

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403050

循环流化床炉生物质掺烧降碳技术研究

吴丽萍¹, 李民杰², 陈思雨², 高江鹏¹, 金余其²

(1.新疆宇澄热力股份有限公司, 新疆 克拉玛依 834000;

2.浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

[摘要] 火电行业的降碳工作直接关系到“双碳”目标的实现, 而循环流化床炉具有燃料适用性广的优势, 能够大比例掺烧可再生“零碳”能源-生物质燃料, 大幅降低火电厂碳排放。在役循环流化床炉和燃煤条件, 进行生物质混合掺烧试验, 并对燃烧稳定性、污染物排放及热效率进行了综合评估。掺烧试验结果表明: 生产单位蒸汽煤耗量随掺烧比增大显著降低, 燃烧工况稳定; 掺烧条件下单位石灰石耗量降至4.5 kg/t蒸汽左右, SO₂排放量达标; 掺烧后炉内温度升高, 排烟温度升高, 而飞灰量增大, 使热损失有所增大; 通过调控风量配比、料层差压及过量空气系数, 总体热效率接近设计值; 长期运行条件下, 生物质掺烧比达到约30%, SO₂和NO_x排放量合格, 尾部受热面未受明显腐蚀, 1 t蒸汽减排CO₂量约480 kg。

[关键词] 循环流化床; 生物质; 碳排放

[引用本文格式] 吴丽萍, 李民杰, 陈思雨, 等. 循环流化床炉生物质掺烧降碳技术研究[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 144-150.
WU Liping, LI Minjie, CHEN Siyu, et al. Study on carbon emission reduction via co-firing biomass in circulating fluidized bed boilers[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 144-150.

Study on carbon emission reduction via co-firing biomass in circulating fluidized bed boilers

WU Liping¹, LI Minjie², CHEN Siyu², GAO Jiangpeng¹, JIN Yuqi²

(1.Xinjiang Yucheng Thermal Power Co., Ltd., Karamay 834000, China;

2.State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Decarbonization in thermal power industry is directly related to the realization of the “double carbon” target, while the circulating fluidized bed boiler has the advantages of wide fuel applicability and can carry out large-scale fuel blending. Biomass fuel is a renewable “zero-carbon” energy source, its blending can greatly reduce the carbon emissions of thermal power plants. Based on the existing circulating fluidized bed boilers and coal-fired conditions, biomass co-firing tests were conducted, and comprehensive evaluation was also carried out on combustion stability, pollutant emissions, and thermal efficiency. The co-firing experiments results showed that, as the co-firing ratio increased, the coal consumption rate per unit of steam production significantly decreased, with stable combustion conditions maintained throughout the process. Under co-firing conditions, the consumption of limestone decreased to approximately 4.5 kg for 1 ton steam production, with SO₂ emissions meeting the standards. Blending raised the furnace temperature, elevated the exhaust temperature, increased the fly ash content, and slightly increased the heat loss. Through regulating the air volume ratio, material layer pressure difference and excess air coefficient, the overall thermal efficiency closely approached the design value. Under long-term operating conditions, the blending ratio of biomass reached about 30%, and the emissions of SO₂ and NO_x were qualified. The tail heat exchanger was not corroded obviously, and the CO₂ emission reduction amount reached about 480 kg for 1 ton steam production.

Key words: circulating fluidized bed; biomass; carbon emissions

在全球气候变化的严峻形势下, 我国积极承担大国责任, 提出“双碳”目标^[1], 这对我国能源结

构的优化升级提出了更高要求。虽然风、光新能源已取得长足发展, 但其调节能力存在先天不足, 无

收稿日期: 2024-03-22

第一作者简介: 吴丽萍 (1975), 女, 高级工程师, 主要研究方向为油田稠油热采设备、技术管理, 燃煤流化床注汽锅炉技术, 燃气直流注汽锅炉技术, 油田水处理技术等, 1446321472@qq.com。

通信作者简介: 金余其 (1971), 男, 研究员, 主要研究方向为工程热物理和固废焚烧技术, jinyuqi@zju.edu.cn。

法独立保障我国电力能源的安全稳定^[2]。基于我国以煤电为主的电力产供销结构,燃煤机组的低碳转型与减排效果直接关系到“双碳”目标的实现^[3]。为此,能源行业提出“前端降碳、中端替碳、后端固碳”的发展思路,其中“中端替碳”为攻关生物质混合燃料掺烧技术,降低燃煤消耗量。

生物质是“零碳”燃料,能够替代燃煤燃烧,达到降碳作用,已应用于多种燃烧方式^[4-5]。在燃煤锅炉中,循环流化床锅炉具有燃料种类适应性广、经济性好及运行范围灵活等优势^[6],对掺烧生物质具有良好的适应性^[7]。因此,能源行业为实现“双碳”目标,构建以新能源为主体的火电厂稠油热采系统,需要发挥流化床锅炉的灵活性优势,发展生物质掺烧新技术^[8]。

本文根据当地生物质燃料供应情况,选取杂木生物质颗粒作为燃料,基于已建成的循环流化床锅炉和现有燃煤条件开展掺烧试验,通过分析对燃料特性、热效率、污染物排放、受热面情况及减碳量,得到了实际工程中生物质掺烧方式的减碳效果及其对循环流化床锅炉综合影响数据,为后续研究和掺烧方式的推广提供了改进方向和应用策略。

1 试验材料与方法

1.1 生物质和煤

当地生物质企业主要提供秸秆、杂木和松木生物质颗粒,生物质颗粒照片如图 1 所示,表 1 为生物质和煤的工业分析。根据表 1 的数据可知,杂木

松木生物质燃料的发热量接近现用煤,且含硫量较低,掺烧时对锅炉的影响最小。图 1b)显示,秸秆和杂木颗粒压制后均呈现密实的状态;图 1c)则显示,杂木颗粒更易产生明火,这与更高的挥发分含量有关。考虑到杂木颗粒经济性更好,因此本次掺烧试验选用杂木生物质颗粒作为生物质燃料。将杂木颗粒压制成柱状满足循环流化床锅炉对物料粒径($\leq 10\text{ mm}$)的要求,以适用于现有上料系统。



1—秸秆颗粒; 2—杂木颗粒; 3—松木颗粒。

图 1 生物质颗粒照片

Fig.1 Photos of the biomass particles

由表 1 可见:掺烧用煤热值达到 17 MJ/kg 以上;其中 1 号煤水分、硫分稍高,性价比最高;2 号煤热值高,价格也高,可与低热值煤掺混使用;3 号和 4 号煤热值、价格适中。

1.2 试验平台及方法

本研究试验平台包括 2 个供汽站,4 台燃煤锅炉。其中,第一、二供汽站均包含 2 台锅炉,即 1-1 号炉和 1-2 号锅炉,以及 2-1 号锅炉和 2-2 号锅炉,涉及锅炉参数见表 2。

表 1 生物质和煤工业分析
Tab.1 Proximate analysis for biomass and coal

种类	编号	$w_{ar}(A)/\%$	$w_{ar}(V)/\%$	$w_{ar}(FC)/\%$	$w_{ar}(M)/\%$	$w_{ar}(S)/\%$	低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)
生物质	1 (秸秆)	10.1	58.3	18.4	9.0	0.3	14.55
	2 (杂木)	5.9	70.3	15.8	5.1	0.1	17.14
	3 (松木)	1.0	79.6	14.9	5.9	0	18.33
煤	1	15.0	37.1	28.1	19.8	0.4	18.07
	2	9.8	34.2	39.8	16.2		21.88
	3	15.4	34.6	33.0	17.0	0.5	19.26
	4	18.4	35.1	28.5	18.0	0.5	17.41

试验所用掺混方法为,每隔 12 h 使用装载机分别将煤与生物质燃料按比例铲入落煤口内,最终汇入炉前煤仓后,通过给煤机进入炉膛参与燃烧。2022 年 5 月—7 月进行第一阶段掺烧试验,用于评估掺烧对锅炉的影响,确定掺烧比,结果见表 3。

其中,每铲生物质质量约 2.2 t,每铲煤质量约 3.5 t。2023 年进行第二阶段长期连续运行试验,生物质掺烧比为 25%~30%,采用预先掺混方式,使低位热值稳定在 19.3 MJ/kg 左右。

表 2 锅炉参数
Tab.2 The boiler parameters

项目	第一供汽站	第二供汽站
额定蒸发量/(t·h ⁻¹)	130	130
额定蒸汽压力/MPa	14.00	9.81
额定蒸汽温度/℃	350	332
锅炉排烟 50%负荷 温度/℃	≥120	≥120
100%负荷 温度/℃	≤140	≤140
锅炉保证热效率/%	≥90	≥90
锅炉运行负荷范围/(t·h ⁻¹)	39~130	39~130
锅炉安全稳定运行工况范围	30%~100%B-MCR	30%~100%B-MCR
排污率/%	≤10	≤10
蒸汽过热度/℃	10~30	10~30

表 3 第一阶段燃料特性
Tab.3 Fuel characteristics of phase one

序号	试验日期	生物质掺烧比/%	低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	硫质量分数/%
1	5.21—5.24	9	16.05	0.39
2-2号炉	5.25—6.02	15	17.32	0.33
3	6.03—6.14	20	17.59	0.28
4	6.15—6.17	16	17.34	0.26
2-1号炉	6.18—7.10	25	16.90	0.24
6	7.02—7.18	29	17.72	0.33

1.3 碳排放核算方法

生物质燃料碳排放按生物质折算标煤的碳排放量计算。生物质折算标煤量为：

$$FC_{sc,sub} = FC_b \times \frac{NCV_b}{NCV_{sc}} \quad (1)$$

式中：FC_{sc,sub} 为生物质的标准煤替代量，t；FC_b 为生物质的消耗量，t；NCV_b 为生物质低位发热量每天检测值，取周平均进行计算，GJ/t；NCV_{sc} 为标准煤低位发热量，取值为 29.3 GJ/t。

燃煤碳排放量为：

$$E_R = FC_{sc,sub} \times EF_{sc} \quad (2)$$

式中：E_R 为生物质燃料碳排放量，t；EF_{sc} 为燃煤的二氧化碳排放因子，CO₂ 排放质量与标准燃煤质量比，取 2.54。

2 试验结果及分析

2.1 煤耗及运行状况分析

图 2 为第一阶段试验掺烧配比和煤单耗（生产 1 t 蒸汽所需燃煤量）变化情况。试验 1—6 分别对应 81.52、82.63、86.49、93.27、96.44、89.65 t/h 负荷。由图 2 可见：掺烧比每上升 5%，煤单耗降低 1~3 kg/t；相比于负荷区间 81~87 t/h，负荷区间 90~96 t/h 内煤单耗的降幅更大。生物质掺烧比越大，煤单耗越低，

降碳效果越好^[9-12]，但增大掺烧量引起的不利影响也会变得更明显^[13-16]。根据第一阶段试验结果，生物质掺烧量达到 25%~30%时，不会对设备造成明显不利影响。

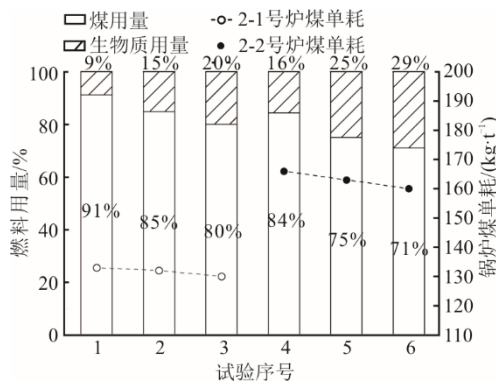


图 2 第一阶段燃料用量及煤单耗
Fig.2 Fuel consumption and coal specific consumption in phase one

2023 年第二阶段试验采用预先掺混方式，掺烧比为 25%~30%，定期对煤、生物质、飞灰、底渣 4 项进行化验分析，结合生物质底渣少、挥发分高的特性，优化控制掺烧比每周对关键参数进行优化调整。图 3 为第二阶段试验中 1、2 号供汽站煤单耗和产量趋势。

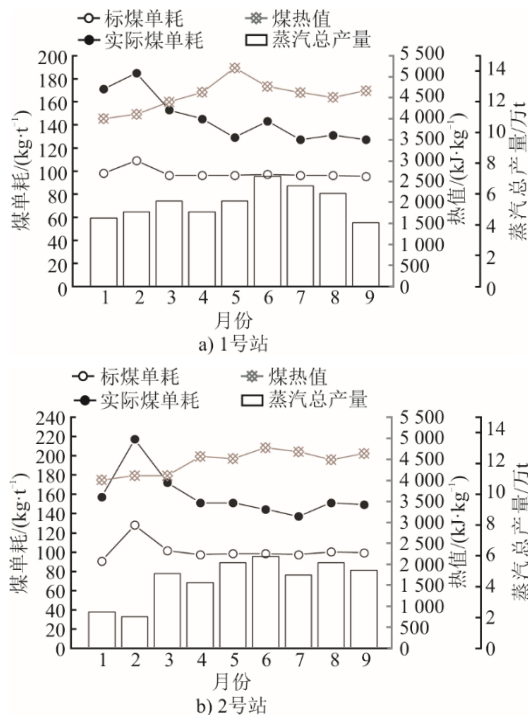


图 3 1月—9月 1、2 号站煤单耗、产量趋势分析
Fig.3 Analysis of coal consumption and production trends for No.1 and No.2 station from Jan. to Sep.

由图 3 可见，2023 年第一季度出现煤单耗高的现象。为此，试验采取“一炉一策”即对每台锅炉

的风量配比、料层差压及过量空气系数进行单独反馈调控。在后续生产中该问题得到了有效解决，其中第三季度 1、2 号供汽站生物质总体掺烧比例为 23.43%，1 号供汽站标煤单耗稳定在 97 ± 1 kg/t，2 号供汽站标煤单耗则稳定在 99 ± 2 kg/t，煤单耗趋于稳定。

2.2 热效率分析

与燃煤相比，生物质燃料自身的灰分较低^[17-18]，另外掺烧后石灰石用量会降低，因此底渣量也会减少，但生物质燃料燃烧产生低密度的灰烬会更多，因此飞灰增多^[16]。图 4 为第一阶段试验得到的燃烧温度及排烟热损失。由图 4a)可见，生物质掺烧比约 30%时，入炉物料的灰分减少约 2%，底渣量减少约 0.8 t/h，灰渣物理热损失降低约 0.1%，飞灰量则增加约 0.7 t/h，机械不完全燃烧热损失上升约 0.6%。

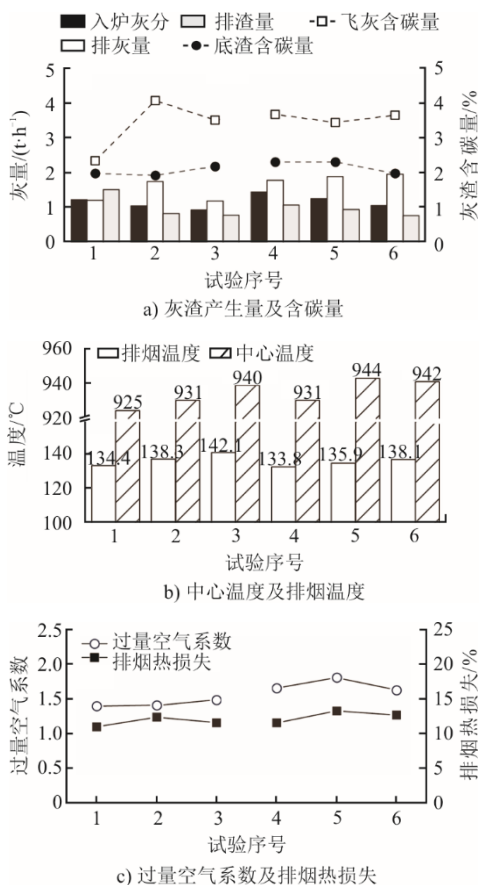


图 4 燃烧温度及排烟热损失

Fig.4 Combustion temperature and flue gas heat loss

生物质燃料的热值低于燃煤，但热量释放时间短^[19]，因此掺烧生物质时，床温变化速率快，中心区域升温较高，且所需的空气量更多^[15]。由图 4b)可见，生物质掺烧量约 30%时，炉膛中心温度上升 17 °C，过量空气系数升高 0.23，排烟温度上升 8 °C，

排烟热损失值增大 0.2%。

为降低灰渣含碳量和排烟温度，对第二阶段试验进行了调整和优化。表 4 为第一、二阶段灰渣及排烟热损失。由表 4 可见，调控有效降低了灰渣物理热损失和排烟热损失，提高了热效率。第二阶段试验中，1 号供汽站锅炉热效率实测为 89%，已接近设计效率。8 月、9 月 2 号供汽站基本只运行了 2-2 号锅炉，且受水质及设备情况影响，将中级省煤器上部集箱管线跨接至上级省煤器上部集箱管线，舍弃了上级省煤器蛇形管，导致热效率有所降低，实际热效率为 87.46%。若受热面完整，掺烧条件下的热效率将高于此数值。综上，掺烧生物质后锅炉的热效率有所降低，但总体接近设计值。

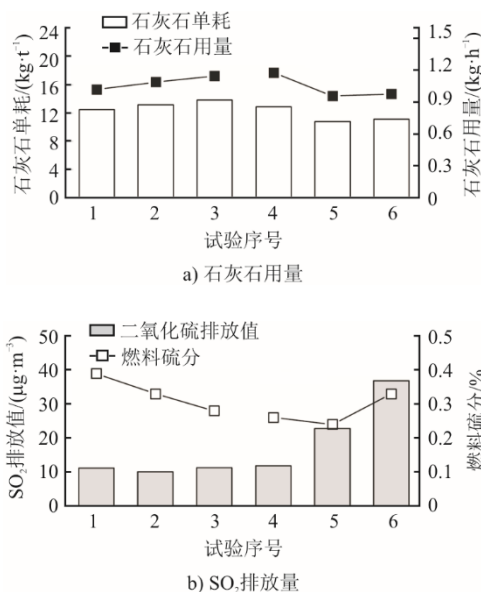
表 4 第一、二阶段灰渣及排烟热损失

Tab.4 Ash residue and flue gas heat losses in phase one and phase two

试验阶段	灰渣含碳质量分数/%	不完全燃烧热损失/%	排烟热损失/%	热效率/%	排烟温度/°C
一	4.45	1.66	11.10	85.64	151
二	2.40	0.74	9.20	87.46	144

2.3 SO₂、NO_x 排放及尾部受热面分析

掺混生物质燃料可降低入炉硫分，同时，燃烧飞灰所含碱性物质还对 SO₂ 具有一定捕获作用^[20]。因此，掺烧生物质有利于 SO₂ 减排，减少石灰石用量^[21]。第一阶段试验中的烟气 SO₂ 排放量及石灰石用量情况如图 5 所示，运行期间 SO₂ 未超标。由图 5 可见：试验 1—5 掺烧比每增加 5%，入炉燃料硫分约降低 0.06%；但试验 6 出现了燃料硫分和 SO₂ 排放值升高的现象，这是由于燃煤煤质变化。



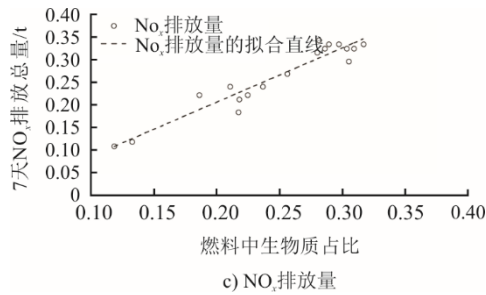


图 5 石灰石用量及 SO₂、NO_x 排放量
Fig.5 Lime usage and SO₂ emissions

后续试验中改进了掺混方式，有效解决了该问题。在 2023 年第三季度试验中，石灰石单耗降为 4.24 kg/t，SO₂ 排放达标，说明长期掺烧运行达到了降低石灰石用量的效果。

生物质燃料的掺烧对 NO_x 排放量的影响尚不明确^[22]。一方面，生物质氮含量一般低于原煤，主要以氨基形式存在，但氨基向 NO_x 的转化率不高^[20]。此外，生物质燃料热解产生的 CH₃ 基团和 NH₃ 基团能够将 NO_x 还原为 HCN 或 N₂^[20]。另一方面，试验平台采用选择性非催化还原（SNCR）脱硝工艺，虽然烟气温度小幅升高有利于 NO_x 的还原反应发生，但炉膛温度上升可能使热力型 NO_x 生成量提高，引起 NO_x 产量波动^[10,17,23]。图 5c)显示，在第二阶段试验中，NO_x 排放量与掺烧量表现出一定正相关性，说明掺烧量提高时，NO_x 排放量略有提高。

生物质燃料中的 Na、K 及 Cl 等元素含量高，但可提高灰熔点的 Al 含量却很低^[16]，可能加剧受热面的积灰、腐蚀^[24-25]。经过第一阶段 58 天的掺烧试验后，对锅炉尾部受热面情况在掺烧试验前后的积灰、腐蚀情况进行对比，结果如图 6 所示。

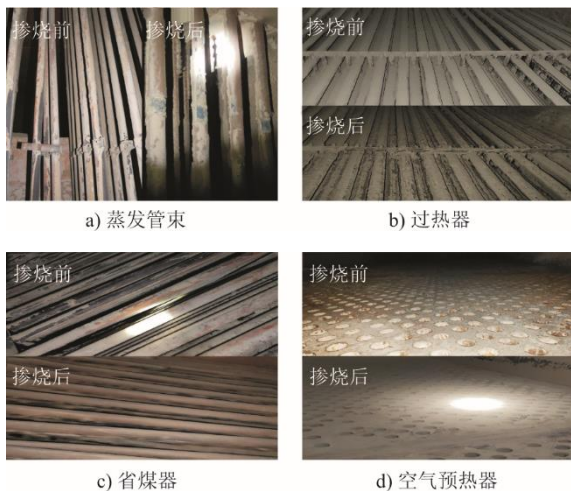


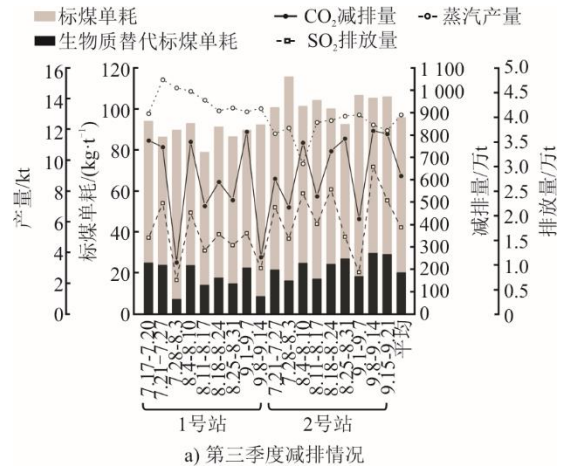
图 6 掺烧前后尾部受热面情况

Fig.6 The situation of tail heating surface conditions before and after co-firing

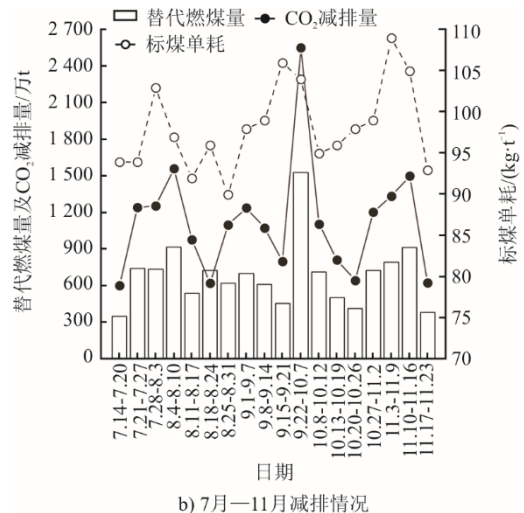
由图 6 可以发现，蒸发管束、过热器、省煤器、空气预热器表面无明显变化，管束上都为浮灰及松软的灰粘结，未出现尾部受热面管束表面板结、结焦或严重腐蚀情况。可见，掺烧生物质不会在短期内引起严重的腐蚀、积灰现象，但需要重视除灰工作以避免粘结的灰长期累积。

2.4 CO₂ 减排量分析

图 7 为 CO₂ 减排情况。由图 7a)可见，在第三季度试验中，燃料单位消耗水平与负荷呈负相关，而 CO₂ 减排量的变化趋势则与掺烧量变化趋势相同。第三季度累计生产蒸汽 23.4 万 t，平均标煤单耗 95.97 kg/t，能耗水平低于第一、二季度。第三季度 CO₂ 减排量达到 1.1 万 t，平均减排量为 179.8 t/d，折合约 480 kg/t 蒸汽。10 月—11 月能耗水平略有提高，故 7 月—11 月平均标煤单耗达到 98.14 kg/t，期间 CO₂ 减排量达到 2.1 万 t，平均减排量为 128.8 t/d。此外，图 7a)还显示，SO₂ 的排放量与掺烧量变化存在正相关，虽然排放并未超标但需要加强运行控制。



a) 第三季度减排情况



b) 7月—11月减排情况

图 7 CO₂ 减排情况
Fig.7 The CO₂ emission reduction status

3 结 论

生物质作为一种“零碳”燃料,在燃煤替代方面具有良好的应用前景,而循环流化床燃煤锅炉能够充分发挥适应性强的优势,达到大比例稳定掺烧。循环流化床锅炉掺烧生物质时,应加强风量配比、料层差压及过量空气系数的反馈调控,并确保入炉燃料热值稳定,从而使锅炉运行状况稳定,提高热效率。

1) 在 25%~30% 生物质掺烧工况下,锅炉运行稳定,受热面未明显积灰、腐蚀,污染物排放达标。 CO_2 减排量达到约 480 kg/t 蒸汽,理论 SO_2 排放量下降,石灰石用量降低。

2) 与未进行生物质掺烧相比,底渣量减少,冷渣机负荷降低,提高了锅炉带负荷能力。在锅炉内循环渣量下降的情况下,通过调整一、二次风量配比,使掺烧料层低于原煤料层,达到了节电效果。

3) 可根据锅炉需求,调控掺烧热值,调整经济运行负荷区间。

但掺烧生物质也存在以下问题: 1) 生物质热量释放时间短,着火点高,不适用于点炉初期,不利于长期在煤仓中混存; 2) 炉内温度升高,排烟温度升高,排烟热损失增大,存在高温腐蚀以及尾部受热面腐蚀加剧的可能性; 3) 飞灰量增大,除尘器磨损增加,机械不完全燃烧热损失升高,且飞灰碱金属氯化物含量增大,可能加剧腐蚀。

[参 考 文 献]

- [1] 习近平. 中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达峰及 2060 年前实现碳中和[N/OL]. 新华社, 2022-02-16. http://www.cnenergynews.cn/zhuanti/2022/02/16/detail_20220216117678.html.
XI Jinping. China aims to peak CO_2 emissions before 2030 and achieve carbon neutrality before 2060[N/OL]. Xinhua News Agency, 2022-02-16. http://www.cnenergynews.cn/zhuanti/2022/02/16/detail_20220216117678.html.
- [2] 周义, 张守玉, 郎森, 等. 煤粉炉掺烧生物质发电技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 26-34.
ZHOU Yi, ZHANG Shouyu, LANG Sen, et al. Progress in research on biomass co-firing technology in pulverized coal boilers[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(6): 26-34.
- [3] 吕俊复, 周托, 张扬, 等. 碳中和目标下的循环流化床锅炉技术展望[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1005-1012.
LYU Junfu, ZHOU Tuo, ZHANG Yang, et al. Prospects of circulating fluidized bed boiler technology under the goal of carbon neutrality[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1005-1012.
- [4] 任琼, 邢献军, 马培勇, 等. 生物质热解炭与煤混合燃烧特性及动力学研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(7): 886-893.
REN Qiong, XING Xianjun, MA Peiyong, et al. Combustion characteristics and kinetics of biomass pyrolysis char mixed with coal[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2022, 45(7): 886-893.
- [5] 范浩东, 单雄飞, 张缦, 等. 生物质流化床结渣、沾污特性及抑制方法研究进展[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(增刊 1): 1-6.
FAN Haodong, SHAN Xiongfei, ZHANG Man, et al. Research progress on slagging, fouling characteristics, and inhibition methods in biomass fluidized beds[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(Suppl.1): 1-6.
- [6] 姜华伟, 袁淼, 袁野, 等. 燃煤循环流化床锅炉混燃污泥研究与应用进展[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 11-20.
JIANG Huawei, YUAN Miao, YUAN Ye, et al. Research and application progress on co-combustion of sewage sludge in coal-fired circulating fluidized bed boilers[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 11-20.
- [7] 赵鹏勃, 李楠, 袁野, 等. 垃圾衍生燃料耦合燃煤流化床燃烧特性研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(9): 752-757.
ZHAO Pengbo, LI Nan, YUAN Ye, et al. Research on combustion characteristics of refuse-derived fuel coupled with coal in circulating fluidized bed[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(9): 752-757.
- [8] 谭厚章, 杨富鑫, 阮仁晖, 等. 掺烧生物质对 660 MW 燃煤机组锅炉影响研究[J]. 热力发电, 2022, 51(4): 23-29.
TAN Houzhang, YANG Fuxin, RUAN Renhui, et al. Study on the effects of biomass co-firing on a 660 MW coal-fired unit boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4): 23-29.
- [9] 马辉, 汪海洋, 韩辉, 等. 多种生物质与煤掺混燃烧特性研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 167-172.
MA Hui, WANG Chaoyang, HAN Hui, et al. Study on combustion characteristics of various biomass blends with coal[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 167-172.
- [10] 王喆江, 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 technologies under the “Dual Carbon” goals[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 52-59.
- [11] 高清林, 高嘉琦, 李毅, 等. 燃煤机组耦合生物质直燃发电综合分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(12): 1571-1578.
GAO Qinglin, GAO Jiaqi, LI Yi, et al. Comprehensive analysis of coal-fired units coupled with biomass direct combustion power generation[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(12): 1571-1578.
- [12] YANG B, WEI Y M, HOU Y B, et al. Life cycle environmental impact assessment of fuel mix-based biomass co-firing plants with CO_2 capture and storage[J]. Applied Energy, 2019, 252: 113483.
- [13] 刘向民, 张津铭, 张涛, 等. 燃煤流化床锅炉耦合含碳废弃物燃烧技术研究进展[J/OL]. 洁净煤技术, 1-15. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.23072501>.
LIU Xiangmin, ZHANG Jinming, ZHANG Tao, et al. Research progress on coupling coal-fired fluidized bed boilers with carbon-containing waste combustion technology[J/OL]. Clean Coal Technology, 1-15. <https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.23072501>.

- doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.23072501.
- [14] KUMAR H., MOHAPATRA S, SINGH R, et al. CFD analysis of a fluidized bed combustor based on co-firing[C]. Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2015, 8A: 2016.
- [15] SILVENNOINEN J, HEDMAN M. Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler[J]. Impacts of Fuel Quality on Power Production and Environment, 2013, 105: 11-19.
- [16] BHUIYAN A A, BLICBLAU A S, ISLAM A K M S, et al. A review on thermo-chemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace[J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 91(1): 1-18.
- [17] 王一坤, 邓磊, 贾兆鹏, 等. 燃煤机组大比例直接耦合生物质发电对机组影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(12): 80-91.
WANG Yikun, DENG Lei, JIA Zhaopeng, et al. Study on the impact of large-scale direct coupling of biomass power generation with coal-fired units on the units[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12): 80-91.
- [18] WANG C, ZHU X, LIU X, et al. Correlations of chemical properties of high-alkali solid fuels: a comparative study between Zhundong coal and biomass[J]. Fuel, 2018, 211: 629-637.
- [19] 刘苏楠, 周劲松, 项阳阳, 等. 基于生物质工业分析的高位热值预测[J]. 热力发电, 2018, 47(12): 41-46.
LIU Sunan, ZHOU Jinsong, XIANG Yangyang, et al. Prediction of high calorific value based on industrial analysis of biomass[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 41-46.
- [20] 郭慧娜, 吴玉新, 王学斌, 等. 燃煤机组耦合农林生物质发电技术现状及展望[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 12-22.
GUO Huina, WU Yuxin, WANG Xuebin, et al. Current status and prospects of coal-fired unit coupling with agricultural and forestry biomass power generation technology[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 12-22.
- [21] ROKNI E, REN X, PANAH A, et al. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels[J]. Fuel, 2018, 211: 363-374.
- [22] WIELGOSINSKI G, LECHTANSKA P, NAMIECINSKA O. Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion[J]. Journal of the Energy Institute, 2017, 90(5): 787-796.
- [23] 刘宁, 魏博, 王珊, 等. 棉秆掺烧对燃煤锅炉燃烧特性影响的数值模拟研究[J]. 锅炉技术, 2024, 55(2): 1-6.
LIU Ning, WEI Bo, WANG Shan, et al. Numerical simulation study on the effect of cotton stalk co-firing on the combustion characteristics of coal-fired boilers[J]. Boiler Technology, 2024, 55(2): 1-6.
- [24] 马宇宸, 张一珍, 汤薛玉, 等. 活性添加剂对生物质循环流化床燃烧特性影响研究进展[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231221>.
MA Yuchen, ZHANG Yizhen, TANG Xueyu, et al. Research progress on the influence of active additives on the combustion characteristics of biomass circulating fluidized bed[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-14. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231221>.
- [25] MA X, LI F, MA M, et al. Investigation on blended ash fusibility characteristics of biomass and coal with high silica-alumina[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(8): 7941-7951.

(责任编辑 杨嘉蕾)