

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.06.012

铝金属基底月尘被动防护表面研究

张海燕^{1,2}, 王 晓¹, 李思新¹, 王 鷁², 王永军²,
李存惠², 王卫东¹, 朱应敏¹, 张 骥¹

(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 真空与低温重点实验室, 兰州 730000)

摘 要:月尘是探月任务中遇到的极大环境因素,对探月设备的粘附是影响其功能实现甚至重要部件失效的主要因素。月尘与铝金属基底粘附力可优化项为范德华力。针对以上理论结果,通过电化学刻蚀结合低表面能涂覆设计了一种月尘防护表面。通过控制防护表面制备过程中的时间和工艺得到不同粗糙度和表面能的防护样品,最终得出所制备样品的最优表面能为 22.52 mJ/m^2 , 表面粗糙度为 $2.444 \mu\text{m}$ 。通过翻转测试得到翻转角度为 60° 时的月尘防护效率为 58.41% 。经测试,通过电化学刻蚀得出的样品,继续增加电化学刻蚀时间和电流,表面粗糙度继续增大,月尘容易卡在微结构中,并不能继续提高月尘防护效率。研究得出的月尘被动防护技术可以广泛应用于未来深空探测任务的部组件防护。针对不同的防护表面,后续可开展效果优良的防尘表面研究,本方法比主动月尘防护方法节省在轨电源损耗。

关键词:月尘;粘附特性;表面改性;月尘被动防护

中图分类号:V443

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2022)06-0085-06

The investigation on lunar dust passive protection of aluminum surface

ZHANG Haiyan^{1,2}, WANG Xiao², LI Sixin¹, WANG Yi², WANG Yongjun¹,
LI Cunhui¹, WANG Weidong¹, ZHU Yinmin¹, ZHANG Ji¹

(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)

Abstract: Lunar dust is the biggest problem met in lunar exploration. The deposited lunar dust on lunar exploration equipment will affect their function or even let them lose efficiency. This study firstly analyses the main adhesion force is Van Der Waals Force. Thus, in order to protect lunar equipment from lunar hazards, a low surface energy and micro structure surface should be designed. In this paper, this protect surface is obtained through electrochemical etching on condition of different electrical density and time. Finally, the best efficient protect surface with surface energy of 22.52 mJ/m^2 and with surface roughness of $2.444 \mu\text{m}$ is obtained and its lunar dust protection efficiency is 58.41% when the rotation angle is 60° , which reveals that lunar dust passive protection method can be widely used in future deep space exploration. Through test, the samples has bigger roughness when the etching time and current increase using electrochemical etching, which may get lunar dust stuck in microstructure and therefore decrease lunar dust protection efficiency. In future, we are prepared to design high efficient lunar dust passive

收稿日期:2022-05-22; 修回日期:2022-06-27

基金项目:国家自然科学基金(编号:42004157);真空与低温重点实验室基金(编号:6142207200202);甘肃省自然科学基金(编号:21JR7RA743)

引用格式: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. 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.

protection surfaces for different protected instrument surface, which will save much energy than active lunar dust protection method.

Key words: lunar dust; adhesion force; surface modification; lunar dust passive protection

0 引言

月球表面覆盖着一层风化层(土壤),风化层中约有 20% 的体积由直径小于 20 mm 的月尘颗粒组成,中值粒径为 $70\ \mu\text{m}$ ^[1]。由于其体积小,月球重力低,很容易在任何干扰发生时传播。从阿波罗时代起,月尘被美国航天局确定为成功完成未来探月任务的主要障碍^[2-4]。月尘在探月任务中主要在三个方面会极大制约探月任务的顺利安全执行,第一方面是月尘颗粒粘附在与轴承和密封件接触的机械设备部件上以及热控表面等,导致密封机构等灾难性的破坏^[5-7],第二方面是月尘颗粒覆盖太阳能电池板和光学元件,如透镜和镜子,降低了它们的光学性能^[8-9],第三方面是月尘表面锋利且具有毒性,宇航员在月球行走执行任务过程中,宇航服会被月尘划伤后漏气,宇航员月球行走后带入登月舱的灰尘使取下头盔的宇航员呼吸困难,且舱内存在的月尘颗粒也会影响宇航员的视力^[10-11]。无论对探月设备还是宇航员而言,月尘都是极大的障碍,因此在未来更长时间的探月任务中,月尘对任务的顺利进行将造成极大的困扰。为了减轻月尘粘附在探月设备、密封机构机械部件表面、宇航员的防护设备造成危害,需要深入研究月尘与探月设备接触表面之间的粘附特性及主导因素,在月面活动中有针对性地进行月尘监测和防护,降低月尘对探月设备或宇航员的危害,保障未来探月任务的顺利执行和安全实施。

月尘在月面受扰动的机制分为自然机制和人为活动两种。自然机制主要是指月表发生的微流星体碰撞和月尘静电悬浮,碰撞和悬浮后的月尘会污染探月设备功能表面^[12]。在人为活动引起的月球尘埃事例中,最严重的是火箭发射和着陆。在阿波罗 12 号任务执行过程中发现,在距离着陆地点 155 m 位置处的探测器表面发生了大量的灰尘积聚^[13]。人为引起月尘扰动的次要因素是月面的科学探测活动,包括月表采样、宇航员行走、月球车探测等,这些人类在轨活动也会引起月尘扰动^[14-15]。在嫦娥三任务中对发动机着陆、月球车行走和自然机制引起的月尘沉积量进行了在轨监测,最终得出由发动机着陆引起的月尘累积量为 $8.3\ \text{mg}/\text{cm}^2$,月

球车行走和自然机制引起的月尘年累积量为 $21.4\ \text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{y}$ ^[16-17]。

近年来,随着探月任务不断推进,NASA 也开始征集相关的月尘监测和月尘防护方案,旨在未来月球基地建立过程中和载人月球探测任务中可以做到很好的月尘防护,避免月尘对任务本身造成的困扰。目前月尘防护方式主要有主动防护与被动防护两种方法,主动防护主要有机械清除、流体清除和静电清除三种^[18],虽然除尘效率高,但需要在轨进行能源供给且装置结构复杂,容易造成被防护设备损伤。因此,在轨探测设备表面可以使用被动防护方式防护月尘损伤,此种防护方法成本低廉、简单可靠,在未来月尘防护中将会大量应用。

1 月尘颗粒与铝表面粘附力

月尘与铝表面接触时,通常会受到范德华力和重力共同作用。范德华力是由相邻中性原子或分子相互感应而产生的瞬时的极性所造成的粒子间的一种弱作用力^[12]。微米、亚微米量级的颗粒与表面接触时,颗粒会出现表面挤压、变形、粘连等现象,这些现象与宏观尺度的接触完全不同,此时两种物质之间的距离很小,分子和原子之间的电子云会因为震动而极化,范德华力起主要作用。范德华力是一种近程力,在月尘颗粒距离粘附表面较远的情况下,其与壁面间的吸引效果最弱。通常情况下,范德华力的计算公式为^[19]

$$F_{\text{vdw}} = \frac{H}{6} \left[\frac{rR}{z_0^2(R+r)} + \frac{R}{(z_0+r)^2} \right] \quad (1)$$

其中, R 为颗粒半径, r 为被防护表面粗糙微凸体半径, H 为哈梅克常数, z_0 为范德华力平衡间距,一般为 $0.4\ \text{nm}$ 。

假设月尘颗粒为球形,则重力可表示为

$$G = \frac{4\pi}{3} \rho_p R^3 g \quad (2)$$

其中, g 为 $1.63\ \text{m/s}^2$ 。 ρ_p 为月尘颗粒密度取 $3.1952\ \text{g}/\text{cm}^3$ ^[20]。通常情况下,月尘颗粒的粘附力远大于重力,且重力为月球自然环境引起的固有力,对于粘附力的优化应针对范德华力。

2 金属表面月尘被动防护

2.1 范德华力影响因素分析

由式(1)可知,范德华力的主要确定因素为哈梅克常数和月尘颗粒的粒径这 2 个参数。对于月表特定粒径的月尘而言,哈梅克常数减小会降低月尘颗粒与接触表面之间的范德华力,而哈梅克常数是探月设备表面材质的表面能的表征。因此,月尘颗粒的粘附力很大程度上取决于与之接触表面材料的表面能和颗粒的粒径。表面能是分离两个表面所需的功,具体是指在分子尺度上,所接触的两个表面最初紧密接触,将它们分开时抵抗分子间吸引力所做的功,最终直到接触的两个表面被无限远地分开。在月球空间中,月球高真空环境许多影响是显而易见的,例如空气阻力的不显著性、缺乏渗透性问题或排气等。月球环境下,水蒸气或氧气分子的缺乏,也会影响许多材料的表面化学,因此材料的表面能会因处于真空中而受到显著影响。例如,当云母在高真空中时,表面能为 $\gamma_s \approx 4500 \text{ mJ/m}^2$,但当在潮湿的实验室空气中,表面能降至 $\gamma_s \approx 300 \text{ mJ/m}^2$ [21]。众所周知,超洁净的金属表面在高真空条件下接触和(或)相对滑动时会形成“冷焊”。单层氧化物或其他污染物会阻止此类键的形成,还会显著降低测量的表面能 [22]。因此,在月球环境下,材料会表现出比地球上高得多的有效表面能。已有的研究证明,荷叶效应中水滴会滑落荷叶表面是因为荷叶表面的低表面能特性和纳米结构引起的粗糙度的变化。根据以上分析,从月尘防护角度来讲,通过降低接触表面的表面能并通过微纳结构设计可以降低月尘与探月设备功能表面的粘附力。

2.2 月尘被动防护表面制备

目前用于月尘防护的技术可分为主动防护和被动防护技术两种,主动技术是那些旨在清洁表面或利用外力保护表面免受灰尘沉积的技术。流体、机械和电动/静电方法属于这一类。流体方法是指使用液体、凝胶、泡沫和气体将颗粒从表面带走的方法。机械方法包括刷涂、吹气、振动和超声波驱动技术。灰尘控制中的电动/静电方法受到基于太阳能的静电悬浮机制的启发,对不带电或低电荷粒子的控制需要不同于通过光电发射和电子撞击的自然充电的创造性充电机制。被动技术是指在实验室中进行物理或化学预处理,以减轻灰尘吸引力,安装后不使用外力的技术。这些减尘技术利用

表面改性来减少灰尘层和被保护表面之间的粘附。应用遮蔽物和防护罩来拦截一些表面上的灰尘沉积也属于这一类 [18]。

由于月球环境的特殊性,一些在地球上的常规机械除尘方法在月球上并不适用。比如在阿波罗计划期间,普通条件下利用尼龙刷能够很好的清除月球车散热器表面粘附的月尘,但是在月球环境下,刷子并不能清除掉非常细小的颗粒,所以散热器表面的热性能还是会显著下降 [23]。除此之外,有研究学者利用液体冲洗的方法来清除月尘,但是月球上本身并没有液态水,如果依靠航天器自身携带的液体来清除显然是不现实的。因为航天器的表面系统通常都是能量有限的,而且电动防尘罩存在电气或机械故障的可能性,所以不依赖于输入能量的被动除尘方法显示出了一定的优势。

本研究通过设计一种低表面能的微纳结构表面来对探月设备进行月尘防护,属于被动防护方法。其制备方法如下:首先,将铝片切割为实验室用大小(20 mm × 20 mm),用砂纸打磨去除表面氧化层,用乙醇、超纯水依次超声清洗 10 min,吹干备用。以铝片作阳极,以相同尺寸的紫铜片作阴极,两板间距 20 mm,面对面放置在 0.2 mol/L 的 NaCl 溶液中。在 1 A/cm² 和 2 A/cm² 的电流密度下进行电化学刻蚀 120 s 和 240 s。刻蚀完毕取出放在超纯水中停止反应。超声清洗 20 min,取出后放在烘箱中 150 °C 下加热 2 h 烘干。取出后的样品再进行全氟硅烷溶液的喷涂,最后得到低表面能微纳结构月尘防护表面。

2.3 月尘被动防护表面防护效率测试

图 1 为不同条件下制备的月尘防护表面。从图 1 可知,通过电化学刻蚀法得到了具有纳米结构的微结构样品,可以观察到样品表面的微纳结构存在,且不规则。

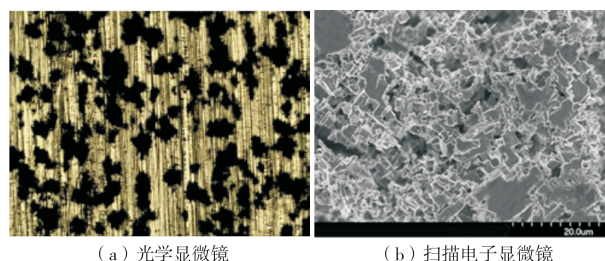


图 1 光学显微镜和扫描电子显微镜下的形貌表征

Fig. 1 Morphology characterization under optical microscope and scanning electron microscope

通过接触角测试仪分别测试了不同刻蚀时间和不同刻蚀电流条件下样品表面的接触角,可以直观看到样品表面被处理后的表面能变化。表 1 列出样品在不同制备条件下的粗糙度测试结果。

表 1 不同样品粗糙度测试结果

Tab. 1 Roughness test results of different samples

样品序号	样品制备条件	粗糙度
1	2 min, 1 A/cm ²	0.976
2	2 min, 2 A/cm ²	2.201
3	4 min, 1 A/cm ²	1.683
4	4 min, 2 A/cm ²	2.444

从表 1 可以得出,对于不同的制备时间和不同的电流密度,所得到的样品表面粗糙度有所不同。在制备时间相同的条件下,电流密度增大会使得表面粗糙度增加;相同电流密度下,制备时间增加也会使得表面粗糙度增加。一般意义上,表面粗糙度越大,月尘颗粒与接触表面之间的接触面积越小,可以减小月尘粘附力。但针对粒径较小月尘,经过测试,继续增大表面粗糙度不能提高月尘防护效率,因此粗糙度为 2.444 是最优粗糙度。

表面粗糙度是影响表面构型的一个重要参数,也会直接影响范德华力。为了得到粗糙度对范德华力的影响,需要对样品进行表面能测试,通过对比得到最优表面能的样品。本研究通过接触角测试仪可获得所制备样品的表面能,所测得与水的接触角如图 2 所示。

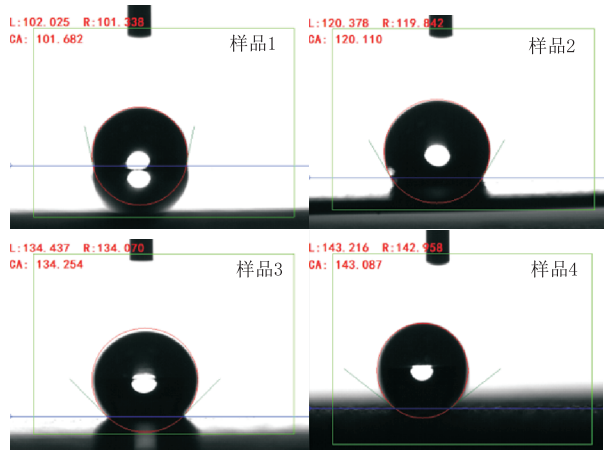


图 2 不同样品表面接触角测试结果

Fig. 2 Contact angle results of different samples

由图 2 可以得到,所有样品表面接触角都为疏水表面,测试过程中测得未经处理的铝基表面接触角为 90.583°,因此可以得出经过处理后的表面

都不同程度降低了表面能,其具体表面能测试数据如表 2 所列。

表 2 不同样品表面的表面能测试结果

Tab. 2 Surface energy of different samples

样品名称	表面能测试值/(mJ/m ²)
铝基表面	43.36
样品 1	36.67
样品 2	31.85
样品 3	26.23
样品 4	22.52

从表 2 可以看出,经过低表面能处理后的样品表面的表面能都有一定程度的降低,样品 4 的表面能最低。表 2 测试数据与图 2 所得到的测试角测试结果一致,即样品 4 的接触角越大表面能越低。通过比较表 1 和表 2 可得,随着刻蚀时间和刻蚀电流的增加,粗糙度越大,表面的微结构表面积越大,使得相同低表面能涂层处理后粗糙度大的表面获得的低表面能物质多,从而实现降低范德华力的作用。

为了更加清晰地得知所设计表面的防尘性能,本研究通过翻转法对样品进行防尘能力测试,通过翻转法对防尘效果进行分析评价,实验中使用的模拟月尘为贵阳理化所提供的样品,其原理为:

$$\eta = \frac{m_b - m_a}{m_a} \times 100\% \quad (3)$$

其中, m_a 是测试前月尘样品的质量, m_b 是测试后月尘样品的质量。

实验中先通过振荡器对月尘震荡,不仅可以使样品表面的月尘覆盖均匀,还可以使得月尘颗粒通过摩擦带电。整个月尘防护效率评价实验都采用贵阳地化所制备的月尘模拟物 CLD-i,其月尘特性参考文献[24]。测试实验结果如表 3 所列, M_{b1} 为旋转 30°测试后的样品质量, M_{b2} 为旋转 60°测试后的样品质量。

表 3 月尘防护效率测试实验结果

Tab. 3 Experimental results of lunar dust protection efficiency test

样品名称	m_a/g	$M_{b1}/g, \theta_1 = 30^\circ$	$M_{b2}/g, \theta_2 = 60^\circ$
铝基表面	0.5905	0.5582	0.4927
样品 1	0.6558	0.5846	0.5074
样品 2	0.8696	0.8409	0.6375
样品 3	0.5558	0.4456	0.3867
样品 4	0.596	0.4403	0.4121

从表 3 可以得到在翻转角度分别为 30° 和 60° 时,样品表面剩余的月尘质量,由式(3)计算不同样品表面的月尘清除效率,计算结果如表 4 所列。

表 4 不同样品表面月尘防护效率

Tab.4 Lunar dust protection efficiency of different samples

样品名称	30° 翻转角度防尘 效率 $\eta/\%$	60° 翻转角度防尘 效率 $\eta/\%$
铝基表面	5.47	16.56
样品 1	10.86	22.63
样品 2	18.59	26.69
样品 3	19.83	30.42
样品 4	26.12	58.41

表 4 计算得出了 30° 和 60° 翻转角度下不同样品的防尘效率。4 种样品表面相比未处理过的铝基表面,月尘防护效率都有所提升。 30° 和 60° 翻转角度条件下,样品 4 的防尘效率最高为 58.41%,结合表 2 可得出样品表面的表面能越低,则月尘防护效率越高,但是防尘效率最高未超过 60%,究其原因,可能的推测结果有以下 2 点:1) 为了使得样品表面的月尘均匀分布于样品表面,使用振荡器对样品进行测试前处理,振荡过程中月尘颗粒会发生摩擦带电现象,使得月尘的粘附力中静电力项有所增加,且实验过程中无法测得实际的电荷情况以及电荷是否泄放,使得实验测试过程中代入了静电力这一项,对范德华力项有所影响;2) 整个实验在地面进行,没有测得在真空环境下对整个实验结果的影响,也会引入相应的误差项。

3 结论

文章首先根据月尘颗粒与接触表面的粘附力理论模型得出范德华力是影响粘附力的主要因素,针对范德华力公式中的参数,可以得出通过降低接触表面的表面能和接触表面的面积进行范德华力优化。基于以上理论分析,设计了一种通过电化学刻蚀结合低表面能物质喷涂方式的月尘被动防护方法。通过设定不同的制备工艺参数,设计了 4 种具有微纳结构的低表面能样品,分别测试了 4 种表面的表面能,通过在 2 A/cm^2 的电流密度条件下对表面进行 4 min 的电化学刻蚀后,再对表面进行低表面能涂层涂覆,可以得出此表面的表面能最低,最终得到的防尘效率也越高。为了验证所制备表面的防尘效率,在地面建立了测试实验系统,最终

得出翻转角度为 60° 时的最优防尘效率为 58.41%。通过本研究可知,在无源条件下月尘被动防护方法也可以极大提高月尘防护效率,为后续月球探测任务中月尘防护提供新的思路。

月球高真空、高低温环境这些因素对样品表面性能会产生影响,为了可以获得更加准确可靠的月尘防护效率数据,在未来的实验中需要对所制备的表面在真空环境下测试,对比防护表面在地球环境和月球环境下的性能差异,为后续月尘防护提供可靠的数据。除此之外,在后续研究中,在基于铝金属作为基底材料条件下,需要对在轨不同的探月设备功能表面进行月尘防护研究,设计出适合不同探月设备功能表面的月尘防护方法,为未来探月任务的月尘防护提供定制化的月尘防护产品。

参考文献:

- [1] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. The Lunar sourcebook [M]. Cambridge University Press, 1991.
- [2] ZAKHAROV A V, ZELENYI L M, POPEL S I. Lunar dust: Properties and potential hazards [J]. Solar System Research, 2020, 54(6): 455-476.
- [3] 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(2): 362-366.
- [4] CHRISTOFFERSEN R. Lunar dust effects on spacesuit insights from the Apollo spacesuits: NASA/TP-2009e214786 [R]. Insights from the Apollo Spacesuits, 2009.
- [5] GAIER J, WATERS D, BANKS B, et al. Evaluation of surface modification as a lunar dust mitigation strategy for thermal control surfaces [C]//41st International Conference on Environmental Systems, 2011: 5183.
- [6] CAIN J R. Lunar dust: The hazard and astronaut exposure risks [J]. Earth, Moon, and Planets, 2010, 107(1): 107-125.
- [7] GAIER J R, JAWORSKE D A. Lunar dust on heat rejection system surfaces: Problems and prospects [C]//AIP Conference Proceedings, 2007: 880.
- [8] KAWAMOTO H, HASHIME S. Practical performance of an electrostatic cleaning system for removal of lunar dust from optical elements utilizing electrostatic traveling wave [J]. Journal of Electrostatics, 2018, 94(1): 38-43.
- [9] 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(4):370-379.
- [10] LINNARSSON D, CARPENTER J, FUBINI B, et al. Toxicity of lunar dust[J]. Planetary and Space Science, 2012, 74(1):57-71.
- [11] WANG J, HUANG Z. Dust effects on spacesuit charging/ arcing: Implications for astronaut safety on lunar surface [J]. The Impact of Lunar Dust on Human Exploration, 2020, 21(4):15019.
- [12] KATZAN C M, JONATHAN L E. Lunar dust transport and potential interactions with power system components; NASA-CR-4404[R]. Lewis Research Center, 1991.
- [13] MPAGAZEHE J N, STREET K W Jr, DELGADO I R, et al. An experimental study of lunar dust erosive wear potential using the JSC-1A1 lunar dust simulant [J]. Wear, 2014, 316(1-2):79-91.
- [14] LI M, TIAN D B, BAI Y, et al. Simulation test on lunar dust raising by lunar rover wheel[C]//Design, Manufacturing and Mechatronics, 2015.
- [15] MPAGAZEHE N J, STREET W K, DELGADO R I, et al. Kicking up some dust: An experimental investigation relating lunar dust erosive wear to solar power loss; NASA/TM-2013-218068; E-18744[R]. 2014.
- [16] 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.
- [17] LI D T, WANG Y, ZHANG H, et al. In situ investigations of dust above the lunar terminator at the Chang'E-3 landing site in the mare imbrum [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(17):1-11.
- [18] AFSHAR-MOHAJER N, WU C Y, CURTIS J S, et al. Review of dust transport and mitigation technologies in lunar and Martian atmospheres [J]. Advances in Space Research, 2015, 56(6):1222-1241.
- [19] ZHANG H Y, WANG X, ZHANG J, et al. Adhesion effect analysis of ultra-fine lunar dust particles on the aluminum-based rough surface based on the fractal theory [J]. Advances in Space Research, 2022, 69(7):2745-2755.
- [20] LI C L, HU H, YANG M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission [J]. National Science Review, 2021, 9(2):188.
- [21] BAILEY A I, PRICE A G, KAY S M. Interfacial energies of clean mica and of monomolecular films of fatty acids deposited on mica, in aqueous and non-aqueous media [J]. Special Discussions of the Faraday Society, 1970, 7(1):118.
- [22] RABINOWICZ E, TANNER R I. Friction and wear of materials [J]. Journal of Applied Mechanics, 1966, 33(2):479.
- [23] GAIER J R, SIAMIDIS J, LARKIN E M G. Effect of simulated lunar dust on the properties of thermal control surfaces [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2010, 47(1):147-152.
- [24] TANG H, LI X Y, ZHANG S S, et al. A lunar dust simulant: CLDS-I [J]. Advances in Space Research, 2017, 59(4):1156-1160.

作者简介:张海燕(1990—), 甘肃平凉人, 博士研究生, 工程师。主持国家自然科学基金项目、真空技术与物理国家级重点实验室基金项目、甘肃省青年人才托举工程项目、甘肃省陇原创新创业人才项目和甘肃省自然科学基金项目等 10 余项国家和省部级科研项目。发表 SCI 论文 20 余篇, EI 论文 10 余篇。主要从事空间尘埃探测及防护研究。E-mail: zhy_zhanghaiyan@163.com