燃煤发电机组碳排放强度影响因素研究

马学礼¹, 王笑飞¹, 孙希进¹, 师 婧², 陈锦鹏³, 党立晨¹ (1.中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075; 2.西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 3.华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

[摘 要] 燃煤发电作为我国当前主导能源,其CO2排放在全社会占比较大。为实现碳达峰、碳中和目标,迫切需要掌握现有燃煤发电机组碳排放强度影响因素,以不断降低碳排放强度。在 陕北、宁东、准东及哈密4个大型煤电基地内,选择典型燃煤机组,研究碳排放强度与机 组类型、运行负荷、燃煤品质、空冷方式等因素的关系。结果表明:高参数、大容量机组 CO2排放强度相对较低,直接空冷机组 CO2排放强度相对较高;随着机组负荷下降,CO2 排放强度呈现增大趋势;燃煤单位热值含碳量、碳氧化率、硫分、挥发分等均会影响 CO2 排放强度,排烟方式、环境温度等的影响可以忽略不计。该研究结果可以为工程设计单位 开展绿色低碳电厂设计优化及改造提供指导,为发电集团加强碳排放管理和降低碳排放强 度提供路径,为电力调度部门优化负荷安排提供参考。
 [关 键 词] 燃煤电厂; CO2; 排放强度; 碳达峰; 碳中和

[中图分类号] TM611; X22 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfd.202108176

[引用本文格式] 马学礼, 王笑飞, 孙希进, 等. 燃煤发电机组碳排放强度影响因素研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 190-195. MA Xueli, WANG Xiaofei, SUN Xijin, et al. Influence factors of carbon emission intensity of coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 190-195.

Influence factors of carbon emission intensity of coal-fired power units

MA Xueli¹, WANG Xiaofei¹, SUN Xijin¹, SHI Jing², CHEN Jinpeng³, DANG Lichen¹

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China;
 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
 3. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Power generated through coal combustion is the dominant energy in China, the carbon dioxide (CO_2) emission during this process has accounted for an important proportion in the whole society. In order to achieve the goal of carbon emission peak and carbon neutralization and continuously reduce the carbon emission intensity, it is urgent to master the influencing factors of carbon emission intensity of existing coal-fired power units. Typical coal-fired power units from four large scale coal-fired power bases in north Shaanxi, east Ningxia, Zhundong and Hami were selected to investigate the relationship between CO_2 emission intensity and unit type, operating load, coal quality, air cooling mode and other factors. The results show that, the CO_2 emission intensity of units with high parameter and large capacity is relatively low, and that of the direct air cooling units is relatively high. As the unit load decreases, the CO_2 emission intensity increases. The carbon content per unit calorific value, carbon oxidation rate, sulfur content and volatile matter of coal will affect the CO_2 emission intensity, while the effects of smoke exhausting mode and ambient temperature can be ignored. The research results can provide a guidance for engineers to design or reconstruct the green and low-carbon power plants, a path for power generation groups to strengthen carbon emission management and reduce carbon emission intensity, and a reference for power dispatching departments to optimize the load arrangement.

Key words: coal-fired power plant; carbon dioxide; emission intensity; carbon peak; carbon neutralization

收稿日期: 2021-08-31

基 金 项 目: 陕西省重点研发计划(2017ZDCXL-GY-02-03)

Supported by: Key Research and Development Plan of Shaanxi Province (2017ZDCXL-GY-02-03)

第一作者简介:马学礼(1983),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为能源环境保护,maxueli@nwepdi.com。

近年来由温室效应导致的全球变暖问题愈发 严重。为共同应对全球气候变化,中国承诺 CO₂排 放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前 实现碳中和^[1],即"3060"目标。

能源活动为我国最大 CO₂温室气体排放源,在 我国 CO₂总排放量中占比近 90%,其 CO₂全部来自 化石燃料燃烧,其中电力行业贡献超过 40%^[2-5]。燃 煤发电作为我国当前主导能源,其 CO₂排放在整个 电力行业中占比超过 90%。为实现我国既定的 "3060"目标,燃煤发电 CO₂减排受到各级政府及 发电集团的高度重视,迫切需要掌握现有燃煤发电 机组碳排放强度影响因素,为绿色低碳燃煤发电机 组设计、改造提供依据,以不断降低碳排放强度。

鉴于此,在陕北、宁东、准东及哈密4个大型 煤电基地选择典型燃煤机组,依据《中国发电企业 温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》及相关 方法^[6-9],对其碳排放强度进行核算,并在此基础上 开展碳排放强度影响因素研究。

1 机组类型

本文共选择 19 个电厂 38 台机组,机组型式见表 1。

地 区	等级/ MW	机组容量/ MW	机组 负荷率/%	锅炉型式	空冷型式	排烟方式
陕 北	300	2×300	68.8/66.5	亚临界	直接空冷	烟囱
		2×350	67.6/69.1	超临界	间接空冷	烟囱
	600	2×600	83.0/82.7	亚临界	直接空冷	烟囱
		2×660	71.1/73.3	超临界	直接空冷	烟囱
		4×600	81.9/83.3/ 82.1/81.8	亚临界	直接空冷	烟囱
	1 000	2×1000	70.3/70.2	超超临界	直接空冷	烟囱
		1×1000	72.5	高效超超临界	间接空冷	烟囱
		1×1000	71.0	高效超超临界	间接空冷	冷却塔
宁东	300	2×330	63.0/65.5	亚临界	直接空冷	烟囱
	600	2×600	72.7/70.3	亚临界	直接空冷	烟囱
		2×660	67.2/70.8	超临界	间接空冷	烟囱
		2×660	73.5/74.4	超超临界	间接空冷	烟囱
		2×660	72.2/74.7	超超临界	间接空冷	冷却塔
		2×660	75.2/73.1	高效超超临界	间接空冷	冷却塔
	$1\ 000$	2×1 060	68.1/66.4	超超临界	直接空冷	烟囱
准	300	2×350	66.4/71.1	超临界	间接空冷	烟囱
东	600	2×660	71.5/69.3	超超临界	间接空冷	烟囱
哈	600	2×660	61.0/61.8	超临界	间接空冷	烟囱
密	600	2×660	57.8/52.4	超超临界	间接空冷	烟囱

表 1 研究机组型式 Tab.1 Types of the studied untis

1.1 机组容量

机组容量表征发电机组的额定发电功率,通常

情况下,同一类型机组的机组容量越高,其发电效率越高,机组单位发电量的标准煤耗越低。当前我国燃煤电厂主导单台机组容量为 300 MW 级、600 MW 级和 1 000 MW 级。本文研究的 38 台机组中,涉及 300 MW 级机组 8 台、600 MW 级机组 24 台、1 000 MW 级机组 6 台。以发电 CO₂ 排放强度为例,其随机组容量变化如图 1 所示。



图 1 发电 CO₂ 排放强度随机组容量变化 Fig.1 Relationship between CO₂ emission intensity of power generation and unit capacity

由图 1 可以看出,就单台机组而言,受制约于 碳排放强度多重因素影响,其随机组容量并无显著 变化趋势。但对所有机组统计后发现,发电 CO₂ 排 放强度随机组容量增加而降低。其中:600 MW 级 机组相比 300 MW 级机组降低约 4.5%;1 000 MW 级机组相比 600 MW 级机组降低约 3.8%,相比 300 MW 级机组降低约 8.1%。

1.2 锅炉型式

本文所指锅炉型式主要根据锅炉蒸汽参数(主 蒸汽压力、温度等)分为亚临界、超临界和(高效) 超超临界锅炉,涉及亚临界锅炉12台,超临界锅炉 10台,(高效)超超临界锅炉16台。其中亚临界锅 炉主蒸汽压力为 17.5 MPa, 主蒸汽/再热蒸汽温度为 538 ℃/538 ℃或 540 ℃/540 ℃; 超临界锅炉主蒸汽 压力在 25.4~25.8 MPa, 主蒸汽/再热蒸汽温度约为 570 ℃/570 ℃或 566 ℃/566 ℃; 超超临界锅炉主蒸 汽压力在 26.25~28.35 MPa, 主蒸汽/再热蒸汽温度 约为605℃/603℃或605℃/613℃;在超临界蒸汽 参数基础上再次提高蒸汽压力和温度,即工业上的 高效超超临界机组,本研究中高效超超临界机组主 蒸汽压力为 29.4 MPa, 主蒸汽/再热蒸汽温度达到 605 ℃/(613~623 ℃)。为不断降低能耗和减少污染物 排放,当前世界主要经济体正开展 700 ℃等级先进 超超临界技术研发[10]。

根据锅炉型式分析机组 CO₂排放强度,结果如 图 2 所示。对超超临界和高效超超临界 1 000 MW



图 2 机组 CO₂ 排放强度随锅炉型式变化 Fig.2 Relationship between CO₂ emission intensity and boiler type of coal-fired power units

从图 2 可以看出:对于 300 MW 级机组,锅炉 蒸汽参数由亚临界提升至超临界时,发电、供电 CO₂ 排放强度分别降低约 9.2%、15.4%;对于 600 MW 级机组,锅炉蒸汽参数由超临界提升至超超临界 时,发电、供电 CO₂ 排放强度分别降低约 9.8%、 11.6%;对于 1 000 MW 级机组,锅炉蒸汽参数由超 超临界提升至高效超超临界时,发电、供电 CO₂ 排 放强度分别降低约 2.2%、4.5%。其主要原因在于随 着锅炉蒸汽参数提高,机组发电效率不断提高。

2 机组负荷

机组负荷属于电厂实际运行中不可控的重要 外部因素,又是影响机组能耗水平的主要因素。相 关研究表明^[11-12]:机组负荷降低时,锅炉热效率有 所降低,厂用电率、热耗率及供电煤耗均有所增加。 佘园元等^[12]通过试验得出,某超超临界 600 MW 机 组负荷由 480 MW 降低至 155 MW 时,锅炉热效率 由 93.80%降低至 91.74%,厂用电率由 5.04%增大 至 10.46%,热耗率由 7 920.0 kJ/(kW h)增大至 9 085.1 kJ/(kW h),试验供电煤耗由 310.3 g/(kW h) 增大至 388.1 g/(kW h)。图 3 给出了不同机组年均 CO₂排放强度与年运行负荷率关系。

由图 3 可以看出:机组年负荷率相差较大时, 负荷率较大者 CO₂ 排放强度较低,反之机组负荷率 较小者 CO₂ 排放强度较高;当机组负荷率相差不大 时,二者相互关系不显著,究其原因在于机组实际 运行中,影响 CO₂ 排放强度的因素众多,单一机组 负荷影响难以显现。

以 600 MW 级机组为例,本文研究的 8 台亚临界 600 MW 级机组年运行负荷率达到 78.8%; 6 台超临界 600 MW 级机组年运行负荷率为 67.6%,相比亚临界 600 MW 级机组负荷率降低 11.2 百分点,

发电、供电 CO₂ 排放强度分别增加 9.1%、6.8%。以 同一电厂的 2 台机组为例:某亚临界 2×330 MW 循 环流化床机组,1 号机组年负荷率较 2 号机组降低 2.5 百分点,发电、供电 CO₂ 排放强度较 2 号机组 分别增加约 0.015、0.020 t/(MW h);某超超临界 2× 1 060 MW 直接空冷燃煤机组,3 号机组年负荷率较 4 号机组高 1.7 百分点,发电、供电 CO₂ 排放强度 较 4 号机组分别降低约 0.027、0.039 t/(MW h)。



图 3 机组 CO2排放强度随运行负荷变化 Fig.3 Relationship between CO2 emission intensity and load rate of coal-fired power units

3 燃煤品质

3.1 单位热值含碳量与碳氧化率

依据《中国发电企业温室气体排放核算方法与 报告指南(试行)》及相关方法,燃煤单位热值含碳 量(wcc)为燃煤碳元素质量分数与其收到基低位发 热量的比值,如公式(1)所示。

$$w_{\rm CC} = w_{\rm C} / V_{\rm NCV} \tag{1}$$

式中:wc为燃煤的碳元素质量分数,%;V_{NCV}为燃 煤的收到基低位发热量,GJ/t。

燃煤碳氧化率(F_{OF})为燃煤中的碳氧化燃烧转 化为 CO₂的效率,在实际运行中该指标通过监测机 组炉渣、飞灰产量及含碳量计算得来。

燃煤单位热值含碳量 (w_{CC}) 和碳氧化率 (F_{OF}) 直接影响燃煤 CO₂ 排放因子 (F_{EF}),其计算公式如 式(2)所示。

$$F_{\rm EF} = w_{\rm CC} \times F_{\rm OF} \times 44/12 \tag{2}$$

式中: F_{OF} 为燃煤碳氧化率,%;44/12 为 CO₂ 与碳 元素的分子质量之比。

燃煤产生的 CO₂ 的排放量(*E*)直接受燃煤活 动水平(*D*_{AD})和 CO₂ 排放因子(*F*_{EF})影响,其计 算公式如式(3)所示。

$$E=D_{\rm AD}\times F_{\rm EF}$$
 (3)

式中: *D*_{AD} 为燃煤活动水平, GJ, 其计算公式如式(4)所示。

$$D_{AD}=C_{FC} \times V_{NCV}$$
 (4)
式中: C_{FC} 为燃煤消耗量,t。

不难看出,单位热值含碳量(w_{CC})和碳氧化率 (F_{OF})越高,单位燃煤 CO₂ 排放量越大。因二者影 响机组热效率及发电效率,故发电 CO₂ 排放强度也 会产生变化。但综合多重因素影响,本研究未得出 三者之间存在显著增减规律。

3.2 硫分

燃煤硫分越高,单位燃煤脱硫消耗脱硫剂越 多,脱硫过程 CO₂排放越多,所占比例也相对越大。 图 4 给出了调研的 19 个电厂的燃煤硫分与脱硫过程 CO₂排放之间的关系。由图 4 可以看出,二者呈现较 为显著的一致性规律。脱硫过程产生的 CO₂ 在整个 燃煤电厂中所占比例较低。19 个电厂在超低排放脱 硫剂消耗较大的情况下,脱硫过程产生的 CO₂ 排放 占比均值仅 0.4%,个别电厂脱硫产生的 CO₂排放占 比达到 1.6%(主要在于其燃煤硫分近 2%)。总的来 看,硫分变化对整个电厂的 CO₂排放强度影响较小。





3.3 挥发分

挥发分不直接参与燃煤 CO₂ 排放计算,但挥发 分是反映燃烧性能的重要指标。对燃用同一类煤的 锅炉,挥发分高有利于煤的着火、稳燃和燃尽,挥 发分低则燃烧不完全,无法充分燃烧进而影响单位 煤耗 CO₂ 排放量。燃烧效率发生变化,机组热效率 及发电效率随之产生变化,发电及供电 CO₂ 排放强 度也会产生变化。因此,总的来看挥发分对 CO₂ 排 放强度影响很小。

4 空冷方式

燃煤电厂空冷方式分为直接空冷和间接空冷, 直接空冷根据通风方式分为机械通风和自然通风, 间接空冷根据配用的凝汽器不同分为表面式凝汽 器和混合式凝汽器。目前主要采用机械通风式直接 空冷系统(ACC)和表面式间接空冷系统(ISC)。

ACC 是指汽轮机排汽直接用空气冷凝,空气与 蒸汽进行热交换,其工艺流程为汽轮机排汽通过管 道排至室外空冷凝汽器内,轴流冷却风机使空气流 过冷凝器外表面,将排汽冷凝成水,凝结水送回锅 炉回用。该系统的主要特点是冷却效率高、占地面 积小、初期投资较小,但运行时噪音大、受环境风 影响大、真空系统庞大、厂用电高。

ISC 是指汽轮机排汽以水为中间介质,将排汽 与空气之间的热交换分 2 次进行:一次为蒸汽与冷 却水之间在表面式凝汽器中换热,一次为冷却水和 空气在空冷塔里换热。其工艺流程为汽轮机排汽进 入凝汽器,由凝汽器管束内的冷却水进行表面换 热,凝汽器循环水排水由循环水泵打至塔内空冷散 热器,冷却水出水回到汽轮机房凝汽器内作闭式循 环。该系统的主要特点是运行噪声小、对环境条件 敏感程度较 ACC 略低,但冷却塔占地面积大,塔外 布置的冷却器受环境风影响大,防冻控制繁琐。

从上述对比分析不难看出,空气冷却系统对燃 煤电厂发电 CO₂排放强度基本无影响,但因不同空 冷系统厂用电消耗差异较大,对电厂供电 CO₂排放 强度带来影响。本文对 18 台直接空冷、20 台间接 空冷机组的供电 CO₂排放强度对比分析,其结果如 图 5 所示。



图 5 不同空冷系统的机组供电 CO₂排放强度 Fig.5 Relationship between CO₂ emission intensity of power supply and air cooling system

由图 5 可以看出,对于不同容量机组,ACC 因 其自身厂用电消耗较高,其供电 CO₂ 排放强度均相 对较高,如 600 MW 级、1 000 MW 级 ACC 机组相 比 ISC 机组,供电 CO₂ 排放强度增加约 5%。

5 其他因素

5.1 排烟方式

燃煤电厂锅炉烟气主要通过烟囱排放。冷却塔 排放烟气(又称"烟塔合一")取消烟囱建设,充分 利用冷却塔巨大的热量加热空气,对烟气形成包裹 和抬升,以增加烟气排放高度,扩大烟气扩散范围, 降低污染物落地浓度,且占地小投资省,近年来广 受青睐,在数十家燃煤电厂中得到成功应用^[13-14]。 烟囱排烟和冷却塔排烟示意如图 6 所示。不同排烟 方式的厂用电消耗存在差异,因此排放方式影响电 厂供电 CO₂排放强度,但对燃煤电厂发电 CO₂排放 强度并无影响。



a)烟囱排烟



b)冷却塔排烟

图 6 烟囱排烟和冷却塔排烟 Fig.6 The exhaust from stack and from cooling tower

通过对大量 350、600、1 000 MW 机组采用不 同排烟方式进行对比发现,采用烟塔合一(相比烟 囱)年均增加机组电耗约 200 kW,对整个电厂的厂 用电率影响甚微,对电厂供电 CO₂排放强度影响很 小。对宁东某 2×660 MW 烟塔合一机组研究表明: 全厂年均发电、供电 CO₂排放强度分别为 0.786、 0.828 t/(MW h),在该地区同类型机组中,处于较优 水平。因此,排烟方式对机组的 CO₂排放强度影响 极小,可以忽略不计。

5.2 环境温度

环境温度直接影响燃煤电厂锅炉空气预热器 入口空气温度,空气预热器入口空气温度变化导致 锅炉排烟温度随之改变,进而影响锅炉效率。有研 究表明^[15]:若某 300 MW 机组在夏季期间运行时平 均环境温度取 25 ℃,冬季期间运行时平均环境温 度取 0 ℃,因环境温度升高导致机组在夏季期间运 行时(与冬季相比)煤耗升高 3.25 g/(kW h)。参照本 研究中 38 台机组的标煤 CO₂ 排放系数 2.86,上述煤 耗升高引起 CO₂ 排放强度增加约 0.009 t/(MW h)。可 见,一定温度范围内,因环境温度升高,一般会带 来机组煤耗和 CO₂ 排放强度略有升高。

6 结论与建议

1) 燃煤发电机组碳排放强度受机组容量、锅炉 型式、机组负荷、燃煤品质、空冷方式等多重因素 影响。高参数、大容量机组因蒸汽参数、热效率等 同步提升, CO₂ 排放强度相对较低。从碳排放强度 看,燃煤机组坚持走大容量、高参数发展路线是减 碳的重要举措之一。

2)机组负荷率直接影响机组发电及供电效率。 负荷下降时,CO₂排放强度会呈现增大趋势。随着 燃煤机组运行灵活性和调峰率日渐提升,数量庞大 的燃煤机组投入深度调峰,单台机组全年平均负荷 率日趋下滑,对降低全行业机组整体碳排放强度不 利。建议在保障电力系统安全的前提下,淘汰落后 机组,优化调峰机组数量,提升单台机组运行负荷, 提高能源利用效率。

3)燃煤单位热值含碳量及碳氧化率直接影响 CO₂排放,二者呈正相关。硫分影响脱硫过程 CO₂ 排放,但脱硫过程 CO₂排放占比低。

4) ACC 空冷方式因厂用电消耗较高,供电 CO₂ 排放强度相对较高。排烟方式、环境温度对 CO₂排 放强度影响可以忽略不计。

第1期

[参考文献]

- [1] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL].(2020-09-22)[2021-08-28].http://www.Xinhuanet.com/2020-09/22/c_1126527652.htm.
 XI Jinping. Address at the general debate of the 75th united nations general assembly[EB/OL].(2020-09-22)[2021-08-28].http://www.xinhuanet.com/2020-09/22/c_1126527652.htm.
- [2] 中华人民共和国生态环境部.中华人民共和国气候变化 第三次国家信息通报[R/OL]. (2019-07-01) [2021-08-28]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/201907/P0 20190701762678052438.pdf.
 Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. The third national communication on climate change of the People's Republic of China[R/OL]. (2019-07-01) [2021-08-28]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/
- ydqhbh/wsqtkz/201907/P020190701762678052438.pdf. [3] 中华人民共和国生态环境部.中华人民共和国气候变化 第二次两年更新报告[R/OL]. (2019-07-01) [2021-08-28]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/201907/P0 20190701765971866571.pdf. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Second biennial update report on climate change of the People's Republic of China[R/OL]. (2019-07-01) [2021-08-28]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/ ydqhbh/wsqtkz/201907/P020190701765971866571.pdf. [4] 中国电力企业联合会 中国燃煤电厂士气运路物控制
- [4] 中国电力企业联合会.中国燃煤电厂大气污染物控制 现状 2009[M].北京:中国电力出版社,2009:2-15.
 China Electricity Council. The current status of air pollution controlfor coal-fired power plants in China 2009[M]. Beijing: China ElectricPower Press, 2009: 2-15.
- [5] 苏燊燊,赵锦洋,胡建信.中国电力行业 1990-2020 年 温室气体排放研究[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(5): 353-362.
 SU Shenshen, ZHAO Jinyang, HU Jianxin. Grennhouse gas emission from power sector in China from 1990 to 2050[J]. Climate Change Research, 2015, 11(5): 353-362.
- [6] 国家发展和改革委员会. 中国发电企业温室气体排放 核算方法与报告指南(试行)[S/OL]. (2013-10-15) [2021-08-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/W0 20190905508183676844.pdf.
 National Development and Reform Commision. Guidelines for accounting methods and reporting of greenhouse gas emissions by Chinese power generation enterprises (for Trial Implementation)[S/OL]. (2013-10-15) [2021-08-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ tz/201311/W020190905508183676844.pdf.
- [7] 高建强, 宋铜铜, 杨东江. 燃煤发电机组碳排放折算 方法研究与应用[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 88-92.
 GAO Jianqiang, SONG Tongtong, YANG Dongjiang. Research and application of carbon emission conversion

method for coal-fired generating units[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 88-92.

- [8] 盖志杰, 王鹏辉. 燃煤电厂碳排放典型计算及分析[J].
 中国电力, 2017, 50(5): 178-184.
 GAI Zhijie, WANG Penghui. A typical calculation and analysis of carbon emissions from coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 178-184.
- [9] 刘睿, 翟相彬. 中国燃煤电厂碳排放量计算及分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1164-1169.
 LIU Rui, ZHAI Xiangbin. Calculation of carbon emissions from China coal plants and the reduction suggestion[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1164-1169.
- [10] 王倩, 王卫良, 刘敏, 等. 超(超)临界燃煤发电技术发展与展望[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.
- [11] 刘福国,蒋学霞,李志. 燃煤发电机组负荷率影响供 电煤耗的研究[J]. 电站系统工程, 2008, 24(4): 47-49. LIU Fuguo, JIANG Xuexia, LI Zhi. Investigation on affects of generator load on coal consumption rate in fossil power plant[J]. Power System Engineering, 2008, 24(4): 47-49.
- [12] 佘园元,高登攀,张厚昌,等.基于不同煤种的全运行 负荷下机组运行经济性研究[J].热力发电,2021, 50(3): 63-69.
 SHE Yuanyuan, GAO Dengpan, ZHANG Houchang, et al. Economy study for units running at full load burning coals with different calorific values[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 63-69.
- [13] 汤蕴琳. 火电厂"烟塔合一"技术的应用[J]. 电力建设, 2005, 26(2): 11-12.
 TANG Yunlin. Application of technology for "combining stack and cooling tower into one" in coal-fired power plants[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(2): 11-12.
- [14] 张仁锋, 苏燊燊, 马继军, 等. 烟塔合一的环境影响实 证研究[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 162-169.
 ZHANG Renfeng, SU Shenshen, MA Jijun, et al. An empirical study on environmental impact of the integration of the natural draft cooling tower and the flue gas[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 162-169.
- [15] 翟培强.环境温度变化对锅炉效率的影响[J]. 华中电力, 2005, 18(2): 49-53.
 ZHAI Peiqiang. Influence on boiler efficiency for the change of environment temperature[J]. Central China Electric Power, 2005, 18(2): 49-53.

(责任编辑 刘永强)