

固体氧化物燃料电池产业的发展现状及展望

陈烁烁

(潮州三环(集团)股份有限公司, 广东 潮州 515600)

摘 要: 固体氧化物燃料电池(SOFC)是先进陶瓷材料的一种重要应用, 能通过高温电化学反应, 直接将燃料中的化学能转换为电能。具有发电效率高、安静无噪音、绿色低排放、燃料来源广泛等优点, 是实现我国化石能源清洁利用的有效途径。本文就国内外 SOFC 产业的发展情况进行介绍, 并从应用、技术开发、产业链及国家政策方面对我国 SOFC 产业的未来发展做了展望。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 化石能源清洁利用; 产业发展

中图分类号: TQ174.75

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2020)05-0627-06

Development and Prospects of Solid Oxide Fuel Cell Industry

CHEN Shuoshuo

(Chaozhou Three-Circle (Group) Co., Ltd., Chaozhou 515600, Guangdong, China)

Abstract: As an important application of advanced ceramic materials, solid oxide fuel cell (SOFC) is a power generation technology that directly converts chemical energy into electricity through high-temperature electrochemical reactions. It has the advantages of high electricity conversion efficiency, low noise, low emissions, and fuel source flexibility. It is an effective way to realize clean utilization of fossil energy. This article introduces the development of SOFC industry in China and overseas market, and looks forward to the future development in terms of applications, technology development, supply chain and national policies.

Key words: solid oxide fuel cell; clean use of fossil fuels; industrial development

0 引 言

随着全球经济与社会的快速发展, 能源需求的日益增长与环境恶化之间的矛盾日益突出。我国碳排放量高、PM_{2.5} 污染等问题尤为突出。一方面, 我国能源结构相对单一, 2017 年的一次能源来源中, 化石能源占比高达 81%, 油气资源对外依存度分别达到 70%和 40%^[1], 且不断攀升, 成为我国能源供应的重大风险, 在短期内无法得到根本扭转; 另一方面, 我国的煤炭资源储量在所有化石能源储量的占比高达 94%^[2], 而目前由于煤炭的深加工和处理技术的限制, 煤炭的利用仍是以简单的燃烧获取热量为主, 但是燃烧不可避免产生大量的飞灰、硫氧化物、氮氧化物等大气污染

物, 由此引发了系列环境污染问题。因此, 如何促进化石能源的高效、清洁利用, 是我国面临的重大战略问题。

SOFC 是一种通过高温电化学反应直接将化学能转换为电能的发电技术, 具有发电效率高、安静无噪音、无硫氧化物和氮氧化物的排放、二氧化碳排放大幅降低且易捕集, 可使用天然气、煤制气、沼气等资源高效发电等优点, 是实现我国化石能源清洁利用的有效途径^[3,4]。

1 SOFC 应用的优点

SOFC 与常用的分布式发电设备, 如微型燃气轮机、中小型燃气轮机、内燃机等相比, 具有明

收稿日期: 2020-06-12。修订日期: 2020-07-15。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1502600)。

通信联系人: 陈烁烁(1982-), 男, 博士, 高级工程师。

Received date: 2020-06-12.

Revised date: 2020-07-15.

Correspondent author: CHEN Shuoshuo (1982-), Male, Ph.D., Senior engineer.

E-mail: css@cctc.cc

显的优势^[5-7]:

(1) 发电效率高。SOFC 将化学能直接转换成电能, 不受卡诺循环效率限制, 发电效率可以高达 65% 以上, 发电效率具有明显优势, 尤其是在 MW 级以下的发电单元, 优势特别明显。同时, SOFC 作为分布式能源供电, 可就近安装在负载中心临近位置, 避免了电网长距离传输和配送损耗。

(2) 燃料来源广泛。SOFC 可使用的燃料类型非常多, 包括天然气、石油气、沼气、氢气、煤制气、甲醇、柴油等。因为 SOFC 运行温度较高, 可将燃料中含碳化合物催化重整为 H_2 和 CO 后发电, 不会被 CO 毒化, 且采用非贵金属 Ni 作为内重整催化剂, 成本低, 可实现化石能源清洁利用。

(3) 余热品质高。SOFC 发电余热温度较高, 约 300-400 $^{\circ}C$, 且余热温度稳定, 余热经过热回收系统可以供暖, 也可以以热制冷的形式使用。

(4) 无振动、低噪音。SOFC 通过电化学反应发电, 不产生机械振动, 工作噪音在 45 dB 以下, 非常安静, 因此, 安装地点非常灵活, 可以在生活小区、办公楼等露天安装或楼顶安装。

(5) 绿色环保、低碳排放。SOFC 发电通入的燃料必须经过除硫处理, 且发电过程的温度与压力较低, 因此, 尾气中不含 SO_x 和 NO_x , 不会产生雾霾。一方面由于发电效率高, 相同发电量可大幅降低 CO_2 排放; 另一方面, SOFC 的反应产物只有 CO_2 和 H_2O , 将水蒸汽冷凝, 即可进行 CO_2 气体捕集, 实现 CO_2 近零排放。美国能源部甚至对 SOFC 提出实现 97% 的 CO_2 捕集率的发展目标。

2 国外 SOFC 产业的发展情况

目前, SOFC 还处于商业化初期, 仅少数发达国家的企业开发出商业化应用的 SOFC 发电系统。

美国 Bloom Energy 公司是 SOFC 行业公认技术力量最强的公司, 其主打的产品是 50 kW 规格(如图 1 所示), 发电效率可达 65%^[8]。根据该公司公开披露的数据, 2019 年的装机容量 120 MW 左右。目前, 在美国、韩国、日本和印度等安装推广, 应用在包括苹果、谷歌、沃尔玛、易趣、AT&T、NTT 等公司的数据中心, 及楼宇、银行、医院的分布式能源上。2020 年 7 月, 该公司公布了与三星重工合作, 将产品应用于船舶电源的计划, 预计到 2022 年, 船舶应用的年装机量可达 300 MW。该公司一直得到美国联邦政府和各州政府的大力支持, 近年来, 每年以 50% 左右的速度快速增长。

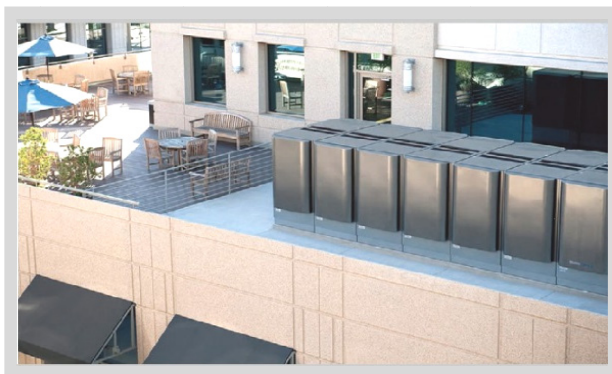


图 1 美国 Bloom Energy 的 SOFC 系统, 一个“箱子”为 50kW
Fig.1 The SOFC system of Bloom Energy in the United States, 50 kW per "box"

日本三菱日立电力系统公司 2018 年宣布实现商用 250 kW 和 1 MW 规格的联合发电产品, 面向商业和工业市场, 应用于分布式能源, 大幅度降低碳排放^[9]。该技术采用 SOFC 和燃气涡轮联合发电机组, 经过了多年的实地验证, 2018 年, 新一代产品发电效率约 55%, 2019 年, 在东京安装了其商用以来的第一套系统。

日本京瓷在 2017 年宣布推出 3 kW 的 SOFC 系统, 应用在小型商业领域^[10]。该技术采用平板管状电池技术路线, 发电效率可达 54%, 综合热电联产效率可达 90% 以上。此前, 有媒体报道了日本京瓷公司超过 10 年寿命的电堆技术, 展示了 SOFC 在长寿命上的优势。爱信精机和大阪燃气采用日本京瓷电堆, 至 2019 年, 总共安装了超过 20 万台 700 W 的家用热电联供 SOFC 系统。

德国博世积极布局 SOFC 的全产业链, 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 10 kW 的 SOFC 热电联供系统^[11], 发电效率达到 60%, 主要针对的应用市场是小型的工商业和数据中心。

澳大利亚公司 CFCL 早在 2010 年就在欧洲推出了 1.5 kW 的家用热电联供 SOFC 系统, 发电效率高达 68%, 热电联供综合效率超过 85%^[12]。目前在欧洲安装超过 1500 套, 由于成本较高, 其市场规模仍然不大。

发达国家都纷纷采取了对 SOFC 的政策支持和补贴。

美国政府 2018 年修订的《两党预算法案》, 包含了对燃料电池投资税收抵免(ITC)。根据 ITC 政策, 将在五年内逐步减少 30% 的税收抵免, 最终确保燃料电池产品达到其它清洁能源技术同等发展水平。早在 2009 年, 美国政府通过《美国复

苏与再投资法案》, 又称“激励法案”, 开始对燃料电池购买者给予补贴。2012 年修订的 ITC 政策, 根据燃料电池的发电效率予以 30-50% 的税收抵免; 此外, 美国一些州政府, 如加州、康涅狄格州和纽约州等, 都出台了相关的燃料电池发展的支持政策。

日本经济贸易产业省(METI)为新能源和工业技术发展组织(NEDO)提供资金, 主导支持 SOFC 发展规划。NEDO 补助在 Ene-farm 规划下居民用 CHP 燃料电池设备。计划到 2020 年销售 140 万台家用燃料电池系统, 目标价格降低至 100 万日元。

韩国政府 2010 年推出的绿色家园项目, 计划至 2020 年, 100 万个家庭使用新能源的发电模式, 规定至少 10% 是用燃料电池发电, 并出台了相关的激励政策; 2012 年, 在韩国的可再生能源组合标准(RPS)进一步推动下, 所有发电容量超过 500 MW 的电厂, 需要配套可再生能源和“新”技术(包括燃料电池和动力电池), 比例需要从 2012 年的 2% 增加至 2023 年的 10%。

欧盟 2008 年出台燃料电池与氢联合行动计划项目(FCH-JU), 吸引了 250 余个合作伙伴, 启动了 70 余个产业项目; 2012 年, 欧洲 12 个欧盟成员国计划联合实施了 Ene-field 项目, 该项目支持 9 家燃料电池系统制造商及 1000 套微型 CHP 系统; 2017 年, 欧盟启动 PACE 项目, 用来接棒 Ene-field。德国联邦政府另外出台 KfW433 计划, 补贴小型家用的 SOFC CHP 系统。

世界各国的大力扶持正在助力 SOFC 新技术走向应用。

3 我国 SOFC 产业的发展情况

从上世纪 90 年代开始, 我国一些高校和研究所在科技部支持下开始 SOFC 技术的研究工作。最早参与开发研究的单位包括中国科学院上海硅酸盐研究所、宁波材料研究所、大连物理化学研究所及中国矿业大学(北京)等。经过多年的研究, 积累了大量的成果^[13-22], 对 SOFC 技术背后的机理研究已经非常透彻, 影响衰减、可靠性等技术问题的认识逐渐成熟, 建立的理论模型可以探索和指导进一步的技术提升。

随着技术成熟度逐步提高, 越来越多的企业参与到该产业。潮州三环(集团)股份有限公司是较为突出的一家, 该公司是我国电子陶瓷领域的龙

头企业, 从 2004 年开始开展 SOFC 相关技术的开发和量产工作, 目前, 已经成为全球最大的 SOFC 电解质隔膜供应商和欧洲市场上最大的 SOFC 单电池供应商, 该公司自 2015 年开始开展 SOFC 电堆核心部件的开发和生产工作, 目前, 电堆发电效率达 68% 以上, 预计寿命可达到 5 年, 具有良好的可靠性。此外, 潍柴动力股份有限公司也在积极布局燃料电池的业务, 2018 年成为英国 Ceres Power 的第一大股东, 进入 SOFC 领域。徐州华清京昆能源有限公司、宁波索福人能源技术有限公司也在积极开展 SOFC 的产业化工作。

即便如此, 国内 SOFC 产业与美国、日本和欧洲的先进水平相比, 还有较大的差距, 主要体现在以下方面:

(1) 尚未出现商业化的 SOFC 系统。我国的 SOFC 系统开发, 都还是停留在实验室和样机阶段, 没有商业化的 SOFC 引领, 产业的参与度较低;

(2) SOFC 产业链还不完整。SOFC 工作温度高, 所用的换热器、燃烧器、预重整器、水蒸气发生器、电源、电控系统都是高度定制化的产品, 目前, 国内还没有专业厂家供应相关的核心零部件;

(3) 参与的企业较少, 技术力量不强。国内参与 SOFC 的开发和产业化的企业不多, 除了潮州三环(集团)股份有限公司、潍柴动力股份有限公司经济实力较强, 其他参与的公司规模较小, 而日本、欧洲参与该技术开发都是大型的知名企业。

4 国内 SOFC 的应用展望

4.1 SOFC 应用的市场前景

我国不仅是能源消耗大国, 同时还面临较严峻的环境问题, 因此, SOFC 具有非常广阔的应用市场前景, 包括以下方面:

(1) 分布式能源: SOFC 在发电效率上具有很大的优势, 并且无噪音、无排放, 安装地点灵活, 可在小区内、建筑物里、楼顶等区域安装。SOFC 分布式能源的普及, 也有利于国家能源战略安全。

(2) 充电站: 目前, 随着电动车的普及, 充电站的电源需求对电网造成很大的冲击, 并且面临的压力越来越大, SOFC 可以为充电桩的电源供给提供有力的支撑和补充。

(3) 轮船、海岛及边远地区: 现有柴油发电机

的领域,都可以采用绿色、无污染、无噪音的 SOFC,其发电成本比柴油内燃机更加经济;2020 年 5 月,广东省开展了内河流域船舶 LNG 动力改造的计划,将采用 LNG 大幅度降低内河船的 SO_x 、 NO_x 的排放。在替代柴油机的领域,SOFC 有较大的优势。

(4) 数据中心:供电集中,可以采用以 SOFC 为核心的冷热电三联供,能源的综合利用效率可以超过 85%。

SOFC 的推广,对于改善我国的能源结构风险、降低环境污染,具有非常显著的促进作用。

4.2 SOFC 应用的技术瓶颈

4.2.1 大功率 SOFC 系统

适合我国国情的应用是接近 100 kW 的大功率 SOFC 系统,目前,这个功率段的系统在我国还是一片空白。涉及到的核心技术有 4 项:(1)大功率的电堆模组设计和开发;(2)高效的热平衡系统的设计和开发,包括换热器、燃烧器、水蒸气发生器、预重整器、气流歧管和隔热部件设计;(3)电源系统的设计开发,包括直流升压和逆变;(4)控制策略开发,使系统能够应对各种工况,包括正常的升降温、发电工况,以及突发的断气、超温、泄漏、掉负荷等突发工况。大功率系统的成功开发,是产业化发展的前提。

4.2.2 不断提高功率密度

SOFC 单电池的功率密度可以测到 2000 mW/cm^2 以上(图 2)^[23-26],但是,目前世界主流的 SOFC 厂家,电堆的功率密度运行在 $200\text{--}300 \text{ mW/cm}^2$ 之间,远远没有发挥 SOFC 单电池的性能。主要原因是电堆中的热管理困难,功率密度增加之后,电堆产生的焦耳热大幅度提高,依靠空气冷却电堆需要的能量大幅提高,系统总输出和发

电效率下降。提高电堆的高效热管理能力,是不断提高功率密度的关键。德国纽伦堡大学 Marius 和 Juergen 提出的平面热管技术^[27-30]或许是一个解决方案,该技术通过在 SOFC 单电池层间设置平板型的热管,将电堆工作过程产生的热量快速转移到电堆外部,大幅度降低电堆的温度梯度,减少冷却空气的使用,以进一步改善电堆热管理能力,显著提高电堆的热效率。不断提高功率密度,才能不断提高 SOFC 与其他技术的竞争力。

4.3 SOFC 应用的配套产业

SOFC 的发展离不开相关的配套产业。在材料领域,各种功能陶瓷,耐高温金属、隔热材料等材料供应,以及相应的成型和防护涂层技术;在热工机械领域,工作温度高达 800°C 左右的高温换热器、燃烧器、水蒸气发生器、预重整器、气流歧管等部件的设计、计算、加工和测试;在催化与热工领域,燃料的脱硫、重整处理、隔热处理、尾气处理等;在电控领域,风机、DC/DC 和 DC/AC 电源模块等,及其控制逻辑。

SOFC 是个涉及综合学科的产业,涉及到许多的行业,需要众多的厂家共同参与,降低 SOFC 部件的生产制造成本^[31]。

4.4 SOFC 应用的产业政策

我国是能源消耗大国,发展 SOFC 对我国解决环境与能源之间的矛盾具有重要的意义。对比发达国家,我国已经出台了详细的 SOFC 发展目标和相应的补贴政策,我国在产业政策方面相对落后。希望未来国家和各地政府也能出台相关政策,如在产品开发阶段,给予分布式能源、船舶电源等示范工程类项目;在产业化初期,根据安装功率给予一定比例的补贴;在天然气价格、上网电价上给予一定的倾斜,支持 SOFC 的发展。

预计在未来的几年,随着产业的发展和国家的逐步重视,支持 SOFC 的政策会出现,同时引导产业链上的企业关注和投入,而强有力的资源整合单位也会陆续介入,共同推动 SOFC 的发展,实现我国化石能源的清洁利用。

5 总 结

固体氧化物燃料电池可通过高温电化学反应,将燃料中的化学能直接转换为电能,由于具有发电效率高,安静无噪音、绿色低排放、燃料来源广泛等优点,具有广阔的应用前景。目前,多个发达国家已开发出商用的 SOFC 发电系统,

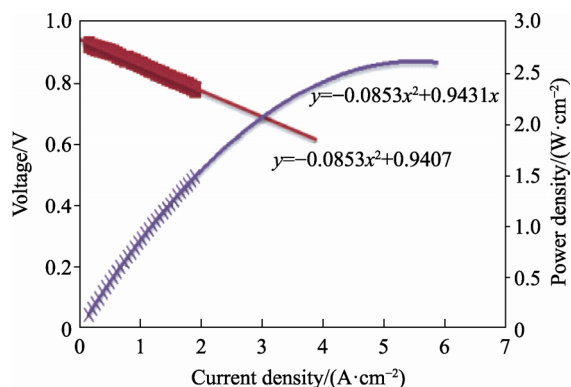


图 2 SOFC 单电池功率密度曲线示意图

Fig.2 Schematic diagram of SOFC singlecell power density curve

但我国的 SOFC 产业与其相比仍有一定差距。市场方面需要开拓适合 SOFC 初期推广应用的商业场景; 技术方面需要开发满足应用场景的 SOFC 系统、继续提高功率密度等技术力量; 产业链方面需要相关的配套产业的加入; 政策方面需要国家的支持。这样才能够在全方位推动 SOFC 的发展, 促进我国能源转型与化石能源的清洁利用。

参考文献:

- [1] 中国能源研究会. 中国能源发展报告 2018[R]. 北京: 北京大学出版社, 2020.
- [2] 贺佑国, 叶旭东, 王震. 煤炭工业发展形势及“十三五”展望[J]. 中国电业, 2015, (5): 26-29.
HE Y G, YE X D, WANG Z. China Electric Power, 2015, (5): 26-29.
- [3] 卢俊彪, 张中太, 唐子龙. 固体氧化物燃料电池的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(8): 1177-1180.
LU J B, ZHANG Z T, TANG Z L. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(8): 1177-1180.
- [4] 毛宗强, 黄建兵, 王诚, 等. 低温固体氧化物燃料电池研究进展[J]. 电源技术, 2008, 32(2): 75-79.
MAO Z Q, HUANG J B, WANG C, et al. Chinese Journal of Power Sources, 2008, 32(2): 75-79.
- [5] 彭苏萍, 韩敏芳, 杨翠柏, 等. 固体氧化物燃料电池[J]. 物理, 2004, 33(2): 90-94.
PENG S P, HAN M F, YANG C B, et al. Physics, 2004, 33(2): 90-94.
- [6] 迟克彬, 张凤华. 固体氧化物燃料电池研究进展[J]. 天然气化工: C1 化学与化工, 2002, 27(4): 37-44.
CHI K B, ZHANG F H. Natural Gas Chemical Industry, 2002, 27(4): 37-44.
- [7] 于兴文, 黄学杰, 陈立泉. 固体氧化物燃料电池研究进展[J]. 电池, 2002, 32(2): 110-112.
YU X W, HUANG X J, CHEN L Q. Battery, 2002, 32(2): 110-112.
- [8] Bloom Energy Server. http://en.wikipedia.org/wiki/Bloom_Energy_Server, 2020-06-12.
- [9] IRIE H, MIYAMOTO K, TERAMOTO Y, et al. Efforts toward introduction of SOFC-MGT hybrid system to the market [J]. Mitsubishi Heavy Ind Tech Rev, 2017, 54.
- [10] KYOCERA Develops industry's first 3-kilowatt solid-oxide fuel cell for institutional cogeneration. https://global.kyocera.com/news-archive/2017/0702_bnfo.html.
- [11] Bosch forms strategic collaboration with fuel-cell expert Ceres Power, <https://www.bosch-press.de>, 2020-06-12.
- [12] RICHARD J P, JONATHAN L, MICHAEL K. CFCL's bluegen product [J]. ECS Transactions, 2011, 35(1): 81-85.
- [13] WEN T L, WANG D, CHEN M, et al. Material research for planar SOFC stack [J]. Solid State Ionics, 2002, 148(3-4): 513-519.
- [14] WEN T L, WANG D, TU H, et al. Research on planar SOFC stack[J]. Solid State Ionics, 2002, 152-153: 399-404.
- [15] WEI Q T, GUO R S, WANG F H. Study on the composite cathode of solid oxide fuel cell [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2004, 28: 64-66.
- [16] WENTING M, MINFANG H, HUIYAN Y. Fabrication and performance of anode-supported electrolyte thin films SOFCs [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 37(1): 431-434.
- [17] WANG G, ZHU C F, XUE J H, et al. Efficiency analysis of solid oxide fuel cell [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2008, 6.
- [18] CUI D, CHENG M. Numerical analysis of thermal and electrochemical phenomena for anode supported microtubular SOFC [J]. AIChE Journal, 2009, 55(3): 771-782.
- [19] GUAN W, WANG W G. Electrochemical performance of planar solid oxide fuel cell (SOFC) stacks: from repeat unit to module [J]. Energy Technology, 2014, 2(8): 692-697.
- [20] WU W, GUAN W B, WANG G L, et al. In-Situ investigation of quantitative contributions of the anode, cathode, and electrolyte to the cell performance in anode-supported planar SOFCs [J]. Advanced Energy Materials, 2014, 4(10): 1400120.
- [21] ZHANG X, LIU L, ZHAO Z, et al. Enhanced oxygen reduction activity and solid oxide fuel cell performance with a nanoparticles-loaded cathode [J]. Nano Letters, 2015, 15(3): 1703-1709.
- [22] WANG X, MA Z, ZHANG T, et al. Charge-transfer modeling and polarization DRT analysis of proton ceramics fuel cells based on mixed conductive electrolyte with the modified anode-electrolyte interface [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(41): 35047-35059.
- [23] ALINGER M. SOFC degradation program at ge global research [A]. In Ninth Annual SECA Workshop,

- Pittsburgh, PA [C], 2008.
- [24] 方海燕, 程继贵, 杨俊芳. 中温氧化物燃料电池电解质材料制备和性能研究[J]. 科技广场, 2011, (1): 217-220.
- FANG H Y, CHENG J G, YANG J F. Science Mosaic, 2011, (1): 217-220.
- [25] FELLET M, ROSSNER W. Ceramics improve operating conditions of solid-oxide fuel cells [J]. MRS Bulletin, 2015, 40(3): 214-215.
- [26] GAAMOUCHE R, ABBOU A, REDOUANE A, et al. Modeling and simulation of direct coupling of an electrolyzer to pv system for hydrogen production [A]. In 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) [C], 2018: 1-5.
- [27] MARIUS D, JÜRGEN K. Thermal management of high temperature solid oxide electrolyser cell/fuel cell systems [J]. Energy Procedia, 2012, 28:37-47.
- [28] LEIMERT J M, DILLIG M, KARL J. Hydrogen inactivation of liquid metal heat pipes [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2016, 92: 920-928.
- [29] DILLIG M, PLANKENBÜHLER T, KARL J. Thermal effects of planar high temperature heat pipes in solid oxide cell stacks operated with internal methane reforming [J]. Journal of Power Sources, 2018, 373: 139-149.
- [30] NEUBERT M, HAUSER A, POURHOSSEIN B, et al. Experimental evaluation of a heat pipe cooled structured reactor as part of a two-stage catalytic methanation process in power-to-gas applications [J]. Applied Energy, 2018, 229: 289-298.
- [31] 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.