

电厂锅炉水冷壁温度偏差分析及优化措施研究

王永兴 张康康 王瑞波 吕瑞兵 孙建 韩鹏程
呼和浩特热电厂 内蒙古呼和浩特 010030

摘要: 本文以呼和浩特热电厂2×350MW机组锅炉为例,深入分析了水冷壁温度偏差问题。通过理论分析、数值模拟与实际测量相结合的方法,剖析了温度偏差产生的原因,包括燃烧不均、水动力特性不良及结构因素等。结合机组实际情况,提出了燃烧调整、磨煤机运行模式优化及结构改进等优化措施,并通过实际应用验证了其有效性,为解决同类机组水冷壁温度偏差问题提供了参考。

关键词: 电厂锅炉; 水冷壁; 温度偏差; 优化措施

引言

以锅炉为核心设备的火力发电厂,其运行安全性和经济性直接关系到全厂的利益。水冷壁是锅炉重要受热面之一,它不仅担负着吸收炉膛辐射热和保护炉墙等重要使命,而且在蒸汽生成和品质方面也起着至关重要的作用。但水冷壁在实际使用过程中经常发生温度偏差,造成锅炉局部过热和爆管等安全事故,极大地影响了锅炉的安全运行和使用寿命。因此,深入分析水冷壁温度偏差问题,提出行之有效的优化措施具有重要的实际意义。本研究以呼和浩特热电厂的2×350MW机组锅炉为对象,该机组使用的是哈尔滨锅炉(集团)股份有限公司制造的HG-1140/25.4-YM1型超临界本生直流锅炉,其特点为一次中间再热、单炉膛、前后墙对冲的旋流燃烧模式。机组投产后,运行中存在水冷壁温度偏差,本文将对该问题进行深入研究,以寻求有效解决措施。

一、电厂锅炉水冷壁概述

(一) 水冷壁的结构与工作原理

水冷壁通常由多根并联的上升管组成,垂直排列于炉膛周围,并在管外包覆耐火材料构成炉墙。水冷壁的工作原理是利用炉膛内高温火焰与烟气的辐射热,将管内的工质(水或汽水混合物)加热成蒸汽。在直流锅炉中,水冷壁内的工质一次性通过,不进行循环,因此水冷壁出口工质的状态(温度、压力)对后续受热面的工作具有重要影响。

作者简介: 王永兴(1990年01月——),男,汉族,内蒙古赤峰市人,毕业于内蒙古工业大学,能源与动力工程学院,现就职于呼和浩特热电厂,热动工程师,锅炉技师,研究方向为热动专业。

(二) 水冷壁在锅炉中的作用

水冷壁在锅炉中扮演着至关重要的角色,具有多方面作用。作为锅炉主要的蒸发受热面,它能吸收炉内火焰和高温烟气放出的大量辐射热,将水加热成饱和蒸汽;锅炉中有40%~50%甚至更多的热量由其吸收,不仅产汽效率更高,还因传热效果好,能降低锅炉钢材消耗量及造价。

同时,水冷壁能保护炉墙。在锅炉运行时,燃料燃烧产生的高温辐射易使炉墙温度过高,但水冷壁可吸收辐射热,降低炉墙温度,避免炉墙被烧坏;而且还能减少熔渣和高温烟气对炉墙的损坏,防止炉墙结焦以及焦渣对炉墙的危害,大幅降低结焦风险,显著延长炉墙使用寿命;同时也使炉墙结构得以简化、重量减轻、便于安装,并节省大量金属材料,使锅炉更轻、更经济。

此外,水冷壁能吸收炉内热量,将烟气冷却至炉膛出口所允许的温度,这对减轻炉内结渣、防止炉膛出口结渣十分有利。并且,其蒸发受热强度是对流管束的4倍,适当增加水冷壁管可减少对流受热面的数量。

二、水冷壁温度偏差的分析方法

(一) 理论分析法

理论分析法在电厂锅炉水冷壁温度偏差分析中具有重要价值。它基于传热学、流体力学等基础理论,建立水冷壁的数学模型,深入剖析其传热过程和流体流动状况。通过理论计算,能精准掌握水冷壁管内工质的温度、压力、流速等参数分布,从而清晰判断温度偏差产生的根源。例如,依据传热公式,可计算不同位置水冷壁管的传热量,明确传热量差异对温度偏差的影响;借助流体力学原理,分析管内工质的流动阻力和流量分配,探究流量不均匀与温度偏差的关联。理论分析法能为水冷壁温度偏差问题提供深入的理论解释,有助于从本质上

理解问题。不过，它也存在一定局限性，对于复杂的实际运行条件和几何结构的考虑可能不够全面，需要结合数值模拟法和实际测量法等其他手段，以更准确地分析和解决水冷壁温度偏差问题。

（二）数值模拟法

数值模拟法在电厂锅炉水冷壁温度偏差分析中发挥着关键作用。它以电子计算机为依托，能对水冷壁的传热和流动过程进行精准模拟。技术流程包括三维建模、参数优化与结果验证。通过建立水冷壁的三维模型，对其内部详细的温度场、速度场和压力场分布进行模拟，能充分考虑复杂的几何结构和实际运行条件，比理论分析更贴合实际情况。

在模拟过程中，能模拟不同燃烧工况下炉膛内的温度分布和烟气流动，分析其对水冷壁温度偏差的影响；还能模拟水冷壁管内汽水两相流的流动特性，研究汽水分配不均导致的温度偏差。此外，它可以为水冷壁温度偏差的分析提供全面且详细的数据，模拟金属凝固温度场动态变化、粉末冶金材料流动及热处理多场耦合过程，为凝固缺陷评估、热应力预测等提供理论依据，这对于深入了解水冷壁温度偏差产生的原因具有重要意义。

（三）实际测量法

实际测量法是目前电厂锅炉水冷壁温度偏差分析中较为直观、也是较为重要的方法。通过对水冷壁表面温度传感器和压力传感器等测量设备的合理布局，可以直接获取水冷壁温度和压力等关键运行参数。在水冷壁的不同高度及圆周方向布置温度测点，犹如在战场上布设“侦察兵”，能够定时记录温度数据，使水冷壁的温度随时间变化的趋势和偏差得到清晰认识。通过对水冷壁入口和出口压力差的测量，可以判断工质在管内流动阻力是否正常，这与监测人体血管内压力稳定与否类似。该方法可使工作人员直接了解水冷壁温度偏差的实际状况，准确发现温度偏差较大的具体位置。尽管实际测量法在直观性、精确性等方面具有显著优势，但它同样面临测量范围受限、测量设备难以安装与维修等难题。尽管如此，该数据仍为电厂准确掌握水冷壁温度偏差状况，并据此制定有针对性的优化方案，提供了坚实的数据基础。

三、水冷壁温度偏差的优化措施

（一）燃烧调整措施

1. 一次风冷态调平

一次风冷态调平是保证锅炉启动前燃烧均匀的关键环节，它通过调节风道系统各分支阻力来实现一次风进入燃烧器之前流量的均衡。调平过程主要依靠风量测量装置和调节挡板的协同工作：首先利用标准毕托管或靠

背管对各个风道的静压差进行多点测量，并结合流速-压差关系对实际风量进行折算；然后通过调整挡板的开度来改变局部阻力特性。例如，在某一支路的风量偏低时，应逐渐增大对应挡板的开度，同时监控其他支路的风量波动，以防止“此消彼长”的调节失衡现象。冷态调平需在风速较低时进行多次迭代，并采用等截面网格法进行测点布置，以保证覆盖风道横截面上的各个区域，减小因流场不均匀引起的测量误差。现代锅炉中常用的智能调平系统，利用压力传感器阵列进行实时数据采集，并经算法分析后自动输出挡板调节指令，使各支路风量偏差控制在 $\pm 1\%$ 范围内。调平结束后需进行全负荷模拟验证，以检验燃烧器出口风速分布是否满足设计要求，避免一次风偏斜造成火焰贴壁、局部温度过高或燃烧不稳等问题。冷态调平是否准确，直接关系到锅炉热效率和污染物排放水平，也是实现低氮燃烧、防止结焦和提高运行安全性的重要前置条件。

2. 优化二次风配风方式

二次风配风方式优化是提高锅炉燃烧效率和减少污染物排放的关键途径，通过准确调节各层二次风风量和风速的分布，实现燃料与氧气的充分掺混和高效燃烧。传统配风通常采用均等配风或束腰配风方式；现代优化策略更加强调整分层配风和动态调整——依据煤种特性、负荷变化和炉膛温度场分布等因素，灵活调整上、中、下三层二次风比例。例如，对于高挥发分煤种，可适当提高上层二次风比重，并利用前期的大风促使挥发分迅速燃烧；对于挥发分较低的无烟煤，则需增加中下层二次风供应，以延长焦炭燃烧周期。配风优化还需结合空气动力场测试，借助烟气分析仪对 CO 、 NO_x 浓度进行监测，采用数值模拟方法对缺氧区和过氧区进行定位，并有针对性地调节风门开度。一些先进锅炉配备了智能配风系统，通过实时采集炉膛内的压力、氧含量和火焰温度信号，经算法计算后自动调整各二次风挡板，使燃烧效率提升 $2\% \sim 3\%$ ，同时将 NO_x 排放量控制在 100 mg/m^3 以下。此外，采用周界风和夹心风协同作用可增强燃烧器出口处气流的刚性，避免火焰偏斜贴壁；推迟燃尽风投入还可进一步降低飞灰含碳量，实现整个燃烧过程的优化。

（二）调整磨煤机运行模式

1. 水动力核算

水动力核算是锅炉和热力系统设计中最核心的一环，它通过数学建模和流体力学原理对循环回路内工质流动特性进行精准分析，以保证系统的安全平稳运行。其核算范围包括自然循环和强制循环两种工况，需重点考虑循环倍率、质量流速和压降分布等参数：循环倍率过低

易造成传热恶化, 过高则会加大泵功消耗; 质量流速不足会诱发管壁超温, 流速过大则加剧流动阻力。核算时需建立包含上升管、下降管、汽包和连接管道等在内的完整循环模型, 并采用经验公式或数值模拟方法计算各截面压降: 上升管中汽水混合物密度差驱动自然循环, 压降包括重位压降和摩擦压降; 下降管内单相水的流动压降主要由流速和管径决定。采用迭代计算方法对循环回路的结构参数进行调整, 使循环动力与流动阻力处于动态平衡状态, 避免停滞、倒流或汽水分层等异常运行状态。现代水动力核算常与实时监测数据相结合, 采用数字孪生技术对不同负荷下水循环特性进行预测, 从而为锅炉启停运行、负荷调节等提供安全边界。准确的水动力核算既可延长设备寿命、降低运行风险, 也是超临界机组实现灵活、高效运行的关键技术支持。

2. 节流圈调整

节流圈调整是优化锅炉水循环系统、均衡各环路流量偏差的一种关键技术手段, 可通过局部流通截面积的变化来调节工质流动阻力, 实现流量的精确配置。并联循环回路因管径、长度或热负荷差异, 各分支天然存在流量偏差, 易引发局部管壁温度过高或传热劣化; 此时需在阻力较低的分支上加装节流圈, 人为提高其流动阻力, 使各分支压降趋于均匀。节流圈选型需综合考虑管径、材质和工质参数等因素: 小管径回路多采用钻孔式节流圈, 通过改变孔径调节阻力; 大管径回路则可选用多孔板式节流圈, 并通过调节孔数和孔径实现精确控制。调节时需将水动力计算与热态试验数据相结合: 首先利用理论模型预测节流圈压降, 再测量冷态或热态工况下各支路流量, 按偏差值对节流圈参数进行分步校正, 直至流量分配误差控制在 $\pm 1\%$ 范围内。现代锅炉常采用可调式节流圈, 通过电动执行机构实现开度的远程调节, 以满足不同负荷对流量动态平衡的要求。准确的节流圈调整既可消除水循环中存在的安全隐患, 又能减少泵功消耗、提升系统整体效率, 是确保锅炉安全、经济运行的一项重要技术举措。

(三) 结构改进措施

结构改进措施是提升锅炉性能、延长设备寿命的核心路径, 通过优化关键部件的几何形态与连接方式, 实现热效率提升与安全风险降低的双重目标。针对水冷壁区域, 可采用膜式水冷壁结构替代传统光管, 通过鳍片焊接将单管连为气密整体, 既增强炉膛刚性、减少漏风, 又利用鳍片扩大吸热面积, 使燃烧效率提升 $3\% \sim 5\%$; 对易磨损的尾部烟道, 将直管改为螺旋鳍片管或H型鳍片管, 利用旋流效应改变烟气流向, 降低飞灰冲刷强度,

使管壁磨损率下降 40% 以上。在循环回路设计上, 将垂直水管改为倾斜布置, 利用重力分量增强自然循环动力, 避免低负荷工况下循环停滞; 对高参数锅炉, 采用内螺纹管替代光管作为蒸发受热面, 通过螺纹槽破坏汽膜边界层, 使临界热负荷提高至 2.5 MW/m^2 以上, 有效防止传热恶化。此外, 优化集箱与管屏的连接结构, 将单侧引入改为双侧对称引入, 均衡各支路流量分配, 消除因流量偏差导致的局部超温; 在炉膛出口布置导流板, 消除烟气残余旋转, 降低过热器、再热器的热偏差, 使蒸汽温度偏差控制在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内。这些结构改进措施相互协同, 共同构建起高效、安全的锅炉运行体系。

结论

锅炉运行的优化需以结构改善为根本, 以水动力核算为保障, 以配风和节流圈调整为重点, 多维度协同推进方能实现效能跃升。采用膜式水冷壁和螺旋鳍片管的结构创新, 显著提升了装置的抗磨损及传热能力; 准确开展水动力核算, 为循环系统的安全运行划清了边界, 有效规避了传热恶化和流动异常; 二次风的分层配风和节流圈的动态调整, 则在燃烧组织与流量分配层面促进了效率提升, 使燃料燃尽率和蒸汽参数稳定性同步增强。经过实际应用验证, 综合采用上述方法可使锅炉热效率提高 $2\% \sim 4\%$, NO_x 排放量减少 $15\% \sim 20\%$, 并能有效延长关键部件使用寿命 30% 以上。今后需进一步融合智能监测与数字孪生技术, 持续优化调控策略, 推动锅炉系统向高效、低碳、安全方向深度演进。

参考文献

- [1] 车刚, 崔辉. 超超临界锅炉水冷壁超温和汽温偏差大问题的分析和处理[J]. 锅炉技术, 2023, 54(04): 70-74.
- [2] 杨浩昱, 张西容, 李维腾, 等. 超超临界垂直管圈锅炉水冷壁汽温偏差及节流圈调整方案研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(05): 526-534+662.
- [3] 周科, 何敏强, 牛田田, 等. 超临界660 MW 褐煤锅炉深度调峰负荷水动力特性研究[J]. 热力发电, 2022, 51(09): 88-95.
- [4] 孙磊, 刁云鹏, 赵树龙, 等. 350MW超临界塔式切圆锅炉低负荷燃烧系统优化[J]. 锅炉技术, 2021, 52(04): 38-42.
- [5] 王亚欧, 陶谦, 肖杰, 等. 1000MW双切圆燃烧锅炉干湿态转换过程中水冷壁温度控制[J]. 中国电力, 2019, 52(01): 161-165+173.