

锅炉燃烧工况优化对水冷壁高温腐蚀及四管泄漏的防控应用研究

谷文明

陕西华电榆横煤电有限责任公司榆横发电厂 陕西 榆林 719000

摘要: 水冷壁高温腐蚀与四管泄漏是制约燃煤锅炉安全经济运行的主要障碍,二者均与炉内燃烧工况密切相关。本文针对600MW亚临界锅炉运行中频繁发生的水冷壁腐蚀减薄和过热器爆管问题,通过炉内燃烧工况测试与贴壁气氛分析,明确了主燃区过量空气系数偏低与贴壁还原性气氛过强是导致高温腐蚀的主要原因,而炉膛出口烟温偏差和局部热负荷集中则加速了四管泄漏的发生。基于此,提出了以燃烧器配风优化为核心、兼顾受热面改造与煤质调控的综合防控方案。实施后水冷壁贴壁CO浓度降低68%,高温腐蚀速率下降约55%,因四管泄漏导致的非计划停运次数由年均2.8次降至0.6次,为同类机组燃烧优化防控受热面失效提供了工程参考。

关键词: 锅炉; 燃烧工况; 高温腐蚀; 四管泄漏; 配风优化

引言: 水冷壁高温腐蚀与四管泄漏是燃煤锅炉长期面临的重大安全隐患,二者本质上均与炉内燃烧工况的恶化密切相关。低氮燃烧改造后,主燃区强还原性气氛虽有效抑制了 NO_x 生成,却同时显著提高了 H_2S 和CO浓度,加速了水冷壁硫化腐蚀进程。与此同时,燃烧器配风不合理导致的火焰偏斜和局部热负荷集中,使过热器管屏频繁超温,缩短了管材使用寿命。然而,目前多数电厂的燃烧调整仍以满足 NO_x 排放为主要目标,对燃烧工况与受热面安全之间的关联缺乏系统分析和定量评估。本文从燃烧工况与受热面失效的内在关联出发,提出以燃烧优化为核心的防控技术方案,并通过工程应用验证其效果。

1 水冷壁高温腐蚀机理与燃烧工况的关联

1.1 水冷壁高温腐蚀的主要类型与特征

水冷壁高温腐蚀按机理不同可分为三类。硫化物型腐蚀是最主要的腐蚀形式,发生在主燃烧器区域壁面附近,当贴壁气氛中 H_2S 浓度超过100ppm时, H_2S 与管壁金属直接反应生成疏松的 FeS 腐蚀层,该腐蚀层无保护性,会持续剥落并暴露出新鲜金属表面加速腐蚀进程。硫酸盐型腐蚀发生在管壁温度较高的区域(通常 $> 600^\circ\text{C}$),煤中碱金属与硫反应生成低熔点复合硫酸盐沉积于管壁形成熔融膜,加速氧化层剥落。氯化物型腐蚀由煤中氯元素在高温下释放 HCl 和 Cl_2 引发, Cl 原子对氧化层的破坏能力远超 O_2 ,可造成快速穿透性腐蚀。三种腐蚀类型在实际运行中往往交叉共存,但在低氮燃烧改造后的锅炉中,硫化物型腐蚀因还原性气氛增强而成为主导形式^[1]。

1.2 燃烧工况对腐蚀环境的决定作用

燃烧工况对水冷壁腐蚀环境的决定性影响体现在三个层面。首先,主燃区过量空气系数 α 是控制贴壁气氛的根本因素,当 α 从0.85降至0.75时,贴壁CO浓度从约5000ppm急剧上升至30000ppm以上, H_2S 浓度同步升高,硫化腐蚀速率可增大3~5倍。其次,煤粉细度和一次风速影响煤粉气流的着火点位置与火焰刚性,细度过粗或风速过低会导致火焰贴壁,使壁面热负荷和还原性气氛同时升高。再者,各层燃烧器出力不均会导致炉膛热负荷中心偏移,局部区域的壁面热负荷超出设计值20%~30%,高温与还原性气氛的叠加效应使腐蚀速率呈指数级上升。

1.3 腐蚀高风险区域的判定方法

水冷壁腐蚀高风险区域的判定需综合运行参数与检测数据。通过在水冷壁侧墙布置贴壁气氛测点,可以绘制炉膛不同高度和不同水平位置的还原性气氛分布图谱。超声波测厚和割管取样分析则提供管壁剩余厚度和腐蚀层结构的定量数据。将两种信息叠加,可以识别出腐蚀风险的具体位置和严重等级。以四角切圆锅炉为例,燃烧器区域的侧墙中部、前后墙的角部区域以及火焰刷墙位置通常具有最高的 H_2S 浓度和最大的壁厚减薄量。定期检测制度建议为每季度进行一次贴壁气氛抽取、每年进行一次重点区域超声波测厚,以跟踪腐蚀发展趋势。

2 四管泄漏的燃烧成因分析

2.1 四管泄漏的主要类型与统计特征

四管泄漏指锅炉水冷壁、过热器、再热器和省煤器四种受热面管道的泄漏失效事故。对某电厂近5年的四管

泄漏事故统计表明,水冷壁泄漏占比最高(约35%),其次是高温过热器(约28%)和再热器(约22%),省煤器泄漏占比相对较低(约15%)。水冷壁泄漏以高温腐蚀减薄爆管为主,过热器与再热器泄漏以长期超温蠕胀破裂为主,省煤器泄漏以磨损和给水品质问题为主。约80%的四管泄漏事故存在燃烧工况异常的前兆,如炉膛出口烟温偏差超标、氧量异常波动、飞灰含碳量升高等,表明燃烧工况与受热面安全之间存在密切关联^[2]。

2.2 燃烧偏差对过热器再热器超温的影响

炉膛出口烟气温度偏差和速度偏差是导致过热器与再热器超温泄漏的关键因素。在四角切圆燃烧锅炉中,炉膛出口的残余旋转使烟气在水平烟道左右两侧形成温差,当该温差超过30℃时,高温侧管屏的壁温将明显高于设计值。以600MW锅炉为例,炉膛出口左右烟温差达40℃时,高温侧过热器壁温较设计值高出15~20℃,长期运行下该区域管材的蠕变寿命缩短约60%。燃烧器摆角不当、各层燃烧器风粉分配不均、煤质变化导致火焰中心高度偏移等燃烧因素,均可引起炉膛出口烟温偏差的超标。局部热负荷集中使某些管屏长期处于超温状态,超温管屏的氧化皮生成加速,氧化皮剥落堵塞后续管段,造成进一步的冷却不良和温度升高。

2.3 燃烧工况与水冷壁热疲劳的关系

水冷壁热疲劳裂纹是四管泄漏的另一重要形式,其根本原因在于燃烧工况不稳导致的温度循环波动。当炉膛燃烧脉动或频繁变负荷时,水冷壁管壁温度随之周期性变化,热膨胀与收缩产生的交变热应力使管材在经历一定次数的热循环后萌生疲劳裂纹。深度调峰运行下机组的频繁变负荷加剧了这一过程——日变负荷次数由传统的2~3次增加到8~10次,水冷壁承受的热循环次数增加了3~4倍。裂纹通常从向火面萌生,在热应力持续作用下扩展,最终穿透管壁形成泄漏。燃烧工况的稳定性直接决定了壁温波动的幅度和频率,是控制热疲劳损伤的关键因素^[3]。

3 燃烧工况优化方案与防控措施

3.1 贴壁气氛优化与配风调整策略

贴壁气氛优化的核心是在不显著提高NO_x排放的前提下降低壁面附近的H₂S和CO浓度。具体策略包括三个方面。一是设置贴壁风系统,在主燃烧器区域的侧墙位置引入约5%~8%总风量的贴壁风,通过形成空气保护膜将还原性气氛与壁面隔离,贴壁风射流速度应控制在15~20m/s。二是调整二次风配比,将主燃区过量空气系数 α 从0.75~0.78提升至0.80~0.85,牺牲部分低氮效果换取腐蚀环境的改善。三是实施燃烧器负荷均衡分配,通过

各燃烧器一次风量和煤粉浓度的在线监测与调整,将同层燃烧器之间的煤粉浓度偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内。高硫煤工况下贴壁风率应适当上调至8%~10%,低硫煤工况可适度下调以兼顾低氮效果。

3.2 炉膛出口烟温偏差控制

控制炉膛出口烟温偏差应从燃烧器工况和火焰中心高度两方面入手。在燃烧器层面,通过调整各燃烧器喷口的二次风挡板开度,使各层燃烧器风量按“下大上小”的塔式配风原则分配,增强下部燃烧器的刚性,减弱上部燃烧器的火焰上冲趋势。同时优化燃尽风摆角,将燃尽风水平摆角调整至适当值以抵消炉膛出口的残余旋转。在火焰中心高度控制方面,将制粉系统运行组合优化为优先投运下层磨煤机、控制上层磨煤机出力,使火焰中心高度维持在炉膛高度的55%~60%区间,炉膛出口烟温偏差可从40℃降至15℃以内。定期进行炉膛空气动力场冷态试验,校验燃烧器喷口角度与实际射流方向的一致性,是维持长期配风效果的基础性工作。

3.3 煤质管控与受热面升级配合

在燃料层面,控制入炉煤质是降低腐蚀介质浓度的前端手段。建议将入炉煤硫分控制在1.0%以下,对于硫分超标的煤种,通过与低硫煤按1:2至1:3比例掺烧,将混煤硫分降至安全阈值以下。碱金属含量超过3%的煤种应避免单独燃用,可掺烧高岭土以吸附气相碱金属,减少硫酸盐沉积物的生成。在受热面升级方面,对腐蚀严重区域的水冷壁管材进行升级更换,将原有20G材质更换为耐蚀性能更好的15CrMoG或T91材质;过热器管屏的高温段将TP304H升级为Super304H,提高抗高温氧化和抗蠕变性能。

3.4 燃烧优化与四管泄漏防控的协同机制

燃烧优化与四管泄漏防控之间存在密切的协同效应。贴壁气氛的改善直接降低水冷壁硫化腐蚀速率,是防控水冷壁泄漏的第一道防线。炉膛出口烟温偏差的有效控制使过热器和再热器管屏的温度分布趋于均匀,消除了因局部超温导致的蠕变损伤。火焰中心高度和炉膛热负荷分布的优化同时降低了水冷壁的热疲劳应力和过热器的热偏差,实现了对多种泄漏模式的综合防控^[4]。三项措施以燃烧工况优化为纽带,将水冷壁、过热器、再热器三类受热面的防控需求统一到同一技术框架中,通过配风调整一次动作即可对多种泄漏风险产生协同抑制效果。

4 燃烧优化防控效果综合评估

4.1 贴壁气氛改善效果

在600MW亚临界锅炉上实施了综合燃烧优化改造。

贴壁风系统在侧墙B、C层燃烧器高度各增设4个贴壁风喷口,贴壁风风量由总风量的0提升至7%。二次风配风模式由原“均匀配风”调整为“塔式配风”,B、C两层燃烧器二次风挡板开度由75%提升至88%,E层由75%降至60%,燃尽风率由28%降至23%。改造后72小时满负荷热态试验数据表明,B层燃烧器高度侧墙贴壁CO浓度由改造前的28000~35000ppm降至9000~12000ppm,降幅约68%;贴壁O₂浓度由0.5%~1.0%升至3.0%~4.0%,还原性气氛显著改善。H₂S浓度同步由改造前的150~200ppm降至40~60ppm,贴壁气氛已基本脱离硫化腐蚀的危险区间。

4.2 受热面壁温与热偏差控制效果

炉膛出口左右侧烟温差由改造前的38~42℃降至12~16℃,降幅约60%。过热器管屏壁温超限(>590℃)的运行时间占比由改造前的15%降至2%以下,高温过热器管屏壁温分布均匀性显著改善。再热器壁温偏差由改造前的25~30℃收窄至8~12℃,管屏间最大温差降低了约60%。炉膛火焰中心高度由改造前的炉膛高度约65%位置降至约57%,接近设计推荐值。水冷壁出口工质温度波动幅度由改造前的±8℃收窄至±3℃,变负荷过程中水冷壁壁温波动幅度由±15℃降至±6℃,热疲劳应力水平显著降低。

4.3 腐蚀速率与泄漏频次变化

腐蚀速率监测数据表明,改造后水冷壁向火面最大腐蚀速率由0.32mm/年降至0.14mm/年,降幅约55%。重点监测区域连续两次检修的超声波测厚数据显示,壁厚减薄量由改造前18个月的0.48mm降至改造后18个月的0.21mm,减薄速率明显放缓。运行一个检修周期后的统计数据显示,因四管泄漏导致的非计划停运次数由年均2.8次降至0.6次。水冷壁、过热器、再热器三类受热面均未发生泄漏事故,实现了水冷壁零腐蚀泄漏、过热器零爆管、再热器零泄漏的防控目标。

4.4 综合效益分析

NO_x排放浓度由改造前的280mg/Nm³微升至295mg/Nm³,增幅约5%,仍在超低排放限值要求范围内。因非计划停运减少带来的发电量增加、检修费用节约、启动油耗节省等综合经济效益约620万元/年。受热面检修周期可由原2年延长至4年以上,腐蚀严重区域管排更换费用节省约80万元/年。改造总投资约800万元,静态投资回收期约15个月,全生命周期经济效益显著。

结束语

本文从水冷壁高温腐蚀与四管泄漏两类受热面失效问题出发,系统分析了其与炉内燃烧工况的内在关联,证明了燃烧优化在受热面安全防控中的核心地位。研究表明,贴壁气氛与炉膛出口温度偏差是连接燃烧工况与受热面失效的关键中间变量,通过对这两个变量的精确控制,可实现对腐蚀与泄漏两类问题的协同防控。未来应在数字孪生和智能燃烧技术的支持下,建立基于在线贴壁气氛监测和炉膛出口烟温预测的闭环燃烧优化系统,将受热面安全防控从目前的“定期检修+事后处理”模式升级为“实时感知+主动预防”模式,从根本上提升锅炉受热面的运行可靠性。

参考文献

- [1]林司.煤粉细度对锅炉水冷壁高温腐蚀的影响研究[J].华东科技,2025(12):48-51.
- [2]刘军,郑志行,吴爱军,等.600 MW超临界锅炉水冷壁高温腐蚀综合治理应用研究[J].锅炉技术,2022,53(6):65-71.
- [3]彭志敏,杜艳君,贺拴玲,等.350 MW四角切圆锅炉水冷壁高温腐蚀及H₂S在线监测预警[J].锅炉技术,2022,53(6):1-7.
- [4]郑东升.660 MW燃煤锅炉水冷壁局部高温腐蚀原因分析及优化调整[J].电力系统装备,2024(8):150-152.