

月面广义资源探测及其原位利用技术构想

姜生元¹, 沈毅¹, 吴湘¹, 邓宗全¹, 赖小明², 张家强², 梁鲁³, 周琴⁴

(1. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 北京卫星制造厂, 北京 100190;
3. 北京空间技术研制试验中心, 北京 100190; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:以载人登月场景下的月面资源精细化利用为目标, 概述了月面资源探测与原位利用技术的国内外发展现状。针对未来载人登月探测任务规划以及确定预先研究目标的实际需求, 提出了月面环境资源的广义分类和精细化利用思想, 并以载人登月场景下的“人-器-机-环境”系统为研究对象, 细化了可在轨利用的资源、需带回地球的样本资源和人机废弃物资源等三类资源的拓扑组成。本着继承与创新兼顾、前瞻性与实用性包容的概念研究理念, 重点阐述了宇航员人因主导的矿物资源勘查、月面环境条件的资源化利用、多态样本的采集、人机废弃物的循环利用等月面广义资源的探测与原位利用技术途径。

关键词: 人机联合; 月面广义资源; 探测; 原位利用; 技术途径

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2015)04-0291-11

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2015.04.001

0 引言

自1969年首次成功载人登月以来, 人类已先后6次将12名宇航员和载人月球车送上月球, 开展了一系列科学考察与采样返回任务。期间, 各航天大国纷纷开展了载人登月和月球基地建设等方面的关键技术预先研究以及人机联合探测模式规划等研究工作。最近, 针对月球、火星等地球外天体的载人探测成为深空探测领域的热点话题之一^[1-2]。从技术可行性和经济承受能力两个角度来分析, 以月球为目的的载人探测活动更具有实现的可能。

随着人类对地球外天体认识的深入以及科技水平的发展, 21世纪载人登月探测活动的科学和技术内涵相比于40年前的Apollo时代已经具有显著差异。从20世纪80年代开始, 国际上出现了月球资源原位探测与利用的研究热潮, 典型代表是美国NASA提出并实施的ISRU(in-situ resource utilization)计划^[3]。纵观1969年以来各国的载人登月探测计划和预先研究成果, 已经明确彰显了人类进一步深化对月球实地勘察和月面资源原位利用方面的理性思考和探索追求。可以预见, 本世纪的载人登月探测活动, 将越来越重视科学目标的牵引, 越来越重视资源的现场勘察和原位利用。

本文调研分析了国内外月面资源探测与辨识、月面人机联合探测模式及实施方案、月球特殊环境条件的资源化利用、月面矿物资源的转化与利用、月球样本的采集与分析、月面人机废弃物的资源化处理等方面的信息资料, 力图梳理出载人登月模式下人机联合资源探测、资源原位利用方面的关键技术和实施途径, 为未来载人登月科学目标制定、任务模式规划和关键技术攻关提供借鉴和参考。

1 月面资源探测与利用技术综述

1.1 探测手段概述

月球资源的探测与评估手段和技术方法, 可分为地基观测、星载遥感、实地勘察三种类别。地基观测是月球资源探测的原始阶段, 为人类认识月球提供了初步的、感官的、定性的表面形貌数据; 星载遥感技术, 利用卫星搭载光谱、射线或雷达等探测仪器, 可完成月面地形地貌, 以及月壤、月岩、月尘等矿物的种类、成分及丰度的数据探测, 利用这些探测数据可深化对月球资源的科学认识, 标志性成果有月表地质填图、月表环境建模与分析等; 实地勘察是月球资源探测最直接、最精确的探测手段, 具有三种实施途径, 一是探测器着陆探测, 二是无人自主采样返回探测, 三是载人登月人机联合探测^[4-6]。

1.2 前苏联的无人自主采样探测

针对月球的实地勘察探测活动,前苏联成功完成了5次探测任务,共有3次无人自主采样返回以及2次月球车巡视勘察。

1970~1976年间,前苏联成功发射了Luna16、Luna20、Luna24无人自主钻取采样探测器,通过钻取的方式成功从月球采回月壤剖面样本共计约320 g。通过钻取过程中的钻进负载反馈参数,预估反演了着陆区月壤剖面的原位月壤的物理构成和力学参数。通过返回样品的科学分析,深化了人类对月球物质成分、矿物类型的科学认识。

1970年,成功发射的“月行者1号”无人月球车,在月面工作了320多天,总行程10 540 m,考察面积达9万km²,在500多个月面点上进行了土壤物理特性的科学探测,在25个点上进行了土壤的化学成分分析,拍摄了2万多张月面照片。1973年成功发射的“月行者2号”无人月球车,在月面工作了5个多月,总计巡游了37 m,行程上超过了在火星巡游了10年的“机遇号”一大截,在总里程方面至今仍居于地外天体巡视探测长跑成绩之首。

前苏联的月面无人采样探测成果,为人类认知月壤纵深剖面信息、月壤广域分布信息奠定了初步基础^[7]。

1.3 美国的月面人机联合勘察

1969~1972年,美国成功实施了6次载人登月活动,先后把12名宇航员送上月球,采集并带回了约380 kg月球样本。Apollo14搭载了人力轮式车,Apollo15、Apollo16和Apollo17都搭载了电动载人月球车,由于月球车的作用,扩展了宇航员在月面上的活动范围、拓展了任务模式。由于Apollo载人登月任务的成功实施,探测器、月球车、宇航员、科学探测仪器、手持式采样作业机具等组成了载人登月模式下典型的“人-器-机-环境”系统,形成了月面人机联合探测概念的雏形,为以后的载人探月规划和预先研究提供了第一手参考和比对案例。

由于有了宇航员的现场决策,Apollo的月面探测活动比较丰富多样。由宇航员手持或由月球车运载,在目标点布置了无源地震仪、激光测距反光镜、剖面温度测试仪等科学探测仪器,相比于无人自主探测,能够开展的科学实验更为丰富。

Apollo任务的重要目标是甄选并采集月面上的各类矿物资源样本。利用锤子、耙子、钳子、铲子、筛网、贯入取芯管、取芯钻机等手动或电动工具,采

集了月尘、月壤、月岩和月壤剖面样本,并密封封装于特制样品收集容器中。相比于前苏联的无人钻取采样,美国宇航员获取的样本类型和形态更为多样、样本采集前后的环境支持信息获取更为充分,为返回地球后开展详实的科学分析奠定了基础。

总结美国的载人登月任务,最具有标志性的成果是成功开展了月面资源的人机联合探测和样本采集。限于当时的技术水平,Apollo系列任务尚没有开展月面资源的原位利用^[8]。

1.4 美国的人机联合探测概念及ISRU计划

NASA为了重返月球和载人登陆火星计划,21世纪初开启了人机联合探测模式及实施方案规划,启动了“人与机器人系统”(human robotic systems, HRS),研究了短期、中期和长期多种任务规模的人机联合探测模式,并研制了独具特色的载人月球车和月面移动作业机器人系统。针对月球基地建设任务,对月面资源的探测与采集、设备在轨检测与维护,进行了地面试验验证。在HRS项目中,已经前瞻性地重点体现了月面资源的原位利用和生保物资的循环利用技术的实现途径。

从20世纪80年代开始,美国NASA提出并系统实施了ISRU(in-situ resource utilization)计划的整体构想。先后与加拿大、德国、欧空局等合作,以火山渣为原料制备出了氧气、氢气和水等物资,获得了对未来载人航天具有重大借鉴意义的标志性研究成果。

2008年,美国设计了第一台可演示验证的ISRU样机,进行了月壤开采、氧气制备、资源储存等地面演示,使用氢气还原火山灰实现了水的制备,制备出1 000 mL水,效率约为1%~2%。2010年,美国进行了第2次ISRU地面演示实验,使用了大量的科学仪器,包括地面探测雷达、磁强计、X射线荧光光谱仪、多光谱成像仪、挥发物分析设备、质谱仪等,并且将太阳能应用于碳热还原反应,实现了水及氧气的制备,制备出氧气28 g,效率约为9%。第3次试验验证增加了国际合作,加拿大航天局(Canada space agency, CSA)提供了火山灰的挖掘传输设备,光纤集热器、燃料电池等。通过碳热还原将氧气的制备效率提升到9.5%~10%;此次收集水量约为31.5 g,制备储存氢气400 g,氧气236 g,并完成17次液氧和甲烷推进器的点火试验。此外,还利用火山渣为原料,3D打印出了建筑材料,为月球基地现场建造提供了有效途径。

可以说美国启动的 ISRU 计划,开启了月球资源原位利用技术的先河,获得的成果鼓舞人心。在此之后,很多国家陆续启动了月面资源原位利用技术探索研究^[9-12]。

1.5 国内概况

按照我国的探月工程实施规划,正在实施“绕”“落”“回”无人自主探月阶段。截止目前,我国通过“嫦娥1号”“嫦娥2号”“嫦娥3号”月球探测器,已经获得了分辨率较高的月球表面环境、地貌、地形、地质构造信息,为下一阶段的月球局部资源地质勘查、资源品位与分布研究奠定了基础。

为了进一步推进并落实“探”“登”“驻”三大步载人登月和长期驻月计划,我国已经启动了载人登月、月球基地和月球无人科研站的立项论证工作,很多研究机构也启动了相关预先研究工作^[13]。

针对月球资源探测和原位利用,我国目前的研究多数体现为概念层面的成果和方案层面的论证报告。与美国、俄罗斯和欧空局等发达国家相比,我国起步较晚,技术差距较大。为实现跨越式发展,需要认真研究国外技术发展趋势,并秉持继承性与创新

性兼顾的原则,适时制定中国的长远发展规划,及时按照理性科学探测目标驱动原则开展预先研究工作。

2 广义月面资源及其精细化利用

回顾人类首次登月至今的实际型号任务、实施计划和预先研究案例,可以得到如下启示:

1) 人机联合探测模式,可以开展更有针对性、灵活性、更有科学价值的月面探测活动。从这个角度分析,完全应用机器人任务模式,不可能替代载人登月模式;

2) 未来的载人登月探测活动,任务规模将越来越大、任务周期将越来越长。生保物资的在轨循环利用、人机废弃物的循环利用、矿物资源的就地转化利用等都将成为未来载人登月活动的迫切补给需求。为此,本文横向联想载人登月、环地轨道载人飞船和深空探测的补给需求和关键技术发展方向,提出“广义月面资源”概念,并以此为线索梳理出了载人登月模式下,广义月面资源的拓扑分类,如图1所示。

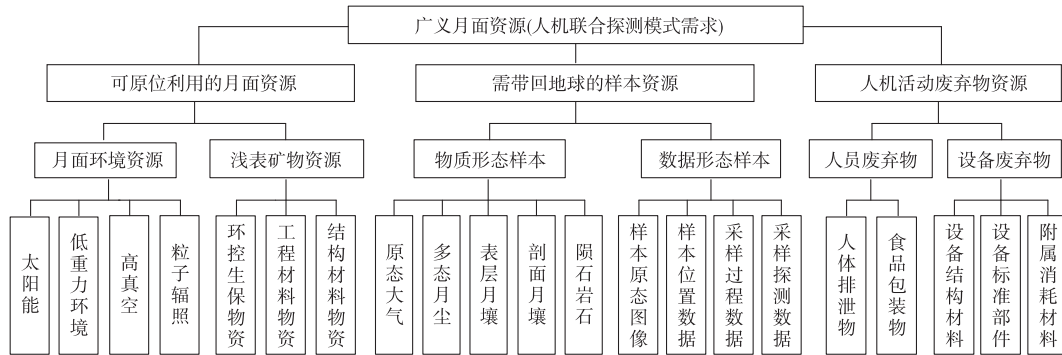


Fig. 1 Classification of the lunar surface generalized resources

所提出的广义月面资源由三种类别组成:

1) 可原位利用的月面资源,又可细分为月面环境资源和浅表层矿物资源两个子类;

2) 需带回地球的样本资源,细分为物质形态样本和数据形态样本两个子类;

3) 人机活动废弃物资源,细分为人员废弃物和设备废弃物两个子类。这种广义资源概念继承并拓展了载人登月采样返回任务模式,继承并移植了载人飞船的生保物资循环利用技术和在轨制造技术。

这种广义资源概念把月面环境资源(太阳能、低重力、高真空等)和狭义的月面矿物资源作为同等重要程度来对待,便于拓展视野、开阔载人登月月面资

源探测与原位利用规划的思路,是后续关键技术梳理、技术实施途径研究的灵魂和主线^[14-16]。

3 人机联合探测与原位利用研究构想

站在为我国未来的载人登月科学目标论证、任务模式规划以及相关关键技术攻关提供有益参考的角度,前述提及的广义月面资源概念为指导思路,本着前瞻性与继承性相结合、国家战略与人类需求相结合的原则,对人机联合月面资源的探测手段与方法,以及月面广义资源的精细化利用技术途径进行了系统梳理和概括,提出了以下5个方面的战略研究和关键技术攻关构想。

3.1 广义月面资源探测、采集、转化利用方法

1) 关于月面矿产资源探测技术

主要是针对浅表层矿物资源和陨石资源探测方法,主要从两个角度开展:一是空间遥测探测方法,调研 NASA、ESA、俄罗斯宇航局等国际主要研究机构对地外天体遥测所采用的设备(如高频雷达探测仪、多光谱成像仪器等)及其所使用的探测方法、探测对象、探测效果等开展系统调研分析工作;二是着陆探测方法(比如矿石、陨石、月壤等),围绕宇航员感官探测(如颜色对比,敲击判断硬度等)和有效载荷的数据探测(如“嫦娥 3 号”探地雷达、月球车的土壤特性探测仪器、质谱仪等)2 种实现途径,调研国际深空探测中已经采用的方法,并注意结合地质学探测方法的移植应用^[17-18]。

2) 关于月面资源的采集、转运、存储技术

在月面上需要采集、转运和存储的月面资源主要是指月岩、月壤和月尘等,围绕目前国际上针对坚硬固体类材料(比如月岩)、可变形材料(月壤)以及气态材料(月尘)采用的设备及技术方法,结合中国人机联合探测任务背景需求,从协助宇航员采样和自动采样等多个角度,重点关注月面资源取样效果、转运效率及存储密封性等关键性能,开展国际信息的调研与分析工作。

3) 关于月面资源的就地转化与利用技术

主要从月面环境资源转化利用、月面能源及生保资源制备、月面建筑及结构材料制备、月面人机废弃物再利用 4 条线索开展调研与分析。关于月面环境资源,主要关注月面的超高真空条件、太阳风和空间粒子辐照条件、月面地质条件的转化利用技术;关于月面生保资源制备,重点关注宇航员月面活动及生存所需要的水、氧气物资,如何从月面现有资源中转化生成;关于月面建筑及结构材料制备,重点关注月壤和月岩原材料如何通过热、激光等能量或者从地面携带的少量辅助材料联合作用,转化生成可供人机联合探测任务需求的金属材料、建筑材料等;关于月面人机废弃物再利用,重点关注月面人机联合探测活动中产生的宇航员人体排泄物、食品容器废弃物、月面探测设备废弃物包括机械零部件的再加工与再利用,机械设备标准部件的再利用(轴承、电机、减速器、紧固件等)、设备工作介质再利用(如推进剂残留物、润滑油等消耗性物资);调研分析空间站、美国载人登月等工程相关任务中采用的人机废弃物处理方法^[19]。

3.2 月面矿物资源的感官辨识、采集与转化利用方法

借鉴美国月面资源原位利用技术发展规划,开展月面矿产资源原位探测与辨识、月面矿产资源开采、运输及资源原位利用技术研究,全面分析月面资源及其原位利用技术,就月面原位制备水、氧气等生保消耗材料,钛、铁等金属材料以及建筑材料的原位制备途径^[20-22],形成如下构想。

1) 月面矿产资源感官主导辨识方法研究

针对月面矿产资源的原位探测和辨识,充分调研国内外月面及地质资源的探测辨识技术,综合利用紫外、可见、红外等光谱识别技术,结合 X 射线、 γ 射线、中子计、质谱仪、色谱分析仪等技术手段,在有人参与的月面活动中,充分发挥宇航员主观智能识别作用,对月面矿产资源种类及其成分进行辨识。同时,利用月面活动过程中月球车的巡视探测功能对月面特定区域存在的矿产资源情况进行精细化的探测和辨识,对其成分、品位及丰度进行综合分析,明确矿产资源的横向及深度分布信息^[23-24]。

2) 月面资源的采集技术研究

资源开采是资源利用的基础,充分利用现有地面资源的采集开采技术,结合月面特有环境特性分析,将月面月球车及机器人等作为月面资源采集的主要手段。前期探测结果证明,月面存在大量的玄武岩,其主要成分为钛铁矿,含有丰富的铁、钛、氧等资源,可以作为氧气、水、金属材料制备的原材料。钛铁矿属于顺磁性材料,通过月面“人-机”粉碎及磁性筛选,可以实现高品位钛铁矿资源的采集,同时钛铁矿中含有的其他金属及其非金属成分也可以通过碳热还原、熔岩电解等手段进行氧气、金属及非金属等资源的制备^[25-26]。

3) 月面原位水、氧气及金属材料的综合利用技术

我国月面资源原位发展利用技术,可以充分借鉴 NASA、ESA 在月面资源原位利用技术研究成果,将氢气还原、碳热还原及熔岩电解等作为月面氧气及金属制备的备选技术方案,同时与高温裂解、硫酸还原等技术进行可行性及经济性比较,论证相关方案的技术成熟度^[27]。

4) 以月壤为原料的建筑材料制备技术

借鉴 Apollo 采样分析及 NASA 相关机构对模拟月壤的研究成果,月球表面月尘和月壤主要由纳米至微米尺度的各类型矿石颗粒组成,由于月尘及

月壤的颗粒较小,因此在微波及激光束作用下,可以将月球表面月尘、月壤烧结形成固体块材以供月面建筑使用。同时借鉴地面混凝粘结技术以及模拟月壤的硫基混凝、水基混凝及树脂基固化等相关技术,可以实现月球表面使用月壤原位制备建筑结构材料^[28-30]。

3.3 关于月面环境条件的资源化利用方法研究

本部分的研究可从2个层面开展:一是可开展月面可利用环境资源本身特性及其对人类活动的影响研究,研究对象是资源本身,研究的主要环境资源包括太阳辐射、低重力环境、高真空环境、宇宙射线辐射及地质特征,这方面研究需广泛搜集国内外研究文献,重点关注人类已有月面探测活动成果的集成和移植应用;二是可针对月面环境资源的应用领域与途径、利用技术与方案、利用可行性等方面的研究工作,以利用方法为研究对象。主要利用领域包括月球能源制备、月面深空科学研究及月面空间试验等方面。月面环境条件的资源化利用相关技术需要以目前已开展的地球轨道空间环境资源化利用技术为基础,是轨道空间环境资源化利用技术的拓展和延伸,很大程度上需要借鉴目前已完成和正在进行的轨道项目经验,包括空间站微重力科学试验项目、生命科学试验项目、空间太阳能电站规划、空间天文望远镜项目等^[31-34]。

1) 月球能源提取与转化技术

在月球能源制备方面,一方面需要调研人类已有的月面太阳能利用方法(苏联的月球车及中国的“玉兔号”都有在月面使用太阳能提供能源的经验),另外应重点研究月面太阳能电站建设的可行性。通过搜集国内外对空间太阳能电站及月面太阳能电站的设计方案,分析总结出月面太阳能电站的构造、能量转化方法、能量传输方式等关键信息,并结合我国实际情况,提出月面太阳能电站可行性建设方案。研究将涉及月面太阳能电站基材制备技术、月面太阳能电站系统设计与仿真试验技术、月面超大型结构模块化轻量与控制技术、月面超大功率高效发电与电力管理技术、月面超大型系统在轨制造、组装与维护技术、月面超大功率高效无线能量转化与传输技术等关键技术。除电能外,还可开展将太阳能转化为热能的技术途径研究,为现场建筑物结构的烧结提供能源。

2) 月基深空探测站技术

利用月面环境资源进行月面天文观测具有可行

性,可调研哈勃望远镜、韦伯望远镜及我国天宫光学舱等空间观测设备的有关技术,结合地基天文观测站的设计经验,针对月面环境特点提出月基天文观测站的建设方案。研究将会涉及月面天文望远镜的设计建造、有效载荷研制、控制中心建设及设备安全防护等方面的前瞻性技术问题。此外,利用月球的特殊环境条件也可尝试利用月面低重力环境建设深空探测发射站的可行性。需要调研月面发射场所的建设、月面发射技术及地月间物资转移技术等方面信息,提出月面中继发射站建设的可行性方案。

3) 月面空间科学实验技术

调研目前已开展的空间科学实验成果,总结空间材料制备、生物制品制备技术现状,结合月面特有环境条件,分析在月面建设材料科学、生物科学、物理科学等方面科学实验室的可行性。研究包括低重力/高真空条件下泡沫材料、金属与合金材料、疫苗药物等产品的制造方法,以及在月面开展太阳物理学、天体物理学、重力波物理学、中微子物理等研究的技术途径。

3.4 关于人机废弃物的资源化利用方法研究

参照载人飞船人体排泄物的循环利用技术以及空间在轨制造技术,以长周期月面人机联合探测的生保物资需求供给为核心目标,深化开展人体排泄物和设备废弃物的循环利用技术研究。针对气体、液体、固体三种形态的人体排泄物,可按3种可行的技术途径开展研究。

1) 气态废弃物的再生循环利用技术

气态废弃物的资源化利用技术路线如图2所示。从CO₂、水蒸气、有害气体的收集存储为起点,可重点研究CO₂的吸附/分离再利用方法,水蒸气的冷凝方法(冷凝后用于液体废弃物资源化处理循环),有害气体的去除方法等关键技术,提出分离后CO₂的2个循环模式,并通过后期的气体成分检测阶段修正前期处理及利用方法,做到物尽其用^[35]。

2) 液态废弃物的再生循环利用技术

液态废弃物资源化利用技术路线如图3所示。以冷凝水、尿液、卫生用水、处理其他废弃物过程化学反应生成的水和蒸汽等收集存储为起点,提出研究废液分批处理和持续循环处理2种处理方案,不同废液使用不同处理方法,处理后使用途径也不同,可参考但不限于如下循环模式:如冷凝水处理后作为饮用水,化学反应生成水与尿液处理后用于电解制氧,卫生用水处理后仍做卫生用水等,经水资源质

量检测后修正废水处理方法,调整循环模式,最大限度

度的节约与优化配置水资源^[36-40]。

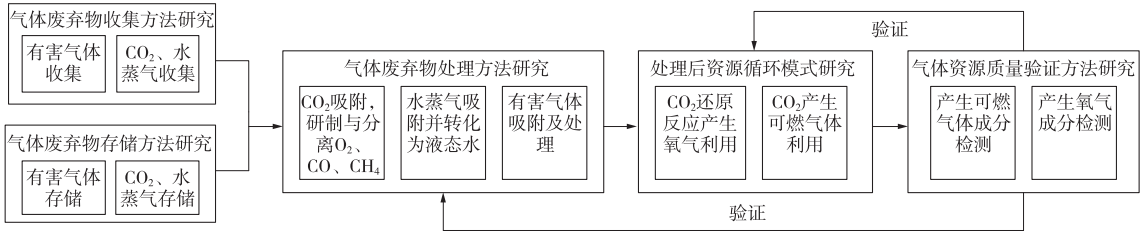


图 2 气态废弃物资源化利用技术实施路线图
Fig. 2 Technical scheme of gaseous waste utilization

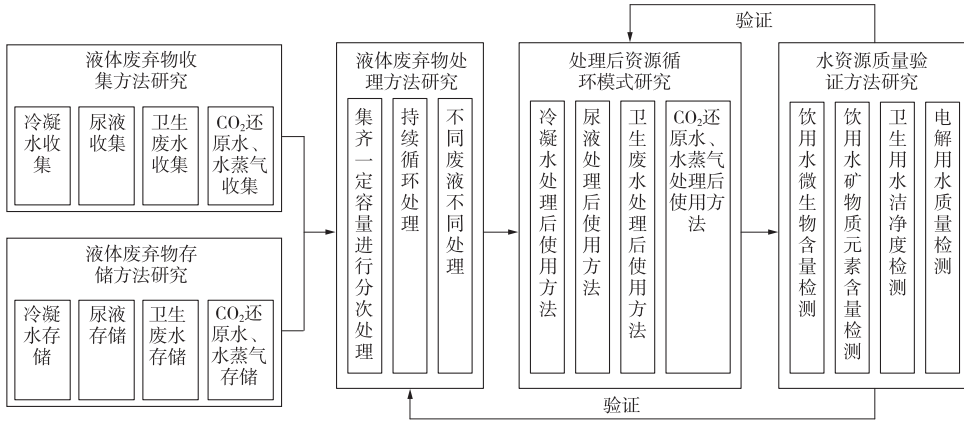


图 3 液体废弃物资源化利用技术路线图
Fig. 3 Technical scheme of liquid waste utilization

3) 固体废弃物的再生循环利用技术:将功能性报废设备组成单元的资源化处理归于固体废弃物资源化利用技术路线如图 4 所示。以食品残渣、粪便、食品药品医疗器械包装、功能性报废设备组成单元收集存储方式为起点,研究有机物干燥及分解、非金属包装压缩及在轨制造、金属包装材料提纯及再加工,功能性报废设备组成单元处理及复用方法,提出不同材料的不同循环模式,以及质量验证修正处理方法及循环模式。

上述废弃物资源化利用技术路线特点是从废弃

物的收集、存储出发,研究废弃物资源化处理方法,规划处理后的资源循环模式,并通过质量验证反馈情况调整废弃物的处理方法和循环模式,以期最大限度将废弃资源转化为可用资源^[41-42]。

3.5 关于多态样本的采集与分析方法研究

针对月表空间内的粒子及粉尘、表层样本、地质剖面样本及其数据探测需求,开展月球样本采集方式与组配方案研究。利用样本采集工具以及月球车等辅助工具,对月球实体形态的样本进行采集、存储和密封封装。针对数据形态的样本,利用潜入器等科学探测仪器进行数据样本采集,通过在线辨识技

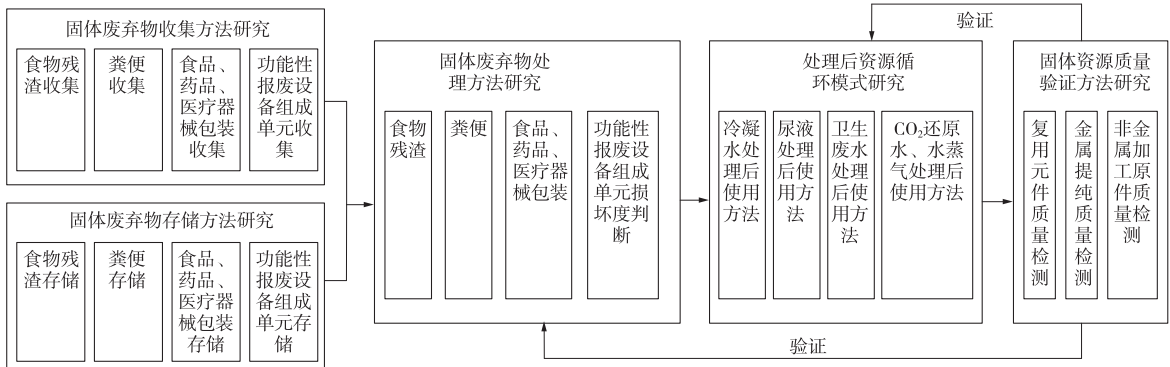


图 4 固体废弃物资源化利用技术路线图
Fig. 4 Technical scheme of solid waste utilization

术,将所采集的科学数据传回地球。利用地面分析技术,对所获得的月球样本进行科学研究。

1) 月球多态样本的采集技术

针对月表以上空间样本(粒子、大气、尘埃)、表层样本(岩石、陨石、月壤)、次表层样本(岩芯、月壤剖面)等多种状态的月球样本,开展样本对象的物理力学特性研究,采样机具与采样对象相互作用力学建模与仿真研究,采样机具方案设计、采样行为及效果模拟等基础性研究工作,突破相关关键技术,形成宇航员操控用采样机具组件的设计方法体系,为未来的载人登月采样机具组配提供基础依据^[43-44]。

2) 月球多态样本的封装存储技术

月球样本封装存储的目的,是尽量保持多态样本的原位物理形态、化学特性和原始地质学信息,可能涉及的关键技术有密封封装技术和原始地质学信息的采集技术2个方面。关于密封封装技术,可以参考借鉴美国 Apollo、前苏联的 Luna 和中国的“嫦娥5号”的软金属塑性密封、焊接密封等可行技术,同时也可以尝试探索其他方式的先进密封技术。关于样本原始地质学信息,主要是指样本原始位置周围矿物的相对位置、周围矿物类型和形态、与周围矿物的契合关系等信息,一般可通过照片视频、样品采集力等数据信息来保留^[45-48]。

3) 月球多态样本的地面分析技术

借鉴美国 Apollo 和前苏联 Luna 月球样本的处理技术,一般需要经分样、存储和分析等步骤。各操作步骤都需要有相关的环境条件和操控机具、检测仪器方面的关键技术保障。国内不同学科的专家可以有针对性地选题,并在广泛调研的基础上开展创新性研究。值得一提的是,利用返回的模拟月壤,可以开展模拟月壤制备规范的反推式研究,以逐渐完善我国地外天体采样探测试验样本制备规范的科学性和实效性^[49]。

4 载人登月模式下的采样探测任务展望

4.1 采样探测技术发展趋势

美国和前苏联已经在40年前完成月面采样返回任务,总计采集了380 kg月壤样品。我国的“嫦娥5号”,也将于2017年前后发射,利用钻取、表取两种采样形式获取约2 kg的月壤样品。进一步结合美国、欧空局和日本针对小行星、火星的采样计划,从技术资料中可以明显看出,针对月球的采样探

测具有以下发展趋势:

1) 样品形态的多样化

样品形态不仅仅涵盖狭义的月壤或月岩,还需要兼顾月表大气、尘埃、粒子,以及月壤纵深剖面样本、广域关联样本的采样。

2) 采样方式的多样化

采样方式不仅仅局限于传统的钻取采样和表层样本采样,还出现了飞行侵入式采样、机械作动式潜入采样、温爆式岩石采样、冲击破碎式采样等多种方式。

3) 采样工具的载荷化

未来的采样工具,其功能不仅仅限于单一的样品采集工具,航天发达国家已经高度关注并实施了采样机具的探测功能。在采样机具上合理布置环境感知、作业运动和负载感知、作业效能感知等传感器,可以获取采样过程的多维度探测信息。

4) 采样过程的数据化

近期在国际上出现了采样对象辨识、采样对象原位状态下物理力学参数反演的研究热潮,这说明人类对地外天体样品的采集需求逐渐地趋于理性,数据形态的样本采集也已成为科学家高度关注的探测成果,在一定意义上说,物质形态的样本和数据形态的样本相辅相成,对于深化地外天体的物质构成认识,具有更为重要的科学价值。

4.2 人机联合采样技术展望

依据作者掌握的国内外信息以及从事深空采样探测的研究经验,针对我国未来拟实施的载人登月探测任务模式,提出以下几项具有显示度的采样方式,供同行参考。

1) 器基深孔钻探取芯技术

在着陆舱上搭载一个可由宇航员操控的多杆组接式深孔钻取采样装置,实现10 m以上量级的钻进取芯。利用载人着陆舱的重力,可以提供较大的钻压力,宇航员现场参与操控,采样作业更安全,成功率更高;借鉴“嫦娥5号”的无滑差软袋取芯技术,可采集到10 m以上量级保持层序信息的月壤剖面样本,甚至可能会钻探至月球基岩,目前人类尚未实施过这种深度的连续采样,对人类充分认识月壤和月球基岩有重要意义。器基宇航员操控深孔钻进技术、大尺度连续样本取芯技术、月壤厚度地质学勘察技术,是值得关注的预先研究和关键技术攻关方向。

2) 断崖层序样本采集技术

参照地质勘探领域地质断层的科考任务,宇航

员可行走至具有大尺度断崖区域,利用人工离散点采样、电动机具连续采样以及现场数据采集等方式,采回保持原始层序信息的断崖样本和地质学数据。这种任务,在历次载人登月任务以及探月规划中都没有尝试,具有重要的科学意义和显示度。值得开展的关键技术预先研究方向有:断崖层序样本的宇航员人工原位勘察与甄选技术、断崖攀升或悬降人工操控采样技术、断崖样本的全息数据采集技术等。

3) 无钻杆连续取芯技术

针对载人登月的长周期作业模式,可利用创新应用蠕动掘进式潜入器、无滑差连续样本取芯等采样技术,实现几十米量级以上的连续取芯。这种采样方式,采样机具的尺度小、采样作业功耗需求低,取芯采样尺度不受探测器尺度制约,相比于多杆组接式钻进采样方式具有特殊优势。

4) 可穿戴集成一体化采样技术

宇航员在月面上开展勘察采样,受到宇航服的约束,能够携带的采样机具和探测设备有限、活动范围有限、采样作业能力受限。为此,开展可穿戴集成一体化采样装备的预先研究工作具有重要的实用价值,可在穿戴式目标辨识导航技术、多功能一体化采样作业手套、多功能一体化样本收集包等方面开展创新研究与地面验证。

5) 纵深 & 广域分布式关联采样技术

充分结合载人登月模式下的“宇航员+着陆舱+月球车+探测仪器+操控作业机具”系统级任务模式的特点,克服先行案例中样本关联度低、纵深度不够、广域性不够的缺点,从月面资源深度探测的科学目标需求出发,开展纵深 & 广域分布式关联采样系列关键技术的预先研究工作。可分解实施如纵深 & 广域分布式关联采样任务模式规划与评估技术、广域样本关联度评估与甄选技术、纵深式采样作业技术、广域分布式采样技术、广域全息数据采集技术等基础性研究工作。

5 结束语

本文对美国和前苏联等国家的月面资源探测与原位利用技术进行了调研分析与综述,结合当前世界各国高度关注的载人登月中长期探测模式资源需求,提出了广义月面资源分类及其精细化利用的研究思路,人机联合探测模式下的广义月面资源探测辨识、采集转运、就地转化和利用等关键技术的研究构想。此外,依据世界各国地外天体无人自主采样

技术以及载人登月采样技术的已有成果、任务规划和预先研究进展,概括出了人类针对地外天体采样探测的发展趋势,即样品形态的多样化、采样方式的多样化、采样机具的载荷化以及采样过程的数据化。以此为依据,针对我国未来的载人登月任务,提出了器基深孔钻取、断崖层序样品采集、无钻杆连续取芯、可穿戴集成一体化采样探测、广域纵深关联性采样等独创性研究方向的目标和关键技术实施途径。本文所提出的研究思路和研究构想,可为深空探测领域同行开展关键技术研究以及国家层面的载人登月任务规划,提供参考和借鉴。

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远. 月球探测的进展与我国月球探测的科学目标[J]. 贵州工业大学学报, 2003, 32(6): 1-7, 17. [Ouyang Z Y. International lunar exploration progress and scientific objectives of Chinese lunar exploration program[J]. Journal of Guizhou University of Technology, 2003, 32(6): 1-7, 17.]
- [2] 曾令斌, 邱宝贵, 肖杰, 等. 月面机器人探测路线图及典型方案研究[J]. 载人航天, 2015, 21(3): 263-269. [Zeng L B, Qiu B G, Xiao J, et al. Research on the roadmap and typical scenarios of lunar surface robot exploration[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(3): 263-269.]
- [3] Gerald B S, William E L. 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.
- [4] 王晓海. 深空探测技术最新研究进展[J]. 测试技术学报, 2007, 21: 144-148. [Wang X H. The latest research progress of deep space explore technology[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2007, 21: 144-148.]
- [5] 龙乐豪. 关于中国载人登月工程若干问题的思考[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(6): 1-5. [Long L H. On issues of China manned lunar exploration[J]. Missile and Space Vehicle, 2010(6): 1-5.]
- [6] 张志贤, 果琳丽, 戚发劼. 月面人机联合探测概念研究[J]. 载人航天, 2014, 20(5): 432-442. [Zhang Z X, Guo L L, Qi F R. Conceptual study on crew-robot coordinated exploration on lunar surface[J]. Manned Spaceflight, 2014, 20(5): 432-442.]
- [7] 叶培建, 邓湘金, 彭兢. 国外深空探测态势特点与启示(上)[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(5): 401-416. [Ye P J, Deng X J, Peng J. Features of deep space exploration in other countries and the enlightenment for the development in China (part 1)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(5): 401-416.]
- [8] 叶培建, 邓湘金, 彭兢. 国外深空探测态势特点与启示(下)[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(6): 501-512. [Ye P J, Deng X J, Peng J. Features of deep space exploration in other

- countries and the enlightenment for the development in China (part 2)[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(6):501-511.]
- [9] Gerald B S, William E L, Kurt R S, et al. NASA in-situ resource utilization (ISRU) project-development & implementation[C]//AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition. California: AIAA, 2008.
- [10] Kurt R S, Gerald B S. In-situ resource utilization for lunar and mars exploration [C]//The 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Nevada: AIAA, 2007.
- [11] Gerald B S, William E L. Integration of in-situ resource utilization into lunar/Mars exploration through field analogs [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47:20-29.
- [12] Subhayu S, Chandra S R, Ramana G R. Processing of lunar soil simulant for space exploration applications[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 413-414:592-597.
- [13] 叶培建,彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[J]. *中国工程科学*, 2006, 8(10):13-18. [Ye P J, Peng J. Deep space exploration and its prospect in China [J]. *Engineering Science*, 2006, 8(10):13-18.]
- [14] 欧阳自远,邹永廖,李春来,等. 月球某些资源的开发利用前景[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2002, 27(5):498-503. [Ouyang Z Y, Zou Y L, Li C L, et al. Prospect of exploration and utilization of some lunar resources[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(5):498-503.]
- [15] 王世杰,李雄耀,唐红,等. 月面环境与月壤特性研究的主要问题探讨[J]. *地球化学*, 2010, 39(1):73-81. [Wang S J, Li X Y, Tang H, et al. Lunar surface environment and properties of lunar soil: a review [J]. *Geochimica*, 2010, 39(1):73-81.]
- [16] 赵艳芳. 月球潜在资源利用对中国能源安全的战略意义[J]. *资源开发与市场*, 2010, 26(12):1130-1133. [Zhao Y F. Developing of moon potential resources: strategic significances to energy security of China[J]. *Resource Development & Market*, 2010, 26(12):1130-1133.]
- [17] 李大耀. 论月球资源和航天月球探测[J]. *航天返回与遥感*, 2004, 25(1):60-64. [Li D Y. On moon resources and lunar exploration by spacecraft[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2004, 25(1):60-64.]
- [18] 鲁暘筱懿,平劲松,Shevchenko V. 俄罗斯“月球-全球”和“月球-资源”探月任务[J]. *航天器工程*, 2013, 22(4):103-108. [Lu Y X Y, Ping J S, Shevchenko V. Russian lunar exploration missions: LUNA-Glob & LUNA-resource[J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(4):103-108.]
- [19] 李丽华,唐辉明,刘数华,等. 月球混凝土研究进展[J]. *混凝土*, 2011(9):12-14. [Li L H, Tang H M, Liu S H, et al. Review on lunar concrete[J]. *Concrete*, 2011(9):12-14.]
- [20] 张明皓,陈超,兰瑞平,等. 月球表面多种金属元素的分布特征初探[J]. *地学前缘*, 2007, 14(5):277-284. [Zhang M H, Chen C, Lan R P, et al. A preliminary analysis: the distribution of metallic elements on the Lunar surface[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5):277-284.]
- [21] 吴冲龙,毛小平,田宜平,等. 月球资源探测信息的管理与可视化探讨[J]. *地质科技情报*, 2004, 23(4):15-18. [Wu C L, Mao X P, Tian Y P, et al. Information management and visualization of the lunar resources exploration[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(4):15-18.]
- [22] 李雄耀,王世杰,陈丰,等. 月壤厚度的研究方法与发展[J]. *矿物学报*, 2007, 27(1):64-68. [Li X Y, Wang S J, Chen F, et al. Methods and advances in research on lunar soil thickness[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 27(1):64-68.]
- [23] 欧阳自远,邹永廖,李春来,等. 月球探测与人类社会的可持续发展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(4):328-333. [Ouyang Z Y, Zou Y L, Li C L, et al. Lunar exploration and containable development for human society[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(4):328-333.]
- [24] 张全生,郭东莉,夏骥. 为月球资源就地应用的LiOH电解制氧技术分析和实验观察[J]. *航天医学与医学工程*, 2013, 26(3):211-214. [Zhang Q S, Guo D L, Xia J. Analysis and experimental study on LiOH electrolysis process used for in-situ-resources usage of lunar mineral resources[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2013, 26(3):211-214.]
- [25] 李海阳,张波,黄海兵. 航天员与类人机器人月面联合探测概念初步研究[J]. *载人航天*, 2014, 20(4):301-306. [Li H Y, Zhang B, Huang H B. Preliminary concept study on integrated lunar exploration of astronaut and humanoid robot [J]. *Manned Spaceflight*, 2014, 20(4):301-306.]
- [26] 李芄,王世杰,李雄耀,等. 利用月球含氧矿物制取氧气的方法学比较[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2009, 28(2):183-188. [Li P, Wang S J, Li X Y, et al. Review of oxygen production using oxygenous minerals on the moon[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2009, 28(2):183-188.]
- [27] 唐红,王世杰,李雄耀,等. 月壤钛铁矿微波烧结制备月球基地结构材料的初步设想[J]. *矿物学报*, 2009, 29(2):229-234. [Tang H, Wang S J, Li X Y, et al. A preliminary design for producing construction materials for the lunar base: micro wave sintering ilmenite of lunar soil[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29(2):229-234.]
- [28] 李丽华,唐辉明,刘数华,等. 月球混凝土研究进展[J]. *混凝土*, 2011(9):12-14. [Li L H, Tang H M, Liu S H, et al. Review on lunar concrete[J]. *Concrete*, 2011(9):12-14.]
- [29] 宋靖华,周青. 利用月壤进行月球基地建设的3D打印技术[J]. *华中建筑*, 2015(3):33-42. [Song J H, Zhou Q. 3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil [J]. *Huazhong Architecture*, 2015(3):33-42.]
- [30] 叶青,杨慧,马成畅. 月球用水泥及混凝土的探索和设计[J]. *新型建筑材料*, 2010, 5:16-19. [Ye Q, Yang H, Ma C C. Exploration and design of cement and concrete for the lunar

- environment[J]. *New Building Materials*, 2010,5:16-19.]
- [31] 朱恩涌,果琳丽,陈冲. 有人月球基地构建方案设想[J]. *航天返回与遥感*, 2013,34(5):1-6. [Zhu E Y, Guo L L, Chen C. Research on manned lunar base construction scheme[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013,34(5):1-6.]
- [32] 邓连印,郭继峰,崔乃刚. 月球基地工程研究进展及展望[J]. *导弹与航天运载技术*, 2009(2):25-30. [Deng L Y, Guo J F, Cui N G. Progress and prospects of engineering for lunar bases[J]. *Missile and Space Vehicle*, 2009(2):25-30.]
- [33] 果琳丽,李志杰,齐玢,等. 一种综合式载人月球基地总体方案及建造规划设想[J]. *航天返回与遥感*, 2014,35(6):1-10. [Guo L L, Li Z J, Qi F, et al. An overall tentative plan and construction blueprint of manned lunar base[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014,35(6):1-10.]
- [34] Ruess F, Schaenzlin J, Benaroya H. Structural design of a lunar habitat[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2006, 19(3):133-157.
- [35] 周抗寒,傅岚,韩永强,等. 再生式环控生保技术研究及进展[J]. *航天医学与医学工程*, 2003,16:566-572. [Zhou K H, Fu L, Han Y Q, et al. Research and development of technique of regenerative environmental control and life support system[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2003,16:566-572.]
- [36] 王传增,余青霓,周抗寒,等. BDD 电催化氧化处理模拟空间站冷凝废水的实验研究[J]. *航天医学与医学工程*, 2011,24(4):296-301. [Wang C Z, Yu Q H, Zhou K H, et al. Electro-catalytic oxidation of humidity condensate wastewater at boron-doped diamond in simulated space station[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2011,24(4):296-301.]
- [37] 杨松林,丁平,赵成坚,等. 中国空间站水回收系统关键技术分析[J]. *航天医学与医学工程*, 2013,26(3):221-226. [Yang S L, Ding P, Zhao C J, et al. Analysis of key techniques for water reclamation system in Chinese space station[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2013, 26(3):221-226.]
- [38] 何新星,吴大蔚,李莹辉. 空间站再生水污染防治策略[J]. *载人航天*, 2012,18(1):15-21. [He X X, Wu D W, Li Y H. Study on habitability design of long duration manned spacecraft[J]. *Manned Spaceflight*, 2012,18(1):15-21.]
- [39] 周抗寒,尚传勋,刘成良,等. 空间站尿及废水再生装置与实验研究[J]. *航天医学与医学工程*, 1997,10(5):323-327. [Zhou K H, Shang C X, Liu C L, et al. An experimental study on regeneration device for urine and waste water in space station[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 1997,10(5):323-327.]
- [40] 于涛,李永峰,马军,等. 空间站尿液废水处理回用技术及其应用进展[J]. *上海工程技术大学学报*, 2009,23(2):124-130. [Yu T, Li Y F, Ma J, et al. Study on urine waste treatment and water reclamation techniques in space station[J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2009,23(2):124-130.]
- [41] 王晶,袁卫星,袁修干. 舱外航天服便携式生命保障系统研究进展[J]. *航天医学与医学工程*, 2009,22(1):67-71. [Wang J, Yuan W X, Yuan X G. Research progress of portable life support system for extravehicular activity spacesuit [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2009, 22(1): 67-71.]
- [42] 梁志伟,高峰,吴志强,等. “飞天”舱外航天服便携式生保系统研制[J]. *载人航天*, 2010(1):37-43. [Liang Z G, Gao F, Wu Z Q, et al. Progress on design and application of the manned space standard system [J]. *Manned Spaceflight*, 2010(1):37-43.]
- [43] 郑燕红,邓湘金,赵志晖,等. 地外天体采样任务特点及关键技术发展建议[J]. *探矿工程*, 2014,41(9):71-74. [Deng Y H, Deng X J, Zhao Z H, et al. The character and key technology suggestion of extraterrestrial sampling mission [J]. *Exploration Engineering*, 2014,41(9):71-74.]
- [44] 鄢泰宁,冉恒谦,段新胜. 宇宙探索与钻探技术[J]. *探矿工程*, 2010,37(1):3-7. [Yan T N, Ran H Q, Duan X S. Universe exploration and drilling technique[J]. *Exploration Engineering*, 2010, 37(1):3-7.]
- [45] 杜永刚,杨震春,付朝晖,等. 一种新型深空探测样品封装技术[J]. *航天器工程*, 2014,23(5):47-53. [Du Y G, Yang Z C, Fu Z H, et al. Technology of a sample vacuum encapsulation for deep space exploration[J]. *Spacecraft Engineering*, 2014,23(5):47-53.]
- [46] 杜永刚,杨震春,付朝晖,等. 月球样品自动封装技术的可行性探讨[J]. *航天器环境工程*, 2010,27(5):566-569. [Du Y G, Yang Z C, Fu Z H, et al. Automatic packaging technology for lunar sample [J]. *Spacecraft Engineering*, 2010,27(5):566-569.]
- [47] 沈毅,邓湘金,郑燕红,等. 月球样品封装装置外驱式开合盖机构的设计研究[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会论文集(下册),杭州:[s. n.], 2012: 943-949.
- [48] 张斌,俞敏,杨华勇. 深空样品密封技术综述[J]. *航天器环境工程*, 2013,30(1):26-33. [Zhang B, Yu M, Yang H Y. A review of encapsulation techniques for planetary samples[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013,30(1):26-33.]
- [49] 孙灵芝,凌宗成,刘建忠. 美国阿波罗月球样品的处理与保存[J]. *地学前缘*, 2012,19(6):128-136. [Sun L Z, Ling Z C, Liu J Z. An introduction to the curation of Apollo lunar samples[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 19(6): 128-136.]

作者简介:

姜生元(1969—),男,教授、博士生导师,主要研究方向:深空采样探测技术、宇航空间机构及控制技术。

通信地址:哈尔滨工业大学科学园 2F 栋 403 室(3037 信箱)(150080)

电话:13796621169

E-mail:jiangshy_2002@163.com

Technical Schemes of Investigation and In-Situ Utilization for Lunar Surface Generalized Resources

JIANG Shengyuan¹, SHEN Yi¹, WU Xiang¹, DENG Zongquan¹,
LAI Xiaoming², ZHANG Jiaqiang², LIANG Lu³, ZHOU Qin⁴

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin 150001, China; 2. Beijing Spacecraft Manufacture Factory, Beijing 100190, China; 3. Beijing Space Technology Manufacture and Test Center, Beijing 100094, China;
4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: For the goal of refined utilization of lunar surface resources with human assistance, this paper outlined the present situation of the development of lunar surface exploration and in-situ resource utilization technology. For actual requirements of China's future manned lunar exploration mission and advance research, it presents a generalized classification for refined utilization of the lunar surface resources. In this classification, the human-robot-environment system was treated as research object, and the lunar surface environment resources can be divided into three categories: resources be utilized on-orbit, sample resources need to bring back to the earth and waste produced by human and machines. Follow the research concept of balancing the inheritance and innovation, it focuses on technical schemes of investigation and in-situ utilization for lunar surface generalized resources, including the mineral resources investigation, resources utilization on the lunar surface environment condition, collections of polymorphic samples and the recycling of the wastes produced by human and machines.

Key words: human-robot combination; lunar surface generalized resources; investigation; in-situ utilization; technical means

[责任编辑:杨晓燕]