

# 整体煤气化燃料电池联合发电 (IGFC) 技术研究进展

王琦<sup>1</sup>, 杨志宾<sup>1</sup>, 李初福<sup>2</sup>, 雷泽<sup>1</sup>, 刘淑琴<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

**摘要:**整体煤气化燃料电池联合发电技术(IGFC)是一种新型煤基洁净高效发电技术,不考虑热电联供的情况下,发电效率达 60% 以上,可有效控制污染物的排放,为 CO<sub>2</sub> 捕集和回收创造了条件,可实现 CO<sub>2</sub> 的近零排放。IGFC 系统一般由煤气化净化、燃料电池发电、余热回收及 CO<sub>2</sub> 捕集和封存等子系统构成,其中燃料电池发电技术是制约 IGFC 发展的关键技术。固体氧化物燃料电池(SOFC)及熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)是适配 IGFC 系统的 2 种燃料电池技术,其中 SOFC 在生产成本及发电效率方面更具优越性。2017 年国家能源集团牵头,联合中国矿业大学(北京)、北京低碳清洁能源研究院、华能清洁能源技术研究院、清华大学等,在国家重点研发计划项目支持下承担了开发 100 kW 级 SOFC 和 MCFC 发电单元,建成 MW<sub>in</sub> 级 CO<sub>2</sub> 近零排放的 IGFC 示范工程任务,项目成果推动了我国 IGFC 系统从基础技术研发向产业化迈进的步伐。

**关键词:**整体煤气化燃料电池;联合发电技术;煤气化及净化;固体氧化物燃料电池;CO<sub>2</sub> 捕集与封存  
中图分类号:TQ53;TK114 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2022)01-0077-7

## Research progress of integrated coal gasification fuel cell combined power generation (IGFC) technology

WANG Qi<sup>1</sup>, YANG Zhibin<sup>1</sup>, LI Chufu<sup>2</sup>, LEI Ze<sup>1</sup>, LIU Shuqin<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

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

**Abstract:** Integrated coal gasification fuel cell combined power generation technology (IGFC), whose power efficiency can exceed 60% without considering cogeneration, is a new clean and efficient power generation technology of coal-based. Moreover, it can effectively control the emission of pollutants, create conditions for the capture and recovery of CO<sub>2</sub>, and realize near zero emission of CO<sub>2</sub>. IGFC system is generally composed of coal gasification & purification, fuel cell power generation, waste heat recovery, CO<sub>2</sub> capture and storage and other subsystems. Fuel cell power generation technology is the key technology that restricts the development of IGFC. Solid oxide fuel cell (SOFC) and molten carbonate fuel cell (MCFC) are both of the fuel cell technologies suitable for IGFC system. SOFC has more advantages in cost of production and power generation efficiency. In 2017, China Energy Group, together with China University of mining and Technology-Beijing, National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, China Huaneng Group Clean Energy Research Institute and Tsinghua University, undertook the National Key R&D Program of China, which includes the development of 100 kW SOFC and MCFC power generation units, and the building of MW<sub>in</sub> IGFC demonstration project with near zero CO<sub>2</sub> emission. The project achievements have promoted the pace of China's IGFC system from basic technology R&D to industrialization.

**Key words:** Integrated coal gasification fuel cell; combined power generation technology; coal gasification and purification; solid oxide fuel cell; CO<sub>2</sub> capture and storage

## 0 引言

国家统计局发布的 2021 国家能源统计年鉴表

明,2010—2019 年,我国每年火电发电量占总发电量的比值在 69.7%~79.5% 不等,由于我国一次能源供给中煤炭超过能源总量的 60%,因此以煤炭为基

收稿日期:2021-12-03;责任编辑:常明然 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.Q21120603

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0601900);国家自然科学基金面上资助项目(52072405)

作者简介:王琦(1981—),女,黑龙江绥化人,博士研究生。E-mail: wangqi\_hlj@sina.com。通讯作者:杨志宾(1981—),男,河北衡水人,教授。E-mail: yangzhibin0001@163.com。

引用格式:王琦,杨志宾,李初福,等.整体煤气化燃料电池联合发电(IGFC)技术研究进展[J].洁净煤技术,2022,28(1):77-83.

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): 77-83.



移动阅读

础能源的火电发电格局短期内无法改变。传统的燃煤直接发电方式,不仅能源利用率低,且产生大量CO<sub>2</sub>气体,带来能源浪费、环境污染及温室效应等危害<sup>[1-2]</sup>。未来还需要考虑通过煤电灵活调峰来平衡电网,以适应大规模可再生能源发电。因此清洁、高效、灵活、安全的煤基发电技术是未来的主要发展方向。

近年来随着洁净煤技术的快速发展,我国发展了多种新型燃煤发电技术如整体煤气化联合发电技术(IGCC)<sup>[3]</sup>、超超临界发电技术<sup>[4]</sup>、煤电与光伏储能联动等<sup>[5]</sup>,已经实现了对硫化物和氮氧化物的有效控制与减排,但由于CO<sub>2</sub>排放浓度低,捕集成本过

高,仍很难解决燃煤导致的CO<sub>2</sub>排放问题<sup>[6-7]</sup>。

整体煤气化燃料电池联合发电技术(IGFC)是一种清洁高效的绿色煤电技术,与CO<sub>2</sub>捕集技术结合,可以达到60%以上的高发电效率和实现CO<sub>2</sub>近零排放<sup>[8-9]</sup>。

## 1 IGFC 关键技术

IGFC 主要包括煤气化及净化、燃料电池发电、尾气燃烧余热回收 3 个模块,燃烧得到的CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O的混合气体可耦合CO<sub>2</sub>捕集及封存技术、固体氧化物电解池(SOEC)技术等。图1为IGFC系统一般流程。

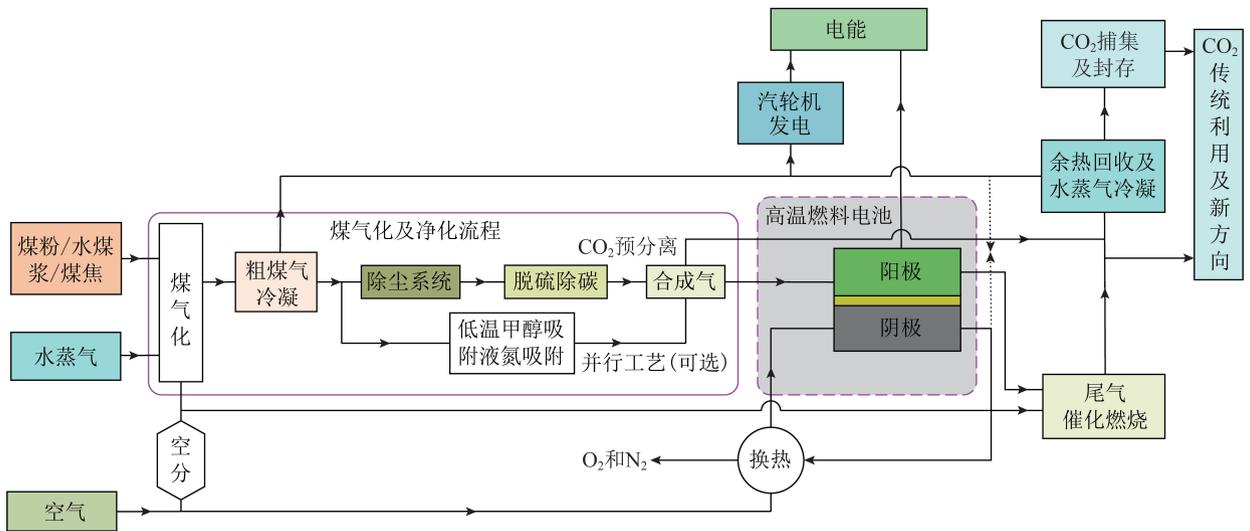


图1 IGFC系统典型流程

Fig.1 Flow diagram of IGFC system

IGFC的一般过程为煤(或天然气、生物质等)经气化生成合成气,热量回收后,合成气进入净化单元脱除硫与粉尘等有害物质,净化后的气体送入高温燃料电池阳极侧,同时阴极侧通入空气,燃料气与氧化气体在电池内发生电化学反应产生电,反应过程中大部分可燃成分转化为电和热,未转化的可燃成分随电池阳极尾气排出,进入燃烧室进行催化燃烧,全部转化为CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O。该混合气体热量回收并冷凝出H<sub>2</sub>O后,得到纯度在90%以上的CO<sub>2</sub>气体,可直接捕集封存<sup>[10]</sup>。燃烧所得混合气体也可用于固体氧化物电解池(SOEC)制氢或合成气,作为能源供给及化工生产原料<sup>[11]</sup>。

### 1.1 煤气化及净化

煤气化及净化技术是较为成熟的洁净煤技术之一,根据原料、反应条件、应用场景等不同,煤气化技术多达数百种,我国煤气化技术先进,部分主流技术统计见表1<sup>[12-13]</sup>。气流床气化、固定床气化及流化床气化技术在工业生产中均有示范应用。

不同的气化过程,不同煤种的原料煤,进料采取干法还是湿法,采用空气喷吹或氧气喷吹操作,干粉煤入料时采用N<sub>2</sub>气体输送或CO<sub>2</sub>气体输送,这些条件的变化都影响合成气的组成,进而影响燃料电池的输出效率。由表1可知,气流床煤气化技术所得的合成气中,煤气有效成分CO和H<sub>2</sub>占比高达90%,固定床和流化床均较低。IGFC系统对燃料的入料浓度有一定要求,燃料浓度越低,电池最大开路电压越低,在给定电流密度下极化损耗越大<sup>[14]</sup>。此外固定床气化技术中,粗煤气中含一定量的焦油和酚,较难完全去除,流化床气化技术除了CO和H<sub>2</sub>等有效组分偏低外,粗煤气中粉尘的带出量较大,粗煤气净化环节耗能较高。而IGFC系统对气体的纯净度要求较高,否则会毒化电池电极。因此采用气流床技术作为IGFC煤气化技术较为合适。ZHENG等<sup>[15]</sup>研究了面向IGFC系统的超细煤粉的气化反应技术,分析了气化反应特性、灰熔融特性及污染物形成机理等,开发了高温/高压摆动式吸附装置,H<sub>2</sub>S和

表 1 我国主要煤气化技术汇总

Table 1 Application summary of main coal gasification technologies in China

项目	气化炉技术	煤种	压力/MPa	单台最大 处理量/(t·d <sup>-1</sup> )	碳转化 率/%	冷煤气 效率/%	煤气有效成分 (CO+H <sub>2</sub> )占比/%
气 流 床 气 化 技 术	Shell	褐煤、烟煤、无烟煤、石油焦等	4.0~4.2	2 000			≥89
	神宁炉	褐煤、烟煤、无烟煤等干粉煤	4.0~4.5	2 000~3 000	≥99	80~82	≥91
	HT-L 航天炉	褐煤、烟煤、无烟煤等干粉煤	4.0~6.5	1 000~3 000			90~91
	SE-东方炉	褐煤、烟煤、无烟煤等干粉煤	5.0	2 000~5 000			约 89
	AP 公司(德士古)水煤浆	烟煤、低阶煤等水煤浆	4.0~8.7	3 000			80~83
	多喷嘴水煤浆	褐煤、烟煤、无烟煤等水煤浆	1.5~8.7	3 000~4 000	≥98	70~76	约 82
	清华炉	褐煤、烟煤、无烟煤等水煤浆	4.0~6.5	—			约 80
	E-Gas	褐煤、烟煤、无烟煤等水煤浆	4.0	2 400			约 54
固 定 床 气 化 技 术	赛鼎炉	褐煤、长焰煤、气煤、不黏煤等块煤	4.0~6.0	1 500	≥98	85~90	50~79,且
	德国 Lurgi 炉子	褐煤、长焰煤、气煤、不黏煤等块煤	2.5~4.0	—	≥98	85~90	含有一定量
	BGL 熔渣气化	褐煤、长焰煤、气煤、不黏煤等块煤	2.5~7.0	200~1 200	≥99	87~92	的焦油和酚类
	晋煤集团 H 炉、S 炉、L 炉	不黏煤或弱黏结性块煤	4.0/4.0/6.5	—	—	—	—
流 化 床 气 化 技 术	KEDA 流化床 (双循环流化床)	褐煤、次烟煤、烟煤等粉煤	常压	100			约 78
	中科合肥	褐煤、次烟煤、烟煤等粉煤	0.025	1 200	≥96	70~76	—
	加压循环流化床	褐煤、次烟煤、烟煤等粉煤	1.2	2 500			40

CO<sub>2</sub>去除率超过 99.9%,进一步减少了 IGFC 系统污染物的排放。IGFC 系统中煤气化流程如图 1 所示。

## 1.2 高温燃料电池技术

燃料电池是一种将存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置,模块化结构、发电效率高,美国将燃料电池列为经济繁荣和国家安全至关重要的 27 项必须发展的技术之一,美国时代周刊将燃料电池列为 21 世纪的高科技之首。其中固体氧化物燃料电池(SOFC)及熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)是适用于 IGFC 系统的燃料电池技术,而 SOFC 采用全固态陶瓷结构,寿命可达 10 万 h,发电效率最高,一次发电效率可达 50%~65%,热电联供效率可达 90%以上,SOFC 可使用氢气,不要求高纯度,特别是可直接使用各种含碳燃料,与现有能源供应系统兼容,具有更好的应用前景。自 2000 年以来,我国部分研究团队开始开展 SOFC 的相关研究工作,至今已有较为完备的技术储备、人才储备,并构建了一定的产业化环境<sup>[16]</sup>。

中国科技大学、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、金属支撑等不同侧重点上开展了相关的基础研究工作。“十二五”期间,中科院大连化物所、宁波材料所、华中科技大学和中科院上硅所分别承担了

“863 计划”项目,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)固体氧化物燃料电池中心在氢能与燃料电池方面已有 20 多年的研发经验,承担了国家重点研发计划、“973”、“863”,中美、中瑞、中丹国际合作、中国工程院战略咨询(重大及重点)、北京市未来科学城建设专项、山西省煤基重点科技攻关等 20 余项国家及省部级科研项目,与国内外许多大学和研究机构都建立了良好的合作和交流关系,在 SOFC 领域有着很强的技术积累和学科优势,已成为我国 SOFC 领域最重要的研发团队之一。

此外,依托各高校的技术输出与转化,目前国内已有部分 SOFC 电池公司开展商业化活动,宁波索福人公司、华清京昆能源公司等均可提供量产的各类电池材料粉体、半电池器件、千瓦级电池堆等。“十三五”期间,大型能源集团如国家能源集团、国家电网、华能集团、潍柴动力、晋煤集团、中广核、新奥集团等开始介入,开展示范应用。

## 1.3 余热回收利用及 CO<sub>2</sub>捕集与转化

余热回收与利用技术一直是锅炉及电厂的重要辅助技术。IGFC 系统中,煤气化产生高温粗煤气,以及电池尾气催化燃烧产生高温的 CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>O 的混合气体,在这 2 个环节中产生大量余热,而 IGFC

系统中采用高温燃料电池发电,通过全系统的热量平衡与统筹利用,可有效增加系统的综合热效能。

燃煤发电除了发电效率低外,最难克服的是低浓度  $\text{CO}_2$  气体的排放问题。目前典型  $\text{CO}_2$  气体的捕集与储存技术面临的障碍是低浓度  $\text{CO}_2$  在捕集过程中的高成本、高耗能问题。IGFC 系统中的高温燃料电池技术,由于燃料气与空气不混合,可以在发电过程中实现  $\text{CO}_2$  的富集,得到的  $\text{CO}_2$  体积分数超过 90%,且气体成分纯净,为  $\text{CO}_2$  直接捕集及后续的储存利用提供了条件。

地质储存、海洋储存及矿物碳化固定等传统方法是  $\text{CO}_2$  大规模储存与固定的主要途径,但存在泄漏、改变地层结构、成本高昂、影响海洋生态系统平衡等影响,发展高效有益的  $\text{CO}_2$  转化利用新技术是未来发展方向。如利用太阳能光催化  $\text{CO}_2$  还原为碳氢燃料(如甲烷、甲醇、乙醇、甲酸、CO 等),可以实现资源的持续利用。

中国矿业大学(北京)固体氧化物燃料电池中心团队<sup>[17]</sup>研究了 IGFC 系统中 SOFC 阳极尾气经催化燃烧得到  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的高温混合气体,耦合可再生能源,通过固体氧化物电解池(SOEC)高效电解,得到  $\text{H}_2$  和 CO 混合气,达到能量转化和储存目的,耦合能源化工生产过程,提出了  $\text{CO}_2$  转化利用的新思路。图 2 为 IGFC 系统中  $\text{CO}_2$  的捕集及转化工艺流程。

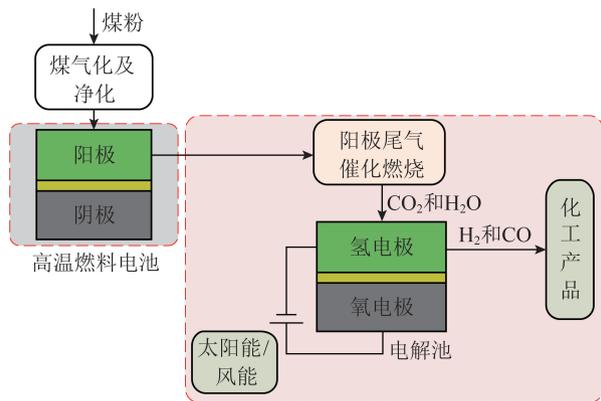


图 2 IGFC 系统中  $\text{CO}_2$  捕集及转化工艺流程<sup>[17]</sup>

Fig.2 Flow chart of  $\text{CO}_2$  capture and conversion process in IGFC system<sup>[17]</sup>

## 2 IGFC 研究进展

IGFC 受到世界的广泛关注,研究较为深入的有日本、美国、欧洲部分国家,韩国、澳大利亚等也开展了部分工作。

### 2.1 国际 IGFC 技术发展现状

#### 2.1.1 日本

1992 年,日本基于美国西屋(Westinghouse)公司的 SOFC 技术在日本开展了 IGFC 系统的可行性评价研究。该系统设计有高温气体净化系统等辅助单元,设计研究结果表明 300 MW 级系统的发电效率接近 47%<sup>[18]</sup>。

1995 年,在 METI(经济、贸易和工业部)和 NEDO(新能源和工业技术发展组织)资助下,依托洁净煤技术的技术储备,日本开展了煤炭能源“EAGLE”项目,开始了 IGFC 的系统设计研究。1996 年和 1997 年,分别进行了基本设计和详细设计,1998 年 8 月在 Wakamatsu 建设了中试线,系统的设计发电效率为 53.3%<sup>[19]</sup>。

随后日本开展了 Super-IGFC 项目的设计研究工作,该系统煤的气化采用蒸汽气化炉,发电模块采用 SOFC,电池发电过程中产生的热和蒸汽直接供给气化炉,系统中不设蒸汽轮机和燃气轮机,系统更加简化,设计预估热电联供的总效率可达 89%<sup>[20-21]</sup>。

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  $\text{CO}_2$  捕集示范集成项目的建设情况,项目已完成 1、2 期的建设,即 IGCC 系统与  $\text{CO}_2$  捕集回收系统,第 3 期将建成 IGFC 系统。项目建成后目标是应用于 500 MW 级商业发电设施,  $\text{CO}_2$  回收率为 90% 的条件下实现 47% 左右的送电端效率(HHV)。

#### 2.1.2 美国

美国能源部(DOE)通过“Vision 21”与“SECA”项目不断推动升级 IGFC 系统的研发工作<sup>[22]</sup>。在 2005 年,美国能源部出资 8 300 万美元委托美国 GE 公司开发以煤炭为燃料集成 SOFC/燃气轮机的联合发电系统,该系统设计了分别采用 SOFC、MCFC 作为发电单元,阳极尾气循环及直接排放 4 种方案。研究对比表明,4 种方案中,采用加压 SOFC 与阳极尾气循环联合利用的系统,整体发电效率最高。系统整体设计效率可达 61.5%,但  $\text{CO}_2$  后续的捕集及封存,将消耗一定能量,因此系统的整体设计效率修正为 58.4%<sup>[23]</sup>。SOFC 模型中,评估气体空间分配方式,以确定系统中最小空气流量所需的最高温度和温度梯度,进而优化系统的能量消耗,可进一步提升 IGFC 大系统的能量转换效率。2016 年,美国国家能源技术实验室发布基于 SOFC 技术的研究进展及规划,将于 2025 年和 2030 年建成 10 MW 和 50 MW IGFC(含  $\text{CO}_2$  捕集)示范系统。

### 2.1.3 欧洲地区

21世纪初期,由法国 Bertin and Cie 公司牵头,由丹麦科技大学,荷兰能源研究基金会(ECN),法国 Usine D Electricite De Metz 公司,法国 CdFINGERIE 公司等共同参与开展了 IGFC 的可行性研究,称为“Baraka”项目<sup>[24]</sup>。项目研究系统由煤气化、气体净化、燃料电池发电、热回收 4 个子系统构成。从发电效率、经济性 2 个方面系统评价了 MCFC 和 SOFC 的优劣。研究发现 SOFC 更适合 IGFC 系统的应用,采用 SOFC 技术系统更加简单;阴极处因压缩空气所消耗的能耗更小;电解质为固态,电极两侧气体交叉泄漏的风险更小;考虑到电池堆的生产成本,SOFC 系统因设备少而略占优势。该系统设计综合转化效率超过 84.8%,发电效率超过 46.7%<sup>[25]</sup>。

### 2.1.4 其他国家

韩国墨尔本大学的 RUDRA 等<sup>[26]</sup>研究了 IGFC 系统中热回收蒸汽发电(HRSG)的优化,以提高 SOFC 废气的热回收效率,并最大化 IGFC 系统蒸汽循环中产生的发电量。采用 Aspen Plus 模拟软件开发热力学模型,用于模拟混合燃料电池系统配置。新加坡国立大学的 PAVAN 等<sup>[27]</sup>研究了以生物质或天然气为燃料的 IGFC 系统,研究表明天然气是优于生物质的首选燃料,并且维持吉布斯平衡过程对于最大能量生产至关重要。如果在操作上难以将燃烧和气化装置均保持在吉布斯平衡点上,那么燃气轮机比燃料电池使用时应更注重吉布斯平衡。

## 2.2 IGFC 技术的国内发展现状

随着中国洁净煤技术“九五”计划实施,我国开始布局燃煤发电新技术的研究。2000年起,SOFC 技术在国内掀起研究热潮,新工艺、新材料、新器件得到极大发展,到“十三五”期间,《煤炭工业发展“十三五”规划》、《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》以及 2016 年国家发展和改革委员会与国家能源局联合发布的《能源技术革命创新行动计划(2016—2030)》等一系列政策出台,煤炭清洁利用提出了详细的发展方向及时间规划。IGFC 技术作为煤电新技术之一,在“十四五”期间将得到进一步的技术提升。

2012—2016 年,中国矿业大学(北京)作为依托单位承担的国家 973 项目“碳基燃料固体氧化物燃料电池体系基础研究”,针对 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,为 SOFC 的产业化推进提供了理论基础和应用基础支撑。2017 年国家能源集团牵头,联

合中国矿业大学(北京)、北京低碳清洁能源研究院等承担了国家重点研发计划“CO<sub>2</sub>近零排放的煤气化发电技术”,其核心是开发 SOFC 及 SOEC 关键技术及系统,项目采取逐级放大、分步实施的技术研发策略,先后在宁夏煤业试验基地完成了 1 kW 和 5 kW 测试平台的调试、试车及电堆/模块的长周期稳定性试验,并实现了 20 kW 级联合煤气化燃料电池发电系统的试车<sup>[15-17,28-29]</sup>。

项目组在推进项目示范过程中开发了 SOFC/SOEC 堆(图 3(a))和 IGFC 测试平台(图 3(b)),搭建了新型 20 kW 级系统(图 3(c))和 IGFC 示范基地(图 3(d))。最近,中国矿业大学(北京)采用人工神经网络映射逻辑搭建了一种新型物理全维模型模拟电堆的多物理场和多维特性,该模型对单电池及 30 片电池的电堆进行试验验证,精度可达 2%。模型实现了 SOFC 堆的全三维多物理场和多维动态模拟,综合了多场的电化学反应、气体传输和化学反应的动力学行为,为电堆的放大提供了理论支撑<sup>[30]</sup>。下一步,项目组将依托已有的技术研究储备开展 100 kW 级系统的示范。

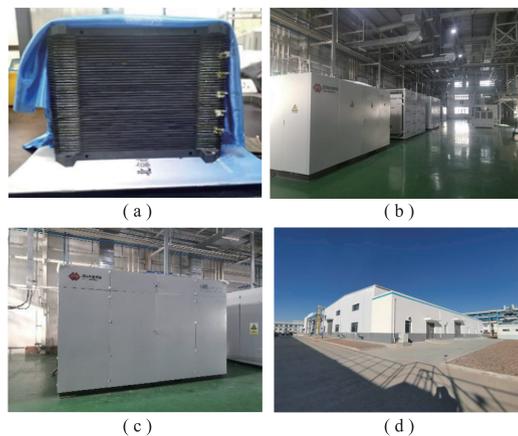


图 3 IGFC 系统示范

Fig.3 IGFC system demonstration

## 3 IGFC 发展面临的挑战

IGFC 系统是碳基燃料发电新技术的重要发展方向,经过 20 多年的基础研究积累,正在走向示范应用。该技术能否成为主导未来发电技术的主流,关键在于成本控制和燃料电池技术的成熟度<sup>[31-32]</sup>。众所周知,IGFC 的核心技术——SOFC 电池技术目前未能实现完全的产业化,其关键材料的低成本量产制备和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。因此实现关键材料的低成本规模化加工、突破关键器件的高性能及长期稳定性,都是制约 IGFC 系统能否成为解决碳基燃料零

碳发展的关键因素。

## 4 结 语

笔者系统介绍了 IGFC 原理、关键技术的研究进展,梳理了美国、日本、欧洲地区等国家在 IGFC 技术的研发与示范方面开展的工作;重点介绍了我国在 IGFC 方面技术进展,提出了阻碍 IGFC 产业化的成本控制问题及电池和电堆高性能、稳定性运行的技术瓶颈问题。

## 参考文献 (References):

- [1] 彭苏萍,张博,王佟. 煤炭资源可持续发展战略研究[M].北京:煤炭工业出版社,2015.
- [2] 王哮江,刘鹏,李荣春,等.“双碳”目标下先进发电技术研究进展与展望[J]. 热力发电,2022,52(1):52-59.  
WANG Xiaojiang, LIU Peng, LI Rongchun, et al. Research progress and prospects of advanced power generation technology under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Thermal Power Generation, 2022, 52(1): 52-59.
- [3] REN Siyue, FENG Xiao, WANG Yufei. Energy evaluation of the integrated gasification combined cycle power generation systems with a carbon capture system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 147:111208.
- [4] 王倩,王卫良,刘敏,等.超(超)临界燃煤发电技术与展望[J]. 热力发电, 2021, 50(2):1-9.  
WANG Qian, WANG Weiliang, LIU Min, et al. Development and prospect of (ultra) supercritical coal-fired power generation technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 1-9.
- [5] 姜薇,曹炯明. 新能源发展形势下的煤电与光伏储能联动发展[J]. 新能源科技, 2021(10):30-32.  
JIANG Wei, CAO Jiongming. Linkage development of coal power and photovoltaic energy storage under the situation of new energy development[J]. New Energy Technology, 2021(10): 30-32.
- [6] 孙旭东,张博,彭苏萍. 我国洁净煤技术 2035 发展趋势与战略对策研究[J]. 中国工程科学,2020, 22(3):132-140.  
SUN Xudong, ZHANG Bo, PENG Suping. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in China Toward 2035[J]. Chinese Engineering Science, 2020, 22(3): 132-140.
- [7] NICHOLAS S Siefert, SHAWN Litster. Exergy and economic analyses of advanced IGCC-CCS and IGFC-CCS power plants[J]. Applied Energy,2013,107(7):315-328.
- [8] JUAN D Arroyave, FARID Chejne, JUAN M Mejía, et al. Evaluation of CO<sub>2</sub> production for enhanced oil recovery from four power plants[J]. Energy, 2020,206:118161.
- [9] 董斌琦,李初福,刘长磊,等. CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> near zero emission and its challenges[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 189-193.
- [10] MUHAMMAD Ashraf Sabri, SAMAR Al Jitan, DANIEL Baha-

mon, et al. Current and future perspectives on catalytic-based integrated carbon capture and utilization[J]. Science of the Total Environment, 2021,798:148081.

- [11] 李汶颖. 固体氧化物电解池共电解二氧化碳和水机理及性能研究[D]. 北京:清华大学,2015.
- [12] 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.
- [13] 王欢,范飞,李鹏飞,等. 现代煤气化技术进展及产业现状分析[J]. 煤化工, 2021, 49(4): 52-56.  
WANG Huan, FAN Fei, LI Pengfei, et al. Modern coal gasification technology progress and industry status analysis [J]. Coal Chemical Industry, 2021, 49(4): 52-56.
- [14] JANSEND, P C Van der Laag, A B J Oudhuis, et al. Prospects for advanced coal-fuelled fuel cell power plants[J]. Journal of Power Sources, 1994,49:151-165.
- [15] ZHENG Shu, SHI Yixiang, WANG Zhiqi, et al. Development of new technology for coal gasification purification and research on the formation mechanism of pollutants[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8(3):335-348.
- [16] HAN Minfang, LYU Zewei. Solid oxide cells development in China[C]//The Proceedings of 14th European SOFC & SOE Forum. Lucerne;The European Fuel Cell Forum, 2020.
- [17] YANG Zhibin, LEI Ze, GE Ben. Development of catalytic combustion and CO<sub>2</sub> capture and conversion technology[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8(3): 377-382.
- [18] JANSEN D, P C van der Laag, A B J Oudhuis. Prospects for advanced coal-fuelled fuel cell power plants[J]. Journal of Power Sources, 1994,49:151-165.
- [19] TAJIMA M, KAWAMURA M, YOSHIOKA F, et al. The outline of EAGLE project (Coal Energy Application for Gas, Liquid, and Electricity) [C]// The Proceedings of the National Symposium on Power and Energy Systems. Tokyo: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [20] GUAN Guoqing. Clean coal technologies in Japan: A review[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2017,25:689-697.
- [21] GUAN Guoqing, FUSHIMI Chihiro, TSUTSUMI Atsushi, et al. High-density circulating fluidized bed gasifier for advanced IGCC/IGFC - Advantages and challenges [J]. Particology, 2010, 8(6):602-606.
- [22] RUTH L A. Vision 21: Ultra-clean energy plants for the 21st century [C]//2000 Gasification Technologies Conference. San Francisco: Gasification Technologies Council, 2000.
- [23] LI Mu, ASHOK D Rao, JACOB Brouwer, et al. Design of highly efficient coal-based integrated gasification fuel cell power plants[J]. Journal of Power Sources, 2010,195: 5707-5718.
- [24] TIMO Kivisaari, PEHR Björnboma, CHRISTOPHER Sylwan, et al. The feasibility of a coal gasifier combined with a high-temperature fuel cell [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 100:167-180.

- [25] GHOSH S, DE S. Energy analysis of a cogeneration plant using coal gasification and solid oxide fuel cell[J]. Fuel and Energy Abstracts, 2006, 31(2/3):345-363.
- [26] RUDRA Souman, LEE Jinwook, ROSENDAHL L, et al. A performance analysis of integrated solid oxide fuel cell and heat recovery steam generator for IGFC system[J]. Frontiers of Energy & Power Engineering in China, 2010, 4(3):402-413.
- [27] NARAHARISETTI P K, LAKSHMINARAYANAN S, KARIMI I A. Design of biomass and natural gas based IGFC using multi-objective optimization[J]. Energy, 2014, 73: 635-652.
- [28] 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.
- [29] MU Shujun, YANG Wenqiang, ZHOU You. Power electronics based MW SOFC system design for Integrated Gasification Fuel Cell (IGFC)[C]//The Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Portland: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.
- [30] BA Liming, XIONG Xingyu, YANG Zhibin, et al. A novel multi-physics and multi-dimensional model for solid oxide fuel cell stacks based on alternative mapping of BP neural networks[J]. Journal of Power Sources, 2021, 500: 229784.
- [31] SURINDER P Singh, BRANDON Ohara, ANTHONY Y Ku. Prospects for cost-competitive integrated gasification fuel cell systems[J]. Applied Energy, 2021, 290:1-18.
- [32] YANG Zhibin, GUO Mengyuan, WANG Ning, et al. A short review of cathode poisoning and corrosion in solid oxide fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42: 24948-24959.