



月尘被动防护技术的最新研究进展

穆萌 张海燕 王晓 李存惠 张小平 王明智 朱应敏 高立波 赵呈选 陆洋 王卫东

State-of-the-art passive protection technologies of lunar dust

Mu Meng Zhang Hai-Yan Wang Xiao Li Cun-Hui Zhang Xiao-Ping Wang Ming-Zhi Zhu Ying-Min
Gao Li-Bo Zhao Cheng-Xuan Lu Yang Wang Wei-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 060501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201517

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201517>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

月表尘埃颗粒带电的机理及应用研究

Charging mechanism and application of lunar dust grains

物理学报. 2018, 67(13): 135201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180047>

荧光寿命显微成像技术及其应用的最新研究进展

Recent progress of fluorescence lifetime imaging microscopy technology and its application

物理学报. 2018, 67(17): 178701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180320>

浅海被动水下偏振成像探测方法

Passive underwater polarization imaging detection method in neritic area

物理学报. 2018, 67(18): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180692>

二维纳米材料及其衍生物在激光防护领域中的应用

Two-dimensional nanomaterials and their derivatives for laser protection

物理学报. 2020, 69(18): 184201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200313>

一种基于单水听器的浅海水下声源被动测距方法

A passive range method of underwater source based on single hydrophone

物理学报. 2017, 66(18): 184301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.184301>

室温磁制冷技术的研究进展

Progress of room temperature magnetic refrigeration technology

物理学报. 2017, 66(11): 110701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.110701>

综述

月尘被动防护技术的最新研究进展*

穆萌¹⁾ 张海燕¹⁾²⁾ 王晓¹⁾ 李存惠^{2)†} 张小平³⁾ 王明智¹⁾⁴⁾
朱应敏¹⁾ 高立波¹⁾⁴⁾ 赵呈选²⁾ 陆洋⁴⁾⁵⁾ 王卫东^{1)4)‡}

1) (西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071)

2) (兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

3) (澳门科技大学, 月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078)

4) (港城大-西电微纳制造联合实验室, 深圳 518057)

5) (香港城市大学机械工程系, 香港 999077)

(2020年9月11日收到; 2020年11月9日收到修改稿)

月球的特殊环境使月尘具有导电等特殊的性质, 极易黏附在探测仪器上造成设备的失效, 给探月工程带来极大的危害, 因此国内外众多研究组对月尘危害展开深入研究. 本文从黏附机理、防护方法和实验测试几方面对月尘的被动防护技术进行综述和展望. 首先, 阐述了月尘对探测设备造成的不利影响及影响因素, 进而具体论述月尘黏附的机理, 详细介绍造成黏附的两种主要作用力的理论基础. 然后, 针对不同作用机理系统阐述了降低月尘颗粒黏附力的主要方法, 对月尘被动防护技术的最新进展进行了总结. 最后, 结合防护方式的不同, 总结了测试月尘黏附力的方法, 从而为有效实现探测设备表面月尘防护奠定基础.

关键词: 月尘, 被动防护, 黏附机理, 测试方法**PACS:** 05.70.Np, 95.55.Pe, 81.65.-b**DOI:** 10.7498/aps.70.20201517

1 前言

自1969年阿波罗(Apollo)十一号载人飞船成功登月以来, 世界各国对月球的科学研究便成为航天活动深空探测的趋势和热点. 目前, 欧洲空间局与阿丽亚娜集团合作研讨月球采矿技能, 计划于2025年开始勘探提取月球表面风化土; 美国航天局(NASA)将发射猎户座飞船和SLS重型运载火箭造访月球; 2019年中国则成功实现“嫦娥四号”在月背软着陆, 用于开展月背低频射电天文观测与研究, 并进一步研究月背巡视区形貌及月表浅层

结构, 在人类探月史上又迈出了一大步^[1]. 截至2020年, 中国已成功完成五次探测任务, 目前正在实施探月工程三期“嫦娥五号”任务、“嫦娥六号”任务来实现月面采样返回, 并计划建设月球科研站, 进而对月面开展探测与其他技术试验^[2].

然而, 月球空间中各种不可预知的因素给深空探测带来了极大的考验, 其中月尘是探月工程中最大的危害, 给登月带来了许多困难^[3]. 研究表明, 月尘主要由晶质颗粒与较大的火成岩碎块、玻璃质碎片(包括大量的玻璃球粒)及微量金属颗粒组成, 平均直径为40—130 μm , 在月球的低重力和近乎真空的环境中, 这些细小微粒很容易被自然或人为

* 真空技术与物理重点实验室基金(批准号: HTKJ2019KL510007)、国家自然科学基金(批准号: 42004157, 12075108)和陕西省重点研发计划(批准号: 2020GY-252)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: licunhui@spacechina.com

‡ 通信作者. E-mail: wangwd@mail.xidian.edu.cn

活动扰动而悬浮在空中. Apollo 报告中指出当辐射器表面 11% 被月尘覆盖时, 其表面电磁波吸收率增加近一倍^[4]; 另外, 由于大多数月尘颗粒呈不规则形状, 容易造成机械损伤, 降低探测器使用寿命, 严重的会造成机械结构卡死, 使月球车紧急终止^[5]; 更重要的是, 月尘会造成宇航员的视觉模糊与行动困难, 一旦宇航服产生破损后进入体内, 硅酸盐将与胃中的水结合生成有害的化学物质^[6], 图 1 所示为 Apollo 任务中被月尘污染的宇航服^[7]. Sun 等^[8]将月球土壤模拟物与 PM2.5 作对比, 检测大鼠术后的病理变化等指标, 发现月球土壤模拟物毒性强于 PM2.5, 会引起肺损伤和炎性疾病. 因此, 减少月尘在探测过程中的危害是月球探测任务中必须解决的任务.

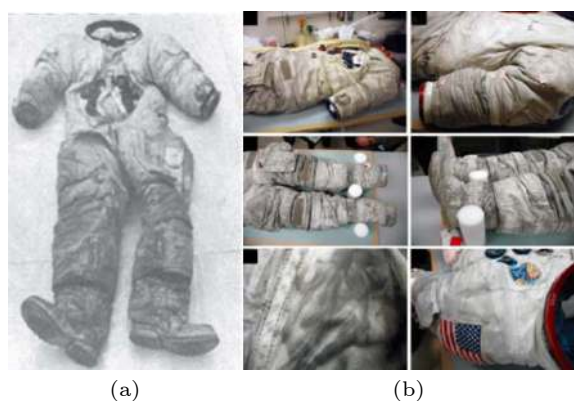


图 1 Apollo 任务中被月尘污染的宇航服 (a) 宇航服整体污染情况; (b) 宇航服局部污染情况^[7]

Fig. 1. Spacesuit contaminated by lunar dust during Apollo mission: (a) Overall pollution of spacesuit; (b) local contamination of spacesuit^[7].

目前, 月尘的防护方式主要分为主动防护与被动防护两种. 主动防护主要是清洁被保护表面或利用外力防止灰尘在器件表面积累, 常用的方法有机械式和静电法. 区别于主动防护技术, 被动技术不借助外力来减小月尘在仪器或设备表面上的吸附, 主要是利用表面改性来减小灰尘与被保护表面之间的黏附, 因此在使用前通常对仪器或设备表面进行物理或化学预处理, 通过降低月尘与仪器或设备表面的相互作用力实现防护的目的. 主动防护技术虽然除尘效率高, 但往往需要更多的能源和复杂的结构, 导致可靠性降低, 并且容易对设备造成损伤. 对某些不易采用主动防护技术的仪器或设备来说, 月尘的被动防护技术是一种成本低、简单易行的方法, 通过对仪器或设备的表面进行被动防护, 可提

高航天器关键部件对复杂月球环境的适应性并延长它们的使用寿命.

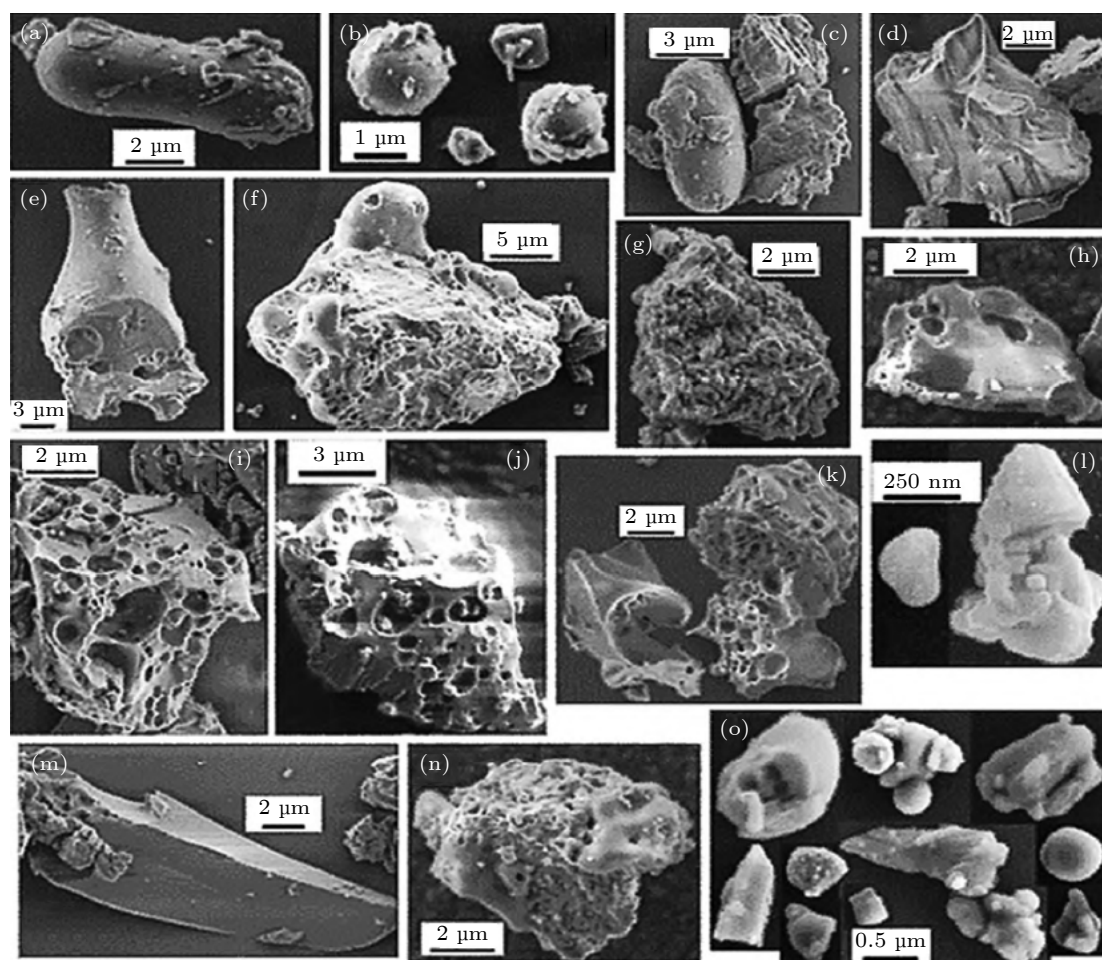
本文主要对近十年来国内外在月尘被动防护方面的研究进展进行回顾和总结, 内容涉及月尘对探测设备的危害、吸附机制和防护技术进展等方面. 首先, 从月尘对探测设备造成的不利影响出发, 阐述尘埃的被动防护问题. 然后, 从评估尘埃防护有效性的角度探讨尘埃颗粒造成黏附的原因, 分析造成月尘黏附的短程范德瓦耳斯力与长程静电力的作用机制. 进而, 总结月尘被动防护技术的最新研究进展. 最后, 对现有防尘技术及有效性进行总结与未来展望.

2 月尘黏附机理

月球环境中尘埃的不断沉积对深空探测产生巨大的威胁, 研究尘埃的沉积机制, 进而确定月尘与材料间的相互作用力, 对克服尘埃黏附特性, 确定有效的防护机制非常重要. Walton^[9]从月尘的物理特性入手, 研究了月尘在月表环境中受到的多种作用力, 发现月尘黏附在表面后, 主要受到与表面能相关的黏附力, 如范德瓦耳斯力和静电力的影响. Berkebile 等^[10]研究了真空环境中火山玻璃与航天器材料的黏附力, 提出在超高真空环境如月球、火星等小行星中造成严重的灰尘黏附主要受到静电力和表面能两个物理机制的影响.

2.1 月尘粒子的运动与分布

月球与地球环境之间有很大的区别, 月球重力加速度是地球重力加速度的 $1/6$, 近月空间内, 大气密度只有地球上的 $1/10^{12}$, 整个月球表面由一层厚厚的流星撞击产生的风化层覆盖着, 这些风化层产生了大量微米、亚微米级的粉尘颗粒. 根据 NASA 科学家对 Apollo 月球样品的分析, 月壤中绝大多数颗粒直径在 $30\ \mu\text{m}$ — $1\ \text{mm}$ 之间, 其中颗粒粒径小于 $2\ \mu\text{m}$ 的月尘占月壤总重量的 90% 以上^[11], 这些颗粒表面分布有不规则的尖锐棱角, 如图 2 所示^[12], 这些矿物质颗粒具有较高的表面能, 在月球的真空环境下能达到 $4500\ \text{mJ}/\text{m}^2$. 月球环境中还充满着如太阳风、太阳宇宙射线和系外高能宇宙射线等辐射^[13], 且不断受到流星体和微流星体的冲击, 撞击速度大约为 2.4 — $72\ \text{km}/\text{s}$ ^[14], 月球颗粒从被撞击后的陨石坑中升起并散布在四周, 还有可能形成喷射粒子链继续撞击, 产生二次粒子,

图 2 不同形貌的 20 μm 月尘颗粒扫描电子显微镜 (SEM) 暗场像^[12]Fig. 2. Various surface and shape features of 20 μm lunar dust particles via scanning electron microscope (SEM)^[12].

这些二次粒子可进一步使局部辐射环境复杂化. 由于长期暴露在这些辐射产生的电场中, 具有较高的比表面积与绝缘性的尘埃颗粒很容易携带静电, 所产生的静电力克服了大多数粒子在行星尘埃环境中控制其运动的引力和表面力^[15], 容易漂浮在空间中, 且具有较强的黏结性. 在月球的明暗界限交替线或附近, 由于太阳紫外辐射对月尘的充电影响, 会使月尘周期性地升起, 离开月面近半米高. 此外, 月尘粒径较小、质量较轻, 当在静电力的作用下黏附在探测设备表面时, 会受到很强的范德瓦耳斯力, 黏附力变强, 颗粒很难从设备表面脱离, 进而造成对设备的危害.

2.2 月尘与材料间的作用力

2.2.1 范德瓦耳斯力

相邻中性原子或分子相互感应而产生的瞬时极性所造成的粒子间的一种弱作用力即为范德瓦耳斯力. 微米、亚微米量级的颗粒与表面接触的现

象与宏观尺度完全不同, 由于此时两者之间的距离很小, 分子和原子之间的电子云会因为振动而极化, 范德瓦耳斯力起主要作用, 因此会出现表面挤压、变形和粘连等现象. Rima 等^[16]研究了灰尘积累中的四种基本力: 毛细力、范德瓦耳斯力、静电力和重力, 结果表明, 在相对湿度较高时, 毛细力主要影响黏附, 而在干燥环境下, 主要受范德瓦耳斯力的影响, 而且粗糙度显著增加的表面大幅度减小了粒子与表面之间的毛细力. 由此推知, 粒子与固体表面之间的吸附作用主要由范德瓦耳斯力组成.

光滑球形颗粒与平面之间的范德瓦耳斯力一般计算表达式为

$$F = AR/(6D^2), \quad (1)$$

式中 R 为颗粒半径, D 为球形颗粒与接触表面之间的距离, 且 $D \ll R$; A 为 Hamaker 常数, 可用表面能估算大小,

$$A = 12\pi D_0^0 \Delta\gamma, \quad (2)$$

其中 D_0 大约为 0.2 nm, $\Delta\gamma = \sqrt{\gamma_p\gamma_s}$, γ_p 和 γ_s 分别是粒子和表面的表面自由能.

对于宏观接触体, Dzyaloshinskii 等^[17] 基于多体理论的量子场方法, 在只考虑理想光滑接触的情况下, 使用长波长近似 (DLP 方法) 计算相互的吸引力. 在微观方法中, 范德瓦耳斯力被认为是组成物体的原子或分子相互作用的能量. 众多研究人员针对范德瓦耳斯力的量化提出不同的方法, Hamed 等^[18] 通过研究粒子碰撞参数对应的范德瓦耳斯截止距离, 力求找到粒子碰撞表面反弹和黏附的标准, 使用离散元方法发现截止距离对颗粒临界速度的影响程度取决于阻尼比和粒径大小, 当阻尼比接近 1 时临界速度接近趋向无穷. 此外, 随着附着能的增加, 截止时间和粒子速度与碰撞持续时间成反比. Avijit 等^[19] 利用聚苯乙烯颗粒靠近较大的二氧化硅颗粒表面, 测量大约 80 nm 的接触范围, 得到具有更大信噪比的范德瓦耳斯力, 并在实验中使用卡方拟合来量化范德瓦耳斯力的 Hamaker 常数.

实际接触时颗粒和表面不同的粗糙度和力学特性都会影响接触间距, 从而影响范德瓦耳斯力的大小. 由于在较大距离上, 粒子分布主要受范德瓦耳斯色散力的影响, Valmacco 等^[20] 考虑忽略双层力的影响, 用原子力显微镜 (AFM) 测量盐水溶液中二氧化硅粒子对之间的粒子分布, 通过热处理控制颗粒表面粗糙度. 结果表明, 随着温度的增加, Hamaker 常数从 7×10^{-23} J 变为 2.4×10^{-21} J, 色散力增强, 在此过程中, 颗粒纳米尺度的表面粗糙度变小, 证明粗糙度的均方根与 Hamaker 常数负相关. 因此在考虑减小范德瓦耳斯力时应减小其接触物质表面能或改变接触面粗糙度, 在选择尘埃的防护方式时应该充分考虑这些因素.

2.2.2 静电力

由于月球表面复杂的等离子环境, 月球表面会形成一个稳定的局部电场, 此时月壤颗粒会因反复充放电而带电, 带电后尘埃颗粒的运行受到洛伦兹力的影响, 但目前对于月球环境中颗粒带电的特性认识还不够充分.

通常意义上, 粒子间的静电力通常是用库仑定律对力的估计, 或者是基于高斯定律计算电场. 库仑力通过计算单个粒子的静电力进而叠加求和得到, 高斯定律是通过计算电荷密度的方法计算静电力的, 但需要计算网格上电场的离散化, 实际处理

时分辨率难以实现. 针对两种算法的量化难度, Holger 和 Miltiadi^[21] 提出一种基于 P3M 算法的混合方案, 将两种算法结合, 使求解大量粒子之间的库仑力计算效率变高, 在相同精度的情况下计算成本减少 80%, 但仅限于等极性粒子. 对于设备表面与带电月尘颗粒的接触, 其静电力大小的计算式为

$$F = -\alpha \frac{Q^2}{16\pi\epsilon_0 R^2}, \quad (3)$$

其中 Q 为均匀分布在颗粒表面的电荷, R 为颗粒半径, ϵ_0 为真空介电常数, α 为依赖于介电粒子极化率的修正因子.

基于这些量化方法, 其他研究人员提出减小静电力的方法, 以减少在某些情况下静电力对实际系统产生的危害. Javid 等^[22] 利用一种可调电介质层掺杂高极化材料来提高静电/微结构胶黏剂中的静电附着力, 实验结果表明, 增加电介质的相对介电常数可以增加电黏附力, 且微观结构本身可以增加黏胶黏结力. Wang 等^[23] 使用粒子图像测速仪研究了静电袋式除尘器中粒子的运动, 同时采用电低压冲击器对沉积电荷量进行间接测量. 研究表明, 带电粒子的运动受到粒子间静电斥力和带电尘埃层的共同作用, 且粒子运动速度与颗粒带电量的大小正相关. Zhao 等^[24] 研究了颗粒表面粗糙度对材料静电力产生的影响, 在研究中考考虑颗粒接触面积、颗粒形状、相对湿度等多重因素的影响, 发现接触面积与静电强度正相关, 接触湿度与静电强度负相关, 同时, 静电力的大小随颗粒粗糙度的增大而先增大后减小, 而与颗粒物质无关. Zhu 等^[25] 发现添加少量的抗静电粉, 可以减少静电力的产生, 进而改变颗粒与接触壁的相互作用性能.

3 被动防护技术

深空探测中被动防尘方式的有效性, 很大程度上取决于设备的防尘机理, 只有单一的防尘机理也许并不能很好地达到降尘效果, 为了有效、长期地控制效果, 必须明确月尘的防护机制. 被动防护最简单的方式有设置防护罩、防尘遮板、表面改性等. 在光学系统中, 常使用设置防护罩的方法^[26], 防护罩可以在不工作时盖住光学镜面, 工作时自动打开, 这样可以避免不工作时光学镜头被灰尘黏附, 但是使系统变得复杂, 容易产生新的问题. 安装在

月球车上的挡尘板, 当月球车行走时, 挡风板会阻隔一部分月尘, 改变月尘的运动方向, 有效地减小月尘影响的范围. 表面改性的方法则是借助离子束等技术方法, 改变材料表面状态, 从而获得一些新材料或使改性后的材料的结构与性质得到更好的提高.

3.1 减小范德瓦耳斯力的防护方法

当两种固体之间接触时, 主要取决于范德瓦耳斯力的作用大小, 这种由诱导偶极的电子交互作用引起的色散力会发生变化, 进而增强接触物体间的作用力. 为了减小范德瓦耳斯力, 在选择表面时考虑降低材料表面能或者将材料处理为具有一定粗糙度的表面 (如图 3 所示^[27]).

3.1.1 低自由能表面

表面自由能作为材料表面状态的特征因子, 指的是物质表面积增大时, 系统自由能相应增加, 这是由于表层原子朝向外面的键能没有得到补偿, 使得表面质点比体内质点具有额外的势能, 这是材料自身的特点, 对材料表面的多种物理化学性质和界

面反应如吸附、润湿和结合等现象有很大的影响. 由于固体内分子排列紧密且在微观界面分布不均匀, 没有可靠的方法直接测定固体的表面能, 因此对于固体表面自由能的计算, 一般是通过测量某种液体和固体表面之间的接触角, 然后借助一定的关系式来表征的. 薛伟等^[28]使用 Owens 二液法计算了不同表面的表面能, 并通过施加分子膜等手段使表面能从 70 mJ/m^2 降为 25 mJ/m^2 , 此时构件表面的黏附力从 784.7 N/m^2 减小到 46 N/m^2 , 充分证明微观黏附力和表面能总体存在较好的对应性.

针对固体尘埃的防护, 通常利用低表面能涂层涂覆的方法达到减摩、抗黏附的目的. 颜晨曦等^[29]使用水汽固化的方式制备全氢聚硅氮烷 (PHPS) 涂层, 在制备过程中控制固化温度与时间, 发现涂层接触角最大时疏水性最好, 且随着固化时 PHPS 涂层中化学键的变化, 极性组分增加, 表面能增大, 涂层具有优异的附着性能. 另外, Zhan 等^[30]将凝结液滴的自跳效应用于干燥环境下的表面除尘, 由此制备了一种透光性与机械性能良好的涂层, 用于玻璃表面的改性 (如图 4 所示), 处理后的玻璃既具

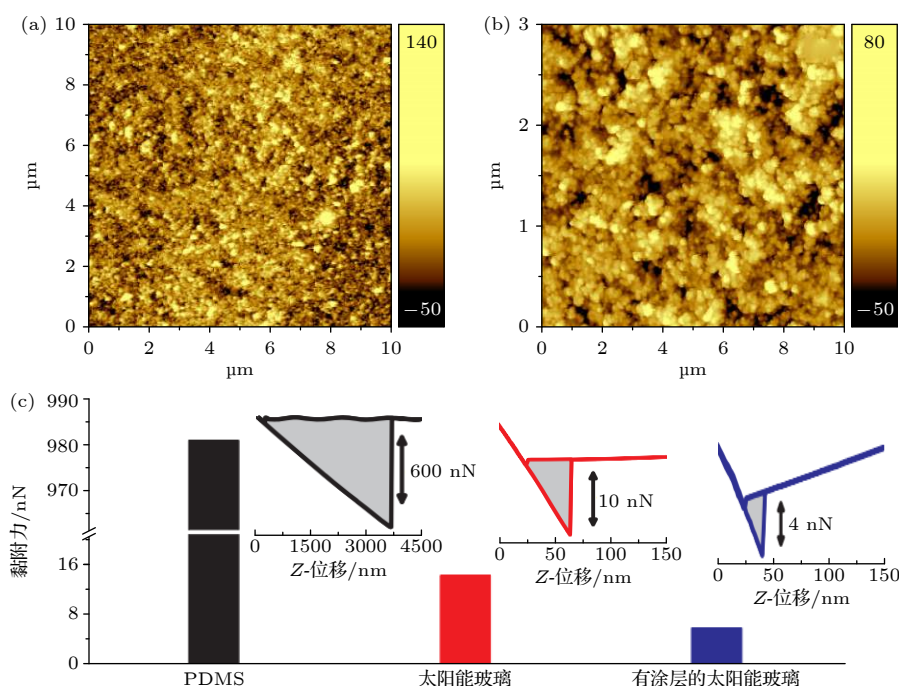


图 3 不同方式处理后的玻璃表面的黏附力 (a), (b) 太阳能玻璃表面上的粒子组件的 AFM 图像; (c) 用 PDMS 预处理的太阳能玻璃、太阳能玻璃、涂有纳米结构粒子组件的太阳能玻璃上的黏附力值; 在 10 个不同的区域进行测量, 值的误差小于 10%, 灰色区域对应于将二氧化硅球从表面分离所需的能量^[27]

Fig. 3. Adhesion force of solar glass surface treated in different ways: (a), (b) AFM images of the particle assemblies on the solar glass surface; (c) adhesion force values on the surface of solar glass pretreated with PDMS, solar glass, and solar glass coated with nanostructured particle assemblies. Measurements were performed on ten different areas. The error in the values is less than 10%. The grey areas correspond to the energy required to separate a silica sphere from the surface^[27].

有良好的疏水性与高光透射率,且凝结水跳跃性能优异,通过表面的低黏附性与冷凝液的跳跃而自动去除较小的颗粒.因此在深空探测中为减小灰尘对探测设备的黏附性,可在考虑材料表面能的同时考虑使用特殊涂层对表面的改性.

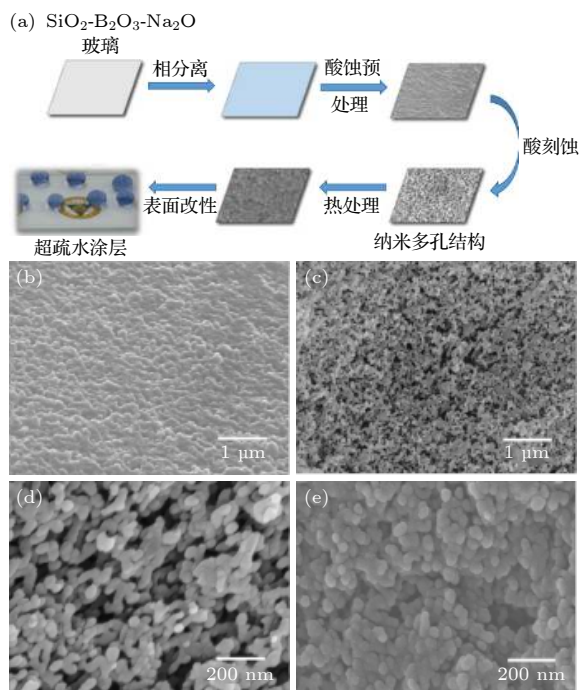


图4 纳米结构涂层的制备及表面特征 (a) 纳米结构涂层的制备; (b)–(e) 在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行 2 h 相分离处理后的涂层 SEM 图像, 其中 (b) 酸预处理后的表面图像; (c) 酸蚀刻处理后的表面低倍率图像和 (d) 高倍率图像; (e) 热处理后的涂层的 SEM 图像^[30]

Fig. 4. Preparation and surface characteristics of nanostructured coatings. (a) Preparation of the nanostructured coatings. (b)–(e) SEM images of coatings after phase separation treatment at $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 2 h : (b) Image of the surface after acid pretreatment; (c) low-magnification and (d) high-magnification images of the surface after acid etching treatment; (e) SEM image of the coating after heat treatment^[30].

3.1.2 改变表面粗糙度

表面的粗糙程度与表面黏附尘埃有很大的关系,当尘埃粒径与表面粗糙度相差很大时,附着与黏附没有太大影响,当粒子很大时,几乎所有粒子被去除,当粒子很小时,所有粒子全部黏附在表面. Amiriashar 等^[31]研究了表面初始粗糙度和超疏水性的综合影响,使用 17-4PH 不锈钢作为基板,应用锌电镀层制备了具有不同形貌的粗糙表面,并在涂层前 (图 5(a)–(c)) 和涂层后 (图 5(d)–(f)) 对不同表面进行 SEM 成像,图 5(e) 为电沉积后形

成的纳米结构表面,图 5(g)–(h) 为高倍的 SEM 显微图,发现在初始表面粗糙度为 $(4.62 \pm 0.15)\text{ }\mu\text{m}$ 时表面均匀性最好,此时涂层附着力最佳.在月球表面,尘埃颗粒粒径很小,粒子与接触面的大小处于纳米尺度,此时粒子与表面接触的总附着力随表面粗糙度的不同而不同,当表面粗糙度小于 10 nm 时,粒子与表面之间的非接触力即范德瓦耳斯力起主要作用,附着力随纳米粗糙度的减小而增大,因此可考虑改变表面粗糙度的方法来减小固体尘埃在设备表面的黏附. Peillon 等^[32]使用纳米级、亚微米级、微微级三种不同尺度粗糙度的基板测量黏附力,发现与纳米级粗糙度光滑表面相比,粗糙度均方根为 712 nm 的微粒子的黏附力下降了两个数量级.另外在微米尺度,黏附力与粒径的相关性有一个次于表面粗糙度的影响.因此,在考虑探测设备的材料选取时,可以对表面材料进行一定的处理,将其处理成有一定粗糙度的表面对减少范德瓦耳斯力的大小,进而防止尘埃的附着有很重要的意义.

Moutinho 等^[33]使用抛光处理玻璃表面,并在相对湿度为 0 的稳定环境中测定 AFM 针尖和 SiO_2 球体颗粒与表面接触的范德瓦耳斯力,结果如图 6 所示.可以看出,在粗糙度变化时附着力随粗糙度的增大而减小,且颗粒尺寸影响在较小粗糙度时更明显,此时颗粒越大,有效接触面积越大,从而使黏附力增大.在生物学方面, Wu 等^[34]通过电抛光法制备了不同表面粗糙度的不锈钢样品,纳米级的表面粗糙度在抑制细菌黏附和形成微菌落方面发挥重要作用.

3.1.3 表面的制备

有研究表明,对于不同的表面处理方法,材料表面自由能会发生变化,进而引起结合功的变化,自由能越高结合功越高,材料的吸附效果越优越.低表面能材料的表面制作在技术上已经相当成熟,常见的低表面能材料包括烷烃类化合物、有机硅化合物、含氟化合物和其他化合物等.另外,构造具有一定粗糙度的表面可以降低表面附着物的黏附,构建粗糙表面时通常需要事先对表面进行预处理,表面预处理的主要目的是去除表面的所有污染物和薄弱层,获得较大的表面面积,并确保触发机械、物理和化学方面与黏附有关的键合机制.很多研究致力于开发合适的表面预处理方法,目的在于

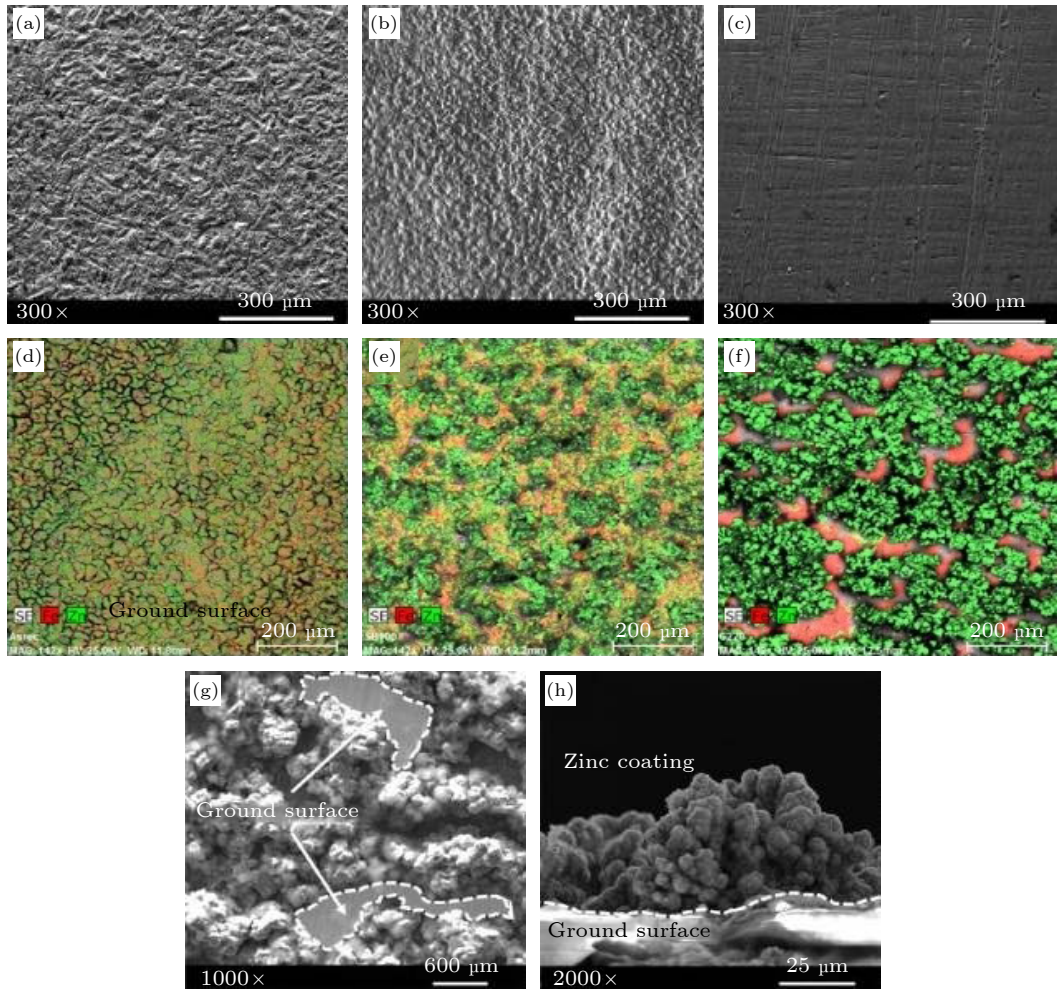


图 5 (a) 接收样品、(b) 喷砂样品和 (c) 研磨样品表面 SEM 图像; (d), (e), (f) EDX 叠加在接收、喷砂、研磨样品的 SEM 图像; (g) 研磨样品 (f) 的高倍扫描电镜显微图; (h) 涂 Zn 涂层的研磨样品截面图^[31]

Fig. 5. SEM micrographs taken from the surface of (a) as-received, (b) sand-blasted, and (c) ground samples. The EDX chemical concentration maps superimposed on the SEM images of the coated (d) as-received, (e) sand-blasted, and (f) ground surfaces. (g) Higher magnification SEM micrograph of the ground surface shown in (f). (h) SEM image showing the applied Zn coating cross-sectional view on the ground surface^[31].

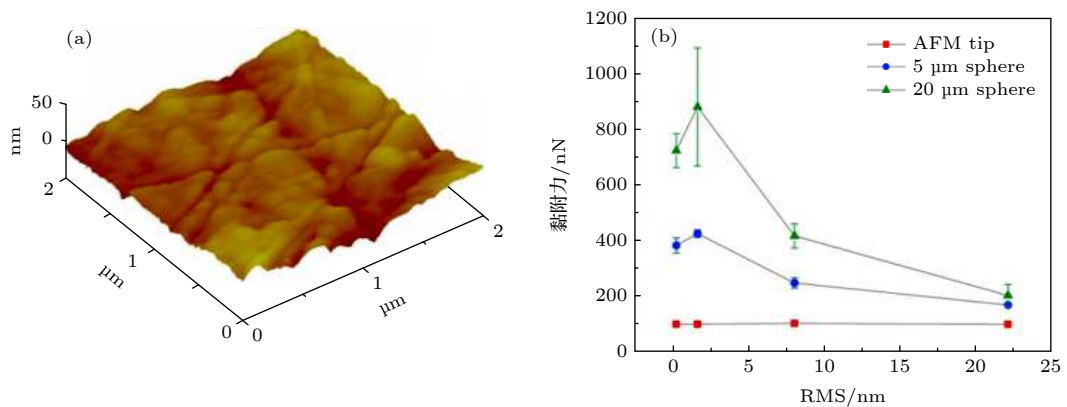


图 6 表面粗糙度值不同时 AFM 针尖和 SiO₂ 球的附着力^[33]

Fig. 6. Adhesion of AFM tip and SiO₂ ball with different surface roughness values^[33].

制备具有微纳结构及低表面能的表面。主流的有等离子刻蚀法、溶胶-凝胶法、电化学法、相分离法等。

图 7 为等离子刻蚀原理图, 主要是利用等离子体中的自由基粒子对材料进行去除。Li 等^[35]将常压等

离子加工技术用于熔融石英光学加工,并在实验中发现等离子体处理的表面粗糙度相对于原始表面 $2.2 \text{ nm } R_q$ 增大至 $38 \text{ nm } R_q$, 另外表面出现的透明区与不透明区是因为表面过于粗糙导致可见光漫反射, 两个区域微观形貌的主要差异是蚀刻细胞微观结构的大小和密度造成的. Ji 等^[36] 采用 $50 \text{ nm } \text{SiO}_2$ 颗粒溶胶与 MgF 溶胶混合, 制备出具有自清洁和抗磨损的抗反射膜, 图 8 所示为制得的薄膜涂附在玻璃表面上的示意图.

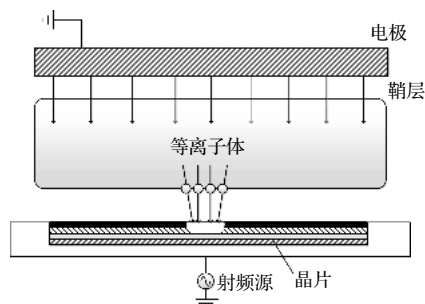


图 7 电容耦合放电等离子体中的刻蚀示意图

Fig. 7. Schematic diagram of etching in capacitively coupled discharge plasma.

月球车表面应使用机械强度高、重量轻且受空间环境效应影响小的材料, 常选用铝、碳/聚酰亚胺、高强度陶瓷纤维、 β 布等, 其中聚酰亚胺自身机械强度较高, 具有良好的介电性、高温稳定性, 抗辐射性能好等优点而被选择. Gotlib-Vainstein 等^[37] 使用液相沉积的方法在 Kapton 基材上沉积了 SnO_2 , 结果表明该涂层在很大程度上防止了原子氧对表面的侵蚀, 且减少了静电放电的现象. Du 等^[38] 使用紫外激光器对聚酰亚胺进行表面改性, 使用高压氩气除去表面激光变形时产生的碎屑. 结果表明使用低功率强度和高脉冲重叠的激光处理

的情况下, 可以实现激光织构聚酰亚胺表面的超疏水性, 体现了表面具有低表面能的性质, 且在保持脉冲重叠不变的情况下, 激光功率强度越高, 水接触角越大, 如图 9 所示.

通过不同的方法制作特殊涂层, 或使表面具有多级粗糙结构, 并将其应用于设备表面, 可以实现对尘土的有效防护. Critchlow 等^[39] 和 van Dam 等^[40] 使用不同方法对样品进行处理, 结合微粗糙结构等使样品接触面增加, 进而附着力增强. Chen 等^[41] 使用聚乙烯亚胺 (PEI) 交联戊二醛 (GA) 为改性剂, 对经过碱溶液处理的聚酰亚胺薄膜进行表面改性, 得到一种具有金属化的聚酰亚胺薄膜, 这种薄膜具有与金属铜层机械锁接的表面粗糙度 (图 10), 且电阻率较低, 可以黏附在表面上不易落下. Quan 和 Zhang^[42] 在太阳能电池上覆盖高透光疏水性涂层, 证明了低表面能和涂层粗糙结构结合, 可以降低颗粒与表面之间的黏附力, 与未经处理的玻璃表面相比, 灰尘通过机械振动更容易被除去.

Chi 等^[43] 将纳米有机二氧化硅黏合剂与二氧化硅纳米粒子结合, 制备具有高机械强度和自清洁的反射涂层, 该涂层具有透射率高达 99.9% 的透射峰, 具有 161° 的水接触角和 4.2 GPa 的硬度, 适合在恶劣条件中广泛使用. 另外有研究组^[44] 利用可伸缩制造工序的玻璃基板制造自清洁疏水纳米涂层 (SCHN), 制作涂层时, 先使用金刚石微纳米颗粒磨料对玻璃基底进行处理, 使之出现微观粗糙面, 再用三氯硅烷蒸汽 (TCPFOS) 进行沉积. 处理后的涂层黏附性降低, 且具有一定的耐盐、耐酸、耐碱、耐磨性及适当的热分解温度, 可以应用于太阳能电池板的自清洁, 还可用于具有金属

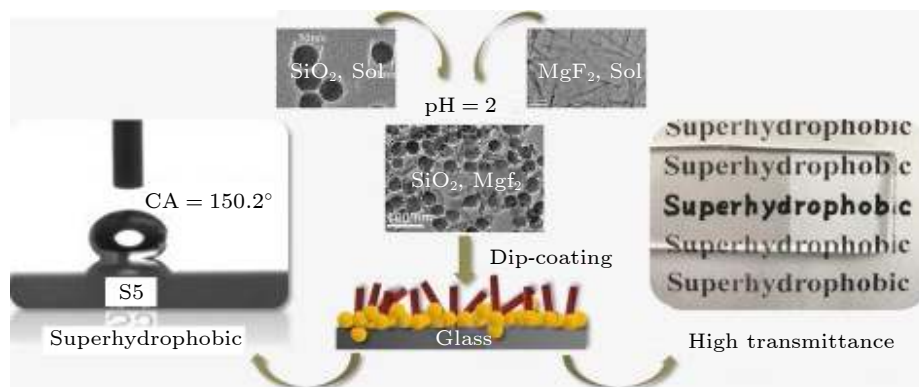


图 8 具有自清洁和抗磨损的抗反射膜^[36]

Fig. 8. Anti-reflective film with self-cleaning and anti-wear^[36].

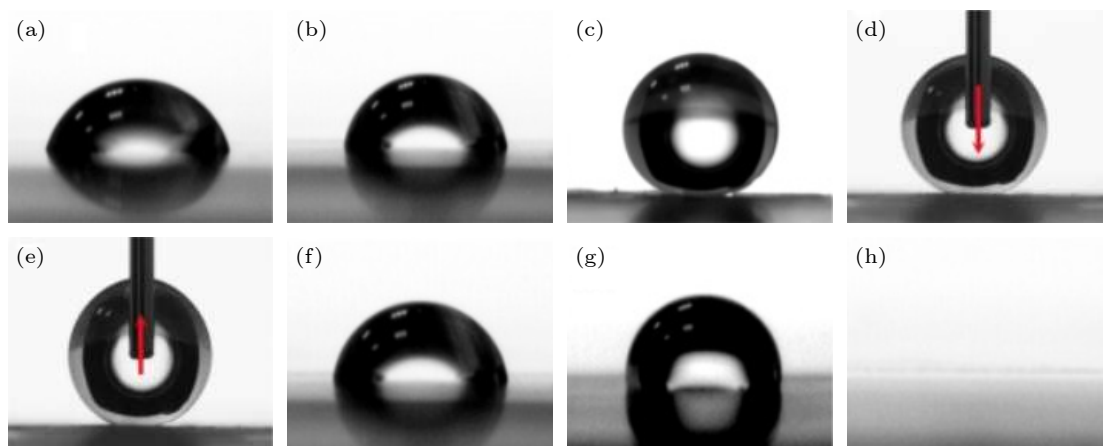


图 9 不同激光功率强度及强度处理的聚酰亚胺表面的水接触角^[38] (a) $7.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, 40%; (b) $7.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, 60%; (c) $7.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, 90%; (d) 前进角 $7.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, 90%; (e) 滞后角 $7.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, 90%; (f) $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, -40%; (g) $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 0%; (h) $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 40%

Fig. 9. Water contact angle of polyimide surface treated with different laser power intensities and overlaps: (a) $7.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ and 40%; (b) $7.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ and 60%; (c) $7.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ and 90%; (d) advancing angle at $7.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ and 90%; (e) receding angle at $7.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ and 90%; (f) $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ and -40%; (g) $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ and 0%; (h) $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ and 40%^[38].

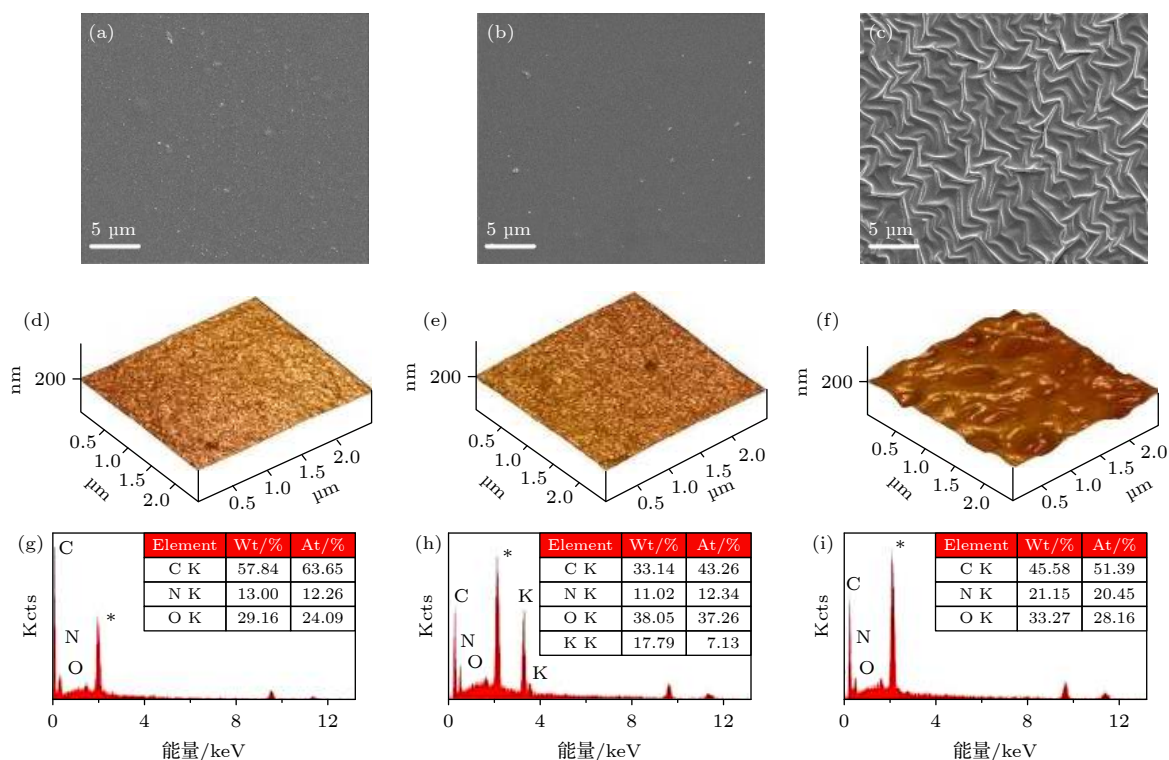


图 10 聚酰亚胺 (PI) 薄膜表面形貌图^[41] (a), (d), (g) 原始 PI 薄膜的 SEM, AFM, EDS 图像; (b), (e), (h) 使用 KOH 预处理后的 PI 薄膜的 SEM, AFM, EDS 图像; (c), (f), (i) 使用 GA-PEI 进一步处理后的 PI 薄膜的 SEM, AFM, EDS 图像

Fig. 10. Surface topography of polyimide film^[41]: SEM images, AFM images and EDS spectra of (a), (d), (g) original PI film, (b), (e), (h) pre-modified PI film treated with KOH and (c), (f), (i) PI film further treated with GA-PEI.

结构的腐蚀保护, 并具有防污所需的性能. 因此, 在设备表面涂敷一层具有自洁效应的纳米尺度表面不仅可以减小灰尘的沉积速率, 达到防尘的效果, 还有更好的温度缓解. 使用改性后的材料作为

探测设备表面涂层, 使设备不与行星表面直接接触, 且由于低表面能材料对灰尘的黏附作用小, 可以减小尘埃对设备的附着力, 进而减小尘埃对设备的危害.

3.2 降低静电力的防护方法

月球与火星的探测任务中,部分设备本身已经具有很好的防尘效果,但是由于自身工作的需要,周围会产生一定的电场,造成对月尘的吸附,这种情况就需要减小静电力以降低对颗粒的黏附作用,保证设备的工作效率.一方面可以在设备表面覆盖一层导电膜增强材料表面导电性,中和月尘颗粒所带电荷,Cui和Zheng^[45]为提高光学性能,使用电沉积方法在氧化铟锡(ITO)镀膜玻璃表面沉积2 nm的TiO₂正电荷纳米粒子,这种纳米粒子可以吸附带负电的月尘颗粒,另外由于TiO₂纳米颗粒填充到了ITO层的空隙中,ITO层变得光滑(如图11所示),相比未处理表面,TiO₂/ITO镀膜玻璃基材透光率从75%—87%提高至85%左右,这种方法可以用于探测设备中的相机表面,既达到了防尘的效果又保证了良好的透光性.Choi等^[46]研究了具有低压降特性的铝涂层导电纤维过滤器,可以有效地利用静电捕获微纳颗粒污染物.该过滤器表面涂覆有一层铝前驱体油墨,经过测试后显示该过滤器表面具有较低的薄层电阻,且机械耐久性良好.通过带电粒子与纤维之间的库仑力,可以捕获尺寸为30—400 nm的超细颗粒,除尘率极高.这种在表面涂覆纤维的方法可以显著提高带电粒子的去除效率,制备工艺简单且可扩展,有助于降低成本,用于对带电颗粒的防护.

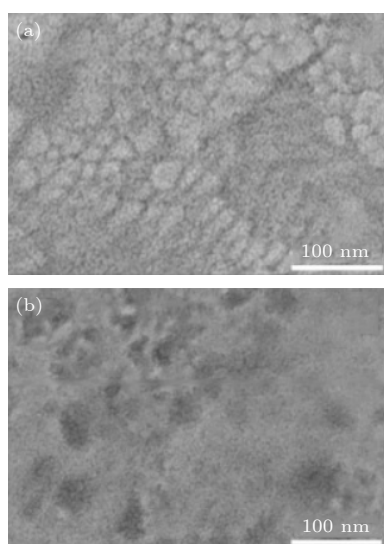


图 11 电沉积法制备的 ITO (a) 和 TiO₂/ITO (b) 的涂层玻璃基底的 FE-SEM 图像^[45]

Fig. 11. FE-SEM images of ITO (a) and TiO₂/ITO (b) coated glass substrates prepared by electrodeposition for 5 min^[45].

另一方面,可以将设备周围静电力变为静电斥力,迫使带电粒子远离表面,从而达到阻止颗粒黏附在表面的效果.这一概念最早由 Masuda 等^[47]提出,并实现了采用静电行波除尘的系统,这种系统没有机械部件,可靠性高.后来,Kawamoto 等^[48]将平行的 ITO 电极印刷在玻璃基板上作为传送器,然后利用四相矩形电压施加在传送器上产生静电行波(如图12(a)),进而去除月尘的黏附.但是这种方法需要的 ITO 电极较为昂贵,为解决这一问题,使用一个嵌入在太阳能电池板盖板上的平行细线电极的防尘玻璃板和一个产生两相矩形电压的高压源组成除尘系统^[49],如图12(b)所示,这种系统可以很好地清除较大的灰尘颗粒.利用这种原理,Yilbas 等^[50]将 SiO₂ 颗粒沉积到玻璃表面达到疏水性后,又在表面搭建电路,以便能够在表面上的灰尘颗粒上产生脉冲形式的静电效应,排斥将要沉积在表面的灰尘颗粒,对于月球车上的太阳能电池板,可以将其镀膜并倾斜放置,也可以减少月尘的影响.Kohli^[51]表明颗粒的去除取决于克服颗粒对表面的黏附力,颗粒去除系统使用一系列电极组成,这些电极与嵌入在表面绝缘层中的电源相连接,并给电极施加单相或多相电压以产生驻波或行波,当颗粒受到的库仑力超过黏附力时,可以使用介电电泳移除颗粒.

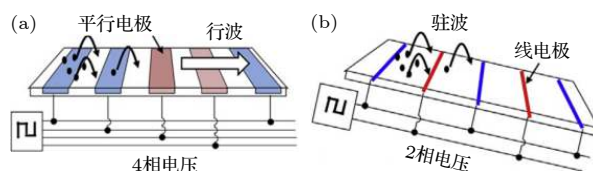


图 12 采用 (a) 行波和 (b) 驻波的静电清洗系统原理图^[49]
Fig. 12. Schematic diagrams of the electrostatic cleaning systems that use a (a) traveling wave and (b) standing wave^[49].

除此之外,近期有研究组提出将主动防护与被动防护的技术相结合,进而减少宇航服上黏附的灰尘.Manyapu 等^[52]将电动力学防尘罩(EDS)与工作功能匹配涂层(WFM)相结合,开发了一套关于宇航服集成的防尘系统.在这套系统中,EDS 利用静电力和介电泳力产生电场除去尘埃颗粒,然后使用新型高性能材料如碳纳米管柔性纤维作为电极将 EDS 集成到太空服,对比普通的金属电极,这种柔性纤维具有更好的弯曲疲劳和回弹性,实验表明此系统可以去除 80%—95% 的模拟月尘颗粒,

且颗粒大小基本处于 10—75 μm 的范围内. 这套系统经过改进^[53]后, 将碳纳米管柔性纤维制成的平行导电纱嵌入到宇航服表面, 可以更好地应用于柔性材料, 通过排斥漂浮的颗粒与悬浮已沉降的灰尘来达到防尘的效果. Richard 等^[54]使用剪切增稠液 (STF) 渗透进宇航服环保衣物 (EPG), 并在织物表面使用超疏水涂层, 其理论模型如图 13 所示, 这种处理方式在保证弹性的同时, 防尘渗透能力增强, 抗磨损性能也得到了改善, 可以达到宇航服轻量级、高柔性、高耐穿性的要求.

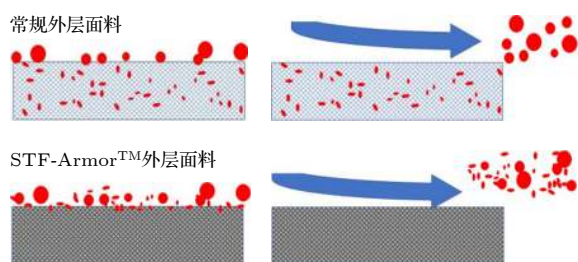


图 13 STF 减缓粉尘渗入及 EPG 壳层织物的超疏水处理^[54]

Fig. 13. STF reduces dust penetration and super-hydrophobic treatment of EPG shell fabric^[54].

Jiang 等^[55]针对导体表面除尘, 研究了基于锆钛酸铅陶瓷 (PLZT) 光伏异常效应的新型除尘技术. 在实验中使用紫外线对 PLZT 照射来充电, 基底表面覆盖绝缘聚酰亚胺膜来防止颗粒反复充电, 结果表明这种除尘技术可以有效清除一定范围内的粉尘颗粒, 效率可以达到 95.3%, 但是这种技术同样具有一定的局限性, 不能对所有的灰尘颗粒进行有效清除. 与这种方式类似, Lu 等^[56]提出了一种履带式自主除尘装置来清除导体与非导体表面上的月球尘埃, 履带采用柔性共面双极电极, 并使用 PLZT 控制除尘装置的路径与速度, 结果表明这种装置不受表面材料的影响, 且电极面积越

小, 除尘效果越好, 这种方式可以去除 50—100 μm 的月尘颗粒, 除尘率可以达到 95.3%. 这些新型除尘方式为月尘防护提供了新的思路, 不仅可以达到预期的除尘效果, 并且受到的影响因素不断减少, 可以有效地实现在月球表面上对尘埃颗粒的防护, 减少探测过程中的危害.

4 实验测试手段

目前, 实验测试月尘防护效果的方法主要分为直接测试和间接测试两种. 直接测试是指通过一些具体的设备测试处理工艺前后月尘质量、数量的变化来达到评价防尘效果的目的, 间接测试是指通过将月尘质量的变化等效到其他热、电、光学量的变化进而达到评价防尘效果的目的. 其中直接测试的方法主要有自然沉降法^[57]、吹扫法^[58]、离心法^[59]等. 间接测试的方法包括透光率法^[60]、求太阳吸收率 (α) 与热发射率 (ϵ) 比值法^[61]、输出电压法^[62]. 此外还有针对防尘涂层的耐用性进行的辐照、温度、微重力环境等测试^[63].

4.1 直接测试

Zhang 等^[57]将深色红外反射颜料和熔融的低密度聚乙烯 (LDPE) 混合, 通过模板热压的方法得到了一种超疏水表面. 通过室外的静置实验在灰尘自然沉降 30 天后观察表面灰尘沉积情况, 证实了该种薄膜具有一定的防尘效果. Crowder 等^[58]开发了一种表面化学改性工艺, 可以应用在光学、聚合物、金属和硅的各种表面并有着优异的防尘效果. 通过吹扫的方式对改性表面进行定性分析, 利用粒子计数法对防尘效果进行了定量统计. 图 14 是在手套箱中进行样品表面月尘涂敷和“吹扫”的具体过程.



图 14 表面月尘涂敷及“吹扫”过程^[58]

Fig. 14. Lunar dust coating and “purge” process^[58].

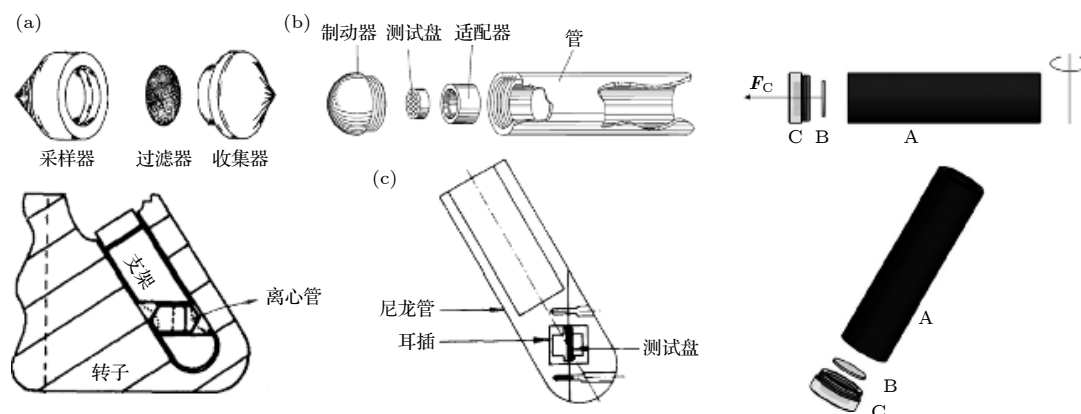


图 15 几种不同的用于测颗粒黏附的离心管结构^[64-68]

Fig. 15. Several different centrifuge tube structures used to measure particle adhesion^[64-68].

离心法测试尘埃颗粒的黏附效果由来已久,早在 1986 年, Kulvanich 和 Stewart^[64] 设计出了一种用于测试粒子间黏附力的离心管结构. 1987 年, Booth 和 Newton^[65] 也设计出一种特殊结构的离心管用来测试粒子和表面的黏附作用. 近年来, Nguyen 等^[59]、Salazar-Banda 等^[66]、Markelonis 等^[67]、Schulze 等^[68] 先后设计并优化了一系列的离心管结构用于测试粒子的黏附作用. 图 15 所示是上述研究人员设计的不同的离心管结构^[64-68].

2010 年 Crowder 等^[58] 设计出一种新的离心装置和粒子计数法结合起来对表面的防尘效率进行了定量表示, 如图 16 所示. 在真空箱室内架置一个滚筒, 将测试基板固定在滚筒上, 通过网筛将灰尘颗粒洒落于滚筒的样品表面. 设置不同的滚筒转速, 利用 CCD 相机记录样品表面灰尘沉积情况, 通过粒子计数法对不同表面的防尘效果作出评价.

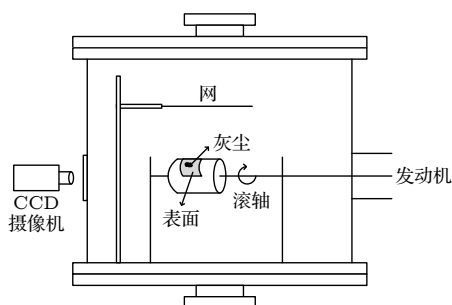


图 16 一种用于防尘测试的真空离心装置^[58]

Fig. 16. Vacuum centrifugal device for dustproof test^[58].

4.2 间接测试

徐阳等^[60] 将制备的纳米晶复合涂层应用在太阳能电池玻璃盖板上, 通过翻转操作前后太阳能板

的输出电压的变化以及灰尘对玻璃盖板的透光率的影响, 证实了该种超微结构的复合涂层可以最大限度地清除沉积的灰尘, 恢复太阳能电池的发电能力. NASA 格伦研究中心利用防尘表面处理前后太阳吸收率 (α) 与热发射率 (ϵ) 的比值评估了三种不同的表面处理方法在 AZ93, AlFEP 和 AgFEP 三种热控表面的防尘处理效果. 此种测试方法有效地表征了几种表面处理方法的优劣. 其中功函数匹配涂层的方法和波尔科技公司的专业化学表面改性处理工艺在上述几种热控表面的防尘效果有了显著提升. 图 17 是几种典型航空材料处理前后灰尘吸附效果的对比^[61].

利用输出电压等效反映除尘效果的方法一般用于主动除尘的方式中, 比如在电帘除尘的方式中应用广泛. 孙旗霞等^[62] 从实现交变电场的电帘出发, 分别介绍了电帘表面的交变电场分布、颗粒在电帘表面的受力状态、颗粒群运动过程中的摩擦电荷分布、颗粒运动的模拟方法、颗粒运动过程、除尘效率和能耗的实验和理论研究. 对自清洁太阳能电池板的防尘效率通过太阳能电池的输出变化来确定. Kawamoto 和 Seki^[69] 从 2005 年开始就致力于行波电帘的研究, 通过设计不同的电帘结构并不断优化, 先后设计了多相电帘以及不同的电极结构. 通过评价月尘质量、显微计数以及输出的变化评估了不同电帘设备的除尘效率. 图 18 是四相电帘的除尘效果^[70].

4.3 其他测试

月球环境复杂, 对航天器的危害因素主要有月尘、真空环境、温度环境、太阳辐射和微重力环境

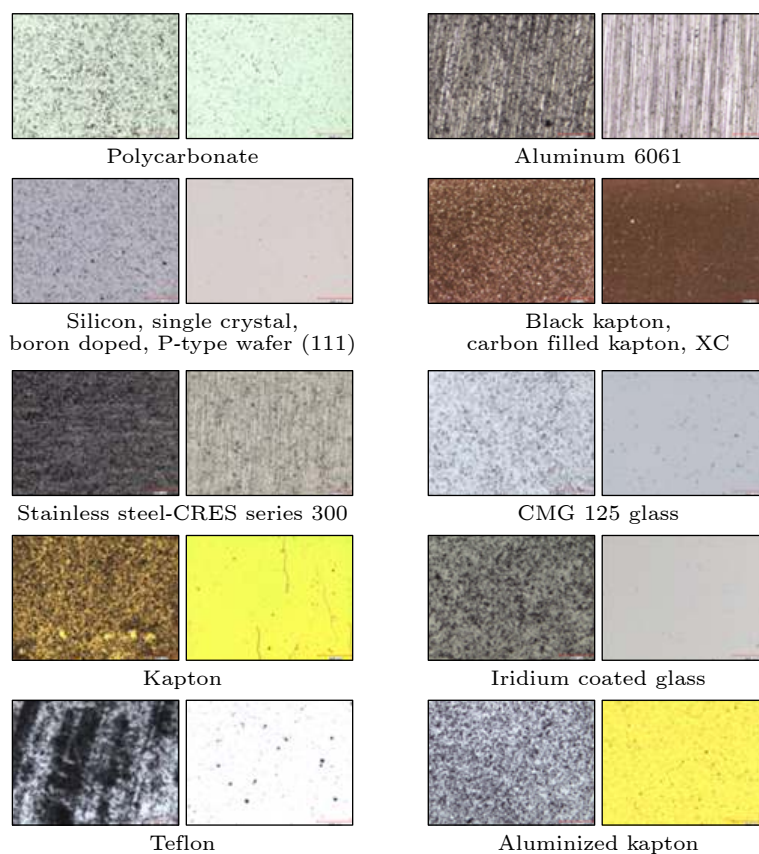


图 17 表面处理前后样品表面灰尘吸附效果^[61]

Fig. 17. Dust adsorption effect on sample surface before and after surface treatment^[61].

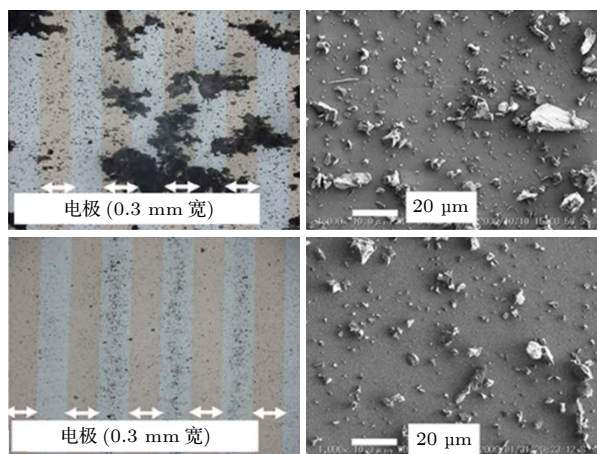


图 18 四相电帘在空气与真空环境下的除尘效果^[70]

Fig. 18. Dust removal effect of four-phase electric curtain in air and vacuum environment^[70].

的影响,即使在地球环境上测试的样品具有良好的防尘效果,在真实月球环境下也可能并不能达到预定效果,因此建立高还原度的月球模拟环境对月尘防护及相关实验的有效程度非常重要。

基于此, NASA 格伦研究中心建造了一套高还原度的月球环境模拟装置——月球尘埃黏附钟罩

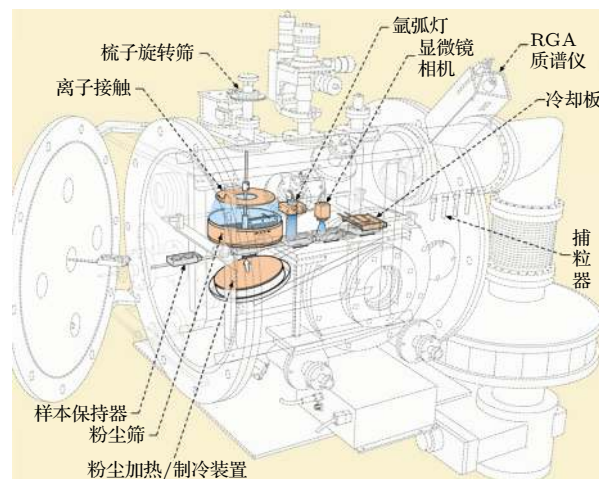


图 19 月球环境模拟装置 LDAB^[63]

Fig. 19. Lunar Environment Simulator LDAB^[63].

(LDAB), 如图 19 所示^[63]. 该套装置主要由筛梳旋转器、等离子接触板、灰尘筛、灰尘加热器/冷却器、氩弧灯、冷墙、除尘器、RGA 质谱仪构成. 此装置可以通过电阻加热器加热灰尘, 在粉尘上方产生射频空气等离子体来模仿太阳风, 同时氩弧灯可以模拟从紫外光到红外光的近太阳光谱, 对月尘进行

辐照和加热.

王志浩等^[71]使用已开发的月尘沉积与吸附实验系统,建立了基于颗粒运动的黏附力分析测试方法,使用辐射源辐照装置内的模拟月尘颗粒,并通过不断提高装置电压,观察高速摄像机拍摄的颗粒运动情况来获取月尘和平面材料间的黏附力及颗粒荷电电量.李青等^[72]针对月球探测器在不同力学环境下展开研究,使用道路模拟试验台模拟探测器在移动过程中颠簸振动的时域和能量,并使用分段等效包络的方法制定探测器软着陆过程试验条件,嫦娥三号实际飞行验证了这种方法的有效性.

5 总 结

在月球探测中月尘的沉积对设备的寿命及宇航员的安全有严重的威胁,月尘防护技术的有效性至关重要.月球表面环境不同于地球,存在各种射线的影响,且尘埃颗粒粒径较小,表面带有一定电荷的电量,使得月尘主要受到范德瓦耳斯力与静电力的作用,极易黏附在设备表面.本文在综述月尘被动防护技术时,从黏附机理出发,论述了造成月尘颗粒黏附在表面的主要作用力,以黏附力作为理论基础,总结具有低表面能、一定粗糙度等性质的材料对表面范德瓦耳斯力的影响,以及改变表面导电状态对静电力的影响等不同方式,并论述表面黏附力的测试方法.

月尘的防护方式主要分为主动防护与被动防护,主动防护机械冲洗的方法对材料表面容易产生永久性磨损,且用于冲刷的液体在月球环境下不易获取.相比之下,被动防护的方式维护简单且对表面伤害小,一般而言,最有效的防尘技术是使用经过表面处理后的材料作为探测设备表面,在月球环境下损伤最小,且不耗费人力.考虑到各种技术的优缺点,深空探测中应尽量使用材料改性,再将这种材料与主动技术相结合,通过表面覆膜或刻蚀等方法使暴露在外层的表面自由能降低,并增大其粗糙度,对于空中漂浮的带电粒子,考虑电子中和原理,将易吸附电子的表面处理为导电材料,尽可能中和电子,减少灰尘的黏附.对于月尘防护效果的测试,主要分为直接测试与间接测试,但对比而言,两种测试方法只能简单地估算结果,而不能准确地量化黏附力.因此对月尘的防护,使用主动与被动防护结合,并在最终使用近似月球环境的设备检测

其防护效果更能得到预期结果.

参考文献

- [1] Zhang H, Wang Y, Chen L, Zhang H, Li C, Zhuang J, Li D, Wang Y, Yang S, Li X, Wang W 2020 *Sci. China Ser. E: Technol. Sci.* **63** 520
- [2] Pei Z Y, Hou J, Wang Q 2020 *Infrared Laser Eng.* **49** 19 (in Chinese) [裴照宇, 侯军, 王琼 2020 *红外与激光工程* **49** 19]
- [3] Gaier J R 2011 *SAE Int. J. Aerosp.* **4** 279
- [4] Mcallister F 1972 NASA Technical Report TN D-6737
- [5] Morea S F 1992 *Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century* Houston, USA, April 5-7, 1988 p619
- [6] Buhler C R, Calle C I, Clements J S, Mantovani J, Ritz M I 2007 *IEEE Aerospace Conference Big Sky, USA, March 3-10, 2007* p1
- [7] Pan W J 2016 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [潘万竟 2016 硕士学位论文(哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [8] Sun Y, Liu J, Zheng Y, Xiao C, Wan B, Guo L, Wang X, Bo W 2017 *J. Chin. Med. Assoc.* **81** 133
- [9] Walton O R 2007 NASA Technical Report 214685
- [10] Berkebile S, Street K, Gaier J 2011 3rd *AIAA Atmospheric Space Environments Conference* Honolulu, USA, June 27-30, 2011 p3675
- [11] Greenberg P S, Chen D R, Smith S A 2007 NASA Technical Report 214956
- [12] Yang L, Jaesung P, Darren S, Eddy H, Lawrence A T 2008 *J. Aerosp. Eng.* **21** 272
- [13] Heavens N G, Richardson M I, Kleinböhl A 2011 *J. Geophys. Res. Planets* **4** 116
- [14] Grün E, Horanyi M, Sternovsky Z 2011 *Planet. Space Sci.* **59** 1672
- [15] Horanyi M 1996 *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **34** 383
- [16] Rima J I, Daniel J, Luis A, Benjamin F, Monammed A 2019 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **191** 413
- [17] Dzyaloshinskii I E, Lifshitz E M, Pitaevskii L P 1961 *Adv. Phys.* **10** 165
- [18] Hamed A, Geoffrey E, Roberto M A 2016 *Powder Technol.* **299** 9
- [19] Avijit K, Shuvojit P, Soumitro B, Banerjee A 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 123701
- [20] Valmacco V, Elzbieciak-Wodka M, Besnard C, Maroni P, Trefalt G, Borkovec M 2016 *Nanoscale Horiz.* **1** 325
- [21] Holger G, Miltiadis V P 2017 *Powder Technol.* **322** 185
- [22] Javid M, Amin K M, Valid A, Shokoufeh A, Matthew S 2019 *J. Electrostat.* **97** 58
- [23] Wang J, Wang X, Zhu T, Zhao Y 2018 *J. Electrostat.* **94** 14
- [24] Zhao Y, Fang J, Wang Y, Shen Y, Wang C 2019 *Powder Technol.* **357** 33
- [25] Zhu K, Rao S M, Huang H Q, Wang C H, Matsusaka S, Masuda H 2004 *Chem. Eng. Sci.* **59** 3201
- [26] Nein M E, Davis B 1991 *Proc. SPIE* **98** 110
- [27] Polizos G, Sharma J K, Smith D B, Tuncer E, Park J, Voylov D, Sololov A P, Meyer H M, Aman M 2018 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **188** 255
- [28] Xue W, Zheng R R, Zhang M, Xie G X, Wang Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **4** 2518 (in Chinese) [薛伟, 郑蓓蓉, 张森, 解国新, 王权 2009 *物理学报* **4** 2518]
- [29] Yan C X, Song J J, Cao J P 2019 *Plat. Finish.* **41** 14 (in Chinese) [颜晨曦, 宋娟娟, 曹建平 2019 *电镀与精饰* **41** 14]

- [30] Zhan W, Wang W, Xiao Z, Yu X, Zhang Y 2018 *Surf. Coat. Technol.* **356** 123
- [31] AmiriAfshar M, Rafieezad M, Duan X, AliNasiri A 2020 *Surf. Interfaces* **100526**
- [32] Peillon S, Autricque A, Redolfi M, Stancu C, Pluchery O 2019 *J. Aerosol Sci.* **137** 105431
- [33] Moutinho H R, Jiang C S, To B, Perkins, Muller M, Al-Jassim M M, Simpson L 2017 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **172** 145
- [34] Wu S, Altenried S, Zogg A, Zuber F, Maniura K, Ren Q 2018 *ACS Omega* **3** 6456
- [35] Li D, Li N, Su X, Liu K, Ji P, Wang B 2019 *Appl. Surf. Sci.* **489** 648
- [36] Ji Z, Bao L, Wang H, Chen R 2017 *Mater. Lett.* **207** 21
- [37] Gotlib-Vainstein K, Gouzman I, Girshevitz O, Bolker A, Atar N, Grossman E, Sukenk, Chaim N 2015 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** 3539
- [38] Du Q, Ai J, Qin Z, Liu J, Zeng X 2018 *J. Mater. Process. Technol.* **251** 188
- [39] Critchlow G, Webb P, Tremlett C, Brown K 2000 *Int. J. Adhes. Adhes.* **20** 113
- [40] Van Dam J P B, Abrahami S T, Yilmaz A, Gonzalez G, Trrrryn H 2020 *Int. J. Adhes. Adhes.* **96** 102450
- [41] Chen J, Qi A, Rodriguez R D, Sheremmet E, Wang Y, Sowade E, Baumann R R, Feng Z 2019 *Appl. Surf. Sci.* **487** 503
- [42] Quan Y Y, Zhang L Z 2017 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **160** 382
- [43] Chi F T, Liu D J, Wu H Y, Lei J H 2019 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **200** 109939
- [44] Maharjan S, Liao K, Wang A, Barton K, Curran S A 2020 *Mater. Chem. Phys.* **239** 122000
- [45] Cui H, Zheng Z 2019 *Thin Solid Films* **691** 137612
- [46] Choi D Y, Jung S H, Song D K, An E J, Park D, Kim T O, Jung J H, Lee H M 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 16495
- [47] Masuda S, Fujibayashi K, Ishida K, Inaba H 1972 *Electr. Eng. Jpn.* **92** 43
- [48] Kawamoto H, Uchiyama M, Cooper B L, McKay D S 2011 *J. Electrostat.* **69** 370
- [49] Kawamoto H, Guo B 2018 *J. Electrostat.* **91** 28
- [50] Yilbas B S, Al-Qahtani H, Al-Sharafi A, Bahattab S, Kassas M 2019 *Sci. Rep.* **9** 8703
- [51] Kohli R 2019 *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques* (Vol. 11) (Amsterdam: Elsevier) p391
- [52] Manyapu K K, De Leon P, Peltz L, Gaier J R, Waters D 2017 *Acta Astronaut.* **137** 472
- [53] Kavya K M, Leora P, Pablo D L 2019 *J. Space Saf. Eng.* **6** 248
- [54] Richard D, Norman J W, Maria K 2018 48th *International Conference on Environmental Systems*. Albuquerque, New Mexico, July 8 – 12, 2018 p183
- [55] Jiang J, Lu Y, Zhao H, Wang L 2019 *Acta Astronaut.* **165** 17
- [56] Lu Y, Jiang J, Yan X, Wang L 2019 *Smart Mater. Struct.* **28** 085010
- [57] Zhang J, Zhu C, Lv J, Wei C, Feng J 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 40219
- [58] Crowder M S, Stover R, Lawitzke A, Devaud G, Dove A, Wang X 2010 *Optical System Contamination: Effects, Measurements, and Control* San Diego, USA, August 10, 2008 p77940G
- [59] Nguyen T T, Rambanapasi C, Boer A H D, Fruhkubj H W, Ven P, Vries J, Busscher H, Maarschalk K 2010 *Int. J. Pharm.* **393** 89
- [60] Xu Y, Qi Z Y, Wang Z H, Tian D P 2019 *Surf. Technol.* **48** 167 (in Chinese) [徐阳, 齐振一, 王志浩, 田东波 2019 表面技术 **48** 167]
- [61] Gaier J, Waters D L, Misconin R, Banks B, Crowder M 2011 41st *International Conference on Environmental System* Portland, Oregon, July 17-21, 2011 p5183
- [62] Sun Q X, Yang N N, Cai X B, Hu G K 2012 *Adv. Mech.* **6** 113 (in Chinese) [孙旗霞, 杨宁宁, 蔡小兵, 胡更开 2012 力学进展 **6** 113]
- [63] Gaier J R, Jaworske D A 2007 *AIP Conference Proc.* **880** 27
- [64] Kulvanich P, Stewart P 1987 *Int. J. Pharm.* **35** 111
- [65] Booth S W, Newton J M 1987 *J. Pharm. Pharmacol.* **39** 679
- [66] Salazar-Banda G R, Felicetti M A, Concalves J A S, Coury J R, Aguiar M L 2007 *Powder Technol.* **173** 107
- [67] Markelonis A, Wang J S, Ullrich B U, Chien M W, Brown G J 2014 *Appl. Nanoscience* **5** 457
- [68] Schulze H, Wahl B, Gottschalk G 1989 *J. Colloid Interface Sci.* **128** 57
- [69] Kawamoto H, Seki K 2005 *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. C* **71** 1161
- [70] Kawamoto H 2012 *Proceedings of Earth and Space Conference* Shanghai, China, June 8–11, 2012 p94
- [71] Wang Z H, Bai Y, Tian D B, Li M 2015 *Equip. Environ. Eng.* **12** 75 (in Chinese) [王志浩, 白羽, 田东波, 李蔓 2015 装备环境工程 **12** 75]
- [72] Li Q, Ren D P, Wang C, Zhang H 2018 *Spacecraft Eng.* **27** 137 (in Chinese) [李青, 任德鹏, 王闯, 张熹 2018 航天器工程 **27** 137]

REVIEW

State-of-the-art passive protection technologies of lunar dust*

Mu Meng¹⁾ Zhang Hai-Yan¹⁾²⁾ Wang Xiao¹⁾ Li Cun-Hui^{2)†}
Zhang Xiao-Ping³⁾ Wang Ming-Zhi¹⁾⁴⁾ Zhu Ying-Min¹⁾ Gao Li-Bo¹⁾⁴⁾
Zhao Cheng-Xuan²⁾ Lu Yang⁴⁾⁵⁾ Wang Wei-Dong^{1)4)‡}

1) (*School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China*)

3) (*State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China*)

4) (*CityU-Xidian Joint Laboratory of Micro/Nano-Manufacturing, Shenzhen 518057, China*)

5) (*Department of Mechanical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China*)

(Received 11 September 2020; revised manuscript received 9 November 2020)

Abstract

In lunar circumstances, lunar dust has special properties such as conductivity, which can cause lunar dust to easily adhere to the surface of detection equipment. And this behavior will cause the equipment to fail to function properly and thus affecting the lunar exploration missions. According to the researches of lunar dust protection, in this article the passive protection technology of lunar dust is mainly analyzed. Firstly, the lunar-dust caused adverse factors and effects on detection equipment are analyzed. Then the mechanism of lunar dust adhesion is studied, and the theoretical basis of the two main forces that cause adhesion is discussed. Secondly, the main methods of reducing the adhesion of lunar dust particles are systematically explained according to different adhesion mechanisms, and the latest progress of the passive protection technology of the lunar dust is introduced in detail. Combined with the different protection methods, the method of testing the adhesion of the lunar dust is summarized. These studies lay the foundation for effectively protecting the surface of detection equipment from being affected by the lunar dust.

Keywords: lunar dust, passive protection technology, adhesion mechanism, testing method

PACS: 05.70.Np, 95.55.Pe, 81.65.-b

DOI: 10.7498/aps.70.20201517

* Project supported by the Fund of the Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, China (Grant No. HTKJ2019KL510007), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42004157, 12075108), and the Key R&D Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2020GY-252).

† Corresponding author. E-mail: licunhui@spacechina.com

‡ Corresponding author. E-mail: wangwd@mail.xidian.edu.cn