

煤气化燃料电池发电技术研究进展

安航, 周贤, 彭烁, 钟迪, 姚国鹏
(中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

[摘要] 煤气化燃料电池发电 (IGFC) 技术是一种清洁高效的绿色煤电技术, 可以与 CO₂ 捕集技术相结合实现高效率的 CO₂ 捕集, 并为后续的碳利用与封存提供基础。本文介绍了 IGFC 技术的研究进展: 首先对 IGFC 系统的整体流程进行说明, 其中包括煤气化、粗煤气净化、燃料电池发电、尾气燃烧与余热回收发电等单元的具体流程及主要技术; 然后综述了煤气化与煤气净化单元、燃料电池发电单元及 IGFC 整体流程的模拟研究进展; 并对日本、美国 and 我国的 IGFC 技术研发与示范情况与目标进行了说明; 最后总结了 IGFC 技术研发亟需解决的关键问题, 其中主要包括大功率燃料电池的长周期运行、粗煤气中温干法净化和尾气纯氧催化燃烧技术开发等技术存在问题, 可为后续兆瓦级 IGFC 系统的开发与示范提供指导。

[关键词] IGFC; 煤气化; 燃料电池; 尾气燃烧; 余热回收; 整体流程

[中图分类号] TK16 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfid.202104049

[引用本文格式] 安航, 周贤, 彭烁, 等. 煤气化燃料电池发电技术研究进展[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 20-26. AN Hang, ZHOU Xian, PENG Shuo, et al. Research progress on integrated gasification fuel cell power generation technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 20-26.

Research progress on integrated gasification fuel cell power generation technology

AN Hang, ZHOU Xian, PENG Shuo, ZHONG Di, YAO Guopeng
(Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Integrated gasification fuel cell (IGFC) power generation technology is a clean and efficient green coal power technology, which can be combined with CO₂ capture technology to achieve CO₂ capture of high efficiency and get ready for the subsequent utilization and storage. This paper introduces the overall process of IGFC system, including coal gasification, syngas purification, fuel cell power generation, exhaust gas combustion and waste heat recovery system. Researches on coal gasification and syngas purification units, fuel cell power generation units and overall process simulation of IGFC were summarized. Moreover, researches and development on IGFC technology and demonstration of plants in Japan, the United States and China were introduced. Furthermore, the key problems that the IGFC technology research and development needs to solve were summerized, including large power fuel cells in the long period operation, syngas purification in medium temperature and catalytic combustion technology of exhaust gas in pure oxygen. The research can provide guidance for the subsequent development and demonstration of MW-level IGFC systems.

Key words: IGFC; coal gasification; fuel cell; exhaust gas combustion; waste heat recovery; overall process

我国化石能源以煤炭为主, 因此以煤为原料的火力发电目前仍是我国最主要的发电方式。传统的火电厂通过煤直接燃烧进行发电, 不仅发电效率不高而且会产生大量的粉尘和温室气体。随着我国 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和目标的提出, 发

电等能源行业需要大幅降低 CO₂ 排放, 实现碳近零排放^[1]。基于此。我国的能源体系和组成结构将发生重大变革, 煤炭等化石能源的利用将朝着低碳、高效、灵活的方向发展。

我国的燃煤发电技术经过多年努力取得了较

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0601901)

Supported by: National Key Research and Development Program (2017YFB0601901)

第一作者简介: 安航(1994), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为先进能源技术, an2@qny.chng.com.cn。

大的进步,但现有技术水平下燃煤直接发电机组仍难以满足 CO₂ 减排目标。燃煤发电机组在 CO₂ 捕集后效率损失较大,而易于捕集 CO₂ 的整体煤气化联合循环发电 (integrated gasification combined cycle, IGCC) 技术的效率损失较小,且具备大幅提升效率的潜力^[2-3]。发展 CO₂ 近零排放的煤气化发电新方法主要包括采用先进 CO₂ 捕集技术与高参数富氢燃气轮机的 IGCC 系统、将 IGCC 与高温燃料电池相结合的煤气化燃料电池发电 (integrated gasification fuel cell, IGFC) 系统,以及采用 CO₂ 吸收体的内在碳捕集技术等^[4-5]。

IGFC 技术将煤气化技术与燃料电池发电技术相结合,是 IGCC 技术的延伸。由于燃料电池技术将原料中的化学能直接转化为电能,不受卡诺循环效率的限制,可以大幅度提高发电系统的能量利用效率,理论上 IGFC 系统的净发电效率最高可以达到 56%~58%^[6-7]。同时,IGFC 系统可以实现 CO₂

的富集,尾气中 CO₂ 干基浓度可以达到 95% (体积分) 以上,与碳捕集与封存 (carbon capture and storage, CCS) 技术配合可以实现煤基发电的 CO₂ 近零排放。因此,IGFC 技术被视为最具发展前景的煤气化发电技术^[8],有望成为煤基发电低碳化的关键。

本文详细介绍了 IGFC 系统中煤气化与净化、燃料电池发电、尾气燃烧与余热回收等主要模块的功能与流程,在说明各模块模拟研究发展现状的基础上,对中外各国 IGFC 技术研发与示范情况进行了介绍,最后总结了当前 IGFC 技术发展中亟需解决的问题,为兆瓦级 IGFC 系统的开发提供技术指导。

1 IGFC 技术

煤气化燃料电池发电系统主要包括煤气化、粗煤气净化、燃料电池发电、尾气燃烧、余热回收等模块^[9]。图 1 为 CO₂ 近零排放的 IGFC 系统流程。

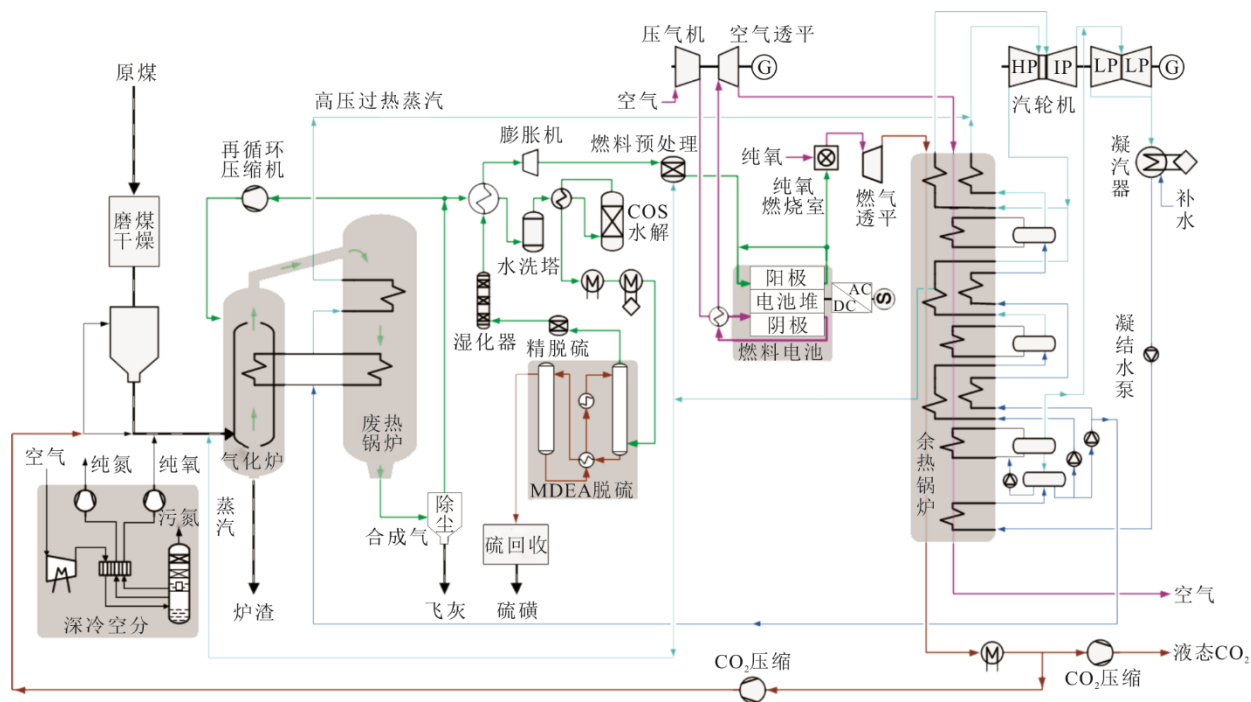


图 1 CO₂ 近零排放的 IGFC 系统流程
Fig.1 Process of IGFC system with CO₂ near zero emission

由图 1 可见,原料煤经预处理后进入气化炉发生热解和气化反应,生成以 CO、H₂、CO₂、CH₄ 为主要成分的粗煤气,经废热锅炉进行热量回收后进入粗煤气净化单元;在净化单元,对粗煤气中的粉尘、硫化物、氮氧化物等进行脱除,净化气进入燃料电池发电单元;在燃料电池发电单元,净化气经

过预处理(水汽变化和甲烷水蒸气重整)后进入阳极,在高温(约 800℃)下发生电化学反应,大部分净化气化学能完全转化为电能。未反应完全的部分随阳极尾气循环回阳极入口或进入纯氧燃烧室进行充分燃烧,燃烧后 CO₂ 的干基浓度可达 95% 以上。经纯氧燃烧的尾气进入余热回收装置(燃气轮

机和余热锅炉)回收尾气中的热量并发电。通过燃料电池-燃机-蒸汽轮机三循环,IGFC 系统的能量效率相较于传统煤基发电技术大幅提高。同时,IGFC 系统中不引入氮气等惰性气体,为 CO₂ 的高效回收提供了便利。

1.1 煤气化

煤气化炉是 IGCC 系统和 IGFC 系统的关键部分

之一。根据气化炉形式的不同,主要分为气流床、流化床、固定床等;根据进料形式的不同,可以进一步分为干煤粉进料和水煤浆进料^[10],以干煤粉进料的气化炉冷煤气效率一般比水煤浆进料更高。表 1 列举了目前国内外主流气化炉性能,由中国华能集团有限公司开发的两段式干煤粉气化炉性能达到了国际领先水平,目前正在开发每天 3 500 t 的气化炉装置。

表 1 主流气化炉性能比较
Tab.1 Performance comparison of major type gasifiers

技术	GE-Texaco	E-gas	Shell	Prenflo	东方炉	航天炉	神宁炉	华能两段炉
国家	美国	美国	荷兰	德国	中国	中国	中国	中国
送料方式	水煤浆	水煤浆	干煤粉	干煤粉	干煤粉	干煤粉	干煤粉	干煤粉
反应形式	单级	两级	单级	单级	单级	单级	单级	两级
喷嘴数	单	多	多	多	单	单	单	多
冷煤气效率/%	70~76	73~78	79~81	79~81	79~80	78~83	80~82	80~83
碳转化率/%	90~96	90~96	98~99	98~99	98~99	98~99	98~99	98~99
操作温度/℃	1 300~1 450	1 300~1 450	1 300~1 500	1 300~1 500	1 400~1 550	1 400~1 500	1 350~1 650	1 400~1 700

1.2 粗煤气净化

在燃料电池发电过程中,预处理装置的重整催化剂和燃料电池的电极容易受到杂质(硫化物、卤元素等)影响,需要对粗煤气进行净化。并且由于燃料电池对杂质的容忍度比燃气轮机低得多,所以粗煤气净化的净化要求更高。目前主要采用常温湿法净化法来除去粗煤气中的灰分、硫化物、氮氧化物、卤化氢、氨等有害杂质。粗煤气常温湿法净化具体流程为:粗煤气先进入旋风分离器或陶瓷过滤器除去飞灰,然后进入水洗塔进一步洗涤除尘和去除酸性气体,随后经硫化羰(COS)水解器和甲基二乙醇胺(MDEA)脱硫系统脱除大部分的硫,再进入精脱硫系统将煤气中的硫体积分数降至 10⁻⁷ 以下。另外,中温干法净化能够简化净化单元的流程,

减少换热器的使用,同时提高系统能量利用效率,但目前尚不成熟,是粗煤气净化研究的热点^[11-13]。

1.3 燃料电池发电单元

常见的燃料电池种类包括固体氧化物(SOFC)、熔融碳酸盐(MCFC)、磷酸盐(PAFC)、碱性(AFC)、质子交换膜(PEMFC)等。表 2 对比了 5 种常见燃料电池的性能和特点^[14-15]。从表 2 可以看出,各种燃料电池具有不同的电极材料、电解质和催化剂,因而具有不同的适用燃料、工作温度和杂质敏感性,其中 SOFC 和 MCFC 由于其能以 CO 为燃料气、工作温度较高,是燃料电池发电单元的合适选择^[16]。AFC、PAFC 和 PEMFC 则由于其对 CO 或 CO₂ 较为敏感,容易中毒,暂时无法用于 IGFC 系统中。

表 2 常见燃料电池的特性
Tab.2 Characteristics of common fuel cells

电池种类	碱性(AFC)	磷酸盐(PAFC)	质子交换膜(PEMFC)	熔融碳酸盐(MCFC)	固体氧化物(SOFC)
电解质	KOH 溶液	固定化 H ₃ PO ₄	水和聚合物离子交换膜	熔融碳酸盐	钙钛矿/金属陶瓷
电极材料	Pt	C	C	Ni 或 NiO	钙钛矿/金属陶瓷
催化剂	Ni/Ag	Pt	Pt	电极材料	电极材料
燃料	H ₂	H ₂	H ₂	H ₂ 、CO、CH ₄	H ₂ 、CO、CH ₄
工作温度/℃	0~230	150~220	40~100	600~700	500~1 000
燃料利用率/%	>80	>80	>80	>80	>80
杂质敏感性	CO ₂ 、CO、Cl、S	CO ₂ 、S	CO ₂ 、CO、Cl、S	Cl、S	Cl、S
使用寿命/(×10 ³ h)	5~8	30~80	20~60	20~40	~90

1.4 尾气燃烧与余热回收发电

从燃料电池发电单元排出的阳极尾气温在 800 °C 以上, 由于燃料电池燃料利用率一般不超过 85%^[8-9], 尾气中含有相当比例的未反应气体, 因此需要进入纯氧燃烧室进一步燃烧或返回到燃料电池单元入口进行循环^[17]。进行纯氧燃烧时, 采用常规的燃烧器处理 SOFC 尾气通常存在燃烧温度高、尾气污染成分高和易受尾气组成波动影响的缺点。因此, 越来越多的研究者采用催化燃烧器来达到有效降低燃烧器温度、降低尾气污染、增加尾气波动适应性的目的^[18]。余热回收单元中, 在纯氧燃烧室中充分燃烧后的尾气先进入燃气轮机膨胀做功, 而后经过多级余热锅炉产生不同压力的蒸汽, 进入汽轮机做功发电^[19]。尾气的低品位余热还可以通过热泵技术或有机朗肯循环进行进一步回收^[20]。

2 IGFC 系统模拟研究进展

目前 IGFC 系统在世界上还没有成熟的大规模应用, 对该系统的研究大多基于模拟计算。研究者们针对 IGFC 系统的不同模块和整体流程开展了大量的模拟工作, 如煤气化单元的气化炉模拟、气化反应模拟, 煤气净化单元的常温湿法脱硫、中温干法脱硫工艺模拟, 燃料电池单元中建立燃料电池通道模型或用反应器模拟燃料电池, 余热回收单元中对燃气-蒸汽联合循环的动力系统模拟等, 这些研究从各个模块为 IGFC 系统的完善做出了贡献。

2.1 煤气化与煤气净化

煤气化与煤气净化单元是 IGCC 和 IGFC 系统的关键模块, 该单元决定了进入燃料电池发电模块的净化气组成, 对电池堆中反应的进行和系统的能量利用效率有直接影响。

Furusawa 等人^[21]建立了三段式循环流化床气化炉模型, 计算出该气化炉模型在 800、850、900 °C 的操作温度下分别能达到 85.0%、82.7%、80.9% 的冷煤气效率, 同时操作温度越高气化所需时间越短。在考虑冷煤气效率、气化时间之间的平衡后, 建议气化温度为 850 °C。Spiegl 等人^[22]研究了分别以 CO₂ 和 CO₂/H₂O 混合物为气化助剂时的气化效果, 结果表明提高 CO₂/C 比例可以增加碳转化率, 但 CO₂ 转化率降低; 加入一定比例的水蒸气作为气化助剂可以有效提高碳转化率, 并且可以调节气化炉出口粗煤气中 CO/H₂ 的比例。Wang 等人^[23]将化学循环气化和 CO₂ 吸附技术与 IGFC 发电结合起

来, 发现在煤气化单元增加载氧剂和吸附剂有利于提高 SOFC 的输出功率, 同时系统具有较高的焓效率。李萍萍等^[24]参照美国能源部报告中的百兆瓦级 IGFC 系统工艺流程, 研究了系统操作压力和进料甲烷含量对系统效率的影响, 结果表明常压下操作的 SOFC 系统净效率为 41%, 增加系统工作压力和提高进料气体中甲烷含量可以显著提高电池堆电效率。Taufiq 等人^[7]研究了中温干法净化和常温湿法净化对系统效率的影响, 发现中温干法净化比常温湿法净化系统的净效率高 6.91%。董斌琦等^[8]对比了以合成气和天然气为原料的燃料电池发电系统的主要参数, 发现由于没有甲烷重整吸热反应, 合成气燃料电池发电过程放热量明显增大, 导致发电效率降低, 并且其需要更多的阴极空气将多余热量带出, 增加了系统换热的难度。

目前针对煤气化与煤气净化单元的研究较多地关注气化炉的结构设计优化以提高冷煤气效率, 以及研究气化操作参数对气化效果的影响、以中温干法净化代替常温湿法净化来提高能量利用效率等方面, 但离新一代、更高效的可以应用到工业装置上的煤气化装置还有一定距离, 中温干法脱硫技术的应用还需要进一步的研究和示范。

2.2 燃料电池发电

燃料电池发电单元是 IGFC 系统的核心单元, 该单元的能量转换效率直接决定了系统的发电效率。高燃料利用率的燃料电池是提高系统发电效率的关键, 在系统模拟中如何更真实地反映燃料电池中进行的过程也一直是模拟工作的重点。

汪洋^[25]建立了单流道燃料电池模型, 并研究了压力和进气参数等对电池温度分布、输出能量密度、电化学反应速率的影响。Li 等人^[26]建立了二维平面 SOFC 模型, 并将其与传统的无因次 SOFC 模型进行对比, 结果进一步证明了在 IGFC 系统设计中采用多维 SOFC 模型的必要性, 同时发现系统所需要的冷却空气流量比无因次 SOFC 模型预测的大得多。李元姣^[27]基于 IGFC 发电系统模型研究了气煤比、给煤比、汽煤比、进煤量等参数对 IGFC 系统性能的影响, 结果表明 IGFC 系统发电效率随进煤量、气煤比的增加而降低, 随给煤比的增加而增加, 汽煤比的影响则不明显。孟辉^[28]研究了电池工作压力、工作温度、燃料利用率和氢气含量等对燃料电池性能和 IGFC 系统性能的影响, 发现燃料电池效率在不同电流密度下达到最佳值时的运行温

度不同、燃料电池输出电压随燃料利用率增加而减小、系统效率随燃料利用率的增加先增大后减小。

从目前的研究内容来看,构建二维乃至三维的燃料电池模型进行工况分析是研究燃料电池工作特性与性能优化的重要方式,其成本较低,可行度较高,但仍具有一定的难度。已有的研究较多地关注燃料电池的操作参数对电池效率和系统效率的影响,而较少关注电池细化结构设计。未来要开发高性能、能够长周期运行的燃料电池从而为高效率的IGFC系统提供切实保障,还需要更多地针对燃料电池中的细节如流道设置和工质流动特性、电极处的传质传热反应行为等方面的模拟工作。

2.3 IGFC 系统整体流程

已有的研究发现在IGFC系统中耦合CO₂捕集系统可以实现高效率、高纯度的CO₂捕集,同时不显著降低系统的发电效率,有望成为重要的减碳排放途径,有助于实现“碳中和、碳达峰”目标。

Park等人^[29]对比了带CO₂捕集的IGFC系统和IGCC系统,发现IGFC系统的输出功率和能量利用效率比IGCC系统高得多,并且增加CO₂捕集所带来的系统净效率降低在IGFC系统中显得更不明显。Lanzini等人^[30]研究了带部分甲烷化和CO₂捕集装置的IGFC系统,结果表明部分甲烷化和CO₂捕集装置的引入可以有效增加系统的能量利用效率。Obara等人^[31]研究了IGFC系统的动态调整特性,结果表明在负荷变化20%时,功率输出达到稳定需要约2.2 h。Michael^[32]研究了带CO₂捕集的IGFC/GT混合系统,结果表明在燃料电池发电单元前增加水汽变换反应器有利于提高总体能量利用效率,CO₂排放量主要受系统净效率和CO₂捕集装置前CO₂中的碳占总碳比例的影响。Taufiq等人^[7]研究了不同电流密度、工作压力下的IGFC/GT-ST混合系统,发现电流密度为0.2 A/cm²、工作压力为405.3 kPa时系统净效率最高为50.04%,并且系统输出功率中有45.5%来自余热锅炉产生的蒸汽带动汽轮机发电。

已有的对IGFC系统整体流程模拟的研究较好地反映了系统的特性、系统中关键参数对系统效率的影响和增加CO₂捕集、部分甲烷化等装置的效果。但在目前的研究中,研究者一般用Aspen Plus内置的反应器来模拟各模块中进行的过程,其中煤气化模块常采用简单动力学,燃料电池模块常采用2个独立的反应器模拟阴阳极,且燃料利用率常采用某

个设定值,这使得目前的模拟计算与实际系统仍有一定的差距^[33]。对IGFC系统整体模拟而言,其模拟效果的进一步提高需要依赖于对各关键单元模拟工作研究的进一步细化和深入。

3 IGFC 系统示范进展与关键问题

3.1 IGFC 系统研究与示范进展

自IGFC系统被提出以来,美国能源部(department of energy, DOE)和日本新能源产业技术发展组织(new energy and industrial technology development organization, NEDO)均投入巨额资金进行IGFC技术的研发和应用示范^[8]。自2000年起,美国能源部成立固态能源转化联盟(solid state energy conversion alliance, SECA),支持IGFC系统的研发。目前SECA正专注于开发低成本、模块化、燃料灵活性高的SOFC技术。美国能源科技实验室(national energy technology laboratory, NETL)正资助燃料电池在大规模电站的长周期运行的研究,旨在2020年和2025年分别实现10 MW和50 MW的IGFC装置验证^[34-35]。日本在2012年启动由NEDO支持、大崎CoolGen公司运行的大崎CoolGen项目。该项目在EAGLE(coal energy applications for gas, liquid and electricity)项目的基础上,力争分3个阶段验证带CO₂分离与捕集技术的IGFC发电系统。该项目一阶段已完成,在170 MW规模的电厂实现了世界最高水平的基于高位热值(higher heating value, HHV)的40.8%的供电效率(40.8% HHV)。其二阶段目标是增加CO₂分离与捕集装置并在实现90%CO₂回收率的前提下达到40% HHV。三阶段目标则是在IGFC系统上实现90%CO₂回收率和47% HHV。我国于2017年在国家重点研发计划中对IGFC项目立项,由国家能源集团牵头,华能清能院、中国矿业大学、苏州华清等单位重点参与,预期建成燃料电池发电效率高于50%、CO₂捕集率高于91%的兆瓦级IGFC示范系统。

从发电容量、系统发电效率、CO₂捕集率等关键指标来看,我国目前针对IGFC系统的研究与日本、美国等国差距不大^[36]。在保证90%的CO₂捕集率、燃料电池容量在兆瓦级的情况下,我国燃料电池发电效率不低于50%,而日本CoolGen项目的IGFC示范则旨在达到47% HHV的送电端效率。由此可见,我国提出的IGFC系统在系统运行指标方

面达到了国际先进水平。此外,燃料电池组的规模化也是 IGFC 系统成功示范的重要研究方向。

3.2 IGFC 系统的研究方向与技术关键

根据国内外目前 IGFC 系统技术进展,其在未来的研究中亟需解决的技术问题主要有:

1) 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。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,同时单电池的输出功率需要尽可能高才能实现大功率的 IGFC 发电系统,且压力对电池输出功率有重要影响。此外,由于燃料电池单元需要将多块电池进行集成,需要解决燃料气体在不同电池间的均布问题。

2) 现有的粗煤气常温湿法净化脱硫工艺会损失粗煤气中较多的热量,且工艺流程相对复杂,需要大量的换热器来降低系统能量损失,有必要加快具有更高能量利用效率的中温干法净化脱硫工艺的研发与应用。

3) 燃料电池排出的尾气中含有相当比例的未充分反应的组分,需要在纯氧燃烧室中进行充分燃烧,但尾气的热值较低,采用催化燃烧的方式可以有效降低燃烧难度。考虑到尾气燃烧室是 IGFC 系统必不可少的单元,极有必要研制成本低、寿命长、活性高的催化燃烧的催化剂,并进行相应的催化燃烧器开发。

4 结 语

1) IGFC 技术将煤气化与净化、燃料电池发电、尾气燃烧与余热回收等工艺流程集成,被视为是最具前景的绿色煤电技术,并且可以很好地与碳捕集技术结合起来,以发电效率少量下降为代价达到令人满意的 CO₂ 捕集率。

2) 详细介绍了目前国内外在煤气化与净化、燃料电池发电单元与 IGFC 系统整体流程模拟方面的研究进展,分析了 IGFC 系统中各单元对发电效率的影响,并对各单元未来研究方向提供了建议。

3) 介绍了美国、日本和我国在 IGFC 技术研发与示范上所做的工作与在建项目。我国在技术研发上仍需继续深入,需要针对大功率燃料电池的长周期运行、粗煤气中温干法净化、尾气催化纯氧燃烧等关键技术加大研发力度,为我国煤电的绿色发展提供支持。

[参 考 文 献]

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 樊强, 许世森, 刘沅, 等. 基于 IGCC 的燃烧前 CO₂ 捕集技术应用与示范[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 163-167.
FAN Qiang, XU Shisen, LIU Yuan, et al. Application and demonstration of IGCC-based pre-combustion CO₂ capture technology[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 163-167.
- [3] FUSHIMI C, GUAN G. Advanced integrated coal gasification combined cycle: current status of development[M]//Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Encyclopedia of Sustainable Technologies, 2017: 423-439.
- [4] 孙旭东, 张蕾欣, 张博. 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 1-6.
SUN Xudong, ZHANG Leixin, ZHANG Bo. Research on the coal industry development and transition in China under the background of carbon neutrality[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(2): 1-6.
- [5] HACKETT G A, GERDES K, SONG X, et al. Performance of solid oxide fuel cells operated with coal syngas provided directly from a gasification process[J]. Journal of Power Sources, 2012, 214: 142-152.
- [6] LI M, RAO A D, BROUWER J, et al. Design of highly efficient coal-based integrated gasification fuel cell power plants[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(17): 5707-5718.
- [7] TAUFIQ B N, KIKUCHI Y, ISHIMOTO T, et al. Conceptual design of light integrated gasification fuel cell based on thermodynamic process simulation[J]. Applied Energy, 2015, 147: 486-499.
- [8] 董琦琦, 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.
- [9] 张斌, 倪维斗, 李政. IGCC 及煤气化-固体氧化物燃料电池混合循环的技术经济性分析[J]. 动力工程, 2005, 25(1): 141-146.
ZHANG Bin, NI Weidou, LI Zheng. Techno-economic analysis of IGCC and hybrid systems of coal gasification and SOFC[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(1): 141-146.
- [10] 程晓磊, 张鑫. 现代煤气化技术现状及发展趋势综述[J]. 煤质技术, 2021, 36(1): 1-9.
CHENG Xiaolei, ZHANG Xin. Summary of present situation and development trend of modern coal gasification technology[J]. Coal Quality Technology, 2021, 36(1): 1-9.
- [11] DOU B L, WANG C, CHEN H S, et al. Research progress of hot gas filtration, desulphurization and HCl removal in coal-derived fuel gas: a review[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012, 90: 1901-1917.
- [12] MAYUMI T, KOUETSU A, YUICHI Y, et al. Dry gas cleaning in coal gasification systems for fuel cells using composite sorbents[J]. Powder Technology, 2008, 180(1/2): 232-238.
- [13] MAKOTO K, HIROYUKI A. Dry syngas purification

- process for coal gas produced in oxy-fuel type integrated gasification combined cycle power generation with carbon dioxide capturing feature[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 203(3): 925-936.
- [14] GIDDEY S, BADWAL S P, KULKARNI A, et al. A comprehensive review of direct carbon fuel cell technology[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, 38(3): 360-399.
- [15] UMBERTO L. Overview on fuel cells[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30: 164-169.
- [16] LIU M, ARAVIND P V, WOUDESTRA T, et al. Development of an integrated gasifier-solid oxide fuel cell test system: a detailed system study[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(17): 7277-7289.
- [17] CHEN S Y, LIOR N, XIANG W G. Coal gasification integration with solid oxide fuel cell and chemical looping combustion for high-efficiency power generation with inherent CO₂ capture[J]. *Applied Energy*, 2015, 146: 298-312.
- [18] 陈星. 固体氧化物燃料电池系统优化及后燃烧室催化燃烧特性分析[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019: 25-36.
CHEN Xing. Optimization of solid oxide fuel cell system and analysis of rear combustion chamber catalytic combustion characteristics[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2019: 25-36.
- [19] EL-EMAM R S, DINCER I, NATERER G F. Energy and exergy analyses of an integrated SOFC and coal gasification system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(2): 1689-1697.
- [20] PIEROBON L, ROKNI M, LARSEN U, et al. Thermodynamic analysis of an integrated gasification solid oxide fuel cell plant combined with an organic Rankine cycle[J]. *Renewable Energy*, 2013, 60: 226-234.
- [21] FURUSAWA Y, TAGUCHI H, ISMAIL S N, et al. Estimation of cold gas efficiency and reactor size of low-temperature gasifier for advanced-integrated coal gasification combined cycle systems[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 193: 304-316.
- [22] SPEIGL N, BERRUCEO C, LONG X Y, et al. Production of a fuel gas by fluidised bed coal gasification compatible with CO₂ capture[J]. *Fuel*, 2020, 259: 116242.
- [23] WANG S, LI B W, YANG X S, et al. Performance of sorption-enhanced chemical looping gasification system coupled with solid oxide fuel cell using exergy analysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(2): 1752-1761.
- [24] 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.
- [25] 汪洋. 煤气化发电固体氧化物燃料电池三维多场耦合仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2018: 54-58.
WANG Yang. Simulation study on three-dimensional multi-field coupling of solid oxide fuel cell for coal gasification power generation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018: 54-58.
- [26] LI M, BROUWER J, RAO A D, et al. Application of a detailed dimensional solid oxide fuel cell model in integrated gasification fuel cell system design and analysis[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(14): 5903-5912.
- [27] 李元姣. 煤基合成气固体氧化物燃料电池系统建模及性能分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 58-63.
LI Yuanjiao. Modeling and performance analysis of solid oxide fuel cell system for coal-based synthetic gas[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014: 58-63.
- [28] 孟辉. IGCC-SOFC 复合动力系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009: 39-45.
MENG Hui. IGCC-SOFC composite dynamic system research[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009: 39-45.
- [29] PARK S K, AHN J H, KIM T S. Performance evaluation of integrated gasification solid oxide fuel cell/gas turbine systems including carbon dioxide capture[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(9): 2976-2987.
- [30] LANZINI A, KREUTZ T G, MARTELLI E, et al. Energy and economic performance of novel integrated gasifier fuel cell (IGFC) cycles with carbon capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 26: 169-184.
- [31] OBARA S, MOREL J, OKADA M, et al. Study on the dynamic characteristics of an integrated coal gasification fuel cell combined cycle[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(43): 14996-15011.
- [32] KRUGER M. Process development for integrated coal gasification solid oxide fuel cells hybrid power plants – Investigations on solid oxide fuel cells/gas turbine hybrid power plants run on clean coal gas[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 19-31.
- [33] 李利娟, 吴军, 刘红良, 等. 计及新能源影响静态结合的电网脆弱节点辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 64-72.
LI Lijuan, WU Jun, LIU Hongliang, et al. Static and dynamic integration method on identifying vulnerability nodes considering new energy power[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 64-72.
- [34] ZHANG X. Current status of stationary fuel cells for coal power generation[J]. *Clean Energy*, 2018(2): 2.
- [35] 王昊昊, 徐泰山, 马彦宏, 等. 计及多类型电源协调的有功控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(4): 167-175.
WANG Haohao, XU Taishan, MA Yanhong, et al. A novel active power control strategy considering multi-resource coordination[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 167-175.
- [36] 刘辉, 刘强, 张立, 等. 考虑需求侧协同响应的热电网供微网多目标规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 43-51.
LIU Hui, LIU Qiang, ZHANG Li, et al. Multi-objective planning for combined heat and power microgrid considering demand side cooperative response[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 43-51.

(责任编辑 杜亚勤)