

锅炉结焦成因分析与运行预防措施研究

姚泰月 惠思铭 彭龙飞 刘 华 张 魁

华能沁北发电有限责任公司 河南 济源 459000

【摘 要】：锅炉结焦是影响燃煤电厂安全稳定运行的重要问题，主要受燃料特性、燃烧控制参数及运行管理等因素影响。灰熔点低、碱金属含量高的煤种易在高温区域熔融沉积，引发严重结渣现象。燃烧控制参数失衡会加剧局部热负荷集中，促进灰渣黏附过程。通过优化空气配比、调整燃烧器运行方式并强化清焦管理，可在一定程度上缓解结焦风险。工程实践中，多电厂应用分级燃烧、智能吹灰与在线监测等措施，取得了良好效果。针对煤质变化频繁的问题，还需建立动态运行调控机制，提升锅炉系统的适应能力，为今后燃煤机组的安全高效运行提供支撑。

【关键词】：锅炉结焦；燃烧控制；灰熔点；运行管理；预防措施

DOI:10.12417/2811-0536.25.10.004

引言

锅炉结焦是燃煤电厂运行中常见的技术难题，直接影响设备安全性与运行效率。随着煤质波动频繁、环保要求趋严，传统运行方式已难以满足复杂工况下的防控需求。结焦过程涉及燃料特性、燃烧状态及受热面条件等多个环节，成因复杂且难以根除。近年来，通过优化燃烧控制、改进设备配置与引入智能监测系统，结焦防控水平有所提升。但面对多样化的煤质变化和高负荷运行要求，仍需探索更具适应性的运行策略。在此背景下，深入分析结焦成因并提出针对性预防路径，对保障锅炉长期稳定运行具有重要意义。

1 燃料特性对锅炉结焦趋势的影响机制

燃料特性是影响锅炉结焦行为的根本因素之一，其化学组成、灰分性质以及燃烧反应特性直接决定了炉膛内结焦的发生概率与发展趋势。煤种的挥发分含量、固定碳比例、灰熔点温度及灰成分中的碱酸比等因素均在不同程度上调控着燃烧过程中灰颗粒的状态变化与沉积倾向。高挥发分煤种在燃烧初期释放大气可燃物，易导致火焰中心前移，局部区域热负荷集中，从而提升结焦风险；而低挥发分煤种则因着火困难、燃烧不稳定，容易造成未燃碳堆积，加剧飞灰中未燃物含量，间接促进结焦过程。

灰熔点作为判断结焦倾向的重要指标，其高低直接影响灰渣在高温区域是否发生软化、熔融并最终黏附于水冷壁或炉膛受热面。灰分中氧化铁、氧化钙、氧化钠等碱性氧化物含量较高时，会显著降低灰熔点，增强灰渣的黏结性，进而促进结渣层的形成与扩展。煤中硫含量的变化也通过影响灰渣的化学活性和燃烧气氛，进一步调控结焦过程的发展方向。

煤粉细度不均匀或粒径分布不合理，也会造成局

部燃烧不完全，形成还原性气氛，促使灰中金属元素还原析出，增强灰渣的黏附能力。燃料配比的稳定性同样对结焦趋势具有重要影响。在多煤种混烧条件下，不同煤质之间灰成分差异较大，混合燃烧后可能生成新的低熔点复合物，改变原有灰渣的物理化学性质，诱发更为复杂的结焦行为。燃料特性不仅是锅炉设计阶段需重点考虑的因素，也是运行过程中必须动态监控的关键参数。通过对燃料特性的系统分析，有助于从源头识别结焦风险，为后续燃烧控制策略的制定提供理论依据和技术支撑。

2 燃烧控制参数失衡引发的结焦风险

燃烧控制参数是决定锅炉运行稳定性和燃烧效率的关键变量，其配置是否合理直接影响炉膛内部温度场分布、空气动力学结构以及灰渣的形成与沉积行为。当这些参数出现失衡时，极易在局部区域形成高温、还原性气氛，从而诱发或加剧锅炉结焦现象。炉膛出口温度过高是燃烧控制失衡的一个典型表现，通常由于过量空气系数偏低或二次风配比不当所致。在这种情况下，燃料燃烧释放的热量未能被充分带走，导致火焰中心上移，炉膛上部区域温度显著升高，超过灰渣软化温度后，灰粒熔融并黏附于受热面，逐步形成致密的结渣层。

一次风速不足会导致煤粉着火延迟，延长燃烧区长度，使得未燃尽颗粒进入炉膛中上部继续燃烧，进一步提高该区域的局部热负荷，增加结焦发生的概率。二次风与三次风的配比失调也会破坏炉内空气动力学结构，造成燃烧区域氧气分布不均，形成局部缺氧环境。这种环境下，灰分中的金属氧化物易被还原为低熔点的金属单质或低价态化合物，增强灰渣的黏结能力，促进结渣过程的持续发展。送风温度不稳定或风量波动频繁，还会引起燃烧状态的周期性变化，使炉

内温度场呈现非稳态特征,不利于灰渣的均匀排放,反而有利于其在受热面上的附着与积累。燃烧器布置方式及倾角调节不合理也是影响燃烧控制参数平衡的重要因素。

燃烧器角度偏转过大可导致火焰直接冲刷水冷壁,使局部区域长期处于高温状态,加速灰渣熔融沉积;喷口堵塞或磨损则改变气流组织形态,降低燃烧效率,形成局部富燃料区,助长结焦趋势。低负荷运行时,锅炉热力与空气动力学特性变化显著,整体温度下降,火焰传播减缓,燃烧区域收缩,易造成局部燃料集中或空气供给不均。若未根据负荷需求调整燃烧器投运数量与配风比例,燃烧过程将偏离设计工况,产生局部缺氧或燃烧不充分区域,加剧燃烧不稳定性,和局部高温区的形成,促进灰渣熔融沉积。

3 基于运行调整的结焦抑制策略设计

在锅炉实际运行过程中,燃烧状态与炉内热力环境受到多种操作参数的共同影响,因此通过优化运行策略来抑制结焦现象成为一种高效且可实施的技术路径。该类策略主要围绕燃烧控制、风量配比、负荷调节及清焦管理等环节展开,旨在通过对关键运行变量的动态调控,降低炉膛局部高温和灰渣黏附倾向,从而实现对结焦过程的有效抑制。合理调整燃烧空气配比是运行控制中防止结焦的核心手段之一。通过提高过量空气系数,可以在一定程度上增强炉内氧化性气氛,抑制还原性区域的形成,减少低熔点金属成分的析出,从而削弱灰渣的黏结能力。优化一、二次风比例有助于改善煤粉着火条件,使火焰分布更加均匀,避免局部热负荷过高所引发的灰粒熔融沉积问题。特别是在燃用高灰熔点煤种时,适当增加二次风量并提前投入三次风,可以有效延长火焰行程,分散燃烧热释放,减缓结焦趋势的发展。

炉膛温度场的稳定性也是运行调整中的重点控制目标。通过调节燃烧器倾角或投运方式,可以改变火焰中心位置,避免火焰直接冲刷水冷壁面,降低受热面附近局部超温的风险。在不同负荷条件下,应根据燃烧特性动态调整燃烧器组合与配风模式,确保燃烧区域氧量分布均衡,维持炉内温度梯度处于合理范围,从而减少灰渣在受热面上的沉积概率。煤粉细度与给粉均匀性对结焦行为具有显著影响,因此在运行中应加强对制粉系统的监控。保持煤粉粒径在设计范围内,有助于提升燃烧效率,减少未燃碳残留,从而降低飞灰中可燃物含量,减轻其对灰渣熔融特性的不利影响。稳定给粉速率并避免煤粉浓度波动过大,可防止局部燃料富集现象的发生,减少因燃烧不均导致的局部高

温区,进一步遏制结焦过程。

定期清焦与在线监测技术的应用构成了运行调整策略的重要组成部分。在锅炉连续运行过程中,即便采取了多项预防措施,仍可能在受热面形成一定厚度的积渣层。必须结合吹灰系统定时清理,防止结渣累积至影响传热效率的程度。利用红外测温、图像识别等手段实时监测炉内燃烧状态与结焦情况,有助于及时发现异常并调整运行参数,提升整体控制精度。运行人员的操作经验与判断能力也直接影响到结焦防控效果。建立标准化运行规程,并结合历史数据与模型预测进行辅助决策,有助于提升运行调整的科学性和前瞻性。通过将运行参数设定与结焦风险评估相结合,形成闭环反馈机制,可在复杂工况下实现对锅炉结焦趋势的动态干预,保障设备长期安全稳定运行。

4 电厂结焦防控的工程实践验证

在锅炉运行管理中,结焦防控策略的有效性最终需通过实际工程应用加以验证。通过对多个燃煤电厂实施燃烧优化调整、设备改造及运行参数动态控制等综合措施,系统评估其对结焦趋势的抑制效果,能够为后续技术推广提供可靠依据。炉内燃烧状态的实时调控是工程实践中控制结焦的重要手段。部分电厂通过引入分级燃烧技术,合理分配一、二次风比例,使燃烧过程分阶段进行,有效降低火焰中心温度并减少氮氧化物生成,同时避免局部高温区引发灰渣熔融沉积问题。该方法在多台 300MW 及以上机组中得到应用,结果表明受热面结渣厚度明显减小,锅炉排烟温度下降,整体热效率有所提升。

空气动力场组织的优化也是改善结焦状况的关键环节。一些电厂采用可调式旋流燃烧器替代传统固定结构,增强气流扰动与混合强度,促进煤粉充分燃尽,减少未燃碳在飞灰中的残留比例。结合燃烧器倾角调节功能,灵活控制火焰形态,防止高温烟气直接冲刷水冷壁,从而降低水冷壁区域结渣速率。运行数据显示,经过燃烧器改造后,炉膛出口温度分布趋于均匀,结焦清理周期延长,检修频率显著降低。吹灰系统的高效运行对于维持受热面清洁至关重要。多数电厂已逐步将传统蒸汽吹灰方式替换为声波或激波吹灰技术,提高清焦效率并减少对受热面的机械冲击。部分单位还引入智能吹灰控制系统,根据炉膛温度、烟气成分和结焦监测数据自动触发清灰动作,实现按需吹灰,不仅提升了清焦效果,也降低了能耗与维护成本。

在运行管理方面,电厂普遍加强了对入炉煤质的监控力度,建立燃料特性数据库,并结合历史结焦记

录制定煤种掺配方案。通过优选灰熔点较高、碱金属含量较低的煤种组合,有效缓解了混烧过程中可能出现的低熔点复合灰渣问题。运行人员依据负荷变化动态调整燃烧参数,形成标准化操作流程,提升了应对复杂工况的能力。部分电厂引入在线结焦监测系统,利用红外成像、图像识别与热力模型分析等手段,实现对炉膛内部结焦程度的连续评估。该类系统可实时反馈受热面温度异常区域信息,辅助运行人员及时调整风量、配比或投运吹灰装置,达到提前干预、预防严重结焦的目的。监测数据积累也为后期数据分析与策略优化提供了基础支撑。

5 复杂煤质变化下的运行适应性优化路径

随着燃煤电厂面临燃料来源多样化和煤质波动频繁的现实挑战,锅炉运行系统必须具备更高的灵活性与适应性,以应对因煤质变化所带来的结焦风险。在这一背景下,构建基于煤质特性的动态运行调控机制,成为提升锅炉运行稳定性的关键方向。煤质变化主要体现在挥发分、灰分、硫含量、发热量及灰熔点等多个参数的波动,这些因素直接影响燃烧过程的稳定性与灰渣行为的可控性。尤其当入炉煤灰熔点降低或碱金属含量升高时,极易在炉内高温区域形成低熔点复合物,增强灰渣黏附倾向,导致水冷壁及对流受热面快速积渣。因此,在煤质频繁变动的情况下,传统固定模式的燃烧控制策略已难以满足实际需求,亟需建立具有前瞻性和响应能力的运行调整体系。

为提升运行系统的适应能力,电厂应加强对入炉煤质的实时监测与分析,依托在线煤质检测装置获取关键参数,并结合历史运行数据构建煤种特性数据库。通过将煤质信息与锅炉燃烧模型相耦合,可实现对燃烧状态的预测与预警,提前识别潜在的结焦风险,为

运行调整提供决策支持。在此基础上,推动燃烧控制策略的动态化升级是适应煤质变化的核心手段之一。采用自适应燃烧控制系统,依据煤质参数自动调节一次风率、二次风配比、燃烧器投运组合及火焰中心高度,使燃烧过程始终处于最佳匹配状态。该类系统能够有效缓解因煤质突变导致的燃烧不稳定问题,避免局部高温区的形成,从而抑制灰渣熔融沉积趋势。

运行人员的操作规范也需随之调整,强化对煤质变化的响应意识与操作技能。建立基于煤质分类的标准化运行指导手册,细化不同煤种条件下的参数设定范围与调整原则,有助于提高运行干预的精准度。借助人工智能算法与大数据分析技术,开发运行辅助决策平台,可进一步提升运行调整的科学性与实时性。在设备层面,推进燃烧器结构优化与空气分级系统的智能化改造,也是增强运行适应性的有效途径。新型可调式旋流燃烧器可根据煤质变化灵活调整气流组织形式,增强煤粉与空气的混合效率,确保燃烧充分且均匀。配合智能风量控制系统,实现对炉内氧量分布的精细化管理,减少还原性气氛的生成,从而降低结焦发生的概率。

6 结语

锅炉结焦问题受燃料特性、燃烧控制及运行管理等多重因素影响,其防控需从机理分析出发,结合工程实践不断优化运行策略。通过燃烧参数调整、设备升级与智能化管理手段,可有效抑制结焦趋势,提升锅炉运行的安全性与经济性。面对煤质波动日益频繁的现实,构建具备动态响应能力的适应性调控体系成为关键方向。未来应进一步融合智能监测与自动控制技术,实现对结焦风险的实时识别与精准干预,推动燃煤电厂向高效清洁运行模式发展。

参考文献:

- [1] 陈志远.燃煤锅炉结渣机理与防治技术研究进展[J].热能动力工程,2021,36(4):12-18.
- [2] 刘建国,高志强.燃烧方式对锅炉结焦特性影响的实验研究[J].动力工程学报,2020,40(3):201-207.
- [3] 孙立群.多煤种混烧条件下锅炉结焦特性分析[J].电站系统工程,2022,38(2):45-49.
- [4] 赵振中.锅炉运行参数优化对防止结焦的作用探讨[J].中国电力,2019,52(7):88-93.
- [5] 黄文涛.火电厂锅炉结焦监测与预警系统研究现状[J].热力发电,2023,52(1):33-39.