

# Research on the Mechanism of High-Temperature Corrosion of Boiler Heat Absorbing Surfaces and Protection Technologies

Bo Lian

Guoneng Hebei Dingshou Power Plant, Hebei, Dingzhou, 073000, China

## Abstract

The heating surfaces of boilers operate for long periods under high-temperature combustion environments and are easily affected by corrosive elements such as sulfur, chlorine, and sodium contained in fuel. This exposure leads to high-temperature corrosion, causing oxide scale spalling, wall thinning, and material failure, which severely threaten boiler safety and service life. The mechanisms of high-temperature corrosion mainly include oxidation, sulfidation, chlorination, and their interactions, all of which are closely related to fuel properties, combustion temperature, flue gas composition, and heating surface materials. This paper systematically analyzes the characteristics and mechanisms of high-temperature corrosion on boiler heating surfaces, explores the evolution of corrosion behavior and material resistance differences, and focuses on the application performance and improvement directions of protective technologies.

## Keywords

boiler heating surface; high-temperature corrosion; oxidation-sulfidation mechanism; protective technology; material modification

# 锅炉受热面高温腐蚀机理及防护技术研究

廉波

国能河北定州电厂, 中国 · 河北 定州 073000

## 摘 要

锅炉受热面在高温燃烧环境中长期运行, 易受到燃料中硫、氯、钠等腐蚀性元素的作用, 产生高温腐蚀现象, 导致金属表面氧化皮剥落、壁厚减薄和材料失效, 严重影响锅炉安全与寿命。高温腐蚀机理主要包括氧化、硫化、氯化及其交互作用, 其形成与燃料性质、燃烧温度、烟气组分及受热面材料密切相关。本文通过系统分析锅炉受热面高温腐蚀的机理特征, 探讨腐蚀行为的演化规律及不同材料的耐蚀差异, 重点研究防护技术的应用效果与改进方向。

## 关键词

锅炉受热面; 高温腐蚀; 氧化硫化机理; 防护技术; 材料改性

## 1 引言

锅炉受热面作为热能转换系统的关键部件, 直接承受高温烟气冲刷与燃料燃烧产物侵蚀, 其高温腐蚀问题已成为影响锅炉效率与安全运行的主要因素。近年来, 随着燃料多样化与超超临界机组的推广, 锅炉运行温度显著升高, 腐蚀环境复杂化, 使受热面高温腐蚀问题愈加突出。高温腐蚀不仅导致设备检修周期缩短、运行成本增加, 还可能引发爆管等重大安全隐患。针对这一问题, 国内外学者在腐蚀机理、材料行为及防护技术等方面开展了大量研究, 提出了多种防护措施。然而, 现有研究仍存在防护技术适应性不足、机理认知不完善、在线监测精度有限等问题。

## 2 锅炉受热面高温腐蚀的基本特征与影响因素

### 2.1 高温腐蚀的定义及分类

高温腐蚀是指金属材料在高温含腐蚀性介质环境中发生的化学或电化学反应过程, 导致材料表面氧化、硫化、氯化等反应生成腐蚀产物并逐渐剥落。该过程不同于一般湿腐蚀, 具有温度高、反应速率快、腐蚀形式复杂的特点。根据腐蚀介质及反应特征, 可分为氧化腐蚀、硫化腐蚀、氯化腐蚀及熔盐腐蚀等类型。在锅炉受热面中, 高温腐蚀通常由燃料中杂质元素与烟气成分相互作用引起, 形成低熔点盐类覆盖物, 破坏保护膜完整性, 促使金属持续被侵蚀, 从而降低材料的使用寿命与结构强度。

### 2.2 受热面材料在高温环境下的腐蚀特征

锅炉受热面长期处于高温烟气冲刷和灰渣沉积环境中, 腐蚀特征表现为表层氧化皮剥落、局部点蚀与晶间腐蚀并存。合金钢表面在氧化过程中形成  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  等氧化膜, 但在高温硫、氯环境下易转化为低熔点的复合物, 削弱保护

【作者简介】廉波 (1985–), 男, 蒙古族, 中国辽宁朝阳人, 本科, 工程师, 从事空冷机组节能优化研究。

性能。腐蚀过程具有阶段性和累积性，早期表现为膜层生长，后期出现剥离与深层侵蚀。烟气温度超过 500℃后，腐蚀速率呈指数增加，受热面结构处于长期应力作用下易产生裂纹扩展与疲劳失效。材料组织中的合金元素分布与稳定性直接影响抗腐蚀性能。

### 2.3 影响锅炉受热面高温腐蚀的主要因素分析

锅炉受热面高温腐蚀受燃料性质、运行温度、烟气成分及材料结构多重因素影响。燃料中硫、氯、钠、钾等杂质在燃烧后生成腐蚀性气体与熔融盐沉积于金属表面，引发化学反应。运行温度决定了反应速率与膜层稳定性，当温度超过 600℃时，氧化膜保护性显著下降。烟气含氧量、湿度及流动速度对腐蚀速率具有放大作用。受热面设计参数、表面粗糙度和应力分布影响膜层结合力，维护工况与吹灰频率亦决定腐蚀发展趋势。

## 3 锅炉受热面高温腐蚀的形成机理研究

### 3.1 燃料成分及燃烧产物对腐蚀机理的影响

燃料中硫、氯、钠、钾等元素在高温燃烧后形成  $\text{SO}_2$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{KCl}$  等物质，与金属表面反应生成低熔点腐蚀产物。燃用高硫煤时，硫化物在高温下易与金属形成  $\text{FeS}$  或  $\text{FeO} \cdot \text{FeS}$  等化合物，破坏氧化膜的致密结构。生物质燃料中氯含量高，生成的氯化物在金属表面沉积后与氧气反应生成金属氯化物和氧化物的循环反应，加剧腐蚀。燃料灰分成分和粒径分布影响沉积层导热性，改变受热面温度分布，促进腐蚀反应持续进行。

### 3.2 高温氧化、硫化及氯化反应机理

氧化腐蚀由金属与氧气直接反应形成氧化膜，膜层厚度与温度呈正相关，超过 650℃后膜层结构疏松，易剥落。硫化反应主要发生在含硫烟气环境中，硫化物侵入氧化膜内部生成低熔点硫化铁，加速膜层失稳。氯化反应过程更为复杂，氯离子渗入金属表面后生成挥发性金属氯化物，在高温氧气作用下分解为氧化物并释放氯离子，形成腐蚀循环。多种反应并行使腐蚀产物层结构松散，氧扩散与金属迁移加剧，导致腐蚀加速。

### 3.3 受热面温度梯度与腐蚀加速作用分析

锅炉受热面存在显著温度梯度，高温区的热应力与物质扩散速率增加，使腐蚀反应更活跃。不同区域的温度差引起膜层热膨胀不均，导致膜层破裂与剥落，金属暴露后形成新的活性腐蚀点。灰渣堆积区域温度局部升高，使熔盐相生成量增加，加速硫化和氯化反应。温度梯度还影响金属离子迁移速率，促使 Fe、Cr、Ni 等元素向表层扩散并与腐蚀介质反应，导致合金元素贫化，降低材料耐蚀性。长期温度不均使腐蚀呈现周期性增强趋势。

## 4 锅炉受热面材料的高温腐蚀行为与失效特征

### 4.1 常用受热面材料的高温腐蚀敏感性对比

受热面常用材料包括 20G、12Cr1MoV、T91、TP347H

等合金钢，耐蚀性能随合金元素含量提高而增强。含铬钢在氧化环境下能形成致密  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  膜层，具有较好保护作用，而低合金钢因 Cr 含量不足，膜层疏松易剥落。奥氏体不锈钢在氯化环境下存在点蚀风险，镍基合金在含硫环境中表现优异。材料的显微组织、晶粒大小及热处理工艺决定其抗腐蚀能力差异，运行数据表明 T91 在 650℃以下腐蚀速率低于 0.05 mm/年，而低合金钢超过 0.12 mm/年。

### 4.2 腐蚀形貌及组织变化特征

受热面腐蚀表面形貌呈现多样性，主要包括氧化层剥落、点蚀坑及沿晶腐蚀沟。显微分析显示腐蚀层由外氧化层、内反应层及基体过渡层构成。外层  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  结构疏松易脱落，内层  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  较致密但易受氯化破坏。高温环境下，合金元素如 Cr、Mo 在晶界富集形成脆性相，导致局部裂纹扩展。长期运行后，腐蚀产物与基体界面处出现孔洞和脱碳区，金属晶粒粗化，组织由珠光体向铁素体转变，力学性能显著下降。

### 4.3 高温腐蚀导致的性能衰退与失效模式

锅炉受热面在高温腐蚀作用下表现出强度下降、塑性减弱和断裂韧性降低等特征。氧化层周期性脱落使金属壁厚持续减薄，引发承压能力下降。硫化腐蚀造成金属内部脆化，氯化腐蚀引起点蚀穿透，最终导致爆管或渗漏失效。受热应力与腐蚀共同作用产生热疲劳裂纹，裂纹沿晶界扩展形成断裂。长期运行数据表明，当腐蚀速率超过 0.1 mm/年时，设备安全寿命缩短 30% 以上。腐蚀产物的堆积还会降低换热效率，造成燃料消耗增加与能效下降。

## 5 锅炉受热面高温腐蚀的防护技术与优化措施

### 5.1 防腐涂层与复合涂层技术的应用研究

防腐涂层是应对锅炉受热面高温腐蚀的关键措施之一，通过在金属表面形成致密隔离层，阻止腐蚀介质与基体反应。研究表明，采用 NiCrAlY、FeCrAl 等金属涂层后，在 650℃下的氧化增重速率较裸材降低 70%，腐蚀深度减少 0.09 mm。陶瓷涂层如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$  具有高熔点与低热导率，可在 700℃长期稳定工作，其耐氯化性能提升 3 倍。金属-陶瓷复合涂层通过多层界面结合形成梯度结构，兼具金属韧性与陶瓷耐蚀性，在热循环 200 次后结合强度仍保持在 37 MPa 以上。工业试验结果显示，经复合涂层处理的水冷壁管在含硫量 1.5% 的煤燃烧环境中运行 4000 小时，腐蚀速率控制在 0.04 mm/年以下，换热效率提高 5%，运行寿命延长至原设计值的 2 倍以上。

### 5.2 燃烧优化与烟气成分控制技术

燃烧优化从源头上抑制腐蚀性介质生成，是减少高温腐蚀的有效路径。通过空气分配控制、二次风调节及燃烧分级等手段，可有效降低烟气中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{HCl}$  浓度。实验数据显示，当炉膛过量空气系数保持在 1.1 至 1.2 之间时， $\text{HCl}$  体积分数降低 26%， $\text{SO}_2$  减少 19%。采用分级燃烧技术，可在火焰高温区形成局部还原性气氛，阻止氯化铁与硫化铁生成。投

加 CaO 和 MgO 基脱硫剂后,金属表面硫沉积厚度由 12 $\mu\text{m}$  降至 4 $\mu\text{m}$ 。烟气再循环技术通过控制  $\text{O}_2$  浓度与温度分布,使受热面温差小于 35 $^{\circ}\text{C}$ ,减少熔盐生成与积灰附着。现场监测表明,采用综合优化措施后,锅炉运行时间提升 1500 小时,腐蚀速率下降约 45%,排烟温度降低 12 $^{\circ}\text{C}$ ,系统能效显著提高。

### 5.3 材料表面改性与结构优化防护措施

材料表面改性技术通过改变材料的表层组织和化学组成,从根本上提升抗高温腐蚀能力。离子渗铬处理可在钢管表层形成厚度约 65 $\mu\text{m}$  的 Cr 富集层,使腐蚀速率降低 68%。渗铝技术在 700 $^{\circ}\text{C}$  条件下运行 3000 小时后,表层仍保持完整致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜。激光熔覆技术通过高速熔融 Ni 基粉末形成稀释率小于 4% 的复合层,其硬度提高 1.7 倍,氧化层结合力增强 40%。结构优化方面,通过调整受热面布置角度与管间距,可减少灰渣堆积厚度 20%,降低局部温度梯度。试验锅炉运行 6000 小时后,改性钢管腐蚀深度仅 0.03 mm,寿命延长 55%,热效率提升 3.2%。该类改性与结构优化的协同防护体系在 600 $^{\circ}\text{C}$  至 800 $^{\circ}\text{C}$  环境下表现出稳定性与经济性兼具的技术优势。

## 6 锅炉受热面高温腐蚀防护的检测与评估技术

### 6.1 高温腐蚀在线监测与诊断技术

高温腐蚀在线监测是实现锅炉安全运行的重要保障。常用监测手段包括电化学阻抗谱、高温电导率传感器及光学红外成像技术。通过在受热面布置电极阵列,可实时测定腐蚀电流密度,精度达到  $\pm 0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。红外热像仪在 600 $^{\circ}\text{C}$  环境下能准确识别温差异常区,检测分辨率为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。在某 600 MW 机组运行中,部署 32 个传感节点后,系统能提前 72 小时预警局部腐蚀异常。信号通过数据采集模块传输至控制中心,结合算法模型实现腐蚀速率动态计算与趋势预测。在线监测的引入使设备检修周期延长 20%,紧急停炉次数减少 3 次,显著提升运维效率与安全性。

### 6.2 腐蚀速率与寿命预测模型研究

腐蚀速率预测模型为锅炉寿命评估提供定量依据。基于 Arrhenius 方程和多元线性回归法建立的经验模型表明,温度每升高 50 $^{\circ}\text{C}$ ,腐蚀速率约增加 1.6 倍。采用耦合反应动力学与扩散模型,可准确模拟 Fe、Cr、Ni 元素在氧化层内的迁移规律,预测误差小于 8%。结合 Monte Carlo 随机

模拟方法建立的寿命预测模型可在运行初期预测材料剩余寿命,偏差不超过 5%。某电厂 T91 合金受热面运行数据分析显示,模型预测寿命为 8.7 年,与实测 8.4 年基本一致。该模型可为检修决策提供依据,实现基于数据驱动的寿命管理,提升设备安全性与经济性。

### 6.3 防护效果的综合评估与维护策略

防护效果评估是验证防腐技术有效性的重要环节。评估体系包括腐蚀速率、膜层结合力、表面粗糙度及化学稳定性四类指标。实验数据显示,经复合涂层处理后的受热面样管在 700 $^{\circ}\text{C}$  下运行 5000 小时后,腐蚀速率低于 0.05 mm/年,膜层结合力保持在 36 MPa 以上。红外热成像与声发射技术可用于检测早期裂纹扩展位置,误差小于 3 mm。定期维护策略强调运行周期内每 2000 小时进行一次厚度检测与样管更换。通过建立设备防护档案与风险评估数据库,可实现寿命全过程管理。综合分析表明,防护体系实施后,锅炉年均维护费用下降 18%,设备可利用率提升 9%,为受热面长期稳定运行提供了可靠保障。

## 7 结语

锅炉受热面高温腐蚀是影响设备运行安全与使用寿命的关键问题,其机理复杂、影响因素多样。通过对腐蚀形成规律的深入研究与防护技术的系统分析,可以发现材料选择、燃烧优化、涂层防护及在线监测构成了高温防腐体系的核心。防腐涂层与表面改性技术显著提升了受热面的耐蚀性能,燃烧与烟气控制从源头抑制了腐蚀介质的生成,在线监测与寿命预测为防护措施优化提供了数据支持。未来应在高温合金研发、智能监测系统及腐蚀机理建模方面持续创新,实现锅炉受热面防护的高效化、智能化与长期稳定运行,为能源装备的安全、高效与绿色发展提供坚实技术支撑。

### 参考文献

- [1] 王浩,刘成威,覃恩伟,吴树辉,陈国星,叶林. 生物质锅炉受热面高温腐蚀分析及对策[J].热喷涂技术,2022,14(04):63-70.
- [2] 龙吉生,高峰,刘亚成. 高参数垃圾焚烧余热锅炉受热面的防腐措施与实践[J].环境卫生工程,2022,30(04):48-54.
- [3] 郭灏,刘亚成,范卫东. 锅炉受热面高温腐蚀实验研究进展及防腐保护[J].锅炉技术,2022,53(04):1-8.
- [4] 程海松,刘岗,雷刚,谭俊,陈春彦,梁勇,苏岳亮,吴开颜,杜永斌. 燃煤锅炉受热面高温腐蚀防护涂层技术研究进展[J].材料导报,2020,34(S1):433-435+447.