

Views & Comments

## 中国燃料电池现状与展望

彭苏萍

Research Center of Solid Oxide Fuel Cell, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China

### 1. 背景

绿色、低碳、可持续发展已经成为全球共识[1]。在中国，低碳和绿色能源变革面临许多困难和挑战。一方面，作为世界上最大的能源生产国和消费国，中国正面临着大规模以煤为基础的化石能源开采导致的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放严重的问题[2-3]。另一方面，由于可再生能源发电本身的间歇性和波动性，以及我国可再生能源资源地理分布的不均匀性，大规模可再生能源的储存和调峰问题亟待解决。因此，迫切需要开发革命性的能源转换和储存技术，以应对巨大的能源挑战。

氢能具有显著的优势，如洁净、可储存、安全性和可控性；此外，它是一种能源互联介质，可以在诸如交通、工业和建筑的许多领域中部署和利用。氢能可以整合传统化石能源和可再生能源，实现两种能源的平稳过渡[4]。燃料电池技术是氢能应用的关键环节，因为燃料电池可以将氢能和电能结合起来，这将是解决中国碳排放问题的一个重要选择。

### 2. 燃料电池简介

燃料电池是一种直接将燃料的化学能转化为电能的发电装置。根据所用电解质的类型，燃料电池可分为固体氧化物燃料电池(SOFC)、质子交换膜燃料电池(PEM-

FC)、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)[5]。目前，全球燃料电池供应类型主要包括PEMFC和SOFC，从便携式、交通运输到大规模固定电力系统，应用广泛，如图1所示。

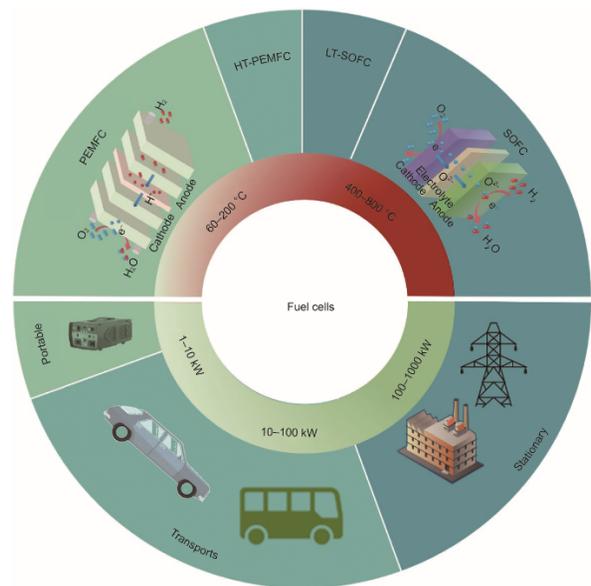


图1. 燃料电池应用示意图。HT-PEMFC：高温质子交换膜燃料电池；LT-SOFC：低温固体氧化物燃料电池；PEM：聚合物电解质膜。

本工作重点介绍了国内和全球质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池的发展现状，讨论了中国质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池技术中存在的问题，总结了质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池工业供应链

中需要解决的关键问题，并对保障措施和政策建议进行了展望。积极发展燃料电池技术将促进中国的能源供给侧改革，推动能源技术革命，为中国早日实现碳达峰和碳中和目标奠定技术基础。

### 3. 质子交换膜燃料电池的发展现状

质子交换膜燃料电池有许多优点，如工作温度低、启动速度快、应用范围广，特别是在运输领域中。欧洲、美国、日本和韩国政府以及大型汽车公司已经将燃料电池汽车作为重要的发展方向。截至2020年年底，全球氢燃料电池汽车保有量达到34 218辆[6]。就全球氢燃料汽车发展类型而言，氢燃料电池汽车主要是乘用车。小型燃料电池乘用车技术的发展使得大型燃料电池商用车的发展成为可能，如氢燃料电池重型卡车和叉车。在国际上，许多质子交换膜燃料电池材料和部件已经初步实现商业化。单个燃料电池系统的功率已经从30~60 kW发展到超过150 kW，铂（Pt）的负载量已经减少到 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1}$ 。目前，固体氧化物燃料电池发展的主要焦点是在高功率、低贵金属催化剂负载、低成本和长寿命方向[7]。

发展燃料电池汽车对于保障国家能源安全、营造低碳减排环境、促进汽车产业转型升级具有重要的战略意义。近年来，中国国内燃料电池产业链进入快速增长阶段，但中国的燃料电池汽车主要是商用车。截至2020年年底，中国拥有7729辆氢燃料电池商用车，这个数字还在快速增长[6]。未来，氢能和燃料电池技术在机车和船舶行业将有广阔的应用前景。

到目前为止，中国燃料电池系统的整体性能已逐渐接近国际一流水平，并处于技术同步发展阶段。国内的燃料电池相关厂商主要包括国家电力投资集团（SPIC）氢能公司、上海捷氢科技股份有限公司、新源动力股份有限公司和潍柴动力股份有限公司等。

加氢站（HRS）的数量影响着质子交换膜燃料电池技术的应用。截至2021年年底，全球共有659家加氢站在运营，其中183家在中国运营。然而，中国以商用车为导向的发展路线并不取决于商业化初期加氢站的数量。

中国已经对质子交换膜燃料电池进行了许多基础研究。根据文献计量分析，在2008—2018年期间关于质子交换膜燃料电池的总共15 020篇研究论文中，美国的贡献最大，为3009篇（约占论文总量的20%）。中国的贡献紧随其后，为2480篇（超过论文总量的16%）[8]。

中国企业是质子交换膜燃料电池车辆、系统和电池堆的主要参与者，但从事燃料电池零部件生产的企业很少，

特别是最基本的关键材料和部件，如质子交换膜、碳纸、催化剂、空气压缩机和氢循环泵等。虽然国内企业在系统领域已开始追赶国际水平，但与国际先进产品相比，在可靠性和耐久性方面仍有明显差距，而且我国一些关键零部件和材料的获取仍依赖进口。中国迫切需要加强国内燃料电池的基础研究以及创新材料、部件和新技术的研发。中国还必须实现关键材料和部件的国产化，提高燃料电池和电池堆的功率密度，为赶超全球先进的燃料电池发展地位奠定基础。

一般来说，传统的低温质子交换膜燃料电池（LT-PEMFC）是在低于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下运行，并且由于系统中水蒸气和液态水的存在，因此存在关键的水管理问题，需要复杂的流场设计来解决。低温质子交换膜燃料电池需要极纯的燃料（即氢气），几乎没有杂质，以防止催化剂中毒；此外，重整气必须通过水煤气转换进行处理，以将一氧化碳（CO）含量降低到10 ppm以下（ $1 \text{ ppm}=1 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ）。在高电流密度下，低温质子交换膜燃料电池也存在氧传输受限的问题，导致大的极化。近年来，高温质子交换膜燃料电池（HT-PEMFC;  $120\sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ）因其优于低温质子交换膜燃料电池的优点而吸引了越来越多的关注，例如，由于高温质子交换膜燃料电池中没有液态水，因此易于热量和水的管理，而且其催化剂对有毒气体的耐受性提高，可以直接使用重整气作燃料[9]。

### 4. 固体氧化物燃料电池的发展现状

固体氧化物燃料电池可以使用非高纯度的氢作为燃料。特别地，它们可以使用各种含碳燃料（如天然气、生物质气、汽油、柴油、乙醇等）直接运行[10]，与现有的能源供应系统兼容。固体氧化物燃料电池又称为陶瓷燃料电池，具有全固态陶瓷结构，寿命可达100 000 h，可模块化设计，易于安装，在不同额定功率下具有较高的电效率，并能提高电网运行的灵活性和安全性。固体氧化物燃料电池的缺点包括运行温度较高——这影响了材料选择的范围和由于材料退化而造成的寿命损坏——以及冷启动较慢。固体氧化物燃料电池最常见的应用领域是固定式发电，包括小型家用热电联产（CHP）、数据中心备用电站和工业固定电站。在这些应用中， $\text{CO}_2$ 近零排放的大规模分布式整体煤气化燃料电池发电（IGFC）系统将成为未来主要的研究方向。

美国、欧洲、日本等发达国家和地区一直占据着固体氧化物燃料电池技术的全球领先地位。经过几十年的技术攻关，出现了数家具有特色技术和商业化产品的固体氧化

物燃料电池公司，如美国的 Bloom Energy、日本的 Kyocera、英国的 Ceres Power、意大利的 Solid Power 和爱沙尼亚的 Elcogen [11–12]。在这些公司中，由风险投资资助的 Bloom Energy 公司是目前固体氧化物燃料电池商业化最成功的燃料电池公司。其固体氧化物燃料电池产品的单输出功率范围为 100~250 kW，其电转换效率可高达 65%。Bloom Energy 为苹果、沃尔玛和美国银行等数十家全球财富 100 强企业的大型数据中心提供了安全可靠的电力供应。2020 年，Bloom Energy 和三星重工签署了一项联合开发协议，共同设计和开发燃料电池船舶，实现了他们对船舶清洁能源和更可持续的海上运输业的愿景。日本的 Kyocera 公司在 1985 年开始为固体氧化物燃料电池应用开发专利陶瓷技术。2011 年，该公司开始批量生产家用千瓦级固体氧化物燃料电池热电联产系统，总效率超过 90% [较低热值 (LHV)]。目前，安装数量持续增加，同时价格逐渐降低。

国外固体氧化物燃料电池研发主要着眼于降低成本和提高稳定性方面；相比较而言，我国的研发起步较晚，仍处于初步探索阶段。近年来，中国在固体氧化物燃料电池关键材料和单体电池的研发方面取得了长足的进步。潮州三环（集团）股份有限公司（CCTC）凭借其在陶瓷制造方面的专业知识，已成为 Bloom Energy 的固体氧化物燃料电池电解质片的核心供应商。“十二五”期间，由中国矿业大学（北京）牵头完成了首个面向固体氧化物燃料电池的国家重点基础研究发展计划（973 计划）。此外，国家高技术研究发展计划（863 计划）示范项目（包括 5 kW 系统和 25 kW 电池堆项目）分别由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、华中科技大学和中国科学院上海硅酸盐研究所承担。然而，在高效、可靠和稳定的电池堆和系统集成技术方面尚未实现完全突破，导致中国在固体氧化物燃料电池商业化方面远远落后于国外。“十三五”期间，国家能源集团、国家电网有限公司、潍柴等大型能源公司已启动固体氧化物燃料电池研发，为固体氧化物燃料电池在中国的发展创造了良好的机遇。

2017 年 7 月，国家能源集团联合中国矿业大学（北京）等获得了科技部国家重点研发计划的资助，开发“CO<sub>2</sub>近零排放的煤气化燃料电池发电技术”[13]。这个项目的核心是高温固体氧化物燃料电池技术的开发。IGFC 是一个将整体煤气化联合循环（IGCC）与高温固体氧化物燃料电池相结合的发电系统。IGFC 有望进一步提高煤气化发电的效率，降低二氧化碳捕集成本，同时实现二氧化碳和污染物的近零排放，是煤炭发电的一项根本性变革技术。

中国尚未公开报道长期运行的固体氧化物燃料电池商

业系统。中国的固体氧化物燃料电池研究主要集中在关键材料、工艺、设计和部件技术的突破，以及示范项目的建设。例如，目前的 IGFC 示范项目是由国家能源集团在宁夏建立的。2022 年，100 kW 的 IGFC 试验示范系统通过了专家现场评估。此外，潮州三环（集团）股份有限公司报道了一个 100 kW 的固体氧化物燃料电池系统示范，其交流发电的净效率高达 64.1%。“十四五”以来，随着氢能和燃料电池的发展，国家出台了一系列政策，固体氧化物燃料电池技术进入快速发展期。

固体氧化物燃料电池研发面临的第一个关键问题是高温下运行带来的许多部件的退化问题。固体氧化物燃料电池技术是典型的“高门槛”技术[14]，涉及电化学、材料科学、机械工程等相关专业。然而，国内行业发展的专有信息不能很好地共享。在基础研究方面，国内大部分高校或企业都是单打独斗，只能在自己熟悉的研究领域开展力所能及的工作，没有形成合力来建立一个良好的理论和技术体系。

其次，中国固体氧化物燃料电池研发起步较晚，投资不足，产业参与不足。虽然国内发表了相当数量的与固体氧化物燃料电池相关的论文，但结合实际应用的固体氧化物燃料电池关键技术研究还相对薄弱，导致商业化进程缓慢。与中国形成鲜明对比的是，在美国和日本，工业界、学术界和政府互动是固体氧化物燃料电池发展的基础[15]。例如，美国为发展固体氧化物燃料电池建立了一个固态能源转换联盟（SECA）计划，该计划由三方组成：工业团队、核心技术团队和联邦机构，三方协调合作，共同促进了固体氧化物燃料电池产品的开发和商业化。此外，投入力度也极大地影响了商业化进程，自 2002 年以来，美国对固体氧化物燃料电池的年均投资一直保持在 3000 万美元以上，Bloom Energy 在美国的累计投资已超过 10 亿美元。

## 5. 燃料电池的战略思考和发展路径

燃料电池是未来能源转型的重要技术手段。因此，在未来很长一段时间内，中国需要继续加强燃料电池的基础和应用研究，重视燃料电池相关工程，加强燃料电池工艺和设备的研发，促进燃料电池产业的形成。还需要不断完善中国燃料电池产业供应链，逐步扩大燃料电池系统示范规模，提高燃料电池技术成熟度，完善燃料电池法规和标准建设，加强燃料电池顶层规划和设计，并提出引导燃料电池产业的政策。最后，中国需要为燃料电池建立低成本的材料、部件、系统和生产产业链，以实现燃料电池的无补贴商业运营。

目前,随着燃料电池技术的快速进步,中国已经具备了生产高功率质子交换膜燃料电池堆和系统的水平,为了提高燃料电池性能和寿命的同时大幅降低成本,质子交换膜燃料电池的发展路径也逐渐清晰。质子交换膜燃料电池中的大多数关键材料和部件都是进口的,这严重限制了燃料电池的制造成本,并且在未来的商业化过程中无法确保关键材料的安全供应。因此,当前发展的重点是大力推动形成具有自主知识产权的燃料电池堆和关键材料产业链,确保质子交换膜燃料电池商业化发展的技术支持和生产能力。

鉴于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,在“十四五”期间应尽快研制100 kW级固体氧化物燃料电池发电单元,为未来兆瓦级乃至100 MW级发电系统的规模化奠定基础。100 kW级发电单元作为基本单元可广泛用于城市数据中心和分布式发电、农村和偏远地区的生物质燃气发电以及大规模煤气化燃料电池发电。

### 5.1. 质子交换膜燃料电池产业链中的关键任务

质子交换膜燃料电池产业链未来必须完成以下关键任务:

(1) 改善质子交换膜燃料电池电池堆的性能和比功率,提高质子交换膜燃料电池的耐久性,降低成本(特别是对于商用车辆),并改善质子交换膜燃料电池电池堆中关键核心材料的国内供应;

(2) 发展高温质子交换膜燃料电池技术,研究高温/高污染耐受性和高海拔环境适应性技术,巩固高温质子交换膜燃料电池新材料体系,促进质子交换膜燃料电池生产和大规模质子交换膜燃料电池应用。

### 5.2. 固体氧化物燃料电池产业链中的关键任务

要提升固体氧化物燃料电池产业链,必须完成以下关键任务:

(1) 开发低成本、高性能的单电池技术,研究使用含碳或氨燃料的固体氧化物燃料电池的应用[16],研究运行工况下电极活性的提高和污染物抗侵蚀机理,研究开发质子导体材料和关键技术,发展低温固体氧化物燃料电池,以及开发加速寿命测试的技术和方法;

(2) 高效、稳定和可靠的电池堆设计和集成技术,包括可循环和可修复的陶瓷金属密封技术、低成本不锈钢材料开发和抗氧化涂层技术;

(3) 大功率模块集成技术和热管理技术、系统集成技术及相关控制策略等IGFC系统技术开发;

(4) 扩大固体氧化物燃料电池的工业应用,如运输和

船舶应用,并加强固体氧化物电解池(SOEC)的制氢技术开发。

## 6. 保障措施和政策建议

为了促进燃料电池技术的发展和早日商业化,中国需要加强燃料电池的顶层设计,从国家层面布局战略规划,并继续支持燃料电池的基础科学和关键技术研究。同时,中国必须立足国情,坚持多应用场景,因地制宜开展燃料电池商业应用示范。

## 致谢

本工作得到了国家重点研究发展计划(2017YFB0601900)和中国工程院重大咨询项目(2019-ZD-3)的支持。

## References

- [1] White paper of “energy in China’s new era” [Internet]. Beijing: The State Council Information Office of the People’s Republic of China; [cited 2020 Dec 21]. Available from: <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/42311/44521/>. Chinese.
- [2] CO<sub>2</sub> emissions by country 2022 [Internet]. World Population Review; [cited 2022 Nov 1]. Available from: <https://worldpopulationreview.com/countryrankings/co2-emissions-by-country>.
- [3] Sun X, Zhang B, Peng S. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in China toward 2035. *Strateg Study Chin Acad Eng* 2020;22(3):132–40. Chinese.
- [4] Li Z, Zhang W, Zhang R, Sun H. Development of renewable energy multi-energy complementary hydrogen energy system (a case study in China): a review. *Energy Explor Exploit* 2020;38(529):014459872095351.
- [5] Steele BCH, Heinzel A. Materials for fuel-cell technologies. *Nature* 2001;414:345–52.
- [6] China Hydrogen Alliance. China hydrogen energy and fuel cell industry development report 2020. Beijing: China Hydrogen Alliance; 2021.
- [7] Huang X, Zhao W, Shao Z, Chen L. Development strategies for new energy materials in China. *Strateg Study Chin Acad Eng* 2020;22(5):60–7. Chinese.
- [8] Yonoff RE, Ochoa GV, Cardenas-Escorcua Y, Silva-Ortega JI, Meriño-Stand L. Research trends in proton exchange membrane fuel cells during 2008–2018: a bibliometric analysis. *Heliyon* 2019;5(5):e01724.
- [9] Haider R, Wen Y, Ma ZF, Wilkinson DP, Zhang L, Yuan X, et al. High temperature proton exchange membrane fuel cells: progress in advanced materials and key technologies. *Chem Soc Rev* 2021;50:1138–87.
- [10] Kendall K. High-temperature solid oxide fuel cells for the 21st century (second edition)—introduction to SOFCs. Amsterdam: Elsevier; 2015.
- [11] Andersson M, Sundén B. Technology review—solid oxide fuel cell. Stockholm: Energiforsk; 2017.
- [12] The Fuel Cell Industry Review 2021. London: E4tech; 2021.
- [13] Peng S. Current status of national integrated gasification fuel cell projects in China. *Int J Coal Sci Technol* 2021;8(3):327–34.
- [14] Singh M, Zappa D, Comini E. Solid oxide fuel cell: decade of progress, future perspectives and challenges. *Int J Hydrog Energy* 2021;46(54):27643–74.
- [15] Fernandes MD, Bistrizki V, Domingues RZ, Matencio T, Rapini M, Sinisterra RD. Solid oxide fuel cell technology paths: national innovation system contributions from Japan and the United States. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;127:109879.
- [16] Jiang L, Fu X. An ammonia-hydrogen energy roadmap for carbon neutrality: opportunity and challenges in China. *Engineering* 2021;7(12):1688–91.