

基于燃煤火电厂锅炉结焦问题与解决措施分析

杨永胜

陕西煤业化工集团神木电化发展有限公司 陕西 神木 719316

摘要：燃煤火电厂锅炉结焦问题严重影响机组运行效率与安全性，其成因涉及煤质特性、锅炉设计与运行参数、环境因素等多方面。基于此，本文系统分析了结焦形成机理，提出针对性解决措施，通过优化煤质选择与混配、调整炉膛温度场与气流分布、控制过量空气系数及配风均匀性、采用新型防结焦材料与技术，并结合智能监测与预警系统实现动态防控，旨在提升锅炉热效率与运行稳定性，为燃煤火电厂安全经济运行提供理论支撑与技术参考。

关键词：燃煤火电厂；锅炉结焦；问题；解决措施

引言

燃煤火电厂作为我国能源结构的核心组成部分，其锅炉运行效率直接影响电力供应稳定性与能源利用经济性。然而，锅炉结焦问题长期困扰行业，成为制约机组安全高效运行的关键因素。结焦不仅导致受热面传热效率下降、排烟温度升高，增加能耗与污染物排放，还可能引发爆管、炉膛出口堵塞等严重事故，威胁机组整体安全性。因此，深入对燃煤火电厂锅炉结焦问题的研究具有重要的现实意义。

1 燃煤火电厂锅炉结焦机理分析

1.1 锅炉结焦的基本概念

锅炉结焦是燃煤火电厂运行过程中常见且影响重大的问题之一，其本质是煤粉在锅炉内燃烧时，煤中的灰分在高温环境下发生熔融、粘结，并逐渐在锅炉受热面上堆积硬化形成硬质焦块的过程。这一过程涉及复杂的物理化学变化，从煤粉进入炉膛开始，随着温度升高，灰分中的矿物质开始软化、熔融，在气流和重力作用下，部分熔融态灰粒会附着在炉膛水冷壁、过热器、再热器等受热面表面^[1]。若这些灰粒不能及时被气流带走或通过其他方式清除，就会不断积聚，与周围已附着的灰粒相互融合，最终形成结构紧密的焦块，即结焦现象。而锅炉结焦依据结焦部位和形成原因可大致分为两类。一类是炉膛结焦，主要发生在炉膛内水冷壁附近区域，多因炉内温度分布不均、局部区域温度过高，导致灰分过早熔融并粘附在水冷壁上，随着时间推移不断增厚扩展。另一类是尾部受热面结焦，常见于过热器、再热器和省煤器等部位，通常是由于烟气携带的未完全燃烧的煤粉颗粒或熔融态灰粒，在流经这些受热面时，因流速降低、温度变化等因素，使得灰粒沉积并逐渐结焦。

1.2 结焦的物理化学过程

结焦是煤粉在锅炉内燃烧时，其灰分经历复杂物理

化学变化后粘附于受热面的现象。（1）煤灰成分与熔融特性是结焦的基础，灰分中碱性氧化物如氧化钙、氧化铁含量较高时，会显著降低灰熔点，使灰分在相对较低温度下呈现熔融或半熔融状态。这种低熔点特性使灰粒在高温环境下更易软化变形，为结焦创造了物质条件。（2）炉内温度场与气流场分布对结焦过程具有决定性影响，炉膛中心火焰温度较高，灰粒在此区域被加热至熔融状态后，随烟气向炉膛四周扩散。在扩散过程中，灰粒逐渐冷却，但若炉膛结构或燃烧组织不当，导致局部区域温度过高或气流速度过低，会使灰粒未能充分冷却便接触受热面。此时，熔融态灰粒因表面张力作用粘附在管壁上，形成初始结焦层。（3）灰粒在受热面上的沉积与熔融是结焦发展的关键环节，初始沉积层主要由挥发性灰分冷凝或微小颗粒热迁移形成，其结构疏松但具有绝热性，可使管壁外表面温度升高。随着温度升高，后续撞击的灰粒若仍保持熔融或半熔融状态，会与初始沉积层发生粘结，使焦块厚度不断增加。同时，已形成的焦块会改变局部气流场，导致更多灰粒在此区域沉积，形成恶性循环。在持续高温作用下，焦块逐渐硬化，形成结构致密的结焦体，严重阻碍热量传递。整个结焦过程涉及煤灰熔融、气流输运、热迁移、粘附凝固等多个物理化学环节，各环节相互关联且受锅炉设计参数、运行工况及煤质特性共同影响。

1.3 结焦的影响因素

（1）煤质特性是影响结焦的内在因素，灰分含量高意味着煤中不可燃矿物质增多，燃烧后产生的灰渣量随之增大，增加了结焦的物质基础。灰分中碱性氧化物与酸性氧化物的比例失衡，会显著改变灰熔点，若碱性氧化物占比过高，灰熔点降低，灰粒在燃烧过程中更易熔融粘结^[2]。硫分在燃烧时生成二氧化硫及三氧化硫，这些气体与水蒸气结合形成酸性物质，不仅会腐蚀受热面，

还会与灰分中的碱性成分发生反应,生成低熔点的硫酸盐,加剧结焦倾向。(2)挥发分含量影响煤粉的燃烧速度和火焰长度,挥发分过高会使燃烧初期火焰集中,局部温度过高,促使灰粒过早熔融;挥发分过低则会导致燃烧不完全,未燃尽的碳粒随烟气流动,在受热面附近继续燃烧,使局部温度升高,同样为结焦创造条件。(3)锅炉设计与运行参数对结焦的影响不容忽视,炉膛结构不合理,如高度不足、宽度过大或受热面布置密集,会导致烟气流动不畅,局部区域出现涡流或死角,使灰粒在此沉积并熔融结焦。(4)燃烧方式的选择直接影响炉内温度场和气流场的分布,采用四角切圆燃烧时,若切圆直径过大或气流旋转强度不足,会使火焰偏斜,造成炉膛出口受热面结焦;前后墙对冲燃烧时,若火焰中心偏离,也会导致局部过热结焦。

2 燃煤火电厂锅炉结焦解决措施研究

2.1 煤质优化与选择

(1)选用低灰分、低硫分煤种是直接有效的手段,低灰分煤在燃烧过程中产生的灰渣量较少,从源头上减少了结焦所需的物质基础。灰分含量降低意味着灰粒数量减少,在炉内高温环境下,灰粒相互碰撞粘结形成焦块的可能性随之降低。同时,低灰分煤燃烧时产生的飞灰浓度降低,烟气携带的灰粒对受热面的冲刷和沉积作用减弱,有助于保持受热面的清洁。低硫分煤的燃烧能减少二氧化硫及三氧化硫的生成,避免这些气体与灰分中的碱性成分反应生成低熔点的硫酸盐,从而降低灰熔点下降导致的结焦风险。此外,低硫煤燃烧产生的酸性气体减少,对锅炉受热面的腐蚀作用减轻,有利于延长设备使用寿命,间接减少因设备损坏引发的结焦问题。(2)煤种混配与预处理技术是进一步优化煤质的重要方法,不同煤种的灰分、硫分、挥发分等成分存在差异,通过科学合理的混配,可以将多种煤的优势互补,使混合后的煤质更符合锅炉燃烧要求^[1]。将高灰分煤与低灰分煤按一定比例混合,既能利用高灰分煤的价格优势,又能控制整体灰分含量在合理范围内。对于硫分含量差异较大的煤种,混配可平衡硫分,避免局部区域硫分过高导致结焦加剧。(3)预处理技术包括洗选、破碎、筛分等环节,洗选能去除煤中的部分矿物质和杂质,降低灰分和硫分含量,提高煤的纯度。破碎和筛分可使煤的粒度均匀,保证燃烧过程中煤粉与空气充分混合,提高燃烧效率,减少因燃烧不完全产生的未燃尽碳粒,这些碳粒在受热面附近继续燃烧会导致局部温度升高,引发结焦,因此均匀的粒度有助于维持炉内温度场的稳定,降低结焦风险。通过煤质优化与选择,可为锅炉稳定高效

运行创造良好条件,有效减少结焦问题的发生。

2.2 锅炉设计与运行优化

锅炉设计与运行优化是解决燃煤火电厂锅炉结焦问题的重要途径,其中优化炉膛结构、改善气流分布是基础性工作。(1)合理的炉膛结构应保证烟气在炉内流动顺畅,避免出现涡流或死角。通过调整炉膛的几何尺寸,如高度、宽度和深度,使烟气能够均匀地流经各个受热面,减少局部区域的灰粒沉积。此外,优化炉膛内受热面的布置,合理控制水冷壁、过热器和再热器等部件的间距和角度,既能保证足够的换热面积,又能防止灰粒在特定位置过度积聚。改善气流分布还需关注燃烧器的布置和设计,采用合适的燃烧器角度和喷口形状,使煤粉气流在炉膛内形成良好的旋转动量,增强火焰的充满度,促进煤粉与空气的充分混合,确保燃烧均匀,避免局部高温区域的出现,从而降低灰粒熔融粘结的可能性。(2)调整燃烧方式、控制燃烧温度是防止结焦的关键环节^[4]。不同的燃烧方式对炉内温度场和气流场的影响各异,应根据煤质特性和锅炉结构选择适宜的燃烧方式。通过合理组织燃烧过程,控制火焰中心位置,避免火焰偏斜或冲刷受热面,减少局部过热。并且,严格控制燃烧温度,使其处于灰分熔点以下的合适范围,防止灰粒过早熔融。(3)优化过量空气系数、减少局部缺氧对于抑制结焦至关重要。过量空气系数过小,氧气供应不足,燃烧不完全,会产生大量还原性气体,使灰熔点降低,同时未燃尽的碳粒在受热面附近继续燃烧,导致局部温度升高,加剧结焦倾向。过量空气系数过大,又会降低炉内温度,增加排烟热损失,还可能使烟气流速过快,对受热面造成冲刷磨损。因此,需根据锅炉实际运行情况,精确调整过量空气系数,保证燃烧过程中氧气供应充足且均匀,避免局部区域出现缺氧或富氧状态,维持炉内良好的燃烧环境,有效减少结焦问题的发生。

2.3 新型防结焦技术

(1)受热面涂层技术通过在锅炉受热面喷涂特殊功能涂层形成致密保护层,有效阻止熔融灰渣与金属基体直接接触。这类涂层通常由高导热陶瓷材料、耐高温粘结剂及抗腐蚀添加剂复合而成,既能保持金属管壁原有导热性能,又可降低灰渣与表面的结合强度,使焦渣在重力或气流作用下自然脱落。部分涂层还具备自润滑特性,进一步减少灰渣附着可能性,同时耐高温氧化和抗粉尘冲刷性能可延长涂层使用寿命,降低锅炉停炉检修频率。(2)声波吹灰技术利用高强度声波在炉膛内形成周期性压力波动,使沉积在受热面的灰渣颗粒产生共振并逐渐松脱。声波发生装置通过压缩空气或蒸汽驱动,产

生频率可调的机械振动波,其能量足以破坏灰渣层与管壁间的分子结合力,同时避免对金属表面造成机械损伤。该技术特别适用于处理粘结性灰渣,通过持续声场作用可防止灰渣层增厚,且设备结构简单、维护成本低,能与蒸汽吹灰形成互补。(3)激光除焦技术通过高能激光束瞬间加热焦渣表面,使其局部汽化或熔融后脱离受热面。激光聚焦系统可精准定位结焦区域,通过控制光斑尺寸和能量密度实现非接触式清理,避免对管壁造成热应力损伤。该技术适用于处理顽固焦块,尤其对高温过热器、再热器等部位的板结焦层清理效果显著,且操作灵活度高,可配合锅炉在线监测系统实现定点清除。(4)其他新型防结焦技术包括磁控防焦技术,通过在炉膛内建立特定磁场抑制灰渣中铁磁性物质的聚集;复合添加剂技术,向燃料中添加特殊化学物质改变灰渣熔融特性或提高其流动性。

2.4 智能监测与预警系统

(1)智能监测与预警系统通过集成多维度数据采集与分析技术,实现对锅炉结焦问题的动态感知与主动防控。锅炉运行参数在线监测作为系统基础,利用高精度传感器网络实时采集炉膛温度、烟气成分、受热面壁温、蒸汽压力等关键参数,结合分布式控制系统实现数据的高频传输与存储。这些参数经预处理后形成反映锅炉燃烧状态的特征向量,为后续分析提供数据支撑。监测系统采用边缘计算与云计算协同架构,在确保实时性的同时提升数据处理能力,可对异常参数进行快速识别并触发初步预警。(2)结焦风险评估与预警模型构建于机器学习框架之上,通过历史数据训练与实时特征融合实现风险量化。模型输入涵盖煤质特性参数、运行工况数据及环境条件,利用深度神经网络捕捉参数间的非线性关系,结合迁移学习技术适应不同锅炉型号的差异化特征^[5]。输出层采用多级风险分级机制,根据结焦倾向程度划分预警等级,并生成包含关键风险因子的可视化报告。(3)智能决策支持系统作为预警体系的终端,将风

险评估结果转化为可执行的运维策略。系统内置专家知识库与优化算法,可根据当前风险等级自动推荐调整方案,包括燃烧配风优化、吹灰频率调整、负荷分配优化等。对于高风险工况,系统启动应急预案生成模块,通过多目标优化算法在保证安全的前提下最小化经济损失。决策支持模块还具备人机交互功能,允许运维人员根据经验修正系统建议。整个系统通过数字孪生技术实现虚拟映射,可在不影响实际运行的情况下模拟不同策略的效果,为决策提供科学依据。智能监测与预警系统的应用使锅炉结焦防控从被动处理转向主动预防,显著提升了火电厂运行的安全性与经济性。

结语

综上所述,燃煤火电厂锅炉结焦问题具有成因复杂、危害广泛的特点,其治理需贯穿燃料选择、锅炉设计、运行管理及技术创新全链条。未来,随着“双碳”目标推进,燃煤火电厂需进一步探索低碳燃料替代与深度调峰技术,同时加强结焦机理基础研究,推动防控技术向智能化、精准化方向发展。通过技术升级与管理优化协同发力,结焦问题有望得到根本性解决,为保障能源安全与行业可持续发展奠定坚实基础。

参考文献:

- [1]李建伟.660 MW四角切圆燃烧超超临界锅炉结焦原因分析及对策[J].电站系统工程,2025,41(03):15-18.
- [2]袁欣欣.生物质掺烧比例优化及其对锅炉结焦特性的影响研究[J].高科技与产业化,2024,30(10):67-68.
- [3]王学成,程俊杰,陶鑫,等.基于C# WinForm的超临界锅炉结焦监测及智能吹扫系统设计[J].工业控制计算机,2025,38(06):15-16.
- [4]马骏,牛原渊.基于数字技术的火电厂锅炉节能降耗[J].数字技术与应用,2025,43(03):117-119.
- [5]赵士强.火电厂锅炉运行过程中的节能方法[J].科技资讯,2024,22(15):173-175.