



移动扫码阅读

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.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.07.024

DONG Binqi,LI Chufu,HUANG Bin,*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.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.07.024

CO₂ 近零排放的煤气化燃料电池发电技术及挑战

董斌琦¹,李初福²,刘长磊³,黄斌⁴,王琦⁴,范为鹏⁴,李萍萍²

(1. 国家能源投资集团有限责任公司,北京 100011; 2. 北京低碳清洁能源研究所,北京 102209; 3. 神华新能源有限责任公司,北京 100007; 4. 神华宁夏煤业集团煤制油分公司,宁夏 银川 750411)

摘要:煤气化燃料电池发电(IGFC)是一种新型煤电技术,可大幅提高煤电效率,实现 CO₂ 及污染物近零排放。介绍了 IGFC 技术原理、优势及现状,调研了高温燃料电池的国内外进展,并介绍了正在开展的国家重点研发计划 IGFC 项目情况。利用 Aspen 软件建立合成气燃料电池发电系统模型,对即将开展的 MW_{th} 级 IGFC 示范系统进行模拟和分析,并与天然气燃料电池发电系统进行比较。同时根据目前研究进展情况,总结了 CO₂ 近零排放的 IGFC 系统主要的技术挑战,包括电堆开发、多堆模块设计、尾气燃烧、热量回收和系统控制等方面,为后续 MW_{th} 级 IGFC 系统开发及示范提供方向指导。

关键词:IGFC; 固体氧化物电池; 熔融碳酸盐电池; CO₂ 捕集

中图分类号:TQ152 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2019)07-0189-05

Integrated gasification fuel cell power generation technology with CO₂ near zero emission and its challenges

DONG Binqi¹, LI Chufu², LIU Changlei³, HUANG Bin⁴, WANG Qi⁴, FAN Weipeng⁴, LI Pingping²

(1. China Energy Group Corporation Limited, Beijing 100011, China; 2. National Institute of Clean and Low Carbon Energy, Beijing 102209, China;

3. Shenhua New Energy Company Ltd., Beijing 100007, China; 4. Coal to Oil Branch Company, Shenhua Ningxia Coal Industry Group, Yinchuan 750411, China)

Abstract: Integrated gasification fuel cell (IGFC) power generation is a novel coal power technology, which could greatly improve the efficiency of coal to electricity and achieve zero emission of CO₂ and pollutants. This paper first introduces the principle, advantages and status of the IGFC technology, and investigates the technical progress in high temperature fuel cell at home and abroad. The IGFC project status of the national key R & D program is also introduced. Subsequently, a model for syngas fuel cell power generation system is built using Aspen software, and the MW_{th} IGFC demonstration system is simulated and analyzed using the model. Simulation results for syngas fuel cell power system are also compared with the natural gas fuel cell power system. Finally, according to the current research progress, the main technical challenges for the IGFC system with CO₂ near zero emission are summarized, including stack development, multi-stack module design, exhaust gas combustion, heat recovery and system control, etc., which could provide guidance for the development and demonstration of the MW_{th} level IGFC system.

Key words: integrated gasification fuel cell; solid oxide fuel cell; molten carbonate fuel cell; CO₂ capture

0 引言

煤电面临发电效率提高和 CO₂ 及污染物近零排放的瓶颈问题,为从根本上突破这 2 大瓶颈,解决煤电 CO₂ 捕集带来效率下降和成本增加的难题,目前在整体煤气化联合循环发电(IGCC)的基础上发展

的煤气化燃料电池发电技术(IGFC)^[1-2],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,在高效发电的同时完成燃料电池内部 CO₂ 富集,大幅降低 CO₂ 捕集成本^[3-4],实现 CO₂ 及污染物近零排放,是煤电技术的根本性变革,被视作未来最有发展前景的

收稿日期:2019-02-09;责任编辑:赵瑞

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0601900)

作者简介:董斌琦(1981—),男,湖北鄂州人,高级工程师,硕士。

CO₂近零排放煤气化发电技术。美国能源部和日本新能源产业技术发展组织(NEDO)均长期持续投入巨资进行IGFC技术研发和应用示范。1999年,美国能源部成立的固态能源转化联盟(SECA),旨在开发百兆瓦级IGFC系统^[5]。2003年,美国肯塔基先进能源公司与燃料电池能源(Fuel Cell Energy)公司合作,在沃巴什河IGCC电站示范2 MW IGFC发电系统,验证了IGFC技术可行性。美国“Future Gen”项目中固体氧化物燃料电池(SOFC)与燃气轮机的300 kW级工程示范装置,该装置已连续运行超过6 800 h,发电效率已达到52%,热电联供后则能达到80%以上^[6-7]。

日本政府于2003年制定了微型燃料电池的研究计划,而主要用于小型发电厂的SOFC则是日本燃料电池发展的另一个重要方向,并在家庭用户中得到推广应用^[8]。2015年日本制定了IGFC发展规划,目标是到2025年IGFC发电效率达到55%。目前,《中国战略性新兴产业发展报告》^[9]《能源技术革命创新行动计划(2016~2030年)》和《“十三五”电力发展规划》均将IGFC列为战略性能源新技术。国家重点研发计划在2017年度中对IGFC项目进行了立项,项目由国家能源集团牵头,预计在2021年完成MW_级CO₂近零排放的IGFC系统示范。

1 煤气化燃料电池发电系统简介

1.1 系统流程

CO₂近零排放的IGFC系统主要包括煤气化、合成气脱硫、高温燃料电池、尾气纯氧燃烧、余热回收等过程^[10]。煤经过纯氧气化生成合成气(主要成分是CO、H₂、CO₂、CH₄),进行热量回收后进入净化单元将硫和粉尘脱除;净化合成气送入到高温燃料电池阳极,与阴极渗透过来的阳离子在600~800℃下发生反应,大部分可燃组分被反应转化成电和热,未转化的可燃组分随电池阳极尾气排出,送入燃烧炉进行纯氧燃烧,全部转化为CO₂和H₂O,燃烧尾气经预热回收并分离出水后,得到纯度95%以上的CO₂气体,可达到直接封存的浓度要求。IGFC系统流程如图1所示。

1.2 IGFC系统优势

根据美国DOE研究结果^[10-11],IGFC系统大规模应用后,在系统效率、投资、水耗、发电成本等方面具有明显优势(表1^[10-11]),比带CO₂捕集的常规PC电站、IGCC电站效率可提高15%以上,投资降低40%左右,度电水耗下降80%以上。

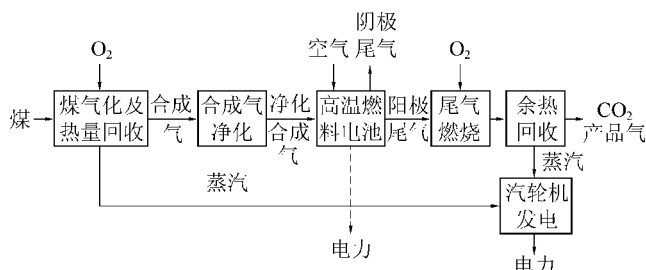


图1 IGFC系统流程示意

Fig. 1 Flow schematic for IGFC system

表1 带CO₂捕集燃煤电厂性能指标比较

Table 1 Comparison for performance of coal-based power plant with CO₂ capture

| 名称 | PC(常规) | IGCC | IGFC(常压) | IGFC(加压) |
|---------------------------------------|--------|-------|----------|----------|
| 净效率/(%HHV) | 28.4 | 32.6 | 51.1 | 57.0 |
| 投资/(\$ · kW ⁻¹) | 3 570 | 3 330 | 2 150 | 2 100 |
| 水耗/ (G · min ⁻¹ · MW) | 10.7 | 18.3 | 2.5 | 1.8 |
| 度电成本/(\$ · kW · h ⁻¹) | 0.150 | 0.151 | 0.108 | 0.103 |

2 国内外高温燃料电池技术进展

目前,煤气化及净化技术已实现大规模商业化应用,制约IGFC系统规模化应用的主要瓶颈在于高温燃料电池技术以及其系统集成优化。高温燃料电池技术包括SOFC和MCFC 2种^[12],目前主要掌握在布鲁姆能源(Bloom Energy, BE)、燃料电池能源(Fuel Cell Energy, FCE)、通用燃料电池(GEFC)等少数公司手里。

2.1 BE公司

BE公司是行业内公认SOFC技术力量最强、运作最成功的公司。BE公司SOFC采用电解质支撑电池技术,经过之前西屋公司多年的研发,该技术相对成熟,寿命和可靠性较好。BE公司目前主打产品规格在100~250 kW,标准模块是50 kW(图2),并在数据中心、楼宇等进行分布式商业应用,总规模达到100 MW级以上^[13]。



图2 BE公司50 kW的SOFC模块

Fig. 2 50 kW SOFC module of BE company

2.2 FCE公司

FCE公司在DOE资助下,长期从事SOFC技术开发,已开发出了16 kW级的SOFC电堆(图3),正

在开发单套规模为 200 kW 的天然气 SOFC 发电系统^[14]。

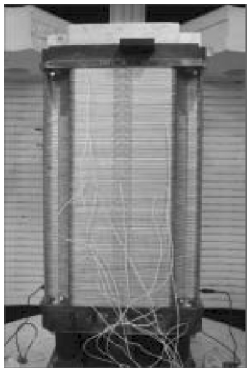


图 3 FCE 公司 16 kW 的 SOFC 电堆
Fig. 3 16 kW SOFC stack of FCE company

FCE 公司主要产品是 MCFC,在 MCFC 技术领域是业内最强的。已开发出 350 kW MCFC 电堆和单套规模为 3 MW 的天然气 MCFC 发电系统,并在韩国建设了 59 MW 级天然气 MCFC 发电站(图 4)。

2.3 GEFC 公司

GEFC 公司采用金属支撑的板式 SOFC 技术,电池片尺寸为 20 cm×20 cm,利用热喷涂技术制造,生产成本较低,适合于批量化生产,但是技术路线较新,还缺乏寿命及可靠性的验证数据。GEFC 电堆功率为 10~20 kW,电堆较为成熟。GEFC 公司研制了 50 kW

系统样机(图 5),并进行了 5 000 h 的测试^[15]。



(a) 3 MW 级天然气 MCFC 发电系统



(b) 韩国 59 MW 天然气 MCFC 电站

图 4 FCE 公司 MCFC 系统及应用
Fig. 4 MCFC system and application of FCE company



图 5 GEFC 50 kW 的 SOFC 模块
Fig. 5 GEFC 50 kW SOFC module

国外领先的高温燃料电池公司技术水平见表 2。

表 2 国外领先的高温燃料电池公司技术水平

Table 2 Technical performance of high temperature fuel cell from famous oversea companies

| 公司名称 | BE | FCE | GEFC | FCE |
|--------------|--------------|-------------|------------|-----------|
| 电池种类 | SOFC | SOFC | SOFC | MCFC |
| 单堆规模/kW | 1.0 | 16.0 | 15.0 | 350 |
| 单套系统/模块规模/kW | 50 | 200 | 50 | 3 000 |
| 燃料气 | 天然气 | 天然气/液化气 | 氢气 | 天然气 |
| 发电效率/% | 60~65 | 60~65 | ~50 | ~47 |
| 成熟度 | 百兆瓦级分布式商业化应用 | 200 kW 系统样机 | 50 kW 系统样机 | 百兆瓦级商业化应用 |

2.4 国内公司

我国高温燃料电池技术远落后于发达国家,2016 年中国矿业大学牵头完成了“973 计划”项目《碳基燃料固体氧化物燃料电池体系基础研究》,开发出 10 kW 级熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)和 kW 级固体氧化物燃料电池(SOFC)。目前从事 SOFC 电堆研发的公司主要有潮州三环集团、苏州华清京昆新能源公司、宁波索福人能源技术公司等^[16],其中潮州三环公司在国内处于领先水平,开发出了 1.5 kW 的天然气固体氧化物燃料电池堆,发电效率达到 60%以上。从事 MCFC 技术研发的公司主要有中国华能清能院等^[17],中国华能清能院 2014 年成

功运行了 2 kW MCFC 电池堆,发电效率达到 43.9%,并于 2015 年成功运行了 6 kW MCFC 电池堆,发电效率提升至 45%,目前正在开发 20 kW 级的 MCFC 电堆。

国内公司高温燃料电池堆性能还有待进一步提高,并需要进行系统应用验证。国家重点研发计划在 2017 年对 IGFC 项目进行了立项,项目由国家能源集团牵头,联合中国矿业大学(北京)、北京低碳清洁能源研究所、中国华能清能院、清华大学、苏州华清京昆新能源公司、华北电力大学等单位对 IGFC 技术进行攻关,利用 4 年将开发 100 kW 级 SOFC 和 MCFC 发电单元,建成国际上首套 MW_级 CO₂ 近零排放的

IGFC 示范系统,燃料电池发电效率 $\geq 50\%$,CO₂捕集率 $\geq 91\%$,将显著提升我国在该领域的水平。

3 IGFC 示范系统模拟及分析

针对 MW_{th}级 CO₂近零排放的 IGFC 示范系

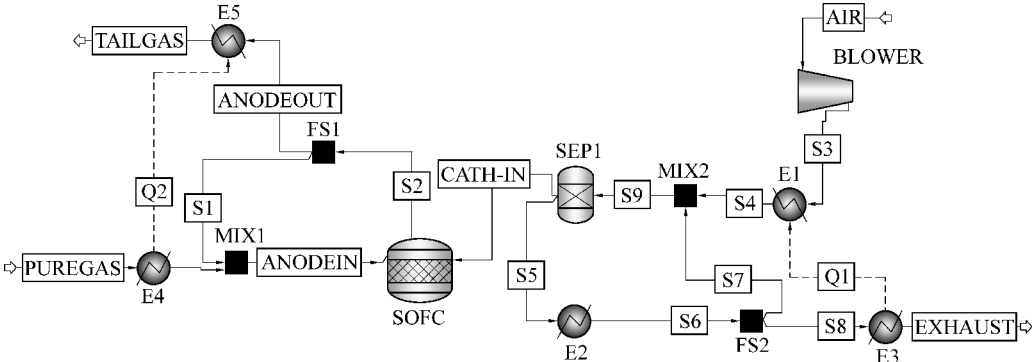


图 6 基于 Aspen plus 的 SOFC 模型
Fig. 6 SOFC model based on Aspen plus

表 3 IGFC 示范系统合成气组成

| Table 3 Syngas composition for the IGFC system demonstration | | | | | % |
|--|-------|---------------------|---------------------|--------------------|---|
| w(H ₂) | w(CO) | w(CO ₂) | w(CH ₄) | w(N ₂) | |
| 61.77 | 36.72 | 0.24 | 0.14 | 1.13 | |

合成气和天然气燃料电池发电系统主要参数比较见表 4。结果表明,与天然气燃料电池发电系统相比,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显著增大,约是天然气燃料电池发电过程的 1.5 倍,导致燃料电池发电效率降低 10% 左右,并且需要大量的阴极空气将热量带出,增加系统的热量管理难度。

表 4 合成气和天然气燃料电池发电系统主要参数比较

| Table 4 Parameters comparison for of syngas and natural gas fuel cell power system | | | |
|--|--------------------|-------|-------|
| 项目 | 单位 | 合成气 | 天然气 |
| 燃料输入热量 | MW | 1.0 | 1.0 |
| 燃料气流量 | Nm ³ /h | 315.0 | 102.8 |
| 阴极空气流量 | Nm ³ /h | 6 383 | 4255 |
| 燃料电池工作温度 | ℃ | 750 | 750 |
| 燃料利用率 | % | 85 | 85 |
| 阳极尾气热值 | kJ/Nm ³ | 1 561 | 1 465 |
| 燃料电池发电功率 | kW | 550 | 650 |
| 燃料电池发热量 | kW | 300 | 200 |
| 燃料电池发电效率 | % | 55.0 | 65.0 |

4 IGFC 示范系统主要技术挑战

根据目前国内外主要技术进展,CO₂近零排放的 IGFC 系统技术挑战主要有:

统,建立 MW_{th}级合成气燃料电池发电系统模拟模型(图 6),根据示范现场合成气实际组成(表 3,经过部分变换和低温甲醇洗净化),对系统进行模拟和分析,并与天然气燃料电池发电系统进行比较。

1) 电堆是燃料电池发电系统的核心技术,要求电堆具有良好的稳定性和一致性,并且单堆功率尽可能高,才能实现大功率发电系统。目前,国外已经基本突破,但是对中国技术封锁,且没有针对合成气特性的电堆;国内技术差距较大,还需要加大开发力度。

2) 目前高温燃料电池单堆功率都较小,为了能够使得系统功率更大,降低其他辅助设备成本,需要将多个电堆集成一个模块,需要解决气体在多个电堆间均匀分布的问题。模块集成的电堆越多,气体均匀分布难度就越大。

3) 根据热量衡算计算,合成气高温燃料电池发电过程放热量约是天然气发电的 1.5 倍,电热比例约为 6.5 : 3.5,为了回收电堆放出的热量,需要使用高温换热器,工作温度在 800 ℃ 左右。高温换热器加工制造和长周期运行是一个较大挑战。

4) 合成气高温燃料电池发电尾气热值低,电池燃料利用率为 85% 左右时,尾气的低位热值仅有 1 256~1 674 kJ/Nm³,利用常规燃烧技术难以稳定燃烧。

5) 高温燃料电池过程控制包括工艺控制和电力控制,两者会相互影响,需要一个良好的协调机制。

5 结 论

1) 介绍了 IGFC 技术原理、优势及现状,并重点介绍了 IGFC 的关键技术高温燃料电池的国内外技术进展,包括 BE、FCE、GEFC、潮州三环、苏州华清京昆新能源、中国华能清能院等公司技术情况。

2) 利用 Aspen 软件建立合成气燃料电池发电系统模型,对即将开展的 MW_{th}级 IGFC 示范系统进行模拟和分析,并与天然气燃料电池发电系统进行比较。

较。结果表明,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显著增大,约是天然气燃料电池发电过程的1.5倍,导致燃料电池发电效率降低10%左右。

3)根据目前研究进展情况,总结了CO₂近零排放的IGFC系统主要的技术挑战,包括电堆开发、多堆模块设计、尾气燃烧、热量回收和系统控制等方面,为后续MW_{th}级IGFC系统开发及示范提供方向指导。

参考文献(References):

- [1] 彭苏萍,韩敏芳.煤基/碳基固体氧化物燃料电池技术发展前沿[J].自然杂志,2009,31(4):187-191.
PENG Suping,HANG Minfang.Development of coal/carbon based solid oxide fuel cell[J].Chinese Journal of Nature,2009,31(4):187-191.
- [2] 衣宝廉.燃料电池:原理·技术·应用[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [3] SUBHASHC S,KEVIN K.高温固体氧化物燃料电池:原理、设计和应用[M].韩敏芳,蒋先锋,译.北京:科学出版社,2006.
- [4] 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].Chin Soc for Elec Eng,2017,37(1):200-208.
- [5] SU Rdoval W.SOFC development in the USA,the 8th European solid oxide fuel cell forum:B0106[C].Lucerne,Switzerland,2008.
- [6] 许臣.煤基SOFC/IGCC联合循环系统性能研究[D].镇江:江苏科技大学,2010.
- [7] PRAPAN K,SANKAR B,ATSUSHI T.Energy recuperation in solid

oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) combined system [J].Journal of Power Sources,2003,117:7-13.

- [8] 孟辉.IGCC-SOFC复合动力系统研究[D].北京:华北电力大学,2009.
- [9] 彭苏萍,黄其励,俞珠峰,等.煤炭高效转化及近零排放利用产业培育与发展[C]//中国战略性新兴产业发展报告,北京:科学出版社,2013:109-120.
- [10] DOE.Cost and performance baseline for fossil energy plants[Z].出版社不详,2010.
- [11] DOE.Analysis of integrated gasification fuel cell plant configurations[Z].出版社不详,2010.
- [12] 程健,许世森,徐越.高温燃料电池发电技术分析[J].热力发电,2009,38(11):7-11.
CHENG Jian,XU Shisen,XU Yue.Analysis of power generation technology with high-temperature fuel cells[J].Thermal Power Generation,2009,38(11):7-11.
- [13] ANON.Delivering Better Electrons[EB/OL].[2018-11-02].
<https://www.bloomenergy.com/>.
- [14] HOSSEIN G.Advances in sofc power system development,annual Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) project report[Z].出版社不详,2016.
- [15] HICHEY D,ALINGER M,SHAPIRO A,*et al.*Stack development at GE-fuel cells[J].ECS Transactions,2017,78(1):107-116.
- [16] 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.
- [17] 王洪建,许世森,程健,等.熔融碳酸盐燃料电池发电系统研究进展与展望[J].热力发电,2017,46(5):8-13.
WANG Hongjian,XU Shisen,CHEN Jian,*et al.*Progress and prospects of molten carbonate fuel cell system[J].Thermal Power Generation,2017,46(5):8-13.