

# 高湿烟气工况下烘干窑除尘器防腐技术研究

张 帅

神东煤炭矿业服务公司 内蒙古 鄂尔多斯 017200

**摘要:** 针对烘干窑高湿烟气(相对湿度  $\geq 85\%$ )伴随酸性介质、温度波动引发的除尘器腐蚀问题,本文分析工况特性、腐蚀类型及机理,对比材质升级、涂层防护、结构优化三类防腐技术的优劣与现存问题。基于适配性、耐久性与经济性原则,设计多维度优化方案,经试验验证,该方案可使核心部件腐蚀速率降低60%以上,运维成本下降30%,延长设备使用寿命至10年以上,为高湿烟气工况下烘干窑除尘器防腐提供可靠技术支撑与实践参考。

**关键词:** 高湿烟气工况;烘干窑;除尘器;防腐技术

**引言:** 烘干窑运行中产生的高湿烟气含 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等酸性介质,温度波动于 $80\text{-}150^\circ\text{C}$ ,易形成冷凝液引发设备电化学、化学及协同腐蚀,导致滤袋破损、壳体穿孔等故障,影响除尘效率与生产安全。现有防腐技术存在适配性不足、成本偏高或防腐效果差等问题,难以满足工业生产需求。开展相关防腐技术研究,优化防腐方案,对保障设备稳定运行、降低运维成本具有重要现实意义。

## 1 高湿烟气工况特性及烘干窑除尘器腐蚀机理

### 1.1 烘干窑高湿烟气工况特性分析

(1) 烟气组分特征: 烘干窑烟气中水蒸气含量极高,相对湿度常达85%以上,伴随 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{HCl}$ 等酸性介质,浓度随物料特性波动,易形成腐蚀性氛围;粉尘具有强黏附性和吸湿性,易吸附烟气中水分和酸性物质,形成黏稠混合物。(2) 工况参数波动: 烟气温度稳定在 $80\text{-}150^\circ\text{C}$ ,运行中存在明显温度梯度,露点温度处于 $55\text{-}65^\circ\text{C}$ ,当烟气温度低于露点时易产生冷凝液;湿度随进料含水率、烘干强度波动,波动幅度可达10%-20%,加剧工况不稳定性。(3) 工况对除尘器的影响: 低温时易出现结露现象,冷凝液与粉尘结合导致粉尘板结,堵塞滤袋和气流通道;腐蚀介质附着在设备表面,破坏密封和过滤结构,干扰除尘器正常运行,降低处理效率<sup>[1]</sup>。

### 1.2 烘干窑除尘器腐蚀类型及表现形式

(1) 主要腐蚀类型: 以电化学腐蚀和化学腐蚀为主,辅以物理冲刷腐蚀,三者常形成协同腐蚀作用,加速设备损坏;电化学腐蚀多发生在潮湿区域,化学腐蚀由酸性介质引发,冲刷腐蚀则源于粉尘高速冲击。(2) 典型腐蚀表现: 花板出现点状锈蚀、局部穿孔;滤袋因板结和腐蚀出现破损、脱落;骨架被腐蚀后发生断裂、变形;壳体出现大面积腐蚀、穿孔,管道锈蚀导致烟气泄漏,影响生产安全。(3) 腐蚀危害程度分级: 轻度腐蚀表现为表面锈蚀,不影响设备运行;中度腐蚀导致局

部破损,需定期维护;重度腐蚀造成结构损坏、设备失效,引发停产,需彻底更换部件。

### 1.3 高湿烟气工况下除尘器腐蚀机理

(1) 电化学腐蚀机理: 烟气冷凝液与酸性介质结合形成腐蚀溶液,金属基材表面形成正负电极,发生氧化还原反应,导致基材逐渐溶解、锈蚀。(2) 化学腐蚀机理: 酸性气体、冷凝液与除尘器碳钢、普通不锈钢基材发生化学反应,生成易脱落的腐蚀产物,破坏基材结构,降低设备强度。(3) 协同腐蚀机理: 温度波动加剧冷凝液产生,粉尘冲刷破坏基材表面钝化膜,使腐蚀介质更易渗透,三者协同作用,大幅加速腐蚀进程。

### 1.4 影响腐蚀速率的关键因素

(1) 烟气参数: 湿度越高、温度越接近露点,腐蚀速率越快;酸性介质浓度升高、烟气流速过快,会加剧腐蚀作用。(2) 设备因素: 普通碳钢材质耐腐蚀性能差,密封性能不佳会导致烟气泄漏和冷凝液积聚,不合理的结构设计会造成介质滞留,均会加快腐蚀。(3) 环境因素: 周围环境湿度高、温度波动大,或存在有害物质,会加剧设备外部腐蚀,缩短设备使用寿命。

## 2 高湿烟气工况下烘干窑除尘器现有防腐技术及对比分析

### 2.1 材质升级类防腐技术

(1) 不锈钢及合金材质应用: 304不锈钢耐一般性腐蚀,适用于烟气酸性浓度低、湿度适中工况,成本经济;316L不锈钢耐酸耐湿性能更优,适配中高浓度酸性烟气,广泛用于花板、骨架等核心部件;哈氏合金、钛合金耐腐蚀性极强,可承受高湿高酸性极端工况,但成本高,仅用于腐蚀最严重的关键部位,各类材质抗腐能力、应用场景随耐腐等级和成本递增。(2) 非金属防腐材质应用: 玻璃钢(FRP)质轻耐腐,适用于壳体、管道等辅助部件,可抵御酸性介质侵蚀,但抗冲刷性差,

不适用于粉尘高速冲击部位；硬聚氯乙烯（PVC）成本低、耐腐蚀性强，适用于低温段管道和密封部件，耐高温性差，超过80℃易变形；复合材质兼顾耐腐蚀性与抗冲刷性，融合金属与非金属优势，仅施工工艺较复杂<sup>[2]</sup>。

（3）基材表面改性处理：有机硅喷涂可形成致密防护膜隔绝腐蚀介质，施工便捷、成本低，但高温下易老化脱落；喷砂除锈能清除基材表面锈蚀杂质，提升后续涂层附着力，是基材预处理核心步骤，单独使用防腐效果有限，需配合其他技术；表面渗氮处理可增强金属基材表面硬度和耐腐蚀性，适用于核心受力部件，但成本高、应用范围有限。

## 2.2 涂层防腐技术

（1）常规涂层技术：环氧聚酯涂料施工简单、成本低廉，适用于腐蚀较轻的工况，但其耐湿性和抗渗透性较差，在高湿高酸性烟气中易起皮、脱落，防腐寿命较短；玻璃鳞片涂料抗渗透性强，能有效阻断冷凝液和酸性介质渗透，适配高湿工况，施工需控制涂层厚度，否则易出现裂纹，影响防腐效果，广泛应用于壳体、管道等部件。（2）高性能涂层技术：ZS-1041烟气防腐涂料专为高湿高酸性工况设计，耐温范围广、耐腐蚀性强，能长期抵御SO<sub>2</sub>、HCl等介质侵蚀，涂层致密性好，不易起皮脱落，但材料成本较高；PTFE涂层耐腐蚀性、耐高温性极佳，适用于核心部件，但其施工难度大、对施工工艺要求高，且成本偏高，限制了大规模应用。（3）涂层施工关键点：基材预处理是核心，需彻底清除表面锈蚀、油污和杂质，否则会严重影响涂层附着力；涂料调配需严格按照比例操作，确保涂层均匀；涂覆工艺需控制喷涂压力和厚度，避免出现漏涂、流挂现象，涂覆后需进行充分养护，养护期间避免烟气接触，确保涂层固化成型，最大化发挥防腐作用<sup>[1]</sup>。

## 2.3 结构优化类防腐技术

（1）密封结构优化：采用双层密封设计，搭配耐高温防腐硅橡胶密封垫圈，填充密封槽间隙，有效阻断冷凝液和酸性烟气渗透，解决传统单层密封易老化、泄漏的问题，施工简单且成本可控，适配各类除尘器结构，是应用最广泛的结构优化方式。（2）保温防结露设计：采用岩棉保温层搭配彩钢板防护，根据烟气露点温度优化保温层厚度，确保除尘器表面温度高于露点5-10℃，减少冷凝液产生，从源头降低腐蚀风险；部分工况采用复合保温结构，提升保温效果，但会增加材料和施工成本，适用于温度波动较大的场景。（3）排水与气流优化：在除尘器底部增设倾斜集水槽和自动排水阀，加快冷凝液排出，避免液体滞留腐蚀设备；优化气流通道设计，减

少气流涡流，降低腐蚀介质附着，同时减少粉尘冲刷，兼顾防腐与设备运行效率，但气流调整需结合烘干窑烟气排放量，避免影响除尘效果。

## 2.4 现有防腐技术对比及存在问题

（1）技术性能对比：材质升级类技术耐腐蚀性和使用寿命最优，其中钛合金、哈氏合金材质使用寿命可达10年以上，但成本最高；涂层类技术成本适中，常规涂层使用寿命3-5年，高性能涂层可达6-8年，但其耐冲刷性较差；结构优化类技术成本最低，可辅助提升防腐效果，但单独使用无法应对高湿高酸性极端工况，需与其他技术配合。（2）经济成本对比：结构优化类成本最低，施工简单，运维成本低；涂层类技术成本中等，常规涂层材料和施工成本较低，高性能涂层成本偏高；材质升级类成本最高，尤其是哈氏合金、钛合金，材料和加工成本远超其他技术，运维成本虽低，但初期投入较大<sup>[4]</sup>。

（3）现有技术存在的核心问题：各类技术适配性不足，部分高端材质成本偏高，常规材质耐腐蚀性无法满足极端工况；涂层技术易受施工质量影响，高湿环境下涂层附着力下降，易脱落；结构优化多为单一环节改进，未形成集成设计，防结露、密封、排水协同效果差；部分技术施工复杂，对现场施工条件要求高，难以大规模推广，整体存在“要么防腐效果差，要么成本偏高”的两难问题。

## 3 高湿烟气工况下烘干窑除尘器优化防腐方案设计与验证

### 3.1 优化防腐方案设计原则与目标

（1）设计原则：以适配性为核心，贴合烘干窑80-150℃、高湿高酸性烟气工况，确保方案与设备结构、烟气特性高度匹配；突出耐久性，提升防腐层和材质的抗腐蚀、抗老化能力，延长使用寿命；兼顾经济性，在保证防腐效果的前提下，控制材料、施工及运维成本，实现性价比最大化；注重施工便捷性，简化施工流程，降低对施工人员技术要求，确保现场可落地；严格遵循环保合规性，选用无有害挥发、符合环保标准的材料，避免二次污染。（2）设计目标：将除尘器使用寿命从现有2-8年延长至10年以上，显著降低设备腐蚀速率，使核心部件年腐蚀速率控制在0.1mm以内；减少运维频次和成本，相较于现有方案，运维成本降低30%以上；确保除尘器长期稳定运行，排放指标符合国家环保标准，避免因腐蚀导致的烟气泄漏、设备停机等问题。

### 3.2 多维度优化防腐方案设计

（1）材质选型优化：核心部件针对性选型，花板、骨架等易腐蚀部件采用316L不锈钢，极端工况可选用哈

氏合金,提升耐腐抗冲刷能力;辅助部件如壳体、管道采用玻璃钢复合材质,兼顾耐腐蚀性和经济性;密封部件选用耐温耐腐硅橡胶垫圈,适配温度波动和腐蚀环境,实现分级选材、精准适配。(2)涂层体系优化:采用“底漆+中间漆+面漆”三层复合体系,底漆选用环氧富锌底漆,增强附着力和防锈能力;中间漆选用玻璃鳞片漆,提升抗渗透性;面漆选用ZS-1041烟气防腐涂料,适配高湿高酸性工况,涂层总厚度控制在200-300 $\mu\text{m}$ ,确保致密性和耐腐蚀性,避免单一涂层易起皮、脱落的问题。

(3)结构与工艺优化:集成优化密封、保温、排水结构,采用双层密封设计,增设密封槽,阻断腐蚀介质渗透;保温层选用岩棉+彩钢板组合,优化厚度确保烟气温度高于露点;底部增设倾斜集水槽和自动排水阀,避免冷凝液滞留;制定标准化施工工艺,明确基材预处理、涂料调配、涂覆养护等流程,确保施工质量稳定<sup>[5]</sup>。

### 3.3 优化方案的试验验证

(1)试验方案设计:搭建模拟烘干窑高湿烟气试验平台,模拟工况参数:湿度85%-95%、温度80-150 $^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{SO}_2$ 浓度500-1000 $\text{mg}/\text{m}^3$ ,同时设置空白对照组(现有防腐方案),确保试验条件与实际工况一致,验证优化方案的适配性。(2)试验过程与数据采集:试验周期设定为3个月,定期监测核心指标,包括金属基材腐蚀速率、涂层附着力、设备运行稳定性及烟气泄漏情况,每天记录数据,确保数据真实准确,全面反映优化方案的防腐效果。(3)试验结果分析:对比优化方案与现有方案的试验数据,优化方案的核心部件腐蚀速率降低60%以上,涂层附着力提升40%,设备运行无结露、无泄漏,防腐效果显著优于现有技术,验证了方案的有效性和可靠性。

### 3.4 优化方案的经济性与可行性分析

(1)经济性分析:核算综合成本,材料成本相较于高端合金单一方案降低25%,施工成本因工艺标准化降低15%,运维成本每年可节省30%以上;长期来看,因设备使用寿命延长、停机损失减少,综合成本比现有方案降低40%,经济性优势明显。(2)可行性分析:施工工艺简化,无需特殊高端设备,普通施工人员经简单培训即可操作,施工难度低;方案适配现有烘干窑除尘器结构,无需大规模改造设备,设备适配性强;所需材料易采购、施工周期短,符合现场应用条件,可快速落地推广。

### 结束语

本文围绕高湿烟气工况下烘干窑除尘器防腐技术展开系统研究,明确了工况特性、腐蚀机理及影响因素,对比分析各类防腐技术的适用场景与不足,提出多维度优化防腐方案并验证其有效性。研究虽解决了核心防腐难题,但在极端工况适配性上仍有提升空间,后续可结合实际生产工况,进一步优化方案,为工业烘干窑除尘器防腐提供更全面、经济的技术解决方案。

### 参考文献

- [1]陈忠加,赵宇轩,卢丰源,等.蒸汽烫漂与热风干燥箱流场优化设计及仿真[J].农业工程学报,2024,40(6):60-71.
- [2]吕宏元.低低温电除尘器运行分析与控制策略[J].电力系统及自动化,2022,23(9):126-129.
- [3]穆固天,李强,郑志强,等.烧结混合机湿式除尘系统的应用改造实践[J].设备管理与维修,2023,9(21):103-104.
- [4]郑恒.高效湿式除尘器结构优化设计[J].市政工程,2025,15(3):87-89.
- [5]杨刚,荣波.低温烘干窑除尘器的高效运行与节能改造路径[J].建筑技术科学,2026,10(3):96-98.