

DOI: 10.3901/JME.2024.22.351

月壤水冰组构特征模拟及其力学特性研究 展望与构想*

姜生元¹ 刘君巍¹ 李雄耀² 汪恩良³ 邹猛⁴ 田野⁵ 王储⁶ 张伟伟¹

1. 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001;
2. 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550081;
3. 东北农业大学水利与土木工程学院 哈尔滨 150006;
4. 吉林大学工程仿生实验室 长春 130015;
5. 哈尔滨商业大学轻工学院 哈尔滨 150006;
6. 中国空间技术研究院 北京 100094)

摘要: 随着深空探测技术的发展,月壤水冰逐渐成为了地外天体探测的热点和焦点。目前,世界各国纷纷启动月壤水冰物质剖面潜入原位探测,使得月壤水冰组构特征模拟及其力学特性研究成为了迫切需求。然而,月壤水冰物质与地面冻土存在明显的地-月差异性,尤其是其来源、演化机制、赋存形态和分布等特征。总结月壤水冰的探测历程,概述国内外在月壤水冰组构特征模拟及其力学特性测试的研究进展,着重分析月壤水冰物质的目标特性,展望月壤水冰组构模拟及其力学特性研究的未来发展趋势。提出未来研究过程中需要重点解决的四大关键技术,并给出相应的研究构想。最后,对月壤水冰组构特征模拟及其力学特性测试在当前研究中存在的问题进行总结,并对其发展应用前景进行展望。

关键词: 月壤水冰; 演化机制; 组构特征模拟; 力学特性测试

中图分类号: V11

Prospects and Ideas on the Simulation of the Fabric Feature of Lunar Icy Regolith and the Test of Its Mechanical Properties

JIANG Shengyuan¹ LIU Junwei¹ LI Xiongyao² WANG Enliang³ ZOU Meng⁴
TIAN Ye⁵ WANG Chu⁶ ZHANG Weiwei¹

- (1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;
2. Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081;
3. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150006;
4. Key Laboratory of Bionic Engineering, Jilin University, Changchun 130015;
5. Light Industry College, Harbin University of Commerce, Harbin 150006;
6. China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

Abstract: With the technology development of deep space exploration, lunar icy regolith has gradually become a hot spot and focus of the exploration of extraterrestrial objects. Recent years, many countries have started in-situ detections of lunar icy regolith profiles, which makes it an urgent need to simulate the characteristics of water ice fabric and study its mechanical characteristics. However, there are obvious Earth-Moon differences between lunar icy regolith and frozen soil on the Earth, especially in its origin, evolution mechanism, occurrence form and distribution. The history of water ice exploration is first summarized. And the research progress of lunar icy regolith fabric simulation and its mechanical characteristics studies at home and abroad are introduced. The target

* 国家自然科学基金资助项目(U2013603, 52005136, 51805008, 51911530117)。
20231211 收到初稿, 20240421 收到修改稿

characteristics of material is analyzed with emphasis, and the future development trend of lunar icy regolith fabric simulation and its mechanical characteristics study are predicted finally. Four key technical problems that need to be solved in the future research are put forward, and the corresponding research ideas are given. Finally, the current research problems and prospects for development and application of water ice fabric characteristics simulation and its mechanical properties test are summarized and prospected.

Key words: lunar icy regolith; evolutionary mechanism; simulation of fabric characteristics; testing of mechanical properties

0 前言

水是宇宙中丰度最大的矿物,控制着行星演化、地质作用和生命演化等一系列重要进程^[1-2]。从最初的太阳星云到太阳系各天体的形成,从地球到八大行星的演化,从地球岩浆演化到全球气候变化,再从有机物的形成到生命的出现,这些行星科学、地球科学和生命科学的核心问题都与水息息相关^[3-4]。

月球和火星等地外天体是否有水、来源于哪里、在星壤剖面中赋存与分布状态如何、物理力学特性及其影响因素,一直是人类深空探测科学与工程的前沿和热点问题。人类通过遥感探测手段已确知,在月球两极永久阴影区内赋含水冰物质^[5-7],但还无法确知水冰在月壤剖面不同区域的真实赋存与分布状态。

目前,世界各国均拟在遥感探测已有成果的基础上,开展月球水冰物质原位探测计划,以消除遥感探测多解性带来的问题。根据目前的探测结果可知,月壤水冰物质主要存在于月表一定深度以下。若想实现原位探测,探测机具必须具备相适应的剖面潜入能力^[8],且具有良好的地面可验证条件。那么,在潜入探测机具设计阶段,月壤水冰物质的物理力学特性就是一项重要的设计准则。在潜入机具地面试验验证阶段,具有与真实月壤水冰高度拟实的模拟样本这一试验对象是该阶段的必要条件。所以,从月壤水冰的组构特征模拟和力学特性测试研究两方面进行论述,总结月壤水冰的探测进展,分析月壤水冰的目标特性,探讨未来的发展趋势及面临的挑战,并提出相应的研究构想。

1 月壤水冰目标特性

1.1 探测进展

从 1961 年 WATSON 等^[9]提出月球永久阴影区有水的科学假说以来,人们对月球水冰物质的认知历程大致经历了四个时期,分别为质疑期、模糊期、明确期和证认期,如图 1 所示。

(1) 质疑期,即质疑水冰是否真的存在。1969—1976 年间 Apollo 与 Luna 系列任务采样返回的样品

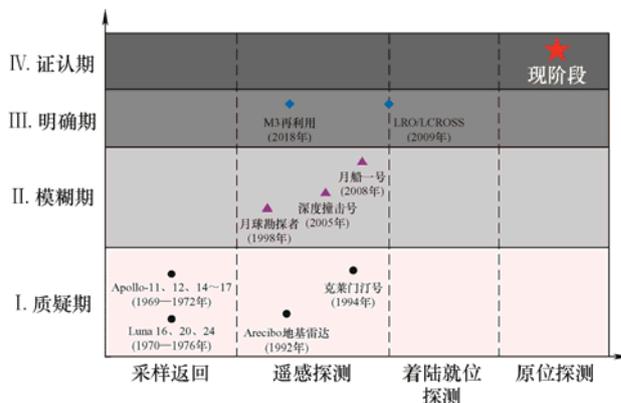


图 1 月球水冰探测历史阶段

中鉴定到了一些含水矿物相,但是被归因于陆地蚀变的可能性更大一些^[10-12]。美国康奈尔大学利用地基雷达搜寻到水冰物质的回波信号,但是回波信号的异常受月表地形的影响使人无法确认是否为水冰物质^[13-15]。1994 年美国克莱门汀探测器利用地球深空探测网络接收到的双基地雷达回波信号,认为月球南极永久阴影区存在大量水冰,但是这一结论同样受到质疑^[15-16]。

(2) 模糊期,即无法辨别是水冰还是其他含 H 物质。在这一阶段,月球勘探者号、深度撞击号和月船一号其上搭载的科学载荷受限于探测原理及数据解译技术的限制,无法分辨探测到的水冰物质信号究竟代表的是羟基还是水冰物质^[17-20]。

(3) 明确期,即明确水冰物质的存在。2009 年美国 LCROSS 探测器成功撞击月球南极的 Cabeus 陨坑,利用可见-近红外光谱仪和极紫外相机探测溅射挥发分的光谱数据,发现水冰的含量高达 $5.6\% \pm 2.9\%$ ^[21-25]。2018 年夏威夷大学李帅团队重新分析月船一号的探测数据,利用 M³ 在 1.3 μm 、1.5 μm 、2.0 μm 探测波段的显著特征,判定月球永久阴影区存在水冰物质^[8]。但是 M³ 的探测范围只有月表以下毫米级深度,也就是说,这次探测到的水冰可能只是“冰山一角”。

(4) 证认期,即证实人们对月壤水冰物质特性的认识与猜想。在这一阶段,世界各国纷纷启动针对月球极区水冰物质的原位潜入探测计划,如美国的 VIPER、俄罗斯的 Luna 27 和我国的“嫦娥七号”探测计划^[26-30]。人们期望采集到月壤水冰样品,并

利用搭载的科学载荷分析月壤水冰的组成、分布、赋存状态及其综合物性。

1.2 目标特性

月壤水冰的目标特性主要指月壤水冰的来源、演化机制、赋存形态及分布情况等。充分认识月壤水冰的目标特性是在地面开展月壤水冰组构模拟及物性测试的必要前提与科学指导。目前，人类通过返回样品及遥感探测数据分析，已初步获知月壤水冰的目标特性。

1.2.1 月壤水冰的来源及演化

一般认为月球水冰主要有三种来源：一是撞击月球的彗星或陨石带入；二是由太阳风中的氢与月壤和月岩的氧化亚铁发生还原反应生成；三是月球深部释放的岩浆水^[22, 31-32]。这些水应存在于月球两极撞击坑内的永久阴影区，由于没有太阳光的照射，其温度一般非常低，所以水冰在此区域的存在比较

稳定^[33-35]。

月球撞击起源说认为，45亿年前，一颗名为Theia的原行星撞向早期的地球，其给地球带来水的同时，撞击物经过吸积形成了早期的月球^[36-37]。早期的月球具有全球性的岩浆洋，温度可达1000℃以上。在这一阶段，月球上大部分的水和挥发物经过了脱气作用，导致月球表面的挥发物含量很低。随后几十亿年，月球经历了一系列的地质演化活动，其中彗星冰核撞击月球、月球内部岩浆活动及太阳风质子的注入等均为月球带来了一定量的水资源，如图2所示。假设彗星和原始岩浆水的释放在月球全球尺度上来说应该是等概率的，太阳风质子在月球低纬度地区的作用更强一些，即在月球低纬度地区太阳风作用形成的水的浓度更高。但是受温度的影响，低纬度地区可能不能很好地保存这些水冰物质。

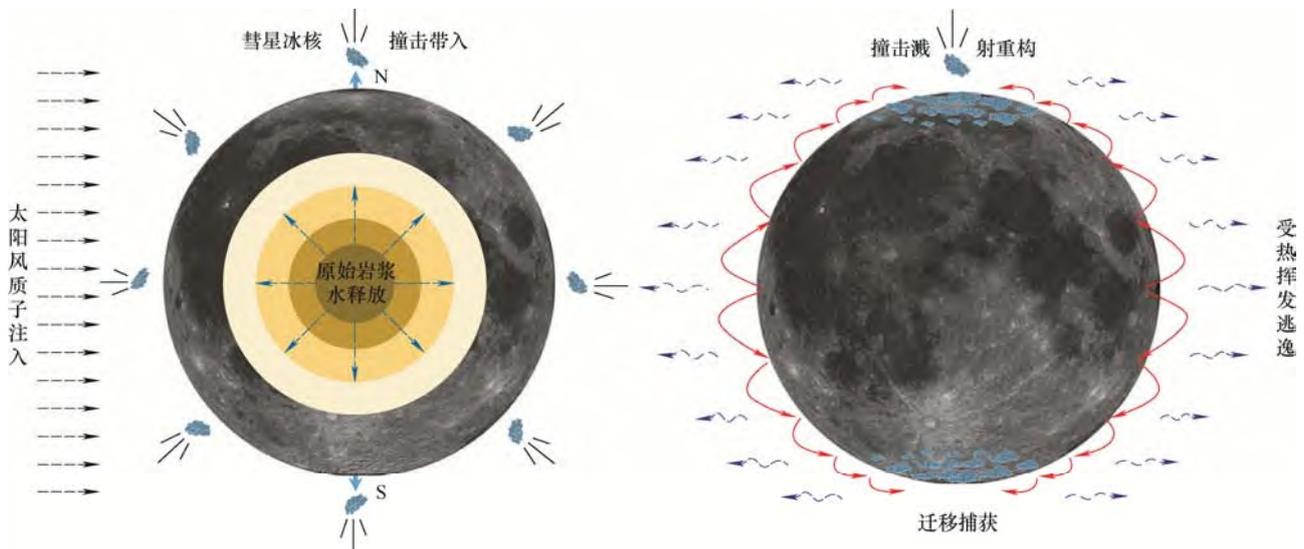


图2 月球水的来源及演化机制

目前，有关月壤水冰演化机制的科学假说主要有三种。

(1) 逃逸机制：即月球水冰及挥发物受光照、空间电离辐射、撞击生热等作用而挥发逃逸，这种机制在月球中低纬度光照区的作用尤为明显^[32, 38-39]。

(2) 迁移机制：逃逸的月球水冰及挥发物一部分扩散到太空中而永久损失掉，另一部分挥发物会在月球表面以弹道随机跳跃的方式进行全球性的迁移，当其迁移至温度条件适合挥发物存在的冷阱区域时就会被捕获^[32]。

(3) 撞击溅射重构机制：陨石、微陨石及彗星等撞击可能带来水，这种撞击呈现“幕布”分布，即不连续性来源。由于撞击规模大小不一，而撞击

体大多来自外太阳系，撞击过程中经历极端的高温高压条件，足以使撞击体中的水变成水蒸气。其中大约三分之二的水蒸气会逃逸进入太空，剩下的三分之一将继续参与月球水的演化^[39]。由于陨石和微陨石的撞击挖掘埋藏，或者来源于附近撞击溅射物的覆盖，导致表面月壤不断被深埋。当埋藏深度对应的温度达到升华点时，水冰发生气化并向较冷的月面迁移。长期的撞击溅射重构从月面不断往下层输送含有水冰的月壤颗粒，最终会导致在某一升华-凝华界面产生富集。

1.2.2 赋存形态

极区月壤中水冰的赋存形态主要有三种：矿物晶格中的结构水、颗粒表面吸附水和水冰。第一种矿物结构水，主要以羟基的形式与阳离子结合存在

于晶格中, 相对较为稳定, 主要是含水岩浆在冷却过程中结晶矿物捕获羟基以及太阳风质子注入硅酸盐矿物中形成, 是光照区月壤水的主要存在方式, 在月船 1 号和我国“嫦娥三号/四号”任务中红外光谱在 1.4 μm 和 2.8 μm 附近的吸收峰均可说明矿物结构水的存在。同时, 由于撞击溅射和静电迁移等, 光照区月壤也可进入永久阴影区并被保存下来。因此, 矿物结构水在极区光照区和永久阴影区的月壤中均有存在。

第二种颗粒表面吸附水, 主要是吸附于矿物颗粒表面的水分子, 在月球表面高真空条件下容易脱附, 只能存在于极低温度的永久阴影区。月球南极永久阴影区温度通常在 $-40\sim-30\text{ K}$, 形成“冷阱”捕获自由运动水分子(包括由光照区迁移而来、早期岩浆去气以及彗星撞击等产生的水分子)并保存下来, 经过长期的捕获, 月壤颗粒表面可形成连续或不连续的水分子吸附膜, 若吸附水分子足够多将形成“冰膜”。

第三种水冰, 主要埋藏在永久阴影区的次表层月壤间隙内。由于撞击溅射和静电迁移, 永久阴影区内月壤随时间推移逐渐积累, 原先位于表面的月壤颗粒逐步被埋藏。随着埋藏深度的增加, 由于月球内部热流的作用, 温度也逐渐升高。当温度高于脱附或者升华温度时, 颗粒表面的吸附水发生脱附或升华, 往上逃逸, 但当水分子迁移至温度低于脱附或者升华温度的月壤层时, 重新被该层位的月壤颗粒吸附。随着时间推移, 将形成在某一层位富集水并可能形成水冰层, 而其下月壤为干燥月壤。

由于缺少月球原位采样探测案例, 目前仍然无法准确获取永久阴影区冰壤混合的真实状态。不过基于目前的遥感探测结果和相关模型, 有些科学家提出冰壤混合可以简单分为三类, 即冰、壤均为细颗粒的混合; 冰块与月壤混合; 水冰层与月壤混合。第一种混合过程类似于月壤的形成演化过程, 只是中间会有水不断加入(上述三种来源)。最终, 伴随着月壤的成熟度提高(细粒化、均匀化), 水冰也形成细小的颗粒。第二种混合过程类似于在月壤演化中, 有大量水的混入, 如彗星撞击带来的水。月球勘探者探测结果表明在干燥的月壤下分布着不连续的水冰。因此, 这也更支持该种冰壤混合方式。第三种过程为在月壤的演化过程中, 需要有持续性的水加入到月壤中。

当然, 实际冰壤的混合模式根据当地的地质特征和外部环境可能会更加复杂。冰壤的混合模式也很可能并不是单一的。图 3 展示了一些研究学者基

于上述三种模式, 并主要考虑水冰的含量, 将冰壤混合方式进一步细分: 从少量的冰颗粒与月壤混合, 到冰与月壤颗粒胶结, 到填充月壤孔隙, 到冰团聚包裹月壤颗粒, 再到局部的冰块和冰层。

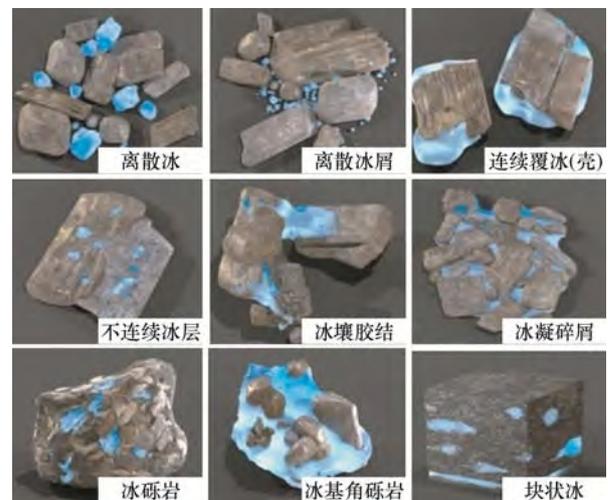


图 3 微观状态下月壤与水冰可能的物理结合状态^[40]

1.2.3 撞击坑水冰分布情况

1979 年, ARNOLD^[41]首次通过模拟计算给出月球永久阴影区水冰含量为 $10^{16}\sim 10^{17}\text{ g}$, 相当于 $1\%\sim 10\%$ 。但是需要注意的是, 这里的评估依赖于永久阴影区的面积以及水冰的厚度等因素。2000 年, FELDMAN 等^[5]对 LP-NS 中子数据评估的水冰含量为 $1.5\%\pm 0.8\%$, MITROFANOV 等^[21, 42]对于 LEND 数据分析认为月球两级水冰含量为 $0.5\%\sim 4.0\%$, 2014 年, MILLER 等^[43]应用不同能量中子对于不同深度响应程度差异的特征发现月球南极 Shackleton 撞击坑表面水当量约为 1% , Cabeus 撞击坑深度为 10 cm 处水当量为 4% 。2012 年, GLADSTONE 等^[44]利用 LAMP、FUV 反射光谱显示水冰含量为 $1\%\sim 2\%$, LCROSS 原位探测得到飞溅物推断 Cabeus 撞击坑的水冰含量为 $5.6\%\pm 2.9\%$ ^[21-22, 25]。结合月壤水冰的来源及演化机制可知, 月壤水冰的赋存及分布呈现出多样性、概率性、离散性和可预测的特点。

(1) 多样性: 月壤中的水冰物质具有结构水、吸附水及水冰等多种赋存形态。

(2) 概率性: 主要指探测区域是否有水冰物质是无法确知的, 是概率事件。

(3) 离散性: 水冰物质在月面表层和次表层剖面均有分布, 但其分布是不连续的。

(4) 可预测性: 根据月球水冰形成与演化的科学假说预知其赋存区域与类别。

所以, 综合以上内容预测月球永久阴影区撞击

坑水冰的赋存与分布状态如图4所示。撞击坑不仅有永久阴影区，在撞击坑外部和坡面还存在一定的光照区，撞击坑的永久阴影区包括坑底和一定的坡面。在撞击坑的不同区域，月壤水冰的赋存形态、丰度及分布状态均存在较大的差异。

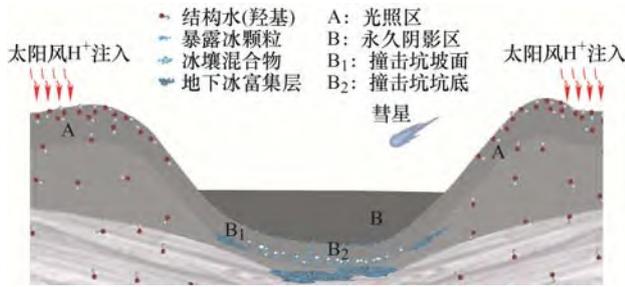


图4 永久阴影撞击坑中水(冰)分布示意图

(1) 撞击坑光照区：该区域的水主要以结构水(羟基)的形式赋存于矿物晶格中，含量约为 ppm 量级，主要来源于太阳风 H^+ 的注入。其分布情况主要受光照强度和时间的影

(2) 撞击坑坑底：当水分迁移至永久阴影区后，受永久阴影区极端低温的影响，水分极易被冷阱捕获，从而形成暴露的冰颗粒(表面霜冻层)。此外，在彗星撞击作用下，次表层月壤水冰也会被溅射并暴露于月表。这种形式的水主要吸附在月壤颗粒的表面，其含量可能不超过 1%。沿着月壤纵深剖面而下，大概率存在于月壤颗粒混合的冰壤胶结物，其质量分数在 5%~6%。随着深度进一步增大，可能存在地下冰的富集层。

(3) 撞击坑坡面：类似于撞击坑坑底，月壤水冰同样可能以暴露的冰颗粒、冰壤混合物及冰富集层等形态存在。由于剖面温度、地质构造及热辐射等因素均在一定程度上影响月壤水冰物质的赋存与分布，所以坡面与坑底水冰的分布上应该会有所区别。由于复杂的地形条件会使得挥发物逃逸的路径变得更加复杂曲折，所以在剖面石块的下方可能会有水局部富集的现象。这一特点对开展月壤水冰采样探测方案的选择与采样机具的设计具有重要意义。

综上所述：① 月壤水冰的赋存环境具有特殊性，其赋存形态也具有多样性的特点；② 月壤水冰物质的广域和剖面纵深分布具有概率性和离散性特征；③ 在开展撞击坑永久阴影区月壤水冰探测时，应具备一定的剖面潜入能力，重点关注含量较大的冰壤混合物及冰富集层，以提高探测的成功率。

2 研究进展

鉴于目前对开展月壤水冰原位潜入认证的迫切

需求，各国研究机构纷纷启动相应的研究计划，而月壤水冰组构特征模拟及其力学特性的探究又是潜入探测的先导性基础。

2.1 月壤水冰组构模拟

月壤水冰主要存在于月球南北两极的永久阴影区中，而月球极区地形又主要以高地为主，其月壤原料以斜长岩为主，其他矿物为辅，这与月海月壤存在很大的区别。目前世界多国研究机构均研制了不同类型的高地月壤模拟物，如表1所示^[45-54]。以NASA研制的NU-LHT系列高地月壤模拟物为例，其矿物类型、化学成分、粒度参数、比重、内聚力及内摩擦角等参数与JSC-1A模拟月壤存在较大的差异。在确保月壤水冰模拟物原料的矿物类型、化学组分、粒度等其他参数与极区月壤相似的条件

表1 典型的高地月壤模拟物

序号	名称	国别	原料
1	NU-LHT 系列	美国 NASA 和 USGS	斜长岩、斜长岩、玻璃
2	LHS-1	美国中佛罗里达大学	斜长岩、玄武岩
3	MLS-2	美国明尼苏达大学	斜长岩
4	OPRH2N/H2W/H3N/H3W	美国 Off Planet Research 公司	斜长岩、玄武岩
5	OPRFLCROSS1	美国 Off Planet Research 公司	模拟月壤+非纯水冰
6	OB-1	加拿大新不伦瑞克大学	斜长岩
7	TUBS-T	德国不伦瑞克工业大学	斜长岩
8	UoM-B	英国曼彻斯特大学	石英砂、火山灰
9	LSS-ISAC-1	印度空间研究组织(ISRO)	斜长岩
10	NAO-1	地化所和国家天文台	辉长岩

NASA 研究人员采用分层压实制备的方式^[55](图5)，首先将液态水与干燥的模拟月壤按照一定的比例混合，待混合完成后将样本密封，并静置一段时间。随后，将样品放入模拟月壤桶中，并利用落锤进行分层压实。最后，先将样本放置在 -20°C 的环境下冷冻24 h，再利用样本桶外的液氮循环管路将样本冷冻到预定的更低温度。在冷冻过程中，可利用沿纵深和径向布置的传感器动态监测样本温度的变化。METZGER等^[56]开展了月壤水冰剖面样本的模拟研究，在1 m高的样本柱中分层布置了不同含水率的水冰模拟物。月壤水冰组构模拟国外研究现状如图5所示。

英国萨里航天中心 PITCHER 等^[57]以三种不同的方式进行样品含水率的配置：第一，将经过水



图 5 月壤水冰组构模拟国外研究现状

分散器产生的水蒸气通过导管引入到干燥的模拟物中；第二，将干燥的样品放置在由几个等距环组成的钢骨架笼中，将笼放到蒸煮锅中，并在锅中注入 3 cm 高的水，最后加热蒸煮锅使水蒸发浸润样品；第三，用压力蒸煮锅代替普通蒸煮锅，在试验过程中允许锅内水蒸气压力较高。ESA 的研究人员采用手动搅拌填充的方式制备月壤水冰模拟样本，将定量的水均匀倾洒在干燥样本表面，随后利用手工搅拌的方式将样本均匀混合，最后将样本压实并进行充分冷冻^[58]。

这些方法基本都基于地面冻土领域的制备技术体系，即将液态或气态水与干燥的模拟月壤配比、混合并击实成型，这种方式借鉴了地面冻土领域样本制备的先进经验，在地面环境及工程条件下的可操作性更强、经济性更好，但是其未考虑月壤水冰的形成演化机制和地面冻土存在本质上的差异，这可能会导致月壤水冰模拟物与真实月壤水冰的等效度较差。

2.2 力学特性测试

为了解月壤水冰的宏观物理力学特性，2008 年 GERTSCH 等^[59]利用 JSC-1 模拟月壤原料制备不同含水率的月壤水冰模拟样本，并开展单轴抗压强度测试，如图 6 所示。利用二次函数将结果

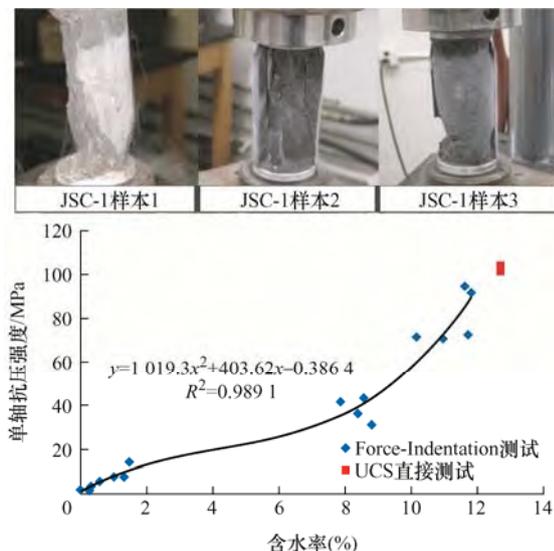
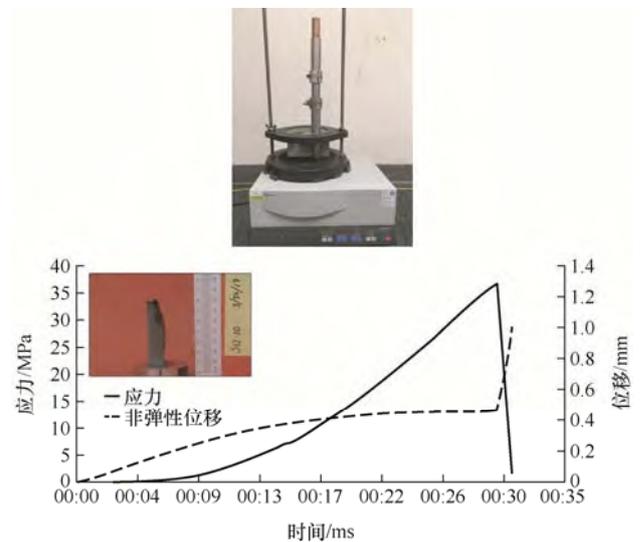


图 6 GERTSCH 等开展的样本单轴抗压强度测试

进行拟合，可知月壤水冰的单轴抗压强度随含水率的增大逐渐增大，当含水率为 13% 时，单轴抗压强度可达 102~104 MPa。同时，随着温度的逐渐降低，强度逐渐增大，且温度高于 -100 °C 时，样本表现为黏塑性，温度低于 -100 °C 时，样本呈现为脆性破坏。

2018 年，ATKINSON 等^[60]同样开展了月壤水冰模拟样本的单轴抗压强度测试工作(图 7)，其采用的样本尺寸为 $\Phi 25.4 \times 63.5$ mm，长径比 2.5:1，加载速率 0.24~2 mm/s。ZACNY 等共获得了 3%、5%、12% 三类含水率及 77 K、253 K 两类温度样本的 20 组试验数据。试验结果显示，含水率 12.07%，密度 1.85 g/cm³，温度 77 K 的月壤水冰模拟样本最大强度可达 37.15 MPa。这与 GERTSCH 等的测试结果存在较大的差异。

图 7 ATKINSON 等^[60]开展的样本单轴抗压强度测试

2016 年，英国萨里航天中心 PITCHER 等^[57]确定了利用月球高地模拟物(Lunar highland simulant, LHS)制备的月壤水冰模拟样本的饱和点，并探究月壤水冰模拟物在不同含水量下的力学性质(图 8)。试验结果表明，LHS 的饱和点在 13% 至 17% 的含水率之间，样本含水量的增加会使贯入越来越困难。同时，PITCHER 等使用手持式贯入仪测量含水量 3%~8% 的样本中心和边缘的贯入强度。结果表明随着样本含水率的增大，样本的贯入阻力明显增大。当水的质量含量约为 5%±1% 时，样本的贯入阻力会发生急剧变化。此外，5% 的含水率为一个临界点，在该临界点处贯入阻力急剧增加。为了验证贯入测试的试验结果，PITCHER 等制备了三个含水率分别为 3%、6%、12%、直径 70 mm，高度为 140 mm，温度 -20 °C，密度 1.55 g/cm³ 的柱状样本，并开展单轴抗压强度测试试验。试验结果，

表明不同含水率样本的测试结果差异较大。同时,贯入强度值比单轴抗压强度值高得多,这是因为在单轴抗压强度测试中没有侧向限制,而贯入过程中必须克服圆锥形尖端周围材料施加的阻力及沿轴的摩擦力。



图8 PITCHER等^[57]开展的样本力学特性测试

综上,人们已经通过多种方式去探索月壤水冰的力学性质,并对其有了一个初步的认识,为开展月壤水冰采样探测工程任务的实施提供了一定的输入条件。但是目前对月壤水冰力学特性的认识还不甚深入,这是由于在地面条件下进行月面拟实环境测试需要消耗的代价非常高,比如极区低至40 K温度条件的模拟,这也必然导致目前的试验不具备深入探索月壤水冰力学特性影响规律及力学本构关系的条件。此外,月壤水冰这种受矿物类型、化学组分、密度、粒度及孔隙等参数影响的复杂材料具有类似冻土的高度离散性。所以,仅从样本的温度、含水率及密度等宏观参数角度不足以从本质上揭示其力学特性响应机制。

3 发展趋势预测

可以预见,未来月壤水冰探测任务的成功与否会非常依赖月壤水冰模拟物的等效程度及其力学特性的认知深度,尤其是以原位资源利用和月球基地建设为目的的后续探测任务,该方向的研究必将呈现出更加科学、系统、深入的特点。

(1) 从参照地面冻土领域经验转向以月壤水冰形成演化机制为基准。月壤水冰的形成演化机制与地面冻土存在本质上的差异,此外在水冰的来源、组成、赋存、分布等方面也存在地-月差异性。以月壤水冰的形成演化机制为基准,选用等效的地面特种工业技术开展月壤水冰组构特征模拟,可最大程度保证模拟物与真实月壤水冰的相似度,以确保力学特性测试数据的科学性与真实性。

(2) 从满足工程需要迈向科学系统研究。当前人们开展月壤水冰物质研究多从工程实施的需要出发,以满足工程验证为目的,尤其是月壤水冰组构特征模拟及其力学特性研究。工程实施的初级阶段只需要确定月壤水冰的力学苛刻度边界,并以此为依据开展探测载荷的设计。随着研究的深入及后续

探测任务的规划,分析月壤水冰组构特征及其力学特性的影响因素,追求模拟物与真实月壤水冰的相似度、等效度、覆盖度将成为必然。同时,也将不再满足于力学苛刻度边界的认知,必将系统探究月壤水冰的力学、热学及电学等综合物性及其影响机制。

(3) 从只关注宏观组构特征转向对细观组构特征的重视。月壤水冰组构特征极其复杂,包括矿物组成、粒径分布、孔隙度、密度及含水率等宏观组构参量,也包括颗粒形貌、密度分布、水分分布及冰壤胶结界面等细观特征参量,其物理力学特性受宏观组构参量的综合影响。单单追求月壤水冰宏观组构特征的模拟将无法保证与真实月壤水冰的相似度和等效度,也无法从根源解释月壤水冰物理力学特性产生差异的原因。

(4) 从开环模拟转向闭环模拟调控。早期研究往往只追求完成月壤水冰模拟物质制备即可,容易忽略月壤水冰模拟物制备过程中是否存在微裂纹、冻胀及水分分布不均等缺陷,也无法保证模拟物宏观组构与真实月壤水冰的相似度和等效度。未来在开展月壤水冰组构特征模拟过程中,必将引入宏观组构表征和样本缺陷检测,分析产生缺陷的机理,并提出相应的防控措施。

4 关键技术及研究构想

4.1 地-月差异性分析及组构特征模拟策略

在地面开展月壤水冰组构特征模拟方法研究,既要参考地面冻土样本制备的先进经验,又需要充分考虑月面极端环境、形成演化机制及其赋存状态等方面与地面冻土的差异性。通过分析月壤水冰与地面冻土在赋存环境、来源、组成及演化机制方面的差异,评判这些差异带来的影响。根据评判分析结果,确定月壤水冰模拟样本的制备准则。构建赋存环境模拟、基础原料及组构模拟、模拟工艺参量的置信水平分析模型,根据分析结构进一步调控评判因子,修正组构特征模拟策略,研究流程如图9所示。

(1) 赋存环境差异性分析及环境参数调控:月球极区温度低至 $-230\text{ }^{\circ}\text{C}$,真空度高达 10^{-11} Pa ,在地面营造大尺度空间的绝对拟实低温、真空环境条件极为困难,且工程代价极大。温度和真空度是月壤水冰综合物性的关键影响因素,环境参数的差异将会导致物性参数与真实值不一致。因此,需要开展环境参数(真空度、温度)对月壤水冰样本力学、热学、电学特性的影响评判分析研究,为月壤水冰

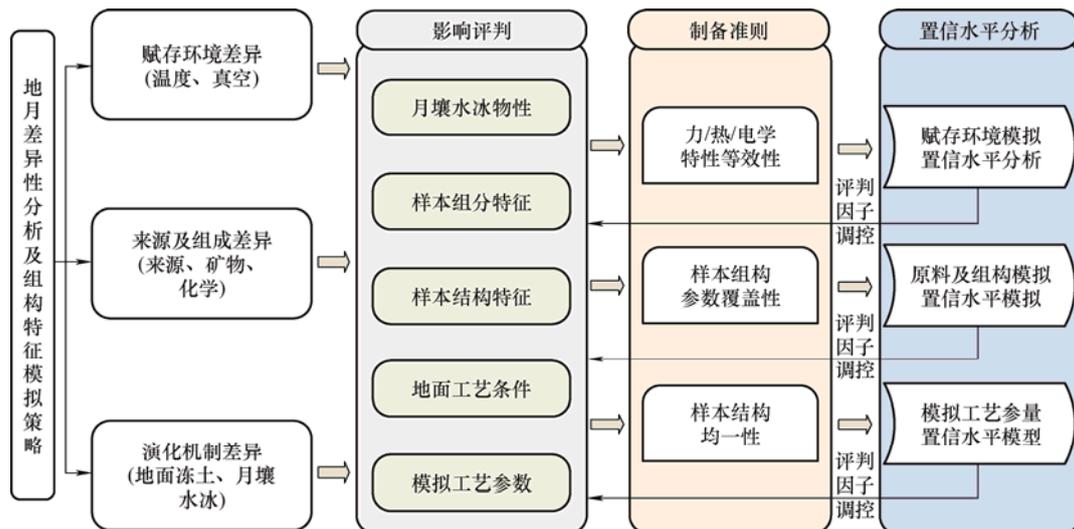


图9 地月差异分析及组构特征模拟策略研究流程

物性等效性准则制定奠定基础。同时，建立赋存环境置信水平分析模型，进一步分析真空、低温环境对月壤水冰物性的影响，利用分析结果调控评判因子，为环境参数调控提供理论策略。

(2) 来源与组成差异性分析及组构特征模拟调控：地面冻土中的水冰物质主要来源于地球内源水循环，主要由固体矿物颗粒、黏塑性冰(胶结冰、冰夹层、冰包裹体)、气体及未冻水组成。与月壤水冰存在本质差别，体现为月壤水冰主要来源于彗星陨石撞击、太阳风作用及月球内源水释放，其主要由固体矿物颗粒及冰壤混合物组成。在月面极端低温、极端真空环境下，月壤水冰内部不可能有很多气体及未冻水存在。由于地面冻土和月壤水冰在这两方面存在的显著差异，需要开展样本组分特征及样本结构特征分析，为月壤水冰组构参数范围制定、矿物类型、化学组分、样本组构特征模拟提供参考。同时，建立基础原料及组构模拟置信水平分析模型，利用分析结果调控评判因子，为月壤水冰组构特征模拟策略制定提供理论依据。

(3) 形成与演化机制差异性分析及模拟工艺调控：寒区水循环与水平衡是地球冻土形成与演化的主要驱动机制，而月壤水冰的形成演化机制目前已知的主要有逃逸机制、迁移机制、溅射重构机制。形成与演化机制上的差异决定了在开展月壤水冰组构模拟时不能完全参照已有的地面冻土制备技术，需要重点分析月壤水冰的挥发逃逸机理、冷阱捕获机制及溅射重构作用，筛选与之等效的地面特种制备技术。分析地面工艺技术的局限性，如地面无法实现 10^{-11} Pa 的月面真空环境及很难达到 -230 °C 的温度环境，所以需要开展地面工艺条件及模拟工艺参数分析，为月壤水冰样本结构均一性提供保证。

同时，建立基础原料及组构模拟置信水平分析模型，根据分析结果调控评判因子，为月壤水冰组构特征模拟准则制定及工艺参数调控奠定基础。

4.2 月壤水冰模拟物基础原料制备技术

人们已经通过采样返回的方式获得了月海地区的月壤样品及丰富的科学探测数据，如中国的嫦娥五号已成功从月球风暴洋取回 1 731 g 月壤样品，并且积累了模拟月壤制备的大量经验。所以，充分继承嫦娥五号等月壤钻探任务中模拟月壤制备研究的基础，开展嫦娥五号地面钻进试验用模拟月壤的适用性分析非常必要。同时，计算分析月壤水冰探测数据，确定月壤水冰模拟物矿物原料的甄选准则，标准化模拟月壤基础原料的制备工艺，研究流程如图 10 所示。

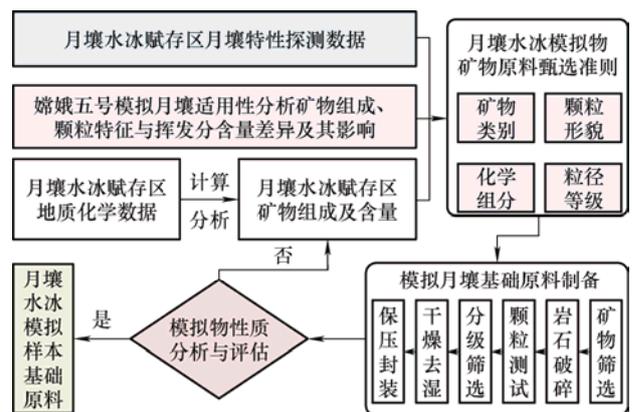


图10 月壤水冰模拟物基础原料制备研究流程

(1) 月壤水冰探测数据分析：分析月壤水冰赋存区月壤特性探测数据，主要包括赋存环境和地质化学信息。根据月壤水冰赋存区地质化学数据计算分析月壤水冰赋存区矿物组成及含量信息。月壤水冰赋存区主要位于月球南北两极，其矿物组成、颗

粒特征及挥发分含量等特性与月海地区的月壤存在一定的差异。所以，是否可直接用嫦娥五号模拟月壤作为月壤水冰模拟物的基础原料需要进行适用性分析。对比现有模拟月壤和高地月壤的矿物类别差异，分析其中斜长石、辉石、橄榄石及钛铁矿等影响月壤水冰模拟样本物性的主要成分。根据目前月球样品、地球岩石和地球矿物的热学和电学分析结果，推测现有模拟月壤和月壤水冰模拟物在力学、热学及电学特性方面的关系与差异，确定现有模拟月壤的适用性。

(2) 月壤水冰模拟物矿物原料甄选准则及制备工艺：综合月壤水冰探测数据分析结果，确定月壤水冰模拟物矿物原料甄选准则。即以矿物类别、化学组分、颗粒形貌及粒径等级等与月壤组构特征和物性强相关的特征为甄选依据，开展月壤水冰模拟月壤基础原料制备。制备工艺流程如下：① 矿物筛选：基于样本力/热/电学特性等效原则，选取与真实月壤水冰物质具有矿物组成及化学成分相似的地球岩石；② 岩石破碎：选取与月壤形成演化机制等效的特殊制备技术，开展月球极端不规则度颗粒模拟物制备，形成不同颗粒形貌、粒径大小的颗粒物质；

③ 颗粒测试：采用电镜扫描对模拟物颗粒形态进行拍照和扫描，获取模拟物的颗粒形态纵横比、复杂度因子、长度直径比等关键参数，以便比对分析与真实月壤相似度等级，并使用激光粒度仪对模拟物颗粒粒度和粒度分布进行检测；④ 分级筛选：对加工后的月壤模拟物原料进行级配筛选，采用多级旋振筛分器和微米级颗粒筛分仪进行逐级筛分处理，筛选出微米级月壤模拟物颗粒；⑤ 干燥去湿：对月壤模拟颗粒进行烘干处理；⑥ 保压封装：对不同粒径的颗粒重新收集并封装存储，形成具有多种不同粒径等级的模拟月壤基础原料库。

(3) 模拟物性质分析与评估：全面分析制备的月壤水冰模拟物基础原料，将结果与参考标准进行综合对比分析，评估模拟样品是否具有较高的等效度。若等效度较差，则进一步优化加工制备流程。

4.3 月壤水冰宏细观组构特征模拟及缺陷防控技术

宏细观组构特征模拟技术及其缺陷防控工艺研究包括宏细观参数体系构建、月壤水冰模拟物制备工艺及模拟物缺陷防控三方面内容，具体研究路线如图 11 所示。

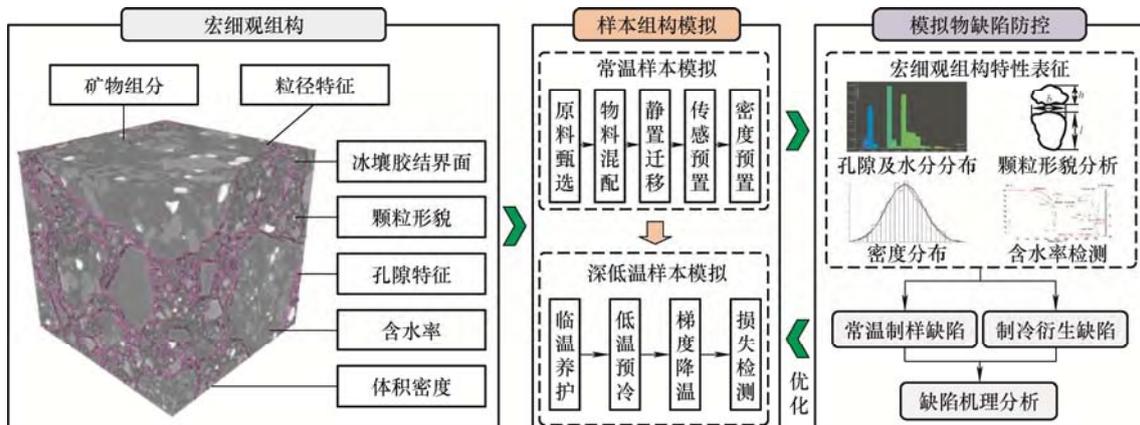


图 11 宏细观组构特征模拟及其缺陷防控工艺

(1) 宏细观参数体系构建：依据月壤水冰地月差异、目标特征及物性影响因素分析的结果，制定月壤水冰模拟物制备准则。在满足组构相似性、参数覆盖性及结构均一性的前提下，表 2 从宏观、微观两个层面构建月壤水冰的组构参数体系：宏观组构参数(矿物类别、粒径分布、样本温度、含水率、孔隙度及体积密度等)；细观组构参数(颗粒形貌、冰壤胶结、粒内孔隙、孔隙分布、水分分布、温度分布及密度分布等)。宏细观组构参数体系的构建可为月壤水冰模拟物制备工艺提供理论依据，为组构表征测试提供目标对象，为缺陷机理防控提供底层思路。

(2) 月壤水冰模拟物制备工艺：在参考地面冻土模拟样本制备的经验基础上，充分考虑月壤水冰的形成演化机制及其与地面冻土在来源和组成上的差异，并结合地面特种工业技术，将月壤水冰宏细观组构模拟分为常温样本模拟和深低温样本模拟两个阶段。

1) 常温样本模拟：① 原料甄选阶段，根据矿物类别和化学组分相似这一准则，筛选与匹配月壤水冰模拟物基础原料。利用扫描电镜及激光粒度仪对颗粒的形貌和粒径分布进行测试分析，将符合标准的模拟物基础原料进行分级筛分,最后根据月壤水冰模拟物参数将不同等级的粒径按比例级配；

表 2 月壤水冰模拟样本评价指标参数表

评价维度	评价指标	指标符号
U_1 : 相似度	u_{11} : 矿物组成	C_m
	u_{12} : 化学成分	C_c
	u_{13} : 颗粒形貌	M_p
	u_{14} : 颗粒密度	D_p
	u_{15} : 粒径分布	D_s
	u_{16} : 样本温度	T
	u_{17} : 样本密度	ρ
	u_{18} : 样本孔隙比	e_s
	u_{19} : 样本含水率	w
U_2 : 均一度	u_{21} : 温度分布	D_T
	u_{22} : 密度分布	D_d
	u_{23} : 含水率分布	D_w
	u_{24} : 孔隙分布	D_h
	u_{25} : 粒度分布	D_ϕ
U_3 : 覆盖度	u_{31} : 含水率范围	R_w
	u_{32} : 温度范围	R_T
	u_{33} : 密度范围	R_D
	u_{34} : 孔隙范围	R_h

② 物料混合阶段, 分析月壤水冰的形成演化机制, 在科学性和经济性的前提下选择不同的工艺方法, 并确定初始工艺参数, 将模拟月壤颗粒与水冰物质充分混合; ③ 静置迁移阶段, 为了保证水分在样本内部的均匀分布, 利用水分的自由迁移特性, 在特定的临界温度环境条件下, 将混合完成的模拟物密封静置保存一定时间; ④ 传感预置阶段, 根据样本尺寸大小, 选择点阵式或场域式布置温度传感, 用于动态监测样本各处在冷冻全流程的温度变化情况; ⑤ 密度预制阶段, 根据样本尺寸及制备代价, 可选取单层压实、落锤冲击和三维振夯等不同方式。

2) 深低温样本模拟: 将常温模拟样本置于临界温度环境下养护一定时间, 随后转移至 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 环境下进行低温预冷。在预冷过程中可根据样本尺度、制备时间代价及目标需求的不同, 选择单向冻结或周向冻结等方式。可采用梯度降温的策略, 将样本依次从超低温冰箱($-80\text{ }^\circ\text{C}$)、液氮浴($-196\text{ }^\circ\text{C}$)和液氮浴($-230\text{ }^\circ\text{C}$)中转移, 实现样本从 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 逐级冷冻至 $-230\text{ }^\circ\text{C}$ 甚至更低的目的。最后, 由于冷冻媒介的侵蚀作用, 会造成月壤水冰模拟样本中的质量损失, 所以需要进行损失分析与评估。

(3) 模拟物缺陷防控: 依据构建的月壤水冰模拟物宏观参数体系, 利用 CT、冷冻扫描电镜、密度分析仪及热重分析仪等设备对制备完后的月壤水冰模拟物进行组构特征分析, 获知样本的含水率、孔隙分布特征、颗粒形貌特征及密度分布等宏观

组构特征, 判断月壤水冰模拟物是否符合结构均一性的制备要求。根据月壤水冰模拟物的制备阶段, 将模拟物缺陷产生阶段分为常温制样缺陷和制冷衍生缺陷。分析这些缺陷的生成机理, 并提出相应的防控措施, 优化月壤水冰模拟物制备工艺, 调控模拟物制备工艺参数, 以保证模拟物的结构均一性。

4.4 月壤水冰力学特性测量方法及其误差控制技术

月壤水冰力学特性研究是开展月壤水冰潜入式探测载荷设计与地面验证的前提基础。目前人们缺乏月壤水冰力学特性的探测数据, 同时受月壤水冰物质组构特征复杂、赋存环境极端、影响因素耦合关联等特点的制约, 人们对冻土类物质力学特性的认知也局限于地面温度环境, 不具有完全参考的价值。所以, 在月面拟实环境下, 开展月壤水冰模拟物低至 $-230\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的静态、动态力学特性测试, 分析矿物原料、温度环境、含水率等因素对样本力学特性的影响规律, 确定月壤水冰的力学边界, 既可服务于月壤水冰科学探测任务的需要, 也可延展地面冻土力学的认识。

(1) 月壤水冰静动态力学特性测试方法: 开展月壤水冰模拟物的抗压强度、抗剪强度及动态冲击特性的测试研究, 以含水率 w 、样本温度 T 和密度 ρ 等对模拟样本力学特性具有显著影响的因素作为变量, 分别选取 m_i 种含水率、 n_i 种样本温度和 q_i 种样本密度的典型模拟样本, 开展单轴抗压强度、抗剪强度及动态冲击特性测试, 构建样本承压参数数据库 $M(\sigma_b, E, \nu)$ 、抗剪参数数据库 $N(c, \phi)$ 及动态抗压参数数据库 $P(C_0)$ 。在开展样本力学特性测试的过程中, 采用与测试样本同样参数的样本作为陪件, 沿样本深度方向布置阵列式温度传感器, 用以监测测试全流程的样本温度变化。在整个测试环节需要为陪件定制特种工装, 用以保证测试过程中陪件具有与测试样本同样的边界约束条件。

(2) 影响因素分析: 影响月壤水冰模拟物力学特性的因素主要由样本因素和测试因素两类, 样本因素分为宏观组构参数和微观组构参数, 宏观参数包括矿物类别、粒径分布、样本温度、含水率、密度及孔隙度等, 微观参数包括矿物组分、颗粒形貌、冰壤胶结界面、颗粒孔隙及孔隙、水分、温度和密度的分布等。测试因素包括测试时的加载速率和边界条件。对获得的力学特性试验数据进行处理, 分析力学特性随参数变化的趋势, 如样本的单轴抗压强度随温度的变化规律, 随后分析样本 w 、 T 、 ρ 等因素对样本力学特性的敏感度。

(3) 误差分析与控制: 月壤水冰模拟样本力学

特性测试过程中产生的误差主要有三类,分别为系统误差、随机误差和过失误差。系统误差主要包括仪器本身的误差、基础原料筛选误差、制备工艺误差和测量工具误差,随机误差主要由表征测试时的抽样误差、环境波动和电磁干扰,过失误差主要包括测试过程中的人为操控失误、数据处理时的截断误差和舍样误差。分析各类误差对样本力学特性的影响,计算绝对误差和相对误差,并提出相应的误差修正措施。

5 结论

随着深空探测技术的发展,虽然人们对月壤水冰物质特性有了一定的认识,但是其远达不到服务于未来月壤水冰资源原位利用、月球基地建设和太阳系演变历史研究的要求。由于对月壤水冰在月面真实赋存、分布状态等特性的认知匮乏,所以其组构特征模拟及其力学特性测试对于全世界领域同行来说都是共性难题,随意的模拟不具备科学价值和技术严谨性,过分的拟实又会造成研发成本和周期的浪费。目前,该领域的研究仍处于初级阶段,依然存在很多问题需要解决,如模拟准则是否科学、模拟样本是否存在缺陷及模拟样本的等效度是否达标,这些问题需要在今后的技术实施中予以高度重视,并应以月壤水冰的目标特性为科学指导。解决这些问题的过程,也是深入认识月壤水冰物质的过程。

参 考 文 献

- [1] 陈丰,李雄耀,唐红,等.水(冰):宇宙矿物[J].矿物学报,2015,35(2):255-266.
CHEN Feng, LI Xiongyao, TANG Hong, et al. Water ice: Cosmic mineral[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(2): 255-266.
- [2] 惠鹤九.月球内部水的研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2017,36(5):696,706-713.
HUI Hejiu. Water in the lunar interior: A review[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(5): 696, 706-713.
- [3] LUCEY P G. A lunar water world[J]. Science, 2009, 326(5952): 531-532.
- [4] LAWRENCE D J. A tale of two poles: Toward understanding the presence, distribution, and origin of volatiles at the polar regions of the Moon and Mercury[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2017, 122(1): 21-52.
- [5] FELDMAN W C, LAWRENCE D J, ELPHIC R C, et al. Polar hydrogen deposits on the Moon[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2000, 105(E2): 4175-4195.
- [6] ANAND M. Lunar water: A brief review[J]. Earth, Moon, and Planets, 2010, 107(1): 65-73.
- [7] FELDMAN W C. Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: Evidence for water ice at the lunar poles[J]. Science, 1998, 281(5382): 500-1496.
- [8] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(36): 8907-8912.
- [9] WATSON K, MURRAY B C, BROWN H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(9): 3033-3045.
- [10] TAYLOR L A, MAO H, BELL P. Identification of the hydrated iron oxide mineral akaganéite in Apollo 16 lunar rocks[J]. Geology, 1974, 2(9): 429-432.
- [11] GIBSON E K, MOORE G W. Volatile-rich lunar soil: Evidence of possible cometary impact[J]. Science, 1973, 179(4068): 69-71.
- [12] EL GORESY A, RAMDOHR P, PAVIĆEVIĆ M, et al. Zinc, lead, chlorine and FeOOH-bearing assemblages in the Apollo 16 sample 66095: Origin by impact of a comet or a carbonaceous chondrite[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 18(3): 411-419.
- [13] STACY N. High-resolution synthetic aperture radar observations of the Moon[D]. New York: Cornell University, 1993.
- [14] STACY N, CAMPBELL D, FORD P. Arecibo radar mapping of the lunar poles: A search for ice deposits[J]. Science, 1997, 276(5318): 1527-1530.
- [15] WEIDENSCHILLING S, NOZETTE S, SHOEMAKER E, et al. The possibility of ice on the Moon[J]. Science, 1997, 278(5335): 144-146.
- [16] NOZETTE S, LICHTENBERG C, SPUDIS P, et al. The clementine bistatic radar experiment[J]. Science, 1996, 274(5292): 1495-1498.
- [17] FISHER E A, LUCEY P G, LEMELIN M, et al. Evidence for surface water ice in the lunar polar regions using reflectance measurements from the lunar orbiter laser altimeter and temperature measurements from the diviner lunar radiometer experiment[J]. Icarus, 2017, 292: 74-85.
- [18] HAYNE P O, HENDRIX A, SEFTON-NASH E, et al. Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet

- albedo and temperature measurements[J]. *Icarus*, 2015, 255: 58-69.
- [19] ZUBER M T, HEAD J W, SMITH D E, et al. Constraints on the volatile distribution within Shackleton crater at the lunar south pole[J]. *Nature*, 2012, 486(7403): 378-381.
- [20] STARUKHINA L V. On the origin of excess hydrogen at the lunar poles[J]. *Solar System Research*, 2000, 34: 215.
- [21] MITROFANOV I G, SANIN A B, BOYNTON W, et al. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 483-486.
- [22] PIETERS C M, GOSWAMI J, CLARK R, 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): 568-572.
- [23] 郑永春, 邹永廖, 付晓辉. LRO 和 LCROSS 探月计划: 科学探测的分析与启示[J]. *航天器工程*, 2011, 20(4): 117-129.
ZHENG Yongchun, ZOU Yongliao, FU Xiaohui. LRO and LCROSS missions: Overview and enlightenment for future lunar exploration[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(4): 117-129.
- [24] 胡智新. 月球表面水冰探测进展[J]. *航天器工程*, 2010, 19(5): 111-116.
HU Zhixin. Review on lunar exploration of water-ice[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(5): 111-116.
- [25] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 463-468.
- [26] 姜生元, 刘君巍, 张伟伟, 等. 月面人机联合采样探测发展趋势与任务设想[J]. *载人航天*, 2019, 25(5): 572-580.
JIANG Shengyuan, LIU Junwei, ZHANG Weiwei, et al. Development trend and mission prospect of the man-machine joint lunar sampling exploration[J]. *Manned Spaceflight*, 2019, 25(5): 572-580.
- [27] 王立武, 郭东文, 张章, 等. 美国宇航局 Artemis 月球探测计划简介[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(5): 1-12.
WANG Liwu, GUO Dongwen, ZHANG Zhang, et al. Introduction to NASA's Artemis lunar exploration program[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(5): 1-12.
- [28] 贾瑛卓, 覃朗, 徐琳, 等. 月球水冰探测[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(3): 290-296.
JIA Yingzhuo, QIN Lang, XU Lin, et al. Lunar water-ice exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 290-296.
- [29] 杜宇, 盛丽艳, 张焯, 等. 月球水冰赋存形态分析及原位探测展望[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(6): 607-614.
DU Yu, SHENG Liyan, ZHANG He, et al. Analysis of the occurrence mode of water ice on the Moon and the prospect of in-situ lunar exploration[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(6): 607-614.
- [30] 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站[J]. *科学通报*, 2020, 65(24): 2577-2586.
PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, et al. Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(24): 2577-2586.
- [31] SUNSHINE J M, FARNHAM T L, FEAGA L M, et al. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the deep impact spacecraft[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 565-568.
- [32] LUCEY P G. The poles of the Moon[J]. *Elements*, 2009, 5(1): 41-46.
- [33] 郑永春, 张锋, 付晓辉, 等. 月球上的水: 探测历程与新的证据[J]. *地质学报*, 2011, 85(7): 1069-1078.
ZHENG Yongchun, ZHANG Feng, FU Xiaohui, et al. Water on the Moon: Exploration history and new evidence[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(7): 1069-1078.
- [34] 徐琳, 刘建忠, 邹永廖, 等. 月球表面水冰的探测和意义[J]. *空间科学学报*, 2003, 23(1): 42-49.
XU Lin, LIU Jianzhong, ZOU Yongliao, et al. Discovery of water ice on the Moon surface and its significance[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2003, 23(1): 42-49.
- [35] 郑永春, 王世杰, 刘春茹, 等. 月球水冰探测进展[J]. *地学前缘*, 2004, 11(2): 573-578.
ZHENG Yongchun, WANG Shijie, LIU Chunru, et al. Review on exploration of water ice on the Moon[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(2): 573-578.
- [36] 许英奎, 朱丹, 王世杰, 等. 月球起源研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(5): 516-521.
XU Yingkui, ZHU Dan, WANG Shijie, et al. Recent advances of lunar formation theories[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(5): 516-521.
- [37] MARAKUSHEV A A. Origin of the earth and Moon in evolution of the solar system[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(3): 13-22.
- [38] COOK A, SPUDIS P, ROBINSON M, et al. The topography of the lunar poles from digital stereo

- analysis[J]. Lunar and Planetary Science Conference, 1999: 1154.
- [39] BENNA M, HURLEY D, STUBBS T, et al. Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(5): 333-338.
- [40] CANNON K, DEUTSCH A, HEAD J. Stratigraphy of ice and ejecta deposits at the lunar poles[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(21): e2020GL088920.
- [41] ARNOLD J R. Ice in the lunar polar regions[J]. Journal of geophysical research: Solid earth, 1979, 84(B10): 5659-5668.
- [42] MITROFANOV I, BARTELS A, BOBROVNITSKY Y, et al. Lunar exploration neutron detector for the NASA lunar reconnaissance orbiter[J]. Space Science Reviews, 2010, 150(1): 183-207.
- [43] MILLER R S, LAWRENCE D J, HURLEY D M. Identification of surface hydrogen enhancements within the Moon's Shackleton crater[J]. Icarus, 2014, 233: 229-232.
- [44] GLADSTONE G R, RETHERFORD K D, EGAN A F, et al. Far-ultraviolet reflectance properties of the Moon's permanently shadowed regions[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2012, 117(E12): E00H04.
- [45] BATTLER M M. Development of an anorthositic lunar regolith simulant: OB-1[D]. Fredericton: University of New Brunswick, 2008.
- [46] LINKE S, WINDISCH L, KUETER N, et al. TUBS-M and TUBS-T based modular regolith simulant system for the support of lunar ISRU activities[J]. Planetary and Space Science, 2020, 180: 104747.
- [47] ANBAZHAGAN S, VENUGOPAL I, ARIVAZHAGAN S, et al. A lunar soil simulant (LSS-ISAC-1) for the lunar exploration programme of the Indian Space Research Organisation[J]. Icarus, 2021, 366: 114511.
- [48] VENUGOPAL I, MUTHUKKUMARAN K, SRIRAM K, et al. Invention of Indian Moon soil (lunar highland soil simulant) for Chandrayaan missions[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2020, 6(4): 1-9.
- [49] MILLER J, TAYLOR L, ZEITLIN C, et al. Lunar soil as shielding against space radiation[J]. Radiation Measurements, 2009, 44(2): 163-167.
- [50] BATTLER M M, SPRAY J G. The Shawmere anorthosite and OB-1 as lunar highland regolith simulants[J]. Planetary and Space Science, 2009, 57(14): 2128-2131.
- [51] LI Y, LIU J, YUE Z. NAO-1: Lunar highland soil simulant developed in China[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2009, 22(1): 53-57.
- [52] JUST G, JOY K, ROY M, et al. Geotechnical characterisation of two new low-fidelity lunar regolith analogues(UoM-B and UoM-W) for use in large-scale engineering experiments[J]. Acta Astronautica, 2020, 173: 414-424.
- [53] TOKLU Y C, AKPINAR P. Lunar soil simulants-an assessment[C]// 2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). Istanbul, Turkey: IEEE, 2019: 635-638.
- [54] ZENG X, HE C, WILKINSON A. Geotechnical properties of NT-LHT-2M lunar highland simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2010, 23(4): 213-218.
- [55] KLEINHENZ J, LINNE D. Preparation of a frozen regolith simulant bed for ISRU component testing in a vacuum chamber[C]// 51st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Texas: AIAA, 2013: 2013-0732.
- [56] METZGER P T, GALLOWAY G M, MANTOVANI J G, et al. Low force icy regolith penetration technology[R]. Florida: NASA Kennedy Space Center, 2011. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20110014970>.
- [57] PITCHER C, KÖMLE N, LEIBNIZ O, et al. Investigation of the properties of icy lunar polar regolith simulants[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(5): 1197-1208.
- [58] FISACKERLY R, CARPENTER J, VISENTIN G, et al. Accessing, drill and operating at the lunar south pole: Status of European plans and activities[C]// Earth and Space 2014. St. Louis, Missouri: American Society of Civil Engineers, 2015: 237-246.
- [59] GERTSCH L S, ROSTAMI J, GUSTAFSON R. Review of lunar regolith properties for design of low power lunar excavators[C]// 6th Conference of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Arlington, VA: Missouri University of Science and Technology, 2008: 1-15.
- [60] ATKINSON J, ZACNY K. Mechanical properties of icy lunar regolith: Application to ISRU on the Moon and Mars[C]// Earth and Space 2018: Engineering for Extreme Environments. Reston: American Society of Civil Engineers, 2018: 109-120.

作者简介:姜生元(通信作者),男,1969年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为地外天体无人自动采样探测技术、宇航空间机构测试与仿真及复杂环境下移动作业机器人技术。
E-mail: jiangshy@hit.edu.cn