

我国固体氧化物燃料电池产业发展战略研究

胡亮¹, 杨志宾¹, 熊星宇², 雷泽¹, 葛奔¹, 张博¹, 彭苏萍¹

(1. 中国矿业大学(北京)固体氧化物燃料电池中心, 北京 100083; 2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 固体氧化物燃料电池(SOFC)具有发电效率高、燃料适应性强、高温余热可回收等优点,在大型发电、分布式发电及热电联供、交通运输及调峰储能等领域具有广阔的应用前景,是最前沿的燃料电池技术。大力发展采用氢及碳基燃料的固体氧化物燃料电池技术将有助于推动我国能源供给侧结构性改革,推动能源技术革命,为实现碳达峰、碳中和目标奠定技术基础。本文介绍了国内外固体氧化物燃料电池产业的发展现状,分析了我国固体氧化物燃料电池产业发展面临的难题,结合国外固体氧化物燃料电池产业发展的经验,梳理了我国固体氧化物燃料电池产业发展的思路及重点任务。研究提出,加快制度体系建设,加强固体氧化物燃料电池技术及产业发展的顶层设计;强化财税金融支持,充分发挥市场在资源配置中的决定性作用,突出企业主体地位;坚持创新驱动发展,把自主技术创新作为推动固体氧化物燃料电池产业发展的主要驱动力;完善标准规范体系,形成具有自主知识产权的技术标准;加强固体氧化物燃料电池领域人才培养,深化国际交流与合作,为今后我国固体氧化物燃料电池产业的规模化、商业化发展提供指导。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 碳达峰; 碳中和; 氢能; 新型能源技术

中图分类号: TK91 **文献标识码:** A

Development Strategy for Solid Oxide Fuel Cell Industry in China

Hu Liang¹, Yang Zhibin¹, Xiong Xingyu², Lei Ze¹, Ge Ben¹, Zhang Bo¹, Peng Suping¹

(1. Research Center of Solid Oxide Fuel Cell, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Solid oxide fuel cell (SOFC) has the advantages of high power generation efficiency, excellent fuel adaptability, high-temperature waste heat recovery and so on. It is the most cutting-edge fuel cell technology and has promising application prospects in fields such as large-scale power generation, distributed power generation, combined heat and power generation, transportation, and energy storage. The SOFC technology uses hydrogen and carbon-based fuels and thus can help promote the supply-side reform of China's energy sector, promote energy technology revolution, and lay a technological foundation for realizing carbon peak and carbon neutralization. This study analyzed the current status of SOFC industry in China and abroad, and discussed the challenges, development ideas, and key tasks for developing the SOFC industry of China. Specifically, China needs to improve its institutional system and the top-level design for SOFC technology and industry development, strengthen fiscal, taxation, and financial support for the industry, and encourage independent technological innovation. Moreover, it is imperative to improve the standards system to form

收稿日期: 2022-04-30; **修回日期:** 2022-05-20

通讯作者: 彭苏萍, 中国工程院院士, 中国矿业大学(北京)教授, 主要研究方向为能源系统; E-mail: psp@cumtb.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国氢能源与燃料电池发展战略研究”(2019-ZD-03); 中国工程院院地合作重点咨询项目“吉林省西部生态经济带生态功能提升与绿色发展战略研究”(JL2020-001)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

technical standards with independent intellectual property rights, strengthen personnel training, and deepen international exchanges and cooperation. This study is expected to provide guidance for the large-scale and commercial development of China's SOFC industry in the future.

Keywords: solid oxide fuel cell; carbon peak; carbon neutralization; hydrogen energy; new energy technology

一、前言

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础,目前对以煤、石油、天然气等为代表的传统化石能源的过度开发利用,导致了日益严重的环境问题。为实现人类社会可持续发展,推动能源行业向低碳化、无碳化、低污染方向发展成为世界各国的共识。

中国是世界上最大的能源生产国和消费国,目前以煤为基础的大规模化石能源开发造成二氧化碳排放问题严重,2021年我国二氧化碳排放量超 1.19×10^{10} t,占全球总量的32.8%,占比最大[1]。与此同时我国能源安全问题突出,目前我国石油的对外依存度已超70%,天然气的对外依存度已超40%,对外依存度现状不能满足最基本的能源安全需求[2];另一方面,可再生能源发展迅速,可再生能源成为增量主体,到“十四五”末可再生能源的发电装机占中国电力总装机比例将超过50%,但由于风能、太阳能等本身的间歇性及我国风能、太阳能等资源地域分配不均,大规模可再生能源储能调峰问题迫切需要得到解决;此外,大电网集中式供电远距离输送损耗大、效率低,尤其安全问题不容忽视,重大事故会造成巨大经济损失,开发分布式发电技术提高能源利用效率将成为未来新趋势。十九大报告明确提出要推进能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系。氢能作为一种绿色低碳、清洁高效、安全、可持续的二次能源,氢能的应用可以广泛渗透到传统能源的各个方面,包括交通运输、工业燃料、发电等。氢能符合中国碳减排重大战略,同时有利于解决中国能源安全问题,是国家能源革命的重要媒介。氢能可以将传统化石能源和可再生能源连接起来,实现二者平稳过渡。发展氢能是实现能源结构转型升级,推进我国能源生产和消费革命的重要抓手[3]。

燃料电池(FC)是一种将燃料的化学能直接转换为电能的发电装置,具有能量转化效率高、排放低、无噪声等特点,是21世纪的能源革命性发电技

术。燃料电池技术与氢能源产业直接关联,是核心技术环节。根据所使用的电解质不同,燃料电池主要分为固体氧化物燃料电池(SOFC)、质子交换膜燃料电池(PEMFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)、磷酸燃料电池(PAFC)和碱性燃料电池(AFC)等[4]。全球范围燃料电池的主要技术路线目前以采用高纯氢气作燃料的PEMFC和可以采用粗氢和碳氢燃料的固体氧化物燃料电池为主。以氢气为能源、低温运行的PEMFC,在以新能源汽车为代表的交通领域有广阔的发展空间。高温固体氧化物燃料电池燃料适应性强,可使用氢气,不要求高纯度,特别是可直接使用各种含碳燃料(天然气、生物质气、汽油、柴油、乙醇等),发电效率高,应用前景广泛,目前在固定式发电应用领域更为突出[5,6]。

我国要构建“清洁、低碳、安全、高效”的现代能源体系,必须依托新型能源技术的突破,氢能是未来最重要的能源载体,而可以实现氢能和现有化石燃料清洁高效利用的固体氧化物燃料电池技术,与我国现有能源供应系统兼容,必将担负起非常重要的历史使命。大力发展可以采用多种燃料的固体氧化物燃料电池技术将助推我国供给侧能源改革,推动能源技术革命,为实现碳达峰、碳中和目标奠定技术基础。为了促进我国固体氧化物燃料电池技术产业链的全面发展,本文依托中国工程院咨询项目的支持,分析了国内外固体氧化物燃料电池技术和产业发展现状,凝练了我国发展固体氧化物燃料电池技术面临的问题,梳理了固体氧化物燃料电池产业链面临的重点任务,提出了若干保障措施与政策建议,研究将为今后固体氧化物燃料电池的规模化、商业化发展奠定基础。

二、固体氧化物燃料电池的技术特点及应用场景

高温固体氧化物燃料电池发电不需经过从燃料化学能→热能→机械能→电能的转变过程,其能量

转化效率高、操作方便、无腐蚀、燃料适用性广，可广泛地采用氢气、一氧化碳、天然气、液化气、煤气、生物质气、甲醇、乙醇、汽油和柴油等多种碳氢燃料，很容易与现有能源资源供应系统兼容 [6]。同时，固体氧化物燃料电池不需要贵金属催化剂，原材料资源丰富且成本低。另外，固体氧化物燃料电池具有环境友好排放低和噪声低等优点，是公认的高效绿色能源转换技术。固体氧化物燃料电池的高效率、无污染、全固态结构和对多种燃料气体广泛适应性等方面的突出优点，成为其广泛应用的基础。

固体氧化物燃料电池最常见的应用领域为固定式发电，包括小型家庭热电联供系统（CHP），分布式发电或数据中心备用电源，以及工业用大型固定式发电站等。其中，二氧化碳近零排放的大型煤气化燃料电池发电技术（IGFC）和可以采用氢气、甲烷、甲醇以及氨等作为燃料的分布式发电技术是未来主要研究方向。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，可在IGCC的基础上进一步提高煤气化发电效率，降低CO₂捕集成本，同时实现CO₂及污染物近零排放，是煤炭发电的根本性变革技术 [7,8]。

另外，固体氧化物燃料电池作为辅助或动力电源在车辆、轮船、无人机等领域也有推广应用。其中，2016年日产汽车发布了世界上首款以固体氧化物燃料电池动力系统驱动的燃料电池原型车。2020年Bloom Energy（BE）公司与三星重工株式会社签署了一项联合研发协议，共同设计和开发以固体氧化物燃料电池为动力的燃料电池船，实现其对船舶清洁能源和更加可持续的海上运输业的发展愿景。

三、固体氧化物燃料电池技术的发展现状及问题剖析

（一）国外固体氧化物燃料电池技术的发展现状

美国、欧洲、日本等发达国家和地区在固体氧化物燃料电池技术方面一直处于世界领先地位，经过几十年的技术研发和攻关，已经基本实现了固体氧化物燃料电池技术的商业化运行 [9,10]，发展出多家具有特色技术的固体氧化物燃料电池企业。

美国是最早开始布局固体氧化物燃料电

池研发的国家，由美国能源部（DOE）牵头，持续支持数十年。目前从全球市场来看，美国的固体氧化物燃料电池累计装机量处于绝对领先地位，重点扶持大中型工/商业用供电，特别是由于美国自然灾害频繁，缺少可靠电网，数据中心备用电源应用场景丰富。2001年，由风险资金成立的BE公司，是目前固体氧化物燃料电池领域技术力量最强的公司，也是固体氧化物燃料电池商业化最成功的公司，实现了数百千瓦到数兆瓦的分布式发电系统的商业化应用。图1为BE公司投放的固体氧化物燃料电池发电系统产品，其标准配置可产生250 kW的功率，占地面积大约相当于30 ft集装箱的一半，发电效率高达65%，处于世界领先水平，通过提供安全可靠供电服务于银行和金融服务、数据中心、政府、酒店、物流等各个行业，主要客户包括苹果公司、沃尔玛百货有限公司、美国银行、谷歌公司等数十家全球财富百强公司。除了比较知名的BE公司外，FuelCell Energy等公司也积极进行固体氧化物燃料电池研发布局。美国固体氧化物燃料电池技术推进得益于美国联邦政府的积极引导和财政支持，同时一些地方州政府也通过补贴或税收减免等方式，推动固体氧化物燃料电池产品投放。

日本在新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的领导下，固体氧化物燃料电池规划主要包括家用型（千瓦级）以及电厂型（兆瓦级及以上）等，日本从2005年开始启动家用燃料电池热电联供（ENE-FARM）计划，对ENE-FARM进行示范运行及政府补助，因此目前以家用小型热电联供系统最



图1 BE公司固体氧化物燃料电池发电系统

为成熟,保有量位居全球第一,其中日本京瓷株式会社等从1985年开始一直挑战小型固体氧化物燃料电池的技术开发,2011年率先推出的家用千瓦级固体氧化物燃料电池热电联供系统进入市场,整体系统效率可达90%(LHV)以上,其利用高超的精密陶瓷设计、制造和测评技术,可实现产品 9×10^4 h连续工作,360次启停,12年的设计寿命,目前安装数量持续增加,价格逐渐降低。除此之外,在工业用固体氧化物燃料电池技术研发方面,日本三菱重工(MHI)从20世纪90年代开始针对煤炭高效利用,进行大规模固体氧化物燃料电池发电系统研究。目前,日本三菱与日立集团合资成立的电力公司已成功研发出250 kW固体氧化物燃料电池-微型燃气轮机(MGT)系统,并在日本推广应用。日本NEDO与大崎电业社2017年合作开展IGFC验证项目,2019年开始进行第三期验证工作,即CO₂近零排放IGFC(600 kW \times 2),目标是未来在应用于500 MW级商业发电设施时,CO₂回收率为90%的条件下实现47%的供电效率。

欧洲具有一批成功实现产品化的公司,如Ceres Power、Sunfire、Solid Power、Elcogen、Convion、Topose等,与日本相似,欧洲的固体氧化物燃料电池市场主要应用为微型热电联供(Micro-CHP)系统,近年来由于可再生能源的快速发展,Sunfire、Topose正在转向固体氧化物燃料电池的逆过程即固体氧化物电解池技术研究。Ceres Power是一家英国公司,是新一代、低成本金属支撑燃料电池技术的领导者,其特有的Steel Cell TM技术,源自英国帝国理工学院,已持续研究开发近16年,2019年,Ceres Power宣布成功开发了首个专为氢燃料设计的零排放热电联产系统。爱沙尼亚的Elcogen成立于2001年,具有最先进的陶瓷阳极支撑、低温固体氧化物燃料电池制造技术,其生产的电池片和电堆性能处于国际领先水平,目前已经商业化。芬兰的Convion公司成立于2012年,主要基于固体氧化物燃料电池技术开发用于分布式发电和工业自发电的燃料电池系统,其开发的C60产品,可使用天然气或沼气为原料,输出功率60 kW,发电效率达到60%,总的能量效率达到83%。

从各个国家固体氧化物燃料电池技术商业化进程可以看出,固体氧化物燃料电池技术的发展需要政府的引导和大力支持,特别是在商业化尚未成

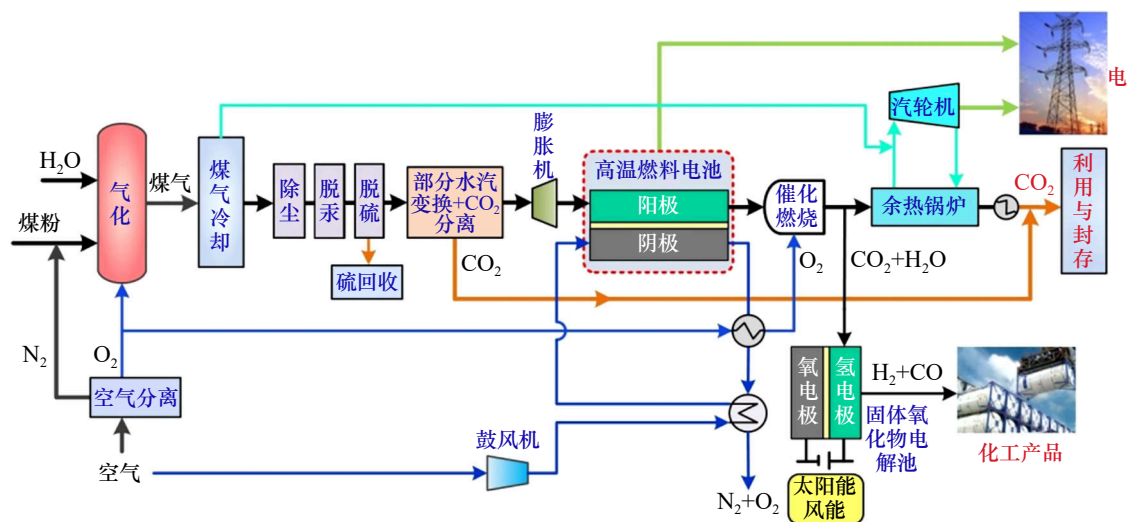
型的前期导入阶段,财政补贴尤为重要。另一方面,政府、企业、高校、科研院所之间的协同合作机制对于固体氧化物燃料电池全产业链发展非常重要。

(二) 我国固体氧化物燃料电池技术的发展现状及存在问题

国外固体氧化物燃料电池的研发方向主要聚焦于降低成本和提高稳定性方面,中国则起步较晚,尚处于初步探索阶段。“十二五”期间,中国矿业大学(北京)作为依托单位,联合中国科学技术大学、北京科技大学等承担了国家“973计划”项目——碳基燃料固体氧化物燃料电池体系基础研究,开展固体氧化物燃料电池相关基础理论和关键技术研究;中国科学院大连化学物理研究所、宁波材料技术与工程研究所、华中科技大学和中国科学院上海硅酸盐研究所分别承担了“863计划”项目——5千瓦系统和25千瓦电池堆项目,在固体氧化物燃料电池关键材料及单电池开发方面取得很大进步[11]。

“十三五”期间,大型能源集团如国家能源集团、国家电网有限公司、中国华能集团有限公司、潍柴动力股份有限公司、晋能控股装备制造集团有限公司等开始介入,为固体氧化物燃料电池的发展提供了很好契机。

在固体氧化物燃料电池技术应用场景方面,IGFC技术有助于实现煤炭的清洁高效利用,是煤炭领域的变革性技术。为推进IGFC相关技术攻关和工程示范,科学技术部在2017年立项了国家重点研发计划“CO₂近零排放的煤气化发电技术”,由国家能源集团牵头,联合中国矿业大学(北京)、中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、清华大学等单位组成“产学研”攻关团队,其核心任务是开发高温固体氧化物燃料电池和固体氧化物电解池技术,建成CO₂近零排放的IGFC示范工程,项目总体技术路线如图2所示。IGFC系统一般由煤气净化、高温燃料电池发电、余热回收及CO₂捕集和封存等子系统构成,其中高温燃料电池发电技术是制约IGFC发展的关键技术。项目组目前已开发了固体氧化物燃料电池电堆和IGFC测试平台,已实现了20千瓦级IGFC发电系统试车,下一步将依托已有技术开展100千瓦级IGFC发电系统示范[12]。目前,国内IGFC仍处于起步阶段,煤气净化提纯

图2 CO₂近零排放的IGFC系统技术路线图

技术、高温燃料电池技术、系统耦合控制技术等相关技术研究正逐步开展。高温固体氧化物燃料电池技术是制约IGFC发展的关键技术，目前，国内的固体氧化物燃料电池技术尚未完全成熟，一方面应加强基础研究，另一方面要重点开展关键技术攻关，降低成本，提高寿命。

国内相关的固体氧化物燃料电池企业主要有潮州三环（集团）股份有限公司、苏州华清京昆新能源科技有限公司、宁波索福人能源技术有限公司、武汉华科福赛新能源有限责任公司等。

潮州三环（集团）股份有限公司是美国BE公司的主要供货商，从2004年开始开展固体氧化物燃料电池电解质膜的开发和生产。2012年开始量产固体氧化物燃料电池单电池，2017年开始向国内市场推出固体氧化物燃料电池电堆，目前正在进行30 kW固体氧化物燃料电池系统研发。苏州华清京昆新能源科技有限公司创建于2010年，相关产品包括单电池、电堆、发电系统等。2018年成立徐州华清京昆新能源科技有限公司，在徐州投资建设固体氧化物燃料电池智能制造工厂。2019年8月，徐州华清固体氧化物燃料电池项目首批20万片单电池生产线投产。宁波索福人能源技术有限公司创立于2014年，目前建立了固体氧化物燃料电池单电池、电池堆以及发电系统的生产线，一直对外公开销售单电池、电堆以及发电系统等产品；2022年1月，研制的25 kW固体氧化物燃料电池发电系统顺利运行。武汉华科福赛新能源有限责任公司成立于2016年，是

一家专业从事固体氧化物燃料电池发电系统研发的高科技企业。目前，公司成功研制了1~5 kW独立发电系统及各种规格测试台。

从整体来说，国内固体氧化物燃料电池在产业化方面与国外差距巨大，仍处于产业发展初期，虽然经过了20多年的技术积累，已经基本掌握了固体氧化物燃料电池关键材料的制备技术和大面积单电池的量产技术，但技术力量不强，特别是由于核心电堆的一致性、可靠性以及低成本技术未完全突破，加之国产高温系统辅助部件缺失，我国目前尚无公开报道长期运行的固体氧化物燃料电池商业化系统，固体氧化物燃料电池的应用研究仍然主要集中在突破关键技术及建设示范工程上。目前我国固体氧化物燃料电池产业化发展仍存在很多亟待解决的问题。

1. 应用基础研究薄弱，关键技术缺失

固体氧化物燃料电池运行温度高，产业链长，工程技术难度也最大，是典型的“高门槛”技术，且国外固体氧化物燃料电池先进技术和产品早期均对中国一定程度禁运禁售，属于“卡脖子”类核心技术，全靠自主研发。我国固体氧化物燃料电池起步明显落后，开始从事固体氧化物燃料电池研究时，国外已基本具备了固体氧化物燃料电池产业化的基础，电池稳定性评估已经达到了数万小时，即使目前，国内也不具备如此高稳定性的固体氧化物燃料电池技术。我国固体氧化物燃料电池发表论文数量众多，但主要偏向于新材料方面，与实际应用相结

合的关键技术研究相对薄弱,致使产业化进程缓慢。

2. 固体氧化物燃料电池产业链长、国内技术无法共享

在基础研究方面,国内大部分高校或企业是单兵作战,只能在自己熟悉的专业领域开展一些力所能及的工作,致使相关基础研究较为分散,虽然有科研项目支持,但未完全形成合力,未能形成良好的理论和技术体系。在资金薄弱的情况下,很多工作是重复性的,所以国内固体氧化物燃料电池的进展十分缓慢。相比之下,欧洲、日本和美国各企业之间商业合作频繁,技术互补,发展迅猛。美国针对固体氧化物燃料电池,在1999年由能源部牵头建立固态能量转换联盟(SECA),由产业团队、技术团队和联邦政府三方构成,相互协调配合,共同推进固体氧化物燃料电池产品的研发与商业化进程。日本主要在NEDO的领导下进行固体氧化物燃料电池的相关研发工作,NEDO联合了日本主要科研机构 and 大型企业,致力于进一步提升运行寿命和降低系统成本。

3. 缺少足够的资金投入,产业化成本较高

相对于其他燃料电池,固体氧化物燃料电池难度很大,需要投入巨大的资金来支持。但是,在早期除了政府提供的国家项目支持外,很少有企业投资。大多数企业都处于观望的状态,只有部分由高校或研究院组建的企业在推进固体氧化物燃料电池的产业化,进展相对缓慢。在产业化初期,由于规模较小,参与的企业较少,配套不足,核心电池电堆以及各种零部件,包括热交换器、催化燃烧器、氢气循环泵等,都是定制产品,导致了固体氧化物燃料电池系统价格高。此外,固体氧化物燃料电池的工作温度高达650~800℃,工业级的固体氧化物燃料电池产品要求有数万小时的寿命,且常年不间断运行,对各种部件、材料、涂层的耐高温老化性能要求极高,推高了材料及工艺成本。固体氧化物燃料电池高加速老化测试评价技术不成熟,任何的技术改进均需要相当长的时间进行验证。在产业初期,研发投入折算的成本非常高。但值得庆幸的是,“十四五”以来,固体氧化物燃料电池正在被众多企业重视,发展前景明朗。随着氢能与燃料电池的发展热潮,一系列政策出台,固体氧化物燃料电池技术进入快速发展期。

四、我国固体氧化物燃料电池产业发展路径

(一) 发展思路

“十四五”以来国家密集出台了多项针对氢能的政策,特别是2022年3月23日,国家发展和改革委员会、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》,提出稳步推进氢能多元化示范应用。燃料电池车辆只是氢能应用的突破口,长远发展应逐步拓展在储能、分布式发电、工业等领域的应用。固体氧化物燃料电池应用前景广泛,既能实现煤炭、天然气等化石能源的高效低碳利用,还能实现氢能的绿色高效利用,因此,以固体氧化物燃料电池为代表的燃料电池技术是未来能源转型的重要技术支撑,也是新兴产业发展的重要方向。

从保障我国能源安全和发展战略性新兴产业的国家战略需求出发,发展固体氧化物燃料电池技术及产业有利于优化能源结构、带动产业转型升级、推动能源生产与消费革命、壮大绿色低碳产业体系、培育出新的经济增长点。因而,我国未来相当长一段时间需要持续加强固体氧化物燃料电池基础与应用技术研究,掌握固体氧化物燃料电池理论、材料创新体系;重视固体氧化物燃料电池相关的工程、工艺与装备开发,推进固体氧化物燃料电池产业的形成,健全与完善固体氧化物燃料电池产业链;逐步扩大固体氧化物燃料电池系统示范规模,提升固体氧化物燃料电池技术水平;完善固体氧化物燃料电池法规标准建设,加强顶层规划与设计,发挥政策对固体氧化物燃料电池产业的引导作用,最终建立低成本的固体氧化物燃料电池材料、部件、系统的制备与生产产业链,实现固体氧化物燃料电池在无补贴的情况下商业化运行。

随着我国能源形势日益严峻及环保压力持续加大,对降低CO₂排放、实现煤炭资源清洁高效利用的需求越来越迫切[13],煤炭清洁高效利用技术创新是我国《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》的重要内容。在整体煤气化联合循环发电的基础上发展的煤气化燃料电池发电技术,可实现煤基发电由单纯热力循环发电向电化学和热力循环复合发电的技术跨越,大幅提高煤电效率,在高效发电的同时实现污染物近零排放和负荷快速响应,被视作未来最有发展前景的近零排放煤气化发电技

术。国家《“十三五”国家科技创新规划》和《能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）》等都将IGCC/IGFC列为重要内容和发展目标。2017年，我国启动了面向2030年重大科技项目，其中明确要求完成基于IGFC发电关键技术研发和工程示范。

因此，为满足当前能源需求和环境保护，一方面需要加快开发基于固体氧化物燃料电池的化石能源的洁净、高效利用技术，另一方面也需要突破基于固体氧化物燃料电池的储能调峰技术，促进能源结构向可再生能源过渡，推动能源技术革命。

（二）重点任务

我国应该加快研发固体氧化物燃料电池系列关键技术，实现固体氧化物燃料电池系统的规模性示范，面向2035年应该进行兆瓦级固体氧化物燃料电池规模化的示范与试运行。重大技术攻关包括兆瓦级固体氧化物燃料电池分布式能源系统开发，突破固体氧化物燃料电池材料、封接、连接体关键材料及技术，掌握长寿命的固体氧化物燃料电池及其关键部件的批量制备与生产技术、系统集成技术。试验示范方面：确定IGFC重点示范工程，推动固体氧化物燃料电池装备的试验示范，实现规模化应用。

基于国家能源技术革命的重大需求，针对商业化实际应用，通过对固体氧化物燃料电池的国内外研究现状和专利布局进行梳理，明确了我国固体氧化物燃料电池技术差距、制约因素及发展优势，同时鉴于目前国内固体氧化物燃料电池技术尚未完全成熟，迫切需要示范需求，“十四五”时期尽快开发100千瓦级固体氧化物燃料电池发电单元在规模和示范效果上均无疑是最合适的选择，可为兆瓦级乃至百兆瓦级发电系统规模化奠定基础。100千瓦级发电单元在城市数据中心及分布式发电应用、农村及偏远地区生物质气发电、大型煤气化燃料电池发电、水面舰艇洁净高效发电、电解制氢实现能源转化与储存等方面均具有广泛的应用前景。基于此，我国固体氧化物燃料电池需要突破的关键性技术主要包括以下方面。

1. 开发低成本高性能单电池批量化制备技术

加强低成本、高性能关键元件产业化技术研发和批量生产，重点解决产品一致性、稳定性和长寿命等；掌握薄膜电解质低温致密化及高活性纳米电

极原位构建技术，提高阴极活性以及阳极抗氧化及颗粒粗化能力，研究服役工况下材料结构演变和界面互扩散过程，研究电池耐久性加速实验方法，实现工业尺寸单电池的低成本批量稳定生产。高性能单电池的一致性对于电堆的集成至关重要，需要设备的可靠性及工艺的标准化。另外单电池的成品率迫切需要提高，从而降低生产成本。

2. 突破高一致性可靠性电堆设计、集成及产业化技术

对于高温运行的电堆单元工程化集成技术及批量化装配技术，重点解决一致性和稳定性；在电堆集成过程中，燃料供应（布气技术）、单元电池取电、封接材料选择及结构设计技术均非常关键，需要设计具有自主知识产权的高可靠电堆结构，开发新型可循环及可修复的复合封接材料和封接方法，开发低成本不锈钢材料，优化抗氧化涂层制备技术，掌握电堆标准化组装技术，为高性能稳定运行奠定基础。

3. 掌握高效系统集成、控制管理及示范技术

虽然小电堆开发相对容易，但采用小电堆集成难度大，系统结构复杂、热管理难度大。采用大功率的电堆，虽然开发困难，但系统相对简单，传热宽容度好。需要解决多电堆管理集成模组工程化技术，多堆之间串、并联管理，电堆内热和尾气余热利用和平衡管理技术；需要重点突破系统（高效率、低成本、长寿命）集成控制技术、长期性能评价及衰减快速评测技术等。实现配套气化炉设备平衡（BOP）部件标准化研发及批量制造，突破直接使用多种复杂碳基燃料的固体氧化物燃料电池热电源系统集成技术，掌握电力控制及并网技术，最终通过产、学、研、资结合，共同发展固体氧化物燃料电池技术。

4. 拓展固体氧化物燃料电池产业化应用场景

海上航运业面临越来越严苛的船舶排放控制。国际海事组织（IMO）提出，到2050年全球海运业温室气体年排放量要比2008年减少50%，以推动海运业逐步朝零碳目标迈进。为实现零碳目标，可再生能源在船舶交通方面的利用将变得越来越重要。由于锂电池等新技术的体积功率密度难以达到大型船舶长航时的要求，提高发电系统体积功率密度是大力推广新能源船舶领域应用的主要发展方向。可以使用高体积能量密度燃料，并且更高效发电的固

体氧化物燃料电池技术会在船舶动力方面得到大力施展的空间,同时,由于没有对固体氧化物燃料电池启动时间进行约束,该技术在交通领域最具竞争力。因此,国家需要在船舶领域对固体氧化物燃料电池技术进行引导,实现固体氧化物燃料电池电力系统在船舶上应用。

太阳能、风能等可再生能源的快速增长迫切需要大力发展与之相匹配的大规模储能调峰技术。可逆固体氧化物电池(RSOC)是一种全固态电化学能量转换装置,集成了固体氧化物燃料电池和固体氧化物电解池优势,可以实现化学能和电能的高效洁净转换,有望应用于间歇式可再生能源长周期存储转化、智能电网调峰以及分布式发电等领域,与现有能源系统兼容,符合国家重大需求。当电能不足时,外界供给其燃料(和空气),它以固体氧化物燃料电池方式工作;当电能过剩时,外界供给其可再生电能(H_2O/CO_2),它以固体氧化物电解池方式工作,通过电解的方式将 H_2O/CO_2 转化为 H_2/CO (可进一步制备甲烷、甲醇等),把电能以化学能的方式存储下来或再用于燃料电池发电,RSOC可逆循环效率可达70%以上,具有很好的应用前景。

五、保障措施与政策建议

为推动固体氧化物燃料电池自主关键技术发展及早日商业化,国家需要加强顶层设计,统筹规划,持续支持开展固体氧化物燃料电池基础科学问题与关键技术研究,同时立足国情,坚持多元应用与示范先行,因地制宜开展固体氧化物燃料电池技术的商业应用示范。

(一) 加快制度体系建设,加强固体氧化物燃料电池技术及产业发展的顶层设计

随着“双碳”目标的提出,国内陆续出现固体氧化物燃料电池示范应用案例,地方政府开始发布相关政策方面的扶持,2021年北京市出台氢能产业发展实施方案,明确将固体氧化物燃料电池的发展目标列入其中。2022年4月,广东省印发《广东省能源发展“十四五”规划》,提出发展固体氧化物燃料电池及其分布式发电成套装备,推广高温燃料电池冷热电三联供应用示范。但与欧美等发达国家和地区相比,我国固体氧化物燃料电池补贴力度还

不够大,产业链不够完善,要从政策上鼓励既具有核心技术又有长远发展规划和发展潜力的企业加大投入,尤其是填补国内空白的核心材料与零部件的企业,并加强监督管理,设立阶段性目标,提高政策实施的滚动评估力度,有效推进固体氧化物燃料电池产业发展。从国家层面明确固体氧化物燃料电池技术发展路线图,引领固体氧化物燃料电池创新发展方向。

(二) 强化财税金融支持,充分发挥市场在资源配置中的决定性作用,突出企业主体地位

发挥好财政性资金作用,支持开展固体氧化物燃料电池重大技术装备的试点示范和前沿关键技术研发应用。基于已有政策的延续性,针对所选择的典型行业,参考国外先进经验与成熟案例,制定相关的激励与补贴政策以及对应的约束与监督机制、考核机制。对具有一定基础的关键性零部件供应链企业进行政策培育与保底。

(三) 坚持创新驱动发展,把自主技术创新作为推动固体氧化物燃料电池产业发展的主要驱动力

注重发展核心技术,尤其要重视关键材料与部件的国产化。完善技术链、健全产业链,特别要关注上游关键材料的批量生产线,研制出符合市场需求的产品,使固体氧化物燃料电池产业健康、可持续发展。聚焦固体氧化物燃料电池发展面临的技术短板,集中优势资源,在核心材料、核心装备、关键零部件、系统集成等领域开展技术攻关,提升自主化能力,缩小与国际先进水平的差距。

(四) 完善标准规范体系,形成具有自主知识产权的技术标准

目前国际上仅有少量固体氧化物燃料电池标准,我国固体氧化物燃料电池标准更是缺乏。2018年国家能源局同意成立能源行业高温燃料电池标准化技术委员会,主要负责固体氧化物燃料电池和熔融碳酸盐燃料电池技术及产业领域的标准化工作。因此需要在此基础上尽快推动完善固体氧化物燃料电池产业技术标准体系,支持开展团体标准、行业标准研究,加快构建国家标准、行业标准和团体标准相结合的标准化协同创新机制,超前部署固体氧化物

燃料电池创新领域标准。鼓励行业龙头企业牵头研究制定企业标准。推荐固体氧化物燃料电池产品检验检测和认证公共服务平台建设,加快完善固体氧化物燃料电池产品质量认证体系。建设若干固体氧化物燃料电池国家技术标准创新基地,建立各级标准化及第三方检测认证平台。

(五) 加强固体氧化物燃料电池领域人才培养, 深化国际交流与合作

人才是科技创新的第一要素,应积极推进固体氧化物燃料电池领域专业人才储备工作建设。一方面,应积极引进高精尖技术人才,迅速组建一批“产学研政”多方协同创新的固体氧化物燃料电池产业技术攻关团队。另一方面,要加强燃料电池后备人才建设,推进燃料电池相关学科体系建设,目前教育部设立了氢能科学与工程和碳储科学与工程专业,还应鼓励大专院校设置燃料电池专业,职业性院校加强燃料电池相关技能型人才培养。同时,还应建立健全固体氧化物燃料电池产业人才激励机制,助推整个固体氧化物燃料电池产业健康、有序、快速发展。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Global energy review: CO₂ Emissions in 2021 [EB/OL]. (2022-03-02)[2022-04-30]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>.
- [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. China Petroleum Enterprise Association. Blue paper on China's oil and gas industry development analysis and outlook report (2021—2022) [R]. Beijing: China Petroleum Enterprise Association, 2022.
- [3] 凌文, 刘玮, 李育磊, 等. 中国氢能基础设施产业发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 76–83. Ling W, Liu W, Li Y L, et al. Development strategy of hydrogen infrastructure industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(3): 76–83.
- [4] Sharaf O Z, Orhan M F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 810–853.
- [5] 韩敏芳, 彭苏萍. 碳基燃料固体氧化物电池发展前景 [J]. 中国工程科学, 2013, 15(2): 4–6. Han M F, Peng S P. Prospect of carbon-based solid oxide fuel cells [J]. Strategic Study of CAE, 2013, 15(2): 4–6.
- [6] Kendall K, Kendall M. High-temperature solid oxide fuel cells for the 21st century: Fundamentals, design and applications(second edition) [M]. Salt Lake City: Academic Press, 2015.
- [7] Peng S P. Current status of national integrated gasification fuel cell projects in China [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021 (8): 327–334.
- [8] 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. Dong B Q, Li C F, Liu C L, et al. Integrated gasification fuel cell power generation technology with CO₂ near zero emission and its challenges [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 189–193.
- [9] Oluleye G, Gandiglio M, Santarelli M. Pathways to commercialisation of biogas fuelled solid oxide fuel cells in European wastewater treatment plants [J]. Applied Energy, 2021, 282: 116127.
- [10] Fernandes M D, Bistrizki V, Domingues R Z, et al. Solid oxide fuel cell technology paths: National innovation system contributions from Japan and the United States [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 127: 109879.
- [11] 韩敏芳. 固体氧化物燃料电池(SOFC)技术进展和产业前景 [J]. 民主与科学, 2017 (5): 25–26. Han M F. Technical progress and industrial prospect of solid oxide fuel cell (SOFC) [J]. Democracy & Science, 2017 (5): 25–26.
- [12] 王琦, 杨志宾, 李初福, 等. 整体煤气化燃料电池联合发电(IGFC)技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(1): 77–83. Wang Q, Yang Z B, Li C F, et al. Research progress of integrated coal gasification fuel cell combined power generation (IGFC) technology [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(1): 77–83.
- [13] 孙旭东, 张博, 彭苏萍. 我国洁净煤技术2035发展趋势与战略对策研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 132–140. Sun X D, Zhang B, Peng S P. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in china toward 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 132–140.