

聚苯胺/漆酚复合改性无溶剂环氧防腐涂料的制备及性能研究

严晨曦, 魏 铭*, 邓国林, 林泳岐, 李明皓

(武汉理工大学化学化工与生命科学学院, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 为提高环氧涂料对金属腐蚀的抑制作用, 延长工程设备的使用寿命, 促进生物基环保涂料的开发利用, 利用漆酚与全氟辛酸(PFOA)掺杂聚苯胺(PANI), 制备改性环氧树脂涂料(PUEP)。结果表明: 当环氧树脂、PANI和漆酚的质量比为100.00:0.75:8.00时, 制得的PUEP涂层性能最佳。对比改性前的环氧树脂涂层, 0.75%-PUEP实部阻抗提升至 $1.3 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。涂层接触角由 51.5° 提升至 102.1° 。热重分析表明, 50%质量损失温度上升, 高温环境下的热稳定性增强。相较于环氧树脂涂层, 该涂层力学性能得到明显提升, 展现良好的应用潜力。

关键词: 环氧树脂; 漆酚; 聚苯胺; 无溶剂涂料; 全氟辛酸

中图分类号: TQ630.7

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)07-0024-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.07.005

Study on Preparation and Properties of Polyaniline/Urushiol Composite Modified Solvent-free Epoxy Anti-corrosive Coating

YAN Chenxi, WEI Ming*, DENG Guolin, LIN Yongqi, LI Minghao

(School of Chemistry, Chemical Engineering and Life Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: To enhance the corrosion inhibition of epoxy coatings on metals, extend the service life of engineering equipment, and promote the development and utilization of bio-based environmentally friendly coatings, a modified epoxy resin coating (PUEP) was prepared using urushiol and perfluorooctanoic acid (PFOA)-doped polyaniline (PANI). The results showed that the PUEP coating exhibited optimal properties when the mass ratio of epoxy resin, PANI, and urushiol was 100.00 : 0.75 : 8.00. Compared with the unmodified epoxy resin coating, the real part impedance of the 0.75%-PUEP increased to $1.3 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$. The contact angle of the coating increased from 51.5° to 102.1° . Thermogravimetric analysis indicated that the temperature at 50% mass loss increased, indicating enhanced thermal stability under high-temperature conditions. The mechanical properties of the coating were significantly improved compared with those of the epoxy resin coating, demonstrating promising application potential.

Keywords: EP; Urushiol; PANI; Solvent-free coating; PFOA

环氧树脂(EP)因耐化学腐蚀性强、易加工、力学性能良好以及对多种基材附着力优异,在重防腐领域具有广泛应用^[1-3]。然而,相较于水性涂料^[4]、粉末涂料^[5]等绿色涂料,EP在性能上仍与传统溶剂型涂料存在一定差距。因此,无溶剂环氧涂料的研究逐渐成为热点。利用漆酚改性EP是一种常见的生物基改性方法。漆酚的长脂肪链和酚羟基结构能够有效改善EP的附着力、耐腐蚀性和耐热性,同时具有环保和可再生优势^[6-7]。然而,漆酚引入过多时,其苯环结构会破坏涂层的匀整性,因此还需要通过其他方式对EP进一步改性,以获得性能更佳的涂层^[8-9]。引

入聚苯胺(PANI)不仅可以改善涂层的耐候性,还能进一步提升其疏水性和防腐性^[10-11]。乔星明等^[12]在漆酚改性EP的基础上引入有机硅(AS)进行协同改性,改性后涂层的防腐性能、疏水性和耐热性均有明显提升。朱飞等^[13]采用漆酚糠醛对EP进行改性,引入新型锈转化剂,成功制备出集稳定、转化和渗透三位一体的带锈带油防腐涂料。

PANI作为一种经典的导电聚合物,因优异的导电性、氧化还原性、环境稳定性和无毒性等特点,已被广泛应用于多个领域^[14-16]。PANI涂层的耐腐蚀性能被认为源于物理阻隔、钝化和缓蚀作用,大量研究证实其在金属防腐领

收稿日期 Submitted date 2025-07-23; 修回日期 Revised date 2025-08-21; 录用日期 Accepted date 2025-09-08

*联系人, weiming1965@163.com

引用本文: 严晨曦, 魏铭, 邓国林, 等. 聚苯胺/漆酚复合改性无溶剂环氧防腐涂料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(7): 24-28.

Citation: YAN C X, WEI M, DENG G L, et al. Study on preparation and properties of polyaniline/urushiol composite modified solvent-free epoxy anti-corrosive coating[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(7): 24-28.

域的有效性^[17-19]。然而,由于PANI分子的刚性结构,无机酸掺杂的PANI材料难以溶解或均匀分散,严重限制其在涂料等领域的应用^[20]。因此,越来越多的研究人员在制备掺杂PANI时倾向于使用带有特定官能团的有机酸^[21-22]。例如,BALLABIO等^[23]通过表面活性剂单层辅助界面合成(SMAIS)制备植酸(PA)掺杂的PANI薄膜,发现随着PA含量的增加,结构有序度逐渐降低。KARAOĞLAN等^[24]利用苯磺酸(BSA)掺杂PANI,成功制备导电性和溶解性良好的PANI,该材料在光电器件方面展现出极佳的应用前景。

本研究从生漆中提取漆酚,对EP进行改性以提升交联密度,得到漆酚环氧树脂(UEP)。采用原位聚合法合成全氟辛酸(PFOA)掺杂的PANI粉末,利用PANI与UEP良好的相容性,在助剂和超声分散条件下使其互溶,得到聚苯胺改性漆酚环氧树脂(PUEP)。通过调节各组分比例,获得PANI和UEP的最佳配比。

1 实验部分

1.1 主要原料

EP,BFE-170,工业级,天太高新科技有限公司;EP固化剂(T-31),工业级,昆山久力美电子材料有限公司;漆酚乙醇溶液,漆酚质量分数40%,工业级,武汉市国漆厂;苯胺、过硫酸铵(APS),分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;十六烷基三甲基氯化铵(CTAC),工业级,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;PFOA,工业级,上海麦克林生化科技股份有限公司;N,N二甲基苄胺,化学纯,上海源叶生物科技有限公司;无水乙醇,化学纯,国药集团化学试剂有限公司;腰果酚缩水甘油醚,工业级,武汉曙尔生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),IRTracer,日本岛津企业管理有限公司;接触角测试仪,JC2000CS,上海中晨数字技术设备有限公司;漆膜附着力测试仪,QFZ-II,天津材料试验机厂;涂膜铅笔硬度划痕硬度仪,QHQ,天津材料试验机厂;漆膜冲击测试仪,QCJ,天津材料试验机厂;漆膜弯曲测试仪,QTX-1,天津材料试验机厂;数显厚度仪,QNIX-4500,天津材料试验机厂;配备能谱仪(EDS)的场发射扫描电镜(SEM),SEM500X,国仪量子技术股份有限公司;电化学工作站,CS2350,武汉科斯特仪器股份有限公司;热重分析仪(TG),TOLEDO-TGA2,瑞士梅特勒-托利多公司;电化学工作站,CS2358,武汉科斯特仪器有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 PANI的制备

采用超声辅助原位聚合的方法合成PANI。称取适量PFOA、苯胺、CTAC于250 mL烧杯中,随后加入25 mL蒸馏水和50 mL乙醇,在冰水浴下搅拌至完全溶解。另称取一定量的APS,溶解于25 mL蒸馏水中,缓慢滴加至冰水浴中的水溶液。在冰水浴中超声处理6 h后,置于0~4℃环境下继续搅拌18 h,完成PANI的氧化聚合反应。过滤

后经蒸馏水、乙醇交替洗涤两次,在60℃下干燥24 h,研磨得到细小的PANI颗粒,备用。

1.3.2 UEP及其涂层的制备

称取适量EP于250 mL三颈烧瓶中,升温至80℃,转速调至350 r/min,开始搅拌。通入氮气后,同时开启冷凝回流,缓慢滴加一定量的漆酚乙醇溶液,滴加结束后在350 r/min转速下持续搅拌5 min。升温至132℃,停止升温并加入0.4 mL催化剂。然后转速降低至200 r/min,保温反应1.5 h,停止加热,冷却至室温,得到UEP。样品以漆酚的引入量(以EP质量为基数)区分,分别命名为6.00%-UEP、8.00%-UEP、10.00%-UEP。

UEP中引入一定量的活性稀释剂腰果酚缩水甘油醚和固化剂,充分搅拌后,使用150目滤布过滤,采用简单的刮涂方式将UEP均匀涂抹在事先准备好的钢板片上。室温下静置24 h,然后置于100℃烘箱中6 h,待涂层实干后即可。其中,钢板片为测试级镀锡钢板片,使用前依次使用400目砂纸和240目砂纸往复打磨,用脱脂棉球蘸取无水乙醇擦拭干净,烘干,备用。

1.3.3 PUEP及其涂层的制备

UEP涂层经后续测试确定漆酚最佳质量分数为8.00%,采用上述方法制备8.00%-UEP。量取15 mL乙醇,加入一定量PANI超声分散均匀,将混合溶液倒入制备好的UEP中,充分搅拌后旋蒸除去多余乙醇,得到PUEP。后续操作同上,得到实干后的PUEP涂层。以PANI引入量(以EP质量为基数)区分,分别命名为0.25%-PUEP、0.50%-PUEP、0.75%-PUEP、1.00%-PUEP。表1为EP、UEP和PUEP涂层的配方。

表1 EP、UEP和PUEP涂层的配方
Tab.1 Formula of EP, UEP and PUEP coatings 单位:g

样品	m_{EP}	$m_{漆酚}$	$m_{乙醇}$	m_{PANI}	$m_{腰果酚缩水甘油醚}$	$m_{固化剂}$
EP	50	0	0	0	5	10.0
6.00%-UEP	50	3.0	4.5	0	5	8.0
8.00%-UEP	50	4.0	6.0	0	5	7.5
10.00%-UEP	50	5.0	7.5	0	5	7.0
0.25%-PUEP	50	5.0	7.5	0.125	5	7.5
0.50%-PUEP	50	5.0	7.5	0.250	5	7.5
0.75%-PUEP	50	5.0	7.5	0.375	5	7.5
1.00%-PUEP	50	5.0	7.5	0.500	5	7.5

1.4 性能测试与表征

FTIR测试:采用傅里叶变换红外光谱仪进行测试,波数范围为4 000~400 cm⁻¹。

SEM和EDS测试:样品经液氮脆断,在断面处进行喷金处理,采用配备能谱仪的场发射扫描电镜观察断面形貌并采用打点点扫的方式进行元素分析。

接触角测试:将涂有样品的钢板片平整地放在实验台上,缓慢滴加蒸馏水在光滑的涂层表面,采用量角法进行数据读取。

膜厚测试:依据 GB/T 13452.2—2008 进行测试,在不同点位测取3次数据,取平均值。

附着力测试:依据 GB/T 1720—2020,采用画圈法进行测试,测试结果为0~7级。

柔韧性测试:依据 GB/T 1731—2020 在恒温恒湿条件下进行测试。

耐冲击性测试:依据 GB/T 1732—2020 进行测试,在规定的温度下把仪器重锤从一定高度自由落下,以冲击处不出现裂痕、脱落以及皱纹为准,测试结果以0~50 cm进行评价。

TG 测试:称取 5 mg 块状样品,与坩埚充分接触。在 N_2 气氛下,从室温开始升温,升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测试范围为室温~ $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

电化学阻抗谱(EIS)测试:使用电化学工作站进行交流阻抗测试,腐蚀介质和浸泡溶液均采用质量分数3.5%的 NaCl 溶液制备。

2 结果与讨论

2.1 涂层 FTIR 表征

图1为EP、UEP和PUEP涂层的FTIR谱图。从图1可以看出,UEP和PUEP在 971 cm^{-1} 处环氧基团特征峰相较于EP有所减弱,这说明漆酚的引入消耗一部分环氧基团,UEP和PUEP在 $1\ 725\text{ cm}^{-1}$ 处新出现的吸收峰与漆酚中 $\text{C}=\text{O}$ 的拉伸振动有关。PUEP在 $2\ 971\text{ cm}^{-1}$ 处出现 $-\text{CH}_3$ 的反对称伸缩振动,同时在波数 $1\ 149\text{ cm}^{-1}$ 处出现 $-\text{CF}_2-$ 的非对称伸展,说明掺杂PFOA的PANI成功反应,PUEP涂层制备成功。

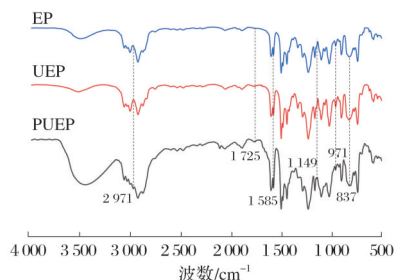


图1 EP、UEP和PUEP涂层的FTIR谱图
Fig.1 FTIR spectra of EP, UEP and PUEP coatings

表2 EP、UEP和PUEP涂层的力学性能测试数据

Tab.2 Mechanical properties test data of EP, UEP and PUEP coatings

样品	膜厚/ μm	附着力/级	耐冲击性/cm	耐10% H_2SO_4 溶液/d	耐10% NaOH溶液/d	柔韧性/mm	固含量/%
EP	84.2	1	35	8	27	1.0	100.00
6.00%-UEP	87.4	0	45	20	43	1.0	98.25
8.00%-UEP	88.1	0	50	21	45	1.0	97.77
10.00%-UEP	85.2	1	50	19	40	1.5	96.64
0.25%-PUEP	86.4	0	50	32	47	0.5	96.42
0.50%-PUEP	82.2	0	50	33	49	0.5	95.56
0.75%-PUEP	84.4	0	50	37	51	0.5	95.82
1.00%-PUEP	87.1	0	50	31	50	1.0	96.45

在8.00%漆酚的基础上加入PANI,可以观察到,PANI的加入对涂层的附着力和耐冲击性未造成明显影响。引

2.2 涂层接触角测试

图2为EP、UEP和PUEP涂层的接触角。从图2可以看出,UEP疏水性均得到提升。这是因为漆酚与EP结合后,漆酚分子中的长疏水脂肪链向涂层表面富集,涂层表面能降低,导致接触角下降。经测试,8.00%-UEP性能最佳。引入PANI后,涂层疏水性能得到进一步提升。这是因为PANI中掺杂的PFOA具有疏水长链和亲水性羧基,在应用过程中吸附在金属表面,形成一层疏水膜,使涂层接触角上升。在8.00%漆酚的基础上,随着PANI含量的增加,涂层接触角开始逐渐增大。当PANI质量分数为0.75%时,接触角最大,为 102.1° 。这是因为当PANI含量较低时,其与EP具有良好的相容性,不易发生团聚,随着PANI含量的增加,涂层疏水基团增加,接触角呈现上升的趋势,但当达到某一临界值时,PANI在EP中发生团聚现象,高浓度的PANI-PFOA使涂层的表面粗糙度增加,涂层接触角下降。

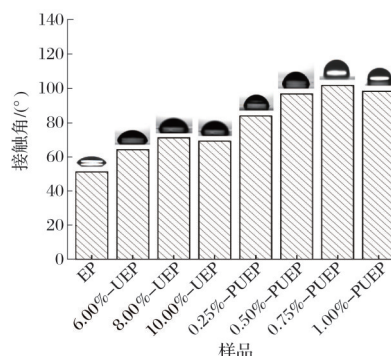


图2 EP、UEP和PUEP涂层的接触角

Fig.2 Contact angles of EP, UEP and PUEP coatings

2.3 涂层力学性能测试

表2为EP、UEP和PUEP涂层的力学性能测试数据。从表2可以看出,引入适当的漆酚可以提升环氧涂层的附着力、耐冲击性和耐酸碱性,但当漆酚含量进一步增大时,附着力和柔韧性却有所下降。这是由于漆酚的引入会提升环氧涂层的交联密度,最开始,涂层各种力学性能会有所提升,但当交联密度过大时,涂层匀整性受到影响,因此力学性能和耐酸碱性有所下降。

入过量PANI时,柔韧性从0.5 mm增大至1.0 mm。这可能是由于团聚后的PANI本身作为一种硬质填料,阻碍了涂

层中链段的运动和滑移。在8.00%漆酚基础上加入PANI,涂层耐酸性提升明显优于耐碱性。这是由于PANI在酸性环境中结构更加稳定,在金属表面更容易形成一层致密的钝化保护膜,从而保护钢板不受腐蚀。碱性环境下PANI的钝化行为受阻,只能依靠掺杂的PFOA提供酸性环境形成钝化保护膜,因此对耐碱性的提升不如耐酸性明显。所有涂层固含量均高于95%,符合无溶剂涂料标准。

2.4 涂层断裂形貌及表面EDS分析

图3为EP、8.00%-UEP和0.75%-PUEP涂层的SEM照片以及0.75%-PUEP涂层的EDS谱图。从图3a可以看出,EP涂层表面有大量凸起和缩孔,这些缺陷会加快腐蚀介质的进入,导致防腐性能不佳。从图3b可以看出,UEP涂层引入漆酚后,表面形貌有较大改善,但仍有部分凸起裂纹。从图3c可以看出,PUEP涂层加入PANI后,断面变得光滑平整,无明显颗粒团聚。PANI颗粒的加入改善了涂层的柔韧性,掺杂了有机质子酸的PANI与EP相容性较好,不易发生团聚。从图3d可以看出,涂层中含有一定量的F元素,进一步说明PFOA成功掺杂在PANI中。

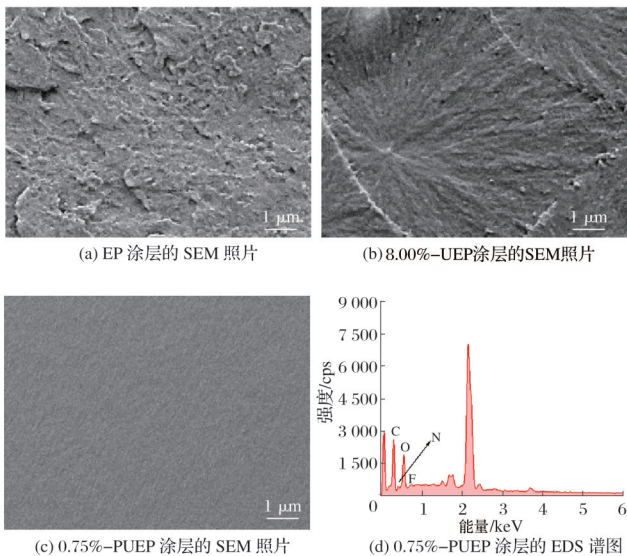


图3 EP、8.00%-UEP和0.75%-PUEP涂层的SEM照片以及0.75%-PUEP涂层的EDS谱图
Fig.3 SEM images of EP, 8.00%-UEP and 0.75%-PUEP coatings and EDS spectra of 0.75%-PUEP coating

2.5 涂层综合热分析

图4为EP、8.00%-UEP和0.75%-PUEP的TG曲线,表3分别为EP、8.00%-UEP和0.75%-PUEP的TG数据。其中, $t_{10\%}$ 和 $t_{50\%}$ 分别为10%和50%质量损失温度; t_{max1} 和 t_{max2} 为第一阶段和第二阶段最大质量损失速率温度。从表3可以看出,UEP涂层的 $t_{10\%}$ 和 $t_{50\%}$ 较EP有所提升。这是由于漆酚具有邻苯二酚结构,其本身具有相当的刚性和稳定性,引入EP交联网络后形成了更致密、稳定的交联三维网络结构,热稳定性上升。而PUEP添加了掺杂PFOA的PANI,在其提供的酸性环境下,EP在初始热降解阶段会加速分解,因此在低温区域 $t_{10\%}$ 反而有所下降。随着降解温

度继续上升,PUEP涂层在初始阶段加速降解后热稳定性迅速回升,在高温区域 $t_{50\%}$ 仍高于EP涂层10.79℃。这说明高温环境下PUEP涂层较EP涂层热稳定性有所提升。

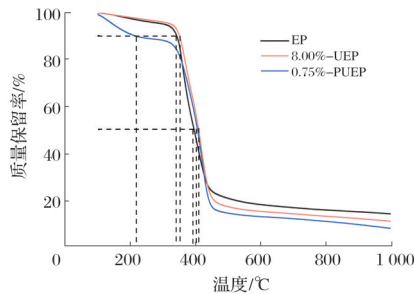


图4 EP、8.00%-UEP和0.75%-PUEP的TG曲线
Fig.4 TG curves of EP, 8.00%-UEP and 0.75%-PUEP
表3 EP、8.00%-UEP和0.75%-PUEP的TG数据
Tab.3 TG data of EP, 8.00%-UEP and 0.75%-PUEP单位:℃

样品	$t_{10\%}$	$t_{50\%}$	t_{max1}	t_{max2}
EP	342.67	396.33	364.14	404.14
8.00%-UEP	351.58	410.17	367.71	416.17
0.75%-PUEP	214.67	407.12	138.14	421.33

2.6 涂层电阻抗图谱测试

图5为浸泡6 d和20 d后的EP、UEP和PUEP涂层的Nyquist图。其中, Z' 为实部阻抗, Z'' 为虚部阻抗。

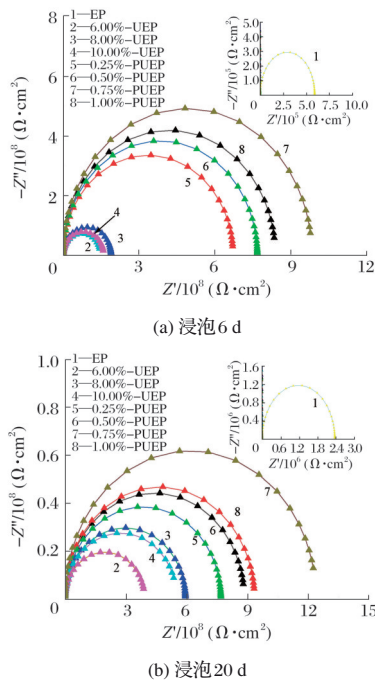


图5 浸泡6 d和20 d后的EP、UEP和PUEP涂层的Nyquist图
Fig.5 Nyquist plots of EP, UEP and PUEP coatings after soaking for 6 d and 20 d

Nyquist图中圆弧半径越大,说明涂层防腐性能越好。从图5a可以看出,改性后的EP涂层防腐性能较EP涂层均有明显提升。0.75%-PUEP具有最大的 Z' ,为 $1.3\times10^9\Omega\cdot\text{cm}^2$,相比EP涂层提升3个数量级。最开始引入漆酚进入EP交联网络后,涂层致密性增大,阻碍了腐蚀介质的进入。添加PANI后,PANI会释放出有机酸PFOA,有机酸可以与金属

腐蚀产物反应形成氧化物,沉积在金属表面。这种沉积减少了腐蚀的发生。同时,PFOA会在涂层表面构成一层致密的疏水膜,由于腐蚀介质主要来源于水,因此涂层防腐性能得到进一步提升。当PANI引入量过大时,PANI颗粒发生团聚,破坏涂层的匀整性,涂层间隙扩大导致腐蚀介质进入,降低了涂层的防腐性能。从图5b可以看出,浸泡20 d后各涂层Z均呈现下降趋势,这表明腐蚀主要介质水已经渗透进入涂层。添加了PANI颗粒的PUEP涂层下降趋势较EP和UEP涂层不明显。这是由于PANI在金属表面腐蚀形成了一层耐蚀性较好的金属氧化膜,金属呈现为钝化状态,在电解质溶液中维持金属的钝化状态,阻止了金属的进一步腐蚀,这是基于PANI阳极保护的作用机理。

3 结论

利用漆酚和PANI成功对EP进行改性,通过漆酚参与EP交联网络构建,提升涂层致密度。引入掺杂PFOA的PANI,构建钝化保护层以及疏水表面层,制备出具有良好疏水性、防腐性的无溶剂防腐涂料。环氧涂层的防腐性能和接触角随着漆酚含量的提升呈现先增大后减小的趋势,确定漆酚的最佳质量分数为8.00%。在8.00%漆酚的基础上,通过力学性能测试和电阻抗图谱测试确定PANI的最佳配比为0.75%。0.75%-PUEP涂层附着力提升至0级,耐冲击性提升至50 cm,在3.5% NaCl溶液中浸泡6 d后Z为 $1.3 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$,表明PUEP涂层要比EP和UEP涂层更能阻止腐蚀介质的渗透。改性后的EP在柔韧性上仍存在进一步改进空间,受限于PANI与EP之间的相容性,提升效果有限。利用纳米材料特有的表面效应和尺寸效应制备纳米PANI,可以提升涂层的力学性能和防腐性能。

参考文献

- [1] SREEHARI H, SETHULEKSHMI A S, SARITHA A. Bio epoxy coatings: An emergent green anticorrosive coating for the future[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2022, 307(8): 2200004.
- [2] ZHANG S, ZHOU P, LI Y, et al. Enhancing mechanical and anti-corrosion properties of waterborne epoxy coatings with (+) -catechin and tea polyphenol copolymerized nanosheets[J]. Corrosion Science, 2025, 255: 113155.
- [3] SOMSOLE L N, THEJASREE P, NARASIMHAMU K L, et al. Experimental investigation and optimization of epoxy composites reinforced with jute fiber and alumina using the Jaya ANFIS approach [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 30462.
- [4] ZHANG Y, LIU Z X, HAN Y H, et al. Preparation and performance of waterborne polyurethane composite coatings for electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2025, 22(3): 1079-1086.
- [5] ROGERS J. Efficient powder coating of geometrically complex parts [J]. IST International Surface Technology, 2024, 17(2): 38-39.
- [6] LIANG K X, CHEN J L, LIN Y C, et al. Natural resin-derived urushiol-based phosphorylation derivative towards flame-retardant and mechanically strong epoxy resin[J]. Polymer Degradation and Stability, 2024, 229: 110985.
- [7] TANG G W, YAN Z S, MA L R, et al. Modification of urushiol derivatives by liquid crystal epoxy resin[J]. International Journal of Polymer Science, 2015, DOI: 10.1155/2015/132809.
- [8] WANG M Y, YU S W, ZHAO C J, et al. Modification of bisphenol a type epoxy resin by biobased magnolol epoxy[J]. High Performance Polymers, 2024, 36(8): 430-444.
- [9] 林健, 冯晨, 刘炜, 等. 漆酚醛胺/环氧树脂体系固化动力学研究[J]. 中国生漆, 2023, 42(4): 49-52.
- [10] ARUNA M, NAGABHOOSHANAM N, PARIHAR P S, et al. Enhancement of solar thermal performance and reduction of thermal loss behaviour of solar thermal collector featured with polyaniline and paraffin[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 278: 127273.
- [11] MANDAL A K, PAL T, MUKHERJI S, et al. Evanescent wave absorbance based label-free detection of microcystin in water and body fluids using polyaniline coated optical fiber[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2025, 340: 126350.
- [12] 乔星明, 魏铭, 刘传奇, 等. 硅/漆酚复合改性无溶剂环氧涂料的制备与性能[J]. 塑料科技, 2022, 50(9): 58-63.
- [13] 朱飞, 魏铭, 夏雪, 等. 无溶剂漆酚糠醛环氧带锈涂料的制备及性能研究[J]. 现代化工, 2025, 45(S1): 220-224.
- [14] ANUPAMA K, TOMY M, XAVIER T S, et al. Trigonal selenium nanocrystallites decorated cellulose-polyaniline composite as a potential supercapacitor electrode material[J]. Journal of Power Sources, 2025, 654: 237811.
- [15] HAO Y S, LIU S J, SONG L X, et al. Preparation and anticorrosion mechanism of citric acid doped polyaniline nanotubes in epoxy coating [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(35): e57374.
- [16] FERCHICHI K, CHOUCHAINE A, AMDOUNI N, et al. Anionic dye removal with a thin cationic polyaniline coating on cellulosic biomaterial[J]. ACS Omega, 2024, 9(14): 15935-15949.
- [17] ZHANG Q Q, ZHANG S Y, LIU R, et al. Near-infrared light-responsive lubricating coating with polyaniline microspheres for long-term anti-icing and high-efficiency de-icing[J]. Small, 2025, 21(39): e07428.
- [18] NEHA, SAHA R, ANUJ, et al. Efficient anticorrosion coatings based on waste tea bags-derived nanocrystalline cellulose-incorporated polyaniline nanocomposites[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2024, 77(5): 1373-1379.
- [19] VYAVAHARE S A, MORE A P. Roasted neem (*Azadirachta indica*) bark powder/polyaniline (PANI) -epoxy composite coating for anticorrosive application[J]. Polymer Bulletin, 2024, 81(13): 11709-11727.
- [20] ZHAO T, CHEN Z B, YI X Q, et al. Functionalized modified Ti_4O_7 polyaniline coating for 316SS bipolar plate in proton-exchange membrane fuel cells[J]. Polymers, 2024, 16(18): 2592.
- [21] GRGUR B N, POPOVIĆ A S, SALEMA A. Influence of alkyd composite coatings with polyaniline doped with different organic acids on the corrosion of mild steel[J]. Metals, 2023, 13(8): 1364.
- [22] WANG W Y, WEN C X, ZHENG D Y, et al. Simultaneous degradation of RhB and reduction of Cr(VI) by MIL-53(Fe)/Polyaniline (PANI) with the mediation of organic acid[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022, 42: 55-63.
- [23] BALLABIO M, ZHANG T, CHEN C, et al. Band-like charge transport in phytic acid-doped polyaniline thin films[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(43): 2105184.
- [24] KARAOĞLAN N, BINDAL C. Synthesis and optical characterization of benzene sulfonic acid doped polyaniline[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2018, 21(6): 1152-1158.