

氢能与燃料电池的研发及商业化进展

潘相敏^{1,2}, 林瑞^{1,2}, 李昕³, 马建新^{1,2}

1. 同济大学汽车学院, 上海 201804
2. 同济大学新能源汽车工程中心, 上海 201804
3. 中华人民共和国科学技术部国际合作司, 北京 100862

摘要 氢能被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源, 近年来以燃料电池技术为代表的氢能开发和利用已在全球各国取得巨大进展, 并开始部分实现商业化。本文在广泛调研的基础上, 综述了近两年来全球范围内氢能和燃料电池研发、示范和商业化发展的现状与趋势, 并提出关于中国氢能与燃料电池技术研究发展的建议。

关键词 氢; 燃料电池; 氢能

中图分类号 TK91

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.27.011

Research Development and Commercialization Advances of Hydrogen Energy and Fuel Cell

PAN Xiangmin^{1,2}, LIN Rui^{1,2}, LI Xin³, MA Jianxin^{1,2}

1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China
2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China
3. Department of International Cooperation, the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Beijing 100862, China

Abstract Hydrogen energy is considered as the most promising clean energy resource for 21st century. In recent years, hydrogen energy and fuel cell technologies have made great progresses around the world, and start commercial deployments. Based on extensive investigation, the global Research, Development, and Demonstration (RD&D) and commercialization involving hydrogen energy and fuel cell in past two years are reviewed, and suggestions for hydrogen energy and fuel cell technologies Research, Development (R&D) in China are put forward.

Keywords hydrogen; fuel cell; hydrogen energy

0 引言

氢能被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源, 在 21 世纪的第 1 个 10 年结束之际, 以燃料电池技术为代表的氢能的开发和利用已在全球各国取得巨大进展, 并开始部分实现商业化。2010 年 5 月 14—15 日, 第 13 次国际氢经济和燃料电池伙伴计划会议(IPHE)在德国埃森召开; 随后, 5 月 16—21 日, 第 18 届世界氢能会议(WHEC)也在埃森举行。从会议透出的信息显示, 即便在全球遭遇金融危机的情况下, 各国持续开展氢能与燃料电池技术研究、开发和商业化部署的脚步也没有放缓。

中国科学技术部以及同济大学、清华大学等单位派代表

出席了这两个会议。本文是在收集整理这两次会议信息, 并扩展调研近两年多以来全球范围内氢能和燃料电池研发、示范和商业化现状基础上的综述。希望能为中国制定氢能与燃料电池技术发展战略提供参考。

1 商业应用与示范进展现状

1.1 燃料电池商业应用

由于各国政府对于燃料电池应用的鼓励措施力度不断加大、燃料电池使用记录越来越多和燃料电池成本的不断降低, 在全球范围内, 用于发电和电网支持应用的兆瓦级燃料电池系统的需求不断增加, 零售业和制造业公司开始看到燃

收稿日期: 2010-12-06; 修回日期: 2011-08-29

基金项目: 国家国际科技合作计划项目(2010DFA64080)

作者简介: 潘相敏, 副研究员, 研究方向为氢能技术, 电子信箱: panxiangmin@tongji.edu.cn

料电池热电联产系统、叉车、备用电源和远程发电应用的价值,各国,尤其是在亚洲和北美地区的商业应用成功案例正在不断增多。据估计,2009年燃料电池单元的全球出货量约24000个,与2008年相比增长了41%^[1]。

日本家用燃料电池系统的发展处于世界领先地位,正在成千上万的日本家庭示范推广。到2008年底,日本家庭拥有超过3000台燃料电池(PEM)热电联供(CHP)装置,可以使家庭的主要能源用量减少24%,二氧化碳的排放量减少39%^[2]。2009年,日本加速了家用燃料电池Ene-Farm社区燃料电池计划的发展,对于Ene-Farm系列燃料电池产品具有划时代的意义。从2009年5月开始,松下东京燃气公司的Ene-Farm机组以大约330万日元的价格出售^[3];7月,由日本石油公司与日本三洋电气公司联合组建的合资公司Eneos Celltech公司、东京燃气公司和东芝公司都表示,由其生产的社区Ene-Farm装置开始面向市场发售。在2009财年中,日本销售了5000—6000台家用燃料电池,经过1年多的运营,日本的家用燃料电池认可率已经达到71%^[4]。

2009年,韩国浦项制铁公司(POSCO)订购了68MW的熔融碳酸盐燃料电池(MCFC),并开始在韩国境内大规模的生产MCFC发电系统的辅助设备组件,POSCO制定的新的燃料电池行业清洁发展机制(CDM)已经获得了联合国的批准,用以指导MCFC的生产制造^[5]。另外,三星公司在汉城外的发电厂安装了4.8MW的燃料电池发电机组^[6]。

在美国,固定式燃料电池为燃料电池提供了一个重要的早期市场。2008年,美国安装了大约50套新的大型固定式燃料电池装置为用户提供分布式电源,世界上最大的固定式燃料电池装置——4.8MW的站内发电量,就位于美国新的世界贸易中心大楼内^[7];2009年,康涅狄格州公共事业委员会已批准要建立9座熔融碳酸盐燃料电池发电厂,发电量共计27.3MW;俄亥俄州为实现本地二氧化碳的零排放,从加拿大巴拉德公司购买1MW聚合物电解质膜燃料电池发电装置;美国能源部与联邦航空管理局、美国国防部正在实施安装43套燃料电池应急备用电源系统的项目^[8]。

美国是燃料电池叉车的主要早期使用者,建立了明确的商业案例。继2008年成功示范之后,美国国防后勤局在宾夕法尼亚州供应站安置了40辆燃料电池叉车和室内加氢设施,并着手为另2个供应站购买40辆燃料电池叉车。燃料电池叉车的销售迅速扩展到商业设施,如5个新的能源部项目计划在联邦快递、Genco和Sysco等公司部署300多辆燃料电池叉车。其他燃料电池叉车的客户包括Central Grocers、Nestle Water、Wal-Mart、Whole Foods、Bridgestone和Coca Cola^[9]等。

1.2 燃料电池汽车示范

燃料电池汽车(FCV)得到了世界各国政府和企业的的高度重视,特别是美国、日本和德国及其企业都加大了燃料电池汽车的研发与示范,并且取得了重大进展,预计在未来的5—10年内FCV将正式进入市场。

2008年以来,最新一代的本田和通用氢燃料电池汽车示范工程冲击着商业化之路。通用在纽约、加利福尼亚州和华盛顿特区投放了由100辆雪佛兰Equinox氢燃料电池汽车组成

的车队,到2009年底,车队已实现了行驶100万英里(约 1.61×10^6 km)。通用宣布,其下一代燃料电池系统与现在的Equinox燃料电池相比,体积减少一半,重量减轻到220磅(约99.8kg),并节省一半贵金属用量。本田在日本和加利福尼亚州推出了它的Clarity氢燃料电池汽车,2008年6辆Clarity燃料电池汽车在加利福尼亚州投入使用,2011年夏天总数约200辆。

加利福尼亚州是世界燃料电池示范的先驱。自2001年以来,汽车、能源公司和地方、州与联邦政府联盟已经在加州投放了298辆燃料电池汽车进行示范,行驶里程接近250万英里(约 4.02×10^6 km)^[10]。2009年5月26日,由世界七大汽车制造商(戴姆勒、通用、本田、现代、尼桑、丰田、大众)制造的12辆各种氢燃料电池轿车和燃料电池SUV从美国加利福尼亚州的圣地亚哥出发,进行了为期9天的氢公路旅行,行程约2700km,沿途停靠28个城市,终点为加拿大哥伦比亚省的温哥华市,一路上车队受到人们的热烈欢迎,氢燃料电池车的优异性能给许多人留下了深刻的印象。

在加拿大,世界最大的氢燃料电池汽车车队在2010年不列颠哥伦比亚省惠斯勒冬奥会上成功交付,车队共包括20辆第六代燃料电池公交车,其中包括雪佛兰Equinox燃料电池车,它们与柴油动力车相比,可减少62%的温室气体排放量,成为2010年温哥华冬奥会官方用车,为冬奥会提供了强有力的环保交通保障。另外还有5辆福特福克斯燃料电池车正在温哥华低陆平原进行为期3年的测试。

在日本,日本政府开始租赁氢燃料电池汽车。2008年9月,丰田公司宣布,它已开始以每月7700美元的价格租赁最新的氢燃料电池汽车给日本政府,租赁期超过30个月;丰田的Highlander燃料电池混合动力汽车取得了单个满容量的压缩氢气罐可行驶431英里(约694km)的续驶里程,和等效于4.55L汽油行驶68.3英里(约110km)的平均燃油经济性。

在德国,奔驰公司发布了最新的燃料电池车200系列产品和Citaro柴油-电力混合动力车和质子动力的三重混合动力客车(由燃料电池、电池和超电容器供电);奔驰所有乘用车和商用车的氢燃料车型,已经经过了450万km的道路测试。从2010年起,汉堡陆续接收了20辆配有燃料电池驱动系统的梅塞德斯-奔驰B级燃料电池车。

在英国,英国交通技术开发公司引入Riversimple小型和市内燃料电池车,计划在2013年开始市场化;英国皇家邮政公司收到3台氢燃料汽车,是除北美地区以外唯一拥有氢能动力邮政车辆的地方。

中国在2008年北京奥运会上成功组织和进行了23辆燃料电池汽车的示范,2010年上海世博会则投入近200辆燃料电池车辆作为观光和服务用车,其示范规模和周期在全球范围内名列前茅。

1.3 基础配套设施

随着燃料电池汽车的快速发展,对大规模氢基础配套设施的需求也越来越迫切。2009年,戴姆勒、福特、通用/欧宝、本田、现代/起亚、雷诺/日产和丰田7家车企联合签署了一封致能源公司和政府机构的公开信,指出2015年起将有“significant number”(显著数量)的燃料电池汽车推向市场,因此

迫切需要建设氢基础设施,尤其是在欧洲(德国)、美国、日本和韩国等重点市场。据统计,世界目前有超过 370 座加氢站在运营和规划中^[4],主要集中在日本、欧洲和美国等国家或地区。

日本现建有 15 个加氢站,分布在 11 个城市中,其中千住、朝日、大黑、霞关 4 座加氢站配备了 70MPa 级设备,这些站及其制氢设备是由日本 JHFC 项目实施建设的,现在运营安全。日本 8 家能源公司(新日本石油、昭和壳牌石油、出光兴产等 5 家大型石油企业以及东京燃气、大阪燃气和东邦燃气 3 家大型都市燃气公司)自 2009 年以来联合进行加氢站及设备的开发与示范,力争到 2015 年使氢气供给进入商业化阶段。

韩国正努力发展氢能高速公路网络,包括有 6 座正在运营的和 4 座计划中的加氢站。其中 2 座采用现场电解水制氢技术,5 座采用管道或公路运输补给,其余 3 座将采天然气或石脑油重整制氢技术。

美国正在运营的加氢站达到 69 座,规划中的加氢站 38 座。运营的 69 座加氢站中,有 9 座是在 2009 年开放的,包括纽约的 3 座,加利福尼亚州的 2 座,以及科罗拉多州、南卡罗来纳州、西弗吉尼亚州和密歇根州各 1 座。加利福尼亚州经营的加氢站总数达到了 27 座。加州燃料电池联盟计划到 2017 年要在加州部署 46 座加氢站,为预计在该日期之前能驶上道路的 50000 辆燃料电池汽车服务。美国加州燃料电池合作组织——CaFCP,于 2010 年 5 月 4 日在美国国家氢能会议期间公布了其“氢燃料电池车与加氢站下一步实施计划”,对 2009 年制定的 2010 至 2011 年的工作计划作了修改完善,旨在 2011 年加利福尼亚的加氢站网络所能服务的氢燃料电池车从目前的数百辆扩大到数千辆,并为 2015 年燃料电池汽车市场化作准备。计划中要在加州新建 7 座加氢站,并对原有 4 座加氢站进行扩建改造,计划于 2011 年底完成。

加拿大现建有 7 座加氢站,分别位于温哥华、萨里、北温哥华、高贵林港、维多利亚、温哥华机场和惠斯勒,是加拿大氢能长期发展计划的一部分。

整个欧洲目前拥有 22 座加氢站。德国、冰岛、挪威、丹麦在氢基础设施建设方面取得了不错的成绩。北欧国家一直站在氢能利用的前列,而且也引导着燃料电池技术的发展,正稳步地朝向氢经济迈进^[6]。

德国在氢能与燃料电池产业化方面一直扮演着领导者的角色。在 2007 年,德国出台了国家创新项目(NIP),明确支持氢能与燃料电池技术的发展,旨在加速其产业化程。该项目预算资金为 1400 万欧元(2007—2016),其中 50%以上是用于支持氢交通基础建设。预计在 2014 年建成由汉堡至柏林之间的 8 座加氢站。德国政府希望在 2030 年能够全面建设加氢站服务网络。另一个规模较大的项目是北莱茵河至威斯特伐利亚氢公路项目(NRW),一个由 6 座加氢站组成的集群,可以很容易地延伸到汉堡。2009 年 9 月 10 日,德国与欧洲几个主要工业巨头在柏林签署 H₂ Mobility 项目合作备忘录,就从 2011 年底在德国全面开展氢基础设施网络建设达成一致意见。此举对氢燃料电池车的商业化具有里程碑的意

义。项目的成功实施将确保德国乃至欧洲在世界清洁能源领域的领导地位。

冰岛首都 Reykjavík 目前有 2 座加氢站,较大的 1 座加氢站采用现场电解水制氢。冰岛由于其独特的地理资源优势,该国的电力均来自可再生能源,因此,所生产的氢属于可再生氢。另 1 座是位于港口的加氢站,规模较小,主要为观鲸船加氢,氢气从大加氢站运来,经过一年的使用证明,该加氢站达到了安全与效率方面的设计要求。

挪威挪威石油公司在全长 580km 的氢公路上建设的 4 座加氢站相继投入使用。该批加氢站均采用现场制氢,产氢量 20—120kg/d。

丹麦计划 2011 年建设 5 座加氢站,与瑞典连成一体,有助于沟通挪威 HYDRO 氢公路到德国 HRW 和汉堡的氢公路项目,目前相关的验证工作已经展开。丹麦在风能发电技术方面一直处于世界领先水平,其 HydrogenLink 项目中的加氢站不仅可以给氢燃料电池车、燃料电池叉车提供燃料,同时又可用来储存风能所产生的电力,可谓“一站多用”。此外,挪威的 HyNor、瑞典的 Hyfuture 和丹麦的 HydrogenLink 项目联合成立斯堪的纳维亚氢公路合作伙伴,旨在让斯堪的纳维亚在 2012 年成为欧洲第一个实现氢能应用商业化的地区,并继而向整个欧洲扩展。

与丹麦、德国、挪威不同,英国政府缺少一个长期的氢能路线图来引导低碳交通运输。2010 年,英国伯明翰大学的 1 座加氢站投入使用,用来给校园里的几辆氢燃料电池通勤车加注燃料。配备的是 Air Products100 系列加氢设备,每天可给 6 辆该型小轿车加注燃料。在英国氢能协会(UKHA)的帮助下,英国政府已着手进行氢基础设施建设,为 2012 年伦敦奥运会作准备。最近,英国 Riversimple 公司推出氢燃料电池城市概念车,引起轰动,预计 2013 年进行批量生产。这将促进英国加氢站等基础设施的建设进程。

中国目前在北京和上海共有 4 座加氢站在示范运行,分别是北京加氢站、绿能加氢站、上海浦东济阳路加氢站与安亭加氢站。上海世博会期间,还有 2 座移动加氢站投入运行,与济阳路加氢站和安亭加氢站共同组成了国内首个氢基础设施网络,为世博示范运行的 196 辆燃料电池汽车提供氢气加注服务。

2 政府政策支持状况

伴随着燃料电池的商业化,世界各国及各联盟都纷纷出台政策或宣布计划以支持氢能和燃料电池的发展。其中最惹人注目的是日本、韩国和美国。日本宣称要在 2025 年建成 1000 座规模的加氢站网络,实现燃料电池汽车商业化;韩国在燃料电池装置补贴上做出大手笔,提供装置价格的 80%的资金补贴;美国国会否决了奥巴马政府欲将 2010 年用于氢与燃料电池研发项目的资金削减一半以上的提议。另外,其他国家和联盟也出台了一些重要的政策或计划支持其各自氢能与燃料电池的研发与商业化进程。

2009 年初,日本政府宣布了 FY2009 税制改革法案中关于对环境友好型车辆提供税收减免的政策。根据这项法

案,汽车吨位税将对混合动力车和电动车无效,代表着另一个燃料电池车项目发展刺激方案的采用。2009年4月,日本发布了一个经济刺激方案,总投资15万亿日元,为可再生能源发电项目提供资金,包括电动车、燃料电池以及二氧化碳的捕集和存储(CCS)技术的开发。同时为购买包括混合动力车在内的环保汽车的业主提供10—25万日元的补贴,为购买 Ene-Farm CHP 的企业或个人提供了大约50%的费用减免^[7]。这套方案的目的是通过为消费者提供补贴来增加燃料电池的销量,并最终实现燃料电池制造行业的规模经济效益,到2015年系统项目的成本将跌至8000美元,到2018年时将降至4000美元。此外,2010年初日本经济贸易产业省宣布了将通过对质子交换膜技术的补贴继续支持燃料电池在汽车和家庭方面的发展,特别是在基础催化剂研究方面。

日本的燃料电池汽车发展市场化目标是到2015年,要使2000辆燃料电池汽车在路上并建设15个加氢站;到2025年达到200万辆燃料电池汽车和1000个加氢站^[4]。如图1所示^[8]。

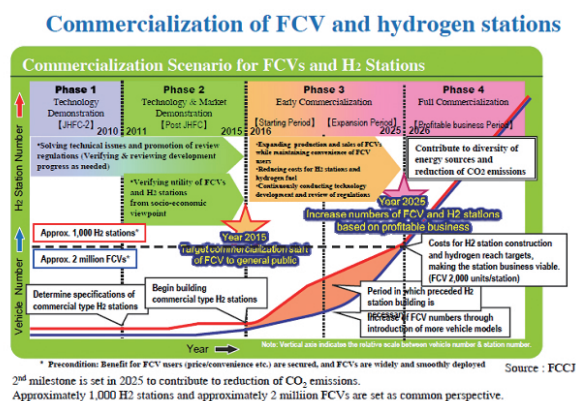


图1 日本燃料电池汽车及加氢站的商业化计划

Fig. 1 Commercialization scenario for FCVs and H₂ stations in Japan

韩国政府公布了一项补贴政策,从2010年开始,为购买本国生产的燃料电池装置的单位或个人提供该装置价格80%的资金补贴;2013—2016年,补助将下降到产品价格的50%;2017—2020年,补助将下降到产品价格的30%^[5]。这一政策到目前为止是世界上补贴金额最高的政策,政策会刺激燃料电池产品的销售,并且在某种程度上降低燃料电池系统的生产成本。韩国还公布了一项斥资380亿美元的“绿色新政”项目,其中许多计划都与燃料电池和氢能项目相关。韩国政府的首要目的在于为3个能源领域赋予优先权,即太阳能、风能和燃料电池,目的在于,到2012年在绿色产业部门增加600万人的就业机会并且获得全球绿色技术市场7%的份额,到2030年要上升至13%^[7]。韩国市场的多数活动主要集中在大型的固定应用与直接甲醇燃料电池(DMFCs)的便携应用。2009年5月,韩国首都首尔开始推广氢燃料电池的使用,计划到2020年使氢燃料电池的使用量占首尔市全部替代能源使用量的30%。韩国政府的目标是成为全球燃料电池制造商的领袖之一。韩国天然气公司预测韩国燃料电池行

业在2012年将雇佣8000名员工,2030年将雇佣71000名员工。这与韩国2012年燃料电池产业实现本土化,2012年以后建立海外市场并在2020年实现全球市场20%的目标相一致。韩国预测2011将会制造1000个燃料电池热电联产单元,2012—2014年,每年将生产1000辆燃料电池汽车^[4]。美国对氢能技术的重视由来已久,虽然目前仍处于示范阶段,但其氢能的技术条件已经成熟。有专家预测,美国燃料电池汽车、氢能生产和加氢基础设施的商业化可望在2015年之前实现。按照美国氢能技术路线图,到2040年美国将走进“氢能经济”时代。

美国在2008年底通过的“能源法案”将燃料电池系统的投资税收抵免延长至2016年。该法案还将燃料电池的年度纳税信用上限从每0.5kW每年500美元上调至1500美元,并提供2年以补助金代替信贷的机会。

2009年4月,“美国复苏与再投资法案”(ARRA)为燃料电池行业制定了相关的税收激励措施,有效期至2010年,这可能对短期的发展决策产生影响。这些措施包括:加氢站设施的税务减免增加到了设施花费的30%,高达20万美元(之前的上限为3万美元);居民联合使用的社区燃料电池装置的税务减免增加到3334美元/kW(之前为1000美元/kW);商业燃料电池装置的税务减免现在没有足够的税务责任,适用于最低容量5kW的燃料电池;为投资包括燃料电池技术开发在内的清洁能源技术开发项目的公司提供30%的税务减免。此外,美国交通部TIGER计划提供了1340万美元的刺激经费用于燃料电池项目,为加利福尼亚州氢燃料电池公共汽车项目提供运营资金并出资购买固定燃料电池装置。

2009年5月,美国奥巴马政府曾欲把2010年用于能源部能源效率和可再生能源办公室(EERE)氢与燃料电池研发项目的资金(1.69亿美元)削减一半以上,只提供6800万美元。为此,美国氢能协会、燃料电池协会(USFCC)、加利福尼亚州、南卡罗来纳州等州的代表团及相关团体密切合作,最终取得了美国国会的支持,EERE的氢能与燃料电池项目获得1.74亿美元的政府支持资金,比能源部所要求的建议拨款要高两倍多^[9]。此事件反映了在欧洲、日本等国的竞争下,美国政府、行业及民众充分认识到了氢能与燃料电池技术对美国保持在清洁能源领域领先地位的重要作用。美国能源部2011财年氢能与燃料电池技术预算总额为2.56亿美元,其分配如图2所示^[9]。

加拿大联邦政府在2003—2008年,已投入大约2.15亿美元的资金用于氢能和燃料电池技术的研发、示范和推广^[7]。加拿大政府追寻氢高速公路理念的建立,于2010年在温哥华到维多利亚的区域范围内建立7个加氢站和实施氢能村庄项目,项目中包含燃料电池叉车、固体氧化物燃料电池热电机组、熔融碳酸盐燃料电池混合动力装置。

欧盟2008年夏天决定斥资10亿欧元用于燃料电池和氢能的研究和发展。欧盟此举旨在把燃料电池和氢能技术发展成为能源领域的一项战略高新技术,使欧盟在燃料电池和氢能技术方面处于世界领先地位,欧盟将力争在2020年前建

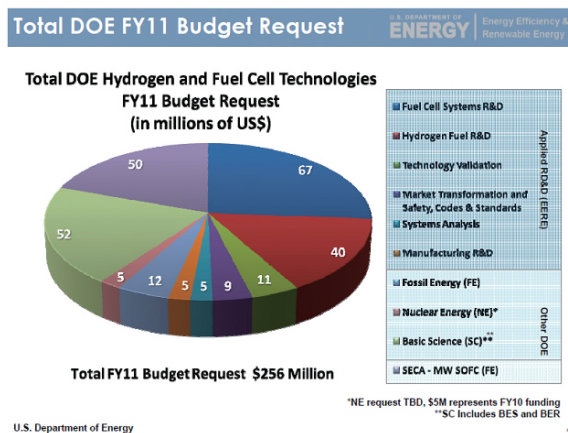


图 2 美国能源部 2011 年度氢与燃料电池项目预算

Fig. 2 US DOE FY11 budget on hydrogen and fuel cell teconologies

立一个燃料电池和氢能的庞大市场。欧盟正在实施的第 7 框架计划(2007—2012)的一些项目将突破燃料电池和氢能发展的一些关键性技术难点,包括氢气车队项目、ZERO-REGIO 项目和小型车辆氢气链项目的公开实验,其目的是对于已经完成或新开始的与燃料电池汽车相关的公开实验项目进行评价。

此外,欧盟 2009 年 6 月 8 日和 6 月 25 日分别有两项立法生效,要求汽车制造商在 2012 年将其在欧盟注册生产新车的二氧化碳排放量削减到 130g/km 的平均水平,并且修改了欧盟公路运输燃料指令,要求到 2020 年时燃料供应商的供应燃料要减少其温室气体排放生命周期的 10%。这意味着汽车制造商为满足立法要求,可能会转向生产燃料电池车,而燃料供应商则可能会转向投资氢基础设施。欧盟燃料电池与氢能技术联合行动计划为上述项目的研究与开发提供 1400 万欧元的资金。近期的一项提议包括为 5 项研究或开发项目提供资金:运输和燃料补充基础设施(2640 万欧元)、氢的生产和配送(570 万欧元)、固定电站和热电联产(2590 万欧元)、早期市场(1030 万欧元)及跨领域问题(300 万欧元)^[7]。

中国政府把氢能与燃料电池技术列为中长期科学和技术发展规划战略的重点之一,近年来持续加大对研发和示范的投入。近期最引人注目的一项政策是 2009 年初宣布的对包括燃料电池汽车在内的新能源汽车实施财政补贴的政策,随后中国在包括北京、上海在内的 13 个城市开始大规模的新能源汽车示范运行,2010 年试点城市进一步扩大至 20 个。

3 研究进展与技术发展趋势

在第 18 届世界氢能大会上,各国政治家、企业家、科学家以及教育专家均积极地展示他们的研究成果并陈述各自的观点,从中可以大体看出世界对氢能和燃料电池的基础和应用研究以及工业化的共识和方向。这次大会主要从燃料电池的基础研究及应用、氢能的生产、运输和存储技术几个方面进行了探讨。

3.1 燃料电池基础研究

铂(Pt)是目前公认的性能优异的质子交换膜燃料电池的

催化剂,但其价格高昂,并且 Pt 的储量不足以支撑汽车工业规模化生产的需求。近年对催化剂制备技术的研究以及燃料电池膜电极(MEA)制备技术的发展,已使得燃料电池的 Pt 用量大幅度的下降,并有望继续降低。但是若将来燃料电池汽车大规模生产,目前的技术水平尚有一定的差距。

目前的研究主要从寻找新的材料以及提高 MEA 制备技术来达到降低 Pt 含量的要求。如德国乌尔姆大学的研究人员发现,Pt 与钴等过渡金属的合金比纯 Pt 具有更强的氧化还原活性,使用这种催化剂能大大降低催化剂的成本,若能够研制出高稳定性的碳载铂基阴极催化剂对 PEMFCs 的商业化至关重要^[10]。不仅如此,降低燃料电池的 Pt 含量在工艺方面还有很大的空间,法国的斯特拉斯堡大学研究人员发现新型 Sibunit 碳载体可在保持相同催化剂活性情况下使催化剂层厚度变小,从而减少催化剂中的铂含量,降低膜电极的厚度^[11]。一些燃料电池产商通过改进催化剂涂膜技术,降低膜电极的厚度而达到降低 Pt 含量的目的。

由于 Pt 价格高昂,储量有限,寻找性能与 Pt 相当的非 Pt 催化剂亦是一热点。日本的横滨国立大学的 Akimitsu Ishihara 教授报告了具有钽添加物、钽氮氧化物、氧化锆、三氧化钛、锆氮氧化物、铬氧化物和钽氧化物的硬质合金在酸性溶液中很稳定并具有很高的 ORR 催化活性,并探讨了 Pt/C 催化剂的失效机理和电解质性能之间的关联^[12]。日本的九州大学的 Kazunari SASAKI 教授(2010 年 IPHE 技术成就奖获得者)进行了燃料电池催化剂载体材料的研究,研究发现采用半导体氧化物和碳纳米材料均能获得比较好的电池性能,半导体氧化物和碳纳米纤维可应用于高温燃料电池中的碳黑催化剂载体^[13]。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的研究人员示范了两种非 Pt 的高性能燃料电池催化剂。从上述研究可知燃料电池的关键材料以及 MEA 的制备技术是当前国际燃料电池基础研究重要的方向。

高温质子交换膜燃料电池的研究亦是本次会议重要的一个议题。燃料电池在高温工作,不仅能解决燃料中杂质气体(主要是 CO)的困扰,而且还能简化燃料电池的水热管理,减少对冷却系统的需求。德国的杜伊斯堡大学燃料电池技术中心报告了高温质子交换膜燃料电池堆的性能^[14];丹麦技术大学从材料、单电池、电堆以及系统等方面对高温质子交换膜燃料电池的性能衰减及机理方面进行了深入的研究^[15],他们的研究表明在 150℃燃料电池连续运行 5000h 已经不成问题,这些都有助于以后高温燃料电池系统的开发。但是如何提高高温燃料电池的寿命和性能至今仍未有很好的解决方案,技术难点主要是长寿命高性能的高温质子交换膜的研制。目前中国在高温质子交换膜燃料电池方面的研究相对比较薄弱,尤其在高温膜、单电池、系统方面的研究比德国、美国和日本有一定的差距。若高温质子交换膜能取得技术性的突破,将来不仅能应用于交通工具,并且在热电联供方面有非常广阔的应用前景。

此外,燃料电池的性能研究以及机理的探讨对燃料电池的应用研究亦非常的重要。从本次大会上看出,目前对在线技术的研究日益引起重视并取得了一定的进展。德国海涅大

学应用拉曼光纤技术研究了质子交换膜燃料电池的在线原位诊断过程;德国航天航空局的在线分区技术用于研究燃料电池性能及在线错误诊断都引起与会者很高的兴趣。

在燃料电池主题中除了质子交换膜燃料电池 (PEMFC), 直接醇类燃料电池 (如直接甲醇燃料电池) 也引起大家的关注和兴趣。值得一提的是碱性燃料电池的研究又重新引起大家的关注, 早在 20 世纪 60 年代, 碱性燃料电池就由于原料便宜, 可以采用非 Pt 催化剂而广泛应用于航天领域, 如果能有效地去除 CO_2 , 克服其受 CO_2 毒害的致命弱点, 则低温碱性燃料电池将有可能应用于汽车领域。

3.2 氢气制备与储运

在氢的制备技术方面, 如何利用可再生能源, 如太阳能生物制氢和废弃物制氢在会场是非常热门的话题。随着可再生能源的日益短缺和可再生能源制氢技术的迅速发展, 世界各地利用可再生能源制氢的示范应用越来越多, 不难预见, 可再生能源制氢技术将在未来被广泛应用。从本次大会看出, 利用太阳能生物制氢占的比例较大, 德国、日本、美国、加拿大、英国等研究所都在这方面展示了最新的研究成果。德国卡尔斯鲁厄理工学院研究了微藻类的光生物制氢, 研究发现某些绿藻具有利用太阳能从水中制氢的能力^[16]。英国伦敦大学帝国理工学院成功设计了一种用于绿藻的新型平板式光生物制氢反应器, 并研究了单细胞绿藻中发酵作用和产氢之间的联系^[17], 这种新型的低成本反应器能满足绿藻的成长要求和产生足够的氢气。另外, 利用生物发酵制氢也有很多的研究机构涉足。

光催化制氢方面还是偏重基础研究, 如利用 Fe_2O_3 制氢, 并通过添加 RuO_2 或者 IrO_2 催化剂来提高性能, 澳大利亚悉尼大学报道了一种应用于光催化水解制氢的以乳胶为载体, 染料敏化的核壳结构二氧化钛催化剂^[18]。德国马克斯-普朗克生物无机化学研究所研究了用半导体硅化钛作为催化剂电解水产氢。英国伦敦大学理工学院研究了太阳能电解水制氢的用氧化铈纳米颗粒修饰的氧化铁光电阳极。本次大会上提出的通过光化学催化合成直接储存太阳能用于发电和分解水制氢的概念是一个很好的创意, 而其核心技术是光电材料的合成及制备。

重整制氢一直是制氢的传统技术, 本次会议德国与瑞士报导了一种新的工艺, 设计了一种多用的燃料反应器, 利用辐射热将使燃料表面不断汽化, 能够将各种液态碳氢化合物和醇类转化为气相, 从而为重整和燃料应用中的混合物制备过程提供了便利^[19]。而德国林德集团将钌膜技术应用于重整制氢系统, 已经在进行小规模示范, 具有商业应用价值。此外, 德国 Jülich 研究中心“原型工厂核能工业用热 (Prototype Plant Nuclear Process Heat)”计划在核能煤气化大规模制氢技术方面取得两项突破性进展, 并在模拟核能条件下的中间试验厂中进行了成功示范^[20]。

氢的储存技术主要为高压、低温罐以及多功能的材料储存, 如何降低费用和提高储氢性能是研究的热点。在储氢材料领域, 新的储氢材料不断被开发出来, 这些材料都具有优良的储氢性能和安全性能, 其中包括高容量的金属硼氢化

物, 金属氢化物纳米管, 以及胺硼烷的复合物等, 可改善氢存储系统的运行性能和存储容量。储存 35MPa 和 70MPa 压缩气体的汽车氢燃料储罐系统设计得到优化, 增加了容量并减少了成本。本次大会上, 意大利帕多瓦大学报道了通过掺入 Nb_2O_5 和石墨碳来提高 MgH_2 材料的储氢容量和吸-放氢性能的研究结果^[21]。英国皇家天文学会高温联合研究所介绍了与质子交换膜燃料电池集成的可逆固态碳纳米管储氢系统^[22]。而南非西开普大学研究了低温质子膜燃料电池发电系统的金属氢化物储氢单元 AB5、AB-alloys 和 AB2 等类型的储氢材料, 研究发现它们具有杂质中毒概率低、易激活、吸附或解吸速度快和室温下反应压力弹性大等优点^[23]。

3.3 燃料电池及氢能在交通领域的应用

氢作为重要的能源载体通过燃料电池而应用于未来的交通领域已获得业内共识, 汽车制造商们对燃料电池在汽车领域的应用已不再处于观望的态度, 而认为即使目前燃料电池遇到一些困难, 也只是暂时的, 燃料电池汽车必然是 22 世纪的绿色环保汽车。一些领先的汽车制造公司以及燃料电池制造商, 如戴姆勒克莱斯勒、本田、通用汽车、加拿大巴拉德、美国联合技术动力等公司积极开发燃料电池发动机技术并取得了可喜的成绩。在第 18 届世界氢能大会上, 这些公司的领导人积极阐述自己的观点, 而在会场外, 多家汽车公司展示了最新的燃料电池汽车并进行试乘试驾, 他们的报告体现出对燃料电池基础研究、燃料电池系统集成技术、燃料电池汽车的未来走向、燃料电池汽车的环境影响技术对策、氢气加注技术、氢能基础设施等方面的极大的研究力度和对抢先占领未来汽车市场的强烈意识。

燃料电池汽车商业化最需要解决的问题是可靠性、寿命及费用, 另外, 材料和系统的发展及大批量生产的技术亦是目前燃料电池汽车需要解决的困难。在第 18 届世界氢能大会上, 戴姆勒克莱斯勒公司总裁 Dr. Dieter Zetsche 做了题为“氢能在汽车工业的应用”的报告, 对氢燃料和氢基础设施投入了极大的关注。加拿大巴拉德 (Ballard) 汽车公司的研究人员提出燃料电池的基础研究是基本, 但将来大规模的发展, 在系统集成方面则要付出更多的努力。Opel 公司的 Lars Peter Thiesen 在报告中^[24]提到 Opel 将在 Hydrogen4 的基础上研发下一代的燃料电池发动机, 对其一些指标有了明确的想法, 如其重量和体积均只有目前的 1/2; Pt 用量大幅度地降低, 到 2015 年至少降低一半, 整个燃料电池系统只需要 30g 的 Pt, 从而大幅度降低燃料电池的费用; 燃料电池的耐久性能显著提高, 达到 2015 年 210000km 的目标。在氢基础设施方面, 工业界已有 70MPa 氢气快速加注的技术解决方案, 如通过在 -40℃ 预冷却达到 3min 内完成加注的目标, 并通过红外通讯实时监测车载储氢罐内压力和温度的变化, 提高加注系统的可靠性。但德国柏林的燃料电池汽车及加氢站示范运行结果显示氢加注系统的可靠性还是低于预期。显然, 提高加氢站的可靠性、可操作性和燃料易获得性 (服务的便利性) 对燃料电池汽车市场化亦起着很重要的作用。

本次大会, 从发达国家的发展状况可以看出氢能与燃料电池技术的研发已从政府资助项目逐步过渡到众多的工业

公司资助和发展氢能和燃料电池技术,并且无论在材料还是系统方面在国际市场已占据了领先地位。以日本为例,从基础材料到系统方面,已经形成了一个完整的产业链,如TANAKA的催化剂,Asahi KASEI的膜,GORE-TEX的膜和MEA,TORAY和MITSUBISHI RAYON的气体扩散层,NOK-FREDENBERG的气体扩散层、密封材料和增湿材料等,这些材料已占据了国际市场的领先地位,而在系统方面,日本的NEDO和一些大公司,如丰田、本田、日产、三菱都重点资助和发展车用质子交换膜燃料电池以及固定站燃料电池的发展。德国机械设备制造业联合会燃料电池部Karl P. Kiessling主席在会上指出在德国大概有200多家燃料电池系统和组件的供应商,德国的工业界已经形成了共识和联盟以实现燃料电池技术的突破。总体而言,各发达国家对燃料电池汽车发展的中长期发展已经布局完毕,在基础研究方面不遗余力地努力,在系统集成方面已经瞄准在可靠性的基础上实现轻量化、小体积以及批量生产的工艺和机械设备等目标。

目前中国的燃料电池基础研究方面还相对薄弱,很多原材料依赖于进口,如催化剂和碳纸的供应一直受国外供应商的限制,并且价格非常昂贵。因此中国应该在基础研究方面继续加大投入,需要政府积极支持研究所和高校投入相关基础研究。另一方面,国内的能源公司和汽车公司也应大力度地参与到氢能与燃料电池汽车研发中,尤其在系统集成方面要加大研究的力度,否则将加大与发达国家之间的差距,而失去潜在的巨大市场。

4 结论与展望

综上所述,在各国政府的推动和产业界的积极参与下,氢能与燃料电池的研究、开发和示范已在各发达国家取得巨大进展。燃料电池在分布式发电、热电联产、叉车等领域已出现初期商业化趋势,在交通领域已有很多成功示范,各国同时还在加大氢能基础设施的建设发展力度,在氢能与燃料电池的基础研究方面仍在不断深入。虽然我国目前的基础研究水平与发达国家尚有一定的差距,但是2010年上海世博会上燃料电池汽车的大规模示范运行,也初步展示了我国在氢能与燃料电池开发应用上的实力和技术。总体而言,目前我国尚处于有利位置,但若不追紧则有可能掉队,在氢能与燃料电池技术研究及应用方面我们应迈更大的步子。

参考文献(References)

- [1] The Hydrogen and Fuel Cell Technical Advisory Committee. The state of hydrogen and fuel cell commercialization and technical development—2009 annual report[R]. Washington: HFCTAC, 2009.
- [2] The Hydrogen and Fuel Cell Technical Advisory Committee. The state of hydrogen and fuel cell commercialization and technical development—2008 annual report[R]. Washington: HFCTAC, 2009.
- [3] Butler J. 2009 legislation quarterly review—Q1 [R]. London: Fuel Cell Today, 2009.
- [4] Butler J. Semi-annual legislation review: April 2010 [R]. London: Fuel Cell Today, 2010.
- [5] Butler J. 2009 legislation quarterly review—Q3 [R]. London: Fuel Cell Today, 2009.
- [6] Jerram L C, A dehamna. 2009 hydrogen infrastructure survey[R]. London: Fuel Cell Today, 2009.
- [7] Butler J. 2009 legislation quarterly review—Q2 [R]. London: Fuel Cell Today, 2009.
- [8] Koguchi H. Research, development, and deployment of fuel cells and hydrogen in Japan [C]. The 13th IPHE ILC/SC meeting. Essen, Germany, May 14–15, 2010.
- [9] Mills M. Hydrogen and fuel cell technologies update [C]. The 13th IPHE ILC/SC meeting. Essen, Germany, May 14–15, 2010.
- [10] Colmenares L C, Jusys Z, Lennartz M, *et al.* PEMFC cathode catalyst degradation: model study on the stability and ORR performance of Pt/C and PtCo/C electrocatalysts [C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [11] Savinova E R, Ruvinsky P S, Pronkin S N. Development of low platinum catalytic layers for PEM fuel cells [C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [12] Ishihara A, Matsuzawa K, Mitsushima S, *et al.* Challenge of non-precious metal oxide-based cathode for polymer electrolyte fuel cell[C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [13] Sasaki K, Takasaki F, Shiratori Y, *et al.* Alternative electrocatalyst support materials for polymer electrolyte fuel cells: Semiconducting oxides and carbon nanofibers [C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [14] Beckhaus P, Burfeind J, Bandlamudi G, *et al.* Experience in stack development for high temperature PEM fuel cells [C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [15] Jensen J Q, Li Q F, Pan C, *et al.* Ongoing efforts addressing degradation of high temperature PEMFC[C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [16] Lehr F, Schaub G, Kruse O, *et al.* Photobiotechnological hydrogen production with microalgae [C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [17] Tamburic B, Zemichael F W, Maitland G C, *et al.* Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hydrogen production[C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [18] Lorenzo C, Maschmeyer T, Masters A F. Latex-supported, dye-sensitised, TiO₂ core shell spheres, for the photocatalytic generation of hydrogen from water [C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [19] Aicher T, Szolák R, Griesser L. Versatile fuel processor for oxidative steam reforming and catalytic partial oxidation of various liquid fuels[C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [20] Verfondern K, Lensa W von. Coal gasification for hydrogen production using nuclear energy [C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [21] Principi G, Khandelwal A, Agresti F, *et al.* Pellets of MgH₂-based composites as practical material for solid state hydrogen storage[C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [22] Borzenko V I, Blinov D V, Dunikov D O, *et al.* Reversible solid state hydrogen storage system integrated with PEM fuel cell [C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [23] Ullenberg Ø, Lototskyy M, Ntsendwana B. Metal hydride hydrogen storage units for LT PEMFC power systems [C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.
- [24] Lars Peter Thiesen. Hydrogen4 – The first year of operation in Europe [C]. The 18th World Hydrogen Energy Conference. Essen, Germany, May 16–21, 2010.

(责任编辑 岳臣)