

季铵盐改性导电 TiO₂晶须在环氧涂料中的性能研究

葛平瑞¹, 左士祥^{1,2}, 唐 骏³, 李霞章¹, 刘文杰¹, 姚 超^{1,3}

(1.常州大学石油化工学院, 江苏 常州 213164; 2.常州大学盱眙凹土研发中心, 江苏 盱眙 211700; 3.浙江凯色丽科技发展有限公司, 浙江 湖州 313200)

摘要:采用十八烷基二甲基羟乙基季铵硝酸盐(HDC)对导电 TiO₂ 晶须(AT)进行有机表面改性, 制得改性导电 TiO₂ 晶须(MAT)。利用水接触角测试、热分析、傅里叶红外光谱和透射电子显微镜等对 MAT 进行表征。结果表明, 当 $m(\text{HDC}) : m(\text{AT}) = 0.05$ 时, 改性效果较佳且 HDC 以物理吸附方式存在 AT 表面, 有机包覆层厚度约为 4 nm。将改性前后的导电粉体添加到环氧树脂涂料中, 研究导电涂料的流变性能及其涂层的导电性能和力学性能。结果表明, 与 AT 相比, MAT 在导电涂料中具有更好的分散性和抗流挂性能, 且涂层的导电性能和力学性能更加优异。当 MAT 质量分数为 9% 时, 导电填料之间相互连接形成三维导电网络, 涂层表面电阻可达 $1.90 \times 10^6 \Omega/\text{sq}$ 。此外, MAT 环氧导电涂料触变性小且储能模量大, 具有较高的稳定性。

关键词: TiO₂ 晶须; 有机表面改性; 物理吸附; 流变性能

中图分类号: TQ134.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)11-0179-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.11.033

Research on performance of quaternary ammonium salt modified conductive TiO₂ whiskers in epoxy coatings

GE Ping-rui¹, ZUO Shi-xiang^{1,2}, TANG Jun³, LI Xia-zhang¹, LIU Wen-jie¹, YAO Chao^{1,3}

(1.School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2.Xuyi R&D Center of Attapulgate Applied Technology, Changzhou University, Xuyi 211700, China;

3.Zhejiang Coloray Technology Development Co., Ltd., Huzhou 313200, China)

Abstract: Octadecyl dimethyl hydroxyethyl quaternary ammonium nitrate (HDC) is used for organic surface modification of conductive TiO₂ whiskers (AT) to prepare cationic modified conductive TiO₂ whiskers (MAT) that is characterized by water contact angle measurement, thermal analysis, Fourier infrared spectroscopy and transmission electron microscopy. The results show that as $m(\text{HDC}) : m(\text{AT}) = 0.05$, the modification effect is better. HDC is physically adsorbed on the surface of AT, and the thickness of organic coating layer is about 4 nm. The conductive powders before and after the modification are respectively added into epoxy resin coatings to study the rheological properties of conductive coatings, and the conductivity and mechanical properties of the coating. It is shown that compared with AT, MAT has better dispersibility and anti-sagging performance in conductive coatings, and the conductive and mechanical properties of the coating are more excellent. When the amount of MAT added is 9%, the conductive fillers connect to each other to form a three-dimensional conductive network, and the surface resistance of the coating can reach $1.90 \times 10^6 \Omega/\text{sq}$. In addition, MAT epoxy conductive coatings have low thixotropy, large storage modulus, and high stability.

Key words: TiO₂ whiskers; organic surface modification; physical adsorption; rheological properties

导电涂料是一种将导电涂层涂覆在非导电材料上, 使非导电材料具备一定的导电性能, 抑制静电荷产生和促进静电荷消除的功能性涂料^[1]。导电涂料主要由成膜树脂、导电填料、分散溶剂和功能助剂组成的多相分散体系^[2]。导电填料包括无机导电填料和有机抗静电剂。有机抗静电剂具有受环境湿度影响大、耐久性差等缺点。无机导电填料因具有生产成本低、化学稳定性好、耐候性强等优点而被广

泛应用于导电涂料中。但导电层(如 ATO 掺锡氧化锡)在树脂体系中分散性差、易团聚^[3]。

导电二氧化钛晶须是一维纳米功能材料, 具有白度高、化学稳定性和热稳定强等特点, 棒状结构易形成导电网络, 而且抗形变能力和耐久性优异^[4]。因此, 将 ATO 包覆于二氧化钛晶须核体表面的 TiO₂ 晶须复合型导电材料兼具 ATO 与 TiO₂ 晶须的优异性优点, 是众多应用领域中最具有应用研究价值的

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2022-09-06

基金项目: 浙江省重点研发计划(2019C01083); 淮安市自然科学研究计划(HAB201952)

作者简介: 葛平瑞(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型功能复合材料的制备及性能研究, yaochao420@163.com; 姚超(1969-), 男, 博士, 教授, 主要从事超细功能材料制备和表面修饰方面的研究, 通讯联系人, yaochao@cczu.edu.cn。

导电填料。十八烷基二甲基羟乙基季铵硝酸盐是阳离子抗静电剂的主要成分,属于阳离子表面活性剂,能与树脂体系更好的相溶,具有优异的抗静电效果。故采用十八烷基二甲基羟乙基季铵硝酸盐对导电 TiO_2 晶须进行表面改性,导电 TiO_2 晶须在环氧树脂中分散性显著提高,而且改性剂中的季铵盐基团具有抗静电效果,两者产生协同作用,更好地提升涂层的导电性能。

笔者以十八烷基二甲基羟乙基季铵硝酸盐对导电 TiO_2 晶须进行表面改性,将改性后的导电填料应用到涂料中,制备出环氧导电涂料,同时,考察其导电性能、力学性能和流变性能。

1 实验部分

1.1 实验材料与设备

导电 TiO_2 晶须,常州纳欧新材料有限公司生产;二甲苯、氢氧化钠(NaOH),均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产;十八烷基二甲基羟乙基季铵硝酸盐,山东优索化工科技有限公司生产;环氧树脂,江苏海丰新材料有限公司生产;改性聚二甲硅氧烷(消泡剂),巴斯夫(中国)有限公司生产;聚丙烯酸酯(流平剂),苏州青田新材料有限公司生产。

DSA25 型光学水接触角测试仪,德国 Data Physics 公司生产;D/Max 2500PC 型 X 射线粉末衍射仪,日本理学株式会社生产;209/F3 型热重分析仪,德国耐驰仪器公司生产;IS50 型傅里叶变换红外光谱仪,美国赛默飞世尔科技公司生产;JEOL-2100 型高分辨透射电子显微镜,日本电子株式会社生产;MCR302 型高级旋转流变仪,奥地利安东帕有限公司生产;KREBOR 800 型数显重锤式表面电阻测试仪,苏州科力华电子有限公司生产。

1.2 实验步骤

1.2.1 季铵盐改性导电二氧化钛晶须

将 AT 加入到用 1 mol/L NaOH 调节 pH 为 8~9 的去离子水中,超声分散 15 min 后注入烧瓶中,在水浴温度 80℃ 下不断搅拌。将十八烷基二甲基羟乙基季铵硝酸盐溶解在去离子水中,搅拌均匀后倒入烧瓶中,改性 30 min 后过滤,用去离子水洗涤。将滤饼置于 80℃ 烘箱干燥 12 h,得到改性 MAT 粉末。

1.2.2 导电涂料及涂层的制备

将 45 g 环氧树脂溶解于 50 g 二甲苯溶剂中,再添加适量涂料助剂,用分散砂磨机分散均匀。分别

加入一定量 AT 和改性后的 MAT 粉末,分散剂转速维持在 2 000 r/min,时间为 30 min,得到 AT 导电涂料和 MAT 导电涂料,各组分添加质量如表 1 所示。将导电涂料均匀涂覆在 150 mm×70 mm 规格涂有底漆的马口铁上,在一定温度下固化得到导电涂层后,用数显重锤式表面电阻仪测量其表面电阻。

表 1 导电涂料配方

成分组成	质量/g	成分组成	质量/g
环氧树脂	45	消泡剂	0.8
二甲苯	50	流平剂	1.2
导电填料	1、3、5…15		

1.3 流变性能测试

1.3.1 稳态剪切特性

利用高级旋转流变仪对环氧导电涂料进行稳态剪切特性测试,在温度为 25℃、剪切速率为 1~200 s^{-1} 范围内,探究涂料黏度与剪切应力随剪切速率的变化情况。运用幂律流体模型研究导电涂料流动数据曲线。

幂律流体模型:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; K 为稠度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流型指数,量纲为一,流型指数 n 是衡量非牛顿程度的量度,当 $n=1$ 时,即为牛顿流体;当 $n<1$,为假塑性流体;当 $n>1$,为膨胀性流体。

1.3.2 触变性

随着剪切速率完成增大—停留—减小循环后,剪切速率与剪切应力的数据曲线会形成滞后环,根据滞后环面积大小判断触变性优劣。在测试温度 25℃ 下,设置剪切速率由 5 s^{-1} 渐渐增大到 131 s^{-1} 后,停留 5 min,然后从 131 s^{-1} 逐渐降回 5 s^{-1} ,得到涂料剪切速率与剪切应力的触变性数据曲线。

1.3.3 储能模量

在测试温度为 25℃、剪切频率为 1 Hz 的条件下,研究 2 种涂料样品储能模量随剪切应力变化关系。设置剪切应力的变化范围在 0~50 Pa,通过高级旋转流变仪(MCR302 型)测试得到 2 种涂料样品在相同测试温度、剪切频率下,储能模量随剪切应力变化的数据曲线,判断黏弹性涂料发生弹性形变存储能量的能力。

1.4 导电涂层的力学性能

按国家标准 GB/T 6739—2006 并通过在漆膜上推压已知硬度标号的铅笔硬度来测定漆膜硬度;根据国家标准 GB/T 9286—1998,以直角网格图形切割涂层穿透至底材时来评定涂层从底材上脱离的抗

性;根据国家标准 GB/T 1732—1993,以固定质量的重锤落于试板上而不引起漆膜破坏的最大高度 (cm) 表示漆膜耐冲击性;根据国家标准 GB/T 6742—86,测定涂层绕圆柱轴弯曲时的抗开裂或从金属底板上剥离的性能。

2 结果与讨论

2.1 水接触角测试

改性剂质量分数对 MAT 水接触角的影响如图 1 所示。由图 1 中可以看出,随着表面活性剂 HDC 质量分数的增加,导电材料 MAT 的水接触角快速增大,这是因为表面活性剂 HDC 的亲水基团物理吸附在 AT 材料表面,疏水基团暴露在外,致使材料 AT 表面能降低,疏水性增强^[5]。当质量分数为 5% 时,水接触角最大达到 146.5°,说明材料表面的表面活性剂达到了饱和单分子层吸附;当质量分数大于 5% 时,导电材料水接触角减小,这与材料表面过饱和状态表面活性剂暴露亲水基团的多分子层吸附有关^[6]。综合考虑,在 $m(\text{HDC}) : m(\text{MAT}) = 0.05$ 时,改性效果最佳。

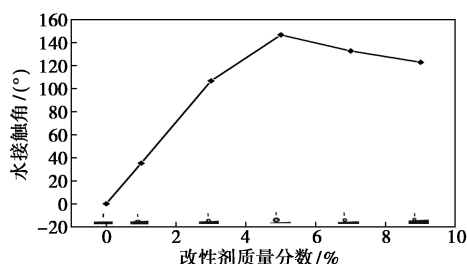
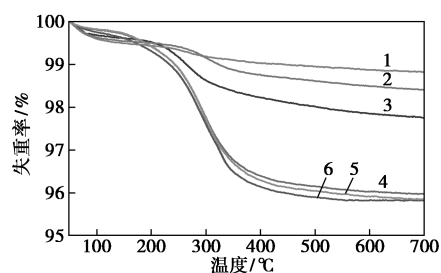


图 1 改性剂质量分数对 MAT 水接触角的影响

2.2 热分析

AT 与 MAT 的热重曲线如图 2 所示。由图 2 中可以看出,当温度在 200℃ 以下时,AT 材料热失重原因主要是表面物理吸附水蒸发,失重率为 0.57%;而改性后 MAT 比改性前 AT 的热失重小,这是由于 HDC 表面活性剂对 AT 进行改性后,材料的表面能降低,疏水性增强,导致 MAT 表面吸附水减少。温度在 200~500℃ 时,AT 材料失重率是材料表面羟基热失重导致,失重率为 0.48%。当质量分数为 1%、3%、5%、7%、9% 时,失重率分别为 1.59%、2.25%、4.04%、4.16%、4.18%,这是由于物理吸附在 MAT 表面的有机基团高温燃烧失重所致。当质量分数大于 5% 时,材料失重率基本相近,表明材料表面已经形成饱和单分子层,这与改性材料的水接触角测试数据一致,故表面活性剂 HDC 对 AT 改性最适宜的质量比为 $m(\text{HDC}) : m(\text{AT}) = 0.05$ 。

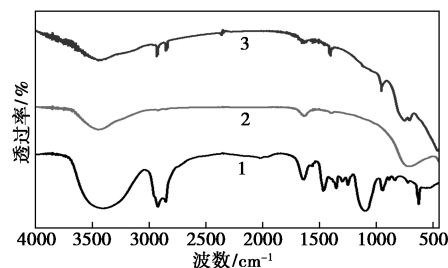


1—HDC;2— $m(\text{HDC}) : m(\text{AT}) = 0.01$;3— $m(\text{HDC}) : m(\text{AT}) = 0.03$;
4— $m(\text{HDC}) : m(\text{AT}) = 0.05$;5— $m(\text{HDC}) : m(\text{AT}) = 0.07$;
6— $m(\text{HDC}) : m(\text{AT}) = 0.09$

图 2 AT 与 MAT 的热重曲线

2.3 红外光谱分析

表面改性前后导电二氧化钛晶须的红外光谱图如图 3 所示。由图 3 中曲线 2 可以看出,AT 导电材料在 3 452、1 642 cm^{-1} 处有 2 个明显的吸收峰,这是 AT 表面吸附水中 O—H 伸缩振动吸收峰和弯曲振动吸收峰^[7-8]。通过对比改性前 AT 和改性后 MAT 的红外光谱图可以看出,改性后 MAT 在 2 926 cm^{-1} 和 2 854 cm^{-1} 处出现 2 个吸收峰,为 C—H 键的伸缩振动峰;在 954 cm^{-1} 处还出现了 C—N 键伸缩振动峰,说明改性后 MAT 表面存在十八烷基二甲基羟乙基季铵根。改性后 MAT 的吸收峰与 HDC 吸收峰相比并没有产生新的吸收峰,原来的吸收峰也没有发生偏移,表示改性剂 HDC 是通过物理吸附方式包覆在 AT 的表面^[9]。

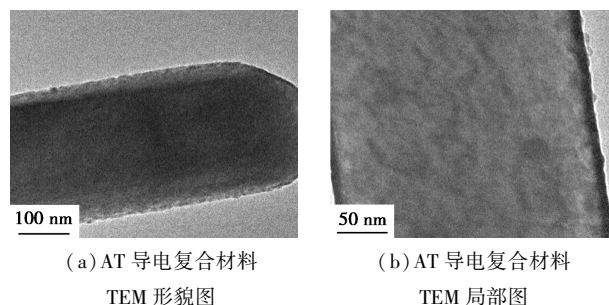


1—HDC;2—AT;3—MAT

图 3 表面改性前后导电二氧化钛晶须的红外光谱图

2.4 TEM 分析

AT 和 MAT 导电材料的 TEM 图如图 4 所示。

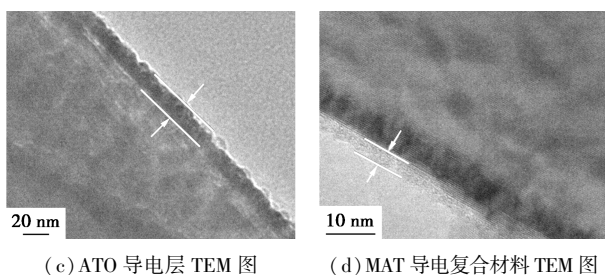


(a) AT 导电复合材料

TEM 形貌图

(b) AT 导电复合材料

TEM 局部图



(c) ATO 导电层 TEM 图 (d) MAT 导电复合材料 TEM 图

图 4 AT 和 MAT 导电材料的 TEM 图

由图 4(a)~图 4(c)中可以看到,AT 导电材料为棒状结构,直径约为 0.3 μm。AT 材料表面有均匀且连续的颗粒状 ATO 导电层,厚度约为 16 nm。由图 4(d)中可以看出,MAT 材料表面存在有机分子层,厚度约为 4 nm。

2.5 涂层表面电阻的测定

AT 与 MAT 质量分数(导电组分质量占配方中的质量)对环氧涂层表面电阻的影响如图 5 所示。由图 5 中可以看出,当 MAT 导电填料质量分数由 3%增加至 9%时,表面电阻降低了 6 个数量级。根据渗流理论分析可知,导电填料质量分数增加的同时,其渗透阈值也在不断地增大,导电填料之间逐渐相互连接形成重叠的导电网络,致使涂层表面电阻发生跳跃式减小^[10]。当 MAT 导电填料质量分数由 9%增加至 15%时,涂层表面电阻降低很小,电阻最低可达 $8.32 \times 10^5 \Omega/\text{sq}$ 。这是因为涂层中导电填料渗流阈值已经形成完整三维导电网络状态,继续添加导电填料也不会使涂层表面电阻发生明显降低。不同导电填料对涂层导电性能的影响如表 2 所示。由表 2 可知,相对于 HDC 和导电 TiO₂ 晶须,改性后的导电 TiO₂ 晶须具有更加良好的导电性。这是由

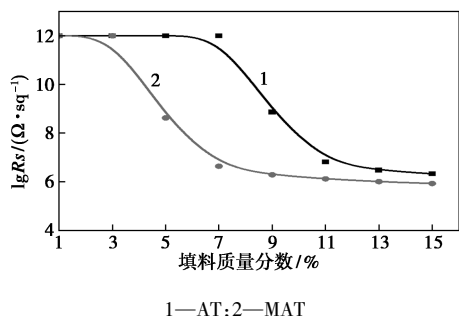


图 5 AT 与 MAT 质量分数对环氧涂层表面电阻的影响

表 2 不同导电填料对涂层导电性能的影响

涂层性能	0.4% HDC	0.4% HDC 改性 8% 导电 TiO ₂ 晶须	9% 导电 TiO ₂ 晶须
电阻/Ω	9.22×10^8	2.63×10^6	7.24×10^5

于采用 HDC 有机改性 AT 不但提高其在环氧树脂中的分散性,而且与 AT 具有协同效应,能有效降低涂层的表面电阻。

2.6 涂层的力学性能

AT 与 MAT 导电填料不同质量分数对环氧导电涂层的力学性能影响如表 3 所示。从表 3 中可以看出,MAT 环氧涂层相比 AT 环氧涂层力学性能部分提升。这是由于改性后的导电填料与基体树脂的相容性提升,填料在涂层中分散更均匀。同时,导电填料质量分数的增大破坏了涂层交联密度和基体树脂的柔性,导致涂层柔韧性和附着力降低^[11],而涂层的硬度和耐冲击性在改性前后并没有降低。

表 3 不同导电填料的添加量对涂层力学性能的影响

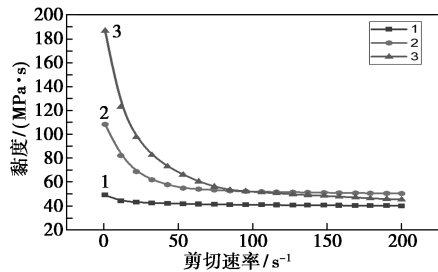
质量分数/%	AT 环氧涂层				MAT 环氧涂层			
	附着力	硬度	柔韧	耐冲	附着力	硬度	柔韧	耐冲
			性/mm	击/cm			性/mm	击/cm
3	0 级	2H	1	50	0 级	2H	1	50
5	1 级	2H	1	50	0 级	2H	1	50
7	1 级	2H	1	50	1 级	2H	1	50
9	1 级	2H	1	50	1 级	2H	1	50
11	1 级	2H	1	50	1 级	2H	1	50
13	1 级	3H	1	50	1 级	3H	1	50
15	2 级	3H	2	50	1 级	3H	1	50

2.7 环氧导电涂料的流变性能

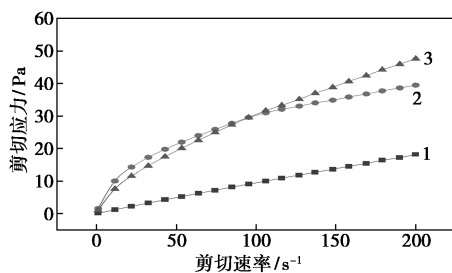
2.7.1 涂料稳态剪切特性

根据稳态剪切流变学分析 AT 环氧涂料与 MAT 环氧涂料的流体流变特性。测试温度为 25℃、剪切速率为 1~100 s⁻¹下黏度与剪切速率的变化曲线如图 6(a)所示。从图 6(a)中可以看出,随着剪切速率的增加,涂料的黏度降低,表现出明显的剪切稀化现象^[12]。根据黏度与剪切速率的变化曲线可知,在低剪切速率下(静止或刷涂后),MAT 环氧涂料比 AT 环氧涂料具有较高的黏度及防流挂和颜料的沉降;在高剪切速率时(刷涂时),MAT 环氧涂料黏度低,方便涂刷并使涂料具有很好的流动性。因此,导电填料经过表面改性处理后,在涂料领域的实际应用中能提高其性能。测试温度 25℃时剪切应力与剪切速率的变化曲线如图 6(b)所示。由图 6(b)可知,环氧涂料在剪切速率为 1~200 s⁻¹范围内,剪切应力与剪切速率呈线性关系,故环氧涂料属于牛顿流体;而 AT 环氧涂料与 MAT 环氧涂料的剪切应力与剪切速率呈非线性关系,因此这 2 种涂料属于非

牛顿流体。根据幂律流体模型方程得出环氧树脂体系的流动指数 n 值约为 1,属于牛顿流体;AT 环氧涂料与 MAT 环氧涂料的流动指数 n 值分别为 0.457、0.727,属于非牛顿流体中的假塑性流体。



(a) 黏度与剪切速率的变化曲线



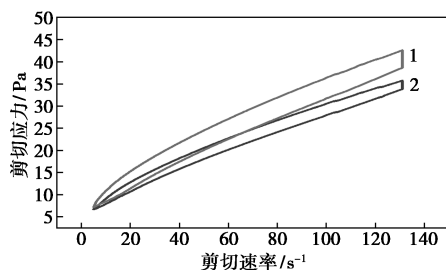
(b) 剪切应力与剪切速率的变化曲线

1—环氧涂料;2—AT 环氧导电涂料;3—MAT 环氧导电涂料

图 6 黏度、剪切应力与剪切速率的变化曲线

2.7.2 涂料触变性分析

AT 与 MAT 环氧导电涂料触变性变化曲线如图 7 所示。由图 7 中可以看出,当剪切速率经过上升—停留—下降循环过程后,剪切速率与剪切应力的数据曲线会形成滞后环,根据滞后环面积大小判断触变性大小^[13]。AT 环氧导电涂料的滞后环面积为 533.2 Pa/s, MAT 环氧涂料的滞后环面积为 295.1 Pa/s。由于 MAT 环氧涂料的环面积小,故触变性小,故 MAT 环氧涂料稳定性高,可长期保存不发生絮凝沉降。



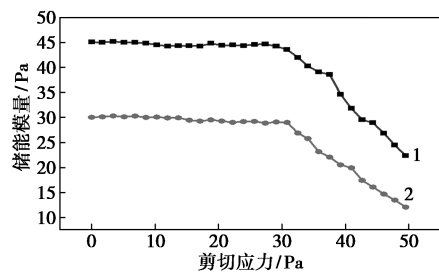
1—MAT 环氧涂料;2—AT 环氧涂料

图 7 触变性滞后曲线

2.7.3 涂料储能模量分析

储能模量与剪切应力的变化关系如图 8 所示。由图 8 中可以看出,储能模量在低剪切应力下基本

保持恒定,随着剪切应力的不断增大而快速减小。储能模量快速减小与涂料体系结构被破坏有关。涂料体系在低剪切速率时保持较高的储能模量,在剪切应力增大到 30 Pa 左右,涂料体系形成的三维网状结构被破坏,导致储能模量快速减小。经 HDC 改性后的 MAT 导电填料更适合在溶剂型涂料中均匀分散,分散后的导电涂料更具稳定性。相对于 AT 环氧涂料,改性后的 MAT 环氧涂料的储能模量更高,涂料发生弹性形变存储能量的能力强,抗流挂性更佳^[14]。



1—MAT 环氧涂料;2—AT 环氧涂料

图 8 储能模量与剪切应力变化关系

3 结论

(1) HDC 对 AT 有机改性的合适用量为 $m(\text{HDC}) : m(\text{AT}) = 0.05$;改性剂 HDC 与 AT 以物理吸附方式结合,在导电材料的表面形成连续、均匀、厚度约为 4 nm 的有机分子层。

(2) MAT 涂层相对于 AT 涂层具有更好的导电效果,其力学性能更加优异。

(3) 与 AT 环氧导电涂料相比, MAT 环氧导电涂料具有低剪切速率黏度高、高剪切速率黏度低、触变性小、储能模量高的特点,故其方便涂刷,抗流挂性和稳定性优异。

参考文献

- [1] 庆奕良,王国志,刘文兴,等.导电涂料的简介及研究现状[J].现代涂料与涂装,2020,23(11):41-44.
- [2] 杨波,李爽,张双红,等.不同偶联剂对复合纳米导电涂料性能的影响研究[J].涂料工业,2020,50(6):1-6.
- [3] 王英.掺锡氧化锡导电复合材料的性能研究[D].天津:天津大学,2014.
- [4] Gao Q, Wang M, Gao C, et al. Light-colored conductive fabric coatings using uniform ATO@TiO₂ whiskers[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(1):351-363.
- [5] Luo T, Zeng W, Zhang R, et al. Hydrophobic modification of silica surfaces via grafting alkoxy groups[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2021, 3(4):1691-1698.

(下转第 188 页)

性,提高催化剂活性。

(3)推断了香紫苏醇合成香紫苏内酯的机理。由于烯丙醇结构迁移,双键断键后得到羟甲基酮,羟甲基酮与香紫苏醚达成一个偏向于香紫苏醚的平衡,氧化后生成羧酸和羟基醛。羧酸关环即得香紫苏内酯,而羟基醛和甲基酮形成平衡,二者经过氧化氢催化氧化也得到羧酸和香紫苏内酯。

参考文献

- [1] 刘六军,何静,陈素文,等.龙涎香型香料分子结构与香气关系的应用研究[J].北京林业大学学报,2002,24(4):4.113-116.
- [2] 吴亚.香紫苏醇氧化降解合成香紫苏内酯的研究[D].西安:陕西师范大学,2005:2-10.
- [3] Zahra J P, Chauvet F, Coste-Maniere I, *et al.* ChemInform abstract: Oxidative degradation of the sclareol side chain: Hemisyntheses of ambergriis derivatives using in the key steps palladium complexes or ruthenium tetroxide generated in situ [J]. ChemInform, 1998, 134 (10-11): 1001-1024.
- [4] Bolster M G, Lagnel B M F, Jansen B, *et al.* The synthesis of Ambrox-like compounds starting from (+)-larixol. Part 2 [J]. Tetrahedron, 2001, 57(39): 8369-8379.
- [5] Ht A, Pe B, Kb A. A review of the role of hydrogen peroxide in organic transformations [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021, 104: 259-332.
- [6] Barton D, Parekh S I, Taylor D K, *et al.* An efficient synthesis of (-)-dodecahydro-3a, 6, 6, 9a-tetramethylnaphtho [2, 1-b] furan from (-)-sclareol [J]. Cheminform, 1994, 25(52): 5801-5804.
- [7] Fairlamb I, Matthias Beller, Carsten Bolm. Transition metals for organic synthesis: Building blocks and fine chemicals. Wiley-VCH, 2004; 2nd edition, two-volume set, hardcover [J]. Applied Organometallic Chemistry, 2010, 19(12): 1275-1276.
- [8] Koike K, Inoue G, Fukuda T. Explosion hazard of gaseous ozone [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2004, 32(3): 295-299.
- [9] A K K, B M N, A K I, *et al.* Explosion properties of highly concentrated ozone gas [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(4-6): 465-468.
- [10] 魏俊发, 吴亚, 石先莹, 等. 香紫苏内酯的合成方法: 1683352A [P]. 2005-02-24.
- [11] Amaniampong P N, F Jérme. Catalysis under ultrasonic irradiation: A sound synergy [J]. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2019, 22: 7-12.
- [12] 郝梦亚, 朱薇, 马姝雅, 等. 超声辅助钨柱撑膨润土吸附刚果红的研究 [J]. 现代化工, 2021, 41(S01): 163-168.
- [13] Zhang Zongbo, Xu Chunling, Liu Wengang, *et al.*, Ultrasonic assisted rapid preparation of superhydrophobic stainless steel surface and its application in oil/water separation [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 81: 105848.
- [14] Umego E, He R, Ren W, *et al.* Ultrasonic-assisted enzymolysis: Principle and applications [J]. Process Biochemistry, 2021, 45(6): e15559.
- [15] Sun P, Lu P, Xu J, *et al.* The influence and control of ultrasonic on the transport and electrochemical properties of redox couple ions in deep eutectic solvent (DES) for redox flow battery application [J]. Electrochimica Acta, 2021, 394(1): 139140.
- [16] Qin J, Li N, Jiang M, *et al.* Ultrasonication pretreatment assisted rapid co-assembly of cellulose nanocrystal and metal ion for multi-functional application [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 277: 11829.
- [17] Ht A, Pe B, Kb A. A review of the role of hydrogen peroxide in organic transformations [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021, 104: 295-332.
- [18] Chorkendorff I, Niemantsverdriet J W. concepts of modern catalysis and kinetics [J]. Ceramurgia+Ceramica Acta, 2010, 40(2): 115.
- [19] Sancheti S V, Gogate P R. A review of engineering aspects of intensification of chemical synthesis using ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 36: 527-543.
- [20] Diwathe M C, Gogate P R. Ultrasound assisted intensified synthesis of 1-benzyloxy-4-nitrobenzene in the presence of phase transfer catalyst [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 346: 438-446.
- [21] Abimannan P, Selvaraj V, Rajendran V. Sonication effect on the reaction of 4-bromo-1-methylbenzene with sodium sulfide in liquid-liquid multi-site phase-transfer catalysis condition-Kinetic study, Ultrason [J]. Sonochem, 2015, 23: 156-164. ■
- [6] Jiménez-ángel F, Khoshnood A, Firoozabadi A. Molecular dynamics simulation of the adsorption and aggregation of ionic surfactants at liquid-solid interfaces [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(46): 25908-25920.
- [7] Jang I, Shin K, Yang I, *et al.* Enhancement of thermal conductivity of BN/epoxy composite through surface modification with silane coupling agents [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 518: 64-72.
- [8] Chen Z, Gu M, Wang F, *et al.* Conductive TiO₂ nanorods via surface coating by antimony doped tin dioxide [J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 225: 181-186.
- [9] Zhou H, Sun S, Ding H, *et al.* Surface Organic Modification of TiO₂ Powder and Relevant Characterization [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 9562612.
- [10] 赵维, 李玉红, 陈佑宁, 等. 导电涂料研究进展 [J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(1): 103-106.
- [11] 黄玲燕. 环氧树脂导电防腐涂料的制备及其性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [12] Eley R R. Applied rheology and architectural coating performance [J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2019, 16(2): 263-305.
- [13] Osterhold M. Rheological methods for characterising modern paint systems [J]. Progress in Organic Coatings, 2000, 40(1): 131-137.
- [14] 樊庆春, 童身毅. 涂料流平性与流挂研究进展 [J]. 中国涂料, 2012, 27(4): 26-29. ■

(上接第 183 页)