

北京航空航天大学学报
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics
ISSN 1001-5965,CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目：太阳能电池月尘沉积效应与暴露风险
作者：唐翔，梁亚楠，夏清，陈睿
DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0580
收稿日期：2026-08-22
网络首发日期：2026-11-20
引用格式：唐翔，梁亚楠，夏清，陈睿．太阳能电池月尘沉积效应与暴露风险[J/OL]．北京航空航天大学学报. https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0580



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

太阳能电池月尘沉积效应与暴露风险

唐翔[1,2]，梁亚楠[1]，夏清[1]，陈睿[1,3,✉]

（1. 中国科学院 国家空间科学中心，北京 100190；2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院，北京 100049；
3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院，北京 100049)
*通信作者 E-mail： chenrui2010@nssc.ac.cn

摘要 针对月球南极环境中太阳能电池面临的月尘沉积风险，搭建真空月尘迁移实验平台，研究 50～500 eV 电子辐照、紫外辐照及不同安装角度下钙钛矿太阳能电池短路电流变化，并采用航天器等离子体相互作用仿真软件（SPIS）分析三类等离子体环境中的近月面月尘分布。结果表明，短路电流与月尘沉积面密度之间可采用指数经验关系描述，月尘沉积主要集中在辐照初期，增大安装角度可明显降低等效沉积量。仿真显示，太阳风环境下近月面月尘数密度最高，可达 10^8~10^9 m^{-3}；20 m 高度处密度较近月面降低约 1 个数量级。结合月尘数密度和安装角度实验结果构建相对月尘暴露风险指数，风险随安装高度和角度增大而明显降低，可为月球南极光伏组件布置与防尘设计提供参考。
关键词 月尘迁移；月球南极；钙钛矿太阳能电池；SPIS 仿真；月尘暴露风险
中图分类号 V416.5 文献标志码 A DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0580

Lunar dust deposition effects and exposure risk of solar cells

TANG Xiang[1,2], LIANG Yanan [1], XIA Qing[1], CHEN Rui[1,3,✉]

（1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China；

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China；

3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）
*E-mail: chenrui2010@nssc.ac.cn

Abstract To address the risk of lunar dust deposition on solar cells operating in the lunar south polar environment, a vacuum experimental platform was established to investigate lunar dust transport. Changes in the short-circuit current of perovskite solar cells were examined under 50-500 eV electron irradiation, ultraviolet irradiation, and different installation angles. The Spacecraft Plasma Interaction Software (SPIS) was employed to simulate the near-surface distribution of lunar dust under three representative plasma environments. The results show that the relationship between short-circuit current and deposited lunar dust areal density can be characterized by an empirical exponential function. Lunar dust deposition occurred primarily during the initial stage of irradiation, while increasing the installation angle significantly reduced the equivalent dust deposition. Simulations indicate that the near-surface lunar dust number density is highest under solar-wind conditions, reaching 10^8-10^9 m^{-3}, and decreases by approximately one order of magnitude at a height of 20 m. Based on the simulated lunar dust number densities and experimental results obtained at different installation angles, a relative lunar dust exposure risk index was developed. The index decreases markedly with increasing installation height and angle. These findings provide a useful reference for the deployment and dust-mitigation design of photovoltaic modules in the lunar south polar region.
Key words lunar dust migration; lunar south pole; perovskite solar cells; SPIS simulation; lunar dust exposure risk

近年来，月球探测逐步向长期驻留、原位资源利用和月面基地建设发展，稳定可靠的能源供应成为月面任务持续运行的重要保障。太阳能电池具有质量轻、技术成熟和可持续供能等优势，是月面着陆器、巡视器及未来月球南极基地的重要发电单元。而月球表面的高真空、紫外辐照和等离子体环境

收稿日期：2026-08-22
基金项目：国家自然科学基金（12275303）；中国科学院国家空间科学中心攀登计划（E5PD3002）
Fund： National Natural Science Foundation of China (12275303); Pandeng Program of National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences (E5PD3002).
网络首发时间：2026-11-20 10:25:35 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2625.v.20261119.1337.001

会引起月尘带电、迁移与沉积，进而遮挡太阳能电池受光表面并降低其输出性能。因此，研究月尘沉积对太阳能电池性能的影响及其在不同空间环境下的暴露风险，对月面光伏系统设计具有重要意义。

月尘迁移是月面环境效应研究中的重要问题。NASA 在总结 Apollo 任务经验时指出，月尘会引起视野遮挡、设备堵塞、表面污染、热控性能下降、密封失效和材料磨损等多类问题[1]。Hood 等在真空环境中开展静电起尘实验，发现尘埃起跳速率具有明显时间相关性，初始阶段较快，随后逐渐降低[2]。Pagán Muñoz 等通过单颗粒实验指出，电子束或紫外辐照产生的二次电子和光电子可在颗粒—基底微腔内发生再吸收，增强局部电荷积累并诱发颗粒运动[3]。Richmond 等进一步发现，低密度等离子体与真空紫外辐照共同作用时，尘埃颗粒的带电和迁移能力会明显增强[4]。迁移月尘沉积于太阳能电池表面后，会遮挡和散射入射光，进而降低电池输出性能。马子良等人基于层叠遮挡理论建立了月尘遮蔽太阳电池模型，指出太阳电池表面相对透过率随月尘沉积面密度增加呈指数衰减[5]。Wang 等研究了月尘沉积质量和光入射角对三结 GaInP/GaAs/Ge 太阳能电池短路电流的影响，表明短路电流衰减同时受沉积质量和入射角控制[6]。Voarino 等针对月球基地光伏组件开展了月尘覆盖及清洁周期对功率损失影响的分析[7]。上述研究为认识月尘迁移机制及其对太阳能电池性能的影响提供了重要基础，但现有工作多集中于静态覆盖、人工落尘或单一环境条件，对电子辐照诱导的迁移月尘在太阳能电池表面的沉积过程、安装姿态对沉积行为的影响，以及不同等离子体环境下近月面月尘暴露水平的差异仍缺乏统一分析。

针对上述问题，本文搭建真空月尘迁移实验平台，研究不同能量电子和安装角度条件下月尘迁移沉积及太阳能电池电性能变化规律，建立短路电流与等效月尘沉积密度之间的定量关系；通过采用 SPIS 仿真分析太阳风（Solar Wind，SW）、磁鞘（Magnetosheath，MS）和等离子体片（Plasma Sheet，PS）环境下月球南极近月面月尘数密度及其高度分布差异，并结合安装角度实验结果构建太阳能电池相对月尘暴露风险指数，比较不同环境、安装高度和安装角度下的风险差异，为月球南极光伏组件的安装与防尘设计提供参考。

1 月尘迁移及太阳能电池积尘实验

1.1 实验原理及装置

月尘颗粒在月面高真空、紫外辐照及空间等离子体作用下易发生充电，其表面电位主要受入射电子注入、二次电子发射、背散射电子发射和光电子发射等过程共同控制[8]。由于月尘颗粒多含绝缘矿物组分，表面及颗粒间微腔区域的电荷不易快速耗散，容易形成局部电荷积累和非均匀电场。当静电力及颗粒间库仑排斥力超过重力、黏附力等约束作用时，颗粒可脱离原始堆积状态，发生滚动、跳跃、悬浮或迁移。迁移月尘到达太阳能电池受光表面后，会遮挡、散射和吸收入射光，使电池受光状态发生变化，并进一步引起输出性能衰减[9]。

Apollo 14 任务中 CPLEE 载荷曾测得月面带电粒子能量范围为 50 eV～50 keV，其中 40～100 eV 低能电子以及 300～500 eV 电子峰是地磁尾等离子体环境中的重要组成部分[10]。已有研究表明，月壤及斜长石类绝缘矿物的二次电子发射响应可能在 300～400 eV 附近较强[11]。为覆盖低能电子作用区间及二次电子发射较敏感的能量范围，实验选取 50～500 eV 作为电子辐照标称能量区间，开展真空条件下的月尘迁移沉积实验，重点分析不同辐照条件下月尘迁移沉积对太阳能电池性能的影响规律。

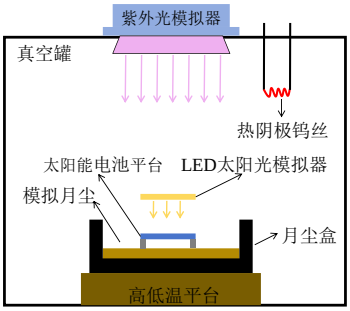

图 1　月尘迁移及太阳能电池积尘实验装置示意图

Fig.1　Schematic diagram of the experimental setup for lunar dust migration and solar cell dust deposition

月尘迁移及太阳能电池积尘实验装置如图 1 所示，主要由真空罐、月尘放置与温控单元、钨丝电子源、紫外辐照系统、LED 光照系统、太阳能电池平台和电性能测试系统组成。实验在真空环境中开展，真空度保持在 6×10^{-3} Pa，以降低气体碰撞、表面吸附和空气放电等因素对月尘带电迁移过程的影响。实验采用 CLDS-i 型模拟月尘，其粒径分布、颗粒形貌以及化学组成与真实月尘具有较高相似性。表 1 给出了 Apollo 15 月尘样品 15041 与 CLDS-i 化学组成的对比，二者主要氧化物组成总体较为接近，因此 CLDS-i 可作为月尘地面模拟实验的代表性替代材料[12]。使用前在 150 ℃条件下烘干 12 h 以上，以去除颗粒表面吸附水分及挥发性物质。

表 1　CLDS-i模拟月尘与Apollo 15月尘化学组成对比

Table 1　Chemical composition comparison of CLDS-i simulant and Apollo 15 lunar dust

	Apollo 15-15041		CLDS-i
	10–20 μm	<10 μm	
SiO_2	46.20	46.60	49.99
Al_2O_3	13.50	16.40	14.09
MgO	10.80	9.37	8.16
CaO	10.20	11.60	7.17
MnO	0.21	0.17	0.11
FeO	14.40	11.00	11.53
Na_2O	0.41	0.49	2.78
K_2O	0.18	0.23	1.23
TiO_2	1.88	1.79	1.22
Total	97.78	97.65	96.28

模拟月尘平铺于真空罐中央的月尘盒内，盒底高低温平台将温度保持在 26 ℃，真空罐和月尘盒整体接地。钨丝电子源位于月尘盒上方约 25 cm，通过 6 A 直流电流加热产生热发射电子，并施加相对于接地月尘盒的负偏压，使电子加速轰击月尘表面。课题组前期同类装置实验表明，月尘源区附近的局部电子密度可达 10^8 cm^{-3} 量级[13]，该参数反映高通量、短时地面加速试验条件，不直接对应真实月面环境。由于电子到达月尘表面附近时的能量主要受加速电压控制，本文以加速电压对应的能量作为电子辐照的标称能量。考虑到不同电压下电子束流密度及空间分布可能存在差异，所得能量效应主要反映不同标称电子能量工况下的综合响应。

表 2 太阳能电池主要参数

Table 2 Main parameters of the solar cell

参数	值
电池类型	钙钛矿
电池尺寸	4×5 cm^2
开路电压	7.0 V
短路电流	52.4 mA
填充因子	69 %
效率	15 %
最大功率	253 mW

实验对象为钙钛矿太阳能电池，主要性能参数见表 2。太阳能电池安装于月尘盒上方的载物台上，电池表面与月尘表面的距离约为 1 cm。实验月尘盒尺寸为 30 cm×30 cm，与太阳能电池的面积比为 45:1。考虑到地球重力对月尘迁移距离的约束，以及先前电子束辐照实验中月尘沉积密度随径向距离增大而降低的规律[2]，本实验月尘源尺寸较为充足，可减弱有限边界对局部沉积过程的影响。

真空罐上方设置紫外光模拟器，用于提供紫外辐照环境。电性能测试所需光照由 AM0 光谱 LED 太阳光模拟器提供，其光谱与月面无大气吸收条件下的太阳辐照光谱较为接近。光源尺寸与太阳能电池尺寸相同，放置于载物台上方 15 cm 处。太阳能电池正、负极通过真空法兰电连接端口引出，并连接至 Keithley 2400 源表。源表每隔 1 min 进行一次 I-V 曲线扫描。实验中，电子辐照持续 60 min，随后关闭电子源并继续监测 10 min，用于比较电子辐照开启和关闭前后太阳能电池性能变化及月尘沉积状态。

1.2 月尘沉积密度与短路电流的标定关系

太阳能电池表面积尘后，月尘颗粒会对入射光产生遮挡、散射和吸收作用，使进入电池吸收层的有效光通量降低，进而引起电性能参数变化[14]。在光谱分布、光照强度和测试温度相对稳定的条件下，短路电流主要受光生载流子数量控制，与电池有效受光状态密切相关。相比开路电压和最大输出功率，短路电流对表面积尘引起的有效受光变化具有更高敏感性，且受串联电阻、填充因子等因素影响相对较小，适合作为月尘沉积影响评估和等效沉积量反演的主要参数。

为建立短路电流与月尘沉积程度之间的定量关系，采用精密天平和落尘筛开展静态落尘标定实验。实验中，利用落尘筛在太阳能电池表面形成不同沉积面密度的模拟月尘覆盖层，使用精度为 0.01 mg 的精密天平测量沉积月尘质量，根据太阳能电池有效受光面积计算月尘沉积面密度[15]。每一沉积面密度条件下重复测试 5 次，并取中值作为该条件下的短路电流结果。

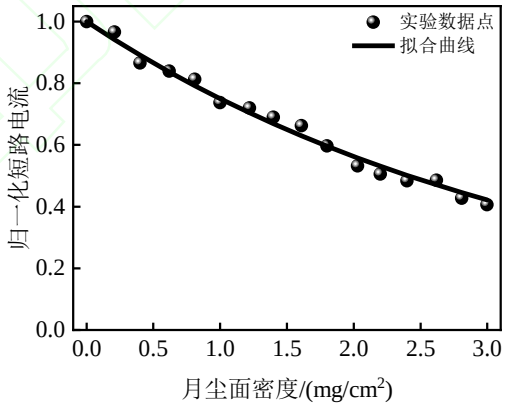

图 2 归一化短路电流随月尘沉积面密度变化关系

Fig.2 Variation of normalized short-circuit current with lunar dust deposition areal density

图 2 给出了归一化短路电流随月尘沉积面密度的变化关系。随着沉积面密度增加，归一化短路电流逐渐下降，说明月尘覆盖削弱了太阳能电池的有效受光能力。在低沉积面密度阶段，少量月尘颗粒即可在电池表面形成明显遮挡，短路电流下降较快；随着沉积面密度进一步增加，新增颗粒会部分落在已有颗粒或已遮挡区域上，新增有效遮光面积减小，短路电流下降趋势逐渐趋缓。相关研究表明，

月尘沉积质量与太阳能电池短路电流衰减之间存在明确关联[16]。结合静态落尘标定结果，采用指数函数对归一化短路电流与月尘沉积面密度之间的关系进行拟合：

$$I_{SC}^{*}=\exp(-\alpha\rho) \tag{1}$$

式中：I^* SC 为归一化短路电流，ρ 为月尘沉积面密度，单位为：mg/cm²；α 为遮挡系数，单位为：cm²/mg，用于表征单位沉积面密度下月尘对短路电流的衰减程度。拟合 α=0.2878 cm²/mg，决定系数为 R^2=0.98。所得指数衰减趋势与 Wang 等建立的月尘遮光模型一致[6]。在光线正入射条件下，约 3.0 mg/cm² 的模拟月尘可使三结太阳能电池短路电流下降约 50%；由式（1）计算相同沉积面密度下的短路电流衰减约为 57.8%，两者处于相近量级。静态落尘标定反映了给定积尘量下的电性能响应，而电子辐照下的月尘沉积具有时间演化特征。该标定关系由短路电流变化反演等效月尘沉积面密度，可用于进一步分析不同电子能量及安装角度下的动态沉积过程。

1.3 不同电子能量下的月尘沉积效应

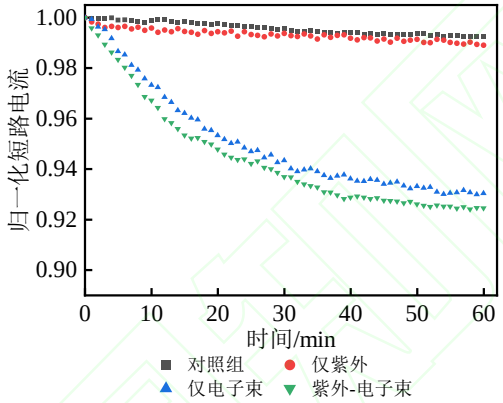

图 3　不同辐照条件下归一化短路电流变化

Fig.3　Variation of normalized short-circuit current under different irradiation conditions

为区分紫外辐照和电子辐照对月尘迁移沉积的影响，设置 4 组对比实验，如图 3 所示。对照组不放置模拟月尘，同时开启紫外辐照和 300 eV 电子辐照，用于表征非积尘因素对太阳能电池输出的影响；仅紫外辐照组放置模拟月尘并开启紫外光模拟器，但不施加电子辐照；仅电子辐照组放置模拟月尘并施加 300 eV 电子辐照，但不开启紫外辐照；紫外—电子耦合辐照组则在放置模拟月尘的同时开启紫外辐照和 300 eV 电子辐照[17]。

图 3 显示，无月尘对照组与仅紫外辐照组的归一化短路电流均缓慢下降，且变化幅度接近；两组含电子辐照的有月尘实验组衰减更明显，表明在本实验条件下，电子辐照相关的积尘响应更显著。无月尘对照组的小幅衰减可能与电池温度响应及测试漂移有关，后续以同一时刻有月尘实验组与无月尘对照组的归一化短路电流之比进行修正，以减小非积尘因素的影响[18]。仅紫外辐照组未出现明显额外衰减，可能与光源中心波长约 350 nm、单光子能量约 3.5 eV，低于部分月壤矿物约 5 eV 的光电子发射阈值有关[19]。

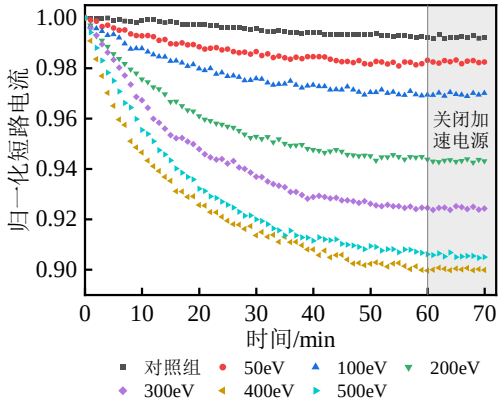

图 4 不同电子能量条件下归一化短路电流变化

Fig.4 Variation of normalized short-circuit current under different electron energy conditions

图 4 给出了不同电子能量条件下归一化短路电流随时间的变化。电子辐照开启后的 0～60 min 内，各电子辐照组短路电流均随时间下降，说明电子辐照能够促进月尘颗粒带电迁移，并在太阳能电池表面形成沉积。50 eV 和 100 eV 组的电流衰减较弱，60 min 时分别约下降 1.7%和 3.1%；随着电子能量升高，200 eV 和 300 eV 组分别约下降 5.6%和 7.5%；400～500 eV 工况下的衰减幅度较大，其中 400 eV 工况在 60 min 时约下降 10.0%，500 eV 工况约下降 9.4%，二者变化水平较为接近。从曲线形态看，各组均表现出初期下降较快、后期逐渐趋缓的特征，300～500 eV 条件下这一特征更为明显，表明较高电子能量更容易在辐照初期诱导月尘快速迁移沉积。随着实验进行，月尘表层易迁移颗粒逐渐减少，沉积速率降低，短路电流衰减也逐渐趋于稳定。

不同标称电子能量下的短路电流衰减幅度并未随能量升高而持续增加，400 eV 与 500 eV 工况的衰减程度较为接近，该现象可能与二次电子发射的能量依赖性有关。Anderegg 等对 Apollo 14 月壤样品的实验测量表明，二次电子发射产额在 300～400 eV 附近达到峰值[20]。在此能区，二次电子及其在颗粒间微腔内的再吸收改变局部电荷分布，增强颗粒间静电作用，使表层颗粒更易克服重力和黏附力发生起跳与迁移，从而诱导辐照初期快速积尘。由于二次电子发射产额并非随电子能量单调增加，且颗粒迁移还受到电子束分布和局部充电状态的影响，500 eV 工况下的沉积程度未进一步明显增大。

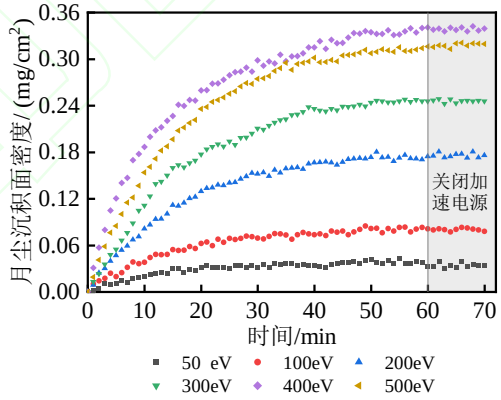

图 5 不同电子能量条件下等效月尘沉积面密度变化

Fig.5 Variation of equivalent lunar dust deposition areal density under different electron energy conditions

为进一步比较不同电子能量下的月尘沉积程度，根据 1.2 节建立的短路电流与月尘沉积面密度标定关系，将修正后的归一化短路电流变化换算为等效月尘沉积面密度。如图 5 所示，各电子能量条件下等效月尘沉积面密度均随时间增加并逐渐趋于稳定。50～400 eV 范围内，等效沉积面密度总体随电子能量升高而增大；500 eV 组略低于 400 eV 组，与短路电流变化规律一致。

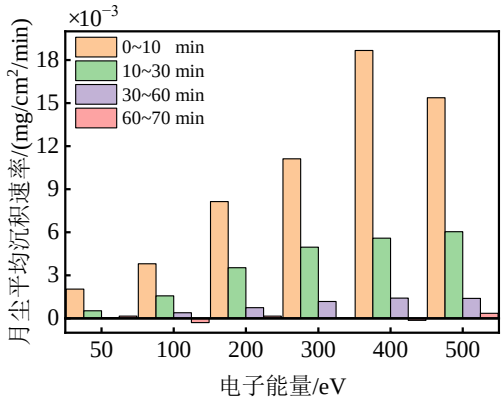

图 6　不同电子能量条件下月尘平均沉积速率
Fig.6　Average lunar dust deposition rate under different electron energy conditions

图 6 比较了不同时间阶段的月尘平均等效沉积速率。各电子能量条件下，0～10 min 阶段的沉积速率最高，10～30 min 和 30～60 min 阶段依次降低，进一步说明月尘迁移沉积主要集中在电子辐照初期。60 min 关闭电子源后，各组等效沉积速率接近于零，表明电子辐照停止后持续月尘迁移明显减弱。

1.4 安装角度对月尘沉积的影响

月球极区太阳高度角较低，太阳能电池在实际布置中通常需要采用倾斜或近垂直安装，以改善受光条件和能量获取能力。安装角度的变化不仅会改变太阳能电池与入射光的相对关系，也会影响迁移月尘与电池表面的碰撞、附着和保持过程[21]。为分析安装姿态对月尘沉积行为的影响，在 300 eV 电子辐照条件下开展不同安装角度实验，安装角度设置为 0°、15°、30°、45°、60°、75°和 90°。实验过程中，LED 光源随太阳能电池安装角度同步调整，保持沿电池表面法向照射，以保证不同角度下测试光照条件基本一致。

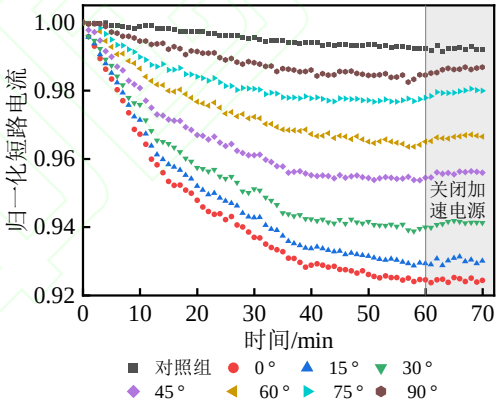

图 7　不同安装角度下归一化短路电流变化
Fig.7　Variation of normalized short-circuit current at different installation angles

图 7 给出了不同安装角度下归一化短路电流随时间的变化。电子辐照开启后的 0～60 min 内，各安装角度下归一化短路电流均随时间下降，说明迁移月尘可在不同姿态的太阳能电池表面形成沉积。随着安装角度增大，短路电流衰减幅度总体减小，其中 0°条件下衰减最明显，90°条件下衰减最弱。这说明增大安装角度能够降低迁移月尘在受光表面的沉积程度，从而减弱月尘遮挡引起的短路电流衰减。

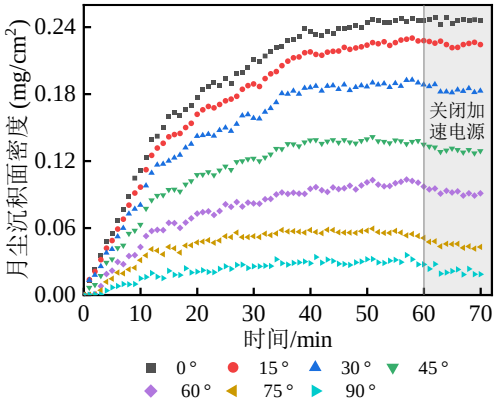

图 8　不同安装角度下等效月尘沉积面密度变化

Fig.8　Variation of equivalent lunar dust deposition areal density at different installation angles

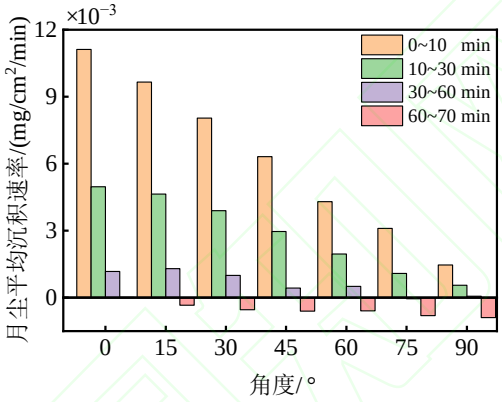

图 9　不同安装角度下月尘平均沉积速率

Fig.9　Average lunar dust deposition rate at different installation angles

图 8 和图 9 分别给出了不同安装角度下等效月尘沉积面密度随时间的变化及分阶段平均等效沉积速率。图 8 显示各角度下等效沉积面密度均在实验初期增长较快，随后逐渐趋缓，且总体随安装角度增大而减小。60 min 时，0° 和 60° 工况下的等效沉积面密度分别为 0.246 和 0.097 mg/cm²，表明安装姿态对迁移月尘的捕集与沉积具有明显影响。安装角度较小时，太阳能电池表面对近似向下沉积的月尘具有较大的有效接收面积，颗粒更容易沉积在受光表面；安装角度增大后，颗粒与电池表面的碰撞由近似正碰逐渐转变为斜碰，同时重力沿电池表面的切向分量增大，颗粒更易发生反弹、滑移或脱落；而局部静电作用及范德华黏附可使部分颗粒保持附着。上述因素共同影响月尘的沉积结果。由图 9 可知，各安装角度下 0～10 min 阶段的平均沉积速率明显高于 10～30 min 和 30～60 min 阶段，说明月尘沉积主要集中在实验初期；随着表层易迁移颗粒逐渐减少，沉积过程逐渐趋于稳定。60 min 关闭电子辐照后，60～70 min 阶段出现负的等效沉积速率，可能是部分已沉积月尘发生脱落或在电池表面重新分布，使月尘遮挡效应减弱。由此可见，在满足月面受光需求的前提下，适当增大太阳能电池安装角度有助于降低迁移月尘沉积风险，并减小由月尘污染引起的电性能衰减。

1.5 月尘沉积与短路电流演化经验模型

前述实验表明，电子辐照下等效月尘沉积面密度在实验初期快速增加，随后增长逐渐趋缓。不同标称电子能量会影响电子轰击、二次电子发射及颗粒带电过程，其响应还受电子束分布与局部充电状态等因素影响，难以用单一经验参数概括。相比之下，安装角度具有较明确的几何效应，并与月面太阳能电池的布置直接相关。基于上述实验特征，本节建立月尘沉积随时间演化的经验公式，再进一步讨论饱和等效月尘沉积面密度与安装角度之间的关系。

根据月尘沉积的时间演化特征，假设月尘瞬时沉积速率与尚未达到的饱和沉积量成正比，可建立

一阶趋稳型经验方程：

$$\frac{dS}{dt}=K(S_\infty-S) \tag{2}$$

式中：S 为等效月尘沉积面密度，S_∞为饱和等效月尘沉积面密度，考虑到各安装角度下等效月尘沉积面密度在 60 min 附近已接近稳定，采用 60 min 时的等效月尘沉积面密度近似估计 S_∞；K 为沉积速率常数，单位为 $\mathrm{min^{-1}}$，用于表征沉积过程趋于稳定的快慢。取实验初始时刻太阳能电池表面无明显月尘沉积，即 $S(0)=0$，可得：

$$S(t)=S_\infty[1-\exp(-Kt)] \tag{3}$$

进一步考虑安装角度对 S_∞的影响。电子辐照使月尘颗粒带电并发生迁移后，部分颗粒在重力作用下向太阳能电池表面沉降。安装角度较小时，太阳能电池面向沉降月尘的有效接收面积较大，颗粒更容易沉积并保持在受光表面；随着安装角度增大，电池表面的水平投影接收面积逐渐减小，颗粒与电池表面的碰撞方式由近似正碰转变为斜碰，反弹、滑移或脱落的可能性增加，最终沉积量随之降低。根据这一重力沉降和几何投影关系，饱和等效月尘沉积面密度可近似表示为：

$$S_\infty(\theta)=A\cos\theta+B \tag{4}$$

式中：θ 为太阳能电池相对于水平面的安装角度；$A\cos\theta$ 表示由有效投影面积决定的主要沉积分量；B 为经验修正项，用于表征实际沉积过程相对于理想余弦投影关系的整体偏移，可综合反映碰撞与黏附等非几何因素。A 和 B 的单位均为 $\mathrm{mg/cm^2}$。

利用不同安装角度下 60 min 时的饱和等效月尘沉积面密度进行拟合，结果如图 10 所示。拟合关系为：

$$S_\infty(\theta)=0.25\cos\theta-0.0052 \tag{5}$$

其中，拟合决定系数为 R^2=0.915，表明余弦经验关系能够描述等效沉积面密度随安装角度增大而降低的总体趋势。低角度条件下，实验点与余弦拟合关系吻合较好；随着安装角度增大，颗粒斜碰、反弹、滑移和脱落等非投影因素增强，实验结果相对拟合曲线的偏离有所增大。

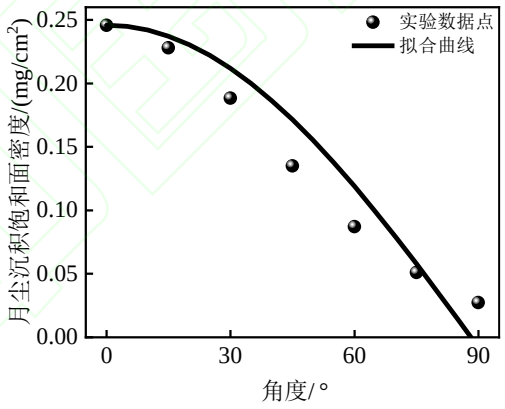

图 10　不同安装角度下饱和月尘沉积面密度拟合结果
Fig.10　Fitting results of saturated lunar dust deposition areal density at different installation angles

结合式（3）、式（4）以及 1.2 节建立的短路电流标定关系式（1），可得到归一化短路电流随时间和安装角度变化的经验表达式：

$$I^*_{SC}(t,\theta)=\exp\{-\alpha[A\cos\theta+B][1-\exp(-Kt)]\} \tag{6}$$

采用式（6）对 0～60 min 内不同安装角度下的短路电流变化进行拟合，得到模型参数和拟合优度如表 3 所示。需要说明的是，90° 工况下短路电流衰减幅度很小，所得 R^2 为负值，不能有效反映沉积过程的时间演化特征。表 3 仅列出 0° ～75° 工况的拟合结果。

表 3 不同安装角度下短路电流演化模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of the short-circuit current evolution model at different installation angles

安装角度	K/min^{-1}	R^2
0°	0.065	0.897
15°	0.056	0.899
30°	0.049	0.873
45°	0.038	0.812
60°	0.037	0.817
75°	0.068	0.755

由表 3 可知，0°～30°范围内模型拟合效果较好，R^2 接近 0.90，说明式（6）能够较好描述低角度条件下短路电流快速下降并逐渐趋稳的变化过程；45°～75°范围内，拟合优度有所降低，表明随着安装角度增大，月尘沉积过程不再完全受有效投影面积和一阶趋稳过程控制，颗粒斜碰、滑移、脱落以及局部静电吸附等因素对短路电流变化的影响增强。90°工况下沉积量最低，短路电流变化幅度有限，不适合采用式（6）进行定量拟合。式（6）可从时间趋稳特征和安装角度投影效应两个方面描述月尘沉积引起的短路电流演化过程，适用于不同安装姿态下太阳能电池相对积尘风险的比较。需要指出的是，该模型仍属于地面短时加速实验条件下的经验描述，尚未充分考虑月面低重力、长期辐照、颗粒粒径分布、颗粒间黏附、表面电荷演化和颗粒脱落等因素，后续仍需结合真实月面环境进一步修正。

2 月球南极不同等离子体环境下的月尘暴露风险分析

2.1 SPIS 模型与仿真参数

月尘迁移沉积实验揭示了不同辐照条件及安装姿态下太阳能电池的积尘响应规律，但太阳能电池在月球南极的月尘暴露风险还与近月面月尘的空间分布有关。太阳风、磁鞘和等离子体片环境下，电子和离子的密度、温度存在差异，可影响月面充电状态及带电月尘输运[22]。为比较不同等离子体环境下月球南极近月面月尘分布差异，采用欧空局研发的开源软件 SPIS 及其尘埃模块 SPIS-Dust 开展数值仿真[23]。

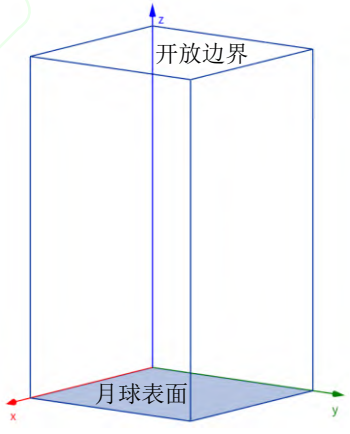

图 11 仿真模型示意图

Fig.11 Schematic diagram of the SPIS simulation model

仿真采用三维有限大小的月面“元胞”模型，并结合边界条件近似模拟无限延展的局部月面环境，模型示意如图 11 所示。仿真区域下边界设置为月壤覆盖的月面，上方为等离子体和带电月尘运动区域。x 方向两侧边界设置为周期性边界，用于近似模拟局部月面在该方向上的连续延展，粒子从

一侧边界离开后以相同速度从对侧重新进入仿真区域；y 方向两侧边界设置为反射边界，粒子到达边界后以相反法向速度返回仿真空间。上边界设置为开放边界，等离子体和月尘颗粒可由该边界进出。三种环境均采用相同的边界设置以保证结果的可比性。

表 4　不同环境及电子辐照工况仿真参数

Table 4　Simulation parameters for different environments and electron irradiation

参数	太阳风	磁鞘	等离子体片	单一电子辐照
离子密度/m^{-3}	10^7	5×10^4	5×10^5	0
电子密度/m^{-3}	10^7	5×10^4	5×10^5	10^{14}
离子温度/eV	10	500	5000	0
电子温度/eV	10	50	600	50~500
粒子速度/(km/s)	430	430	430	430
仿真区域尺寸/m	50×50×200	1000×1000×5000	1000×1000×5000	0.3×0.3×0.5
网格尺度/m	5	200	200	0.1

不同等离子体环境下德拜长度不同，仿真区域尺寸和网格尺度根据相应环境参数进行设置[24]，具体参数如表 4 所示[25]。考虑月球南极低太阳高度角特征，仿真中太阳高度角统一设置为 0°，等离子体入射方向与月面近似平行。此外，为验证仿真模型的合理性，参照 1.3 节电子辐照实验条件，补充设置 50～500 eV 单一电子辐照工况。

2.2 仿真结果验证与月尘数密度分布

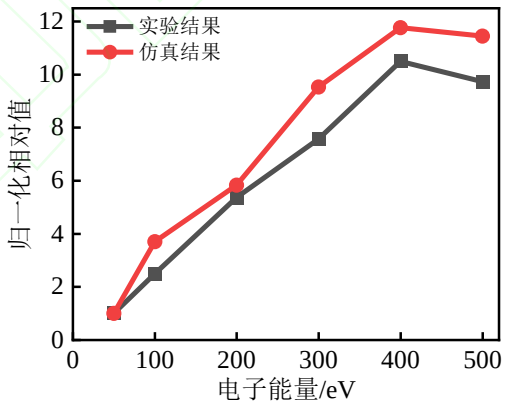

图 12　单一电子辐照下实验与仿真相对比例对比

Fig.12　Comparison of experimental and simulated relative ratios under electron-only irradiation

单一电子辐照仿真结果如图 12 所示。仿真采用近表面月尘数密度中值，实验采用 60 min 时的等效月尘沉积面密度，并分别以 50 eV 工况为基准计算相对比例。实验与仿真结果均随电子能量升高逐渐增大，在较高能量下增幅趋缓并不再继续增加，二者在所考察能量范围内呈现基本一致的变化趋势，为模型描述电子辐照诱导月尘迁移的能量响应提供了定性支持。考虑到仿真月尘数密度与实验沉积面密度之间尚未建立完整的定量映射关系，本研究主要开展趋势一致性比较，模型定量预测精度仍

有待进一步验证。仿真结果的相对增幅整体高于实验，可能与实际沉积过程中月尘颗粒的输运、捕集及附着等因素有关。

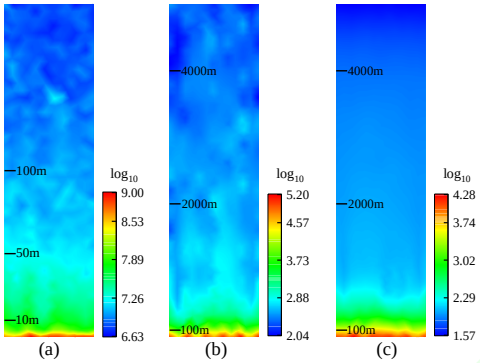

图 13 不同等离子体环境下月尘数密度对数分布(单位:m^{-3})：(a) 太阳风；(b) 磁鞘；(c) 等离子体片

Fig.13 Logarithmic distribution of lunar dust number density under different plasma environments (unit: m^{-3}): (a) SW; (b) MS; (c) PS

太阳风、磁鞘和等离子体片环境下月尘数密度在 x-z 平面内的对数分布如图 13 所示。太阳风环境中，月面附近形成较为连续的高密度月尘区域，近月面月尘数密度达到 10^8~10^9 m^{-3} 量级，且高密度区域沿高度方向具有一定延伸。Popel 等考虑太阳辐射及太阳风粒子作用，得到近月面月尘数密度可达 10^9 m^{-3} 量级，与仿真结果处于相近数量级[26]。磁鞘环境下近月面月尘数密度主要处于 10^5 m^{-3} 量级，较太阳风环境降低约 3～4 个数量级。等离子体片环境中的月尘数密度最低，近月面区域整体处于 10^4 m^{-3} 及以下量级。

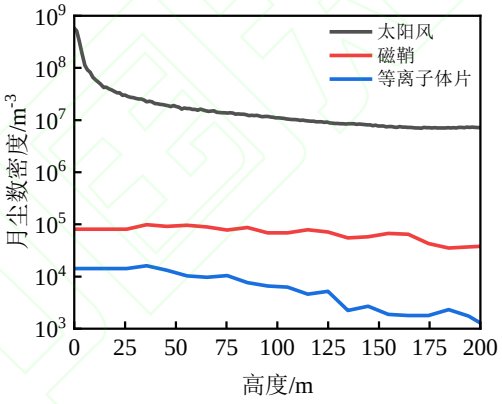

图 14 不同等离子体环境月尘数密度随高度的变化

Fig.14 Variation of lunar dust number density with height under different plasma environments

图 14 给出了 0～200 m 高度范围内三种环境下月尘密度的统计结果。三种环境中，月尘数密度均随高度增加而降低，但衰减幅度和影响范围存在差异。太阳风环境下月尘密度在近月面上方下降最为明显，5～10 m 高度范围内由近月面的 10^8~10^9 m^{-3} 降至约 10^8 m^{-3}，20 m 附近进一步降至 10^7~10^8 m^{-3}，至 100 m 高度附近仍保持在 10^7 m^{-3} 量级，说明太阳风环境下带电月尘可影响较大的近月面高度范围。磁鞘环境中，0～200 m 范围内月尘密度主要维持在 10^5 m^{-3} 附近；等离子体片环境中月尘密度最低，0～200 m 范围内约为 10^3~10^4 m^{-3}。整体来看，太阳风环境下月尘密度最高、垂向影响范围最大，磁鞘环境月尘密度中等且垂向衰减较缓，等离子体片环境月尘密度最低。

2.3 太阳能电池相对月尘暴露风险评估

太阳能电池的月尘暴露风险受环境月尘分布及组件安装高度、角度的共同影响。结合第 1.2 节建立的短路电流与月尘沉积面密度的指数标定关系，以 SPIS 仿真获得的月尘数密度表征环境暴露水平。假设相同暴露时间及近似一致的颗粒捕集条件下，等效沉积负荷与局部月尘数密度成正比，以太

阳风近月面工况为参考，定义基于等效受光衰减率的月尘暴露风险评价指标为：

$$R_j(h,\theta)=1-\exp\left[-\alpha S_{60}(\theta)\frac{n_j(h)}{n_{\mathrm{SW}}(0)}\right] \tag{7}$$

式中：$R_j(h,\theta)$为第 j 种等离子体环境、安装高度 h 及安装角度 θ 下的等效受光衰减率；$n_j(h)$为第 j 种等离子体环境在高度 h 处的月尘数密度中值。该指标越大，表明月尘沉积造成的潜在受光损失越明显，暴露风险越高。

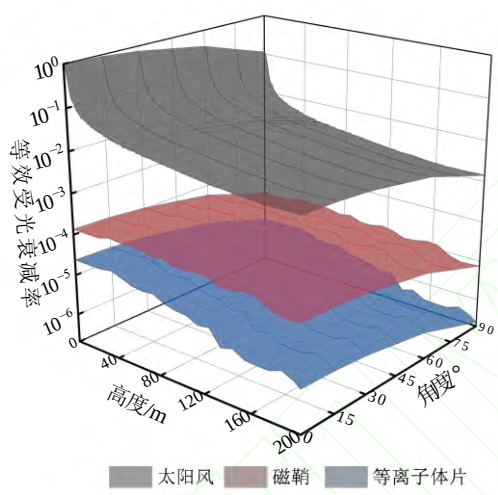

图 15　不同等离子体环境及安装条件下基于等效受光衰减率的太阳能电池月尘暴露风险

Fig.15　Lunar dust exposure risk of solar cells characterized by equivalent irradiance attenuation under different plasma environments and installation conditions

根据式（7）计算得到不同等离子体环境及安装条件下的月尘暴露风险，结果如图 15 所示。三种环境下的等效受光衰减率呈明显分层，由高到低依次为太阳风、磁鞘和等离子体片环境。在太阳风近月面条件下，安装角度由 0° 增至 60° 时，等效受光衰减率由 6.83%降至 2.75%，降低约 59.7%；当安装高度提高至 20 m 且采用 60° 安装时，等效受光衰减率进一步降至 0.17%，较近月面 0° 参考工况降低约 97.5%。结果表明，提高安装高度和增大安装角度均有助于降低月尘沉积造成的潜在遮光风险，可为月球南极光伏组件布置及防尘设计提供参考。

3　结　论

1)月尘沉积会显著降低太阳能电池有效受光能力，短路电流可作为表征积尘程度的敏感参数。静态落尘标定结果表明，归一化短路电流与月尘沉积面密度满足式（1），可通过短路电流衰减反演等效月尘沉积面密度。

2)在静态落尘标定基础上，获得了电子辐照诱导的月尘动态沉积规律。50～400 eV 范围内等效沉积量总体随电子能量增大而增加，400～500 eV 工况下变化水平接近；各工况沉积速率初期较高，随后逐渐趋于稳定。

3)增大太阳能电池安装角度可降低迁移月尘在受光表面的等效沉积量。0° 至 60° 等效沉积面密度降低约 60.5%。式（6）能够描述沉积过程的时间趋稳及安装角度影响。

4)基于三种等离子体环境下的月尘数密度和安装角度实验结果，构建了以等效受光衰减率表征的月尘暴露风险模型。太阳风环境下风险最高；20 m 高度、60° 安装时，等效受光衰减率较近月面 0° 工况降低约 97.5%，表明提高安装高度和角度可有效降低月尘暴露风险。

未来研究可进一步开展低重力、更复杂的等离子体环境条件下的积尘实验，修正月尘沉积模型参数；同时，可结合防尘涂层、电场除尘、机械清洁和阵列构型优化等措施，开展面向月面长期运行光伏系统的综合防尘设计研究。

参考文献（References）

[1] Wohl C J,Burgess J K,Belbin S P,et al.Lunar dust considerations for vertical solar arrays.Volume 1:Lunar environment and dust interactions:NASA/TM-20240003496[R].Cleveland:National Aeronautics and Space Administration,2024.

[2] Hood N,Carroll A,Mike R,et al.Laboratory investigation of rate of electrostatic dust lofting over time on airless planetary bodies[J].Geophysical Research Letters,2018,45(24):13206-13212.

[3] Pagán Muñoz J H,Wang X,Horányi M,et al.Charging and mobilization of dust particles on a surface in plasma[J].Physical Review Letters,2024,133(11):115301.

[4] Richmond J L,Pagán Muñoz J H,Wang X,et al.Enhanced charging and mobilization of photoemitting dust particles in a low-density plasma[J].Geophysical Research Letters,2025,52(1):e2024GL113715.

[5] 马子良，王志浩，白羽，等．太阳电池月尘遮蔽模型分析及试验研究[J]．航天器环境工程，2016，33（4）：408-412．
Ma Z L,Wang Z H,Bai Y,et al.Modelling and testing of lunar dust overlapping solar cell[J].Spacecraft Environment Engineering,2016,33(4):408-412(in Chinese).

[6] Wang Y,Ye X,Xu H,et al.Investigating the impact of lunar dust simulants deposition on the short-circuit current of a triple-junction GaInP/GaAs/Ge solar cell-based dust detector:a combined experimental and mathematical study[J].Renewable Energy,2025,248:123092.

[7] Voarino P,Lombard T,Jamin C,et al.Destination Moon:how "Luna" dust affects photovoltaics modules?[C]//IOP Conference Series:Materials Science and Engineering.Bristol:IOP Publishing,2025,1328(1):012001.

[8] Horányi M,Szalay J R,Wang X.The lunar dust environment:concerns for Moon-based astronomy[J].Philosophical Transactions of the Royal Society A:Mathematical,Physical and Engineering Sciences,2024,382(2271):20230075.

[9] Jin H,Li X,Wei G,et al.Properties of lunar dust and their migration on the Moon[J].Space:Science & Technology,2024,4:0142.

[10] O'Brien B J,Reasoner D L.Charged particle lunar environment experiment (CPLEE):preliminary science report[R].Houston:Department of Space Science,Rice University,1970.

[11] Gan H,Zhang X,Li X,et al.Experiments on the electrostatic transport of charged anorthite particles under electron beam irradiation[J].The Astrophysical Journal,2022,930(1):42.

[12] Tang H,Li X,Zhang S,et al.A lunar dust simulant:CLDS-i[J].Advances in Space Research,2017,59(4):1156-1160.

[13] 夏清，李梦谣，蔡明辉，等．月面环境月球车摩擦充放电风险研究[J]．物理学报，2025，74（21）：219401．
Xia Q,Li M Y,Cai M H,et al.Study on risk of triboelectric charging and discharging of lunar rovers in lunar surface environment[J].Acta Physica Sinica,2025,74(21):219401(in Chinese).

[14] Rittenhouse J J,Boeringa Z L,Han D,et al.Lunar dust mitigation for solar cells via ultrasonic vibrations[J].Acta Astronautica,2025,228:474-485.

[15] Barker D C,Olivas A,Farr B,et al.Adhesion of lunar simulant dust to materials under simulated lunar environment conditions[J].Acta Astronautica,2022,199:25-36.

[16] 张沛松，张海燕，孙彬文，等．光入射角及尘埃对太阳能电池月尘探测器的影响研究[J]．真空与低温，2023，29（4）：399-405．
Zhang P S,Zhang H Y,Sun B W,et al.Study of the effect of light incidence angle and dust particles on the lunar dust detector of solar cells[J].Vacuum and Cryogenics,2023,29(4):399-405(in Chinese).

[17] Taylor K,Elliott A,Wang X,et al.Photoelectric charging and lofting of dust particles on a conducting surface with external electric fields[J].Physics of Plasmas,2024,31(7):073703.

[18] Moot T,Patel J B,McAndrews G,et al.Temperature coefficients of perovskite photovoltaics for energy yield calculations[J].ACS Energy Letters,2021,6(5):2038-2047.

[19] Abbas M M,Tankosic D,Craven P D,et al.Lunar dust charging by photoelectric emissions[J].Planetary and Space Science,2007,55(7-8):953-965.

[20] Anderegg M,Feuerbacher B,Fitton B,et al.Secondary electron emission characteristics of lunar surface fines[C]//Proceedings of the Third Lunar Science Conference.Cambridge,MA:MIT Press,1972,3:2665-2669.

[21] Feng Y,Zhou Z,Wang R,et al.Modeling of electrostatic and contact interaction between low-velocity lunar dust and spacecraft[J].Space:Science & Technology,2024,4:0187.

[22] Runov A,Angelopoulos V,Khurana K,et al.Properties of quiet magnetotail plasma sheet at lunar distances[J].Journal of Geophysical Research:Space Physics,2023,128(11):e2023JA031908.

[23] Gan H,Zhao C,Wei G,et al.Numerical simulation of the lunar polar environment:implications for rover exploration challenge[J].Aerospace,2023,10(7):598.

[24] Sjögren A,Eriksson A I,Cully C M.Simulation of spacecraft sheath impact on Langmuir probe measurements[C]//Proceedings of the 11th Spacecraft Charging Technology Conference.NASA,2010.

[25] Sarrailh P,Hess S,Mateo Velez J C,et al.SPIS-DUST detailed design document and software user manual v2:RT 1/21505 DESP[R].Toulouse:ONERA,2016.

[26] Popel S I,Kopnin S I,Golub' A P,et al.Dusty plasma at the surface of the Moon[J].Solar System Research,2013,47(6):419-429.