

月壤原位挥发分加热炉密封圈设计及月尘影响分析

王思龙¹, 唐钧跃², 张露², 张宏安², 王印超³, 刘子恒^{2,4}, 李健楠⁴, 卢孜筱⁵, 姜生元²

(1. 深空探测实验室, 北京 100195; 2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001; 3. 沈阳航空航天大学, 沈阳 110136;
4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 5. 国家纳米科学中心, 北京 100190)

摘要: 针对挥发分测量仪中的加热炉密封圈在轨使用过程中会沾染月尘而影响其性能的特点, 面向静密封弹簧蓄能密封圈进行设计, 设计了耐高低温、可多次重复密封、容尘性好的挥发分测量仪加热炉密封圈, 为验证月尘沾染下密封圈的稳定密封性能, 通过搭建密封圈模拟月尘沾染试验平台对沾染模拟月尘后密封圈密封性能变化进行试验测试和分析, 结果表明: 在极端工况下, 密封力仅300 N时, 泄漏率小于 $9 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 增大密封力是降低泄漏率最有效的方式, 且在合适的密封力范围内, 具有多次重复密封的能力。研究可为月壤挥发分测量仪在轨应用提供参考。

关键词: 弹簧蓄能密封圈; 月尘; 泄漏机理; 密封性能

中图分类号: V444.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)06-0607-12

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20240049

引用格式: 王思龙, 唐钧跃, 张露, 等. 月壤原位挥发分加热炉密封圈设计及月尘影响分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(6): 607-618.

Reference format: WANG S L, TANG J Y, ZHANG L, et al. Design of seals for a lunar soil in-situ volatile heating furnace and analysis of lunar dust effects[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(6): 607-618.

引言

月球探测的成果将为人类重返月球和建立月球基地提供依据。月球科学研究对推动空间科学发展具有重要作用, 月球资源开发利用对人类的可持续发展具有重要意义, 目前“嫦娥七号”探月工程科学目标是探测与研究水、挥发性成分的分布、含量和来源^[1-3], 安装在“嫦娥七号”的科学载荷挥发分测量仪可通过原位测量月壤中的挥发分及其同位素含量, 为探索月球表面氮元素来源、区域地质年代和月壤成熟度等提供科学依据, 其核心功能模块中的分体式加热炉用于重复加热月壤样品制备月壤挥发分, 为防止挥发分的泄漏, 需要一个重复密封组件维持炉内低泄漏率的密封环境, 防止影响质谱仪定量分析月壤挥发分的准确性。

在工程实际中, 月尘受静电力的作用较明显, 且容易附着在密封圈的表面, 影响其密封性能。有的月尘颗粒粒径只有 $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ^[4-5], 由于月球的重力只有地球重力的1/6, 作业区域的月尘在空间悬浮的时间相对比较长, 这些极其细微的尘埃颗粒会在机构运转的过程中沾染在密封圈表面, 影响密封圈的密封性能。

因此设计一个耐高低温、可多次重复密封、容尘性好的密封圈和研究月尘沾染对密封圈密封性能的影响具有重要的意义。

20世纪六七十年代至今, 美国、苏联、欧洲、日本和中国都进行了采样返回任务或原位采样分析任务, 各国进行的采样任务也采用了多种密封方案。美国的“海盗号”(Viking)火星探测器加热炉的密封方式为双层环形刀口嵌入炉体上表面的金环形成密封面^[6]; “罗塞塔号”(Rosetta)通过氧化锆球体挤压接触加热炉上表面的软质铂环形垫的方式密封彗星样本^[7-8]; “好奇号”(Curiosity)火星分析仪样品处理系统通过钎焊到样品杯底的退火铜垫和加热炉上的钛合金刀口挤压接触形成密封, 采用逐次递增密封力的方式, 首次密封需施加的密封力为667 N, 最大到1350 N, 该密封组件的泄漏率可达到 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ^[9]; “毅力号”(Perseverance)火星车当样品管内样品收集完毕后, 密封施力机构提供高达2 kN的密封力将密封盖内的卡套向内推入, 镀有金镀层的刀口挤压钛金属管壁, 从而在接触面上建立起良好密封条件^[10]。

欧洲和俄罗斯联合提出的“火星太空生物学计划”

收稿日期: 2024-11-20 修回日期: 2025-02-20

基金项目: 国家重点研发计划(2025YFF0510801, 2022YFA1204604); 黑龙江省自然科学基金青年项目B类(YQ2025E010); 深空探测全国重点实验室开发基金(NKDSEL2024003); 黑龙江省重点研发计划(2024ZXDXB52)

(Exobiology on Mars, ExoMars) 携带了火星有机分子分析仪 (Mars Organic Molecule Analyzer, MOMA) 通过移动密封压力台使加热炉顶部的刀口挤压嵌入密封台上的氧化锆球体, 形成有效的气体密封^[11]。

俄罗斯的“月球16号”(Luna 16) 探测器采用橡胶圈密封样品收集装置和球形返回舱, 由于橡胶的高低温承受能力有限而产生了一定的泄漏^[12]; “月球27号”(Luna 27) 的主要任务是探测月球南极的水冰及其赋存状态, 通过将末端的氧化锆球与加热炉端面经过 400 N 的力挤压接触形成密封, 在高达 0.90 mg/cm² 的粉尘水平和高达 400 N 的作用力下, 泄漏率最好可达 10⁻² Pa·m³/s^[13]。

“隼鸟1号”(Hayabusa 1) 采用双氟碳O型橡胶圈进行密封, 样品收集器转移到样品容器后, 通过锁紧机构与压簧施加密封力挤压橡胶圈而形成密封效果, “隼鸟2号”(Hayabusa 2) 进行了改进, 去掉了容易吸附陆地大气的氟碳材料, 但将密封力增大了1倍^[14]。

“嫦娥五号”月球探测器将表取与钻取获得的月球样品分别存储在初级封装容器中, 之后将两者放入密封封装装置内。采用一种金属刀口与橡胶复合密封结构, 兼顾金属密封与橡胶密封的优缺点^[15]。研究人员通过地面试验测试, 密封力大致 3 kN, 对应的密封漏率优于 4.5 × 10⁻⁹ Pa·m³/s, 能够适应飞行过程中的真空、高低温、月尘等环境^[16]。

本文设计了弹簧蓄能密封圈, 分析了加热炉密封方案原理和泄漏机理。为验证密封圈在在轨作业过程中沾染月尘后的稳定密封性, 搭建了密封圈模拟月尘沾染试验台。还设计了密封圈模拟月尘沾染试验, 并分析了不同工况、密封力及密封次数对弹簧蓄能密封圈密封性能的影响, 探究其在轨作业时的泄漏情况, 验证了密封圈的容尘性能。

1 月壤挥发分测量仪

为探索月球表面氮元素来源、区域地质年代和月壤成熟度, 在“嫦娥七号”巡视器安装科学载荷月壤挥发分测量仪, 用于原位测量月壤中的挥发分及其同位素含量。

挥发分测量仪系统由4个部分组成, 微量采样单元从月表钻取样品, 暂存于安装在巡视器舱外的样品暂存单元, 挥发分制备单元接收样本吸纳片后转移至加热炉中, 在加热过程中提取其中挥发成分后, 弃除吸纳片, 最后由挥发分测量仪主体中的4极杆质谱仪检测挥发分, 全流程如图1所示。

其中感应加热炉主要用于加热吸纳片, 提取挥发

物质, 其示意图如图2所示, 加热炉的气密性可决定挥发分检测的准确性和成功率,

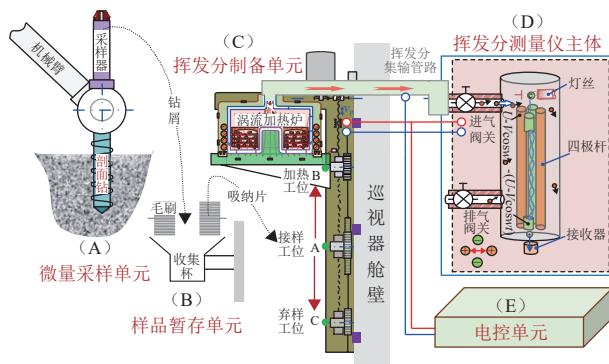


图1 挥发分测量仪系统组成
Fig. 1 System components of volatile measurement instrument

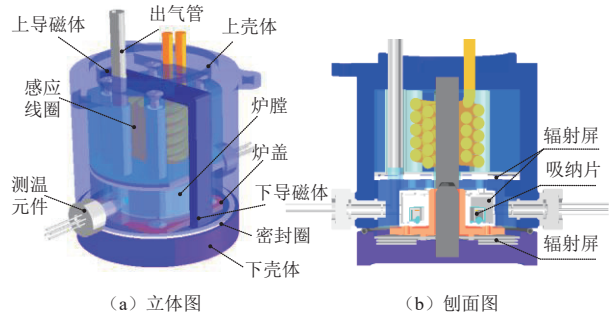
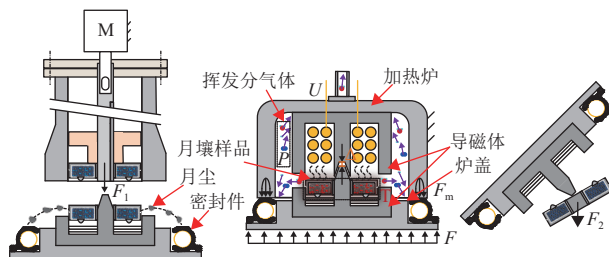
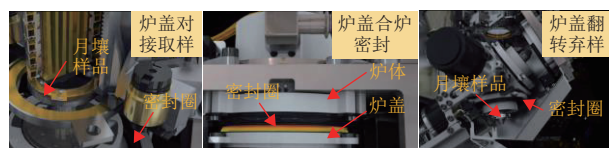


图2 感应加热炉结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of induction heating furnace structure

有密封圈参与的流程有炉盖对接取样、炉盖合炉密封和炉盖翻转弃样, 如图3所示, 对接取样的过程中, 月壤样品封装器会从取样管内推出掉落至炉盖, 在这个过程中细粒径月壤可能会从封装器内飘洒至密封圈表面。沾染的尘埃颗粒会在合炉密封后嵌入在密封区域内, 进一步影响密封圈的密封性能。



(a) 密封圈密封原理图



(b) 密封圈密封实物图

图3 密封圈密封流程

Fig. 3 Sealing process of seal ring

除此之外,核心吸纳片处温度可高达950℃,在真空环境下,通过反射屏、炉体、炉壳形成了多层隔热屏障,减少传递至密封圈的热量,以降低密封圈选材要求。

为保证挥发分测量的正常进行和加热炉的可靠密封性能,对密封圈进行了专项设计,由加热炉的在轨作业原理可知,散料过程中会有部分月尘沾染到密封唇上,影响密封性,因此在密封圈设计过程中进行了专项容尘性设计,并对沾染月尘后的密封性和重复性进行专项验证。

2 密封圈设计

2.1 密封圈设计难点

月壤挥发分测量仪单机载荷工作场景与需求对加热炉密封结构设计提出了一些高要求。

密封泄漏率要求:基于挥发分测量仪的测量原理,在15次散料后,密封泄露率需小于 $4 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,方能保证挥发分测量仪的准确性;

密封重复性要求:加热炉需要重复接送样进行提取分析(≥ 36 次),则散料密封组件需要具备一定的可重复使用性能;

密封温度环境要求:挥发分热提取分析密封界面处高温可达100℃,低温可达-60℃,故散料密封组件需要经受高低温环境考验;

有限密封力限制要求:如图1所示,由于加热炉与主机连接处采用悬臂梁结构设计,较大密封力易发生结构破坏,经前期仿真分析验证,炉盖可提供的最大密封力仅为400 N,要求在此限制下达到密封要求;

密封容尘性要求:散料密封组件可能会遭受来自月面环境中自然悬浮的月尘与送样时产生的微扬尘,粒径小于10 μm ,面积浓度不大于10颗/ mm^2 ,将会极大影响其密封性能,这对散料密封组件的容尘性提出一定要求;

密封圈材料释气性要求:月表超高真空环境(10~12 Pa)的特殊性,在高真空中易挥发的材料会对挥发分提取分析过程产生影响,因而不适用。

2.2 密封圈设计及方案优选

1) 密封圈方案设计

通过对以上任务要求和工况分析,分别提出了平衡式金属空心环端面密封、双道卡套片状环径向密封和内置弹簧密封环端面密封3种密封方案。

(1) 平衡式金属空心端面密封

如图4所示为金属空心环密封方案密封结构示意图,该密封方案主体结构为金属空心环,在一定密封

力作用下金属空心环产生弹塑性变形,填充炉体与炉盖接触面的微观间隙从而产生密封效果。

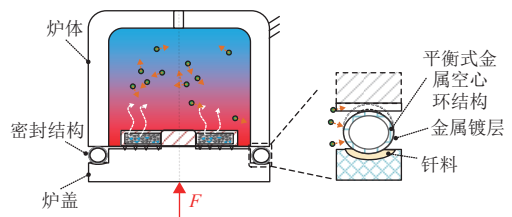


图4 平衡式金属空心环密封方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of balanced metal hollow ring sealing scheme

力作用下金属空心环产生弹塑性变形,填充炉体与炉盖接触面的微观间隙从而产生密封效果。

金属结构使其具有良好环境适应性,但通过检漏试验发现,最大密封力400 N难以建立良好密封条件,密封检漏结果出现多次大漏现象。

(2) 双道卡套片状环径向密封

密封方案如图5所示,该方案主要通过过盈配合装入炉体卡槽内的双道卡套片状环与炉盖卡槽边缘接触形成密封效果。炉盖在密封力作用下沿接近炉体方向运动,卡套片状环被挤压变形,填充炉盖卡槽接触部分微观间隙从而建立密封条件。

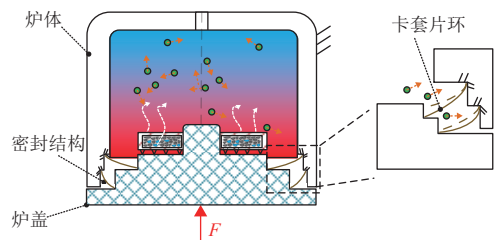


图5 双道卡套片状环径向密封方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of radial sealing scheme of double ferrule sheet ring

该方案中卡套片状环采用无氧铜材料TU1,卡套片状环端部与炉盖卡槽接触处进行局部精磨处理,以提高其接触表面质量。

该方案对炉体与炉盖之间的对接精度要求较高,炉盖沿炉体运动过程中产生的偏差亦导致难以建立密封条件。

(3) 内置弹簧密封环端面密封

该密封方案如图6所示,该密封方案主要由内置弹簧与密封唇构成,依靠弹簧的弹性变形补偿密封唇由于偏心等受力不均造成密封接触不良等问题,密封唇产生弹塑性变形与炉体接触面产生密封效果。

表1为各密封方案对比结论,经过综合对比,内置弹簧密封环端面密封方案具有所需密封力较小、耐温

范围较广、易加工和重复密封性能较好的特点, 后续通过对此密封方案进行详细结构设计, 确认其详细结构参数。

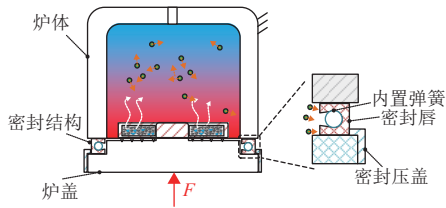


图6 内置弹簧密封环密封方案示意图

Fig. 6 Schematic diagram of internal spring seal ring sealing scheme

表1 密封方案多维度对比

Table 1 Multi-dimensional comparison of sealing schemes

密封方案	密封类型	耐高温性	密封力需求	连接难易	对接精度要求	密封效果
平衡式金属空心环端面密封	端面密封	较好	较大, kN量级	钎焊工艺, 较难	较高	好
双道卡套片状环径向密封	径向密封	较好	适中	过盈装配, 正常	很高	差
内置弹簧密封环端面密封	端面密封	较好	较小	螺钉固连, 较易	较高	较好

2) 密封圈结构设计

(1) 内置弹簧设计

由刚度曲线图7可知, 弹簧整体刚度从高到低依次为螺旋卷绕扁弹簧、悬臂式弹簧、盘绕式斜圈弹簧。悬臂式弹簧整体结构呈“V”形, 其刚度较低且弹簧根部容易应力集中, 整体性能不稳定; 盘绕式斜圈弹簧整体刚度较小且不断变化, 给定力载作用下形变量不确定。故综合考虑选择刚度值较大、结构稳定且刚度为定值的螺旋卷绕扁弹簧。

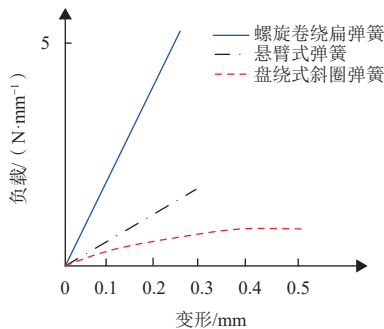


图7 不同类型弹簧负载与变形关系曲线

Fig. 7 Load and deformation curves of different types of springs

对弹簧刚度进行分析即研究其在载荷作用下的形变量, 弹簧整体结构具有如图8(a)所示的周期对称性, 其结构整体受力具有重复性, 故研究其刚度特性时采用如图8(b)所示的单周期弹簧进行分析。

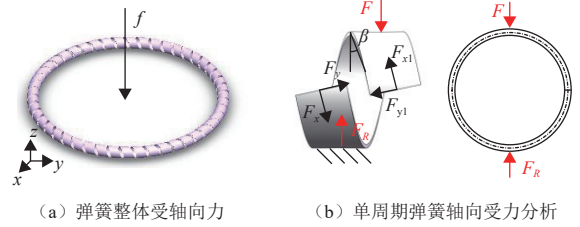


图8 弹簧受力分析图

Fig. 8 Spring force analysis

基于如下假设对单周期弹簧进行受力分析^[17]: 假设轴向力 f 均匀作用在弹簧片状横截面上, 受力分析计算时将受力作用点等效到截面形心处; 由于螺旋角 β 较小, 为降低分析难度, 在计算分析时不考虑其影响。

在图8单周期弹簧受力分析基础上, 结合结构受力特点确认结构受力具有对称性, 故取如图9所示的单周期模型的1/4进行受力分析, 其对称界面处所受剪力为0, 所承载荷力为单周期模型的一半。弹簧整体刚度为

$$K = nk = \frac{nEb^3}{3\pi R^3} \quad (1)$$

其中: n 为并联单周期弹簧节数; k 为一节单周期弹簧刚度; E 为弹簧材料的弹性模量; b 为弹簧片宽度; h 为弹簧片厚度; R 为弹簧圈半径。如图10为单周期弹簧结构细节参数, 结合式(2)~(7)可知, 弹簧整体刚度与弹簧片厚度 h 、弹簧片宽度 b 及弹簧截面直径 d 有关, 且厚度 h 及截面直径 d 对弹簧整体刚度影响更显著。

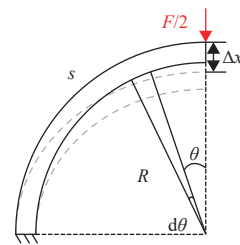


图9 弹簧单周期1/4圈受力分析图

Fig. 9 Spring single cycle 1/4 turn force analysis

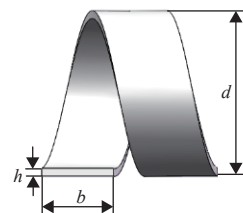


图10 单周期弹簧主要结构参数

Fig. 10 Main structural parameters of single cycle spring

为验证所构建弹簧刚度原理模型的正确性, 采用有限元仿真对弹簧进行静力学刚度分析, 仿真设置如图11

所示, 下压板固定, 上压板通过向下施加位移载荷, 通过后处理提取下压板的压缩反力即可间接求得单周期弹簧刚度。

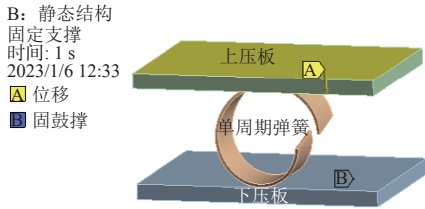


图 11 刚度仿真分析设置
Fig. 11 Stiffness simulation analysis setting

通过研究不同弹簧片厚度 h 、弹簧片宽度 b 及弹簧截面直径 d 参数变化趋势, 将仿真值与理论值进行对比。设置上压板压缩 0.2 mm , 对于弹簧片厚度 h 在 $0.1\sim 0.3\text{ mm}$ 、弹簧片宽度 b 在 $1.4\sim 1.8\text{ mm}$ 、弹簧截面直径 d 在 $3\sim 3.4\text{ mm}$ 的压缩反力 F_R 仿真结果进行数据处理后与理论计算值对比如图 12 所示。由对比曲线可知, 刚度 k 与弹簧片厚度 h 、弹簧片宽度 b 呈正相关, 而与弹簧截面直径 d 呈负相关, 且弹簧片厚度 h 对弹簧刚度影响更显著。弹簧片厚度 h 、弹簧片宽度 b 、弹簧截面直径 d 在一定范围内取值对应的刚度变化趋势和基本数值在理论和仿真方面一致, 弹簧刚度原理模型具有较高的准确性。

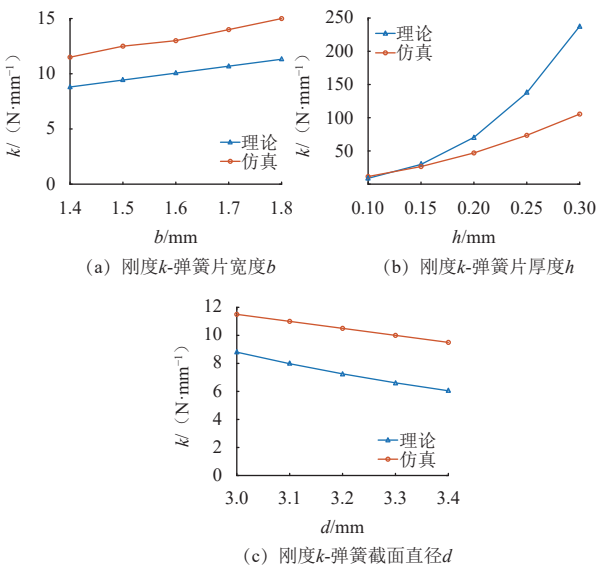


图 12 理论计算与仿真结果对比曲线
Fig. 12 Comparison between theoretical calculation and simulation results

结合弹簧等效刚度理论模型及一定取值范围内变化趋势, 弹簧细节参数设计值为: 弹簧片厚度 h 取 0.1 mm , 弹簧片宽度 b 取 1.4 mm , 弹簧截面直径 d 取

3 mm , 计算可得弹簧整体刚度约为 704 N/mm , 忽略密封唇的微小形变对于密封结构整体刚度的影响, 最大密封力 400 N 作用下的弹簧最大变形量为 0.57 mm , 满足任务工况下密封结构整体最大变形量小于 0.8 mm 的要求。

(2) 密封唇设计

为配合炉体结构端面密封, 密封唇整体采用环形结构, 如图 13 为不同开口朝向对应于加热产生挥发分前后工况受力分析图, 对于开口朝内的密封唇而言, 加热产生挥发分后气体压力作用于密封唇内侧力 F_p 与弹簧压缩反力 F_R 共同提供密封力, 而对于开口向外的密封唇而言, 加热前后密封力无变化。对于本工况而言, 加热炉内部气压大于外部超高真空气压, 开口朝内的密封唇密封效果更好, 故密封唇整体设计结构为环形且开口朝内。

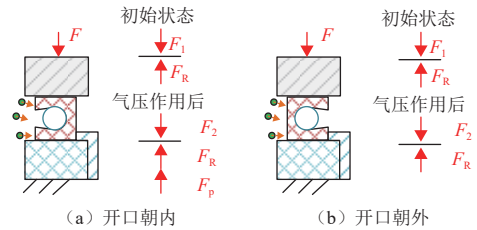


图 13 密封唇接触部位受力状态分析对比
Fig. 13 Analysis and comparison of stress state of sealing lip contact part

在送样过程中会有月尘沾染到密封唇表面, 严重影响密封唇的密封性能, 因此进行密封唇容尘设计, 如图 14 所示, 密封唇端面采用双道突起结构, 兼具冗余备份和容尘效果, 相较于平面端面密封唇结构具有更大的接触应力与更好的容尘性能。

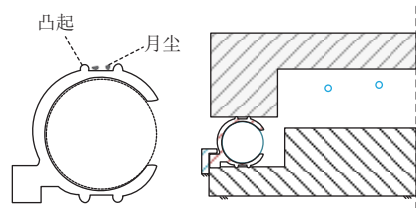


图 14 密封唇容尘设计
Fig. 14 Seal lip dust design

密封唇凸起类型会影响其与炉体配合面的接触状态, 从而影响密封性能。通过有限元仿真方法对比矩形凸起、梯形凸起、半圆形和无凸起四种类型的应力及接触状态, 为确定凸起类型提供参考。

通过控制其他结构参数不变, 仿真温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 密封力取 100 N , 图 15 与图 16 所示为 4 种类型凸起的 von-Mises 应力云图及接触状态曲线图。

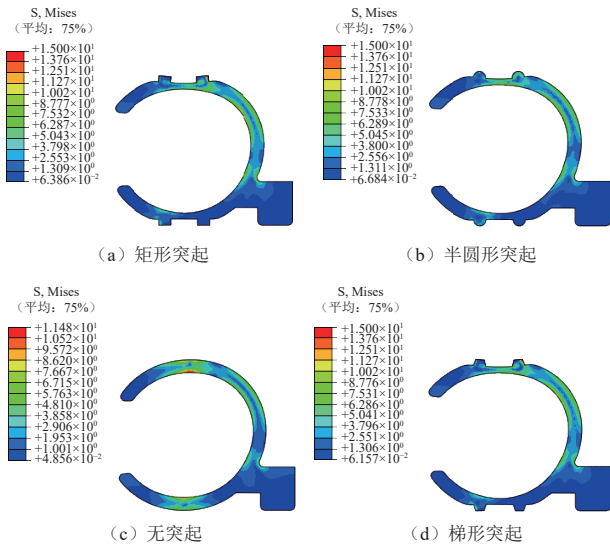


图 15 不同形状凸起密封唇von-Mises应力云图

Fig. 15 Von-Mises stress nephogram of raised seal lip with different shapes

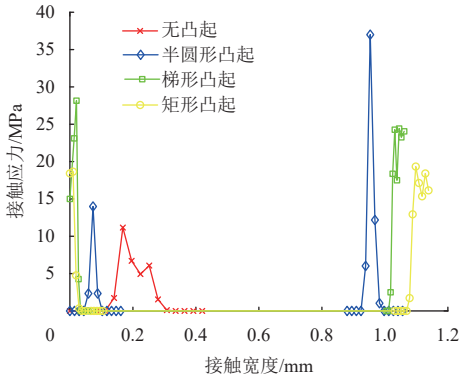


图 16 不同形状凸起密封唇接触应力分布曲线

Fig. 16 Contact stress distribution of different shaped convex seal lips

根据以上仿真结果，一方面凸起结构在相同接触宽度的基础上增加了接触应力，密封性能更优；另一方面梯形凸起和矩形凸起接触宽度较小，且在凸起边缘处易造成应力集中，长时间使用会加速密封唇接触部位磨损，故密封唇采用半圆形凸起结构。

综合上述设计分析，密封唇整体设计结构如图17所示，环状边缘设有压边以便密封唇结构定位安装。密封唇的各设计参数如表2和图18所示。

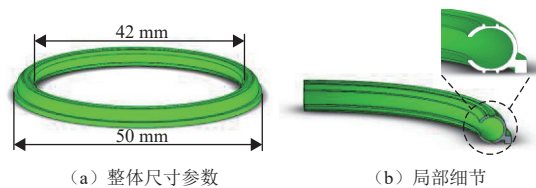


图 17 密封唇整体结构三维模型

Fig. 17 Three-dimensional model of seal lip structure

3) 密封圈材料选择

材料的选择主要考虑到在轨作业的温度、多次重复密封导致的蠕变特性以及真空环境下的释气性。

表 2 密封唇主要结构参数

Table 2 Main structural parameters of sealing lip

结构参数	参数值	mm
凸起高度 h	0.14	
凸起距离 a	0.89	
弧面宽度 w_1	0.3	
端面宽度 w_2	0.14	
截面直径 R	0.3	
内凸起半径 r_1	22.15	
外凸起半径 r_2	22.85	

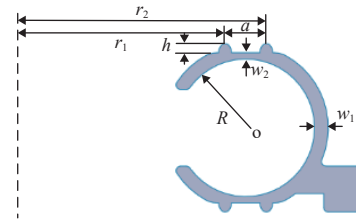


图 18 密封唇结构细节参数

Fig. 18 Seal lip structure details parameters

因此采用了耐温 $-192\sim 260\text{ }^\circ\text{C}$ 的云母填充聚四氟乙烯作为密封唇材料，经热处理后的316L不锈钢作为蓄能弹簧材料，可耐 $1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温，以满足实际在轨作业时的温度要求。

由于在轨作业时金属对温度变化和光照辐射不敏感，因此开展了云母填充聚四氟乙烯随温度变化蠕变量专项试验，考虑到在轨工作密封次数不少于36次以及单次加热时间的要求，取1.2倍裕度进行时间拉偏，故本次蠕变试验时间约为7 776 min。在 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 下测试7 776 min，覆盖36次密封流程时间，得到的测试结果曲线如图19所示。

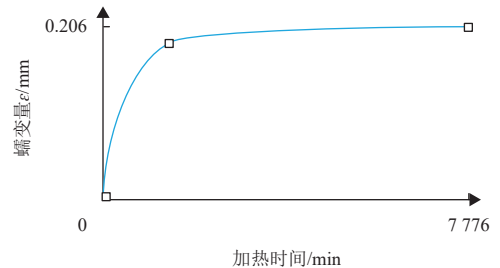


图 19 云母填充聚四氟乙烯蠕变-加热时间曲线

Fig. 19 Creep-heating time of polytetrafluoroethylene (PTFE)

由此可见在400 N载荷作用下， $120\text{ }^\circ\text{C}$ ，7 776 min后蠕变量为0.206 mm，云母填充聚四氟乙烯应变为10.3%。对于密封圈释气性的要求，开展了云母填充聚四氟乙烯的释气性验证试验，加热温度达到 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时，试验过程中略有释气现象，分析为材料放入真空前从大气环境吸收的一定量挥发分。除试验以外还查

阅了《真空设计手册》^[18]中关于VCMER测试数值知云母填充聚四氟乙烯材料在150℃测试温度下, 2.5 h内的质量损失百分率为0.315%, 材料出气量较小。

由此可以分析出, 聚四氟乙烯(SFB-2)具有良好的低温环境(-192~260℃)适应性, 虽然聚四氟乙烯材料在高温100℃下略有释气现象, 但经评估释气量可接受, 除此之外, 云母填充聚四氟乙烯还具有良好的防静电特性, 可以减少静电吸附月尘颗粒数量。故选用云母填充聚四氟乙烯(SFB-2)材料为密封组件弹-塑性密封材料, 密封圈实物图如图20所示。

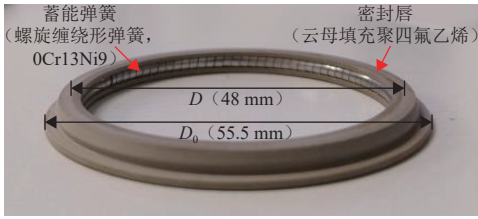


图 20 加热炉密封圈实物图
Fig. 20 Sealing ring of heating furnace

3 月尘影响密封性能模型

基于传统接触力学^[19]的接触半径与压痕深度和压力的关系是在弹性力学的理想条件下推导出来的, 在本研究中月尘颗粒在密封面间的接触状态是完全嵌入密封唇内, 所以月尘颗粒和密封唇的接触模型必须根据磨料和接触面的硬度进行修正^[20]

$$F_q = \left[\frac{2H_1}{2H_1 + H_2 + H_3} \right]^{K_1} F_h \quad (2)$$

其中: H_1 、 H_2 、 H_3 为磨粒硬度、密封唇硬度、炉体硬度; F_q 为磨粒嵌入力; K_1 为嵌入力修正系数; F_h 为施加载荷。

通过建立月尘颗粒挤压接触密封唇的有限元仿真模型来获得修正系数。建立的有限元仿真模型如图21所示, 月尘颗粒建模为三维椭球体, 密封唇建模为圆柱体, 密封唇的三维模型尺寸远大于月尘颗粒尺寸, 防止边界效应对仿真结果产生影响。月尘颗粒和密封唇为面接触, 接触算法采用罚函数。

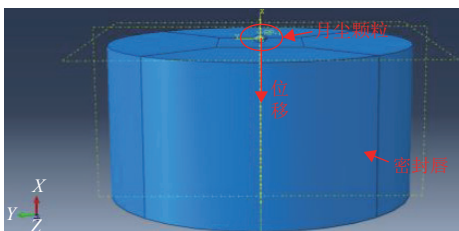


图 21 月尘-密封唇有限元仿真模型
Fig. 21 Finite element simulation model of lunar dust-seal lip

密封唇的材料为云母填充聚四氟乙烯, 其材料力学性能参数采用高低温拉压试验机检测获得, 月尘颗粒材料参数来源于斜长岩。各材料参数如表3所示。

表 3 材料参数表

Table 3 Material parameters

材料名称	温度/ ℃	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa
云母状PTFE	-60	2.20	5132	0.45	89.8
	20		2588		51.2
	130		1158		22.4
月尘颗粒	20	2.65	70000	0.25	140.2

约束密封唇的所有自由度, 初始月尘颗粒和密封唇接触, 对月尘颗粒施加x方向的位移, 获得月尘颗粒的x方向的支反力, 代入力学模型计算得到-60、20、130℃下的修正系数分别为: 4.122、4.447和4.955, 均衡取值为4.4。因此, 月尘颗粒和密封唇的力学接触模型为

$$\begin{cases} P = \left[\frac{2H_1}{2H_1 + H_2 + H_3} \right]^{4.4} \frac{4cE^*r_e^3}{3abF_1(e_0)^3} \\ P = \left[\frac{2H_1}{2H_1 + H_2 + H_3} \right]^{4.4} \frac{4(ab)^{1/2}E^*\delta^{3/2}}{3c^{1/2}F_2(e_0)^{3/2}} \end{cases} \quad (3)$$

其中: 各个材料的硬度值一般为 $2.8\sigma_y$, σ_y 为各个材料的屈服强度; a 、 b 、 c 为椭球体颗粒的三轴; δ 为压痕深度; E^* 为颗粒和密封唇的等效弹性模量; r_e 为等效接触半径; $F_1(e_0)$ 和 $F_2(e_0)$ 为理想条件下接触半径和压力的关系。结合上述力学接触模型和颗粒粒径尺寸, 可以计算得到不同粒径的单个月尘颗粒在-60、20、130℃下嵌入密封唇需要的压力和影响域。

泄漏通道的流导表征气体在密封面间的流动能力, 而月尘颗粒嵌入密封面间会影响密封面间局部泄漏通道的流导。局部区域由之前各个径向通道流导的并联关系变为串联与并联的关系, 因此单个颗粒影响的局部泄漏通道的流导 C_h 为

$$\begin{cases} 1/C_1 + 1/C_3 = \frac{\left(\frac{2h}{\tan \alpha} + \frac{2h}{\sin \alpha} \right) (L-b)}{19.4 \left(\frac{h^2}{\tan \alpha} \right)^2} \sqrt{\frac{M}{T}} \\ C_h = \frac{n}{1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3} \end{cases} \quad (4)$$

其中: C_1 、 C_3 为密封区域颗粒前后泄漏通道的流导; C_2 为局部区域流导; α 和 h 为挤压接触形成的泄漏通道的等腰三角形底角和高; L 为泄漏通道的长度; M 为气体的摩尔质量; T 为气体的热力学温度。

结合密封圈表面的月尘颗粒的粒径和基础密封性能预测模型, 沾染月尘后的密封圈的泄漏率 Q 由三部分组成, 分别是沾染月尘影响前的基础泄漏率 Q_1 、局部区域影响后的泄漏率 Q_2 和局部区域影响前的泄漏率 Q_3 , 密封圈月尘影响密封性能预测模型为

$$Q = Q_1 + \frac{M}{3.88 \times 10^{-7}} \frac{L}{3.64} \frac{B_1}{H/\tan\alpha} \frac{P}{1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3} - Q_3 \quad (5)$$

其中: H 为表面粗糙度; B_1 为颗粒嵌入间隙的边长。

目前已有的月球样品中月尘颗粒粒径的基本范围为30 nm~100 μm , 在密封圈表面沾染的月尘质量相同时, 利用模型分析得到: 随着月尘颗粒粒径的减小, 密封圈的泄漏率先减小后增大, 具体的关系趋势如图22所示。

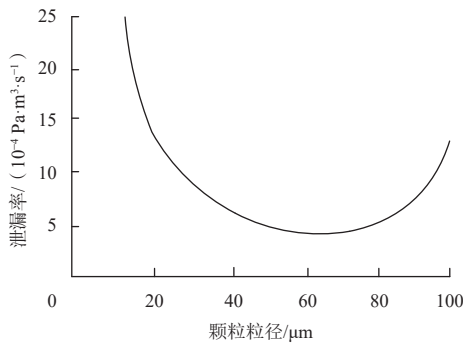


图22 月尘颗粒粒径与泄漏率的理论关系

Fig. 22 Theoretical relationship between lunar dust particle size and leakage rate

根据前述分析, 颗粒尺寸及其形态均对密封圈的泄漏率产生显著影响。然而, 本研究中所采用的云母状聚四氟乙烯材料展现出优良的塑性特性, 使得颗粒形态对唇面接触的影响相对较小。因此, 在本研究中, 颗粒尺寸对泄漏率的影响被视为主要因素, 并将重点探讨这一变量的作用机制。

4 密封圈模拟月尘沾染试验

4.1 密封圈模拟月尘沾染试验平台设计

为研究月尘颗粒沾染对密封圈密封性能的影响, 需模拟密封圈在轨密封流程。因此, 研制了密封圈模拟月尘沾染试验平台, 试验平台机械系统主要由取样管装置、工序机构密封装置和检漏装置组成。取样管装置和工序机构密封装置实现密封圈的密封流程, 包括接样过程、合炉密封过程和弃样过程, 检漏装置通过真空管路检测密封圈的密封性能。

1) 检漏装置

由于氦质谱检漏仪法相对于静态升压法和辅助真

空罩压降法灵敏度高和操作时间短, 因此选择氦罩法作为密封性能检测系统的检漏方法。氦罩法是利用检漏罩将被检件的整体或局部罩起来, 在检漏之前先将罩内的空气尽可能排出, 然后向罩内充入示漏气体, 再将检漏仪与被检件通过真空管路相连接, 启动检漏仪检测, 最终以检漏仪输出的信号表征漏孔的存在和被罩部位的总泄漏率。氦罩法检漏原理图如图23所示。

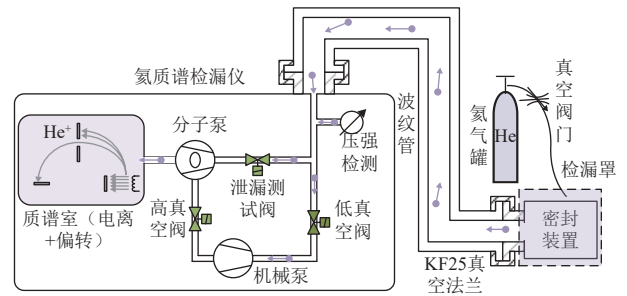


图23 氦罩法检漏原理

Fig. 23 Principle of helium hood leak detection

2) 试验平台设计

如图24为接样过程试验平台, 包括工序机构密封装置、取样管装置和检漏装置的主要结构、相对位置及驱动原理。工序机构密封装置固定位置呈30°角, 主要功能是驱动炉盖和炉体合炉密封, 通过控制炉盖的位移和旋转角度精确实现炉盖与取样管组件和炉体的对接。取样管装置的功能是通过电机驱动将内部月壤样品封装器推出掉落至炉盖上。如图25所示为合炉密封过程的试验平台, 炉盖上由法兰和螺栓固定的密封圈在电机驱动下与炉体挤压接触形成密封环境。炉体外伸管路配合真空管路(波纹管管和真空卡箍)与氦质谱检漏仪相连接, 检漏罩包裹工序机构密封装置, 通过氦罩法检测密封圈的密封性能。

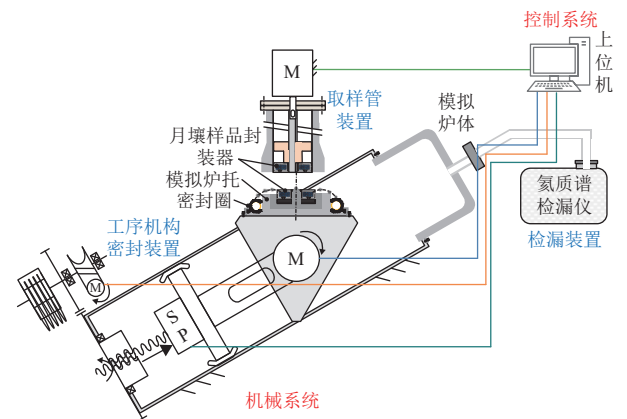


图24 接样过程密封圈模拟月尘沾染密封试验平台

Fig. 24 Sealing test platform for simulated lunar dust contamination during sample receiving process

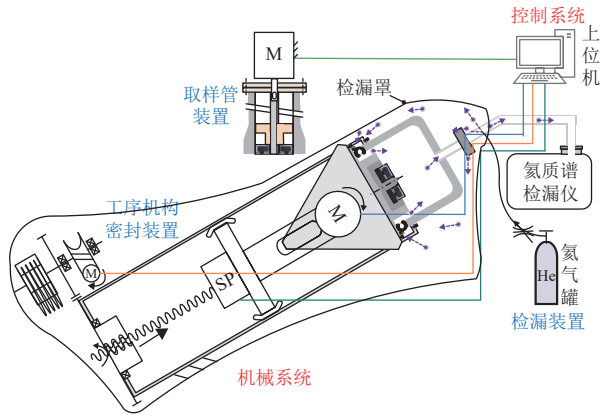


图 25 合炉密封过程密封圈模拟月尘沾染密封试验平台

Fig. 25 Sealing test platform for simulated lunar dust contamination in sealing process

4.2 密封圈模拟月尘沾染试验设计

为探究加热炉密封圈模拟在轨重复密封的工作流程中沾染的模拟月尘对密封圈密封性能的影响, 基于密封圈模拟月尘沾染试验平台开展模拟月尘沾染密封试验。试验材料为3种工况的模拟月壤, 分别是标称工况、挑战工况和极端工况, 3种模拟月壤的原料为斜长岩和玄武岩, 其工况定义如表4所示。3种工况不同粒径的岩石颗粒的重量百分比不同, 主要都分布在0~75 μm^[21], 其中极端工况的大颗粒粒径占比大于挑战工况, 挑战工况大于标称工况, 3种工况的模拟月尘的粒径范围能够覆盖在轨工作状态下可能的粒径范围。标称工况下由于粒径细小更易产生月尘沾染, 3种工况的模拟月尘原料实物图如图26所示。

表 4 模拟月壤沾染密封试验工况定义表

Table 4 Simulated lunar dust contamination seal test condition definition

序号	粒径值/mm	重量百分比/wt%			公差/%
		标称工况	挑战工况	极端工况	
1	<0.01	13.58	12.02	9.95	-1~+1.5
2	0.01~0.025	12.04	10.66	8.82	-1~+1.5
3	0.025~0.05	12.90	11.41	9.45	-1~+1.5
4	0.05~0.075	8.29	7.33	6.07	-0.1~+0.35
5	0.075~0.1	5.55	4.91	4.07	-0.1~+0.35
6	0.1~0.25	14.27	12.62	10.45	-1~+1.5
7	0.25~0.5	10.25	9.07	7.51	-1~+1.5
8	0.5~1	8.54	7.56	6.26	-0.1~+0.35
9	1~2	6.87	6.69	6.80	-0.1~+0.35
10	2~4	3.97	5.51	8.67	-0.1~+0.20
11	4~10	2.95	6.24	12.35	-0.1~+0.25
12	>10	0.79	5.97	9.63	-0.1~+0.20

鉴于传送机构的强度和刚度限制, 最大密封力被设计限定为500 N。若超出此阈值, 电机及传送结构将面临超过其设计载荷极限的风险, 可能导致系统性能下降或结构损伤。对上述3种工况的月壤按照表5的试

验矩阵分别开展了标称工况、挑战工况和极端工况下在轨工作流程下的重复密封试验。

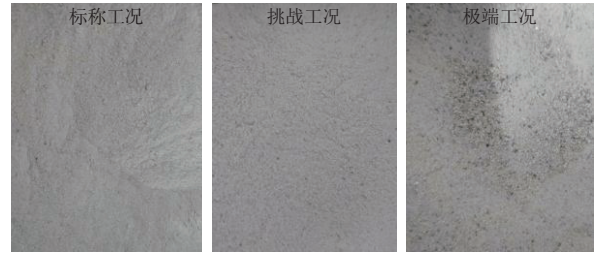


图 26 3种工况的模拟月壤原料

Fig. 26 Three types of simulated simulated lunar soil materials

表 5 重复密封试验矩阵

Table 5 Repeated sealing test matrix

密封次数		密封力/N		
5次				
10次	300±1	400±1	500±1	
15次				

4.3 模拟月尘沾染密封试验结果

按照上述密封试验流程分别开展了3种月壤工况下的密封试验, 每种工况下的密封试验均开展了15次, 在5次、10次和15次时检测密封圈的泄漏率并记录, 并且用电子天平测量密封圈表面沾染的模拟月尘质量并记录, 试验结果如图27所示。图27(a)~(c)所示为不同工况下密封试验时密封圈的泄漏率随密封次数、密封力的变化规律, 图27(d)所示为密封圈在3种工况下开展密封试验沾染的模拟月尘量随密封次数的变化规律。密封圈沾染的模拟月尘量随着模拟月尘沾染试验次数的增加而线性增加, 在3种工况下开展密封试验, 密封圈沾染的模拟月尘量随密封次数的变化规律基本一致。模拟月尘沾染量的增加会增大密封圈的泄漏率, 3种工况下的密封圈的泄漏率随试验次数的变化规律基本一致, 呈线性增加。

除此之外可以看到, 标称工况的模拟月尘沾染量最大, 但是泄漏率最低, 相同密封次数和密封力情况下, 泄漏率标称工况最小, 极端工况最大, 且极端工况泄漏率在密封次数为15次, 密封力为300 N时不超过 $9 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。此外, 当增加密封力到500 N时, 泄漏率显著降低。

试验后采用5倍光学显微镜对密封圈与炉体的接触区域进行多点观测, 如图28所示, 由于在取样管送样前经过了振动敲击, 大颗粒在密封前就已沿着密封圈边缘滚落, 因此密封唇与炉盖接触面不存在大粒径模拟月尘颗粒。对表面沾染的模拟月尘颗粒进行统计分析, 3种工况下的密封圈表面沾染的模拟月尘粒径均小于25 μm。

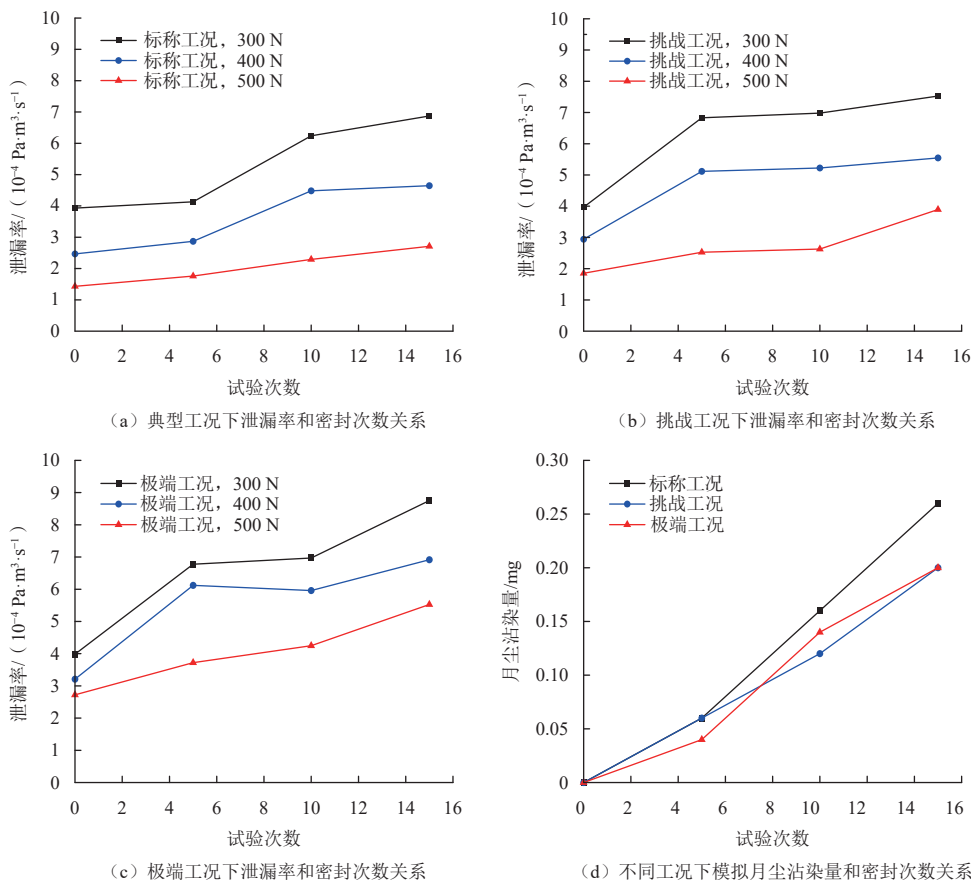


图 27 模拟月尘沾染密封试验结果

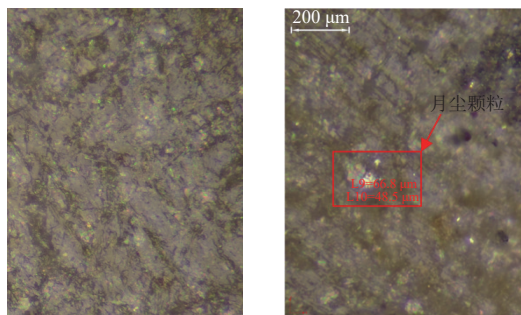
Fig. 27 Simulated lunar dust contamination seal test results

5 结论

本文设计了挥发分测量仪的月壤加热炉弹簧蓄能密封圈, 研究了密封圈的静密封泄漏机理, 开展了模拟月尘沾染密封试验, 进行了密封圈沾染月尘密封性专项验证, 得到以下结论:

- 1) 本文设计的弹簧蓄能密封圈具有良好的重复密封性能, 在3种工况下, 密封力不小于400 N, 重复密封15次时, 密封性能均保持良好, 本文设计的密封圈具有良好容尘性;
- 2) 泄漏率标称工况最小, 极端工况最大, 且最大泄漏率不超过 $9 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$;
- 3) 当密封力达到500 N时, 3种工况下, 泄漏率都显著下降。

本文研究内容可为挥发分测量仪及其密封圈的设计提供科学数据及理论参考。未来将开展局部沾染月尘在重复密封过程中对密封性能的动态影响研究, 完善月尘对密封圈密封性能的动态影响研究, 完善月尘对密封圈密封性能的影响机理并优化密封性能预测模型和密封规程。



(a) 试验前密封面 (b) 试验后密封面

图 28 试验前后密封唇表面

Fig. 28 Surface of seal lip before and after testing

由此可见, 密封圈的密封性能随着染尘量的增加而逐渐减小, 密封圈的重复密封性能也会减弱, 但是在当增加密封力到500 N时, 泄漏率显著降低, 因为密封圈材料云母填充聚四氟乙烯是高塑性材料, 在500 N时, 材料发生塑性变形, 对模拟月尘的包裹效果更好, 密封唇和炉面间间隙突然变小, 大大降低了泄漏率, 同时因为这种特性使得密封圈具有了可重复密封的能力。

参考文献

- [1] 卢波. 月球探测的意义及发展态势[J]. 国际太空, 1998(4): 2-5.
- [2] XU L, PEI Z Y, ZOU Y L, et al. China's lunar and deep space exploration program for the next decade (2020-2030)[J]. 空间科学学报, 2020, 40(5): 615-617.
- [3] 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.
WANG Q G, WANG C, PANG Y, et al. Drilling sealing and water resource extraction and conversion technology of icy lunar soil[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(6): 617-624.
- [4] CARRIER III W D. Lunar soil grain size distribution[J]. *The Moon*, 1973, 6(3-4): 250-263.
- [5] LIU Y, TAYLOR L A. Lunar dust: chemistry and physical properties and implications for toxicity[C]//Proceedings of NLSI Lunar Science Conference. [S. l.]: NLSI, 2008.
- [6] RUSHNECK D R, DIAZ A V, HOWARTH D W, et al. Viking gas chromatograph-mass spectrometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1978, 49(6): 817-834.
- [7] LIZIA P D, ZAZZERA F B, FINZI A E, et al. Planning and implementation of the on-comet operations of the instrument SD2 onboard the lander Philae of Rosetta mission[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 125: 183-195.
- [8] FINZI A E, ZAZZERA F B, DAINESE C, et al. SD2-how to sample a comet[J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128: 281-299.
- [9] MAHAFFY P R, WEBSTER C R, CABANE M, et al. The sample analysis at Mars investigation and instrument suite[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170: 401-478.
- [10] MOELLER R C, JANDURA L, ROSETTE K, et al. The Sampling and Caching Subsystem (SCS) for the scientific exploration of Jezero crater by the Mars 2020 Perseverance rover[J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217(1): 1-43.
- [11] GOESMANN F, BRINCKERHOFF W B, RAULIN F, et al. The Mars Organic Molecule Analyzer (MOMA) instrument: characterization of organic material in martian sediments[J]. *Astrobiology*, 2017, 17(6-7): 655-685.
- [12] WRIGHT P. Luna-16: an outstanding new achievement of Soviet space science: AD-712228[R]. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 1970.
- [13] ABERNETHY F A, SHERIDAN S, BARBER S J. Gas containment for in situ sample analysis on the Moon: utility of sealing materials in the presence of dust[J/OL]. *Planetary and Space Science*, 2020, 180: 104784. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003206319301710>.
- [14] SAWADA H, OKAZAKI R, TACHIBANA S, et al. Hayabusa2 sampler: collection of asteroidal surface material[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 208(1): 81-106.
- [15] 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.
DENG X J, ZHENG Y H, JIN S Y, et al. Design and implementation of sampling and packaging system for Chang'e-5 mission[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2021, 51(7): 753-762.
- [16] 杜永刚, 王雪松, 闫春杰, 等. 月球样品封装装置金属密封结构的参数计算[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(5): 417-419.
DU Y G, WANG X S, YAN C J, et al. Parameter calculation of metal seal structure for lunar sample encapsulation device[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(5): 417-419.
- [17] 丁大江, 刘照智, 王飞, 等. 径向弹簧蓄能密封结构最大接触应力的有限元分析[J]. *润滑与密封*, 2019, 44(5): 142-148.
- [18] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [19] 张丽丽, 尚新春, 许风光. 橡胶球体压缩变形的实验研究[C]//北京力学会第13届学术年会论文集. 北京: 中国力学学会, 2007.
- [20] XIE X P, XIE Y B. Analysis of three - body abrasive wear with fatigue theory[J]. *Tribotest*, 1998, 4(3): 289-295.
- [21] LIU Y, TAYLOR L A. Lunar dust: chemistry and physical properties and implications for toxicity[C]//Proceedings of NLSI Lunar Science Conference. Moffett Field, California: Lunar and Planetary Institute, 2008.

作者简介:

王思龙(1991-), 男, 工程师, 主要研究方向: 月球与深空探测、通信链路及航天工程管理。

通信地址: 北京市海淀区东冉北街9号(100195)

电话: 15210102268

E-mail: wangsilong0524@163.com

唐钧跃(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 月球物质模拟技术、月球资源原位勘探与综合利用。**本文通信作者。**

通信地址: 黑龙江省哈尔滨市一匡街2号哈工大科学园科创大厦 J1609(150080)

电话: (0451)86413857

E-mail: tangjunyue@hit.edu.cn

Design of Seals for a Lunar Soil In-Situ Volatile Heating Furnace and Analysis of Lunar Dust Effects

WANG Silong¹, TANG Junyue², ZHANG Lu², ZHANG Hongan², WANG Yinchoao³,
LIU Ziheng^{2,4}, LI Jiannan⁴, LU Zixiao⁵, JIANG Shengyuan²

(1. Deep Space Exploration Lab, Beijing 100195, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

5. National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China)

Abstract: The sealing ring of the heating furnace in the volatiles measurement instrument is prone to contamination by lunar dust during on-orbit use, affecting its performance. Therefore, a static sealing spring-energized sealing ring was designed which is resistant to high and low temperatures, capable of multiple repeated seals, and possesses good dust tolerance. In order to verify the stable sealing performance of the sealing ring under moon dust contamination, a test platform was constructed to evaluate the changes in sealing performance after contamination by simulated lunar dust. The results show that under extreme conditions, with a sealing force of only 300 N, the leakage rate was less than $9 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, increasing sealing force was to be the most effective way to reduce leakage rate, and within an appropriate range of sealing force, the sealing ring was capable of multiple repeated seals. This study provides a reference for on-orbit application of the lunar soil volatiles measurement instrument.

Keywords: spring-energized seal; lunar dust; leakage mechanism; sealing capability

Highlights:

- Results show that increased simulated lunar dust contamination reduces sealing performance, with a maximum leakage rate of less than $9 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$.
- Increasing sealing force significantly reduces the leakage rate.
- The spring-energized sealing ring designed in this study demonstrates excellent sealing performance.
- The contamination rate of simulated lunar dust under typical conditions is higher than that under challenging and extreme conditions.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]