

燃料电池技术发展现状与展望

侯 明, 衣宝廉*

(中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要: 燃料电池是一种高效、清洁的电化学发电装置,近年来得到国内外普遍重视. 本文详细阐述了燃料电池的近期研究进展与面临的挑战及未来发展方向. 燃料电池在宇宙飞船、航天飞机及潜艇动力源方面已经得到应用,在汽车、电站及便携式电源等民用领域成功地示范,但低成本、长寿命仍然是商业化面临的瓶颈问题. 未来我国应大力推进燃料电池在水下潜器、航天飞行器等特殊领域的应用,解决高可靠性与安全性及环境适应性等关键问题;同时,在民用领域要实现燃料电池寿命与成本兼顾,从材料、部件及系统等3个层次深入技术改进与创新,尽快推进燃料电池的商业化.

关键词: 燃料电池; 动力源; 寿命; 成本

中图分类号: TQ152

文献标识码: A

1 燃料电池工作原理与分类

燃料电池(Fuel Cell, FC)是把燃料中的化学能通过电化学反应直接转换为电能的发电装置. 按电解质分类,燃料电池一般包括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)、碱性燃料电池(Alkaline Fuel Cell, AFC)、固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)及熔融碳酸盐燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)等^[1]. 以质子交换膜燃料电池为例,主要部件包括:膜电极组件(Membrane Electrode Assembly, MEA)、双极板及密封元件等. 膜电极组件是电化学反应的核心部件,由阴阳极多孔气体扩散电极和电解质隔膜组成. 电解质隔膜两侧分别发生氢氧化反应与氧还原反应,电子通过外电路做功,反应产物为水. 额定工作条件下,一节单电池工作电压仅为0.7 V左右. 为了满足一定应用背景的功率需求,燃料电池通常由数百个单电池串联形成燃料电池堆或模块. 因此,与其它化学电源一样,燃料电池的均一性非常重要. 燃料电池发电原理与原电池类似(见图1),但与原电池和二次电池比较,需要具有一相对复杂的系统,通常包括燃料供应、氧化剂供应、水热管理及电控等子

系统,其工作方式与内燃机类似. 理论上只要外部不断供给燃料与氧化剂,燃料电池就可以持续发电.

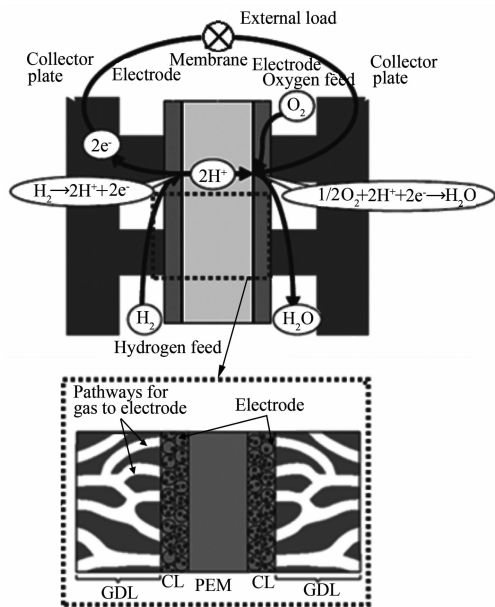


图1 PEMFC 基本原理

Fig. 1 Principle of a PEMFC

燃料电池从发明至今已经经历了100多年的历程. 由于能源与环境已成为人类社会赖以生存

的重点问题,近 20 年以来,燃料电池这种高效、洁净的能量转化装置得到了各国政府、开发商及研究机构的普遍重视. 燃料电池在交通运输、便携式电源、分散电站、航空/天及水下潜器等民用与军用领域展现出广阔的应用前景. 目前,燃料电池汽车、电站及便携式电源等均处于示范阶段,在商业化道路上还需要解决成本、寿命等一些瓶颈问题. 成本和寿命是相互联系的,同时满足两者需求是实现民用燃料电池应用所面临的主要挑战. 航天飞机、潜艇动力用燃料电池目前国际上均已应用,在只侧重寿命、可靠性的特殊领域,现有燃料电池技术是可以满足应用需求的. 因此,根据不同的应用背景采用不同的技术路线,是制定燃料电池技术发展战略的重要基础.

2 燃料电池的应用

2.1 航天领域

早在上个世纪 60 年代,燃料电池就成功地应用于航天技术,这种轻质、高效的动力源一直是美国航天技术的首选. 表 1 列出了燃料电池航天应用中的几个典型案例. 以燃料电池为动力的 Gemini 宇宙飞船 1965 年研制成功,采用的是聚苯乙烯磺酸膜,完成了 8 天的飞行. 由于这种聚苯乙烯磺酸膜稳定性较差,后来在 Apollo 宇宙飞船采用了碱性电解质燃料电池(图 2A),从此开启了燃料电池航天应用的新纪元. 在 Apollo 宇宙飞船 1966 年至 1978 年服役期间,总计完成了 18 次飞行任务,累积运行超过了 10 000 h^[2],表现出良好的可靠性与安全性. 除了宇宙飞船外,燃料电池在航天飞机上的应用是航天史上又一成功的范例. 美国航天飞机载有 3 个额定功率为 12 kW 的碱性燃料电池(图 2B),每个电堆包含 96 节单电池,输出电压为 28 V,效率超过 70%. 单个电堆可以独立工作,确

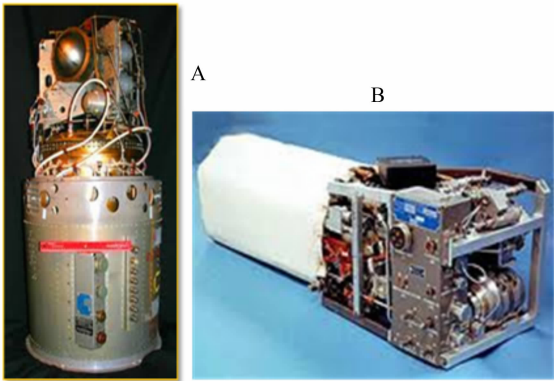


图 2 应用于航天领域的燃料电池(美国)
A. Apollo 宇宙飞船用燃料电池;B. 航天飞机用燃料电池
Fig. 2 Fuel cells for space application (U. S.)
A. fuel cell in Apollo spacecraft; B. fuel cell in space shuttle

保航天飞机安全返航,采用的是液氢、液氧系统,燃料电池产生的水可以供航天员饮用. 从 1981 年首次飞行直至 2011 年航天飞机宣布退役,在 30 年期间里燃料电池累积运行了 101 000 h,可靠性达到 99% 以上^[2].

中国科学院大连化学物理研究所早在 70 年代就成功研制了以航天应用为背景的碱性燃料电池系统^[1],其性能与系统照片如表 2 和图 3 所示. A 型额定功率为 500 W, B 型额定功率为 300 W,燃料分别采用氢气和肼在线分解氢,整个系统均经过环境模拟实验,接近实际应用. 这一航天用燃料电池研制成果,为我国此后燃料电池在航天领域应用奠定了一定的技术基础.

2.2 潜艇方面

燃料电池作为潜艇 AIP (Air-Independent Propulsion, AIP) 动力源,从 2002 年第一艘燃料电池 AIP 潜艇下水至今已经有 6 艘在役^[3],还有一些

表 1 燃料电池航天应用案例
Tab. 1 Cases of fuel cells for space applications

Aircrafts	Year	FC power	FC type	Operation time
Gemini Spacecraft	1965	1.0 kW	PEMFC (polystyrene sulfonic acid)	8 d
Apollo Spacecraft	1966 ~ 1978	1.5 kW (rated) 2.2 kW (peak)	AFC (KOH)	Over 10 000 h (in 18 missions)
Space Shuttle	1981 ~ 2011	12 kW (rated) 16 kW (peak)	AFC (Bacon type, molten KOH)	101 000 h (accumulated lifetime)

表 2 中国研制的航天用燃料电池性能参数
Tab. 2 Performance of domestic fuel cells for space applications

Parameter	Type A	Type B
Rated power/kW	0. 50	0. 30
Peak power/kW	1. 0	0. 6
Voltage/V	28 ± 2	28 ± 2
Mass/kg	40	60
Volume/cm ³	22 × 22 × 90	39 × 29 × 57
Temperature/℃	92 ± 2	91 ± 1
Pressure/MPa	0. 15 ± 0. 02	0. 13 ~ 0. 18

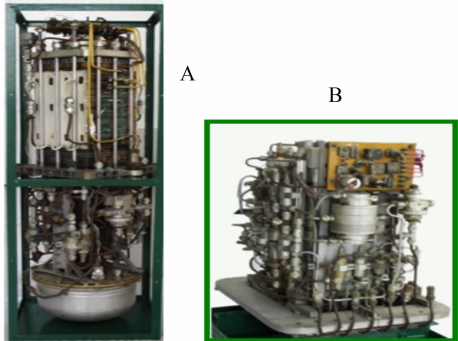


图 3 航天用燃料电池动力模块图
Fig. 3 Fuel cell modules for space application

FC-AIP 潜艇在建造中. 2009 年 10 月意大利军方订购的 2 艘改进型 FC-AIP 潜艇开始建造^[4], 潜艇水面排水量为 1450 吨, 总长为 56 m, 最大直径为 7 m, 额定船员 24 名, 水下最大航速为 20 节, 计划在 2015 ~ 2016 年开始服役. FC-AIP 潜艇具有续航时间长、安静、隐蔽性好等优点, 通常柴油机驱动的潜艇水下一次潜航时间仅为 2 天, 而 FC-AIP 潜艇一次潜航时间可达 3 周. 这种潜艇用燃料电池是由西门子公司制造(图 4), 采用镀金金属双极板. 212 型艇装载了额定功率为 34 kW 的燃料电池模块, 214 型艇装载了 120 kW 燃料电池模块, 2 种型号的燃料电池模块参数如表 3 所示, 额定工况下效率接近 60% .

3 燃料电池示范

除了上述实际应用外, 燃料电池还在多个领域展现了不同规模的示范, 包括电动汽车、电站、应急不间断电源、便携式电源及充电器等. 在这些领域, 燃料电池展示了一定的应用前景. 示范的目的是发现问题并解决问题, 不断完善技术, 使之逐

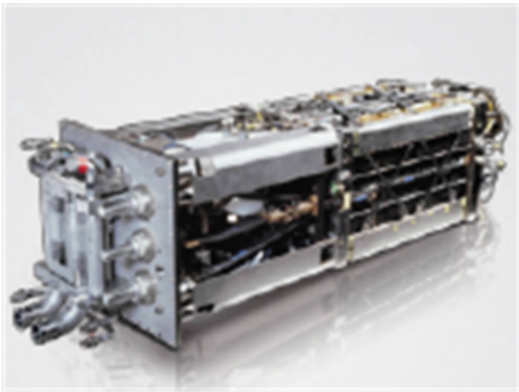


图 4 潜艇用燃料电池模块(西门子)
Fig. 4 Fuel cell module for submarine (Siemens)

表 3 潜艇用燃料电池模块技术参数(西门子)
Tab. 3 Technical parameters of fuel cell modules in submarine(Siemens)

Parameter	Type 212	Type 214
Rated power/kW	34	120
Active area/cm ²	1163	1163
Size/cm	48 × 48 × 145	50 × 53 × 176
Cell number	72	320
Mass/kg	650	900
Pt loading/mg · cm ⁻²	4	4
Efficiency at rated power	59%	58%
Efficiency at 20% rated power	69%	68%
Operating temperature/℃	70 ~ 80	70 ~ 80
Pressure/MPa (H ₂ /O ₂)	0. 23/0. 26	0. 23/0. 26

步接近商业化目标.

3.1 电动汽车

随着汽车保有量的增加, 传统燃油内燃机汽车造成的环境污染日益加剧, 同时, 也面临着对石油的依存度日益增加的严重问题. 燃料电池作为汽车动力源是解决因汽车而产生的环境、能源问题的可行方案之一, 近 20 年来得到各国政府、汽车企业、研究机构的普遍重视. 燃料电池汽车示范在国内外不断兴起, 较著名的是欧洲城市清洁交通示范项目 (Clean Urban Transport for Europe, CUTE), 第 1 期共有 27 辆车在 9 个欧洲城市运行 2 年^[4]; 并于 2006 ~ 2009 年进行第 2 期示范 (Hy-Fleet; CUTE)^[5], 33 辆燃料电池客车在包括北京的 10 个城市运行; 整个项目累计运行 140 000 h, 行驶

表 4 Citaro 燃料电池客车主要性能参数^[6]
Tab. 4 Specification of Citaro fuel cell buses

Parameter	Pure FC bus	FC-battery hybrid bus
Vehicle model	Mercedes-Benz Citaro	Mercedes-Benz Citaro
Size (length × height)/m	12 × 3.67	12 × 3.40
Max. mass/kg	19 000	18
Net mass/kg	14 200	13.2
Transport capacity	70	76
Driving range/km	200	250
Fuel cell/kW	250	120
Battery		26.9 kWh, Max 180 kW
Driving power/kW	205 kW (15 ~ 20 s)	220 kW (15 ~ 20 s)
Hydrogen tank	9 cylinders, >40 kg, 35 MPa	7 cylinders, >35 kg, 35 MPa

约 2 100 000 km, 承载乘客约 850 万; 目前, 正在着手进行第 3 期 (Clean Hydrogen in European cities project, CHIC) 示范。代表性的车型是由 Daimler 公司制造的燃料电池客车 Citaro, 分别采用纯燃料电池、燃料电池与蓄电池混合动力 (主要性能参数见表 4), 加拿大 Ballard 公司提供燃料电池模块 (见图 5), 电堆采用模压石墨双极板, 具有较好的操作弹性。

通过示范, 车用燃料电池技术取得了长足的进展。近年来, 燃料电池汽车在性能、寿命与成本方面均取得一定的突破。在性能方面, 美国 GM 公司的燃料电池发动机体积比功率已与传统的四缸内燃机相当^[6], 德国 Daimler 公司通过 3 辆 B 型 Mercedes-Benz 燃料电池轿车 F-Cell 的环球旅行向世人展示了燃料电池汽车的可使用性, 其续航里程、最高时速、加速性能等已与传统汽油车相当, 计划 2014 年开始实施批量生产^[7]; 在寿命方面, 美国 UTC Power 公司的燃料电池客车至 2011 年 8 月已经累积运行了 10 000 h^[8], 寿命指标已达到商业化目标; 在成本方面, 各大汽车公司都致力于降低燃料电池 Pt 用量, 经过不断地技术改进, 美国 GM 公司一台 94 kW 的发动机, Pt 用量从上一代的 80 g 降低到 30 g, 并计划 2015 年 Pt 用量再降低至 1/3, 达到每辆车 Pt 用量 10 g^[9]。日本 Toyota 公司也宣布燃料电池发动机催化剂 Pt 用量降低到原来的 1/3, 预计 2015 年单车成本降低至 50 000 美元,



图 5 汽车用燃料电池模块 (Ballard)
Fig. 5 Fuel cell module for FCVs (Ballard)

并计划于 2015 年实现燃料电池汽车商业化^[10]。

我国燃料电池汽车, 自“九五”末期第一台燃料电池中巴车的问世, 到“十一五”2008 年北京奥运会和 2010 年上海世博会燃料电池汽车的示范运行, 十几年的发展, 燃料电池电动汽车技术取得了可喜的进步。在北京奥运会上, 燃料电池轿车成为“绿色车队”中的重要成员 (图 6A)。20 辆帕萨特“领取”燃料电池轿车为北京奥运会提供了交通服务, 单车无故障行驶里程达到了 5200 km; 在上海世博会上, 包括 100 辆观光车、90 辆轿车 (图 6B) 和 6 辆大巴车, 总计 196 辆燃料电池汽车完成了历时 6 个月的示范运行。其中, 100 辆观光车是由国内研制, 装有 5 kW 燃料电池系统。70 辆轿车装载的是国内研发的燃料电池系统, 分别采用 55 kW 和 33



图 6 参加国内外示范项目的中国燃料电池电动汽车
A. 2008 年北京奥运会示范;B. 2010 年上海世博会示范;C. 北京公交示范;D. 2010 年新加坡世青赛示范

Fig. 6 Domestic FCV demonstration worldwide
A. FCV demonstration in 2008 Beijing Olympic Games; B. FCV demonstration in 2010 Shanghai World Expo.; C. FCV demonstration for public transportation in Beijing; D. FCV demonstration in Singapore 2010 Youth Olympics

kW 两种类型的燃料电池发动机,前者是常规电-电混合模式,后者是 Plug-in 模式,平均单车运行里程 4500 ~ 5000 km,最长的单车运行累积里程达到 10 191 km. 3 辆大巴车装载的是 863“节能与新能源汽车重大项目”资助的 80 kW 燃料电池发动机,累积运行了 15 674 km,最长单车里程为 6600 km. 此外,还参加了北京公交车示范运行(图 6C)以及国际一些示范或赛事,包括国际清洁能源 Bibendum 大赛、美国加州示范及新加坡世青赛(图 6D)等,展示了中国燃料电池技术的进步.

目前,燃料电池发动机技术明显提升,在中国科技部支持下,国产 PEMFC 关键材料和部件的开发取得了重大进展,研制成功了高导电性及优化孔结构的碳纸、增强型复合质子交换膜、高稳定性/高活性 Pt-Pd 复合电催化剂^[11]及薄型全金属双极板等. 经过膜电极技术的优化,电催化剂利用率得到大幅提高,流场优化提高了高电流密度下水管理能力,使额定工作点由 0.66 V@0.5 A·cm⁻² 提升至 0.66 V@1.0 A·cm⁻²,比功率达到 1300 W·L⁻¹(见图 7,新源动力提供),在同样功率输出情况下,体积和质量分别减小了一半.

3.2 燃料电池固定式分散电站

污染重、能效低一直是困扰火力发电的核心问题,燃料电池作为低碳、减排的清洁发电技术,

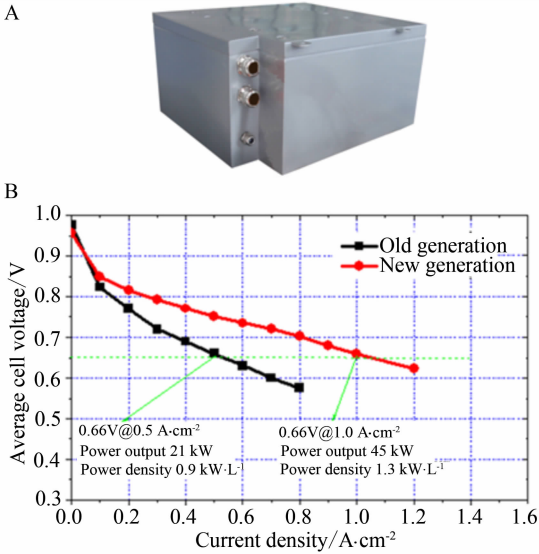


图 7 中国研发的车用燃料电池模块(A)及燃料电池发动机性能(B)

Fig. 7 FC module for FCVs (A) and performance of FC engines (B) of China

受到国内外的普遍重视. 燃料电池电站不同于燃料电池汽车,没有频繁启动问题,因此可以采用以下 4 种燃料电池技术,分别是磷酸燃料电池、质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池和熔融碳酸盐燃料电池.

PAFC 电站代表性的开发商是 UTC Power 公司^[2],其开发的 PureCell[®] Model 系列 200 kW 和 400 kW 磷酸燃料电池发电系统(图 8A),20 多年里已经在 19 个国家安装运行近 300 台,部分电站运行已经超过 40 000 h 的设计寿命. 发电系统以天然气为原料,由燃料处理、燃料电池模块及电调节与控制 3 个部分组成,电效率接近 40% (LHV). 若计入热回收,总效率可以接近 80% ~ 90% (LHV). 磷酸燃料电池电站在技术上发展比较成熟,但由于使用贵金属催化剂,大规模商业化还面临成本高的瓶颈问题.

PEMFC 电站的代表性开发商是 Ballard 公司,主要开发 250 kW ~ 1 MW 的示范电站^[12](图 8B),目前示范数量还不多,国内华南理工大学也进行了 300 kW PEMFC 电站的示范. 质子交换膜燃料电池用于固定电站与用于燃料电池汽车相比,由于工况相对缓和,不需要像燃料电池汽车那样频繁变载,避免了动态工况引起的燃料电池材料衰减,相对延长了寿命. 但是,成本问题还是 PEMFC 电站商业化面临的主要问题. 另外,由于 PEMFC 的

操作温度在 $80 \sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,故其热品质比较低,热量回收效率不高,影响整体燃料利用率.再有,为了防止 PEMFC 燃料电池中毒,燃料需要净化,会增加一部分成本.高温质子交换膜燃料电池 (HT-PEMFC) 操作温度可以达到 $150 \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,一定程度上可以缓解上述问题,目前 HT-PEMFC 技术还处于研发中.

Siemens Westinghouse 公司开发了固体氧化物燃料电池电站,以阴极作支撑的管式 SOFC 机械强度高,热循环性能好,易于组装与管理.自 2000 年以来,西门子-西屋公司已建成多台大型 $100 \sim 250\text{ kW}$ 分散电站进行试验运行(图 8C),其中以天然气为燃料的 100 kW SOFC 系统总计运行 $20\,000\text{ h}$, 220 kW SOFC 与燃气轮机联合发电系统效率可达到 $60\% \sim 70\%$.但现有的技术如电化学气相沉积和多次高温烧结等导致阴极支撑型 SOFC 电池成本过高、难以推广.借助廉价的湿化学法、等离子喷涂等技术替代电化学气相沉积制备电解质薄膜,并运用改进烧结工艺、减少烧结次数等手段,有望达到大幅度降低阴极支撑管型 SOFC 成本的目的.

MCFC 电站,美国 FuelCell Energy 公司处于国际领先地位,其开发的 MCFC 电站已在全球装机 60 余台(图 8D),主要用于医院、宾馆、大学及废水处理厂等场所示范发电. MCFC 操作温度较高($650 \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$),可以实现热电联供及与气轮机联合循环发电,以进一步提高燃料的能量转化效率.由于

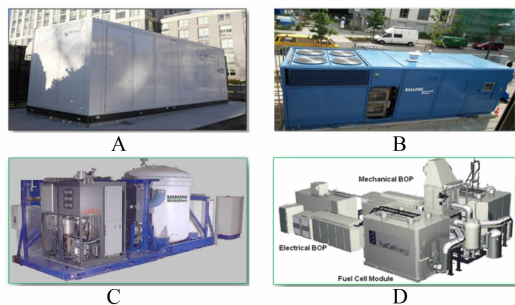


图 8 燃料电池分散电站示范

A. PAFC 电站 (UTC Power); B. PEMFC 电站 (Ballard); C. SOFC 电站 (Siemens Westinghouse); D. MCFC 电站 (FuelCell Energy)

Fig. 8 Demonstration of fuel cell stationary power station
A. PAFC power station (UTC Power); B. PEMFC power station (Ballard); C. SOFC power station (Siemens Westinghouse); D. MCFC power station (FuelCell Energy)

熔盐的强腐蚀性以及高温对材料是一个挑战,寿命是 MCFC 要解决的关键问题.

3.3 备用电源与家庭电源

与现有的柴油发电机比较,燃料电池作为不间断备用电源,具有高密度、高效率、长待时及环境友好等特点,可以为电信、银行等重要部门或偏远地区提供环保型电源.家庭与一些公共场所大多采用 $1 \sim 5\text{ kW}$ 小型热电联供装置,家庭电源通常以天然气为燃料,这样可以兼容现有的公共设施,提供电网以外的电,废热可以以热水的形式利用,备用电源也可采用甲醇液体燃料.在燃料电池电源产品研发方面,日本的 Ebara-Ballard 公司 1 kW 家庭型燃料电池电源,其产品已经在 700 多个场所试验,并建立了年产 4000 台的生产基地;美国 Idatech 公司研制的 5 kW UPS 已于 2008 年拿到印度 ACME 集团 30 000 台的订单;美国 Plug Power 公司已实现近千台的 5 kW 电源(图 9A)的销售,主要用于通讯、军事等方面;此外,Relion 与 Alteryx 公司也开拓了燃料电池备用电源市场(图 9B).我国也已研制了 10 kW 的供电系统,以家庭用电为示范,已经运行了 2500 h .

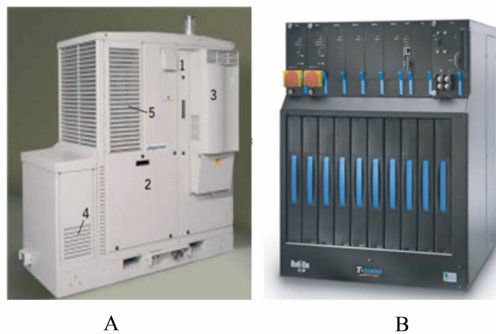


图 9 燃料电池备用电源

A. 5 kW 备用电源 (Plug Power); B. 2 kW 备用电源 (Relion)

Fig. 9 Fuel cell backup power source

A. 5 kW backup power source (Plug Power); B. 2 kW backup power source (Relion)

3.4 燃料电池可移动电源、充电器

燃料电池作为小型可移动电源或二次电池的充电器,也是目前研发的热点.主要技术基础是采用直接甲醇燃料电池,即以甲醇为燃料,这种液体燃料具有携带方便、比能量高等特点.直接甲醇燃料电池初期是瞄准手机、笔记本电脑电源市场,旨

在提供长待时电池,但由于在系统管理、小型化等技术方面还有待突破,近期人们又把目光集中到了充电器市场. 东芝公司 2009 年发布了甲醇燃料电池充电器产品 Dynario™ (见图 10A)^[13],可为手机等电子器件充电,以满足手机日益增加的多功能化需求. 经由 USB 接口在 20 s 内可为一部手机充电,燃料罐 14 mL 储存高浓度甲醇,可以充 2 部常规手机. 该产品已经通过了国际电工协会(International Electrotechnical Commission, IEC)的安全标准,首次试售 3000 部,收集用户反馈意见与市场反应以便进行改进. 国内也研制成功了多功能直接甲醇燃料电池充电器,为野外移动通讯设备等供电,其工作时间可从原来的几个小时提高到 1~3 天. 经过环境模拟试验,表现出良好的环境适应性和可使用性. 此外,直接甲醇燃料电池在军民微小型可移动电源领域也展示了广阔的应用前景^[14]. 国内研制的额定输出功率为 25~50 W 的 DMFC 移动电源系统(见图 10B),经同行专家现场测试表明,能量密度达 502 Wh·kg⁻¹,约为锂离子电池的 3 倍. 随着现代化战争装备的日益先进,单兵作战需要更多电子装备,直接甲醇燃料电池可在单兵作战电源发挥优势. 美国陆军开发了型号为 M-25 燃料电池单兵电源,用于数字通讯、GPS 等电子装备. 经过实际测试表明,这种电池可以在平均 20 W 功率下使用 72 h,而质量比传统电池降低了 80%. 该项目得到美国陆军采办挑战项目总计约 3 亿美元的资助^[15]. 此外,供陆军指挥系统的无线电卫星通讯、远程监控装置等微小型移动电源也引起各国的普遍关注.

目前,直接甲醇燃料电池在技术方面还需要进一步解决寿命、稳定性等关键问题,性能有待进一步提升. 重点是通过研制新型的阻醇膜、多元合

金催化剂以及调变膜电极组件结构等,解决材料在运行过程中的稳定性与耐久性、系统水热管理等问题,并同时解决工程化实际问题,使 DMFC 在充电器与可移动电源等领域尽早实现商业化.

4 燃料电池技术发展思路

如上所述,燃料电池应用主要集中在潜艇、航天等特殊领域,且技术已相对成熟. 而民用领域如燃料电池电动汽车、电站等尚处于示范阶段,相关技术距离商业化还有一定的差距,存在着成本、寿命等瓶颈问题. 其原因可以归结为民用产品与特殊应用产品对成本承受力的差异. 特殊领域由于面对的是特殊应用,对成本目标没有苛刻的要求,而民用产品面对的是广大消费群体,低成本是应用的前提条件. 民用产品在追求低成本的同时,寿命也面临着挑战,如减少 Pt 用量虽可降低燃料电池成本,但低 Pt 催化剂电池的耐久性却更加严峻. 因此,兼顾低成本与长寿命是实现燃料电池民用产品商业化要解决的关键问题. 表 5 列出了几种代表性的民用与特殊应用领域的燃料电池技术参数比较. 以催化剂为例,特殊领域贵金属催化剂担载量是民用产品的 1~2 个数量级,因而它的抗衰减能力比民用产品大大提高,燃料电池所面临的寿命问题也会迎刃而解.

因此,现阶段我国一方面要大力推进燃料电池在特殊领域的应用,力争占领未来此领域动力源的制高点;另一方面要促进燃料电池在民用领域的技术进步,加快燃料电池民用产品的商业化步伐.

4.1 提高性能与可靠性,加快我国燃料电池技术在特殊领域的应用

1) 航空航天

燃料电池在航天领域的应用,除了前面叙述的在 Apollo 航天飞机等的成功应用外,以燃料电池为动力的平流层飞艇、无人机等也成为国际研发热点,燃料电池在航天领域已展示了广阔的应用前景.

在航天技术中,高比能量是追求的重要指标之一. 目前,有 2 条技术路线,一是采用氢/氧或氢/空燃料电池技术,即利用携带的氢气与氧气或空压机,提供一定航程所需的燃料与氧化剂;另一种是依据可再生燃料电池技术(Regenerative Fuel Cell, RFC),即飞行器向日时由太阳能电池提供动

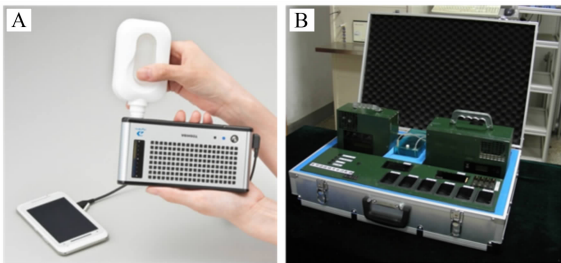


图 10 DMFC 电子器件充电器(A)和 DMFC 移动电源系统(B)

Fig. 10 DMFC charger (A) and DMFC portable power source (B)

表 5 民用与特殊用途燃料电池技术参数比较
Tab.5 Parameters comparison of fuel cells for civil and special applications

Parameter	Submarine (Type 212)	Spacecraft (Apollo)	Typical FCV
Catalyst loading	4 mgPt/cm ²	20 mgAu-Pt/cm ²	0.1 ~ 0.4 mgPt/cm ²
Bipolar plate	Au coating	Mg with Au coating	Stainless steel with non-noble metal coating
Power density/W ·kg ⁻¹	53	100	1000
Lifetime/h	~ 6500	~ 10 000	2000 ~ 3000 (current level in China)

力同时电解水生成氢气与氧气,背日时电解产物氢和氧使燃料电池发电作为飞行器动力源. 氢/氧燃料电池重点解决的是燃料和氧化剂的携带与燃料电池耦合技术;氢/空燃料电池的瓶颈技术是高效空压机,目前国内这方面技术还处于研发过程中. 相比之下,可再生燃料电池在航天技术方面的应用引起人们更多的重视,尤其是一体化 RFC 技术,使系统集成更加紧凑,有利于提高系统比能量.

再生燃料电池由于电解过程需要较高的电位 (1.5 ~ 1.8 V),对燃料电池材料是一个挑战. 其中导电、耐腐蚀兼容的双极板与扩散层材料是研发的重点,如轻质的 Ti 双极板与多孔 Ti 扩散层材料在高电位下具有较高的耐腐蚀性,但是原材料表面接触电阻较大,需要经过表面处理. 使用贵金属 Pt、Au 等可增加导电和耐腐蚀性,然而成本较高. 其它的替代方案目前正在研究中. 为了提高系统比能量,需要燃料与氧化剂 5 ~ 10 MPa 高压储存,因此 RFC 的高压水电解技术更应重点关注. 除了高压要求的电解池硬件强度及密封问题外,高压下气液两相流动的传递过程对电化学反应的影响也需进行研究. 为了提高系统比能量,RFC 系统水管理和热管理也应当进一步改进,如采用无泵水循环技术可减少系统部件、减轻质量,采用热解石墨或热泵技术可以实现更加高效排热.

目前 RFC 可分为燃料电池和电解池分体式 and 一体式 2 种. 分体式技术比较成熟,一体式技术还处于研究阶段,关键是双效氧电极技术,一体式 RFC 研制成功可极大地提高系统比功率与比能量. 此外,为了适应空间环境,动力系统的环境适应性也要特别考虑. 可根据环境实验项目,作 RFC 电池与系统的结构设计,以满足空间应用的需求.

2) 水下潜器

水下应用燃料电池除了能给潜艇提供安静、

长航时的动力源系统外,还可以用于水下机器人、水下蛙人等动力源.

水下燃料电池均以氢氧燃料电池技术为基础,其中排水与零排放技术是目前研究的热点. 燃料电池生成水在阴极侧,在氢-空燃料电池中可以通过气体吹扫与夹带把生成水排出燃料电池,以保证电池安全可靠运行. 但在以氧气为氧化剂的情况下,按给定的反应计量比,氧气的体积仅为空气的 1/5,如此必将减弱生成水的排出能力,导致电池发生“水淹”,不能正常运行. 采用氢氧尾气循环和内部排水技术等可实现氢氧燃料电池的有效排水.

水下操作更苛刻的要求是零排放. 目前,零排放技术有 2 种,一种是氢氧吸收技术,另一种是氢氧复合技术. 氢氧吸收是利用储氢、储氧材料,把尾排的氢氧储存起来,但其储存量受储罐容积限制;氢氧复合是利用催化作用把排出的少量氢、氧复合生成水,达到零排放目的. 在氢氧复合技术中,控制好氢氧化学反应计量比是关键. 另外氢氧复合催化剂在有水生成情况下的稳定性也是要关注的问题.

在水下用燃料电池系统中,氢气供给有多种方式,如金属固态储氢、高压气态储氢、低温液态储氢以及甲醇重整制氢等. 可根据不同的应用背景选择不同的储氢技术,如水下机器人通常优先选择高压气态高纯氢以满足一定的续航里程;而潜艇比较成熟的技术还局限于使用金属固态储氢,其中储放氢过程的能量须与燃料电池耦合;对甲醇重整制氢过程,也要考虑制氢过程与燃料电池发电过程的热平衡,以提高整个系统的工作效率.

水下燃料电池系统部件模块化是提高可靠性的重要措施,一个动力系统可以由多个模块并、串联而成,当一组模块出现故障,可以瞬间切断,在

线更换,以提供系统长航时运行能力。

4.2 解决寿命与成本问题,促进民用燃料电池产品的商业化

燃料电池汽车、电站等民用产品面临着的低成本与长寿命兼顾问题,是制约商业化的瓶颈问题。需要从燃料电池材料、部件与系统3方面进行改进与创新,以促进燃料电池尽早走向应用。车用燃料电池的问题尤为突出,下面以车用质子交换膜燃料电池为例,探讨成本与耐久性兼容的解决方案。

1) 燃料电池核心材料的创新

① 发展贵金属部分替代或完全替代的催化剂

改进目前使用的 Pt/C 催化剂是降低成本与提高寿命的关键。研究显示,由于燃料电池动态工况或高电位会引起催化剂的团聚、流失,从而引起催化剂活性比表面积下降,造成燃料电池性能严重衰减。此外,由于 Pt 成本较高且资源有限,降低 Pt 催化剂用量势在必行。然而在低 Pt 催化剂研发的同时,也必须解决相关的稳定性,以期建立低成本、长寿命的最优解决方案。

优化制备方法,利用形貌控制,可有效地提高催化剂活性与稳定性^[16]。孙世刚等^[17]利用高指数晶面 Pt 具有的开放表面结构、高密度的台阶原子以及其所处的短程有序环境等特点,使催化剂的活性和稳定性方面均得到显著提高。

Pt 合金催化剂目前显示出较好的发展前景,借助加入第2或第3种非 Pt 金属,利用电子或几何效应,在达到低 Pt、高活性的同时,稳定性也相应提高。其中核壳型催化剂是研究热点之一,利用非贵金属为支撑核,表面贵金属为壳的结构,可降低 Pt 用量,提高质量比活性。如由欠电位沉积方法制备的 Pt-Pd-Co/C 单层核壳催化剂^[18]总质量比活性是商业催化剂 Pt/C 的3倍;利用脱合金方法制备的 Pt-Cu-Co/C 核壳电催化剂^[19],质量比活性可达 Pt/C 的4倍。此外,Pt 催化剂表面的修饰也可以起到提高稳定性作用,如以金簇修饰 Pt 纳米粒子^[20],提高了 Pt 的氧化电势,起到了抗 Pt 溶解的作用,经过30 000次循环后金修饰的铂催化剂的活性表面积与初始状态相比并没有明显降低。

Pt₃Pd/C 比 Pt/C 抗衰减能力之所以有较大提高,原因在于加入 Pd 提高了 Pt 的氧还原活性,改善了其抗氧化能力^[13]。中国科学院大连化学物理

研究所包信和研究组借助贵金属 Pt 表面与单层氧化亚铁薄膜中铁原子的强相互作用产生的界面限域效应,成功构建了表面配位不饱和和亚铁结构催化剂,在一氧化碳低温活化过程中显示出非常独特的催化活性,可高效去除 CO 毒物,该催化剂在 PEMFC 实际工况条件下稳定运行超过 1500 h^[21];最近,又将界面限域的概念扩展到 PtNi、PtSn、PtCo 等催化体系,发现了界面限域的配位不饱和 Ni 物种及其在低温氧化反应中的重要作用。

催化剂载体的改进,也是提高催化剂稳定性的有效途径之一。由于目前 Pt 催化剂载体大多采用 XC-72 碳黑,在高电位及电位循环下会发生载体腐蚀,是造成催化剂团聚与流失的主要原因。改进催化剂载体可以从2个方面着手,一是改进目前的碳载体材料,如高温石墨化处理、添加官能团等方法,可以提高高电位下载体的耐腐蚀性;二是采用新的载体材料,碳纳米管或氮掺杂的碳纳米管^[22-23]、纳米碳须、W_xC_y^[24]、氧化铟锡^[25]等碳与非碳载体。这些新型载体材料在一定程度上提高了耐腐蚀性,但是比表面积均远低于现有的载体材料。目前具有高导电、高比表面积与高耐蚀性兼顾的载体材料还是研究的难点。

在探求低 Pt 催化剂的同时,非 Pt 催化剂的研究也一直在进行中。如金属硫化化合物、金属大环配合物等展示了较好的初活性,但稳定性还远满足不了要求。近期,Lefèvre 等^[26]在非 Pt 催化剂的研究方面取得了进展,以载量为 5.3 mg·cm⁻² 的非贵金属 Fe/N/C 电催化剂制备的电极,低电流密度下与 Pt 载量为 0.4 mg·cm⁻² 的 Gore 电极性能相当。但因前者担载量比 Pt 催化剂高出几倍甚至十几倍,电极厚度随之增加,从而导致电极反应的传质阻力大幅度增加,而且其稳定性还需进一步改善^[27]。此外,近期研究的氮掺杂碳基非 Pt 催化剂也表现出较高的氧还原反应催化活性与稳定性^[28]。

至今,酸性体系下能使用的非 Pt 催化剂还没有突破性进展。目前,人们把目光聚集到碱性体系的聚合物燃料电池。由于碱性环境中的氧还原动力学快于酸性条件,催化剂可实现贵金属替代,使燃料电池成本得到根本性的降低。武汉大学庄林研究组结合实验与计算提出了利用非化学计量比金属氧化物修饰调控 Ni 表面电子结构,所得 Ni 基 HOR 催化剂表面的反应选择性、抗氧化性均大幅

度提高,藉此组装的碱性聚合物电解质燃料电池可以完全摆脱对贵金属催化剂的依赖^[29]. 目前技术难点是研究高离子传导性、高稳定性的碱性离子交换膜. 一些学者进行了季胺或季膦型聚合物膜的研究^[30],通过对电解质可溶性溶剂的选择,制备出带有立体化三相界面的非贵金属催化剂膜电极,但聚合物膜的离子传导性与稳定性还有待于进一步提高.

② 进一步促进高性能、廉价国产材料的批量供应

除了催化剂外,其它材料如质子交换膜、碳纸等也是制约成本与寿命的重要因素. 其中 Nafion 系列的均质全氟磺酸膜在燃料电池环境中由于反应过程中氢氧自由基的攻击,发生衰减,影响电池寿命. 此外,该种膜大部分依赖于进口,成本较高. 因此需要研制新型高稳定的国产化质子交换膜替代 Nafion 膜,主要是从提高机械性能与化学稳定性出发进行改进. 例如采用多孔材料、碳纳米管、TiO₂ 纳米管等与全氟磺酸树脂复合的增强膜^[31-32],可有效地增强膜的机械性能,使之在动态工况下,稳定性显著提高. 在膜中加入自由基淬灭剂,也可抵抗发电过程氢氧自由基的攻击,从而提高化学稳定性^[33]. 再者,短侧链膜因其具有较好的质子传导率及高的稳定性也引起了关注,制备带自由基淬灭剂的短侧链复合膜是一个比较有前景的发展方向.

碳纸目前也是采用进口材料,在科技部“863 课题”支持下,国产化的替代产品已经基本研制成功,其性能已接近国际先进水平,有待进一步优化及研制批量化生产工艺与设备,以满足燃料电池商业化的需求. 高稳定性、低成本的国产化材料,是发展国内燃料电池技术的必由之路.

2) 燃料电池关键部件的改进

① 高催化剂利用率、性能稳定的膜电极技术

除了催化剂本身以外,改进、优化燃料电池膜电极组件制备方法是有效提高 Pt 利用率、降低成本的重要手段. 国际上已经发展了 3 代 MEA 技术路线:一是把催化层制备到扩散层上,通常采用丝网印刷方法,该技术已经成熟;二是把催化层制备到膜上,与第一种方法比较,在一定程度上提高了催化剂的利用率与耐久性;三是有序化的 MEA,把催化剂如 Pt 制备到有序化的纳米结构上,使电极呈有序化结构,有利于降低

大电流密度下的传质阻力,进一步提高燃料电池性能,降低催化剂用量. 利用有序化 MEA 制备技术,3M 公司研制的纳米结构薄膜 MEA,其 Pt 担载量可降至 0.15 ~ 0.25 mg·cm⁻²,并显示出较好的性能^[34].

② 高均一性电堆技术

提高电堆的一致性,提升额定工作点电流密度,也是降低燃料电池 Pt 用量以及其它硬件成本的重要环节. 车用燃料电池为了满足一定功率需求,电堆通常都是由数百节单电池组成,电堆内单电池间的一致性在保证燃料电池能够高功率运行的关键. 一致性除了与燃料电池材料、部件加工的均一性有关外,还与电堆的水、气、热分配密切相关. 从设计、制备及操作 3 方面出发进行调控,通过模拟仿真手段研究流场结构、阻力分配对流体分布的影响,找出关键影响因素,重点研究水的传递、分配与水生成速率、水传递系数、电极/流场界面能之间的关系,研究稳态与动态载荷条件对电堆阻力的影响,保证电堆在运行过程中保持均一性,从而可以大幅提升额定工作点电流密度以及电堆的功率密度,降低成本.

3) 燃料电池系统技术的完善

① 缓解燃料电池衰减的控制策略

研究发现,动态循环工况、启动/停车过程、连续低载或怠速运行等都是引起燃料电池衰减的主要原因^[35-36]. 针对这些,提出车用燃料电池的合理控制策略^[37],规避可能引起衰减因素的出现,起到保护材料遭到侵害的作用. 燃料电池关键材料的研究需要相对长的时间,就目前看,可以在现有材料的基础上通过改变控制策略,以提高其耐久性.

采用二次电池、超级电容器等储能装置与燃料电池构建电-电混合动力,既可减缓燃料电池输出功率变化速率,又可避免燃料电池载荷的大幅度波动,以使燃料电池能在相对稳定的情况下工作,避免加载瞬间由于空气饥饿引起的电压波动,减缓运行过程中因频繁变载而引起的电位扫描最终导致催化剂的加速衰减. 还可采用“前馈”控制策略,即在加载前预置一定量的反应气^[38],以减轻反应气的饥饿现象. 利用辅助负载限电位法,亦可有效地抑制启动、停车瞬间由于阳极侧易形成氢空界面而产生的高电位^[36]. 此外,碳腐蚀速率与进气速率密切相关^[39]. 在启动过程中快速进气可以降低高电位停留时间,达到减少碳载体损失的目的

的. 利用混合动力控制策略,在低载时给二次电池充电,提高电池的总功率输出,也可起到降低电位的目的. 此外,美国 UTC 公司在一个专利中提出了怠速限电位的方法^[40]. 通过调小空气量、同时循环尾排空气以降低氧浓度的办法,达到抑制电位过高的目的. 合理的控制策略可实现燃料电池内部有效水管理,保持燃料电池内水处在一定的合适范围,尤其在动态工况下,使水能够跟踪动态操作变化,保证燃料电池正常稳定工作,避免由于干湿度频繁变化导致的失效或性能衰减.

② 高比功率、高可靠性的系统集成技术

目前,国内车用燃料电池系统质量比功率仅为 $300 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$,而国际先进水平的系统质量比功率已经达到 $650 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. 造成差距的主要原因是国际上大多都是汽车制造商在从事燃料电池发动机的制造,他们利用传统汽车工业技术基础,研制出高集成度的产品. 有鉴于此,国内燃料电池开发单位需要与汽车厂开展合作,移植传统汽车工业的成熟技术,推进燃料电池系统技术的进步,并进一步提高部件可靠性,延长无故障间隔时间,促进燃料电池商业化.

5 结 语

燃料电池经过近半个多世纪的发展,已经实现了在航天飞机、宇宙飞船及潜艇等特殊领域的应用,而民用方面由于受寿命与成本的制约,至今在电动汽车、电站、便携式电源或充电器等各行业还处于示范阶段. 未来我国应大力推进燃料电池在特殊领域的应用,增强我国的国防军事实力;同时,要集中解决寿命与成本兼顾问题,从材料、部件、系统等3个层次进行技术改进与创新,加快燃料电池民用商业化步伐,提供高效、环境友好的燃料电池发电技术,为建立低碳、减排、不依赖于化石能源的能量转化技术新体系做贡献.

参考文献(References):

- [1] Yi B L (衣宝廉). Fuel cells-Principle, technologies and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [2] <http://www.utcpower.com>
- [3] Wikipedia. Type 212 submarine. http://en.wikipedia.org/wiki/Type_212_submarine, 30 Nov. 2009
- [4] Cute (Clean Urban Transportation for Europe) Detailed Summary of Achievements, http://ec.europa.eu/energy/res/fp6_projects/doc/hydrogen/deliverables/summary.pdf.
- [5] Hyfleet: CUTE Hydrogen transportation-Bus technology & fuel for today and for a sustainable future. http://hyfleetcute.com/data/HyFLEETCUTE_Brochure_Web.pdf
- [6] General Motors Announces New Fuel Cell System. <http://www.fuelcelltoday.com/online/news/articles/2009-09/General-Motors-Announces-New-Fue>.
- [7] Mercedes-Benz F-CELL World Drive-the finale. Successful finish: F-CELL World Drive reaches Stuttgart after circling the globe. <http://fuelcellsworld.com/news/2011/06/02/>
- [8] UTC Fuel Cell Transit Bus Sets Record. <http://evworld.com/news.cfm?newsid=26282>
- [9] <http://www.fuelcelltoday.com/online/news/articles/2010-03/GM-Uncovers-Production-Intent-Fu>
- [10] <http://www.fuelcelltoday.com/online/news/articles/2010-05/Toyota-Outlines-Cost-Down>
- [11] Zhou Z M, Shao Z G, Qin X P, et al. Durability study of Pt-Pd/C as PEMFC cathode catalyst [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35 (4): 1719-1726.
- [12] <http://www.ballard.com>
- [13] Toshiba News Releases, Toshiba launches direct methanol fuel cell in Japan as external power source for mobile electronic devices. http://www.toshiba.co.jp/about/press/2009_10/pr2201.htm, 22 Oct, 2009
- [14] Kamarudin S K, Achmad F, Daud W R W. Overview on the application of direct methanol fuel cell (DMFC) for portable electronic devices [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34 (16): 6902-6916.
- [15] Crawley G. 2007 Military Survey, <http://www.fuelcelltoday.com/media/pdf/surveys/2007-Military.pdf>, May 2007
- [16] Wang Z L. Transmission electron microscopy of shape-controlled nanocrystals and their assemblies [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2000, 104 (6): 1153-1175.
- [17] Tian N, Zhou Z Y, Sun S G, et al. Synthesis of tetrahedral platinum nanocrystals with high-index facets and high electro-oxidation activity [J]. Science, 2007, 316(5825): 732-735.
- [18] Shao M, Sasaki K, Marinkovic N S, et al. Synthesis and characterization of platinum monolayer oxygen-reduc-

- tion electrocatalysts with Co-Pd core-shell nanoparticle supports[J]. *Electrochemistry Communications*, 2007, 9(12): 2848-2853.
- [19] Srivastava R, Mani P, Hahn N, Strasser P. Efficient oxygen reduction fuel cell electrocatalysis on voltammetrically dealloyed Pt-Cu-Co nanoparticles [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2007, 46(47): 8988-8991.
- [20] Zhang J, Sasaki K, Sutter E, et al. Stabilization of platinum oxygen-reduction electrocatalysts using gold clusters[J]. *Science*, 2007, 315(5809): 220-222.
- [21] Fu Q, Li W X, Bao, X H, et al. Interface-confined ferrous centers for catalytic oxidation[J]. *Science*, 2010, 328(5982): 1141-1144.
- [22] Qin X P (秦晓平), Shao Z G (邵志刚), Zhou Z M (周志敏), et al. The preparation and electrochemical stabilities of Pt/short MWNTs [J]. *电源技术 (Chinese Journal of Power Sources)*, 2009, 33(10): 847-852.
- [23] Chen Y, Wang J, Liu H, et al. Enhanced stability of Pt electrocatalysts by nitrogen doping in CNTs for PEM fuel cells [J]. *Electrochemistry Communications*, 2009, 11(10): 2071-2076.
- [24] Zhang S S (张生生), Zhu H (朱红), Yu H M (俞红梅), et al. The oxidation resistance of tungsten carbide as catalyst support for proton exchange fuel cells[J]. *Chinese Journal of Catalysis (催化学报)*, 2007, 28(2): 109-110.
- [25] Chhina H, Campbell S, Kesler O. An oxidation-resistant indium tin oxide catalyst support for proton exchange membrane fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(2): 893-900.
- [26] Lefèvre M, Proietti E, Jaouen F, et al. Iron-based catalysts with improved oxygen reduction activity in polymer electrolyte fuel cells [J]. *Science*, 2009, 324(5923): 71-74.
- [27] Gasteiger H A, Markovic N M. Just a dream- or future reality[J]. *Science*, 2009, 324(5923): 48-49.
- [28] Jin H, Zhang H M, Zhong H X, et al. Nitrogen-doped carbon xerogel: A novel carbon-based electrocatalyst for oxygen reduction reaction in proton exchange membrane (PEM) fuel cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(9): 3389-3394.
- [29] Lu S, Pan J, Huang A, Zhuang L, et al. Alkaline polymer electrolyte fuel cells completely free from noble metal catalysts[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(52): 20611-20614.
- [30] Gu S, Cai R, Luo T, et al. A soluble and highly conductive ionomer for high-performance hydroxide exchange membrane fuel cells[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2009, 48(35): 6499-6502.
- [31] Liu F Q, Yi B L, Xing D M, et al. Nafion/PTFE composite membranes for fuel cell applications[J]. *Journal of Membrane Science*, 2003, 212(1/2): 213-223.
- [32] Matos B R, Santiago E I, Rey J F Q, et al. Nafion-based composite electrolytes for proton exchange membrane fuel cells operating above 120 °C with titania nanoparticles and nanotubes as fillers[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(3): 1061-1068.
- [33] Zhao D, Yi B L, Zhang H M, et al. Cesium substituted 12-tungstophosphoric ($Cs_xH_{3-x}PW_{12}O_{40}$) loaded on ceria-degradation mitigation in polymer electrolyte membranes[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 190(2): 301-306.
- [34] Debe M K, Schmoeckel A K, Vernstrom G D, et al. High voltage stability of nanostructured thin film catalysts for PEM fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(2): 1002-1011.
- [35] Tang H, Qi Z G, Ramani M, et al. PEM fuel cell cathode carbon corrosion due to the formation of air/fuel boundary at the anode[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 158(2): 1306-1312.
- [36] Liang D, Shen Q, Hou M, et al. Study of the cell reversal process of large area proton exchange membrane fuel cells under fuel starvation[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(2): 847-853.
- [37] Perry M L, Patterson T, Reiser C. System strategies to mitigate carbon corrosion in fuel cells[J]. *ECS Transactions*, 2006, 3(1): 783-795.
- [38] Shen Q, Hou M, Yan X Q, et al. The voltage characteristics of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) under steady and transient states[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 179(1): 292-296.
- [39] Shen Qing, Hou M, Liang D, et al. Study on the processes of start-up and shutdown in proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 189(2): 1114-1119.
- [40] Reiser C A, Homogenous gas in shut down fuel cells: US, WO2010056224[P]. 2010-05-20.

Progress and Perspective of Fuel Cell Technology

HOU Ming, YI Bao-lian*

(*Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China*)

Abstract: Fuel cell, a clean and high-efficiency electrochemical power source, has being paid much attention worldwide recent years. In this paper, the progress and perspective of fuel cell technology are elucidated in detail. Fuel cells have been applied in some special fields such as spacecraft, shuttle and submarines. However, in the areas of transportation, stationary station and portable power source, fuel cells are still under demonstration due to the durability and cost problems. The reliability and surrounding survivability of fuel cells should be enhanced in the special application. Meanwhile, the durability and cost of fuel cells are the main issues to be solved in the civil application. Fuel cell technologies need to be improved from three aspect innovations of key materials, components and system in order to realize fuel cell commercialization.

Key words: fuel cell; power source; durability; cost