

660MW超超临界直流锅炉水冷壁传热特性与壁温控制策略优化

赵涵瑜

国能浙江舟山发电有限责任公司 浙江 舟山 316012

摘要: 本文聚焦 660MW 超超临界直流锅炉水冷壁, 先概述其结构、作用, 接着分析传热特性, 指出受工质、烟气及结构运行等因素影响, 且与壁温关联紧密。随后诊断现有壁温控制策略缺陷, 如变负荷适应性差、多因素耦合控制缺失、预警机制滞后。最后提出优化策略, 包括基于传热预测的前馈控制、多参数协同控制、智能预警与应急调控模块, 并给出量化实现路径。经实践验证, 优化策略有效提升壁温控制水平, 保障锅炉安全稳定运行。

关键词: 660MW超超临界直流锅炉; 水冷壁; 传热特性; 壁温控制策略

引言: 在电力行业不断发展进程中, 660MW 超超临界直流锅炉凭借高效、节能等优势, 成为主力机组。水冷壁作为锅炉核心部件, 其传热特性与壁温控制至关重要, 直接关乎锅炉运行的安全性与经济性。然而, 当前水冷壁在复杂工况下常出现壁温超标等问题, 现有控制策略难以满足需求。因此, 深入分析水冷壁传热特性, 诊断现有控制策略缺陷, 并提出针对性的优化策略, 对于提升锅炉运行水平、保障电力供应稳定具有重要意义。

1 660MW 超超临界直流锅炉水冷壁概述

1.1 锅炉整体结构与工作原理

660MW超超临界直流锅炉采用经典的II型布置形式, 其整体结构紧凑且功能完备, 主要由炉膛、燃烧器、过热器、再热器、省煤器以及水冷壁系统等关键部分构成。在额定工况下, 该锅炉运行压力处于25-30MPa的区间, 蒸汽温度则维持在566-600℃。其核心工作原理基于无汽包强制循环技术, 工质从省煤器流入后, 在水冷壁中依次完成预热、蒸发等一系列过程, 随后经由过热器进一步升温, 最终达到额定参数。整个流程中, 工质的流动完全依靠给水泵产生的压头来驱动。燃烧器采用四角切圆布置方式, 这种设计能使煤粉与空气充分混合, 在炉膛内实现高效燃烧, 释放出大量热量。这些热量通过辐射与对流两种方式传递给水冷壁, 既确保了工质能够充分吸热, 又能有效控制炉膛温度, 避免因温度过高而引发高温腐蚀与结焦等问题, 保障锅炉的稳定运行。

1.2 水冷壁结构特点

此锅炉的水冷壁采用了“螺旋管圈+垂直管屏”的复合结构, 这种独特设计充分结合了两种结构的优势。螺旋管圈布置在炉膛下部, 管圈倾角在30°-45°之间, 管径为Φ38.1mm, 节距为50mm, 材质选用性能优异的SA-

335P91。垂直管屏则布置于炉膛上部及折焰角区域, 管径为Φ44.5mm, 节距为63mm, 材质为SA-335P92。水冷壁管采用内螺纹结构, 螺纹深度0.8mm, 导程12mm, 这种设计能够增强工质的扰动, 显著提升传热系数^[1]。管屏之间通过鳍片焊接连接, 形成密排膜式结构, 不仅有效密封炉膛, 防止高温烟气泄漏, 还能扩大受热面积。整体结构设计充分考虑了传热效率与抗膨胀变形能力, 确保水冷壁在复杂工况下仍能稳定运行。

1.3 水冷壁在锅炉中的作用

水冷壁作为锅炉的核心受热面, 在锅炉运行中发挥着不可替代的关键作用。首先, 它能够高效吸收炉膛内煤粉燃烧所释放的辐射热量, 将工质从亚临界温度逐步加热至超临界状态, 顺利完成蒸发过程, 为后续的过热器提供符合要求的合格蒸汽, 保障蒸汽品质。其次, 密排的膜式水冷壁构建起炉膛的密闭空间, 有效防止高温烟气泄漏, 减少热量损失, 提高锅炉的热利用效率。同时, 流动的工质可对壁面进行冷却, 将壁温严格控制在材料允许的范围内, 对于P91材质而言, 允许的最高壁温为610℃, 避免因炉膛高温导致壁面氧化、腐蚀以及蠕变失效等问题。此外, 水冷壁的热交换效率直接关系到锅炉的整体热效率, 对机组的节能降耗具有至关重要的影响, 是提升锅炉经济性的关键因素。

2 660MW 超超临界直流锅炉水冷壁传热特性分析

2.1 传热特性影响因素识别

水冷壁的传热特性受到工质侧、烟气侧以及结构运行等多方面因素的综合影响。在工质侧, 流量偏差是导致局部传热不均的重要因素。当管屏间的流量偏差超过10%时, 传热系数会产生高达8%的波动。特别是在超临界压力下, 工质的比热在370-390℃会出现峰值, 在此温

度区间, 传热强化与恶化的临界工况容易交替出现, 给传热稳定性带来挑战。烟气侧, 炉膛中心的烟气温度高达1500-1600℃, 流速为3-5m/s, 其冲刷强度直接决定了对流传热的效果。而且, 飞灰沉积厚度每增加1mm, 传热阻力就会提升12%, 同时NO_x含量升高也会降低辐射传热系数。在结构运行方面, 螺旋管圈倾角的变化会影响流量分配。在30%-100%的变负荷过程中, 传热系数会随着负荷的下降而降低, 当负荷发生突变时, 传热响应会出现20-30秒的滞后。

2.2 基于实验与模拟的传热规律研究

以660MW机组为研究对象搭建实验平台, 在水冷壁的不同区域精心布置了56个热电偶以及24个工质参数监测点。设计了额定、75%、50%三种负荷工况, 并连续采集168小时的数据。同时, 运用Fluent软件构建管内-管外耦合传热模型, 网格划分精度达到0.1mm, 边界条件输入实际运行参数。实验与模拟结果显示, 在额定负荷下, 螺旋管圈的传热系数处于2800-3200W/(m²·K)的区间, 垂直管屏则为2200-2600W/(m²·K)。当工质处于比热峰值区时, 传热系数会骤升40%, 但壁温波动幅度可达25℃。在低负荷工况下, 工质流速降低, 传热系数下降至额定值的65%, 此时容易出现传热恶化现象, 壁温超温的风险显著提升。

2.3 传热特性与壁温的关联机制

传热特性与壁温之间呈现出显著的负相关关系。通过敏感性分析可知, 传热系数每下降10%, 壁温就会升高18-22℃。螺旋管圈由于流速较高、扰动较强, 传热系数相对稳定, 壁温波动能够控制在±12℃的范围内。而垂直管屏在炉膛上部, 随着烟气温度降低, 传热系数下降, 壁温容易出现局部峰值。燃烧器区域的水冷壁受到的辐射热较强, 如果传热系数因飞灰沉积下降15%, 壁温可升至620℃, 超出P91材质的允许值。工质比热峰值区是传热特性与壁温关联的关键节点, 在此区域, 传热强化会使壁温降低, 但参数的波动容易引发传热突变, 导致壁温骤升骤降, 进而加剧材料的疲劳损伤, 影响水冷壁的使用寿命和安全性^[2]。

3 现有水冷壁壁温控制策略缺陷诊断

3.1 现有控制策略应用现状

目前, 660MW机组水冷壁壁温控制主要采用“水煤比调节+燃烧调整”的模式。在控制逻辑方面, 水煤比的调整依据负荷变化, 按照固定的曲线进行。具体而言, 负荷每变动10%, 水煤比就会对应调整0.05-0.08。燃烧调整则通过改变二次风配风比例以及喷燃器摆角来实现, 其中喷燃器摆角可在30°-60°的范围内, 依据蒸汽温度的

变化进行调节。对于壁温的监测, 主要依靠在炉膛四周布置的热电偶, 这些热电偶所采集的数据会通过DCS系统进行实时显示。一旦壁温超过610℃, 系统就会触发报警机制。从某区域机组的运行数据来看, 在额定负荷的情况下, 壁温控制效果相对较好。然而, 当机组处于变负荷运行状态或者遭遇恶劣天气时, 壁温超标的情况就会显著增加。据统计, 该区域机组年平均超温故障次数达到了12次, 这不仅影响了机组的稳定运行, 还对水冷壁的安全造成了潜在威胁, 亟待对现有的控制策略进行优化和改进。

3.2 核心控制缺陷分析

现有控制策略存在三大核心缺陷, 严重影响了水冷壁壁温控制的效果。其一, 变负荷适应性差。在低负荷(≤50%)运行工况下, 水煤比调节存在明显的滞后现象, 滞后时间长达40-60秒。这使得壁温波动幅度高达30-50℃, 远远超出了允许的范围, 对水冷壁的安全运行构成了威胁。其二, 多因素耦合控制缺失。现有的控制策略仅仅以负荷和蒸汽温度作为调控的依据, 没有充分考虑飞灰沉积、烟气成分变化等重要因素。例如, 当飞灰沉积厚度达到2mm时, 控制偏差就会达到15%, 导致壁温精准度严重不足^[3]。其三, 预警机制滞后。目前的预警机制完全依赖于实时壁温数据进行报警, 缺乏提前预判的能力。一旦超温发生, 需要人工进行干预, 应急响应时间较长, 很容易错过最佳的调控时机。这就导致超温持续时间往往超过5分钟, 进一步加剧了水冷壁的损伤程度。

4 660MW超超临界直流锅炉水冷壁壁温控制策略优化

4.1 基于传热预测的前馈控制模块

该模块聚焦于传热系数的实时精准预测, 以构建的BP神经网络模型为核心驱动力。其输入参数丰富多元, 涵盖工质流量、温度、压力, 烟气温度、流速及成分, 还有运行负荷等共计12项关键指标。为确保模型的预测精度, 运用10万组历史数据进行深度训练, 最终实现预测精度高达92%以上。模型具备高效运算能力, 每5秒便能输出一次传热系数预测值。当预测值下降幅度超过8%时, 前馈控制逻辑迅速启动。它会依据不同工况, 自动且精准地调整水煤比与喷燃器摆角。例如, 在预测到低负荷状态下传热系数下降时, 提前将水煤比提高0.1, 同时把喷燃器摆角下调5°。这种前瞻性的调整策略, 成功实现了从“被动响应”到“主动预判”的重大转变。有效将调控滞后时间大幅缩短至10秒以内, 极大提升了水冷壁壁温控制的及时性与精准性, 为锅炉的安全稳定运行提供了有力保障。

4.2 多参数协同控制模块

此模块构建了“水煤比-配风方式-烟气流量-壁温”四维耦合控制矩阵,将复杂多变的运行工况精细划分为12种典型场景,每种场景都对应着一套最优参数组合。在工质侧,依据传热预测结果动态灵活调整水煤比,同时借助水冷壁入口联箱调节阀,对流量分配进行优化,确保各管屏流量偏差严格控制在5%以内,保证工质流动的均匀性。烟气侧,实时严密监测飞灰沉积厚度与烟气成分。一旦飞灰沉积超标,立即增大二次风风速10%-15%,强化吹灰效果,防止因飞灰堆积影响传热;当NO_x含量升高时,精准调整一次风与二次风比例,维持辐射传热稳定。在区域差异化控制方面,针对燃烧器区域水冷壁,强化流量供给,较其他区域提升8%-10%,实现精准控温,有效避免局部过热或过冷现象,提升整体传热效率^[4]。

4.3 智能预警与应急调控模块

智能预警模型精心设置了三级阈值体系。一级预警(壁温590℃或传热系数下降5%)触发黄色预警,及时提示运行人员密切关注相关参数变化;二级预警(壁温600℃或传热系数下降8%)触发橙色预警,自动迅速启动前馈调控机制,提前采取措施防止壁温进一步升高;三级预警(壁温610℃或传热系数下降10%)触发红色预警,立即启动应急调控程序。应急措施涵盖多个方面,包括快速提升对应区域水冷壁流量15%,调整喷燃器摆角10°使其远离超温区域,启动区域吹灰装置等。该模块响应时间极短,≤10秒,能在30秒内将超温壁温有效降至安全范围。同时,通过声光报警与短信通知运维人员,形成“自动调控+人工值守”的双重保障体系,确保在紧急情况下能够迅速、有效地应对,保障锅炉安全。

4.4 优化策略的量化实现路径

首先开展控制参数标定工作,通过168小时全工况实验,精确确定不同负荷下的最优参数;在额定负荷时,

水煤比控制在1.05-1.1,喷燃器摆角设定为45°;75%负荷时,水煤比为1.1-1.15,摆角调整为40°;50%负荷时,水煤比处于1.15-1.2,摆角设为35°。其次完成系统集成,将精心设计的优化逻辑无缝嵌入机组DCS系统,与现有监测系统实现完美对接,达成数据实时交互与指令自动执行,确保控制策略能够高效、准确地实施。搭建可视化监控平台,实时直观展示传热系数、壁温、调控参数等关键指标,支持历史数据追溯与趋势分析,为运行人员提供全面、便捷的监控手段。最后建立严谨的校验机制,每季度通过热态实验对模型参数进行修正,确保控制精度始终保持在较高水平,量化数据显示,优化后控制参数与实际最优值偏差≤3%。

结束语

本文围绕660MW超超临界直流锅炉水冷壁展开研究,通过全面分析传热特性,精准诊断现有壁温控制策略缺陷,针对性地提出优化策略并给出量化实现路径。实践表明,优化后的控制策略显著提升了壁温控制效果,有效降低了壁温超标风险,增强了锅炉运行的安全性与稳定性。未来,随着技术不断进步,可进一步探索更智能、精准的控制方法,持续优化锅炉运行性能,为电力行业高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]何颖.超超临界机组垂直管圈水冷壁管防超温协调控制策略的优化[J].中国科技纵横,2022(5):63-65.
- [2]颜纲要,杜磊,杨志君.600MW超临界锅炉低负荷水冷壁超温控制策略[J].仪器仪表用户,2023,30(1):85-87,40.
- [3]白哲,陈晓龙,杨元成.超超临界电站锅炉水冷壁管横向开裂原因分析[J].电力安全技术,2024,26(04):60-63.
- [4]张雷,吕一仕,杨佳,等.基于深度学习算法实现锅炉水冷壁壁管缺陷识别[J].设备管理与维修,2023(21):140-144.