

文章编号: 1673-3193(2024)06-0764-08

基于EDEM的炸药颗粒静电积累仿真研究

谢天奇¹, 张会锁¹, 陶洋¹, 李程¹, 牛欣乐¹, 王彦杰²

(1. 中北大学机电工程学院, 山西太原 030051; 2. 山西江阳化工有限公司, 山西太原 030041)

摘要: 为了提高炸药颗粒在运输过程中的安全性, 研究了炸药经过滑槽后的静电积累。选取了JO-9159炸药进行研究, 并通过EDEM进行仿真计算, 研究了滑槽长度、滑槽倾角、滑槽宽度以及炸药粒径等对炸药运输过程中静电积累的影响。结果表明, JO-9159炸药的静电积累随滑槽倾角的增大而降低, 且当滑槽倾角由20°增至40°时, JO-9159炸药的荷质比降低约400%, 对静电积累影响显著。炸药荷质比随滑槽长度的增加而增大。滑槽宽度越宽, 药粒在滑槽中的堆积程度越小, 其与滑槽的接触面积越大, 电荷转移量越大, 炸药荷质比越大。炸药粒径越小, 颗粒打破物体表面电子分布的能力越强, 电荷转移量越多, 炸药颗粒荷质比越大。滑槽倾角对炸药颗粒静电积累的影响显著大于另外3种因素, 且其炸药静电积累影响的排序为滑槽倾角>滑槽长度>滑槽宽度>炸药粒径。

关键词: EDEM; 静电积累; JO-9159炸药; 滑槽法

中图分类号: TJ303.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.06.005

引用格式: 谢天奇, 张会锁, 陶洋, 等. 基于EDEM的炸药颗粒静电积累仿真研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 764-771.

XIE Tianqi, ZHANG Huisuo, TAO Yang, et al. Simulation of electrostatic accumulation of explosive particles based on EDEM[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(6): 764-771.

Simulation of Electrostatic Accumulation of Explosive Particles Based on EDEM

XIE Tianqi¹, ZHANG Huisuo¹, TAO Yang¹, LI Cheng¹, NIU Xinle¹, WANG Yanjie²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Jiangyang Chemical Co., Ltd., Taiyuan 030041, China)

Abstract: In order to improve the safety of explosive particles during transportation, the electrostatic accumulation of explosives after passing through chute was studied. JO-9159 explosive was selected for research, and simulation calculation was carried out by EDEM to study the effect of chute length, chute angle, chute width and explosive particle size on the static accumulation during transportation. The results show that the electrostatic accumulation of JO-9159 explosive decreases with the increase of chute angle, and when the chute angle increases from 20° to 40°, the charge-to-mass ratio of JO-9159 explosive decreases by about 400%, which has a significant effect on the electrostatic accumulation. The charge-to-mass ratio of explosive increases with the length of chute. The wider the chute, the smaller the accumulation degree of charge particles in the chute, the larger the contact area with the chute, the larger the

收稿日期: 2023-11-06

作者简介: 谢天奇(2001—), 男, 硕士生, 主要从事火炸药及目标易损性方面的研究。

通信作者: 张会锁(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要从事弹箭虚拟设计及智能化技术的研究。E-mail: 13653513620@139.com。

charge transfer amount and the higher the charge-to-mass ratio of explosive. The smaller the explosive particle size, the stronger the ability of the particles to break the electron distribution on the surface of the object, the more charge transfer amount, the larger the charge-to-mass ratio of the explosive particles. The influence of chute angle on electrostatic accumulation of explosive particles is significantly greater than the other three factors, and the order of influence on electrostatic accumulation of explosive particles is chute angle > chute length > chute width > explosive particle size.

Key words: EDEM; accumulation of static electricity; JO-9159 explosive; chute method

0 引言

静电积累一直是火炸药生产运输过程中重点关注的安全生产问题之一,若炸药静电积累达到一定程度,可能会导致火炸药的燃烧甚至爆炸,因此对炸药静电积累影响因素方面的研究显得尤为重要。

目前,对于静电安全方面的研究主要集中在实验研究方面。石先锐等^[1]通过斜槽模拟的方法模拟了高能硝铵发射药的摩擦起电特性,并通过法拉第笼测量出带电量,系统地研究了滑槽长度、接触介质、湿度、药体形貌以及配方组成等对高能硝铵发射药起电特性的影响。孙铭泽等^[2]通过蒙特卡洛数值模拟实验发现最优化 D 法在小概率发火能量计算上准确度最高,同时对兰利法进行了优化改进,使其可操作性更强,为获得更准确的火炸药静电最低引燃能量的方法和更有效的途径。陆明^[3],周文韬等^[4]研究了 RDX 在滑槽运输中静电积累在不同方面的影响。曹兴^[5-6]、张广华等^[7]针对 O-9159 炸药分别进行了压制成型以及不同爆轰波形的仿真研究。

虚拟仿真技术在工程实践中日益受到人们的关注,然而,目前对于火炸药模拟仿真方面的研究还比较少,对此本文选取 JO-9159 炸药为研究对象,利用 EDEM 颗粒仿真软件中的 Tribocharging 模型对经过滑槽后的炸药颗粒的静电积累进行研究,并采用滑槽法研究了滑槽长度、滑槽倾角、滑槽宽度以及炸药粒径对运输过程中炸药静电积累的影响,旨在为火炸药静电安全研究提供参考。

1 离散元仿真模拟理论

1.1 Tribocharging 模型

EDEM^[8]摩擦充电模型可以用来模拟一种材

料内部的粒子与另一种材料接触后的电荷变化情况,电荷在接触物体间进行相互转移,使得他们在分离后各自带上不同的电量。该模型源于 Greeson^[9]的研究成果,描述了金属球沿着绝缘管滚动时的摩擦起电的特性,具体方程为

$$\frac{dq}{dt} = \alpha(q_s - q) - \beta q, \quad (1)$$

式中: q 为球形颗粒在 t 时刻时所携带的电荷量, C ; q_s 为饱和电荷量, C ; α 为电荷产生时间常数; β 为电荷耗散时间常数。对式(1)进行积分可得

$$q(t) = q_s \frac{1}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} [1 - e^{-(\alpha + \beta)t}]. \quad (2)$$

在 EDEM 中,由于电荷耗散主要是与空气的离子撞击所造成的,其过程相对缓慢,且对实验影响相对较小,故对其忽略不计,所得简化方程为

$$q(t) = q_s (1 - e^{-\alpha t}). \quad (3)$$

在 EDEM 中, q_s 饱和电量是指当颗粒表面分布的电荷密度足以达到放电时,颗粒本身所能携带的最大电荷量。表面电荷密度为 $2.66 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, 用其乘以颗粒的表面积,就可以得到颗粒本身的饱和电量 q_s 。

1.2 Hertz-Mindlin (no slip) 模型

Hertz-Mindlin(no slip)模型是 EDEM 中默认的接触模型,该模型以 Mindlin 的研究成果^[10]为理论基础,公式如下:

法向力

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

式中: R^* 为模型颗粒的等效半径; E^* 为颗粒的等效杨氏模量; δ_n 为颗粒的法向重叠量。

阻尼力

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} \vec{v}_n^{\text{rel}}, \quad (5)$$

式中: \vec{v}_n^{ret} 为相对速度的法相分量; m^* 为颗粒的等效质量; β 为与恢复系数相关的参数; S_n 为法向刚度。

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}, \quad (6)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R\delta_n}, \quad (7)$$

式中: e 为恢复系数。

切向力

$$\vec{F}_t = -S_t \vec{\delta}_t, \quad (8)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R\delta_n}, \quad (9)$$

式中: S_t 为切向刚度; $\vec{\delta}_t$ 为切向重叠量; G^* 为等效切向模量。

切向阻力

$$\vec{F}_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} \vec{v}_t^{\text{ret}}, \quad (10)$$

式中: \vec{v}_t^{ret} 为相对切向速度。

具体模型如图 1 所示。

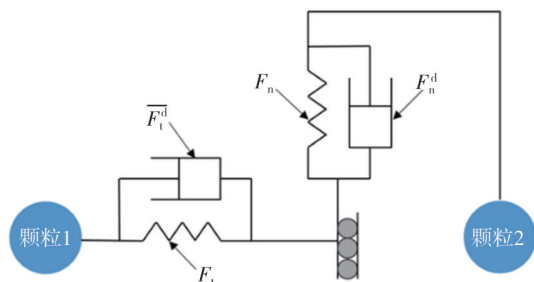


图 1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model

2 JO-9159 炸药仿真分析

2.1 仿真实验材料及参数

选择 JO-9159 炸药, 通过设定颗粒密度、粒径和炸药总质量, 生成一定数量的炸药颗粒进行仿真实验, 以此来探讨炸药在仿真实验过程中的静电积累量, 炸药相关参数如表 1 所示。

表 1 JO-9159 炸药相关参数^[11]

Tab. 1 Dynamite parameters of JO-9159^[11]

| 参数 | 数值 |
|--------------------------|---------|
| 炸药颗粒名称 | JO-9159 |
| 泊松比 | 0.224 |
| 密度/(kg·m ⁻³) | 1 890 |
| 剪切模量/MPa | 3.431 |
| 质量/g | 25 |
| 粒径分布方式 | 正态分布 |

接触模型的材料为钢, 相关参数如表 2 所示。

表 2 45# 钢材料相关参数^[12]

Tab. 2 Related parameters of 45# steel materials^[12]

| 参数 | 数值 |
|--------------------------|-------|
| 泊松比 | 0.3 |
| 密度/(kg·m ⁻³) | 7 800 |
| 剪切模量/GPa | 70 |

2.2 模型创建

2.2.1 EDEM 仿真模型说明

JO-9159 炸药颗粒的粒径较小, 为了缩短仿真时间, 降低仿真难度, 结合有关文献^[13]对所建模型进行一定比例的缩小, 仿真模型如图 2 所示。

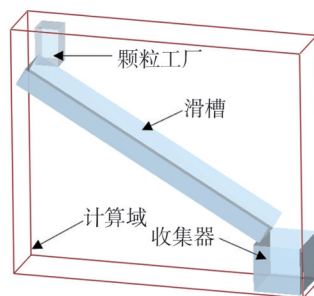


图 2 EDEM 仿真模型

Fig. 2 EDEM simulation model

图 2 中, 颗粒工厂负责生成 JO-9159 炸药颗粒, 尺寸大小(长×宽×高)为 25 mm×25 mm×40 mm, 由于颗粒工厂只负责生成炸药颗粒而不涉及静电计算, 故不对其进行网格划分。滑槽尺寸如表 3 所示, 采用 5 mm 三角形网格, 由于不同实验滑槽的长度和宽度不同, 所以网格数量约在 2 000~3 800 之间。收集器用来收集经过滑槽的 JO-9159 炸药颗粒, 并显示静电积累量, 尺寸大小为 50 mm×60 mm×50 mm, 网格数量为 1 174。计算域的尺寸大小为 $x=336$ mm, $y=61$ mm, $z=224$ mm。

2.2.2 网格收敛性分析

针对网格收敛性, 分别对 1, 3, 5 mm 网格进行分析, 以滑槽倾角 20°, 滑槽长度 300 mm, 滑槽宽度 50 mm 以及炸药颗粒均值 1 mm 进行收敛性分析实验, 具体结果如表 3 所示。

由表 3 实验数据可以发现, 1 mm 网格与 5 mm 网格的静电积累误差仅为 0.96%, 排除随机误差的影响不会对本文研究产生实质性影响, 因此选用 5 mm 网格以提高计算效率。

表 3 不同网格尺寸下的静电积累

Tab. 3 Electrostatic accumulation in different grid sizes

| 网格尺寸/mm | 静电积累量/C |
|---------|-----------|
| 1 | -28.457 1 |
| 3 | -28.393 2 |
| 5 | -28.187 8 |

2.3 模型验证

本试验通过模拟炸药在滑槽运输过程中的静电积累来判断仿真过程中所设参数的准确性以及仿真实验的可靠性, 仿真结果如图 3 所示。

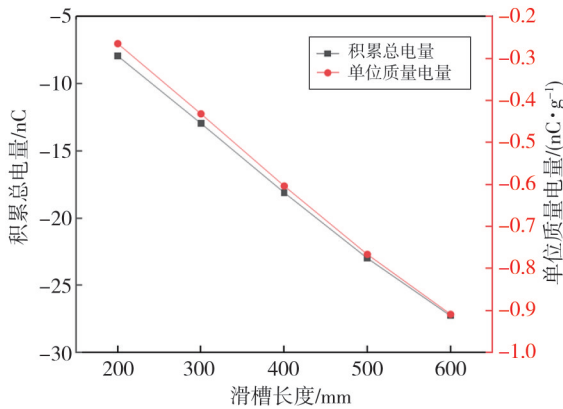


图 3 仿真验证图

Fig. 3 Simulation verification diagram

由图 3 可以看出, 炸药在滑槽运输过程中积累的总电量不断变小, 由此推断是滑槽材质(钢)的电子转移进炸药, 从而显示其带负电, 数值结果为负值, 这与石先锐等^[1]的结果相吻合, 可推断仿真结果正确。

2.4 各影响因素敏感度分析

本文采用与石先锐等类似的方法来研究 JO-9159 炸药颗粒的静电积累, 即利用离散元仿真方法, 运用 Tribocharging 模型和 Hertz-Mindlin(no slip)模型计算每个颗粒通过滑槽后所携带的电量, 并将每个颗粒所携带的量进行累加, 得到所积累的静电总量。在此方法的基础上, 利用正交分析的方法^[14-16]研究了滑槽倾角、滑槽长度、滑槽宽度以及炸药粒径对炸药运输过程中静电积累的影响。

2.4.1 F 值的计算

组内偏差平方和

$$S_{SE} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (11)$$

式中: i 为水平数, $i=1, 2, \dots, r$; m 为在第 i 个水平下的实验总次数; y_{ij} 为第 i 个水平下第 j 次实验

的实验数据; \bar{y}_i 为第 i 个水平下的样本均值。

组间偏差平方和

$$S_{SA} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^m (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (12)$$

式中: \bar{y} 为样本总均值。

F 值

$$F = \frac{S_{SA}/d_{f_1}}{S_{SE}/d_{f_2}} \quad (13)$$

式中: d_{f_1}, d_{f_2} 分别为 S_{SA}, S_{SE} 的自由度。

2.4.2 极差的计算

$$x = y_{i, \max} - y_{i, \min}$$

式中: x 为极差; $y_{i, \max}$ 为 i 水平下的最大值; $y_{i, \min}$ 为 i 水平下的最小值。

2.4.3 影响因素及各因素水平

影响因素及各因素水平如表 4 所示。

表 4 仿真实验各影响因素

Tab. 4 Influencing factors of simulation experiment

| 因素符号 | 因素名称 | 影响因素水平 | | |
|-------|----------|--------|-----|-----|
| | | -1 | 0 | 1 |
| T_1 | 滑槽倾角/(°) | 20 | 30 | 40 |
| T_2 | 滑槽长度/mm | 200 | 300 | 400 |
| T_3 | 滑槽宽度/mm | 30 | 50 | 70 |
| T_4 | 粒径/mm | 0.8 | 1 | 1.2 |

依照所选因素以及所选参数水平设计实验, 结果如表 5 所示。

表 5 仿真实验设计及结果

Tab. 5 Simulation experiment design and results

| 序号 | 影响因素 | | | | 静电积累总量/C | 炸药荷质比 |
|----|-------|-------|-------|-------|-----------|--------------|
| | T_1 | T_2 | T_3 | T_4 | | |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -17.305 3 | -0.692 212 |
| 2 | -1 | 0 | 0 | 0 | -28.303 3 | -1.132 132 |
| 3 | -1 | 1 | 1 | 1 | -32.880 5 | -1.315 22 |
| 4 | 0 | -1 | 0 | 1 | -7.799 13 | -0.311 965 2 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | -1 | -16.508 4 | -0.660 336 |
| 6 | 0 | 1 | -1 | 0 | -13.799 9 | -0.551 996 |
| 7 | 1 | -1 | 1 | 0 | -4.654 09 | -0.186 163 6 |
| 8 | 1 | 0 | -1 | 1 | -5.472 29 | -0.218 891 6 |
| 9 | 1 | 1 | 0 | -1 | -10.249 9 | -0.409 996 |

3 实验结果分析

根据上述实验, 通过正交分析可以得到各个影响因素不同水平下的影响情况如表 6 所示。

由表 6 可以发现, 滑槽倾角对炸药颗粒在滑槽运输中静电积累的影响最大, 炸药粒径对静电积累的影响最小, 影响程度的排序为滑槽倾角 >

滑槽长度>滑槽宽度>炸药粒径。

表6 分析统计表

Tab. 6 Analytical statistical tables

| 因素水平 | 不同影响因素下的荷质比 | | | |
|------|-------------|--------|--------|--------|
| | 滑槽倾角 | 滑槽长度 | 滑槽宽度 | 粒径 |
| -1 | -1.047 | -0.397 | -0.488 | -0.588 |
| 0 | -0.508 | -0.670 | -0.618 | -0.623 |
| 1 | -0.272 | -0.759 | -0.721 | -0.615 |
| 极差 | 0.775 | 0.362 | 0.233 | 0.035 |
| F值 | 3.042 | 0.688 | 0.264 | 0.006 |

3.1 滑槽倾角对JO-9159静电积累的影响

为了更准确地描述和研究滑槽倾角对炸药在滑槽中静电积累的影响,将滑槽长度、滑槽宽度和炸药粒径都控制在0水平下进行实验,结果如图4所示。

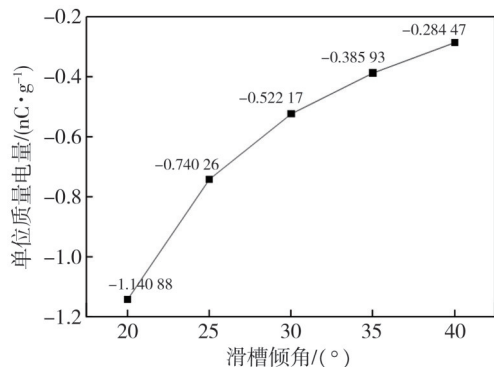


图4 炸药荷质比随滑槽倾角的变化

Fig. 4 Variation of charge-to-mass ratio of explosive with slope of chute

由图4可以看出,JO-9159炸药颗粒在0水平下经滑槽滑落后,随着滑槽倾角的不断增大,炸药颗粒的荷质比不断降低。当滑槽倾角为20°时,25 g JO-9159炸药颗粒的静电积累量为-28.5220 nC,荷质比达到-1.14088 nC/g;当滑槽倾角40°时,静电积累总量减小为-7.11183 nC,荷质比减小为-0.28447 nC/g;炸药荷质比降低了约400%,且静电减小趋势未见停滞,由此可以发现增加滑槽倾角可以有效减小炸药颗粒的静电积累。分析其原因可以发现,倾角为20°时炸药颗粒经滑槽全部滑出所需的时间约为1.1 s,而倾角为40°时炸药全部滑出所需的时间约为0.57 s,可见炸药颗粒与滑槽的接触时间随倾角的增加,降低约190%。由于接触时间减少,EDEM仿真无法考虑滑槽与炸药颗粒静电泄露对静电积累的影响,而随着倾角的增大,炸药颗粒

与滑槽之间的正压力减小,已有研究^[17-20]表明,在滑槽材质不变的情况下,炸药颗粒与滑槽之间的正压越小,钢材中电子向炸药颗粒的转移量少,因此炸药在运输中的静电量积累减少。

3.2 滑槽长度对JO-9159静电积累的影响

为研究滑槽长度对JO-9159炸药静电积累的影响,在保持滑槽倾角、滑槽宽度、炸药粒径在0水平下,进行试验,结果如图5所示。

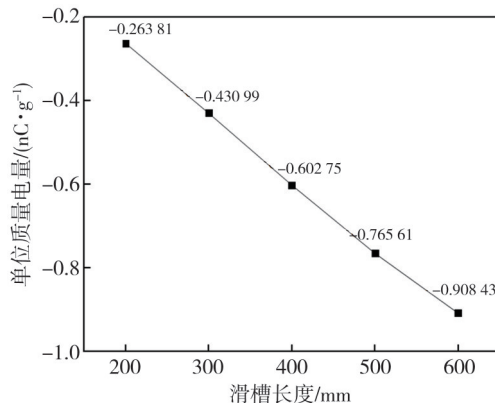


图5 炸药荷质比随滑槽长度的变化

Fig. 5 Variation of charge-to-mass ratio of explosive with chute length

由图5可以看出,随着滑槽长度的增加,炸药颗粒的荷质比逐渐增加,且静电积累随滑槽长度的增加近似线性增长。这主要是由于滑槽长度越长,炸药颗粒与滑槽接触的时间越长,炸药在滑槽上的分散程度越高,滑槽与炸药颗粒之间所传递的电荷也就越多,因而导致静电积累程度越高,炸药荷质比越大。

3.3 滑槽宽度对JO-9159静电积累的影响

以5 mm为步长,保持滑槽倾角、滑槽长度和炸药粒径在0水平下以及其他影响因素不变的情况下,对滑槽宽度为30~70 mm进行试验,结果如图6所示。颗粒堆叠情况如图7所示,截取位置为滑槽1/2位置处。

由图6可以看出,随着滑槽宽度的增加,JO-9159炸药的荷质比不断增加,且未见饱和。分析其原因可以发现,在不考虑湿度以及炸药之间自身粘结性的情况下,随着滑槽宽度的增加,炸药颗粒在滑槽上的分布更加均匀,且炸药与滑槽的总接触面积不断加大,导致钢材与炸药之间的电子传递数目增多,因此导致了炸药静电积累量的增加。

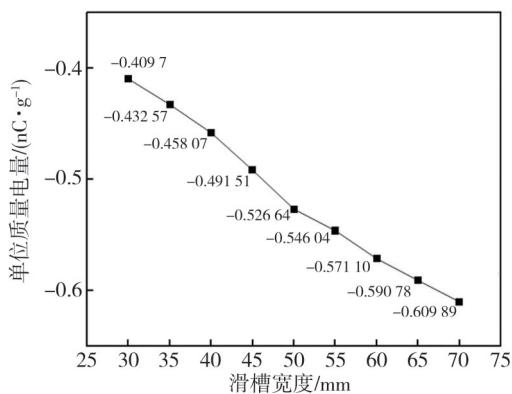
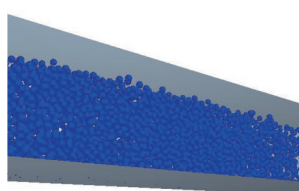
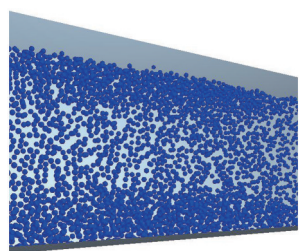


图 6 炸药荷质比随滑槽宽度的变化

Fig. 6 Variation of charge-to-mass ratio of explosive with chute width



(a) 30 mm 宽滑槽



(b) 70 mm 宽滑槽

图 7 不同槽宽时的炸药颗粒堆积情况

Fig. 7 Explosive particle accumulation of different chute width

3.4 粒径对 JO-9159 静电积累的影响

采用正态分布的方法, 粒径均值以 0.1 mm 为步长从 0.7~1.3 mm 逐步递增进行试验, 结果如图 8 所示。颗粒分散情况如图 9 所示, 截取位置为滑槽 1/2 位置处。

由图 8 可以看出, 随着粒径平均值的增大, 炸药颗粒经滑槽运输后的荷质比逐渐变小, 这与黄业令等^[17]的研究结果相吻合。当粒径平均值为 0.7 mm 时, 荷质比为 -0.569 33 nC/g, 当粒径平均值为 1.3 mm 时, 荷质比为 -0.469 44 nC/g, 静电积累量减少了 21%, 此结果比上述 3 种因素影响下的静电积累量小。由于炸药颗粒越小, 颗粒的比表面积越大, 表面能越高, 在滑槽中的分布更加密集, 与滑槽接触的面积越大, 使得颗粒在与物体摩擦时更容易打破物体表面的电子分布,

所传递的电荷增多, 因此就导致其静电积累量增大。

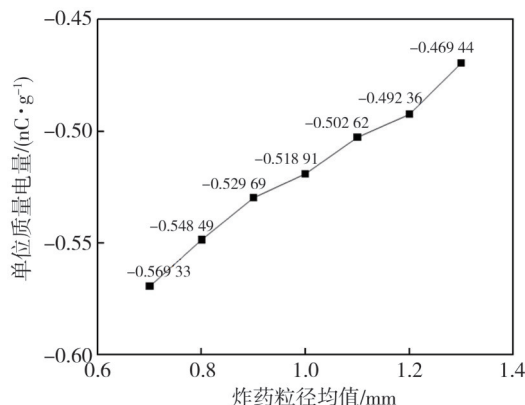
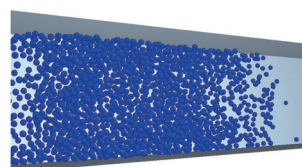
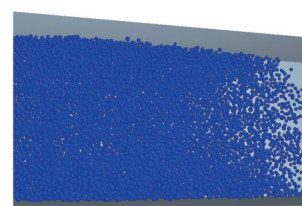


图 8 荷质比随炸药粒径的变化

Fig. 8 Variation of charge-to-mass ratio with explosive particle size



(a) 均值 0.7 mm 的炸药颗粒



(b) 均值 1.3 mm 的炸药颗粒

图 9 不同粒径时的炸药颗粒堆积情况

Fig. 9 Explosive particle accumulation of different particle size

4 结 论

1) 利用 EDEM 中的 Tribocharging 模型与 Hertz-Mindlin(no slip)模型, 模拟仿真了 25 g JO-9159 炸药颗粒在滑槽倾角、滑槽长度、滑槽宽度以及炸药粒径等 4 种因素的不同水平下的静电积累情况, 运用方差分析的方法, 统计出 4 种因素对炸药静电积累影响大小的排序为滑槽倾角>滑槽长度>滑槽宽度>炸药粒径。

2) 通过对上述 4 种影响因素的深入研究, 可以发现, 25 g JO-9159 炸药颗粒的静电积累程度随滑槽倾角的增大而减小, 且影响程度显著大于另外 3 种因素, 所以在实际工况中应着重考虑滑槽倾角对炸药运输过程中静电积累的影响。

3) 随着滑槽长度的增加,滑槽与炸药颗粒的接触时间增加,炸药在滑槽长度方向上的分散程度增大,炸药与滑槽的接触程度增大,在接触时间以及分散程度的共同影响下炸药静电积累量不断增高。

4) 随着滑槽宽度的增加,炸药颗粒与滑槽的接触面积将会增加,滑槽与炸药颗粒之间的电子转移程度将会增大,因此也就导致了炸药经滑槽运输后的静电积累增加。

5) 炸药颗粒粒径越小,颗粒与物体摩擦起电的情况就越明显,因为小颗粒具有更大的比表面积,更高的表面能,且在相同质量的条件下,颗粒在滑槽中的分布更加密集,这也就导致了小颗粒的炸药打破物体表面电子分布的能力更强,电荷转移量更高,静电积累程度更大。

参考文献:

- [1] 石先锐,许灿啟,贾永杰,等. 典型高能硝酸发射药的摩擦静电起电特性[J]. 火炸药学报, 2022, 45(1): 109-114.
SHI Xianrui, XU Canqi, JIA Yongjie, et al. Frictional static electricity characteristics of typical high energy nitramine Gun propellant [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(1): 109-114. (in Chinese)
- [2] 孙铭泽,王艳平,罗太明,等. 火炸药静电感度试验数理统计方法分析与优化[J]. 火炸药学报, 2023, 46(3): 266-274.
SUN Mingze, WANG Yanping, LUO Taiming, et al. Analysis and optimization of mathematical statistics methods for electrostatic sensitivity test of explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(3): 266-274. (in Chinese)
- [3] 陆明,赵省向,陈晶. RDX混合炸药的摩擦静电起电性能测定与分析[J]. 含能材料, 2008, 16(6): 708-711.
LU Ming, ZHAO Shengxiang, CHEN Jing. Measurement and analysis of the frictional static electricity characteristics of composite RDX [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(6): 708-711. (in Chinese)
- [4] 周文韬,何中其,陈网桦. 微纳米含能材料静电积累特性与危险性分析[J]. 含能材料, 2015, 23(7): 688-692.
ZHOU Wentao, HE Zhongqi, CHEN Wanghua. Electrostatic accumulation characteristic and hazard analysis of micro-nano energetic materials [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(7): 688-692. (in Chinese)
- [5] 曹兴. 粉体炸药压制成型工艺仿真与质量预测[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [6] 曹兴,曹红松,张根生,等. 炸药压制工艺参数对空心装药质量影响的仿真研究[J]. 含能材料, 2021, 29(3): 202-210.
CAO Xing, CAO Hongsong, ZHANG Gensheng, et al. Simulation study on the influence of compression process parameters on the quality of hollow charges [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(3): 202-210. (in Chinese)
- [7] 张广华,沈飞,王辉,等. 基于不同状态方程的聚能装药爆轰波形对比及验证[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(35): 100-103.
ZHANG Guanghua, SHEN Fei, WANG Hui, et al. Comparison and proving of detonation wave of the shaped charge based on different equation of state [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(35): 100-103. (in Chinese)
- [8] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真: 离散元素法的工业应用与EDEM软件简介[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- [9] GREASON W D. Investigation of a test methodology for triboelectrification [J]. Journal of Electrostatics, 2000, 49(3/4): 245-256.
- [10] MINDLIN R D. Compliance of elastic bodies in contact [J]. Journal of Applied Mechanics, 1949, 16(3): 259-268.
- [11] 刘群,陈朗,鲁建英,等. 炸药颗粒压制成型数值模拟[J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 421-426.
LIU Qun, CHEN Lang, LU Jianying, et al. Numerical simulation of explosive particles compaction [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(6): 421-426. (in Chinese)
- [12] 王依,李永祥,徐雪萌. 食品粉体螺旋输送荷电特性数值模拟[J]. 包装工程, 2022, 43(5): 167-172.
WANG Yi, LI Yongxiang, XU Xuemeng. Numerical simulation of screw conveying charge characteristics of food powder [J]. Packaging Engineering, 2022, 43(5): 167-172. (in Chinese)
- [13] 李永祥,李飞翔,徐雪萌,等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 320-327.
LI Yongxiang, LI Feixiang, XU Xuemeng, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 320-327. (in Chinese)
- [14] 王黎明, 范盛远, 程红胜, 等. 基于 EDEM 的猪粪接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 95-102.
WANG Liming, FAN Shengyuan, CHENG Hongsheng, et al. Calibration of contact parameters for pig manure based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 95-102. (in Chinese)
- [15] 李锦环. 怎样用方差分析方法分析试验数据[J]. 吉林农业, 2012(2): 60.
LI Jinhuan. How to analyze test data by variance analysis method [J]. Jilin Agriculture, 2012(2): 60. (in Chinese)
- [16] 高鑫雨, 赵胜利. 混水平正交试验的假设检验误差控制[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2021, 47(3): 33-40.
GAO Xinyu, ZHAO Shengli. Hypothesis test error control for mixed level orthogonal experiment [J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science), 2021, 47(3): 33-40. (in Chinese)
- [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] 黄业令, 李小东, 王晶禹, 等. RDX 炸药混料工艺的摩擦静电起电性能测定[J]. 科技创新与生产力, 2016(2): 84-86.
HUANG Yeling, LI Xiaodong, WANG Jingyu, et al. Measurement of frictional static electricity characteristics of RDX mixing technology [J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2016(2): 84-86. (in Chinese)
- [19] 王恒. 含能粉体材料及其常用溶剂的静电积累特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [20] 张文添, 曹平, 孙可平. 喷射航空煤油过程中静电起电实验研究[J]. 广东工业大学学报, 2011, 28(3): 28-29.
ZHANG Wentian, CAO Ping, SUN Keping. Research on electrostatic electrification in the process of aviation fuel injection [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2011, 28(3): 28-29. (in Chinese)

声 明

本刊已许可中国知网、万方、维普、超星等数据库以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述数据库著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。
