

# 燃料电池在航天中的应用

吴 峰,叶 芳,郭 航,马重芳

(北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室,传热与能源利用北京市重点实验室,北京 100022)

**摘要:**介绍了燃料电池在航天领域中的应用情况。碱性燃料电池已经在航天飞机中成功应用,但存在成本高、寿命短和安全性差等缺点。再生燃料电池通常由质子交换膜燃料电池组成。再生燃料电池 + 太阳能电池的组合在月球基地、大功率卫星和空间站及近空间飞行器上有很好的应用前景。

**关键词:**燃料电池; 航天; 电源

**中图分类号:** TM911.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 1579(2007)03 - 0238 - 03

## The application of fuel cells in aerospace

WU Feng, YE Fang, GUO Hang, MA Chong-fang

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation of Ministry of Education, Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion of Beijing Education Commission, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** Application of fuel cells in aerospace area was introduced. Alkaline fuel cells were successfully used into aerospace shuttles, but it had shortcomings such as high cost, short lifetime and poor security. Regenerative fuel cells were composed of proton exchange membrane fuel cells. Regenerative fuel cells plus solar arrays had potential in aerospace application and could be used in lunar bases, space stations, huge power satellites and aircrafts or airships hovering in near space.

**Key words:** fuel cells; aerospace; power source

质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 的工作温度低,启动快,比功率大,操作简单,适合于应用在航天领域中<sup>[1]</sup>。

### 1 燃料电池用于航天器电源系统的优势

电源系统是航天器中不可缺少的重要组成部分,其可靠性直接影响着航天器的寿命。航天器电源要根据飞行任务、航天器设计寿命和供电要求来选择。早期发射的短寿命小功率航天器往往选择锌银电池;长寿命地球轨道飞行的卫星一般选择太阳能阵列 + 蓄电池组;而燃料电池更适合应用于载人航天器;深太空探索则可选择核电源<sup>[2]</sup>。航天器的发展迫切需要大功率、长寿命和高可靠性的电源系统。

电源系统的质量在航天器中的比重较大,如我国 2003 年发射的一颗微小卫星,电源占整个卫星质量的 16.6%。航天发射的成本很高,以 1996 年的发射技术,1 kg 设备发射上天的费用为 2 万美元<sup>[3]</sup>,高能量密度的燃料电池在航天应用领域很有吸

引力。燃料电池的能量密度可达 100 ~ 1 000 Wh/kg<sup>[4]</sup>,而航天电源中使用较多的镍电池,能量密度仅为 25 ~ 40 Wh/kg<sup>[5]</sup>。对质量要求非常严格的高空长航时太阳能飞行器,要求储能装置的比能量在 400 Wh/kg 以上,目前只有燃料电池可满足要求。燃料电池同蓄电池相比,无自放电、无记忆效应及不存在过充过放。燃料电池系统中贮存的氧气和氢气,还可用于生命支持系统和姿态调整。从再生燃料电池中排出的废热温度约为 50 ~ 70 °C,可用于航天器的热管理<sup>[6]</sup>。

### 2 燃料电池在航天中的应用和研究热点

按电解质的不同,在航天领域中应用过的燃料电池可分为 PEMFC 和碱性燃料电池 (AFC)。AFC 主要作为航天飞机的主电源;PEMFC 既可作为主电源应用,也可作为再生燃料电池 (RFC) 的组成部分。

燃料电池在航天领域最早的应用,是美国 GE 公司为双子

#### 作者简介:

吴 峰(1977 - ),男,山东人,北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室硕士生,研究方向:燃料电池;

叶 芳(1973 - ),女,浙江人,北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室讲师,研究方向:燃料电池,本文联系人;

郭 航(1970 - ),男,北京人,北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室副教授,研究方向:燃料电池;

马重芳(1940 - ),男,北京人,北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室教授、博士生导师,研究方向:燃料电池。

**基金项目:**国家自然科学基金项目 (No. 50236010, No. 50406010),北京市属市管高等学校人才强教计划项目

星载人飞船开发的聚苯磺酸膜燃料电池(为早期的 PEMFC)。在使用中,电池中的电解质膜发生降解,造成电池寿命变短、生成物水被污染,不能提供给航天员饮用。尽管 GE 公司之后推出了全氟磺酸膜燃料电池,但没有中标<sup>[7]</sup>。后来 AFC 在航天领域开始应用,并取得了成功。

近 20 年来,PEMFC 在地面应用上展现出巨大的潜力,激发了人们的研究兴趣,性能上有了很大的提高,价格也在逐渐降低。研究人员开始注意到 PEMFC 在航天中的应用潜力,开展了许多研究。

NASA(美国航天航空局)的相关研究集中在可应用于月球基地电源系统、近空间飞行器动力系统的 RFC 及 AFC 的升级。RFC 可作为月球基地的电源系统<sup>[8]</sup>,其气体贮存系统庞大。NASA 的工作人员研究了不同气体贮存系统的质量<sup>[8]</sup>。近空间飞行器,尤其是长航时无人机对电源的能量密度要求很高,RFC 是能满足其要求的。NASA 和美国国防部积极研究将 RFC 应用到该领域<sup>[9-10]</sup>,NASA 也认识到 AFC 的相对不足并对其升级<sup>[11-12]</sup>;欧洲学者研究了用再生 AFC 取代蓄电池的可行性<sup>[7]</sup>;日本正在积极研究应用于太空环境中的 PEMFC,并搭建了相关的实验平台<sup>[13-14]</sup>。

### 3 AFC 在航天中的应用

AFC 是目前航天领域中应用最成功的燃料电池。它采用 KOH 溶液为电解质,燃料和氧化剂分别为纯氢和纯氧。早期用于阿波罗登月飞船的是 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。目前,美国航天飞机使用的是石棉膜 AFC,它由 96 只单体电池组成,输出电压为 28 V,输出功率为 12 kW<sup>[15]</sup>。

尽管 AFC 在航天中的应用已经很成熟,但也有人指出了 AFC 的不足<sup>[11-12]</sup>:维护和购置成本高、寿命短、安全性差。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太大( $< 34.5$  kPa),气体压力控制较困难<sup>[11]</sup>。KOH 是强碱,其强腐蚀性使 AFC 的寿命较短,早期 UTC 燃料电池公司生产的用于航天飞机的 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<sup>[12]</sup>。KOH 在水中容易溶解,使得 AFC 工作产生的水要经过一定的处理才可饮用;这同时会造成电解质流失,影响电池性能。AFC 的安全性也不能令人满意,如美国 1997 年 4 月的一次发射任务,由于 AFC 失效,航天飞机上机组人员仅完成了 10% 的任务就不得不提前返航<sup>[11]</sup>。

### 4 RFC 在航天中的应用

RFC 从功能上看类似于二次电池<sup>[15]</sup>。当外界需要电能时,RFC 将贮存在氢气和氧气中的化学能转换为电能;当能量富余时,RFC 利用外界提供的电能将水电解为氢气和氧气。RFC 可以分为一体式、分开式和综合式。一体式的特点是水的电解和供电均由相同组件完成;分开式由完全独立的两个组件分别完成水的分解和供电;综合式则将两个组件放入同一单元中。目前,RFC 中完成发电功能的组件一般为 PEMFC,早期有采用 AFC 的研究<sup>[6]</sup>。在航天领域中,同传统的蓄电池相比,

RFC 的能量密度要高很多<sup>[15]</sup>。RFC 通常要与太阳能电池阵列联合使用<sup>[9]</sup>,其重要应用前景是月球基地<sup>[8]</sup>、近地轨道卫星、空间站<sup>[16]</sup>及高空长航时无人机<sup>[17]</sup>。

月球基地,尤其是有人职守的月球基地,能量消耗很大,如美国的相关研究一般假定,月球基地的所需功率为 20~100 kW<sup>[8]</sup>。选择能量密度大的电源系统,可节约大量的发射费用。月球的自转周期很长(达 28 个地球日),其中无日照时间为 16 个地球日<sup>[8]</sup>,用于月球基地的电源必须能长期供电。RFC 只需要增加氢、氧和水的贮存系统,就能满足要求。若月球上存在水,RFC 系统甚至可以不从地球上带水。尽管 RFC 的能量密度比其他化学电源高得多,但由于在月球上的电源功率和供电周期都很长,其质量仍很大。据 NASA 的研究结果,用于月球基地的电源系统质量约为 9 000 kg,其中贮存系统的比例很高<sup>[8]</sup>。NASA 对高压气态贮存和液态贮存这两种贮存系统进行了研究。高压气态贮存的缺点是贮存罐的质量很大;液态贮存系统中,气体液化系统是不可缺少的,要额外消耗一部分能量,这就要求更多的太阳能电池阵列,且气体液化系统的质量也不小,虽然在气体贮存上可以减轻,但整个系统的质量并没有减少,气体液化系统中运动部件多,维护困难,安全性差<sup>[8]</sup>。

循环充放电效率低是 RFC 的一个缺点。由于蓄电池充满电有浮充阶段,即恒压充电,太阳能电池阵列产生的电能无法被充分利用;RFC 没有浮充的问题,这在一定程度上弥补了不足<sup>[16]</sup>。

采用电力驱动的高空长航时无人的电源,能量密度应大于 400 Wh/kg<sup>[17]</sup>,目前,可以满足该要求的化学电源只有 RFC。用于一架无人机的一体式 RFC,功率密度可达 791 Wh/kg<sup>[17]</sup>。

### 5 燃料电池航天应用在我国的研究现状

中国科学院大连化学物理研究所于 1997 年承担了一项有关 RFC 系统研究的“863”项目,成功开发了百瓦级再生氢氧燃料电池原型系统,在此基础上,进行了一体式再生氢氧燃料电池的应用基础研究。

航天领域中,电池处于微重力状态,气液两相流动、传质传热规律与平常不同<sup>[18]</sup>。NASA 已经把水管理作为应用于航天的 PEMFC 的关键技术。北京工业大学通过落塔开展了微重力条件下燃料电池中热物理规律的相关研究,发现在不同重力条件下,甲醇燃料电池阳极气液两相流动及电池电性能均不同<sup>[19]</sup>。

### 6 结论

介绍了燃料电池在航天领域中的应用简况。AFC 是目前航天领域中应用较成功的一种燃料电池,但存在成本和维护费用昂贵、寿命短和安全性差等问题。PEMFC 主要以 RFC 的形式出现在航天应用中,RFC+太阳能电池的联合供电系统在月球基地、大功率近地卫星、空间站及近空间长航时飞行器上有一定的应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] TONG Ye-xiang(童叶翔), LIU Peng(刘鹏), SHENG Pei-kang(沈培康). 质子交换膜和直接甲醇燃料电池进展[J]. Battery Bimonthly(电池), 32(3):178-180.

- [2] MA Shi-jun(马世俊). 卫星电源技术[M]. Beijing(北京): Chinese Astronautics Publishing House(宇航出版社), 2001.
- [3] HU Werrui(胡文瑞). 微重力科学进展[J]. Physics(物理), 1996, 25(8): 453 - 458.
- [4] Smith W. The role of fuel cells in energy storage [J]. J Power Sources, 2000, 86(1 - 2): 74 - 83.
- [5] LI Guo-xin(李国欣). 20 世纪上海航天器电源技术的进展[J]. Aerospace Shanghai(上海航天), 2002, (3): 42 - 48.
- [6] Tillmetz W, Dietrich G, Benz U, *et al.* Regenerative fuel cell for space and terrestrial use [A]. Energy Conversion Engineering Conference[C]. 1990(3): 154 - 158.
- [7] YI Bao-lian(衣宝廉). 燃料电池——原理·技术·应用[M]. Beijing(北京): Chemical Industry Press(化学工业出版社), 2003.
- [8] Jan D L, Rohatgi N, Voecks G, *et al.* Thermal, mass and power interactions for lunar base life support and power systems [A]. Colorado Springs, CO, United States. SAE PAPER 932115. International Conference on Environmental Systems[C]. 1993: 1 - 19.
- [9] Bents D J, Scullin V J. Hydrogen-oxygen PEM regenerative fuel cell energy storage system [R]. NASA/ TM-2005-213381, NASA: NASA Center for AeroSpace Information, 2005: 1 - 19.
- [10] Mitlitsky F, Myers B, Weisber A H. Reversible (unitised) PEM fuel cells devices[J]. Fuel Cells Bulletin, 1999, 2(11): 6 - 11.
- [11] Warshay M, Prokopius P, Le M, *et al.* The NASA fuel cell upgrade program for the space shuttle orbiter [A]. Energy Conversion Engineering Conference[C]. 1997: 228 - 231.
- [12] McCurdy K. Space shuttle upgrades: long life alkaline fuel cell [R]. (Abstract) AIAA Annual Technical Symposium, Houston, TX, United States, 2004.
- [13] 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]. J Power Sources, 2006, 157(2): 886 - 892.
- [14] Sone Y, Ueno M, Kuwajima S. Fuel cell development for space applications: fuel cell system in a closed environment [J]. J Power Sources, 2004, 137(2): 269 - 276.
- [15] Burke K A. Fuel cell for space science application [R]. NASA/ TM-2003-212730, NASA: NASA Center for AeroSpace Information, 2003: 1 - 10.
- [16] Hoberecht M A, Green R D. Use of excess solar array power by regenerative fuel cell storage systems in low earth orbit [A]. Energy Conversion Engineering Conference[C]. 1997(1): 224 - 227.
- [17] Burke K A. High energy density regenerative fuel cell systems for terrestrial applications [J]. IEEE AES Systems Magazine, 1999, 23 - 34.
- [18] ZHAO Jiar-fu(赵建福). 微重力条件下气/液两相流动流型的研究进展[J]. Advances in Mechanics(力学进展), 1999, 29(3): 42 - 56.
- [19] LU Cui-ping(律翠萍). 微重力条件下直接甲醇燃料电池阳极流道内两相流的实验研究[D]. Beijing(北京): Beijing University of Technology(北京工业大学), 2006.

收稿日期: 2007 - 01 - 30

37 年精心打造的品牌

荣获首届“国家期刊奖”的杂志

## 欢迎订阅《电池》

《电池》是中国最早对国内外公开发行的电池专业科技期刊, 37 年来, 《电池》杂志全心全意为国内外读者服务。《电池》的英文摘要早已被国内外多家权威文摘刊物收录, 并被美国 Advanced Battery Technology、美日联合出版的 ITE Battery Newsletters、英国的 Batteries International 等多家专业刊物宣传、推广、介绍。

《电池》荣获首届“国家期刊奖”, 并进入“中国期刊方阵”“双高”期刊行列, 2003 年、2005 年分别荣获了第二届、第三届国家期

刊奖百种重点期刊奖, 连续两次被评为全国优秀科技期刊, 并多次荣获省、部级优秀期刊一等奖。

《电池》在国内外享有崇高的声誉, 已发行到 30 多个国家和地区。《电池》是中文核心期刊, 以报道应用技术和科研成果为主, 兼顾国内外生产经验和动态。《电池》可供电池界人士及高校师生、研究人员阅读参考; 也为商业、商检、外贸、消费者和电池用具设计生产人员所必备。

欢迎国内外新老订户及时订阅《电池》杂志! 欢迎索取订单!

电话: 0731 - 5141901

传真: 0731 - 5427570

E-mail: dianchi @public. cs. hn. cn

联系人: 罗秋珍 李 胜

如需更多信息, 欢迎访问《电池》网 <http://www.batterypub.com>