

固体氧化物燃料电池平板式电池堆的研究进展

宋世栋^①, 韩敏芳^{①*}, 孙再洪^②

① 中国矿业大学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;

② 苏州华清京昆新能源科技有限公司, 昆山 215313

* 联系人, E-mail: hanminfang@sina.com

2013-07-25 收稿, 2013-10-29 接受, 2014-04-04 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2012CB215400, 2012CB215406)和教育部新世纪人才计划(80051803)资助

摘要 燃料电池可以直接将燃料的化学能转化为电能, 其发电效率高、污染物排放少, 是一种高效、洁净的发电装置. 固体氧化物燃料电池(SOFC)的燃料适用性强、稳定性好, 被认为是现阶段最有应用前景的绿色发电系统. 本文介绍了 SOFC 的平板式单电池及电池堆的最新研究进展, 以及国际上代表性研发单位的技术现状, 并提出了在平板式 SOFC 商业化进程中亟待解决的问题.

关键词

固体氧化物
燃料电池
电池堆
发电系统
平板式
碳氢燃料

1 平板式 SOFC 电池堆及发电系统的进展概述

固体氧化物燃料电池(SOFC)的电池堆最早可追溯到 20 世纪 30 年代, Baur 等人^[1]用 8 个单电池串联, 组装了第一个电池堆. 此后, SOFC 发电技术获得了快速发展, 尤其是整体发电系统. 目前, SOFC 发电系统已经覆盖了小型电源、移动式电源、家庭用分布式电源、交通工具的(辅助)动力电源系统以及中心电站. 以煤气、天然气、丙烷和生物质气等碳基燃料工作的 SOFC 已成功实现了示范发电. 发达国家和地区普遍把 SOFC 作为一种战略储备技术, 并成立专门机构, 投入大量研发资金, 集中力量对 SOFC 中的关键技术进行攻关, 以降低 SOFC 发电成本和系统衰减率, 加快其商业化进程.

1999 年美国在能源部的领导下, 整合了 SOFC 领域的专业公司和大学及国家实验室, 成立了固态能量转换联盟(Solid State Energy Conversion Alliance, SECA, <http://www.seca.doe.gov>), 专门针对 SOFC 开展相关研究. SECA 项目对阳极支撑(ASC)平板式结构

SOFC 的目标是使用煤气、天然气、液化石油气和航空柴油等碳基燃料, 开发从千瓦级的辅助电源系统, 数十千瓦的热电联供系统(CHP), 到兆瓦级固定电站的煤基 SOFC 发电系统^[2]. 项目的总体目标中重点开发高效、低成本的 100 MW 级的固定电站, 尤其是煤气化燃料电池联合循环系统(IGFC). 同时要求实现高效的碳捕获和限制其他污染物(氮氧化物和硫氧化物等)的排放. 具体指标为到 2015 年实现 60%的发电效率(HHV, 以煤为燃料的交流电效率), 能够捕获 90%的 CO₂. 目前 SECA 项目中有 3 个工业团队, 主要负责开发 SOFC 发电系统模块, 完善发电系统设计, 以及实现成本降低的目标. 为实现与其他发电系统拥有可竞争的发电成本, SECA 项目要求 SOFC 电池堆的成本为 175 美元/kW, 发电模块的成本为 700 美元/kW. 截止到 2010 年底, 3 个工业团队都已经达到 SECA 项目的成本指标, 下一步目标为扩大 SOFC 发电模块的功率规模, 应用于 250 MW 级的商业发电系统样机^[3].

由于在研究方向和项目指标的调整方面具有更高的灵活性, SOFC 的先进技术主要被一些高技术公司掌握. 美国布鲁姆能源公司(Bloom Energy)虽然未

引用格式: 宋世栋, 韩敏芳, 孙再洪. 固体氧化物燃料电池平板式电池堆的研究进展. 科学通报, 2014, 59: 1405-1416

Song S D, Han M F, Sun Z H. The recent progress of planar solid oxide fuel cell stack (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 1405-1416, doi: 10.1360/972013-318

加入 SECA 项目组,却是目前 SOFC 电池堆领域中走在商业化最前端的单位之一.其 SOFC 技术起源于美国国家航空航天局(NASA)的火星计划,核心技术基于平板式 SOFC 结构.目前该公司已开发出商业化的 100 kW 发电系统模块,2011 年装机容量达到 4 MW (<http://www.bloomenergy.com/fuel-cell/es-5700-data-sheet/>).日本非常看好 SOFC 发电系统的研发,从国家层级上倾注了大量资金,使得其 SOFC 技术水平和规模得到了快速提升.比如“SOFC 系统和基础技术开发”项目在 2008~2010 年投入经费达到 4300 万美元,而“SOFC 示范研究”项目从 2007~2010 年投入经费 3700 万美元.目前日本和美国成为行业内的领导者,其商业化进程已超过美国,是世界上最早实现民用 SOFC 发电系统商业化的国家.日本在新能源产业技术综合开发机构(New Energy and Industry Technology Development Organization, NEDO)组织的领导下,从 1989 年开始 SOFC 相关研究和技术发展 (http://www.nedo.go.jp/english/introducing_message_c.html).近年来已在千瓦级分布式 SOFC CHP 系统方面取得成功,并初步实现商业化. NEDO 组织对 SOFC 发电系统的具体指标为实现 40000 h 的连续工作,衰减率小于 0.25%/1000 h,并实现 250 次的重复启动.在 2010 年 12 月,日本共安装 SOFC 小型 CHP 系统 132 台,平均发电效率为 35%.对于用电量为 500 kW h/月的用户,可节省 16%的一次能源消耗,实现 34%的 CO₂ 减排量^[4].其电池堆主要为阳极支撑的扁管式结构,由三菱重工、三菱材料和东陶公司负责制造.在欧洲,主要进行平板式 SOFC 电池堆及发电系统的研发.欧盟从第六框架计划起,开始联合欧洲优势力量,集中攻关,实施了诸多计划,重点支持诸如 Real SOFC(<http://www.real-sofc.org/>)、SOFC 600(<http://www.sofc600.eu/about-sofc600/>)等数 10 个项目.项目组织以大学和研究所为主要力量,联合相关领域的公司,进行 SOFC 的基础研究和技术研发^[5].其中代表性单位为德国的于利希研究中心(Forschungs Zentrum Jülich, FZJ)、丹麦的托普索燃料电池公司(Topsoe Fuel Cell A/S)和丹麦科技大学 Risø 国家实验室,以及英国的帝国理工大学与锡里斯公司(Ceres Power)等.在 2015 年以前,欧盟将建成从千瓦级到兆瓦级的各种规模的 SOFC 示范发电系统^[6].此外,加拿大^[7]、澳大利亚^[8]、韩国等也对平板式 SOFC 电池堆进行了较深入的研究,并已取得一定进

展.澳大利亚的陶瓷燃料电池公司(Ceramic Fuel Cell Limited, CFCL)所制造的 1~2 kW BlueGen 发电系统使用含有约 200 片阳极支撑结构单电池的平板式电池堆,可实现高达 60%的发电效率.该公司在 2011 和 2012 年为德国的国家创新计划(NIP)项目提供 200 台 BlueGen CHP 系统.

相比发达国家的快速发展,中国 SOFC 技术水平和产业化进程滞后.在中国科学院系统中,上海硅酸盐研究所和宁波材料技术与工程研究所主要研发阳极支撑的平板式 SOFC 电池堆及发电系统;中国科学院大连化学物理研究所研究中高温燃料电池有很早的历史,曾成功组装并运行了 90, 130, 300 W 和 1000 kW MCFC 电池组,通过“九五”攻关的验收,目前主要研发管式结构 SOFC 电池堆及发电系统;北京中国科学院物理研究所主要开展碳基燃料 SOFC 相关的基础科学研究.在高校系统中,中国矿业大学(北京)开展了从碳基燃料、SOFC 关键材料、元器件生产到 SOFC 电池堆等一系列研究工作;中国科学技术大学在 SOFC 相关基础科学领域开展了长期的研究工作;华中科技大学重点研发阳极支撑平板式 SOFC 发电系统;清华大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、吉林大学、西安交通大学、华南理工大学、南京工业大学、北京科技大学、北京工业大学、苏州大学等数 10 所大学都分别开展了各具特色的基础研究工作.然而,中国 SOFC 技术水平与发达国家还存在较大的差距,目前尚未有成熟的平板式 SOFC 电池堆及发电系统的示范运行.

2 平板式 SOFC 电池堆的技术现状

SOFC 电池堆的发展自 1930 年以来,出现了多种电池堆的设计方式.从 1960 年以后,电池堆的设计主要集中于平板式电池堆和管式电池堆两种结构.平板式 SOFC 电池堆的主要缺点是密封难度大、热循环性能差、性能衰减高;优点是电流路径短、比功率高、电性能好.而管式 SOFC 电池堆的主要缺点是电流路径长、内电阻大、比功率低、制造难度大、成本高;优点是密封容易、稳定性好.平板式 SOFC 电池堆是由电池组件以平板式结构串联在一起组成^[9].在平板式 SOFC 中,电流流向与电池垂直,流程短且采集均匀,所以电池的欧姆极化比管式 SOFC 低,可以实现更高的电性能.此外,平板式 SOFC 电池结构简单,电解质和电极制备容易控制,电池的造价也比管式电池低得多,制造成本更容易满足美国 SECA 项目

组制定的 SOFC 商业化成本指标^[10]。因此,平板式电池堆是目前国际上 SOFC 研究的热点和主流。按单电池支撑结构的特点可将平板式电池分为电解质支撑(ESC)、阳极支撑、阴极支撑(CSC)、金属支撑(MSC)等,其中开发最多的是阳极支撑结构^[9]。

阳极支撑平板式 SOFC 因为其电解质薄膜电阻小、功率密度高,尤其适合在中低温(650~750℃)范围内运行,是构建千瓦级 SOFC 独立发电系统的基础。美国 SECA 项目中的德尔福公司(Delphi Corp)、通用电器公司(GE)、Versa 动力系统公司(Versa Power Systems, VPS)以及联合技术动力公司(UTC Power)等都已示范了阳极支撑平板式 SOFC 电池堆。德尔福公司已成功运行了 5 kW 电池堆。通用公司也于 2006 年成功交付美国能源部 6 kW SOFC 系统。Versa 动力系统公司组装的 10 kW 平板式 SOFC 电池堆稳定运行了 5000 h,衰减速率仅为 2.6%/1000 h。德国于利希研究中心成功运行了 20 kW 平板式电池堆。丹麦的托普索燃料电池公司也单独开发了 5 kW 的 SOFC 系统,并与芬兰的瓦锡兰公司(Wärtsilä)合作完成 20 kW 的示范演示。荷兰的能源研究中心(Netherlands Energy Research Centre, ECN)主要进行 40 kW 级 SOFC CHP 系统的商业化开发。在 2015 年以前,欧盟计划建成 80000 套 1~10 kW 的 SOFC 系统,2600 套 10 kW~1 MW 的 SOFC 发电系统,50 套兆瓦级以上的 SOFC 系统。在国内,中国科学院上海硅酸盐研究所、中国科学院宁波材料技术与工程研究所、华中科技大学、哈尔滨工业大学等也重点开发阳极支撑 SOFC。虽然在材料研究、电极材料制备等方面取得了可喜成绩,目前已经能够制备出高性能的平板式单电池,但是缺乏可以长期稳定运行的大功率 SOFC 平板式电池堆及示范发电系统,与国外相比尚有较大的差距。另外,阳极支撑电池结构仍然存在抗热循环、抗氧化还原性能差等问题,需要进一步研究。

2.1 单电池结构

在 SOFC 单电池中,主要由阳极、电解质和阴极 3 层电池组件构成,通常是其中某一层厚度最大,该层除了具备作为电极或者电解质应该有的功能外,还起到维持整个单电池特定力学性能的作用,因此把最厚的这层称为支撑层,对应的结构称之为相应的支撑方式。目前在平板式 SOFC 中,主要有电解质支撑和阳极支撑,最近还发展了新型的金属支撑结构等,上述设计各具特点,如图 1 所示。

(i) 电解质支撑结构。平板式 SOFC 结构中电解质支撑结构的发展最早,其中电解质层厚度通常在 150~300 μm ,其突出特点是性能稳定、制备工艺简单、制作成本低,但是运行温度高,通常都在 800~950℃。国际上已经成功运行的电解质支撑平板式 SOFC 电池堆已达到数百千瓦量级。美国布鲁姆能源公司使用了电解质支撑的单电池,并已推出多台百千瓦级 SOFC 系统,自 2008 年以来多家用户使用了布鲁姆公司推出的发电模块(Bloom Box): 易趣公司(Ebay)和可口可乐公司(Coca-Cola)安装了 500 kW 的 SOFC 系统;谷歌公司(Google)和沃尔玛公司(Walmart)安装了 400 kW 的 SOFC 系统;史泰博公司(Staples)安装了 300 kW 的 SOFC 系统;联邦快递公司(Fedex)安装了 100 kW 的 SOFC 系统^[11]。德国 Fraunhofer 陶瓷技术和系统公司(Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems, IKTS)长期研究钇稳定氧化锆(YSZ)电解质支撑的 SOFC 相关技术,以 IKTS 相关 SOFC 技术为依托,成立了凯尔福公司(Kerafol)、H. K. Starck 公司、Staxera 公司和 EBZ GmbH 公司,分别向市场批量提供电池片、SOFC 电池堆和系统,并联合出售 500 W~2 kW SOFC 发电系统(<http://www.ikts.fraunhofer.de/EN/microenergysys->

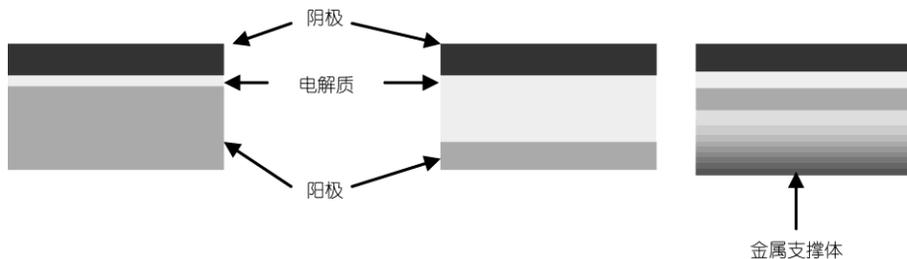


图 1 不同支撑结构的 SOFC

从左到右依次为阳极支撑、电解质支撑和金属支撑结构

tems/index.jsp, <http://www.hcstarck.com/en/home/press.html>, <http://www.kerafol.com/en/sofc.html>, <http://www.plansee.com/en/Products-Interconnects-for-fuel-cells-61.htm>). 日本关西电力公司(Kansai Electric Power)开发了以掺杂镓酸镧(LSGM)为电解质的电解质支撑型 SOFC, 在中温(650~800℃)下取得了很高的发电效率(60%), 并展示了 10 kW 的 SOFC 系统^[12]. 中国矿业大学(北京)一直致力于电解质支撑 SOFC 相关技术研究, 已成功实现了电解质片及电解质支撑电池的批量化生产, 并通过了教育部组织的技术成果鉴定, 如图 2 所示.

(ii) 阳极支撑结构. 阳极支撑平板式 SOFC 是目前世界上研究最多的结构形式. 阳极层的厚度通常在 200~1000 μm, 电解质层厚度通常在 10~80 μm, 因为薄层电解质内阻小, 电池可以在较低温度(650~750℃)下运行, 功率密度高. 但是采用 Ni-YSZ 为主的阳极材料, 长期以来一直存在抗热循环、抗氧化还原性能差等问题. 美国 SECA 项目组中的成员德尔福公司、通用电器公司、Versa 动力公司以及联合技术公司等都已示范了阳极支撑平板式 SOFC 电池堆. 德尔福公司已成功运行了 5 kW 电池堆, 2009 年把 1.5 kW 的 SOFC 作为汽车辅助动力系统(APU)用在大型货车上, 成功示范运行^[13]. 通用公司于 2006 年成功交付美国能源部 6 kW SOFC 系统, 发电效率为 49%(LHV, http://thefraserdomain.typepad.com/energy/2006/10/ge_delivers_6_k.html). Versa 动力公司制造了 10 kW 平板式 SOFC 电池堆, 稳定运行了 5000 h, 衰减速率为 2.6%/1000 h^[14]. 德国于利希研究中心成功运行了 20 kW 平板式电池堆^[15]. 丹麦的托普索公司单独开发了 5 kW 的 SOFC 系统, 并与芬兰瓦锡兰公司合作完成 20 kW 系统的演示示范(<http://www.topsoefuelcell.com/>). 荷兰能源研究中心(Netherlands Energy Research Centre, ECN)也致力于发展平板型

SOFC, 目标为 40 kW 级的 SOFC CHP 系统(<http://www.ecn.nl/news/newsletter-en/2009/october-2009/sofc-performs-better/>).

(iii) 金属支撑结构. 电解质支撑结构 SOFC 的运行温度高、功率密度低; 阳极支撑结构 SOFC 的抗热冲击性不好, 热循环和抗氧化还原循环性能差, 所以人们尝试寻找新的结构和支撑方式, 开发了金属支撑型 SOFC. 这种结构的优点是运行温度低、支撑体稳定, 是目前研究的热点方向, 但是其制备工艺复杂, 技术难度高. 英国的锡里斯公司和丹麦托普索公司, 都开发了千瓦级金属支撑 SOFC 电堆, 并已实现示范运行. 目前美国、德国、韩国、日本等都在开展相应的研究工作.

以上 3 种平板式 SOFC 的主流结构中, 虽然电解质支撑 SOFC 电池堆的长期稳定性好, 并在百千瓦级示范系统中表现出良好的性能, 但是与阳极支撑结构相比, 电解质层内阻大, 需要在更高温度(800~950℃)下运行才能获得需要的性能输出. 过高的运行温度又会带来其他方面的问题. 从电解质支撑转变为阳极支撑, 一定程度上解决了 SOFC 运行温度过高的难题, 但是这种结构又一直存在抗热循环差、阳极材料抗氧化还原循环能力差、长期稳定性差等系列问题. 在阳极支撑电池中通常使用的 Ni 基金属陶瓷阳极材料, 需要在 SOFC 首次启动过程中, 将阳极中的 NiO 还原成 Ni. 因此, 在之后 SOFC 运行过程中, 一直存在着 NiO-Ni 相互转化的动态过程. 在 SOFC 突然中断燃料时, 会导致大量 Ni 向 NiO 转化, 发生体积膨胀, 导致阳极微观结构发生变化, 产生应力, 破坏只有数十微米厚的电解质薄层, 造成电池性能下降或者彻底破坏. 因此, 热循环能力强、适合多次循环启动工作的金属支撑结构 SOFC 在小功率应用领域中具有非常好的发展前景.



图 2 中国矿业大学(北京)研发的电解质支撑单电池

2.2 单电池的形状

目前单电池主要有矩形和圆形 2 种形状. 矩形电池一般有燃料气和空气同向流(co-flow)、异向流(counter-flow)和交叉流(cross-flow)3 种气体导向方式. 而圆形电池一般为燃料气从圆形流场圆心处导入, 在电池边缘与空气混合发生燃烧反应. 比如瑞士苏尔寿海克斯公司(Sulzer Hexis)设计的圆柱形电池堆, 单电池为圆形电解质支撑结构, 连接体为圆形, 流场为放射状通道, 可以为双层连接体设计, 也可以使用单层连接体. 这种电池堆设计的优点是密封难度小、较容易实现电池堆的自热维持操作. 此外, 还有波纹状的单电池, 其优点是自身可形成流道, 可以不使用流场, 从而简化了连接体结构, 但制造难度很高.

2.3 连接体材料

(i) 连接体材料的选择. 连接体材料目前主要有陶瓷和金属合金 2 类. 高温 SOFC 使用高温导电陶瓷作为连接体材料, 如掺杂铬酸镧钙钛矿氧化物. 然而, 陶瓷材料虽然更加耐腐蚀, 可以实现更低的性能衰减, 其导电和导热性能较差, 因此使用耐高温的金属作为连接体材料成为趋势. 中低温 SOFC 可以使用低成本的不锈钢作为连接体材料. 连接体在 SOFC 中的基本功能主要分为两大方面: 一方面在相邻的 2 个电池的电极之间(阴极和阳极之间)起着导电和导热的的作用; 另一方面又起到分隔相邻 2 个单电池阴极中的空气(氧气)和阳极中的燃料气体(氢气)的作用.

SOFC 连接体材料至少具备以下 2 个特性: (1) 导电特性. 对于连接体而言, 在 SOFC 的高温工作环境中必须维持很高的导电性. 连接体在 800℃ 的电导率应不低于 1 S/cm, 这个数值比同温度下的电解质物质 YSZ 的导电率 2×10^{-2} S/cm 大约高 2 个数量级. (2) 热膨胀特性. 连接体的热膨胀系数应和构成 SOFC 的电解质和电极材料的热膨胀系数接近, 这样可以最大限度地降低热循环所发生的热应力. 一般连接体材料的平均热膨胀系数大致在 $(10 \sim 12) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. 而 YSZ 为 $(10 \sim 11) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 镧锶锰氧化物 (LSM) 为 $(10 \sim 12) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 镧锶钴铁氧化物 (LSCF) 为 $(14 \sim 17) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. 通常合金的热膨胀系数较高, 所以开发 SOFC 连接体材料时必需适度调整合金的热膨胀系数.

虽然 SOFC 操作温度的降低使金属成为非常有前途的连接体材料, 然而较高的操作温度还是会造成金属的抗蠕变强度下降, 而且金属材料在氧化气氛中会被氧化导致连接体与电极的接触电阻增大. 此外, 一些含铬金属, 如 Inconel 不锈钢材料还存在铬元素挥发导致阴极材料中毒和降低电池性能的问题. 如果 SOFC 的操作温度进一步降低, 允许使用铁基不锈钢作为连接体材料, 不仅可以解决 Cr 毒化阴极的问题, 降低连接体的材料成本, 还可以降低其加工成本.

(ii) 连接体的流场设计. 在燃料电池连接体的设计中, 流场设计直接影响电池堆的传质阻力. 流场应使电池堆气路的压降达到最小, 同时为电化学反应提供从流道到电极表面均匀分布的反应物气体. 双极板电池堆设计中最常见的流道配置是平行直通、点状、蛇形和交叉梳状配置等设计. 由于蛇形配置的流场和交叉配置的流场通道较长, 有利于提高燃料气的利用率, 但其造成压降较大并且加工成本高. 在平行流场设计中, 流道中压降较小, 但如果一个流道中产生传质障碍将导致剩余流道中气流的重新分布, 使得气体分配不均. 点状配置有利于流场均匀分布, 但对单电池强度要求较高.

(iii) 气路歧管设计. 对于平板式单电池, 流道制作于连接体上或流场板中, 而波纹状的单电池由于自身形成流道, 可以直接使用无流场的平板连接体. 平板式 SOFC 电池堆可以有外歧管和内歧管 2 种气路设计方式^[16,17]. 而内歧管设计中还可分为歧管通过电解质的方式, 也就是直接在单电池上开出气孔形成流腔的设计, 以及歧管通过连接体但不通过电解质的设计, 比如将单电池封接在金属或陶瓷边框上, 通过在边框上开出气孔来传输反应气. 内歧管气路的设计中 2 个气路都需要被封接材料封接, 而外歧管气路可以只进行单侧封接. 与内歧管设计相比, 外歧管设计结构简单、密封容易, 但内歧管设计电池堆结构更加紧凑, 且可任意调整燃料气和空气的不同导气方向, 操作更灵活.

2.4 封接材料

(i) 封接材料的要求. 平板式 SOFC 电池堆需要在较高的工作温度下实现密封. 封接材料的作用为: 防止燃料气和氧化气混合、防止燃料气渗漏、将不同

的组件结合在一起、以及提供电池堆组件之间的绝缘。密封材料需要与被封接组件具有良好的热匹配性，其热膨胀系数需要与进行封接的连接体材料、电解质及电极材料相近。还要具有在还原气氛及氧化气氛中良好的化学及力学稳定性。此外还需要具有好的电绝缘性，尤其是在阳极侧还原气氛中需要具有很好的化学稳定性以免由于封接材料中金属氧化物的还原引起内短路。

(ii) 封接材料的类型。平板式 SOFC 电池堆对封接要求较高，一般涉及到多种不同类型间的组件封接。例如：电池与连接体或电池与边框(陶瓷-金属)、边框与连接体(金属-金属)、边框与绝缘垫片(陶瓷/金属-陶瓷)之间的封接。封接材料主要可分为黏结型和压实型 2 种。(1) 黏结型密封材料由于是靠黏结力将 2 种封接元件结合在一起，因此首先需要具有良好的润湿性。黏结型封料可以分为硬密封和软密封 2 种。硬密封材料在电池堆工作温度下处于刚性状态，封接温度高于电池堆的工作温度，而软密封材料则可保持一定的黏滞状态。硬密封材料需要具有和封接元件相匹配的热膨胀系数，而软密封材料这方面要求相对稍低。目前 SOFC 电池堆中普遍使用玻璃及玻璃-陶瓷材料作为黏结型密封材料，具有润湿性好、成本低、加工容易、组分可调节及使用温度范围宽等优点。然而这种材料同时也存在着脆性、热循环过程中易遭破坏、易与其他元件发生反应以及可能存在易挥发元素毒化电极材料等问题。由熔融填料制备成的金属封料也可实现良好的封接性能，但也存在一些缺陷：首先金属封料需要配合绝缘材料使用，增加了封接的复杂性；其次，满足 SOFC 工作条件要求的金属封接材料并不多。虽然已有报道称 Au 或 Ag 等贵金属可实现良好的封接性能，但成本太高，难以在 SOFC 领域实现重要应用。(2) 压实型封料是通过在密封元件封接面之间施加压力实现密封。压实型封料需要具有高温下较好的弹性，且材料本身要有一定的柔性以消除封接面微观尺度上粗糙不平引起的渗漏。压实型封接材料的优点为对封接元件的热膨胀匹配要求较低，有利于实现较高的热循环性能。这种封料需要在加压下实现密封，对电池堆的设计提出了较高要求，而且普遍需要一些特殊设计来使电池堆在较高工作温度下仍维持一定的封接压力，以维持电池堆的接触电阻能够在在一个较低的水

平。云母及云母基复合材料是比较常用的压实型封接材料。单独的云母封接漏气率较高，于是研究人员通过制备玻璃-云母复合封料来提高封接的气密性，如图 3 所示。压实型封接有利于 SOFC 电池堆实现多次热循环启动，但其长期稳定性仍需要进一步考察。

3 平板式 SOFC 电池堆的成本分析

SOFC的一次发电效率高达50%~65%，相比其他类型燃料电池具有明显的优势。然而，SOFC较高的制造成本一直是阻碍其商业化进程的最大因素。早在1996年，Ippommatsu等人^[18]就根据当时的原材料价格、加工成本、人工以及维护成本评估了几种类型SOFC单电池的制造成本。他们共考察了4种管式结构和2种平板式结构的单电池的成本，电池的活性面积为400 cm²。分析表明，使用等离子喷涂工艺制的，以Ni-YSZ为阳极、YSZ为电解质、LSM为阴极的阳极支撑型单电池的成本约为100 美元/片。SOFC电池堆的操作条件(工作电压、燃料流量等)直接影响发电系统的发电成本。其中降低资本成本需要尽可能提高电池堆的功率，而运营成本的降低则需要提高电池堆的燃料利用率。Khandkar等人^[19]通过数学模型研究了发电系统中一个25 kW平板式电池堆的最适宜操作条件及成本。电池堆的单电池尺寸为15 cm ×15 cm，使用天然气为燃料，寿命设计为5年。模型结果表明电池堆的最佳操作条件为燃料利用率约为60%，单电池的工作电压约为0.55 V，电池堆最低成本为465 美元/kW。Lokurlu等人^[20]分析了燃料电池CHP系统的成本。对于使用西屋公司制造的100 kW 管式电池堆构造的CHP系统，其成本将高达

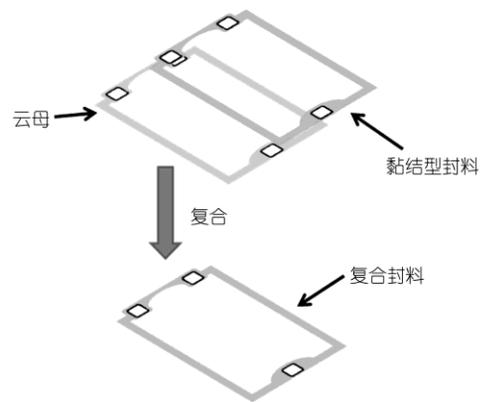


图3 复合型封接材料示意图

20000 欧元/kW, 而传统的燃气 CHP 系统成本仅为 500~1000 欧元/kW. 使用平板式电池堆可以在一定程度上降低电池堆以及发电系统的制造成本. Fontell 等人^[21]针对瓦锡兰公司和托普索公司开发 200 kW 以上的平板式 SOFC CHP 系统的需要, 分析了 250 kW 平板式 SOFC 发电系统的成本, 并与燃气轮机 CHP 系统进行了成本比较. SOFC 系统中主要成本为电池堆、系统控制装置以及动力电子设备(主要为逆变器等等). 其中电池堆的成本所占比例最高, 约占总成本的 31%, 系统控制装置的成本占 17%, 动力电子设备成本占 15%. 电池堆基于丹麦 Risø 国家实验室开发的 2.2 kW 的平板式电池堆, 单电池为阳极支撑结构, 尺寸为 12 cm×12 cm, 采用天然气为燃料, 电池堆为内歧管结构, 燃料气和空气为异向流向. 分析表明, 如果要实现商业应用, 平板式 SOFC 发电系统的投资成本应低于 1500 欧元/kW. 作者分析和比较了 250 kW 平板式 SOFC 发电系统与 300 kW 的燃气轮机发电系统的发电成本. 对于发电开始第 1 年的成本, SOFC 系统已经能够与燃气轮机系统竞争, 其发电成本为 54.4 美元/(MW h), 燃气轮机系统为 47.1 欧元/(MW h). 而 5 年后和 10 年后 SOFC 系统的发电成本低于燃气轮机发电系统, 分别为 42.3 和 36.9 欧元/(MW h), 燃气轮机系统的发电成本分别为 44.3 和

41.6 欧元/(MW h). 平板式电池堆的成本降低主要有扩大产量和设计新型电池堆结构 2 种途径. 最近的研究表明^[22], 如果按照年产量 50000 台计算, 一个 3~10 kW 的 CHP 系统中, SOFC 电池堆的成本为 770~825 美元/kW, 而理论计算估计的电池堆最低成本为 200 美元/kW. 美国能源部制定的 CHP 成本目标为 2015 年时达到 1200 美元/kW, 2020 年时达到 1000 美元/kW. 因此, 将 1~2 kW 的燃料电池 CHP 系统成本目标定为在 2020 年前达到 3000~5000 美元/kW 更具有可行性.

4 平板式 SOFC 电池堆代表性研发单位的技术现状

平板式 SOFC 电池堆技术较成熟的代表性研发单位有 SECA 项目组的德尔福公司、燃料电池能源公司(Fuel Cell Energy, FCE)-Versa 动力系统公司团队、以及非 SECA 项目组的布鲁姆能源公司. 欧洲则有德国于利希研究中心和丹麦的托普索公司-瑞索国家实验室团队. 此外, 还有澳大利亚的陶瓷燃料电池公司、日本的美西电力公司-三菱材料公司(KEPCO-MMC)团队等. 各研究单位的技术比较列于表 1 和 2 中.

表 1 美国平板式 SOFC 电池堆开发单位的技术比较^{a)}

研发单位	电池结构	电池材料			电池堆组件		技术水平(kW)
		阳极	电解质	阴极	连接体	封接材料	
FCE-VPS 团队	阳极支撑	Ni-YSZ	YSZ	BSCNF	Coated Sanergy HTC	压实型	25
德尔福公司	阳极支撑	Ni-YSZ	YSZ	SDC/LSCF	-	玻璃陶瓷型	25
布鲁姆能源公司	电解质支撑	Ni-ScSZ	ScSZ	-	Plansee CFY	-	100

a) “-”表示没有公开可以查询到相关数据

表 2 欧洲平板式 SOFC 电池堆开发单位的技术比较

研发单位	电池结构	电池材料	功率	电池堆效率 (%)	温度 (°C)	衰减率 (/1000 h)	寿命 (h)
于利希研究中心	阳极支撑	Ni-YSZ/YSZ/CGO/LSCF, LSM	100 W~15 kW		700	0.3%	>10000
锡里斯动力公司	金属支撑	Ni-CGO/CGO/YSZ/LSCF	~1 kW		500~600	N/A	
苏尔寿海克斯公司	电解质支撑	Ni-YSZ/YSZ/LSM	1.27 kW	38 DC, 33 AC	900	1.3%	>4500
托普索公司	阳极支撑	Ni-ScSZ/ScSZ/LSCF	1~3 kW		700	0.5%	~1000
SOFC 能源公司/ HT Ceramix	阳极支撑	Ni-YSZ/YSZ/LSM, LSCF	5 kW	65 LHV	750	0.3%	3000
凯尔福/H. C. Starck	电解质支撑	Ni-GDC ^{a)} /ScSZ/YSZ-LSM			850	0.5%	-

a) GDC/CGO, 氧化钪掺杂的氧化铈

4.1 布鲁姆能源公司

布鲁姆能源公司的 SOFC 技术起源于 NASA 的火星计划项目, 该公司主要由风险基金建立, 以研发 SOFC 发电机为目标, 是目前 SOFC 电池堆领域中走在商业化最前端的单位之一. 由于布鲁姆能源公司不属于 SECA 项目组, 其公开技术报道很少, 许多技术细节尚未公开. 目前该公司已开发出商业化的 100 kW 发电机, 2011 年装机容量达到 4 MW. 布鲁姆公司开发的家用 Bloom Box 在 2010 年引起了巨大反响. Google 就是它的第 1 个客户. Ebay 公司自 2009 年夏季开始一直在运行 Bloom Box 为其供电. 目前加州已有 20 家高科技公司已经用上了它生产的电池, 如: Ebay, 美国银行(Bank of America), 奥多比(Adobe), 沃尔玛(Walmart), 加州理工(Caltech), 消防基金会(Fireman's Fund)等. 该公司的公开资料显示, 其开发的平板式电池堆使用电解质支撑的单电池, 在电解质上直接开出气孔形成内歧管气路结构. 最近, 苹果的北卡罗来纳州数据中心(North Carolina data center)也计划使用布鲁姆公司的发电模块提供电能. 布鲁姆公司开发的 Energy Server 发电系统使用天然气或生物质气工作, 如功率为 200 kW 的 ES-5700 型 Energy Server 发电系统(<http://www.bloomenergy.com/fuel-cell/es-5700-data-sheet/>), 发电系统仅提供电能, 较 CHP 系统简单, 发电效率高达 50%.

4.2 德尔福汽车系统公司(Delphi Automotive System)

德尔福汽车系统公司主要研发 3~5 kW 的阳极支撑平板式 SOFC 电池堆以及发电系统, 用于小型固定电源及辅助动力装置. 该公司使用传统材料和工艺制备阳极支撑型 Ni-YSZ/YSZ/SDC/LSCF(YSZ, 钐掺杂氧化铈)单电池. 电池堆使用新型的卡带盒式结构, 由平板式单电池、带有流腔孔的金属边框和分隔板密封在一起组成 1 个盒式单元, 若干个单元组合成电池堆. 电池堆每英寸高度可含有 5~10 个重复单元. 这种电池堆具有质量轻、体积小等优点. 德瑞福开发的电池堆模块由 30 个单电池组成, 功率达到 1 kW, 体积仅为 3.5 L, 重量为 13 kg. 德瑞福在车用 APU 的 SOFC 电源方面取得了成功. 2008 年, 德尔福的车载 APU 在 386 重型卡车上装机并试运行成功, 为车载 SOFC 的商业化应用奠定了基础. 美国能源部(DOE)

将与德尔福及其伙伴企业——美国 Battelle 研究所共同开发和测试能够以低成本量产, 面向商用及军用汽车的 SOFC 辅助电源装置, 2006~2010 年之前有望投产面向军用目的及轿车、卡车和家用的 SOFC 辅助电源装置. 德尔福公司已将电池堆成功地整合到辅助动力装置中用来驱动彼得比尔特(Peterbilt)牌 384 型卡车. 该装置可产生 1.5 kW 峰值功率, 系统效率达到 25%, 已运行 440 h, 行驶 3543 km^[23,24].

德尔福公司开发的第 3 代电池堆使用阳极支撑电池, 阳极材料为 Ni-YSZ, 电解质为 YSZ, 阴极为 LSCF, 电池为矩形, 尺寸为 144 mm × 98 mm, 厚度为 550 μm^[23]. 最近, 德尔福开始研发第 4 代电池堆^[24]. 第 4 代电池堆使用大尺寸单电池, 电池尺寸为 300 mm × 158 mm, 厚度和第 3 代电池一样. 电池堆使用稀释的氢气为燃料, 工作温度为 750 °C. 由 25 片单电池组装的电池堆功率达到 5.064 kW(@0.81V), 由 40 片单电池组装的电池堆功率为 7.45 kW, 燃料利用率可达到 80%, 与第 3 代单电池性能接近, 表明德尔福公司拥有非常成熟的电池堆放大技术. 在 2003 年, 该公司使用煤气化气体为燃料, 供给 1 个 5 kW 的电池堆连续工作 75 h 以上. 目前, 德尔福和联合技术动力公司合作建造 25 kW 以及更高功率的电池堆, 用于以煤或者其他碳氢化合物为燃料工作的兆瓦级常压 IGFC 发电系统.

4.3 德国于利希研究中心

德国于利希研究中心自 1990 年开始 SOFC 电池堆及系统的研发, 是欧洲 SOFC 研发领域的领导者. FZJ 已开发出几代不同结构的电池堆, 组装和测试了超过 430 个从 100 W~15 kW 级的平板式 SOFC 电池堆. 于利希研究中心的目标为提高平板式电池堆的寿命和热循环耐受性, 提高电池堆的性能, 降低工作温度, 深入理解性能衰减机理. 该中心开发的电池堆已实现 30000 h 的连续工作, 是目前公开报道中平板式 SOFC 电池堆最高的连续工作时间. 其衰减率为在 700 °C 下, 以 500 mA/cm² 工作时, 电压衰减 10 mV/1000 h. 传统的发电技术如燃气轮机 and 燃气发动机使用寿命约为 25000 和 60000 h, 因此于利希研究中心认为平板式 SOFC 发电系统具有很好的竞争能力^[25]. 于利希研究中心研发阳极支撑结构的 Ni-YSZ/YSZ/LSM(LSCF)单电池, 使用 Ba(Ca)系硅酸盐玻璃作为封料, Crofer22APU 为连接体材料. 电池主要采

用较高成本的物理气相沉积(PVD)工艺制备,为了降低成本,于利希研究中心还考察了化学气相沉积(CVD)、滚压、喷涂、浸渍、旋涂等工艺,试图在高成本工艺带来的电池高性能与降低成本之间达到平衡。于利希研究中心在2000年报道了E型和F型2种电池堆结构^[26]。在E型结构中,使用厚板金属连接体,流道通过机械加工于连接体的两侧。单电池封接在金属边框上,然后将边框焊接于连接体上构成电池堆,气体导向为异向流。在F型设计中,使用与E型设计相同的异向流气体导向和内歧管气路结构。但是使用薄板连接体,省略了燃料侧的流道,燃料气通过Ni网布气。Ni网布气造成的压降仅为E型结构压降的2倍,处于可接受的范围之内。在F型结构中,金属边框不再通过焊接工艺密封于连接体上,而是使用同样的玻璃-陶瓷封料镶于连接体上。这种F型电池堆结构相比E型结构重量更轻,制造工艺简化,因而成本得到降低。目前于利希中心正在进行面向辅助动力装置的轻重量G型电池堆的开发^[26]。G型电池堆使用卡带式结构,连接体使用薄板通过冲压工艺制成,边框和连接体通过焊接方式密封在一起,构成1个卡带盒单元。由于进一步降低了连接体和边框的厚度,电池堆的重量降低了90%,制备工艺简化,成本得到大幅度降低。于利希研究中心目前主要进行提高电池堆稳定性和开发新材料的研发工作。在2004年开发了由60片单电池组装的平板式电池堆。单电池尺寸为20 cm×20 cm。使用氢气为燃料时功率达到13.3 kW,以甲烷为燃料时功率为11.9 kW^[26]。

4.4 燃料电池能源公司——Versa 动力系统公司团队

Versa 动力系统公司一直致力于低成本的中温阳极支撑型平板式SOFC电池堆的研发,与燃料电池能源公司一起为SECA项目研发大功率SOFC发电系统。VPS公司的平板式电池堆技术已趋于成熟,电池堆采用内歧管设计,燃料气和空气为交叉流方向。目前VPS的主要目标是进一步提高电池堆的寿命、降低衰减率以及降低电池堆的工作温度。最近VPS使用10 cm×10 cm尺寸阳极支撑单电池组装的电池堆在650℃条件下,功率密度达到0.4 W/cm²^[27]。为了降低成本,电池堆使用YSZ电解质、Ni阳极、铁基不锈钢等传统材料,使用适合于大批量生产的流延、丝网印刷、以及连续烧结工艺制造。电池堆功率水平为20

kW级,目前VPS的目标主要是提高电池堆的使用寿命和降低工作温度。单片电池堆在750℃,500 mA/cm²电流密度下可连续工作9000 h,电压衰减为3.1 mV/1000 h,衰减率约为0.36%/1000 h。1 kW级的电池堆实现了13000 h的连续工作,电池堆工作温度为670℃,电流密度为372 mA/cm²,电压衰减为3.5 mV/1000 h,衰减率为0.43%/1000 h。为了进一步降低成本,VPS公司研发了25 cm×25 cm的大尺寸单电池(活性面积为550 cm²),并组装了一个含有32片单电池的电池堆。以213 A(0.387 A/cm²)连续工作了7500 h,电压衰减为8.2 mV,衰减率为0.95%/1000 h。目前1个20 kW级的电池堆正在测试中,已连续工作2000 h^[27]。

4.5 丹麦托普索公司-丹麦科技大学-瑞典索国家实验室团队

丹麦的托普索燃料电池公司与丹麦科技大学、瑞典索国家实验室合作,自1989年开始共同研发电池堆材料,单电池以及使用金属连接体的高性能、长寿命、高耐受性的平板式电池堆。主要目标是提高现有阳极支撑电池结构的电池堆技术水平和开发下一代SOFC电池堆。其下一代电池堆主要采用金属支撑结构和纳米电极技术,以提高其使用寿命和热循环耐受性。该团队已开发出几代阳极支撑型单电池,目前为2.5代,其相比于2代单电池的变化为使用LSCF代替LSM为阴极材料,GDC作为阻挡层,降低了电池的工作温度。为了降低成本,还使用了流延、喷涂和丝网印刷来制备单电池。2.5代单电池(12 cm×12 cm)已在电池堆中测试了稳定性。电池堆可以在750℃,以220 mA/cm²电流密度连续工作10000 h以上,电压衰减为7 mV/1000 h。下一代的金属支撑电池采用氢气气氛中共烧结和浸渍活性电极的工艺制备,电池工作温度为650~700℃。经过测试,一个5 cm×5 cm的金属支撑电池在650℃可以连续工作3000 h,衰减率为1%/1000 h。该团队还进行了平板式SOFC小型CHP系统的开发和示范工作,所开发的PowerCore样机为1.4 kW级,直流发电效率达到60%(LHV),已经成功通过丹麦“小型CHP项目”的测试。目前托普索团队正在进行更大功率的SOFC发电模块的研发。托普索和瓦锡兰公司合作开发了由24个电池堆组装的20 kW级发电系统样机。以甲醇工作的样机作为船用辅助动力系统实现了在严酷操作

条件下 1250 h 的寿命, 而使用生物质气工作的寿命可达到 2000 h 以上^[28]. 托普索团队的近期目标是发展民用 CHP 系统的商业化, 以及发展大型 CHP 系统.

4.6 瑞士苏尔寿海克斯公司

苏尔寿海克斯公司主要致力于开发基于 SOFC 的小型 CHP 系统(Micro-CHP), 至今已有超过 15 年的 SOFC 研发经验, 该产品命名为 Galileo 1000N. 目前该公司已为客户安装测试了超过 60 个 Galileo 1000N 型系统, 使用寿命可达 28000 h. 在 2010 年初, 苏尔寿海克斯进一步提高了单电池性能, 系统的交流发电效率可达 30%~35%, 热和电的总效率达到 90%(LHV). 该公司使用的单电池为电解质支撑结构, 电池为圆形, 使用金属连接体, 电池和连接体从中心开孔导气. 电池堆的工作温度为 850~900℃. 天然气经过部分氧化转化后从中心通入电池, 预热的空气从连接体外沿通入^[29]. 反应后的燃料气在电堆周围进行燃烧, 为电池堆提供热, 这一设计简化了密封工艺和系统的热管理. 苏尔寿海克斯公司计划于 2013 年将 CHP 系统推向市场. Galileo 1000N 系统在实地现场测试中, 因为频繁的重复启动操作, 该系统仅实现了 2000~3000 h 的使用寿命. 在实验室测试条件, 该系统实现了 28000 h 的连续工作, 其中热循环 8 次, 衰减率为 1.8%/1000 h.

4.7 英国锡里斯公司

英国锡里斯公司主要开发金属支撑型 SOFC 电池堆及发电系统, 电池堆采用掺杂氧化铈为电解质, 工作温度为 550~600℃. 以增湿氢气为燃料时, 550℃ 和 600℃ 下的功率密度分别可达 0.24 和 0.31 W/cm². 以模拟重整气为燃料时, 600℃ 时的功率密度达到 0.25 W/cm²^[30]. 金属支撑型 SOFC 电池堆最显著的优点是成本低、热启动快(仅需 13 min), 耐热循环和氧

化还原循环性能好, 25 次热冲击和 7 次氧化还原循环后仅有 3% 的性能衰减. 目前锡里斯公司正致力于使用天然气为燃料的家用 Micro-CHP 系统. 该公司开发的小型 CHP 系统采用壁挂式, 可以非常方便地接入普通民用天然气网络, 提供中央供暖、热水和电能, 能够满足一般英国家庭的需要. 每年可节省 25% 的能源成本和减排 1~2 t 的 CO₂(<http://www.cerespower.com/ProductOverview/ResidentialCHP/>). 锡里斯公司开发的燃料电池模块(fuel cell module, FCM)主要由电池堆、空气预热器、尾气燃烧器和燃料处理器组成. 该公司于 2010 年 9 月展示了 Micro-CHP 系统, 安装在厨房内, 体积小巧、适合民用, 并已达到欧洲产品安全要求. 2011 年, 锡里斯组装并实地测试了 4 组该型号 CHP 单元, 然而这些单元的衰减率较高, 为 3%/100 h^[30].

5 平板式 SOFC 电池堆亟待解决的问题

在推动 SOFC 商业化的进程中, 平板式 SOFC 电池堆主要面临降低成本和延长使用寿命两大技术瓶颈. 2007 年 SECA 完成了第一期目标, 针对不同结构的 SOFC 展示了相应的示范发电系统, 达到了成本指标(<800 美元/kW). 目前, SECA 项目已进展到第二期, 主要针对工程放大和进一步降低成本(<400 美元/kW), 达到 SECA 第二期目标后将有望全面推动 SOFC 发电系统实现商业化. 现阶段平板式 SOFC 电池堆亟待解决的问题主要为以下几方面: (1) 进一步降低单电池和连接体的制造成本, 优化金属连接体的耐高温性能; (2) 提高阳极支撑单电池的稳定性, 降低电池长期工作的性能衰减; (3) 解决金属连接体长期运行中的氧化腐蚀以及有害元素对电池的毒化问题; (4) 进一步提高封接材料的密封性能, 开发可在较低压力和温度下实现密封的高温封接材料, 提高燃料利用率; (5) 提高平板式电池堆的多次热循环启动能力, 降低启动时间.

参考文献

- 1 Baur E, Preis H. Ueber brennstoff-ketten mit festleiter-tern. *Z Elektrochem*, 1937, 43: 727-732
- 2 Surdoval W A. SOFC development in the USA. In: Steinberger-Wilckens R, Bossel U, eds. *Proceedings of the 8th European Solid Oxide Fuel Cell Forum*. Lucerne, Switzerland, 2008. B0106
- 3 Vora S D. Recent developments in the SECA program. In: Singhal S, Eguchi K, eds. *Solid Oxide Fuel Cells 12 (SOFC XII)*. Pennington: Electrochemical Society Inc., 2011. 35: 3-9

- 4 Hosoi K, Ito M, Fukae M. Status of national project for SOFC development in Japan. In: Singhal S, Eguchi K, eds. Solid Oxide Fuel Cells 12 (SOFC XII). Pennington: Electrochemical Society Inc., 2011. 35: 11–18
- 5 Rietveld B. SOFC development in Europe. In: Steinberger-Wilckens R, Bossel U, eds. Proceedings of the 8th European Solid Oxide Fuel Cell Forum. Lucerne, Switzerland, 2008. B0105
- 6 Steinberger-Wilckens R. European SOFC technology-status and trends. In: Singhal S, Eguchi K, eds. Solid Oxide Fuel Cells 12 (SOFC XII). Pennington: Electrochemical Society Inc., 2011. 35: 19–29
- 7 Borglum B. Development of solid oxide fuel cells at versa power systems. In: Steinberger-Wilckens R, Bossel U, eds. Proceedings of the 8th European Solid Oxide Fuel Cell Forum. Lucerne, Switzerland, 2008. B0303
- 8 Foeger K. SOFC micro-CHP of ceramic fuel cell Ltd-products for today. In: Steinberger-Wilckens R, Bossel U, eds. Proceedings of the 8th European Solid Oxide Fuel Cell Forum. Lucerne, Switzerland, 2008. B0202
- 9 Minh N Q. Ceramic fuel cells. *J Am Ceram Soc*, 1993, 76: 563–588
- 10 Singhal S C, Kendall K. 韩敏芳, 蒋先锋, 译. 高温固体氧化物燃料电池——原理、设计和应用. 北京: 科学出版社, 2007. 309–331
- 11 毛宗强, 王诚. 低温固体氧化物燃料电池. 上海: 上海科学技术出版社, 2012. 267–280
- 12 Crawley G, Munroe N. Solid oxide fuel cells (SOFC). *Fuel Cell Today*, 2007, 1–16
- 13 Kerr R. Delphi SOFC stack development update. In: 2009 SECA Annual Review Meeting. Pittsburgh, PA, USA, 2009. 1–30
- 14 Borglum B, Tang E, Pastula M. Development of solid oxide fuel cells at versa power systems. *ECS Trans*, 2011, 35: 63–69
- 15 Steinberger-Wilckens R, Blum L, Buchkremer H P, et al. Recent results in solid oxide fuel cell development at Forschungszentrum Juelich. *ECS Trans*, 2009, 25: 213–220
- 16 Minh N Q, Horne C R. Apparatus and method of fabricating a monolithic solid oxide fuel cell. US Patent, 5162167, 1992-11-10
- 17 Minh N Q, Stillwagon T L. Monolithic solid oxide fuel cells with integral manifolds. US Patent, 5256499, 1993-10-26
- 18 Ippommatsu M, Sasaki H, Otoshi S. Evaluation of the cost performance of the SOFC cell in the market. *Int J Hydrog Energ*, 1996, 21: 129–135
- 19 Khandkar A, Hartvigsen J, Elangovan S. A techno-economic model for SOFC power systems. *Solid State Ionics*, 2000, 135: 325–330
- 20 Lokurlu A, Grube T, Hohlein B, et al. Fuel cells for mobile and stationary applications-cost analysis for combined heat and power stations on the basis of fuel cells. *Int J Hydrog Energ*, 2003, 28: 703–711
- 21 Fontell E, Kivisaari T, Christiansen N, et al. Conceptual study of a 250 kW planar SOFC system for CHP application. *J Power Sources*, 2004, 131: 49–56
- 22 Naimaster I V E J, Sleiti A K. Potential of SOFC CHP systems for energy-efficient commercial buildings. *Energy Build*, 2013, 61: 153–160
- 23 Steinberger-Wilckens R, Blum L, Buchkremer H, et al. Recent results in solid oxide fuel cell development at forschungszentrum juelich. In: Singhal S, Eguchi K, eds. Solid Oxide Fuel Cells 12 (SOFC XII). Pennington: Electrochemical Society Inc., 2011. 35: 53–60
- 24 Mukerjee S, Haltinera K, Kerra R, et al. Solid oxide fuel cell development: Latest results. *ECS Trans*, 2007, 7: 59–65
- 25 Mukerjee S, Haltiner K, Kerr R, et al. Latest update on delphi's solid oxide fuel cell stack for transportation and stationary applications, In: Singhal S, Eguchi K, eds. Solid Oxide Fuel Cells 12 (SOFC XII). Pennington: Electrochemical Society Inc., 2011. 35: 139–146
- 26 Steinberger-Wilckens R, De Haart L G J, Vinke I C, et al. Recent results of stack development at forschungszentrum julich. In: Nigel S, Alevtina S, Oleksandr V, eds. Fuel Cell Technologies: State and Perspectives. New York: Springer-Verlag, 2005. 202: 123–134
- 27 Borglum B, Tang E, Pastula M. Development of solid oxide fuel cells at Versa Power Systems. In: Singhal S, Eguchi K, eds. Solid Oxide Fuel Cells 12 (SOFC XII). Pennington: Electrochemical Society Inc., 2011. 35: 63–69
- 28 Christiansen N, Holm-Larsen H, Primdahl S, et al. Recent progress in development and manufacturing of SOFC at Topsoe Fuel Cell A/S and Risø DTU. In: Singhal S, Eguchi K, eds. Solid Oxide Fuel Cells 12 (SOFC XII). Pennington: Electrochemical Society Inc., 2011. 35: 71–80
- 29 Mai A, Iwanschitz B, Weissen U, et al. Status of hexis' SOFC stack development and the galileo 1000 n micro-CHP system. In: Singhal S, Eguchi K, eds. Solid Oxide Fuel Cells 12 (SOFC XII). Pennington: Electrochemical Society Inc., 2011. 35: 87–95
- 30 Leah R, Bone A, Selcuk A, et al. Development of highly robust, volume-manufacturable metal-supported SOFCs for operation below 600°C. In: Singhal S, Eguchi K, eds. Solid Oxide Fuel Cells 12 (SOFC XII). Pennington: Electrochemical Society Inc., 2011. 35: 351–367

The recent progress of planar solid oxide fuel cell stack

SONG ShiDong¹, HAN MinFang¹ & SUN ZaiHong²

¹ Union Research Center of Fuel Cell, School of Chemical & Environment Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

² Suzhou Hua Tsing Power Sci & Tech Co., Ltd., Kunshan 215313, China

Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs) represent an attractive technology for the conversion of chemical to electrical energy because of their high efficiencies and low environmental impact. Additionally, they also have good fuel flexibility and long-term stability, which could direct utilize the hydrocarbon fuels and contribute to the more sparing utilisation of remaining fossil fuel reserves. Thus, they have been regarded as one of the most promising green power generation system in the near future. SOFC stacks are the key components of SOFC power generation system. Planar SOFC stack fabricated by assembling the planar single cells in series have the advantages of short current route and thereby of the low ohmic cell resistance, high power density and performance, simple structure, relatively easy fabrication process and low cost. However, it still has drawbacks of difficult sealing technique, low thermal cycle stability and high performance degradation. In this paper, the recent progress of the research and development on planar SOFC single cells and stacks are comprehensively reviewed, including the materials and structures of single cells, sealing strategy and types of sealants, design and materials of interconnects and the design and assembly of the stacks. The state of the art technologies and the current achievements of the companies and institutes which take the lead in SOFC field are introduced as well. Finally, some key issues need to be addressed for promoting the commercialization processes of planar SOFC stacks are put forward.

solid oxide fuel cell, stack, power generation system, planar, hydrocarbon fuels

doi: 10.1360/972013-318