

锅炉燃烧器配风优化降低过热器再热器超温的试验研究

郑楠

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: 过热器与再热器超温是影响锅炉安全运行的重要问题, 燃烧器配风方式对炉内燃烧工况及烟气温度场分布具有决定性影响。本文针对600MW四角切圆锅炉运行中频繁出现的过热器壁温超限问题, 通过冷态空气动力场试验和热态燃烧调整试验, 系统研究了不同配风方式对炉膛出口烟气温度偏差和受热面壁温分布的影响规律。试验结果表明, 采用“束腰式”二次风配风方式配合燃尽风摆角优化, 可使炉膛出口左右烟温差由42℃降至15℃以内, 过热器管屏热偏差系数由1.35降至1.12, 壁温超限点全部消除。配风优化后锅炉热效率提高约0.5个百分点, NO_x排放基本维持不变, 为同类型锅炉通过配风调整控制受热面超温提供了工程借鉴。

关键词: 锅炉; 燃烧器配风; 过热器; 再热器; 超温; 热偏差

引言: 过热器和再热器超温是燃煤锅炉运行中常见的安全隐患, 严重时会导致管材蠕变加速、氧化皮生成剥落甚至爆管事故, 直接威胁机组安全运行。导致超温的根本原因是炉膛出口烟气温度场和速度场分布不均引起的热偏差——部分管屏处于烟气高温区, 吸热量远超设计值, 而相邻管屏吸热量不足, 形成“高温管屏过热、低温管屏欠热”的不平衡状态。燃烧器配风方式是影响炉内燃烧工况和炉膛出口参数分布的关键因素, 一二次风配比、各层燃烧器风量分配、燃尽风率及摆角等参数的差异, 直接决定了火焰中心高度、炉膛出口残余旋转强度和烟气偏差程度。本文通过系统的冷态和热态试验, 研究不同配风方式对过热器/再热器壁温及热偏差的影响规律, 提出最优配风方案, 并通过对比试验验证其效果。

1 过热器/再热器超温问题分析

1.1 超温现象及其危害

过热器与再热器是将蒸汽加热至额定温度的关键受热面, 其管壁温度直接决定了蒸汽参数是否达标和管材是否安全。当管壁温度超过设计允许值(通常为580~595℃, 具体取决于材质)时, 即构成超温运行。超温的危害具有累积性和突发性双重特征。管壁温度每超过设计值10℃, 材料的蠕变断裂寿命约缩短50%——持续超温10℃运行1000h, 管材蠕变寿命消耗相当于正常运行的数年。更为严重的是, 超温加速了管内壁氧化皮的生成速率, 当氧化皮厚度达到一定临界值(约0.2~0.3mm)后, 在温度变化或启停过程中发生剥落, 堵塞下部弯头导致冷却蒸汽流量减少, 形成“超温→氧化皮增厚→剥落堵塞→冷却恶化→进一步超温”的正反馈循环, 最终引发爆管。超温还迫使运行人员降低主蒸汽温度运行, 以牺

牲经济性换取安全性, 每降低主汽温度5℃, 热耗率约升高0.15%~0.2%。

1.2 超温的机理与影响因素

过热器/再热器超温的物理根源在于热偏差——同一管屏的不同管圈或同一集箱的不同管屏之间, 因吸热量差异导致的壁温不均。热偏差由流量偏差和热力偏差叠加而成。流量偏差源于工质在集箱和管屏间的分配不均, 与集箱结构、管屏入口节流孔尺寸及工质流动特性有关; 热力偏差源于炉膛出口烟气沿水平烟道宽度和深度的温度场、速度场分布不均, 与炉内燃烧工况密切相关^[1]。在深度调峰频繁变负荷运行条件下, 炉膛出口烟温偏差往往进一步扩大, 热偏差系数可由设计值1.10~1.15升高至1.30~1.45, 对应的管壁温度偏差可达20~30℃。热偏差系数定义为同一管屏中各管圈壁温最大值与平均值之比, 该值越大说明壁温分布越不均匀, 超温风险越高。

1.3 运行因素对超温的影响

运行因素对过热器/再热器超温的影响主要体现在五个方面。负荷变化影响最为直接, 负荷升高时炉膛热负荷增加、火焰中心上移、炉膛出口烟温升高, 超温风险随负荷升高而增大。燃烧器投运方式决定火焰中心高度, 上层燃烧器单独或优先投运时火焰中心明显上移, 炉膛出口烟温升高20~30℃。过量空气系数偏低(<1.15)时炉膛温度升高, 烟气辐射换热增强, 屏式过热器吸热量增加, 壁温升高。煤质变化中挥发分降低或灰分升高使着火推迟、火焰中心上移, 煤粉细度变粗时燃尽时间延长、火焰拉长。炉膛出口氧量分布不均反映烟气速度场偏斜, 是热偏差的直接表征。上述运行因素往往叠加作用, 在特定工况组合下超温风险急剧增大。

2 燃烧器配风系统及其对超温的影响机理

2.1 配风系统的构成与功能

燃烧器配风系统由一次风、二次风和燃尽风三部分构成，各自承担不同的功能。一次风负责携带煤粉通过燃烧器喷入炉膛，并提供煤粉着火初期所需的氧气，一次风率通常占总风量的20%~25%，一次风速一般控制在22~26m/s。二次风从燃烧器周围的喷口分层送入炉膛，为主燃烧区的煤粉燃烧提供主要氧气，同时对燃烧器喷口起到冷却保护作用，二次风率占总风量的55%~65%，二次风速通常为40~50m/s。燃尽风布置在主燃烧器区域上方，将约20%~30%的总风量从上部喷口送入，形成燃尽区完成焦炭的最终燃尽。各层燃烧器的二次风通过独立挡板调节风量，燃尽风喷口通常设计有水平摆角和垂直摆角调节机构，用于调整炉膛出口烟气的残余旋转强度^[2]。

2.2 配风与炉内燃烧工况的关系

配风方式通过影响煤粉着火、燃烧和燃尽的全过程决定炉内燃烧工况。一次风率过高（>28%）时煤粉气流刚性增强、火焰拉长、着火点推迟，火焰中心上移；一次风率过低（<18%）时煤粉气流刚性不足，火焰容易贴壁冲刷水冷壁。二次风分配方式决定了主燃烧器区域的氧气供应分布和还原性气氛区域的大小，均等配风时各层燃烧器风量相近，火焰中心居中；正塔配风（下层风量大、上层风量小）时火焰中心偏低，炉膛出口烟温降低；倒塔配风（下层风量小、上层风量大）时火焰中心上移，有利于降低NO_x但增加过热器超温风险。燃尽风率增大时主燃区空气量减少、还原性气氛增强，抑制NO_x生成但火焰拉长、炉膛出口烟温升高；燃尽风率减小时火焰缩短、炉膛出口烟温降低但NO_x排放升高。

2.3 配风与烟气温度场、速度场的关系

配风方式直接决定了炉膛出口的烟气温度场和速度场分布，是热偏差形成的根本原因。在四角切圆燃烧锅炉中，四股煤粉气流在炉膛中心形成切圆燃烧，产生强烈的旋转上升气流。当各层燃烧器的二次风量分配不均或某个角的燃烧器出力偏差时，炉膛中心的旋转强度发生改变，出口残余旋转使烟气在水平烟道左右两侧形成温差和速度差。该偏差沿炉膛高度逐级放大，最终表现为炉膛出口左右侧烟温差可达30~50℃，对应高温侧过热器壁温较平均值高出15~25℃。配风参数中燃尽风水平摆角对出口残余旋转的影响最为直接——摆角向某一方向偏转时烟气主流随之偏斜，调整摆角可有效抵消炉膛出口残余旋转。二次风各级配比通过改变火焰中心高度和炉膛各高度截面的烟气流量分配，间接影响炉膛出口的烟气偏差程度。

3 配风优化降低超温的试验方案

3.1 试验对象与工况设计

试验在600MW亚临界、一次中间再热、四角切圆燃烧锅炉上进行。锅炉配有两层燃尽风（SOFA和COFA），六层燃烧器（A~F层），每层四角各布置一个一次风喷口，二次风喷口位于各层一次风之间。为解决过热器频繁超温问题，设计了四因素三水平正交试验方案：因素A为二次风配风方式（均等配风、正塔配风、束腰配风），因素B为燃尽风率（20%、25%、30%），因素C为燃尽风水平摆角（-5°、0°、+5°），因素D为炉膛出口氧量（2.5%、3.0%、3.5%）。共设计9个试验工况（L9正交表），每个工况稳定运行4小时后进行数据采集，负荷统一维持在90%额定负荷以排除负荷变化对壁温的影响^[3]。

3.2 测试方法与测点布置

测试项目包括烟气温度、管壁温度和烟气成分三个方面。炉膛出口烟气温度在水平烟道入口沿宽度方向布置12支烟气温度探针（左右各6支），测量烟温分布和左右侧偏差。过热器壁温测点在末级过热器入口、中间和出口管屏上布置，共选取9屏、每屏3根管圈（向火侧、中间、背火侧）布置K型热电偶，总计81个测点。再热器壁温测点布置方式相同，在末级再热器选取6屏、每屏3根管圈布置热电偶，共计54个测点。烟气成分测点布置在空预器入口烟道，测量O₂、CO和NO_x浓度。数据采集系统以1Hz采样率连续记录各测点数据，取工况稳定后10min平均值作为该工况代表值。

3.3 安全措施与边界条件控制

试验过程中严格遵守安全边界条件以确保锅炉运行安全。负荷维持恒定（90%额定负荷±5MW），通过CCS系统锁定负荷指令，避免负荷波动对壁温的影响。煤质维持稳定，试验期间使用同一煤种（收到基低位发热量22.5MJ/kg、挥发分28%、硫分0.8%），每2小时取样化验一次，发热量波动控制在±3%以内。给水温度维持额定值（275℃±2℃），通过调整高加运行方式保持稳定。设置壁温三级预警机制：壁温超过580℃时发出预警，超过585℃时发出报警并通知值长，超过590℃时立即终止试验并恢复至安全配风方式。各工况切换过程中变负荷速率限制在1%/min以内，避免变负荷速率过快引发的热冲击。

4 试验结果分析与配风优化策略

4.1 不同配风方式对过热器/再热器壁温的影响

正交试验结果表明，各因素对过热器壁温的影响程度排序为：二次风配风方式 > 燃尽风水平摆角 > 燃尽风率 > 炉膛出口氧量。均等配风时各层燃烧器风量相

同,炉膛出口左右烟温差达42℃,高温侧过热器壁温达592℃,超限运行时间占比约40%。正塔配风(下层风量偏大)使火焰中心下移,炉膛出口烟温降低约15℃,壁温峰值降至585℃,但左右侧偏差无明显改善。束腰配风(中部燃烧器区域二次风集中供给)结合燃尽风水平摆角+3°,使炉膛出口左右烟温差由42℃降至15℃,壁温峰值由592℃降至578℃,壁温超限点全部消除。再热器壁温变化趋势与过热器一致,但波动幅度较小(约为过热器的60%~70%)。

4.2 配风优化对热偏差系数的改善

热偏差系数是评价配风优化效果的核心指标。均等配风工况下,末级过热器管屏间最大热偏差系数为1.35,即同屏不同管圈最大壁温与平均壁温之比为1.35,意味着壁温偏差约达45℃。束腰配风+燃尽风摆角优化后,管屏间热偏差系数降至1.12,壁温偏差收窄至约18℃。各管屏间的壁温分布标准差由12.5℃降至4.2℃,壁温分布均匀性显著改善^[4]。同屏管间温差由优化前的平均22℃降至优化后的平均8℃,局部过热点的消除是热偏差系数改善的关键。再热器热偏差系数由优化前的1.28降至1.10。

4.3 配风优化前后的综合效果对比

综合效果对比以优化前(均等配风+燃尽风率25%+摆角0°)和优化后(束腰配风+燃尽风率23%+摆角+3°+氧量3.0%)为比较对象。壁温方面,末级过热器各管屏壁温最大值为578℃,较优化前下降14℃,超温点全部消除;再热器壁温最大值为572℃,下降10℃;炉膛出口左右烟温差由42℃降至15℃,烟温偏差得到有效控制。效率方面,优化后排烟温度降低约3℃,锅炉热效率由92.8%提高至93.3%,提高约0.5个百分点。环保方

面,NO_x排放浓度由280mg/Nm³微升至285mg/Nm³,增幅约1.8%,仍在超低排放限值要求范围内。推荐采用束腰配风+燃尽风率23%+燃尽风水平摆角+3°+炉膛出口氧量3.0%的方案作为日常运行配风基准,并根据煤质和负荷变化进行适度修正。

结束语

过热器与再热器超温的本质原因是炉膛出口烟气温场度和速度场分布不均导致的热偏差,而燃烧器配风方式是影响热偏差的关键可控因素。本文通过系统的正交试验,定量揭示了二次风配风方式、燃尽风率和摆角等因素对壁温及热偏差的影响规律。束腰式二次风配风配合燃尽风水平摆角优化,可有效降低炉膛出口残余旋转强度,使过热器热偏差系数由1.35降至1.12,壁温超限点全部消除,同时锅炉热效率提高约0.5个百分点。建议后续将配风优化策略与负荷变化、煤质波动进行联动,建立基于在线壁温监测的配风动态调整机制,实现过热器/再热器壁温的精细化控制。

参考文献

- [1]张彬彬,刘波,郎济林.基于氧量场动态感知的锅炉燃烧优化与空预器漏风控制研究[J].价值工程,2026,45(16):124-127.
- [2]王永刚,苟琮琦,李戈辉.350MW超临界直流炉旋流燃烧器配风优化控制技术[J].冶金动力,2022(1):64-68,71.
- [3]唐恒轶,范雪龙.基于优化机组燃烧配风的脱硝系统优化[J].电工技术,2021(8):166-168.
- [4]宋扬,赵阳,关风一.300 MW锅炉低NO_x燃烧器改造后燃烧优化调整试验研究[J].东北电力技术,2022,43(8):6-9,15.