 火炸药学报, 2003, 26(4): 8-10.  
HUANG Zhen-ya, LIAO Xin. Safety for High Energy Nitramine Propellant Used in High Pressure Gun[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(4): 8-10.
- [2] SANGHAVI R, KHIRE V, CHAKRABORTHY T, et al. Studies on RDX Influence on Performance Increase of Triple Base Propellants[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2006, 31(4): 318-321.
- [3] 吴艳光, 吴晓青, 陈洪伟, 等. 不同晶型奥克托今用于硝胺发射药的性能[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 206-209.  
WU Yan-guang, WU Xiao-qing, CHEN Hong-wei, et al. Performance of Nitramine Propellants with Different Phases of HMX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(2): 206-209.
- [4] SANGHAVI R R, KAMALE P J, SHAIKH M A R, et al. HMX Based Enhanced Energy LOVA Gun Propellant[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143(1-2): 532-534.
- [5] 赵强, 刘波, 刘少武, 等. 堵孔钝感高能叠氮硝胺发射药的性能[J]. 含能材料, 2020, 28(3): 242-247.  
ZHAO Qiang, LIU Bo, LIU Shao-wu, et al. Performance of Plugged and Insensitive High-Energy Azidonitramine Gun Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(3): 242-247.
- [6] 石先锐, 闫光虎, 王勇, 等. 新型高能叠氮硝胺发射药高压燃烧稳定性研究[J]. 火炸药学报, 2021, 44(2): 245-251.  
SHI Xian-rui, YAN Guang-hu, WANG Yong, et al. Study on High Pressure Combustion Stability of a New Type of High Energy Azidonitramine Gun Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2021, 44(2): 245-251.
- [7] 杨建兴, 舒安民, 马方生, 等. GAP 对高能硝胺发射药力学性能及燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2014, 37(6): 83-86.  
YANG Jian-xing, SHU An-min, MA Fang-sheng, et al. Effect of GAP on the Mechanical and Combustion Performance of High Energy Nitramine Gun Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(6): 83-86.
- [8] 薛欢, 何卫东, 徐汉涛. 改性高能太根发射药热分解与燃烧性能研究[J]. 含能材料, 2015, 23(8): 791-795.  
XUE Huan, HE Wei-dong, XU Han-tao. Thermal Decomposition and Combustion Performance of Modified High-Energy TEGN Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(8): 791-795.
- [9] 解德富, 黄振亚, 张成, 等. 高燃速功能材料对高能发射药性能的影响[J]. 爆破器材, 2020, 49(6): 27-31.  
XIE De-fu, HUANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, et al. Influence of High Burning Rate Functional Materials on Properties of High Energy Gun Propellant[J]. Explosive Materials, 2020, 49(6): 27-31.
- [10] 金志明, 翁春生. 火炮装药设计安全学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.  
JIN Zhi-ming, WENG Chun-sheng. Charge Design Safety of Guns[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [11] 王永强, 杨慧群, 韩进朝. 改善发射药力学性能方法研究进展[J]. 化工新型材料, 2019, 47(7): 50-53.  
WANG Yong-qiang, YANG Hui-qun, HAN Jin-chao. Study Progress in Method for Improving the Mechanical Property of Gun Propellant[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(7): 50-53.
- [12] 孙鹏飞, 廖昕, 王泽山. 醋酸丁酸纤维素对发射药涂层低温力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2018, 41(2): 186-191.  
SUN Peng-fei, LIAO Xin, WANG Ze-shan. Effects of Cellulose Acetate Butyrate on Mechanical Properties of Coating Layers of Gun Propellant at Low Temperature[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(2): 186-191.
- [13] 芮筱亭, 冯宾宾, 王燕, 等. 发射装药发射安全性评定方法研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(1): 1-11.  
RUI Xiao-ting, FENG Bin-bin, WANG Yan, et al. Research on Evaluation Method for Launch Safety of Propellant Charge[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(1): 1-11.
- [14] 杨均匀, 袁亚雄, 张小兵. 发射药破碎对火炮射击安全性影响的研究综述[J]. 弹道学报, 1999, 11(4): 92-96.  
YANG Jun-yun, YUAN Ya-xiong, ZHANG Xiao-bing. Research Survey of the Effect of Grain Fracture on the Fire Safety in Solid Propellant Gun[J]. Journal of Ballistics, 1999, 11(4): 92-96.
- [15] 芮筱亭, 王国平, 陈涛. 弹药发射安全性导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.  
RUI Xiao-ting, WANG Guo-ping, CHEN Tao. Direction

- to Launch Safety of Ammunition[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [16] 来峰, 芮筱亭, 王浩, 等. 对发射装药引起膛炸机理的讨论[J]. 兵工学报, 2007, 28(2): 153-157.  
LAI Feng, RUI Xiao-ting, WANG Hao, et al. Discussion about Mechanism of Breech-Blow Caused by Gun Propellant Charge[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(2): 153-157.
- [17] PILLAI A G S, SANGHAVI R R, DAYANANDAN C R, et al. Studies on RDX Particle Size in LOVA Gun Propellant Formulations[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2001, 26(5): 226-228.
- [18] NAYA T, KOHGA M. Influences of Particle Size and Content of HMX on Burning Characteristics of HMX-Based Propellant[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 27(1): 209-215.
- [19] 张冬梅, 郑朝民, 衡淑云, 等. 含 RDX 高能硝胺发射药的热分解动力学补偿效应[J]. 火炸药学报, 2014(3): 82-85.  
ZHANG Dong-mei, ZHENG Chao-ming, HENG Shu-yun, et al. Thermal Decomposition Kinetic Compensation Effect of High Energy Nitroamine Gun Propellants Containing RDX[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014(3): 82-85.
- [20] 付有, 王彬彬, 徐滨, 等. RDX 对改性单基发射药燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(2): 161-166.  
FU You, WANG Bin-bin, XU Bin, et al. Effect of RDX on Combustion Performance of Modified Single Base Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(2): 161-166.
- [21] 石先锐, 闫光虎, 贾永杰, 等. RDX 和 NGU 对叠氮硝胺发射药动态燃烧稳定性的影响[J]. 爆破器材, 2020, 49(5): 14-19.  
SHI Xian-rui, YAN Guang-hu, JIA Yong-jie, et al. Influence of RDX and NGU on the Dynamic Combustion Stability of Azidonitramine Gun Propellants[J]. Explosive Materials, 2020, 49(5): 14-19.
- [22] 赵毅, 黄振亚, 刘少武, 等. 改善高能硝胺发射药力学性能研究[J]. 火炸药学报, 2005, 28(3): 1-3.  
ZHAO Yi, HUANG Zhen-ya, LIU Shao-wu, et al. Study of Improving Mechanical Performance of High-Energy Nitroamine Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005, 28(3): 1-3.
- [23] 周敬, 杨丽侠, 张邹邹, 等. 高能发射药动态力学强度的影响因素研究[J]. 爆破器材, 2016, 45(2): 29-33.  
ZHOU Jing, YANG Li-xia, ZHANG Zou-zou, et al. Study on the Influence Factors of Dynamic Mechanical Properties of High-Energy Gun Propellant[J]. Explosive Materials, 2016, 45(2): 29-33.
- [24] 杨建兴, 杨伟涛, 马方生, 等. RDX 粒度对硝胺发射药力学性能及燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(9): 706-711.  
YANG Jian-xing, YANG Wei-tao, MA Fang-sheng, et al. Effect of RDX Particle Size on the Mechanical and Combustion Properties of Nitramine Gun Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(9): 706-711.
- [25] 张洪林. 侵蚀燃烧在发射装药内弹道中的应用研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(2): 129-133.  
ZHANG Hong-lin. Application Research of Erosive Burn in Propellant Charge Interior Ballistics[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(2): 129-133.
- [26] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.  
ZHANG Xiao-bing. Interior Ballistics of Guns[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2014.