DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.02.016

月球氦-3资源利用技术研究进展与应用前瞻

卢忆安[1,2]，姚晓宇[3]，郑爽[1,2]，尹鹏宇[3]，任尔行[3]，王婷婷[4]，贺怀宇[5]，沈俊[3*]

（1. 中国科学院理化技术研究所，北京 100190；2. 中国科学院大学未来技术学院，北京 100049；3. 北京理工大学机械与车辆学院，北京 100081；4. 深空探测全国重点实验室，合肥 230088；5. 中国科学院地质与地球物理研究所，北京 100029）

摘要：月球氦-3作为未来聚变能源、先进低温科技领域的关键资源，对于保障人类能源可持续发展、未来深空开发具有重要价值；虽在月壤细颗粒中富集，但实施开发面临极端环境检测、提取能耗、闭环储运等挑战，亟需建立相应的工程化应用体系。本文面向月球氦-3资源的全链条开发需求，在系统梳理月球氦-3资源研究现状和探测任务规划的基础上，分析了月球氦-3资源的来源与赋存机制及遥感反演、原位质谱探测等资源评价方法；对比剖析了高温热解、机械破碎、热解耦合等采集与提取工艺的能效约束及工程难点，并从系统工程视角探讨了气体富集、封装、低温贮存、地月转运等关键技术链条。进一步提出了“地面先行、原位验证、逐步放大”的技术演进路径，未来可重点突破月球氦-3高分辨原位检测、低能耗热释放及深冷分级分离技术，强化多源数据融合反演、原位能源耦合利用、模块化采集与提取系统集成设计。相关内容全面展示了月球氦-3资源开发从实验室模拟走向月面工程实践的演进逻辑，可为领域技术研究与工程推进提供参考。

关键词：月球氦-3；原位资源利用；采集与提取；储运技术；同位素分离

中图分类号：P184；V476.3　　**文献标识码：**D

Progress and Prospects of Lunar Helium-3 Resource Utilization Technologies

Lu Yian[1,2], Yao Xiaoyu[3], Zheng Shuang[1,2], Yin Pengyu[3], Ren Erxing[3], Wang Tingting[4], He Huaiyu[5], Shen Jun[3*]

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 4. National Key Laboratory of Deep Space Exploration, Hefei 230088, China; 5. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Lunar helium-3 is regarded as a key strategic resource for future fusion energy and advanced cryogenic technologies, and it is of great significance for sustainable energy development and future deep-space exploration. Although helium-3 is enriched in fine-grained lunar regolith, its practical exploitation is still constrained by resource detection under extreme lunar environments, high energy consumption of extraction processes, and requirements for closed-loop storage and transportation. Therefore, an engineering-oriented application system for lunar helium-3 utilization is urgently needed. Oriented toward the full-chain development requirements of lunar helium-3, this study reviews the current research status and planned exploration missions related to lunar helium-3, and analyzes the source as well as implantation and occurrence mechanisms of lunar helium-3, together with resource assessment methods including remote-sensing inversion and *in-situ* mass spectrometric detection. Moreover, it examines the energy-efficiency constraints

收稿日期：2026-02-14；**修回日期：**2026-04-14

通讯作者：*沈俊，北京理工大学机械与车辆学院教授，研究方向为极低温制冷及地外资源利用技术；E-mail: jshen@bit.edu.cn

资助项目：深空探测实验室开放基金项目(NKDSEL2024001)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

and engineering difficulties in collection and extraction processes, including high-temperature thermal release, mechanical crushing, and coupled thermal extraction methods. Key technical chains, including gas enrichment, packaging, cryogenic storage, and Earth-Moon transportation, are further discussed from a systems engineering perspective. On this basis, a technological evolution route of "ground-based development, *in-situ* verification, and stepwise scale-up" is proposed. Future research should focus on high-resolution *in-situ* detection of lunar helium-3, low-energy thermal release, and deep-cryogenic staged separation; and multi-source data fusion inversion, coupling with *in-situ* energy utilization, and integrated design of modular collection and extraction systems should be strengthened. This study presents the evolutionary logic of lunar helium-3 resource development from laboratory simulation to lunar-surface engineering practice, which may provide a reference for future technological research and engineering implementation in this field.

Keywords: lunar helium-3; *in-situ* resource utilization; collection and extraction; storage and transportation technologies; isotope separation

一、前言

进入21世纪，国际上的月球探索活动逐步由科学探测转向以建立月球基地、开展原位资源利用（ISRU）为长期目标的阶段[1]。美国将月球ISRU纳入“阿尔忒弥斯”计划中的任务与技术路线图[2]；欧洲航天局（ESA）在新版太空探索路线图中将月球ISRU作为长期发展方向[3-4]；日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）与相关工程公司合作开展月球ISRU工厂概念研究，确认关键技术可行性[5]。国际上的月球探索活动正在形成“资源勘测–技术示范–系统验证”发展路径。

潜在可用的月球资源类型众多，其中氦-3因在未来能源、前沿科技领域具有应用前景而受到高度关注。氦-3作为氘–氦-3核聚变反应的关键燃料，释放的能量主要由带电粒子携带，理论上具有清洁、高效、安全等独特优势，被视为未来理想的能源形式之一。氦-3也是超导量子计算、医学成像、低温物理研究等前沿科技领域的关键同位素制冷剂[6]，稳定供应氦-3成为影响超导量子计算大规模发展与产业化应用的关键因素。地球因磁场与大气的屏蔽而极少储藏氦-3，估算地球上的氦-3储量约为500 kg。月球表层月壤蕴藏的氦-3资源总量预计超过1×10^6 t[7]，是人类目前已知最具开发潜力的地外能源库。鉴于来源的稀缺性，氦-3的市场价格为百万美元/kg的水平，显现了该类资源在月球开发中的经济属性。对人类未来发展而言，开采月球氦-3是缓解地球氦-3资源短缺的有效途径。

主要航天国家及其商业实体开始布局月球氦-3资源利用。美国通过“阿尔忒弥斯”计划为商业公司参与月球资源开发提供指引。俄罗斯重启“月球”系列探测任务，将月壤挥发物资源利用研究纳入与中国共建的“国际月球科研站”科研项目[8]。印度航天研究组织在“月船三号”成功登陆月球南极后，声明了勘探包括氦-3在内月球资源的远期目标。ESA以参与美国“阿尔忒弥斯”计划、支持内部基础研究的方式，为未来的月球资源利用进行技术储备。商业航天企业也成为月球资源利用领域的积极参与者，如美国星际矿业公司公布“月球勘探”商业计划，拟在2030年前后开展月球氦-3的商业化开采。然而，月球资源开发的国际法律规则仍在演进之中，尚未形成资源开采、利用边界、利益分配机制方面的共识。

掌握先进的月球资源勘探与开采利用技术成为获取未来战略主动权的关键因素。国际上月球氦-3资源利用研究主要围绕4个核心环节展开，面临一系列技术难点与挑战。月球氦-3资源特性是工程实施的基础，尚缺乏精细化、高分辨率的月球氦-3资源分布图谱。氦-3资源探测及评价涉及轨道遥感间接探测、月面原位直接勘测两类主要方式，探测设备在月面极端环境下的高可靠、长期工作、超高灵敏度、小型化仍是工程挑战。氦-3采集与提取涉及月壤采集、矿物预处理、释气及气体富集，核心瓶颈为真空条件下细颗粒的有效分离、低能耗条件下的高效释气与纯化。氦-3储运需要高性能的低温绝热系统以支持月面的长期存储、降低地月运输过程中的损耗。

系统梳理月球氦-3资源利用技术现状并探讨应用方案，具有前瞻性并受现实需求驱动。本文综述国际上月球氦-3资源特性、勘探、提取、贮存等方面的研究与应用进展，分析蕴含的关键科学与工程问题，提出全链条系统构想与自主工程架构，可为月球资源利用领域的战略规划和技术部署提供参考。

二、月球氦-3 资源特性

氦-3 是自然界中极为稀有的氦同位素，原子核由 2 个质子、1 个中子构成，相对原子质量为 3.016，常温常压下为惰性气体，不具有放射性[9]。月球缺乏全球磁场和稠密大气，长期受太阳风直接辐照，在表层月壤中赋存了较为丰富的氦-3 资源。研究月球氦-3 的来源与形成机理、注入与赋存机制、空间分布与含量特征，是未来开发利用的关键前提。

（一）来源与形成机理

宇宙中的氦元素主要有两种形成途径：宇宙大爆炸时期的原初核合成、恒星内部的核聚变反应[10]。太阳是典型的主序星，太阳核心时刻进行着将氢聚变为氦的核聚变反应（成为太阳能量的主要来源）。太阳内部以质子－质子链为主的核聚变反应在 $^{1}H \rightarrow {}^{2}H \rightarrow {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He$ 序列中持续产生中间产物氦-3（见图 1），产生与消耗过程达到动态平衡，使太阳内部始终维持着一定浓度的氦-3[11]。太阳内部的物质输运过程（如对流）将太阳核心产生的氦-3 输运至日冕。日冕的温度超过 1×10^{6} K，日冕层中的高温等离子体在太阳引力无法束缚的情况下向太空膨胀形成超声速带电粒子流（即太阳风）[12]。

太阳风的物质组成与太阳外层大气基本一致，主要由高速带电的质子和电子（合计占比约为 95%）构成，也包含约 4% 的 α 粒子（氦-4 原子核）、微量的其他惰性气体离子[11]。根据“尤利西斯号”太阳探测器上太阳风离子成分谱仪的长期原位观测数据，太阳风中 $^{3}He/^{4}He$ 的同位素比值为 1×10^{-4} 量级，呈现与风速、源区条件相关的系统差异[13]。阿波罗月球任务“太阳风成分实验”[14]使用金属箔在月面直接曝晒并返样分析得到 $^{3}He/^{4}He\approx4\times10^{-4}$（不确定度为 1×10^{-4}），与“尤利西斯号”太阳探测器的结果量级一致，也证明可在月面上有效捕获太阳风粒子。在“起源号”航天任务返回的超纯晶圆靶片上测定了全太阳风 $^{3}He/^{4}He$ 的平均比值为 4.64×10^{-4}[15]，进一步验证了太阳风中 $^{3}He/^{4}He$ 的同位素比值。

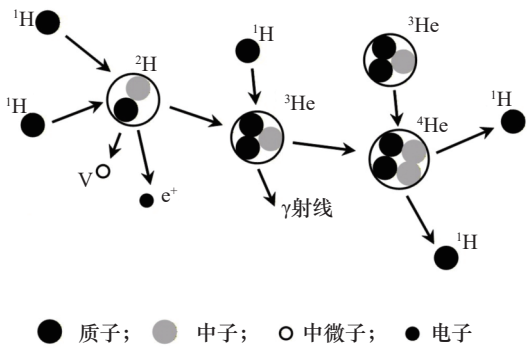


图 1　质子－质子链式反应分支

对阿波罗等任务返回的月壤样品进行同位素分析是确定月壤中挥发分来源的关键手段。20 世纪 70 年代对“阿波罗 16 号”月壤样本中的惰性气体进行测量，结果（$^{3}He/^{4}He\approx3\times10^{-4}$）与太阳风特征高度一致[16]。随后采用闭式高分辨逐步刻蚀技术分析月壤中的钛铁矿等矿物，证实释放出的氦、氖具有与太阳风几乎一致的同位素组成。氦同位素组成 $^{3}He/^{4}He$ 精细测定为 $(4.47\pm0.13)\times10^{-4}$，不同年代的样品结果也相似，由此量化了月壤中太阳风氦-3 的同位素基准[17-18]。通过太阳风注入的解释同样适用月壤中氮以外的挥发性元素[19]。月壤样品同位素研究认为太阳风的持续注入是月壤中氦元素的主要来源，此结论构成了月球氦-3 资源特性的基础认识。

（二）注入与赋存机制

太阳风粒子抵达并轰击月球表面后被有效捕获并长期保存，关键在于月壤颗粒对注入粒子的捕获能力、不同矿物组分的差异性保持、注入与多种流失过程之间的动态平衡。

太阳风造成的大部分辐照损伤是由氦离子流引起的，而辐照损伤会导致材料中出现更多的陷阱位点（即晶格缺陷）[20]。随着辐照损伤的累计，月壤颗粒最外层从有序晶体结构逐渐向无序的非晶态演变，进而形成无定形边缘。透射电镜结果显示，暴露月壤颗粒表面普遍出现厚度为 20~100 nm 的辐照－蒸汽复合边缘层（见图 2）[21-22]，能量为千电子伏特

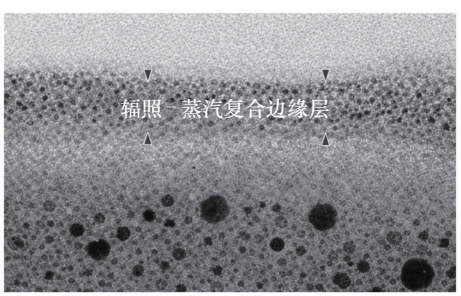


图 2　辐照－蒸汽复合边缘层的结构示意图

级的H^+/He^+在硅酸盐中的投影射程亦为数十至上百纳米，两者的厚度同量级即表明太阳风粒子的初始分布主要受限于这一区域[11]。复合边缘层中的高密度缺陷、非晶态网络构成氦-3的主要俘获介质，当注入的氦离子在晶格中被陷阱位点捕获，离子迁移便受缺陷势阱主导并显著受阻；晶体结构中更多、更显著的缺陷能够比无定形离子晶格（无定形玻璃）中的缺陷更有效地吸附注入的氦离子[23]。

月壤是由多种矿物组成的混合物，不同的矿物组分导致氦-3的捕获和保持能力存在明显差异。早期针对阿波罗任务风化层细颗粒与单矿物的阶梯升温释放及化学逐步刻蚀实验表明，月壤中钛铁矿的氦-3及氦-4浓度是月壤风化层平均浓度的10~12倍，显著高于同粒径的橄榄石、辉石/斜长石等矿物[24-26]，大部分惰性气体囤积在表层深度约200 nm区域[27]。钛铁矿具有优越的氦保持能力，不仅与钛铁矿相对致密且稳定的晶体结构有关[28]，而且得益于长期太阳风辐照在钛铁矿表面形成的厚度为40~50 nm的玻化TiO_2层；致密无序的玻璃相降低了氦-3沿晶道逃逸的概率，提高了氦-3长期保留的效率[29]。然而，在属性类似的“高钛、富铁”玄武岩母岩条件下，富铁辉石/橄榄石在空间风化过程中普遍生成玻化团聚体，在非晶界面处被玻璃包裹的起泡纳米铁同样携带了高密度氦泡。这就解释了风化成熟的细粒与团聚体中出现的氦-3富集现象[30]。

月壤中氦-3的赋存积累量始终处于动态平衡状态，主要由太阳风注入、损失、再封存等过程共同决定。在注入端，入射离子可能会在表面部分被中和为能量中性原子，“嫦娥四号”探测器结果反演显示月球表面静电势为50~260 V，使带电粒子在抵达月表前即减速和偏转，进而降低有效注入通量并使植入层变浅[31]。在损失端，持续的太阳风溅射（太阳风中的高能离子通过动量传递将表面原子从晶格中击出并使之逃逸的过程）会不断剥离月球表面原子并携带已俘获的稀有气体流失[32]。同时，月昼夜温差提供周期性热驱动，使浅表弱束缚的氦-3更易发生热脱附/扩散，进而增加氦-3的逸散倾向。长期的“园艺作用”（微陨击翻耕）可兼有释放、封存双重效应：冲击瞬时产生的局部熔融与蒸汽流，会以蒸发、溅射的方式释放部分惰性气体；也会在邻域沉积蒸汽并生成富缺陷的玻化层与蒸汽沉积层，为稀有气体提供新的陷阱与纳米孔隙（而再俘获/封存一部分稀有气体），长期作用后可将含氦-3颗粒翻埋至温度更冷且温变幅度更小的次表层[33-34]。

（三）空间分布与含量特征

月球氦-3的含量和分布受多种物理、地质因素的协同控制，呈现显著的空间异质性。当前月球氦-3空间分布与含量特征的认知，主要建立在遥感探测数据反演、返回样品分析、理论模型计算的基础之上。月壤中氦-3的含量与太阳风通量、钛铁矿含量、光学成熟度（OMAT）、月表温度及地形密切相关。

太阳风注入通量是月球氦-3富集的基本前提，在月球表面呈现明显的宏观分布规律：高纬度地区因入射角较小，单位面积接收的有效通量低于赤道区域；地球磁尾的作用使月球正面（近月面）受到显著的磁场屏蔽，导致接收的太阳风通量少于长期暴露于太阳风中的月球背面（远月面）[35]。观测数据显示，变化的太阳风α粒子注入贡献了约85%的氦储层[36]，逸散层中氦的驻留时间与通量变化高度相关[37]。这表明氦同位素的短期丰度分布受到显著的注入源动态影响。仅从注入源角度看，远月面赤道区域是氦-3的初始优势富集区。

月壤特殊的矿物组分特别是以钛铁矿为代表的含钛氧化物与富铁基质（辉石/橄榄石）提供了更高的氦俘获/保留效率，这是氦-3得以保存的关键因素。基于“克莱门汀号”探测器光谱数据开发的TiO_2含量遥感反演算法显示，近月面的高钛玄武岩月海普遍具有FeO含量偏高（可达20 wt%~24 wt%，而月海平均仅为16 wt%）、TiO_2富集的化学背景[38]。月球高地则因低的FeO、TiO_2含量成为劣势区，即便处于太阳风通量较强的低/中纬度，单位体积的俘获/保留效率也偏低[36,39]。多源数据比对结果表明[40-41]，高钛物质（TiO_2含量>6 wt%）集中在月球正面的月海玄武岩区域，而月球高地、大部分月球背面区域的TiO_2含量较低。因此，尽管近月面接收的太阳风通量较少，富含钛铁矿的高钛月海区域因其卓越的物质保存能力而成为月球氦-3资源最富集区域之一。

OMAT是表征月壤受空间风化（主要指太阳风辐照、微陨石撞击）改造程度的综合性参数[42]。在控制其他因素的前提下，氦-3含量与OMAT呈负相

关，即OMAT越低，则暴露时间越长、金属纳米铁颗粒及玻化团聚体等发育越充分、单位体积的氦-3积累量越多[39]。当TiO_2含量较高时，这一负相关效应会被部分抵消，如阿波罗月球任务样品中高TiO_2样品偏离了OMAT–^{3}He的负相关趋势[40]。结合“嫦娥三号”探测器搭载的“玉兔号”月球车巡视区原位反演数据来看，将风化层厚度与表面TiO_2–^{3}He经验回归联合，估算氦-3的面密度为0.083~0.114 g/m^2，显著高于月面上的均值[43]。这表明，TiO_2、层厚对氦-3含量的主导性强于OMAT，OMAT更适合作为加权因子参与综合评估。因此，TiO_2/FeO的空间格局、OMAT指标可共同刻画与氦-3潜在富集相一致的带状高值区。

温度是调控氦-3解吸速率的最直接物理参数。月球赤道区域昼间温度接近400 K，在月球极区永久阴影坑内温度常年低于100 K。极大的温差使得月球极区成为太阳风气体的天然冷阱。理论模型结果表明，低温环境可将氦-3解吸速率降低数个数量级，从而有效抵消月球极区太阳风通量偏低的劣势，甚至可能使月球极区成为氦-3浓度最高的区域[44]。“月球勘探者号”在月球极区发现了氢富集的佐证[45]，也为未来月球极区氦-3资源勘探提供了重要的理论指导。月面地形则通过影响太阳风的局部入射角和产生阴影来进一步调节氦-3的微观分布格局。

月球氦-3的计算过程复杂，需要考虑多种变量，主流的计算方法及其结果如表1所示。基于遥感数据、阿波罗月球任务样品分析，普遍估算月球氦-3资源总量为1×10^{6}吨量级（见表2）[7,41,46]。不同的假设条件、遥感数据反演参数的内在误差、对太阳风动态变化以及用于模型校准的返回样品因采集和保存过程中气体损失而致的代表性偏差，都有可能导致月球氦-3总量估算的不同。随着探测活动、数据反演精度的提升，未来有望更精准地评估月球氦-3资源总量。

表1　氦-3分布研究的差异总结

文献来源	时间 / 年	计算方法	高氦-3区域
[40]	2007	太阳风通量、TiO_2、OMAT、月壤厚度	风暴洋、静海
[41]	2010	太阳风通量、TiO_2、OMAT、月壤厚度	风暴洋、远侧高地
[46]	2010	反演介电常数、月壤厚度	赤道区域、月壤厚度较厚区域
[47]	2019	太阳风通量、TiO_2、OMAT	利奇奥里、格里马尔迪陨石坑
[48]	2020	机器学习、反演介电常数、多传感数据	火山玻璃沉积区
[43]	2023	探地雷达预测“嫦娥三号”探测器着陆点附近的月壤厚度	“嫦娥三号”探测器着陆点

注：月壤厚度根据多通道微波辐射计反演得到。

表2　月球氦-3总量估计

文献来源	时间 / 年	氦-3总量/(×10^5 t)	假设条件
[49]	1986	11	高地和月海深度
[50]	1992	10	高地和月海深度
[51]	1993	8.4±6.9	分布均匀
[38-39]	1999	10	月壤深度
[52]	2007	24.69	TiO_2含量
[40]	2007	6.5	随深度衰减
		12.7	分布均匀
[41]	2010	6.6	随深度衰减
		17	分布均匀
[46]	2010	10.3	分布均匀

三、氦-3资源探测与评价技术

（一）轨道遥感间接探测

氦-3在可见光、近红外、微波、γ射线波段都不存在突出且独特的光谱线，难以像矿物那样被遥感设备直接成像。因此，月球氦-3探测主要采用间接遥感思路[53]。应用多种轨道载荷获取一系列与氦-3富集密切相关的参量（如太阳风通量、月壤成熟度、富钛矿物含量、风化层厚度及介电特性、外逸层中性氦的时空变化等），再利用已有月球样品和物理模型建立经验关系并将之推广到月球全域，进而反演出近表层氦-3的面丰度、整层月壤内氦-3的体储量。

1. 光学 / 高光谱成像反演月壤成分与成熟度

针对氦-3的轨道数据评价起源于“克莱门汀号”探测器的多光谱任务。“克莱门汀号”探测器配置了轻量化（410 g）、低功耗（4.65 W）的电荷耦合器件相机，首次获取了覆盖月球全域的紫外、

红外、可见光等波段的影像数据[54-55]，采用滤光片以显著增强对含铁矿物的光谱辨识能力。以此为基础，开展了可见光多波段反射率与月壤矿物含量之间的关系研究，建立了FeO含量推导模型、FeO/TiO_2反演算法；引入OMAT参数并以阿波罗月球任务返回样品的特性为约束，构建了以“克莱门汀号”探测器数据为支撑的钛铁、OMAT月球全域制图体系[38,56-57]。随后，整合多源光谱数据及月球样品的特性，针对月海、高地、极区开展差异化区域优化，显著提升了月球复杂地形和高纬地区的FeO、TiO_2丰度分布图的可靠性[58-61]。在矿物、OMAT图的支撑下，应用TiO_2、OMAT、归一化的太阳风通量组合生成的月球氦-3面丰度分布图，给出了覆盖月球正反两面的氦-3面丰度与体储量估算值，确定了高钛月海为氦-3的最优先勘探区[35,40,41]。

2000年以来，高光谱成像技术进步迅速，显著提高了月表矿物识别和丰度反演的精度。在成像光学的基础上引入分光单元，高光谱成像仪可将像元辐射按波长展开为连续光谱，从而获得空间–光谱一体化的三维数据立方体[62]。以“月船一号”搭载的月球矿物测绘仪（M^3）为例，载荷覆盖0.42~3.0 μm光谱范围，具有10纳米级光谱分辨率、70~140 m空间分辨率，可针对月球全域范围解析辉石、橄榄石、富钛矿物的吸收特征，进而获取高质量的矿物学底图[63]。此外，得益于波段扩展至3 μm，M^3在太阳照射区高纬度表面首次探测到了与OH/H_2O相关的吸收特征[64]。这一过程与氦-3的太阳风注入机制同源，为研究太阳风与月表相互作用提供了新的证据。结合“克莱门汀号”探测器的多光谱数据、M^3提供的精细矿物制图，进一步优化了FeO、TiO_2的丰度反演结果，提高了氦-3潜在富集区的岩性约束可靠度[65-66]。

2. 微波辐射计反演月壤厚度

光学和高光谱遥感主要反映月壤表层数十微米至数毫米厚度范围内的矿物成分与成熟度信息，对氦-3在风化层中的体积分布约束度有限。为了弥补相关不足，“嫦娥一号”“嫦娥二号”探测器均搭载了多通道微波辐射计，利用微波低损耗、强穿透的介电特性（最大探测地下10 m深度），获取了月表亮温数据[67-68]。多通道微波亮温反演的月壤厚度，与地基雷达推算、撞击坑形态分析推算、阿波罗任务原位测量点数据均有良好的相关性[41,69]，相应观测结果支持了基于轨道微波数据开展月壤厚度及氦-3体储量评价的可行性。

3. 中子／γ射线能谱确定元素丰度

γ射线能谱仪（GRS）／中子谱仪（NS）作为微波遥感的有效补充手段，可探测月表浅层（约20~50 cm）元素被银河宇宙射线激发后产生的特征γ射线来确定相应元素的丰度[70]。以美国“月球勘探者”、日本“月极”探测器为代表的早期GRS/NS，实现K、Th、U、Fe、Ti、H等元素在月球全域尺度上的丰度制图，为识别高钛玄武岩单元和极区富氢区提供了基础[60,71]。“嫦娥二号”探测器搭载的GRS优化了能谱分辨率和探测效率，提取了微弱含量H的全月分布信号[72]。γ射线和中子探测技术无法直接测定氦-3，但提供的Ti、Fe元素丰度数据支持精确绘制月球钛铁矿分布图并在多源反演中作为风化层成分的先验约束，有效降低月球氦-3丰度反演模型与资源量评估的不确定性。

4. 紫外／极紫外观测月外逸层氦

紫外／极紫外光谱探测可从月球外逸层尺度对氦的收支平衡进行全局约束。例如，月球勘测轨道飞行器搭载的紫外光谱仪，通过He I发射谱线获取了月球外层氦原子的时空分布与演化特征[37,73]，相关结果与1973年“阿波罗17号”质谱仪的就地测量数据具有良好的一致性[74]。此类任务提供了新型的月球全域动态监测手段，为深入研究月球氦的来源、释放、迁移机制筑牢了基础。观测对象以氦-4为主，在已知太阳风$^3He/^4He$比值、放射性衰变贡献的前提下，观测数据可作为校准氦-3俘获效率、驻留时间的独立约束，进而为轨道遥感模型中太阳风通量与月壤保留能力之间的耦合关系提供物理依据。

综上，受限于氦-3缺乏直接的光谱识别特征，氦-3的轨道探测需依托多源遥感数据的综合反演。光学和高光谱成像为辨识月壤矿物组成与成熟度提供了高空间分辨率的约束。微波辐射探测在一定深度范围内可弥补风化层厚度与介电特性信息的缺失。中子和γ射线能谱分析为测定Ti、Fe等关键元素丰度提供了定量的先验信息。紫外／极紫外观测从外逸层尺度方面为太阳风氦的注入与释放过程提供了约束。将观测参量与返回样品实验数据、物理模型深度耦合，在工程应用中建立太阳风通量、月壤保留能力、岩性特征之间的半经验关联模型，将

成为月球全域尺度上开展氦-3 丰度、储量的综合反演及勘探靶区选优的核心技术手段。

（二）月面原位直接勘测

与轨道遥感的间接反演相比，着陆器上的原位分析装置可以直接对月壤样品热释放气体、月球近表空间稀薄气体进行高灵敏度的质量分析，成为检验氦-3 资源评价模型与遥感参数标定的基础性手段。现有关于月壤氦-3 含量的定量认知主要来自返回样品的稀有气体质谱实验，在此基础上演化出适用于月面环境的小型质谱、色谱–质谱、多谱型方案。

应用高真空静态稀有气体质谱系统，结合阶段升温或化学刻蚀，可有效释放月壤中的挥发性组分；利用多通道磁扇形质谱仪测定各同位素数据，分辨质核比（m/z）=3、m/z=4 对应的峰值可测量氦-3 绝对丰度、$^3He/^4He$ 同位素比值。实验表明，细粒风化层样品的氦-3 质量分数多为数个 ng/g（ppb 量级）[75-77]。制定返回样品的稀有气体质谱研究方案，关键在于将固相 ppb 量级氦-3 转化为气相 ppm 量级可测信号，在合理设计样品量、富集 / 净化流程的基础上，确保现有空间质谱技术在灵敏度上满足氦-3 原位测定的需求[78-81]。

最早开展月面氦元素原位分析的是“阿波罗 17 号”携带的开口式四极杆质谱仪，在 1~110 amu 质量数范围内的探测灵敏度为 10^2 atoms/cm^3 量级[82]。后续的轨道和撞击探测延续了四极杆质量分析方案，用于获取月球近月空间稀薄气体环境及日照侧外逸层的多组分质量谱信息[83-85]。受制于质量分辨率不足，四极杆质谱仪在 m/z=3 信号处难以有效区分 $^3He^+$ 与 H_3^+、HD^+ 的干扰峰[86]；但相关探测实践在工程角度上验证了小型四极杆质谱仪在月面环境下长期稳定运行的可行性，为在密闭分析室内进一步提高灵敏度和同位素分辨率确定了基础[87]。

行星探测任务（如“木星伽利略号”“金星先驱者号”“土星土卫六卡西尼号”等探测器）积累了丰富的轻元素与稀有气体同位素测量经验，采用的磁扇形与四极杆质谱仪为月球氦-3 原位测定提供了可借鉴的技术路线。“木星伽利略号”探测器上的四极杆质谱和同位素富集单元，可在木星大气中同时测得 $^3He/^4He$、多种稀有气体同位素比值，对含量低至 10^{-7}~10^{-6} 混合比的轻同位素具有良好的分辨率与精度[78,88]。“金星先驱者号”探测器的中性气体质谱仪采用 1~208 amu 的磁扇形质量分析器，对痕量气体成分的检出限约为 1 ppm，设置了专门的惰性气体同位素比测量单元[89-90]。“土星土卫六卡西尼号”探测器采用紧凑四极杆结构测定了土星和土卫六环境中的轻质中性与离子组分，质量分辨率和动态范围足以分离 1~4 amu 范围内的氢、氦及其同位素[91]。“火星凤凰者号”探测器集成了磁扇形质谱仪、气体富集池、溅射离子泵，质量范围为 0.7~140 amu，具备 ppb 量级低丰度星壤热释气体检测能力[92]。

色谱–质谱联用为月球氦-3 原位测量提供了另一类重要技术方案。“惠更斯号”探测器联合采用多柱色谱系统与四极杆质谱仪，通过复杂气体混合物的分级分离与质谱质量分析，检测了混合比为 10^{-8}~10^{-7} 的痕量成分同位素[93]。在火星取样与分析实验中，将多通道气相色谱、宽质量数四极杆质谱、可调谐激光光谱仪集成，具备原位大气分析、固体岩土样品加热、循环富集与组分分离等能力，测定了 1~1000 ppb 痕量挥发分及其同位素比[94]。

在质量分析单元的小型化方面，离子阱质谱、新一代傅里叶变换质谱等为月面巡视器搭载氦-3 原位分析仪提供了具有更高分辨率与集成度的技术方案。离子阱质谱仪完成太空环境中的生存和运行验证，与色谱技术、阶梯升温热释放手段结合应用，实现对轻元素稳定同位素比的原位定量（见图 3）[95-96]。静电轨道阱质谱的原型仪器在行星环境模拟实验中实现 10^5 Δm/m 的质量分辨率、ppm 量级的质量精度，展现出对复杂混合物中氦同位素峰进行精细分辨及定量的应用潜力[97]。随着商用质谱仪的迭代升级，小型化、高性能的探测载荷逐步在各类商业月球货运任务中投入实地验证。

结合相关质谱探测经验，面向月球氦-3 资源的原位探测方案普遍采用“样品加热–富集腔–色谱分离–质谱检测”的结构形式。小型四极杆、离子

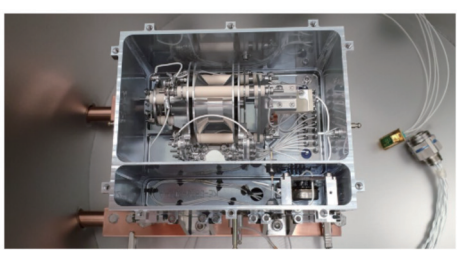


图 3　ESA 勘探者任务配置的月球挥发物探测器核心

阱等质量分析单元，在满足1~100 amu质量范围、10^{-13}~10^{-12} A检出下限的同时，支持将整机质量控制在数千克、功耗控制在数十瓦以内，适合在月面着陆器或巡视器平台上长期运行[98-100]。此类系统与采样钻探、样品控温处理等单元进行一体化集成，能够获得着陆点以下氦-3含量、$^3He/^4He$比值及其随深度的变化，为轨道遥感资源评价提供定点定量标定能力。

基于核技术的非接触式原位探测为快速测绘月球氦-3分布提供了新思路。美国星际矿业公司提出了一种基于纳秒中子分析及关联粒子成像的探测方案[101]，利用车载中子源激发月表Ti、Fe的特征辐射，实时反演钛铁矿浓度来间接锁定氦-3富集区。这种无需挖掘、“边走边测”的高效快速探测，有望大幅提高采矿点的筛选效率。近年来，针对氦-3核自旋特性的原位探测方法成为研究热点，如基于射频原子磁力计的非接触式测量，可对加热释放并经极化自旋的氦-3气体产生的微弱偶极磁场信号进行分析，在理想条件下对百克量级样品的检测灵敏度达到1 ppb水平[102]。虽然相关研究仅处于实验室验证阶段，也对磁环境的稳定性、氦-3释放/极化过程高度敏感，但作为未来氦-3资源直接勘探的潜在技术路线，将成为突破原位探测工程瓶颈的重要发展方向之一。

月球氦-3的原位直接探测可提供轨道遥感无法获取的定点高精度数据，将为氦-3资源评价和开采决策提供直接支持，然而未形成可在月面长期稳定开展氦-3高灵敏测量的工程化方案。质谱方法仍然是氦-3高灵敏定量测定的优选技术路线，高分辨磁质谱结合样品加热、富集腔的方案最有望成为未来月面直接探测氦-3的工程实现方向，相关仪器研制应关注小型化、高分辨率、痕量灵敏度、工程可行性。

四、氦-3采集与提取技术

氦-3采集与提取是月球原位资源开发的核心环节。根据月球氦-3空间分布的层位、粒径、岩相指向性等特征，开发利用需要经历月壤采集与预处理、氦-3释放、气体收集富集的全流程。月球处于高真空、低重力、剧烈温变的极端环境，对各环节技术应用都提出了严苛的约束。需要从工艺链视角出发，对氦-3采集与提取相关技术进行梳理和评估。

（一）月壤采集

月壤采集作为氦-3提取的前置核心环节，能够定向获取富氦-3物料并进行目标组分的物理分选，以显著降低后续释放环节的能耗与设备负荷。氦-3集中于月表浅层（厚度<100 μm）的细颗粒矿物中，一般高钛铁的月海风化层中氦-3含量更高[103-104]。在微观形态上，氦-3易被俘获在矿物表面玻璃层及晶格缺陷等处，相应赋存形态决定了后续破碎与热处理环节的难度及能耗。采集与预处理环节需要在场址选择、采样深度、粒径结构、矿物组成之间进行综合权衡，以最大程度地提高富氦细粒级物料在进料中的组分比例。

针对大规模、长周期的月球氦-3资源开发需求，提出了多种月面采矿及一体化处理方案。现有的月面采矿及原位处理技术方案主要以移动式作业平台为核心装备，深度集成挖掘机采掘、输送机构搬运、后端热处理设备，对月壤进行大通量处理与挥发分提取。在典型的工程设计方案中，采用斗轮挖掘机并配合筛分单元进行浅层月壤的连续处理，引入双向螺旋输送通道与内部低压腔体，在控制流速与压力梯度、确保密封的基础下持续出料[105-106]。对于功能可扩展的矿机原型，可在移动平台上进一步集成样品加热与收集系统，适应不同规模的月球基地开发需求[107-108]。相关一体化系统已在实验室、类月面试验场完成初步验证，但功率密度、粉尘防护、长期可靠性等仍待开展工程化研究[109]。

近年来，商业航天活动加快介入，推动了月球资源开发的商业化进程。美国星际矿业公司提出了具备每小时百吨级处理能力的氦-3“收割机”方案，模拟农业收割机连续流作业模式构建“即采即选”的选矿处理系统。方案原型已开展地面验证，初步展示了预处理阶段实时剔除低含氦量粗颗粒岩石的能力，可将单位产出能耗降低50%，大幅优化加热系统的体积与质量效率。此类商业化技术验证载荷拟在美国国家航空航天局（NASA）的商业月球载荷服务项目中获得发射机会。

不同于工程采矿场景，资源评估和工艺验证可依托小体积、高精度的取样装置来完成。现有的月壤微定量采样器配置了多层分隔舱、可控体积腔

体，支持毫克级、定量、定粒径的取样[110]，可在开采前快速获得不同层位和粒径条件下的氦-3 含量与释放特性。在深层采样方面，低功率钻进技术的可行性验证表明，轻量化钻具支持对硬质岩层的连续取芯，可拓展应用至极区、月海等地质单元[111]。近年来，NASA 开发了钻探勘探新地形钻机（见图 4），采用了旋转冲击式设计，可钻取月表 1 m 以下未受空间风化严重影响的深层挥发分样本；也集成“随钻随测”系统以监测钻进电流与温度，支持地层性质的实时评估；还可配合商用质谱仪进行逸出气体的在线分析[112-113]。ESA 研制了机器人钻机并与样品分析设备结合，用于−150 ℃条件下对月表 1 m 以下样品挥发分的提取与分析[90]。此类高精度的采集架构、钻 / 测一体化设计，为定点开采富含氦-3 的深层月壤提供了工程化方案。

（二）矿物预处理

物料采集后的预处理是降低后端热处理能耗的关键环节，主要围绕粒度分级、除尘、磁选、静电分选 4 个技术单元展开[114]。针对粒度控制，离心筛分技术已在模拟低重力环境下实现对月壤粗细颗粒的有效分离，如 NASA 在微重力飞机测试中有效分离了粒径>5 mm 的粗颗粒、粒径<100 μm 的细颗粒[115]。磁选技术是富集钛铁矿的重要手段，“阿波罗 16 号”样品的磁化率测量与磁选实验显示，高钛月海风化层中的磁性矿物含量明显更高，强磁场分选可用于含富氦-3 钛铁矿的初选[116]。静电分离技术关联月球真空环境下的增强颗粒摩擦带电效应，在地面试验中通过合理配置摩擦材料与电场实现钛铁矿 2~3 倍的富集[117]；抛物线飞行实验进一步证实，静电分离技术在低重力条件下仍具有良好的富集效率[118]。模块化集成技术成为预处理装备的重点发展方向，如集成旋转锥形粒度分级、永磁滚筒磁选、静电分选的复合分离系统（见图 5），在模拟月壤实验中展现出优异的处理能力与富集效果，实现铁氧化物组分约 2.5 倍的富集[119]。此外，介电弹性体驱动的振动输送系统在低重力环境下具有较高的物料输送速率，为预处理阶段中物料在采集、筛分、选矿等单元之间的输送提供了解决方案[120]。

（三）氦-3 释放技术

氦-3 释放指打破氦原子在矿物晶格缺陷、非晶玻璃层、纳米气泡中的束缚，使之在加热或应力作用下通过扩散、裂隙网络迁移到颗粒表面并逸出，是采集与提取整个链条中能耗显著、对回收率影响最大的环节。主要采用高温释放、机械破碎相结合的梯度释放方式，实施分阶段且节能高效的氦-3 释放（见表 3）。

1. 高温释放

氦-3 高温释放是研究广泛、技术成熟度最高的方法，通过升温提高氦原子在固体中的扩散系数，促进氦原子跨越由晶格位错、空位、非晶层构成的势垒并沿晶格和晶界向表面迁移并逸出。针对阿波罗月球任务样品的一系列实验表明，氦同位素释放遵循阿伦尼乌斯扩散关系，具有显著的多阶段释放特征（约 50% 的嵌入氦-3 在 500 ℃时释放，约 95% 的在 800 ℃时释放）[76,121-122]。基于动力学分析提出了“跳跃扩散”模型，认为氦-3 在室温下即可发生缓

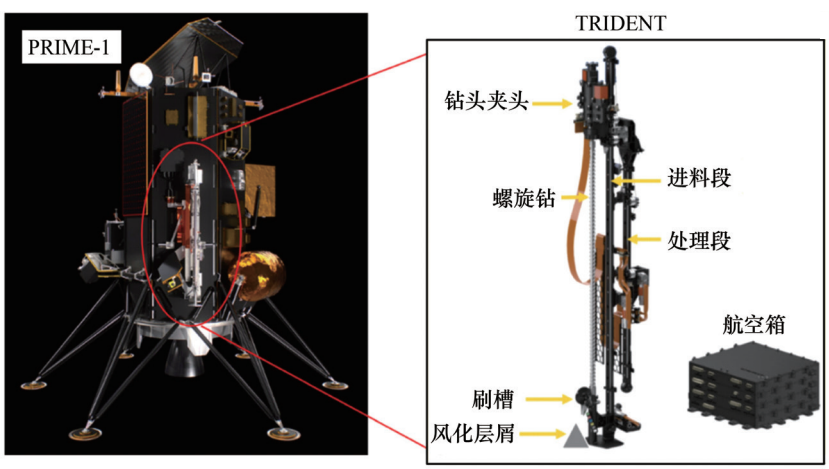


图 4　安装在 Nova-C 着陆器上的 PRIME-1 有效载荷和 TRIDENT 钻机

慢迁移，随着温度升高扩散速率呈指数级增长。然而，不同的陷阱位点具有不一致的激活能，导致释放曲线呈宽峰分布[123]。

基于分子动力学、第一性原理的计算过程能够精细刻画氦-3在钛铁矿中的热行为。分子动力学模拟表明，氦原子在金属表面的聚集和气泡演化会诱发严重的晶格畸变与原子重排，这种由缺陷诱导的俘获效应是限制氦-3低温释放的核心因素。针对钛铁矿的原位变温模拟揭示了释放过程的温度阶梯特征：低于300~1000 K温区的氦-3主要在晶格间隙与浅缺陷之间迁移，释放效率有限；当温度>1000 K时，深层空位陷阱中的氦-3开始大量逃逸而形成明显的“加速释放区”[124-125]。针对月球极区挥发物热提取开发的动力学耦合模型表明，挥发物的释放存在温度选择性，矿物分解阶段（>300 ℃）为氦-3与其他组分的协同提取提供了可用的温度节点[126]。

高温释放法的工程实现主要分为静态加热、流化床加热两类：前者对月壤颗粒进行整体加热，原理验证充分且氦-3回收率超过85%[104,106]；后者利用气体悬浮颗粒进行高效热交换，适合大规模连续处理，在月面环境下存在复杂气体流速控制、粉尘扬起、严苛密封等应用挑战[105]。在工程验证方面，NASA开发了氦提取与采集试验台，通过移动床热管换热器等对月壤模拟物进行受控加热，在700 ℃条件下实现0.14 μg/s的氦释放速率[127]。

综合来看，1000 K可视为月球原位提取氦-3的代表性加热阈值。需要指出的是，非晶TiO_2玻璃层的存在显著抑制了氦-3的扩散（见图6），因而在玻璃包裹的真实月壤体系中，可能需要更高的温度才能达到理想的释放效果。

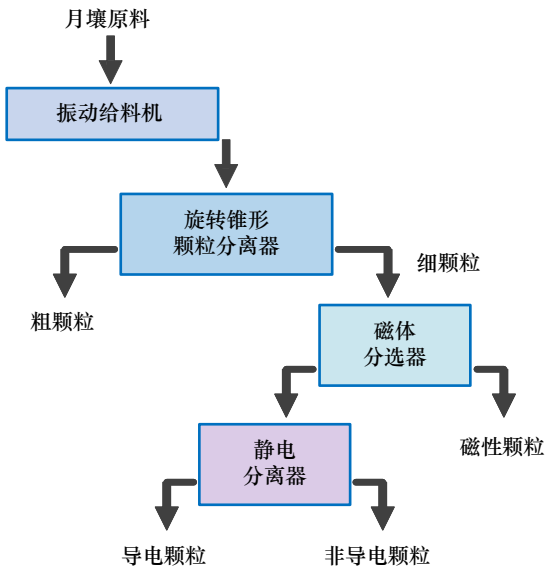


图5　月壤颗粒复合分离系统的工作原理

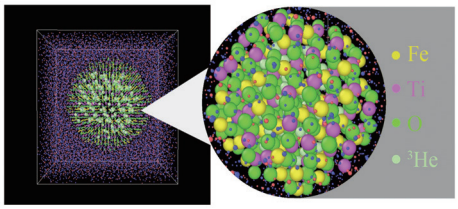


图6　玻璃-钛铁矿嵌套结构模型示意图

表3　氦-3释放技术路径对比

技术路径	核心原理	关键工艺温度	氦-3释放/回收率	相对能耗估算	技术成熟度	优势	挑战/局限	典型文献
静态加热法	整体加热月壤颗粒，依赖热扩散释放	700~1300 ℃	>85%	高	高（基于阿波罗样品试验）	原理验证充分，无需复杂机械运动	能耗高，同时加热易导致矿物烧结	[104, 106, 127]
流化床加热法	利用气体悬浮颗粒进行热交换	700~800 ℃	>90%（理论）	中–高	中（实验室原型）	连续处理，热效率高	流速控制难，粉尘扬起严重，密封困难	[105]
机械破碎法	破坏晶格和囊泡，常温释放	常温	较低（<50%，视粒度而定）	低（高温法的1/8~1/6）	低–中（实验室阶段）	避免高温热系统	释放不完全，设备易磨损	[29, 128]
机械–热联合法	先机械破坏表面势垒，再低温加热	150~250 ℃	接近高温法水平	中–低（较传统法降低10%~30%）	中（近期研究热点）	平衡加热温度、能耗与回收率	系统复杂度增加，需集成研磨与加热模块	[129-130]

2. 机械破碎

机械破碎通过应力诱发裂隙与新生表面积的方式来降低氦的扩散路径和束缚能，是一种偏重结构改造的释放手段。岩石力学实验表明，稀有气体的脱气效率与机械破碎产生的新表面积正相关，月壤钛铁矿在研磨、碰撞下引发玻璃层开裂、氦气泡暴露逸出；氦的扩散系数远高于氩等其他稀有气体，更易随着破碎过程实现快速释放[122]。“嫦娥五号”探测器样品的高分辨电镜研究为机械释放提供了新的物质基础。月壤钛铁矿颗粒表面约 50 nm 厚的非晶 TiO_2 玻璃层中富集了大量的高压氦气泡，这些处于非固溶或非晶格束缚的“自由气体”无需高温即可释放，常温球磨等机械方法在能耗上仅为高温法的 1/8~1/6[29]。纳米级高压气泡赋存稳定性的相关研究指出，一旦在应力作用下形成连通裂隙或引发气泡聚并，气体即会发生短程扩散并快速逃逸[128]。这从物理机制上为机械破碎辅助氦-3 的高效提取提供了理论支持。

从更广泛的矿物学研究来看，氦的初次运移除了受温度控制，还与矿物裂隙、蚀变、重结晶等结构演化过程密切相关。破碎和颗粒细化可以显著降低扩散距离，促使原本难以释放的氦通过新形成的晶界和微裂隙逃逸[129]。这表明，在高温热解前引入研磨或冲击处理，不仅能提高单位时间的氦释放速率，还有望在较低的峰值温度下实现与传统工艺相当的提取效率（进而显著降低能耗）。在此基础上，应用“筛选 – 研磨 – 加热”三步法提取策略，将月壤粒径研磨直至微米级并在 150~250 ℃条件下加热，相比直接高温熔融或单一高温热解方案可降低功耗 10%~30%[130]，在功耗受约束的月面环境下展现出应用优势。在此耦合路径的基础上，太阳能聚光分频梯度提取技术发展成为全集成解决方案[131]：通过光谱分频同时实现光伏制氢、光热供能，驱动月壤依次经历机械球磨、中温热解、高温氢还原 3 个梯度阶段；既利用物理破碎释放气泡氦，又通过化学还原提取深层晶格氦，从而显著提高氦-3 资源产出比。

（四）气体收集与富集技术

热解或机械破碎工艺释放的产物是由 H_2、H_2O、CO、CO_2、CH_4、N_2 等组成的多组分混合物，其中氦（包括氦-3）仅占极低的体积分数。气体收集与富集可拆分为 3 个核心环节：在真空环境下高效收集与暂存混合气体，通过冷凝、吸附、膜分离等手段预富集氦组分，氦-3 与氦-4 的同位素分离。

早期的工程设想普遍采用集中式气体处理模式，即由开采单元负责原料获取与预加热，产生的挥发分经由封闭管路集中输送至深冷分离与储存装置[105]。实验研究表明，利用金属真空管路维持高真空环境，可显著降低释气过程的气体损耗；气体经离心分离或静电除尘以去除细粉尘后，通过级联冷阱（温度约为 77 K）凝结 H_2O、CO_2 和高沸点物质，配合吸气泵或吸气剂除去活性组分（如 O_2、N_2、CO），即可有效获取仅包含惰性气体与氢的混合原料气[132-133]。针对稀薄气体的捕获，已有研究提出利用低于 60 K 的辐射制冷表面构建“冷微陷阱”，被动捕获氢、氦、氖等稀薄气体，此类区域的氦-3 浓度可达 80 ppb/m^2，结合多极磁场与真空管道进一步将真空扩散损失下降至 1/5、氦-3 回收率达到 96%[134]。

月壤释气中氦的体积分数通常仅在 10^{-3} 量级，即便开展物理选矿和热释气，总氦含量仍然较低，故在同位素分离前需要进行粗富集。在天然气工业领域，通过深冷精馏方式将天然气中的含氦量由痕量提升至 0.3%~1% 的粗氦流后再进行提纯，已是成熟的工业路径[135]。该工艺应用于月面环境时，需要缩比传统塔器设备并与月表大型散热系统及月尘防护结构进行工程耦合。在沿用传统的深冷分离技术之外，高性能吸附、膜分离新材料等方面的研究成果为低能耗氦预富集提供了新的选择。高通量分子模拟研究对上千种金属有机骨架（MOFs）材料进行了筛选评估，部分孔径为 3.7~5.5 Å 的 MOFs 材料对氦表现出极高的选择性透过潜力[136]，为研发面向月球极端环境的轻质吸附剂、膜分离材料提供了设计依据。

氦-3 的最终利用依赖高纯度同位素分离技术。相较其他气体同位素分离体系，氦-3 与氦-4 分离可选的技术路径有限。基于分子质量差异的气体扩散与离心分离方法在铀、轻元素同位素体系中已有成熟应用，但氦-3、氦-4 质量差异仅在 25% 左右，因分离因子极低而难以有效富集。化学交换法虽然广泛应用于氢、碳同位素分离，但对于惰性气体氦而言不具有可行性。吸附或膜分离技术近年来在材料领域取得进展，但相应分离机制依赖弱相互作用势

差，通常仅适用于粗富集阶段。在现有的技术体系中，深冷精馏、基于超流效应的量子分离方法成为氦-3与氦-4分离的核心路径。例如，美国研究机构发展了适用于月面环境的超漏与深冷精馏两级提纯系统：利用氦-4在2.17 K的超流特性，将氦-3丰度从ppm量级提高到约1%，再通过3~4 K的多塔级精馏获取99%纯度的氦-3产品；超流分离过程依赖量子流体的微观物理属性，故能良好适应低重力环境[105,135]。最新的工程化方案提出，采用多级斯特林与绝热去磁制冷联合制冷架构（见图7）可将氦气分级冷却至超流温区；通过辐射器与地外环境散热，在微细毛细管中实现无重力同位素分离；引入低温超流氦-4循环用于前级预冷与热屏蔽，支持月面低能耗条件下的连续提纯[137-139]。

鉴于高纯度氦-3提纯装置的复杂性与极高能耗，现阶段“月面粗富集、地面精提纯”是兼顾技术可行性与经济性的务实策略。着眼于未来的深空探索能源补给、独立地外工业体系建设的长远战略，发展具备全流程精制能力的月面原位资源闭环利用技术是必然趋势。未来的工程化方案可考虑构建多级耦合处理链条：前端发展膜分离与物理除尘技术，在常温区高效截除CO_2、CH_4等大分子背景气，大幅削减后端的冷负荷；中端发展变压/温变吸附捕获残留的N_2、CO等微量活性杂质，利用月面环境进行吸附剂的原位再生；后端发展深冷与极低温制冷技术，运用超流体超漏效应，攻克氢液化分离与同位素量子筛分的难题。为了加速工程实现，后续研究可聚焦膜/吸附分离材料在月尘辐射环境下的适应性、真空极低温环境下的极限热管理、能耗–效益边界处理，以关键问题的突破带动氦-3获取从单一的资源开采向完备的原位能源工程体系演进。

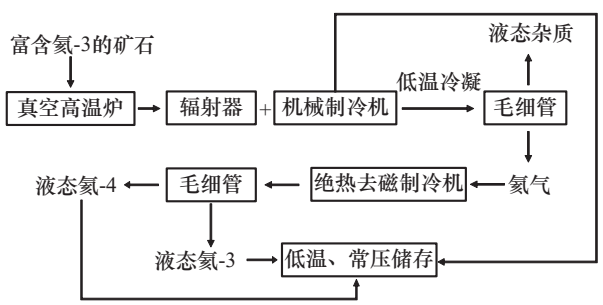


图7　月球氦-3的开采示意图

五、氦-3储运技术

氦-3从月壤中释放并提纯后，面临在月面与地面之间安全、高效转运并长期保存的问题。氦原子半径小、热力学性质特殊、经济价值高，增压压缩、封装、贮存、输运成为储运全流程的关键环节。

（一）氦-3封装技术

1. 渗透与热环境应对

氦-3封装面临的核心挑战是氦极小的原子半径与月面极端热环境的耦合效应。氦原子具有极强的渗透能力，极易通过材料微孔、晶格间隙、密封连接界面而发生物理逃逸。月球表面的热环境极为严苛，赤道区域的昼夜温差变幅可达280 K，这种剧烈的周期性热流波动与储罐内部液态氦-3的超低温工况（<3.2 K）叠加，易在容器壁面、接口等处产生显著的温度梯度与热应力[140]。在此环境下，传统的聚合物密封件易硬化、形变、脆裂而致密封失效。此外，液态氦-3在特定条件下具有独特的超流动性，能够沿细微缝隙爬升渗漏，对氦-3与氦-4共存的封装系统提出额外的密封挑战[141-142]。

针对氦-3的封装，现有研究重在容器内壁的隔膜涂覆与钝化技术，如在金属内壁沉积氧化铝等阻隔层来降低氦原子的渗透率[143]。结合运用双层绝热结构、主动再冷凝技术，将显著缓解液态氦-3的蒸发损失，提升氦-3在月面极端环境下的长期贮存性能[144]。因此，为了确保氦-3长期封存的气密性与稳定性，需要在密封结构设计、低温材料选择、表面涂层与制造工艺等方面持续攻关。

2. 气体增压与压缩技术

气体增压与压缩技术是实现氦-3高效储运的关键环节之一。鉴于月球资源开采过程中氦-3的初始压力通常低于1 kPa、需提升至兆帕级的储运压力，该环节对增压装置的极低吸气能力、宽工况适应性、高压缩比等提出了需求。

在压缩机动力学选型方面，容积式压缩机凭借低压进气的强适应性、压力波动的不敏感性而具有技术优势，相关技术路线关注结构紧凑、无润滑油、振动可控等特性，如线性压缩、涡旋压缩成为深空低温制冷与稀有气体压缩方面的主流方案，在多次地外探测任务中验证了良好的增压性能[145]，如

英国牛津大学研发了磁动式线性压缩机，在盖亚、韦伯望远镜等任务中成为斯特林制冷机、脉冲管制冷机的驱动装置[146]。针对空间微重力环境，JAXA开发了三级串联的氦-3线性压缩机组，在入口压力仅为0.4 kPa的条件下实现33 μmol/s的稳定流量，支撑了50 mK级极低温冷却[147]，验证了线性活塞式容积压缩机在低压、微量氦同位素循环中的工程可行性；美国先锋航天公司基于涡旋泵的耦合装置，实现气体压缩比超过600倍（从初始压力0.8 kPa增长至500 kPa），在长周期测试中保持了系统的稳定性[148]；NASA“毅力号”火星车搭载的涡旋压缩机，在0.665 kPa的极低进气压力下将气体增压至3 MPa，支撑了火星表面数百小时的原位制氧作业[149]。此外，多级增压模式可迁移至月球氦-3压缩[150]，以多级容积式压缩机串联的方式将月壤挥发气体中的低压氦-3逐级增压至目标值；相关技术路径与NASA月球采矿装置的多级压缩思路一致，得到火星稀薄气体压缩的工程化经验支撑。

在国际上，空间线性压缩机技术朝着更大功率、精密微振动控制方向演进。为了获得更大的压缩比、更稳健的系统运行，大功率动磁式压缩机成为发展重点，相应的高效驱动技术、长寿命板弹簧结构正在开展攻关[151]。为了满足严苛振动环境的要求，先进压缩机设计关注小型化、轻量化（以减振控制精度提升、气浮轴承技术商业化应用为支撑），从而规避压缩机振动对卫星平台高精度测量带来的不利影响[152]。

（二）贮存与热控技术

根据氦-3的物理特性，现阶段主要存在气态储存、液态储存两种技术路径，相关方案在储存密度、技术复杂度、安全性等方面具有不同的工程特征。

1. 高压气态储存

高压气态储存是当前氦-3储存最直接的技术路径。氦-3的临界参数极低（临界温度约为3.35 K、临界压力约为1.165×10^5 Pa），接近理想气体，但相应的工程储存归类为高压气态储存。该方案具有技术成熟、常温存储、充装便捷等优点，已有良好的应用基础，典型压力为数十兆帕。例如，NASA的月球采矿装置设计中，通过多级压缩机将月壤挥发气体压缩至约20 MPa并储存在车载高压气瓶中[7]，是验证月球氦-3获取与地面运输可行性的主流方案。

高压气态储存方案无需复杂的深低温制冷与热防护系统，可显著降低设备的结构质量与维护复杂度。将提纯后的氦-3气体多级压缩至10 MPa并充入高压气瓶中，可视为兼顾技术可行性与地月物流效率的技术方案[153]。这类方案的主要挑战在于气瓶的强度和密封，需采用高强度合金钢或复合材料瓶体，解决阀门、接头在循环充放后的密封可靠性。根据气瓶国际标准[154]，不同材料的压力容器均需严格满足抗拉强度、冲击韧度等指标。NASA总结ISRU技术进展时指出，采用碳纤维缠绕的复合材料压力容器（COPV）是未来月面流体储存的主流技术方向，相比传统的钢瓶可减重50%以上[155]。以T1000碳纤维/环氧树脂复合材料为代表的COPV具有更高的环境适应能力，在−40~80 ℃范围内可满足30 MPa压力气瓶的使用要求，适用于空间任务[156-157]。为了追求极致的轻量化，COPV从早期的金属内胆（III型）向聚合物内胆甚至无内胆（IV型/V型）结构演进[158]。先进的空间流体储罐不仅能承受数十兆帕的高压，而且可在液氢温区至150 ℃的宽温域内保持结构完整性，满足月球氦-3气体储存强度、环境适应性的双重需求。

2. 低温液化与零蒸发储存

氦-3在沸点以下（约3.2 K）进行液化后再低温储存，可大幅提高储存密度。液态氦-3的体积能量密度远高于气态氦-3，在同等储罐容积下可有效提升氦-3资源装载效率。然而，该技术路径门槛较高，对低温绝热容器、主动制冷设备提出了严苛要求；在此工况下，储罐的内外壁、内部支撑结构需承受从深低温到环境温度的剧烈跨度（数百K）。设计核心在于通过精细化热管理抑制月面周期性热流波动引发的内部压力变化，避免罐体结构疲劳、支撑部件失效、绝热层剥落等风险[159]。

单纯依靠传统的真空多层绝热难以满足长期储存的需求。NASA开发了载荷响应多层绝热、承载式多层绝热方案，以离散聚合物垫片替代传统的网状间隔物，在有效降低层间热传导的同时，提升了对外部防热屏、主动冷却管道的结构支撑能力[160-161]。JAXA针对月面低温推进剂储存需求，提出了非层间接触式绝热布局、自蒸发气辅助冷却支撑腿的结合应用策略，进一步阻断了支撑结构的漏热路径[162]。在被动绝热的基础上，引入主动制冷是

开展氦-3长期“零蒸发”储存的关键。NASA集成90 K级、20 K级（针对氦-3则需更低温区）的逆布雷顿循环制冷机，配合应用管路附壁或宽面积冷却屏技术，构建了高效的分布式冷却网络，有效拦截了穿透绝热层的环境残余热量[163]。随着高能力制冷机技术成熟度的提升，这种被动绝热、主动制冷的混合热控架构有望成为未来地外天体原位资源长期储存的首选技术方案。NASA正在开发的20 W@20 K、150 W@90 K大功率制冷机已进入工程验证阶段，双级冷却架构将显著降低深低温储存的能耗[164-165]。此外，针对微重力环境下液位难以测量的难题，射频质量测量计通过监测贮箱内电磁波模态变化即可精确计量氦-3等低温流体，是未来在轨储存与结算的关键辅助技术。

（三）输运与在轨操作技术

氦-3的运输过程涉及从月球基地将储存容器送入航天器、经由地月转移轨道运抵地球、再交付地面设施。整个过程中储存容器经受发射加速度、空间失重、过载振动等考验，安全与防漏是首要关注点。美国能源部对氘、氦-3存储的指南要求，容器定期检验渗漏并配有双壳屏蔽防护[143]。在阀门与法兰连接处设置具有真空“护罩”功能的夹层结构，以实时监控压力变化、预警潜在泄漏。例如，在聚变堆氚装置中，多在关键接头处设计双层密封并设置夹层抽真空作为“护罩”，再监测夹层真空度的变化以及时发现内层密封的潜在泄漏[166]。

将氦-3从月面储罐或着陆器转移至地月运输飞船，面临着微重力环境下气液两相流管理的直接挑战。与地面重力环境不同，微重力导致气液分离困难且极易在传输管路中形成气塞。仿真模拟、探空火箭飞行试验显示，虽然微重力环境有助于流体沿壁面铺展，但同时显著增加了管路内的气泡滞留风险；需要采用专门的管线预冷策略、液体获取装置，确保单相液流的稳定传输[167-168]。为了支持不同模块之间的流体互通，国际对接系统标准在航天领域得到推广，通过标准化硬/软捕获机构、流体传输脐带接口实现机械连接、流体传输的自动化耦合，为氦-3的在轨高效转运提供了可用的工程规范[169]。

在宏观物流架构层面，构建高效、低成本的地月运输网络是月球氦-3资源商业化开发的关键。针对氦-3的大质量、深低温载荷运输需求，将地月转移载具设计为往返于低地轨道与地月拉格朗日点的专用“太空拖船”，促成物流衔接[170]。相较传统的化学推进，气芯核火箭等核热推进技术具有更高的比冲和推重比，能够显著降低运输成本[171]。更为前瞻的构想是引入直接核聚变驱动引擎，利用氘–氦-3聚变反应产生的能量推进飞船，这意味着运输飞船直接消耗运载的部分液态氦-3，构成“以氦运氦”的高效自持闭环运输体系[172]。

六、月球氦-3资源开发全链条设计与自主工程架构

从资源开发的角度来看，月球氦-3利用是贯穿资源勘测、采装、热/机械释放、气体分离与提纯、封装与储运、月地运输、地面终端利用全链条的系统工程，各环节在物质流、能量流、信息流上高度耦合。在月球氦-3资源特性、探测评价、采集与提取、封装与储存技术讨论的基础上，进一步从系统工程角度出发提出月球氦-3资源开发的整体方案架构，突出模块化、原位化、高效协同的设计原则，以支撑未来由技术验证向工程示范、产业化应用的演进路径。

（一）全链条系统构想

采用“就地处理、高效利用、闭环协同”基本理念，构建面向氦-3的月面资源开发系统以及相应的多模块协同工艺链条（见图8）。系统的上游由轨道、着陆、巡视一体化资源勘测网络提供输入。可引入微纳卫星多轨道交叉探测以突破时空分辨率的局限，利用太赫兹光谱成像、冷原子干涉量子重力仪等新型载荷，配合轨道高光谱成像、微波辐射计、γ射线/中子谱仪等，精准反演TiO_2、FeO、OMAT、月壤厚度等参数，划定潜在的氦-3富集带。在着陆与巡视阶段，可引入智能母舰、微型机器人集群的协同探测架构，部署自主地质钻探机器人，利用连续管式取芯、深层探针等方式，穿透风化层并进行深部层理与垂直分布验证；机器人集群搭载新微型中子谱仪、质谱仪及射频原子磁力计等新型载荷，结合原位样品分析装置，对候选区域进行高密度的网格化原位分析，将探测数据汇聚并形成面向工程设计的三维资源模型与优选开发靶区。

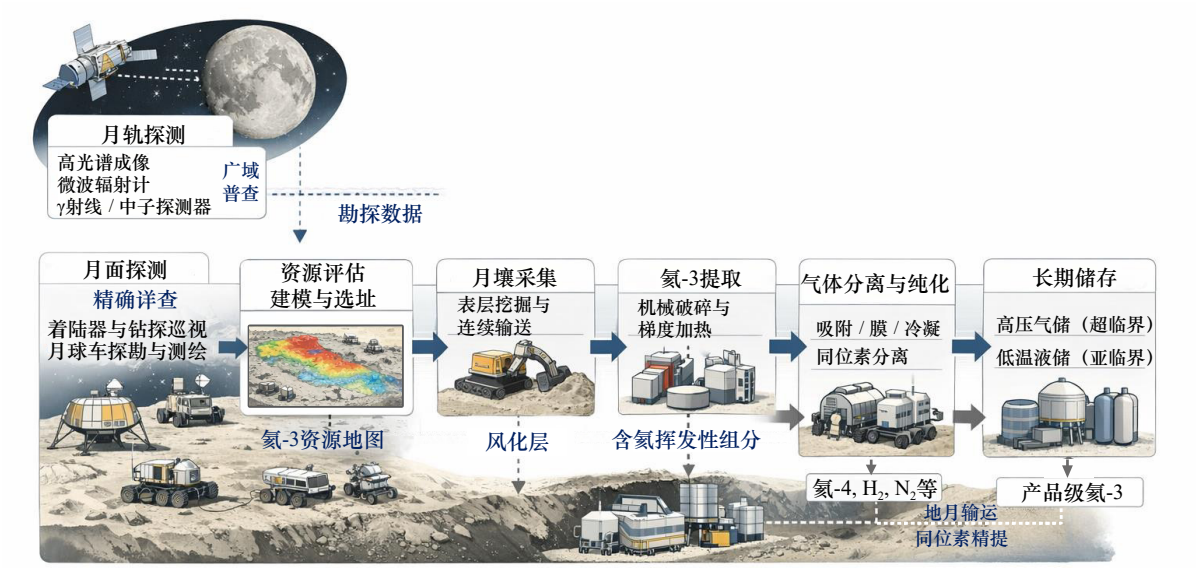


图 8　氦-3 资源利用全链条概念图

在此基础上，月面采装子系统任务由移动式采矿单元（如履带式月壤挖掘 / 推土车）承担，对富集区浅层风化层进行薄层剥离与连续输送，配合防尘密封与多级筛分，开展对目标粒径月壤的高通量获取。

在氦-3 释放与提取环节，优先采用机械研磨、剪切、冲击等方式破坏玻璃质边缘层，促使纳米气泡氦-3 在接近室温或中低温条件下释放，再视需要叠加适度加热以提高解吸速率。相应的工艺模块通常由密闭研磨腔体、缓冲料仓、气体抽提管路构成，在舱内对月壤进行连续搅拌和细碎，释放出的挥发分在真空或稀薄惰性气氛中被抽入后端气体分离单元，进行固 – 气两相流的空间分离。

气体分离与提纯系统承担从多组分低丰度气体到较高纯度氦-3 的产品转化功能。在月面环境中采用“低温冷凝 – 级联节流 / 制冷 – 膜分离 / 吸附 – 同位素精制”的多级流程：通过机械制冷手段冷凝去除 H_2、H_2O 等易液化杂质，随后在更低温度窗口冷凝大部分氦-4，使氦-3 在气相中相对富集；结合多孔膜、低温吸附、同位素蒸馏等手段，提高 $^3He/^4He$ 数值。考虑月面真空与低重力环境，整个分离与储存子系统需与高效低温制冷技术、绝热容器、可靠阀门 / 密封方案等结合应用，才能兼顾能耗、质量、安全性要求。根据任务需求，最终产品以高压气瓶形式封装，进入后续的月地运输环节。

在系统能量与物质管理方面，整体方案需要从设计起始就引入能量流与物质流的协同优化，以避免能源消耗在挖土和加热上。热处理与低温分离单元布置在近月昼与月夜交界区域或极区，以便利用日照条件与低温环境降低制冷负荷。采装与破碎工艺与余热回收过程集成，如利用废气焓值预热进料，或将低温端的冷量用于氦-3 储罐与精密仪器温控。各模块之间通过机械臂、密闭输送系统、中间缓存单元构建相对封闭的物质通道，减少月尘外逸和设备磨蚀，提高系统长期运行的可靠性。

需要指出的是，受限于月球氦-3 的极低富集量，以氦-3 为单一目标产物的开采模式在经济性上可能面临挑战，因而将月球氦-3 与月表其他资源实施协同开采利用是提升整体工程经济性的重要思路。在全链条系统中，脱氦月壤仍富含金属氧化物与硅酸盐组分，可进一步采用物理选矿、化学还原工艺提取 Ti、Fe 等工业原材料并将之作为月球基地建筑材料或增材制造原料；对于月壤中伴生释放的太阳风注入挥发分（如 H_2、H_2O、CO、CO_2、N_2）进行一体化捕获与处理，作为燃料电池供能组分、推进剂、金属氧化物还原剂等[173-174]。“一矿多用”的集成模式将昂贵的能源与设施部署成本分摊至多种资源产出，能够显著提升工程任务的单位经济效益。

（二）原位开发与地面验证路线

鉴于月面环境具有极端性、任务窗口有限、运

载成本高昂，月球氦-3资源开发系统“一步到位”地直接部署成熟生产线难度较大，适宜采取“地面先行、原位验证、逐步放大”的技术演进路径。在发展过程中，地面与月面试验场景相互支撑和反馈是降低系统复杂性与工程风险的重要手段。

在地面阶段，面向氦-3全链条开发的关键瓶颈环节，构建专用验证平台。针对采装与预处理环节，可在真空、低温、部分重力模拟条件下，使用月壤模拟物开展履带式采装设备的推挖阻力、月尘侵蚀、防护效果等试验，评估连续作业时的机械可靠性与能耗指标。围绕释放与提取工艺环节，需要利用掺杂天然或模拟钛铁矿颗粒的月壤样品，系统对比不同破碎粒径、研磨强度、温度程序下氦-3与伴生气体的释放效率，从而获得适用于工程放大的动力学参数与能效边界。在气体分离与封装环节，需在地面建设缩比深冷分离与储存系统，充分测试运行工况、负荷调节、启停特性、安全边界等，为未来的月面部署提供成熟的模块化单元。

在原位验证阶段，可优先搭载结构质量、功率、体积受限的小型集成单元，实施从采样、破碎、提气、初步富集到少量氦-3封装的闭环演示，重点验证工艺连续性、月尘环境下的可靠性、远程控制策略。这个做法与美国“阿尔忒弥斯”计划及其商业载荷服务体系为合作方提供发射原型设备进行原位验证机会类似。此阶段的目标是获得真实月面环境下的工艺参数、故障模式、系统集成经验，为下一步部署提供数据基础。

在原位验证取得成功后，可逐步转入小规模示范运行阶段。此阶段的系统通常采用多单元并联布局，由若干个采装–提取一体化单元、1个或数个集中分离–储存单元构成。通过扩展作业面积、延长连续工作时间、优化作业路径规划，开展月壤处理通量级别（数千吨/月）验证，评估单位氦-3产出能耗、设备更新需求、维护策略。此阶段直接关联月地运输链的建立，如与可重复使用登月飞行器、地月货运飞船对接，开展“月面–轨道–地面”的物流流程演练，为未来商业化运营打通全链条。

（三）技术发展路线

结合系统构想与验证路径，参考现有的国际探月任务规划，可将我国月球氦-3资源开发利用的技术发展路线大致划分为近期（2026—2030年）、中期（2031—2040年）、远期（2040年以后）3个阶段，对应不同的技术成熟度水平与工程目标。

近期阶段的核心任务在于筑牢基础与验证关键原理。在资源层面，进一步完善基于TiO_2、FeO、OMAT、月壤厚度等遥感参数的多源约束资源评价模型，缩小氦-3储量估算的不确定性区间，为开发选址提供更可靠的依据。在工艺层面，围绕低温机械破碎、辅助热解、深冷分离的新型流程开展系统性研究，形成可在月面部署的工程化模块原型，在地面模拟环境下获得能耗、效率、寿命等关键指标。

中期阶段的重点任务在于系统集成与示范验证。随着月球科研站基本型的建成、“阿尔忒弥斯”中长期基地建设目标的推进，可在极区或高钛月海区域部署若干套“采装–提取–分离–封装”一体化系统，实施持续多月乃至多年运行的示范工程。此阶段的研究重心将从单点技术突破转向系统级优化，包括作业调度与路径规划、多能互补的能源管理（涉及太阳能、核能、余热利用）、多单元协同运行的智能控制及健康管理等；同步提升配套的地月运输能力，通过可重复使用登月器、电磁弹射系统或其他新型运输模式，构建稳定的氦-3地月物流通道。此阶段的发展成效将直接决定月球氦-3资源开发能否跨入工程应用门槛。

远期阶段的愿景是建设月球氦-3开采与地面聚变利用耦合的能源系统。在月球侧，将形成具备年产吨级氦-3能力的采矿与处理基地，内部可保持能源相对自给（如通过月面光伏耦合核电支撑采矿与低温制冷），在物质流上尽可能构建封闭循环（如回收利用副产的氦-4和氢，用于基地冷却或推进剂合成）。在地球侧，随着氘–氦-3聚变技术的成熟，氦-3将从稀缺制冷同位素转变为战略聚变燃料，月面与地面之间有望形成稳定的氦-3供应链和配套市场体系，支撑地面聚变示范堆甚至商用电站的燃料需求。此外，围绕氦-3运输与利用的国际规则、资源所有权、收益分配机制将在实践中逐步形成，氦-3资源开发也从单纯的科技议题演化为综合性的“技术–经济–政策”议题。

整体来看，构建月球氦-3资源开发系统方案，是对跨学科系统集成能力、长期任务规划能力的综合检验。明确全链条系统构想，分阶段推进原位开发与地面验证，在时间轴上清晰规划技术发展路

线，有望逐步将氦-3 从月壤中的潜在资源转变为人类可持续能源体系的环节之一，为人类未来深空开发、能源保障战略提供新支撑。

七、结语

月球氦-3 资源作为未来聚变能源、先进低温科技的基础，实施开发利用已从单纯的科学设想转化为国际航天强国竞逐的战略焦点。本文总结了氦-3 资源特性，明确了高钛月海区域、极区冷阱作为核心勘探靶区的资源优势，详细讨论了从轨道遥感与月面原位探测的资源评估体系，到机械破碎与热解耦合的提取方案，再到深冷液化封装与地月长途输运的关键技术瓶颈，全面展示了从实验室模拟走向月面工程实践的演进逻辑。针对月球氦-3 开发在资源评价精度、低浓度高通量提取、深冷同位素分离、与地月运输体系协同等方面的发展挑战，建议开展多学科交叉的前沿技术布局，支撑构建全链条的实施框架。

月球氦-3 资源开发利用的后续研究与工程实践，宜紧扣“地面先行、原位验证、协同放大”的技术演进路线。一方面，进一步攻关极端真空、昼夜温差、微重力条件下的低能耗采集与超导级纯度分离技术，解决氦-3 在高能效比与高密封性之间的工程矛盾；另一方面，将氦-3 资源开发全面融入地月物流运输网络、未来月面科研基地的能源管理系统，通过“一矿多用”、余热利用、能源梯级回收、多模块智能协同，稳步降低开发成本与能耗需求。随着商业航天的深度参与、国际勘测合作的持续深化，月球氦-3 资源开发利用将从实验室级的原理可行性研究，加速转化为支撑人类迈向深空、构建地外能源补给闭环的关键方面，为全球能源转型、人类空间文明的长期发展提供关键动力。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: February 14, 2026; **Revised date:** April 14, 2026

Corresponding author: Shen Jun is a professor from the School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology. His major research fields include cryogenic refrigeration and extraterrestrial resource utilization technologies. E-mail: jshen@bit.edu.cn

Funding project: Open Foundation of Deep Space Exploration Laboratory (NKDSEL2024001)

参考文献

[1] Crawford I A. Lunar resources：A review[J]. Progress in Physical Geography：Earth and Environment，2015，39(2)：137-167.

[2] Sanders G，Kleinhenz J. Update on NASA’s ISRU development and mission plans for the Artemis program[C]// 27th IAA Symposium on Human Exploration of the Solar System，2024：82120.

[3] European Space Agency. ESA space resources strategy[EB/OL]. [2026-04-05]. https：//sci.esa.int/documents/34161/35992/1567260390250-ESA_Space_Resources_Strategy.pdf.

[4] European Space Agency. Terrae novae：Europe’s exploration vision[EB/OL]. [2026-04-05]. https：//www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/Terrae_Novae_Europe_s_exploration_vision.

[5] Cooperation with JGC Corporation on the concept of a lunar ISRU plant has started [EB/OL]. (2021-06-28)[2026-04-05]. https：//humans-in-space.jaxa.jp/en/news/detail/001529.html.

[6] Lucas M，Danilov A V，Levitin L V，et al. Quantum bath suppression in a superconducting circuit by immersion cooling[J]. Nature Communications，2023，14：3522.

[7] Olson A D. Lunar helium-3：Mining concepts，extraction research，and potential ISRU synergies[C]//ASCEND 2021，2021：12628.

[8] Russia to launch Luna-27 lunar lander mission atop Angara rocket from Vostochny spaceport [EB/OL]. [2026-04-05]. https：//tass.com/science/1352047.

[9] Dobbs R. Helium three[M]. Oxford：Oxford University Press，2001：1-2.

[10] Carroll B W，Ostlie D A. An introduction to modern astrophysics [M]. Cambridge：Cambridge University Press，2017：296-315，1177-1179.

[11] Slyuta E N，Yakovlev O I，Voropaev S A，et al. He implantation and concentrations in minerals and lunar regolith particles[J]. Geochemistry International，2013，51(12)：959-967.

[12] 史建魁，叶永烜，刘振兴. 空间物理学进展(第五卷)[M]. 北京：科学出版社，2015：25-64.
Shi J K，He Y X，Liu Z X. Advances in space physics (Volume 5)[M]. Beijing：Science Press，2015：25-64.

[13] Bodmer R，Bochsler P. The helium isotopic ratio in the solar wind and ion fractionation in the corona by inefficient Coulomb drag[J]. Astronomy & Astrophysics，1998，337：921-927.

[14] Geiss J，Buehler F，Cerutti H，et al. Solar-wind composition experiment：19720015179[R]. Washington，DC：National Aeronautics and Space Administration，1972：14.1-14.10.

[15] Heber V S，Baur H，Bochsler P，et al. Isotopic mass fractionation of solar wind：Evidence from fast and slow solar wind collected by the genesis mission[J]. The Astrophysical Journal，2012，759(2)：121.

[16] Eberhardt P，Eugster O，Geiss J，et al. Noble gases in Apollo 16 lunar fines[R]. Houston：Lunar and Planetary Institute，1973：209-211.

[17] Benkert J P，Baur H，Signer P，et al. He，Ne，and Ar from the solar wind and solar energetic particles in lunar ilmenites and pyroxenes[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，1993，98(E7)：13147-13162.

[18] Heber V S，Baur H，Wieler R. Helium in lunar samples analyzed

by high-resolution stepwise etching: Implications for the temporal constancy of solar wind isotopic composition[J]. The Astrophysical Journal, 2003, 597(1): 602-614.

[19] Ozima M, Seki K, Terada N, et al. Terrestrial nitrogen and noble gases in lunar soils[J]. Nature, 2005, 436(7051): 655-659.

[20] Borg J, Bibring J P, Cowsik G, et al. A model for the accumulation of solar wind radiation damage effects in lunar dust grains, based on recent results concerning implantation and erosion effects[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1983, 88(S2): 725-730.

[21] Keller L P, McKay D S. The nature and origin of rims on lunar soil grains[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(11): 2331-2341.

[22] Pieters C M, Noble S K. Space weathering on airless bodies[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2016, 121(10): 1865-1884.

[23] Scherzer B M U. Development of surface topography due to gas ion implantation[M]. Heidelberg: Springer, 1983: 271-355.

[24] Baur H, Frick U, Funk H, et al. Thermal release of helium, neon, and argon from lunar fines and minerals[C]//Proceedings of the 3rd Lunar Science Conference, 1972: 1947-1966.

[25] Frick U, Baur H, Funk H, et al. Diffusion properties of light noble gases in lunar fines[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1973, 4: 1987.

[26] Frick U, Baur H, Ducati H, et al. On the origin of helium, neon, and argon isotopes in sieved mineral separates from an Apollo 15 soil[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1975, 6: 2097-2129.

[27] Eberhardt P, Geiss J, Graf H, et al. Trapped solar wind noble gases, Kr81/Kr exposure ages and K/Ar ages in Apollo 11 lunar material[J]. Science, 1970, 167(3918): 558-560.

[28] Harris-Kuhlman K R. Trapping and diffusion of helium in lunar minerals[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 1998: 42.

[29] Li A, Chen X, Song L J, et al. Taking advantage of glass: Capturing and retaining the helium gas on the Moon[J]. Materials Futures, 2022, 1(3): 035101.

[30] Cymes B A, Burgess K D, Stroud R M. Helium reservoirs in iron nanoparticles on the lunar surface[J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5: 189.

[31] 谢良海，张爱兵，李磊，等. 嫦娥四号能量中性原子观测揭示太阳风与月面相互作用新特征[J]. 空间科学学报，2022，42(1)：11-24.
Xie L H, Zhang A B, Li L, et al. Chang'e-4 energetic neutral atom observation reveals new features about the solar wind-moon interaction[J]. Chinese Journal of Space Science, 2022, 42(1): 11-24.

[32] Bilson E. Solar wind effects on the surface chemistry of lunar grains[J]. Geophysical Research Letters, 1978, 5(6): 481-484.

[33] Denevi B W, Noble S K, Christoffersen R, et al. Space weathering at the Moon[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2023, 89(1): 611-650.

[34] Costello E S, Ghent R R, Hirabayashi M, et al. Impact gardening as a constraint on the age, source, and evolution of ice on mercury and the Moon[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2020, 125(3): e2019JE006172.

[35] Johnson J R, Swindle T D, Lucey P G. Estimated solar wind-implanted helium-3 distribution on the Moon[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(3): 385-388.

[36] Benna M, Mahaffy P R, Halekas J S, et al. Variability of helium, neon, and argon in the lunar exosphere as observed by the LADEE NMS instrument[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(10): 3723-3729.

[37] Grava C, Hurley D M, Feldman P D, et al. LRO/LAMP observations of the lunar helium exosphere: Constraints on thermal accommodation and outgassing rate[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 501(3): 4438-4451.

[38] Lucey P G, Blewett D T, Jolliff B L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E8): 20297-20305.

[39] Lucey P G, Blewett D T, Taylor G J, et al. Imaging of lunar surface maturity[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E8): 20377-20386.

[40] 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.

[41] Fa W Z, Jin Y Q. Global inventory of helium-3 in lunar regoliths estimated by a multi-channel microwave radiometer on the Chang-E 1 lunar satellite[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(35): 4005-4009.

[42] Cudnik B. Optical maturity (OMAT)[M]. Cham: Springer, 2022: 1-6.

[43] Ding C Y, Li Q Q, Xu J W, et al. Moon-based ground penetrating radar derivation of the helium-3 reservoir in the regolith at the Chang'e-3 landing site[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2023, 16: 2764-2776.

[44] Starukhina L V. Polar regions of the Moon as a potential repository of solar-wind-implanted gases[J]. Advances in Space Research, 2006, 37(1): 50-58.

[45] Feldman W C, Lawrence D J, Elphic R C, et al. Polar hydrogen deposits on the Moon[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E2): 4175-4195.

[46] Wang Z Z, Li Y, Jiang J S, et al. Lunar surface dielectric constant, regolith thickness, and ^{3}He abundance distributions retrieved from the microwave brightness temperatures of CE-1 lunar microwave sounder[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(9): 1365-1378.

[47] Kim K J, Wöhler C, Berezhnoy A A, et al. Prospective ^{3}He-rich landing sites on the Moon[J]. Planetary and Space Science, 2019, 177: 104686.

[48] Shukla S, Tolpekin V, Kumar S, et al. Investigating the retention of solar wind implanted helium-3 on the Moon from the analysis of multi-wavelength remote sensing data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3350.

[49] Wittenberg L J, Santarius J F, Kulcinski G L. Lunar source of ^{3}He for commercial fusion power[J]. Fusion Technology, 1986, 10(2): 167-178.

[50] Wittenberg L J, Cameron E N, Kulcinski G L, et al. A review of ^{3}He resources and acquisition for use as fusion fuel[J]. Fusion

Technology，1992，21（4）：2230-2253.

[51] Fegley B J，Swindle T D. Lunar volatiles：implications for lunar resource utilization[EB/OL]. （1993-06-01）[2026-03-15]. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993rnes.book..367F/abstract.

[52] Slyuta E N，Abdrakhimov A M，Galimov E M. The estimation of helium-3 probable reserves in lunar regolith[C]//Lunar and Planetary Science XXXVIII，2007：2175.

[53] 徐琳，邹永廖，刘建忠. 月壤中的氦-3[J]. 矿物学报，2003，23（4）：374-378.
Xu L，Zou Y L，Liu J Z. Helium-3 in lunar regolith[J]. Acta Mineralogica Sinica，2003，23（4）：374-378.

[54] Nozette S，Rustan P，Pleasance L P，et al. The clementine mission to the moon：Scientific overview[J]. Science，1994，266（5192）：1835-1839.

[55] Kordas J F，Lewis I T，Priest R E，et al. UV/visible camera for the Clementine mission [C]//Proceedings of the Space Telescopes and Instruments，1995：175-186.

[56] Lucey P G，Taylor G J，Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon[J]. Science，1995，268（5214）：1150-1153.

[57] Lucey P G，Blewett D T，Hawke B R. Mapping the FeO and TiO_2 content of the lunar surface with multispectral imagery[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，1998，103（E2）：3679-3699.

[58] Le Mouélic S，Lucey P G，Langevin Y，et al. Calculating iron contents of lunar highland materials surrounding Tycho crater from integrated Clementine UV-visible and near-infrared data[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2002，107（E10）：1-9.

[59] Wilcox B B，Lucey P G，Gillis J J. Mapping iron in the lunar mare：An improved approach[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2005，110（E11）：2005JE002512.

[60] Lawrence D J，Feldman W C，Elphic R C，et al. Iron abundances on the lunar surface as measured by the Lunar Prospector gamma-ray and neutron spectrometers [J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2002，107（12）：1-26.

[61] Qiu D G，Chen W C，Yan J G，et al. FeO and TiO_2 maps of the lunar polar regions derived from the clementine data[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2025，130（2）：e2024JE008753.

[62] 刘银年. 高光谱成像遥感载荷技术的现状与发展[J]. 遥感学报，2021，25（1）：439-459.
Liu Y N. Development of hyperspectral imaging remote sensing technology[J]. National Remote Sensing Bulletin，2021，25（1）：439-459.

[63] Pieters C M，Boardman J，Buratti B，et al. The Moon mineralogy mapper（M^3）on chandrayaan-1[J]. Current Science，2009，96（4）：500–505.

[64] Pieters C M，Goswami J N，Clark R N，et al. Character and spatial distribution of OH/H_2O on the surface of the Moon seen by M^3 on chandrayaan-1[J]. Science，2009，326（5952）：568-572.

[65] Zhang W，Bowles N E. Mapping lunar TiO_2 and FeO with M^3 data[C]//European Planetary Science Congress 2013，2013：374.

[66] Surkov Y，Shkuratov Y，Kaydash V，et al. Lunar ilmenite content as assessed by improved Chandrayaan-1 M^3 data[J]. Icarus，2020，341：113661.

[67] 连懿，陈圣波，孟治国，等. 利用嫦娥二号微波辐射计数据的全月亮温制图[J]. 武汉大学学报（信息科学版），2015，40（6）：732-737.
Lian Y，Chen S B，Meng Z G，et al. Distribution of microwave radiation brightness temperatures on the lunar surface based on Chang'e-2 MRM data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University，2015，40（6）：732-737.

[68] 欧阳自远. 嫦娥一号卫星的初步科学成果与嫦娥二号卫星的使命[J]. 航天器工程，2010，19（5）：1-6.
Ouyang Z Y. Science results of Chang'e-1 lunar orbiter and mission goals of Chang'e-2[J]. Spacecraft Engineering，2010，19（5）：1-6.

[69] Shkuratov Y G，Helfenstein P. The opposition effect and the quasi-fractal structure of regolith：I. Theory[J]. Icarus，2001，152（1）：96-116.

[70] Ma T，Chang J，Zhang N，et al. Gamma-ray spectrometer onboard Chang'e-2[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A：Accelerators，Spectrometers，Detectors and Associated Equipment，2013，726：113-115.

[71] Feldman W C，Barraclough B L，Fuller K R，et al. The Lunar Prospector gamma-ray and neutron spectrometers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A：Accelerators，Spectrometers，Detectors and Associated Equipment，1999，422（1/2/3）：562-566.

[72] 李泳珲，赵剑锟，姜爽，等. 基于CE2-GRS数据的月表氢元素分布特征研究[J]. 核技术，2023，46（12）：120201.
Li Y H，Zhao J K，Jiang S，et al. Distribution characteristics of hydrogen elements on lunar surface based on CE2-GRS data [J]. Nuclear Techniques，2023，46（12）：120201.

[73] Gladstone G R，Stern S A，Retherford K D，et al. LAMP：The lyman alpha mapping project on NASA's lunar reconnaissance orbiter mission[J]. Space Science Reviews，2010，150（1）：161-181.

[74] Stern S A，Retherford K D，Tsang C C C，et al. Lunar atmospheric helium detections by the LAMP UV spectrograph on the lunar reconnaissance orbiter[J]. Geophysical Research Letters，2012，39（12）：2012GL051797.

[75] Hintenberger H，Weber H W，Voshage H，et al. Concentrations and isotopic abundances of the rare gases，hydrogen and nitrogen in Apollo 11 lunar matter[C]//Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference，1970：1269-1282.

[76] Black D C，Nyquist L E，Pepin R O，et al. Rare gases in Apollo 11 lunar material[C]//Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference，1970：65482.

[77] Gibson E Jr，Johnson S. Thermal analysis-inorganic gas release studies of lunar samples[C]//Proceedings of the Second Lunar Science Conference，1971：1351-1366.

[78] Russell C T. The Galileo mission[M]. Dordrecht：Springer Netherlands，1992.

[79] Hoffman J H，Griffin T P，Limero T，et al. Space applications of mass spectrometry[R]. Orlando：Kennedy Space Center，2010.

[80] 贺怀宇，王英，邓成龙，等. 月壤中的稀有气体[J]. 地球化学，2010，39（2）：123-130.
He H Y，Wang Y，Deng C L，et al. Noble gases in the lunar soil[J]. Geochimica，2010，39（2）：123-130.

[81] Palmer P T，Limero T F. Mass spectrometry in the U.S. space program：Past，present，and future[J]. Journal of the American Soci-

ety for Mass Spectrometry，2001，12(6)：656-675.

[82] Hoffman J H，Hodges R R Jr，Johnson F S，et al. Lunar atmospheric composition results from Apollo 17[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings，1973：40255.

[83] Sridharan R，Ahmed S M，Pratim D T，et al. The sunlit lunar atmosphere：A comprehensive study by CHACE on the Moon impact probe of Chandrayaan-1[J]. Planetary and Space Science，2010，58(12)：1567-1577.

[84] Hoffman J H，Hodges R R，Evans D E. Lunar orbital mass spectrometer experiment[R]. Houston：Lunar and Planetary Science Conference. 1972.

[85] Goswami J N，Annadurai M. Chandrayaan-1 mission to the Moon[J]. Acta Astronautica，2008，63(11/12)：1215-1220.

[86] Niemann H B，Atreya S K，Carignan G R，et al. The Galileo probe mass spectrometer：Composition of Jupiter's atmosphere[J]. Science，1996，272(5263)：846-849.

[87] Hilchenbach M. Space-borne mass spectrometer instrumentation[J]. International Journal of Mass Spectrometry，2002，215(1/2/3)：113-129.

[88] Niemann H B，Atreya S K，Carignan G R，et al. Chemical composition measurements of the atmosphere of Jupiter with the Galileo probe mass spectrometer[J]. Advances in Space Research，1998，21(11)：1455-1461.

[89] Colin L，Hunten D M. 11. Pioneer Venus experiment descriptions[J]. Space Science Reviews，1977，20(4)：451-525.

[90] Niemann H B，Booth J R，Cooley J E，et al. Pioneer Venus orbiter neutral gas mass spectrometer experiment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，1980，18(1)：60-65.

[91] Waite J H，Lewis W S，Kasprzak W T，et al. The cassini ion and neutral mass spectrometer (INMS) investigation[J]. Space Science Reviews，2004，114(1)：113-231.

[92] Hoffman J H，Chaney R C，Hammack H. Phoenix Mars mission—The thermal evolved gas analyzer[J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry，2008，19(10)：1377-1383.

[93] Niemann H B，Atreya S K，Bauer S J，et al. The gas chromatograph mass spectrometer for the Huygens probe[J]. Space Science Reviews，2002，104(1)：553-591.

[94] Mahaffy P R，Webster C R，Cabane M，et al. The sample analysis at Mars investigation and instrument suite[J]. Space Science Reviews，2012，170(1)：401-478.

[95] Heather D，Fisackerly R，Trautner R，et al. The ESA PROSPECT payload for CP22：Science activities and operations planning[C]//55th Lunar and Planetary Science Conference，2024：1085.

[96] Todd J F J，Barber S J，Wright I P，et al. Ion trap mass spectrometry on a comet nucleus：The ptolemy instrument and the rosetta space mission[J]. Journal of Mass Spectrometry，2007，42(1)：1-10.

[97] Briois C，Thissen R，Thirkell L，et al. Orbitrap mass analyser for in situ characterisation of planetary environments：Performance evaluation of a laboratory prototype[J]. Planetary and Space Science，2016，131：33-45.

[98] 赵占锋. 月球资源探测小型质谱仪关键技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010：92.
Zhao Z F. Research on key technologies of miniature mass spectrometer used for lunar exploration[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2010：92.

[99] Tabert A M，Griep-Raming J，Guymon A J，et al. High-throughput miniature cylindrical ion trap array mass spectrometer[J]. Analytical Chemistry，2003，75(21)：5656-5664.

[100] 周志权，吕浩，张栋，等. 质谱仪在深空探测中的应用[J]. 质谱学报，2015，36(6)：492-505.
Zhou Z Q，Lyu H，Zhang D，et al. Application of mass spectrometer in deep-space exploration[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society，2015，36(6)：492-505.

[101] Salvino C，Dahmer A. Extraterrestrial nanosecond neutron analysis and associated particle imaging：US 12235405 B1[P]. 2025-02-25.

[102] Kominis I K，Kosmas C. Prospecting for lunar ^{3}He with a radio-frequency atomic magnetometer[J]. Journal of Applied Physics，2025，138(17)：174901.

[103] Cameron E N. Helium mining on the Moon：Site selection and evaluation[C]//The 2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities，1992：189-197.

[104] Kulcinski G L. A resource assessment and extraction of lunar ^{3}He：UWFD-M 879[C]//The US-USSR Workshop on D-^{3}He Reactor Studies，1992：2-5.

[105] Li Y T，Wittenberg L J. Lunar surface mining for automated acquisition of helium-3：Methods，processes，and equipment[C]//The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century，1992：609.

[106] Sviatoslavsky I N，Jacobs M. Mobile helium-3 mining and extraction system and its benefits toward lunar base self-sufficiency：WCSAR-TR-AR3-8808-1 [R]. Wisconsin：Wisconsin Center for Space Automation and Robotics，University of Wisconsin-Madison，1988：3-8.

[107] Matthew E G. A lunar volatiles miner[D]. Madison：University of Wisconsin，2006：15-49.

[108] Olson A. The mark IV：A scalable lunar miner prototype[C]//The International Astronautical Congress，2013：1-11.

[109] Sanders G B，Larson W E. Progress made in lunar in situ resource utilization under NASA's exploration technology and development program[J]. Journal of Aerospace Engineering，2013，26(1)：5-17.

[110] 张志恒，唐钧跃，张伟伟，等. 月壤微定量采样器设计与试验验证[J]. 深空探测学报(中英文)，2022，9(2)：165-172.
Zhang Z H，Tang J Y，Zhang W W，et al. Micro quantitative sampler for lunar regolith：Design and validation[J]. Journal of Deep Space Exploration，2022，9(2)：165-172.

[111] Zwierzyński A J，Teper W，Wiśniowski R，et al. Feasibility study of low mass and low energy consumption drilling devices for future space (mining surveying) missions[J]. Energies，2021，14(16)：5005.

[112] Zacny K，Chu P，Vendiola V，et al. TRIDENT drill for VIPER and PRIME-1 missions to the Moon[C]//Earth and Space 2022，2023：465-474.

[113] Rew D Y. Global trends of in-situ resource utilization[J]. Journal of Space Technology and Applications，2023，3(3)：199-212.

[114] 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.

[115] Dreyer C B, Walton O, Riedel E P. Centrifugal sieve for size-segregation and beneficiation of regolith[C]//Earth and Space 2012@Struction, and Operations in Challenging Environments, 2012: 31-35.

[116] Taylor L A, Oder R R. Magnetic beneficiation of highlands soils: Concentrations of anorthite and agglutinates[C]//Lunar and Planetary Science Conference, 1990: 1243-1244.

[117] 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.

[118] 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.

[119] Berggren M, Zubrin R, Jonscher P, et al. Lunar soil particle separator[C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2011: 24432.

[120] Adachi M, Hamazawa K, Mimuro Y, et al. Vibration transport system for lunar and martian regolith using dielectric elastomer actuator[J]. Journal of Electrostatics, 2017, 89: 88-98.

[121] Ducati H, Kalbitzer S, Kiko J, et al. Rare gas diffusion studies in individual lunar soil particles and in artificially implanted glasses[J]. The Moon, 1973, 8(1): 210-227.

[122] Honda M, Kurita K, Hamano Y, et al. Experimental studies of He and Ar degassing during rock fracturing[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, 59(2): 429-436.

[123] Anufriev G S. Hopping diffusion of helium isotopes from samples of lunar soil[J]. Physics of the Solid State, 2010, 52(10): 2058-2062.

[124] Zhang B L, Wang J, Li M, et al. A molecular dynamics study of helium bubble formation and gas release near titanium surfaces[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 438(1/2/3): 178-182.

[125] 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.

[126] Reiss P. In-situ thermal extraction of volatiles from lunar regolith[D]. Munich: Technical University of Munich, 2018: 67-69.

[127] Olson A D S, Kulcinski G L, Santarius J F, et al. Granular flow and heat transfer modeling for the helium extraction and acquisition testbed[C]//Earth and Space 2018, 2018: 17-27.

[128] Seydoux-Guillaume A M, David M L, Alix K, et al. Trapping of helium in nano-bubbles in euxenite: Positive identification and implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 448: 133-139.

[129] 李平, 马向贤, 张明震, 等. 矿物中氦的扩散过程及控制因素研究进展[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(4): 697-706.
Li P, Ma X X, Zhang M Z, et al. Research progress on diffusion process and controlling factors of helium in minerals[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(4): 697-706.

[130] 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: CN201911172554.9[P]. 2020-04-07.
Su F, He H Y, Liu R R, et al. Low-energy lunar in-situ noble gas extraction system and method: CN201911172554.9[P]. 2020-04-07.

[131] 孔慧, 李吉, 沈俊, 等. 一种太阳能梯度提取月壤^{3}He的系统及方法: CN118619219A[P]. 2024-09-10.
Kong H, Li J, Shen J, et al. System and method for solar-powered gradient extraction of ^{3}He from lunar soil: CN118619219A[P]. 2024-09-10.

[132] Miura Y N, Okazaki R, Takano Y, et al. The GAs extraction and analyses system (GAEA) for immediate extraction and measurements of volatiles in the Hayabusa2 sample container[J]. Earth, Planets and Space, 2022, 74(1): 76.

[133] Olson A D S. Recent progress in lunar helium-3 extraction research[C]//Wisconsin Space Conference, 2016: 1-7.

[134] Zwierzyński A J, Ciążela J, Boroń P, et al. Lunar cold microtraps as future source of raw materials—Business and technological perspective[J]. Applied Sciences, 2023, 13(24): 13030.

[135] Verkhovniy A I, Bondarenko V L, Kutsko A G, et al. Sources for helium-3 isotope extraction and prospects of its development[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2022, 57(11): 940-951.

[136] Grenev I V, Gavrilov V Y. High-throughput screening of metal–organic frameworks for helium recovery from natural gas[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2024, 368: 113021.

[137] 沈俊, 禹芳秋, 戴巍, 等. 一种在月球表面提纯氦3的系统和方法: CN202110614794.0[P]. 2021-08-20.
Shen J, Yu F Q, Dai W, et al. System and method for purifying helium-3 on lunar surface: CN202110614794.0[P]. 2021-08-20.

[138] 沈俊, 王昌, 戴巍, 等. 一种用于月球氦3的开采设备及开采方法: CN202011622727.5[P]. 2022-07-01.
Shen J, Wang C, Dai W, et al. Mining equipment and mining method for lunar helium-3: CN202011622727.5[P]. 2022-07-01.

[139] 沈俊, 姚晓宇, 尹鹏宇, 等. 一种用于地外环境的辐射散热器: CN121430360A[P]. 2026-01-30.
Shen J, Yao X Y, Yin P Y, et al. A radiation radiator for extraterrestrial environments: CN121430360A[P]. 2026-01-30.

[140] Christie R J, Plachta D W, Hasan M M. Transient thermal model and analysis of the lunar surface and regolith for cryogenic fluid storage: NASA/TM--2008-215300[R]. Cleveland: Glenn Research Center, 2008: 5-6.

[141] Shvarts V, Zhao Z, Bobb L, et al. UHV compatible ^{3}He-^{4}He dilution refrigerators for STM in high magnetic field[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2009, 150(1): 012046.

[142] Ezoe Y, DiPirro M, Fujimoto R, et al. Porous plug phase separator and superfluid film flow suppression system for the soft X-ray spectrometer onboard Hitomi[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2017, 4(1): 1.

[143] Venturini A, Papa F, Utili M. Preliminary experimental quantification of helium leakages from flanged connections at HCPB TBS operative conditions[J]. Energies, 2023, 16(14): 5519.

[144] 沈俊, 禹芳秋, 戴巍, 等. 一种月球氦3的储运装置: CN202110614795.5[P]. 2023.04.18.
Shen J, Yu F Q, Dai W, et al. Storage and transportation device for lunar helium-3: CN202110614795.5[P]. 2023-04-18.

[145] Liang K. A review of linear compressors for refrigeration[J]. International Journal of Refrigeration，2017，84：253-273.

[146] Penanen K，Banks K，Breda D，et al. Mid-infrared instrument cryocooler on James Webb space telescope：Cooldown，commissioning，and initial performance[R]. Chongqing：The International Society for Optical Engineering，2024.

[147] Shinozaki K，Sawada K，Sato Y，et al. Development of helium-3 compressors and integration test of closed-cycle dilution refrigerator system[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences，Aerospace Technology Japan，2016，14(30)：27-31.

[148] Zubrin R M，Muscatello A C，Berggren M. Integrated Mars in situ propellant production system[J]. Journal of Aerospace Engineering，2013，26(1)：43-56.

[149] Starr S O，Muscatello A C. Mars in situ resource utilization：A review[J]. Planetary and Space Science，2020，182：104824.

[150] 何格，尹鹏宇，沈俊，等. 一种用于地外环境的气体压缩与冷却系统：CN121322346A[P]. 2026-01-13.
He G，Yin P Y，Shen J，et al. A gas compression and cooling system for extraterrestrial environments：CN121322346A[P]. 2026-01-13.

[151] Amouzegar L，Nguyen T，Petach M，et al. Northrop grumman next generation mini cooler plus performance[J]. IOP Conference Series：Materials Science and Engineering，2020，755(1)：012009.

[152] Arts R，Martin J Y，Willems D，et al. Miniature stirling cryocoolers at thales cryogenics：Qualification results and integration solutions[J]. Tri-Technology Device Refrigeration，2016，9821：98210P.

[153] Sviatoslavsky I. The challenge of mining He-3 on the lunar surface：How all the parts fit together[R]. Madison：Wisconsin Center for Space Automation and Robotics，1994：4-5.

[154] Gas cylinders—Refillable seamless steel gas cylinders—Design，construction and testing[EB/OL]. (2010-04-15)[2026-04-15]. https://cdn.standards.iteh.ai/samples/41500/0e2ef6673f1f4db18cf616c89a92401e/ISO-9809-3-2010.pdf.

[155] McLaughlan P B，Forth S C，Grimes-Ledesma L R. Composite overwrapped pressure vessels，a primer：NASA/SP-2011-573[R]. Houston：NASA Johnson Space Center，2011：1-3.

[156] Tam W，Ballinger I，Jaekle D. Conceptual design of space efficient tanks[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit，2006：5058.

[157] Yu B，Ma T J，Zhang Y，et al. Composite over-wrapped pressure vessel technology for spacecraft propulsion systems[J]. Journal of Manufacturing Science and Mechanical Engineering，2025，3(1)：53-67.

[158] Eko A J，Epaarachchi J，Jewewantha J，et al. A review of type IV composite overwrapped pressure vessels[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2025，109：551-573.

[159] 杨浩楠，殷靓，巨永林. 大型液氢储罐绝热结构发展现状及面临挑战[J]. 制冷学报，2025，46(3)：57-66.
Yang H N，Yin L，Ju Y L. Development status and challenges of thermal insulation in large liquid hydrogen storage tanks[J]. Journal of Refrigeration，2025，46(3)：57-66.

[160] Glaister D，Schmidt J，McLean C，et al. Long term cryogenic storage technologies overview for NASA exploration applications[C]//42nd AIAA Thermophysics Conference，2011：3774.

[161] Dye S A，Johnson W L，Plachta D W，et al. Design，fabrication and test of load bearing multilayer insulation to support a broad area cooled shield[J]. Cryogenics，2014，64：135-140.

[162] Kinefuchi K，Miyakita T，Umemura Y，et al. Cooling system optimization of cryogenic propellant storage on lunar surface[J]. Cryogenics，2022，124：103494.

[163] Plachta D，Stephens J，Johnson W，et al. NASA cryocooler technology developments and goals to achieve zero boil-off and to liquefy cryogenic propellants for space exploration[J]. Cryogenics，2018，94：95-102.

[164] Nugent B T. Space exploration applications for development of high capacity cryocoolers[C]//International Cryocooler Conference 21，2020：5010721.

[165] Ameen L M，Kenny R J，Johnson W L，et al. Cryogenic fluid management technology[C]//9th Space Propulsion Conference，2024：6-10.

[166] Giancarli L M，Bravo X，Cho S，et al. Overview of recent ITER TBM program activities[J]. Fusion Engineering and Design，2020，158：111674.

[167] Pesich J M，Hauser D M，Hartwig J W，et al. CFD modeling of cryogenic chilldown in a complex channel under normal and low gravity conditions[C]//AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum，2020：23.

[168] Kinefuchi K，Sarae W，Umemura Y，et al. Investigation of cryogenic chilldown in a complex channel under low gravity using a sounding rocket[J]. Journal of Spacecraft and Rockets，2019，56(1)：91-103.

[169] Revision F. International docking system standard[EB/OL]. [2026-04-15]. https://www.internationaldockingstandard.com/.

[170] Carlson A. The logistics development of a cis-lunar transfer vehicle[C]//AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition，2011：7110.

[171] Palaszewski B A. Atmospheric mining in the outer solar system：in situ resource utilization，factories，and moon mining parametric analyses[C]//AIAA Aviation Forum & Ascend 2025，2025：4078.

[172] Swanson C，Paluszek M A，Thomas S. Lunar cargo tug using direct fusion drive[C]//AIAA Scitech 2021 Forum，2021：0147.

[173] 周诚，覃文波，高玉月，等. 地外原位资源利用任务需求与关键技术调查研究[J]. 中国工程科学，2025，27(4)：234-246.
Zhou C，Qin W B，Gao Y Y，et al. Extraterrestrial *in-situ* resource utilization：Mission requirements and key technologies[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(4)：234-246.

[174] 王巍，姚伟. 太空资源开发的发展态势与太空新经济探讨[J]. 中国航天，2024(6)：6-19.
Wang W，Yao W. The trend of space resource exploitation and new space economy[J]. Aerospace China，2024(6)：6-19.