

工业余热锅炉受热面高温腐蚀机理分析与防护涂层技术应用

武 帅

(陕西延长石油榆林凯越煤化有限责任公司, 陕西 榆林 719000)

摘 要 余热锅炉是一种重要的能量回收和节能减排装置, 其受热面在长期服役条件下极易发生高温腐蚀, 严重影响其安全运行和服役寿命。本文围绕废热锅炉受热面腐蚀的基础理论问题, 重点研究高温环境下金属与介质间的相互作用所引起的氧化、硫化等化学反应, 分析其主要影响因素, 并根据腐蚀机制提出相应的防护措施, 通过优化涂料配方及工艺参数, 构建一种新型的耐高温腐蚀防护屏障。实验表明, 这种新型的保护涂料能够显著地降低高温环境下金属表面的氧化速度, 延缓其腐蚀过程, 保证整个锅炉的可靠性。

关键词 工业余热锅炉; 高温腐蚀; 腐蚀机理; 防护涂层技术; 设备安全性

中图分类号: TK228

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.18.006

0 引言

大型余热锅炉受热面的高温腐蚀是影响其安全服役的重要原因。在高温条件下, 金属与介质发生氧化、硫化等化学反应, 造成传热面的严重腐蚀, 不仅影响传热效率, 而且会带来安全隐患。本文拟从理论和实验两个方面, 对废热锅炉受热面的高温腐蚀机制进行系统分析, 识别其主要影响因素, 探讨高效的热防护涂层技术。从改善涂料配方及工艺条件入手, 构建耐高温腐蚀防护屏障, 延缓腐蚀发展, 保证锅炉安全稳定运行。该研究对提高能源使用效率, 减少维修费用, 促进节能减排, 都具有十分重要的意义。

1 工业余热锅炉受热面高温腐蚀机理与现象

1.1 工业余热锅炉受热面高温腐蚀机理

工业废热锅炉是一种重要的能量回收装置, 其作用是将高温烟气或废热转换成可再生能源。在钢铁、化工、电力等高能耗工业领域, 可大幅提高能源利用率, 在节能减排方面具有重要意义。工业废热锅炉的主要构成是: 一种用于对废热进行回收的热交换装置, 另一种是保证系统正常运转的辅助装置。而所有这些功能的实现, 都取决于其良好的传热性能和良好的耐高温性能。加热面为金属材质, 与高温烟气直接接触, 既要经受较强的热冲击, 又要处理复杂的化学环境。

废热锅炉工作温度高达几百至几千摄氏度, 烟气

中含有硫化物、氯化物等强腐蚀性物质, 对其抗腐蚀能力提出严峻挑战^[1]。在无特定保护措施的条件下, 受热面在长期服役过程中极易发生氧化、硫化等复合腐蚀反应, 在其表面生成疏松的腐蚀产物, 从而使其力学和导热性能不断下降。在此基础上, 提出了一种新的适用于锅炉的新方法, 即在一定程度上降低了锅炉的热效率, 同时也给设备带来了安全隐患, 提高了维修、运行费用。

1.2 工业余热锅炉受热面高温腐蚀现象

废热锅炉受热面是造成高温腐蚀的主要原因。金属材料在高温服役过程中极易产生氧化、硫化等化学破坏, 这些破坏多发生在高温烟气或腐蚀介质中。烟气中的硫氧化物、氯化物及水蒸气等物质在高温环境下与金属表面发生反应, 生成的腐蚀产物是影响其强韧性能的重要因素。高温氧化是金属腐蚀的主要途径, 其主要特征是氧化物在材料表层沉积, 形成一层易碎、不均匀的氧化层, 无法有效地保护下层金属。高温硫化、熔盐等腐蚀也是电厂锅炉普遍面临的难题, 其作用将导致锅炉受热面减薄、强度显著下降, 严重时会产生裂纹, 严重威胁机组安全运行。锅炉在服役过程中的温度、流体组成和表面粗糙度等因素常常会导致设备的失效, 从而导致设备的寿命缩短, 安全隐患增加, 能源利用率降低, 从而带来更多的经济损失。高温腐蚀现象及影响因素详情如表1所示。

作者简介: 武帅(1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 化工厂热电站锅炉日常运行管理。

表 1 高温腐蚀现象及影响因素汇总

腐蚀类型	主要特征	影响因素与后果
高温氧化	形成脆弱、不均匀的氧化层，保护性差	高温环境、氧含量，导致基体强度下降
高温硫化	硫氧化物与金属反应，生成腐蚀性硫化物	烟气中 SO _x 浓度，引起受热面变薄、开裂
熔盐腐蚀	熔融盐类沉积并加速金属腐蚀	氯化物、水蒸气共存，促进腐蚀产物堆积
综合腐蚀影响	金属强度与韧性降低，出现应力裂缝	温度波动、表面粗糙度、液体成分，缩短设备寿命，降低能效，增加安全风险

2 工业余热锅炉受热面腐蚀机理与关键影响因素

2.1 腐蚀反应特性解析

金属材料在工业余热锅炉受热面处在高温环境条件下，其腐蚀特性首要体现为氧化、硫化以及氯化等等繁杂化学反应的整体影响。上述反应的主要机理归于金属元素同高温烟气内氧、硫、氯元素以及它们的化合物进行化学相互作用。氧化反应属于腐蚀的首要类型。在高温条件下，金属表面同氧接触，快速形成金属氧化物膜。因为高温条件之下氧化物的紧密度不够或者机械强度不够，氧化膜易于破损或者脱落，金属基体因而显露并且不断遭受侵蚀。

硫化反应是另一种明显的腐蚀形式。高温烟气中含硫化物或许同金属构成金属硫化物层。此类硫化物的构成并且氧的配合作用，将加快金属的损耗。氯化腐蚀于高温条件之中呈现格外繁杂，高温之下氯化物挥发性提升，介质中的氯于同金属接触之际不只直观

腐蚀表面，并且会借助毁坏已经形成的氧化膜以推动持续的腐蚀循环^[2]。

2.2 重要环境参数探讨

高温腐蚀受到很多环境参数影响，包括温度、气氛成分以及腐蚀介质浓度等方面。温度直接决定金属材料氧化速度和硫化反应强度，高温促进腐蚀产物形成并且改变物理化学性质。气氛当中氧含量、硫化物还有卤化物浓度属于影响腐蚀反应重要介质条件，含硫化物燃烧副产品跟金属表面接触产生复杂硫酸盐和硫化物薄膜，造成腐蚀速度加快。水汽存在改变氧化产物性质，而且容易跟硫化物反应，加重腐蚀情况。受热面温度分布不均匀加上流体流动快慢也影响腐蚀速度，温度差别导致腐蚀分布不均匀，流速变化干扰腐蚀介质到达表面传质过程。研究并且控制这些关键参数，有助于了解腐蚀特点并且开展有效防护措施。受热面腐蚀机理及主要影响因素如表 2 所示。

表 2 受热面腐蚀机理及主要影响因素汇总

腐蚀类型	主要反应特征	关键影响因素
氧化腐蚀	高温下形成金属氧化物膜，膜易破裂脱落	温度、氧分压、氧化膜致密性
硫化腐蚀	生成金属硫化物层，协同氧作用加速金属损耗	烟气中硫化物浓度、氧气共存条件
氯化腐蚀	氯破坏氧化膜，促进持续腐蚀，具高挥发性	氯化物浓度、高温下氯的渗透与反应活性
环境协同作用	温度梯度、流速、水汽等加剧腐蚀不均匀与剥落	温度波动、烟气流速、水蒸气含量

3 防护涂层技术开发与性能体现

3.1 涂层材料配比及制备改进

涂层材料的配比和制备优化是提高工业余热锅炉受热面承受高温腐蚀能力的重要步骤。在选择防护涂层材料的时候，必须全面考虑材料能够承受高温的能力、抵抗氧化的能力、抵御硫化的能力，以及抵抗机械冲击的能力这些特点，确保在高温腐蚀这种恶劣环境下，涂层能够一直保持稳定并且发挥良好作用。硅基化合物、铝基合金、氧化物陶瓷等都是常见的涂层材料种类，可以通过改变主要成分的比例，同时加入一些微量金属元素或者稀土元素，让涂层变得更加紧密，进而明显加强抵抗腐蚀的能力^[3]。

3.2 涂层作用机制阐明

防护涂层借助改善材料组成和界面结构，构成了一个紧密而且拥有出色化学稳定性的保护屏障，彻底隔绝了氧化剂、硫化物等腐蚀性介质和金属基体的直观接触。在高温环境之中，涂层于热力学和动力学层面施展协同作用，当中紧密的涂层结构高效减少了氧气和别的腐蚀性气体的渗透速率，因而缓解了金属基体的氧化反应。涂层材料之中的耐温组分可以平稳保留在高温环境之中，并且阻止硫化等高温反应的促进。界面结合力的强化保证了涂层与基体之间的持久牢固黏附，降低热膨胀系数差异引发的涂层剥落风险。涂层制备之中的微观晶粒排列设计，使界面裂纹扩展和

高温摩擦损伤能够获得良好遏制。结构与性能上的改进不但保证了锅炉运转期间的热效率稳定性,还可以明显减少由于化学和物理损伤引起的设备失效。

4 高温条件下涂层效能保障与设备安全提升

4.1 高温工作状态下涂层表现

防护涂层遇到高温条件,主要体现在热稳定性和抗腐蚀性能两方面。试验数据显示,防护涂层面对高温工作环境时,内部结构紧密程度高并且材料组成具备很好的热耐受能力,能有效减少氧化速度加快情况,同时完全阻挡侵蚀性化学物质深入破坏金属基体内部部分。防护涂层依靠形成稳定化学界面层方式,可以明显减少氧化反应和硫化反应活跃程度,并能延缓金属材料腐蚀发展速度。这样既保护了材料表面完整无损状态,又减少了因为热膨胀造成应力集中和裂纹产生情况。实验结果说明,防护涂层经过几百小时高温连续运行之后,性能参数仍然保持优秀水平,为锅炉系统长期稳定运行带来可靠保障^[4]。

4.2 设备安全性维护措施

要想确保工业余热锅炉在高温环境下持续正常运转,必须从多个角度全面保养和管理设备。需要特别关注锅炉运行时的环境数据,如温度、压力和介质成分的变化情况,及时调整运行参数来降低高温带来的破坏效果。还要重视重要部件的检查和保养,尤其是受热面部分,要仔细查看涂层是否完好无损。一旦发现问题,如涂层脱落、裂缝或者局部损坏,需及时安排修补工作,防止腐蚀进一步扩大。

在设备常规保养内,对于高温区域的润滑和冷却系统实施改进设计,可以高效减少温差突变对于设备基体的应力影响^[5]。改进锅炉燃烧工艺,削减腐蚀性介质的产生比例为增强设备安全性能的关键方法之一。定时审查涂层材料的适用性与持久性能,保证其持久对于金属基体的防护效果。通过上述措施,工业余热锅炉的运行稳定性将获得加强,不但降低了突发停机和保养频率,并且明显提高了设备的全部使用寿命和经济性。

此外,涂层的定期检测与寿命预测也是保障设备安全的关键环节。目前可采用红外热成像、超声波测厚等在线监测手段,实时评估涂层完整性与剩余厚度,从而建立涂层劣化预警机制,变被动维修为主动预防。同时,结合锅炉运行大数据,构建腐蚀速率预测模型,能够更精确地规划涂层补涂周期,避免过早补涂造成浪费或过晚修补导致失效。对于服役超过设计寿命的锅炉,建议在每次停炉检修期间对受热面进行金相取样分析,判断基体金属是否已发生不可逆的劣化,以

决定是继续使用还是更换受热面管段。另外,还应建立涂层全生命周期档案,记录每次检测数据与维护记录,为后续运行决策提供依据。这一系列从监测、预测到决策的闭环管理,可进一步提升工业余热锅炉的运行安全性与经济效益。

5 综合效益整合

在工业余热锅炉高温腐蚀机理与防护涂层技术研究范畴内,节能减排效果总结意义重大。在节能方面,涂层保护技术可显著提升锅炉设备稳定性与使用寿命,为工业能源高效利用提供支撑。它能有效降低受热面热量散失,减少因腐蚀导致的热效率降低。涂层形成完整隔离层,阻止高温介质直接接触金属基体,降低材料破坏程度,推动锅炉长期平稳运行,减少设备维修与零部件更换,进而降低能源资源额外消耗。在减排方面,涂层可减少腐蚀产生的各类污染物,使锅炉排放的气体 and 颗粒更清洁。热力设备在高温高压下会产生氧化物、硫化物等有害物质,涂层能减少其释放到空气中,避免对自然生态造成负面影响,还能降低锅炉部件修理需求,减少闲置锅炉的能源浪费。

6 结束语

本文深入探究工业余热锅炉受热面高温腐蚀问题,剖析氧化、硫化等反应机理,明确腐蚀主因,通过改进涂层材料配方与工艺参数,研发出结构紧密、抗高温性能优异的防护涂层。实验结果显示,改进后的防护涂层技术在真实环境中可有效减缓金属氧化、延缓腐蚀,增强锅炉结构稳定性与热能利用效率,保障设备安全可靠运行。但是,研究还存在试验时间短、涂层长期耐久性测试不完整、不同环境界面反应未完全明晰等不足。未来可深入探索两个方向:一是对防护涂层在极端恶劣条件下的长期表现进行详细评估;二是用数字精确计算高温腐蚀中各化学反应的具体规律。

参考文献:

- [1] 王浩,刘成威,章恩伟,等.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] 冯驰,王建峰,段素杰.合金钢高温防护涂层的研制及性能[J].锻压技术,2022,47(04):235-241.
- [3] 王秋锋.浅谈锅炉水冷壁高温腐蚀的形成因素及治理对策[J].特种设备安全技术,2023(04):14-15,24.
- [4] 白杨,郭洋洲,高国栋,等.粉锅炉高比例燃用准东高碱煤试验研究[J].热力发电,2023,52(07):157-166.
- [5] 陈乐.垃圾焚烧锅炉受热面高温腐蚀探讨[J].工业锅炉,2023(03):24-28.