

月壤水冰资源“探-采-用”一体化实施方案设计

周光旭¹, 崔中雨², 张伟伟¹, 姜生元¹, 果琳丽³

(1. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150040; 2. 燕山大学 先进锻压成型技术与科学教育部重点实验室, 秦皇岛 066004; 3. 中国空间技术研究院 北京空间机电研究所, 北京 100190)

摘要: 分析了月球水冰资源的赋存分布及采样探测与利用存在的技术挑战, 系统梳理了其探测、采样与利用发展历程、典型案例及发展趋势, 总结出水冰资源精准预判、就位科学分析、高效提取和转化利用4大关键技术及解决途径。针对月球极区水冰资源探测与利用需求, 充分利用月球极区深低温及水冰赋存特性, 提出一种水冰资源“探-采-用”一体化实施方案, 详细介绍了应用场景及功能、设计方案及评价、应用前景等。该方案可为探月四期工程、月球科研站建设等重大任务提供技术参考和科学探测依据。

关键词: 月球极区; 水冰资源; 采样探测; 原位利用; 一体化方案

中图分类号: V416.5

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)02-0178-12

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220009

引用格式: 周光旭, 崔中雨, 张伟伟, 等. 月壤水冰资源“探-采-用”一体化实施方案设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(2): 178-189.

Reference format: ZHOU G X, CUI Z Y, ZHANG W W, et al. Conception of integrated scheme of “exploration, mining and utilization” of lunar water-ice resources[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(2): 178-189.

引言

自1961年, Waston等^[1]提出月球两极永久阴影区(Permanently Shadowed Regions, PSR)可能存在水冰资源以来, 掀起了月球水冰资源探索的热潮。月球陨坑观测和遥感卫星(Lunar CRater Observation and Sensing Satellite, LCROSS)撞击极区永久阴影坑^[2-3], 获得了极区水资源存在的证据, 其含量 $5.6 \pm 2.9 \text{ wt}\%$, 储量可达数10亿t。极区(30~40 K、 10^{-11} Pa)的水资源以气固两态存在, 自身具有挥发性, 通过加热便可提取利用, 这使得水资源成为最基础、最容易实现的地外天体原位资源利用方式^[4]。极区水资源的开发利用具有巨大前景, 中国探月四期工程和月球科研站建设都将月球原位水资源的开发利用作为重点。

目前针对月球水资源探测存在相互独立、彼此隔离的短板, 缺乏有效的在轨标定手段及完整可靠的证据链。本文梳理了水资源探测亟待解决的关键技术及解决途径, 提出了一种“探-采-用”一体化实施方案, 详细介绍了该方案的应用场景、设计方案及未来发展等。该方案为未来月球极区水冰资源探测与开发利用提供参考。

1 月球水冰资源赋存分布特性

1.1 月球水冰资源赋存环境

了解月球水冰资源的分布、赋存环境及相关特性, 对未来原位水资源的利用具有重要意义。目前对月球水冰资源的探测都是基于遥感(雷达、中子谱仪、光谱仪)和航天器撞击等方式获得的数据进行反演得到, 虽然单个探测任务技术和仪器存在一定的局限性, 但已明确的是月球存在着大量水资源, 且具有分布广泛、两极富集、储量丰富等特点^[5]。通过已有的研究初步可知其形成与演化机制, 即月球水资源来源主要^[6]有: ①彗星天体带入; ②太阳风质子注入; ③月球内部释放。月球表面极大的昼夜温差及超高真空极端环境, 水难以稳定存在, 从低纬地区向两极迁移, 并在两极富集。遥感数据^[7]表明, 水资源除了会在两极阴影坑富集, 在局部光照区、太阳辐照区及中低纬度火山碎屑沉积物的冷阱中也均探测到水资源的存在。但由于两极太阳辐射角较小, 存在平均温度30~40 K的永久阴影坑, 水资源以水冰的形式存在, 仅在月球南极的水资源储量就高达数10亿t之多^[8]。

在地外天体撞击等特殊作用下, 月壤主要以碎

石、岩屑等颗粒形式存在, 且粒度分布范围较宽, 内部空隙较大, 水资源赋存具有可能性, 已有研究表明, 极区水资源的主要存在形式: ①游离水, 以冰晶颗粒吸附于月壤表面, 形成霜冻层; ②冰壤胶结水, 以水冰赋存于月壤颗粒之间; ③埋藏水, 以大面积冰层埋藏于剖面深处。同时, 在月球不同的剖面深度, 水资源含量及赋存形式存在明显差异, 以南极永久阴影区为例, 表层可能存在几厘米厚的霜冻层, 在0.4~1 m处月壤水冰含量较高, 并随深度的增大水冰含量可能减小^[9]。月球水资源主要分布在极区的永久阴影坑内, 其存在形式呈现出多样性、离散型及可预测性等特点。这为水资源探测利用提供了可行性, 同时也带来了难点和不确定性, 因此针对不同深度水资源采取不同提取方式是十分必要的。

1.2 含水冰月壤特性分析

通过对月壤样品分析, 其由多种岩石与矿物组成, 为避免不必要的风险, 对含冰月壤进行力、热特性分析是实现月球资源开发利用及工程的重要前提。

1.2.1 物理力学特性

月壤物理力学特性主要包括颗粒粒径级配、颗粒形状、比重、密度、孔隙比、压缩特性和剪切强度等。根据月球车和宇航员对月表原位月壤物理和力学特性的测试结果^[10-12]分析, 月壤的承载力、压缩性和抗

剪性等宏观力学性质与孔隙比密切相关。Gertsch等^[13]利用JSC-1模拟月壤原料制备的不同含水率月壤水冰模拟样本的单轴抗压强度随含水率的增大逐渐增大, 当含水率为13 wt%时, 单轴抗压强度可达102~104 Mpa。除含水率外, 样本强度也会随温度降低而逐渐增大, 当温度高于173 K时样本表现为粘塑性, 低于173 K时样本表现为脆性。而Atkinson等^[14]开展的月壤水冰模拟样本单轴抗压强度试验中, 77 K时含水率为12.07 wt%的样本强度也达到了37.15 Mpa。虽上述2组测试结果差异较大, 但仍足以说明低温环境下含冰月壤具有极高的强度, 且影响因素较多。但目前对含冰月壤的研究多集中在样本抗压和贯入强度, 缺少绝大多数探测机具作用机理所需的抗剪强度研究, 未来需要通过更系统的方式对含冰月壤力学特性及其影响因素研究, 这对顺利开展后续工作具有重要的意义。

1.2.2 热学特性

月球极区月壤中斜长石含量较高, 基于“阿波罗”(Apollo) 样品的热导率试验发现, 月壤热导率随样品温度和密度产生显著的变化, 如图1(a)所示。由Apollo 15和16的测试结果^[15]推测, 在100~400 K内, 热导率在(0.5~1.5) × 10⁻³ W/(m·K)变化, 随样本密度的增加而增大。温度和密度分别通过月壤颗粒间热辐射和热传导来影响热导率的变化, 结果如图1所示。

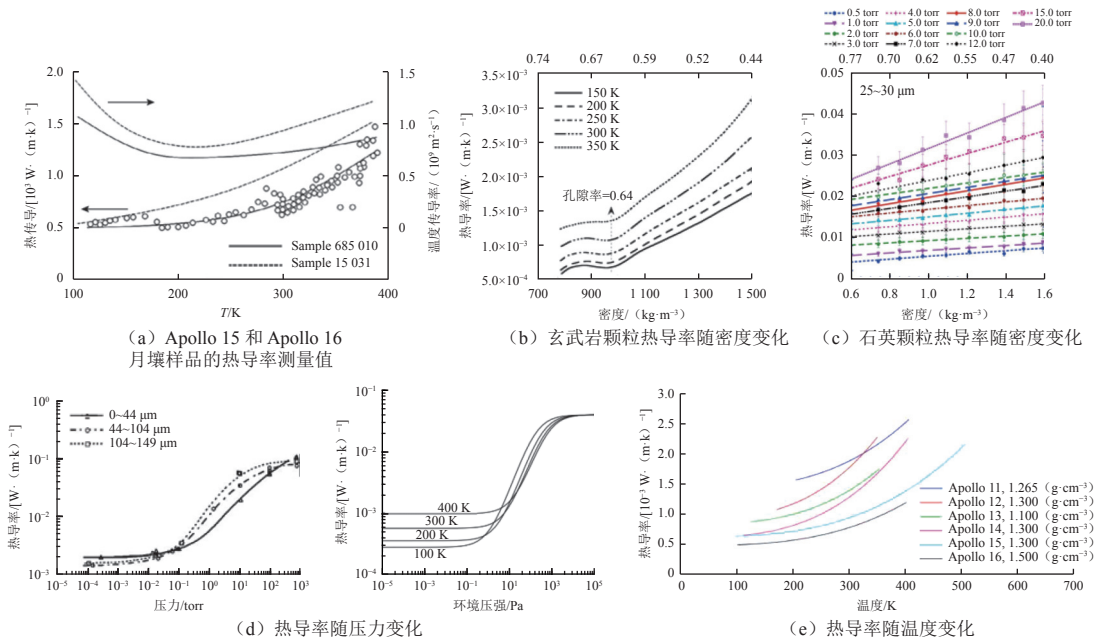


图1 热导率的影响因素分析^[14-24]

Fig. 1 Analysis of influence of thermal conductivity^[14-24]

关于月面物质热导率的研究主要分为就位探测和实验室测量2种, Langseth等^[16]根据Apollo 15和17就位热流测量试验分析得出月面以下1~2.36 m深度范围内

的热导率值为0.015~0.03 W/(m·K), 而Cremers等^[17-18]通过实验室设备对Apollo样品进行热导率测试, 发现在不同密度和温度下(1 100~1 950 kg/m³、110~430 K),

样本热导率大多分布在 $5 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 从而得出密度对热导率存在较大的影响。1970年, Fountain等^[19]利用实验室营造的月球拟真空环境测量玄武岩颗粒的热导率; 2010年Presley等^[20]对石英颗粒进行热导率测量得到热导率随密度增加呈现上升的规律, 结构如图1(b)、1(c)所示。Woodside等^[21-22]发现压力对颗粒状物体热导率影响也较为显著, 如图1(d)所示分界点出现在0.1 torr, 当压力在0.1 torr以下热导率随温度的变化并不显著, 当压力大于该值时呈现正相关趋势。Fountain等^[19]在不改变密度的情况下, 得到了热导率随温度变化的趋势。由图1(e)可知分界线在300 K左右, 当温度低于300 K时, 热导率随温度的变化较为平稳, 之后随温度的变化上升趋势明显加快。

就位探测和实验室试验数据表明, 月壤热导率低且随着环境压力和自身温度、密度的变化会产生较大的变化。通过对月球水资源来源、赋存形式及含水冰月壤物理性质的分析, 为未来水冰资源精准探测、低成本获取提供了前提条件, 结合月球的特殊环境条件, 为开发高效的利用形式提供了可行性条件, 使水资源的开发利用兼具科学性和实用性。

2 月球水冰资源探测与利用发展现状

2.1 月球水冰资源探测发展历程

月球水资源的探测结果, 主要来源于采样返回的

样品分析及在轨卫星遥感探测等。

采样返回探测是指通过无人自主探测器或载人登月等方式在月表进行原位采样, 采集样品后返回地球进行科学分析。截至目前, 只有20世纪70年代前苏联发射的Lunar系列(Luna16、20、24)无人自主采样探测器、美国Apollo系列载人登月任务(Apollo11、14~17)^[23]及中国“嫦娥五号”成功到达月面并将样品带回地球。其中Luna 24带回的样品发现了0.1 wt%的水含量, 是人类第1次在月壤样品中发现水资源存在的证据。在Apollo带回的样品中也发现了0.1~0.3 wt%的水分, 虽然这个发现可能是陆地蚀变等不可控因素造成的, 但也大大激起了人们对于月球水资源的研究兴趣。

在轨遥感探测是通过卫星携带的光谱分析、雷达、中子谱仪等仪器返回的探测数据进行处理, 获得月面资源的分布。美国发射的“克莱门汀”(Clementine)环月探测器^[24]第1次得到了月球存在水冰的间接证据。为验证数据的可信度, 美国及印度相继发射了“月球勘探者号”(Lunar Prospector, LP)“卡西尼号”(Cassini)、“月船一号”(Chandrayaan-1)等探测器, 进一步获得了月球极区存在水资源的间接证据^[25-26]。虽然可以确认氢元素的存在/富集, 但无法明确氢元素的存在形式是水分子还是水冰或者羟基。这使得人们对月球上水资源的分布及存在形式有了基本认识, 针对当前月球水冰资源开发状况进行了总结, 结果如图2所示。

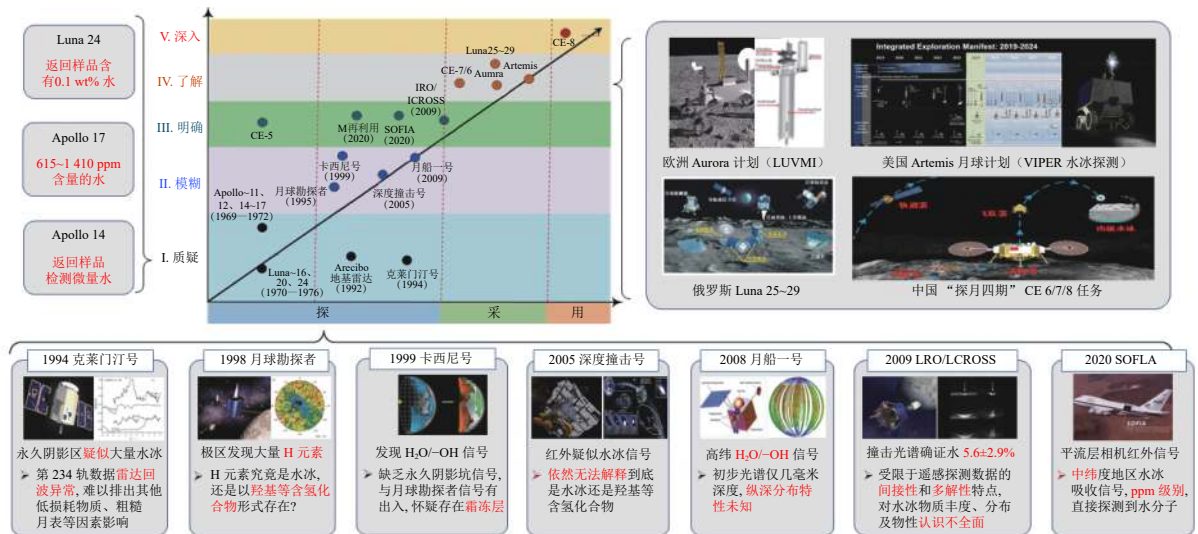


图2 月球水冰资源开发趋势^[23-28]

Fig. 2 Development trend of lunar water resources^[23-28]

通过分析LCROSS卫星撞击永久阴影坑产生的溅射云团, 获得了水冰资源存在的直接证据, 其含水量为 $5.6 \pm 2.9 \text{ wt}\%$, 储量可达数10亿t。李帅团队^[7]通过

对月球矿物绘图仪(Moon Mineralogy Mapper, M3)观测数据再利用, 验证了月球南北纬 70° 以上的永久阴影区多处含有水冰。2020年美国利用平流层红外

天文台 (Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy, SOFIA) 对永久阴影坑辐射谱观测发现了存在水分子, 且在两极富集^[27]。2021年, 中国科学院地质与地球物理研究所对“嫦娥五号”携带的“月球矿物光谱仪”数据进行分析结果显示, 1 t月壤含有 120 g水, 1 t岩石含有 180 g水, 再一次“实锤”了月球上存在水。

以上所获得的探测数据对月球水资源的了解只是冰山一角, 因此需要利用更先进的探测仪器进行实地原位采样探测。世界各国将目光锁定在月球南极, 探

月四期“嫦娥七号”、美国“阿尔忒弥斯” (Artemis)、俄罗斯联邦航天局与欧洲航天局合作的Luna27及欧洲的Aurora计划^[28]都将在月球南极永久阴影坑中进行原位采样及就位分析, 目标是获得水资源存在的直接证据, 最终将为未来月球原位利用及月球基地建设以及人类深空探测发展提供基础和跳板。

2.2 月球水冰资源探测与利用

月球上水资源主要为表面霜冻层、剖面水冰层和深层冰层3类。针对不同深度水资源的特点, 研究人员提出了具有针对性的提取方案, 如图3所示。

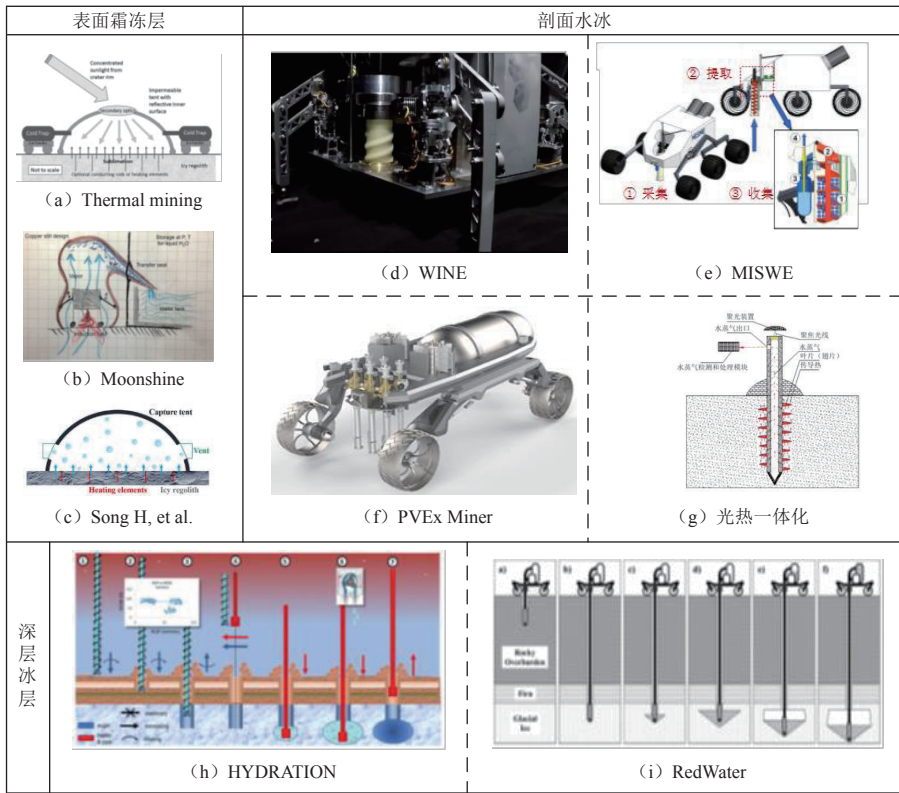


图3 水资源提取方案^[28-37]
Fig. 3 Water resources extraction scheme^[28-37]

针对表面霜冻层及浅表层水资源, 科罗拉多矿业学院空间资源中心Sowers等^[29]提出一种类似于“帐篷”的装置, 利用太阳能加热表层水冰资源; Orenstein等^[30]利用感应线圈进行热量传递; 北京科技大学Song等^[31]开展的月球极区水冰资源原位热采温控机制及开采优化研究也取得重要进展。这3种装置均是通过传递热量使水冰相变挥发, 再将收集到的水资源进行转移, 但这种方式对于月面的穿透能力有限, 同时缺少密闭的相变环境使得水资源散失, 造成大量损失。

针对月面深处大面积冰层, 基于Rodwell设计, Lordos等^[32]提出了HYDRATION系统、Mank等^[33]提出了Redwater水提取系统。Redwater已在南极洲提取了数

千万升水。两者均需先对地下水资源融化, 然后再进行液态水提取, 但只针对大面积纯冰层有效, 应用场景受限, 并且液态水的收集需要布置额外的运输装置及温度压强控制系统, 大大增加了成本, 同时提取的液态水中可能含有大量腐蚀性化学物质, 容易对硬件设施造成破坏。

水蒸气更适合远距离传输并不需要额外的设备, 并且水蒸气中的水是纯净的且有利于进一步利用。因此世界各国对于气态水收集兴趣更大。目前来看针对月球剖面中水冰资源的开发利用更具性价比和挑战性。目前, 中国及美国的多个机构基于钻进采样过程对极区水资源提取提出了多种设计方案。美国Honeybee

Robotics公司基于深槽螺旋钻提出的sniffer装置^[33],为扩大水资源提取范围和装置机动性,研究人员在螺旋钻具基础上结合提取装置,开发出了“WINE”(The World is Not Enough)、“MISWE”(Mobile In-Situ Water Extractor)等移动装置^[4,34];同时为降低系统能耗、提升效率,基于取芯钻具开发了PVEx装置^[35],在减少样品获取功耗的同时增强了环境适应性,使水资源提取利用过程实现了一体化,并与移动车结合开发了PVEx miner装置。中国钱学森空间技术实验室充分利用太阳能等提出了“光热一体化”方案^[36],利用中空钻具获取并原位加热月壤来提取水资源,但是试验数据并不理想,大部分水资源都被周围冷阱重新捕获;此外,该实验室也利用深槽螺旋钻开发了一种水资源提取系统^[37],但这些装置均受限于钻探功耗。

综上所述,目前世界各国都将开发利用月球南极水冰资源作为未来深空探测任务的重点,但目前已开发的装置均存在能耗高、提取效率低问题,因此开发一种简单、可靠、高效能的提取装置对于月球极区水资源开发利用具有重大意义。

未来月球水资源的开发利用一定是多方面装置协同合作,能够探得准、采得精、用得来。由于月球南极水冰资源分布具有概率性、随机性,首先需要结合已有的遥感、触探等方式进行综合改进,掌握水资源的分布情况并能精确定位;其次由于月球极区的极端环境条件,缺少太阳辐射,对装置能耗也提出了苛刻要求。同时为实现资源采集的高效性,需实现多种技术集成,在采集过程中及时分辨更优位置并作出策略调整。多器协同、一体化、广覆盖、高集成度、精准采集将会是今后原位资源利用装置的发展趋势。

3 月球水冰资源探测与利用关键技术

尽管对含水冰月壤的研究取得了一定进展,但对于水冰资源大量高效的开发利用仍存在非常多的困难与挑战。月球水冰资源提取开发主要包括月壤水冰资源精准采样、水分子诱导挥发、气体分子转移、冷凝收集等多个环节,同时在低温、高真空的极端环境如何保证各个环节顺利进行,寻找解决问题的最佳途径,成为水资源开发的关键。

3.1 水冰资源精准预判技术

目前对月球极区水资源的分布主要是通过星载探测雷达/中子谱仪/光谱仪等遥感探测方式实现远距离非接触探测。雷达探测数据具有多解性和模糊性,受月球表面粗糙度影响较大^[38];光谱仪是对分子之间各类键吸收的波长比进行分析;中子谱仪等主要是对月球

表面的H元素进行探测,耗时长且分辨率低,难以实现信息实时处理。在已有探测活动中使用的载荷及其特点如表1所示。

表1 水资源探测载荷比较

Table 1 Comparison of water resource detection loads

载荷	质谱分析法	光谱法	中子谱法	遥感雷达
典型案例	Apollo15/17、月船一号	Luna27、HAYABUSA-2	美国LP/LRO、嫦娥四号	克莱门汀、嫦娥系列
工作原理	根据质荷比区分挥发分	分子间各类键波长吸收比	核物理方法,根据氢总量计算	雷达发射电磁波,反射波时延计算
分辨力	/	厘米量级	米量级	百米量级以上
技术特点	需要样品采集且无法直接获得含水率	穿透力弱,仅为厘米量级	无法区分含氢物种类	受表面粗糙度影响较大,数据存在多解性和模糊性

目前各探测活动之间彼此独立且大部分数据无法定标,难以实现数据共享,数据可信度也大大降低。因此在作业前需对水冰资源分布实现精准预判,通过远程遥感实现米级定位,给移动平台以足够的定位精度,最大程度减少地外能量的消耗。故采用“多器协同”方案,充分发挥各探测方式的优势,采用远程遥感和原位探测相结合实现水冰资源分布“地图”的构建,以达到优选作业地点、提高效率的目标。

3.1.1 大范围表层水冰资源遥感探测及分布评估

通过在卫星上搭载相关载荷资源初步分布探测。通过微型合成孔径雷达发射雷达波可分辨月表水资源的分布,识别可能的冰存在形式,从而构建月表水含量分布图;同时利用遥感中子谱仪,绘出月表H元素的分布规律,为进一步就位探测提供重要依据。

3.1.2 着陆局部区域表层水冰资源就位分析与预判

通过移动平台搭载科学探测仪器在遥感预判基础上实现更加精准的探测。

1) 随行中子探测

利用移动探测器(星球车、飞跃器等)舱体或机械臂末端搭载中子谱仪,“边走边探”实现可达区域的精准探测。但利用中子谱仪构建区域氢丰度分布图具有耗时长、结果滞后,同时受到作业条件的限制,该方案仅在光照区具有可行性,不适用于极区永久阴影坑作业。

2) 随行红外光谱探测

通过选择性吸收某些波长的红外线,实现被测物体分子结构及化学成分的分析。该方式针对水冰资源特定挥发物质的光学吸收特征,选定2个或多个谱段的激光器组成简化探测器,既可降低红外光谱探测器的资源代价,又可针对月壤表面 μm 级水冰含量做定量预

估。但该方式测量精度受到其它矿物成分、粒径级配及表面粗糙度的影响,因此需要在任务开始之前在轨标定提高探测可靠性。

3.1.3 作业位置剖面水冰资源精准就位分析与预判

以上方式均为非接触式探测,可实现水冰资源在水平方向的分布预测,但难以判断剖面水资源的分布。因此需要一种可突破高强度含水冰月壤的装置(以剖面采样钻为例),实现不同深度接触式探测分析。

1) 随行跨步足探仪

在移动部件上搭载物性传感器形成足探仪,通过触探含水冰月壤物性信息实现极区月壤电/热学等参数原位测量,实现浅表层水冰与岩石等预判,辅助雷达实现在轨定位,以达到精确定位目的。

2) 随钻热电物性传感

采用足探仪相似原理,将物性传感器搭载在剖面钻具上,可获得不同深度水资源含量分布的信息。

3) 随钻红外光谱仪

随钻物性传感仅可以实现剖面中离散点上水含量的精确分析,而红外光谱仪可以完成在作业过程中水含量的动态分析,多器协同实现剖面水资源的精确分析与预判,构建水冰资源分布的三维地图。

但上述技术存在探测精度不足、集成性差、作用力小、响应相对较慢等缺陷。因此,研究新型高集成快速响应装置,是目前月球水冰采样探测的重要任务。

3.2 水冰物质就位科学分析技术

为扩大月球极区探测科学成果,提高水冰资源探测装备的精准度与响应性,还需对月壤挥发分(低沸点元素和化合物)分析,这对于揭示行星形成与演化具有重要的意义,也可为未来月球基地建设提供重要参考。前期因技术受限,对于挥发分的研究主要通过采样带回方式进行,这会造成部分信息的丢失和改变。因此需要基于微量样本实现原位高精检测与采集,并利用质谱分析仪及气相色谱仪等挥发分成分及含量等进行就位提取整理,对水冰资源含量及利用价值进行精准辨识。

1) 微量采样

通过移动载体搭载方式对月面月壤进行多点定粒径、定密度、定质量毫克级采样,实现概率平均、探测范围扩大、提高有效样品采集成功率等优势。

2) 高效提取

利用水易挥发特点(水资源相变挥发温度150K),在密闭环境中利用高效加热方式,根据各物质挥发性实现宽范围、高精度(0.1K级)精准控温,从而实现各物质的分时分级提取。

3) 精确分析

利用水分子分析仪及质谱仪等载荷在秒级内对提取的挥发物质种类及含量进行识别。对于剖面的物质,则需要利用搭载剖面钻等机具的物性传感等载荷进行原位探测,对月壤中水资源含量实现高达1%精度的测定,从而在作业过程中实现对极区月壤水冰、挥发分等物质的识别及信息获取,构建水资源剖面分布的局部地图,使后续提取作业施加的能量具备高精准性和有效性。

3.3 水冰资源高效提取技术

已有研究表明,在月球极区极端环境下,含水冰月壤物理力学特性高,作业条件受限,因此水资源提取是一个系统性的作业,需要多部分协同工作,完成样品采样、水分提取及收集等环节。

1) 月壤水冰保真采样

极区环境下水资源以冰的形式赋存于月壤颗粒空隙中,具有极高的机械强度,同时又极易受热挥发。利用螺旋钻具(环形空间切割)、线切掘进(循环切削散热)等方式,在完成样品高效收集的同时实现低扰动作业防止样品水分散失。

2) 挥发分加热提取

月球极区太阳辐射角小导致可获得能源受限,加之月壤颗粒间导热性极差,多孔结构增加水资源转移流阻,增加了水资源提取的难度。因此了解冰-壤混合物热学特性变化规律,开发新型热提取方案,加快热量传递速度十分重要。水冰相变过程需要消耗大量能量,但在一定热源条件下水冰相变速率有限,使得施加能量受到限制。因此增大能量的接触面积,减少传递路径成为了提升加热效率的有效方式。

3) 挥发分转移收集

挥发分收集主要突破2个技术难点:①水资源净化;②水资源高效捕获。蒸发后的水分子适合远距离传输,因此可作为提取对象,且水蒸气中分子构成较为单一,可实现收集纯净的水资源,并可在一定条件下实现水资源三态转化,进而实现储存和再利用。

同时利用极区的深低温环境,将低温月壤作为冷媒,并通过特殊设计的冷阱结构实现挥发分高效收集。将提取的水资源进行存储、提纯,最终根据不同使用需求直接进行转换,真正做到定点输送、物尽其用。

3.4 水冰资源转化利用技术

水冰资源除了作为维持生命必须的物资外,还可以经过转化用于热循环系统、科学实验及科学演示等活动。如利用电解的方式,将水转化为氢气和氧气,作为宇航工作必须的燃料和助燃剂。

但极区太阳辐照角较小,极区中太阳能缺乏,使得作业过程中能量补给受限。同时获取高强度样品及水资源利用过程能量消耗较大,造成月球极区环境能源匮乏、所需催化剂等辅助原料缺乏的问题,因此开发低能耗、高效率的水冰资源提取利用装置是极其关键的一步。

4 月球水冰“探-采-用”一体化方案

月球极区水资源利用是未来深空探测发展的重要

保障手段,通过多器协同形成“探-采-用”一体化方案是一种有效的实施手段。但目前对于月球水资源的探测存在探-采分离的缺陷,对于水资源的精准定位仍存在较大的进步空间。

应用遥感卫星进行宏观预判构建月球极区水资源分布地图,并在该地图指引下通过月球车携带探测装置前往标记区域进行局部细化探测,完成科学化目标探测和资源提取。本文针对该问题提出了一体化方案,如图4所示。

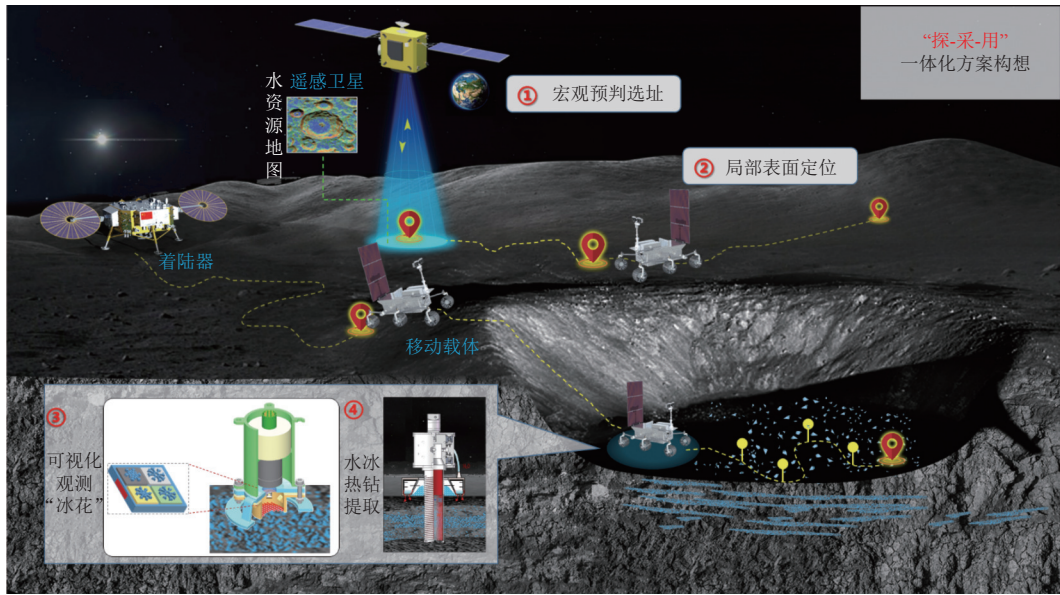


图4 “探-采-用”一体化方案应用场景

Fig. 4 Application scenario of the integrated scheme: exploration, sampling, and utilization

1) 利用在轨卫星探测构建水资源分布地图,并对具有采集价值的地点进行标记,完成着陆器选址;

2) 利用移动载体搭载的探测装置实现对标记地点进行精确探测,优选开采地点;

3) 充分利用月面低温环境对该地点表层月壤的挥发分进行提取/分析,进行可视化探测;

4) 利用自身搭载的剖面钻具获取该地点剖面信息,构建水资源分布“三维地图”;

5) 对于开采价值较高的开采位置,可利用提取装置进行水资源的收集并进行进一步利用。

4.1 应用场景定义

为实现水资源利用过程能探得准、采得精、用得来,将方案进行分解,大致分为多器协同定位/探测水冰资源预判、月壤水冰挥发分采样就位探测、水资源提取及收集等过程。

1) 水冰资源预判

月球极区水资源分布具有离散性、概率性,因此水冰资源开发利用第1步就是针对水冰资源分布进行精

确定位预判。本方案采用多器协同方式进行联合探测,其中包括信标网络构建,以及利用轨道器、着陆平台等实现资源利用地点精确选定,以提高定位精度,减少不必要的资源浪费。

2) 挥发分就位探测

通过非接触探测方式无法获得水冰资源在剖面的分布信息,且由于挥发分提取过程能耗较高,因此剖面信息对于判断位置是否具有开采价值以及确定开采策略是十分重要的。如果能合理掌握并利用剖面信息,可在精准探测的前提下节约能耗,实现探月装置更加高效节能。

3) 水冰资源提取与利用

在明确水冰资源空间分布特征后,利用水资源提取装置进行针对性提取,并充分利用月球极区极端低温环境得到收集冷阱,收集资源并加以利用。

4.2 水冰资源就位预判方案设计

1) 宏观预判选址

利用在轨遥感卫星携带的立体相机、雷达/辐射

计、光谱探测、中子谱仪等构建极区水资源的分布地图, 标记大概率含水地点, 完成着陆区的预选址, 提供位置信息, 实现着陆移动平台的高效、精准移动。

2) 局部表面定位

通过水资源分布地图指引以及移动平台和遥感卫星的实时通信, 使移动平台高效精准地进入标记区域, 并利用其搭载的分布式红外探头、中子谱仪等获得高精度资源分布信息, 完成勘探选址过程。

4.3 挥发分科学分析方案设计

1) 移动触探

通过移动平台集成的物性传感器进行接触探测, 实现“边走边探”, 提高作业效率, 通过地面标定结果进行水资源识别, 确认采集地点。

月球环境复杂, 因此移动平台需具备月面辨识、路径规划能力以提高目标地点的可达性。同时由于月球极区的极端真空低温环境, 使得月壤热电活性较低, 需提升物性传感器存活性、精确性、快速性, 进而对极区月壤参数进行探测。

2) 可视化观测

通过触探检测精确定位高开采价值位置后, 需获得其表层挥发分组成的详细信息, 提出一种集成化的挥发分观测仪, 如图5所示。

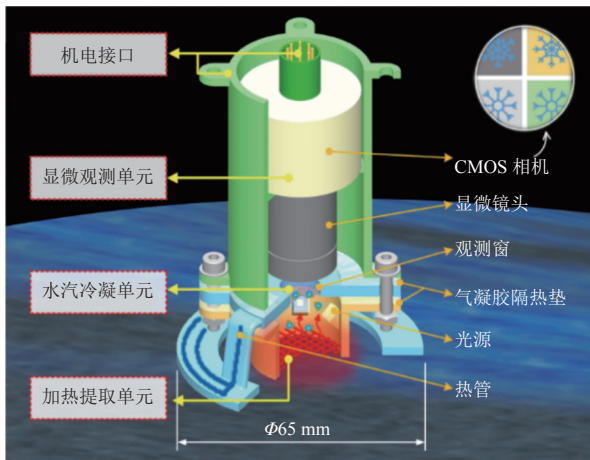


图5 可视化模块原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the visualization module

该部分主要由加热提取、水汽冷凝、显微观测单元和用于安装连接的机电结构等部分组成, 预计尺寸为直径65 mm × 高130 mm, 整体重量 ≤ 200 g。

加热提取单元: 由气凝胶隔热垫和网状的加热丝组成形成封闭的腔室, 利用网状的加热丝与月壤进行热量交换, 诱导水挥发以便于捕获。

水汽冷凝单元: 由冷凝板和热管组成, 热管与低温含水冰月壤接触并通过热管导热实现冷凝板的降温, 为水汽冷凝提供冷环境。

显微观测单元: 由CMOS相机、显微镜镜头、观察窗及LED光源组成, 在光源照射下, 显微相机可对“冰花”实现分辨率高达0.2 μm的显微摄像, 并具有消除色差和像差的功能。

该部分工作时首先将其按压在月壤表面, 使冷凝单元接地端与月壤接触, 通过热管高效导热使冷凝板降温。同时加热提取单元形成一个密闭小腔室, 利用网状加热丝对月壤中的水分进行加热提取, 扩散出的水分子会在密闭腔体上方的水汽冷凝板上凝结形成冰花, 利用LED光源提供照明, 通过显微镜对冰花进行显微成像。在此过程中, 加热和冷凝单元之间采用高性能隔热设计防止冷凝单元受热, 从而影响观测效果, 并能使传感器处于较合适工作环境。

通过以上步骤可打造月球的“可视化冰花”, 并采用冷凝板内嵌加热丝祛除冷凝冰花, 实现重复利用。该方案充分利用月球极端环境, 减小设备体积的同时降低了系统能耗, 也可作为物性触探技术的互检手段。但目前对于含冰月壤这类多孔介质中水资源热致挥发机制及真空环境下冰颗粒形态研究较少, 需对该过程建立完善的理论体系, 以实现提取过程的合理预测。

3) 采样探测

与开采位置表面相比, 剖面信息更为重要。该部分由回转冲击钻具、物性传感阵列及观测仪等组成。

首先利用回转冲击钻具对含水冰月壤进行破碎, 在钻进过程中, 分布在钻具全尺度的物性传感可以对剖面水冰含量进行实时测定, 并判断水冰提取价值。但极区环境下含水冰月壤具有极高强度, 这需要钻具具备较强的突破能力。水冰的胶结使月壤呈现脆性, 因此在回转钻具的基础上增加冲击作用可有效降低作业的钻进负载, 通过调节进转比和振转比可对40 Mpa目标实现低反力突破^[39], Zancy等^[28]使用MSR钻机在冲击辅助作用下以50 N钻反力对高硬度玄武岩实现突破, 并利用LPD钻机针对-100℃下1~5 wt%含水冰样本实现突破钻进, 且反力和功耗低于20 N、20 Watts。

在特定规程下可实现含冰月壤剖面的突破, 对含水率较高位置可实现厘米级高精度定位, 确保每一次提取过程成功率较高, 在保证水资源提取效率的同时减少能源的损耗。真实含冰月壤组织结构较实验室制备模拟样本更为复杂, 需要通过钻进过程的实时反馈实现钻机进转比、振转比等相关参数进行调节, 以提高工况适应性。

4.4 水冰资源提取方案设计

开采位置优选后, 需提取该位置剖面的水资源, 但永久阴影坑内缺乏能量, 因此提出一种一体化水资源提取装置。装置如图6所示。

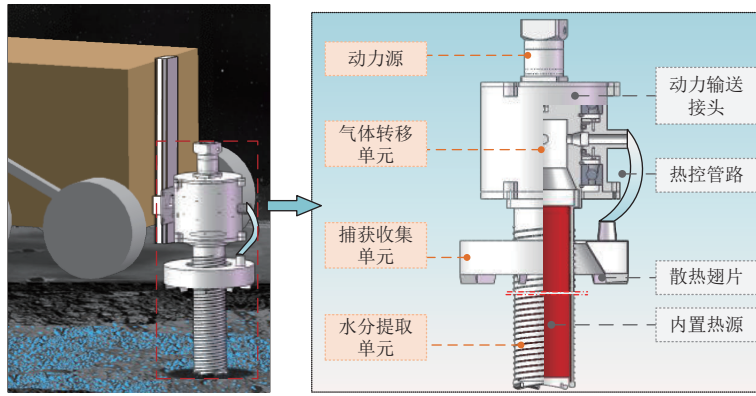


图6 水资源提取装置原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the principle of water extraction device

4.4.1 水冰资源提取装置

该部分主要由水分提取单元、气体转移单元、冷凝部件及灵活动力接口组成。该装置实现了水资源提取一体化设计，并充分利用月面环境降低系统能耗，实现高效作业。

水分提取单元：由中空钻具和内侧热源组成，利用中空钻具的环形切割空间可减少样本接触面积，降低钻进负载，进而降低提取过程综合成本。通过预压作用创建密闭环境，并利用内侧热源诱导水分挥发，实现提取水分。

气体转移通道：由旋转接头和热控管路组成，旋转接头形成动静部件之间的通道连接，热控管路可防止水汽在转移过程中出现凝结。

冷凝部件：由散热翅片、凝结翅片及存储容器组成，散热翅片可以充分利用月球表面的环境条件，插入月壤实现冷凝潜热的释放，以保持收集装置的过冷度进而实现高效收集水资源。翅片插入表层月壤也可

起到锚固装置的作用。该部件可减少液氮、液氦等高压冷剂的使用，降低系统能耗。

作业过程中，动力装置首先将该模块移动至选定地点，将环形冷凝模块下方的散热翅片插入月壤表层。之后中空钻具在较低钻进力矩下实现高效钻进，获取含水冰样品。在预压力作用下创建密闭环境，开启加热模块，传递热量诱导水分挥发。挥发气体在极化电极的作用下实现在热控管路中的定向快速转移，进入冷凝装置进行收集。水资源提取结束后，钻具提出留下样品，在最大程度上保持月面原貌，并通过移动载体实现作业范围扩大，使得该装置可实现高效循环使用。

4.4.2 方案验证与能力分析

为验证上述方案及系统布置的可行性，本研究搭建了热钻式提取装置样机，并利用已有低温真空环境对含冰模拟样本开展了效能验证试验，分别验证了其采样效果及水资源提取功能，样机系统如图7所示。

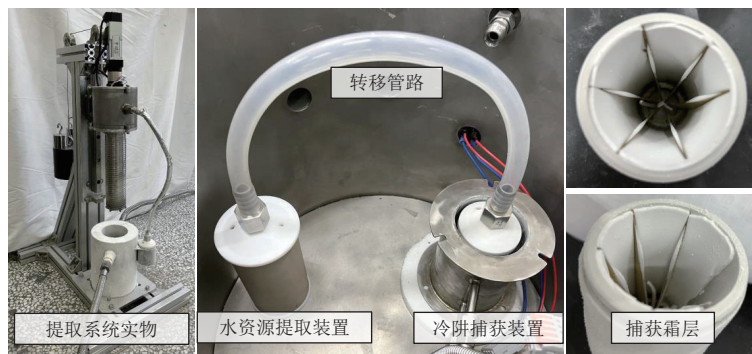


图7 热钻式提取装置样机

Fig. 7 Hot drill extraction device prototype

样本制备记录完成之后，利用保湿膜包裹并冷冻。为保证样本的均一性，本研究采用二级预制冷（ -30°C 、 -80°C ）和最终利用液氮在试验前80 min进行降温（ -180°C ）完成样本的准备。在含水率为

8.5 wt%的模拟含冰月壤中，使用轴压力80 N、功率100 W，在10 min内实现150 mm样品的获取，钻进深度曲线如图8所示。

取样后的月壤利用设定温度 -130°C 的冷阱进行水

冰捕获,并在120℃热源条件下,可有效地实现水资源的收集提取,试验结果如表2所示。经测试最终收集速率可达13 g/h。综合能耗2.59 Whr/g。样机结束工作后热源性能稳定,因此该系统有效可行,可实现月壤水冰78%的原位取样与利用。

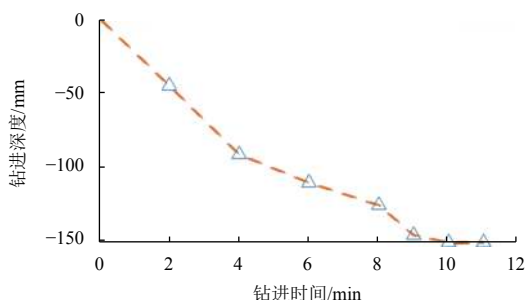


图8 钻进深度变化曲线

Fig. 8 Variation curve of drilling depth

表2 月壤水冰提取收集试验结果

Table 2 Experimental results of water ice extraction and collection from lunar soil

序号	含水率/wt%	密度/%	提取速率/(g·h ⁻¹)	获取速率/(g·h ⁻¹)	捕获比平均功例/%	平均功率/W	提取能耗/(Whr·g ⁻¹)
1	8.5	82	16.50	12.93	78.40	33.58	2.59
2			17.60	13.60	77.30	35.68	2.62

4.5 水冰资源利用方案设计

据目前已知的4种潜在月球资源:月球高原风化层中的硅酸盐,通常含有>40%的氧气;月海岩中氧化铁平均含有14%的FeO,有些地区可能含量高达25%;在太阳风风化层嵌入的原子(通常为百万分之几);两极附近永久阴影坑风化岩层中的水冰,含量巨大可供人类使用较长的时间。

4.5.1 O₂利用方案

根据中子谱仪探测结果,月球极区水冰资源处于40 cm深度风化层内。本文考虑拟利用螺旋钻取方式从PSR提取水冰资源,随后利用水分收集装置加热使得内部水冰资源汽化为水分子,并被导向水电解槽电解成氧气和氢气。氢气再循环回反应器,水再循环到电解槽,在电解槽中产生的氧气被输送到氧气罐进行液化和储存。

由于水分电解需要大量能量,当水资源产量较低时,可由同位素温差电池提供能源;当水资源产量较高时,可由电池组提供能源。此外,还可利用月球风化层中的硅酸盐和FeO来提取氧气资源。

水资源既可作为维持生命延续的基本物资,又可用于月球基地各类装置的热循环系统,降低地月转移过程中物资携带量及风险,进一步降低了成本。

4.5.2 H₂利用方案

水冰资源被提取后,可进一步作为原材料进行制氢制氧,氢气可用来制作空间燃料电池,作为太阳能的补充,扩大月面活动的范围。其次作为燃料,可为深空探测(火星探测、太阳系边际探测)提供燃料补给,借助低重力环境可降低成本,增加了月球基地建设的可行性。

除此之外,水冰资源还可用来进行化学合成和动植物培育等多方面活动,对未来载人登月等探测任务的开展具有极为重要的意义。

4.6 方案评价及应用前景

本文提出的方案通过多器协同,并整合已有成功探测技术和相关物理环境因素,在降低能耗的同时提高了效率。整机高度集成,各系统彼此独立又协同配合,可充分提升水资源提取的成功率;“探-采-用”一体化装置极大降低了系统的复杂度,提高了可靠性。为今后月球原位水冰资源利用及月球基地建设任务中提供了物资获取方案。但本文没有对机具加热过程设置温度控制策略,未能对装备隔热绝热进行优化设计,使得试验边界条件动态波动范围较大,目前未达到工程应用需求。同时仍需优化试验条件,建立完整的低温真空环境对装备的可行性进行进一步验证。

5 结论

1) 本文调研分析了月球水冰资源的形成及演化机制、月壤力学及热学特性,得出水资源具有广泛分布、两极富集、储量丰富等特点。为未来水冰资源精准探测、低成本获取提供了前提,使得水资源的开发利用过程兼具科学性和实践性。

2) 本文通过梳理月球水冰资源探测的发展历程和利用方案,优化了原有案例彼此独立、数据共享性差等缺陷,提出了未来月球极区水资源利用装置多器协同发展的构想,总结出水冰资源精准预判、就位科学分析、高效提取以及转化利用4大关键技术及解决途径。

3) 充分利用月球极区低温环境和水资源赋存特性,提出了一种“探-采-用”一体化方案,整合已有探测技术和物理环境因素,实现一次发射、多器协同配合,可实现数据在轨定标。在提高探测成功率、系统可靠性、数据可信度的同时,大大降低系统的能耗。并着重介绍了可视化模块和水资源提取装置的组成及作业原理。

4) 该方案切实可行,相对安全可靠,为未来月球水资源提取任务提供了研究基础与科学方案。

参 考 文 献

- [1] WATSON K, BRUCE C B, BROWN H, et al. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(9): 3033-3045.
- [2] ANAND M. Lunar water: a brief review[J]. *Earth Moon & Planets*, 2010, 107(1): 65-73.
- [3] 徐琳, 刘建忠, 邹永廖, 等. 月球表面水冰的探测和意义[J]. *空间科学学报*, 2003, 23(1): 42-49.
- XU L, LIU J Z, ZOU Y L, et al. Detection and significance of Moon surface water ice[J]. *Journal of Space Science*, 2003, 23(1): 42-49.
- [4] ZACNY K, METZGER P, LUCZEK K, et al. The world is not enough(WINE): harvesting local resources for eternal exploration of space[C]//Proceedings of AIAA Space 2016. Long Beach, California: AIAA, 2016.
- [5] 辛航. 月球两极存在大量冰态水[J]. *国际太空*, 1998, 4(4): 14.
- XIN H. There is a large amount of ice water in the two stages of the Moon[J]. *International Space*, 1998, 4(4): 14.
- [6] BENNA M, HURLEY D M, STUBBS T J, et al. Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(5): 333-338.
- [7] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(36): 8907-8912.
- [8] KLETETSCHKA G, KLOKOČNÍK J, HASSON N, et al. Distribution of water phase near the poles of the Moon from gravity aspects[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 1-9.
- [9] 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.
- [10] DAVIES J G, LOVELL B, PRITCHARD R S, et al. Observations of the Russian Moon probe Luna 9[J]. *Nature*, 1966, 209(5026): 848-850.
- [11] KARACHEVTSEVA I, OBERST J, SCHOLTEN F, et al. Cartography of the Lunokhod-1 landing site and traverse from LRO image and stereo-topographic data[J]. *Planetary and Space Science*, 2013, 85: 175-187.
- [12] SEVERNY A B, TEREZ E I, ZVEREVA A M. The measurements of sky brightness on Lunokhod-2[J]. *The Moon*, 1975, 14(1): 123-128.
- [13] GERTSCH L S, ROSTAMI J, GUSTAFSON R. Review of lunar regolith properties for design of low power lunar excavators[C]//Proceedings of the 6th Conference of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Arlington, Virginia: Missouri University of Science and Technology, 2008.
- [14] ATKINSON J, ZACNY K. Mechanical properties of icy lunar regolith: application to ISRU on the Moon and Mars[C]//Proceedings of Earth and Space 2018: Engineering for Extreme Environments. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2018.
- [15] CREMERS C J, HSIA H S. Thermal conductivity of Apollo 16 lunar fines[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. USA: LPSC, 1974.
- [16] LANGSETH M G, KEIHM S J, PETERS K. Revised lunar heat-flow values[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. USA: LPSC, 1976.
- [17] CREMERS C J. Thermal conductivity of lunar fines from Apollo 11[C]//Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference. Houston: NASA, 1970.
- [18] CREMERS C J, BIRKEBAK R C, DAWSON J P. 1970. Thermal conductivity of fines from Apollo 11[C]// Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference. Houston: NASA, 1970..
- [19] FOUNTAIN J A, WEST E A. Thermal conductivity of particulate basalt as a function of density in simulated lunar and Martian environments[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(20): 4063-4069.
- [20] PRESLEY M A, CHRISTENSEN P R. Thermal conductivity measurements of particulate materials: 5. Effect of bulk density and particle shape[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2010, 115(E7): 1-13.
- [21] WOODSIDE W, MESSMER J H. Thermal conductivity of porous media. I. Unconsolidated sands[J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(9): 1688-1699.
- [22] MASAMUNE S, SMITH J M. Thermal conductivity of beds of spherical particles[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1963, 2(2): 136-143.
- [23] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- OUYANG Z Y. Introduction to Moon Science [M]. Beijing: China Astronautical Press, 2005.
- [24] NOZETTE S, LICHTENBERG C L, SPUDIS P, et al. The Clementine bistatic radar experiment[J]. *Science*, 1996, 274(5292): 1495-1498.
- [25] FELDMAN W C, MAURICE S, BINDER A B, et al. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: evidence for water ice at the lunar poles[J]. *Science*, 1998, 281(5382): 1496-1500.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] ZACNY K, PAULSEN G, KLEINHENZ J, et al. Development and testing of a lunar prospecting drill (LPD) to search for water-ice[C]//Proceedings of Earth and Space 2014. St. Louis, Missouri: ASCE, 2014.
- [29] SOWERS G F, DREYER C B. Ice mining in lunar permanently shadowed regions[J]. *New Space*, 2019, 7(4): 235-244.
- [30] ORENSTEIN N. ISRU potable water harvester for astronaut missions[C]//Proceedings of 45th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: NASA, 2014.
- [31] SONG H, ZHANG J, NI D, et al. Investigation on in-situ water ice recovery considering energy efficiency at the lunar south pole[J]. *Applied Energy*, 2021, 298: 117136.
- [32] LORDOS G, VANDERHOUT A, ADAMS A, et al. Hydration: mining water ice on the Moon and Mars using downhole radiative heating[EB/OL]//2021-4-15[2022-4-14]. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483374.044>
- [33] MANK Z D, ZACNY K A, SABAH D, et al. Redwater: a Rodwell system to extract water from Martian ice deposits[C]//[EB/OL]//2021-4-15[2022-4-14]. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483374.044>.
- [34] 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 AIAA Space 2012 Conference &

- Exposition. Pasadena, California: AIAA, 2012.
- [35] ZACNY K, INDYK S, LUCZEK K, et al. Planetary Volatiles Extractor (PVEX) for In Situ Resource Utilization (ISRU) on the Moon[C]//Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group. Columbia: LPI, 2016.
- [36] 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.
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.
- [37] HE L, WANG C, ZHANG G, et al. A novel auger-based system for extraterrestrial in-situ water resource extraction[J]. *Icarus*, 2021, 367: 114552.
- [38] 欧阳自远. 中国嫦娥工程进展(上)[J]. *图书馆杂志*, 2008(11): 81-88.
OUYANG Z Y. Progress of China's Chang'e project (Part 1)[J]. *Library Journal*, 2008(11): 81-88.
- [39] 李鹏. 月岩取心钻头及其低作用力高效能钻进特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
LI P. Research on moon rock coring bit and its low-force and high-efficiency drilling characteristics [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- 作者简介:
周光旭(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向: 地外天体采样探测。
通信地址: 哈尔滨市南岗区一匡街2号哈工大科学园科创大厦 J1609室(150001)
E-mail: gx_zhou827673455@163.com
张伟伟(1988-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向: 地外天体采样探测。**本文通信作者**。
通信地址: 哈尔滨市南岗区一匡街2号哈工大科学园科创大厦 J1609室(150001)
E-mail: zweier@hit.edu.cn

Conception of Integrated Scheme of “Exploration, Mining and Utilization” of Lunar Water-Ice Resources

ZHOU Guangxu¹, CUI Zhongyu², ZHANG Weiwei¹, JIANG Shengyuan¹, GUO Linli³

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of Ministry of Education of China, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. China Academy of Space Technology, Beijing 100190, China)

Abstract: Four key technologies and solutions were summarized four key technologies and solutions: accurate prediction of water ice resources, scientific in-situ analysis, efficient extraction, and its transformation and utilization. For the demand of the detection and utilization of water ice resources in the polar regions of Moon, taking advantage of the deep low temperature and occurrence characteristics of water ice in the lunar polar regions, an integrated scheme of “Detecting, Mining and Utilization” on lunar water-ice resources was this paper proposed, and the application scenarios and functions, design plans and evaluations, application prospects, etc. The project provides technical reference and a scientific basis for future exploration, development and utilization of water ice resources in lunar polar regions, support for China's fourth lunar exploration project and lunar scientific research station construction and other major missions.

Keywords: polar regions of Moon; water ice resources; detection and sampling; in situ utilization; integrated schem

Highlights:

- This paper investigates and analyzes the development history of the exploration, sampling and utilization of lunar water resources, systematically reviews the typical cases and development trend, and optimizes the defects of the original cases such as their independence and poor data sharing.
- This paper puts forward the development concept of multi-device collaboration for water resources utilization in the lunar polar region in the future, and summarizes four key technologies and solutions of accurate prediction, scientific analysis in place, efficient extraction and conversion of water ice resources.
- This paper makes full use of the deep-low temperature and the characteristics of water ice occurrence in the lunar polar region, and proposes an integrated implementation scheme of “exploration-mining-use” of water ice resources. The application scenarios and functions, design scheme, evaluation and application prospect are introduced in detail, which provides technical reference and a scientific basis for the exploration, development and utilization of water ice resources in the lunar polar region in the future.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]