

· 专题:双清论坛“月球科研站的关键科学问题” ·

月球原位资源利用及关键科学与技术问题*

刘建忠^{1, 2**}

李雄耀^{1, 2}

朱凯^{1, 2}

许英奎^{1, 2}

杨溢^{1, 3}

张敬宜^{1, 3}

雷丹泓^{1, 2}

罗泰义^{1, 2}

凌宗成⁴

王功⁵

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081
2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 山东大学(威海), 威海 264209
5. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094

[摘要] 月球探测已成为21世纪各航天国家深空探测竞相追逐的首要目标,在月球上建设短期有人值守,长期无人智慧运行的月球科研站或者月球基地已成为人类共同的愿景。同时,把认识月球和利用月球作为同等重要的科学目标,是新时代月球探测最为显著的特点。月球原位资源利用既是新时代月球探测的科学目标,也是保障月球基地建设和运行顺利进行的重要途径,越来越受到关注。及早开展月壤、水冰以及太阳能等地外原位资源利用背后的基础科学和技术问题的研究,是我国在新一轮月球探测中抢占先机的必由之路。本文从月球基地建设的愿景出发,开展了月球原位资源利用的需求分析,阐述了月球原位资源利用的必要性和可行性,对月球原位资源利用过程中的关键科学与技术问题进行了梳理。梳理的关键科学和技术问题包括四个方面:(1)月球关键资源勘查规范;(2)月壤综合利用;(3)月面能源高效持续利用;(4)月球资源开发利用过程中的环境危害防护和权益保护。

[关键词] 月球基地;原位资源利用;勘查规范;月壤综合利用;月面能源

1 新世纪月球探测科学目标的重大转变

Apollo探月时代的主要科学目标是认识月球,新时代月球探测工程将认识月球和利用月球都作为重要的科学目标,是月球探测工程任务的时代需求和重大跨越^[1-6]。根据1979年联合国大会通过的《关于各国在月球和其它天体上活动的协定》(即《月球公约》),月球资源属于全人类,遵循先到先得的原则。2015年美国制定了《2015外太空资源探索与利用法》,规定“先勘探即先拥有”的外太空资源商业开发原则。2016年欧洲航天局公布了建造“月球村”的太空计划,将获取月球天然资源视为首要任务之一。2018年,时任美国总统宣布美国将于2028年重返月球并建立月球基地。2019年3月,时任美国



刘建忠 博士生导师,中国科学院地球化学研究所研究员。中国空间科学学会理事,中国宇航学会深空探测专业委员会委员。主要从事月球与行星地质方面的研究工作,已发表科研论文200余篇,其中SCI论文80余篇,参与编写专著3部。先后主持或参加国家自然科学基金、科技基础性工作专项、中科院战略性先导专项、前沿重点项目、国家重大专项、863计划课题等40余项。2000年被评为中国科学院优秀博士后,2002年获侯德封矿物岩石地球化学青年科学家奖,2007年获中国青年科技奖,2012年获国家科技进步奖特等奖,2017年作为负责人入选中科院创新交叉团队,2019年入选贵州省核心专家,2020年获国务院特殊津贴。

副总统公布了“阿尔忒弥斯”计划,其目标是建立月球永久基地,为载人登陆火星做准备。“阿尔忒弥斯”计划在2024年实现重返月球,并运送第一位女

收稿日期:2022-03-02;修回日期:2022-05-02

* 本文根据第302期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email:liujianzhong@mail.gyig.ac.cn

性航天员登上月球。2020年4月6日,美国总统签署《关于鼓励国际支持太空资源的获取和使用》(Executive Order on Encouraging International Support for the Recovery and Use of Space Resources)的行政令,鼓励美国公民在月球或其他星球从事商业活动,美国并不将太空资源视为全球共有资源。该政令的颁布,被媒体解读为是美国吹响了抢夺太空资源大战的号角。另外,俄罗斯、日本以及印度等国家也通过不同的形式公布了各自的月球探测规划和设想,总体目标都是建立月球基地,开展月球资源的利用^[4]。

2020年12月17日,我国嫦娥5号月球探测器携带从月面采集的1731克月球样品返回地球,标志着我国探月工程“绕”“落”“回”三步走的无人月球探测战略成功实现。近年来,在国防科工局和921办的领导下,我国也展开了无人月球后续工程以及载人月球探测工程的论证工作,以认识月球、利用月球资源为主要科学目标,长远目标是建立短期有人值守、长期无人运行月球科研站。

2021年6月16日,在全球空间探索大会上,中俄联合发布了《国际月球科研站路线图 V1.0》和《国际月球科研站合作伙伴指南 V1.0》,确定国际月球科研站的建设预计分为勘、建、用三个阶段实施。其中:(1)2021—2025年为勘察阶段,主要任务是科研站的设计和选址,拟实施的探测任务包括中国的CE-4、CE-6和CE-7任务,俄罗斯的Luna-25、Luna-

26和Luna-27,以及其他合作伙伴可能开展的高精度软着陆任务;(2)2026—2030年完成指挥中枢技术验证,开展月球采样任务,具体包括CE-8和Luna-28任务;2030—2035年,拟完成建设科研站的在轨和月面能源、通讯、运输等设施;(3)2036年之后,将开始载人着陆探测。科研站可能的目的地是月球正面西北部的阿里斯塔克斯撞击坑和马里乌斯山,以及月球南极附近的阿蒙森撞击坑。

月球探测是未来一个时期国际深空探测的热点,而建立月球基地,开展月球原位资源利用将是主要的科学和工程目标,与阿波罗时代相比,月球探测的目标发生了重大的转变^[3,4]。

2 月球原位资源利用及其必要性和可行性

2.1 原位资源利用的研究概况

原位资源利用(In Situ Resource Utilization, ISRU)技术是利用地外天体原位资源转化为空间任务所需各种产品的一系列技术手段^[5]。原位资源利用技术可实现勘查和提取月球等天体上的可利用资源,能显著减少从地球发射到目标天体的载荷,有效节省发射成本。所以,原位资源利用技术是供应月球空间站和月球基地等中长期任务长期运行较为经济有效的途径(图1)。实施原位资源利用技术包括至少六个关键的环节:资源勘探、资源获取、资源加工、原位制造、原位建筑、原位能源。原位资源利用的技术路线至少包括四个步骤:(1)对目的地勘测、

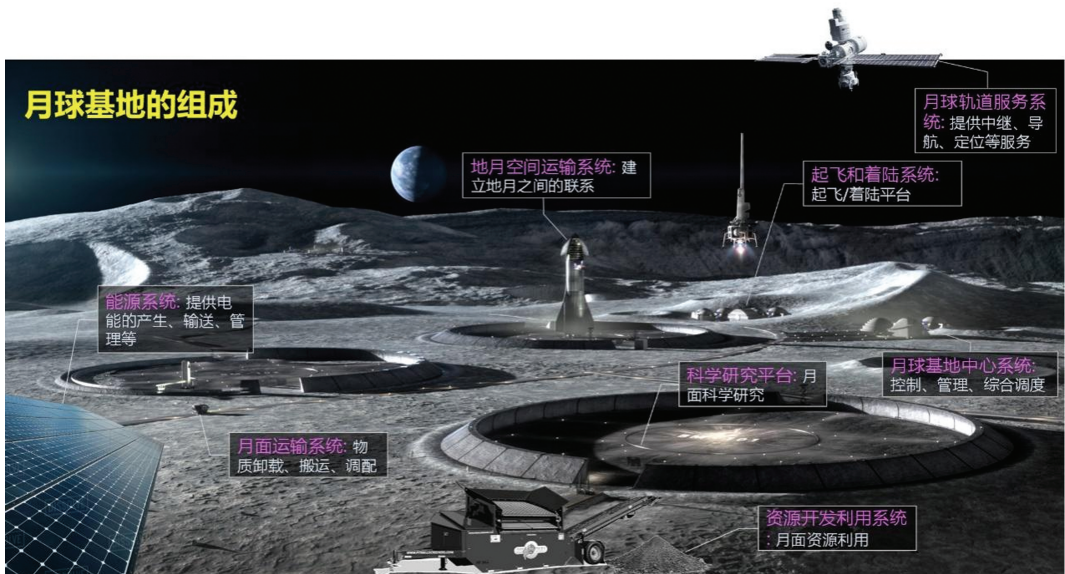


图1 月球基地假想图^①

① 图片引自网络, <https://spaceth.co/3d-print-technology/>, 略有改动。

勘探和测绘,以确定可利用资源;(2) 原始资源的采集和预处理,以获取资源;(3) 将原始资源转化为推进剂、能源、生保等消耗品;(4) 制造产品并安装基地原位资源利用设施^[1, 7]。

月球原位资源利用的概念提出较早。在 Apollo 任务首次载人登月之前,Lowman^[8]分析了载人月球和行星探测的经济性,最早提出月球乃至行星的原位资源利用设想。该工作不但统计了月球上潜在资源的种类,而且设想了月球资源可能的利用方案,指出原位利用月球和行星资源制造推进剂,可以将行星际飞行的成本降低 75%~90%。该设想是月球原位资源利用概念的雏形。此后较长一段时间,月球研究侧重点偏向大推力火箭,月球样品测试,月球成因研究,原位资源利用研究几近停滞。直到 20 世纪 70 年代末 80 年代初,Ash 等^[9]将利用火星表面原位资源实现推进剂制造的技术方案概括为 ISPP(In Situ Propellant Production),提出原位利用行星资源制造推进剂降低空间任务成本。ISPP 后来被更全面的 ISRU 所代替,Freitas 和 Gilbreath^[10]针对月球固体物料,进行了结构材料制造流程调研,认为月球原位冶金和制造合金型材具备可行性,并首次提出 ISRU 这一缩写。

20 世纪 80 年代中后期,Mendell^[11]提出了“月球前哨站”和“月球基地”设想。随着 20 世纪 90 年代月球探测的再度兴起,月球原位资源利用研究再度受到重视。与月球基地配套的金属材料制造、配件制造方案,能源供给方案等,如雨后春笋般涌现,例如 Criswell 和 Waldron 提出的月表原位资源制造硅光电池阵列方案,Keller 和 Taberroux 提出的氟电解还原冶金方案,Haskin 提出的熔岩电解冶金方案,Allen 提出的月土烧结建材方案等^[12-15]。

自 20 世纪 90 年代以来,月球和行星科学家提出了制备或回收水、氧气、氢气的概念性方案。例如 Senior 使用真空热分解法处理月壤制备 O₂ 以及 Si 的低价氧化物,Talor 和 Carrier 提取月壤氧气和挥发分的方案,前述 Haskin 提出的熔岩电解冶金过程回收氧气的方案,Allen 提出的月壤烧结建材过程中回收水的方案,但这些方案回收的水仅是数十至数百 ppm 数量级的痕量,对月球基地维生系统而言水的制备成本过高^[14-17]。在月球极区水冰富集的理论基础上,尤其是克莱门汀探测器发现月球极区可能存在数亿吨的水冰之后,从月球高纬度地区开采水冰制氧、制氢的方案逐渐走入了人们的视线^[18, 19],但永久阴影区的极低温环境给方案的实施带来了

困难。

月球 ISRU 系统也越发重视月表能源的综合利用,尤其是太阳能、核能。在前述 Criswell 和 Waldron 提出的硅光电池阵列方案基础上,Ignatiev^[20]提出了月表喷涂太阳能电池和光伏机器人,Duke^[21-22]提出模块化原位制造月表太阳能电池单元,Thieme 等^[23]提出了利用富克里普物质月壤的月表核能发电系统,通过放射性热源实现斯特林发动机发电。

2000 年以来,各种月球原位资源利用方案开始由设计图走进现实,转为实验室验证阶段^[24-33]。美国 NASA 开展了利用火山灰、钛铁矿等制备 O₂、H₂ 和 H₂O 等的技术验证试验。2008 年美国设计了第一台可演示验证的 ISRU 样机,进行了月壤开采、水和 O₂ 制备、资源储存等功能验证。以氧气制备为例,从月壤金属和非金属氧化物中提取氧的概念性方案超过 20 种,其中部分开展了缩比验证试验,如 Currier 等^[25]提出的一种利用等离子体提取金属和 O₂ 回收工艺,Anand^[32]等采用低压下运行的高温太阳能反应器对不同氧化物材料进行热还原的初步可行性实验,Karr^[30]开发出一种使用离子液体从月壤中回收金属和 H₂、O₂ 的新方法。Cardiff 等^[26]使用 1 m² 菲涅耳透镜蒸发月壤模拟物,成功蒸发约 1 g 的气体,之后对产生的气体进行了质谱分析,结果表明产生了 O₂。另外,美国 NASA 和欧洲 ESA 已经联合研发了原位资源利用设备——火星氧气制备和就位利用实验装置(Mars Oxygen ISRU Experiment, MOXIE)。该设备已搭载在美国 Mars 2020 探测任务的毅力号上,首次在行星探测任务中开展资源就位利用的实验,并成功在火星上利用大气中的二氧化碳制成氧气^[34]。

因此,地外物质原位资源利用已经具备了良好的理论基础和技术可行性,有望在未来月球探测和基地运行中实施。

2.2 月球原位资源利用的必要性和紧迫性

如前所述,21 世纪以来的各个航天国家把利用月球、建立月球基地作为重要的科学目标,而原位资源利用作为实现这一科学目标的重要途径受到越来越多的关注。月球原位资源利用主要有以下两个方面的优势,一是降低运行成本,二是降低运行风险,因此开展月球原位资源利用是必要的。

(1) 降低月球基地运行成本

月球科研站的建设和运转,月面生存和生活的保障,月面科学实验和深空探测等都需要强大的资

源、能源和物质保障。按照目前的研究结果,有两种解决途径,一是从地面携带,二是月面的资源原位利用。按照目前的技术水平,地一月之间每公斤的运输成本约在 50 000~90 000 美元之间,通过飞船往返地一月来运送物质支持人类在月面活动耗费巨大、效率较低、可行性较低。根据目前的探测结果,月球上富含多种类型的资源、能源及基础建设材料,通过原位资源利用技术,可以提供宇航员在月球上所需的生命支持物质(特别是氧气和水)、从月球返回以及走向深空的推进剂(如液氢、液氧)、辐射防护材料(月壤)、生产金属和陶瓷作为月球基地建设的必需材料和太阳能电池板的支架等,降低地月之间运输的运输量和运输成本,提高月球科考站的自我维持能力和航天员的月面生存时间。因此,如果可以在月面实现原位综合利用,那将为人类的月面活动提供强有力的支撑。

(2) 提高自主性和可靠性,降低运行风险

通过月球原位资源利用,可实现月球基地资源、能源和生命必需品的自给自足,月球基地成为一个独立运行的系统,摆脱对地球资源和能源供给的依赖,降低因地月运输发射窗口选择、地球自然灾害、空间天气威胁等偶发事件对月球基地正常运行的影响。月球基地资源和能源的综合循环利用,可以提高自主性,减少因地月运输等对月球基地选址的约束。减少人为因素对航天任务和宇航员

生命的威胁,提升月球基地的可靠性,降低运行风险。

同时,按照国际上遵循的先到先得原则,抢先获取月球优质资源的所有权和开采权是原位资源利用中亟待开展的工作。根据 2015 国际月球公约,月球资源遵循先到先得原则。美国也制定了《2015 外太空资源探索与利用法》,规定谁先勘探,谁先拥有的商业开发原则,将重返月球并建立月球基地的时间提前到 2024 年。开发利用月球资源并建立月球基地也是我国未来月球探测的主要目标之一,如果能抢先占领优质资源的所有权和开采权,将降低资源原位利用的成本,为未来基地建设和运行带来更大的便利。可见月球资源勘查和利用也属于具有开疆拓土性质的战略性工程,面对国际竞争,抢先获取月球优质资源所有权和开采权是资源开发利用的重中之重。

2.3 月球原位资源利用的需求分析

资源原位综合利用是月球基地建设的主要目标之一,根据目前对月球的认识以及月球基地建设的愿景,月球是人类开展深空探测的前哨站和中转站,是人类资源和能源地外接替基地的最优选择,其超高真空、低重力也是开展许多科学实验的理想场所。根据月球基地建设的愿景,未来月球基地的需求方面及主要建设内容如表 1 所示。

表 1 月球基地的建设愿景及需求

月球基地的建设愿景	建设需求	须开展建设的内容
短期有人值守,长期无人智慧运行	满足有人工作和生存的环境 满足长期智慧运行	生活和工作的场所的建筑(房屋) 生存必须品的制备(食物,水,氧气) 持续稳定的电力供应 可以适应月面环境机器和设备
人类走向更遥远深空的中转站和前哨站	发射深空探测器	火箭燃料制备(液氢+液氧) 深空火箭与探测器主要部件(外壳、大的部件)的生产 发射场系统的建设
人类资源和能源的地外接替基地的最优选择	能源基地 资源基地	太阳能及核燃料的分布与储量计算 适应月面环境的发电装置研制 资源需求研究 资源元素的分布与储量计算 资源元素的赋存状态识别 适应月面环境的冶炼装置研制
开展多学科科学实验的理想场所	材料科学研究 生命科学研究 物理科学研究	开展晶体生长、冶金试验和特殊材料研究,探索物理性能、力学性能等的影响规律与机理,研发新型材料 利用月球空间环境开展生物学研究 利用月球的空间环境开展量子、粒子的物理特征等方面的研究

其中,对于人类资源和能源的地外接替基地的最优择这一愿景,目前还存在很多的争议,因此,本文将月球原位资源利用的功能需求综合为两个方面。

第一,月球基地本身建设的需求。

(1) 人类活动需求:基地必须具备人类生存和活动的场所,必须开展人类工作和生活场所的建设,并开展人类生保物质的制备。例如:水、氧气和氮气(或氩气)是人类在太空生存和工作所必需的。需要月球水、氧气和氮气的就位开采或者从地球运输。

(2) 原材料就地需求:基地的建设和维护需要大量且持续性的材料供应,如果全部从地球获取需要持续性的运输与供应,不符合实际^[1, 35]。因此,无论开始建设所需的材料还是后期维护所需的材料,尽量就位开采,并利用3D打印技术进行简单零件与部位的建设^[36, 37]。

(3) 能源与电力供应需求:为了满足长期智慧运行,必须进行持续稳定的电力供应,并有可以适应月面环境的机器和设备。为了提供持续稳定的电力供应,需要分析月球的太阳光照强度并制备相应的光电装置^[38]。同时,可研究利用月球³He进行核聚变发电或者KREEP岩中的U-Th等进行核裂变发电用以满足供电需求^[6]。

(4) 科学实验需求:在月球上开展基地实验研究,为月球本身及类地行星的科学研究提供了一个平台。例如:材料科学研究、生命科学研究、物理科学研究、地质科学研究等。

第二,月球基地作为深空探测中转站的需求。

(1) 推进剂的需求:为实现深空探测中转站的功能,需要开展太空探测器制造以及运输燃料的生产。以现有的技术而言,要让有效载荷能够在行星表面着陆或发射,唯一的方式是利用火箭引擎,在太空中,有效载荷发射升空仍然需要推进剂,对于火箭来说,液氢和液氧是现如今效率最高的推进剂选择。

(2) 探测器部件就位生产的需求:深空探测的火箭与探测器主要部件,这些主要部件的主要原材料涉及到Fe原料、Ti原料等,都可以就位制备,需要设计恰当的制备方案与设备。

(3) 发射场系统的建设:需要的原材料与月球基地的本身建设类似,但是需要设计相应的方案与材料需求。

上述月球基地和深空探测中转站建设的功能需求可以综合为三个方面的资源需求:1) 能源需求;2) 生保物质需求和3) 硬件建设物质需求。其中能

源主要为基地各类设备的正常运行以及宇航员生存提供安全高效的电力供应。生保物质是保障宇航员生存所需的食物、氧气和水等。而硬件建设物质包括建筑原材料,金属非金属材料和各种材料试剂等。

2.4 原位资源利用的可行性

如前所述,月球基地的建设与运行需要有三个方面的资源需求,月球上可资利用的资源能不能满足上述需求是月球原位资源利用必须要回答的问题。经过60多年的月球探测活动,目前获得的探测结果可以给出一个肯定的答案。

2.4.1 能源利用

(1) 太阳能

由于月球表面几乎没有大气,太阳辐射可以长驱直入。计算表明^[39],每年到达月球范围内的太阳光辐射能量大约为12万亿千瓦,相当于目前地球上一年消耗的各种能源所产生的总能量的2.5万倍。按太阳能能量密度为1.353千瓦/平方米计算,假设在月球上使用目前光电转化率为20%的太阳能发电装置,则每平方米太阳能电池每小时可发电2.7千瓦时,若采用1000平方米的电池,则每小时可产生2700千瓦时的电能。由于月球自转周期恰好与其绕地球公转周期的时间相等,所以月球的白天是14天半,晚上也是14天半,月球的一天相当于地球近一个月的长度,这样月表就可以获得更多的太阳能。如果在月球表面建立全球性的并联式太阳能发电厂,就可以获得极其丰富而稳定的太阳能,这不但解决了未来月球基地的能源供应问题,而且随着人类空间转换装置技术和地面接收技术的发展与完善,还可以用微波传输太阳能,为地球提供源源不断的能源。

通过对月球的遥感探测以及采样返回分析,月壤中氧元素占40%,硅占20%^[40]。Si主要存在于斜长岩的钙长石中,推测品位为70 wt%。根据月球遥感探测数据可知,月球上斜长岩的分布超过了月球表面的60%^[40],从而估算斜长岩面积可达 2.3×10^7 km²,根据高地地区月壤厚度约为10 m估算^[41],得出斜长质月壤体积约为 2.3×10^5 km³;其次还利用钛铁矿的碳高温还原流程可以生成单质硅,钛铁矿主存在于月海玄武岩中,而玄武质月壤体积约为 3.2×10^4 km³。由此可以看出,月球上Si的储量非常丰富,而Si元素是太阳能电池板以及半导体元件必不可少的元素。制造1平方米太阳能发电板中的电池片大概需要400~500 g左右的硅,月壤中的硅含量完全能满足太阳能发电板的制

造需求。

(2) 核聚变能

^3He 是一种清洁、安全和高效的核聚变发电的燃料。整个月球表面都被月壤覆盖,在月海区平均厚约 5 米,月陆区厚约 10 m^[41]。这些土壤长期接受太阳的照射,富集由太阳风粒子直接注入的挥发性化学元素和同位素,这其中就包括大量的 ^3He 。据“阿波罗”和“月球号”探测器实测结果,按照 ^3He 在总的氦元素中的比值,可计算出 ^3He 在月壤中的平均含量为 3~4 ng/g,从而得到月壤中 ^3He 的资源总量可达 100 万~150 万吨^[41],其中静海、风暴洋等是 ^3He 资源的重要富集区,其储量分别约为 30 万吨和 55 万吨。研究表明静海区域内近 50%的月海可以开采 ^3He ,是未来开采月球 ^3He 资源的首选区域^[42]。模拟计算表明,在加热至 1000 k 以上时,月壤中 ^3He 可以得到大量释放^[43]。美国和苏联在 1985 年提出了国际热核聚变实验堆计划(ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor)。在各国专家的通力合作下,成功制造了一系列原型部件模块,并开展了实验,论证了实验性聚变堆的工程技术可行性,目前 ITER 计划已从建造阶段迈入装配阶段^[44]。2021 年 8 月,美国在加利福尼亚州劳伦斯利弗莫尔国家实验室的国家点火装置获得超过 1.3 兆焦耳的能量,这一突破使得核聚变处于点火的临界点,使可控核聚变商业化应用的实现向前迈进了一大步^[45]。如果采用 D- ^3He 核聚变发电,美国年发电总量仅需消耗 25 吨 ^3He ^[41];中国 1992 年的年发电总量只需 8 吨 ^3He ,100 吨 ^3He 就足以供应全球一年的电能需求。以目前全球电价计 1 吨 ^3He 的价值约 40 亿美元,可见核聚变发电具有非常大的前景^[41, 42]。

(3) 核裂变能

月球的放射性元素 U/Th,也有很高的储量,可以用作核裂变的原料。U、Th 含量高的区域主要集中在月球正面的西部月海区及其附近;而含量次之的区域位于南极—艾肯盆地内。在月球背面,天然放射性元素含量普遍表现为低值特征。根据月球探测器获得的数据可以知道,月球上的放射性元素 U/Th 主要存在于月球正面的 KREEP 岩和其他演化程度较高的岩石矿物中(例如磷灰石、陨磷钙钎石等),U 平均含量为 6.1 $\mu\text{g/g}$,Th 平均含量为 22 $\mu\text{g/g}$,根据生热元素的简单计算模式^[46]和高 Th 覆盖面积^[47],可以估算出风暴洋区下覆 KREEP 岩的体积约为 $2.2 \times 10^8 \text{ km}^3$ ^[48],从而计算得出钍 8.4

亿吨和铀 3.6 亿吨。考虑到有 Lunar Prospector 探测的 Th 含量仅仅是混合型的结果,那么实际 KREEP 岩中的 Th 含量肯定还要高一些。而全世界铀的储量 160 万吨左右,与地球相比月球上核裂变燃料也有丰富的储量。

2.4.2 生命与生保物质

(1) 水冰

月球存在水冰的设想最早是由美国科学家 Watson 等^[49]1961 年提出的,他们认为月球极地一些撞击坑底部可能处于太阳照射不到的永久阴影区(两极永久阴影区),表层和次表层温度将常年维持在 40 K 左右。这些水冰的来源可能包括:1) 彗星(含水量 > 70%,质量约为 $7 \times 10^3 \text{ kg}$)或小天体带入;2) 太阳风中的氢原子与月壤和月岩中的 FeO 发生还原产生反应;3) 月球深部的岩浆水。有关研究表明,上述这些水中应有 20%~50%以冰的形式储存在月球的两极永久阴影区内^[50]。传感卫星(LCROSS)于 2009 年撞向南极卡布斯永久阴影陨石坑,测量得该区风化层的水冰丰度为 $5.6 \pm 2.9 \text{ wt}\%$ ^[51]。永久阴影区面积大约 1850 km^2 ,按照月壤平均密度 1.5 g/cm^3 计算^[52],则永久阴影区内表面 40 cm 风化层中所含水冰的总质量约为 0.6 亿吨。

(2) 钛铁矿还原

月球上尤其是正面,广泛分布着月海玄武岩,月海玄武岩中的钛铁矿含量可高达 25%—30%(体积比)。钛铁矿是铁(Fe)、钛(Ti)金属的主要来源,通过钛铁矿与氢的反应可以得到大量水($\text{FeTiO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$),这也将是未来月球基地获取水资源的重要途径之一,为生命和生保物质提供基础。消耗 1 t 钛铁矿,同时需消耗 0.013 t 氢气,可以生成 0.12 t 水,0.37 t 铁和 0.52 t 二氧化钛。如果按照开采的月壤厚度为 40 cm 计算,生产 1 t 水,大约需要 10 t 的钛铁矿,只需要开采 220 m^2 的月海区月壤。而且此方法可以在月球基地附近直接生产^[53, 54]。

为粗略估算月海玄武岩中钛铁矿的资源量,首先要探测月海玄武岩的分布面积与月壤厚度及其钛铁矿的含量。目前较为精确的计算月海玄武岩面积与厚度的方法,是根据撞击坑(盆地)的周边溅射物的多光谱成像数据判断月海物质(玄武岩)和高地物质(斜长岩)的分布特征,再利用成坑模式推算出月海盆地玄武岩的延伸深度,进而计算玄武岩的体积^[55, 56],根据这一模式,粗略估算出月表 22 个月海

玄武岩的总体积约为 106 万 km^3 ，若以钛铁矿含量超过 8%，即 TiO_2 的含量 $>4.2\%$ 的月海玄武岩进行估算(通过 Clementine 多光谱成像数据的分析，玄武岩中 TiO_2 含量大于 4.2% 的月海玄武岩占月海玄武岩总体积的 30% 左右)，则经计算月球上 TiO_2 的含量 $>4.2\%$ 的月海玄武岩中钛铁矿 (FeTiO_3) 可达 85 万亿吨。富含钛铁矿的玄武质月壤是月表的松散堆积，属于相对较容易开发利用的优质资源。通过遥感观测可知月海玄武岩覆盖着约月球表面的 17%^[40]，由此估算出的面积约为 $6.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，同样，根据月海区域月壤厚度约为 5 m^[41]，估算玄武质月壤体积约为 $3.2 \times 10^4 \text{ km}^3$ 。若以钛铁矿含量超过 8%，即 TiO_2 的含量 $>4.2\%$ 的玄武质月壤作为开发利用的主要对象，则需进一步计算 TiO_2 含量大于 4.2% 的玄武质月壤体积。通过 Clementine 多光谱成像数据的分析，玄武岩中 TiO_2 含量大于 4.2% 的玄武质月壤占总体积的 30% 左右，若按照月壤平均密度 1.5 g/cm^3 计算^[52]，月球上富含钛铁矿的优质月壤 ($\text{TiO}_2 > 4.2\%$) 中钛铁矿 (FeTiO_3) 总资源量约为 1.2 万亿吨。尽管上述估算带有很大的不确定性，但可以肯定的是，月海玄武岩中蕴涵着丰富的钛铁矿，是未来月球开发利用最重要的矿产资源之一。

(3) 磷酸盐的利用

经探测，月球正面存在较高含量的 KREEP 岩和经过高度演化的岩石类型，而这些岩石中富含 K 和 P 这些生保物质的基础元素。Haskin 等^[57] 以及 Fegley 和 Swindle^[58] 经过研究计算讨论得到，K 平均含量为 0.8 wt. %，最大含量可达 1.8 wt. %，推测品位为 9 wt. %，P 的平均含量为 0.6 wt. %，最大含量可达 2.2 wt. %，推测品位为 10 wt. %。结合 KREEP 岩中的 U 和 Th 的平均含量以及储量，可以得出月球上 K 和 P 的储量也非常庞大的推论。

2.4.3 硬件建设

(1) 月壤基建

以目前的科技发展趋势，利用月壤原位开展 3D 打印是建造月球基地和其他仪器设施硬件的主要技术手段之一。月海月壤平均厚度 5 m，足以满足基地建设和仪器设备制造的需求。在月球上，可将太阳能或核聚变能方便地转化成微波能，利用微波将月壤烧结技术制造所需硬件^[59]，例如微波烧结路面硬化，房屋防护层制造等。3D 打印和微波烧结技术在地球上已经完全可以实现，而应用于月球时所需的原材料可以就地取材，现在需要考虑和验证月面

环境对打印和烧结仪器，烧结过程，以及产出的构件力学、机械性质等方面的影响。

(2) 金属冶炼

钛铁矿冶炼也依赖于玄武岩质月壤。月球蕴藏有丰富的金属矿产资源，据上述可知，月球上月海玄武岩分布广泛，其中可开发利用的钛铁矿 (FeTiO_3) 的总资源量非常丰富， TiO_2 的含量 $>4.2\%$ 的月海玄武岩中钛铁矿资源量达到 85 万亿吨，其中方便开发利用的优质月壤中钛铁矿约 1.2 万亿吨。利用钛铁矿的氢还原流程可以生成非常可观的金属铁 (Fe) 和 TiO_2 ；克里普岩是月球高地三大岩石类型之一，因富含 K(钾)、REE(稀土元素) 和 P(磷) 而得名，通过模式计算，仅在风暴洋区克里普岩中稀土元素的资源量约为 225 亿~450 亿吨^[41, 42]；此外，月球还蕴藏有丰富的铬、镍、钾、钠、镁、硅、铜等矿产资源，将会为人类社会的可持续发展做出贡献。

3 原位资源利用亟需解决的关键科学与技术问题

如前所述，月球原位资源利用是必要的、紧迫的也是可行的，因此开展原位资源利用背后的科学和技术问题的研究刻不容缓，本文按照月球资源利用的需求以及利用的过程，对其亟需解决的关键科学和技术问题进行了梳理。主要包括四个方面的内容：(1) 月球关键资源勘查；(2) 月壤的综合利用；(3) 月面能源高效持续利用以及；(4) 月球资源开发利用过程中的环境危害防护和权益保护。

3.1 月球关键资源勘查

资源勘查是原位资源利用的第一步，是“开疆拓土”的战略性工作和国际竞争的“国家行动”。月球矿产资源勘查可为认识月球演化和月球成矿机制提供原始资料，拓展人类对地外矿产资源认知的理论体系。其主要目标是按照勘查规范，完成月球关键资源的预查、普查、详查和勘探。通过地质、物探、化探工作，以及钻探施工，对月球矿产进行系统勘查，查明其形态、规模、产状和品位变化情况，查明矿石的物质组成、矿石质量。在勘查工作的基础上，圈定月球最优质矿产资源富集区，计算资源储量，评估经济价值，为资源利用提供物质基础。主要需要关注的科学问题和关键技术包括：

(1) 关键资源的特征和成因研究：这里的关键资源主要为：钛铁矿、KREEP、水冰、挥发分等；

(2) 矿产工艺矿物学研究：需要重点关注的矿物有钛铁矿、磷灰石和白磷钙矿等；

(3) 资源勘查规范研究:根据月球资源的类型、特点等开展月面矿产资源勘查规范的研究,建立具有自主知识产权的勘查规范,指导后续的月球探测任务。

3.2 月壤的综合利用

月球基地基础设施建设、生保物质生产以及能源的供应都涉及到月壤的综合利用,特别是玄武岩质月壤的利用。主要包括:

(1) 利用月壤开展月球原位基建

月球基地建设必须符合一定的标准和原则:

1) 附近资源可以支撑基地建设和运维所需的大部分材料、能源和生保物质;2) 符合月球环境和科学原理,具备长久的安全性和可靠性;3) 可抵御月面极端环境,保障宇航员和仪器的安全和正常运行。根据有人月球基地主体结构制造地点的不同,即月球或地球,可以将月球基地的构建途径分为两种,月面组装和月面建筑^[60, 61]。根据月球基地建设不同阶段的目标和需求,月球基地结构和架构可能有以下几种方式:太空舱式(初期阶段,以月面组装为主,有刚性舱、柔性舱以及刚性舱+柔性舱几种方案)、洞穴式(过渡阶段,月面组装+月面建筑)、建筑式和3D打印式(后期阶段,以月面建筑为主)^[60-62]。而目前需要对这几类基地开展经济合理性,月面实施过程的可行性等方面的综合评估,结合后续的月面验证工作,以确定最优方案。月面基础设施需要大量建筑材料,如果所有材料都从地面上行则会产生巨额运输成本,不具有经济上的可行性。以月壤为原材料进行月面基建所需各类单元结构件的原位3D打印和微波烧结制造,可大幅降低成本,是确保月面基建任务高效开展的关键,同时还可用于月球科考过程所需工具的原位制造和维修,提升任务可靠性。目前的月球ISRU系统在理论和技术上还存在着诸多挑战,例如月壤的采选冶和运输过程的自动化以及具体实施方案等仍然面临着许多工程技术问题,后续利用月壤开展月面原位基建则可能主要采用3D打印和微波烧结的方式进行,其中涉及的主要科学和技术问题包括:

- ①月球自主ISRU系统开发和验证;
- ②月球建筑物结构和架构研究;
- ③低重力环境下粘结剂浸润行为改变机理;
- ④月面环境对于固化材料降解;
- ⑤结构件在月面环境下的性能衰减机理;
- ⑥微波烧结技术;
- ⑦月面低重力环境下月壤纤维制备。

(2) 利用月壤进行关键金属的月面冶炼

月面基础设施需要大量金属耗材,而玄武岩质月壤中含有铁、钛、铝、镁、硅等大量的矿产资源,尤其具备丰富的钛铁矿,是提炼钛、铁等关键金属的重要原材料。从玄武岩质月壤中冶炼关键金属在科研站建设过程中具有重要的应用价值,月面金属冶炼中涉及的主要科学和技术问题包括:

- 1) 月面冶炼的热力学和动力学规律;
 - 2) 低重力条件下流化床中的流场控制;
 - 3) 微重力和异常温度波动下的金属提炼工艺;
 - 4) 铁、钛金属的真空精炼技术。
- (3) 利用月壤制备氧气

氧气是航天员太空生存和深空航天器发射的基本保障。月壤制氧的实现可以摆脱对地球供氧的依赖,是月球科考站自主运行的生命保障,显著拓展人类月面驻留能力和太空持续生存能力,具有重要的应用价值。按照目前的技术发展水平和趋势,在月面上进行氧气制备主要有两种途径,一是利用月壤中的钛铁矿进行还原反应生成,二是利用月壤进行高温分解获取。月壤制氧涉及的主要科学和技术问题包括:

- 1) 氧化化学反应—氧气多相分离速率与月面环境影响规律;
 - 2) 极端环境中资源转化热动力学过程;
 - 3) 极端环境中金属氧化物分解行为;
 - 4) 极端环境中氧气相分离规律等。
- (4) 水冰的综合利用

月球水冰是月球基地/科研站建设和运行中的重要保障和生命生存的必需品。水不但是维持生命的必须资源,还可以分解为氢和氧,可以提供氢燃料和生命所需的氧气,对于后期深空探测和太空资源利用方面都具有潜在的应用价值。但是由于水冰主要分布在两极的永久阴影区中,给资源探测和工程实施带来了极大的难度,特别地目前对于月球水冰的赋存状态还并不确定,因此水冰综合利用涉及的主要科学和技术问题包括:

- 1) 月球水冰的来源、运移富集机制和赋存状态研究;
- 2) 水冰开采、提取、纯化、搬运、储存、转换利用技术。

3.3 月面能源高效持续利用

一般认为太阳能是基地和科研站初期阶段主要的能源供给形式,光伏发电是目前太阳能利用最有效和成熟的方式。在基地建设和运行的后期,核能

将是主要的能源供给形式,因为月球上具有大量的高效、清洁的核聚变燃料 ^3He ,因此核聚变能将是重点关注的能源供给形式。

(1) 太阳能高效持续利用

太阳能的利用包括直接利用太阳能进行光伏发电以及利用温差发电。月球基地建设将分阶段逐步完成,在不同阶段,光伏发电的技术方案和实施手段也不同。在初级阶段,将通过运输地球上的光伏组件在月面开展工作。在未来月球基地开发的高级阶段,将利用月球本身的矿物资源、高真空和低重力环境,发展适用于月面原位制备的、不同于地面的新型光伏器件是月面光伏面临的重要课题。由于太阳的辐照,月昼时月球表面温度高达 127°C ,月夜时月表温度将低至 -183°C ,而月面1m以下的温度基本稳定在 -20°C 左右。因此,充分利用月球表面和月壤恒温层之间的较大温差,构筑温差发电系统,将为月面科学研究,尤其是月夜阶段的探月活动供给稳定、持久的原位能源保障。温差发电技术的核心包括热电材料性能和热电器件技术两个方面。另外月面发电系统面临着月面极端环境(温差大、粒子辐照、月尘)的挑战。太阳能高效利用涉及的主要科学和技术问题包括:

- 1) 月面极端环境下光伏组件的制造技术;
- 2) 月尘粘附特性和有效除尘技术;
- 3) 适用月面环境的高效率、高可靠、宽温域热电发电器件的开发。

(2) 核能高效持续利用

^3He 是高效清洁的核反应原料,随着可控核聚变技术的逐步发展,基于 ^3He 核聚变反应发电是未来月球能源供应的主要途径之一。玄武岩质月壤,尤其是高钛玄武岩质月壤富含氦元素,是提取氦的重要原料。国际现有方案主要集中在月球样品采集、提取和分析方面,对于月面原位实现分离提纯的全链路尚停留在方案阶段。全链路中要突破的关键技术点集中于原位加热提取、纯化分离与存储。月壤中可控 ^3He 核聚变反应的顺利进行与后续能源利用同时也依赖于核聚变技术的进步和商业化运行。ITER计划于2001年完成了基于新运行模式的工程设计及大部分部件与技术的研发工作,在此过程中论证了实验性聚变堆的工程技术可行性。该设计预计的建设期为10年,运行实验期为20年。目前ITER计划已迈入装配阶段^[44]。美国国家点火装置成功获得超过1.3兆焦耳的能量的突破^[45]。ITER计划的顺利实施,再加上美国国家点火装置项目的

有效推进,都为早日实现核聚变能的商业化运行提供了助推器。因此,月壤提取氦气并实现月面原位利用涉及的主要科学和技术问题包括:

- 1) 月壤特性与氦的赋存状态的关系;
- 2) 原位提取、纯化分离与存储技术;
- 3) 月球氦-3及挥发分资源的提取和综合利用全链路的月面实验验证;
- 4) 可控核聚变技术。

3.4 月球资源开发利用过程中的环境危害防护和权益保护

人类首次在地外天体开展基地的建设和运行,进行资源的开采和利用,一定会带来很多环境问题,特别是,月球上超高真空、低重力、无磁场等特殊环境一定给资源的开发利用带来很多未知的难题。月壤表层及近月空间还有一些微小颗粒,通常小于20微米,平均粒径约为 $300\sim 600\text{ nm}$ 的月尘,主要由玻璃质组分及少量硅酸盐矿物组成,形态复杂多样,具有锋利的棱角边缘,颗粒表层通常含有太空风化成因的纳米级金属铁颗粒,对光谱、磁性、热物性等具有一定的影响。月尘在月面辐射环境中易带电,同时在电场驱动、陨石撞击以及探测活动过程中容易产生扬尘,对航天员和航天器造成危害。另外,因为人的活动受到恶劣环境的限制,在月球上开展资源的利用需要更高的成本,因此资源的综合循环利用也显得更为重要。因此环境危害防护和权益保护涉及的主要科学和技术问题包括:

- 1) 月球资源利用过程中的环境危害防护;
- 2) 月面尘埃环境及其危害防护;
- 3) 高效清洁综合循环利用;
- 4) 月球资源开发利用法规研究与制定。

4 结 论

随着人类深空探测活动的深入开展,月球资源开发和利用已逐渐成为月球探测活动的热点。月球原位资源利用不仅是建立月球基地、实现人类长期驻留月球必须突破的关键技术,还是解决未来人类资源和能源危机的重要途径。根据月球探测现状,月球上蕴含可供人类利用的基本建材、重要金属和生保物质,以及高效清洁的核聚变燃料,而且月球上没有大气层,具有丰富且稳定太阳能。初期的资源勘查和利用需要从地球运输仪器设备,在宇航员或机器人的协作下完成。随着月球基地设施的完备以及自动化ISRU系统的建立,利用月球的原位资源对地基进行完善和运维,极大地降低地月之间物质

运输成本,实现月球基地短期有人值守,长期无人智慧运行的模式。要实现月球原位资源利用的目标,首先面临的是月球低重力、高真空、高辐射、月尘、陨石撞击等特殊环境对宇航员和仪器设备的危害,当月球自动化 ISRU 系统建立,则需要面临能源、废物处理以及月面特殊环境对矿产和水冰等资源采选冶工程实施过程以及材料和构件制作过程的影响,还要考虑月面特殊环境下制备的材料和工程构件在力学、机械、老化速率等性质的变化。这些关键科学与技术问题有些可以通过在地球开展预先的理论和实验模拟研究解决,而有一些只能通过月面实验进行回答和验证。虽然目前月球 ISRU 技术的实现还存在许多有待解决的问题,但是随着科学技术的发展,越来越多的科学和技能难题逐渐被攻克,尤其是第一台可演示验证的 ISRU 样机和火星制氧装置的成功,为月球原位资源利用的实现建立了良好的基础,月球 ISRU 有望在未来月球探测和基地运行中成为降低运行成本和运行风险,提高运行效率的重要抓手。

参 考 文 献

- [1] 李志杰, 果琳丽. 月球原位资源利用技术研究. 国际太空, 2017(3): 44—50.
- [2] 王赤, 张贤国, 徐欣锋, 等. 中国月球及深空空间环境探测. 深空探测学报, 2019, 6(2): 105—118.
- [3] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程. 深空探测学报, 2019, 6(5): 405—416.
- [4] 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站. 科学通报, 2020, 65(24): 2577—2586.
- [5] Rapp D. 面向载人月球及火星探测任务的原位资源利用技术. 周建平, 果琳丽, 郭世亮, 等, 译. 北京: 中国仪器出版社, 2018.
- [6] 高楠, 许英奎, 罗泰义, 等. 月球矿产资源勘查进展及展望. 矿物学报, 2022, 42(2): 222—230.
- [7] 姜生元, 沈毅, 吴湘, 等. 月面广义资源探测及其原位利用技术构想. 深空探测学报, 2015, 2(4): 291—301.
- [8] Paul LJ. Lunar resources-Their value in lunar and planetary exploration. Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 1966: 443.
- [9] Ash RL, Dowler WL, Varsi G. Feasibility of rocket propellant production on Mars. Acta Astronautica, 1978, 5(9): 705—724.
- [10] Freitas RA, Gilbreath WP. Advanced automation for space missions. Journal of the Astronautical Sciences. 1982, 30(1): 221.
- [11] Mendell WW. Lunar bases and space activities of the 21st century. Lunar and Planetary Institute, 1985.
- [12] Criswell DR, Waldron RD. Lunar system to supply solar electric power to earth// Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. USA: IEEE, 1990: 61—71.
- [13] Keller R, Taberaux AT. Electrolysis of lunar resources in molten salt// In Resources in Near-Earth Space, Proceeding of 2nd Annual Symposium. UA/NASA SERC, 1991.
- [14] Haskin LA, Colson RO, Lindstrom DJ, et al. Electrolytic smelting of lunar rock for oxygen, iron, and silicon\ The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. NASA Conference Publication, 1992: 411—422.
- [15] Allen CC, Morris RV, McKay DS. Experimental reduction of lunar mare soil and volcanic glass. Journal of Geophysical Research: Planets, 1994, 99(E11): 23173—23185.
- [16] Senior C. Lunar oxygen production by pyrolysis Space Programs and Technologies Conference. Huntsville, AL, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1992: 1663.
- [17] Taylor LA, Carrier III WD. Oxygen production on the moon: An overview and evaluation. Resources of near-earth space. 1993: 69.
- [18] Duke M, Gustafson R, Rice E. Mining of Lunar polar ice// 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Virginia: AIAA, 1998.
- [19] Feldman WC, Lawrence DJ, Elphic RC, et al. Polar hydrogen deposits on the Moon. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E2): 4175—4195.
- [20] Ignatiev A, Kubricht T, Freundlich A. Solar Cell Development on the Surface of the Moon// International Astronautics Federation, 1998.
- [21] Duke MB, Ignatiev A, Freundlich A, et al. Silicon PV cell production on the moon. Journal of Aerospace Engineering, 2001, 14(2): 77—83.
- [22] Duke MB. Development of the moon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2006, 60(1): 597—655.
- [23] Thieme LG, Qiu S, White MA. Technology Development for a Stirling Radioisotope Power System for Deep Space Missions. (2000-03-01)/[2022-03-02]. <http://www.oak.doe.gov/procure/Stirling/tp209767.pdf>.
- [24] Schwandt C, Hamilton JA, Fray DJ, et al. The production of oxygen and metal from lunar regolith. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 49—56.
- [25] Currier R, Blacic J. Plasma processing of lunar and planetary materials. Space Resources Roundtable II, 2000.

- [26] Cardiff EH, Pomeroy BR, Banks IS, et al. Vacuum pyrolysis and related ISRU techniques. AIP Conference Proceedings, 2007, 880(1): 846—853.
- [27] Ignatiev A, Freundlich A. The use of lunar resources for energy generation on the Moon. Moon, 2012; 325—334.
- [28] Carpenter J, Fisackerly R, Houdou B. Establishing lunar resource viability. Space Policy, 2016, 37: 52—57.
- [29] Andrew HC, Peter K. A carbothermal scheme for lunar oxygen production// In Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. 1985; 559.
- [30] Karr L, Curreri P, Thornton G, et al. Ionic Liquid Facilitated Recovery of Metals and Oxygen from Regolith 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. Orlando, FL. Reston, Virginia: AIAA, 2018; 5291.
- [31] Allen CC, Graf JC, McKay DS. Sintering Bricks on the Moon// Engineering, Construction, and Operations in Space IV. 1994; 1220—1229.
- [32] Anand M, Crawford IA, Balat-Pichelin M, et al. A brief review of chemical and mineralogical resources on the Moon and likely initial *in situ* resource utilization (ISRU) applications. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 42—48.
- [33] Larson W, Sanders G, Sacksteder K. NASA's In-Situ Resource Utilization Project: Current Accomplishments and Exciting Future Plans AIAA SPACE 2010 Conference & Exposition. Anaheim, California. Reston, Virginia: AIAA, 2010; 8603.
- [34] Hecht M, Hoffman J, Rapp D, et al. Mars oxygen ISRU experiment (MOXIE). Space Science Reviews, 2021, 217(1): 1—76.
- [35] 果琳丽, 王平, 朱恩涌, 等. 月球基地工程重点关注问题. 科技创新导报, 2014, 11(26): 18—19.
- [36] 宋靖华, 周青. 利用月壤进行月球基地建设的3D打印技术. 华中建筑, 2015, 33(3): 33—42.
- [37] 宋蕾, 徐佼, 唐红, 等. 模拟月壤成型研究现状. 矿物学报, 2020, 40(1): 47—57.
- [38] 任德鹏, 李青, 许映乔. 月球基地能源系统初步研究. 深空探测学报, 2018, 5(6): 561—568.
- [39] 邹永廖, 刘建忠. 在月球上建太阳能发电厂. 甘肃科技纵横, 2002, 31(5): 57.
- [40] Jolliff BL, Wiczorek MA, Shearer K, et al. New views of the Moon. Chantilly, Virginia: Mineralogical Society of America, 2006.
- [41] 欧阳自远, 邹永廖. 月球的地质特征和矿产资源及我国月球探测的科学目标. 国土资源情报, 2004(1): 36—39.
- [42] Wittenberg LJ, Cameron EN, Kulcinski GL, et al. A review of 3He resources and acquisition for use as fusion fuel. Fusion Technology, 1992, 21(4): 2230—2253.
- [43] 宋洪庆, 杜恒畅, 张杰, 等. 月球氦-3资源原位开采热释放行为研究. 空间科学学报, 2021, 41(5): 787—792.
- [44] 科技部. 国际热核聚变实验堆(ITER)计划从建造阶段迈入装配阶段. 河南科技, 2020(23): 1.
- [45] 于琳娜. 商用核聚变又近了一点! 中国电力报, 2021-09-04(12).
- [46] Wiczorek MA, Phillips RJ. Thermal modeling of mare volcanism and the “procellarum KREEP terrane” // Lunar and Planetary Science Conference. 1999: 1547.
- [47] Lawrence DJ, Feldman WC, Barraclough BL, et al. Thorium abundances on the lunar surface. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E8): 20307—20331.
- [48] 邹永廖, 欧阳自远. 月面克里普岩成分特征及REE等资源开发利用前景. 空间科学学报, 2003, 23(6): 436—442.
- [49] Watson K, Murray BC, Brown H. The behavior of volatiles on the lunar surface. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1961, 66(9): 3033—3045.
- [50] Butler BJ. The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon. Journal of Geophysical Research: Planets, 1997, 102(E8): 19283—19291.
- [51] Gladstone GR, Hurley DM, Retherford KD, et al. LRO-LAMP observations of the LCROSS impact plume. Science, 2010, 330(6003): 472—476.
- [52] 欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [53] Ness JRO, Sharp LL, Brekke DW, et al. Hydrogen reduction of lunar soil and simulants. Engineering, Construction, and Operations in space-III: Space'92, 1992, 1: 617—628.
- [54] Yoshida H, Watanabe T, Kanamori H, et al. Experimental study on water production by hydrogen reduction of lunar soil simulant in a fixed bed reactor. Space Resources Roundtable Inc., Golden, CO, 2000; 0704—0188.
- [55] Head JW. Lava flooding of ancient planetary crusts: Geometry, thickness, and volumes of flooded lunar impact basins. The Moon and the Planets, 1982, 26(1): 61—88.
- [56] Head JW III, Wilson L. Lunar mare volcanism: Stratigraphy, eruption conditions, and the evolution of secondary crusts. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(6): 2155—2175.
- [57] Haskin L, Warren P. Lunar chemistry. Lunar sourcebook, 1991, 4(4): 357—474.
- [58] Fegley B Jr, Swindle TD. Lunar volatiles: implications for lunar resource utilization. Resources of Near-Earth Space, 1993.

- [59] 唐红, 王世杰, 李雄耀, 等. 月壤钛铁矿微波烧结制备月球基地结构材料的初步设想. *矿物学报*, 2009, 29(2): 229—234.
- [60] 果琳丽, 李志杰, 齐玢, 等. 一种综合式载人月球基地总体方案及建造规划设想. *航天返回与遥感*, 2014, 35(6): 1—10.
- [61] 朱恩涌, 果琳丽, 陈冲. 有人月球基地构建方案设想. *航天返回与遥感*, 2013, 34(5): 1—6.
- [62] 刘进军, 郭建成, 蒋峥. 论月球基地的建设与技术. *卫星与网络*, 2021(8): 56—65.

Key Science and Technology Issues of Lunar In Situ Resource Utilization

Jianzhong Liu^{1, 2*} Xiongyao Li^{1, 2} Kai Zhu^{1, 2} Yingkui Xu^{1, 2} Yi Yang^{1, 3}
 Jingyi Zhang^{1, 3} Danhong Lei^{1, 2} Taiyi Luo^{1, 2} Zongcheng Ling⁴ Gong Wang⁵

1. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081*

2. *CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

4. *Shandong University (Weihai), Weihai 264209*

5. *Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094*

Abstract Lunar exploration has become the primary goal of the deep space exploration competes among various space countries in 21st century, and the construction of the short-time attended and long-term unattended intelligent lunar research station or lunar base has become the shared vision of mankind. Meanwhile, understanding and utilizing moon are regarded as the equally important scientific goal, which is also the most distinctive characteristic of the lunar exploration in the new era. And the in situ resource utilization has gained more and more attention, which is not only the essential approach to achieve the scientific goal of lunar exploration in the new era, but also the essential method to ensure the construction and smooth running of lunar base. The only way for our country to take the first opportunity in the new round of lunar exploration is to carry out the research on the basic science and technical issues behind the in-situ utilization of lunar soil, water ice, solar energy and other extraterrestrial resource as soon as possible. From the vision of the lunar base construction, this article analyzes the demand for the lunar in situ resource utilization, and elaborates the necessity and feasibility of the lunar in situ resources utilization, and sorts its key science and technology issues, which can be summarized into four aspects: (1) Codes for exploration of lunar key resource; (2) Comprehensive utilization of lunar soil; (3) Effective and sustainable utilization of lunar surface energy; (4) The prevention of environmental hazards and the protection of rights and interests in the development and utilization process of lunar resources.

Keywords lunar base; in situ resource utilization; codes for exploration; comprehensive utilization of lunar soil; lunar surface energy

(责任编辑 吴征天 张强)