

DOI: 10.19666/j.rlfed.202306086

某350 MW机组对冲锅炉燃用高碱煤炉膛 腐蚀防治研究

祁青福¹, 马世城¹, 杨忠灿², 李炎², 贾子秀², 卢红玲¹

(1.嘉峪关宏晟电热有限责任公司, 甘肃 嘉峪关 735100;

2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为降低燃料采购成本, 保证燃料供应, 甘肃某电厂大比例掺烧了部分新疆高碱的广汇煤和新疆能源煤。高碱煤掺烧后, 锅炉出现较严重的受热面高温腐蚀和结焦现象, 负荷最高只能带到85% ECR。为减轻高温腐蚀, 对锅炉开展了煤质特性、燃烧优化调整和设备改进技术研究。结果表明: 锅炉燃用较低硫份煤的情况下仍然发生较严重的高温腐蚀, 主要与新疆煤中的钠、钙等碱金属及氯质量分数较高有关, 通过提高氧量、降低一次风量、减弱燃烧器外二次风旋流强度和开大贴壁风等运行调整手段, 可以一定程度上改善水冷壁高温腐蚀特性; 彻底解决该问题, 还需使用添加剂、进行防高温腐蚀喷涂、增加吹灰器、改进贴壁风和燃烧器设计等技术途径。该研究成果可为解决高碱煤掺烧过程中出现类似问题的电厂提供借鉴和参考。

[关键词] 高碱煤; 掺烧; 高温腐蚀; 防治

[引用本文格式] 祁青福, 马世城, 杨忠灿, 等. 某350 MW机组对冲锅炉燃用高碱煤炉膛腐蚀防治研究[J]. 热力发电, 2024, 53(1): 91-98. QI Qingfu, MA Shicheng, YANG Zhongcan, et al. Study on corrosion prevention and control of the furnace of a 350 MW opposite-firing boiler burning high-alkali coal[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(1): 91-98.

Study on corrosion prevention and control of the furnace of a 350 MW opposite-firing boiler burning high-alkali coal

QI Qingfu¹, MA Shicheng¹, YANG Zhongcan², LI Yan², JIA Zixiu², LU Hongling¹

(1. Jiayuguan Hongsheng Electric Heat Co., Ltd., Jiayuguan 735100, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to reduce fuel procurement costs and ensure fuel supply, a certain power plant in Gansu burns a large proportion of Xinjiang high-alkali Guanghui coal and Xinjiang Energy coal. After burning the high-alkali coal, the boiler experiences severe high-temperature corrosion and coking on the heating surface, and the maximum load can only be carried to 85% ECR. In order to reduce high-temperature corrosion, research has been conducted on coal quality characteristics, combustion optimization adjustment, and equipment improvement technology for boilers. The research results show that, the boiler still experiences severe high-temperature corrosion even when burning low sulfur coal, which is mainly related to the high content of alkali metals such as sodium and calcium, as well as chlorine in Xinjiang coal. By increasing oxygen content, reducing primary air volume, weakening the swirling strength of outer secondary air of the burner, and increasing wall-attached air, operation adjustment measures can improve the high-temperature corrosion characteristics of the water wall to some extent. But to completely solve this problem, it is necessary to start with the use of additives, high-temperature corrosion prevention spraying, adding soot blowers, improving wall-attached air and burner design, and other corresponding technologies. The results of this study can provide useful reference and guidance for power plants that encounter similar problems during the process of high-alkali coal burning.

Key words: high-alkali coal; mixed burning; high temperature corrosion; prevention

收稿日期: 2023-06-05

第一作者简介: 祁青福(1979), 男, 高级工程师, 主要从事电力生产和管理工作, qiqingful@163.com.

通信作者简介: 杨忠灿(1977), 男, 高级工程师, 主要研究方向为煤炭安全、清洁、高效燃烧, yangzhongcan@tpri.com.cn.

甘肃某电厂 2×350 MW 机组锅炉是超临界参数、强制循环、一次中间再热、单炉膛平衡通风、固态排渣、露天布置、全钢构架的 II 型直流炉，采用前后墙对冲燃烧方式，东锅旋流燃烧器前三后二布置，在主燃烧器上方布置 2 层燃尽风，设计燃用哈密烟煤。锅炉结构布置如图 1 所示。屏式过热器、高温过热器、高温再热器、低温过热器、低温再热器简称屏过、高过、高再、低过、低再。

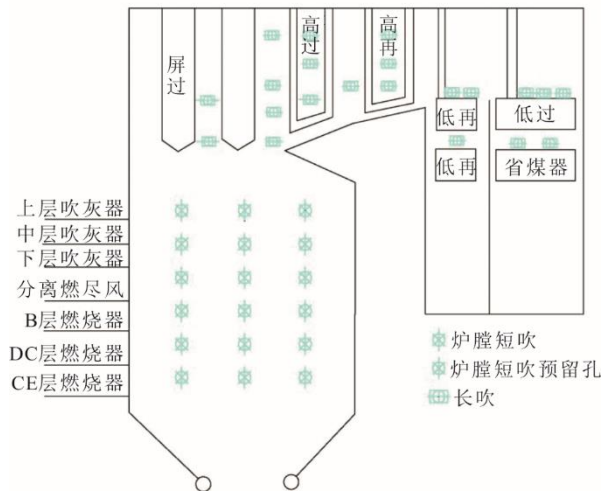


图 1 锅炉结构布置

Fig.1 Diagram of boiler structure layout

近年来，随着来自外蒙的策克煤停供和煤炭供应形势紧张，以及电厂靠近新疆等因素，除采购部分哈密煤外，电厂还大比例采购了供应相对充足的广汇煤和新疆能源煤，据 2022 年统计，新疆煤的掺烧比例已从 40%（质量分数，后同）提高至 60%~70%。由于新疆煤的碱金属含量较高，灰熔点较低，在大比例掺烧后，锅炉除出现了其他电厂常见的结渣沾污加重^[1-3]，负荷受限问题外，锅炉下层燃烧器下部至还原区上部四面墙水冷壁还出现了较严重的高温腐蚀问题。如最严重的右侧墙水冷壁高温腐蚀速率由 1.13 mm/a 大幅升高至 2.12 mm/a，最高腐蚀速率达 3.59 mm/a，锅炉不得不频繁大面积换管，且通过简单喷涂和燃烧优化调整无法解决，锅炉运行的安全性、经济性受到严重威胁。

本文通过煤质特性研究、燃烧优化试验、防高温腐蚀技术研究等手段，对锅炉掺烧高碱低硫时的受热面高温腐蚀特性及其防治技术进行了研究，指明了锅炉在燃用新疆高碱煤时发生高温腐蚀的原因和控制方法，研究成果可以为有类似问题的电厂提供有益的借鉴和参考。

1 煤质化验分析

锅炉目前主要分磨燃用哈密煤和广汇煤、新疆能源煤混煤，新疆高碱煤质量占比为 60%~70%，3 种煤的煤质数据见表 1。

表 1 主力煤种和高碱煤煤质分析
Tab.1 Coal quality analysis of main coal and high-alkali coal

项目	哈密煤	广汇煤	新疆能源煤
全水分 $w_t(M)/\%$	12.00	17.00	14.60
空气干燥基水分 $w_{ad}(M)/\%$	2.97	4.36	4.49
灰分 $w_d(A)/\%$	15.44	6.73	10.88
挥发分 $w_{daf}(V)/\%$	35.64	32.00	43.52
碳分 $w_{ar}(C)/\%$	58.18	61.26	57.96
氢分 $w_{ar}(H)/\%$	4.11	4.14	3.61
氧分 $w_{ar}(O)/\%$	9.10	9.42	11.02
氮分 $w_{ar}(N)/\%$	1.07	1.08	1.41
全硫 $w_{t,ar}(S)/\%$	0.16	0.36	0.55
低位发热量 $Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	21.84	22.76	22.27
灰软化温度 $ST/^\circ C$	1 179	1 198	1 124
当量氧化钠 $w_{al}(Na_2O)/\%$	1.96	2.59	3.52
煤中氯 $w_{ar}(Cl)/\%$	0.02	0.26	0.02

由表 1 可见，与电厂设计和常用的哈密煤相比，广汇煤水分、热值偏高，灰分和挥发分偏低，硫分偏高，新疆能源煤水分和热值略高、挥发分较高、灰分偏低、硫分偏高。从灰熔点 ST 来看，3 种煤的灰熔点均低于 1 260 $^\circ C$ ，都属于易结渣煤种，而且广汇煤和新疆能源煤的当量 Na_2O 质量分数 ($w(Na_2O) = w(Na_2O) + 0.659w(K_2O)$) 与哈密煤相比均较高，大比例掺烧时入炉煤的碱金属质量分数增加，有可能超过锅炉所能承受的 Na_2O 质量分数 2.5%~3.0% 的指标^[4]，导致锅炉结焦沾污风险加重，锅炉无法带满负荷。此外，广汇煤中的氯质量分数较高，严重超过我国煤中氯质量分数平均水平 0.019%^[5]，可能会造成炉内受热面高温腐蚀和脱硫系统废水处理困难。

2 煤质特性研究

为进一步考察新疆高碱煤与锅炉各系统的适应性，本节对各煤种的燃烧结渣和高温腐蚀特性进行深入研究。

2.1 着火、燃尽及结渣特性

将各煤种的煤粉细度 R_{90} 控制在 18%~20%，在西安热工研究院着火炉上进行哈密煤和广汇煤、新疆能源煤的煤粉气流着火试验，在一维火焰炉上进行燃尽和结渣试验，测试 3 种煤的着火温度、燃尽率和结渣指数，试验结果如图 2—图 4 所示。

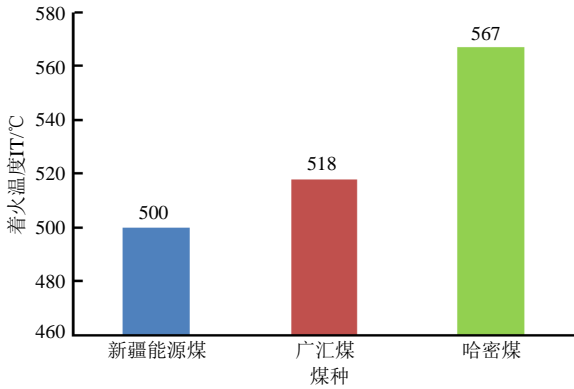


图 2 着火温度 IT 测试结果
Fig.2 Ignition temperature test results

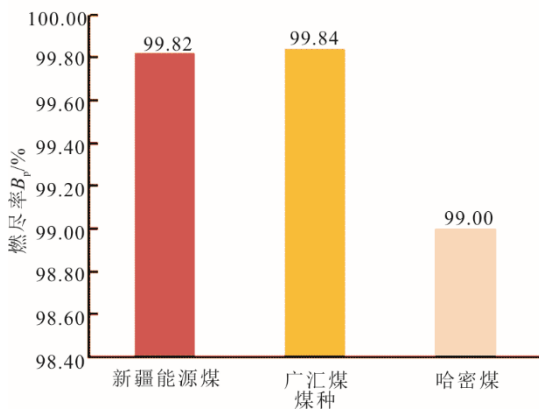


图 3 一维炉燃尽率 B_p 测试结果
Fig.3 Burnout rate test results of one-dimensional furnace

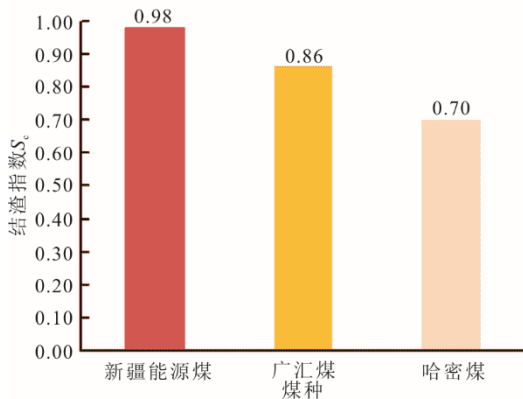


图 4 一维炉结渣指数 S_s 测试结果
Fig.4 Slagging index test results of one-dimensional furnace

根据《煤粉气流着火温度的测定方法》^[6]和《煤粉燃烧结渣特性和燃尽率一维火焰炉测试方法》^[7],哈密煤和广汇煤、新疆能源煤的着火、燃尽、结渣等级见表 2。由表 2 可见,3 种煤均属于极易着火、极易燃尽、极易结渣煤种。在按非高碱煤设计的锅炉大比例燃用高碱煤时,将高碱煤与低灰熔点煤掺烧,可能会限制高碱煤的掺烧比例。

表 2 试验煤种着火、燃尽、结渣等级
Tab.2 Ignition, burnout and slagging grade of test coal

煤种	着火等级	燃尽等级	结渣等级
哈密	极易	极易	严重
广汇	极易	极易	严重
新疆能源	极易	极易	严重

2.2 高温腐蚀特性

根据燃煤锅炉高温腐蚀原理,锅炉受热面高温腐蚀主要分为硫化物型、碱金属硫酸盐型和氯化物型 3 种^[8]。就本文所讨论的 350 MW 锅炉来说,3 种类型的高温腐蚀均可能发生,具体分析如下。

1) 高碱煤大比例掺烧时,入炉混煤的硫分为 0.5%~0.6%,低于同类机组锅炉发生严重高温腐蚀时入炉煤硫分高于 1.0%的经验值。但对于对冲燃烧锅炉,由于在最外侧燃烧器与炉墙之间存在流动死滞区,该区域补风不足,同时一次风气流风速较高在炉墙中间发生碰撞扩散,容易在两侧墙中间形成贴壁燃烧,以及低氮燃烧炉内整体供风不足和现有贴壁风刚性不足等原因,都会导致锅炉水冷壁近壁区域还原性气氛体积分数较高,从而生成较高体积分数的 H_2S ,与 Fe 和 FeO 发生化合反应,引起硫化物型高温腐蚀。

2) 高碱煤大比例掺烧时,入炉煤的碱金属质量分数大幅提高至 2.5%~3.0%,在炉内结焦油污较重的情况下,炉温水平大幅提高,煤灰中碱金属量和挥发比例均大幅增加,挥发后的 Na_2SO_4 在受热面上凝结,并在 SO_3 的作用下与受热面管氧化膜发生反应生成复合硫酸盐,从而对管材造成破坏,该化合物在 550 °C 左右即呈熔融状态,可随吹灰或打焦剥落,加剧腐蚀。该种腐蚀不仅在高温对流受热面上发生,在电厂送检的水冷壁管表面油污层中也检出了大量的 Na_2SO_4 和 K_2SO_4 ,说明大比例掺烧高碱煤时,硫酸盐型腐蚀也较常发生。

3) 高碱煤大比例掺烧时,入炉煤的氯质量分数也会随之大幅升高,煤中 NaCl 等氯化物转化生成的 HCl 会与 Fe 和 FeO 直接发生化合反应生成 $FeCl_2$,也会在 CO 的作用下与 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 发生反应生成 $FeCl_2$ 和 FeO,从而破坏水冷壁表层氧化膜和金属,然后 $FeCl_2$ 迅速挥发,进而使管壁金属直接受到 HCl 的腐蚀。同时由于氧化膜受到破坏, H_2S 也能直接到达金属表面,加速了管壁的腐蚀速度。但有资料表明^[9],当煤中氯的质量分数较高(大于 0.30%)时才可能发生比较严重的氯化物型高温

腐蚀, 一般情况下这种腐蚀发生可能性不是很大。

总体来看, 高碱煤大比例掺烧时, 入炉混煤中的硫分不高, 虽然碱金属和氯质量分数较高, 但参考新疆地区燃用高碱煤的经验, 在结焦沾污可控的情况下, 并未出现严重的水冷壁和高温对流受热面高温腐蚀, 因此该电厂锅炉的高温腐蚀原因和防治措施还需从燃烧优化调整和设备改进等方面加以研究。

3 燃烧优化调整试验研究

除煤质方面的因素外, 当高碱煤在锅炉上大比例掺烧时, 对锅炉高温腐蚀影响较大的还包括运行氧量、一次风速、燃烧器旋流强度、燃尽风门和贴壁风门开度等, 另外由于高碱煤锅炉结焦沾污速度较快、炉温水平较高, 水冷壁壁温偏高也会加剧高温腐蚀速度^[10]。

调整试验前, 首先对制粉系统运行参数进行了优化调整, 将同层燃烧器一次风速偏差控制在 $\pm 5\%$ 、煤粉细度 R_{90} 控制在20%以内, 消除一次风速不均、煤粉细度偏大问题对锅炉运行的不利影响。试验过程中, 在上层B层和中层D层燃烧器标高A、B两侧墙中部布置测点, 测点位置编号分别为BA、BB、DA、DB。抽取水冷壁贴壁气氛, 测试其中的 H_2S 体积分数, 考察运行参数变化对高温腐蚀的影响。

3.1 O_2 体积分数调整试验

在锅炉85%ECR稳定工况下, 入炉煤硫分在0.52%, 保持其他参数不变, 改变锅炉运行 O_2 体积分数从2.5%至3.0%, 对水冷壁贴壁气氛中的 H_2S 进行了测量, 结果如图5所示。

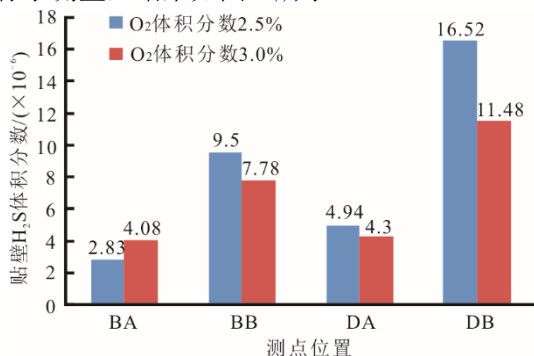


图5 O_2 体积分数对贴壁气氛的影响

Fig.5 Effect of oxygen volume fraction on the near wall atmosphere

由图5中可以看出, 中上层燃烧器两侧墙中间水冷壁附近烟气中的 H_2S 体积分数均处于较高水平, 这是锅炉水冷壁发生高温腐蚀的主要原因, 且由于对冲锅炉结构的影响, B侧 O_2 体积分数低于A

侧, 导致B侧水冷壁贴壁气氛中 H_2S 体积分数更高, 腐蚀风险更大。运行中 O_2 体积分数从2.5%提高至3.0%时, 4个点的 H_2S 体积分数均值从 845×10^{-6} 降低至 691×10^{-6} , 降低17%, 但仍高于发生较严重高温腐蚀的临界体积分数 200×10^{-6} , 而此时锅炉受引风机出力限制 O_2 体积分数已无法继续提高。

总体上看, O_2 体积分数提高有利于降低贴壁烟气中的 H_2S 体积分数, 在一定程度上改善腐蚀状况, 但供风充足也会导致燃烧放热强度增加, 炉内结焦加重, 需注意炉膛吹灰。

3.2 一次风量调整试验

试验过程中发现, 为保证磨煤机稳定运行, 磨煤机的通风量较设计值偏高10%左右, 一次风风速较高会导致其不易被内二次风旋转气流带动, 容易在炉膛中间位置发生前后墙对冲气流碰撞并扩散至两侧墙形成贴壁燃烧、结焦及高温腐蚀, 不利于减轻水冷壁高温腐蚀。因此, 这里在锅炉85%ECR稳定工况下, 入炉煤硫分在0.62%, 保持其他参数不变的情况下, 通过降低一次风量至设计值附近考察一次风风速变化对水冷壁高温腐蚀的影响, 结果如图6所示。

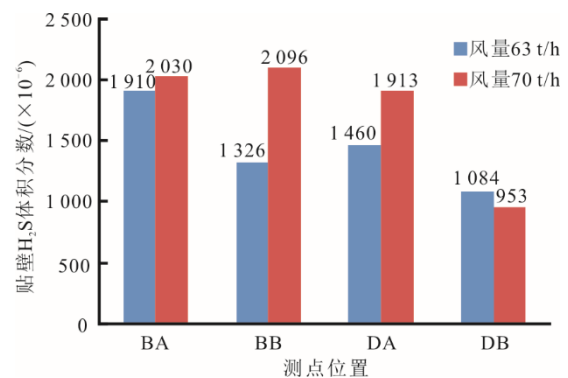


图6 一次风量对贴壁气氛的影响

Fig.6 Effect of primary air volume on the near wall atmosphere

从图6可以看出, 燃烧器一次风量下降后, 除DB位置外, 其他位置的贴壁气氛中的 H_2S 体积分数均呈下降趋势, 4个点的 H_2S 体积分数均值从 1748×10^{-6} 降低至 1445×10^{-6} , 降低17%, 幅度较大, 同时近壁中的氧量从0升高至1.5%~2.0%, 贴壁气氛改善明显, 十分有利于控制水冷壁的高温腐蚀。这说明, 除了一次风风速降低减少了一次风在炉膛中部的碰撞扩散燃烧外, 还使一次风的刚性变弱, 一次风气流容易被内二次风旋转带动混合, 减

轻了一次风和二次风的分离, 相当于补充了燃烧初期的氧气, 有利于硫的氧化, 减少了 H_2S 的生成。

此外, 一次风风速降低还有利于加速煤粉气流着火, 降低炉膛出口烟温。但需要注意的是, 一次风风速降低也可能造成燃烧器喷口结焦和烧损。

3.3 外二次风门调整试验

观察发现, 目前该型旋流燃烧器的内二次风门已全开, 有利于提供早期燃烧需要的空气, 减少 H_2S 的生成。按照设计, 燃烧器采用外二次风门同时调节外二次风量和旋流强度, 外二次风门大时风量大、旋流弱。电厂在实际运行过程中为抑制燃烧、降低燃烧强度一般把外二次风门开度按照 60%/50%/50%/60% 的小开度设置, 这可能会造成靠两侧墙的燃烧器外二次风量小、旋流强度过大, 容易引起供风不足和煤粉气流被带动贴墙燃烧引起结焦和腐蚀。因此, 在锅炉 85% ECR 稳定工况下, 入炉煤硫分在 0.52%, 保持其他参数不变的情况下, 通过改变靠侧墙两燃烧器的外二次风门开度为 60%、60%/80%、80%, 考察外二次风门变化对水冷壁高温腐蚀的影响, 结果如图 7 所示。

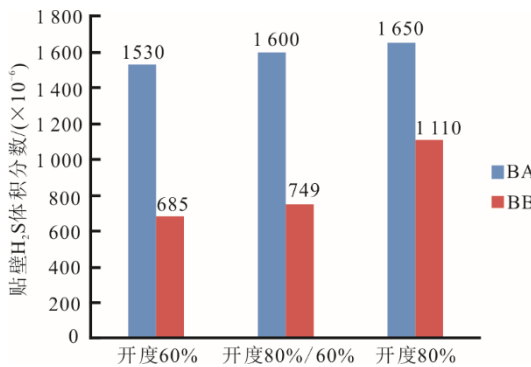


图 7 外二次风门开度对贴壁气氛的影响

Fig.7 Effect of outer secondary air damper opening degree on the near wall atmosphere

从图 7 可以看出, 靠两侧墙的燃烧器外二次风门开大后, 外二次风旋流下降, 水冷壁近壁中的 H_2S 体积分数均值反而从 1108×10^{-6} 升高至 1175×10^{-6} 和 1380×10^{-6} , 说明虽然外二次风旋流下降, 但由于风量增加, 外二次风转动量是增加的。由于外二次风转动量增加, 其对一次风的卷吸带动能力增强, 煤粉气流更容易被引流偏转贴墙燃烧, 导致靠近两侧墙水冷壁贴壁气氛中 H_2S 体积分数有小幅升高, 不利于减缓水冷壁高温腐蚀。

同时, 运行过程中还发现, 外二次风门开度过大, 锅炉会出现两侧墙流焦和冷灰斗拐角堆焦现

象, 说明外二次风门开大不利于控制结焦和高温腐蚀, 因此建议中上层燃烧器外二次风门开度 80%, 下层燃烧器 60%。

3.4 燃尽风门调整试验

燃尽风门的主要作用是降低生成 NO_x 质量浓度, 其通过调整主燃烧器区的供风量来实现。锅炉在运行时如果过分追求较低的 NO_x 质量浓度水平, 往往会造成主燃烧器区缺风, 形成较多的硫化氢。试验过程中, 在锅炉 85% ECR 稳定工况下, 入炉煤硫分在 0.62%, 保持其他参数不变, 改变燃尽风门开度为 0、30%、70%, 考察燃尽风门变化对高温腐蚀的影响, 结果如图 8 所示。由图 8 可以看出, 锅炉在燃尽风开度分别为 0、30%、70% 时, 对应 4 个点的贴壁 H_2S 体积分数均值从 1176×10^{-6} 升高至 1614×10^{-6} 、 2245×10^{-6} , 水冷壁高温腐蚀风险加大, 较低的燃尽风门开度时主燃烧器区供风更充足, 有利于减轻高温腐蚀。

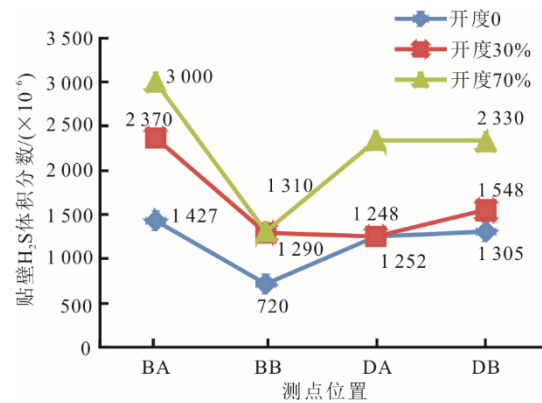


图 8 燃尽风门开度对贴壁气氛的影响

Fig.8 Effect of SOFA damper opening degree on the near wall atmosphere

此外, 燃尽风门开大后, NO_x 质量浓度从 360 mg/m^3 逐渐下降至 290、265 mg/m^3 , 同时低再进口烟温明显升高, 不利于运行安全。因此, 在运行过程中考虑高温腐蚀防治和低氮燃烧的要求, 燃尽风门开度宜设置为 30%。

3.5 贴壁风门调整试验

为补充锅炉两侧墙存在的流动死滞区内风量, 减轻两侧墙水冷壁高温腐蚀, 锅炉在设计时在第 3 层燃烧器标高及其上方的还原区中部标高前后墙角部共设置 4 层贴壁风, 风源取自二次风。这里在锅炉 85% ECR 稳定工况下, 入炉煤硫分在 0.52%, 保持其他参数不变, 改变贴壁风门开度为 0、100%, 考察贴壁风的防腐蚀能力, 结果如图 9 所示。

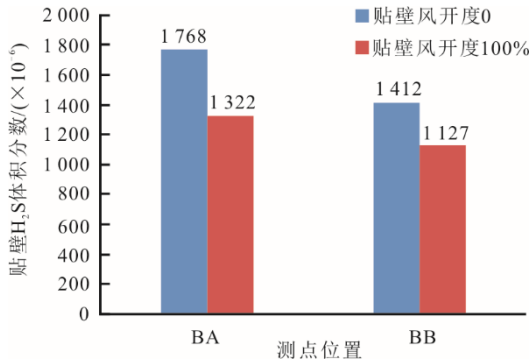


图9 贴壁风门开度对贴壁气氛的影响

Fig.9 Effect of wall-attached air damper opening degree on the near wall atmosphere

从图9可以看出,贴壁风门从全关至全开后,靠两侧墙流动死滞区内的供风增加,对应的贴壁 H_2S 体积分数均值从 1590×10^{-6} 下降至 1125×10^{-6} ,降幅为 465×10^{-6} ,水冷壁高温腐蚀倾向下降。但 H_2S 绝对体积分数仍较高,水冷壁高温腐蚀风险仍较高。现有贴壁风的作用不明显,分析认为这主要是因为电厂目前设计的贴壁风气流刚性不足、容易扩散,因此无法起到补充炉墙中间氧气、隔绝煤粉气流火焰的作用。

3.6 入炉煤硫分影响试验

电厂目前主要燃用硫分较低的哈密煤和硫分相对较高的广汇煤和新疆能源煤,通过降低新疆能源煤的比例,改变入炉混煤硫分分别为0.42%、0.52%和0.62%,在锅炉85%ECR稳定工况下,保持其他参数不变,考察硫分变化对水冷壁高温腐蚀的影响,结果如图10所示。

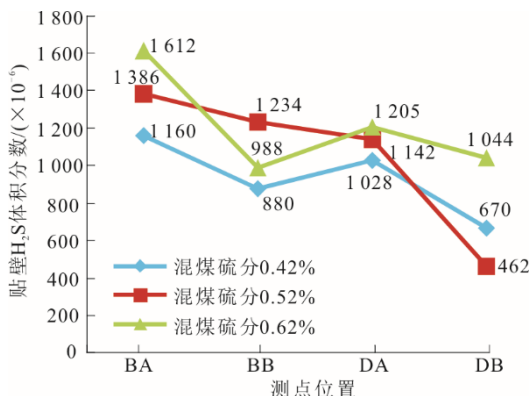


图10 入炉煤硫分对贴壁气氛的影响

Fig.10 Effect of sulfur content in coal on the near wall atmosphere

图10的试验结果表明,随着入炉煤种的改变和入炉煤硫分的升高,整体贴壁气氛中的 H_2S 呈升

高趋势, H_2S 体积分数均值从 935×10^{-6} 逐渐升高至 1056×10^{-6} 、 1212×10^{-6} ,这说明较低的入炉煤硫分有利于水冷壁高温腐蚀控制。因此,在目前贴壁风条件下,建议锅炉应尽量燃用低硫煤,即增大哈密煤的比例、降低新疆能源煤的比例,分磨掺烧广汇煤和新疆能源煤时,宜将其置于下层磨煤机,该区域温度较低、供风相对较为充足,对减轻水冷壁高温腐蚀较为有利。

3.7 试验小结

从上述燃烧调整试验结果可以看出,水冷壁近壁气氛中的氧量过低和 H_2S 体积分数过高是造成锅炉发生严重高温腐蚀的主要原因。通过适当提高氧量,降低一次风量和外二次风旋转动量,关小燃尽风门,开大贴壁风门以及降低入炉煤硫分,可以在一定程度上减轻水冷壁高温腐蚀,贴壁气氛中的 H_2S 体积分数可从 1092×10^{-6} 大幅降低至 690×10^{-6} ,水冷壁高温腐蚀风险大为降低,但仍高于腐蚀界限值 200×10^{-6} ,可见燃烧调整并不能从根本上解决水冷壁高温腐蚀问题。

4 高温腐蚀防治技术研究

4.1 燃烧器流场结构及改进

图11为靠侧墙燃烧器流场分布。

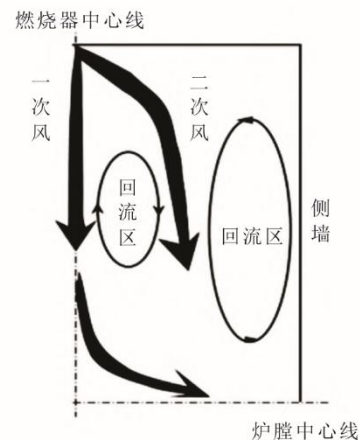


图11 靠侧墙燃烧器流场分布

Fig.11 Flow field distribution of burner against side wall

一方面东锅旋流燃烧器在一次风和内二次风之间形成的内回流区在燃烧初期阻碍了一次风与内二次风的混合,加剧了炉膛中心区域形成强还原性氛围,煤中硫分主要被转化为 H_2S ;另一方面,侧墙及角部的外回流区流场结构对一次风气流运动造成不利影响,即侧墙负压区将强还原性高温烟

气和未燃烧完全的煤粉气流引流至侧墙水冷壁, 导致侧墙水冷壁高温腐蚀^[11]。这 2 个方面是造成水冷壁近壁烟气中 H_2S 体积分数高的主要原因。

针对前者, 宜将燃烧器内二次风旋流叶片设为可调式, 必要时减弱内二次风旋流、加强内二次风对煤粉气流的包裹, 为燃烧初期多供风, 减少 CO 和 H_2S 的生成, 这已在可调内二次风旋流的某电厂锅炉上得到应用^[12]。针对后者, 某电厂提出了增加贴壁风、燃烧器向炉膛中心偏转角度等措施, 使 H_2S 体积分数降低至安全范围内, 取得了不错的防高温腐蚀效果^[13]。

4.2 超音速电弧喷涂技术

除对燃烧器结构进行优化外, 还需采用良好的喷涂材料和工艺进行防护。

在喷涂领域, 热喷涂工艺是应用较为成熟且可有效防止水冷壁高温腐蚀的主要方法。该工艺又可分为火焰喷涂、电弧喷涂以及等离子喷涂等。火焰喷涂主要有粉末火焰喷涂(焊)、丝材火焰喷涂、陶瓷棒材火焰喷涂、高速火焰喷涂(HVOF)、爆炸喷涂(D-GUN)等; 电弧喷涂是在 2 根丝状的金属材料之间产生电弧, 电弧产生的热量使金属丝融化, 由压缩空气气流雾化并喷向水冷壁表面形成涂层, 喷涂材料必须为导电的金属或合金丝; 等离子喷涂是采用由直流电驱动的等离子电弧作为热源, 将金属、合金、陶瓷等材料加热到熔融或半熔融状态, 并以高速喷向经过预处理的工件表面形成牢固的表面层。

目前, 国内市场上各类锅炉水冷壁防腐喷涂厂家多且杂, 产品质量参差不齐且价格差异非常大, 采用进口材料的单价较高, 国产材料的单价基本上在 2 000 元/ m^2 以内。建议选取有一定应用业绩且专业的喷涂单位进行相关喷涂防腐工作。

4.3 非对称高速贴壁风技术

如前所述, 该锅炉虽然也设置了贴壁风, 但风源取自二次风, 其刚性不足、容易扩散, 无法有效起到补充氧气和隔绝烟气的作用。

针对低氮燃烧后锅炉高温腐蚀频发的问题, 某公司研发出了非对称高速贴壁风技术^[14], 该技术布置方式基本相同, 区别是风源采用刚性较强的一次风, 且设计具有以下特点: 1) 高风速、低风率, “高瘦型”矩形喷口, 可做到腐蚀区域气流全覆盖; 2) 喷口风量与气流方向非对称布置, 实现重点腐蚀区域定向防治; 3) 喷口风量与角度可调, 运行

可调节性高; 4) 适用于中高硫分煤种, 可提高锅炉对硫分的适应性。

目前, 该技术已在赣能丰城、国能盘山、华能沁北等电厂得到应用, 辅以喷涂技术, 防腐蚀效果显著, 其流场如图 12 所示。



图 12 非对称贴壁风火花示踪

Fig.12 Asymmetric wall-attached air spark tracing diagram

4.4 结焦和沾污治理

水冷壁结焦严重, 容易造成水冷壁壁温升高, 加速管壁腐蚀。有资料表明, 在水冷壁壁温 300~500 $^{\circ}C$, 管壁外表面温度每升高 50 $^{\circ}C$, 腐蚀程度则增加 1 倍。因此, 在大比例掺烧高碱煤时, 采取有效措施减轻水冷壁结焦和降低水冷壁壁温是十分必要的。

参考新疆高碱煤锅炉目前的燃用经验, 治理结焦沾污方面可借鉴的比较成熟的手段主要有 3 种:

1) 对高碱煤与锅炉的适应性进行评估, 并开展配煤掺烧和燃烧优化调整试验, 在保证锅炉带负荷和安全稳定运行的情况下确定合适的高碱煤比例;

2) 运行过程中添加 5%~8% 的高岭土, 对高碱煤飞灰进行改性, 提升其中的硅、铝质量分数, 降低钠、钾质量分数, 增强对钠的固化能力, 减少钠、钾氧化物的挥发, 基本可实现全烧高碱煤^[15];

3) 进行设备改造, 增加炉膛蒸汽吹灰器数量, 尤其注意在易结焦的燃烧器区、还原区要布置吹灰器, 做到吹灰全覆盖, 必要时装设水力吹灰器, 同时在屏区和水平烟道受热面以及低再、低过进口增加长吹, 可以起到有效控制结焦沾污的作用。对于本 350 MW 锅炉, 炉膛建议安装的吹灰器数量不低于 60 只、水力吹灰器可安装 4 只。

5 结论和建议

本文通过煤质特性研究、燃烧优化调整试验、高温腐蚀防治技术研究, 对甘肃某电厂 350 MW 对冲燃烧锅炉大比例燃用新疆高碱煤的锅炉的高温

腐蚀特性和防治措施进行了研究, 主要得到以下结论和建议。

1) 该锅炉燃用的广汇煤和新疆能源煤, 均属于极易着火、燃尽和结渣煤种, 氯和碱金属质量分数较高, 硫质量分数中等, 与哈密煤大比例掺烧时, 容易导致锅炉受热面出现硫化物、硫酸盐和氯腐蚀。

2) 燃烧调整结果表明, 水冷壁近壁气氛中的氧量过低和 H_2S 体积分数过高是造成锅炉发生严重高温腐蚀的主要原因。通过燃烧调整手段, 只能在一定程度上减轻水冷壁高温腐蚀, 无法完全消除。

3) 煤粉气流与二次风在燃烧早期无法充分混合以及强还原性高温烟气和未完全燃烧的煤粉气流引流至侧墙水冷壁附近贴壁燃烧, 是 H_2S 产生的主要原因, 建议采取优化内二次风旋流叶片角度和燃烧器向炉内层倾向措施。

4) 除减少 H_2S 产生外, 高温腐蚀防治建议还应从增加非对称高速贴壁风补充供风、采用高质量的喷涂材料和工艺、采取措施减轻炉内结焦沾污 3 个方面加以改进, 彻底解决水冷壁高温腐蚀问题。

[参考文献]

- [1] 杨忠灿, 刘家利, 何红光. 新疆准东煤特性研究及其锅炉选型[J]. 热力发电, 2010, 39(8): 38-40.
YANG Zhongcan, LIU Jiali, HE Hongguang. Study on properties of Zhundong coal in Xinjiang region and type-selection for boilers burning this coal sort[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(8): 38-40.
- [2] 史永胜, 卢红玲. 锅炉掺烧高碱金属煤的试验研究[J]. 华北电力技术, 2013(1): 39-42.
SHI Yongsheng, LU Hongling. Research of blending combustion of boiler fueled with high alkali metal coal[J]. North China Electric Power Technology, 2013(1): 39-42.
- [3] 董明钢. 高钠煤对锅炉受热面结渣、沾污和腐蚀的影响及预防措施[J]. 热力发电, 2008, 37(9): 35-39.
DONG Minggang. Influence of high-sodium coal upon slagging, contamination and corrosion on the heating surface of boilers[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(9): 35-39.
- [4] 杨忠灿, 刘家利, 姚伟. 准东煤灰沾污指标研究[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(2): 81-84.
YANG Zhongcan, LIU Jiali, YAO Wei. Fouling index of Zhundong coal ash[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(2): 81-84.
- [5] 刘家利. 特变电工集团 350 MW 锅炉燃用天池能源煤锅炉设备选型研究[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2012: 34.
LIU Jiali. Research on equipment selection for TBEA group 350 MW boiler with burning Tianchi energy coal [R]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 2012: 34.
- [6] 煤粉气流着火温度的测定方法: DL/T 1446—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 1.
Measurement of ignition temperature of pulverized coal-air flow: DL/T 1446—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 1.
- [7] 煤粉燃烧结渣特性和燃尽率一维火焰炉测试方法: DL/T 1106—2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 1.
Test methods for pulverized coal combustion slagging characteristics and burnout rate on one-dimensional flame furnace: DL/T 1106—2009[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 1.
- [8] 程超, 韩建伟, 任建辉. 300 MW 电站锅炉水冷壁高温腐蚀现象产生原因的探讨[J]. 锅炉技术, 2023, 39(2): 22-24.
CHENG Chao, HAN Jianwei, REN Jianhui. Discussion on the causes of high temperature corrosion on the water wall of 300 MW power plant boilers[J]. Boiler Technology, 2023, 39(2): 22-24.
- [9] 岑可法, 樊建人. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 1.
CEN Kefa, FAN Jianren. Principles and calculations for preventing dust accumulation, slagging, wear and corrosion in boilers and heat exchangers[M]. Beijing: Science Press, 1995: 1.
- [10] 李炎. 宏晟电热锅炉前后墙对冲锅炉火焰冲刷侧墙水冷壁研究[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2023: 47.
LI Yan. Research on the flame erosion of the side water cooling wall of the Hongsheng electric heat boiler[R]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 2023: 47.
- [11] 闫廷庆, 支卫峰. 对冲燃烧锅炉侧墙水冷壁高温腐蚀原因的空气动力学研究[J]. 锅炉技术, 2022, 53(1): 22-25.
YAN Tingqing, ZHI Weifeng. Flow-field investigation of high-temperature corrosion on side waterwall of opposed-firing boilers[J]. Boiler Technology, 2022, 53(1): 22-25.
- [12] 杨忠灿. 国华盘山电厂 1 号锅炉低氮燃烧器改造后燃烧调整试验研究[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2013: 19-20.
YANG Zhongcan. Experimental study on combustion adjustment after low nitrogen burner transformation of boiler No.1 in Guohua Panshan power plant[R]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 2013: 19-20.
- [13] 陈敏生, 廖晓春. 改造燃烧系统降低对冲锅炉侧墙还原性气氛[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 91-95.
CHEN Minsheng, LIAO Xiaochun. Modification on combustion system of opposed firing boiler to reduce de-oxidation atmosphere at sidewalls[J]. Electric Power, 2014, 47(1): 91-95.
- [14] 梁学斌, 孙军, 蒙毅, 等. 非对称高速贴壁风系统在 530 MW 俄制机组上的应用[J]. 热力发电, 2017, 46(3): 87-92.
LIANG Xuebin, SUN Jun, MENG Yi, et al. Application of asymmetric high speed wall attached air system on 530 MW Russian-made units[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3): 87-92.
- [15] 严婕. 准东煤掺配高岭土对锅炉运行性能影响的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 38-42.
YAN Jie. Research on the effect of mixing Kaolin with Zhundong coal on the operating performance of boilers [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 38-42.

(责任编辑 邓玲惠)