

月球科研站能源技术研究进展与展望

张辉, 董珂琪, 姚伟

(中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

摘要: 月面能源是月球科研站建设和运行的基础和保障。分析了月球科研站的能源特点与需求, 包括大功率、多样化的能源需求, 长寿命、高可靠、昼夜不间断的供能要求, 以及月球环境的适应性要求; 重点分析太阳能光伏+储能电池、太阳能光热利用、月面核能、再生燃料电池等月面能源技术在月球科研站中的应用优势、限制条件及发展建议, 并对各能源系统进行了比较, 进而提出了月球科研站能源系统构架, 为未来月球科研站能源设计和研制提供参考。

关键词: 月球探测; 月球科研站; 能源技术; 能源系统方案

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)05-0423-12

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230058

引用格式: 张辉, 董珂琪, 姚伟. 月球科研站能源技术研究进展与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(5): 423-434.

Reference format: ZHANG H, DONG K Q, YAO W. Progress and prospect of energy technologies on lunar scientific research station[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(5): 423-434.

引言

月球作为地球唯一的天然卫星和离地球最近的自然天体, 被视为地球的“第八大洲”。月球蕴藏丰富的自然资源, 其资源开发将推动人类文明跨入新阶段。21世纪, 各航天大国再次聚焦月球, 月球探测进入到开发利用新阶段。中国在圆满完成“载人航天与探月工程”国家科技重大专项的基础上, 启动了“探月工程四期”, 计划通过实施“嫦娥六号”“嫦娥七号”“嫦娥八号”等任务, 在2030年前建成由多个月面探测器、月球轨道器、中继卫星等构成的月球科研站基本型, 突破月面长期科研作业、原位资源勘查与开发利用等关键技术, 深化“测月”“巡天”“观地”等空间科学研究, 为后续建成长期无人值守、短期有人照料的月球科研站奠定基础^[1], 在此基础上将进一步建设国际月球科研站^[2]。美国于2017年正式发布“阿尔忒弥斯”(Artemis)计划, 联合西方大国主导重返月球并建立月球基地。Artemis-1号已于2022年开启无人绕月飞行, 并计划2024年将太阳能发电、推进和通信系统由商业火箭运抵“深空门户”, 2028年在月球上建立可持续的人类居住点^[3]。欧洲积极开展月球南极探测, 发起了国际月球村计划。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)公布的载人探索的“曙光”探测计划表明欧洲将在2025

年实施载人登月^[4]。俄罗斯公布的航天发展计划目标是在2034年着手建立首个月球基地^[5]。日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)提出了未来太空开发的主要内容包括“月球探测与利用”和“太阳系探测”, 并计划在2026年前实现机器人的月球登陆与行走、2030年建成月球空间活动基地^[6]。

月面能源是月球科研站建设和运行的基础和保障。与月球探测器相比, 月球科研站和未来的月球基地对能源的规模、多样性和可靠性等方面提出了很高的要求, 同时还需面对月面高低温交变、超高真空、强辐射、低重力等极端环境的挑战。本文重点针对中国未来的月球科研站任务和月球环境特征, 分析能源系统的基本要求, 结合能源技术的发展现状和趋势, 提出月球科研站能源技术的发展建议, 为月球科研站任务提供参考。

1 月球科研站能源需求

国际月球科研站(International Lunar Research Station, ILRS)任务以科学研究与资源开发利用为牵引, 是在月球表面和月球轨道上建设可进行月球自身探索和利用、月基观测、基础科学实验和技术验证等多学科、多目标科研活动的长期自主运行、远景有人参与的综合性科学实验设施, 如图1所示。ILRS建设

主要分为“勘、建、用”3个阶段,初步规划五大任务:ILRS-1建成指挥中枢、基本的能源和通信设施;ILRS-2建成月球研究与探索设施;ILRS-3建成月球原位资源应用技术验证设施;ILRS-4验证后续探测的通用技术;ILRS-5建成月基天文和对地观测设施^[2]。

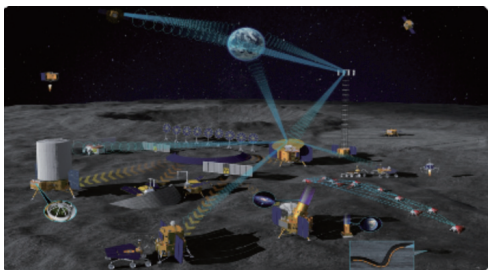


图1 国际月球科研站概念图^[2]

Fig. 1 Conceptual map of the international lunar research station^[2]

总体上看,月球探测从单一化、小规模探测任务发展到多样化、规模化、常态化的月球科研站和开发任务。这些任务的顺利实施和开展离不开充足的能源供给,对月面能源提出了更高的要求。

1.1 大功率、多样化的能源需求

月球科研站建设将于2025—2035年分阶段部署,随着规模不断增长,对能源的需求也持续增加。初期的月球无人探测器巡视、采样等任务,能源供给通常在kW级。当开展月面科学实验、月球资源利用试验和短期有人驻留阶段时,能源需求将达到几十kW级。当开展规模化月球资源开发和长期有人驻月活动,满足人类长久生存的能源供给将达百kW甚至MW级^[7]。为满足科学研究、资源开发、交通运输、宇航员生活等综合需求,以及工作场地的多样性,需具备光、热、电、化学等多种能源方式。

1.2 长寿命、高可靠、昼夜不间断的供能要求

探月四期工程计划将探测器月面工作寿命延长至8年,以完成月球科研站基本型建立。后续国际月球科研站建成后,将开展规模化、常态化的月面活动。未来的月球科学实验室和资源利用设施不能受到月面昼夜循环的影响,进行间歇性工作,宇航员长期驻留期间,夜间仍需持续保障供热、供电,确保环控生保系统安全可靠运行。因此,月球科研站的长期运行要求长寿命、高可靠、昼夜不间断的能源供应。此外,考虑到不同发电方式、用电设备、多能互补的匹配与控制复杂性,拥有自主和可靠的月面能源系统至关重要^[8]。

1.3 月球环境的适应性要求

能源供应取决于各种因素,月球地形、光照、温度、辐射等均为限制条件^[9-11]。根据科学和应用目标的

不同,月球科研站可选择在月球低纬、中纬和高纬建站。由于可能赋存大量的水冰资源^[12]及优良的太阳能资源,月球南极已成为中国、美国和欧洲等建设月球科研站和月球基地的首选区域。月球南极存在极昼现象,受地形影响很大,有些高地太阳可见度非常好,但有些撞击坑内长年没有阳光照射,为永久阴影区。因此环境温度差异也非常大,光照良好的区域温度可能高于253 K,而永久阴影区内年平均温度仅50 K左右。虽然主基地可建设在撞击坑边缘太阳能充足的地区,但如何进入永久阴影区进行规模化水冰和其它挥发物的开采面临极端的能源挑战。另外,月面的高真空、低重力环境也对能源系统的流体运输、热量排散带来重要影响,极有可能降低核反应堆的发电效率以及燃料电池的工作寿命;太阳能电池除了受光照的直接影响,强辐射导致其性能衰退的影响同样不可忽视。

2 月面能源技术发展现状

空间能源是航天器的安全可靠运行的基础。经过长期发展,已为各类卫星和深空探测器的空间长期飞行提供了重要保障,取得了重要进展。空间中可利用的一次能源方式包括太阳能、核能、化学能和热能,但在月球上能够便于获得、长期持久的能源主要为太阳能和核能。通过光电、光热、光化学、核热、热电、电化学等转换方式,可以将一次能源转换为电能、热能和化学能等方式,为昼夜不间断工作,便捷、高效的能源二次利用提供途径。另外,月面多样化的科学探索和资源利用等工作内容还会面临进入到阴影区、甚至是永久阴影区工作,这虽然可以通过储能电池的方式为探测器、作业车等进行供电,但当进行规模化开发时,能源需求非常大,需解决大功率、远距离的能源传输问题,可能的途径包括有线电缆、太阳能直接反射、激光/微波无线能量传输、月球轨道太阳能电站结合有线/无线传输等方式。

太阳能光伏+储能电池是空间探测应用最多、最为成熟的能源系统,在光照期通过太阳能电池阵将太阳能转换为电能,同时为储能电池充电;在阴影期通过储能电池为探测器提供电能。由于月球绝大部分地区月夜长达14个地球日,当供电需求达kW以上时,常规蓄电池由于比能量低,整体重量大,难以满足要求。当循环周期长时,再生燃料电池的比能量优势突出,因此,近年来,再生燃料电池成为月面能源的重要方向。

空间核能由于能量密度高、工作持久(可达数十年)、不受光照等环境制约等优势,是解决长期无

光照的月夜供能和太阳能功率密度低的木星以及更远的深空探测的供能手段。它主要包括利用核衰变能的空间核同位素能源(电源和热源)以及利用核裂变能的空间核反应堆能源两种方式。

近年来,随着有人居住的月球基地建设、规模化月球资源开发等任务的提出和迅速发展,面临着数10 kW以上的热能/热电联供生命保障需求,以及上千度高温的月壤储热、月壤打印、月壤制氧、矿物冶炼等需求。太阳能聚光热利用的方式已受到越来越多的关注和探索。例如,月壤资源可为原位利用与供应能源提供一种可能^[13],月壤经过烧结或融化后可直接用作储热材料,月昼时充足的太阳光在月壤储能层中蓄热,月夜时可以提供热,并进行后续发电,从而实现从白天到夜间的不间断供能以及提高系统的原位能源利用率。

因此,根据月球科研站大功率、多样化的能源需求,长寿命、高可靠、昼夜不间断的供能要求,以及月球环境的适应性要求,重点分析太阳能光伏+储能电池、太阳能光热利用、月面核能3种月面能源技术。

2.1 太阳能光伏+储能电池技术

月球为真空环境,无大气分子、气溶胶颗粒、云雨等的衰减作用,其表面太阳辐射强度达1 380 W/m²。长时间、持续的阳光照射使得太阳能利用成为月球基地能源供应的首选对象。但是,受月面长月夜和阴影作用影响,限制了太阳能的使用条件。因此,为保障持续供能,需增加额外的可充放电/可再生的储能电池能源系统与太阳能光伏系统联合供电。月面光照主要受纬度和地形影响,由于月球自转轴的倾角很小(1.543°),月面绝大部分区域昼夜时间相同,月夜长达14个地球日。在极区撞击坑边缘高地,可能存在长期持续光照,如表1所示,太阳相对持续时间可达170%(昼夜均分为100%,极昼为200%),这有利于太阳能的充分利用。但总的来说,月面上面临很长的无光照时间,需要通过储能电池技术来解决阴影期/月夜期的能源供应问题。

表1 月球南极典型坑缘高地的太阳光照条件^[14]

Table 1 Solar light conditions in the typical crater edge plateau of the moon's South Pole^[14]

位置	月面坐标(°S, °W)	日照率/%
沙克尔顿火山口边缘, A点	89.68, 166.0	162
沙克尔顿火山口边缘, B点	89.44, 141.8	164
热尔拉什火山口边缘	88.71, 68.7	170
沙克尔顿火山口边缘, C点	88.79, 124.5	172
马拉珀特山A	86.04, 2.7	148
马拉珀特山b	86.00, 2.9	148

利用光伏发电配合蓄电池是月球探测器能源供应的有效选择之一。由“月球17号”(Luna-17)携带的世界上第一台无人驾驶月球车采用了输出功率为160 W的太阳电池阵为月球车和着陆器供电,蓄电池用于月夜期间供电。2020年,“嫦娥五号”探测器利用高效能的太阳能电池板实现了光照期发电的自给自足;而在非光照期,由比能量高达195 Wh/kg蓄电池承担供电责任^[15]。为了可持续地探索月球,日本航天航空局和丰田公司公布了将可折叠太阳能电池阵和燃料电池组成复合能源系统作为月球车动力驱动的项目,预计续航最大可达16 000 km^[16]。

2.1.1 太阳能光伏发电技术

太阳能光伏发电是通过光电效应将太阳光转化为电能的技术,主要通过太阳能电池阵实现,是空间飞行器主要能源技术。1958年“先锋1号”(Vanguard-1)卫星首次应用太阳能电池^[17]。直至2019年,国际空间站通过由4组(262 400块)硅太阳能电池组装的太阳能电池板提供高达120 kW电量^[18]。为了获取更高的功率转换效率和抗辐射性,基于单结和多结III-V族半导体叠层太阳能电池成为当前空间探测任务的首选产品。2022年,美国Artemis计划^[19]中“猎户座”(Orion)飞船携带了4个砷化镓太阳能电池阵列飞往月球,可提供约11 kW的供电能力。Artemis计划在月球南极基地将开发垂直的太阳能阵列系统,该系统可以自主部署高达32英尺的太阳能电池阵列,并在必要时收回以进行搬迁和减少装载体积^[20],并且为解决月球南极因陡峭地形而难以获取太阳光的问题,2021年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)为Artemis计划提出了“光弯折机”概念,该系统将不断地捕获太阳光,并被直径为2~4 m的光伏阵列接收,预计产生10 kW的电能^[21]。面向未来月球科研站建设,太阳能光伏发电需重点突破高比功率和高光电转换效率两个重点指标。

针对高比功率问题,太阳能电池阵经历了从刚性、半刚性到柔性的结构转变,以满足高达数万瓦超大功率的需求。2019年,Game Changing Development(GCD)公司启动自适应轻型月球太阳能阵列系统项目^[22],目标是设计一个体积紧凑的通用阵列来完成10 kW级功率输出,并适应极端温度和最大限度地收集月球极区任务地点的阳光。2021年,Matthew表明通过将光伏电池以卷绕方式存放能够实现高效率 and 低成本指标^[23]。对于15 kW的太阳翼,与刚性电池阵比,卷绕式太阳能阵列(ROSA)减少了33%的质量和75%的装载体积。美国已经向国际空间站发射ROSA太阳能

阵(图2)。Spectrolab公司将输出功率升级为120 kW的卷绕式太阳电池阵应用于执行国际空间站任务,这为发展超100 kW大功率电池技术提供基础^[24]。中国全球首次采用三结砷化镓太阳能电池作为新一代柔性太阳翼,为“天宫空间站”提供约100 kW电力。



图2 卷绕式轻型太阳电池阵在轨测试^[23]
Fig. 2 On-orbit flight testing of Roll-Out solar array^[23]

不断提升光电转换效率也是太阳能光伏发电研究的重点内容。2017年,“天舟一号”货运飞船使用由砷化镓光伏发电技术制造的太阳翼,为飞船供能,系统转化效率可达30%以上。2020年,上海空间电源研究所为新一代载人飞船试验船研制的平均光电转换效率34%的太阳电池阵^[24]。受太阳能电池板面积限制,“嫦娥五号”月球探测器采用多边形、多尺寸的电池进行混合布片,使得太阳能电池效率提升到31%以上。宇宙辐射对太阳能电池效率有重要影响,严重的单次太阳质子事件可能导致多结电池效率永久性的降低5%~10%,在月面上长期暴露在宇宙射线辐射下,将导致太阳能电池每年2%~3%的性能衰减^[10]。

2.1.2 储能电池技术

虽然宇航级锂离子电池比能量可达200 Wh/kg,但为满足一个小型月球科研站的10 kW用电需求,需要的储能重量超20 t,太阳能光伏+储能电池的综合功率密度低于0.5 W/kg,难以满足要求^[25]。再生燃料电池虽然技术成熟度不足,仍未开展空间应用,但具有明显的比能量优势,随功率、循环周期不同,报道的比能量在300~1 000 Wh/kg之间^[26-27],有望在月球科研站上得到应用。

质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane

Fuel Cells, PEMFC)因工作温度温和、独立性强、功率大,并且可以根据负载要求快速改变输出功率,适用于月球车的可移动电源。作为大功率短期飞行任务航天器的主电源,美国通用电气公司为双子座任务开发了第一个PEMFC^[28]。载人飞船的主电源系统由3个1 kW聚苯乙烯磺酸电解质燃料电池模块构成,为飞行任务(360 h)提供全部能源消耗。2007年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)公布了“牵牛星”(Altair)月面着陆器(LSAM)的设计概念(见图3),LSAM分为两级^[29]。下降级选择由196个单体组成的电池堆,共分成6个组,用于满足3 h下降和7 d表面运行分别所需要的3.345 kW和3.9 kW电功率。

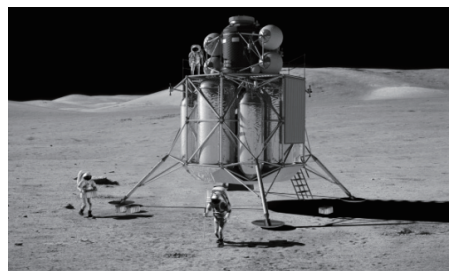


图3 “牵牛星”月面着陆器携带PEMFC^[29]
Fig. 3 “Altair” lunar lander carries PEMFC^[29]

目前, NASA致力于基于静态排水的燃料电池及其辅助配套设备的研制,以实现超过130 W/kg的比功率目标。同时, NASA计划将在未来月球前哨站通过PEMFC的应用实现月球基地建设的能源供给。PEMFC虽然可以满足航空航天能源需求。但是,在PEMFC辅助系统复杂,而且液氢和液氧携带量有限,使得电源系统的连续供电受限。因此,与太阳能电池阵联合,再生燃料电池是主要发展方向。

再生燃料电池(RFC)是将燃料电池技术和水电解技术相结合的一种新型能源装置,发电组件一般为PEMFC或固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)。作为目前比能量最高(400~1 000 Wh/kg)的储能系统, RFC具有重量轻、充放电效率高(高达70%)、使用寿命长(高达约10 000 h)、无环境污染等独特优势。然而,目前RFC循环周期受材料耐久性、密封可靠性、燃料储存容量等因素限制。

2006年, NASA格伦研究中心成功验证了一种能够在8 h内持续稳定输出5 kW功率再生燃料电池系统^[30],该研究进一步证明了RFC作为储能装置在月球和行星表面的潜在应用。2011年,俄罗斯开发了由7个单电池堆叠的RFC,该电池在燃料电池模式下可产生500 W电功率,初步测试表明,在电流密度为0.5 A/cm²时,其

循环效率为30%^[31]。2018年,美国GCD计划在约4年内完成小规模RFC在模拟月球环境中的演示^[21]。RFC可以在月球夜间或长时间移动系统(如加压载人漫游车)工作期间提供动力。由PEM燃料电池和PEM电解槽组成闭环RFC系统预计在350 h的月夜产生大约100 W的功率,并在日照时再生反应物。

2019年,意大利的Barbera小组展示了用于模拟月球表面任务的2 kW模块化电池堆^[32]。两个PEMFC电堆均携带10个单体,分别为月球基地和月球车供电,燃料电池堆在80 A时总功率为1 kW,这证明了RFC系统在实际太空探索任务中应用的可行性。最近,日本展示了一种RFC集成系统,该系统实现了0.8 kW的功率生产^[33-35]。

尽管RFC的能量密度比其它化学电源高得多,但由于月球科研站需要电源供电周期很长,因此开发高压轻质RFC、提高其关键材料/组件耐久性、增加再生系统水循环管理和综合能量利用率是加快RFC空间应用的有效途径,图4为再生燃料电池工程设计示意图。

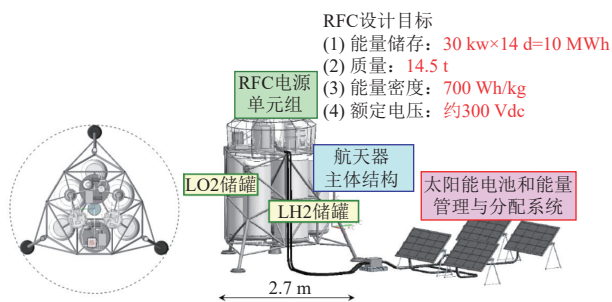


图4 月球基地的再生燃料电池工程设计^[36]
Fig. 4 Renewable fuel cell design for a lunar base^[36]

2.2 太阳能光热利用技术

2.2.1 太阳能光热发电

太阳能光热发电是将聚光的太阳光通过传热工质转化为高品位热能,再通过斯特林、热电器件等方式把热能转换为电能的技术。因月夜长达350 h,太阳能光伏-储能电池面临发射质量和成本的巨大挑战^[37],例如,为应对10 kW的供电需求,即使采用500 Wh/kg高比能的再生燃料电池,储能质量也会超过7 t。因此,必须对月球原位资源加以有效利用,才能大大降低从地球携带的物质^[38]。采用太阳能聚光并利用月壤进行蓄热和发电是满足月球基地能源需求的重要解决方案^[39-40],NASA最新发布的2015年技术路线图把月壤蓄热列为地外目的地探索任务的核心技术内容。钱学森空间技术实验室针对太阳能聚光月壤蓄热发电系统建立了有限时间热力学模型并进行了性能分析,评估了发电系统的热力学性能^[13]。2019年,Lappas等^[41]提出

一种基于太阳光的储热系统,该系统通过菲涅耳反射器和集中器将太阳光收集到月壤表面蓄热,并使用循环热管和增强的普罗米修斯热电系统最终产生6~11.5 kW电能以支持月面活动。2020年,Patrick等^[42]提出了一种结合原位月球风化层资源储热系统与温差发生器的发电系统,其中储热系统充当热机的热源,由烧结月壤制成并埋在月壤中以减少热量损失,每个热电单元在月夜结束时产生18 W电量。2021年,Hu等^[43]建立了一种基于原位资源利用(In situ Resources Utilization, ISRU)的太阳能储热发电系统,线性菲涅耳反射镜被配置为太阳光收集器,同时球体堆叠的月球风化层作为储热罐与斯特林发电机耦合,为宇航员和月球探测装置提供持续的电能(平均输出功率为6.8 kW)。2023年,钱学森空间技术实验室^[44]发展了由高倍率太阳能聚光装置、基于月壤原位利用的储能系统和热电转换装置组成的太阳能蓄热发电系统(图5所示),开展了地面试验,可储存约394 kJ的热能,并可利用斯特林发电机实现热电转换。

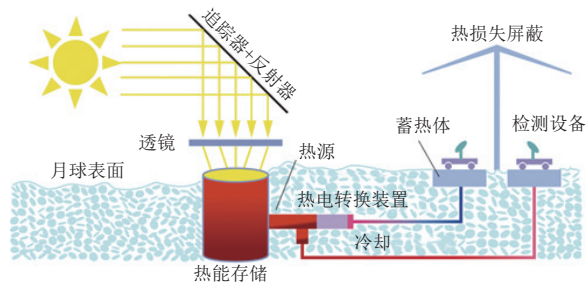


图5 月壤原位资源用的能源存储与转换系统^[44]
Fig. 5 Energy storage and conversion system for in-situ resources of lunar soil^[44]

由于太阳能光热发电技术复杂,成熟度低,需解决高倍聚光、月壤致密化、高温蓄热、高温导、高温热电转换等问题,需发展高集成、耐高温的太阳能热发电系统。

2.2.2 太阳能热制造

月球表面充沛的太阳光直射为基地建设提供了便利,虽然原位资源利用为月球与深空探测提供了物质基础和可持续探索的能力,但规模化开发能源需求量大,需充分开发太阳能原位制造与建造技术。利用太阳光进行原位资源利用的潜在可能包括:月壤3D打印、热解制氧、矿物冶炼等方式。

物理科学股份有限公司(Physical Science Company Limited, PSI)建议使用光纤波导代替定日镜来引导集中的阳光进行烧结。2010年,Nakamura等^[45]介绍了在NASA Mauna Kea ISRU站点使用石英棒将太阳光聚集

到Tephra火山土壤层,通过提供540 W的功率并以1~2.35 mm/s的光栅速度烧结得到块状体。2018年,德国航天中心^[46]采用一个52 m²的平面镜跟踪太阳并将光反射到聚光器上,从而为月壤烧结收集的最高功率达20 kW的能量,以48 mm/s的光栅速度对JSC-2A风化层模拟物逐层烧结,最终证明了太阳能3D打印各种形状月壤砖作为月球建筑模型的可行性。Fateri等^[47]使用光通量密度为1.2 MW/m²的太阳光模拟器和47 mm/s的扫描速度进行了环境和真空条件下的层状JSC-2A月壤烧结,以实现可互锁的建筑构件。钱学森空间技术实验室提出了静电输运-太阳聚光熔融月壤打印技术^[48]。而NASA将于2028年,在Artemis计划中通过收集月球南极太阳光来启动3D打印技术(见图6),基于此目标,正进行以BP-1月球模拟物为原材料的打印实验。

应,并使用太阳能阵列用于装置的电力需求(454 W)。Guerrero-Gonzalez^[52]提出最有效的ISRU工艺是通过熔融风化层电解生产硅铁合金和氧气,经计算得出,预计需要311.34 kW的太阳能才能从高地风化层中生产25 t/a的金属,同时生产23.9 t/a的氧气。

对于太阳能原位制造,每种技术均有自己的定位。为了更详细、准确地了解月球原位资源利用各种技术的能源需求与消耗,还需采用一种整体的和多学科的方法,更加全面的建模与比较,以制定最合适、能耗最小和最实际的制造方法。

2.3 月面核能技术

核能具有高能转化比、长使用周期、环境适应性强、不依赖阳光、可全天候工作等优点,是月球科研站及其它深空探测任务的候选能源,也是在难以获得太阳能时的必选能源。主要分为同位素热源、同位素电源和核反应堆。

2.3.1 同位素热源

对于热功率密度较高的放射性同位素,自发衰变产生的热能可直接作为热源使用。采用半衰期适当的放射性同位素热源,能够在整个工作期限内产生持续稳定的热量而不受外界影响,性能可靠。美国首先采用钚(Pu-238)氧化物作为燃料开发热功率为1 W的标准同位素热源(Radioisotope Heating Unit, RHU),先后用于“伽利略号”(Galileo)木星探测器、“火星探路者”(Pathfinder)、“勇气号”(Spirit)和“机遇号”火星车(Opportunity)^[53]。前苏联将RHU应用于“月球17号”和“月球21号”(Luna-21)的月球探测^[54]。2013年,中国首次在“嫦娥三号”探测器成功搭载了3个120 W同位素热源、1个8 W同位素热源、1个4 W同位素热源^[55],保证了探测器安全度过长达14 d的-180 °C低温月夜考验,完成了月面探测任务。2018年,“嫦娥四号”探测器同样采用钚238同位素热源为月夜生存提供能源^[56]。核同位素热源灵活性好,能够为极端环境下的深空探测提供热源,但是无法提供电能而开展月夜工作。

2.3.2 同位素电源

同位素电源(Radioisotope Thermoelectric Generators, RTG)是利用热电转换技术,将放射性同位素衰变所释放的热能转化为电能的装置。与其它电源相比,RTG生存能力强、结构紧凑、易于携带和安装,可以在高低温、真空、辐射、冲击和震动等恶劣环境下正常工作,既可以为深空探测器提供电能,还可以为热控系统提供热能。

目前,美国拥有世界上最先进的RTG研制与应用

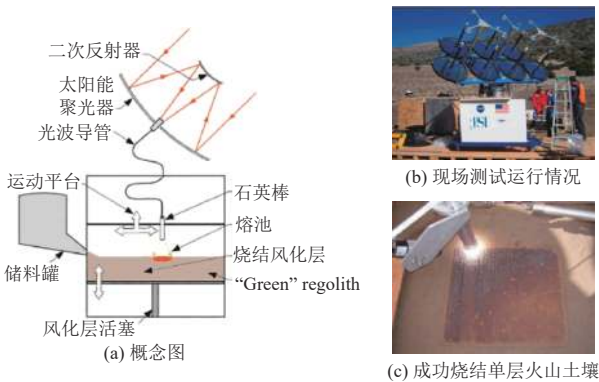


图6 太阳光3D打印^[45]
Fig. 6 Solar 3D printing^[45]

利用月球资源生产氧气是实现在月球表面人类长期生存的第一步。通过从月球表面的可用物质中产生氧气,可以消除对地球再补给及其成本的依赖。Nakamura等^[49]首先提出将集中的太阳辐射传输到光波导传输线上,再导向热接收器,来进行月球风化层热化学处理,以便在月球表面产生氧气。氧气制氧装置中的太阳能热系统将被放置在月球极地地区,通过捕获通量强度将为1.353 kW/m²太阳光对月壤进行1 800~1 900 °C热处理,以证明太阳能热系统在月球上制氧的可行性和有效性。Colozza等^[50]对基于聚光太阳能从月球风化层中提取氧气的方案进行了评估,经系统设计,当采用碳热还原钛铁矿以每年产生1 000 kg氧气时,用来提供热能的太阳能聚光器的功能需求在8 320~9 961 W之间,其中还需要提供约1 800 W电能用于氧气生产过程中设备运行。2021年,Linne等^[51]进一步研究了碳热还原过程中从月壤中每年提取产10.5 t液氧,所消耗的能量。结果表明,浓缩器中必须捕获94.9 kW的太阳能,才能将48.8 kW能量输送到反应器中用于用于碳热反

技术,截止到2020年,历年深空探测任务中曾利用近50个RTG提供电能和热能^[56]。SNAP-3^[57]是应用于空间任务的首代同位素电源系统,由钚-238 (Pu-238) 燃料、温差元件和碲化铅 (PbTe) 热电元件组成的SNAP-3B-RTG电源能够提供2.7 W的电功率。基于此,美国将SNAP-19-RTG用于“海盗号”(Viking) 飞船以获得高分辨率的火星表面图像^[58],产生的初始电功率为42.5 W,转换效率为6.3%。“阿波罗”计划中均使用SNAP-27-RTG为月面探索装置供能^[59],并提供73 W的电输出功率。为了获取更高功率,利用硅锗热电技术来提高整体功率转换效率,从而开发了百瓦级RTG (MHW-RTG)^[60]。从“伽利略号”开始,采用模块化设计的GPHS-RTG增强同位素电源制造水平,通过对各个模块组合提供特定任务所需的功率量,实现强通用性^[61]。在装满Pu-238燃料的情况下初期输出功率为292 W,转换效率为6.6%。2015年,飞越冥王星的“新视野号”(New Horizons) 飞船携带有一个250 W GPHS-RTG。美国能源部公开了多用途同位素电源 (MM-RTG) 的研制任务,经PbTe/TAGS热电转换后,初始电功率可达123 W,并预计在经过14年长期使用后依旧剩余99 W的电功率^[62]。MMRTG作为“好奇号”(Curiosity) 和“毅力号”(Perseverance) (2020年) 火星探测器的主电源发射成功^[63],代表了目前美国静态转换放射性同位素电源技术的最高水平。中国首次将研制的空间同位素电源应用于“嫦娥四号”月球探索^[64],该探测器配置了3个120 W RHU和2个4 W RHU,其中1个120 W RTG用于发电,能够在提供月夜保温所需热能的同时,为月夜温度采集器月夜工作提供电能。

通过静态热电转换技术向动态RTG转变,可将转换效率大幅提高至20%~30%。NASA最先启动了斯特林放射性同位素发电机 (SRG) 项目^[65],SRG使用2个GPHS模块和动态功率转换,展现出高转换效率 (23%) 的明显优势。因此,在相同的功率输出下,SRG所需要的钚-238燃料减少了约75%,SRG-110装置的比功率约为3.3 W/kg。2005年,DOE研发了更为先进的ASRG,采用更高比功率的斯特林发电机的ASRG任务初始输出电功率为130 W,能量转换效率25%^[66]。2022年,中国发射的梦天实验舱成功搭载了高效自由活塞斯特林热电转换装置进入太空,该装置地面测试的热电转换效率为24.4%。

虽然放射性同位素电源已经被广泛应用于空间探索领域,但是依然存在众多局限性。例如,输出功率较小;燃料Pu-238供应非常有限,制造成本和复杂性非常高;随着放射源的衰变和热电转换器件的长时间

使用,电性能会逐渐减小。因此,开发高性能热电转换材料和高效热电转换技术是提高RTG利用的重要发展方向。

2.3.3 核反应堆电源

空间核反应堆电源利用核裂变能,发电功率达kW级甚至MW级。为空间探测设计的核反应堆电源最早开始于美国SNAP计划,所有SNAP系列核反应堆的设计寿命均为1年,能量产生范围为0.5~5 kW^[67]。前苏联在1956—1988年间相继开发不同型号核反应堆 (Romashka、BUK和TOPAZ核反应堆),共发射了34个低功率裂变反应堆作为空间军事侦查卫星的动力源^[68]。Romashka是以高浓碳化铀为燃料,通过温差发电直接转换的小功率空间反应堆 (约0.8 kW)。BUK型核反应堆同样采用液态金属冷却快中子堆结合温差发电技术,得到约3 kW的电功率。随后,苏联开始研究热离子转换技术,并研制TOPAZ-1热离子空间反应堆。为改进发电功率,所采用的静态能量转换系统的TOPAZ-2反应堆是一个小型氢化锆慢化热中子反应堆,可以输出5 kW的电功率。基于热离子反应堆的基础,美国提出了堆芯部件全为不锈钢的模块化设计,并将研究方向转向热管技术来提高热电转换效率。HOMER-15^[69]是一种较小热管运行的火星探索反应堆,仅在600 °C时就可以运行,能够提供约11.5 kW热功率并最终输出3 kW电功率。为了进一步推动核反应堆电源的空间应用,结构简单、易工程化成为新的发展目标。洛斯阿拉莫斯实验室提出了KiloPower项目^[70],图7展示了其整体概念结构设计,该反应堆电源采用U-235富集度为93%的UMo合金热管堆,由8个125 W的斯特林发电机实现热电转换,系统输出功率为1 kW,设计寿命15年。以低浓铀为燃料的kW级空间核反应堆能够避免高浓铀燃料固有的安全问题,基于KiloPower项目设计了以19.75 wt%浓缩铀和10 wt%钼合金为燃料的核反应堆以缓解过度反应^[71]。随后,NASA将与月球表面探测相关的KiloPower-1 kW反应堆技术扩展到10 kW^[72]。同时,美国USRA开始了针对能在月球上使用

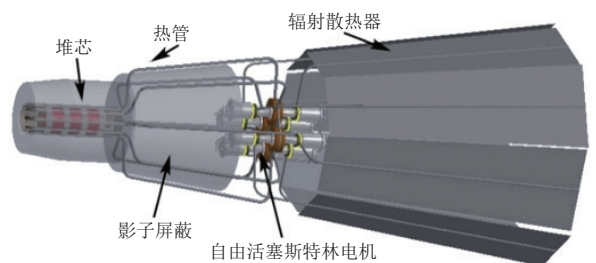


图7 KiloPower-1 kW核反应堆^[70]

Fig. 7 KiloPower-1 kW nuclear reactor^[70]

用的空间应用的小型模块化裂变反应堆研究,使用丰度小于20%的低浓铀U-Mo燃料在月表提供40~150 kW的电功率。表2对比了各核反应堆电源的性能指标。

表2 1~10 kW级空间核反应堆电源性能指标^[68-72]
Table 2 Performance index of 1~10 kW space nuclear reactor power^[68-72]

项目名称/ 电源型号	组件	输出电 功率/kW	质量/ kg	热电转换 效率/%
KiloPower-10 kW	UMo合金燃料/斯特林循环	10.0	1 800	25.0
KiloPower-1 kW	UMo合金燃料/斯特林循环	1.0	406	28.6
HOMER-15	UN燃料/斯特林循环	3.0	768	20.0
TOPAZ-2	UO ₂ 燃料/热离子转换	5.0	1 061	3.7
BUK	UMo合金燃料/热电偶转换	3.0	930	3.0
Romashka	UC ₂ 燃料/热电偶转换	0.8	509	2.0
SNAP-10A	U-ZrH _x 燃料/热电偶转换	0.5	435	1.6

为了推动核反应堆的进一步发展,满足深空探测的需求,开发了大功率空间核反应堆电源。美国开发的SP-100核能供应系统,主要目标是研制出适用于月球和火星基地建设的10~100 kW核电源,最终确定了高温锂冷却氮化铀反应堆结合温差转换技术的方案^[73],输出电功率为106 kW。NASA鉴于安全和可靠性的考虑,采用热管和斯特林/布雷顿转换器传输反应堆能量,开发的SAFE-400通过两个布雷顿系统可产出100 kW电能。2006年,NASA启动了“星表裂变反应堆电源”(FPS)计划^[74],以40 kW电源系统为研发重点,通过液态金属冷却反应堆结合斯特林热电转换进行发电。

当核反应堆的功率趋向MW级时,将成为深空探测不可取代的能源保障。2009年,俄罗斯开启了MW级空间核电源研制的新阶段,近期已经完成了由超高温气冷快堆结合布雷顿发电的核动力装置,达到约1 MW输出功率和34%转换效率,预计2025年可实施核动力飞船的在轨飞行^[75]。除此之外,热离子核反应堆电源仍是目前俄罗斯的主要研究方向,2012年公布了新型热离子转换器设计,实现了低温运行和>10%的转换效率,达到亚MW级的电输出功率^[76]。近来,俄罗斯也在进行Gerkules空间核动力拖船的研发。

核反应堆电源虽然在能量供应方面存在优势。但是,价格昂贵、技术难度高、开发周期长、质量与尺寸均不具有竞争力等关键问题仍有待解决。因此,应加强先进快堆优化设计、减轻质量和体积、提高安全性,以保证月球科研站能源系统的可靠供应。

3 月球科研站能源技术的挑战与发展展望

综上所述,采用太阳能、核能和燃料电池等多能源复合供给的形式是月球科研站能源系统的有效方案。太阳电池阵在光照充足时为载荷供电;而在缺少光照的时候,同位素电源、核反应堆电源、燃料电池与储能装置结合为负载供电。然而,同位素电源、核反应堆电源一旦启动,不能随时停止。表3比较了不同能源技术优缺点与技术挑战,为月面能源系统设计提供参考。

表3 月球科研站能源技术比较
Table 3 Comparison of energy technologies for lunar research stations

能源技术	输出功率 范围	优势	缺点	技术挑战
太阳能 光伏+ 储能 技术	光伏 电池阵 <100 kW	1. 利用阳光. 独立发电 2. 没有环境安全问题 3. 无须额外的设施 4. 电源容易扩展, 功率范围宽	1. 易受环境(地点. 地形. 光照. 辐照和温度)影响 2. 电池板上容易积累月尘而降低发电性能	1. 极端真空低温. 宇宙高能辐射. 低重力和月尘防护的适应性 2. 最大限度利用能源, 保证电源系统输出功率
	再生燃 料电池 <100 kW	1. 比能量最高的储能系统 2. 寿命长, 适合低重量. 3. 长耗时的用电需要 4. 安全. 环保. 无污染	1. 整体系统质量相对较大 2. 循环充放电效率受限制	3. 满足月夜期间能源供给, 保证电源系统自身安全
太阳能 光热利 用技术	光热电 转换 <400 kW	1. 结构紧凑. 体积轻小 2. 增加蓄热, 同时实现供热和供电	1. 结构组成复杂 2. 技术成熟度低	1. 便捷. 低成本能量获取和高效能量转换 2. 提供月球原位资源制造稳定. 切实可行能源供应
月面核 能技术	同位素 热源 <10 kW	1. 提供持续稳定的热量而不受外界环境影响 2. 灵活性好. 性能可靠	1. 功率低 2. 安全性风险大	
	同位素 电源 <1 kW	1. 生存能力强, 不受外界环境影响 2. 寿命长, 实现长期稳定供电 3. 无需外部电源. 易于携带和安装	1. 发电能力较弱 2. 制造难度大. 成本高 3. 随放射源衰变和热电器件长时间使用, 电性能逐渐减小	1. 提高工作热管理. 自主控制. 系统安全. 电源分配技术, 以适应月表环境特点 2. 实现核能的辐射防护
	核反 应堆 电源 1 kW~ MW	1. 可实现MW大功率输出 2. 发电不依赖于太阳光照和地理位置 3. 环境适应能力强	1. 反应堆因强辐射需放置在安全距离, 需要长距离的电力传输 2. 放射性污染和热污染强, 核废料处理困难 3. 核反应堆工作, 需考虑环境安全性	

针对月球科研站任务对长期稳定、可靠能源需求,通过对空间能源现状分析,结合月球科研站的建设目标,提出了一套月球科研站能源系统构架(见图8),该系统主要是由高倍太阳能聚光、高效光热转换、月壤储热、长效光电转换、再生燃料电池等5个核心子系统组成,其中,高倍太阳能聚光能够与长效光电转换、再生燃料电池相配合增加整体转换效率,可为月球科研站提供热能;再生燃料电池利用月球中水资源产生氢气和氧气,也可以使用氢气和氧气,产生水和电能,不但可以解决地球上氢氧携带量的限制,而且可以与航天器上的生命保障系统、推进系统等共用,有效降低空间任务成本和提高系统效率,这是其独一无二的优势。

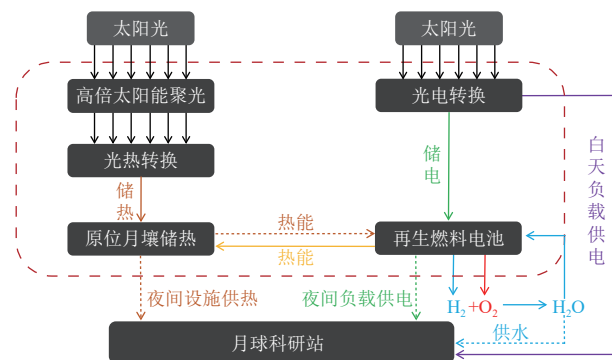


图8 月球科研站能源供应系统

Fig. 8 Energy supply system of lunar research station

该系统在月昼期间,通过高倍太阳能聚光及光热转换装置将太阳光汇聚导入月壤块内部,以原始月壤或者经过加工的月壤作为月球天然、低成本的储热载体,将热能储存备用。同时长效太阳能电池阵利用光伏效应将光能转换为电能,向负载供电,过剩的电能用于向再生燃料电池供电,并利用原位获取 H_2O 资源以电解出 H_2 、 O_2 ,并储存到氧与氢贮箱中;月夜期间,再生燃料电池将消耗储存的热能、 H_2 、 O_2 进行发电,向负载提供所需的电能,产生的 H_2O 将传输到 H_2O 贮箱中备用,而月壤块中储存的热能将保障月球科研站的热能需求,充分利用物理-化学的互补储能,从而实现了不间断的热、电、氧气和燃料联供。

此外,考虑到月球科研站能源系统的高功率和环境稳定性需求,发展集成太阳能-同位素能源-核反应堆电源多路供电的技术路线是一种极具竞争力的备选方案。太阳能电站在连续光照时可为月球日常活动提供能源,而阴影时可采用核能提供热量和电能的基本保障。

月球科研站任务复杂,需要结合太阳能、核能、

燃料电池等多种能源技术途径,根据不同的能源需求,设计多技术互为支撑的能源系统,通过协同利用、能源互补,控制与管理多种能源,能够实现能源系统的充分、灵活应用。

4 结论

月面能源是月球科研站建设和运行的基础和保障。本文重点针对中国未来的月球科研站任务和月球环境特征,分析提出大功率、多样化的能源需求,长寿命、高可靠、昼夜不间断的供能要求,以及月球环境的适应性要求。重点分析了太阳能光伏+储能电池、太阳能光热利用、月面核能3种月面能源技术在月球科研站中的应用优势、限制条件及发展建议。太阳能电池阵重点突破高转化效率、高比功率、大面积问题,优先与再生燃料电池系统联合工作;太阳能光热发电技术复杂,成熟度低,需解决高倍聚光、月壤致密化、高温储热、高温导、高温热电转换等问题,发展高集成、耐高温的太阳能热发电系统;针对数千瓦功率、上千度高温的月壤制氧、矿物冶炼等规模化资源利用需求,需重点发展太阳能聚光热利用技术。基于此,本文提出了一种基于高倍太阳能聚光、高效光热转换、月壤储热、长效光电转换、再生燃料电池等技术互相支撑的能源系统设计方案,旨在满足月球环境适用性、大功率输出和长寿命不间断等能源需求,实现月球科研站长期持续的热、电、氧气和燃料联供,这为中国科研站成功建设和顺利运行提供参考,同时对中国深空探测能源技术起促进作用。

参 考 文 献

- [1] 张哲,秦同,师一帅,等.月球科研站人工智能技术研究[J].深空探测学报(中英文),2022,9(6):560-570.
ZHANG Z, QIN T, SHI Y S, et al. Research on artificial intelligence technology for lunar scientific research station[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(6): 560-570.
- [2] 中国国家航天局.国际月球科研站合作伙伴指南[EB/OL].中国:中国国家航天局,2021-06-16. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6812148/content.html>.
- [3] CREECH S, GUIDI J, ELBURN D. Artemis: an overview of NASA'S activities to return humans to the Moon[C]//Proceedings of 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Big Sky, MT, USA: IEEE, 2022.
- [4] 杨开."新世界"路线图,能否开启欧洲空间探索新篇章?[J].太空探索,2022(10):42-49.
YANG K. Can the "New World" roadmap open a new chapter in European space exploration?[J]. Space Exploration, 2022(10): 42-49.
- [5] Spacenews. China, Russia reveal roadmap for international Moon base[EB/OL].(2021-7-16). <https://spacenews.com/china-russia-reveal-roadmap-for-international-moon-base/>.

- [6] IACOMINO C. Global space exploration landscape: strategies and programmes[J]. *Commercial Space Exploration: Potential Contributions of Private Actors to Space Exploration Programmes*, 2019(2): 7-33.
- [7] ZHANG H, HU Z X. A tentative idea for robotics lunar base[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(5): 95-98.
- [8] SAHA D, BAZMOHAMMADI N, RAYA-ARMENTA J M, et al. Space microgrids for future manned lunar bases: a review[J]. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 2021, 8: 570-583.
- [9] 刘奕宏, 张明, 杨祎, 等. 月球科网站分布式能源系统方案设计[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(6): 579-588.
- LIU Y H, ZHANG M, YANG Y, et al. Scheme design and key technology research of distributed energy system for lunar scientific research station[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(6): 579-588.
- [10] KACZMARZYK M, MUSIAL M. Parametric study of a lunar base power systems[J]. *Energies*, 2021, 14(4): 1141.
- [11] 袁勇, 赵晨, 胡震宇. 月球基地建设方案设想[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(4): 374-31.
- YUAN Y, ZHAO C, HU Z. Prospect of lunar base construction scheme[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(4): 374-31.
- [12] MITROFANOV I G, SANIN A B, BOYNTON W V, et al. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 483-486.
- [13] LU X, MA R, WANG C, et al. Performance analysis of a lunar based solar thermal power system with regolith thermal storage[J]. *Energy*, 2016, 107: 227-233.
- [14] BUSSEY D B J, MCGOVERN J A, SPUDIS P D, et al. Illumination conditions of the south pole of the Moon derived using Kaguya topography[J]. *Icarus*, 2010, 208(2): 558-564.
- [15] 刘志强, 赵晨, 曹彦, 等. “嫦娥五号”轨道器供电系统高比能设计[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2021, 8(3): 237-243.
- LIU Z Q, ZHAO C, CAO Y, et al. High specific energy design of power supply and distribution system for Chang'E-5 Orbiter[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(3): 237-243.
- [16] BROWN C, THANGAVELU M. Helios-lune tranquillitas: artemis iii exploration mission with retrieval of solar activity records[C]//*Proceedings of 73rd International Astronautical Congress (IAC)*. [S. l.]: IAC, 2022.
- [17] BAILEY S G, RAFFAELLE R, EMERY K. Space and terrestrial photovoltaics: synergy and diversity[J]. *Progress Photovoltaics: Research and Applications*, 2002, 10: 399-406.
- [18] NASA. About the space station solar arrays[EB/OL]. (2019-08-10). https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/solar_arrays-about.html.
- [19] 张崇峰, 许惟扬, 王燕. 载人月球探测月面活动发展设想[J]. *上海航天(中英文)*, 2021, 38(3): 109-117.
- ZHANG C F, XU W Y, WANG Y. Development ideas of manned lunar surface exploration[J]. *Aerospace Shanghai*, 2021, 38(3): 109-117.
- [20] NASA. Industry to mature vertical solar array technologies for lunar surface[EB/OL]. (2021-3-23). <https://www.nasa.gov/feature/nasa-industry-to-mature-vertical-solar-array-technologies-for-lunar-surface>.
- [21] ROBERTSON B E, RINES M R, TAYLOR C, et al. The light bender concept for power distribution on a lunar base [J]. *ASCEND*, 2021: 4160.
- [22] MASON L, RUCKER M. Common power and energy storage solutions to support lunar and Mars surface exploration missions[C]//*Proceedings of International Astronautical Congress (IAC)*. Washington: IAC, 2019.
- [23] CHAMBERLAIN M K, KIEFER S H, LAPOINTE M, et al. On-orbit flight testing of the Roll-Out solar array[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 179: 407-414.
- [24] 王凯, 王训春, 钱斌, 等. 高效太阳能电池及其阵列技术的空间应用研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(5): 1436-1446.
- WANG K, WANG X C, QIN B, et al. Recent development on space application for high-efficiency solar cells and array technology[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(5): 1436-1446.
- [25] BENAROYA H. Lunar habitats: a brief overview of issues and concepts[J]. *Reach*, 2017, 7: 14-33.
- [26] GARCIA C P, CHANG B, JOHNSON D W, et al. Round trip energy efficiency of NASA Glenn regenerative fuel cell system[C]//*Proceedings of NHA Annual Hydrogen Conference 2006*. Washington: [s. n.], 2006.
- [27] COLOZZA A J. Small lunar base camp and in situ resource utilization oxygen production facility power system comparison: NASA-2020-220368[R]. USA: NASA, 2020.
- [28] REID C M, MILLER T B, HOBerecht M A, et al. History of electrochemical and energy storage technology development at NASA Glenn Research Center[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 26(2): 361-371.
- [29] FRASER S D. Power system options for lunar surface exploration: past, present and future[J]. *Moon: Prospective Energy and Material Resources*, 2012: 295-323.
- [30] BENTS D J, SCULLIN V J, CHANG B J, et al. Hydrogen-oxygen PEM regenerative fuel cell development at Nasa Glenn Research Center[J]. *Fuel Cells Bulletin*, 2006, 2006(1): 12-14.
- [31] GRIGORIEV S A, MILLET P, POREMBSKY V I, et al. Development and preliminary testing of a unitized regenerative fuel cell based on PEM technology[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(6): 4164-4168.
- [32] GIACOPPO G, HOVLAND S, BARBERA O. 2 kW Modular PEM fuel cell stack for space applications: development and test for operation under relevant conditions[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 1683-1696.
- [33] ITO H, MIYAZAKI N, ISHIDA M, et al. Efficiency of unitized reversible fuel cell systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(13): 5803-5815.
- [34] QIU D, PENG L, LAI X. kW-grade unitized regenerative fuel cell stack design for high round-trip efficiencies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 270: 116277.
- [35] GARCHE J, SMOLINKA T, NAVARRA M A, et al. Chapter 11: regenerative fuel cells[J]. *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications*, 2022, P365-406.
- [36] OKAYA S. Aerospace fuel cell rapid prototyping power system concept[C]//*Proceedings of 12th International Energy Conversion Engineering Conference*. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [37] SONE Y. A 100-W class regenerative fuel cell system for lunar and planetary missions[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(21): 9076-9080.
- [38] SANDERS G B, LARSON W E. Progress made in lunar in situ

- resource utilization under NASA's exploration technology and development program[J]. *Earth and Space* 2012: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, 2012, 7: 457-478.
- [39] BALASUBRAMANIAM R, GOKOGLU S, SACKSTEDER K, et al. Analysis of solar-heated thermal wadis to support extended-duration lunar exploration[J]. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 2011, 25(1): 130-139.
- [40] CLIMENT B, TORROBA O, GONZALEZ-CINCA R, et al. Heat storage and electricity generation in the Moon during the lunar night[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 352-358.
- [41] LAPPAS V, KOSTOPOULOS V, TSOURDOS A, et al. Lunar in-situ thermal regolith storage and power generation using thermoelectric generators[C]//Proceedings of AIAA Scitech 2019 Forum. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [42] FLEITH P, COWLEY A, POU A C, et al. In-situ approach for thermal energy storage and thermoelectricity generation on the Moon: modelling and simulation[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 181: 104789.
- [43] HU D, LI M, LI Q. A solar thermal storage power generation system based on lunar in-situ resources utilization: modeling and analysis[J]. *Energy*, 2021, 223: 120083.
- [44] LIU Y W, SHEN T R, LV X C, et al. Investigation on a lunar energy storage and conversion system based on the in-situ resources utilization[J]. *Energy*, 2023, 7(2): 126681.
- [45] NAKAMURA T, SMITH B. Solar thermal system for lunar ISRU applications: development and field operation at Mauna Kea, HI[C]//Proceedings of 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. San Diego, California, US: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2011.
- [46] MEURISSE A, MAKAYA A, WILLSCH C, et al. Solar 3D printing of lunar regolith[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 152: 800-810.
- [47] FATERI M, MEURISSE A, SPERL M, et al. Solar sintering for lunar additive manufacturing[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(6): 04019101.
- [48] 王超, 姚伟, 李啸天, 等. 一种利用静电输运和聚光熔融烧结的原位资源处理系统: 中国, 201810183951.5[P]. 2018-09-11.
- [49] NAKAMURA T, VAN PELT A D, GUSTAFSON R J, et al. Solar thermal power system for oxygen production from lunar regolith[C]//Proceedings of El-Genk M. S. Space Technology and Applications International Forum. New Mexico, US: AIP conference, 2008.
- [50] COLOZZA A, HELLER R, WONG W, et al. Solar energy systems for lunar oxygen generation[C]//Proceedings of 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida, US: AIAA, 2010.
- [51] LINNE D L, SCHULER J M, SIBILLE L, et al. Lunar production system for extracting oxygen from regolith[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 34(4): 04021043.
- [52] GUERRERO-GONZALEZ F J, ZABEL P. System analysis of an ISRU production plant: extraction of metals and oxygen from lunar regolith[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 203: 187-201.
- [53] CATALDO R L, BENNETT G L. US space radioisotope power systems and applications: Past, present and future[J]. *Radioisotopes-Applications in Physical Sciences*, 2011: 473-496.
- [54] ZUNIGA A F, TURNER M F, RASKY D, et al. Building an economical and sustainable lunar infrastructure to enable lunar industrialization[C]//Proceedings of Pisacane V. AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. Orlando, USA: AIAA, 2017.
- [55] LI T L, LIU Y H, ZHANG Y Z, et al. Comprehensive modeling and characterization of Chang'E-4 radioisotope thermoelectric generator for lunar mission[J]. *Applied Energy*, 2023, 336: 120865.
- [56] 牛厂磊, 罗志福, 雷英俊, 等. 深空探测先进电源技术综述[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(1): 24-34.
- NIU C L, LUO Z F, LEI Y J, et al. Advanced power source technology of deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1): 24-34.
- [57] HULA G. Atomic power in space II: a history of space nuclear power and propulsion in the United States: INL/EXT-15-34409-Rev000; TRN: US2309061[R]. Idaho Falls, US: Idaho National Laboratory for DOE, 2015.
- [58] BENNETT G. Space nuclear power: opening the final frontier[C]//Proceedings of 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). San Diego, California: AIAA, 2006.
- [59] BENNETT G L. Mission interplanetary: using radioisotope power to explore the solar system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(3): 382-392.
- [60] WINTER F D, STAPFER G, MEDINA E. The design of a nuclear power supply with a 50 year life expectancy: the JPL Voyager's SiGe MHW RTG[J]. *IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine*, 1999, 15(4): 5-12.
- [61] VINING C B, SERVICES Z, BENNETT G L. Power for science and exploration: upgrading the General-Purpose Heat Source Radioisotope Thermoelectric Generator (GPHS-RTG)[C]//Proceedings of 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Nashville, TN, USA: AIAA, 2010.
- [62] BALINT T S, JORDAN J F. RPS strategies to enable NASA's next decade robotic Mars missions[J]. *Acta Astronautica*, 2007, 60(12): 992-1001.
- [63] WHITING C E, WOERNER D F. Lifetime performance of spaceborne RTGs[J]. *The Technology of Discovery: Radioisotope Thermoelectric Generators and Thermoelectric Technologies for Space Exploration*, 2023: 183-212.
- [64] WHITING C E. Nuclear systems used for space exploration by other countries[J]. *The Technology of Discovery: Radioisotope Thermoelectric Generators and Thermoelectric Technologies for Space Exploration*, 2023, 10: 77-84.
- [65] ANDERSON D J. NASA radioisotope power conversion technology NRA overview[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2005, 746: 421-428.
- [66] MASON L S. Dynamic energy conversion: Vital technology for space nuclear power[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 26(2): 352-360.
- [67] ANDERSON R V. Technological implications of SNAP reactor power system development on future space nuclear power systems: DOE/SF/11687-T1; ON: DE83016162[R]. Rockwell International Corp. , Canoga Park, CA (USA): Energy Systems Group, 1982.
- [68] EL-GENK M S. Deployment history and design considerations for space reactor power systems[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(9-10):

- 833-849.
- [69] POSTON D I. The Heatpipe-Operated Mars Exploration Reactor (HOMER)[C]//Proceedings of AIP Conference. New Mexico, USA: American Institute of Physics, 2001.
- [70] POSTON D I, GODFROY T, MCCLURE P R, et al. KiloPower project-KRUSTY experiment nuclear design: LA-UR-15-25540[R]. Los Alamos, NM (United States): Los Alamos National Lab. , 2015.
- [71] POSTON D I, GIBSON M A, GODFROY T, et al. KRUSTY reactor design[J]. Nuclear Technology, 2020, 206(sup1): S13-S30.
- [72] MCCLURE P R, POSTON D I, GIBSON M A, et al. Kilopower project: the KRUSTY fission power experiment and potential missions[J]. Nuclear Technology, 2020, 206(sup1): S1-S12.
- [73] SCOLESE C. NASA's nuclear systems initiative[J]. National Aeronautics and Space Administration, 2002, 14(2): 1-9.
- [74] BARTH C, PIKE D. Lunar power transmission for fission surface power[J]. Nuclear and Emerging Technologies for Space (NETS-2022), 2022(8): 11-17.
- [75] KOROTEEV A S, OSHEV Y A, POPOV S A, et al. Nuclear power propulsion system for spacecraft[J]. *Thermal Engineering*, 2015, 62: 971-980.
- [76] ANDREEV P V, GULEVICH A V, ZARITSKY G A, et al. Physical and engineering potential of thermionics for advanced projects of sub-megawatt SNPS[J]. Nuclear and Emerging Technologies for Space (NETS-2012). 2012, 2(3): 12-19.
- 作者简介:
张辉(1978-),女,研究员,博导,主要研究方向:能源转化技术与储能材料、月壤原位资源利用。
通信地址:北京市海淀区友谊路104号院(100094)
电话:(010)68111079
E-mail:hzhreach@139.com
董珂琪(1994-),女,助理工程师,主要研究方向:能源转化技术与储能材料、月壤原位资源利用。
通信地址:北京市海淀区友谊路104号院(100094)
电话:(010)68111897
E-mail:dongkeqi46@163.com
姚伟(1972-),男,博士,研究员,主要研究方向:地外资源利用。本文通信作者。
通信地址:北京市海淀区友谊路104号(100094)
电话:010-68747483
E-mail:yaowei_72@qq.com

Progress and Prospect of Energy Technologies on Lunar Scientific Research Station

ZHANG Hui, DONG Keqi, YAO Wei

(China Academy of Space Technology (CAST), Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Lunar energies are the essential foundation and prerequisite for construction and operation of lunar scientific research stations. This work analyzes the energy features and requirements the lunar research station, including high power and diversified energy, high-reliability and uninterrupted day-night energy, and energy adaptability towards the lunar environment. The application advantages, limiting conditions, and development suggestions of lunar energy technologies (solar photovoltaic + energy storage batteries, solar thermal utilization, lunar nuclear energy, and renewable fuel cells) in lunar research stations are summarized and emphasized. Based on the analyses and comparisons of the energy technologies, we propose new energy system architectures for lunar scientific research stations to provide reference for the future energy design and development of the lunar research station.

Keywords: lunar exploration; lunar research station; energy technologies; energy system scheme

Highlights:

- According to the long-term mission challenges of the lunar research station under extreme environment, the requirements of various energy technologies for the lunar research station are summarized and analyzed.
- A lunar research station energy system is proposed by using mutual supports of high-power solar concentrators, high-efficiency photothermal conversion, heat storage using lunar soil, long-term photoelectric conversion, and renewable fuel cells.

[责任编辑:高莎,英文审校:宋利辉]