

月球极区水冰资源原位开发利用研究进展

王超, 张晓静, 姚伟

(中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

摘要: 月球极区水冰资源开发利用是支撑基地建设和运行的重要手段之一。基于月球极区水冰资源的最新探测和数据分析结果, 研究梳理了月球水冰资源的分布特征和存在形式, 介绍了国内外月球极区水冰资源开发利用计划、实施方案和发展趋势, 并详细介绍了提出的光热钻取一体化开发利用方案。并进行了地面水冰提取原理试验模型, 开展了地面含水沙土的水提取试验。试验结果表明, 该装置在含水率5 wt%的土壤中, 能够达到30 g/h以上的水提取速率和大约4 kg/h/m³的水提取能力, 以期应用于探月四期工程任务中。

关键词: 原位资源利用; 水冰; 月球极区; 月球基地

中图分类号: V467.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)03-0241-07

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20191029003

引用格式: 王超, 张晓静, 姚伟. 月球极区水冰资源原位开发利用研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(3): 241-247.

Reference format: WANG C, ZHANG X J, YAO W. Research prospects of lunar polar water ice resource in-situ utilization[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 241-247.

引言

月球作为距离地球最近的天体, 以其独特的空间位置、广阔的科学探索前景, 成为人类地外天体探测和资源利用的首选目标^[1]。从20世纪50年代开始, 月球探测一直是深空探测活动的热点。近年来, 美国重返月球计划和我国实施的探月工程更是把月球探测推向了新的高潮。按照美国重返月球计划, 最快在2024年实现载人登月, 并将在月球南极附近区域建立一个永久性基地^[2]。我国“探月四期”也准备在月球南极着陆, 建立长期无人值守、短期有人照料的科研基地。充足的能源和资源保障是月球基地选址的核心约束因素^[3]。

水冰资源作为深空探索活动特别是载人探索活动的重要物质和能源原料, 它的作用十分突出和关键^[5]。月球极区有许多较深的陨石撞击坑, 有些甚至常年见不到阳光, 被称为永久阴影区(Permanent Shadow Region, PSR), 前期发射任务的大量探测结果表明, 这些地方很可能有水冰存在。因此, 月球极区, 尤其是南极区域成为各国首选的基地选址区域。但由于月球的极端环境, 其水冰资源主要存在于月壤之中, 且存在形式复杂, 不确定性特点显著, 对其开发和利用提出了巨大的挑战。

本文以未来月球基地建设和持久运营供给需求为目标, 聚焦月球极区水冰资源开发利用, 研究梳理月球极区水冰资源分布特征和存在形式, 介绍分析了月球极区水冰资源开发利用技术发展现状和趋势, 深入解析月球极区水冰资源开发利用涉及的关键问题和技术挑战, 并详细介绍了钱学森空间技术实验室提出的钻取一体化开发利用方案, 以期为我国月球极区水冰资源开发利用提供参考。

1 月球极区水冰资源及其分布状态

1.1 月球水冰资源探测历程

月球存在水冰的设想最早由美国科学家Watson等于1961年提出^[6]。他们推测月球两极撞击坑中可能存在大量水冰, 形态为冰-尘混合物, 即“脏冰”(dirty ice)。在月球“脏冰”设想提出后的50余年间, 围绕月球水冰资源探测活动在持续开展。早在1976年, 前苏联“月神24号”(Luna 24)探测任务返回的170 g月壤样品中探测发现了0.1 wt% (岩石样品, 1 000 ppm)的水含量, 成为人类首次在月壤中发现水的证据^[7]。此后, 美国相继发射了“克莱门汀号”(Clementine)^[8]、“月球勘探者号”(Lunar Prospector, LP)^[9]、“月球勘测轨道号”(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)^[10-11]探

探测器, 2008年10月22日, 印度发射了“月船1号”(Chandrayaan-1)探测器^[12-13], 通过探测器上携带的雷达、中子、光谱等仪器获取了大量月球极区的数据, 通过对其进行分析, 特别是获得了在PSR存在水冰资源的间接证据。2009年, 美国月面环形山观测与遥感卫星(Lunar Crater Observing and Sensing Satellite, LCROSS)^[14-15]任务通过单次撞击PSR获取表面溅射物, 利用近红外吸收光谱探测到了气化云柱中含有水蒸气和冰的吸收峰。经估算该PSR的水冰含量可达 5.6 ± 2.9 wt%。综上所述, “干”的月球其实可能存在大量水冰资源, 特别是在高纬度极地区域, 由于PSR的存在, 水冰资源储量更加可观, 且水冰资源可能位于月壤浅表层区域, 极大降低了探测开采难度和成本, 使月球水资源开发具有技术可行性和商业可操作性。

1.2 月球水冰资源分布特征

1) 月球两极PSR

PSR内长期缺乏太阳辐照, 温度基本维持在40 K左右, 因此, 在此区域沉积了大量不同形态的水资源, 也被认为是目前月球水含量最为丰富的区域。根据LRO紫外反照率和温度测试探测得到的月球阴影区如果水冰是以混合在月壤中的形式存在, 水冰的含量大约在0.1~2 wt%, 如果以纯水冰的形式存在, 最高含量能够达到约10 wt%, 且分布在浅表层区域^[16]; 根据LCROSS探测点探测得到的阴影区水含量大约为3%~10%, 且分布在表面干层以下10~20 cm区域; 根据Mini SAR/RF仪器探测位置探测到的阴影区可能含有大量的水冰资源, 且分布在2 m以内区域^[17]。

2) 月球局部光照区

大量研究结果表明, 月球不仅在PSR区域, 且在局部光照区也存在水资源。2010年, “月球勘测轨道器”利用携带的月球探索中子探测器(Lunar Exploration Neutron Detector, LEND)分别对A、B、C的3个位置的氢含量进行探测分析, 从而得到了不同位置的氢含量分布图谱^[18-19]; 同时, 通过太阳能势分析表明, 上述富氢区域存在一定的光照时间, 表明该区域为局部光照区。

3) 太阳辐照区

早期通过对月球取样带回的月壤进行成分分析, 认为在月壤和月球岩石内存在少量的氢或水。Pieters等^[20]对印度“月船1号”上携带的月球矿物制图仪的近红外光谱数据进行分析, 结果发现, 除了月球极地地区外, 几乎所有的纬度都存在羟基或水的光谱信号。然而, 光谱探测只能感应月球表面几毫米的深度, 推测探测到的水应该为以结晶水的形式存在于月球的矿物

中。月表温度在白天可达到120 °C左右, 而结晶水通常需要加热到200 °C以上才能释放, 所以在中低纬度检测到水的信号并非偶然。

4) 火山碎屑物分布区

在第47届月球与行星科学大会(2016年)上, 有学者利用轨道观测数据估计了月球火山碎屑沉积物和富硅质穹丘的含水量, 结果表明南北纬30°之间的含水量与“阿波罗”带回的样品(月壤和岩石)测得的是一致的, 并且在该纬度区域的所有大型火山碎屑沉积物中观察到的水特征与内源性来源一致^[21]。在“阿波罗”样品中探测到了50~100 ppm含量的氢组分, 这些氢元素分布在月壤的内部; 对“阿波罗”样品中的磷灰石进行分析, 结果标明水的质量百分比含量为0.1%~0.3%; 在火山玻璃中分析得到的水含量为0~50 ppm^[22]。

1.3 月球水冰资源存在形式

月球的水冰资源可能以3种形式存在: ①岩浆水(magmatic water或juvenile water), 主要是以OH形式赋存在矿物晶格中的水; ②表层水(surface water), 月球表面大部分区域浅表层以H₂O或OH形式存在的水资源; ③埋藏水(buried water), 月球极地区域深埋于月壤内部的水资源^[23]。

岩浆水的主要形成机理可能为月球内部火山喷发, 脱离月表时岩浆扩散去气后结晶形成玻璃珠^[24-25], 玻璃珠矿物四周形成强束缚的H或OH, 也即岩浆水。通过对阿波罗样品中的15427和74220进行二次离子质谱技术分析发现了一定挥发浓度的H₂O^[26]。目前, 科学家们分别在火山碎屑中的火山玻璃、月海玄武岩熔岩流、各种类型的深成岩中都检测到了不同丰度的水。

表层水的形成机理主要是太阳风离子注入矿物之后与氧结合形成OH(太阳风离子与月表物质相互作用如图1所示)^[27]。首先H热激发及从结晶体扩散形成中性氢环境排放或氢气排放; 晶格缺陷捕获氢; 氢快速局部离化; 表面反射质子回归太阳风环境。此外, 由

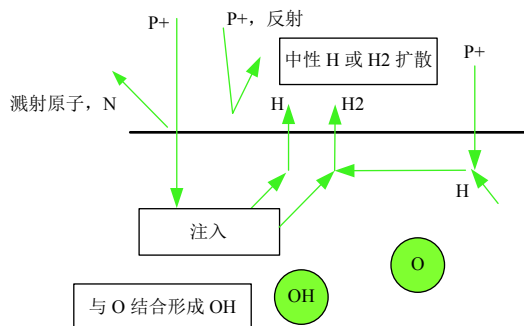


图1 太阳风离子与月表物质相互作用^[27]

Fig. 1 Solar wind implantation process^[27]

太阳风中的氢原子与月壤和月岩中的FeO发生还原反应： $\text{FeO} + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$ 。

埋藏水主要分布于月球的两极PSR，其主要由彗星或小天体带入。当彗星撞击月球并剧烈破碎时，碎块溅落到撞击坑PSR与月壤混合。这些水分子，是以弹道的形式（ballistic migration），从低纬度迁移到高纬度，并在PSR保存下来。

2 国外月球极区水冰资源开发利用技术和方案设计

根据月球极区水冰资源存在形式、不同区域含量、热物理特性以及作用区域光照条件等特征，典型月球极区水冰资源开发利用技术途径包括主动式获取方案和被动式热提取方案。

主动式获取方案涉及的功能单元或环节主要包括：①水合星壤的采集或收集；②能量源；③能量传输至阴影区；④水冰提取过程；⑤水合土壤或水资源的运输。

2.1 国外月球极区水冰资源开发装置

主动式获取方案以美国蜜蜂机器人公司（Honeybee Robotics）设计的一款移动式原位水提取装置（主动式钻孔）为典型代表。该装置主要包括冻土获取与运输系统、挥发物提取与收集系统、储水罐等^[28]。该装置采用钻取方式获取原始冻土并将其搬运至密封舱体内，通过放射性同位素产生热量进行加热，挥发水蒸气通过冷凝管进行冷凝收集，汇集于储水罐内。整个装置集成于移动式车体上，可随车体移动变换钻取位置。装置结构设计简单，集成度高，可操作性较强，可用于月球、火星及近地行星表面原位获取水资源。

科罗拉多矿业学院空间资源中心提出了采用被动式热提取（thermal mining）技术方案提取月球永久阴影区水冰（图2）^[29]。该方案并不是通过水合土壤提取，而是直接原位加热阴影区的水合土壤，蒸发的水蒸气在星壤表层冷凝从而获得液态水。来自永久阴影区撞击坑外缘的几个定日镜将太阳光集中在类似于“帐篷”的收集水蒸气的装置顶部，顶部有一个二级光学反射装置，将能量传递给表面，而“帐篷”内部是具有反射性，保证将辐射能固定在其中，然后将次表层水冰加热到220 K形成水蒸气，接着将载有冷阱装置的搬运小车连接“帐篷”，将水蒸气冷冻在冷阱装置中，再运输到制造 O_2 、 H_2 的装置中。只要泄露区域面积不超过冷阱接入面积（ $\sim 1 \text{ m}^2$ ）的10%，帐篷在10 min之内就能达到稳态环境，达到稳态主要受控于水分子升华、热转移以及水蒸气通过表面被束缚等因素。压力

约为10~30 Pa，足够低的压力能够确保分析方法的正确性，并且不会将“帐篷”吹走。

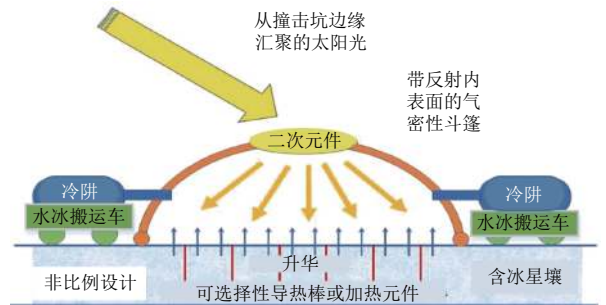


图2 水冰资源热提取方案^[29]
Fig. 2 Thermal mining of water ice^[29]

2.2 国外月球极区水冰资源开发计划方案

1) “资源勘探者任务”（Resource Prospector Mission, RPM）计划

一系列的探测任务发现月球上有氢和水之后，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）正在为发射一辆月球车探测次表面挥发物并加以提取做准备，这项任务称为“资源勘探者任务”（Resource Prospector Mission, RPM），核心是“月壤与环境科学及氧与月球挥发物提取”（Regolith & Environment Science and Oxygen and Lunar Volatile Extraction, RESOLVE）有效载荷，由NASA肯尼迪空间中心（Kennedy Space Center, KSC）负责。RESOLVE载荷主要包括钻取装置（Drill）、挥发物探测系统（NIRVSS）、挥发物提取装置（OVEN）以及挥发物分析装置（LAVA）等（图3）^[30]。RPM的设想是由月球车来侦察月球永久阴影区及其附近次表面氢浓度很高的区域，然后钻采样品，并进行加热和分析。理想的情况是能直接获取水，但RESOLVE有效载荷上也将配备氧提取设备，用来从月壤中提取氧，并利用氢来加以处理，从而生产水。



图3 RESOLVE月球探测科学载荷及取样装置^[30]

Fig. 3 Illustration of RESOLVE^[30]

2) 俄罗斯联合欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的月球-资源着陆器和“皮洛特-加洛省”(PROSPECT)探测器计划

俄罗斯针对月球规划了一系列“月球”(Luna)后续计划^[31]。根据俄罗斯2012年公布的《2030年前航天活动发展战略》，俄方将在2025年发射代号为“月球27号”(Lunar 27)的“月球-资源”着陆器，考察月球南极。俄罗斯联合ESA共同实施这项任务，ESA的探月项目机构将在俄罗斯“月球-资源”着陆器上安装PROSPECT探测器，该探测器分为两部分：一是钻头，实现从近2 m的深度范围内提取和运输土壤；二是微型化学实验室，从提取的土壤中获得挥发物资源并进行气体成分检测。该探测器可实现考察区域土壤挥发物的提取、原位分析和评估。“月球-资源”着陆器计划在月球南极登陆之后，需要从地面之下2 m深处采集样本，这对打孔、钻探技术提出了极高的要求。由于此区域冰层极度坚硬，ESA的工程师们目前正在研发足够强韧、有效的钻头，以便届时能够实现预定的目标。

3 光热钻取一体化开发利用方案

1) 方案构建与原理分析

钱学森空间技术实验室研究团队针对国际上现有水冰资源提取面临过程环节多、重量功耗大等显著不足，提出了光热钻取一体化设计方案(图4)^[32]。该方案设计采用的核心结构包括钻头、钻杆、柔性密封盖和导光镜面。钻头端部布置楔形切削刃，利用钻头切削刃实现地外土壤钻进。为实现钻探和挥发物提取的功能集成，钻杆内部设计为中空，钻杆表面壁上开气孔。导光镜面布置在钻杆顶端，为透光石英玻璃，保证入射光线的透过率。导光镜面将外部聚光装置汇聚的太阳光导入钻杆内部，提供钻杆加热地外土壤，提取地外土壤内部水蒸气等挥发物所需的热能，钻杆顶部中空内表面涂敷高反涂层，保证入射光线在其表面具有高反射率；钻杆底部中空内表面涂敷高吸涂层，保证顶部反射光线在底部充分吸收。螺旋叶片(翅片)既起到钻进表层土壤作用的同时，还起到加热翅片功能，确保钻杆内部热量能高效、均匀传递至钻取表层土壤，加速表层土壤内部水蒸气等挥发物沿气孔挥发至钻杆中心中空部分。柔性密封盖贯穿布置在钻杆上、下部分界面附近，当钻杆螺旋部分钻进地外土壤时，柔性密封盖紧贴表层土壤表面，降低钻取表层土壤热量和挥发物损失。

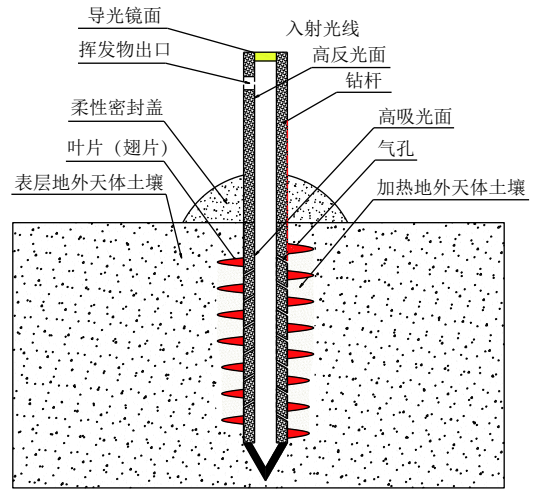


图4 钻取一体化系统^[32]

Fig. 4 The combine system of drilling and extracting^[32]

其工作原理：首先通过对钻杆施加冲击载荷和旋转力矩，利用钻头切削刃进行钻进，叶片(翅片)进行表层地外土壤钻探；当钻杆下段完全钻入表面土壤后，柔性密封盖与表层土壤紧密贴合；钻具顶端聚光装置引入聚焦太阳光，经钻杆顶端导光镜面至钻杆内部中空腔体；下部钻杆被太阳能加热并通过叶片(翅片)的受热传导传递热量至浅表土壤加热；柔性密封盖及周围冰冻土壤起隔热及密封作用，水等挥发物经气孔进入钻杆内部中空腔体并上升至气体出口，进入冷凝分离和检测处理模块，完成单次挥发物提取任务，如图5所示。钻具退出，进行下次作业。

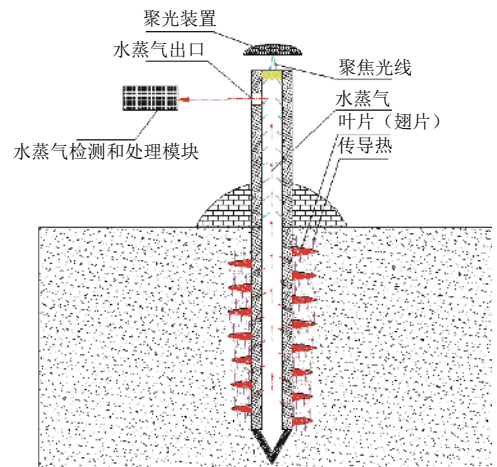


图5 方案系统工作原理^[32]

Fig. 5 Working principle of system^[32]

2) 方案优势分析

此技术方案与当前技术相比，由于采用功能结构一体化设计思路，将钻杆钻取、太阳能聚光加热与水蒸气等挥发物提取进行功能集成，极大降低了整体结构复杂度，提高了结构工作可靠性。另外，功能化叶

片(翅片)结构,柔性密封盖密封、热防护结构也大大提高了装置挥发物提取效率。

3) 方案验证与能力分析

为了验证上述系统构型方案的可行性和水冰提取能力,研究团队基于上述系统构型方案,构建了地面水冰提取原理试验模型(图6),开展了地面含水沙土的水提取试验。试验结果表明,该装置在含水率5 wt%的土壤中,能够达到30 g/h以上的水提取速率和大约4 kg/h/m³的水提取能力^[33]。目前,研究团队针对该系统构型的月面真空模拟环境和冰冻含水模拟月壤的水提取试验也在同步开展中。

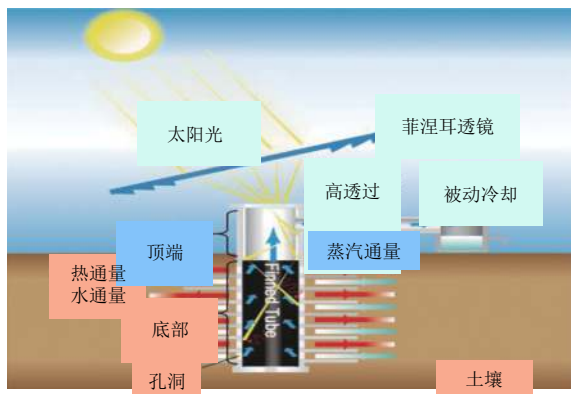


图6 土壤水冰提取试验系统模型^[33]

Fig. 6 Concept scheme for harvesting water from soils^[33]

4 月球极区水冰资源开发利用关键技术

月球极区水冰资源开发利用主要包括月球极区水冰资源的识别探测、含水月壤获取、加热提取、冷凝收集以及分解转换等多个技术环节,同时涉及月球极区环境下水冰资源开发利用面临的工程问题,如何结合月球极区环境特点,寻求合理技术途径和方法,是月球极区水冰资源开发利用的关键。

4.1 月球极区水冰资源探测技术

月球极区水冰资源储量、分布状态和存在形式是开展月球极区水冰资源开发利用的前提和基础。而上述信息的获得需要匹配合理的探测手段和方法。月球极区探测一般分为远程表征和原位探测,其中远程表征又分为地基观测和天基观测,相对于地基观测,天基观测避免了地球大气干扰,极大提高了观测范围和观测效率;同时,空间深低温环境提高了天基观测的仪器探测精度和灵敏度。远程表征常用的表征类型为光谱和光度,光谱用于确定表面矿物含量,光度用于确定旋转速率和形状。原位探测可采用抵近探测和着陆探测,常用的探测手段包括X射线和伽马射线光

谱和光学成像,前两者可以检测表面资源元素组成,而后者则可以测量密度。因此,如何基于探测目标和对象特点,优化配置探测手段和方法,是月球极区水冰资源探测技术的难点和重点。

4.2 月球极区水冰资源钻取一体化技术

由于月球极区水冰资源获取涉及钻取、转移、密封和加热处理等诸多环节,同时对装置重量、功耗和效率约束性极强,现有钻取技术机构繁多、回路复杂;体积、重量大,很难满足月球极区环境应用需求。因此,需要在研究月球极端条件下冻土/冰层的物理化学特性、加热状态下冻土挥发物融化升华过程、土壤多孔软介质热质传递过程基础上,考虑月面极区环境、复杂的含水土壤力学特性及高隔热性能约束,采用诸多创新设计,诸如结构功能一体化思路,减少动作环节;增大含水土壤加热表面积,提高水分脱离效率;提高密封效果,减少水分损失,以此实现高效低功耗采集及轻量化要求。

4.3 水蒸气冷凝与微液滴收集技术

由于月球表面的低气压、弱引力特征明显,且含水月壤中的水含量又比较低,导致加热获取的水蒸汽属于典型的稀薄蒸汽,同时内部混合多种类型的其它挥发物气体。上述特征都为含水月壤水资源的收集提出了巨大挑战。由于低压、弱引力环境对凝结换热机理和特性都具有显著影响,但国内外尚无针对性研究。超疏水表面增强凝结传热是一种较为有效的冷凝强化方法^[34],但面临冷凝液滴形成的气膜/涂层阻碍热量传递以及超疏水表面易被破坏等显著不足,还需要做深入研究。为实现低压、弱引力条件下的高效凝结换热,一方面需要蒸汽在凝结表面的成核可控;另一方面需要凝结液滴快速脱离。

4.4 氢氧光化学合成技术

目前水分解主要以电催化为主,虽已完成光催化分解水的实验室原理验证,但绝大多数的研究以材料开发和化学反应机理为主,应用研究尚未报道;同时,对于低/微重力条件下的光催化研究报道几乎为零。在微重力分解水研究方面,虽然已有大量的研究报道,但是对于地外多场耦合与微重力条件下多相物理化学过程的研究,特别是通过先进调控技术实现对物理化学过程的精确控制,研究在特殊环境下的反应过程机理的报道还很少,制约了相关器件和系统的进一步改进与发展。在微重力分解水装置的开发方面,虽然日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA)已经有较为成熟的系统

样机,但是其工作原理基于传统的电解池系统,能耗大,且分解效率不足一般条件下的1/3;同时装置的稳定性和寿命也存在不确定性。因此,需要研究更加高效、稳定的氢氧光化学合成方法。

5 结束语

月球极区水冰资源开发利用面临水冰提取、搬运转移以及转换利用等多个耗能环节,而月球极区特别是水冰含量丰富的永久阴影区由于常年缺乏太阳光照射,如何解决水冰资源开发利用过程所需的能源供给是工程实施的首要难题。此外,由于永久阴影区内温度基本维持在几十K的极低温,工程机械设备需要满足特殊温度条件,且由于缺乏温度交变作用力,永久阴影区内土质松软,为工程实施过程的设备移动和运输带来极大挑战^[35]。再者,月球极区水冰资源开发利用工程实施还涉及水冰资源提取和转化各个环节的强耦合关系,同样面临系统效率和可靠性问题。工程实施还需要考虑低气压弱引力条件下水冰资源的运输和存储问题以及永久阴影区内的通信、远程无人操控问题,都是月球极区水冰资源开发利用工程实施需要考虑的因素。

月球极区水冰资源开发利用需要面对多尺度/多维度月球极区水冰探测以及月球极区极端环境水冰资源提取和转换等相关科学和技术问题,同时需要解决水冰资源开发利用相关的工程实施难题。

参 考 文 献

- [1] 叶培建,于登云,孙泽洲,等.中国月球探测器的成就与展望[J].深空探测学报,2016,3(4):323-333.
YE P J, YU D Y, SUN Z Z, et al. Achievements and prospect of Chinese Lunar Probes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 323-333.
- [2] 蔡婷.美国副总统要求2024年前送人重返月球[J].中国航天,2019(5):46-49.
- [3] 袁勇,赵晨,胡震宇.月球基地建设方案设想[J].深空探测学报,2018,5(4):374-381.
YUAN Y, ZHAO C, HU Z Y. Prospect of Lunar base construction scheme[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(4): 374-381.
- [4] ABBUD-MADRID A, BEATY D, BOUCHER D. Mars water in-situ resource utilization(ISRU)planning(M-WIP)study[EB/OL].(2016)[2019-10-29]. http://mepag.nasa.gov/reports/mars_water_ISRU_study_pptx.
- [5] WATSON K, MURRAY B C, BROWN H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(9): 3033-3045.
- [6] AKHMANOVA M V, DEMENT'EV B V, MARKOV M N. Water in mare crissium regolith("Luna 24")[J]. Geokhim, 1978(5): 285-288.
- [7] NOZETTE S, LICHTENBERG C L, SPUDIS P D, et al. The clementine bistatic radar experiment[J]. Science, 1996, 274: 1495-1498.
- [8] TRET'YAKOV V I, MITROFANOV I G, BOBRONITSRII Y I, et al. The first stage of the "BTN-Neuton"space experiment on board the Russian segment of the international space station[J]. Cosmic Research, 2010, 48(4): 293-307.
- [9] MITROFANOV I G, SANIN A B, BOYNTON W V, et al. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detect or experiment LEND[J]. Science, 2010, 330(6003): 483-486.
- [10] THOMSON B, BUSSEY D, NEISH C, et al. An upper limit for ice in Shackleton crater as revealed by LRO Mini-RF orbital radar[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(14): 1-4.
- [11] SPUDRS P D, BUSSCY B J. Results of the mini-SAR IMAGING RADAR, Chandrayaan-1 mission to the Moon[C]//41st Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI, 2010.
- [12] 胡智新.月球表面水冰探测进展[J].航天器工程,2010,19(5):111-116.
HU Z X. Review on lunar exploration of water ice[J]. Space Engineering, 2010, 19(5): 111-116.
- [13] NONEMAN S. Is there water on the Moon? NASA's LCROSS mission: MSFC-5404[R]. Washington, DC: NASA, 2007.
- [14] MARMIE J. LCROSS, lunar crater observation and sensing satellite project[C]//International Space Development Conference. Chicago, USA: National Space Society, 2010.
- [15] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct detections of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. Pnas, 2018, 115(36): 8907-8912.
- [16] HAYNE P O, HENDRIX A, NASH E S, et al. Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements[J]. Icarus, 2015, 255: 58-69.
- [17] CALLA O P N, MATHUR S, GADRI K L. Quantification of water ice in the Hermite-A crater of the lunar north pole[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(7): 926-930.
- [18] SANDERS G B. Lunar polar ISRU as a stepping stone for human exploration[C]//Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group. Laurel, Maryland: NASA, 2013.
- [19] CARPENTER J, FISACKERLY R, HOUDOU B. Establishing lunar resource viability[J]. Space Policy, 2016(37): 52-57.
- [20] PIETERS C M, GOSWAMI J N, CLARK R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1[J]. Science, 2009, 326: 568-572.
- [21] LI S, MILLIKEN R. Heterogeneous water content in the lunar interior: insights from orbital detection of water in pyroclastic deposits and silicic domes[C]//The American Geophysical Union(AGU) Fall Meeting. San Francisco, USA: AGU, 2015.
- [22] IVANOV A V. Volatiles in lunar regolith samples: a survey[J]. Solar System Research, 2014, 48(2): 120-138.
- [23] CRIDER D H, VONDRAK R R. The solar wind as a possible source of lunar polar hydrogen deposits[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E11): 26773-26782.
- [24] 刘杨, TAYLOR L A. 月球上的"水"[J]. 岩石学报, 2011, 27(2): 579-588.
LIU Y, TAYLOR L A. Water on the Moon[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(2): 579-588.
- [25] SAAL A E, HAURI E H, CASCIO M L, et al. Volatile content of lunar

- volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior[J]. *Nature*, 2008, 454: 192-196.
- [26] BASILEVSKY A T, ABDRAKHIMOV A M, DOROFEEVA V A. Water and other volatiles on the Moon: a review[J]. *Solar System Research*, 2012, 46(2): 89-107.
- [27] FARRELL W M, HURLEY D M, ZIMMERMAN M I. Solar wind implantation into lunar regolith: hydrogen retention in a surface with defects[J]. *Icarus*, 2015, 225: 116-126.
- [28] ZACNY K, CHU P, PAULSEN G, et al. Mobile In-Situ Water Extractor(MISWE) for Mars, Moon, and asteroids in situ resource utilization[C]//AIAA Space 2012 Conference & Exposition. Pasadena, California: AIAA, 2012.
- [29] DREYER C B, SOWERS G, WILLIAMS H. Ice mining in lunar permanently shadowed regions[C]//Space Resources Roundtable XIX/Planetary & Terrestrial Mining Sciences Symposium. Golden, CO: [S. n.], 2018.
- [30] JSC/KSC/JPL. OVEN & LAVA subsystems in the RESOLVE payload for resource prospector: KSC-E-DAA-TN25396[R]. [S. 1.]: JSC/KSC/JPL, 2015.
- [31] 尹怀勤. 俄欧欲联合在月球背面建立基地[J]. *太空探索*, 2016(3): 28-31.
- [32] 姚伟, 王超, 李啸天, 等. 一种地外天体表面水资源获取钻具装置及钻取方法: 中国, ZL201810162389.8[P]. 北京: 中国空间技术研究院, 2018.
- [33] LI X T, ZHANG G, WANG C, et al. Water harvesting from soils by light-to-heat induced evaporation and capillary water migration[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 175: 115417.
- [34] 宋永吉, 任晓光, 任绍梅, 等. 水蒸气在超疏水表面的冷凝换热[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(1): 95-97.
- SONG Y J, REN X G, REN S M, et al. Condensation heat transfer of steam on super-hydrophobic surfaces[J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2007, 28(1): 95-97.
- [35] KORNUATA D, MADRID B A A, ATKINSON J, et al. Commercial lunar propellant architecture: a collaborative study of lunar propellant production[J]. *REACH - Reviews in Human Space Exploration*, 2019, 13: 100026.

作者简介:

王超(1983-), 男, 工程师, 主要研究方向: 地外原位资源利用技术。

通讯地址: 北京5142信箱225分箱(100094)

电话: (010)68747483

E-mail: wangchao@qxslab.cn

姚伟(1972-), 男, 研究员, 主要研究方向: 行星宜居性及可持续探索、地外原位资源利用技术等。本文通讯作者。

通讯地址: 北京5142信箱225分箱(100094)

电话: (010)68747483

Research Prospects of Lunar Polar Water Ice Resource In-Situ Utilization

WANG Chao, ZHANG Xiaojing, YAO Wei

(Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: It is crucial to utilize water ice resources in the pole regions in order to support the construction and functions of the lunar base. Based on exploration and data analysis results of lunar missions, the distribution and existing form of water ice in the lunar poles are analyzed. Then, the technical scheme and implementation methods, as well as the developing trend of lunar polar resource utilization are introduced. The integrated development and utilization scheme of photothermal drilling is introduced in detail. The experimental model of surface water ice extraction principle is carried out, and the water extraction test of ground water bearing sand soil is carried out. The experimental results show that the device can achieve a water extraction rate of more than 30 g/h and a water extraction capacity of about 4 kg/h/m³ in the soil with 5 wt% water content. Finally some key problems and technical challenges of key technical aspects for water ice utilizing are discussed, including prospecting, extraction, condensation and collection, and transferring of water ice. This paper aims to provide the reference for China's lunar polar resource utilization.

Keywords: in-situ resource utilization; water ice; lunar pole; lunar base

Highlights:

- The latest exploration results of water ice on the moon are investigated and analyzed.
- The distribution characteristics and occurrence forms of water ice on the moon are studied.
- The current situations and development trends of the exploitation and utilization of water ice on the moon are summarized.
- The key problems and technical challenges in the development and utilization of water ice resources on the moon are summarized and analyzed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]