

DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0778

深空探测任务中岩土力学若干问题及研究进展

潘鹏志^{1,2}, 王兆丰^{1,2}, 封雨捷^{1,2}, 李雨芯^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京 100043)

摘 要: 随着地球资源能源枯竭与深空探测技术的进步, 世界各国纷纷规划了针对月球、火星、小行星等地外天体的诸多深空探测任务。抢占深空探测相关科技制高点至关重要, 而保障深空探测任务圆满完成更是重中之重。梳理了世界各国近期深空探测任务的时间节点、任务目标和涉及的相关岩土力学与工程问题。地外天体岩土材料赋存于特殊重力、温度、辐射和大气环境, 同时受流星体撞击等扰动的影响, 与地球岩土材料相比有其特殊性。在文献调研的基础上, 探讨了“四特一扰动”的赋存环境与特殊形成过程导致的地外天体岩土力学特性转变。基于当前深空探测任务规划, 总结了任务中不同特定需求面临的若干岩土力学难题及研究进展, 包括无人勘探与原位力学测试、极端环境试验平台搭建、极端环境岩土材料力学特性、工程机具与岩土相互作用、地外岩土原位资源利用, 以期助力我国深空探测任务顺利开展和推动岩土力学向地外天体岩土力学方向拓展。

关 键 词: 深空探测; 地外天体岩土力学; 地外采样; 资源利用; 工程勘察

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 11-3153-20

Some issues and research progress in rock and soil mechanics for deep space exploration missions

PAN Peng-zhi^{1,2}, WANG Zhao-feng^{1,2}, FENG Yu-jie^{1,2}, LI Yu-xin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100043, China)

Abstract: As terrestrial resources and energy become increasingly scarce and advancements in deep space exploration technology progress, numerous countries have initiated plans for deep space missions targeting celestial bodies such as the Moon, Mars, and asteroids. Securing a leading position in deep space exploration technology is critical, and ensuring the successful completion of these missions is of paramount importance. This paper reviews the timelines, objectives, and associated geotechnical and engineering challenges of recent deep space exploration missions from various countries. Extraterrestrial geotechnical materials exist in unique environments characterized by special gravity, temperature, radiation, and atmospheric conditions, and are subject to disturbances such as meteoroid impacts. These factors contribute to significant differences from terrestrial geotechnical materials. Based on a thorough literature review, this paper investigates the transformation of geomechanical properties of extraterrestrial geological materials due to the distinctive environmental conditions, referred to as the "four unique characteristics and one disturbance", and their distinct formation processes. Considering current deep space mission plans, the paper summarizes the geotechnical challenges and research advancements addressing specific mission requirements. These include unmanned exploration and in-situ mechanical testing, construction of extreme environment test platforms, the mechanical properties of geotechnical materials under extreme conditions, the interaction between engineering equipment and geotechnical materials, and the in-situ utilization of extraterrestrial geotechnical resources. The goal is to support the successful execution of China's deep space exploration missions and to promote the development of geomechanics towards extraterrestrial geomechanics.

Keywords: deep space exploration; extraterrestrial geomechanics; extraterrestrial sampling; resource utilization; engineering surveys

收稿日期: 2024-06-20

录用日期: 2024-07-04

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52125903)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52125903).

第一作者简介: 潘鹏志, 男, 1976 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事复杂极端环境下数字岩土力学研究。E-mail: pzpan@whrsm.ac.cn

1 引言

深空探测是指将航天器发射到地月距离以远的宇宙空间,对地外天体等进行探测的航天活动^[1]。自 1958 年以来,世界各国已累计开展了近 300 次深空探测活动,实现了对太阳系内月球、地球以外其他行星、彗星等天体的实地或轨道遥感探测。近年来,国外政府和研究机构相继制订了诸多深空探测计划,竞相争夺深空探测领域相关的科技制高点。2017 年,美国提出了“阿尔忒弥斯(Artemis)”月球载人探测计划^[2],联合日本、印度等太空强国,规划 2024 年实施月球南极登陆,试图主导国际月球探测格局^[3]。俄罗斯瞄准可能存在大量水冰的月球南极,制订了“月球 26~28 号”任务,计划获得月表高分辨率图像,采集月球岩土样品,实现太空暴露环境下低温钻探取样。欧洲航天局在多个领域实现国际联合深空探测任务,提出了“月球村”(Moon Village)构想,参与了美国“深空之门”(Gateway)轨道空间站计划,同时计划参与俄罗斯“月球 27 号”任务,承担月球极区资源勘测。

我国目前已圆满完成了包括月球探测“绕、落、回”三步走战略规划与“天问一号”行星探测工程

等在内的 7 次深空探测任务^[4],建立了较为完整的深空探测科学与工程体系^[5-6]。目前我国探月工程 4 期任务已部署实施,2024 年,嫦娥六号顺利登陆月球背面,并顺利返回地球,共带回了共 1 935.3 g 人类首份月背样本^[7],获得了举世瞩目的关注。在未来的几年,嫦娥七号将在月球南极开展水冰资源探测,而嫦娥八号将与嫦娥七号共同构建月球科研站基本型^[8]。此外,我国计划于 2030 年前后实现载人登月,同步开展月球原位科学试验。天问二号和天问三号任务规划实现小行星原位取样返回和火星采样返回任务^[9]。

表 1 总结了世界各国近期深空探测任务的计划时间节点、任务目标。地外天体采样、工程勘察、岩土资源原位利用以及基地建设等任务是下一阶段世界各国关注的热点。在这些任务中,2 m 以下的月壤及月岩的取样、月球南极永久阴影区的表层取样探测、月表火表原位力学测试、月壤原位成型等都是与岩土力学学科紧密相关的亟待解决的难题。与地球岩土力学领域相比,地外天体岩土材料赋存环境极端、形成过程特殊、原位测试难度大、现有理论适用性不明,这些都给深空探测任务带来了一系列挑战。

表 1 近期各国深空探测任务
Table 1 Summary of recent national deep space exploration missions

国家/地区	任务	时间节点	任务目标	岩土力学与工程相关问题
中国	嫦娥六号	2024 年	月背采样返回	地外天体采样
	嫦娥七号	2026 年前后	月球南极环境详查与勘探,寻找水	月表工程勘察
	嫦娥八号	2028 年前后	南极预选着陆区月球资源勘查及原位利用,构建月球科研站基本型	地外岩土资源原位利用、地外天体基地建设
	载人登月	2028—2030 年	先无人登月,再实现载人登月	地外天体采样、地外岩土资源原位利用
	天问二号	2025 年	小行星采样返回	地外天体采样
	天问三号	2028 年	火星采样返回	地外天体采样
美国	国际月球科研站	2030—2040 年	环境探测及资源利用试验验证,地月环境探测及科学实验,科研站升级为多功能月球基地	月表工程勘察、地外岩土资源原位利用、地外天体基地建设
	阿尔忒弥斯(Artemis)	2019—2024 年	南极地质学研究,月球水冰探测	地外天体采样
		2025—2030 年	原位资源利用,生命科学研究,就地测量及采样返回	月表工程勘察、地外岩土资源原位利用、地外天体基地建设
	月球 26 号		绘制月球矿物成分,月表水冰分布图	月表工程勘察
俄罗斯	月球 27 号	2024—2030 年	2 m 下深月壤力热物理性能测试	地外天体采样、地外岩土资源原位利用
	月球 28 号		采集 2 m 下月壤,并低温保存返回地球	地外天体采样
	月球后续任务	2030 年后	建设可容纳 12 人的月球基地	地外岩土资源原位利用、地外天体基地建设
欧洲	ExoMars	2028 年	火星深层钻探	地外天体采样
	Triple F	2028 年	彗星核部取样返回	地外天体采样
	GAUSS	2029 年	谷神星采样返回	地外天体采样
日本	MMX	2029 年	对火星及其卫星探测,火卫一采样返回	火表工程勘察、地外天体采样
印度	月船 4 号	2026—2028 年	月球南极找水,钻取采样	月表工程勘察、地外天体采样
	月船 5 号	2030 年	月球南极采样及原位测试	地外天体采样、地外岩土资源原位利用

因此，基于岩土力学学科，进一步认识地外岩土材料、了解其在地外极端环境下的性质是现阶段的重中之重，也是完成深空探测任务的重要理论依据。本文系统地分析了地外天体岩土力学的特殊转变，初步提出了地外天体岩土力学这一岩土力学细分领域的研究范畴，从无人勘探与原位力学测试、极端环境试验平台搭建、极端环境岩土材料力学特性、工程机具与岩土相互作用、地外岩土原位资源利用 5 个方面梳理了目前在深空探测任务中遇到的一系列岩土力学问题及研究进展，以期为国家深空探测任务的顺利开展贡献一份力量。

2 地外天体岩土力学特性转变

2.1 “四特一扰动”赋存环境相关力学特性转变

由月球、火星和小行星等有限探测结果可知，与地球上的环境不同，地外岩土材料具有独特的赋存环境特征。这些特征可被概括为“四特一扰动”，

包括：特殊重力条件，特殊温度条件，特殊辐射条件，特殊大气条件，以及流星体扰动的影响。每一种特征都对地外岩土材料的力学特性产生显著影响。

表 2 对比了地球、月球和火星的空间环境情况^[10-13]。不同天体之间赋存环境各不相同，如地球平均重力加速度为 9.8 m/s^2 ，月球平均为 1.67 m/s^2 ，火星平均为 3.63 m/s^2 ；月球表面大气层缺失，火星表面大气层稀薄，导致它们表面温差悬殊，气压也远低于地球平均水平。地球上的岩土材料长期经历空气、水和生物的复合风化作用，而地外岩土材料则长期处于特殊重力场、特殊大气、极端温差、强辐射、陨石撞击等极端环境^[14]。这些巨大的环境差异使得地外岩土材料具有与地球不同的物理力学性质，包括内聚力、内摩擦角、孔隙度、剪切模量等^[15-20]，传统岩土理论和准则往往无法很好地反映岩土材料在这种极端环境下的特性。

表 2 地球、月球和火星的空间环境^[10-13]
Table 2 Space environment of the Earth, the Moon and Mars^[10-13]

类别	重力加速度 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	温度 / $^{\circ}\text{C}$	气压 / kPa	平均辐射水平 / mSv	大气组分	流星体撞击
地球	9.8	-89~58	101.3	2.4	77%的 N_2 、21%的 O_2 以及少量 CO_2	影响较小，大部分被大气层阻隔
月球	1.67	-233~123	3×10^{-13}	380.0	稀薄，含有少量 He、Ne、Ar	明显，形成坑洞和环形山
火星	3.63	-140~35	0.7	100.0	96%的 CO_2 、1.93%的 Ar 和 1.89%的 N_2 以及少量的 O_2 、CO	流星体的影响比地球和月球都要小，较少的大型陨石撞击

特殊重力条件对岩土力学特性具有显著影响。在低重力环境下，岩土颗粒材料通常表现出大摩擦角、强膨胀等特殊力学性质^[21]，但现有颗粒材料的强度准则难以很好地表征这种特殊性质。近年来，国内外学者针对重力对岩土材料的影响开展了许多研究，如 Xiao 等^[18]通过分析日本 JAXA 的抛物线飞行试验结果，提出了一种新的流变模型来揭示低重力条件下砂土的速度依赖性，并预测了加载速率和低重力水平对地基承载力的耦合影响。Li^[17]和蒋明镜^[22]等分别采用物理试验和离散元数值方法对月面及地面跨度范围内重力场环境下的静力触探机制进行了分析。Mo 等^[23-24]通过磁加速度模拟低重力场，对模拟星壤材料开展了三轴试验和静力触探试验，分析了低重力情况下的剪切强度特征，并提出了一种基于静力触探试验的地基承载力预测方法。Zou^[25]、Li^[26-27]等通过室内试验和离散元数值方法研究了低围压情况下 QH-E 模拟月壤的剪胀特征和体应变随着围压的变化规律。

地外天体中的极端温度和巨大温差也是影响岩

土材料力学性质的一个重要因素。月球日夜温差近 300°C ，火星日夜温差近 200°C ，岩石和土壤长期暴露在地外天体表面日夜交替的极端温度环境下^[12]。极端温度反复变化引起的热应力会对岩土材料的强度和变形产生显著影响。已有研究表明，热循环是火星等行星天体岩石破裂的重要原因^[28-30]，热疲劳对于小行星的表面风化层更新也有重要贡献^[31]。地外天体常见 -100°C 以下的超低温环境，但目前针对这一温度区间内岩石和土壤特性的研究还鲜有报道。

特殊辐射与大气条件区别于地球，往往对岩土力学特性造成较大的影响。例如，在月球表面的高真空高辐射环境下，月壤颗粒间的距离极小，通常在地球环境中影响较小的范德华力在月球表面环境中成为了月壤黏聚力的主要来源，颗粒间的范德华力会影响月壤的黏聚力和抗拉强度^[32]。当前针对月壤颗粒材料的范德华力计算理论主要集中于小粒径颗粒（粒径为 $0.001 \sim 10 \mu\text{m}$ ），而真实月壤的平均粒径约为 $70 \mu\text{m}$ ^[32]。粒径会影响颗粒间接触的分析，对于大粒径颗粒间存在的面接触和颗粒咬合现象，

其对范德华力的影响仍需进一步考虑。

由于大多数地外天体大气层的缺少, 导致太空空间中的流星体与微流星体撞击的流量远大于地球, 同时撞击星球表面的速度约为 $13\sim 18\text{ km/s}$ ^[33]。超高速带来的瞬时超高压和超高温^[34]使岩土体的变形破坏机制与应力波传播规律改变^[35], 例如在地质冲击过程中岩石周围的压力振荡, 很短的波长和高压压力振荡会暂时降低地质压力, 从而减少破裂目标岩石之间的摩擦力^[36]。

2.2 特殊形成过程导致的力学特性转变

由于地外天体“四特一扰动”赋存环境的影响, 地外岩土材料所经历的风化、沉积与变质过程也与地球存在显著区别^[12]。下面将以人类探测数据相对较多的月球与火星为例, 探讨地外岩土材料特殊形成过程。

月球缺乏大气层, 表面直接暴露在宇宙环境中, 如图 1 所示^[37], 月表持续受到流星体剧烈而频繁的撞击。撞击过程中伴随的高温高压环境导致岩石发生破碎、变形、熔融和汽化, 产生丰富的矿物相变^[38], 形成撞击岩(包括冲击玻璃和冲击熔融角砾)。另一方面, 月球风化层成分与结构高度依赖于原生矿物以及该地区的成岩/风化过程^[39]。月壤是月表风化层的主要组分, 受流星体撞击、高能粒子辐射和极端温差等风化作用的影响^[40-41]。月壤颗粒粒径分布广泛, 呈典型壤/岩混合特征^[15]。由于月表环境极度干燥、遭受持续的流星撞击、且缺乏生物风化, 月壤颗粒形状各异, 以棱角状、次棱角状和长条状为主, 表面凹凸不平且粗糙, 结构为多棱角和多孔隙^[42-44]。

火星具有较为稀薄的大气层, 其表面也遭受了长期持续的流星体撞击。火星表面风化层主要由橄榄石、辉石、斜长石等火成岩矿物和硫酸盐+氯化物或硫酸盐+氯氧化物等蚀变矿物组成, 与地球玄武岩类似^[45]。火星表面风速非常快, 是地球的 10 倍左右, 空气密度是地球的 $1/120$, 易形成火星沙尘暴^[46-47]。火星沙尘暴持续地对火壤进行磨蚀作用, 使得火壤颗粒形状不规则度相较于月球较低。凤凰号配备的显微相机显示, 表层火壤主要为多角形、椭球型和近球形, 少数为尖角形^[48-49]。

特殊形成过程会对岩土力学特性造成显著影响。地外天体的岩土材料往往呈现不规则的形状和较大的粒径分布范围, 这对其强度和承载力都产生了一定的影响^[50-51]。以月壤为例, 现有研究表明月壤颗粒表面形状棱角分明、粗糙度高、粒径分布范围广^[51-52], 月壤颗粒的不规则形状易导致颗粒间产生机械咬合。此外, 地外天体风化层的相对密度也表

现出区别于地球的特性。撞击时产生强烈而广泛的夯实与震动作用导致撞击坑底处月球风化层相对密度急剧增大, 远远大于地球正常水平, 长期持续的流星体撞击使得较深层的月壤固结度更高, 根据 Apollo 系列的数据, 月表 30 cm 以下的月壤相对密度为 90% 以上^[53]。月球表面的土壤颗粒由于其独特的形状相互之间形成了紧密的互锁结构, 并且表现出较高的相对密度, 这两种特征共同赋予了月壤较高的摩擦角。此外, 火星也表现出类似的力学特性, 40 cm 以下火壤具有超出预期的贯入阻力^[54]。

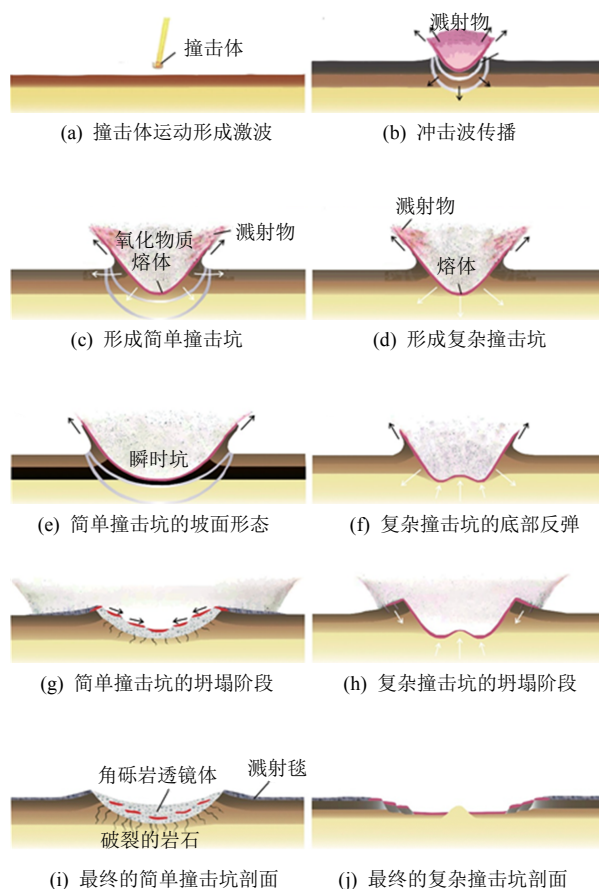


图 1 月表撞击过程示意图^[37]

Fig.1 Schematic diagram of the lunar surface impact process^[37]

2.3 地外天体岩土力学的研究范畴

在对地外天体进行探测或工程建设时, 其岩土体会显示出与地球不同的力学响应, 这是因为地外天体存在着独特的“四特一扰动”环境和地质形成过程。目前深空探测任务聚焦于地外天体采样、工程勘察、岩土资源原位利用以及基地建设等几大发展需求。因此, 地外天体岩土力学作为岩土力学学科的一个新兴重要分支, 亟需进一步发展。地外天体岩土力学的研究范畴可包括针对特殊空间环境和

地质成因对岩土力学的影响及人类工程影响下对地外岩土体的力学响应开展的研究, 其研究目的主要是服务于深空探测任务。

3 深空探测任务中的岩土力学问题与研究现状

基于我国当前深空探测任务规划, 从岩土力学角度出发, 梳理了深空探测任务紧密相关的几个科学问题, 以期助力我国深空探测任务顺利开展和推动岩土力学学科向地外天体岩土力学方向拓展。

3.1 地外岩土体无人工程勘探与原位力学测试

当前深空探测任务的重点与起点是探月工程。月球是离地球最近的天体, 也是人类向深空旅行的重要门户和中转站。建立月球基地和科研站不仅可以开发月球资源, 亦可进一步验证深空探测技术, 为火星与其他天体的探测积累经验^[55-59]。根据现阶段月球基地的规划, 主要分为 4 个阶段, 即探测试验阶段、生命保障阶段、生产补给阶段和社区移民阶段^[55]。在探测试验阶段, 基地选址需综合考虑光照能源、潜在水资源、原位资源采集利用等因素, 因此勘探月球岩土体的地形地貌信息与获取原位岩土力学性质是选址的基础。

现在对地外天体进行勘探的主要方式包括月表多点采样、高精度遥感和原位物探等^[60], 获取月球矿产和水冰资源分布, 探明月表和月球深部的地质结构和资源分布是近期深空探测任务的首要着力点, 也是基地建设和驻人科研站稳定运行的重要保障。目前宏观遥感探测分辨率能够达到 10 m 至 km 量级, 可以实现月球全球高覆盖率的探测, 但是高精度的资源分布图仍十分欠缺^[60-61]。开发出分辨率更高的月表影像、覆盖范围更广的光谱仪、精细化更高的雷达探测是解决这一问题的有效方案, 通过无人自主化的月球车或机器人进行原位勘探也是一种必备的补充手段^[62]。尤其是对于特殊的地下熔岩管构造, 派遣探测车并搭载原位岩土勘探设备是获取地下非结构环境信息的最佳方式之一^[63-66]。

针对月球勘探, 地球常用的岩土力学原位勘探手段在极端环境、人员、地面响应周期等约束下, 面临无人自主化、工程适应性和测试结果可靠性等挑战^[67-68]。表 3 整理了 5 种岩土力学原位测试方法在地外天体勘探中的应用情况与优缺点^[69-83]。其中钻探试验与地球物理探测是其中使用较为广泛的原位测试方法, 与规划的 2 m 以下无人钻探取样、月球南极含水冰月壤钻取、高精度月表资源分布图获取等深空探测任务息息相关。比较可知, 现有原位

测试方法的深空探测应用大多不成熟, 往往受到各种因素约束而不得不进行简化。例如, 作为深空探测任务中的科学载荷, 这些原位测试装备在质量、体积、功率和自动化等方面均受到一定限制, 地外天体的极端环境也严重影响了测试结果可靠性。为了在深空探测中获取尽可能多的岩土材料信息, 同时实现无人自主化, 亟需对传统岩土工程原位测试方法进行创新, 设计小型轻量、自动智能的原位测试科学载荷, 并提高现有方法在深空探测任务中的适用性。

3.2 地外天体极端环境高仿真岩土力学试验平台

深空探测任务常常需要进行一系列地面先导性试验, 以验证技术可行性、材料器件适应性, 并对设备性能进行评估^[84]。目前国内外已经搭建了不同规模的地外环境模拟平台与试验设施, 并对各类深空探测任务中的科学载荷进行了评估^[85-86]。为顺利完成“嫦娥五号”无人采样任务, 北京卫星制造厂和北京航空航天大学团队共同研制了“月面钻进真空环境模拟装置”, 该装置实现了月球表面真空环境和月面钻进负载的模拟, 并研究了真空环境下月壤钻进过程中钻具的力学和热学特性^[87-89]。谢和平院士团队提出了月球大深度保真取芯探矿思路, 设计了“月球大深度保真取芯探矿机器人系统”, 建立了模拟月球环境的保真取芯平台, 并对极端环境下的模拟月壤的热物理特性展开了研究^[90-92]。苏州科技大学和天津大学团队通过模拟火壤铺设了与真实火星表面吻合度较好的模拟火表试验场地, 并测试了“天问一号”火星着陆器的相关避障功能和着陆测试^[86]。中国矿业大学团队利用磁力场和真空泵机组研发了“月球小重力及真空环境地面模拟试验系统”, 并初步研究了在极端环境下模拟月壤的静力触探特性和导热系数特性^[93]。

根据 2.1 节的分析, 地外天体岩土材料“四特一扰动”的极端赋存环境往往会造成岩土力学特性转变。目前专门针对岩土力学特性转变的高仿真试验平台稍有欠缺。同时, 现有的地面模拟试验装置大多只能实现单一或两三种耦合环境的模拟, 对于真实地外极端环境的多因素耦合模拟难度较大。2024 年初, 由哈尔滨工业大学和中国航天科技集团有限公司承建的能够模拟真空、高低温、带电粒子辐射、电磁辐照、空间中性气体和固体颗粒物等 6 大太阳系典型空间极端环境的“空间环境地面模拟装置”开始正式运行, 是世界首个综合研究多因素空间环境耦合效应的大型装置^[94-95]。这一国家大科学装置对空间综合环境的模拟效果非常好, 但将其

表 3 岩土力学原位测试方法在地外天体探测中的应用

Table 3 Application of geotechnical in-situ testing methods to the detection of extraterrestrial objects

原位测试方法	原理	获取信息	优点	缺点	应用情况
触探试验	将圆锥型探头压入土体中,并在此过程中记录压入阻力	土壤的承载力、黏聚力、内摩擦角、压缩模量等	较好地完成月壤物理力学特性的测试任务	设备重量和体积控制严格,测试精度低和效率不高	①前苏联 1966 年发射的月球 13 号配备有一件较为简易的圆锥贯入试验仪 ^[69] ,前苏联的月球 17 号和月球 21 号采用了升级版的锥形叶片贯入仪 ^[70-71] ; ②美国阿波罗 15 号与阿波罗 16 号任务使用了一种自记贯入仪 ^[71] 。
铲斗试验	铲子收集土样后,在铲斗上部通过振动过筛取得的土样用于探测器上的其他科学载荷试验	土壤的承载力,黏聚力,内摩擦角和粒度	不需宇航员操作,无人探测器即可完成	需占用较大的操作空间,以保证作业的安全性和有效性	①美国 1967 年发射的勘察者 3 号与 1968 年的勘察者 7 号中装备了机械臂与挖掘斗 ^[72] ,1975 年发射的火星探测器维京 1 号、维京 2 号装备有铲斗用于获取表面土壤样品 ^[73] ,2008 年着陆的凤凰号火星探测器配备了机械挖掘臂与铲斗装置; ②中国“嫦娥五号”月球探测器中配备机械臂与铲斗装置 ^[74] 。
钻探试验	利用钻机在地层中钻孔,以此来鉴别和划分地表下的地层,并在孔深处取样	土壤的原位分层信息	对土壤的破坏性小,能在短时间内了解较大面积的地下情况	太空低重力使钻压不足,土壤摩擦力小,搭载功率有限,钻具润滑及冷却问题	①前苏联在月球 16 号、月球 20 号、月球 24 号任务中实现地外天体无人钻探 ^[75] ; ②美国阿波罗 15 号、阿波罗 16 号和阿波罗 17 号宇航员使用电动钻机进行钻孔 ^[75] ;2012 年的好奇号、2018 年的洞察号、2021 年的毅力号火星探测任务均配备了钻探取样器; ③中国嫦娥五号月球探测器中配备钻取装置 ^[74] 。
地球物理探测	通过地震探测方法或探地雷达等电磁探测方法获取地下岩土体性质和形态	地外天体基础物性参数及地质结构划分	高精度、高效率、无损坏、设备集成度高等	数据占用小、数据处理较为复杂、装载位置较差等	①美国阿波罗 11 号、12 号、14 号、15 号、16 号、17 号都搭载了月震仪,获取了大量珍贵数据 ^[76-77] ;火星任务中,维京 1 号、维京 2 号、洞察号火星探测器等都进行了火震探测试验 ^[78-79] ; ②中国嫦娥三、四、五号 3 次任务中均装载了测月雷达设备;祝融号火星车上配备有测火雷达 ^[80] 。
摄影测量	分析探测器拍摄的受人类活动扰动前后的地外天体表面照片,得出地外天体表面土壤岩石部分性质	估算土壤的承载力,反演地外天体表面土壤的物理力学参数	这些登陆时的活动痕迹是一种珍贵的数据来源	图像清晰度、色彩等质量不理想,获得的数据比较有限,不能直接获取原位测试数据	①前苏联发射的月球 9 号和月球 13 号使用探测器开展了近距离摄影测量; ②美国的勘察者 3 号、5 号、6 号通过安装反射镜,获得了更大的摄像角度和范围; ③玉兔系列、毅力号、祝融号等在巡视中运用摄影测量方法分析了轮壤作用后的车辙,并提出了基于轮壤力学模型的星壤承压和剪切参数辨识方法,初步估算了星壤力学参数 ^[81-83] 。

与近期深空探测任务相结合,从而验证月壤钻取技术、月面资源原位利用、基地建设技术等,仍存在很多难点。另外,考虑到该设备的实际使用运行成本,将其应用于大尺度岩土工程试验验证并不现实。极端环境下岩土体的单元试验是获取岩土体性质最直观的渠道,有利于获取极端环境下岩土材料的特殊力学特性。因此,基于岩土工程学科特点,仍有必要设计研发集成地外极端环境的多场耦合试验平台,制备高仿真的模拟星壤材料,为深空探测任务的科学载荷和未来基地建设方案提供必要地面试验支撑。

3.3 地外极端环境下岩土材料力学特性及结构服役性能评估

当前获取地外岩土材料力学特性主要有 3 种途径:一种是宇航员或者机器人在地外天体表面原位

测量得出;一种是取样返回,针对真实样品开展力学实验获得;一种是采用地球模拟星壤或微观数值模拟获取。原位测量与取样返回实施难度高且数据有限,因此目前普遍采用第 3 种方式研究极端环境下的岩土材料特性。根据 2.2 节的分析,由于地外岩土体特殊的形成过程,采用地球模拟物或开展数值模拟试验往往不能准确把握特殊形成过程导致的地外岩土力学特性转变,因此亟需发展全新的原位评估技术,或者研究基于微量返回样品的力学特性分析方法,如基于原子力显微镜、纳米压痕等微细观手段构建数字孪生模型等^[96]。

此外针对基地建设任务,其涉及的挡土墙设计和洞室围岩稳定性分析方法等岩土结构服役性能评估也面临新的挑战。以月球熔岩管道基地为例,因月球重力仅为地球的 1/6,月球熔岩管道尺寸比地

球熔岩管道大很多,并且具备保温、防辐射、避免陨石撞击等独特优点,被很多专家学者认为是建立月球基地的理想选择^[59, 64, 97]。国内外学者依据现有月壤参数,采用有限元分析推测了月球熔岩管的尺寸,但不同计算方法得出的结果差异极大,甚至有学者认为熔岩管的宽度能够达到 5 km,可以容纳一个费城^[98-100]。因此,在地外天体极端工程环境中,由于岩土材料性质未知,机制认知匮乏,现有结构设计和岩体分级方法等适用性存疑,大多数结构服役性能评估方法迫切需要重新构建。

3.4 工程机具与地外岩土体相互作用机制

3.4.1 地外岩土体钻探取样

目前常用的地外天体钻探方法主要有螺旋钻进、气动钻进、超声波钻进和仿生钻进 4 种^[10]。其中螺旋钻探是稳定性最好的方法,能够应对不同的地质环境,搭配回转、冲击等运动模式,取样体积大,样品保真度高。但是存在功耗较高,机械结构复杂、散热困难、反作用力大、切削排屑等问题。气动钻进模式简单,破岩能力强,通常与螺旋钻结合使用,但可能会破坏样本的原始信息。超声波钻进能够穿透高硬度的岩石,功耗较低,但是钻进深度有限,往往与其他钻探方法集成使用,以提高钻进效率和深度。由于其对钻进平台的重力依赖性较低,适用于勘探超低重力的小行星。仿生钻进具备较高的能量利用率,不需要大量的钻头压力,但是很难穿透硬岩,钻进效率较低,获取样品也较少。

表 4 总结了目前成功实施钻探采样的深空探测任务^[101-114]。值得一提的是,钻探是获取地外天体

深部样本的最有效方法,其中无人取样的最大深度为 2.25 m (月球 24 号),载人钻探取样的最大深度为 3.05 m (阿波罗 17 号)^[115-116]。由表 4 可知,目前人类在地外天体取样深度的极限是 3 m 左右,并且仅能取到表层松散土壤,尚未真正钻取到岩石样本,获取深层原始地质信息。此外,获取的土壤或岩石样本离开原位环境后,返回地球时已严重失真,无法反映原位赋存状态^[117-118]。纵观国内外地外天体采样任务,钻探深度浅、获取样品少,主要是受到极端环境制约、地质环境未知和工作条件有限 3 个方面的影响。

(1) 极端环境制约:不同于地球环境,地外天体表面的低重力、真空环境、高低温等恶劣环境都要求取样设备具有极高的环境适应能力。钻头重量对钻进效率至关重要,地外天体的低重力导致钻头重量远低于地面钻进机器,从而无法提供足够的钻头钻压,甚至会产生很大的反作用力^[119]。真空环境限制了钻取过程中的热量散发,也会影响钻具和岩土材料间的摩擦系数,采样过程中缺乏冷却液等冷却介质会使钻具内部热量积聚过热^[87, 120]。地球中岩土材料的热传递方式主要是热传导和热对流,而在地外天体的钻进过程中,太阳热辐射影响并不明显,热对流在高真空环境中大大减少,热传导成为主要的热传递方式^[10]。极端的低温环境和巨大的昼夜温差都对钻具材料的热物理性能有较高的要求,否则易发生脆断破坏或运动间隙失配等问题^[121]。

(2) 地质环境未知:地外采样过程中钻具与岩土材料相互作用强烈,岩土材料的成分和性质都对钻取效率影响很大。大部分缺乏大气层保护的地外

表 4 成功钻探采样的深空探测任务
Table 4 Overview of deep space exploration missions with successful drill sampling

任务	时间	国家/地区	天体	直径 / mm	采样深度 / mm	样品质量 / g	转速 / (r · min ⁻¹)	功率 / W	参考文献
月球 16 号	1970	前苏联	月球	26.00	350.0	101.0	500	280.0	[101]
阿波罗 15 号	1970	美国	月球	26.20	2 360.0	1 343.5	430	456.0	[102]
阿波罗 16 号	1972	美国	月球	26.20	2 240.0	1 007.6	280	456.0	[103]
阿波罗 17 号	1972	美国	月球	26.20	3 050.0	1 772.5	280	456.0	[103]
月球 20 号	1972	前苏联	月球	26.00	250.0	55.0	500	280.0	[101]
月球 24 号	1976	前苏联	月球	—	2 250.0	170.1	—	900.0	[104]
罗塞塔号	2004	欧洲	小行星	12.00	230.0	—	<150	<14.5	[105]
凤凰号	2008	美国	火星	6.350	7.9	—	5 300	—	[106]
好奇号	2012	美国	火星	16.00	65.0	—	150	—	[107]
猎兔犬 2 号	2013	欧洲	火星	20.00	2 000.0	—	—	3.0	[108]
洞察号	2018	美国	火星	27.00	30.0	—	—	5.0	[109]
嫦娥五号	2020	中国	月球	—	900.0	1 731.0	—	>1 000.0	[110-113]
毅力号	2021	美国	火星	13.00	—	—	200	—	[114]

天体会经常遭受星际陨石的撞击,其地质环境复杂,岩土材料粒度分布很广。星壤下部存在碎石层,且不同地点不同深度特征迥异,容易出现多块碎石卡阻钻头、钻头磨损、钻具弯曲等影响进尺效率的情况^[122]。此外,与地球截然不同的环境会影响对于岩土材料的评估,比如研究人员发现含水冰冻土的内聚力远高于干燥土壤^[123],且钻进相同深度的水饱和冻土和干燥岩石,水饱和冻土所需的钻进功率是干燥岩石的 3 倍^[124]。

(3) 工作条件有限:与地面钻探相比,深空探测中的钻探任务工作条件非常有限。首先,航天器对于科学载荷体积和重量的限制,使得分配给钻探系统的功率非常有限。其次,由于液体在地外环境中容易冻结或升华,钻探的辅助器具匮乏。最后,航天技术中的控制软件集成度有限,且与地外天体通讯存在延迟问题,需要钻探设备能够自动判别处理紧急情况。

在地外天体极端环境下,钻具与岩土材料之间存在复杂的力学和热物理耦合作用机制。尽管地外钻探技术在过去几十年里取得了重大进展,但仍存在诸多困难和挑战。国内外许多学者通过试验测试、理论分析和数值模拟对其展开了很多研究,以获得影响钻进载荷、钻头磨损和钻具温度等因素的状态参数^[87-91, 116, 125-126],进而优化钻具结构,实现深层岩土采样和永久阴影区采样的突破。针对目前深空探测任务采样硬度高、深度深、取样量大等要求,亟需研究地外天体极端环境下岩土材料在钻具扰动下的应力、变形状态,揭示钻取过程中钻具-岩土-潜在水冰的多介质热力耦合作用及固态水的相变机制,以助力地外天体极端环境深层采样技术的发展。

3.4.2 地面力学

工程机具(星球车、机械臂等)在松软的地外天体星壤中作用时,会对其造成一定的扰动,根据其表面的痕迹(车辙、压痕等),可以反演出星壤的力学参数^[82-83, 127-128]。由于航天器载荷的限制,目前火星探测器中几乎没有配备专业的试验设备,火壤相关力学参数基本都是通过车轮/机械臂-火壤相互作用间接反演获得。勇气号和机遇号火星车都曾陷入火星松软沙地,勇气号直至能源耗尽也未能脱困^[129-130]。其主要原因是松软的火壤加剧了车轮的滑转和沉陷,火星车系统驱动力无法克服地面阻力^[83]。通过车辙和机械臂压痕,评估该区域的星壤力学特性,能够为机械臂表层采样选址提供依据,也有助于星球车的路径规划、风险预测和紧急脱困^[131-132]。

地面力学的研究目前主要分为两个方面,即车辆行走机构与土壤作用的力学和土壤作业机械与土壤相互作用的力学^[63, 133]。星球车地面力学属于轮壤相互作用力学,轮壤相互作用力学可以应用于星球车的结构设计和性能优化,对于辨识星壤参数也有重要意义^[134]。总体来说,地面力学的应用依据包括两方面,即星壤的基础力学参数(如承压模量、沉陷指数、内聚力、内摩擦角等)和机械与星壤的接触力学模型。当前国内外学者针对地外天体地面力学开展了相关研究,对星壤的承压特性和剪切特性作出评估,并根据车轮扰动后的星壤摄影数据建立了多个轮壤接触力学模型对星壤力学参数进行反演。如李姿雯等^[127]将地面力学理论应用到小行星风化层地形描述中,研究探测器着陆时与表面风化层的低速碰撞动力学问题。薛龙^[83]和王康^[131]等通过分析表取采样机械臂的触月传感组件与月表接触留下的压痕,对月壤的承压力学特性和剪切力学特性进行评估。Kang^[135]和 Xue^[136]等基于视觉方法测量车辙沉陷,并采集车轮扭转、滑转率等轮壤相互作用参数,基于轮壤相互作用地面力学模型反演出了月壤的内聚力和内摩擦角,对月球车周边月壤力学状态和通过性能进行评估。Ding 等^[137]基于地面力学模型和数字孪生技术对玉兔二号漫游车行驶过程中的轮壤相互作用进行了分析,得出了细粒度月球岩土材料的承载和剪切特性,认为嫦娥四号作业点的内摩擦角在 $21.5^{\circ} \sim 42.0^{\circ}$ 范围内,内聚力在 $520 \sim 3\ 154\ \text{Pa}$ 之间,并突破性地评估了月表风化层横向特性的外摩擦角在 $8.3^{\circ} \sim 16.5^{\circ}$ 之间。

当前关于车轮/机械臂-星壤相互作用的研究大多为经验或半经验分析,缺少多种载荷试验及定量分析机具-星壤相互作用模型及参数的研究。此外,目前使用较多的轮壤接触力学模型多为 Bekker 模型和 Wong 模型^[138-139],这两个模型均是基于地球车辆与地面相互作用力学关系建立的,对于地外天体特殊赋存环境考虑不足,且模型建立在平板承压模型基础上,这两个模型在地外天体中的可适用性均有待商榷。因此建立更具代表性的轮壤接触力学模型是地外天体地面力学中亟需解决的岩土力学难题之一。

3.5 地外岩土资源原位开发利用

原位资源利用(in-situ resource utilization, 简称 ISRU)是指利用原位资源为探测任务提供产品或服务的硬件及技术,是我国国际月球科研站的重要任务之一^[9]。目前,国内外针对地外岩土资源的原位利用技术已开展了大量地面/空间站模拟验证研究^[140-142]。

由于真实地外样品数量有限，这些地面研究多利用模拟星壤材料开展。根据不同研究目的，模拟星壤会针对性地选择模拟真实地外岩土材料中的不同关键特性^[143]。当前模拟星壤的常见方法主要包括全岩模拟和单矿物模拟，两种方法均能较好地模拟真实星壤的化学成分、矿物成分和粒径分布^[144]。但

目前难以模拟月壤颗粒独特的棱角形状和富含玻璃质胶结物的物化性质。表 5 列出了国内外几种经典的模拟星壤。各种模拟星壤在制备时关注的重点有所不同，如 CUG 系列关注了月壤热学性质，CUMT-1 中加入了氧化铁作为磁性掺合料以研究低重力环境下的力学性质。

表 5 经典模拟星壤相关情况
Table 5 Summary of classical extraterrestrial regolith simulants

国家	名称	原料	年份/年	研制目的	特点	参考文献
中国模拟月壤	CAS-1	玄武质火山灰	2007	力学特性研究	成分匹配	[145-146]
	CLRS-1	低钛玄武质火山灰	2009	高温烧结	成分匹配	[147]
	NAO-1	辉长岩	2009	月壤科学与工程研究	用高钙长石制得，与月球高地样品的钙含量匹配	[148]
	CUG 系列	火山渣	2011	月表钻机取样研究	关注月壤热学性质	[144]
	TJ-1	火山灰	2011	力学特性研究（承载力、剪切强度等）	成分、粒径匹配	[149]
	JLU 系列	火山渣、斜长石	2012	力学特性研究（承载力）	粒径匹配，可大规模生产	[150-151]
	QH-E	火山岩	2016	低围压条件下的力学特性	颗粒粒径与形状匹配，干密度与孔隙率匹配	[25]
	NEU-1	火山灰	2019	提取金属与氧气	有机元素接近 0	[152]
	BH-1	火山灰	2021	地聚物合成、力学特性研究、3D 打印效果	粒径、化学成分匹配	[153-154]
	CUMT-1	火山灰与氧化铁、碳酸氢铵	2022	低重力环境下的力学特性	考虑月壤形成的地质过程，具有一定磁性	[155]
	HUST-1	火山灰	2022	烧结效果及力学特性	成分、粒径匹配，一定程度上具有奇异颗粒形状	[156]
	IRSM-1	火山灰、钛磁铁矿、碳酸氢铵	2023	低重力环境下的力学特性	成分与高钛月壤相似，具有一定磁性	[157]
	HIT-L-1	火山灰	2023	烧结效果	成分与月球南极地区高地月壤成分匹配	[158]
美国模拟月壤	JSC-1	玄武质火山岩	1993	多尺度工程研究	产量极大，化学成分与矿物成分不明确	[159]
	MLS-1	高钛玄武岩	1990	研究高钛材料	高钛含量，未考虑矿物成分匹配	[160]
韩国模拟月壤	KLS-1	玄武岩	2018	多尺度工程研究	颗粒粒径相似，未考虑成分匹配	[161]
日本模拟月壤	FJS-1	玄武质熔岩	1998	化学成分与物理特性研究	与钛铁矿混合，化学成分相似，谱学性质与电学性质相差大	[162]
中国模拟火壤	JMSS-1	玄武岩与磁铁矿	2015	用于科学和工程试验	矿物、化学与物理性质匹配度高	[163]
	NEU Mars-1	火山渣、玄武岩	2020	用于原位制氧气与金属	成分与粒径匹配	[164]
	TJ-M1	火山灰	2021	着陆器试验场地工程测试	粒径匹配、能大规模生产	[86]
美国模拟火壤	JSC-Mar1	火山灰和火山渣	1998	用于科学和工程试验	与火壤的反射光谱非常吻合	[165]
	MMS	玄武岩	2008	含冰火壤取样问题	模拟物包含火壤和火岩，支撑多尺度研究	[166]

地外岩土材料原位成型是一种可持续且相对可靠的获取建筑材料的方法，目前主要采用烧结熔融成型和黏结成型两种技术^[56]。

烧结成型是在低于熔点温度下加热松散多孔土壤，使其黏结并致密化。太阳能原位烧结成型技术的验证已被列为嫦娥八号探测器的科学任务之一。烧结工艺包括微波烧结、放电等离子烧结、热压熔

铸和激光烧结等，烧结效果不仅受星壤热学性质的影响，还受到烧结条件（烧结温度、保温时间、加热/降温速率等）的影响^[167]。烧结后样品抗压强度范围广，从 5 MPa 到 152 MPa 不等^[156, 168]，其中热压熔铸法的产物强度最高达 152 MPa。产物的微观结构和致密化程度不仅取决于烧结前样品成分和粒径^[169]，还受烧结温度、停留时间和加热速率等过程

参数的影响。其中烧结温度影响最大,最佳温度区间为 1 100~1 200 °C^[170-171],烧结过程中形成的尖锐锯齿状胶结物有利于增强微波吸收^[172]。烧结法原位利用率高、成型精度好,但仍需解决效率低、能耗高和规模小等问题。

黏结成型工艺包括胶凝材料水化固化混凝土^[169]、地质聚合物混凝土^[153, 170-171]、生物成型混凝土^[173-174]、硫磺混凝土^[175]等。黏结成型效果受到星壤的成分与粒度影响,也受到外加剂的影响^[176-177]。目前众多学者针对不同黏结材料在极端环境下的成型效果和服役能力开展了研究,样品在低重力、高真空环境成型时表现高孔隙率^[169, 178],能有效抵抗流星体冲击和强辐射^[179],但在极端温度条件下易出现开裂与骨料脱黏现象^[141, 175]。黏结成型的成型效率高,能耗较低,能够大规模生产,但原位资源利用率有待提高,成型过程中可能需要水的参与。

3D 打印增材制造作为一种自动化、信息化的新制备工艺,在地外天体原位资源利用中备受关注,能够为月球基地建设提供无人、远程和原位利用的潜在方案。许多研究人员尝试将以上两种岩土资源原位成型技术与 3D 打印结合,以提高建造效率、降低能耗、大规模生产。黏结成型多与挤出成型 3D 打印工艺相结合,将星壤制得的类混凝土材料按预设路径挤出并干燥成型。浆体流动性和可建造性是挤出成型的基础要素。在极端环境下,适当调节外加剂^[179]和选取合理环境温度窗口^[180]有利于建筑材料的打印成型。烧结成型方法多与高能束 3D 打印工艺相结合。太阳能烧结利用聚光装置使地外风化层烧结致密化,国内钱学森空间技术实验室已成功验证了静电运输-聚光熔融月壤 3D 打印系统的地面可行性^[181-182]。除了将地外岩土材料固化作为建筑材料,一些研究表明岩土材料也能加工获取多种衍生材料,如纤维^[183-184]、氧气^[185]等。

地外岩土材料原位成型技术是地外基地建设的重要保障,目前众多成型技术在实际运用中仍面临较大挑战,且成型材料在极端环境下的服役性能仍未得到有效验证。探索适用性更强的原位成型技术,发展能在极端环境下高效服役的岩土材料,创新地外建筑结构一体化成型技术,都是未来岩土力学学科需重点关注的方向。

4 结语与展望

本文从近期完成与规划的深空探测任务出发,分析了“四特一扰动”赋存环境和特殊形成过程对地外岩土材料性质引起的转变,初步给出了地外天

体岩土力学的研究范畴。为了助力深空探测任务顺利实施,岩土工程学科亟需创新发展小型轻量、自动智能的原位岩土测试科学载荷,搭建集成地外极端环境的多场耦合试验平台,研究极端条件下岩土材料特殊力学响应,揭示钻取过程中钻具-岩土-潜在水冰的多介质热力耦合作用及固态水的相变机制,建立适用于地外天体的轮壤接触力学模型,探索地外原位智能建造新方法、新技术。

目前地外岩土力学领域的理论研究滞后于人类深空探测活动,传统空间科学与地球物理领域的研究工作大多集中在空间技术与行星地质层面,对地外天体极端环境下岩土材料的特殊性和工程机具与岩土材料相互作用机制关注不足,很多涉及岩土材料的机具失效行为都无法给出有效解释。地外天体岩土力学作为岩土力学学科的一个新兴重要分支,亟需一批科研人员以岩土工程学科为出发点,围绕深空探测关键技术难题贡献更多的中国智慧。为解决这些问题,将岩土工程学科与机械、地质、材料、矿业、冶金等学科的交叉融合是大势所趋,需要掌握并建立极端环境岩土材料测试方法,发展地外天体极端环境勘察、采样、资源利用理论与方法,培养出具有岩土工程背景和行星科学专业知识的交叉型复合人才。

参考文献

- [1] 于登云,马继楠.中国深空探测进展与展望[J].前瞻科技,2022,1(1):17-27.
YU Deng-yun, MA Ji-nan. Progress and prospects of China's deep space exploration[J]. **Science and Technology Foresight**, 2022, 1(1): 17-27.
- [2] NASA. Artemis accords[EB/OL]. [2023-12-10]. <https://www.nasa.gov/artemis-accords/>.
- [3] 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 Li-wu, GUO Dong-wen, ZHANG Zhang, et al. Introduction to NASA's artemis lunar exploration program[J]. **Spacecraft Recovery & Remote Sensing**, 2020, 41(5): 1-12.
- [4] 叶培建,邹乐洋,王大珩,等.中国深空探测领域发展及展望[J].国际太空,2018(10):4-10.
YE Pei-jian, ZOU Le-yang, WANG Da-yi, et al. Development and outlook of China's deep space exploration field[J]. **Space International**, 2018(10): 4-10.

- [5] SHI K, YUE Z, DI K, et al. The gardening process of lunar regolith by small impact craters: a case study in Chang'E-4 landing area[J]. **Icarus**, 2022, 377: 114908.
- [6] FA W. Bulk density of the lunar regolith at the Chang'E - 3 landing site as estimated from lunar penetrating radar[J]. **Earth and Space Science**, 2020, 7(2): e2019EA000801.
- [7] YUE Z Y, GOU S, SUN S J, et al. Geological context of Chang'e-6 landing area and implications for sample analysis[J]. **The Innovation**, 2024, 5(5): 100663.
- [8] 余后满, 饶炜, 张益源, 等. “嫦娥七号”探测器任务综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(6): 567-576.
YU Hou-man, RAO Wei, ZHANG Yi-yuan, et al. Mission analysis and spacecraft design of Chang'E-7[J]. **Journal of Deep Space Exploration**, 2023, 10(6): 567-576.
- [9] 国家航天局. 国际月球科研站合作伙伴指南[EB/OL]. [2021-06-16]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6812147/content.html>.
China National Space Administration. International Lunar Research Station (ILRS) Guide for Partnership[EB/OL]. [2021-06-16]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6812147/content.html>.
- [10] ZHANG Y, ZHANG T, WEI H, et al. Advances in extraterrestrial drilling technology to discover the secrets hidden inside celestial bodies[J]. **Space Science Reviews**, 2022, 218(6): 47.
- [11] NASER M Z. Extraterrestrial construction materials[J]. **Progress in Materials Science**, 2019, 105: 100577.
- [12] HARRY Y, MCSWEEN J, MOERSCH J E, et al. Planetary geoscience[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [13] HODGES R R, HOFFMAN J H, JOHNSON F S. The lunar atmosphere[J]. **Icarus**, 1974, 21(4): 415-426.
- [14] ZHANG T, WANG B, WEI H, et al. Review on planetary regolith-sampling technology[J]. **Progress in Aerospace Sciences**, 2021, 127: 100760.
- [15] 周国庆, 李瑞林, 严康, 等. 月球采矿中月壤/岩力学问题的理论与试验方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 183-191.
ZHOU Guo-qing, LI Rui-lin, YAN Kang, et al. Theoretical and experimental methods for lunar regolith/rock related mechanical issues in lunar minerals mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(1): 183-191.
- [16] MARDOUKHI A, MARDOUKHI Y, HOKKA M, et al. Effects of test temperature and low temperature thermal cycling on the dynamic tensile strength of granitic rocks[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2021, 54(1): 443-454.
- [17] LI R, CHEN J, ZHANG J, et al. Cone penetration resistance of CUMT-1 lunar regolith simulant under magnetic-similitude lunar gravity condition[J]. **Acta Geotechnica**, 2023, 18(12): 6725-6744.
- [18] XIAO S, CHENG X, HOU M, et al. Analysis of experimental results on the bearing capacity of sand in low-gravity conditions[J]. **Microgravity Science and Technology**, 2022, 34(2): 16.
- [19] LI Y, HAO Z, JIA X. Experimental study of fracture behaviors of granite at ultra-low temperatures[J]. **Construction and Building Materials**, 2024, 419: 135510.
- [20] XIE H, WU Q, LIU Y, et al. Direct measurement and theoretical prediction model of interparticle adhesion force between irregular planetary regolith particles[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2023, 33(11): 1425-1436.
- [21] ALSHIBLI K A. Constitutive and stability behavior of soils in microgravity environment[C]//AIP Conference Proceedings. [S. l.]: [s. n.], 2000.
- [22] 蒋明镜, 戴永生, 王新新. 低重力环境下静力触探贯入机制离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2045-2053.
JIANG Ming-jing, DAI Yong-sheng, WANG Xin-xin. DEM analysis of cone penetration tests under low gravity conditions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(11): 2045-2053.
- [23] MO P Q, GAO F, ZHOU G, et al. An experimental study on triaxial compression tests and cone penetration tests in planetary regolith simulant under low gravity fields[J]. **Journal of Testing and Evaluation**, 2019, 47(3): 1677-1700.
- [24] MO P Q, ZHOU G, GAO F, et al. Bearing capacity of surface circular footings on granular material under low gravity fields[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2021, 13(3): 612-625.
- [25] ZOU W L, LI Y L, CHEN L, et al. Mechanical properties of QH-E lunar soil simulant at low confining stresses[J]. **Journal of Aerospace Engineering**, 2016, 29(2): 04015036.

- [26] LI Y L, ZOU W L, WU W, et al. Triaxial compression tests of QH-E lunar soil simulant under constant mean principal stress path using discrete element method simulations[J]. **Granular Matter**, 2018, 20(4): 79.
- [27] LI Y L, WU W, CHU X, et al. Effects of stress paths on triaxial compression mechanical properties of QH-E lunar soil simulant studied by DEM simulation[J]. **Granular Matter**, 2020, 22(2): 32.
- [28] VILES H, EHLMANN B, WILSON C F, et al. Simulating weathering of basalt on Mars and Earth by thermal cycling[J]. **Geophysical Research Letters**, 2010, 37(18): 2010GL043522.
- [29] VILES H, MESSENZEHL K, MAYAUD J, et al. Stress histories control rock-breakdown trajectories in arid environments[J]. **Geology**, 2018, 46(5): 419-422.
- [30] EPPES M C, WILLIS A, MOLARO J, et al. Cracks in Martian boulders exhibit preferred orientations that point to solar-induced thermal stress[J]. **Nature Communications**, 2015, 6(1): 6712.
- [31] DELBO M, LIBOUREL G, WILKERSON J, et al. Thermal fatigue as the origin of regolith on small asteroids[J]. **Nature**, 2014, 508(7495): 233-236.
- [32] 赵学亮, 王浩, 陈正翰, 等. 月壤颗粒间的范德华力作用研究进展[J]. 空间科学学报, 2023, 43(2): 291-301.
- ZHAO Xue-liang, WANG Hao, CHEN Zheng-han, et al. Review on van der Waals interaction between lunar soil particles[J]. **Chinese Journal of Space Science**, 2023, 43(2): 291-301.
- [33] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- OUYANG Zi-yuan. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2005.
- [34] MIYAHARA M, TOMIOKA N, BINDI L. Natural and experimental high-pressure, shock-produced terrestrial and extraterrestrial materials[J]. **Progress in Earth and Planetary Science**, 2021, 8(1): 59.
- [35] 张山豹, 孔祥振, 方秦, 等. 弹体超高速侵彻石灰岩靶体地冲击的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(1): 74-86.
- ZHANG Shan-bao, KONG Xiang-zhen, FANG Qin, et al. Numerical simulation on ground shock waves induced by hypervelocity penetration of a projectile into a limestone target[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2022, 42(1): 74-86.
- [36] RILLER U, POELCHAU M H, RAE A S P, et al. Rock fluidization during peak-ring formation of large impact structures[J]. **Nature**, 2018, 562(7728): 511-518.
- [37] 肖智勇. 撞击过程和内太阳系撞击历史[J]. 地质学报, 2021, 95(9): 2641-2661.
- XIAO Zhi-yong. Impact cratering and impact history of the inner Solar System[J]. **Acta Geologica Sinica**, 2021, 95(9): 2641-2661.
- [38] STÖFFLER D, HAMANN C, METZLER K. Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system[J]. **Meteoritics & Planetary Science**, 2018, 53(1): 5-49.
- [39] VANIMAN D, DIETRICH J, TAYLOR G J, et al. Exploration, samples, and recent concepts of the moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [40] 黄雨, 蒋馥鸿. 月壤工程地质特性综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 1281-1285.
- HUANG Yu, JIANG Fu-hong. Review of engineering geologic characteristics of lunar regolith[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2013, 41(9): 1281-1285.
- [41] LUCEY P. Understanding the lunar surface and space-moon interactions[J]. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, 2006, 60(1): 83-219.
- [42] HEYWOOD H. Particle size and shape distribution for lunar fines sample 12057,72[C]//Proceedings of Lunar Science Conference. [S. l.]: [s. n.], 1971.
- [43] MITCHELL J K, HOUSTON W N, SCOTT R, et al. Mechanical properties of lunar soil-density, porosity, cohesion, and angle of internal friction[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. [S. l.]: [s. n.], 1972.
- [44] 郑永春, 欧阳自远, 王世杰, 等. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石, 2004(4): 14-19.
- ZHENG Yong-chun, OUYANG Zi-yuan, WANG Shi-jie, et al. Physical and mechanical properties of moon soil[J]. **Mineralogy and Petrology**, 2004(4): 14-19.
- [45] 刘汉生, 王江, 赵健楠, 等. 典型模拟火星土壤研究进展[J]. 载人航天, 2020, 26(3): 389-402.
- LIU Han-sheng, WANG Jiang, ZHAO Jian-nan, et al. Research progress of typical Martian soil simulants[J]. **Manned Spaceflight**, 2020, 26(3): 389-402.
- [46] SCHOFIELD J T, BARNES J R, CRISP D, et al. The Mars Pathfinder atmospheric structure investigation/

- meteorology (ASI/MET) experiment[J]. **Science**, 1997, 278(5344): 1752-1758.
- [47] 赵嘉成, 罗宇轩, 张道博, 等. 基于原位资源利用的火星基地建造方案[J]. 工业建筑, 2024, 54(1): 102-114.
- ZHAO Jia-cheng, LUO Yu-xuan, ZHANG Dao-bo, et al. A novel approach for Martian base construction using in-situ resources[J]. **Industrial Construction**, 2024, 54(1): 102-114.
- [48] GOETZ W, PIKE W T, HVIID S F, et al. Microscopy analysis of soils at the Phoenix landing site, Mars: classification of soil particles and description of their optical and magnetic properties[J]. **Journal of Geophysical Research: Planets**, 2010, 115(E8): 2009JE003437.
- [49] 党兆龙, 陈百超. 火星土壤物理力学特性分析[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 129-133, 144.
- DANG Zhao-long, CHEN Bai-chao. Physical and mechanical characterization of Martian soils[J]. **Journal of Deep Space Exploration**, 2016, 3(2): 129-133, 144.
- [50] 郑敏, 蒋明镜, 申志福. 简化接触模型的月壤离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 766-771.
- ZHENG Min, JIANG Ming-jing, SHEN Zhi-fu. Discrete element numerical analysis of lunar soil with a simplified contact model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Suppl.1): 766-771.
- [51] JIANG M, SHEN Z, THORNTON C. Microscopic contact model of lunar regolith for high efficiency discrete element analyses[J]. **Computers and Geotechnics**, 2013, 54: 104-116.
- [52] LIU Y, JENG D S, XIE H, et al. On the particle morphology characterization of granular geomaterials[J]. **Acta Geotechnica**, 2023, 18(5): 2321-2347.
- [53] CARRIER W D, III, OLHOEFT G R, MENDELL W. Physical properties of the lunar surface[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [54] SPOHN T, HUDSON T L, WITTE L, et al. The InSight-HP3 mole on Mars: lessons learned from attempts to penetrate to depth in the Martian soil[J]. **Advances in Space Research**, 2022, 69(8): 3140-3163.
- [55] 张泽旭, 袁帅, 潘文特, 等. 月球驻人基地建设综述与关键技术分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(5): 455-469, 453-454.
- ZHANG Ze-xu, YUAN Shuai, PAN Wen-te, et al. Review and prospect of key technologies for lunar manned base[J]. **Journal of Deep Space Exploration**, 2023, 10(5): 455-469, 453-454.
- [56] 丁烈云, 周诚, 高玉月, 等. 地外建造研究进展与科学技术挑战[J]. 土木工程学报, 2024, 57(6): 26-42.
- DING Lie-yun, ZHOU Cheng, GAO Yu-yue, et al. Research progress and scientific & technological challenges in extraterrestrial construction[J]. **Journal of Civil Engineering**, 2024, 57(6): 26-42.
- [57] 蒋明镜, 王思远, 姜朋明, 等. 月球基地的建设远景与挑战[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 114-125.
- JIANG Ming-jing, WANG Si-yuan, JIANG Peng-peng, et al. The long-range perspective and challenges for the construction of lunar base[J]. **Journal of Shandong University (Engineering Science)**, 2024, 54(2): 114-125.
- [58] 冯鹏, 包查润, 张道博, 等. 基于月面原位资源的月球基地建造技术[J]. 工业建筑, 2021, 51(1): 169-178.
- FENG Peng, BAO Cha-run, ZHANG Dao-bo, et al. Construction technology for lunar bases using lunar in-situ resources[J]. **Industrial Construction**, 2021, 51(1): 169-178.
- [59] 梅洪元, 包为民, 于登云, 等. 关于未来月球基地建筑方案的构想[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(6): 553-559.
- MEI Hong-yuan, BAO Wei-min, YU Deng-yun, et al. Research on building plans design for future China lunar base[J]. **Journal of Deep Space Exploration**, 2022, 9(6): 553-559.
- [60] 林红磊, 陈剑, 李超, 等. 嫦娥工程月球探测任务遥感科学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2023, 42(3): 478-493.
- LIN Hong-lei, CHEN Jian, LI Chao, et al. Research progress of remote sensing for the Chang'E lunar exploration mission[J]. **Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry**, 2023, 42(3): 478-493.
- [61] 何志平, 桂裕华, 李津宁, 等. 面向月球环绕探测的光谱成像: 研究现状与技术挑战[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 410-420.
- HE Zhi-ping, GUI Yu-hua, LI Jinning, et al. Spectral imaging for lunar orbit exploration: research status and technical challenges[J]. **Acta Optica Sinica**, 2022, 42(17): 410-420.
- [62] 于登云, 潘博, 马超. 星球探测机器人研究现状与发展展望[J]. 宇航学报, 2023, 44(4): 633-643.
- YU Deng-yun, PAN Bo, MA Chao. Research status and

- development prospect of planetary exploration robots[J]. **Journal of Astronautics**, 2023, 44(4): 633-643.
- [63] 黄澜, 于兆玮, 丁亮, 等. 面向熔岩管探测的星球子车及其参数化设计方法研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(1): 19-34.
- HUANG Lan, YU Zhao-wei, DING Liang, et al. Planetary child rover for lava tube exploration and its parametric design[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2023, 59(1): 19-34.
- [64] 肖龙, 黄俊, 赵佳伟, 等. 月面熔岩管洞穴探测的意义与初步设想[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2018, 48(11): 87-100.
- XIAO Long, HUANG Jun, ZHAO Gui-wei, et al. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes[J]. **Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica**, 2018, 48(11): 87-100.
- [65] 谢更新, 韩娅, 晏铭, 等. 利用熔岩管道建设月球农场的初步构想[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(5): 512-524.
- XIE Geng-xin, HAN Ya, YAN Ming, et al. A tentative conception of building lunar farm with lava tube[J]. **Journal of Deep Space Exploration**, 2023, 10(5): 512-524.
- [66] 谢和平, 张国庆, 李存宝. 月球恒温层地下空间利用探索构想[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1): 1-8.
- XIE He-ping, ZHANG Guo-qing, LI Cun-bao. Scheme of underground space utilization of lunar thermostatic layer[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2020, 52(1): 1-8.
- [67] 秦克章, 邹心宇. 行星矿产及行星资源地质学初论[J]. 岩石学报, 2021, 37(8): 2276-2286.
- QIN Ke-zhang, ZOU Xin-yu. Potential mineral resources in the planets and preliminary discussion on planetary resource geology[J]. **Acta Petrologica Sinica**, 2021, 37(8): 2276-2286.
- [68] 陈薪硕, 李守定, 张晓静, 等. 行星地质工程原位测试方法[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1525-1544.
- CHEN Xin-shuo, LI Shou-ding, ZHANG Xiao-jing, et al. In-situ testing method for planetary geological engineering[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2021, 29(5): 1525-1544.
- [69] CHERKASOV I I, MIKHEEV V V, SMORODINOV M I, et al. Determination of the structural and mechanical properties of the lunar soil by the automatic lunar station “Luna-13”[J]. **Journal of Engineering Physics**, 1968, 14(4): 309-311.
- [70] KASSEL S. Lunokhod-1 Soviet lunar surface vehicle[R]. [S. l.]: RAND Corporation, 1971.
- [71] ZACNY K, WILSON J, CRAFT J, et al. Robotic lunar geotechnical tool[C]//Earth and Space 2010. Hawaii: [s. n.], 2010.
- [72] VREBALOVICH T, JAFFE L D, DWORNIK S E. Introduction: surveyor 3 lunar landing[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1968, 73(12): 3981-3982.
- [73] ELLERY A. Robotic sample acquisition[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016: 419-470.
- [74] 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 Xiang-jin, ZHENG Yan-hong, JIN Sheng-yi, et al. Design and implementation of sampling, encapsulating, and sealing system of Chang'E-5[J]. **Scientia Sinica (Technologica)**, 2021, 51(7): 753-762.
- [75] ZACNY K, PAULSEN G, SZCZESIAK M, et al. Lunar Vader: development and testing of lunar drill in vacuum chamber and in lunar analog site of antarctica[J]. **Journal of Aerospace Engineering**, 2013, 26(1): 74-86.
- [76] NUNN C, GARCIA R F, NAKAMURA Y, et al. Lunar seismology: a data and instrumentation review[J]. **Space Science Reviews**, 2020, 216(5): 89.
- [77] NAKAMURA Y, LATHAM G V, DORMAN H J. Apollo lunar seismic experiment—final summary[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1982, 87(S01): A117-A123.
- [78] ANDERSON D L, DUENNEBIER F K, LATHAM G V, et al. The Viking seismic experiment[J]. **Science**, 1976, 194(4271): 1318-1321.
- [79] KNAPMEYER-ENDRUN B, KAWAMURA T. NASA's InSight mission on Mars—first glimpses of the planet's interior from seismology[J]. **Nature Communications**, 2020, 11(1): 1451.
- [80] 李春来, 刘建军, 耿言, 等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 406-413.
- LI Chun-lai, LIU Jian-jun, GENG Yan, et al. Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission[J]. **Journal of Deep Space Exploration**, 2018, 5(5): 406-413.

- [81] TANG Z C, LIU J J, WANG X X, et al. Physical and mechanical characteristics of lunar soil at the Chang'E-4 landing site[J]. **Geophysical Research Letters**, 2020, 47(22): e2020 GL089499.
- [82] 薛龙, 党兆龙, 陈百超, 等. 地面力学在火星壤力学参数估计研究中的进展与展望[J]. 宇航学报, 2020, 41(2): 136-146.
- XUE Long, DANG Zhao-long, CHEN Bai-chao, et al. Advances and prospects of Martian soil parameter identification based on terramechanics[J]. **Journal of Astronautics**, 2020, 41(2): 136-146.
- [83] 薛龙, 姚猛, 李立犇, 等. 基于触月压痕的表层月壤力学状态试验分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(3): 497-503.
- XUE Long, YAO Meng, LI Li-ben, et al. Experimental analysis of mechanical properties of surface lunar soil based on lunar indentation[J]. **Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)**, 2022, 52(3): 497-503.
- [84] International Space Exploration Coordination Group (ISECG). In-Situ resource utilization gap assessment report[R]. Paris: ESA, 2021.
- [85] 张家铭, 闫赟彬. 美国宇航局“Artemis”月球探测计划新进展[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(2): 127-133.
- ZHANG Jia-ming, YAN Yun-bin. The progress of NASA's Artemis lunar exploration program[J]. **Spacecraft Recovery & Remote Sensing**, 2022, 43(2): 127-133.
- [86] 蒋明镜, 石安宁, 奚邦禄, 等. 火星探测器着陆试验场地研造[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 826-832.
- JIANG Ming-jing, SHI An-ning, XI Bang-lu, et al. Study and construction of landing test site for Mars rover[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2023, 45(4): 826-832.
- [87] 赖小明, 白书欣, 赵曾, 等. 模拟 1 月面环境钻进过程热特性研究[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 162-167.
- LAI Xiao-ming, BAI Shu-xin, ZHAO Zeng, et al. Research on the thermal features of the drilling process under the simulated lunar surface environment[J]. **Journal of Deep Space Exploration**, 2016, 3(2): 162-167.
- [88] 丁希仑, 刘舒婷, 张涛. 月面钻进真空环境模拟装置的设计与验证[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(11): 2271-2278.
- DING Xi-lun, LIU Shu-ting, ZHANG Tao. Design and verification of vacuum environmental simulation device for lunar surface drilling[J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 2016, 42(11): 2271-2278.
- [89] ZHANG T, DING X L, XU K, et al. Evacuation method and outgassing rate of a lunar regolith simulant for deep drilling tests[J]. **Acta Astronautica**, 2019, 157: 455-464.
- [90] 谢和平, 张国庆, 罗通, 等. 月球大深度保真取芯探矿机器人系统构想与设计[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(2): 1-9.
- XIE He-ping, ZHANG Guo-qing, LUO Tong, et al. Scheme and design of a lunar large-depth and in-situ condition-holding coring robot system[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2020, 52(2): 1-9.
- [91] GAO M Z, WANG X, ZHANG G Q, et al. The novel idea and technical progress of lunar in-situ condition preserved coring[J]. **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, 2022, 8(2): 46.
- [92] HAO H C, GAO M Z, LI C B, et al. Selection and thermal physical characteristics analysis of in-situ condition preserved coring lunar rock simulant in extreme environment[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2023, 33(11): 1411-1424.
- [93] 李瑞林, 陈大庆, 周国庆, 等. 月球小重力及真空环境地面模拟试验系统研制[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(5): 823-838.
- LI Rui-lin, CHEN Da-qing, ZHOU Guo-qing, et al. Development of terrestrial modelling system for lunar low gravity and vacuum environments[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2022, 51(5): 823-838.
- [94] 冯咬齐, 易忠, 李西园, 等. 面向载人月球探测的月面环境模拟试验关键技术分析[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(1): 1-6.
- FENG Yao-qi, YI Zhong, LI Xi-yuan, et al. Key technologies in lunar surface environmental simulation test for manned lunar exploration[J]. **Spacecraft Environment Engineering**, 2018, 35(1): 1-6.
- [95] 国家航天局. 空间环境地面模拟装置正式通过国家验收[EB/OL]. [2024-02-28]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10477320/content.html>.
- China National Space Administration. China's first domestically developed ground simulation space station

- passes acceptance review[EB/OL]. [2024-02-28]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10477320/content.html>.
- [96] 唐旭海, 许婧璟, 张怡恒, 等. 基于微观岩石力学试验和 NWA13618 陨石的小行星岩石力学参数分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1157-1163.
- TANG Xun-hai, XU Jing-jing, ZHANG Yi-heng, et al. Determining mechanical parameters of asteroid rocks using NWA13618 meteorites and microscopic rock mechanics experiment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(5): 1157-1163.
- [97] 石耀霖, 胡才博, 张怀, 等. 对我国月球科研站开展特定固体月球动力学研究的一些思考[J]. 中国科学基金, 2022: 1-12.
- SHI Yao-lin, HU Cai-bo, ZHANG Huai, et al. Some thoughts on the special research of solid lunar dynamics in China's lunar scientific research station[J]. **Bulletin of National Natural Science Foundation of China**, 2022: 1-12.
- [98] BLAIR D M, CHAPPAZ L, SOOD R, et al. The structural stability of lunar lava tubes[J]. **Icarus**, 2017, 282: 47-55.
- [99] THEINAT A K, MODIRIASARI A, BOBET A, et al. Lunar lava tubes: morphology to structural stability[J]. **Icarus**, 2020, 338: 113442.
- [100] DU J, FA W, WIECZOREK M A, et al. Thickness of lunar mare basalts: new results based on modeling the degradation of partially buried craters[J]. **Journal of Geophysical Research: Planets**, 2019, 124(9): 2430-2459.
- [101] YLIKORPI T. Preliminary design of an automated lunar soil sampler[D]. Helsinki: Helsinki Aalto University, 1994.
- [102] DOYLE P. The Apollo missions and Moon rocks, 1969-1972[J]. **Geology Today**, 2017, 33(4): 142-147.
- [103] ZACNY K. Lunar drilling, excavation and mining in support of science, exploration, construction, and in situ resource utilization (ISRU)[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 235-265.
- [104] BASILEVSKY A T, IVANOV B A, IVANOV A V, et al. Clarification of sources of material returned by Luna 24 spacecraft based on analysis of new images of the landing site taken by lunar reconnaissance orbiter[J]. **Geochemistry International**, 2013, 51(6): 456-472.
- [105] DAINESE C, FINZI A, MALNATI F. Test facility for SD2 comet sampler performance improvement[C]// Proceedings of the 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation. [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [106] BONITZ R G, SHIRAISHI L, ROBINSON M, et al. NASA Mars 2007 Phoenix lander robotic arm and icy soil acquisition device[J]. **Journal of Geophysical Research: Planets**, 2008, 113(E3): 2007JE003030.
- [107] GROTZINGER J P, CRISP J, VASAVADA A R, et al. Mars science laboratory mission and science investigation[J]. **Space Science Reviews**, 2012, 170(1-4): 5-56.
- [108] RICHTER L, COSTE P, GROMOV V, et al. Development of the "planetary underground tool" subsurface soil sampler for the Mars express "Beagle 2" lander[J]. **Advances in Space Research**, 2001, 28(8): 1225-1230.
- [109] GRYGORCZUK J, WIŚNIEWSKI Ł, KĘDZIORA B, et al. Hammering mechanism for HP 3 experiment (InSight)[C]// Proceedings of the 43rd Aerospace Mechanisms Symposium. [S. l.]: [s. n.], 2016.
- [110] LI C, HU H, YANG M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission[J]. **National Science Review**, 2022, 9(2): nwab188.
- [111] ZHANG X, ZHANG G Q, XIE H P, et al. A Review of sampling exploration and devices for extraterrestrial celestial bodies[J]. **Space Science Reviews**, 2022, 218(8): 59.
- [112] PANG Y, ZHANG T, WEI H Y, et al. Influence of lunar regolith compressibility on sampling performance of thick wall spiral drills[J]. **Chinese Journal of Aeronautics**, 2023, 36(2): 350-362.
- [113] ZHANG T, PANG Y, ZENG T, et al. Robotic drilling for the Chinese Chang'E 5 lunar sample-return mission[J]. **The International Journal of Robotics Research**, 2023, 42(8): 586-613.
- [114] 申彦, 邹猛, 党兆龙, 等. 火星车通过性评估技术现状与展望[J]. 光学精密工程, 2023, 31(5): 729-745.
- SHEN Yan, ZOU Meng, DANG Zhao-long, et al. Trafficability analysis for Mars rover: present and development[J]. **Optics and Precision Engineering**, 2023, 31(5): 729-745.
- [115] BAR-COHEN Y, ZACNY Kris. Advances in extraterrestrial drilling: ground, ice, and underwater[M]. Boca Raton: CRC Press, 2020.

- [116] 陈浩文, 冉恒谦, 王艳丽, 等. 月球钻探模拟试验及技术展望[J]. 钻探工程, 2023, 50(增刊 1): 192-199.
CHEN Hao-wen, RAN Heng-qian, WANG Yan-li, et al. Lunar drilling simulation experiments and technical prospects[J]. **Drilling Engineering**, 2023, 50(Suppl.1): 192-199.
- [117] 申志强, 李帅, 刘德赟, 等. 地外天体探测与钻取技术发展研究[J]. 航天器工程, 2023, 32(1): 97-104.
SHEN Zhi-qiang, LI Shuai, LIU De-yun, et al. Research on development of extraterrestrial object detection and drilling technology represented[J]. **Spacecraft Engineering**, 2023, 32(1): 97-104.
- [118] 姚智晓, 晁超越, 郭浩语, 等. 火星壤采样探测技术研究进展与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13): 83-101.
YAO Zhi-xiao, ZHAO Chao-yue, GUO Hao-yu, et al. Progress and perspective of Martian regolith-sampling technology[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2021, 57(13): 83-101.
- [119] ZACNY K A, PAULSEN G, SZCZESIAK M. Challenges and methods of drilling on the Moon and Mars[C]//2011 Aerospace Conference. [S. l.]: [s. n.], 2011.
- [120] 张涛, 丁希仑. 月面钻进环境模拟及钻进过程钻具力热特性研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 117.
ZHANG Tao, DING Xi-lun. Simulation of lunar surface drilling environment and study of force and heat characteristics of drilling tools during drilling process[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2019, 55(8): 117.
- [121] ZACNY K A, COOPER G A. Considerations, constraints and strategies for drilling on Mars[J]. **Planetary and Space Science**, 2006, 54(4): 345-356.
- [122] ZACNY K A, CHU P, PAULSEN G, et al. Asteroids: anchoring and sample acquisition approaches in support of science, exploration, and in situ resource utilization[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 287-343.
- [123] ZACNY K A, COOPER G A. Investigation of the performance of a coring bit in frozen mud under Martian conditions of low temperature and pressure[J]. **Journal of Geophysical Research: Planets**, 2005, 110(E4): 2004JE002341.
- [124] HORNE M F. Drilling on Mars – Mathematical model for rotary-ultrasonic core drilling of brittle materials[D]. California: UC Berkeley, 2015.
- [125] 唐钧跃, 邓宗全, 陈崇斌, 等. 面向深空探测的星球钻取采样技术综述[J]. 宇航学报, 2017, 38(6): 555-565.
TANG Jun-yue, DENG Zong-quan, CHEN Chong-bin, et al. Review of planetary drilling & coring technologies oriented towards deep space exploration[J]. **Journal of Astronautics**, 2017, 38(6): 555-565.
- [126] 季节, 张伟伟, 杨旭, 等. 月球极区水冰采样探测技术综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 101-113.
JI Jie, ZHANG Wei-wei, YANG Xu, et al. Overview of water ice sampling and detection techniques in the lunar polar region[J]. **Journal of Deep Space Exploration**, 2022, 9(2): 101-113.
- [127] 李姿雯, 曾祥远. 着陆探测器低速碰撞小天体风化层的动力学分析[J]. 力学与实践, 2022, 44(6): 1261-1267.
LI Zi-wen, ZENG Xiang-yuan. Dynamical analyses on the low-velocity impact between the landing probe and the asteroid deformable regolith[J]. **Mechanics in Engineering**, 2022, 44(6): 1261-1267.
- [128] 袁野, 杨怀广, 丁亮, 等. 反映载荷影响的星球车车轮试验及模型研究[J]. 机械工程学报, 2024: 1-9.
YUAN Ye, YANG Huan-guang, DING Liang, et al. Experimental study and modeling considering the influence of wheel load for planetary exploration rovers[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2024: 1-9.
- [129] ARVIDSON R E, BELL J F, BELLUTTA P, et al. Spirit Mars rover mission: overview and selected results from the northern Home Plate Winter Haven to the side of Scamander crater[J]. **Journal of Geophysical Research: Planets**, 2010, 115(E7): 2010JE003633.
- [130] 潘冬, 陈朕, 袁宝峰, 等. 火星车沉陷机制与脱困策略研究[J]. 机器人, 2022, 44(1): 2-8.
PAN Dong, CHEN Zhen, YUAN Bao-feng, et al. Sinkage mechanism and extrication strategy of Mars rover[J]. **Robot**, 2022, 44(1): 2-8.
- [131] 王康, 姚猛, 李立犇, 等. 基于月面表取采样触月压痕的月壤力学状态分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(3): 1146-1152.
WANG Kang, YAO Meng, LI Li-ben, et al. Mechanical performance identification for lunar soil in lunar surface sampling[J]. **Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)**, 2021, 51(3): 1146-1152.
- [132] 黄晗, 许述财, 张金换, 等. 基于轮辙非接触测量的月壤非参数化识别方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(2): 366-374.

- HUANG Han, XU Shu-cai, ZHANG Jin-huan, et al. Non-parametric identification method for lunar regolith based on rut non-contact measurement[J]. **Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)**, 2019, 49(2): 366-374.
- [133] 丁亮. 月/星球车轮地作用地面力学模型及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- DING Liang. Wheel-soil interaction terramechanics for lunar/planetary exploration rovers: modeling and application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011
- [134] 于兆玮. 面向悬崖释放的星球熔岩管探测车设计及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- YU Zhao-wei. Design and experimental research of a planetary lava tube rover for cliff decent[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021
- [135] KANG S. Terrain parameter estimation and traversability assessment for mobile robots[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [136] XUE L, LI J, ZOU M, et al. In situ identification of shearing parameters for loose lunar soil using least squares support vector machine[J]. **Aerospace Science and Technology**, 2016, 53: 154-161.
- [137] DING L, ZHOU R, YU T, et al. Lunar rock investigation and tri-aspect characterization of lunar farside regolith by a digital twin[J]. **Nature Communications**, 2024, 15(1): 2098.
- [138] 王开灏. 星球车轮壤接触力学模型重构及试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- WANG Kai-hao. Reconstruction and experimental study on dynamic model of wheel-soil interaction on planetary rovers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [139] WONG J Y, REECE A R. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses part I: performance of driven rigid wheels[J]. **Journal of Terramechanics**, 1967, 4(1): 81-98.
- [140] 贾阳, 申振荣, 党兆龙, 等. 模拟月壤研究及其在月球探测工程中的应用[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(3): 241-247.
- JIA Yang, SHEN Zhen-rong, DANG Zhao-long, et al. Lunar soil simulant and its engineering application in lunar exploration program[J]. **Spacecraft Environment Engineering**, 2014, 31(3): 241-247.
- [141] 刘琛, 李勇, 周文, 等. 模拟月/火星壤的原位成型技术研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(22): 14-20.
- LIU Chen, LI Yong, ZHOU Wen, et al. In-situ forming technology of lunar/Martian soil simulant[J]. **Materials Reports**, 2022, 36(22): 14-20.
- [142] 宋蕾, 徐佼, 唐红, 等. 模拟月壤成型研究现状[J]. 矿物学报, 2020, 40(1): 47-57.
- SONG Lei, XÜ Jiao, TANG Hong, et al. Research progress of the simulated lunar soil molding[J]. **Acta Mineralogica Sinica**, 2020, 40(1): 47-57.
- [143] ZHOU C, GAO Y Y, ZHOU Y, et al. Properties and characteristics of regolith-based materials for extraterrestrial construction[J]. **Engineering**, 2024, 37(7): 159-181.
- [144] 贺新星, 肖龙, 黄俊, 等. 模拟月壤研究进展及 CUG-1A 模拟月壤[J]. 地质科技情报, 2011, 30(4): 137-142.
- HE Xin-xing, XIAO Long, HUANG Jun, et al. Lunar Soil simulant development and lunar soil simulant CUG-1A[J]. **Bulletin of Geological Science and Technology**, 2011, 30(4): 137-142.
- [145] 张宇, 余飞, 陈善雄, 等. CAS-1 模拟月壤动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 74-82.
- ZHANG Yu, YU Fei, CHEN Shan-xiong, et al. Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio of CAS-1 lunar soil simulant[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 74-82.
- [146] 郑永春, 王世杰, 冯俊明, 等. CAS-1 模拟月壤[J]. 矿物学报, 2007, 27(增刊 1): 571-578.
- ZHENG Yong-chun, WANG Shi-jie, FENG Jun-ming, et al. CAS-1 lunar soil simulant[J]. **Acta Mineralogica Sinica**, 2007, 27(Suppl.1): 571-578.
- [147] 王丽爽. 高温烧结与 SLM 成型 CLRS-1 模拟月壤及样品性能表征[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- WANG Li-shuang. High-temperature sintering and SLM molding CLRS-1 simulated lunar soil and characterizing the sample performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [148] LI Y Q, LIU J Z, YUE Z Y. NAO-1: Lunar highland soil simulant developed in China[J]. **Journal of Aerospace Engineering**, 2009, 22(1): 53-57.
- [149] 蒋明镜, 李立青. TJ-1 模拟月壤的研制[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 209-214.
- JIANG Ming-jing, LI Li-qing. Development of TJ-1 lunar soil simulant[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(2): 209.
- [150] 邹猛, 李建桥, 何玲, 等. 不同粒径分布模拟月壤承压

- 特性试验研究[J]. 航空学报, 2012, 33(12): 2338-2346.
- ZOU Meng, LI Jian-qiao, HE Lin, et al. Experimental study on the pressure-sinkage characteristic of the simulant lunar regolith with different particle size distributions[J]. **Acta Aeronautica et Astronautica Sinica**, 2012, 33(12): 2338-2346.
- [151] SUN X, ZHANG R, LI X, et al. JLU-H: a novel lunar highland regolith simulant for use in large-scale engineering experiments[J]. **Planetary and Space Science**, 2022, 221: 105562.
- [152] LI C Y, XIE K Y, LIU A M, et al. The preparation and characterization of NEU-1 lunar soil simulants[J]. **Journal of the Minerals Metals & Materials Society**, 2019, 71(4): 1471-1476.
- [153] ZHOU S, LU C, ZHU X, et al. Preparation and characterization of high-strength geopolymer based on BH-1 lunar soil simulant with low alkali content[J]. **Engineering**, 2021, 7(11): 1631-1645.
- [154] ZHOU S, YANG Z, ZHANG R, et al. Preparation and evaluation of geopolymer based on BH-2 lunar regolith simulant under lunar surface temperature and vacuum condition[J]. **Acta Astronautica**, 2021, 189: 90-98.
- [155] LI R, ZHOU G, YAN K, et al. Preparation and characterization of a specialized lunar regolith simulant for use in lunar low gravity simulation[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2022, 32(1): 1-15.
- [156] HAN W B, DING L Y, CAI L X, et al. Sintering of HUST-1 lunar regolith simulant[J]. **Construction and Building Materials**, 2022, 324: 126655.
- [157] 周宁希, 陈健, 黄珏皓, 等. 磁性高钛模拟月壤 IRSM-1 的研制及其性质研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(增刊 1): 110-113.
- ZHOU Ning-xi, CHEN Jian, HUANG Jue-hao, et al. Development and properties of a magnetic high-titanium lunar regolith simulant IRSM-1[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2023, 45(Suppl.1): 110-113.
- [158] WANG R, QIAO G, SONG G. Additive manufacturing by laser powder bed fusion and thermal post-treatment of the lunar-regolith-based glass-ceramics for in-situ resource utilization[J]. **Construction and Building Materials**, 2023, 392: 132051.
- [159] MCKAY D S, CARTER J L, BOLES W W, et al. JSC-1: A new lunar regolith simulant[C]//Lunar and Planetary Science Conference. [S. l.]: [s. n.], 1993.
- [160] HILL E, PATCHEN A, TAYLOR L, et al. Quantitative characterization of JSC-1 and MLS-1 lunar soil simulants[C]//Proceedings of 68th Annual Meeting of the Meteoritical Society. [S. l.]: [s. n.], 2005.
- [161] RYU B H, WANG C C, CHANG I. Development and geotechnical engineering properties of KLS-1 lunar simulant[J]. **Journal of Aerospace Engineering**, 2018, 31(1): 04017083.
- [162] KANAMORI H, UDAGAWA S, YOSHIDA T, et al. Properties of lunar soil simulant manufactured in Japan[C]//Space 98. [S. l.]: [s. n.], 1998.
- [163] ZENG X, LI X, WANG S, et al. JMSS-1: a new Martian soil simulant[J]. **Earth, Planets and Space**, 2015, 67(1): 72.
- [164] GUAN J Z, LIU A M, XIE K Y, et al. Preparation and characterization of Martian soil simulant NEU Mars-1[J]. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 2020, 30(1): 212-222.
- [165] ALLEN C C, JAGER K M, MORRIS R V, et al. JSC MARS-1: a Martian soil simulant[C]//Space 98. [S. l.]: [s. n.], 1998.
- [166] PETERS G H, ABBEY W, BEARMAN G H, et al. Mojave Mars simulant—characterization of a new geologic Mars analog[J]. **Icarus**, 2008, 197(2): 470-479.
- [167] FARRIES K W, VISINTIN P, SMITH S T, et al. Sintered or melted regolith for lunar construction: state-of-the-art review and future research directions[J]. **Construction and Building Materials**, 2021, 296: 123627.
- [168] KRISHNA BALLA V, ROBERSON L B, O'CONNOR G W, et al. First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts[J]. **Rapid Prototyping Journal**, 2012, 18(6): 451-457.
- [169] GUALTIERI T, BANDYOPADHYAY A. Compressive deformation of porous lunar regolith[J]. **Materials Letters**, 2015, 143: 276-278.
- [170] GHOLAMI S, ZHANG X, KIM Y J, et al. Hybrid microwave sintering of a lunar soil simulant: Effects of processing parameters on microstructure characteristics and mechanical properties[J]. **Materials & Design**, 2022, 220: 110878.
- [171] WARREN P, RAJU N, EBRAHIMI H, et al. Effect of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of molded Martian and Lunar regolith[J].

- Ceramics International**, 2022, 48(23): 35825-35833.
- [172] BARMATZ M, STEINFELD D, WINTERHALTER D, et al. Microwave heating studies and instrumentation for processing lunar regolith and simulants[C]//44th Lunar and Planetary Science Conference. [S. l.]: [s. n.], 2013.
- [173] GRACIA V, CASANOVA I. Sulfur concrete: a viable alternative for lunar construction[C]//Space 98. New Mexico: [s. n.], 1998.
- [174] DAVIS G, MONTES C, EKLUND S. Preparation of lunar regolith based geopolymer cement under heat and vacuum[J]. **Advances in Space Research**, 2017, 59(7): 1872-1885.
- [175] MONTES C, BROUSSARD K, GONGRE M, et al. Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration applications[J]. **Advances in Space Research**, 2015, 56(6): 1212-1221.
- [176] ZHANG R R, ZHOU S Q, LI F. Preparation of geopolymer based on lunar regolith simulant at in-situ lunar temperature and its durability under lunar high and cryogenic temperature[J]. **Construction and Building Materials**, 2022, 318: 126033.
- [177] ROBERTS A D, WHITTALL D R, BREITLING R, et al. Blood, sweat and tears: extraterrestrial regolith biocomposites with in vivo binders[J]. **Materials Today Bio**, 2021(12): 100136.
- [178] SHIWEI N, DRITSAS S, FERNANDEZ J G. Martian biolith: A bioinspired regolith composite for closed-loop extraterrestrial manufacturing[J]. **Plos One**, 2020, 15(9): e0238606.
- [179] PILEHVAR S, ARNHOF M, PAMIES R, et al. Utilization of urea as an accessible superplasticizer on the moon for lunar geopolymer mixtures[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2020, 247: 119177.
- [180] 周思齐, 张荣荣, 杨湛宁, 等. 3D 打印模拟月壤道路材料制备与性能研究[J]. **中国公路学报**, 2022, 35(8): 105-117.
- ZHOU Si-qi, ZHANG Rong-rong, YANG Zhan-ning, et al. Preparation and performance evaluation on 3D printed road material based on lunar soil simulant[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2022, 35(8): 105-117.
- [181] 杨孟飞, 邹志刚, 汪卫华, 等. 月球资源开发利用的进展与展望[J]. **中国空间科学技术**, 2024, 44(1): 1-10.
- YANG Meng-fei, ZOU Zhi-gang, WANG Wei-hua, et al. Progress and prospect of lunar resources exploitation and utilization[J]. **Chinese Space Science and Technology**, 2024, 44(1): 1-10.
- [182] 王超, 张光, 吕晓辰, 等. 模拟月壤激光熔融成型工艺参数试验初探[J]. **航天器环境工程**, 2021, 38(5): 575-580.
- WANG Chao, ZHANG Guang, LÜ Xiao-chen, et al. Experimental study of the parameters of laser melting molding process with regard to simulated lunar soil[J]. **Spacecraft Environment Engineering**, 2021, 38(5): 575-580.
- [183] 蒋明镜, 张鑫蕊, 司马军, 等. 壤基材料加筋月壤技术在月球基地建设中的应用[J]. **苏州科技大学学报(自然科学版)**, 2023, 40(3): 11-20, 53.
- JIANG Ming-jing, ZHANG Xin-rui, SIMA Jun, et al. Future application of lunar-textile composite/reinforced regolith to the construction of lunar bases[J]. **Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2023, 40(3): 11-20, 53.
- [184] 邢丹, 蒯雄宇, 郭泽世, 等. 模拟月壤制备连续纤维的可行性研究[J]. **中国科学: 技术科学**, 2020, 50(12): 1625-1633.
- XING Dan, XI Xiong-yu, GUO Ze-shi, et al. Study on the feasibility of preparing a continuous fibre using lunar soil simulant[J]. **Scientia Sinica (Technologica)**, 2020, 50(12): 1625-1633.
- [185] HECHT M, HOFFMAN J, RAPP D, et al. Mars oxygen ISRU experiment (MOXIE)[J]. **Space Science Reviews**, 2021, 217(1): 9.