

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.004

# 基于固体氧化物燃料电池的高效清洁发电系统

曹静<sup>✉</sup>, 王小博, 孙翔, 罗志斌

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 固体氧化物燃料电池 (SOFC) 是一种尖端技术, 可通过电化学反应将碳氢燃料中的化学能转化为电和热, 具有燃料来源广、发电效率高、余热品质高、运行安静、排放低、可模块化安装等优点, 是实现化石能源高效清洁利用的有效途径之一。[方法] 文章阐释了 SOFC 发电原理, 介绍了国内外 SOFC 技术和产业化现状, 分析了基于 SOFC 的分布式热电联供、联合循环发电以及煤气化燃料电池发电技术 (IGFC) 新一代发电系统应用场景。[结果] 通过燃料电池发电技术路线和产业化现状研究, 浅析了目前存在的问题, 并结合我国资源禀赋和对高效清洁发电装置的市场需求, 对该领域的未来发展趋势进行了展望。[结论] 对比国内外在 SOFC 领域的技术差距, 基于国内在 SOFC 电堆核心材料方面的优势, 加大对 SOFC 系统集成技术攻关, 为新一代以高温燃料电池为核心的清洁高效发电产业奠定基础。

**关键词:** 固体氧化物燃料电池; 联合循环; 煤气化燃料电池发电技术

中图分类号: TK91; P754.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)02-0028-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## High-efficiency Clean Power Generation System Based on Solid Oxide Fuel Cell

CAO Jing<sup>✉</sup>, WANG Xiaobo, SUN Xiang, LUO Zhibin

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] Solid oxide fuel cell (SOFC) is a high-tech product that can convert chemical energy in hydrocarbon fuel into electrical and heat through electrochemical reaction. The advantages of fuel flexibility, high efficiency, high quality heat, silent operation, low emission and modular installation make SOFC one of the effective ways to achieve efficient and clean utilization of fossil energy. [Method] The article explained the principle of SOFC power generation, introduced the domestic and foreign SOFC technology and industrialization status, and analyzed the application scenarios of SOFC-based distributed combined heat and power, combined cycle power generation, and new generation integrated gasification fuel cell cycle (IGFC) power generation system. [Result] Through the SOFC power generation technology route and industrialization research, the existing problems are analyzed, considering China's resource endowment and demand for efficient and clean power generation devices, the future development trends in this field are prospected. [Conclusion] Compared with the domestic and foreign SOFC technology gap, based on the domestic advantage in the core materials of SOFC stacks, the SOFC system integration technology should be strengthened to lay a foundation for the new generation of clean and efficient power generation industry centered on SOFC.

**Key words:** SOFC; combined cycle; IGFC

## 0 引言

燃料电池发电技术是氢能高效利用的重要内容和理想手段。作为继水电、火电和核电之后能持续

产生电力的第四种连续发电方式, 燃料电池是一种清洁、高效的能量转换装置, 通过电化学反应将化学能直接转换成电能, 避开传统的燃烧做功发电模式, 不受卡诺循环限制, 兼具效率高、排放低、安全无噪音等优点。根据电解质的不同, 燃料电池可分为五大类: 质子交换膜燃料电池 (PEMFC)、碱性燃料电池 (AFC)、磷酸燃料电池 (PAFC)、熔

收稿日期: 2020-05-18 修回日期: 2020-06-19

基金项目: 中国能建广东院科技项目“氢能和燃料电池关键技术”(EV05021W)

融碳酸盐燃料电池 (MCFC) 和固体氧化物燃料电池 (SOFC)。其中 SOFC 是高温燃料电池, 在高效发电的同时产生高品质热源, 被誉为 21 世纪最具前景的绿色发电系统<sup>[1]</sup>。

## 1 固体氧化物燃料电池发电原理及特点

### 1.1 SOFC 发电原理

SOFC 的反应温度在 650~950 ℃, 能量转换是通过电极上的电化学反应来进行的, 其工作原理如图 1 所示。电解质采用固体氧化物陶瓷 (通常为氧化锆) 介质, 起传递 O<sup>2-</sup> 离子及分离空气和燃料的双重作用; 电堆阳极燃料来自碳氢化合物重整后的氢气, 通过阳极的多孔结构扩散到阳极与电解质的界面; 电堆阴极持续通入空气, 具有多孔结构的阴极表面吸附氧, 由阴极本身的催化作用, 使 O<sub>2</sub> 得到电子变为 O<sup>2-</sup> 进入电解质固体离子导体, 由浓度梯度引起扩散, 到达阳极界面, 与阳极燃料发生反

应, 失去的电子通过外电路回到阴极, 发出电能<sup>[2]</sup>。

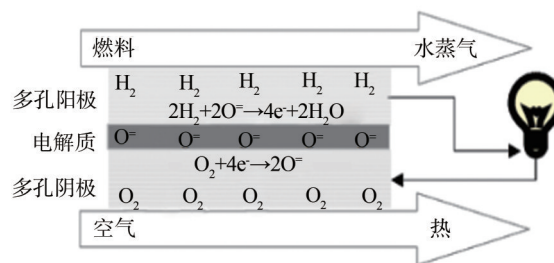


图 1 SOFC 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of SOFC

SOFC 系统可分为电堆 (Stack) 和外围 BOP (Balance of Plant) 辅助单元。电堆是燃料电池核心, 是将化学能直接转化电能的装置。围绕电堆的外围辅助单元有空气供给预热单元、燃料供给 (重整) 单元、尾气回收单元、电管理单元以及控制单元, 如图 2 所示<sup>[3]</sup>。

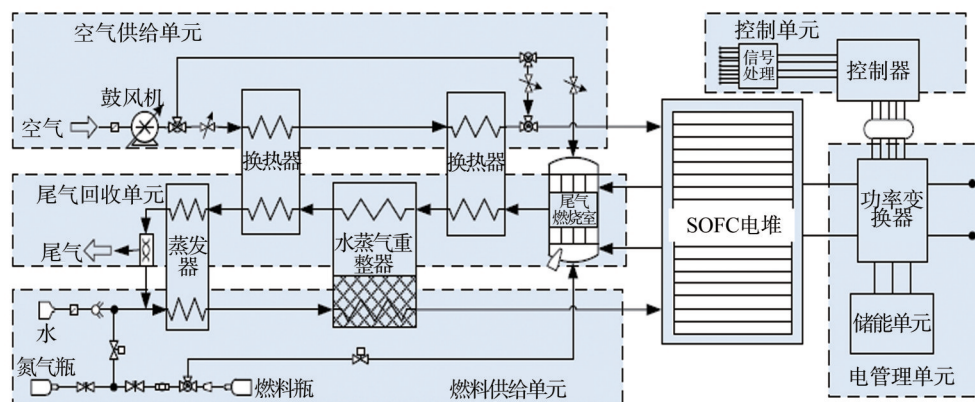


图 2 固体氧化物燃料电池发电系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SOFC generation system

### 1.2 SOFC 的种类

SOFC 的单元组件设计形式大体分为两类, 即管式结构和平板式结构。管式设计由于良好的密封性能而具有长期运行稳定的特点, 而平板式设计由于电流路径短而具有高的功率密度, 两种设计各有优点, 可根据不同的应用场景选择 SOFC 的设计类型<sup>[4]</sup>。

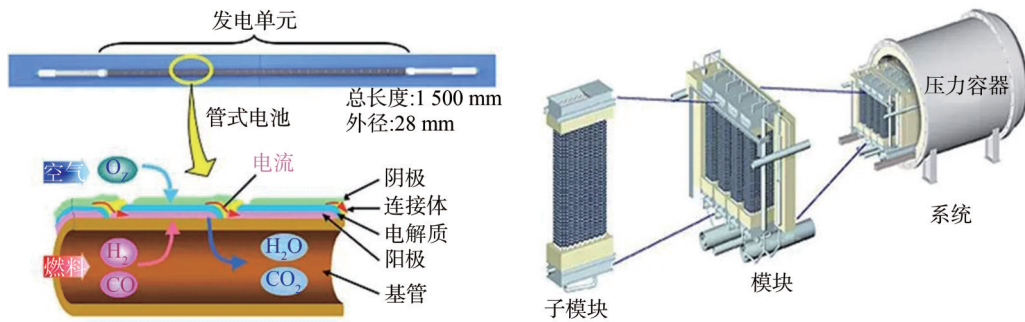
#### 1.2.1 管式 SOFC

管式结构 SOFC 是最早发展的一种形式, 也是目前较为成熟的一种形式, 其发电单元和系统集成如图 3 所示。单电池由一端封闭、一端开口的管子构成。最内层是多孔支撑管, 由里向外依次是阳

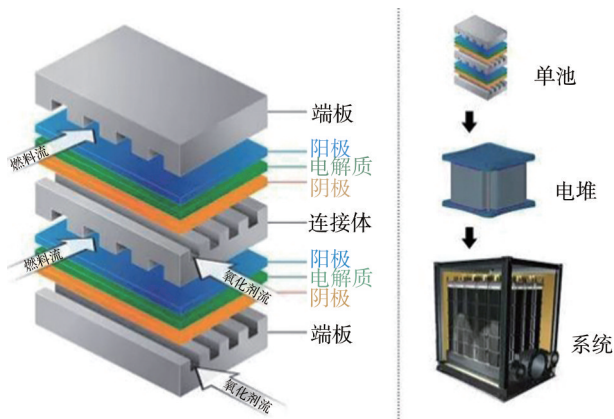
极、电解质和阴极薄膜。燃料从管芯输入, 空气通过管子外壁供给。管式 SOFC 电池堆单体自由度大, 不易开裂; 采用多孔陶瓷作为支撑体, 结构坚固; 电池组装相对简单, 容易通过电池单元之间并联和串联组合成大功率的电池组。但是管式 SOFC 电极之间的间距大, 电流通过电池的路径较长, 内阻损失大, 因此相应的功率密度较低<sup>[5]</sup>。

#### 1.2.2 平板式 SOFC

平板式结构 SOFC 的几何形状简单, 由阳极、电解质、阴极薄膜组成单体电池, 两边带槽的连接体连接相邻阴极和阳极, 并在两侧提供气体通道,

图3 管式SOFC发电单元和系统集成<sup>[6]</sup>Fig. 3 Tubular SOFC power generation unit and system integration<sup>[6]</sup>

同时隔开两种气体，如图4所示。平板式SOFC电池结构和制备工艺简单，从而可以大大降低制造成本<sup>[6]</sup>。但是平板式SOFC电池组件边缘要求耐高温密封来隔离氧气和燃料气；对双极连接板材料要求很高，需要与电极材料热匹配、具有良好的抗高温氧化性能和导电性能<sup>[7-8]</sup>。

图4 平板式SOFC发电单元和系统集成<sup>[6]</sup>Fig. 4 Planar SOFC power generation unit and system integration<sup>[6]</sup>

### 1.3 SOFC的特点

#### 1.3.1 高效

SOFC与传统做功发电技术（内燃机和燃气轮机）的不同之处在于，SOFC通过电化学方式转换燃料的化学能，直接产生电能，避免了燃烧步骤以及将热量转化为机械功来驱动发电机的过程。与低温燃料电池相比，其高温反应产生的高品质热源可有效利用，提高综合应用效率。SOFC的净发电效率在50%~60%之间。并且SOFC发电效率不受规模大小限制，已实验证明千瓦级SOFC发电系统也可达到60%的净发电效率，在小规模分布式发电应用

中有得天独厚的优势。大规模超超临界燃煤火力发电效率40%左右，F级联合循环燃气轮机发电效率可到达60%，但对于MW级小型燃机，离开联合循环，发电效率很难高于45%。

#### 1.3.2 燃料来源丰富

由于SOFC工作温度高（650~950℃），低分子量烃可以在内部进行重整，通过简单的调节和脱硫处理，可以使用天然气，生物沼气，乙醇，甲醇，丙烷，焦炉气，煤层气、LPG（液化石油气）等作为燃料。

#### 1.3.3 运行安静

SOFC发电的电化学原理，除了风机、泵等BOP辅助系统设备的运行轻微噪声外，无大功率发电转动设备，可以安装在工作、生活和休闲等区域，基本上无振动和无噪音污染。

#### 1.3.4 固态电解质电堆

SOFC是以固体氧化物（陶瓷）作为电解质，不需要贵金属作催化剂（相对于PEMFC），无液态熔盐介质（与MCFC相比）的热腐蚀<sup>[7]</sup>。对不同燃料的耐受能力比较高，故电池系统结构简单，运行寿命长，规模化生产成本较低。预计当SOFC年产量规模到达2.5GW/年时，单位千瓦建设成本约5680元。

#### 1.3.5 低排放

SOFC发电是电化学反应过程，避免了高温燃烧产生的NO<sub>x</sub>排放；燃料是反应前脱硫，反应尾气无SO<sub>x</sub>排放。由于SOFC发电效率高，相同的发电量所需的一次燃料更少，这意味着更少的CO<sub>2</sub>排放到大气中，图5给出了单位千瓦时发电量，SOFC发电过程相对于传统燃烧做功发电CO<sub>2</sub>排放量对比。

#### 1.3.6 模块化结构

SOFC采用模块化接收设计，安装灵活，占地面积小，建设周期短。

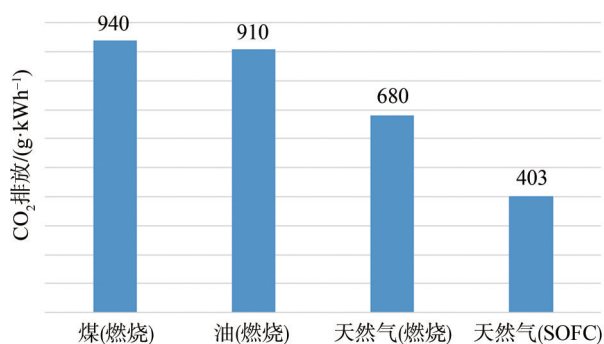


图 5 单位 kWh 发电量 CO<sub>2</sub> 排放量对比

Fig. 5 Comparison of CO<sub>2</sub> emissions per kWh power generation

## 2 SOFC 发电系统应用场景

### 2.1 家庭用固定式小型热电联产(m-CHP)

SOFC 可用于家庭固定式小型热电联产 (m-CHP, 1 kW~5 kW), 利用已有天然气管网, 通过 SOFC 实现热电联供, 减少电能传输损失, 提供家庭用热, 大大提高燃料直接利用效率, 综合效率达 90% 以上<sup>[9]</sup>, 如图 6 所示。日本和德国家庭用固定式小型热电联产装置已经做到初步商业化。日本的 ENE-FARM 计划销售量已达 20 万套以上, 其中 SOFC 比例逐年提高。日本 2020 年奥运村宿舍, 就是采用 SOFC 热电联供方式。

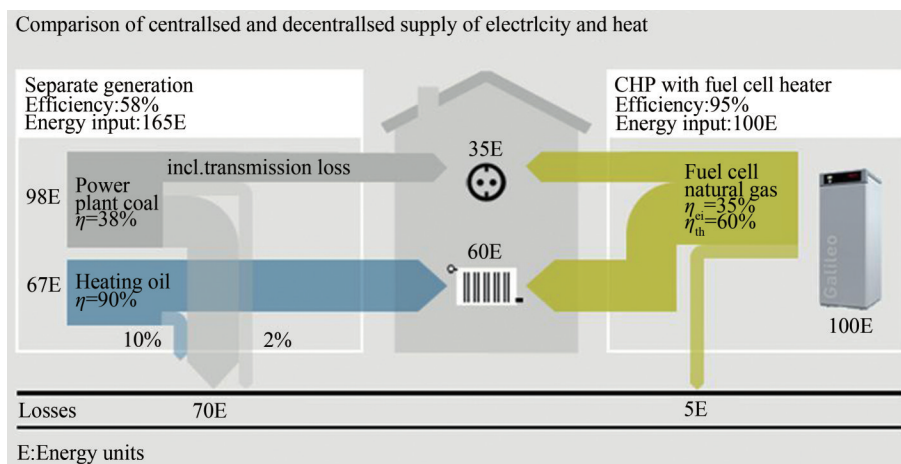


图 6 集中供能和分布式热电联供一次能源消耗比较

Fig. 6 Comparison of overall primary energy consumption between centralized supply or m-CHP

[Source: Hexis AG, www.hexis.com]

### 2.2 分布式发电

电能可以远距离传输, 但是热量输送范围有限。SOFC 可用作分布式发电装置, (冷) 热电联供是其最优方案, 美国 APPLE、GOOGLE、AT&T、EBAY 数据中心、医院、商业区和工业园区等均有成熟的应用, 图 7 是美国 Bloom Energy 公司 SOFC 在医院分布式发电应用案例图片, 其 SOFC 产品累计销售装机容量已经达到 800 MW。

### 2.3 SOFC+GT+ST 联合循环发电

目前技术水平 SOFC 实际的燃料利用率最高只能达到 85%, SOFC 发电后, 其阳极排气温度高达 900 °C, 未反应的燃料在燃烧室中与贫氧的阴极排气燃烧, 使反应温度提高, 进入燃气轮机发电机, 产生电能, 形成 SOFC+GT (Gas Turbine) 联合循环, 提高发电效率<sup>[10-11]</sup>。高温燃气轮机排气压力降



图 7 SOFC 分布式发电在医院应用

Fig. 7 Application of SOFC distributed generation in hospital

[Source: https://www.bloomenergy.com]

至常压, 进入余热锅炉, 产生蒸汽, 推动蒸汽轮机做功发电, 形成 SOFC+GT (Gas Turbine) +ST (Steam Turbine) 三级联合循环发电系统, 其原理如图 9 所示。日本三菱重工研制的 250 kW 管式

SOFC+GT联合循环发电装置如图8所示,发电效率55%,热电综合利用效率73%;SOFC+GT+ST三级联合循环发电系统正在实验测试中,发电效率高达65%。

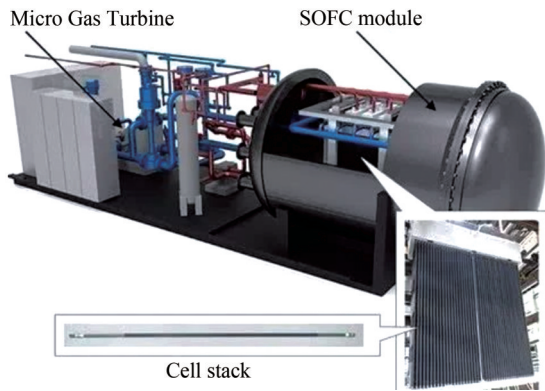


图8 三菱重工 250 kW SOFC+GT 联合循环发电系统  
Fig. 8 Mitsubishi's 250 kW coupled SOFC-GT system  
[source: NEDO]

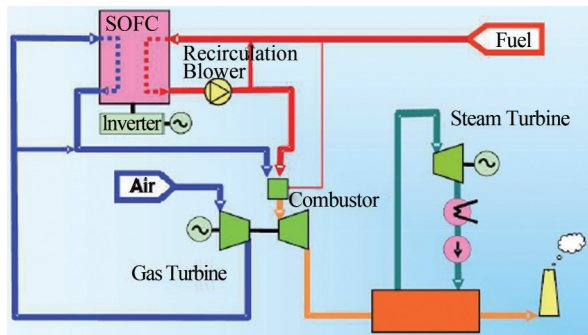


图9 三菱重工 SOFC+GT+ST 三级联合循环发电原理图  
Fig. 9 Mitsubishi's SOFC+GT+ST triple combined cycle system  
[source: MHI, Proceedings of Fuel Cell Seminar 2011]

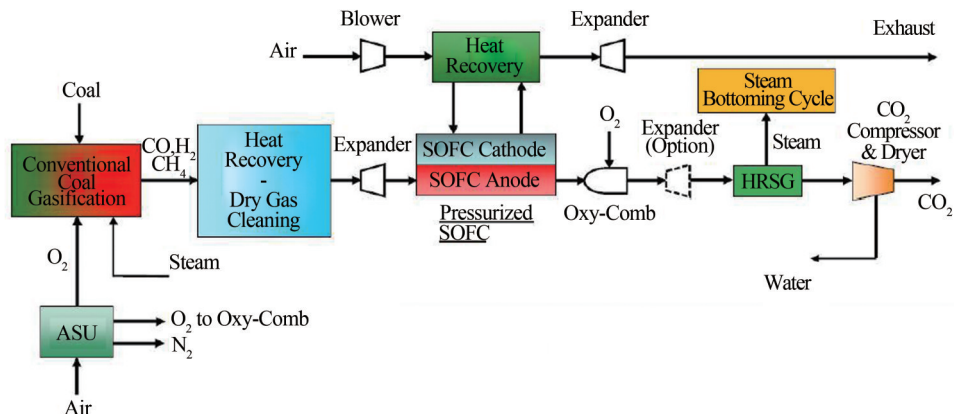


图10 IGFC 工艺流程图

Fig. 10 IGFC process flow diagram

[Source: NETL, Proceedings of International Energy Agency (IEA) 2011 - Annex24, Solid Oxide Fuel Cells]

## 2.4 大型 IGFC 发电站

SOFC对燃气中杂质的容许值较高,煤气化成气可作为SOFC的燃料,形成整体煤气化燃料电池发电系统IGFC(Integrated Gasification Fuel Cell Cycle)。IGFC是将IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)与SOFC结合的发电系统,(主要工艺流程如图10所示),进一步提高煤气化发电效率到50%以上,相比于IGCC水耗降低80%<sup>[12]</sup>,SOFC阳极尾气经富氧燃烧产物CO<sub>2</sub>浓度90%以上,到达直接封存或利用浓度要求<sup>[13-14]</sup>。IGFC工艺流程在煤气化和富氧燃烧环节都有纯氧需求,结合未来氢气清洁化制取趋势<sup>[15]</sup>,耦合利用大规模清洁能源电解水制氢副产的廉价氧气,可进一步降低IGFC空分制氧厂用电耗,提高供电效率。

## 3 SOFC 发电技术和产业国内外现状

### 3.1 国外现状

目前美国SOFC技术主要掌握在Bloom Energy、Fuel Cell Energy、GE通用燃料电池等少数公司手里。Bloom Energy是SOFC领域的龙头企业,其产品功率在50 kW~200 kW之间。Fuel Cell Energy公司在美国能源部资助下,正在开展MW级天然气SOFC分布式电站示范项目的建设。GE通用燃料电池公司研制了50 kW系统样机,并完成了5 000 h运行测试。

日本SOFC技术在国际处于领先地位,尤其是基于管式SOFC+GT+ST联合循环发电技术全球领先,同时也是SOFC家庭用固定式小型热电联产商

业化最成功的国家。技术和产业化处于领导地位的公司主要有:三菱重工、日本京瓷、日产、大阪燃气等。但是美国和日本的SOFC无论是产品还是技术对中国都是禁止出售和转让的。

欧洲主要走的板式SOFC技术路线,知名企业主要有芬兰的Elcogen和Convion公司、德国Sunfire、奥地利AVL、意大利Solid Power、瑞士Hexis和英国Ceres Power公司等。其中芬兰Convion公司致力于致力于百kW级SOFC天然气或生物沼气分布式发电系统商业化,CX0系列产品输出功率在30~100 kW之间,净发电效率60%,模块化设计。英国Ceres Power于2018年与潍柴集团签订合作协议,2019年生产出首台30 kW SteelCell SOFC车用系统,用于压缩天然气(CNG)燃料电池大巴的示范<sup>[16]</sup>。

美国能源部(DOE)和日本新能源产业技术发展组织(NEDO)均长期持续投入巨资进行IGFC技术研发和应用示范。美国“FutureGen”项目中固体氧化物燃料电池与燃气轮机的300 kW联合系统工程示范装置,该装置已连续运行超过十年,发电效率已达到58%,热电联供后则能达到88%以上。Fuel Cell Energy公司根据美国能源部SOFC发展规划,联合Worley Parsons完成了670 MW IGFC示范电站的初步设计和选址,IGFC的动力岛包括8组由42个燃料电池堆组成的模块、2个合成气膨胀机、余热锅炉和蒸汽轮机。

2015年日本制定了IGFC发展规划,目标是到2025年IGFC供电效率达到55%,示范项目分为三个阶段,目前第一阶段与第二阶段OSAKI公司的IGCC项目已完成投运,第三阶段的核心示范是在IGCC系统内整合100 MW SOFC发电,预计2022年投产<sup>[17]</sup>。

### 3.2 国内现状

国内的SOFC目前处于关键技术攻关和小规模应用示范阶段。中国矿业大学牵头完成了“973计划”项目《碳基燃料固体氧化物燃料电池体系基础研究》,对SOFC的材料和系统进行了详细的研究,包括电解质材料、煤气化SOFC的理论计算、实验研究等工作,研发出kW级SOFC系统。潮州三环集团牵头执行的国家重点研发计划《固体氧化物燃料电池电堆工程化开发》对提高SOFC的效率和长

期运行稳定性的工程化问题进行了攻关,开发出了1.5 kW的SOFC电堆,发电效率达到60%以上;潮州三环集团的燃料电池隔离膜板是SOFC最核心的零部件,该企业是国内屈指可数的SOFC核心技术自主可控同时具有国际影响力的产业链核心环节企业,是国际SOFC龙头企业Bloom Energy公司核心供应商。

在系统集成优化方面,华中科技大学主要研发平板式阳极支撑SOFC,已开发了300 W、1 kW、5 kW发电系统。中科院上海硅酸盐研究所已研制5 kW级SOFC独立发电系统,正对提升系统集成度、系统发电效率与稳定性进行攻关。中科院宁波材料所与宁波索福人能源技术有限公司已突破百kW级SOFC系统技术。2017年国家能源集团牵头开展国家重点研发计划《CO<sub>2</sub>近零排放的煤气化发电技术》研究,在关键设备研发如SOFC电堆、高温换热器等和系统工艺集成设计已取得了进展,预期建成MW级IGFC示范系统,发电效率≥50%,CO<sub>2</sub>捕集率≥91%。

## 4 SOFC发电发展趋势

我国富煤、贫气、少油的资源条件决定了未来很长一段时间以煤炭为主的化石能源仍在能源结构中占主导地位,煤炭的高效清洁化利用和减少CO<sub>2</sub>排放仍是发电技术重点探索的方向。超超临界燃煤发电技术将发电效率提升到40%,目前技术发展受到高温高压材料限制,发电效率很难获得突破性提高;大型电厂通常建设在偏远郊区,发电余热无法长距离输送到负荷中心利用,综合效率很难提高;并且常规燃煤发电技术尾气CO<sub>2</sub>浓度低,捕集成本非常高。基于SOFC的发电技术可突破常规发电遇到的技术瓶颈,高效灵活的分布式发电,解决发电效率瓶颈和余热利用问题,能量综合利用率大幅提高;IGFC大规模发电站提高发电效率的同时,由于尾气排放具有CO<sub>2</sub>富集优势,减少捕集成本。基于SOFC发电系统将成为新一代发电技术主流,进一步提高化石能源高效清洁利用率。

## 5 结论

美国通过SECA计划、日本通过Ene-Farm计划、欧盟通过Ene. Field等计划,都已经在SOFC领

域取得了显著的成果。我国在 SOFC 关键技术和系统集成方面与发达国家有较大差距,但在 SOFC 电堆最核心材料方面具有优势技术和产业化企业。《中国战略性新兴产业发展报告》、《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》、《能源技术创新“十三五”规划》等战略规划文件均将 SOFC 发展列为关键能源创新技术,借助国家政策优势和对高效清洁发电技术的的市场需求,加大对 SOFC 核心技术攻关和关键设备研发,加快技术引进消化吸收再创新,培育行业龙头企业,推广应用示范,为新一代以高温固体氧化物燃料电池为核心的清洁高效发电系统奠定技术和产业基础。

#### 参考文献:

- [1] 衣保廉. 燃料电池—高效、环境友好的发电方式 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [2] 孙克宁. 固体氧化物燃料电池 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [3] 蒋建华. 平板式固体氧化物燃料电池系统的动态建模与控制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [4] 刘少名, 邓占锋, 徐桂芝, 等. 欧洲固体氧化物燃料电池 (SOFC) 产业化现状 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(3): 278-288.  
LIU S M, DENG Z F, XU G Z, et al. Commercialization and future development of the solid oxide fuel cell (SOFC) in Europe [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(3): 278-288.
- [5] TIMURKUTLUK B, TIMURKUTLUK C, MAT D M, et al. A review on cell/stack designs for high performance solid oxide fuel cells [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56(1): 1101-1121.
- [6] 钜大锂电. 固体氧化物燃料电池 (SOFC) 产业化发展分析 [EB/OL]. (2018-09-23) [2020-05-18]. <http://www.juda.cn/news/33924.html>.
- [7] 侯丽萍, 张暴暴. 固体氧化物燃料电池的系统结构及其研究进展 [J]. 西安工程科技学院学报, 2007, 21(2): 267-270+278.  
HOU L P, ZHANG B B. Solid oxide fuel cell system structure and research progress [J]. Journal of Xi'an University of Engineering Science and Technology, 2007, 21(2): 267-270.
- [8] HARBOE S, SCHREIBER A, MARGARITIS N, et al. Manufacturing cost model for planar 5 kWel SOFC stacks at Forschungszentrum Jülich [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(15): 8015-8030.
- [9] MCPHAIL J S, KIVIAHO J, CONTI B. The yellow pages of SOFC technology. International status of SOFC deployment 2017 [M]. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, 2017.
- [10] 胡小夫, 汪洋, 田立, 等. 中高温 SOFC/MGT 联合发电技术研究进展 [J]. 华电技术, 2019, 41(8): 1-5.  
HU X F, WANG Y, TIAN L, et al. Progress in intermediate and high temperature SOFC/MGT combined power generation technology [J]. Huadian Technology, 2019, 41(8): 1-5.
- [11] MUELLER F, GAYNOR R, AULD E A, et al. Synergistic integration of a gas turbine and solid oxide fuel cell for improved transient capability [J]. Journal of Power Sources, 2008, 176(1): 229-239.
- [12] National Energy Technology Laboratory. Analysis of integrated gasification fuel cell plant configurations [R/OL]. (2011-02-22) [2020-05-18]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=4B0D5C261F1B5ABE4E0EFB735C3B199B?doi=10.1.1.222.67&rep=rep1&type=pdf>.
- [13] 董斌琦, 李初福, 刘长磊, 等. CO<sub>2</sub> 近零排放的煤气化燃料电池发电技术及挑战 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 189-193.  
DONG B Q, LI C F, LIU C L, et al. Integrated gasification fuel cell power generation technology with CO<sub>2</sub> near zero emission and its challenges [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 189-193.
- [14] 彭苏萍, 黄其励, 域珠峰, 等. 煤炭高效转换及近零排放利用产业培育与发展 [R]. 北京: 科学出版社, 2013: 109-120.
- [15] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书 [EB/OL]. (2019-07-03) [2020-05-18]. [https://www.sohu.com/a/324664615\\_733088](https://www.sohu.com/a/324664615_733088).
- [16] BARRETT S. Ceres Power, Weichai finalise strategic collaboration, JV deal [J]. Fuel Cells Bulletin, 2019(1): 11-11.
- [17] 中国工程科技发展战略研究院. 2020 中国战略性新兴产业发展报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.

#### 作者简介:



曹静

曹静 (通信作者)

1982-, 女, 陕西延安人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师, 电机与电器硕士, 主要从事能源咨询、电力系统规划咨询、氢能研究和咨询工作 (e-mail) caojing@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)