

LYCTWA 型贴壁风在墙式对冲燃烧锅炉上的应用及仿真模拟研究

武学谦,刘鹏飞,崔星源,张超群

(烟台龙源电力技术股份有限公司,山东 烟台 264006)

摘 要:针对某电厂 600 MW 墙式对冲燃烧锅炉在低氮燃烧改造后存在严重的水冷壁高温腐蚀问题,采取 LYCTWA 型贴壁风系统对其进行了高温腐蚀治理改造。通过全炉膛数值模拟与现场试验相结合的方法,研究了侧墙壁面区域的烟气成分分布以及不同的贴壁风布置方案对炉内燃烧及高温硫腐蚀的影响。结果表明:模拟结果与电厂实际腐蚀区域相吻合,腐蚀区域主要集中在第 2 层主燃烧器至燃尽风间的侧墙区域。加装了贴壁风系统后,数值模拟和试验结果均显示侧墙还原性气体体积分数大幅降低,水冷壁贴壁气氛得到显著改善。

关 键 词:LYCTWA 型贴壁风;高温腐蚀;数值仿真

中图分类号:TK224.1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.03.018

[引用本文格式]武学谦,刘鹏飞,崔星源,等. LYCTWA 型贴壁风在墙式对冲燃烧锅炉上的应用及仿真模拟研究[J]. 热能动力工程,2022,37(3):122-128. WU Xue-qian, LIU Peng-fei, CUI Xing-yuan, et al. Application and simulation of LYCTWA type wall air in wall type opposed boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 122-128.

Application and Simulation of LYCTWA Type Wall Air in Wall Type Opposed Boiler

WU Xue-qian, LIU Peng-fei, CUI Xing-yuan, ZHANG Chao-qun

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

Abstract: For resolving the serious high temperature corrosion problem of water wall of a 600 MW wall type opposed firing boiler after low nitrogen combustion transformation, the LYCTWA type wall air system was adopted to treat the high temperature corrosion of the boiler. Through the methods of numerical simulation and field test, the distribution of flue gas composition in the side wall area was analyzed, and the effects of different wall air arrangements on the combustion performance of the boiler and high temperature sulfur corrosion were also studied. The results show that, the simulation results were consistent with the actual corrosion area of the power plant, and the corrosion area was mainly in the side wall area between the second main burner and the room of over-fire air (OFA). Furthermore, it was found that, after the installation of the wall air system, the volume fraction of reducing gas in the side wall was greatly reduced, and the atmosphere of water wall was greatly improved.

Key words: LYCTWA type wall air, high temperature corrosion, numerical simulation

引 言

目前,国内多数大型电站相继完成了煤粉锅炉低氮燃烧技术改造。低氮燃烧改造的核心技术是空气分级燃烧,通过空气分级燃烧可以使省煤器出口的 NO_x 排放质量浓度削减 30% ~ 60%。空气分级燃烧虽然可以降低 NO_x 的排放质量浓度,但也给锅炉的安全运行带来一系列的问题。首先,分级燃烧后炉内的还原区域相应增大,还原区内的 H_2S 、 SO_2 和 HCl 等强腐蚀性气体也大幅增加。这些气体在一定条件下极易破坏水冷壁表面的氧化铁保护膜,造成水冷壁出现严重的硫化物型高温腐蚀。其次,随着炉内还原性气氛的增强,煤的灰熔融温度将进一步降低,这不仅会造成该区域水冷壁结渣,还会加速受热面的高温腐蚀^[1]。

据统计,我国约 80% 以上燃用贫煤的大型电站锅炉存在不同程度的水冷壁高温腐蚀^[2]。而采用空气分级燃烧后,几乎所有墙式对冲燃烧锅炉都存在水冷壁高温腐蚀的问题^[3-4]。高温腐蚀主要由一次风气流贴壁转变为强还原性气氛所致,腐蚀区域在高度方向上由主燃区扩展到燃尽风(Over Fire Air,OFA)标高以下的中下辐射区。

近年来,锅炉水冷壁的高温腐蚀防治技术主要有水冷壁防腐喷涂和增设贴壁风两种方式。其中,贴壁风技术以其简单可靠且能够从根源上缓解高温腐蚀的优点在工程实践中得到广泛应用。在工程实践中,通过现场试验研究的方法确定贴壁风布置方案将消耗大量的人力、物力及财力。因此,随着计算机和计算流体力学技术的快速发展,应用计算流体力学(CFD)仿真技术来优化设计锅炉贴壁风的布置方案越来越受到重视^[5-7]。

常规的贴壁风通常布置在前后墙靠侧墙区域,一般采用对冲布置方式。然而,该布置方式对侧墙中间区域水冷壁的保护范围十分有限。以某 600 MW 前后墙对冲燃煤机组锅炉为研究对象,通过全炉膛数值模拟与理论计算相结合的方法,研究了侧墙壁面区域的烟气成分分布,以及不同贴壁风布置方案对炉内燃烧及高温硫腐蚀的影响。在此基础上,提出了最优化的贴壁风布置方案,分析了炉内的速度场及组分浓度场分布。经过现场试验结果校验,侧墙还原性气体体积分数大幅降低,水冷壁贴壁气氛显著改善,对贴壁风改造的工程实践具有一定

的借鉴意义。

1 研究对象

锅炉型号为 HG1913/25.4 - YM3,是采用 Π 型露天布置、一次中间再热、固态排渣、全钢构架、前后墙对冲燃烧方式的变压本生直流锅炉。锅炉过热器采用两级喷水减温器,再热蒸汽采用尾部烟气挡板调温,并备有事故喷水减温器。锅炉主要设计参数和燃煤参数如表 1 所示。锅炉设计煤质和校核煤质特性如表 2 所示。

表 1 锅炉主要设计参数
Tab.1 Main design parameters of boiler

参 数	BMCR 工况	BRL 工况
过热蒸汽质量流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	1 913	1 816
过热蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	571	571
过热蒸汽压力/ MPa	25.4	25.28
再热蒸汽进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	311	305.5
再热蒸汽出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	569	569
再热蒸汽压力/ MPa	4.19	3.96
给水温度/ $^{\circ}\text{C}$	283	279.4
排烟温度/ $^{\circ}\text{C}$	126	118.3
燃料消耗量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	237.7	227.6
过剩空气系数	1.19	1.19
炉膛容积热负荷/ $\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$	81.36	77.9
炉膛截面热负荷/ $\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$	4.314	4.13
锅炉效率/%	94.04	94.19

注:BMCR 工况—最大连续出力工况;BRL 工况—额定工况

表 2 煤质特性
Tab.2 Coal quality characteristics

参 数	设计煤种	校核煤种
碳/%	64.4	54.14
氢/%	3.64	3.51
氧/%	10.05	6.83
氮/%	0.79	0.80
硫/%	0.43	0.77
灰份/%	8.79	21.02
水份/%	12.1	12.93
空干基水份/%	8	3.31
干燥无灰基挥发份/%	38	39
低位热值/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	23 826	20 870

锅炉采用中速磨冷一次风机直吹式制粉系统,

配置 6 台 ZGM113 型中速磨煤机。前后墙各布置 3 层低 NO_x 轴向旋流燃烧器(LNASB),共 30 只。同时,在旋流燃烧器正上方布置燃尽风口,前后左右墙共 10 只,实现空气分级燃烧,降低炉内 NO_x 的生成。燃尽风喷口距最上层燃烧器的距离为 3.509 m。

目前,该锅炉已经完成了低氮燃烧升级改造。针对实际燃用煤质的条件,最下层 10 只 LNASB 燃烧器改造为 LYSC-I 型燃烧器,并将其他 20 只燃烧器优化改造为 LYSC-III 型低 NO_x 燃烧器。取消锅炉前、后墙标高 34.713 m 处的原燃尽风喷口,在锅炉前、后墙水冷壁标高约 36.75 m 处各开设 5 个直径约 0.96 m 的墙孔,对应安装 LY-OFA 型燃尽风喷口,将原燃尽风风箱、风道适当改造以适应新 OFA 的需要。

2 问题及分析

近年来,该锅炉实际燃煤中的含硫量升高,干燥基硫份(St,d)平均高达 2% 以上,偏离设计煤种较大,该锅炉实际运行中水冷壁存在明显的腐蚀现象,如图 1 所示。水冷壁减薄速率逐年升高,个别区域壁厚减薄至 3.2 mm,年最大减薄约 1.8 mm。



(a) 腐蚀区域

(b) 硫化物沉积

图 1 水冷壁腐蚀照片

Fig.1 Photos of water wall corrosion

该锅炉为超临界锅炉,运行过程中锅炉的水冷壁壁温基本控制在 325 ~ 360 °C 之间,此温度区间适宜发生硫化物型高温腐蚀。根据相关单位对该锅炉水冷壁近壁区的 CO 、 O_2 和 H_2S 含量进行的实际测量,结果显示,主燃区和还原区近壁区的 O_2 体积分

数极低且 CO 体积分数极高,同时 H_2S 浓度也非常高。

结合炉内检查情况和水冷壁壁面气氛测试值综合分析,对水冷壁向火侧沉积物进行取样分析,表面沉积物中主要以 FeS 、少量 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 等成份组成,具有硫化物型高温腐蚀的特征,且越靠近管母线,S 元素的质量分数也越高。综合以上分析,炉膛水冷壁近壁区一定发生了硫化物型高温腐蚀。根据现场腐蚀检查情况,高温硫腐蚀区域主要集中在第 2 层主燃烧器至燃尽风高度范围的侧墙区域,并且具有中间部位腐蚀严重,向两侧逐渐减轻的特点。

3 改造方案及仿真论证

采用数值模拟的方法,对不同改造方案的效果进行分析论证。图 2 为以该电厂锅炉为原型建立 1:1 的全尺寸物理模型,采用分区域划分网格的方法以减少伪扩散,进而对整个计算区域进行了网格划分。贴壁风采用全尺寸物理模型,并分别将贴壁风风道、风箱和喷口进行建模。其中,由于墙式对冲燃烧锅炉的燃烧器结构复杂,有内二次风、外二次风、中心风和一次风等多重通道。二次风流经内、外二次风通道时,在叶片组的作用下产生旋转,在燃烧器出口形成旋流。为准确地计算该旋转气流,燃烧器的各通道网格单独划分,并进行单只燃烧器的冷态流场计算。为减少网格数目,炉膛大部分区域采用结构化网格^[8-10]。

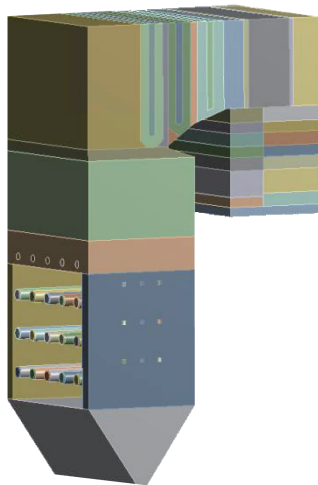


图 2 全炉膛模型

Fig.2 Furnace model

在计算中采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟气相湍流输运。煤粉颗粒采用随机轨道模型,分别使用单/双混合分数-概率密度函数模拟气相湍流燃烧。采用动力/扩散控制反应速率模拟焦炭的燃烧,采用 DO 模型计算辐射传热。关于 NO_x 的生成仅考虑热力型 NO_x 及燃料型 NO_x ,压力-速度的耦合采用 SIMPLE 法进行求解。旋流燃烧器及炉膛网格划分如图 3 所示。

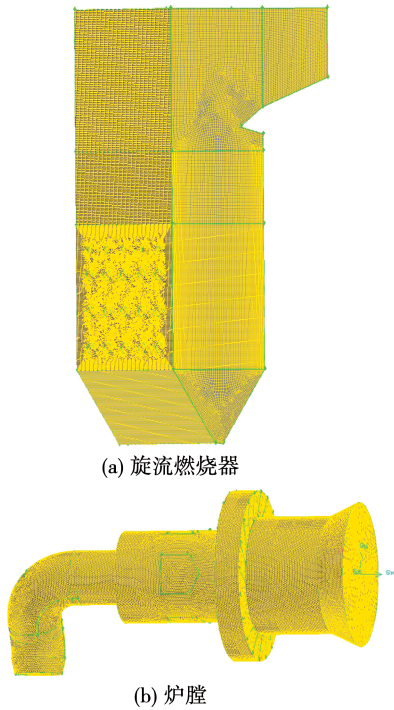


图3 旋流燃烧器及全炉膛网格划分

Fig.3 Grid division of swirl burner and furnace

在基准工况下,控制排烟氧量的体积分数为 3.3%,所有工况的贴壁风喷口形状均采用较大高宽比的矩形喷口,采用高速直流风设计。各工况设置及边界条件如表 3 所示。

表3 工况及边界条件设置

Tab.3 Setting of working conditions and boundary conditions			
工况	喷口数	风率/%	布置方式
1	12	1.87	单列均等
2	14	3.74	单列均等
3	24	3.74	双列均等
4	24	3.74	双列非均等

综合数值仿真计算结果与现场空间布置的可实施性,决定采用工况 3 为本次贴壁风系统改造的最终方案。改造方案如下:为保证添加贴壁风装置后不会对低氮技术改造造成负面的影响,每层贴壁风均从两侧的二次风道取风,以保证富燃料区的氧气体积分数不会升高。根据本次改造方案,炉膛出口原过量空气系数 1.15 不变。具体布置方式为:在左、右侧墙靠中间位置上各布置 3 层贴壁风,每层对应布置两个靶向对称的贴壁风喷口。贴壁风喷口位于标高 25~34.3 m 处的锅炉两侧墙中间区域。

3.1 截面温度分布

图 4 为炉膛中心截面区域温度分布。由图 4 可知,与改造前相比,改造工况的炉膛中心截面区域温度场分布变化不大,原因是贴壁风风率占总风率比例较低,且射流方向与水冷壁夹角较小,属于附壁射流,未影响炉膛中心区域的还原性气氛。

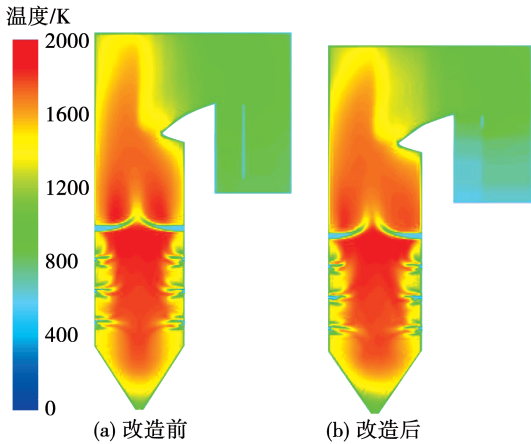


图4 炉膛中心截面区域温度分布

Fig.4 Temperature distribution on the central section of furnace

3.2 侧墙壁面区域 CO 与 O₂分布

改造前,侧墙中间区域缺氧严重,主燃烧区附近的侧墙中间近壁区域氧气体积分数接近 0,该区域处于强还原性气氛,是造成高温腐蚀的主要因素。改造后通过增加贴壁风给侧墙区域补给风量,锅炉水冷壁的贴壁气氛呈非还原性,如图 5 和图 6 所示,贴壁 O₂体积分数显著升高(主燃区两侧墙近壁大部分区域氧气体积分数已升至 3% 以上)。贴壁风技术改造后,不仅降低了 CO 气体的体积分数而且提高了侧墙近壁区 O₂的体积分数,从两个方面缓解了

高温腐蚀对侧墙水冷壁管的影响。

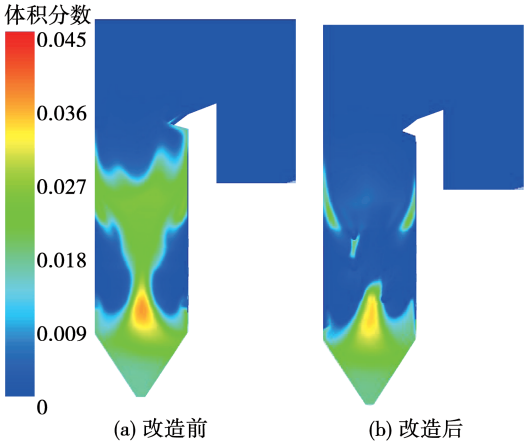


图 5 侧墙水冷壁区域 CO 体积分数分布
Fig. 5 CO distribution in water wall area of side wall

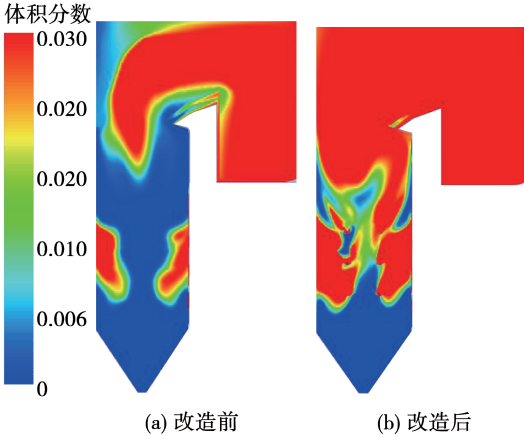


图 6 侧墙水冷壁区域 O₂ 体积分数分布
Fig. 6 O₂ distribution in water wall area of side wall

3.3 侧墙壁面区域 H₂S 分布

由图 7 可知,改造前在下层燃烧器至 OFA 上部的侧墙大片区域存在高体积分数的 H₂S 气体,主要分布在侧墙水冷壁中间区域,造成该区域产生严重的高温腐蚀问题。增加贴壁风后,在喷口附近形成良好的贴壁风膜,提高近壁区 O₂ 体积分数,降低该区域的还原性气氛。可以看出侧墙 H₂S 体积分数明显降低,高温腐蚀状况得到明显改善。

3.4 侧墙煤粉颗粒质量浓度场分布

由图 8 可知,从炉膛近壁面区域的煤粉质量浓度分布来看,两侧墙在加装了高速附壁射流后,未燃尽的煤粉及灰颗粒的刷墙贴壁现象得到明显改善。原因是当加入贴壁风后,贴壁风从喷口进入炉膛,随

着烟气向上流动,使炉膛近壁区域形成一层空气“保护膜”,具有较好的成膜特性,能够有效阻隔煤粉直接刷墙的情况,从而使左右侧墙区域的煤粉颗粒也有效减少,达到了预期效果。

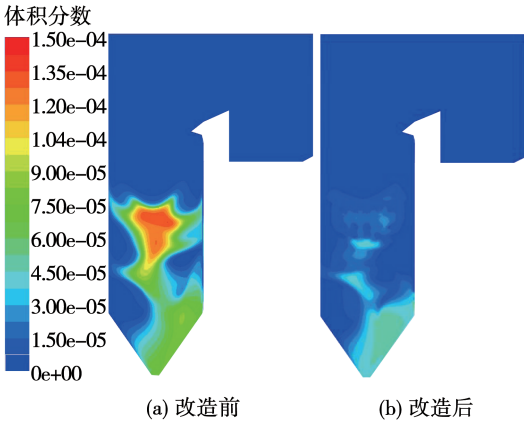


图 7 侧墙水冷壁区域 H₂S 体积分数分布
Fig. 7 H₂S distribution in water wall area of side wall

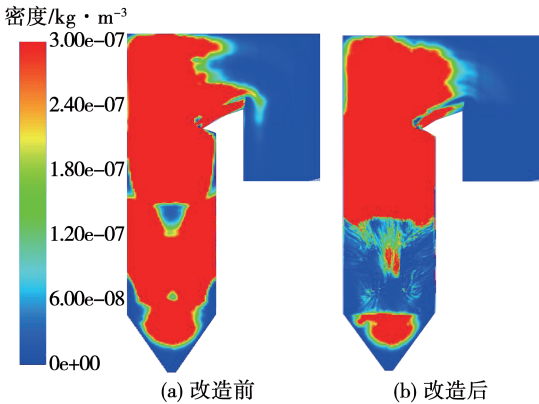


图 8 侧墙水冷壁区域煤粉颗粒质量浓度场分布
Fig. 8 Concentration distribution of pulverized coal in water wall area of side wall

4 现场试验结果

锅炉在进行了贴壁风系统改造后,为了验证改造的实际效果,在不同负荷下进行了锅炉侧墙壁面气氛的测试试验工作。改造前后的主要数据对比结果如表 4 所示。

4.1 主要性能参数对比

根据以往工程实践经验及煤粉质量浓度分布综合分析,改造前墙式对冲燃烧锅炉的炉膛上升气流中 CO 等未燃尽气体及较细的未燃尽碳颗粒容易沿水冷壁壁面上升,一方面容易加剧水冷壁管的高温

腐蚀,另一方面还容易导致锅炉气体不完全燃烧热损失和锅炉固体不完全燃烧热损失增大,影响锅炉效率。改造后,从锅炉运行的性能参数比较来看,加装贴壁风系统后锅炉的燃烧效率小幅提高,有效解决上述问题。

表 4 改造前后锅炉性能参数对比

Tab.4 Comparison of boiler performance parameters before and after retrofit		
参 数	改造前	改造后
电负荷/MW	615	620
主蒸汽温度/℃	567.5	569
再热蒸汽温度/℃	566	567.7
收到基硫份/%	1.13	1.08
运行平均氧量/%	2.81	2.86
给水温度/℃	287	289
排烟温度/℃	143.5	140.1
NO _x 排放质量浓度/mg·m ⁻³	345	348
锅炉效率/%	93.92	94.15

4.2 贴壁气氛对比

锅炉水冷壁壁面区域的 H₂S 气体体积分数是作为判断锅炉水冷壁高温腐蚀倾向性的主要指标,其体积分数的大幅降低能够有效缓解锅炉水冷壁区域的高温腐蚀问题。

现场试验测试结果如图 9 ~ 图 11 所示。加装 LYCTWA 型贴壁风系统后,锅炉水冷壁气氛中 H₂S 气体平均体积分数较改造前有较大幅的降低,改造后 H₂S 气体平均体积分数小于 4.5 × 10⁻⁴。如表 5 所示。改造后 26.8 及 31.3 m 标高测点实测的壁面 CO 平均体积分数进一步降低,与数值模拟仿真数据趋势相同。另外,改造后左侧水冷壁壁面的 CO 平均体积分数低于右侧墙,这与目前锅炉存在一定偏烧问题有关。

表 5 改造前后锅炉两侧墙壁面 CO 平均体积分数对比

Tab.5 Comparison of average CO concentration on both sides of boiler wall before and after retrofit					
工况	测点标	左侧平均体积分数/10 ⁻²		右侧平均体积分数/10 ⁻²	
	高/m	改造前	改造后	改造前	改造后
1	22.3	4.95	4.56	2.70	2.65
2	26.8	3.96	2.86	3.72	3.52
3	31.3	2.85	2.26	5.70	4.25

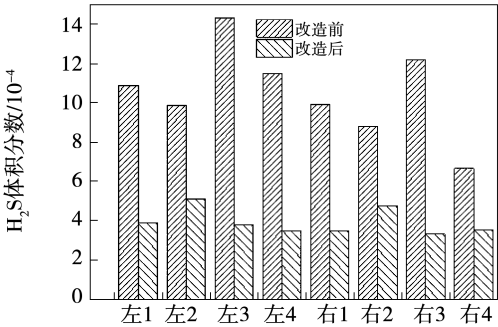


图 9 侧墙水冷壁区域 22.3 m 标高实测 H₂S 体积分数

Fig.9 Measured H₂S concentration at 22.3 m height in water wall area of side wall

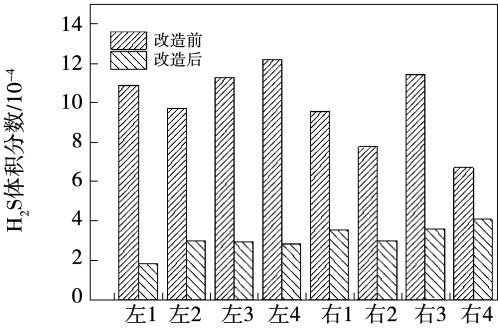


图 10 侧墙水冷壁区域 26.8 m 标高实测 H₂S 体积分数

Fig.10 Measured H₂S concentration at 26.8 m height in water wall area of side wall

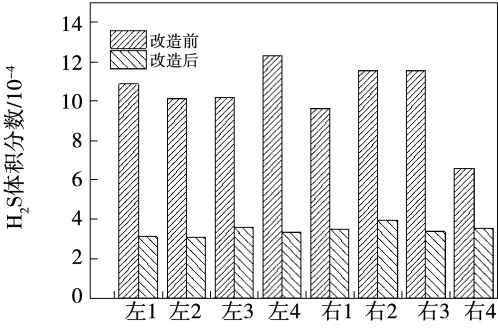


图 11 侧墙水冷壁区域 31.3 m 标高实测 H₂S 体积分数

Fig.11 Measured H₂S concentration at 31.3 m height in water wall area of side wall

5 结 论

针对某电厂 600 MW 墙式对冲燃烧锅炉在低氮燃烧改造后存在严重的水冷壁高温腐蚀问题,采取 LYCTWA 型贴壁风系统对其进行了高温腐蚀治理

改造。通过全炉膛数值模拟与现场试验相结合的方法,研究了侧墙壁面区域的烟气成分分布以及不同的贴壁风布置方案对炉内燃烧及高温硫腐蚀的影响,研究表明:

(1) 仿真模拟结果与电厂实际腐蚀区域较为吻合,腐蚀区域主要集中在第2层主燃烧器至燃尽风间的两侧墙水冷壁区域。加装了贴壁风系统后,数值模拟和试验结果均显示侧墙还原性气体体积分数大幅降低,水冷壁贴壁气氛显著改善。由于贴壁风的总风率小于锅炉总风量的4%,未造成火焰中心上移和 NO_x 大幅升高。改造后,锅炉燃烧效率为94.15%,相比改造前略有上升。

(2) 加装LYCTWA型贴壁风系统后,不仅有效降低了侧墙近壁区域的CO气体体积分数,而且提高了该区域的 O_2 平均体积分数(O_2 体积分数明显升高,由低于0.5%升高至1%以上),从两个方面缓解了高温腐蚀对侧墙水冷壁管的影响。

(3) 高速射流型贴壁风具有喷口射流速度高、射流穿透能力强、布置灵活的特点。能够直接布置在腐蚀最严重的中间区域,热态下射流速度大于45 m/s。能够穿透高温黏性火焰从而形成良好的成膜特性,有效降低左右两侧炉墙区域的煤粉颗粒,防止煤粉颗粒刷墙贴壁,从而大大缓解水冷壁的高温腐蚀现象。

参考文献:

- [1] 刘建全,孙保民,白涛,等. 600 MW 超临界旋流燃烧锅炉炉内温度场数值模拟及优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2): 15–21.
LIU Jian-quan, SUN Bao-min, BAI Tao, et al. Numerical simulation and optimization of temperature field in 600 MW supercritical swirl combustion boiler[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2011, 31(2): 15–21.
- [2] 洪立,江焯烨. 600 MW 超临界对冲锅炉水冷壁高温腐蚀分析及处理[J]. 锅炉技术, 2016(1): 63–65.
HONG Li, JIANG Zhuo-ye. High temperature corrosion analysis and treatment of water wall of 600 MW supercritical opposed flow boiler[J]. Boiler Technology, 2016(1): 63–65.
- [3] 关键,袁伟中,项群扬,等. 大型电站燃煤对冲锅炉水冷壁贴壁气氛分布规律研究[J]. 电站系统工程, 2016(4): 25–31.

GUAN Jian, YUAN Wei-zhong, XIANG Qun-yang, et al. Study on the distribution law of wall sticking atmosphere in water wall of coal fired opposed draft boiler in large power plant[J]. Power Plant Systems Engineering, 2016(4): 25–31.

- [4] 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(11): 11–36.
LI Chun-xi, XU Tao, LI Min, et al. Numerical study on high temperature sulfur corrosion prevention of opposed firing boiler[J]. Journal of Power Engineering, 2016(11): 11–36.
- [5] 马启磊,空气深度分级旋流燃烧器动力场冷态试验与数值仿真[J]. 发电设备, 2019(5): 3–33.
MA Qi-lei. Cold state test and numerical simulation of dynamic field of air deep classification swirl burner[J]. Power Generation Equipment, 2019(5): 3–33.
- [6] 张经武,李卫东,许传凯,等. 电站煤粉锅炉燃烧设备选型[M]. 北京:中国电力出版社, 2017.
ZHANG Jing-wu, LI Wei-dong, XU Chuan-kai, et al. Type selection of pulverized coal fired boiler combustion equipment in power plant[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [7] 刘武成. 现代电站锅炉技术及其改造[M]. 北京:中国电力出版社, 2006.
LIU Wu-cheng. Modern power plant boiler technology and its transformation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [8] 陈登高,李振山,蔡宁生. 煤粉空气分级燃烧中还原性气氛的模拟预测及分析[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 109–122.
CHEN Deng-gao, LI Zhen-shan, CAI Ning-sheng. Simulation prediction and analysis of reducing atmosphere in air staged combustion of pulverized coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 109–122.
- [9] 许伟刚,谭厚章,刘原一,等. 水冷壁高温腐蚀倾向判断及 H_2S 近壁面许用浓度研究[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 113–119.
XU Wei-gang, TAN Hou-zhang, LIU Yuan-yi, et al. Determination of high temperature corrosion tendency of water wall and study on allowable concentration of H_2S near wall[J]. China Electric Power, 2018, 51(7): 113–119.
- [10] 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 reducing atmosphere near the wall of water wall of opposed swirl combustion boiler[J]. Journal of Power Engineering, 2017, 37(7): 513–519, 539.

(刘颖 编辑)