

CO₂ 近零排放的煤间接液化和 IGFC 集成系统

杨占奇¹, 许明², 张乐乐¹, 杜念友¹, 龚思琦², 张继华¹, 杨霞², 李初福²

(1. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司, 宁夏银川 750411; 2. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

摘要:在碳中和背景下, 煤间接液化面临着巨大的碳减排压力。在先进煤间接液化技术基础上, 构建了 CO₂ 近零排放的煤间接液化和煤气化燃料电池 (IGFC) 集成系统, 通过高温燃料电池直接利用煤制合成气和费托合成尾气高效发电, 替代传统的自备电站给煤间接液化过程供电供热, 同时实现尾气 CO₂ 富集, 降低 CO₂ 捕集难度。介绍了国内外 IGFC 技术研究进展, 开展了系统集成关键技术 IGFC 技术研发与示范, 依托煤间接液化装置建成了国内首个兆瓦级 IGFC 技术试验基地, 开发了国内首套 100 kW 级 CO₂ 近零排放的 IGFC 试验示范系统, 实现了连续稳定运转, 燃料电池系统发电功率 101.7 kW, 发电效率 53.2%, CO₂ 捕集率 98.6%, 验证了集成系统可行性。

关键词:煤间接液化; 费托合成; IGFC; 燃料电池; CO₂ 捕集

中图分类号: TQ53; TK91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2023)01-0059-05

Integrated system of indirect coal liquefaction and IGFC with near zero CO₂ emission

YANG Zhanqi¹, XU Ming², ZHANG Lele¹, DU Nianyou¹, GONG Siqi², ZHANG Jihua¹, YANG Xia², LI Chufu²

(1. Coal to Oil Branch Company, Ningxia Coal Industry Co., Ltd., CHN Energy, Yinchuan 750411, China;

2. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: Under the background of carbon neutralization, indirect coal liquefaction is facing huge pressure of carbon emission reduction. On the basis of advanced indirect coal liquefaction technology, an integrated system of indirect coal liquefaction and integrated gasification fuel cell (IGFC) with near zero CO₂ emissions has been built. Through high-temperature fuel cells, coal-based syngas and Fischer-Tropsch synthesis tail gas can be directly used for efficient power generation, replacing the traditional self-contained power station to supply power and heat for the indirect coal liquefaction process. At the same time, CO₂ enrichment of tail gas is realized, reducing the difficulty of CO₂ capture. For the integrated system, the IGFC technical research progress was introduced, and the integrated demonstration of IGFC technology was carried out. Based on the indirect coal liquefaction unit, the first megawatt level IGFC test base in China was built, and the first 100 kW level IGFC test demonstration system with near zero CO₂ emissions was developed, realizing continuous and stable operation. The fuel cell system generated 101.7 kW of power, with 53.2% of power generation efficiency and 98.6% of CO₂ capture ratio. The feasibility of the integrated system is verified.

Key words: coal indirect liquefaction; Fischer-Tropsch synthesis; IGFC; fuel cell; CO₂ capture

0 引言

煤间接液化可以将我国丰富的煤炭资源转化为稀少的油品, 降低石油对外依存度, 对于保障国家能源安全具有重要意义^[1-2]。截至 2020 年, 我国煤间接液化项目建成的产能超过 800 万 t, 其中宁煤 400 万 t 煤间接液化项目是全球单体规模最大的煤制油

项目, 处于世界领先水平^[3-4]。但现有的煤间接液化技术也是一个高碳排放过程^[5], 生产每吨油品约排放 8 t CO₂, 包括工艺过程直接碳排放和热电消耗间接碳排放两大部分。在碳中和背景下, 煤间接液化面临巨大的碳减排压力, 降低煤间接液化过程碳排放难点在于降低热电消耗的间接碳排放。

收稿日期: 2022-10-18; 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.T22101801

作者简介: 杨占奇 (1984—), 男, 宁夏吴忠人, 高级工程师, 硕士。E-mail: 15011094@ceic.com

通讯作者: 李初福 (1980—), 男, 广西桂林人, 正高级工程师, 博士。E-mail: 17240117@ceic.com

引用格式: 杨占奇, 许明, 张乐乐, 等. CO₂ 近零排放的煤间接液化和 IGFC 集成系统[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(1): 59-63.

YANG Zhanqi, XU Ming, ZHANG Lele, et al. Integrated system of indirect coal liquefaction and IGFC with near zero CO₂ emission[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(1): 59-63.



移动阅读

1 我国煤间接液化发展现状及问题

煤间接液化过程包括煤气化、净化、费托合成等主要单元。费托合成是以合成气(主要为 H_2 和 CO) 为原料在适当条件下催化合成液态烃类产物的工艺过程。

国内中科合成油技术有限公司开发的铁基浆态床费托合成技术已经成功应用于宁煤和伊泰等多个工业化项目;兖矿集团开发的铁基低温费托合成技术已经实现了商业化运行,开发的高温费托技术实现了示范;中国科学院大连化学物理研究所开发了钴基浆态床费托合成技术并应用于延长石油 15 万 t/a 和潞安 6 万 t/a 等示范项目。截至目前,我

国已经建成投产的煤间接液化工业化示范项目见表 1。

煤间接液化过程排放 CO_2 主要来自 2 个方面: ① 煤气化合成气里碳多氢少,需要将一部分 CO 转化为氢气调节氢碳比满足费托合成要求, CO 转化为 H_2 的同时会排放 CO_2 ,这部分 CO_2 经工艺过程吸收捕集后排放, CO_2 体积分数可达 90% 以上,经简单处理后可以用于封存或利用;② 煤间接液化过程需要消耗电力和蒸汽,而生产电力和蒸汽过程消耗燃料煤产生 CO_2 排放, CO_2 体积分数在 10%~20%。这部分 CO_2 排放量占煤间接液化过程 CO_2 排放总量的 30% 左右^[2],且 CO_2 浓度低,捕集难度大,能耗大。

表 1 全国已建成投运的煤间接液化工业化示范项目

Table 1 Indirect coal liquefaction commercial projects in operation in China

煤间接液化工业化项目	建成规模/(万 $t \cdot a^{-1}$)	投产时间
内蒙古伊泰鄂尔多斯煤间接液化项目	16	2009年3月
山西潞安煤间接液化项目	16	2009年7月
神华鄂尔多斯煤间接液化项目	18	2009年12月
兖矿陕西未来能源煤间接液化项目	115	2015年8月
神华宁煤宁东煤间接液化项目	400	2016年12月
内蒙古伊泰鄂尔多斯煤间接液化项目	120	2017年7月
山西潞安高硫煤综合利用间接液化项目	108	2017年12月
山西潞安焦炉煤气制化学品项目	6	2014年10月
延长石油榆林煤化费托合成示范项目	15	2020年7月
合计	819	

2 煤间接液化和 IGFC 集成系统

在先进煤间接液化技术基础上,通过开发和集成高温燃料电池发电技术,构建 CO_2 近零排放的煤间接液化和煤气化燃料电池(IGFC)集成系统(图 1),通过高温燃料电池直接利用煤制合成气和费托合成尾气高效发电,代替传统的锅炉电站为煤间接液化过程供电供热,可提高供电效率。高温燃料电池可直接使用合成气、化工尾气和天然气等进行高效发电,发电效率达 50%~60%^[6-7],远高于常规的同等规模燃气发电系统效率(30%~43%)^[8],高温燃料电池在高效发电同时,可实现发电尾气 CO_2 富集, CO_2 体积分数可达 90% 以上,大幅降低这部分 CO_2 捕集难度,有利于实现系统 CO_2 近零排放,助力实现碳中和战略目标。

煤间接液化和 IGFC 集成系统具有以下优势:

① 自备锅炉电站机组规模小,功率通常在 100~

300 MW,蒸汽参数低,发电净效率低(30%~40%),如果再配置 CO_2 捕集,发电净效率还要降低 10~12 个百分点,意味着发电净效率只有 20%~30%。而 100 MW 级 IGFC 系统,在 CO_2 捕集率 90% 工况下,系统发电净效率可达 47% 以上,远高于自备锅炉电站机组,可显著降低煤间接液化燃料煤耗,提高系统能效。② IGFC 系统与煤间接液化共用煤气化净化装置,可降低 IGFC 系统投资,进一步提高系统效率。③ 费托合成过程尾气富含 CO 、 H_2 、 CH_4 等,是一种非常适合于高温燃料电池的气体,通过高温燃料电池发电利用可显著提高尾气经济价值,同时减少排往火炬的尾气,降低污染物排放。以某百万吨级煤间接液化与 200 MW 级 IGFC 集成系统为例,系统的主要参数见表 2。

集成系统中煤间接液化技术已基本成熟,主要瓶颈为 IGFC 技术,目前尚未实现工业化示范。

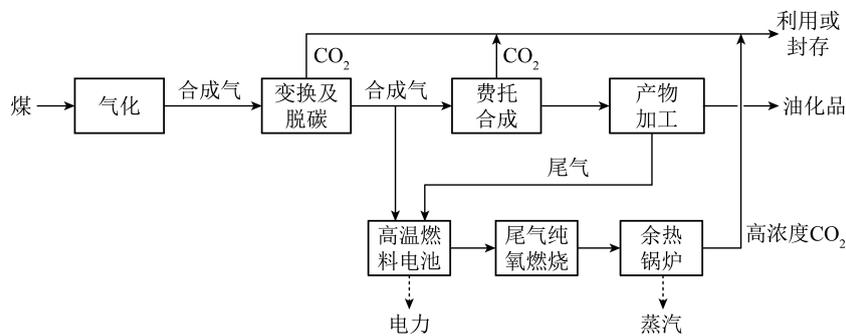


图 1 煤间接液化和 IGFC 集成系统示意

Fig.1 Schematic diagram of coupled system of indirect coal liquefaction with IGFC

表 2 煤间接液化和 IGFC 集成系统关键单元配置

Table 2 Key unit setting of coupled system of indirect coal liquefaction with IGFC

关键单元	数值
煤气化处理量/(t·d ⁻¹)	12 000
费托合成油产量/(万 t·a ⁻¹)	100
高温燃料电池发电功率/MW	200
尾气纯氧燃烧热功率/MW	50

3 IGFC 关键技术及研究进展

3.1 IGFC 关键技术进展

制约 IGFC 技术发展的主要瓶颈为高温燃料电池和尾气纯氧燃烧技术。高温燃料电池包括固体氧化物燃料电池 (SOFC) 和熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC) 2 种, 其中 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等领域具有广阔的应用前景, 是最前沿的燃料电池技术^[9-10]。

美国、日本、欧洲等发达国家和地区在 SOFC 技术方面一直处于世界领先地位, 经几十年的技术研发和攻关, 已基本实现了 SOFC 技术的商业化运行, 发展出多家具有特色的 SOFC 企业, 如布鲁姆能源 (Bloom Energy, BE)、燃料电池能源 (Fuel Cell Energy, FCE)、三菱重工 (MHI)、锡里斯 (Ceres) 等。美国的 SOFC 企业商业化最为成功, 其中 BE 公司的标准配置的 SOFC 发电系统功率可达 250 kW, 以天然气为原料发电效率可高达 65%, 处于世界领先水平^[11]。

相较于国外, 我国在 SOFC 研发方面还有较大差距。中国科学技术大学、哈尔滨工业大学、清华大学、西安交通大学等国内高校分别在电解质支撑、阳极支撑、金属支撑等电池材料方面开展了基础研究工作。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等开展了 5 kW SOFC 系统和 25 kW 电池堆项目的研发。中国矿业大学 (北京) 对 SOFC

中关键材料设计及荷电传导机制、界面演变、电极反应动力学及一体化电池设计中多尺度多场耦合性能演化等开展了基础理论研究, 开发了千瓦级电池堆。商业化的电池堆研发企业也仍处于产业化发展初期, 目前从事 SOFC 电堆研发的公司主要有潮州三环、苏州华清、宁波索福人、武汉华科福赛、潍柴动力、氢邦科技等^[11], 近年来取得了快速发展。2019 年, 潍柴动力首套 30 kW 天然气 SOFC 热电联供系统投入运行; 2021 年索福人研制的 25 kW 级天然气 SOFC 系统顺利开车; 2022 年, 三环集团和广东能源集团研发的以天然气为原料的国内首个百千瓦级 SOFC 发电项目投入运行, 系统发电功率达 210 kW, 发电效率达 61.8%; 2023 年潍柴动力发布的全球首款大功率金属支撑商业化 SOFC 产品, 以天然气为原料, 系统发电功率达 120 kW, 发电效率超 60%。

IGFC 系统中高温燃料电池发电后的尾气热值低, 常规方法难以稳定燃烧, 张静思等^[12]和李嘉瑞等^[13]研究了 SOFC 尾气在多孔介质和金属纤维燃烧器中的燃烧特性, 实现了稳定燃烧。IGFC 系统中高温燃料电池发电时燃料气与空气不混合, 可在发电过程中实现 CO₂ 富集, 为进一步富集 CO₂, 发电尾气通常采用纯氧燃烧。季明彬等^[14]研究了 100 W 级 SOFC 尾气纯氧催化燃烧特性; WANG 等^[15]研究了 10 kW 级 SOFC 尾气纯氧直接燃烧特性, 表明发电尾气经纯氧燃烧后 CO₂ 体积分数可达 90% 以上, 为 CO₂ 直接捕集及后续贮存利用提供了条件。

3.2 IGFC 集成示范进展

美国能源部 (DOE) 通过“Vision 21”与“SECA”等项目不断推动升级 IGFC 系统的研发工作。2005 年, 美国能源部委托美国 GE 公司开发以煤炭为燃料的集成 SOFC/燃气轮机联合发电系统, 系统整体设计效率达 61.5%, 但 CO₂ 后续捕集及封存将消耗一定能量, 因此系统整体设计效率修正为 58.4%。2016 年, 美国国家能源技术实验室 (NETL) 发布基于 SOFC 技术的研究进展及规划, 将于 2025 年和

2030年建成10和50 MW IGFC(含CO₂捕集)示范系统^[16]。

日本通过开展煤炭能源“EAGLE”项目,开始IGFC系统设计研究。1998年在Wakamatsu建设了中试线,系统设计发电效率为53.3%。2019年,日本公布了由NEDO和大阪发电公司合作完成的世界上第1座煤气化燃料电池联合循环发电厂(IGFC-IGCC)及CO₂捕集示范集成项目的建设情况,项目已完成1、2期建设,即IGCC系统与CO₂捕集回收系统,第3期将建成IGFC系统,建设2台600 kW级SOFC发电单元,正在开展试验研究,目标是应用于500 MW级商业发电设施,CO₂回收率为90%的条件下实现47%左右的送电端效率^[16]。

2017年,国家科技部立项了“CO₂近零排放的煤气化发电技术”,由国家能源集团牵头,推动国内IGFC技术研发与集成示范,取得了积极进展^[17-18]。李萍萍等^[19]以美国能源部报告中的百兆瓦级IGFC系统流程为基础,考察系统操作压力和进料甲烷含量对系统净发电效率的影响,结果表明增加电堆操作压力和进料甲烷含量有利于提高系统效率。许世森等^[20]基于SOFC技术,构建了百兆瓦级IGFC系统,在碳捕集率大于90%情况下,系统供电效率达到46.2%。2018年,晋煤集团开展了15 kW级IGFC系统集成验证;2020年,国家能源集团完成了20 kW级IGFC验证系统运转,在此基础上2022年建成了国内首个兆瓦级IGFC技术试验基地,研制了国内首套100 kW级CO₂近零排放的IGFC试验示范系统(图2),由煤气化净化工业装置供应合成气,包括5套20 kW级SOFC发电模块,连续稳定运行了100 h以上(图3),燃料电池系统最大发电功率101.7 kW,燃料电池系统发电效率53.2%,CO₂捕集率98.6%,验证了集成系统可行性。



图2 100 kW级IGFC试验示范系统现场装置

Fig.2 Experimental equipment of 100 kW IGFC system

3.3 IGFC技术面临的挑战

目前国内外IGFC集成示范的规模还较小,离

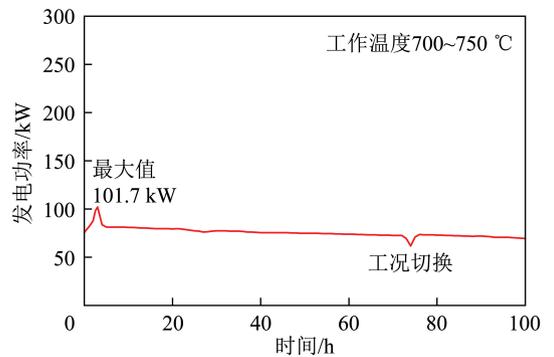


图3 100 kW级IGFC试验示范系统运行曲线

Fig.3 Operation curve of 100 kW IGFC system

工业化应用尚有差距,在未来研究中亟需解决的问题主要有:① SOFC电池技术目前仍未实现完全产业化,其关键材料的低成本量产制备和高一致可靠电池堆的批量化生产,一直是产业化进程中的最大阻碍;② 大功率加压燃料电池的长周期运行仍是制约IGFC系统的最重要因素,高温燃料电池是IGFC系统的核心单元,其耐久性是影响发电成本的关键,同时需尽可能提高单堆功率才能实现大功率IGFC发电系统,尽可能提高操作压力才能提高IGFC系统效率;此外,由于燃料电池单元需将多电堆进行集成,解决燃料气体在不同电堆间的均布、高温热膨胀匹配、电路高效串并联等问题;③ 高温燃料电池排出的尾气中含有相当比例未充分反应的组分,需在纯氧燃烧室中充分燃烧,但尾气热值较低,采用催化燃烧可有效降低燃烧难度,需研制成本低、寿命长、活性高的催化燃烧的催化剂,并进行相应催化燃烧器开发。

4 结 语

在先进煤间接液化技术基础上,构建CO₂近零排放的煤间接液化和煤气化燃料电池(IGFC)集成系统,通过高温燃料电池直接利用煤制合成气和费托合成尾气高效发电,替代传统自备电站为煤间接液化过程供电供热,同时实现尾气CO₂富集,降低了CO₂捕集难度。介绍了国内外IGFC技术研究进展,开展了系统集成关键IGFC技术研发与示范,依托宁煤400万t/a煤间接液化装置,建成了国内首个兆瓦级IGFC技术试验基地,研制了国内首套100 kW级IGFC试验示范系统,实现了连续稳定运转,固体氧化物燃料电池系统发电功率101.7 kW,发电效率53.2%,CO₂捕集率98.6%,验证了集成系统可行性。在碳中和背景下,随着高温燃料电池技术逐渐成熟,CO₂近零排放的煤间接液化和IGFC集成系统将具有广阔的发展前景。

参考文献 (References):

- [1] 徐振刚. 中国现代煤化工近 25 年发展回顾·反思·展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8):1-25.
XU Zhengang. Review rethink and prospect of China's modern coal chemical industry development in recent 25 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8):1-25.
- [2] LI Chufu, LI Yonglong, XU Ming, et al. Studies on pathways to carbon neutral for indirect coal liquefaction in China[J]. Clean Energy, 2021, 5(4):644-654.
- [3] 武鹏, 吕元, 郭中山, 等. 煤间接液化及产品加工成套技术开发研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4):1-22.
WU Peng, LYU Yuan, GUO Zhongshan, et al. R&D progress of indirect coal liquefaction and product processing integrated technology[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4):1-22.
- [4] 郭中山, 王峰, 杨占奇, 等. 400 万 t/a 煤基费托合成装置运行和优化[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4):1-8.
GUO Zhongshan, WANG Feng, YANG Zhanqi, et al. Operation and optimization of 4 Mt/a industrial plant of coal-based Fischer-Tropsch synthesis[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4):1-8.
- [5] 韩红梅. 煤化工生产和消费过程的碳利用分析[J]. 煤化工, 2020, 48(1):1-4.
HAN Hongmei. Carbon utilization analysis of coal chemical production and consumption process[J]. Coal Chemical Industry, 2020, 48(1):1-4.
- [6] 李初福, 黄斌, 刘长磊, 等. 费托合成尾气燃料电池发电系统模拟与分析[J]. 计算机与应用化学, 2018, 35(11):953-958.
LI Chufu, HUANG Bin, LIU Changlei, et al. Simulation and analysis of the fuel cell power generation system with Fischer-Tropsch synthesis tail gas[J]. Computers and Applied Chemistry, 2018, 35(11):953-958.
- [7] 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 Binqi, LI Chufu, LIU Changlei, 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.
- [8] 杨锦成, 杨小明. 燃气分布式供能项目经济性研究[J]. 上海节能, 2012, 32(9):32-44.
YANG Jincheng, YANG Xiaoming. Study on the economy of gas distributed function project[J]. Shanghai Energy Conservation, 2012, 32(9):32-44.
- [9] 于泽庭, 蒙青山, 张承慧, 等. CO₂近零排放固体氧化物燃料电池冷热电联供系统的性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):200-208.
YU Zeting, MENG Qingshan, ZHANG Chenhui, et al. Performance analysis of the near zero CO₂ emissions tri-generation system based on solid oxide fuel cell cycle[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):200-208.
- [10] 蔡浩, 魏涛, 高庆宇. 国内固体氧化物燃料电池主要研究团体及发展现状[J]. 化工新型材料, 2015, 43(3):9-11.
CAI Hao, WEI Tao, GAO Qingyu. Development status of SOFC stacks and systems and domestic main research groups[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(3):9-11.
- [11] 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.
HU Liang, YANG Zhibin, XIONG Xingyu, et al. Development strategy for solid oxide fuel cell industry in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3):118-126.
- [12] 张静思, 陈志光, 詹心怡, 等. 固体氧化物燃料电池尾气在多孔介质中的燃烧特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(7):1047-1052.
ZHANG Jingsi, CHEN Zhiguang, ZHAN Xinyi, et al. Combustion characteristics of exhaust gas for solid oxide fuel cell in porous medium burner[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(7):1047-1052.
- [13] 李嘉瑞, 邹春, 姚青, 等. 固体氧化物燃料电池电堆尾气燃烧稳定性研究[J]. 煤气与热力, 2021, 41(7):32-36.
LI Jiarui, ZOU Chun, YAO Qing, et al. Study on combustion stability of exhaust gas from solid oxide fuel cell stack[J]. Gas & Heat, 2021, 41(7):32-36.
- [14] 季明彬, 李大钧, 龚思琦, 等. SOFC 尾气催化燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术, 2021, 27(2):201-207.
JI Mingbin, LI Dajun, GONG Siqi, et al. Catalytic combustion characteristics of SOFC tail gas[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2021, 27(2):201-207.
- [15] WANG Hanlin, LEI Qilong, LI Pingping, et al. Key CO₂ capture technology of pure oxygen exhaust gas combustion for syngas-fueled high-temperature fuel cells[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8(3):383-393.
- [16] 王奇, 杨志宾, 李初福, 等. 整体煤气化燃料电池联合循环发电(IGFC)技术进展研究[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(1):78-84.
WANG Qi, YANG Zhibin, LI Chufu, et al. Research progress of integrated coal gasification fuel cell combined power generation (IGFC) technology[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(1):78-84.
- [17] PENG Suping. Current status of national integrated gasification fuel cell projects in China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8(3):327-334.
- [18] WEI Chang, LIU Zhien, LI Chufu, et al. Status of an MW_{th} integrated gasification fuel cell power generation system in China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8(3):401-411.
- [19] 李萍萍, 刘长磊, 黄斌, 等. 煤气化燃料电池发电系统模拟及分析[J]. 计算机与应用化学, 2018, 35(12):988-996.
LI Pingping, LIU Changlei, HUANG Bin, et al. Process simulation and energy analysis for IGFC system[J]. Computers and Applied Chemistry, 2018, 35(12):988-996.
- [20] 许世森, 周贤, 安航, 等. 整体煤气化燃料电池发电系统构建及模拟优化研究[J]. 中国电机学报, 2022, 42(19):7102-7112.
XU Shisen, ZHOU Xian, AN Hang, et al. Research on system construction and simulation optimization of integrated gasification fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19):7102-7112.