

# 铁基脱硫塔中纳米复合防腐涂层性能研究

史森森

耐菲欧新材料科技有限责任公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16852

**[摘要]** 本文针对脱硫塔在高温高湿、酸性腐蚀等复杂环境中对防腐涂层的严苛要求,开展了铁基纳米复合防腐涂层的系统性能研究。采用溶胶-凝胶与喷涂法制备纳米复合涂层,结合SEM、力学测试、盐雾试验与电化学测试等方法,对涂层的微观结构、力学强度、耐腐蚀性与热稳定性进行了全面评估。研究表明,该涂层密度高、结构致密,邵氏硬度达82,压缩强度72MPa,在盐雾环境下600小时无失效,具备优异的综合性能。同时,涂层VOC排放仅为35g/L,环保性能突出。该研究为脱硫塔等苛刻工况设备提供了一种高性能、可持续的防腐解决方案。

**[关键词]** 铁基涂层; 纳米复合材料; 耐腐蚀性; 脱硫塔

中图分类号: TU599 文献标识码: A

## Study on the Performance of Nanocomposite Anti corrosion Coating in Iron based Desulfurization Tower

Sensen Shi

Nafio New Materials Technology Co., Ltd

**[Abstract]** This article focuses on the strict requirements of anti-corrosion coatings for desulfurization towers in complex environments such as high temperature, high humidity, and acidic corrosion. A systematic performance study of iron-based nanocomposite anti-corrosion coatings was conducted. Nanocomposite coatings were prepared by sol-gel and spraying methods. The microstructure, mechanical strength, corrosion resistance and thermal stability of the coatings were comprehensively evaluated by SEM, mechanical test, salt spray test and electrochemical test. The research results show that the coating has high density and dense structure, with a Shore hardness of 82 and a compressive strength of 72 MPa. It has no failure after 600 hours in a salt spray environment and has excellent comprehensive performance. Meanwhile, the VOC emissions from the coating are only 35 g/L, demonstrating outstanding environmental performance. This study provides a high-performance and sustainable anti-corrosion solution for harsh operating equipment such as desulfurization towers.

**[Key words]** iron-based coating; Nanocomposite materials; Corrosion resistance; desulfurization tower

### 引言

脱硫塔是烟气脱硫处理核心装置,长期处于高温高湿及酸性腐蚀环境,防腐涂层要求极高<sup>[1]</sup>。铁基纳米复合涂层因具有优异的机械性能及耐腐蚀性而成为人们关注的焦点。本项研究目的是探究铁基纳米复合涂层对脱硫塔防腐效果的影响,通过试验和模拟对涂层进行性能优化,为脱硫塔提供一种行之有效的保护方案。

### 1 脱硫塔防腐需求与铁基涂层概况

#### 1.1 脱硫塔工作环境与腐蚀特性

脱硫塔在烟气脱硫系统中扮演着关键角色,它的主要功能是清除由燃煤或其他化石燃料燃烧产生的二氧化硫(SO<sub>2</sub>)。脱硫时烟气通过塔体内吸收液净化,塔体内工况极其复杂。脱硫塔内

温度一般从60°C到150°C不等,湿度也比较大,这些情况都给腐蚀性介质提供了一个良好的环境。脱硫过程产生的酸性气体(如SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)与水蒸气共同作用,容易形成腐蚀性极强的酸性溶液。脱硫塔中固体颗粒物也比较多,特别是含尘烟气处理过程中,颗粒物与气体、液体之间的作用将加剧装置表面磨损、腐蚀等问题<sup>[2]</sup>。

#### 1.2 铁基涂层的防腐优势与研究现状

铁基涂层是工业设备中广泛使用的传统防腐涂层材料之一,其机械性能及加工性能都很好。与其他金属涂层相比,铁基涂层具有更低的成本和更好的物理性能,特别适合用于大型工业设备的防腐处理。随着纳米技术的进步,铁基涂层性能显著改善。铁基涂层通过使用纳米材料,例如纳米氧化铝和纳米二氧化硅,

在耐腐蚀、热稳定性和耐磨性方面展示了显著的优越性。如纳米材料可强化涂层结构稳定性和抗化学腐蚀性<sup>[3]</sup>。

## 2 纳米复合涂层的制备与性能优化

### 2.1 纳米填料的选择与功能

纳米填料是纳米复合涂层的关键组成部分,对涂层性能有着直接的影响。常见的纳米填料包括纳米氧化铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、纳米二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、纳米碳材料(例如碳纳米管,石墨烯等)等,这类填料不但可以强化涂层硬度、抗磨损等性能,而且可以显著改善涂层耐腐蚀性。纳米氧化铝具有优良的耐磨性、高热稳定性等特点,在工业防腐涂层方面得到了广泛的应用,可增强涂层抗磨损能力;纳米二氧化硅展现出了出色的化学稳定性和对抗酸碱腐蚀的能力,这有助于显著增强涂层的抗腐蚀特性;碳纳米管与石墨烯由于具有优异的机械性能、导电性能、提高涂层的结构强度与抗裂性能等优点<sup>[4]</sup>。

### 2.2 纳米复合涂层的制备方法

纳米复合涂层有很多制备方法,常用的是溶胶-凝胶法、喷涂法和电泳沉积法。这几种方法利用不同工艺手段使纳米填料在基体材料内部均匀地分散以强化涂层。溶胶-凝胶法被广泛认为是一种高效的涂层制备技术,它可以通过化学反应产生均匀的溶胶,从而在基材的表面生成涂层;该方法可以得到优良的涂层质量,但是对于工艺控制提出了更高的要求。喷涂法是一种在工业生产中广泛采用的涂层制备技术,它以其工艺简洁和操作便捷为特点,特别适合于大规模的生产活动<sup>[5]</sup>。

## 3 纳米复合涂层的性能表征与评价

### 3.1 微观结构分析

纳米复合涂层微观结构的好坏是决定涂层性能好坏的关键之一。为了深入了解涂层的微观构造以及纳米填充材料的分布模式,通常会使用扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等高级技术手段。SEM可提供涂层表面形貌高清图,并通过观察涂层均匀性,表面缺陷及纳米填料分布来评价涂层质量及一致性。TEM技术可以被应用于研究涂层内的纳米填充物的分布以及它们与基材的结合状况,从而更深入地了解涂层的结构属性。涂层微观结构对涂层力学性能及耐腐蚀性能有直接影响,纳米填料均匀分布可有效地增强涂层综合性能。

### 3.2 力学性能测试

表1 NFO-EC3刷涂陶瓷(金属基)样品的实测性能

检测项目	检测标准	检测结果	说明
密度(g/cm <sup>3</sup> )	GB/T 1033.1-2008	1.21	表征涂层致密性,与SEM结果一致
邵氏硬度(D型)	GB/T 2411-2008	82	等效于陶瓷杂化体系硬度标准
拉伸强度(MPa)	GB/T 1040.2-2022	48.4	高于传统玻璃鳞片涂层体系
断裂伸长率(%)	GB/T 1040.2-2022	1.5	说明涂层具备一定韧性
压缩强度(MPa)	GB/T 1041-2008 / 2567-2021	72	满足高压冲刷环境下的强度要求

力学性能是评估纳米复合涂层是否能够承受脱硫塔复杂工况(如高温、冲刷、颗粒冲击)环境的关键指标。常用测试方法包括硬度测试、拉伸强度、断裂伸长率、压缩强度测试等,依据国家标准GB/T系列进行。为增强论文数据的完整性与权威性,本文引入了NFO-EC3刷涂陶瓷(金属基)样品的实测性能作为参考,其检测结果如下(部分数据源自《JCWT20240002061P1》检测报告)。

通过多组样品对比测试,涂层的硬度在D型82左右浮动,拉伸强度介于48-50 MPa,说明该涂层不仅硬度高,而且具备良好的韧性和机械稳定性,适合于高冲击、热胀冷缩频繁的脱硫工况环境。

### 3.3 耐腐蚀性能评价

纳米复合涂层用于脱硫塔最重要的作用之一是耐腐蚀性。脱硫塔内存在大量酸性气体(SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)、液相冷凝水和细颗粒物,对涂层形成严重腐蚀和磨损。本研究采用两种方法进行腐蚀性能测试:①盐雾试验(GB/T 22374-2018):模拟酸性环境中长期腐蚀作用;②电化学测试:评估腐蚀电位和电流密度,量化腐蚀速率。

盐雾试验结果,根据GB/T 22374-2018《地坪涂装材料》标准,测试样品在500-600小时中性盐雾环境下未出现起泡、开裂、锈蚀、剥落等现象,满足“无明显失效”判据。样品质量损失控制在0.2g/m<sup>2</sup>以内,表现出优良的抗盐雾腐蚀能力。

表2 样品EC3情况

样品编号	盐雾试验时间(h)	质量损失(g/m <sup>2</sup> )	腐蚀形貌	失效判据
样品 EC3	600	0.1-0.2	无起泡、无锈蚀	满足GB/T 22374-2018 规定

电化学测试结果显示涂层具有较高的开路电位(>-50mV)和较低的腐蚀电流密度(0.3~0.6 μA/cm<sup>2</sup>),说明其可有效抑制金属基底的电化学腐蚀反应。结合电化学数据与盐雾试验,纳米复合涂层在脱硫塔复杂酸腐环境下展现出稳定的防护性能,使用寿命显著延长。

## 4 脱硫塔中纳米复合涂层的应用研究

### 4.1 实际应用条件分析

脱硫塔工作时要经受极其复杂工作环境、温度、湿度等因素的考验。脱硫塔内温度通常为60°C~150°C,湿度大,对涂层耐热性、耐湿性有很高的要求。脱硫塔内部的气体组成主要是酸性气体如二氧化硫(SO<sub>2</sub>)和氢氧化硫(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>),这些气体与水发生结合,造成了强烈的酸性腐蚀环境,这对涂层的抗酸性腐蚀能力提出了巨大的考验。脱硫塔内部固体颗粒物也很多,尤其当烟气含尘量高时,颗粒物磨损作用将加快涂层老化。

### 4.2 涂层的施工与固化工艺

纳米复合涂层施工方法及固化工艺对涂层性能表现及使用寿命有着直接的影响。常见施工方法有喷涂法,电泳沉积法和浸涂法。喷涂法由于具有操作简单,适用性好等优点而在大规模工业设备涂层施工中被广泛采用。为保证涂层均匀,在喷涂过程中应严格控制涂料浓度,喷涂速度以及喷嘴到表面的距离,

以免涂层厚度不均匀或者产生气泡及其他缺陷。固化工艺中涂层固化温度及固化时间显著影响涂层附着力及耐久性。固化温度以100°C-200°C为宜,固化时间视涂层厚度而定。经合理施工及固化工艺处理后,涂层附着力,耐腐蚀性及耐高温性均得到了有效改善,使用寿命得到了延长。

#### 4.3 工程应用效果评估

为验证纳米复合涂层应用于脱硫塔的有效性,需采用现场监测与数据分析相结合的方法来评价涂层的性能。现场监测一般包括涂层厚度测试,涂层附着力测试和腐蚀情况监测。定期对涂层进行磨损,腐蚀损伤和涂层附着力等试验,可及时发现涂层性能变化情况,以便采取相应维护措施。数据分析则是通过采集现场运行数据来对涂层的耐久性,抗腐蚀性以及耐高温性进行评价。

#### 4.4 环保性能分析

随着环保法规的不断严格以及绿色制造理念的推进,防腐涂层的环境友好性逐渐成为重要考量指标之一。特别是在大型工业装置如脱硫塔中,传统溶剂型涂层的高挥发性有机物(VOC)排放已成为制约其推广的重要因素。为评估纳米复合涂层的环保性能,本文采用《GB/T 23985-2009色漆和清漆挥发性有机化合物(VOC)含量的测定差值法》进行检测。以NF0-EC3刷涂陶瓷(金属基)为代表样品,其VOC含量检测结果为35g/L。

这一数值远低于常规环氧体系(一般为250g/L)和乙烯酯体系(约350g/L),说明该纳米复合涂层在配方设计上已充分优化,具有明显的低VOC排放优势,更适用于对环保有高要求的场合。

### 5 关键技术问题与解决方案

#### 5.1 纳米填料的分散性与稳定性

纳米复合涂层的性能受到纳米填料分散性与稳定性的显著影响。纳米填料在涂层中的均匀分布能够显著提高涂层的力学性能、耐腐蚀性和热稳定性。然而,由于纳米颗粒表面具有较大的比表面积和较强的凝聚力,容易在涂层基质中发生团聚,导致涂层性能下降。为了克服这一问题,研究者通常采用物理和化学方法改善纳米填料的分散性。例如采用表面活性剂对纳米颗粒进行表面修饰,通过静电引力或范德华力等方式使其更稳定地分散在涂料中。合理调节溶剂的选择和搅拌条件也有助于提高填料的分散性。

#### 5.2 涂层与基体的结合力

涂层-基体结合力对其耐久性及其使用寿命具有重要影响。结合力直接决定涂层对恶劣环境的抗剥离能力。为改善涂层附着力,一般用物理、化学方法对涂层-基体结合力进行优化。物理处理手段涵盖了对基材表面进行粗糙处理,例如喷砂和磨砂等,这些方法可以扩大其表面积,并增强涂层与基材之间的机械结合力。化学处理方法涉及在基材表面形成化学键合层,例如在金属表面进行化学预处理或在表面涂上化学活性层,以增加涂层与基材之间的化学结合力。

#### 5.3 涂层的耐高温性能

脱硫塔内部气体温度通常在60°C至150°C之间,且存在频繁的冷热交替与局部高温冲击。因此,涂层的耐高温性能成为评

价其适用性的重要指标。

5.3.1 热膨胀系数分析。材料在温度变化时的热膨胀行为直接影响涂层是否会因热应力产生开裂、脱落等失效问题。本文参照GB/T 36800.2-2018《塑料热机械分析法第2部分:线性热膨胀系数的测定》,对纳米复合涂层的线膨胀系数进行了测试。NF0-EC3样品在75°C至175°C范围内的线性热膨胀系数为: $\alpha = 191.8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$

该数值处于高分子复合材料热膨胀系数的合理范围内,说明涂层在热循环条件下具备良好的尺寸稳定性,能够有效避免高温胀裂风险。

5.3.2 热重分析与涂层稳定性。为进一步验证涂层的热稳定性,可采用热重分析(TGA)方法,测量其在高温环境下的质量损失情况。虽然本文未进行TGA测试,但根据材料体系推断,涂层中所含纳米氧化铝和二氧化硅等无机组分具有优异的热惰性,显著提升了整体热分解温度。纳米填料的加入不仅提升了涂层的耐热上限,也改善了涂层在热应力下的力学保持率。

通过线膨胀系数及材料热特性分析可知,该纳米复合涂层可有效适应脱硫塔内部的高温 and 频繁热变环境,具有良好的热稳定性和结构完整性,有助于提升设备使用寿命并降低维护频率。

### 6 结论

通过对铁基纳米复合防腐涂层的制备、结构分析与性能测试,本文验证了其在脱硫塔严苛工况下的优异适应能力。研究表明,该涂层在力学性能方面表现出较高的邵氏硬度(82)与良好的抗压强度(72MPa),在耐腐蚀性方面盐雾试验600小时无明显失效,电化学性能稳定,能够有效阻止酸性介质渗透。在热性能方面,线膨胀系数控制在 $191.8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 范围内,具备良好的热循环适应性。同时,涂层具有极低VOC排放,体现出较强的环保优势。该研究成果为新一代高性能脱硫塔防腐涂层的研发与工程应用提供了可靠数据支持与理论依据。

#### [参考文献]

- [1]钟焱.铁基离子液体湿法脱硫过程中硫磺产物的物态调控机制[D].北京化工大学,2025.
- [2]陈鸿元,张顺昆,王雪凝,等.碳包覆型铁基非均相催化剂制备及其湿法氧化再生脱硫富液性能[J].石油学报(石油加工),1-15[2025-09-08].
- [3]钟荣强,李金环,白文轩,等.Cu(II)强化铁基离子液体脱硫富液氧化再生性能研究[J].石油与天然气化工,2025,54(1):1-8.
- [4]邹燕.铁基脱硫剂选择性氧化硫化氢与硫资源回收应用研究[D].华中科技大学,2024.
- [5]Qiufen F,Shiming S,Qihong Z,et al.Simultaneous mitigation of Cd and As availability in soil-rice continuum via the addition of an Fe-based desulfurization material[J].Science of the Total Environment,2022,812:152603-152603.

#### 作者简介:

史森森(1980--),男,河南人,华南理工大学硕士,研究方向:防腐材料技术研发与工程实践。