

本刊专稿

《地外原位资源利用差距评估报告》解析

周诚^{1,2},程杉杉^{1,2},高玉月^{1,2},周燕^{1,2}

摘要 《地外原位资源利用差距评估报告》是国际空间探索协调组(ISECG)定期更新的关于全球太空探索任务的汇总文件,旨在推动全球太空探索与原位资源利用(ISRU)的可持续性。首先,基于ISRU的总体目标与关键结构分解,总结了目前针对ISRU技术、试验测试设备以及星壤模拟物3方面开展的评估工作,并进行归类比较。其次,通过重点解析此报告的ISRU差距评估内容,依次对各参与国当前在原位资源勘查、原位资源采集和预处理、生产消耗品的资源加工、生产建造和制造原料的资源加工、月面原位建造、地外空间制造6大关键领域的技术研究重心与优势展开具体的分析。最后,提出了基于解析此报告对ISRU技术的多学科融合研究、高保真极端环境模拟平台建设以及结合深空探测需求推进高水平ISRU任务实施的展望。

关键词 原位资源利用;测试设备;星壤模拟物;差距评估;地外建造

近年来,随着人们对地外天体认识的逐步加深以及发展太空经济的需要,开发地外星体上的原位资源在太空探索任务中占据着越来越重要的地位^[1]。通常,月球与火星上的原位资源包括自然资源,例如水、太阳风植入挥发物(氢、氦、碳、氮等)、矿物岩石和风化层中的金属、大气组分,以及人为资源,例如航天员的垃圾和废物、已完成主要用途的废弃设施等。当前提倡的整合原位资源利用(ISRU)能力与系统有助于未来实现更经济与可持续的地外探索架构计划。

将ISRU纳入地外探索任务最关键的影响在于节省发射成本,同时延长任务寿命。此外,通过利用原位资源,还可以降低对执行地外任务的关键要求。具体而言,包括航天器推进性能与其复杂程度,以及

生命支持系统的运行效率等^[2-3]。最终,人类计划借助ISRU开发更广泛的技术,进一步降低地外任务风险以实现空间商业化^[4]。目前各国主要从自然资源角度着眼,即月球上存在的大量以月壤为基础的、以水和挥发性物质为基础的2类资源,而火星上的资源通常指富含二氧化碳的火星大气资源以及在火星表面广泛存在的水冰资源^[5-6]。

在探究提高全球太空探索的可持续性背景下,国际空间探索协调组(ISECG)于2006年成立。作为一个由27个航空机构所组成的非强制性论坛,ISECG通过协商一致的方式增强各国合作以推进全球太空探索路线图。自2011年首次发布《全球探索路线图》(GER)以来,截至目前ISECG已发布了此报告的4个迭代版本。为如期执行GER中预期的地外任务,ISECG为ISRU主题成立了一个差距评估组,其中包括意大利航天局(ASI)、法国国家太空研究中心(CNES)、加拿大航天局(CSA)、澳大利亚联邦科学与

1. 华中科技大学国家数字建造技术创新中心,武汉 430074

2. 华中科技大学土木与水利工程学院,武汉 430074

收稿日期:2023-12-18;修回日期:2024-02-27

基金项目:中国工程院战略研究与咨询项目(2023-JB-09-10,2023-XZ-90);国家重点研发计划项目(2021YFF0500300,2023YFB3711300)

作者简介:周诚,教授,研究方向为地外建造,电子信箱:charleschou@163.com

引用格式:周诚,程杉杉,高玉月,等.《地外原位资源利用差距评估报告》解析[J].科技导报,2025,43(2):22-33;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.01890

工业研究组织(CSIRO)、德国宇航中心(DLR)、欧洲太空局(ESA)、日本宇航机构(JAXA)、韩国航空宇宙研究院(KARI/KICT/KIGAM)、卢森堡航空局(LSA)、美国国家航空航天局(NASA)、阿联酋空间局(UAE-SA)以及英国航天局(UKSA)。各成员机构旨在通过共同努力明确当前已确定的ISRU技术需求,汇总归纳未来必须解决的关键技术差距。同时,定期为ISECG提供《地外原位资源利用差距评估报告》(简称《差距评估报告》)^[7]。

本文概述了ISRU战略,重点介绍了其总体目标以及针对月球和火星探索的阶段性目标,并对其涵盖的3方面关键应用功能进行了解构。系统地梳理了《差距评估报告》中展示的各参与国当前针对ISRU技术、试验测试设备、星壤模拟物等已开展的研究工作。通过比较各成员国在6大ISRU领域及其分解结构下的技术研究水平,分析总结了各国目前在ISRU研究中的优势与侧重点。最终,提出了基于解析《差距评估报告》获得的展望,以期为未来的太空探索任务与地外建设工程提供具有借鉴价值的建议。

1 原位资源利用战略

空间探索,战略先行,多个航天国家已陆续发布空间科学中长期规划以及相关战略与政策^[8]。其中,原位资源利用战略的制定与实施是人类进行地外探索的一个重大突破,也是人类逐步开展深远太空探索的坚实基础。当前原位资源利用已被NASA列为载人深空探索优先发展的首项技术,也成为中国在载人深空探测领域中优先发展的选择之一。

1.1 原位资源利用总目标与阶段性目标

原位资源利用的总体目标为最大程度地减少往返月球与火星的费用,建立长期载人空间基地的自给自足以扩大地外科学与探索工作,实现空间活动的商业化发展^[7]。为最终在地外任务中成功地应用ISRU,在结合探月与探火的发展规划背景下,《差距评估报告》给出并分析了各阶段的ISRU目标。

ISRU差距研究小组基于2020年发布的关于月球表面探测方案的更新文件,载人月球探索架构划分为3阶段,依次是登陆月球、基地建设与拓展,以及

位于月表或月球轨道的设施与航天器的持续性运行^[9]。第一阶段于2024年实行,ISRU目标为开展月球环境下更广泛更深入的资源勘查、设备运作分析等前期工作。同时,此阶段也将展开针对相关资源利用的技术和小型的月表操作示范任务。第二阶段为建立可持续的月球基地,通过进行基于ISRU的小规模生产任务,以验证基地是否具备可持续运营所必需的各要素的综合能力。第三阶段的ISRU目标着眼于月表的航天员活动与着陆器的重复使用,以及进一步地为火星任务提供推进剂与消耗品等。

与月球类似,报告中基于火星环境下ISRU系统的逐步建立确定了火星探测的4个规划发展阶段。在准备阶段中,ISRU目标旨在对火星表面地形与资源展开全面的勘测与信息收集,并依次部署相关的测试分析技术。第二阶段又名“踏上火星”阶段,对应多个短期探索与返回任务,将进一步监测火星环境,并开展小规模资源提取与处理示范活动^[7]。之后的第三、四阶段与月球探索发展规划中的ISRU目标基本吻合。第三阶段旨在建立一个初步的居住基础设施,为后续的可持续性发展进行积累,而第四阶段的目标则是建立支持乘员活动的表面设备以及经过验证后的基础设施,为最终实现持续性存在提供保障。

1.2 原位资源利用关键功能分解

ISRU系统的开发与实施涉及广泛的技术、应用等,图1展示了ISRU的3大主要关键领域,分别为原位推进剂与消耗品生产、原位建造,以及基于ISRU衍生原料的空间制造^[7]。为准确地研发ISRU的相关能力以实现可持续的探索任务与地外基础设施的发展,各领域均需要进一步细分其下涵盖的子功能区。

针对原位推进剂与消耗品生产领域,根据产品交付流程可划分为原位资源勘查、资源采集与预处理、生产消耗品、生产建造和制造原料的资源加工4个子功能区。针对原位建造领域,主要分为场地评估规划与清理平整、地表压实与稳固,以及各个具体的建造过程(如增材制造)等。针对基于ISRU衍生原料的空间制造系统,其分类虽与原位建造系统类似,但关注的重点在于单一零件的生产、复杂硬件的组装、装置设备修理和维护等方面。

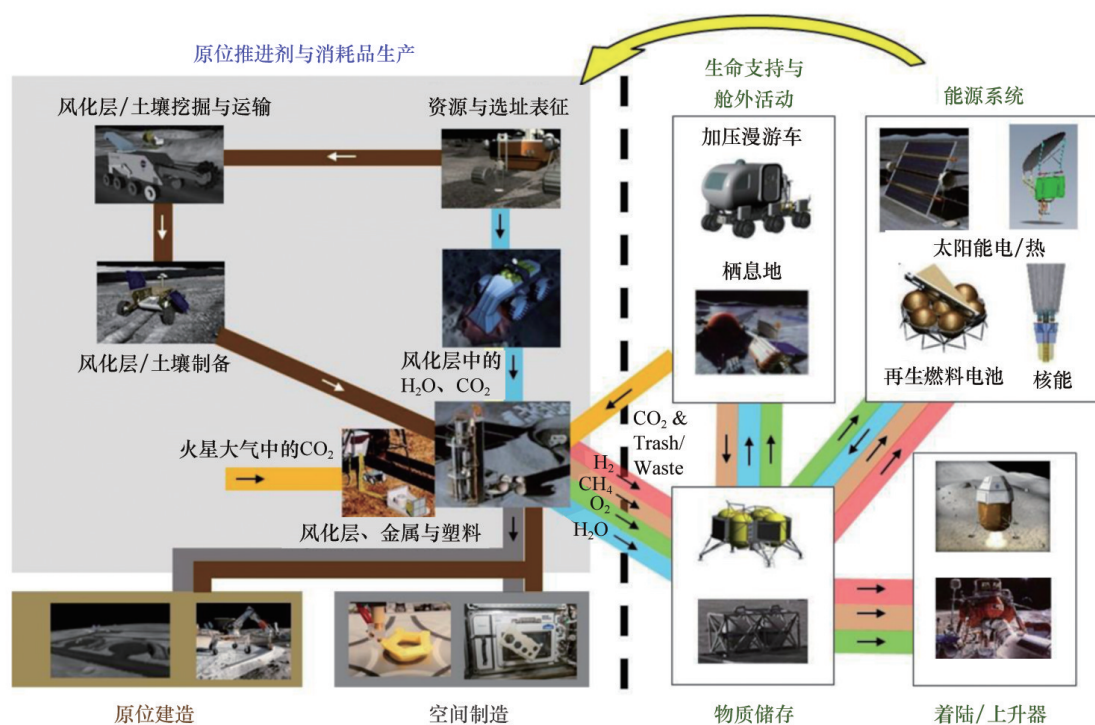


图1 原位资源利用(ISRU)3大领域与星体表面的联系

2 针对原位资源利用的评估工作

为评估当前各国 ISRU 的发展状况以确定未来将在哪些方面深入开展研究工作,《差距评估报告》对过去、近期与未来计划开发的 ISRU 技术、模拟试验测试设备以及星壤模拟物进行了较全面的评估。

2.1 ISRU 技术评估

作为一项长期的持续性工作,技术评估的目的在于汇总各国家机构重点关注的技术领域,同时比较不同国家机构的技术优势与潜在特长,为未来技术系统的开发范围提供指导方向^[7]。报告中的技术评估工作沿用了 1.2 节中阐述的分解结构,具体条目将在 3.2 节中进行详细的展示与分析。

目前,多数机构的 ISRU 技术开发重点在于针对原位资源的采矿与初加工,以此来获得任务所需产品。各机构已开展了不同程度的技术研究工作,包括 ASI 开发的 ExoMars 钻探系统,CSA 研发的漫游车,ESA 设计的含钻头、分析仪器与加热系统的 PROSPECT 载荷,直接从月壤中提取氧气的 ISRU-DM 载荷以及 NASA 空间技术任务局总负责的各项 ISRU 处理技术项目。其中,NASA 与 ESA 在技术成

熟度(TRL)与技术范围方面表现出明显优势。不仅具备多个成熟度高的装置,并且其已经研发的 ISRU 技术涉及的子功能区众多。针对不同 ISRU 领域的详细技术开发比较与评估将在 3.2 节中给出。

2.2 试验测试设备评估

ISRU 相关硬件设施与技术系统在数月乃至数年的运行中不仅会与月壤进行持续的相互作用与影响,月球上的复杂环境因素(重力、温度、辐射、光照等)也会影响月球居住建筑设备的性能、可靠性和工作寿命^[10]。因此,开发具备高保真度的模拟月球极端环境,同时也可以容许硬件设施与月壤相互作用的试验测试设备至关重要。针对各机构目前已有的,或计划开发的试验设备,《差距评估报告》对其具备的环境模拟能力、可容纳的硬件尺寸展开了详细的评估。

评估结果如表 1 所示,按照报告中划分的 4 类规模(组件级、子系统级、系统级与大型设备级)进行了汇总整理。除 NASA 在设备数量上占据领先地位外,其余机构的测试设备研发水平与进度较为一致。当前大多数研究机构的测试设备可模拟 77~400 K 的月面温度环境,且真空度可达到 10^{-6} kPa。总体而言,

表1 ISRU试验测试设备评估

设备级别	机构	温度环境	真空度/ kPa	辐射	太阳能	物质环境	最大设备尺寸/m
组件级 (直径 <1.2 m)	NASA(10)	77~437 K	1.3×10 ⁻⁷	<2 keV	√	月尘、月壤、岩石	1.06(L)×1.37(D)
	ESA(3)	3~373 K	10 ⁻¹¹	—	紫外线 120~500 nm	月壤	0.79(L)×0.42(D)
	ASI(1)	低温 100 K	10 ⁻³	—	—	月尘、月壤	0.2×0.2
	DLR(1)	80~723 K	<10 ⁻⁸	1~100 keV	5000 W/m ²	月壤	直径0.4, 辐照目标 直径0.08
	KICT/KIGAM(1)	室温~2073 K	1.3×10 ⁻⁷	<500 keV	√	—	—
	UAESA(2)	77~473 K	1.3×10 ⁻⁶	—	—	—	0.8(L)×0.6(D)
子系统级 (直径= 1.2~ 4.25 m)	NASA(5)	77~473 K	1.3×10 ⁻⁶	—	√	月尘、月壤	1.35(L)×3.6(D)
	ESA(3)	80~413 K	5×10 ⁻⁷	—	紫外线	月尘、月壤、岩石	3.9(L)×1(D)
	ASI(2)	80~413 K	5×10 ⁻⁷	—	—	月壤、岩石	3.9(L)×1.0(D)
	DLR(2)	—	—	850 W/m ²	—	—	直径3
	KICT/KIGAM(1)	77~423 K	1.3×10 ⁻⁹	—	—	月尘、月壤、岩石	—
	UAESA(1)	213~393 K	1.3×10 ⁻⁶	—	—	—	2(L)×2(D)
系统级 (直径= 4.25~ 7.62 m)	CSA(1)	40~393 K	1.3×10 ⁻⁵	√	>800 W/m ²	月尘、月壤	1×1×0.9
	NASA(3)	77~421 K	1.3×10 ⁻⁶	—	—	月尘、月壤、岩石	3.66(L)×4.57(D)
	ESA(1)	待定	待定	待定	待定	月尘、月壤	5(D)
大型 设备级 (直径 >7.62 m)	KICT/KIGAM(1)	77~423 K	1.3×10 ⁻⁹	—	—	月尘、月壤、岩石	—
	NASA(9)	20 K~室温	1.3×10 ⁻⁶	—	—	月壤、岩石	19.81(L)×36.58(D)
	ESA(2)	153~373 K	2×10 ⁻³	—	√	月尘、月壤	30(L)×15(D)×10(H)
	ASI(3)	—	—	—	—	月尘、岩石	19×17
	KICT/KIGAM(1)	263~313 K	—	—	—	月尘、月壤	—
JAXA(1)	—	—	—	—	√	岩石	—

注:括号中的数字表示对应机构目前已有的可运行的设备数目;“√”表示具备辐射/太阳能环境模拟功能,但具体参数未知;“—”表示设备能力不详。L、D、H分别表示设备的长度、深度、高度。

各个国家/机构目前都已开发多种组件与子系统级别的测试设施,满足模拟月尘与岩屑以及月球高真空与极端温差的条件。然而,系统级与大型设备级别的设施数量十分有限,且多数试验测试设备对于地外辐射以及光照条件的模拟能力仍较为欠缺。

2.3 星壤模拟物评估

随着对月壤与火壤认识的逐步深入,为顺利实

施 ISRU 任务,制备特征更加多样化且高度贴近真实星壤的模拟物的需求也在不断增大。因此,《差距评估报告》对各机构现有的星壤模拟物的库存状况与未来计划开发的潜在可能性进行了全面的评估。

评估结果如表2、表3所示,针对每个国家/机构的各类星壤模拟物的模拟类型、特征、当前的4类状态进行了汇总整理。鉴于多种模拟物现阶段已处于

表2 模拟月壤评估

月壤模拟物名称	机构	模拟类型/特征	状态
OPRH2N	NASA	高地	可用
OPRH3N		高地	可用
OPRL2N		月海	可用
OPRL2NT		高钛月海	可用
LHS-1		高地(基于阿波罗 16号样品)	可用
LMS-1		中钛月海	可用

表2 模拟月壤评估(续)

月壤模拟物名称	机构	模拟类型/特征	状态
NU-LHT系列	NASA	高地(基于阿波罗16号样品)	有库存,难再生产
JSC-1		月海	停用
JSC-1A系列		月海	有库存,可再生产
BP-1		月海	可用
MLS-1		高钛月海(基于阿波罗11号样品)	停用
GreenSpar		高地斜长岩	可用
GRC-1, GRC-3		用于地面力学测试	有库存,可再生产
DNA-1	ESA	低钛月海	有库存,难再生产
EAC-1a		低钛月海	可用
TUBS-T		高地	可用
TUBS-H		低钛月海	可用
UoM-Black		机械性能测试	可用
UoM-White		机械性能测试	可用
AGK-2010		岩土性质	可用
FJS-1	JAXA	月海	可用
大岛基地模拟物		月海	停用
小山基地模拟物		高地	停用
FJS-2		基于阿波罗14号任务	停用
FJS-3		高钛月海	停用
OB-1	CSA/NRCan	高地	停用
Chenobi		高地	停用
OB-1A		高地	待定
UW-1M		月海	待定
UW-1H		高地	待定
KIS-1	KICT/KIGAM	机械性能	可用
KIGAM-L1		高地	可用

表3 模拟火壤评估

月壤模拟物名称	机构	模拟类型/特征	状态
MGS-1系列	NASA	基于盖尔陨石坑Rocknest目标矿物学的全球玄武岩土壤	可用
JSC Mars-1,1A		光亮火壤	停用
JSC-RN		Rocknest风积沙阴影,用于取水	可用
MMS		风化的玄武岩火壤	停用
ES-1,2,3,4	ESA	不同粗细砂石颗粒混合物	有库存,难再生产
OUCM-1, CM-2		现代模拟火壤	可用
OUEB-1, EB-2		早期玄武岩	可用
OUHR-1, HR-2		富含赤铁矿	可用
OUSR-1, SR-2		富含硫	可用

不可用或难再生产状态,未来将需要更多种类和更高保真度的模拟星壤。尤其是针对位于如月球极地

和高地的月壤模拟物研发,以此来支持后续ISRU能力的开发。此外,与模拟月壤相比,目前模拟火壤的

研发仅有 NASA 与 ESA 2 个机构开展了较为系统工作,且当前的研究仍处于模拟某单一性质(如矿物组分)的初步探索阶段。

3 原位资源利用差距评估解析

3.1 差距评估目标与分解结构

ISRU 差距评估工作旨在明确已确定的技术需求以及未来必须解决的技术差距,以便按计划实施 ISECG 发布的全球探索路线图中的任务。ISECG 从与 ISRU 目标相关的各项技术、试验测试设备等的系统性一一映射出发,评估了各关键 ISRU 领域的问题与需求。同时参照各机构目前的实际能力状况,在结

合地面已有的相关技术水平后,确定了各参与国的 ISRU 差距^[7]。基于现有的载人月球计划,报告的重点分析对象为月球任务中 ISRU,仅对火星的潜在 ISRU 方案进行了简单评估。

差距评估组按照 ISRU 价值链中对应的原位资源勘查、挖掘、提取/提炼以及产品供应与应用的阶段分别进行了比较与评估。图 2 展示了报告中划分的 ISRU 差距评估 6 大分解领域,与 1.2 节中的关键功能相吻合,依次为原位资源勘查评估、原位资源采集和预处理评估、生产消耗品的资源加工评估、生产建造和制造原料的资源加工评估、月面原位建造评估以及地外空间制造评估。

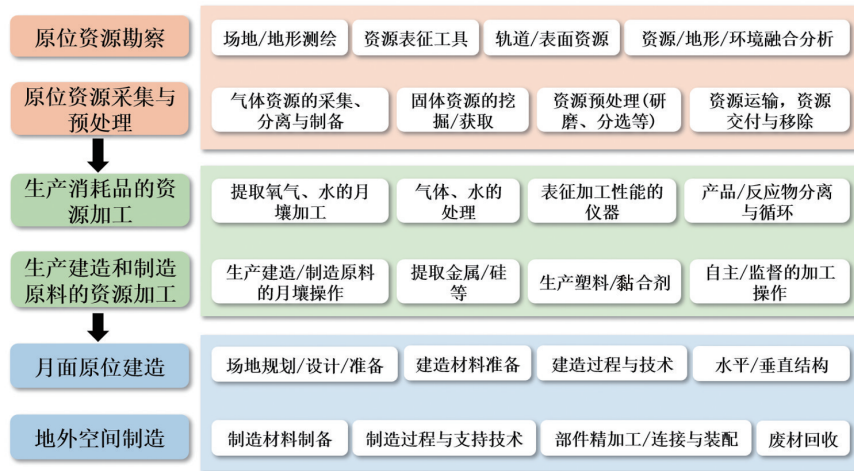


图 2 原位资源利用差距评估分解结构

3.2 6大领域评估

3.2.1 原位资源勘查评估

为实现未来人类在月球与火星上的可持续的表面活动,需全面掌握各原位资源的分布、类型、储量等特征,从而为选址与开展后续的资源提取加工活动提供信息。因此,原位资源勘查在人类探索月球与火星的早期阶段具有重要意义,是进行差距评估的首要考量领域,《差距评估报告》给出的差距评估结果如表 4^[7]所示。

目前,NASA、ESA、CSA 等各航天机构对原位资源勘查均开展了较为全面的研究。其中,NASA 在开发资源表征工具方面的研究较为成熟,其研发的针

对水冰/挥发物的特征分析仪器已达到 TRL6(technology readiness level,技术成熟度等级)。另外,在此领域同样具有优势的 ESA 对于表面资源评估的研究已扩展至火星层面。相较之下,JAXA 与 KARI 在针对轨道站点与表面资源的评估领域进行的研究十分不足。然而,KARI 在场地/地形测绘方面开展的技术研究是其区别于其他机构的一大特点与优势。

3.2.2 原位资源采集和预处理评估

对于经勘察与定性分析后的原位资源,通常对其采取诸如提取、分选等一系列预处理操作,旨在为后续的资源加工做准备。针对原位资源,如月壤的采集和预处理过程是使得 ISRU 最终能产出产品的

表4 原位资源勘查差距评估

工作分解结构		NASA	ESA	JAXA	CSA	DLR	KARI	CNES
场地/地形测绘		—	—	\	—	—	√	—
资源表征工具	物理/岩土性质表征工具	√	√	√	√	√	√	√
	矿物/化学表征工具	√	√	\	√	√	√	√
	地下冰表征工具	√	√	√	√	√	—	√
	水/挥发物表征工具	√	√	√	√	√	—	√
轨道站点资源	表面成像/矿物分析	√	√	\	√	—	√	√
	永久阴影区(PSR)成像	√	√	\	√	√	—	—
	高分辨率/中子光谱	√	—	\	√	—	√	—
表面资源	加工与选址综合工具	√	√	√	—	√	—	√
	用于资源评估的移动工具	√	—	√	√	√	—	—
	资源评估的自主性工具	√	√	√	√	√	—	√
	通信与导航	√	√	√	√	√	—	—
地形/环境/资源融合分析		√	—	√	√	—	—	—

注：“√”表示已开展相关技术工作，“—”表示无相关技术工作，“\”表示不适用。

必要途径,也是 ISRU 评估流程中的关键一环^[11]。通常,原位资源采集和预处理的相关技术水平直接关系到下阶段生产原料的可获得性与品质,此领域的差距评估结果如表5所示。

当延伸到资源采集与预处理这一技术领域后,大部分机构目前已开发的能力范围开始出现大量空白。由表5可知,NASA与ESA对资源采集与预处理

下的各分解结构的研究均有涉猎,但同时两者在有关火星气体资源的采集与运输两类技术上也各有侧重。另一方面,其他参与机构仅针对个别技术层面开展了相应的研发工作。例如,CSA当前仅专注于开展针对固体资源的获取、交付与移除研究,DLR已实施相关气体资源的运输技术开发,而KARI的研究重心则为资源的研磨与分离等预处理。

表5 原位资源采集与预处理差距评估

工作分解结构		NASA	ESA	JAXA	CSA	DLR	KARI	CNES
气体资源的采集、分离和制备	火星二氧化碳	√	√	\	—	—	—	—
	火星氮气/氩气	√	—	\	—	—	—	—
固体资源的挖掘/获取	颗粒物	√	√	\	√	—	—	—
	矿物/冰	√	√	\	√	—	—	—
资源预处理	研磨/粉碎	√	√	\	—	—	√	—
	矿物分离	√	—	\	—	—	√	—
	粒度分选	√	√	\	—	—	—	—
资源运输	固体材料运输	√	√	\	—	—	—	—
	气体运输	—	√	\	—	√	—	—
资源交付与移除	可移动性	√	√	\	√	√	—	—
	自主性	√	√	\	√	—	—	—
	通信与导航	—	—	\	—	—	—	—

注：“√”表示已开展相关技术工作，“—”表示无相关技术工作，“\”表示不适用。

3.2.3 生产消耗品的资源加工评估

消耗品通常被视为对执行未来载人登月计划影响最大的 ISRU 产品。通过 ISRU 技术生产推进剂、燃料、生命支持产品等消耗品可极大地节省地外任务的费用,并以此发展更加可持续性的地外系统。通

常,生产消耗品的资源加工主要指从月壤中提取氧气以及从极地永久阴影区中提取水冰资源^[7]。除此之外,还包括将火星大气加工转化为氧气与碳氢化合物等燃料^[12]。根据报告汇总得到各机构在生产消耗品的资源加工领域的差距评估结果如表6所示。

表6 生产消耗品的资源加工差距评估

工作分解结构		NASA	ESA	JAXA	CSA	DLR	KARI	CNES
提取氧气的月壤加工(物理/化学方法)		√	√	\	—	—	—	√
提取水的月壤加工	进料工具	√	—	\	—	—	—	—
	地表下封闭式反应器	√	√	\	—	√	—	—
	远程地下加热/蒸汽收集	√	—	\	—	—	—	—
二氧化碳处理	二氧化碳制氧	√	√	\	—	—	—	—
	二氧化碳制甲烷与水	√	√	\	—	—	—	—
	二氧化碳制碳氢化合物	√	√	\	—	—	—	—
	二氧化碳制碳	√	√	\	—	—	—	—
水处理	水电解	√	√	\	—	—	—	—
	水捕获/储存	√	√	\	—	—	—	—
表征加工性能的工具	矿物表征仪器	√	√	\	—	—	—	√
	化学分析仪器	—	√	\	—	—	—	√
	纯度表征仪器	√	√	\	—	—	—	√
产品/反应物分离	化学分离/吸附	√	—	\	—	—	—	—
	物理分离	√	—	\	—	—	—	—
	热分离(冷冻/蒸馏)	√	—	\	—	—	—	—
产品/试剂污染物的去除	水净化	√	√	\	—	—	—	—
	气体净化	√	√	—	—	—	—	—

注:“√”表示已开展相关技术工作,“—”表示无相关技术工作,“\”表示不适用。

由表6可知,当前仅有 NASA 对这一领域下的所有分解结构开展了研究与规划。区别于其他机构, NASA 还特别关注了反应物与产物的分离处理以此来获得更高质量的 ISRU 产物。其次是 ESA, 尽管其还未对从月壤中提取水的整个流程进行系统性的研究,且暂时缺乏将产品与反应物分离的相关技术。除此之外, CNES 与 DLR 分别对利用月壤制备氧气与水进行了相应的研究,其他研究机构目前在此领域的技术研究尚未展开。

3.2.4 生产建造和制造原料的资源加工评估

在成功研发出更多样的高性能材料前,月壤是最合适的用于地外场景下的建造和制造原料。评估生产建造和制造原料的资源加工往往与后续的月面

原位建造领域、空间制造领域密不可分。生产支持地外任务的氧气与水等资源是进行资源加工操作的重要目的之一。此外,还可从月壤中提取多种金属、黏结剂等材料作为原料用于建造和制造过程,此领域的差距评估结果如表7所示。通过报告提供的评估结果易见, NASA 和 ESA 已开展了月壤预处理、提取金属与生产塑料等原料的研究。其他参与机构中仅有 DLR 和 KARI 分别对自主操作加工与提取金属2方面进行了一定的技术尝试。然而,相比于金属的生产,以 KARI 为例的研究机构目前针对是否开展塑料类产品的技术研究还在做进一步的衡量。此情况可能是由于加工塑料与黏结剂的过程一般较复杂,前体的转换效率低,产品的初始性能较差等^[13]。

表7 生产建造和制造原料的资源加工差距评估

工作分解结构		NASA	ESA	JAXA	CSA	DLR	KARI	CNES
生产建造/制造原料的月壤预处理		√	√	—	—	—	—	—
提取金属/硅等	提取金属	√	√	\	—	—	√	—
	提取硅	—	—	—	—	—	—	—
生产塑料/黏结剂		√	√	—	—	—	—	—
自主/监督的操作加工		√	—	—	—	√	—	—

注：“√”表示已开展相关技术工作，“—”表示无相关技术工作，“\”表示不适用。

3.2.5 月面原位建造评估

根据载人月球探索架构可知,月面原位建造对于实现可持续的月球探索任务和发展月表基础设施均十分关键。由于与地球不同的极端月球环境,地

球上常用的建造方法大多并不适合月球场景^[14]。因此,研究基于ISRU的各种月面建造方法尤为重要。在完成生产建造和制造原料的评估工作后即开展对于月面原位建造领域的评估,如表8所示。

表8 月面原位建造差距评估

工作分解结构		NASA	ESA	JAXA	CSA	DLR	KARI	CNES
场地规划与设计		√	√	—	—	√	√	—
场地准备	平整清理地形	√	—	—	√	—	—	—
	地表稳固	√	—	—	√	√	—	—
	地下作业	√	—	—	—	—	—	—
	护道施工	√	√	—	√	—	—	—
建造材料准备	尺寸/性状控制	√	—	—	—	—	—	—
	组分混合	√	√	\	√	—	—	—
	运输	√	—	—	√	—	—	—
建造过程与技术	增材制造	√	—	—	—	√	—	—
	制砖/压制	√	√	—	—	√	—	—
	烧结/熔融	√	√	—	—	√	—	—
	支撑/框架	√	—	—	—	√	—	—
	连接	—	—	—	—	√	—	—
水平结构	道路施工	√	—	—	—	—	—	—
	着陆/发射台建设	√	√	—	√	√	—	—
垂直结构与防护结构	地下结构	√	—	—	—	—	—	—
	地面无压结构	√	√	—	—	√	—	—
	地面承压结构	√	—	—	—	—	—	—

注：“√”表示已开展相关技术工作，“—”表示无相关技术工作，“\”表示不适用。

综合比较,NASA、ESA、CSA、DLR和KARI都已相应开展了月面原位建造相关的研究,而JAXA与CNES则完全未涉猎ISRU领域。其中,展现出最明显技术优势的是NASA与DLR2家航天机构,已具备成熟的建筑材料、结构以及工艺技术,以NASA的月

壤表面操作机器人(RASSOR,TRL6)和DLR的太阳能烧结系统(EU/H2020 RegoLight,TRL5)为代表。尽管ESA与CSA在此领域中已开展的技术研究在其下各分解结构中均有涉足,但暂时较为零散,还未形成系统的ISRU相关建造流程或方案。另外,KARI

目前仅停留在场地规划与设计阶段。

3.2.6 地外空间制造评估

地外空间制造对于实施长时间的载人航天任务至关重要。开展地外空间制造不仅能够最大限度地减少物流与备件存储量,还可大幅度降低地月往返

运输过程中产生的风险^[7]。通常,月面原位建造和地外空间制造在技术、工艺、产品等方面的联系较为紧密^[15]。因此,针对 ISRU 的地外空间制造领域的评估内容与方法和月面原位建造领域类似,差距评估结果汇总于表 9。

表 9 地外空间制造差距评估

工作分解结构		NASA	ESA	JAXA	CSA	DLR	KARI	CNES
制造材料制备		√	√	—	—	√	√	—
制造过程与技术	增材制造	√	√	—	—	—	—	—
	减材制造	√	—	—	—	—	—	—
	复合制造、近净形制造	√	√	—	—	—	—	—
部件精加工		√	√	—	—	√	—	—
连接装配与回收		√	—	—	—	—	—	—

注:“√”表示已开展相关技术工作,“—”表示无相关技术工作,“\”表示不适用。

分析表 9 可知,地外空间制造领域目前还不是各参与机构针对 ISRU 研究的热点,多数机构仍处于探索如何制备用于空间制造材料的技术阶段。当前仅有 NASA、ESA 与 DLR 进行了空间制造流程中位于较后期的研究,如相关制造技术以及部件加工技术。在此之中,NASA 的技术研究体系最为完整,已布局并实施了空间部件回收的技术研究。此外,ESA 已发展至部件的精加工技术研发环节,而 DLR 的相关研究仍比较零散。

4 总结与展望

4.1 总结

4.1.1 ISRU 技术研究已成为空间科学与应用领域热点

由于 ISRU 涉及围绕原位资源的勘查、采集、处理与利用进行的多学科领域的系统性能力测试,且在资源识别到产品交付的全过程均需开展大量应用性试验,当前针对 ISRU 的技术研究已成为空间科学与应用领域的一大热点。具体而言,以 NASA 为首的各参与国的研究机构目前均在进行或计划进行多种 ISRU 技术的开发工作,尤其是在原位资源勘查评估、设备可移动性与自主性,加工月壤等原位资源以提取氧气、金属等应用领域已获得多项技术性突破。

4.1.2 国外正在部署用于 ISRU 技术研究的模拟环境设施

由于月球的环境条件与地球大不相同,国外各机构已先后部署了多种组件级与子系统级别的用于 ISRU 技术研究的极端环境模拟设施,旨在模拟月球极端环境,如强辐射、高真空、大温差等。此外,还允许容纳月尘、月壤、岩石等与装备硬件相互作用以验证 ISRU 技术的可行性与有效性。当前该协调组内各机构开发的模拟环境设施中能达到的最大模拟真空度为 10^{-11} kPa,最高模拟环境温度在 400 K 左右,然而现有的或计划研发的均缺少尺寸大于 4.25 m 的系统级别与更大型的空间环境模拟设施,以及具备模拟地外辐射与光照条件能力的设施。

4.1.3 该协调组内各国针对 ISRU 技术研究的重心和路线不同

通过解析该报告的 ISRU 差距评估结果不难发现,ISECG 内各国针对 ISRU 技术的研究重心以及研究路线各有不同。NASA 与 ESA 在整体上对于 ISRU 价值链的研究较为系统、全面,尤其在原位资源采集与处理、资源加工、地外空间制造等领域,目前已具备多项相关且成熟度较高的 ISRU 技术与测试设备。此外,德国对于月面原位建造过程与技术的研究已形成一定体系,而加拿大则分别重点针对原位资源的表征与获取流程设计了不同的技术路线。

4.2 展望

4.2.1 进一步深入开展多学科融合的 ISRU 基础研究与技术攻关

ISRU 基础研究跨越多个学科,包括材料科学、机械工程、土木建筑、地质学、航空航天学等。因此,未来还需进一步深入开展上述多个学科融合的 ISRU 相关研究,共同探索如何在外太空环境中有效地利用当地资源。通过凝聚多学科智慧,针对包括装置自主性与表面移动、材料的运输与储存、能源供应与储存、生命支持系统等一系列 ISRU 关键技术进行攻关。此举不仅有助于大幅降低任务成本、减少对地球资源的依赖,还对逐步增强未来在地外建造中的竞争力与主动权具有重要意义。

4.2.2 进一步加强高保真极端环境模拟验证条件与平台建设

ISRU 在具体地外任务中的开展需得到与其相当规模的先导性试验的测试与验证。因此,未来还应进一步加强高保真地外环境模拟平台的建设,特别是对于高低温、近真空、辐射、太阳能等极端条件的模拟能力的开发。对于模拟测试中的验证条件,在基于不同环境参数,如温度、压力、湿度等的组合下,确保其与实际应用场景相符。通过高保真极端环境模拟测试与验证条件优化,不仅可以更清晰地了解 ISRU 过程中各类材料与结构在地外环境下的服役性能,还有助于利用原位资源提升月面活动的可持续性,为未来的基地建设与太空探索提供更多的技术支持。

4.2.3 进一步结合深空探测需求推进高水平 ISRU 任务实施

协调实施高水平的 ISRU 任务对于解决地外建造中涉及的原位建材成形、建筑结构自主搭建等关键问题,实现可持续发展具有举足轻重的作用。因此,未来还应在结合深空探测需求的前提下,积极推进更多高水平 ISRU 任务的实施。通过细化各 ISRU 任务的时间表、资源需求、风险评估等因素,确保包括开展实地试验、验证技术可行性等在内的 ISRU 任务能够顺利进行。此外,ISRU 任务所涉及的技术研究和应用需要多位相关方的共同努力,通过合作及分享经验、资源和技术,更好地推进高水平 ISRU 任务的实施,从而促进未来 ISRU 在地外建造领域中的发展,最终达到可持续性目标。

参考文献(References)

- [1] Sanders G B, Larson W E. Final review of analog field campaigns for *in situ* resource utilization technology and capability maturation[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(10): 2381-2404.
- [2] Kornuta D, Abbud-Madrid A, Atkinson J, et al. Commercial lunar propellant architecture: A collaborative study of lunar propellant production[J]. *Reach*, 2019, 13: 100026.
- [3] Fu Y M, Li L Y, Xie B Z, et al. How to establish a bioregenerative life support system for long-term crewed missions to the moon or Mars[J]. *Astrobiology*, 2016, 16(12): 925-936.
- [4] Lavoie T, Spudis P D. The purpose of human spaceflight and a lunar architecture to explore the potential of resource utilization[C]// AIAA Space Forum 2016, California, USA: SPACE 2016 Conference & Exposition, 2016: 5526.
- [5] Hecht M, Hoffman J, Rapp D, et al. Mars oxygen ISRU experiment(MOXIE)[J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217(1): 9.
- [6] Crawford I A. Lunar resources: A review[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2015, 39(2): 137-167.
- [7] In-Situ Resource Utilisation Gap Assessment Report[R]. Quebec: The International Space Exploration Coordination Group, 2021.
- [8] 王赤, 时蓬, 白青江, 等. 2022年空间科学与深空探测热点回眸[J]. *科技导报*, 2023, 41(1): 79-102.
- [9] Global exploration roadmap: Lunar surface exploration scenario update[R]. ISECG, 2020.
- [10] 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.
- [11] Jayathilake B A C S, Ilankoon I M S K, Dushyantha M N P. Assessment of significant geotechnical parameters for lunar regolith excavations[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 196: 107-122.
- [12] Starr S O, Muscatello A C. Mars *in situ* resource utilization: A review[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 182: 104824.
- [13] Oh K, Chen T, Kou R, et al. Ultralow-binder-content thermoplastic composites based on lunar soil simulant[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(9): 2245-2250.
- [14] 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, 3: 37.
- [15] 田小永, 李涤尘, 卢秉恒. 空间3D打印技术现状与前景[J]. *载人航天*, 2016, 22(4): 471-476.

Analysis of the "ISRU Gap Assessment Report" by the International Space Exploration Coordination Group

ZHOU Cheng^{1,2}, CHENG Shanshan^{1,2}, GAO Yuyue^{1,2}, ZHOU Yan^{1,2}

1. National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract The In-situ Resource Utilization Gap Assessment Report, a summary document updated periodically by the International Space Exploration Coordination Group (ISECG), aims to promote the sustainability of global space exploration and *in-situ* resource utilization (ISRU). Firstly, based on the overall goal of ISRU and the breakdown of key structures, the current assessment work on ISRU technologies, test facilities and regolith simulants are summarized and compared. Then, by focusing on the core ISRU gap assessment in this report, the current technological research priorities and advantages of each participating country in the six key areas of *in-situ* resource exploration, *in-situ* resource acquisition and preparation, resource processing for production of mission consumables, resource processing for production of manufacturing and construction feedstock, civil engineering and surface construction, and in-space manufacturing are analyzed in turn. And the conclusions and prospects gained from the report are presented in the end of this paper.

Keywords *in-situ* resource utilization; test facility; regolith simulant; gap assessment; extraterrestrial construction ●



(责任编辑 傅雪)