DOI: 10.19666/j.rlfd.202411259

对冲燃烧贫煤锅炉改神华烟煤技术研究

贾彦伏[1]，缪 淼[2,3]，刘光鹏[3]，刘广友[1]，周 武[2,3]，谢建文[4]，
张建修[1]，杨章宁[2,3]，冉燊铭[2,3]
（1.国家能源聊城发电有限公司，山东 聊城 252000；
2.能源清洁低碳热转化利用技术与装备四川省重点实验室，四川 成都 611731；
3.东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643001；
4.国家能源集团新能源技术研究院有限公司，北京 102211）

［摘 要］为解决贫煤锅炉改烧神华烟煤造成的结渣、燃烧器烧损等问题，以某超临界600 MW对冲锅炉为研究对象，通过热力计算、数值模拟分析重点开展了燃烧系统改造方案的可行性研究。研究结果表明：采用差异化热负荷设计、边排燃烧器内倾、多维贴壁风等技术，燃烧器区域热负荷从1.71 MW/m^{2}降低到1.44 MW/m^2，炉膛出口烟气温度由1 058 ℃降低为1 010 ℃；改造实施后测试结果显示600 MW负荷时，飞灰含碳量从改造前6.06%下降到改造后1.42%，锅炉效率由92.76%提升到94.03%，各负荷下炉膛出口NO_x排放质量浓度降低了50%~60%，改造后锅炉能长期安全高效运行。提出的改造技术方案对同类机组在低挥发分煤改烧烟煤条件下的燃烧系统优化改造具有指导意义。

［关 键 词］对冲燃烧锅炉；煤质适应性；差异化热负荷；工程验证

［引用本文格式］贾彦伏，缪淼，刘光鹏，等. 对冲燃烧贫煤锅炉改神华烟煤技术研究[J]. 热力发电，2025, 54(9): 171-178. JIA Yanfu, MIAO Miao, LIU Guangpeng, et al. Research on the technology of replacing lean coal with Shenhua bituminous coal for opposed firing boilers[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 171-178.

Research on the technology of replacing lean coal with Shenhua bituminous coal for opposed firing boilers

JIA Yanfu[1], MIAO Miao[2,3], LIU Guangpeng[3], LIU Guangyou[1], ZHOU Wu[2,3], XIE Jianwen[4], ZHANG Jianxiu[1], YANG Zhangning[2,3], RAN Shenming[2,3]
(1.National Energy Liaocheng Power Generation Co., Ltd., Liaocheng 252000, China;
2.Energy Cleaning and Low-Carbon Thermal Conversion Utilization Technology and Equipment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China;
3.Dongfang Boiler Co., Ltd., Zigong 643001, China; 4.China Energy New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: To solve the problems of slagging and burner burnout caused by lean coal boilers which convert to firing Shenhua bituminous coal, a 600 MW supercritical opposed firing boiler was taken as the research object. Through thermal calculation and numerical simulation analysis, a feasibility study for the combustion system retrofit scheme was carried out with emphasis. The results show that, by adopting differentiated heat load design, inclined installation of side wall burners into the furnace, and multiple dimensions of wall mounted wind, the heat load in the burner area reduced from 1.71 MW/m^2 to 1.44 MW/m^2, and the flue gas temperature at the furnace outlet decreased from 1 058 ℃ to 1 010 ℃. The performance test results after the retrofit show that at rated load, the unburnt carbon content of coal ash decreased from 6.06% to 1.42%, the boiler efficiency increased from 92.76% to 94.03%, and the NO_x emissions at the furnace outlet reduced by 50%~60% at various loads. The boiler can operate safely and efficiently for a long period. The proposed transformation technology scheme has guiding significance for the optimization and retrofit of combustion systems of similar units under the condition of converting low volatile coal to bituminous coal.

Key words: opposed firing boiler; coal adaptability; differentiated heat release rate; engineering verification

收稿日期：2024-11-27

第一作者简介：贾彦伏（1982）男，高级工程师，主要研究方向为锅炉燃烧优化及燃煤掺配，12075674@ceic.com。
通信作者简介：冉燊铭（1974），男，硕士，教授级高级工程师，主要研究方向为热能工程与电站锅炉技术，ransm@dbc.com.cn。

煤炭是我国能源安全的压舱石，煤电技术将向“安全、高效、清洁、低碳、灵活”的目标发展[1]，要求燃煤机组节能降耗、减少污染物排放[2]。近年来我国煤炭价格回落，低挥发分煤由于反应性差导致燃烧效率低，高温燃烧产生更多的 NO_x，部分燃煤电厂更倾向于采购性价比高的烟煤[3]，推动燃料从低挥发分煤向烟煤转换。

当贫煤锅炉改烧或掺烧烟煤时，如果对燃料品质把控不当、入炉掺烧方式不当、运行参数控制不准，就容易发生制粉系统积粉、自燃、燃烧器喷口烧损、炉膛大面积结渣、冷灰斗堵焦、受热面严重积灰甚至汽温不足等问题[4-5]。

武生[6]通过新增粉管旁路热风送粉，有效控制磨煤机出口粉管温度和送粉风速。董玉贵等[7]在某电厂将钢球磨中仓制热风送粉系统改为中速磨直吹式系统，极大提高了制粉系统安全运行水平。汪华剑等[8]采用抽炉烟干燥制粉和乏气热风复合送粉技术，实现了安全扩烧烟煤和 NO_x 减排 60%的效果。

刘平等[9]针对超小断面四角切圆锅炉燃烧系统进行煤质适应性改造研究，改造后烟煤掺烧比例从 20%提高到 67%~100%。王小龙等[10]对贫煤锅炉配煤掺烧模式下焦炭燃尽率的影响因素进行了数值模拟研究，发现掺烧位置和粒径对焦炭燃尽率影响较大。甘加耀等[11]通过数值模拟和 BP 神经网络预测模型分析了复杂燃料掺烧情况下炉膛配风、配煤、负荷变化对锅炉燃烧及结渣特性的影响，并开发了防结渣燃烧优化系统。

现有贫煤锅炉改烧烟煤的研究多针对四角切圆燃烧方式，对冲燃烧锅炉的改造研究报道较少。本文以某超临界 600 MW 对冲燃煤锅炉为研究对象，探讨燃料从贫煤改为神华烟煤的燃烧系统改造技术，通过热力计算、数值模拟研究提出适用于贫煤锅炉的改造方案，以期提高锅炉的安全性、经济性和环保水平，可为同类机组改造提供参考。

1 研究对象

1.1 设备概况

该电厂 3 号机组为超临界 600 MW 发电机组，锅炉型号为 DG1900/25.4-Ⅱ4，采用一次中间再热、变压运行，固态排渣、平衡通风、对冲燃烧，配正压直吹式制粉系统，采用 6 台 BBD4360 双进双出磨煤机带动态分离器。炉膛截面为 19 419.2 mm（宽）×15 456.8 mm（深）。

原燃烧系统布置如图 1 所示。前后墙各布置 3 层旋流煤粉燃烧器，每层 4 只共 24 只。燃烧器上方布置一层燃尽风，每层 4 只燃尽风喷口，并在前、后墙各布置了 2 只侧燃尽风喷口。

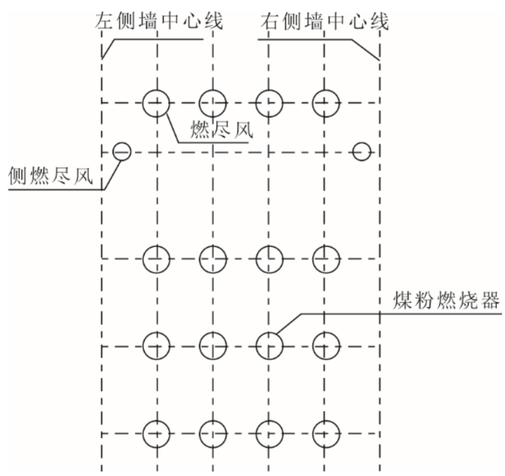

图 1 原燃烧系统布置示意
Fig.1 Schematic diagram of the raw combustion system layout

1.2 燃料参数

原设计燃料为山西阳泉无烟煤与河北贫煤的混煤，本次改造煤为神华烟煤，设计煤为神混 5000 和准混 4500 掺烧比例按质量比 7:3 的混煤，校核煤为神混和自采烟煤掺烧比例按质量比 2:1 的混煤。煤质分析见表 1。

表 1 燃料的元素分析和工业分析
Tab.1 Proximate and ultimate analysis of the fuels

项目	原设计煤	改造设计煤	校核煤
$w_{ar}(C)/\%$	59.34	54.62	57.19
$w_{ar}(H)/\%$	2.91	3.19	3.33
$w_{ar}(O)/\%$	2.37	9.67	9.20
$w_{ar}(N)/\%$	0.87	0.77	0.82
$w_{ar}(S)/\%$	1.05	0.27	0.56
$w_{ar}(M)/\%$	6.80	16.30	15.33
$w_{ar}(A)/\%$	26.66	15.18	13.57
$w_{daf}(V)/\%$	11.24	37.34	36.94
$Q_{net,ar}/(MJ\cdot kg^{-1})$	22.78	20.67	21.71
灰变形温度 DT/℃	1 400	1 280	1 310
灰软化温度 ST/℃	1 450	1 400	1 320
灰熔化温度 FT/℃	1 500	1 450	1 380

通过煤质特性判别可知，相比于原设计煤，神混煤尤其是神华侏罗纪烟煤具有易结渣、极易着火、极易燃尽的特点，随着神混煤掺烧比例增大，灰熔点偏低的趋势会更为明显。

2 改造方案研究

2.1 锅炉改造前掺烧烟煤运行情况

燃贫煤锅炉采用小断面炉膛，炉膛断面热负荷、燃烧器区域壁面热负荷均较大，改烧烟煤后容易造成热量释放集中，加剧结渣[12]；同时烟煤火焰传播速度快[13]，贫煤设计的燃烧器改烧烟煤后易发生着火点过近，导致喷口烧损等问题，影响锅炉的安全稳定运行。

该电厂尝试在下层燃烧器掺烧部分烟煤，运行结果表明，飞灰可燃物质量分数超过 6%，燃烧效率不高，原因可能是烟煤抢风造成低挥发分煤燃尽差[14]；燃烧器及燃尽风喷口区域水冷壁结渣严重，频繁发生大焦掉落，炉膛负压波动大；侧墙中心区域水冷壁灰渣层厚度约 100 mm（呈松散状），并存在严重高温腐蚀。日常运行高负荷时炉膛出口 NO_x 质量浓度 650~800 mg/m^3（标况，O_2 体积分数 6%，下同）。

2.2 改造方案分析

结合本项目具体条件，采用了燃烧系统改造、增加吹灰器、制粉系统改造等措施。为提高未来对强结渣煤种的适应性，本次改造将结渣风险防控作为首要考虑的问题，改造总体思路见表 2。煤质改变后，原燃烧器的风率和风速等参数都不再适用，需要对其进行改造。由于烟煤燃烧较为剧烈，结渣风险也随之增大。为了预防这一问题，一方面可以降低燃烧区域的燃烧强度并优化燃烧器结构，另一方面还可以增加吹灰器，两者相结合可有效预防结渣。钢球磨煤机磨制烟煤时相较贫煤容易爆炸，且出口风粉混合物选取温度更低，因此需增加防爆门并对调温冷风管道扩径。

表 2 改造方案分析
Tab.2 Analysis of the retrofitting scheme

需重点解决的问题	主要措施
安全燃用神华烟煤	燃烧系统改造 炉膛热力指标优化 增加吹灰器
制粉系统适应性	防爆改造 调温风扩容
受热面吸热匹配与安全	热力计算与壁温计算校核

北仑 1 号机组等我国早期 600 MW 机组曾出现过燃神华煤炉膛严重结渣的重大事故，行业内已形成了通过选取较低的炉膛热负荷、适当提高一次风速、优化空气动力场防止火焰刷墙、吹灰器优化等措施解决结渣问题的共识[15]。

本项目锅炉原设计炉膛为典型的瘦高型贫煤炉膛，其主要热力指标见表 3。

表 3 锅炉主要炉膛热力指标
Tab.3 Main furnace thermal indicators of the boiler

项目	原设计	DL/T 831—2015 烟煤推荐范围
炉膛断面热负荷/(MW·m^{-2})	4.96	4.00~4.80
容积热负荷/(kW·m^{-3})	81.93	80.00~95.00
燃烧器区壁面热负荷/(MW·m^{-2})	1.71	1.30~1.80
上层燃烧器距屏底距离/m	29.89	20.00~23.00

与 DL/T 831—2015 对 600 MW 锅炉的推荐范围相比，炉膛容积热负荷接近下限，而与燃烧器区域结渣风险密切相关的炉膛断面热负荷、燃烧器区壁面热负荷均接近甚至超出上限，对结渣控制不利。在炉膛尺寸不变、炉膛容积热负荷和断面热负荷无法改变的情况下，可通过增大燃烧器布置间距，降低燃烧器区域热负荷，达到降低燃烧器区域严重结渣风险的目的。本项目上层燃烧器距屏底距离大，为燃烧器上抬拉大层间距创造了有利条件。

燃烧系统改造方案为：

1）燃烧器数量保持不变，采用差异化热负荷设计，即 3 层燃烧器采用不等层间距布置：炉膛相对低热负荷区域的中下层燃烧器间距小幅拉开 0.5 m，高热负荷区域的中上层燃烧器间距加大 2.0 m，旨在均衡炉内整体热负荷分布，平抑火焰尖峰温度，降低炉膛结渣风险。不等层间距设计使中下层燃烧器火焰有较好的相互支持能力，有利于维持低负荷下的稳燃能力，也与电厂平时低负荷投中下层燃烧的运行习惯相符。火焰中心位置整体抬升 1.25 m，避免因烟煤释放热量快造成水冷壁吸热过多而汽温不足的问题。改造前后炉膛断面热负荷、燃烧器区域热负荷与烟煤锅炉对比如图 2 所示。

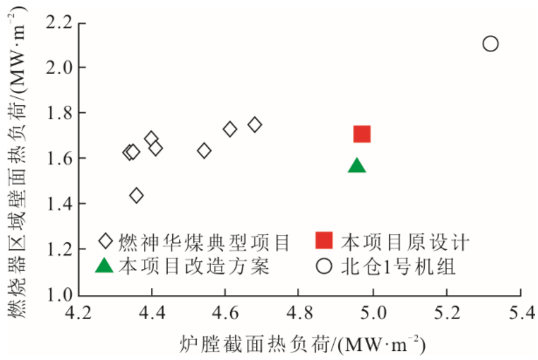

图 2 热力指标对比
Fig.2 Comparison of the thermal indicators

2）更换 OPCC 燃烧器，燃烧器及配风按神华烟煤重新设计以保证燃烟煤时安全可靠。一次风速由燃烧低挥发分煤的 20 m/s 提高至 24 m/s，确保不回火烧损燃烧器。外二次风扩锥角度按 30°选取，避免扩锥角度过大引起气流飞边造成燃烧器周边结渣[16]。

3）采用前后墙边排对冲贴壁风+两侧墙条状弥漫式贴壁风的多维贴壁风系统，结合边排燃烧器内倾 5°，降低还原性烟气和煤粉冲刷侧墙风险[17]，减轻两侧墙水冷壁高温腐蚀。与独立的前后墙布置贴壁风或两侧墙布置贴壁风相比，组合布置贴壁风能更有效改善两侧墙水冷壁近壁区还原性气氛，降低高温腐蚀发生倾向[18]。为避免贴壁风率过大导致未燃尽碳和 NO_x 排放浓度升高，改造方案的贴壁风率选取 4.5%。

4）采用燃尽风上下摆动技术调节火焰中心，增加了炉膛出口烟温的调控手段，防止高温受热面结焦。

2.3 热力计算分析

对改造前后 2 种燃烧器布置方式 BMCR 工况进行了锅炉整体热力校核计算，结果见表 4。

表 4 锅炉改烧烟煤前后 BMCR 工况参数计算结果
Tab.4 Calculation results of parameters under BMCR condition before and after firing bituminous coal

项目	改造前	改造后
炉膛过剩空气系数	1.18	1.15
炉膛总风量/($t·h^{-1}$)	2 290	2 118
炉膛出口烟气流量/($kg·s^{-1}$)	2 351	2 341
炉膛出口烟温/℃	1 058	1 010
实际燃料消耗量/($t·h^{-1}$)	242.3	263.4
总输入热量/($GJ·h^{-1}$)	5 366	5 412
断面热负荷/($MW·m^{-2}$)	4.96	5.01
容积热负荷/($kW·m^{-3}$)	81.93	82.45
燃烧器区域平均热负荷/($MW·m^{-2}$)	1.71	1.44

热力计算结果表明：在通流改造后锅炉总输入热量增加，炉膛容积热负荷和断面热负荷小幅度升高。改造方案拉大了燃烧器层间距，燃烧器区域平均热负荷从 1.71 MW/m^2 降低到 1.44 MW/m^2。尽管燃烧器层间距拉大造成火焰中心抬高，但由于烟煤反应性好释放热量快，炉膛辐射吸热量增加，使得炉膛出口烟气温度由 1 058 ℃降低为 1 010 ℃，炉膛出口高温受热面结渣风险不大。

2.4 数值模拟分析

2.4.1 计算模型及方法

为更准确地评估锅炉运行状态及改造技术方案的效果，采用 CFD 软件进行了数值模拟计算，选用非预混燃烧模型，进出口边界条件根据改造的设计煤种、燃烧器设计风速风温和壁面条件设定，预测炉内燃烧温度分布、污染物排放特性。

将燃烧器与炉膛整体作为研究对象，计算区域为冷灰斗至炉膛烟气出口之间，按该锅炉实际尺寸建立 1:1 几何模型。为保证计算精度，根据流场特征采用六面体和四面体结合的混合网格划分方法，对复杂流场和燃烧集中区域网格进行加密。在 624 万、806 万、1 066 万、1 248 万网格数量下开展数值模拟。在 806 万后随着网格数量的增加，炉膛温度几乎不再发生变化。因此，为了节省计算资源，最终确定网格数为 806 万。

计算中气相湍流输运模拟采用 k-ε 湍流模型，煤粉颗粒的跟踪采用 stochastic tracking 模型，气相湍流燃烧模拟使用单/双混合分数–概率密度函数模型，对煤粉挥发分的析出采用 the two competing rates model 模型，采用 the kinetics/diffusion-limited rate model 模拟焦炭的燃烧，辐射传热计算采用 P1 模型，对 NO 生成考虑了热力型及燃料型 NO。压力–速度的耦合采用 SIMPLE 法求解。

2.4.2 炉膛温度分布

图 3 为改造前后炉膛中心剖面温度分布情况。改造前，炉膛高温峰值区域位于中层燃烧器至燃尽风之间，下炉膛充满度较差，与实际运行情况相同；改造后燃烧区域热负荷分布更加均衡，高温区位于炉膛中心位置，近壁面附近温度低于改造前，炉膛中心最高温度从 1 723 ℃降低到 1 619 ℃，有效降低局部峰值温度，有利于降低热力型 NO_x 生成，同时冷灰斗区域和燃尽风以上高温区减少，有效预防炉膛结渣。

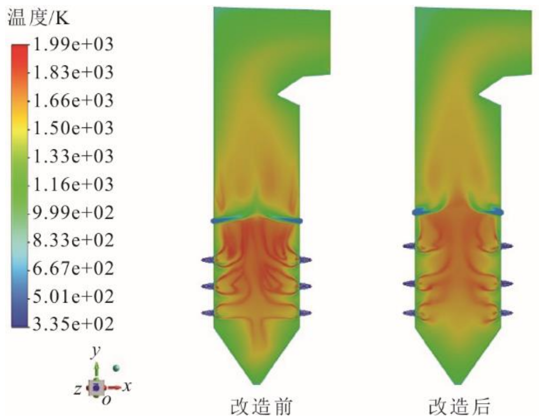

图 3 炉膛中心剖面温度分布
Fig.3 Temperature distribution in longitudinal section of the furnace

对冲燃烧锅炉左右侧墙壁面温度较高，易造成该区域出现结渣，改烧烟煤后煤粉燃烧速率加快更易导致整体温度升高、结渣概率增大[19]。图 4 对比了改造前后炉膛内水冷壁近壁面 0.2 m 处温度大于 1 350 ℃的区域。由图 4 可以看出：改造前由于燃烧器布置集中，燃料燃烧热量集中释放，炉内前后墙及两侧墙均有大片区域近壁面温度大于 1 350 ℃；改造方案通过燃烧器的差异化拉大层间距、边排燃烧器内倾，改善了炉内气流和火焰的温度分布，且水冷壁近壁面高温区域面积明显减小，降低了炉膛水冷壁结渣风险。

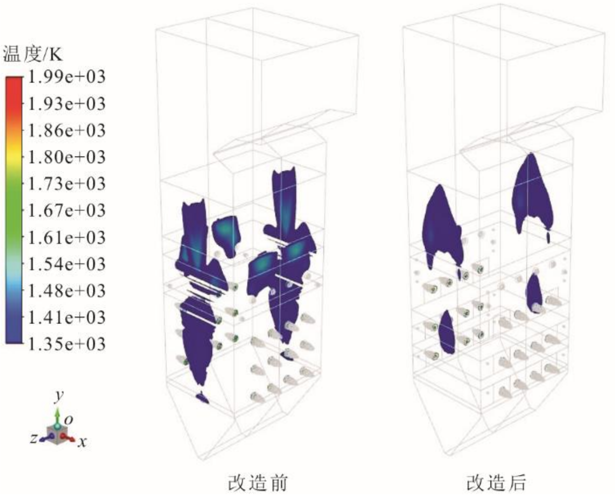

图 4 近壁面烟温大于 1 350 ℃的区域
Fig.4 Temperature field in regions with near wall temperature above 1 350 ℃

图 5 为改造前后沿炉膛高度方向截面平均温度分布情况。

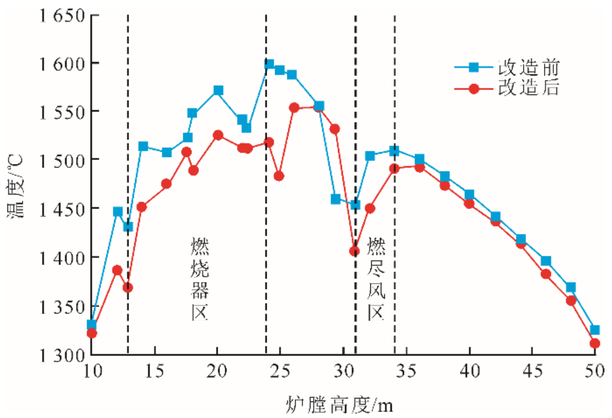

图 5 沿炉膛高度方向截面平均温度
Fig.5 Average temperature along the height direction of the furnace section

随着燃料的分层送入，燃烧器区域温度整体呈升高趋势，还原区温度略有降低，随着燃尽风的补充，未燃尽的煤粉颗粒充分燃烧，在燃尽风区域温度又小幅度升高。改造前燃烧器布置集中，煤粉燃烧速度快，存在明显的局部高温区，导致热量无法及时传递给工质，结果表现为炉膛截面平均温度更高；改造后将中上层燃烧器和燃尽风标高抬高，增大燃烧区域总高度，炉内热负荷分布更加均衡，改善了炉内燃烧和传热过程，提高了炉膛辐射吸热量，尽管火焰中心略有上升，但炉膛截面平均温度相比改造前更低。

2.4.3 煤粉颗粒速度分布及燃尽率

图 6 为炉膛中心剖面煤粉颗粒速度矢量场。可以看出改造前主燃烧区域煤粉颗粒速度较高，导致煤粉颗粒在炉膛内停留时间过短，燃烧不充分；在侧墙区域存在大量低速的煤粉颗粒，增加煤粉颗粒在水冷壁面沉积或结渣风险；冷灰斗区域煤粉下冲动量更大，直接冲刷冷灰斗，加速其磨损。改造后主燃区的燃烧速度得到控制，燃烧更加充分，缓解了煤粉颗粒直接冲刷侧墙和冷灰斗区域。

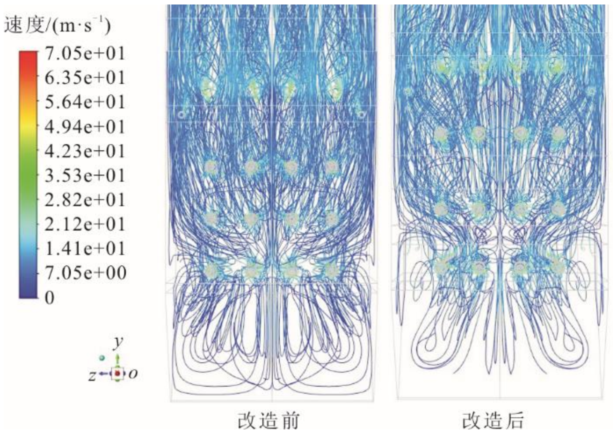

图 6 炉膛中心剖面煤粉颗粒速度矢量场
Fig.6 Velocity vector field of coal powder particles in central section of the furnace

图 7 对比了改造前后炉膛内煤粉燃尽程度，模拟结果用 DPM Burnout（分散相向连续相的质量交换量）示意，煤粉燃尽率用 Char content conversion rate（焦炭转化率）进行结果统计。改造前煤粉燃烧主要集中于主燃烧区，煤粉颗粒在离开燃烧器喷口后容易发生提前着火现象，这是喷口烧损的重要原因。改造后主燃区高度增加，燃烧区域温度分布更加均匀，有利于改善喷口超温和降低热力型 NO_x 生成；边排燃烧器向炉内偏转后，改善了煤粉贴壁燃烧的情况，有利于缓解结渣；改造后燃烧器区域平均热负荷强度下降，导致炉膛出口煤粉燃尽率从 99.2%降低到 98.7%，但对锅炉效率影响有限。

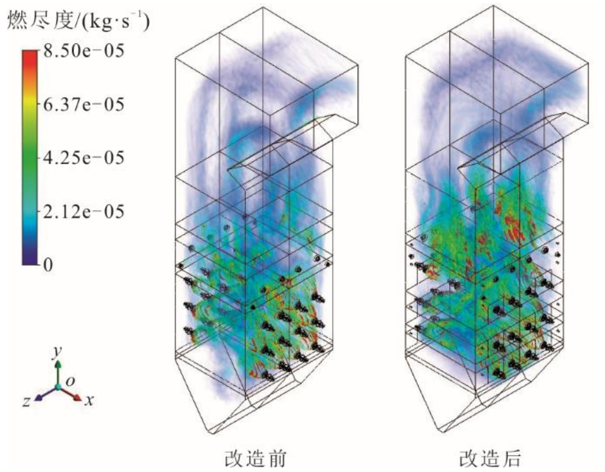

图 7 炉膛内煤粉燃尽程度
Fig.7 Burnout degree of coal powder in the furnace

2.4.4 污染物分布

改造前后炉膛中心剖面 NO 分布如图 8 所示。由图 8 可以看出：改造前由于局部高温区的存在，生成了大量热力型 NO，同时煤粉在主燃区停留时间短，NO 还原不充分，也可能导致燃料型 NO 的增加；改造后燃烧器间距拉大，燃烧区域热负荷均匀分布，原始 NO 生成质量浓度降低，炉膛出口 NO 质量浓度从 343 mg/m^3 降至 286 mg/m^3。

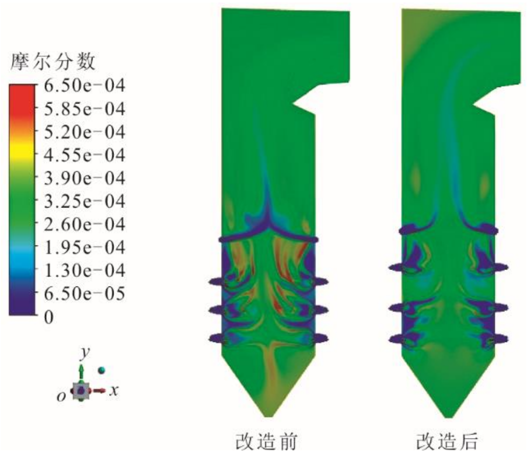

图 8 炉膛中心剖面 NO 分布
Fig.8 Distribution of NO in longitudinal section of the furnace

图 9 显示了炉膛内近壁面 CO 摩尔分数分布情况。由图 9 可知：改造前炉膛近壁面区域分布大面积的 CO，尤其是侧墙位置 CO 含量最高，这也是目前对冲燃烧锅炉高温腐蚀最严重的区域；改造方案通过燃烧器优化布置和增加贴壁风，有效抑制煤粉气流向两侧墙扩散，并进行及时补氧，侧墙 CO 含量显著降低，两侧墙高温腐蚀和结渣风险可控。

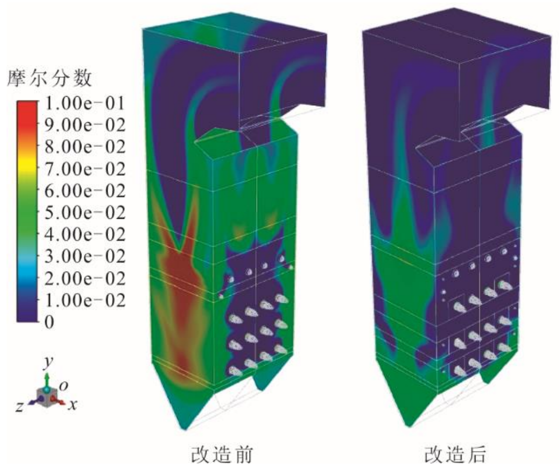

图 9 炉膛内近壁面 CO 分布
Fig.9 CO distribution near the wall in the furnace

3 改造方案效果

该锅炉实施上述燃烧系统方案改造前后，均开展了性能测试，试验期间分别测量了 100%、75%、50%额定负荷下锅炉效率、烟气 NO$_x$ 质量浓度等性能指标。改造前的试验煤质为低挥发分煤掺少量神华烟煤，改造后试验煤质为神华烟煤。

图 10 给出了改造前后飞灰含碳量和修正后的锅炉效率试验数据。改造后在各负荷下，飞灰含碳量均大幅下降，锅炉效率大幅提高。600 MW 负荷时，飞灰含碳量从改造前 6.06%下降到改造后 1.42%，锅炉效率由 92.76%提升到 94.03%。

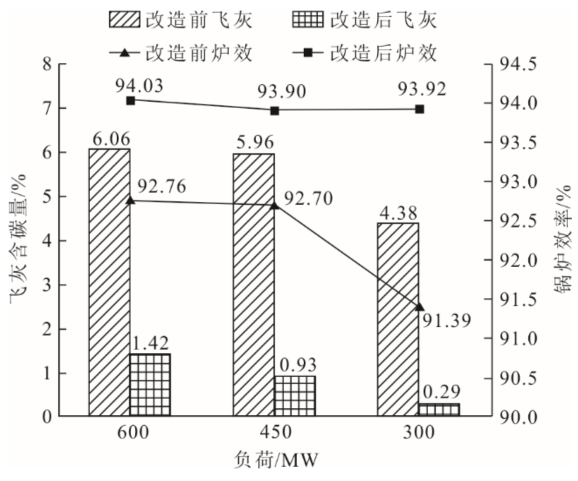

图 10 改造前后飞灰含碳量和锅炉效率
Fig.10 The carbon content in fly ash and boiler efficiency before and after renovation

图 11 对比了改造前后省煤器出口 NO$_x$ 排放水平。改造前 600 MW 负荷时省煤器出口 NO$_x$ 质量浓度约 665 mg/m^3，改造后额定负荷下炉膛出口 NO$_x$ 质

量浓度降低到 272 mg/m³，其他各运行负荷段 NO_x 质量浓度较改造前降低了 50%~60%。

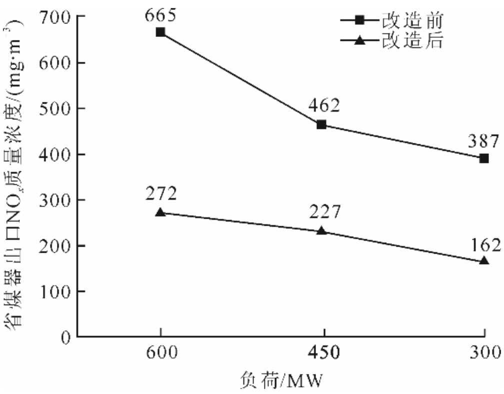

图 11 改造前后省煤器出口 NO_x 质量浓度
Fig.11 The NO_x mass concentrations at outlet of the economizer before and after renovation

改造后经过近 2 年运行验证，炉膛水冷壁和炉膛出口高温受热面未出现严重结渣，年掉焦次数由 143 次降至 4 次，每万千瓦时发电 SCR 喷氨量下降 21%，证明了本研究方案能有效适应贫煤对冲锅炉改烧神华烟煤，并提高了锅炉的运行效率和减少了污染物排放。

4 结 论

1）针对燃贫煤锅炉改烧神华烟煤造成的结渣、燃烧器烧损等问题，通过差异化拉大燃烧器层间距布置均衡炉内热负荷分布、更换新型燃烧器提高对煤质适应性、增加多维贴壁风减少煤粉冲刷侧墙、采用燃尽风摆动技术调节火焰中心，可有效提高锅炉运行安全性和经济性。

2）根据锅炉布置条件拉开燃烧器层间距后，燃烧器区域热负荷从 1.71 MW/m² 降低到 1.44 MW/m²，数值模拟结果表明改造后燃烧区域热负荷分布更加均衡，燃烧器喷口峰值温度降低，保证燃烧器喷口安全运行，同时改善煤粉贴壁燃烧的情况，水冷壁近壁面高温区域面积明显减小，两侧墙还原性气氛下降，降低侧墙水冷壁高温腐蚀风险。热力计算表明炉膛出口烟气温度由 1 058 ℃降低为 1 010 ℃，有利于降低高温受热面结渣风险。

3）数值模拟结果与性能试验结果趋势一致，这表明本改造方案可保证锅炉安全经济运行，并减少污染物排放。燃烧系统改造后经过近 2 年运行验证，实现了纯燃烧神华烟煤，炉膛未出现大面积结渣，低负荷稳燃能力增强，脱硝喷氨量大幅下降。改造后的性能试验结果表明，机组 600 MW 负荷时，飞灰含碳量从改造前 6.06%下降到改造后 1.42%，锅炉效率由 92.76%提升到 94.03%，提高了锅炉的运行效率。

［参 考 文 献］

［1］ 杨勇平. 燃煤发电系统能源高效清洁利用的基础研究综述[J]. 发电技术, 2019, 40(4): 308-315.
YANG Yongping. Review of basic research on energy clean and efficient utilization in coal-fired power systems[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(4): 308-315.

［2］ 国家发展改革委, 国家能源局. 关于开展全国煤电机组改造升级的通知: 发改运行〔2021〕1519 号[A]. (2021-10-29) [2024-11-27].
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on the *notional transformation and upgrading of coal power units*: FGYX〔2021〕No.1519[A]. (2021-10-29) [2024-11-27].

［3］ 冯雨, 杨玲, 杨小敏. 2024 年我国无烟煤市场发展与展望[J]. 中国煤炭, 2024, 50(4): 27-35.
FENG Yu, YANG Ling, YANG Xiaomin. Development and outlook of China's anthracite coal market in 2024[J]. China Coal, 2024, 50(4): 27-35.

［4］ 李德波, 狄万丰, 李鑫, 等. 1 045 MW 超超临界贫煤锅炉燃用高挥发分烟煤的燃烧调整研究及工程实践[J]. 热能动力工程, 2016, 31(1): 117-123.
LI Debo, DI Wanfeng, LI Xin, et al. Study of the adjustment to the combustion in a 1 045 MW ultra-supercritical boiler burning bituminous coal with a high volatile content instead of lean coal and its engineering practice[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(1): 117-123.

［5］ 郑国, 龙新峰. 300 MW 机组锅炉改烧烟煤改造及防结焦措施[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 118-123.
ZHENG Guo, LONG Xinfeng. Retrofitting of burning bituminous coal for a 300 MW unit boiler and the anti coking countermeasures[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 118-123.

［6］ 武生. 1 100 t/h 锅炉贫煤改烧烟煤改造方案及效果分析[J]. 电力学报, 2020, 35(5): 457-462.
WU Sheng. Transformation plan and effect analysis of 1 100 t/h boiler from lean coal to bituminous coal[J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(5): 457-462.

［7］ 董玉贵, 王大志, 吴琪珑, 等. 贫煤锅炉改烧烟煤效果分析[J]. 电站系统工程, 2017, 33(3): 17-20.
DONG Yugui, WANG Dazhi, WU Qilong, et al. Pulverizing system transformation schemes of burning bituminous coal in a 330 MW lean coal-fired boiler[J]. Power System Engineering, 2017, 33(3): 17-20.

［8］ 汪华剑, 周虹光, 邓玲惠, 等. 一种新型低 NO_x 燃烧技术在贫煤改烧烟煤中的应用[J]. 热能动力工程, 2015, 30(4): 611-616.
WANG Huajian, ZHOU Hongguang, DENG Linghui, et al. Application of a new low-NO_x combustion technology for a 330 MW lean-coal utility boiler burning a bituminous coal[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2015, 30(4): 611-616.

［9］ 刘平, 张文振, 初伟, 等. 超小断面切圆锅炉宽煤种适应性燃烧改造研究[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(9): 111-122.
LIU Ping, ZHANG Wenzhen, CHU Wei, et al. Study on

combustion modification of expanded coal adaptability in ultra-small section circle-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(9): 111-122.

[10] 王小龙, 张飞龙, 王里, 等. 330 MW 机组燃用贫煤锅炉配煤掺烧数值模拟研究[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 112-116.
WANG Xiaolong, ZHANG Feilong, WANG Li, et al. Numerical simulation on coal blending in a 330 MW unit boiler firing lean coal[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 112-116.

[11] 甘加耀, 钟文琪, 周冠文, 等. 复杂煤种锅炉水冷壁结渣特性的数值模拟及防结渣配煤优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7681-7692.
GAN Jiayao, ZHONG Wenqi, ZHOU Guanwen, et al. Numerical simulation study on slagging characteristics and coal blending optimization of anti-slagging of water-wall of coal-fired boiler under complex types of coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7681-7692.

[12] NAOKI S, DEDY E P, SHUNICHIRO U, et al. Growth and gravity shedding of ash deposition layer in pulverized coal combustors[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 134: 1-10.

[13] ZHU W K, LI X H, PENG J B, et al. Study on the combustion behaviours of two high-volatile coal particle streams with high-speed OH-PLIF[J]. Fuel, 2020, 265: 116956.

[14] LI S, CHEN Z C, HE E, et al. Combustion characteristics and NO_x formation of a retrofitted low-volatile coal-fired 330 MW utility boiler under various loads with deep-air-staging[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 223-233.

[15] 程志强, 王桂芳, 姚伟, 等. 安全经济燃用神华煤的几点建议[J]. 热力发电, 2002, 31(3): 62-64.
CHENG Zhiqiang, WANG Guifang, YAO Wei, et al. Several advices on secure and economical combustion with Shenhua coal[J]. Thermal Power Generation, 2002, 31(3): 62-64.

[16] 党林贵, 陈国喜, 王春玉, 等. 前后墙对冲旋流燃烧锅炉炉膛结渣试验研究和改造实践[J]. 动力工程学报, 2015, 35(10): 781-785.
DANG Lingui, CHEN Guoxi, WANG Chunyu, et al. Experimental study on slagging mechanism in an opposite firing boiler and the countermeasures[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(10): 781-785.

[17] 柳宏刚, 张广才, 王志刚, 等. 墙式对冲燃烧锅炉高温腐蚀原因分析与治理[J]. 热力发电, 2013, 42(12): 129-131.
LIU Honggang, ZHANG Guangcai, WANG Zhigang, et al. High temperature corrosion in wall-firing boiler: reason analysis and treatment[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(12): 129-131.

[18] 陈勤根, 陈国庆, 朱青国, 等. 对冲旋流燃烧锅炉贴壁风布置方式对比研究[J]. 动力工程学报, 2021, 41(8): 624-631.
CHEN Qingen, CHEN Guoqing, ZHU Qingguo, et al. Comparative study on the arrangement of the closing to wall air system in opposed firing boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(8): 624-631.

[19] 邓念念, 周臻, 肖祥, 等. 660 MW 旋流对冲燃煤锅炉燃烧过程的数值模拟及结渣分析[J]. 动力工程学报. 2014, 34(9): 673-677.
DENG Niannian, ZHOU Zhen, XIAO Xiang, et al. Simulation on combustion process and analysis on slagging behavior of a 660 MW swirl-opposed coal-fired boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(9): 673-677.

（责任编辑　邓玲惠）

广告目次

《热力发电》……封三

浙江顺豪新材料有限公司……后彩插 1

西安热工研究院有限公司……后彩插 2—27

《热力发电》订阅……后彩插 28

上海冠龙阀门节能设备股份有限公司……后彩插 29

隔而固（青岛）振动控制有限公司……后彩插 30