

月壤原位资源利用技术研究进展

徐桂弘¹, 李阳², 李瑞², 张曼¹, 唐则涛¹, 唐政¹

1. 贵州理工学院 土木工程学院, 贵州 贵阳 550001;
2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550001

中图分类号: TD989 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)04-0012-12
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.04.002

摘要 月球蕴藏着大量的金属与非金属矿产资源, 充分利用月球矿产资源, 可减少地球发射到月球的荷载, 节约深空研究、开发成本。对月壤原位资源利用中的月壤物理特性、模拟月壤材料固化成型工艺和提取冶金工艺的一般原理、基本过程、技术特点及最新研究进展情况进行了综述, 并对这些方法在月球矿物原位利用方面的应用前景进行了展望。

关键词 月壤; 资源利用; 原位成型; 冶金提取

原位资源利用技术是利用地外天体原位资源转化为空间任务所需各种产品的一系列技术手段。月球作为深空探测的前哨站和中转站, 原位资源利用技术可实现勘查和提取月球等天体上的可利用资源, 显著减少从地球发射到月球的荷载, 节省发射成本^[1]。

月球蕴藏着大量的金属与非金属矿产资源。据估算月球上钛铁矿的总资源量约为1.2万亿t^[1], 钛铁矿中太阳风注入的³He总资源量约为100~150万t^[2], 两极地区水冰的总资源量约数千万~数亿吨。月球表面除了山脉、撞击坑外, 还覆盖着一层月球土壤, 月壤主要成分包括橄榄石、斜长石、辉石、尖晶石、钛铁矿等碎屑, 角砾岩碎屑、各种玻璃物质陨石碎片等^[3], 如何从月表土壤中实现矿物分离提取氧气、金属等必备的物质材料是人类和机器人在月球上行动可持续性的关键。

1 月壤物理特性

月壤颗粒的宏观物理力学特性及微观形貌特征是研究月壤原位资源利用的基础。月壤长期经受微陨石轰击、太阳风注入、宇宙射线辐射等作用, 其微观形貌和几何形态复杂。统计结果表明, 嫦娥五号月壤95%的颗粒粒径集中在1.40~9.35 μm, 玻璃质含量约16.6%^[4], 嫦娥五号粗粒和细粒月壤的Is/FeO值分别

为15.9±10.8和64.4±5.6, 平均Is/FeO值约为30左右^[5], 接近不成熟型月壤。与阿波罗月海玄武岩地区样品相比, 嫦娥五号月壤在相似的颗粒密度(约3.1 g/cm³)情况下, 具有更低的质量密度(1.24 g/cm³; 阿波罗与月球号: 1.45~1.9 g/cm³)和更高的孔隙度(约61%; 阿波罗与月球号: 44%~52%)^[6], 嫦娥五号(0.56 m²/g)与阿波罗(0.52 m²/g)月壤的比表面积差别不大。

由于月壤颗粒粒径极为细微, 显微形貌、结构以及化学组成的原位微区分析通常需要在纳米级尺度分辨率开展, 对数据的准确获取造成了极大的困难。目前, 可查阅的数据表明, 月壤风化层所含的主要矿物有辉石、橄榄石、斜长石、钛铁矿和尖晶石等。2022年, 中科院地球化学研究所Guo Z等^[7-8]等在嫦娥五号月壤前期研究工作中, 首次证实亚微米级磁铁矿以及多种成因的纳米级单质金属铁的存在, 革新了学术界关于月壤形成与演化特征的一些基本认识。

月壤的物理力学性质研究主要涉及月壤压缩性和抗剪性, 月壤物理特性主要是由内聚力 c 和摩擦角 ϕ 两个指标决定。由于月壤颗粒表面多棱角、钩角、锯齿等不规则结构, 干燥状态的月壤内摩擦角变化范围较大(0°~53°), 内摩擦角约为33.3°, 内聚力 $c=1.0$ kPa^[9]。由于月壤样品稀少, 月壤的宏观力学性能及剪切性能大多以模拟月壤开展研究, 且在研究方法

收稿日期: 2023-06-14

基金项目: 深空探测实验室前沿科研计划(2022-QYKYJH-HXYF-023); 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]重点027); 贵州省科学技术基金项目(黔科合基础-ZK[2022]一般170)

作者简介: 徐桂弘(1979—), 女, 博士, 教授, 主要从事岩石力学、高速重载轨道及轨道动力学方向科研、教学工作。E-mail: smileanne@163.com。

通信作者: 李阳(1984—), 男, 博士, 研究员, 主要从事地球化学、天体化学研究工作。

上出现多种方式。吉林大学 Meng Zou 等^[10]通过月球车车轮识别月壤力学参数,对模拟月壤内摩擦角(φ)、和剪切变形模量(K)值进行识别,研究结果表明 GA-BP(遗传算法优化的反向传播神经网络)算法能准确、有效地在线识别风化层剪切参数。印度国家理工学院 T. Prabu 等^[11]通过循环三轴试验,对新型月球高地模拟模型 LSS-ISAC-1 在模拟月震条件下的动力特性进行了解释。在相对密度(30%、63%和80%)、围压(5~75 kPa)和频率不同的情况下,通过循环三轴试验确定剪切模量和阻尼比,以代表月球表面的松散、中等和密集状态。印度国家理工学院 Thannasi Prabu 等^[12]阐述了新研制的月球高原土壤模拟样品(LSS-ISAC-1)的抗剪强度参数、应力-应变关系和体积变化特性,对内摩擦角临界状态、剪胀角、杨氏模量、泊松比、内部可蚀性、小应变剪切波速、剪切模量等工程性质进行了评价。试验结果表明,该模拟月壤可以很好地代表实际的月球高原土壤。

此外,吉林大学 Xumin Sun 等^[13]提出了一种完全由天然斜长石复合材料制成的新型月球高原模拟月壤,并确定了化学成分、颗粒形态、粒径分布、比重、容重、最大和最小密度、抗剪强度等岩土特性,与 Apollo 16 月壤样品参数和其他现存高原模拟月壤的数据进行了对比,虽然无法替代阿波罗 16 号月壤样品,但是在矿物成分方面是相似的,且价格低廉,可以批量生产。佛罗里达大学 Maxim Isachenkov 等^[14]研制出一种新型月壤,通过 XRF、XRD、SEM、EDX、DTA、TGA、UV/Vis/NIR 光谱和激光衍射等方法进行了表征,发现与之前开发的模拟阿波罗月壤相似,可以很好地模拟月球风化层性质。

综上所述,目前针对月壤物理力学等特性研究,科学上重点关注其独特物质成分、探究其形成演化机理,由于样品稀少,主要依托于模拟样品开展相关研究,难以系统、精确地揭示其宏观物理特性与矿物组成、颗粒特征等的影响规律。

2 月壤原位成型制造技术研究进展

月壤风化层原位成型资源利用技术主要是指材料固化成型和“矿物提取及冶金”两类。月壤固化成型包括将月壤材料熔融固化成型、在月壤中加入外加剂将月壤固化成型或直接压制月壤成型。矿物提取及冶金主要通过使用化学介质、特殊的还原物质或加热手段,分离提取月壤中的氧气、金属、低价金属氧化物等。

目前国内外关于月壤的原位成型制造技术主要有4种:黏结成型、碱激发成型、烧结成型和3D打印技术^[15]。

2.1 月壤黏结成型技术

硫磺混凝土((Sulfur concrete)是用硫磺作为胶凝

材料,把原料加热到一定温度(140 ℃左右),使硫磺熔化,再经过搅拌、装模和冷却工序即可形成具有一定的强度的固体结构。硫磺混凝土具有较高的抗压、抗拉强度,具有较大的弹性模量,还具有一定的耐腐蚀性且可以熔融回收重复利用等优点。2005年, Toutanji 研究团队^[16-18]将加热熔融的硫磺和 JSC-1 模拟月壤以一定比例进行混合,得到力学性能良好的无水混凝土块;后续与 NASA 合作,评估了硫磺混凝土的抵抗冲击和月球辐射的能力,以及在真空条件下承受极端温度和热循环的能力。Richard N 等^[19]使用 JSC-1 模拟月壤激发剂、硫磺、SiO₂ 粉末等,制备了硫磺混凝土。2022年,伊朗阿米尔卡比尔大学 Mohammad Hossein Shahsavari^[20]研究在真空、微重力和不同温度条件下硫磺混凝土的工作性能及流动性能,发现硫含量增加会降低含硫混凝土的渗透性。

2.2 碱激发成型技术

地质聚合物混凝土是将硅铝酸盐骨料与碱性活化剂溶液混合,通过两者之间产生的脱水缩聚反应形成胶凝剂将骨料黏结起来而制得的混凝土材料。该概念在1991年由 Davidovits^[21]提出,美国 Carlos Montes 等在2015年首次尝试以模拟月壤为原料制备地质聚合物混凝土,将调制的碱性活化剂溶液与 JSC-1A 模拟月壤分别以 0.32 : 1 和 0.2 : 1 的比例进行混合,然后分别用常规浇筑法,在 60 ℃ 恒温环境中固化 72 h 制得。在此之后, Alexiadis 等与 NASA 合作以模拟月壤和模拟火星壤为原料,通过向原料中掺入 K₂SiO₃ 改变原料硅铝比,研究硅铝比对制得样品的力学强度的影响以及碱溶液浓度对样品性能的影响^[22]。2019年 Cai 等^[23]研究了 Ca(OH)₂ 和 P.I 52.5 水泥作为月壤混凝土钙质原料的效果,发现 Ca(OH)₂ 是更好的钙质原料来源。2020年美国宾夕法尼亚州立大学 Juliana Moraes Neves^[24]研究发现掺加 75% JSC-1A(模拟月壤)和 25% 硅酸盐水泥的砂浆在水化 28 d 时的抗压强度可达 30 MPa,北京航空航天大学 Siqi Zhou 等^[25-26]研究将铝(Al)材料、模拟月壤混合制备地质聚合物,发现该聚合物的力学性能良好,72 h 的抗压强度可达 38.2 MPa。捷克 Anna-Marie Lauermannová^[27]将模拟月壤、氯氧镁水泥(MOC)、石墨烯等按比例混合制备混凝土,当模拟月壤含量为 50% 时,试样的抗压强度高达 67 MPa。英国伯明翰大学 Jahinder Momi^[28]研究了模拟月壤与水、氢氧化钠(碱性剂)和尿素(高效减水剂)的混合流变性能。周兆曦^[29]对不同养护温度和 NaOH 掺量的模拟月壤进行无侧限抗压强度实验、X 射线衍射试验和扫描电镜实验,发现高温蒸养可提高材料的抗压强度。华中科技大学 Lixiong Cai 等^[30]以玄武质月球风化层模拟月壤为主要原料,将 Ca(OH)₂ 和 P.I 52.5 混合制备混凝土,发现 Ca(OH)₂ 能有效地提高混凝土的强

度,并能有效地促进目标水化产物的生成。Zhuojun Hu 等^[91]对铝酸盐混凝土、硫磺混凝土、镁硅混凝土、聚合物混凝土和地质聚合物混凝土等加入月壤颗粒后的力学性能进行了评价分析。

由于月壤的矿物成分类似于火山灰,富含硅铝酸盐,可通过硅铝质原料与碱发生化学反应生成起胶结作用的无定型凝胶,硬化后生成具有网络结构的地质聚合物。常用的碱激发剂有氢氧化钠、氢氧化钾、硅酸钠、硅酸钾等。月球风化层作为一种原位资源,已被证明可用作制备月球路面用地质聚合物的原料。ESA 利用火山灰材料制备了模拟月壤 DNA-1,并利用碱激发成功固结了模拟月壤^[32-33],国内也报道了利用 NaOH、水玻璃等激发并固结模拟月壤的研究。美国特拉华大学 Jennifer N. Mills 等^[34-35]在真空极端高温(60 °C)和低温(-80 °C)下,采用碱激发剂制备月壤地质聚合物,发现 60 °C 时地质聚合物固体结构抗压强度较大。Rongrong Zhang^[36]研究发现氢氧化钠(NaOH)可形成较高强度地质聚合物和致密的结构,当温度在 84.5~33.5 °C 之间变化时,该地质聚合物 72 h 抗弯抗压强度在 5.7~31.2 MPa 之间变化。

2.3 烧结成型技术

烧结技术是以月壤、无机材料为原料,经过成型、高温烧制工艺,可望在月球表面将月壤生产为特定属性和特定应用的结构部件,其强度主要来源于月壤再结晶形成的共价键,因此烧结成型构件会产生坯体致密化和再结晶,致密度增大、强度提高,但体积会出现收缩现象。早期的月壤烧结成型主要采用温控炉内加热的方式,得到的固体构件强度相对较低。NASA 前期研究表明,真实月壤颗粒的烧结温度约为 100~1 000 °C,恒温时间应达到 2~2.5 h 时,模拟月壤颗粒可胶结为整体。D A Altemir 等^[37]将模拟月壤在 253 MPa 的压力下,采用普通电炉升温技术,当温度达到 1 000 °C、持续时间为 30 min 时,烧结固体构件的强度在 14 MPa 左右。Rui Dou 等^[38]研究模拟月壤(CLRS-2)在 1 100 °C 和 1 150 °C 下烧结的样品的收缩率和力学性能,发现在空气中 1 150 °C 烧结的样品具有最高的烧结收缩率,力学性能最好,这可能是由于在烧结后形成了玻璃相和致密结构。Andrea Zocc 等^[39]采用差热分析法对 JSC-2A 模拟物在常温和惰性条件下的烧结和熔化行为进行了研究,并采用 X 射线衍射分析法测定了晶体峰上的矿物成分。

近几年随着试验条件的提高,月壤烧结成型技术研究出现了多种形式。Xiang Zhang 等^[40]研究了火花离子烧结技术(spark plasma sintering)对微观组织演变、相变和力学性能的影响机制,发现等离子烧结构件的强度可以达到普通混凝土的 10 倍以上。中国科学院 Lei Song 等^[41]研究了真空环境条件对低钛玄武岩模拟

月壤(CLRS-1)烧结的影响,发现在 1 100 °C 温度下真空烧结可获得密度为 1.19 g/cm³ 的多孔材料,该结构构件可望用于月球基地保温隔热结构部件。HAN W B 等^[42]通过 HUST-1 模拟月壤,对比了大气和真空环境下不同烧结结构构件的收缩变形特性,发现温度是影响烧结构件微观形貌的重要参数,随着温度的升高,烧结构件的逐渐密实,收缩变形逐渐增大,抗压强度可达 70 MPa。

微波烧结技术由于高效、加热均匀等优点,被认为是极具潜力的月壤原位加工方法。Young-Jae Kim 等^[43]通过对 KLS-1 型模拟月壤进行微波烧结,发现随着烧结温度的升高固体结构强度显著提高,在 1 120 °C 时,烧结固体结构强度为 37.0±4.8 MPa,在-100~200 °C 的循环温度应力下,热膨胀系数保持良好。Hailong Liao 等^[44]利用激光熔炼技术成功制备了月壤 Al、Si、Mg 复合材料,相对密度为 92.5% 的样品抗压强度为 264 MPa。Shayan Gholami 等^[45]研究微波烧结时间、温度等参数对模拟月壤致密化、微结构演变和力学性能的影响,显示微波烧结试样的孔隙率在 8.5%~11.5% 之间,烧结温度是影响微观结构的主要因素。

烧结成型制造技术及应用领域有了新的拓展,Robert E. Ferguson 等^[46]研究将月壤、火星风化层制备瓷砖。Liu 等^[47]研究发现,CLRS-2 模拟月壤粉末与光固化树脂混合制备的浆料烧结处理后,平均抗压强度和抗弯强度为 428.1 MPa 和 129.5 MPa。Julian Baasch 等^[48]的研究表明,利用月壤材料可以铸造多种铝制构件。综上所述,烧结成型法易于大批量制造,生产效率高,所产出的成品需要一定热源设备技术,未来需要在设备和工艺适应性方面开展进一步研究,且烧结成型技术对月球特殊环境的适用性仍有待继续研究验证。

2.4 3D 打印技术

3D 打印技术又称为增材制造技术,是在三维数字模型的基础上,利用逐层制造方式实现对构件三维加工制造的一种新型加工制造技术。目前,所报道的以模拟月壤为原料的 3D 增材制造技术,主要包括挤出打印技术、D-shape 3D 打印成型、激光 3D 打印成型和“模拟月壤油墨”3D 打印技术、光固化 3D 打印、太阳光聚焦 3D 打印成型等,模拟月壤 3D 打印技术主要试验步骤及相关特征如表 1 所示。

在挤压成型研究方面,Shannon L. Taylor 等^[49]通过 3D 挤压成型,用 JSC-1A 月壤模拟材料制作网格桁架结构,发现玻璃相可改变桁架结构的相对密度、峰值抗压强度等。挪威 Shima Pilehvar 等^[50]研究了极端温度变化和真空环境条件下,挤压 3D 打印技术中尿素对月壤聚合物物理力学性质的影响,发现尿素具有减水功能,最大可以降低所需水量的 32%。

表 1 模拟月壤 3D 打印技术

Table 1 Simulated lunar soil 3D printing technology

3D 打印技术	主要试验步骤	添加剂	缺点
挤出打印	又称为轮廓工艺, 先打印出轮廓, 然后填充轮廓内部, 实现建造部件的填充	硫	硫需要从地球上运输, 挤压过程受到微重力的限制
D-shape 3D打印	利用一个(或多个)可移动的打印喷管将黏结剂喷洒至砂质材料, 黏结后, 多次叠加得到需要的建筑构件	无机黏结剂	无机黏结溶液的运输和储存受到限制, 液体的打印喷射过程受到微重力的限制
激光3D打印	激光被用来烧结粉末, 一层一层压实, 制造成型		烧结层间黏结效果较差, 超高真空条件下换热机理还没有形成系统的理论
“月壤油墨”打印	月壤粉末直接配制成“油墨”, 然后挤压成型	有机溶液	有机溶剂需要从地球输送, 油墨挤压受到微重力的限制
光固化打印	紫外线被用来选择性地曝光材料, 使印刷材料凝固成特定的形状	固化树脂	光固化树脂材料需要从地球运输, 打印成型固体结构易碎, 抗冲击性差
太阳光聚焦3D打印	利用阳光聚焦熔融月壤逐层成型	无	阳光聚焦效果差, 而且穿透力很弱。烧结样品薄, 可控性低

D-shape 打印技术由意大利工程师 Enrico Dini 提出, 它是利用一个可移动打印喷管阵列将黏合剂喷洒至砂质材料, 黏结叠加得到建筑构件。2014 年, Cesaretti G 等^[51]以模拟月壤为原料, 采用 D 型 3D 打印工艺制备了具有良好抗拉强度和韧性强度的“蜂窝状”结构件; 2010 年, Ceccanti G 等^[52]以模拟月壤为原料, 使用无机溶液固结成功打印出“放射虫”结构件, 该技术已被证实在真空环境中可以正常开展工作。

激光 3D 打印以激光束定向烧结月壤粉体熔融, 由计算机控制层叠堆积成型、凝结的技术。该成型技术可控参数较多, 如月壤颗粒的粉体形状、热转变温度、热导率、激光吸收率、激光作用功率、扫描速度、扫描间距、层厚等参数, 都对最终成型构件质量有重要的影响。Balla 等^[53]在 2012 年使用连续波 Nd-YAG 激光在 3 mm 厚的铝合金基板上进行了模拟月壤的直接 3D 打印实验, 制备出了直径 8~10 mm、高 25~30 mm、相对理论密度 92%~95% 的构件, 证明了激光 3D 打印的可行性。Fateri 和 Gebhardt^[54]利用激光选区熔化技术制备出了 10 mm×10 mm×3 mm 的方块试样及齿轮螺母样件, 其硬度值为 1 245 HV, 高于同一烧结条件下二氧化硅的硬度值(865 HV)。Gerdes 等^[55]研究了金属基底和陶瓷基底在不同激光功率、不同打印速度下的成型质量, 发现月壤原材料在陶瓷基底上具有更好的 3D 打印效果。

“月壤油墨打印”成型技术是将黏合材料(即“油墨”)选择性地沉积到月壤粉末床, 将月壤粉末黏合在一起, 从而制造出工程需要的几何结构部件。Taylor 等^[56]在 2018 年开发了一种由 JSC-1A 模拟月壤以及聚乳酸羟基乙酸有机物混合而成的 3D 打印“油墨”, 后将油墨直接挤出成功打印出了微支柱的规则桁架结构件。北京航空航天大学周思齐等^[57]以水胶比 0.28~0.32 的 BH-1 模拟月壤地质聚合物浆体为打印墨水制备道路材料, 采用动态剪切流变试验测试了打印温度在 40~80 °C 下浆体的流动曲线, 得到剪切破坏特性。

光固化成型技术主要以光敏树脂为材料, 通过紫外光或者其他光源照射凝固成型, 逐层固化, 最终得到完整的结构部件。2019 年, 中国科学院航天制造技术重点实验室 Liu M 等^[58]使用 3D 光固打印的方式, 利用模拟月壤所制备构件的平均抗压强度达到了 428.1 MPa、平均抗弯曲强度达到了 129.5 MPa。

太阳光聚焦 3D 打印技术, 是通过直接聚焦太阳光实现外星壤增材制造。Kayser Works 公司创始人 Markus Kayser 于 2011 年在撒哈拉沙漠通过太阳光 3D 打印机采用砂子成功制备出等截面扭转和变截面构件。德国联邦航空航天中心 A. Meurisse 等^[59]利用模拟月壤材料首次制成了太阳能 3D 打印砖, 但抗压强度不到 5 MPa, 目前无法直接应用于工程建设。在 1 000 °C 条件下通过逐层覆土的方式制备了模拟月壤砖, 证实了太阳能聚光打印的可行性。

综上所述, 挤出打印成型、D-shape 3D 打印、“月壤油墨”打印成型月壤构件, 需要从地球上运输的添加剂, 且成型过程受微重力的限制, 其技术还有待进一步考证。激光 3D 打印技术, 整体黏结性能较差, 激光热源机理对烧结的影响关系尚需进一步研究。光固化成型技术需要激光聚焦设备、反应性稀释剂、光引发剂等, 成型过程自动化程度高、尺寸精度高、表面质量优良, 目前得到成型构件的抗压强度值最高。但是该成型技术制件脆性大、可使用材料的种类少、液态树脂有气味和毒性, 所需要的树脂材料需要从地球上运输。太阳光聚焦 3D 打印成型技术, 尚存在烧结制品整体度差、强度低等问题, 且构件缺陷形成机理缺乏充分研究, 但是该技术无需要从月球上运输材料, 可能发展为未来月球基地建设的重要技术支撑, 或将成为月球资源原位利用技术的重要组成部分。

3 冶金提取研究进展

3.1 化学介质还原法

化学介质还原法是根据月壤的化学性质, 通过氢

气、甲烷等碳基作为燃料,以卤素气体作为还原介质对月壤中的氧化物成分进行还原,提取所需要的金属或气体。

在氢气还原月壤研究方面,由于水电解可得到的氢气和氧气,当温度在 100~2 000 °C 范围时,月壤风化层中的铁氧化物可以被还原,得到金属铁。Carr 等^[60]在 1963 年提出了水电解为氢气和氧气的试验装置,如图 1 所示。该装置在试验过程中需要保持较高的氢气分压,同时产生水蒸气,需要将水蒸气移出反应系统。Denk 等^[61]提出一种可连续工作面包板式反应装置,该装置可以通过太阳能聚焦加热至高温条件,分解出氢气处理钛铁矿。2017 年,ESA 发明一套试验装置(见图 2),该装置同样是通过氢气还原月壤,并以纯钛铁矿为试验材料,得到了 34% 的还原率^[62-63]。英国 H.M. Sargeant 等^[64]以氢气作为还原介质,还原模拟月壤(NWA 12592)和一块月球陨石(NWA 12592)、两种阿波罗月壤(10084 和 60500),发现阿波罗月壤(10084)的 O₂ 还原量最高。

除了氢气作为还原介质,工业生产中碳基还原剂

也可以用于月壤氧化物的还原反应^[65]。Loutzenhisser 等^[66]自主研发了聚焦太阳能还原二氧化硅实验装置,加热温度至 1 724~1 990 °C,通过木炭还原高纯度二氧化硅得到了金属硅。2022 年,希腊雅典国立技术大学 Michail Samouhos^[67]对 BP-1 模拟月壤进行了碳热还原,发现在温度 1 300 °C 条件下,大量使用碳还原剂可以促进粒状硅铁合金的形成,该硅铁合金后期还可以应用于 3D 打印材料。

由于气体 F₂ 的氧化性强于 O₂,氟可以取代氧置换出氧气。2020 年,南非开普敦大学 Evren M. Turan^[68]采用氟化工艺,发现每千克模拟月壤可以生产 0.21 kg 的硅和 0.32 kg 的氧。但是,由于氟腐蚀性较强,在每个反应过程中都需要专用反应设备,因此该试验过程较为复杂。此外,月球上缺少氟气,采用该试验方法提取化学物质时,需要从地球上输送氟气。

此外,欧洲航天局 P. Reiss 等^[69]通过热重分析(TGA)法,将纯氮、氢和甲烷作为还原介质,对纯钛铁矿和模拟月壤(NULHT-2M)进行还原试验,发现氢气可以很好地还原钛铁矿,当试验温度 500 °C 时,氢气可以用来减少模拟月壤钛铁矿的含量。由于模拟月壤的损失不显著,通过甲烷还原时,出现一些副产物,如水、二氧化碳和一氧化碳等,其精确的反应物质量需要进一步研究。

3.2 电化学还原法

电化学还原法是通过电极和固体/液体界面给液体中的离子或分子提供电子使其发生还原反应的方法。对月壤电化学还原,主要包括直接熔融电解法和熔盐电解法。熔融电解法是在熔炉内放置月壤并将温度升至 1 600 °C 左右,熔融状态月壤通电后,阴极的金属阳离子被还原为金属或合金,氧离子迁移阳极析出氧气。由此,可达到制备金属材料的目的。熔融电解过程需保持较高温,熔融月壤具有一定化学侵蚀性,电极材料需要承受 1 600~2 000 °C 的高温并具有一定的耐腐蚀性,常见的如铱、铂等贵金属。由于月壤材料的稀缺及试验条件的限制,目前缺乏相关研究报道。

熔盐电解法是将月壤熔融状态下加入熔盐介质电解,提取金属和氧气的方法,其中阴极析出金属,阳极析出氧气。熔盐电解法主要包括 FFC^[70]法和 OS^[71]法,如图 3 和图 4 所示。两种方法的区别在于阴极设置差异,FFC 法的阴极是放置一定强度和孔隙的月壤烧结柱,直接电解得到氧气和金属物质,而 OS 法是在阴极内部装有月壤粉末样品通过钙热还原法得到金属和氧气。

2010 年,剑桥大学 Kilby K T^[72]等研究结果表明,模拟月壤的熔盐电解效率在 40%~60% 之间,而在冰晶石熔盐体系中电解铝的电流效率可达 95%。英国

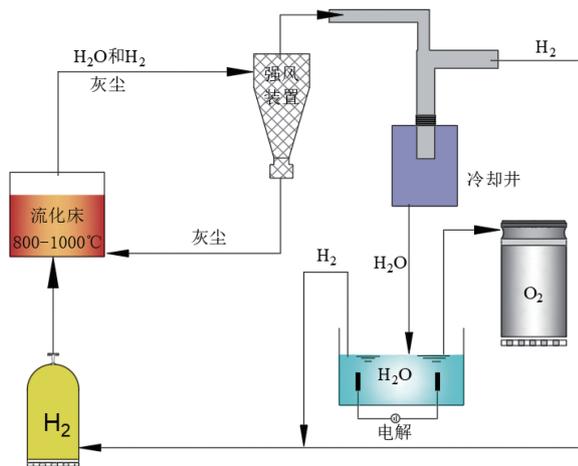


图 1 氢气还原过程示意图
Fig. 1 Hydrogen reduction process diagram

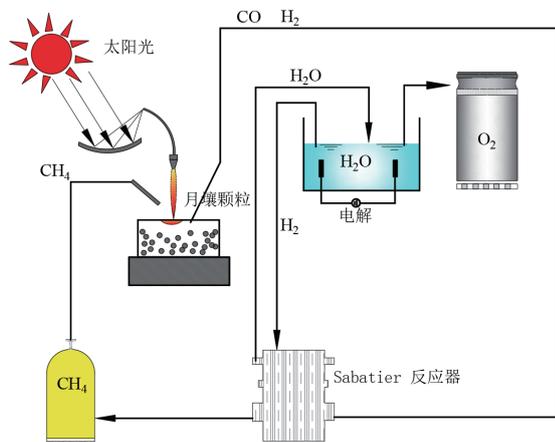


图 2 部分熔融还原示意图
Fig. 2 Partial melting reduction diagram

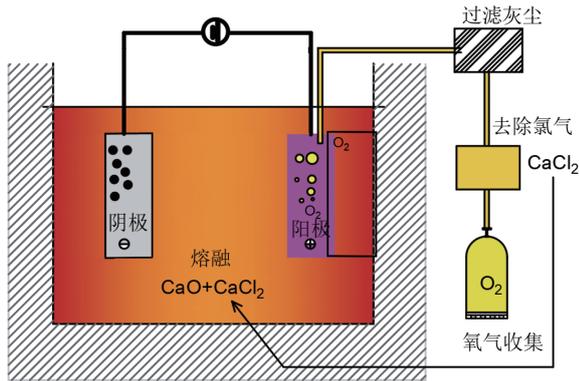


图 3 熔盐电解法-FC 法
Fig. 3 Molten salt electrolysis method-FC method

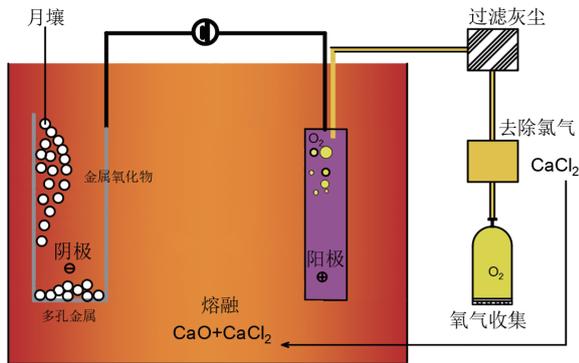


图 4 熔盐电解法-OS 法
Fig. 4 Molten salt electrolysis method-OS method

剑桥大学 Kamal Tripuraneni Kilby 等^[73]开展了利用石墨材料作为阳极和氧化锡(SnO₂)基作为阳极进行, 电解还原氧化铬(Cr₂O₃)的试验, 发现用 SnO₂ 作为阳极可以提高点脱氧的电流效率, SnO₂ 基材料的电流效率为 55%; 相比之下, 石墨在 3.0 V 和 2.0 V 时分别为 30% 和 50%。2017 年, 东北大学 Xie K Y^[74]采用惰性阳极铝热还原电解法从模拟月壤 1 号(MLS-1)中提取氧气和金属, 在冰晶石盐介质中熔融的 MLS-1 和金属铝加热至 980 °C 高温持续 4 h, 进行铝热还原, 得到了 Al、Si 和 Al₃FeSi。

2020 年, 英国格拉斯哥大学 Bethany A. Lomax 等^[75]开发了一种同时从月壤中提取氧气和金属的工艺装置, 该工艺装置采用 SnO₂ 作为阳极板电解还原模拟月壤粉末颗粒, 试验样本中大约 1/3 的氧气以气体的形式析出, 其中总氧的 96% 被成功提取, 其余得到混合金属合金产品, 由于反应堆容器的腐蚀性而有所损失。2022 年 Alexandre Meurisse 等^[76]研究通过将纯 CaCl₂ 盐转变为 KCl、NaCl 和 LiCl 的共晶混合物来降低电化学 FFC 过程的温度。在 660 °C 的所有共晶中, 在 24 h 内可以去除月球矿物中 40% 的氧、在 950 °C 的 CaCl₂ 的基线条件下进行对比实验, 可以去除 85% 的氧气。Yanhua Peng 等^[77]研究在氩气环境下模拟月壤与石墨混合采用高温碳热化学还原方法(温度为 1 000~1 600 °C), 得到单相 α-Fe, 且无残余杂质。

由于熔融电解法需要持续的高温环境, 且对于电极和反应容器具有一定的化学腐蚀性, 目前的条件难以满足熔融电解实施。因此, 高性能廉价电极和电解槽材料开发及真空环境下的电解效率提升也是目前电解还原的重要方向。熔融电解直接以熔融月壤为电解质, 电解得到金属材料及基地建设所需要的气体等, 是月壤资源原位利用发展的方向。熔盐电解所需的电解温度较低, 可成功地制备金属和氧气。但需要地球供给氯化物或氟化物, 试验过程中因挥发等造成的损耗也不利于电解物质的循环再利用, 在月壤资源原位利用中有一定的局限性。

3.3 真空热解法

真空热解法是在一定真空度下, 将月壤样品在热解器中加热至几百度或更高, 使样品蒸发、分解为氧化物、气态金属和氧气等。最早于 1992 年由 Steurer、Nerad 等^[78]提出气相热解试验的方法, 如图 5 所示。该实验装置将月壤颗粒作为原材料, 通过聚焦板将太阳光聚集, 将月壤颗粒分解出游离氧, 通过冷凝线圈降低氧气和金属冷凝的温度, 收集氧气。

2002 年 Colao F^[79]、Nakano M 等^[80]利用激光维持的等离子技术研究氧化铝的高温热解, 试验结果表明, 氧化铝一旦超过沸点, 就会随着蒸发分解成各种原子和分子。月表具有丰富的太阳能和高真空的环境, 激光热分解不需要添加还原剂即可实现金属和氧气的制备, 是目前具有较好发展前景的月球冶金提炼方法。但是, 由于激光保持等离子(LSP)的大温度梯度难度较大, 氧化铝粉体难以加热至汽化的温度, 其还原率始终较低, 现阶段研究仍存在较大的困难, 需要进一步开展深入研究。2005 年, Sauerborn M 等^[81]和 Matchett J 等^[82]采用太阳辐射能和菲涅耳透镜聚焦太阳光的方法, 在真空环境下高温分解金属氧化物和硅酸盐、模拟月壤等。采用大型菲涅耳透镜将太阳辐射聚焦在位于真空室内的一小块模拟风化层样品上, 将

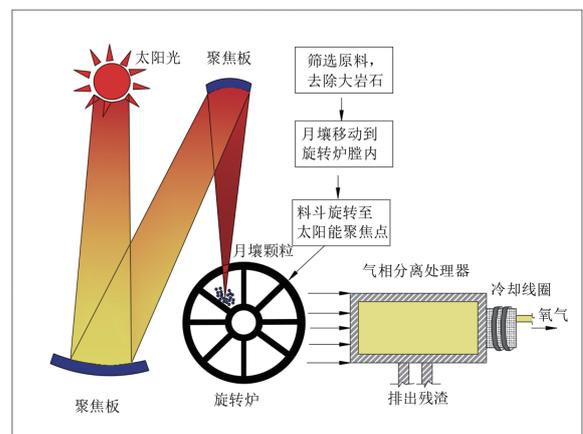


图 5 真空热解法分解月壤
Fig. 5 Decomposition of lunar soil using vacuum pyrolysis method

样品加热至 1 000~2 000 °C 之间,实现模拟月壤样品的分解,并测量了压力、温度、质量损失、残余气体等,对月球表面气相热解对氧气的加工和制备进行了研究。2007 年, Yabe 等^[83] 采用脉冲激光加热的方式,在地球上开展了氧化镁分解试验,发现在高温煅烧中产生的气团存在中性镁粒子,当温度超过 4 000 K 时氧化镁热解生成氧气和镁。2009 年, Burton 等^[84] 设计了一个采用核辐射源加热的封闭间歇循环系统,模拟了从月壤风化层中提取氧气的过程。

日本东京工业大学 Liao S H 等^[85] 通过激光诱导氧化镁生产了 Mg,成功地从 SiO₂ 中去除了氧,同时得到硅和镁。2022 年, Chengyun Wang 等^[86] 研究了原始

低钛模拟月壤光聚合热处理分解工艺,获得了抗折强度为 108.8 MPa、抗压强度为 222.8 MPa 的最佳烧结件。Garrett L. Schieber 等^[87] 提出一种新型的间接太阳能接收器,通过太能辐照,分解月壤冰风化层,从而在月球永久阴影区域月壤中热提取水。布伦瑞格大学 Julian Baasch 等^[88] 利用铝、铝合金和模拟月壤铸造各种铝制构件。Matthew G. Shaw 等^[89] 提出了一种在月球环境条件下利用太阳能对月壤中氧化物进行选择热分解以生产金属钠和金属钾的理论途径,在 800 °C 环境下第一次分解 FeO,第二次分解得到 Na 和 K。

冶金提取技术见表 2。

表 2 月壤冶金提取技术总结

Table 2 Summary of Moon Soil Metallurgical Extraction Technology

提取技术	温度/°C	可直接提取得到的物质	特性
氢气还原	800~1 000	Fe	可以直接提取金属铁,但只能处理月壤中的铁矿物,不能制取氧气。以水电解制氢为基础的氢冶金技术可直接制备金属和氧气,是较具前景的原位利用技术
碳基还原技术	800~1 000	Fe、Si	可以直接提取硅,但是碳基还原剂需要从地球上运输,不能制取氧气
氟化过程	低于 700	O ₂	过程复杂,氟需要从地球上运输。如能进一步提高氟循环效率,可能发展为一种重要的氧气制备手段
熔融电解	1 600~2 000	Fe、Ti、Al、Si、Ca、Mg、O ₂	能从月壤中提取大部需要的矿物和气体,但是对电极要求较高
熔盐电解	800~1 000	Fe、Ti、Al、Si、Ca、Mg、O ₂	可以从月壤中提取大部分金属,对原材料要求低。但是熔盐需要从地球补充。电解法工艺成熟且对原料适用性高,理论上可以还原月壤风化层中的任何金属氧化物,但该技术与应用仍有较大差距,需进一步提升电流效率并不断改良惰性阳极材料
真空热解	2 000~10 000	Fe、Ti、Al、Si、Ca、Mg、O ₂	对试验设备要求较低,可以获得需要的金属和氧气,但是分解率较低。对月球环境适用性高,其中激光热解法具有技术原理简单、设备易操作、对原料要求低、月球环境适用性好等优点

4 熔融月壤风化层制备玻璃纤维

玄武岩纤维是玄武岩石料在 1 450~1 500 °C 熔融后,通过铂铑合金拉丝漏板高速拉制而成的连续纤维。玄武岩连续纤维具有高强度、电绝缘、耐腐蚀、耐高温等性能,目前已经在地球制造业中广泛应用。

中国科学院新疆理化技术研究所马鹏程等^[90-91] 与德国德累斯顿莱布尼茨高分子研究所合作,利用玄武岩本身含有的金属元素,将样品通过高温炉加热至 1 500 °C,持续 2 h,将样品晶相完全熔融,随后把熔融体用水快速冷却,得到月壤玻璃体。将月壤玻璃体粉碎后加入到连续纤维拉丝熔炉中,在 1 400 °C 下保温 0.5 h,用牵引棒牵引将其绕在拉丝机上,通过控制拉丝机转速得到具有不同直径的连续纤维。颠覆了传统玄武岩纤维是绝缘材料的概念,实现了导电玄武岩纤维的制备。

随着月球基地建设的开展,利用月球玄武岩就地取材制备纤维材料、纤维材料用量比例设计与工部件形态研究、月壤纤维单件与个部件之间相互作用等,

有可能成为该领域的研究重点。

5 月壤生物、生命工程就地资源利用技术研究进展

未来需要建设载人月球基地,在月球基地构建高效的植物栽培技术体系是实现受控生态生保系统功能的重要保障。月壤具备植物生长必需的元素,构建基于月壤资源的植物栽培技术体系,能够进一步提高月球基地的独立性和自给能力。2014 年,中国航天员科研训练中心人因工程重点实验室秦利峰等^[92-93] 以低钛玄武质模拟月壤作为研究对象,通过模拟月壤中的氮、磷、钾肥力含量和矿质养分含量动态变化为研究对象,开展为期 50 d 的月壤肥力生物改良实验,发现鱼腥藻和水华鱼腥藻在模拟月壤上的生物量随培养时间增加而升高,模拟月壤中的可溶性氮、总氮含量和有机碳含量增加。北京航空航天大学 Zhikai Yao 等^[94] 以栽培小麦苗长为指标,发现模拟月壤内部的生物具有改善固体废物、发酵等功能。Yao 等^[95] 提出一种月球表面地外光合作用的途径,通过利用太阳能对嫦娥

5号月壤样品、水分解和CO₂转化,获得O₂、H₂、CH₄和CH₃OH等一系列气体物质。这对实现“零能耗”地外生命支持系统提供了可参考的方案。

6 结论

目前国内外针对月壤资源的原位利用技术已开展了大量研究工作,月壤资源利用领域取得了一系列进展。但是由于月球空间环境的独特性,一些已有的技术尚未成熟,缺乏对月球空间环境及地质环境等相关适应性的试验验证。此外,月球的超高真空和微重力特点可为资源的原位利用提供无氧反应环境、无容器生产和冶炼等,大温差、宇宙射线强辐射给材料及产物稳定性带来了不确定因素等,提升了部分技术的实施难度。

(1)月壤的黏结成型技术可以直接、快速地对复杂结构部件的制造,制得的模拟月壤样品力学性能良好,在工业制造和建筑业具有较好的应用前景。但是制备过程中所用的活化剂溶液需使用大量的水,向月球上运输材料成本较高且使用难度较大,并且真实月壤是否具有地聚活性还需进一步探究,所以该方法在月球上应用面临着挑战。

(2)硫磺混凝土具备较高的抗压、抗拉强度、较大的弹性模量及耐腐蚀性,且可以熔融收回重复利用等优点,但是部分原材料需要从地球上输运。地质聚合物混凝土少,整体成型结构更为致密,试件抗压强度较好,但月面真空环境下搅拌、浇筑成型难以实现。烧结成型法易于大批量制造,生产效率高,所产出的成品需要一定热源设备技术,未来需要在设备和工艺适应性方面开展进一步研究。

3D增材制造技术可用于各类复杂形状零部件的制造,所得烧结制品存在整体度差、强度较低、生产率低等缺点。月壤烧结成型研究虽然取得了一定的进步,但由于实际的月壤成分复杂,在烧结、熔融过程中可能发生一系列物理、化学变化,这给控制烧结条件带来了困难,从而导致产物强度难以提升。月球昼夜温差极大、太阳风、宇宙辐射强烈等恶劣环境因素导致单一的月壤烧结制品生产条件难以满足。

(3)化学介质还原法、电解法、真空热解法等技术在前期的研究中,取得了一定的进展。

(4)直接熔融月壤制备玻璃纤维法是较具前景的原位利用手段,但在月球环境下的适用性仍有待进一步验证。

总体来说,当前对月壤物理特性研究及其对月球原位资源利用影响的综合研究,缺乏基于返回样品的月壤微观特性、物理特性及其成因的深入分析,特别是基于月壤返回样品、原位探测数据以及规范化月壤综合物理特性数据库支持的地面模拟实验的等效验证;缺乏基于返回样品分析结果的月球表面钛铁矿、

³He以及水冰的分布特征和储量的精确评估以及相应资源原位利用方案的优化和升级。长远来看,可考虑同时发展月壤提取冶金技术与月壤材料化成型技术,形成原料制备、构架制造的生产链,实现对月壤资源的规模化、连续化、模块化利用。

参考文献:

- [1] 刘建忠,李雄耀,朱凯,等.月球原位资源利用及关键科学与技术问题[J].中国科学基金,2022,36(6):907-918.
LIU J Z, LI X Y, ZHU K, et al. Utilization of lunar resources in situ and key scientific and technical issues[J]. China Science Foundation, 2022, 36(6): 907-918.
- [2] FAN L L, TONG X, LIU Y, et al. Research progress of lunar mineral resources and in-situ beneficiation technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023(4): 1-11 [2023-10-26]. DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.04.001.
- [3] WANG Y S, HAO L, LI Y, et al. In-situ utilization of regolith resource and future exploration of additive manufacturing for lunar/martian habitats: A review[J]. Applied Clay Science, 2022, 229: 106-123. ISSN 0169-1317, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106673>.
- [4] LI Q L, ZHOU Q, LIU Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the moon from Chang'e-5 basalts[J]. Nature, 2021, 600 (7887): 54-80.
- [5] LU X, CHEN J, LING, Z, et al. Regolith at Chang'e-5 landing site: mature lunar soils from Fe-rich and young mare basalts[J]. Nature Astronomy, 2020, 15(6): 187-190190.
- [6] HEIKEN, G H, VANIMAN D T, et al. A User's Guide to the Moon[M]. 1991.
- [7] GUO Z, LI C, LI Y, WEN Y, et al. Nanophase iron particles derived from fayalitic olivine decomposition in Chang'e-5 lunar soil: Implications for thermal effects during impacts[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 49: 97-123.
- [8] GUO Z, LI C, LI Y, WEN Y, et al. Sub-microscopic magnetite and metallic iron particles formed by eutectic reaction in Chang'e-5 lunar soil[J]. Nature Communications, 2022, 13 (1): 1-7.
- [9] 郑永春,欧阳自远,王世杰,等.月壤的物理和机械性质[J].矿物岩石,2004,24(4):14-19.
ZHENG Y C, OUYANG Z Y, WANG S J, et al. The physical and mechanical properties of lunar soil[J]. Mineral Rocks, 2004, 24(4), 14-19.
- [10] MENG Z, LONG X, HONG J G, et al. Identification of the shear parameters for lunar regolith based on a GA-BP neural network[J]. Journal of Terramechanics, 2020, 89: 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.02.003>.
- [11] T. PRABU, KASINATHAN MUTHUKKUMARAN, I. VENUGOPAL, et al. Assessment of dynamic properties of a new lunar highland soil simulant (LSS-ISAC-1) developed for Chandrayaan missions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 155: 107-178. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107178>.
- [12] THANNASI PRABU, KASINATHAN MUTHUKKUMARAN, INDARAM VENUGOPAL, et al. Assessment of shear strength and compressibility characteristics of a newly developed lunar highland soil simulant (LSS-ISAC-1) for Chandrayaan lander and rover missions[J]. Planetary and Space Science, 2021, 209(1): 105-154. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105354>.
- [13] XUMIN SUN, RUI ZHANG, XIUJUAN LI, et al. JLU-H: A novel lunar highland regolith simulant for use in large-scale engineering

- experiments[J]. *Planetary and Space Science*, 2022, 221: 105–162. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2022.105562>.
- [14] MAXIM ISACHENKOV, SVYATOSLAV CHUGUNOV, ZOE LANDSMAN, et al. Characterization of novel lunar highland and mare simulants for ISRU research applications[J]. *Icarus*, 2022, 376: 114–173. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114873>.
- [15] 刘琛, 李勇, 周文, 等. 模拟月/火星壤的原位成型技术研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(22): 14–20.
LIU C, LI Y, ZHOU W, et al. Advances in in-situ modeling of lunar/Martian soil[J]. *Materials Bulletin*, 2022, 36(22): 14–20.
- [16] 宋蕾, 徐佼, 唐红, 等. 模拟月壤成型研究现状[J]. *矿物学报*, 2020, 40(1): 47–57. DOI:10.16461/j.cnki.1000-4734.2019.39.090.
SONG L, XU Y, TANG H, et al. Current status of modeling lunar soil[J]. *Journal of mineralogy*, 2020, 40(1): 47–57. DOI: 10.16461/J.CNKI.1000-4734.2019.39.090.
- [17] TOUTANJI H, GLENN-LOPER B, SCHRAYSUEN. Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, B. Strength and Durability Performance of Waterless Lunar Concrete[C]//43rd AIAA 2005: 11427–11438.
- [18] TOUTANJI H, EVANS S, GRUGEL R N. Performance of lunar sulfur concrete in lunar environments[J]. *Constr Build Mater*, 2011, 29: 444–448.
- [19] HOUSSAM A. TOUTANJI, STEVE EVANS, et al. Performance of lunar sulfur concrete in lunar environments[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29: 444–448. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.041>.
- [20] RICHARD N. GRUGEL, HOUSSAM TOUTANJI. Sulfur “concrete” for lunar applications – Sublimation concerns[J]. *Advances in Space Research*, 2008,41(1): 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.08.018>.
- [21] MOHAMMAD HOSSEIN SHAHSAVARI, MOHAMMAD MEHDI KARBALA, SOHA IRANFAR, et al. Martian and lunar sulfur concrete mechanical and chemical properties considering regolith ingredients and sublimation[J]. *Construction and Building Materials*, 2022(1): 350–351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>.
- [22] MONTES C, BROUSSARD h, GONGRE M, et al. Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration applications[J]. *Adv Space Res*, 2015, 56(6): 1212–1221.
- [23] ALEXIADIS A, ALBERINI F, MEYER M E. Geopolymers from lunar and Martian soil simulants[J]. *Adv Space Res*, 2017, 59(1): 490–495.
- [24] CAI L X, DING L Y, LUO H B, et al. Preparation of autoclave concrete from basaltic lunar regolith simulant: effect of mixture and manufacture process[J]. *Constr BuildMater*, 2019, 207: 373.
- [25] JULIANA MORAES NEVES, SIVAKUMAR RAMANATHAN, et al. Characterization, mechanical properties, and microstructural development of lunar regolith simulant–portland cement blended mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258: 120–315.
- [26] ZHOU S Q, LU C H, ZHU X Y, et al. Preparation and characterization of high-Strength geopolymer based on BH-1 lunar soil simulant with low alkali content[J]. *Engineering*, 2021, 7(11): 1631–1645.
- [27] ZHOU S Q, YANG Z N, ZHANG R R, et al. Preparation and evaluation of geopolymer based on BH-2 lunar regolith simulant under lunar surface temperature and vacuum condition[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 189 (2): 90–98.
- [28] ANNA M, LAUERMANNOVA, IVANA FALTYSOVA, et al. Regolith-based magnesium oxychloride composites doped by graphene: Novel high-performance building materials for lunar constructions[J]. *Flat Chem*, 2021, 26 (1): 100–134. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2021.100234>.
- [29] JAHINDER MOMI, TAYLOR LEWIS, FEDERICO ALBERINI. et al. Study of the rheology of lunar regolith simulant and water slurries for geopolymer applications on the Moon[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68 (11): 4496–4504. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.08.037>.
- [30] 周兆曦, 马芹永, 汪寒艳. 不同养护温度下模拟月壤地聚物力学试验与分析[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2021, 39(6): 10–14.
ZHOU Z X, MA Q Y, WANG H Y. Mechanical test and analysis of polymer in simulated lunar soil under different curing temperatures[J]. *Journal of Jiamusi University Science*, 2021, 39(6): 10–14.
- [31] LI X C, LIE Y D, LUO H B, et al. Preparation of autoclave concrete from basaltic lunar regolith simulant: Effect of mixture and manufacture process[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 207: 373–386. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.146>.
- [32] HU Z J, SHI T, CEN M Q, et al. Research progress on lunar and Martian concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 343: 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128117>.
- [33] HOPKINSON N, HAGUE R, DICKENS P. Manufacturing: an industrial revolution for the digital age[M]. Chichester: John Wiley&Sons, Ltd., 2005.
- [34] PEGNA J. Exploratory investigation of solid freeform construction[J]. *Autom Constr*, 1997, 5 (5): 427–436.
- [35] JENNIFER N, MILLS, MARIA KATAZROVA, et al. Comparison of lunar and Martian regolith simulant-based geopolymer cements formed by alkali-activation for in-situ resource utilization[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69 (1): 761–777. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.10.045>.
- [36] X GUIHONG, Z WEIBIAO, L HUARONG, et al. Water pressure variation properties research in non-ballasted track crack interior under fatigue loading[J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2019, 25(4): 735–743.
- [37] ZHANG R R, ZHOU S Q, LI F, et al. Preparation of geopolymer based on lunar regolith simulant at in-situ lunar temperature and its durability under lunar high and cryogenic temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318: 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126033>.
- [38] ALTEMIR D A. Cold press sintering of simulated lunar basalt[C]//Lunar and Planetary Science Conference. 1993.
- [39] DOU R, TANG W Z, WANG L. et al. Sintering of lunar regolith structures fabricated via digital light processing[J]. *Ceramics International*, 2019,45(14):17210–17215.ISSN0272–8842.<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.276>.
- [40] ANDREA ZOCCA, MIRANDA FATERI, DOMINIK AL-SABBAGH. et al. Investigation of the sintering and melting of JSC-2A lunar regolith simulant[J]. *Ceramics International*, 2020, 46 (9): 14097–14104. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.212>.
- [41] ZHANG X, SHAYAN GHOLAMI, MAHDIEH KHEDMATI, et al. Spark plasma sintering of a lunar regolith simulant: effects of parameters on microstructure evolution, phase transformation, and mechanical properties[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(4) : 5209–5220.
- [42] SONG L, XU J, FAN S Q, et al. Vacuum sintered lunar regolith simulant: Pore-forming and thermal conductivity[J]. *Ceramics International*, 2019, 45 (3): 3627–3633.
- [43] HAN W B, DING L Y, CAI L X, et al. Sintering of HUST-1 Lunar regolith simulant[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 324: 126655.

- [44] YOUNG-JAE KIM, BYUNG HYUN RYU, HYUNWOO JIN, et al. Microstructural, mechanical, and thermal properties of microwave-sintered KLS-1 lunar regolith simulant[J]. *Ceramics International*, 2021, 47 (19) : 26891–26897. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.098>.
- [45] HAILONG LIAO, JUNJIE ZHU, SHIJIE CHANG, et al. Lunar regolith–AlSi10Mg composite fabricated by selective laser melting[J]. *Vacuum*, 2021, 187: 110–122.
- [46] SHAYAN GHOLAMI, ZHANG X, YOUNG-JAE KIM, et al. Hybrid microwave sintering of a lunar soil simulant: Effects of processing parameters on microstructure characteristics and mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2022, 220: 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110878>.
- [47] ROBERT E. FERGUSON, EVGENY SHAFIROVICH. Aluminum–nickel combustion for joining lunar regolith ceramic tiles[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 197: 22–29.
- [48] LIU M, TANG W Z, DUAN W Y, et al. Digital light processing of lunar regolith structures with high mechanical properties[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(5): 5829–5836.
- [49] JULIAN BAASCH, LISA WINDISCH, FRANK KOCH, et al. Frank Koch, et al. Regolith as substitute mold material for aluminum casting on the Moon[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 182: 1–12.
- [50] SHANNON L. TAYLOR, ADAM E. JAKUS, KATIE D, et al. Interfacing of micro-trusses created by extrusion–3D–printing of lunar regolith inks[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 143: 1–8.
- [51] SHIMA PILEHVAR, MARLIES ARNHOF, ANDREAS ERICHSEN, et al. Investigation of severe lunar environmental conditions on the physical and mechanical properties of lunar regolith geopolymers[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 11 (1): 1506–1516. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt>.
- [52] CESARETTI G, DINI E, DE KESTELIER X, et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 430.
- [53] CECCANTI F, DINI E, DE KESTELIER X, et al. 3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil[J]. *International Astronautical Congress*, 2010: 10: 3–15.
- [54] BALLA V K, ROBERSON L B, CONNOR G W, et al. First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts[J]. *Rapid Prototyp J*, 2012, 18 (6): 451.
- [55] FATERI M, GEBHARDT A. Process parameters development of selective laser melting of lunar regolith for on–site manufacturing applications[J]. *Int J Appl Ceram Technol*, 2015, 12 (1): 46.
- [56] GERDES N, FOKKEN L G, LINKE S, et al. Selective Laser Melting for processing of regolith in support of a lunar base[J]. *J Laser Appl*, 2018,30(3): 032018.
- [57] TAYLOR S L, JAKUS A E, KOUBE K D, et al. Sintering of microtrusses created by extrusion–3D–printing of lunar regolith inks[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 143: 1.
- [58] 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(8): 105–117. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.08.010.
ZHOU S Q, ZHANG R R, YANG Z N, et al. Preparation and properties of 3d–printed lunar soil road materials[J]. *Chinese Journal of Highways*, 2022, 35(8) : 105–117.
- [59] LIU M, TANG W Z, DDUAN W Y, et al. Digital light processing of lunar regolith structures with high mechanical properties[J]. *Ceram Int*, 2019, 45(5): 5829.
- [60] MEURISSE A, MAKAYA A, WILLSCH C, et al. Solar 3D printing of lunar regolith[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 152: 800–810. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.063>.
- [61] CARR B B. Recovery of water or oxygen by reduction of lunar rock[J]. *AIAAJ*, 1963, 1(4): 921.
- [62] DENK T, GONZALEZ-PARDO A, CANADAS I, et al. Design and test of a concentrated solar powered fluidized bed reactor for ilmenite reduction: 1st Ed[M] Santiago: Solar Power&Chemical Energy Systems, 2017.
- [63] SARGEANT H M, ABERNETHY FAJ, WRIGHT I P, et al. Hydrogen reduction of ilmenite: towards an in[J]. situ resource utilization demonstration on the surface of the Moon[J]. *Planet Space Sci*, 2020, 180: 104–121.
- [64] SARGEANT H, ABERNETHY F, et al. Experimental development and testing of the ilmenite reduction reaction for a lunar ISRU demonstration with ProSPA[C]// *Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, 2019: 1797–1801.
- [65] SARGEANT H, S J BARBER, M. et al. Hydrogen reduction of lunar samples in a static system for a water production demonstration on the Moon[J]. *Planetary and Space Science*, 2021, 205: 105–287. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105287>.
- [66] LU Y H, REDDY R G. Extraction of metals and oxygen from lunar soil[J]. *High Temp Mater Process*, 2008, 27(4): 223.
- [67] LOUZENHISER P G, TUERK O, STEINFELD A. Production of Si by vacuum carbothermal reduction of SiO₂ using concentrated solar energy[J]. *JOM*, 2010, 62(9): 49–54.
- [68] MICHAIL SAMOUHOS, PETROS TSAKIRIDIS, et al. In–situ resource utilization: ferrosilicon and SiC production from BP–1 lunar regolith simulant via carbothermal reduction, *Planetary and Space Science*[J]. 2022, 212: 105–414. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105414>.
- [69] EVREN M. TURAN, SAMUEL A, STEIN, RIDDHI MAHARAJ, et al. A flow sheet for the conversion of lunar regolith using fluorine gas[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65 (7) : 1852–1862. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.014>.
- [70] P REISS, F KERSCHER, L GRILL, et al. Thermogravimetric analysis of chemical reduction processes to produce oxygen from lunar regolith[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 181: 104–795.
- [71] FRAY, D J. Anodic and cathodic reactions in molten calcium chloride[J]. *Can Metall Q*, 2002, 41 (4): 433.
- [72] ONO K. Fundamental aspects of calciothermic process to produce titanium[J]. *Mater Tran*, 2004, 45 (5) : 1660.
- [73] KILBY K T, JIAO S Q, FRAY D J. Current efficiency studies for graphite and SnO₂–based anodes for the electro–deoxidation of metal oxides[J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55(23): 7126.
- [74] KAMAL TRIPURANENI KILBY, JIAO S Q, FRAY D J. Current efficiency studies for graphite and SnO₂–based anodes for the electro–deoxidation of metal oxides[J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55 (23): 7126.
- [75] XIE K Y, SHI Z N, XU J L, et al. Aluminothermic reduction–molten salt electrolysis using inert anode for oxygen and Al–base alloy extraction from lunar soil simulant[J]. *JOM*, 2017, 69(10): 1963.
- [76] BETHANY A, LOMAX, MELCHIORRE CONTI, et al. Proving the viability of an electrochemical process for the simultaneous extraction of oxygen and production of metal alloys from lunar regolith[J]. *Planet space*, 2020, 180: 104748.
- [77] ALEXANDRE MEURISSE, BETHANY LOMAX, ÁRON SELMECI, et al. Lower temperature electrochemical reduction of lunar regolith simulants in molten salts[J]. *Planetary and Space Science*, 2022, 211:

- 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105408>.
- [78] PENG Y H, TANG H, MO B, et al. Influencing factors for the preparation of Fe₀ in lunar soil simulant using high-temperature carbothermic reduction[J]. *Advances in Space Research*, 2022: 273–1177. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.074>.
- [79] STEURER W. Vapor phase pyrolysis[J/OL]. NASA Technical Reports Server, 2021, 3: 15–25.
- [80] COLAO F, LAZIC V, FANTONI R, et al. A comparison of single and double pulse laser-induced breakdown spectroscopy of aluminum samples[J]. *Spectrochimica Acta B: At Spectrosc*, 2002, 57(7): 1167.
- [81] NAKANO M, MATSUI M, TANAKA K, et al. Numerical simulation on alumina reduction using laser plasma[J]. *Appl Plasma Sci*, 2012, 20(1): 43.
- [82] SAUERBORN M. PYROLYSE VON. Metalloxide und Silikaten unter Vakuum mit konzentrierter Solarstrahlung[M]. Bonn: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2005.
- [83] MATCHETT J. Production of lunar oxygen through vacuum pyrolysis[M]. Washington D C: The George Washington University, 2006.
- [84] YABE T, MOHAMED M S, UCHIDA S, et al. Noncatalytic dissociation of MgO by laser pulses towards sustainable energy cycle[J]. *J Appl Phys*, 2007, 101(12): 123106.
- [85] BURTON R L, SCHUBERT P J, RYSANEK F, et al. Oxygen Extraction apparatus and process[J]. United States Patent, US 2009: 26–92.
- [86] LIAO S H, YABE T, MOHAMED M S, et al. Laser-induced Mg production from magnesium oxide using Si-based agents and Si-based agents recycling[J]. *J Appl Phys*, 2011, 109 (1): 013103.
- [87] WANG C Y, GONG H Q, WEI W, et al. Vat photopolymerization of low-titanium lunar regolith simulant for optimal mechanical performance[J]. *Ceramics International*, 2022, 48 (20): 29752–29762.
- [88] GARRETT L. SCHIEBER, BRANT M. JONES, THOMAS M. ORLANDO, et al. Indirect solar receiver development for the thermal extraction of H₂O from lunar regolith: Heat and mass transfer modeling[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 190: 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.09.020>.
- [89] JULIAN BAASCH, LISA WINDISCH, FRANK KOCH, et al. Regolith as substitute mold material for aluminum casting on the Moon[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 182: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.045>.
- [90] MATTHEW G. SHAW, GEOFFREY A. BROOKS, M. AKBAR RHAMDHANI, et al. Thermodynamic modelling of ultra-high vacuum thermal decomposition for lunar resource processing[J]. *Planetary and Space Science*, 2021, 204 (1): 105–272. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105272>.
- [91] 邢丹, 葱雄宇, 郭泽世, 等. 模拟月壤制备连续纤维的可行性研究[J]. *中国科学(技术科学)*, 2020, 50(12): 1625–1633.
- XING D, XI X Y, GUO Z S, et al. Study on the feasibility of preparing a continuous fibre using lunar soil simulant (in Chinese)[J]. *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 1625–1633. doi: 10.1360/SST–2020–0141.
- [92] BING HAO, THERESA FORSTER, EDITH MADER. Modification of basalt fibre using pyrolytic carbon coating for sensing applications[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 101: 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.010>.
- [93] 秦利锋, 林启美, 薛彩荣, 等. 月球土壤的生物改良试验: 固氮蓝藻对模拟月壤肥力的影响[J]. *航天医学与医学工程*, 2020, 33(6): 497–503.
- QIN L F, LIN Q M, XUE C R, et al. Biological improvement of lunar soil: effect of nitrogen-fixing cyanobacteria on simulated lunar soil fertility[J]. *Aerospace Medicine and medical engineering*, 2020, 33(6): 497–503.
- [94] 秦利锋, 艾为党, 唐永康, 等. 模拟月壤对蓝细菌生长特性的影响[J]. *载人航天*, 2014, 20(6): 555–561.
- QIN L F, AI W D, TANG Y K, et al. Effects of simulated lunar soil on growth characteristics of cyanobacteria[J]. *Manned space flight*, 2014, 20(6): 555–561.
- [95] YAO Z K, FENG J J, LIU H. Bioweathering improvement of lunar soil simulant improves the cultivated wheat's seedling length[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 193: 1–8.

Research Progress on In-situ Resource Utilization of Lunar Soil

XU Guihong¹, LI Yang², LI Rui², ZHANG Man¹, TANG Zetao¹, TANG Zheng¹

1. School of Civil Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550001, China;

2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550001, China

Abstract: The moon stores a large number of metallic and non-metallic mineral resources. Making full use of lunar mineral resources can reduce the load of Earth launched to the moon and save the cost of deep space research. In this paper, the physical properties of lunar soil, the general principles, basic processes, technical characteristics and the latest research progress of the solidification molding process of simulated lunar soil materials and the extraction metallurgy process are reviewed, and the application prospects of these methods in the in-situ utilization of lunar minerals are prospected.

Keywords: lunar soil; resource utilization; in-situ forming; metallurgical extraction

引用格式: 徐桂弘, 李阳, 李瑞, 张曼, 唐则涛, 唐政. 月壤原位资源利用技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(4): 12-23.

XU Guihong, LI Yang, LI Rui, ZHANG Man, TANG Zetao, TANG Zheng. Research progress on in-situ resource utilization of lunar soil[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(4): 12-23.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn