DOI: 10.19666/j.rlfd.202605113

可调回流区分级着火燃烧技术在贫煤锅炉深度调峰改造中的应用

周强[1]，李兴智[2]，李仁义[2]，周广钦[2]，张森[2]，张喜来[2]，
马帅[3]，姚斌[3]，邓宏杰[4]
（1. 胜利石油管理局有限公司胜利发电厂，山东 东营 257087；
2. 西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
3. 华中科技大学能源与动力工程学院，湖北 武汉 430074；
4. 湖北省电力规划设计研究院有限公司，湖北 武汉 430060）

［摘 要］【目的】以贫煤锅炉深度调峰改造成功案列为依托，从技术原理、数模研究、工程应用情况等对可调回流区分级着火燃烧技术进行分析、研究，为该技术在亚临界锅炉燃用贫煤超低负荷下实现不投油稳定燃烧改造中的应用提供可行性支撑。【方法】采用构建精细化 CFD 模型对 30%ECR 工况进行全炉膛燃烧数值模拟，分析流场、温度场及水冷壁热负荷变化。研究了可调回流区分级着火燃烧器的原理，并与数值模拟研究相融合，指导工程应用改造。【结果】数值模拟结果表明，30%ECR 工况燃尽率达 99.86%，CO 质量浓度仅 4.38 mg/m^3。改造后，30%ECR 负荷稳燃试验表明，燃用贫煤时，不投油最低电负荷降至 90 MW，炉膛负压波动正常，脱硝全程投运且排放达标。【结论】可调回流区分级着火燃烧器通过钝体开缝形成主动分级着火机制及可调周界风设计，达到了低负荷强化稳燃与高负荷防结渣的目的。修正后的锅炉效率为 91.47%，实现锅炉宽负荷高效运行。改造达到了预期目的，为同类贫煤锅炉深度调峰改造提供技术参考。

［关 键 词］可调回流区分级着火燃烧技术；深度调峰；贫煤；数值模拟；灵活性改造

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码.

Application of adjustable recirculation zone staged ignition combustion technology in deep peak regulation retrofit of lean coal-fired boilers

Zhou Qiang[1], Li Xingzhi[2], Li Renyi[2], Zhou Guangqin[2], Zhang Sen[2], Zhang Xilai[2],
Ma Shuai[3], Yao Bin[3], Deng Hongjie[4]
(1. Shengli Power Plant, Shengli Petroleum Administration Co., Ltd., Dongying 257087, China;
2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
3. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
4. POWERCHINA Hubei Electric Engineering Corporation Limited, Wuhan 430060, China)

Abstract: [Objective] Deep peak regulation has become an essential operational requirement for thermal power units to adapt to the large-scale grid integration of new energy sources. Lean coal-fired subcritical boilers frequently encounter unstable combustion and require auxiliary oil ignition during ultra-low load operation, which restricts the flexible peak-shaving capacity of power plants. Taking a successful deep peak regulation renovation project of a lean coal-fired boiler as the research basis, this paper conducts a comprehensive study on the adjustable recirculation zone staged ignition combustion technology. It systematically elaborates the core content of the technology from

收 稿 日 期：2026-05-29 修 回 日 期：2026-10-10 接 受 日 期：2026-10-15 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：煤炭重大专项（2025ZD1701100，2025ZD1701102）
Supported by：Coal-Major Project (2025ZD1701100, 2025ZD1701102)
第一作者简介：周强（1973），男，高级工程师，主要研究方向为机组灵活性调节及控制，zhouqiang973.slyt@sinopec.com。
通信作者简介：李兴智（1988），男，高级工程师，主要研究方向为高碱煤燃烧特性及结渣沾污防控技术，lixingzhi@tpri.com.cn。

three key dimensions: technical working principle, computational numerical simulation, and practical engineering application effects. This research aims to validate the technical feasibility of applying the proposed technology to realize full oil-free stable combustion for subcritical lean coal-fired boilers under ultra-low load conditions, and to provide reliable technical support and practical guidance for the promotion and implementation of similar boiler renovation projects. [Methods] In this study, a high-precision refined Computational Fluid Dynamics (CFD) model was established to carry out full-furnace combustion numerical simulation under the typical ultra-low load condition of 30% Economic Continuous Rating (30% ECR). Based on the simulation calculation data, the dynamic variation characteristics of furnace internal flow field distribution, combustion temperature field uniformity, and water wall heat load were comprehensively analyzed. In addition, the structural composition and stable combustion mechanism of the adjustable recirculation zone staged ignition burner were expounded in detail, and the field operation data and test results of the engineering renovation were summarized and analyzed to verify the practical performance of the technology. [Results] The numerical simulation results demonstrate that excellent combustion performance is achieved at the 30% ECR ultra-low load working condition. Specifically, the pulverized coal burnout rate reaches 99.86%, and the flue gas carbon monoxide (CO) concentration is as low as 4.38 mg·m^{-3}, indicating thorough fuel combustion. The field steady combustion tests conducted at 30% ECR load after technical renovation further verify the remarkable practical effect. When the boiler operates with lean coal, the minimum oil-free stable combustion electric load is successfully reduced to 90 MW. During the whole ultra-low load operation period, the furnace negative pressure fluctuates steadily within the normal safe range. The denitrification system can maintain continuous and stable operation, and all flue gas emission indicators fully meet the national ultra-low emission standards. [Conclusion] The adjustable recirculation zone staged ignition burner adopts a slotted bluff body structure to construct an active staged ignition mechanism, combined with a flexible adjustable perimeter air design. The innovative structural design effectively solves two key operational problems of lean coal-fired boilers, realizing stable combustion reinforcement under low load conditions and preventing furnace slagging under high load conditions. After the renovation, the corrected thermal efficiency of the boiler reaches 91.47%, which realizes high-efficiency and stable operation of the boiler in a wide load range. All operational indicators of the renovated boiler fully meet the design expectations. This study provides a valuable and practical technical reference for the deep peak regulation transformation of the same type of subcritical lean coal-fired boilers, and has good engineering application and promotion value.

Key words: adjustable recirculation zone staged ignition combustion technology; deep peak regulation; lean coal; numerical simulation; flexibility renovation

我国煤电机组正加速从基础保障电源向系统调节型电源转变。在双碳政策下，国家提出四个升级方向：高效调控、清洁降碳、安全可靠、运行智能[错误!未找到引用源。]。在此背景下，燃用低挥发分煤种的机组，如燃用贫煤和无烟煤的锅炉，在深度调峰方面面临的挑战尤为严峻[错误!未找到引用源。]。

煤粉气流的着火稳定性主要取决于着火区烟气温度、煤粉浓度和高温烟气回流量三个关键因素。贫煤挥发分低、着火温度高、燃烧反应速率慢，传统燃烧器在 30%BMCR 以下负荷难以形成稳定着火源。围绕低负荷稳燃问题，既有研究印证了浓淡分离、钝体稳燃及低氮分级燃烧等技术的有效性，但多聚焦于烟煤锅炉或中等调峰深度需求，对于贫煤锅炉在 30%额定负荷以下的深度调峰改造，尚缺乏工程实践的完整案例[错误!未找到引用源。]。

胜利发电厂 3 号机组采用亚临界自然循环汽包炉，四角切圆燃烧并配备百叶窗水平浓淡煤粉喷嘴。至改造前，喷口已出现变形、烧损等问题，不投油最低稳燃负荷仅为 45%BMCR，无法满足深调要求。本文采用 CFD 数值模拟与工程应用相结合的方法，系统研究可调回流区分级着火燃烧器（ARZ-SIB II燃烧器）在贫煤锅炉深度调峰中的技术可行性与实际应用效果。

1 设备概况和现存的问题

1.1 设备概况

胜利发电厂 3 号锅炉由上海锅炉厂生产的亚临界中间一次再热自然循环汽包炉，锅炉主要设计参数如表 1 所示，BMCR 工况主蒸汽流量 1025t/h，过热器/再热器出口温度均为 540℃。锅炉采用单炉膛四角切圆燃烧，在炉室下部四个切角处各布置一组直流式摆动燃烧器。每组燃烧器又分成上下两组各 2 个一次风喷嘴组。共计 7 层二次风喷嘴，4 层一次风喷嘴和 2 层燃尽二次风喷嘴。制粉系统采用双进双出钢球磨直吹式系统，4 台 BBD3854 型双进双出钢球磨正压直吹式，设计燃用山西西山、寿阳及山东淄博地区贫煤，设计煤种干燥无灰基挥发分 15.37%。

表 1 3 号机组锅炉设计参数表
Tab.1 Design parameters of Boiler No.3

项目	规范
型号	SG-1025/17.4-M851
型式	亚临界自然循环汽包炉/中间一次再热
过热蒸汽流量/(t·h^{-1})	1025
过热器出口压力/MPa	17.5
过热器出口温度/℃	540
再热蒸汽流量/(t·h^{-1})	842.05
再热器进口压力/MPa	3.86
再热器出口压力/MPa	3.66
再热器进口温度/℃	326.7
再热器出口温度/℃	540

1.2 改造前存在的问题

原百叶窗式水平浓淡煤粉燃烧器已运行超过十年，喷口烧损、开裂、扭曲变形严重，射流刚性衰减，火焰中心偏移。不投油最低稳燃负荷为45%BMCR，且 A 层磨煤机单独运行时稳燃效果极差。机组现有调峰能力远不能满足政策与市场需求，燃烧器换型改造具有极强的必要性和紧迫性。

2 燃烧器改造选型分析

2.1 典型燃烧器对比分析

针对胜利电厂 3 号锅炉现有燃烧器系统存在的问题，结合山东省能源发展政策要求、电厂调峰需求和燃用煤质特性，开展燃烧器选型分析，并对三种主流电站锅炉燃烧器（针对切圆锅炉）改造方案进行对比研究[错误!未找到引用源。]。典型燃烧器性能对比如表 2 所示，通过从稳燃性能、煤种适应性、抗结渣能力、改造成本及与电厂实际工况匹配度等维度综合论证。可以看出 ARZ-SIB Ⅱ燃烧器在低负荷稳燃和污染排放方面均具有良好的优势，并且具备设备改造的难度低，经济性成本小的特点。

传统钝体燃烧器结构如图 1 所示，利用钝体阻挡煤粉气流形成高温烟气回流区，通过回流高温烟气加热煤粉气流，使其达到着火温度实现稳燃，是电站锅炉应用较早的稳燃燃烧器技术。优点：技术成熟、结构简单，制造成本低，运行维护便捷，与四角切向燃烧锅炉的适配性较好。缺点：稳燃能力有限，仅依靠烟气回流实现着火，超低负荷下回流区温度低、范围小，稳燃效果差，难以将不投油稳燃负荷降至 40%BMCR 以下；抗结渣能力差，高负荷下钝体附近易形成高温炽热点，煤粉易在钝体表面结焦，且射流刚性一般，易导致炉膛局部结渣；煤种适应性一般，对难着火煤种的着火促进作用有限，无法满足电厂燃用煤质要求；低氮排放性能差，燃烧过程中氧化性氛围较强，NO_x 生成量偏高。

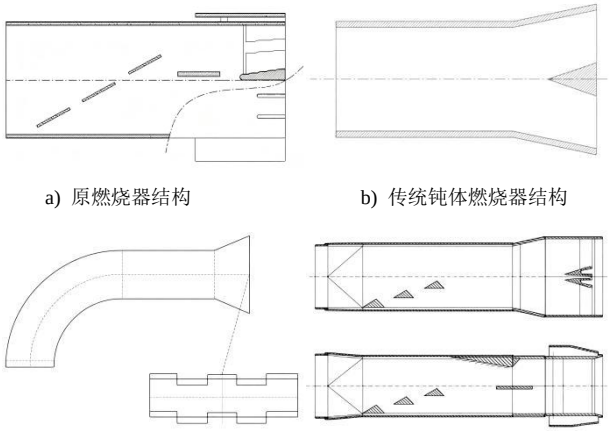
WR 低氮燃烧器结构如图 1 所示，通过煤粉浓淡分离、分级配风及烟气再循环技术，在燃烧器出口形成浓淡双区燃烧，浓相区提升煤粉浓度实现稳燃，淡相区降低氧体积分数抑制 NO_x 生成，兼顾稳燃性能与低氮排放。优点：低氮排放性能优异，分级配风与浓淡燃烧可有效降低 NO_x 生成量，满足环保超低排放要求；具备一定的低负荷稳燃能力，煤粉浓淡分离提升了浓相区着火稳定性，可将不投油稳燃负荷降至 35%BMCR 左右；结构设计较为成熟，在国内亚临界锅炉中应用较多。缺点：超低负荷稳燃能力仍有不足，对于电厂燃用的难着火煤种，30%BMCR 以下负荷的稳燃可靠性不足，无法满足深度调峰的极致需求；结构复杂，对风粉配比、配风精度要求极高，需配套优化制粉系统和风量调节系统，改造工程量大、成本高；抗结渣性能一般，浓相区燃烧温度较高，易引发燃烧器喷口及炉膛局部结渣，且对运行调试水平要求高，调试不当易导致燃烧不完全。

ARZ-SIB Ⅱ燃烧器结构如图 1 所示，在传统钝体稳燃技术基础上进行创新升级，通过钝体开缝向高温烟气回流区引入少量煤粉，使这部分煤粉在回流区优先着火，形成稳定的高温点火源，主动引燃主煤粉气流，实现“分级着火”；同时配备可调周界风系统，低负荷时送入少量粉气混合物强化稳燃，高负荷时送入二次风冷却喷口、推迟着火，兼顾超低负荷稳燃与高负荷抗结渣。优点：超低负荷稳燃能力卓越，主动式高温点火源设计大幅提升着火稳定性，可将不投油稳燃负荷降至 30%BMCR 以下，完全满足山东省能源规划要求和电厂深度调峰需求；煤种适应性极佳，分级着火机制对难着火煤种的着火促进作用显著，可适配电厂山西西山、寿阳等地区的燃用煤质，且对煤质波动的适应性强；抗结渣与防腐蚀性能优异，可调周界风在高负荷下有效冷却燃烧器喷口，避免喷口烧损和结焦，同时优化炉膛射流组织，使热负荷分布均匀，降低水冷壁高温腐蚀和炉膛结渣风险；兼顾燃烧经济性与低氮排放，分级着火使煤粉燃烧更充分，可降低飞灰可燃物含量，提升锅炉热效率；同时燃烧过程中形成局部还原性氛围，有效抑制 NO_x 生成，满足环保要求。缺点：对燃烧器安装精度、配风调节精度有一定要求，需在改造过程中严格把控施工质量。

表 2　典型燃烧器性能对比表
Tab.2 Performance comparison of typical burners

项目	原燃烧器	传统钝体燃	WR 低氮燃	ARZ-SIB

	（百叶窗水平浓淡煤粉喷嘴）	烧器	烧器	Ⅱ燃烧器
不投油最低稳燃负荷	⩾45%BMCR	⩾40%BMCR	⩾35%BMCR	⩽30%BMCR
煤种适应性（难着火煤）	差	一般	较好	优秀
抗结渣及高温腐蚀性能	差	一般	一般	优秀
低氮排放性能	一般	差	优秀	良好
与现有制粉系统兼容性	一般	良好	较差	优秀
改造工程量	-	小	大	小
改造成本	-	低	高	适中
运行维护便捷性	一般	优秀	较差	良好
锅炉热效率提升潜力	无	小幅	中等	显著
是否满足政策/调峰需求	否	否	基本满足	完全满足
综合推荐度	-	不推荐	次优	强烈推荐



a) 原燃烧器结构　b) 传统钝体燃烧器结构

c) WR 燃烧器结构　d) ARZ-SIB Ⅱ燃烧器结构

图 1 燃烧器结构示意
Fig.1 Schematic diagram of the burner structure

2.2 可调回流区分级着火燃烧器稳燃原理

图 2 显示了传统钝体燃烧器的着火原理，已着火的高温烟气在回流区内回流至主气流根部，掺入主流并加热，使其达到着火温度并燃烧，可形成闭合回流加热着火链[错误!未找到引用源。]。

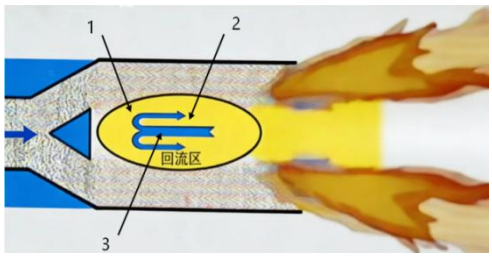
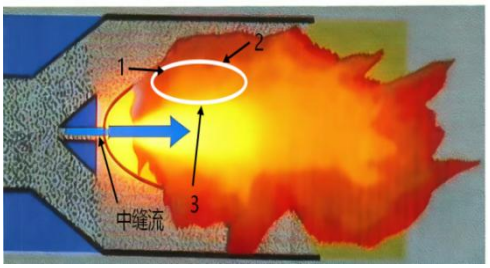
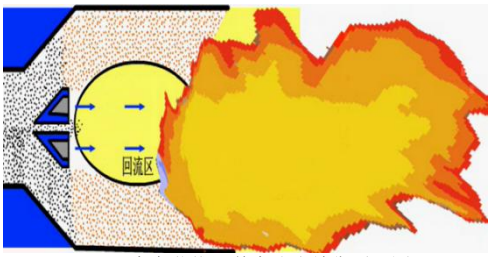


图 2 传统钝体燃烧器原理
Fig.2 Schematic diagram of the conventional bluff-body burner

图 3 显示了回流区分级着火燃烧器的着火原理，利用回流区实现稳焰，即高温烟气回流加热主流，新鲜气流在 1 处与回流烟气掺混升温，2 处开始燃烧并进入回流区，3 处完成反应，形成封闭着火链。掺混燃烧集中在主流与回流交界的剪切层，因回流区与主流中心温差小，着火链可近似为仅通过边界交换气流的绝热系统。但钝体燃烧火焰着火区在钝体绕流气流边界上，火焰长且刚性差。



a）低负荷强化燃烧稳燃原理图



b）高负荷推迟着火防止结焦原理图

图 3 回流区分级着火燃烧器原理图
Fig.3 Schematic diagram of the recirculation-zone staged-ignition burner

回流区分级着火燃烧器与传统钝体稳焰器不同的是：钝体开缝，增加了中缝流，将少量的燃料和空气引入到开缝钝体形成的回流区中，在最有利的着火区域首先着火，形成值班火焰，然后在点燃主气流[错误!未找到引用源。]。燃烧着火区在喷嘴中心位置，火焰短且刚性强，因此具有很好的稳燃特性，适用于锅炉深度调峰稳燃。喷入少量燃料进入回流区，使主燃在回流区的引燃能量增大，强化燃烧达到低负荷稳燃；高负荷运行时，温度较低的热风喷入回流区，会使回流区降温，或者回流区消失、着火延迟、火焰后移、避免燃烧器结焦。

2.3 小结

传统钝体稳燃燃烧器是依靠钝体将煤粉气流阻隔，形成高温烟气回流区，将煤粉加热至着火温度实现稳燃，是一种成熟的锅炉早期稳燃技术。其结构简单、造价低、运维方便，适配四角切向锅炉；

WR 低氮燃烧器依托煤粉浓淡分离、分级配风及烟气再循环，形成双区燃烧，兼顾稳燃与低氮排放[9]。ARZ-SIB Ⅱ燃烧器在传统钝体稳燃技术基础上进行创新升级，通过钝体开缝向高温烟气回流区引入少量煤粉，使这部分煤粉在回流区优先着火，形成稳定的高温点火源，主动引燃主煤粉气流，实现“分级着火”；同时配备可调周界风系统，低负荷时送入少量粉气混合物强化稳燃，高负荷时送入二次风冷却喷口、推迟着火，兼顾超低负荷稳燃与高负荷抗结渣。

综合上表分析，ARZ-SIB Ⅱ燃烧器可在最小化改造工程量和成本的前提下，彻底解决原燃烧器系统的核心问题，大幅提升锅炉超低负荷稳燃能力、煤种适应性和抗结渣性能，满足山东省“十四五”能源发展规划要求，为油田新能源消纳提供可靠调峰支撑，同时改善锅炉燃烧经济性，降低运维成本。

3 析燃烧器改造 CFD 数值模拟分析

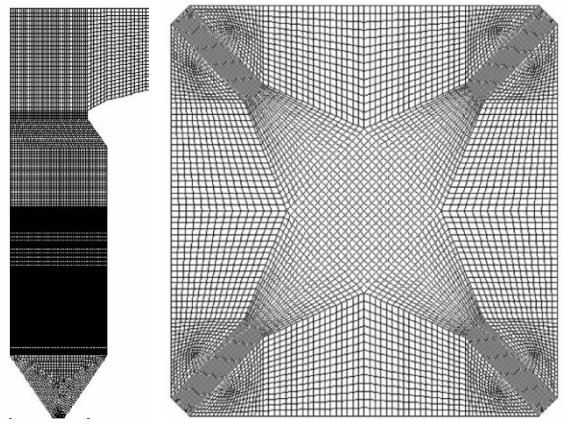
为了更好的对燃烧器的改造进行理论指导，开展了 CFD 数值模拟分析，重点对改造后 30%ECR（仅 A、B 两层可调回流区分级着火燃烧器运行）工况进行数值模拟，以提高改造可行性。

3.1 数学建模

锅炉炉内煤粉燃烧涉及多相流动、传热传质和复杂化学反应等。从工程应用出发，全炉膛三维燃烧数值模拟采用的主要模型简要如下：气相湍流流动：采用带旋转修正的 Realizable k-ε 双方程模型模拟气相湍流流动。该模型对旋转流动、强逆压梯度边界层流动和流动分离具有优于标准 k-ε 模型的模拟精度[错误!未找到引用源.]；煤粉颗粒运动：采用随机颗粒轨道模型模拟煤粉颗粒运动，在拉格朗日坐标系下计算颗粒瞬时运动方程，考虑阻力、重力及湍流脉动对颗粒轨迹的影响；气相燃烧：采用混合分数—概率密度函数（PDF）模型，通过求解混合分数及其脉动均方值的输运方程，结合设定 PDF 分布计算各组分时均浓度和气体温度，避免求解大量组分输运方程；煤粉燃烧：挥发分析出采用双平行反应模型，焦炭燃烧采用扩散-动力控制模型，燃烧速率同时受化学动力学和氧扩散条件控制；辐射传热：采用 P-1 辐射模型，将辐射传递方程转化为偏微分方程组求解，适用于光学厚度大和几何结构复杂的煤粉炉；NOx 生成：采用后处理方法，求解 NO、HCN 和 NH3 的输运方程。热力型 NO 采用扩展 Zeldovich 机理，燃料型 NO 采用 De Soete 模型，湍流脉动影响采用设定 β 函数 PDF 模型处理。

3.2 几何建模与网格划分

根据锅炉和燃烧器实际结构尺寸精细化建模，包括燃烧器具体结构、炉膛、燃尽风喷口及尾部烟道。采用分区网格划分方法，使用高质量六面体网格，网格数为 238 万。燃烧器出口区域网格加密，以准确模拟该区域物理量梯度大的特性；燃烧器出口网格方向与流动方向一致，以减小伪扩散误差，几何模型和燃烧器截面网格如图 4 所示。



a）锅炉侧视图　　b）锅炉截面图

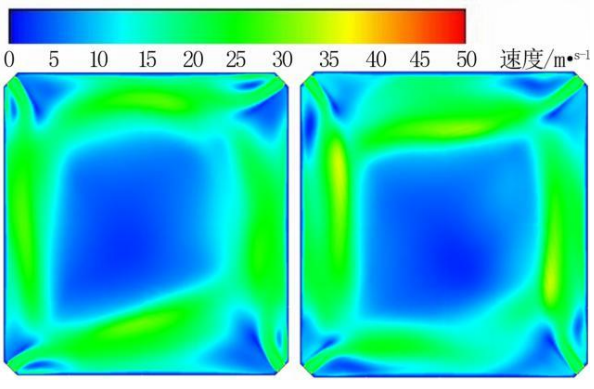
图 4 几何模型与网格

Fig.4 Geometric model and computational mesh

3.3 数值模拟计算结果与分析

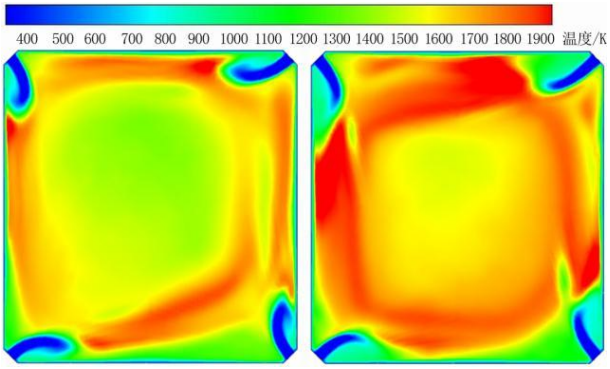
3.3.1 30% ECR 数值模拟计算结果

图 5、图 6 和图 7 分别为 30% ECR 负荷燃烧器区域水平截面速度分布、温度分布和氧体积分数分布图，图 8 为 30% ECR 负荷锅炉竖直截面速度分布、温度分布和氧体积分数分布。可以看出，改造后锅炉在 30%ECR 负荷下投运 A、B 两层燃烧器时，锅炉仍具有较好的炉膛充满度，切圆旋转方向正常，假想切圆相对居中，流场均匀性较好，未发生偏斜。各角燃烧器射流火焰相互支撑，未发生脱火，断层现场，具有较好的火焰传播特性。



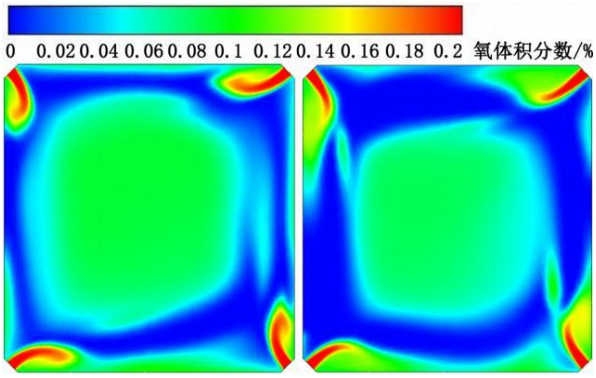
a）A 层燃烧　　b）B 层燃烧器

图 5 燃烧器区域水平截面速度分布
Fig.5 Velocity distribution in the horizontal cross-section at the burner level



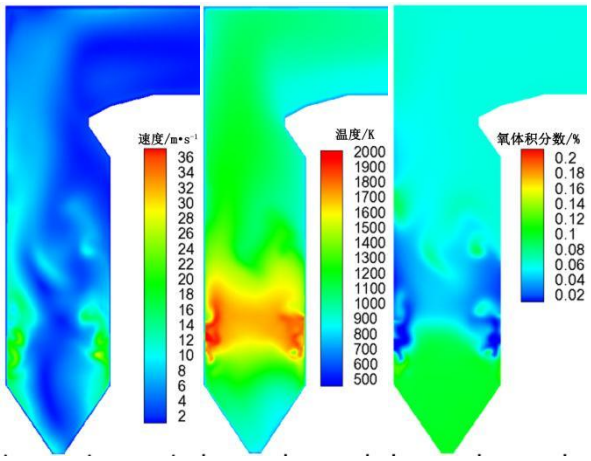
a）A 层燃烧器 b）B 层燃烧器

图 6 燃烧器区域水平截面温度分布
Fig.6 Temperature distribution in the horizontal cross-sections at the burner level



a）A 层燃烧器 b）B 层燃烧器

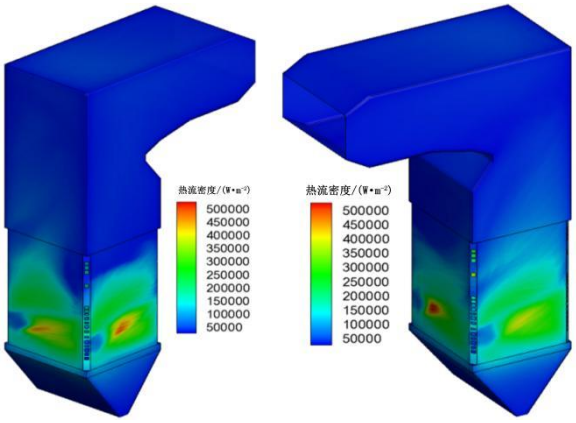
图 7 燃烧器区域水平截面氧体积分数分布
Fig.7 Oxygen volume fraction distribution in the horizontal cross-sections at the burner level



a）速度分布 b）温度分布 c）氧体积分数

图 8 竖直截面截面速度、温度、氧体积分数分布图
Fig.8 Contours of velocity, temperature, and O_2 concentration on the vertical sections

图 9 为模型计算得出的沿炉膛高度方向热流密度分布，炉膛热流分布较为均匀，主燃烧区四周近水冷壁区域未出现明显的热流偏差。



a）前/右侧水冷壁热流分布 b）后/左侧水冷壁热流分布

图 9 炉膛热流分布
Fig.9 Furnace heat-flux distribution

炉膛出口的烟气氧体积分数、飞灰含碳量和 CO 质量浓度的统计结果如表 3 所示，在 30%ECR 负荷下炉膛出口 O_2 体积分数为 5.85%时，煤粉的燃尽率为 99.86%，炉膛出口 CO 质量浓度为 4.38 $mg·m^{-3}$。

表 3 锅炉出口参数统计
Tab.3 Boiler outlet parameters

项目	数值
O_2 体积分数/%	5.85
CO 质量浓度/($mg·m^{-3}$)	4.38
燃尽率/%	99.86

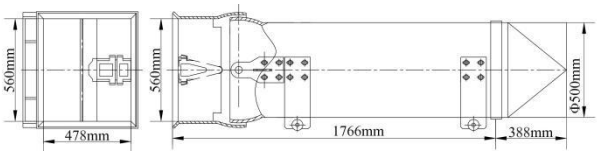
3.3.2 数值模拟结论

数值模拟表明：可调回流区分级着火燃烧器在高负荷下形成了“高温低氧中心+低温高氧近壁”的炉内气氛分布，有利于兼顾燃烧效率与安全性；在 30%ECR 低负荷下仅 A、B 两层运行仍具有充分稳燃能力和高燃尽率。基于此，确定 A、B 层采用可调回流区分级着火燃烧器进行改造。

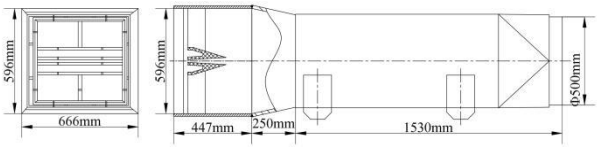
4 燃烧器改造方案

针对胜利电厂煤质多变、热值波动及劣质煤掺烧的燃料特性，设计回流区分级着火燃烧器，改造前/后燃烧器结构如图 10 所示，改造维持燃烧器整体长度、方圆节和燃烧器外形尺寸等基本不变。将 A、B 两层共 8 台一次风燃烧器更换为可调回流区分级着火燃烧器，一次风速设计为 22~30m/s，根据模拟结果采用“风包粉”布置方案，二次风在煤粉气流外侧形成包裹，背火侧设置侧边风通道。分级着

火链是依托钝体回流稳焰原理构建的，依靠高温烟气回流对新鲜气流分级加热，实现稳定着火。设计热二次风为周界风，通过调节周界风的大小，来调控回流区，进一步控制着火距离[错误!未找到引用源。]。该燃烧器可实现低负荷稳燃并大幅提升煤种适应性；强化燃烧进程，提升燃尽率，改善燃烧经济性；同时优化火焰温度场分布，抑制热力型 NO_x 生成，兼顾锅炉运行的安全性、经济性与环保性，适配电厂实际需求。



a）改造前的浓淡燃烧器



b）改造后的可调回流区分级着火燃烧器

图 10 改造前与改造后燃烧器喷口图
Fig.10 Burner nozzles before and after the retrofit

5 改造后试验验证

5.1 试验煤质参数

本次试验煤质为贫煤，试验煤质数据如表 4 所示。

表 4 试验煤质参数
Tab.4 Coal Quality Parameters of Test Coal

项目	试验煤种
全水分 M_t/%	8.9
空干基水分 M_{ad}/%	1.73
收到基灰分 A_{ar}/%	19.71
干燥无灰基挥发分 V_{daf}/%	17.79
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}$/(MJ·kg^{-1})	23.19
收到基碳 C_{ar}/%	61.86
收到基氢 H_{ar}/%	3.36
收到基氧 O_{ar}/%	4.29
收到基氮 N_{ar}/%	0.85
收到基硫 $S_{t,ar}$/%	1.00
煤灰软化温度 ST/℃	1430

5.2 高负荷试验

高负荷锅炉效率测试结果如表 5 所示，额定负荷下，炉膛出口氧体积分数为 3.5%时，锅炉飞灰含碳量为 3.43%、NO_x 生成质量浓度为 397 mg·m^{-3}、锅炉效率为 92.30%，汽水参数和受热面壁温正常。整体来看，高负荷下机组带负荷能力正常，锅炉运行稳定，未出现大面积、不可控结渣。

表 5 100%ECR 工况下锅炉效率测试结果
Tab.5 Boiler efficiency test results under 100% ECR working condition

参数	100%ECR
电负荷/MW	320
运行磨煤机	ABCD
运行氧量/%	3.5
排烟温度/℃	145
修正后排烟温度/℃	144.7
飞灰含碳量/%	3.43
炉渣含碳量/%	1.0
未燃尽碳热损失/%	0.97
排烟热损失/%	6.53
修正后锅炉效率/%	92.30
NO_X 生成量（6%O_2）/(mg·m^{-3})	397

5.3 30%ECR 负荷稳燃试验验证

5.3.1 论试验过程

2025 年 11 月 24 日 9:00，机组负荷为 270 MW，对炉膛进行整体吹灰，持续至 12:00 结束。

2025 年 11 月 24 日 14:00，在纯凝模式下，保持 A、B 磨煤机运行，机组负荷降低至 120MW（40%ECR）。试验期间三大风机、磨煤机运行正常，炉膛负压波动正常，在运燃烧器煤火检正常，着火正常，锅炉燃烧稳定，各受热面管壁不超温，NO_x 排放达标。现场测试显示，A、B 层火焰温度为 1372℃，温度水平较高。

2025 年 11 月 24 日 14:30~16:00，在纯凝模式下，保持 A、B 磨运行，机组负荷以 2MW/min 速率降低，每降低 10MW 稳定 30min，16：00 至 90MW（30%ECR）。试验期间制粉系统，烟风系统及炉膛负压波动均正常，燃烧器煤火检未出现扰动，看火孔观火火焰明亮，锅炉燃烧稳定，未发生壁温超温，NO_x 达标排放。实测 A、B 层火焰温度为 1343℃，温度水平较高。

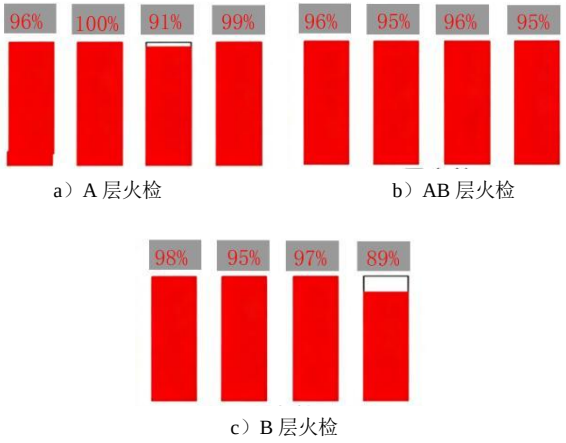
2025 年 11 月 24 日 16:00~18:00，机组负荷保持在 90 MW（30%ECR）运行两个小时，机组运行正常，试验结束。

5.3.2 论试验结果

1）稳燃情况

在机组 90 MW 低负荷稳燃试验期间，锅炉火检强度指示如图 11 所示，3 号锅炉在机组 90 MW 低负荷稳燃试验期间，火检指示强度较高，只有 B4 略低，但在试验过程中，没有出现大的波动和跳跃，

火检较为稳定，结合就地看火，火焰较为明亮，在煤粉气流周界处出现明显的着火迹象，A、B 层燃烧器标高温度为 1343℃，没有出现火焰闪烁或忽明忽暗的现象发生，表明锅炉燃烧状况良好，具有 90 MW 低负荷稳燃能力。另外，炉膛负压正常，在-80 Pa~-100 Pa 范围内波动。



a）A 层火检　　b）AB 层火检

c）B 层火检

图 11 低负荷试验期间火检强度
Fig.11 Flame detector signal intensity during the low-load test

2）锅炉效率

低负荷下的热经济性是评价深度调峰改造效果的重要指标[错误!未找到引用源。]，为了评估低负荷期间的锅炉燃烧经济性，在机组 90 MW 稳燃试验期间进行了锅炉效率测试，试验结果如表 6 所示，3 号机组在 90 MW 低负荷稳燃试验工况、燃用干燥无灰基挥发分 V_{daf}=17.79%的贫煤，飞灰可燃物含量为 0.59%，修正后的排烟温度为 135.4℃，修正后的锅炉效率为 91.47%，低负荷锅炉炉效高，实现锅炉宽负荷高效运行。

表 6 3 号机组低负荷稳燃试验工况效率测试结果
Tab.6 Efficiency test results for Unit No.3 under low-load stable-combustion conditions

项目	30%ECR
电负荷/MW	90
运行磨煤机	AB
运行氧量/%	8.5
排烟温度/℃	146.0
修正后排烟温度/℃	135.4
飞灰含碳量/%	0.72
炉渣含碳/%	1.00
未燃尽碳热损失/%	0.21
排烟热损失/%	8.11
修正后锅炉效率/%	91.47

3）汽水系统

汽水系统统计参数如表 7 所示，锅炉在 30%额定负荷运行时，主蒸汽温度 521 ℃，再热蒸汽温度为 524 ℃，主汽温略低于 40%负荷时的设计值 529 ℃、再热汽温高于 40%负荷时的设计值 500 ℃。主蒸汽减温水量裕度较大，再热蒸汽减温水量较低，受热面安全性较好。

表 7 机组 90 MW 负荷汽水系统参数
Tab.7 Steam-water system parameters of the unit at 90 MW

项目	90
主蒸汽流量/(t·h^{-1})	270
给煤量/(t·h^{-1})	39.6
运行磨	AB
总风量/(t·h^{-1})	500
主蒸汽压力/MPa	7.2
主蒸汽温度/℃	521
一级减温水开度/%	39
二级减温水开度/%	42/64
再热蒸汽压力/MPa	1.0
再热蒸汽温度/℃	524
再热蒸汽减温水开度/%	2/22

4）受热面金属壁温

3 号机组锅炉在 90 MW 低负荷稳燃试验期间，水冷壁、屏过、高过、高再和低过、低再等各级受热面壁温正常，没有出现超温现象。

5）SCR 入口烟温和 NO_x 质量浓度

宽负荷脱硝是深度调峰的重要配套措施[错误!未找到引用源。]。提高低负荷 SCR 入口烟温是保证脱硝系统连续投运的关键，省煤器给水旁路复合热水再循环等技术可用于提升入口烟温[错误!未找到引用源。]。3 号机组锅炉设置分级省煤器，在 90MW 电负荷时，SCR 入口烟温 A/B 侧分别为 332/326 ℃，烟道截面最大最小烟温偏差均小于 15 ℃，SCR 入口烟温高于脱硝温度保护值 310℃，说明目前的脱硝进口烟温满足深调至 30%负荷的要求。

在 90 MW 负荷时，A/B 脱硝入口 NO_x 质量浓度侧分别为 795/715 mg·m^{-3}，脱硝出口 A/B 侧分别为 41.2/42.6 mg/Nm^3，能够满足达标排放要求，达到了锅炉灵活性改造的目标[错误!未找到引用源。]。

6 结语

本文以胜利电厂 3 号锅炉深度调峰改造为例，对比分析 3 种典型适用于切圆锅炉燃烧的燃烧器的特点，结合电厂的实际问题、需求和数值模结果，优选了可调回流区分级着火燃烧器进行深调改造。可调回流区分级着火燃烧器借助钝体特殊开缝，通过调节周界风的风量来调节钝体中心风，在低负荷时送入少量粉，强化燃烧稳定火焰；高负荷时送入

二次风，推迟着火防止结焦并兼顾低NO_x排放特性，在胜利电厂实现了 30% ECR 负荷稳燃，修正后的锅炉效率为 91.47%，锅炉炉内燃烧稳定，汽水参数和受热面壁温正常，能够实现 NO_x 达标排放。改造达到了预期要求。对于燃烧贫煤锅炉实现深度调峰，提供了工程应用指导方案。

[参 考 文 献]

[1] 冀帅宇, 段立强, 王远慧, 等. 典型燃煤机组灵活调峰策略及性能研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 94.
Ji S Y, Duan L Q, Wang Y H, et al. Research on flexible peak load regulation strategy and performance of typical coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 94.

[2] 关朋远. 煤粉锅炉超低负荷运行的技术问题和应对措施[J]. 电器工业, 2023(12): 66.
Guan P Y. Technical problems and countermeasures for ultra-low-load operation of pulverized coal-fired boilers[J]. China Electrical Equipment Industry, 2023(12): 66.

[3] 王文鼎. 350MW 超临界单辅机锅炉深度调峰改造实践[J]. 锅炉制造, 2022(1): 1.
Wang W D. Reformation practice of depth peak regulation for 350MW supercritical single auxiliary boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2022(1): 1.

[4] 钟伟, 马达夫, 何翔. 660MW 超超临界对冲燃烧锅炉低负荷试验[J]. 发电设备, 2021, 35(6): 435.
Zhong W, Ma D F, He X. Experiment on a 660MW supercritical opposed firing boiler under low load[J]. Power Equipment, 2021, 35(6): 435.

[5] Ma D F, Zhang S Y, He X, et al. Combustion stability and NO_x emission characteristics of a 300 MW_e tangentially fired boiler under ultra-low loads with deep-air staging[J]. Energy, 2023, 269: 126795.

[6] 陈江涛, 李强, 彭丹, 等. 660MW 机组锅炉稳燃改造方案研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(3): 148.
Chen J T, Li Q, Peng D, et al. Research on the retrofit scheme of 660MW unit boiler for stable combustion[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(3): 148.

[7] 周科, 成汭珅, 解冰, 等. 典型旋流燃烧器低负荷稳燃特性试验[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 121.
Zhou K, Cheng R S, Xie B, et al. Experimental study on combustion stability characteristics of typical swirl burners at low load[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 121.

[8] Huang C C, Li Z Q, Lu Y, et al. Gas-particle flow and rapid load-up characteristics of a novel deep peak regulation burner[J]. Frontiers in Energy, 2025, 19(5): 738.

[9] 田景茹, 崔海亭, 甘拥, 等. 空气分级旋流低氮燃烧器数值模拟研究[J]. 河北工业科技, 2025, 42(6): 566.
Tian J R, Cui H T, Gan Y, et al. Numerical simulation study on low-nitrogen combustion air staged swirl burner[J]. Hebei Journal of Industrial Science & Technology, 2025, 42(6): 566.

[10] 付忠广, 王瑞欣, 石黎, 等. 旋流器通道宽度对旋流预混燃烧特性影响数值模拟[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 63.
Fu Z G, Wang R X, Shi L, et al. Effect of cyclone channel width on swirling premixed combustion: numerical simulation[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 63.

[11] 牛艳青, 薛旭峰, 张浩, 等. 多级调风预燃式旋流燃烧器冷态试验研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(5): 196.
Niu Y Q, Xue X F, Zhang H, et al. Cold experiment research of multi-stage air-regulating pre-combustion cyclone burner[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(5): 196.

[12] Zhang H Q, Pang Y C, Cui H C, et al. Thermal economy analysis on deep peak regulation operation of supercritical 630MW coal-fired unit[J]. Frontiers in Energy Research, 2025, 13: 1611001.

[13] 刘沛奇, 王建峰, 李乾坤, 等. 600MW 级燃煤机组宽负荷脱硝改造方案论证及评价[J]. 锅炉技术, 2021, 52(4): 69.
Liu P Q, Wang J F, Li Q K, et al. Demonstration and evaluation of wide-load denitration reform scheme for 600MW coal-fired units[J]. Boiler Technology, 2021, 52(4): 69.

[14] 杨新杰, 吴泽沛, 郭亮, 等. 600MW 超临界机组灵活性全负荷脱硝运行技术[J]. 电力设备管理, 2020(4): 107.
Yang X J, Wu Z P, Guo L, et al. 600MW supercritical unit flexibility full load denitration operation technology[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(4): 107.

[15] 雷斐, 赵有为. 超超临界锅炉省煤器给水旁路复合热水再循环提高 SCR 入口烟温的应用研究[J]. 中国设备工程, 2024(1): 131.
Lei F, Zhao Y W. Application of a composite hot-water recirculation system with an economizer feedwater bypass to increase SCR inlet flue gas temperature in an ultra-supercritical boiler[J]. China Plant Engineering, 2024(1): 131.

（责任编辑　李园）