

# 月球矿产资源及其原位选矿技术研究进展

范琳琳<sup>1</sup>, 童雄<sup>1,2,3</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 温小韵<sup>1</sup>, 胡泽伟<sup>1</sup>

- 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南昆明 650093;
- 金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 云南昆明 650093;
- 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南昆明 650093

中图分类号: TD989 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)04-0001-11  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.04.001

**摘要** 月球上赋存有丰富的铁(Fe)、钛(Ti)、铬(Cr)和铝(Al)等矿产资源。目前, 原位资源利用(ISRU)是月球矿产资源开发利用的最有效途径, 选矿是原位资源利用的关键步骤。然而传统选矿工艺技术不适用于月球低重力、水资源紧缺、极端温度的环境, 新的选矿技术亟待研究。从月球表面已探明的有用气体元素、水冰型矿产资源、金属和非金属矿产资源的类型及分布出发, 分析了月球重力、表面温度、水资源和灰尘等环境因素对月球选矿技术实施造成的阻碍, 总结了低能耗提取、离心筛分、静电分选和磁选等月球选矿技术的模拟研究进展, 对未来月球选矿技术发展进行了展望。

**关键词** 月球; 矿产资源; 原位资源利用; 矿物加工

## 引言

月球是距离地球最近的天体, 蕴藏了太阳系起源和演化的无穷奥秘, 也是人类走向深远空间的前哨站和试验场<sup>[1]</sup>。人类自1959年就对月球展开了探索, 到1969年, 美国阿波罗11号首次实现了人类登月, 并带回了一些月球表面的岩石样本。此后, 先后有6个探测器和12名宇航员登上月球, 382 kg月球岩石和土壤样品被带回地球。通过检测发现, 这些样品中含有丰富的(Fe)、钛(Ti)、铬(Cr)、铝(Al)等金属元素, 还含有钍(Th)、铀(U)和氦(He)等稀有元素<sup>[2-3]</sup>, 可作为矿产资源进行开发利用。

随着人类对月球探索的不断深入, 开发利用月球矿产资源将其用于月球基地建设和后续太空探索已成为新期望和新课题。将月球上的矿产资源运回地球进行加工和利用理论上是可行的, 但运输成本过高, 月球矿产资源原位利用乃是最经济合适的方式。资源原位利用(ISRU)技术是指从月球表面土壤和大气中提取金属元素、水或其他资源, 就地用于月球基地的开发建设<sup>[4-5]</sup>。要实现月球矿产资源原位高效利用, 必须基于月球环境(低重力、超低温、低氧、少水), 研究探索合适的选矿技术<sup>[5-6]</sup>。选矿(矿物加工)是用物理、化学、生物等方法对天然矿物资源进行加工以获

取有用物质的科学技术, 其包括分离、富集、提纯、提取、深加工等。本文拟在国内外已探测的月球矿产资源类型及分布情况的基础上, 研究分析月球原位选矿的难点, 总结月球选矿技术探索研究情况, 对今后月球选矿技术进行展望, 希望能为未来月球矿产资源的原位开发提供参考。

## 1 月球矿产资源

根据地质构造类型, 月球表面被划分为两个主要的地质单元: 月球高地和月海<sup>[7]</sup>。月球高地和月海表面覆盖着一层由撞击作用和太空风化作用形成的风化层, 其主要由矿物和岩石碎屑、熔融玻璃、黏结集块岩组成<sup>[8]</sup>。根据成分特征与成因, 可将月球高地、月海和月球风化层的岩石分为三大类: 月海玄武岩、KREEP岩和高地岩石<sup>[9]</sup>。

在地球上, 矿产资源是指通过地质作用形成的、具有利用价值的、呈固、液、气三态的自然资源<sup>[9]</sup>。月球矿产资源是指位于月球表面或地下的各种矿物质和化学元素。月球的矿产资源主要赋存于月球表面的玄武岩、高地岩石(斜长岩)、KREEP岩和风化层中<sup>[8]</sup>。月球矿产资源可分为有用气体元素、水冰型矿产资源、金属矿产资源和非金属矿产资源<sup>[10]</sup>。

收稿日期: 2023-06-20

作者简介: 范琳琳(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为浮选理论与工艺, E-mail: 1370359507@qq.com。

通信作者: 童雄(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为复杂多金属难处理矿产资源综合利用。E-mail: kgxiongong@163.com。

## 1.1 月球的有用气体元素

月球作为太阳风的粒子收集器,长期接受太阳的照射,月球风化层中注入了大量的挥发性元素和同位素,如有用气体元素氢(H)、氦-3( $^3\text{He}$ )、碳(C)和氮(N)<sup>[4]</sup>。据估算,月壤中的稀有气体(氦、氖、氩等)含量高达 $0.98\sim 1.27\text{ cm}^3/\text{g}^{[11]}$ 。Rasera等<sup>[12]</sup>对阿波罗号和月球号任务带回的样本以及月球轨道飞行器收集的遥感数据的分析表明,月球富含氢(H)和氦-3( $^3\text{He}$ ),但碳(C)和氮(N)含量相对较少。

由太阳风注入月球风化层中的氦-3( $^3\text{He}$ )是最有价值的资源之一,它是一种可长期使用的清洁、安全和高效的未来新能源,可以作为核聚变的材料,并且几乎没有辐射<sup>[13]</sup>。由于月球本身没有磁场,所以氦-3( $^3\text{He}$ )

能在月球稳定存在,而地球因磁场作用使氦-3( $^3\text{He}$ )沿着地球磁力线慢慢扩散,最终消失于大气层中。月球上丰富的氦-3( $^3\text{He}$ )资源赋存于月壤的矿物和玻璃中,由于钛铁矿是一种紧密排列的六边形晶体结构矿物,其孔洞尺寸与氦-3( $^3\text{He}$ )原子的尺寸基本相同,所以氦-3( $^3\text{He}$ )资源集中赋存于富钛铁矿的月壤中。Fa等<sup>[14]</sup>基于氦-3( $^3\text{He}$ )地表分布、月球表面数字高程图(DEM)经验构建的风化层厚度以及 $^3\text{He}$ 深度的指数剖面,估算出全月球氦-3( $^3\text{He}$ )库存量约为 $6.50\times 10^8\text{ kg}$ ,其中月球近侧约为 $3.72\times 10^8\text{ kg}$ ,远侧约为 $2.78\times 10^8\text{ kg}$ ,并绘制了月球表面每 $1\text{ m}^2$ 风化层中氦-3( $^3\text{He}$ )的总量图(图1)。月球上氦-3( $^3\text{He}$ )储量可满足地球的上万年能源需求,开发利用月球风化层中的氦-3( $^3\text{He}$ )对地球能源的可持续性发展至关重要。

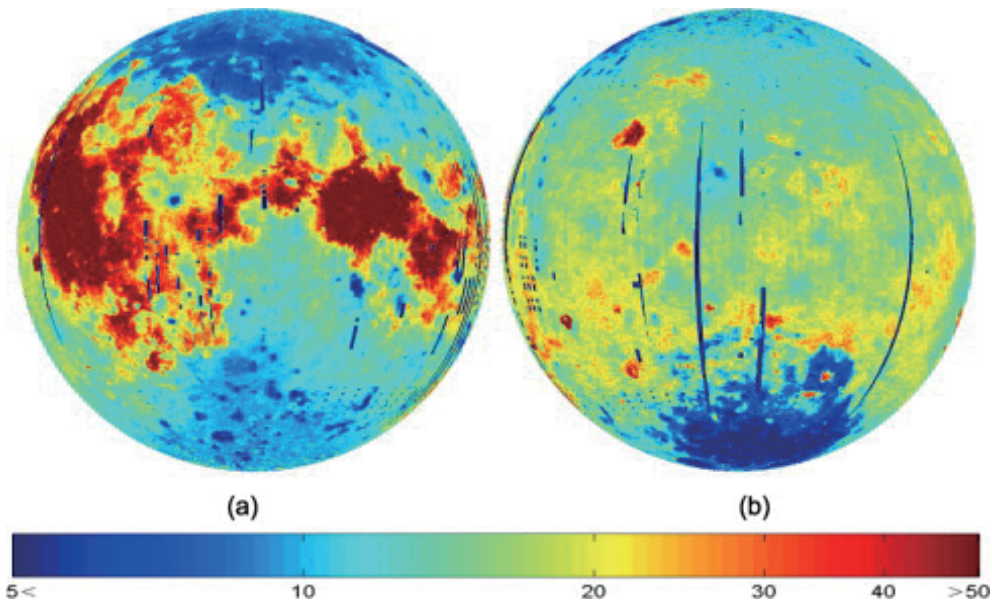


图1 月球表面每 $1\text{ m}^2$ 风化层中 $^3\text{He}$ 的总量( $10^{-9}/\text{m}^2$ )<sup>[14]</sup>:(a)近侧,(b)远侧

Fig. 1 Total amount of  $^3\text{He}$  per  $1\text{ m}^2$  of the regolith ( $\text{ppb}/\text{m}^2$ ) over lunar surface: (a) nearside, (b) farside

## 1.2 水冰型矿产资源

水冰型矿产资源指的是月球极地永久阴影区富含水冰的月壤型矿床,主要可利用资源是水<sup>[8]</sup>。月球两极永久阴影区由于长期缺乏太阳照射,温度基本维持在 $-233\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,因此,在此区域沉积了大量的冰水混合物,月球两极永久阴影区也被认为是目前月球水含量最为丰富的区域<sup>[15]</sup>。据探测数据估算,月球极地永久阴影区月壤中水冰含量可达 $(5.6\pm 2.9)\%$ ,水冰资源储量十分可观<sup>[15-17]</sup>。

Paul等<sup>[18]</sup>利用月球勘测轨道器的表面温度测量和紫外线反照率光谱探测得到,月球极地永久阴影区的水冰与干风土密切混合存在时,其在月壤中的含量大约在 $0.1\%\sim 2\%$ ;水冰以纯水冰的形式存在时,其在月壤中最高含量能达 $10\%$ 。高楠等人<sup>[8]</sup>基于月球极地永久阴影区水冰资源勘查的中子谱仪H元素数据,绘

制了月球南北极区的水冰丰度图,如图2所示。

## 1.3 月球的金属矿产资源

月球上的金属矿产资源主要包括黑色金属、稀有/稀散金属及有色金属矿产资源,其种类及用途如表1所示<sup>[8]</sup>。

## 1.4 月球的非金属资源矿产

月球的非金属矿产资源指的是不包括金属元素的矿物质和化合物。由于月球水含量极低,且不具有发育变质作用,使其无法形成绝大多数地球上常见的非金属资源<sup>[9]</sup>。通过人类的探测任务和样本分析,发现月球上的非金属矿产资源主要为硅(Si)和磷(P)<sup>[8]</sup>。

月球上硅(Si)元素储量十分丰富,通过对月球的遥感探测以及采样返回分析,月壤中硅元素占 $20\%$ <sup>[19]</sup>。

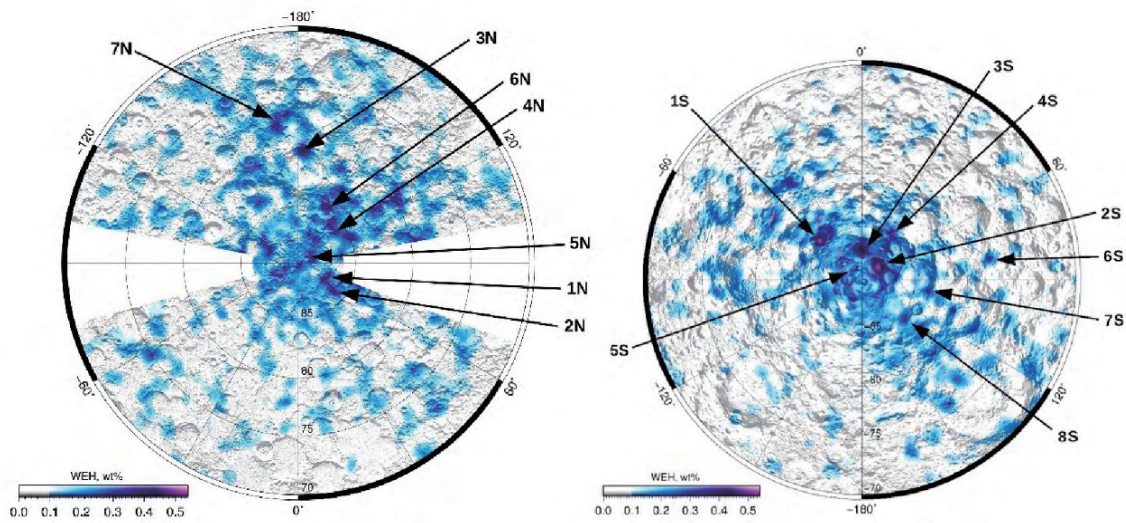


图 2 月球极区水冰物质含量分布(左: 北极, 右: 南极)<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Distribution of water-ice within lunar poles (left: north pole; right: south pole)

表 1 月球金属资源矿产种类及其用途<sup>[8]</sup>

Table 1 Types and application of lunar metal resources and minerals

资源种类	矿产资源	赋存岩石	主要赋存矿物或来源	推测品位	可能用途
黑色金属	Fe	月海玄武岩	辉石、钛铁矿、橄榄石	20.00%	基地建设
	Mn	月海玄武岩	辉石、橄榄石	0.30%	合金的添加料
	Cr	月海玄武岩	铬铁矿、辉石	2.00%	制造钢材
	Cr	高地苏长岩	铬铁矿	15.00%	制造钢材
稀有/放射性金属	Ti	高钛玄武岩	钛铁矿、辉石	16.00%	制造火箭外壳、基地建设
	Th	KREEP岩/其他演化程度较高火成岩	磷灰石、陨磷钙钠石	0.05%	核燃料、战略资源
	U	KREEP岩/其他演化程度较高火成岩	磷灰石、陨磷钙钠石	0.01%	核能燃料
	Ce	KREEP岩/其他演化程度较高火成岩	磷灰石、陨磷钙钠石	0.35%	特殊材料、战略资源
有色金属	Al	斜长岩	钙长石	18.00%	基地建设混凝土
	Ni	月壤	陨石撞击	0.15%	制造火箭外壳、基地建设
	Zn	火山玻璃	火山玻璃	0.08%	合金材料
其他	K	KREEP岩/其他演化程度较高火成岩	磷灰石、陨磷钙钠石	9.00%	生命必需元素、重要原料

斜长岩约占月球表面岩石的 60%，硅 (Si) 主要赋存于斜长岩的钙长石中，推测品位约为 70%<sup>[20]</sup>，实现岩石中硅 (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<sup>[21]</sup>。

月球上的磷 (P) 元素主要赋存于磷灰石、陨磷钙钠石中，推测品位约为 10%<sup>[8]</sup>。

## 2 月球选矿影响因素

选矿是根据物料的粒度、密度、电导率、磁性和表面化学特性等性质，将其分离与富集的过程<sup>[22]</sup>。目前的选矿技术都是基于地球环境进行设计的，月球的重力和地表温度等因素较地球而言有很大不同，将目

前的选矿技术应用于月球选矿中还需要大量的探索研究。在过去的 60 年里，科技人员对从月球矿产资源中提取有用成分进行了大量研究工作<sup>[4]</sup>。要开发在月球上能使用的选矿工艺和设备，需要将地球环境和月球环境进行对比，找出月球选矿的主要难点，进行针对性研究。表 2 总结了地球和月球之间的主要差异指标，分析了这些差异会对月球选矿造成的影响。

### 2.1 重力加速度

目前的选矿技术，都是基于地球重力场进行的。根据观测到的数据和万有引力公式进行估算，月球的重力约为地球重力的 1/6。将选矿技术应用到月球上，



表 2 地球和月球对矿物加工环境影响的比较<sup>[4,23-24]</sup>

Table 2 Comparison of the environmental effects of the earth versus lunaron processing

指标	地球	月球	对月球选矿的影响
重力加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	9.81	1.62	磨机建造耗材大； 影响矿物颗粒分离沉降
平均地表温度/℃	14	130~150(昼间) -180~-160(夜间)	可能会降低选矿设备的强度； 致使选矿药剂挥发或凝固
人类活动	频繁	严格限制	要求选矿设备自动化程度较高
水资源/亿t	1.3×10 <sup>0</sup>	2.7×10 <sup>3</sup> (预测)	月球水资源目前技术开采较困难； 要求选矿在无水条件下进行
灰尘	容易压制	静电，磨蚀	对选矿设备造成磨损； 对人体健康造成损害

月球重力可能会对选矿过程中的磨矿、重力选矿、浮选等造成一定影响。重力选矿主要就是借助重力对不同密度的矿粒进行分离的方法<sup>[25]</sup>，低重力条件下，矿物颗粒沉降会受到影响。假设某矿粒分别在月球和地球的同一种介质中进行自由沉降(不考虑月球温度对介质黏度的影响)，其重力  $F_g$ 、浮力  $F_b$ 、阻力  $F_d$  的计算公式为<sup>[26]</sup>：

$$F_g = mg = \frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_p g \quad (1)$$

$$F_b = \frac{m}{\rho_p} \rho g = \frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho g \quad (2)$$

$$F_d = \zeta A_p \frac{\rho u^2}{2} \quad (3)$$

式中： $m$  为颗粒的质量， $g$  为重力加速度， $m/s^2$ ； $d_p$  为颗粒的粒度， $mm$ ； $\rho_p$  为颗粒的密度， $g/cm^3$ ； $\rho$  为介质的密度， $g/cm^3$ ； $\zeta$  为阻力系数， $\zeta = \Phi(Re) = \Phi\left(\frac{d_p u_t \rho}{\mu}\right)$  (这里  $u_t$  为颗粒的自由沉降末速， $mm/s$ ； $\mu$  为介质的运动黏性系数)； $u$  是颗粒的自由沉降速度， $mm/s$ ； $A_p$  为颗粒垂直沉降方向上的投影面积， $A_p = \frac{\pi}{4} d_p^2$ ， $mm^2$ 。

矿物颗粒自由沉降末速度计算式为：

$$u_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho)gd_p}{3\rho\zeta}} \quad (4)$$

将月球和地球重力加速度带入(4)式，月球上的自由沉降末速度约为地球上的 2/5，沉降速度较慢，不利于矿物分选，为了提高分选效率，建议引入离心场。

在磨矿时，矿物物料及研磨介质在研磨过程中的运动方式有抛落式、泄落式和离心式三种<sup>[27-28]</sup>。这三种运动状态受到重力加速度作用，月球重力加速度相对于地球较小，地球上适用的磨机在月球可能需要大量技改。如一个直径 10 m 的球磨机在月球上需要增加到直径为 60 m 才能产生同等的效率<sup>[29]</sup>。

在筛分时，矿粒通过本身的重力和筛网的振动来进行粒度分级<sup>[30]</sup>。月球重力加速度较小，矿物在月球上重力减小，筛分时微细矿粒会向上漂浮，影响矿粒分级效果。

在干式磁选时，矿物颗粒进入磁选机的分选腔内，

磁性矿物颗粒因受到磁力的作用会吸附于磁辊表面被带到无极区卸下，非磁性矿物颗粒在机械合力(包括离心力、重力、介质阻力和摩擦力等)作用下落入非磁性矿粒出口，使得磁性矿物颗粒从中分选出来<sup>[31]</sup>。磁性和非磁性矿粒在落入分选区时都受到重力的影响，月球重力较低，会导致部分细小矿粒漂浮，难以落入到预定分选区域，影响选别效果。

静电分选是利用矿物摩擦特性、导电特性、介电常数差异，使其在电场中受到不同的静电力、重力和离心力等作用力，从而在电场中拥有不同的运动轨迹，来实现矿物分选的一种物理选矿方法<sup>[32]</sup>。电选过程中，重力和离心力都是作为矿物颗粒落入分选区的脱落力存在，月球低重力环境可能会改变部分矿粒运动状态，将电选应用于月球矿物选别可以通过增大离心力来减少重力对电选过程的影响，提高分选效果。

## 2.2 平均地表温度

月球表面与地球表面的热环境显著不同，月球表面几乎没有大气层，与外层空间的热交换通过辐射进行，再加上月球自转周期较长(约为 29 个地球日)，所以月球表面昼夜温差极大<sup>[33]</sup>。月球上纬度不同，温度差异也较大，月球赤道平均温度为 114~124℃，两极平均温度为 -223~-73℃<sup>[34]</sup>。

月球的极端高温和极端低温环境会对选矿药剂造成不利影响，温度过高会使选矿药剂挥发，温度过低会使选矿药剂冻结，达不到预期选别效果。选矿药剂在月球上的储存较为困难，再加上月球可用水源匮乏，浮选在月球矿产选别中难以应用，干式磁选、电选和光电选矿等干式选矿在月球矿物选别中具有重大应用前景，但需要注意的是，月表温差大会降低选矿设备的强度，这就要求选矿设备材料有较强的耐高温和耐低温性能，使其机械结构能够在较大的温度梯度内运行，或者可以利用导热物质，如热管和冷却剂，连接到散热器，以管理热量积聚<sup>[4]</sup>。

## 2.3 人类活动

地球大气中的含氧量约为 21%，能够维持人类的

正常生命活动。与地球不同,月球的大气层极其稀薄,主要由惰性气体组成<sup>[35]</sup>,人类需要借助供氧设备才能在月球生存。月球表面温度较为极端,并不适合人类长时间活动。目前选矿技术自动化程度较低,许多选矿设备还需要人为进行调控,人类在月球活动受限会影响到矿石选别效果。研发在月球上使用的选矿技术应往模块化和高自动化方向靠拢,以便于选矿设备的维修和运行。

## 2.4 水资源

目前已有确切证据表明,月球样本中存在水,月球两极存在水冰<sup>[36]</sup>。由于月球环境特殊,目前从月球获取水资源仍存在许多技术挑战<sup>[37]</sup>。地球上的大部分选矿技术,如磨矿、浮选、重选和湿式磁选要用大量的水,而月球可用水资源匮乏,在月球对矿物进行湿式选别是十分困难的,需要开发新的干法选矿技术<sup>[12]</sup>。

## 2.5 月尘

月球尘埃(简称月尘)是月壤中广泛分布的易于迁移的细小尘埃颗粒(粒径小于 20  $\mu\text{m}$ ),是由星际微流星体对月球表面的超高速撞击产生的<sup>[38-39]</sup>。在太阳电磁辐射、太阳风等离子体和地球磁层尾部等离子体的影响下,月球表面被照亮部分带电。在与太阳辐射相互作用后,由于光电效应,月球表面出现一层光电子。当悬浮在月球表面的尘埃粒子与太阳电磁辐射相互作用时,会发射出额外的光电子。位于月球表面或近表层的尘埃粒子吸收光电子、太阳辐射的光子、太阳风的电子和离子,以及(如果月球位于地球磁层尾部)磁层等离子体的电子和离子。所有这些过程都促进了尘埃粒子的带电,它们与带电的月球表面相互作用,形成月尘的悬浮<sup>[40]</sup>。月球尘埃具有很强的磨蚀性,由于其玻璃状的成分、细小的尺寸和大的表面积与体积比,极容易形成静电电荷<sup>[41]</sup>。

由于月尘悬浮并带有静电荷,使其极易附着于物体表面。月尘覆盖在选矿设备表面可能会诱发设备局部过热、机械结构卡死、密封失效、材料磨损等一系列问题。不仅如此,月尘还会对人体的健康造成威胁,导致人类产生咳嗽、流泪、打喷嚏等过敏反应症状,严重时可引起人类呼吸困难,长期吸入月尘易诱发各种呼吸道、内脏器官的癌变<sup>[38]</sup>。由于月球缺乏环境大气,粉尘管理十分困难。

## 3 月球原位选矿技术探索

现有的选矿技术并不适用于月球低重力加速度、极端温度、可用水资源匮乏、尘埃悬浮的环境,再加上目前选矿技术自动化程度较低,月球表面人类活动受限,使在月球上开展选矿工作非常困难。针对以上难点,需要对月球选矿技术展开一系列的探索。如低

能耗提取、离心分级、静电分选和干式磁选。由于水冰型矿产资源的主要利用资源是水,所以该类型矿床不需要分选富集<sup>[8]</sup>。

月球钛铁矿含量十分丰富,可开发利用的钛铁矿( $\text{FeTiO}_3$ )的总资源量约为  $1.5 \times 10^7$  亿 t<sup>[41]</sup>,且大部分氦-3( $^3\text{He}$ )资源都赋存于钛铁矿中,目前选矿研究大多都是围绕钛铁矿进行的。

### 3.1 低能耗提取

氦-3( $^3\text{He}$ )本身属于挥发性元素,对月壤进行高温加热至 600  $^{\circ}\text{C}$  左右就可将其中 90% 以上的氦释放出来,然后再通过低温分离就可以获得氦-3( $^3\text{He}$ )。国内外常见的氦-3( $^3\text{He}$ )提取方式是通过高温加热炉、直接聚焦太阳光或微波加热月壤来实现<sup>[42]</sup>。高温加热提取相当耗能,对月球氦-3( $^3\text{He}$ )资源原位开发利用是难以承担的重负,难以在月球上大规模推广应用,需要研发新的低能耗提取技术。

苏菲等<sup>[43]</sup>人发明了一种低能耗月球原位稀有气体提取系统,该系统包括筛选、研磨和加热装置。研磨装置又包括壳体、锤体、电磁驱动系统、进料口、和出料口。该系统工作时机械臂将月壤采回并投入筛选装置中,筛选出粒径 100  $\mu\text{m}$  以下的月壤。然后将筛选出的月壤样品在真空条件下利用研磨装置内的电磁线圈产生磁场,使锤体往复运动对月壤进行研磨,研磨后的月壤送入加热装置,加热至 150~250  $^{\circ}\text{C}$ ,释放出吸附在矿石内的稀有气体。该系统提取功耗仅为现有技术中 900  $^{\circ}\text{C}$  热熔提取功耗的 10%~30%,能对月球的氦-3( $^3\text{He}$ )资源进行有效提取并减少能耗。

李健楠等人<sup>[42]</sup>发明了一种提取月球氦-3( $^3\text{He}$ )资源的地面试验装置,该装置由主要由磨蚀坩埚、磨蚀杵、调节组件和 U 形导出管构成。磨蚀坩埚和磨蚀杵位于真空腔室内,以模拟月球真空环境;驱动器利用磁流体与磨蚀杵相连,保证真空腔室内的真空度。该装置工作时是将待处理样品放入磨蚀坩埚内,用调节组件对磨蚀杵深入磨蚀坩埚内的深度进行调节,驱动器再带动磨蚀杵转动对样品进行摩擦释放氦气,释放后的氦气再由导出管输出。该装置无需高温加热或彻底粉碎待处理样品即可完成氦-3( $^3\text{He}$ )资源提取,能有效减少能耗。

氦-3( $^3\text{He}$ )的低能耗提取相较于现有的高温加热提取方式,具有能耗低、提取工艺简单、资源利用率高和装置适应性好的特点,但月球上存在许多高能带电粒子,可能会对保证设备正常运转的磁性材料产生一定影响,进而导致设备性能降低,需要对高能带电粒子如何影响磁性材料进行模拟研究,找出解决措施,以保证设备在月球上能正常运转,对氦-3( $^3\text{He}$ )资源进行高效利用。

### 3.2 离心筛分

月球选矿筛分设备利用离心力作为主力,结合剪切流和振动运动对矿物颗粒进行不过分依赖于重力的粒度分级。

Dreyer 等<sup>[30]</sup> 研究了一种离心筛分选矿机,它是在离心力、剪切流和振动运动的作用下,利用固体颗粒的自然流动进行分层。筛分示意图如图 3 所示,物料从右侧进入旋转的圆柱形筛网,筛网内的螺旋/螺杆以稍大的速度旋转,剪切物料床并将其移动到输出端;在离心力的作用下,细粉被迫通过筛网,粗料被移动到末端并离开筛网。Dreyer 等以筛速 188 r/min 和螺旋钻/刷转速大于 60 r/min 的速度对月球风化层模拟物 JSC-1A 进行了离心筛分,从中分离出了粗料中的过细物料,实验表明利用离心力作为动力能使矿物颗粒进行不依赖于重力水平的粒度分级。

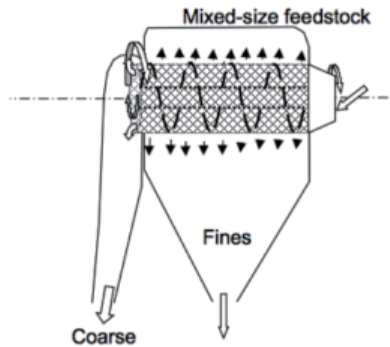


图 3 离心筛分示意图<sup>[30]</sup>  
Fig. 3 Schematic of centrifugal sieve concept

Mitchell 等<sup>[44]</sup> 研发了一种 3D 打印锥形离心机系统,如图 4 所示,该系统由三个核心模块组成:控制模块、分离模块和收集模块,控制模块用于控制分离过程中锥体的角速度,由步进电机、步进电机驱动器和控制器组成;分离模块由锥体、角度调节器和底盘组成;收集模块包括一个颗粒收集器和收集管。锥形离心机分选过程为矿物颗粒混合物被注入到一个具有纹理表面的旋转金属锥上,由于较大和较小的微粒在重力、离心力和摩擦力的联合作用下呈现不同的轨迹,它们在离开金属锥表面后会落入不同分选区域,以达到矿物颗粒分离效果。Mitchell 等对设备的锥体直径、锥体角度、轴倾角等进行了对比研究并利用该设备对由重晶石、方解石、石英组成的细颗粒矿物进行了分离实验研究,筛分后的细颗粒矿物浓度、实验回收率和理论回收率的峰值分别为 74.2%、53.5% 和 45.6%。实验回收率和理论回收率相差较大是因为矿粒受到锥体表面粗糙度和锥面角度的影响,使微粒附着在锥面上。该系统对月球矿物颗粒有一定分选效果,设备还可以通过熔融沉积建模 (FDM) 三维 (3D) 打印在月球表面的低重力条件下制造,具有巨大应用

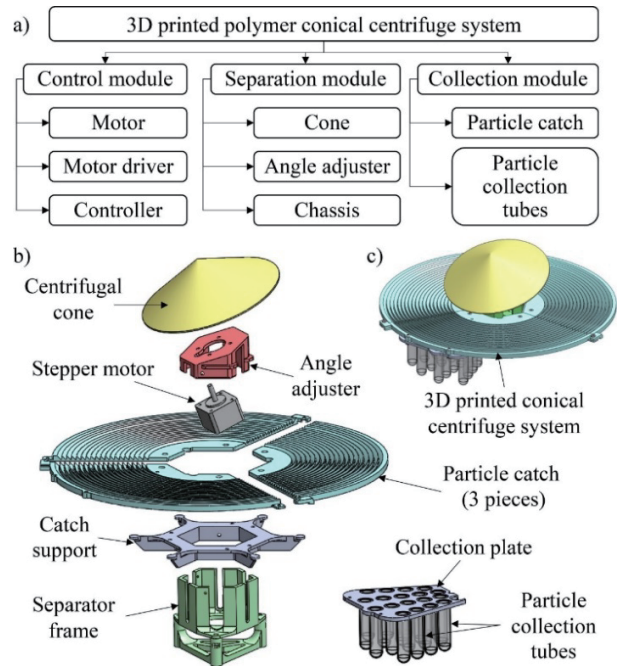


图 4 3D 打印圆锥离心机系统设计图<sup>[44]</sup>: (a) 系统的三个主要模块; (b) 系统的关键组成部分; (c) 圆锥离心机系统的组装图

Fig. 4 Design of the conical centrifuge system. (a) Three main modules of the system. (b) Key components of the system. (c) Assembled view of the conical centrifuge system

前景。

离心筛分用离心力代替重力对不同大小的矿粒实现了有效分选,但出料还是由重力驱动,所以在月球低重力条件下出料速度较慢,需要在矿物出料口处做优化设计,如添加增压装置来保证正常排料速度。

### 3.3 静电分选

月球风化层的导电性和介电损耗很低,其中不同的矿物也具有明显不同的化学结构,再加上月球环境中缺乏使颗粒黏在一起的水分,不同的矿物颗粒之间分散且具有不同的电荷量和极性,从而可以被分离出来,使其适合静电分选<sup>[45-46]</sup>。

通过静电力对月球矿物进行选别的技术主要有三种:滑动分离器的导电感应、平行板分离器的摩擦充电和静电行波。滑动分离器的导电感应除了 Agosto 在 1983—1985 年做过研究外,后续研究较少。

#### 3.3.1 平行板分离器的摩擦充电

平行板分离器的摩擦充电是一种不需要水的干燥分离方法,通过使用滑动板分离器 and 高压电极对颗粒进行感应充电来实现。原理是,风化层内的不同矿物颗粒通过与不同成分的材料接触而产生摩擦荷电,这些带电粒子根据它们的电荷质量比 ( $Q/M$ ) 在电场中进行静电分离<sup>[47-49]</sup>。

Li 等<sup>[49]</sup> 采用带有铜摩擦增压器的气动垂直平行板分离器对直径为 200~140 目 (75~106  $\mu\text{m}$ ) 的钛铁



矿与其他矿物(钠长石、辉石、镁橄榄石、石英)的二元混合物、三元混合物和定制风化层模拟物进行了测试,测试结果表明,对于钛铁矿和镁橄榄石的混合物,钛铁矿应带负电,而镁橄榄石带正电;对于钛铁矿与其他矿物的二元混合物,钛铁矿应带正电,其他矿物带负电;对于具有两种以上组分的混合物,电荷极性由电荷量和功函数的相对差异控制。通过使用摩擦静电分离技术,可以在这五种混合物中富集钛铁矿和其他矿物。

Trigwell 在 2006—2012 年间对平行板分离器的摩擦充电分选月球矿物做了大量研究,并对使用的设备进行不断改进,从一开始的气动驱动的板分离器到目前的自由落体摩擦电分离器<sup>[45-47]</sup>。Trigwell 等<sup>[50]</sup>用自由落体摩擦电分离器(如图 5 所示)对月矿混合物(长石、锂辉石、橄榄石、钛铁矿按质量比 4:4:1:1 组成)、月球模拟矿 JSC-1A(50~75 μm 粒度)、月球模拟矿 NU-LHT-2M(添加 5% 质量的钛铁矿)、阿波罗 14 号样品 14163 和阿波罗 17 号样品 77051 进行了摩擦带电静电选矿实验,并通过 X 射线光电子能谱(XPS)分析其组成,发现分选后的样品中的 Fe 和 Ti 含量明显升高,实验结果表明,摩擦静电分选对这些样品中钛铁矿有一定程度的富集效果,并表明摩擦静电选矿最佳分选粒度约为 50~100 μm。

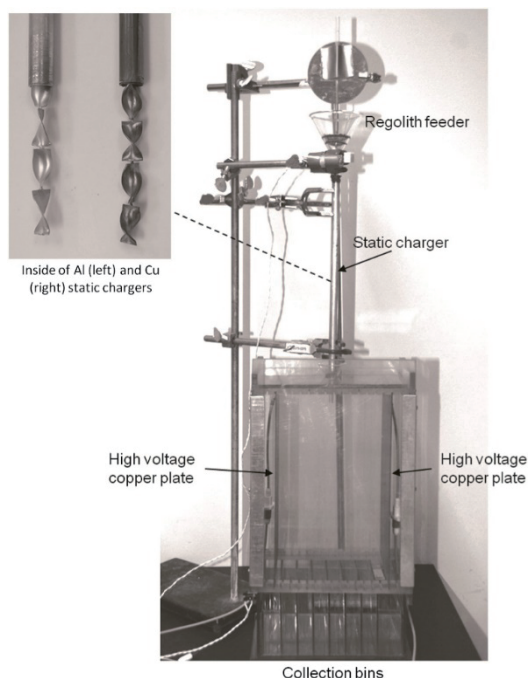


图 5 自由落体式摩擦电分离器<sup>[50]</sup>

Fig. 5 Free-fall triboelectric separator

Quinn 等<sup>[46]</sup>对 Trigwell 使用的设备进行了矿物电荷积累和偏转优化,对 NU-LHT-2M 月球模拟矿(以纯矿物钛铁矿、橄榄石、锂辉石和长石混合组成)进行了两次失重飞行(RGF)实验,旨在测试月球引力的影响以及静电场强度对分离器功效的影响。第一次

飞行对电极施加了 $\pm 8$ 、 $\pm 10$ 和 $\pm 12$  kV 电压,实验后钛铁矿的富集度高达 60.3%,回收率为 69.4%。第二次对电极施加了 $\pm 13$ 、 $\pm 15$ 和 $\pm 20$  kV 电压对修改后的模拟物(添加 10% 钛铁矿)进行实验,发现钛铁矿在一次通过后最多可富集 10.6 百分点(约 10% 到 20.6%),回收率 23.9%。第二次实验回收率降低可能是因为电荷质量比最小的粒子上仍能感受到地球重力的影响,导致足够数量的颗粒根据重力方向下落到其他收集箱,没有下落到静电分选的收集箱中。通过两次 RGF 实验,表明更高的电压会导致更高品位的钛铁矿,实验表明摩擦充电与自由落体平行板分离器相结合有助于钛铁矿的富集。

目前模拟实验数据表明,平行板分离器的摩擦充电选矿是一种对月球风化层矿物进行分离和富集最简单有效的方法<sup>[51]</sup>。然而,由于矿物颗粒大小、形状和角度、晶格缺陷、表面污染、离子和水的吸附、介电常数、接触类型以及接触的数量和持续时间都会影响摩擦充电转移的电荷量,而月球矿物的许多电磁特性还没有经过经验测定,如介电常数,且用于实验室测试的风化层模拟矿物不具有自然静电荷,但月球风化层表面具有天然的静电荷,其带电粒子大小和存在的深度尚未确定,所以在地球上进行实验表征是具有挑战性的,对月球矿物的电磁特性进行研究和入选矿粒进行预处理是必要的<sup>[12]</sup>。此外,目前平行板分离器摩擦充电的研究数据回收率较低且不稳定,可能是因为矿物颗粒还是受到地球重力的影响,可以通过改变电压来减小地球重力对矿物颗粒分选的影响。

### 3.3.2 静电行波

平行电极和合适的多相电压源可以产生静电行波(ETW)场。带入该场的中性或带电微粒,在电场力、引力等与其不同物理性质相关的力的作用下,会以不同的轨迹运动。一些颗粒可以通过与覆盖电极的介电层接触而进一步带电(摩擦带电)。设计参数适宜(例如电极配置、间距和电压特性)的静电行波系统可用于传输和分离细小的干颗粒<sup>[52]</sup>。

Kawamoto 等<sup>[53]</sup>开发了一种利用电动力行波的分选系统(如图 6 所示),该设备分选过程为当对电极施加四相高压时,电极上方产生电动力行波,小的矿物颗粒通过垂直沉降的电极在高位向上输送,大颗粒容易下降。还利用该系统对粒径为 45 μm 月球模拟矿 FJS-1(由 49.4% SiO<sub>2</sub>、10.0% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、9.3% CaO、8.0% FeO 和 4.4% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成)进行了真空(0.1 Pa)实验,所获得的的小颗粒平均粒径为 12 μm,小于 10 μm 的颗粒产率为 30%,相较于两相电压的驻波分选系统,10 μm 的颗粒产率提高了 20 百分点,实验结果表明该系统适用于月球矿物粒度分选。

静电行波分选法具有结构简单、功耗低和不需要

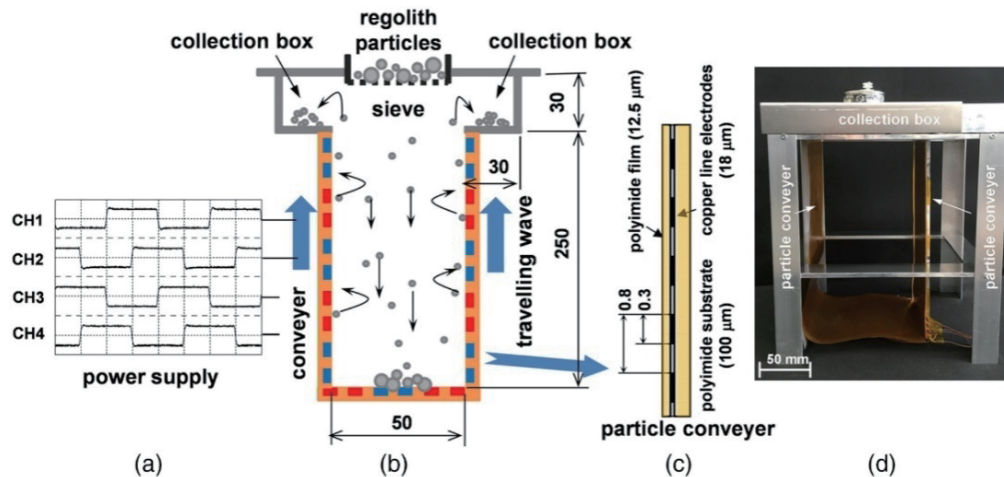


图 6 电动行波分选系统的实验装置<sup>[53]</sup>。(a) 四相直角波电压的波形;(b) 设置的配置;(c) 输送机板的横截面图;(d) 安置在真空室的分选系统的照片

Fig. 6 Experimental setup of sorting system using electrodynamic traveling wave: (a) wave form of four-phase rectangular-wave voltage; (b) configuration of setup; (c) cross-sectional drawing of a conveyor sheet; and (d) photograph of sorting system settled in a vacuum chamber

任何机械驱动或消耗品的优点。由于月球风化层具有自然静电充电的特性,可能会使基于人工电荷采集的分离技术变得无用,在矿物颗粒进入静电行波系统之前对大块风化层进行脱料是必不可少的<sup>[4]</sup>。此外,月球昼夜温差较大,夜间发电较为困难,需要大型储能的太阳能发电解决方案以保证设备夜间的正常运行。

### 3.4 磁选

磁选是在不均匀磁场中利用矿物之间的磁性差异而使不同矿物实现分离的一种选矿方法<sup>[54]</sup>。鉴于月球风化层中都含有大量铁磁性物质,用磁选对其进行分选理论上是可行的。磁选设备是利用磁系材料(锶铁氧体、钕铁硼合金、钕钴铜永磁合金等)产生不均匀磁场使矿粒磁化,进而产生磁力,磁化后的磁性矿粒因受磁力作用会吸附于磁体表面,随磁场强度减弱而落于磁性产品槽,非磁性矿粒在离心力和重力作用下落入非磁性产品槽<sup>[55]</sup>。磁选法是钛矿选矿工艺中最普遍使用的方法<sup>[56-57]</sup>。相较于电磁磁选机,永磁磁选机具有结构简单、节省能耗、操作维护方便和性能稳定的优点,使其能更好适应复杂的月球环境,所以目前月球磁选研究大多围绕永磁磁选进行<sup>[58]</sup>。

Oder 等<sup>[12]</sup>使用 Frantz 等动力分离器,从辉石(顺磁性)中磁性分离氧化铁和钛铁矿取得了一定的成功。Kawamoto 等<sup>[59]</sup>将月球模拟物 FJS-1( $<53 \mu\text{m}$ )均匀地摩擦在宇航服上,然后使用永磁体进行去除,成功地从织物中去除了 50%~70% 的模拟物。Berggren 等<sup>[12]</sup>探索使用 N-50 级钕铁硼永磁体从二元混合物和月球模拟物中富集磁性和顺磁性材料,实验成功地从石英砂中富集了氧化铁(从 10% 富集至 87%,两次分选)和钛铁矿(从 10% 富集至 75%,三次分选)。

从目前公布的数据来看,对月球模拟矿物进行磁

选的研究较少且模拟实验的成功程度也较低。随着月球土壤成熟度的增加,风化层中磁性成分的比例也会增加,这使得从富铁辉石和凝结核中分离出钛铁矿变得更具挑战性<sup>[60]</sup>。由于永磁磁选机是磁体经外磁场磁化后获得高剩磁来产生较强的恒定磁场对矿物进行选别,月球磁场强度变化对永磁磁选机影响较小,但需要注意月球低重力对磁选过程中微细矿物颗粒下落时的影响。永磁体还易受高温和化学腐蚀等复杂多变的运行环境的影响,产生不可逆的退磁风险<sup>[61]</sup>。因此,永磁体磁选机应用到月球上时,需配备冷却和防尘装置。

## 4 结论与展望

(1)月球矿产资源丰富,合理开发利用有助于月球基地建设和后续太空探索。由于月球低重力、超高真空、强烈的太阳照射、风化层的静电敏感性、阴影区域的低温以及庞大的供应链成本等问题难以克服,月球矿产资源开发利用仍存在诸多困难,目前仍处于探索研究阶段。

(2)为了实现对月球矿产资源的高效利用,许多学者模拟月球环境进行了许多选矿研究,目前对月球选矿的模拟研究技术有:①低能耗提取;②离心筛分;③平行板分离器的摩擦充电分选;④静电行波分选;⑤永磁体分选。

(3)通过对月球选矿技术进行综述,发现月球选矿技术研究中有以下问题被忽略:①细粒( $<50 \mu\text{m}$ )占月球风化层的 40%,但在目前月球选矿技术研究是被忽略的。②静电行波分选研究中颗粒大小和形状特征的影响常常被忽视。③月球尘埃容易附着在设备表面,且具有很强的磨蚀性,因此可能会对长时间加工的材料产生磨损,需对选矿设备所处环境进行防尘



处理。④迄今为止的大部分月球原位选矿研究都集中在静电分选上,对磁选和其他干式选矿技术研究较少。智能光电分选作为干选法,具有不耗费药剂、分选精度高、分选效率高、矿物回收率高等优点,在月球原位选矿中具有应用前景,但光源发射器容易受光照、温度、湿度等因素的影响,需要对光电分选机进行一定技改以适应月球环境,并且还需要对月球矿物的物理特性进行深入研究,以确定光电分选设备的应用参数,使光电分选机的分选效率和使用寿命最大化,从而降低成本,提高选矿效率。⑤月球表面受到来自太阳的电磁(EM)、高能粒子和银河宇宙射线的辐射,辐射会损坏电子元件、降解建筑材料和造成人体损害,选矿场所的屏蔽辐射设计也是必不可少的。

### 参考文献:

- [1] 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.  
WU W R, LIU J Z, TANG Y H, et al. China lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 405-416.
- [2] ZHOU C, JIA Y, LIU J, et al. Scientific objectives and payloads of the lunar sample return mission-Chang'e-5 [J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(1): 823-836.
- [3] TOKLU Y C, ACIKBAS N C, ACIKBAS G, et al. Production of a set of lunar regolith simulants based on Apollo and Chinese samples[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 72(2): 565-576.
- [4] SHAW M, HUMBERT M, BROOKS G, et al. Mineral processing and metal extraction on the lunar surface—challenges and opportunities[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2022, 43(7): 865-891.
- [5] 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: 106673.
- [6] KAWAMOTO H. Vibration transport of lunar regolith for in situ resource utilization using piezoelectric actuators with displacement-amplifying mechanism[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2020, 33(3): 04020014.
- [7] CRAWFORD I A. Lunar resources: a review[J]. *Progress in Physical Geography—Earth and Environment*, 2015, 39(2): 137-167.
- [8] 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.  
GAO N, XU Y K, LUO T Y, et al. Recent advance and prospect of the lunar mineral resources exploration[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2022, 42(2): 222-230.
- [9] 秦克章,邹心宇.行星矿产及行星资源地质学初论[J].岩石学报,2021,37(8):2276-2286.  
QING K Z, ZOU X Y, Potential mineral resources in the planets and preliminary discussion on planetary resource geology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(8): 2276-2286.
- [10] 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.  
PEI Z Y, LIU J Z, WANG Q, et al. Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(24): 2577-2586.
- [11] 欧阳自远,邹永廖.月球的地质特征和矿产资源及我国月球探测的科学目标[J].国土资源情报,2004(1):36-39.  
OUYANG Z Y, ZOU Y L. Geological characteristics and mineral resources of the moon and scientific objectives of lunar exploration in China[J]. *Natural Resources Information*, 2004(1): 36-39.
- [12] RASERA J N, CILLIERS J J, LAMAMY J A, et al. The beneficiation of lunar regolith for space resource utilisation: A review[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 186: 104879.
- [13] 宋洪庆,杜恒畅,张杰,等.月球氦-3资源的原位开采热释放行为研究[J].空间科学学报,2021,41(5):787-792.  
SONG H Q, DU H C, ZHANG J, et al. Release behavior research of in-situ helium-3 resources extraction in moon under heating[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, 41(5): 787-792.
- [14] FA W Z, JIN Y Q. Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer[J]. *ICARUS*, 2007, 190(1): 15-23.
- [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.  
WANG C, ZHANG X J, YAO W, et al. Research prospects of lunar polar water ice resource in-situ utilization[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 241-247.
- [16] NOZETTE S, LICHTENBERG C L, SPUDIS P, et al. The clementine bistatic radar experiment[J]. *Science (New York, N. Y.)*, 1996, 274(5292): 1495-1498.
- [17] 吴言蔚,贺佳峰,王国光.月球内部水和月表水冰资源研究进展[J].高校地质学报,2023.  
WU Y W, HE J F, WANG G G, Research advances of water in lunar interior and water ice on lunar surface[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2023.
- [18] HAYNE P O, HENDRIX A, SEFTON-NASH E, et al. Evidence for exposed water ice in the moon's south polar regions from lunar reconnaissance orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements[J]. *ICARUS*, 2015, 255: 58-69.
- [19] BRADLEY L. Jolliff, L. R. Gaddis, G, et al. New views of the Moon: better understanding through data integration[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2000, 81(31): 349-353.
- [20] 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. Key science and technology issues of lunar in situ resource utilization[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(6): 907-918.
- [21] 李琛,魏奎先,李阳,等.月球表面矿产资源原位利用研究进展[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(12):3289-3299.  
LI C, WEI K X, LI Y, et al. Research progress on in-situ resources utilization of lunar surface minerals[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2020, 51(12): 3289-3299.
- [22] CILLIERS J J, RASERA J N, HADLER K. Estimating the scale of space resource utilisation (SRU) operations to satisfy lunar oxygen demand[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 180: 104749.
- [23] 刘贤良.月昼期间月球车的热性能计算[D].南京:南京航空航天大学,2018.  
LIU X L. Thermal calculation for a lunar rover in the lunar day[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [24] 支羽萧,石耀霖.月表温度对于月幔对流影响的数值模拟研究[J].地球物理学报,2023,66(2):685-697.  
ZHI Y X, SHI Y L. Influence of surface temperature on lunar convection[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(2): 685-697.
- [25] 刘惠中,吴华东.螺旋选矿设备的应用现状及展望[J].有色金属(选矿部分),2022(5):151-158.  
LIU H Z, WU H D. Application and prospect of spiral concentrator[J].

- Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2022(5): 151-158.
- [26] 张银川, 徐春江, 田忠坤, 等. 干扰床分选机颗粒自由沉降末速数学模型探索[J]. 选煤技术, 2018(1): 32-35.  
ZHANG Y C, XU C J, TIAN Z K, et al. Study on mathematical modelling for calculating free settling terminal velocity of particles in teetered bed separator[J]. Coal Preparation Technology, 2018(1): 32-35.
- [27] 刘志伟. 磨机磨矿效率影响因素分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(4): 66-69.  
LIU Z W. Discussion of the factors that influence grinding efficiency[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2018(4): 66-69.
- [28] 雷存友, 余浔, 冯裕果. 碎磨工艺现状及发展趋势[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(5): 15-19.  
LEI C Y, YU X, FENG Y G. Present status and development trend of comminution process[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2019(5): 15-19.
- [29] Craig L. Resource modelling for mining on the moon, mars and asteroids[C]//AusIMM Future Mining Conference. 2019.
- [30] Dreyer C B, Walton O, Riedel E P. Centrifugal sieve for size-segregation and beneficiation of Regolith[C]//Proceedings of the 13th ASCE Aerospace Division Conference and the 5th NASA/ASCE Workshop on Granular Materials in Space Exploration. 2012, 31-35.
- [31] 靳少康. 影响新型干式磁选机分选品位的因素分析[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.  
JIN S K. Analysis of factors affecting the separation grade of new dry magnetic separator[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2022.
- [32] 王海锋. 摩擦电选过程动力学及微粉煤强化分选研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2011.  
WANG H F. Study on the dynamics of triboelectrostatic separation and enhanced separation of fine coal[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2011.
- [33] 宋馨, 张有为, 刘自军, 等. 极月轨道上太阳能电池阵外热流规律分析[J]. 空间科学学报, 2015, 35(3): 362-367.  
SONG X, ZHANG Y W, LIU Z J, et al. External heat flux of the solar array on the polar lunar orbit[J]. Chinese Journal of Space Science, 2015, 35(3): 362-367.
- [34] WILLIAMS J P, PAIGE D A, GREENHAGEN B T, et al. The global surface temperatures of the moon as measured by the diviner lunar radiometer experiment[J]. ICARUS, 2017, 283: 300-325.
- [35] HODGES R R, HOFFMAN J H, JOHNSON F S. The lunar atmosphere[J]. Icarus, 1974, 21(4): 415-426.
- [36] 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.
- [37] Burke J D. Perpetual sunshine, moderate temperatures and perpetual cold as lunar polar resources[M]//Moon: Prospective Energy and Material Resources. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 335-345.
- [38] 张小平, 甘红, 李存惠, 等. 月尘运动与生物毒性研究进展[J]. 地球与行星物理理论评, 2021, 52(5): 495-506.  
ZHANG X P, GAN H, LI C H, et al. Recent progress in lunar dust migration and biological toxicity research[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2021, 52(5): 495-506.
- [39] YANG K, FENG W M, XU L Y, et al. Review of research on lunar dust dynamics[J]. Astrophysics and Space Science, 2022, 367(7): 67.
- [40] POPEL S I, ZELENYI L M, GOLUB A P, et al. Lunar dust and dusty plasmas: recent developments, advances, and unsolved problems[J]. Planetary and Space Science, 2018, 156: 71-84.
- [41] COLWELL J E, BATISTE S, HORANYI M, et al. Lunar surface: dust dynamics and regolith mechanics[J]. REVIEWS OF GEOPHYSICS, 2007, 45(2): RG2006.
- [42] 李健楠, 贺怀宇, 刘子恒, 等. 一种提取月球氦-3资源的地面试验装置及方法: 202210092037.6[P]. 2022-05-13.  
LI J N, HE H Y, LIU Z H, et al. The invention relates to a ground test device and method for extracting lunar helium-3 resources: 202210092037.6[P]. 2022-05-13.
- [43] 苏菲, 贺怀宇, 刘冉冉, 等. 一种低能耗月球原位稀有气体提取系统及提取方法: 201911172554.9[P]. 2021-05-04.  
SU F, HE H Y, LIU R R, et al. The present invention relates to a low energy consumption lunar in situ noble gas extraction system and extraction method: 201911172554.9[P]. 2021-05-04.
- [44] MITCHELL K, URADE S, KERSHAW A, et al. 3D printing of conical centrifuge system for mineral particle separation[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 306: 122567.
- [45] TRIGWELL S, CAPTAIN J, ARENS E, et al. Evaluating the use of tribocharging in electrostatic beneficiation of lunar simulant[C]//Florida AVS Symposium. 2007.
- [46] QUINN J W, CAPTAIN J G, WEIS K, et al. Evaluation of tribocharged electrostatic beneficiation of lunar simulant in lunar gravity[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(1): 37-42.
- [47] TRIGWELL S, CAPTAIN J G, ARENS E E, et al. The use of tribocharging in the electrostatic beneficiation of lunar simulant[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(3): 1060-1067.
- [48] TRIGWELL S, LANE J E, CAPTAIN J G, et al. Quantification of efficiency of beneficiation of lunar regolith[J]. Particulate Science and Technology, 2013, 31(1): 45-50.
- [49] LI T X, BAN H, HOWER J C, et al. Dry triboelectrostatic separation of mineral particles: a potential application in space exploration[J]. Journal of Electrostatics, 1999, 47(3): 133-142.
- [50] TRIGWELL S, CAPTAIN J, WEIS K, et al. Electrostatic beneficiation of lunar regolith: applications in in situ resource utilization[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(1): 30-36.
- [51] RASERA J N, CILLIERS J J, LAMAMY J A, et al. Experimental investigation of an optimised tribocharger design for space resource utilisation[J]. Planetary and Space Science, 2023, 228: 105651.
- [52] YU Y, CILLIERS J, HADLER K, et al. A review of particle transport and separation by electrostatic traveling wave methods[J]. Journal of Electrostatics, 2022, 119: 103735.
- [53] KAWAMOTO H, MOROOKA H, NOZAKI H. Improved electrodynamic particle-size sorting system for lunar regolith[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2022, 35(1): 04021115.
- [54] 赵文迪, 章晓林, 景满, 等. 钛铁矿选别工艺进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(2): 50-56.  
ZHAO W D, ZHANG X L, JING M, et al. Progress of ilmenite separation process[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2020(2): 50-56.
- [55] 张冰倩, 林周越, 方利强, 等. 磁选机的研究与应用现状[J]. 云南冶金, 2017, 46(5): 13-17.  
ZHANG B Q, LIN Z Y, FANG L Q, et al. Research and application status of magnetic separator[J]. Yunnan Metallurgy, 2017, 46(5): 13-17.
- [56] 刘琴. 我国钛矿选矿概述[J]. 四川有色金属, 2021, 138(1): 6-8.  
LIU Q. Review of titanium ore processing in China[J]. Sichuan

- Nonferrous Metals, 2021, 138(1): 6–8.
- [ 57 ] 李金, 罗荣飞, 王洪彬, 等. 原生钛铁矿石选矿装备的应用进展与优化建议[J]. 现代矿业, 2021, 37(6): 166–168.  
LI J, LUO R F, WANG H B, et al. Application progress and optimization suggestions of primary titanite mineral processing equipment[J]. Modern Mining, 2021, 37(6): 166–168.
- [ 58 ] 冯定五, 孙仲元, 陈苾. 钕铁硼永磁体在选矿中的应用[J]. 磁性材料及器件, 1994(4): 51–55.  
FENG D W, SUN Z Y, CHEN J. Application of NdFeb permanent magnet in mineral processing[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 1994(4): 51–55.
- [ 59 ] KAWAMOTO H, INOUE H. Magnetic cleaning device for lunar dust adhering to spacesuits[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 25(1): 139–142.
- [ 60 ] Oder R R. Magnetic separation of lunar soils[C]//in IEEE Transactions on Magnetics. 1991: 5367–5370.
- [ 61 ] 孙自凯. 永磁同步电机永磁体退磁故障性能分析[J]. 电机技术, 2022(6): 53–56.  
SUN Z K. Performance analysis on the permanent magnet demagnetization fault of PMSM[J]. Electrical Machinery Technology, 2022(6): 53–56.

## Research Progress of Lunar Mineral Resources and In-situ Beneficiation Technology

FAN Linlin<sup>1</sup>, TONG Xiong<sup>1,2,3</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, WEN Xiaoyun<sup>1</sup>, HU Zewei<sup>1</sup>

1. Faculty of Land Research Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. National and Local Joint Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Metal Mine Tailings Resources, Kunming 650093, Yunnan, China;

3. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources for Clean Utilization, Kunming 650093, Yunnan, China

**Abstract:** The lunar is rich in iron (Fe), titanium (Ti), chromium (Cr) and aluminum (Al) and other mineral resources. At present, in situ resource utilization (ISRU) is the most effective way to develop and utilize lunar mineral resources, and mineral processing is the key step of in situ resource utilization. However, the traditional mineral processing technology is not suitable for the lunar environment of low gravity, water shortage and extreme temperature, and new mineral processing technology needs to be studied urgently. Based on the types and distributions of proven useful gas elements, water-ice mineral resources, metal and non-metal mineral resources on the lunar surface, the obstacles caused by environmental factors such as lunar gravity, surface temperature, water resources and dust on the implementation of lunar mineral processing technology were analyzed, and the progress of simulation research on lunar mineral processing technology such as low-energy extraction, centrifugal screening, electrostatic separation and magnetic separation was summarized. The future development of lunar mineral processing technology is prospected.

**Keywords:** lunar; mineral resources; resource in-situ utilization; mineral processing

引用格式: 范琳琳, 童雄, 刘洋, 温小韵, 胡泽伟. 月球矿产资源及其原位选矿技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(4): 1–11.

FAN Linlin, TONG Xiong, LIU Yang, WEN Xiaoyun, HU Zewei. Research progress of lunar mineral resources and in-situ beneficiation technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(4): 1–11.