

星表规模化资源采集机器人研究进展及发展趋势

张 涛¹, 张广飞², 赵 曾³, 刘昊洋¹, 孙启臣³, 赖小明³, 徐 坤¹,
丁希仑¹

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006;
3. 中国空间技术研究院北京卫星制造厂, 北京 100094)

摘 要: 地外资源采集不仅有助于缓解地球矿产资源枯竭的压力, 还能显著降低从地球运输物资的成本与风险, 为长期驻留和深空探测任务提供关键支持。本文聚焦于规模化地外资源采集机器人的研究进展。首先, 分析了地外天体资源的种类及其利用前景, 并系统回顾了以往太空任务中的小规模月壤采集机器人、当前研究的规模化资源采集机器人, 以及地面采矿设备的相关技术。然后, 探讨了行星环境约束、地面技术限制、遥远距离限制及法律与道德因素对资源采集的挑战。其次, 详细阐述了规模化资源采集机器人从概念设计到原型开发的关键技术, 包括设计与制造、工艺处理与方法、自主控制、能源系统设计及地面测试。最后, 展望了规模化资源采集机器人的未来发展趋势, 包括资源采集多样化、资源采集智能化、多机器人协作采集及采集与建造一体化, 并据此提出了未来发展的 3 个阶段。

关键词: 太空探测; 空间机器人; 资源采集; 星壤采样; 太空采矿

Progress and Prospect of Large-scale Planetary Resource Collection Robots for Planetary Surfaces

ZHANG Tao¹, ZHANG Guangfei², ZHAO Zeng³, LIU Haoyang¹, SUN Qichen³, LAI Xiaoming³,
XU Kun¹, DING Xilun¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. School of Electro-mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
3. Beijing Spacecrafts, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The collection of extraterrestrial resources not only relieves the pressure from Earth's depleting mineral reserves, but also significantly reduces the costs and risks of transporting materials from Earth, providing critical support for long-term habitation and deep-space exploration missions. This article focuses on the research progress of large-scale planetary resource collection robots. Firstly, the types of planetary resources and their utilization prospects are analyzed, followed by a systematic review of small-scale planetary regolith collection robots deployed in past space missions, current research on large-scale resource collection robots, and relevant technologies derived from terrestrial mining equipment. Then, the challenges posed by planetary environmental constraints, terrestrial technical limitations, long-distance operational constraints, and legal-ethical factors to resource collection are explored. Secondly, the key technologies of large-scale resource collection robots from conceptual design to prototype development are elaborated in detail, encompassing design and manufacturing, process handling and methods, autonomous control, energy system design, and ground testing. Finally, the future development trends for large-scale resource collection robots are discussed, including the diversification of resource collection, the advancement of intelligent control, the implementation of multi-robot collaborative collection, and the integration of collection and construction systems. Based on this, three stages of future development are proposed.

Keywords: space exploration; space robotics; resource collection; regolith sampling; space mining

自古以来, 人类对浩瀚宇宙的探索从未停歇。这种探索不仅源于对未知世界的好奇, 更是人类文明延续和发展的必要选择。地外天体探测在推动科

学进步、获取稀缺资源、拓展人类生存空间等方面具有重要战略意义^[1-3]。然而, 地外天体探测面临着巨大的风险和挑战: 目标天体距离地球遥远, 环

境条件极端恶劣,地球可利用资源有限^[4]。目前,深空探测任务主要依赖地球资源供给,这不仅消耗巨大、成本高昂,而且严重制约了探测任务的规模和持续性。地外天体蕴藏着丰富的可利用资源,这些资源不仅种类多样,而且储量巨大^[5]。星壤广泛存在于地外天体表面,可用于建造地外基地。水冰可分解为氢氧燃料和饮用水。金属矿物如铁、钛、铝等可用于各种零部件制造。稀有资源如氦 3 则是核聚变理想的燃料。规模化资源采集能够为地外基地提供持续的物质保障,显著降低对地球补给的依赖,从而提高深空探测任务的自主性和可持续性^[6]。原位资源利用技术可以大幅降低从地球运输物资的成本和风险,为长期深空探测任务和人类永久驻留提供支持^[7]。因此,星表规模化资源采集不仅是深空探测的关键支撑,也是人类迈向星际文明的重要一步。

在过去的几十年中,人类已经成功开展了多次小规模星壤采样任务,为未来的规模化资源采集奠定了基础。早期的月球探测任务,如美国的“阿波罗计划”首次实现了在月球表面采集与返回土壤和岩石样本^[8]。前苏联“月球 16 号”任务带回了第一个机器人采集的月壤样本^[9]。这些任务不仅验证了月壤采集的可行性,还为后续的深空探测提供了宝贵的数据和经验。随着技术的进步,火星和小行星的采样任务也取得了显著进展。美国的“好奇号”和“毅力号”火星车成功采集了火星表面的土壤和岩石样本,并进行了原位分析^[10]。日本的“隼鸟号”和美国的“欧西里斯号”则从不同的小行星上成功采集了样本并返回地球^[11-12]。这些任务的成功不仅展示了机器人技术在极端环境中的适应能力,也为未来的规模化资源采集提供了技术参考和经验积累。

在极端恶劣的地外环境中,空间机器人技术展现出显著优势。相比人类,空间机器人能够更好地适应高真空、低重力、强辐射和极端温差等严苛条件,并在这些环境中长期、高效、精准地执行资源采集任务,同时可通过集群协同的方式大幅提升采集效率^[13]。这些优势使得空间机器人成为地外天体资源规模化采集的关键支撑^[14]。虽然目前针对地外天体资源规模化采集的机器人研究仍主要停留在理论探索与概念设计阶段,但随着空间机器人技术的不断进步,其在自主导航、环境感知和复杂作业能力方面的提升,正推动以机器人为核心的资源采集系统从技术验证加速向工程应用转变,为资源规模化采集任务提供可靠的技术保障^[16-19]。资源采

集与利用不仅能显著减小对地球资源补给的依赖,还为人类的长期驻留和星际探索奠定物质基础,推动人类迈向更广阔的宇宙空间。因此,地外天体资源的规模化采集与利用将成为未来深空探测的重要趋势^[20-23]。

研究人员已对资源采集机器人进行了探索性研究,这将为进一步开展规模化的采集研究提供重要基础。然而,现有技术尚无法满足工业化实践的需求。随着航天部门、私营企业及研究机构的积极参与,深入了解地外天体资源现状并确定大规模开采方法的需求日益迫切。因此,本文研究星表资源采集机器人的研究现状与发展趋势,不仅填补了相关分析文献的空白,还通过审视现有技术的实践,剖析不足与故障成因,针对技术挑战提出解决方案,为研制更可靠、高效的资源采集技术提供参考。

1 地外天体潜在资源分析 (Analysis of potential resources on extraterrestrial bodies)

1.1 地外天体存在的资源

地外天体资源是未来太空探索和人类长期地外生存的关键。根据现有的探测与科学研究,月球、火星及小行星带等天体蕴藏着丰富的资源,包括星壤、金属矿物、水冰、稀土元素和氦 3 等^[23-27]。

星壤是指覆盖在月球、火星等天体表面的松散碎屑状风化层物质,主要由细粒岩石碎屑、矿物颗粒及尘埃组成,其形成机制与陨石撞击等空间风化作用密切相关^[28]。在太空建筑领域,星壤展现出显著的应用价值,可将其直接转化为混凝土、建筑砖块或玻璃材料,从而为地外基地建设提供重要的原位资源支持。从矿物学角度来看,星壤在资源方面具有显著的赋存优势^[29]。月壤主要含硅酸盐矿物,其化学成分以二氧化硅、氧化铝、氧化钙及氧化镁等氧化物为主^[30]。火星土壤则因其富含赤铁矿而呈现特征性的红色调,主要元素组成包括铁、硅、镁和钙^[31-32]。特别值得关注的是,小行星带蕴藏着极其丰富的金属资源。据估算,其铁族金属总储量约为地球储量的 10^7 倍,仅一颗直径 10 km 的 M 型小行星所含矿物资源的经济价值,相当于地球已探明矿产储量的 4 000 倍^[33]。未来对这些地外矿物资源的开发利用,不仅将极大促进深空探测活动的发展,还可为地球提供重要的金属原料。

水冰是地外天体资源中关键的一项,不仅是生命支持系统的基础,还可通过电解过程分解为氢气和氧气,为燃料和呼吸气体提供来源^[34]。已在月球

极区永久阴影坑和火星中高纬度地区探测到大量沉积的水冰, 其中月球的冰层储量保守估计超过 6 亿吨, 而火星极地的冰层深度可达数十米, 其总储量足以支撑未来地外基地的长期运行需求^[35-37]。除水冰外, 氦 3 也是一种极具潜力的资源。在月球表面, 尤其是在受太阳风照射较多的区域, 积累了大量氦 3, 总储量高达数千吨^[38]。此外, 稀土元素(如钕、镧、铈等)在地外天体资源中也占据重要地位。这些元素广泛应用于电子设备、电动汽车电池和太阳能电池等领域, 但地球上的储量有限且开采过程对环境破坏较大。相比之下, 碳质和硅质小行星中的稀土储量可满足地球数十年需求, 其开采将有效缓解资源短缺和环境压力^[5,39]。

目前, 人类对地外天体资源的认知主要依赖陨石分析、光谱研究、原位探测和采样带回分析。然而, 这些天体的实际组成远比现有研究揭示的更为复杂。只有通过持续的勘探与更大规模的采样任务, 才能积累足够数据, 进而准确评估资源的分布规律、赋存状态及工业化开采的可行性。

1.2 行星资源的利用前景

随着航天技术的不断进步, 地外天体资源正在从科学探索阶段转向探索与应用并重的阶段^[39]。月球、火星和小行星带等天体的资源具有巨大的开发潜力, 未来的太空采矿和资源利用将成为长期支撑太空探索的基础。以下从不同的资源类型探讨它们的应用前景。

1) 挥发性资源利用: 水冰是月球上含量最丰富的挥发性物质, 同时也是火星、C 型小行星和彗星的重要资源。通过电解作用, 水冰可分解为氢气和氧气, 既能作为航天器的推进剂, 又能为生命支持系统提供呼吸气体。美国航空航天局(NASA)的小行星探勘机器人(RAP)小组指出, 水是最有可能在太空中大规模提取并用作推进剂的资源^[40]。未来, 水冰的高效开采与电解可显著降低航天器对地球燃料补给的依赖, 使月球或火星成为深空探测任务的燃料补给站, 从而大幅扩展人类探索太空的范围。氢气的用途不仅限于推进剂, 还可为地外天体的探测、资源开采及基地建设提供能源。在生命维持系统中, 水冰不仅可直接用于饮用, 还可通过电解持续供应氧气, 是保障宇航员长期驻留太空的核心资源。此外, 水因其高线性能量吸收率和低二次粒子发生率, 是理想的辐射屏蔽材料^[41]。除水冰外, 火星大气中 95% 的二氧化碳也具有重要的利用价值^[42]。在火星上将二氧化碳转化为氧气已经被 NASA 的火星氧气原位资源利用实验(MOXIE)

证实。2021 年 4 月, NASA 研制的氧气制备设备搭载在“毅力号”火星车上, 采用固体氧化物电解技术, 将火星大气中的二氧化碳转化为氧气和一氧化碳, 从火星大气中提取了约 5 g 氧气, 这足以支持一名宇航员呼吸约 10 min^[43]。二氧化碳还可通过萨巴蒂尔反应与氢结合生产甲烷燃料, 而氢可通过电解水冰得到^[44]。这一循环利用体系将极大减少从地球运输燃料的需求, 为定居火星奠定基础。

2) 金属资源利用: 利用地外天体的钛铁矿资源, 通过多种制造工艺, 可实现零部件的原位制造。传统加工技术(如铸造、锻造)与先进增材制造技术(包括选择性激光烧结和选择性激光熔化)均适用于钛铁矿的加工制造^[45]。利用该资源可生产航天器子系统组件、空间基础设施构件以及月球/火星基地的建筑部件。由于大多数行星处于中微重力环境, 这些结构对力学性能的要求较地球上的标准可降低 30%~50%, 从而显著简化了制造工艺的要求^[46]。但是, 零部件的原位制造所需的关键技术, 如极端地外空间环境下矿物开采、金属精炼和制造工艺, 仍面临许多技术挑战^[47]。M 型小行星蕴含的金属矿物具有突出的在轨开发价值^[48]。通过建立空间提炼与制造系统, 可生产空间站所需关键部件, 降低空间设施对地球补给的依赖。此外, 部分 C 型小行星富含的铂族元素经在轨冶炼提纯后, 既可作为高附加值材料返回地球, 又能为空间制造系统提供优质原料。这种“空间资源—空间制造—多向应用”的闭环利用模式, 将推动形成可持续发展的太空工业体系。

3) 星壤资源利用: 星壤作为地外天体表面最易获取的原位资源之一, 其多样化利用方式为未来深空探测和地外基地建设提供了重要支撑。在太空建筑材料领域, 月壤或火星土壤通过 3D 打印、高温烧结或聚合物固化等技术可直接转化为结构材料^[7,49-50]。欧洲航天局(ESA)已成功利用模拟的月壤通过太阳能聚焦固化烧结和黏结剂固化技术制造出建筑模块^[51-52]。华中科技大学采用真空热压烧结工艺制成可铆接的月壤砖块, 并已将其送往中国空间站进行太空实验, 以验证其在太空环境中的力学性能、热学性能变化及抗辐射能力^[53-54]。针对空间辐射防护这一关键挑战, 除了水可以屏蔽辐射, 使用星壤屏蔽是另一种可行的解决方案^[55]。星壤因其高密度和多元素组成特性, 能够有效吸收和散射辐射粒子。利用这一特性, 可将月壤堆积成防护层并覆盖在月球基地表面数米, 从而将辐射剂量降低至安全水平^[56]。火星土壤在空间辐射防护方面

更具优势，其富含的铁氧化物能进一步增强屏蔽效果^[57]。这种就地取材的防护方式，比从地球运输防护材料更具可行性。在功能性构件制造领域，星壤展现出更广泛的应用潜力。月壤中的硅酸盐矿物经提纯后可获得硅元素，可用于制造太阳能电池板，其硅酸盐和氧化物成分可烧制成耐高温陶瓷，可用于制造管道、容器等设备^[58]。火星土壤因其独特的矿物组成，可开发出具有特殊性能的陶瓷材料，如抗氧化铁侵蚀的涂层^[59]。这些就地生产的材料不仅能满足基地日常需求，还可为科学实验提供支持。

4) 稀有资源利用：稀有资源在地外天体中的开发利用潜力巨大，其中最具代表性的是月球氦 3 和小行星铂族金属及稀有金属。氦 3 作为理想的核聚变燃料，具有清洁、低污染的特点。每年仅需从月球提取数十吨氦 3，即可满足地球数年的能源需求。然而，氦 3 的工业化开采仍面临重大技术挑战，包括需要开发能够在大面积月壤中进行加热挥发分离的技术，以及更高效的聚变反应堆。小行星铂族金属及稀有金属的开发具有独特优势。M 型小行星富含铂族金属（如铂、钯、铑），其储量远超地球已知矿藏^[60]。这些金属是高效催化剂的理想材料，在燃料电池、化学合成和废气处理等领域具有重要的应用价值。铂应用在氢燃料电池中可显著提升地外基地能源系统的效率。此外，C 型小行星蕴含丰富的稀土元素（如钕、镧），这些元素是制造高性能电池和半导体器件的关键原料^[47,61]。通过发展在轨冶炼和提纯技术，这些稀有金属可直接用于空间制

造，生产高效太阳能电池或电子设备，从而大幅降低对地球供应链的依赖。同时，若将提纯后的铂族金属和稀土元素运回地球，不仅能有效缓解地面资源短缺问题，还将有力推动高科技产业的发展。

2 研究现状（Research status）

在过去的几十年中，随着太空探索任务的日益增多，采集机器人在星壤采集和科学实验等领域的应用研究逐渐获得广泛关注并取得了显著发展，成为深空探测不可或缺的重要组成部分。与此同时，地面资源采集技术的不断进步也为太空资源采集提供了宝贵的参考和有力的支持。

2.1 太空任务中的采集机器人

尽管当前技术水平和科学研究仍有限，太空资源尚未实现大规模开采，但针对地外星壤的小规模采集技术已历经半个多世纪的发展。全球各国的研究人员设计并开发了多种创新型采样器，其中部分已在深空探测任务中成功获取星壤样品，如表 1 所示。

2.1.1 月球采样机器人

月球是距离地球最近的天体，从人类进行深空探测开始一直是探测的热点目标。Surveyor 3/7 着陆器最先装有采样器，该采样器是一个固定在 3 自由度伸缩机械臂末端的铲挖装置，具备广阔的采样覆盖区域，分别在 1967 和 1968 年对月壤进行了采样^[4,62]（图 1(a)）。前苏联是第一个通过机器人采集月壤样本并返回的国家，分别于 1970、1972 和

表 1 目前成功实施的星壤采样返回任务
Tab.1 Currently successful planetary regolith-sampling and return missions

采集类型	发射年份	任务	国家	天体	取样深度	样品质量
有人采集	1969	阿波罗 11 号	美国	月球	表层	21.6 kg
	1969	阿波罗 12 号		月球	表层	34.3 kg
	1971	阿波罗 14 号		月球	表层	42.3 kg
	1971	阿波罗 15 号		月球	表层/次表层 2.4 m	77.3 kg
	1972	阿波罗 16 号		月球	表层/次表层 2.2 m	95.7 kg
	1972	阿波罗 17 号		月球	表层/次表层 3 m	110.5 kg
无人采集	1970	月球 16 号	苏联	月球	表层	101 g
	1972	月球 20 号		月球	表层	30 g
	1976	月球 24 号		月球	次表层 3 m	170 g
	2003	隼鸟 1 号	日本	小行星	表层	< 1 g
	2014	隼鸟 2 号		小行星	表层	5.4 g
	2016	欧西里斯号	美国	小行星	表层	121.6 g
	2020	嫦娥五号	中国	月球	表层/次表层 1 m	1 731 g
	2024	嫦娥六号		月球	表层/次表层 1 m	1 935.3 g

1976 年通过“月球 16/20/24 号”着陆器携带的回转冲击钻收集月壤样品^[63]。“月球 16/20 号”的钻探采样器是相同的(图 1(b)), 安装在一个细长的机械臂末端, 可完成 350 mm 深度的样本收集^[64]。“月球 24 号”的采样器则不同, 由一个固定在 2.5 m 长滑轨上的回转冲击钻和一套柔性取芯软袋组成^[65]。美国于 1969 年成功完成“阿波罗 11 号”载人航天任务, 实现了人类首次登月, 并利用人工采集的方式带回月壤样本^[66]。在此后 3 年时间里, 美国航天员共进行了 6 次月壤采集与返回任务^[67]。在“阿波罗 11/12/14 号”任务中, 宇航员利用铲子、钳子、耙子、取芯管、锤子等工具收集月壤(图 1(c)), 铲子用于采集月球表面的月壤; 钳子用于夹取月表岩石; 取芯管则用于采集月表以下月壤, 取芯管竖直插入月壤中, 利用锤子反复敲击其顶端, 在经过大概 50 次敲击后, 采集深度可达 700 mm^[68]。在“阿波罗 15/16/17 号”任务中, 宇航员还在月球表面成功收集了深达 2.4~3 m 的月球次表层样品^[69]。

2020 年 12 月“嫦娥五号”(CE-5)成功返回地球(图 1(d)), 并带回共计 1 731 g 月球样本^[70-71]。考虑到月球钻取采样存在很大的不确定性, “嫦娥五号”探测器设计了钻取采样和机械臂表面采样两

种模式, 并为此设计了一个 4 自由度的机械臂, 末端携带 2 种采样装置——表层采样装置和钻取采样装置^[72-73]。其中, 钻进取芯机(图 1(e))采用旋转冲击的方式采集月球剖面样本, 最终钻入月壤约 1 m 采集了深层样品^[74]。表层采样装置由二连杆机械臂驱动, 携带了 2 个采样器——浅钻式和铲挖式。浅钻式采样器(图 1(f))则可以对一些相对较硬的目标进行浅层钻孔, 并通过末端特殊的花瓣结构实现样品提取。铲挖式采样器(图 1(g))采样量更大, 在机械臂关节驱动下做回转运动, 完成样品采集工作。作为后续任务, “嫦娥六号”探测器在 2024 年成功登陆月球背面, 沿用与“嫦娥五号”相同的钻取和表面采样装置实现了人类首次月背采样, 并带回共计 1 935.3 g 月球背面样本^[75-77]。

2.1.2 火星采样机器人

火星是太阳系中与地球最相似的星球, 为评估其宜居性和生命存在的可能性, 人类对其进行了大量的探测, 典型代表如图 2 所示。1975 年, NASA 发射了“海盗 1 号”和“海盗 2 号”火星探测器, 探测器着陆器的机械臂末端安装了铲型采样装置, 采样铲在内置马达的驱动下可以绕轴 180° 旋转, 完成采样动作并将其封装在样品收集器中, 采样铲

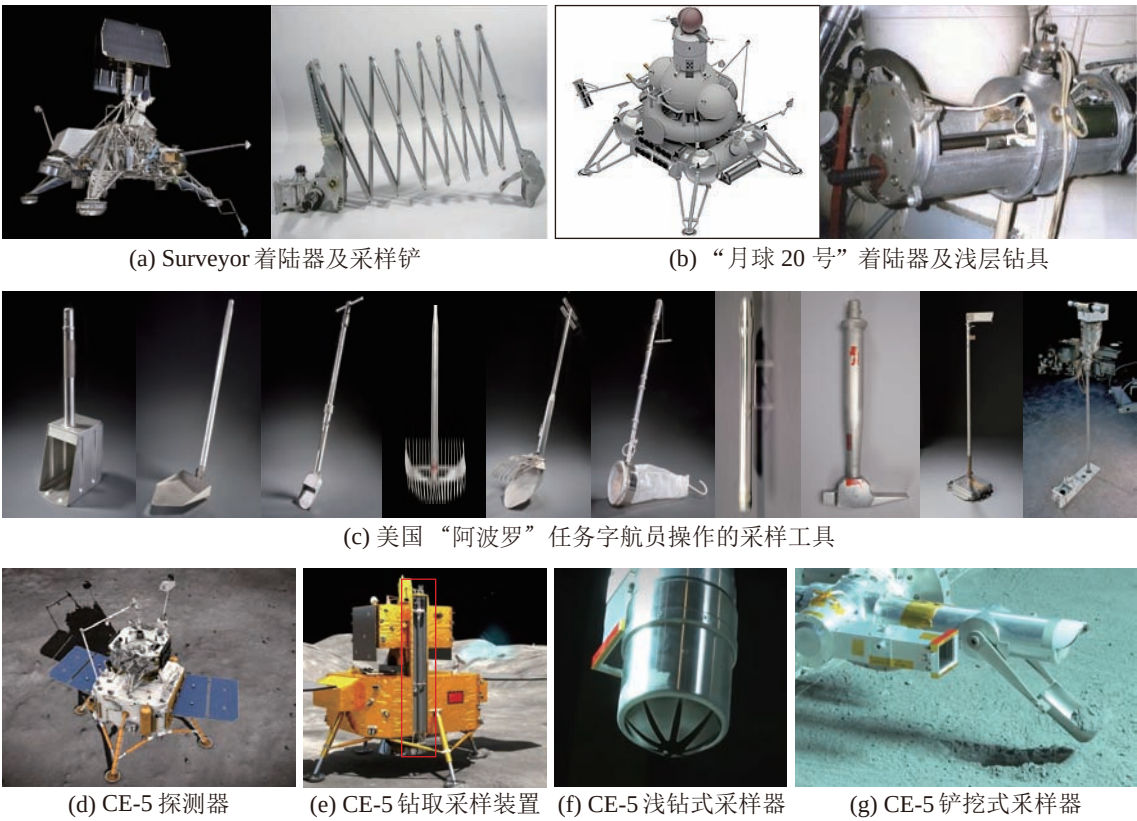


图 1 月球探测中的采样器

Fig.1 Samplers in the lunar exploration

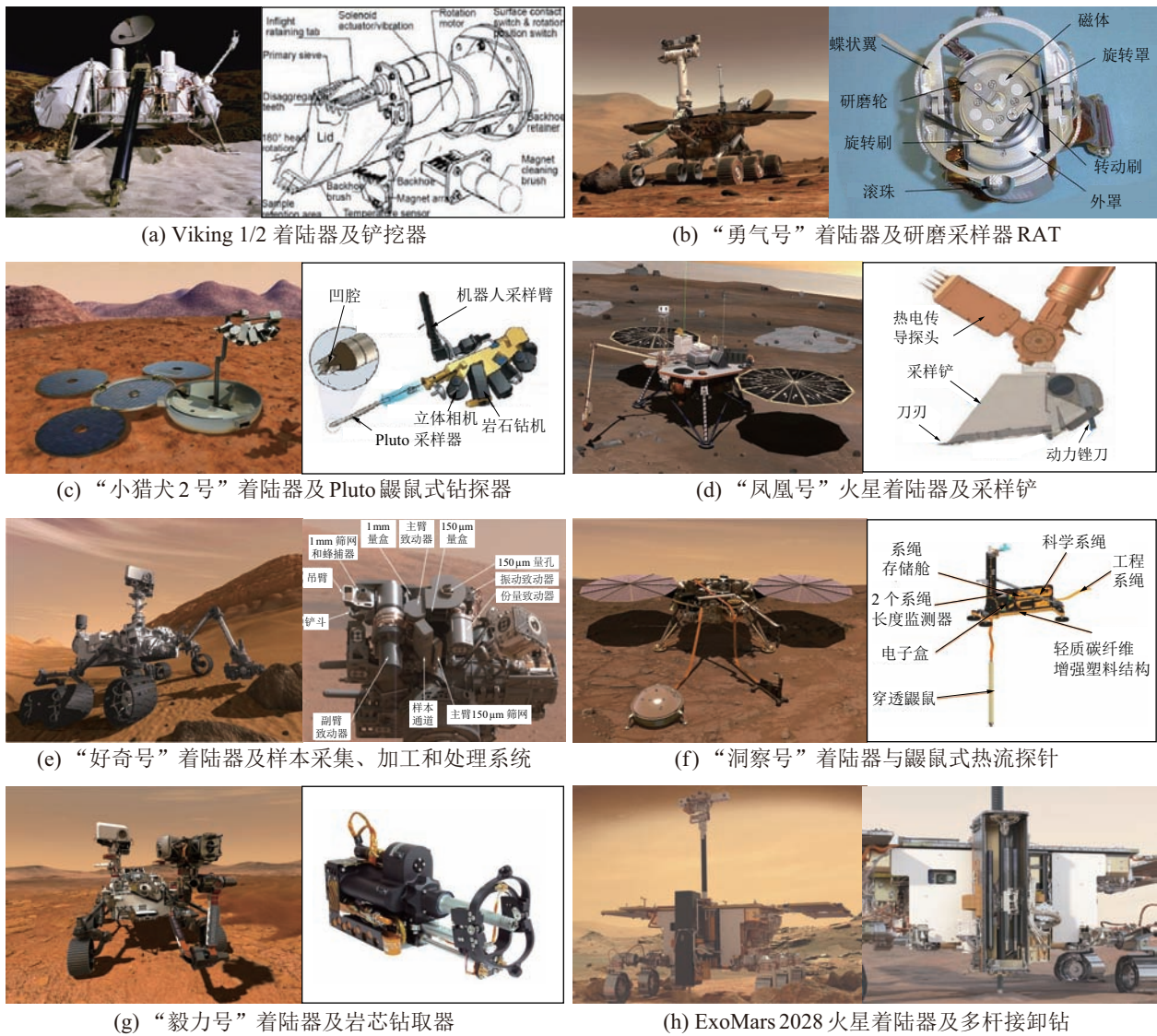


图 2 火星探测中的采样器

Fig.2 Samplers in the Mars exploration

在采样过程中的运动方式为一段圆周运动^[78]（图 2(a)）。采样器端部装有过滤网，可对火星土壤样品进行初次筛分处理。当采样器被反向拖动时，其底部装的反向铲可以掀开表层火星土壤^[79-80]。“海盗号”火星探测器对火星土壤进行就地采样与分析，并未携带样品返回。2003 年，“勇气号”和“机遇号”火星车都携带了岩石抛磨工具 RAT（图 2(b)），用于打磨岩石风化层，以便观察岩石的内部纹理和成分^[81]。RAT 在采样时，机械臂将压紧在岩石表面，两侧蝶形翼受压张开起支撑作用，马达驱动带有 2 个金刚石切削具的研磨轮以 300 r/min 的速度高速回转研磨岩石表面，产生的岩粉即可被采样器收集^[82]。2003 年，ESA 在 Mars Express 任务中“小猎犬 2 号”着陆器上搭载了 Pluto 鼯鼠式钻探器（图 2(c)），主要通过圆柱形凸轮旋转产生的前向锤

击动作而钻入星壤，并通过后向锤击动作辅助拉动绳索返回地面，其最大钻取深度为 2 m，但因着陆失败未曾工作^[83]。

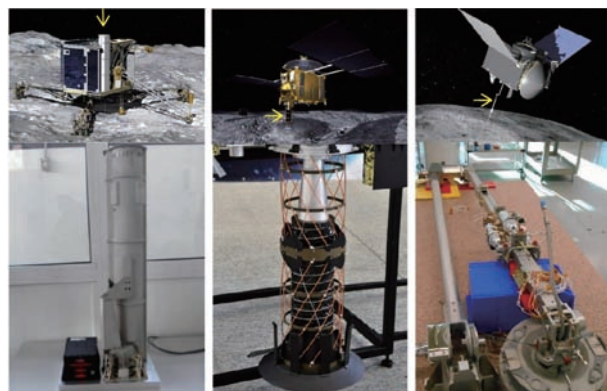
2008 年，NASA 发射了“凤凰号”火星着陆器，其末端安装了由 2.4 m 长的 4 自由度机械臂驱动的铲挖式采样装置，为破坏火星表面的冻土层以便采样，采样铲安装了锯齿形刀片和动力锉刀^[84]（图 2(d)）。机械臂上还安装了相机，可以指导热电传导探头插入火星土壤。与“海盗号”相同，“凤凰号”也是就地采样并分析，采样铲在采样过程中的运动方式为一段圆周运动。2012 年，“好奇号”火星车带着样本采集、加工和处理系统 SA/SpaH（图 2(e)）成功登陆火星，用来获取火星表面岩石和土壤样品，并将这些样品加工成细颗粒后分发给科学仪器进行原地分析，其在测量土壤含水率的任

务中发挥了重要作用^[85-87]。2018 年,“洞察号”着陆器携带的热流探针(图 2(f))同样为鼯鼠式设计,计划在火星表面钻进 5 m,但因对土壤摩擦特性估计不足,实际只钻进 35 cm^[88]。2020 年,“毅力号”着陆器携带了样品采集和存储系统(图 2(g)),用于采集并存储岩石样品以备送回^[89]。该系统有多个钻头和多个钻管,可在火星表面依靠火星车移动实现大区域的岩石取样^[90]。ESA 为即将到来的 ExoMars 2028 任务设计了一个多杆接卸钻 Deep Drill (图 2(h)),采用 3 根钻杆对接可实现 2 m 钻深,钻头空腔在钻进模式下关闭,需要取样时可打开形成取芯腔^[91-93]。

2.1.3 小天体采样机器人

小天体不仅保存了太阳系早期形成与演化的关键历史信息,而且还贮藏着丰富的能源与矿产资源,这对太阳系科学研究和太空资源开采具有至关重要的意义。然而,小天体通常体积较小、形状不规则,且重力加速度极低,导致着陆器难以依靠自身重量来平衡采样作业时产生的反作用力。因此,与月球或火星的采样任务相比,小天体采样任务面临更为严峻的技术挑战^[94]。

目前世界上有 4 个采样机器人实施了小行星取样任务,如图 3 所示。2004 年,ESA 发起的 Rosetta 任务中包含了对 67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星的探测^[95]。其中,“菲莱”着陆器携带了一个钻探采样和样品原位分析系统 SD2 (图 3(a))。该系统的设计是为了直接在彗星表面钻取样本,并在原地进行化学分析,以揭示彗星材料的组成。SD2 系统能够通过一个伸缩钻杆深入彗星表面,从中提取样本后,利用内置的仪器分析这些样本的化学和物理特性^[96]。然而,在实际任务中,“菲莱”着陆器因为着陆问题未能稳定工作,导致 SD2 系统无法进行预定的采样分析。日本于 2003 年 5 月发射探测小行星“糸川”(Itokawa)的“隼鸟号”飞行器(图 3(b))。2005 年 9 月,“隼鸟号”成功到达目标小行星“糸川”,“隼鸟号”利用自身携带的相机,清晰地拍到“糸川”小行星表面堆满各种尺寸的风化颗粒^[97]。“隼鸟号”采用“一触即走”的方式进行采样,携带 3 枚质量为 10 g 的子弹。在下降靠近小行星表面的合适时机触发弹射器,子弹以 300 m/s 的速度射向表面,激起风化层颗粒。随后探测器利用 1 m 长的喇叭形收集器捕获飞溅物^[98]。然而在 2 次靠近小行星表面的采样过程中,均没有正常触发弹射系统,子弹并没有被射出,但收集器最终收集到数千个因探测器扰动而飞溅的风化颗粒^[99]。



(a) “菲莱”着陆器和 SD2 分析系统 (b) “隼鸟号”飞行器和投射采样器 (c) “欧西里斯号”飞行器和取样臂

图 3 小天体探测中的采样器

Fig.3 Samplers in the small body exploration

继“隼鸟号”之后,日本于 2014 年 12 月发射了“隼鸟 2 号”探测器对“龙宫”(Ryugu)小行星进行采样探测^[100]。“隼鸟 2 号”同样利用子弹以 300 m/s 的速度轰击小行星表面,并利用喇叭形收集器收集飞溅物颗粒^[101]。2018 年 6 月“隼鸟 2 号”抵达“龙宫”并成功实施采样,2020 年 8 月,“隼鸟 2 号”的样品返回舱降落于澳大利亚 Prohibited 地区,并带回约 4.5 g 小行星样本^[102]。继日本之后,为实现对 Bennu 101955 小行星的采样,NASA 于 2016 年 9 月发射“欧西里斯号”飞行器并结合“一触即走”和“气体激励”的采样方式采集小行星表面的颗粒样本^[94](图 3(c))。当探测器贴近小行星表面时,其取样臂末端的采样腔突然注入氮气,扰动表面风化层颗粒并使其随气流运动。气流将颗粒样本带入采样腔,并通过细孔过滤网保留样本。2018 年 12 月“欧西里斯号”顺利抵达 Bennu 101955 小行星,并成功实施了 3 次“一触即走”的采样,并于 2023 年 9 月返回地球,最终得到 121.6 g 的样本^[103-104]。

2.1.4 有人/无人采集系统比较

在以上太空任务中,采样系统可以分为有人系统和无人系统两大类。这 2 种系统在技术实现、任务复杂度、采样效率、适应性以及成本效益等方面存在显著差异,如表 2 所示。对地外样品采样任务中有人与无人采集系统的实际应用进行比较分析,可以为未来地外采样任务提供重要的参考。

有人采集系统主要依赖宇航员直接操作工具完成采样任务,无人采集系统依靠机器人完成采样任务。在“阿波罗 11~17 号”任务中,宇航员使用铲子、钳子、取芯管、手动冲击钻等工具,完成了从表层到次表层 3 m 深的月壤采集。这种方式高度依

表 2 地外天体有人采集系统与无人采集系统的对比
Tab.2 Comparison of manned and unmanned extraterrestrial planetary collection

比较维度	有人采集系统	无人采集系统
操作方式	宇航员手动操作工具（如铲子、取芯管、冲击钻），灵活性高，需复杂的生命支持系统。	机器人自动化或遥控操作（如机械臂、钻探装置、气体激励），无需生命支持系统。
任务复杂度	宇航员可实时调整策略，适应复杂地质条件，但受限于体力与任务时长。	适应多样化深空环境（如月球背面、火星冻土、小行星微重力），但应变能力弱。
采样效率	效率高，样本量大且多样。例如，“阿波罗”计划 6 次任务共带回 382 kg 月壤样品，含表层、深层芯样和岩石，操作时间短。	样本量较小。例如，“嫦娥五号” 1.7 kg，“隼鸟 2 号” 5.4 g，“欧西里斯号” 121.6 g，操作时间长。
成本与安全	成本极高（“阿波罗”计划 254 亿美元），安全性要求高，风险包括人员伤亡。	成本较低，风险仅限于设备损失，可尝试高风险操作。

赖宇航员的判断力、操作技巧和现场适应能力。然而，有人采集系统需要复杂的生命支持系统和载人航天器，技术实现难度和风险较高。相比之下，无人采集系统无需生命支持系统，能够在空间极端环境下长期运行。“月球 16/20/24 号”任务中的回转冲击钻、“嫦娥五号”的表取与钻取双模式采样装置，以及“隼鸟号”和“欧西里斯号”的“一触即走”采样系统，均通过机械臂、钻探装置或气体激励等技术实现采样。但无人采集系统的操作受限于预设程序和遥控指令，对突发状况的应变能力较弱。有人采集系统在任务复杂度上具有天然优势，宇航员能够根据现场情况实时调整采样策略，但是这种采集方式受限于宇航员的体力和耐力，更适用于地球附近行星的采样任务。无人采集系统则更适合多样化的深空环境。火星上的“勇气号”和“好奇号”通过移动平台和多样化采样工具应对了火星表面的冻土和岩石，小行星任务中的“隼鸟 2 号”和“欧西里斯号”特殊的采样系统克服了微重力的挑战。

有人采集系统在采样效率和样本多样性方面具有显著优势，但任务成本极高。“阿波罗”计划在 6 次登月中累计带回 382 kg 月壤样本，样本类型多样，包括表层月壤、次表层芯样和岩石碎片。相比之下，无人采集系统的采样量通常较小。“月球”计划在 3 次月球采样中共带回 301 g 样品，“嫦娥五号”带回 1 731 g 样品。而“欧西里斯号”在小行星上历经数月、3 次尝试，仅采集 121.6 g 样本。在成本方面，有人采集系统的投入巨大，“阿波罗”计划总成本高达 254 亿美元。相比之下，无人采集系统的成本较低。日本“隼鸟 2 号”任务成本约为 1.5 亿美元，美国“欧西里斯号”任务成本约为 10 亿美元，远低于载人任务。此外，载人任务对安全性要求极高，任何失误都可能导致严重后果，例如

“阿波罗 1 号”火灾事故造成 3 名宇航员遇难。而无人采集系统的风险主要是设备损失，无需考虑人员安全，因而可尝试更高风险的操作。

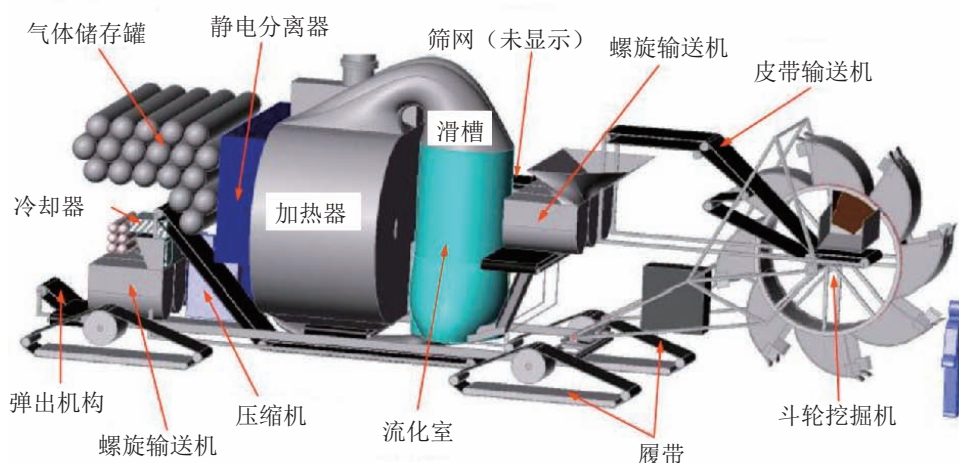
综合而言，有人采集系统在采样效率、灵活性和样本多样性上占据优势，适合需要大量高质量样本的短期任务。无人采集系统则在成本效益、环境适应性和安全性上更具竞争力，适合长期、远程和多样化的深空探测任务。未来，随着机器人技术和人工智能的进步，无人采集系统有望通过自主决策和实时适应能力弥补与有人采集系统的差距，从而在太空资源采集领域发挥更大作用。

2.2 资源开采机器人

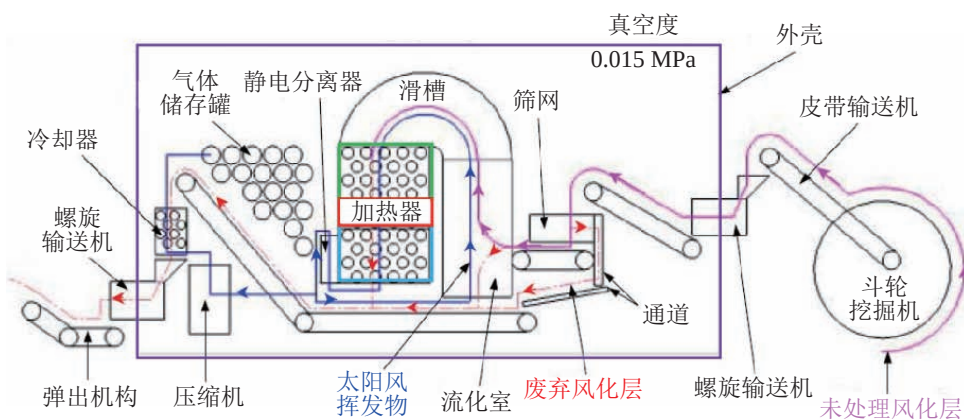
虽然当前地外天体资源规模化开采技术尚未成熟，但近年来取得了很大的技术突破，太空采矿极有可能在未来 20 年内成为现实^[47]。目前，一些研究机构和商业公司正积极筹备地外天体的采矿活动，并致力于开发适用于深空作业的开采机器人，以下是相关领域的一些代表性研究。

2.2.1 Mark 系列开采机器人

美国威斯康星大学聚变技术研究所（FTI）利用“阿波罗”计划采集的月球样品气体释放实验来进行月球挥发物开采机器人的概念设计^[105]。该机器人共进行了 3 次迭代设计 Mark-I、II 和 II-I^[15,106-107]，最新的一代是 Mark-III（图 4）。Mark-III 主要包括挖掘铲斗轮、输送系统、分离系统、加热器、挥发物存储系统、动力与移动系统和机身，其工作原理是通过机械和热处理过程从月壤中提取挥发物，具体包括 6 个步骤。1) 挖掘：3.8 m 直径的挖掘铲斗轮以 27.4 m/h 的速度挖掘 3 m 深、8.4 m 宽月壤。2) 筛分与传输：月壤通过直径小于 50 mm 的筛网进行筛选，再通过输送带将其送至螺旋输送机，进入 15 kPa 的压力密闭舱，筛分出粒径小于 0.25 mm 的颗粒。3) 流化：流化床使小于 0.1 mm 的



(a) Mark-III 结构示意图



(b) 月壤及挥发物通过 Mark-III 内部的路径示意图

图 4 Mark-III 开采机器人

Fig.4 Mark-III mining robot

颗粒以预定速度向上流至加热器, 大颗粒排出被送至输送机排出。4) 加热与释放: 太阳能集热器加热月壤至 700°C , 释放挥发物。5) 气体分离与存储: 静电分离器分离气体与尘埃, 大部分气体循环至流化床, 其余经 6 级压缩机 (20 MPa) 存储, 水和二氧化碳冷凝为液体。6) 废料排放: 冷却后的土壤通过螺旋输送机排出并抛回月表。Mark-III 的总质量为 $9\,900\text{ kg}$, 尺寸为 $13.5\text{ m}\times 5.4\text{ m}\times 4.9\text{ m}$, 功率为 350 kW , 开采效率为 1258 t/h , 最大挖掘深度为 3 m , 预计产量为每年 33 kg 氦 3, 201.3 t 氢气和 108.9 t 水。Mark-III 初步证明了月球挥发物开采技术支持基地建设的可行性, 其低压设计和太阳能驱动具有创新性, 但高功率需求、运行限制和环境挑战仍有待解决。

2.2.2 RASSOR 开采机器人

美国 NASA 提出了一种能够在月球或火星表面开采星壤的机器人 RASSOR (图 5(a)), 该机器人主要包括铲斗鼓系统、执行器、移动系统、传感器

与控制系统和能源系统^[16]。RASSOR 的工作原理是通过反向旋转的铲斗鼓实现零水平反推力挖掘, 以适应低重力环境。机器人前后臂各安装一个铲斗鼓, 反向旋转, 铲斗锯齿边缘切入星壤, 螺旋挡板收集星壤, 每鼓容量 40 kg , 满载后将铲斗鼓提升至指定位置, 通过轮式移动平台并结合立体视觉导航返回着陆器。到达返回着陆器后, 机器人将铲斗鼓置于接收斗上方, 反转旋转卸下土壤。此外, 除了强大的挖掘功能, RASSOR 还具备行走、越障、爬坡等功能 (图 5(b)~(e))。目前, RASSOR 2.0 已经在肯尼迪航天中心完成了性能测试, 总质量为 66 kg , 挖掘深度大于 1 m , 最大行进速度 0.57 m/s , 月壤挖掘效率为 25 kg/h , 功率为 108 W 。RASSOR 的最终目标为每日工作 16 h , 挖掘 35 次, 年产超 10^6 kg 星壤。RASSOR 2.0 通过创新的零反作用力设计和低质量结构, 为火星资源开采提供了可行方案。其在深挖能力和自动化水平方面具有优势, 但热控、电池与制造难题尚待解决。



(a) RASSOR 开采机器人



(b) 表面挖掘



(c) 表面行走



(d) 跨越障碍



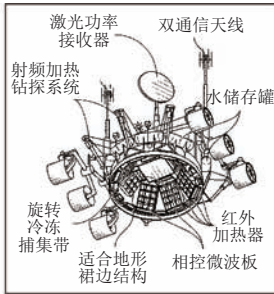
(e) 向上爬坡

图 5 RASSOR 开采机器人及其具备的功能

Fig.5 RASSOR mining robots and its functions



(a) RGD 概念图



(b) RGD 结构示意图

图 6 RGD 开采机器人

Fig.6 RGD mining robot

2.2.3 RGD 开采机器人

美国传星宇航公司 (TransAstra) 提出了一种月球挥发物开采机器人 RGD (图 6), 旨在解决传统着陆包裹质量有限 (每包仅几吨) 却需从月壤中经济可靠地勘探和提取大量挥发性物质的难题 [108-109]。为了避免机械开采功率大、效率低的问题, RGD 开采结合使用射频、微波和红外辐射, 通过深度控制加热曲线加热月壤冻土和其他类型的冰沉积物。温度升高使水冰升华, 并促使大部分挥发性物质从月壤中向上迁移到低温捕集器中, 从而使其以液态形式储存。RGD 将地下传感器与 TRL-6 钻头相结合, 然后集成到电动探测车中, 以便探测和收集挥发性气体。在使用过程中, 车辆停在开采地点, 放下收集罩以收集该地区的可用水, 然后再继续前进。当车载储罐装满后, 车辆将返回基地清

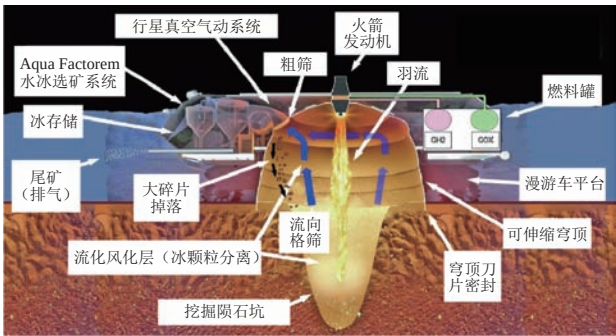
空储罐, 然后再返回到开采地点继续采集。探测车可以使用电池供电并在基地充电, 也可以携带由远程激光器供电的激光接收器。通过使用多频辐射系统, RGD 在开采过程中可最大限度地减少周围月壤中水蒸气的重新冻结。据估计, 用于承载 RGD 的探测车质量将在 2~5 t 之间, 每个探测车每年可在水中收集其质量 20~100 倍的挥发性物质。

2.2.4 Rocket M 开采机器人

美国马斯特恩太空系统公司联合蜜蜂机器人公司和月球基地公司开发了 Rocket M 开采机器人 (图 7), 重点提取月球永久阴影区的水冰 [110]。Rocket M 包括火箭引擎开采系统、气动传输系统、选矿系统和漫游车, 其工作原理是利用小型火箭引擎 (440 N 推力, 氧/氢燃料) 的深坑效应开采月球永久阴影区的水冰月壤, 具体包括 4 个步骤。1) 开采: 火箭引擎在封闭罩内发射 0.5 s 脉冲, 产生高温高压喷流, 分解并流化含冰土壤, 形成直径为 0.8 m, 最大深度为 2 m 的深坑。2) 传输: 气动系统利用火箭废气压力将流化土壤传输至选矿系统。3) 选矿: 选矿系统通过磁选、静电分离和气动分选提取水冰, 尾矿返回月表。4) 收集: 水冰存储于漫游车, 运送至指定位置, 可进一步电解为氧气和氢气作为推进剂。Rocket M 总质量为 818 kg, 月壤处理效率为 75.8 kg/(kW·h), 每周期 (指单次开采循环)



(a) Rocket M 概念图



(b) Rocket M 开采原理图

图 7 Rocket M 开采机器人

Fig.7 Rocket M mining robot

3.3 kW·h, 年耗电 4.6 MW·h 时, 月壤开采效率为 70 kg/s, 水冰开采效率为 15 g 水/1 g 推进剂, 预计每日水冰产量为 1 200 kg。Rocket M 首创火箭深坑采矿, 利用喷流代替机械挖掘, 水冰开采效率高, 投资回报率高。但 Rocket M 也面临着开采深度有限, 无法开采更深层的水冰资源, 火箭脉冲也会引发水冰的部分升华, 造成资源浪费等问题。如果这些问题得到妥善处理, Rocket M 有望推动月球水冰开采取得突破性发展。

2.2.5 SCAR-E 开采机器人

SCAR-E 是英国小行星采矿公司和日本东北大学空间机器人实验室合作开发的一种新型六足攀爬机器人(图 8), 专为太空资源勘探和小行星采矿任务设计^[111]。SCAR-E 整体为六足仿生结构, 相比于传统轮式或履带式探测器能够在陡峭、崎岖的地形上自由行走。SCAR-E 末端的六指抓取装置使其能够执行复杂的检查和操作, 如攀爬陡峭的表面或检查航天器外壳等。SCAR-E 整机质量为 15 kg, 高度为 0.4 m, 水平跨度为 1.6 m, 有效载荷为 5 kg, 整机具有 18 个自由度, 6 个 RGB-D 高清摄像头, 360° 视野空间, 具备高度的自主性。该机器人预计 2035 年以后用于小行星商业开采任务。

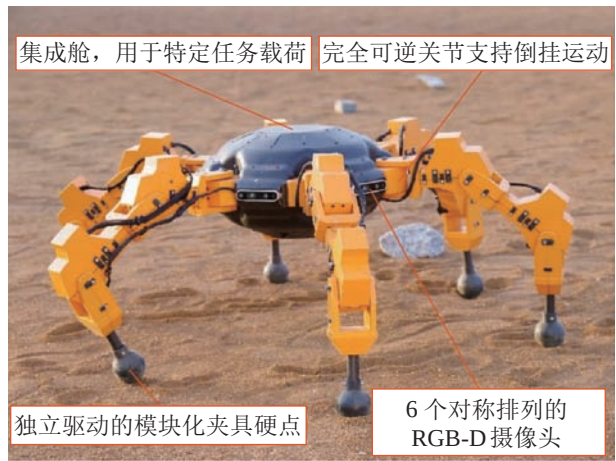


图 8 未来用于地外天体开采的 SCAR-E 机器人
Fig.8 SCAR-E robot for future exoplanet mining

2.2.6 CASPER 开采机器人

美国亚利桑那州立大学 BIRTH 实验室开发了一款名为 CASPER 的原型机器人(图 9)^[112]。该机器人采用 4 个反向旋转的阿基米德螺旋推进器作为移动系统, 结合中央斜坡式离散铲斗进行挖掘。CASPER 通过螺旋推进器搅动并疏松颗粒介质, 同时利用前端螺旋推进器的旋转方向和宽度配置优化挖掘性能。CASPER 的实验表明, 向内旋转的

螺旋配置能显著提升挖掘效率, 在 40 r/min 的转速和 4 s 负载持续时间下, 最优配置可实现 30 kg/h 的挖掘速率、10.2 m/min 的移动速度, 系统总质量仅 3.4 kg, 功耗低于 30 W。相比传统轮式或履带式挖掘系统, CASPER 在保持较低质量与功耗的同时, 通过提出的挖掘运输率参数证明了其综合性能接近更大型系统, 尤其适用于在太空资源开采任务中对轻量化和低功耗要求严苛的场景。

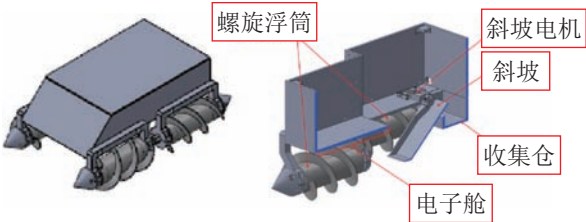


图 9 CASPER 开采机器人
Fig.9 CASPER mining robot

2.2.7 多管绳芯钻井机器人

北京航空航天大学刘家斌等^[113]研发了一种用于行星风化层采集的多管绳芯钻井机器人(图 10), 该机器人将多管钻井与绳芯采样技术有机结合, 实现了在无需宇航员干预的情况下连续自动采集深层星壤样品。该机器人主要包括钻探组件(具备渗透、旋转和夹持功能, 用于打通钻孔并保证钻管连接的稳定性)、操控组件(负责自动抓取、转移及存储钻管和核管)以及采芯组件(通过线缆捕捉技术实现核样的快速提取), 从而大幅提高了采样效率并有效保护了采样样品垂直层序的信息。机器人行程为 830 mm, 最大速度为 1 400 mm/min, 最大钻压力为 3 000 N。月壤钻进实验表明, 该机器人在自动钻进、采样及钻管断连等关键环节均表现出良好的性能, 为未来行星表面深层开采任务提供了一种创新且高效的解决方案。

2.2.8 中国首台太空采矿机器人

中国矿业大学刘新华教授团队^[114]研制的多功能太空采矿机器人(图 11), 主要针对微重力乃至失重环境下的地质勘探与矿物采集任务而设计。机器人采用仿生六足模式, 兼具车轮与爪刺结构, 车轮可在坑洼不平的小行星地表移动, 爪刺足则提供锚定支撑, 从而确保在低重力环境中钻探不会漂移或打滑。该机器人还配备了差动系统悬架与离合器等协同机构, 可根据地外星体地形及工况自适应调整姿态, 以应对极端温差、真空环境和辐射等挑战。目前, 该机器人原型机已经申请专利, 后续将在月球极端模拟环境下继续进行性能测试。

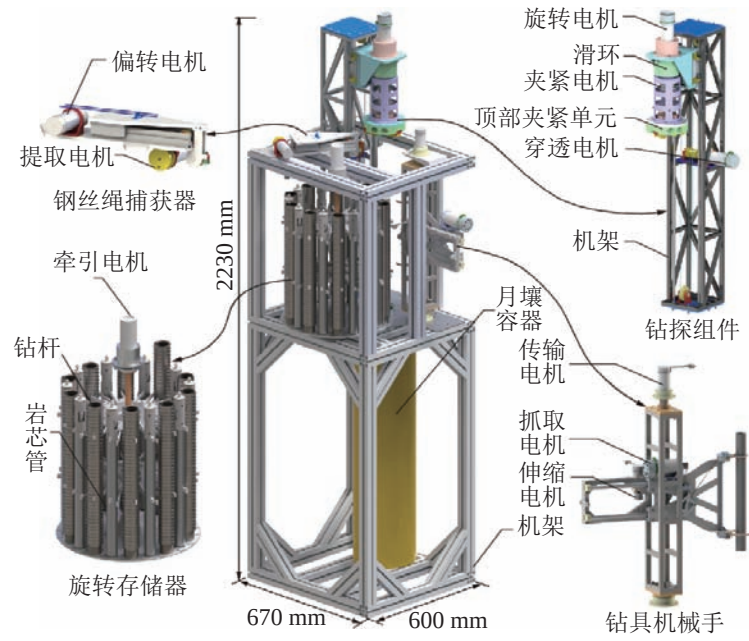


图 10 多管绳芯钻井机器人
Fig.10 Multi-string and wireline-coring drilling robot

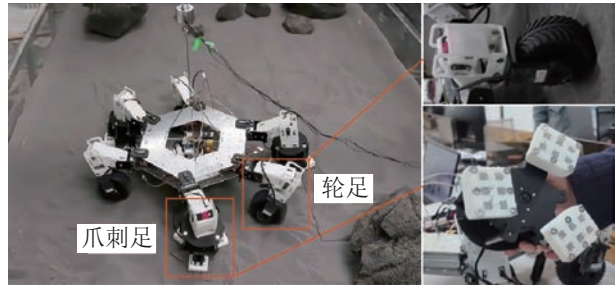


图 11 中国首台太空采矿机器人
Fig.11 China's first space mining robot



图 12 Offworld 公司开采机器人群落
Fig.12 Offworld company mining robot colony

2.2.9 Offworld 公司开采的机器人群落

Offworld 是一家位于美国加利福尼亚的初创企业，致力于研发可在月球、火星等外太空环境中自主开采矿物的机器人系统^[115]（图 12）。该公司正开发一套多功能、自动化太空资源采集系统，用于实现资源的开采。其机器人群落具备自主决策与协同作业能力，可高效执行探测、开采、收集、运输和矿石处理等复杂任务。

1) Surveyor 勘探机器人：Surveyor 是一款全向移动、多功能探测机器人（图 12(a)），主要在非结构化外太空环境中用于自主测绘与勘探。其尺寸为 158 cm×128 cm×78 cm，质量为 480 kg，最大速度 1.1 m/s，扭矩 320 N·m，配备 11.7 kW·h 电池容量的全电动系统，连续作业时间超 4 h，电池模块可更换，适用温度范围 -20~60 °C。Surveyor 采用双倒置履带悬架设计，具备卓越的越障、爬坡（坡度超 30°）及抗翻倒能力，即使翻倒仍可继续运行。机器人集成独特的机器学习算法，支持测绘、勘探、矿石识别等多种应用场景，无需外部基础设施（如通信网络或云服务器）即可实现实时导航与 3D 地图重建。

2) Excavator 选择性开采机器人：Excavator 配备双操作臂，其中一臂末端安装高功率锯，另一臂配备凿具，可实现岩面精准测绘与双重挖掘功能（图 12(b)）。其尺寸为 200 cm×150 cm×78 cm，质量为 800 kg，最大速度 1.0 m/s，配备 11.7 kW·h 全电动系统，连续作业时间超 4 h，电池模块可更换，适

用温度范围 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Excavator 具备极端地形自主导航功能, 可避免碰撞, 并通过自建网络与远程监控器通信, 实现选择性开采, 减少废石产出并提升材料分选效率。

3) Collector 收集机器人: Collector 用于开采过程中碎屑的拾取、存储与运输, 最大有效载荷 250 kg (图 12(c))。其尺寸为 $200\text{ cm}\times 125\text{ cm}\times 75\text{ cm}$, 质量为 400 kg , 最大速度 2 m/s , 采用零转弯半径设计, 推力超 3 kN , 配备 $20\text{ kW}\cdot\text{h}$ 全电动系统, 连续作业时间超 4 h , 电池模块可更换, 适用温度范围 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Collector 配备耐磨机械系统, 可收集粒径 $1\sim 30\text{ cm}$ 的岩石, 并通过真空收集器处理直径小于 1 cm 的细粒与粉尘, 仅遗留微米级颗粒, 确保高效回收有用矿石。

4) Hauler 运输机器人: Hauler 是一种自主运输机器人 (图 12(d)), 可运输矿物碎片或牵引其他机器人。其尺寸为 $300\text{ cm}\times 140\text{ cm}\times 75\text{ cm}$, 质量为 $1\text{ }000\text{ kg}$, 最大速度 3 m/s , 牵引力超 10 kN , 配备 $20\text{ kW}\cdot\text{h}$ 全电动系统, 连续作业时间超 4 h , 电池模块可更换, 适用温度范围 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Hauler 基于群落机器人架构, 支持传感器数据共享与多机器人协作, 采用强化学习控制架构, 可在复杂环境中自主导航、识别并避开障碍物, 实现材料高效运输。

5) Dozer 装载机器人: Dozer 前端配备高强度推土铲, 用于将岩石或松散材料推至指定区域 (图 12(e)), 其尺寸为 $200\text{ cm}\times 125\text{ cm}\times 75\text{ cm}$, 质量为 400 kg , 最大速度 2 m/s , 采用零转弯半径设计, 推力超 3 kN , 配备 $20\text{ kW}\cdot\text{h}$ 全电动系统, 连续作业时间超 4 h , 电池模块可更换, 适用温度范围 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Dozer 搭载人工智能控制系统, 可与其他机器人通信及数据整合, 配备全地形移动系统与高扭矩电机, 能适应极端环境与狭窄空间的作业需求。

6) Micro Fractor 处理机器人: Micro Fractor 是一种基于输送带的岩石初步处理机器人 (图 12(f))。通过聚焦高能微波束, 机器人对较大岩石块施加热冲击, 诱导内部微观裂缝的扩展与累积, 将坚硬岩石转化为较软状态, 暴露出有价值矿物, 从而提升金属矿石的加工效率。

2.2.10 资源开采机器人总结

资源开采机器人在月球、火星及小行星等环境中的研究已取得显著进展。如表 3 所示, 相关技术涵盖机械挖掘、热处理、喷气开采及钻探采样等, 形成了体系化的解决方案。这些技术针对水冰、氦 3 及月壤等资源的开采需求, 展现了多样化的设计理念与工程实现方式。

现有研究表明, 资源开采机器人具备较强的环境适应性与技术创新能力。Mark-III 通过集成机械挖掘技术与太阳能热处理技术, 实现月壤挥发物高效提取, 开采速率达 $1\text{ }258\text{ t/h}$, 初步验证了支持月球基地建设技术的可行性。RASSOR 2.0 采用反向旋转铲斗鼓设计, 克服低重力环境下的反作用力问题, 以 66 kg 的轻量化结构实现 25 kg/h 的挖掘效率, 彰显了微重力环境开采的潜力。RGD 利用多频辐射加热技术, 通过挥发物升华迁移降低机械开采的能耗, 并集成地下冰勘探功能, 体现出了较高的技术集成度。Rocket M 创新性地利用火箭引擎喷流形成深坑效应, 开采效率达 4.2 t/h , 特别适用于月球永久阴影区水冰的快速提取。CASPER 以 3.4 kg 超轻质量和 30 W 低功耗实现 30 kg/h 挖掘速率, 为轻量化设计树立了典范。多管绳芯钻井机器人通过绳芯采样技术保留了深层样品的层理信息, 适用于行星风化层的精准采样。Offworld 公司的机器人群落通过勘探、开采、运输与处理的协同作业, 展现了模块化与自主化的发展趋势。这些技术在开采效率、能源利用及环境适应性方面均取得了突破, 为地外资源利用奠定了坚实基础。

然而, 现有技术在实现规模化及深部资源开采时仍存在显著局限性。如表 3 所示, 大多数机器人开采深度局限于 $1\sim 3\text{ m}$, 难以触及 10 m 以上深部资源富集层。水冰与氦 3 等资源在纵深剖面上的分布具有高度不确定性, 而当前勘探手段精度不足, 难以支持靶向开采, 导致资源定位与提取效率偏低。逐层挖掘方式在深部开采中需耗费大量时间与能量来移除表层物质, 开挖体积大、资源消耗高, 且易造成挥发性资源 (如水冰易因升华逃逸) 浪费。尽管 Mark-III 集成度高, 但其 350 kW 的功率需求与 $9\text{ }900\text{ kg}$ 质量显著增加了工程实现的难度。Rocket M 的喷气开采虽高效, 但受限于 2 m 深度及部分水冰升华损失, 故应用范围受限。此外, 现有机器人多以单一开采功能为核心, 缺乏与资源加工及基础设施建设的有效衔接。例如, RASSOR 2.0 与 CASPER 专注于月壤挖掘, 未能整合下游资源或基地建设环节, 导致资源利用链条断裂。同时, 地外环境的极端条件对机器人的热控、能源供给及材料耐久性提出了严苛要求。RASSOR 2.0 热控能力不足, RGD 的辐射加热技术虽节能但水冰损失较大, Offworld 公司的 Excavator 与 Dozer 机器人虽具备强大开采能力, 但其 $20\sim 80\text{ kW}$ 的功率需求在能源匮乏的月球环境中难以满足。这些问题共同制约了资源开采机器人向规模化、可持续方向的发展。

表 3 资源开采机器人总结
Tab.3 Summary of resource extraction robots

名称	开采方式	质量	开采速率	深度	功率	星球	矿物	特点
Mark-III	机械挖掘	9 900 kg	1 258 t/h	3 m	350 kW	月球	氦 3	集成度高、开采提炼一体化，但功率高，质量大，工程实现难度大。
RASSOR 2.0	机械挖掘	66 kg	25 kg/h	1 m	108 W	月球	月壤	质量小，效率高，特别适应微重力环境，但热控能力差，开采深度浅。
RGD	辐射加热	—	—	—	—	月球	挥发物	集成度高，能量效率高，但技术复杂，水冰损失大。
Rocket M	喷气加热	818 kg	4.2 t/h	2 m	3.3 kW	月球/火星	挥发物	方法简单，能量效率高，适合早期任务。
SCAR-E	—	15 kg	—	—	—	小行星	-	越障能力强，灵活可靠，没有开采功能，开采需借助专门的执行器。
CASPER	机械钻进	3.4 kg	30 kg/h	—	30 W	月球/火星	星壤	质量小，功率低，效率高，但体积较小，难以实现大规模资源开采。
多管绳芯 钻井机器人	机械钻进	—	—	0.8 m	—	月球/火星	星壤	方法可行，工作可靠，但功能单一，开采效率低。
中国太空 采矿机器人	—	—	—	—	—	月球/火星	—	适合在微重力环境下运动，灵活度高，没有开采功能。
Excavator	机械切割	800 kg	—	—	80 kW	月球/地球	月壤/岩石	具备开采和勘测功能，搭载多种岩石开采工具，但功率大，在月球环境中难以实现。
Collector	碎料运输	400 kg	—	—	20 kW	月球/地球	月壤/岩石	具备收集工具和牵引盘，可高效收集碎料，但灵活性差，越障能力低。
Hauler	碎料运输	400 kg	—	—	20 kW	月球/地球	月壤/岩石	具备强大的牵引力，可拖动矿石碎料和机器人，但功率大，在月球环境中难以实现。
Dozer	机械铲取	400 kg	—	—	20 kW	月球/地球	月壤/岩石	自动化程度高，开采能力强，但功率大，在月球环境中难以实现。

表 4 地面环境中常见的多种机械采矿设备
Tab.4 Various mechanical mining equipments commonly used in terrestrial environments

设备类型	表层矿开采设备	深层矿开采设备
挖掘与装载设备	斗轮挖掘机、拉铲挖掘机、电铲、液压挖掘机，轮式装载机	连续采矿机、长壁采矿机、隧道掘进机盾构机、竖井掘进机、铲运机
钻孔设备	露天钻机	地下采矿钻车
运输设备	矿用卡车、带式/刮板式输送机	矿用卡车、带式/刮板式输送机、矿井提升机
加工设备	破碎机、振动筛、球磨机、浮选机	破碎机、振动筛、球磨机、浮选机
辅助设备	洒水车	顶板锚杆机、喷射混凝土机、水炮车、通风系统

2.3 地面采矿技术在地外资源采集中的借鉴与启发

地面采矿技术经过数十年发展，形成了效率高、适应性强且系统集成的设计理念和技术体系，为地外资源采集机器人的研发提供了重要参考。其在效率优化、环境适应和模块化设计方面的经验，可为应对地外环境的独特挑战奠定技术基础。根据开采深度，地面采矿设备分为表层和深层两大类，表 4 列出了与地外应用相关的常见设备。

2.3.1 表层开采作业设备

表层开采设备（图 13）主要用于地表浅层资源开采，广泛应用于露天矿和砂石矿，具备高效挖掘、灵活运输和初步加工的特点，满足资源大规模采集的需求。

挖掘与装载设备是表层开采的核心，依赖机械力与动力系统协同工作。斗轮挖掘机通过电机驱动旋转轮上的铲斗，连续切削松软矿体及覆盖层，物

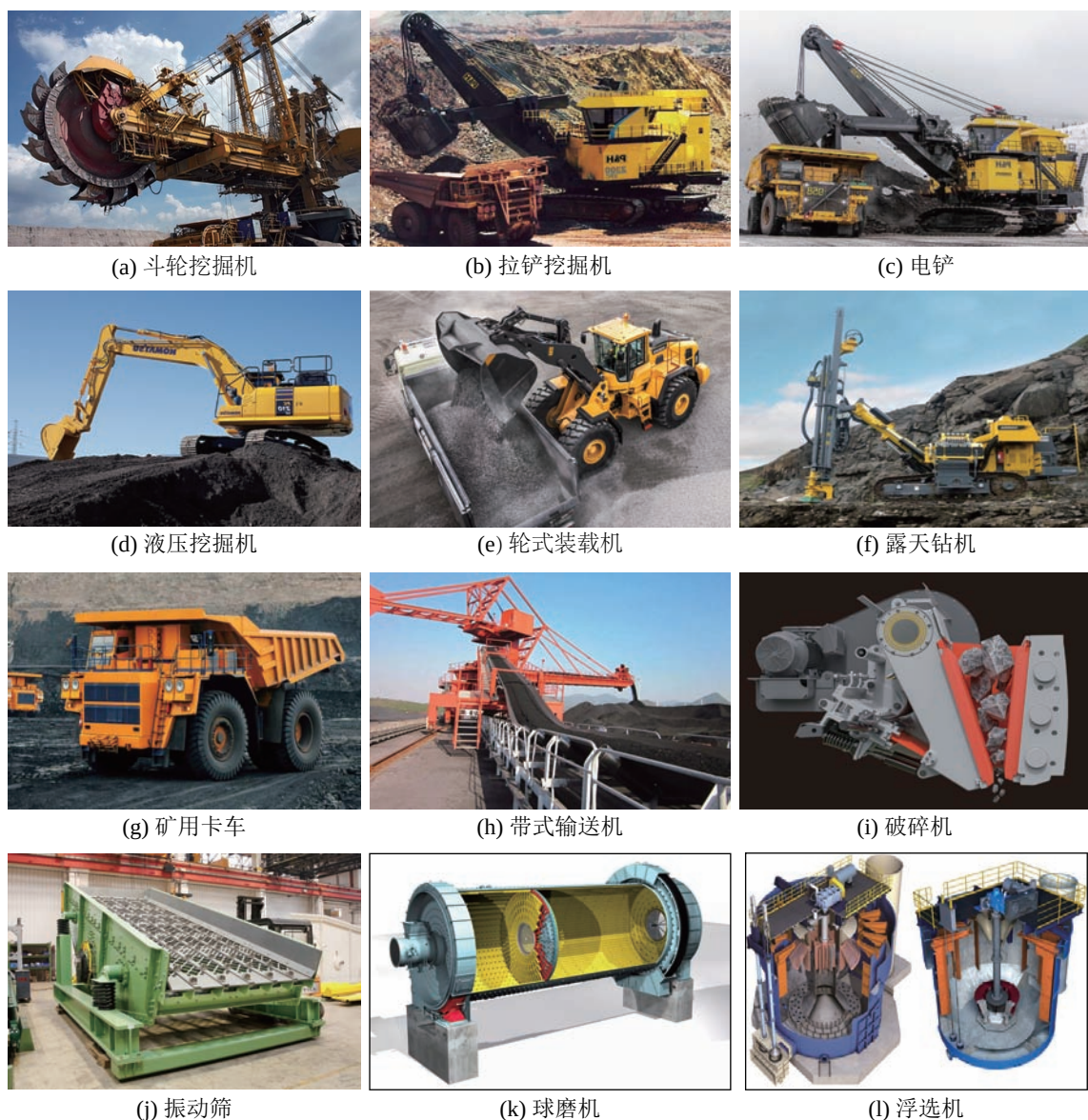


图 13 地面表层开采作业设备

Fig.13 Equipments for surface mining operations

料经输送带卸载, 每小时可处理数千吨^[116]。其连续挖掘原理适用于月球风化层采集, 但需采用轻质合金替换重型钢结构, 并以太阳能或核能驱动以适应无氧环境。液压挖掘机通过高压液压系统驱动多关节机械臂, 实现灵活挖掘和卸料, 适合地外复杂地形的小型采场^[117]。然而, 在高真空、低重力和极端温差的太空环境中, 液压系统面临密封和低温失效挑战, 难以直接应用, 但其挖掘原理可通过电动驱动等方式改进, 有助于地外紧凑型机器人设计。轮式装载机凭借前置铲斗和轮式底盘的高机动性, 可为地外短距离物料搬运提供设计参考。

钻孔设备主要用于爆破前的准备工作, 露天钻机是典型代表, 采用旋转式或冲击式钻进方式, 配合空气或水循环排出岩屑^[118]。现代钻机集成了自

动定位和导航系统, 可根据地质特征优化参数^[119], 其高效性和精确性适用于地外任务, 如月球风化层钻探或火星硬岩采样, 但需改进以适应真空和辐射环境, 例如采用电驱动和耐辐射的电子元件。运输设备是实现物料高效转移的关键。矿用卡车依靠大功率引擎, 承载能力能达到数十吨到数百吨, 宽胎的设计能增强崎岖地形的稳定性和抓地力, 可改用紧凑型电动版本来适应地外运输。带式输送机和刮板式输送机分别通过电机驱动传送带和链条推送物料, 有助于月球或火星矿物运输系统的设计。

加工设备负责矿石的初步破碎与分离, 通常布置于矿场附近, 形成从挖掘到加工的完整流水线。颞式破碎机通过挤压来破碎大块物料, 反击式破碎机利用高速转子来撞击碎裂矿石, 振动筛按粒度进

行分层，球磨机研磨矿石成粉，浮选机通过气泡分离有用矿物^[120-122]。这些原理可指导地外基地紧凑型自动化加工单元的设计，例如利用风化层生产建筑材料。辅助设备优化作业环境，保障开采顺畅。洒水车通过水雾沉降粉尘，因地外缺水，可借鉴其理念开发静电或磁力除尘装置，缓解地外粉尘对机器人操作的干扰^[123-124]。

2.3.2 深层开采作业设备

深层开采设备（图 14）适用于深层金属矿或煤矿，需应对狭窄空间、高温高压和围岩不稳定等挑战。其高集成化、安全性和极端环境适应性为地外深层资源采集提供了技术参考。

挖掘与装载设备负责矿体切割与物料转移。连

续采矿机通过滚筒刀具切割矿体，内置输送带直接运出物料，适合软岩或煤矿^[125]。长壁采矿机沿矿层移动，液压支架可稳定顶板，实现矿石自动化运输^[126]。隧道掘进机和盾构机切割硬岩，盾构机配备附加结构支撑系统^[127-128]。竖井掘进机通过旋转刀盘或冲击式钻头切割岩体，完成垂直井筒的挖掘，常用于深部矿山的通风井或提升井施工^[129]。这些技术可启发火星或月球地下采矿机器人的设计，采用电液或纯电动系统替换液压驱动以适应真空环境。钻孔设备主要用于凿岩爆破，地下采矿钻车是典型代表，采用小型化设计和电驱动，适用于地外地下冰或矿藏钻探，需通过辐射硬化电子元件提升可靠性。



图 14 地面深层开采作业设备
Fig.14 Equipments for deep surface mining operations

运输设备在深层开采中需适配地下巷道的空间限制, 同时保障矿石的高效流转。矿用卡车与表层开采设备功能相似, 但车身更紧凑, 依靠大功率引擎驱动, 适用于短距离运输。带式输送机和刮板式输送机则需耐高温高压, 结构更为坚固, 通过电机或链条驱动在巷道内实现连续运输^[130]。矿井提升机作为深层矿井的“生命线”, 通过电机驱动卷筒缠绕钢丝绳来提升罐笼或箕斗, 将矿石和人员垂直运至地表, 其设计强调安全性和可靠性^[131]。这些运输设备共同构成了深层矿产的运输体系。加工设备在深层开采中的作用与表层类似, 主要包括破碎机、球磨机等, 通常布置在地表以节省地下空间。地下仅进行初步破碎, 通过机械力将大块矿石分解为便于运输的小颗粒, 后续细化和分离则在地表完成。这种分工提高了深层开采效率, 紧凑型加工单元可适配地外地下基地, 处理深层矿物或水冰以支持原位资源利用。辅助设备对深层开采的安全性和可持续性至关重要。顶板锚杆机和喷射混凝土机能增强巷道的稳定性, 水炮车清理粉尘, 通风系统维持空气质量^[132-134]。地外环境中, 可利用原位资源制造凝固剂构建支护结构, 开发封闭氧气循环系统以适应少氧环境^[135]。

2.3.3 地面采矿技术对地外资源采集的启发

地面采矿技术的成熟经验为地外资源采集机器人的研发提供了重要指导。通过继承地面技术的核心优势, 并针对地外环境的独特性进行创新, 未来机器人系统有望实现高效、可持续的行星资源采集, 为深空探测和人类星际探索奠定基础。以下从技术适应、环境应对和系统集成 3 个方面, 总结其对地外资源采集的启发。

1) 技术适应: 地面采矿技术在机械设计、动力系统优化和作业效率提升上为地外机器人提供了技术迁移的框架。基于表层和深层设备的切削、钻探和运输原理, 可引入轻量化材料、非传统动力(如太阳能、核能)及耐辐射电子系统, 转化为适用于地外环境的实用技术方案。关键在于, 地外机器人需超越简单改装, 开发基于行星资源原位制造的新工程范式, 减少对地球供应链的依赖, 从而提高对月球、火星等多样化地质条件的适应性。

2) 环境应对: 借鉴地面采矿在复杂环境中的应对策略, 表层和深层开采中的粉尘控制效果和结构稳定技术表明, 地外机器人需具有环境感知与响应能力。例如, 可基于地面浮选和支护原理, 利用原位固化技术开发行星风化层或冰资源, 构建采矿点或地下基地的防护结构。借助地面通风系统的循

环理念设计地外密闭生态系统, 确保长期作业的可持续性。未来, 机器人需结合先进传感器和人工智能, 实时适应极端温差、真空和尘暴等动态环境, 提升作业的稳定性和安全性。

3) 系统集成: 地面采矿的自动化和模块化设计为地外采矿的智能化提供了方向。表层和深层设备的远程控制与协同作业经验表明, 地外机器人需向全自主、多机协作的系统演进。基于地面自动定位和运输系统的原理, 可开发具备自主导航、任务规划和故障自诊断功能的智能机器人集群, 以适应地外通信延迟和资源约束。地面采矿的流水线理念可延伸为地外采矿—加工—利用的闭环体系, 通过机器人网络实现从资源开采到基地建设的无缝衔接, 显著提升地外资源采集的效率和自主性。

3 挑战和制约因素 (Challenges and constraints)

尽管最近几十年人类在太空技术方面取得了巨大进步, 但仍然处于探索浩瀚宇宙的初级阶段。相较于地球上规模化的资源采集活动, 地外星表规模化资源采集活动面临着更多的限制和更为严峻的挑战。这些限制和挑战大致可以分为 4 类, 即行星环境约束、地面技术限制、遥远距离限制和法律与道德制约。

3.1 行星环境约束

不同于地球上的作业环境, 地外天体或小天体的环境复杂且极端, 因此在功能、耐用性和适应性方面对采集机器人要求极高^[136]。具体来说, 行星环境约束主要体现在以下几个方面:

1) 极端温度约束: 行星表面温度的极端波动是地外资源采集面临的一个重大障碍。例如, 月球表面温度在昼夜交替时可经历从 $-180\sim 130^{\circ}\text{C}$ 的巨大温差, 而火星的温度则在 $-113\sim 7^{\circ}\text{C}$ 之间变化^[137-138]。如此剧烈的温度变化不仅增加了材料选择和机械设计的复杂性, 也极大影响了采集设备的功能。在极低温度下, 某些材料可能会变脆, 无法承受长期的高负载; 而在极高温下, 设备则可能因过热而损坏。因此, 地外资源采集机器人需要具备先进的热管理系统, 以应对这些极端的温度变化并在长期作业中保障设备的稳定性。

2) 重力差异约束: 不同星体之间的重力差异巨大。月球的表面引力仅为地球的 $1/6$, 火星的表面引力约为地球的 $1/3$, 而在一些小行星上, 表面引力更低。这些差异直接影响机器人操作的稳定性和效率。在低重力环境下, 机器人容易失去平衡, 以

及在采集过程中产生不必要的滑动,导致采集效率下降。机器人在执行如钻探、挖掘、取样等任务时,需要设计特别的支撑和固定系统以克服重力不足带来的影响。

3) 大气约束:地外星体,如月球和小行星表面,几乎没有大气或气压极低,这种真空环境限制了资源采集机器人的运行。在低气压环境下,热传递方式与地球不同,气体对流几乎消失,热量的散发依赖于热辐射。这意味着采集过程中产生的热量难以及时散发,容易导致机器人过热而损坏。此外,低气压也使得气动传输系统的效率大打折扣,尤其是在对资源进行搬运和传输时,气体压差的变化可能会显著影响资源的运输效率。因此,为了应对这些挑战,必须为机器人设计能够在低气压条件下可靠运行的采样和传输系统。此外,大气中的尘埃和气体对设备的污染也是一个值得关注的问题。火星表面常年存在尘暴,尘土会损伤机械部件,影响传感器和电池的性能^[139]。因此,机器人还应具备更强的抗污染、抗尘和防腐蚀的能力。

4) 辐射环境约束:外太空环境的辐射条件尤为恶劣,行星表面存在太阳辐射、宇宙射线以及其他高能辐射,辐射水平远远高于地球表面^[140]。长期暴露在高辐射环境下,机器人电子设备和材料容易受到损害,出现传感器失灵、组件老化等问题。为了确保机器人能够在长时间任务中稳定运行,必须采用辐射屏蔽技术,并对关键部件进行强化,以减少辐射对设备的影响。

5) 地质条件约束:不同天体的表面特征、矿物成分和风化层结构存在巨大差异,这对资源采集机器人的设计和操作提出了较高要求。例如,在月球或火星上,风化层的矿物成分、颗粒分布以及抵抗外力的能力等可能随着地形和深度的变化而大不相同^[141-143]。在这种情况下,机器人不仅需要具备灵活应对不同地质条件的能力,还必须能够通过现场探测准确判断资源的分布,选择最佳的采集策略和方法。此外,复杂的表面地形,如坑洞、岩石或崎岖地形,也使得采集机器人在执行大规模资源采集任务时面临更多的不确定性和风险。

3.2 地面技术限制

尽管当前的技术水平已具备初步支撑外星资源采集活动的能力,但在规模化任务中地面技术的局限性对星表资源规模化采集机器人的设计与应用提出了诸多约束。地面技术的限制可分为以下 3 个方面:

1) 质量限制:太空探测任务中火箭的发射成本

与质量和高度相关,每增加 1 kg 的重量,发射费用会提升数千美元^[144]。受地球重力影响,火箭的运载能力也是有限的,星表资源规模化采集的工程应用需要在可靠性的前提下尽可能地减轻有效载荷,这意味着机器人的重量受到严格限制。然而,现有技术在保证强度与功能的前提下实现极致轻量化设计依然存在困难。动力系统、机械臂、开采设备等关键部件的轻量化不仅对设计提出了挑战,也会影响系统的总体可靠性和耐久性。

2) 尺寸约束:采集机器人的尺寸同样受限于发射器的有效载荷能力和空间约束^[10]。由于火箭的货舱空间有限,采集设备的尺寸必须在设计阶段精确优化。这种限制直接影响了机器人模块的集成方式以及任务所需的设备种类。地面上已有的大型采矿设备在当前发射技术下难以携带,导致资源采集的效率和范围受到限制。过大的尺寸还会增加地外操作的复杂性,在陨石坑或崎岖地形上运行时,较大的设备往往因灵活性不足而难以完成预定任务。

3) 能源供应:受地外环境中能源获取有限的影响,机器人需要在能量有限的情况下完成复杂且高强度的任务。太阳能是目前主要的能源获取方式,但在月球夜晚或火星沙尘暴等环境中,太阳能采集效率会显著下降^[145]。此外,高能耗的任务设备在开采过程中会迅速消耗能源,限制了单次任务的持续时间。因此,现有能源技术的缺陷限制了机器人持续执行任务,迫切需要开发高效的储能设备和能耗管理技术。

3.3 遥远距离限制

遥远的距离是星表规模化资源采集活动的又一重大挑战。当前人类已能够通过航天器将探测器送往月球、火星等天体,但由于距离太遥远,信号传输存在显著的延迟和带宽限制。以月球为例,单程信号传播延迟最小 1.211 s,最大为 1.352 s,而火星与地球之间的延迟最小 3.1 min,最大为 22 min^[4]。这意味着星表资源采集机器人在执行任务时,不能依赖实时的人工控制。当操作员完全脱离实时监控和决策时,机器人如何安全可靠地完成预定操作是一个需要解决的且具有挑战性的问题。地外星表采集任务往往涉及到极其庞大的数据量,如高清影像、传感器数据、环境监测数据等,地面和星际之间的带宽限制会影响数据传输的效率和可靠性。尤其在信息量较大的任务中,数据传输需要大量的时间,可能导致任务的周期延长,甚至出现任务失败的风险。考虑到行星微重力条件,采集活动通常需要很长时间才能完成,机器人执行器和其他组件容

易发生故障。遥远距离限制还加大了后勤支持的难度。对于远离地球的天体, 维修、物资补给和备件更换在短时间内几乎难以从地球供应, 这就要求机器人具备高度的自我诊断能力和一定的修复能力。因此, 遥远距离限制不仅影响任务的执行效率, 还增加了系统的复杂性。

3.4 法律与道德

随着人类对地外天体资源的探索 and 开发逐步深入, 相关的法律与道德问题也逐渐成为不可忽视的制约因素。外太空的资源开发涉及复杂的国际法律框架。《外层空间条约》(1967 年) 明确规定, 外太空及天体不属于任何国家的主权范围, 所有的探索与使用必须遵循和平、合作和国际共享的原则^[146]。然而, 随着资源开发需求的增加, 如何在侵犯国际法和国家主权的前提下进行星表资源的采集和使用, 成为一个复杂的法律问题。在现行法律框架下, 虽然外太空资源被视为“无主之物”, 但如何确定资源的所有权、开发权以及利用权依然存在诸多争议^[147]。美国于 2015 年通过了《2015 外空资源探索与利用法》, 允许私人公司开采太空资源并拥有资源的所有权, 但这一法律并未获得国际社会的普遍认同^[148]。一些国家和国际组织对此表示担忧, 认为这样的法律可能导致“太空殖民化”, 引发资源争夺和冲突^[149]。现行国际法对于外空自然资源大规模开采和利用的规则亟待完善。外星资源开发

涉及的生态破坏问题也需要引起关注。在星表采矿过程中, 过度开发可能会对当地的自然环境造成不可逆的损害, 尤其是当采集活动导致行星或小天体的地表和结构发生长期、不可逆变化时, 将引发关于星际生态保护的伦理讨论。对于如何在采集资源的同时保护外星环境, 避免“外星污染”或“地球化”问题, 国际社会亟需达成共识, 并制定相应的规范。

4 关键技术 (Key technologies)

为保障极端星表环境下采集的高效性与安全性, 机器人技术需在设计、制造、控制、能源及测试等关键领域取得突破。技术创新是确保机器人长期稳定运行并满足星表作业需求的核心。以下从设计与制造、工艺处理与方法、自主控制、能源系统及地面测试 5 个方面, 系统分析相关关键技术 (图 15)。

4.1 设计与制造

在星表资源采集机器人的设计与制造中, 除了考虑高效能和可靠性, 还需要特别关注其在极端环境中的适应性。这些机器人不仅要能够承受地外天体表面的挑战, 还要具备执行复杂任务的能力。因此, 设计过程中涉及的各个环节, 从机构设计到零部件, 再到材料的选择和优化, 都必须以高度的灵活性和耐久性为目标。

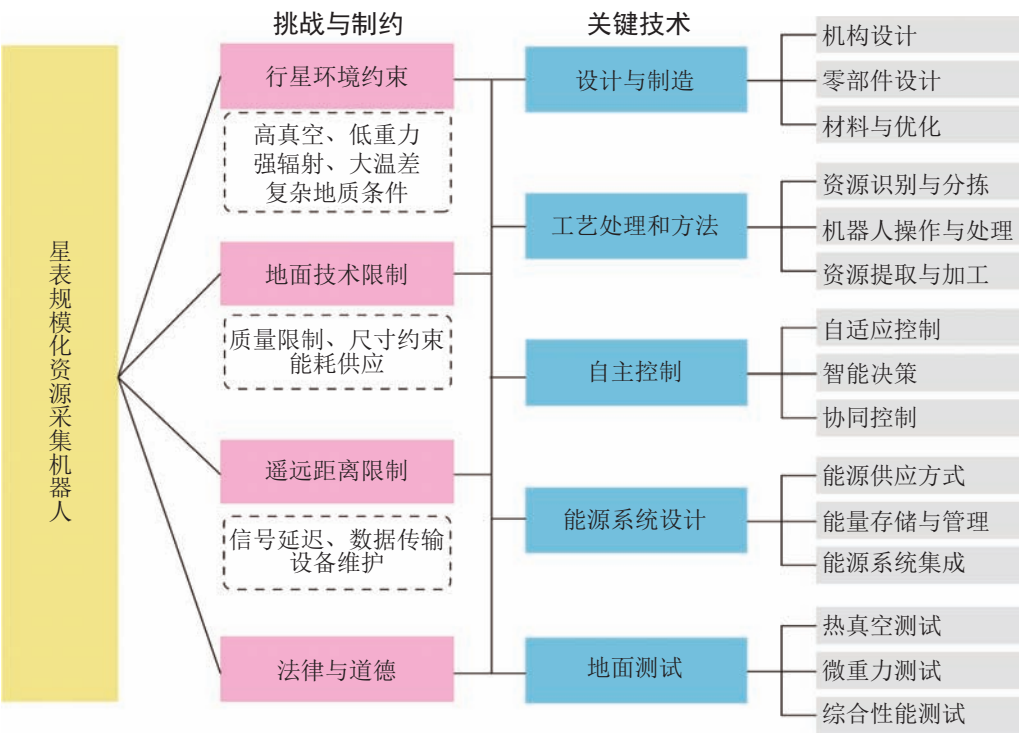


图 15 星表规模化资源采集机器人的关键技术体系图

Fig.15 Key technologies of large-scale planetary resource collection robots

1) 机构设计: 星表作业的复杂性要求机器人具备多功能、高适应性的作业机构。根据任务需求, 针对不同星体的表面特征和作业目标, 研究变拓扑、多构态、模块化的机构设计方案。模块化设计不仅使得机器人能够根据任务需求灵活调节配置, 还可以提高维修和升级的灵活性^[150]。构建各功能执行机构的构形库和制定性能评价指标, 是确保机器人在星表复杂环境中快速部署并执行任务的关键。这类设计方法有助于提高机器人的自适应能力和可靠性, 尤其是在未知或难以预测的星表环境下, 模块化系统能够快速响应并有效调整任务。

2) 零部件设计: 星表的极端环境要求机器人具备强大的环境适应性, 这意味着设计零部件和结构时必须考虑高温、低温、强辐射以及微重力等因素的影响。机器人零部件的材料需要具备高阻热、抗撞击、防辐射、耐腐蚀等特性。材料的辐射抗性直接影响到机器人的长期可靠性, 采用辐射屏蔽材料以及改进现有的抗辐射涂层技术成为设计中不可或缺的一部分^[62]。为了保证在恶劣环境下长时间稳定工作, 还需要开发轻量化、高强度、高功率密度的关键零部件, 如高效能电池、高效驱动系统和高耐磨材料, 以保证机器人具备较高的作业效率和持久的工作能力。

3) 材料与优化: 轻质高强度材料一直是航空航天工程的研究热点, 因为它们在减轻结构重量、提高能源效率和增强机械性能方面具有重要优势^[151]。这一特性同样适用于高性能资源采集机器人的设计, 尤其是在地外环境下, 轻质高强度材料能够有效减轻机器人的总重量, 提高其机动性和适应性。此外, 机器人的材料必须具有优异的耐热性, 以承受外星环境中的极端温度和较大的温度波动。优化热管理系统是设计中不可忽视的一部分。特别是在高辐射、高温差的环境下, 如何高效地进行热散逸和热保护, 确保机器人系统的稳定性和长效性, 是材料选择与优化中必须解决的问题。

4.2 工艺处理

星表资源规模化采集任务中, 工艺处理的创新是确保资源高效、精确采集的关键环节。

1) 资源识别与分拣技术: 资源采集机器人需要具备高效的资源识别与分拣能力。基于传感器融合技术, 机器人能够准确识别资源的种类、形态及其质量等关键信息。常用的技术包括视觉传感器(如 CCD/CMOS 图像传感器)与激光雷达(LiDAR)的融合技术, 该融合方法通过图像处理和深度学习算法来提高识别的准确性和实时性^[152-153]。针对不同

类型的资源, 开发高效的分拣方法也至关重要, 基于机器学习优化的路径规划算法能够在复杂环境中高效定位和抓取目标资源^[154]。

2) 机器人操作与处理方法: 在资源采集过程中, 机器人需要执行精准的操作与处理任务, 如钻探、开采、切割、搬运等。不同的资源类型要求不同的操作方法。对于小型矿物, 采用柔性抓取和精准定位技术来避免破坏资源的结构。而对于较为坚硬的矿石, 需要结合机械钻探与激光切割等手段。近年来, 机器人操作精度的提高得益于新型伺服驱动系统和智能控制技术, 尤其是力反馈与自适应控制技术, 机器人能够实现复杂的操作任务, 且保持高效率与高稳定性^[155]。

3) 材料加工与资源提取: 资源采集之后, 通常还需要进行后续的加工与提取。对于星表资源, 特别是矿石、稀有元素等的提取工艺, 涉及多种先进的化学、物理和热力学过程。针对某些金属矿石的提取, 常采用高效的热解、溶剂萃取或生物冶金等方法^[156-158]。在这一过程中, 机器人需要具备相应的工艺处理能力, 如高温耐受、抗腐蚀性强等特性, 才能在极端的环境中长期工作。

4.3 自主控制

相较于地球资源采集, 行星资源采集面临未知地质条件的挑战。长时间的通信延迟要求机器人具备自主执行任务的能力, 因而需配备强大且智能的控制系统以确保高效操作。

1) 自适应控制: 星表环境具有复杂多变的特性, 例如极端的温度变化、微重力条件以及不断变化的地形。为了使机器人能够实时感知环境变化并作出调整, 需要采用多源信息融合与自适应控制方法^[159]。通过集成视觉、激光雷达、触觉传感器等多种传感器的数据, 机器人能够获得更全面的环境信息。在此基础上, 建立环境—感知—控制一体化的系统架构, 能够形成基于环境特征的自适应控制策略库, 以应对复杂多变的星表作业环境。这种技术能够确保机器人在不确定的环境下高效、安全地执行任务。

2) 智能决策: 在星表作业中, 任务通常具有高度的不确定性与复杂性。为了高效分配任务并进行决策, 采用层次化递阶决策理论与动态规划方法, 可以根据任务的优先级和资源的可用性进行任务分解与重构^[160]。通过构建任务分解框架和多层次的决策与规划体系, 机器人能够根据实时反馈进行自适应调整, 从而提高任务完成的效率与成功率^[161]。

3) 协同控制: 星表资源采集任务往往涉及多个机器人协同工作, 这对通信与协同控制提出了更高要求^[162]。由于星表作业系统中多主体间需要进行实时通信与协同控制, 如何设计高效、可靠的通信架构成为关键。为了应对远程通信的带宽限制和延迟, 采用分层式网络拓扑结构与自适应带宽分配方法, 能够在动态环境下保证通信的稳定性^[163-164]。同时, 设计多体自组织通信协议与动态资源调度机制, 能够确保机器人间信息的高效传递和任务的高效分配^[165]。这些技术的突破为星表大规模资源采集任务的成功实施提供了强有力的支撑。

4.4 能源系统设计

星表规模化资源采集机器人在极端环境中执行长时间、高强度的作业任务, 对能源系统提出了极高的要求。与地球环境不同, 星表环境通常缺乏稳定的外部能源供给, 且面临极端温度、强辐射和微重力等挑战。因此, 能源系统设计成为机器人长期自主运行的关键技术之一。以下从能源获取方式、能量存储技术与能量管理技术 3 个方面展开讨论。

1) 能源获取方式: 星表资源采集机器人的能源获取方式直接影响任务的持续性和作业效率。星表环境无法依赖传统能源, 研究聚焦于可再生能源和环境适应性技术。太阳能是主要能源, 可采用高效率光伏电池获取, 但受光照条件限制, 因此需开发抗辐射、抗尘涂层和自清洁技术以提升光伏系统的性能^[166-167]。为应对光照不足, 放射性同位素热电机 (RTG) 也成为重要选择, 利用同位素衰变热量发电提供稳定能源, 适合地外阴影区域工作^[168]。然而, RTG 需解决热管理、辐射防护和质量优化问题, 确保安全与轻量化^[169]。混合能源方式整合太阳能与 RTG, 增强了能源获取的可靠性^[170]。

2) 能量存储技术: 能源获取的间歇性和任务需求的波动性要求机器人具备高效的能量存储与管理技术, 以确保能源的稳定供给和合理分配。高性能电池是能量存储的核心, 目前主要采用锂离子电池技术^[171]。锂离子电池因其高能量密度而得到广泛应用, 但其在低温或高辐射环境下的性能衰减问题亟待解决^[172]。固态电池凭借更高的安全性和环境适应性成为研究热点, 尤其是在极端温度条件下, 其稳定的电化学性能能够显著延长机器人的工作寿命^[173]。除了电池技术, 超级电容器因其快速充放电能力和长循环寿命, 也在某些高功率需求的场景中得到了应用, 如瞬时高能耗的钻探或搬运任务^[174-176]。

3) 能量管理技术: 为确保能源的高效分配与系统的稳定运行, 需解决任务需求的波动性与环境的

不确定性等问题。智能能量管理系统通过实时监测电池状态、任务负载和环境参数, 基于机器学习算法动态优化能源分配。分布式能量管理架构能提高系统的鲁棒性, 各子系统能独立调控能源, 降低单点故障风险。能量预测模型结合星表光照和温度数据, 提前规划充电与任务调度, 提升效率。热管理是能量管理的关键, 采用相变材料和微型热管可稳定电池工作温度, 防止过热或低温失效。能量共享技术在多机器人协同任务中尤为重要, 通过无线能量传输或动态调度实现资源优化。

4.5 地面测试

考虑到星表环境的复杂性和挑战性, 进行高保真度的地面模拟验证成为了机器人可靠性的重要评估手段。通过在热真空环境下对机器人系统进行全面测试, 不仅可以模拟和验证机器人在极端温度、辐射、微重力等条件下的表现, 还可以通过系统化的测试流程进行多维度的性能考核, 以确保其能够在未来的星际任务中执行资源采集等关键任务。

1) 热真空测试: 星表资源采集任务通常发生在极端环境中, 尤其是温度的极端变化对机器人系统的热管理提出了严峻挑战。因此, 热真空测试成为地面测试中的重要环节。热真空环境能够模拟外太空的真空状态和极端温度, 机器人在此环境下进行测试, 能够真实再现其在星表上的表现。多物理场耦合分析方法在此测试中发挥着关键作用, 它通过模拟热、力、辐射等多种物理因素的交互作用, 帮助设计人员识别潜在的系统弱点。机器人在执行钻探或挖掘任务时, 受热冲击、力反馈和机械运动的影响, 通过这种多物理场的综合分析, 可以提前调整系统设计, 以优化机器人的热控制和结构性能。

2) 微重力测试: 月球、火星和小行星的重力低于地球, 许多任务需要在微重力或近零重力环境下进行。因此, 模拟微重力环境对于验证机器人操作性能至关重要。微重力模拟实验方法通常包括气浮系统、多关节机械手系统、吊索悬挂系统等^[177-179]。通过这些技术, 测试人员可以再现微重力或低重力条件下机器人执行运动、抓取、采集等任务时的行为。这一过程不仅考验机器人的力学控制能力, 还要求其在无重力或极低重力环境下保持高精度的操作。尤其是在执行精准钻探、抓取或移动目标等任务时, 机器人必须能够精准控制施加的力量, 以避免因过度震动或力失控而造成系统损坏。

3) 综合性能测试: 地面测试不仅限于模拟单一环境条件, 还需要进行综合性能考核。测试设备应能够同时模拟极限温度、气候变化、辐射环境、微

重力等多重复杂环境,以全面评估机器人在多种环境交互下的表现。在完成这些多重测试后,数据采集系统会收集并反馈机器人各项参数的变化情况,为设计优化提供依据。通过在极端温度下测试不同材料的性能,设计团队可以调整结构设计,优化材料选择,从而提高机器人在星表环境中的可靠性和效率。

5 未来发展趋势 (Development trends)

行星资源开发是未来太空探索的重要方向,中国、美国、日本等国家已在星壤、矿物、水资源等探测方面取得进展。尽管相关技术有一定积累,但总体来说当前仍处于资源采集的初级阶段。基于长期开发需求,本文从多个维度对资源采集机器人的发展趋势进行分析。

5.1 资源采集多样化

在目前的技术水平上,资源采集主要集中在星壤面,采集区域更倾向于平坦地形,以降低技术复杂性并保证行星探索的成功。然而,地外天体资源采集的目标远不止如此,旨在大规模采集以充分了解行星的资源分布与原位利用。随着空间探索技术的不断进步,星表资源采集机器人的研究逐渐朝着多样化的方向发展。未来的资源采集不再局限于单一类型的资源或区域,而是涉及到多样化的采集对象、区域以及规模。

1) 采集对象多样化:目前,资源采集机器人主要关注的是在小行星、月球、火星等天体上进行矿物资源的采集。未来,采集对象将更加多样化,不仅包括矿物、水冰等传统资源,还将涉及气体、元素、甚至有机物等其他资源。随着科学技术的进步,未来甚至会探索采集天体表面外层大气中的气体资源或太阳风中的氢、氦等有潜力的资源。此外,天体间与生命起源相关的物质也可能成为未来的研究重点之一。多样化的采集对象增加了资源采集机器人的任务复杂度,但也为开发不同类型的能源提供了多元化的选择。

2) 采集区域多样化:传统的资源采集主要集中在太阳系内的某些特定天体,如小行星带、月球和火星等。然而,随着技术的进步和空间探测范围的扩大,资源采集的区域也将更加多样化。未来的资源采集机器人将不仅仅局限于近地空间的天体,还可能拓展到远离地球的深空区域,如木星、土星及其卫星带,甚至是更远距离的其他恒星系统。区域的多样化要求机器人具备更强的适应性和更广泛的任務能力,包括在极端环境下进行采集、资源运输

以及能源补给等。

3) 采集规模更大化:随着技术的进步和商业化应用的逐步成熟,未来的资源采集任务将不再是单一的、局部的小规模作业,而是逐步向大规模、多目标的采集任务发展^[18]。这种大规模的资源采集将依赖于高效的机器人群体协作技术和高度自动化的操作系统。未来的资源采集机器人将能够在更大的范围内进行资源勘探、评估和回收,甚至能够实现对多颗天体的长期、多阶段的资源采集作业。这种大规模采集不仅能够满足地球对能源的需求,也可能为太空开发提供充足的资源供应,推动人类向深空拓展。

5.2 资源采集智能化

随着机器人学、机器人机构学、人工智能、机器学习,以及传感技术的不断发展,资源采集的智能化逐渐成为未来星表规模化资源采集机器人的重要趋势。智能化不仅能够提升采集效率,降低人力成本,还能在复杂多变的太空环境中有效应对突发情况,实现自主、精准的资源采集任务。

1) 巧妙采集机构:采集机构是资源采集机器人中最核心的部分之一,智能化的采集机构设计将直接影响采集效率和作业安全性。未来的采集机构将通过创新的设计来提高灵活性和适应性。例如,利用柔性机械臂和仿生机器人技术,使机器人能够在不同类型的天体表面进行精准的资源抓取和采集^[180-181]。巧妙的机构设计不仅要考虑高效的抓取力,还要能够应对复杂地形的变化,如软硬不均的表面、陡峭的坡度等,甚至能够根据不同资源的物理特性调整采集策略。

2) 智能工艺处理:太空资源的采集不仅仅是获取原材料,往往还需要将这些资源进行初步加工,以便后续运输或利用。智能工艺处理技术将依赖先进的自动化制造系统和智能算法。未来的资源采集机器人将具备自适应的工艺处理能力,能够根据采集资源的种类和环境变化,自动调整处理流程。在一些极端环境下,智能化处理系统能够根据资源的物理特性选择最佳的加工方式,同时优化能源消耗和物质回收效率。此外,随着深空任务的拓展,机器人将能够自主进行资源加工。利用采集到的水冰制造氧气和氢气,利用采集的矿物资源进行 3D 打印,建造太空基地或航天器零部件。

3) 智能控制策略:随着计算机视觉、深度学习、决策算法等技术的进步,智能控制策略将帮助机器人在复杂的太空环境中自主决策和高效执行任务。未来的资源采集机器人将能够根据感知到的环

境信息, 实时调整运动轨迹、采集方式以及处理流程, 从而提升任务的执行效率和精准度。智能控制系统将基于多传感器融合技术实时分析环境数据, 动态规划最优的路径与动作。同时, 利用先进的机器学习和优化算法, 机器人能从历史任务和实时数据中不断学习与改进, 在资源采集过程中优化动作策略, 降低任务失败风险。在复杂的工作环境中, 机器人还具备自我诊断和修复功能, 一旦出现故障或受到损害, 能自主调整策略并采取应急措施。

5.3 多机器人协作采集

在未来星表资源采集的任务中, 由于采集区域的广阔性、任务的复杂性以及对效率的高要求, 单一机器人往往难以独立完成所有任务。因此, 多机器人协作将成为资源采集的重要发展方向。通过合理的任务分配、高效的通信网络和集群协作机制, 多个机器人能够协调作业, 提高采集效率并减少作业时间。

1) 任务分配策略: 随着资源采集任务规模的不断扩大, 未来的多机器人协作系统将采用更加智能化的任务分配策略。传统的任务分配方法通常是基于静态规则或简单的调度算法, 而在未来, 任务分配将更多依赖于人工智能和自适应算法。机器人系统能够根据实时的环境信息、任务优先级、机器人能力及状态等因素, 动态调整任务分配策略。例如, 机器人在采集过程中遇到障碍物或故障时, 系统可以即时重新分配任务, 确保任务能够在最短时间内完成。这种自适应、灵活的任务分配策略将大幅提高资源采集的效率, 避免资源浪费并提高任务完成的可靠性。

2) 高效通信网络: 未来的资源采集机器人将依赖于高效、低延迟的通信网络来实现多机器人间的协调与信息共享。随着深空探索任务的增加, 机器人之间需要实现高频率的数据交换和实时的环境感知共享, 这要求通信网络具备更高的带宽和更低的延迟。特别是在延迟时间长和数据规模大的深空环境中, 激光通信和量子通信等新兴技术将为机器人提供更高效率的通信能力。更重要的是, 机器人将能实现更智能的通信策略, 比如通过自适应网络协议来优化通信路径和数据流量, 在通信不稳定或中断时能自动切换至备份网络, 确保任务顺利进行。

3) 集群协作采集: 在未来的资源采集任务中, 集群协作将成为提高效率的关键。多个机器人能够共同完成广泛而复杂的采集任务。每个机器人将根据任务需求和环境条件自动调整采集方式和工作区域, 通过共享信息和协作算法, 避免重复劳动并高

效分配任务。此外, 集群协作将能够实现机器人之间的资源共享和协同作业, 特别是在面对极端或难以预见的环境时, 机器人可以快速切换角色, 执行不同类型的采集任务或应对紧急情况, 确保任务的持续推进。随着技术的发展, 未来的集群协作将更加智能化, 机器人能够自主协作完成复杂的空间资源采集任务, 并在各种复杂环境中展现出更强的适应性和鲁棒性。

5.4 采集与建造一体化

随着地外天体资源开发的深入, 采集与建造一体化逐渐成为规模化资源采集机器人的重要趋势。该模式通过无缝整合资源采集与基地建造, 不仅提升了资源利用效率, 还有效应对了地外极端环境的挑战, 为人类长期驻留和深空探索提供了支撑。地外天体表面普遍面临高真空、强辐射及大幅温差等苛刻条件。例如, 太阳质子事件可引发急性辐射损伤, 宇宙射线的累积效应威胁宇航员健康, 而昼夜剧烈的温差易导致设备因温度波动而失效。相较之下, 行星地下环境因星壤的天然辐射屏蔽作用而较为稳定且辐射较低, 适宜长期作业。因此, 依托机器人同步开展资源开采与设施建设, 利用原位资源技术将采集的星壤、矿物等转化为建筑材料, 直接构筑防护性设施, 实现采集与建造一体化。这一趋势既减少了对地球补给的依赖, 又为资源规模化开采与基地可持续发展开辟了新路径。

采集与建造一体化的实现依赖于机器人系统的高度集成与技术创新。在此模式下, 机器人不再局限于单一的资源采集功能, 而是能在开采过程中同步加工和利用资源。例如, 基于星壤的 3D 打印技术可将采集的星壤转化为具有辐射屏蔽功能的建筑材料, 直接用于地下栖息地或储藏设施的建造, 从而显著降低运输成本并提升任务自主性。此外, 机器人可通过实时分析星壤成分, 筛选适合建造的材料用于基础设施建设, 提取富含水冰的星壤生产氧气和燃料, 或分离富含金属矿物的星壤进行冶炼, 形成高效的闭环作业模式。随着材料科学和机器人控制技术的进步, 采集与建造一体化技术将进一步优化资源分配效率。机器人可根据环境变量动态调整挖掘与建造策略, 确保设施的稳定性和功能性。这种多功能集成设计不仅推动了资源采集的规模化, 还为地外基地的快速部署奠定了技术基础。总之, 采集与建造一体化体现了技术融合的优势, 为深空探索的长期目标提供了切实可行的解决方案。

5.5 未来发展 3 个阶段

随着空间技术的迅速发展, 地外资源采集机器

人的研究正迈向新的高度,尤其是在国内外大规模星球探测的推动下,如国际月球科研站的建设规划。未来,资源采集技术将逐步实现从无人自动化到无人与载人协同的转变,并最终支持人类在地外环境中的长期驻留与自给自足。基于此,本文将地外资源采集机器人的发展趋势分为以下3个阶段:

1) 近期阶段:轻量化与模块化无人探测系统的优化。近期阶段,资源采集机器人将聚焦于轻量化和模块化设计,通过新型材料的应用和机器人结构的创新,显著提升灵活性和环境适应性。这一阶段的重点在于提升任务的成本效益与执行效率,使机器人能够适应月球、小行星等地外环境的多样性,快速完成局部资源的识别、采集与初步处理。例如,国际上已有的月球科研站规划中的无人探测任务(如中国探月四期计划^[182]、美国 Artemis 计划^[183]及俄罗斯“月球”系列计划^[184]等)将部署着陆器和机器人系统,用于月表环境勘测和资源采样。与此同时,机器人将配备高效的能源系统(如太阳能或放射性同位素电池供电),确保任务的长期可持续性。此外,机器人将具备初步的自主决策能力,能够独立完成简单任务并适应环境变化,为后续载人任务提供基础数据和技术验证。这一阶段的无人系统将为大规模探测奠定技术基础,同时与规划中的载人任务形成衔接。

2) 中期阶段:多机器人协作与载人任务的初步集成。资源采集机器人将通过多机器人协作系统实现更大规模的资源开采与探测,并在载人任务中实现人机协同工作。随着任务范围的扩展,机器人集群将通过集群协作快速扫描更广泛的区域,生成详细的资源分布图。例如,中国国际月球科研站计划在2035年前建成基本型^[185-186],届时多台机器人将在月球南极区域协同作业,识别水冰等关键资源并优化采集策略,同时支持航天员轮值驻守,进行设备调试与资源利用实验。机器人将配备先进的传感器和成像技术,实现资源的高精度探测与可视化,并通过高效的任务分配与协作网络避免重复工作,提升整体效率。此外,能源管理能力将进一步增强,采用高效光伏和热能收集系统,确保在复杂环境中的持续运行。这一阶段的无人与载人任务互补运行将显著提升资源采集的规模化水平,为未来的深空基地建设提供技术积累与物资支持。

3) 远期阶段:完全自主与载人协同的资源利用体系。远期阶段,资源采集机器人将具备完全自主适应未知环境的能力,并与载人任务深度融合,执行复杂、多目标的资源开采与加工任务。机器人不

仅能够深入地外复杂环境进行长周期作业,还能通过高度智能化的控制系统实现动态环境感知与任务调整。例如,国际月球科研站的拓展型规划将以月球轨道站为枢纽,结合月面机器人与航天员操作,构建可持续的资源利用体系。机器人将拓展地下资源开采与加工领域,利用月壤和水冰生产氧气、燃料和建筑材料(如中国“月壶尊”方案中的月壤砖砌筑技术^[187-188]、“三叶草”式布局 and “中国星”式布局^[189]),为太空长期驻留提供支持。此外,机器人将与资源回收系统高度集成,形成网点化功能站(如水冰提取站、月基冶炼站),实现大部分物资的本地化生产,减少对地球运输的依赖。这一阶段,资源采集机器人将成为支持人类深空生存与发展的核心基础设施,可在载人任务中与航天员协同工作,共同推动星表基地的规模化建设,提升自给自足能力,为星际探索奠定坚实基础。

参考文献 (References)

- [1] 蒲秀浪, 杨宇红, 刘耘. 太空找矿综述: 矿产资源勘探新方向[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2024, 43(6): 1280-1303.
PU X L, YANG Y H, LIU Y. A review of space ore prospecting: A new direction for exploring mineral resources[J]. Petrology and Geochemistry, 2024, 43(6): 1280-1303.
- [2] MCSWEEN J H Y, HAMILTON V E, FARLEY K A. Perspectives on Mars sample return: A critical resource for planetary science and exploration[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2025, 122(2). DOI: 10.1073/pnas.2404248121.
- [3] ZHOU C Y, ZHOU M Y, XU Y S, et al. Lunar topographic survey and reconstruction and its application in Lava tube exploration[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(1): 34-48.
- [4] ZHANG T, WANG B, WEI H Y, et al. Review on planetary regolith-sampling technology[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 127. DOI: 10.1016/j.paerosci.2021.100760.
- [5] DALLAS J A, RAVAL S, SAYDAM S, et al. Investigating extraterrestrial bodies as a source of critical minerals for renewable energy technology[J]. Acta Astronautica, 2021, 186: 74-86.
- [6] FLEMING M, LANGE I, SHOJAIEINIA S, et al. Mining in space could spur sustainable growth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2023, 120(43). DOI: 10.1073/pnas.2221345120.
- [7] 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. DOI: 10.1016/j.clay.2022.106673.
- [8] DIRRI F, LONGOBARDO A, PALOMBA E, et al. Recovery and transport of samples[J]. Sample Return Missions, 2021: 297-314.
- [9] REEVES R. Russian robots on the Moon[M]. Berlin, Germany: Springer, 1994.
- [10] 姚智晓, 晁超越, 郭浩语, 等. 火星壤采样探测技术研究进展与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13): 83-101.

- YAO Z X, ZHAO C Y, GUO H Y, et al. Progress and perspective of Martian regolith-sampling technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(13): 83-101.
- [11] YOSHIKAWA M, KAWAGUCHI J, FUJIWARA A, et al. The Hayabusa mission[M]//Sample Return Missions. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2021: 123-146.
- [12] LAURETTA D S, BALRAM-KNUTSON S S, BESHORE E, et al. OSIRIS-REx: Sample return from asteroid (101955) Bennu[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212: 925-984.
- [13] YAN X T, VISENTIN G. Fundamentals of space robotics [M]//Space Robotics: The State of the Art and Future Trends. Cham, Switzerland: Springer, 2024: 13-47.
- [14] 丁烈云, 徐捷, 骆汉宾, 等. 月面建造工程的挑战与研究进展[J]. *载人航天*, 2019, 25(3): 277-285.
DING L Y, XU J, LUO H B, et al. Lunar construction: Challenges and research progresses[J]. *Manned Spaceflight*, 2019, 25(3): 277-285.
- [15] SVIATOSLAVSKY I N, JACOBS M. Mobile helium-3 mining and extraction system and its benefits toward lunar base self-sufficiency[C]//Proceedings of the Space '88 Conference. New York, USA: American Society of Civil Engineers, 1988: 310-321.
- [16] MUELLER R P, COX R E, EBERT T, et al. Regolith advanced surface systems operations robot (RASSOR)[C]//IEEE Aerospace Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/AERO.2013.6497341.
- [17] MUELLER R P, SIBILLE L, LEUCHT K, et al. Swamp works: A new approach to develop space mining and resource extraction technologies at the National Aeronautics Space Administration (NASA) Kennedy Space Center (KSC) [C]//Future Mining Forum. 2015.
- [18] ARZO S T, SIKERIDIS D, DEVETSIKIOTIS M, et al. Essential technologies and concepts for massive space exploration: Challenges and opportunities[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 59(1): 3-29.
- [19] GOLDSMITH D, REES M. The end of astronauts: Why robots are the future of exploration[M]. Cambridge, USA: The Belknap Press of Harvard University Press, 2022.
- [20] 白师宇, 赖际舟, 吕品, 等. 面向地下空间探测的移动机器人定位与感知方法[J]. *机器人*, 2022, 44(4): 463-470.
BAI S Y, LAI J Z, LÜ P, et al. Mobile robot localization and perception method for subterranean space exploration[J]. *Robot*, 2022, 44(4): 463-470.
- [21] 黄佳雷, 高一丹, 叶志彪, 等. 行星探测机器人的研究现状与技术发展[J]. *机械制造与自动化*, 2023, 52(2): 153-156.
HUANG J L, GAO Y D, YE Z B, et al. Research status and technology development of planetary exploration robot[J]. *Machinery Manufacturing and Automation*, 2023, 52(2): 153-156.
- [22] 薛智慧, 刘金国. 空间机械臂操控技术研究综述[J]. *机器人*, 2022, 44(1): 107-128.
XUE Z H, LIU J G. Review of space manipulator control technology[J]. *Robot*, 2022, 44(1): 107-128.
- [23] ZHENG N H, DING C Y, SU Y, et al. Water ice resources on the shallow subsurface of Mars: Indications to rover-mounted radar observation[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(5). DOI: 10.3390/rs16050824.
- [24] ABESADZE R. Natural resources of the future[J]. *International Journal of New Economics and Social Sciences*, 2021, 13(1): 163-176.
- [25] KESZTHELYI L P, COYAN J A, BENNETT K A, et al. Assessment of lunar resource exploration in 2022[R]. US Geological Survey, 2023.
- [26] BALARAM V. Potential future alternative resources for rare earth elements: Opportunities and challenges[J]. *Minerals*, 2023, 13(3). DOI: 10.3390/min13030425.
- [27] ELLERY A. Trials and tribulations of asteroid mining[C]//Earth and Space 2024: Engineering for Extreme Environments. Florida, USA: ASCE Press, 2024: 1085-1098.
- [28] SLABIC A, GRUENER J E, KOVTUN R N, et al. Lunar regolith simulant user's guide: Revision A[R]. Hampton, USA: NASA Langley Research Center, 2024.
- [29] PUTIRKA K D. Exoplanet mineralogy[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2024, 90(1): 199-257.
- [30] CRAWFORD I A, ANAND M, BARBER S, et al. Lunar resources[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2023, 89(1): 829-868.
- [31] HART R, CARDACE D. Mineral indicators of geologically recent past habitability on Mars[J]. *Life*, 2023, 13(12). DOI: 10.3390/life1312234.
- [32] NABABAN D C, SHAW M G, HUMBERT M S, et al. Metals extraction on Mars through carbothermic reduction[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 234: 87-98.
- [33] ROSS S D. Near-earth asteroid mining[R]. Pasadena, USA: California Institute of Technology, 2001.
- [34] DICKSON D, HARTVIGSEN J, DREYER C, et al. Optimization of an electrolysis system for production of rocket fuel from lunar ice[C]//IEEE Aerospace Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438251.
- [35] 吴言蔚, 贺佳峰, 王国光. 月球内部水和月表水冰资源的评估研究[J]. *高校地质学报*, 2024, 30(2): 165-177.
WU Y W, HE J F, WANG G G. Evaluation of water in lunar interior and water ice on lunar surface[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2024, 30(2): 165-177.
- [36] AHMED T, NAYAB T, SAEED M. Perspective view of hydrology on the Martian surface[J]. *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology*, 2024: 472-481.
- [37] MORGAN G A, PUTZIG N E, PERRY M R, et al. Availability of subsurface water-ice resources in the northern mid-latitudes of Mars[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(3): 230-236.
- [38] SLYUTA E N, TURCHINSKAYA O I. Helium-3 in the lunar soil[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2023.
- [39] 王巍, 姚伟. 太空资源开发技术体系研究[J]. *宇航学报*, 2023, 44(11): 1621-1632.
WANG W, YAO W. Research on the technology architecture of space resource exploitation[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(11): 1621-1632.
- [40] ZACNY K, COHEN M M, JAMES W W, et al. Asteroid mining[C]//AIAA Space 2013 Conference and Exposition. Reston, USA: AIAA, 2013. DOI: 10.2514/6.2013-5304.
- [41] MEURISSE A, CARPENTER J. Past, present and future rationale for space resource utilisation[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 182. DOI: 10.1016/j.pss.2020.104853.
- [42] ROSS B, HAUSSENER S, BRINKERT K. Assessment of the technological viability of photoelectrochemical devices for oxygen and fuel production on Moon and Mars[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1). DOI: 10.1038/s41467-023-38676-2.

- [43] HOFFMAN J A, HINTERMAN E R, HECHT M H, et al. 18 Months of MOXIE (Mars oxygen ISRU experiment) operations on the surface of Mars – Preparing for human Mars exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 210: 547-553.
- [44] IOELOVICH M. Thermodynamic analysis of methane synthesis by hydrogenation of carbon dioxide[J]. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2024, 24(2): 927-931.
- [45] MAZANEK D D, MERRILL R G, BROPHY J R, et al. Asteroid redirect mission concept: A bold approach for utilizing space resources[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 117: 163-171.
- [46] AZAMI M, KAZEMI Z, MOAZEN S, et al. A comprehensive review of lunar-based manufacturing and construction[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2024, 150. DOI: 10.1016/j.paerosci.2024.101045.
- [47] ZHANG W, CHENG Q K, LI J L. Technical progress in the utilization and exploitation of small celestial body resources[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 208: 219-255.
- [48] JOYCE E R, SNYDER M P. Technologies enabling colonization of near-Earth asteroids[C]//AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition. Reston, USA: AIAA, 2014. DOI: 10.2514/6.2014-4372.
- [49] HAN W B, ZHOU Y, CAI L X, et al. Physical, mechanical and thermal properties of vacuum sintered HUST-1 lunar regolith simulant[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 34(9): 1243-1257.
- [50] CALUK N, SEISDEDOS G, AZIZINAMINI A. Destructive and non-destructive testing of potential lunar polymer concrete for future lunar habitable infrastructure[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 405. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133395.
- [51] MEURISSE A, MAKAYA A, WILLSCH C, et al. Solar 3D printing of lunar regolith[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 152: 800-810.
- [52] SCHILD T, COWLEY A, GRUNDSTROM B, et al. Direct ink writing with lunar regolith: An avenue for off-Earth construction[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2024.
- [53] WANG Z K, ZHENG Z C, JIANG L X, et al. Microwave sintering of HUST-2 lunar highland regolith simulant: Effects on microstructure evolution, mechanical and thermal properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 467. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140391.
- [54] 周诚. 从一块月壤砖开始, 搭建月球基地 (唠“科”)[N/OL]. 人民日报, 2025-01-25 [2025-02-03]. <http://gd.people.com.cn/n2/2025/0125/c123932-41120707.html>.
- [55] DALLAS J A, RAVAL S, SAYDAM S, et al. An environmental impact assessment framework for space resource extraction[J]. *Space Policy*, 2021, 57. DOI: 10.1016/j.spacepol.2021.101441.
- [56] 迟海义, 袁帅, 潘文特, 等. 月壤—柔性充气膜组合式防护层力热性能分析[J]. *宇航学报*, 2024, 45(5): 778-789.
- [57] CHI H Y, YUAN S, PAN W T, et al. Analysis of the force-thermal properties of a combined lunar soil-flexible inflatable membrane shielding layer[J]. *Journal of Astronautics*, 2024, 45(5): 778-789.
- [58] ZHANG J, GUO J N, DOBYNDE M I, et al. From the top of Martian Olympus to deep craters and beneath: Mars radiation environment under different atmospheric and regolith depths [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(3). DOI: 10.1029/2021JE007157.
- [58] 徐桂弘, 李阳, 李瑞, 等. 月壤原位资源利用技术研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(4): 12-23.
- XU G H, LI Y, LI R, et al. Research progress on in-situ resource utilization of lunar soil[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(4): 12-23.
- [59] 郭峰, 吴嘉宁, 阎绍泽, 等. 地外天体原位资源利用技术研究进展[C]//2023 智能制造与机械动力学学术大会摘要集. 南京: 中国振动工程学会, 2023: 27-28.
- GUO F, WU J N, YAN S Z, et al. Research progress on in-situ resource utilization technology for extraterrestrial bodies[C]//Abstracts of the 2023 Conference on Intelligent Manufacturing and Mechanical Dynamics. Nanjing: Chinese Society for Vibration Engineering, 2023: 27-28.
- [60] DAHL C, GILBERT B, LANGE I. Mineral scarcity on Earth: Are asteroids the answer[J]. *Mineral Economics*, 2020, 33(1): 29-41.
- [61] HASNAIN Z, LAMB C A, ROSS S D. Capturing near-Earth asteroids around Earth[J]. *Acta Astronautica*, 2012, 81(2): 523-531.
- [62] ZHANG X, ZHANG G Q, XIE H P, et al. A review of sampling exploration and devices for extraterrestrial celestial bodies[J]. *Space Science Reviews*, 2022, 218(8). DOI: 10.1007/s11214-022-00926-y.
- [63] BASILEVSKY A T, IVANOV B A, IVANOV A V, et al. Clarification of sources of material returned by Luna 24 spacecraft based on analysis of new images of the landing site taken by lunar reconnaissance orbiter[J]. *Geochemistry International*, 2013, 51: 456-472.
- [64] WANG Y H, WANG J P, ZHANG G Q, et al. Advances in drill-based sampling technology for extraterrestrial bodies[J]. *Space Science Reviews*, 2024, 220(6). DOI: 10.1007/s11214-024-01100-2.
- [65] ZACNY K, PAULSEN G, SZCZESIAK M, et al. LunarVader: Development and testing of lunar drill in vacuum chamber and in lunar analog site of Antarctica[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 26(1): 74-86.
- [66] KANU N J, GUPTA E, VERMA G C. An insight into India's Moon mission – Chandrayan-3: The first nation to land on the southernmost polar region of the Moon[J]. *Planetary and Space Science*, 2024. DOI: 10.1016/j.pss.2024.105864.
- [67] ZHANG X, ZHANG G Q, WANG Y H, et al. Design and coring performance analysis of handheld and machine-based composite lunar soil coring device[J]. *Advances in Space Research*, 2025, 75(11): 8287-8303.
- [68] 周诚, 李浩然, 韩文彬, 等. 面向原位建造的月壤采集技术研究进展及展望[J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2024, 52(8): 65-75.
- ZHOU C, LI H R, HAN W B, et al. Research progress and prospects of lunar soil collection technology for in-situ construction[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(8): 65-75.
- [69] YOUNG A. The Apollo lunar samples: Collection analysis and results[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2017.
- [70] 胡浩, 裴照宇, 李春来, 等. 无人月球采样返回工程总体设计——嫦娥五号任务[J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(11): 1275-1286.
- HU H, PEI Z Y, LI C L, et al. Overall design of unmanned lunar sampling and return project – Chang'e-5 mission[J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2021, 51(11): 1275-1286.

- [71] XIAO L, QIAN Y Q, WANG Q, et al. The Chang'e-5 mission [M]//Sample Return Missions. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2021: 195-206.
- [72] 张宽, 于天一, 胡晓东, 等. 月面表层无人采样控制技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 173-182.
ZHANG K, YU T Y, HU X D, et al. Control technology for unmanned sampling of lunar surface[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 173-182.
- [73] ZHANG T, PANG Y, ZENG T, et al. Robotic drilling for the Chinese Chang'E 5 lunar sample-return mission[J]. International Journal of Robotics Research, 2023, 42(8): 586-613.
- [74] ZHAO W J, WANG C. China's lunar and deep space exploration: Touching the moon and exploring the universe[J]. National Science Review, 2019, 6(6): 1274-1278.
- [75] ZENG X G, LIU D W, CHEN Y, et al. Landing site of the Chang'e-6 lunar farside sample return mission from the Apollo basin[J]. Nature Astronomy, 2023, 7(10): 1188-1197.
- [76] CUI Z X, YANG Q, ZHANG Y Q, et al. A sample of the Moon's far side retrieved by Chang'e-6 contains 2.83-billion-year-old basalt[J]. Science, 2024, 386(6728): 1395-1399.
- [77] ZHANG Q W L, YANG M H, LI Q L, et al. Lunar farside volcanism 2.8 billion years ago from Chang'e-6 basalts[J]. Nature, 2025: 356-360.
- [78] HOLMBERG N A. Viking'75 spacecraft design and test summary[M]. Washington, USA: NASA Reference Publication, 1980.
- [79] 李操. 基于机械臂的月壤挖掘采样及力学参数辨识的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LI C. Study of lunar soil excavation acquisition and mechanical parameters identification based on robot arm[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [80] 李季. 月壤表层采样抓取式末端执行器构型设计与结构参数优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LI J. Configuration design and parameter optimization for lunar surface grab-sampling end-effector[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [81] INDYK S, SPRING J, FORD S, et al. Operating the rock abrasion tool (RAT) after thirteen years of an originally ninety day mission[C]//2018 SpaceOps Conference. Reston, USA: AIAA, 2018, 2018-2322.
- [82] 姜水清, 刘荣凯, 林云成, 等. 铲挖式表层月壤采样器设计与试验[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(1): 49-58.
JIANG S Q, LIU R K, LIN Y C, et al. Design and test of a sampler for lunar surface regolith[J]. Chinese Space Science and Technology, 2019, 39(1): 49-58.
- [83] RICHTER L, COSTE P, GROMOV V V, et al. Development and testing of subsurface sampling devices for the Beagle 2 lander[J]. Planetary and Space Science, 2002, 50(9): 903-913.
- [84] ARVIDSON R E, BONITZ R G, ROBINSON M L, et al. Results from the Mars Phoenix Lander robotic arm experiment [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2009, 114(E1). DOI: 10.1029/2009JE003408.
- [85] ANDERSON R C, JANDURA L, OKON A B, et al. Collecting samples in Gale crater, Mars; an overview of the Mars science laboratory sample acquisition, sample processing and handling system[J]. Space Science Reviews, 2012, 170: 57-75.
- [86] MARTIN-TORRES F J, ZORZANO M P, VALENTIN-SERRANO P, et al. Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(5): 357-361.
- [87] LAKDAWALLA E. SA/SPaH: Sample acquisition, processing, and handling[M]//The Design and Engineering of Curiosity. Cham, Switzerland: Springer, 2018: 185-220.
- [88] KNAPMEYER-ENDRUN B, KAWAMURA T. NASA's insight mission on Mars – First glimpses of the planet's interior from seismology[J]. Nature Communications, 2020, 11. DOI: 10.1038/s41467-020-15251-7.
- [89] MOELLER R C, JANDURA L, ROSETTE K, et al. The sampling and caching subsystem for the scientific exploration of Jezero crater by the Mars 2020 perseverance rover[J]. Space Science Reviews, 2021, 217: 1-43.
- [90] ZACNY K, AVANESYAN A, PAULSEN G, et al. Mars drill for the Mars sample return mission with a brushing and abrading bit, regolith and powder bit, core PreView bit and a coring bit[C]//IEEE Aerospace Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2012. DOI: 10.1109/AERO.2012.6187051.
- [91] ALTIERI F, FRIGERI A, LAVAGNA M, et al. Investigating the Oxia Planum subsurface with the ExoMars rover and drill [J]. Advances in Space Research, 2023, 71(11): 4895-4903.
- [92] BRIONES C, RODRIGUEZ-MANFREDI J A, KERESZTURI A, et al. Robotic missions to Mars[M]//Mars and the Earthlings: A Realistic View on Mars Exploration and Settlement. Cham, Switzerland: Springer, 2025: 51-84.
- [93] Thales-Alenia-Space. The search for life on Mars goes on with ExoMars 2028[EB/OL]. (2024-04-09) [2024-12-21]. <https://www.thalesaleniaspace.com/en/press-releases/search-life-mars-goes-exomars-2028>.
- [94] YIN C H, HUANG J C, QUAN Q Q, et al. Technical progress in landing mechanisms for exploring small solar system bodies [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 122. DOI: 10.1016/j.paerosci.2021.100697.
- [95] GEURTS K, FANTINATI C, ULAMEC S, et al. Rosetta lander: On-comet operations execution and recovery after the unexpected landing[C]//14th International Conference on Space Operations. Reston, USA: AIAA, 2016. DOI: 10.2514/6.2016-2509.
- [96] BOEHNHARDT H, BIBRING J P, APATHY I, et al. The Philae lander mission and science overview[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2017, 375(2097). DOI: 10.1098/rsta.2016.0248.
- [97] MIYAMOTO H, KARGEL J, FINK W, et al. Granular processes on Itokawa, a small near-Earth asteroid: Implications for resource utilization[J]. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2008. DOI: 10.1117/12.784634.
- [98] KUBOTA T, OTSUKI M, YANO H, et al. Descent and touchdown dynamics for sample collection in Hayabusa mission[C]//57th International Astronautical Congress. Reston, USA: AIAA, 2006. DOI: 10.2514/6.IAC-06-C1.3.02.
- [99] YANO H, KUBOTA T, MIYAMOTO H, et al. Touchdown of the Hayabusa spacecraft at the Muses Sea on Itokawa[J]. Science, 2006, 312: 1350-1353.

- [100] WATANABE S I, TSUDA Y, YOSHIKAWA M, et al. Haya-busa2 mission overview[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 208: 1-14.
- [101] GOTTWALD M. Interplanetary travels-visits to our cosmic neighborhood[M]. Berlin, Germany: Springer, 2024.
- [102] 徐传喜. 面向星球采样的颗粒物电场收集与运移方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- XU C X. Research on method of electric field collecting and transporting particles for planet sampling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [103] POLIT A T, LUNNING N G, RIGHTER K, et al. Sample return and preliminary examination timeline for the OSIRIS-REx mission[C]//54th Lunar and Planetary Science Conference. Houston, USA: Johnson NASA Conference Publication, 2023.
- [104] LAURETTA D S, CONNOLLY JR H C, AEBERSOLD J E, et al. Asteroid (101955) Bennu in the laboratory: Properties of the sample collected by OSIRIS-REx[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2024, 59(9): 2453-2486.
- [105] CAMERON E N. Titanium in lunar regolith and its use in mining site selection[R]. Wisconsin, USA: University of Wisconsin-Madison, 1987.
- [106] GAJDA M E. A lunar volatiles miner[D]. Madison, USA: University of Wisconsin-Madison, 2006.
- [107] SVIATOSLAVSKY I N. The challenge of mining HE-3 on the lunar surface: How all the parts fit together[C]//Engineering, Construction, and Operations in Space IV. New York, USA: ASCE, 1993: 668-677.
- [108] HEDRICK G. Towards mining rare Earth elements on the Moon[C]//IEEE Aerospace Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2023. DOI: 10.1109/AERO55745.2023.10116027.
- [109] LOURA H. Lunar-polar propellant mining outpost (LPMO): Affordable exploration and industrialization[EB/OL]. (2019-04-10) [2024-12-30]. <https://www.nasa.gov/general/lunar-polar-propellant-mining-outpost-lpmo-affordable-exploration-and-industrialization/>.
- [110] KUHNS M, KUHNS R J, MEYAN F, et al. Rocket mining for lunar and Mars ISRU[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2023.
- [111] CANDALOT A, HASHIM M, HICKEY B, et al. Soft gripping system for space exploration legged robots[C]//Walking Robots into Real World. Cham, Switzerland: Springer, 2024: 144-156.
- [112] GREEN M, MCBRYAN T, MICK D, et al. Regolith excavation performance of a screw-propelled vehicle[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(3). DOI: 10.1002/aisy.202100125.
- [113] LIU J B, YE M H, XU J C, et al. A multi-string and wireline-coring drilling robot for planetary regolith sampling[J]. *Advances in Space Research*, 2025, 75(7): 5736-5756.
- [114] 潘虹旭, 代钦夫. 国内首个太空采矿机器人来了! “星际矿工”如何采矿? 太空资源有哪些? [EB/OL]. (2025-03-16) [2025-04-02]. <https://my.mbd.baidu.com/r/1zUbYieVXik?f=cp&rs>.
- [115] Offworld. Autonomous mining on the earth and the moon[EB/OL]. (2023-04-19) [2024-12-30]. <https://www.offworld.ai/products>.
- [116] 程佳, 孙雪, 王浩, 等. DW1500 型斗轮挖掘机斗轮机构的研究[J]. *机械工程与自动化*, 2017(2): 113-115.
- CHENG J, SUN X, WANG H, et al. Study on bucket mechanism of DW1500 type of bucket excavator[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2017(2): 113-115.
- [117] 林述温, 陆哲, 危世佳, 等. 挖掘机工作过程动力特性仿真及主构件参数多目标优化设计方法[J]. *中国机械工程*, 2024, 36(6): 1371-1379.
- LIN S W, LU Z, WEI S J, et al. Simulation of dynamic characteristics of excavator working processes and multi-objective optimization design method of main component parameters[J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 36(6): 1371-1379.
- [118] KAI Z, KUANGDI X. Mining and driving equipment, categories of[M]//The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy. Singapore: Springer, 2022: 1334-1336.
- [119] SHCHERBAKOV P, TYMCHENKO S, BITIMBAYEV M, et al. Mathematical model to optimize drilling-and-blasting operations in the process of open-pit hard rock mining[J]. *Mining of Mineral Deposits*, 2021, 15(2): 25-34.
- [120] 谢存黎, 田小松, 王飞旺, 等. 离散元法在矿石破碎中的应用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2024, 44(1): 126-134.
- XIE C L, TIAN X S, WANG F W, et al. Application research status of discrete element method in ore crushing[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024, 44(1): 126-134.
- [121] 赵环帅. 我国振动筛理论研究及技术应用进展[J]. *化工矿物与加工*, 2021, 50(11): 16-22.
- ZHAO H S. Progress in theoretical research and technical application of vibrating screen in China[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2021, 50(11): 16-22.
- [122] 张涛, 钱煜, 周茗. 高效节能球磨机在金矿选矿中的应用[J]. *中国机械*, 2024(34): 96-99.
- ZHANG T, QIAN Y, ZHOU M. Application of high-efficiency and energy-saving ball mill in gold ore beneficiation[J]. *Machine China*, 2024(34): 96-99.
- [123] CLEMENTS J S, THOMPSON S M, COX N D, et al. Development of an electrostatic precipitator to remove Martian atmospheric dust from ISRU gas intakes during planetary exploration missions[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, 49(6): 2388-2396.
- [124] CALLE C I, BUHLER C R, JOHANSEN M R, et al. Active dust control and mitigation technology for lunar and Martian exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 69(11-12): 1082-1088.
- [125] 葛世荣. 采煤机技术发展历程(四)——连续采煤机[J]. *中国煤炭*, 2020, 46(9): 1-14.
- GE S R. The development history of coal shearer technology (Part four) – Continuous shearer[J]. *China Coal*, 2020, 46(9): 1-14.
- [126] 胡景. 铝土矿长壁开采采矿机研制与应用[J]. *煤矿机电*, 2022, 43(6): 16-20.
- HU J. Development and application of longwall mining machine for bauxite[J]. *Colliery Mechanical & Electrical Technology*, 2022, 43(6): 16-20.
- [127] ZHENG Y L, ZHANG Q B, ZHAO J. Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 57: 287-299.
- [128] SCHÖSSER B, LAVASAN A A, BAILLE W, et al. Face support, soil conditioning and material transport in Earth-pressure-balance and hydro shield machines[J]. *Interaction Modeling in Mechanized Tunneling*, 2023: 165-252.

- [129] 刘志强, 宋朝阳, 纪洪广, 等. 深部矿产资源开采矿井建设模式及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 826-845. LIU Z Q, SONG Z Y, JI H G, et al. Construction mode and key technology of mining shaft engineering for deep mineral resources[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 826-845.
- [130] 张敬辉. 连续采矿机运输机设计与研究[J]. 中国金属通报, 2019(3): 134-135. ZHANG J H. Design and research of conveyor for continuous mining machine[J]. China Metal Bulletin, 2019(3): 134-135.
- [131] 张文刚, 范守俊, 张红光, 等. 矿井提升机井架稳定性应力分析及安全性研究[J]. 矿山机械, 2024, 52(12): 25-29. ZHANG W G, FAN S J, ZHANG H G, et al. Stability stress analysis of derrick for mine hoist and its safety study[J]. Mining & Processing Equipment, 2024, 52(12): 25-29.
- [132] 付孟雄, 刘少伟, 贾后省. 锚杆机动力参数对煤巷顶板锚固孔钻进特征影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 517-524. FU M X, LIU S W, JIA H S. Study on effects of dynamic parameters of bolter on roof bolt hole drilling characteristics[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 517-524.
- [133] 刘子文. 正反无轴双螺旋湿式混凝土喷射机的研究与应用[J]. 煤矿机电, 2024, 45(2): 12-18. LIU Z W. Research and application of front and back non-axis double helix wet concrete spraying machine[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2024, 45(2): 12-18.
- [134] HUANG G H, ZHENG F R, ZHANG Y X, et al. Experimental study on the dust suppression effect of water cannon mud in drilling and blasting tunnel[C]//International Conference on Smart Transportation and City Engineering. Bellingham, USA: SPIE, 2021: 282-291.
- [135] CESARETTI G, DINI E, DE KESTELIER X, et al. Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. Acta Astronautica, 2014, 93: 430-450.
- [136] 丁希仑, 高海波, 黄攀峰, 等. 蓬勃发展的空间机器人技术与应用[J]. 机器人, 2022, 44(1): 1. DING X L, GAO H B, HUANG P F, et al. Booming space robot technology and applications[J]. Robot, 2022, 44(1): 1.
- [137] 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.
- [138] DITTEON R. Daily temperature variations on Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1982, 87(B12): 10197-10214.
- [139] RUCKER M A. Dust storm impacts on human Mars mission equipment and operations[C]//Workshop on Dust in the Atmosphere of Mars and Its Impact on Human Exploration. Houston, USA: Johnson NASA Conference Publication, 2017.
- [140] NELSON G A. Space radiation and human exposures, a primer[J]. Radiation Research, 2016, 185(4): 349-358.
- [141] SMITH D E, ZUBER M T, SOLOMON S C, et al. The global topography of Mars and implications for surface evolution[J]. Science, 1999, 284(5419): 1495-1503.
- [142] JAUMANN R, HIESINGER H, ANAND M, et al. Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding[J]. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 15-41.
- [143] 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.
- [144] BARRY K. Evaluation of the economics around space resource extraction and in-situ resource utilization (ISRU)[C]//75th International Astronautical Congress. Paris, France: IAF, 2024. DOI: 10.52202/078383-0008.
- [145] HASSAN G, YILBAS B S, AL-SHARAFI A, et al. Dust mitigation strategies concerning solar energy applications: A comprehensive review[J]. Solar Energy, 2024, 277. DOI: 10.1016/j.solener.2024.112728.
- [146] JOHNSON C D. The outer space treaty[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2018.
- [147] TRONCHETTI F. Legal aspects of space resource utilization [M]//Handbook of Space Law. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing Limited, 2015: 769-813.
- [148] 廖敏文. 外空资源法律地位的确定问题研究[J]. 国际法研究, 2018(2): 40-66. LIAO M W. The identification of the legal status of space resources[J]. Chinese Review of International Law, 2018(2): 40-66.
- [149] TAICHMAN E A. The Artemis accords: Employing space diplomacy to de-escalate a national security threat and promote space commercialization[J/OL]. National Security Law Brief, 2021, 11(2). <https://digitalcommons.wcl.american.edu/nslb/vol11/iss2/5/>.
- [150] CORDIE T, STEINDL R, DUNGAVELL R, et al. Modular field robots for extraterrestrial exploration[J]. Advances in Astronautics Science and Technology, 2020, 3(1): 37-47.
- [151] SONI R, VERMA R, GARG R K, et al. A critical review of recent advances in the aerospace materials[J]. Materials today: Proceedings, 2023, 113: 180-184.
- [152] ZHENG J X, BI S S, CAO B, et al. Visual localization of inspection robot using extended Kalman filter and Aruco markers[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, New York: IEEE, 2018: 742-747.
- [153] MAKОВИYCHUK V, WAWRZYNIAK L, GUO Y, et al. Isaac Gym: High performance GPU-based physics simulation for robot learning[DB/OL]. (2021-08-25) [2024-12-30]. <https://arxiv.org/abs/2108.10470>.
- [154] JAYANT A K, BHATNAGAR S. Model-based safe deep reinforcement learning via a constrained proximal policy optimization algorithm[C]//Advances in Neural Information Processing Systems 35. Red Hook, USA: Curran Associates Inc., 2022: 24432-24445.
- [155] LI Y H, ZHENG L, WANG Y H, et al. Impedance learning-based adaptive force tracking for robot on unknown terrains [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2025, 41: 1404-1420.
- [156] WHITWORTH A J, VAUGHAN J, SOUTHAM G, et al. Review on metal extraction technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes[J]. Minerals Engineering, 2022, 182. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107537.
- [157] EL-NADI Y A. Solvent extraction and its applications on ore processing and recovery of metals: Classical approach[J]. Separation & Purification Reviews, 2017, 46(3): 195-215.
- [158] WATLING H R. Review of biohydrometallurgical metals extraction from polymetallic mineral resources[J]. Minerals, 2014, 5(1): 1-60.

- [159] ZHANG Y L, ZHANG T, WEI H Y, et al. Advances in extraterrestrial drilling technology to discover the secrets hidden inside celestial bodies[J]. *Space Science Reviews*, 2022, 218. DOI: 10.1007/s11214-022-00915-1.
- [160] NOROOZI F, DANESHMAND M, FIORINI P. Conventional, heuristic and learning-based robot motion planning: Reviewing frameworks of current practical significance[J]. *Machines*, 2023, 11(7). DOI: 10.3390/machines11070722.
- [161] LI H, FREI R J, WENSING P M. Model hierarchy predictive control of robotic systems[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 3373-3380.
- [162] MARTINEZ ROCAMORA JR B, KILIC C, TATSCH C, et al. Multi-robot cooperation for lunar in-situ resource utilization[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2023, 10. DOI: 10.3389/frobt.2023.1149080.
- [163] KASHID S, KUMAT A D. Hierarchically decentralized heterogeneous multi-robot task allocation system[C]//7th International Conference on Intelligent Robotics and Control Engineering. Piscataway, USA: IEEE, 2024: 143-148.
- [164] ZHAO Y L, LIU P, WANG J H, et al. Overview of star catalog detection robots[C]//1st Aerospace Frontiers Conference. Bellingham, USA: SPIE, 2024: 410-421.
- [165] ALQUDSI Y, MAKARACI M. Exploring advancements and emerging trends in robotic swarm coordination and control of swarm flying robots: A review[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2025, 239(1): 180-204.
- [166] HUANG T, SHEN M H, SONG L L, et al. Robust and transparent dust removal coating applied to polyimide-based photovoltaic modules for lunar rovers[J]. *Heliyon*, 2024, 10(11). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31985.
- [167] GORDON K L, DAS L, GALHENA T L, et al. Spray-deposition of graphene/polymer thin coatings on polyimide sheets for lunar dust adhesion mitigation[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 219: 449-458.
- [168] SARGEANT H M, MESALAM R, WATKINSON E J, et al. Ice-mining on the Moon with radioisotope power systems[C]//Proceedings of the Nuclear and Emerging Technologies for Space. Idaho Falls, USA: American Nuclear Society, 2023: 494-498.
- [169] MAZZOTTI M, SARGEANT H M, BARCO A, et al. Ice-mining lunar rover using Americium-241 radioisotope power systems[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 225: 801-811.
- [170] STEPHENSON K, LANDGRAF M. Hybrid radioisotope-solar power systems as a key to sustained lunar exploration [C]//European Space Power Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ESPC.2019.8932065.
- [171] MIKOLAJCZYK T, MIKOLAJEWSKI D, KLODOWSKI A, et al. Energy sources of mobile robot power systems: A systematic review and comparison of efficiency[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(13). DOI: 10.3390/app13137547.
- [172] LUO H W, WANG Y D, FENG Y H, et al. Lithium-ion batteries under low-temperature environment: Challenges and prospects[J]. *Materials*, 2022, 15(22). DOI: 10.3390/ma15228166.
- [173] HE Y, SHANG W X, TAN P. Insight into rechargeable batteries under extreme pressure and gravity for deep space exploration[J]. *Carbon Neutralization*, 2024, 3(5): 773-780.
- [174] BUGGA R V, BRANDON E J. Energy storage for the next generation of robotic space exploration[J]. *The Electrochemical Society Interface*, 2020, 29(1): 59-63.
- [175] LIANG Z X, HE J R, HU C G, et al. Next-generation energy harvesting and storage technologies for robots across all scales [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(4). DOI: 10.1002/aisy.202200045.
- [176] HULSEN B, SCHOBEL P, MULSOW N A. Modular EPS for small mobile robotic space systems[C]//13th European Space Power Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2023. DOI: 10.1109/ESPC59009.2023.10413260.
- [177] 徐文福, 梁斌, 李成, 等. 空间机器人微重力模拟实验系统研究综述[J]. *机器人*, 2009, 31(1): 88-96.
XU W F, LIANG B, LI C, et al. A review on simulated micro-gravity experiment systems of space robot[J]. *Robot*, 2009, 31(1): 88-96.
- [178] CHEN M, ZENG L, JIN Y, et al. Design and verification of microgravity simulation system for space station manipulator[C]//3rd International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 439-444.
- [179] CHEN M, ZENG L, NI W C, et al. Design and experimental verification of microgravity simulation system for lunar sampling manipulator[C]//Seventh International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation. Bellingham, USA: SPIE, 2022: 443-451.
- [180] RAHIMI NOHOJI H, VOOS H. Compliant robotics in space: A prospective review of soft and deformable systems for space missions[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2025, 7(7). DOI: 10.1002/aisy.202400785.
- [181] LIN Y F, KONOW N, DUMONT E R. How moles destroy your lawn: The forelimb kinematics of eastern moles in loose and compact substrates[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2019, 222(4). DOI: 10.1242/jeb.182436.
- [182] WANG C, JIA Y Z, XUE C B, et al. Scientific objectives and payload configuration of the Chang'E-7 mission[J]. *National Science Review*, 2024, 11(2). DOI: 10.1093/nsr/nwad329.
- [183] CREECH S, GUIDI J, ELBURN D. Artemis: An overview of NASA's activities to return humans to the Moon[C]//IEEE Aerospace Conference, Piscataway, USA: IEEE, 2022. DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843277.
- [184] LITVAK M, KOZLOVA T, ILYIN A, et al. Luna-25 robotic arm: Results of experiment with analog of lunar regolith in lunar like conditions[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 200: 282-290.
- [185] PENG Q B, WANG P, XING L. Perspectives on China's manned lunar scientific research and test station[J]. *Advances in Astronautics Science and Technology*, 2024, 7(1): 51-64.
- [186] ZHANG P, DAI W, NIU R, et al. Overview of the lunar in situ resource utilization techniques for future lunar missions[J]. *Space: Science & Technology*, 2023, 6: 549-566.
- [187] ZHOU C, CHEN R, XU J, et al. In-situ construction method for lunar habitation: Chinese super Mason[J]. *Automation in Construction*, 2019, 104: 66-79.
- [188] ZHOU C, TANG B, DING L Y, et al. Design and automated assembly of Planetary LEGO Brick for lunar in-situ construction[J]. *Automation in Construction*, 2020, 118. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103282.
- [189] ZHENG Z X, GAO F Y, MEI H Y, et al. Construction planning and development strategy of scientific research bases on the Moon and Mars and other celestial bodies[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(1): 49-61.

作者简介:

张 涛 (1990-), 男, 博士, 教授。研究领域: 空间机器人, 星球采样机器人, 仿生机器人。