

燃料电池驱动未来

葛奔¹, 祝叶华²

1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083
2. 科技导报社《科技导报》编辑部, 北京 100081

摘要 面对日益凸显的能源和环境问题, 世界各国早已经达成了谋求绿色可持续发展道路的共识。燃料电池作为新能源技术领域的热点, 被普遍认为是一种高效清洁的新型发电方式, 可灵活地为交通工具、家用电器、航空航天等提供动力。本文概述了燃料电池的发展历程、发电原理及现实应用等, 重点介绍了目前燃料电池技术的发展与应用。

关键词 燃料电池; 新能源; 应用

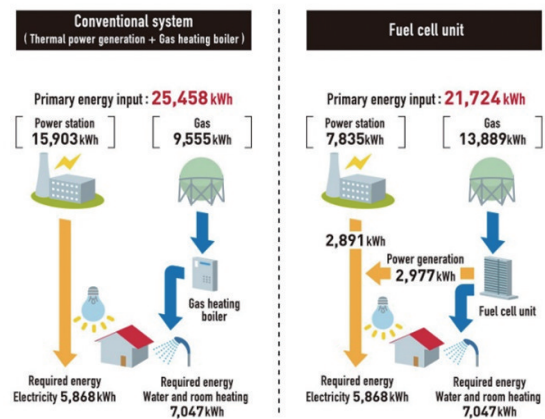
能源是人类社会向前发展的源动力, 能源技术的发展是衡量一个国家经济发展水平和生活水准的重要指标之一。人类社会的每一次进步都与能源技术的突破与创新不可分割。但现有的能源结构及人类的不合理利用, 给人类社会带来“重创”: 酸雨、温室效应、全球气候变暖、空气污染、臭氧层破坏等环境问题在一步步“逼迫”人类重视能源结构的转型。而寻求高效、清洁和可持续发展的新能源技术也是全球各国必须面对和重视的问题。

燃料电池(fuel cell, FC)是一种能有效控制燃料和氧化剂的化学反应, 并将其中的化学能直接转化为电能电学装置, 是一种把燃料中的化学能转换成电能的能量转换器, 被誉为继火电、水电及核电之外的第4种发电方式。燃料电池虽然名叫“电池”, 但实际和电池是有区别的, 电池属于储能器范畴, 而燃料电池不储能, 本质上只是一个能量转换器, 更像是一台“发电机”。

与传统发电方式相比, 燃料电池有其特殊之处: 在反应过程中, 燃料电池能量转换过程无明火燃烧活动, 所以能量转换效率不受“卡诺循环”限制, 除此之外, 燃料电池还具有燃料多样化、噪音低、排气较清洁、对环境污染小、维修性好以及可靠性高等优点^[1]。图1为日本松下电器市场调研后得出的燃料电池直接发电与传统间接发电的比较数据(4口之家的年耗电量对比), 相对于传统间接发电, 单个家庭通过燃料电池发电的能量消费方式1年可以节约3734 kW·h的电量^[2]。经过多年的发展, 目前燃料电池已逐渐应用在民用、交通、军事等领域。

Required energy for a household : 12951 kW·h
(Electric power + Space heater + Hot water)

For typical detached house with 4 people (estimated by Panasonic)



Energy saving of 3734 kW·h (compare to conventional system)

图1 燃料电池直接发电与传统间接发电对比

1 燃料电池发展历程

作为第4类发电技术, 燃料电池曾被《Time》列为21世纪高科技之首, 被认为是21世纪能源之星。

从19世纪初开始, 燃料电池的概念逐渐在能源领域“崭露头角”, 经历了200多年的发展^[3], 其发展源头需追溯到电化学现象的发现。

Volta是首位观察到电化学现象的科学家, 他与Ritter共同被尊为电化学的奠基人; 1839年, 英国科学家Grove在水的

收稿日期: 2017-02-28; 修回日期: 2017-03-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2017QJ03); 国家自然科学基金项目(51502153)

作者简介: 葛奔, 讲师, 研究方向为新能源材料, 电子信箱: geben@cumb.edu.cn; 祝叶华(共同第一作者), 博士, 研究方向为环境新能源材料, 电子信箱: zhuyehua@cast.org.cn

引用格式: 葛奔, 祝叶华. 燃料电池驱动未来[J]. 科技导报, 2017, 35(8): 12-18; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.08.001

电解过程中发现了燃料电池原理,并发表了第1篇有关燃料电池的文章,介绍了燃料电池的原理性实验;1889年,Mond和Langer改进了Grove的发明,利用浸有电解质的多孔非传导材料作为电池隔膜,以铂黑充为催化剂,通过钻孔的铂或金片为电流收集器组装出以氢和氧为燃料和氧化剂的燃料电池;20世纪50年代,美国通用电气公司发明了首个质子交换膜燃料电池;1959年,Bacon制造出第1个可以工作的培根型燃料电池(AFC),Allis-Chalmers公司推出了第1台以燃料电池提供动力的农用拖拉机;20世纪60年代,美国航空航天管理局(NASA)在阿波罗登月飞船上首次使用燃料电池作为主电源,燃料电池因此为人类的登月做出了“卓越的贡献”。自此之后,燃料电池技术的研究引起各国重视,开始步入快速发展阶段^[4]。

20世纪70年代之后,在环境保护和能源需求的双重压力下,尤其是1973年石油危机的爆发,让世界各国开始正视能源的重要性,更加激发了科学家对燃料电池技术的研发热情,第1代燃料电池(以净化重整气为燃料的磷酸型燃料电池,PAFC)、第2代燃料电池(以净化煤气、天然气为燃料的熔融碳酸盐型燃料电池,MCFC)和第3代燃料电池(固体氧化物电解质燃料电池,SOFC)相继被开发。

1993年,加拿大Ballard Power System公司推出世界上首辆以质子交换膜燃料电池为动力的车辆,燃料电池开始进军民用领域。20世纪90年代,燃料电池作为清洁、廉价、可再生的能源使用方式逐渐由实验室走入“寻常百姓家”^[4]。目前,世界上许多医院、商场、学校等公共场所都安装了燃料电池供电,各国的汽车制造商也开始研发各种以燃料电池为动力的新能源车辆。美国、日本、加拿大、欧洲及澳洲在燃料电池的研究和应用领域处于世界前列,中国从20世纪50年代,也开启了燃料电池的研究,在20世纪70年代,中国的燃料电池研究达到高潮,但后来大踏步的热情被一度中断,20世纪90年代,在国际能源需求告急以及国内环境恶化的情况下,中国的燃料电池开发再度成为热门领域^[5]。

2 燃料电池原理

燃料电池历经200多年的发展,如今已逐步走出实验室,融入到人类社会生活中。不同种类的燃料电池凭借着各自的性能优势在不同领域“大放异彩”,但其原理都是相通的。

燃料电池单体由3部分构成:阳极、阴极及电解质。其“发电”过程可大致分解为以下4个步骤。

- 1) 在阳极催化剂作用下,燃料气(氢气、甲烷、甲醇等)发生氧化反应,生成阳离子并给出自由电子。
- 2) 在阴极催化剂作用下,氧化物(通常为氧气)发生还原反应,得到电子和阴离子。
- 3) 阳极反应产生的阳离子或阴极产生的阴离子通过电解质运动到对电极上,生成反应产物并排到电池外。
- 4) 在电势差的驱动下电子通过外电路从阳极运动到阴

极,这样整个反应过程达到物质平衡和电荷平衡,外部用电器获得了燃料电池所提供的电能。工作原理如图2所示^[6]。

虽然不同类型燃料电池的基本原理是相通的,但通常由于电解质不同,所允许通过的载流子也不同,因而对应的电池反应会存在一些差异。

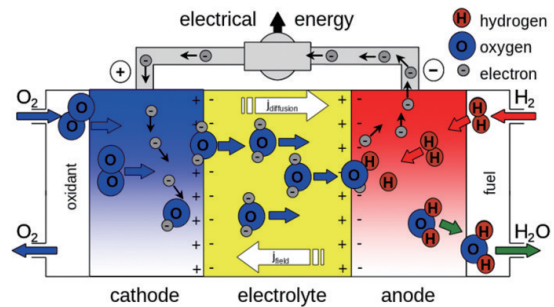


图2 燃料电池发电原理

3 燃料电池分类

根据电解质的不同,燃料电池可以分为碱性燃料电池(AFC)、磷酸燃料电池(PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)和质子交换膜燃料电池(PEMFC)5种,其性能比较和发电原理如表1^[7-8]所示。

目前5种燃料电池分别各自处于不同的发展阶段,除此之外,燃料电池还有几种特殊的类型:直接甲醇燃料电池(DMFC)、再生燃料电池(RFC)和直接碳燃料电池(DCFC)。

4 燃料电池的应用

燃料电池提供了一种提高能源利用率、减少废弃排放的新型发电模式,其自身独特的优势决定了燃料电池在新一轮能源革命中的重要位置。根据燃料电池的规模,不同功率大小的燃料电池有基本固定的应用领域,如图3所示^[9]。根据燃料电池的分类,不同类型的燃料电池由于工作温度、燃料适应性不同也有分别各自的应用空间。

4.1 质子交换膜燃料电池(PEMFC)

质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)是目前最接近商业化的燃料电池,也是未来最有希望为新能源汽车提供动力的电池。PEMFC单电池由阳极、阴极和质子交换膜组成,质子交换膜作为传递H⁺的介质,只允许H⁺通过,其结构图如图4所示^[10]。

美国通用公司为了给双子星座提供动力源,最早在1960年就开发出了PEMFC,但是后期由于性能不佳,该电池方案输给了碱性燃料电池(AFC),最终没有得以应用。1970年,美国杜邦公司研发出全氟磺酸膜(Nafion膜),它是性能最好的质子交换膜,为后期PEMFC的快速发展奠定了基础。尽管如此,由于其他类型燃料电池在该历史时期取得的突破,导致PEMFC失去了优势,研究出现了一段很低的低谷期。

表1 5种燃料电池性能比较

种类	电解质	工作温度范围/℃	电解质腐蚀性	氧化剂	极板材料	催化剂(阳/阴极)	燃料	发电效率/%	优点	缺点	应用领域
AFC	KOH	低于260	中	纯氧/双氧水	镍	镍/银洗	电解纯氢	50~60	启动快, 室温常压下工作	需以纯氧做氧化剂, 成本高	航天, 特殊地面, 潜艇
PAFC	H ₃ PO ₄	19~210	强	空气	石墨	铂系	天然气, 轻质油, 甲醇等	40~50	对CO ₂ 不敏感, 成本相对较低	对CO敏感, 启动慢, 成本高	特殊需求, 区域供电
MCFC	LiCO ₃ , K ₂ CO ₃	600~700	强	空气	镍, 不锈钢	镍/氧化镍	天然气, 甲醇等, 煤气	50~65	空气做氧化剂, 天然气或甲烷做燃料	工作的温度较高	区域供电, 联合发电
SOFC	Y ₂ O ₃ 稳定ZrO ₂ 或钙钛矿	约1000	无	空气	陶瓷, 不锈钢	镍LaMnO ₃ 或LaCoO ₃	天然气, 甲醇, 煤气	55~70	空气做氧化剂, 天然气或甲烷做燃料	工作的温度过高	分布式电站, 交通工具电源, 移动电源
PEMFC	质子交换膜(如Nafion膜)	约85	无	空气	石墨, 金属	铂系	天然气, 甲醇等	30~40	空气做氧化剂; 固体电解质, 室温工作, 启动迅速	对CO非常敏感, 反应物需要加湿	电站, 交通工具电源, 潜艇, 移动电源

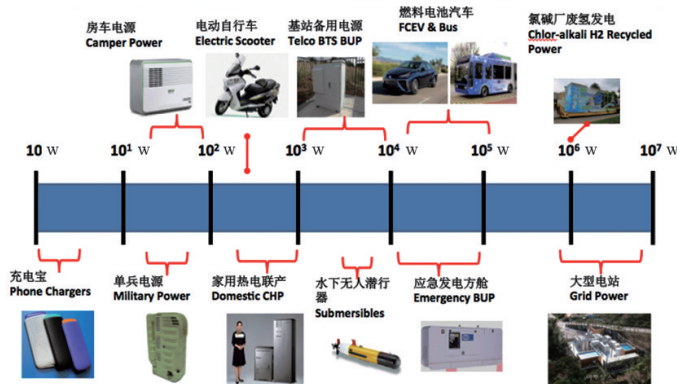


图3 不同功率的燃料电池应用领域

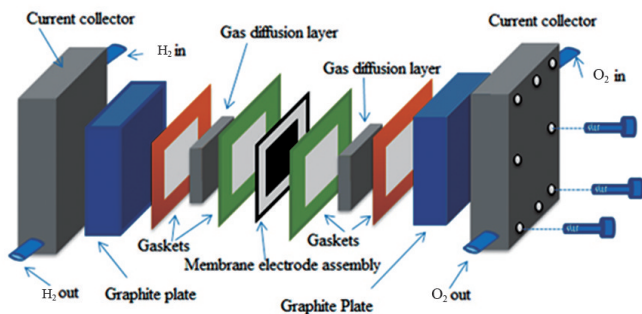


图4 PEMFC燃料电池结构

直到1980年代, 电池技术和材料的发展和石油的短缺促使PEMFC又迎来一轮新研发热潮, 研究人员开始尝试将PEMFC应用于汽车电源。PEMFC在20世纪90年代发展迅

速, 尤其是作为便携式电源和机动车电源, 整体发展受到了氢燃料电池车行业的带动(图5^[12]、图6^[13])。1993年, 以PEMFC驱动的公共汽车问世, 由Ballard公司(Ballard Power System Inc.)研制, 该公司于2001年建成了世界上第1座PEMFC燃料电池厂。

除此之外, PEMFC燃料电池在军事领域也大有作为, 2003年4月7日, 世界上第1艘现代化的AIP质子交换膜燃料电池潜艇(德国马克的212A型U31潜艇)诞生(图7)。在2008年北京奥运会和2010年上海世博会上, 中国自主研发的燃料电池轿车和客车也已成功示范运行。

在所有的燃料电池类型中, PEMFC的工作温度最低, 也是发展规模最大的一种。Fuel Cell Today统计数据显示, 2005—2010年, 在小型电源领域, 国际上有超过15万套燃料电池交付使用, 总功率远超15 MW, 而在这其中, 有96%是PEMFC。同时, PEMFC在交通领域也被“寄予厚望”, 全球几乎所有的汽车制造商都在致力于燃料电池汽车的研发^[14-15]。



图5 巴拉德氢燃料电池客车

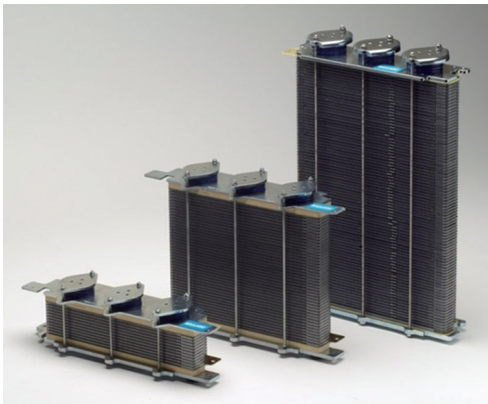


图6 巴拉德质子交换膜燃料电池



图7 质子交换膜燃料电池潜艇(图片来源:百度图库)

4.2 固体氧化物燃料电池(SOFC)

固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种在中高温下直接将储存在燃料和氧化剂中的化学能转化成电能的全固态化学发电装置,属于第3代燃料电池,被认为未来会与PEMFC一样得到广泛普及应用。

与其他燃料电池相比,SOFC的研究起步较晚。1899年,Nernst发现 ZrO_2 在 $600\sim 1000^\circ C$ 下可以传导离子,由此拉开了SOFC燃料电池研发的序幕。1937年,Baur和Preis制造出第1个小型氧化锆燃料电池。1962年,美国西屋电气公司的Ruka和Weissbart发文介绍了氢氧SOFC的特性,指出了烃类燃料在SOFC内完成燃烧的催化转化和电化学反应的2个必要的基本反应过程;1970年,氧化锆作为氧浓度传感器应用在汽车尾气检测中,也间接推动了SOFC的发展^[1]。

20世纪70年代的石油危机为SOFC的发展提供了机遇,美国能源部也和西屋公司合作,开始大力发展管式SOFC发电装置。1986年,美国田纳西州试运行了400 W管式SOFC燃料电池组。1989年,日本东京和大阪煤气公司分别安装了3 kW级列管式SOFC发电机组,且机组连续运行了5000 h,这是SOFC从实验室走向商业化发展的重要标志。

目前,中国的SOFC研究工作目前还处于起步阶段,中国科学院上海硅酸盐研究所、中国科学技术大学、清华大学、吉林大学、中国科学院化工冶金研究所、华南理工大学等是国内主要从事SOFC研发的机构和高校^[1]。

SOFC从结构上主要分为平板式(图8)^[8]和管式(图9)^[13]2种,此外还有一些异型结构,如扁管式。

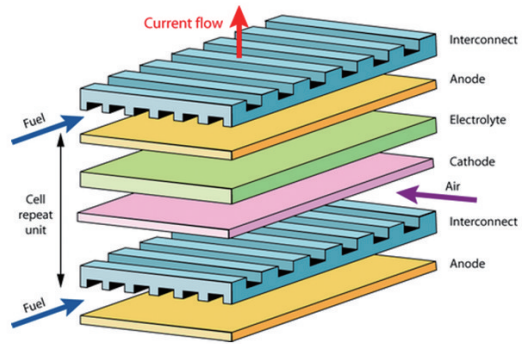


图8 平板式SOFC电池

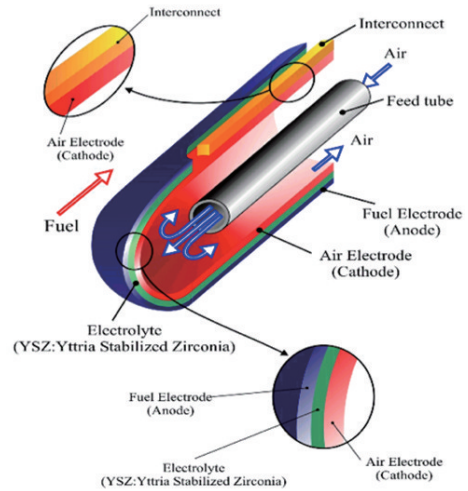


图9 管式SOFC电池

管式SOFC是最早被研究也是目前最接近商业化的发电技术。2002年5月,西门子西屋公司与加州大学合作,在加州安装了第1套SOFC与气体涡轮机联动发电系统(图10)^[16],能量转化效率高达58%。除了西屋公司外,日本三菱重工长崎造船所、九州电力公司和东陶公司、德国海德堡中央研究所等也进行了kW级管状结构SOFC发电试验。



图10 SOFC与气体涡轮机联动发电系统

平板式燃料电池在21世纪初期开始与管式燃料电池形成竞争力。加拿大的Global热电公司在中温平板型SOFC研发领域具有重要的地位。中国科学院上海硅酸盐研究所、中国科学院大连化学物理研究所、清华大学、中国科技大学等国内众多研究单位也在进行平板型SOFC的研发。

2016年8月4日报道称,日产公司推出e-Bio Fuel-Cell固体氧化物生物燃料电池概念车(图11)^[17],这是世界首款固体氧化物燃料电池车,利用纯生物乙醇发电,污染较小。



图11 e-Bio Fuel-Cell生物燃料电池概念车

4.3 熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)

熔融碳酸盐燃料电池(molten carbonate fuel cell, MCFC)是采用碱金属(Li、Na、K)的碳酸盐作为电解质的燃料电池。MCFC燃料电池与其他燃料电池的区别在于:为避免电解质碳流失,反应中需用到 CO_2 , CO_2 在阴极消耗,在阳极再生成,循环使用。实际的MCFC燃料可由石油、煤、天然气等转化产生的富氢燃料气代替,这是MCFC的优势。

美国的MCFC主要由Fuel Cell Energy(FCE)开发,目前已实现小范围的商业化应用。20世纪60年代,FCE公司就为美国陆军制造了MCFC燃料电模块用于军事领域^[18],而今,在美国的部分州,FCE公司的MCFC燃料电池机组(图12)^[19]也逐渐开始启用。

日本的MCFC燃料电池技术研发始于1981年的“月光计划”,1991年后转为重点,主要研发者是东京电力公司、关西电力公司等。德国的MCFC燃料电池主要由Daimler Chrysler公司的子公司MTU承担。韩国主要由韩国电力公司研究院和韩国科学技术研究院进行外部改质型MCFC的研发。

2001年,中国成功进行了熔融碳酸盐燃料电池组的发电试验。2014年12月,华能清能院煤气化及多联产技术部制氢与燃料电池实验室2 kW 熔融碳酸盐燃料电(MCFC)发电系统运行成功(图13),峰值输出功率达到3.16 kW,是目前国内输出功率最大的MCFC燃料电池发电系统。

4.4 碱性燃料电池(AFC)

1902年,碱性燃料电池(alkaline fuel cell, AFC)的概念最早出现在美国专利上。20世纪40—50年代, Bacon证实了AFC的有效功率。1969年AFC性能击败了PEMFC,成功应用于Apollo任务中搭载人类至月球。AFC作为宇宙探测飞行

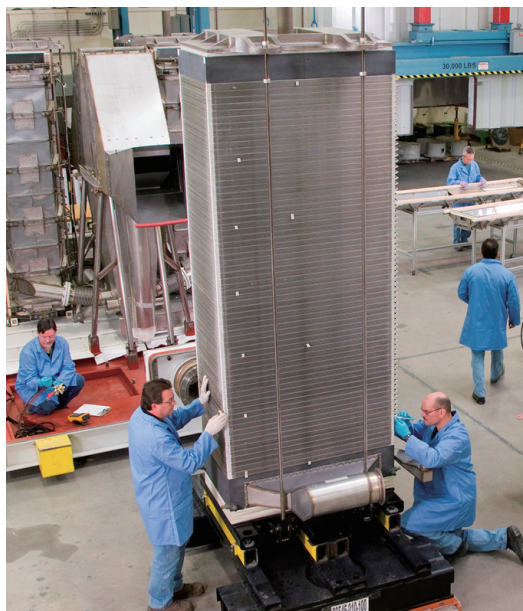


图12 位于美国丹伯里的MCFC燃料电池机组
(图片来源:FuelCell Energy)



图13 MCFC发电系统(图片来源:中国华能集团公司)

等特殊用途的动力电源已经达到了成熟的实用化阶段。

AFC采用有限电解质溶液的措施来维持稳定的三相界面。通常,电解质为30%~45%的KOH溶液,电解质工作过程中定向传输的离子为 OH^- ,因此产物水在阳极一侧生成。由于电解质为碱性溶液,在实际应用中,AFC如果采用空气作为氧化剂,寿命就会受到空气中二氧化碳的影响而大大降低。正因为这个缺点,AFC通常必须以纯氧作为氧化剂,这提高了AFC商业应用的成本。因此,除应用于一些特殊领域外,目前AFC的商业应用率不高^[20]。

4.5 磷酸燃料电池(PAFC)

磷酸燃料电池(PAFC)是以浓磷酸为电解质,可以在150~220℃工作,是在民用领域发展的较为成熟的一类燃料电池。

PAFC最早在20世纪60年代由美国开始研究,最具代表性的研究单位是美国的联合技术公司(UTC)。1977年UTC与美国其他9家电力公司联合开发出了兆瓦级PAFC。1983年后由UTC派生的国际燃料电池公司(IFC)开始了200 kW级PAFC成套设备的开发,目前在美国已建造了MW级的

PAFC 电站。2006年,德国大众宣布利用磷酸开发出了可在 120°C 高温下工作的燃料电池。该公司预测 2020 年便可向市场投放可供日常生活使用的燃料电池车。中国对 PAFC 的研究暂处于空白状态。

发电厂、现场发电、车辆、小容量可移动电源及其他(军事领域等)是 PAFC 燃料电池目前主要应用领域。

比起一般发电厂,PAFC 电厂在发电负荷较低时也能保持高的发电效率。另外,PAFC 现场安装,简单、省时、电厂扩容容易(图 14)^[21-22]。



图 14 日本 PAFC 燃料电池发电装置

现场(集中)发电(cogeneration)是 PAFC 的最佳应用方案之一,是把 PAFC 直接安装在用户附近,来提供能源。这种方式利用电和热效率高,传输损失小,图 15 为日本现场发电装置^[23]。



图 15 日本现场发电装置

PAFC 应用于车辆动力电源需要配备蓄电池来满足车辆启动和爬坡时的用电需求。1994 年美国能源公司展示了第一台以甲醇为燃料 PAFC 做动力的公交车(图 16)^[24]。

PAFC 还可用于军事领域,其优势在于运行时噪音低和热辐射量极少,有利于隐蔽目标。

4.6 特殊燃料电池的应用

除了上述 5 种常规的燃料电池外,还有些特殊类型的燃料电池目前应用也非常广泛。如:直接甲醇燃料电池(direct



图 16 第 1 台以甲醇为燃料 PAFC 做动力的公交车

methanol fuel cell, DMFC)、直接碳燃料电池(direct carbon fuel cell, DCFC)等。

直接甲醇燃料电池(DMFC)其实是 PEMFC 的一个亚类,只是燃料采用了甲醇。如果燃料为乙醇,则为直接乙醇燃料电池,但甲醇相对更容易被氧化,因而 DMFC 较为常见。DMFC 的性能与以氢为燃料的 PEMFC 还有较大差距,但氢燃料 PEMFC 造价高,这为 DMFC 提供了可能。DMFC 作为小功率、便携式的电源有较多的优点(图 17^[25]、图 18^[26]),但 DMFC 在近期内要用来代替 PEMFC 作为电动车的动力源似乎不太可能。



图 17 DMFC 燃料电池应用



图 18 DMFC 燃料电池汽车

直接碳燃料电池(DCFC)是将碳通过电化学氧化过程直接转换为电能的装置,过程中不需要碳气化、重整,效率可达80%,是一种高效、清洁的燃料电池。DCFC的研究历史其实非常悠久。19世纪中叶第1个DCFC被研制出,但直到20世纪70年代,才开启了碳燃料电池的研究热潮。不过,尽管研究历史悠久,但是DCFC的进展缓慢,目前还处于实验室阶段,离商业化应用始终有一段距离。

5 结束语

尽管燃料电池在技术上取得了很大突破,也慢慢走向应用,但目前的燃料电池仍存在成本高和寿命短的问题,要想在短时间内实现商业化应用还面临着诸多挑战。因此,在未来一段时间内,燃料电池技术的突破口仍旧是寻求便宜、高校的新能源电池。

参考文献(References)

- [1] 马文会. 固体氧化物燃料电池复合掺杂阴极材料的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2001.
- [2] Primary energy savings with a fuel cell unit [EB/OL]. [2017-03-04]. https://panasonic.co.jp/ap/FC/en_benefit_02.html.
- [3] History [EB/OL]. [2017-03-07]. <http://www.fuelcelltoday.com/history>.
- [4] 刘博. 直接液体(乙醇、甲酸)燃料电池电催化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [5] 张胜涛, 温彦. 燃料电池发展及其应用[J]. 世界科技研究与发展, 2003, 25(3): 57-66.
- [6] Solid oxide fuel cell: Modeling and simulation[EB/OL]. [2017-02-18]. https://www.iam.kit.edu/wet/english/3014_3406.php.
- [7] 毛宗强. 燃料电池(可再生能源丛书)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [8] Fuel cells [EB/OL]. [2017-04-01]. <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/printall.php>.
- [9] Fuel cell applications by power range[EB/OL]. [2017-03-36]. <http://www.nowogen.com/4030-EN.html>.
- [10] Fuel cells: Types and chemistry[EB/OL]. [2017-02-12]. <http://nptel.ac.in/courses/103102015/3>.
- [11] 俞红梅, 衣宝廉. 车用燃料电池现状与电催化[J]. 中国科学(化学), 2012, 42(4):480-494.
- [12] European fuel cell buses[EB/OL]. [2017-03-08]. <https://fuelcellworks.com/archives/2013/05/14/ballard-anticipates-powering-80-of-europe-an-fuel-cell-buses-in-revenue-service-in-2014/ballard-power-systems-inc-european-fuel-cell-buses/>.
- [13] Bennett N. Ballard lands major Indonesian power contract[EB/OL]. [2017-02-22]. <https://www.biv.com/article/2012/8/ballard-lands-major-indonesian-power-contract/>.
- [14] Solid oxide fuel cell [EB/OL]. [2017-04-12]. <http://www.web.se.shibaura-it.ac.jp/kimi/study.php>.
- [15] 刘志祥, 钱伟, 郭建伟, 等. 质子交换膜燃料电池材料[J]. 化学进展, 2011, 23(2/3): 487-500.
- [16] Solid oxide fuel cell history[EB/OL]. [2017-03-12]. <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/so/sox3.htm>.
- [17] Sheehan S. Nissan e-bio fuel-cell revealed as world's first solid-oxide fuel cell vehicle [EB/OL]. [2017-03-28]. <http://www.autocar.co.uk/car-news/green-cars/nissan-e-bio-fuel-cell-revealed-world%E2%80%99s-first-solid-oxide-fuel-cell-vehicle>.
- [18] Molten carbonate fuel cell history[EB/OL]. [2017-02-13]. <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/mc/mcfc1.htm>.
- [19] Wandel M. The basics[EB/OL]. [2017-04-04]. <http://www.respectmyplanet.org/publications/international/fuel-cells-101-learning-the-basics>.
- [20] 倪萌, 梁国熙. 碱性燃料电池研究进展[J]. 电池, 2004, 34(5): 364-365.
- [21] Distributed generation technologies[EB/OL]. [2017-03-23]. <http://www.wisconsinr.org/technologies.html>.
- [22] Cameron D S. Catalysts for fuel cell applications[J]. Platinum Metals Review, 1985, 29(3): 107-112.
- [23] Fuji electric exhibit FP-100 fuel cell pack[EB/OL]. [2017-02-19]. http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/image_library/3,1,1,46,11679.html.
- [24] Hang L. Liquid-fueled phosphoric acid fuel cell transit bus[EB/OL]. [2017-01-18]. <http://mae.engr.ucdavis.edu/~hypaul/facilities.htm>.
- [25] Toshiba integrates prototypes of world's smallest direct methanol fuel cell unit into mobile audio players [EB/OL]. [2017-01-11]. https://www.toshiba.co.jp/about/press/2005_09/pr1601.htm.
- [26] Direct methanol fuel cell hybrid vehicle, introducing SILENT-F: A step towards an electric vehicle for everyday use[EB/OL]. [2017-01-15]. <https://fuelcellworks.com/archives/2014/05/28/direct-methanol-fuel-cell-hybrid-vehicle-introducing-silent-f-a-step-towards-an-electric-vehicle-for-everyday-use/>.
- [27] Cao D X, Sun Y, Wang G L. Direct carbon fuel cell: fundamentals and recent developments[J]. Journal of Power Sources, 2007, 167(2): 250-257.

(责任编辑 刘志远)