

# 火电厂锅炉结焦原因分析与预防性运维策略优化研究

张兆坤 高仝瞰 魏 晋

华能平凉发电有限责任公司 甘肃 平凉 744000

**【摘 要】**：锅炉结焦是制约火电厂稳定运行与热效率提升的关键问题，其形成机理涉及燃料特性、燃烧工况及炉膛结构等多重因素。若未及时应对，将导致传热恶化、运行不稳甚至设备损伤。围绕结焦成因进行系统性识别，有助于制定科学的预防性运维策略。通过构建基于运行参数、结焦监测及风险评估的综合管理机制，能够提升运维效率，延长设备使用寿命，助力火电机组高效、低碳运行。

**【关键词】**：锅炉结焦；火电厂；预防性运维；运行参数优化；风险控制

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.072

## 引言

锅炉结焦问题长期困扰火电厂的安全高效运行，其表现为炉膛内壁、受热面等部位因高温熔融灰渣黏附而形成硬结层，造成换热恶化与热效率下降。结焦一旦发展严重，不仅增加清焦成本，更可能诱发炉管爆破等安全事故。近年来，随着煤质变化频繁、负荷调节频繁，结焦风险进一步加剧。面对运行环境的复杂性，构建具前瞻性的运维机制迫在眉睫。科学识别结焦成因并对症下药，是提升锅炉系统运行可靠性和经济性的有效路径。

## 1 火电厂锅炉常见结焦类型及其形成过程分析

### 1.1 高温区灰渣熔融对受热面的影响机制

在锅炉运行过程中，高温燃烧区内的灰渣在高温下会发生熔融反应。当灰渣熔点较低或炉膛温度过高时，灰粒熔融后在重力或气流作用下沉积于受热面，形成致密的玻璃态熔渣层。此类结焦不仅附着力强，而且极难通过常规吹灰手段清除。灰渣与受热面长期接触后将严重降低换热效率，进而导致局部金属过热，加剧炉管损伤风险。特别是在炉膛燃尽区或水平烟道段，结焦形成速度较快，与局部气流组织紊乱、燃料挥发分含量偏高密切相关。某些矿物质如钾、钠在高温下易生成低熔点化合物，也是促使灰渣粘附的关键因素。

### 1.2 煤质变化对炉膛燃烧稳定性的干扰作用

近年来，火电厂普遍面临燃煤多样化与掺烧趋势显著的问题。不同煤种之间挥发分、灰分及灰熔点差异明显，若未进行煤质适配与燃烧优化，则炉膛燃烧区的温度场将发生显著波动。一旦火焰中心偏移、局部过热或不完全燃烧现象频发，将直接导致炉膛结焦几率显著上升。高灰分煤燃烧后易产生大量含硅、铝等高粘结力矿物质成分，加剧灰粒黏附。部分低挥发分煤种燃点高、火焰稳定性差，在负荷波动时更容易形成高温滞留区，进而为结焦提供物理环境。煤中含硫、氯元素的变化

亦可能影响灰渣化学特性，使熔渣流动性发生变化，诱发结焦加重。

### 1.3 运行参数波动导致结焦加剧的典型模式

锅炉运行过程中，一旦主燃料风比失衡、氧量调节不当、负荷频繁波动等问题发生，将造成炉内气流组织混乱及局部温度失控。当锅炉负荷快速上升或下降时，燃烧调整不及时将引起火焰偏斜或短距离回燃，形成高温滞留区域，导致部分灰粒熔化后快速粘附在炉膛壁面。风速不足将削弱灰粒悬浮力，提升其沉积概率；过量空气系数偏高或偏低亦会影响燃烧效率与灰分熔融状态，进而影响结焦发展。自动控制系统响应延迟或参数设置不合理，也可能使燃烧工况持续处于结焦敏感区域，形成不易察觉的结焦隐患链条，影响锅炉长期稳定运行。

## 2 结焦行为对锅炉运行性能与设备寿命的危害解析

### 2.1 传热恶化与燃料消耗增加的直接表现

锅炉结焦层具有明显的隔热特性，覆盖在受热面后显著降低了金属壁面向工质传递热量的能力。为维持额定蒸汽参数，需提高燃料消耗以弥补传热效率下降所造成的热损失，从而造成能耗增加与运行成本上升。结焦层越厚，热阻越大，锅炉燃烧系统需付出更多能量维持传热过程，导致锅炉效率整体下降。受热面表面温度升高易使金属材料长期处于应力状态，进一步降低其疲劳寿命。在结焦严重部位，流动阻力增加还会导致局部烟气滞留，影响整个换热系统的气流分布，恶性循环加剧热交换恶化现象，成为效率衰减的关键因素。

### 2.2 结焦诱发炉管爆破与锅炉停运的风险路径

在锅炉运行中，结焦导致的局部高温及热交换失衡将使管壁温度异常升高，诱发金属组织结构退化，进而加快炉管氧化腐蚀与疲劳裂纹的产生。当管壁强度降至临界点，极易发生爆管事故，造成蒸汽泄漏、设备损毁乃至人身伤害。此类故障通

常具有突发性强、恢复周期长的特点,一旦出现需全炉停运处理,直接影响电厂发电计划和运行经济性。爆管频发区域常与结焦高发区高度重合,尤其是再热器、过热器等高温受热面,其热负荷本就集中,一旦叠加结焦效应,风险成倍上升。结焦已成为锅炉运行过程中不可忽视的安全隐患源。

### 2.3 长期积焦对锅炉运行调节能力的削弱效应

锅炉系统在实际运行中需频繁根据电网负荷进行灵活调节,结焦一旦形成,将严重影响系统的动态响应能力。由于结焦引起的传热滞后性,锅炉主汽温、再热温调整响应慢,调节过程需更多时间和燃料补偿,限制了机组调峰范围和调节效率。部分控制逻辑将依赖于受热面换热情况反馈进行燃烧调控,若反馈信号受结焦干扰失真,将导致控制系统误判,进一步引发运行波动。长期积焦还可能改变炉膛内部气流通道结构,使局部燃烧状态难以恢复至设计工况,对调节性能构成长期干扰,降低设备运行灵活性与稳定性。

## 3 锅炉结焦预警机制与智能监测技术的系统构建

### 3.1 关键监测点布设与数据采集方式设计

建立科学的锅炉结焦预警机制,需合理布设监测点并完善参数采集系统。常见监测对象包括炉膛温度分布、排烟温度偏差、主汽温波动及吹灰频率等关键参数,分布点位应兼顾结焦易发区域与换热性能代表性区域。红外热成像、激光测温及声波检测等技术被广泛用于结焦检测,其数据需与实时运行数据融合分析以获取趋势预警信号。采集系统应具备高频率、抗干扰能力强与数据校准能力,配合边缘计算装置,可实现现场初步数据分析与上传。数据完整性和实时性直接关系到预警系统的可靠性,是智能监测机制的基础支撑环节。

### 3.2 基于运行参数的结焦趋势智能诊断模型

构建结焦趋势识别模型的核心在于充分挖掘和利用锅炉系统历史运行大数据,通过多源数据融合实现对结焦演变规律的深度学习。所采集的数据不仅包括炉膛温度场空间分布、锅炉负荷实时波动、煤质挥发分和灰熔点等理化指标,还应整合空气系数、燃料风比变化路径及吹灰记录等动态参数。基于这些特征变量,利用支持向量机、随机森林、卷积神经网络等多种算法构建分类与回归模型,形成输入变量与结焦状态之间的非线性映射关系。模型训练过程中应持续优化权重分配,提高对微弱异常趋势的敏感度和鲁棒性。模型需具备持续学习与实时迭代的能力,能在锅炉运行参数发生变化时自动适应,提升预测精度。设定多级风险等级报警机制后,系统可在结焦初期发出干预建议,推动运维策略由传统滞后响应向预测预警、主动干预的方向转变,实现运行状态的智能调控。

### 3.3 远程监控平台在异常识别中的实际应用

现代火电厂普遍部署基于工业互联网的远程监控平台,实现对锅炉运行数据的集中采集与可视化呈现。通过统一数据接口接入智能传感器与现场 PLC 设备,监控平台可实现对结焦趋势图、风险等级分布图及历史清焦记录的动态显示。结合 AI 图像识别与大数据分析模块,平台可识别烟温分布异常、吹灰无效反馈及热效率下滑等结焦征兆。系统还可集成运维管理模块,将预警结果直接反馈至检修计划编制系统,形成闭环管理流程。远程平台的运行不依赖现场人员常驻,具备更高的实时性和智能化水平,是构建高效预警体系的重要支撑工具。

## 4 预防性运维体系中多元策略的协同优化路径探索

### 4.1 基于煤质适应性的燃烧控制策略优化

在多煤种掺烧背景下,锅炉燃烧控制系统需具备动态适配不同煤质特性的能力。煤种变化直接影响燃烧速度、挥发分释放时机及灰渣熔熔点,若控制策略不及时调整,将加剧结焦风险。优化过程中可引入基于燃料性质参数的自适应燃烧控制逻辑,通过在线煤质检测装置采集灰熔点、挥发分等关键指标,调整配风结构、火焰中心位置及燃烧强度。配合炉膛三维温度分布监测,实现对燃烧区域温度场的精准调控。风煤比控制精度的提升,能够有效规避局部高温、火焰偏斜等诱发结焦的燃烧异常状态,是实施预防性运维的关键环节。

### 4.2 检修计划与结焦发展规律的协同编排思路

传统定期检修机制以时间周期为主导,忽略了锅炉各区域结焦发展速度的差异性,往往无法实现精准维护,导致部分区域频繁检修、资源浪费,而重点部位却因结焦积聚未能及时处理,引发运行隐患。为解决这一问题,应构建与结焦实际演化过程相匹配的动态检修体系。该体系应基于炉膛各监测点采集的温度分布、排烟温差、吹灰效果衰减程度及锅炉热效率变化曲线等多维数据,利用智能算法分析出不同区域的积焦趋势和临界状态,设定差异化的检修阈值。一旦某一区域达到预设风险等级,系统可自动推送清焦或检修指令,实现按需维护。此外,结合设备运行时长与煤质变化信息,按模块分段制定检修计划,有效缓解人员与物资的调配压力。通过引入评估模型进行检修收益分析与风险成本预判,还可进一步优化检修优先级排序,全面提升锅炉运维的科学性与响应性。

### 4.3 智能吹灰系统与人工干预的融合机制设计

在实际运行中,单一的智能吹灰系统难以完全覆盖所有受热面,存在盲区及执行滞后的问题。建立智能系统与人工干预融合的吹灰管理机制,是提升除焦效果的有效手段。智能吹灰系统应基于排烟温度梯度、结焦监测数据等动态参数,灵活调

整吹灰频率与强度，避免过度吹灰或频繁启动带来的能耗损失。而人工干预可用于特殊区域或极端状态下的定点清焦作业，特别是在自动化系统无法识别的部位起到补充作用。通过系统集成控制平台，实现人工吹灰任务的远程下发与执行记录归档，形成“自动+人工”互补的清焦操作网络，有效提升锅炉运行清洁度。

## 5 提升锅炉运维绩效的策略评估与管理机制完善思路

### 5.1 预防性维护执行效果的定量评估模型构建

在实施预防性运维过程中，亟需建立一套系统化的绩效评估模型，对各项策略的执行效果进行定量分析。评估模型可引入运行经济性指标、能效变化趋势、检修间隔延长幅度及故障频率下降情况等综合因子，通过构建多维指标体系反映不同策略对结焦问题的抑制效果。结合运行工况变化前后数据的对比分析，判定各项运维措施的实际收益，为下一周期的策略调整提供数据支持。评估体系还应具备可追溯性与可扩展性，可根据设备状态、负荷特性及燃料结构进行自定义权重调整，以实现高适配度的绩效考核管理。

### 5.2 运维人员技术培训与响应能力提升路径设计

面对锅炉系统运行复杂化与智能化趋势，运维人员的技能储备与响应效率成为运维质量的重要保障。为适应结焦问题防控的技术需求，有必要构建内容全面、结构科学的专项培训体系，培训内容应涵盖燃烧调节基础理论、锅炉系统动态响应逻辑、数据分析方法、异常信号识别能力及智能控制系统操作等

方面。采用虚拟仿真平台开展实训教学，可模拟典型结焦场景如高温偏区、吹灰无效、负荷突变等复杂情况，使学员在逼真环境中提升实际应对能力。同时，应配套设立值班响应流程与岗位协同机制，在突发状况中形成“发现—判断—处理—反馈”闭环响应链。定期组织典型案例复盘、问题原因剖析及经验分享交流，推动知识体系动态更新，形成一支具备前瞻意识、应变能力和技术融合能力的高素质运维队伍。

### 5.3 多部门协同下锅炉系统运行优化的管理机制建设

锅炉运维涉及运行、燃料、检修、设备管理等多个部门的协同配合，仅依靠单一职能部门难以实现全面的运行优化。构建跨部门协作机制，可设立运维协调小组，统一调度燃料投用策略、检修资源配置与运行参数优化任务。在信息系统中打通各部门数据接口，实现煤质变化信息、运行参数与设备状态的共享与联动。建立结焦风险共享评估平台，基于统一指标体系发布风险等级通告，推动决策统一、资源共享。管理制度层面应细化各环节职责，落实奖惩激励机制，提升协作效率与执行力，形成高效联动的锅炉运行管理闭环。

## 6 结语

本文围绕火电厂锅炉结焦问题展开分析，从结焦类型、形成机理、运行影响到智能监测与预防性运维策略进行了系统阐述。结合煤质适应性控制、清焦机制优化及绩效评估管理等多个维度，构建出一套协同高效的运维优化路径。通过建立智能化预警系统与跨部门联动机制，有助于全面提升锅炉系统的运行稳定性与经济性，为火电厂实现安全、高效、清洁运行提供了思路支撑与实践参考。

## 参考文献：

- [1] 黄志强,林嘉伟.基于智能诊断的锅炉结焦预测模型研究[J].热能动力工程,2022,37(5):38-45.
- [2] 吴海清,孙柏年.煤质变化对锅炉结焦行为的影响及控制对策[J].动力工程学报,2021,41(4):52-58.
- [3] 许婧文,周德昌.火电厂锅炉吹灰系统优化控制研究[J].电站系统工程,2023,39(1):44-49.
- [4] 陆建辉,陈佳颖.火电厂锅炉运行参数波动对受热面结焦影响分析[J].电力设备管理,2020,41(12):29-33.
- [5] 马倩楠,曹泽坤.火电机组预防性检修策略及绩效评估模型探讨[J].电力技术与环保,2023,39(2):76-81.