

•科学前沿•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400130



本刊网刊

深空资源原位利用技术研究发展综述

奚邦禄¹, 祁麟¹, 蒋明镜^{2*}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要:随着人类深空探测活动从短期探索向长期可持续方向发展,深空资源原位利用(ISRU)已成为降低探测成本、实现可持续深空探索的关键。深空环境中蕴藏丰富的水冰、氦-3、金属与非金属矿物、太阳能等资源,能够为生命维持、能源供应、材料建造等任务提供重要支持。然而,深空极端环境(如高真空、极端温度、微重力、强辐射等),以及星壤特殊的力学与矿物特性,使得资源开采、原位转化与工程建设面临机理复杂、技术可行性低、装备适应性差等挑战。现有地面资源开采理论与技术难以直接应用于深空,亟需发展面向深空特殊环境与资源特征的原位利用理论与方法。本文围绕深空资源原位利用的技术体系,从资源表征与映射、原位消耗品生产、土木工程建设、能源生产与存储、环境资源利用及 ISRU 模拟现场试验 6 个方面,系统梳理国内外研究进展。其中,美国 NASA 凭借阿波罗计划积累的丰富样品与先进探测技术,在深层资源表征与映射、原位资源获取、原位消耗品生产及能源生产与存储等方面,形成了较为成熟的技术体系与试验设备,占据先发优势。而后,探讨了深空资源原位利用仍面临的诸多科学问题与技术挑战,如深空复杂环境下资源精准勘探、规模化开采与高效转化技术不成熟,月球/火星基地量化设计缺失,能源生产与存储系统缺乏工程验证等。最后,明确了未来该领域将朝着智能化勘探、高效化转化、工程化应用的方向发展。本文综述国内外相关技术发展现状,重点解析 NASA 的成熟技术与设备,探讨现存问题与发展趋势,旨在为中国深空资源原位利用技术的研发与突破提供重要参考,助力中国深空探测实现可持续、可负担的高质量发展。

关键词:深空资源;原位资源利用;月球基地;月壤

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)02-0001-22

自 19 世纪 60 年代以来,人类经过长期、广泛的太空探索,对宇宙的认识有了长足的发展,其中,NASA 的 New Horizons 探测器飞越冥王星,穿行柯伊伯带,飞离太阳系,开始探测太阳系外的未知世界。当前,深空探测所需物质、能源均从地球携带发射,而运输至月球或火星 1.0 kg 的物质,在地球上发射时需要至少 7.5 kg 的物质(多数为推进剂)^[1],且发射成本随着携带物质质量的增加呈指数型增长^[2],使得当前深空探测成本极其昂贵,难以持续探测。因此,NASA 自 2004 年 1 月颁布太空探索新愿景(VES)以来^[1],重点开展可持续、可负担(sustainable and affordable)的深空探测,其关键在于定位、提取并利用太空中存在的能源与资源,将其转换为深空探测或基地建设等任务中所需要的关键能源与产

品,最大程度地降低探测任务对地球资源的依赖,从而降低深空探测成本,即深空资源原位利用(ISRU, *in-situ resource utilization*)^[1]。此后,国内外航天机构都在布局开展深空资源原位利用的技术研究,如:2005 年,NASA 在“探测技术与开发计划(ETDP)”^[3]中将月球资源原位利用列为 12 项关键技术之一;2007 年,日本宇宙航空研究开发机构的“月亮女神计划”,开展了月球资源原位利用技术和验证研究项目^[4];2019 年,俄罗斯航天局的“月球-全球计划”提出开展月球内部构造及月球资源原位利用等研究^[5];2021 年,欧洲空间局的“空间资源战略”白皮书公布了月壤深层钻取、原位运输、再加工等系列研究任务^[6];随着中国月球探测计划及相关工程科学活动的实施,《2021 中国的航天》公布了空间资源原位利用

收稿日期:2024-02-26 修回日期:2024-09-21 网络出版日期:2024-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(52209127);中央高校基本科研业务费(JZ2024HGTD0206)

作者简介:奚邦禄(1991—),男,副教授,博士。研究方向:月球岩土工程。E-mail: xibanglu@126.com

*通信作者:蒋明镜,教授, E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

技术、月球科研站建设等任务。

已有深空原位资源包括水、太阳风注入的挥发物(富含氢、氦、碳、氮等物质)、太空土壤中富有的金属和矿物、大气成分、无限太阳能、永昼/夜、低重力和高真空环境等深空自然资源及人类深空探测活动的废弃物和残余硬件等废弃资源^[1]。相比于从地球发射时携带一切必需物质,从深空资源中生产的必需产品和能源或重复利用早期探测活动中丢弃设备(月球车、探测器等)可以显著降低发射成本和安全风险,提升深空探测效率。因此,通过 ISRU 可以很大程度上减小人类往返月球和火星的直接费用,实现建立月球基地、

扩大深空科学和探索工作、深空探测商业化的最终目标。相比于美国 20 世纪 60 年代开始月球基地建设、月壤开采等深空资源原位利用技术研究,中国深空资源原位利用技术研究起步较晚,进展较为滞后。为此,本文综述了国内外深空资源原位利用技术发展现状,依据 NASA 研究中 ISRU 循环过程^[3],从资源表征与映射、原位生产、土木工程建造、能源生产与存储和原位环境资源利用 5 个步骤进行详细介绍如图 1 所示;而后,介绍 NASA 利用开发较成熟的一系列技术和设备开展模拟现场试验的主要成果,以为中国深空原位资源利用技术的发展提供参考。

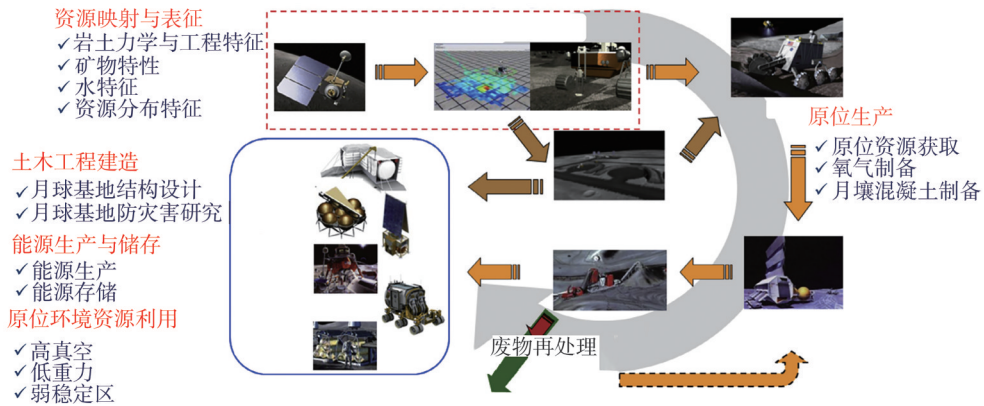


图 1 ISRU 循环^[3]

Fig. 1 ISRU cycle^[3]

1 资源表征与映射

在利用深空原位资源前,首先需要原位资源的特征及分布进行研究,包括其物理、矿物、化学性质,加热过程中可能释放的挥发性或分解物质及其所在位置、环境等。仅当对原位资源的特征及分布研究清楚后,才能对深空资源利用的开发方法及效益进行评估。随着深空资源勘探技术的快速发展^[7],国内外学者详细研究了深空原位资源的特征及分布。

1.1 岩土体力学与工程特征

天体表面岩土体是深空资源的主要载体,受天体特殊环境影响,呈现不同特征形式,如月表干燥月壤层可形成稳定的沟槽(图 2(a))^[8]、火星表面呈现碎石凸起或 Polygon 特征(图 2(b)、(c))^[9]、碎石类小行星表面的碎石堆^[10]。对于外星体岩土体力学特性,早在阿波罗计划时期,国内外学者针对月壤的岩土工程特性进行了原位静力触探试验、沟槽试验,以及月壤取回试样微型三轴、直剪等试验,探明了月壤的力学特性^[11-13],研究发现月面高真空、高温差环境会增大月壤内摩擦角,使得干燥月壤表现有黏聚力^[14-16]。Nie 等^[17]基于嫦娥 5 号月壤单颗粒特征(摩擦系数、杨氏模量等)预测其残余内摩擦角。随着发现月球水冰存在的证据,已有研究进

一步探讨水冰对月壤特性的影响,发现单轴压缩试验中含冰月壤呈脆性破坏,与传统意义上的冻土破坏具有显著差异^[18],且其强度随着含冰量增加^[19]、温度降低、干密度增加^[20]而逐渐提高。目前,关于真实月岩强度测试的报道相对较少,大多采用地球相似岩石开展试验,测试其动态抗拉强度^[21]及月表高真空^[22]和极端温差环境^[23]对其的影响规律。结果表明:高温作用后,真空中月岩弹性模量比大气环境中降约 15.0%,而强度提升约 22.5%^[24];随着温度从 -120 °C 增加至 200 °C,岩石单轴抗压强度从约 310 迅速下降至约 220 MPa^[22]。火壤方面,美国 Viking^[24]、Pathfinder^[25]、Spirit^[26]、Opportunity^[27]等和中国祝融号^[28]火星车通过车轮滚动前进的图像分析^[29],对火星土壤的力学特性进行初步分析;Peters 等^[30]基于火星岩石钻样数据推算火星岩石强度,发现盖尔撞击坑附近岩石的强度最小为 1.5~5.0 MPa,最大为 15.0~30.0 MPa。此外,有学者通过小行星天体的热传导遥感^[31]或样品测试^[32-33]及现场原位冲击试验^[34]分析总结了小行星天体土壤的力学特性。表 1 汇总了目前研究中月壤、火壤及部分小行星土壤的基本力学特性。土壤工程特性方面,由于月面和地面环境的差异及原位试验的昂贵成本,现有研究大多先在地面环境下针对月壤及其模拟材料开展试验研究(静力触

探试验^[35]、静载荷试验^[36]、月球车行驶试验^[37]等),探究月壤在地面环境下的工程特性;而后,通过数值模拟或月面环境模拟等特殊手段,揭示月面环境的影响规律,如月面低重力环境和高真空对基坑开挖^[38]、月球车行驶^[39]、静力触探^[40]、静载荷^[41]等试验的影响规律;最后,结合未来月壤取样、原位试验结果等手段进一步验证已有研究成果的可靠性^[42]。

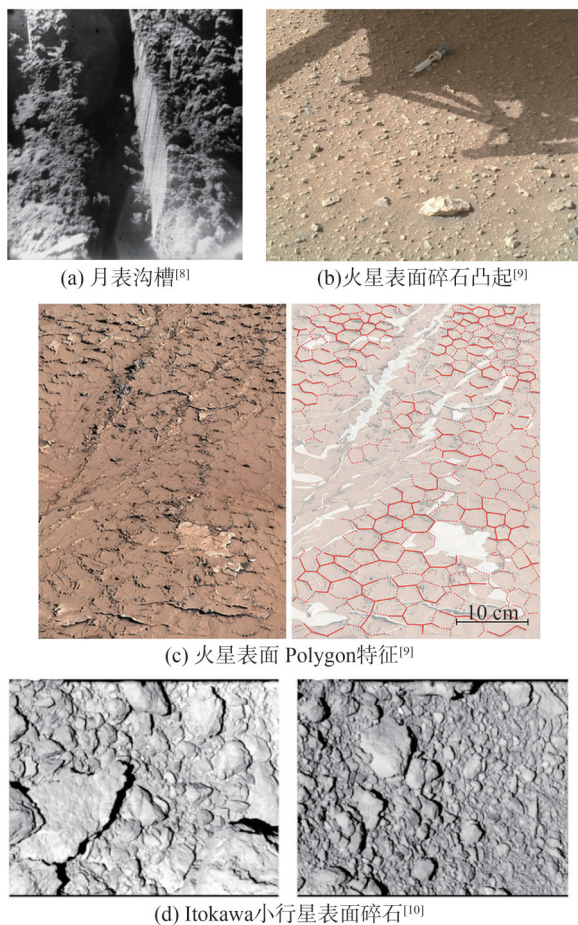


图 2 外星体表层特征

Fig. 2 Extraterrestrial surface characteristics

表 1 各天体土壤力学特性

Tab. 1 Mechanical behaviors of extraterrestrial soil

| 参数 | 内摩擦角/(°) | 黏聚力/kPa |
|-----------------------------|---------------------------|--|
| 月壤 ^[7-9] | 25.0~50.0 | 0.260~1.800 |
| 火星土壤 ^[21-25] | 15.6~39.6 | 0~6.000 |
| 近地小行星 29075 ^[27] | — | 0.024~0.088 |
| Itokawa 小行星 ^[28] | 约 40.0 | — |
| Bennu 小行星 | 15.0~47.0 ^[24] | 0~1 000.000 ^[27] 或 ≤0.002 ^[30] |

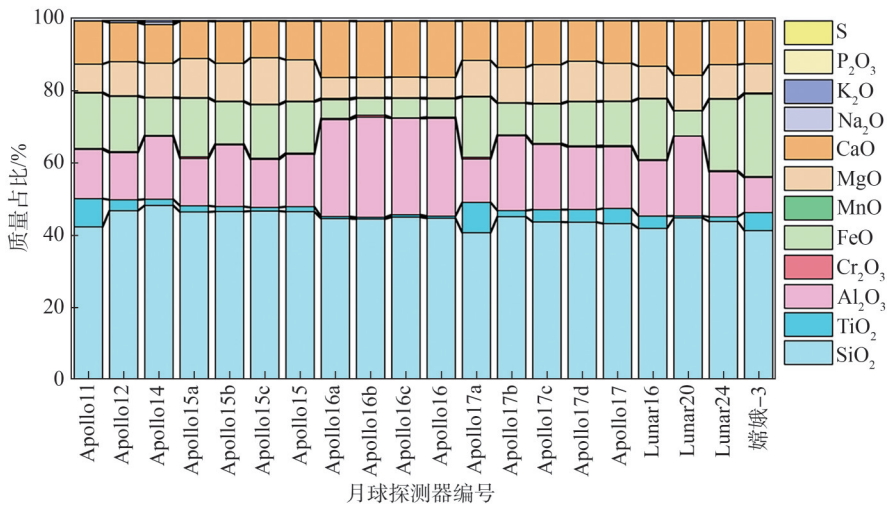
综上所述,在深空岩土体力学与工程特性研究中,对于月壤的研究较为丰富,详细探讨了月面高真空、高温差、含冰量等赋存环境的影响规律,然而月球南极地区超真空、低重力、极端温度和冰效应耦合作

用下月壤宏观力学特性和微观结构,以及实际工程利用(如冰开采、基地建设、运输)中月壤与人工设备间的相互作用尚需进一步研究。此外,受限于探测难度及目前研究成果,针对火壤、星壤力学与工程特性的研究相对较少。

1.2 岩土体矿物特性

阿波罗计划期间对月岩和月壤矿物成分有较为成熟的认识。月岩根据其成因和成分可分为月海玄武岩、克里普岩、高地岩石和角砾岩^[11,13]。其中:月海玄武岩主要包括辉石、富镁橄榄石、富钙长石;克里普岩主要由斜长石、辉石、二氧化硅矿玻璃基质等组成(本质上属于月海玄武岩,但包含有K、P、REE和Th、U等不相容元素);高地岩石分为斜长岩和富镁结晶套岩(斜长石、橄榄石、尖晶石)两类;角砾岩由不同区域、不同岩床的矿物和撞击体物质在撞击作用下混合而成。月壤主要包括玻璃态的硅酸盐及各种岩石和矿物碎片,其成分范围从玄武岩到斜长岩,并包含少量陨石(质量分数<2%)^[11,13],主要由SiO₂、Al₂O₃、FeO、TiO₂、MgO和CaO这6种氧化物构成。由于月海与高地存在地质差异,TiO₂质量分数波动较大(图3)^[43]。中国学者在嫦娥5号月壤样品中首次发现新矿物——嫦娥石^[44]。嫦娥6号获取的月球背面月壤样品中铝氧化物和钙氧化物含量较高,铁氧化物含量相对较低,与阿波罗计划中的月海玄武岩和斜长岩混合物的特征一致;但样品中的钍、铀和钾等微量元素含量显著低于kREEP玄武岩^[45]。火星土壤(NASA的Curiosity号样品)分析结果表明,其矿物成分与夏威夷火山地区风化玄武岩土壤类似,含有大量的长石、辉石和橄榄石^[46];火星探测器Pathfinder号和Viking号的APXS(Alpha proton X-ray spectrometer)分析结果表明火星土壤以SiO₂(质量占比分别为48.6%和43.4%)和Fe₂O₃(质量占比分别为17.5%和18.2%)为主^[47]。对于小行星矿物成分,反射光谱分析可初步验证其典型矿物成分,如:Yamato793321小行星矿物成分与含水碳质球粒陨石相近^[48];日本对Itokawa小行星取回的样品分析结果表明,其星壤矿物成分主要包括橄榄石(质量占比为67%)、单斜辉石(质量占比为18%)、斜长石(质量占比为9%)、斜方辉石(质量占比为2%)^[32]。

目前,针对月壤矿物成分的研究较为丰富,尤其是阿波罗计划和嫦娥5号的月壤样品,充分揭示了月球正面月壤的矿物特性;嫦娥6号样品分析进一步揭示了月球背面月壤矿物特性。然而,受限于探测难度及样品稀缺性,针对火壤、星壤样品矿物成分的分析尚需更多研究。

图3 月壤矿物成分^[43]Fig. 3 Mineral composition of lunar soil^[43]

1.3 水特征

月球上是否存在水冰一直是月球探测的热点问题^[49]。目前,证明月球存在水冰的研究多根据雷达探测^[50]、中子探测仪^[51]、光谱仪探测^[52]、红外观测结果^[53]进行推断,如:2018年,NASA基于Chandrayaan-1上搭载的M3数据证明月球两极表面有水,并给出了具体的范围(图4(a))^[54],表明月球水冰主要分布在两极地区,且南极比北极更集中,部分地区含冰量高达30%,总含量可达 10^{11} kg^[55],甚至 10^{12} kg^[56]。Brown等^[57]总结了65个永久阴影区的观测数据,推算出Cabeus、Shoemaker、Faustinite等5个地区水冰的潜在含量达数万吨。月球上的水冰可能是由含水陨石或彗星撞击月球后,水分逐渐向两极迁移、富集形成的^[58-60]。研究表明,月壤水冰主要有结构水、吸附水和冰水3种形式^[61-62]。Cannon等^[63-64]进一步将水冰划分为冰层与月壤、冰块与月壤、冰粒与月壤混合3大类,以及离散冰粒、连续覆盖冰、角砾冰等多种类型。但目前尚无直接证据表明月球存在水冰,也有学者认为探测结果可能是由探测位置的坡度和粗糙度导致的,因而对水冰的存在提出质疑,确切结论尚需开展水冰原位探测、采集含水月壤确定^[49]。对于火星,已有研究确定了火星表面存在水冰(图4(b))^[65],主要以地下冰层、极地冰盖和冰下湖泊等形式存在^[56,66]。地下冰层覆盖了火星1/3浅层地下,稳定存在于 40° 以上中高纬度地区地表以下^[67];极地冰盖由多个大型冰体组成,如北极冰盖直径最大达1 100.0 km,厚约2.5 km^[68-69];Orosei^[70]和Lauro^[71]等根据雷达信号推测在火星南极Ultimi Scopuli区下方可能存在约20 km宽的液态水层,这可能是局部地热导致温度升高、基底融化而引起的^[72]。

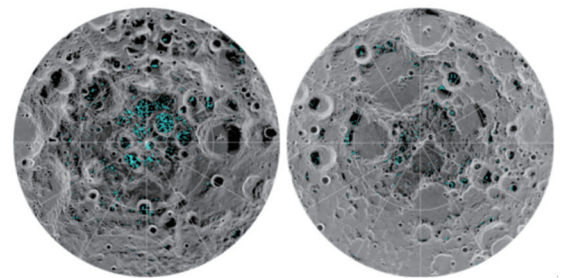
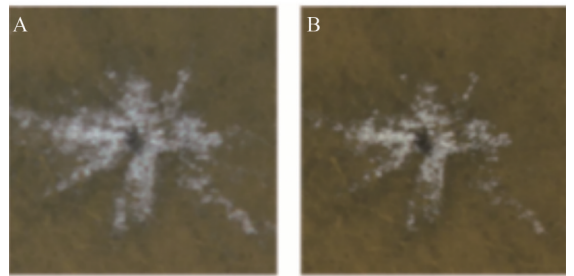
(a)月球上水冰分布^[54](b)火星上水冰^[65]

图4 月球和火星上的水特征

Fig. 4 Water characteristics on the Moon and Mars

近年来,月球与火星水冰研究逐渐深入,针对月球/火星上水冰的赋存形式、分布特征及资源含量等均取得很大的研究进展。然而,目前对水冰的研究手段主要是遥感影像,需要更全面、更高精度的形貌数据进行分析;同时,还需结合现场雷达、原位勘探等更多手段对月球和火星水冰资源的分布特征开展更系统全面的研究,如水冰随深度的赋存规律、复杂地形区分布特征等,为未来深空原位资源的原位利用提供数据支撑。

1.4 资源分布特征

表层土壤资源分布特征是开展ISRU的基础。高楠等^[73]系统总结了月面环境下可采用的矿产资源及其使用方式。已有研究多采用Kaguya高能分辨 γ 射线谱仪特征、月球探矿者伽马射线谱仪探测月球表面的

矿产资源分布(图5)。由图5(a)、(b)中Fe分布和TiO₂分布(红色表明含量多)可以发现,铁氧化物和二氧化钛(钛铁矿, FeTiO₃)主要集中在海拔较低的月海区^[74]。气体资源方面,可基于微波辐射计数据测得全月³He含量分布,如图5(c)所示,可知其最大估测储量达百万吨^[75];稀土元素、铀和钍元素等可通过伽马射线测得其主要储藏在克里普岩赋存区域,分布在月球西北近侧的风暴洋和雨海盆地地区^[76],如图5(d)所示。火星资源分布方面,赵健楠等^[77]综合火星各类可利用资源的分布情况,得到其资源分布特征如图6所示,可知大气资源主要分布于火星北部平原及南部高原内的大

型撞击盆地,风力资源主要分布于火星表面的斜坡区,水资源主要分布于火星中高纬度,含水矿物与橄榄石主要分布于南部高原,太阳能主要分布于火星赤道附近。

已有深空资源探索多依赖单一遥感数据,在资源高丰度区存在饱和问题,忽略了辐射、散射等遥感特征对全月不同类型资源分布、储量信息识别与反演的优势,制约了对月球和火星资源的精确综合勘查;且目前初步探明了月表部分主量元素分布,尚未获取月球稀缺金属、矿产资源分布数据。未来仍需发展高精度的资源定量遥感分析,以及功能更为全面的无人勘探车等技术。

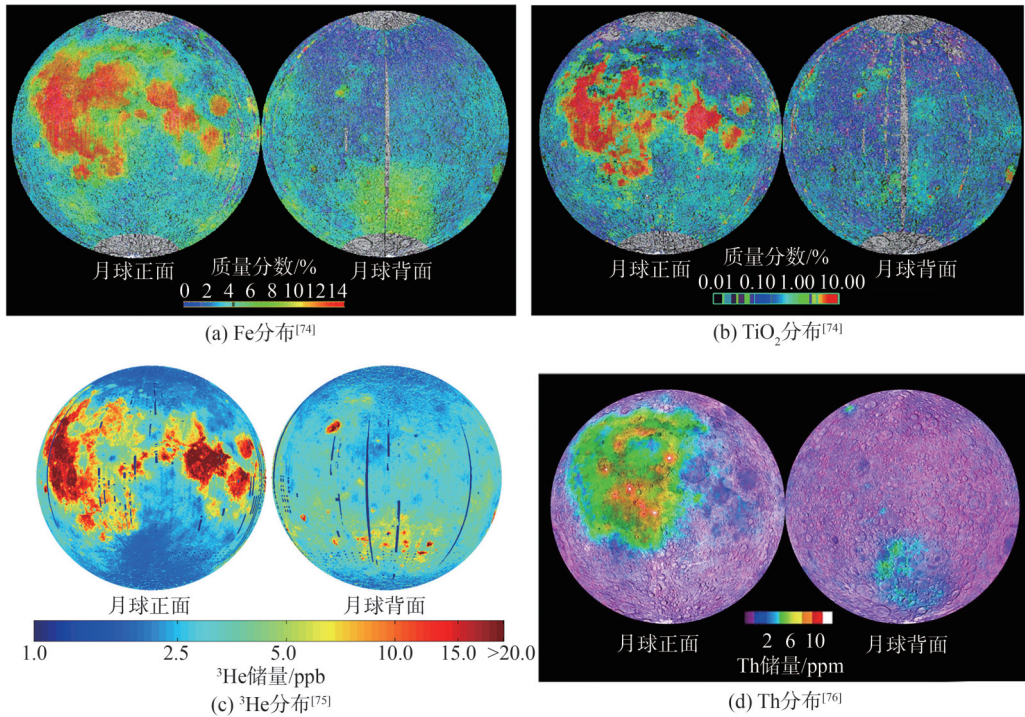


图5 月表资源分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of lunar resources

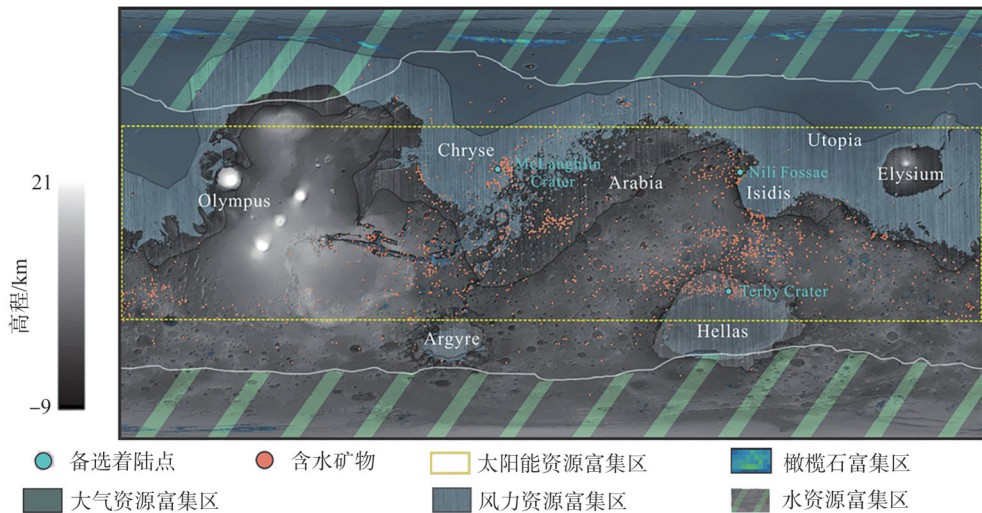


图6 火星资源分布特征^[77]

Fig. 6 Distribution characteristics of martian resource^[77]

综上所述,深空外天体中赋存有大量的水冰、 ^3He 、金属和非金属、太阳能等各种资源,可为生命维持、动力推进、食品生产和制造等人类活动提供支撑。然而,受限于目前的探测方式、样品数量等,现有针对深空资源分布特征与储量及赋存环境、地形地貌等的研究仍具有一定的不确定性。此外,未来深空原位资源利用研究可能针对人类并未详细研究过的外天体开展,因此,在开展深空原位资源利用之前,尚需集成地球地质勘探、地球物理勘探、遥感技术、矿产勘探等,研发无人智能勘探机器人开展前驱任务。该自动勘探机器人应具备准确判断目标天体中可利用资源的种类、赋存形式、赋存环境、岩土体特征的功能,进而结合人工智能分析判别资源开采利用时会面临的挑战,如何优选合适的开采方法、设备等问题。

2 原位消耗品生产

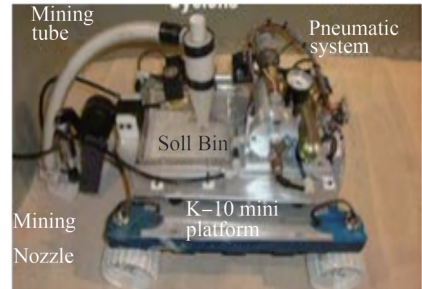
原位消耗品生产包括从原位资源中获取、提取和生产被“消耗”或用于推进、动力与生命支持、制造、建造等其他活动的产品。由于推进剂可占着陆器和化学推进运输元件质量的很大比例(通常为70%~90%)^[1],因此,运输元件、推进剂等原位生产一直是ISRU的发展重点。

2.1 原位资源获取

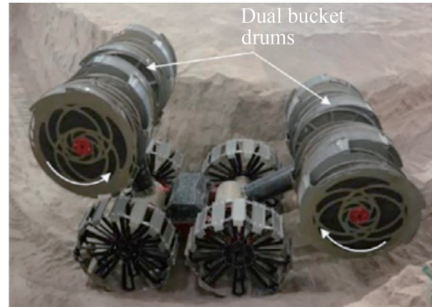
表层土壤是用于原位资源消耗品生产的首选原料,因此表层土壤的高效开挖/开采是深空资源原位利用所面临的实际问题。已有地球土壤大规模开挖/开采多采用抓取、铲挖等方式,对开挖设备质量依赖性较大^[78]。而月表高真空、低重力、高温差等复杂环境和月壤高摩擦、低黏聚力特性对月壤开挖设备提出较高要求。为提升月壤的开挖效率,降低运输至月球的开挖设备质量,国内外学者提出不同的改进铲挖方法和气动式开挖方式,如:采用振动/冲击式铲挖方式可降低开挖阻力^[79-80],提升开挖效率;研发改进开挖设备实现连续性开挖,如采用旋转铲斗铲挖^[81]、气动式开挖(利用月面真空环境和管道中气体将月壤吸入土槽箱中)^[82]、鼓式旋转开挖等^[83-84]设备,如图7所示。此外,通过飞机飞行^[85]、数值模拟^[86]等分析发现:月面高真空环境会放大月壤力学特性,增大月壤开采阻力;而低重力环境会降低月壤开采阻力。开挖阻力与重力场近似呈线性增加而非正比关系,据此可根据地面试验结果预测月面环境下的月壤开挖阻力。对于火星或小行星土壤,已有研究多针对土体的勘探、取样,火星土壤取样方法与月壤较为类似,多采用铲挖(如海盜1/2号^[87])、钻取(福布斯1/2号^[88])、综合型采样(Icy Soil Acquisition Device, 凤凰号^[89])等方式。星壤取样则采



(a) 旋转铲斗铲挖^[81]



(b) 气动式开挖^[82]



(c) 鼓式旋转开挖^[84]

图7 月壤开挖设备

Fig. 7 Lunar excavators

用触采式装备(Touch and Go, OSIRIS-Rex 任务^[90]、Hayabusa 2 任务^[91])。

已有研究大多针对月壤力学特性,以及月面高真空、低重力环境对开挖设备开挖效率的影响,并未考虑月壤/月尘和火星土壤颗粒吸附对开挖设备的磨损、月表高真空和火星低气压对设备运行性能影响、月面微陨石冲击和火星沙尘暴等灾害防护设计等问题^[83,92-93]。表2总结了月球和火星表面的恶劣环境及开挖设备尚需解决的关键挑战。

2.2 氧气制备

月球表面可用于提取氧气的原料主要包括可能存在的水冰和月壤。对于水冰,主要通过加热法获得水冰-月壤混合物中热可挥发气体,如水、氧气等物质,分离挥发性气体即可获得氧气,而后通过电解水进一步获得氧气和氢气^[74,94]。对于月壤矿物中存在的氧气,主要利用氢还原法^[95]、甲烷还原法^[96]、电解还原法^[97]、真空热解法^[98]获取。氢还原法主要利用氢气将月壤氧化铁成分中的氧气置换成水,再将水电解,如图8(a)所示,故氢还原法的生产效率较低且依赖于月

表 2 月球与火星环境差异及挑战^[83,92-93]

Tab. 2 Lunar and martian environmental differences and challenges^[83,92-93]

| 星体 | 土体颗粒 | 重力场 | 大气压/kPa | 温差/°C | 大气成分 | 岩土特性 | 与地球 运输、通讯 距离/(10 ⁴ km) | 操作 方式 | 爆炸效应 | 装备设计 | 其他 |
|----|-------------|----------------------|--|-------------|--|------------------------|---|--|----------------------|-----------------------------|--------------------|
| 月球 | 月壤/月尘 颗粒 | 1/6g | 3×10 ⁻¹³ | -171~111 | — | 高真空、水 冰、高温差 耦合效应 | 38.4 | 无人 操作 | 极端温 差、低重 力、缺氧 | 铲头磨 损、土层 粘连、密 封问题等 | 微陨石冲 击、太阳 风等 |
| 火星 | 火星尘埃磨 | 1/3g | 0.6 | -90~30 | 95.3%CO ₂ 、 2.7%N ₂ 、 0.1%O ₂ | 低气压、水 冰、低温耦 合效应 | ≥5 600.0 | 无人 操作 | 低温、 低重力、 缺氧 | — | 沙尘暴等 |
| 挑战 | 颗粒磨损 效应 | 牵引力降 低引发稳 定性问题 | 无法防止太 阳辐射,干扰 电子设备; 润滑剂挥发 引起润滑 问题,妨碍 零件工作 | 设备运行 稳定性 | | 含冰土体 强度高,挖 掘难度大 | 开采设备运输 限制、通讯滞 后 | 操作难 度大, 特别是 切屑清 除、钻 头降温 | 环境差异 导致爆炸 效应不同 | | 影响设备 正常工作 |

壤中氧化铁含量,但在低压、高温、小粒径月壤下的生产效率较大^[99-100]。目前,已研制出 PILOT 及 ROxygen 两套氢还原样机,用于搅拌、加热和还原月壤^[101-102],其外场模拟试验显示,氧提取效率约为 1%~2%^[103]。甲烷还原法与氢还原法类似,主要利用甲烷(可用碳、一氧化碳、氢气和一氧化碳混合物)与月壤中金属氧化物反应生成一氧化碳、氢气、水和二氧化碳,再利用氢气将一氧化碳和二氧化碳还原成水和甲烷,再电解水即可获得氧气和氢气。该方法中,当温度低于 1 100 °C 时,仅氧化铁可反应;当温度高于 1 200 °C 时,月壤中二氧化硅和二氧化钛均可被还原,而其余氧化物均不可被还原^[94],且温度越高反应速率越快^[104]。目前,NASA 委托 Orbitec 公司研制了一套碳热还原系统,氧提取效率约为 9.6%^[98]。直接电解法通过直接电解熔融月壤将氧气从金属氧化物中提取出来(图 8(b))。理论上,所有金属物均可被电解还原^[105],而室内试验发现对于月壤混合物,当电还原

进行到一定程度时,会形成尖晶石相,残余熔融月壤的黏度和液相线点增大,O₂无法继续提取^[106]。NASA 也资助了熔盐电解法制氧装置并对所用熔剂、电极、气体采集与分析、补给与出渣等方面开展了研究^[107-109]。真空热解法^[110]的依据是金属氧化物会在真空、高温环境下蒸发解离成亚氧化物、金属和氧气(图 8(c)),如 AlO、SiO 和 TiO^[105]。但生产的氧气会增加反应室的气压,需要被持续抽离^[94]以维持真空环境。NASA 委托乔治·华盛顿大学对真空热解法中压力、温度对模拟月壤质量损失、残余气体的影响进行了全面分析,但对于生成的气体未作分馏处理^[109]。

对于火星,其大气层由 95.3% 二氧化碳、2.7% 氮气、0.1% 氧气组成,可通过电解大气中二氧化碳生产氧气。NASA 研发的原位试验机 MOXIE 搭载“毅力号”火星车于 2021 年着陆火星,每小时成功生产 12 g 的氧气,纯度达 98% 以上^[111-112]。

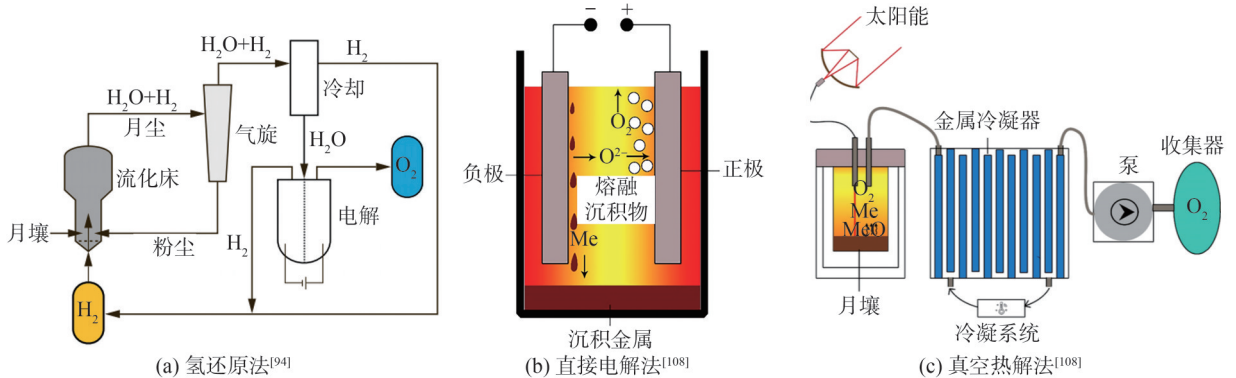


图 8 基于月壤的氧气制备方法

Fig. 8 Techniques of oxygen preparation from lunar regolith

氧气既是生命支持的消耗品,也是推进剂的氧化剂。为了实现可持续的月球任务,学者们提出在原地

提取 O₂ 的不同概念,见表 3。

由表 3 可知:使用氢气或甲烷在温度 1 000 °C 下仅

能还原沉积物中的氧化铁化合物, 即其产量取决于月壤铁丰度; 熔融月壤可以还原硅酸盐, 但需要考虑碳损失; 电解还原法和熔融盐电解法都面临阳电极腐蚀更换或惰性阳电极的问题; 氟化技术更侧重于金属提

取, 氧气仅是副产品; 真空热解法原则上只需要月壤和太阳能, 但存在持续抽离生产氧气及维持真空的难题; 火星上电二氧化碳法尚缺乏氧气液化、存储的系统。

表 3 月面氧气提取方法^[106-112]

Tab. 3 Oxygen extraction methods on the lunar surface^[106-112]

| 方法 | 条件 | 矿物 | 产物 | 反应效率 | 缺点 | 优点 |
|-----------------|--|--|---|---|------------------------------------|--------------------------|
| 氢气还原法 | 800~1 000 °C | 氧化铁矿物、 FeTiO ₃ | 水、Fe、TiO ₂ | 10~25 min(每 40 g)、 10 min(每 10 g) | 产量低, 依赖于 氧化铁含量 | 过程简单 |
| 甲烷还原法 | 800~1 100 °C (氧化铁)、 800~1 000 °C (SiO ₂ 和 TiO ₂) | SiO ₂ 和 TiO ₂ 、 氧化铁矿物 | CO、H ₂ 、H ₂ O、 CO ₂ | 分解率达 70%~ 100% 每小时 | 碳缺失(Fe ₃ C), 需再生产或运输 | 过程简单, 可用固体碳反应 |
| 甲烷还原法 (熔融月壤) | >1 625 °C | SiO ₂ 和 TiO ₂ 、 氧化铁 | CO、H ₂ 、H ₂ O、 CO ₂ 、O ₂ | 250 kg O ₂ (每年)、 10~20 kg O ₂ (每 100 kg 月壤) | 碳缺失(Fe ₃ C), 需再生产或运输 | 产量较高, 可生产金属 铁、硅、铜、铅和锌 |
| 氟化技术 | <70 °C | 氧化矿物 | O ₂ | | 需要持续生产 F ₂ | 化学反应快 |
| 电解还原法 | 1 600~2 000 °C, 电压>12 V | 月壤 | O ₂ | 125.7 g O ₂ (每 2.4 kg 月壤)、35 g O ₂ (每 100 g 月壤) | 阳极材料腐蚀, 需定期更换 | 无需添加物, 所有月壤均可反应 |
| 熔融盐电解 | 950~1 250 °C | 月壤 | O ₂ | | 电极腐蚀需更换, 盐蒸发需补充 | 可生产金属铝、锂、镁等 |
| 真空热解法 | <10 ⁻⁴ Pa, >1 000 °C | 月壤 | O ₂ | 0.05%~10.10% O ₂ 产量 | 产出氧气需不断抽走 以维持真空 | |
| 电二氧化碳 | 0.96~1.13 V | 火星大气 | O ₂ | 12 g/h | 尚缺乏氧气液化、 存储系统 | 无需土壤取样等操作 |

2.3 水资源开采

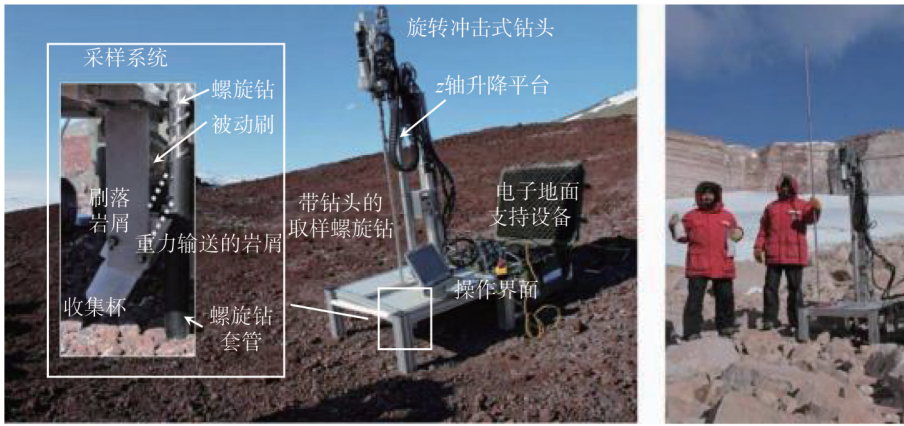
水资源的开采对于深空基地建立及人类地外探索极其重要。国内外学者提出多种水冰资源开采方案, 可分为钻取开采与原位开采两类^[113]。钻取开采法首先将水冰或含冰土壤开采运输至密封舱体, 而后对水冰或含冰月壤加热, 收集、冷凝水蒸气。如 Zacny 等^[114]提出的移动式原位水提取装置(MISWE, 图 9(a))、Wiens 等^[115]提出的传送带式水提取装置。原位开采法多通过在原位土体中安装热元件加热土层, 收集并储存挥发的水蒸气, 如 Sowers 等^[116]提出的帐篷式水资源提取方案、Wasilewski^[117]提出的钢缆式水采集系统和钱学森空间技术实验室^[118]的含冰土壤钻取密封与光热相变蒸发水冰提取一体化方法。其中: Zacny 等^[114]提出的 MISWE 样机仅需消耗 0.9 Whr/g 的能量即可收集土体中 92% 的含水量; 钱学森空间技术实验室^[118]搭建的一体化原理样机搭载低温真空环境模拟平台(图 9(b))可实现含冰土壤的低功耗钻取, 土壤输运速率 > 1.7 kg/h, 功耗 < 100 W, 水资源获取速率达 26.6 g/h, 氢氧分解的总气体产率达 12.6 g/h。

目前, 深空水资源开采方法在室内试验和地面模拟测试中均取得良好的试验效果, 验证了深空环境中水冰资源开采的可行性。然而, 未来面对深空月面高真空与极低温、火星低气压与低温等复杂环境中应用

时, 仍需完成一系列技术突破, 包括水冰原位封存、低能耗提取等, 尤其是水资源规模化提取方案及水冰分解后的灾害防控论证尤为重要。

2.4 混凝土制备

月壤混凝土是未来建造月球基地的消耗性材料, 由于月球表面水冰的存在尚未明确, 当前对于月壤混凝土的研究主要针对无水月壤混凝土的制备, 可分为高温熔融月壤混凝土和水替代物月壤混凝土两大类。高温熔融月壤混凝土是利用微波^[119]、激光^[120]、电热组元件^[121]和聚焦太阳光^[122]等方式获得超高温(1 500 °C)将月壤融化、冷却后形成的混凝土材料, 强度可达 100 MPa^[121]; 水替代物月壤混凝土采用月壤中可提取的硫磺^[123-124]、地球上运输的高分子聚合物^[125-126]或地聚物水泥^[127]代替常规混凝土中的水和水泥, 在高温下(150 °C)融化进而胶结月壤颗粒形成混凝土材料, 其中, 硫磺-月壤混凝土的抗压强度约为 35 MPa^[123], 聚乙烯-月壤混凝土的抗压强度约为 10 MPa^[125], 铝酸钙混凝土抗压强度约为 69~120 MPa^[128]。此外, 还探究了月面高真空、高温差循环变化等月面环境对无水混凝土的劣化影响, 如图 10 所示, 发现模拟月壤的矿物成分(DNA、JSC-1A)、级配、真空环境等均对无水混凝土的强度特性具有显著影响。Bao 等^[129]对原位材料比、固化温度、时间、实施条件、抗压强度、抗拉强度、



(a) MISWE样机^[114]



(b) 低温真空环境模拟试验平台^[118]

图 9 月壤中水开采装置

Fig. 9 Water extraction device from lunar regolith

固化尺寸和环境适应性 8 个关键指标进行评估后认为风土袋装由于其原位材料比高、时间要求低、没有高温要求、快速和大规模施工、缺点最少(只有抗压强度低于中性分数)而成为一种最有前途的应用方案。以上制备月壤混凝土的技术同样适用于火星混凝土制备^[130]。如:Kading 等^[131]提出使用沉积熔融玄武岩制造火星基地,但火星土壤在 1 350 °C左右才开始融化,高于月壤的 1 100 °C。Barkatt 等^[132]认为火星适用硫磺混凝土,并提出利用火星壤中的硫化物和硫酸盐、大气中的二氧化碳生产硫磺的试验方法。

已有混凝土固化技术中,水替代物月壤混凝土和风土袋装需要额外添加剂或辅助材料,从地球上大量运输这些添加剂或辅助材料的成本过于昂贵,并不适用于早期月球基地建设。而高温熔融月壤混凝土不需要附加剂,且可以使用月面丰富的太阳能等能源资源,是早期月球基地建设的可行性方案。然而,已有研究仅从概念或室内试验方面完成了月壤混凝土的固

化研究,尚未将月面复杂环境和月壤特性对固化设备运维的影响考虑在内。表 2 中列举的开挖设备在月球和火星环境下开采时所面临的关键挑战,对原位混凝土固化设备同样存在。

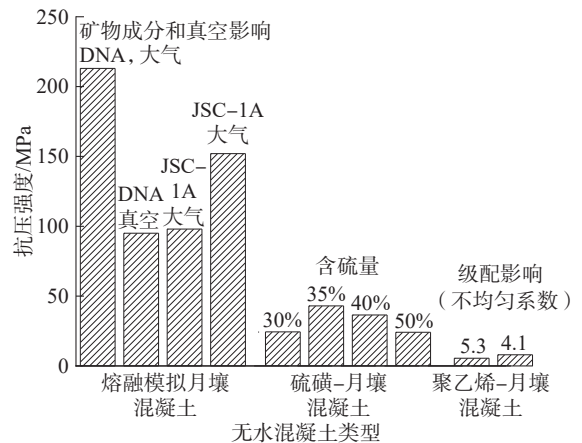


图 10 不同方法制备月壤混凝土抗压强度^[121,123-124]

Fig. 10 Compressive strength of lunar concrete prepared by different methods^[121,123-124]

综上所述,目前有较丰富的深空资源开采与利用方法,但距离实现原位深空资源利用,尚有大量技术难题有待解决,包括深空环境下大规模土壤和岩石开采、收集和运输,深空资源规模化、可持续化生产,原位生产产品性能保障等一系列问题。未来可结合最新开采工艺(如原位流态化开采、人工智能)研究深空环境下月壤/火壤的规模化无人开采技术,集勘探、开采、生产、存储、运输一体的智能机器人设计理论;研发深空原位资源高效、高质生产理论、技术和装备体系。

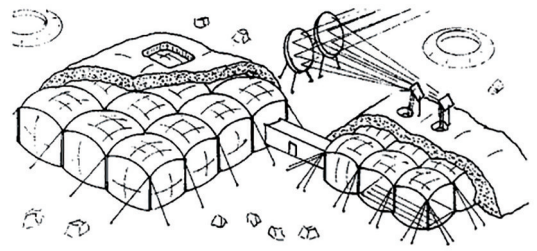
3 土木工程建设

当前深空探测中的土木工程建造侧重于月球或火星基地的建设,尤其是月球基地的建设已成为 21 世纪世界各国深空探测的首要目标。

3.1 混凝土制备基地结构设计

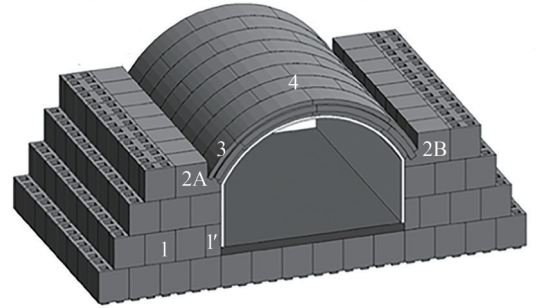
自 1963 年美国 Department of Army 提出 Boeing 式月球基地后,国内外学者陆续提出可充气式、装配式、混凝土式和熔岩管道式月球基地^[78,133]。可充气式月球基地(图 11(a))主要由纤维复合材料^[134]或填满结构性泡沫^[135]的双层膜构成,外部覆盖月壤作为防辐射材料,其优势在于成本较为低廉,可通过充气展开方式简单快速建设^[78]。装配式月球基地采用不同几何结构的八角形或空间单元组成,各单元共同组成月球基地^[136],每个单元可在地球组装后软着陆到月球进行装配即可建设完成^[78]。混凝土月球基地主要采用无水月壤混凝土建造月球基地,可采用机器人组装^[137](图 11(b))、3D 打印^[122]等方式,且可建设于地下以防止月面高辐射、高温差和陨石冲击等灾害的影响^[138]。熔岩管道式月球基地利用月球表面熔岩管道作为月球基地的建设地点^[139-141],其优势在于无需大量月壤开挖等工作,是目前月球基地建设的理想位置。火星是目前为止太阳系中与地球环境最相似的星球,被认为是人类移民的理想目的地,国外已经提出 Mars Homestead Project^[142]、Mars Science City^[143]等火星基地概念。从结构上看,基地大多采用火壤混凝土建造,可分为地上式^[142-143]和地上地下结合式^[144-145]两类。Kading 等^[131]建议采用 3D 打印的三角形混凝土薄板拼装成圆顶结构(Ag-dome 结构,图 12(a));赵嘉成等^[130]提出采用充气气囊、碳纤维骨架、硫磺混凝土外覆层和组合舱门的新型结构形式,并命名为中华穹顶(图 12(b))。

月球是距离地球最近的外天体,因此月球基地是人类深空探测的第一站,已经成为世界各大国的深空探索任务目标。月球基地的结构设计要比火星基地更为丰富、全面,结构类型更多。然而,目前月球和火星基地的设计都尚处于概念结构设计阶段,未开始考虑



(a) 充气式基地^[78]

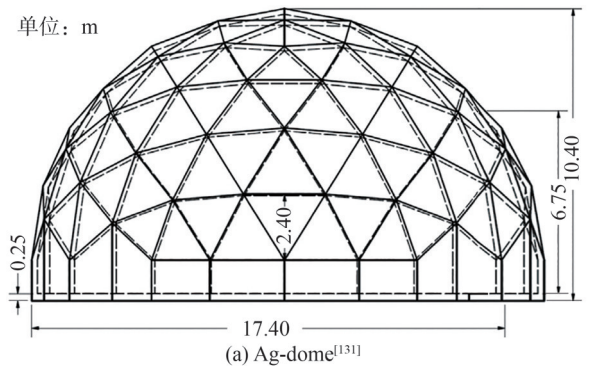
1. 标准块; 2. 拱脚块; 3. 半拱块; 4. 全拱块。



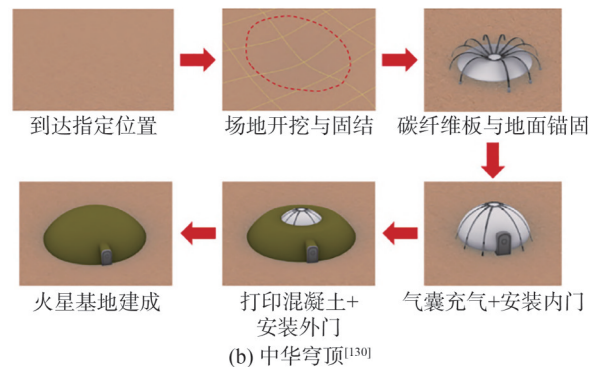
(b) 装配式混凝土基地^[137]

图 11 月球基地设想

Fig. 11 Concept of lunar base



(a) Ag-dome^[131]



(b) 中华穹顶^[130]

图 12 火星基地设想

Fig. 12 Concept of Mars base

月面复杂环境下建筑材料自身强度、环境耐久性等对基地结构稳定性影响的量化设计。以月下基地结构(图 13)为例,其结构量化设计要素主要包括:1)月基承载力、土压力等工程特性。关于月壤力学与工程特性的低重力、高真空效应研究已取得较多进展(第 1.1 节),但已有成果难以直接应用于月壤工程特性的量

化分析,仍需结合原位测试试验(如“十字板”剪切、静力触探、动力触探、静载试验、波速测试及其他现场试验等)开展进一步研究^[146]。2)基地基础。已有月球基地采用了轮式基础^[147]、足垫基础^[148]、微型桩^[149]、展开式金属基础^[150]等形式的基础,但并未对基础-月基相互作用开展量化分析。3)建筑材料。月面建筑材料在月面长期极端温差循环、极端低温、高真空(基地内大

气泄漏)环境下的长期工作性能缺乏量化描述。4)基地结构。基地结构应进一步从荷载设计、结构密封效应、稳定性分析、极端温差诱发温度自应力、安全系数/可靠性分析等角度细化、量化设计。5)灾害防护。基地结构应考虑陨石/微陨石冲击、月震等灾害的影响,确保灾害发生时基地的安全运维;火星基地则需考虑表面沙尘暴灾害的防护。

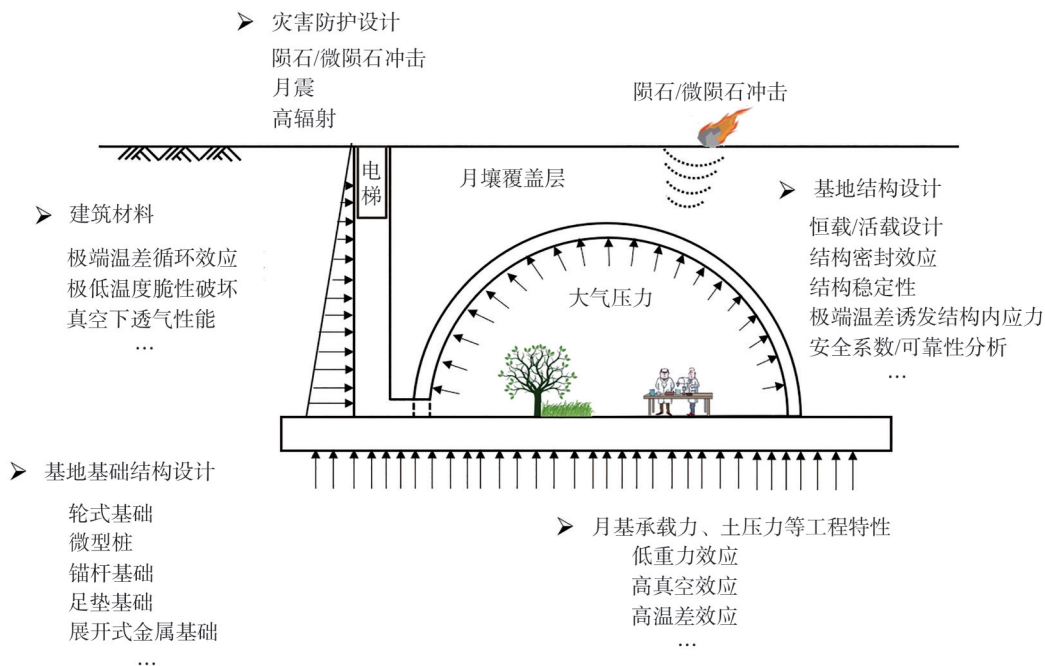


图 13 月下基地结构量化设计要素

Fig. 13 Design considerations in the quantitative design of lunar base structures

3.2 基地防灾害研究

深空基地建造设计中,需考虑深空特殊灾害的影响,包括月面高辐射、高温差、陨石和微陨石撞击、火星沙尘暴等。月球表面太阳辐射远高于地球,在月球基地上至少需要 2.5 m 厚的覆盖保护层才能使得月表辐射剂量满足放射工作人员的允许水平^[78]。对于月表高温差环境可采用月壤覆盖层防护,3.0 m 厚的月壤覆盖层足以保护任意位置的月球基地^[151],且月表 1.3 m 深度处月壤可视为达到恒温层^[138]。对于充气式月球基地,一般采用由隔热层、隔热层与阻气层构成的柔性热防护系统,并根据非稳态传热模型进行热分析^[152],如 NASA 提出的多层隔热结构(MLI)^[153]。针对陨石和微陨石撞击灾害,已有学者针对有月壤覆盖的拱形结构^[154]或可充气结构^[155]开展冲击效应研究,但并未考虑月壤特性或月面低重力环境的影响。Kondic 等^[156]研究了重力场对冲击深度的影响,发现重力场越大,冲击深度越小。对于火星基地,主要需考虑火星地表强烈的沙尘暴(平均风速超过 14 m/s^[157])。然而,从土木工程角度来看,上述研究缺乏更多的室内试验验证和工程实践,无法直接用于月球基地的结构设计。

综上,月球/火星基地建设在选址、设计、施工、运维等各方面都存在许多关键科学问题亟需解决,主要难点在于月面/火星环境下建筑构件的标准化、无人化、智能化生产与装配,月面低重力、微陨石撞击、高温差、高辐射等和火星表面低重力、强沙尘暴等极端恶劣环境的智能防护与避险设计。未来可结合月面/火星环境模拟技术深入研究月面/火星极端环境对月球/火星基地的劣化和破坏效应,利用人工智能、虚拟现实等技术研发智能防护与避险措施,结合已有建筑装配式工艺、人工智能、3D 打印等技术研发月球/火星基地及其构件的标准化生产、组装、建造工艺及装备等。

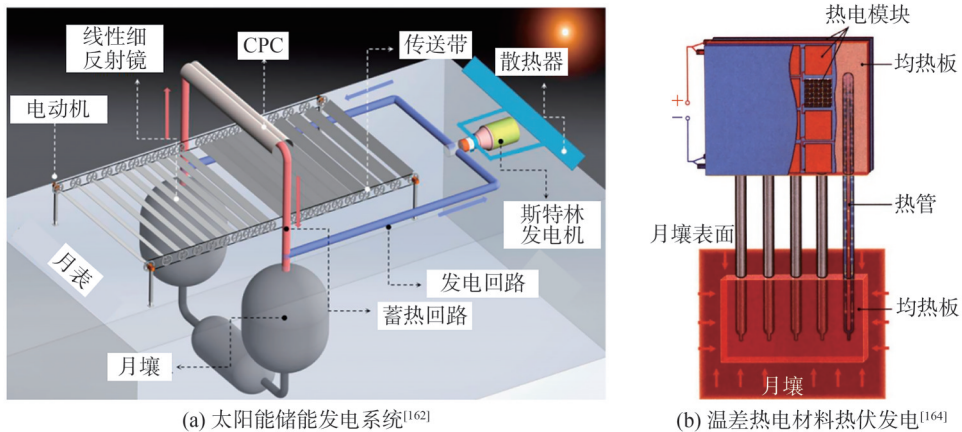
4 能源生产与存储

能源是维持月球基地正常工作的前提,也是各阶段月球基地基本的需求,以及月球基地设计建设的关键核心技术。月球表面没有大气海洋,传统的风能、潮汐能、化石能等能源在月球上难以使用,可方便利用和存储的主要是电能、热能和核能,均能满足对能源长期稳定、环保洁净的要求。

4.1 能源生产

深空探测中已经将光伏发电和核反应堆动力电池作为能源系统^[158-159]。但在用于原位能源生产时,光伏发电由于运输成本高、原位生产困难和夜间无法使用等问题,而被认为不适宜作为月球基地主能源生产方式^[160-161];核反应堆动力电池需要特殊的核辐射防护处理和复杂繁重的控制设施,故用于月球基地能源系统尚需进一步开展降低系统质量、提高质量比功率的研究^[161-162]。

为此,国内外学者相继提出光热发电系统、月球温差发电系统、燃料电池系统等^[163]。光热发电系统是利用太阳能将物质加热以高压气体的形式驱动发电,



(a) 太阳能储能发电系统^[162]

(b) 温差热电材料热光伏发电^[164]

图 14 月球能源生产系统

Fig. 14 Lunar power generation system

火星上可利用的能源主要为风能(沙尘暴,风速> 14 m/s),全火星近地表可利用风能总量约为 5.45×10^{10} W^[165]。在利用火星风能时,风力涡轮机的设计应具备自动驱砂、选址、部署功能^[157]。Holstein 等^[166]提出一种轻型水平轴风力涡轮机,并在模拟火星大气环境的风洞中进行了测试,验证了火星表面风力发电的适用性。

目前,月球着陆器、月球车等各种设备均使用高效的太阳能电池板和蓄电池来提供必需的能源,但这种能源供给方式寿命短、量级低,难以满足月球基地的能源需求。光热发电系统、月球温差发电系统、火星风力漩涡机等新型能源生产模式为月球和火星基地能源系统提供了新的发展思路和方法。但目前这些能源生产模式的设想尚需更全面、系统地研究,以形成全套的能源生产理论、技术和装备体系。

4.2 能源存储

能源存储技术主要可分为 3 类:电存储、热存储和化学存储^[134]。电存储将月球能源转化为电能存储在蓄电池中,但该方法对蓄电池质量要求过高,不适用于初级阶段的月球或火星基地^[161]。热存储采用储热材料将月球能源以热能的形式储存,现有研究均以月壤作

如以月壤作为加热物质、氦气作为高压气体驱动的太阳能储能发电系统(图 14(a))^[164],直接利用热能的太阳菲涅耳透镜-热离子转换系统^[160],以及热瓦迪(Thermal Wadi)系统^[163]。月球温差发电系统是利用热电材料的塞贝克效应直接将热能转换为电能,如利用月表与月岩层温差的月球温差热电材料热光伏发电系统(图 14(b))、月球温差磁悬浮发电系统^[121]。燃料电池系统是直接将储存在燃料和氧化剂中的化学能转化为电能的发电装置。对于深空探测领域,一般认为以氢氧燃料电池,结合水电解技术和制氧技术可同时输出电能、热能和多余的水,然而该过程电效率较低,故尚需研究高效的电解催化技术^[161]。

为储热材料^[167],并可以通过压实、烧结等方式提升月壤的热传导率^[168]。化学储能将太阳能直接转为 H_2 、 CO 等化学储能物质,该方法储能密度高、能量损失小且应用灵活,被认为是最具有发展前景的太阳能储存方式^[169]。其中,热储能方式充分利用原位月壤和太阳资源作为储热材料和热量来源,能够降低月球基地建设对地球资源的依赖,是早期月球基地能源储存的优选方案。

目前,深空环境下能源的生产与存储尚处于概念设计阶段,缺乏系统的理论、技术和装备支撑,尤其在基础理论方面存在诸多亟待解决的科学问题,如月表极端高温与低温环境下半导体热电材料的性能演变规律、换热结构在热循环作用下的变形与劣化机制等。同时,在工程应用方面,需突破适用于月表极端恶劣环境的能源生产装备设计与制造、能源生产与储存基础设施的无人化构建与智能化运维等一系列技术挑战。未来需依托地球上新材料、新能源等科技更新,深入开展将现有深空能源生产与存储概念设计成果向试验技术、装备研制、深空环境效应模拟、在轨验证等方向转化的研究,并结合人工智能与无人化施工技术,逐步实现深空环境下原位能源生产与存储系统的

可行化与工程化。

5 环境资源利用

月球表面除了丰富的矿产、能源资源外,其表面独特的环境也是深空探索中的重要资源之一,包括高真空、低重力、弱稳定区等^[13]。在地面环境上模拟低重力^[170]、高真空^[171]极为困难且成本昂贵,但许多半导体产品制作和科学研究都需要真空环境^[171]或低重力环境^[170],如:制作沉积高纯层状化合物半导体的分子束外延工艺(MBE)要求超高真空环境^[172],微重力材料科学、生物学等研究需要低重力环境^[173],均适用于在月面环境下开展。弱稳定区^[174]是指月球引力、地球引力和绕共心转动离心力共同作用下在地月空间中形成的区域,该区域内的航天器只需要稍加大速度增量即可脱离地月系统,且已被美国、俄罗斯等国家用以节约运载能力和发射成本。此外,地球气候系统研究中,在月球上可观测地球气候的变化且月球近面表面温度变化蕴含着地球气候系统能量收支平衡变化的重要信息,因而被认为是监测地球气候系统的极佳平台,可以突破人造地球卫星视角局限、不长期稳定的缺陷^[175]。

然而,目前人类对于月球的开发尚处于初级阶段,无法有效利用月面的特殊环境资源,也尚未形成

系统的月面极端环境综合利用技术。未来需针对月面综合环境实验室智能化和无人化的建设和运维、月面极端环境对月面设备的损伤效应和防护等方面开展进一步研究。

6 ISRU 模拟现场试验

已有 ISRU 技术研究大多针对关键技术开展室内试验研究,且已有技术尚未实际应用于深空资源利用。为弥合已有 ISRU 技术和设备与未来空间任务所需设备之间的差距,降低深空探测任务中 ISRU 技术风险,NASA 自 2008 年至 2012 年,集合所研发的 ISRU 中较为成熟的技术及相关设备,开展了一系列的模拟现场试验,论证 ISRU 现有技术和装备在模拟现场的可实现性^[1-3],为未来 ISRU 的实现奠定了研究基础。首次原位测试在 Moses Lake 湿润砂土(具有一定黏聚力)中开展,主要针对一个 4.1 m 长的复杂平板装置(LANCE, Lunar attachment node for construction and excavation)开展土壤开挖、整平、筑路等功能评价,该装置在易拆卸和竖向运动能力上尚需进一步改进。第 2 次原位测试在夏威夷的 Mauna kea 开展,包括资源定位、土壤开采、原位资源处理与产品保存等一系列连续的 ISRU 过程试验(图 15),部分试验并未达到理想

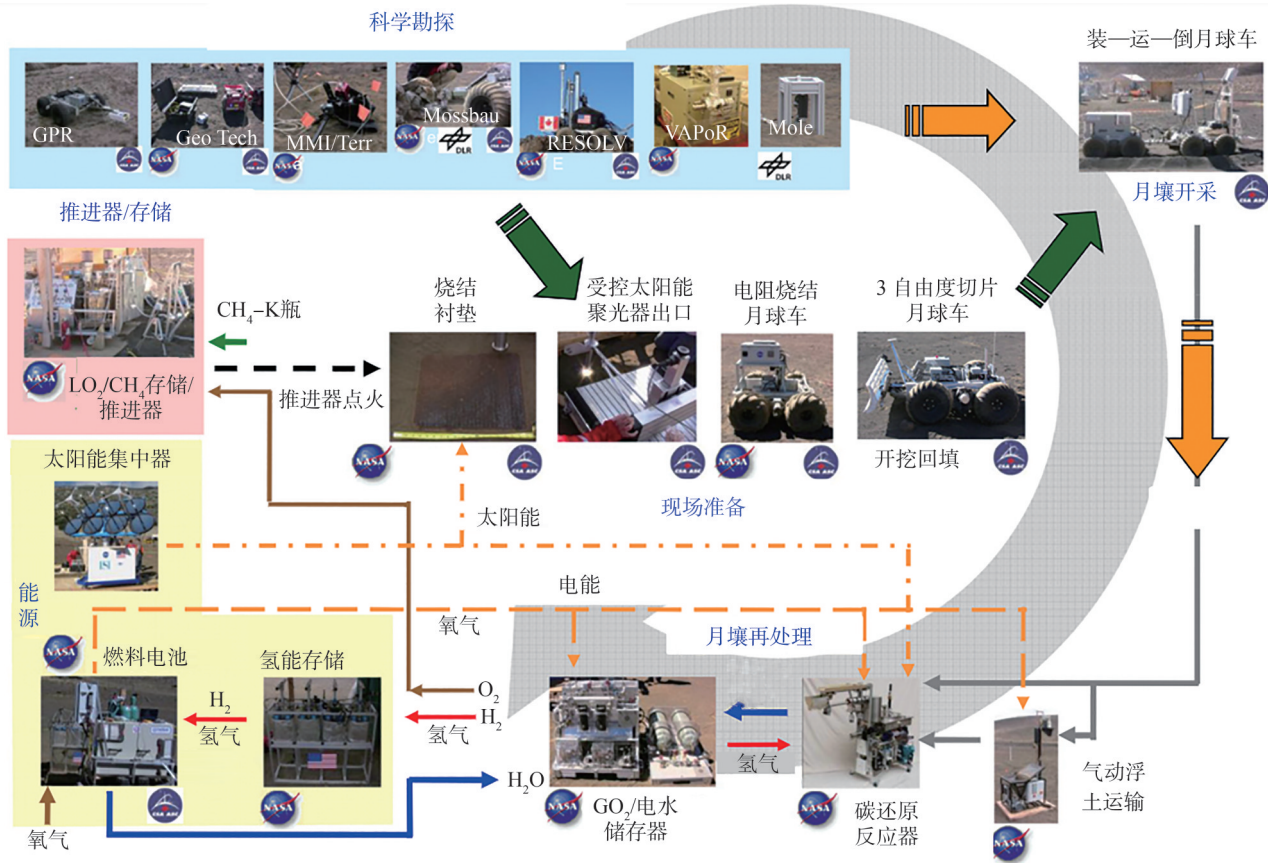


图 15 ISRU 现场模拟试验及其设备^[3]
Fig. 15 Field test of ISRU and its apparatus^[3]

效果,如采样设备未考虑不同地形及粉尘作用,但改进后设备仍较好地完成了 ISRU 过程试验。随后, NASA 开展了第 3 次原位测试,采用改进设备进行了内容更加丰富的 ISRU 过程测试,取得了巨大成功,完成了装载—运输—卸载开挖设备的自动与遥感控制,碳还原法制备 28 g 氧气并在 Cryo Cart 中传递及液化存储等任务。之后的第 4 次原位试验又引入了 NASA 新型柔性开挖设备和人类机器人系统。在基本验证了 ISRU 技术可行性后, NASA 开展了以“完成任务”为目标的第 5 次原位测试,试验顺利完成了表征和绘制月球极地资源、月球极地土壤和挥发物质的物理、矿物/化学性质研究等任务。然而,实际 ISRU 仍面临许多挑战,如生产产品性能、耐久性问题,月表高温差、高辐射、月尘等特殊环境对设备的损伤,月面低重力环境对设备运行效果的影响等。

NASA 目前开展的现场模拟试验并未更多地模拟月面极端恶劣环境,这是因为目前仍缺乏在地面环境下经济、全面地模拟月面低重力、高辐射、高温差、微陨石冲击、太阳风、月尘效应等一系列恶劣环境,尤其是难以实现较大面积的模拟。未来仍需发展月面极端环境地面模拟等效理论,探索模拟试验方法,以期为 ISRU 技术和装备的有效验证提供基础。

7 结 论

深空资源原位利用(ISRU)是未来开展可持续、可负担深空探测的关键技术。本文从资源表征与映射、原位消耗品生产、土木工程建设、原位能源生产与存储、环境资源利用、ISRU 模拟现场试验 6 个方面综述了当前国内外研究进展,初步探讨了深空资源原位利用尚存在的科学问题及发展趋势,主要结论如下。

1)资源表征与映射。深空环境中赋存有大量的水冰、 ^3He 、金属和非金属、太阳能等各种资源,可为生命维持、动力推进、食品生产制造等人类活动和可持续、可负担深空探测提供资源支撑。但受限于探测方式、样品数量等,当前研究成果仍具有一定的不确定性,未来应进一步集成地球地质勘探、地球物理勘探、遥感技术、矿产勘探等,研发无人智能勘探飞行器,准确判断天体中可利用资源的种类、赋存形式、赋存环境、岩石体特征,进而结合人工智能分析判别资源开采利用时会面临的挑战,优选合适的开采方法与设备等。

2)原位消耗品生产。当前研发的深空土壤开挖、无水混凝土制备、氧气和水生产的技术与设备已在室内试验中得到成功应用。然而,距离原位深空资源利用仍有大量技术难题需要解决,包括土体颗粒对设备的磨损效应、太阳辐射的电子信号干扰效应、长距离设备通讯与操作、原

位产品可持续化生产和性能保障等问题。未来需结合最新开采工艺(如原位流态化开采技术、人工智能技术)研究深空环境下土壤和岩石的规模化无人开采技术,研发集勘探、开采、生产、存储、运输于一体的智能机器人设计理论,实现深空原位资源高效和高质量生产的系统理论创新、技术升级和装备更新。

3)土木工程建设。已有月球/火星基地仍处于概念设计阶段,并未开展土木工程专业的量化设计,对于月壤/火壤承载力、基地基础选型、荷载设计、结构稳定性设计、灾害防护设计等缺乏系统全面的量化验算,尤其是对月面极端温差、高真空、高辐射、微陨石冲击和火星沙尘暴等灾害的量化设计。未来土木工程建设需从概念设计逐渐落地,系统全面分析深空复杂环境对基地结构设计的影响规律,利用人工智能、虚拟现实等技术研发智能防护与避险措施,结合已有建筑装配式工艺、人工智能、3D 打印等技术研发月球/火星基地及其构件的标准化生产、组装、建造工艺及装备等。

4)能源生产与存储。当前研究结合深空复杂环境提出可行的原位能源生产与存储技术,但尚处于概念设想阶段,缺乏系统的理论、技术和装备支撑,以及室内试验、拟深空环境试验验证。未来需结合地球上新材料、新能源等科技更新,使深空能源生产与存储的概念设计逐渐向试验技术、装备制造、拟环境试验验证等方向深入发展,结合人工智能和无人化建设逐步实现深空环境原位能源的生产与存储。

5)环境资源利用。月球的高真空、低重力、弱稳定区等是地球上难以再现的重要环境资源,火星亦是太阳系中与地球环境最接近的外天体。然而,受限于月球和火星的探索水平,尚无法有效利用月面/火星的特殊环境资源,也未形成系统利用月面/火星极端环境的综合技术。未来需针对深空综合环境实验室智能化、无人化建设与运维,极端环境对设备的损伤效应和防护等方面开展进一步研究,探索深空环境资源利用潜能。

6)ISRU 模拟现场试验。NASA 开展的一系列模拟现场试验,成功完成了资源表征与映射、土壤开采、原位资源处理与产品保存(无水混凝土、氧气)等任务,论证了 NASA 现有技术和装备的可实现性。然而,由于缺乏在地面环境下经济、全面地模拟月面低重力、高辐射、高温差和火星低重力、高温差、沙尘暴等恶劣环境的试验技术,现场模拟试验并未考虑月面/火星的极端恶劣环境。未来仍需发展月面/火星极端环境地面模拟等效理论,探索模拟试验方法,为 ISRU 技术和装备的有效验证提供基础。

开发利用深空资源已成为新一轮深空探测热点。在过去半个世纪,美国凭借 Apollo 丰富样品储量和先

进深空探测技术的优势,开展了大量月球/火星地质学与工程学研究,在深空资源开发领域已形成“先知”“抢占”优势。中国在 ISRU 技术与设备方面的研究刚刚起步,很多技术尚处于概念设计阶段且缺乏相应可操作性的设备或设计技术,有必要发展可行性技术方案,研发考虑深空复杂环境的可操作性装备,集成为可实施的 ISRU 技术与设备体系,从而实现中国未来深空探测可持续和可负担发展。

参考文献:

- [1] Sanders G B, Larson W E. Final review of analog field campaigns for in Situ Resource Utilization technology and capability maturation[J]. *Advances in Space Research*, 2015,55(10):2381–2404.
- [2] Zacny K, Mueller R P, Craft J, et al. Five-step parametric prediction and optimization tool for lunar surface systems excavation tasks[C]//*Proceedings of the Earth and Space 2010*. Honolulu: American Society of Civil Engineers, 2010: 1128–1151.
- [3] Sanders G B, Larson W E. Progress made in lunar *in situ* resource utilization under NASA’s exploration technology and development program[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013,26(1):5–17.
- [4] Kato M, Takizawa Y, Sasaki S. The SELENE Mission: Present status and science goals[C]//*Proceedings of the Sixth Japan/China Workshop on Microgravity Sciences*, 2005.
- [5] Fan Weiwei, Yang Fan, Han Lin, et al. Overview of Russia’s future plan of lunar exploration[J]. *Science & Technology Review*, 2019,37(16):6–11. [范唯唯, 杨帆, 韩淋, 等. 俄罗斯未来月球探索与开发计划解析[J]. *科技导报*, 2019,37(16): 6–11.]
- [6] Flahaut J, van der Bogert C H, Crawford I A, et al. Scientific perspectives on lunar exploration in Europe[J]. *npj Microgravity*, 2023,9:50.
- [7] Chen Weibiao, Liu Jiqiao, Zhu Xiaopeng, et al. Spaceborne lidar remote sensing progress and developments[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024,51(11):1101011. [陈卫标, 刘继桥, 竹孝鹏, 等. 星载激光雷达遥感技术进展与发展趋势[J]. *中国激光*, 2024,51(11):1101011.]
- [8] Perko H A, Nelson J D, Sadeh W Z. Surface cleanliness effect on lunar soil shear strength[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001,127(4):371–383.
- [9] Stephen Carney. Mars[EB/OL]. [2024–01–20]. <https://mars.nasa.gov>.
- [10] Michikami T, Nakamura A M, Hirata N. The shape distribution of boulders on Asteroid 25143 Itokawa: Comparison with fragments from impact experiments[J]. *Icarus*, 2010, 207(1):277–284.
- [11] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京:中国宇航出版社, 2005.
- [12] Zheng Yongchun, Ouyang Ziyuan, Wang Shijie, et al. Physical and mechanical properties of lunar regolith[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2004,24(4):14–19. [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*, 2004,24(4):14–19.]
- [13] Taylor G J, Warren P, Ryder G, et al. Lunar source book: A user’s guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [14] Vey E, Nelson J D. Studies of lunar soil mechanics[R]. NASA contract NASr-65(02), 1966.
- [15] Oravec H A, Abel P B, Asnani V M. Simulation of the lunar environment for the study of regolith strength[C]//*Proceedings of the Earth and Space 2010*. Honolulu: American Society of Civil Engineers, 2010:217–230.
- [16] Nelson J D, Vey E. Relative cleanliness as a measure of lunar soil strength[J]. *Journal of Geophysical Research*(1896–1977), 1968,73(12):3747–3764.
- [17] Nie Jiayan, Cui Yifei, Senetakis K, et al. Predicting residual friction angle of lunar regolith based on Chang’e-5 lunar samples[J]. *Science Bulletin*, 2023,68(7):730–739.
- [18] He Chengdan, Li Yasheng, Wen Zhi, et al. Study on physical and mechanical properties of frozen simulated lunar soil in lunar polar region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021,43(6):1773–1781. [何成旦, 李亚胜, 温智, 等. 月球极区冻结模拟月壤物理力学特性研究[J]. *冰川冻土*, 2021,43(6):1773–1781.]
- [19] 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.
- [20] Liu Junwei, Zhang Weiwei, Tian Ye, et al. Analysis and prediction of uniaxial compressive strength of icy lunar regolith under extreme temperature[J]. *Advances in Space Research*, 2022,69(12):4391–4407.
- [21] Cohn S N, Ahrens T J. Dynamic tensile strength of lunar rock types[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981,86(B3):1794–1802.
- [22] Hao Haichun, Gao Mingzhong, Wu Yan, et al. The mechanical properties and failure mode of simulated lunar rock by *in situ* temperature real-time action of lunar-based[J]. *Fractals*, 2024,32(4):2440020.
- [23] Krokosky E M, Husak A. Strength characteristics of basalt rock in ultra-high vacuum[J]. *Journal of Geophysical Research*(1896–1977), 1968,73(6):2237–2247.
- [24] Moore H J, Clow G D, Hutton R E. A summary of Viking sample-trench analyses for angles of internal friction and cohesions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1982,87(B12):10043–10050.
- [25] Moore H J, Bickler D B, Crisp J A, et al. Soil-like deposits observed by sojourner, the pathfinder rover[J]. *Journal of*

- Geophysical Research:Planets,1999,104(E4):8729–8746.
- [26] Arvidson R E, Anderson R C, Bartlett P, et al. Localization and physical properties experiments conducted by spirit at gusev crater[J]. Science, 2004, 305(5685): 821–824.
- [27] Arvidson R E, Anderson R C, Bartlett P, et al. Localization and physical property experiments conducted by opportunity at meridiani planum[J]. Science, 2004, 306(5702): 1730–1733.
- [28] Ding L, Zhou R, Yu T, et al. Surface characteristics of the Zhurong Mars rover traverse at Utopia Planitia[J]. Nature Geoscience, 2022, 15(3): 171–176.
- [29] Dang Zhaolong, Chen Baichao. Analysis on physical and mechanical properties of Martian soil[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 129–133. [党兆龙, 陈百超. 火星土壤物理学特性分析[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 129–133.]
- [30] Peters G H, Carey E M, Anderson R C, et al. Uniaxial compressive strengths of rocks drilled at gale crater, Mars[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(1): 108–116.
- [31] Gundlach B, Blum J. Regolith grain size and cohesive strength of near-Earth Asteroid(29075) 1950 DA[J]. Icarus, 2015, 257: 126–129.
- [32] Zeng Xiaojia, Li Xiongyao, Martin D J P, et al. The Itokawa regolith simulant IRS-1 as an S-type asteroid surface analogue[J]. Icarus, 2019, 333: 371–384.
- [33] Cox C, Brisset J, Partida A, et al. Asteroid regolith strength: Role of fine-fractions[J]. Planetary and Space Science, 2024, 240: 105829.
- [34] Perry M E, Barnouin O S, Daly R T, et al. Low surface strength of the asteroid Bennu inferred from impact ejecta deposit[J]. Nature Geoscience, 2022, 15(6): 447–452.
- [35] Jiang Mingjing, Xi Banglu, Lei Huayang. Investigation of gravity effect on penetration resistance in Tongji-1 lunar regolith simulant by centrifuge tests[J]. Advances in Space Research, 2018, 62(5): 945–956.
- [36] Jiang Mingjing, Xi Banglu, De Blasio F V, et al. Physical model tests of the bearing behavior of Tongji-1 lunar soil simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2019, 32(2): 04018150.
- [37] Jiang Mingjing, Dai Yongsheng, Cui Liang, et al. Soil mechanics-based testbed setup for lunar rover wheel and corresponding experimental investigations[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2017, 30(6): 06017005.
- [38] Jiang Mingjing, Shen Zhifu, Utili S. DEM modeling of cantilever retaining excavations: Implications for lunar constructions[J]. Engineering Computations, 2016, 33(2): 366–394.
- [39] Jiang Mingjing, Dai Yongsheng, Cui Liang, et al. Experimental and DEM analyses on wheel-soil interaction[J]. Journal of Terramechanics, 2018, 76: 15–28.
- [40] Jiang Mingjing, Liu Fang, Wang Huaning, et al. Investigation of the effect of different gravity conditions on penetration mechanisms by the Distinct Element Method[J]. Engineering Computations, 2015, 32(7): 2067–2099.
- [41] Xi Banglu, Jiang Mingjing, Mo Pinqiang, et al. Bearing capacity of lunar soil ground under extraterrestrial environmental effects[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 165: 105923.
- [42] Gao Yang, Spiteri C, Li Chunlai, et al. Lunar soil strength estimation based on Chang'E-3 images[J]. Advances in Space Research, 2016, 58(9): 1893–1899.
- [43] Li Chen, Wei Kuixian, Li Yang, et al. Research progress on *in-situ* resources utilization of Lunar surface minerals[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2020, 51(12): 3289–3299. [李琛, 魏奎先, 李阳, 等. 月球表面矿产资源原位利用研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(12): 3289–3299.]
- [44] Li T, Li Z, Huang Z, et al. Changesite-(Y), IMA 2022–023. CNMNC Newsletter69[J]. Mineralogical Magazine, 2022, 86: 988–992.
- [45] Li Chunlai, Hu Hao, Yang Mengfei, et al. Nature of the lunar far-side samples returned by the Chang'E-6 mission[J]. National Science Review, 2024, 11(11): nwae328.
- [46] Jet Propulsion Laboratory. Meet the Mars Samples: Sapphire Canyon(Sample 25)[EB/OL]. [2026–02–06]. https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/news/msl20121030.html.
- [47] Bell III J F, McSween H Y, Crisp J A, et al. Mineralogic and compositional properties of Martian soil and dust: Results from Mars Pathfinder[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E1): 1721–1755.
- [48] Nakamura T. Yamato 793321 CM chondrite: Dehydrated regolith material of a hydrous asteroid[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 242(1/2): 26–38.
- [49] 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. [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.]
- [50] Nozette S, Lichtenberg C L, Spudis P, et al. The Clementine bistatic radar experiment[J]. Science, 1996, 274(5292): 1495–1498.
- [51] Feldman W C, Maurice S, Lawrence D J, et al. Evidence for water ice near the lunar poles[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2001, 106(E10): 23231–23251.
- [52] Schultz P H, Hermalyn B, Colaprete A, et al. The LCROSS cratering experiment[J]. Science, 2010, 330(6003): 468–472.
- [53] Honniball C I, Lucey P G, Li S, et al. Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA[J]. Nature Astronomy, 2021, 5(2): 121–127.
- [54] Li Shuai, 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 of the United States of America,2018,115(36):8907–8912.
- [55] Hurley D,Colaprete A,Elphic R,et al.Lunar polar volatiles: Assessment of existing observations for exploration[R]. NASA Goddard Space Flight Center,2016.
- [56] Crawford I A. Lunar resources: A review[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment,2015,39(2): 137–167.
- [57] Brown H M,Boyd A K,Denevi B W,et al.Resource potential of lunar permanently shadowed regions[J].Icarus,2022, 377:114874.
- [58] Stewart B D,Pierazzo E,Goldstein D B,et al.Simulations of a comet impact on the Moon and associated ice deposition in polar cold traps[J].Icarus,2011,215(1):1–16.
- [59] Prem P,Artemieva N A,Goldstein D B,et al.Transport of water in a transient impact-generated lunar atmosphere[J]. Icarus,2015,255:148–158.
- [60] Zhang Tian,Tang Hong,He Huaiyu,et al.Review of comprehensive exploitation technology of lunar water ice resource[J].Chinese Journal of Space Science,2023,43(2): 273–290.[张天,唐红,贺怀宇,等.月球水冰资源综合开发技术研究概况[J].空间科学学报,2023,43(2):273–290.]
- [61] He Chengdan,Li Yasheng,Wen Zhi,et al.Research progress of lunar surface water ice detection and occurrence form[J]. Vacuum and Cryogenics,2021,27(6):589–600.[何成旦,李亚胜,温智,等.月表水冰探测与赋存形态研究进展[J].真空与低温,2021,27(6):589–600.]
- [62] Li Xiongyao,Wei Guangfei,Zeng Xiaojia,et al.Review of the lunar regolith and water ice on the poles of the moon[J]. Journal of Deep Space Exploration,2022,9(2): 123–133.[李雄耀,魏广飞,曾小家,等.极区月壤和水冰形成演化机制及物理特性研究[J].深空探测学报(中英文), 2022,9(2):123–133.]
- [63] Cannon K M,Britt D T.A geologic model for lunar ice deposits at mining scales[J].Icarus,2020,347:113778.
- [64] Cannon K M,Deutsch A N,Head J W,et al.Stratigraphy of ice and ejecta deposits at the lunar poles[J].Geophysical Research Letters,2020,47(21):e2020GL088920.
- [65] Dundas C M,Byrne S,McEwen A S,et al.HiRISE observations of new impact craters exposing Martian ground ice[J]. Journal of Geophysical Research: Planets,2014,119(1): 109–127.
- [66] Liu Zhenghao,Liu Yang,Liu Jia,et al.Distribution characteristics and research progress of water-ice on Mars[J].Earth Science,2024,49(6):2253–2276.[刘正豪,刘洋,刘佳,等.火星水冰分布特征和研究进展[J].地球科学,2024,49(6):2253– 2276.]
- [67] Jin Yu,Shu Wenxiang,Zhang Weiwei,et al.Development status and tentative plan of Mars water ice collection technology[J].Manned Spaceflight,2020,26(1):128–134.[靳宇,舒文祥,张伟伟,等.火星水冰采集技术发展现状及方案设想[J].载人航天,2020,26(1):128–134.]
- [68] Byrne S.The polar deposits of Mars[J].Annual Review of Earth and Planetary Sciences,2009,37:535–560.
- [69] Clifford S M,Crisp D,Fisher D A,et al.The state and future of Mars polar science and exploration[J].Icarus,2000,144(2): 210–242.
- [70] Orosei R,Lauro S E,Pettinelli E,et al.Radar evidence of subglacial liquid water on Mars[J].Science,2018,361 (6401):490–493.
- [71] Lauro S E,Pettinelli E,Caprarelli G,et al.Multiple subglacial water bodies below the south pole of Mars unveiled by new MARSIS data[J].Nature Astronomy,2021,5(1):63–70.
- [72] Arnold N S,Conway S J,Butcher F E G,et al.Modeled subglacial water flow routing supports localized intrusive heating as a possible cause of basal melting of Mars' south polar ice cap[J].Journal of Geophysical Research: Planets,2019,124(8):2101–2116.
- [73] Gao Nan,Xu Yingkui,Luo Taiyi,et al.Recent advance and prospect of the lunar mineral resources exploration[J].Acta Mineralogica Sinica,2022,42(2):222–230.[高楠,许英奎,罗泰义,等.月球矿产资源勘查进展及展望[J].矿物学报, 2022,42(2):222–230.]
- [74] Colozza A J.Small lunar base camp and in situ resource utilization oxygen production facility power system comparison[R].Glenn Research Center,2020.
- [75] Fa Wenzhe,Jin Yaqui.Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer[J].Icarus, 2007,190(1):15–23.
- [76] Prettyman T H,Hagerty J J,Elphic R C,et al.Elemental composition of the lunar surface: Analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector[J].Journal of Geophysical Research,2006,111:E12007.
- [77] Zhao Jiannan,Zhang Shiqi,Geng Zhiqing,et al.Progress and prospects in the research of Martian resource endowment and the in-situ resource utilization technology[J]. Acta Geologica Sinica,2024,98(2):611–622.[赵健楠,张诗琪,耿志卿,等.火星资源赋存状况及其原位利用技术研究进展与展望[J].地质学报,2024,98(2):611–622.]
- [78] Benaroya H,Bernold L,Chua K M.Engineering,design and construction of lunar bases[J].Journal of Aerospace Engineering,2002,15(2):33–45.
- [79] Klosky J L,Sture S,Ko H Y,et al.Vibratory excavation and anchoring tools for the lunar surface[C]//Proceedings of the Engineering, Construction, and Operations in Space V. Albuquerque:American Society of Civil Engineers,1996:903–911.
- [80] Mueller R,Schuler J,Smith J D,et al.Reducing extra-

- terrestrial excavation forces with percussion[C]//Proceedings of the 2013 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE,2013:1–11.
- [81] Skonieczny K, Wettergreen D S, Whittaker W. Advantages of continuous excavation in lightweight planetary robotic operations[J]. *The International Journal of Robotics Research*,2016,35(9):1121–1139.
- [82] Zacny K, Mueller R, Galloway G, et al. Novel approaches to drilling and excavation on the moon[C]//Proceedings of the AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. Pasadena: AIAA,2009:AIAA2009–6431.
- [83] Just G H, Smith K, Joy K H, et al. Parametric review of existing regolith excavation techniques for lunar in Situ Resource Utilisation(ISRU) and recommendations for future excavation experiments[J]. *Planetary and Space Science*, 2020,180:104746.
- [84] Schuler J D, Smith R P, Mueller R P. Rassor, the reduced gravity excavator[C]//Lunar ISRU 2019, Developing a New Space Economy through Lunar Resources and Their Utilization. Maryland,2019:5061.
- [85] Boles W W, Scott W D, Connolly J F. Excavation forces in reduced gravity environment[J]. *Journal of Aerospace Engineering*,1997,10(2):99–103.
- [86] Jiang Mingjing, Xi Banglu, Arroyo M, et al. DEM simulation of soil-tool interaction under extraterrestrial environmental effects[J]. *Journal of Terramechanics*,2017,71:1–13.
- [87] Holmberg N A, Faust R P, Holt H M. Viking’75 spacecraft design and test summary. Volume 1: Lander design[M]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Branch,1980.
- [88] Sagdeev R Z, Zakharov A V. Brief history of the phobos mission[J]. *Nature*,1989,341(6243):581–585.
- [89] Smith P H. The phoenix mission to Mars[C]//Proceedings of the 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Big Sky: IEEE,2004.
- [90] Bierhaus E B, Clark B C, Harris J W, et al. The OSIRIS-REx spacecraft and the touch-and-go sample acquisition mechanism(TAGSAM) [J]. *Space Science Reviews*,2018, 214(7):107.
- [91] Tsuda Y, Saiki T, Terui F, et al. Hayabusa2 mission status: Landing, roving and cratering on asteroid Ryugu[J]. *Acta Astronautica*,2020,171:42–54.
- [92] Satish H, Radziszewski P, Ouellet J. Design issues and challenges in lunar/Martian mining applications[J]. *Mining Technology*,2005,114(2):107–117.
- [93] Gies J V. The effect of the lunar surface environment upon machinery[C]//Proceedings of the Engineering, Construction, and Operations in Space V. Albuquerque: American Society of Civil Engineers,1996:639–645.
- [94] Schlüter L, Cowley A. Review of techniques for In-Situ oxygen extraction on the moon[J]. *Planetary and Space Science*,2020,181:104753.
- [95] Carr B B. Recovery of water or oxygen by reduction of lunar rock[J]. *AIAA Journal*,1963,1(4):921–924.
- [96] Lu Y, Reddy R G. Extraction of metals and oxygen from lunar soil[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2008,27(4):223–234.
- [97] Kesterke D G. Electrowinning oxygen from silicate rocks[M]. US Department of Interior, Bureau of Mines,1971.
- [98] Carroll W F. Research on the use of space resources[M]. Pasadena: Jet Propulsion Lab. California Inst of Tech,1983.
- [99] Sueyoshi K, Watanabe T, Nakano Y, et al. Reaction mechanism of various types of lunar soil simulants by hydrogen reduction[C]//Proceedings of the Earth & Space 2008. Long Beach: American Society of Civil Engineers, 2008: 1–8.
- [100] Clark L. Precursor in-situ lunar oxygen testbed(PILOT) Hawaii field testing Nov 2008[C]. AIAA Space 2009. Pasadena, 2009.
- [101] Lee K A, Oryshchyn L, Paz A, et al. The ROxygen project: Outpost-scale lunar oxygen production system development at Johnson space center[J]. *Journal of Aerospace Engineering*,2013,26(1):67–73.
- [102] Keller B, Clark D, Kirkland J. Field test results of the PILOT hydrogen reduction reactor[C]//Proceedings of the AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. Pasadena: AIAA,2009:6475.
- [103] Zhao Y, Shadman F. Reaction engineering for materials processing in space: Reduction of ilmenite and carbon monoxide[C]. 2nd Annual Symposium of the University of Arizona. Tucson,1991.
- [104] Gustafson R, White B, Fidler M. 2010 field demonstration of the solar carbothermal regolith reduction process to produce oxygen[C]//Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA,2011:434.
- [105] Haskin L A, Colson R O, Lindstrom D J, et al. Electrolytic smelting of lunar rock for oxygen, iron, and silicon[C]. The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. Houston,1992.
- [106] Sadoway D R, Sirk A, Sibille L, et al. Advances in molten oxide electrolysis for the production of oxygen and metals from lunar regolith[R]. NASA 20130012503.
- [107] Sibille L, Dominguez J. Joule-heated molten regolith electrolysis reactor concepts for oxygen and metals production on the Moon and Mars[C]//Proceedings of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston: AIAA,

- 2012:639.
- [108]Zhang Peng,Dai Wei,Niu Ran,et al.Overview of the lunar *in situ* resource utilization techniques for future lunar missions[J].Space:Science & Technology,2023,3:37.
- [109]Matchett J P,Pomeroy B R,Cardiff E H.Production of lunar oxygen through vacuum pyrolysis[R].Greenbelt M D: NASA Goddard Space Flight Center,2006.
- [110]Li Chen,Wei K,Li Yang,et al.Theoretical calculation and experimental verification of the vacuum thermal decomposition process of lunar silicon oxide[J].Vacuum,2022,202: 111162.
- [111]Rapp D,Hinterman E.Adapting a Mars ISRU system to the changing Mars environment[J].Space:Science & Technology,2023,3:41.
- [112]Hao Jian,Li Danming,Dang Wenqiang,et al.Progress in *in situ* resource utilization of atmospheric on Mars[J].Vacuum and Cryogenics,2018,24(5):289–296.[郝剑,李丹明,党文强,等.火星二氧化碳及水资源利用的研究进展[J].真空与低温,2018,24(5):289–296.]
- [113]Li mingrui.Mechanochemical analysis and optimization of the lunar south pole water ice drilling and collection process[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2022.[李明瑞.月球南极水冰钻取采集过程的力热分析与优化[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.]
- [114]Zacny K,Chu P,Paulsen G,et al.Mobile *in situ* water extractor(MISWE) for Mars,moon, and asteroids *in situ* resource utilization[C]//Proceedings of the AIAA SPACE 2012 Conference & Exposition. Pasadena: AIAA, 2012: 5168.
- [115]Wiens J,Bommarito F,Blumenstein E,et al.Water extraction from Martian soil[C]//Fourth Annual HEDS-UP Forum,2001(1106):11–25.
- [116]Sowers G F,Dreyer C B.Ice mining in lunar permanently shadowed regions[J].New Space,2019,7(4):235–244.
- [117]Wasilewski T G.Evaluation of drilling-based water extraction methods for Martian ISRU from mid-latitude ice resources[J].Planetary and Space Science,2018,158:16–24.
- [118]Wang Qinggong,Wang Chao,Pang Yong,et al.Study of drilling-based water extraction technology from icy lunar regolith[J].Journal of Deep Space Exploration,2022,9(6): 617–624.[王庆功,王超,庞勇,等.含冰星壤钻取密封与水资源提取转化技术研究[J].深空探测学报(中英文),2022, 9(6):617–624.]
- [119]Taylor L A,Meek T T.Microwave sintering of lunar soil: Properties,theory,and practice[J].Journal of Aerospace Engineering,2005,18(3):188–196.
- [120]Fateri M,Gebhardt A.Process parameters development of selective laser melting of lunar regolith for on-site manufacturing applications[J].International Journal of Applied Ceramic Technology,2015,12(1):46–52.
- [121]Meurisse A,Beltzung J C,Kolbe M,et al.Influence of mineral composition on sintering lunar regolith[J].Journal of Aerospace Engineering,2017,30(4):04017014.
- [122]Meurisse A,Makaya A,Willsch C,et al.Solar 3D printing of lunar regolith[J].Acta Astronautica,2018,152:800–810.
- [123]Omar H A.Production of lunar concrete using molten sulfur[R]. Final Research Report for JoVe NASA Grant NAG8–278,1993.
- [124]Toutanji H,Fiske M R,Bodiford M P.Development and application of lunar “Concrete” for habitats[C]//Proceedings of the Earth & Space 2006.League City/Houston: American Society of Civil Engineers,2006:1–8.
- [125]Varela Miranda L,Valdes J R,Cortes D D.Solar bricks for lunar construction[J].Construction and Building Materials, 2017,139:241–246.
- [126]Sik Lee T, Lee J, Yong Ann K. Manufacture of polymeric concrete on the moon[J].Acta Astronautica,2015,114:60–64.
- [127]Wang Kaituo,Lemougn P N,Tang Qing,et al.Lunar regolith can allow the synthesis of cement materials with near-zero water consumption[J].Gondwana Research,2017,44:1–6.
- [128]Hu Zhuojun, Shi Tao, Cen Muqiu, et al. Research progress on lunar and Martian concrete[J].Construction and Building Materials,2022,343:128117.
- [129]Bao Charun, Zhang Daobo, Wang Qinyu, et al. Lunar *in situ* large-scale construction: Quantitative evaluation of regolith solidification techniques[J]. Engineering, 2024, 39: 204–221.
- [130]Zhao Jiacheng, Luo Yuxuan, Zhang Daobo, et al. A novel approach for Martian base construction using *in-situ* resources[J].Industrial Construction,2024,54(1):102–114.[赵嘉成,罗宇轩,张道博,等.基于原位资源利用的火星基地建设方案[J].工业建筑,2024,54(1):102–114.]
- [131]Kading B, Straub J. Utilizing *in-situ* resources and 3D printing structures for a manned Mars mission[J].Acta Astronautica,2015,107:317–326.
- [132]Barkatt A,Okutsu M.Obtaining elemental sulfur for Martian sulfur concrete[J].Journal of Chemical Research,2022, 46(2):17475198221080729.
- [133]Deng Lianyin, Guo Jifeng, Cui Naigang. Progress and prospects of engineering for lunar bases[J].Missiles and Space Vehicles,2009(2):25–30.[邓连印,郭继峰,崔乃刚.月球基地工程研究进展及展望[J].导弹与航天运载技术,2009(2): 25–30.]
- [134]Sadeh W Z,Sture S,Miller R J.Engineering, construction, and operations in space III [M]. New York:ASCE,1992.
- [135]Chow P Y,Lin T Y.Structural engineer’s concept of lunar structures[J].Journal of Aerospace Engineering,1989,2(1): 1–9.

- [136]Kelso H M,Hopkins J,Morris R,et al.Design of a second generation lunar base[J].Applied Mechanics & Materials,1989,323-327.
- [137]Zhou Cheng,Chen Rui,Xu Jie,et al.*In-situ* construction method for lunar habitation:Chinese Super Mason[J].Automation in Construction,2019,104:66-79.
- [138]Xie Heping,Zhang Guoqing,Li Cunbao.Scheme of underground space utilization of lunar thermostatic layer[J].Advanced Engineering Sciences,2020,52(1):1-8.[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.]
- [139]Daga A W,Daga Ma,Wendell W.A preliminary assessment of the potential of lava tube-situated lunar base architecture[C]//Engineering, construction,and operations in space II .New York,1990:568-577.
- [140]Song Jinghua,Zhang Yangshuhe,Yuan Huanxin.A tentative plan of lunar base under lava tubes[J].Urbanism and Architecture,2019,16(7):44-51.[宋靖华,张杨姝禾,袁焕鑫.利用熔岩管道建设月球基地的规划设想[J].城市建筑,2019,16(7):44-51.]
- [141]Xie Gengxin,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.[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.]
- [142]MacKenzie B,Leahy B,Petrov G,et al.Mars homestead:A Mars base constructed from local materials[C]//Proceedings of the Space 2006.San Jose,California.Reston, Virginia:AIAA,2006:7472.
- [143]Troemner M,Ramyar E,Meehan J,et al.A 3D-printing centered approach to Mars habitat architecture and fabrication[J].Journal of Aerospace Engineering,2022,35:04021109.
- [144]李琦.“火星 1 号基地”带你登陆“火星”[J].今日科苑,2019(5):1.
- [145]Norman Foster,Irene Gallou,Marc Guberman.3D Printed Mars Habitation[EB/OL].[2026-01-20].<https://www.fosterandpartners.com/projects/mars-habitat/>
- [146]Jiang Mingjing,Wang Siyuan,Jiang Pengming,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.[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.]
- [147]Sherwood B.Principles for a practical moon base[J].Acta Astronautica,2019,160:116-124.
- [148]Haeuplik-Meusburger S,Bannova O.Reflections on early lunar base design—From sketch to the first moon landing [J].Acta Astronautica,2023,202:729-741.
- [149]Boni C,Royer-Carfagni G.Flextegrity arched structures for Lunar bases built from indigenous materials[J].Acta Astronautica,2024,215:107-116.
- [150]Brennan L,Siecinski R,Tremayne M,et al.Mechanical design of a lunar habitat structure and deployment mechanism[J].Acta Astronautica,2023,213:102-120.
- [151]Mottaghi S,Benaroya H.Design of a lunar surface structure. I :Design configuration and thermal analysis[J].Journal of Aerospace Engineering,2015,28:04014052.
- [152]Kuang Songsong.Structural design and thermal protection analysis of inflatable deployable lunar base[D].Hangzhou: Zhejiang University,2014.[匡松松.充气可展式月球基地结构设计及热防护分析研究[D].杭州:浙江大学,2014.]
- [153]Rais-Rohani M.On structural design of a mobile lunar habitat with multi-layered environmental shielding[R].NASA/CR-2005-213845,2005.
- [154]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.
- [155]Malla R B,Gionet T G.Dynamic response of a pressurized frame-membrane lunar structure with regolith cover subjected to impact load[J].Journal of Aerospace Engineering,2013,26(4):855-873.
- [156]Kondic L,Fang X,Losert W,et al.Microstructure evolution during impact on granular matter[J].Physical Review E, Statistical,Nonlinear,and Soft Matter Physics,2012,85(1): 011305.
- [157]Haslach H.Wind energy:Are source for a human missi onto Mars[J].British Inter planetary Society,1989,42: 171-178.
- [158]Goldsmith P,Reppucci G M.Advanced photovoltaic synchronous-orbit spacecraft power systems[J].Journal of Energy,1978,2(2):81-84.
- [159]Ulamc S,Biele J,Blazquez A,et al.Rosetta lander-Philae: Landing preparations[J].Acta Astronautica,2015,107:79-86.
- [160]Ellery A.Generating and storing power on the Moon using *in situ* resources[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part G:Journal of Aerospace Engineering,2022,236(6):1045-1063.
- [161]Ren Depeng,Li Qing,Xu Yingqiao.Preliminary research on the lunar base energy system[J].Journal of Deep Space Exploration,2018,5(6):561-568.[任德鹏,李青,许映乔.月球基地能源系统初步研究[J].深空探测学报,2018,5(6): 561-568.]
- [162]Hu Dinghua,Li Mengmeng,Li Qiang.A solar thermal storage power generation system based on lunar *in-situ* resources utilization:Modeling and analysis[J].Energy,2021,

- 223:120083.
- [163]Wegeng R, Mankins J, Balasubramaniam R, et al. Thermal wadis in support of lunar science & exploration[C]//Proceedings of the 6th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). Cleveland: AIAA, 2008: 5632.
- [164]Xie Heping, Li Cunbao, Sun Licheng, et al. Conceptualization of in-situ energy support technology on the Moon[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(3): 1–9. [谢和平, 李存宝, 孙立成, 等. 月球原位能源支撑技术探索构想[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(3): 1–9.]
- [165]Zhang Ning, Lu Xi, Zhao Jiannan, et al. Research status and utilization approach of Martian wind resources[J]. *Manned Spaceflight*, 2020, 26(3): 381–388. [张宁, 陆希, 赵健楠, 等. 火星风力资源的研究现状及利用途径[J]. *载人航天*, 2020, 26(3): 381–388.]
- [166]Holstein R C, Thomas P E, Merrison J, et al. Wind turbine power production undercurrent martian atmospheric conditions[J]. *Mars Work shop on Amazonian and Present Day Climate*, 2018, 2086: 4004.
- [167]Colozza A J. Analysis of lunar regolith thermal energy storage[R]. NASA sti/recon technical report n, 1991.
- [168]Tillotson B. Regolith thermal energy storage for lunar nighttime power[C]//Proceedings of the Conference on Advanced SEI Technologies. Cleveland: AIAA, 1991: 3420.
- [169]Sun Feng, Peng Hao, Ling Xiang. Progress in medium to high temperature thermochemical energy storage technologies[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2015, 4(6): 577–584. [孙峰, 彭浩, 凌祥. 中高温热化学反应储能研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2015, 4(6): 577–584.]
- [170]Miao Nan, Wang Jing, Liu Zhanhe, et al. Simulation and analysis of liquid behavior in micro-gravitational drop tower experiments[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(4): 1763–1769. [苗楠, 王菁, 刘战合, 等. 微重力落塔实验中的流体行为仿真与分析[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(4): 1763–1769.]
- [171]Lu Yaowen, Bai Xiangchun, Dai Jianshe, et al. Self-developed portable calibration apparatus of vacuum gauge with 10^5 Pa– 10^{-7} Pa range: An instrumentation study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, 40(6): 531–535. [卢耀文, 柏向春, 代建设, 等. 一种 $10^5 \sim 10^{-7}$ Pa 现场真空计校准装置的设计[J]. *真空科学与技术学报*, 2020, 40(6): 531–535.]
- [172]Landis G A. Degradation of the lunar vacuum by a moon base[J]. *Acta Astronautica*, 1990, 21(3): 183–187.
- [173]Wu Jiansheng. China's space microgravity test and on-board service[J]. *Spacecraft Engineering*, 1992, 1(4): 23–27. [吴健生. 我国空间微重力试验及搭载服务[J]. *航天器工程*, 1992, 1(4): 23–27.]
- [174]Zhu Yilin. New ideas of developing and utilizing the moon[J]. *International Space*, 2003(4): 1–3. [朱毅麟. 开发利用月球的新思路[J]. *国际太空*, 2003(4): 1–3.]
- [175]Huang Shaopeng. Unexpected climate change information obtained by the Apollo lunar heat flow experiment[C]. Hefei: The 25th annual meeting of China Geophysical Society, 2009. [黄少鹏. 阿波罗月球热流测量的意外收获: 地球气候变化信息[C]. 合肥: 中国地球物理学会第二十五届年会, 2009.]

Review on the Research and Development of *In-situ* Utilization Technology of Deep Space Resources

XI Banglu¹, QI Lin¹, JIANG Mingjing^{2*}

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract:

Significance A key aspect of enabling sustainable and affordable deep space programs is locating, extracting, and utilizing energy and resources available in deep space and converting them into the essential energy and products required for deep space exploration missions, with the aim of minimizing the dependence of exploration missions on Earth resources. This approach is known as *In-Situ* Resources Utilization (ISRU). This study reviews the current state of knowledge on *in-situ* resource utilization technologies for deep space resources in China and internationally, and examines the existing scientific challenges and future development trends of ISRU. It provides a reference for the research and development of *in-situ* resource utilization technologies in China.

Progress The current research mainly focused on resource representation and mapping, *in-situ* consumables production, civil engineering construction, *in-situ* energy production and storage, environmental resource utilization, and ISRU analog testing. 1) The mechanical and mineralogical properties and the distribution characteristics of water and gas resources in geotechnical bodies on the Moon, Mars, and some asteroids were preliminarily demonstrated through integrated sample analysis and various remote sensing probes. The results indicated that deep-space environments contained many resources, such as water ice, ³He, metals, non-metals, and solar energy. These resources can provide essential support for human activities, including life support, power propulsion, food production, and manufacturing, as well as support sustainable and affordable deep-space exploration. 2) Numerous technologies and pieces of equipment for lunar soil excavation, preparation of anhydrous concrete, and pro-

duction of oxygen and water were proposed and manufactured through indoor testing. 3) The construction of lunar and Mars bases represented an ambitious objective for human space colonization, and various structural configurations were proposed while considering the complex environmental and geological conditions of deep space. However, existing lunar and Mars bases remained at the conceptual design stage, and quantitative design from a civil engineering perspective has not yet been conducted. Systematic and comprehensive quantitative calculations for the bearing capacity of lunar soil, the selection of lunar base foundations, detailed loading design, structural stability, and disaster protection remained insufficient. 4) Energy is the cornerstone for the long-term operation and maintenance of future lunar bases. Abundant energy resources were identified in deep space, such as solar energy on the Moon and wind energy on Mars, and feasible *in-situ* energy production and storage technologies were proposed while considering the complex deep-space environment. However, these energy production and storage technologies remain at the conceptual stage and lack systematic theoretical foundations, technological development, equipment support, and indoor testing and verification under deep-space environmental conditions. 5) The high vacuum, low gravity, and weak stability zone of the Moon represent valuable environmental resources that can hardly be reproduced on Earth, and Mars is the closest external body in the solar system with environmental conditions similar to those of the Earth. However, due to limited exploration and development on the Moon and Mars, these special environmental resources cannot yet be effectively utilized, and no systematic technologies have been developed for the comprehensive utilization of the extreme environments of the Moon and Mars. 6) NASA possesses significant technological leadership in *In-Situ* Resources Utilization, and a series of relatively mature technologies and related equipment have been developed over recent decades. In addition, a series of simulated field experiments was conducted, completing tasks such as resource characterization and mapping, soil mining, and *in-situ* resource treatment and product preservation studies (anhydrous concrete, oxygen), which demonstrated the feasibility of NASA's existing technologies and equipment.

Conclusions and Prospects Over the past half-century, NASA, by virtue of the advantages of Apollo's abundant sample reserves and advanced deep space exploration technologies, has conducted many studies on the geology and engineering of the Moon and Mars. Therefore, it has established an advantage of "early knowledge and early leadership" in the field of deep space resource utilization. However, research on ISRU technology and equipment has only recently begun in China. Many technologies remain at the conceptual design stage and lack corresponding operable equipment or practical design programs, particularly in the areas of *in situ* resource extraction and transfer, *in situ* product production and storage, lunar base structure and protection design, and energy production and storage. Therefore, it is necessary to conduct targeted feasibility technology research and develop operational equipment that accounts for the complex environments of the Moon and Mars. Then, these technologies should be integrated into an implementable ISRU technology and equipment system to achieve sustainable and affordable development for China's future deep space exploration.

Key words: resource in deep space; *in-situ* resource utilization; lunar base; lunar soil

(编辑 李轶楠)

引用格式: Xi Banglu, Qi Lin, Jiang Mingjing. Review on the research and development of *in-situ* utilization technology of deep space resources[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(2): 1-22. [奚邦禄, 祁麟, 蒋明镜. 深空资源原位利用技术研究发展综述[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(2): 1-22.]