

PEM 水电解技术在航天上的应用现状 与发展趋势

王 飞¹, 周抗寒¹, 管春磊², 焦飞飞¹, 黄武博¹

(1. 中国航天员科研训练中心 人因工程重点实验室, 北京 100094; 2. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘 要: 介绍了质子交换膜(PEM)水电解技术的特点及其在国内外航天领域的应用现状, 在分析空间任务的发展趋势, 以及能源、动力、环境控制与生命保障系统需求变化的基础上, 认为在未来载人航天任务中, 能源、动力、生保物质互用的解决方法是摆脱依赖地面支持、实现自主和可持续保障的最优途径, 并指出了 PEM 水电解技术作为实现这一技术途径的关键环节所面临的挑战。

关键词: 质子交换膜(PEM)水电解技术; 航天; 空间任务

中图分类号: TN 911.73; TP 391.9

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.02.003

Application Status and Development of PEM Water Electrolysis in Aerospace Field

WANG Fei¹, ZHOU Kanghan¹, GUAN Chunlei², JIAO Feifei¹, HUANG Wubo¹

(1. National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China; 2. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract: In this paper, the characteristics of proton exchange membrane water electrolysis (PEMWE) are introduced. The application status of PEMWE in aerospace field is also presented. Based on the analyses for the development tendency and the requirement changes of energy, power, environment control and life support system in space missions, it is believed that in future manned space missions, the mutual-use of energy, power, and materials for life support may be the optimum solution for the independence of ground support and the achievements of autonomy and sustainability. Furthermore, the challenges of the PEMWE as the key link to realize such technological approaches are put forward.

Key words: proton exchange membrane water electrolysis (PEMWE); aerospace; space mission

0 引言

水电解技术在空间领域的应用始于俄罗斯“和平”号空间站^[1], 它使用流动碱式水电解技术, 采用强碱性的氢氧化钾溶液作为电解质, 电解槽的阴极、阳极之间采用多孔石棉等作为隔膜, 作为生保系统为航天员提供氧气。进一步改进后的电解制氧装置用于国际空间站俄罗斯服务舱的生保系统中。美国采用了一种新的水电解制氧技术, 即质子

交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)水电解技术^[2], 采用该技术的电解制氧装置于 2008 年 11 月在国际空间站美国服务舱内正式投入运行。

随着氢能源技术的发展, 促进了 PEM 水电解技术的进步与成熟, 将加速推动这一技术在航天方向的应用拓展。本文介绍了 PEM 水电解技术在国内外航天领域中的应用与研究现状, 并通过对发展趋势的分析, 提出该技术尚待深化发展的方向。

收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-03-15

基金项目: 载人航天领域预先研究资助项目(050403)

作者简介: 王 飞(1978—), 男, 副研究员, 主要研究方向为环境控制与生命保障技术。

通信作者: 周抗寒(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为环境控制与生命保障技术。

1 PEM 水电解技术的特点

与传统的碱性水电解原理不同,PEM 水电解技术采用纯水作为工质,PEM 膜起着电解质与隔膜的双重作用。当水电解器工作时,膜上水化的质子通

过界面区域在阳极和阴极之间传递,发生酸性水电解反应。由于工作原理的不同,导致 PEM 水电解与流动碱式水电解在水电解器性能、系统性能之间存在明显差异,见表 1。

表 1 PEM 水电解器与碱性水电解器以及系统总体性能对比

Tab.1 Comparison of the general performance of PEM and alkali water electrolyzers

	碱性水电解技术	PEM 水电解技术
电池槽	无贵金属催化剂,成本低	采用贵金属催化剂,成本高
	电流密度低(0.2~0.4 A·cm ⁻²)	电流密度低(1.5~3.0 A·cm ⁻²)
	低载荷波动范围	系统响应快速,适应动态和宽载荷波动操作
	气体纯度低	效率高,气体纯度高,氧气为医用氧
	电解液有腐蚀性和剧毒 V ₂ O ₅	单堆可达 100 Nm ³ ·h ⁻¹
	大规模,最大 1 000 Nm ³ ·h ⁻¹	体积小,适于多电解槽集成 MW 级产品
	体积大,难以多电解槽集成	技术进步在提升产品的性价比
	工作温度约 95 °C	工作温度为 60~80 °C
	工作压力为 1.6 MPa(大型槽)	工作压力为 3.5 MPa(按需求可进一步提高)
系统	氢氧侧等压设计	氢氧气可差压设计
	系统组成和操作复杂,成本高	系统组成简单、紧凑、小型化,成本低
	氢气分离器容积大,系统留存氢气量多	氢气分离器很小,系统留存氢气水,安全性高
	单槽产氢量达 1 000 Nm ³ ·h ⁻¹	通过多电解槽集成实现 >1000 Nm ³ ·h ⁻¹ 系统

PEM 水电解器、碱性水电解器工作特性对比图如图 1 所示。

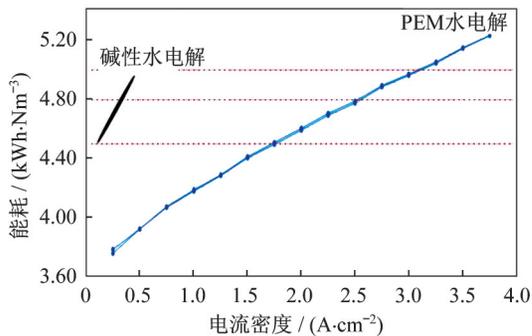


图 1 PEM 水电解器与碱性水电解器工作特性对比

Fig.1 Comparison of the performance characteristics of PEM and alkali water electrolyzers

由表 1 和图 1 可见,由于 PEM 水电解器在大电流密度时的极化远小于碱性水电解器,导致 PEM 水电解器工作电流密度范围很宽,而且具有低比能耗的优势。PEM 水电解器的工作电流密度可以达到 3.0 A·cm⁻² 以上,远高于碱性水电解器的 0.2~0.4 A·cm⁻²。尽管由于 PEM 水电解器使用成本较高的贵金属材料作为催化剂,部分抵消了提高电流密度对缩小水电解系统规模,减少了催化剂用量方

面的贡献,导致目前只有小型 PEM 水电解装置性价比优于碱性水电解。但是,随着技术的进步,大型、超大型的 PEM 水电解系统性价比将与碱性水电解系统趋同。

由于 PEM 水电解技术采用致密、无孔的高分子聚合物膜作为电解质和阴、阳极隔膜,对比采用多孔、非电解质隔膜的碱性水电解,工作模式更加灵活,耐内外压能力更强。在供水模式方面,不同于碱性水电解需要两腔同时供碱液,且必须完全浸没隔膜,PEM 水电解可以采用阳极或阴极单侧供水,从而减少对水气分离器的需求。甚至还可以静态供水,通过控制水蒸气的输入量与反应量达到平衡,使电解器直接生成不含液态水的氢气、氧气,从而取消碱性水电解系统必须配套的水气分离器,大大简化了系统的流程^[3]。

在承压能力、压力制度方面,由于 PEM 膜具有较强的耐压能力,因此,不同于碱性水电解必须保持阴、阳极室之间压力平衡的工作特性,PEM 水电解既可以采用阴、阳极室压力相同的等压模式,也可以采用差压模式。对于高压水电解系统,既可以采用低压水电解铠装、配备复杂压控系统的设计方案,也可以采用系统简单但技术难度大的无铠装高

压水电解器设计方案;此外,还可采用系统极为简单,只是阴极室或阳极室工作在高压,另一侧工作在常压的高差压设计方案^[4]。

2 载人航天工程对水电解技术的需求及经济可行性

2.1 载人航天工程对水电解技术的需求

随着航天技术的进步,21世纪载人航天活动发展路线是建造与运营空间站,建立永久性月球基地^[5],实现载人火星飞行。在这一系列工程中,对水电解技术的需求可能在以下3个方面:

1) 在航天器生命保障系统中的应用。航天生命保障系统的主要功能之一是为乘员提供氧气^[6]。短期载人航天飞行均采用非再生式环控生保技术,通过飞行器携带高压氧瓶满足乘员在轨生活期间对氧气的需求。然而,该方案对于长期、深空探索是不可实现的。以3人乘组为例,每年消耗的氧气量接近1 t,高压氧瓶的质量需求达1.5 t,这将给物资补给带来无法承受的负担。因此,空间站中采用水电解制氧,但空间站均为常压工作的水电解装置,产生的氧气不能直接为舱外航天服气瓶充氧,而月球基地建设过程中大规模月面活动时舱外服氧瓶、星际航行过程中应急生保系统氧瓶的在轨充填,都有在轨生产高压氧气的需求。

2) 在空间电源系统中的应用。由于航天任务规模的发展,对大功率、高比能电源的需求越来越强。高功率空间飞行器能源系统主要由太阳能光伏电池、储能与发电模块等部分组成。根据储能与发电模块的不同,空间电源系统分为蓄电池(镉镍、锂)、再生燃料电池系统等^[7]。蓄电池系统的质量与电源规模成正比,光影周期越长,质量增加越显著。相比之下,由水电解与氢、氧燃料电池构成的再生燃料电池系统具有比能量较高,以及10 kW以上的燃料电池电源系统质量对规模不敏感的特点,更适宜于大规模、长光影周期的任务。在月球基地任务中,再生燃料电池系统成为满足任务的优选能源方案之一,水电解模块作为储能环节成为这一系统的关键部分,其比能耗、工作压力、储能密度等成为影响再生燃料电池系统指标的重要因素。要满足再生燃料电池电源系统性能的要求,水电解装置部分的规模须达到发电功率2倍以上,气体输出压力超

过10 MPa。

3) 在空间动力上的应用。无论登陆火星,还是登陆月球,都离不开高效降落推进系统,这一推进系统最重要的要求是发动机必须有很深的调节能力。洛克希德-马丁公司的研究表明,氢、氧是可重复使用的单级着陆器动力系统唯一可行的推进剂组合。该公司研制的着陆器推进系统将使用液氧、液氢推进剂,并计划在月球轨道上建立推进剂储存与转运设施,从地球运送水或从月球表面提取水,将其转化为液氧、液氢推进剂。

此外,在航天器中也可以使用氢、氧发动机作为推进动力。美国国家航空航天局(NASA)提出了“水火箭”-可逆燃料电池组合方案,通过在轨水电解提供高压氢气、氧气为燃料电池电源作燃料,同时为氢、氧发动机提供燃料^[8]。

2.2 在轨高压水电解制氧的经济性分析

等效系统质量(Equivalent System Mass, ESM)指系统的硬件质量及支持硬件的其他部分的估算质量之和,相当于能够提供系统功能所需的总发射质量,从而等同于发射成本。依据总质量及等效系统质量对方案进行经济性评价是目前一种比较客观与科学的方法。

2009年,NASA 约翰逊中心联合 Hamilton Sundstrand 公司在前期研究的基础上,以长期驻月基地任务以及180 d周期的标准“前哨”飞行任务作为分析对象,进行了多种供氧方案的总质量及等效系统质量评价^[9]。任务中设定每次出舱活动为2人,高压氧(20.7 MPa)消耗量为 $0.73 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{次}^{-1}$,任务次数为150次。分析结果表明:180 d及10 a任务所需的高压氧资源分别为218 kg、4 364 kg。对各种在轨高压氧、高压氢气补给方案的经济性进行对比,设定的方案包含高压气瓶运输、液氧运输、在轨电解制氧、利用原位资源制氧共4类、7种方案,具体如下:1) 地面携带工作压力范围为21.4~27.6 MPa高压气瓶供氧(A);2) 地面携带低温储罐运氧,将其蒸发后与气态氧混合成高压氧(B1);3) 地面携带低温储罐运氧,由变温吸附压缩机加压到27.6 MPa(B2);4) 轨道上低压水电解制氧,用多级活塞式压缩机压缩至20.7 MPa(C);5) 轨道上用PEM水电解装置输出压力12.8 MPa的氧,用压缩机增压到24.8 MPa(D);6) 共享能源系统的高压水电解供

氧,同时也为航天服供氧,电解装置输出压力 24.8 MPa(E);7) 月球基地“原位资源利用装置”电解输出 5.2 MPa 氧气,压缩机提高到 24.8 MPa(F)。分析的结果如图 2 和图 3 所示。

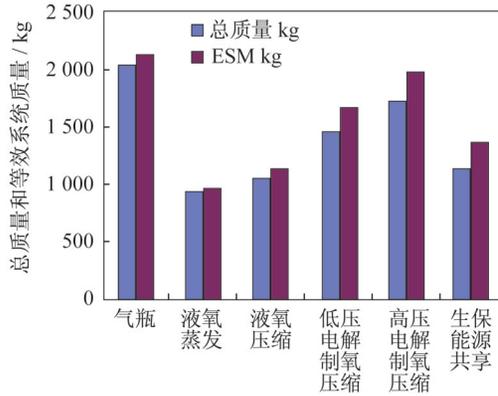


图 2 180 d 开放式任务环控生保高压氧补给方案的总质量和等效系统质量对比

Fig.2 Comparison of the total mass and ESM of the high pressure oxygen supply scheme for environmental control and life support in the 180 d open mission

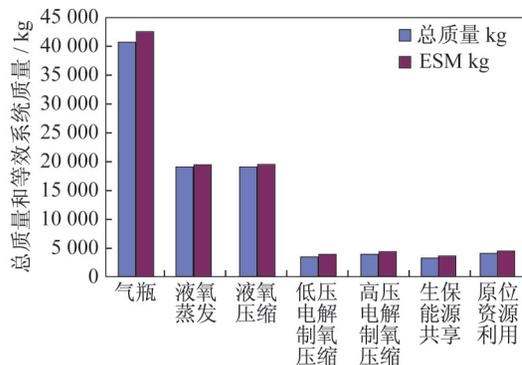


图 3 10 a 封闭式任务环控生保高压氧补给方案的总质量和等效系统质量对比

Fig.3 Comparison of the total mass and ESM of the high pressure oxygen supply scheme for environmental control and life support in the 10 a closed mission

结果表明:对于 180 d 任务,采用液氧或生保能源共享的高压电解制氧方案比较理想。对于 10 a 任务,则在轨电解的方案最优。尽管压缩机质量、体积和功率都较低,与低压电解组合在等效质量方面略占优势,但由于无油,活塞和金属气缸之间的摩擦缩短压缩机使用寿命,增大维护负担。

国际空间站为气闸舱及出舱活动(Extravehicular Activity, EVA)补氧的高压压缩机的宝贵运行

经验也表明:在氧气充填系统中,压缩组件的质量、功耗与维护负担较重,解决这些问题十分困难,而且压缩氧气过程存在严重的安全风险。因此,采用直接在轨高压电解制氧替代机械压缩机的技术有很大的价值。

3 国内外 PEM 水电解技术现状

3.1 国外研究现状

美国是最早进行 PEM 水电解技术研究的国家,代表了目前国际水电解技术和应用的最高水平。1982 年,美国通用电气公司(GE)为美国海军“海狼”级核潜艇研制了水电解制氧装置原型机^[10],在潜艇上累计工作了 100 000 h,铠装在高压容器内的 PEM 电解器输出气体压力为 2~20 MPa。此后,Hamilton Standard 公司接替 GE,负责潜艇用高压水电解制氧装置的研制工作。

美国为航天员供氧的 PEM 水电解制氧装置,于 2006 年 7 月运送至国际空间站,2008 年 11 月 22 日开始运行。其工作模式是在轨道运行周期 90 min 内,53 min 阳照区正常运行,37 min 阴影区转入待机模式,额定工况满足 4 名乘员,最大工况满足 7 名乘员的耗氧需求。系统工作压力为 0.28 MPa,额定工作电流为 10~55 A,待机电流为 1 A^[11-12]。

在轨高压氧充装方面,为解决航天飞机退役后,航天员出舱活动时所需要的高压氧瓶在轨充装的问题,由 Giner Electrochemical、Hamilton Sundstrand 公司分别开展 20.7 MPa 在轨水电解器研究工作^[13]。其中,Hamilton Sundstrand 采用阴极供水、无铠装高差压(氢气 0.3 MPa、氧气 20.7 MPa)电池堆设计方案;Giner Electrochemical 采用阴极供水、差压结合波纹筒体铠装电池堆设计方案(电解制氧输出压力为 13.8 MPa,机械增压至 20.7 MPa)。

针对月球基地、载人火星探索等长期、复杂任务的环控生保-空间能源-推进系统设计问题,NASA 提出了“水火箭”-可逆燃料电池组合方案,研制出原理样机,进行了地面试验验证。在该方案中,在轨高压水电解装置提供氢、氧发动机以及燃料电池的燃料,产物水可提供给环控生保系统作为饮用水或作为电解制氧的原料^[8]。

在民用可再生能源领域,欧美等国家纷纷推出兆瓦级的消纳弃电的 PEM 水电解制氢系统^[14-15],其

中美国的普顿 Proton Onsite、英国的 ITMpower、加拿大的 Hydrogenics、德国 Siemens 等公司代表了目前 PEM 水电解技术大规模、产业化应用的国际水

平。一些代表性机构 PEM 水电解制氢装备的技术参数见表 2。

表 2 PEM 水电解制氢装备及技术参数

Tab.2 Hydrogen production equipment and technical parameters by PEM water electrolysis

研发机构	Proton Onsite	GINER	ITMpower	Hydrogenics	Siemens	AREVAH2GEN
产品系列	“M”	“Merrimack”	“HGas”	“HYLYZER 600”	“SILYZER200”	“E120”
系统功率/MW	0.5~2.0	—	1.0	2.0	1.25	0.6
单堆产氢量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	50	30	73	400	225	30
单堆额定功率/MW	0.25	0.15	0.35	2.0	1.25	0.15
单堆峰值功率/MW	0.25	0.15	0.35	3.0	2.0	0.15
单位能耗/(kWh·Nm ⁻³)	4.9	5.0	4.8	5.0	5.5	5.0
H ₂ 输出压力/MPa	3.0	4.0	3.5	3.0	3.5	1.5/3.5
启动(响应)时间/s	<10	—	<1	—	<10	—

3.2 国内研究现状

近年来,国内多家单位开展了 PEM 水电解技术的研究工作,如中国航天员中心、中船重工 718 所、航天科技集团 811 所、大连化物所等。航天员中心研制的 PEM 电解制氧试验装置于 2012 年 7 月随“天宫 1 号”发射入轨,并在轨稳定运行^[16-17]。在此基础上研制的电解装置将装备到空间站,作为航天员供氧设备。该装置采用阴极供水的 PEM 水电解与静态水气分离技术方案^[6],配套的水电解器地面稳定运行超过 23 000 h^[6]。图 4 所示为“天宫一号”电解制氧装置。



图 4 “天宫一号”电解制氧装置

Fig.4 “Tiangong-1” electrolysis oxygen generation device

在高压水电解技术方面,研制了高差压水电解单电池,采用阴极常压供水、高压产氧的设计方案,当耐压达到 10 MPa、运行压差为 5.0 MPa 时,氧气

纯度可达 99.9%。

此外,为潜艇生保系统研制了输出压力 5.0 MPa、产氧量 3 m³·h⁻¹样机。在能源应用方面先后参加北京航天动力研究所、航天科技集团 811 所再生式燃料电池能源系统研究,研制了单模块 30 kW、5 MPa 水电解器,电堆性能的一致性与单体试样基本一致^[18-20]。

在高稳定、大电流密度电极材料研究与制备方面,目前研制的电极材料在工作温度为 70 °C,当电流密度为 1.5 A·cm⁻²和 2.5 A·cm⁻²时,单池电压分别稳定在 1.82 V 和 2.00 V,极化曲线如图 5 所示。在电流密度 1.00~3.25 A·cm⁻²的工况下,持续测试 10 000 h,运行稳定。

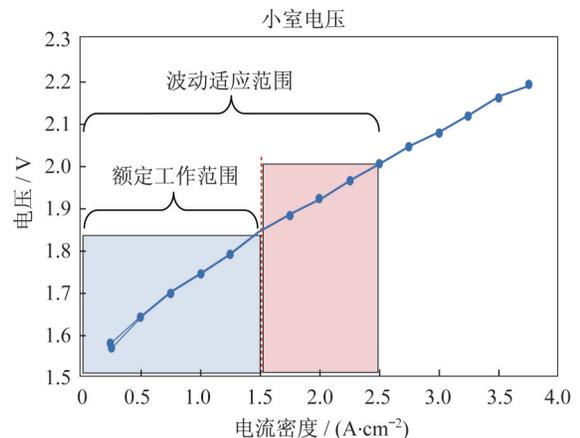
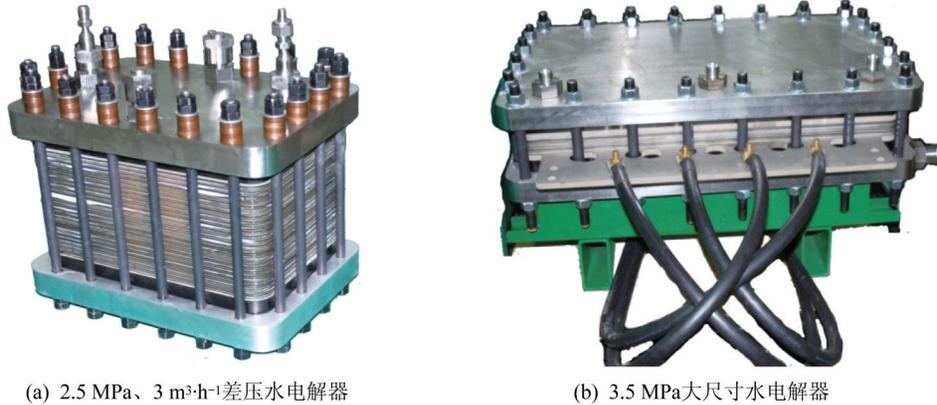


图 5 高稳定、大电流密度 PEM 电极材料极化曲线

Fig.5 Polarization curve of novel high stable PEM electrode material at high current density

在差压式、大尺寸水电解器设计与研制方面,研制的差压式水电解器的阴(高压)与阳极之间压差可达 2.5 MPa,产氢量为 $3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,工作电流密度为 $1.5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。等压大尺寸水电解器氢、氧输出压

力可达 3.5 MPa,单电池有效电极面积达到 1550 cm^2 ,工作电流密度为 $1.5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,如图 6 所示。电堆的极化曲线与图 5 基本相同。



(a) 2.5 MPa、 $3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 差压水电解器

(b) 3.5 MPa大尺寸水电解器

图 6 差压水电解器和大尺寸水电解器

Fig.6 High differential pressure water electrolyser and large-scale water electrolyser

4 PEM 水电解技术空间应用的趋势与挑战

在月球建立人类的永久性基地、登陆火星是 21 世纪载人航天的发展路线,在这一飞行过程中涉及的目标轨道包括:低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)、地月平动的探索节点(Earth-Moon Libration point orbits, EML)、月球轨道、近地轨道(Near Earth Orbit, NEO)、火星轨道,飞往这些轨道的特征参数对比见表 3。

表 3 不同空间任务的显著特征

Tab.3 Distinct characteristics of various space missions

特征参数	空间站	EML	NEO	火星
持续时间	20~30 a	20~30 a	~1 a	~3 a
更新补给间隔	~3 月	~6 月	~1 a	~3 a
应急返回	小时	~3 d 或 3 d 以下	最多 1 a	最多 2 a
乘组人数/人	6	3	3	3
质量负荷(相对)	1	3	5	10

由表 3 可见,随着飞行距离的延长,发射成本急剧增加。相比于低地球轨道的空间站,载人深空飞行任务不但对载荷的发射质量、体积、功耗等有更高约束,而且由于应急返回的不现实性,除了可靠性、寿命要求更高,依赖地面补给的低轨道后勤保障模式也不能适应需求,将被自主的、可持续在轨

生产的保障体系所替代。因此,通过系统兼容设计,实现能源、动力、环境控制与生命保障物质互用的解决方案与现有的、各自独立的解决方案相比,具有无法比拟的技术与经济优势,将成为未来深空探索任务中能源、动力、生保系统的发展方向。

PEM 水电解技术是联接生保物质、能源与动力物质的关键技术。本身的技术原理与特点决定了该技术具备构建小型化、轻量化空间设备的能力,具有无需机械压缩机增压而实现高压氧气、氢气输出的能力,可满足在轨高压氧瓶充装、高压氢气储能需求。PEM 水电解技术在地面可再生能源系统中的大规模应用,将加速提升成熟度与可靠性,推动该技术在空间领域的大规模应用。尽管该技术已经在空间站生保系统中得到应用,但对比能源、动力领域的要求,PEM 水电解还面临如下技术差异以及由此而带来的技术挑战:1) 能源系统的燃料物质量的需求是生保系统的成百上千倍,在微重力或低重力条件下高效的水、气分离将面临困难;2) 电池堆工作电流密度成 10 倍以上的增加,在微重力或低重力条件下电池内传热、传质以及低能耗的保障面临困难;3) 输出压力成 100 倍以上的增加,无铠装电池堆的密封及材料问题和高压下气体纯度保障面临挑战。

5 结束语

随着载人航天任务向深空探索的发展,能源、动力、生保物质互用的解决方法是摆脱依赖地面支持,实现自主的、可持续保障的最优途径,作为这一途径实施关键环节的 PEM 水电解技术,无论是该技术所具备的特点,还是已具有的技术积累,均具备了构建这一系统的良好基础。在深化解决所面临的新问题后,PEM 水电解技术将在空间应用中发挥更大的作用。

参考文献

- [1] SAMSONOV N M, FARAFONOV N S, GAVR-ILOV L I, et al. Experience in development and long-term operation of Mir's system for oxygen generation by electrolysis [R]. SAE 2000-01-2356, 2000.
- [2] ROBERT J E. International space station United States oxygen generator development testing [R]. SAE 2000-01-2351, 2000.
- [3] FRED M, BLAKE M, ANDREW H W, et al. Applications and development of high pressure PEM systems [C]// Portable Fuel Cells Conference. 1999: UCRL-JC-134539.
- [4] COLLING A K, ROY R J. Development status and testing of high differential pressure SPE water electrolysis cells [R]. ICES 981802, 1998.
- [5] 贺波勇,顾绍景,黄海兵,等.中秋节载人登月任务窗口与转移轨道设计研究[J].上海航天,2017,34(5): 9-15.
- [6] 吴志强,高峰,邓一兵,等.空间站再生生保关键技术研究[J].航天医学与医学工程,2018,31(2): 105-111.
- [7] 王东,张伟,刘向.质子交换膜燃料电池及其空间应用[J].上海航天,2005,22(2): 39-42.
- [8] MITLISKY F, WEISBERG A H, CARTER P H, et al. Water rocket-electrolysis propulsion and fuel cell power [R]. AIAA 1999-4609, 1999.
- [9] FRANK F J, BRUCE C, MICHAEL K, et al. High-pressure oxygen generation for outpost EVA study [R]. ICES 2009-01-2534, 2009.
- [10] ANTHONY C, KEVIN P. Hydrogen generation through renewable energy sources at the NASA Glenn Research Center [R]. NASA/CR-2007-214682, 2007.
- [11] CLOUD D, ZARZYCKI M. Development status of the ISS oxygen generation assembly and key components [R]. SAE 2002-01-2269, 2002.
- [12] GREGORY J G. International space station (ISS) environmental control and life support (ECLS) system overview of events: 2016-2017 [R]. ICES 2017-059, 2017.
- [13] EDWIN W S, TIMOTHY J N, MCORTNEY K M, et al. Development testing of high-pressure cathode feed water electrolysis cell stacks for microgravity environments [R]. AIAA 2011-5058, 2011.
- [14] NELSON A K, TOMAS L G, DAVID B O. A solar-powered, high-efficiency hydrogen fueling system using high-pressure electrolysis of water: design and initial results [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33: 2747-2764.
- [15] PIERRE M, DIANA D, SERGUEY G, et al. GenHyPEM: a research program on PEM water electrolysis supported by the European Commission [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34: 4974-4982.
- [16] 李俊荣,尹永利,周抗寒,等.空间站电解制氧技术研究进展[J].航天医学与医学工程,2013(3): 216-220.
- [17] 尹永利,周抗寒,李俊荣,等.电解制氧装置环境适应性设计与试验研究[J].航天医学与医学工程,2015(5): 358-262.
- [18] 周抗寒,任春波,王飞,等.5 MPa 高压质子交换膜水电解装置的研制与试验[J].航天医学与医学工程,2012(5): 368-371.
- [19] 李俊荣,周抗寒,王飞,等.高压质子交换膜水电解技术研究[J].载人航天,2015(2): 121-129.
- [20] 周抗寒,王飞,李俊荣,等.高效、高压质子交换膜水电解技术的研究[C]//第三届高分辨对地观测学术年会优秀论文集.2014: 300-309.