

文章编号: 1003-1480 (2025) 02-0011-07

# HMX静电积电积累特性及规律研究

马智刚<sup>1</sup>, 李小东<sup>2</sup>, 刘劲松<sup>1</sup>, 张宏光<sup>1</sup>, 洪瑞<sup>1</sup>

(1. 长春设备工艺研究所, 吉林 长春, 130012; 2. 中北大学, 山西 太原, 030051)

**摘要:** 为了研究奥克托今(HMX)的静电积电积累特性与规律, 通过斜槽法模拟HMX在生产、运输、存储和使用过程中的静电积累过程, 采用法拉第筒测试了不同斜槽长度、倾角、材质、环境温度与湿度条件下HMX的静电积累量, 并研究了HMX混合物、细化及包覆处理方式对HMX静电积累的影响。结果表明: HMX的静电积累量随斜槽长度增大而增加; 斜槽倾角为60°时HMX的静电积累量达到最大值; 与不同材质斜槽摩擦后, HMX的静电积累由大到小依次为ABS、1060铝、304不锈钢、黄铜。HMX的静电积累量随着湿度增大而降低, 但是湿度对其影响十分有限; HMX的静电积累量随着温度升高而降低。对于HMX与石墨混合物, 石墨含量增大会导致其静电积累量降低; 对于HMX与铝粉混合物, 铝粉含量增大会使其静电积累量增加。细化后的HMX由于粒径变化导致其静电积累量成倍增加; 包覆处理后的HMX由于表面物质变化导致其静电极性发生变化。

**关键词:** HMX; 静电积累; 斜槽法; 接触分离

中图分类号: TJ450.6; TQ564 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.02.002

## Research on the Characteristics and Rules of HMX Electrostatic Electrification Accumulation

MA Zhi-gang<sup>1</sup>, LI Xiao-dong<sup>2</sup>, LIU Jin-song<sup>1</sup>, ZHANG Hong-guang<sup>1</sup>, HONG Rui<sup>1</sup>

(1. Changchun Equipment Technology Research Institute, Changchun, 130012; 2. North University of China, Taiyuan, 030051)

**Abstract:** In order to study the electrostatic electrification accumulation characteristics and rules of octogin(HMX), the chute method was used to simulate the electrostatic accumulation process of HMX during production, transportation, storage, and use. Faraday tube was used to test the electrostatic accumulation amount of HMX under different chute lengths, inclination angles, materials, environmental temperature and humidity conditions. The effects of HMX mixture, refinement, and coating treatment methods on the electrostatic accumulation of HMX were also studied. The results show that the electrostatic accumulation of HMX increases with the chute length; When the inclination angle of the chute is 60°, the electrostatic accumulation of HMX reaches its maximum value; After friction with chutes made of different materials, the electrostatic accumulation of HMX decreases in the following order: ABS, 1060 aluminum, 304 stainless steel, and brass. The electrostatic accumulation of HMX decreases with increasing humidity, but the influence of humidity on it is very limited; The electrostatic accumulation of HMX decreases with increasing temperature. For the mixture of HMX and graphite, an increase in graphite content will lead to a decrease in electrostatic accumulation; For the mixture of HMX and aluminum powder, an increase in aluminum powder content will lead to an increase in electrostatic accumulation. The refined HMX has a doubled accumulation of static electricity due to changes in particle size; The electrostatic polarity of HMX after coating treatment changes due to surface material changes.

**Key words:** HMX; Electrostatic accumulation; Chute method; Contact separation

收稿日期: 2025-01-08

作者简介: 马智刚(1996-), 男, 研究实习员, 主要从事弹药装药设备以及含能材料安全性研究。

引用本文: 马智刚, 李小东, 刘劲松, 等. HMX静电积电积累特性及规律研究[J]. 火工品, 2025(2): 11-17.

奥克托今 (HMX) 是一种综合性能优良的单质猛炸药, 常用于高威力的导弹战斗部, 也用作核武器的起爆装药和固体火箭推进剂。干燥状态下, HMX 粉体的电阻率一般可以达到  $10^{14} \Omega \cdot m$  以上, 属于高绝缘材料。在其生产、运输、储存和使用过程中, HMX 可能会与各种工具、容器、设备、包装材料等发生摩擦而产生静电<sup>[1]</sup>, 静电产生后难以自主消散, 易积累大量的静电电荷, 从而产生静电电场。当静电场强度达到周围介质的击穿场强, 就可能发生静电放电, 从而导致着火和爆炸等事故<sup>[2-4]</sup>。

检测不同条件下含能材料的静电积累量并分析其规律, 从而在生产过程中制定有效的防护措施, 对于预防静电引起的事故, 提高生产、运输、存储、使用过程的安全性有十分重要的意义。Hao T 等<sup>[5]</sup>研究了药物粉末静电特性和混合物均匀性的关系, 其中, 药物粉末采用活性药物成分咖啡因, 助流剂采用硅石粉, 润滑剂采用硬脂酸镁, 使用法拉第筒测量实验产生的静电量, 对药物的安全生产提供了一些建议。Lim C W 等<sup>[6]</sup>通过控制聚氯乙烯颗粒沿管壁滑动, 研究了颗粒前向  $\rho$  角、长宽比、滑移面积、滑动方向、滑动时间、相对湿度对静电起电量大小的影响。Jiawei Hu 等<sup>[7]</sup>研究了单粒子的摩擦带电情况, 得出在短滑动距离内, 颗粒的最终电荷与初始电荷呈线性关系, 滑动长度越长, 产生的摩擦电荷越多, 并分析了法向载荷对摩擦电荷密度的影响, 将摩擦带电描述为滑动接触面积和实际接触面积的协同效应。陆明等<sup>[8]</sup>研究表明工业 RDX 静电荷积累量随质量线性增长, 工业 RDX/Al 混合物相对于工业 RDX 静电电性由负转正。周铭锐等<sup>[9]</sup>研究了斜槽材质、环境、研究对象特质不同时石英砂的静电积累特性, 得出了相关规律。李志敏<sup>[10]</sup>系统研究了仪器条件、环境因素、样品粒度对 8 种典型起爆药静电量的影响规律, 并对实验数据进行了拟合, 以拟合方程的形式表示各因素对静电量的影响。董浩然<sup>[11]</sup>通过 CFD-DEM 耦合模拟研究了金属球和气化灰渣的碰撞荷电过程, 发现随着进口风速增大, 炭颗粒静电量先增大后减小, 并将实验结果与模拟结果进行对比, 发现二者规律一致。

为了研究 HMX 的静电起电积累特性与规律, 本

文采用斜槽法模拟了 HMX 在生产、运输、存储和使用过程中的静电积累方式, 用法拉第筒测得其静电积累量, 首先从斜槽长度、倾角、材质 3 个方面研究了介质对 HMX 静电积累的影响; 其次从环境温度和湿度 2 个方面研究了所处环境对 HMX 静电积累的影响; 最后研究了混合物以及细化、包覆处理方式对 HMX 静电积累的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

HMX 原料, 工业级, 中国兵器工业集团 805 厂; 氟橡胶 F2602, 工业级, 中昊晨光化工研究院有限公司; 纳米铝粉, 纯度大于 99.9% (粒径约为 50 ~ 100 nm), 河北复朗施纳米科技有限公司。

### 1.2 实验装置

实验装置主要包括主体支架、斜槽、减速器、法拉第筒、数字电荷仪 5 个部分, 如图 1 所示。



图 1 斜槽法测试实验装置

Fig.1 Experimental setup for the chute method testing

斜槽可以选用 304 不锈钢、1060 铝、ABS 等不同材质, 通过减速器可以实现斜槽倾角在  $10 \sim 80^\circ$  间自由调节。法拉第筒是一种测量静电积累量的传感器, 其内外筒绝缘, 电阻在  $10^{14} \Omega$  以上, 绝缘材料选择聚氯乙烯、聚四氟乙烯等, 使用量程为 20 nC。数字电荷仪 EST111, 由北京华晶汇科技有限公司生产, 测量范围为  $\pm 10 \text{ pC} \sim \pm 20 \text{ } \mu\text{C}$ , 准确度为  $\pm 0.5\%$ , 使用环境温度为  $-10 \sim 45^\circ\text{C}$ , 使用环境湿度不大于 80% RH。

斜槽法测量 HMX 粉体的带电量本质上是模拟 HMX 在生产及使用过程中与管道、包装和各种工具发生摩擦后的静电起电现象<sup>[9-10]</sup>。实验过程为: 3 g 样

品在不同实验条件下依靠自身重力从斜槽由上至下滑落,在下滑过程中,样品与斜槽表面相互摩擦,带上静电电荷,带电的样品落入法拉第筒中,与法拉第筒连接的数字电荷仪实时显示法拉第筒中样品的带电量 and 电荷极性<sup>[12-13]</sup>,重复至少6次实验,得到5组有效实验数据,求平均值,得到该实验条件下 HMX 的静电积累量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 斜槽长度对 HMX 静电积累的影响

在环境温度为 15 °C,湿度为 20%RH,304 不锈钢斜槽倾角为 50°的条件下,HMX 沿斜槽下滑不同距离时的静电积累量如图 2 所示。

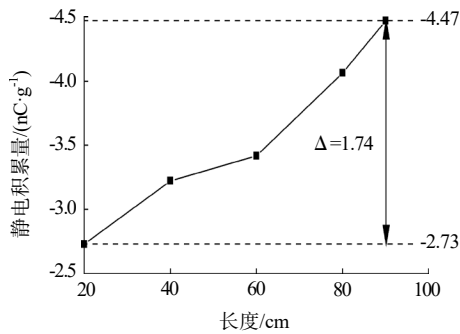


图 2 不同下滑距离对应的 HMX 静电积累量

Fig.2 HMX electrostatic accumulation corresponding to different sliding distances

由图 2 可知,HMX 沿斜槽下滑后带负电,且随着下滑距离增大,HMX 的静电积累量增加。当下滑距离为 20 cm 时,HMX 的静电积累量最小,带电量为  $-2.73 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ ;当下滑距离为 90 cm 时,HMX 的静电积累量为  $-4.47 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ ,较下滑距离为 20 cm 时增加了 64%。这是因为随着下滑距离增大,HMX 与斜槽的摩擦距离变长,同时,HMX 在斜槽上更加分散,与斜槽的接触更加充分,因此,样品的静电积累量增加。此外,距离增长还会使下滑时间增加,从而导致下滑过程中消散的电荷也增加。由于 HMX 是高绝缘物质,其体积电阻率较大,容易产生静电,且难以自主消散,因此,在下滑过程中,HMX 静电积累的增加量远大于其自然消散的量<sup>[14]</sup>。综上,当斜槽长度在 90 cm 以内时,HMX 的静电积累量随下滑距离增大而增加。

### 2.2 斜槽倾角对 HMX 静电积累的影响

环境温度 16 °C,湿度 30%RH,下滑距离为 90 cm 的条件下,HMX 沿不同倾角的 304 不锈钢斜槽下滑时的静电积累量如图 3 所示。

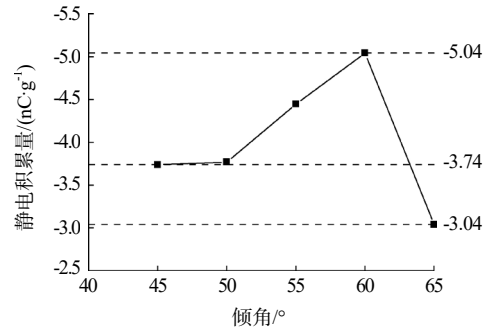


图 3 不同斜槽倾角对应的 HMX 静电积累量

Fig.3 HMX electrostatic accumulation corresponding to different chute inclination angles

由图 3 可知,斜槽倾角在 45 ~ 50°之间时,HMX 的静电积累量基本不变,为  $-3.74 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ ;斜槽倾角在 50 ~ 60°之间时,HMX 的静电积累量增加,当斜槽倾角为 60°时增大至  $-5.04 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ ,相较于斜槽倾角为 50°时增加了 35%;斜槽倾角在 60 ~ 65°之间时,HMX 的静电积累量降低,当斜槽倾角为 65°时减小至  $-3.04 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ ,相较于斜槽倾角为 60°时降低了 40%。这主要是因为 HMX 的静电积累量不仅受到斜槽倾角的影响,还与自身的流散性有一定关系。摩擦力和摩擦速度越大,越有利于静电的产生。当斜槽倾角在 45 ~ 50°之间时,由于 HMX 粉体自身流散性的关系,明显观察到有较多的 HMX 留在斜槽表面,此时部分 HMX 与斜槽未产生摩擦,因此 HMX 的静电积累量较少。而斜槽倾角在 50 ~ 60°之间时,更多的 HMX 沿着斜槽下滑而产生摩擦,因此 HMX 静电积累量的增长率明显提高。当斜槽倾角为 60°时,HMX 的静电积累量达到最大值。随着斜槽倾角进一步增大,HMX 作用于斜槽的正压力减小,导致 HMX 与斜槽之间的摩擦力减小,沿着斜槽方向的力增大,下滑速度加快<sup>[15]</sup>。当斜槽倾角在 60 ~ 65°之间时,HMX 的运动主要是由重力所引起的下滑,此时下滑速度过快,部分 HMX 没有充分带电便滑入法拉第筒中,因此,HMX 的静电积累量明显降低。

### 2.3 斜槽材质对 HMX 静电积累的影响

在环境温度为 15 °C,湿度为 20%RH,斜槽倾角

为 50° 的条件下, HMX 沿不同材质斜槽下滑 90 cm 时的静电积累量如表 1 所示。

表 1 HMX 在不同材质斜槽上的静电积累量

Tab.1 Static accumulation of HMX on the chute of different materials

| 序号 | 斜槽材质    | 静电积累量/(nC·g <sup>-1</sup> ) |
|----|---------|-----------------------------|
| 1  | 304 不锈钢 | -3.92                       |
| 2  | 黄铜      | -3.78                       |
| 3  | 1060 铝  | -4.29                       |
| 4  | ABS     | -8.66                       |

由表 1 可知, HMX 与绝缘材质斜槽摩擦后的静电积累量明显大于其与金属材质斜槽摩擦后的静电积累量。对于金属材质斜槽, HMX 的静电积累量由大到小依次为: 1060 铝、304 不锈钢、黄铜。通过查阅 IEEE Std.C62.47 和美国 ESD 协会网站发布的不同材质静电序列标准, 所选取的斜槽材料在序列中从前到后依次为: 1060 铝、304 不锈钢、黄铜、ABS。静电序列是根据 2 种物质相互接触时产生静电的极性, 将各种物质依次排成的序列。依据静电序列, 前后 2 种物质接触时, 前者带正电, 后者带负电, 且 2 种物质距离越远带电量越大。HMX 与几种不同材质的斜槽摩擦后均带负电, 因此, HMX 在静电序列中的顺序在几种金属材料之后, 与几种金属材质的斜槽摩擦后带电量由大到小依次为: 1060 铝、304 不锈钢、黄铜, 与静电序列的规律相符。

HMX 与 ABS 斜槽摩擦后的静电积累量为-8.66 nC·g<sup>-1</sup>, 且不满足于静电序列规律。这是由于相对于金属材料, ABS 的表面明显较为粗糙, 导致 ABS 与 HMX 之间有更大的摩擦力, 因此, 其静电积累量明显增加。

## 2.4 温湿度对 HMX 静电积累的影响

### 2.4.1 湿度对 HMX 静电积累的影响

在 304 不锈钢斜槽倾角为 50° 的条件下, HMX 在不同湿度下沿斜槽下滑 90 cm 时的静电积累量如图 4 所示。由图 4 可知, HMX 的静电积累量随着环境湿度的增大而降低。当湿度为 20%RH 时, HMX 的静电积累量为-4.33 nC·g<sup>-1</sup>; 当湿度上升至 80%RH 时, HMX 的静电积累量为-3.77 nC·g<sup>-1</sup>, 相对于湿度为 20%RH 时降低了 13%。这是由于当湿度增大时, 空气中的水分子浓度增大, 水分子在热运动过程中与 HMX 和斜槽表面的接触概率也增大, 使得 HMX 和

斜槽表面更容易附着水分子。水分子的存在使 HMX 和斜槽表面的电导率有一定提升, 从而使 HMX 所带静电荷消散速度增加, 因此, HMX 的静电积累量降低。当环境湿度由 20%RH 增加至 80%RH, 湿度增加了 300%, 但 HMX 的静电积累量仅减小了 13%, 这是由于 HMX 无吸湿性, 因此湿度对 HMX 静电积累量的影响有限。

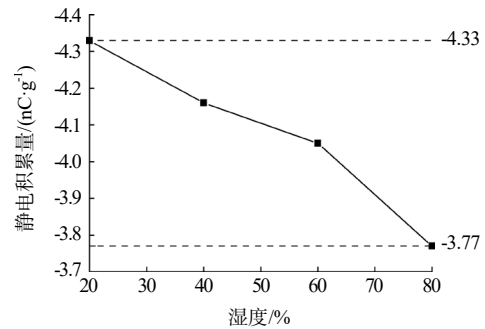


图 4 不同湿度对应的 HMX 静电积累量

Fig.4 HMX electrostatic accumulation corresponding to different humidity levels

### 2.4.2 温度对 HMX 静电积累的影响

在 304 不锈钢斜槽倾角为 50° 的条件下, HMX 在不同温度下沿斜槽下滑 90 cm 时的静电积累量如图 5 所示。

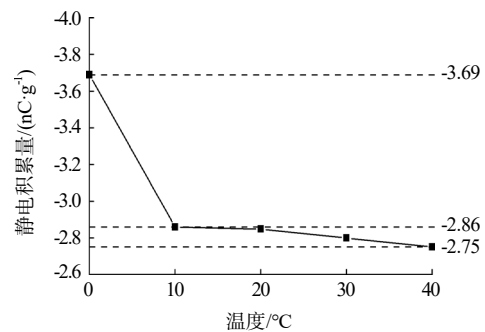


图 5 不同温度对应的 HMX 静电积累量

Fig.5 HMX electrostatic accumulation corresponding to different temperatures

由图 5 可知, HMX 的静电积累量随着温度升高而降低。当温度为 0 °C 时, HMX 的静电积累量为-3.69 nC·g<sup>-1</sup>; 当温度为 10 °C 时, HMX 的静电积累量为-2.86 nC·g<sup>-1</sup>, 较温度为 0 °C 时降低了 22%; 当温度为 40 °C 时, HMX 的静电积累量为-2.75 nC·g<sup>-1</sup>, 较温度为 10 °C 时降低了 4%。温度从 0 °C 升高至 10 °C 过程中 HMX 静电积累量的下降速度明显大于温度从 10 °C 升高到 40 °C 过程中的下降速度。这是因为温度升高导致空气中水分子热运动加剧, 水分子附着到 HMX 和斜槽表

面的概率增加,从而使 HMX 的静电积累量降低。而当温度为 10 °C 时, HMX 表面附着的水分子已经趋近饱和状态,因此温度从 10 °C 升高至 40 °C 过程中, HMX 的静电积累量仅下降了 4%。

## 2.5 HMX 混合物的静电积累

### 2.5.1 HMX 与石墨混合粉体

当环境温度为 15 °C 时, HMX 中混合不同比例的石墨后,沿斜槽下滑 90 cm 时的静电积累量如图 6 所示。

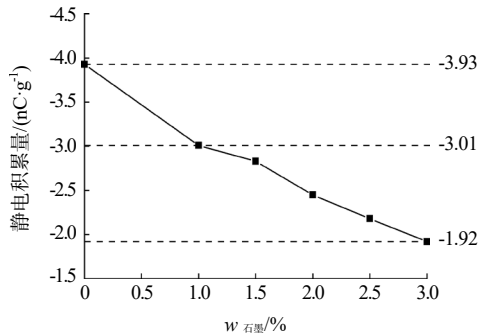


图 6 不同石墨含量对应的 HMX 静电积累量

Fig.6 HMX electrostatic accumulation corresponding to different graphite contents

由图 6 可见, HMX 与石墨混合粉体的静电积累量随着石墨含量的增大而降低。当石墨含量为 0% 时, HMX 的静电积累量为  $-3.93 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 当石墨含量为 1% 时, 混合粉体的静电积累量为  $-3.01 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ , 较 HMX 下降了 23%; 当石墨含量为 3% 时, 其静电积累量为  $-1.92 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ , 较石墨含量为 1% 时下降了 36%, 下降趋势明显。这是因为石墨具有良好的导电性且表面光滑, 石墨的加入一定程度上减小了 HMX 与斜槽之间的摩擦系数, 从而使其摩擦力降低, 减少静电积累。同时, 在 HMX 与石墨的混合过程中, 部分 HMX 表面会形成一层石墨薄层, 实质上变成了石墨与不锈钢斜槽摩擦产生的静电, 因为石墨的功函数为 4.6 eV, 与不锈钢的功函数 4.5 eV 较为接近, 这部分 HMX 与斜槽摩擦所产生的电量较少, 且容易消散, 因此, HMX 与石墨的混合粉体静电积累量明显降低。

### 2.5.2 HMX 与铝粉混合粉体

当环境温度为 15 °C 时, HMX 中混合不同比例的铝粉后, 沿斜槽下滑 90 cm 时的静电积累量如图 7 所示。由图 7 可见, HMX 与铝粉混合粉体的静电积累量随着铝粉含量的升高而增加。当铝粉含量为 30%

时, 混合粉体的静电积累量为  $-3.07 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 当铝粉含量为 45% 时, 混合粉体的静电积累量为  $-4.06 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ , 较铝粉含量为 30% 时增加了 24%。

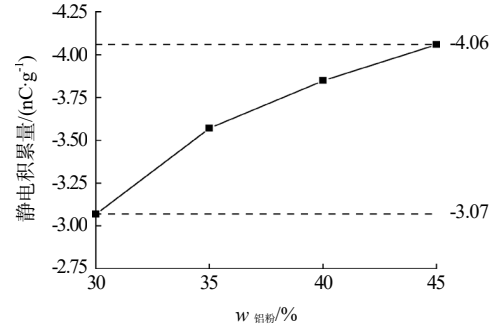


图 7 不同铝粉含量对应的 HMX 静电积累量

Fig.7 HMX electrostatic accumulation corresponding to different aluminum powder contents

铝粉与石墨均具有良好的导电性, 但 HMX 与石墨的混合粉体、HMX 与铝粉的混合粉体在静电积累方面却呈现相反的规律。这是由于 HMX 与铝粉的混合粉体下滑时, 摩擦作用不仅存在于 HMX 与斜槽之间, HMX 与铝粉之间也有摩擦作用<sup>[16]</sup>。参考静电序列, 铝的排序在 304 不锈钢之前, 因此, HMX 与铝粉摩擦后的静电积累量大于 HMX 与斜槽摩擦所产生的静电积累, 且铝粉均匀混合在 HMX 粉体中, HMX 与铝粉之间的摩擦作用较为充分, 因此, 铝粉含量在 30% ~ 45% 时, 随着铝粉含量增加, 混合粉体的静电积累量也增加。

## 2.6 HMX 自身性质改变对静电积累的影响

在 HMX 的实际应用中, 通常要使用一些手段对 HMX 进行处理, 其中, 细化和包覆是 2 种对 HMX 最常用的处理方式, 处理后 HMX 的理化性质会发生一定变化, 从而导致其摩擦起电的带电量发生变化。因此, 对 HMX 原料以及细化、包覆处理后的 HMX 的静电积累量进行比较。在环境温度 15 °C, 湿度 20%RH, 304 不锈钢斜槽倾角为 50° 的条件下, 原料 HMX、细化 HMX、包覆 HMX 沿斜槽下滑 90 cm 时的静电积累量如表 2 所示。

表 2 不同自身性质下 HMX 静电积累量

Tab.2 HMX electrostatic accumulation under different intrinsic properties

| 序号 | 样品     | 静电积累量 / (nC·g <sup>-1</sup> ) |
|----|--------|-------------------------------|
| 1  | HMX 原料 | -5.44                         |
| 2  | 细化 HMX | -20.87                        |
| 3  | 包覆 HMX | 3.28                          |

由表 2 可见,细化后的 HMX 静电积累量为 $-20.87 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ ,相较于 HMX 原料的静电积累量增加了 283%;包覆处理后的 HMX 静电积累量为 $3.28 \text{ nC}\cdot\text{g}^{-1}$ ,相较于 HMX 原料的静电积累量有所降低,且带电极性发生了变化。

原料 HMX、细化 HMX、包覆 HMX 的 SEM 照片如图 8 所示。由图 8 可见, HMX 原料的粒径均在 $10 \mu\text{m}$  以内,细化 HMX 的粒径均在 $5 \mu\text{m}$  以内,包覆处理后的 HMX 粒径大于 $400 \mu\text{m}$ 。

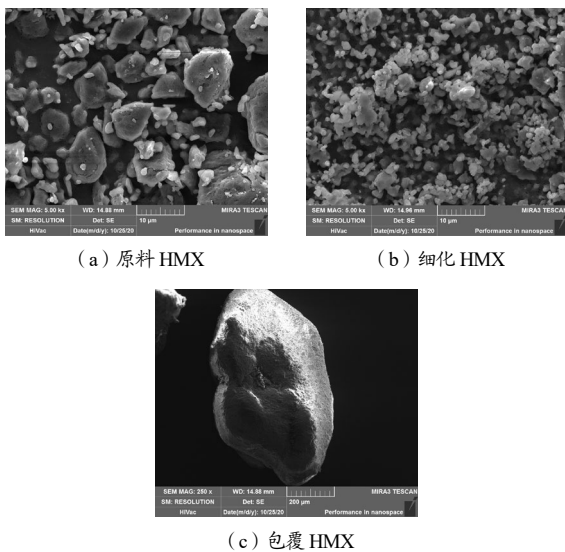


图 8 原料 HMX、细化 HMX、包覆 HMX 的 SEM 图  
Fig.8 SEM images of raw HMX, refined HMX, and coated HMX

细化 HMX 的静电积累量成倍增加,这是由于细化 HMX 与 HMX 原料的化学组成基本相同,仅仅是形状、大小发生了明显变化,且表面更加光滑,在质量不变的情况下,细化 HMX 粒径变小,使其比表面积有较大增加,从而使 HMX 与斜槽的总接触面积增加,进而导致其静电积累量成倍增加。

包覆处理后的 HMX 相对于 HMX 原料的静电积累量降低,这是因为包覆处理后的 HMX 粒径变大,比表面积减小,与斜槽的总接触面积减小,摩擦面积减少,从而导致其静电积累量降低;而带电极性的改变是因为包覆处理后的 HMX 表面成分为氟橡胶 F2602,此时的摩擦由 HMX 与 304 不锈钢斜槽之间的摩擦转变为 F2602 与 304 不锈钢斜槽之间的摩擦,而氟橡胶在静电序列中的位置可参照硬橡胶,处于不锈钢之前,因此, F2602 与 304 不锈钢斜槽摩擦积累

了正电荷,从而导致包覆处理后的 HMX 的带电极性也由负电荷变为正电荷。

### 3 结论

本文研究了不同斜槽长度、倾角、材质、环境温度与湿度、HMX 混合物、细化及包覆处理方式对 HMX 的静电积累量的影响,得出结论如下:

(1) HMX 沿斜槽下滑过程中,当下滑长度在 $0 \sim 90 \text{ cm}$  之间时, HMX 静电积累量随下滑距离增加而单调增大;当斜槽倾角在 $45 \sim 65^\circ$  之间时,随着倾角增大, HMX 的静电积累量先增加后减小; HMX 沿不同材质的斜槽下滑一定距离的静电积累量由大到小依次为: ABS、1060 铝、304 不锈钢、黄铜,其中, HMX 沿 ABS 材质斜槽下滑的静电积累量相对于其他几种材质大幅增加。

(2) 环境湿度在 $20\% \text{ RH} \sim 80\% \text{ RH}$  范围内, HMX 的静电积累量随湿度的增加而降低,但是湿度对其影响十分有限;环境温度在 $0 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内, HMX 的静电积累量随着温度升高而降低,且温度从 $0 \text{ }^\circ\text{C}$  升高至 $10 \text{ }^\circ\text{C}$  过程中 HMX 静电积累量的下降速度明显大于温度从 $10 \text{ }^\circ\text{C}$  升高到 $40 \text{ }^\circ\text{C}$  过程中的下降速度。

(3) 石墨对减少 HMX 的静电积累量具有良好作用,仅添加 3% 的石墨,即可使 HMX 的静电积累量减少 51%;对于 HMX 与铝粉的混合粉体,当铝粉含量在 $30\% \sim 45\%$  范围内,随着铝粉含量增加,混合粉体的静电积累量也增加。

(4) 生产应用过程中,对 HMX 进行细化、包覆等处理会使其理化性质发生改变,从而对其静电积累量产生较大影响。细化后的 HMX 由于粒径变化导致其静电积累量成倍增加;包覆后的 HMX 由于表面物质变化导致其带电极性发生变化。

### 参考文献:

- [1] 卫水爱. 粉体输送、储存过程中静电安全监测技术研究[C]// 中国物理学会静电专业委员会. 中国物理学会第十五届静

- 电学术年会论文集. 兵器工业安全技术研究所, 2009.
- [2] 曹欣茂. 炸药静电危险的研究[J]. 火炸药, 1993(3): 33-35, 21.
- [3] 杨虎林, 李海庆. 静电安全新技术在火、化工行业的应用[J]. 安防科技, 2007(12): 62-64, 29.
- [4] 马峰. 火炸药生产中的静电危害及其防护[J]. 安防科技, 2004(5): 44-45.
- [5] Hao T, Tukianen J, Nivorozhkin A, et al. Probing pharmaceutical powder blending uniformity with electrostatic charge measurements[J]. Powder Technology, 2013(245): 64-69.
- [6] Lim C W E, Yao J, Zhao Y. Electrostatic effects in pneumatic transport of granular materials[J]. International Journal of Modern Physics: Conference Series, 2012(19): 351-361.
- [7] Jiawei Hu, Qun Zhou, Cai Liang, et al. Experimental investigation on electrostatic characteristics of a single grain in the sliding process[J]. Powder Technology, 2018(334): 132-142.
- [8] 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): 1 602-1 606.
- [9] 周铭锐, 李志敏, 张同来, 等. 火工药剂静电积累量的测试[J]. 含能材料, 2013, 21(02): 244-248.
- [10] 李志敏. 起爆药静电响应规律与安全设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [11] 董浩然. 气化灰颗粒碰撞强化荷电及电选脱炭研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [12] 陈学武, 申安琪. 粉尘带电量的几种测定方法[J]. 工业安全与防尘, 1985(02): 34-37.
- [13] 柯进. 静电计量检测的研究[J]. 计量与测试技术, 2009(7): 24-26.
- [14] 张卫, 张健. 非接触式静电电压测量仪校准装置设计与开发[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(6): 21, 25.
- [15] 常天海, 尹俊勋, 黎曦, 等. 静电基本参数的测试原理[J]. 安全, 2006, 27(4): 21-24.
- [16] 蒋方扬, 王永强. 硫磺粉体在直管道中输送的数值模拟和粉体摩擦产生的静电量变化的分析[J]. 建筑安全, 2017, 32(6): 36-38.
- [17] 黄业令. 含能材料静电起电积累特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [18] 卫水爱, 孙磊, 李文海, 等. 发射药混同过程静电性能测试及风险评估[J]. 含能材料, 2019, 27(6): 493-500.