

DOI: 10.19666/j.rlfed.202211252

煤电“三改联动”实施分析与措施建议

刘志强¹, 叶春¹, 张源², 李云凝¹

(1.中国电力企业联合会, 北京 100761; 2.国能龙源蓝天节能技术有限公司, 北京 100039)

[摘要] 煤电“三改联动”是煤炭清洁低碳转型的有效手段。分析了煤电的能效、灵活性和供热现状, 研究了煤电实施“三改联动”的政策要求、实施进展和预期效果。从改造技术难度看, 节能改造难度最高, 灵活性改造次之、供热改造难度相对较低。预计“十四五”末全国煤电供电煤耗率将降至 297 g/(kW·h)左右, 新增调峰能力预计在 4 000 万 kW 以上, 供热范围进一步扩大。针对煤电亏损面大、部分类型机组技术改造难度大、设备低负荷运行安全隐患大、改造投入产出不可预期性大、改造资金有待进一步加大等问题, 从政策、技术、标准、市场等角度提出了促进煤电“三改联动”的措施建议。

[关键词] 煤电; 节能改造; 灵活性改造; 供热改造; 三改联动

[引用本文格式] 刘志强, 叶春, 张源, 等. 煤电“三改联动”实施分析与措施建议[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 154-159.
LIU Zhiqiang, YE Chun, ZHANG Yuan, et al. Analysis and suggestions on the implementation of “three-renovation” of coal-fired power[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 154-159.

Analysis and suggestions on the implementation of “three-renovation” of coal-fired power

LIU Zhiqiang¹, YE Chun¹, ZHANG Yuan², LI Yunning¹

(1. China Electricity Council, Beijing 100761, China; 2. CHN Energy Longyuan Blue Sky Energy Conservation Technology Co., Ltd., Beijing 100039, China)

Abstract: “Three-renovation” (energy-saving renovation, flexibility renovations and heating renovations) of coal-fired power is an effective measure for clean and low carbon utilization of coal. The paper analyzes current energy efficiency, flexibility and heating situation of coal-fired power, and researches the policy requirement, implementation progress and expected effect of “Three-renovation”. In terms of technical difficulty, energy saving renovation is the most difficult, followed by flexibility and heat supply. It is anticipated that the coal consumption for power supply will be decreased to about 297 g/(kW·h), the additional peak regulation capacity will be over 40 GW and the heating scope will be further expanded. In view of the problems such as large coal power loss, difficult technical transformation of some types, hidden safety risks of equipment under low load operation, unanticipated input and output of renovation, and small financial support of renovation, this paper puts forward measures and suggestions to promote the “Three-renovation” from the perspectives of policy, technology, standards and market.

Key words: coal-fired power; energy-saving renovation; flexibility renovation; heating renovation; three-renovation

煤电是中国能源电力稳定供应的“压舱石”, 是中国经济社会发展、新型能源系统的重要支撑。煤电能效水平的提升, 有利于降低电力能源消耗和电力碳排放强度; 煤电灵活性调节能力的提升, 有利于新能源发电量占比的快速提升和满足电力系统的调节需求; 扩大煤电机组的供热量和供热范围,

可以提高煤电机组热效率, 有利于全社会的节能降碳。在“双碳”目标要求下, “十四五”阶段是实现碳达峰目标的关键时期, 深入开展煤电节能降碳改造、灵活性改造和供热改造(即“三改联动”)对于推动煤电清洁低碳转型, 构建新型电力系统具有重要的现实意义。

收稿日期: 2022-11-15 网络首发日期: 2022-11-25

基金项目: 中国电力企业联合会 2022 年研究课题

Supported by: Research Project of China Electricity Council in 2022

第一作者简介: 刘志强(1982), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力节能减排、新能源等, liuzhiqiang@cec.org.cn.

1 煤电基本情况

1.1 全国煤电情况

截至 2021 年底, 全国全口径发电装机容量 23.8 亿 kW, 其中煤电装机 11.1 亿 kW; 全国全口径发电量为 83 959 亿 kW·h, 其中煤电发电量 50 426 亿 kW·h^[1]。长期以来, 煤电装机占比在 70% 左右, 煤电发电量占比在 75%~80%^[2]。2010 年之后我国能源转型加速, 煤电装机及发电量占比持续下降, 2021 年降至 46.7%; 发电量占比增速低于装机占比, 2021 年降为 60.1%, 仍是电量的主体。2010—2021 年煤电装机及发电量占比变化情况如图 1 所示。

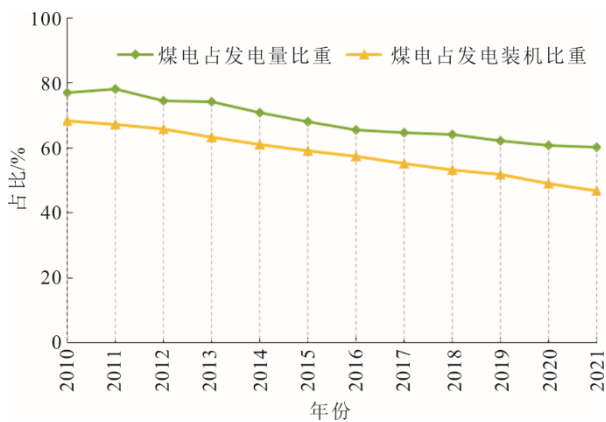


图 1 2010—2021 年煤电装机及发电量占比变化情况

Fig.1 Change of the proportion of coal-fired power installed capacity and generating capacity from 2010 to 2021

1.2 煤电能效情况

2010—2021 年全国 6 000 kW 及以上火电厂供电煤耗率如图 2 所示。

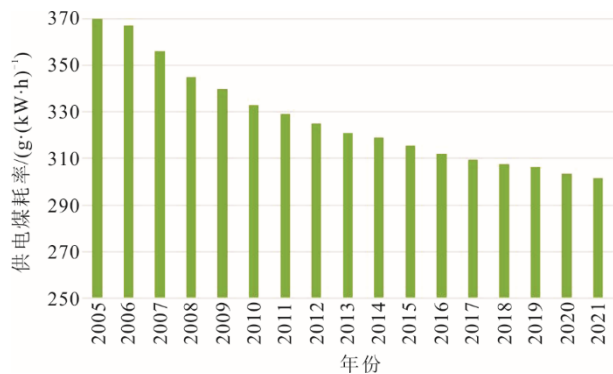


图 2 2010—2021 年全国 6 000 kW 及以上火电厂供电煤耗率

Fig.2 Net coal consumption rate of 6 000 kW and above thermal power units in China from 2010 to 2021

2021 年, 全国 6 000 kW 及以上火电厂供电煤耗率为 301.5 g/(kW·h)。其中, “十一五” “十二五”

“十三五”期间火电供电煤耗率分别下降 27.0、17.6、11.8 g/(kW·h), 下降绝对值逐步收窄^[3]。因火电装机中有燃气发电机组、生物质发电机组等, 煤电供电煤耗率高于火电 2~3 g/(kW·h)。煤电上大压小、供热改造、节能改造、管理提升等因素是煤电及火电供电煤耗率下降的主要因素。与国外相比, 煤电平均装备技术水平明显高于其他国家, 煤电热效率已经达到世界先进水平^[4]。

1.3 煤电灵活性情况

机组运行灵活性取决于锅炉燃烧稳定性以及汽轮机和主要辅机的适应性。目前国内大部分燃煤锅炉低负荷稳燃能力在 40%~50% 额定负荷, 通过改造可下探至 20%~30% 额定负荷^[5]。在现有技术支撑下, 现役纯凝煤电调峰负荷可下探至 35% 以下, 新建超超临界机组调峰负荷可以达到 30%。近年来, 部分投运机组进行了最低发电负荷 20% 深度调峰的试验或尝试, 但未常态化运行。供热机组灵活调节能力不及纯凝机组, 经过热电解耦, 部分机组电负荷调节能力可下探至 40% 以下, 但受热电比、供热型式的影响较大。此外, 煤电在快速调节方面进行了大量探索, 部分机组负荷响应速率可达到 2.0%Pe/min (Pe 为额定功率), 相比于灵活性改造前调节速度大幅提升。

1.4 煤电供热情况

2005 年以来, 煤电企业大力开拓供热市场, 结合热源积极开展供热改造, 供热机组规模已经达到 5.83 亿 kW^[6], 供热机组比例逐年提高, 6 000 kW 以上供热机组的比例由 2005 年的 14.0% 提高至 2021 年的 44.9%, 供热量由 2005 年的 19.3 亿 GJ 增长至 2021 年的 56.7 亿 GJ。由于统计口径的不同, 供热机组占比相差较大, 如多个发电央企供热机组占比超过 70%。

2 “三改联动”实施难度与预期效果

2.1 改造目标

2021 年 10 月, 国家发展改革委、国家能源局印发《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》(发改运行〔2021〕1519 号), 提出“十四五”期间节能降碳改造规模不低于 3.5 亿 kW; 供热改造规模力争达到 5 000 万 kW; 存量煤电机组灵活性改造完成 2 亿 kW, 实现煤电机组灵活改造规模 1.5 亿 kW 等。

为落实煤电机组改造升级的工作部署, 2022 年 7 月, 国家发展改革委办公厅、国家能源局综合司

印发《关于做好 2022 年煤电机组改造升级工作的通知》(发改运行〔2022〕662 号),规定了煤电机组节能降碳改造、灵活性改造、供热改造的认定标准。与《常规燃煤机组单位产品能源消耗限额》(GB 21258—2017)相比,节能降碳改造认定标准提高了超临界 30 万 kW 机组、亚临界 60 万 kW、亚临界 30 万 kW 及以下机组的能耗要求,供电煤耗率分别下降 8、12、12 g/(kW·h)(见表 1);灵活性改造认定标准要求纯凝工况下煤电最小发电出力不高于

35% 额定负荷,或是供热运行时单日 6 h 最小发电出力不高于 40% 额定负荷;供热改造认定标准主要为纯凝机组实施采暖或工业抽汽改造,或是供热机组通过改造增加供热面积或工业供汽量。

截至 2021 年底,煤电“三改联动”已经完成改造 2.4 亿 kW,2022 年预计改造 2.68 亿 kW(其中,节能降碳改造任务计划 8 815 万 kW,灵活性改造任务计划 1.15 亿 kW,供热改造任务计划 6 537 万 kW)，“十四五”期间累计改造预计达到 6 亿 kW 以上。

表 1 煤电节能减碳改造认定标准与 GB 21258—2017 标准 3 级指标比较

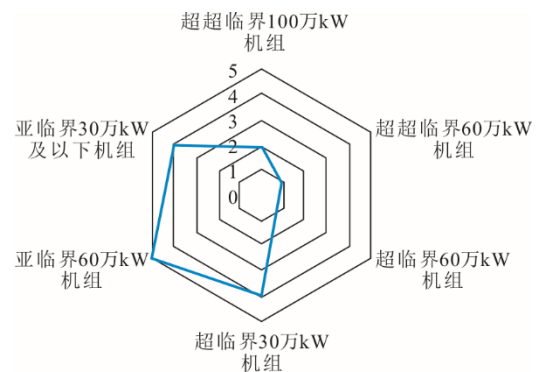
Tab.1 Comparison between the coal-fired power energy saving renovation requirements and GB 21258—2017 standard Level 3 indicators

机组类型	节能减碳改造认定标准/(g·(kW·h) ⁻¹)	GB 21258—2017 标准 3 级指标/(g·(kW·h) ⁻¹)
常规机组	超超临界 100 万 kW	≤285
	超超临界 60 万 kW	≤293
	超临界 60 万 kW	≤300
	超临界 30 万 kW	≤300
	亚临界 60 万 kW	≤302
	亚临界 30 万 kW	≤311
	亚临界 30 万 kW 以下	≤311
空冷机组	常规+15	≤352 (超高压 12.5 万、20 万 kW 等级机组)
W 火焰炉机组	常规+9	
循环流化床锅炉机组	湿冷机组	常规+15
	空冷机组	常规+25

2.2 改造难度分析

节能降碳改造方面,不同类型机组实现认定标准的难易度相差较大。对于纯凝机组,当前亚临界 30 万 kW 等级机组供电煤耗率达到 311 g/(kW·h)的比例相对较低,改造工作量相对较大,有技术难度。亚临界 60 万 kW 等级机组在技术水平上与亚临界 30 万 kW 等级机组相似,实现 302 g/(kW·h)供电煤耗率难度巨大,可选技术方案不多。超临界 30 万 kW 等级机组由于容量相对较小,汽轮机的级内漏汽损失较大,多数机组额定运行工况下供电煤耗率多处于 310~320 g/(kW·h),通过通流改造等技术改造可降低一定煤耗率,但实现 300 g/(kW·h)难度较大。超临界 60 万 kW 等级机组能耗水平基本在 300 g/(kW·h)左右,如在良好的管理水平和设备状态较好的前提下,改造工作量较小。超超临界 60 万、100 万 kW 等级机组若采用欧洲技术体系的机组基本可以满足要求,部分采用其他技术体系的机组需要进行改造。此外,部分 W 火焰炉机组、循环流化床锅炉机组对应等级机组亦需进行一定规模的改造,才能实现认定煤耗率要求。纯凝机组技术改造难度如图 3

所示。对于供热机组,按照当前“好处归电”的煤耗率计算方式^[7],煤电机组供热后(包括供热量提高后)实际供电煤耗率较纯凝机组会有所下降,下降幅度主要与供热量、供热方式相关。例如,东北供热机组供热和非供热状态下,供电煤耗率相差可达 150 g/(kW·h)。但供热是外部因素,煤电企业无法控制。



注:图中数值标示难度系数,数值越大表明改造难度越大,数值越小表明改造难度越小。

图 3 纯凝机组节能减碳技术改造难度
Fig.3 Technical energy saving renovation difficulty of pure condensing unit

灵活性改造方面,煤电灵活性改造技术成熟、路线选择众多,但存在机组灵活性改造后长期低负荷运行导致的安全性和经济性问题。常见的灵活性改造技术包括储能技术、锅炉稳燃技术(如燃烧器改造、点火及稳燃技术、制粉系统改造、二次风配风优化、省煤器改造、氮氧化物达标改造等)、汽轮机灵活性改造(如汽轮机辅机适配性改造技术等)等^[8]。

供热改造方面,技术改造无实质性难度,主要为技术经济性、具体技术方案之间的差别。具体的供热改造技术包括:采暖供热改造(如中排管道打孔直接供热、低位能供热、热泵供热、长距离供热等)、工业供热改造(如再热冷端/再热热段抽汽供热、中压联合汽阀供热、主蒸汽直抽等)、余热余压梯级利用等。

此外,部分改造具有协同耦合节能、供热和灵活性的作用,如低压缸零/微出力、高低旁路联合供热改造等既增加了电力调节的灵活性和供热能力,同时也达到了一定的节能效果。

2.3 改造效果分析

煤电节能降碳改造对于改造机组能够显著降低其供电煤耗率,但由于改造后的运行情况不确定(如负荷率)、供热影响不确定等,改造后运行效果是否能够完全体现仍有较大的不确定性。综合考虑“十四五”新建煤电、供热、灵活性等因素,煤电供电煤耗率“十四五”期间预计整体下降 $7\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 左右,2025年煤电平均供电煤耗率降至 $297\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 左右。

按照实施方案要求,“十四五”期间煤电灵活性改造规模为2亿kW,按照最小技术出力均降低10百分点,可形成稳定可靠的调峰能力约2000万kW左右。从实际情况看,配合新能源建设(煤电调峰资源/灵活性改造成为新能源建设获取指标的影响因素)等,全国灵活性改造规模将超过2亿kW,再叠加灵活性制造等因素,“十四五”末全国煤电可新增调峰能力预计在4000kW以上。

按照实施方案要求,供热改造规模5000万kW。从实际情况看,各发电集团供热改造规模较大,可能达到计划规模的2倍,供热机组比重和供热量将进一步提高。但对外供热量不受发电企业控制、热价调整频率低等因素影响,煤电机组供热改造进展具有不确定性。

3 “三改联动”存在的问题

3.1 煤电大面积亏损

2022年前3季度,全国煤电企业因电煤价格上涨导致电煤采购成本同比额外增加2600亿元左右,大型发电集团仍有超过一半以上的煤电企业处于亏损状态^[9]。部分企业现金流异常紧张,负债率较高,投资能力较弱,资金风险日益加大。部分东北、西南地区的煤电企业资金链已经断裂,需要上级公司(发电集团)进行委贷、担保才能保证资金周转,推进“三改联动”工作难度较大。

3.2 部分机组技术改造难度大

从改造难度看,节能改造难度最大、灵活性改造次之、供热改造需依据热负荷情况进行确定。

部分机组技术改造难度较大,如部分无供热、投产时间较长的亚临界600MW等级机组节能降碳改造难度较大;部分循环流化床机组按照综合利用项目设计处理煤矸石、煤泥,节能改造难度大,节能升级改造后效果有待进一步验证^[10];W火焰机组最低运行负荷较高^[11],灵活性改造难度高于常规燃煤机组,改造案例较少等。此外,部分地方存在改造层层加码问题。

3.3 机组长周期低负荷运行对安全和节能影响大

煤电机组长期在深度调峰、频繁调峰工况下运行,增加了机组设备尤其是重要金属部件的老化和提早失效风险,对于老旧机组风险隐患更加突出。当前机组灵活性运行的风险隐患尚无数据支撑或未完全暴露,难以科学辨识,给后续机组安全稳定运行带来不确定性。同时,由于机组改造规模较大,检修改造周期与电力供应安全保障有待进一步协调优化,当前已出现电厂停机改造计划调度无法进行安排的情况;新型冠状病毒肺炎疫情对部分电厂改造进度产生一定影响。

频繁调峰导致节能改造效果大打折扣,低负荷下机组运行能耗大幅度升高,进一步影响了机组经济性。以典型机组40%额定容量运行能耗为例^[12],亚临界30万、60万kW等级机组与其额定容量相比,供电煤耗率升高约30~50 $\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;超超临界60万、100万kW等级机组与其额定容量相比,供电煤耗率升高可能超过50 $\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。此外,低负荷机组能耗的准确测量存在较大困难,部分试验测点偏离了测量范围,误差较大。

3.4 机组改造不可预期性增大

在节能降碳改造方面,经过多轮改造,投入少、效果好、煤耗率降低多的项目多已改造完成。目前投入多、改造量大、投资回收期长的节能技改项目仅通过节煤获得的收入难以通过技术经济核算,且受煤电利用小时和煤价的不确定影响,节能改造投资回报具有很大的不确定性。在灵活性改造方面,部分地方辅助服务市场不能支撑灵活改造成本,这也是“十三五”时期灵活性改造推进滞后的主要原因。在供热改造方面,普遍存在热价较低、供热成本无法疏导、受“两个细则”考核较重、企业亏损严重等问题。

3.5 改造资金支持有待进一步加强

“十四五”期间实施“三改联动”的机组规模及数量较大,改造资金需求量巨大,在煤电大面积亏损背景下,仍需出台更大激励政策推动改造进程。根据测算,“十四五”期间改造资金要求将超过1 200 亿元,虽然国家设立专项再贷款用于支持煤炭清洁高效利用,还有节能降碳中央预算内资金给予煤电专项升级改造资金支持,但从实际情况看,煤电实际得到的资金支撑比例仍比较低,在亏损的背景下仍需更具操作性的激励政策。

4 促进“三改联动”的措施建议

4.1 全面综合施策,保障煤电企业健康发展

持续增加煤炭供应总量,尽快释放煤炭产能,控制电煤价格在合理区间。继续疏导煤电上网电价,进一步放开燃煤发电上网电价涨跌幅限制。合理疏导供热成本,建立煤、热价联动的居民热价机制,建立由供需双方通过协商确定的工业热价市场化定价机制,取消各类限价行为。统筹煤电保供和碳市场发展,合理设置碳排放配额缺口,不宜大幅下调基准线,减轻火电企业整体成本负担。鼓励煤电与新能源融合发展,鼓励煤电企业利用自身优势参与新能源项目开发,在新能源指标分配、列入年度开发方案时给予煤电一定倾斜。

4.2 加大市场和财税支持,正向激励“三改联动”

发挥市场配置资源的作用,深化电力市场建设,加快建立完善现货市场、辅助服务市场、容量市场等,加大有偿调峰补偿力度,制定容量成本回收机制体现容量价值。加大财税金融对煤电企业的支持力度,出台面向煤电行业所得税普惠制政策,延长承担保供责任的煤电企业所得税亏损结转年

限,支持煤电企业的委托贷款利息纳入增值税抵扣范围和煤电“三改联动”。继续给予煤电改造升级专项资金/贷款支持力度,分区域、分机组、分改造内容出台煤电升级改造的金融和减税退税等支持政策。支持煤电企业拓宽融资渠道,鼓励发电企业通过合同能源管理等方式推进煤电机组改造升级。

4.3 统筹安排、有序推进“三改联动”

根据电力供需形势,有序安排煤电机组停机改造窗口和改造规模等,杜绝因改造影响电力安全稳定供应情况发生。各地区结合机组特点,科学有序推进改造工作,在灵活性改造方面,先行改造新能源装机规模大、电力系统灵活性需求大地区的煤电,先行改造机组参数低、容量小、灵活调节容易的煤电(如亚临界机组);在节能方面,先行改造投入小、见效快、改造时间短的煤电,适当提高大容量、高参数机组煤电负荷水平;在供热改造方面,结合区域供热需求情况合理推进。完善煤电退役、备用、延寿相关机制(如在“十五五”期间服役期满的亚临界60万kW机组),以需求、安全为基妥善处理该类机组的“三改联动”要求。

4.4 依法治企、科学推进“三改联动”

科学合并修订GB 21258、GB 35574标准,将循环流化床锅炉机组纳入限额范畴,实现限额标准对于煤电机组的全覆盖,同时处理好标准与文件间的协调关系。加快“三改联动”配套标准(包括设计改造、电厂运行、设备与试验、监督、指标计算)的制修订工作,给予“三改联动”标准支撑。各地应以国家发展改革委、国家能源局印发的文件以及修订后的能耗限额要求为准,不应再提出其他额外加严要求,坚决杜绝层层加码。对于达不到煤耗率认定标准的拟关停/备用机组,合理给予豁免条件。

4.5 优化调度方式、发挥“三改联动”作用

在统筹考虑机组特性和效益的基础上,加大煤电与其他电能的优化力度,提高大容量机组煤电负荷水平,发挥大容量、高参数、低能耗火电机组基荷作用,将100万、60万kW机组以及热电联产机组作为基荷电源,更好地发挥大容量、高参数机组能效作用,通过优化调度,逐步实现更大范围的系统性节能和降碳。持续优化调度运行方式,包括优化煤电机组启停方式、减少煤电旋转备用等,实现煤电与新能源耦合运行和煤电整体发电效率最优,发挥煤电“三改联动”最大效果,全面提升机组运行的经济性和安全性。

4.6 加大科技创新, 助力“三改联动”进程

在组织方式上积极整合上下游领域科技资源, 畅通产学研自主创新协作, 深化能源科技创新平台建设, 增强煤电低碳转型创新活力。围绕煤炭清洁高效利用、智能化与数字化等领域, 促进人工智能、大数据、5G、物联网等先进信息技术与能源技术深度融合。以提高低负荷能效、保证设备低负荷运行安全为目标, 切实加强“三改联动”专项技术研究攻关, 探索“抽汽储能”等新型技术。推动煤电由单一电力供应向提供电、热、水、汽、气等综合能源服务方向和循环经济平台进化。

[参考文献]

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2022[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2022: 252.
China Electricity Council. Annual development report of China's power industry 2022[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2022: 252.
- [2] 中国电力企业联合会. 中国煤电清洁发展报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 7
China Electricity Council. Clean development of coal-fired power in China[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017: 7.
- [3] 刘志强, 潘荔, 赵毅, 等. “十四五”时期我国火电行业节能潜力分析与建议[J]. 中国能源, 2021, 43(4): 12-18.
LIU Zhiqiang, PAN Li, ZHAO Yi, et al. Analysis and suggestions on the energy saving potential of China's thermal power in the 14th Five-Year Plan[J]. Energy of China, 2021, 43(4): 12-18.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 中国电力企业联合会. 2021 年电力工业统计资料汇编 [R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2022: 37.
China Electricity Council. Electric power industry statistics compilation of date[R]. Beijing: China Electricity Council, 2022: 37.
- [7] 白天宇, 杨宇, 郑莆燕, 等. 以发电量最大为目标的母管制热电联产系统两级优化调度[J]. 热能动力工程, 2022, 37(8): 33-39.
BAI Tianyu, YANG Yu, ZHENG Puyan, et al. Two-level optimal scheduling of main-pipeline CHP units with maximum generation capacity as objective[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 33-39.
- [8] 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.
- [9] 中国电力企业联合会. 2022 年三季度全国电力供需形势分析预测报告 [R/OL]. (2022-10-25)[2022-10-28]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-314813>.
China Electricity Council. Report on Analysis and forecast of national power supply and demand situation in the third quarter of 2022[R/OL]. (2022-10-25) [2022-10-28]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-314813>.
- [10] 范庆伟, 管洪军, 陈显辉, 等. 现役燃煤火电机组提升参数改造技术现状及关键问题分析[J]. 热能动力工程, 2022, 37(6): 12-18.
FAN Qingwei, GUAN Hongjun, CHEN Xianhui, et al. Present situation and key problem analysis in parameters increasing reformation technology for active coal-fired thermal power units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6): 12-18.
- [11] 马达夫, 何翔, 吕为智, 等. 660 MW 超临界 W 火焰锅炉低负荷稳燃特性研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(1): 259-266.
MA Dafu, HE Xiang, LYU Weizhi, et al. Investigations of combustion stability in a 660 MW supercritical W-flame boiler under low load[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(1): 259-266.
- [12] 中国电力企业联合会. 煤电机组灵活性运行政策研究[R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2019: 15.
China Electricity Council. Research on flexible operation policy of coal-fired power[R]. Beijing: China Electricity Council, 2019: 15.

(责任编辑 刘永强)