

NG/NC 基体对复合改性双基推进剂 机械感度的影响

邓重清, 党永战, 胥会祥, 蔚红建, 张正中, 庞维强

(西安近代化学研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究硝化甘油 (NG) 增塑的硝化棉 (NC) 基体对复合改性双基 (AP/CMDB) 固体推进剂机械感度的影响。**方法** 采用光辊压延法和柱塞式挤出法, 分别制备 NG 增塑的 NC 吸收药样品及以其为基体的固体推进剂样品, 采用扫描电镜表征不同增塑比的 NC/NG 基体及推进剂的微观形貌, 采用摩擦感度仪、撞击感度仪测试 NG/NC 基体及推进剂的机械感度。**结果** 当 NG 的质量分数由 41.5% 降至 37.5% 时, NG/NC 基体的撞击感度降低 53.0%。加入超细高氯酸铵 (AP) 后, 采用 NG 质量分数为 37.5% 的基体的推进剂, 撞击感度增加 46.7%, 而加入球形铝粉后, AP 颗粒分散均匀性和 NG/NC 网络均匀性增加, 推进剂抗冲强度提高, 撞击感度及摩擦感度分别降低 44.4% 和 20.0%。**结论** AP/CMDB 推进剂的机械感度与微观结构明显相关, AP 的加入提高了推进剂机械感度, Al 粉的加入提高了粉体的分散均匀性和 NG/NC 对粉体颗粒的包裹效果, 降低了推进剂机械感度。

关键词: NG; NC; 基体; 推进剂; 摩擦感度; 撞击感度

中图分类号: TJ760 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)10-0019-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.10.003

Effect of NG/NC Matrix on the Mechanical Sensitivity of AP/CMDB Propellant

DENG Chong-qing, DANG Yong-zhan, XU Hui-xiang, YU Hong-jian, ZHANG Zheng-zhong, PANG Wei-qiang

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the effect of nitrocellulose matrix plasticized by nitroglycerin on the mechanical sensitivity of AP/CMDB propellant. The NG/NC matrix and AP/CMDB propellant samples were respectively prepared by roll calender and plunger extruder. Impact sensitivity and friction sensitivity of them were tested. Impact sensitivity of NG/NC matrix decreased 53% when NG mass fraction was reduced to 37.5% from 41.5%, but increased 46.9% when superfine AP was added in. Spherical Al powder was added in after, the uniformity of AP dispersion and NG/NC bond evidently increased, impact intensity of the AP/CMDB propellant also increased, impact sensitivity and friction sensitivity respectively decreased 44.4% and 20.0%.

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2022-09-14

Received: 2022-07-27; Revised: 2022-09-14

作者简介: 邓重清 (1983—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为固体推进剂配方工艺。

Biography: DENG Chong-qing (1983-), Male, Master, Researcher, Research focus: formulation and technic research of solid propellant.

通讯作者: 庞维强 (1977—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为固体推进剂配方工艺。

Corresponding author: PANG Wei-qiang (1977-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: formulation and technic research of solid propellant.

引文格式: 邓重清, 党永战, 胥会祥, 等. NG/NC 基体对复合改性双基推进剂机械感度的影响[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 019-025.

DENG Chong-qing, DANG Yong-zhan, XU Hui-xiang, et al. Effect of NG/NC Matrix on the Mechanical Sensitivity of AP/CMDB Propellant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 019-025.

The mechanical sensitivity AP/CMDB propellant has apparently relations with its microstructure, it is raised up by adding into superfine AP powder as the agglomeration of AP and depressed down by adding spherical Al powder as the modification of dispersion uniformity of AP and Al particles.

KEY WORDS: NG; NC; matrix; propellant; friction sensitivity; impact sensitivity

复合改性双基 (AP-CMDB) 推进剂是基于双基推进剂基体加入高氯酸铵 (AP)、铝 (Al) 粉形成的一类推进剂, 具有燃速易调节、耐高压冲击的优点, 常用于弹体发射和修正。AP-CMDB 推进剂的主体材料 NG、NC 和超细 AP 均为高感度材料^[1-4], 使得推进剂的安全性能较差, 推进剂在制造应用过程中的安全风险较高, 降低该类推进剂的感度是提高其应用安全性的主要研究方向之一^[5-9]。

为了降低推进剂的感度, 提高其安全性能, 国内开展了较多研究, 一般方法是应用 FOX-7、HATO 等低感度含能材料^[10-12]或采用石墨类材料等降感添加剂加入推进剂体系中, 改善 AP/RDX/HMX 等的表面形貌, 提高其球形度或通过含能材料的包覆等改性处理等进行降感^[13-17]。王晗等^[18]采用导电聚合物对 AP/Al/CMDB 推进剂进行了降感研究, 采用质量比为 2:8 的导电性共聚物 (PER, 含丙烯酰胺和丙烯酸酯季铵盐) 和掺杂导电 ZnO 的导电聚苯胺 (BAZ), 降低了推进剂的撞击感度、摩擦感度和静电火花感度。滕学峰等^[19]采用 HMX 部分替代超细 AP、低分子有机酯部分代替 NG、加入碳基降感剂等方法降低了 AP/Al/CMDB 的机械感度, 特性落高达到 21.3 cm, 摩擦感度降低至 52%。另外, 有学者认为, AP 是影响 AP/CMDB 推进剂机械感度的主要因素之一, AP 改性和复合处理对降低 AP 的机械感度有明显的影响^[20-22], 如球形化 AP 可用于替代常规 AP 应用于推进剂中, 用于降低推进剂的感度。秦超等^[23]采用灰色关联分析方法, 研究了固体推进剂撞击感度、摩擦感度及火焰感度等多项感度的灰色关联度, 认为增塑比是影响高能固体推进剂摩擦感度、局部热感度的最主要因素。NG/NC 基体可视为均相材料, NG 是 NC 的增塑剂, 二者在 AP/CMDB 推进剂中的质量分数较高, 达到 60% 以上。AP/CMDB 推进剂基体由 2 种高感度材料 NG 和 NC 组成, 但其安全性及其对推进剂的影响机理鲜有研究。国外研究人员将 NG 和 NC 在溶剂中分散混合, 将溶剂挥发后, 测试得到了 NG/NC 胶状物的机械感度, 研究了放置时间、测试条件等对其机械感度的影响。结果表明, 6 h 内, 特性落高为 7.6 cm, 超过 6 h, 特性落高提高至 15 cm^[24-25], 但其状态与在 AP/CMDB 应用的基体物理状态不同。双基基体的应用与推进剂制备工艺密切相关, 塑化后的 NG/NC 是 AP/CMDB 推进剂制备的直接原材料, 是影响双基推进剂安全性能的重要因素, 但国内外关于该类 NG/NC 基体及其对推进剂安全性能的研究较

少。本文以典型 NG/NC 基体为对象, 通过研究基体品种及粉体加入后推进剂的微观形貌和机械感度差异, 对推进剂机械感度的影响机制进行了分析, 为 AP-CMDB 推进剂的低感化研究路径选择奠定了基础。

1 试验

1.1 设备与仪器

试验所用设备与仪器: 10 L 卧式捏合机, 大连橡塑厂; 100 T 柱塞式油压机, 郑州锻压机床厂; 摩擦感度测试仪, 撞击感度测试仪, 西安近代化学研究所; 摆锤式简支梁撞击试验机, 西安近代化学研究所; 扫描电子显微镜, Quanta600F, 美国 FEI 公司。

1.2 主要材料

试验所用主要材料: NG/NC 吸收药, 宜宾川安化工有限公司; 超细高氯酸铵 (AP, D_{50} 约 3 μm), 航天化学动力厂; 铝粉 (Al, D_{50} 约 13 μm), 鞍山微细铝粉实业有限公司; 无水乙醇、丙酮 (分析纯), 西安化学试剂厂; 中定剂 (C_2), 重庆长风化工厂。

1.3 样品制备

基体样品制备: NG/NC 吸收药 (含安定剂 1.0%) 采用光辊压延机压延驱水, 并切成片状, 过 20 目筛, 取筛下物, 再过 40 目筛, 取筛上物作为基体测试样品。

推进剂样品制备: 在卧式捏合机中加入 NG/NC 基体和 AP、Al 粉进行混合, 同时加入乙醇与丙酮混合溶剂辅助混合, 得到的混合物采用 100T 柱塞式油压机挤出成形, 在烘箱中湿烘, 驱除溶剂后, 切成长度一定的管状样品和颗粒状样品待测。

1.4 测试方法

撞击感度测试参照 GJB 770A—97 方法 602.1, 测试条件: 落锤质量为 2 kg, 样品质量为 30 mg, 撞击感度以样品 50% 爆炸可能性时的特性落高 H_{50} 表示。

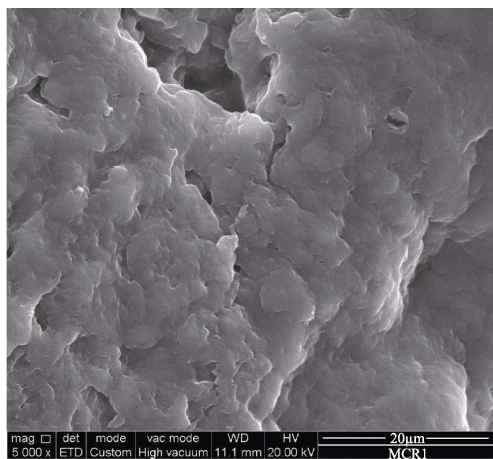
摩擦感度测试参照 GJB 770A—97 方法 601.2, 测试条件: 摆角为 66°, 样品质量为 20 mg, 压力为 2.45 MPa, 样品质量为 30 mg, 摩擦感度以样品爆炸概率 P 表示。

抗冲强度测试参照 GJB 770A—97 方法 417.1, 测试温度为 -40 °C, 样品长度为 60 mm, 样品外径为 7.9 mm, 内径为 4.9 mm。

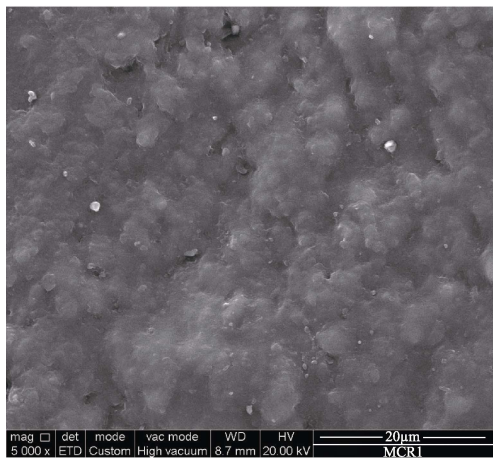
2 结果与讨论

2.1 双基基体的微观形貌及机械感度

NG 对 NC 的增塑效果对推进剂的力学性能及安全性能有明显的影 响。NG 质量分数为 37.5% (S1) 和 41.5% (S2) 的 NG/NC 吸收药是常用的 2 种吸收药, 将制备的 2 种片状双基基体采用扫描电镜对其表面、内部的微观结构进行了表征 (见图 1、图 2), 并对其粉体样品的机械感度进行了测试, 结果见表 1。



a S1

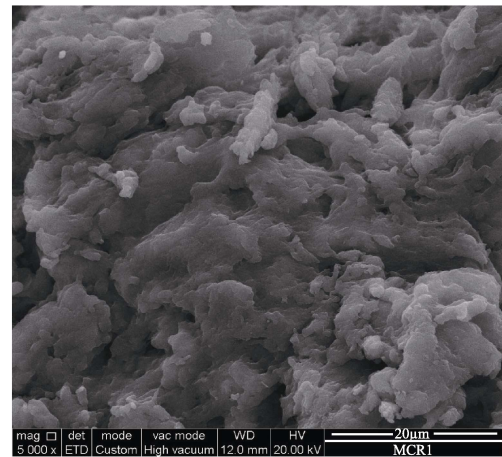


b S2

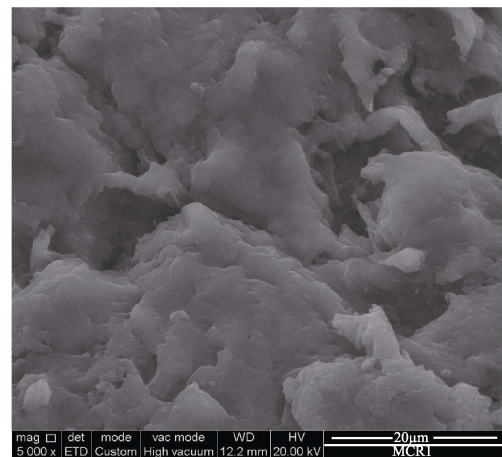
图 1 样品表面

Fig.1 Surface morphology of samples

NC 增塑效果是影响其应用性能的重要因素^[26], 近似于均相材料, 但从图 1 和图 2 可以看出, 相比于 S2, S1 表面更为平整, 其表面有裂纹和孔隙。从二者的内部形貌可以看出, S1 基体中分散着增塑程度存在差异的 NG/NC 混合物, 没有形成胶状, 而 S2 相对完整度很高, 没有分散的不规则基体, 表明 NG 均匀地扩散至 NC 分子中。NC 属于刚性高分子材料, 增大其分子链回转半径, 可以增加其柔性^[27]。NG 加入后, 与 NC 分子产生氢键, 使 NC 分子内的相互作用力减弱, 因此 NG 含量增加, 即分子数量增多, 明



a S1



b S2

图 2 样品内部

Fig.2 Internal morphology of samples

表 1 2 种 NC/NG 双基基体的机械感度
Tab.1 Mechanical sensitivity of two NC/NG matrix

样品	$w_{NC}/\%$	$w_{NG}/\%$	增塑比	撞击感度 H_{50}/cm	摩擦感度 $P/\%$
S1	61.5	37.5	0.610	28.8	84
S2	57.5	41.5	0.722	18.8	92

显提高了 NC 的分子柔性。

试验结果表明, NG 含量变化对 NC/NG 基体的摩擦感度、撞击感度有较大的影响。S2 比 S1 基体中 NG 的质量分数高 4%, 特性落高由 28.8 cm 降低至 18.8 cm, 撞击感度提高了 53%, 而摩擦感度提高 8%, 表明 NG/NC 增塑比对基体的撞击感度起主导作用, 而增塑比的变化同时也是影响基体微观结构的直接因素。NC 的分子链结构为刚性结构, 表现为纤维状, NG 含量提高有利于提高 NC 的分子链柔性, 降低 NC 的形变刺激, 使 NC 对撞击感度的贡献减少。但 NG 质量分数增加 4% 后, 其特性落高大幅降低, 撞击感度急剧增加, 表明 NG 是影响基体撞击感度的主导因素。这可能存在 2 种影响因素: 一种可能是 NG 分子

中敏感基团—O—NO₂密度高,决定了基体整体的硝基密度;第二种可能是NG含量过高,与NC形成溶解不平衡,发生相分离,形成自由态的NG分子,而NG的物理状态对其机械感度有极大影响。固态、液态的冲击感度有很大的差异,液相NG的冲击感度远高于固相或固液相混合状态,从而引起撞击速度的急剧下降。摩擦感度降低较小,可能由于NC刚性结构对摩擦感度有主要影响,NG扩散至NC中后,对摩擦剪切作用的敏感程度降低,因此NG含量的变化引起的摩擦感度变化不明显。

2.2 双基基体对推进剂机械感度的影响

2.2.1 NG/NC基体与AP混合

NG/NC基体与AP为AP-CMDB推进剂的主体材料,2种材料的总质量分数达到90%以上。将NG/NC基体、AP按质量比61:30进行混合,制备了AP/CMDB推进剂样品,并测试了其安全性能,见表2。

表2 双基基体与AP对推进剂机械感度的影响
Tab.2 Effect of DB and AP on the mechanical sensitivity of propellant

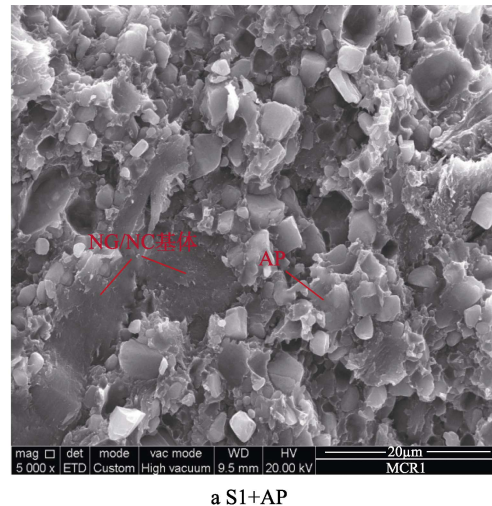
样品	特性落高 H_{50}/cm	摩擦感度 $P/\%$
S1+AP	15.3	96
S2+AP	14.1	100

超细AP的加入,大幅提高了S1基体的撞击感度,特性落高降低了13.5cm,但对于S2基体撞击感度的影响较小,特性落高降低了3.7cm,二者的摩擦感度分别提高了12%和8%。这表明AP对AP/CMDB推进剂的感度影响强度与基体差异相关,增塑比越小,AP对机械感度的贡献越大,即NG含量越高,加入超细AP后,对基体的撞击感度影响越小。由于基体摩擦感度较高,加入AP后,摩擦感度虽然小幅提高,但由于摩擦感度达到了100%,较难量化表征AP对推进剂摩擦感度的影响程度。

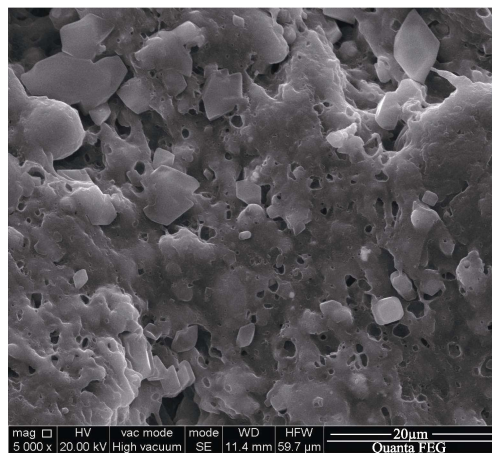
超细AP团聚是影响AP/CMDB推进剂微观结构的重要影响因素^[28],因此对AP加入后推进剂的微观形貌进行了表征,如图3所示。从图3可以看出,AP分别与S1、S2基体混合后,其微观形貌存在一定的区别,AP在S2基体中的分散均匀性比在S1基体中要高,但均存在不同程度的颗粒聚集,易在团聚内部形成细微的气孔,在外界刺激下,易导致瞬时绝热压缩,产生高温。同时,团聚AP颗粒内部的非规则性剪切破碎及与粘合网络的摩擦,也协同增加了热点形成概率。

2.2.2 NG/NC基体与Al粉、AP混合

Al粉作为燃烧剂,对推进剂能量提升明显,是常用推进剂主要粉体材料。为了研究其对AP-CMDB推进剂机械感度影响,以S2为基体,加入AP和Al



a S1+AP



b S2+AP

图3 加入AP后推进剂微观形貌

Fig.3 Micro-surface image of propellant containing AP

粉,制备了4种不同球形Al粉含量的AP/Al/CMDB推进剂样品,并测试了其机械感度,见表3。

表3 含不同Al粉含量推进剂的机械感度
Tab.3 Mechanical sensitivity of propellant with different mass fraction of Al powder

Al粉质量分数/%	撞击感度 H_{50}/cm	摩擦感度 $P/\%$
0	14.1	100
3	20.0	80
5	20.5	80
8	21.9	76

从表3可以看出,随着Al含量的增加,推进剂的摩擦感度和撞击感度均明显降低,摩擦感度约降低20%,撞击感度约降低43%,但Al粉质量分数在3%~8%内推进剂机械感度的差异较小。针对该现象,对加Al粉后的推进剂微观形貌进行表征,并对其抗冲强度进行测试。加入5%Al粉后,推进剂的结构如图4所示,不同Al粉含量推进剂的抗冲强度如图5所示。

从图4可以看出,加入Al粉后,基体粘结网络

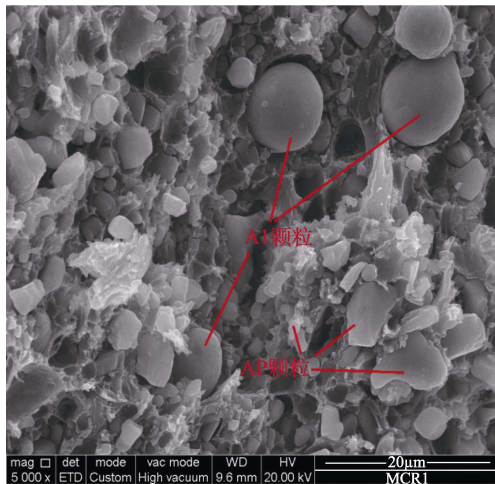


图 4 Al 粉质量分数为 5% 的推进剂微观形貌

Fig.4 Micro surface image of propellant containing 5% mass fraction of Al powder

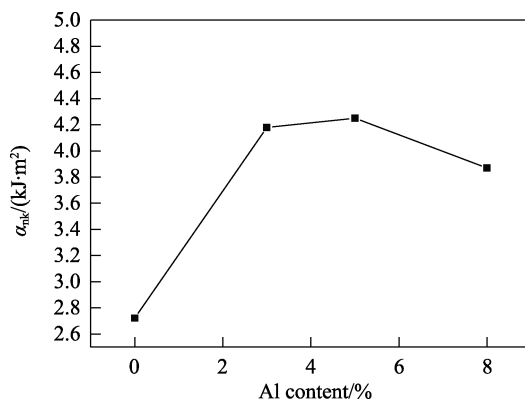


图 5 不同含量 Al 粉的推进剂抗冲强度

Fig.5 Impact intensity of propellant with different mass fraction of Al powder

分散均匀, 形成了“蜂窝形”网络骨架, 对颗粒进行了有效包裹, 有利于提升网络骨架强度。推进剂抗冲强度明显增加, Al 粉质量分数在 3%~5% 时, 效果最优。粉体的良好分散对于减少“热点”有利, AP 分散均匀降低了 AP 团聚现象引发自身热点形成的概率, 对减少撞击产生的团聚颗粒破碎现象有利, 双基基体的“蜂窝”形骨架强度提高, 减少了机械刺激下产生的粘性剪切形变, 减小了 AP 颗粒间的摩擦及 AP 与 NC/NG 基体的摩擦, 热量积聚点减少。同时, 由于球形化 Al 颗粒的硬度高, 其颗粒直径大于大部分的超细 AP 颗粒, 在受到撞击作用时, 能够优先于 AP 颗粒受到撞击形变, 减少外界机械力对非规则型 AP 颗粒的直接作用, 其球形几何特性能够提高传导给基体的受力面积, 对冲击力进行一定的缓冲。

3 结论

通过对 NG/NC 基体和推进剂的微观形貌、机械感度的研究, 得出以下结论:

1) NG 含量增加, NC/NG 基体的撞击感度大幅

提高。

2) 超细 AP 的加入, 使得 NG/NC 基体的机械感度提高, NG/NC 增塑比越大, 机械感度提高越明显。

3) AP/CMDB 推进剂微观结构是影响机械感度的重要因素, 加入球形 Al 粉能有效提高 AP 的分散均匀性, 使双基基体对粉体颗粒紧密包裹, 提高推进剂的抗冲强度, 降低推进剂的撞击感度和摩擦感度。

参考文献:

- [1] 王彩玲, 赵省向. 不同粒度 AP 的机械感度[J]. 火炸药学报, 2006, 29(6): 27-29.
WANG Cai-ling, ZHAO Sheng-xiang. Mechanical Sensitivity of AP with Different Particle Size[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(6): 27-29.
- [2] JONES M L, LEE E. Impact Sensitivity of Nitroglycerin[J]. Journal of Energetic Materials, 1997, 15(2/3): 193-204.
- [3] 万雪杰, 郭效德, 欧阳刚, 等. AP 超细球形粒子的制备与表征[J]. 火炸药学报, 2015, 38(1): 51-55.
WAN Xue-jie, GUO Xiao-de, OUYANG Gang, et al. Preparation and Characterization of Ultra-Fine Spherical AP Particles[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(1): 51-55.
- [4] 王玉姣, 刘杰, 顾志明, 等. AP 粒度对其感度、推进剂燃烧速度及临界电子激发能的影响[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(1): 95-97.
WANG Yu-jiao, LIU Jie, GU Zhi-ming, et al. Effects of the Particle Size of Ammonium Perchlorate on Its Sensitivity, burning Rate of Propellants and Critical Initiation Electron Energy[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(1): 95-97.
- [5] 贾昊楠, 安振涛, 路桂娥, 等. 某新型改性双基推进剂的热安全性[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(5): 662-665.
JIA Hao-nan, AN Zhen-tao, LU Gui-e, et al. Thermal Safety of one New-Type CMDDB Propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(5): 662-665.
- [6] 周海清, 张平. AP-CMDB 推进剂燃速压强指数的变化分析与辨识[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(2): 130-132.
ZHOU Hai-qing, ZHANG Ping. Analysis and Discrimination of the Burning Rate Pressure Exponent of AP-CMDB Propellants[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(2): 130-132.
- [7] 江劲勇, 路桂娥, 苏振中, 等. 新型固体推进剂改铵铜-3 安全贮存寿命研究[J]. 含能材料, 2004(S1): 296-298.
JIANG Jin-yong, LU Gui-e, SU Zhen-zhong, et al. Research on Safe Storage Life of New Solid Propellant GATo-3[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004(S1): 296-298.
- [8] 张正中, 蔚红建, 郭效德, 等. 类球形超细 AP 在

- AP-CMDB 推进剂中的应用[J]. 火炸药学报, 2020, 43(4): 424-427.
- ZHANG Zheng-zhong, YU Hong-jian, GUO Xiao-de, et al. Application of Spheroidal Ultrafine AP in AP-CMDB Propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(4): 424-427.
- [9] 陈京, 王晗, 刘萌, 等. 复合改性双基推进剂降感技术及感度机理研究进展[J]. 火炸药学报, 2017, 40(6): 7-16.
- CHEN Jing, WANG Han, LIU Meng, et al. Progress of Study on Desensitization Techniques and Sensitivity Mechanisms of Composite Modified Double-Base Propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(6): 7-16.
- [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 Ben-bo, XIA Min, HUANG Jia-qi, et al. Characterization of Bu-NENA/NC Low Sensitive Double-Base Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(10): 794-798.
- [11] 陈中娥, 李忠友, 姚南, 等. FOX-7 及含 FOX-7 的 HTPB 推进剂安全性能[J]. 含能材料, 2010, 18(3): 316-319.
- CHEN Zhong-e, LI Zhong-you, YAO Nan, et al. Safety Property of FOX-7 and HTPB Propellants with FOX-7[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(3): 316-319.
- [12] 黎博, 刘巧娥, 高向东, 等. 机械球磨法制备纳米 HATO 及其性能测试[J]. 火炸药学报, 2019, 42(1): 97-102.
- LI Bo, LIU Qiao-e, GAO Xiang-dong, et al. Preparation of Nano-HATO by Mechanical Milling Method and Its Performance Test[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2019, 42(1): 97-102.
- [13] 刘波, 刘少武, 张远波, 等. RDX 降感技术研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2012, 10(1): 67-70.
- LIU Bo, LIU Shao-wu, ZHANG Yuan-bo, et al. Research Progress in Reducing Sensitivity Technique of RDX[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2012, 10(1): 67-70.
- [14] 安崇伟, 宋小兰, 郭效德, 等. CMDB 推进剂 RDX 填料表面包覆对其机械感度和力学性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(6): 521-524.
- AN Chong-wei, SONG Xiao-lan, GUO Xiao-de, et al. Influence of Surface Coating of RDX Fillers on Mechanical Sensitivity and Properties of CMDB Propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2007, 30(6): 521-524.
- [15] 汪波, 刘玉存, 李敏. HMX 粒度对其撞击感度的影响研究[J]. 华北工学院学报, 2005, 26(1): 35-37.
- WANG Bo, LIU Yu-cun, LI Min. Study on the Influence of Particle Size on the Impact Sensitivity of HMX[J]. Journal of North China Institute of Technology, 2005, 26(1): 35-37.
- [16] 付廷明, 杨毅, 李凤生. 球形超细 HMX 的制备[J]. 火炸药学报, 2002, 25(2): 12-13.
- FU Ting-ming, YANG Yi, LI Feng-sheng. Preparation of HMX Microsphere[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(2): 12-13.
- [17] 李秀秀, 李晓东, 杨荣杰. 碳纳米管/高氯酸铵复合粒子的制备与性能研究[J]. 含能材料, 2004, 12(Z1): 143-146.
- LI Xiu-xiu, LI Xiao-dong, Yang Rong-jie. Preparation and Performance Study of Particles of Carbon Nanotubes Ammonium Perchlorate Composite[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(Z1): 143-146.
- [18] 王晗, 樊学忠, 张伟, 等. 导电聚合物降低浇注高能 AP/Al/CMDB 推进剂感度研究[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(1): 97-100.
- WANG Han, FAN Xue-zhong, ZHANG Wei, et al. Effects of Conductive Polymers on Sensitivities of Cast High-Energy AP/Al/CMDB Propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(1): 97-100.
- [19] 滕学峰, 邓重清, 胡铨, 等. 高氯酸铵(AP)基复合改性双基(AP/CMDB)推进剂燃速控制与降感研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(6): 178-182.
- TENG Xue-feng, DENG Chong-qing, HU Quan, et al. Research of Burning Rate Controlling and Sensitivity Reducing of AP/CMDB Propellant[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(6): 178-182.
- [20] 施金秋, 邓国栋, 朱陈森, 等. 降低超细高氯酸铵感度的方法研究[J]. 爆破器材, 2014, 43(3): 9-13.
- SHI Jin-qiu, DENG Guo-dong, ZHU Chen-sen, et al. Study on the Method of Reducing the Sensitivity of Ammonium Perchlorate Superfine Powder[J]. Explosive Materials, 2014, 43(3): 9-13.
- [21] 李玉斌, 黄辉, 潘丽萍, 等. 高氯酸铵的包覆降感与应用研究[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 792-797.
- LI Yu-bin, HUANG Hui, PAN Li-ping, et al. Desensitizing Technology of AP by Coating and Its Application[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(6): 792-797.
- [22] 吴飞, 郭效德, 焦宗平, 等. 超细高氯酸铵复合粒子的制备及性能研究[J]. 含能材料, 2016, 24(3): 261-268.
- WU Fei, GUO Xiao-de, JIAO Zong-ping, et al. Preparation and Properties of Ultra-Fine Ammonium Perchlorate Composite Particles[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(3): 261-268.
- [23] 秦超, 赵孝彬, 李军. 固体推进剂安全性能影响因素的灰色关联分析[J]. 含能材料, 2012, 20(6): 762-765.
- QIN Chao, ZHAO Xiao-bin, LI Jun. Grey Relational Analysis in Influencing Factors of NEPE Propellant Sensitivity[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(6): 762-765.
- [24] HSU P, HUST G, ZHANG M, et al. Effect of Aging on the Safety and Sensitivity of Nitroglycerin/Nitrocellulose Mixtures[R]. Office of Scientific and Technical Informa-

- tion (OSTI), 2013.
- [25] GORDEYEV V Y, MATVEYEV Y S. Effect of Initial Temperature of Certain Explosive Liquids on their Sensitivity to Explosion Excitation by Cavitation[J]. Fizika Goreniya I Vzryva, 1969, 5(4): 589-592.
- [26] 贾林, 张皋, 张林军, 等. 压延烘干法制备用于定量分析的叠氮硝酸吸收药[J]. 火炸药学报, 2016, 39(6): 94-97.
- JIA Lin, ZHANG Gao, ZHANG Lin-jun, et al. Azidonitramine Intermediate Sample Preparation for Quantitative Analysis by Calendering-Drying Method[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(6): 94-97.
- [27] 齐晓飞, 张晓宏, 李吉祯, 等. NC/NG 共混体系的分子动力学模拟研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 93-99.
- QI Xiao-fei, ZHANG Xiao-hong, LI Ji-zhen, et al. Molecular Dynamics Simulation of NC/NG Blends[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1): 93-99.
- [28] 张正中, 樊学忠, 李吉祯, 等. AP-CMDB 推进剂微观结构及药形尺寸对低温力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2015, 38(6): 91-94.
- ZHANG Zheng-zhong, FAN Xue-zhong, LI Ji-zhen, et al. Effects of Microstructure and the Form and Size on Mechanical Properties of AP-CMDB Propellant at Low Temperature[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(6): 91-94.

责任编辑: 刘世忠