

# 深空物质资源利用现状与展望

吴伟仁, 张哲\*, 敖显泽, 贾琇, 赵媛, 杨洪伦, 祖琳, 凌丽丽

深空探测实验室(天都实验室), 合肥 230000

**摘要** 深空探测是国家综合实力的集中体现, 已成为世界航天大国科技竞争的制高点。深空资源利用是国际深空探测的重要前沿方向。其中, 深空物质资源的利用对于拓展人类生存空间具有极为深远的意义。介绍了深空资源的基本内涵, 概述了深空资源利用的意义; 以深空物质资源为研究对象, 总结了星球挥发分开采利用、大气资源利用、矿产资源开采冶炼, 以及星表原位制造建造等技术的国内外研究进展; 展望了深空物质资源利用未来发展趋势, 以为后续研究工作提供参考。

**关键词** 深空探测; 深空物质资源; 原位资源利用

深空探测是指发射航天器对月球及其以远的天体或空间进行探测的航天活动<sup>[1]</sup>。20世纪, 以美国、苏联为主的深空探测任务以认识星球为主要目标, 极大地推动了航天技术的快速发展, 建立和完善了空间科学、行星科学等基础学科的知识体系。进入21世纪, 利用星球成为国际深空探测领域新的研究热点, 美国国家航空航天局(NASA)于2019年正式启动阿尔忒弥斯(Artemis)计划, 希望以月球原位资源利用促进可持续的月球探索, 并通过月面创新计划(LSII)、小型企业创新研究计划(SBIR)等资助月球原位资源利用技术攻关。同年, 俄罗斯国家航天集团公司(Roscosmos)公布了与俄罗斯科学院联合制定的《月球综合探索与开发计划草案》, 规划了水提取、氧气制取、原位资源制造零部件等

月球资源利用方向的多个科学探测与研究任务。2022年, 欧洲航天局(ESA)发布《“新世界”(Terrae Novae)2030+战略路线图》, 将原位资源利用作为未来10年重点任务之一。日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)于2015年成立太空探索创新中心(TansaX), 旨在推动包括原位资源利用在内的前沿技术研究。中国探月工程“绕、落、回”取得圆满成功, 探月工程四期已获批立项, 将建成国际月球科研站基本型<sup>[2]</sup>。其中, “嫦娥六号”将于2024年前后发射, 实施月背采样返回任务; “嫦娥七号”将于2026年前后发射, 开展月球南极环境与资源详查; “嫦娥八号”将于2028年前后发射, 开展月球资源利用等新技术试验验证<sup>[3]</sup>。

深空资源的范畴涵盖物质资源、环境资源、位

收稿日期: 2023-08-09; 修回日期: 2023-09-14

作者简介: 吴伟仁, 中国工程院院士, 研究员, 研究方向为航天测控通信与深空探测总体设计, 电子信箱: wuwr@cae.cn; 张哲(通信作者), 研究员, 研究方向为深空资源利用、深空智能感知与通信技术, 电子信箱: cndszz@sina.cn

引用格式: 吴伟仁, 张哲, 敖显泽, 等. 深空物质资源利用现状与展望[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 6-15; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.

19.001

置资源<sup>[4]</sup>。深空物质资源是指存在于天体或深空环境中的天然物质,包括气体、液体、固体和其他形式的物质;深空环境资源是指星表天体或深空环境中独特的大气/真空、重力、磁场、温度条件、太阳辐射、宇宙辐射等;深空位置资源是指星表或空间中独特的地理地势、轨道位置。深空资源利用可定义为将深空天体及空间的物质、环境、位置等元素转化为可满足深空探测原位长期科研作业、可靠生存驻留、自主维修维护等任务需求,以及丰富地球资源供给手段、扩展人类生存空间等各种要素的过程。其中,深空物质资源利用是破解地球矿产资源枯竭难题、承载人类文明永续发展愿景的必然途径。

## 1 深空物质资源概述

深空物质资源主要富集于月球、火星、小行星等天体,是人类取之不尽、用之不竭的资源宝库,具有广阔的开发利用前景。例如月球、火星和小行星等地外天体含有人类生产、生活所需的氦-3(<sup>3</sup>He)、钍/铀/钍稀贵金属、水冰等资源,有望催生地外天体采矿、在轨建造、地外基地运营等新兴产业形态,

服务人类社会可持续发展。

### 1.1 月球物质资源

月球是距离地球最近的天体,已探测到的有较大利用潜力的物质资源主要包括氦-3、水冰、稀贵金属矿物等。

氦-3是理想的核聚变原料,其与氘核反应既不产生高能中子也不产生放射物质,月球氦-3的总储量约为 $10^6$  t<sup>[5]</sup>,若实现可控聚变发电可为人类供应数千年能源。月球水冰赋存于极区的永久阴影坑,月球观测和遥感卫星(LCROSS)于2009年撞向南极凯布斯(Cabeus)的永久阴影区,测得该区的水冰丰度为 $5.6\pm 2.9$  wt%,据此数据推算,全月水冰总量为 $10^8$  t。月球矿物种类主要有玄武岩(辉石、钛铁矿、橄榄石)、斜长岩(钙长石)、克里普岩等,矿物化学成分主要是二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )、氧化钛( $\text{TiO}_2$ )、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )等(表1)。其中,钛铁矿( $\text{FeTiO}_3$ )分布在月海,静海区域钛含量约为12 wt%,贫钛区域钛含量约为1 wt%,全月钛铁矿总量约150万亿t;克里普岩(KREEP)主要分布在月球高地,富含钾、稀土元素、磷及钍、铀等放射性元素<sup>[6]</sup>。

表1 采样返回月壤的主要化学成分

(wt%)

样品成分	阿波罗(Apollo)任务						月球(Luna)任务		嫦娥五号
	11号	12号	14号	15号	16号	17号	16号	20号	
$\text{SiO}_2$	42.20	46.17	48.10	46.20	45.09	39.87	43.96	44.95	42.20
$\text{TiO}_2$	7.80	3.07	1.70	2.16	0.56	9.42	3.53	0.49	5.00
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13.60	13.71	17.40	10.32	27.18	10.97	15.51	23.07	10.80
$\text{FeO}$	15.30	15.41	10.40	19.75	5.18	17.53	16.41	7.35	22.50
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$\text{MgO}$	7.80	9.91	9.40	11.29	5.84	9.62	8.79	9.26	6.48
$\text{CaO}$	11.90	10.55	10.70	9.74	15.79	10.62	12.07	14.07	11.00
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.30	0.35	0.23	0.53	0.11	0.46	0.29	0.15	—
$\text{Na}_2\text{O}$	0.47	0.48	0.70	0.31	0.47	0.35	0.36	0.35	0.26
$\text{K}_2\text{O}$	0.16	0.27	0.55	0.10	0.11	0.08	0.10	0.08	0.19
$\text{MnO}$	0.20	0.22	0.14	0.25	0.07	0.24	0.21	0.11	0.28
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.05	0.10	0.51	0.06	0.06	0.13	0.21	0.08	0.23
合计	99.78	—	99.83	—	—	99.29	—	99.96	98.94

### 1.2 火星物质资源

火星是太阳系中与地球最为相似的行星,有望成为人类星际移民的第一站。火星含有丰富的大气、水冰与矿物等物质资源。

火星大气稀薄,年平均气压约为750 Pa(不到地球1%),成分为95.3%的二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、2.7%的氮气( $\text{N}_2$ )、1.6%的氩气(Ar),以及微量的氧气( $\text{O}_2$ )、一氧化碳(CO)和水( $\text{H}_2\text{O}$ )。二氧化碳可用于生产

含碳化合物、氧气,以及作为金属/二氧化碳火箭发动机的燃料<sup>[7]</sup>。火星水资源主要以水冰形式赋存于北极冰盖及南极二氧化碳冰盖下方。在中高纬地区,美国“凤凰号”探测器的勘探结果表明,碎石表层下方也存在冻土和少量纯净水冰<sup>[8]</sup>。中低纬地区,地表或地下沉积层也有大量矿物水。火星水冰总体积预计超过 500 万 km<sup>3</sup>。火星矿物主要包括页硅酸盐(高岭石、蒙脱石、云母等)、长英(石英、长石、熔料长石等)、碳酸盐(六水方解石、文石、铁白云石等)、硫酸盐(黄钾铁矾等)、镁铁质(橄榄石、辉石、斜辉石、单斜辉石等),以及石膏、高氯酸盐和其他盐类。从化学成分来看,与地球、月球及部分小行星相似,火星土壤主要是二氧化硅、氧化铝、氧化镁等成分(表 2)<sup>[9]</sup>。

表 2 火星土壤主要化学成分 (wt%)

样品成分	表层火壤	赤铁矿边缘火壤	勃朗峰火壤
SiO <sub>2</sub>	45.50	41.90	44.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.80	8.10	8.80
MgO	7.20	7.00	7.20
CaO	7.52	6.27	6.82
K <sub>2</sub> O	0.48	0.43	0.48
TiO <sub>2</sub>	1.09	0.83	1.07
SO <sub>3</sub>	4.68	4.68	7.29
FeO	20.10	26.50	19.00
Na <sub>2</sub> O	1.40	1.60	1.70
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.82	0.83	0.94
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.52	0.37	0.37
(K、Na、Mg)ClO <sub>4</sub>	0.43	0.46	0.54
MnO	0.40	0.32	0.37
合计	98.94	99.29	99.28

### 1.3 其他星球物质资源

太阳系中小行星根据轨道分为火星和木星轨道之间的主带小行星和近地小行星,其中,主带小行星数量超过 50 万个。根据光谱特性,小行星分为 C 型、S 型、M 型等。C 型小行星主要含碳以及水合矿物,数量占比为 75%;S 型小行星主要含硅、铁、镁等,数量占比为 17%;M 型小行星主要由铁、镍构成,部分 M 型小行星富含铂、钴、铈、铀、钚等珍稀金属,相比于 C 型、S 型小行星,此类小行星数量较少。以 M 型小行星灵神星为例,其直径约为

200 km,是迄今为止太阳系中质量最大的一颗小行星,其 95% 以上物质是金属,预计含 5 亿吨铁、5 千万吨镍以及数亿吨其他稀有金属<sup>[10]</sup>。美国计划 2023 年 10 月发射“灵神星”探测器,对其形成演化、地质特征、物质组成等开展研究。

太阳系中其他星球也含有丰富的资源,例如,木星、土星含有氨-3,天王星、海王星有氢、氨、甲烷,木卫二有液态海洋等。上述星球距地球遥远、环境极端、能源获取困难,因此考虑到技术难度和经济性,月球、火星、近地小行星的物质资源利用方案具有较高可行性。

## 2 深空物质资源利用技术研究进展

为降低星球基地、科研站运行成本,提高自主性和可靠性,减小运行风险,主要航天国家纷纷围绕挥发分开采利用、星球大气资源利用、矿产资源开采冶炼、星表原位制造建造等技术开展了研究,并且实现典型技术的在轨验证。

### 2.1 星球挥发分开采利用技术

挥发分指固体样品中通过撞击、加热等物理过程,能够以气相方式从样品中脱离的物质成分,比如月球氨-3、水冰、硫化氢,火星水冰,小行星水冰等。其中,氨-3 和水冰最具代表性,氨-3 可作为核聚变燃料,提供能源;水冰可为深空探测活动提供生命保障物资,还可以制备氢气、氧气等燃料,以支持人类进一步探索更远深空。

早在 1985 年,美国阿波罗(Apollo)任务带回的月球样品中就已发现氨-3。研究认为,氨-3 溶解在月壤颗粒中,高温加热提取氨-3 耗能高、速率慢。“嫦娥五号”样品的研究发现,月壤玻璃层中存在大量直径 5~25 nm 的氨气泡,且大部分气泡都位于钛铁矿月壤颗粒表面的玻璃层与晶体的界面附近(图 1),因此使用机械破碎法就可以在常温下提取以气泡形式储存的氨-3<sup>[11]</sup>。

针对月面浅表层或次表层的水冰资源开采,蜜蜂机器人公司(Honeybee Robotics)提出了潜入式挥发分提取装置(MISWE)(图 2(a)),将机具以螺旋钻进的方式钻入月壤,再通过冲击破碎或回转切

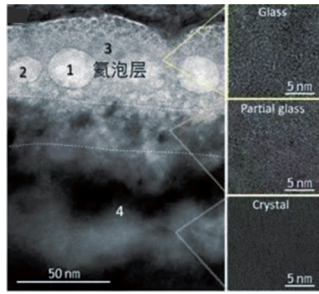


图1 钛铁月壤颗粒表面的氮气泡

削将月壤颗粒转移至加热装置,实现水汽提取<sup>[12]</sup>。2019年NASA支持的“创新先进概念”(NIAC)计划中,科罗拉多矿业学院提出原位加热式提取方案,通过太阳能、电加热等方式加热浅表或次表层含冰月壤,水冰受热挥发后通过冷阱装置捕获收集<sup>[13]</sup>。英国开放大学进行了低温真空条件下低功耗微波月壤水冰提取实验,在25 min内,可从含冰模拟月壤中提取60%左右的水分<sup>[14]</sup>。钱学森空间技术实验室提出光热钻取一体化开发利用方案(图2(b)),并进行了含冰模拟月壤取水地面试验验证,结果表明,针对含水率5 wt%的模拟月壤,该装置的水提取速率为30 g/h<sup>[15]</sup>。

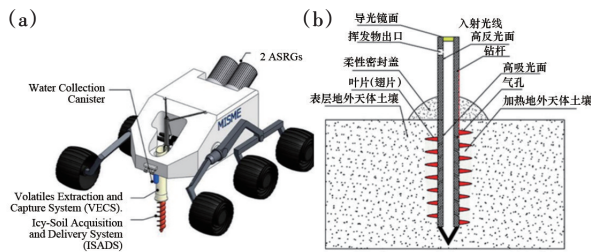


图2 潜入式挥发分提取装置(a)和光热钻取一体化水冰利用方案(b)

探测数据表明,火星极有可能存在水冰资源。研究认为,可利用的火星水资源包括两极冰盖中的水冰、火壤中的水分,以及火星大气中的水汽。火壤中的水提取技术与月面取水类似,而针对火星两极的冰盖,可参考地球极区取水的罗德里格斯井(Rodriguez Well)技术(图3),利用大型钻具穿透表层,将地下冰盖融化形成一个液态水池后再进行抽取。虽然该技术可实现火星极区地下水的大规模采集,但能耗较高、效率较低<sup>[16]</sup>。

目前月球或火星水冰开采后的利用主要围绕

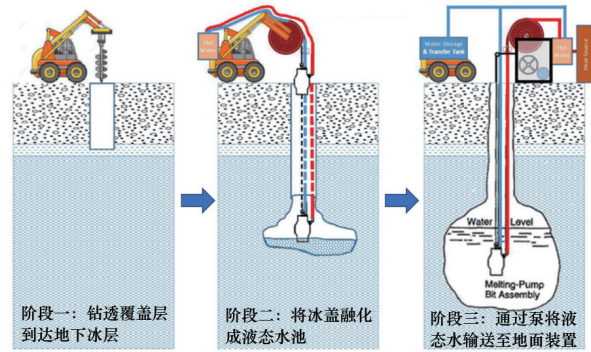


图3 Rodriguez Well技术取水示意

低重力环境下水的电解制氢氧展开,相关技术已经应用在空间站中物化再生环控和生命保障系统。国际空间站俄罗斯舱段电解制氧装置采用流动碱式电解芯体与静态水气分离器的技术方案,美国舱段使用的是质子交换膜(PEM)电解水制氧装置技术。中国空间站环控生保系统采用PEM电解水技术,同时结合空间微重力环境下气液分离、两相流管理等关键技术,保证了空间站氧气资源100%再生,水资源闭合度提升到95%以上,每年减少上行补给6 t,主要技术指标达到世界领先水平。

国内各研究团队在新型电解水催化剂探索方面也有较大进展,包括磁控溅射法制备的高熵合金薄膜<sup>[17]</sup>,价态演化调控镍铁氢氧化物催化剂,以及月壤作为催化剂的探索研究等<sup>[18]</sup>,都为未来的星壤水冰资源利用提供了新的技术思路。

## 2.2 星球大气资源利用技术

对于有大气的星球,若以大气为原料,原位制备推进剂、水、氧气、食物、能源等物资,将具有重要意义,比如火星二氧化碳资源化利用。

有效利用火星中的二氧化碳主要有2种方法:碳捕获和存储以及碳转化技术。碳捕获和存储技术旨在通过捕集火星大气中的二氧化碳并改变气压和温度来转变其状态,从而获得高压气流和液态/超临界态的二氧化碳射流。液态和超临界态的二氧化碳可以用于装置表面清洁,也可基于射流破岩完成岩石切割和岩芯钻取等任务<sup>[19]</sup>。

碳转化技术旨在将火星表面丰富的二氧化碳资源转化为高附加值的燃料和生保物资,实现地外人工碳循环过程。其中,高温固态氧化物电解池

(SOEC)是一种全固态结构的能量与物质转换器件,具有高效、清洁和无污染等优点,可直接将二氧化碳高效转化为一氧化碳和氧气,在深空探测领域有广阔的应用前景。2021年,搭载在“毅力号”火星车上的火星制氧原位资源利用实验载荷(MOXIE)实现人类首次地外天体原位资源利用在轨验证,目前已完成16次制氧实验,总共成功产生了122 g氧气(图4)<sup>[20]</sup>。除了SOEC电解纯二氧化碳制氧技术,水/二氧化碳共电解技术也可以在电解池的阴极产生丰富的氢气和一氧化碳,它们可进一步经过费托合成转化为甲烷。美国爱达荷州国家实验室在800℃下利用单体SOEC进行了高温共电解水/二氧化碳的实验,在电堆的下游增加了甲烷反应器,从而在产物气中获得40%~50%体积浓度的甲烷,初步实现了高温共电解水/二氧化碳合成燃料的设想<sup>[21]</sup>。

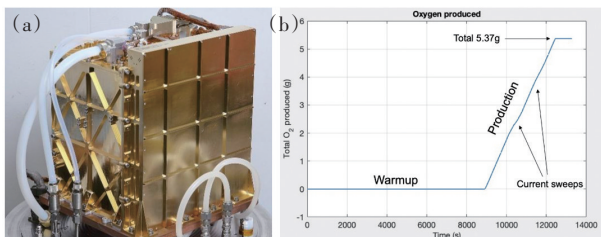


图4 MOXIE装置(a)及其首次火星产氧实验(b)

### 2.3 矿产资源开采冶炼技术

月球、火星及小行星等星球上含有丰富的矿产资源及稀有物质,可以冶炼得到金属/非金属/合金用作星球基地、科研站建筑材料,同时制备氧气作为生保物资。

由于长期经受太阳风化作用,月球、火星等星球表面的矿物资源主要以星壤、星岩等形态赋存。月壤开采利用方面,NASA开展了月壤采矿机器人(RASSOR)技术研究,其中以双滚筒铲斗挖掘机最具代表性(图5)<sup>[22]</sup>,在两侧使用反向旋转的滚筒铲斗,能够减小水平和垂直方向的反作用力,具有多

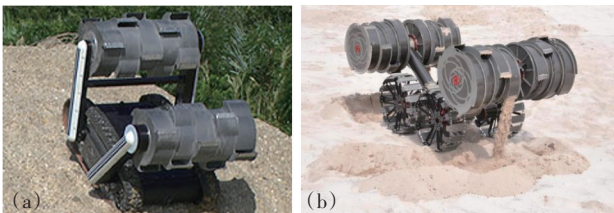


图5 NASA双滚筒铲斗挖掘机

地形适应性、反向运行、卸料方便等优点。

针对月壤矿物冶炼技术,国外重点开展了氢还原法、碳热还原法、电解法、离子液体电解法、真空热分解法、等离子体分解法等技术研究。其中氢还原法、碳热还原法、电解法的研究较为全面,技术成熟度较高,但氢还原法和碳热还原法中还原剂的回收率较低;离子液体电解法、真空热分解法、等离子体分解法等正处于概念研究和原理验证阶段,技术成熟度较低。

洛克希德·马丁公司、NASA格伦研究中心分别研制了氢还原月壤制氧原理样机PILOT(图6(a))<sup>[23]</sup>和ROxygen<sup>[24]</sup>,并开展了地面原理试验,由于氢气仅能还原模拟月壤中的一部分钛铁矿,氧气产率相对较低,约为1%~2%。英国开放大学构建了氢还原模拟月壤制氧实验台<sup>[25]</sup>,选用纯度为95%的钛铁矿作为原料,最大理论产氧量可达10.5 wt%。西班牙塞维利亚大学以太阳能聚光为能源,搭建了氢还原模拟月壤制氧中试样机,模拟月壤还原速率约为25 kg/h<sup>[26]</sup>。NASA研发了碳热还原月壤制氧先导试验台,氧气产率为2%~15.6%,碳回收率为52.6%~83.3%<sup>[27]</sup>。2023年,NASA成功地在模拟月球环境下利用碳热还原法从约翰逊航天中心(JSC)-1模拟月壤中制备氧气,单位能耗的产氧量为10.77~13.42 g/kWh(图6(b))<sup>[28]</sup>。

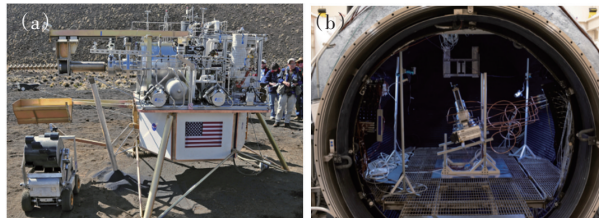


图6 氢还原(a)和碳热还原(b)月壤制氧原理样机

麻省理工学院在1600℃下将不含铁的JSC-1模拟月壤熔融后电解(图7(a)),平均电流效率为60%~100%,氧气产率为35%<sup>[29]</sup>。目前,美国蓝色起源(Blue Origin)、月球资源(Lunar Resources)、蓝移(Blueshift, LLC)及以色列赫利俄斯(Helios)等商业公司也在积极开展月壤直接熔融电解制氧技术研究。ESA与空间应用服务公司采用熔盐电脱氧工艺从模拟月壤中制取氧气,以氯化钙与其他氯化物

共晶混合物( $\text{CaCl}_2 \cdot X\text{Cl}$ ,  $X=\text{Li}、\text{K}、\text{Na}$ )替代单一的氯化钙( $\text{CaCl}_2$ )熔盐,可将电解温度降低至 $660^\circ\text{C}$ ,计划2025年进行月面试验验证<sup>[30]</sup>。

中国对矿物冶炼已经开展一些研究工作。中国科学院地球化学研究所开展的氢气还原铁矿制取水实验,每生产1.5 kg的水需处理120 kg模拟月壤,能耗为6 MWh<sup>[31]</sup>。东北大学在 $960^\circ\text{C}$ 的冰晶石( $52.7\%\text{NaF}-47.3\%\text{AlF}_3$ )熔盐中电解模拟月壤,阳极气体中氧气体积分数为97.10%,阴极的产物为56.70%铝( $\text{Al}$ )和40.80%硅( $\text{Si}$ )<sup>[32]</sup>。北京科技大学在氯化钙熔盐体系使用了二硼化钛( $\text{TiB}_2$ )阳极,恒电位电解100 h后腐蚀速率低至 $1.38 \times 10^{-3} \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{h})$ <sup>[33]</sup>。武汉大学设计了由熔融氯化钙电解槽和熔融碳酸盐电解槽组成的双电解槽系统(图7(b)),依次将月壤转化为金属和二氧化碳,二氧化碳转化为碳和氧气<sup>[34]</sup>。

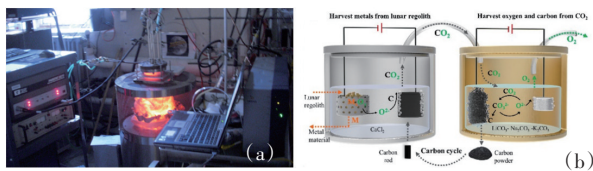


图7 月壤熔融电解(a)和月壤熔盐电解(b)

火星原位资源利用以二氧化碳为主,针对矿产资源的研究目前还较少。NASA指出在火星上金属冶炼的化学和热力学约束与地球类似,可以采用氢还原法、一氧化碳还原法从火壤或矿物中还原出铁,而氢气和一氧化碳可分别从火壤水冰、大气二氧化碳中获得<sup>[35]</sup>。北京理工大学提出使用生物方法转化火壤高氯酸盐进行原位制氧的设想,并对工艺过程、影响因素、行星保护等问题进行了分析<sup>[36]</sup>。NASA提出火星湿法加工技术(MAPS),通过酸性离子液溶解火壤、酸碱度调节、分离、沉淀等工艺,获得高纯度氧化物,并通过进一步化学反应获得氧气和金属(图8)<sup>[37]</sup>。

#### 2.4 星表原位制造建造技术

鉴于高昂的深空往返运输成本,基于储量巨大的星壤基材料开展功能件和构筑物原位制造与建造,是持续性和大规模开展地外星球驻留、星表作业和科学与应用研究的重要基础。

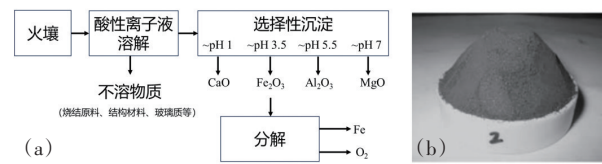


图8 MAPS技术原理(a)及富集的氧化铁(b)

按照对地球资源的依赖程度,星表原位制造建造技术可分为有添加剂和无添加剂2种技术路线;按照制备工艺可分为常温固结和高温固结2种技术路线。其中,常温固结技术,主要包括光固化成型、碱激发星壤地质聚合物及粘接剂喷射等;高温固结技术,主要包括选择性激光融化、太阳能聚光粉床熔覆、微波烧结等。

光固化成型技术将光敏树脂与月壤混合,再用特定波长与强度的光源照射使混合物固化。中国科学院太空制造技术重点实验室自主研发了面曝光立体光刻陶瓷3D打印机和满足低重力条件的浆料,成功烧结出抗弯强度为108.8 MPa、抗压强度为222.8 MPa的结构件样品,但该工艺需较多添加剂(图9(a))<sup>[38]</sup>。

粘接剂喷射技术是一种基于粉末粘合剂的喷墨增材制造技术,以D型打印(D-shape)技术为代表。该技术使用粘度低且表面张力高的液体油墨六水合氯化镁( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )的饱和溶液(约65 wt%),与月壤中的氯化镁( $\text{MgO}$ )通过化学反应结合,形成了具有良好拉伸强度以及韧性的结构件。2010年,ESA成功开展了基于粘接剂喷射技术的蜂巢结构成型实验(图9(b))<sup>[39]</sup>。

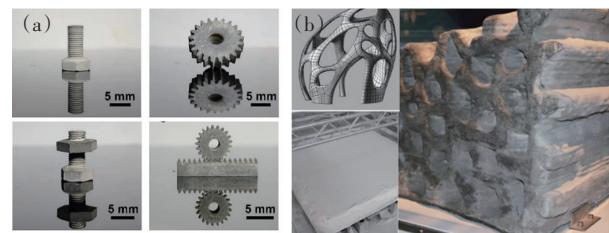


图9 光固化成型样品(a)和D-shape成型过程与成型结构(b)

碱激发星壤地质聚合物是一种以天然矿物、固体废弃物或人工硅铝化合物为原料制备的具有硅铝四面体三维网络结构的聚合凝胶体。2022年北

京航空航天大学利用北航(BH)-1模拟月壤混合碱激发剂制备的浆体进行月壤3D打印,研究了不同水胶比和打印温度对材料流变时变行为的影响、流变参数与材料3D打印工作性能的关系、不同打印填充率对3D打印试件强度的影响规律,据此获得打印件性能较优的工艺参数(图10)<sup>[40]</sup>。

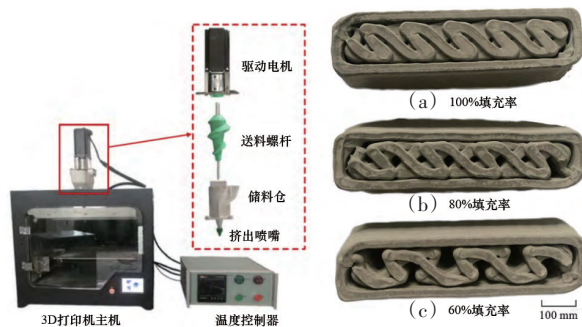


图10 月壤地质聚合物增材制造设备及样品

选择性激光熔化(SLM)技术是基于集中的激光热源对粉末进行紧凑型烧结的技术。该技术可以制造高熔点材料,如陶瓷粉末和复杂的多相土壤。2016年,拉夫堡大学等使用SLM打印模拟月壤以获得晶格结构(图11),获得了抗压强度为 $4.2\pm 0.1$  MPa的网状结构件<sup>[41]</sup>。2019年中国航空发动机研究院、北京航空航天大学和北京科技大学利用SLM技术对模拟月壤进行增材制造,使用最小的激光输出功率,以最快的速度完成激光选区融化成型,成形件具有较好的几何精度和力学性能<sup>[42]</sup>。

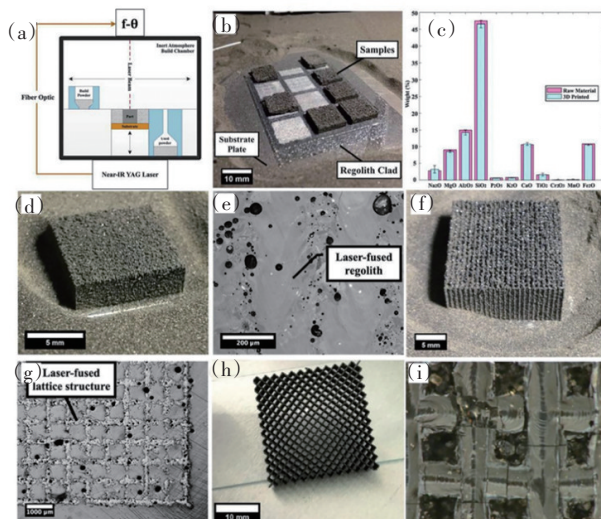


图11 选择性激光烧结样品

太阳能聚光粉床熔覆熔融技术利用聚光太阳能直接将月球土壤逐层烧结成型。美国物理科学公司(Physical Sciences Inc.)研究了使用菲涅尔透镜聚光、石英光纤导光烧结试验,由于汇聚光斑较大(约3 cm)且有散焦问题,成型体几何形状精度较低<sup>[43]</sup>。哈尔滨工业大学搭建了太阳光增材制造原型系统,以菲涅尔透镜聚光器汇聚太阳光开展了模拟月壤和沙漠砂等多种材料的粉床熔覆原型试验,获得了强度较高的可定制形状的结构件(图12)<sup>[44]</sup>。

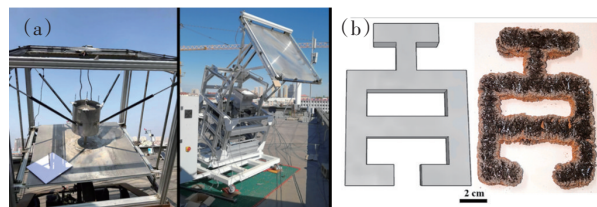


图12 太阳光粉床熔覆增材制造原型系统(a)及成型样品(b)

微波在模拟月壤中具有良好的穿透深度,可有效地加热材料。田纳西大学研究发现2.45 GHz微波可以穿透模拟月壤至65 cm,并据此提出了采用选择性微波烧结(SMWS)方法进行模拟月壤成型的技术路线<sup>[45]</sup>,但在烧结过程中由于升温速度很快和微波场强不均匀等缺点,很容易导致在样品内部产生温度梯度,从而导致烧结产品出现裂纹等缺陷。

### 3 深空物质资源利用未来展望

深空物质资源作为人类的共同财产,承载着人类文明可持续拓展的愿景,是未来深空探测的重要研究方向。深空物质资源利用包括勘查、开采、分选、冶炼、建造等多个环节,深空环境和地球环境存在较大区别,为实现中国相关技术快速发展,服务星表科研站、星球基地建设和运营,后续研究工作可以从以下5个方面深入开展。

#### 3.1 全面详实的物质资源勘查技术

资源勘查是深空物质资源利用的第一步。深空物质资源勘查可为研究星球演化和资源汇聚规律提供原始资料,拓展人类对深空物质资源认知的理论体系。深空物质资源勘查需要针对不同星球

的资源概况、环境特点,借鉴现有的地球资源勘查技术和方法,充分借鉴和吸收以往的深空探测任务成功经验,制定资源勘查规范,并通过环绕、飞跃、巡视、采样返回等多种任务手段,采用地质、物探、化探及钻探等方法<sup>[46]</sup>,对深空物质资源进行系统勘查,查明其物质组成、赋存形态、储量规模、矿物品位等特征。在此基础上,选定资源富集区,计算相关资源储量,评估经济价值,为深空物质资源利用奠定基础。

### 3.2 环境适应的物质资源开采技术

月球、火星、小行星具有低/微重力环境,导致作业设备的重量不足以为挖掘机具提供足够反作用力,反作用力用于穿透堆积密度很高的表层星壤,不能为钻进机具提供开采水冰、星岩等硬质块状资源的大钻压条件<sup>[12]</sup>。因此,针对星壤采掘,可使用不依赖移动系统牵引力或重量的对称滚筒铲斗技术,借助反作用力抵消低重力环境中的挖掘力<sup>[22]</sup>。针对星岩、水冰钻取,可采用机具尺度小、作业功耗需求低的蠕动掘进、超声辅助贯入等技术,降低对作业设备尺度、重量的要求。

### 3.3 高效节能的物质资源转化技术

开采后的水冰、星壤、矿石等资源需要经历提纯、冶炼、制造等转化过程,例如,通过氢还原月壤制氧、电解月壤熔融物制氧、月壤选择性激光熔化成型等技术,支持星表科研站、基地建设运行。上述转化过程通常能耗较大,在星表能源受限情况下,节能变得尤为重要。因此,探索低能耗物质资源提取转化技术、星表环境下能量梯级利用技术,将成为深空物质资源转化领域可持续发展的关键因素,为深空物质资源的高效利用,深空星表的长期驻留,以及人类未来开展更大规模、更高频次的太空活动提供支持。

### 3.4 智能可靠的资源利用装备技术

深空物质资源利用系统需要多器协同完成星表资源的开采、分选、冶炼、制造等流程,而星表环境复杂、任务周期长、与地球通信存在较大时延等约束条件,要求深空物质资源利用系统相比传统探测器具备更高的可靠性和自主智能性。因此,需要进行新材料、新工艺研究,以提升装备耐候性,并适

应高低温交变、宇宙射线、星壤/星岩磨损环境等极端作业条件。通过人工智能技术将提升设备在任务规划、命令执行、器上状态监测与故障发生时的系统重构能力,最终实现无地面操控和无人参与情况下的自主安全运行。

### 3.5 全程拟实的等效考核验证技术

星球物质宏微观形态与物理特性、深空真空/复杂大气、低/微重力、大温度交变,以及强辐射、高陨石撞击风险等极端环境条件,对深空物质资源利用活动产生了重要影响。传统的星球物质模拟与制备技术主要侧重于探测载荷定标和力学等效验证,矿物组成和应用场景较为单一。而以深空物质资源利用为目标的模拟物对矿物组成、粒形粒貌、等效范围、含冰星壤赋存状态等方面具有更高的要求。在星球环境及作业场景模拟方面,国内外尚缺乏深空物质资源利用模拟试验条件,应建立服务于深空物质资源利用的高水平研究平台,开展全流程、大尺度、多频次、高拟实的实验研究,探索与验证深空物质资源“查一采一选一冶一造”全链条的技术方案,有力支撑深空物质资源利用任务实施。

## 4 结论

随着人类对资源的需求量和开采量日益增加,全球将面临资源枯竭的危机。深空物质资源不仅是地球资源的重要补充和储备,也是确保可持续深空探测和地外科研站长期自主建设、运行与维护的物质基础。NASA 率先启动了深空物质资源利用预先研究,并以月球物质资源利用为重点,开展了月球挥发分开采利用、月壤开采冶炼、月壤 3D 打印等地面试验验证;在火星二氧化碳利用方面,开展了小规模氧气提取在轨试验等探索性研究工作。中国深空物质资源利用研究起步晚,应尽快启动相关体系架构规划、发展路线图制定等工作,针对深空物质资源利用的“查一采一选一冶一造”等技术环节,牵引相关单位开展关键技术攻关,以期在取得丰富科学与应用研究成果的同时,有力支撑深空探测事业发展,拓展地月空间经济圈,服务人类社会文明进步。

## 参考文献(References)

- [1] 吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报, 2014, 1(1): 5-17.
- [2] 国家航天局. 国际月球科研站合作指南[EB/OL]. (2021-06-16)[2023-07-31]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6812147/content.html>.
- [3] 中华人民共和国中央人民政府门户网站. 国家航天局与亚太空间合作组织签署关于国际月球科研站合作联合声明[EB/OL]. [2023-07-31]. [https://www.gov.cn/lianbo/2023-04/25/content\\_5753104.htm](https://www.gov.cn/lianbo/2023-04/25/content_5753104.htm).
- [4] 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.
- [5] Fa W, Jin Y Q. Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer[J]. Icarus, 2007, 190(1): 15-23.
- [6] Zong K, Wang Z, Li J, et al. Bulk compositions of the Chang'e-5 lunar soil: Insights into chemical homogeneity, exotic addition, and origin of landing site basalts[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2022, 335: 284-296.
- [7] 王志琴, 李孟哲, 张津泽, 等. 火星探测用金属/CO<sub>2</sub>燃烧技术研究进展与展望[J]. 宇航总体技术, 2019(5): 61-70.
- [8] Mellon M T, Arvidson R E, Sizemore H G, et al. Ground ice at the phoenix landing site: Stability state and origin[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(E1): 288-293.
- [9] 冯磊, 舒文祥, 文陈, 等. 火星原位资源可用途径分析[J]. 材料导报, 2022, 36(22): 3-9.
- [10] 张克非, 李怀展, 汪云甲, 等. 太空采矿发展现状、机遇和挑战[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6): 1025-1034.
- [11] Li A, Chen X, Song L, et al. Taking advantage of glass: Capturing and retaining the helium gas on the moon[J]. Materials Futures, 2022, 1(3): 035101.
- [12] Zacny K, Chu P, Paulsen G, et al. Mobile *in-situ* water extractor (MISWE) for Mars, Moon, and Asteroids *in situ* resource utilization[C]//AIAA SPACE 2012 Conference & Exposition. Pasadena, California: 2012: 5168.
- [13] Sowers G F, Dreyer C B. Ice mining in lunar permanently shadowed regions[J]. New Space, 2019, 7(4): 235-244.
- [14] Cole J D, Lim S, Sargeant H M, et al. Water extraction from icy lunar simulants using low power microwave heating[J]. Acta Astronautica, 2023, 209: 95-103.
- [15] 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.
- [16] 靳宇, 舒文祥, 张伟伟, 等. 火星水冰采集技术发展现状与方案设想[J]. 载人航天, 2020, 26(1): 128-134.
- [17] Wang S, Xu B, Huo W, et al. Efficient FeCoNiCuPd thin-film electrocatalyst for alkaline oxygen and hydrogen evolution reactions[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2022, 313: 121472.
- [18] Zhong Y, Low J, Zhu Q, et al. *In situ* resource utilization of lunar soil for highly efficient extraterrestrial fuel and oxygen supply[J]. National Science Review, 2023, 10(2): nwac200.
- [19] Perera M S A, Ranjith P G, Viète D R. Effects of gaseous and super-critical carbon dioxide saturation on the mechanical properties of bituminous coal from the Southern Sydney Basin[J]. Applied Energy, 2013, 110: 73-81.
- [20] Hoffman J A, Rapp D, Hecht M. The Mars oxygen ISRU experiment (MOXIE) on the Mars 2020 rover[C]//AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition. Pasadena, California: 2016, 82-87.
- [21] O'Brien J E, Mckellar M G, Harvego E A, et al. High temperature electrolysis for large-scale hydrogen and syngas production from nuclear energy—summary of system simulation and economic analyses[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(10): 4808-4819.
- [22] Robert P M. Regolith advanced surface systems operations robot (RASSOR) excavator: U.S. Patent 9,027,265 [P]. 2015-03-12.
- [23] Clark D. Field test results of the PILOT hydrogen reduction reactor[C]//AIAA Space 2009. Pasadena, CA: International Astronautical Federation, 2009, 9: 14-17.
- [24] Lee A, Oryshchyn L, Paz A, et al. The ROxygen project outpost-scale lunar oxygen production system development at Johnson Space Center[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(1): 67-73.
- [25] Sargeant H M. Water from lunar regolith: Reduction by hydrogen for a small-scale demonstration of *in situ* resource utilisation for the Moon[D]. London: Open University (United Kingdom), 2020.
- [26] Denk T. Terrestrial demonstrator for the hydrogen extraction of oxygen from lunar regolith with concentrated solar energy[D]. Sevilla: Departamento de Ingeniería Energética, Universidad de Sevilla, 2022.
- [27] Gustafson R. 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. Orlando, Florida, USA: International Astronautical Federation, 2010: 1163.
- [28] Dunbar B. NASA successfully extracts oxygen from lunar soil simulant[EB/OL]. (2023-04-25) [2023-07-31]. <https://www.nasa.gov/feature/nasa-successfully-extracts-oxygen-from-lunar-soil-simulant>.
- [29] Shchetkovskiy. Development and testing of high surface area iridium anodes for molten oxide electrolysis[M]//Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. New

- York: American Society of Civil Engineers, 2010: 1039–1045.
- [30] Space Applications. ESA awards space resources contract to space applications services[EB/OL]. (2012–05–21) [2023–07–31]. <https://www.spaceapplications.com/news/esa-awards-space-resources-contract-to-space-applications-services>.
- [31] Li Y, Li X, Wang S, et al. *In-situ* water production by reducing ilmenite[J]. Moon: Prospective Energy and Material Resources, 2012: 189–200.
- [32] 刘爱民. 混合氧化物及月壤仿真样提取金属和制备氧气[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [33] 寇明银, 王明涌, 焦树强. 高温熔盐体系惰性阳极与月壤电解制氧技术[J]. 工程科学学报, 2021, 43(12): 1618–1629.
- [34] Shi H, Li P, Yang Z, et al. Extracting oxygen from chang'e-5 lunar regolith simulants[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(41): 13661–13668.
- [35] Stoker C R, Gooding J L, Roush T, et al. The physical and chemical properties and resource potential of Martian surface soils[J]. Resources of Near-earth Space, 1993: 659–707.
- [36] 李艳菊, 吴月, 范春萍, 等. 火星表面高氯酸盐生物转化及原位制氧工艺技术[J]. 空间科学学报, 2020, 40(4): 531–539.
- [37] Enke B L. Mars: Prospective energy and material resources[M]. Bucharest: Springer Science & Business Media, 2009.
- [38] Wang C, Gong H, Wei W, et al. Vat photopolymerization of low-titanium lunar regolith simulant for optimal mechanical performance[J]. Ceramics International. 2022, 48(20): 29752–29762.
- [39] Ceccanti F. 3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil[C]//Proceeding of the 61st international Astronautical congress IAC. Prague, Czech Republic: International Astronautical Federation, 2010: 1–9.
- [40] 周思齐, 张荣荣, 杨湛宁, 等. 3D打印模拟月壤道路材料制备与性能研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35: 105–117.
- [41] Goulas A, Engström D S, Friel R J, et al. Investigating the additive manufacture of extra-terrestrial materials [C]//27th Annual International Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium—An Additive Manufacturing Conference. Austin, Texas: SFF, 2016: 2271–2281.
- [42] 李雯, 徐可宁, 黄勇, 等. 基于SLM的模拟月壤原位成形技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45: 1931–1937.
- [43] Nakamura T, Smith B K. Solar thermal system for lunar ISRU applications: Development and field operation at Mauna Kea, HI[C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florid: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2011: 1889–1896.
- [44] 王锐. 月壤资源太阳光3D打印工程材料化利用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [45] Taylor L A, Meek T T. Microwave sintering of lunar soil: Properties, theory, and practice[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2005, 18: 188–196.
- [46] 高楠, 许英奎, 罗泰义, 等. 月球矿产资源勘查进展及展望[J]. 矿物学报, 2022, 42(2): 222–230.

## Utilization of deep space matter resources: State of the art and prospects

WU Weiren, ZHANG Zhe\*, AO Xianze, JIA Xiu, ZHAO Yuan, YANG Honglun, ZU Lin, LING Lili

Deep Space Exploration Laboratory (Tiandu Laboratory), Hefei 230000, China

**Abstract** Deep space exploration embodies comprehensive national power and has become the commanding height of science and technology competition among the world's space powers. Deep space resource utilization is the key frontier of international deep space exploration, in which the utilization of matter resources is of great significance for humanity's space expansion. This paper introduces the connotation of deep space resource and summarizes the significance of its utilization. Focusing on matter resources, this paper investigates the state-of-the-art research on the volatile extraction and utilization, atmospheric resource utilization, mineral resource extraction and refining, and *in-situ* manufacturing and construction on planetary surfaces. Finally, this paper offers an outlook for the trends in utilization deep space matter resources, paving the way for the future research in deep space exploration.

**Keywords** deep space exploration; deep space material resources; *in-situ* resource utilization ●



(责任编辑 王微)