

国际固体氧化物燃料电池堆及系统

苏巴 辛格尔

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,煤气化燃料电池联合研究中心,北京 100083)

[摘要] 为了实现固体氧化物燃料电池(SOFC)的广泛应用,世界上许多公司正在致力于SOFC的开发、制造和商业研究。本文回顾和讨论了SOFC领域的相关发展现状。

[关键词] SOFC;SOFC电池堆;管式电池;热电联供;辅助动力单元

[中图分类号] TM911.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)02-0007-08

1 前言

由于卓越的电性能和燃料选择的灵活性,固体氧化物燃料电池(SOFC)发电系统可以在数瓦到数兆瓦的很宽泛的功率范围上实现应用。世界上很多公司正在开发多种用途的SOFC电池堆和发电系统。下面将详细介绍该领域的一些代表性公司已经实现展示或正在研发的SOFC电池堆和发电系统。有关SOFC技术的发展和商业化进程已经在两个燃料电池的国际会议中出版的科学出版物、书籍^[1]和会议记录里进行了详细介绍。第一个会议是两年一度的固体氧化物燃料电池国际会议,该会议始于1989年^[2-13]。第二个是欧洲燃料电池论坛下的固体氧化物燃料电池论坛^[14-22]。这两个会议反映了在过去25年中SOFC的发展历程。本文的内容就是从这些出版物、公司网站及其新闻稿中摘录而来的。

2 小型SOFC系统(<10 kW)

1~5 kW级别的SOFC的一个主要应用就是以天然气为燃料的用户提供热电联供(CHP)。早期的SOFC CHP单元由瑞士Hexis AG公司设计生产并实施检测。这些单元是基于平板式SOFC系统构

建的,其内部中心有一圆孔作为燃料气的进气道,燃料气呈放射状排出,如图1所示。空气经过预加热过程,经由电池堆内部金属连接体上的4个气道从外部进入,然后转向,呈放射状排出。未经电化学转化的过剩气体排出后在电池堆边缘进行富氧燃烧。在此设计基础上,发展出名为“Galileo 1000 N”的系统,如图2所示,该系统可以提供1 kW的电力和大约1.8 kW的热量;电能转化效率约为30%,总体效率超过90%。至今已安装和展示了80余个类似的CHP单元。目前Hexis AG正在与德国的锅炉公司Stiebel Eltron和Hoval合作创立一个子公司以进行相关的维护和系统组装。

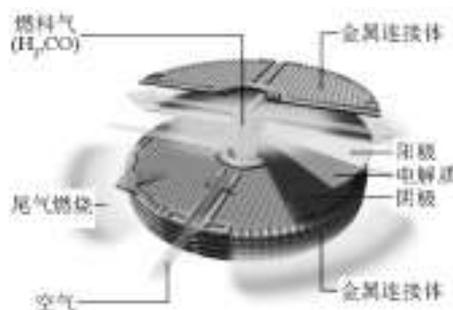


图1 Hexis AG 平板式SOFC

Fig.1 Hexis AG planar solid oxide fuel cell

[收稿日期] 2012-12-14

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划“973计划”资助项目(2012CB215406)

[作者简介] 苏巴 辛格尔(1945—),男,印度裔美国人,中组部“千人计划”,中国矿业大学(北京)教授,美国国家工程院院士,主要研究方向为固体氧化物燃料电池及煤基新型高效发电系统;E-mail:singhalfuelcell@gmail.com



图2 Hexis AG 1 kW CHP 系统, Galileo 1000 N
Fig.2 Hexis AG 1 kW CHP system, Galileo 1000 N

英国 Ceres Power 公司开发了金属支撑型的平板式 SOFC 系统。该系统采用钪基电解质,能为一般英国家庭提供电力并满足其主要的热能需求(包括热水)。金属支撑的 SOFC 电池堆可以在一个相对较低的温度下(550~600 °C)运行,并且更轻便。因此,Ceres Power 的发电系统(如图3所示)结构非常紧凑,可以采取壁挂的形式安装,从而为热水器的更换和居民应用拓展了一种新的使用方式。Ceres Power 已经和 British Gas 公司以及 Calor 公司进行了三方合作并能保证一定量的订单。2011 年,Ceres Power 组装并实地测试了 4 组该 CHP 单元,结果这些单元却表现出每百小时 3 % 的衰减率,通过研究最终发现性能衰减主要归咎于实验设备里的污染物,消除这些污染物的影响之后可以使衰减率降到每百小时大约 1 %。Ceres Power 现正在为 2016 年的商业化目标发展、推动并测试和优化更高功率的 CHP 系统。



图3 Ceres Power 壁挂式 1 kW CHP 单元
Fig.3 Ceres Power's wall-mountable 1 kW CHP unit

澳大利亚 Ceramic Fuel Cells 有限公司为一般家用设计了 1~2 kW 的 BlueGen 单元,采用平板式阳

极支撑的 SOFC,如图4所示。该单元大概有 200 片电池,已经运行和正在运行的 BlueGen 单元遍布世界各处。这些单元的电能转化效率可以达到 60 %,对于小型发电系统来说已是非常可观。除了大量的实验,产品研发、测试和设备生产也在澳大利亚的 Noble Park 进行。Ceramic Fuel Cells 有限公司在英国 Bromborough 设有一个生产 ZrO₂ 的工厂,在德国 Heinsberg 有一套电池堆和组装的生产设备。



图4 Ceramic Fuel Cell 公司的 BlueGen 单元
Fig.4 Ceramic Fuel Cell Ltd. BlueGen unit

丹麦的 Topsoe Fuel Cell A/S 与丹麦科技大学 Risoe 国家实验室合作,开发出阳极支撑和金属支撑的 SOFC,并为微 CHP 系统组成了 1~2 kW 规模的电池堆(作为 CHP 系统的“动力核心”),如图5所示。这些电池堆同时还被应用在示范卡车上作为辅助动力单元(APUs)和分布式发电机。Topsoe 已经为一个 20 kW 的生物质发电系统和一个 20 kW 的示范性海运 APU 提供了该种电池堆。此外,Topsoe 还与 Wärtsilä、Danfoss 和 AVL 合作将电池堆集成到系统中。目前,Topsoe 和 SK 控股公司达成两项发展 SOFC 技术商业化的协议。一项协议是发展 CHP 系统的商业化以提供给居民住户,另一项协议是发展大型 CHP 系统的商业化。协议中,Topsoe Fuel Cell 提供燃料电池堆,SK 控股公司将发展、制造并部署 SOFC 发电系统,双方将在技术领域进行合作。



图5 Topsoe Fuel Cell 的 SOFC 堆
Fig.5 Topsoe Fuel Cell's SOFC stacks

其他公司在研发电池堆(德国 Staxera 公司)和

组装基于平板式 SOFC 的民用 CHP 系统等方面也都涉及。目前这些公司主要利用平板式 SOFC 制作电池堆和发电系统。由于管式电池堆具有较高的可靠性和长期稳定性,它在家用方面也非常具有诱惑力。Kyocera(日本)已研发出两种形式的扁管电池,其合作公司已经在生产家用单元系统。Kyocera、Osaka Gas、Aisin、Chofu 和 Toyota 日前宣布已完成家用 SOFC 废热发电系统的商业应用,称为 ENE-FARM Type S。ENE-FARM Type S 是采用阳极支撑扁管 SOFC(见图 6)的家用发电系统,其电能转化效率达到了 46.5%。上述合作公司中,Kyocera 负责生产电池堆,Aisin 负责研究发电部分,Chofu 负责研究热水供应和利用废热加热,Osaka Gas 负责系统的销售(目前只限于日本市场)。公司希望在不久的将来扩展它们的生产业务。由于该系统的模块数量少、排出废热少,使得发电单元和供水、供热单元可以紧凑地结合在一起,如图 7 所示。Nippon Oil(ENEOS)利用 Kyocera 的阳极支撑扁管电池制造出了类似的 CHP 单元。另外,Tokyo Gas(同 Rinnai 和 Gastar 合作)利用 Kyocera 的扁管电池将其分段排列成电池堆(如图 8 所示),制造出家用 CHP 系统。



图 6 Osaka Gas 和 Nippon Oil 制造家用 CHP 所采用的 Kyocera 阳极支撑扁管电池
Fig.6 Kyocera's anode-supported flat tubular cell utilized by Osaka Gas and Nippon Oil for residential CHP units



图 7 利用 Kyocera 阳极支撑扁管电池制造的 700 W SOFC CHP 单元(左:SOFC 系统;右:热水箱)
Fig.7 A 700 W SOFC CHP unit (left: SOFC system; right: hot water tank) utilizing Kyocera's anode-supported flat tubular cells

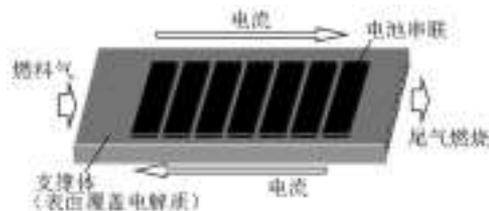


图 8 Tokyo Gas 制造家用 CHP 单元采用的 Kyocera 扁管分段排列式电池堆
Fig.8 Kyocera's flat tube segmented-in-series cell-stack used by Tokyo Gas in producing residential CHP units

日本 Toto 公司正在生产和测试阴极支撑管式电池组装的 2 kW 规模的 CHP 单元。美国 Siemens 公司与加拿大 Fuel Cell Technologies 公司合作生产和测试了几十个利用阴极支撑管式电池组装的 3~5 kW 规模的 CHP 单元,这些单元性能良好,运行一年依旧具有稳定的性能。让人遗憾的是这些单位已经不再继续 SOFC 方面的业务了。尽管如此,SOFC 家用系统依然通过与加工公司的合作而加速发展,尤其是在日本市场和欧洲市场。

需要补充说明的是,开发出的小型 SOFC 系统还被利用在偏远地区以实现分布式发电和军事用途。Acumentrics Corporation(美国)利用管式电池为电网以外的用户制造出规模从 250 W 到 10 kW 不等的发电系统。小半径的管式电池减小了梯度变化,增强了电池的热循环性能,并能实现快速启动。一个 Acumentrics 系统能在 30 min 内实现启动。管式结构能在启动的同时进行燃料的重整,剔除了板式 SOFC 中常有的又大又贵的外重整器,如图 9 所示。

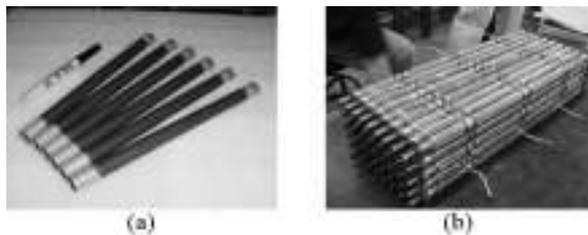


图 9 Acumentrics Corporation 的小型管式 SOFC(a) 和电池束(b)

Fig.9 Acumentrics Corporation's small tubular SOFC (a) and cell bundles (b)

3 大型分散式电站的 SOFC 系统

自 1986 年起,Westinghouse 公司(其化石燃料部门 1998 年被 Siemens 收购)成功将 15 个 SOFC 系统整合在一起,其功率范围达到 0.4~220 kW,并在

消费者使用地进行了测试。用时最长的是一个100 kW 空气气氛发电系统,该系统使用的是管式SOFC,如图10所示。这个100 kW的废热利用系统是首个以整体形式出现的展示性管式SOFC模块。该电池堆包含了1 152个电池(直径2.2 cm,活性长度150 cm),每24个电池一束,共48束。该系统在美国、荷兰、德国和意大利等国以脱硫的天然气为燃料运行了36 750 h,运行过程中并未检测到任何性能衰减,发电效率一直维持在46%。这是首个SOFC大规模发电的成功范例。



图10 Siemens/Westinghouse 100 kW SOFC 废热利用发电系统

Fig.10 Siemens/Westinghouse 100 kW SOFC cogeneration system

Siemens公司制造了一个220 kW的加压SOFC/气体涡轮联合系统。如图11所示,该系统在美国California-Irvine大学国家燃料电池研究中心进行了安装和测试。该系统是首个SOFC和微涡轮发电机耦合的示范,也是承压SOFC发电机中的典型代表。该系统总计运行了3 400 h,利用纯交流电换算得到的发电效率为53%。分析认为配备该SOFC/气体涡轮的联合系统在兆瓦级别的系统上的发电效率可达到70%。



图11 Siemens/Westinghouse 200 kW 加压SOFC/微气体涡轮混合发电系统

Fig.11 Siemens/Westinghouse 200 kW pressurized SOFC/micro gas turbine hybrid power system

如前文所述, Siemens/Westinghouse 已不再发展SOFC业务。然而,其他公司仍旧继续在SOFC大规模发电系统的利用上发展。其中首推美国

Versa Power Systems(同FuelCell Energy合作)、美国United Technologies(同Delphi Corporation合作)和Rolls-Royce Fuel Cell System(英国-美国)团队。这些公司的研发活动由美国能源部固态能源转换联盟(SECA)项目支持,在2000年发起,旨在降低SOFC发电系统的成本。

总部位于美国Littleton, Colorado,生产线位于加拿大Calgary的Versa Power Systems使用25 cm×25 cm(活性面积550 cm²)的阳极支撑平板式燃料电池组装成功率为60 kW的电池堆,如图12所示。美国Fuel Cell Energy公司将这种电池堆整合为数兆瓦规模的系统,以煤或其他碳氢化合物作为燃料进行分布式发电。

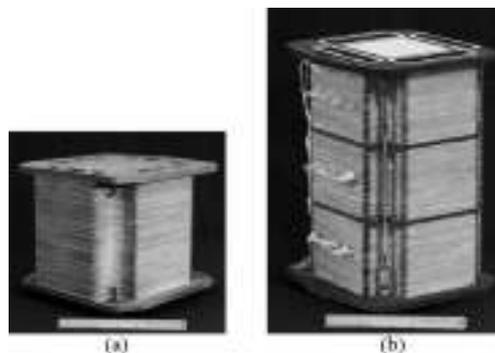


图12 Versa Power Systems的10 kW(a)和20 kW(b)规模的SOFC电池堆

Fig.12 Versa Power Systems' 10 kW (a) and 20 kW (b) size SOFC stacks

美国Delphi Corporation研发出阳极支撑平板式电池堆用于运输APUs,这将在本文第4部分进行详细讨论。Delphi同样与UTC Power合作,UTC Power计划采用Delphi的SOFC技术建造25 kW以及更高功率的电池堆,其最终目的是实现以煤或者其他碳氢化合物为燃料供给数兆瓦的发电系统进行发电。目前,UTC Power已经完成了25 kW电池堆的设计、建造和调试,并提出了有关atmospheric IGFC系统概念性的设计,该设计利用SOFC/气体涡轮/汽轮机的循环,在没有配备碳捕获存储系统(CCS)的情况下,得到了57%(HHV)的电能转化效率。2003年,Delphi在亚拉巴马州Wilsonville的煤气化厂(PSDF)以煤气化气体为燃料,用一个5 kW的电池堆验证了SOFC燃料选择的灵活性。这次实验证实了煤气化气体也可以有效地通过燃料电池转化为电能。在PSDF进行的煤气化是在一个先进的循环流化床下进行的。在这次电池测试中添加

了一个气体净化装置,其中包含热气体模块和冷气体模块,以保证进入电池堆的气体不含有硫、氯和焦油等。将Delphi的SOFC电池堆加热到工作温度750℃以后通入煤气作为燃料。同时,这个实验用第二个电池堆进行了重复操作。两个电池堆均工作了75h以上。这项成功的测试表明SOFC确实可以按照预期采用煤气进行发电。

从2009年开始,Rolls-Royce Fuel Cell Systems (RRFCS)开始关注美国市场并接触了一些从2007年起就比较知名的SOFC企业。鉴于材料和电池片

的研究在美国进行,RRFCS减少了在英国的劳动力,现在该公司主要关注欧洲的系统方面。RRFCS利用一种整体性的平板式布局,如图13所示。采取这种设计的电池可以得到相对高的电压,但是其电流相对较低。电池通过低成本的丝印工艺将活性功能层制备在一个由廉价 $MgO+MgAl_2O_4$ 制成的陶瓷板上。目前,RRFCS仍在优化这种设计,并提出了一个概念性的方案,如图14所示。对于一个参照该方案设计出的数兆瓦的燃料电池发电系统采取交流电换算的方式,其发电效率将可能达到60%以上。

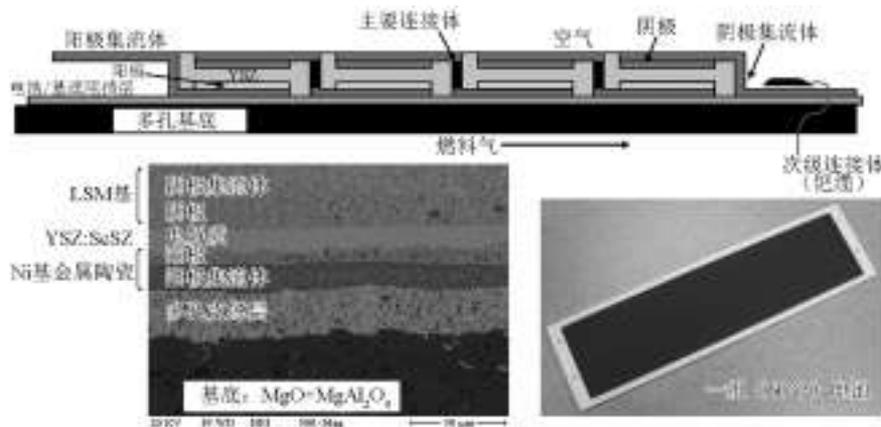


图13 Rolls-Royce Fuel Cell System的整合平板式SOFC

Fig.13 Rolls-Royce Fuel Cell System's integrated planar solid oxide fuel cell



图14 Rolls-Royce Fuel Cell System 数兆瓦级别SOFC电池堆概念设计图

Fig.14 Rolls-Royce Fuel Cell System's conceptual design of a multi-megawatt class SOFC power system

Mitsubishi Heavy Industries(日本)从1984年开始在Nagasaki、Kobe和Yokohama着手研发SOFC。他们研发了管式(分段集成)和平板式多块分层(MOLB)电池。2005年,一个25kW的MOLB-SOFC CHP系统运行了3240h,另一个30kW的MOLB-CHP系统在2005年Aichi世界博览会上运行了3870h。目前,研究主要集中在分段集成式的管式电池上。早在2001年该公司就测试了一个10kW的加压管式SOFC,目前正在测试另一个200kW的系统。Mitsubishi公司面临的主要技术难题集中在燃料气和空气的漏气(由于连接体和电解质之间重

叠的区域致密度不够导致)上,氧气通过连接体渗漏到阳极含有镍氧化物的区域,导致系统体积膨胀,热应力增大以致破裂。Mitsubishi 200kW级加压SOFC/气体涡轮系统已经在52%的发电效率下运行了3000h,如图15所示。目前,该公司正致力于研发300kW级的混合系统,其未来目标是现行系统的一半。该系统已于2012年间在Tokyo Gas安装。



图15 Mitsubishi重工200kW级加压SOFC/气体涡轮混合系统

Fig.15 Mitsubishi Heavy Industries 200 kW class pressurized SOFC/gas turbine hybrid system

其他公司也在开发大规模的发电电池堆和系统。韩国的Posco公司正在研发50kW阳极支撑大

规模分散发电系统。作为德国参与合办项目 SOFC20 的一部分,德国 Fraunhofer 陶瓷科技和系统研究中心 (IKTS)、澳大利亚 Plansee SE、德国 AVL List GmbH、德国 Schott AG 和德国 Jülich Research Center 正在研究一个以天然气为燃料的静态系统展示品。Fraunhofer 陶瓷科技和系统研究中心设计了一个“热箱”式系统,该系统由 8 个 SOFC 电池堆组成。其在 2012 年 3 月的首次测试非常成功。在测试中,该电池堆的输出功率达到 55 kW。进一步的实验采用了模拟天然气组成的混合气,该电池堆模块将被安装在 AVL List GmbH 一个专门为系统开发的环境当中进行测试,以期得到一个发电效率高于 50% 的结果。Plansee 主要通过目前世界上规模最大的粉末冶金技术在 130 mm×150 mm 的尺度上进行连接体涂层的整体加工。Plansee 研发出一种新型 Cr、Fe 和 Y 合金,即目前众所周知的 CFY 合金,主要用于电解质支撑电池的电池堆。这种 Cr 基合金的热膨胀系数与 YSZ 非常匹配。和其他公司不一样的是,这种 Plansee 连接体对于任何想加工连接体的制造商都有售。

目前最成功的大规模 SOFC 发电系统制造公司当属 Bloom Energy (美国),该公司获得风险投资后于 2001 年在美国加州 Sunnyvale 成立。它已经制造、销售和组装了数百个 100 kW 级的 SOFC 发电系统,如图 16 所示。该公司研发的电池堆采用平板式 SOFC,面向的商业对象包括 Adobe Systems、Bank of America、Cox Enterprises、Coca Cola Company、eBay、FedEx、Google、Safeway、Staples、Walmart 等。Bloom Energy 现在正在美国东部 Delaware 建造另一套新的生产设备以加速他们 SOFC 发电系统的商业化。



图 16 5 个装配在 eBay 中心的 100 kW 规模 SOFC
Fig.16 Five 100 kW size SOFC systems installed at eBay Headquarters

世界范围内对 SOFC 进行的大量相关研究,目的都是为了降低 SOFC 发电系统的成本,尤其是电池制造和电池堆材料成本,以及直流电向交流电的转化和其他各部件的平衡。

4 便携式 SOFC 发电系统

便携式设备所需要的电力在数毫瓦到数百瓦

之间。质子交换膜燃料电池(包括直接醇燃料电池)由于其质量轻、操作温度低,可以应用于此种设备。基于 SOFC 的便携发电系统也已发展了在军工、休闲、紧急情况以及交通运输方面的应用。由于其对燃料的普适性,不要求一定使用氢气作为燃料。SOFC 在采用丙烷、汽油、柴油、煤油、JP-8 军用燃料、乙醇和其他生物质能的情况下亦能保证正常运行。对于便携式设备来说,最大的挑战在于它必须质量轻并且能迅速启动以及保证蓄热性能。迅速启动对便携式设备来说尤其重要,但同样也是非常难实现的,这主要是由于陶瓷对热冲击的耐受性。一种解决方式是采用微管 SOFC,其对热冲击具有一定的耐受性。另外,因为功率密度和管径成反比,微管设计也能提供较高的体积功率密度。

微管 SOFC 已经被美国的 Ultra Electronics AMI 成功整合在便携式设备当中。为军用(士兵、无人空中设备以及无人陆上设备)、休闲(不接入电网的露营、爬山以及长距离远足等)和紧急电源设计制造了小型(50~300 W)SOFC 单元。图 17 所示为 Ultra Electronics AMI 50 W 和 250 W 的可持续供电系统。50 W 的系统采用丙烷驱动,为地上传感器、无人飞行器和机器人提供动力。250 W 的系统则采用丙烷或液化石油气驱动,用于延长军事任务的时间和为电子设备、无线电和电脑等提供非电网电力。在便携式设备中使用普通廉价燃料(丙烷、丁烷和液化石油气)可以减轻后勤供应的负担。



图 17 AMI 的 50 W (a) 和 250 W (b) 便携式 SOFC 系统
Fig.17 AMI's 50 W (a) and 250 W (b) portable SOFC systems

美国 Lilliputian Systems 公司基于 SOFC 和微型机电系统发展出用芯片制造的 Silicon Power Cell 技术。该技术包含一个基于芯片的 SOFC 和一个可循环的高能燃料匣以提供动力。Lilliputian Systems 的产品平台包含移动电力系统、整合电力系统和嵌入式电力系统,可提供从手机到笔记本电脑功率范围内所需要的电力。Lilliputian Systems 最近公布了它的最新产品,一种为用户设备提供电力的便携式充

电装置,如图18所示。通过和零售商 Brookstone 有限公司的合作,这种独立、便携、轻量化、无需插电的电源系统可为用户电子设备(如手机、移动手持设备、MP3 音乐/视频播放器、数码相机等)通过标准 USB 接口充电。它可通过一个独立循环装置提供可“持续使用”数星期的便携电源,持续时间比其余的供电方式更长久,花费则比之前的备用电池小得多。这种便携式 SOFC 发电系统为手机电量不足的消费者提供了非常吸引人的使用方案和广泛的便携性和自由性(无需电源插头)。此外,该系统还能多种设备提供电力,显著减少了消费者外出时对电线和电源适配器的需要。



图18 Lilliputian 的便携式 SOFC 单元,一个可换电匣可充满 10~14 个 iPhone

Fig.18 Lilliputian's portable SOFC unit that can deliver 10~14 full charges for an iPhone with one replaceable cartridge

5 基于 SOFC 的机载辅助动力装置

燃料电池系统的另一应用是在交通运输领域。质子交换膜燃料电池作为一种便携式装置,推动了电池在交通领域中对内燃机的取代过程。质子交换膜燃料电池需要使用完全不含一氧化碳的纯净氢气才能稳定运行。由于当前没有小型的氢气装置,在技术层面上要使随车携带的转化装置把目前常用的燃料(如汽油、柴油)转化成氢气也面临非常大的困难,主要表现为结构复杂并且价格昂贵。此外,从重整油中分离出一氧化碳也十分困难。相比之下,燃料电池可以将一氧化碳和氢气一起作为燃料,其较高的工作温度和阳极侧水的供应使得碳氢化合物可以在电池表面或内部进行转化。并且在燃料电池中不需要使用贵金属催化剂,降低了电池的成本。虽然还没有在实际应用中推广,但可以预见 SOFC 将用于 APUs,这种基于燃料电池的 APU 将会应用于日益增长的豪华电动汽车、休闲车以及包含冰箱、电视、音箱、甚至电脑和微波炉等各种舒适设备的重型卡车。与上文提到的便携式装置一样,SOFC 在机载辅助动力装置上面面临的挑战依旧是实现 SOFC 系统的尺寸紧凑、轻质量、短启动时间、高机械强度和强热循环等性能。

Delphi 公司研发出用阳极支撑平板式 SOFC 制造的 SOFC APU 系统。该 APU 单元可使用汽油或

柴油工作,通过在 APU 单元内的部分氧化进行重整。该 APU 系统包括燃料电池堆、燃料改善子系统、能量恢复单元、热量管理子系统、加工气体供应子系统、控制子系统、电力电子技术和储能子系统,如图 19 所示。2008 年,Delphi 公司和美国 Motors Co. 成功展示了 Delphi 公司的固体燃料电池 APU 系统在 Peterbilt 型号 386 卡车上“旅馆式办公”的负载应用(见图 20)。Delphi SOFC APU 为 386 卡车的电力系统、空调和卡车的电池提供能量,在整个测试过程中,卡车的柴油发动机始终都处于熄火状态。Delphi 公司希望在未来几年内实现此类 SOFC APUs 的商业化。

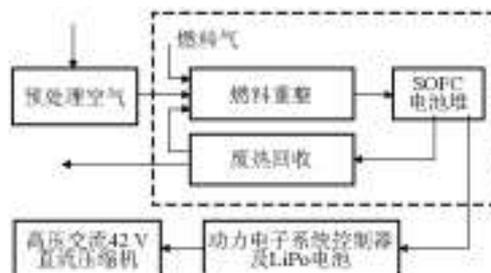


图19 SOFC 辅助动力装置的基本构成

Fig.19 Basic building blocks of an SOFC APU



图20 Delphi SOFC APU 安装在 Peterbilt 汽车下部

Fig.20 Delphi's SOFC APU mounted underneath a Peterbilt's truck cabin

如前文所述,Topsoe 的燃料电池堆也可以应用于 APUs。这家公司开发出了用于 APU 的 3 kW 轻量(约 6 kg)电池堆(见图 21)。



图21 用于 APU 的 Topsoe 燃料电池堆概念设计

Fig.21 Conceptual design of the Topsoe fuel cell stack for APU application

6 结语

本文对世界上面向各种应用的SOFC电池堆及SOFC发电系统的开发和商业化进行了概述,如住宅热电联供机组、大型分布式发电系统、小型便携式设备和辅助动力装置等。在日本,小型民用热电联供的固体氧化物燃料电池系统的产业化已经启动。Bloom Energy在美国已经向商业客户出售了几百个100 kW的SOFC发电系统,目前正在提高其生产速度以加快SOFC分布式发电系统的商业化。世界各地正广泛致力于降低SOFC发电系统成本的研究,尤其是在电池制造和电池堆材料方面,以及直流电向交流电的转化和其他各组件的平衡。

(本文由巩玉栋、宋世栋、韩敏芳翻译)

参考文献

- [1] Singhal S C, Kendall K. High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications [M]. Oxford: Elsevier, 2003.
- [2] Singhal S C. First International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 1989.
- [3] Grosz F, Zegers P, Singhal S C, et al. Solid Oxide Fuel Cells II [C]//Luxembourg: Commission of the European Communities, 1991.
- [4] Singhal S C, Iwahara H. Solid Oxide Fuel Cells [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 1993.
- [5] Dokiya M, Yamamoto O, Tagawa H, et al. Solid Oxide Fuel Cells IV [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 1995.
- [6] Stimming U, Singhal S C, Tagawa H, et al. Solid Oxide Fuel Cells V [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 1997.
- [7] Singhal S C, Dokiya M. Solid Oxide Fuel Cells VI [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 1999.
- [8] Yokokawa H, Singhal S C. Solid Oxide Fuel Cells VII [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 2001.
- [9] Singhal S C, Dokiya M. Solid Oxide Fuel Cells VIII [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 2003.
- [10] Singhal S C, Mizusaki J. Solid Oxide Fuel Cells IX [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 2005.
- [11] Eguchi K, Singhal S C, Yokokawa H, et al. Solid Oxide Fuel Cells X [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 2007.
- [12] Singhal S C, Yokokawa H. Solid Oxide Fuel Cells XI [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 2009.
- [13] Singhal S C, Eguchi K. Solid Oxide Fuel Cells XII [C]//Pennington: The Electrochemical Society, 2011.
- [14] Bossel U. First European Solid Oxide Fuel Cell Forum Proceedings [C]//Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum, 1994.
- [15] Thorstensen B. Second European Solid Oxide Fuel Cell Forum Proceedings [C]//Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum, 1996.
- [16] Stevens P. Third European Solid Oxide Fuel Cell Forum Proceedings [C]//Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum, 1998.
- [17] McEvoy A J. Fourth European Solid Oxide Fuel Cell Forum Proceedings [C]//Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum, 2000.
- [18] Huijsmans J. Fifth European Solid Oxide Fuel Cell Forum Proceedings [C]//Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum, 2002.
- [19] Mogensen M. Sixth European Solid Oxide Fuel Cell Forum Proceedings [C]//Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum, 2004.
- [20] Kilner J. Seventh European Solid Oxide Fuel Cell Forum Proceedings [C]//Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum, 2006.
- [21] Steinberger-Wilckens R. Eighth European Solid Oxide Fuel Cell Forum Proceedings [C]//Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum, 2008.
- [22] Irvine J T S. Ninth European Solid Oxide Fuel Cell Forum Proceedings [C]//Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum, 2010.

Status of worldwide SOFC stacks and systems development

Subhash C Singhal

(Union Research Center of Fuel Cell, School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

[Abstract] Many companies worldwide are pursuing the development, manufacturing and commercialization of the solid oxide fuel cell (SOFC) technology for power generation for a variety of applications. This paper reviews and discusses the status of such development.

[Key words] solid oxide fuel cell (SOFC); SOFC stack; tubular cell; combined heat and power (CHP); auxiliary power units (APUs)