

固体氧化物燃料电池产业发展现状及前景分析

郭士，孙兆松，张伟

（中石化（大连）石油化工研究院有限公司，辽宁大连116045）

摘要：固体氧化物燃料电池（SOFC）是一种直接将燃料化学能转换为电能的能量转换装置，不受卡诺循环的限制，能量转化效率高，而且具备燃料适应性广、清洁无污染、全固态结构、不使用贵金属催化剂等优点。SOFC技术的应用领域十分广泛，不但能够对氢能进行绿色高效利用，还能实现对传统化石能源的高效清洁利用，为实现我国碳达峰、碳中和目标做出重要贡献。介绍了国内外SOFC产业的发展现状，对产业发展前景进行了分析；针对我国SOFC产业发展所遇到的困难提出了相应的解决办法和建议。

中国是目前全球最大的能源消费国，在所有的能源消费中，化石能源消费占比达到85%。中国的能源禀赋是“富煤缺油少气”，其化石能源消耗中占比最大

的是煤炭，这就造成了中国的CO₂排放问题，2022年CO₂

排放量达到了121亿t[1]，占全球总排放量的32.88%， “双碳”目标的实现面临较大压力。中国的石油和天然气对外依存度分别达到了70%和40%[2]，对我国的能源安全造成了巨大的挑战。在这样的大背景下，中国的能源结构调整势在必行，必须发展多元化的能源结构。氢能在“替煤减碳”过程中发挥着积极作用，尤其是对于风能、太阳能等可再生能源生产的绿氢，其生产及使用中不排放任何CO₂

。近几年来，国内氢能“热度”也不断攀升，2022年3月，国家发改委正式发布《氢能产业发展中长期规划（2021—2035年）》，明确了氢能在我国能源绿色低碳转型中的战略地位。

燃料电池可以直接将燃料中化学能转化为电能，根据电解质的不同，主要有碱性燃料电池（AFC）、质子交换膜燃料电池（PEMFC）、磷酸型燃料电池（PAFC）、熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）和固体氧化物燃料电池（SOFC）等类型。SOFC是一种全固态燃料电池，又称为陶瓷燃料电池，其主要优点是不使用贵金属催化剂、运行温度高、燃料适用范围广、余热温度高、适合热电联产，近年来发展速度为各种类型燃料电池之首[3-5]。SOFC不但能够对氢能进行绿色高效利用，还能实现对传统化石能源的高效清洁利用。

1国外产业发展现状

美国、欧洲、日本等发达国家在SOFC技术方面处于领先地位，目前已经基本实现了SOFC的商业化运行，产业规模不断扩大。

1.1美国

1937年，美国制造了历史上第一台SOFC；1962年美国西屋公司开始研究SOFC，80年代获得突破；2000年西门子-西屋公司制造出规模200kW的SOFC电站。美国的SOFC累计装机量领先全球，其主要应用场景是大中型工/商业用供电。Bloom Energy公司是目前技术最强的公司，其技术相对成熟，运行可靠性好，该公司开发的SOFC主打产品规格为50 kW模组，通过多模组的组合最大可以做到几十兆瓦的燃料电池系统，其产品目前已应用在苹果、谷歌等多家公司。Bloom Energy与三星重工合作，预计到2022年，船舶应用实现年装机量300MW。2021年与韩国SK集团开展合作，在2022—2025年至少增加500MW的装机量。另一家全球燃料电池领域的著名企业是美国Fuel Cell Energy公司，其开发的250 kW SOFC系统能够作为制氢的电解器或发电的燃料电池运行，还能够使用多种燃料，包括天然气、可再生沼气或氢气[6]。

1.2欧洲

与美国的SOFC市场偏向大中型工/商业用供电系统不同，欧洲市场的主要推广方向是微型热电联供（Micro-CHP）系统，其中比较有代表性的企业有Sunfire、Ceres Power、Solid Power、Hexis、Elcogen、Convion、Topose、博世等。德国Sunfire公司是基于碱性以及固体氧化物技术生产工业电解槽的全球领导者，其SOC（固体氧化物电池）电堆正向发电，反向操作可以电解制氢。Sunfire近期聚焦于SOEC系统，2021年试运营了目前世界上最大的250kW的SOEC电解制氢示范系统，每1h可生产5.7kg的氢气。2022年该公司在荷兰鹿特丹的Neste炼油厂安装了世界上首台2.6MW的高温电解槽。近年Sunfire正在迅速扩大其生产能力，并筹集了更多资金，2022年获得2.15亿美元D轮融资，并签署高达640MW的电解槽协议。英国Ceres Power是新一代低成本燃料电池技术领导者，其特有的SteelCell技术，源自英国帝国理工学院[7]，具有启动速度快、功率密度高的优势。Ceres Power产品在住宅、商业发电和交通领域都有商业化应用

。因为不锈钢有很高的热导率和电导率, 所以其工作温度很低, 启动快, 可以用于汽车。近年来Ceres Power也在积极推固定式发电和SOEC的市场。Ceres Power在2018年被潍柴动力收购了20%的股份, 已经跟潍柴动力、博世、康明斯一起开发出30kW的商用车增程器。意大利Solid Power公司主要开发micro-CHP系统, 其开发的2.5kW规模ENGEN2500系统总效率约90%。截止到2018年已销售超过1000台BlueGEN发电系统。瑞士Hexis公司是高温燃料电池技术领域的世界领先公司之一, 主要面向电功率小于10kW的固定应用, 为单户家庭、多户公寓建筑、小型商业应用设计和生产基于燃料电池的微型热电联产装置[8]。目前主打的商业化产品, 输出电功率1.505kW, 电效率40%, 输出热功率2.1kW, 系统总效率达到90%, 系统寿命为10年。爱沙尼亚Elcogen公司的SOFC在将燃料转化为电能方面创造了74%的世界纪录。Elcogen公司的产品是SOFC单片电池和电堆, Elcogen从2021年开始, 计划每年生产约50MW的电池, 在SOFC系统方面则是与Magnex公司合作。Magnex是日本SOFC系统开发商, 正在开发250W的SOFC便携式系统和1~5kW的SOFC沼气/乙醇热电联产系统, 目标是在三年内销售超过3000件SOFC产品[9]。德国博世也在积极布局SOFC产业链, 2018和2019年两次投资英国电堆生产商Ceres Power, 引进电堆生产线, 并且开发出10kW的SOFC热电联供系统, 发电效率达到60%, 其主要的应用市场是小型的工商业和数据中心[10]。

1.3日本

日本的SOFC产业在新能源产业技术综合开发机构(NEDO)领导下发展迅速, 特别是有政府补助的家用燃料电池热电联供(ENE-FARM)计划, 其小型家庭SOFC热电联供技术成熟可靠, 保有量居世界首位。日本主要的SOFC企业有京瓷、大阪燃气、三菱日立、爱信精机等。日本京瓷从1985年开始开发燃料电池, 一直挑战小型SOFC的技术开发, 京瓷的电池堆在2011年便安装在日本的家用SOFC发电系统中。现在已经实现第三代更小型化的产品, 产品发电功率达700W, 实现了9万小时连续工作、360次启停、12年设计寿命[11]。三菱重工从上世纪80年代开始开发SOFC技术, 2001年开发出10kW级的管式SOFC发电系统, 2013年成功运行200kW的SOFC+MGT复合发电系统, 2014年成立了三菱日立电力系统株式会社, 致力于SOFC联合循环大型发电系统研发, 2018年宣布实现商用250kW以及1MW的联合发电产品。

2国内产业发展现状

中国的SOFC研究开发工作主要在科研院所和高校, 资金来源主要是国家或地方科技项目支持。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、中国科学院宁波材料技术与工程研究所、中国科学技术大学、中国矿业大学、华中科技大学等单位都在长期坚持对SOFC的研发, 经过几十年的积累, 已经初步掌握了从原材料生产、大面积单电池批量生产制备、电堆组装到整个SOFC系统的设计开发技术。但是同欧美日的先进水平及商业化应用相比, 我国的SOFC产业处在工业示范向商业应用的过渡阶段, 商业化的曙光开始显现, 这吸引了许多企业开始参与进来, 促进了产业发展。

潮州三环集团目前是全球SOFC隔膜板主要供应商之一, 2005年开始给全球固态燃料电池领军企业Bloom Energy供应电解质片。该公司于2012年收购了澳大利亚CFCL公司, 掌握了SOFC的成套技术, 2022年成功运行了由3个35kW模组组成的100kW示范系统。2023年1月同广东省能源集团有限公司合作开展的“210kW高温燃料电池发电系统研发与应用示范项目”, 在广东惠州天然气发电有限公司顺利通过验收。本次项目前后安装的6台35kW SOFC系统, 总功率 ≥ 210 kW, 平均交流发电净效率61.8%, 运行时间最长的机台已超过5000h, 系统热电联供效率高达91.2%, 实现了210kW SOFC固定式发电系统的集群研究和应用示范[12]。潍柴动力2018年5月战略投资全球领先的SOFC技术公司英国希铿斯, 成为其最大股东。目前潍柴动力已经实现了SOFC技术的工程化突破, 全面掌控了新一代SOFC关键核心技术, 其2023年2月发布的120kW产品是全球首款大功率金属支撑SOFC, 净发电效率超过60%, 热电联产效率达到92.55%, 在大型SOFC系统中全球最高[13]。除上述两家上市企业外, 像国家能源集团、中石油、中石化、广东能源集团、南方电网等央企也在积极布局SOFC产业, 主要是因为这些企业自己有燃料、有市场、偏向于实际应用。此外还有几个初创企业具备较强的技术实力, 宁波索福人是SOFC行业里面技术比较全面的一家, 打通了从粉体到系统的技术路线, 以平板式的SOFC为主, 出自中科院宁波材料所, 现在最大的系统功率做到了25kW。浙江氢邦科技有限公司的技术也是来自于中科院宁波材料所燃料电池团队, 核心技术是高性能、长寿命、高可靠性的大面积平管型SOFC, 目前开发出了5kW级的电堆, 正在开发SOFC系统。徐州华清京昆技术背景是清华大学, 2019年在徐州建立25MW的电池生产线。华科福赛的技术背景是华中科技大学, 该公司也打通了粉体到系统的技术路线, 2015年发布了一个5kW的天然气SOFC发电系统。浙江臻泰新能源公司采用独特的平管式电池结构, 目前最大的电堆可以做到1kW, 其反应温度约650℃, 电堆运行稳定性好, 也具备做配套系统的能力。

3应用前景分析

3.1应用场景

在能源结构转型和“双碳”目标的背景下，SOFC技术因为其效率高、燃料适应性广、清洁无污染、全固态结构、不使用贵金属催化剂等技术特点，展现出越来越广阔的应用前景，不但能实现化石能源高效清洁利用、降低碳排放，还能促进绿氢产业发展，改善我国的能源结构。具体的应用场景有以下几个方面：

（1）小型家庭热电联供系统

小型SOFC家庭热电联供系统能够为家庭住宅提供电能和热水，在节能减排以及电力的削峰填谷方面优势明显。这方面日本已经有了成功的先例，其家用热电联产产品“ENE Farm”自2009年5月已经累计销售超过11万台。

（2）分布式发电

SOFC发电效率高、无噪音、无污染排放、功率范围调整灵活，可以提供百千瓦到几十兆瓦功率的燃料电池系统，特别适合作为分布式发电或者数据中心的备用电源。Bloom Energy公司开发的产品目前已在苹果、谷歌、易趣等众多公司得到应用，在美国安装超过130MW的SOFC燃料电池。

（3）交通领域

SOFC作为车辆、轮船、无人机等工具的辅助或者动力电源也得到了推广应用。2016年日产发布了世界首辆SOFC作为动力源的汽车，SOFC的燃料是生物乙醇，续航里程可超过600km。Bloom Energy公司与三星重工合作，计划将产品应用于船舶电源，预计到2027年，将有超过100艘邮轮需要超过4GW的电池订单。

（4）大型发电站

CO₂

近零排放的大型煤气化燃料电池发电技术（IGFC）是将整体煤气化联合循环发电（IGCC）与高温固体氧化物燃料电池或MCFC相结合的发电系统，发电效率更高，CO₂捕集成本低，是煤炭发电的根本性变革技术[14-15]。三菱日立电力则致力于SOFC联合循环大型发电系统研发，2018年实现商用250kW和1MW规格的联合发电产品。

（5）反向电解制氢

SOFC正向运行可发电，逆向运行可实现电解，即为固体氧化物电解池（SOEC）。SOEC可以通过电解水制氢，把与负荷不匹配而浪费的电能储存到氢气中，且电解效率高达85%~95%，远高于其他电解技术。

3.2我国SOFC产业发展瓶颈

3.2.1电堆寿命

电堆是SOFC的核心部件，主要涉及高稳定性密封材料的开发，高效稳定连接体材料、低热应力、热梯度、低成本的电堆核心技术，目前全球仅少数公司掌握长寿命、高可靠性电堆的设计和生产技术。最棘手的问题是电堆密封材料，电堆的密封是用高温玻璃胶或高温陶瓷胶来密封的，而玻璃、金属和电池片的热膨胀系数不同，在高温、电流、气流扰动的工作条件下，电堆密封结构容易被破坏而导致性能衰减，电堆启停次数受到严重制约。目前国内并未解决好平板式SOFC电堆的密封问题，SOFC系统使用寿命无法保证。

3.2.2大功率系统开发

100kW规模的SOFC系统是应用最广泛的系统。近几年时间我国才开始出现100~200kW规模的SOFC系统示范装置，在电堆模组设计、集成及批量化装配，温度场、流场的均一化控制，长周期运行方面还缺乏经验，没有完全掌握相关的核心技术。只有开发出高效、长周期稳定运行的大功率系统，才能实现固体氧化物燃料电池的产业化。

3.2.3配套系统不够完善

SOFC的产业链很长，相应的配套产业多，比如双极板的涂层技术、高稳定密封材料、辅助系统BOP相关设备，缺乏成熟的配套供应体系。尤其是SOFC辅助系统BOP设备的设计、加工和测试都不完善，高温换热器、氢气循环泵、蒸汽发生器等关键设备都需要定制，有些甚至必须要进口，使得SOFC系统的生产制造成本高昂。

3.2.4 缺乏有力的政策支持

从欧、美、日等具备先进固体氧化物燃料电池技术的商业化过程可以看到，固体氧化物燃料电池产业发展需要政府的引领规划和政策支持，特别是在商业化的前期阶段，财政补贴显得尤为关键。目前我国在PEMFC领域有针对性政策支持，但在SOFC领域缺乏有力的支持政策，同欧美等发达国家的补贴力度相比还不够大。

3.2.5 资本投入不足

国外SOFC行业中发展好的企业都得到了资本的大力支持，国内除潮州三环集团、潍柴动力具备较为雄厚的资本，多数颇有实力的相关企业属于科研院所人员基于多年研究成果设立的初创型公司，融资较为困难，商业化产品进展缓慢。资本投入不足，市场规模小、利润低，反过来造成相关配套企业少、积极性不高，对SOFC产业化发展造成双重打击。

3.3 未来发展趋势

3.3.1 运行温度中、低温化

高温操作能够提升系统发电效率，但是从工程实际应用的角度来看会造成SOFC性能下降，如电池材料不同相之间的缓慢扩散、电极材料在高温下烧结失活、电堆密封材料失效漏气等，造成电池部件性能下降甚至失效，降低电池的寿命。如果将SOFC的操作温度降下来，不但能降低电堆和装置的制作成本，还能改善电堆密封问题，加速SOFC的产业化。目前有两条技术路线可降低操作温度，一是开发合适的中低温型电解质材料；二是通过先进的薄膜制备技术减小传统的电解质厚度。

3.3.2 燃料多样化

SOFC的优点之一是燃料适应性强。氢气极难压缩液化的物理特性，决定了规模化的储氢和运氢是一个比较难实现的问题。如果把氢跟碳去结合，或者是跟氮结合生成甲烷、甲醇、乙醇或者是氨气这样的储氢介质，就能解决氢气的存储和运输问题，而SOFC可以直接将这些储氢介质当作燃料使用。通过大型煤气化燃料电池发电技术（IGFC），SOFC还可以间接地将煤炭作为燃料，同时实现CO₂及污染物近零排放。

3.3.3 电池结构多样化

SOFC电池结构的不同决定了其性能禀赋和适用场景，从目前成熟的商用电池来看，三菱动力、Bloom Energy、Ceres Power和日本京瓷的电池结构都是不一样的，虽然它们各有优缺点，系统规模和应用场合各有不同，但是电池可靠性好，能够实现长周期稳定运行。SOFC的应用场景十分广泛，因此也需要不同技术特点的电池与之匹配，电池结构多样化趋势越发明显。

4 结语

SOFC因其有发电效率高、燃料适应性强等突出的优点，具有广阔的应用前景。目前，欧、美、日等国家已实现SOFC的商业化应用，我国的SOFC系统还处在工业示范阶段，距离商业化应用还有较大差距。我国SOFC技术发展及商业化应用面临诸多难题，首先需要加强应用基础研究，掌握长寿命、高可靠性电堆的设计和制备技术，开发出高效、长周期稳定运行的大功率系统。在商业化初期还需要国家政策的支持和财政补贴，需要资本的大力投入，使产业初步实现规模化，同时能促进相关配套产业链不断完善，形成良性循环，实现SOFC产业快速、健康、有序发展，助力我国能源结构转型和实现“双碳”目标。

参考文献

- [1] International Energy Agency. CO₂ Emissions in 2022 [EB/OL]. (2023 - 03 - 02). <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
- [2] 中国石油企业协会.中国油气产业发展分析与展望报告蓝皮书(2021—2022)[R].北京:中国石油企业协会,2022.
- [3] Lim Y, Park J, Lee H, *et al.* Rapid fabrication of lanthanum strontium cobalt ferrite (LSCF) with suppression of LSCF/YSZ chemical side reaction via flash light sintering for SOFCs[J]. Nano Energy, 2021, 90: 106524.
- [4] 刘辉,于洁,乔翠,等.固体氧化物燃料电池电解质材料的研究进展[J].电源技术,2020,44(10):1549-1551.

- [5] 韩敏芳,彭苏平.固体氧化物燃料电池材料及制备[M].北京:科学出版社,2004:17-24.
- [6] Solid oxide fuel cells.High-efficiency solid oxide fuel cells[EB/OL].<https://www.fuelcellenergy.com/platform/solid-oxide-fuel-cell-platforms>,2023-03-08.
- [7] 胡亮,杨志宾,熊星宇,等.我国固体氧化物燃料电池产业发展战略研究[J].中国工程科学,2022,24(3):118-126.
- [8] Clean Electricity.Reliable Heat.Onwards to the Green Hydrogen and NetZero World[EB/OL].<http://www.hexis.com/index.html>,2023-03-12.
- [9] Elcogen与Magnex合作推进固体氧化物燃料电池商业化[EB/OL].<http://www.china-nengyuan.com/news/154690.html>,2023-03-15.
- [10] 陈烁烁.固体氧化物燃料电池产业的发展现状及展望[J].陶瓷学报,2020,41(5):627-631.
- [11] 京瓷.SOFC[EB/OL].<https://www.kyocera.com.cn/prdct/ecd/sofc/index.html>,2023-04-10.
- [12] 210 kW SOFC项目顺利验收!潮州三环合作广能集团[EB/OL].<https://mh2.in-en.com/html/h2-2421416.shtml>,2023-04-12.
- [13] 潍柴发布全球首款大功率金属支撑固体氧化物燃料电池 SOFC 商业化产品[EB/OL].https://www.weichaipower.com/about/history/2023/202302/t20230223_91609.html,2023-04-12.
- [14] Peng S P.Current status of national integrated gasification fuel cell projects in China[J].International Journal of Coal Science & Technology,2021,8(3):327-334.
- [15] 董斌琦,李初福,刘长磊,等.CO₂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.■

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/215225.html>