

月球表面矿产资源原位利用研究进展

李琛^{1,2}, 魏奎先², 李阳³, 马文会^{1,4}, 赵斯哲³

1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明, 650093;
2. 云南省高校空间冶金军民融合重点实验室, 云南 昆明, 650093;
3. 中国科学院 地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳, 550081;
4. 昆明理工大学 真空冶金国家工程实验室, 云南 昆明, 650093)

摘要: 月球作为地球唯一的天然卫星, 存在着丰富的资源, 是人类开展深空探测的首选目标, 也是人类进行外层空间探测的理想基站。月球表面矿产资源原位利用技术(ISRU)一直是研究的热点, 其目的在于清洁高效地提取月球表面的矿产资源, 满足月球基地建设和深空探测的需求。由于月表环境特殊, 传统的提取工艺不能够满足需求, 所以要提出与其适用的方法。本论文从冶金学科角度阐述了ISRU的现状, 介绍了月表的环境特点、月壤组成以及能源种类; 叙述了月表所含矿产资源的种类、赋存状态以及各类金属的元素的质量分数以及存在的地理位置。系统归纳了现阶段ISRU提取金属的工艺, 并分析了各工艺的特点, 着重阐述了还原法, 电解法, 热解法以及其他方法的工艺及原理, 并对各原位利用技术从工艺、实施角度等方面进行了总结与评估。月表矿产资源的提取必须遵循原位提取的原则, 载荷和环境等条件制约着现有工艺的施行。月壤主要氧化物组成包括CaO, MgO, Al₂O₃, TiO₂, SiO₂和FeO, 其储量可以满足需要。同时, 针对不同资源的提取应采取不同的措施, 如用氢还原实现Fe的提取, 使用电解法提取Al, Si和Ti, 使用热分解法提取O等。此外, 文章还基于ISRU的共性与发展趋势, 指出月表矿产资源的开发需要在发展新工艺的同时, 以现有工艺连续化操作、清洁循环利用资源、设备小体积、轻量化以及电、光能化作为未来研究的主要方向。

关键词: 月表资源; 原位提取; 提取冶金; 电解法; 热解法; 还原法

中图分类号: TF19

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)

文章编号: 1672-7207(2020)12-3289-11



Research progress on in-situ resources utilization of Lunar surface minerals

LI Chen^{1,2}, WEI Kuixian², LI Yang³, MA Wenhui^{1,4}, ZHAO Sizhe³

1. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

收稿日期: 2020-06-20; 修回日期: 2020-08-30

基金项目(Foundation item): 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(2018HB009); 教育部创新团队项目(IRT-17R48) (Project(2018HB009) supported by the Reserve Talents of Young and Middle-aged Academic and Technical Leaders in Yunnan Province; Project(IRT-17R48) supported by the Program for Innovative Research Team in University of Ministry of Education)

通信作者: 魏奎先, 博士, 教授, 从事真空冶金研究; E-mail: kxwei2008@hotmail.com

2. Space Metallurgy Key Laboratory of Military-civilian Integration, Universities in Yunnan Province, Kunming 650093, China;
3. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;
4. National Engineering Laboratory for Vacuum Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: As the only natural satellite of the earth, Lunar has abundant resources. It is the first target for humans to carry out deep space exploration, and the ideal lunar station for the human to accomplish outer space exploration. In-situ resource utilization(ISRU) technology of lunar surface mineral has always been research hotspot and the purpose is to extract the mineral resources cleanly and efficiently on the lunar surface to meet the requirements of lunar base construction and deep space exploration. Due to the special environment of the lunar surface, the traditional extraction process can not meet its needs. So it is necessary to propose a suitable method. The status of ISRU in metallurgical perspective was described in this paper. The environmental characteristics of lunar surface, the composition of lunar soil and the types of energy, the types and occurrence of mineral resources in the lunar surface, the mass fraction of various metal elements and the geographical location of their existence were introduced. The ISRU metal extraction technology was summarized systematically, and the characteristics of each process was analyzed. The processes and principles of reduction, electrolysis, pyrolysis, and other methods were emphatically elaborated. The in-situ technologies were summarized and evaluated from the aspects of process and implementation. The extraction of mineral resources on the monthly surface must follow the principle of in-situ extraction, and the implementation of existing processes is restricted by loading, environment and other conditions. The main oxides of lunar soil are CaO, MgO, Al₂O₃, TiO₂, SiO₂ and FeO, and their reserves can meet the demand. At the same time, different measures should be taken to extract different resources, such as Fe extraction by hydrogen reduction, Al, Si, Ti extraction by electrolysis, O extraction by thermal decomposition, etc. Besides, based on the commonality and development trend of ISRU, the exploit of mineral resources on the lunar surface in future needs these as main research directions which contains the continuous operation of existing processes, clean recycling resources, small-volume lightweight equipment, and electric and optical energy.

Key words: lunar surface resource; In-situ resource utilization; extraction metallurgy; electrolysis; pyrolysis; reduction

探索月球与建立月球航天基地会极大地促进世界科技的发展,推动人类文明进步。自人类首次登月以来,许多国家先后进行了月球探测器的研发以及登月计划,如欧洲航天局的 SMART 计划、日本的 Kaguya 计划、中国的嫦娥工程、印度的 Chandrayaan 计划、美国的 Apollo 计划、月球侦察轨道器(LRO)、GRAIL 以及前苏联的 Lunar 计划等。美国在 Apollo 计划之后开展了一系列科学实验,制定了许多月球表面矿产资源原位利用技术(ISRU)方案。PAUL^[1]分析了载人月球和行星探测的经济性,回顾了月球的资源和利用方案,指出使用月球和行星资源可以将行星际飞行的成本降

低 75%~90%; HAWKE 等^[2]提出可以依托富含钛铁矿的火山洞建立一个永久性月球基地; CARPENTER 等^[3]认为,扩大探月规模与降低成本可由科研机构对原位资源提取与利用的研究来实现。由于地月运输的成本过高,月球基地的建造需要先进的 ISRU 技术提取人类建造月球基地所需的金属(如 Ti, Si, Al 和 Fe 等)与维持生命所需的 H₂O 和 O₂ 等。月表存在低重力高真空度的极端环境,因此,实现资源的开发利用需要探索大量在地球上很难达到的工艺控制条件,这引起了全世界科研工作者的浓厚兴趣,目前已取得很多突破性进展。

1 月球表面的资源与环境

人类对于月球的探索已有很多年, 随着光谱和遥感等技术的发展以及对采集月壤样品的分析, 月球表面的资源分布已经被人们熟知。

1.1 月球表面的资源

由于月球表面直接暴露于严酷的太空环境之中, 导致其绝大部分都被一层细粉状的风化物质即月壤所覆盖。在月海地区, 月壤通常厚度为 4~5 m, 在高地地区则平均为 10~15 m。月壤的粒径为 40~800 μm , 平均为 60~80 μm ^[4]。月壤颗粒主要是玻璃态的硅酸盐以及各种岩石和矿物碎片, 其成分范围从玄武岩到斜长岩, 并且包含少量(质量分数<2%)陨石成分, 具有极大的提取潜力^[5]。月海区域 Fe 质量分数较高(14%~17%), 其大部分赋存于硅酸盐矿物(即辉石和橄榄石)和钛铁矿中。月壤中的天然 Fe 至少具有 3 种来源^[6]: 陨铁、从分解的基岩来源释放的 Fe 以及通过太阳风还原月壤中的 FeO 而产生的 Fe。Ti 是在航空航天应用中的主要金属, 在月海附近的高钛月海玄武岩中的质量分数很高(5%~8%), 它几乎完全存在于钛铁矿中^[7]。Al 是重要的基建以及功能材料金属, 其质量分数在月球高地岩石中为 10%~18%, 通过分解月球高地的长石可以得到 Al。Si 在所有岩石中质量分数都很高(约为 20%), 实现 Si 的提取可以满足未来工

业化生产太阳能电池板以及电子材料的需求^[5]。Apollo11, Apollo12, Apollo14, Apollo15, Apollo16, Apollo17^[8];Lunar16,Lunar20,Lunar24^[9]和 ChangE-3^[10]分别对月壤进行勘察或采集, 采样区月壤各组分的质量分数见图 1。由图 1 可知: 月壤主要由 SiO₂, Al₂O₃, FeO, TiO₂, MgO 和 CaO 这 6 种主要氧化物构成, 由于月海与高地在地质学存在差异, TiO₂ 质量分数波动较大。

一些月球高地岩石中稀土元素质量分数相对较高, 同时 P 和 K 质量分数也比月壤的高, 月球地质学中将其称为 KREEP rich^[11]。此外, 重要的核能元素 U 和 Th 也集中在 KREEP 中^[12]。

在月壤中, S 存在于陨石成分以及月球原生的 Fe-FeS 相中^[13]。Cl 存在于 FeO(OH, Cl)、磷酸盐和氯化物中, 但分布不均^[14]。含 C 样品中均存在于碳化物相(FeNi)₃C、部分含 C 的陨石(铁, 碳质球粒陨石)和太阳风中^[15]。³He 是具有潜力的核能原料, 其在地球大气中质量约 4×10⁶ kg, 在板块边界地区的天然气中质量约 1×10⁶ kg, 但通过阿波罗样品计算出在月球表面的³He 质量大约为 2.47×10⁹ kg^[16]。月球表面并非完全没有水, 通过对月球土壤进行分析发现, 撞击坑中含有大量来自于太阳风的水^[17], RUBANENKO 等^[18]也通过对陨石坑的深度与直径之比推论了两极的永久阴影区中存在着厚冰层。

1.2 月球表面的环境

月球表面引力只有地球表面引力的 1/6, 昼夜最大温差可达 300 °C 以上, 月球表面几乎无大气,

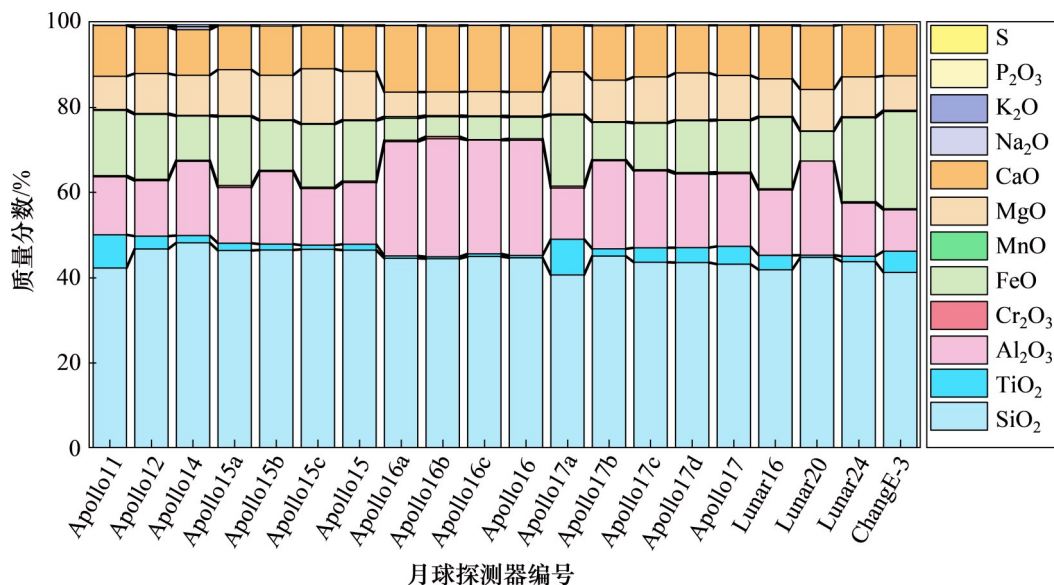


图 1 采样区月壤平均质量分数

Fig. 1 Sampling area average mass composition of lunar soil

表面气压仅为 1×10^{-9} Pa。真空环境导致提取各类气体存在较大的难度,无空冷环境对凝固过程的低温段影响较大;微重力环境对密度差分离的冶炼方式带来了影响,也导致传递过程与凝固过程中需要更多地考虑表面张力。同时,宇宙射线与太阳风可以轻易到达月球表面,从而形成一层结构松散、成分复杂的风化层^[7]。BENAROYA 等^[19]研究风化层中月尘性质后发现,月尘附着在所有物体表面上,造成月尘干扰。

月球表面有着充足的太阳能,合理利用太阳能光伏发电或者转化为热能对于人类月球活动至关重要^[20]。CRISWELL 等^[21-22]提出在月球表面建造太阳能电池阵列并将能量束流到地球上,或将月球太阳能束提取电能后发射到地球上,该方法比实际开采³He 运输到地球上产出能量效率要高得多。地月运输成本高昂,要求空间冶金技术应当致力于资源的就地开采、就地处理和就地利用。此外空间冶金系统应当避免大型化、由于资源有限,湿法冶金较难实现、由于能源种类有限,电能和光能是所有提取工艺最好的选择。

2 月球表面金属资源提取进展

月球资源原位利用与地球冶金工艺存在着一定的差异^[23]。提取的金属材料主要应用于基地建设、空间技术、生活基础以及其副产物氧气与人类生存所必需的 H_2O ^[24]。实现月球冶金技术有利于推进绿色冶金的发展,同时也为深空技术应用打下了良好基础^[25]。

2.1 还原法

2.1.1 碳还原

ANDREW 等^[26]认为碳热还原是在月球表面提取金属与 O_2 的可行方法,其还原过程如图 2 所示,由图 2 可知:将月壤与还原剂(碳粉)混合压块,而后升温进行碳热还原,其热力学行为可参考该条件下的埃林汉姆图。同时可以借助钢铁冶金的工程经验,将产出的矿渣和钢铁等副产品用于月球基建。在钛铁矿还原的工艺中, C 是比 H_2 更高效的还原剂。同时可以 CH_4 为还原剂还原仿真富含 SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO 和 TiO_2 等月壤矿物制备金属和 O_2 。

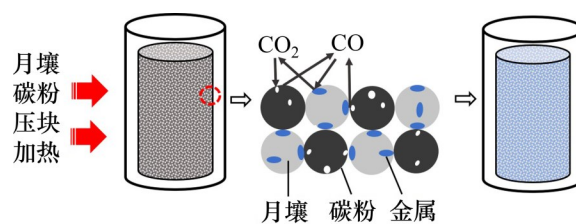


图 2 碳热还原法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of carbothermal reduction method

在碳热还原过程中,碳质还原剂可能会沉积到月壤颗粒上或由于在此过程中可能形成碳化物而被损失。尽管月壤含太阳风注入的 C,但其质量分数仅有 200×10^{-6} ^[27],并不足以满足冶炼过程的需要,因此,需要从地球携带或从月球深挖开采^[28]。此外,碳热还原法提取金属过程中,以 CH_4 形式损失的 C 占总质量的 8%。因此,必须从废弃的矿渣中重新生成 C 或将其循环利用,其可行方案包括合理回收固体废物以及生命支持系统的 SABATIER 反应器中的有机物^[29]。为了减少还原剂的消耗,GUSTAFSON 等^[30]设计了 CH_4 还原反应器,实现了资源的循环利用。

ZHAO 等^[31]比较了 CO 和 H_2 对钛铁矿的还原作用,在较低温度下, CO 还原能力较强,在较高温度下 H_2 还原能力较强。FRIEDLANDER^[32]提出将水蒸气电解后制取 CH_4 作为月球上的还原剂, CH_4 是比 H_2 还原能力更强的气态碳质还原剂,且可以通过电解等工艺流程实现完全循环。

2.1.2 氢还原

SANDERS 等^[33]证实在月壤钛铁矿 $FeTiO_3$ 中仅 FeO 可以被氢还原,所以产率相对较低,并且取决于月壤中的 Fe 质量分数,这主要是因为热力学上 H_2 不具有还原 Ti 氧化物制备单质 Ti 的能力。但是其工艺流程短,因此,受到很多科学家和工程师的青睐。SARGENANT 等^[34]设计了氢还原装置,证明 H_2 与 $FeTiO_3$ 物质的量比为 1 时 (H_2 压力为 418 Pa) 是最佳的还原配比,当在 1 000 °C 下反应 4 h 时可得到最大的产率,可获得 0.17%~3.40% 的 O_2 。当在 1 100 °C 的较高温度下操作时,钛铁矿晶粒会发生相变反应,变化为新的矿相,并能得到更多的 O_2 。

钛铁矿还原过程中产生的氧气可以作为价值较高的副产品,但是其浓度非常低,而且从复杂

的月壤矿物中提取铁将耗费大量能源。SENIOR^[35]认为提取辉石中的Fe可能比H₂还原钛铁矿更加可行,并采用气相还原来提取辉石中的Fe。TAYLOR等^[36]将太阳光聚焦在太阳能炉中即可达到反应所需的高温(>2 000 °C),从而避免了与电能转换和相关的问题。

ProSPA系统^[37]中氢还原是一种新颖的从月壤中提取H₂O的方法。此前通常利用H₂流穿过原料来提取水。但是,在ProSPA中,以准稳态模式处理样品。对气体在这种系统中的扩散进行了理论分析,结果表明H₂O的内扩散是反应的限制性环节,控制这个步骤可以使反应快速进行。

HEDGE等^[38]从动力学角度进行解释,如图3所示,钛铁矿颗粒的总还原速度不仅受到界面化学反应的限制,而且受到H₂和H₂O通过产物层的内扩散限制。因此,随着产物层厚度增加,反应速度随时间呈指数下降,从而扩散势垒增加。REISS等^[39]通过热重分析(TGA),分别使用纯N₂,H₂和CH₄用作TGA的吹扫气体,直接比较纯钛铁矿和高地型月球长石模拟物NULHT-2M在不同气体还原过程中的反应情况,结果表明,钛铁矿从500 °C左右就开始发生还原反应。

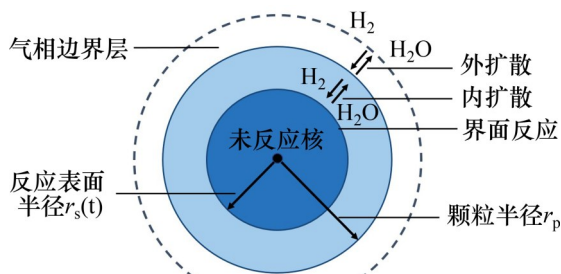


图3 氢气还原未反应核模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hydrogen reduction unreacted nuclear model

2.1.3 金属热还原

DELGADO等^[40]证明了JSC-1A月壤模拟物与Mg的混合物是可燃的。这些混合物中的Al(Mg)热剂型反应可用于在月球上原位生产建筑材料。SiO₂对燃烧具有显著影响,可在较低温度下促进反应,由于月球风化层组成复杂,这些反应的机理尚不清楚。FERGUSON等^[41]使用2种金属粉末之间的自蔓延高温反应来黏结月壤,在Ar气氛和1 kPa压力下,以压块JSC-1A月球风化层模拟物为原料,

利用Al/Ni混合物的还原反应放热并且黏结制成结构材料。王斌等^[42]对Al热还原过程进行了动力学研究,得到了不同氧化物Al热还原的动力学规律。

2.2 电解法

2.2.1 熔盐电解

大部分金属如Ti可以通过熔盐电化学方法从中提取,SCHWANDT等^[43]使用剑桥大学开发的一种熔融盐电化学技术(剑桥法),从不同成分的固体月壤中获得氧气和金属。熔盐电解法示意图如图4所示,采用惰性阳极而不是碳阳极,直接电解出氧气;以CaCl₂为电解质来电解阴极的月壤从而制备金属。此方法在月海和高地中同样可行,所以剑桥法是一个实现提取金属与氧气行之有效的方法。但该方法具有较高的普适性,可以处理SiO₂与Al₂O₃从而产出Al-Si合金。TAYLOR等^[36]认为与熔融氧化物电解的工艺所需的1 600~1 900 °C相比,熔盐电解可在相对较低温度下操作(低于900 °C)。

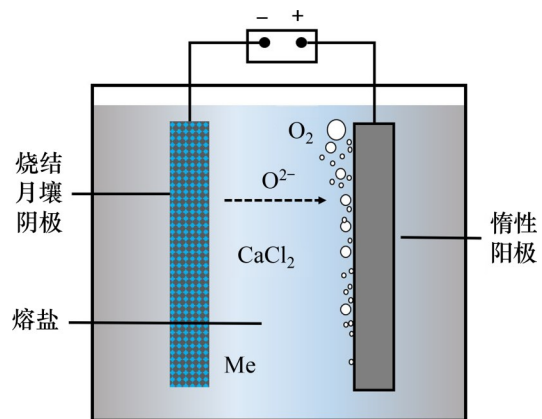


图4 熔盐电解法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of molten salt electrolysis

对熔融盐电化学工艺进行改进可以提取Al;DUKE等^[44]使用类似于从月球材料中提取Al的工艺提取Si。在月球环境中达到太阳能级Si的成分要求可能会很困难^[45-46]。DUKE等^[47-48]研究了熔盐电解生产太阳能级高纯Si的工艺,并提出了在月球表面生产太阳能电池的理论框架。对于铁的提取,谢开珏^[49]通过冰晶石熔盐体系,从钛铁矿以及月壤仿真样品提取O₂与金属Fe。

LOMAX等^[50]证明了Metalysis FFC(Fray, Farthing, Chen)工艺可用于金属和合金的工业规模生产,使用惰性的SnO₂阳极对粉末状固态月壤模拟物进行电解实验。对所得金属粉末进行分析发

现, 该工艺提取了总氧的 96%, 得到了合金产物。

2.2.2 熔融氧化物电解

SADOWAY 等^[51]开发了电解法的一种极端形式——熔融氧化物电解法(又称岩浆电解法), 如图 5 所示, 使用双惰性电极, 阳极产氧, 阴极产金属后进入熔池。该反应必须在熔融氧化物混合物熔化的温度下进行, 使高温离子向它们各自的电极移动。这种方式可以生产 Al, Mg, Li, Na 和稀土金属, 与众不同的是, 该工艺能够原位电解月壤, 在一个电极上产生纯 O_2 , 并在另一电极上产生多种液态金属, 而无需任何形式的支持电解质。

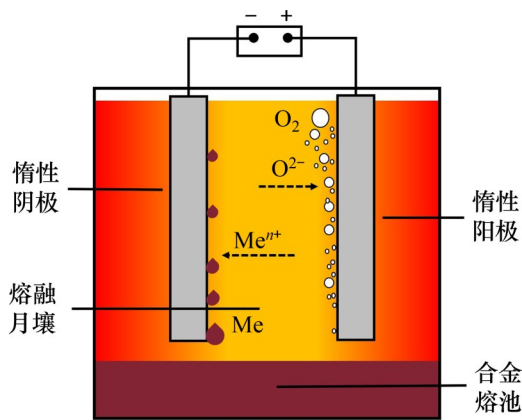


图 5 熔融氧化物电解法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of molten oxide electrolysis

SIBILLE 等^[52-53]认为熔融氧化物电解工艺能在月球表面持续运行。为保证在超过 $1\ 600\ ^\circ\text{C}$ 的温度下持续运行, 并且抵御金属与氧化物熔体的强侵蚀作用, 阴极材料主要选择 Pt 族金属和 Cr 基合金。

SCHREINER 等^[54]研究了熔融月壤电解(MRE)反应器的估计质量和功率, 发现 MRE 反应堆耗能约为 $21\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$, O_2 的年产量为 $2\ 000\sim 3\ 000\ \text{kg}$ 。

2.3 热分解法

2.3.1 氧化物热分解

SENIOR^[55]使用真空热分解法处理月壤制备 O_2 以及 Si 的低价氧化物, 并且采用热力学论证了其可能性, 主要反应为在真空条件下加热 SiO_2 分解为 SiO 与 O_2 (如图 6 所示), 在 $2\ 000\sim 10\ 000\ ^\circ\text{C}$ 加热月矿, 使其中的各种氧化物发生热分解, 通过快速冷凝蒸汽, 分离得到 O_2 和低价亚稳态金属氧化物或金属。

月球的真空环境使金属和氧解离所需的温度大大降低。添加真空电磁分离或分区蒸馏可以捕

获 O_2 , 并捕获和纯化金属。估计该方法可从月壤的金属氧化物中回收超过 95% 的氧气和金属^[55]。

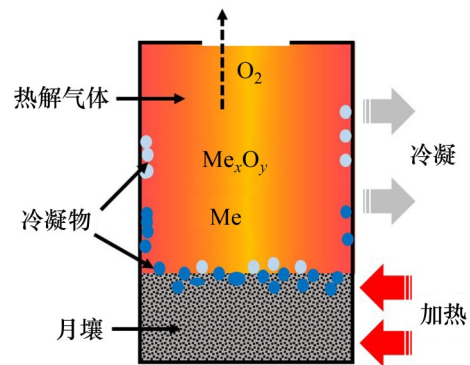


图 6 热分解法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of thermal decomposition

CARDIFF 等^[56]使用 $1\ \text{m}^2$ 菲涅耳透镜蒸发月壤模拟物。该工艺已成功用于蒸发约 $1\ \text{g}$ 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 O_2 。ANAND 等^[57]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。例如, 根据氧化物类型, 在 $1\ 200\sim 2\ 300\ ^\circ\text{C}$ 将具有金红石(TiO_2)、赤铁矿(Fe_2O_3)、尖晶石($M_xFe_{3-x}O_4$)或萤石型结构的材料(CeO_2)热分解。

2.3.2 其余矿物热分解

热分解技术也可用于提取有价值的挥发分如 ^3He 。 ^3He 提取需选定富集的位置。该反应需要最初的氢源作为还原剂(如上所述, H_2 本身可以从月壤中提取)。在提取 ^3He 的同时, 其余月壤中的挥发分也会同时提取, 经过分离即可予以分别收集^[5]。

2.4 其他冶金方法

1) 氯化法和氟化法。DUKE^[58]制定了详细的氟化工艺流程以及物料循环设计, 模拟了工艺单元, 并开发了流程图以确定中间产物和能量需求。每处理 $1\ \text{kg}$ 月壤可以生产 $0.21\ \text{kg}$ 的 Si 和 $0.32\ \text{kg}$ 的 O_2 , 总冷却负荷为 $17\ \text{MJ}/\text{kg}$, 电负荷为 $29\ \text{MJ}/\text{kg}$ 。使用该工艺, 每千克荷载每天可处理 $16\ \text{kg}$ 月壤。

2) 等离子体法。CURRIER 等^[59]提出了一种利用等离子体提取金属和 O_2 回收工艺, 非常适合空间资源的利用。等离子体是理想的还原剂, 等离子体与固体颗粒直接且紧密接触导致反应效率大大增加。当使用氧化物矿物作为原料时, H 等离子体通过还原矿物产生水并从基质中提取 O, 可以得到金属, 随后将水分解成 O_2 和 H_2 。

3) 粉末冶金法。AGOSTO^[60]提出了利用磁选和冲击磨筛技术在月球土壤中进行金属选矿, 每年以 0.41 kW·h/kg 的比能量生产超过 5×10^5 kg 的 Fe-Ni 合金。中南大学对地面粉末冶金的研究已有多年, 形成了较为完备的理论体系, 特别是粉末合金的制备工艺^[61-62]。发展月球粉末冶金有着很广阔的利用前景。

4) 离子液体冶金。离子液体是在室温或接近室温下熔融的有机盐。KARR 等^[63]开发出一种使用离子液体从月壤中回收金属和 O₂ 的新方法。该方法可以溶解月壤的金属氧化物, 然后通过电化学方法回收金属。该反应中放出的 H₂O 被电解产生 O₂ 和 H₂, 氢气被用来使离子液体质子化, 以备后用, 氧气可用于维持生命和推进剂。该工艺具有生产高纯度金属的潜力。

3 原位利用技术总结与评估

3.1 原位操作评估

对真空热分解等 5 种报道较多的工艺进行总结, 结果如图 7 所示, 由图 7 可见: 几乎所有提取工艺都可以实现钛铁矿资源的利用, 其中还原法与分解法可以很好地提取 Fe 资源。Ti 的大型化生产依赖于熔盐电解或者熔融氧化物电解。Si 的生产则依赖于碳热还原与电解, 其中碳热还原和熔融氧化物电解可以处理较低品位资源, 但产出的金属需要精炼方可作为太阳能电池的原材料。熔

盐电解法则需要对原料进行选矿才可以产出较纯的金属。

对于其他金属资源如 Al, Mg 和 Ca 等, 熔融氧化物电解法和真空分解法都可以实现提取, 但其均需要较高的温度, 其中熔融氧化物电解法至少需要 1 800 °C 才可以电解出活泼金属, 而真空分解法可以通过控制压强而减少反应温度。

对于月球资源的原位资源利用, 针对不同类型的资源, 应当采取最适合的方式进行提取; 同时, 对于不同用途的原料(建筑材料和航天材料)也应采取不同工艺进行提取。针对月球资源以及环境的特殊性, 需考虑原位性、可实施性(是否需要辅料)、生产的仪器规模、对原料的适应性、产物的形态与可用性、对空间环境的影响等方面。由于能源限制以及基地建设和维护的需求及成本问题, 导致冶金规模并不是越大越好, 且应模块化流程, 便于保养与维护, 因此, 可优先采用等离子体法开展 Fe 和 Ti 的小批量冶炼试验提取钛铁矿资源, 之后通过热分解法在提取氧气的同时, 提炼 Fe 和 Si 等应用于建材、光伏发电。最后通过还原法、电解法等批量生产 Al, Ti, Si 和 Fe 等可用金属, 同时实现资源的循环利用。

3.2 各类工艺总结

通过可提取金属种类、温度条件、能源消耗、产物形态和环境负荷 5 个方面对真空热分解、熔盐电解、熔融氧化物电解、氢还原、碳还原这 5 种提取工艺进行定性描述与总结, 见表 1。由表 1 可见:

1) 还原法可控制程度较高, 但是还原法所需

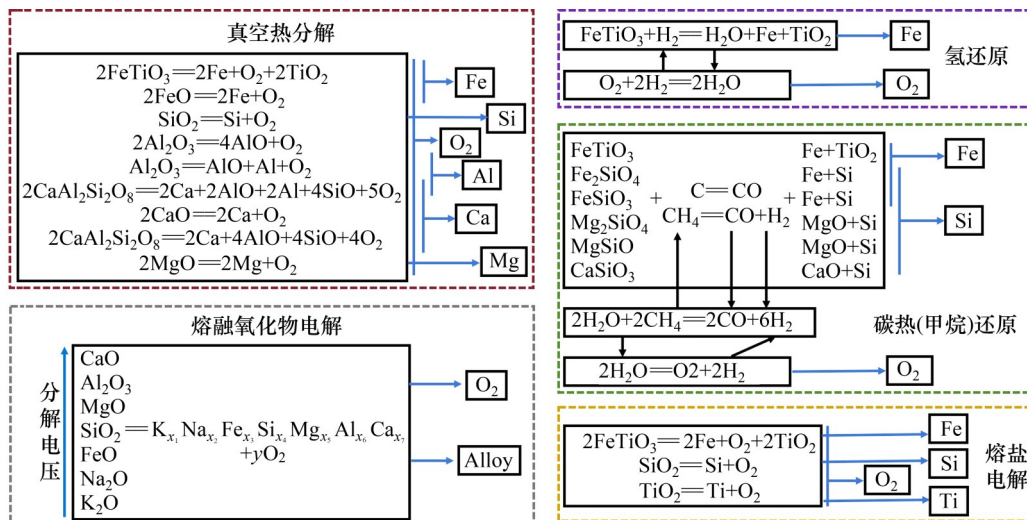


图 7 月球矿产资源原位利用原理图

Fig.7 Schematic diagram of in-situ utilization of lunar mineral resources

表 1 月壤矿产资源原位利用工艺总结

Table 1 Summary of in-situ utilization technology of lunar soil mineral resources

| 方法 | 文献 | 可提取主要金属种类 | 操作温度/°C | 能源消耗 | 产物形态 | 环境负荷 |
|---------|-------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------------|---------------|
| 真空热分解 | [35, 55-57] | Fe, Si, Al, Ca, Ti和Mg | 1 200~10 000 | 升温热、分解热 | 冷凝合金与中间氧化物 | 中间氧化物的处理 |
| 熔盐电解 | [42-50] | Fe, Al, Ti和Si | 700~1 000 | 升温热、电解能 | Ti, Si, Fe粉末, Al液态 | 氯化、氟化物熔盐体系的处理 |
| 熔融氧化物电解 | [51-54] | Fe, Si, Al, Ca, Ti和Mg | 1 600~1 900 | 焦耳热、电解能 | 多种金属混合的合金 | 残余氧化物的处理 |
| 氢还原 | [33-38] | Fe | 500~1 000 | 升温热、反应热、电解能 | Fe, 形态与原料有关 | 冶金渣(渣量与品位有关) |
| 碳还原 | [26-32] | Fe和Si | 900~1 500 | 升温热、反应放热、电解能 | Fe、Si, 形态与原料有关 | 冶金渣(渣量与品位有关) |

的还原剂在月球上尚未发现可适用品位的矿藏。制备还原剂需要额外的生产操作，并且还原法对矿石品位也有着一定要求，这就导致还原法的工艺流程较复杂。

2) 电解法在处理具有理想组分的原料时具有较大优势，但是电解法对所采用电极材料的要求较高；同时，熔盐电解法对矿物品位也有要求，所采用的氯化物-氟化物体系对月球环境造成一定的负荷。

3) 热分解法装置简单，对原料要求较低，可以随地开采。通过控制条件可以提取月壤中存在的挥发分资源。但是传统加热方式需要较高的温度，同时需要较多的电能。聚焦太阳能不能支持较长时间的冶炼，需要一种更大能量密度的加热方式。

4 结论与展望

1) 月壤粒度较小，矿相组成较为复杂，目前未发现高品位的矿藏，其元素成分与地球表层的元素成分较为接近，但易变价金属元素属于低价态。主要氧化物有CaO, MgO, Al₂O₃, TiO₂, SiO₂和FeO等。

2) 月球表面环境恶劣，地月运输载荷价格高昂，月球矿产资源应当致力于就地开采、就地利用、就地处理；同时保证清洁与循环利用，减少太空垃圾的产生。

3) 现阶段原地提取大多采用真空热分解、熔盐电解、熔融氧化物电解、氢还原和碳还原等工艺。各种工艺仅能实现小中型化生产，缺少模块化以及结合任务规划的连续生产案例。要结合月球的环境特性，创新工艺，使其环境成为提取资源的优势。

4) 由于原料成分复杂，组成波动大，品位较低。因此，真空热分解是提取月球矿产资源较为理想的工艺。

参考文献:

- [1] PAUL. L J. Lunar resources-Their value in lunar and planetary exploration[R]. Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 1966: 443
- [2] HAWKE B R, COOMBS C R, CLARK B. Ilmenite-Rich Pyroclastic Deposits: an Ideal Lunar Resource[C]// V. L. SHARPTON, G. RYDER. Proceedings of the 20th Lunar and Planetary Science Conference. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 1990: 249-258.
- [3] CARPENTER J, FISACKERLY R, HOUDOU B. Establishing lunar resource viability[J]. Space Policy, 2016, 37: 52-57.
- [4] RASERA J N, CILLIERS J J, LAMAMY J A, et al. The beneficiation of lunar regolith for space resource utilization: a review[J]. Planetary and Space Science, 2020, 186: 104879.
- [5] CRAWFORD I A. Lunar resources[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2015, 39(2): 137-167.
- [6] MORRIS R. Origins and size distribution of metallic iron particles in the lunar regolith[C]// MERRILL R G. Lunar and

- Planetary Science Conference 11th. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1980: 1697-1712.
- [7] 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, 2002, 27(5): 498-503.
- OUYANG Ziyuan, ZOU Yongliao, LI Chunlai, et al. Prospect of exploration and utilization of some lunar resources[J]. Earth Science, 2002, 27(5): 498-503.
- [8] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 280-285.
- OUYANG Ziyuan. Introduction to Lunar Science[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2005: 280-285.
- [10] LING Zhongcheng, JOLLIFF B L, WANG Alian, et al. Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'e-3 landing site[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 8880.
- [11] WARREN P H, WASSON J T. The origin of KREEP[J]. Reviews of Geophysics, 1979, 17(1): 73-88.
- [12] HATCH G P. Dynamics in the global market for rare earths [J]. Elements, 2012, 8(5): 341-346.
- [13] GOLDSTEIN J, HENDERSON E, YAKOWITZ H, Investigation of lunar metal particles[C]// LEVINSON. A A Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference. Houston, TX: Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement, 1970: 499.
- [14] SHEARER C K, SHARP Z D, BURGER P V, et al. Chlorine distribution and its isotopic composition in "rusty rock" 66095. Implications for volatile element enrichments of "rusty rock" and lunar soils, origin of "rusty" alteration, and volatile element behavior on the Moon[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 139: 411-433.
- [15] GOLDSTEIN J, HEWINS R H, and ROMIG Jr A. Carbides in lunar soils and rocks[C]// MERRILL R B. Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. Houston, Tex: NASA and Lunar Science Institute, 1976: 807-818
- [16] A research trend on lunar resources and lunar base[J]. The Journal of the Petrological Society of Korea, 2017, 26(4): 373-384.
- [17] CHAUSSIDON M. Lunar water from the solar wind[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(11): 766-767.
- [18] 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.
- [19] BENAROYA H, BERNOLD L. Engineering of lunar bases [J]. Acta Astronautica, 2008, 62(4/5): 277-299.
- [20] HARRIS, P. Space enterprise: Humanity's destiny is offworld[J] Journal of Space Philosophy 2012: 1(1): 111-122.
- [21] CRISWELL D R, Solar power system based on the moon. [M]. Houston, TX: Space Systems Operations Inst 1991: 599-621
- [22] CRISWELL D R, WALDRON R D. Lunar system to supply solar electric power to earth[C]// Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Reno, Nevada: IEEE, 1990: 61-71.
- [23] 宋云峰, 赵中伟, 刘旭恒. 外太空冶金[J]. 自然杂志, 2018, 40(4): 270-279.
- SONG Yunfeng, ZHAO Zhongwei, LIU Xuheng. Space metallurgy[J]. Chinese Journal of Nature, 2018, 40(4): 270-279.
- [24] 李志杰, 果琳丽. 月球原位资源利用技术研究[J]. 国际太空, 2017(3): 44-50.
- LI Zhijie, GUO Linli. Research on the technology of lunar In-situ resource utilization[J]. Space International, 2017(3): 44-50.
- [25] 陈志远, 周国治. 月球冶金技术的发展前景[J]. 自然杂志, 2013, 35(1): 1-8.
- CHEN Zhiyuan, ZHOU Guozhi. Prospect of lunar metallurgical industrial research[J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(1): 1-8.
- [26] ANDREW H C, PETER K. A carbothermal scheme for lunar oxygen production[C]// MENDELL W W. Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 1985: 559.
- [27] HASKIN L. and WARREN P, Lunar chemistry[J]. Lunar Sourcebook, 1991, 4(4): 357-474.
- [28] MUELLER R P, TOWNSEND III I I III, MANTOVANI J G. Pneumatic regolith transfer systems for in situ resource utilization[C]// 12th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments; and Fourth NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2010: 1353-1363.
- [29] CAPTAIN J, SANTIAGO-MALDONADO E, DEVOR R, et al. Creating methane from plastics: recycling at a lunar outpost[C]// 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston, Virginia: AIAA, 2010: 1551
- [30] GUSTAFSON R, WHITE B, FIDLER M, et al. Demonstrating the solar carbothermal reduction of lunar regolith to produce oxygen[C]// 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and

- Aerospace Exposition. Reston, Virginia: AIAA, 2010: 1163
- [31] ZHAO Y, SHADMAN F. Reaction engineering for materials processing in space: Reduction of ilmenite by hydrogen and carbon monoxide[J]. Resources of Near-Earth Space 1991. 12.
- [32] FRIEDLANDER H. N. An analysis of alternate hydrogen sources for lunar manufacture[C]// MENDELL W W. Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 1985:611.
- [33] SANDERS G, LARSON W. Progress made in lunar in situ resource utilization under NASA's exploration technology and development program[C]// Thirteenth ASCE Aerospace Division Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, and the 5th NASA/ASCE Workshop on Granular Materials in Space Exploration. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2012: 457-478.
- [34] SARGEANT H M, ABERNETHY F A J, BARBER S J, et al. Hydrogen reduction of ilmenite: Towards an in situ resource utilization demonstration on the surface of the Moon [J]. Planetary and Space Science, 2020, 180: 104751.
- [35] SENIOR C. Lunar oxygen production by pyrolysis[C]// Space Programs and Technologies Conference. Huntsville, Reston, Virginia: AIAA, 1992: 1663.
- [36] TAYLOR L A, CARRER W D. Oxygen production on the moon: An overview and evaluation[J]. Resources of Near-Earth Space, 1993: 69.
- [37] SARGEANT H M, ABERNETHY F A J, ANAND M, et al. Feasibility studies for hydrogen reduction of ilmenite in a static system for use as an ISRU demonstration on the lunar surface[J]. Planetary and Space Science, 2020, 180: 104759.
- [38] HEGDE U, BALASUBRAMANIAM R, GOKOGLU S. Development of a reactor model for chemical conversion of lunar regolith[C]// AIP Conference Proceedings. Albuquerque, New Mexico(USA): AIP, 2007: 941-950.
- [39] REISS P, KERSCHER F, GRILL L. Thermogravimetric analysis of chemical reduction processes to produce oxygen from lunar regolith[J]. Planetary and Space Science, 2020, 181: 104795.
- [40] DELGADO A, CORDOVA S, SHAFIROVICH E. Thermite reactions with oxides of iron and silicon during combustion of magnesium with lunar and Martian regolith simulants[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(9): 3333-3340.
- [41] FERGUSON R E, SHAFIROVICH E. Aluminum-nickel combustion for joining lunar regolith ceramic tiles[J]. Combustion and Flame, 2018, 197: 22-29.
- [42] 王斌, 杜金晶, 刘奎仁, 等. 金属热还原法制备 V-Ti 基合金的动力学研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3635-3641.
- WANG Bin, DU Jinjing, LIU Kuiren, et al. Kinetic study on preparation of V-Ti based alloys by metallothermic reduction method[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(11): 3635-3641.
- [43] SCHWANDT C, HAMILTON J A, FRAY D J, et al. The production of oxygen and metal from lunar regolith[J]. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 49-56.
- [44] DUKE M B. Development of the moon[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2006, 60(1): 597-655.
- [45] LANDIS G A. Materials refining on the Moon[J]. Acta Astronautica, 2007, 60(10/11): 906-915.
- [46] LI Liangxing, GUAN Jinzhao, LIU Aimin, et al. Preparation of solar grade silicon precursor by silicon dioxide electrolysis in molten salts[M]// EPD Congress 2015. Cham: Springer International Publishing, 2015: 209-217.
- [47] DUKE M B, IGNATIEV A, FREUNDLICH A, et al. Silicon PV cell production on the moon[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2001, 14(2): 77-83.
- [48] IGNATIEV A, FREUNDLICH A. The use of lunar resources for energy generation on the moon[J]. Moon, 2012: DOI: 10.1007/978-3-642-27969-0-13.
- [49] 谢开钰. 钛铁矿及月壤仿真样提取金属及制备氧气[D]. 沈阳: 东北大学冶金学院, 2016: 99.
- XIE Kaiyu, Extracting of metal and oxygen from ilmenite and lunar soil simulant composite oxides[D]. Shenyang. Northeastern University. School of Metallurgy, 2016: 99.
- [50] LOMAX B A, CONTI M, KHAN N, et al. Proving the viability of an electrochemical process for the simultaneous extraction of oxygen and production of metal alloys from lunar regolith[J]. Planetary and Space Science, 2020, 180: 104748.
- [51] SADOWAY D, IGNATIEV A and CURRERI P, et al. Regolith extraction through molten regolith electrolysis. [J]. LPI Contributions, 2019: 2152, 5012.
- [52] SIBILLE L. S, SCHREINER, DOMINGUEZ J. Advance concepts for molten regolith electrolysis: one-step oxygen and metals production anywhere on the moon[J]. LPI Contributions, 2019, 2152, 5100.
- [53] SIBILLE L, SADOWAY D, SIRK A, et al. Recent advances in scale-up development of molten regolith electrolysis for oxygen production in support of a lunar base[C]// 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida. Reston,

- Virginia: AIAA, 2009: 659–669.
- [54] SCHREINER S, SIBILLE L, DOMINGUEZ J, et al. Development of a molten regolith electrolysis reactor model for lunar in situ resource utilization”[C]// 8th Symposium on Space Resource Utilization. Reston, Virginia: AIAA, 2015: 1180.
- [55] WINGO D, Vapor and Plasma Phase Pyrolysis; A Key to Lunar Industrialization. [EB/OL] 2019. [https:// www. hou. usra.edu/ meetings/ lunarlsru2019](https://www.hou.usra.edu/meetings/lunarlsru2019).
- [56] CARDIFF E H, POMEROY B R, BANKS I S, et al. Vacuum pyrolysis and related ISRU techniques[C]// LPI Contributions, 2019: 2152, 5098.
- [57] ANAND M, CRAWFORD I A, 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[J]. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 42–48.
- [58] DUKE M B. Development of the moon[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2006, 60(1): 597–655.
- [59] CURRIER R, BLACIC J. Plasma processing of lunar and planetary materials[J]. Space resources roundtable II, 2000: 7018
- [60] AGOSTO W. Beneficiation and powder metallurgical processing of lunar soil metal[C]// 4th Space manufacturing; Proceedings of the Fifth Conference. Reston, Virginia: AIAA, 1981: 3263.
- [61] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 20–50.
- HUANG Peiyun. Principles of powder metallurgy[M]. Beijing, Metallurgical Industry Press, 1982: 20–50.
- [62] 陈晓宇, 李詠侠, 邹丹, 等. 超细 Co-Cr-V 复合金属粉末的制备与表征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 302–309.
- CHEN Xiaoyu, LI Yongxia, ZOU Dan, et al. Preparation and characterization of ultrafine Co-Cr-V alloy powders[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(2): 302–309.
- [63] KARR L, CURRERI P, THORNTON G, et al. Ionic liquid facilitated recovery of metals and oxygen from regolith[C]// 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. Reston, Virginia: AIAA, 2018: 5291.

(编辑 秦明阳)