

# 水溶性丙烯酸酯接枝氯化聚丙烯乳液的性能及应用

黄孙蒙, 许泽军, 张道洪\*

(中南民族大学, a. 催化转化与能源材料化学教育部重点实验室暨催化材料科学湖北省重点实验室; b. 超支化聚合物合成与应用技术湖北省工程研究中心, 武汉 430074)

**摘要** 聚丙烯(PP)基材作为非极性材料, 表面难以直接涂装, 常用油性氯化聚丙烯(CPP)作为底涂以增加PP与涂料之间的附着力, 但含大量挥发性有机物(VOCs), 环境污染严重. 合成的水溶性丙烯酸酯接枝氯化聚丙烯乳液(WA-CPP), 具有VOC含量低(2%~4%)、粘度低(700~1300 cP, 25 °C)、乳液稳定性高和热性能优异等特点. WA-CPP制备的涂层在PP基材上附着力可达0级, 耐冲击性能大于100 cm, 抗弯折性能为0 T<sub>f</sub>; WA-CPP乳液可有效改善PP基材与涂料的相互作用和附着力以及耐水性. 使用扫描电镜等技术分析了附着力增强机制, WA-CPP可望在PP表面改性及涂装等领域得到广泛应用.

**关键词** 水溶性涂料; 氯化聚丙烯; 丙烯酸酯; 乳液

中图分类号 TQ63 文献标志码 A 文章编号 1672-4321(2025)02-0145-08

doi: 10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20240724

## Performance and application of water-soluble acrylate grafted chlorinated polypropylene emulsions

HUANG Sunmeng, XU Zejun, ZHANG Daohong\*

(South-Central Minzu University a. Key Laboratory of Catalysis and Energy Materials Chemistry of Ministry of Education & Hubei Key Laboratory of Catalysis and Materials Science; b. Hubei R&D Center of Hyperbranched Polymers Synthesis and Applications, Wuhan 430074, China)

**Abstract** It is very difficult to coat the surface of polypropylene (PP) substrate directly due to its non-polarity. To improve the adhesion between PP and coatings, oil-soluble chlorinated polypropylene (CPP) is commonly used as a primer, but the high levels of volatile organic compounds (VOCs) lead to seriously environmental pollution. Here, a water-soluble acrylic ester-grafted chlorinated polypropylene emulsion (WA-CPP) was developed and showed low VOCs content (2%~4%), low viscosity (700~1300 cP, 25 °C), high stability and excellent thermal stability. The adhesion of the coating prepared by WA-CPP on PP substrate could reach level 0, with an impact resistance exceeding 100 cm, and a flexural resistance of 0 T<sub>f</sub>. The WA-CPP emulsion could significantly enhance the interaction and adhesion between the PP substrate and paint, as well as the water resistance of the coatings. The improvement mechanism of adhesion was investigated using scanning electron microscope, and demonstrated wide application prospects in surface modification and coating for PP.

**Keywords** water-soluble coatings; chlorinated polypropylene; acrylic ester; emulsions

聚丙烯(PP)作为一种性能优良的热塑性合成树脂, 在医疗器械、汽车零件以及食品包装中有着广泛应用, 是塑料汽车零部件和封装中最有前途的

热塑性聚合物材料之一<sup>[1]</sup>. 但由于PP结晶度高, 表面能低, 与市售常用涂料和油墨的附着力差, 导致无法直接在其表面进行涂料涂布保护和打印<sup>[2]</sup>. 现

收稿日期 2024-04-22

\* 通信作者 张道洪(1976-), 男, 教授, 博士, 研究方向: 超支化聚合物及其应用, E-mail: daohong.zhang@scuec.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点资助项目(U23A20691); 国家民族事务委员会创新团队资助项目(MZR20006); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CZD24001); 中南民族大学学术创新团队资助项目(XTZ24012)

有增强PP与涂料之间附着力的办法是火焰处理、等离子体处理<sup>[3]</sup>、电晕处理,或者在PP表面涂布与其附着力良好的涂层<sup>[4-5]</sup>。氯化聚丙烯(CPP)是由PP氯化改性制得的热塑性树脂,与PP的附着力良好,常作为PP基材的附着力促进剂使用,其在甲苯、乙酸乙酯等有机溶剂中具有良好的溶解性能,因此常将CPP溶解在有机溶剂中使用<sup>[6]</sup>。然而,有机溶剂不仅成本相对较高,且在后续的工艺及处理过程中挥发有机物对人体健康和环境有严重影响,因此研究开发绿色环保,无有机溶剂的水性CPP是解决目前该领域所存在问题的根本途径<sup>[7]</sup>。国外对水性CPP的研究起步较早,主要专利成果被日本、美国等发达国家垄断<sup>[8]</sup>,他们主要采用丙烯酸酯<sup>[9]</sup>、马来酸酐<sup>[10]</sup>对其进行接枝改性,加入胺类试剂中和,通过相反转法制得水性CPP乳液<sup>[11]</sup>,在合成过程中仍需使用有机溶剂,在后续去除有机溶剂的过程中,增加成本且工艺复杂;也有采用分子半导体<sup>[12]</sup>、聚氨酯<sup>[13]</sup>、硅烷改性粘土<sup>[14]</sup>、生物基天然化合物<sup>[15]</sup>等进行改性,都会增加成本。水性CPP应用主要集中在作为PP基材底漆使用来提高附着力<sup>[16-17]</sup>,而BAI<sup>[18]</sup>等通过丙烯酸酯接枝CPP实现了在油墨打印质量上的有效提高。

本文表征了水溶性丙烯酸酯接枝氯化聚丙烯乳液(WA-CPP)的性质及性能,研究了WA-CPP涂层和复合涂层对PP基材表面性能的影响,着重探讨了WA-CPP涂层与PP基材附着力的增强机理,展现了WA-CPP在涂层涂料领域的应用价值。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料及仪器

丙烯酸(AA)、丙烯酸丁酯(BA)、甲基丙烯酸甲酯(MMA)、三乙醇胺(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);氯化聚丙烯(CPP,工业级,泸州北方塑料化工有限公司);过氧化苯甲酰(BPO,化学纯,上海山浦化工有限公司);水性丙烯酸乳液(WAA,单组分,水性涂料,温州君威涂料有限公司)。

差示扫描量热仪(DSC25,美国TA Instruments Waters);热重分析仪(TGA55,美国TA Instruments Waters);台式扫描显微镜(TM4000型,日本Hitachi);扫描电子显微镜(SU8010型,日本Hitachi);黏度流变仪(DV-III Ultra,美国Brookfield);测厚仪(CHY-HS,济南三泉中石实验仪器有限公司)。

### 1.2 水溶性丙烯酸酯接枝氯化聚丙烯乳液的制备

参考文献[19],将AA、BA、MMA、CPP单体混合均匀加入装有搅拌器、冷凝管、恒压漏斗的四口烧瓶中,在机械搅拌下,水浴加热至70~80℃熔融。然后缓慢加入引发剂BPO,继续搅拌反应2~3h,得到乳黄色黏稠流体。在高速搅拌下,加入三乙醇胺水溶液进行中和至pH值7.0左右,继续搅拌乳化1h,即得到乳白色的水溶性丙烯酸酯接枝氯化聚丙烯乳液。

### 1.3 涂层的制备及性能测试方法

聚丙烯(PP)基材的处理:用300目砂纸打磨基材表面,再使用600目砂纸进行打磨,最后用无水乙醇和脱脂棉清洗表面并干燥。

WA-CPP涂层制备:使用挤压厚度为10μm的线棒将WA-CPP乳液均匀涂覆于相应的测试基材上,在130℃下固化2h,得到厚度约5μm的棕黄色不透明涂层。

WAA单涂层制备:使用挤压厚度为10μm的线棒将WAA均匀涂覆于相应的测试基材上,在80℃下固化1h至涂层实干,得到厚度约7μm的白色不透明涂层。

WAA-WA-CPP复配涂层制备:将对应质量配比的WA-CPP和WAA置于圆底烧瓶中,在800r·min<sup>-1</sup>机械搅拌下混合均匀,使用挤压厚度为10μm的线棒将复配漆均匀涂覆于相应测试基材,在130℃下固化2h,得到约5μm的淡乳黄色不透明涂层。

采用离心沉降的方法分析乳液的离心稳定性,取25mL的水性乳液于塑料离心管中,在常温下测试比较乳液的离心稳定性,具体分级方法如下<sup>[20]</sup>:

1级:在1500r·min<sup>-1</sup>×20min下分层;2级:在2000r·min<sup>-1</sup>×20min下分层;

3级:在2500r·min<sup>-1</sup>×20min下分层;4级:在3000r·min<sup>-1</sup>×20min下分层;

5级:在3500r·min<sup>-1</sup>×30min下分层;6级:在3500r·min<sup>-1</sup>×30min下不分层。

乳液黏度采用黏度流变仪进行测试;测试基材打磨方法遵循CB/T 9271—2008标准;涂层表干、实干按照GB/T 1728—2020方法进行判定;涂层厚度采用测厚仪进行测试;涂层附着力按照GB/T 9286—2021方法进行测定;涂层铅笔硬度按照GB/T 6739—2022方法进行测定;涂层耐冲击性能按照GB/T 1732—2020方法进行测定;涂层耐弯折性能按照GB/T 30791—2014方法进行测定;涂层耐水性按照

GB/T 1733—1993 方法进行测定;涂层光泽度按照 GB/T 9754—2007 方法进行测定。

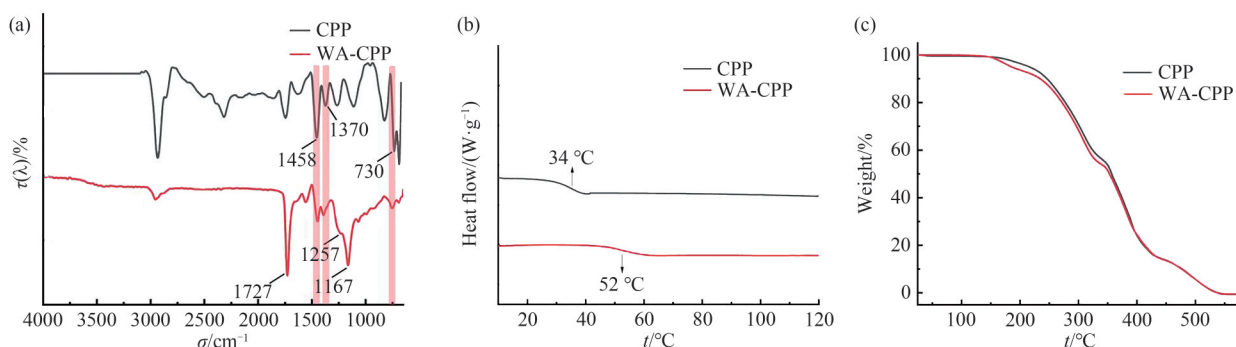
## 2 结果与讨论

### 2.1 WA-CPP 的性质

经测试分析,所制备的水溶性丙烯酸酯接枝氯化聚丙烯乳液(WA-CPP)的固含量为 31%~33%(质

量分数)、VOC 含量为 2%~4%(质量分数)、粘度为 700~1300 cP(25 °C)、粒径为 800~1000 nm、pH 值为 6.5~7.0,乳液在 3500 r·min<sup>-1</sup> 转速下离心 30 min 不产生分层,达 6 级离心稳定性。

取适量的 WA-CPP 乳液于锡纸盒中,在 130 °C 烘箱中固化 3 h,得到 WA-CPP 薄膜,对薄膜进行 FT-IR、DSC 和 TG 等分析,与氯化聚丙烯(CPP)进行对比,结果如图 1 所示。



(a) FT-IR; (b) DSC 曲线; (c) TG 曲线

图 1 CPP 和 WA-CPP 的性质

Fig. 1 Properties of CPP and WA-CPP

由图 1(a)可见:在 CPP 红外光谱的 1458 cm<sup>-1</sup> 和 1375 cm<sup>-1</sup> 处出现了属于 C—H 的弯曲振动峰、在 735 cm<sup>-1</sup> 处出现了属于 C—Cl 的特征峰,而在 WA-CPP 红外光谱的 1727 cm<sup>-1</sup> 处出现了 C=O 的伸缩振动吸收峰,以及在 1236 cm<sup>-1</sup> 和 1163 cm<sup>-1</sup> 出现的 C—O—C 的伸缩振动特征峰,说明氯化聚丙烯主链上含有酯基,表明丙烯酸酯成功接枝到 CPP 主链上。从图 1(b)对比它们的玻璃化转变温度,引入极性的丙烯酸酯链后, CPP 的玻璃化转变温度( $T_g$ )由 34 °C 提高到 52 °C,提升了 9 °C。丙烯酸酯接枝到 CPP 后,增加了主链的空间位阻和分子链间的相互作用,影响了聚合物链段的运动能力,使  $T_g$  提高,进一步说明

了丙烯酸酯成功接枝到 CPP 主链上。同时, WA-CPP 仅有一个玻璃化转变温度,表明 WA-CPP 中几乎没有丙烯酸酯均聚物。由图 1(c)可见: CPP 有 3 个热分解峰, WA-CPP 出现 4 个热分解峰,在 175 °C 附近新增的峰应该归于丙烯酸酯基之间羟基脱水或者乳液的结合水加热失重所致,其他 3 个热分解峰的形状、热分解温度以及产品的残碳率几乎一致,说明接枝丙烯酸酯后氯化聚丙烯的热性能未受影响。

### 2.2 WA-CPP 对 PP 基材涂层性能的影响

使用挤压厚度为 10 μm 线棒将 WA-CPP 水性乳液均匀涂覆于经处理后的 PP 基材,固化时间为 2 h,研究固化温度对涂层性能的影响,结果如表 1 所示。

表 1 固化温度对涂层性能的影响

Tab. 1 Effect of curing temperature on coating properties

	固化温度/°C				
	80	100	120	130	140
附着力	3 级	1 级	1 级	0 级	0 级
涂层情况	涂层未实干	涂层表干	涂层实干,淡黄色	涂层实干,深黄色	涂层实干,棕黄色

由表 1 可见:涂层的附着力随固化温度的提高而提高,在低于 80 °C 的固化温度,涂层无法完全固化;升温至 100~120 °C 时,涂层的附着力逐渐提高至 1 级;再升高温度至 130~140 °C,涂层附着力进一步提升至 0 级,但涂层颜色加深。附着力的提高是因为随固化温度的升高,涂层中去离子水得到有效挥发,颜色的加深是因为 CPP 在高温环境下发生了

降解。

基于 130 °C 的固化温度,研究固化时间对涂层性能的影响,结果如表 2 所示。

由表 2 可见:涂层的附着力随着固化时间的延长而提高,固化时间低于 40 min 时,涂层未能完全实干;当固化时间延长至 120~180 min,附着力等级达到 0 级,但涂层颜色随固化时间延长而逐步加深。

表2 固化时间对涂层性能的影响  
Tab. 2 Effect of curing time on coating properties

	固化时间/min				
	20	40	60	120	180
附着力	1级	1级	1~0级	0级	0级
涂层情况	涂层基本实干,淡黄色	涂层表干,淡黄色	涂层实干,深黄色	涂层实干,深黄色	涂层实干,棕黄色

这一现象的产生同样可以归因于去离子水的有效逸散以及含氯聚合物在高温下的降解.

以上研究说明 WA-CPP 乳液在 130 °C 下固化 120 min 可以获得较优异的性能,为此系统测试了它的其他性质,如水接触角(67°)、铅笔硬度(3B)、光泽度(3.2°)、耐冲击性能(大于 100 cm)、耐弯折强度(0 T<sub>1</sub>)等均较优异,但浸水 10 min 后涂层有脱落现象,说明耐水性能相对较差.

使用不同浸润剂对 WA-CPP 涂层和 PP 基材进行接触角分析,PP 基材对水的接触角为 83°、对二碘甲烷的接触角为 46°,而 WA-CPP 涂层对水的接触角为 67°、对二碘甲烷的接触角为 42°.说明 PP 基材经

WP-CPP 涂层改性后,接触角出现明显下降,可能是 WA-CPP 中羧基等亲水性基团的引入,对涂层的亲水性有明显提升作用.进一步采用 Owens 二液法计算两种材料的表面能,PP 基材的表面能为 36.57 mJ·m<sup>-2</sup>,WA-CPP 涂层的表面能为 42.34 mJ·m<sup>-2</sup>,WA-CPP 涂层的应用使 PP 基材的表面能增加了 5.77 mJ·m<sup>-2</sup>.表面能的增加进一步说明了 WA-CPP 能增加 PP 基材表面的极性,可望提高涂层表面的附着力.

### 2.3 WAA-WA-CPP 对 PP 基材涂层性能的影响

将 WA-CPP 与水性丙烯酸乳液(WAA)进行混合,研究 WA-CPP 的含量对混合乳液性质及涂层性能的影响,结果如表 3 所示.

表3 WAA-WA-CPP 配比对涂层性能的影响  
Tab. 3 Effect of WAA-WA-CPP ratios on coating properties

配比	粒径/nm	黏度/cP	附着力/级	耐水性(25 °C)
WAA	160	2615	2	浸水 168 h,涂层无起泡、脱落现象
WA-CPP	877	731.8	0	浸水 10 min,涂层有明显起泡、脱落现象
30%WA-CPP	232	3720	1	浸水 168 h,涂层无起泡、脱落现象
50%WA-CPP	345	3491	1	浸水 168 h,涂层无起泡、脱落现象
60%WA-CPP	402	3053	1~0	浸水 168 h,涂层无起泡、脱落现象
65%WA-CPP	424	2200	0	浸水 168 h,涂层无起泡、脱落现象
70%WA-CPP	435	2202	0	40 °C 水温浸泡 240 h,涂层无起泡、脱落现象

从表 3 可知,随着 WA-CPP 含量的增加,体系粒径随之增大,黏度先上升后降低,涂层在 PP 基材上的附着力逐步提高,耐水性则无明显降低,在含量为 65%(质量分数)左右时,涂层的性能最好.WA-CPP 的颗粒尺寸大于 WAA,因此 WA-CPP 含量的增加,体系粒径呈现逐步增大.在共混体系中,因为 WAA 和 WA-CPP 同属于极性涂料,不同极性分子相互吸引,带正电的一端可吸引另一个分子带负电的一端,产生偶极力,使得复配涂料流动困难<sup>[21]</sup>,导致体系黏度增大,但随着 WA-CPP 含量的继续增加,体系粒径增大,分子间的相互吸引作用减弱,各粒子间的相互摩擦力减小,使得体系流动性提高<sup>[22]</sup>,粘度降低,因此粘度先增加后降低.对于涂层附着力的增强可归因于 WA-CPP 比 WAA 对 PP 基材具有更相似的化学结构所致.

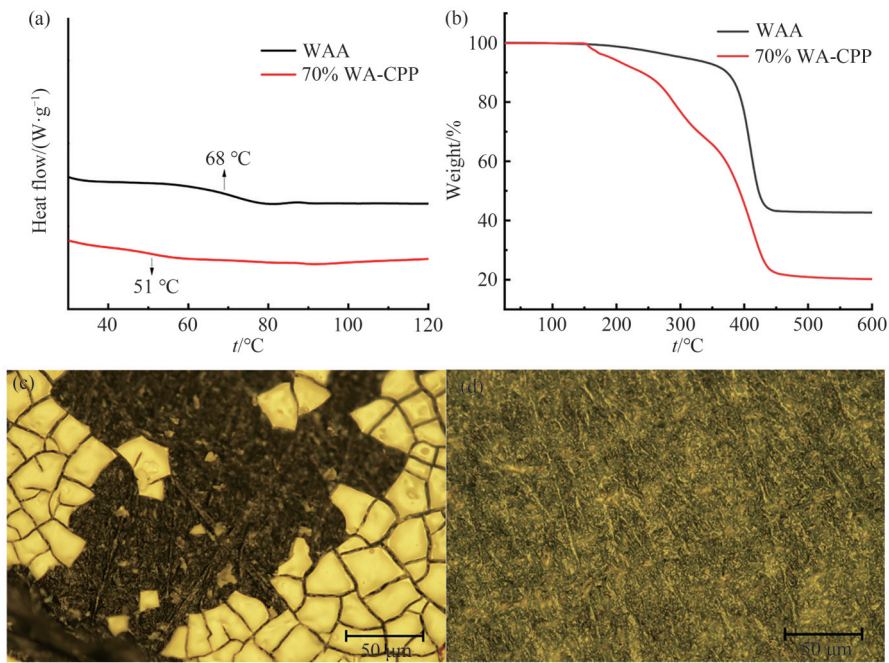
WAA 和 70%WA-CPP 经充分固化后的热性能如图 2 所示.

由图 2(a)可知:WAA 的  $T_g$  为 68 °C,70%WA-CPP

的  $T_g$  为 51 °C,复配后涂料的  $T_g$  有所降低;在图 2(b)中,70%WA-CPP 比 WAA 的热分解温度降低明显,归因于氯化聚丙烯的属于热敏塑料,加热易降解所致.对比图 2(c)和图 2(d)可见:WAA 涂层在 PP 基材上附着力仅为 2 级,微观形貌呈破碎状态,而 70%WA-CPP 涂层的附着力可提升至 0 级,涂层微观形貌完好,进一步说明 WA-CPP 对附着力提高的积极作用.

### 2.4 PP 基材与涂层之间附着力的增强机理

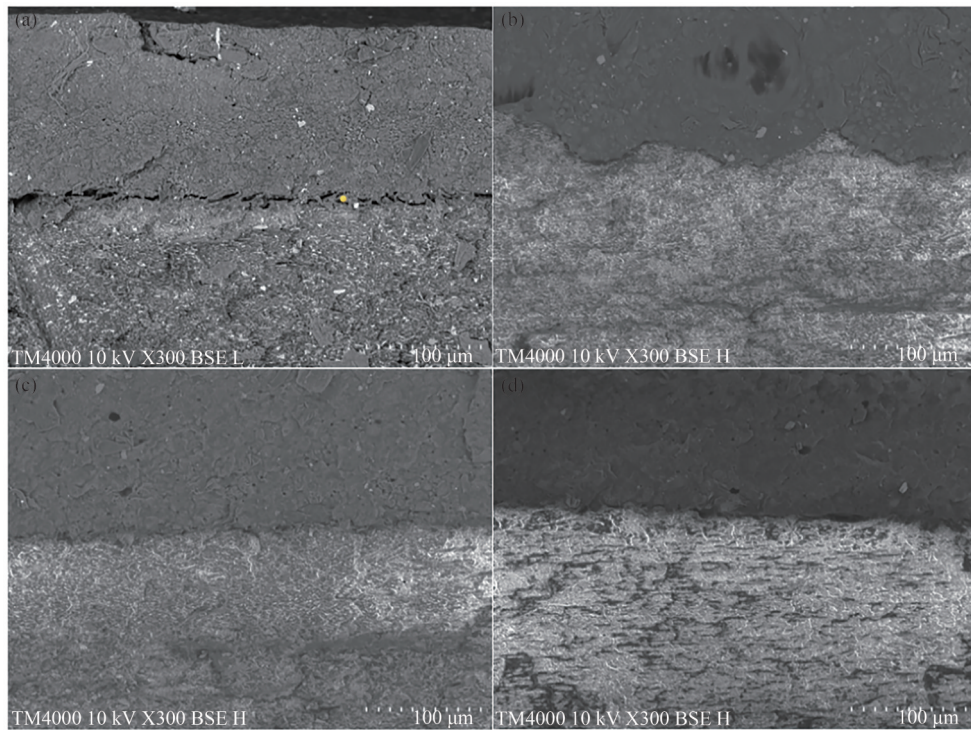
将 WA-CPP 乳液均匀涂布于经过处理的 PP 样条表面,在不同的固化温度下固化 3 h,成膜后将样条置于液氮中浸泡 12 h 以实现脆化,取出样条折断,通过 SEM 观察固化温度对涂层与 PP 基材断裂横截面的微观结构的影响规律,结果如图 3 所示.由图 3 可知:随着固化温度升高,固化程度增加,涂层与基材之间的分离程度逐步减小,涂层逐渐结合紧密.当固化温度为 80 °C 时,涂层与 PP 基材间存在显著分离且涂层存在裂纹,随着固化温度上升至 120 °C



(a) DSC 曲线;(b) TG 曲线;(c) WAA 涂层微观形貌;(d) 70% WA-CPP 复配涂层微观形貌

图 2 WAA 和 70% WA-CPP 性能对比

Fig. 2 Performance comparison of WAA and 70% WA-CPP



(a) 80 °C;(b) 100 °C;(c) 120 °C;(d) 130 °C

图 3 不同固化温度下断裂横截面 SEM 图

Fig. 3 SEM images of fracture cross sections at different curing temperatures

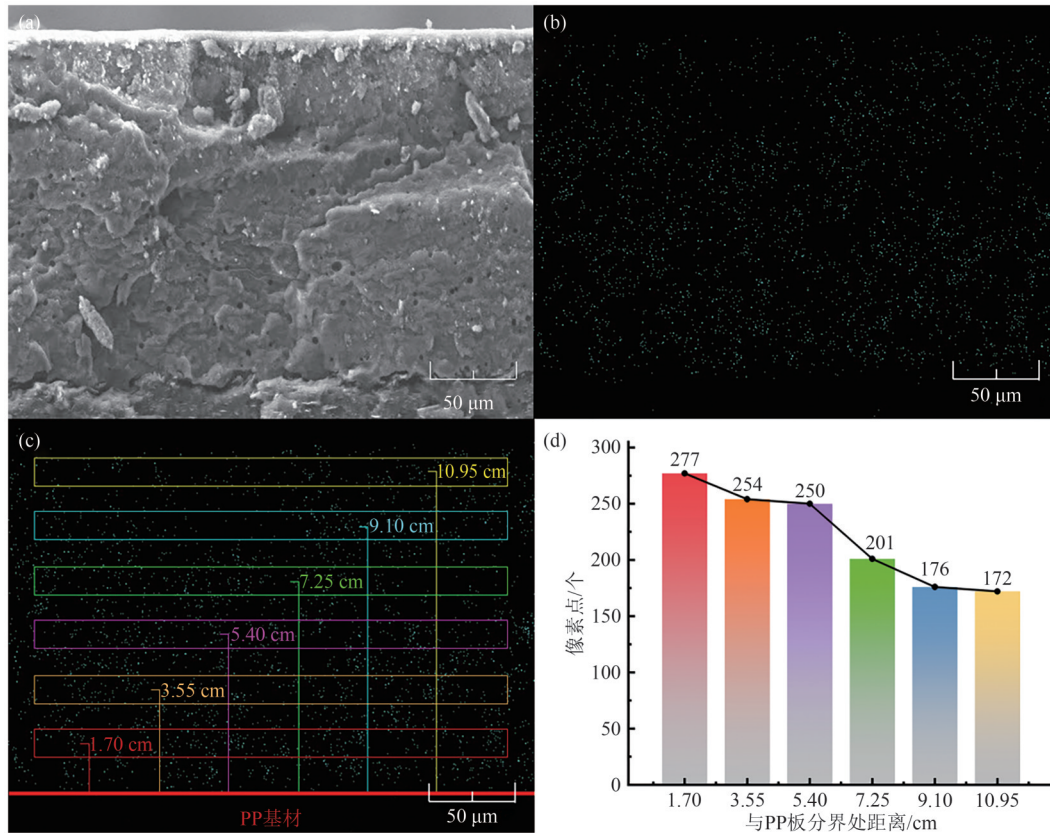
及以上时,涂层与基材间展现出了紧密的界面结合,在 130 °C 展现出较强的结合能力.随着固化温度的提高,涂层中自由水和结合水逐渐挥发,涂层与基材之间的接触面积增大,从而形成致密涂膜.同时,涂层中各组份的相互作用增强,使粒子运动进入基

材间隙,进而提升涂层与基材之间的结合能力<sup>[23]</sup>.

对 130 °C 固化 3 h 的样品[图 3(d)],进行扫描电镜-能谱(SEM-EDS)元素分析,结果如图 4 所示.由图 4 可知:氯元素在邻近 PP 基材的区域数量分布较多,随着与 PP 基材距离的增加,氯元素的区域数量

分布呈递减趋势,氯元素的分布不均说明在固化过程中 CPP 主链上的氯原子发生了迁移.由于叔碳位置上的氯原子和氢原子易被 BPO 分解产生的自由基攻击形成活性位点,进而引发丙烯酸类单体聚合物形成丙烯酸酯支链<sup>[24]</sup>.因此,在接枝改性的 CPP 长

链上,存在取代了氯原子的丙烯酸酯支链和未被取代的氯原子,保留的氯原子主要存在于叔碳位置,与非极性基团相连,在固化过程中非极性基团存在向 PP 基材运动的趋势,从而带动弱极性的氯原子向 PP 基材方向迁移.



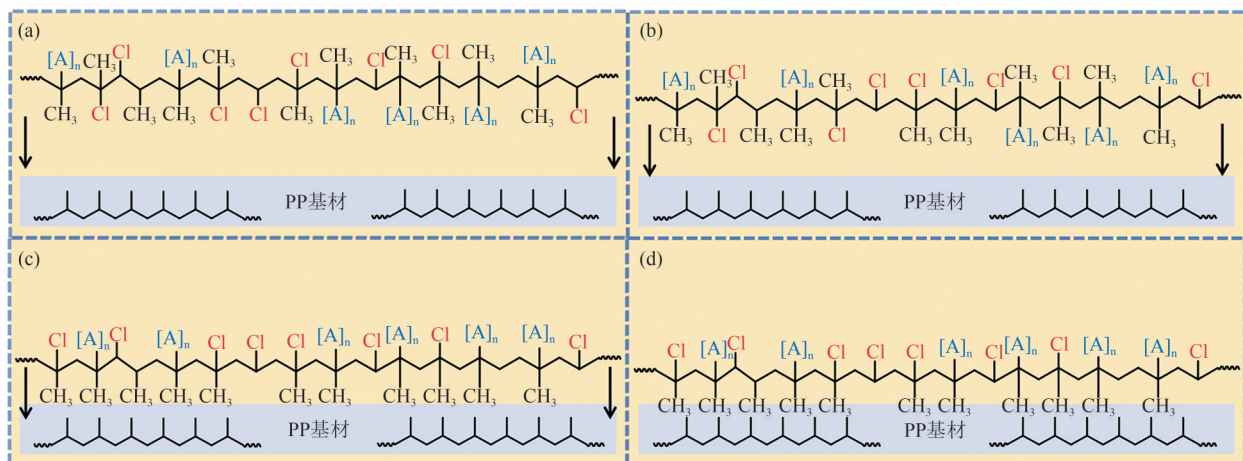
(a) 断裂截面 SEM 形貌; (b) 断裂截面氯元素 Mapping 扫描; (c) 氯元素分布区域划分; (d) 氯元素对应分布区域统计图

图 4 SEM EDS 元素分析谱图

Fig. 4 SEM EDS elemental analysis spectra

根据图 4 的结果,提出图 5 所示的 WA-CPP 水性乳液固化形成涂层的过程中分子链的迁移机理.在

WA-CPP 乳液中存在两类分子链段,一类是极性分子链段,主要包括接枝在 CPP 主链的丙烯酸酯支



(a) 未固化分子链状态; (b) 固化初期分子链状态; (c) 固化中期分子链状态; (d) 固化后期分子链状态

图 5 WA-CPP 固化过程中分子链的迁移机理

Fig. 5 Molecular chain migration mechanisms of WA-CPP during curing

链;另一类是非极性分子链段,主要是未发生接枝反应的CPP分子链<sup>[25]</sup>。在乳液状态下,如图5(a)所示,极性链段与非极性链段在长主链上呈不规则排列分布;在固化初期[图5(b)],涂层中部分极性链段依据“相似相溶”原理向涂层表面方向迁移,非极性链段则开始向PP基材方向迁移<sup>[26]</sup>;在固化中期[图5(c)],极性链段进一步向涂层表面移动,而非极性链段则开始与PP基材靠近;在固化后期[图5(d)],极性链段聚集在涂层表面,非极性链段与PP链段接触、缠结,促进涂层与基材之间紧密结合,提高了涂层在非极性基材上的附着力,与氯元素分布差异性规律一致。此外,靠近涂层表面的极性分子链为PP基材赋予一定极性,有利于提升其与极性涂料的相容性和附着力。

### 3 结论

本文制备了一种水溶性丙烯酸酯接枝氯化聚丙烯乳液(WA-CPP),对其结构进行了表征,并对乳液性质及性能进行了测试,研究了WA-CPP及其与丙烯酸乳液混合物对PP基材表面性能的影响,探讨了PP基材与涂层之间的附着力增强机理,得出如下结论:

(1)WA-CPP乳液具有优异的性质,如固含量在31%~33%,黏度为700~1300 cP,粒径为800~1000 nm,离心稳定性为6级。

(2)WA-CPP涂层在PP基材上展现出优异性能,附着力达到0级,铅笔硬度为3B,光泽度为3.2°,耐冲击强度大于100 cm,耐弯折强度为0 T<sub>i</sub>;与丙烯酸乳液混合后,可进一步提高涂层在PP基材上的附着力。

(3)提出了WA-CPP在固化过程中分子链的迁移机理。

#### 参 考 文 献

- [1] ANTINUCCI G, CIPULLO R, BUSICO V. Imagine polypropylene [J]. *Nature Catalysis*, 2023, 6(6): 456-457.
- [2] ZHANG Z Q, WANG L, ZENG M Q, et al. Corrosion resistance and superhydrophobicity of one-step polypropylene coating on anodized AZ31 Mg alloy [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, 9(4): 1443-1457.
- [3] SAUERBIER P, KÖHLER R, RENNER G, et al. Plasma treatment of polypropylene-based wood-plastic composites (WPC): Influences of working gas [J]. *Polymers*, 2020, 12(9): 1933.
- [4] DING L, ZHANG X, WANG Y. Study on the behavior of BOPP film treated by Corona discharge [J]. *Coatings*, 2020, 10(12): 1195.
- [5] KEHRER M, ROTTENSTEINER A, HARTL W, et al. Cold atmospheric pressure plasma treatment for adhesion improvement on polypropylene surfaces [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 403: 126389.
- [6] FAN Z L, LIU D Z, WANG J J. Study on the miscibility of chlorinated polypropylene with alkyd resin by dilute solution viscometry [J]. *Physics and Chemistry of Liquids*, 2003, 41(4): 391-397.
- [7] 耿直, 许泽军, 杜斌, 等. 无溶剂超支化有机硅耐高温涂层的性能[J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(4): 439-446.
- [8] HINTZE-BRÜNING H, BORGHOLTE H. Coating of untreated polypropylene with halogen free aqueous materials [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2000, 40(1/4): 49-54.
- [9] HU S, SHAO Q, LI J, et al. Quantitative trap analysis of grafting-modified polypropylene based on thermally stimulated depolarization current [J]. *Materials Letters*, 2022, 326: 132990.
- [10] JUBINVILLE D, TZOGANAKIS C, MEKONNEN T H. Simulated recycling of polypropylene and maleated polypropylene for the fabrication of highly-filled wood plastic composites [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(4): 2373-2383.
- [11] 董雪茹, 胡晓燕, 任树珍. 丙烯酸类混合单体接枝改性氯化聚丙烯的研究 [J]. *上海涂料*, 2020, 58(6): 9-12.
- [12] RAN Z, ZHANG Y, LUO Z, et al. Significantly improved high-temperature capacitive performance in polypropylene based on molecular semiconductor grafting [J]. *Materials Today Energy*, 2023, 38: 101429.
- [13] 韩浩然, 刘欣, 许泽军, 等. 水性超支化聚氨酯丙烯酸酯乳液的合成与性能 [J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(3): 289-294.
- [14] VELÁSQUEZ E, GARRIDO L, VALENZUELA X, et al. Valorization of post-consumer recycled polypropylene through their reinforcement with amine and amine/silane organically modified clays for potential use in food packaging [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 38: 101121.
- [15] HAZER B, ASHBY R D. Synthesis of poly vinyl chloride/chlorinated polypropylene-active natural substance derivatives for potential packaging materials application.

- Tannic acid, menthol and lipoic acid[J]. *Food Chemistry*, 2023, 403: 134475.
- [16] 郭逍遥, 汤汉良. 水性汽车 PP 涂料的制备技术研究[J]. *现代涂料与涂装*, 2019, 22(8): 15-17.
- [17] 韩磊. 水性改性氯化聚丙烯在 PP 塑胶底漆中的应用[J]. *化工管理*, 2018(25): 64-66.
- [18] HU W, BAI Y, ZHANG C, et al. Coating based on the modified chlorinated polypropylene emulsion for promoting printability of biaxially oriented polypropylene film [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2018, 32(1): 50-67.
- [19] 张道洪, 黄孙蒙, 陈苏芳, 等. 一种无溶剂水溶性氯化聚丙烯的制备方法; CN115466358A[P]. 2022-12-13.
- [20] 张道洪, 周继亮, 刘娜. 水溶性双酚 A 型环氧树脂乳液的制备[J]. *粘接*, 2008, 29(2): 30-32.
- [21] WANG Q, ZHANG W, WANG C, et al. Microstructure of heavy oil components and mechanism of influence on viscosity of heavy oil [J]. *ACS Omega*, 2023, 8(12): 10980-10990.
- [22] XU B, OOI K T, WONG T N, et al. Study on the viscosity of the liquid flowing in microgeometry [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1999, 9(4): 377-384.
- [23] HO J, MUDRABOYINA B, SPENCE-ELDER C, et al. Water-borne coatings that share the mechanism of action of oil-based coatings [J]. *Green Chemistry*, 2018, 20(8): 1899-1905.
- [24] FU H, LAI W, WANG L, et al. Kinetics for grafting of acrylic acid onto chlorinated polypropylene [J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2011, 19(8): 681-684.
- [25] CLEMENS R J, BATTIS G N, LAWNICZAK J E, et al. How do chlorinated poly(olefins) promote adhesion of coatings to poly(propylene) [J]. *Progress in Organic Coatings*, 1994, 24(1/4): 43-54.
- [26] BAI Y, ZHANG C, LI M, et al. Graft modification of chlorinated polypropylene and coating performance promotion for polypropylene [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014, 48: 231-237.

(责编&校对 刘钊)