



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Energy Systems Engineering—Article

## “嫦娥五号”月球样品在外部电场作用下的充电特性和粒子动力学研究

Junping Gu<sup>a, #</sup>, Xiaoyu Qian<sup>b, #</sup>, Yiwei Liu<sup>a</sup>, Qinggong Wang<sup>a</sup>, Yiyang Zhang<sup>c</sup>, Xuan Ruan<sup>b</sup>, Xiangjin Deng<sup>d</sup>, Yaowen Lu<sup>e</sup>, Jian Song<sup>a</sup>, Hui Zhang<sup>a</sup>, Yunning Dong<sup>e</sup>, Mengmeng Wei<sup>e</sup>, Wei Yao<sup>a, \*</sup>, Shuiqing Li<sup>b, \*</sup>, Weihua Wang<sup>f</sup>, Zhigang Zou<sup>g</sup>, Mengfei Yang<sup>h, \*</sup>

<sup>a</sup> Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

<sup>b</sup> Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>c</sup> Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education, Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>d</sup> Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

<sup>e</sup> Beijing Orient Institute of Measurement and Test, Beijing 100086, China

<sup>f</sup> Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

<sup>g</sup> College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

<sup>h</sup> China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 4 December 2023

Revised 18 April 2024

Accepted 5 August 2024

Available online 22 August 2024

#### 关键词

“嫦娥五号”月壤样品

充电特性

外电场

粒子动力学

粒子碰撞

### 摘要

月壤资源原位利用存在种种挑战,而利用外电场操纵月壤颗粒成为一种颇具前景的空间粒子操纵方法,该方法的核心在于颗粒在电场中的带电特性。本文基于“嫦娥五号”任务带回的月壤样品(CE5 LS),依次在高真空条件下研究了该样品在外电场作用下的带电特性、粒子动力学以及其对航天材料的碰撞损伤。研究表明,月壤颗粒在高真空条件下的充电过程和静电喷射行为与在大气条件下存在显著差异。本实验所用CE5 LS颗粒的粒径范围为27.7~139.0 μm。在3~12 kV·cm<sup>-1</sup>的电场强度下,CE5 LS所获得的电荷量为4.8 × 10<sup>-15</sup>~4.7 × 10<sup>-13</sup> C,电荷质量比为1.2 × 10<sup>-5</sup>~6.8 × 10<sup>-4</sup> C·kg<sup>-1</sup>。CE5 LS在外电场中更容易带负电。此外,在靶材表面上观察到明显的冲击损伤,说明月壤颗粒对航天材料影响较为严重。本研究有助于更全面理解月壤屏蔽与利用的物理机制,并将为开发月球原位工程解决方案提供重要启示。

© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. 引言

在人类首次登月五十年后,“重返月球”计划再次成为全球关注的焦点。人类对太空资源利用的期待日益增长[1–2],有望开启一个崭新的太空经济时代。月壤最初受到关注,是因为其中小粒径部分(即月尘)严重威胁航天

器和宇航员[3]。正如阿波罗17号技术简报中所描述的:“月球表面探索中最令人恼火、最具限制性的问题就是月尘会附着在任何物体上,无论是皮肤、宇航服材料、金属或其他材料,它都能黏上去,而且一旦黏上,会像摩擦力一样阻碍一切接触物的运动。”[4]自那时起,研究人员提出了多种清除月尘的方法[5]。随着近年来原位资源利用

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: yaowei\_72@hotmail.com (W. Yao), lishuiqing@tsinghua.edu.cn (S. Li), yangmf@bice.org.cn (M. Yang).

# These authors contributed equally to this work.

2095-8099/© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2024, 42(11): 267–277

引用本文: Junping Gu, Xiaoyu Qian, Yiwei Liu, Qinggong Wang, Yiyang Zhang, Xuan Ruan, Xiangjin Deng, Yaowen Lu, Jian Song, Hui Zhang, Yunning Dong, Mengmeng Wei, Wei Yao, Shuiqing Li, Weihua Wang, Zhigang Zou, Mengfei Yang. Charging Properties and Particle Dynamics of Chang'e-5 Lunar Sample in an External Electric Field. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.08.003>

(ISRU) 技术的发展, 月壤[6–10] (主要成分包括硅、氧、铝和钛) 再次引起了全球广泛关注。月壤是 ISRU 物理和化学过程中的关键原材料, 可用于提取水冰[11]、氧气[12]、多种矿物质[13]甚至核燃料氦-3 [14], 并可用于原位增材制造以及月球基地建设[15]。此外, 为了满足月球漫长而极寒夜晚的能源供应需求, 也有研究尝试将加工后的月壤作为高温蓄热材料, 用于储热和后续发电[16]。

在实际操作中, 无论是为了消除月尘, 还是为了 ISRU, 月壤颗粒操纵 (如颗粒运输、粒径分选和混合) 都是一项基本且不可避免的过程[17]。然而, 如前所述, 月壤颗粒具有强黏附性, 且月球是一个低重力环境, 因此难以实现太空颗粒操纵, 导致颗粒易附着于表面、聚集、堵塞管道甚至悬浮[17–18]。月球极端环境条件限制了直接使用复杂设备和额外介质来解决这一问题。更为严峻的是, 由于月壤表层直接暴露在太阳风等离子体和太阳紫外 (UV) 辐射中, 会带上静电荷[19], 这将极大加剧颗粒的黏附性[20]并导致复杂的粒子动力学行为[21]。月球地平线辉光现象 (曾由勘测者 5~7 号、月球车 2 号、阿波罗 8 号等任务检测到) 被认为是带电月壤颗粒在电磁力作用下被悬浮并发生前向散射的结果[22]。此外, 静电悬浮的月壤颗粒会以特定速度运动, 更容易与探测器、宇航服等材料表面发生碰撞并附着。由于月壤颗粒具有不规则形状及特殊的机械性质, 其与航天材料发生碰撞和摩擦时, 所造成的损伤将更加严重[3,18,20]。

事实上, 如果能够主动加以利用, 使静电力克服黏附力, 那么静电力可以成为操纵月壤颗粒的强大动力。因此, 美国国家航空航天局 (NASA) 早在 1967 年的一份技术报告中提出了一种利用静电控制月壤颗粒的方法, 用于去除沉积在表面上的细小月尘[23]。此后, 该方法进一步拓展, 用于更为复杂的颗粒运动操控[24–29]。得益于月壤颗粒的可充电特性, 在外加静电场作用下, 颗粒可以带电, 从而实现多种操控方式, 包括定向运输[25–26]、收集[27]、粒径分选[28]和矿物富集[29]等。静电方法在太空颗粒控制、火星资源利用等方面具有广阔的应用前景[30–31]。

静电方法的成功实施依赖于每一个月壤颗粒的带电特性。在研究初期, 出于对月壤性质探索的热情, 研究人员曾尝试在原位月球环境条件下 (如复杂的紫外辐射或等离子体环境中) 研究月壤颗粒的充电过程及运动动力学[21, 32–36]。已有研究揭示了月壤颗粒在等离子体中随充电时间演化的电荷变化过程[19,37]。目前普遍认为, 月球昼面上的月壤通常带正电, 而夜面则带负电[1,27,37]。然而, 这些研究成果对于未来 ISRU 技术的发展仍远远不够。要想主动应用静电方法, 必须深入研究月壤在外加静电场中

的带电特性和粒子动力学行为, 而这一领域目前仍属空白。

此前, 研究人员使用地面材料 (包括导体、半导体和电介质材料, 如氧化铝颗粒和玻璃珠) 进行了初步实验, 以获得颗粒在电场中、常压条件下的带电特性[38–43]。研究发现, 当绝缘颗粒位于带电板上时, 其主要效应来自感应极化, 而非接触电位[38]。感应带电的一般原理是: 当导电颗粒处于电场中并与电极接触时, 电子会沿着与电场方向相反的方向在颗粒与电极之间转移, 从而使原本中性的颗粒带电。这种现象称为导电颗粒在电场中的感应带电[38]。在感应带电过程中, 颗粒所携带电荷的极性与其接触的电极相同, 因此在排斥力作用下颗粒有脱离电极的趋势。如果颗粒与电极持续接触, 当颗粒内部电场为零时, 电荷转移停止, 此时导电颗粒达到感应带电的饱和值[44]。对于理想的电介质颗粒来说, 它们在电场作用下无法与电极进行电荷转移[45–46]。然而, Wu 等[39,41–43]、Shoyama 等[47]、Sayyah 等[40]及其他研究者在常压条件下观察到了电介质颗粒在电场中的感应带电现象。研究人员认为, 大气中的水分在此过程中起到了关键作用: 由于水汽可能在电介质颗粒与电极的接触区域凝结, 形成微小液桥, 使得这些本为绝缘体的颗粒表现出类似导体的行为[40,48]。这一推测得到了 Zhang 等[48]、Howell 等[49]及其他实验的验证。他们发现, 大气中颗粒的感应带电行为取决于多种因素, 主要包括电场强度、颗粒的尺寸、形状、密度和电阻率。随后, 研究人员提出了半经验公式, 用以预测颗粒的饱和带电量, 但尚未得到充分验证[39]。

然而, 在真空条件下, 环境中水分极少, 上述适用于电介质颗粒的带电机制不再有效。而关于电介质颗粒在电场中于真空条件下发生感应带电的研究非常有限。据笔者所知, 仅有 Sternovsky 等[50]开展过相关实验, 但他们的实验中, 感应带电与接触带电是耦合在一起的, 难以区分。至于月壤颗粒在外部电场下的带电特性, 据笔者所知, 目前只有 Arrhenius 等[51]做了相关研究, 他们将粒径小于 1 mm 的月壤颗粒通过振动引入水平电场中。然而, 这种振动供料过程不可避免地会引起显著的摩擦起电, 从而影响实验结果的准确性。考虑到月壤与地球材料之间存在显著差异, 以及地球大气与外层空间真空环境之间的巨大差异, 目前亟须在高真空条件下深入研究月壤在外部电场作用下的带电特性。这不仅有助于加深对相关基础物理机制的理解, 也对于未来原位工程技术方案的开发与应用具有重要意义。

得益于“嫦娥五号”任务, 月球样品被成功带回中国

[52]。本研究团队对这批月表月壤样品（编号为CE5C0400）的粒径、形态和成分等基本特性[9]进行了全面研究。本研究通过在模拟月球高真空环境下施加由两块平行黄铜电极产生的外部电场，实验研究了“嫦娥五号”月壤样品（CE5 LS）的带电特性。本研究观察到了月壤颗粒在电场作用下的喷射行为及其在真空中发生的有趣带电过程。实验测得CE5 LS的带电量 and 荷质比，并提取了其粒子动力学参数及碰撞前的状态参数。此外，本研究还将两种感兴趣的材料[分别为一块带涂层和背衬的Kapton多层绝热材料（MLI）和一块芳纶布]粘贴在上电极的下表面，这两种材料广泛应用于航天器中。通过实验分别研究了月壤颗粒撞击这两种材料表面所造成的影响。

## 2. 实验系统与过程

### 2.1. 实验方法

实验系统示意图见图1（a）。两块平行的矩形黄铜电极（上、下电极）产生电场，电极的截面积为 $80\text{ mm} \times 111\text{ mm}$ ，厚度为 $1\text{ mm}$ ，电极间距为 $10\text{ mm}$ 。黄铜电极安装在一个介电框架内，如图1（b）所示，并放置在高真空罐中，以模拟月球的真空环境。初始状态下，下电极连接直流（DC）电源（高负电压），上电极接地。实验采用高速相机（Phantom v1611，美国Vision Research公司）配合长焦显微模块（Navitar 1-62922和1-60123，美国Navitar公司）拍摄颗粒的运动轨迹。激光器（LWGL532-1W，北京镭志威光电技术有限公司）置于相机对侧，作为背光光源。通过采样探针取样约 $1\text{ mg}$ 的月壤颗粒，并放置在下电极表面，确保颗粒处于高速相机的焦平面上。实验开始前，颗粒通过离子风枪（BK-FS460，中国深圳白光电子科技有限公司）进行中和，以消除操作过程中可能因摩擦带电产生的原始电荷。离子风枪对颗粒表面中和

处理约 $10\text{ min}$ 后移除，随后创造高真空环境。当DC电源开启时，两块平行电极之间形成近似均匀的电场。此时，静置在电极表面上的颗粒感应带电，并在电场力作用下克服附着力和重力喷射悬浮。每个颗粒所获得的电荷值，即感应电荷，可通过对记录下的颗粒运动轨迹进行后处理获得，详见参考文献[40]。

从下电极喷射的颗粒会撞击到上电极下表面。为了同时研究月壤颗粒在悬浮过程中对材料的碰撞和黏附效应，在上电极的下表面通过双面胶粘贴了两种在航天任务中常用的材料[图1（a）]。第一种材料是MLI的一种，由带透明氧化铟锡导电涂层的Kapton薄膜和铝箔背衬组成，广泛应用于航天器的热控系统；另一种材料是芳纶布，用于航天器内部。图1（a）展示了这两种材料的实验前照片。

对于CE5 LS颗粒，所有实验均在 $1.8 \times 10^{-4} \sim 6.8 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ 的高真空条件下进行。用于产生电场的负偏置电压为 $3 \sim 12\text{ kV}$ （类似机制也适用于正偏置电压）。因此，电场强度的范围为 $3 \sim 12\text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，在该范围内颗粒可以被激发悬浮，同时不会引起气体击穿。

### 2.2. 数据处理方法

为了从原始视频中提取颗粒的尺寸和位置信息，本文建立了一套数字图像处理算法。图2（a）所示为一个典型的悬浮颗粒图像。通过对图像进行二值化和滤波处理，可计算目标颗粒的喷射面积，并提取其几何中心，如图2（b）所示。该方法同样适用于一系列连续图像可捕捉颗粒的运动轨迹，如图2（c）所示。

由于颗粒具有不规则形状，颗粒尺寸 $d_{p,e}$ 被定义为其平均喷射面积对应的等效直径，计算公式为：

$$d_{p,e} = \sqrt{\frac{4\Delta x^2}{\pi} \frac{1}{n} \sum_i^n N_i} \quad (1)$$

式中， $\Delta x = 4.1\text{ }\mu\text{m}$ 是每个像素的尺寸； $n$ 是图像序列的帧数； $N_i$ 是第 $i$ 帧图像中颗粒喷射区域所占的像素数。

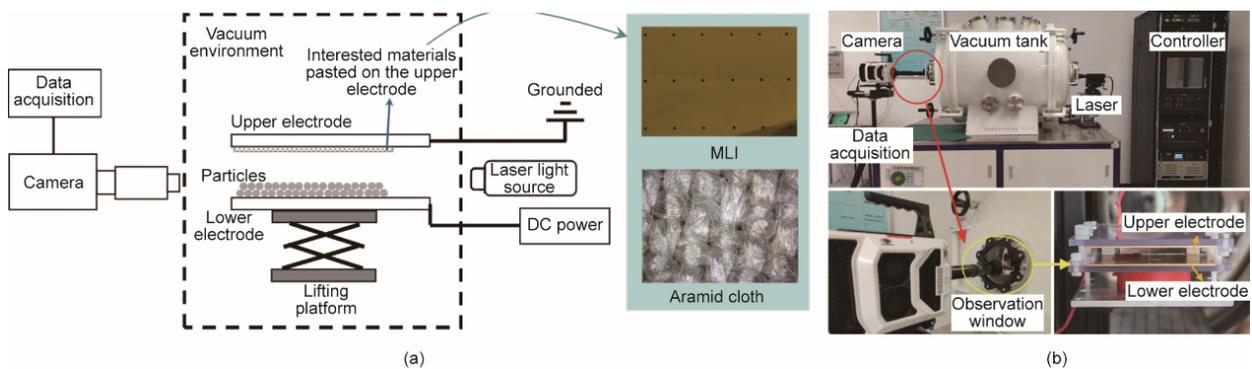


图1. 实验系统图：示意图（a）和实物图（b）。DC：直流电。

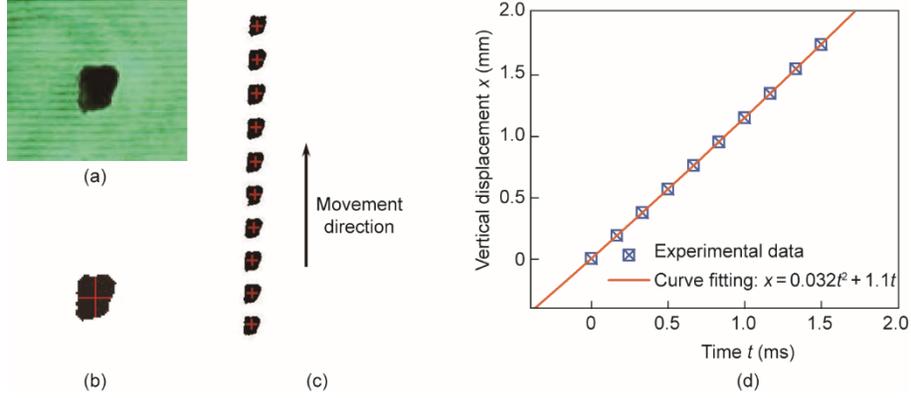


图2. 数据后处理演示。(a) 悬浮颗粒的典型快照；(b) 二值化和滤波处理后的图像；(c) 提取出的颗粒轨迹；(d) 通过图像和曲线拟合得到的粒子垂直位移。

为了获得颗粒的荷质比 ( $q/m$ )，需要对其运动过程进行分析。悬浮颗粒的运动方程为：

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_d + m\mathbf{g} \quad (2)$$

式中， $m$  是颗粒质量； $t$  是时间； $\mathbf{x}$  是颗粒位移； $\mathbf{F}_E$  是电场力； $\mathbf{F}_d$  是阻力； $m\mathbf{g}$  是重力； $\mathbf{g}$  是重力加速度。

电场力可由下式计算：

$$\mathbf{F}_E = q\mathbf{E} \quad (3)$$

式中， $q$  是颗粒所带电荷量； $\mathbf{E}$  是颗粒所处位置的电场强度。

对于远离电极板和电场边界的单个粒子，可忽略其他带电粒子和电极的影响。因此，电场  $\mathbf{E}$  被视为均匀电场，并由两块平行电极之间施加的电场（即外部电场， $\mathbf{E}_{\text{ext}}$ ）估算。在真空条件下，可忽略阻力项；而在大气条件下，阻力在假设流体静止的前提下计算，公式为：

$$\mathbf{F}_d = \begin{cases} 0, & \text{in vacuum} \\ -3\pi\mu d_{p,c} \frac{d\mathbf{x}}{dt}, & \text{in atmosphere} \end{cases} \quad (4)$$

式中， $\mu$  为流体黏度。将公式 (3) 和 (4) 代入公式 (2) 并求解，颗粒在垂直方向上的位移可表示为：

$$x(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0, & \text{in vacuum} \\ v_1t - (v_1 - v_0)\tau \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + x_0, & \text{in atmosphere} \end{cases} \quad (5)$$

式中， $a = \frac{q}{m}E - g$  是加速度； $v_1 = a\tau$  为终端速度； $\tau = m/(3\pi\mu d_{p,c})$  是颗粒的松弛时间； $v_0$  和  $x_0$  分别为粒子的初始速度和初始位置。通过将图像中获得的粒子垂直位移数据代入公式 (5) 进行曲线拟合，即可确定参数  $a$ 、 $v_1$ 、 $v_0$  和  $x_0$ ，如图 2 (d) 所示。进而可以通过以下公式计算粒子的荷质比 ( $q/m$ )：

$$\frac{q}{m} = \begin{cases} \frac{a+g}{E}, & \text{in vacuum} \\ \frac{v_1}{\tau} + g, & \text{in atmosphere} \end{cases} \quad (6)$$

对于粒径为  $d_{p,c}$  的粒子，其质量  $m_p$  可通过公式 (7) 估算。随后，可通过将  $q/m$  乘以  $m_p$  得到粒子所带电荷  $Q$ 。

$$m_p = \frac{\pi\rho_p d_{p,c}^3}{6} \quad (7)$$

式中， $\rho_p$  表示 CE5 月壤的真实密度（不考虑孔隙体积），此处取  $\rho_p = 3.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，见文献[53]。

需要注意的是，通过上述方法得到的电荷量，是指粒子在被电场力投射瞬间所能获得的电荷值。以图 2 中的颗粒为例，通过上述步骤可得粒子尺寸为  $109 \mu\text{m}$ ，荷质比为  $9.7 \times 10^{-5} \text{ C}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，颗粒电荷为  $2.1 \times 10^{-13} \text{ C}$ 。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 带电现象

研究观察到，在高真空条件下，当首次施加外部电场时，仅有极少数原本静置在下电极上的 CE5 LS 颗粒能够被电场悬浮。如果在保持电场强度不变的前提下反转电场方向，则大多数粒子会立即被悬浮。这一现象在本研究施加的所有电场强度条件下均会出现，并且与 CE5 LS 颗粒初始所处电场方向无关。

然而，上述 CE5 LS 粒子在高真空下的悬浮和带电现象与现有文献中在大气条件下的研究结果略有不同。在 Sayyah 等[40]所进行的大气环境静电喷射实验中，颗粒通过感应机制在强电场中获得电荷，并在无需反转电场方向的情况下，由向上的库仑力喷射。

因此，为研究环境对粒子带电行为的影响，本研究还采用了一种模拟月壤材料 CUG-1A（其特性见文献[54]）

分别在高真空和大气条件下进行了带电与喷射实验。结果表明, CUG-1A 粒子在高真空下的喷射行为与 CE5 LS 相似; 而在大气条件下, 当电源开启时, 静置于下电极表面的 CUG-1A 颗粒会带与下电极同极性的电荷, 并在向上的库仑力作用下立即被悬浮, 这与文献[40]中所述现象一致。随着电场强度增加, 向上的库仑力也会增强。此外, 粒子实现悬浮的临界电场强度在高真空下约为  $6.0 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 而在大气中该临界值约为  $4.0 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 低于真空条件。这表明, 在真空中, 颗粒更难以实现感应带电。

本研究认为, 空气和真空中的主要带电机制是不同的。如第1节所述, 电介质颗粒在空气中主要通过水分形成的液桥获得电荷, 并表现出类似导体的行为[46], 而该带电机制在真空中不再起作用, 因为真空环境中几乎没有水分。

为解释粒子在高真空中带电的现象, 本研究回顾了以往相关文献[55], 并尝试提出一种物理机制。如图3 (a) 所示, 静置于下电极上的 CE5 LS 颗粒在外部电场中发生极化, 导致其表面电荷分布不均。靠近下电极的一侧表面将带有与下电极极性相反的电荷, 而远离电极的一侧则呈现出与下电极相同的极性。由于 CE5 LS 颗粒的形状不规则, 其与下电极接触区域附近通常存在微小间隙, 这些微隙会导致该区域的电场发生严重变化, 并使局部电场强度显著增强。如果电场强度足够高, 可能会发生场电子发射。当下电极连接至高负电压电源时, 会有电子从电极表面喷射出来, 在电场中加速, 最终与颗粒表面相撞。若入射电子的动能足够大, 就会激发大量二次电子从粒子表面逸出, 从而使颗粒带上正电。在这种情况下, 带正电的粒子无法在向下的电场中被悬浮, 只有当电场方向反转时, 这些正电粒子才会克服重力与黏附力而向上喷射。如图3 (b) 所示, 当下电极接地(或连接高正电压电源)时, 在粒子与下电极之间的微隙中, 强电场会促使粒子表面发射电子, 这些电子最终撞击下电极。同样地, 如果入射电子

能量足够高, 下电极将释放出大量二次电子。其中部分电子会被粒子远离电极的一侧表面吸收, 从而使粒子整体带上负电。在这种情况下, 粒子同样只有在电场方向反转时才能被电场力驱使而飞离电极表面。

基于上述分析, 可以推测, CE5 LS 颗粒与黄铜电极在真空中的一次/二次电子发射与吸收特性[55]可能成为真空中电介质颗粒的主要充电机制, 因此我们才能观察到有趣的充电现象。需要指出的是, 上述针对高真空条件下颗粒充电的机制仍属初步推测, 有待未来进一步研究验证。

在以下讨论中, 通过切换两块平行电极的极性获取 CE5 LS 颗粒在真空中的电荷数据。实验的具体操作步骤如下: ①使用采样探针采集 CE5 LS 颗粒, 将颗粒置于下电极表面, 并确保其位于高速相机的焦平面上; ②使用离子风枪中和颗粒, 以消除颗粒可能因操作过程中的摩擦带电而产生的原始电荷; ③密封真空容器, 并启动真空泵, 以建立高真空条件; ④设置直流电源电压为指定数值, 同时打开激光器和高速相机; ⑤启动高速相机, 开启 DC 电源, 并记录颗粒的运动行为; ⑥关闭电源, 切换电源两端与电极的连接方式, 即切换两电极的极性; ⑦在相同电场条件下重复步骤⑤和⑥三次; ⑧更改电压值, 重复步骤⑤~⑦; ⑨实验结束后, 关闭电源、激光器和高速相机。

### 3.2. CE5 LS 的带电特性

CE5 LS 颗粒的电荷量 ( $Q$ ) 及其相应的荷质比 ( $q/m$ ) 分别如图4 (a) 与 (b) 所示。从图中可以明显看出, CE5 LS 颗粒的  $Q$  值随颗粒等效直径 ( $d_{p,e}$ ) 的增加而增大, 而  $q/m$  则随着  $d_{p,e}$  的增大而减小。对于直径范围为  $27.7 \sim 139.0 \mu\text{m}$  的 CE5 LS 颗粒, 其  $Q$  值范围为  $4.8 \times 10^{-15} \sim 4.7 \times 10^{-13} \text{ C}$ ,  $q/m$  范围为  $1.2 \times 10^{-5} \sim 6.8 \times 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本实验中,  $Q$ 、 $q/m$  和  $d_{p,e}$  的平均值分别为  $6.5 \times 10^{-14} \text{ C}$ 、 $1.9 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $62.5 \mu\text{m}$ 。单个 CE5 LS 颗粒所携带的电荷约为  $10^4 \sim 10^6$  个元电荷, 而其荷质比远小于电子的荷质比

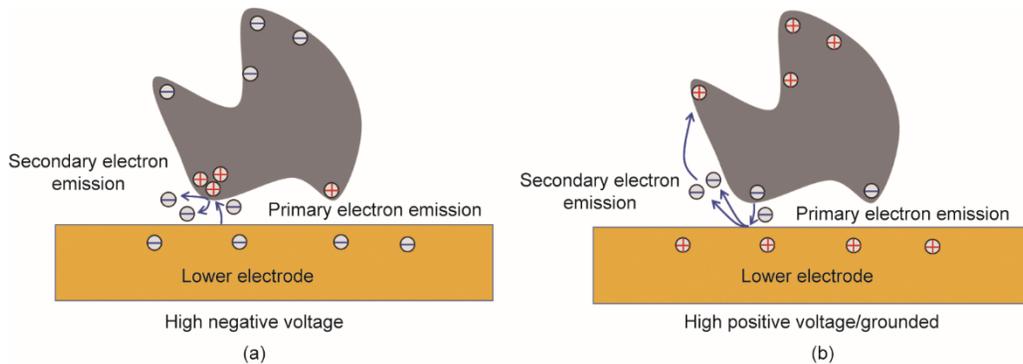


图3. 本文提出的电介质粒子在真空中带电的机制示意图。(a) 下电极连接高负电压, 上电极连接高正电压或接地; (b) 下电极连接高正电压或接地, 上电极连接高负电压。

(约为 $10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。在外部电场强度 ( $E_{\text{ext}}$ ) 的影响方面, 结果表明在本实验条件下,  $E_{\text{ext}}$  对  $Q$  和  $q/m$  的影响并不显著。在大多数情况下, 当  $E_{\text{ext}}$  小于  $6 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$  时, CE5 LS 颗粒无法克服黏附力与重力被悬浮, 原因可能是  $E_{\text{ext}}$  较小或颗粒感应电荷较低。

关于  $E_{\text{ext}}$  对感应电荷的影响, 现有研究[40–41,47]表明, 在一定范围内感应电荷随  $E_{\text{ext}}$  变化并不明显, 这与本研究结果一致。另有研究指出, 颗粒感应带电达到饱和时, 其饱和电荷量  $Q_s$  与  $E_{\text{ext}}$  呈线性关系[50,56–57]。此外, 对于一个放置在理想平面电极上的完美导电球形颗粒, 在半空间内形成均匀电场的条件下, 其感应饱和电荷  $Q_{s,c}$  的计算公式由Maxwell [44]推导得出, 公式如下:

$$Q_{s,c} = \frac{\pi^3}{6} \varepsilon_m d_{p,e}^2 E_{\text{ext}} \quad (8)$$

式中, 环境介质的介电常数  $\varepsilon_m$  等于真空的介电常数。

而介电材料颗粒的饱和电荷  $Q_{s,d}$  的表达式则由文献[41]给出, 如下所示:

$$Q_{s,d} = \frac{\pi^3}{18} \frac{3\varepsilon_{\text{pr}}}{\varepsilon_{\text{pr}} + 2} \varepsilon_m d_{p,e}^2 E_{\text{ext}} \quad (9)$$

式中,  $\varepsilon_{\text{pr}}$  是颗粒的相对介电常数。

为进一步定量评估  $E_{\text{ext}}$  对  $Q$  的影响, 本研究在图 5 (a) 中绘制了  $Q/Q_{s,c}$  及其平均值  $(Q/Q_{s,c})_{\text{ave}}$  随  $E_{\text{ext}}$  变化的关系。可以看出,  $Q/Q_{s,c}$  与  $E_{\text{ext}}$  呈反比关系, 这验证了图 4 中定性观察到的结论, 即“ $E_{\text{ext}}$  对  $Q$  影响不显著”。需要注意的是, 在较小的  $E_{\text{ext}}$  下出现了相对较大的偏差, 这主要是由于在该电场强度下能够被悬浮的颗粒数量有限。

随后, 为进一步研究月壤颗粒感应充电的特性, 本研究将实测颗粒电荷与预测的导体颗粒和电介质颗粒的饱和电荷进行了比较。值得注意的是, 现有研究表明月壤颗粒的相对介电常数 ( $\varepsilon_{\text{pr}}$ ) 几乎都在 2~8 的范围内。将  $\varepsilon_{\text{pr}}$  取 2 和 8 代入公式 (9), 可以计算出不同直径下电介质颗粒的饱和电荷 ( $Q_{s,d}$ ); 同时, 利用公式 (8) 也可计算出相同尺寸的导体粒子的饱和电荷 ( $Q_{s,c}$ )。图 5 (b) 展示了实验数据与预测饱和电荷的对比。图中数据点表示实测电荷

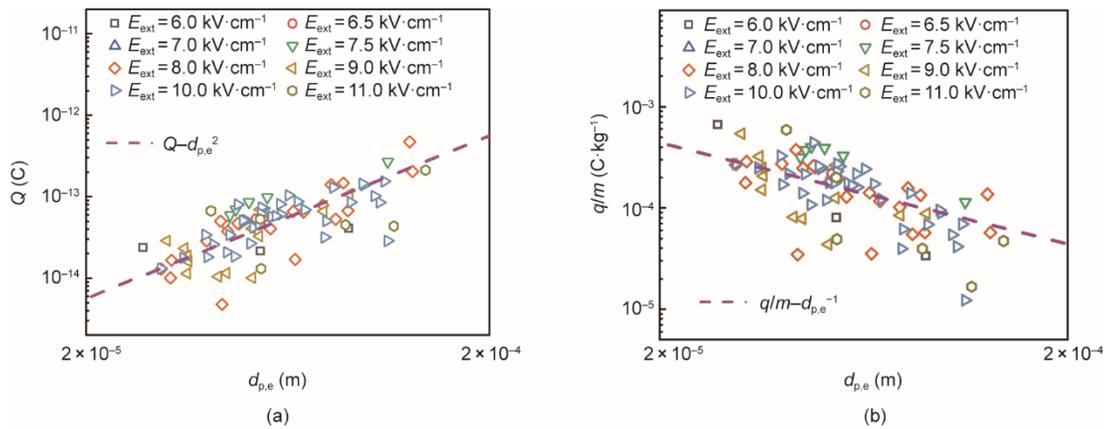


图 4. 粒径和电场强度对真空条件下 CE5 LS 粒子电荷量 (a) 和电荷质荷 (b) 的影响 (虚线为最佳拟合曲线)。

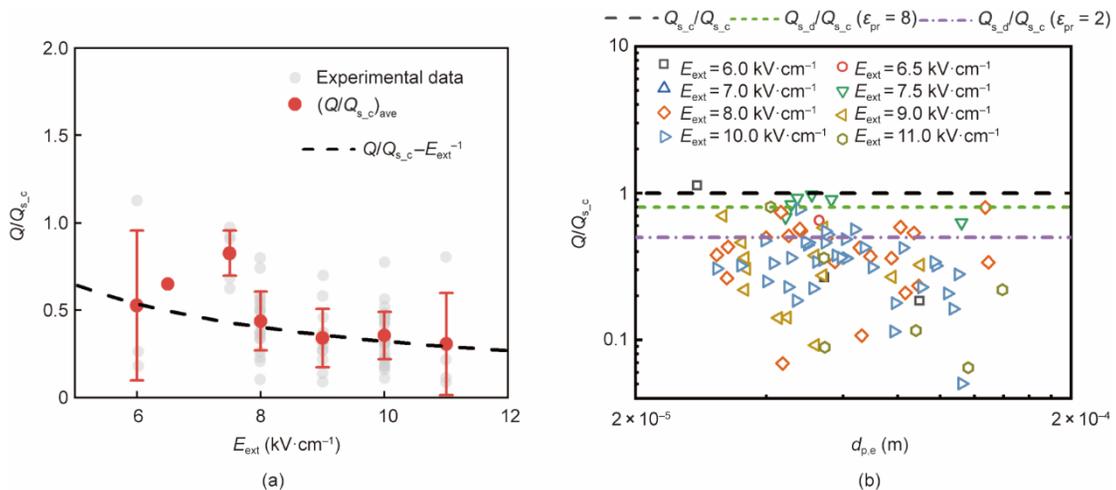


图 5. CE5 LS 颗粒实验测得电荷量  $Q$  与由公式 (8) 计算得到的饱和电荷量  $Q_{s,c}$  的比较。(a)  $Q/Q_{s,c}$  随外部电场强度  $E_{\text{ext}}$  的变化关系 (虚线为反比形式的最佳拟合曲线, 拟合公式为  $Q/Q_{s,c} = 3.23/E_{\text{ext}}$ ); (b) 相对电荷  $Q/Q_{s,c}$  随  $d_{p,e}$  的变化关系图。

$Q$  与  $Q_{s,c}$  的比值。可以明显看出, 在大多数情况下, 悬浮的 CE5 LS 颗粒的电荷量低于导体和介电粒子在相同尺寸下的理论饱和电荷值, 说明在本实验条件下, CE5 LS 颗粒获得的电荷可能尚未达到饱和值。这可能是由于颗粒在尚未达到饱和状态之前, 已获取足够电荷以实现悬浮。此外, 粒子的不规则形状和材料组成的不均匀性也可能有影响。结果还表明, 粒子的未饱和电荷量可能与外部电场强度 ( $E_{\text{ext}}$ ) 无关, 这与  $E_{\text{ext}}$  对饱和电荷的影响机制不同。同时, 图中可观察到  $Q/Q_{s,c}$  与  $d_{p,e}$  无关, 这与公式 (8) 中所示的关系一致, 进一步表明对于 CE5 LS 颗粒而言,  $Q$  与  $d_{p,e}^2$  成正比。

基于本实验结果以及  $Q$  与  $d_{p,e}$ 、 $E_{\text{ext}}$  之间的关系, 本研究提出了在外部电场中 CE5 LS 颗粒能够被悬浮的感应电荷预测公式:

$$Q_{\text{fit}} = \alpha d_{p,e}^{\beta} \quad (10)$$

式中, 指数  $\beta = 2.00$ , 系数  $\alpha = 1.48 \times 10^{-5} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。事实上, 以公式 (10) 的形式对实验数据进行拟合时, 所得最优拟合值为  $\beta = 1.96$ 。然而, 电荷通常分布在颗粒表面, 因此电荷量与颗粒表面积成正比; 对于非多孔颗粒, 其表面积与粒径的平方成正比。考虑到拟合得到的指数  $\beta$  (1.96) 与 2.00 接近, 这一结果验证了电荷储存在粒子表面的假设。 $\beta$  偏离 2.00 的微小差异可能源于粒子形状的不规则性。因此, 基于上述物理意义, 在公式 (10) 中将  $\beta$  固定为 2.00。幂函数项前的系数  $\alpha$  拟合为  $1.48 \times 10^{-5} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ , 由于  $E_{\text{ext}}$  对  $Q$  的影响可忽略, 因此该系数不依赖于  $E_{\text{ext}}$ 。为了评估公式 (10) 的预测精度, 计算了实际电荷值与公式预测值对数比值的平均值和标准差。得到平均偏差为  $(\ln(Q/Q_{\text{fit}}))_{\text{mean}} \approx 0$ , 标准差  $(\ln(Q/Q_{\text{fit}}))_{\text{std}} = 0.6$ 。

实验中, 通过切换两个电极的极性, 颗粒分别被带上

正电或负电, 图 6 (a) 展示了 CE5 LS 颗粒获得正电与负电的能力比较。结果表明, 从下电极喷射出的带负电的 CE5 LS 颗粒数量明显多于带正电的颗粒。为了排除  $d_{p,e}$  的影响, 图 6 (b) 展示了归一化电荷分布, 即  $Q/Q_{\text{fit}} = Q/(\alpha d_{p,e}^2)$ , 其中  $Q_{\text{fit}}$  为由公式 (10) 计算的拟合电荷量。根据图 6 (b) 进一步分析, 带负电的 CE5 LS 颗粒的  $Q/Q_{\text{fit}}$  平均值略高于带正电颗粒的  $Q/Q_{\text{fit}}$  平均值。这表明 CE5 LS 颗粒在外电场中更容易带负电。这一结论也得到了 Arrhenius 等[51]的实验结果支持, 他们的研究发现, 约 98% 的月壤颗粒带有净负电荷。

### 3.3. 颗粒行为

尽管带电过程有所差异, 但颗粒在常压与高真空条件下的行为本质上是相似的。因此, 本研究选取真空条件下的颗粒行为作为分析实例。图 7 展示了在真空中平行电极间 (上电极覆盖有 MLI) CE5 LS 颗粒的一些典型行为, 包括碰撞、反弹、黏附和下落。需要指出的是, 图 7 (a) ~ (c) 中分别为不同的颗粒, 图 7 (a) 所示的是同一颗粒在不同时刻的行为, 图 7 (b) 和 (c) 也适用相同的情况。图 7 (d) 中的照片则显示的是一个颗粒团簇在不同时刻的行为。

在库仑力驱动下, 颗粒被带动升起, 近似垂直方向加速运动, 并最终与上电极发生碰撞, 如图 7 (a) 和 (b) 所示。图 7 (a) 显示, 若颗粒第一次碰撞后的附着力与黏弹性未消耗其全部动能, 则颗粒会首先发生反弹。此“碰撞-反弹”过程会重复进行, 直到颗粒动能耗尽, 最终黏附在上电极上。由于颗粒形状不规则, 碰撞后还会出现水平运动和剧烈旋转。在本实验中, 大多数悬浮的颗粒均经历了这种“碰撞-反弹-黏附”过程。对于动能较低、在第一次碰撞时无法克服黏附与黏弹性势垒的颗粒, 则不会

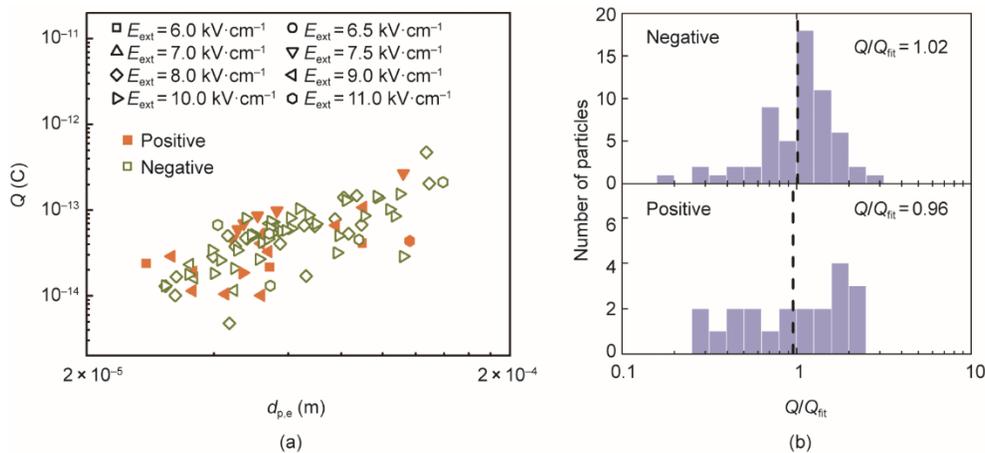


图6. 带正电荷和负电荷的 CE5 LS 粒子之间的电荷比较。(a) 带正电荷和负电荷的 CE5 LS 粒子的  $Q$  实验数据比较; (b) 带正电荷和负电荷的 CE5 LS 粒子的归一化电荷分布。

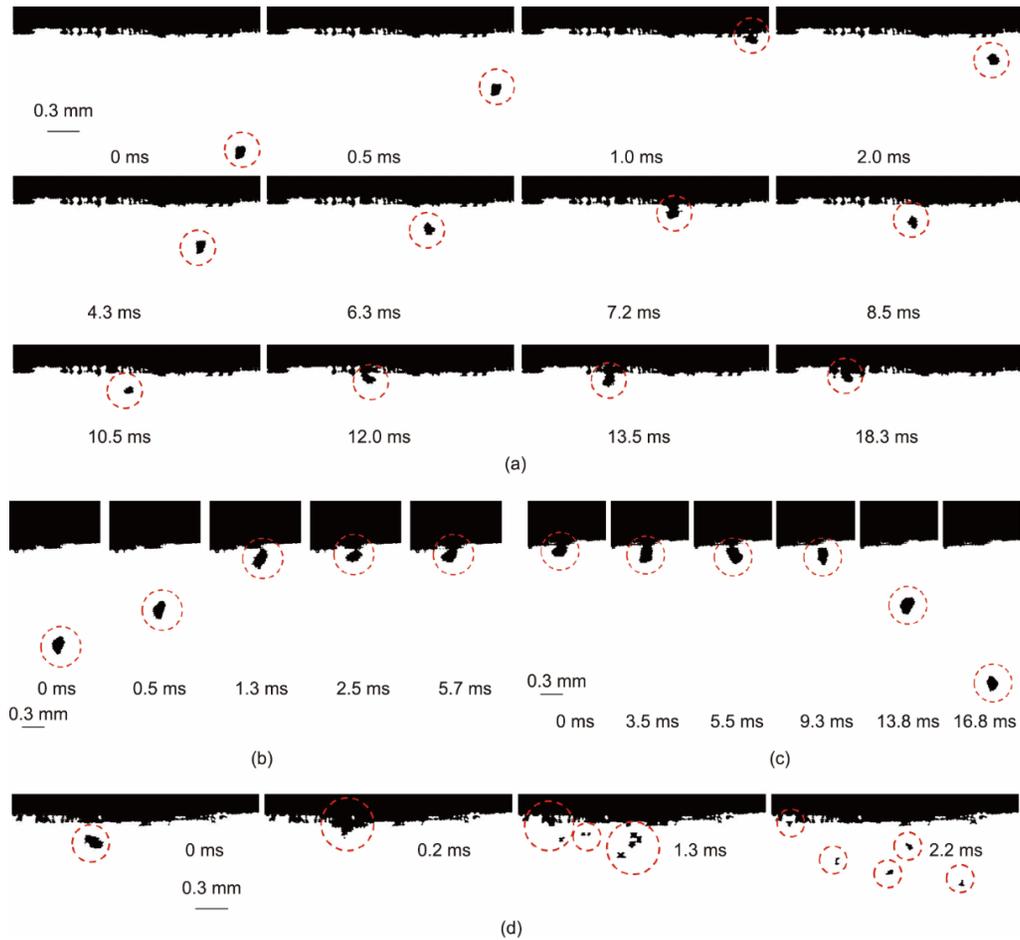


图7. 不同典型行为的快照：(a) ~ (c) 为单个颗粒；(d) 为颗粒团聚体。(a) 悬浮、多次碰撞后的反弹与最终黏附；(b) 碰撞后直接黏附，无反弹；(c) 从上电极掉落；(d) 颗粒团聚体的碰撞与破碎。

发生反弹，而是直接黏附在上电极上，如图7(b)所示。

除悬浮外，黏附在上电极板上的颗粒也可能从上板掉落，如图7(c)所示。与黏附在下电极板上的颗粒情况类似，黏附在上电极板上的颗粒也可能从上电极获得电荷，且由于两电极极性相反，其获得的电荷极性与从下电极获得的相反。颗粒的掉落主要发生以下两种情况：①若电荷转移足够充分，黏附颗粒会获得与上电极相同极性的电荷，此时颗粒在重力与库仑力的共同作用下克服附着力而向下运动；②若电荷转移不足，不能改变颗粒的带电极性，当人为反转电场方向时，颗粒同样会发生掉落。

由于几何链接、摩擦和附着力作用，颗粒还可能发生团聚[58]。如图7(d)所示，在本实验中也观察到了从下电极悬浮起来的颗粒团聚体与上电极发生碰撞。实验发现，大多数团聚体在撞击上板后发生碎裂。正如Ruan和Li的研究[59]所指，若撞击不够强烈，团聚体被压缩而非碎裂；但当撞击动能足够大时，颗粒间的结合力不足以抵御冲击，便会致团聚体破裂[59]。根据碎裂方式的不同，团聚体可分为两类：一类由多个相近尺寸的细小颗粒组成；另一

类则由若干细小颗粒包裹一个较大的核心颗粒构成。先前的研究[58]表明，与库仑力和重力相比，附着力通常在细颗粒行为中占主导地位。然而，团聚行为通过增加团聚体的总电荷量，可相对降低附着力的重要性，使得团聚体更容易克服下电极的附着力并实现悬浮。因此，在外部电场的作用下，团聚行为对细颗粒的悬浮起着重要作用。

当上电极被芳纶布覆盖时，同样可观察到前述典型现象。但在芳纶布表面，在所有被激发悬浮的颗粒中仅有少数颗粒经历多次“碰撞-反弹”过程。这一现象可能因为：①芳纶布中柔软的纤维具有更强的能力来耗散颗粒的动能；②一些颗粒可能深入嵌入芳纶布内部并被困住。

#### 3.4. 电场中CE5 LS颗粒的碰撞分析

如上所述，大多数具有向上初速度的悬浮CE5 LS颗粒会与上电极表面发生碰撞。因此，研究提取并分析了这些受外部电场驱动而运动的CE5 LS颗粒的碰撞前参数。图8展示了碰撞前的冲击速度( $v_c$ )、动能( $U_{k,c}$ )和动量( $P_c$ )。

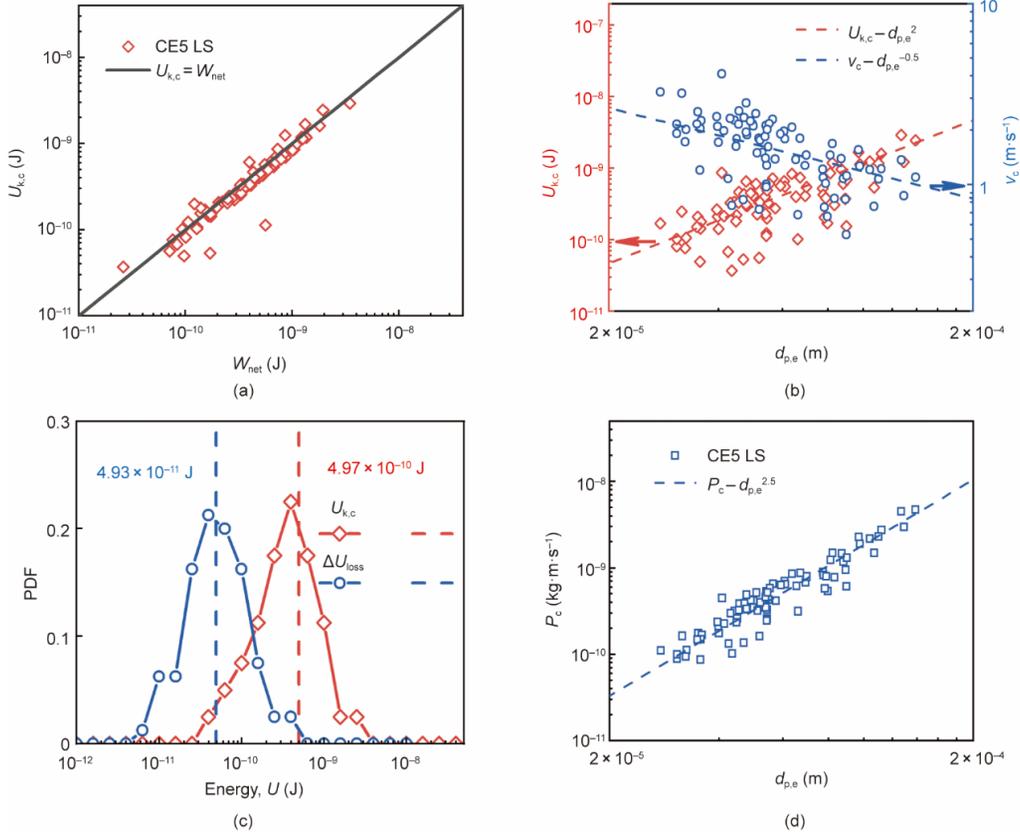


图8. 外部电场驱动下CE5 LS颗粒的运动参数。(a) 碰撞前颗粒的动能 $U_{k,c}$ 与净功 $W_{net}$ 的关系；(b) 碰撞前颗粒的动能 $U_{k,c}$ 与速度 $v_c$ 的关系；(c) CE5 LS颗粒碰撞前动能 $U_{k,c}$ 和能量损失 $\Delta U_{loss}$ 的概率分布函数(PDF)；(d) 碰撞前颗粒的动量 $P_c$ 。

需要指出的是，由于颗粒碰撞过程非常迅速，难以准确记录整个碰撞动态过程。为简化处理，本研究将颗粒与上电极发生碰撞前一帧图像中记录的速度与动能，视为其碰撞前的参数（因为在下一帧中，颗粒已经反弹或附着在上表面）。因此，考虑到颗粒的加速度( $a$ )，实验中确定的碰撞参数略小于实际值。碰撞前颗粒速度的不确定性 $\Delta v_c/v_c$ 可由 $\Delta v_c/v_c \leq (a\Delta t/v_c)$ 估算，其中 $\Delta v_c$ 为本文数据与实际值之间的速度偏差， $a$ 为颗粒加速度， $\Delta t$ 为高速摄像每帧持续时间（实验中摄像机设置为6000帧 $\cdot$ s $^{-1}$ ， $\Delta t = 1/6000$  s）。研究发现， $v_c$ 的平均不确定性为1.5%，95%的数据在2.61%的不确定性范围内。

根据动能定理，CE5 LS颗粒在碰撞前的动能可按如下公式计算：

$$U_{k,c} - U_{k,0} = W_{net} \quad (11)$$

式中， $U_{k,c} = \frac{1}{2} m_p v_c^2$ 为碰撞前的动能； $U_{k,0}$ 为初始动能。因为颗粒靠静电力从下电极悬浮升起并最终撞击上表面，因此 $U_{k,0} = 0$ 。高真空条件下的净功 $W_{net}$ 可由以下公式计算：

$$W_{net} = (QE_{ext} - m_p g)/H \quad (12)$$

式中， $H = 0.01$  m，为上、下两电极之间的距离。

图8(a)展示了碰撞前颗粒动能( $U_{k,c}$ )与由公式

(12) 计算得到的净功( $W_{net}$ )之间的关系。可以看出，大多数实验数据点落在 $U_{k,c} = W_{net}$ 的曲线上，说明大多数颗粒在初始状态下静止于下电极表面，获得足够电荷后被加速射向上电极。图8(b)表明，CE5 LS颗粒的 $U_{k,c}$ 随颗粒直径的增大而增大，而碰撞前速度 $v_c$ 则随颗粒 $d_{p,e}$ 的增大而减小。

CE5 LS颗粒的碰撞前动能 $U_{k,c}$ 的概率分布函数(PDF)如图8(c)所示。大多数颗粒的动能位于 $4 \times 10^{-11} \sim 4 \times 10^{-9}$  J之间。根据文献[60–61]，本研究计算了碰撞过程中的总能量损失 $\Delta U_{loss}$ ，包括黏附损失 $\Delta U_{ad}$ 和耗散损失 $\Delta U_{diss}$ ，如图8(c)所示。总能量损失的范围为 $4 \times 10^{-12} \sim 4 \times 10^{-10}$  J，远小于碰撞前动能的范围，因此大多数颗粒在首次撞击上表面后会发生反弹。CE5 LS颗粒在碰撞前的动量 $P_c = m_p v_c$ 也经过计算并展示于图8(d)，结果显示 $P_c$ 随着 $d_{p,e}$ 的增加而增大。研究 $P_c$ 具有重要意义，因为有研究[62–63]指出，足够的动能和动量可能是颗粒对材料造成损伤的原因，相关内容将在下文进一步讨论。

### 3.5. 月壤颗粒碰撞对材料表面的影响

在某些情况下，颗粒撞击材料表面会产生严重的负面效应，影响其工作性能，见文献[64]。在本实验中，分别

将一块带涂层和背衬的Kapton MLI和一块芳纶布粘贴在上电极的下表面,用以研究外部电场加速下月壤颗粒对这两种不同材料表面的撞击影响。撞击后的材料表面通过显微观察和扫描电子显微镜(SEM)进行分析,揭示颗粒撞击引起的表面损伤情况。

MLI表面在CE5 LS颗粒撞击后的显微观察结果如图9(a)所示。图中深色黑点为附着在表面的颗粒,灰色区域(箭头所指)为MLI的基底成分。可以发现,CE5 LS颗粒牢固地黏附在材料表面。图9(b)~(e)展示了MLI表面的SEM图像。在图9(b)中,可清晰观察到一些在图9(a)中模糊可见的划痕。图9(c)进一步展示了带有CE5 LS颗粒和划痕的MLI表面详细形状。SEM图像显示,CE5 LS颗粒撞击MLI表面不仅会破坏其表面涂层(空心箭头所示),还会损伤其基底材料(实心箭头所示),这可能会影响MLI的正常工作性能。正如第3.3节中的讨论,由于颗粒的不规则形状,一些颗粒在撞击表面后会水平运动或剧烈旋转,可能会导致划痕。此外,如果颗粒在撞击前具有足够大的动能,它甚至会直接嵌入材料基底,如图9(e)中实心圆圈所标示的部分。研究认为,月壤颗粒呈极端不规则的形状,尤其是尖锐的棱角,是造成材料表面严重损伤的主要原因。

芳纶布表面的显微图像如图9(f)所示。可以看到,颗粒更容易被捕获并滞留在交叉编织的纤维间隙中(红圈标出)。图9(g)与(h)所示的SEM图像进一步展示了附着在芳纶布表面的CE5 LS颗粒的细节。直径较小的颗粒能够深入穿透织物材料的纤维结构。然而,在本研究中,由于颗粒与织物的接触时间较短,尚未观察到织物表面受到明显损伤。考虑到不规则CE5 LS颗粒对MLI表面造成的严重影响,可以推测,如果颗粒与织物发生多次反复接触与摩擦,深度嵌入的颗粒可能会对织物造成明显的磨损损伤,如NASA研究[64]所述。

## 4. 结论

本研究系统探讨了“嫦娥五号”月壤样品的感应带电特性及其在外部电场作用下的动力学行为,同时还研究了带电颗粒碰撞对材料表面的影响。相关实验结果有望弥补该科学领域实验数据的不足,并为未来月壤原位资源利用研究提供参考。主要结论如下:

(1) 在高真空条件下,通过周期性地反转外部电场的方向,可轻松实现颗粒喷射。这种现象提供了一种真空中颗粒快速荷电的有趣方法。电极极性的切换过程类似于交变静电场,因此可以认为在外加交变静电场中,颗粒更容易获得电荷。这一发现将为今后利用交变电场控制颗粒行为的静电操控方法的研究、开发和应用提供有力支持。

(2) 实验测得了CE5 LS颗粒的感应电荷量及其荷质比。结果表明,颗粒所带电荷量随其直径增大而增加,呈幂律分布,指数约为2;而荷质比 $q/m$ 则随直径增大而减小。电场强度对颗粒带电量的影响不明显,可能是由于带电尚未饱和。此外,CE5 LS颗粒更容易带负电。本研究还提出了一种感应带电量的预测关系式,具有较好的准确性。

(3) 本研究观察并讨论了CE5 LS颗粒在外部电场作用下的碰撞、反弹、黏附、下落以及团聚体破碎等现象,并结合碰撞前速度、动能和能量损耗等数据进行了分析。显微观察结果表明,由于颗粒形状极度不规则,带电CE5 LS颗粒撞击可在MLI表面造成明显划痕,因此在实际应用中需采取有效的防护措施。

总体而言,月壤原位资源利用是未来深空探测与月球基地建设的关键技术。然而,传统技术在月球极端环境、月壤特殊性质及设施规模方面存在应用限制,因此亟须发展适用于月球的新型可行技术。目前,ISRU技术的成功实施依赖于对月壤在原位条件下特性的全面认识。本研究

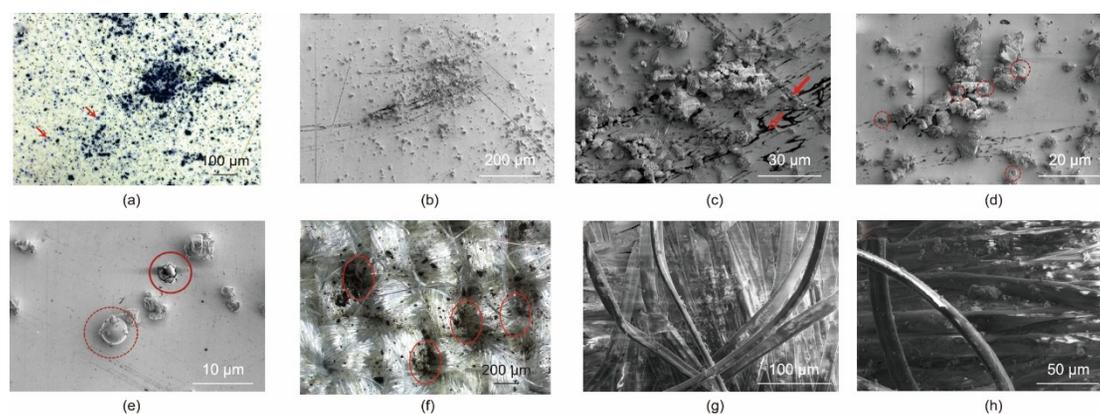


图9. CE5 LS颗粒撞击后两种材料表面的显微观察和SEM观察结果。(a) MLI表面的显微图像;(b)~(e) CE5 LS颗粒撞击后MLI表面的SEM图像;(f) 芳纶布表面的显微图像;(g)~(h) CE5 LS颗粒撞击后芳纶织物表面的SEM图像。

提供了真实月壤颗粒在真空环境下的荷电特性及一种有前景的荷电方法，为开发基于静电方法的月壤除尘、原料运输、矿物富集等新型原位利用技术提供了理论基础和直接参考，并有望推动相关技术在月球上的工程化应用。

## 致谢

感谢中国嫦娥月球探测工程全体工作人员为月壤样品返回所付出的辛勤努力。本研究使用的样品(样品编号: CE5C0400)由中国国家航天局分配。本研究得到了国家自然科学基金(U22B2092、51725601)、北京市“科技新星”计划(20230484334)以及国家航天局探月与航天工程中心的支持。

## Compliance with ethics guidelines

Junping Gu, Xiaoyu Qian, Yiwei Liu, Qinggong Wang, Yiyang Zhang, Xuan Ruan, Xiangjin Deng, Yaowen Lu, Jian Song, Hui Zhang, Yunning Dong, Mengmeng Wei, Wei Yao, Shuiqing Li, Weihua Wang, Zhigang Zou, and Mengfei Yang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Anand M, Crawford IA, Balat-Pichelin M, Abanades S, van Westrenen W, Péraudeau G, et al. A brief review of chemical and mineralogical resources on the Moon and likely initial *in situ* resource utilization (ISRU) applications. *Planet Space Sci* 2012;74(1):42–8.
- [2] Gibney E. How to build a Moon base. *Nature* 2018;562(7728):474–8.
- [3] Gaier J. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions. Report. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 2005 Apr. Report No.: NASA/TM-2005–213610/REV1.
- [4] Wagner SA. The Apollo experience lessons learned for constellation lunar dust management. Report. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 2006 Sep. Report No.: NASA/TP-2006–213726.
- [5] Zanon P, Dunn M, Brooks G. Current lunar dust mitigation techniques and future directions. *Acta Astronaut* 2023;213:627–44.
- [6] Duke MB, Woo CC, Bird ML, Sellers GA, Finkelman RB. Lunar soil: size distribution and mineralogical constituents. *Science* 1970;167(3918):648–50.
- [7] Morrison GH, Gerard JT, Kashuba AT, Gangadharam EV, Rothenberg AM, Potter NM, et al. Multielement analysis of lunar soil and rocks. *Science* 1970; 167 (3918):505–7.
- [8] Apollo 15 preliminary examination team. The Apollo 15 lunar samples: a preliminary description. *Science* 1972;175(4020):363–75.
- [9] Zhang H, Zhang X, Zhang G, Dong K, Deng X, Gao X, et al. Size, morphology, and composition of lunar samples returned by Chang'e-5 mission. *Sci China Phys Mech Astron* 2022;65(2):229511.
- [10] Li CL, Hu H, Yang MF, Pei ZY, Zhou Q, Ren X, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'e-5 mission. *Nat Sci Rev* 2022;9(2):16–28.
- [11] Song HQ, Zhang J, Ni DD, Sun Y, Zheng Y, Kou J, et al. Investigation on *in situ* water ice recovery considering energy efficiency at the lunar south pole. *Appl Energy* 2021;298:117136.
- [12] Schlüter L, Cowley A. Review of techniques for *in-situ* oxygen extraction on the moon. *Planet Space Sci* 2020;181:104753.
- [13] Guerrero-Gonzalez FJ, Zabel P. System analysis of an ISRU production plant: extraction of metals and oxygen from lunar regolith. *Acta Astronaut* 2023;103: 187–201.
- [14] Fa WZ, Jin YQ. Quantitative estimation of Helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer. *Icarus* 2007;190(1):15–23.
- [15] Isachenkov M, Chugunov S, Akhatov I, Shishkovsky I. Regolith-based additive manufacturing for sustainable development of lunar infrastructure—an overview. *Acta Astronaut* 2021;180:650–78.
- [16] Liu YW, Shen TR, Lv XC, Zhang G, Wang C, Gu J, et al. Investigation on a lunar energy storage and conversion system based on the *in-situ* resources utilization. *Energy* 2023;268:126681.
- [17] Just GH, Smith K, Joy KH, Roy MJ. Parametric review of existing regolith excavation techniques for lunar *in situ* resource utilization (ISRU) and recommendations for future excavation experiments. *Planet Space Sci* 2020; 180:104746.
- [18] Walton OR. Adhesion of lunar dust. Report. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 2007 Apr. Report No.: NASA/CR—2001–214685.
- [19] Horanyi M. Charged dust dynamics in the solar system. *Annu Rev Astron Astrophys* 1996;34(1):383–418.
- [20] Arrhenius G, Asunmaa SK. Aggregation of grains in space. *Moon Planets* 1973; 8 (3):368–91.
- [21] Colwell JE, Batiste S, Horanyi M, Robertson S, Sture S. Lunar surface: dust dynamics and regolith mechanics. *Rev Geophys* 2007;45(2):1–26.
- [22] Criswell DR. Horizon-glow and the motion of lunar dust. In: *Proceedings of Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space; 1972 Sep 26–29; Noordwijk, the Netherlands*. Springer Dordrecht; 1973. p. 545–56.
- [23] Tatom FB, Srepe V, Johnson RD, Contaxes NA, Adams JG, Seaman H, et al. Lunar dust degradation effects and removal/prevention concepts. Report. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 1967 Jun. Report No.: TR-792–7–207A: 1–3.
- [24] Yu Y, Cilliers J, Hadler K, Starr S, Wang Y. A review of particle transport and separation by electrostatic travelling wave method. *J Electrostat* 2022; 190: 103735.
- [25] Gu JP, Wang QG, Wu YX, Feng L, Zhang G, Li S, et al. Numerical study of particle transport by an alternating travelling-wave electrostatic field. *Acta Astronaut* 2021;188:505–17.
- [26] Gu JP, Zhang G, Wang QG, Wang C, Liu Y, Yao W, et al. Experimental study on particles directed transport by an alternating travelling-wave electrostatic field. *Powder Technol* 2022;397:117107.
- [27] Kawamoto H, Kato M, Adachi M. Electrostatic transport of regolith particles for sample return mission from asteroids. *J Electrostat* 2016;84:42–7.
- [28] Adachi M, Moroka H, Kawamoto H, Wakabayashi S, Hoshino T. Particle-size sorting system of lunar regolith using electrostatic traveling wave. *J Electrostat* 2017;89:69–76.
- [29] Rasera JN, Cilliers JJ, Lamamy JA, Hadler K. The beneficiation of lunar regolith for space resource utilization: a review. *Planet Space Sci* 2020; 186: 104879.
- [30] Adachi M, Maezono H, Kawamoto H. Sampling of regolith on asteroids using electrostatic force. *J Aerosp Eng* 2016;29(4):04015081.
- [31] Horanyi M, Walch B, Robertson S, Alexander D. Electrostatic charging properties of Apollo 17 lunar dust. *J Geophys Res* 1998;103(E4):8575–80.
- [32] Ding N, Wang J, Polansky J. Measurement of dust charging on a lunar regolith simulant surface. *IEEE Trans Plasma Sci* 2013;41(12):3498–504.
- [33] Abbas MM, Tankosic D, Craven PD, Spann JF, LeClair A, West EA. Lunar dust charging by photoelectric emissions. *Planet Space Sci* 2007;55(7–8):953–65.
- [34] Orger NC, Cordova-Alarcon JR, Toyoda K, Cho M. Lunar surface charging and electrostatic lofting of lunar dust particles under different solar wind conditions and solar ultraviolet radiation. In: *Proceedings of 13th Space Environment Symposium; 2016 Nov 1–2; Tokyo, Japan*. 2016.
- [35] Tankosic D, Abbas M. Measurements on charging of Apollo 11 and 17 lunar dust grains by low energy electrons. *Lunar Planet Sci Conf* 2008:1202.
- [36] Stubbs TJ, Halekas JS, Farrell WM, Vondrak RR. Lunar surface charging: a global perspective using lunar prospector data. In: *Proceedings of Dust in Planetary Systems; 2005 Sep 26–30; Kauai, HI, USA*. 2005. p. SP-643ESA.
- [37] Champlain A, Mateo-Velez JC, Roussel JF, Hess S, Sarraillh P. Parametric study of lunar dust simulants charging and transport under VUV irradiation. In: *Proceedings of 14th Spacecraft Charging Technology Conference; 2016 Apr 4–8; Noordwijk, Netherlands*. 2016.
- [38] Cho AYH. Contact charging of micron-sized particles in intense electric fields. *J Appl Phys* 1964;35(9):2561–4.

- [39] Wu Y, Castle GSP, Inculet II, Petigny S, Swei G. Induction charge on freely levitating particles. *Powder Technol* 2003;135–136:59–64.
- [40] Sayyah A, Mirzadeh M, Jiang Y, Gleason WV, Rice WC, Bazant MZ. Physics of electrostatic projection revealed by high-speed video imaging. *Phys Rev Appl* 2020;13(3):034071.
- [41] Wu Y, Castle GSP, Inculet II, Petigny S, Swei GS. The effect of electric field strength on the induction charge on freely levitating particles. *IEEE Trans Ind Appl* 2004;40(6):1498–503.
- [42] Wu Y, Castle GSP, Inculet II. Induction charging of granular materials in an electric field. *IEEE Trans Ind Appl* 2005;41(5):1350–7.
- [43] Wu Y, Castle GSP, Inculet II. Particle size analysis in the study of induction charging of granular materials. *J Electrostat* 2005;63(3–4):189–202.
- [44] Maxwell JC. A treatise on electricity and magnetism. New York City: Clarendon press; 1873.
- [45] Yu D, Castle GSP, Adamiak K. Dynamic induction charging of particles with finite conductivity. *IEEE Trans Ind Appl*;46(3):1159–65.
- [46] Lacks DJ, Sankaran RM. Contact electrification of insulating materials. *J Phys D Appl Phys* 2011;44(45):453001.
- [47] Shoyama M, Nishida S, Matsusaka S. Quantitative analysis of agglomerates levitated from particle layers in a strong electric field. *Adv Powder Technol* 2019;30(10):2052–8.
- [48] Zhang Y, Pähz T, Liu Y, Wang X, Zhang R, Shen Y, et al. Electric field and humidity trigger contact electrification. *Phys Rev X* 2015;5(1):011002.
- [49] Howell DW, Aronson IS, Crabtree GW. Dynamics of electrostatically driven granular media: effects of humidity. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 2001;63(5):050301.
- [50] Sternovsky Z, Horányi M, Robertson S. Charging of dust particles on surfaces. *J Vac Sci Technol A* 2001;19(5):2533–41.
- [51] Arrhenius G, Asunmaa SK, Fitzgerald RW. Electrostatic properties of lunar regolith. *Lunar Planet Sci Conf* 1972:30–2.
- [52] Leslie M. China's latest moon mission returns new lunar rocks. *Engineering* 2021;7(5):544–6.
- [53] Chen Y, Hu S, Li JH, Li QL, Li X, Li Y, et al. Chang'e-5 lunar samples shed new light on the Moon. *Innovation Geosci* 2023;1(1):100014.
- [54] He XX, Xiao L, Huang J, Wan CH, Wu T, Gao R, et al. Lunar regolith simulant CUG-1A. In: *Proceedings of 41st Lunar and Planetary Science Conference*; 2010 Mar 1–5; Woodlands, TX, USA. ADS; 2010.
- [55] Brooks W, Clark R, Yong J, Hopkins M, Dickens J, Stephens J, et al. Exploring the basic physical mechanisms of cathode- and anode-initiated high-voltage surface flashover. *IEEE Trans Plasma Sci* 2022;50(10):3361–70.
- [56] Mizutani M, Yasuda M, Matsusaka S. Advanced characterization of particles triboelectrically charged by a two-stage system with vibrations and external electric fields. *Adv Powder Technol* 2015;26(2):454–61.
- [57] Xu CX, Zhang WW, Hu S, Li P, Jiang S, Deng Z. Measuring the electrostatic charges of a single particle in contact electrification. *Powder Technol* 2021;393: 619–29.
- [58] Marshall JS, Li SQ. *Adhesive particle flow: a discrete-element approach*. Cambridge: Cambridge University Press; 2014.
- [59] Ruan X, Li SQ. Effect of electrostatic interaction on impact breakage of agglomerates formed by charged dielectric particles. *Phys Rev E* 2022;106 (3): 034905.
- [60] Chen S, Li SQ, Yang MM. Sticking/rebound criterion for collisions of small adhesive particles: effects of impact parameter and particle size. *Powder Technol* 2015;274:431–40.
- [61] Fang Z, Zhang YY, Wu XX, Sun L, Li S. New explicit correlations for the critical sticking velocity and restitution coefficient of small adhesive particles: a finite element study and validation. *J Aerosol Sci* 2022;160:105918.
- [62] Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear* 1960;3(2):87–103.
- [63] Meng HC, Ludema KC. Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear* 1995;181–182:443–57.
- [64] Christoffersen R, Lindsay JF, Noble SF, Meador MA, Kosmo JJ, Lawrence JA, et al. Lunar dust effects on spacesuit systems: insights from the Apollo spacesuits. Report. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 2008 Jan. Report No.: NASA/TP-2009-214786.