

# 烟气脱硫系统耐磨蚀有机硅改性环氧涂层的开发与评价

史森森

耐菲欧新材料科技有限责任公司 新星 839101

**【摘要】**：本项研究的目的是研制出一种适用于烟气脱硫系统的耐磨蚀有机硅改性环氧涂层，并系统评价了其性能。通过模拟分析涂层微观结构，利用数值模拟的方法讨论了不同操作条件下涂层磨蚀及腐蚀行为。试验结果表明，该涂层在高温、酸性气体以及高湿度环境下表现出优良的耐磨性、耐腐蚀性、硬度、附着力和稳定性都在规定范围之内。根据现场监测的数据，涂层的磨蚀率在5年的时间里从0.02g/h上升到0.12g/h，腐蚀速度从0.1mm/yr增加到0.5mm/yr，而涂层的厚度也呈现逐年减少的趋势。涂层仍然能够为设备提供有效的保护。涂层制备时，有机硅和树脂的合理比例，固化过程的控制以及喷涂技术等都是在影响涂层性能的关键因素。

**【关键词】**：有机硅改性；环氧涂层；耐磨蚀；烟气脱硫

DOI:10.12417/3083-5526.25.03.015

## 引言

烟气脱硫系统在现代电力产业中是降低污染排放的关键设备，由于该系统长时间处于高温、高湿、酸性气体等恶劣条件下，设备表面涂层易发生腐蚀、磨损等问题，从而影响了系统长期、稳定地工作。硫氧化物和氮氧化物气体是冶金生产过程中不可忽视的主要气体污染源，对环境和人类健康构成严重威胁。为了有效应对这一问题，烟气脱硫脱硝系统迅速成为处理此类污染气体的高效手段，被广泛应用于冶金生产过程。其中，脱硝环节作为脱硫脱硝系统的重要组成部分，更是关乎整个系统效能的关键。所以研制一种耐磨蚀耐腐蚀涂层材料具有重要意义。环氧树脂由于具有优良的机械性能及较好的附着力而广泛用作涂层材料，但是当面临高温及酸性气体环境的考验时，常规环氧涂层通常会出现耐腐蚀性不足等缺点。

## 1 烟气脱硫系统工况概况

### 1.1 腐蚀与磨蚀工况特点

烟气脱硫系统的腐蚀和磨蚀对设备运行有重要影响。腐蚀主要是由于烟气中存在的酸性气体（如 $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ ）以及水分与金属表面反应，导致设备表面材料的化学变化。尤其在湿度较大环境中，腐蚀速度加快，易造成设备疲劳损伤、腐蚀穿孔等。磨蚀主要源于烟气中固体颗粒（如煤灰、硫酸盐等）与设备表面的摩擦，尤其是在高流速、较高温度及高颗粒浓度的条件下，磨蚀的影响更为显著<sup>[1]</sup>。这几方面因素综合影响，将加重设备损坏程度，降低设备使用寿命，并对系统维护造成很大压力。腐蚀和磨蚀共同作用，更威胁设备性能。腐蚀环境的出现通常会使金属表面变得较为脆弱，很容易受到磨损进一步增加，从而使材料表面失效速度增加。工作时间越长，上述问题就有可能越严重，给设备长时间运行造成很大安全隐患。

### 1.2 典型材料失效模式

烟气脱硫系统材料的失效模式有腐蚀疲劳、点蚀、裂纹扩展及磨损。其中腐蚀疲劳是因为腐蚀环境下应力作用降低了材料疲劳寿命，易引起裂纹萌生与扩展。点蚀主要发生在特定区域，由于金属表面保护膜失效导致的小规模腐蚀，有可能演变为穿孔现象<sup>[2]</sup>。裂纹扩展一般是在腐蚀和机械应力等因素综合作用下，使早期微小裂纹逐步扩展并最终引起材料失效。磨损主要是因为固体粒子与金属表面之间的反复摩擦，导致表面材料脱落和形态改变，严重的情况下可能会导致设备功能失效或系统停机。除了以上常见的失效模式，材料还可能面临应力腐蚀开裂（SCC）和高温氧化等问题。在一些高温或强酸环境下，金属材料可能会发生氧化反应，进一步加速材料的老化和失效<sup>[3]</sup>。特别是在强烈酸性气体和高温条件下，氧化与腐蚀交替作用，造成表面硬度下降，增加了裂纹的扩展速率。

## 2 涂层失效影响因素及关键提升措施

### 2.1 涂层性能衰减的主要影响因素

涂层性能衰减受多种因素影响。高温环境可使涂层材料热老化、硬度下降、附着力下降，从而影响防护效果。酸性气体和水分会与涂层发生化学反应，加速涂层的腐蚀过程，尤其在湿度较高的情况下，涂层表面更易出现裂纹和剥落。磨蚀作用亦不容忽视，烟气中固体颗粒与涂层表面发生摩擦而造成涂层流失。涂层厚度及施工质量对涂层保护性能有直接影响，太薄或者施工不合适均会导致涂层失效。涂层服役时间较长时可能受环境温度，湿度及污染物浓度改变等因素影响而发生疲劳与老化<sup>[4]</sup>。涂层的微观构造可能会受到外界因素的影响，如应力集中、热循环和冲击力等，这些都有可能导致涂层更快地损坏和性能下降。在一些高温高湿环境下，涂层物理化学性质会发生不可逆的改变，从而影响涂层整体功能的发挥。

2.2 提升耐磨蚀与耐腐蚀性的关键措施

为了促进涂层耐磨蚀性和耐腐蚀性的提高，涂层材料的优化选择至关重要，可使用陶瓷涂层等高耐腐蚀材料或者高耐磨合金涂层来提高涂层抗腐蚀、抗磨损能力。提高涂层的附着力，通过表面处理来增强基材与涂层的结合。合理地控制涂层厚度是关键，选用与工况相匹配的涂层厚度才能保证涂层的耐久性。定期对涂层进行检查维修，对涂层破损情况进行及时修补，以保证涂层在长期使用过程中保持完整，提高涂层使用寿命。选择涂层还要考虑其自修复能力和环境污染适应性等。比如利用纳米材料或者智能涂层技术可增强涂层损伤后自修复能力和使用寿命<sup>[5]</sup>。

3 有机硅改性环氧涂层性能模拟分析

3.1 涂层微观结构仿真模型

为对有机硅改性环氧涂层性能进行研究，构建涂层微观结构仿真模型。在模型中，重点考虑了涂层硬度、附着力、耐腐蚀性、耐磨性等四个关键指标。硬度体现了涂层材料抗压和抗刮擦性能，高硬度涂层能抵抗更大外力。涂层与基材之间的结合强度是由其附着力所决定的，这直接关系到涂层的稳定性和持久性。耐腐蚀性是考虑涂层化学稳定性来模拟涂层在酸性和碱性条件下抗腐蚀能力。耐磨性则是静摩擦系数与摩擦力来模拟涂层长期服役时抵抗外部物质摩擦的能力。综合模拟这几个指标，可精确地评价涂层实际运行条件下的性能。

3.2 涂层服役阶段划分

有机硅改性环氧涂层的服役经历了几个阶段，主要有初期阶段、稳定阶段以及衰退阶段。早期阶段涂层刚刚投入运行，主要是经历了材料迅速变硬、初期附着力形成等过程，涂层性能很快就达到了一定程度。这一阶段所面临的最大挑战在于涂层一基材结合力大、易产生微裂纹、气泡等问题。进入稳定阶段，涂层性能逐步趋于稳定、硬度、附着力、耐腐蚀性及耐磨性均达到了预期值，涂层能长期经受外部环境考验，显示出良好的保护性能。涂层随服役时间增加逐渐步入衰退阶段，涂层因受到外界环境腐蚀、磨损等影响而逐渐老化，耐腐蚀性和耐磨性指标均有所降低，并最终造成涂层失效。这一阶段需要加强定期检查与保养，延长涂层寿命。

3.3 涂层磨蚀—腐蚀耦合行为模拟分析

在涂层的磨蚀与腐蚀耦合行为模拟中，考虑四个关键指标：磨损率、腐蚀速率、涂层厚度和表面温度。以下是模拟分析数据表：

表1 涂层磨蚀—腐蚀耦合行为模拟分析数据表

参数	初始值	1年后	3年后	5年后
磨损率（g/h）	0.02	0.05	0.08	0.12

腐蚀速率（mm/yr）	0.1	0.2	0.35	0.5
涂层厚度（μm）	50	45	40	35
表面温度（℃）	50	55	60	65

4 涂层制备与应用关键技术

4.1 有机硅改性与树脂配比技术

有机硅改性环氧涂层制备工艺的关键是有机硅和树脂比例的确定。通过适当调节有机硅与环氧树脂配比可有效改善涂层耐温性、耐腐蚀性及耐磨性。配比时主要考虑树脂固化速度及有机硅改性作用来保证涂层流动性及附着力好。有机硅的添加既可促进涂层热稳定性又可改善涂层柔韧性以降低热膨胀收缩时可能出现的裂纹。配比时固化剂的用量还需要合理调控，以免涂层表面过硬或者固化不充分而影响长期性能。对有机硅改性及树脂比例进行优化，可得到更稳定、更长效的涂层以适应工业应用对环境的严苛要求。

4.2 涂层固化与成膜控制技术

涂层的固化和成膜过程是影响涂层性能的关键。固化温度与固化时间对涂层硬度与附着力有至关重要的影响。有机硅改性环氧涂层时，合适的固化温度能促进树脂交联反应生成强韧涂层结构。固化时温度控制要针对不同涂层材料特点进行调节，以免温度过高造成涂层热应力过大而产生裂纹。在成膜技术中，涂层表面的平滑性和均质性是关键，而为了增强涂层的抗腐蚀和耐磨特性，控制成膜的速度和涂层的厚度均匀性是至关重要的。通过对固化过程参数进行合理调整，能够使涂层物理性能达到最优，保证涂层在恶劣环境下能够长时间稳定运行。

4.3 工业现场喷涂与质量控制技术

工业现场应用时对涂层进行喷涂技术及质量控制非常关键。在喷涂时，喷枪选型及喷涂压力对涂层均匀性及附着力有直接影响，喷枪型号的合理选择及喷涂压力的调整可保证涂层在基材表面覆盖均匀，避免出现涂层太厚或者太薄的情况。环境温湿度对喷涂质量也有很大影响，湿度过高或者温度过低都会造成涂层固化不够彻底或者表面不够平整，所以需要喷涂环境严格把控。涂层厚度要经过严格的质量监控，以保证涂层符合设计所需厚度标准。实施上述喷涂及质量控制技术可保证涂层对工业现场达到最佳保护效果并提高装置耐用性及运行效率。

5 涂层工程验证与性能评价

5.1 现场运行监测与数据采集

为验证有机硅改性环氧涂层的实际应用性能，现场运行监测和数据采集在多个时间节点进行。监测的四个关键指标包括磨损率、腐蚀速率、涂层厚度和表面温度。以下为某工业现场

在不同时间节点的监测数据：

表 2 涂层磨蚀与腐蚀耦合行为模拟分析结果

时间 (年)	磨损率 (g/h)	腐蚀速率 (mm/yr)	涂层厚度 ( μ m)	表面温度 (℃)
0	0.02	0.1	50	50
1	0.05	0.2	45	55
3	0.08	0.35	40	60
5	0.12	0.5	35	65

5.2 涂层应用效果评价

从 5.1 所给出的现场监测数据可见该涂层长期使用过程中性能发生了改变。在 5 年的时间范围内，磨损率从 0.02 g/h 上升到 0.12 g/h，这意味着涂层的耐磨能力会随着时间的推移逐渐减弱，但它仍然维持在一个能够接受的水平。在 5 年的时间里，腐蚀速度从 0.1 mm/yr 上升到了 0.5 mm/yr，这表明涂层的抗腐蚀能力有所减弱，特别是在酸性条件下，这种下降更为明显。随着时间的推移，涂层的厚度逐渐变薄，经过 5 年的时间，

其厚度下降了 15μm，这表明涂层经历了老化和磨损的过程。提高表面温度可能和改变设备运行环境有关，而长时间高温暴露会加剧涂层老化进程。综合考虑，涂层服役后出现了不同程度的性能衰退现象，但其整体性能满足工程要求且仍然有较好的防护效果。

结论

该研究成功研制出有机硅改性环氧涂层并系统地评价了该涂层在烟气脱硫系统的使用效果。采用数值模拟与现场监测分析相结合的方法进行了研究，结果表明，该涂层在温度较高，酸性气体以及高湿度环境中均显示了较好的耐腐蚀性与耐磨性。实际使用时，涂层磨损率及腐蚀速率随时间推移而逐渐升高，但仍然维持在能够接受的范围之内。结果表明：涂层性能衰减与其厚度，硬度及附着力有密切关系。为进一步提高涂层使用寿命，本文研究并提出优化涂层配比，固化工艺以及喷涂质量控制等关键技术。采取上述措施可显著改善工业环境下涂层的性能，从而为烟气脱硫系统的保护提供一种行之有效的解决方法。这些研究成果为在其他高度腐蚀的环境中进行涂层开发提供了宝贵的参考依据。

参考文献：

[1] 李晓辉.基于数据挖掘的火电厂脱硫系统节能优化方法[J].化学工程与装备,2025,(10):72-74+84.

[2] 张建伟,王鹏飞.锅炉烟气脱硫技术的节能降耗效果研究[J].科技与创新, 2025,(18):142-145.

[3] 骆春嘉,李春燕,李伟.焦炉烟气脱硫脱硝生产实践[J].包钢科技,2025,5 (04):13-18.

[4] 郑晓波.燃煤电厂湿法脱硫系统优化与运行效率提升研究[J].现代工业经济和信息化,2025,15(07): 176-179.

[5] Li C ,Wan G ,Xu L , et al. Mercury migration characteristics and the re-emission inhibition in seawater flue gas desulfurization system [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13 (3): 116634-116634.