

月球水冰资源综合开发技术研究概况*

张天^{1,4} 唐红^{1,2} 贺怀宇³
李雄耀^{1,2} 周传娇^{1,4} 刘建忠^{1,2}

1(中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心 贵阳 550081)

2(中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

3(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

4(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 水冰作为月球的重要资源，是未来月球科研站以及月球基地建设和运行的基本保障，开展月球水冰资源综合开发技术研究是目前各航天大国的关注热点之一。本文调研了有关月球水冰的探测和研究成果，阐述了月球水冰的赋存状态与分布特征，详细分析了月球水冰资源在开采提取、分离纯化、储存运输和分解利用等环节的技术方案，并简要评述了各个方案的优缺点。结合中国未来国际月球科研站的建设规划与美国以建立月球基地为目标的阿尔忒弥斯（Artemis）计划，评价分析了适宜开展月球水冰资源综合开发的地区和可行的技术方案，为中国在月球两极地区的水冰资源开发利用方案提供参考。

关键词 月球科研站，月球极区，月球水冰，综合开发

中图分类号 P184

Review of Comprehensive Exploitation Technology of Lunar Water Ice Resource

ZHANG Tian^{1,4} TANG Hong^{1,2} HE Huaiyu³
LI Xiongyao^{1,2} ZHOU Chuanjiao^{1,4} LIU Jianzhong^{1,2}

1(Institute of Geochemistry, Chinese Academic of Sciences, Guiyang 550081)

2(Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academic of Sciences, Hefei 230026)

3(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100029)

4(University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049)

* 中国科学院青年创新促进会项目（2018435），中国科学院前沿科学重点研究计划项目（QYZDY-SSW-DQC028）和2019年贵州省补助资金项目（GZ2019SIG）共同资助

2022-11-16 收到原稿，2023-02-11 收到修定稿

E-mail: zhangtian@mail.gyig.ac.cn. 通信作者 唐红, E-mail: tanghong@vip.gyig.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract As an important resource on the moon, water ice is the basis for the construction and operation of the international lunar research station and lunar base in the future. The research on the comprehensive exploitation of the water ice resource in the lunar polar regions has also attracted the attention of the space powers in the world. The occurrence and distribution of lunar water ice are elaborately described based on a thorough survey of the exploration and research achievements of water ice in the lunar polar regions at home and abroad. The technical schemes of lunar water ice in excavation, extraction, separation and purification, transportation and storage, decomposition and utilization are introduced in detail, as well as the advantages and disadvantages of each scheme are briefly reviewed. The excavation and extraction steps can be classified into two categories based on the distinct extraction sites of lunar water ice: in-situ extraction and remote extraction. According to the different heating methods, the techniques of direct heating by sunlight, drilling heating, and microwave heating are introduced. In the separation and purification steps, three technologies are introduced: low-temperature distillation and cold trap, adsorption purification, and membrane purification technology. For the steps of transporting and storing, the water tanks are classified based on their position, and the requirements for materials are given. In the decomposition and utilization steps of the water ice resource, three kinds of electrode composition technology are introduced, including alkaline electrolysis, proton exchange membrane electrolysis, solid oxide electrolysis technology, and a photocatalytic decomposition technology using TiO_2 as the catalyst is also presented. Combining the construction plans of the future international lunar research station in China and the Artemis program of the United States, which aims to establish a lunar base, the appropriate areas, and technical schemes for the comprehensive exploitation of the lunar water ice resource, is evaluated to provide important references for the exploitation and utilization of water ice in the lunar polar regions.

Key words Lunar research station, Lunar polar regions, Lunar water ice, Comprehensive exploitation

0 引言

自 20 世纪 50 年代发射月球探测器以来,月球是否存在水冰的争议不断。早期理论认为,受太阳紫外辐射、太阳风和月球引力等因素的影响,水不可能稳定存在于月表^[1-3]。Watson 通过理论计算提出水可以在月表的冷阱中稳定存在^[4,5]。20 世纪 90 年代,阿雷西博(Arecibo)地基雷达与克莱门汀(Clementine)的双基雷达探测结果表明,在月球极区可能存在水冰^[6-8]。此后的月球勘探者(Lunar Prospector, LP)通过中子谱仪在月球极区探测到了 H 信号^[9,10],但其撞击试验却并未探测到水冰的存在^[11],使得月球是否存在水冰再次陷入争议。进入 21 世纪,随着探测技术的不断提升,月球存在水冰获得了更多证据。卡西尼号(Cassini)、月船一号(Chandrayaan-1)、深度撞击号(Deep Impact)、月球勘测轨道飞行器(Lunar Re-

connaissance Orbiter, LRO)、月球坑观测和传感卫星(Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, LCROSS)等均在月表探测到水的信号^[12-14]。月船一号搭载的雷达在月球北极确定了 30 个含有水冰的撞击坑^[15]。月球勘测轨道飞行器的中子谱仪在两极永久阴影区探测到 H 信号的富集,指示两极永久阴影区水冰的存在^[16]。月球坑观测和传感卫星的撞击实验也证实了月球两极永久阴影区存在水冰^[17]。Li 等^[18]利用月船一号搭载的月球矿物光谱测绘仪(Moon Mineralogy Mapper, M³)获取了月球两极地区表面暴露的水冰分布特征。对于极区水冰的来源,Arnold^[19]认为主要是由陨石或彗星的撞击以及太阳风的注入形成的。近年来,各国纷纷制定或更新探月计划,中国探月四期工程计划在月球南极建立国际月球科研站,并开展月表资源利用技术的验证工作^[20-23]。美国的阿尔忒弥斯计划也将在月球南极建

立永久性基地,实现对月球资源的开发和利用^[24]。水冰是未来月球科研站和月球基地建设和运行的必需品,如何实现月球水冰资源的综合开发已成为研究的热点。本文梳理了近年来有关月球水冰资源综合开发技术的研究方案,选取月球南极几个典型预选着陆区进行水冰开采提取技术评估,为中国未来月球科研站建设提供参考。

1 月球水冰资源的赋存与分布

1.1 赋存形式

根据遥感探测、样品分析和理论推测,月球极区存在结构水、吸附水和水冰三种形式^[25,26]。结构水是以羟基等形式存在于月表矿物的晶格中,主要通过岩浆冷凝以及太阳风注入月表矿物颗粒形成^[13,25,26]。吸附水是由于永久阴影区的冷阱效应,使自由水分子在月壤颗粒表面形成连续或不连续的水分子吸附膜,主要由月表光照区的太阳风成因水、早期岩浆去气、陨石或彗星撞击产生的水向永久阴影区迁移形成^[26,27]。水冰则直接暴露在月表或埋藏于月壤次表层,主要由陨石或彗星撞击以及其他来源(例如太阳风注入)的水不断富集形成^[19]。据估算,大量含水陨石或彗星的撞击甚至能够形成一个瞬时月球大气,这种大气能够保护水分子在向两极冷阱迁移过程中不受太阳光解破坏并保存在极区,随着极区温度变化和月壤演化而逐渐富集,从而在月球两极地区形成丰富的水冰资源^[28,29]。

Cannon 等^[30]根据水冰的粒度、厚度以及与月壤的演化关系,将月球永久阴影区的冰壤混合形式分为三类。(1)冰层与月壤混合,指层状水冰稳定存在于月球两极地区的大型冷阱内,主要由大型陨石或彗星撞击月表形成。(2)冰块与月壤混合,这是由于太空风化作用,原先的层状水冰被侵蚀破坏,形成块状冰,并与月壤不均匀混合。(3)冰粒与月壤混合,随着月壤的成熟度不断提高(细粒化、均匀化),原先的冰块形成细小的冰粒,并与月壤均匀混合,其埋藏深度一般大于前两者。考虑到月球极区的地质过程和环境条件,冰壤的实际混合形式可能更加复杂。Cannon 等^[31,32]基于上述三种分类,主要考虑水冰的含量,将冰壤混合形式进一步细分为离散冰粒、连续覆盖冰、角砾冰等多种类型(见图 1^[31,32])。但水冰与月壤的真实混合

形式仍需通过未来月表就位探测结果进一步确定。

1.2 分布特征

基于雷达、中子谱仪和光谱仪的探测数据分析,可以获取月球极区水冰的分布特征^[25,26]。Stacy 等^[7]利用阿雷西博地基雷达对月球极区水冰进行了探测,其结果表明,月球极区仅在小于 1 km² 的区域内存在水冰。Spudis 等^[15,33]分析月船一号和月球勘测轨道飞行器的雷达数据发现,永久阴影区多个陨石坑呈现较高的圆极化率(Circular Polarization Ratio, CPR)值,且不同类型陨石坑以及陨石坑内和外部边缘具有不同的圆极化率值,指示永久阴影区水冰分布的不均匀性。Thomson 等^[34]进一步根据模拟计算得出,沙克尔顿撞击坑(Shackleton)较高的圆极化率值是由月壤 1 m 以下 5wt%~10wt% 的水冰造成的。但雷达信号容易受月表粗糙度等因素的影响,因此利用雷达探测月表水冰的分布仍存在较大争议^[7,35-37]。

Feldman 等^[9,10,38]通过分析月球勘探者搭载的中子谱仪获得的数据发现,超热中子计数在两极地区出现明显增大,指示月球水冰广泛分布于月球两极,且可能以纯水冰或水冰与月壤互层的形式存在于月表 40 cm 厚的干燥月壤下,其分布面积可达 1850 km²,据此推算月表两极永久阴影区的水冰储量可达数十亿吨。此外,月球勘测轨道飞行器搭载的中子谱仪也

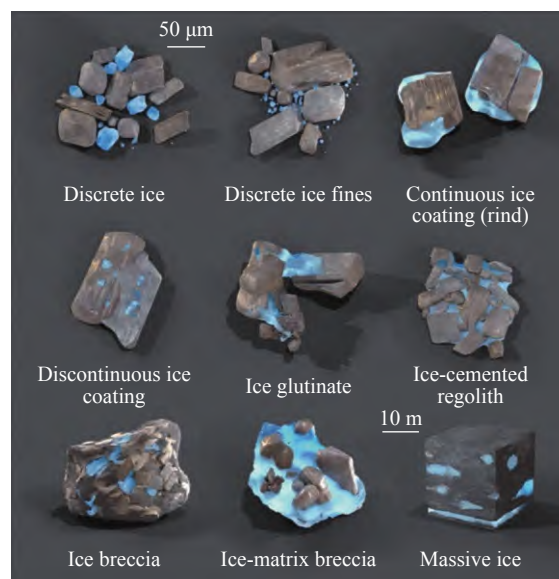


图 1 月球冷阱中水冰与月壤可能的混合形式
Fig. 1 Schematic diagram of the possible mixing forms between lunar soil and water ice in the lunar cold trap

得出了类似结果^[16]。但中子谱仪是通过对 H 信号的探测间接来推测水的存在与分布的,其结果仍具有较大不确定性。

Pieters 等^[13]通过分析月船一号搭载的月球矿物光谱测绘仪的红外光谱数据发现,月表水的吸收强度由赤道向两极逐渐增加,并推测太阳风成因水能够为月球极区冷阱的水冰提供持续来源。Li 等^[18]进一步结合地形及温度等数据,获得月球水冰在两极地区的分布(见图 2^[18]),结果显示月球水冰主要分布在月表 85°S/N 以上的两极地区,且南极比北极更集中,但 Li 等认为只有约 3.5% 的冷阱暴露出水冰,而光谱建模的数据指示,部分含冰地区甚至会有近 30 wt% 的水冰与干燥的月壤混合。该结果与 Cannon 等^[39]分析两极地区的冷阱位置基本一致,进一步证实冷阱效应是造成月球水冰在两极地区富集的主要机制。

综合雷达、中子谱仪和红外光谱的探测结果,水冰在月球两极的分布不连续,南极水冰的分布面积大于北极,但水冰含量可能低于北极^[40,41]。水冰分布与撞击坑的大小无关,但撞击坑内比外缘更富集水冰^[15,33]。两极地区水冰分布的年变化与阴影区面积大小的季节性变化呈现一定相关性^[42-44]。在纵向分布上,水冰主要位于月壤表层 1 m 以下,并且在几十米的深度范围内均可能存在水冰^[45]。Brown 等^[46]综合已有的研究结果,估算了月表 65 个永久阴影区的水

冰位置和储量,结果表明位于南极的坎布斯撞击坑(Cabeus Crater)、苏梅克撞击坑(Shoemaker Crater)、福斯蒂尼撞击坑(Faustini Crater)、德·杰拉许撞击坑(de Gerlache Crater)和霍沃思撞击坑(Haworth Crater)永久阴影区的水冰储量最高,均超过百万吨,其中坎布斯撞击坑甚至有近千万吨级可供开采利用的水冰资源。这些遥感探测结果为开展月表水冰资源综合开发研究奠定了基础,也为未来月球科研站和月球基地选址提供了参考,但仍需进行着陆就位探测才能得到月表水冰的具体分布和储量。

2 开采与提取

开发月表水冰资源可以解决月球科研站建设和运行过程中人类赖以生存的饮用水和氧气供给问题;同时,将水冰分解成氢气和氧气,还可为火箭提供燃料。但是月球的极端环境条件使得月球水冰资源综合开发面临严峻挑战。一方面,月球水冰的赋存状态、储量、分布对其综合开发有直接影响,涉及的开采提取等技术须充分考虑这些差异才能评估出最适宜开展月表水冰资源综合开发的区域。另一方面,月球水冰资源的开发利用还面临开采提取、分离纯化、运输、分解和储存等多个环节的技术困难,需要进行综合全面的技术验证和可行性评估,获得月球水冰开发利用的最优技术方案。目前,结合月球水冰的赋存

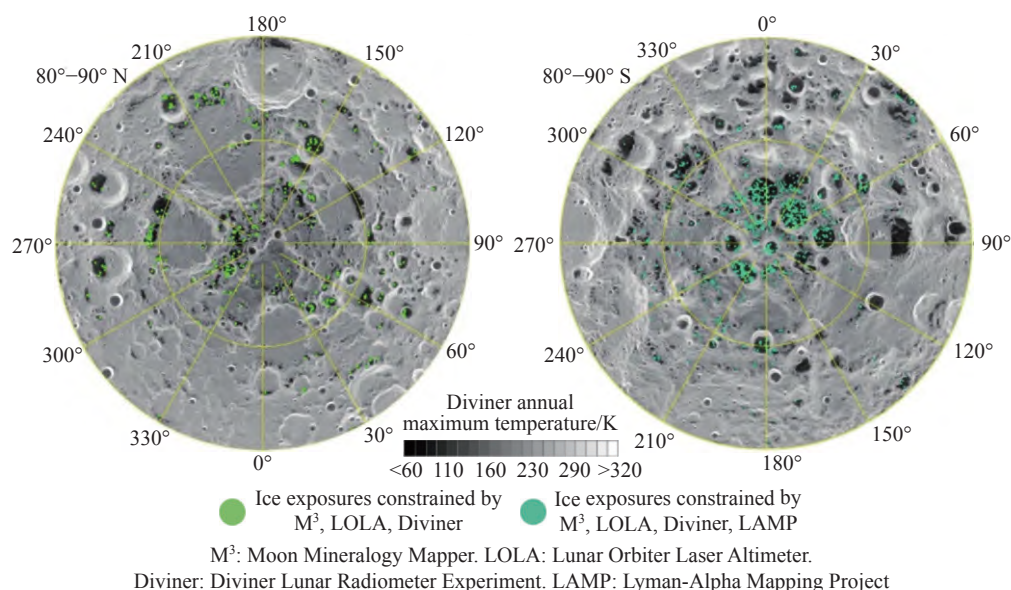


图 2 月球两极地区水冰分布

Fig. 2 Distributions of water ice in the lunar polar regions

状态和分布,提出了水冰开采提取、纯化、分解和储存等方面的技术方案,并对水冰开发的技术难度、开发效率和经济价值等方面进行了初步评估,这为后期月球科研站建设中月球水冰的开发利用提供了重要的参考。水冰综合开发的基本阶段和过程见图 3^[47]。

受月球极区低重力、高真空、月尘、极低温等极端环境条件的影响,传统的开采方法对月球永久阴影区水冰的开采和提取并不适用。对此,基于月球极区水冰的分布和赋存特征,结合月球的特殊环境,提出了就地提取水冰和异地提取水冰两种技术方案^[47-52]。

2.1 就地提取水冰技术

就地提取水冰技术的原理是直接对月球两极永久阴影区的含冰月壤进行加热,获取水冰资源,并通过运输车将获取的水冰运至阳光照射区储存和利用,这种方案的突出特点是无须对含冰月壤进行大规模

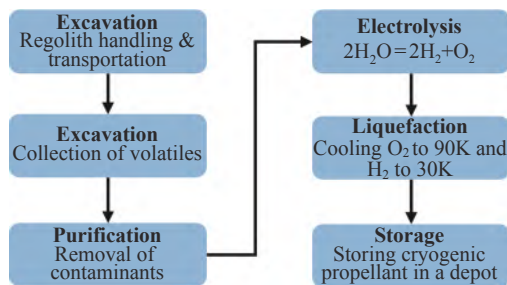


图 3 月球水冰资源综合开发技术的基本阶段和过程
Fig. 3 Basic stage and process of lunar water ice comprehensive exploitation technology

开挖和搬运。就地提取水冰技术主要包括加热开采和加热钻取这两种代表性技术,二者提取水的加热结构如图 4 所示^[49]。

2.1.1 加热开采技术

加热开采技术通过对含冰月壤进行直接加热,使冰升华并以蒸汽的形式从月壤表面释放,再通过冷阱装置进行收集。其典型结构由 Sowers 等提出(见图 5^[48])。

该系统由一个具有内反射表面的密封罩、二次辅助光学元件和多个冷阱构成。整个系统安置在永久阴影区富含水冰的撞击坑内,撞击坑边缘汇聚的太阳光经二次光学元件被均匀地分配到密封罩内,加热含冰月壤。密封罩具有的内反射表面可以积蓄热量,防止水蒸气在密封罩内凝结,也使得月壤得以充分加热。此外,如果热量不足,可将导热棒或加热元件置于含冰月壤表层 1 m 以下,实现辅助加热。Duke 等^[50]提出另一种与之相似的加热开采系统,主要装置包括微波加热器、密封罩、冷阱、运输车、太阳能光伏阵列和电线(见图 6^[50,51])。其不同之处在于将撞击坑边缘收集的光能转换为微波能,用以加热提取水冰资源。

加热开采技术系统设计简便,能够有效减少大型挖掘设备的使用,简化生产工艺,降低生产成本,从而提高生产效率。但是这类系统一般只能开采撞击坑内的表层水冰,难以对撞击坑内较深层次的水冰实现充分提取,当表层水冰采取完毕时,该系统需要转移

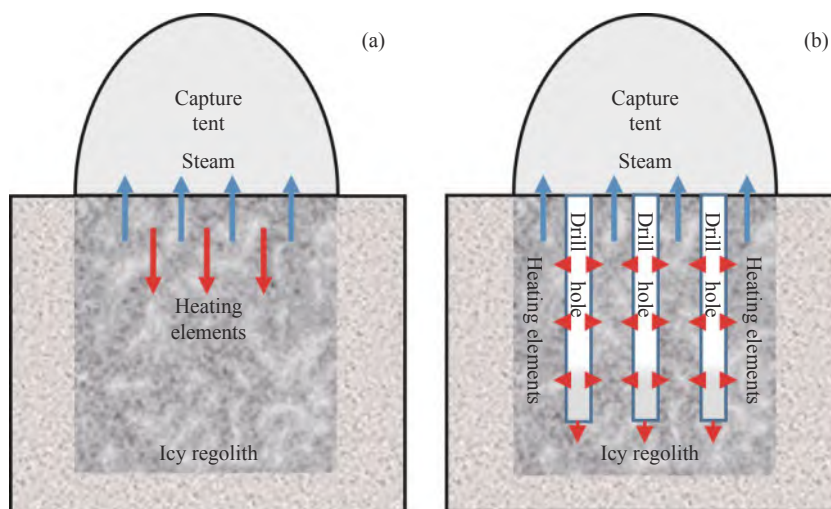


图 4 加热开采 (a) 和加热钻取 (b) 提取水的结构

Fig. 4 Schematic diagram of structures that heat mines (a) and drills (b) for water extraction

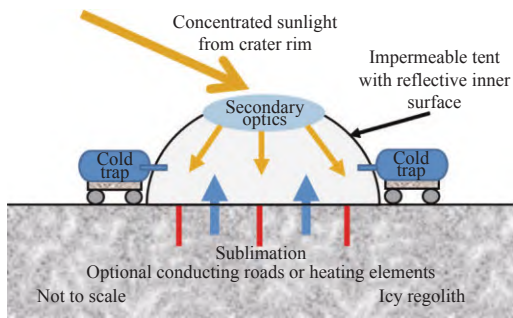


图5 加热开采提取水冰技术

Fig. 5 Schematic diagram of water ice extraction technology by heating mining

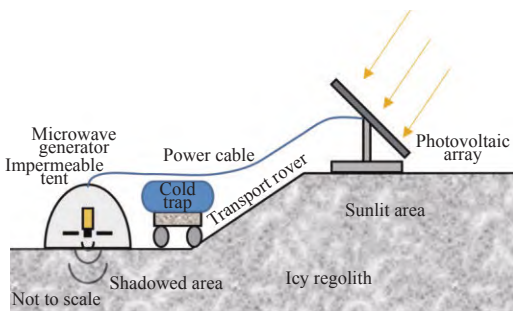


图6 原位微波提取水冰

Fig. 6 Schematic diagram of in situ microwave extraction of water ice

到新的地点重新安置。若采用微波加热体系还需进一步考虑能源转化效率、传输线路长短等问题。

Brisset 等^[49]根据不同的加热功率和月壤中水冰的比例,通过模拟计算发现月壤加热提取水冰需要较高的加热功率,无论是导热棒还是表面加热,低于 $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的热量产生的水蒸气几乎可以忽略不计,无法应用于生产。此外,还需通过额外的加热控制单元防止产生的水蒸气再次凝结,这使得加热开采水冰成为一种极其耗能的方式^[49]。Wasilewski^[53]对加热开采系统进行了模拟分析,结果表明月壤的热导率、热容性质和孔隙度等参数会对开采效率造成重要影响,在初始阶段,表层水冰迅速受热,能快速获得部分产量,但随着表层水冰耗散,月壤的热导率会下降从而抑制下层水冰的采取,且月壤本身不同的热性质可能会进一步降低提取性能。

综上所述,加热开采方法目前存在多种物理条件限制,包括加热装置的高效性、水冰开采提取地点的储量和分布、表层月壤热物理性质以及月表低真空造成的压力梯度等。随着加热和收集技术的发展,加热

开采方法仍能够生产足够的水满足月球科研站运行需求。

2.1.2 加热钻取技术

针对上述加热开采技术只能提取表层水冰的局限性,有研究提出了一种加热钻取技术。Sowers 等^[48]提出了钻孔式提取方案,其原理是先在阴影区的含冰月壤中进行钻孔作业,然后利用加热器使钻孔内水冰升华,利用冷凝装置收集水冰,再将收集的水冰送往光照区的水处理中心再次处理或储存。美国蜜蜂机器人公司提出移动式原位水提取(Mobile In-Situ Water Extraction, MISWE)、嗅探器(Sniffer)和冰心提取器(Corer)三种水冰提取方法^[54,55]。移动式原位水提取法首先通过深槽螺旋钻机系统(ISADS)钻入含冰月壤中,然后通过挥发分提取与收集系统(VECS)加热提取收集水冰。嗅探器是将具有带孔的深槽螺旋钻头钻入含冰月壤后,钻头和深槽中的加热器运行使冰受热升华,随后水蒸气进入空心钻头内并沿钻杆上升至月表布置的冷阱装置中。该方法的优点是可以直接原位提取次表层的水冰,缺陷是升华的水冰不能全部进入钻杆内,造成水冰提取效率降低。冰心提取器本质是一种双壁取心螺旋钻,其外壁为带有浅槽的螺旋钻,由低热导率材料制成,具有较好的隔热性能,内壁带孔并附有加热器。冰心提取器钻入次表层并获取一个冰心(含冰月壤的岩心)后,加热器运行使水冰升华,然后通过内外壁的空间使水蒸气进入月表布置的冷阱装置中。该方法的优点是使热量集中于螺旋钻内,水冰提取效率高。Zacny 等^[54]使用推荐的冰心提取器在含水量为 12 wt% 的土壤里的水冰提取速率达到 $946 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$,但其缺陷是难以控制装置获取冰心和提取剩余水冰的能力。

Wang 等^[56]对加热钻取水冰技术进行优化,提出了光热钻取一体化系统(见图 7^[56])。其核心构件包括聚光装置、柔性密封盖、钻头和钻杆。其工作原理为,首先将带叶钻杆钻入表层月壤下,然后将密封盖与表层月壤紧密贴合,以减少水冰和热量的耗散,再利用聚光装置将太阳光聚集到导光镜面并传递至钻杆内,使下部带叶钻杆被加热,热量进一步传递至周围的含冰月壤,使水冰等挥发分受热升华,经钻杆表面的气孔进入钻杆内部并上升至气体出口,最后经冷凝分离和检测处理模块,完成水冰等挥发分的开采提取。该方案优点在于使用钻取、太阳能聚光加热与水

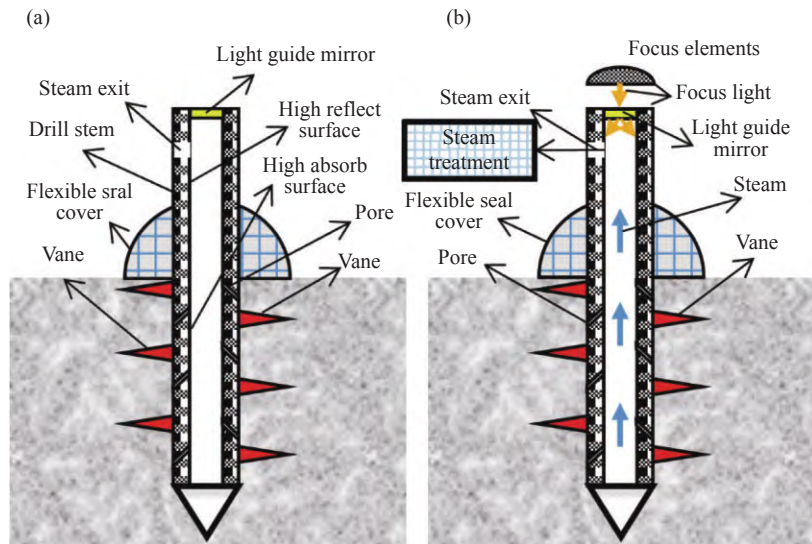


图 7 光热钻取设计方案 (a) 及工作原理 (b)

Fig. 7 Photothermal drilling design (a) and working principle (b)

蒸气等挥发分提取分离的一体化系统,优化了水冰提取结构,并且叶片结构以及热防护结构的设计也提高了水冰提取效率。该方案的地面验证试验表明,在含水量为 5 wt% 的土壤中,该装置能够以 $>30 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速率提取水并实现约 $4 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 的水提取能力。但是由于需要配合载荷使用,该方案设计尺寸不能太大,单位产量仍与上述其他加热开采方法存在较大差距。

2.2 异地提取技术

异地提取水冰技术的原理是通过含冰月壤进行大规模开挖,然后将其运移至特定的提取装置中进行加热,使月壤中的冰升华,收集水蒸气以获取水冰资源。异地提取水冰技术以 Duke 等^[50] 在 1998 年提出的两种设计为代表,根据水冰提取的位置,可分为阴影区异地提取和光照区异地提取^[51]。

2.2.1 阴影区异地提取

阴影区异地提取方案的结构如图 8 所示^[50],主要包括核能加热炉、电动机、蒸汽管道、冷凝器和水箱。主要思路是采用挖掘设备将阴影区的含冰月壤挖掘运移到核热炉内进行加热,使得月壤中的冰升华,再通过密闭的蒸汽管道,将收集到的水蒸气运至光照区进行冷凝处理,最后将冷凝水储存在水箱中。在蒸汽管道两侧安装的电动机,可在必要时支持设备运转和加热蒸汽管道,防止水蒸气在输送过程中冷凝,出现堵塞蒸汽管道等情况。

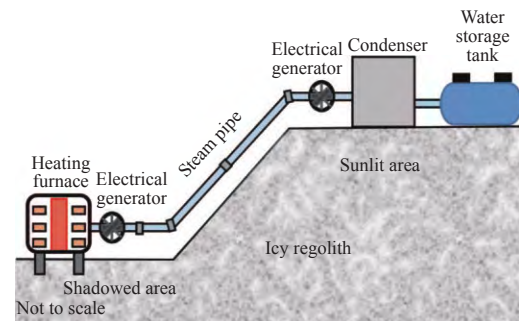


图 8 阴影区异地提取

Fig. 8 Schematic diagram of remote extraction of the shadowed area

2.2.2 光照区异地提取

光照区异地提取的设计如图 9 所示^[50],主要包括电动绞盘、缆线、抓斗、太阳能加热炉和水箱。其原理是在阴影区配备挖掘器械,并通过电动绞盘、抓斗等运输装置直接将挖掘的月壤运至光照区的太阳能加热炉,使月壤中的冰升华,从而收集到水资源。

很明显,与就地提取方案相比,异地提取方案需要开挖大量的含冰月壤,这涉及到挖掘和运输等设备增加的费用,同时这些设备的能源问题和养护问题等必须得到解决,因此异地提取方案的成本相对较高。但是对于较深层次的水冰,这种方案与就地提取方案相比具有较大优势。

虽然目前有关就地提取月球水冰技术和异地提取月球水冰技术进行了方案设计,一定程度上体现了

二者的优缺点,但是对于月球水冰提取方案进行全面评估,选择合理的提取方案仍有困难。首先,不同研究者对于其提出的方案有不同的评估标准。Gustafson 等^[51]从系统的稳定性、使用寿命、安全性、性能表现、提取目标、提取成本、技术风险、人员操作时间和月球环境影响等方面评估了其方案。Sowers 等^[48]则将其提出的方案划分为挖掘式、钻孔式和光照直接加热式三种(前者属于异地提取方案,后二者属于就地提取方案),并对这三种方案所需设备质量、总功率、提取成本、提取方案的可用性和可维护性以及运行风险进行对比评估(见表 1^[48])。从表 1 可以看出,三种方案中光照直接加热式和钻孔式提取方案(即就地提取方案)在质量、成本、可用性和可维护性方面具有明显优势。但由于评估标准的差异,很难对不同作者就地提取或异地提取方案进行系统性对比评估。此外,目前对于各种水冰提取方案的评估基本属于概念性设计,缺乏实践,具有很大的不确定性。因此月球水冰资源提取方案的选择还需要进一步统一评估标准,并结合地面验证实验和未来月球探测试验数据进行优化。

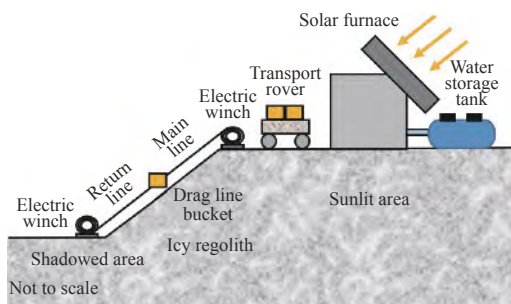


图 9 光照区异地提取

Fig. 9 Schematic diagram of remote extraction at the sunlit area

3 分离提纯

由于月球水冰加热提取的气体除水蒸气之外,还包括 H_2S , NH_3 , C_2H_2 , CO_2 , CH_4 等挥发分^[17,57-61],因此需要对水进行提纯处理,避免或减小具有高度活性、腐蚀性和毒性的挥发分对水的利用造成影响。Holquist 等^[61]设计了月表水纯化和氢氧生产系统(IHOP)的关键阶段(见图 10^[61]),据此开展水冰的分离提纯工作。基于挥发分的沸点和分子直径或其与吸收剂的反应性,分离提纯方法包括低温蒸馏技术、吸附纯化技术和膜提纯技术三种^[62,63]。

3.1 低温蒸馏与冷阱技术

低温蒸馏(也称低温纯化法)是基于不同挥发分沸点差异实现分离和纯化的技术方法,在 20 世纪时已成功应用于商业领域^[62]。表 2^[17,63,64]给出了月球坑观测和传感卫星在喷射羽流中检测到的不同挥发份的沸点,因此在低温蒸馏装置中,采用低温方法($<-150^{\circ}C$)可对至少两种不同沸点的组分进行分离提纯^[63]。此外,研究表明,基于重力的蒸馏装置可以有效提高水纯度^[63,65]。Holquist 等^[61]也将冷阱作为水蒸气纯化的关键技术装置,一方面冷阱可以选择性地从水蒸气中沉积水冰,并排出大多数污染性挥发分;另一方面,通过控制冷阱的温度也可避免水蒸气冻结造成设备堵塞^[63]。

在月球水纯化过程中,利用冷阱与低温蒸馏技术的结合使用可以有效实现水的提纯净化,其过程见图 11^[63]。水的分离提纯需要经过 P1 和 P2 两个阶段,P1 阶段可去除挥发性有机化合物,使水在冷阱中凝集,并通过 P2 阶段进一步纯化,使其满足水电解制备 H_2 和 O_2 的要求。在冷阱中与水分离的其他挥发分根据沸点的不同,可进一步通过低温蒸馏技术实现分离提纯。一般来说,低温纯化系统可以远程自动操

表 1 月球水冰开采提取方案对比

Table 1 Comparison of lunar water ice extraction schemes

方案参数	异地提取方案(挖掘式)	加热钻取技术(钻孔式)	加热开采技术(光照直接加热式)
质量/kg	40400	31900	29000
总功率/kW	2500	2500	2000
成本(Billion. dollars)	3.34	2.71	2.47
可用性/可维护性	中等	中-高	高
风险	低	中等	中等

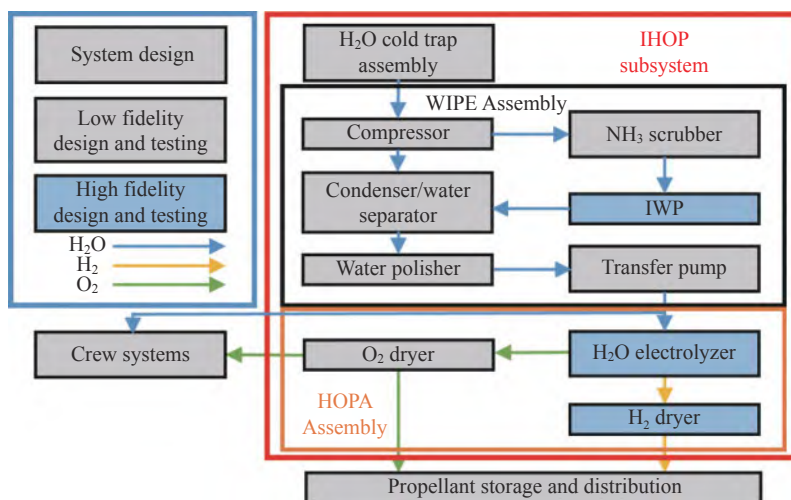


图 10 水纯化和氢氧生产系统 (IHOP)。WIPE 为原位净化设备, HOPA 为氢氧生产组装系统, IWP 为离子膜水纯化

Fig. 10 Lunar surface in-situ water purification and hydrogen and oxygen production system (IHOP).

WIPE: In-situ purification equipment. HOPA: Assembly system for hydrogen and oxygen production.

IWP: Ionomer-membrane Water Purification

表 2 不同组分在 1 atm 气压下的沸点
Table 2 Boiling points of different components at 1 atm pressure

组分	化学式	沸点
氦	He	-268.9°C/4 K
氢气	H ₂	-252.9°C/20.3 K
氮气	N ₂	-195.8°C/77.4 K
一氧化碳	CO	-191.5°C/81.6 K
氧气	O ₂	-183°C/90.2 K
甲烷	CH ₄	-161.5°C/111.7 K
乙烷	C ₂ H ₄	-103.8°C/169.4 K
氯化氢	HCl	-85°C/-188.2 K
硫化氢	H ₂ S	59.6°C/213.6 K
氨气	NH ₃	-33.3°C/239.8 K
二氧化硫	SO ₂	-10°C/263.2 K
二氧化碳	CO ₂	>-56.6°C/>216.6 K*

* 二氧化碳只有在压力大于 5.2 bar 时才能保持液态。

作, 维护少, 节约成本, 并且通过对温度的控制实现多种组分的分离提纯。杂质可通过清洁气体净化或加热系统蒸发得以清除, 因此低温纯化设备已被充分开发和广泛使用。

3.2 吸附纯化技术

吸附是气体或液体的原子和分子依靠范德华力在多孔吸附剂表面的可逆物理结合。在吸附过程中, 吸附剂被用来捕获水蒸气中的某些杂质, 吸附剂可以

定制为不同的分子直径, 以吸附特定的组分。因此, 不同的挥发分可以在非常小的微孔范围内被吸附在吸附剂上, 其过程如图 12 所示^[63,66]。吸附过程可划分为变温吸附 (TSA)、变压吸附 (PSA)、变真空吸附 (VSA) 和变浓度吸附 (CSA)^[62,63,66], 其分别通过控制温度、压力、真空以及浓度等条件实现吸附纯化。吸收也称化学吸附, 利用吸收剂的化学性质与挥发分中杂质进行化学结合, 其并不只依赖于表面效应。吸收剂既可以是固体也可以是液体, 例如宇航服中通过利用 LiOH 与 LiCO₃ 和 H₂O 的反应来吸收 CO₂^[63,67]。因此, 吸附纯化也可应用于月表水蒸气的提纯净化, 而选择合适的吸附剂是该技术的关键。

3.3 膜提纯技术

膜提纯技术是根据挥发分的渗透性差异使气体有选择性地通过薄膜, 达到提纯特定挥发分的目的, 其原理如图 13 所示^[62,63]。渗透性差异主要取决于膜的性质、挥发分固有性质以及挥发分和膜的相互作用。该技术需要在膜上施加一定驱动力 (压力、浓度、电流或温度等), 从而在膜上产生差异达到提纯效果。因此, 薄膜必须在施加的条件下表现出良好的物理化学稳定性才能实现较为理想的分离提纯效果^[63]。

在利用膜蒸馏技术对水进行纯化处理时, 首先将水冰加热提取的气体混合物进行压缩, 使其通过能过滤不同挥发分的特制膜材料, 最终收集到提纯净化后

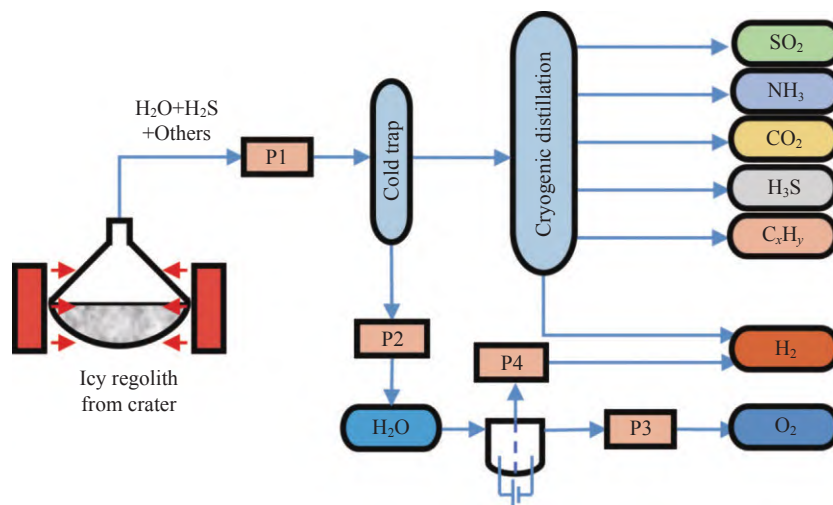


图 11 月球极区水冰的低温蒸馏纯化过程

Fig. 11 Schematic diagram of the purification process of water ice from the lunar polar region by low temperature distillation

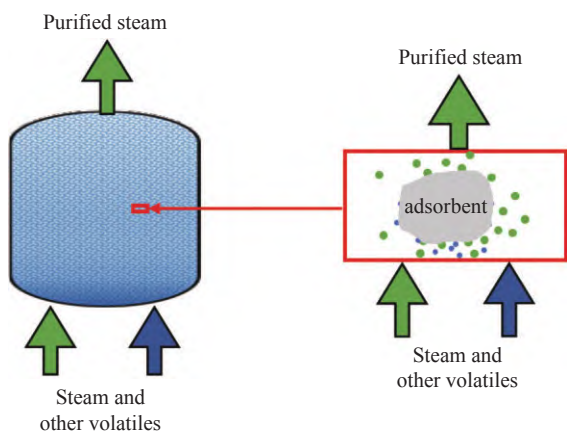


图 12 吸附技术的原理

Fig. 12 Schematic diagram of the adsorption technology

的水冰资源。表 3^[63,68] 给出了一些不同类型的膜材料、相关分离机制和可实现的挥发分纯度。据此可见,膜材料的选择是影响水纯化的关键因素。

综上所述,每种分离提纯技术都有其优缺点。低温蒸馏技术被认为是生产高纯度产品最具成本效益的方法,但与吸附和膜提纯技术相比,低温蒸馏技术可能造成管道被冷凝的污染物堵塞,在使用中有时需要预热。吸附技术虽然在使用时间上比较灵活,但利用该技术需充分了解气体的组成和吸附剂特性。膜提纯技术由于无法完全去除某些污染物,必须在该过程前后增加其他分离提纯技术,因此膜提纯技术在水

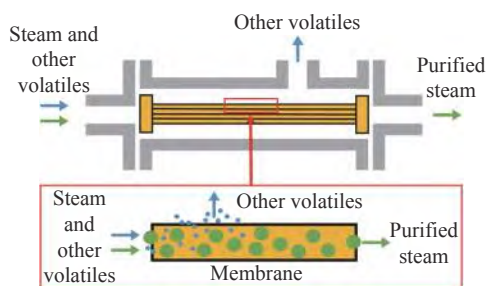


图 13 膜蒸馏技术的原理

Fig. 13 Schematic diagram of the membrane distillation technology

的分离提纯中只能作为中间过程使用。考虑到月球南极的光热条件,可采用冷阱与低温蒸馏,以及吸附纯化的综合体系进行挥发分的分离提纯,最大限度减少电力需求,并有效储存水冰等挥发分^[62]。

4 储存与分解

4.1 水冰资源的储存

20 世纪 80 年代末, Kohout^[69] 首先对不同功率系统的水冰存储设备进行了尺寸和质量的对比设计。Kleinhenz 等^[52] 则根据水箱安装位置和水冰资源的不同处理过程对水冰存储装置展开总体规划。从位置上水箱可划分为三类:一是永久阴影区水箱,用于收集和运输在永久阴影区开采提取的水冰资源;二是撞击坑边缘水箱,用于接收永久阴影区水箱递送的水冰

资源;三是电解水箱,用于储存可进行电解制备 H_2 和 O_2 的超净水资源。此外,不同处理过程对水冰储存装置具有不同的要求(见表 4^[52])。首先是水冰提取过程中的水保存,需要根据水的容量定制水箱,水箱一般为铝质,并需要考虑一定的空位。其次是运输水过程中的保存,该过程需要考虑运输水箱的有效载荷(包括载水量、电池重量)对水箱进行设计。再次是用于电解处理过程的水保存,需要根据水的容量对储存器进行定制。最后是 H_2 和 O_2 的储存,需根据电解效率、容量对储存箱进行定制,储存箱一般也为铝质,容器壁厚度为 3 mm^[52]。由此可见,水冰储存装置需要根据其安装位置、用途、储存量和载荷等因素设计其尺寸、数量与材质,并且还应与水冰的开采提取和分离纯化等技术环节相匹配,以满足储存要求。

4.2 水冰资源的分解

月表水冰资源的分解是指将水冰的加工产物用于生产生活,这里主要关注将水冰分解为 H_2 和 O_2 的相关技术进展。目前,水分解技术主要包括电解法和光催化分解法。

4.2.1 电解技术

水的电解技术是指通过添加电解质导通电流,将水分子进行解离的技术。电解装置由正极、负极和隔膜组成(见图 14^[63]),按照离子通过不同膜的传输机制可将电解装置分为碱性电解(AE)、质子交换膜电解(PEM)和固态氧化物电解(SOEC)三种类型。原理

上,直流电极的负极析出 H_2 ,正极析出 O_2 ,其速率与电极之间的电流成正比。随后可以利用排水集气法收集 H_2 与 O_2 ,其体积比为 2:1^[63]。

碱性电解(AE)是指将电极浸入约为 25 wt%~30 wt%的 KOH 碱性溶液。电极由石棉等多孔隔膜隔开,OH⁻从负极传输到正极,在正极产生 O_2 ,负极产生 H_2 ,然后对收集的气体进行冷凝、纯化和干燥等处理,确保气体的纯净。电解液中杂质堆积过多时,可以进行替换,从而延长其使用寿命。此外,月球的低重力环境会影响电极上气体的去除效果,为减少性能损耗,可搅拌电解液,在电极附近产生运动,以去除气体^[63,70,71]。

质子交换膜(PEM)电解使用的是可以传导质子的固体聚合物膜,并使用催化剂层和多孔集流器将该膜包裹。该装置中水从正极进入,然后被电解, H^+ 向负极移动形成 H_2 , O_2 则在正极形成。一般采用 Pt 作为负极催化剂使水在正极上被电离,而正极催化剂采用 Ru 和 Ir 或其氧化物。为降低污染和延长使用寿命,应事先将水去离子化^[70,71]。水冰提取过程中可能产生的 H_2S 会对催化剂造成影响。Forzatti 等^[72]研究表明, H_2S 的浓度会造成 Co, Ru, Fe 和 Ni 催化剂的活性降低。O'Mahony 等^[73]观察到这种失活的机理是双重的:一方面, H_2S 通过反应在 Pt 表面形成 S 沉积,限制了 Pt 的有效表面积和反应活性;另一方面,电极上 PtS 的形成会导致 Pt 的腐蚀,低浓度的

表 3 不同膜的类型及纯化效率

Table 3 Different types of membranes and purification efficiency

膜类型	分离机制	纯化率/(%)
纳米多孔材料(陶瓷、氧化物、有机聚合物)	粒径差异	<95
无孔有机聚合物	溶解度与扩散速率差异	>95
致密金属	吸附/解离	>99.99
离子迁移(致密陶瓷)	离子导电性	>99.99

表 4 不同过程的储存技术

Table 4 Storage techniques of different processes

子系统	技术	描述和参考
运输水箱	特定尺寸(铝质,50%空位)	基于水容积估算
运输水箱移动平台	特定尺寸	基于载荷比1.5,所有电池和水箱均为载荷进行估算
电解水箱	特定尺寸	基于水容积估算
氢气和氧气储存	特定尺寸:薄壁铝(3 mm)	基于容积

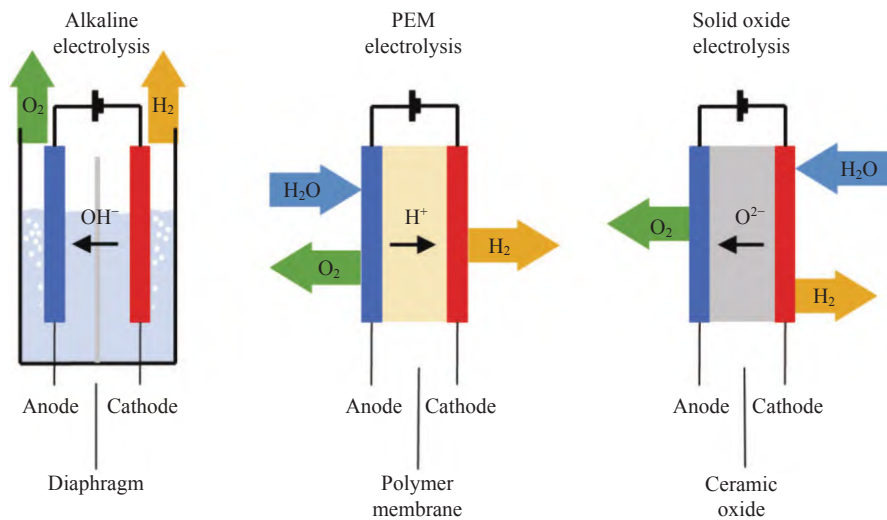


图 14 水电解的不同类型

Fig. 14 Different types of water electrolysis

H_2S 即可使其活性降至原来的 1/1000 甚至更低, 活性降低使得电解速度下降, 最终需要更换电解器^[72,73]。因此, 采用 PEM 电解法应先将水充分提纯, 降低对电解设备的损耗, 提高电解效率。

固体氧化物电解膜(SOEC)是一种在高温下能够传导离子的膜材料, 目前多为掺杂 Y_2O_3 的 ZrO_2 或稀土氧化物。在 $500\sim 900^\circ\text{C}$, 这些氧化物通过掺杂引入的晶格缺陷对 O^{2-} 具有导电性。在该装置中, 水从负极引入, 并在负极电离产生 H_2 , O^{2-} 向正极移动并生成 O_2 。但是由于水需要加热到上述温度范围并且分解产生的 O_2 和 H_2 需再次冷却保存, 因此一般固体氧化物电解膜的效率低于碱性电解或质子交换膜^[74,75]。固体氧化物电解池已在毅力号(Perseverance)火星氧气原位资源利用(ISRU)实验装置(MOXIE)中得以应用^[76,77], 因此该技术也是未来地外天体资源利用的可行技术方案。

4.2.2 光催化分解技术

Fujishima 等^[78] 研究发现, 水中存在 TiO_2 时, 在光照条件下可直接被分解为 H_2 和 O_2 (见 图 15^[79])。这类可使水在光照条件下直接分解的物质称为光催化剂, 是光催化分解水技术的关键。因此, 目前针对光催化剂的合成、改性等已开展大量研究^[79-81]。

根据 TiO_2 的质量分数, 月海玄武岩可分为高钛玄武岩($\text{TiO}_2 > 7.5 \text{ wt}\%$)、中钛玄武岩(TiO_2 为 $4.5 \text{ wt}\% \sim 7.5 \text{ wt}\%$)和低钛玄武岩($\text{TiO}_2 < 4.5 \text{ wt}\%$)^[82]。由于 TiO_2 是很好的光催化材料, 如果能够利用月壤中的

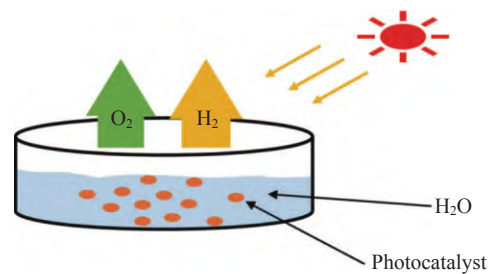


图 15 太阳光与光催化剂相互作用

Fig. 15 Diagram of the interaction between sunlight and the photocatalyst

TiO_2 制备具有光催化活性的月壤材料, 便可用以分解水制取 H_2 和 O_2 ^[81]。目前在光催化分解水的实验室原理方面, 已开展了以材料开发和化学机理为主的验证研究^[79-81], 但很少对低/微重力条件下的光催化分解水进行研究。虽然日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)开发了较为成熟的微重力分解水装置, 但其工作原理依然是传统的电解池系统, 能耗大, 分解效率低。高效稳定的光催化分解水方法有待开展进一步研究^[56]。

对比电解法与光解法, 电解水技术已较为成熟, 在月球科研站和月球基地早期的水冰资源利用技术中可能占主导地位。光催化分解法需确保催化剂的充足供应, 并且光热条件应满足光催化过程的进行。但是随着月表选矿技术的提升, 利用钛铁矿作为催化剂原料来源的光催化分解水方法将成为生产 H_2 和 O_2 的重要手段之一。

5 综合开发方案

综上所述,水冰资源的开发利用涉及水冰的开采提取、分离提纯、储存运输和分解利用等多个环节,同时对装置重量、功耗和效率约束性极强,因此对水冰资源的综合开发应从各个环节分析考虑,设计更优的系统方案。Kornuta 等^[83]为月表水冰资源综合开发过程进行了详细设计,主要包括月表开采、月表推进剂生产、机器服务和能源供给等子系统作业流程^[83]。Sowers 等^[48]也为月球永久阴影区域水冰的提取、运输、加工和利用构建了系统框架,并初步设计了该框架各个配置在月球上的平面布置(见图 16^[48]),以实现将月球水冰转换为推进剂的目的^[48]。

美国国家航空航天局(NASA)同样展开了对水冰资源综合开发系统框架的设计和评估。该系统框架的整体运行概念可分为三部分:位于阴影区坑底的水

冰开采和提炼区,位于坑底边缘的推进剂生产区以及前二者之间的水冰运输区(见图 17^[52])。

在开采区,挖掘设备首先将干燥的覆盖层移除,探测出含冰月壤,并将其开采运输至水冰提取装置中,通过加热使水冰升华。

在运输区,提取的水蒸气将被凝集或冻结在可移动水箱中,当移动水箱将水运输到坑底边缘时,使用设备将移动水箱的水冰资源输送至坑缘的水箱中。

在推进剂生产区,电解水装置将水箱中的水电解产生 H₂ 和 O₂,并经过气体干燥器处理后,再压缩成液氢和液氧储存在相应的存储设备中,从而为空间飞行器提供燃料储备。

为确保该系统框架实现月球水冰资源提取和利用的目的,Kleinhenz 等^[52]提出了一些提取水冰的关键基准参数(见表 5^[52])。结合图 17 与表 5 可知,确保该系统的正常运转还需要注意以下要点^[52]。

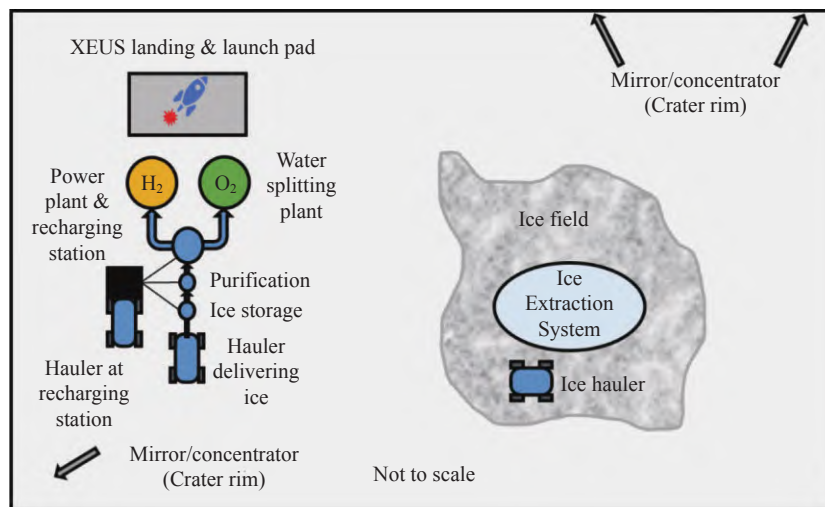


图 16 月球水冰综合开发生产框架平面布置

Fig. 16 Layout of the comprehensive exploitation production frame for lunar water ice

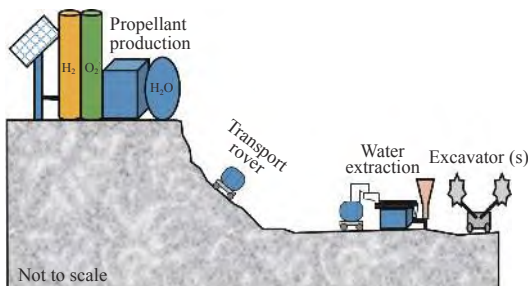


图 17 月球水冰原位资源利用系统设计

Fig. 17 Design of the in-situ resource utilization system for lunar water ice

表 5 提取月球水冰的关键基准参数

Table 5 Key reference parameters for extracting lunar water ice

项目	基准参数值
水冰含量/(wt%)	5
O ₂ 产量要求/t	10
O ₂ /H ₂ 实际产量/t	13/1.7
所需水量/t	15
所需月壤的质量/t(按75%的提取效率)	398
30 cm下水冰的覆盖面积/m ²	1024
水冰的运输时间/d	10

(1) 优先选择干燥月壤厚度小的地区进行开采, 并且挖掘设备应先将表面的干燥月壤清除后再作业。

(2) 干燥月壤的开挖必须在水冰提取设备运转前进行。

(3) 挖掘设备将水冰提取区作为补给站, 要确保其充足的能源供给。

(4) 处理好月壤开采区、水冰提取区以及残渣堆积区的位置关系。

(5) 考虑到月表环境, 水蒸气储存在移动水箱中会冻结, 但无需额外的能量维持其状态。

(6) 挖掘设备以及移动水箱的数量应满足水冰提取和推进剂生产的速率。

(7) 控制好水冰提取区和电解水区的距离, 以合理安排运输时间和降低运输成本。

(8) 开采边缘区上部水箱大小根据电解水的能力确定, 确保电解过程不中断。

6 展望

月表水冰资源的综合开发技术不仅需要充分了解水冰资源的赋存状态与分布特征, 还需深入验证水冰资源开采提取等各个过程, 并结合未来月球探测的计划方案, 设计和评估出最佳的水冰资源综合开发技术方案。NASA 于 2022 年 8 月公布了阿尔忒弥斯 3 号任务的 13 个预选着陆点(见图 18^[84]), 其中福斯蒂尼撞击坑、德·杰拉许撞击坑、霍沃思撞击坑是

Brown 评估出的具有百万吨级水冰储量的撞击坑^[46], 预示着未来在这些地区开展水冰资源综合开发技术研究将大有前景。

中国针对探月四期工程任务要求以及建设国际月球科研站的研究背景, 从光照条件、地形地貌、温度条件、测控条件和科学目标等多个方面综合分析和评估未来月球南极探测的着陆区^[85,86], 归纳提出了沙克尔顿撞击坑、苏梅克撞击坑、霍沃思撞击坑和坎布斯撞击坑等适宜开展水冰资源综合开发的多个地区及 10 个着陆点^[85], 这些区域与 NASA 和 Brown 等评选出的地点基本一致^[46,84]。通过对比沙克尔顿撞击坑、霍沃思撞击坑、苏梅克撞击坑、坎布斯撞击坑和福斯蒂尼撞击坑 5 个撞击坑的特征及其可能的冰储量, 基于不同水冰开采提取技术的优缺点, 本文提出了这 5 个撞击坑适宜开展的水冰开采提取技术建议, 评估了其技术条件和试验阶段(见表 6)。其中, 沙克尔顿撞击坑直径小, 撞击坑边缘的光照条件好, 坑底较浅, 地势平缓, 可采用异地提取技术开采水冰资源; 霍沃思撞击坑直径大, 撞击坑边缘的光照条件也较好, 但坑底深, 地形相对复杂, 宜采用就地加热开采或钻取技术开采水冰资源, 利用坑底距坑缘近的特点也可将含冰月壤传输至光照区开展异地提取; 苏梅克撞击坑和坎布斯撞击坑的直径不仅大, 坑底距坑缘远, 且地形复杂, 对技术条件要求高, 不宜直接作为首次水冰开采提取的区域。据此得出, 沙克尔顿撞击坑和霍沃思撞击坑及其周围区域适宜作为未来中国开

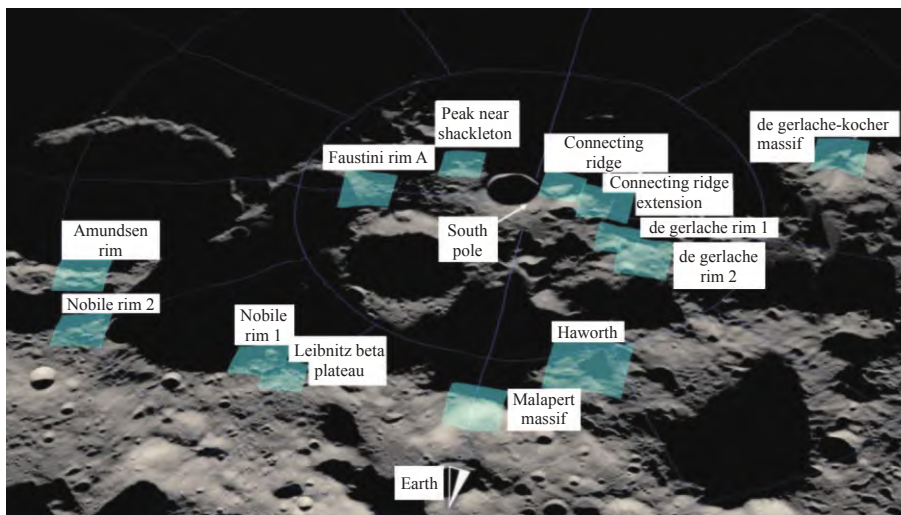


图 18 阿尔忒弥斯 3 号任务的 13 个预选着陆区

Fig. 18 13 pre-selected landing zones for the Artemis 3 mission

展水冰资源综合开发技术初期研究的理想地点,待相关技术条件更加成熟时,可再在苏梅克撞击坑、坎布斯撞击坑和福斯蒂尼撞击坑等复杂地区开展更深入的研究和工程应用。

根据上述水冰资源综合开发技术方案,以及在技术研究程度、风险、成本和适用性方面的比较分析,表7给出了中国未来月球水冰资源综合开发的4个阶段及对应的可行性较高的技术。在水冰开采提取过程中,就地提取技术即加热开采技术和加热钻取技术均具有较高的可行性,但二者的供热系统、密封罩和钻取设备等在低/微重力条件下的运行情况仍需深入研究。在水的分离提纯阶段,根据水的不同用途和纯度,需同时考虑冷阱低温蒸馏和吸附纯化技术,而不宜采用只可作为中间过程的膜纯化技术。在水的分解利用阶段,前期宜采用相对成熟的电解技术,并在月表逐步开展钛铁矿提取和光催化分解水技术的

研究工作。水的储存运输则需要根据不同情况进行定制,以满足实际工作要求。

随着国际上各空间大国以建设月球科研站或月球基地为主要任务、以就位开发月球资源为主要目标的新一轮探月高潮的到来,作为重要战略资源的月球水冰原位开发利用已成为各空间大国在月球探测规划中的首选任务。因此,如何解决月表水冰资源在开采提取、分离提纯、储存运输、分解利用等工作环节问题,实现月球水冰资源的综合开发将是未来月球探测研究的重要内容。目前月球水冰资源综合开发技术的研究仍以概念设计或模拟为主水冰的分布和含量还需后续探测任务进一步明确。但这些研究为未来月球科研站和月球基地就位开发利用月表水冰资源奠定了基础,同时也可为火星等其他地外天体的资源利用提供重要参考。

表 6 开展月球水冰资源综合开发技术研究的区域建议

Table 6 Proposal regions for conducting technical studies on comprehensive exploitation of lunar water ice

地点	特征	开采提取技术	技术条件与试验阶段
沙克尔顿撞击坑 (Shackleton crater)	光照好、地势平缓 永久阴影区面积大 坑缘有永久光照区 预估水冰丰富	异地提取	月球科研站/基地早期
霍沃斯撞击坑 (Haworth crater)	光照好 撞击坑深 百万吨水冰储量	就地加热开采 或加热钻取	月球科研站/基地早期
舒梅克撞击坑 (Shoemaker crater)	撞击坑较深 地形相对复杂 水冰储量大	就地加热开采 或加热钻取	技术条件相对成熟
坎布斯撞击坑 (Cabeus crater)	直径大 地形复杂 千万吨水冰储量	就地加热开采 或加热钻取	技术条件相对成熟
福斯蒂尼撞击坑 (Faustini crater)	地形复杂 百万吨水冰储量	就地加热开采 或加热钻取	技术条件相对成熟

表 7 可行性较高的水冰资源综合开发技术总结

Table 7 Summary of the feasible technology for comprehensive exploitation of lunar water ice

阶段	可行性较高的技术	备注
水冰开采提取	就地提取技术	加热开采或钻取
水的分离提纯	冷阱低温蒸馏和吸附纯化技术	选择合适的吸附剂
水的分解	电解技术	确保水足够纯净
水的储存运输	按需定制	满足各工作环节要求

参考文献

- [1] KUIPER G P. The Atmospheres of the Earth and Planets[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1952
- [2] LUCEY P, KOROTEV R L, GILLS J J, *et al.* Understanding the lunar surface and space-Moon interactions[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, **60**(1): 83-219
- [3] ÖPIK E J, SINGER S F. Escape of gases from the moon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1960, **65**(10): 3065-3070
- [4] WATSON K, MURRAY B, BROWN H. On the possible presence of ice on the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, **66**(5): 1598-1600
- [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] NOZETTE S, LICHTENBERG C L, SPUDIS P, *et al.* The Clementine bistatic radar experiment[J]. *Science*, 1996, **274**(5292): 1495-1498
- [7] STACY N J S, CAMPBELL D B, FORD P G. Arecibo radar mapping of the lunar poles: a search for ice deposits[J]. *Science*, 1997, **276**(5318): 1527-1530
- [8] WEIDENSCHILLING S J. The possibility of ice on the Moon[J]. *Science*, 1997, **278**(5335): 144-145
- [9] 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
- [10] FELDMAN W C, LAWRENCE D J, ELPHIC R C, *et al.* Polar hydrogen deposits on the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, **105**(E2): 4175-4195
- [11] GOLDSTEIN D B, NEREM R S, BARKER E S, *et al.* Impacting Lunar Prospector in a cold trap to detect water ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(12): 1653-1656
- [12] CLARK R N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon[J]. *Science*, 2009, **326**(5952): 562-564
- [13] 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**(5952): 568-572
- [14] ZENG Xiandi, TANG Hong, LI Xiongyao, *et al.* Research review and significance of lunar water originated from solar wind[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, **33**(5): 473-482 (曾献棣, 唐红, 李雄耀, 等. 月表太阳风成因水的研究现状和意义[J]. *地球科学进展*, 2018, **33**(5): 473-482)
- [15] SPUDIS P D, BUSSEY D B J, BALOGA S M, *et al.* Initial results for the north pole of the Moon from Mini-SAR, Chandrayaan-1 mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(6): L06204
- [16] MITROFANOV I G, SANIN A B, BOYNTON W V, *et al.* Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND[J]. *Science*, 2010, **330**(6003): 483-486
- [17] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, *et al.* Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. *Science*, 2010, **330**(6003): 463-468
- [18] 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 of the United States of America*, 2018, **115**(36): 8907-8912
- [19] ARNOLD J R. Ice in the lunar polar regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1979, **84**(B10): 5659-5668
- [20] WU Weiren, LIU Jizhong, TANG Yuhua, *et al.* China lunar exploration program[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, **6**(5): 405-416 (吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程[J]. *深空探测学报*, 2019, **6**(5): 405-416)
- [21] PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, *et al.* Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(24): 2577-2586 (裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站[J]. *科学通报*, 2020, **65**(24): 2577-2586)
- [22] LI Mo. Research on Site Selection of Landing Area for lunar South Pole Exploration Mission[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021 (李默. 月球南极探测任务着陆区选址研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021)
- [23] WANG Chi, YANG Fan, HAN Lin, *et al.* NASA's probe first enters solar atmosphere—a review of hot topics of space science in 2021[J]. *Science & Technology Review*, 2022, **40**(5): 6-21 (王赤, 杨帆, 韩淋, 等. 2021年空间科学热点回眸[J]. *科技导报*, 2022, **40**(5): 6-21)
- [24] SMITH M, CRAIG D, HERRMANN N, *et al.* The Artemis program: an overview of NASA's activities to return humans to the moon[C]//Proceedings of the 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2020: 1-10
- [25] 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)
- [26] 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*, 2022, **9**(2): 123-133)
- [27] JONES B M, ALEKSANDROV A, HIBBITTS K, *et al.* Solar wind-induced water cycle on the Moon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(20): 10959-10967
- [28] 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
- [29] 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

- [30] CANNON K M, BRITT D T. A geologic model for lunar ice deposits at mining scales[J]. *Icarus*, 2020, **347**: 113778
- [31] 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
- [32] CANNON K M, DEUTSCH A N, HEAD J W. Stratigraphy of ice and ejecta deposits at the lunar poles: updates and new insights[C]//Proceedings of the 52 nd Lunar and Planetary Science Conference. 2021, **2548**: 2497
- [33] SPUDIS P D, BUSSEY D B J, BALOGA S M, *et al.* Evidence for water ice on the Moon: results for anomalous polar craters from the LRO Mini-RF imaging radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, **118**(10): 2016-2029
- [34] THOMSON B J, BUSSEY D B J, NEISH C D, *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): L14201
- [35] CAMPBELL D B, CAMPBELL B A, CARTER L M, *et al.* No evidence for thick deposits of ice at the lunar south pole[J]. *Nature*, 2006, **443**(7113): 835-837
- [36] NEISH C D, BUSSEY D B J, SPUDIS P, *et al.* The nature of lunar volatiles as revealed by Mini-RF observations of the LCROSS impact site[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2011, **116**(E1): E01005
- [37] FA W Z, CAI Y Z. Circular polarization ratio characteristics of impact craters from Mini-RF observations and implications for ice detection at the polar regions of the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, **118**(8): 1582-1608
- [38] 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
- [39] CANNON K M, BRITT D T. Accessibility data set for large permanent cold traps at the lunar poles[J]. *Earth and Space Science*, 2020, **7**(10): e2020EA001291
- [40] LAWRENCE D J. A tale of two poles: toward understanding the presence, distribution, and origin of volatiles at the polar regions of the Moon and Mercury[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, **122**(1): 21-52
- [41] LI S, MILLIKEN R E. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: distribution, abundance, and origins[J]. *Science Advances*, 2017, **3**(9): e1701471
- [42] BUSSEY D B J, SPUDIS P D, ROBINSON M S. Illumination conditions at the lunar South Pole[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(9): 1187-1190
- [43] BUSSEY D B J, LUCEY P G, STEUTEL D, *et al.* Permanent shadow in simple craters near the lunar poles[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(6): 1278
- [44] LUCHSINGER K M, CHANOVER N J. Seasons of ice: water ice migration and seasonal transient shadow at the lunar poles[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, **127**(10): e2022JE007336
- [45] RUBANENKO L, VENKATRAMAN J, PAIGE D A. Thick ice deposits in shallow simple craters on the Moon and Mercury[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(8): 597-601
- [46] BROWN H M, BOYD A K, DENEVI B W, *et al.* Resource potential of lunar permanently shadowed regions[J]. *Icarus*, 2022, **377**: 114874
- [47] AUSTIN A, SHERWOOD B, ELLIOTT J, *et al.* Robotic lunar surface operations 2[J]. *Acta Astronautica*, 2020, **176**: 424-437
- [48] SOWERS G F, DREYER C B. Ice mining in lunar permanently shadowed regions[J]. *New Space*, 2019, **7**(4): 235-244
- [49] BRISSET J, MILETICH T, METZGER P. Thermal extraction of water ice from the lunar surface-A 3 D numerical model[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, **193**: 105082
- [50] DUKE M, GUSTAFSON R, RICE E. Mining of lunar polar ice[C]//Proceedings of the 36 th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 1998
- [51] GUSTAFSON R, RICE E. Lunar polar ice-Methods for mining the new resource for exploration[C]//Proceedings of the 37 th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 1999
- [52] KLEINHENZ J E, PAZ A. Case studies for lunar isru systems utilizing polar water[C]//ASCEND 2020. **2020**: 4042
- [53] WASILEWSKI T G. Lunar thermal mining: phase change interface movement, production decline and implications for systems engineering[J]. *Planetary and Space Science*, 2021, **199**: 105199
- [54] ZACNY K, INDYK S, LUCZEK K, *et al.* Planetary volatiles extractor (PVEx) for in situ resource utilization (ISRU)[C]//Proceedings of the 15 th Biennial ASCE Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Orlando: ASCE, 2016
- [55] ZACNY K, METZGER P, LUCZEK K, *et al.* The world is not enough (WINE): harvesting local resources for eternal exploration of space[C]//AIAA SPACE 2016. Long Beach: AIAA, 2016: 5279
- [56] WANG Chao, ZHANG Xiaojing, YAO Wei. Research prospects of lunar polar water ice resource in-situ utilization[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, **7**(3): 241-247 (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*, 2020, **7**(3): 241-247)
- [57] FEGLEY B JR, SWINDLE T D. Lunar volatiles: implications for lunar resource utilization[J]. *Resources of Near-Earth Space*, 1993: 367-426
- [58] DIKOV Y P, IVANOV A V, WLOTZKA F, *et al.* The nature of volatiles in the lunar regolith[J]. *Solar System Research*, 2002, **36**(1): 1-11
- [59] SCHWADRON N A, WILSON J K, LOOPER M D, *et al.* Signatures of volatiles in the lunar proton albedo[J]. *Icarus*, 2016, **273**: 25-35
- [60] IVANOV A V. Volatiles in lunar regolith samples: a survey[J]. *Solar System Research*, 2014, **48**(2): 113-129

- [61] HOLQUIST J, PASADILLA P, BOWER C, *et al.* Analysis of a cold trap as a purification step for lunar water processing[C]//2020 International Conference on Environmental Systems, 2020
- [62] ZHANG B X, CHUI T C. Low temperature engineering applied to lunar in-situ resource utilization[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2006, **823**: 1523-1529
- [63] SCHLÜTER L, COWLEY A, PENNEC Y, *et al.* Gas purification for oxygen extraction from lunar regolith[J]. *Acta Astronautica*, 2021, **179**: 371-381
- [64] HAYNES W M, LIDE D R, BRUNO T J. CRC Handbook of Chemistry and Physics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016
- [65] BOUL P, LANGE K, CONGER B, *et al.* Distillation designs for the lunar surface[C]//Proceedings of the 40 th International Conference on Environmental Systems. Barcelona: AIAA, 2010
- [66] Bart H-J, Gemmingen U V. Adsorption [M]// Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2005: 1012
- [67] DALLBAUMAN L A, FINN J E. Adsorption processes in spacecraft environmental control and life support systems[J]. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 1999, **120**: 455-471
- [68] STOOKEY D J. Membranes: gas-separation applications [M]//Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2005: 45
- [69] KOHOUT L L. Cryogenic reactant storage for lunar base regenerative fuel cells[C]//Proceedings of the International Conference on Space Power. Cleveland: NASA, 1989
- [70] HÄUSSINGER P, LOHMÜLLER R, WATSON A M. Hydrogen[M]//Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2000
- [71] BOUDELAL M. *Power-to-Gas: Renewable Hydrogen Economy for the Energy Transition* [M]. Berlin, Boston: De Gruyter, 2018
- [72] FORZATTI P, LIETTI L. Recent advances in De-NO_x catalysis for stationary applications[J]. *Heterogeneous Chemistry Reviews*, 1996, **3**(1): 33-51
- [73] O'MAHONY A M, DICKINSON E J F, ALDOUS L, *et al.* Electrochemical oxidation of hydrogen sulfide at platinum electrodes in room temperature ionic liquids: evidence for significant accumulation of H₂S at the Pt/1-butyl-3-methylimidazolium trifluoromethylsulfonate interface[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2009, **113**(25): 10997-11002
- [74] NI M, LEUNG M K H, LEUNG D Y C. Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC)[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, **33**(9): 2337-2354
- [75] MOÇOTEGUY P, BRISSE A. A review and comprehensive analysis of degradation mechanisms of solid oxide electrolysis cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, **38**(36): 15887-15902
- [76] HECHT M H, HOFFMAN J A, TEAM M. The Mars oxygen ISRU experiment (MOXIE) on the Mars 2020 rover [C]//Proceedings of the 3 rd International Workshop on Instrumentation for Planetary Mission. 2016, **1980**: 4130
- [77] HECHT M, HOFFMAN J, RAPP D, *et al.* Mars oxygen ISRU experiment (MOXIE)[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(1): 9
- [78] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. *Nature*, 1972, **238**(5358): 37-38
- [79] KUDO A, MISEKI Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting[J]. *Chemical Society Reviews*, 2009, **38**(1): 253-278
- [80] YANG Yahui, CHEN Qiyuan, YIN Zhoulan, *et al.* Progress in research of photocatalytic water splitting[J]. *Progress in Chemistry*, 2005, **17**(04): 631-642 (杨亚辉, 陈启元, 尹周澜, 等. 光催化分解水的研究进展[J]. *化学进展*, 2005, **17**(04): 631-642)
- [81] LI Rengui, LI Can. Research status and development of photocatalytic water splitting for solar energy conversion[J]. *Science & Technology Review*, 2020, **38**(23): 49-61 (李仁贵, 李灿. 太阳能光催化分解水研究进展[J]. *科技导报*, 2020, **38**(23): 49-61)
- [82] OUYANG Ziyuan, ZOU Yongliao, LI Chunlai, *et al.* Prospect of Exploration and Utilization of Some Lunar Resources[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2002, **27**(5): 498-503 (欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 等. 月球某些资源的开发利用前景[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2002, **27**(5): 498-503)
- [83] KORNUTA D, ABBUD-MADRID A, ATKINSON J, *et al.* Commercial lunar propellant architecture: a collaborative study of lunar propellant production[J]. *Reach*, 2019, **13**: 100026
- [84] NASA. NASA identifies Candidate regions for landing next Americans on moon[OL]. (2022-08-19)[2023-03-03]. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-identifies-candidate-regions-for-landing-next-americans-on-moon>
- [85] ZHANG He, DU Yu, LI Fei, *et al.* Proposals for sites selection of soft landing on lunar south polar region[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, **7**(3): 232-240 (张焯, 杜宇, 李飞, 等. 月球南极探测着陆工程选址建议[J]. *深空探测学报*, 2020, **7**(3): 232-240)
- [86] XIAO Long, QIAO Le, XIAO Zhiyong, *et al.* Major scientific objectives and candidate landing sites suggested for future lunar explorations[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2016, **46**(2): 3-24 (肖龙, 乔乐, 肖智勇, 等. 月球着陆探测值得关注的主要科学问题及着陆区选址建议[J]. *中国科学: 物理学·力学·天文学*, 2016, **46**(2): 3-24)