

双碳战略背景下中国煤电技术发展与挑战

于伟静¹, 杨鹏威², 王放放³, 李琦², 赵光金³, 马京香², 马双忱²

(1. 龙源(北京)碳资产管理技术有限公司, 北京 100034; 2. 华北电力大学环境科学与工程系, 河北保定 071003; 3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南郑州 450000)

摘要: 中国煤电装机容量世界居首, 是中国最大的碳源, 也是中国双碳目标及世界气候目标实现的关键。首先, 梳理了中国煤电的发展历程, 指出中国煤电具有体量大、清洁化、低碳化、产能过剩的特点。其次, 分析了中国煤电发展的主要制约因素, 指出煤电关乎发展问题, 对社会稳定、经济发展、能源安全具有重要影响, 退出具有一定的复杂性。此外, 梳理了发展煤电的政策, 表明中国将严控煤电, 推动煤电向基础保障性和系统调节性电源并重转型。进一步, 总结了煤电技术及挑战, 将煤电技术分为节能技术、减排技术和灵活性技术, 其中节能技术分为高效技术和提效技术, 减排技术包括煤与低碳燃料掺烧、煤与新能源耦合发电和CCUS, 灵活性技术包括机组燃烧侧灵活调峰技术、热电联产机组热电解耦技术、发电侧储能调峰和提高变负荷速率调峰技术。同时, 中国煤电面临碳锁定已经形成、节能减排技术受限、灵活性技术待优化3方面的挑战。最后, 通过国内外煤电对比分析, 表明中国煤电机组先进、煤耗和碳排放强度等方面接近或达到世界领先水平, 但煤电技术原创力不足, 在先进节能技术、减排技术等方面积累不足, 处于跟跑阶段。未来, 中国应加强煤电的灵活性运行, 综合考虑灵活性需求、机组特性、经济效益、环保效益, 合理选择灵活性运行策略, 确保整体效益最佳。同时, 积极开发低碳发电技术和减排技术, 为煤电减量退出做好技术储备。

关键词: 煤电; 双碳; 节能减排; 灵活性; 碳锁定

中图分类号: X773 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)07-2641-16

Research and challenge of coal power technology development in China under the background of dual carbon strategy

YU Weijing¹, YANG Pengwei², WANG Fangfang³, LI Qi², ZHAO Guangjin³, MA Jingxiang², MA Shuangchen²

(1. Longyuan(Beijing) Carbon Asset Management Technology Co., Ltd., Beijing 100034, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 3. State Grid Electric Power Research Institute of Henan Province, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: China leads the world in the installed capacity of coal power, which is the largest carbon source and the key to achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals of China and the climate goals of world. Firstly, the development history of coal power in China is reviewed, indicating that coal power has the characteristics of large capacity, clean, low carbon and overcapacity. Also, the main constraints on the development of coal power in China are analyzed, indicating

收稿日期: 2023-04-27 修回日期: 2023-06-28 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.CN23.0551

基金项目: 河南电力公司火电灵活运行能力技术提升研究资助项目 (SGTYHT/21-JS-226)

作者简介: 于伟静 (1990—), 河北廊坊人, 工程师。E-mail: 1204293732@qq.com

通讯作者: 马双忱 (1968—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师。Tel: 0312-7525521, E-mail: msc1225@163.com

引用格式: 于伟静, 杨鹏威, 王放放, 等. 双碳战略背景下中国煤电技术发展与挑战[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2641-2656.

YU Weijing, YANG Pengwei, WANG Fangfang, et al. Research and challenge of coal power technology development in china under the background of dual carbon strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2641-2656.



移动阅读

that the phase out of coal power has a certain complexity which is related to development and has a serious impact on social stability, economic development and energy security. In addition, the policies for the development of coal power are sorted out, indicating that China will strictly control coal power and promote the transformation of coal power to both basic security and system regulation power. Furthermore, the technologies and challenges of coal power are summarized. The technologies of coal power are divided into energy-saving technologies, emission reduction technologies and flexibility technologies, among which the energy-saving technologies are divided into high efficiency technologies and efficiency improvement technologies, the emission reduction technologies include coal and low-carbon fuel blending, coal and new energy coupling power generation and CCUS, and the flexible technologies include flexible peaking technology on the combustion side of the unit, thermoelectric decoupling technology of cogeneration unit, energy storage and variable load rate peaking technology on the power generation side. At the same time, the technological development of coal power in China faces three challenges: the carbon locking has been formed, the energy saving and emission reduction technologies are limited, and the flexibility technologies needs to be optimized. Finally, through the comparative analysis of coal power with that in other countries, it is shown that China's coal power units are close to or reach the world's leading level in terms of advanced performance, coal consumption and carbon emission intensity. However the original creativity of coal power technologies and the accumulation of advanced energy-saving technologies and emission reduction technologies are insufficient which are in the catch-up stage. In the future, China should strengthen the flexibility of coal power operation and choose flexible operation strategy reasonably to ensure the best overall benefits with comprehensive consideration of flexibility needs, unit characteristics, economic benefits, environmental benefits. At the same time, China should actively develop low-carbon power generation technologies and emission reduction technologies to make technical reserves for the reduction and phase out of coal power.

Key words: coal-fired power; carbon peaking and carbon neutrality; energy saving and emission reduction; flexibility; carbon lock-in

工业革命后,受经济发展和人口增长驱动,人为温室气体排放急剧增加,引发气候变化^[1]。2021年,大气CO₂体积分数达到 $(414.71 \pm 0.1) \times 10^{-6}$,比工业革命前(约 278×10^{-6})增加近50%^[2],平均温度升高 $(1.11 \pm 0.13)^\circ\text{C}$ ^[3]。气候变化引起冰层融化,海平面上升,生物多样性减少,洪水、热浪、飓风、干旱、山火等极端天气频发,威胁人类可持续发展^[1,3-7]。

为应对气候变化,形成了以《联合国气候变化框架公约》(1992年)、《京都议定书》(1997年)和《巴黎协定》(2015年)等文件为基础的国际治理框架^[8]。其中,在《巴黎协定》下,所有国家同意在2050年前将温升控制在 2°C ,并尽力控制在 1.5°C ^[9-10]。在此背景下,截至2022年2月,198个国家已承诺实现碳中和^[7]。中国承诺力争2030年前碳达峰,努力争取2060年前碳中和^[11]。

随着经济的快速发展和城市化进程的推进,中国已成为世界上最大的能源消耗和碳排放国^[2,4-5,12-19]。以2021年为例,中国化石能源碳排放为3131.11 Mt,占世界化石能源总排放量(10132.06 Mt)的30.9%^[2]。其中,煤电作为中国最大的碳排放来源^[18-20],其2018年占比达49.6%^[20]。鉴于此,中国煤电是我国乃至世界碳减排的关键。

综上所述,中国煤电的发展对“双碳”目标的实现、

气候变化的控制至关重要,也对中国的电力安全、经济社会发展影响深远。鉴于此,笔者对中国煤电的发展与挑战进行概述,主要包括煤电的发展特点、煤电宏观发展方向和煤电技术发展,特别是总结了煤电技术发展面临的挑战,为相关领域的研究和政策制定提供参考。

1 煤电发展特点

由图1可知,中国煤电发展呈现体量大、清洁化、低碳化、产能过剩的特点:经济发展促进体量增加;政策制定、标准提高、技术改进、监测系统、经济措施推动清洁化^[21];安装先进机组、淘汰落后产能、采用节能技术、提高管理和运行效率提升机组效率^[22],推动低碳进程;经济新常态、批复权下放、新能源竞争造成产能过剩。中国已建成世界最大的清洁燃煤发电体系^[21-26]。

1.1 体量大

ZHANG等^[27]通过对中国经济发展关键节点的总结,将煤电的发展划分为5个阶段,分别是初始阶段(1949—1977)、发展阶段(1978—1991)、完善阶段(1992—2002)、深化阶段(2003—2012)和生态文明阶段(2013至今),分别对应重工业发展、改革开放、市场经济改革、加入世贸组织和经济新常态,特别是改

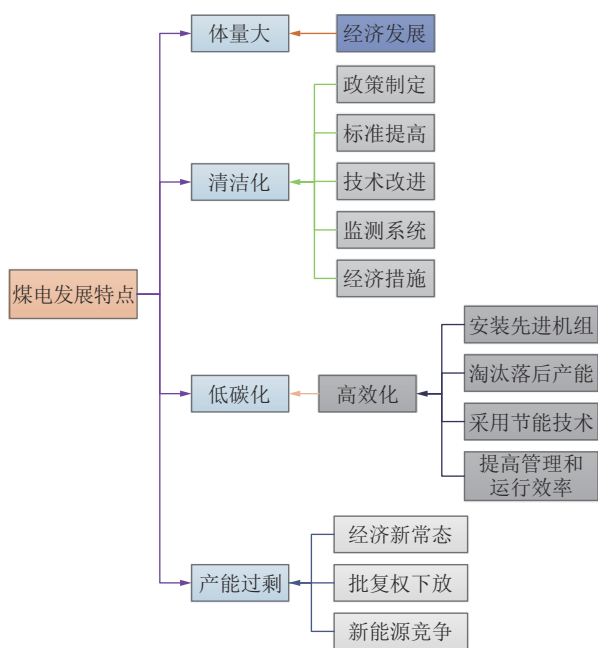


图1 煤电发展特点

Fig.1 Characteristics of coal power development

改革开放和加入世贸组织后, 煤电发展迅速。如图2、3所示 (<https://www.cec.org.cn/upload/1/editor>), 2022年中国火电装机容量达133 239万kW、发电量达58 531亿kW·h, 较1949年的169万kW、36亿kW·h, 分别增加788和1 626倍。而中国火电以煤电为主, 2021年装机容量和发电量占比分别达85.5%和89.0%。同时, 中国发电结构不断优化, 1949—2022年, 火电装机容量和发电量的占比分别由91.2%降至52.0%、83.5%降至69.8%。

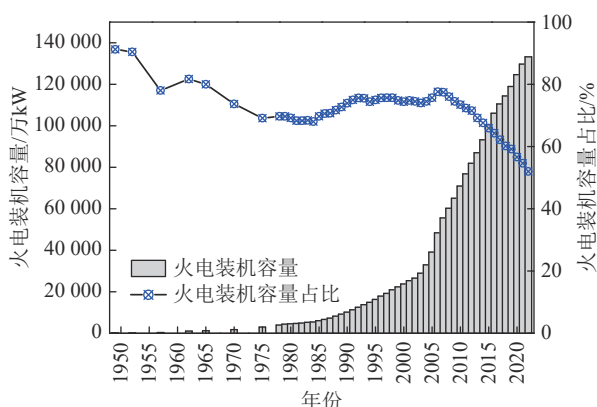


图2 火电装机容量及占比

Fig.2 Capacity and proportion of installed thermal power

此外, 如图4所示 (https://docs.google.com/spreadsheets/d/1_6AkrRZOn3ZXhSV9O6tZnX-m7aJsfG9HiQ_iEqBkbW8/edit#gid=1228809590), 中国煤电世界占比很大: 在运机组容量为1 092 889 MW, 建设机组115 472 MW, 宣布、预批准、批准机组总量为250 069 MW, 分别占世界总量的52%、61%、72%。

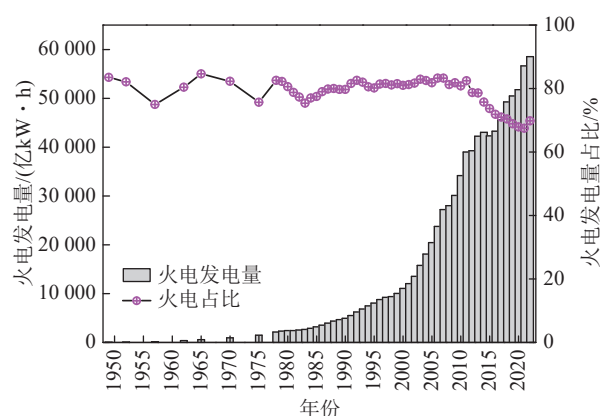


图3 火电发电量及占比

Fig.3 Generation and proportion of thermal power

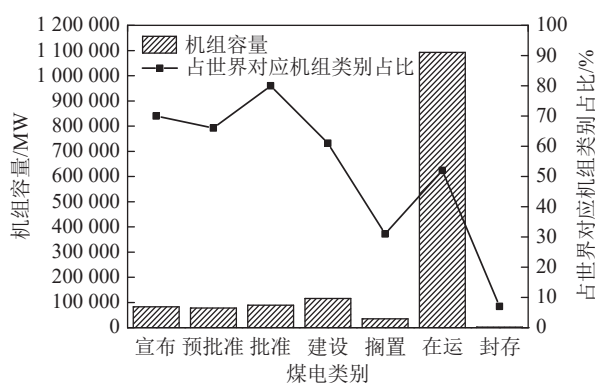


图4 中国煤电装机容量及占比

Fig.4 Capacity and proportion of installed coal power in China

1.2 清洁化

如图5^[28]、6^[29]所示, 随着污染物排放标准的日趋严格, 中国煤电清洁化进程主要经历6个阶段, 其中2014年实施的超低排放, 要求烟尘、二氧化硫、氮氧化物的排放质量浓度不超过10、35、50 mg/m³, 为世界最严标准。为支撑煤电的清洁化进程, 污染物控制技术不断改善、提升, 目前采用的烟尘控制技术包括高频电源、脉冲电源、湿式电除尘器、旋转电极、低低温电除尘器、超净电袋除尘器、湿法脱硫协同除尘; 二氧化硫控制技术包括传统技术提效升级、复合塔、pH分区; 氮氧化物控制采用选择性催化还原技术 (SCR), 通过增加催化剂、研发新型催化剂等, 进一步提高脱硝效率。在此影响下, 1979—2016年, 火电发电量增长38倍, 烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放量却分别下降94%、87%、85%^[28]。同时, 2005—2015年, 煤电发电量增长97.4%, 煤电导致的PM_{2.5}质量浓度却由9.0 μg/m³降至3.6 μg/m³^[24]。

1.3 低碳化

如图7 (<https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/summary-tables/>) 和图8 (<https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-track->

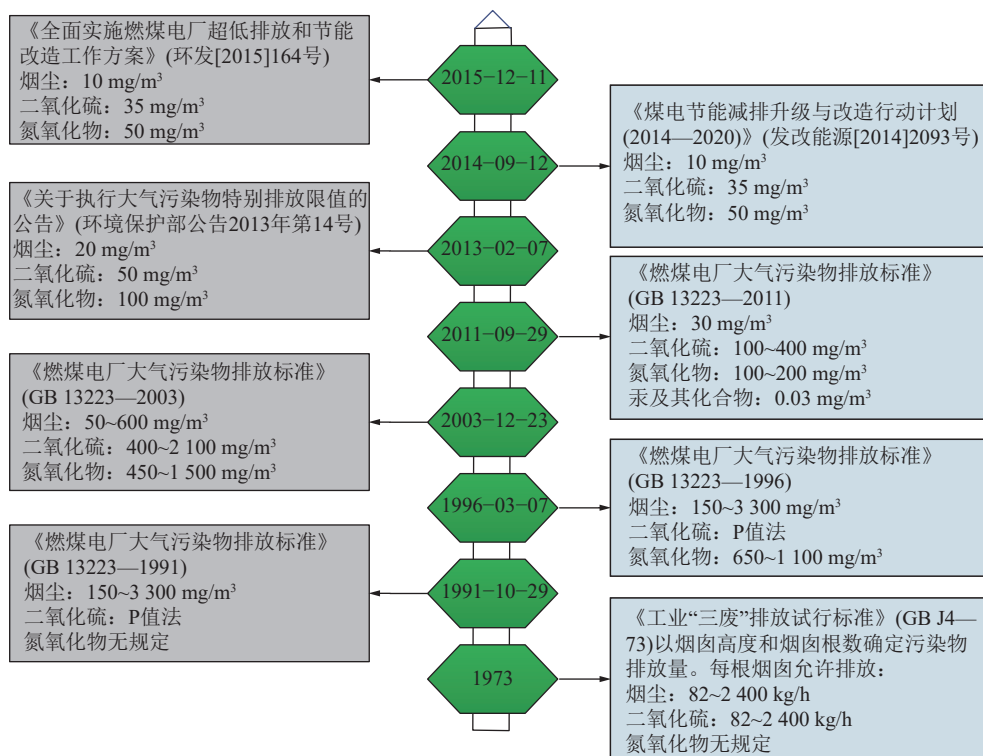


图5 煤电大气污染物排放标准

Fig.5 Emission standards of air pollutants from coal power

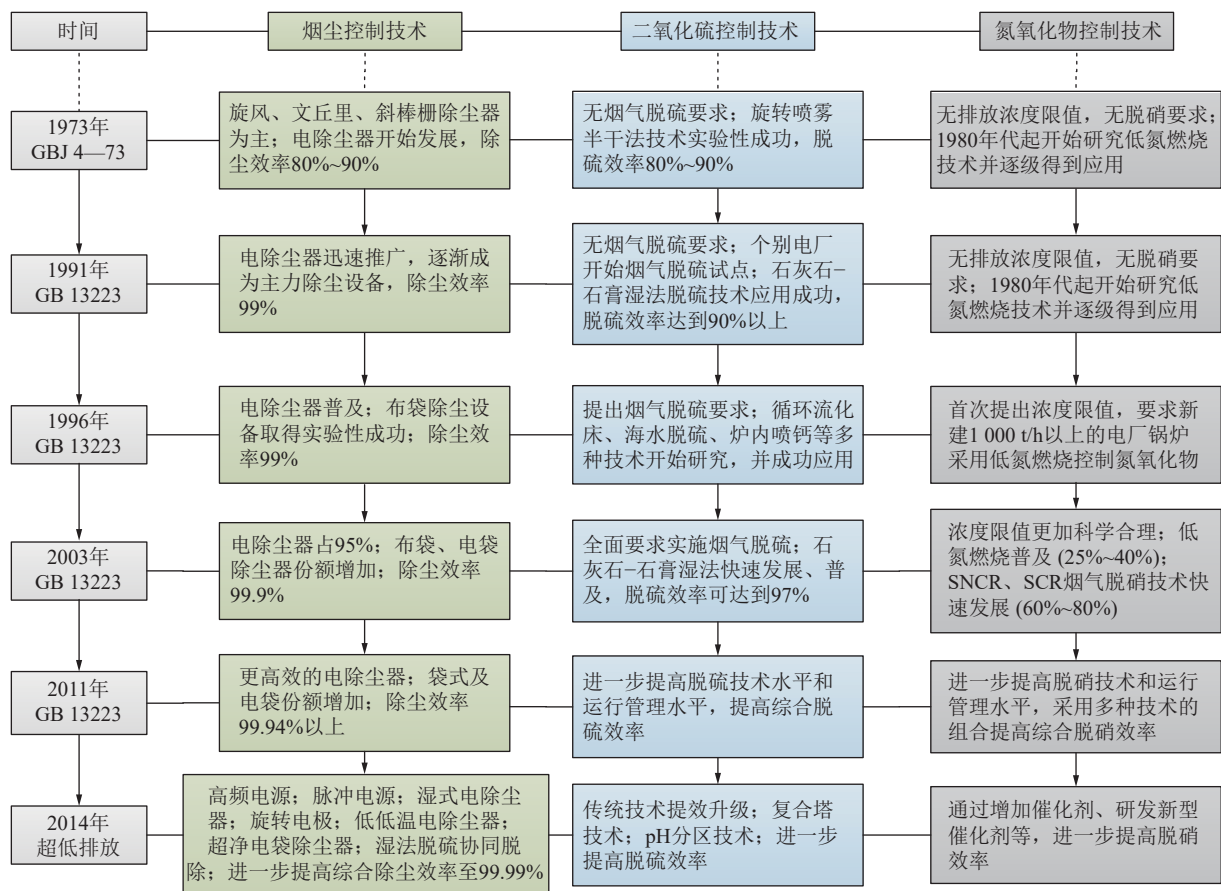


图6 污染物治理技术进展

Fig.6 Technology development of pollutant control

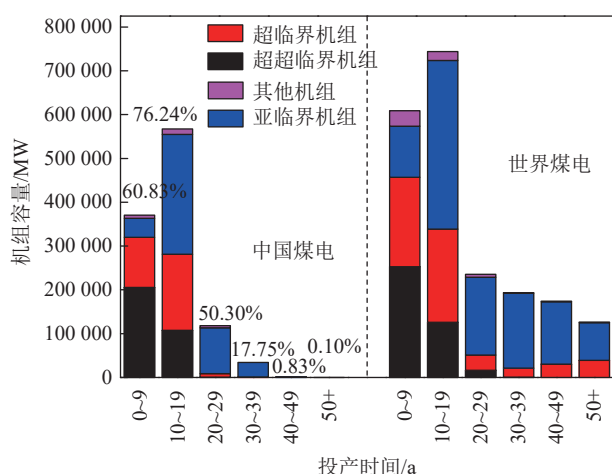


图7 中国和世界煤电结构分布

Fig.7 Structure map of coal power in China and world

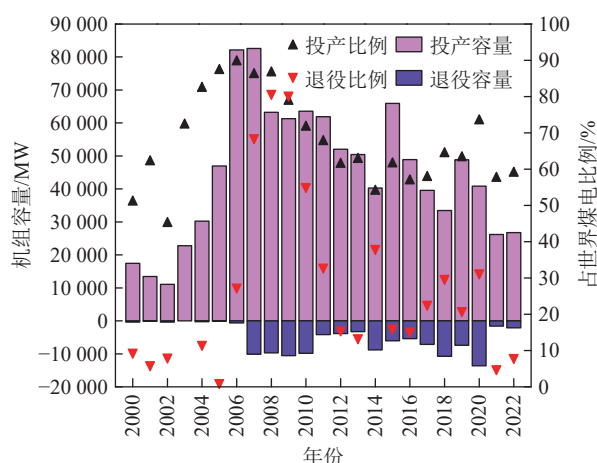


图8 中国煤电投产及退役容量和占比

Fig.8 Coal power capacity added and retired and related ratio in China

er/dashboard/) 所示, 2000—2022 年, 中国投产煤电机组达 1 030 206 MW, 占世界总投产容量的 68.7%。同时, 中国加速淘汰落后产能, 共退役煤电机组达 119 268 MW, 占世界总退役容量的 26.6%。

此外, 中国煤电机组参数高、运行时间短: 截至 2023 年 1 月, 中国已投产超超临界机组达 313 644 MW, 占世界总量的 79.2%; 中国已投产超超临界和超临界机组达 611 094 MW, 占中国煤电总量的 55.9%、占世界同类机组总量的 65.2%; 中国投运时间小于 10 a 机组占总量的 33.9%, 小于 20 a 机组占总量的 85.9%。

在煤电结构不断优化的同时, 如图 9 所示 (<https://www.cec.org.cn/upload/1/editor>), 煤电煤耗下降明显, 1958—2021 年, 发电煤耗和供电煤耗分别降低 274.0 g/(kW·h) 和 299.5 g/(kW·h)。如图 10 所示^[30], 2019 年中国火电碳排放强度已由 2010 年的 920 g/(kW·h) 降至 838 g/(kW·h), 下降了近 9%。2017 年,

日本、OECD、世界、韩国、德国、美国的煤电碳排放强度分别为 912、966、990、1 006、1 007、1 017 g/(kW·h)。中国未公布煤电碳排放强度, 火电碳排放强度为 844 g/(kW·h), 考虑煤电效率和火电效率总体相当, 中国煤电碳排放强度虽高于火电, 但低于日本煤电碳排放强度。

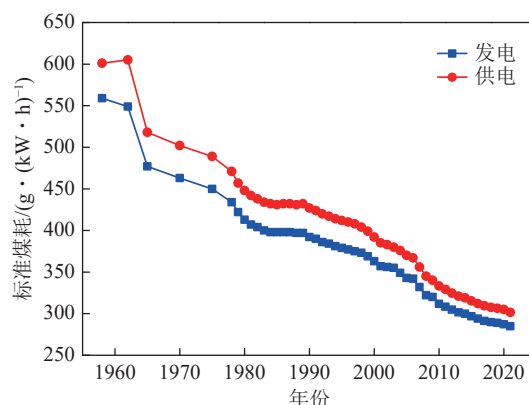


图9 煤耗变化

Fig.9 Coal consumption variation

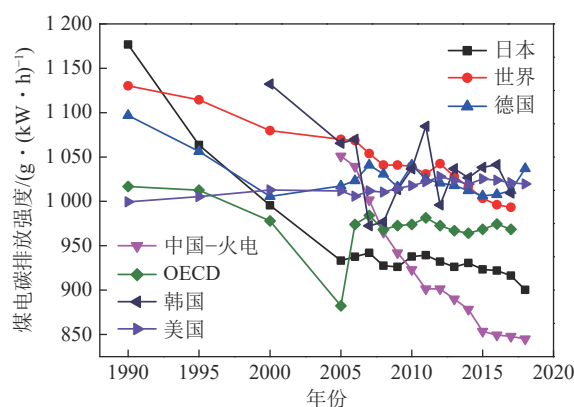


图10 煤电碳排放强度变化

Fig.10 Carbon emission density variation of coal power

1.4 产能过剩

中国煤电取得突出成就的同时, 也面临产能过剩的问题, 如图 11 所示 (<https://www.cec.org.cn/upload/1/editor>), 中国火电设备年利用小时呈下降趋势, 2008—2022 年, 最大年利用小时数为 2011 年的 5 305 h, 最小利用小时数为 2016 年的 4 186 h, 后虽有小微上涨, 但仍处于低位运行。此外, 煤电 2020 年和 2021 年的利用时间分别为 4 323 和 4 601 h, 只占全负荷的约 50%。

煤电产能过剩归因于 3 个方面^[12-13, 27, 31-35]: 一是中国经济进入“新常态”, 能源需求放缓; 其次, 煤电批复权由中央下放地方, 为促进经济发展, 地方政府批复大量煤电项目, 造成产能过剩; 最后, 随着新能源并网量增加, 挤兑煤电份额。煤电利用小时数减少会降

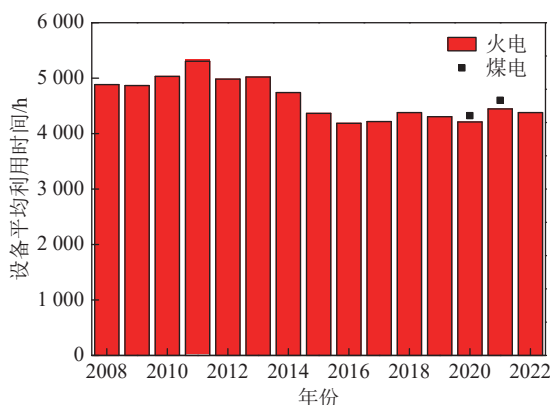


图 11 火电设备年平均利用时间变化

Fig.11 Chart of annual average utilization hours of thermal power equipments

低机组发电效率,使碳排放强度增加^[18,36-38]。此外,随着煤价上涨,煤电企业普遍亏损运行,行业面临较大运行压力^[13,27]。

2 发展煤电的主要制约因素

为兑现低碳承诺,世界各国及相关机构着力推进包含煤电在内的退煤进程^[39-40],但煤电的退出具有一定的复杂性。如图 12 所示,煤电关乎发展问题,对社会稳定、经济发展、能源安全具有重要影响^[41-42]。鉴于中国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋^[27],煤炭深植于中国能源系统和经济体系^[43],而煤电耗煤量约占全国煤炭消耗量的一半^[10,21-22,44]。



图 12 煤电发展平衡

Fig.12 Balance chart of coal power development

2.1 经济发展

煤电是中国主要的电力来源,2021 年煤电装机容量和发电量占比分别为 46.67% 和 60.06%(<https://www.cec.org.cn/upload/1/editor>),支撑了中国经济的快速发展^[22,27,45]。作为最大的发展中国家,中国需要继续保持经济快速发展以满足其发展目标^[46],同时基于其他部门电气化脱碳的需要^[13,47-51],中国电力需求将进一步增长。

此外,中国煤电机组的平均年龄仅 13 a,相比于美国的 40 a、欧盟的 35 a,尽管中国近些年煤电机组的操作寿命周期很低,但较之世界水平的 40~50 a,中国煤电机组寿命周期仍达到 25~35 a,过早退役大型燃煤机组会产生资产搁置的高风险^[51]。

2.2 能源安全

煤电是历史上最低廉的电力来源之一,而且具有可分配性和灵活性,可以维持长时间稳定输出,可对预料和未预料的需求改变产生较为及时的响应,通过调整汽机通量,提供转动惯量和无功功率等服务,确保电网的稳定性^[52]。同时,可再生能源发电具有波动性,现有电网系统对可再生能源的消纳存在问题^[53],随着装机容量增加,对电网的稳定性造成挑战。

近 2 a,受极端天气和能源价格上涨等影响,我国出现大规模电力短缺问题,大型工业用户和部分居民用户用电量受限,更凸显需要煤电发挥兜底保障的重要作用。

2.3 社会稳定

煤电行业约有 200 万直接从业人员和 200 万产品生产及机械制造相关从业人员,煤电快速退出后,将会造成大量人员失业,尽管新能源项目可提供大量的就业机会,但工作性质和所需技能差别很大,煤电相关失业人员再就业难度大,威胁社会的稳定^[19,44,54]。

3 煤电技术发展与挑战

3.1 发展煤电的政策环境

中国煤电短期退出的难度巨大,其未来发展和逐步退出路径是中国实现双碳目标的关键。2021 年,中央政府成立了碳达峰碳中和工作小组,着手构建“1+N”政策体系,其中“1”为 1 个顶层设计文件,“N”为关键行动领域的政策系列方案。为了解中国煤电发展方向,对相关政策文件进行梳理,见表 1,中国将严控煤电,推动煤电向基础保障性和系统调节性电源并重转型,涉及节能、减排、灵活性 3 个具体发展方向。

3.2 煤电技术发展与挑战

技术进步是中国煤电转型的关键。煤电技术类别大致相同,但归类方式有所不同^[53-61]。本文结合中国煤电的政策环境,将煤电技术分为 3 类,分别为节能技术、减排技术和灵活性技术。鉴于中国煤电已普遍实现超低排放,常规污染物排放标准世界最严,常规污染物不再是制约中国煤电发展的制约因素,因此本文所述减排技术为碳减排技术。

3.2.1 节能技术

如图 13 所示,根据机组特性不同,煤电节能技术可分为高效技术和提效技术 2 种:高效技术针对新建

表 1 煤电政策汇总
Table 1 Policies summary of coal-fired power

发布日期	政策名称	煤电政策摘要
2021-10-24	中国中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见	加快煤炭减量步伐,“十四五”时期严控煤炭消费增长,“十五五”时期逐步减少;统筹煤电发展和保供调峰,严控煤电装机规模,加快现役煤电机组节能升级和灵活性改造
2021-10-26	2030年前碳达峰行动方案	加快煤炭减量步伐,“十四五”时期严格合理控制煤炭消费增长,“十五五”时期逐步减少;严格控制新增煤电项目,新建机组煤耗标准达到国际先进水平,有序淘汰煤电落后产能,加快现役机组节能升级和灵活性改造,积极推进供热改造,推动煤电向基础保障性和系统调节性电源并重转型
2021-10-29	全国煤电机组改造升级实施方案	推动煤电行业实施节能降耗改造、供热改造和灵活性改造制造“三改联动”,严控煤电项目,持续优化能源电力结构和布局,深入推进煤电清洁、高效、灵活、低碳、智能化高质量发展;按特定要求新建的煤电机组,除特定需求外,原则上采用超超临界、且供电煤耗低于270 g/(kW·h)(标准煤)的机组;设计工况下供电煤耗高于285 g/(kW·h)(标准煤)的湿冷煤电机组和高于300 g/(kW·h)(标准煤)的空冷煤电机组不允许新建;到2025年,全国火电平均供电煤耗降至300 g/(kW·h)(标准煤)以下;“十四五”期间节煤降耗改造规模不低于3.5亿kW,供热改造规模力争达到5 000万kW,完成灵活性改造2亿kW,增加系统调节能力3 000万~4 000万kW,实现灵活制造规模1.5亿kW
2021-12-28	“十四五”节能减排综合工作方案	要立足以煤为主的基本国情,坚持先立后破,严格合理控制煤炭消费增长,抓好煤炭清洁高效利用,推进存量煤电机组节煤降耗改造、供热改造、灵活性改造“三改联动”,持续推动煤电机组超低排放改造
2022-01-30	国家发展改革委 国家能源局关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见	全面实施煤电机组灵活性改造,完善煤电机组最小出力技术标准,科学核定煤电机组深度调峰能力;在电力安全保供的前提下,统筹协调有序控煤减煤,推动煤电向基础保障性和系统调节性电源并重转型;按照电力系统安全稳定运行和保供需要,加强煤电机组与非化石能源发电、天然气发电及储能的整体协同。推进煤电机组节能提效、超低排放升级改造,根据能源发展和安全保供需要合理建设先进煤电机组
2022-03-22	“十四五”现代能源体系规划	统筹电力保供和减污降碳,根据发展需要合理建设先进煤电,保持系统安全稳定运行必需的合理裕度,加快推进煤电由主体性电源向提供可靠容量、调峰调频等辅助服务的基础保障性和系统调节性电源转型,充分发挥现有煤电机组应急调峰能力,有序推进支撑性、调节性电源建设;全面实施煤电机组灵活性改造,优先提升30万kW级煤电机组深度调峰能力,推进企业燃煤自备电厂参与系统调峰;大力推动煤电节能降碳改造、灵活性改造、供热改造“三改联动”,“十四五”期间节能改造规模不低于3.5 亿kW;新增煤电机组全部按照超低排放标准建设、煤耗标准达到国际先进水平
2022-06-13	减污降碳协同增效实施方案	严控煤电项目,“十四五”时期严格合理控制煤炭消费增长、“十五五”时期逐步减少

机组,分为先进超超临界技术(超高参数和二次再热)、大容量空冷技术、先进循环流化床技术、先进煤气化技术(整体煤气化联合循环(IGCC)和整体气化燃料电池(IGFC))、超临界 CO₂ 循环;提效技术针对现有机组,分为强化传热传质技术、梯级利用技术、能量的合理利用技术、减少阻力和热量损失技术、辅机提效及调速改造技术、优化运行技术。

(1) 高效技术。

表 2 为高效煤电技术特性对比,二次再热超超临界技术、大容量空冷技术、先进循环流化床技术、IGCC 相对成熟,已进行商业应用,而超高参数超超临界技术、超临界 CO₂ 循环技术、IGFC 受限于材料、成本等因素,尚未进行商业应用。中国二次再热超超临界技术和先进循环流化床技术处于世界领先水平,应用

较多,而大容量空冷技术、IGCC 受经济性影响,发展受限。

(2) 提效技术。

提效技术种类繁多,王月明等^[57]、孙月巧等^[63]按图 13 方法归类,EPA^[68]、EIA^[69]等相关报告依据煤电系统进行分类,涉及锅炉系统、汽机系统、烟气系统、水处理系统等。实际应用中,首先分析影响机组耗能的因素^[70],后针对具体机组,因地制宜、一厂一策,采用不同的技术组合,达到技术经济最佳的效果。

3.2.2 减排技术

如图 14 所示,根据减排机理的不同,减排技术可分为 2 类:一是降低煤耗,如引入氨、生物质等低碳燃料及煤电与太阳能等新能源耦合;另一个是未降低煤耗,引入碳捕集、利用、封存(CCUS)技术。

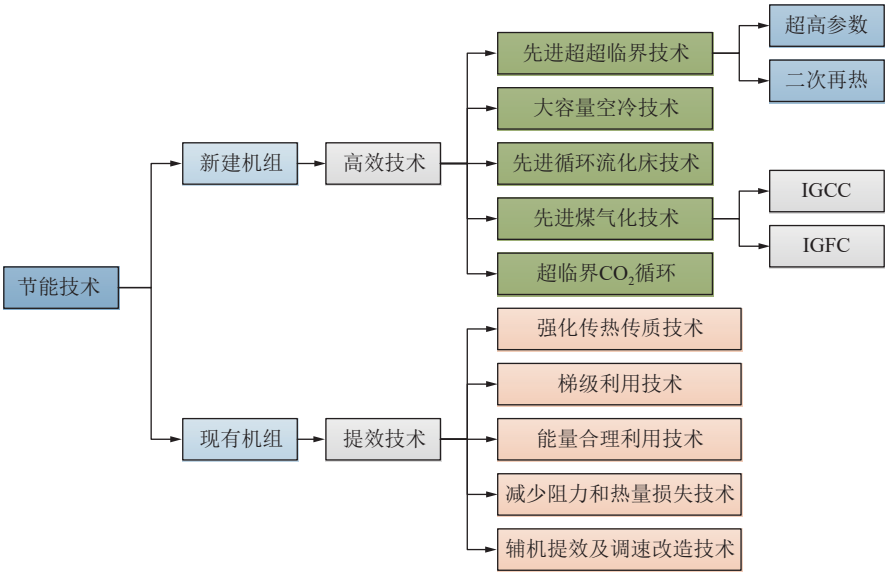


图 13 煤电节能技术

Fig.13 Energy save technologies of coal power

表 2 高效技术对比

Table 2 Comparison of efficient technology

技术	简介	优点	不足	应用情况	文献
超高参数超超临界技术	蒸汽温度700 ℃等级，压力35 MPa及以上。	热效率达50%以上，有效降低煤耗，实现减污降碳目的	缺乏低成本、易加工、可靠的材料	欧盟、美国相关研究已停滞；日本具备相关技术能力，受限于经济性和政策支持；中国2011年启动相关技术研发，已建成部件试验平台，受限于材料，进展缓慢	[53-55, 57-60]
二次再热超超临界技术	在一次再热机组的基础上重新加热高温蒸汽，即在超高压缸和高压缸设置二次再热回路，将出口蒸汽再次送入锅炉内高、低压再热器进行加热，提升了蒸汽整个做工过程的平均吸热温度	热效率比一次再热机组高2%~3%	高温材料腐蚀；汽机、锅炉、热力系统复杂，影响整体效益	德国、日本、美国、丹麦均有二次再热机组投运，中国目前在建和投产二次再热机组23台，其中最优参数机组位于清远电厂和郧城电厂，主蒸汽压力35 MPa，温度615、630、630 ℃	[53-55, 57-58]
大容量空冷技术	以空气替代冷却水，直接或间接冷却机组乏气	节约水资源，以2×660 MW机组为例，节水达80%	能耗高、发电效率低	主要分布于煤源丰富、水资源缺乏地区，受经济性和政策影响较大	[58]
先进循环流化床技术	大量床料聚集在CFB锅炉底部，在一次风和二次风的作用下自底部向出口移动，固体颗粒被旋风分离器捕集进入外床热交换器并最终返回锅炉，形成床料的外部循环	煤种适应性广、环保效益好、资源综合利用高	相对于超临界机组，超超临界循环流化床机组的主蒸汽流量、温度和压力均升高，由此引发的热力系统布置优化问题、水动力安全性问题、高温受热面壁温安全性问题以及低负荷再热蒸汽温度问题仍在探索之中	截至2020年底，中国共有48台在役超超临界CFB锅炉，其中3台600~660 MW级和45台350 MW级；目前在建2个660 MW超超临界CFB项目，分别位于贵州威赫和陕西彬长	[54, 56-58, 62-63]
超临界CO ₂ 循环技术	采用超临界CO ₂ 代替水作为循环工质，采用布雷顿循环代替朗肯循环作为动力循环的一种新型燃煤发电技术	CO ₂ 的临界点较低，比H ₂ O更容易达到超临界状态，具有更高的能量密度；S-CO ₂ 动力循环系统结构更加紧凑，占地面积小；600和700 ℃等级供电效率分别提高3%~5%和5%~8%	关键部件高温腐蚀、系统设计优化、关键设备开发研制、系统灵活性等存在一定的问题	美国、欧盟、日本、韩国等均开展相关研究，中国也搭建了相关试验平台，仍处于研发阶段，未有商业示范机组	[53, 55-58]

续表

技术	简介	优点	不足	应用情况	文献
IGCC	由煤气化、净化系统和燃气蒸汽联合发电系统联合组成, 通常煤粉经气化系统气化后, 经过净化系统除去主要污染物如硫化物、氮化物、粉尘等, 变成清洁的气体燃料, 然后进入燃气轮机燃烧推动透平做工, 排气经过余热锅炉加热给水, 产生的高温高压蒸汽推动蒸汽透平做功	可实现煤的完全清洁利用, 且联合循环效率高干传统燃煤机组, 发电效率可达 48%~52%(高位热值)	成本高、操作复杂	全球投运 IGCC 电站已超过 35 座, 中国自主设计和建造的 IGCC 电站为华能天津 IGCC 示范电站	[53, 56-59]
IGFC	将 IGCC 的燃气蒸汽联合循环发电系统替换为燃料电池发电系统, 目前主要包括固体氧化物燃料电池系统和熔融碳酸盐燃料电池系统。相比 IGCC 系统, IGFC 将煤气化后的 H_2 、CO 通过燃料电池发电, 实现了热力循环发电和电化学发电系统的耦合	燃料电池理论高温余热可通过余热系统回收利用, 综合效率更高; 燃料电池系统终端排放物为纯水和高浓度 CO_2 , 在布置碳捕集系统后, 完全实现清洁、低碳、高效循环, CO_2 近零排放; 发电效率可达 55%~60%(高位热值)	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化制备和一致可靠电池堆的批量化生产, 一直是产业化进程的最大阻碍	日本、美国、欧盟、韩国、新加坡等国家均进行大量研究, 日本已完成世界首座煤气化燃料电池联合循环发电厂前两期建设, 第 3 期将建成 IGFC 系统。中国已完成 IGFC 测试平台, 已积累一定的技术储备	[57-59, 64-65]

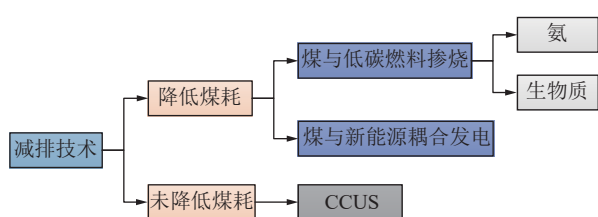


图 14 煤电减排技术

Fig.14 Emission reduction technologies of coal power

(1) 煤与低碳燃料掺烧。

IEA^[55]、ICSC^[52]、帅永等^[56]、董洁等^[58]、王哮江等^[59]均对低碳燃料进行了概述, 常见的低碳燃料包括氢、氨、生物质等, 3 者都可以用于燃气机组, 而氨和生物质可用于燃煤机组。

氨煤掺烧可减少受热面灰渣沉降, 改善锅炉性能, 但存在以下问题: ① 需要增加氨罐和蒸发器, 提高成本; ② 氨燃烧具有火焰温度低、燃烧范围窄的特点, 因此掺烧存在稳燃的问题; ③ 可能存在大量 NO_x 生成的问题。在日本, 氨煤掺烧获得日益关注, 已有 1% 掺烧的示范项目, 计划开展掺烧 20% 的示范。2022 年 1 月, 中国国家能源集团完成了 40 MW 燃煤锅炉混氨燃烧工业试验, 掺氨比例达到 35%, 充分证明了燃煤电站掺混氨燃料发电的技术可行性。

掺烧的生物质包括木头、农业废弃物和草, 相关技术已发展 20 余年, 在英国、丹麦、芬兰、中国等均有应用, 主要包括 3 种方法: ① 共制粉方法, 生物质与煤混合后进入现有制粉系统, 此方法可快速实现且成本低, 只包括部分生物质储存、输送系统的投资, 但掺

烧比例限制在 5%~10%, 甚至更低; ② 生物质在改造的制粉系统或者专门的制粉系统中处理, 处理后的生物质与煤共同燃烧或在改造的燃烧器或单独的燃烧器中燃烧, 掺烧比例可以增加, 但相应的增加改造费用; ③ 通过气化装置将生物质转换为气态燃料, 可用于燃煤或者燃气机组, 但成本较高。

限制低碳燃料掺烧的因素主要是成本和配套产业化系统: 掺氨燃烧需要考虑氨的产量、运输、存储, 掺烧比例为 20%, 1 GW 燃煤机组需要 500 000 t/a 的 NH_3 , 占全球氨贸易量的 2.5%; 生物质掺烧需要考虑生物质的稳定来源及成分的波动性。

(2) 煤与新能源耦合发电。

根据帅永等^[56]、董洁等^[58]、王哮江等^[59]、YANG 等^[60]的研究, 煤电可与风光、地热等新能源耦合发电, 将新能源作为煤电回热系统的热源, 全部或部分取代汽轮机抽汽, 或把新能源引入厂用电系统, 降低机组自身的厂用电率, 实现煤电与新能源发电共同发展。

目前研究较多的是煤与太阳能耦合发电, 通过太阳能集热场吸收来自太阳能的热量, 并将这部分热量传递给工质水或水蒸气, 在合适的设备处进入锅炉, 用以取代燃煤电厂部分高低压抽汽或加热给水, 使汽轮机回热抽汽返回汽轮机做功, 从而增加电站出力, 降低煤耗和污染物排放。美国、澳大利亚、印度均有煤与太阳能耦合发电电厂投运, 中国尚无示范电站运行, 目前仍处于理论探索和试验研究阶段。

(3) CCUS。

CCUS 可显著降低煤电碳排放量, 同时避免煤电

搁置损失,是实现气候变化目标的关键技术^[71-72]。TABBI 等^[73]、LEUNG 等^[74]、AARON 等^[75]、KOYT-SOUMPA 等^[76]、MAI 等^[77] 均对 CCUS 进行了总结,如图 15 所示,CCUS 工艺包括 CO₂ 捕集、分离、压缩、运输、利用或封存等流程:CO₂ 的捕集分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧捕集、化学链燃烧捕集;分

离技术包括吸收法、吸附法、膜法、水合物法、冷冻法等;运输包括公路罐车、铁路罐车、船运和管道;利用分布于农业、工业、能源行业等;封存主要包括提高原油采收率(EOR)、不可开采的煤床、盐碱含水层、深海、就地碳化。目前,较为成熟且应用较多的是燃烧后捕集工艺、MEA 吸收法、管道运输、EOR 利用。

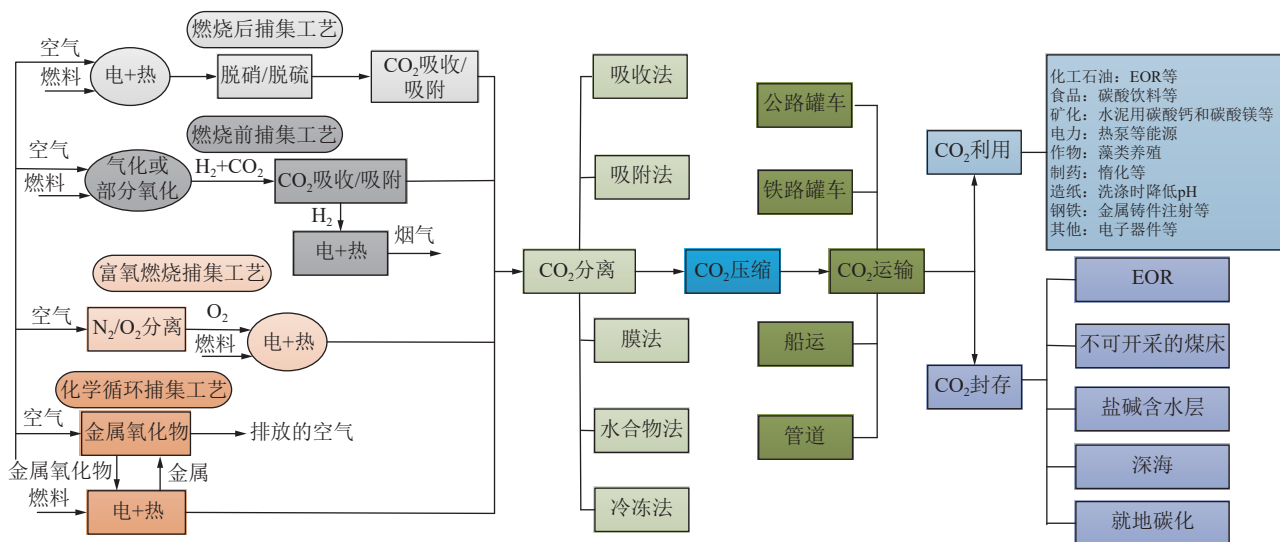


图 15 CCUS 技术路线

Fig.15 Technology roadmap of CCUS

CCUS 技术相对成熟,限制因素主要是能耗和成本较高。加装 CCS 后,能源转换效率将从 48% 降至 36%,大量增加煤耗^[73]。同时,从生命周期角度分析,尽管 CCUS 对 CO₂ 的捕集效率可达 90%,但由于增加其他环境影响,能量损失达 15%~44%,实际捕集效率降至 40%~80%^[78]。此外,中国 CO₂ 的捕集成本在 40~70 美元/t^[74],在缺少政策支持下,煤电经济性存在较大问题^[79]。

目前,根据 Global CCS Institute 的统计 (<https://co2re.co/FacilityData>),见表 3,中国现有 21 个 CCS 项目,其中电力行业有 8 个,大部分属于示范项目。中国 CCS/CCUS 尚处于发展阶段,未形成大规模的产业化集群,除降低能耗和成本外,运输、利用、封存还存在较大发展空间。

3.2.3 灵活性技术

灵活性指的是电力系统的各类资源快速改变自身发电特性以维持系统有功功率平衡的能力^[80]。随着风光等新能源大量渗透,电网稳定性面临重大挑战。煤电的灵活性低于燃气机组^[48,81],但基于中国能源特性,提高煤电灵活性是保持电力供需平衡、应对电网波动性的重要手段。煤电的灵活性体现在 3 方面:启动时间、最小出力、爬坡速率^[48,80]。我国煤电机组灵

活性与国际先进水平存在一定差距,见表 4^[80],表中 Pn 代表机组额定功率。

灵活性技术分类方式多样,部分研究分为锅炉系统改造、汽机和给水系统改造、脱硝等其他系统改造、控制系统改造、热电解耦、储能技术等^[80,82-84]。根据欧阳子区等^[85]的总结,如图 16 所示,煤电灵活性技术分为 4 类,包括机组燃烧侧灵活调峰技术、热电联产机组热电解耦技术、发电侧储能调峰和提高变负荷速率调峰技术。

通过灵活性改造,2022 年 1 月,大唐秦岭电厂 660 MW 机组实现 10% 低负荷深度调峰,成为火电厂深度调峰的新标杆^[58]。在取得成就同时,需关注煤电灵活性运行的负面运行,其会显著增加煤耗和污染物排放,同时影响机组寿命^[56,84,86]。未来,应针对不同的机组类型和调峰需求,综合考虑多方面因素,包括调峰效果、技术可靠性和运行经济性等指标,从中选择恰当的改造路线。

3.2.4 煤电技术面临挑战

(1) 碳锁定已经形成。

受疫情影响,为促进经济发展,中国 2022 年批复 106 GW 的煤电机组,是 2015 年以来的最高水平。此外,50% 新公布和 40% 开工煤电项目出现在电力过剩

表 3 电力行业 CCUS 项目汇总
Table 3 CCUS projects summary in power sector

项目名称	项目归类	项目状态	投运时间	简要概述
中澳燃烧后二氧化碳捕集可行性项目	示范项目	已完成		研究范围包括吉林省华能集团所属某电厂燃烧后碳捕集的技术性、经济性、社会性、环境性及法律法规的可行性
国电泰州电厂碳捕集项目	商业化项目	已完成	2023	国家能源投资集团在江苏省国电泰州电厂建设处理能力50万t/a的碳捕集系统, 每年大约30万t捕集的CO ₂ 被送至中国石化华东石油局提高油田采收率
国华锦界CCS全流程示范项目	示范项目	已完成	2021	国华锦界能源, 在神华集团资助下, 在陕西某燃煤电厂开展CCS示范。年产15万t的CO ₂ 通过罐车送至神华鄂尔多斯现有CO ₂ 注射点
华润海丰电厂碳捕集测试平台	示范项目	已完成	2018	2套碳捕集试验设施安装在广东海丰电厂1号机组, 一套用于测试胺法捕集、一套用于测试膜法捕集, 总捕集能力为70 t/d, 自2018年12月开始测试
华能绿色煤电IGCC示范系统(第2阶段)	示范项目	建设中	2020s	绿色煤电项目在天津建设一套大型CCS设施, 分3个阶段实施, 其中第2阶段是建设一个示范性CO ₂ 捕集系统, 捕集量为6万~10万t/a
华能陇东能源碳捕集和封存项目	商业化项目	新提出	2023	中国华能集团正在组建团队开发150万t/a的燃烧后CO ₂ 捕集和封存项目, 项目位于中国甘肃省正宁县2×1 000 MW超超临界燃煤电厂的2号机组, 捕集的CO ₂ 在超临界状态通过管道运输, 用于地质封存和提高原油采收率
中国石化胜利电厂碳捕集、利用和封存试点项目	示范项目	已完成	2010	捕集能力为3万~4万t/a, 捕集的CO ₂ 通过公路罐车运至胜利油田用于提高原油采收率
中国石化胜利电厂CCS项目	商业化项目	新提出	2025	中国石油化工集团计划“十四五”期间在山东东营胜利电厂建一套燃烧后二氧化碳捕集系统, 捕集能力为100万t/a, 捕集的CO ₂ 将通过管道运至胜利油田用于提高原油采收率

表 4 煤电灵活性参数对比
Table 4 Flexibility parameter comparison of coal-fired power

机组	中国煤电		世界先进机组
	已建机组	改造潜力	
最小出力/%P _n	50(80)	30(50)	20(40)
爬坡速率/(%P _n ·min ⁻¹)	1~2	3~6	4~5
热态启动时间/h	3~5	4	1.5~2.5
冷态启动时间/h	10	5	<10

注: 括号外为常规机组参数, 括号内为热电联产机组参数。

区域^[19,87]。煤电现有机组、新公布机组、已批复机组、开工建设机组容量均居世界首位,一定程度上形成碳锁定^[18-19,36,47,54,88],影响碳解锁的实现。

(2) 节能减排技术受限。

根据《全国煤电机组改造升级实施方案》,在“十一五”、“十二五”、“十三五”期间,电力行业按照国家的要求和部署,深入实施煤电节能减排升级改造,火电供电煤耗持续下降。2020年全国6 000 kW及以上火电厂供电煤耗为305.5 g/(kW·h)(标准煤),比2015年下降9.9 g/(kW·h),比2010年下降27.5 g/(kW·h),比2005年下降64.5 g/(kW·h)。到2025年,全国火电平均供电煤耗降至300 g/(kW·h)(标准煤)。

对于供电煤耗在300 g/(kW·h)(标准煤)以上的煤电机组,应加快创造条件实施节能改造,对无法改造的机组逐步淘汰关停,并视情况将具备条件的转为应急备用电源,“十四五”期间改造规模不低于3.5亿kW。

从上述数据可以看出,在现有技术手段下,煤电节能减排潜力受限。高效技术如超高参数超超临界技术、超临界CO₂循环技术尚处于研发阶段,技术成熟且大规模商业化应用尚需一定周期。而从长远看,为实现气候目标,煤电总量将受限。鉴于高效技术针对新建机组且中国煤电已形碳锁定,因此高效技术发展潜力有限。

同时,CCUS、煤与低碳燃烧掺烧等减排技术因技术性、经济性、可靠性等原因,尚未成熟,虽有示范或商业化案例,但未规模化和产业化。

(3) 灵活性技术待优化。

目前,随着风光等新能源大量并网发电,为维持电网稳定,煤电灵活性需求巨大。根据《全国煤电机组改造升级实施方案》,新建机组全部实现灵活性制造,现役机组灵活性改造应改尽改,“十四五”期间完成2亿kW,增加系统调节能力3 000万~4 000万kW,纯凝工况调峰能力的一般要求为最小发电出力达到35%额定负荷,采暖热电机组在供热期运行时要通过热电解耦力争实现单日6 h最小发电出力达到40%

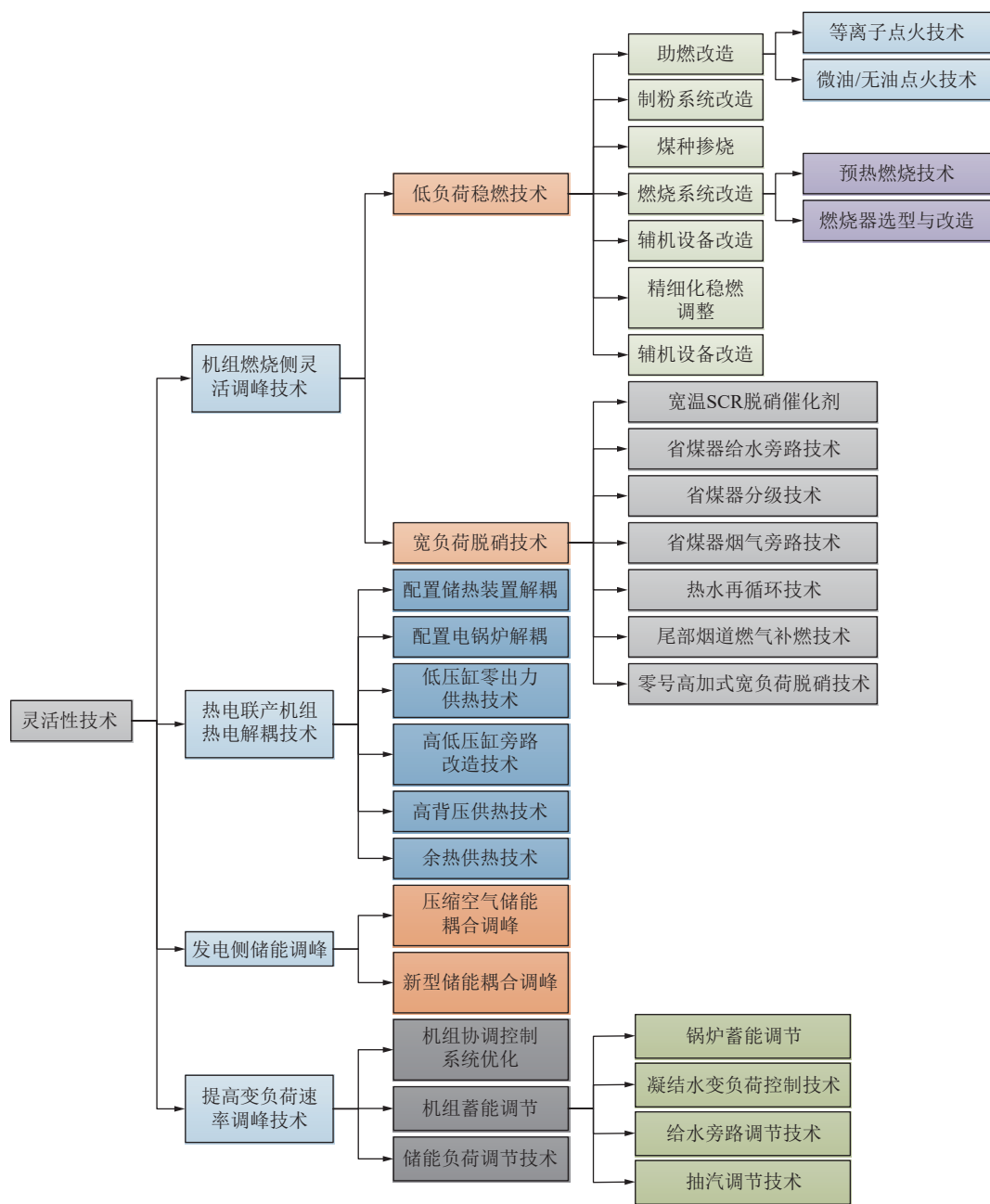


图 16 煤电灵活性技术

Fig.16 Flexible technologies of coal power

额定负荷的调峰能力。

鉴于灵活性运行对能耗、碳排放和机组寿命的不利影响,应综合考虑灵活性需求、机组特性、经济效益、环保效益,建立灵活性运行模型,合理选择灵活性运行策略,确保整体效益最佳。

4 国内外煤电对比分析

我国与欧美等发达国家在发展阶段、资源禀赋、产业结构、科技基础等方面存在较大差异,煤电的发展差异巨大。发达国家已逐步退出煤电,以先进的气电、核电、新能源发电替代,而中国需合理利用优质存

量煤电和其它常规电源资产,这是保障供电安全前提下实现能源电力转型代价较小的选择^[89]。我国在煤电装机容量大、机组先进、煤耗和碳排放强度等方面接近或达到世界领先水平,灵活性指标现阶段较低,但“十四五”期间有望接近世界先进水平(表5)。同时,我国成熟煤电技术发展迅速,但原创力不足,在先进节能技术、减排技术等方面积累不足,处于跟跑阶段。

5 结语与展望

中国煤电装机容量世界居首,是中国最大的碳源,也是中国双碳目标及世界气候目标实现的关键。尽

表 5 中国煤电指标与世界先进水平对比

Table 5 Index comparison between China's coal power and the world's advanced level

指标/技术	中国煤电	与世界先进水平对比
容量	现役煤电装机容量为1 092 889 MW	占世界煤电装机总量52%
结构	已投产超超临界和超临界机组达611 094 MW	占世界同类机组总量65.2%
投运时间	平均为13 a	美国为40 a, 欧盟为35 a,
煤耗 ^[90]	约305 g/(kW · h)	优于美国和德国, 仅次于日本
碳排放强度	879 g/(kW · h) ^[57]	2017年, 日本、OECD、世界、韩国、德国、美国的煤电碳排放强度分别为912、966、990、1 006、1 007、1 017 g/(kW · h)
节能技术	中国二次再热超超临界技术和先进循环流化床技术处于世界领先水平, 应用较多; 已对超高参数超超临界技术、超临界CO ₂ 循环技术等开展研究	欧美、日韩等对高效技术开展大量研究, 拥有先进技术
减排技术	煤氨掺烧技术处于研发阶段, 已进行工业试验; 煤与生物质掺烧已有示范项目; 煤与新能源耦合发电处于理论探索和试验研究阶段, CCUS已有示范项目	日本煤氨掺烧处于世界领先水平, 已有示范项目; 英国、丹麦、芬兰有煤与生物质掺烧项目; 美国、澳大利亚、印度均有煤与太阳能耦合发电电厂投运; 欧美CCUS技术不断成熟, 已逐渐开始产业化
灵活性	“十四五”目标为: 纯凝工况调峰能力的一般要求为最小发电出力达到35%额定负荷, 采暖热机组在供热期运行时要通过热电解耦力争实现单日6 h最小发电出力达到40%额定负荷的调峰能力	世界先进水平纯凝工况达20%, 采暖供热机组达40%

管中国煤电在减污降碳方面取得了巨大成就, 仍面临低碳转型的挑战。

煤电关乎发展问题, 对社会稳定、经济发展、能源安全具有重要影响。鉴于中国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋, 煤炭深植于中国能源系统和经济体系, 而煤电耗煤量约占全国煤炭消耗量的一半, 因此煤电退出存在很大难度。

对中国煤电政策进行梳理, 煤电将充当基础保障性和系统调节性角色, 需要深化节能减排并提升系统灵活性。为此, 将煤电技术分为节能技术、减排技术和灵活性技术。中国二次再热超超临界技术和先进循环流化床技术处于世界领先水平, 应用较多, 而其他先进节能减排技术积累尚不足, 处于跟跑阶段。此外, 中国煤电灵活性不足, “十四五”期间通过改造可接近或达到国际先进水平。

同时, 将中国煤电指标与世界先进水平对比, 存在很大差异, 中国煤电装机容量大、机组先进、煤耗和碳排放强度低, 但在更为先进技术上积累不足。其原因是我国与欧美等发达国家在发展阶段、资源禀赋、产业结构、科技基础等方面存在较大差异, 特别是低碳背景下, 欧美等发达国家逐渐退煤。

2022年, 中国煤电逆势增长, 进一步加重碳锁定效应。短期内, 中国应加强煤电的灵活性运行, 综合考虑灵活性需求、机组特性、经济效益、环保效益, 合理选择灵活性运行策略, 确保整体效益最佳。同时,

积极开发低碳发电技术和减排技术, 为煤电减量退出做好技术储备。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2014 synthesis report[R]. Geneva: IPCC, 2015.
- [2] FRIEDLINGSTEIN P, O'SULLIVAN M, JONES M W, et al. Global carbon budget 2022[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(11): 4811–4900.
- [3] WMA. State of the global climate 2021[R]. Geneva: WMA, 2022.
- [4] FANG K, LI C, TANG Y, et al. China's pathways to peak carbon emissions: New insights from various industrial sectors[J]. Applied Energy, 2022, 306: 118039.
- [5] ZHU Liu, SUN Taochun, YU Ying, et al. Real-time carbon emission accounting technology toward carbon neutrality[J]. Engineering, 2022, 14: 44–51.
- [6] JING M C. Carbon neutrality: Toward a sustainable future[J]. The Innovation, 2021, 2(3): 100127.
- [7] CHEN L, MSIGWA G, YANG Mingyu, et al. Strategies to achieve a carbon neutral society: A review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2022, 20(4): 2277–2310.
- [8] 王志轩, 潘荔, 张建宇, 等. 碳排放权交易培训教材[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2022.
- [9] WANG F, HARINDINTWALI J D, YUAN Z, et al. Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality[J]. The Innovation, 2021, 2(11): 100180.
- [10] LUO Shihua, HU Weihao, LIU Wen, et al. Study on the decarbonization in China's power sector under the background of carbon neutrality by 2060[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022,

- 166: 112618.
- [11] 陈美安, 杨鹏, 胡敏. 中国NDC进程及展望2021: 迈向全球碳中和的未来[R]. 北京: 绿色创新发展中心, 2021.
- [12] LIU Z, DENG Z, HE G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(2): 141–155.
- [13] EFC. China's New growth pathway: From the 14th Five Year Plan to carbon neutrality[R]. Beijing: Energy Foundation China, 2020.
- [14] GUAN Yuru, SHAN Yuli, HUANG Qi, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts[J]. *Earth's Future*, 2021, 9(11): e2021EF002241.
- [15] LUO F, GUO Y, YAO M, et al. Carbon emissions and driving forces of China's power sector: Input-output model based on the disaggregated power sector[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 121925.
- [16] SHI Q, ZHENG B, ZHENG Y, et al. Co-benefits of CO₂ emission reduction from China's clean air actions between 2013—2020[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5061.
- [17] SHAN Y, GUAN D, ZHENG H, et al. China CO₂ emission accounts 1997—2015[J]. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 1–14.
- [18] LI J, ZHANG Y, TIAN Y, et al. Reduction of carbon emissions from China's coal-fired power industry: Insights from the province-level data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118518.
- [19] ZHANG X, CUI X, LI B, et al. Immediate actions on coal phaseout enable a just low-carbon transition in China's power sector[J]. *Applied Energy*, 2022, 308: 118401.
- [20] GUO W, SHI Y, LIU Y, et al. CO₂ emissions retrieval from coal-fired power plants based on OCO-2/3 satellite observations and a Gaussian plume model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023: 136525.
- [21] WANG G, DENG J, ZHANG Y, et al. Air pollutant emissions from coal-fired power plants in China over the past two decades[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140326.
- [22] WANG W, LI Z, LYU J, et al. An overview of the development history and technical progress of China's coal-fired power industry[J]. *Frontiers in Energy*, 2019, 13: 417–426.
- [23] TANG L, QU J, MI Z, et al. Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards[J]. *Nature Energy*, 2019, 4(11): 929–938.
- [24] WU R, LIU F, TONG D, et al. Air quality and health benefits of China's emission control policies on coal-fired power plants during 2005—2020[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(9): 094016.
- [25] LIU X, GAO X, WU X, et al. Updated hourly emissions factors for Chinese power plants showing the impact of widespread ultralow emissions technology deployment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(5): 2570–2578.
- [26] ZHANG Y, BO X, ZHAO Y, et al. Benefits of current and future policies on emissions of China's coal-fired power sector indicated by continuous emission monitoring[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 251: 415–424.
- [27] ZHANG H, ZHANG X, YUAN J, et al. Coal power in China: A multi-level perspective review[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2020, 9(6): e386.
- [28] 王志轩, 潘荔, 刘志强, 等. 中国煤电清洁发展现状及展望[J]. *电力科技与环保*, 2018, 34(1): 1–8.
- WANG Zhixuan, PAN Li, LIU Zhiqiang, et al. Review of present situation and prospect for clean development of coal-fired power in China[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2018, 34(1): 1–8.
- [29] 郦建国, 朱法华, 孙雪丽. 中国火电大气污染防治现状及挑战[J]. *中国电力*, 2018, 51(6): 2–10.
- LI Jianguo, ZHU Fahua, SUN Xueli. Current status and challenges of atmospheric pollution prevention and control of thermal power plants in China[J]. *Electric Power*, 2018, 51(6): 2–10.
- [30] 刘志强, 赵毅, 潘荔. 中外火电节能减排效率分析与比较[J]. *热力发电*, 2021, 50(3): 9–18.
- LIU Zhiqiang, ZHAO Yi, PAN Li. Analysis and comparison of energy saving efficiency and emission reduction efficiency of thermal power between China and foreign countries[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(3): 9–18.
- [31] LAURI Myllyvirta, 沈昕, HARRI Lammi. 2015年中国煤电逆势投资的后果[R]. 北京: 绿色和平, 2016.
- [32] ZHENG J, MI Z, COFFMAN D, et al. The slowdown in China's carbon emissions growth in the new phase of economic development[J]. *One Earth*, 2019, 1(2): 240–253.
- [33] ESER P, SINGH A, CHOKANI N, et al. Effect of increased renewables generation on operation of thermal power plants[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 723–732.
- [34] MI Z, ZHENG J, MENG J, et al. China's energy consumption in the new normal[J]. *Earth's Future*, 2018, 6: 1007–1016.
- [35] LI M, PATINO-ECHEVERRI D, ZHANG J J. Policies to promote energy efficiency and air emissions reductions in China's electric power generation sector during the 11th and 12th five-year plan periods: Achievements, remaining challenges, and opportunities[J]. *Energy Policy*, 2019, 125: 429–444.
- [36] IEA. Enhancing China's ETS for carbon neutrality: Focus on power sector[R]. London: IEA, 2022.
- [37] VISKOVIĆ A, FRANKI V. Evaluating and forecasting direct carbon emissions of electricity production: A case study for South East Europe[J]. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2022, 17(1): 2037028.
- [38] 刘科, 杨兴森, 王太, 等. 基于实时监测的燃煤机组碳排放特性研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(10): 47–53.
- LIU Ke, YANG Xingsen, WANG Tai, et al. Research on carbon emission characteristics of coal-fired units based on real-time monitoring[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(10): 47–53.
- [39] 韩迪, 马越, 陆彬, 等. 全球退煤进展追踪报告[R]. 北京: 绿色创新发展中心, 2021.
- [40] 韩迪, 汪燕辉. 2022年全球退煤进展追踪报告[R]. 北京: 绿色创新发展中心, 2022.
- [41] CUI Ryna, NATHAN Hultman, JIANG Kejun, et al. A high ambition coal phaseout in China: Feasible strategies through a comprehensive plant-by-plant assessment[R]. Maryland: Center for Global Sustainability: College Park, 2020.
- [42] IEA. Phasing out unabated coal current status and three case studies [R]. London: IEA, 2021.

- [43] IEA. The Role of China's ETS in Power Sector Decarbonisation [R]. London: IEA, 2021.
- [44] ZHOU S, CHEN B, WEI W, et al. China's power transformation may drastically change employment patterns in the power sector and its upstream supply chains[J]. IOP Publishing Ltd, 2022.
- [45] 中能传媒研究院. 中国能源大数据报告(2022)[R]. 北京: 中能传媒研究院, 2022.
- [46] IRENA. China's route to carbon neutrality: Perspectives and the role of renewables[R]. Abu Dhabi: IRENA, 2022.
- [47] JEFFREY J. ANDERSON D, ZHAI Haibo, et al. Transitioning to a carbon-constrained world: Reductions in coal-fired power plant emissions through unit-specific, least-cost mitigation frontiers[J]. Applied Energy, 288.
- [48] LI J, HO M S, XIE C, et al. China's flexibility challenge in achieving carbon neutrality by 2060[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 158: 112112.
- [49] IEA. Global Energy Review: CO₂ emissions in 2021 [R]. London: IEA, 2022.
- [50] ETC. Making the hydrogen economy possible: accelerating clean hydrogen in an electrified economy[R]. ETC, 2021.
- [51] IEA. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China [R]. London: IEA, 2021.
- [52] IEA. The role of low-carbon fuels in the clean energy transitions of the power sector [R]. London: IEA, 2021.
- [53] 王卫权, 李丹, 王茜, 等. 中国可再生能源经验总结报告-以风力发电和光伏发电为主[R]. 北京: WWF, 2021.
- WANG Weiquan, LI Dan, WANG Qian, et al. Summary report on China's renewable energy experience-mainly wind power and photovoltaic power generation[R]. Beijing: WWF, 2021.
- [54] ZHAI H, GU B, ZHU K, et al. Feasibility analysis of achieving net-zero emissions in China's power sector before 2050 based on ideal available pathways[R]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 98: 106948.
- [55] ICSC. The role of low emission coal technologies in a net zero Asian future[R]. London: International Centre for Sustainable Carbon, 2022.
- [56] 帅永, 赵斌, 蒋东方, 等. 中国燃煤高效清洁发电技术现状与展望[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 1-10.
- SHUAI Yong, ZHAO Bin, JIANG Dongfang, et al. Status and prospect of coal-fired high efficiency and clean power generation technology in China[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 1-10.
- [57] 王月明, 姚明宇, 张一帆, 等. 煤电的低碳化发展路径研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 11-20.
- WANG Yueming, YAO Mingyu, ZHANG Yifan, et al. Study on low-carbon development path of coal-fired power generation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 11-20.
- [58] 董洁, 乔建强. “双碳”目标下先进煤炭清洁利用发电技术研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 202-212.
- DONG Jie, QIAO Jianqiang. A review on advanced clean coal power generation technology under “Carbon Peaking and Carbon Neutrality” Goal[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 202-212.
- [59] 王峰江, 刘鹏, 李荣春, 等. “双碳”目标下先进发电技术研究进展及展望[J]. 热力发电, 2022, 51(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, 51(1): 52-59.
- [60] YANG Y, LI C, WANG N, et al. Progress and prospects of innovative coal-fired power plants within the energy internet[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 160-179.
- [61] GUAN G, ENERGY N, UNIVERSITY H. Clean coal technologies in Japan: A review[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2017, 25(6): 689-697.
- [62] VINAY Trivedi. Reducing CO₂ footprints of India's coal-based power[R]. New Delhi: Centre for Science and Environment, 2020.
- [63] 孙月巧, 郑宏飞, 孔慧. 碳中和背景下煤电转型关键技术研究展望[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1013-1023.
- SUN Yueqiao, ZHENG Hongfei, KONG Hui. Key technologies and prospects of coal power transformation under carbon neutrality background[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1013-1023.
- [64] CHENG L, JI J, WEI Y, et al. A note on large-size supercritical CFB technology development[J]. Powder Technology, 2020, 363: 398-407.
- [65] YANG C, ZHANG Z, WU H, et al. Dynamic characteristics analysis of a 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Energies, 2022, 15(11): 4049-4069.
- [66] 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 Chunfu, et al. Research progress of integrated coal gasification fuel cell combined power generation(IGFC) technology[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(1): 77-83.
- [67] ZHANG X. Current status of stationary fuel cells for coal power generation[J]. Clean Energy, 2018, 2(2): 14.
- [68] DAVID Hasler. Coal-fired power plant heat rate reductions[R]. Chicago: Sargent & Lundy LLC, 2009.
- [69] EIA. Analysis of heat rate improvement potential at coal-fired power plants[R]. Washington, DC: EIA, 2015.
- [70] CAMPBELL R J. Increasing the efficiency of existing coal-fired power plants[R]. Washington, DC: CRS, 2013.
- [71] LI K, SHEN S, FAN J L, et al. The role of carbon capture, utilization and storage in realizing China's carbon neutrality: A source-sink matching analysis for existing coal-fired power plants[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 178: 106070.
- [72] ETC. Carbon capture, utilisation and storage in the energy transition: Vital But Limited[R]. ETC, 2022.
- [73] TABBI W, AHMAD B, BASSEL S, et al. Outlook of carbon capture technology and challenges[J]. Science of The Total Environment, 2019, 657: 56-72.
- [74] LEUNG D, CARAMANNA G, MAROTO-VALER M M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014(39): 426-443.
- [75] AARON D, TSOURIS C. Separation of CO₂ from flue gas: A review[J]. Separation Science and Technology, 2005, 40: 321-348.
- [76] KOYTSOUMPA E, BERGINS C, KAKARAS E. The CO₂ eco-

- nomy: Review of CO₂ capture and reuse technologies[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2018, 132: 3–16.
- [77] MAI B, ADJIMAN C S, BARDOW A, et al. Carbon capture and storage (CCS): The way forward[J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(5): 1062–1176.
- [78] WANG Y, PAN Z, ZHANG W, et al. Life cycle assessment of combustion-based electricity generation technologies integrated with carbon capture and storage: A review[J]. Environmental Research, 2022, 207: 112219.
- [79] DINDI A, CODDINGTON K, GAROFALO J F, et al. Policy-driven potential for deploying carbon capture and sequestration in a fossil-rich power sector[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(14): 9872–9881.
- [80] 袁家海, 张健, 孟之绪, 等. 电力系统灵活性提升: 技术路径、经济性与政策建议[R]. 北京: 自然资源保护协会, 2022.
- [81] 曹艺严, 陈济, 刘秉祺, 等. 电力增长零碳化(2020—2030): 中国实现碳中和的必经之路[R]. 北京: 落基山研究所, 2021.
- [82] 甘益明, 王昱乾, 黄畅, 等. “双碳”目标下供热机组深度调峰与深度节能技术发展路径[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 1–10.
- GAN Yiming, WANG Yuqian, HUANG Chang, et al. Development path of deep peak-shaving and deep energy conservation technology for cogeneration units with “dual carbon” target[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 1–10.
- [83] KOYTSOUMPA E I, BERGINS C, KAKARAS E, et al. Flexible operation of thermal plants with integrated energy storage technologies[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54: 2453–2460.
- [84] COLIN H. Increasing the flexibility of coal-fired power plants[R]. London: IEA Clean Coal Centre, 2014.
- [85] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J/OL]. 中国电机工程学报: 1–22[2023–04–18]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222007.
- OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LÜ Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1–22 [2023–04–18]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222007.
- [86] DONG Y, JIANG X, LIANG Z, et al. Coal power flexibility, energy efficiency and pollutant emissions implications in China: A plant-level analysis based on case units[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 134: 184–195.
- [87] GEM. China permits two new coal power plants per week in 2022[R]. Covina: GEM, 2023.
- [88] 王庆一. 2021 能源数据[R]. 北京: 绿色创新发展中心, 2022.
- [89] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117–3126.
- XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “Three Elements of Energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117–3126.
- [90] 戴小河. 国家能源局: 煤电仍将长时期承担保障电力安全的重要作用[EB/OL]. (2022–04–24) [2023–06–06]. http://jn.fuzhou.gov.cn/zz/gzdt/zhxw/gjxw/202204/t20220425_4351155.htm.
- DAI Xiaohu. National energy administration: Coal power will continue to bear the heavy burden of ensuring electricity security for a long time[EB/OL]. (2022–04–24) [2023–06–06]. http://jn.fuzhou.gov.cn/zz/gzdt/zhxw/gjxw/202204/t20220425_4351155.htm.