

# 固体推进剂含能颗粒粒度、形貌与感度特性的相关性研究

刘晋湘, 陈江波, 王斐, 张维海, 李芳芳, 杨艳婷, 张军,  
邓海娟, 李艳, 袁丽

(西安北方惠安化学工业有限公司, 西安 710302)

**摘要:** **目的** 研究推进剂含能固体颗粒粒度、形貌与感度特性的相关性。**方法** 采用激光粒度分析仪、扫描电镜、摩擦、撞击、静电感度仪、爆发点测定仪, 对推进剂主要含能固体颗粒 AP、RDX、AL 的粒度及感度进行测试研究, 考察不同规格粒度的 AP、RDX 的机械、静电及热感度, 对 AP、RDX、AL 的混合物料也进行感度测试。**结果** AP 的摩擦、静电感度随着粒度的减小而增加。粗 AP (40~60 目、60~80 目及 100~140 目) 对撞击感度不敏感, 对于粉碎细料 (1~18  $\mu\text{m}$ ), 表现出一定的敏感性。热感度与粒度的关系, 对于 5 s 爆发点, 其结果均大于 400  $^{\circ}\text{C}$ 。对于普通 RDX, 2 种不同粒度的 RDX 对不同激源均表现出较高的敏感性, 高品质 RDX 的感度特性明显优于普通 RDX。AP、RDX、AL 混合后, 感度特性发生了一定的变化。**结论** 细料 AP 机械感度与热感度较高, RDX 粒度越小, 摩擦、撞击感度下降, 3 种粒度 RDX 的静电感度相当, AP、RDX 和 AL 粉混合时仍保持较高的摩擦感度。

**关键词:** AP; RDX; AL; 粒度; 感度; 混合物料

**中图分类号:** TJ55

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2022)10-0036-07

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2022.10.005

## Particle Size, Morphology and Sensitivity Characteristics of Energetic Solid Particles in Propellants

LIU Jin-xiang, CHEN Jiang-bo, WANG Fei, ZHANG Wei-hai, LI Fang-fang, YANG Yan-ting,  
ZHANG Jun, DENG Hai-juan, LI Yan, YUAN Li

(Xi'an North Huian Chemical Industry Company, Xi'an, 710302, China)

**ABSTRACT:** The paper intends to study the correlation between particle size, morphology and sensitivity characteristics of propellant energetic solid particles. By using Laser Particle Size Analyzer (LPSA), Scanning Electron Microscope (SEM), Friction Sensitivity Meter, Impact Sensitivity Meter, Electrostatic Sensitivity Meter and Burst Point Tester, the particle size and sen-

收稿日期: 2022-07-29; 修订日期: 2022-09-19

Received: 2022-07-29; Revised: 2022-09-19

作者简介: 刘晋湘 (1963—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为复合固体推进剂性能测试与表征。

**Biography:** LIU Jin-xiang (1963-), Male, Senior engineer, Research focus: performance testing and characterization of composite solid propellants.

通讯作者: 张维海 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为复合固体推进剂配方。

**Corresponding author:** ZHANG Wei-hai (1980-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: formulation of composite solid propellants.

引文格式: 刘晋湘, 陈江波, 王斐, 等. 固体推进剂含能颗粒粒度、形貌与感度特性的相关性研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 036-042.

LIU Jin-xiang, CHEN Jiang-bo, WANG Fei, et al. Particle Size, Morphology and Sensitivity Characteristics of Energetic Solid Particles in Propellants[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 036-042.

sitivity of the main propellant solid particles AP, RDX and AL were tested and studied to investigate the mechanical, electrostatic, and thermal susceptibility of AP and RDX with different size specifications and test the thermal sensitivities for the mixture of AP, RDX and AL. The results showed that the friction and electrostatic sensitivity of AP increased with the decrease of particle size; the coarse AP (40-60 mesh, 60-80 mesh and 100-140 mesh) is insensitive to the impact sensitivity, but shows a certain sensitivity to crushed fine material (1-18  $\mu\text{m}$ ); the relationship between thermal sensitivity and particle size, for the 5 s burst point, the results are all greater than 400  $^{\circ}\text{C}$ . For common RDX, two kinds of RDX with different particle sizes show high sensitivity to different excitation sources; the sensitivity characteristics of high-quality RDX are obviously better than that of common RDX. After mixing between AP, RDX and AL, the sensitivity characteristics have changed to a certain extent. The fine material AP has higher mechanical and thermal sensitivity; the smaller the particle size of RDX, the lower the friction and impact sensitivity; the electrostatic sensitivity of the three particle sizes of RDX is equivalent; AP, RDX and AL powder still maintain a high friction sensitivity when mixed.

**KEY WORDS:** AP; RDX; AL; particle size; sensitivity; mixed material

高氯酸铵 AP、黑索今 RDX、AL 是复合固体推进剂的主要含能材料,通常在火箭发动机装药中占比 75%以上。这 3 种固体填料从原材料准备到混合、浇注、固化、脱模、整形,伴随整个火箭发动机装药工艺的全过程。过程中,AP、RDX、AL 从流散的颗粒,经混合浸润、捏合、剪切,变成高悬浮的混合料浆。料浆在真空环境高剪切作用下完成浇注,随即在高温环境下被相对固定在黏合剂基体中。最后,经过脱模、整形,完成装药产品的生产,整个工艺过程历时 4~7 d。作为含能固体材料,AP、RDX、AL 自身具备较高的能量,工艺过程中存在氧化剂粉碎强机械刺激、料浆混合挤压和剪切较强摩擦等外界激源的刺激,面临着外界能量输入导致燃烧、爆炸的危险。因此,AP、RDX、AL 及其混合物料自身的感度特性对推进剂装药全过程的安全十分重要,也极大地影响着装药推进剂产品最终的感度特性。因此,搞清 AP、RDX、AL 以及其混合物料的感度特性具有重要意义。

关于 AP、RDX、AL 的粒度与其感度相关性,国内许多研究人员基于英国学者 Bowden 在 1954 年提出的热点理论<sup>[1]</sup>展开了研究<sup>[2-17]</sup>。热点理论是含能材料受外界能量刺激后起爆机理的主要理论,包括热点的形成、热点间相互作用及爆炸形成过程,即含能材料受到外界能量刺激时热点温度的升高及由此引起爆炸。热点是由于含能材料粒子间的孔隙在结晶过程中粒子内部的气泡及裂纹引起。张正中等<sup>[18]</sup>采用扫描电镜、DSC、摩擦感度和撞击感度仪研究了不同粒度 AP 的热感度和机械感度,认为随 AP 粒度的减小,机械感度增大。曾贵玉等<sup>[19]</sup>研究了超细 AP 微观结构对机械感度的影响,不同方式制备的超细 AP 粒子,其形状和大小、晶粒度、孔隙结构、晶体规则度等微观结构方面对其机械感度都有较大的影响。刘玉存等<sup>[20]</sup>对不同粒度的 RDX 进行了机械感度的测试研究,RDX 的粒度对机械感度有明显影响,摩擦、撞击感度随其粒度的减小而降低。周德才等<sup>[21]</sup>测试了不同粒度 RDX 的静电火花感度,粒度越小,其 50%发火电压和发火能越

低,静电火花感度越高。陆明等<sup>[22]</sup>研究了 RDX 与 AL 混合体系的静电火花感度,发现 RDX-AL 不发生爆炸的最大静电火花能量大于 0.013 J。

本文对复合固体推进剂主要含能固体原材料 AP、RDX、AL 及其混合物料在同一框架和条件下进行了系统研究,较为全面和深入地研究了 AP、RDX 及 AL 的粒度和形貌,并考察了粒度和形貌与其感度特性关联性。目的在于掌握其安全特性,为后期深入探索原材料感度与固体火箭发动机装药过程安全和使用安全相关性提供数据支撑,为提升推进剂装药工艺过程安全奠定基础。

## 1 试验

### 1.1 原材料

试验原材料:高氯酸铵(AP),大连氯酸钾厂,规格为 40~60 目、60~80 目及 100~140 目,粉碎细料采用 100~140 目 AP 粉碎,粉碎方式为气流粉碎,规格为 5~10  $\mu\text{m}$ 、9~11  $\mu\text{m}$ 、16~18  $\mu\text{m}$ 。高氯酸铵(AP),规格为 1~3  $\mu\text{m}$ (包覆),洛阳黎明化工研究院;黑索金(RDX),批号 RDX-1,粒度  $D_{50}$  为 28.8  $\mu\text{m}$ ,批号为 RDX-2,粒度  $D_{50}$  为 47.8  $\mu\text{m}$ ,高品质 RDX,粒度  $D_{50}$  为 14.5  $\mu\text{m}$ ,甘肃银光化学工业集团有限公司;铝粉(FLQT2),粒度  $D_{50}$  为 25  $\mu\text{m}$ ,西安航天化学动力厂。

### 1.2 仪器和表征

1) 粒度:英国马尔文公司 Master2000 激光粒度仪,采用 WJ 20554—2018《弹药产品用含能材料(激光粒度法)》。样品处理方法为分散剂加表面活性剂超声 3 min。AP 粒度测定以乙酸丁酯溶剂作为分散剂,卵磷脂为表面活性剂;RDX、AL 粉样品的粒度测定以蒸馏水作分散剂,焦磷酸钠为表面活性剂。

2) 形貌:场发射扫描电镜,FEIQuanta660、日立 SU8010、ZeissSigma300。

3) 摩擦感度:航天 42 所 HT-203B 摩擦感度仪,

采用 GJB 772 A—1997 《火炸药试验方法》中方法 602.1, 摆角为  $66^\circ$ , 表面压力为 2.45 MPa, 药量为 20 mg。

4) 撞击感度: 航天 42 所 HT-202B 撞击感度仪, 采用 GJB 772 A—1997 《火炸药试验方法》中方法 601.1, 定高为 25 cm, 落锤为 10 kg, 药量为 50 mg。

5) 静电感度: 航天 42 所 HT-201B-3 静电感度仪, 采用 QJ 20019.5—2018 《复合固体推进剂安全性能试验方法第 5 部分: 静电火花感度》, 电容为  $0.01 \mu\text{F}$ , 针距为 0.5 mm, 药量为 25 mg。

6) 热感度: 捷克 OZM 公司 AET402 型自动爆发点测试仪, 采用 GJB772A—1997 《火炸药试验方法》中方法 606.1。

## 2 结果和讨论

### 2.1 不同规格 AP

#### 2.1.1 粒度及形貌

不同规格 AP 的粒度见表 1, 形貌见图 1。从图 1a、b、c 中可看出, 对于 3 种粗 AP 颗粒, 颗粒的分散性较好, 其外观形貌表现为类球形, 有一部分为椭

圆形、块状, 表面凹凸不平, 且有一定数量的孔隙。图 1d、e、f 中 3 种规格的粉碎 AP,  $5\sim 10 \mu\text{m}$  的 AP 外观相对光滑, 部分颗粒显示出一定的球形, 但整体颗粒的规整度较差, 特别是大部分颗粒表现出破碎不完全, 呈表面凸起状。 $9\sim 11 \mu\text{m}$  和  $16\sim 18 \mu\text{m}$  的 AP 较  $5\sim 10 \mu\text{m}$  AP 外观表现更差, 颗粒粒度分布不均匀, 含有大量块状颗粒, 有部分块状颗粒带有尖锐的棱角。图 1g—i 中,  $1\sim 3 \mu\text{m}$  颗粒呈类球形, 分布较为均匀, 且分散性良好。

表 1 不同规格 AP 粒度

Tab.1 Particle size of AP with different specifications

AP 规格	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
1~3 $\mu\text{m}$	2.32	0.92	7.54
5~10 $\mu\text{m}$	6.63	2.07	15.4
9~11 $\mu\text{m}$	10.8	2.41	20.7
16~18 $\mu\text{m}$	17.7	2.56	36.8
100~140 目	167.8	114.7	245.2
60~80 目	294.2	174.9	411.0
40~60 目	400.6	272.5	568.2

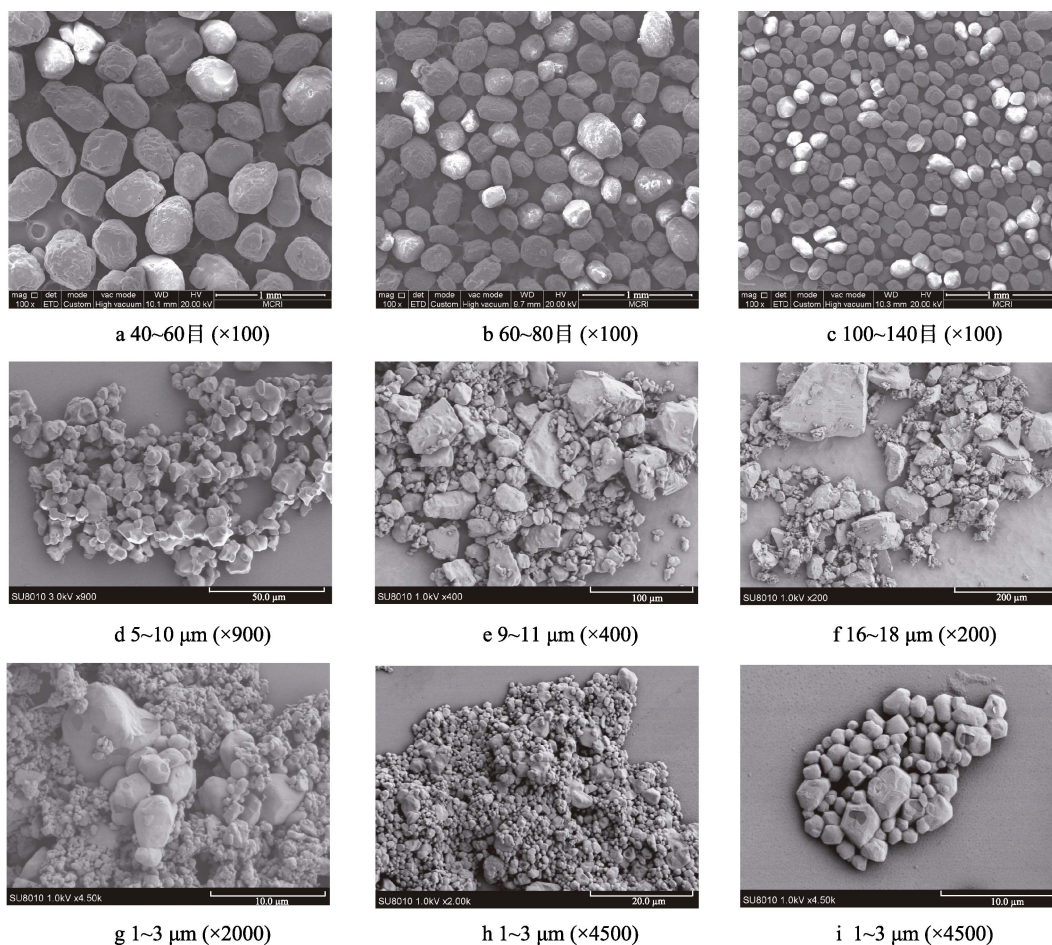


图 1 不同规格 AP 的 SEM 形貌

Fig.1 SEM morphology of AP with different specifications

### 2.1.2 感度

不同规格 AP 的感度见表 2。表 2 中, 1~3 μm、5~10 μm、9~11 μm、16~18 μm 为粗 AP (40~60 目) 粉碎的细料, 其中 1~3 μm 粉碎过程中添加了包覆剂。随着 AP 粒度的减小, 摩擦感度呈总体增高态势。1~3 μm AP 的感度由于采取了十八烷胺的包覆工艺, 在外力摩擦作用下, 表面的十八烷胺包覆层起到了一定的缓冲和润滑作用, 降低了 AP 颗粒表面间的相互摩擦及应力集中, 使摩擦感度的增加得到了一定的削弱。在 5~18 μm 的 3 种粉碎细料中, 5~10 μm 与 9~11 μm 的粒度接近, 且表面外观相对光滑, 但由于相当部分颗粒呈表面凸出状, 这种形态在摩擦

感度试验时, 由于挤压和摩擦作用, 易于破碎而形成热点。

对于 3 种粗颗粒 AP (40~60 目、60~80 目及 100~140 目), 撞击感度均为 0, 表明粗颗粒 AP 因具有较好的流散性, 在外界摩擦激源的作用下, 颗粒易于滑动, 不易形成热点。对于粉碎细料 (5~18 μm), 粒度较小, 且易于团聚, 外力作用产生的黏性流动受到一定程度的阻碍, 表现出一定的撞击敏感性, 但撞击感度不高, 落锤 (10 kg) 250 mm 定高下的爆炸百分数在 32% 以下。对于 1~3 μm 的粉碎 AP, 因其表面相对光滑, 且有包覆层缓冲作用, 撞击感度明显下降, 感度为 4%。

表 2 不同规格 AP 感度  
Tab.2 Sensitivity of AP with different specifications

AP 规格	摩擦感度 (66°-2.45 MPa-20 mg) /%	撞击感度 (250 mm-10 kg-50 mg) /%	静电感度 (0.01 μF-0.5 mm-25 mg) /mJ	5 s 爆发点 (50 mg) /°C
1~3 μm	92	4	87.8	>400
5~10 μm	100	28	107.9	>400
9~11 μm	70	12	120.0	>400
16~18 μm	56	32	157.3	>400
100~140 目	22	0	186.0	>400
60~80 目	6	0	240.3	>400
40~60 目	8	0	275.8	>400

随 AP 粒度的减小, 静电感度呈增加趋势。主要是由于颗粒的堆积和团聚随粒度的减小而增大, 静电火花产生的热作用致使小颗粒 AP 热点易于形成。对于所有规格 AP 的热感度, 5 s 爆发点均大于 400 °C, 表明 AP 在 400 °C 以下相对不敏感。

2.12 μm, 其外观形貌表现为类球形、棒状、表面凸出状, 且有颗粒团聚, 颗粒表面相对光滑。高品质 RDX 颗粒径距为 1.75 μm, 粒度分布较窄, 外观呈类球形, 表面光滑圆润, 类似鹅卵石。

## 2.2 不同规格 RDX

### 2.2.1 粒度及形貌

不同规格 RDX 的粒度见表 3, 形貌见图 2。从图 2 中可看出, 对于 3 种规格的 RDX 颗粒, RDX-1 和 RDX-2 颗粒的粒度分布较宽, 径距分别为 2.19、

表 3 不同规格 RDX 粒度  
Tab.3 Particle size of RDX with different specifications

RDX 规格	D <sub>50</sub> /μm	D <sub>10</sub> /μm	D <sub>90</sub> /μm	Span	比表面积 (/m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )
高品质 RDX	14.5	4.89	30.3	1.75	0.99
RDX-1	28.7	7.90	70.9	2.19	0.60
RDX-2	47.8	12.4	113.9	2.12	0.39

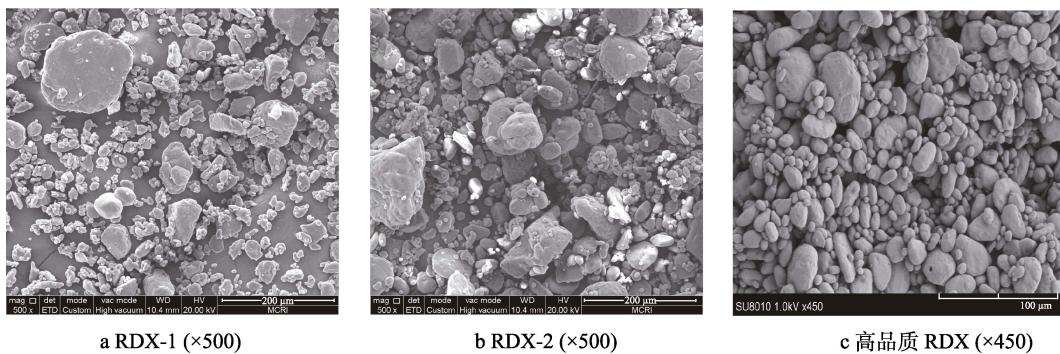


图 2 不同规格 RDX 的 SEM 形貌

Fig.2 SEM morphology of RDX with different specifications

### 2.2.2 感度

不同粒度 RDX 的感度见表 4。从表 4 中可看出, 3 类 RDX 随着粒度的增大, 摩擦感度、撞击感度和静电感度均增高。RDX 粒度越小, 较小的 RDX 晶粒晶体中的缺陷比晶粒大时少, 在摩擦激源作用下的塑性流动过程中, RDX 之间、RDX 与滑柱接触面之间摩擦形成的热点相应减少, 需要爆发的能量较大, 表现为感度较低。对于撞击感度, RDX 粒度减小, 由于小颗粒的 RDX 多以团聚体形式存在, 在外界撞击能激发下, 首先要打破颗粒间的团聚, 这一过程将吸收一部分能量, 使 RDX 的撞击力度减弱, 使得感度下降。静电感度方面, 3 种规格的 RDX 均表现出较

高的敏感性。从 DSC 测试结果来看, RDX 的热分解温度与其粒度大小无关<sup>[23]</sup>, 但 RDX 粒度与其表面积成反比。对于普通黑索金 RDX-1、RDX-2, 粒度小, 比表面积较大, 静电火花作用于 RDX 颗粒接触面增加, 使得热量积聚而引发爆炸的概率增加。高品质 RDX 的粒度最小, 本应表现出更高的静电感度, 但从测试结果看, 其感度最低, 这与其球形化制备及晶体缺陷较少相关。对于 5 s 爆发点, 较小粒度的 RDX 热量积聚程度相对较高, 使得其热感度增大。尽管高品质 RDX 的粒度最小, 但由于其球形度高, 表面光滑, 颗粒的规整性好, 且颗粒的团聚现象也有所改善, 使得高品质 RDX 的 5 s 爆发点未因其粒度的减小而减小。

表 4 不同粒度 RDX 的感度  
Tab.4 Sensitivity of RDX with different specifications

RDX 批号	摩擦感度 (66°-2.45 MPa-20 mg) /%	撞击感度 (250 mm-10 kg-50 mg) /%	静电感度 $E_{50}$ (0.01 μF-0.5 mm-25 mg) /mJ	5 s 爆发点 (50 mg) /°C
高品质 RDX	48	8	58.3	309.7
RDX-1	68	44	51.7	294
RDX-2	76	88	50.8	359

## 2.3 混合物料

### 2.3.1 Al 粉的粒度及微观外貌

从表 5、图 3 中可以看出, FLQT2AL 粉的  $D_{50}$  为 24.7 μm, 径距为 1.15 μm, 外观为球形, 且表面光滑, 粒度分布均匀, 粒度分布较窄, 颗粒的分散性良好。

### 2.3.2 感度

考虑到推进剂装药过程中, 不同规格 AP 混合物

料与 RDX、AL 粉之间存在混合状态, 且有遭遇机械作用的可能, 为此需要了解这些混合物料的感度特性, 混合物料的感度见表 6。表 6 中, AP 混合样

表 5 AL 粉 (FLQT2) 粒度  
Tab.5 Particle size of AL (FLQT2)

Al 规格	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	Span
FLQT2	24.7	13.6	42.1	1.15

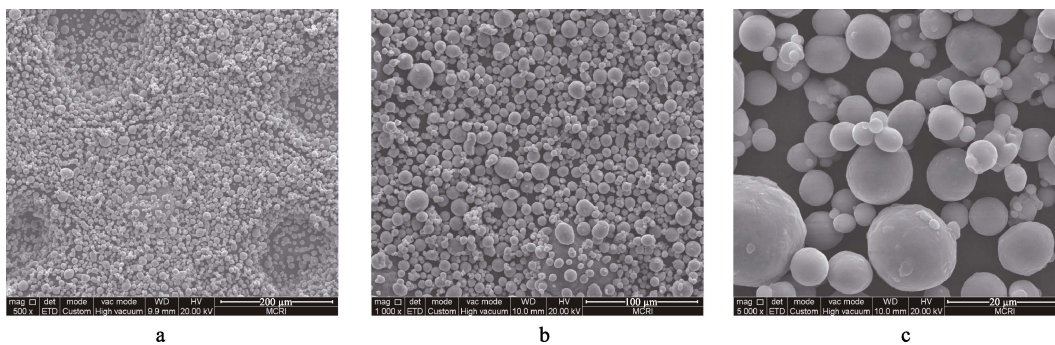


图 3 2#Al 的 SEM 形貌  
Fig.3 SEM morphology of 2# Al

表 6 混合物料的感度  
Tab.6 Sensitivity of mixed material

AP 规格	摩擦感度 (66°-2.45 MPa-20 mg) /%	撞击感度 (250 mm-10 kg-50 mg) /%
AP 混合样	74	77.9 cm
AP 混合样+Al (1:1:1)	16	0
RDX +Al (1:1)	24	12
AP 混合样+Al+RDX (1:1:1)	88	36

注: 77.9 cm 为特性落高  $H_{50}$ , 测试条件为 5 kg-50 mg。

中各组分的质量比为 AP(40~60 目): AP(100~140 目): AP(5~10  $\mu\text{m}$ )=1:1:1, Al 为 FLQT2 铝粉, RDX 为 RDX-1。

从表 6 可以看出, 摩擦感度, AP 混合样品受 5~10  $\mu\text{m}$  细料 AP 感度较高的影响, 感度偏高, 为 74%; AP 混合样加入 Al 粉后, 感度迅速下降为 16%, 这得益于 Al 光滑的表面特性, 使体系整体摩擦系数降低, 减少了摩擦作用下热点产生的几率; 在此基础上, 再加入 RDX 后, 混合样感度又上升为 88%, 表现为较高的感度。这是由于 AP 混合样和 RDX 在混合体系中占比较高, 且含有较高感度的细料 AP (摩擦感度 100%) 和一定感度的 RDX-1 (摩擦感度 68%), 致使感度较高。撞击感度, AP 混合样由于其各组成部分对撞击不敏感, 混合样中 5~10  $\mu\text{m}$  细料感度最高为 28%, 其他 2 种规格撞击感度为 0%, 加之 3 种规格不同粒度 AP 呈一定级配, 颗粒在落锤撞击下能快速散开, 不会积聚热量, 致体系撞击感度较低, 落锤 (5 kg) 特性落高  $H_{50}$  达 77.9 cm (38.2 J)。在加入 Al 粉后, 体系的撞击感度降为 0%, 这与 Al 光滑表面特性有关。在此基础上, 再加入 RDX 后, 体系感度有所上升, 为 36%。这与 RDX 与 AP 混合样中细料 AP 的耦合作用有关。RDX 在与 Al 混合后, 感度降低为 12%, 同样也得益于 Al 粉的作用。试验发现, 试样中混入 Al 粉后, 发生的响应十分剧烈, 并伴随耀眼的火光, 说明作为还原剂的 Al 粉与氧化剂发生了强烈的氧化还原反应。

### 3 结论

1) 对于摩擦、撞击、静电及热刺激, 粗料 AP (40~60 目、60~80 目及 100~140 目) 表现出较低的感度, 细料 (粉碎料, 3~18  $\mu\text{m}$ ) 感度相对较高, 机械刺激中, 摩擦相比于撞击更为敏感。采用包覆工艺的 AP (1~3  $\mu\text{m}$ ) 对机械刺激的敏感性得到改善, 摩擦感度有所降低, 撞击感度得到明显抑制。

2) 3 种粒度的 RDX 对机械刺激具有一定的敏感性, 与 AP 不同, RDX 粒度越小, 摩擦、撞击感度下降。3 种粒度 RDX 的静电感度相当, 高品质 RDX 的静电感度最低。对于热激源, 粒度减小, 5 s 爆发点温度降低, 但高品质 RDX 的热感度并未因其粒度减小而增加。

3) AP 混合物料、RDX 在与 Al 粉混合后, 对摩擦、撞击的感度有所下降, 但在 AP、RDX 和 Al 粉混合时, 仍保持较高的摩擦感度。

#### 参考文献:

[1] BOWDEN F P, YOFFE A D. The Initiation and Growth of Explosions in Liquids and Solids[J]. Journal of the

- Royal Aeronautical Society, 1952, 56(502): 104.
- [2] 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.
- [3] 任秀秀, 赵省向. 高能炸药摩擦感度研究进展[J]. 飞航导弹, 2018(6): 91-97.
- REN Xiu-xiu, ZHAO Sheng-xiang. Research Progress on Friction Sensitivity of High-Energy Explosives[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(6): 91-97.
- [4] 刘萌, 李笑江, 严启龙, 等. 硝铵类高能炸药重结晶降感技术研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2011, 9(6): 54-56.
- LIU Meng, LI Xiao-jiang, YAN Qi-long, et al. Research Progress in Reducing Sensitivity Technology of Nitramines High Energy Explosives by Recrystallization[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2011, 9(6): 54-56.
- [5] 许亚北, 谭迎新, 曹卫国, 等. RDX 热分解特性及 HMX 对其热稳定性的影响[J]. 含能材料, 2020, 28(2): 157-163.
- XU Ya-bei, TAN Ying-xin, CAO Wei-guo, et al. Thermo-Decomposition Performance of RDX and the Effect of HMX on Its Thermo-Stability[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(2): 157-163.
- [6] 李志敏, 张同来, 杨利, 等. 火炸药静电性能研究进展[J]. 科技导报, 2011, 29(26): 74-79.
- LI Zhi-min, ZHANG Tong-lai, YANG Li, et al. Progress on Electrostatic Performances of Explosive[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(26): 74-79.
- [7] 王国利, 曹海峰. 粉状火炸药生产的静电安全[C]//第七届工程爆破学术会议论文集. 成都: 中国力学学会, 2001.
- WANG Guo-li, CAO Hai-feng. Electrostatic Safety in Powdered Explosive Production[C]//Proceedings of the Seventh Academic Conference on Engineering Blasting. Chengdu: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2001.
- [8] 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.
- [9] 耿孝恒, 王晶禹, 张景林. 不同粒度 RDX 的重结晶制备和机械感度研究[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(7): 29-30.
- GENG Xiao-heng, WANG Jing-yu, ZHANG Jing-lin. Recrystallization Preparation of Different Particle RDX and Study on the Mechanical Sensitivity[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2009, 35(7): 29-30.
- [10] 王彩玲, 陈松, 赵省向, 等. Al 粉对 RDX 机械感度的影响[J]. 火工品, 2010(1): 32-34.

- WANG Cai-ling, CHEN Song, ZHAO Sheng-xiang, et al. Influence of Al Powder on Mechanical Sensitivity of RDX[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(1): 32-34.
- [11] 姚李娜, 封雪松, 赵省向, 等. 纳米 Al 对 RDX 基炸药机械感和火焰感度的影响[J]. *火炸药学报*, 2012, 35(4): 15-18.
- YAO Li-na, FENG Xue-song, ZHAO Sheng-xiang, et al. Influence of Nano Al on Mechanical Sensitivity and Flame Sensitivity of RDX-Based Explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(4): 15-18.
- [12] 南海, 郭昕, 孙培培, 等. 包覆材料对高氯酸铵(AP)药粉撞击感度影响[J]. *火工品*, 2013(6): 39-41.
- NAN Hai, GUO Xin, SUN Pei-pe, et al. The Influence of Coating Material on the Impact Sensitivity of AP Powder[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013(6): 39-41.
- [13] 杨斌林, 陈荣义, 曹晓宏. RDX 炸药粒度对其爆轰性能的影响[J]. *火工品*, 2004(3): 50-52.
- YANG Bin-lin, CHEN Rong-yi, CAO Xiao-hong. Influence of Particle Size of RDX on the Detonation Properties[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2004(3): 50-52.
- [14] 张淑玲, 刘天生, 肖秀友. RDX 粒度对某塑性炸药包覆和机械感度性能的影响[J]. *华北工学院学报*, 2002, 23(4): 296-298.
- ZHANG Shu-ling, LIU Tian-sheng, XIAO Xiu-you. Study about the Effect of RDX Particle Size on the Coating of Plastic Explosives and Its Mechanical Sensitivity[J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2002, 23(4): 296-298.
- [15] 于海江, 陈颖洁, 黄薇, 等. 窄范围内 RDX 粒度对感度的影响[C]//中国化学会第 29 届学术年会. 北京: 中国化学会, 2014.
- Yu Haijiang, Chen Yingjie, Huang Wei, et al. The effect of RDX particle size on sensitivity in a narrow range [C]//The 29th Annual Academic Conference of the Chinese Chemical Society. Beijing: Chinese Chemical Society, 2014.
- [16] 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.
- [17] 焦清介, 李江存, 任慧, 等. RDX 粒度对改性双基推进剂性能影响[J]. *含能材料*, 2007, 15(3): 220-223.
- JIAO Qing-jie, LI Jiang-cun, REN Hui, et al. Effect of RDX Particle Size on Properties of CMDB Propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007, 15(3): 220-223.
- [18] 张正中, 唐秋凡, 邓重清, 等. 不同粒度及包覆改性高氯酸铵的热分解性能和安全性能研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(5): 160-163.
- ZHANG Zheng-zhong, TANG Qiu-fan, DENG Chong-qing, et al. Study on Thermal Decomposition and Safety Property of AP with Different Granularity and Coating Modification[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(5): 160-163.
- [19] 曾贵玉, 郁卫飞, 聂福德, 等. 超细高氯酸铵(AP)微观结构对机械感度的影响[J]. *火工品*, 2007(5): 16-19.
- ZENG Gui-yu, YU Wei-fei, NIE Fu-de, et al. The Effect of Microstructure of Ultrafine Ammonium Perchlorate(AP) on Its Mechanical Sensitivity[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(5): 16-19.
- [20] 刘玉存, 王建华, 安崇伟, 于雁武. RDX 粒度对机械感度的影响[J]. *火炸药学报*, 2004, 27(2): 7-9.
- LIU Yu-cun, WANG Jian-hua, AN Chong-wei, et al. Effect of Particle Size of RDX on Mechanical Sensitivity[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 27(2): 7-9.
- [21] 周得才, 吕春玲, 耿孝恒, 等. 粒度对硝铵类炸药静电火花感度的影响[J]. *山西化工*, 2011, 31(1): 18-20.
- ZHOU De-cai, LV Chun-ling, GENG Xiao-heng, et al. Effect of Particle Size of Ammonium Nitrate Explosive on Electrostatic Spark Sensitivity[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2011, 31(1): 18-20.
- [22] 陆明, 赵月兵. RDX 与 Al 混合体系的静电火花感度研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(12): 1602-1606.
- LU Ming, ZHAO Yue-bing. Research on Electrostatic Spark Sensitivity of RDX-Al in the Process of Roller Mixing[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(12): 1602-1606.
- [23] 宋小兰, 李凤生, 张景林, 等. 粒度和形貌及粒度布对 RDX 安全和热分解性能的影响[J]. *固体火箭技术*, 2008, 31(2): 168-172.
- SONG Xiao-lan, LI Feng-sheng, ZHANG Jing-lin, et al. Influence of Particle Size, morphology and Size Distribution on the Safety and Thermal Decomposition Properties of RDX[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2008, 31(2): 168-172.

责任编辑: 刘世忠