月壤挥发分测量仪水含量测量地面定标方法

刘子恒[1,2*],李健楠[1]，唐钧跃[2],刘冉冉[3]，满峰[4]，张雅楠[1]，李荣基[1]，黄新宇[1]，王志辉[5]，章明远[6]，薛长斌[4]，耿浩[4]，王雷[4]，盛丽艳[7],姜生元[2]，贺怀宇[1]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 (北京,100029)
2. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统全国重点实验室 (黑龙江 哈尔滨,150001)
3. 中国科学院大气物理研究所(北京,100029)
4. 中国科学院国家空间科学中心 (北京，100190)
5. 北京工业大学材料科学与工程学院（北京，100124）
6. 北京工业大学物理与光电工程学院（北京，100124）
7. 北京空间飞行器总体设计部 (北京,100094)

摘要 月球极区水含量探测在科学研究与资源利用领域具有重大价值，嫦娥七号计划于2026年发射并前往月球南极开展月壤水和其他挥发分探测任务，其搭载的月壤挥发分测量仪需在发射前完成地面定标测试。该测量仪由微量采样单元、挥发分制备单元、加热炉驱动单元、测量仪主体四部分构成，测量流程涵盖取样、样品转移、加热释放等九个关键环节，过程中可能存在样品重量误差等多种误差类型。为保障在轨测量准确性，需开展地面定标工作，具体包括四项关键内容：真空规定标通过控制不同温度点，实现对气压输出的精准校准；质谱仪定标依托真空系统与进样系统，验证其检测灵敏度；氢氧化铜试验可排除采样与转移环节的误差，并检验系统固有误差；含水模拟月壤全流程定标则模拟在轨真实工作环境，验证全流程测量误差。通过上述定标方法，可有效约束气压测量的随机性与温漂现象，校正系统误差残差，为月壤水含量在轨数据反演提供关键方法支撑。

关键词：嫦娥七号，月壤挥发分测量仪，地面定标，月球极区， 水含量探测

中图分类号 P691

Ground calibration method for water content measurement with lunar soil volatile measuring instrument

LIU Ziheng[1,2*], LI Jiannan[1], TANG Junyue[2], LIU Ranran[3], MAN Feng[4], ZHANG Yanan[1], LI Rongji[1], HUANG Xinyu[1], WANG Zhihui[5], ZhANG Mingyuan[6], XUE Changbin[4], GENG Hao[4], WANG Lei[4], SHENG Liyan[7], JIANG Shengyuan[2], HE Huaiyu[1]

1.Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (Beijing,100029)

最新录用

2. State Key Laboratory of Robotics and Systems, Harbin Institute of Technology (Harbin, Heilongjiang 150001)

3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (Beijing,100029

4. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences (Beijing, 100190

5. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology (Beijing 100124)

6. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology (Beijing 100124)

7. Beijing Space Vehicle Overall Design Department (Beijing,100094)

Abstract

The detection of water content in the polar regions of the moon is of great significance in scientific research and resource utilization. The Chang 'e-7 mission is scheduled to be launched to the South Pole of the moon in 2026 to explore water and other volatiles. The lunar soil volatile measuring instrument it carries needs to complete calibration tests before launch. The lunar soil volatile measuring instrument consists of four parts including micro sampler 、volatile preparation device、furnace driver、main body of the measuremen. The measurement process includes nine steps such as sampling, transfer, and heating release. There are various errors such as sample weight errors. To ensure measurement accuracy, ground calibration is required: the vacuum specification standard calibrates the pressure output by controlling different temperature points. The calibration of the mass spectrometer is verified for sensitivity by means of the vacuum system and the injection system. The copper hydroxide test can be used to eliminate sampling transfer errors and verify systematic errors. The full-process calibration of water-containing simulated lunar soil simulates the in-orbit environment to verify the full-process error. Through these calibration methods, the randomness and temperature drift of barometric measurement can be constrained, and the residual errors of the system can be corrected, providing methodological support for the inversion of on-orbit data on lunar soil water content.

Keywords: Chang'e-7, Lunar soil volatile measuring instrument, Ground Calibration, Lunar Polar Regions, Water Content Detection.

---

*国家自然科学基金（42403040，42241104，42203036）；中国科学院地质与地球物理研究所重点研究项目（IGGCAS -202203）；
投稿日期：
E-mail: liuziheng@mail.iggcas.ac.cn

0 引　言

月球极区水含量探测从科学研究和能源利用方面具有重要意义[1-3]。从科学研究方面关于月球水的来源，科学界至今仍存在诸多争议。外源说认为，彗星、小行星富含水冰，在撞击月球过程中，将水带到了月球；或者太阳风中的氢与月壤中的氧发生反应生成了水；内源说则主张月球早期火山活动将内部的

水和挥发分释放出来，水分子或氢与月壤矿物结合形成羟基，从而在月球表层保留下来 [4-6]。对月球极区水冰的深入研究，有助于科学家解开这些谜团，揭示太阳系早期物质交换的历史，同时也能为研究无大气天体的表面演化机制提供关键线索[7]。

从资源利用视角出发，月球极区永久阴影区是天然的“冷阱”，可长期封存水冰。以月球南极的艾特肯盆地为例，盆地内部存在永久阴影区，科学家推测这些阴影区内可能蕴藏着水冰资源[8]。水作为载人航天任务的 “生命线”，用途极为广泛且关键。既可为宇航员提供日常饮水，通过电解还能产生氧气以满足呼吸需求；同时，水经过处理后分解出的氢和氧，能制成高效的氢氧燃料，为航天器提供动力支撑。目前，从地球向月球运输物资成本极高，若能实现月球极区水冰的就地利用，将大幅降低深空探索的经济门槛，使人类建立月球基地的构想更具可行性[9]。此外月球极区还有望成为深空探测的 “能源补给站”，为未来人类探索火星、小行星等任务提供燃料补给，助力航天器向更深远的太空迈进[10-12]。

随着探测技术的不断进步，在遥感探测方面，美国国家航空航天局的月球勘测轨道器（Lunar Reconnaissance Orbiter 简称 LRO）发挥了重要作用，其搭载的微波雷达（Mini-RF）、热发射红外光谱仪（DIVINER）和中子谱仪（LEND），通过对月球表面的扫描，发现南极永久阴影区存在存在大量氢原子信号，这很可能是水冰聚集的迹象；中子探测器则通过探测氢元素的分布，间接证明了水冰存在的可能性[13,14]。当前关于月球极区水冰的认识可归纳为：根据 LCROSS 撞击试验永久阴影区局部存在高值[15,16]，基于 Moon Mineralogy Mapper（M3）数据永久阴影区表面广泛呈斑块状分布低丰度含“霜”层[17]，此外整个极区的氢含量很高，极区光照区也有可能具有可开发的水资源[14]。遗憾的是至今尚无一次成功就位探测。按照研制计划嫦娥七号搭载在巡视器上月壤挥发分测量仪将在 2026 年发射前往月球南极寻找水冰，其工作路径如图 1 所示，探测地区包含光照区和小冷阱。为了保证测量结果的准确性和可靠性，月壤挥发分测量仪在发射前需要完成定标测试的工作。本文主要阐述该载荷在水冰含量测量方面的定标思路和方法。

最新录用

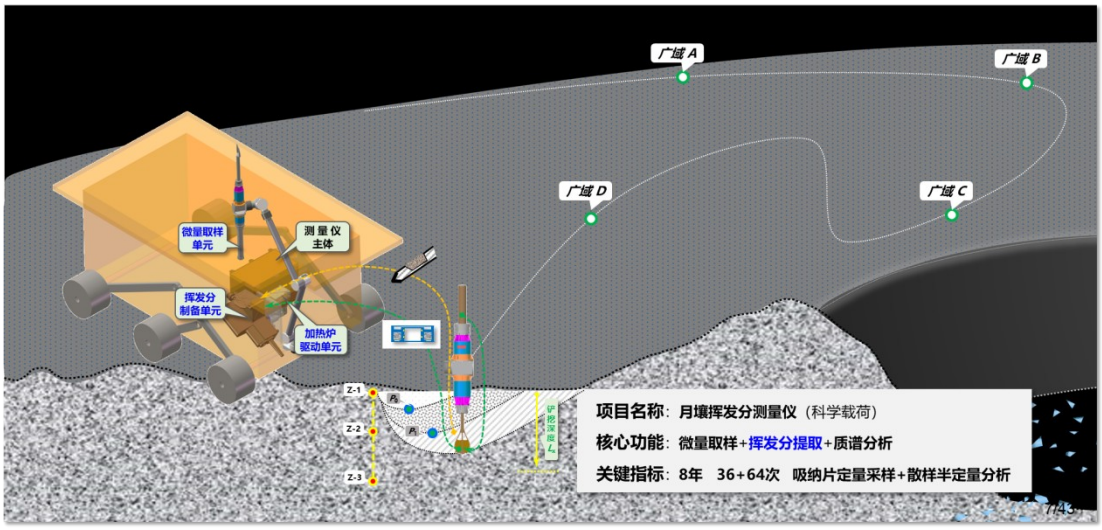


图 1 月壤挥发分测量探测目标和路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the detection targets and paths for the measurement of volatile in lunar soil

1 月壤挥发分测量仪产品组成和测量过程分析

如图 2 所示月壤挥发分测量仪由微量采样单元、挥发分制备单元、加热驱动单元、挥发分测量仪主体四部分组成。如图 3 其中微量取样单元中封装有可以定量采样的吸纳片可以定量封装被分析的月壤，微量取样单元在机械臂的辅助下可以将样品转移到挥发分制备单元，挥发分制备单元在接受到装有月壤的吸纳片后合盖密封，然后通过感应加热的方式对样品进行加热。月壤中不同赋存状态的挥发分会根据不同温度转换成气体释放出来。释放的气体通过管路扩散到质谱仪，气体在质谱仪内会被质谱仪的离子源进行电离，电离后经过质量分析器与其他离子有分别地到达电子倍增器并产生电流。通过对电子倍增器的电流测量结合质谱分析器的数据，可以获得水蒸气在质谱仪腔体内分压，该仪器的主要指标见表 1。该仪器水含量测量结果的准确性主要受采集样品量的准确度、水损失量的准确度以及进入仪器后测量水量的准确度三部分组成。本文主要对测量这一部分标定方法进行说明。

最新采用

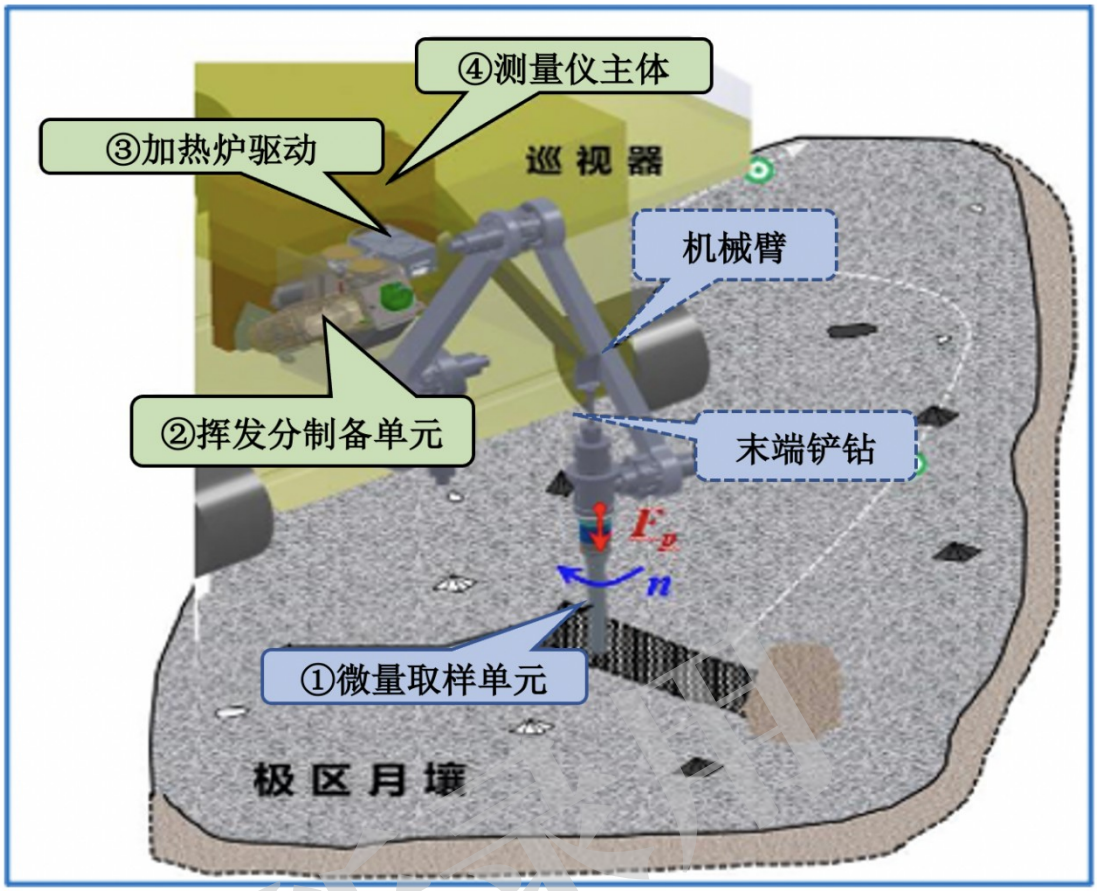


图 2 月壤挥发分测量仪组成图

Fig. 2 Composition diagram of the soil volatile measuring instrument

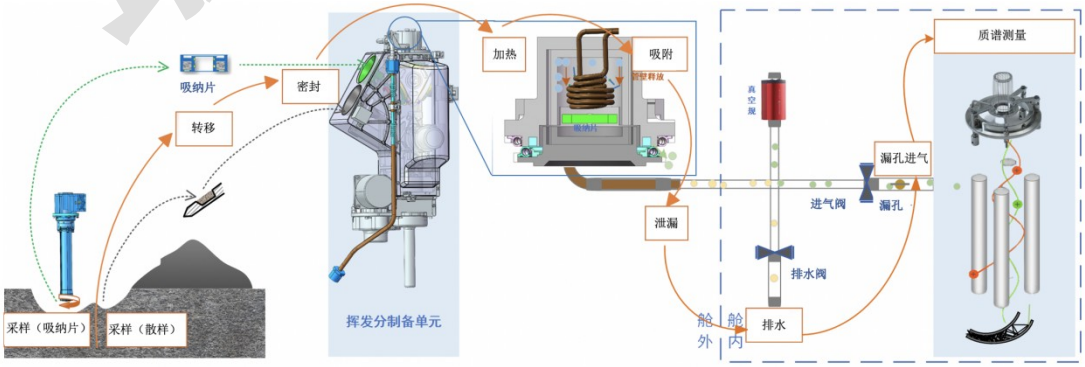


图 3 月壤挥发分测量仪探测流程

Fig. 3 Detection process of lunar soil volatile matter measuring instrument

最新公示

表 1 月壤挥发分测量仪主要技术指标

序号	指 标内 容	具 体 要 求
1.	分析范围	2~150 amu
2.	质量分辨率	≤1 amu
3.	可测挥发分	H_2、He、H_2O、Ne、N_2、CO、CO_2、Ar、Xe、NH_3、CH_4、C_2H_6等
4.	最高加热温度	700 ℃
5.	水含量最低检测线	0.1 wt%
6.	仪器质量	≤15 kg

1.1 采样量的准确度

为了定量测量被分析月壤的水含量，首先要确定被分析样品的质量。月壤挥发分测量仪取样采用定容积、定粒径、定密实度的取样方式，以保证质量的可控性。仪器设计的目标采样量为 175±40 mg。实际采样过程受到轨巡视器的姿态、月壤的成分、含水量、密实度等多种不确定因素影响。因为在地面试验过程中所分析的样品的重量在测试后可以称量且本文主要侧重于测量的定标，所以关于样品重量定标不在本文进行阐述。

1.2 取样-转移水的损失

根据水的相图在月表环境下水冰极容易挥发，并且在测量过程中水含量较高时水蒸气容易达到饱和蒸气压，所以挥发分测量仪在整个水含量测量过程中对温度具有严格的约束，反映在流程上也比较复杂。首先微量取样单元和挥发分制备单元在与被测月壤接触前需要进行预冷降温，微量取样单元末端温度降到-60°C 以下才可以执行采样作业。从测水的角度与月壤直接接触的挥发分制备单元温度越低越好，但是受限于其工作温度，挥发分制备单元预冷并热控到-35°C 后接受微量取样单元送过来的月壤样品。因为上述两个温度都明显高于月表真空条件下水的饱和蒸气压，所以在取样和样品转移的过程中水的损失无法避免。

最新录用

1.3 分析过程中的系统误差

如图 4 当样品被转移到炉膛并密封后，挥发分制备单元的加热炉会对样品进行感应加热，在加热的过程中水蒸气会从月壤当中释放出来，释放的水蒸气一部分被炉膛管壁吸附，一部分会泄漏出去；如果考虑到水含量过高水完全释放出来超过当前温度到饱和蒸气压，按照设计当水含量大于某一阈值会触发排水阀门打开，该过程是将多余的水蒸气排出；当水蒸气排到一定程度炉膛和管壁的水又会释放出来；当水排到设定阈值后关闭排水阀打开进气阀，剩余水蒸气通过微漏孔进入质谱仪对水蒸气的分压进行分析。

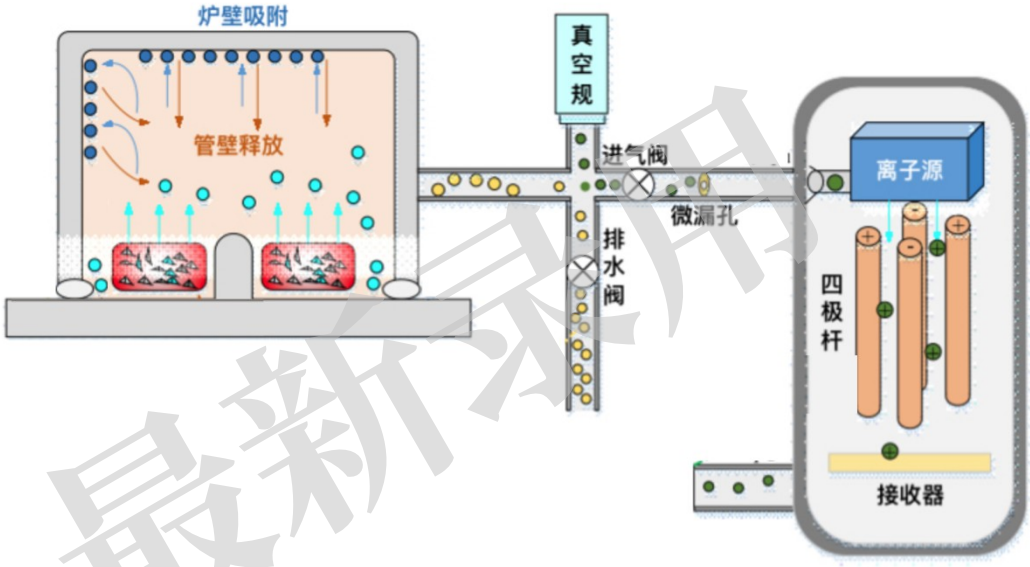


图 4 挥发分测量仪水冰分析过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the water ice analysis process of the volatile measuring instrument

因为月壤中可能存在其他挥发分，在系统内的真空规测量得到的值并不一定能放映水蒸气在炉膛和管路内的气压，所以需要质谱仪分析获得水蒸气在炉膛和管路内的分压。然而质谱仪需要在高真空环境下工作，月壤加热后释放的水的量会很多，所以需要通过一个微漏孔使炉膛和质谱仪腔体之间形成一定的压差（如图 5 所示）。

最新录用

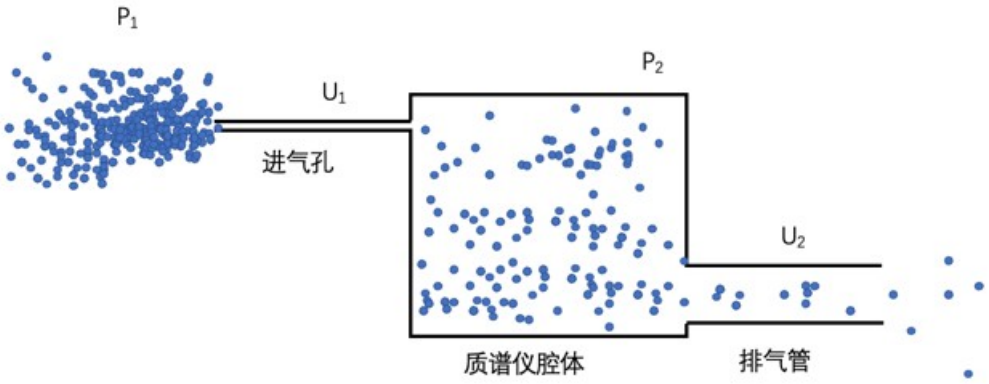


图 5 质谱仪腔体进出气示意图

Fig. 5 Schematic diagram of gas intake and exhaust in the mass spectrometer chamber

综上所述，根据在轨分析测试流程，月壤挥发分测量仪分为取样、样品转移、炉托合炉密封、加热水蒸气释放、水蒸气吸附、泄漏、真空规测量和水蒸气排除（当水含量较高时）、漏孔进气、质谱仪分析九个过程（如图 6）。

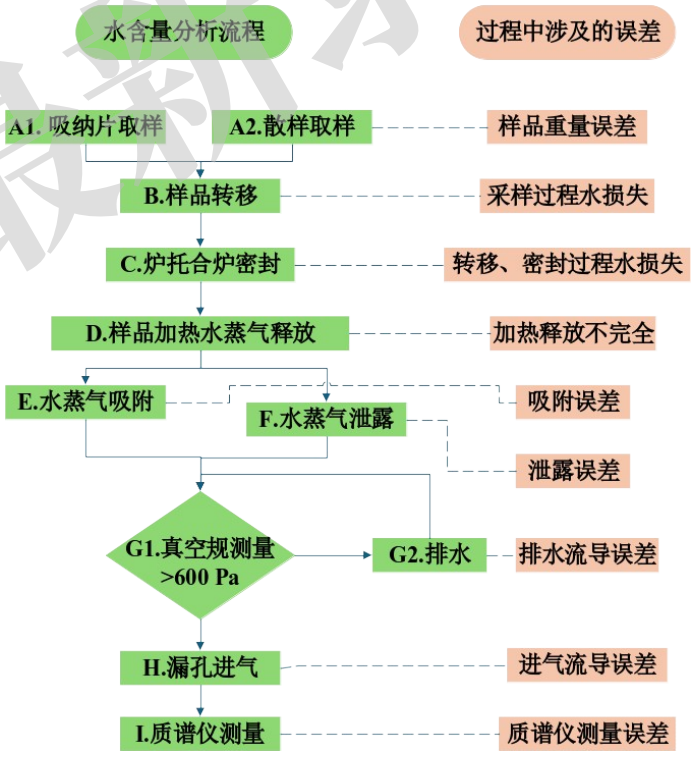


图 6 水含量测量流程、误差分解及相关试验分析图

最新录用

Fig. 6 Water content measurement process, error decomposition and related test analysis diagrams

根据误差分析，及考虑到上次测量的影响，挥发分测量仪水含量分析过程中包含样品重量误差、采样过程水损失误差、转移密封过程中水损失误差、加热释放误差、吸附误差、泄漏误差、排水流导误差、进气流导误差、质谱仪和真空规测量误差。

其中加热释放、吸附、泄漏、流导进气等过程不具备明显的先后顺序，是由测量规程和系统设计引入的系统的误差，可以通过系统标定获得其残差。

1.4 测量的随机误差

挥发分测量仪水冰含量测量的基本原理方法为加热气压法，所以最终的水含量是通过测量加热出来水蒸气的气压，而月壤挥发分测量仪获取气压的方式分为真空规测量和质谱仪测量，这两种测量测量方案一方面有自身的随机性，另一方面都有温度漂移现象，所以需要对其温漂和测量的随机误差进行标定。其中真空规获得的气压是被加热释放气体的总压力，质谱仪测量的结果为水蒸气的分压。

2 真空规和质谱仪定标

2.1 真空规测量定标方法

测试月壤挥发分测量仪主体 HVS03k+04 真空规测量范围、精度以及电压随温度、气压变化情况。实测模拟量与多种单一真实气压具有良好的对应关系。由于真空规自身原理导致其输出存在温漂，因此准确测量挥发分气压需对真空规温度进行测量后对其输出值进行校正。利用测量单元管路系统主动热控控制真空规腔体温度，由真空规安装电路板上的热敏电阻获得真空规温度，调整真空规腔体内气压，利用连接至真空规腔体的薄膜规示数作为标准，对真空规进行校准。

控制真空规腔体温度分别维持在 20±2.5 ℃、25±2.5 ℃、30±2.5 ℃、35±2.5 ℃、40±2.5 ℃、45±2.5 ℃、50±2.5 ℃、55±2.5 ℃、60±2.5 ℃，在每个温度点调整真空规腔体内压力在 0.01 Pa~800 Pa 内变化，对真空规进行校正。

最新录用

2.2 质谱仪测量定标方法

为了准确测定质谱仪在轨工作参数、验证科学指标的可达性、保证科学数据的可靠性，验证月壤挥发分测量仪质谱对水和挥发分测量的灵敏度和分辨率，完成质谱仪在温度范围（-15～65 ℃）水含量测量精度。具体过程如图 7 所示，质谱仪定标试验需要使用一套辅助系统，由提供超高真空环境的真空系统和为其提供可调节分压标准气体的进样系统两部分组成，进样系统含有校准过的薄膜真空作为标准与受试产品连接。通过测量 He、Ne、Ar、Kr、Xe 五种稀有气体和 H_2 产生的离子对峰位置来定标质谱仪的质量轴，通过分析这些峰的峰宽确定质谱仪的质量分辨率，通过调节标气的成分和在管道内的分压找到质谱仪对不同气体峰高与气压之间的对应关系。

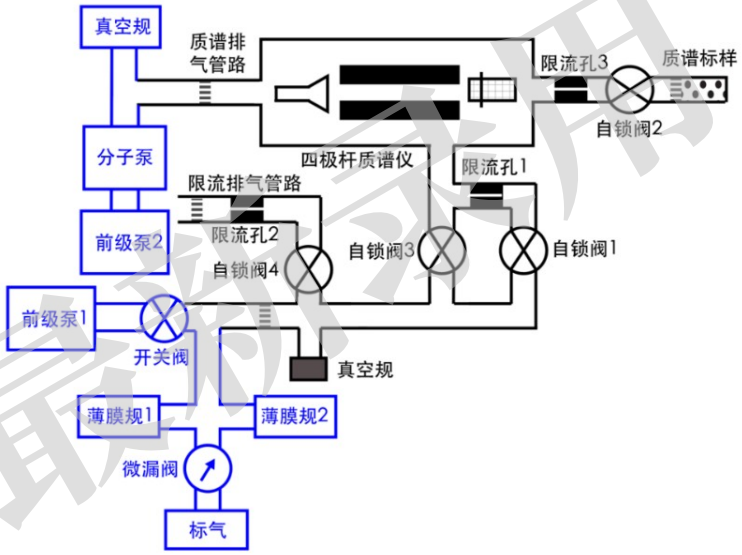


图 7 质谱定标辅助系统示意图

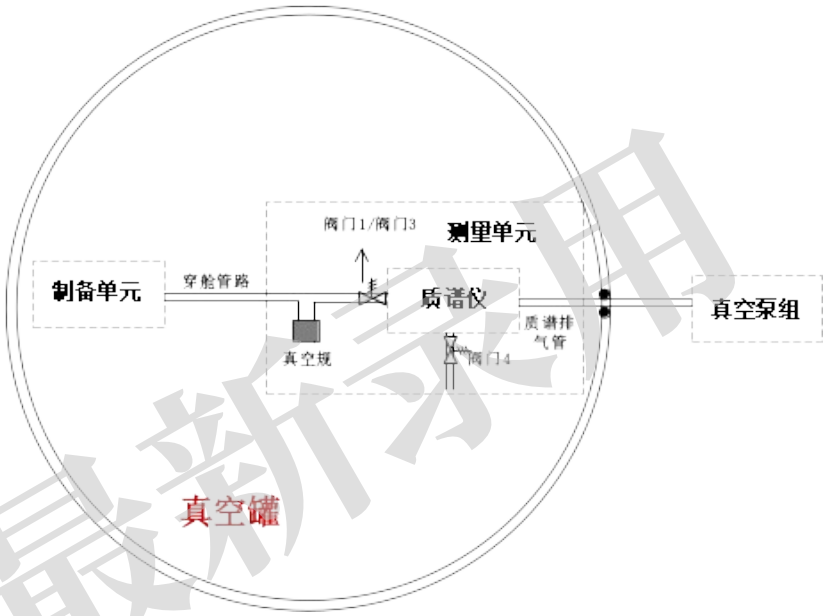
Fig. 7 Schematic diagram of the mass spectrometry calibration auxiliary system

3 氢氧化铜测量系统误差定标

月壤中水含量测量误差主要受到以下十个因素影响：样品重量误差、采样过程水损失、转移过程水损失、炉体和管路泄漏、上次残余影响、加热释放不完全、质谱仪分析误差、管道和腔体吸附、排水流导误差、测量进气流导误差。以上因素混杂在一起，难以准确判别各环节的影响，因此将样品重量误差、采样过和转移过程水损失与加热炉密封以后的水含量误差分开验证。

最终录用

在地面试验过程中，氢氧化铜（$Cu(OH)_2$）常温下比较稳定，便于保存和取用，加热到 ~150–200 ℃ 即可完全脱水为 CuO，加热释放出的水量为 18.5wt %，通过称取不同质量的 $Cu(OH)_2$ 可以准确控制水含量，所以可采用氢氧化铜排除样品重量误差、采样和转移过程的水损失等因素的影响，精确控制进入加热炉中的水含量，并且测量得到相应的真空规和质谱的读数。通过这项试验，可以检验炉体和管路泄漏、上次残余影响、加热释放不完全、管道和腔体吸附、测量进气流导等系统误差，为在轨数据处理提供依据。试验前需要如图 8 所示将月壤挥发分测量仪安装在真空罐中。



最新录用

图 8 试验系统简图

Fig. 8 Schematic diagram of the test system

当检查完各接口连接完备正确后，称取一定量（1~9 mg）的氢氧化铜，并将其装入至吸纳片中；应用工序机构地检将制备单元炉托移动至吸纳片接样位，用镊子夹取装有氢氧化铜的吸纳片，将其放入至炉托上；关闭真空罐舱门，开始抽真空；当真空度优于 1×10^{-3}Pa 时，使用工序机构地检将炉托密封，密封力 200 N 左右；按照氢氧化铜全流程试验的加热规程（按照加热炉定标后的 200 ℃的加热规程加热 10 分钟），将氢氧化铜吸纳片加热，并每隔 1 min 记录真空规的模拟量；当真空规高量程模拟量小于 600 Pa 时，打开阀门 4 等待 30 s，随后关闭阀门 4 等待 30 s，并记录此时真空规的模拟量。

4 含水模拟月壤采样-转移-测量全流程定标

含水模拟月壤采样-转移-测量全流程定标来拟实在轨工作环境模拟了采样、水损失、测量过程的系统误差和测量的随机误差对月壤挥发分测量仪设计的正确性进行验证和标定。其系统组成如图 9 所示。

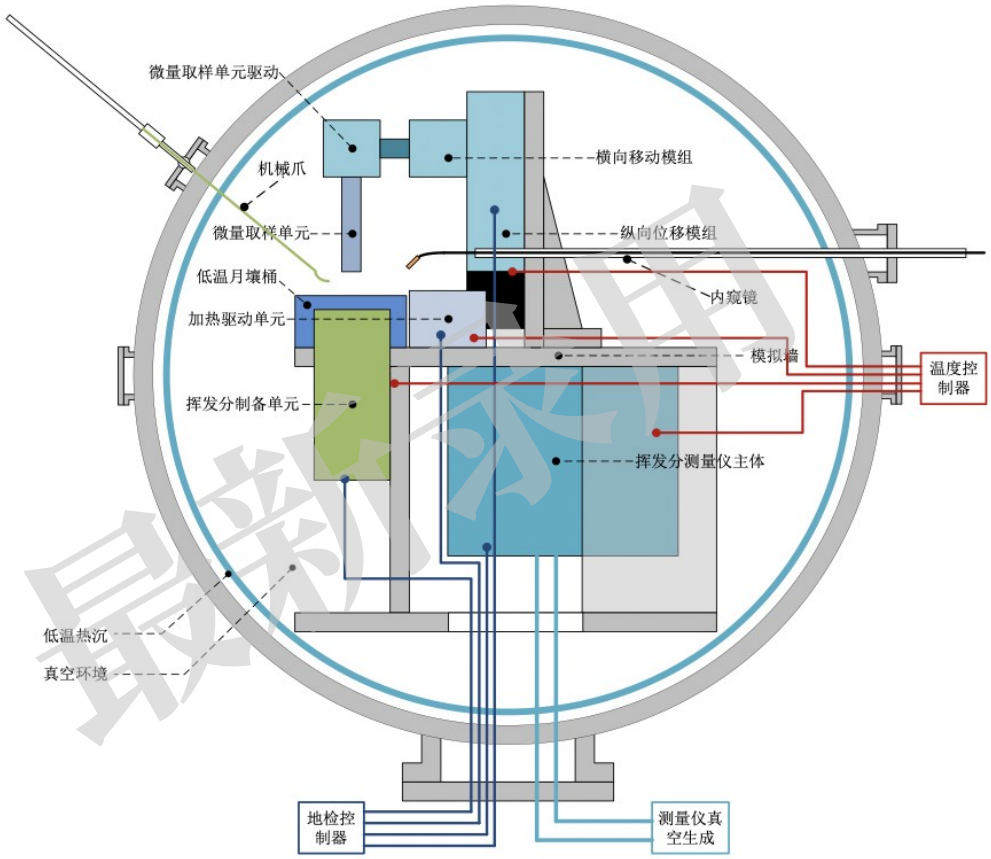


图 9 含水模拟月壤采样-转移-测量全流程定标系统组成图

Fig. 9 Composition diagram of the full-process calibration system for water content simulated lunar soil sampling - transfer - measurement

为了验证数据的可靠性，首先需要制备已知水含量且含量均匀的含水模拟月壤，具体制备过程如下：1）水含量低于 1 的 ppm 手套箱内室温下用天平称取若干质量的模拟月壤转移到烧杯里面；2）对月壤进行烘干，再用天平确认样品的重量；3）计算需要加入水的量；4）用喷壶将水洒入模拟月壤中；5）用搅拌器将上述模拟月壤搅拌均匀并静置 3h 确保水壤均匀；6）将制备好的样品随机

抽取 7 份，用天平称取重量；7）对上述 7 份样品进行烘干，再用天平称取重量，进而计算所做样品的含水量，并获得水含量的均匀度；8）剩余模拟月壤分成 3 份，用液氮进行冷冻，每次各取 1g 左右样品加热称量水含量，1、2、4、12 小时各加热称量水含量（及时补充液氮），测试水含量随时间变化关系。

在试验前，并将月壤挥发分测量仪主体、挥发分制备单元、微量取样单元、模拟月壤杯布置在真空舱内，各个组件间相对位置关系与在轨应用状态保持一致。连接、检查或调试各个组件的功能，通过驱动组件将加热炉压紧密封。并对真空室进行本底气体的烘除，开启抽气系统与舱内分子泵使腔内真空度达到或优于 1×10^{-3} Pa。穿舱真空设备对质谱仪进行抽真空，使气压小于 1×10^{-5} Pa。真空罐制冷，并启动各部组件的热控，维持各部组件在轨工作的温度。真空罐主体温度降到-100 ℃。用机械爪解除模拟月壤杯上保鲜膜和铝箔密封。微量取样单元从模拟月壤杯中采样并将采样的吸纳片转移到炉托。挥发制备单元合盖密封，记录压力传感器的密封压力。通过加热炉将样品加热到预定温度点后保持并用测量仪主体的真空规记录腔体内的分压。每个阶段温度加热前前质谱仪对本底测量 2 分钟，每个温度点加热时间保持 10 分钟并记录相应水蒸气的分压。当真空规的气压大于 600 Pa，打开排水阀进行排水，直到小于 600 Pa，记录排水时间并打开进气阀。测量结束后，打开炉托，弃样。采用相同含水率模拟月壤样品重复上述试验过程不小于 3 次，计算水含量的测量精度。

最新录用

5 结论

通过月壤挥发分测量仪在轨水含量测量方法和过程分析，对于水冰含量定量探测主要影响分为样品采样量、样品在采集和转移过程中损失、水含量测量系统误差以及气压值测量温漂和随机性四个方面。首先通过真空规和质谱仪测量定标可以约束气压测量值的随机性和温漂校正，通过氢氧化铜全流程试验可以约束水含量测量系统误差校的残差，最后通过含水模拟月壤采样-转移-测量全流程定标来系统标定月壤挥发分测量仪在上述四个作用因素下测量结果的有效性。将来为在轨数据反演提供方法支撑。

参考文献

[1] SONG H Q, ZHANG J, NI D D, *et al*. Investigation on in-situ water ice recovery considering energy efficiency at the lunar south pole[J]. *Applied Energy*, 2021, **298**: 117136

[2] LI S, MILLIKEN R E. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: distribution, abundance, and origins[J]. *Science Advances*, 2017, **3**(9): e1701471

[3] LIU Ziheng, YE Hanqing, HE Huaiyu, *et al*. Extraction and analysis of planetary volatiles[J]. *Scientia Sinica Physica*, *Mechanica & Astronomica*, 2022, **52**(1): 214514 (刘子恒, 叶汉青, 贺怀宇, 等. 行星挥发分提取和分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, **52**(1): 214514)

[4] LIN Yangting. Key issues of the formation and evolution of the Moon[J]. *Geochimica*, 2010, **39**(1): 1-10 (林杨挺. 月球形成和演化的关键科学问题[J]. 地球化学, 2010, **39**(1): 1-10)

[5] COHEN B A, SWINDLE T D, KRING D A. Support for the lunar cataclysm hypothesis from lunar meteorite impact melt ages[J]. *Science*, 2000, **290**(5497): 1754-1756

[6] CRIDER D H, VONDRAK R R. Hydrogen migration to the lunar poles by solar wind bombardment of the moon[J]. *Advances in Space Research*, 2002, **30**(8): 1869-1874

[7] PEPIN R O. Atmospheres on the terrestrial planets: clues to origin and evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **252**(1/2): 1-14

[8] Hepp A F, Palaszewski B A, Colozza A J, et al. In-situ resource utilization for space exploration: resource processing, mission-enabling technologies, and lessons for sustainability on earth and beyond[C]//12th International Energy Conversion Engineering Conference. 2014: 3761.

[9] CROTTS A. The New Moon: Water, Exploration, and Future Habitation[M]. New York: Cambridge University Press, 2014

[10] BROWN H M, BOYD A K, DENEVI B W, *et al*. Resource potential of lunar permanently shadowed regions[J]. *Icarus*, 2022, **377**: 114874

[11] JIA Y Z, ZHANG Z L, QIN L, *et al*. Research of lunar water-ice and exploration for China's future lunar water-ice exploration[J]. *Space: Science & Technology*, 2023, **3**: 0026

[12] HU T, YANG Z, LI M, *et al*. Possible sites for a Chinese international lunar research station in the lunar south polar region[J]. *Planetary and Space Science*, 2023, **227**: 105623

最新录用

[13] MITROFANOV I G, SANIN A B, BOYNTON W V, *et al*. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND[J]. *Science*, 2010, **330**(6003): 483-486

[14] LIVENGOOD T A, MITROFANOV I G, CHIN G, *et al*. Background and lunar neutron populations detected by LEND and average concentration of near-surface hydrogen near the Moon's poles[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, **162**: 89-104

[15] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, *et al*. Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. *Science*, 2010, **330**(6003): 463-468

[16] GLADSTONE G R, HURLEY D M, RETHERFORD K D, *et al*. LRO-LAMP observations of the LCROSS impact plume[J]. *Science*, 2010, **330**(6003): 472-476

[17] PIETERS C M, GOSWAMI J N, CLARK R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H2O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1[J]. Science, 2009, **326**(5952): 568-5728

第一作者和通信作者简介

刘子恒 男，1990 年 10 月出生于河北省保定市，现为中科院地质与地球物理研究所高级工程师，嫦娥七号挥发分测量仪副主任设计师，主要研究领域为月球与深空挥发分探测载荷研制和在轨挥发分测量方法研究。



最新录用