

670 MW 对冲旋流燃烧锅炉防高温腐蚀试验研究

崔强, 张振鲁, 李洪瑞

(烟台龙源电力技术股份有限公司, 山东烟台 264006)

摘要: 针对锅炉低氮燃烧改造后水冷壁近壁区发生高温腐蚀的问题, 以某电厂 670 MW 超临界对冲旋流燃烧锅炉为研究对象, 通过贴壁风系统改造结合燃烧优化调整试验, 分析了贴壁风门开度、运行氧量、煤质变化等参数对水冷壁近壁区还原性气氛和炉内燃烧及运行参数的影响。结果表明: 增加贴壁风系统后, 水冷壁近壁区 O_2 体积分数明显提高, CO 体积分数平均值下降 65.4%, H_2S 体积分数平均值下降 53.2%, H_2S 平均值可控制在 0.1×10^{-3} 以下, 缓解高温腐蚀效果显著; 高温腐蚀主要发生在高负荷工况, 提高运行氧量有助于缓解高温腐蚀风险; 增设贴壁风系统对锅炉氮氧化物排放量影响较小。

关键词: 对冲旋流燃烧锅炉; 高温腐蚀; 贴壁风; 硫化氢

中图分类号: TK224.9

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2023.06.021

[引用本文格式] 崔强, 张振鲁, 李洪瑞. 670 MW 对冲旋流燃烧锅炉防高温腐蚀试验研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(6): 182-188. CUI Qiang, ZHANG Zhen-lu, LI Hong-rui. Experimental research on treatment of high temperature corrosion in a 670 MW opposed firing boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(6): 182-188.

Experimental Research on Treatment of High Temperature Corrosion in a 670 MW Opposed Firing Boiler

CUI Qiang, ZHANG Zhen-lu, LI Hong-rui

(Yantai Longyuan Electric Power Technology Co., Ltd., Yantai, China, Post Code: 264006)

Abstract: Aiming at the problem of high temperature corrosion in the near wall area of the water wall after low nitrogen combustion transformation of the boiler, taking a 670 MW supercritical opposed firing boiler as a research object, through the modification of the closing-to-wall air system combined with the combustion optimization adjustment test method, the influence of the closing-to-wall air damper opening, the operating oxygen content and the change of coal quality parameters on the reducing atmosphere, furnace combustion and operating parameters in the near wall area of the water wall was analyzed. Results show that after adding the closing-to-wall air system, the oxygen volume fraction increases significantly, the average CO volume fraction decreases by 65.4% and the average H_2S volume fraction decreases by 53.2%, and the average H_2S volume fraction can be controlled below 0.1×10^{-3} , so the effect of reducing high temperature corrosion is expected to be remarkable; high-temperature corrosion mainly occurs in the case of high unit load, increasing the amount of operating oxygen helps to alleviate the risk of high temperature corrosion; adding the closing-to-wall air system has little affect on the NO_x emission of boiler.

Key words: opposed firing boiler, high temperature corrosion, closing-to-wall air, sulfureted hydrogen

引 言

随着国家对氮氧化物排放标准日益严格,近年来大部分电厂进行了低氮燃烧系统改造,改造后锅炉采用分级燃烧方式,使主燃区氧量降低,容易导致水冷壁发生高温腐蚀。入炉煤硫分的升高也进一步增加了高温腐蚀风险,给锅炉安全稳定运行带来隐患。

针对高温腐蚀现象发生机理^[1-2]及防治措施,大量学者进行了相关研究。目前,防治高温腐蚀的主要措施有防腐喷涂、管材优化、燃烧调整^[3]及贴壁风技术^[4]等,主要通过数值模拟^[5-7]与现场试验^[8]相结合的方式对贴壁风技术进行研究。李永生等人^[9]采用现场试验和数值模拟相结合的方法,分析对冲旋流锅炉侧墙水冷壁近壁区还原性气氛的分布特征。李文学等人^[10]在 600 MW 对冲旋流燃烧锅炉上进行了侧墙贴壁风系统改造后的工业试验,对比分析了不同工况下的改造效果并对运行方式进行了优化。陈敏生等人^[11]采用数值模拟方法优化了前后墙贴壁风喷口布置方案,并分析了贴壁风对炉内燃烧及各参数的影响。陈天杰等人^[12]采用数值模拟方法对对冲旋流锅炉前后墙布置贴壁风、侧墙布置贴壁风及组合布置等 3 种方案进行了对比分析。陈勤根等人^[13]采用数值模拟方法分析了加装 3 种布置方式贴壁风后锅炉各参数的变化。姚露等人^[14]采用数值模拟方法对对冲旋流燃烧锅炉加装组合式贴壁风后的炉内速度场、温度场及烟气组分进行了研究。赵瑞松等人^[15]采用数值模拟方法研究了贴壁风布置方式,并在某 660 MW 对冲燃烧锅炉上进行了应用研究。李春曦等人^[16]对加装侧墙贴壁风的对冲燃烧锅炉进行了全炉膛数值模拟,并对侧墙壁面的还原性气氛、炉内燃烧和污染物排放进行分析。

众多学者对防高温腐蚀进行了大量的数值模拟研究,而对贴壁风系统改造后研究较少。本文以某电厂 670 MW 超临界对冲旋流燃烧锅炉为研究对象,在侧墙多点网格化布置低速膜式贴壁风系统,进行燃烧优化调整试验,研究贴壁风系统在不同工况下对水冷壁近壁区还原性气氛及炉内燃烧和运行参

数的影响,以期为对冲旋流燃烧锅炉水冷壁高温腐蚀防治提供参考。

1 设备简介

某电厂配置 2 台哈尔滨锅炉厂生产的 670 MW 型号为 HG-2115/25.4-YM12 锅炉,锅炉参数如表 1 所示。锅炉为一次中间再热、超临界压力变压运行带内置式再循环泵启动系统的直流锅炉,单炉膛、平衡通风、固态排渣、全钢架、全悬吊结构、Π 型布置、露天布置。30 只低氮轴向旋流燃烧器采用前后墙布置、对冲燃烧,6 台 HP983/Dyn 中速磨煤机配正压直吹制粉系统。

表 1 锅炉主要参数
Tab. 1 Main parameters of boiler

参 数	数 值
最大连续蒸发量/t·h ⁻¹	2 115
额定蒸发量/t·h ⁻¹	1 995
额定蒸汽压力/MPa	25.4
额定蒸汽温度/℃	571
再热蒸汽流量/t·h ⁻¹	1 785.4
再热蒸汽进口压力/MPa	4.51
再热蒸汽出口压力/MPa	4.32
再热蒸汽进口温度/℃	318
再热蒸汽出口温度/℃	569
给水温度/℃	283

2 贴壁风系统改造

2.1 改造方案

为改善水冷壁高温腐蚀严重问题,在两侧墙相应位置布置低速膜式贴壁风喷口,采用多点网格布置精准防治,来降低侧墙水冷壁面还原性气氛,提高壁面附近 O₂ 浓度,缓解受热面产生严重的高温腐蚀问题。根据锅炉检修期间炉内受热面腐蚀严重区域情况,在锅炉两侧墙分别布置 4 层贴壁风,每层贴壁风布置 5 个喷口(单侧墙)。从下往上分别为第 1 层到第 4 层,第 1 层贴壁风标高位于中、上层燃烧器中间位置,第 2 层贴壁风标高位于上层燃烧器中心位置,第 3 层贴壁风位于燃尽风与上层燃烧器之间,第 4 层贴壁风标高位于燃尽风中心位置,每层贴壁

风各由 2 只电动调节门控制进入各层的贴壁风量。贴壁风风源引自二次风系统,贴壁风风量约占总风量的 4%。在每层贴壁风喷口上部各开 5 个测量孔,用于测量水冷壁近壁区烟气中 O_2 、CO 和 H_2S 体积分数。面向炉前方向,炉膛左右两侧墙分别以 A 侧、B 侧表示,A 侧墙从炉前到炉后方向依次布置编号为 1,2,3,4,5 的测点,测点 1 靠近前墙,测点 5 靠近后墙。B 侧墙编号同 A 侧墙。各层贴壁风喷口及测点布置如图 1 所示。

2.2 试验煤质

试验中采用不同入炉煤质,对比分析煤质变化时对水冷壁近壁区气氛及锅炉运行参数的影响。煤质分析如表 2 所示。

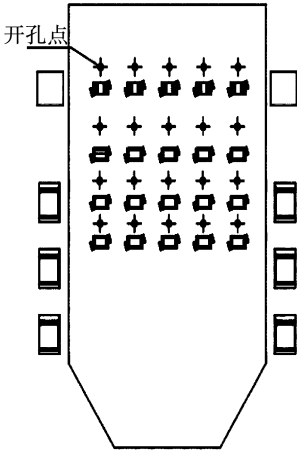


图 1 贴壁风喷口及测点布置示意图
Fig. 1 Arrangement diagram of closing-to-wall air nozzles and measurement points

表 2 煤质分析
Tab. 2 Analysis of the coal quality

煤种	元素分析/%					工业分析/%			$Q_{\text{net, ar}}/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	M_{ar}	A_{ar}	V_{daf}	
1	58.72	3.36	7.11	0.79	0.64	9.61	19.77	32.31	22 440
2	54.18	3.05	6.95	0.63	1.06	10.24	23.89	30.27	20 350

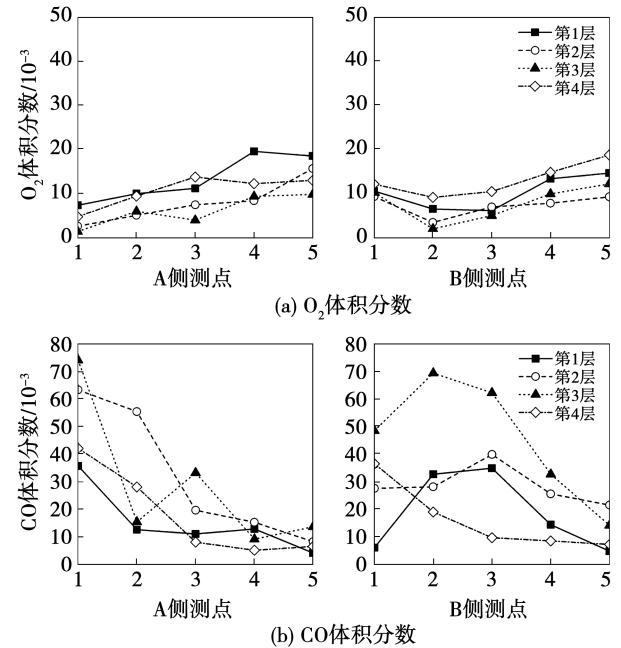
3 试验结果及分析

3.1 改造前后工况对比试验

负荷维持在 660 MW,炉膛出口氧量保持在 2.5%,二次风门开度保持不变,将贴壁风的电动门由零调整至 100%,采用煤种 1 进行试验,使用 tes-to350 烟气分析仪测量各工况下两侧墙近壁区的烟气成分。

图 2 为 660 MW 负荷下贴壁风开度为零时侧墙水冷壁贴壁气氛中 O_2 、CO、 H_2S 体积分数分布。当贴壁风开度为零时,锅炉 A 侧第 1 层到第 4 层测点的氧气体积分数平均值分别为 13.2×10^{-3} 、 7.8×10^{-3} 、 6×10^{-3} 和 10.6×10^{-3} , O_2 体积分数较低区域主要集中在第 2,3 层标高附近和左前墙位置。B 侧第 1 层到第 4 层测点的 O_2 体积分数平均值分别为 10.2×10^{-3} 、 7.3×10^{-3} 、 7.8×10^{-3} 和 13×10^{-3} , O_2 体积分数较低区域主要集中在第 2,3 层标高附近和右墙中间位置。CO 与 H_2S 分布趋势基本一致,但与 O_2 分布趋势相反。A 侧各层 H_2S 体积分数平均值分别为 0.145×10^{-3} 、 0.245×10^{-3} 、 0.243×10^{-3}

和 0.172×10^{-3} ,B 侧各层 H_2S 体积分数平均值分别为 0.12×10^{-3} 、 0.171×10^{-3} 、 0.245×10^{-3} 和 0.114×10^{-3} 。 H_2S 体积分数最高值达 0.4×10^{-3} 以上,主要集中在左前墙和右墙中间位置,存在较大高温腐蚀风险。



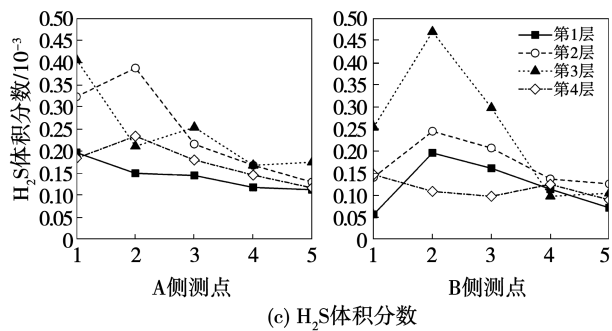


图 2 贴壁风全关时近壁区气氛分布图

Fig.2 Atmosphere distribution in the near wall area when the closing-to-wall air damper is fully closed

图 3 为 660 MW 负荷下贴壁风开度为 100% 时侧墙水冷壁贴壁烟气中 O_2 、 CO 、 H_2S 体积分数的分布图。

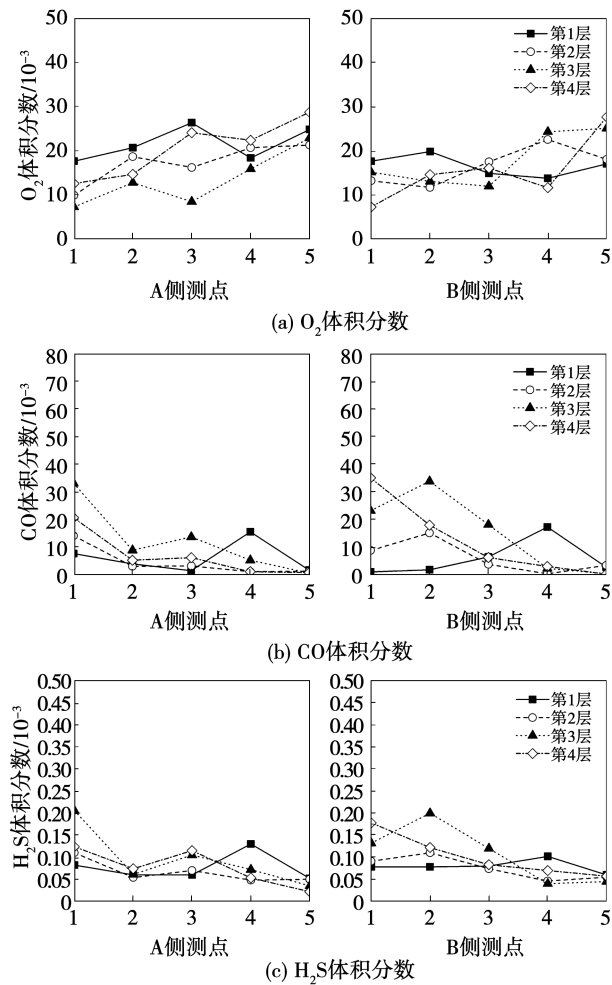


图 3 贴壁风全开时近壁区气氛分布图

Fig.3 Atmosphere distribution in the near wall area when the closing-to-wall air damper is fully open

由图 3 可知,当贴壁风开度为 100% 时,A 侧第 1 层到第 4 层测点的 O_2 体积分数平均值分别为 21.6×10^{-3} 、 17.4×10^{-3} 、 13.5×10^{-3} 和 20.4×10^{-3} ,B 侧第 1 层到第 4 层测点的 O_2 体积分数平均值分别为 16.7×10^{-3} 、 16.6×10^{-3} 、 17.9×10^{-3} 和 15.5×10^{-3} ,整体氧量大幅提升。A 侧各层 H_2S 体积分数平均值分别为 0.077×10^{-3} 、 0.066×10^{-3} 、 0.096×10^{-3} 和 0.078×10^{-3} ,B 侧各层 H_2S 体积分数平均值分别为 0.08×10^{-3} 、 0.075×10^{-3} 、 0.107×10^{-3} 和 0.102×10^{-3} , H_2S 体积分数明显降低,水冷壁近壁区还原性气氛减少,有效缓解了水冷壁的高温腐蚀。

对比 660 MW 负荷工况下贴壁风风门全开全关时贴壁风近壁区的气氛变化,如表 3 所示。

表 3 贴壁风近壁区气氛测试结果对比

Tab.3 Comparison of closing-to-wall air atmosphere test results in the near wall area		
气体	贴壁风全关(A 侧/B 侧)	贴壁风全开(A 侧/B 侧)
$H_2S/10^{-3}$	0.201/0.162	0.079/0.091
$CO/10^{-3}$	23.601/27.102	7.456/10.082
$O_2/10^{-3}$	9.4/9.6	18.2/16.7

由表 3 可知,贴壁风全关时 A 侧 O_2 体积分数平均值为 9.4×10^{-3} , H_2S 体积分数平均值为 0.201×10^{-3} ;B 侧 O_2 体积分数平均值为 9.6×10^{-3} , H_2S 体积分数平均值为 0.162×10^{-3} 。贴壁风开度为 100% 时 A 侧 O_2 体积分数平均值为 18.2×10^{-3} ,较贴壁风全关时提升了 8.8×10^{-3} ; H_2S 体积分数平均值为 0.079×10^{-3} ,较贴壁风全关时降低了 0.122×10^{-3} 。B 侧 O_2 体积分数平均值为 16.7×10^{-3} ,较贴壁风全关时提升了 7.1×10^{-3} ; H_2S 体积分数平均值为 0.091×10^{-3} ,较贴壁风全关时降低了 0.071×10^{-3} 。由此可知,贴壁风开大后,通过向侧墙水冷壁区域定向补风,形成空气保护膜,大幅提高水冷壁近壁区 O_2 体积分数,显著改善近壁区还原性气氛,降低高温腐蚀发生风险。

3.2 贴壁风开度对比试验

锅炉负荷在 660 MW 工况下,炉膛出口氧量保持在 3.0%,分别将每层贴壁风风门开度由零调整为 30%、50%、70% 和 100%,测量贴壁风近壁区气

氛,分析贴壁风各风门开度对水冷壁近壁区气氛的影响,如图 4 所示。

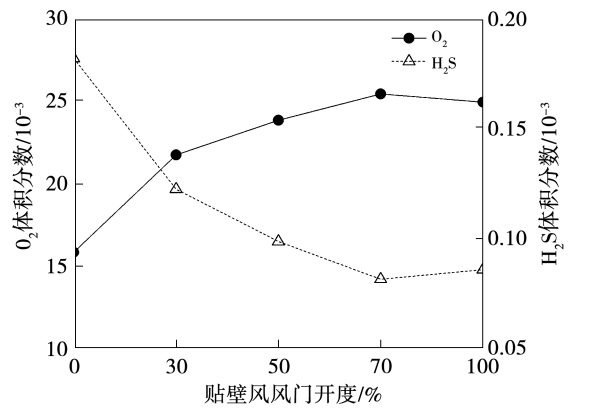


图 4 贴壁风风门开度对近壁区气氛的影响

Fig.4 Effect of the opening degree of closing-to-wall air damper on the atmosphere in the near wall area

由图 4 看出,贴壁风风门开度从全关状态逐渐增大过程中,水冷壁近壁区整体 O₂ 体积分数平均值呈上升趋势,H₂S 体积分数平均值整体呈下降趋势,水冷壁高温腐蚀风险降低。当贴壁风风门开度大于 70% 后,继续增大风门开度对水冷壁近壁区气氛影响较小。分析原因,贴壁风风量只占总风量的 4% 左右,风速较低,可有效覆盖水冷壁形成保护气膜,降低水冷壁还原性气氛。随着保护气膜形成,继续开大风门对提高贴壁风量增加幅度有限,对近壁区气氛影响较小。

3.3 O₂ 体积分数变化对近壁区气氛的影响

保持贴壁风风门在 100% 开度下,测量 660、500 和 330 MW 负荷不同 O₂ 体积分数变化下的贴壁风近壁区气氛,结果如图 5 所示。

由图 5 看出,随着 O₂ 体积分数的升高,水冷壁近壁区 H₂S 体积分数逐渐降低,H₂S 可控制在 0.1×10^{-3} 以下。对比不同负荷下的 H₂S 体积分数可知,高负荷下 H₂S 体积分数明显高于中低负荷,高温腐蚀较中低负荷严重,而中低负荷保持贴壁风门优化开度下发生高温腐蚀几率较低。因此,应重点针对高负荷采取有效措施来降低高温腐蚀风险。

3.4 煤质变化的影响

负荷维持在 660 MW,炉膛出口氧量保持在 3.0%,贴壁风开度 100%,对比燃用不同煤质时水

冷壁近壁区气氛变化,如表 4 所示。

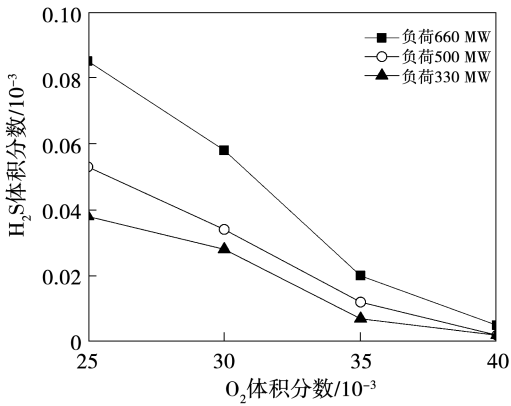


图 5 O₂ 体积分数变化对近壁区平均气氛影响分布图

Fig.5 Effect of the change of oxygen volume fraction on the average atmosphere in the near wall area

表 4 不同煤质下近壁区气氛测试结果

Tab.4 Atmosphere test results in the near wall area under different coal qualities

气体	煤种 1(A 侧/B 侧)	煤种 2(A 侧/B 侧)
H ₂ S/10 ⁻³	0.083 2/0.096	0.119/0.126
CO/10 ⁻³	7.146/8.932	10.757/12.669
O ₂ /10 ⁻³	21.1/20.2	19.6/20.7

燃用煤种 2 时,A 侧水冷壁近壁区 H₂S 体积分数平均值为 0.119×10^{-3} ,B 侧水冷壁近壁区 H₂S 体积分数平均值为 0.126×10^{-3} 。随着煤质硫分的升高,水冷壁近壁区 H₂S 体积分数升高,高温腐蚀加剧。

3.5 对炉膛出口氮氧化物质量浓度影响

图 6 给出了 3 个负荷工况下,贴壁风全关及 100% 开度下的炉膛出口氮氧化物排放质量浓度的变化。试验过程中保持各负荷氧量相同,仅通过调节贴壁风门开度观察贴壁风对氮氧化物质量浓度的影响。660 MW 负荷下贴壁风全关时炉膛出口氮氧化物质量浓度为 279.9 mg/m³,贴壁风开度为 100% 时炉膛出口氮氧化物质量浓度为 268.7 mg/m³。500 MW 负荷下贴壁风全关时炉膛出口氮氧化物质量浓度为 195.3 mg/m³,贴壁风开度为 100% 时炉膛出口氮氧化物质量浓度为 180.5 mg/m³。330 MW 负荷下贴壁风全关时炉膛出口氮氧化物质量浓度为 177.7 mg/m³,贴壁

风开度为 100% 时炉膛出口氮氧化物质量浓度为 172.2 mg/m³。

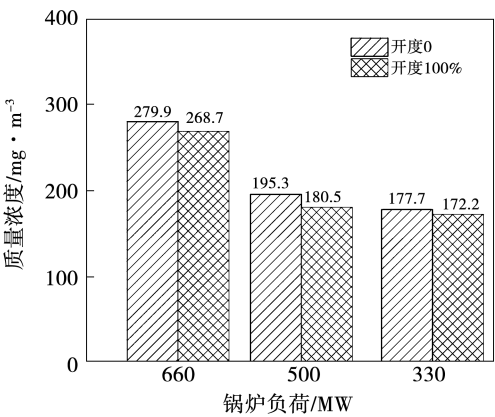


图6 炉膛出口氮氧化物排放质量浓度对比
Fig. 6 Comparison of mass concentrations of NO_x emission at furnace outlet

贴壁风风门由全关到 100% 开度时,炉膛出口氮氧化物质量浓度变化不明显。分析原因是贴壁风引自二次风系统,进入燃烧器的二次风量减小,增加了分级燃烧的效果,抑制了氮氧化物的生成;而贴壁风均匀分布在侧墙水冷壁周围,提高了近壁区焦炭的燃尽率,使主燃区燃烧更均匀充分,氮氧化物排放未发生较大变化。

4 结 论

- (1) 通过贴壁风系统改造,侧墙近壁区还原性气氛明显降低,H₂S 体积分数可控制在 0.1 × 10⁻³ 以下,可有效防治水冷壁的高温腐蚀。
- (2) 贴壁风风门开度从全关状态开大过程中,水冷壁近壁区 O₂ 体积分数呈上升趋势,H₂S 体积分数整体呈下降趋势,水冷壁高温腐蚀风险降低。贴壁风风门调至一定开度后,继续增大开度对水冷壁近壁区气氛影响不明显。
- (3) 高负荷下的 H₂S 体积分数明显高于中低负荷,高温腐蚀较中低负荷严重,在中低负荷保持贴壁风门优化开度下发生高温腐蚀几率较低。
- (4) 由于贴壁风风量较低,贴壁风系统改造后对锅炉氮氧化物排放无明显影响。

参考文献:

[1] 贾宏禄. 锅炉低氮燃烧改造与高温腐蚀控制分析[J]. 电力科

学与工程,2015(6):68-73.
JIA Hong-lu. Analysis of low NO_x combustion system retrofit and high temperature corrosion control[J]. Electric Power Science and Engineering,2015(6):68-73.
[2] 李广伟,孙俊威,黄启龙. 600 MW 对冲燃烧锅炉水冷壁高温腐蚀原因分析及对策[J]. 华电技术,2016,38(6):43-46.
LI Guang-wei, SUN Jun-wei, HUANG Qi-long. 600 MW Opposed firing boiler water wall high temperature corrosion cause analysis and treatment[J]. Huadian Technology,2016,38(6):43-46.
[3] 孙俊威,戴维葆,陈国庆,等. 600 MW 超临界对冲燃烧锅炉水冷壁高温腐蚀运行优化调整[J]. 热能动力工程,2019,34(6):178-183.
SUN Jun-wei, DAI Wei-bao, CHEN Guo-qing, et al. Operation optimization and adjustment for high-temperature corrosion of water wall of 600 MW supercritical opposed firing boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(6):178-183.
[4] 尚亚平. 浅析空气分级燃烧下的贴壁风技术研究[J]. 能源与节能,2021,193(10):131-133.
SHANG Ya-ping. Analysis of research on wall attached air technology under air staged combustion[J]. Energy and Energy Conservation,2021,193(10):131-133.
[5] 杨希刚,金保昇. 对冲旋流燃烧锅炉组合式贴壁风运行参数优化的数值模拟[J]. 动力工程学报,2019,39(7):517-523.
YANG Xi-gang, JIN Bao-sheng. Numerical simulation and optimization on the operation parameters of a combined closing-to-wall air system in a supercritical opposed firing boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2019,39(7):517-523.
[6] 许 涛. 600 MW 对冲燃烧锅炉防高温腐蚀改造的数值模拟[D]. 保定:华北电力大学,2016.
XU Tao. Numerical simulation of 600 MW opposed firing boiler anti-high temperature corrosion modification[D]. Baoding: North China Electric Power University,2016.
[7] 方志星. 对冲燃烧锅炉防高温腐蚀改造数值研究[J]. 浙江电力,2019,38(6):72-77.
FANG Zhi-xing. Numerical study on high-temperature corrosion retrofit of opposite wall firing boiler[J]. Zhejiang Electric Power, 2019,38(6):72-77.
[8] 关 键,陈锡炯,项群扬,等. 配风方式及贴壁风对锅炉贴壁气氛影响规律研究[J]. 电站系统工程,2017,33(3):21-23,26.
GUAN Jian, CHEN Xi-jiong, XIANG Qun-yang, et al. Effect of air distribution and near-wall air on near water-wall flue gas atmosphere distribution for coal firing boiler[J]. Power System Engineering,2017,33(3):21-23,26.
[9] 李永生,刘建民,陈国庆,等. 对冲旋流燃烧锅炉侧墙水冷壁近壁区还原性气氛分布特性[J]. 动力工程学报,2017,37(7):

- 513 – 519, 539.
- LI Yong-sheng, LIU Jian-min, CHEN Guo-qing, et al. Distribution characteristics of reductive atmosphere close to the water wall of an opposed firing boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(7): 513 – 519, 539.
- [10] 李文学, 蔡 培, 张春辉, 等. 600 MW 对冲旋流燃烧锅炉侧墙缝隙式贴壁风系统工业试验[J]. 锅炉技术, 2018, 49(4): 46 – 51.
- LI Wen-xue, CAI Pei, ZHANG Chun-hui, et al. Industrial experiment on the side wall slot closing-to-wall air system in a 600 MW supercritical opposite firing boiler[J]. Boiler Technology, 2018, 49(4): 46 – 51.
- [11] 陈敏生, 廖晓春. 600 MW 超临界锅炉防止高温腐蚀技术改造和运行调整[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 56 – 59, 117.
- CHEN Min-sheng, LIAO Xiao-chun. The retrofit of high-temperature corrosion prevention and operation adjustment for 600 MW supercritical boiler [J]. Electric Power, 2014, 47(4): 56 – 59, 117.
- [12] 陈天杰, 姚 露, 刘建民, 等. 某 660 MW 前后墙对冲燃煤锅炉贴壁风优化方案的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5265 – 5271.
- CHEN Tian-jie, YAO Lu, LIU Jian-min, et al. Numerical simulation on the optimization of closing-to-wall air in a 660 MW front and rear wall opposed coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5265 – 5271.
- [13] 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 Qin-gen, CHEN Guo-qing, ZHU Qing-guo, 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.
- [14] 姚 露, 陈天杰, 刘建民, 等. 组合式贴壁风对 660 MW 锅炉燃烧过程的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 85 – 90.
- YAO Lu, CHEN Tian-jie, LIU Jian-min, et al. Influence of closing-to-wall air on combustion process in 660 MW opposed firing boiler[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(1): 85 – 90.
- [15] 赵瑞松, 邢振中, 安敬学, 等. 660 MW 对冲燃烧锅炉高温腐蚀治理研究[J]. 电站系统工程, 2017, 33(4): 30 – 32, 35.
- ZHAO Rui-song, XING Zhen-zhong, AN Jing-xue, et al. Research on treatment of high temperature corrosion for a 660 MW opposed firing boiler[J]. Power System Engineering, 2017, 33(4): 30 – 32, 35.
- [16] 李春曦, 许 涛, 李 敏, 等. 对冲燃烧锅炉防高温硫腐蚀改造的数值研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(11): 853 – 861.
- LI Chun-xi, XU Tao, LI Min, et al. Retrofit of an opposed firing boiler to prevent high-temperature sulfur corrosion[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(11): 853 – 861.

(丛 敏 编辑)