

超支化蓖麻油基紫外光固化聚酯涂层的合成与表征

温静怡¹, 陈熙¹, 李卓君¹, 韦代东², 谢治辉¹, 雍奇文^{1,*}

1. 西华师范大学化学化工学院, 南充 637009

2. 中科院广州化灌工程有限公司, 广州 510650

摘要: [目的] 针对传统紫外光(UV)固化涂层对石油原料的依赖, 以可再生蓖麻油为原料, 制备并优化超支化蓖麻油基UV固化聚酯涂层, 评估活性稀释剂含量对涂层性能的影响, 为环境友好型高分子涂层的开发提供新的技术路径。[方法] 首先令蓖麻油羟基与2,2-双羟甲基丙酸反应以增加分子支链, 再以顺丁烯二酸酐对端羟基进行酯化来实现亲水改性, 随后采用甲基丙烯酸缩水甘油酯通过开环加成制备超支化聚酯预聚体。利用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)与核磁共振氢谱(¹H-NMR)对关键中间体及产物的化学结构进行表征。将预聚体与不同质量分数(10%、20%、30%或40%)的活性稀释剂甲基丙烯酸羟乙酯配制成UV固化体系并制备涂层, 测试了涂层的凝胶含量、吸水率、水接触角、拉伸性能、耐酸碱性、硬度及附着力。[结果] 当活性稀释剂含量为20%时, 涂层表现最佳: 凝胶含量86.57%, 吸水率3.63%, 水接触角75.2°, 拉伸强度10.0 MPa, 断裂伸长率5.8%, 邵氏A硬度80.40 HD, 附着力1级。[结论] 该配方展现出优异的综合力学性能, 验证了超支化蓖麻油基UV固化聚酯涂层的可行性, 为可持续、高性能环保涂层的制备提供了有效的技术方案。

关键词: 蓖麻油; 超支化聚酯; 紫外光固化; 涂层; 力学性能

中图分类号: TQ633

文献标志码: A

文章编号: 1004-227X(2026)04-0176-09

Synthesis and characterization of hyperbranched castor oil-based UV-curable polyester coatings

WEN Jingyi¹, CHEN Xi¹, LI Zhuojun¹, WEI Daidong², XIE Zhihui¹, YONG Qiwen^{1,*}

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China

2. Guangzhou Chemical Grouting Engineering Co., Ltd., CAS, Guangzhou 510650, China

Abstract: [Objective] To address the dependence of conventional ultraviolet (UV)-curable coatings on petroleum-derived raw materials, a hyperbranched castor oil-based UV-curable polyester coating was prepared and optimized using renewable castor oil. The effect of reactive diluent content on coating properties was evaluated, providing a novel technical pathway for the development of environmentally friendly polymer coatings. [Method] The hydroxyl groups of castor oil were first reacted with 2,2-bis(hydroxymethyl)propionic acid to increase molecular branching, then the terminal hydroxyls were esterified with maleic anhydride to achieve hydrophilic modification. Subsequently, glycidyl methacrylate was introduced via ring-opening addition to synthesize the hyperbranched polyester prepolymer. The chemical structures of key intermediates and the final product were characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) and proton nuclear magnetic resonance (¹H-NMR) spectroscopy. The prepolymer was formulated with different mass fractions (10%, 20%, 30%, or 40%) of the reactive diluent hydroxyethyl methacrylate to prepare UV-curable coating systems. The resulting coatings were tested for gel content, water absorption rate, water contact angle, tensile properties, acid/alkali resistance, hardness, and adhesion. [Result] The coating containing 20% reactive diluent exhibited optimal performance: gel content 86.57%, water absorption rate 3.63%, water contact angle 75.2°, tensile strength 10.0 MPa, elongation at break 5.8%, Shore A hardness 80.40 HD, and Grade-1 adhesion. [Conclusion] This formulation shows excellent comprehensive mechanical properties, validating the feasibility of hyperbranched castor oil-based UV-curable polyester coatings and offering an effective technical strategy for the preparation of sustainable, high-performance, and eco-friendly polymer coatings.

Keywords: castor oil; hyperbranched polyester; ultraviolet curing; coating; mechanical property

超支化聚酯因其高度支化的结构和丰富的末端官能团, 在功能材料领域展现出巨大的应用潜力。与传统线形聚酯相比, 超支化聚酯的结构特点可赋予材料更优异的溶解性、低黏度及高反应性^[1-5], 使其在高性能

收稿日期: 2025-07-25 **修回日期:** 2025-11-26

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2024JJ6364); 国家自然科学基金面上项目(52271073); 四川省杰出青年基金项目(2024NSFJQ0034); 西华师范大学创新团队项目(KCXTD2024-1)。

第一作者: 温静怡(2005-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为UV光固化涂料。

通信作者: 雍奇文(1991-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为防腐涂料。

引用格式: 温静怡, 陈熙, 李卓君, 等. 超支化蓖麻油基紫外光固化聚酯涂层的合成与表征[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45(4): 176-184.

WEN J Y, CHEN X, LI Z J, et al. Synthesis and characterization of hyperbranched castor oil-based UV-curable polyester coatings [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45(4): 176-184.

涂层(如防腐蚀涂层^[6]、电子器件绝缘保护层^[7])、生物医学材料(如药物载体^[8]、抗菌表面涂层^[9])、柔性电子封装(如柔性电路基材^[10])等方面表现突出。然而,传统超支化聚酯严重依赖苯酐等石油基原料,其不可再生性与高碳排放问题制约了可持续发展。开发环境友好的生物基超支化聚酯体系成为亟待突破的关键课题。

紫外光(UV)固化技术凭借高效节能、低挥发性有机物(VOC)排放等优势^[11-12],为超支化聚酯的功能化应用开辟了新路径。其通过光引发剂在UV辐照下产生活性物质,触发聚合物快速固化交联成固体材料。研究表明,UV固化超支化体系快速固化与优异力学性能兼具。例如,Lin等^[13]以Boltorn™ H20超支化聚酯为多元醇核心,采用异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)和甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA)反应得到的中间体对其进行羟基改性,并制成UV固化体系,使涂料具有较高的硬度和良好的柔性;王帅等^[14]通过丙烯酸羟乙酯(HEA)改性超支化聚氨酯,提升了涂层的耐热性。但现有体系仍存在光固化树脂原料高度依赖石化资源的瓶颈。开发高性能的生物基超支化UV固化聚酯,成为绿色涂层领域的重要研究方向。

近年来,生物基超支化UV固化聚酯的研究取得一定进展。丁照洋等^[15]尝试以大豆油基高级脂肪酸酯多元醇为原料合成大豆油基聚氨酯丙烯酸酯,得到光固化涂料;李鹏等^[16]以衣康酸为原料合成了可用于改性的衣康酸单甲酯活性单体,应用于UV涂层。但这些材料常面临湿润性不足、力学强度下降,以及耐化学腐蚀性差等挑战。相比之下,含羟基、酯基及长链脂肪酸的蓖麻油(CO)作为天然可再生资源,产量大、价格低廉^[17-18],为生物基光固化材料提供了新思路。研究表明,蓖麻油可通过与不饱和聚酯反应构建活性网络。过隽石等^[19]利用蓖麻油与2,4-甲苯二异氰酸酯合成预聚物,显著提升了涂层的耐低温性;丁响亮^[20]利用聚乙二醇与蓖麻油混合作为扩链剂,使涂层材料的柔韧性得到改善。这些研究证实,蓖麻油可有效平衡涂层的力学性能与柔韧性,但其在聚酯体系中的应用仍存在湿润性与耐酸性不足等问题,需通过分子设计与固化工艺创新进一步优化^[21-22]。

本研究旨在将蓖麻油作为主体代替石油基原料,设计合成超支化蓖麻油基UV固化聚酯涂层:以CO为多羟基核,以2,2-双羟甲基丙酸(DMPA)为臂,合成第一代超支化蓖麻油基聚酯(C20)。再以C20多元醇为核心,采用顺丁烯二酸酐(MA)对其端羟基进行改性,得到含C=C的第二代超支化蓖麻油基聚酯C20MA。最后采用甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)对其端羧基进行改性,得到目标产物C20MG。将C20MG预聚体和不同含量的稀释剂配制成UV固化体系,在紫外灯下固化,得到一系列超支化蓖麻油基UV固化聚酯涂层。该研究旨在突破生物基聚酯涂层的湿润性与耐酸性的瓶颈,代替石油产品制作UV固化涂层,为其低成本可持续绿色发展提供理论与技术支撑。

1 实验

1.1 原料

蓖麻油(化学纯):上海阿拉丁生化科技股份有限公司;对甲苯磺酸一水合物(*p*-TSA,分析纯):天津市大茂化学试剂厂;2,2-双羟甲基丙酸(DMPA,98%)和甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA):成都润泽本土化工有限公司;二氧六环(分析纯)、甲基丙烯酸羟乙酯(97%)和乙酰丙酮锌(Zn(acac)₂,97%):上海泰坦科技股份有限公司;顺丁烯二酸酐(MA,分析纯)和对羟基苯甲醚(MEHQ,分析纯):成都市科隆化学品有限公司;4-二甲氨基吡啶(DMAP,98%):成都润泽本土化工有限公司;四丁基溴化铵(分析纯):广东翁江化学试剂有限公司;2-羟基-2-甲基-1-苯基-1-丙酮(Darocur 1173,98%):萨恩化学技术(上海)有限公司。

1.2 超支化蓖麻油基聚酯多元醇的制备

1.2.1 合成第一代超支化蓖麻油基聚酯 C20

将37.34 g的CO(40 mmol,1当量)和0.18 g的*p*-TSA依次加入干燥洁净的四颈烧瓶中,并安装好机械搅拌棒、冷凝管和氮气入口,检查装置密封性是否良好。开启氮气阀,通入氮气以排出反应体系中的空气,为后续反应提供惰性气体保护环境。恒温油浴锅加热到145 °C稳定后,缓缓加入14.49 g的DMPA(108 mmol,2.7当量),在氮气的保护下反应2 h后再继续向体系中加入28.98 g的DMPA(216 mmol,5.4当量)和0.22 g的*p*-TSA,继续反应3 h。反应结束后,用水泵在145 °C下抽真空1 h左右,停止反应后得到产物C20。具体合成路线如图1所示。

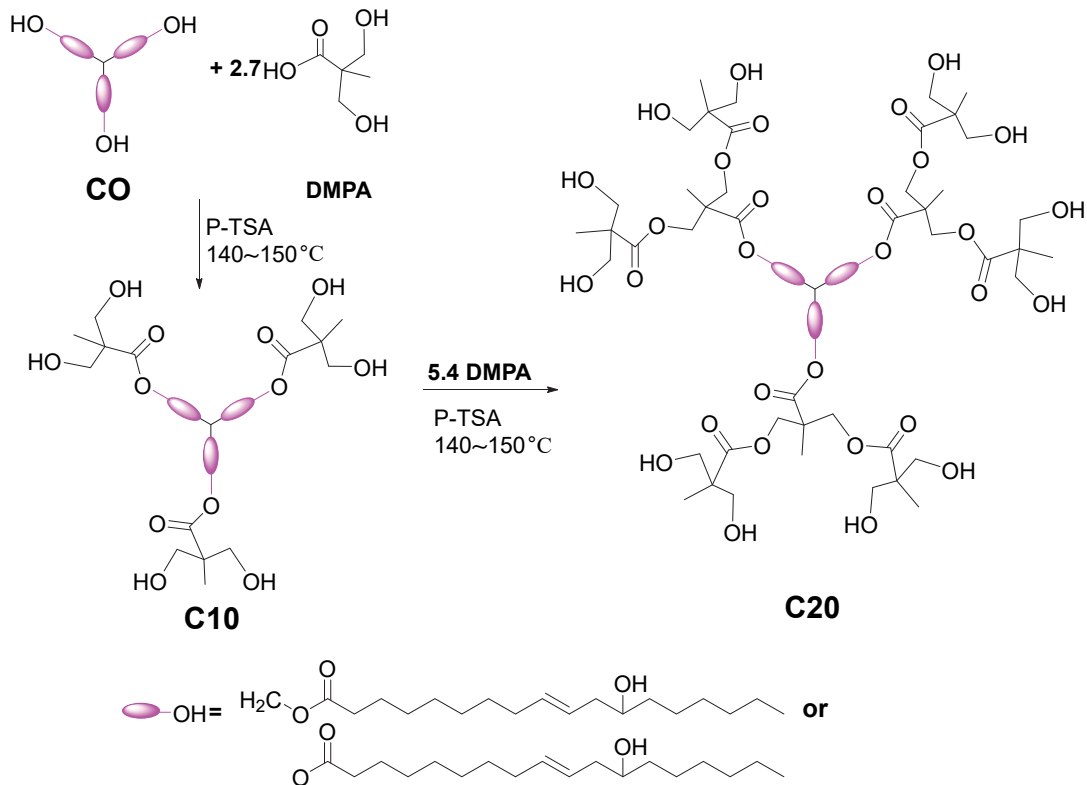


图1 C20的合成路线
Figure 1 Synthesis route diagram of C20

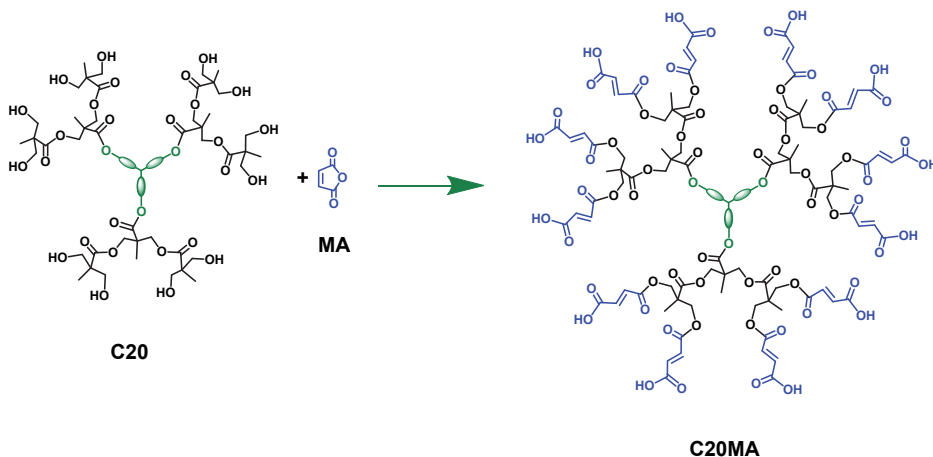
待产物的温度降至 90 ~ 100 °C 后,加入 112.44 g 溶剂二氧六环,产物与溶剂的质量比为 1 : (1.5 ~ 2.0)。

1.2.2 合成第二代超支化蓖麻油基聚酯 C20MA 和 C20MG

称取 18.74 g 的 C20(其中约含 108 mmol —OH)、10.60 g(相当于 108 mmol)的 MA 和 0.15 g 的 DMAP 加入三颈烧瓶中,按照 1.2.1 节所述安装好搅拌装置、冷凝管及氮气保护系统,并将烧瓶固定于恒温油浴锅中。调节油浴温度至 70 °C 后开始计时,反应时间控制在 8 ~ 10 h,最终得到中间产物 C20MA。在上述反应完成后,向体系中加入 0.13 g 的阻聚剂 MEHQ,再加入 15.36 g(相当于 108 mmol)的 GMA 和 0.22 g 的催化剂四丁基溴化铵,将反应温度升高至 110 ~ 120 °C,继续反应约 8 h。最后将其转移至旋转蒸发仪中,在 70 °C 下旋蒸 40 min,以除去残留的溶剂和低沸点副产物,最终得到目标产物 C20MG。具体的合成路线如图 2 所示。

1.3 UV 固化体系的配制和固化

以蓖麻油基预聚体 C20MG 为主体,选用 HEMA 作为活性稀释剂, Darocur 1173 作为光固化引发剂,乙酰丙酮锌作为催化剂,1.2.2 节合成的 C20MG 作为预聚体。在保持预聚体与活性稀释剂总质量 10 g 不变的条件下,通过调整 HEMA 添加比例(梯度间隔 10%)来研究稀释程度对涂层性能的影响,各配方中光引发剂用量固定为体系总质量的 3%,催化剂是活性稀释剂物质的量的 10%,不同样品的成分见表 1。



$$R_{\text{凝胶}} = \frac{m''}{m'} \times 100\% \quad (2)$$

1.4.5 水接触角测试

将制备好的 UV 固化体系混合溶液均匀地涂覆于载玻片表面并进行紫外光固化。然后使用微量注射器在涂层表面滴加 0.05 mL 去离子水,利用 SL200KS 接触角测量仪对水滴在涂层表面的静态接触角进行测定,记录液滴稳定 3 s 后的图像。每个试样选取 5 个不同位置进行测试,取平均值作为最终结果。

1.4.6 拉伸性能测试

采用 RGM-3030 型万能试验机进行拉伸测试,哑铃型样条的尺寸为:窄部宽度 3 mm,厚度 2 mm,有效长度 20 mm。在 5 mm/min 的拉伸速率下,每组样品进行 3 次平行测试,计算断裂时的拉伸强度(σ_m)和断裂伸长率(A),结果取平均值。

1.4.7 邵氏 A 硬度测试

采用 LX-A-2 型邵氏硬度计对每个涂层样品进行 3 次平行测试,取平均值。

1.4.8 耐酸碱碱性测试

按 1.4.3 节制备薄膜涂层样品,称取薄膜涂层的质量,记为 m_i ,使用盐酸和氢氧化钠作为溶剂,将制作好的涂层分别垂直浸入 10% (质量分数,后同)的盐酸和 5% 的硫酸水溶液中,静待 24 h 后取出,用滤纸轻轻擦去涂层表面的残留液体,再将涂层放入真空烘箱中烘至恒重,取出并称取质量 m_t 。质量损失率 $R_{\text{损失}}$ 按式(3)计算。

$$R_{\text{损失}} = \frac{m_i - m_t}{m_i} \times 100\% \quad (3)$$

1.4.9 附着力测试

按划格法,使用切割刀(间距 1 mm)在涂层表面划出 10×10 网格,粘贴胶带后以 60° 角快速撕离。分级标准:切割边缘完全平滑,无一格脱落为 0 级;在切口交叉处的涂层有少许薄片分离,但划格区受影响明显不大于 5% 为 1 级;在切口交叉处和/或沿切口边缘有涂层脱落,受影响的交叉切割面积大于 5% 但不大于 15% 为 2 级;涂层沿切割边缘部分或全部以大碎片脱落,和/或在各自不同部位上部分或全部脱落,受影响的交叉切割面积大于 15% 但不大于 35% 为 3 级;涂层沿切割边缘出现大碎片剥落,或一些方格部分或全部脱落,受影响明显大于 35% 但不大于 65% 为 4 级;大于 4 级的严重剥落为 5 级。

2 结果与讨论

2.1 红外吸收光谱分析

C20、C20MA、C20MG 的 FT-IR 谱图如图 3 所示。在 3441 cm^{-1} 处均出现很典型且宽而大的羟基吸收峰,与合成出来的产物特征相符,含有一定量的羟基^[23-24]。 2938 cm^{-1} 和 2855 cm^{-1} 处对应的应是 $-\text{CH}_2-$ 和 $-\text{CH}-$ 的吸收峰。 1737 cm^{-1} 处是羰基($\text{C}=\text{O}$)的吸收峰,鉴于原料 CO 及产物 C20 的理想分子式中并没有羧酸基团,且在 C20 的谱图中 $1720 \sim 1706 \text{ cm}^{-1}$ 处没有发现原料 DMPA 的羧酸特征吸收峰,说明 DMPA 已基本参与酯化反应,得到了超支化聚酯。 1640 cm^{-1} 处是 $\text{C}=\text{C}$ 双键的伸缩振动峰,表明产物中成功保留了蓖麻油原有的不饱和结构,并在后续引入双键,符合实验最初在 C20 上不断引入双键的设想。在 C20MA 的谱线中, 1846 cm^{-1} 可能是反应物中 MA 未反应完全而出现的酸酐(羰基)的吸收峰,后续在 C20MG 的谱图中该峰消失。 1643 cm^{-1} 处的 $\text{C}=\text{C}$ 双键峰显著增强,可能与 GMA 的引入有关。综上所述,目标产物 C20MG 已成功制备。

2.2 $^1\text{H-NMR}$ 表征与分析

C20、C20MA 和 C20MG 的 $^1\text{H-NMR}$ 如图 4 所示。a 处(化学位移 7.3)突出的峰是氘代氯仿的溶剂峰。化学位移 4.1 ~ 4.4 及 3.4 ~ 3.5 处的质子峰应归属于与酯基($-\text{OCOCH}_2$)和伯羟基($-\text{CH}_2\text{OH}$)键上所连的亚甲基质子峰,5.2 ~ 5.6 处应属于烯基 $\text{C}=\text{C}-\text{H}$ 的质子。化学位移处于 0.8 ~ 1.6 处的特征峰归属于蓖麻油脂肪酸链、DMPA、MA 和 GMA 中的甲基/亚甲基上的不同质子峰。从 C20 到 C20MA 中 v 处出现了新峰,

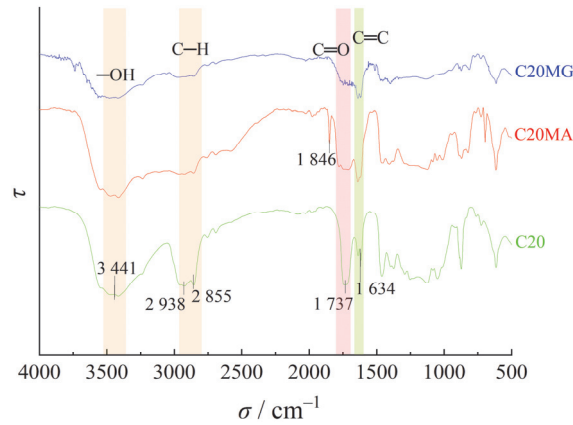


图3 C20、C20MA 和 C20MG 的 FT-IR 谱图
Figure 3 FT-IR spectra of C20, C20MA, and C20MG

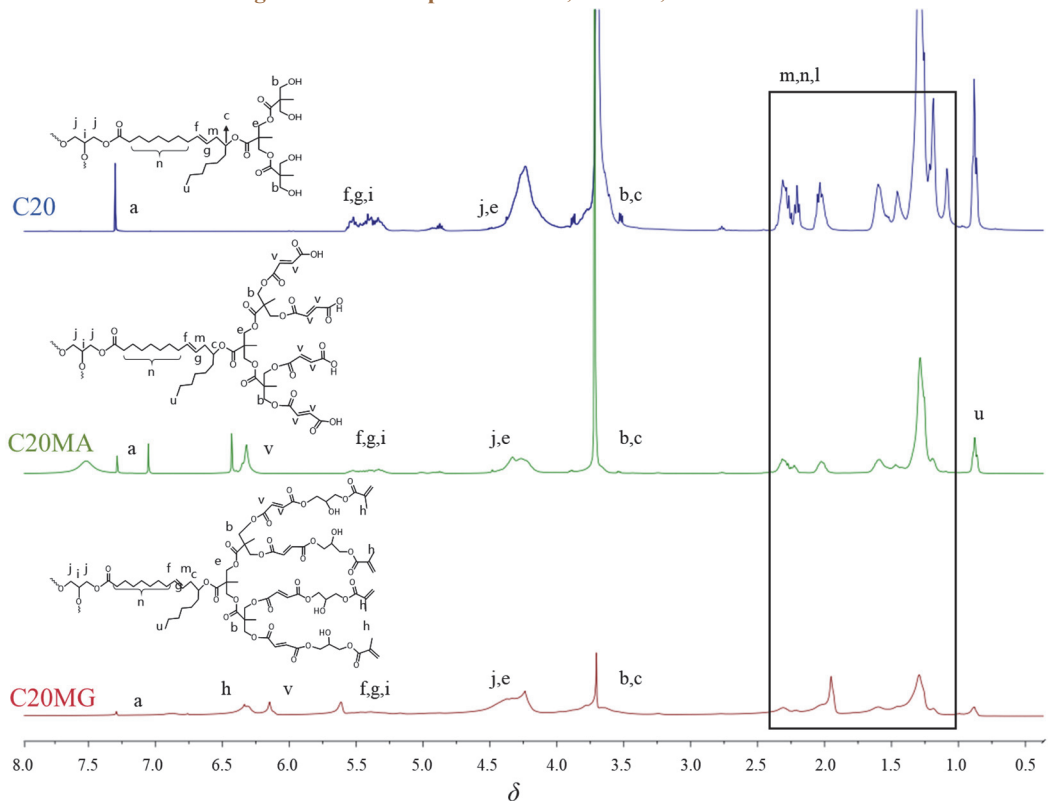


图4 C20、C20MA 和 C20MG 的 ¹H-NMR 谱图
Figure 4 ¹H-NMR spectra of C20, C20MA, and C20MG

而在 C20MG 上 h 处又新出现了峰，这三处表明已成功将马来酸酐和甲基丙烯酸缩水甘油酯引入 C20。综合 FT-IR 和 ¹H-NMR 谱图来看，所合成的产物与预期中的目标产物结构相符。

2.3 涂层的凝胶含量和吸水率

凝胶含量是衡量 UV 固化膜交联程度的重要指标，它反映了固化膜中不溶性部分的比例，凝胶含量越高说明交联越充分，固化膜的交联网状结构越完善。本次实验测得的凝胶含量见图 5。数据显示，凝胶含量在 85.07% ~ 87.21% 之间，表明交联反应较为充分，但仍存在一定的固化不完全现象。这可能与固化时间不足有关，导致部分 C=C 双键未能完全反应。本研究选用的固化条件(紫外光强 120 mW/cm²，距离 5 cm，时间 20 min)是基于对固化效率、能耗及涂层综合性能的初步权衡。虽然延长固化时间理论上可以进一步提高双键转化率和凝胶含量，但也可能增加能源消耗和生产成本，甚至可能导致过度交联而影响涂层的韧性。因此，当前的固化条件是一个在性能与效率之间取得的平衡点。

另外，随着 HEMA 活性稀释剂占比的增加，凝胶含量也在逐步提高，这一现象与黄佳等^[25]的研究结果一致：稀释剂的加入减少了分子间的相互作用力，降低了溶液体系的黏度，使其更容易流动，在低黏度环境下自由基更容易扩散并与 C=C 双键反应，从而促进了 C=C 双键的转化率，提高了树脂的交联密度。

实验还观察到,在活性稀释剂含量增大的同时,吸水率逐步降低,C20MG-1、C20MG-2、C20MG-3和C20MG-4紫外光固化膜的吸水率分别为4.32%、3.63%、3.11%和2.47%,详细趋势对比如图5所示,此现象与上文中提及的凝胶含量增加有着不可分割的联系。高交联密度下涂层的网状结构更加紧密,水分子难以渗透进入涂层内部;反之,低交联密度下水分子更容易渗透到涂层中。此外,亲水基团也会影响水分子的进入,亲水基团越多就越会吸引水分子,吸水率自然而然会增大。

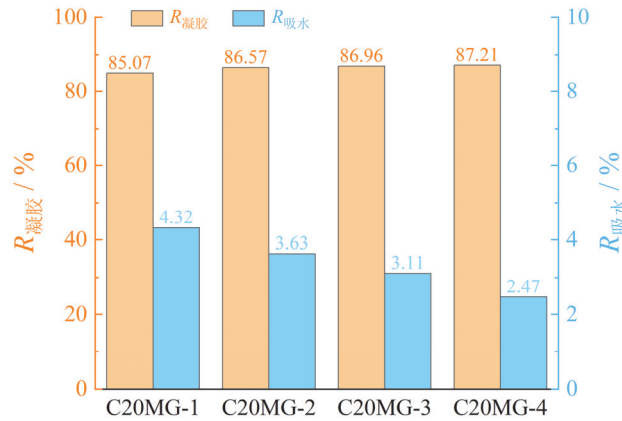


图5 不同涂层的凝胶含量和吸水率

Figure 5 Gel contents and water absorption rates of different coatings

2.4 涂层的水接触角分析

不同活性稀释剂含量所制涂层的水接触角如图6所示。随着活性稀释剂含量的增加,水接触角先增大后减小。在前半段水接触角增大可能是因为HEMA的加入使得体系的黏度降低,C=C双键聚合后网状交联紧密,疏水性增大。后半段却体现出了亲水性,这可归因于活性稀释剂的大量存在。HEMA分子中的羟基为亲水基团,且预聚体的原料本身含有一定量的羟基,虽然通过加入MA和GMA反应掉端羟基,但仍有一部分羟基留存在支链中,从而导致亲水基团的含量增大,吸水性愈发增强,疏水性能自然降低,使得涂层的水接触角减小。实验表明,C20MG-2相比其他三组样品有着最高的水接触角。

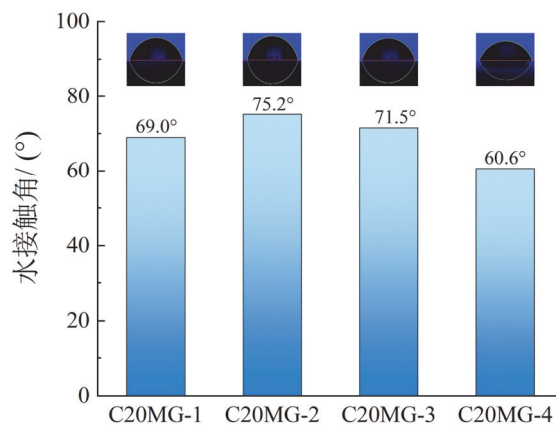


图6 不同涂层的水接触角

Figure 6 Contact angles of different coatings

2.5 涂层的拉伸性能分析

涂层的拉伸强度如图7所示。随着活性稀释剂添加量增大,涂层的拉伸强度从8.6 MPa显著提升到了21.5 MPa,其主要原因是HEMA含量的增大导致体系黏度减小,C=C双键更容易聚合,固化过程中的交联密度逐步提高,分子链间作用力增强,交联结构愈加稳定。而断裂伸长率整体保持在4.5%~5.8%,C20MG-3和C20MG-4略有下降,C20MG-2的断裂伸长率最大。总的来说,涂层韧性良好,同时具有较好的力学性能,可以防止开裂,不会被轻易破坏。

2.6 涂层的常规物化性能

涂层的耐酸碱性能测试结果见表2。在5%(质量分数)HCl溶液中浸泡24h后,4个样品涂层的质量损失在10%以下,可见它们有一定的耐酸性。但涂层在碱溶液里浸泡1h便开始软化翘起,慢慢地呈现出果冻

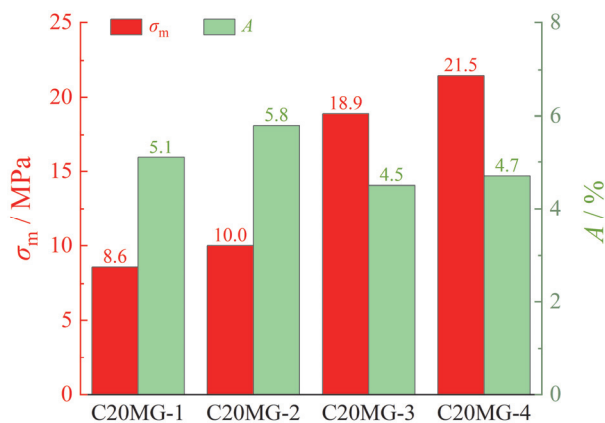


图7 不同涂层的拉伸强度和断裂伸长率
Figure 7 Tensile strength and elongation at break of different coatings

表2 不同涂层的耐酸碱性、硬度和附着力
Table 2 Acid and alkali resistance, hardness, and adhesion strength of different coatings

样品	5% HCl 溶液中的质量损失率/ %	1% NaOH 溶液中的质量损失率/ %	邵氏 A 硬度/ HD	附着力/ 级
C20MG-1	8.54	42.85	78.75	2
C20MG-2	9.67	48.95	80.40	1
C20MG-3	9.77	62.50	78.05	3
C20MG-4	9.84	41.25	75.55	3

质感, 24 h 后瓦解成多个块状, 从容器中捞起时易碎成块, 说明涂层的耐碱性不如耐酸性。这主要归因于分子中酯基结构在碱性条件下会发生严重水解。

固化膜的硬度影响涂料的耐磨性。从表 2 可以看出, 随着活性稀释剂含量增加, 涂层的邵氏 A 硬度测试结果先增大后减小, 整体保持在 75.55 ~ 80.40 HD, C20MG-3 和 C20MG-4 略有下降, C20MG-2 的硬度 80.40 HD 为最大值。

表 2 给出的附着力测试结果表明: 低 HEMA 含量(10% ~ 20%)时, 涂层的附着力增强; 高 HEMA 含量(30% ~ 40%)时, 附着力劣化。这源于界面结合效应与内应力效应的竞争关系。当 HEMA 含量从 10% 增加至 20% 时, 体系黏度降低, 涂料的流平性与对基材的浸润性得到极大改善, 界面结合力增强, 是附着力从 2 级提升至 1 级的主导因素。然而, 当 HEMA 含量进一步增加至 30% ~ 40% 时, 过高的交联密度导致固化内应力急剧增大, 并超过界面结合力, 成为导致附着力下降至 3 级的主要原因。因此, C20MG-2 的综合性能最优, 可归因于其恰好在界面结合力与内应力之间取得了最佳平衡。

3 结论

本实验以蓖麻油为原料, 利用 DMPA 扩展蓖麻油的支链, 加大网状结构, 成功合成了超支化蓖麻油基聚酯, 与传统的 UV 光固化涂层相比, 蓖麻油代替了石油产品, 实现了低污染, 为开发低污染、低成本的 UV 光固化涂层提供了一条有潜力的技术路径。

活性稀释剂 HEMA 添加量为 20% 时所得涂层的性能达到了最优, 其凝胶含量为 86.57%, 吸水率 3.63%, 拉伸强度为 10.0 MPa, 断裂伸长率为 5.8%, 水接触角达到了 75.2°, 邵氏硬度为 80.40 HD, 附着力 1 级, 耐酸性良好。

参考文献:

- [1] 李俊坪, 齐敏, 葛晶, 等. 改性超支化醇酸树脂涂层的制备及性能[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42 (4): 57-65.
LI J P, QI D, GE J, et al. Preparation and properties of modified hyperbranched alkyd resin coatings [J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42 (4): 57-65.
- [2] 闰彦玲, 杨建军, 吴庆云, 等. 超支化聚合物的活性聚合制备方法及及其应用研究进展[J]. 现代化工, 2016, 36 (7): 42-46.
RUN Y L, YANG J J, WU Q Y, et al. Recent progress of the preparation of hyperbranched polymers by living polymerization and their applications [J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36 (7): 42-46.
- [3] 寇玉霞, 童身毅. 超支化聚合物合成及其端基改性[J]. 上海涂料, 2004, 42 (2): 15-19.
KOU Y X, TONG S Y. Synthesis and modification of hyperbranched polymers [J]. Shanghai Coatings, 2004, 42 (2): 15-19.
- [4] 郑晓昱, 王锦成, 杨科, 等. 超支化聚合物的特征、制备及其应用研究进展[J]. 绝缘材料, 2011, 44 (1): 36-40, 46.
ZHENG X Y, WANG J C, YANG K, et al. Research progress on the structure, preparation and application of hyper-branched polymers [J].

- Insulating Materials, 2011, 44 (1): 36-40, 46.
- [5] 周蕾. 超支化聚酯的制备、改性及其在不饱和聚酯树脂中的应用研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
ZHOU L. Preparation and modification of hyperbranched polyester and its application in unsaturated polyester resin [D]. Xiamen: Xiamen University, 2019.
- [6] 李俊坪. 超支化聚合物在高固防腐涂料中的应用[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2023.
LI J P. Application of hyperbranched polymers in high-solid anti-corrosive coatings [D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2023.
- [7] 李嘉昕. 低温等离子体辅助超支化聚酯改性封闭母线环氧绝缘材料的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
LI J X. Dielectric properties of nanocomposites, based on the epoxy resin and HBP/plasma modified nanosilica [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [8] 廖家蔚, 刘红宇, 谢凯欣, 等. 超支化柠檬酸聚酯合成及其应用进展[J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41 (6): 1022-1026.
LIAO J W, LIU H Y, XIE K X, et al. Synthesis and application progress of hyperbranched citric acid polyester [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2023, 41 (6): 1022-1026.
- [9] 毕研刚, 李武松, 刘聪聪, 等. 超支化和树枝状聚合物的抗菌性质及应用[J]. 生命科学, 2021, 33 (8): 1037-1046.
BI Y G, LI W S, LIU C C, et al. The antibacterial properties and applications of hyperbranched polymers and dendrimers [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2021, 33 (8): 1037-1046.
- [10] 林亨. UV 固化环氧树脂电子封装材料的制备及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
LIN H. Preparation and properties of UV curing epoxy resin for electronic encapsulation [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [11] 岳梦恩, 谭晓欣, 韦星船, 等. 水性紫外光固化涂料的研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37 (18): 847-855.
YUE M E, TAN X X, WEI X C, et al. Research progress of waterborne ultraviolet-curable paints [J]. Electroplating & Finishing, 2018, 37 (18): 847-855.
- [12] 王汝康, 曾艳茹, 徐长安, 等. 蓖麻油基聚氨酯光固化薄膜的制备及自修复性能[J]. 广州化学, 2023, 48 (4): 7-15.
WANG R K, ZENG Y R, XU C A, et al. Preparation and self-healing properties of castor oil-based polyurethane photocurable films [J]. Guangzhou Chemistry, 2023, 48 (4): 7-15.
- [13] LIN J N, ZENG X R, HOU Y J, et al. Synthesis and characterization of UV-curable hyperbranched urethane acrylate [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2008, 47 (3): 237-241.
- [14] 王帅, 李贵勋, 何素芹, 等. 紫外光固化超支化聚氨酯丙烯酸酯的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36 (7): 1-8.
WANG S, LI G X, HE S Q, et al. Preparation and properties of practical UV curing hyperbranched polyurethane acrylate [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36 (7): 1-8.
- [15] 丁照洋. 大豆油基多元醇及其 UV 树脂的制备研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2017.
DING Z Y. The preparation and research of soybean oil polyols and UV resin [D]. Wuhan: Hubei University, 2017.
- [16] 李鹏. 基于衣康酸和大豆油的环保型光固化涂料的研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
LI P. Environment friendly UV-cured coatings based on itaconic acid and soybean oil [D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [17] 付长清, 吴聪, 林朝宝, 等. 无皂核壳蓖麻油基聚氨酯苯丙杂化乳液[J]. 电镀与涂饰, 2013, 32 (2): 53-57.
FU C Q, WU C, LIN C B, et al. Surfactant-free core-shell castor oil-based polyurethane styrene/acrylic hybrid emulsion [J]. Electroplating & Finishing, 2013, 32 (2): 53-57.
- [18] 姚哲, 杜俊超, 孙海欧, 等. 蓖麻油基聚氨酯材料研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2024, 22 (4): 15-21.
YAO Z, DU J C, SUN H O, et al. Progress of research on castor oil-based polyurethane materials [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2024, 22 (4): 15-21.
- [19] 过佛石, 梁春群, 谢洪泉. 蓖麻油聚氨酯/不饱和聚酯互穿网络聚合物作为带锈涂料的性能[J]. 涂料工业, 1993 (2): 1-3, 13.
GUO J S, LIANG C Q, XIE H Q. Study on the primer-in-rust based on IPN polymer of castor oil polyurethane/unsaturated poly ester [J]. Paint & Coatings Industry, 1993 (2): 1-3, 13.
- [20] 丁响亮. 聚氨酯丙烯酸酯的制备及其在卷材涂料领域的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
DING X L. Preparation and application of polyurethane acrylate in coil coatings [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [21] 李惠枝, 韦代东, 曾娟娟, 等. 蓖麻油基光敏树脂的合成及其 UV-LED 固化无影胶的性能[J]. 涂料工业, 2024, 54 (5): 14-19, 26.
LI H Z, WEI D D, ZENG J J, et al. Preparation of castor oil-based photosensitive resin and performance of its UV-LED shadowless adhesives [J]. Paint & Coatings Industry, 2024, 54 (5): 14-19, 26.
- [22] 韦代东, 雍奇文, 邓淑玲, 等. 蓖麻油基超支化环氧树脂的合成及其增韧应用[J]. 热固性树脂, 2020, 35 (1): 12-18.
WEI D D, YONG Q W, DENG S L, et al. Synthesis and toughening application of castor oil-based hyperbranched epoxy resin [J]. Thermosetting Resin, 2020, 35 (1): 12-18.
- [23] 李鸽, 马煜骄, 谭诗源, 等. 木质素改性蓖麻油基水性聚氨酯的制备与性能[J]. 皮革科学与工程, 2024, 34 (4): 28-35.
LI G, MA Y J, TAN S Y, et al. Preparation and performance of lignin-modified castor oil-based waterborne polyurethane [J]. Leather Science and Engineering, 2024, 34 (4): 28-35.
- [24] 雍奇文, 袁国铭, 刘琦. 蓖麻油和环氧大豆油改性水性聚氨酯的合成及性能[J]. 聚氨酯工业, 2022, 37 (2): 15-18.
YONG Q W, YUAN G M, LIU Q, et al. Synthesis and properties of waterborne polyurethane modified with castor oil and epoxy soybean oil [J]. Polyurethane Industry, 2022, 37 (2): 15-18.
- [25] 黄佳, 张金帅, 朱国强, 等. 基于大豆油和衣康酸的自修复型紫外光固化涂料[J]. 涂料工业, 2021, 51 (10): 44-53.
HUANG J, ZHANG J S, ZHU G Q, et al. Self-heal UV-curable coatings derived from soybean oil and itaconic acid [J]. Paint & Coatings Industry, 2021, 51 (10): 44-53.

【编辑: 温靖邦】