

# 电厂锅炉高温受热面腐蚀防控技术的研究现状与展望

陈承超

陕西德源府谷能源有限公司 陕西 榆林 719000

**摘要:** 电厂锅炉高温受热面腐蚀是影响锅炉安全、经济运行的关键问题。当前,防控技术主要集中在耐高温、耐腐蚀材料的研发与应用,以及锅炉燃烧参数的优化调整。新型耐高温涂料、金属热喷涂及纳米多层涂层等技术取得一定进展,但存在施工难度大、成本高等问题。未来,智能自修复涂层、环保型水性树脂基涂料等技术将成为研发重点。同时,加强燃烧管理、优化炉膛结构也是防控腐蚀的有效途径。期待技术革新,提升电厂锅炉运行效率。

**关键词:** 电厂锅炉; 高温受热面; 腐蚀防控技术; 现状; 展望

引言: 电厂锅炉作为能源转换的核心设备,其高效稳定运行对于保障电力供应至关重要。然而,高温受热面的腐蚀问题一直是困扰电力行业的技术难题。这不仅影响锅炉的使用寿命,还可能导致安全事故,增加运维成本。因此,深入研究高温受热面腐蚀的机理及防控技术,对于提升锅炉运行效率、保障电力供应安全具有重要意义。本文旨在综述当前防控技术的研究现状,并展望未来发展趋势,为电厂锅炉的腐蚀防控提供理论依据和技术支持。

## 1 电厂锅炉高温受热面腐蚀的机理分析

### 1.1 高温腐蚀的主要类型

(1) 硫腐蚀( $H_2S$ 腐蚀): 当燃料中的硫元素燃烧生成 $H_2S$ 等硫化物时,在高温环境下会与受热面金属发生反应。 $H_2S$ 能直接穿透金属表面氧化膜,与铁等金属结合形成硫化物,导致氧化膜剥落,加速腐蚀进程,尤其在还原性气氛中更为显著。(2) 氯腐蚀: 燃料中的氯元素在燃烧后生成 $HCl$ 等氯化物,高温下会破坏金属表面的钝化层。氯原子具有强渗透性,可与金属形成低熔点氯化物,这些氯化物在受热面表面熔融,持续与金属反应,形成腐蚀循环,对奥氏体不锈钢等材料危害极大。(3) 碱金属腐蚀: 燃料中的钾、钠等碱金属元素燃烧后形成氧化物或硫酸盐,在高温下会附着于受热面。它们与金属表面的氧化膜反应生成低熔点复合盐,使氧化膜失去保护作用,同时碱金属化合物还会催化硫化物的腐蚀反应,加剧腐蚀程度。

### 1.2 腐蚀过程及其影响因素

(1) 煤质与生物质燃料成分: 煤中高硫、高氯含量会直接增加腐蚀介质浓度;生物质燃料中的碱金属和氯含量通常较高,其燃烧产物更易引发碱金属腐蚀和氯腐蚀,且不同燃料的灰分成分会影响腐蚀产物的特性。

(2) 炉内气氛与温度分布: 炉内还原性气氛(如缺氧环

境)会促进 $H_2S$ 等还原性气体的生成,加速硫腐蚀;温度在400-800℃区间时,多数腐蚀反应速率显著提升,而局部过热或温度不均会导致腐蚀速率差异,形成局部严重腐蚀区域。(3) 锅炉结构与受热面材料: 受热面的布置方式影响烟气流动和温度分布,易形成烟气冲刷死角或积灰区域,加剧局部腐蚀;材料的耐腐蚀性直接决定抗腐蚀能力,普通碳钢在高温腐蚀环境中寿命较短,而含铬、镍的合金材料耐蚀性更强<sup>[1]</sup>。

## 1.3 腐蚀的微观机制与动力学模型

(1) 化学反应动力学: 高温腐蚀反应遵循多步化学反应历程,反应速率受温度、反应物浓度等因素影响,符合阿伦尼乌斯方程。例如,硫腐蚀中 $H_2S$ 与Fe的反应速率随温度升高呈指数增长,且反应活化能较低,在高温下易快速进行。(2) 腐蚀产物的形成与演化: 初始阶段,金属表面生成致密氧化膜,可减缓腐蚀;但在腐蚀介质作用下,氧化膜被破坏,形成疏松的硫化物、氯化物或复合盐产物。这些产物的结构和稳定性随反应进行不断变化,如低熔点产物会形成液态膜,加速金属离子的扩散和腐蚀反应的持续进行。

## 2 电厂锅炉高温受热面腐蚀防控技术现状

### 2.1 材料革新与合金应用

(1) 耐高温腐蚀材料: 随着材料科学的发展,一系列耐高温腐蚀的新型材料不断涌现。例如,含有高铬、镍等合金元素的不锈钢材料,凭借其在高温环境下能形成致密且稳定氧化膜的特性,有效阻碍腐蚀介质与金属基体的接触,展现出卓越的抗高温腐蚀性能,在过热器和再热器等高温区域应用广泛。同时,镍基合金凭借其优异的高温强度和耐腐蚀性,也逐渐成为高温受热面材料的优质选择,尤其适用于超超临界机组等对材料性能要求极高的场合。(2) 复合钢管与合金涂层: 复合钢管通过将不同性能的材料复合在一起,发挥各自优势。如

在普通钢管内壁复合一层耐腐蚀合金,既保证了钢管的强度,又大幅提升了其耐腐蚀能力。合金涂层则是采用热浸镀、电镀等工艺,在金属表面涂覆一层合金。像热浸锌涂层,可在钢铁表面形成锌铁合金层,在一定温度范围内能有效防止高温氧化和腐蚀,成本相对较低且工艺成熟,在电厂锅炉部分低温受热面得到广泛应用<sup>[2]</sup>。

## 2.2 热喷涂技术及其进展

(1) 金属、陶瓷及金属陶瓷涂层:金属涂层如镍铬合金涂层,具备良好的导热性和导电性,且与基体金属结合力强,能有效抵御高温硫腐蚀等。陶瓷涂层因具有高硬度、高熔点和良好的化学稳定性,在抗高温冲蚀磨损和腐蚀方面表现出色,如氧化铝陶瓷涂层常用于防止生物质燃料燃烧产生的碱金属腐蚀。金属陶瓷涂层则综合了金属和陶瓷的优点,既有金属的韧性和可加工性,又有陶瓷的耐高温、耐腐蚀特性,在复杂腐蚀环境下的锅炉受热面防护中具有广阔应用前景。(2) 喷涂方法与工艺优化:热喷涂方法不断革新,从传统的火焰喷涂发展到超音速火焰喷涂、等离子喷涂等先进技术。超音速火焰喷涂能使涂层粒子以更高速度撞击基体,形成的涂层更加致密,结合强度更高。同时,工艺参数的优化也至关重要,通过精确控制喷涂温度、喷枪移动速度、涂层厚度等参数,可显著提高涂层质量。例如,在某电厂应用优化后的超音速火焰喷涂工艺,涂层的耐腐蚀性提高了30%以上,有效延长了受热面的使用寿命。

## 2.3 燃烧调整与贴壁风技术

(1) 低氧燃烧技术:低氧燃烧通过合理控制送入炉膛的空气量,使燃料在较低过量空气系数下燃烧,减少氮氧化物生成。但需精准控制,否则易造成燃烧不完全,增加未燃尽碳损失,且在局部区域形成还原性气氛,加剧高温腐蚀。因此,需结合先进的燃烧器设计和自动控制系统,实时监测和调整燃烧工况,确保在降低氮氧化物排放的同时,避免对受热面腐蚀产生不利影响。(2) 贴壁风的设置与优化:贴壁风技术通过在水冷壁附近引入一股冷却风,在壁面形成气膜,降低壁面温度,稀释还原性气体,从而有效抑制高温腐蚀。其设置位置和风量分配极为关键,需根据炉膛结构、燃烧器布置和实际运行情况进行优化。如在某600MW机组中,通过数值模拟和现场试验,优化贴壁风喷口位置和角度,使水冷壁附近氧气含量提高了2%-3%, $H_2S$ 体积分数降低了80%以上,高温腐蚀速率显著下降<sup>[3]</sup>。

## 2.4 给水品质控制与积灰管理

(1) 高品质给水的应用:高品质的除盐水可有效减少水中杂质和溶解氧等对锅炉受热面的腐蚀。采用先

进的水处理工艺,如反渗透、离子交换等,去除水中的钙、镁、铁等金属离子以及溶解气体,防止在受热面形成水垢和发生氧腐蚀。同时,向给水中添加合适的缓蚀剂,在金属表面形成保护膜,进一步增强防腐蚀效果,保障受热面长期稳定运行。(2) 积灰的监测与清理:积灰会影响受热面传热效率,且积灰中的腐蚀性成分可能引发腐蚀。利用红外测温、灰污监测仪等手段实时监测积灰情况,根据积灰程度及时采取吹灰等清理措施。如采用声波吹灰、蒸汽吹灰等方式,定期清除受热面积灰,保持受热面清洁,降低因积灰导致的腐蚀风险,提高锅炉运行效率。

## 3 电厂锅炉高温受热面腐蚀防控技术的挑战与展望

### 3.1 当前技术的局限性

(1) 防护涂层寿命与稳定性问题:现有热喷涂涂层在长期高温交变载荷下易出现开裂、剥落现象。例如,金属陶瓷涂层在600-800℃区间运行1万小时后,约30%的涂层会因热应力积累产生微裂纹,导致腐蚀介质渗入基体。此外,涂层与基体的热膨胀系数差异会加剧界面损伤,在生物质锅炉等含高碱金属环境中,涂层寿命普遍缩短40%以上,难以满足长周期运行需求。(2) 燃烧调整技术的适用范围:低氧燃烧技术在高硫煤机组中易引发局部还原性气氛,当过量空气系数低于1.05时,过热器区域 $H_2S$ 浓度可能突破100ppm,反而加速腐蚀。贴壁风技术的效果受炉膛结构限制,在W型火焰锅炉中,因烟气回流复杂,贴壁风形成的气膜覆盖率仅能达到60%,局部区域仍存在腐蚀风险,且高负荷时贴壁风会降低燃烧效率,导致煤耗上升0.5-1g/kWh。

### 3.2 未来研究方向

(1) 高性能防护材料的开发:重点研发具有自修复功能的智能涂层,通过添加微胶囊化修复剂,在涂层出现裂纹时自动释放并填充损伤区域。同时探索新型MAX相陶瓷材料,其兼具金属导电性与陶瓷耐蚀性,在800℃硫气氛中腐蚀速率可控制在0.01mm/年以下,有望突破传统材料的性能瓶颈。(2) 腐蚀-磨损耦合机理的深入研究:建立高温腐蚀与飞灰冲蚀的耦合动力学模型,揭示两种损伤的交互作用机制。例如,飞灰撞击会破坏腐蚀产物层,使新鲜金属表面暴露,加速腐蚀反应,而腐蚀产物又会改变材料表面硬度,影响磨损速率,需通过分子动力学模拟量化二者的耦合系数。(3) 智能监测与预测系统的构建:开发基于光纤光栅与电化学传感器的多参数监测网络,实时采集壁温、腐蚀电位、烟气成分等数据。结合大数据分析建立腐蚀速率预测模型,实现剩余寿命在线评估,预测误差控制在5%以内,为运维决策

提供精准依据<sup>[4]</sup>。

### 3.3 技术创新与应用前景

(1) 材料基因组工程与机器学习: 利用材料基因组方法加速耐蚀合金研发, 通过高通量计算筛选出Cr-Ni-Mo-W四元合金最优成分, 将实验周期从传统的5年缩短至18个月。机器学习算法可优化涂层制备工艺, 基于10万组历史数据训练的模型, 能将涂层致密度提升至98%以上, 显著提高防护效果。(2) 腐蚀防控技术的集成与优化: 构建“材料防护-燃烧调控-智能运维”一体化系统, 例如将自修复涂层与自适应贴壁风控制联动, 当涂层监测到腐蚀加剧时, 自动调整贴壁风参数。该集成技术在600MW机组试点中, 可使受热面寿命延长至8年以上, 综合运维成本降低20%, 具有广阔的工业化应用前景。

## 4 案例分析与应用实例

### 4.1 典型电厂锅炉高温腐蚀防控案例

#### 4.1.1 改造前后的腐蚀状况对比

某200MW燃煤机组锅炉过热器原用20号碳钢, 运行1.5年后, 管壁平均腐蚀减薄量达0.6mm, 局部出现0.3mm深的腐蚀坑, 存在爆管风险。改造后, 该区域更换为12Cr1MoV合金管并喷涂NiCr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>金属陶瓷涂层, 相同运行周期后, 腐蚀减薄量仅0.08mm, 无明显腐蚀坑, 涂层完整性保持良好, 未出现剥落或开裂。

#### 4.1.2 技术方案与实施效果

技术方案结合材料升级与燃烧调整。材料上, 高温受热面采用耐蚀合金, 关键部位加涂耐磨耐蚀涂层; 燃烧系统采用低氧燃烧技术, 将过量空气系数从1.3调至1.1, 同时优化二次风配风, 增强气流扰动。实施后, 炉膛出口烟气中H<sub>2</sub>S浓度从90ppm降至25ppm, 过热器区域壁温分布更均匀, 连续运行2年未因腐蚀停机, 年节约维修费用约80万元, 锅炉热效率提升0.5%。

### 4.2 不同类型锅炉的防控策略差异

(1) 燃煤锅炉: 针对高硫煤锅炉, 重点控制硫腐蚀。采用脱硫预处理降低煤中硫含量, 高温受热面选用

Cr25Ni20不锈钢, 配合定期蒸汽吹灰减少积灰。燃烧时采用分级燃烧, 主燃区过量空气系数0.9, 抑制H<sub>2</sub>S生成, 燃尽区补充空气保证燃烧完全, 有效降低腐蚀速率。

(2) 生物质锅炉: 因生物质高碱金属特性, 防控侧重碱金属腐蚀。燃料预处理采用水洗法降低钾、钠含量, 高温受热面采用镍基合金Inconel718, 管外喷涂Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷涂层阻挡碱金属附着。设置高频声波吹灰器, 每1.5小时吹灰一次, 防止碱金属化合物熔融沉积, 减少腐蚀。(3) 生物质-燃煤混烧锅炉: 兼顾硫腐蚀与碱金属腐蚀。控制生物质掺烧比例不超过20%, 混合燃料经干燥降低水分, 减少碱金属挥发。受热面采用双金属复合管, 基层保证强度, 覆层选用耐蚀合金。燃烧时调整炉膛温度至1000-1100℃, 平衡燃烧效率与腐蚀风险, 通过在线监测调整配风, 维持合适炉内气氛。

## 结束语

综上所述, 电厂锅炉高温受热面腐蚀防控技术正处于快速发展阶段, 新型耐腐蚀材料的研发、热喷涂技术的优化、燃烧调整策略的完善以及智能监测系统的构建, 均为提高锅炉运行安全性和延长使用寿命提供了有力保障。然而, 面对日益复杂的燃料成分和运行工况, 腐蚀防控仍面临诸多挑战。未来, 需进一步加强基础理论研究, 推动技术创新与集成应用, 构建更加智能化、高效化的腐蚀防控体系, 以应对电厂锅炉高温受热面腐蚀这一长期而艰巨的任务。

## 参考文献

- [1]陈锐.电站锅炉受热面管高温腐蚀机理及措施[J].山东工业技术,2020,(03):27-28.
- [2]罗培钟.电厂锅炉受热面腐蚀原因及预防措施探讨[J].现代工业经济和信息化,2020,(04):43-44.
- [3]杨珍.燃煤锅炉烟气侧高温腐蚀研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2021,(12):127-128.
- [4]黄强.燃煤锅炉水冷壁硫化物高温腐蚀试验[J].长沙理工大学学报,2021,(10):96-97.