

水玻璃-氧化铝-磷酸二氢铝复合涂层在炭素行业高温烟道的应用研究

田 军

宁夏锦腾炭素有限公司 宁夏 中卫 755000

摘要: 针对炭素行业高温、高硫、高粉尘烟道长期面临的高温氧化、SO₂酸雾腐蚀及粉尘冲刷三重耦合破坏问题,传统防护方案存在耐高温性不足、耐酸性差、使用寿命短、综合成本高等技术瓶颈,难以满足长期稳定运行需求。本文研发一种水玻璃-氧化铝-磷酸二氢铝复合涂层体系,兼具超耐高温、强耐酸雾、高耐冲刷、高附着力等核心优势,可有效抵御高温烟气、酸性介质与固体颗粒的长期共同作用,预期使用寿命可达3~5年。该复合涂层配方体系在炭素行业应用为国内首例,成功填补行业技术空白,为高温工业烟气通道防腐耐磨防护提供一条低成本、长寿命、绿色环保的新型技术路线,具备显著的推广价值与经济效益^[1]。

关键词: 高温防腐;复合涂层;炭素烟道

1 引言

炭素制品窑炉设备会连续排放大量高温烟气,后端进入环保系统前的烟气温度大部分在150~180℃,局部位置瞬时温度可达230℃。此类烟气成分复杂,易形成硫酸雾,还裹挟大量粉尘与固体颗粒,对烟道、吸收塔、净化塔等烟气通道内壁形成酸性腐蚀、粉尘冲刷的破坏作用。在长期恶劣工况下,烟道筒体与塔器内壁极易出现锈蚀、减薄、穿孔、泄漏等问题,造成烟气外泄、环境污染、生产中断等安全隐患,已成为制约炭素企业稳定高效运行的共性技术难题。

目前行业主流措施:碳钢加常规防腐措施,裸钢制品在高温含硫含尘烟气中数月乃至数日便出现严重腐蚀穿孔,维护频率高、难度大;有机玻璃鳞片涂层凭借较好的耐腐蚀性在中低温烟道广泛应用,但在170℃长期高温环境下易发生软化、降解、粉化与脱落,耐冲刷性能快速衰减,实际使用寿命仅一到两年,偶尔出现超温便损坏,且材料与施工成本居高不下;普通水玻璃-氧化铝涂层虽具备一定耐高温优势,但存在耐酸性差、易泛碱、孔隙率高、附着力不足、抗粉尘冲刷能力弱等问题,无法适应强腐蚀、高冲刷的复杂工况。^[2]

无机硅酸盐-磷酸盐复合涂层以工业大宗无机物为主要原料,兼具耐高温、不燃、环保无毒、成本低廉、施工便捷等突出优势,在高温工业防腐领域展现出巨大应用潜力。本文以宁夏锦腾炭素有限公司实际工况为应用背景,基于水玻璃-氧化铝基础体系,通过引入石英粉、硅微粉、磷酸二氢铝等功能组分进行协同改性,攻克传统水玻璃涂层耐酸性差、附着力低、不耐冲刷的技术瓶颈,为

国内炭素行业高温烟道防腐耐磨提供全新技术支撑。

2 涂层体系设计与性能原理

2.1 优化配方设计

本研究全部采用来源广泛、采购便捷、性价比高,符合工业化大规模推广应用要求。通过测试,确定最优复合涂层配方(重量比)如下:

1. 基础粘结与固化体系:模数3.0~3.3、波美度40~45° B_e水玻璃40份,氟硅酸钠为固化剂,添加量为氧化铝重量的4%;

2. 耐磨耐蚀骨料体系:α-Al₂O₃型325目氧化铝粉100份, SiO₂含量 ≥ 98%的200目石英粉20份, SiO₂含量 ≥ 92%的硅微粉8份;

3 改性增强功能相:工业级磷酸二氢铝3~5份

各组分按特定比例与顺序混合,形成均匀稳定的喷涂浆料,经喷涂与高温固化后形成整体致密的陶瓷化涂层。

2.2 性能提升机理

2.2.1 耐高温性能

水玻璃在氟硅酸钠催化作用下快速固化生成硅酸凝胶;高温环境下,硅酸凝胶与氧化铝、磷酸二氢铝发生固相反应,形成铝硅酸盐-磷酸铝复合陶瓷相,该陶瓷网络在170~500℃范围内结构稳定,不软化、不分解、不降解,从根本上解决有机涂层高温失效问题,可适应炭素烟道长期高温运行需求^[3]。

2.2.2 耐SO₂酸雾腐蚀性能

硅微粉粒径小、活性高,可有效填充涂层内部孔隙,降低孔隙率,形成致密屏蔽层,阻断SO₂酸雾、水汽等腐蚀性介质向基材渗透;磷酸二氢铝与水玻璃反应生成稳

定复盐,抑制涂层泛碱现象,从根本上提升耐酸性;氧化铝、石英粉等高稳定性无机骨料协同作用,进一步增强涂层在酸性环境下的化学稳定性,实现强耐酸雾腐蚀能力。

2.2.3 耐粉尘冲刷性能

涂层以高硬度氧化铝(莫氏硬度9)为主耐磨骨架,搭配石英粉(莫氏硬度7)形成双级耐磨体系,显著提升抗固体颗粒冲刷能力;硅微粉填充孔隙使涂层更加致密,减少应力集中与局部磨损,抗磨损能力较传统水玻璃涂层提升40%~60%,可长期抵御炭素粉尘高速冲刷。

2.2.4 高附着力性能

磷酸二氢铝可与碳钢基材表面的铁氧化物发生化学反应生成磷酸铁化学键,实现涂层与基材之间的化学粘结;同时,喷砂处理后的基材表面形成微观粗糙结构,涂层与之形成物理锚定作用;化学粘结与物理锚定双重作用,长期运行不空鼓、不起皮、不脱落。

2.3 核心性能指标对比及效果

为直观体现优化后复合涂层的性能优势,将其与传统水玻璃涂层、有机玻璃鳞片涂层进行关键性能对比,结果如表1所示。

表1 不同涂层性能对比

性能指标	优化复合涂层	传统水玻璃涂层	玻璃鳞片涂层
长期耐温/°C	500+	400	≤ 150
耐SO ₂ 酸雾	优异	较差	良好(高温衰减)
年磨损量/mm	< 0.3	0.8~1.2	0.6~1.0
附着力(划格法)	1级	2~3级	1~2级
抗压强度/MPa	≥ 30	≥ 20	—
造价/(元/m ²)	90~100	70~80	150~200
使用寿命/年	3~5	1~2	1~2

注:划格法附着力1级为涂层无脱落,2~3级为局部脱落;年磨损量为170°C含尘烟气工况下实测值。

由表1可知,优化复合涂层在耐温性、耐酸性、耐冲刷性、附着力、使用寿命等方面全面优于传统水玻璃涂层;与玻璃鳞片涂层相比,耐温性提升超200°C,耐冲刷性能提升50%以上,使用寿命延长1~3倍,造价降低50%以上,综合性价比优势极为显著。

3 工程应用与施工工艺

3.1 工程概况

宁夏锦腾炭素有限公司本次防护工程涉及总施工面积913m²。设备正常运行温度170°C~230°C,介质为罐式煅烧炉排放的含SO₂酸雾与炭素粉尘的高温烟气,核心技术需求为耐高温、耐酸雾腐蚀、耐粉尘冲刷、高附着力、长寿命、低成本。

3.2 标准化施工工艺

1. 基层处理:采用喷砂除锈工艺,处理等级达到Sa 2.5级,表面粗糙度控制在Ra = 40~70μm,去除铁锈、氧化皮、油污与灰尘;喷砂完成后2小时内必须进行封底施

工,防止基材返锈影响涂层附着力。

2. 浆料配制:先将干料(氧化铝粉+石英粉+硅微粉+氟硅酸钠)投入搅拌机预混5~10min,保证粉体分散均匀;再加入水玻璃搅拌15~20min至均匀稠浆状;最后加入磷酸二氢铝搅拌5min即可使用,配制好的浆料需在30~40min内用完,避免因固化导致无法施工。

3. 分层喷涂:设计总厚度2.5~3.0mm,分4遍交叉喷涂完成:封底涂层0.5mm→主涂层第一遍1.0mm→主涂层第二遍1.0mm→面涂0.5mm;采用交叉喷涂方式保证涂层厚度均匀、结构致密,无漏喷、无流挂、无针孔。

4. 固化养护:常温自然养护24h达到触干状态,48h完成初步固化;随后采用阶梯升温固化工艺:80°C恒温2h→120°C恒温2h→170°C恒温2h,促进涂层完全陶瓷化;总养护时间72h后,涂层达到最佳性能状态,方可投入正式运行。

3.3 工程费用测算

本次913m²涂层工程费用采用不含税测算,详细费用构成如表2所示。

表2 913m²涂层工程费用测算(不含税)

费用类型	具体项目	费用/元	具体项目	费用/元
材料费用	氧化铝粉(5.5t, 3300元/t)	18150	硅微粉(0.4t, 3000元/t)	1200
	水玻璃(2.1t, 800元/t)	1680	磷酸二氢铝(160kg, 15元/kg)	2400
	氟硅酸钠(220kg, 6元/kg)	1320	施工辅料	1500
	石英粉(1.0t, 1000元/t)	1000		

续表:

费用类型	具体项目	费用/元	具体项目	费用/元
材料费用小计				27250
施工费用	喷砂除锈 (22元/m ²)	20086	脚手架搭建/拆除 (8元/m ²)	7304
	喷涂施工 (22元/m ²)	20086	检测+管理费	7569
施工费用小计				55041
总费用	材料+施工			82291
	备用金 (5%)			4115
工程总造价				≈ 86406

注:工程总造价约8.688万元,单位造价约95元/m²,远低于有机玻璃鳞片涂层150200元/m²的单位造价,成本优势显著。

4 创新性评价

4.1 核心技术创新

1. 体系创新:首次构建水玻璃-氧化铝-石英粉-硅微粉-磷酸二氢铝五元复合体系,实现耐高温、耐酸蚀、耐冲刷、高附着力的协同提升,突破传统水玻璃涂层三大技术瓶颈。

2. 应用创新:将该复合涂层成功应用于炭素行业170°C以上含硫含尘高温烟道,适配强腐蚀、高冲刷恶劣工况。

3. 成本创新:全组分采用工业大宗原料,造价仅为玻璃鳞片涂层的一半左右,施工快捷、寿命更长,性价比行业领先。

4.2 国内首例依据

通过中国知网、万方数据库、专利数据库全面检索,并开展国内炭素行业广泛调研,结果显示:

1. 无任何公开发表文献报道该五元复合涂层配方;
2. 无相关专利记载该配方在炭素高温烟道的应用;
3. 国内炭素企业均采用玻璃鳞片、耐酸胶泥等传统技术,无相同技术应用案例。

因此,本项目该配方体系在炭素行业170°C含硫烟气管道的规模化喷涂应用为国内首例,成功填补炭素行业

高温防腐耐磨技术空白[4]。

5 结论

1. 优化后的水玻璃-氧化铝-磷酸二氢铝复合涂层,完全适配炭素行业170°C上下、含SO₂酸雾、高粉尘冲刷的复杂工况,耐高温、耐酸蚀、耐冲刷、高附着力性能全面达标;

2. 涂层以工业大宗无机物为原料,环保无毒、成本低廉、施工便捷,单位造价约95元/m²,较有机玻璃鳞片方案降低50%以上,综合性价比显著优于传统防护技术;

3. 该涂层在宁夏锦腾炭素913m²烟道的规模化应用为国内炭素行业首例,连续运行12个月性能稳定,年磨损量 < 0.3mm,预期寿命3~5年,应用效果优异;

4. 本研究形成完整的配方设计、施工工艺、质量控制与评价体系,为高温工业烟道防腐耐磨提供可靠新型技术路线。

参考文献

- [1]王健,李勇,张磊.炭素行业焙烧烟道腐蚀机理及防护技术研究进展[J].炭素技术,2022,41(3):78-83.
- [2]刘军,赵阳,陈明.水玻璃基复合涂层的改性研究及应用[J].腐蚀与防护,2021,42(8):65-69.
- [3]张宏,李娟,王浩.磷酸二氢铝改性水玻璃涂层耐高温耐腐蚀性研究[J].中国涂料,2020,35(11):45-50.
- [4]李建明,刘敏,张艳.高温含硫烟气管道防腐涂层的研究与应用[J].工业建筑,2023,53(2):198-202.