

240 t/h 循环流化床锅炉超低负荷试验研究

朱建国^{1,2}, 韩会忠³, 吕清刚^{1,2}, 刘敬樟¹, 李 栋³, 李怀坡³

(1. 中国科学院工程热物理研究所 煤炭高效低碳利用全国重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049;

3. 兖州市银河电力有限公司, 山东 兖州 272100)

摘 要: 循环流化床锅炉在超低负荷运行时, 存在煤耗高、主汽温度低和 NO_x 排放值无法满足 50 mg/m^3 以下环保限值的技术瓶颈, 严重制约了循环流化床锅炉的深度灵活调峰应用。在 1 台 240 t/h 高温高压循环流化床锅炉的炉膛两侧墙, 各耦合了 1 支 24 MW 煤粉流态化自预热器, 通过循环流化床主炉膛给粒煤和预热器给粉耦合燃烧方式, 提升循环流化床低负荷燃烧的炉膛上部温度, 并利用预热燃料还原循环流化床密相区已生成 NO_x 的技术思路, 破解循环流化床锅炉低负荷燃烧的技术难题。结果表明: 煤粉自预热温度达到 800°C 以上, 实现了锅炉负荷 25%(预热给粉 15%+主炉膛给煤 10%) 和锅炉负荷 20%(预热给粉 10%+主炉膛给煤 10%) 的稳定运行, 且在超低负荷下, 仅通过炉内喷氨, NO_x 原始排放分别为 38.2 和 47.5 mg/m^3 , 均达到了超低 NO_x 排放标准, 锅炉热效率分别为 91.52% 和 91.09% 。锅炉负荷 25% 和 20% 时, 循环流化床主炉膛密相区温度均高于 750°C , 且锅炉负荷 25% 时, 主炉膛出口温度达到 670°C , 形成了循环流化床锅炉超低负荷稳定、高效、清洁燃烧的技术方案和运行方式。试验研究结果为循环流化床锅炉深度灵活调峰技术研发和工程应用提供了重要支撑。

关键词: 240 t/h 循环流化床锅炉; 煤粉预热; 超低负荷; 超低 NO_x ; 灵活燃烧

中图分类号: TK16; TQ534.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2026)01-0752-10

Experimental investigation of 240 t/h circulating fluidized bed boiler under ultra-low load conditions

ZHU Jianguo^{1,2}, HAN Huizhong³, LYU Qinggang^{1,2}, LIU Jingzhang¹, LI Dong³, LI Huaipo³

(1. State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. College of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Yanzhou Yinhe Electric Power Co., Ltd., Yanzhou 272100, China)

Abstract: Circulating fluidized bed (CFB) boiler with low load operation is facing technical challenges, including high coal consumption amount, low main steam temperature, and extremely difficult satisfaction to ultra-low NO_x emission regulation of 50 mg/m^3 , which all severely limited the industrial application of the deep peak-shaving technology of CFB boiler. A new technological route was proposed and adopted in a 240 t/h CFB boiler, with two fluidized self-preheaters (heat capacity: 24 MW) installed in the left side wall and right side wall, respectively. By coupling particle coal supplied into the main furnace of the CFB and pulverized coal supplied into the preheater, the upper temperature of the main furnace was increased, the reduction efficiency of NO_x with preheated fuel was enforced, and the technical problems was ex-

收稿日期: 2025-01-15 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 陈思成 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2025.0064

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项课题资助项目 (XDA29010100)

作者简介: 朱建国 (1977—), 男, 山东巨野人, 正高级工程师, 博士生导师, 博士。E-mail: zhujianguo@iet.cn

引用格式: 朱建国, 韩会忠, 吕清刚, 等. 240 t/h 循环流化床锅炉超低负荷试验研究[J]. 煤炭学报, 2026, 51(1): 752-761.

ZHU Jianguo, HAN Huizhong, LYU Qinggang, et al. Experimental investigation of 240 t/h circulating fluidized bed boiler under ultra-low load conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2026, 51(1): 752-761.



移动阅读

pected to be solved for CFB boiler with low load combustion. The investigation results show that the self-preheating temperature of pulverized coal in the preheater is higher than 800 °C, and the stable operations separately in 25% load and 20% load were achieved. Also only with NH₃ injection into the furnace, the NO_x emission were 38.2 mg/m³ in 25% load and 47.5 mg/m³ in 20% load, satisfying the regulation of ultra-low NO_x emissions. With the ultra-low load, the temperature in the dense zone of the main furnace is over 750 °C, creating a beneficial condition for high-efficient combustion of coal particles supplied into the CFB. When the boiler load being 25%, the outlet temperature of the main furnace is over 670 °C, forming a technical scheme of stable, high-efficient, and clean combustion with ultra-low load. The experimental results provide important support for research development and industrial application on the deep and flexible peak-shaving of CFB boiler.

Key words: 240 t/h circulating fluidized bed boiler; pulverized coal preheating; ultra-low load; ultra-low NO_x; flexible combustion

0 引 言

二氧化碳 (CO₂) 是导致全球气候变暖的重要温室气体, 限制 CO₂ 排放是全球的共同事业。2023 年, 中国人均 CO₂ 排放量为 6.9 t^[1], 约为美国的 50%。2020 年, 中国政府提出“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”。实现“碳达峰、碳中和”是中国向世界的庄严承诺和切实履行的重大目标。燃煤电站锅炉的 CO₂ 排放占我国总 CO₂ 排放的 40% 以上, 是排放 CO₂ 的最大主体^[2]。近年来, 国家增加了可再生能源包括光伏和风电的装机容量, 2023 年, 可再生能源装机容量为 14.5 亿 kW, 煤电装机容量为 11.6 亿 kW, 可再生能源装机容量已超过了传统煤电^[3]。但 2023 年, 煤电发电占比依然超过 60%, 煤电发电仍是中国电力的最大来源^[4]。但随着可再生能源装机和发电的进一步增加, 迫切需要燃煤锅炉深度灵活调峰, 以平抑可再生能源电力的间歇性、不稳定性和波动性, 并充分消纳可再生能源电力, 减少化石能源煤炭等消耗, 促进国家“双碳”目标的实现。“双碳”背景下, 新一代燃煤锅炉需要具有负荷调节范围宽、超低负荷高效稳定燃烧、全负荷范围内污染物排放低的技术特征^[5-6]。

循环流化床锅炉因燃料适应性广、炉内气固湍动混合强烈、炉内 NO_x 和 SO₂ 排放低等性能优势, 已实现了广泛应用^[7-8]。其中, 75~480 t/h 等级循环流化床锅炉投用数量超过 3 000 台, 2 000 t/h 等级 (660 MW) 超超临界循环流化床锅炉已于 2024 年在陕西彬长通过了 168 h 满负荷运行试验, 云南能投红河电厂 700 MW 超超临界循环流化床锅炉已完成水压试验, 中国的循环流化床锅炉技术正引领全球循环流化床锅炉技术的发展^[9-10]。但“双碳”背景下, 循环流化床锅炉也迫切需要深度灵活调峰, 以充分消纳可再生能源电力或充分利用谷底电价、在减少 CO₂ 排放的同时

创造经济效益^[11-12]。而循环流化床锅炉负荷调节范围为 30%~100%, 进一步深调特别是锅炉负荷低于 30% 时 (超低负荷) 存在能耗高、NO_x 排放难以达标等一系列瓶颈问题, 限制了循环流化床的深调^[13-14]。段守保等^[15]在 280 t/h 循环流化床锅炉上开展了研究, 利用烟气再循环条件措施的锅炉最低负荷为 50%。李宽等^[16]对 300 MW 亚临界循环流化床锅炉进行了研究, 测试锅炉最低负荷为 125 MW (41.6%), 且 NO_x 生成量高达 495 mg/m³, 炉内喷氨情况下已难以实现 NO_x 超低排放。张思海等^[17]研究了 330 MW 循环流化床锅炉深度调峰技术, 通过对机组进行给煤系统、烟气再循环、二次风、风帽等相关改造, 实现了 18% 超低负荷运行, 锅炉主蒸汽温度 518 °C、再热蒸汽温度 489 °C, 但烟气再循环过程会降低锅炉效率。清华大学吕俊复等^[18]提出了粉煤循环流化床燃烧技术, 将给煤粒径从 10 mm 以下降低到 1 mm 以下, 以实现低床存量下炉内足够高的循环速率及高效传热, 该技术正在推广应用中。

2007 年, 中国科学院工程热物理研究所吕清刚等^[19-20]首次提出了煤粉流态化自维持预热创新方法, 并相继开展了大量试验研究, 已完成 60 和 90 t/h 煤粉预热燃烧锅炉工程示范, 实现了零喷氨下的超低 NO_x 原始排放^[21-22]。2023 年, 为拓宽预热燃烧技术的应用领域, 兖州市银河电力有限公司改建了 1 号 240 t/h 高温高压循环流化床锅炉, 国内外首次耦合了煤粉流态化自预热燃烧器, 以实现锅炉负荷深度调节。运行表明, 较改造前锅炉负荷深度降低 20% 以上, 锅炉负荷均为 50% 时, 投用煤粉流态化自维持预热燃烧器后, 炉膛出口温度提升了 50 °C 以上, 主蒸汽温度提升了 22 °C, 且 50% 负荷投用煤粉流态化自维持预热燃烧器后可在零喷氨下直接实现超低 NO_x 排放, NO_x 排放值为 29 mg/m³, 但试验的锅炉最低负荷为 32%, 未在 30% 以下超低负荷阶段开展试验研究^[23]。

2024 年,笔者团队细化了循环流化床主炉膛给煤粒度,在 240 t/h 高温高压循环流化床锅炉上开展了耦合煤粉预热条件的 20% 负荷和 25% 负荷试验研究。笔者重点阐释超低负荷下的煤粉预热和循环流化床主炉膛燃烧耦合机制、温度分布特性以及污染物排放水平问题,旨在为循环流化床锅炉在超低负荷运行和控制方面提供技术和装备支持。

1 锅炉深调工艺和技改装置

1.1 锅炉负荷深调路线

循环流化床锅炉深度调峰的技术瓶颈在于低负荷炉膛温度低、NO_x 排放超标且无法控制,为破解循环流化床锅炉深度调峰的技术难题,需要革新循环流化床技术路线,中国科学院工程热物理研究所开发的循环流化床深度灵活调峰技术路线如图 1^[24]所示。

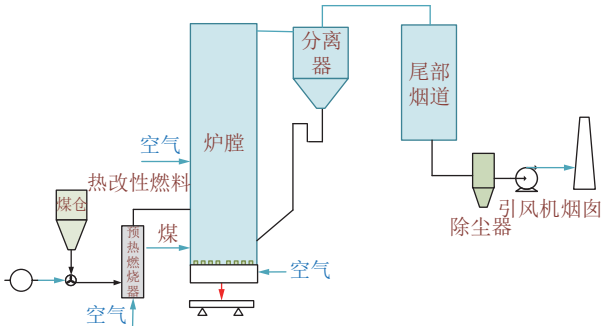


图 1 循环流化床深度灵活调峰技术路线

Fig.1 Technical route for deep and flexible peak shaving of circulating fluidized bed

该技术路线的核心思路在于常规循环流化床耦合了煤粉流态化自预热燃烧器(简称预热器),预热器运行温度为 800~950 ℃,煤粉经预热器后转化为含有高温煤气和高温焦炭的预热燃料,因预热焦炭的比表面积大、活性好,预热燃料喷入循环流化床炉膛后可在低负荷下稳定高效燃烧,破解循环流化床锅炉低负荷燃烧效率低的问题,且因预热燃料从炉膛密相区上部喷入,预热燃料燃烧可提高炉膛出口温度,增加锅炉屏式过热器和高温过热器吸热量,从而提升低负荷下的主蒸汽温度。此外,预热器内为强还原性气氛,煤粉预热过程中煤-N 的 50% 以上可转化为 N₂,预热过程实现了燃料氮的提前脱除^[25-26],这为最终实现低/超低 NO_x 排放创造了条件。循环流化床锅炉炉膛底部密相区给煤仍为粗颗粒煤,煤粒在循环流化床底部的燃烧用于保证炉膛底部床温不低于 750 ℃,始终保持热床层,为循环流化床锅炉随时用颗粒给煤提升负荷创建条件。

煤粉流态化预热器与锅炉耦合或解列方便,锅炉

可在预热器投用或不投用条件下灵活运行。

1.2 预热器与锅炉耦合方式

240 t/h 循环流化床锅炉原设计参数见表 1,其中蒸汽压力为 9.81 MPa,蒸汽温度为 540 ℃,给水温度为 215 ℃,排烟温度为 140 ℃。

表 1 锅炉设计参数
Table 1 Boiler design parameters

参数	数值
额定蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	240
蒸汽压力/MPa	9.81
蒸汽温度/℃	540
给水温度/℃	215
冷空气温度/℃	30
排烟温度/℃	140
热效率/%	91.6

设计的预热器热功率占额定负荷总输入热功率的 25%,预热器总热输入功率为 48 MW_{th},设置 2 支预热器,单支预热器的输入热功率为 24 MW_{th}。

预热器与锅炉的布置方式如图 2 所示,2 支预热器分别命名为 A 侧预热器和 B 侧预热器,A 侧预热器燃料喷口与锅炉左侧墙相接,B 侧预热器与锅炉右侧墙相接,两预热燃料喷口对冲布置,预热燃料喷口位于锅炉前后墙中心线至前墙的中间,即预热燃料喷口位于炉内屏式过热器下方的中心,以便提升低负荷下的主蒸汽温度。

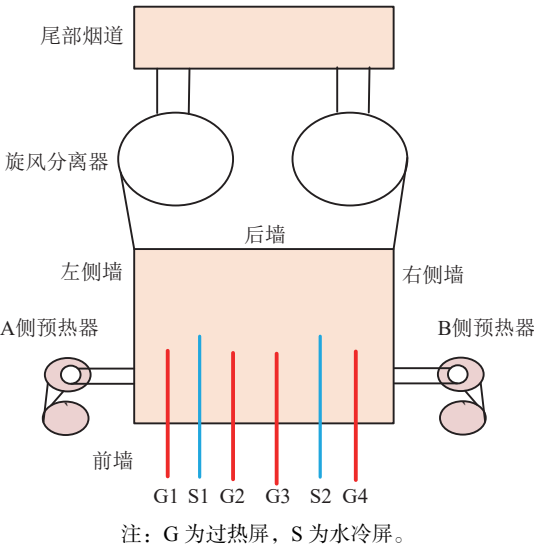


图 2 预热器与锅炉的布置方式

Fig.2 Layout of preheaters and boiler

1.3 预热器与锅炉测点布置

24 MW_{th} 预热器为绝热式的循环流化床,包括风室与布风板、提升管、旋风分离器和返料器等关键部

件, 预热后的燃料由旋风分离器出口通道喷入锅炉。

预热器总高度为 5 280 mm, 提升管上设置了 3 个温度测点 (TA1—TA3), 分别位于风室上部 600、2 500 和 3 900 mm 处, 返料回路立管内设置了 1 个温度测点 (TA4), 旋风分离器出口设置 1 个温度测点 (TA5), 预热器温度测点布置如图 3 所示。

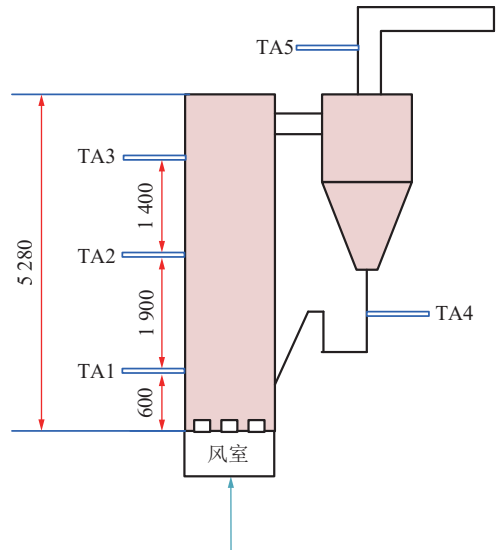


图 3 预热器温度测点布置

锅炉炉膛不同高度的温度测点布置如图 4 所示, 炉膛风室上部 400 mm 密相区内设置了 6 个温度测点, 命名为 T6a—T6f, 其中 3 个测点在前墙, 3 个测点在后墙, 炉膛风室上部 1 000 mm 至炉膛顶部的测温点均在左侧墙和右侧墙, 1 000 mm 处共 4 个温度测点 (T7a—T7d), 左侧墙 2 个温度测点, 右侧墙 2 个温度测点; 风室上部 4 000 mm(T8a—T8d)、6 170 mm(T9a—

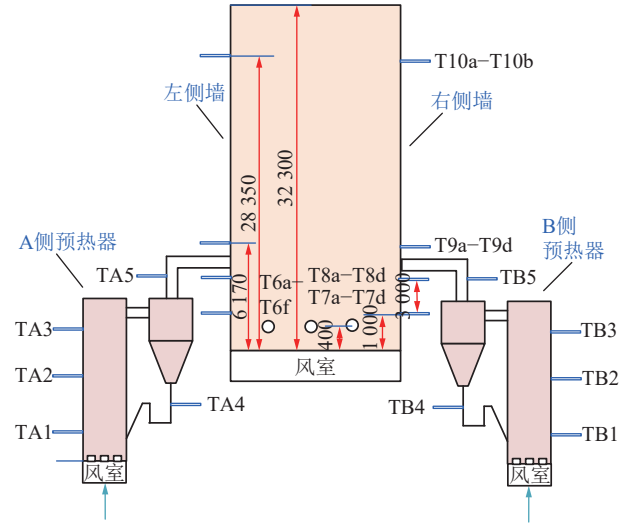


图 4 锅炉炉内不同高度的温度测点布置

Fig.4 Layout of temperature measuring points at different heights inside boiler furnace

T9d) 和 28 350 mm(T10a—T10b) 均设置了温度测点。另 B 侧预热器温度测点位置与 A 侧预热器相同, 命名为 TB1—TB5。

1.4 煤气和烟气采集方法

预热器出口设置了取样口, 利用煤气分析仪 (Gasboard-3100P) 在线采集和分析预热煤气成分。锅炉空气预热器出口至布袋除尘器的尾部烟道设置了烟气取样口, 利用德图分析仪 (TESTO 350) 在线采集和分析烟气成分。

2 试验工况设计

2.1 试验煤种

试验煤种包括主炉膛给颗粒煤和预热器给煤粉, 颗粒煤和煤粉的工业分析和元素分析见表 2。颗粒煤为烟煤, 干燥无灰基挥发分为 37.3%, 热值为 21.01 MJ/kg; 煤粉为优质烟煤, 干燥无灰基挥发分为 34.49%, 热值为 26.30 MJ/kg。

表 2 主炉膛给煤和预热器给粉成分

Table 2 Analysis of coal supplied to main furnace and pulverized coal supplied to preheater

项目	颗粒煤	煤粉
$\omega(C_{ar})/\%$	52.28	68.16
$\omega(H_{ar})/\%$	3.20	3.97
$\omega(O_{ar})/\%$	11.02	13.33
$\omega(S_{ar})/\%$	0.56	0.58
$\omega(N_{ar})/\%$	0.71	0.91
$\omega(A_{ar})/\%$	23.03	6.65
$\omega(M_{ar})/\%$	9.20	6.40
$\omega(V_{daf})/\%$	37.30	34.49
$Q_{ar,net}/(MJ \cdot kg^{-1})$	21.01	26.30

主炉膛给煤粒径范围为 0~10 mm, 给煤粒度分布如图 5 所示, 其中 0~3 mm 颗粒质量比为 56%, 8 mm 以上的颗粒质量分数达到 28%。

试验用煤粉粒径分布如图 6 所示, 煤粉粒径范围为 0~120 μm , 试验煤粉粒径全部在 50 μm 以下, 煤粉粒径整体偏细。

2.2 试验工况

试验工况设计见表 3, 包括 2 个工况, 分别是 25% 超低负荷试验工况和 20% 超低负荷试验工况。其中, 25% 超低负荷下为 2 支预热器投用, 单支预热器工作负荷为设计负荷的 60%; 20% 超低负荷下仅 B 侧预热器投用, A 侧预热器停用, 主要原因在于受预热器给粉稳定性限制, 预热器自身工作负荷需高于 50%。25% 负荷下, 锅炉过剩空气系数为 1.35; 20%

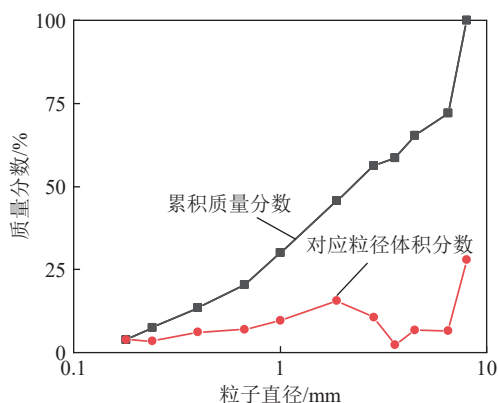


图 5 循环流化床主炉膛颗粒煤粒径分布

Fig.5 Particle size distribution of coal particles supplied to the main furnace of circulating fluidized bed

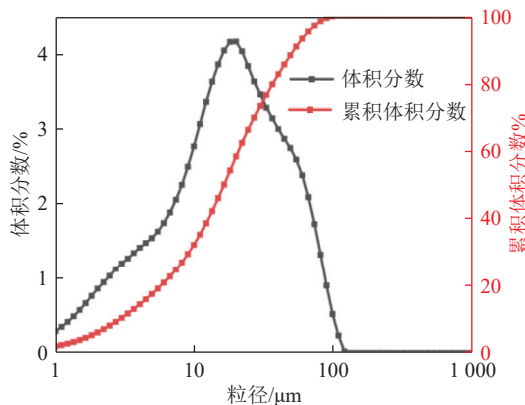


图 6 预热器用煤粉粒径分布

Fig.6 Particle size distribution of coal powder for preheater

表 3 工况参数

Table 3 Design of working condition parameters

项目	工况1	工况2
锅炉负荷比/%	25	20
蒸汽产量/(t·h ⁻¹)	60	48
预热给煤粉负荷比/%	15.0	10.0
主炉膛给煤负荷比/%	10.0	10.0
预热器温度/℃	850	850
过剩空气系数	1.35	1.50

负荷下, 锅炉过剩空气系数为 1.50。在 25% 负荷和 20% 负荷 2 个负荷条件下, 锅炉主炉膛给颗粒煤对应的热负荷均仅为 10%。

锅炉能效测试执行 GB/T 10184—2015《电站锅炉性能试验规程》, 环保测试执行 GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》。

3 试验结果和分析

3.1 预热器温度分布

25% 负荷下 (锅炉蒸发量 60 t/h) A 侧和 B 侧预热

器温度分布如图 7 所示, 其中 B 侧预热器温度比 A 侧预热器温度约高出 20 ℃, 这与两侧给粉机给粉量和风量略存在偏差有关。

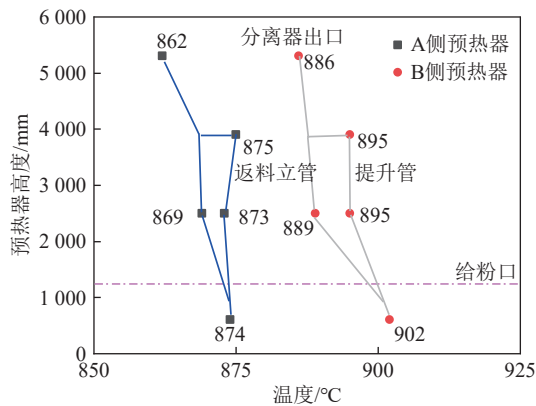


图 7 25% 负荷两侧预热器温度分布

Fig.7 Temperature distribution of preheaters on both sides at 25% load

从图 7 可以看出, 无论是 A 侧预热器还是 B 侧预热器, 其预热器内温度分布非常均匀, A 侧预热器运行温度范围为 869~875 ℃, 预热器内温差为 6 ℃, A 侧预热器预热燃料出口温度为 862 ℃。B 侧预热器运行温度范围为 889~902 ℃, B 侧预热器内温差为 13 ℃, B 侧预热器预热燃料出口温度为 886 ℃。可见, 预热器内温度分布极其均匀, 煤粉经过预热器后实现了均质、稳定预热。

25% 负荷下, A 侧和 B 侧预热器供入的总风量为 5 300 m³/h, 预热器给风量占锅炉总风量的 9.85%。

20% 负荷下 (锅炉蒸发量 48 t/h), B 侧预热器的温度分布如图 8 所示。因单支预热器设计满负荷为 12.5%, 则 B 侧预热器运行负荷为设计负荷的 80%, B 侧给粉机对应的给粉频率为 17.6%, B 侧预热器给入的流化风量为 1 008 m³/h, 送粉风量为 2 133 m³/h, 预热器内气体表观速度为 3.20 m/s, 测算预热器给风量

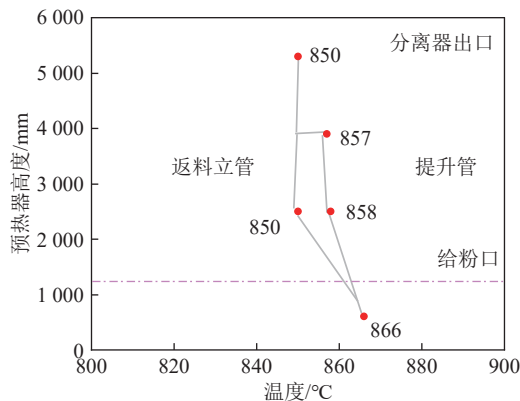


图 8 20% 负荷下 B 侧预热器温度分布

Fig.8 Temperature distribution of B-side preheater at 20% load

占预热器给入煤粉量理论燃烧空气量的 15%, 占该负荷下锅炉总风量的 7.60%。

25% 负荷试验过程中, 预热器出口测试了煤气成分和煤气热值, 见表 4。

表 4 煤气成分及热值

Table 4 Coal gas composition and heating value

项目	数值
$\omega(\text{CH}_4)/\%$	1.42
$\omega(\text{CO})/\%$	11.36
$\omega(\text{CO}_2)/\%$	20.44
$\omega(\text{H}_2)/\%$	0.76
$\omega(\text{N}_2)/\%$	66.02
$Q/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$	3.64

3.2 锅炉炉膛温度分布

试验过程中, 25% 负荷和 20% 负荷的炉膛密相区前后墙的温度分布对比如图 9、图 10 所示。

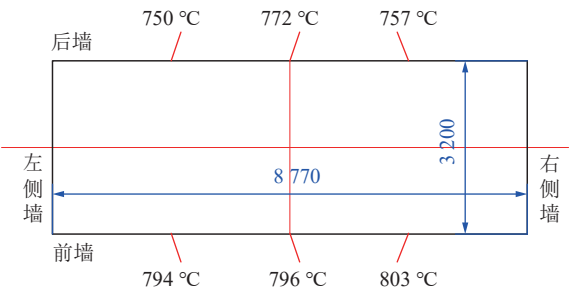


图 9 25% 负荷炉膛底部 400 mm 前后墙温度分布

Fig.9 Temperature distribution of front and rear walls 400 mm from bottom of furnace at 25% load

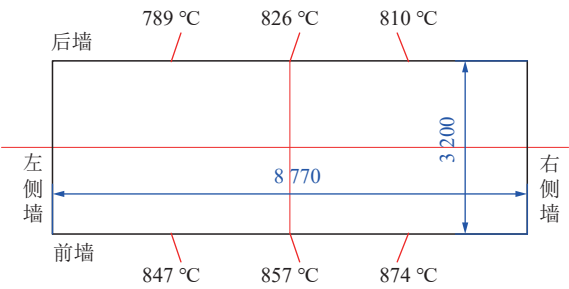


图 10 20% 负荷炉膛底部 400 mm 前后墙温度分布

Fig.10 Temperature distribution of front and rear walls 400 mm from bottom of furnace at 20% load

从图 9 和图 10 可见, 25% 和 20% 负荷下炉膛底部密相区最高温度均在炉膛前墙右侧, 且炉膛前墙平均温度均高于炉膛后墙。25% 负荷下, 炉膛前墙平均温度为 797 °C, 后墙平均温度为 759 °C, 前墙比后墙平均温度高 38 °C; 20% 负荷下, 炉膛前墙平均温度为 859 °C, 后墙平均温度为 808 °C, 前墙比后墙平均温度

高 51 °C。

尽管 25% 负荷和 20% 负荷下循环流化床主炉膛给煤量相同, 但炉膛底部密相区温度发生了变化, 主床一次风机频率和炉膛底部密相区平均温度的关系见表 5。

表 5 炉膛密相区底部平均床温和一次风机频率关系

Table 5 Relationship between average temperature at bottom of dense phase zone of furnace and frequency of primary fan

项目	工况1	工况2
锅炉负荷比/%	25	20
蒸汽产量/(t · h ⁻¹)	60	48
锅炉给煤负荷比/%	10.0	10.0
一次风机频率/%	62	59
炉膛底部密相区平均温度/°C	778	833

从表 5 可以看出, 锅炉负荷从 25% 降低到 20%, 循环流化床一次风机频率从 62% 降低到 59% 时, 循环流化床炉膛密相区平均床温从 778 °C 增加到 833 °C。可见, 在锅炉负荷 20%、主炉膛给煤 10% 的条件下, 循环流化床炉膛密相区温度仍可高于 800 °C, 实现了超低负荷下炉膛密相区的给煤稳定燃烧。

但相比 25% 负荷下, 20% 负荷下循环流化床一次风量降低, 炉膛底部流化速度降低, 导致 20% 负荷下炉膛前后墙床温偏差增加。

25% 负荷和 20% 负荷下锅炉炉膛温度分布如图 11、图 12 所示。

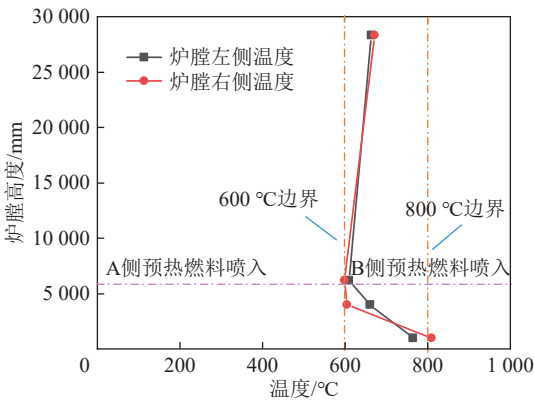


图 11 25% 负荷下炉膛两侧墙温度分布

Fig.11 Temperature distribution of walls on both sides of furnace at 25% load

通过图 11 和图 12 对比分析可以看出, 25% 负荷下, 炉膛预热燃料喷口上部温度明显高于 20% 负荷下炉膛预热燃料喷口上部温度。25% 负荷下, 炉膛出口 2 个测量点温度为 671 和 664 °C, 平均温度为

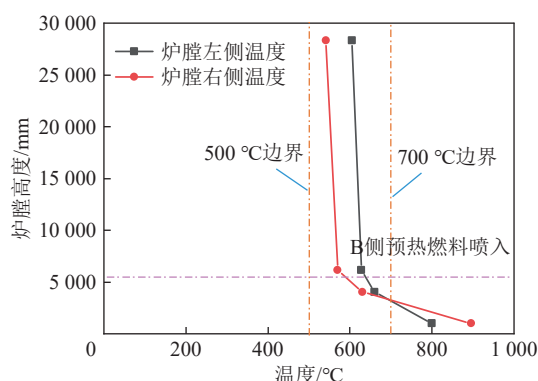


图 12 20% 负荷下炉膛两侧墙温度分布

Fig.12 Temperature distribution of walls on both sides of furnace at 25% load

667.5 °C, 而 20% 负荷下, 炉膛出口 2 个测量点温度仅为 605 和 541 °C、平均温度为 573 °C, 25% 负荷下炉膛出口平均温度比 20% 负荷下炉膛出口平均温度高 94.5 °C。

此外, 20% 负荷下, 仅 B 侧预热燃料喷入, A 侧预热燃料关闭, 因 B 侧预热燃料从右侧墙喷入 (预热燃料喷射速度为 20 m/s), 结果表现为炉内左侧墙不同高度位置的温度高于炉内右侧墙, 说明预热燃料射流深度可穿过炉膛中心, 即射流深度在 4 385~8 770 mm 之间。

3.3 超低负荷下蒸汽温度分析

20% 负荷和 25% 负荷条件下汽水系统温度分布对比如图 13 所示, 20% 负荷和 25% 负荷下给水温度和低温过热器出口蒸汽温度基本相同, 给水温度为 202 °C, 低温过热器出口的蒸汽温度分别为 393 和 396 °C, 但经过屏式过热器后, 25% 负荷的屏式过热器出口蒸汽温度明显高于 20% 负荷屏式过热器出口蒸汽温度, 其温差为 47 °C, 高温过热器出口蒸汽温度偏差为 25 °C。相对于 20% 负荷, 25% 负荷的炉内温度

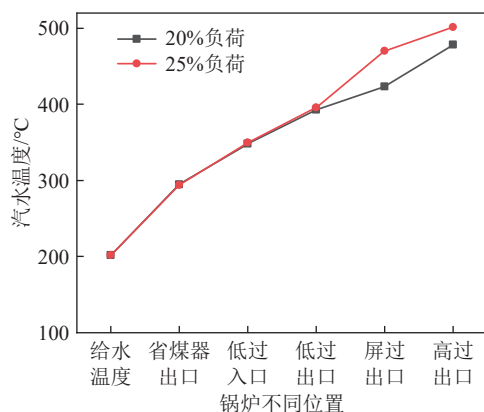


图 13 20% 负荷和 25% 负荷汽水温度对比

Fig.13 Comparison of steam and water temperature at 20% load and 25% load

高, 导致屏式过热器吸热量较多, 表现为屏式过热器换热对应的蒸汽温升增加。

20% 负荷下, 主蒸汽温度为 478.7 °C; 25% 负荷下, 主蒸汽温度为 501.5 °C。

3.4 烟气排放特性

25% 负荷和 20% 负荷下锅炉烟气排放对比见表 6。烟气采样点位于锅炉空气预热器至布袋除尘器的尾部烟道。本试验的 1 号 240 t/h 高温高压循环流化床锅炉存在尾部烟道漏风现象, 导致烟气中 O₂ 含量测量值偏高。而 25% 负荷下锅炉尾部烟道低温过热器出口氧化锆显示的 O₂ 体积分数为 5.87%, 20% 负荷下此处测量值为 7.75%。测算的 25% 负荷下炉内过量空气系数为 1.39, 而 20% 负荷下炉内过量空气系数为 1.58。显然, 超低负荷下过剩空气系数较高。

表 6 锅炉烟气排放对比

Table 6 Comparison of boiler flue gas emissions

项目	工况1	工况2
锅炉负荷比/%	25	20
蒸汽产量/(t · h ⁻¹)	60	48
CO 质量浓度/(mg · m ⁻³)	104	71
O ₂ 体积分数(低过出口)/%	5.87	7.75
O ₂ 体积分数(空预器出口)/%	11.86	13.03
NO _x 质量浓度/(mg · m ⁻³)	38.2	47.5
氨水消耗量/(kg · h ⁻¹)	100	100
炉内过剩空气系数	1.39	1.58

注: NO_x 的质量浓度为烟气中 O₂ 体积分数为 6% 时所得数值。

在炉内氨水喷入量均为 100 kg/h 时, 25% 负荷下 NO_x 排放值为 38.2 mg/m³, 20% 负荷下为 47.5 mg/m³, 均在炉内仅投 SNCR 条件下实现了超低 NO_x 排放。炉内同等喷氨量条件下, 超低负荷 NO_x 排放难以控制的原因包括: 炉内过剩空气系数大、局部氧气浓度相对较高; 炉膛上部温度低, SNCR 脱硝反应差。其中, 20%、25%、50% 和 90% 负荷耦合预热以及 50% 和 90% 负荷改造前达到超低 NO_x 排放的氨水消耗对比等如图 14 所示。从图 14 可以看出, 耦合预热、锅炉负荷 50% 时, 可实现零喷氨的超低 NO_x 排放。对比 50% 负荷和 90% 负荷锅炉改造前后的氨水溶液 (浓度 10%) 消耗量, 发现锅炉耦合预热后, 达到超低 NO_x 排放的氨水消耗量明显减少。这一方面是由于预热过程中部分煤 N 已转化为 N₂, 另一方面是预热燃料与 NO_x 存在还原反应, 导致循环流化床密相区已生成的 NO_x 被部分还原为 N₂。

3.5 锅炉燃烧效率和热效率

在 25% 负荷和 20% 负荷下, 分别对锅炉燃烧效

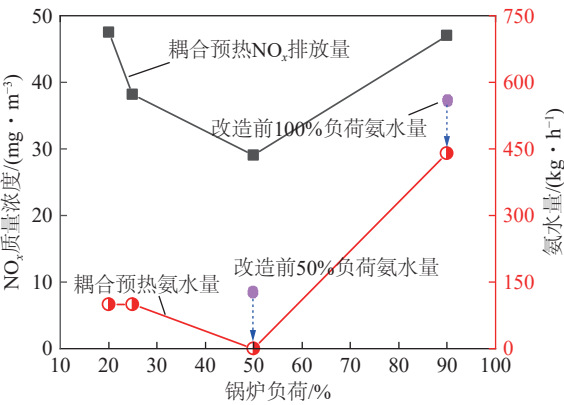


图 14 锅炉不同负荷 NO_x 排放和氨水消耗量对比

Fig.14 Comparison of NO_x emission and ammonia water with different boiler load

率和锅炉热效率进行了测试,其中燃烧效率和热效率测试值见表 7。25% 负荷下,锅炉燃烧效率为 98.88%,热效率为 91.52%;20% 负荷下,锅炉燃烧效率为 98.78%,热效率为 91.09%。超低负荷下该锅炉热效率要高于常规循环流化床锅炉同等负荷的热效率,这主要与本锅炉耦合了煤粉预热路线相关。

表 7 锅炉燃烧效率和热效率主要数值

Table 7 Boiler combustion efficiency and thermal efficiency

项目	工况1	工况2
蒸汽产量/(t·h ⁻¹)	60	48
锅炉负荷比/%	25	20
蒸汽压力/MPa	8.62	8.68
蒸汽温度/℃	501.5	478.7
给水温度/℃	202.1	202.7
尾气O ₂ 体积分数/%	11.86	13.03
尾气CO质量浓度/(mg·m ⁻³)	123.1	85.5
气体不完全燃烧损失/%	0.07	0.05
飞灰可燃物质量分数/%	8.81	8.49
固体不完全燃烧损失/%	1.05	1.17
燃烧效率/%	98.88	98.78
排烟温度/℃	102.9	96.0
排烟损失/%	6.80	7.14
散热损失/%	0.49	0.49
热效率/%	91.52	91.09

锅炉耦合预热不同负荷下的燃烧效率和热效率对比如图 15 所示。可见,锅炉负荷 50% 时,热效率最高,为 91.63%;锅炉负荷 25% 时,燃烧效率最高,为 98.88%。锅炉负荷 90% 时,其燃烧效率和热效率均不如 50% 负荷高,这与高负荷的燃尽时间短和排烟温度

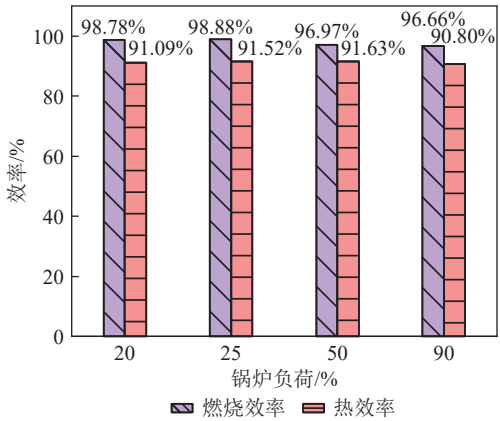


图 15 锅炉不同负荷的燃烧效率和热效率对比

Fig.15 Comparison of combustion efficiency and thermal efficiency with different boiler load

高存在关系。

4 结 论

1) 实现了耦合煤粉预热的 240 t/h 循环流化床锅炉超低负荷稳定运行,25% 负荷下,循环流化床主炉膛给煤为 10%,预热器给粉为 15%;20% 负荷下,循环流化床主炉膛给煤为 10%,预热器给粉为 10%。25% 负荷和 20% 负荷的锅炉热效率分别为 91.52% 和 91.09%,实现了循环流化床锅炉超低负荷的高效燃烧。

2) 实现了预热器在设计负荷的 60% 和 80% 下的稳定运行,预热器工作温度均在 850~950 ℃,不同工况下预热器提升管和返料器内温差均低于 15 ℃,预热燃料出口温度在 800 ℃ 以上,预热燃料的整体、均匀预热为超低负荷下预热燃料的高效燃烧提供了保障。

3) 通过降低循环流化床主床一次风量,尽管锅炉在 20% 超低负荷下运行,但循环流化床炉膛密相区的温度仍可高于 800 ℃,为超低负荷下循环流化床锅炉密相区保持高温床层、保障颗粒煤的燃尽、减少锅炉底渣含碳量和提高热效率方面创造了条件,为循环流化床锅炉 20% 超低负荷的运行控制提供了方法和数值参考。

4) 实现了循环流化床锅炉耦合双侧预热器投运和耦合单侧预热器投运的稳定运行,仅 B 侧预热器投运条件下,锅炉炉膛左侧墙温度明显高于右侧墙对应温度,预热燃料喷射穿透深度超过了炉膛中心即 4 385 mm。25% 负荷下炉膛出口平均温度为 667.5 ℃,较 20% 负荷下炉膛出口平均温度高出 94.5 ℃。

5) 获得了 25% 和 20% 超低负荷下的汽水温度分布,25% 负荷和 20% 负荷低温过热器出口温度基本相同,但蒸汽经过炉内屏式过热器后,25% 负荷下的屏

式过热器出口蒸汽温度提升幅度最为显著,可见,超低负荷下提升蒸汽温度的主要受热面为炉内屏式过热器。在 25% 负荷和 20% 负荷下,高温过热器出口的主蒸汽温度分别为 501.5 和 478.7 °C。

6) 炉内氨水喷入量为 100 kg/h 时(氨水质量分数 10%),该锅炉在 25% 负荷和 20% 负荷下的 NO_x 排放分别为 38.2 和 47.5 mg/m^3 ,实现了超低 NO_x 排放,且 20% 负荷的氨水喷入量较 100% 负荷明显降低,实现了 240 t/h 高温高压循环流化床锅炉超低负荷的超低 NO_x 排放的经济运行方法,技术路线、研究方法和研究结果为循环流化床锅炉深度调峰提供了重要支撑。

参考文献(References):

- [1] 姜培学,金红光. 面向“双碳”目标的能源转化利用领域前沿交叉战略研究[J]. 科学通报, 2024, 69(34): 5007–5015.
JIANG Peixue, JIN Hongguang. A strategic study of interdisciplinary frontier in the field of energy conversion and utilization for the “dual carbon” goals[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(34): 5007–5015.
- [2] 何京东,曹大泉,段晓男,等. 发挥国家战略科技力量作用,为“双碳”目标提供有力科技支撑[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 415–422.
HE Jingdong, CAO Daquan, DUAN Xiaonan, et al. Give full play to national strategic S & T force to provide vigorous support for carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 415–422.
- [3] 黄晓勇. 世界能源蓝皮书: 世界能源发展报告 (2024)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2024.
- [4] 国家统计局. 中华人民共和国统计法[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- [5] 刘吉臻,王庆华,张效宁,等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 燃煤耦合储能系统及智能控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6855–6883.
LIU Jizhen, WANG Qinghua, ZHANG Xiaoning, et al. Novel technologies of flexible coal-fired power generation to support China energy transition: Coal-fired coupled energy storage system and smart control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6855–6883.
- [6] 杨斌,张英佳,李玉阳,等. 面向碳中和的燃烧反应动力学研究进展与展望[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(8): 1993–2008.
YANG Bin, ZHANG Yingjia, LI Yuyang, et al. Research progress and prospect of combustion reaction kinetics oriented to carbon neutralization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(8): 1993–2008.
- [7] 柯希玮,蒋苓,吕俊复,等. 循环流化床燃烧低污染排放技术研究展望[J]. 中国工程科学, 2021, 23(3): 120–128.
KE Xiwei, JIANG Ling, LYU Junfu, et al. Prospects for the low pollutant emission control of circulating fluidized bed combustion technology[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(3): 120–128.
- [8] 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]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 132–140.
- [9] 吕俊复,王君峰,姜孝国,等. 超超临界循环流化床锅炉技术研发进展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6883–6899.
(LÜ/LV/LU/LYU) Junfu, WANG Junfeng, JIANG Xiaoguo, et al. Research and development progress of ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6883–6899.
- [10] 姚禹歌,黄中,张曼,等. 中国循环流化床燃烧技术的发展与展望[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 13–19.
YAO Yuge, HUANG Zhong, ZHANG Man, et al. Development and prospect of circulating fluidized bed combustion technology in China[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 13–19.
- [11] 吕俊复,蒋苓,柯希玮,等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 514–522.
LYU Junfu, JIANG Ling, KE Xiwei, et al. Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 514–522.
- [12] 岳光溪,张扬,张建春,等. 面向双碳目标的多元燃料循环流化床燃烧技术展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6844–6855.
YUE Guangxi, ZHANG Yang, ZHANG Jianchun, et al. Outlook for multiple fuel circulating fluidized bed combustion technologies for the dual carbon goals[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6844–6855.
- [13] 汤仔华,宋国良,宋维健,等. 循环流化床锅炉快速变负荷调节技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2279–2292.
TANG Zihua, SONG Guoliang, SONG Weijian, et al. Research progress on rapid variable load regulation technology of circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2279–2292.
- [14] 刘涛,薛艳芳,王云刚,等. 350MW 墙式切圆锅炉超低负荷稳燃优化[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(3): 99–109.
LIU Tao, XUE Yanfang, WANG Yungang, et al. Optimization of stable combustion at ultra-low load for 350 MW wall tangentially fired boiler[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(3): 99–109.
- [15] 段守保,辛胜伟,顾从阳,等. 循环流化床锅炉低负荷下超低 NO_x 排放研究[J]. 洁净煤技术, 2021(S2): 299–303.
DUAN Shoubao, XIN Shengwei, GU Congyang, et al. Study on ultra-low NO_x emission of circulating fluidized bed boiler under low load[J]. Clean Coal Technology, 2021(S2): 299–303.
- [16] 李宽,曲耀鹏,郑媛,等. 300 MW 循环流化床锅炉低负荷 NO_x 生成特性分析及应对措施[J]. 东北电力技术, 2019, 40(11): 46–49.
LI Kuan, QU Yaopeng, ZHENG Yuan, et al. Analysis and response measures of NO_x low load formation characteristics in 300 MW CFB and countermeasures[J]. Northeast Electric Power Technology, 2019, 40(11): 46–49.
- [17] 张思海,李超然,万广亮,等. 330 MW 循环流化床锅炉深度调峰技术[J]. 发电技术, 2024(2): 199–206.
ZHANG Sihai, LI Chaoran, WAN Guangliang, et al. Deep peak shaving technology of 330 MW circulating fluidized bed boiler[J].

- Power Generation Technology, 2024(2): 199–206.
- [18] 吕俊复, 尚曼霞, 柯希玮, 等. 粉煤循环流化床燃烧技术[J]. [煤炭学报](#), 2023, 48(1): 430–437.
- LV Junfu, SHANG Manxia, KE Xiwei, et al. Powdered coal circulating fluidized bed combustion technology[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2023, 48(1): 430–437.
- [19] 吕清刚, 朱建国, 牛天钰, 等. 煤粉高温预热方法: CN101158468A [P]. 2008–04–09.
- [20] ZHANG Y, ZHU J G, LYU Q G, et al. Characteristics of preheating combustion of power coal with high coking properties[J]. [Journal of Thermal Science](#), 2021, 30(4): 1108–1115.
- [21] 田继林, 朱建国, 朱书骏, 等. 60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉宽负荷运行特性研究[J]. [热力发电](#), 2024, 53(4): 133–140.
- TIAN Jilin, ZHU Jianguo, ZHU Shujun, et al. Wide load operation characteristics of a 60 t/h boiler with pulverized coal preheating[J]. [Thermal Power Generation](#), 2024, 53(4): 133–140.
- [22] 吕清刚, 朱建国, 欧阳子区, 等. 预热燃烧原理及技术[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [23] 朱建国, 韩会忠, 李栋, 等. 240 t/h 循环流化床锅炉深度灵活调峰工程示范[J]. [中国特种设备安全](#), 2024, 40(10): 89–93.
- ZHU Jianguo, HAN Huizhong, LI Dong, et al. The demonstration of 240 t/h circulating fluidized bed boiler with deeply flexible peak-shaving[J]. [China Special Equipment Safety](#), 2024, 40(10): 89–93.
- [24] 朱建国, 吕清刚, 宋维健, 等. 循环流化床锅炉系统及其控制方法: CN117588743A[P]. 2024–02–23.
- [25] ZHANG Y, ZHU J G, LYU Q G, et al. The ultra-low NO_x emission characteristics of pulverized coal combustion after high temperature preheating[J]. [Fuel](#), 2020, 277: 118050.
- [26] ZHANG X Y, ZHU S J, ZHU J G, et al. Preheated combustion characteristics and fuel-nitrogen conversion paths for bituminous coal and anthracite in wide-range preheating temperature[J]. [Journal of the Energy Institute](#), 2023, 108: 101222.