

月面探测器燃料电池应用的初步研究

任德鹏, 李青, 彭松

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 燃料电池是一种高效的清洁能源, 早在20世纪60年代就成功应用于美国载人登月工程中。我国对燃料电池的研究工作开展较早, 当前已初步具备了研发航天器燃料电池的技术能力, 但由于燃料电池属于一次性能源, 使其应用一直受限于航天领域, 近年来我国新型航天器的研发为燃料电池提供了新的应用背景。在调研分析的基础上, 提出了一种使用氢氧燃料电池作为月面探测器主电源的配置方案, 通过与传统供电方案的综合比较总结了燃料电池的优点, 并归纳了后续应用的关键技术和解决途径, 为燃料电池在我国航天领域的应用提供了一种新思路。

关键词: 月面探测器; 燃料电池; 应用研究

中图分类号: V436+.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)06-0552-05

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2017.12.008

引用格式: 任德鹏, 李青, 彭松. 月面探测器燃料电池应用的初步研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(6): 552-556.

Reference format: REN D P, LI Q, PENG S. Preliminary research on the application of fuel cells on lunar probe[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(6): 552-556.

0 引言

燃料电池是一种直接将储存在燃料和氧化剂中的化学能转化为电能的发电装置, 其发电过程不受卡诺循环限制, 具有能量转换效率高、无污染、比功率高的特点^[1]。随着人类面临越来越严重的能源短缺和环境污染问题, 燃料电池的优点越发突显, 在世界范围内引发了广泛的研究热潮^[2]。特别在航天领域, 由于各类新型航天器的研制, 对无污染、长时间高功率输出的能源设备的需求更加强烈^[3]。最初国外燃料电池就是为满足航天器电源的需求而发展起来的, 早在20世纪60年代, 氢氧燃料电池系统已在航天器, 如美国的“双子座”座载人飞船、“阿波罗”登月飞船、俄罗斯的月球轨道器和暴风雪航天飞机上作为主电源系统使用^[4]。我国于20世纪60年代开始燃料电池研究工作, 经多年技术积累已具备研制航天器燃料电池的技术能力。

燃料电池属于一次性能源, 不能长期连续地输出电能, 这是多年来其受限于我国航天领域的主要原因之一。而执行月面采样返回任务的探测器由于其寿命短、能源需求相对少, 为燃料电池的应用创造了条件, 使用燃料电池后可以提高探测器对月面环境的适应能力、简化工作程序设计, 此外燃料电池工作产生的水还可以解决探测器月面的热控问题。

本文在对燃料电池技术特点及研制状况分析的基础上, 提出一种月面探测器燃料电池的配置方案, 并对其应用关键技术进行了剖析。

1 燃料电池原理及分类

燃料电池按电化学原理, 把贮存在燃料和氧化剂中的化学能直接转化为电能, 其内部发生着氧化还原反应。以氢氧燃料电池为例, 其工作原理如图1所示, 具体化学反应如下^[5]。

燃料极(阳极): $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$;

氧化极(阴极): $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$;

总反应式: $H_2 + 1/2O_2 = H_2O + \text{电能} + \text{热能}$ 。

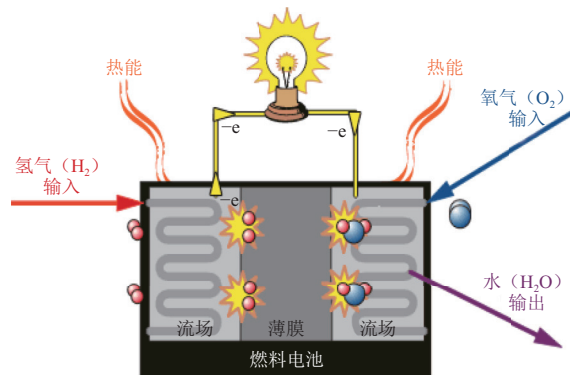


图1 氢氧燃料电池工作原理示意图

Fig. 1 Principle of operation of hydrogen-oxygen fuel cell

依据电解质的不同，燃料电池分为碱性燃料电池（Alkaline Fuel Cell, AFC）、质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC）、磷酸燃料电池（Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC）、熔

融碳酸盐燃料电池（Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC）及固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cell, SOFC）等，各类燃料电池的特点如表1所示。

表1 燃料电池分类及特点

Table 1 Classification and characteristics of fuel cell

简称	电池类型	电解质	工作温度/℃	电化学效率	燃料、氧化剂
AFC	碱性燃料电池	氢氧化钾溶液	室温~90	60%~70%	氢气、氧气
PEMFC	质子交换膜燃料电池	质子交换膜	室温~80	40%~60%	氢气、氧气
PAFC	磷酸燃料电池	磷酸	160~220	55%	天然气、沼气、双氧水、空气
MCFC	熔融碳酸盐燃料电池	碱金属碳酸盐熔融混合物	620~660	65%	天然气、沼气、煤气、双氧水、空气
SOFC	固体氧化物燃料电池	氧离子导电陶瓷	800~1 000	60%~65%	天然气、沼气、煤气、双氧水、空气

2 航天领域燃料电池应用分析

2.1 国外应用情况

目前航天领域以氢氧燃料电池为主，已使用的燃料电池类型为碱性燃料电池和质子交换膜燃料电池。

碱性燃料电池是航天领域最早被实际应用的燃料电池。它采用KOH溶液为电解质，燃料和氧化剂分别为纯氢和纯氧。阿波罗登月飞船的Bacon型AFC由31只单体电池串联而成，输出电压为27~31 V，正常输出功率为563~1 420 W、最大功率2 300 W，工作温度206℃、质量约为113 kg、设计容量为400 h，实际无故障运行了690 h。美国航天飞机使用的石棉膜AFC由96只单体电池组成，输出电压为28 V、输出功率为12 kW、短期最大输出功率可达16 kW、质量约为118 kg、工作温度80℃^[6]。

碱性燃料电池在实际应用中也不断暴露出其购置成本高、寿命短、可靠性低的缺点。NASA每年用于每架航天飞机AFC的维护费用高达0.12~0.19亿美元，而新购置则每架需要0.285亿美元。AFC要求阴、阳极之间的气体压力差不能大于34.5 kPa，压力控制较困难^[7]。KOH是强碱，导致其工作寿命较短，早期的AFC寿命仅为2 600 h，其后经过各种改进，寿命也仅提高到5 000 h^[8]。其工作原理决定了AFC的可靠性不高，如美国1997年4月的一次载人发射任务中，由于AFC失效，导致航天飞机提前返航^[7]。

近20年来，质子交换膜燃料电池在应用中展现出巨大的潜力，性能也有了很大得提高，其价格也在逐渐降低。PEMFC既可作为主电源应用，也可作为再生燃料电池的组成部分。20世纪90年代末期NASA致力于对其所有航天器的AFC进行PEMFC的更新换代，并专门制定了供航天飞机、可重复使用运载器、火星登陆器、空间站使用的PEMFC发展计划。近期，美国联

合科技公司宣布其开发的PEMFC在任务中成功运行了10万h。日本也在积极研究应用于太空环境的PEMFC，并搭建了相应的实验平台^[9]。

2.2 国内研制状态

我国燃料电池研究工作开始于1958年，是世界上从事燃料电池研究较早的国家之一。1958—1970年，国内的科研院所分散地进行了燃料电池的探索性及基础性研究工作。1970年后，在航天事业的推动下，空间燃料电池被列入“曙光计划”，各地的科研机构组成燃料电池协作网，联合开展燃料电池的研究，但70年代末该项目被中止。整个80年代，中国燃料电池的研究工作处于低潮。90年代初，中科院所属的科研院所又开展了对MCFC、PEMFC及SOFC的基础研究，1997年国家科技委将“燃料电池技术”列为国家“九五”计划的重大科技攻关项目。

与国外的研制及应用主线一致，由于碱性燃料电池已不能满足航天的需求，90年代后国内将燃料电池的研究重点转至质子交换膜燃料电池，已突破了系列关键技术，研制的电堆地面功率可达7.5 kW，尤其是中电集团某电源研究所近年来在航天PEMFC的研究方面取得了可观的成果，先后开发出系列产品，使PEMFC比功率不断提高，如图2所示。

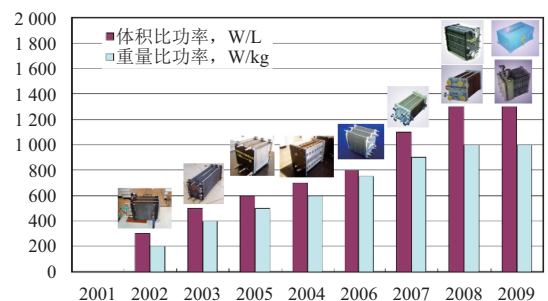


图2 国内燃料电池技术发展情况

Fig. 2 Domestic development of fuel cell technology

3 探测器燃料电池配置方案分析

由国外燃料电池的应用及我国燃料电池的研究现状分析可知,质子交换膜型燃料电池具有工作可靠、成本低且拓展应用强的特点,成为航天领域的主要应用方向,其工作时间受限于燃料携带量的缺点对设计寿命较短的探测器而言影响不突出,而其优点却能简化探测器的设计。以月面采样返回探测器为例,对燃料电池的具体应用进行分析。

3.1 性能要求分析

执行月面采样返回任务的探测器由着陆器和上升器组成,月面着陆后探测器开展月球样品的采集工作,随后由上升器携带样品从月面起飞并进入对接轨道。着陆器和上升器都是短期工作的探测器,任务周期内用电量需求分别为95 kWh和20 kWh,结合当前燃料电池的研制状态,确定了对电池电源系统的指标要求,如表2所示。

表2 电源系统指标要求

Table 2 Performance requirement of power system

项目	要求
最大输出功率/kW	不低于1.7
总发电量/kWh	不低于115
输出电压/V	29 ± 1
工作温度范围/℃	-40~150
转换效率	不小于57%

3.2 系统组成

月面探测器燃料电池电源系统由电池电堆、反应剂储罐、阀门管路组件、水收集装置及电源控制器5部分组成。

1) 电池电堆是电源系统能量转换的主体,它由阴极、阳极、电解质隔膜、极板、集流板、端板、锁紧件等部件构成。燃料气和氧化气分别由电池的阳极和阴极通入,燃料气在阳极上放出电子,电子经外电路传导到阴极并与氧化气结合生成离子,离子在电场作用下通过电解质迁移到阳极上并与燃料气反应形成回路而产生电流。电池的阴、阳两极除传导电子外,也作为氧化还原反应的催化剂。电解质起传递离子和分离燃料气、氧化气的作用。

2) 反应剂储罐包括氢气和氧气贮箱,其外表面包覆隔热材料,避免内部气体在月面高温环境中受热导致压力升高。

3) 阀门管路组件的作用是将储罐内的气体减压后引入电池电堆,并根据电源控制器的指令对工作气体

的质量流量进行调节。

4) 水收集装置的作用是将电池电堆产生的水蒸气进行收集,供探测器“水升华散热装置”使用。

5) 电源控制器的作用是根据探测器的功率需求调节母线电压的稳定,并控制工作气体的流量保持电池电堆稳定运行。

3.3 系统配置设计

根据月面探测器任务特点,着陆器与上升器电源系统采用联合设计,将电池电堆及电源控制器配置在上升器上,同时上升器上配置小型储罐以满足月面起飞后单独工作期间的用电需求;着陆器上配置大储罐和水收集装置,满足月面着陆和月面工作期间着陆器和上升器共同用电需求,并对电堆发电生成的水进行收集。

电源系统最大功率要求不高,小型燃料电池即可满足功率要求,电池电堆质量不超过13 kg;由发电量及系统转换效率要求分析,探测器共需5.1 kg氢气、41 kg氧气提供能源,按最大压力36 MPa状态进行存储,上升器需要配置1个15 L的氧气储罐、1个30 L氢气储罐,着陆器则需要1个70 L氧气储罐、2个70 L氢气储罐,储罐及管路阀门总质量约46 kg;采用橡胶囊式水收集装置,其质量约为1 kg;电源控制器质量不超过10 kg。探测器燃料电池电源系统干重约为70 kg,其中上升器分配32 kg、着陆器38 kg;携带气体总量为46.1 kg,上升器需8 kg、着陆器需38.1 kg。

3.4 方案比较分析

按常规“太阳帆板+蓄电池”的电源设计方案,上升器上需配置太阳翼、蓄电池组和电源控制器,着陆器上也需要单独配置太阳翼和电源控制器,上升器电源系统质量约为36 kg、着陆器系统质量约为55 kg。与之相比,燃料电池方案会导致上升器增重4 kg、着陆器增重21.1 kg,但燃料电池工作过程中能够产生与工作气体消耗相同质量的水,至少能减少探测器20 kg的附加质量,因此该方案导致探测器净质量增加不大于5 kg。使用燃料电池后,探测器没有蓄电池充电平衡问题,在环月轨道可直接准备软着陆,能够缩短15 h以上的任务时间,可将着陆器用电量降至80 kWh左右,电源系统质量也会相应减小,与常规方案能够基本持平。

对于常规的设计方案而言,为满足探测器功率需求太阳帆板面积不能再进一步减小,即便缩短任务周期也不会降低电源系统的质量;在环月轨道上,需要探测器多圈飞行才能满足功率平衡,增加了任务时间;探测器飞行过程中,需要考虑结构承载力的限制而多次收拢太阳帆板,增加了任务执行的复杂性;为

提高月面工作段太阳帆板的发电效率,对探测器的着陆姿态有严格的限制;此外,设计中还需要考虑太阳帆板的遮挡、月面环境适应性等问题,这些都增加了探测器的设计难度。而燃料电池方案则没有上述约束,在月面低纬度工作时可利用其工作中产生的水降低探测器温度、在高纬度环境中可利用其产生的热量为探测器加热,其工作特性基本不受姿态的影响,月面环境适应性强。随着我国月球探测技术的发展,载人登月是未来的发展趋势,在该类任务中燃料电池将会更充分体现出其技术优点。

4 应用关键技术展望

虽然燃料电池有其明显的技术优点,但距在我国航天领域实际应用仍存在一定的差距,需要后续在以下关键技术上继续开展研制工作。

1) 高可靠性设计技术。燃料电池在我国航天器上尚未有应用的先例,作为探测器的主电源必须要求其可靠性不低于0.999,完善系统冗余、备份设计并开展地面可靠性验证试验是后续实际应用过程中的首要工作。

2) 高效储气技术。目前的设计方案将氢氧均以高压气体形式携带,储罐质量占电源系统干重的60%以上,为降低系统质量必须开展高效的储气技术研究。以液体形式携带是系统减重的有效途径之一,但液氢存储需要20 K以下的低温环境,对储罐材料及隔热设计有严格的要求;提高储气压力^[10]、开展多孔纳米材料^[11]或金属材料^[12]吸附储气应用研究也是后续的研究方向。

3) 多功能电源控制技术。燃料电池的电源控制器需要维持探测器母线电压的稳定并具有良好的瞬态特性,同时还要求能够输出较大的瞬态电流,这就需要控制器有高效迅速的控制能力。维持电源系统的输出品质、提高系统的动态响应速度、优化系统的工作状态是燃料电池后续的重点研究内容之一。

4) 月面环境适应技术。探测器上燃料电池主要工作在失重及月面低重力环境中,低重力环境能够影响电堆电极通道内水-气的两相流动,从而改变其电流密度及电堆的温度分布,使实际工作特性与地面状态不同。因此掌握低重力环境对电池的影响、开展针对性设计并研究地面等效试验测试方法是燃料电池在航天领域实际应用的一项重点工作^[13]。同时,燃料电池也需拓宽其工作温度范围,以适应月面的高低温环境。

5) 系统集成及轻小型设计技术。燃料电池在航天领域的应用需要多专业、多学科的综合设计,除继续优化电堆本体设计提高其工作适应能力和转化效率并

降低重量外,还需要集成探测器的供电、热控、构型布局等方面的设计,使燃料电池达到状态匹配、系统优化、并降低系统的体积和重量。

6) 能源综合利用技术。目前燃料电池的转换效率已接近或超过60%,但仍有约40%的能量最终转化成热量,电堆稳定运行需要匹配的热设计;燃料电池安装在探测器上,势必与整个探测器热设计产生耦合。因此,必须开展燃料电池与常规热控方式集成的热设计,月面着陆前利用电池工作的热量为探测器加热以减小对电功率的需求,月面阶段利用电池产生的水对电堆及探测器散热,实现能源的综合利用和水资源的合理调配。

5 结束语

随着我国在燃料电池方面研究工作的不断深入,使其初步具备在航天领域应用的条件,月面探测器的研制也为其提供了较好的应用背景。本文提出了一种探测器的燃料电池系统方案,并将之与传统方案进行了综合对比,在此基础上对燃料电池在我国航天领域实际应用的关键技术进行了剖析,旨在缩短其实际应用周期。

参 考 文 献

- [1] 张亚媛,张沛龙,葛静,等. 燃料电池应用现状及发展前景[J]. 新材料产业,2014(6):65-68.
ZHANG Y Y, ZHANG P L, GE J, et al. Current situation and prospect of fuel cell application[J]. Advanced Materials Industry, 2014(6): 65-68.
- [2] 侯侠,任立鹏. 燃料电池的发展趋势[J]. 云南化工,2011,38(2):34-36.
HOU X, REN L P. Development trend of fuel cell[J]. Yunnan Chemical Technology, 2011, 38(2): 34-36.
- [3] 杨紫光,叶芳,郭航,等. 航天电源技术研究进展[J]. 化工进展,2012,31(6):1231-1237.
YANG Z G, YE F, GUO H, et al. Progress of space power technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(6): 1231-1237.
- [4] 刘向,张伟,孙毅,等. 空间燃料电池技术发展[J]. 中国电子科学研究院学报,2012,7(5):472-476.
LIU X, ZHANG W, SUN Y, et al. The development of space fuel cell technology[J]. Journal of CAEIT, 2012, 7(5): 472-476.
- [5] 王贵明,王全懿. 电动汽车及其性能优化[M]. 北京:机械工业出版社,2010:100-102.
- [6] BURKE K A. Fuel cell for space science application[C]//1st International Energy Conversion Engineering Conference(IECEC). Portsmouth, Virginia: NASA Glenn Research Center, 2003.
- [7] WARSHAY M, PROKOPIUS P, LE M, et al. The NASA fuel cell upgrade program for the Space Shuttle orbiter[C]//Energy Conversion Engineering Conference. [S.l.]: IEEE, 1997: 228-231.
- [8] MCCURDY K. Space shuttle upgrades: long life alkaline fuel cell[R].

- AIAA Annual Technical Symposium. Houston, TX, United States: NASA Johnson Space Center, 2004.
- [9] SONE Y, UENO M, NAITO H, et al. One kilowatt-class fuel cell system for the aerospace applications in a micro-gravitational and closed environment[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 157(2): 886-892.
- [10] 郑津洋, 刘贤信, 徐平, 等. 高压储氢技术研究进展[C]//中国动力工程学会工业气体专业委员会2009年技术论坛. 杭州: 中国动力工程学会, 2010.
- ZHENG J Y, LIU X X, XU P, et al. Recent progress on high pressure hydrogen storage technologies[C]//China Power Engineering Institute Industrial Gas Professional Committee 2009 Technology BBS. Hangzhou: China Power Engineering Institute Industrial Gas Professional Committee, 2010.
- [11] 邓开明, 路瑞锋, 肖传云, 等. 几类多孔材料储氢和氢气提纯的多尺度模拟研究[C]//第十二届国际凝聚态理论与计算材料学会议. 广州: 中国科学院物理所, 2013.
- DENG K M, LU R F, XIAO C Y, et al. Multi-scale simulation of hydrogen storage and hydrogen purification in several porous materials[C]//The 12th International Conference on Condensed Matter Theory and Computational Materials Science. Guangzhou: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [12] 卢国俭, 周仕学. 镁/碳复合纳米材料储氢性能及储氢机理研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(4): 746-750.
- LU G J, ZHOU S X. Hydrogen storage performance and mechanism of Magnesium/Carbon nanocomposites[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(4): 746-750.
- [13] 郭航, 赵建福, 律翠平, 等. 短时微重力条件下燃料电池性能实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(5): 865-867.
- GUO H, ZHAO J F, LYU C P, et al. Experimental study of fuel cells performance in short term microgravity condition[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(5): 865-867.
- 作者简介:
任德鹏(1976-), 男, 博士后, 主要研究方向: 月球探测器的总体设计与试验技术。
 通信地址: 北京5142信箱373信箱(100094)
 电话: (010)68117764
 E-mail: rdpsd@163.com

Preliminary Research on the Application of Fuel Cells on Lunar Probe

REN Depeng, LI Qing, PENG Song

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The fuel cell is a clean energy device with high efficiency and high output power, and has been successfully applied in Apollo program. The research on fuel cell in China started quite early. At present, the technical capability of developing fuel cells for spacecraft is preliminarily established. However, as the fuel cell is one of the disposable energy resource, its application has been limited to the aerospace field. Recently, the development of new spacecraft in China provides a new application opportunity for fuel cells. Based on investigation and analysis, a hydrogen-oxygen fuel cell concept is proposed, as the main power source for a lunar probe. The advantages of the fuel cell are summarized by comparing with the traditional power concept. And its characteristics and key technologies for application are comprehensively analyzed. The scheme provides a new idea for the application of fuel cells in domestic aerospace field.

Key words: lunar probe; fuel cell; applied research

High lights:

- A configuration scheme that uses hydrogen-oxygen fuel cells as the main power source for a lunar probe was proposed.
- The characteristics and the application technology of the hydrogen-oxygen fuel cells scheme were comprehensively analyzed.
- A new idea for the application of fuel cells in domestic aerospace field was provided.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]