

面向水冰探测的月尘防护研究综述

王鹏伟^{1,2} 耿健^{1,2} 杨喆² 任正宜² 郭美如^{1,2*} 王晓冬^{1*}

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院 沈阳 110819; 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)

Review of Lunar Dust Mitigation for Lunar Water Ice Detection

WANG Pengwei^{1,2}, GENG Jian^{1,2}, YANG Zhe², REN Zhengyi², GUO Meiru^{1,2*}, WANG Xiaodong^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract Lunar dust has always been a major problem hindering human exploration of the moon. The sharp, fine and electrostatic characteristics of lunar dust particles can cause great harm to all kinds of mechanical structures, sealing structures, functional surfaces, space instrument loads and even astronauts. This paper summarizes the research progress of the lunar dust mitigation technology, including the whole process of the lunar dust protection strategy; Active mitigation technology represented by electromagnetic method, such as electric curtain, electrostatic field, plasma beam, electric spray and magnetic roller dust removal technology; Passive mitigation technologies mainly include surface modification technology, such as low surface energy to weaken van der Waals force, high roughness nanoscale coating and work function matching coating to weaken electrostatic force, etc. Focusing on the lunar dust mitigation of the water ice detection program of China's lunar exploration project, this paper summarizes the filter and seal dustproof means used in mining, heating and analysis. Spiral groove and clearance seal are used for drilling bit. The heating and analysis vessels are sealed with metal knife edge and O-ring auxiliary seal. A sintered metal filter, a high efficiency particulate air filter (HEPA) and a multistage lunar air filter with a permanent-magnet system (LAF-PMS) are arranged in front of the analytical instrument. A double-layer O-ring seal is arranged at the connecting pipe. Set labyrinth seal and HEPA at external outlet. At last, a scheme design of lunar dust mitigation for lunar water ice detector is given.

Keywords Lunar dust mitigation technology, ISRU, Water ice detection

摘要 月尘一直以来都是阻碍人类探索月球的一大问题,月尘颗粒锋利、细微和带静电等特性可对各类机械结构、密封结构、功能表面、空间仪器载荷以至宇航员产生巨大危害。文章总结了目前月尘防护技术的研究进展,包括月尘的全流程防护及大空间月尘防护研究;以电磁法为代表的主动防护技术,如电帘、静电场、等离子体束、电喷雾和磁辊等除尘技术;以表面改性技术为主的被动防护技术,如减弱范德瓦耳斯力的低表面能、高粗糙度的纳米尺度涂层和减弱静电力的功函数匹配涂层等。聚焦中国探月工程水冰探测计划的月尘防护,综述了针对采掘、加热和分析三个环节所使用的过滤和密封的防尘手段,包括采掘钻杆使用螺旋槽和间隙密封;加热和分析容器采用金属刀口主密封和O型圈辅助密封;在分析仪器前设置烧结金属过滤器、高效空气过滤器(HEPA)和多级永磁月尘过滤器(LAF-PMS);在连接管道处设置双层O型圈密封;在外接出口处设置迷宫密封和HEPA等。最后,给出一种“水冰探测仪月尘防护的方案设计”。

关键词 月尘防护技术 ISRU 水冰探测

中图分类号: V11

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202306002

当今世界主要的航天大国都展开了月球探测项目,中国的探月事业在圆满完成“绕、落、回”三

步走战略后,又将实施“探、登、驻”三步战略。美国在阿波罗登月计划实施后,总结登月过程中面临

的最大问题是月尘所带来的影响。NASA 此后一直将月尘防护技术作为其月球探测项目需攻关的核心技术之一。同样的,月尘问题研究关系到中国探月计划的成败。关于月尘问题的研究目前包括月尘形成成因、月尘迁移、月尘表面污染、月尘机械结构磨损、月尘医学、月尘测量、月尘防护等。

月尘(lunar dust)是月球土壤(lunar regolith)中的细小成分,一般将粒径小于 1 mm 的月壤颗粒称为月尘。月尘代表性样品的中位粒径在 40 μm 到 130 μm 之间,平均粒径为 70 μm ,其中小于 20 μm 的颗粒占重量的 10%~20%^[1-3]。月尘是月球形成过程中陨石体反复撞击以及太阳风、宇宙射线作用而产生的未黏结的颗粒物质,主要由晶质颗粒与较大的火成岩碎块、剥离质碎片及微粒金属颗粒组成^[4]。月尘中含有纳米金属铁,使得其还具有磁性^[1]。图 1 为月尘的形态^[5]。

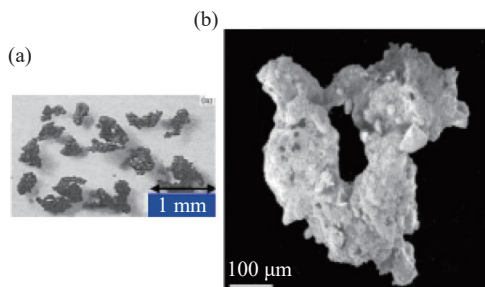


图1 月尘不同尺度下的形态。(a) 1 mm, (b) 100 μm ^[5]

Fig. 1 Morphology of lunar dust at different scales. (a) 1 mm, (b) 100 μm ^[5]

月球表面由于缺乏地球上的风化效应,导致月尘颗粒呈现出不规则 and 锋利尖锐的特性。此外月尘颗粒还在太阳光和宇宙辐射等影响下带有静电。锋利、细微和带静电等特性是考虑月尘影响时不可忽略的因素^[6]。锋利这一特性导致在清除月尘时会划伤功能表面。锋利的月尘还会造成回转结构磨损、卡死和破坏密封结构等^[7]。细微这一特性则表现为渗透性强,月尘容易进入宇航员的呼吸道、肺部从而造成严重后果^[7-8]。带静电这一特性使得月尘极易附着在表面,且粒径越小,电荷密度就越大,更容易附着,这就加大了月尘的清理难度。带静电的月尘接触到电子元器件会影响其正常工作,甚至会造成不可挽回的损失。此外,月尘覆盖到热控表面和光学表面等会导致表面失效,轻则影响正常工作,重则造成设备毁坏^[7]。图 2 为被月尘污染堵塞的管道^[9]。以上是月尘的特性及由此带来的

危害。所以,阿波罗登月的宇航员 Eugene C 返回后说道“我认为月尘是我们在月球上工作遇到的最大障碍之一,我们或许可以克服其他生理问题、物理问题和机械问题,但很难克服月尘带来的问题”^[10]。

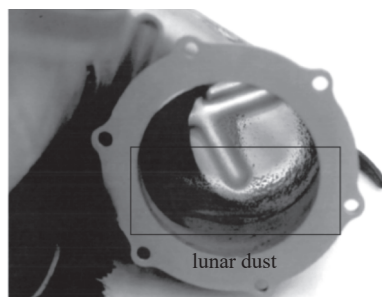


图2 月尘污染后的阿波罗 11 号指挥舱内回风管道^[9]

Fig. 2 Air return duct in Apollo 11 command cabin after lunar dust contamination^[9]

月球表面会因为自然或人为因素造成月尘弥漫。如 Stubbs T J 等^[11]提出的月尘运动模型,如图 3 所示,认为月球表面存在静电场,而月尘颗粒又带电,月尘在电场力作用下克服范德瓦耳斯力和重力的合力向空中飘散,当向上的电场力小于向下的合力时又会下落,从而形成喷泉效应,月尘就这样来回迁移。另一种模型是向上的电场力等于向下的合力,月尘颗粒就会在空中悬浮。而人为因素如着陆器和飞跃器启动和降落时都会喷气,喷管喷出的气体在真空中膨胀形成羽流,羽流产生的弓形激波会将月尘四处吹散。已有研究表明人类的月球活动已使得月球上方的月尘浓度增加^[12]。因此,美国宇航局约翰逊航天中心的 Kristen J 才说月尘无边界(dust knows no boundaries)^[13]。

1 月尘防护技术

由于月尘无所不在,造成的影响巨大且是多方面的,因此需要针对具体应用场合和应用对象采用不同的防尘技术。月尘影响对象大致有表面类的,如温控表面和光学表面等;有机械结构类的,如月球车轮等回转部件以及机械密封部件;有腔室类的,如登月舱、精密仪器内部等。月尘防护有外部防护和内部防护之分,内部即位于腔室内。通常在整个探月过程中都要对月尘进行防护,所以各类防护方法是组合使用的,如仪器内部防护在仪器外部也需要先进行防护。

防尘技术通常分为主动防护和被动防护。主

动防护指通过施加外力去除月尘, 通常需要输入能量, 如机械力、超声波、流体冲击力、静电力、磁力等, 有时甚至需要宇航员亲自操作, 如阿波罗登月时由宇航员用尼龙刷清扫月尘^[14-15]。而被动防护则

不需借助外力, 而是依赖自身结构来防护月尘, 如在所要防护的结构或表面设置挡板或防护罩, 此外, 表面改性也是常被采用的被动防护措施^[14-15]。图 4 为月尘防护技术的分类。

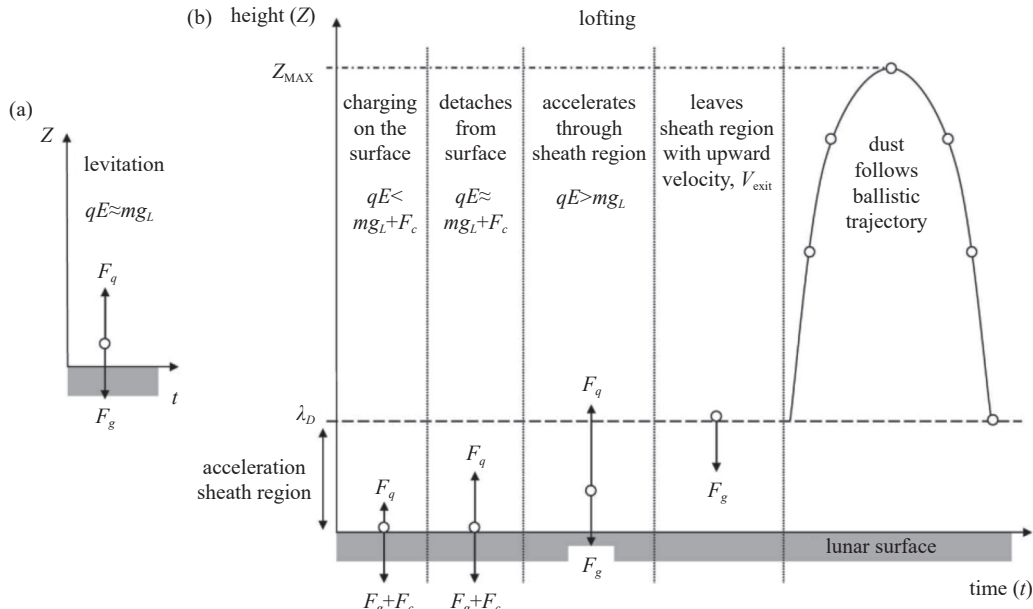


图3 月尘运动模型。(a) 静态悬浮模型与 (b) 动态喷泉模型^[11]

Fig. 3 Lunar dust motion model. (a) Static levitation model and (b) dynamic fountain model^[11]

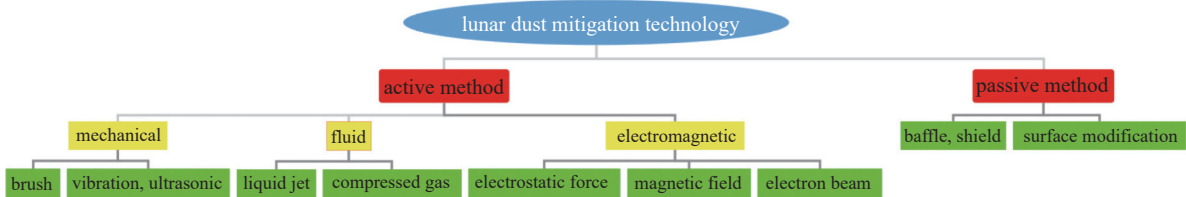


图4 月尘防护技术

Fig. 4 Lunar dust mitigation technology

1.1 月尘的全流程防护及大空间月尘防护研究

由于月尘防护技术多种多样, 如何针对具体月尘防护对象采用针对性防护措施, 这是一个需要系统集成研究的问题。NASA 提出构造一种集成的月尘防护策略——三管齐下 (A Three Pronged Approach), 即操作和结构上的考虑、被动防护技术、主动防护技术^[16]。其中强调在月球探测过程中影响月尘弥漫的最大变量就是操作和结构上的考虑, 如采取缓慢有条理的动作、调整工具的设计结构等。针对羽流问题来优化着陆顺序以及着陆器喷管等部件的设计。总之, 操作路径规划和结构设计属于从源头上减轻月尘的影响, 而主动防护和被动防护

只是起到清除、屏蔽的作用。曾令斌等^[17]结合月尘扬起、传输、沉降附着以及造成破坏的过程, 提出了从减少月尘扬起, 阻断月尘传输, 减弱月尘沉降到抑制月尘附着的全过程月尘防护策略。此外, Aliberti J^[18]提出了一种除尘范式, 即通过考虑除尘对象、所需要提供的材料和能量, 以及除尘后的尘埃去向和过程中产生的副产物, 把除尘过程分为四个阶段即松动月尘-剥离表面-输运月尘-降解月尘。

针对大空间的月尘防护, 如防护月球上已有的设备和设施, 可以选择合适的登月地点, 避免在月尘浓度高和容易产生月尘的月表登陆。还可以采取主动防护, 如在月表进行月面硬化和在设备和设

施周围设置防尘坝等^[17]。Wilson T L 和 Wilson K B^[19]提出一种月壤烧结的办法来硬化月球表面,将环氧树脂和月壤烧结在一起,同时在其表面采用热等离子喷涂技术喷涂氢层,以在一定区域内防止月尘弥漫,图5为该方法的示意图。

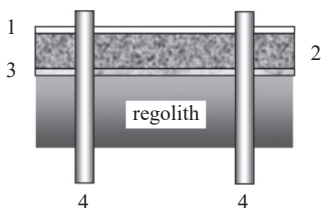


图5 烧结月壤示意图,等离子喷涂氢层1覆盖在环氧树脂-月壤混合物2上,2的底板3为压实的月壤,4为支撑设备(如大型望远镜)的支柱^[19]

Fig. 5 Diagram of sintered lunar regolith, plasma sprayed hydrogen layer 1 is overlaid on an epoxy-lunar soil mixture 2, 2's base plate 3 is the compacted lunar regolith, and 4 is the strut for supporting equipment, such as a large telescope^[19]

以上介绍了月尘的全流程防护研究以及针对大空间的防尘手段。

1.2 主动防护技术

凡是通过借用外力从器件上除去月尘的手段都可归于此类。有机械力、流体冲击力和电磁力三大外力。

主动防护技术研究中以电磁法研究最多。

1.2.1 EDS(Electrodynamic Dust Shield)除尘技术

2004年以来,NASA的Calle C I等^[20]就开始研究电动防尘罩(Electrodynamic Dust Shield, EDS)技术,又称电行波除尘法、电帘除尘法,原理如图6所示^[21]。EDS由嵌入薄电极的多层介质涂层组成,通过多相低频交流电产生行波电场,带静电的月尘颗粒在库仑力和介电泳力的作用下沿表面输送来达到除尘的目的。NASA的研究表明,EDS在模拟火星和月球环境条件下运行很成功^[22]。

Kawamoto H等^[23]考虑了在施加单相矩形电压时EDS的除尘效果,结果表明,在真空条件下微倾斜的板面灰尘去除率达90%以上。配合机械振动和在月球低重力环境下运行,该装置的防尘效果会更高。这与施加四相矩形电压产生的效果几乎一致,但使用单相矩形电压可以使装置大大简化。研究还发现低频和高电压的电压信号除尘效果更好。然而,该方法很难分离和去除直径小于10 μm的月

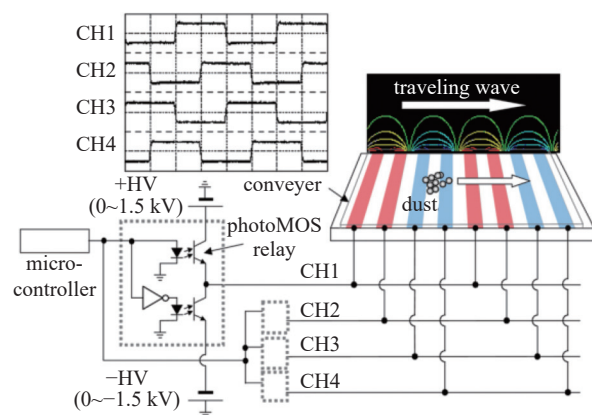


图6 EDS示意图,该装置包括产生四相矩形电压的电源以及放大器、控制器和由印刷在玻璃基板上垂直平行分布且透明的氧化锡锡(ITO)电极组成的月尘传送带^[21]

Fig. 6 A schematic illustration of EDS, which comprises a power supply generating a four-phase rectangular voltage as well as an amplifier, controller and lunar dust conveyor consisting of vertically parallel and transparent Indium Tin Oxide (ITO) electrodes printed on a glass substrate^[21]

尘颗粒。此后,该团队又改进此方法,如调整传送带的布局从简单平行排布变为方形涡旋或圆形涡旋排布,改变电极的间距等,并使用Apollo 11带回的真实月尘进行实验,结果表明真实月尘的清除效果更好,使用模拟月尘得到的数据是保守的^[21]。

孙旗霞等^[24]分析了月尘在EDS上的运动过程和状态,指出库仑力是驱动力,而介电泳力和黏附力是阻力,通过高速摄影方法发现月尘颗粒会做周期性的跳起和下落运动,如图7所示。为尽可能减少EDS的功耗,其提出将低压连续工作模式和高压触发模式结合使用,前者是为了持续清除小粒径的月尘,后者是为了排斥大粒径的月尘降落。

1.2.2 静电力场除尘

Jiang J等^[25]利用光电材料镧修饰锆钛酸铅(PLZT)在强紫外光照射下会极化产生高电压的特性,将其正极接到除尘电极,负极接对待保护表面使月尘极化,从而利用电场力去除月尘。除尘电极是由绝缘层、铜箔和绝缘基底组成的薄片,工作原理如图8(a)所示^[26]。装置测试结果表明,可以清除大部分尺寸为0.01 mm~0.18 mm的月尘颗粒。大于0.18 mm的月尘主要是由于电场力无法克服重力而不能被提升,小于0.01 mm的月尘则受范德瓦耳斯力主导倾向于停留在表面。在320 mm×125 mm覆盖月尘的表面上,该技术的降尘效率可达到95%。

团队进一步优化电极结构^[26], 将其形状设计成梳子状, 见图 8(b), 三种电极铜箔面积相等。实验研究了电极几何参数对除尘效率的影响, 结果表明, 这三种铜箔面积相等的不同形状电极产生的除尘电压相等; 铜箔面积越大, 除尘效率越小, 所以电极面

积相等的梳状电极除尘效率比普通电极更高; 绝缘膜材料和铜箔厚度对除尘效率影响不大; 梳状电极使得表面电荷更均匀, 提高了除尘效率; 齿宽越窄, 除尘效率越高, 齿宽和齿隙均为 1 mm 时, 除尘效率可达到近 100%。

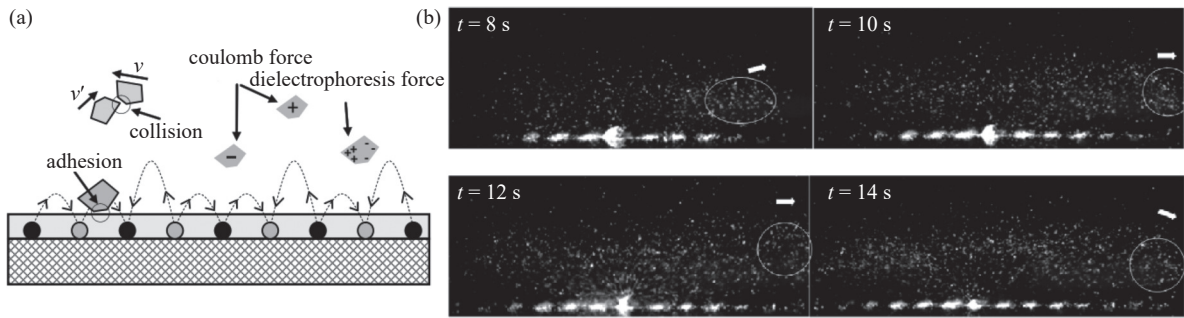


图7 月尘在 EDS 上的运动过程。(a) EDS 上的月尘颗粒在各种相互作用下周期性运动,(b) 高速摄影记录月尘颗粒在 EDS 表面跳起和下落过程^[24]

Fig. 7 The motion process of lunar dust on EDS. (a) The periodic movement of the lunar dust particles on the EDS under various interactions, and (b) the process of the lunar dust particles jumping and falling on the EDS surface was recorded by high-speed photography^[24]

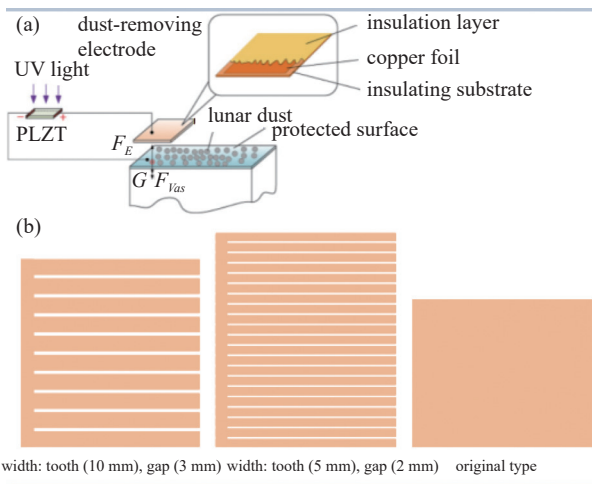


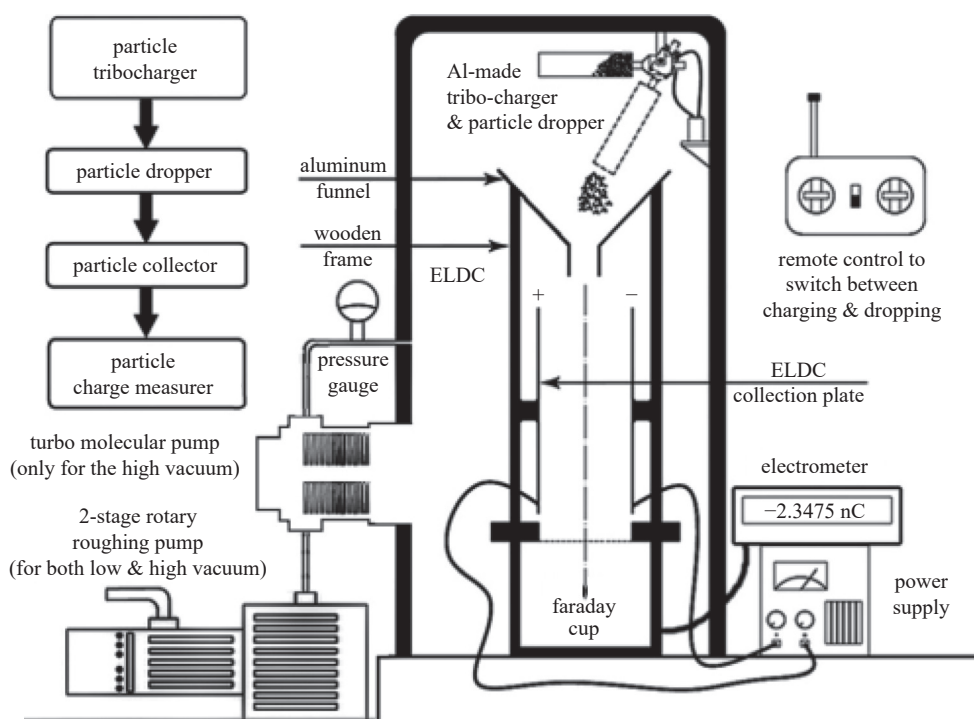
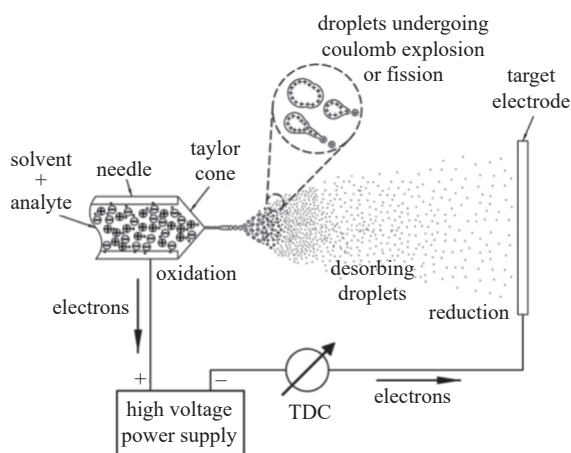
图8 PLZT 电极除尘方法。(a) 除尘原理示意图和 (b) 改进后电极形状与原电极的对比^[26]

Fig. 8 PLZT electrode lunar dust removal method. (a) Schematic diagram of dust removal principle, and (b) comparison between the shape of the improved electrode and the original electrode^[26]

Afshar M N 等^[27-28] 长期研究静电月尘收集器 (ELDC), 通过理论和模拟分析, 发现提供最高约 6.4 kV/m 的电场就可以将 100 μm 的月尘颗粒全部收集起来。该方法所需的电场强度比 EDS 小一千倍。收集到的月尘颗粒会形成与原电场方向相反

的静电场, 这会导致收集效率逐渐降低, 最终月尘会悬浮在电场中间, 此时可以通过施加更大的电压来抵消这一不利影响^[29]。同时进行实验研究, 实验装置简图如图 9 所示, 将模拟月尘摩擦带电 (同时使用旋转管和斜面摩擦带电两种方法, 以获得尽可能高的表面电荷), 用法拉第杯测量电荷以评估收集的月尘含量。实验证明了铝材表面比不锈钢表面更容易除尘 (铝电导率比不锈钢高 24 倍), 也验证了理论分析得到的规律, 即收集效率与外加电压成正比相关, 但是收集效率很低 (高真空情况下最高才 35%)。这与理论和模拟结果差距很大, 分析原因是实验条件与月球极高真空和低重力的情况不符^[29]。该课题组又提出一种静电月球除尘器 (ELDR), 它由多电极集成, 电极采用 X 型排布, 功耗是单电极的 9 倍但是除尘面积扩大了 36 倍, 离散元模拟结果表明长度 5 cm 和 10 cm 的电极处理 30 cm $\times$ 30 cm 的表面达到百分百除尘效率的最低电压分别为 2.2 kV 和 1.4 kV, 但该技术还未进行实验验证^[31]。

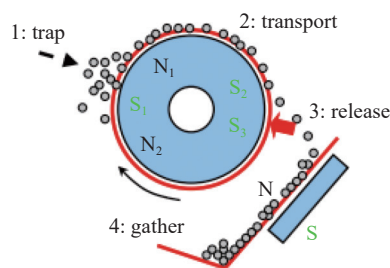
Bango J J 等^[32] 提出一种电喷雾技术, 原理如图 10 所示。由于施加了高电压, 液滴表面电荷密度急剧增加, 射流最终会分裂成多个小液滴, 带电的月尘被这些小液滴吸引并捕获从而达到除尘的目的, 该技术效率很高, 只需要几微瓦的功率和几微

图9 ELDC 的实验装置示意图^[30]Fig. 9 Schematic diagram of the experimental setup of ELDC^[30]图10 电喷雾技术原理示意图^[32]Fig. 10 Schematic diagram of electrospray technology^[32]

升的水。实验结果证明了电喷雾装置可以非常有效地去除尺寸小至 $0.3 \mu\text{m}$ 的颗粒而压降损失接近于零。

1.2.3 磁场除尘

Kawamoto H 等^[33]提出并研制了一种磁辊除尘装置,它由一组固定的多极磁辊、旋转套筒、板式磁铁和收集袋组成,如图 11 所示。带磁性的月尘被磁辊捕集后沿着滚筒旋转,当运动到板式磁铁对面时会被其吸引最后落入收集袋,实验测得的除尘效率

图11 磁辊除尘装置^[33]Fig. 11 Magnetic roller dust removal device^[33]

为 40%^[34]。为了提高效率该团队进一步结合 EDS 辅助吸附搬运月尘^[35],模拟月尘实验结果表明可达到 64% 的除尘效率。考虑到真实月尘的磁导率更高,预计实际除尘效率会更高。该装置结构简单且不消耗电能,是一种有着广阔前景的除尘技术。

1.2.4 电子束诱导除尘

电子束或紫外线可以诱导月尘颗粒发射二次电子,同时这些电子又可以被月尘颗粒重吸收,这样月尘表面可以集聚足够大的电荷量,这些电荷相互排斥可以使月尘从表面脱附^[36],如图 12(a) 所示。Flanagan T M 和 Goree J^[37]研究发现只有在等离子体和电子束一起使用时才可以达到清除表面月尘的目的,单独使用等离子体或电子束都没有效果。Farr B 等^[36]的实验表明电子束法(通入氩气使灯丝

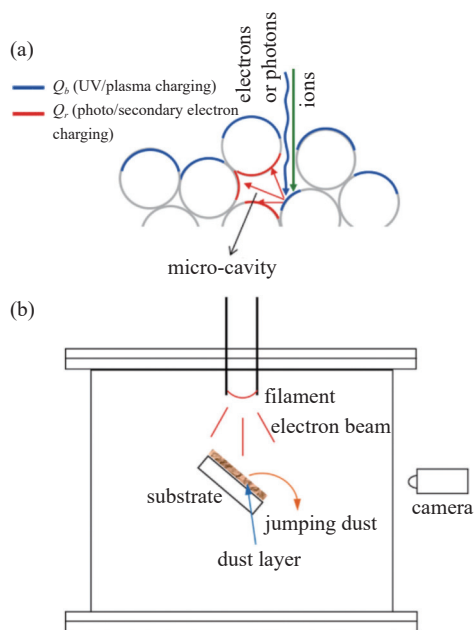


图12 电子束除尘技术。(a) 在月尘颗粒之间的微腔内, 暴露在电子束或紫外线下蓝色表面部分释放出二次电子或光电子, 然后沉积在周围月尘颗粒的红色表面部分上, (b) 实验装置示意图^[38]

Fig. 12 Electron beam lunar dust mitigation technology. (a) Inside a microcavity between lunar dust particles, the blue surface patch exposed to electron beam or UV emits secondary electrons or photoelectrons, which then deposit on the red surface patches of the surrounding particles, and (b) schematic diagram of experimental setup^[38]

发射的电子束碰撞气体分子, 产生高密度的等离子体和电子束的混合物)可以在一分钟以内达到 75%~85% 的清洁效果(剩下的为较难清除的薄单层月尘)。在此基础上改变电子束入射角, 可使整体表面清洁度增加 10%~20%, 实验装置简图如图 12(b) 所示^[38]。

1.2.5 机械力和流体冲击力除尘技术

Aliberti J^[18] 设计了一种刷子和鼓风机一体化的便携式除尘装置, 如图 13 所示, 刷毛是 KevlarTM 纤维, 气体射流由加压二氧化碳气瓶提供, 同时气瓶

用 KaptonTM 绝缘并电加热以防止二氧化碳在月球极低温环境下冷凝。任德鹏等^[39] 设计了一种喷气除尘系统, 如图 14 所示, 这是一种利用气体冲击力来除尘的主动防护技术。通过模拟吹除铝合金板散热面的月尘, 结果表明多喷嘴除尘面积可超过 0.6 m², 除尘时间小于 2 s。但需要携带气瓶, 由于载荷重量限制, 该方法具有不可持续性。所以该方法基本上只能用于一次性清除在探测器着陆时由羽流造成的覆盖在其表面的月尘。

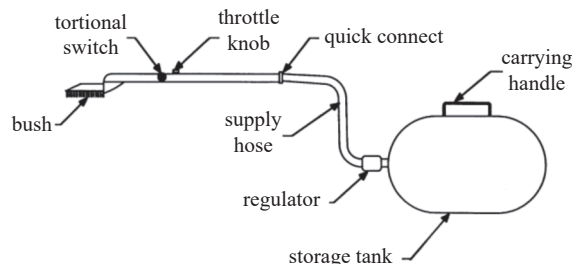


图13 刷子-鼓风机除尘装置示意图^[18]

Fig. 13 Schematic diagram of Brush-Blower dust removal device^[18]

此外, 还有利用尼龙毛刷和机械振动(或超声波)的除尘技术^[14-15,40]。前者因为需要人为操作或者设置复杂的机械结构(影响设备的可靠性), 且毛刷的耐用性有限, 还可能损伤待保护表面, 所以只能作为辅助除尘手段使用。而后者的振动会影响设备的其他部分, 且清除的月尘易飘散到附近表面, 因此实用性不强。

1.3 被动防护技术

被动防护技术研究以表面改性研究最多。

表面改性的研究是基于月尘与各类功能表面的粘附机理展开的, 换言之通过修饰表面使其粘附的作用力减弱, 从而达到月尘防护的目的。穆萌等^[41] 分析月尘粘附机理, 指出其中起决定性作用的作用力是范德瓦耳斯力和静电力, 两种作用力作用范围不同, 前者为短程力, 后者为长程力, 进而就减

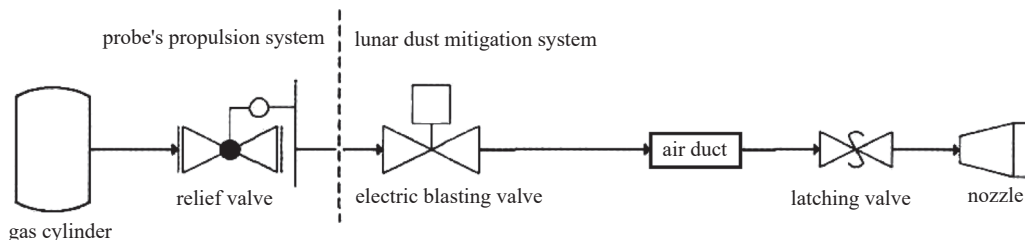


图14 喷气除尘系统示意图^[39]

Fig. 14 Schematic diagram of air jet dust removal system^[39]

轻这两种作用力的被动防护方法进行了回顾,此外该作者还就月尘防护效果测试手段进行了综述。

1.3.1 减弱范德瓦耳斯力

月尘颗粒与接触表面的范德瓦耳斯力与表面材料的表面能和表面粗糙度有关。通过借鉴荷叶防水原理 NASA 开发了 Lotus 涂层^[42],即通过镀一层低表面能、具有纳米尺度微结构的高粗糙度的表面涂层来防尘,如图 15 所示。微纳结构减少有效表面接触面积,从而防止小颗粒月尘附着在微细凹槽里。Connor K M O^[43]的实验表明涂覆了 Lotus 涂层表面接触角大于 150° (强疏水性)而没有涂层时小于 90° (非疏水性)。张海燕等^[44]通过电化学刻蚀结合低表面能涂覆来实现表面改性。通过将布满月尘的已表面改性的铝板翻转一定角度,计算掉落的月尘占总月尘含量的比例来表征月尘防护效率。测试表明表面改性后翻转角度为 60° 时的月尘防护效率为 58.41%,而未处理的表面其效率仅为 16.56%。Wang X 等^[45]比较不同蚀刻方法,发现结合化学蚀刻和电化学蚀刻的复合蚀刻方法可以产生具有微

纳米粗糙度的多尺度结构,经复合刻蚀后,铝基板的粉尘附着力由 45.53 nN 显著降低到 8.89 nN,降幅达 80%;倾斜 90° 试验的月尘覆盖率为 2.19% 比处理前的 9.11% 低了 4 倍。

1.3.2 减弱静电力

功函数匹配涂层(Work Function Matching Coatings, WFM)。功函数是将电子从材料表面转移到材料外部所需要的最低能量,在摩擦起电过程中,电子从功函数低的材料转移到功函数高的材料。如果具有相同功函数的两种材料表面相互接触时,就不会发生电荷转移。通过涂层技术使待保护材料的功函数与月尘功函数匹配,这样带静电的月尘颗粒就不容易附着在各类功能表面上了,这就是 WFM 技术的原理^[46]。James R G 等^[47]采用氩离子束溅射沉积技术在铝基热控表面上镀一层月尘模拟物来制备 WFM 涂层(月尘模拟物与实际月尘的功函数很接近)。氮气吹除实验结果表明除尘效率最高可达 80%,而未经处理前小于 10%。实验团队还采用了氧离子束表面改性,但防尘效果几乎没有提高。

Jesus A D 等^[48]发现熔融月尘模拟物会发生向上迁移的现象,该作者解释为热马兰戈尼效应(也称为热毛细效应),即熔体内部和坩埚壁的温度梯度产生的表面张力大于熔体重力,从而导致熔体以薄膜形式向上迁移,实验结果如图 16 所示。Dorota B 等^[46]也实验验证了这一现象并提出建议将该方法作为表面改性的手段以获得 WFM 涂层。此外,该涂层也同时具有耐磨性,且可以原位利用月壤进行涂覆,具有广阔前景。

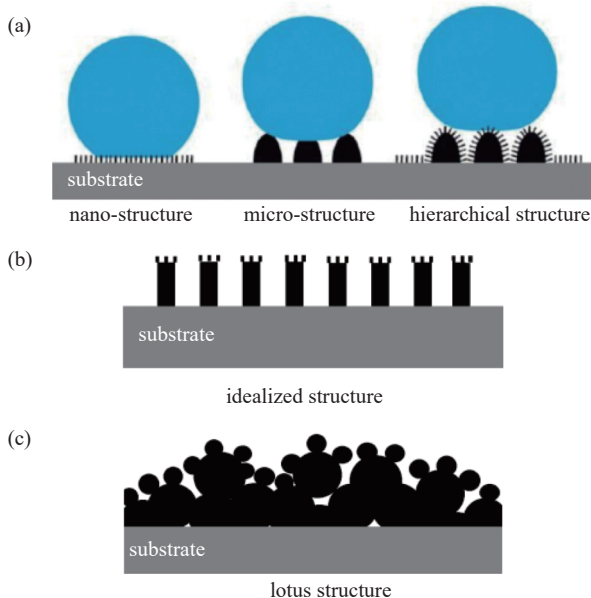


图15 Lotus 涂层结构示意图。(a) 纳米结构、微米结构和微纳分层结构(即 Lotus 涂层采取的结构)(黑色为结构,蓝色为水), (b) 理想的 Lotus 涂层结构, (c) 实际的 Lotus 涂层结构^[43]

Fig. 15 Schematic diagram of Lotus coating structure. (a) Contrast of nano-structure, micro-structure, and hierarchical structure (i.e. structure of Lotus coating) (black for structure, blue for water), (b) ideal Lotus coating structure, and (c) actual Lotus coating structure^[43]

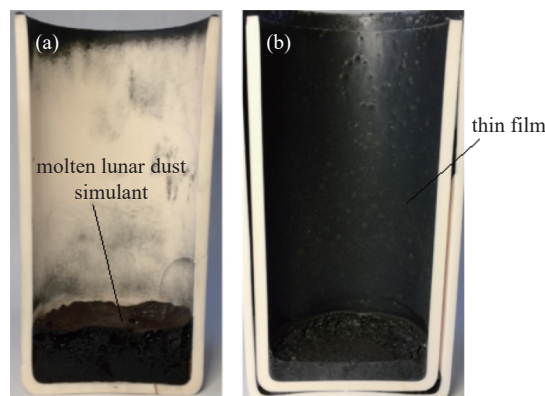


图16 热马兰戈尼效应实验验证。(a) 为实验前 (b) 为实验后^[48]

Fig. 16 Experimental verification of the thermal Marangoni effect. (a) Before the experiment and (b) after the experiment^[48]

此外,还有通过原子层沉积制备的氧化铟锡涂层,这是一种可以消除月尘电荷从而减弱静电吸附力的静电放电涂层^[40]。

1.3.3 其他被动防护方法

此外,把主动防护技术和被动防护技术组合使用共同来实现月尘防护,这也是月尘防护技术的发展趋势。Kavya K M 等^[49-50]将 EDS 主动技术(使用了碳纳米管作为电极材料)和 WFM 被动技术组合集成到宇航服表面来防护月尘,可以同时实现防止月尘累积和清除已经堆积在宇航服表面的月尘这两大功能,试验结果表明可防止尺寸在 10~75 μm 之间超过 80% 的模拟月尘。

Crowder M 等^[51]利用离子束沉积方法制备一种非晶碳氟化合物(a-C:F)薄膜,在硅表面覆盖单分子层该薄膜,表面水接触角从 30°提高到 110°,表现为疏水性。研究表明该方法制备的薄膜能够降低材料表面能,从而显著降低月尘附着力。此外,该薄膜在-196℃~400℃ 间具有热稳定性,有类似金刚石的耐磨性,因此具有广阔前景。James R G 等^[47]将该技术应用于热控表面进行研究,结果表明氮气吹除月尘效率从 23% 提高到 67%。Adrienne D 等^[52]使用该技术修饰三种不同材料表面进行对比研究,包括导体(黑色聚酰亚胺薄膜)、半导体(硅)和绝缘体(石英)。处理后三种材料的粘附力都有明显程度的下降,其中黑色聚酰亚胺薄膜粘附力降低主要是由于接触电荷减少而导致静电力大幅降低(处理后范德瓦耳斯力增加了,但是增加程度不及静电力降低程度)。硅和石英粘附力的减少与降低表面能导致范德瓦耳斯力降低有关。此外,该研究团队还研究了空间紫外线照射对材料表面粘附力的影响,其中黑色聚酰亚胺薄膜和硅受影响不大,但石英在经紫外线照射后粘附力显著增加。

Cannon K M 等^[41]提出一种剥离涂层的想法,其易吸附月尘且吸附完成后可以脱落更新再生,但其目前还没有实际制备出来。

此外,最简单易用的被动防护方法就是设置防尘罩(如针对热控表面和光学表面等)和挡泥板(如月球车等)^[14-15,40]。

2 水冰探测仪的月尘防护

中国将进行月球水冰探测计划,届时飞跃器会飞往月球南极永久阴暗区挖掘月壤,并进行原位检

测以期找到月球水冰存在的直接证据,此外这也是月球原位资源利用(ISRU)的关键一环。

水冰探测仪主要由采掘部分、加热部分和分析部分三大环节组成。采掘部分通常采用螺旋钻取提升;加热部分通常采用微波辐射加热、电阻加热或太阳能聚光加热;分析部分一般采用质谱仪和色谱仪联用。在质谱色谱仪前端要设置小孔防止气流量过大损坏仪器。

针对水冰探测仪的月尘防护问题是一个独特的课题。月尘会堵塞小孔,且进入质谱计中会干扰正常检测甚至有损坏质谱计的风险。此外加热样品后有水蒸气流通,如何在分离月尘等杂质的同时减少水的损失,这是一个待解决的问题。因此,提出使用过滤和密封相结合的防尘方案。

2.1 过滤法

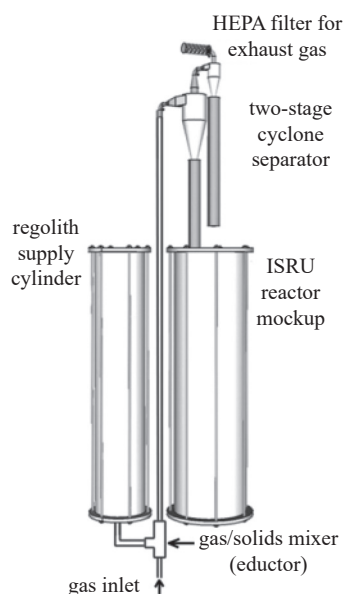
以上综述主要是外表面防护研究,包括应用在温控表面、光学表面以及宇航服上。内表面或是腔室内部防尘往往采用过滤法。如针对水冰探测仪采掘到的样品加热蒸发后在进入分析部分之前,需要对其进行过滤。

月尘等颗粒物与气相混合实际上形成了气溶胶,因此此类防尘问题也即气固分离问题,最常用的方法就是过滤法。初级过滤往往可以采用重力、离心力等外力场过滤器,如旋风除尘器等;过滤精度要求较高则通常使用烧结金属过滤器和高效空气过滤器(HEPA)等微纳过滤器,电除尘器因为其高效过滤精度高、压降小等特点也常常被使用。过滤一般是通过组合使用多级过滤器来实现的,如三级过滤器,预过滤采用筛网,中间过滤级用惯性过滤器,最终过滤器通常使用 HEPA 过滤器,过滤粒径可达 $<5 \mu\text{m}$,除尘效率高达 99% 以上^[9]。这些产品在地表试验效果都能达到预期目标,但是针对空间试验却需要进一步验证。

2.1.1 机械除尘器和纤维过滤器

James G M 等^[53-54]在 NASA 的 ISRU 项目中模拟月球 1/6g 环境下的过滤器效果,其使用两级旋风除尘器进行预过滤最后经过 HEPA 过滤器,装置简图如图 17 所示,结果可去除 99.97% 气动直径超过 0.3 μm 的月尘颗粒。

Biswas A 等^[55]报告了其合成的 $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 含水混合溶胶,通过静电纺丝技术制成纤维垫可以作为过滤器滤芯,其纤维平均直径约为 250 nm 至

图17 一种除尘过滤器布局方式^[53]Fig. 17 A lunar dust filter layout^[53]

1550 nm。实验结果表明在流速为 4.1 L/min 时, 对平均粒径为 $0.29\ \mu\text{m}$ 的雾化颗粒有近乎百分百的过滤效率, 而压降仅为 254 Pa。实验还发现随着平均纤维直径的增加, 压降反而减小, 这与理论推导的单纤维过滤效果相反, 分析可能与多纤维相互作用有关。Phil G 等^[56] 对比三类纤维过滤器的性能, 分别是纺粘织物 (纤维直径为 $40\ \mu\text{m}$)、非织造熔喷聚氨酯织物 (纤维直径为 $3\ \mu\text{m}$) 和由尼龙 6,6 组成的电纺纳米纤维网 (纤维直径为 $0.7\ \mu\text{m}$), 实验结果表明静电纺层没有模拟月尘 ($<20\ \mu\text{m}$ 的极细月尘) 穿透, 相较下熔喷非织造布层穿透更多, 而纺粘布穿透最多。

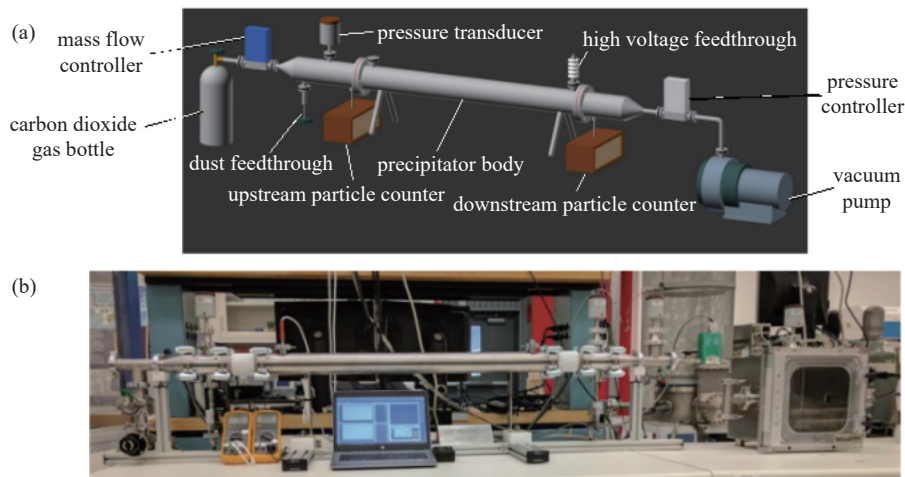
2.1.2 静电除尘器和永磁过滤器

James R P III 等^[57] 针对火星 ISRU 装置入口处的防尘开发了一种静电除尘器, 如图 18 所示。其上装有压力传感器、粒子计数器以及质量流量控制器, 连接处统一使用 O 型圈密封。由于电压可达上千伏, 为了避免高电压突变对传感器的损害, 需要使用 GΩ 级的大电阻。该装置有配套软件控制, 试验除尘率达 99.83%。该课题组进一步开发了第二代产品, 提高了过滤流量, 并将测试部分模块化, 提供有三套高压电极以优化尘埃收集效率^[58]。此外, 还对尘埃测量部分进行了改进, 在现有装置基础上增加了两个尘埃颗粒分析仪, 一个激光器和光学传感器, 用于测量颗粒大小分布、颗粒形态和收集效率^[59]。

Eimer B 和 Taylor L^[60] 提出了一种新型过滤器, 如图 19 所示, 即带有永磁系统的月球空气过滤器 (LAF-PMS), 其利用月尘的磁性来达到净化空气的目的。LAF-PMS 是一种多级过滤器, 由一系列按一定距离排列的永磁铁组成。通过将两块永磁体的相反极彼此靠近, 产生一个强大磁场来捕获通过的月尘颗粒。这种方法有望去除粒径大于 20 nm 的月尘颗粒。通过上下移动塑料隔板, 将插入的铁块嵌入到永磁体的间隙中, 可以使磁性大幅度减弱, 从而实现关闭系统来清除已经收集到的月尘, 防止月尘过多堵塞过滤器。由于水是抗磁性物质, 所以该方法可以避免水也被吸收。

2.1.3 过滤法的实验验证

Hecht M 等^[61-62] 针对火星原位提取氧气实验 (MOXIE) 的过滤, 在火星气体进入实验装置的入口

图18 静电除尘器。(a) 三维模型^[57] 和 (b) 实物图^[58]Fig. 18 Electrostatic precipitator. (a) Three-dimensional model^[57], and (b) physical drawing^[58]

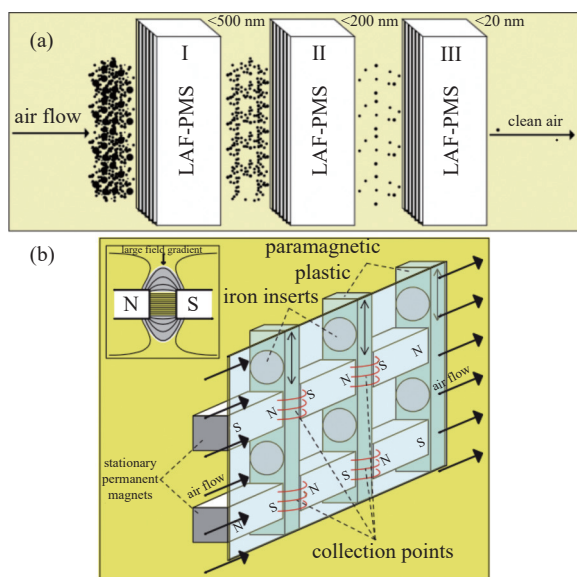


图19 带有永磁系统的月球空气过滤器(LAF-PMS)。(a) LAF-PMS 多级过滤示意图, (b) LAF-PMS 工作原理图^[60]

Fig. 19 Lunar air filtration with a permanent-magnet system (LAF-PMS). (a) Schematic diagram of LAF-PMS multistage filtration, and (b) Schematic diagram of LAF-PMS process^[60]

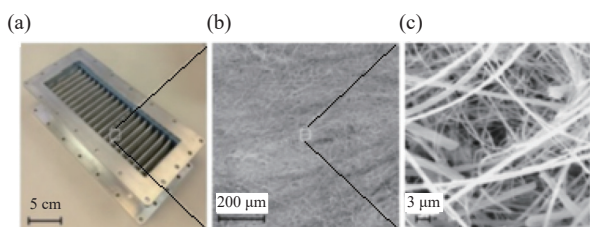


图20 不同尺度下的 HEPA 过滤器。(a) 5 cm, (b) 200 μm , (c) 3 μm ^[62]

Fig. 20 HEPA filter at different scales. (a) 5 cm, (b) 200 μm , (c) 3 μm ^[62]

处放置 HEPA 过滤器,而在加热器的前后设置烧结金属过滤器。图 20 为该实验所使用的 HEPA 过滤器的实物图和其微观电镜照片。通过理论和实验确定了过滤器压降与尘埃量(流速一定)、流速(尘埃量一定)成正相关。由于实验装置在连续流区之外运行,压降随着大气压力的增加而增加,这与地球上 HEPA 过滤器的压降与大气压力无关的规律不一致。MOXIE 已经证明挡板和合适的 HEPA 过滤器组合使用可以阻挡大部分尘埃,其余的可以在合适尺寸的过滤器上捕获,而不会因堵塞而产生过大的压降。

目前,过滤器的研究集中在研制出高效率低压降的产品,处理大流量过滤问题和过滤器小型化研

制,以及研发耐高温烟气过滤器等领域。对于水冰探测此项目,过滤器的小型化显得尤为重要。

2.2 密封防尘

密封可以隔绝器件内外间的物质交换,在空间载荷中的使用也是十分普遍的。考虑到月球特殊的物理条件,同时为了防止月壤样品被污染,所以一般不会使用常规的填料密封,而常用 O 型圈密封、刀口密封、螺旋密封和迷宫密封等。此外,密封件的材料选择也是一个重要考虑点。针对水冰探测仪这样复杂且精密的空间载荷来说,密封应该是无死角全覆盖的,采掘、加热和分析每个环节都需要分别防护,也包括连接的管道。采掘部分的密封为动密封,其余部分都是静密封。

2.2.1 针对采掘部分的密封

Delgado I R 和 Handschuh M J^[63]提出了一种带弹簧的聚四氟乙烯密封圈,如图 21 所示。初步实验结果表明,以 20 r/min 旋转速度循环 10000 次后,密封圈和轴的磨损都很小,且没有观察到模拟月尘颗粒穿过密封-轴界面,其计划后续进行温度影响和更长时间的测试工作。王庆功等^[64]对钻杆动密封也采用了此方法。

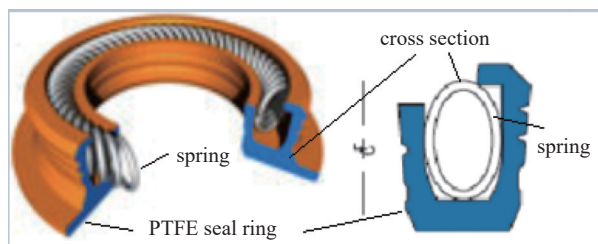


图21 带弹簧的聚四氟乙烯密封圈^[63]

Fig. 21 PTFE seal ring with spring^[63]

范继五等^[65]针对嫦娥五号钻头与套管之间进行间隙密封设计,图 22(a)为密封示意图。试验结果表明随密封间隙变小,进入密封界面的月尘量呈增多趋势,钻头扭矩明显增大,且容易发生卡钻,发现单边间隙为 0.05 mm 时是可行的。Liang J N 等^[66]分析得出是由于月尘颗粒卡在密封间隙,导致了钻头阻塞从而增大了钻探阻力。其在原有间隙密封基础上进行了改进,即在取样口再添加一个带护套的空心薄壁密封环进一步隔离月尘的影响,如图 22(b)。实验结果表明,使用该密封装置后钻探阻力小且稳定。Zhang W W 等^[67]进一步提出了螺旋密封法,如图 22(c),即在钻头内表面设置螺旋槽并在护套外表

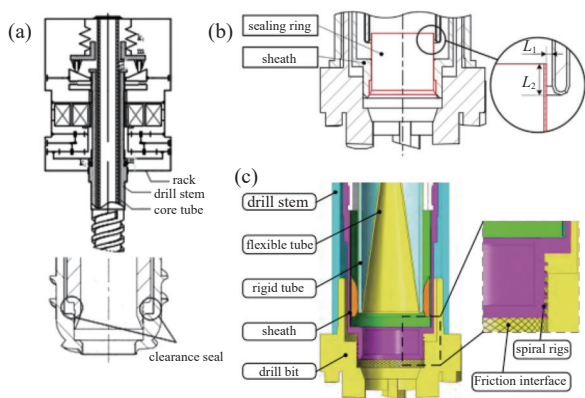


图22 间隙密封防尘及其改进。(a) 间隙密封示意图^[65], (b) 添加一个带护套的空心薄壁密封环^[66], (c) 螺旋密封法示意图^[67]

Fig. 22 Clearance seal for lunar dust mitigation and its improvement. (a) Schematic diagram of clearance seal^[65], (b) addition of a hollow thin seal ring with sheath^[66], (c) spiral seal method^[67]

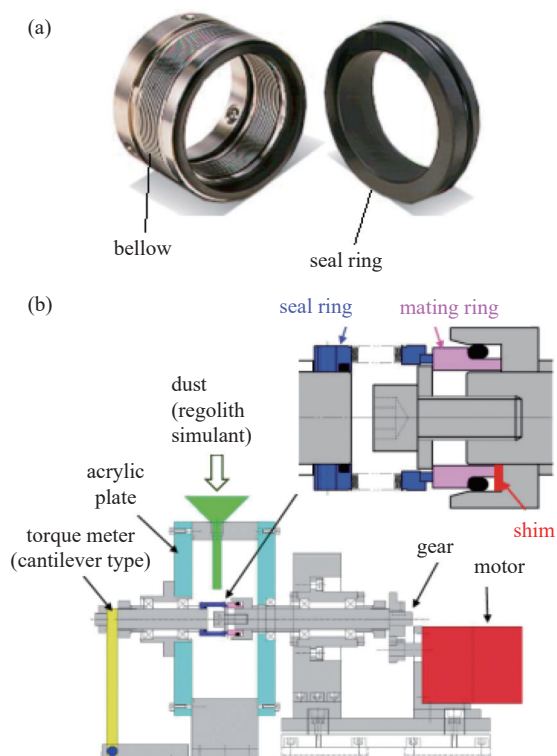


图23 带波纹管的机械密封。(a) 装置实物图, (b) 密封性能测试实验装置^[68]

Fig. 23 Mechanical seal with bellows. (a) Physical drawing of this equipment, and (b) schematic diagram of sealing performance test equipment^[68]

面设置摩擦界面, 月尘将作旋转运动通过螺旋槽排出而不会进入密封间隙。离散元模拟和实验研究

表明, 采用低螺旋角的螺旋密封法比毛毡密封和聚四氟乙烯密封效果都要好。

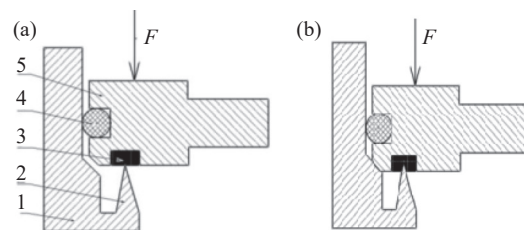
Matsumoto K 等^[68] 对旋转轴的端面密封使用带波纹管的机械密封, 如图 23(a) 所示, 通过调节波纹管长度来施加相应的密封力。其对机械密封的密封环(动环)和配合环(静环)的材料进行面对面旋转摩擦测试, 发现 SiC/SiC 材料组合摩擦系数和磨损率较低, 故选定该材料组合。在模拟月尘环境下测试密封性能, 实验装置如图 23(b) 所示, 通过旋转扭矩评估密封特性, 该值越小越好。该密封形式在有月尘的情况下测量的扭矩波动较大, 但发现月尘并未进入轴内, 推测可能是月尘进入波纹管外表面褶皱区域导致的。为此在波纹管表面加装一个盖子, 结果显示扭矩波动值和无月尘环境一样小。采用 MoS₂ 涂覆密封环和配合环表面, 同时将密封力降至 27 N, 则扭矩可降至 0.02 N·m, 且此时未见较大波动, 说明没有月尘进入, 这种情况下能够防住月尘也能减小密封面磨损。

2.2.2 针对贮存、加热和分析容器的密封

一般在容器密封界面采用刀口密封, 根据使用材料不同可分为弹性体密封(主要指高分子聚合物, 如经常使用的聚四氟乙烯(PTFE))和金属密封。

NASA 对阿波罗计划样品容器密封的解决方案是采用钢银合金刀口密封, 同时辅助以 PTFE 垫片和双层 O 型圈(L608-6 氟硅橡胶)密封^[69]。Margaret P P 和 Paula J D^[69] 针对 RESOLVE 项目建议使用锋利的碳化钨硬质合金刀口, 配合 O 型圈密封(可选金属、氟橡胶(Viton™ A)、PTFE 等)。

Ji M 等^[70-71] 对样品容器采用金属刀口密封, 辅助以橡胶圈密封, 原理如图 24 所示, 当密封容器时, 刀口进入钢银合金进行密封, 橡胶圈同步与容器壁形成径向密封。试验结果表明, 样品容器的漏率小



1-样品容器, 2-刀口, 3-钢银合金, 4-橡胶圈, 5-盖体
1-sample container, 2-knife edge, 3-indium silver alloy, 4-rubber ring, 5-cover body

图24 金属刀口密封前(a)、后(b)^[70]

Fig. 24 (before (a), after (b)) Metal knife edge seal^[70]

于 $5 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

Zhang B 等^[72] 针对样品容器采取 O 型圈密封, 并就其性能进行了地面实验, 测试了三种橡胶材料(氟橡胶、硅橡胶和丁腈橡胶)在交替温度变化和不同安装条件下的弹性。其考虑泄漏率和压力的平衡, 发现 O 型橡胶圈的压缩率为 25% 时较为合适。同时发现由于橡胶收缩方向的影响, O 型橡胶圈径向安装时泄漏率的变化滞后于轴向安装。最后评估丁腈 5080 橡胶密封圈轴向安装最为合适。该课题组又考虑了钢银合金刀口密封^[73], 其所需的压紧力较低, 适用于低功率工况。制备的钢银合金含有 91% 的钢和 9% 的银, 机械性能满足要求, 测试结果表明室温下漏率为 $3 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 这远低于 O 型橡胶圈密封。后续其还将进行月球环境模拟验证实验。

嫦娥五号样品容器采用了弹性体与金属挤压相结合的密封技术^[74], 实现漏率小于 $4.5 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

Feargus A J A 等^[75] 针对欧洲航天局的 ISRU 项目 ProSPA 的加热容器密封, 测试了全氟醚橡胶(Kalrez® 7075)作为弹性体刀口密封的使用效果。实验结果表明, 在月尘密度为 0.90 mg/cm^2 时, 泄漏率控制在 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。此外该研究团队还发现采用 10 mm 的刀口比 5 mm 密封效果更好。该方法虽然密封效果不及钢金属密封, 但是更耐高温比较适合加热器的密封。

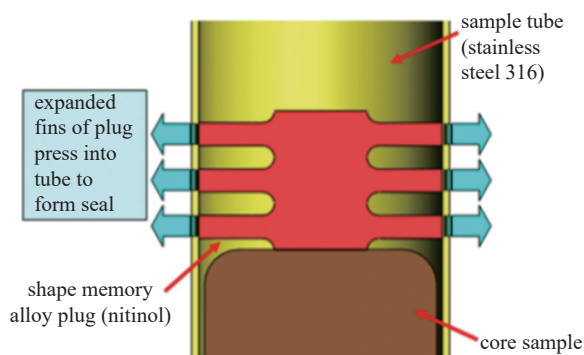


图25 SMA 活塞密封的结构与工作原理^[76]

Fig. 25 Structure and working principle of SMA plug seal^[76]

Paulo Y 等^[76-77] 针对 NASA 火星样品采样返回容器的密封提出使用形状记忆合金(SMA)活塞密封的方法, 活塞材料使用镍钛合金, 其受热后膨胀实现密封, 激活温度范围很广($45-135^\circ\text{C}$), 原理如图 25 所示。经加热冷却测试实验后, 氦检漏仪所测漏率为 $2 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 满足项目要求。此外, 该课题组还用有限元方法模拟容器内部温度场^[78], 发现该密封方法可以将温度控制在要求的 20°C 以下。

3 一种水冰探测仪月尘防护的方案设计

综合采取过往经验, 提出一种面向水冰探测仪的以过滤与密封相结合的全过程月尘防护方法, 如图 26 所示。在钻取装置处采用螺旋槽结合间隙密封, 防止月尘卡死旋转机构。在水冰探测仪加热器

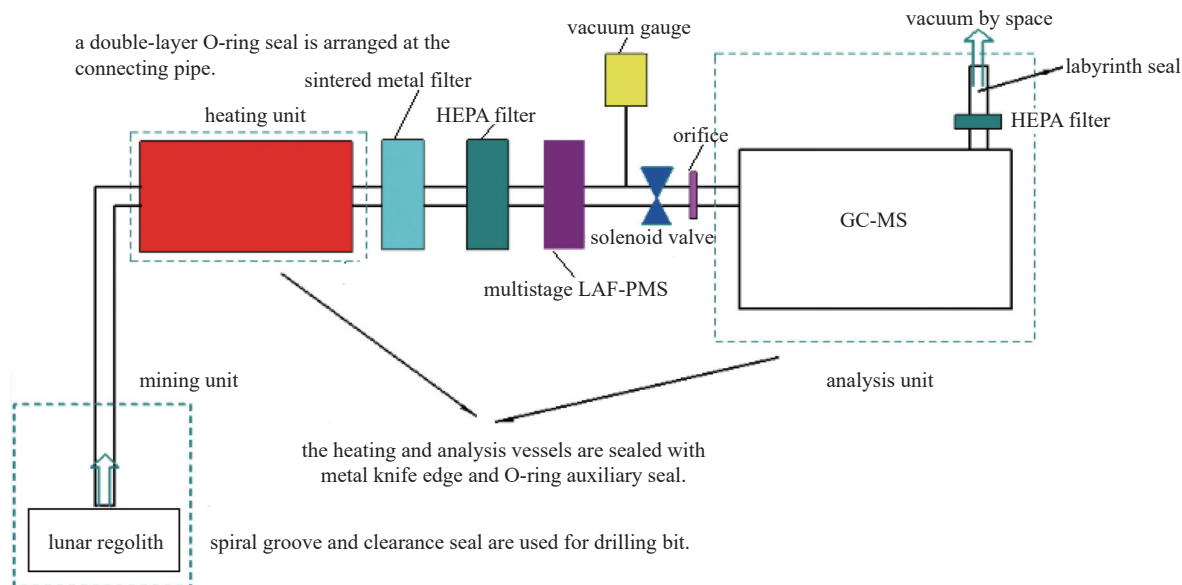


图26 月球水冰探测仪全流程月尘防护方案

Fig. 26 Scheme of full process lunar dust mitigation for lunar water ice detector

表 1 各月尘防护技术总结表
Tab. 1 Summary of lunar dust mitigation technology

技术名称			技术难度	装置复杂/ 可靠性	代价	寿命	除尘效率	不利因素	实用性
主动防护技术	机械力	尼龙刷子	容易	简单	便宜	不耐用	效率较低	只适用清除 5 μm 以上的月尘，且会损伤功能表面	手动或半自动，无人操作不适用
		超声波振动	容易	一般	便宜	耐用	效率较低	易干扰周围精密仪器的正常工作	需额外供能
	流体冲击力	气体射流	容易	简单	便宜	一般	效率较低	气体射流对空间温度骤变敏感	较笨重，不易搭载在小型载荷上
		电动防尘罩 EDS	一般	复杂	成本高	耐用	90% 以上	不适用于导体表面	质量大且能耗高
	电磁力	静电场	容易	一般	一般	一般	95%~100%	较难清除粒径 0.01 mm 以下和 0.18 mm 以上的月尘颗粒	如需清除各种粒径的月尘颗粒需要提高电压，实用性就会降低
		静电月尘收集器 ELDC/ 静电月尘除尘器 ELDR	技术不太成熟	复杂	成本较高	耐用	理论和模拟效率很高，但实验效率只有 35%	需要月尘充分带电；且不适用于大表面除尘	理论与实际相差较大；且较笨重
		电喷雾	一般	复杂	成本高	一般	近 100%	需高电压；且该装置的水会影响水冰探测过程	技术处在实验阶段，实际效率需进一步验证
		磁辊	容易	简单	便宜	不耐用	不高，实验测得为 64% 左右	清除效率与月尘磁导率关系很大	很笨重；且能量消耗较大
		电子束	容易	一般	成本较高	一般	75%~85%	不适用于处理大型表面，且使用会受到太阳光影响	使用高压，耗电量大；且清除速率慢
		Lotus 涂层	一般	一般	一般	一般	最高可达 97% 以上	易受电离辐射和带电月尘影响	涂层只能防止月尘不在表面堆积，而无法将水冰与月尘分离，且对于大型表面来说价格昂贵
表面改性技术	功函数匹配涂层 WFM	一般	简单	便宜	耐用	最高为 80%	需要和导体接触或接地才能发挥作用	主要适用于大型场地的除尘，而搭载在小型仪器上显得笨重	
	旋风除尘器结合 HEPA 过滤器	容易实现	一般	一般	一般	99% 以上	非常笨重且能耗高		
	静电纺丝制成的纤维过滤器	一般	一般	一般	不耐用	几乎 100%	有水挥发会影响水冰探测	效率虽高但不适用水冰探测项目	
	静电除尘器	一般	较复杂	昂贵	耐用	99% 以上	需高电压；且该装置零部件较多，可靠性不高	能耗较高	
过滤	多级永磁过滤器 LAF-PMS	一般	较复杂	一般	耐用	几乎 100%	该装置的自动化实现还需研究	该装置不需额外供能，配合 HEPA 过滤器可实现月尘的全部拦截	
	带弹簧的聚四氟乙烯密封圈	一般	较复杂	一般	耐用	近 100%	在极端温度和辐射的条件下运行不稳定	特殊条件下不稳定的特点将降低其可靠性	
	间隙密封	容易	简单	便宜	不耐用	对小粒径月尘颗粒几乎无效	容易卡钻	卡钻会影响正常工作	
	螺旋密封	一般	较复杂	一般	一般	近 100%	有一定钻探阻力但可控且稳定	在钻探环节该方法是可行的且易于实现	
密封	铜银合金刀口密封	容易	一般	成本高	一般	漏率小于 $5 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	不耐高温	漏率较低可满足要求，且技术非常成熟	
	全氟醚橡胶刀口密封	一般	一般	一般	一般	漏率 $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	密封效果不如金属刀口密封	可作为金属刀口密封的辅助密封形式	
	形状记忆合金密封	较难	复杂	成本高	一般	漏率 $2 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	需加热激活	该技术曾应用于样品试管中，但如何应用于大型腔体和质谱计等精密仪器还需研究	

(接表 1)

技术名称	技术难度	装置复杂/ 可靠性	代价	寿命	除尘效率	不利因素	实用性
WFM 涂层与 EDS 结合	较难	较复杂	成本高	耐用	超过 80%	效率不太高同时难处理 粒径 1 μm 以下的月尘	实用性不高, 两种技术 只是简单叠加而非有机 结合
本文提出的月尘防护方案	较难	复杂	成本高	耐用	99% 以上	环节众多, 可靠性下降, 但是对于水冰探测的月 尘全面防护是必要的	经过精心设计和细致研 究, 该方案具有可行性

和分析仪器间采取逐级过滤的思想, 设置三级过滤器, 前级为烧结金属过滤器($>20\ \mu\text{m}$), 中间级采用 HEPA 过滤器($>0.3\ \mu\text{m}$), 最终级采取 LAF-PMS($>20\ \text{nm}$)。为防止空间中的弥漫月尘进入, 仪器可设置金属刀口密封为主密封, 辅助以橡胶圈密封, 在各连接管道处采用双层 O 型圈密封。在直通月球空间的开口处采用 HEPA 过滤器和迷宫密封形式。

嫦娥三号探测到的月尘一个月球日沉积量约为 $0.83\ \text{mg}/\text{cm}^{2[79]}$, 也即 $12.66\ \text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 根据 Hecht M 等^[61-62]得出的尘埃累积量与面流速成正比的规律, 可估计分析部分出口处的面流速约为 $4.73\ \text{m/s}$ 。ReissP 等^[80]模拟实验表明, 水冰在 300°C 以下就可检测到, 采用的加热容器为圆柱体(可用容积为直径 $12\ \text{mm}\times$ 高度 $18\ \text{mm}$), 加热模式采取 $6^\circ\text{C}/\text{min}$ 步进升温。此时通过理论计算, 加热后气体的面流速约为 $0.175\ \text{m/s}$ 。

国家标准[81]规定, 最低等级 35 的 HEPA 过滤器处理平均粒径 $0.3\ \mu\text{m}$ 的微粒的效率不低于 99.95%, 而处理风量可高达 $4000\ \text{m}^3/\text{h}$, 折算为面流速为 $9829\ \text{m/s}$, 远远高于设计流速。实际上会采用相应较小尺寸的过滤器, 未来还需进行小型化适配工作。根据历次阿波罗任务采集的月壤数据^[4,82-83]和嫦娥五号采集的月壤数据^[84], 粒径在 $0.3\ \mu\text{m}$ 以下的月尘分别约占比重 5%~14% 和小于 10%, 保守估计通过前两级除尘效率可达 86% 以上。而通过多级 LAF-PMS 可实现百分百过滤 $20\ \text{nm}$ 以上的月尘, 此时过滤的月尘已占到 99% 以上。HEPA 过滤器采用 PTFE 材料是强疏水性, 由于水的抗磁性, LAF-PMS 对水分子的检测影响很小。此外, 本方案月尘防护装置不需要能源供应, 可满足载荷的可靠性要求。综上所述, 本方案是合理且有效的。

此外, 为了配合水冰探测仪的正常使用, 还需规划飞跃器的着陆过程, 使由羽流造成的月尘影响降至最低。

4 总结

从技术难度、装置复杂/可靠性、代价、寿命、除尘效率、不利因素、实用性等方面对本文所涉及的各种防护技术做出比较分析, 总结内容详见表 1, 如下。

从表 1 可看到, 诸多技术已经很成熟了, 但是各有优缺点, 因此适用的场合也不一样, 就水冰探测项目的实现来看, 本文提出的方案具有很强的针对性, 与其他技术相比具有质量轻、能耗低、效率高、等显著优势。

介绍了月尘的锋利、细微和带静电等特性以及所带来的不可忽视的危害, 月尘防护研究因而方兴未艾。本文综述了几乎覆盖整个月球探测过程中所使用的防尘技术, 包括以电磁技术为主的主动防护技术和以表面改性为主的被动防护技术。针对水冰探测所提出的新课题又重点聚焦其可能应用的防尘手段, 即过滤和密封。最后提出了一个全流程水冰探测仪的月尘防护解决方案, 预计总体月尘防护效率可高达 99% 以上, 这将保障项目的顺利实施, 为探索月球水冰奥秘、进一步利用月球建设可驻基地和进行 ISRU 项目具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Liu Y, Taylor L. Characterization of lunar dust and asynopsis of available lunar simulant[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59: 1769-1783

[2] Lawrence A T, Harrison H S, Carrier W D, et al. The lunar dust problem: from liability to asset[R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA, 2005, 1-8

[3] Taylor G J, Stephen M, James G. Report of the space resources roundtable VII: LEAG conference on lunar exploration[C]. Lunar Exploration Strategic Roadmap Meeting, 2005, 1-130

[4] Zhang S S, Wang S J, Li X Y, et al. Properties and harmfulness of lunar dust: A review[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(02): 339-350 (张森森, 王世杰, 李雄耀, 等. 月尘的性质及危

- 害评述[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2013, 38(02): 339-350(in chinese))
- [5] Yao R J, Wang X R, Wang Y. A review on lunar dust researches[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(06): 512-515+497 (姚日剑, 王先荣, 王鹳. 月球粉尘的研究现状 [J]. *航天器环境工程*, 2008, 25(06): 512-515+497(in chinese))
- [6] Walton O R. Adhesion of lunar dust[R]. NASA, USA, 2007, NASA/CR-214685, 1-41
- [7] Timothy J S, Richard R V, William M F. Impact of dust on lunar exploration[R]. NASA, USA, 2007, 1-4
- [8] Zhang X P, Gan H, Li C H, et al. Recent progress in lunar dust migration and biological toxicity research[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, 52(5): 495-506 (张小平, 甘红, 李存惠, 等. 月尘运动与生物毒性研究进展 [J]. *地球与行星物理论评*, 2021, 52(5): 495-506(in chinese))
- [9] Agui J H, Stocker P. NASA lunar dust filtration and separations workshop report[R]. NASA, USA, 2009, TM-215821, 1-28
- [10] Sandra A W, The Apollo experience lessons learned for constellation lunar dust management[R]. NASA, USA, 2006, TP-213726, 1-73
- [11] Stubbs T J, Vondrak R R, Farrell W M. A dynamic fountain model for lunar dust[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(1): 59-66
- [12] Weinhold M S, Levine J S. Increased concentrations of lunar dust associated with a denser lunar atmosphere resulting from heightened human presence and activity on the moon[R]. NASA, USA, 2020, 1-2
- [13] Kristen J, Michael J, Angela G, et al. Dust mitigation: impacts & opportunities for science on the lunar south pole[C]. NASA Lunar Surface Science Workshop, 2020, 1-17
- [14] Cao H X, Ruan P, Li T, et al. Summary of lunar dust removal methods for optical system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(20): 5310-5315 (曹红杏, 阮萍, 李婷, 等. 光学系统的月尘防护方法综述 [J]. *科学技术与工程*, 2007, 7(20): 5310-5315(in chinese))
- [15] Afshar M N, Wu C Y, Curtis J, et al. Review of dust transport and mitigation technologies in lunar and martian atmospheres[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(6): 1222-1241
- [16] Johansen M R. An update on NASA's lunar dust mitigation strategy[R]. NASA, USA, 2020, 1-2
- [17] Zeng L B, Qiu B G, Xiao J, et al. Study on characteristics of lunar dust and dust mitigation technologies[J]. *Aerospace Shanghai*, 2015, 32(01): 58-62+72 (曾令斌, 邱宝贵, 肖杰, 等. 月面扬尘特性与月尘防护技术研究 [J]. *上海航天*, 2015, 32(01): 58-62+72(in chinese))
- [18] Aliberti J. Design of a device to remove lunar dust from space suits for the proposed lunar base[D]. NASA, USA, 1990, CR-186679, 1-117
- [19] Wilson T L, Wilson K B. Regolith sintering: a solution to lunar dust mitigation?[J]. *NASA Lunar and Planetary Science*, 2005: 1422-1423
- [20] Calle C I, Mackey P J, Hogue M D, et al. Electrodynamic dust shields on the international space station: Exposure to the space environment[J]. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71: 257-259
- [21] Kawamoto H, Uchiyama M, Cooper B L, et al. Mitigation of lunar dust on solar panels and optical elements utilizing electrostatic traveling-wave[J]. *Journal of Electrostatics*, 2011, 69: 370-379.
- [22] Hickman N S, McFall J, Nason S, et al. Optimization of the photovoltaic powered systems with dust mitigation technology for future lunar and martian missions[C]. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012, 2815-2818
- [23] Kawamoto H, Miwa T. Mitigation of lunar dust adhered to mechanical parts of equipment used for lunar exploration[J]. *Journal of Electrostatics*, 2011, 69: 365-369
- [24] Sun Q X, Yang N N, Cai X B, et al. Advance in lunar surface dust removal method by electrodynamic field[J]. *Advances in Mechanics*, 2012, 42(6): 785-803 (孙旗霞, 杨宁宁, 蔡小兵, 等. 基于交变电场的月表除尘方法研究进展 [J]. *力学进展*, 2012, 42(6): 785-803(in chinese))
- [25] Jiang J, Lu Y F, Zhao H Y, et al. Experiments on dust removal performance of a novel PLZT driven lunar dust mitigation technique[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 165: 17-24
- [26] Jiang J, Lu Y F, Yan X T, et al. An optimization dust-removing electrode design method aiming at improving dust mitigation efficiency in lunar exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 166: 59-68
- [27] Afshar M N, Damit B, Wu C Y. Efficiency evaluation of an electrostatic lunar dust collector[C]. AIAA 41st International Conference on Environmental Systems (ICES), 2011, 5201: 1-14
- [28] Afshar M N, Wu C Y, Sorloaic H N. Efficiency determination of an electrostatic lunar dust collector by discrete element method[J]. *J. Appl. Phys.*, 2012, 112(2): 023305-023309
- [29] Afshar M N, Thakker Y, Wu C Y. Influence of back electrostatic field on the collection efficiency of an electrostatic lunar dust collector[J]. *Aerosol Air Qual. Res.*, 2014,

- 14: 1333–1343
- [30] Afshar M N, Wu C Y, Sorloaica H N. Electrostatic collection of tribocharged lunar dust simulants[J]. *Adv. Powder Technol.*, 2014, 25(6): 1800–1807
- [31] Afshar M N, Wu C Y, Moore R. Design of an electrostatic lunar dust repeller for mitigating dust deposition and evaluation of its removal efficiency[J]. *J. of Aerosol Sci.*, 2014, 69: 21–31
- [32] Bango J J, Dziekan M, Hodgson E. Development of electrospray technology for the removal of lunar dust from habitable space atmosphere[C]. AIAA 41st International Conference on Environmental Systems (ICES), 2011, AIAA 2011-5203: 1-18
- [33] Kawamoto H, Inoue H, Abe Y. Electromagnetic cleaner of lunar dust adhered to spacesuit[C]. Joint Annual Meeting of LEAG-ICEUM-SRR, 2008, 4004: 1-1
- [34] Kawamoto H, Inoue H. Magnetic cleaning device for lunar dust adhering to spacesuits[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2012, 25(1): 139–142.
- [35] Kawamoto H. Handheld cleaning tool for lunar dust adhered to spacesuits using magnetic and electrodynamic forces[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 34(4): 19-25
- [36] Farr B, Wang X, Goree J, et al. Dust mitigation technology for lunar exploration utilizing an electron beam[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 177: 405–409
- [37] Flanagan T M, Goree J. Dust release from surfaces exposed to plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(123504): 1–11
- [38] Farr B, Wang X, Goree J, et al. Improvement of the electron beam (e-beam) lunar dust mitigation technology with varying the beam incident angle[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 188: 362–366
- [39] Ren D P, Zhou X Z, Zhang W, et al. Study on design and test of dust removal for lunar lander[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(2): 134–139 (任德鹏, 周晓舟, 张伍, 等. 月面探测器喷气除尘系统设计及试验研究 [J]. *航天器工程*, 2015, 24(2): 134–139(in chinese))
- [40] Cannon K M, Dreyer C B, Sowers G F, et al. Working with lunar surface materials: Review and analysis of dust mitigation and regolith conveyance technologies[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 196: 259–274
- [41] Mu M, Zhang H Y, Wang X, et al. State-of-the-art passive protection technologies of lunar dust[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2021, 70(06): 135–150 (穆萌, 张海燕, 王晓, 等. 月尘被动防护技术的最新研究进展 [J]. *物理学报*, 2021, 70(06): 135–150(in chinese))
- [42] Margiotta D V, Peters W C, Straka S A, et al. The Lotus coating for space exploration: A dust mitigation tool[R]. NASA, USA, 2010, 77940I: 1-7
- [43] Connor K M O, Abraham N S. Lotus Dust Mitigation Coating and Molecular Adsorber Coating[R]. NASA Tech Briefs, 2015, No. GSFC-E-DAA-TN26955: 1-18
- [44] Zhang H Y, Wang X, Li S X, et al. The investigation on lunar dust passive protection of aluminum surface[J]. *Space Electronic Technology*, 2022, 19(6): 85–90 (张海燕, 王晓, 李思新, 等. 铝金属基底月尘被动防护表面研究 [J]. *空间电子技术*, 2022, 19(6): 85–90(in chinese))
- [45] Wang X, Wang W D, Shao H, et al. Lunar dust-mitigation behavior of aluminum surface with multiscale roughness prepared by a composite etching method[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(29): 34020–34028
- [46] Dorota B, Eóin T, Natan G, et al. Lunar dust: Its impact on hardware and mitigation technologies[C]. *Proceedings of the 46th Aerospace Mechanisms Symposium*, 2022, 287-300
- [47] James R G, Deborah L W, Robert M M. Evaluation of surface modification as a lunar dust mitigation strategy for thermal control surfaces[R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA, 2011, 1-12
- [48] Jesus A D, Jonathan W. Upwards migration phenomenon on molten lunar regolith: New challenges and prospects for ISRU[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63: 2220–2228
- [49] Kavya K M, Pablo D L, Leora P, et al. Proof of concept demonstration of novel technologies for lunar spacesuit dust mitigation[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 137: 472–481
- [50] Kavya K M, Leora P, Pablo D L. Self-cleaning spacesuits for future planetary missions using carbon nanotube technology[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 157: 134–144
- [51] Crowder M, Haley C. Mitigating molecular and particulate contamination via surface energy[J]. *SPIE*, 2008, 7069(706909): 1–9.
- [52] Adrienne D, Genevieve D, Xu W, et al. Mitigation of lunar dust adhesion by surface modification[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59: 1784–1790
- [53] Robert P M, Ivan I T III, James G M. Pneumatic regolith transfer systems for in-situ resource utilization[R]. NASA, USA, 2010, 1-11
- [54] James G M, Ivan I T III. Planetary regolith delivery systems for ISRU[J]. *J. Aerosp. Eng.*, 2013, 26: 169–175
- [55] Biswas A, Park H, Sigmund W. Air filtration with nano and micron sized titania silicate fibers[C]. *Proc.*, 41st International Conference on Environmental Systems, 2011,

- 5185: 1-7
- [56] Phil G, Heidi S G, Robert S, et al. Effect of nanofibers on spore penetration and lunar dust filtration[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2008, 3(2): 19-28.
- [57] James R P III, Jacob R S P, Michael R J, et al. Martian atmospheric dust mitigation for ISRU intakes via electrostatic precipitation[C]. *ASCE EARTH & SPACE*, 2016, 1-65
- [58] James R P III, Michael R J, Jerry J W, et al. Design of a second generation electrostatic precipitator for martian atmospheric dust mitigation of ISRU intakes[R]. *NASA, USA*, 2018, 1-7
- [59] Beverly W K, John E L, Jerry J W, et al. Electrostatic precipitator dust density measurements in a Mars-like atmosphere[J]. *Particulate Science and Technology*, 2021, 39(3): 271-284
- [60] Eimer B, Taylor L. Dust mitigation: lunar air filtration with a permanent-magnet system (LAF-PMS)[C]. *Proc., Lunar and Planetary Institute Science Conference*, 2007, 1654-1655
- [61] McClean J B, Merrison J P, Iversen J J, et al. Filtration of simulated martian atmosphere for in-situ oxygen production[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 191(22): 1-44
- [62] Hecht M, Hoffman J, Rapp D, et al. Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE)[J]. *Space Sci Rev*, 2021, 217(9): 1-76.
- [63] Delgado I R, Handschuh M J. Preliminary assessment of seals for dust mitigation of mechanical components for lunar surface systems[R]. *NASA, USA*, 2010, TM-216343, 1-7
- [64] Wang Q G, Wang C, Pang Y, et al. Study of drilling-based water extraction technology from icy lunar regolith[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(6): 617-624. (王庆功, 王超, 庞勇, 等. 含冰星壤钻取密封与水资源提取转化技术研究 [J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(6): 617-624(in chinese))
- [65] Fan J W, Xu J K, Li P. Analysis and Verification of Rotary Clearance Seal of Moon Coring Drilling Tool[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2020, 43(1): 71-75 (范继五, 许金凯, 李鹏. 月面取芯钻具回转间隙密封分析与验证 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(1): 71-75(in chinese))
- [66] Liang J N, Tao L J, Zhang W W, et al. Analysis of the lunar regolith sample obstruction in the Chang'E-5 drill and its improvement[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69: 2248-2258.
- [67] Zhang W W, Chen H Z, Jianga W K, et al. A spiral seal method in the lunar regolith for Chang'E-5 drill: seal design and experiment[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 11378-11386.
- [68] Matsumoto K, Takada S, Yokoyama T, et al. Development of mechanical seal against dust for lunar exploration[J]. *Trans. JSASS Aerospace Tech.*, 2020, 18(5): 165-173.
- [69] Margaret P P, Paula J D. Survey of dust issues for lunar seals and the RESOLVE project[C]. *NASA Seal/Secondary Air System Workshop*, 2006, 477-494
- [70] Ji M, Wang C Y, Sun L. A structure used for the sealing and locking of lunar samples[C]. *ICSRT '18*, 2018, 38-41
- [71] Ji M, Sun L, Yang M B. Seal design and test verification of lunar sample container[C]. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2018, 439(042025): 1-7
- [72] Zhang B, Yu M, Yang H Y. Leakage analysis and ground tests of the O-type rubber ring seal applied in lunar sample return devices[J]. *Proc IMechE Part G:J Aerospace Engineering*, 2015, 229(3): 479-491.
- [73] Zhang B, Hong H C, Yu M, et al. Leakage analysis and ground tests of knife edge indium seal to lunar sample return devices[J]. *Proc IMechE Part G:J Aerospace Engineering*, 2018, 233(6): 1-13.
- [74] Deng X J, Zheng Y H, Jin S Y, et al. Design and implementation of sampling, encapsulating, and sealing system of Chang'e-5[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2021, 51(7): 753-762 (邓湘金, 郑燕红, 金晟毅, 等. 嫦娥五号采样封装系统设计与实现 [J]. *中国科学:技术科学*, 2021, 51(7): 753-762(in chinese))
- [75] Feargus A J A, Simon S, Simeon J B. Gas containment for in situ sample analysis on the Moon: Utility of sealing materials in the presence of dust[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 180(104784): 1-10
- [76] Paulo Y, Thimal D A, Paul B, et al. Sample sealing approaches for mars sample return caching[R]. *NASA, USA*, 2013, 1-24
- [77] Paulo J Y. Hermetic seal designs for sample return sample tubes[R]. *NASA Tech Briefs*, 2013, NPO-48927, 9-10
- [78] Bao X Q, Paulo Y, Pradeep B. FE simulation of SMA seal for Mars sample return[J]. *Proc. of SPIE*, 2016, 8692(86924T): 1-9
- [79] Zhang H Y, Wang Y, Chen L P, et al. In-situ lunar dust deposition amount induced by lander landing in Chang'E-3 mission[J]. *SCIENCE CHINA : Technological Sciences*, 2020, 63(3): 520-527
- [80] Reiss P, Grill L, Barber S J. Thermal extraction of volatiles from the lunar regolith simulant NU-LHT-2M: preparations for in-situ analyses on the Moon[J]. *Plane-*

- tary and Space Science, 2019, 175: 41–51
- [81] GB/T 13554-2020, 高效空气过滤器 [S]
- [82] Sun H, Shen Z G, Zhang X J, et al. Properties of lunar dust and research status of its simulants[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(6): 642–652 (孙浩, 沈志刚, 张晓静, 等. 月尘特性与模拟月尘研制现状 [J]. 载人航天, 2015, 21(6): 642–652(in chinese))
- [83] Liu Y, Taylor L A. Lunar dust: Chemistry and physical properties and implications for toxicity[C]. NLSI Lunar Science Conference, 2008, 2072: 1-2
- [84] Cao K N, Dong M T, She Z B, et al. A novel method for simultaneous analysis of particle size and mineralogy for Chang'E-5 lunar soil with minimum sample consumption[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(9): 1704–1714 (曹克楠, 董明潭, 余振兵, 等. 一种以极低的样品消耗同时测定嫦娥五号月壤粒度和矿物组成的新方法 [J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 65(9): 1704–1714(in chinese))