

回转式空气预热器腐蚀风险与换热性能研究

徐文健 蒋德俊 王彩芸 田敏

青州鑫晖热能科技有限公司

摘要：本文对回转式空气预热器的换热特性和硫酸腐蚀特性进行了研究，对温度场分布规律和腐蚀区域的空间变化特征进行了讨论。通过建立冷凝—反应耦合模型，对换热器和空预器进行数值模拟，并结合试验数据，评价了单温段和双温段转向调整和转速的调整对换热特性和腐蚀率分布的影响，结果表明，通过适当调整换热器中低温段回转方向及保持较低的盘转速度（0.6 ~ 0.8 r/min），有利于获得更为均匀的换热性能，并有效减轻硫酸腐蚀。

关键词：回转式空气预热器；换热特性；硫酸腐蚀；转向与转速

回转式空气预热器为燃煤电厂的余热回收设备，其换热度和使用寿命是影响锅炉性能的重要参数。由于运行时间长，低温段段热分布不均衡，常产生硫酸冷凝腐蚀，影响设备运行稳定性^[1]。本文通过转向和转速两方面对换热度和腐蚀分布影响的数值模拟和试验结果加以总结，为回转式空气预热器的稳定、防腐蚀运行提供优化措施。

送风机将一次风和二次风送入送风系统，温度传感器使用 E 型铠装热电偶，测点按照等截面网格原则布置在整个换热器。烟气烟样使用多代表点方法对上、下烟道进行取样，两台烟气分析仪在线检测 O₂、NO、CO。

2) 试验方法。试验前通过烟气测点采集进入预热器烟气的主要成分，CO₂ 含量 14.05%，O₂ 含量 3.09%，将

烟气成分进行连续取样平均。温度测试采用代表点法，在烟气入口、一次风通道和二次风通道均设置多个热电偶测量烟气周向温度变化。测点布置采用等截面网格法，信号经数据采集系统采集，每 60s 进行一次刷新。试验重点测试不同流量、入口温度时，各出口温度分布，即周向温度分布是否均匀及梯度如何变化，为提高预热器换热效率及稳定锅炉

1 回转式空气预热器换热的试验研究

1.1 试验系统与方法

1) 试验系统构成。本试验是在某发电厂 1000 MW 燃煤机组三分仓回转式空气预热器试验平台的基础上进行的。试验系统主要包括：空气预热器本体系统、烟气侧送风系统、温度传感器系统、烟气烟样分析系统以及风速和压降传感器系统，如图 1 所示。空气预热器主体为三层转子设计，直径 18 m，被扇形隔板分割为烟气侧、一次风侧、二次风侧三部分，送风系统由引风机和

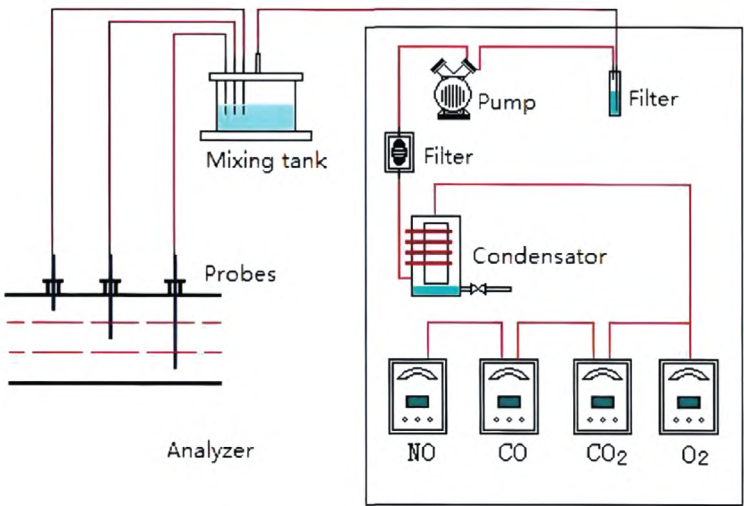


图 1 烟气采样分析系统

燃烧提供数据支撑及优化。

1.2 误差分析

在本次试验中,选择E型热电偶来对烟气及一、二次风的进出口温度进行实时的监控。该监测的误差主要来源于热电势测量的误差、热电偶的标定误差以及由于温度与热电势之间存在的非线性关系所导致的拟合残差误差。在不考虑材料非均匀性的情况下,依据制造商提供的参数,E型热电偶的测温误差约为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。举例来说,当测量温度为 30°C 时,最大相对不确定度可达3.33%,这一数值低于工程热工类试验通常允许的5%误差范围。为提高测量的精确度,本试验采用了I级热电偶,并采取等截面网格化布点的策略^[2]。试验以每60s进行一次采样并计算取平均值的方法来降低随机误差的影响。通过对干扰源的屏蔽和工况的稳定控制,有效减少了系统误差的影响。在整个试验周期内,各测点的误差不确定性都被控制在5%以下,其中大多数测点的误差不确定性都低于3%。

1.3 试验结果与分析

1) 烟气出口温度分布规律。试验测试表明,BMCR、BRL和75%BRL等典型工况的回转式空预器中,烟气出口周向温度分布规律均表现为不均匀性,最大温差可达100K以上。图2为不同工况烟气出口温度分布图,从各个测温测点的数值来看,整体沿周向温度分布规律基本保持线性单调性,即沿着回转方向温度逐渐升高或降低,但在个别位置达到最高值,意味着在局部区域存在换热增强或是减弱的现象。

BMCR工况下,由于其烟气流量最大,温度最高,因此其出口平均温度高于BRL工况10K左右,高于75%BRL工况20K左右,热量释放较为充分,但温度波动也相对较大。分析认为,这种不均匀现象可能与蓄热元件布置,旋转角速度和扇形隔板位置有关,影响着烟气在预热器中的传热传质路径。

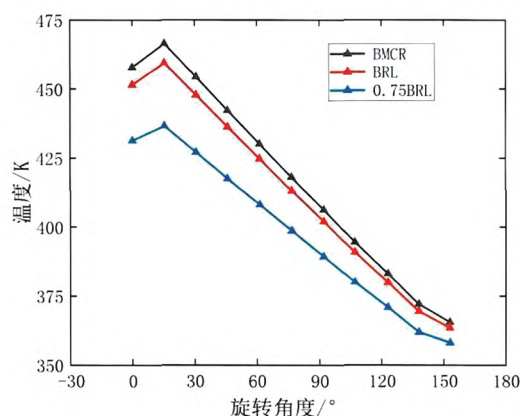
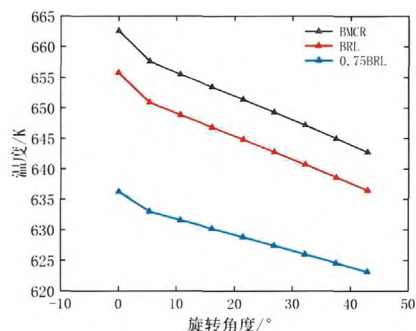
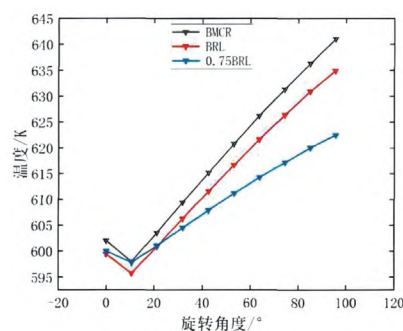


图2 不同工况下烟气出口温度分布图

2) 一、二次风出口温度分布规律。如图3所示,三种工况下,一次风和二次风出口平均温度都存在一定的周向变化,但温度差最大值只有20K,而二次风温度的最大温差在BMCR和BSR工况时高达50K,在75%BSR工况时温度最大差低于20K,说明等负荷运行时低负荷运行更有利于平均温度的分布。从图3可以看出,一次风出口平均温度基本上呈线性分布,BMCR和BSR工况下的温度变化趋势较为一致,75%BSR工况下的温度平均差值略小,但温度分布较为均匀。二次风出口平均温度则存在“先减后增”的趋势,这说明气流混合强弱与换热强弱不同。分析认为,风温分布均匀性决定了进入炉膛燃烧的稳定性,尤其是低负荷时二次风温度梯度减小更有利于改善炉膛温场。因此,风温分布均匀性的提高,不仅有利于提高锅炉的热效率,而且有利于减少局部过热或者 NO_x 的生成。



(a) 一次风温度分布



(b) 二次风温度分布

图3 同工况下空气出口温度分布

2 转向与转速对回转式空气预热器换热特性的影响

2.1 转向对换热性能的影响

2.2.1 单温段转向改变的影响

1) 分析高温段、中温段、低温段单独改变转向时对温度场的影响。对高、中、低温段分别做逆向模拟后发现:不同温段转向对温度场影响差异较大。低温段可逆向显著压缩高温区、消除低温区,出口温度趋于中高水平,改善过冷状况;中温段可逆向平缓温度波动、降低高温峰值,优化梯度分布;而高温段则影响最小,仅使最低温点微升,整体分布基本没有变化。综合而言,相较于高温段,转向对低温段和中温段调整效果更佳。

2) 烟气出口温度降、竖直断面酸露滴腐蚀区转移。在出口和竖直截面分析中,设计工况下酸腐蚀区域主要集中在靠近二次风一侧,高度可达600mm。低温段逆向后腐蚀区转移至另一侧,高度降至400mm,腐蚀风险大幅减小。中温段逆向后仍能降低腐蚀区高度,但分布转移不如低温段。高温段逆向后对腐蚀区无显著影响。因此,低温段和中温段转向优化的腐蚀防控更具成效。

3) 周向温度分布均匀性改善效果对比。周向温度分布,转向优化对温度分布均匀性改善效果不同。设计工况最

大温差 120K 左右,且温度分布较为线性。低温段逆向后温差减小至 60K,分布趋于平缓凸形,均匀性提升显著。中温段逆向后温差减小至 70K,改善程度次之。高温段逆向几乎没有温差变化,改善程度最弱。综合来看,改善程度最大在低温段逆向,中温段次之,高温段可忽略。

2.1.2 双温段转向改变的影响

1) 不同组合(低一中、低一高、中一高)转向变化下的温度分布分析。通过对回转式空气预热器进行低一中温段、低一高温段及中一高温段三种转向组合的模拟研究,发现不同组合对烟气出口温度分布具有不同的影响。低一中温段同时逆向时,烟气出口低温区域从靠近二次风转移至一次风侧,但温区变化不显著,整体温度分布改善有限^[3]。低一高温段转向组合效果较为显著,最低温度区间由 357 ~ 371 K 提升至 371 ~ 386 K,高温区显著收缩,温度场趋于集中。中一高温段转向组合对高温区影响最大,475 ~ 490 K 的区域几乎完全消失,最低温区域也出现明显上移。

2) 烟气出口温度场及竖直断面腐蚀区域变化。低一高温组可使酸露点线高度从 600 mm 下降到 400 mm,严重腐蚀线下降 80 mm;中一高组次之,高度被控制为 420 mm 以内,腐蚀区由外围向中心收缩;低一中温组仅转移腐蚀方向,腐蚀高度并未降低。这表明高温组在反向降低热惯性和压缩腐蚀区方向更具优势。

3) 周向温度梯度变化与均匀性分析。周向温度分布显示:低一中温组合温度梯度变化小,梯度过小,改善不明显,中一高温组合能将温差压缩到 30K 以内,分布曲线呈凸型,均匀性得到显著改善;中一高温组合效果最佳,温差缩小 40K 以上,分布平稳,换热更均衡。可见是否包含高温段是

决定温度均匀性的重要因素。

2.2 转速对换热性能的影响

1) 不同转速时烟气、一、二次风出口烟温变化。随着空气预热器转速的增加,烟气出口烟温逐渐降低,一、二次风烟温呈现“一升一降”的趋势,一次风烟温在升高后突然下降,二次风烟温逐渐升高。转速低于 0.6 r/min 时,传热时间较长,受传热不均匀影响,烟气残留温度较高。当转速在 0.6 ~ 0.8 r/min 时,金属蓄热元件的换热效率较高,二次风温升高,一次风温升较低且名义角度小对系统惯性敏感性低。整体来说,适当增加转速,有利于增强换热性能且减小一、二次风温的温差,有利于燃烧稳定。

2) 出口温度分布、温差与传热效率变化。出口温度分布随转速变化呈现出明显趋势:低转速下,烟气出口存在大面积低温区与局部高温条带,温差大、温度分布不均匀,传热效率偏低。

转速提高至 0.8 r/min 时,低温区面积显著减小,317 ~ 330 K 区段几乎消失,温差缩小,温度场更趋平稳,传热效率大幅提升。进一步提高至 1.0 r/min 以上时,出口温度波动减弱,但效率提升趋缓,局部区域甚至出现温度反弹,说明过高转速可能削弱金属换热元件的蓄热—释热平衡^[4]。因此,存在最佳传热区间,过低或过高均不利于换热系统长期高效运行。

3 回转式空气预热器硫酸腐蚀特性研究

3.1 硫酸蒸汽在竖直壁面上的冷凝特性

1) 冷凝模型与控制方程建立。将组分输运理论和相变理论耦合到 WALLFILM 模型,用以计算含有硫酸烟气的冷凝传热过程发生在竖直壁面上。将锅炉烟气中只包含两种组份:CO₂与 H₂O,利用酸露点的经验公式得出

SO₃与 H₂O 生成 H₂SO₄ 的饱和压,并实现壁面给定温度下的冷凝速率计算。在计算过程中建立控制方程,主要包含质量、动量、能量和相变源项。对液膜厚度、速度、温度变化过程进行描述,为多孔介质腐蚀模型的建立提供物理模型。

2) 模拟结果。液膜厚度与冷凝速度与硫酸蒸汽的体积分数成正比,与壁面过冷度呈线性关系。过冷度增加,冷凝速度开始阶段呈上升趋势,过冷度较大时(90K 以外),冷凝速度有轻微的下降趋势,说明热阻的影响。因此,减小壁温、降低烟气中含硫量的比例,是可以降低腐蚀的可行方法。

3.2 空气预热器整体腐蚀分布特性

1) 酸腐蚀数值模型建立。在回转式空气预热器三维换热模型的基础上,基于多孔介质模型,引入硫酸蒸汽冷凝的对应化学反应模型,将腐蚀过程视为在热力场的役使下发生的气—液相变反应;反应速率系数与温度场耦合通过自定义函数来实现冷凝速率的函数化,转化为化学生成量,以此模拟硫酸液体空间分布,该模型能反映硫酸腐蚀在换热元件内部的发展趋势。

2) 设计条件下的腐蚀分布。模拟结果表明,锅炉烟气中硫酸蒸汽体积分数为 0.003%,酸腐蚀主要发生在低温段,尤其是靠近二次风区和旋转中心附近,烟气出口截面约有 40% 面积上存在硫酸液体,易产生腐蚀热点,竖直截面存在硫酸液体质量分数远高于高温和中温段的现象,表明腐蚀分布与低温区的热力不均匀性有直接关系^[5]。

3.3 转向对空气预热器腐蚀特性的影响

1) 单温段转向改变的影响。分别改变高温段、中温段和低温段旋转方向,模拟其对酸腐蚀分布的影响。结果表明,低温段转向改变后,腐蚀面

(下转第 71 页)



图2 汽轮机前后支撑瓦下瓦块

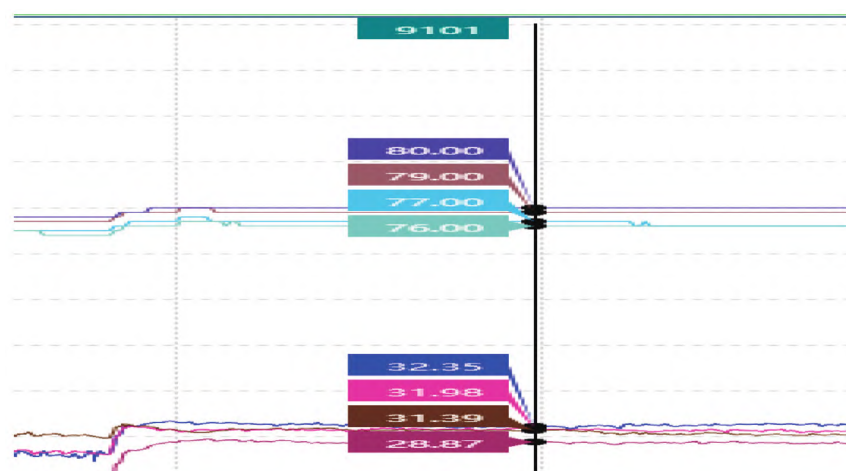


图3 汽轮机检修后振动、温度参数

可以从源头上做好选择,如润滑油优化选型,结合漆膜生成机理,与各供货商做深度交流,了解润滑油组成和性能特点,选择优质的润滑油。其次,坚持做好机组润滑油站的润滑管理和定期对润滑油进行外循环过滤,能有效减缓润滑油漆膜对机组轴瓦温度的影响,为机组长周期运行提供保障。此次对轴瓦温度升高原因分析及处理,有效地解决了该类轴瓦温升问题,为更多类似工况的机组轴瓦温升处理提供了宝贵的经验。

参考文献:

- [1] 韩明. 汽轮机轴瓦温度高的分析与故障排除[J]. 中国设备工程, 2018(09): 18-36.
- [2] 李恒. 裂解气压缩机轴瓦温度高的原因分析及处理[J]. 石油化工设备技术, 2021, 42(05): 11-19.
- [3] 刘建中, 王卫宇. 离心式压缩机轴瓦温度高原因分析与处理[J]. 设备管理与维修, 2023(04): 24-30.

(上接第68页)

积缩小至20%,最大质量分数下降50%以上,腐蚀区域由二次风侧转向一次风侧。中温段转向也能明显减小腐蚀强度。高温段转向有一定影响,但由于距腐蚀敏感区较远,改善效果不明显。

2) 双温段转向改变的影响。组合转向,例如低—高、中—中等转向,进一步降低了腐蚀的程度。低—高温段转向可大幅度降低腐蚀区域和质量分数峰值以及竖直方向腐蚀长度。中—高温段组合效果次之,对中心腐蚀聚集现象有不同程度的减弱作用。低—中温段组合对整体腐蚀的影响较小,应结合温度场的实际使用。

4 结语

通过对回转式空气预热器不同转

向组合与转速变化条件下的数值模拟与试验分析,本文系统揭示了温度场分布特性与酸腐蚀区域的演变规律。研究发现,低温段与中温段的逆向转动能够显著改善烟气出口温度分布的均匀性,并有效降低低温区域的酸液体生成量;而高温段的逆向效果相对有限。转速方面,在设计转速基础上适当提升有助于减小腐蚀面积和酸露点高度,同时提升换热效率。整体而言,转向调整与转速优化需协调实施,以实现热效率提升与结构防护的双重目标,为空气预热器的运行优化提供了技术依据。

参考文献:

- [1] 李君一. 防止空气预热器露点腐蚀措施设计[J]. 大众标准化, 2025(4): 58-60.

- [2] 杨晓, 高文杰, 龙斌, 等. 燃煤机组空气预热器堵塞原因分析及运行调整研究[J]. 锅炉技术, 2025, 56(1): 72-76.
- [3] 阎顺强, 刘广知. 火电机组回转式空气预热器节能提效策略探讨[J]. 大众标准化, 2025(2): 40-42.
- [4] 王瑞, 陈超. 蒸汽空气预热器使用过程中出现问题的研究[J]. 锅炉制造, 2025(1): 28-29+36.
- [5] 马志强. 火电厂空气预热器常见故障的原因分析及措施[J]. 电力设备管理, 2024(24): 87-89.