



循环流化床锅炉深度调峰“C构型”温度分布理念与验证

朱建国^{1,2*}, 吕清刚^{1,2}, 李百航¹, 韩会忠³, 刘敬樟^{1,2}, 刘玉华¹, 高鸣¹

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, 兖州 272100

* E-mail: zhujianguo@iet.cn

收稿日期: 2025-06-26; 接受日期: 2025-09-16; 网络版发表日期: 2025-11-06

中国科学院战略性先导专项课题(编号: XDA29010100)资助

摘要 循环流化床锅炉是煤炭高效清洁燃烧的重要装备, 循环流化床锅炉深度调峰是“双碳”目标下构建新型电力系统和建立低碳工业园区的关键技术. 低负荷的主蒸汽温度低和 NO_x 排放超标是循环流化床锅炉深度调峰的共性技术难题. 本文变革循环流化床锅炉低负荷燃烧的炉膛温度自底向上单调递减的技术特征, 创新性提出循环流化床锅炉低负荷燃烧的“C构型”温度分布理念, 即创建炉膛底部炽热床层的高温区和炉膛上部用于提高主蒸汽温度和SNCR脱硝效率的高温区, 形成炉内上下两端温度高、中间温度低的“C构型”分布曲线, 改变锅炉低负荷的蒸发吸热量和过热吸热量配比关系, 提升过热吸热份额进而提升主蒸汽温度. 采用循环流化床锅炉耦合预热改性燃料方法, 循环流化床锅炉低负荷燃烧由常规的底部颗粒流态化燃烧革新为底部颗粒流态化燃烧与预热改性燃料上部空间燃烧耦合的新模态, 同时形成了预热自脱氮、预热改性燃料与炉内已生成 NO_x 的高效均相还原和异相还原, 以及炉膛上部因提升炉膛出口温度增加SNCR脱硝率的超低 NO_x 控制新体系. 采用“C构型”温度分布创新理念, 结合热力计算, 改建了240 t/h高温高压循环流化床锅炉, 研究表明锅炉负荷50%时, 炉膛温度已经呈现了“C构型”温度分布特征, 且随着锅炉负荷的进一步降低, 炉膛“C构型”特征愈加明显, 锅炉负荷50%时, 耦合预热改性燃料燃烧的主蒸汽温度提升了22°C, 35%~70%负荷范围内实现了零喷氨超低 NO_x 原始排放, 锅炉负荷调节深度从原来的50%降低到20%, 实现了锅炉的深度调峰, 完成了循环流化床锅炉深度调峰“C构型”温度分布创新理念的工业验证. 研究结果有力支撑了循环流化床锅炉深度灵活调峰技术的发展和應用, 为平抑可再生能源波动性、提升可再生能源电力消纳比例提供可行方案.

关键词 循环流化床锅炉, 深度调峰, “C构型”理念, 工业验证

引用格式: 朱建国, 吕清刚, 李百航, 等. 循环流化床锅炉深度调峰“C构型”温度分布理念与验证. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 356–369
Zhu J G, Lyu Q G, Li B H, et al. Concept and verification of the “C-configuration” temperature distribution of circulating fluidized bed boilers with deep peak shaving (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 356–369, doi: [10.1360/SST-2025-0158](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0158)

1 引言

二氧化碳(CO₂)是导致全球气候变暖的重要温室气体, 2015年联合国气候变化大会提出全球平均气温升高在2050年前控制低于1.5°C, 2100年前控制低于2°C^[1]. 减少CO₂排放是全世界的共同目标, 中国政府采取有力措施, 应对气候变化, 推动可持续发展. 实现“碳达峰碳中和”是贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的内在要求. 2024年, 中国CO₂排放126亿吨, 占全球CO₂排放的33.3%, 其中电力行业和工业领域的CO₂排放量占全国CO₂排放的70%以上^[2,3], 提升可再生能源消纳比例是减少CO₂排放的重要举措.

2024年, 中国电力行业的煤电装机占比为35.7%、风光可再生能源装机占比为14.31%, 但煤电发电占比却达到54.8%, 煤电仍为主体性电源, 2024年全国发电构成见图1.

“双碳”目标下预测2060年煤电装机占比仅为5.83%, 风光装机占比为64.08%^[4,5], 风光等可再生能源电力将大幅度增加, 煤电也将从主体电源向调节性电源发生转化, 并形成多能融合或以可再生能源为主体的新型电力系统^[6,7]. 其中, 煤电、风电和太阳能装机容量预测见图2, 电力行业提升可再生能源电力发电比例是绿色低碳转型的关键^[8].

工业是中国经济平稳、快速发展的基石, 绿色低碳生产是“双碳”目标下工业发展的重要方向. 中国的工业园区内正在快速建设屋顶光伏等可再生能源电力项目, 园区内的可再生能源电力鼓励就地消纳, 以促进低碳产品的加工制造和减少工业生产CO₂排放.

而可再生能源电力具有波动性、间歇性和不稳定性, 如某区域24 h内风光发电的变化见图3, 白天、晚上、光照充足和阴雨天气光伏发电量均存在较大波动.

此外, 中国的一些工业园区多采用集中供应蒸汽, 用汽企业包括纺织、食品、板材、化工等存在日间、夜间、工作日、节假日等负荷变化大, 如某园区30 h的用汽负荷变化见图4.

可见, 无论是可再生能源电力的发电侧还是工业园区用汽的负荷侧, 均需要低成本的燃煤锅炉深度灵活调峰来平抑这种变化.

燃煤锅炉的主要炉型分别是以悬浮燃烧为主的煤粉锅炉和以流态化燃烧为主的循环流化床锅炉. 循环

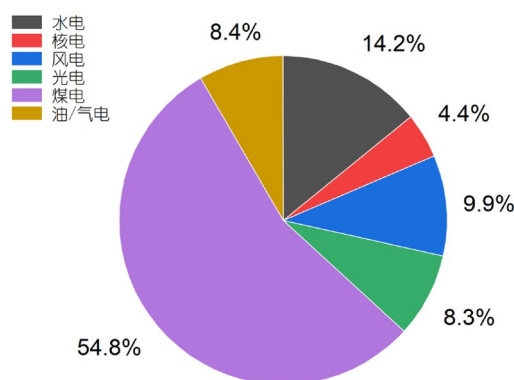


图1 (网络版彩图)2024年全国发电构成

Figure 1 (Color online) China's power generation compositions in 2024.

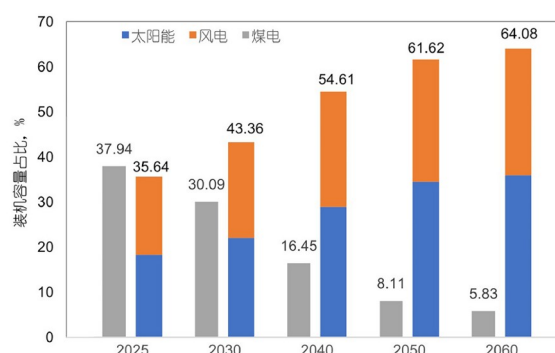


图2 (网络版彩图)装机容量及占比预测

Figure 2 (Color online) Installed capacity and proportion forecast.

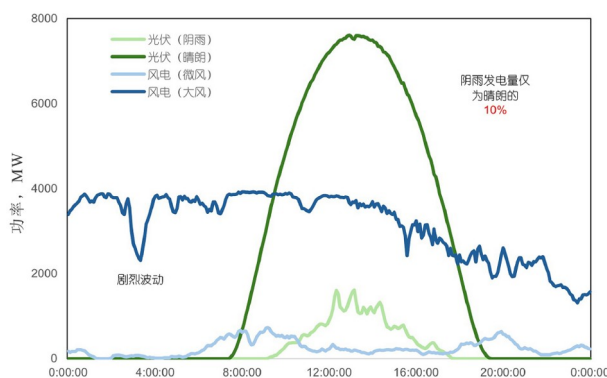


图3 (网络版彩图)某区域风光电力24 h变化^[9]

Figure 3 (Color online) 24 h variation of wind and solar power in a certain area.

流化床锅炉因煤种适应性宽、可燃低热值烟煤、煤矸石、固废等燃料, 且炉内SO₂和NO_x原始排放低, 循环流化床锅炉是煤炭高效清洁燃烧的重要装备^[9-12]. 据

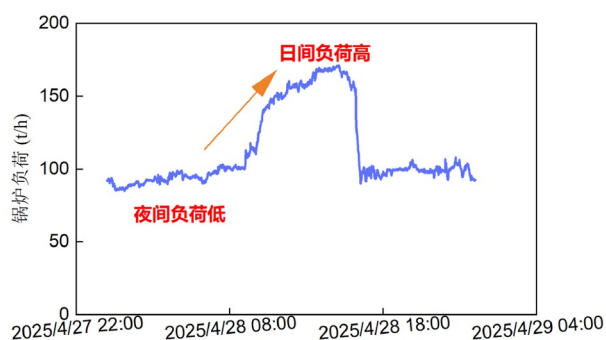


图4 (网络版彩图)某区域30 h用汽负荷变化

Figure 4 (Color online) The 30 h variation of steam load in a certain area.

统计, 中国正在运行的循环流化床锅炉数量超过3500台^[13], 其中全球最大容量700 MW超超临界循环流化床锅炉已于2025年4月在云南能投红河发电有限公司投运。循环流化床锅炉的深度灵活调峰是提升可再生能源消纳比例的关键技术^[14-16]。

国内外尤其是中国在“双碳”目标下已经开展了循环流化床锅炉深度调峰技术研究, 主要的技术路线包括烟气再循环结合空气分级燃烧技术, 二次风中喷氨即二次风SNCR技术, 以及粉煤循环流化床燃烧技术。

段守保等人^[17]在280 t/h循环流化床锅炉上开展了低负荷超低 NO_x 排放研究, 试验煤种为烟煤, 干燥无灰基挥发分含量为24.94%, 收到基灰分含量为24.54%, 收到基热值为20.16 MJ/kg, 利用烟气再循环结合炉内喷氨的锅炉最低负荷为50%。马金荣等人^[18]在325 t/h循环流化床锅炉上开展了宽负荷运行特性研究, 试验煤种为准东煤, 结果表明, 锅炉负荷50%时, 炉膛SNCR区域的烟气温度为650℃, 已严重偏离SNCR脱硝反应温度窗口。张思海等人^[19]对330 MW亚临界循环流化床锅炉深度调峰特性进行了研究, 锅炉燃用煤种为烟煤, 烟气再循环量占一次风量比例为73%时, 在20%负荷下实现了超低 NO_x 排放, 但大量再循环烟气的加入增加了设备能耗, 且因炉内温度低降低了锅炉燃烧效率。

杨敬池等人^[20]开展了超临界350 MW循环流化床锅炉宽负荷 NO_x 排放特性研究, 低负荷下采用二次风SNCR技术, 锅炉燃用煤种为劣质烟煤, 测试结果表明, 锅炉负荷40%时, 旋风分离器前喷氨、 NO_x 排放浓度变化范围为35~60 mg/m^3 ; 上二次风位置喷氨、 NO_x 变化范围为35~45 mg/m^3 。采用二次风内喷入氨水, 可一

定程度在低负荷下降低 NO_x 排放, 但 NO_x 原始浓度降低幅度有限, 且氨水控制较为复杂, 因为喷入炉内的氨水也存在向 NO_x 氧化反应的转化途径。就目前看来, 国内外采用二次风中喷入氨水降低 NO_x 原始排放的研究和工程应用相对较少。

清华大学吕俊复等人^[21]提出了粉煤循环流化床燃烧技术, 入炉煤的粒径从0~10 mm调整为0~1 mm, 结合循环流化床流态化重构理念, 大幅降低一次风率, 低负荷下相应提高二次风率, 增加炉内分级燃烧程度, 降低 NO_x 原始生成。同时, 因粒径降低后, 可在低一次风率下保障床料的充分流化, 有望进一步降低循环流化床锅炉负荷调节深度。尚曼霞等人^[22]完成了粉煤循环流化床锅炉0~1 mm制粉系统开发与热力计算, 确定了磨煤机通用风量、干燥剂配比以及干燥温度等关键技术指标, 预测了制粉系统干燥出力, 分析了0~1 mm制粉系统的性能变化规律。但因0~1 mm制粉系统尚未商业应用, 其粉煤循环流化床燃烧技术的相关工程示范也未见报道。

综上, 现有的循环流化床锅炉调峰深度无法支撑可再生能源占比日益提高下的发展需求, 亟需突破循环流化床锅炉深度灵活调峰技术, 以提升可再生能源电力消纳比例, 促进国家创建低碳工业园区和构建新型电力系统。

2 循环流化床锅炉深调问题瓶颈解析

循环流化床锅炉深度调峰特别是低负荷运行存在主蒸汽温度不足和 NO_x 排放无法达到50 mg/m^3 以下超低 NO_x 排放的共性技术难题^[23]。

2.1 低负荷主蒸汽温度不足

某240 t/h高温高压循环流化床锅炉50%负荷和100%负荷的炉膛温度分布曲线见图5^[24], 其50%负荷下炉膛温度沿炉膛高度方向自底向上单调递减, 且负荷越低, 炉膛温度递减特征愈加明显。

240 t/h高温高压循环流化床锅炉受热面布置示意图见图6, 锅炉蒸发受热面包括屏式过热器在炉膛上部, 锅炉高温过热器和低温过热器在锅炉尾部。循环流化床锅炉低负荷时炉膛上部温度低, 导致低负荷状态下过热量吸热不足, 呈现低负荷下主蒸汽温度不足。

240 t/h高温高压循环流化床锅炉100%负荷和50%

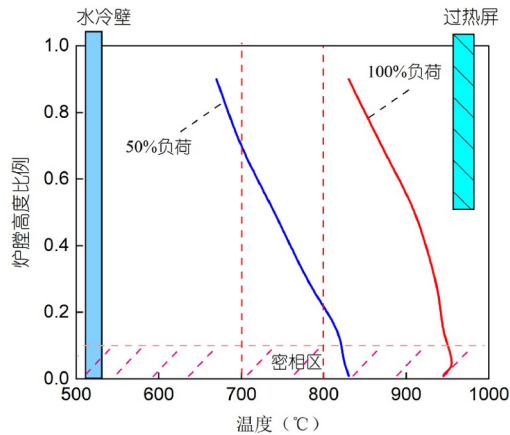


图 5 (网络版彩图)常规循环流化床锅炉温度分布^[24]

Figure 5 (Color online) Temperature distributions of conventional circulating fluidized bed boiler.

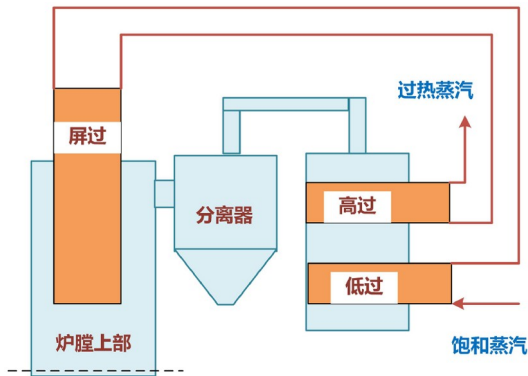


图 6 (网络版彩图)高温高压锅炉受热面布置

Figure 6 (Color online) Heating surface arrangement of high temperature and high pressure boiler.

负荷的热量分配关系见图7, 可见, 锅炉负荷从100%降低到50%时, 蒸发热比例从51.65%增加到62.1%, 过热热比例从35.65%降低到27.5%, 过热热比例的降低与循环流化床炉膛过热器受热面区域烟气温度低直接相关。

因此, 提高低负荷过热热吸热比例、降低蒸发热吸热比例, 是提升循环流化床锅炉低负荷主蒸汽温度的关键所在。

2.2 低负荷NO_x排放难以满足超低NO_x限值

某300 MW亚临界循环流化床锅炉^[25]和350 MW超临界循环流化床锅炉^[23]负荷变化与NO_x排放的关系见图8, 可见, 300 MW亚临界循环流化床锅炉60%负荷

时, NO_x原始生成浓度最低, 锅炉负荷低于60%时, 其NO_x原始生成浓度逐渐增加; 350 MW超临界循环流化床锅炉50%负荷时, NO_x原始生成浓度最低, 锅炉负荷低于50%时, 其NO_x原始生成浓度增加。低负荷NO_x原始生成浓度大的原因与炉内一次风率大、炉内还原气氛弱有关。其中, 300 MW亚临界循环流化床锅炉一/二次风量、一次风当量比和锅炉负荷的关系见图9。可见, 锅炉负荷40%时, 一次风当量比接近1.0, 表明循环流化床锅炉底部还原性气氛较弱, 这是导致循环流化床锅炉低负荷NO_x原始生成浓度高的主要原因。

丹麦技术大学Glarborg等人^[26]的研究表明, 炉内喷入氨气与NO_x反应温度窗口为800°C~1100°C, 炉膛温度低于800°C时, 其NH₃与NO_x还原反应速率降低。可见, 循环流化床锅炉低负荷运行的NO_x原始生成浓

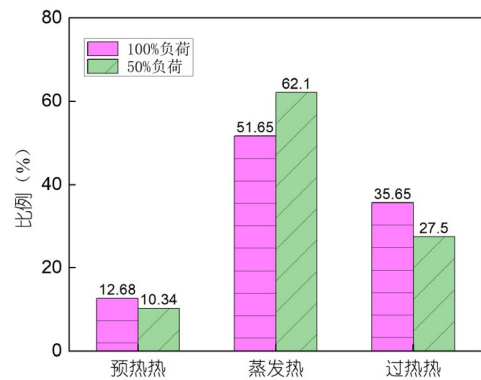


图 7 (网络版彩图)锅炉100%负荷和50%负荷热量分配

Figure 7 (Color online) Heat distributions of the boiler separately with 100% and 50% load.

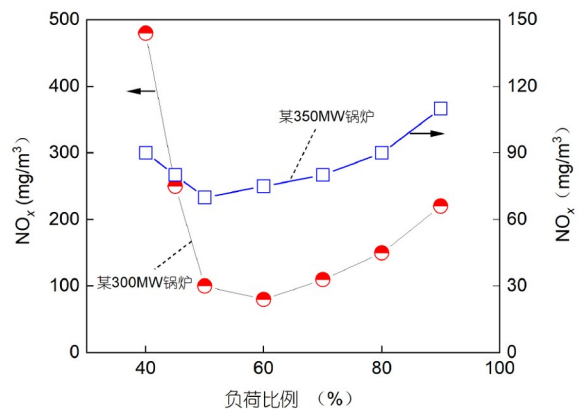


图 8 (网络版彩图)NO_x排放与锅炉负荷的关系^[23,25]

Figure 8 (Color online) The relationship of NO_x emission with boiler load^[23,25].

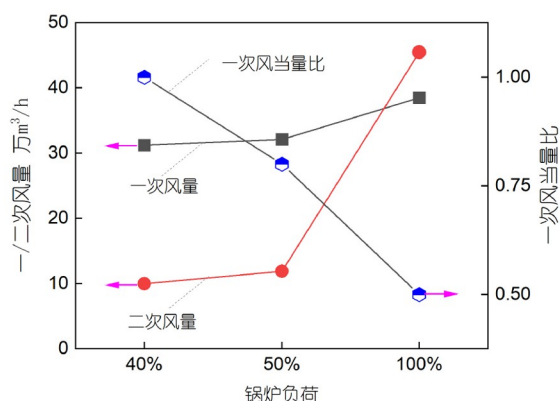


图9 (网络版彩图)风量和当量比与负荷的关系^[25]

Figure 9 (Color online) The relationship of air amount and equivalence ratio with load^[25].

度大和炉膛上部喷氨的脱硝反应率低, 成为循环流化床锅炉低负荷运行无法达到超低 NO_x 排放的技术难题。

3 循环流化床锅炉深调创新理念

针对循环流化床锅炉负荷调节深度受限和 NO_x 超低排放难以达标的技术难题, 提出了循环流化床锅炉低负荷“C构型”温度分布创新理念, 其概念见图10。

“C构型”温度分布的特征在于炉内存在两处高温区, 分别为炉膛底部维持炽热床层的高温区和炉膛上部用于提升过热热吸热量和提升SNCR脱硝反应率的高温区; 而炉膛其他区域温度相对较低, 可以减少锅炉蒸发吸热量。

针对“C构型”的温度分布曲线, 计算的240 t/h高温高压循环流化床锅炉50%负荷下锅炉过热热吸热量为38%, 相比图7提升了10%。过热热吸热比例的提升来自蒸发吸热量的降低, 提升了低负荷的主蒸汽温度, 实现了锅炉热量的重新分配, 解决低负荷主蒸汽温度不足的问题。

此外, “C构型”温度分布中, 锅炉炉膛上部温度高, 提升了SNCR脱硝反应率, 为实现循环流化床锅炉低负荷超低 NO_x 排放提供了保障。

为构建循环流化床锅炉低负荷燃烧的“C构型”温度分布曲线, 循环流化床锅炉采用底部粒煤燃烧与上部预热改性燃料空间燃烧耦合的新模式^[27,28], 其耦合方式见图11。利用预热改性燃料上部燃烧的方式, 提升循环流化床炉膛上部温度。

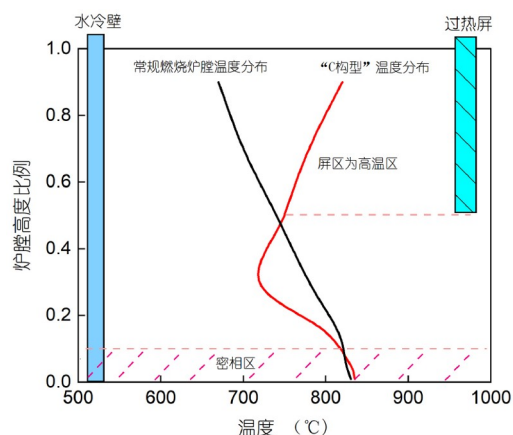


图10 (网络版彩图)循环流化床锅炉低负荷“C构型”温度分布

Figure 10 (Color online) “C-configuration” temperature distribution of circulating fluidized bed boiler with low load.

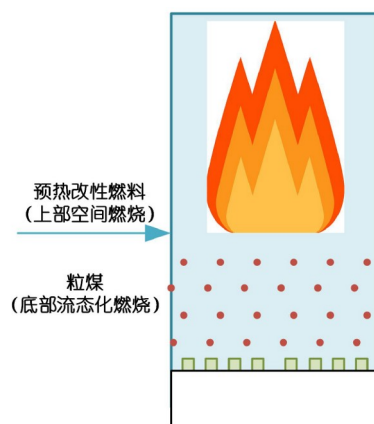


图11 (网络版彩图)循环流化床锅炉低负荷燃烧新模式

Figure 11 (Color online) Novel mode of circulating fluidized bed boiler with low load combustion.

预热改性燃料来自煤的流态化预热改性, 即煤粉经流态化预热后产生的预热改性燃料, 预热改性燃料为包括预热煤气和高温活性焦炭的气固混合二元燃料, 预热改性燃料温度高于 800°C , 预热改性燃料喷入循环流化床炉膛后可在炉膛上部快速燃烧。已有研究表明, 褐煤、烟煤和无烟煤经过流态化预热后, 其相比预热前的原煤, 预热焦炭的比表面积增加、反应活性点位提升, 表1显示了典型煤种预热的基本特性^[29-32]。

预热改性燃料耦合循环流化床燃烧的方式见图12。

从图11和12看出, 循环流化床主炉膛燃烧方式从

表 1 典型煤种预热特性

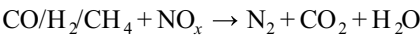
Table 1 Preheating characteristics of typical coal

项目名称	单位	褐煤	烟煤	无烟煤
预热燃料温度	°C	800~850	850~900	900~950
煤气热值	MJ/m ³	1.5~2.5	2.0~3.0	1.0~2.0
预热前后比表面积增加倍数	—	5~10	10~20	1~5
预热前后反应活性提升倍数	—	2~5	3~6	2~4

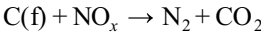
单纯的底部颗粒给煤革新为底部颗粒给煤耦合上部预热改性燃料同时给入, 炉膛内因此划分成三个区域, 即底部的密相区、中部的再燃区和上部的燃尽区。

煤粉流态化预热在绝热的循环流化床内进行, 预热器内为强还原性气氛, 预热器内温度800°C~950°C, 预热器内空气当量比为0.1~0.3, 煤粉预热中煤N的50%以上可转化为N₂^[33~35], 预热实现了燃料氮的预脱除, 预热为循环流化床耦合预热改性燃料燃烧超低NO_x排放创造了条件。

在再燃区内, 预热改性燃料的预热煤气将和循环流化床主炉膛生成的NO_x发生均相还原反应, 其反应机理为



预热改性燃料的预热焦炭和循环流化床主炉膛生成的NO_x发生异相还原反应, 其反应机理为



Do等人^[36]采用煤气、焦油、焦炭等煤热解产物为原料, 研究煤气、焦油、焦炭以及混合物对NO_x还原的影响特性, 结果表明, 焦炭和热解煤气的混合原料对NO_x的还原效率最佳, 这说明NO_x均相还原和异相还原的协同对NO_x分解和转化具有重要作用。

预热改性燃料上部燃烧中, 炉膛上部温度升高, 提升了炉膛上部喷入氨水与NO_x的还原反应率, 为实现超低NO_x排放提供了保障。

可见, 循环流化床锅炉耦合预热改性燃料燃烧, 不仅可创建“C构型”温度分布曲线, 重构炉内温度场分布, 而且可调控炉膛蒸发热和过热热吸热份额的关系, 提升主蒸汽温度, 同时可原位大幅度削减NO_x原始生成。

4 循环流化床锅炉深调创新理念验证

为同时破解循环流化床锅炉深度调峰的低负荷主蒸汽温度不足和NO_x超低排放难的技术瓶颈, 创新性提出了循环流化床低负荷炉膛“C构型”温度分布理念, 创建了循环流化床低负荷的炉膛底部密相区颗粒煤燃烧耦合预热改性燃料上部空间燃烧的新模态, 主动改变了锅炉低负荷燃烧的热量分配关系, 形成了预热提前脱氮、预热改性燃料与循环流化床主炉膛生成NO_x的均相还原和异相还原, 以及炉膛上部依靠提高炉膛出口温度提升SNCR脱硝反应率的超低NO_x排放控制新方法。

4.1 炉膛温度分布热力计算

利用Excel软件, 基于能质平衡、燃烧反应和传热过程, 参考锅炉机组热力计算标准方法和锅炉设备空气动力计算方法, 开发了240 t/h高温高压循环流化床锅炉有无耦合预热的热力计算程序, 其中无耦合预热

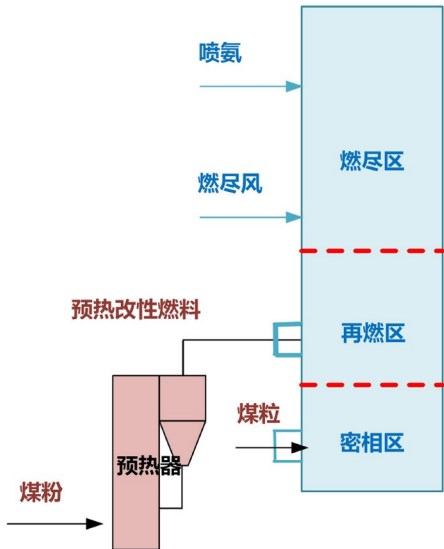


图 12 (网络版彩图) 预热改性燃料耦合燃烧方式
Figure 12 (Color online) The combustion method with preheating modified fuel coupled.

为全部给煤仅从循环流化床密相区给入, 耦合预热为部分给煤(颗粒煤)从循环流化床密相区给入、部分给煤(煤粉)从预热器给入, 不同负荷下有无耦合预热的计算条件见表2.

不同负荷下有无耦合预热的炉膛出口温度热力计算对比见图13, 其中锅炉负荷50%、70%和100%时, 耦合预热比例为20%, 锅炉负荷30%和20%时, 底部给煤热量和耦合煤粉预热热量比例为1:1, 即耦合比例分别为15%和10%.

从图13可知, 无论是否耦合预热, 随着锅炉负荷的降低, 炉膛出口温度降低, 且有预热的炉膛出口温度高于无预热的炉膛出口温度. 但随着锅炉负荷的降低, 有无预热的炉膛出口温度差值增大. 其差值增大的主要原因在于, 循环流化床锅炉无耦合预热下, 炉膛的蒸发吸热量增加, 导致炉膛出口温度降低.

循环流化床锅炉耦合预热情况下, 不同负荷的炉膛温度分布热力计算见图14. 可见, 随着锅炉负荷的降低, 炉膛温度的“C构型”特征愈加明显, 炉膛内的高温和低温差愈大, 也正是由于低温区的存在, 可降低锅炉低负荷的蒸发吸热量, 提升低负荷的主汽温度.

30%负荷下, 改变预热燃料喷口高度, 可改变循环流化床锅炉的炉膛温度分布曲线, 见图15. 随着预热燃料喷口高度的增加, 炉内最低温度降低, 且炉内低温区域增加, 锅炉蒸发吸热量降低, 炉膛出口温度增加.

4.2 炉膛“C构型”温度分布验证

采用循环流化床锅炉“C构型”温度分布创新理念,

表 2 不同负荷的计算条件

Table 2 Calculation conditions with different loads

项目名称	单位	20%		30%		50%		70%		100%	
		有预热	无预热	有预热	无预热	有预热	无预热	有预热	无预热	有预热	无预热
预热负荷比	%	10.0	—	15.0	—	20.0	—	20.0	—	20.0	—
主炉膛负荷比	%	10.0	20.0	15.0	30.0	30.0	50.0	50.0	70.0	80.0	100.0
过剩空气系数	—	1.50	1.50	1.35	1.35	1.25	1.25	1.20	1.20	1.15	1.15
总风量	m ³ /h	51585	51885	69585	69585	106915	106915	143381	143381	195868	195868
一次风量	m ³ /h	35000	35000	35000	41751	50000	58803	60000	78859	85000	97934
二次风量	m ³ /h	4585	16585	14585	27834	19915	48112	46381	64521	73868	97934
预热器风量	m ³ /h	4000	—	5000	—	7000	—	7000	—	7000	—
预热燃料旋流风量	m ³ /h	8000	—	10000	—	15000	—	15000	—	15000	—
燃尽风量	m ³ /h	0	—	5000	—	15000	—	15000	—	15000	—

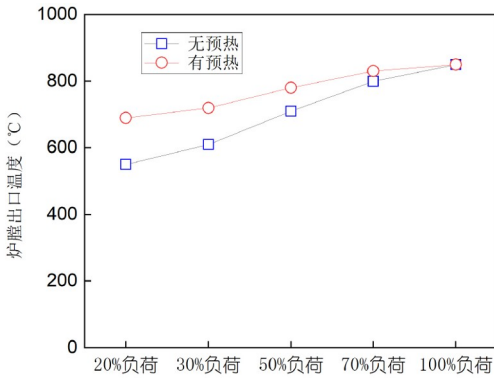


图 13 (网络版彩图)锅炉不同负荷下有无耦合预热的炉膛出口温度
Figure 13 (Color online) The comparison of furnace outlet temperature with preheating or not under different boiler loads.

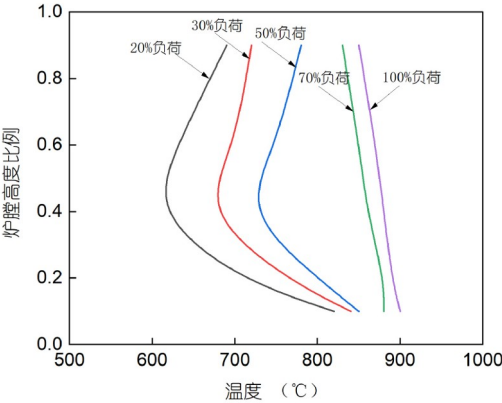


图 14 (网络版彩图)锅炉不同负荷的炉膛温度分布计算
Figure 14 (Color online) Calculation of furnace temperature distributions with different boiler loads.

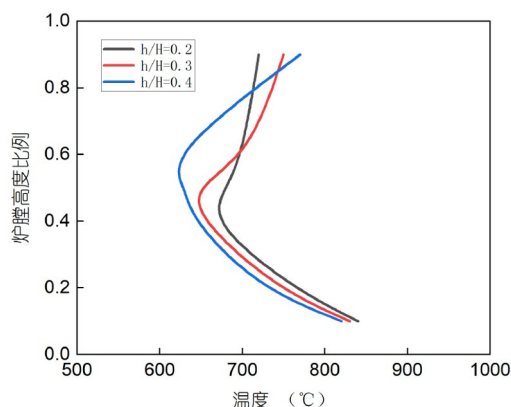


图 15 (网络版彩图)30%负荷预热燃料喷口不同高度的炉膛温度计算

Figure 15 (Color online) Calculation of furnace temperature with different preheating fuel injection heights at 30% load.

开展了兖州市银河电力有限公司240 t/h高温高压循环流化床锅炉技改, 锅炉两侧墙各耦合一个24 MW_{th}预热器, 预热耦合比例(预热给入的热量占锅炉满负荷对应总热量的比)设计为25%, 预热器与锅炉的布置关系见图16。

锅炉单侧24 MW_{th}预热器外形见图17, 预热器为循环流化床形式, 包括提升管、旋风分离器和返料器关键部件, 预热器内部无受热面, 外部为普通碳钢, 内部用保温和耐磨料浇注制作。

预热燃料喷口采用同轴旋流喷口, 喷口中心为预热燃料通道, 喷口外围为旋流二次风通道, 旋流二次风内设有24个旋流叶片, 二次风旋流数为1.20, 预热燃料喷口外形见图18, 预热燃料喷口布置在炉膛底部布风板以上6170 mm、炉内过热屏屏下方6000 mm, 预热燃料喷口高度与锅炉炉膛高度的比例为0.2。

其中, 旋流数较小, 不利于预热燃料和空气的充分混合, 火焰射程长、刚性大; 旋流数过大, 预热燃料喷射后快速升温着火, 存在喷口和壁面区域温度较高的风险。Corrêa da Silva等人^[37]研究表明二次风旋流数为1.65时, 可形成介于直流射流和强回流卷吸的火焰类型; Sung等人^[38]研究表明分级燃烧条件下优化的旋流数为1.33。考虑到预热燃料自身温度高和稳燃特性好, 二次风旋流数设计值为1.20, 未来需结合数值模拟分析预热燃料不同旋流强度的燃烧和排放特性。

锅炉20%(预热10%)、25%(预热12.5%)、32%(预热16%)、40%~85%负荷(预热均为20%)下炉膛的实测

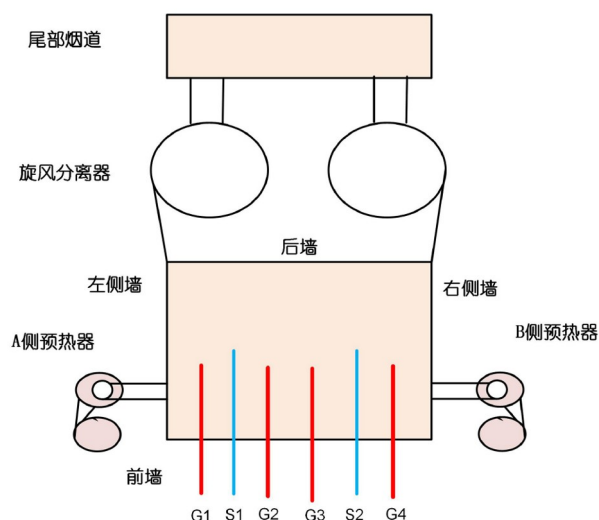


图 16 (网络版彩图)预热器与锅炉的耦合关系

Figure 16 (Color online) Coupling relationship of preheater with boiler.



图 17 (网络版彩图)24 MW_{th}预热器外形

Figure 17 (Color online) Appearance of 24 MW_{th} preheater.

温度分布曲线见图19。

从图19可见, 锅炉负荷50%时, 炉膛温度已改变了常规单调递减的技术特征, 呈现出炉内两端温度高、中间温度低的“C构型”温度分布。锅炉负荷从50%降低到40%、32%、25%和20%的过程中, 炉内“C构型”温度分布特征愈加明显, 240 t/h高温高压循环流化床锅



图 18 (网络版彩图) 24 MW_{th} 预热器预热燃料旋流喷嘴

Figure 18 (Color online) The swirl nozzle of preheating fuel with 24 MW_{th} preheater.

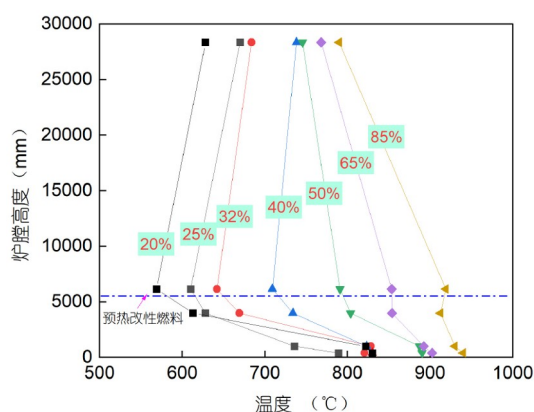


图 19 (网络版彩图) 循环流化床炉膛不同负荷的温度分布

Figure 19 (Color online) Temperature distributions of the circulating fluidized bed furnace with different loads.

炉耦合预热改性燃料燃烧获得了“C构型”温度分布曲线。

对比240 t/h高温高压循环流化床锅炉有无耦合预热改性燃料燃烧的主蒸汽温度, 测量结果见图20。可见, 锅炉负荷50%和70%时, 循环流化床锅炉耦合预热改性燃料燃烧的主蒸汽温度明显高于常规循环流化床燃烧的主蒸汽温度, 50%负荷下主蒸汽温度从508°C增加到530°C, 充分说明“C构型”温度曲线改变锅炉热量分配、提升了过热吸热比例。锅炉负荷低于50%时, 循环流化床锅炉常规燃烧因主蒸汽温度低和无法实现NO_x超低排放两方面因素而不能进一步深调。在“C构型”温度分布下, 循环流化床锅炉最低运行负荷从50%深调到了20%, 锅炉负荷调节深度下降了30%。且图20的主蒸汽温度实测数据趋势与图13的炉膛出口温度热力计算趋势相吻合, 其结果均表明, 随着锅炉负荷的降

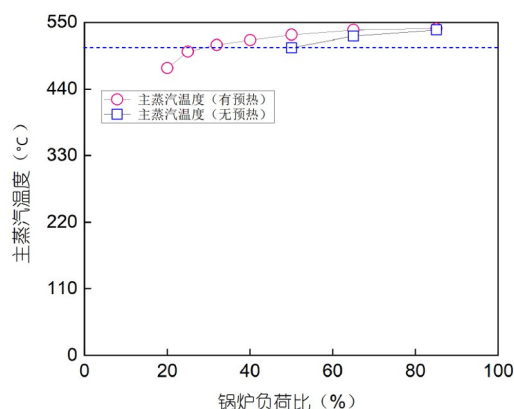


图 20 (网络版彩图) 循环流化床锅炉有无耦合预热的主蒸汽温度对比

Figure 20 (Color online) Comparison of steam temperature of circulating fluidized bed boiler with preheating or not.

低, 耦合预热改性燃料燃烧与无预热改性燃料燃烧的炉膛出口温度和主蒸汽温度差值增大。

4.3 “C构型”温度分布下的原始超低NO_x排放

“C构型”温度分布下, 锅炉负荷35%~70%期间, 可实现零喷氨超低NO_x排放。

锅炉负荷35%时, NO_x排放数值变化见图21, 可见NO_x原始排放数值均低于50 mg/m³(@6%O₂)。

图21的NO_x排放测试期间对应的氨水消耗量变化曲线见图22, 可见, 喷氨量为零。

循环流化床锅炉耦合预热改性燃料燃烧, 由于预热燃料自脱氮并结合预热改性燃料与循环流化床锅炉主炉膛生成NO_x的均相还原和异相还原, 可在零喷氨下直接实现超低NO_x排放, 且35%负荷时NO_x原始排放均值仅为30 mg/m³, 充分体现了循环流化床锅炉耦合预热改性燃料燃烧在降低NO_x排放的显著优越性。

5 “C构型”理念放大应用与展望

“双碳”目标下随着光伏等可再生能源装机容量的增加和工业园区用汽负荷的多变性, 低成本的循环流化床燃煤锅炉深度灵活调峰是平抑可再生能源波动、提升可再生能源消纳比例的重大需求。

针对不同容量等级的循环流化床锅炉, 需结合锅炉运行参数、受热面布置、NO_x排放水平等研发技术方案。某480 t/h超高压再热循环流化床锅炉(蒸汽压力

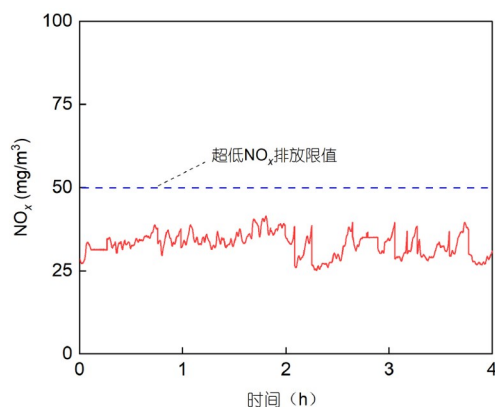


图 21 (网络版彩图) 锅炉NO_x排放变化

Figure 21 (Color online) NO_x emission variation of boiler.

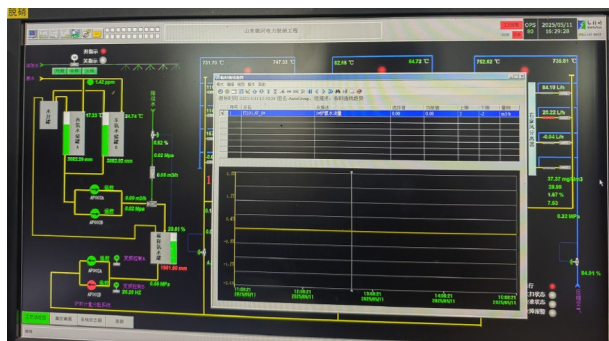


图 22 (网络版彩图) 锅炉4 h零喷氨曲线

Figure 22 (Color online) Zero ammonia injection curve of boiler in four hours.

13.7 MPa、蒸汽温度540℃)最低运行负荷40%, 且40%负荷时, 炉膛上部温度已低于650℃, 结合“C构型”温度分布创新理念和240 t/h高温高压循环流化床锅炉耦合预热改性燃料燃烧的测试数据, 形成了480 t/h超高压再热循环流化床锅炉耦合预热改性燃料燃烧技改方案. 其中, 炉膛两侧墙各布置一个40 MW_{th}预热器, 预热器采用单炉膛、双分离器的双循环、双喷口形式, 其双喷口预热器与锅炉耦合方式见图23, 预热器耦合比例设计为20%, 锅炉耦合预热后其调峰深度将从40%深调到20%. 并利用热力计算程序, 计算了20%负荷下有无耦合预热的炉膛出口温度、主蒸汽温度和再热蒸汽温度, 见图24. 可见, 锅炉20%负荷耦合预热后, 其主蒸汽温度和再热蒸汽温度均可超过500℃.

循环流化床锅炉深度调峰“C构型”温度分布理念的工业验证, 将为循环流化床锅炉深度调峰技术的发展和装备升级提供理论和技术支撑, 促进电站锅炉和

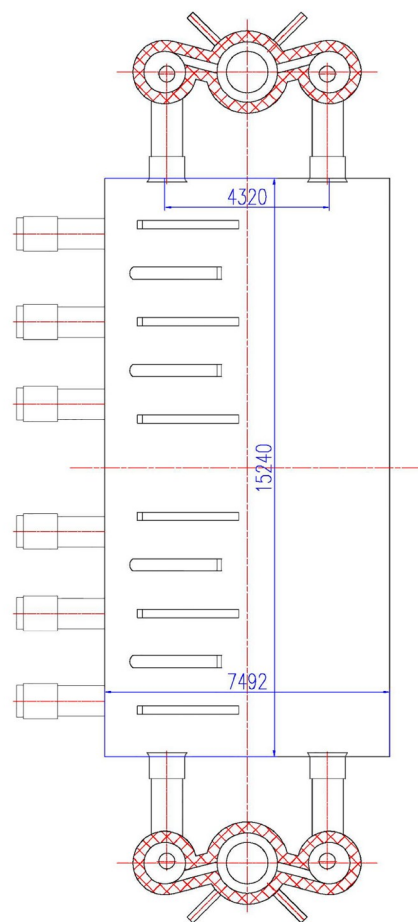


图 23 (网络版彩图) 480 t/h锅炉与预热器耦合方案

Figure 23 (Color online) Coupling scheme of 480 t/h boiler with preheater.

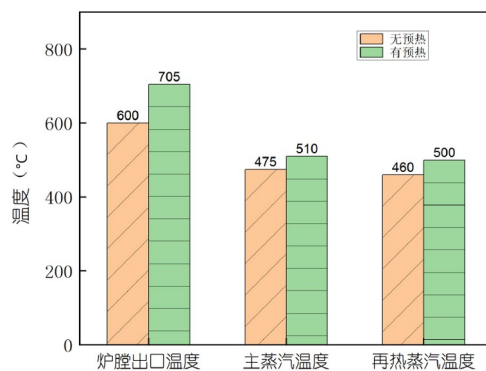


图 24 (网络版彩图) 480 t/h锅炉不同温度热力计算对比

Figure 24 (Color online) Comparison of thermal calculation results for different temperatures of 480 t/h boiler.

工业园区等提升可再生能源消纳比例, 助推中国“双碳”目标实现.

6 结论

针对循环流化床锅炉深度调峰的负荷调节深度受限和低负荷 NO_x 超低排放难以达标的技术瓶颈, 创新性提出了循环流化床锅炉低负荷“C构型”温度分布创新理念, 并在240 t/h高温高压循环流化床锅炉上完成了工程验证, 主要结论如下。

(1) 阐明了循环流化床锅炉低负荷主蒸汽温度不足的根本原因, 低负荷时循环流化床炉膛温度自底向上单调递减, 而锅炉的过热器均布置在炉膛上部 and 锅炉尾部烟道内, 低负荷的蒸发吸热比例大、过热吸热比例小, 导致主蒸汽温度不足; 揭示了循环流化床锅炉低负荷燃烧时 NO_x 无法满足 50 mg/m^3 超低排放限值的本质因素, 一次风率大、炉内还原性气氛弱, NO_x 原始生成浓度高, 且炉膛上部温度低导致了SNCR脱硝反应率低下甚至失效, NO_x 原始生成浓度高和 NO_x 无法有效还原致使循环流化床锅炉低负荷运行 NO_x 不能满足环保限值。

(2) 针对循环流化床锅炉深度调峰的技术瓶颈, 创新性提出了变革循环流化床低负荷炉膛温度分布单调递减的技术特征, 创建循环流化床低负荷炉内底部和上部温度高、中间温度低的“C构型”温度分布曲线, 循环流化床燃烧方式由常规的仅底部密相区颗粒煤燃烧变革为底部密相区颗粒煤燃烧耦合上部预热改性燃料空间燃烧的新模态。循环流化床锅炉耦合预热改性燃料燃烧中, 形成了预热自脱氮、喷入炉内的预热改性燃料与循环流化床锅炉炉膛密相区生成 NO_x 的均相

还原和异相还原以及因炉膛上部温度高提升SNCR脱硝反应率的深度控氮体系。

(3) 开发热力计算程序, 计算了循环流化床锅炉耦合预热改性燃料燃烧的炉膛温度分布, 结果表明, 锅炉有无耦合预热改性燃料燃烧的炉膛出口温度差值随着锅炉负荷的降低而增大, 其原因在于锅炉常规燃烧的蒸发吸热比例随锅炉负荷的降低而增加, 导致炉膛出口温度降低。循环流化床锅炉的炉膛“C构型”温度分布特征与锅炉负荷、预热燃料喷口位置、锅炉配风等关系密切, 其“C构型”曲线不断发生变化, 随着锅炉负荷的降低, “C构型”特征愈加明显, 即炉内高温与低温的温差增加; 随着预热燃料喷口高度增加, 最低温度降低且高度增加, “C构型”曲线发生了滑移。

(4) 采用循环流化床锅炉深度调峰的“C构型”温度创新理念, 完成了240 t/h高温高压循环流化床锅炉技改, 开展了20%、25%、32%、40%、50%、65%和85%负荷耦合预热改性燃料燃烧的试验研究, 结果表明锅炉负荷50%时, 炉膛温度已经呈现了“C构型”温度分布特征, 且随着锅炉负荷的进一步降低, 炉膛“C构型”特征愈加明显。锅炉负荷50%时, 耦合预热改性燃料燃烧的主蒸汽温度提升了 22°C , 35%~70%负荷范围内实现了零喷氨超低 NO_x 原始排放, 20%~35%和70%~100%两个负荷阶段可借助SNCR直接实现超低 NO_x 排放, 锅炉负荷调节深度下降了30%, 完成了循环流化床锅炉深度调峰“C构型”温度分布创新理念工业验证, 体现了理念和技术先进性, 研究结果为循环流化床锅炉深度灵活调峰技术的发展和應用提供支撑。

参考文献

- 1 United Nations. United Nations Framework Convention on Climate. Paris Agreement, 2015
- 2 Energy Institute. Statistical Review of World Energy 2024, 73th ed. London: Energy Institute, 2024
- 3 Xuan Y, Liu X, Guan Y. Enhancing energy efficiency and reducing emissions of energy end-use sectors: Pathways, trends, and strategies (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2025, 39: 509–518 [宣益民, 刘向雷. 终端用能提效减排: 路径、趋势及对策. 中国科学基金, 2025, 39: 509–518]
- 4 Li Z, Li W Q, Zhang Z W, et al. Development strategy of flexible resources in China's power system under the carbon peaking and carbon neutrality goals (in Chinese). *Strateg Study CAE*, 2024, 26: 108–120 [李政, 李伟起, 张忠伟, 等. “双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究. 中国工程科学, 2024, 26: 108–120]
- 5 Shu Y, Zhang L, Zhang Y, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry (in Chinese). *Chin J Eng Sci*, 2021, 23: 1–4 [舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究. 中国工程科学, 2021, 23: 1–14]
- 6 Jiang P X, Jin H G. A strategic study of interdisciplinary frontier in the field of energy conversion and utilization for the “dual carbon” goals (in Chinese). *Sci Bull*, 2024, 69: 5007–5015 [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. 科学通报, 2024, 69: 5007–5015]

5007–5015]

- 7 He J D, Cao D Q, Duan X N, et al. Give full play to national strategic S&T force to provide vigorous support for carbon peak and carbon neutrality goals (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2022, 37: 415–422 [何京东, 曹大全, 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. *中国科学院院刊*, 2022, 37: 415–422]
- 8 Wang T T, Liu B, Ji F, et al. Schematic design and economic analysis of hydrogen co-firing for a peaking power plant with hydrogen from renewable energy (in Chinese). *Clean Coal Technol*, 2025, 31: 54–61 [王天天, 刘彪, 季凡, 等. 可再生能源制氢下调峰电厂掺氢燃烧系统及经济性分析. *洁净煤技术*, 2025, 31: 54–61]
- 9 Liu Y H, Lyu Q G, Gao Z N, et al. Quantitative study on role of flexibility index of coal-fired power units in regulating wind and solar power generation (in Chinese). *J China Coal Soc*, 2025, 50: 2752–2760 [刘玉华, 吕清刚, 高政南, 等. 煤电机组灵活性指标对风光发电调节作用的量化研究. *煤炭学报*, 2025, 50: 2752–2760]
- 10 Leckner B. Hundred years of fluidization for the conversion of solid fuels. *Powder Tech*, 2022, 411: 117935
- 11 Liu X M, Zhang J M, Zhang T, et al. A review of coal-fired fluidized bed boiler coupled with carbon-containing waste combustion technology (in Chinese). *Clean Coal Technol*, 2024, 1–15 [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. *洁净煤技术*, 2024, 1–15]
- 12 Leckner B. From bubbling to circulating fluidized bed combustion—development and comparison. *Heliyon*, 2024, 10: e33415
- 13 Zhang H, Lyu J, Yue G. A review on research and development of CFB combustion technology in China. *Powder Tech*, 2023, 414: 118090
- 14 Yue G X, Zhang Y, Zhang J C, et al. Outlook for multiple fuel circulating fluidized bed combustion technologies for the dual carbon goals (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 6844–6854 [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. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 6844–6854]
- 15 Lyu J F, Wang J F, Jiang X G, et al. Research and development of ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 6883–6899 [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. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 6883–6899]
- 16 Lyu J F, Jiang L, Zhang H, et al. Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization (in Chinese). *Coal Sci Technol*, 2023, 51: 514–521 [吕俊复, 蒋苓, 张海等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景. *煤炭科学技术*, 2023, 51: 514–521]
- 17 Duan S B, Xin W S, Gu C Y, et al. Research on ultra-low NO_x emission of CFB boiler under low load (in Chinese). *Clean Coal Technol*, 2021, 27: 299–303 [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. *洁净煤技术*, 2021, 27: 299–303]
- 18 Ma J R, Meng Q S, Wang J J, et al. Experimental study on operation characteristics of circulating fluidized bed boiler burning Zhundong coal under variable conditions (in Chinese). *Boiler Technol*, 2024, 55: 36–40 [马金荣, 孟庆松, 王建江, 等. 纯烧准东煤循环流化床锅炉变工况运行特性试验研究. *锅炉技术*, 2024, 55: 36–40]
- 19 Zhang S H, Zhang S M, Zhang J J, et al. Performance research on deep peak regulation with flue gas recirculation in a 330 MW subcritical CFB boiler (in Chinese). *Clean Coal Technol*, 2021, 27: 291–298 [张思海, 张双铭, 张俊杰, 等. 330 MW亚临界CFB锅炉烟气再循环深度调峰运行性能研究. *洁净煤技术*, 2021, 27: 291–298]
- 20 Yang J C, Wang Q, Wang P C, et al. Characterization and mitigation of NO_x emissions across a wide load range in supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler (in Chinese). *Clean Coal Technol*, 2025, 31: 78–85 [杨敬池, 王菁, 王鹏程, 等. 超临界350 MW循环流化床宽负荷NO_x排放特性及控制技术. *洁净煤技术*, 2025, 31: 78–85]
- 21 Lyu J F, Shang M X, Ke X W, et al. Powdered coal circulating fluidized bed combustion technology (in Chinese). *J China Coal Soc*, 2023, 48: 430–437 [吕俊复, 尚曼霞, 柯希玮, 等. 粉煤循环流化床燃烧技术. *煤炭学报*, 2023, 48: 430–437]
- 22 Shang M X, Yao Y G, Ke X W, et al. Development and thermal calculation method of 0–1 mm pulverizing system for powdered coal-circulating fluidized bed boiler (in Chinese). *J Cent South Univ*, 2024, 55: 1560–1566 [尚曼霞, 姚禹歌, 柯希玮, 等. 粉煤循环流化床锅炉0–1 mm制粉系统开发与热力计算方法. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55: 1560–1566]
- 23 Ke X, Zhu S, Huang Z, et al. Issues in deep peak regulation for circulating fluidized bed combustion: Variation of NO_x emissions with boiler load. *Environ Pollut*, 2023, 318: 120912
- 24 Zhu J G, Han H Z, Li D, et al. The demonstration of 240t/h circulating fluidized bed boiler with deeply flexible peak-shaving (in Chinese), *China Spec Eq Safety*, 2024, 40: 89–93 [朱建国, 韩会忠, 李栋, 等. 240t/h 循环流化床锅炉深度灵活调峰工程示范. *中国特种设备安全*, 2024, 40: 89–93]
- 25 Li K, Qu Y P, Zheng Y, et al. Analysis and response measures of NO_x low load formation characteristics in 300 MW CFB and countermeasures

- (in Chinese). *Northeast Electric Power Technol*, 2019, 40: 46–49 [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. *东北电力技术*, 2019, 40: 46–49]
- 26 Glarborg P, Miller J A, Ruscic B, et al. Modeling nitrogen chemistry in combustion. *Prog Energy Combust Sci*, 2018, 67: 31–68
- 27 Zhu J G, Lyu Q G, Li B H. Combustion apparatus and control method thereof. China Patent, 202311750966.2 [朱建国, 吕清刚, 李百航. 燃烧设备及其控制方法. 中国专利, 202311750966.2]
- 28 Lyu Q G, Zhu J G, Li B H, et al. The present invention relates to circulating fluidized bed boiler system with fluidized preheater and its control method. China Patent, 202310252077.7 [吕清刚, 朱建国, 李百航, 等. 具有流态化预热器的循环流化床锅炉系统及其控制方法. 中国专利, 202310252077.7]
- 29 Lyu Q G, Zhu J G, Ouyang Z Q, et al. Principle and Technology of Preheating Combustion (in Chinese). Beijing: Science Press, 2024. 9–43 [吕清刚, 朱建国, 欧阳子区, 等. 预热燃烧原理及技术. 北京: 科学出版社, 2024. 9–43]
- 30 Zhang Y, Zhu J, Lyu Q, et al. Coke generation and conversion behavior of pulverized coal combustion. *J Energy Inst*, 2020, 93: 2096–2107
- 31 Liu Y, Lyu Q, Liu J, et al. Effect of the oxygen concentration on the oxy-fuel preheated combustion characteristics and NO_x control path of different coal rank fuels. *Energy*, 2025, 326: 136278
- 32 Zhang X, Zhu S, Song W, et al. Experimental study on conversion characteristics of anthracite and bituminous coal during preheating-gasification. *Fuel*, 2022, 324: 124712
- 33 Zhang Y, Zhu J, Lyu Q, et al. The ultra-low NO_x emission characteristics of pulverized coal combustion after high temperature preheating. *Fuel*, 2020, 277: 118050
- 34 Zhang Y, Zhu J G, Lyu Q G, et al. Analysis of migration characteristics of C/O/N elements in coal under preheated combustion reducing atmosphere (in Chinese). *Clean Coal Technol*, 2022, 28: 18–25 [张毅, 朱建国, 吕清刚, 等. 预热燃烧还原性气氛下煤中C/O/N元素的迁移特性. *洁净煤技术*, 2022, 28: 18–25]
- 35 Zhang X, Zhu S, Zhu J, et al. Preheated combustion characteristics and fuel-nitrogen conversion paths for bituminous coal and anthracite in wide-range preheating temperature. *J Energy Inst*, 2023, 108: 101222
- 36 Do H S, Tran T S, Han Z, et al. Synergetic NO reduction by biomass pyrolysis products simulating their reburning in circulating fluidized bed decoupling combustion. *Chin J Chem Eng*, 2019, 27: 1680–1689
- 37 Corrêa da Silva R, Krautz H J. Combustion measurements of type-1 pulverized coal flames operating under oxy-fired conditions. *Fuel Process Tech*, 2018, 171: 232–247
- 38 Sung Y, Choi G. Effectiveness between swirl intensity and air staging on NO_x emissions and burnout characteristics in a pulverized coal fired furnace. *Fuel Process Tech*, 2015, 139: 15–24

Concept and verification of the “C-configuration” temperature distribution of circulating fluidized bed boilers with deep peak shaving

ZHU JianGuo^{1,2}, LYU QingGang^{1,2}, LI BaiHang¹, HAN HuiZhong³, LIU JingZhang¹, LIU YuHua¹ & GAO Ming¹

¹ Skate 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

Circulating fluidized bed boilers are crucial equipment for the efficient and clean combustion of coal, and their deep peak shaving is a key technology for building a new power system and establishing low-carbon industrial parks under the “dual carbon” goal. Under low-load conditions, both low main steam temperature and high NO_x emissions are the main technical difficulties to realize deep peak shaving for circulating fluidized bed boilers. This paper reforms the traditional technical feature where the temperature distribution from the bottom to the top is monotonically decreasing with low-load combustion of circulating fluidized bed boiler, innovatively proposing a “C-configuration” temperature distribution concept for low-load combustion. The basic characteristics are that there exist two high temperature zones, separately at the bottom of the furnace for keeping the hot bed layer and at the top of the furnace for raising main steam temperature and de-NO_x efficiency with SNCR, and one low temperature zone at the middle, thereby forming the “C-configuration” temperature distribution curve, to change the ratio of vaporization heat to superheating heat to improve main steam temperature. Coupling preheating modified fuel into the middle of the circulating fluidized bed, the combustion of the circulating fluidized bed under low-load conditions will be transformed from normal fluidizing combustion only with coal particles at the bottom to a novel state with bottom fluidized combustion and upper space combustion of preheating modified fuel. A new system with three-stage controlling NO_x formation is established, including self-denitrification in the preheating, homogeneous reduction, and heterogeneous reduction of NO_x with preheating modified fuel, and an increasing de-NO_x efficiency of SNCR resulted from a rise in reaction temperature. Based on the “C-configuration” temperature distribution concept and thermal calculation program, the 240 t/h high-temperature and high-pressure circulating fluidized bed boiler was retrofitted. The results of this investigation showed that when the boiler load is 50%, the temperature curve exhibits the basic characteristics of “C-configuration”, and with the further decrease of boiler loads, the tendency becomes more obvious. As a result, compared to traditional combustion, the main steam temperature coupling preheating modified fuel combustion has elevated 22°C, and the direct ultra-low NO_x emissions were achieved with the load range of 35%–70%. The boiler load regulation depth has been reduced from 50% to 20%, realizing the deep peak shaving and finishing the industrial verification of the “C-configuration” concept. The results would provide good support for the development and application of deep flexible peaking regulation technology for circulating fluidized bed boilers, giving an advanced and feasible scheme for suppressing the fluctuation of renewable energy and thereby promoting the increase of renewable energy accommodation ratios.

circulating fluidized bed boiler, deep peak shaving, “C-configuration” concept, industrial verification

doi: [10.1360/SST-2025-0158](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0158)