

# 化工设备腐蚀防护的新型涂层材料研发与性能测试

谭超

河南省赢基新材料科技有限公司, 河南焦作, 454150;

**摘要:** 针对化工设备在强酸、高盐雾、高温高压等极端工况下, 传统防腐涂层易出现剥离、开裂、失效等问题, 研发一种兼具优异阻隔性、自修复性与环保性的新型复合纳米涂层材料。以环氧树脂 (EP) 为基体, 引入氨基功能化石墨烯 (F-rGO) 与负载缓蚀剂 (苯并三唑, BTA) 的介孔二氧化硅纳米粒子 (MSNs) 为改性填料, 通过溶液共混-喷涂固化工艺制备新型复合涂层。采用扫描电子显微镜 (SEM)、傅里叶变换红外光谱 (FT-IR)、电化学工作站、盐雾试验箱等设备, 系统测试涂层的微观结构、力学性能、耐腐蚀性能及自修复性能, 并结合 ASTM、GB/T 等标准开展性能验证。该新型涂层材料综合性能优于传统环氧涂层, 可有效延长化工设备服役寿命, 为极端工况下化工设备腐蚀防护提供新方案。

**关键词:** 化工设备; 腐蚀防护; 新型复合涂层; 石墨烯

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.04.070

## 引言

化工设备是石油化工、精细化工等行业生产的核心载体, 广泛服役于含酸、碱、盐、有机溶剂及高温高压的复杂腐蚀环境中, 腐蚀问题已成为制约设备服役寿命、威胁生产安全、增加运维成本的关键瓶颈。据美国腐蚀工程师协会数据统计, 全球每年因腐蚀造成的经济损失约占 GDP 的 3-4%, 其中化工行业腐蚀损失占比超过 20%。传统防腐涂层虽具备一定防护效果, 但存在微观缺陷多、附着力不足、耐极端介质性能差、无自修复能力等短板, 在长期服役过程中易被腐蚀介质渗透, 导致涂层剥离、基材锈蚀, 最终引发设备泄漏、停机等安全事故。

近年来, 随着纳米材料技术与涂层改性技术的快速发展, 新型防腐涂层的研发呈现出“多功能化、长效化、绿色化”的发展趋势。石墨烯及其衍生物因具有优异的片层阻隔结构、高比表面积和良好的化学稳定性, 被广泛应用于防腐涂层改性, 可构建物理屏障阻碍腐蚀介质渗透; 介孔纳米粒子作为缓蚀剂载体, 可实现缓蚀剂的可控释放, 赋予涂层主动自修复功能; “生长式”涂层技术通过化学键合实现涂层与基材的原子级融合, 大幅提升涂层附着力<sup>[1]</sup>。然而, 单一改性涂层难以满足化工设备极端工况下的综合防护需求, 且部分涂层存在 VOC 排放超标、施工复杂等问题, 限制了其工程应用。

基于此, 本文针对化工设备腐蚀防护的核心需求, 结合物理阻隔、主动修复与绿色环保理念, 研发一种环

氧树脂基新型复合纳米涂层<sup>[2]</sup>。通过功能化石墨烯构建致密物理屏障, 负载缓蚀剂的介孔二氧化硅赋予涂层自修复性能, 优化制备工艺实现涂层与基材的牢固结合, 系统开展微观结构、力学性能、耐腐蚀性能及环保性能测试, 验证涂层的实际应用价值, 为化工设备腐蚀防护提供技术支撑与理论参考<sup>[3]</sup>。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料与仪器

环氧树脂 (EP, E-51), 工业级, 无锡树脂厂; 氨基功能化石墨烯 (F-rGO, 片层厚度 1-5nm, 粒径 500nm), 南京先丰纳米材料科技有限公司; 介孔二氧化硅纳米粒子 (MSNs, 粒径 100-200nm, 孔径 2-5nm), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 苯并三唑 (BTA, 分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; 固化剂 (聚酰胺 650), 工业级, 天津化学试剂厂; 稀释剂 (二甲苯), 分析纯, 天津科密欧化学试剂有限公司; 基材 (Q235 碳钢, 尺寸 100mm×50mm×3mm), 天津钢铁集团有限公司; 打磨砂纸 (80#、120#、240#、400#)。

扫描电子显微镜 (SEM, SU8010), 日本日立公司, 用于观察涂层微观形貌与截面结构; 傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR, Nicolet iS50), 美国赛默飞世尔科技公司, 用于分析涂层化学结构; 电化学工作站 (CHI660E), 上海辰华仪器有限公司, 用于测试涂层电化学腐蚀性能; 盐雾试验箱 (YWX/Q-150), 上海易世达检测设备有限公司, 依据 ASTM B117-2023 标准开

展盐雾腐蚀测试；划格器（QFH），天津材料试验机厂，依据 ISO 2409 标准测试涂层附着力；拉开式附着力测试仪（PosiTest AT-M），美国 Defelsko 公司，依据 ASTM D4541 标准测试涂层拉开强度；铅笔硬度计（QHJ），上海精密仪器仪表有限公司，依据 GB/T 6739-2024 标准测试涂层硬度；落锤冲击试验机（XCJ-10），承德市金建检测仪器有限公司，依据 ASTM D1654 标准测试涂层冲击强度；弯曲试验机（WDW-10），济南试金集团有限公司，依据 GB/T 6742 标准测试涂层柔韧性；VOC 测试仪（PGM-7340），美国 RAE Systems 公司，依据 GB 30981-2020 标准测试涂层 VOC 排放<sup>[4]</sup>。

### 1.2 新型复合涂层的制备

新型复合涂层采用“溶液共混-喷涂固化”工艺制备，具体步骤如下：

（1）基材预处理：将 Q235 碳钢基材依次用 80#、120#、240#、400#砂纸打磨至表面无氧化皮、无划痕，然后用无水乙醇超声清洗 15min，去除表面油污与杂质，

自然晾干后备用，基材表面处理达到 Sa2.5 级标准。

（2）缓蚀剂负载：将 BTA 溶于无水乙醇中，配制质量浓度为 5% 的 BTA 溶液，加入 MSNs，在 60℃、200r/min 条件下搅拌 2h，随后真空干燥（80℃，2h），得到负载 BTA 的 MSNs（BTA-MSNs），备用。

（3）涂层浆料配制：将 EP 与稀释剂按质量比 4:1 混合，搅拌均匀后加入固化剂（EP 与固化剂质量比 10:3），继续搅拌 30min；随后分别加入不同比例的 F-rGO 与 BTA-MSNs，在高速分散机（3000r/min）中分散 60min，超声处理 30min，消除气泡，得到均匀稳定的涂层浆料。

（4）喷涂与固化：采用空气喷涂法将涂层浆料均匀喷涂在预处理后的基材表面，喷涂压力 0.3-0.5MPa，喷涂距离 20-30cm，喷涂厚度控制在 150-200 μm；喷涂完成后，在 80℃烘箱中固化 2h，再升温至 120℃固化 4h，自然冷却至室温，得到新型复合涂层试样<sup>[5]</sup>。为探究 F-rGO 与 BTA-MSNs 添加量对涂层性能的影响，设计不同配方试样，具体如下表 1 所示。

表 1 不同配方涂层试样的组分比例

试样编号	EP 质量分数 (%)	F-rGO 添加量 (G-占 EP 质量%)	BTA-MSNs 添加量 (占 EP 质量%)	固化剂质量分数 (%)	稀释剂质量分数 (%)
1#	72.7	0	0	21.8	5.5
2#	71.5	0.3	1.0	21.5	5.7
3#	70.8	0.5	2.0	21.2	5.5
4#	70.1	0.8	2.5	21.0	5.6
5#	69.4	1.0	3.0	20.8	5.8

### 1.3 性能测试与表征方法

采用 SEM 观察涂层表面与截面微观形貌，分析涂层致密性、填料分散性及涂层与基材的结合状态；采用 FT-IR 分析涂层的化学结构，验证 F-rGO、BTA-MSNs 与 EP 基体的相互作用，测试波长范围为 4000-400cm<sup>-1</sup>；力学性能测试中，采用划格法（ISO 2409，划格间距 1mm）和拉开法（ASTM D4541）分别测试附着力等级与拉开强度，后者每组测试 3 个试样取平均值，采用铅笔硬度计（GB/T 6739-2024，25℃、1000g 载荷）确定涂层硬度，落锤冲击试验机（ASTM D1654，冲击能量 8J、冲击头直径 10mm）测试涂层是否开裂剥落，弯曲试验机（GB/T 6742）记录无裂纹最小弯曲半径，磁性测厚仪（ISO 2178）通过每个试样 10 个检测点计算厚度偏差；耐腐蚀性能通过中性盐雾测试（ASTM B117-2023，35℃ ± 1℃、5%NaCl 溶液，沉降量 1.0-2.0 mL/(80 cm<sup>2</sup> · h)，测试周期 1500h）、三电极体系电化学测试（3.5%NaCl

溶液，测试极化曲线与 EIS，极化曲线扫描速率 1mV/s、范围-0.2~0.2V，EIS 频率范围 10mHz~100kHz、振幅 5mV）及化学介质浸泡（ASTM G31 标准，10%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、3.5%NaOH 溶液，25℃浸泡 30 天）评估；自修复性能通过划刻 0.5mm 贯穿划痕，在 25℃、90%湿度恒湿箱中培养，24h、48h、72h 后用 SEM 观察并计算划痕愈合效率；环保性能依据 GB 30981-2020 标准，采用 VOC 测试仪与离子色谱仪分别检测 VOC 排放及 Pb、Cr、Cd、Hg 重金属离子含量。

## 2 结果与讨论

不同配方涂层的力学性能测试结果如表 2 所示。由表可知，随着 F-rGO 与 BTA-MSNs 添加量的增加，涂层的力学性能先提升后下降。1#空白组涂层附着力为 2 级，拉开强度 3.8MPa，铅笔硬度 3H，冲击强度 5J，弯曲半径 ≥ 3 倍涂层厚度，厚度偏差 ± 12.3%，力学性能较差。2#试样力学性能有所提升，而 3#试样力学性能最

优,附着力达到0级,拉开强度6.2MPa,铅笔硬度5H,冲击强度8J,弯曲半径 $\leq 1.5$ 倍涂层厚度,厚度偏差 $\pm 7.8\%$ ,满足化工设备对涂层力学性能的要求。这是因为适量的F-rGO可增强涂层的韧性与强度,BTA-MSNs可填充涂层孔隙,提升涂层致密性与均匀性,同时二者

与EP基体的协同作用,有效分散涂层受力,减少应力集中。当添加量超过3#试样的比例时(4#、5#),填料团聚导致涂层内部产生缺陷,力学性能下降,如5#试样拉开强度降至4.5MPa,冲击强度降至6J,弯曲半径增大至2.5倍涂层厚度。

表2 不同配方涂层的力学性能测试结果

试样编号	附着力等级	拉开强度 (MPa)	铅笔硬度	冲击强度 (J)	最小弯曲半径	厚度偏差 ( $\pm\%$ )
1#	2级	$3.8\pm 0.2$	3H	$5\pm 0.3$	$\geq 3.0$	12.3
2#	1级	$5.1\pm 0.3$	4H	$7\pm 0.2$	2.0	9.5
3#	0级	$6.2\pm 0.2$	5H	$8\pm 0.3$	1.5	7.8
4#	1级	$5.3\pm 0.3$	4H	$7\pm 0.2$	2.0	10.2
5#	2级	$4.5\pm 0.2$	4H	$6\pm 0.3$	2.5	11.7

涂层耐腐蚀性能及自修复、环保性能分析与最优配方确定:盐雾腐蚀测试结果显示,1#空白组涂层在盐雾测试300h后表面出现明显锈蚀与起泡(起泡等级4级),600h后大面积剥落,2#试样900h后出现少量锈蚀点,1200h后起泡等级达2级,3#试样1500h后无明显锈蚀、起泡,仅边缘轻微变色(起泡等级0级),4#、5#试样因填料团聚1200h后出现明显锈蚀起泡,这表明3#试样的致密结构可通过F-rGO片层阻隔与BTA-MSNs缓蚀剂释放的协同作用,显著提升耐盐雾性能:极化曲线测试显示3#试样自腐蚀电位( $-0.42V$ )高于1#空白组( $-0.68V$ ),腐蚀电流密度( $8.7\times 10^{-8}A/cm^2$ )远低于空白组( $1.2\times 10^{-5}A/cm^2$ ),EIS测试显示其涂层电阻( $1.2\times 10^8\Omega\cdot cm^2$ )是空白组的52倍,1500h后仍维持在 $5.6\times 10^7\Omega\cdot cm^2$ 以上,体现出良好的长期耐腐蚀稳定性;化学介质浸泡测试中,3#试样在10% $H_2SO_4$ 和3.5%NaOH溶液中浸泡30天的腐蚀速率分别为0.032mm/年和0.028mm/年,均满足耐腐蚀要求,而空白组腐蚀速率显著偏高且表面损伤严重,说明新型复合涂层可有效抵御酸碱侵蚀。自修复性能测试显示,3#试样0.5mm贯穿划痕在25℃、90%湿度条件下,24h开始愈合,72h愈合效率达85%以上,而空白组划痕无愈合且扩大,这是因为BTA-MSNs释放缓蚀剂形成钝化膜,配合F-rGO阻隔作用实现微裂纹自修复。环保性能测试显示,3#试样VOC排放为18g/L,远低于GB30981-2020标准,无重金属离子检出,相比传统涂层更具环保优势。综合上述测试结果,当F-rGO添加量为0.5%、BTA-MSNs添加量为2.0%时(3#试样),涂层微观结构、力学性能、耐腐蚀性能、自修复性能及环保性能均最优,为本次研发的最优配方,其综合性能优于传统环

氧涂层及现有纳米改性涂层,更适用于化工设备极端腐蚀工况。

### 3 结论

以环氧树脂(EP)为基体,氨基功能化石墨烯(F-rGO)与负载缓蚀剂的介孔二氧化硅纳米粒子(BTA-MSNs)为改性填料,通过溶液共混-喷涂固化工艺,成功研发出新型复合防腐涂层,最优配方为F-rGO添加量0.5%、BTA-MSNs添加量2.0%,该涂层微观结构致密、填料分散均匀且与基材结合紧密。最优配方涂层力学性能优异,附着力达0级,拉开强度 $\geq 6.2MPa$ ,铅笔硬度5H,可承受化工设备运行中的机械冲击与形变;耐腐蚀性能卓越,中性盐雾测试1500h无明显损伤,同时具备85%以上的微裂纹自修复效率;VOC排放仅18g/L,无重金属检出,符合绿色环保标准,可替代传统高VOC涂层。后续将优化制备工艺、降低成本,探究更极端工况下的防护性能,结合“生长式”涂层技术提升结合强度,推动其工程化应用。

### 参考文献

- [1]姜振伟.化工设备腐蚀及防护技术分析[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(20):196-198.
- [2]姜平基.化工设备焊接中的腐蚀防护措施研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(03):37-39.
- [3]牛环宁,滕万凤,童路,等.化工设备腐蚀及防护措施研究[J].造纸装备及材料,2024,53(07):53-55.
- [4]赵玮.石油化工设备腐蚀的防护与监测[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(21):48-49.
- [5]钱宏林.现代化工设备的腐蚀问题及其防护技术[J].现代工业经济和信息化,2019,9(11):109-110.