北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

α–蒎烯精油缓释型水性丙烯酸多功能环保涂料

张涵 孙书冬 于志明

Multifunctional eco-friendly water-based acrylic coatings with sustained-release of α-pinene essential oil

Zhang Han, Sun Shudong, Yu Zhiming

引用本文:
张涵, 孙书冬, 于志明. α–蒎烯精油缓释型水性丙烯酸多功能环保涂料[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6):162–171. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250100
Zhang Han, Sun Shudong, Yu Zhiming. Multifunctional eco–friendly water–based acrylic coatings with sustained–release of α–pinene essential oil[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6):162–171. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250100

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250100

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于杉木模板的Zn^{2+}掺杂TiO_2的光催化性能研究

Photocatalytic activity of Zn^{2+} doped TiO_2 based on Chinese fir template

北京林业大学学报, 2021, 43(4): 141–149. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210025

木质基g–C_3N_4/TiO_2复合涂层的制备及光催化性能表征

Preparation of wood–based g–C_3N_4/TiO_2 composite coating and characterization of its photocatalytic properties

北京林业大学学报, 2017, 39(12): 112–117. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170266

一步水热合成ZnO/水热炭复合材料及其性能表征

One–step hydrothermal synthesis and characterization of the ZnO/hydrothermal carbon composite material

北京林业大学学报, 2017, 39(7): 111–116. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170014

甲氧基丙烯酸酯类制剂的木材防腐性能研究

Wood decay performance of strobilurins preservatives

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 131–137. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210010

蒙脱土/聚乙二醇/超支化聚丙烯酸酯乳液改性木材的力学性能

Mechanical properties of wood modified by montmorillonite/poly(ethyl glycol)/hyperbranched polyacrylate emulsion

北京林业大学学报, 2020, 42(12): 135–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200311

纳米纤维素表面聚丙烯酸丁酯原位修饰

In–situ surface modification of cellulose nanofibril with poly(butyl acrylate)

北京林业大学学报, 2019, 41(10): 137–146. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190201

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250100

α-蒎烯精油缓释型水性丙烯酸多功能环保涂料

张 涵[1] 孙书冬[2,3] 于志明[1]

（1. 北京林业大学材料科学与技术学院，北京 100083；2. 国家家具质检中心，北京 100176；3. 国家市场监督管理总局重点实验室（家具健康与智能化质量安全），北京 100176）

摘要:【目的】随着环保与健康意识的增强，开发多功能环保涂料以改善室内环境质量并满足健康养生需求，已成为涂料行业实现增值与创新的重要研究方向。传统水性丙烯酸涂料虽具备一定的环保特性，但在功能拓展上仍存在显著不足。α-蒎烯虽具备植物精气释放潜力，但其过度挥发性限制了其应用效果，且现有缓释技术难以有效提升其长效性。鉴于此，本研究采用微胶囊包埋技术，以海藻酸钠和 TiO_2 为壁材制备 α-蒎烯微胶囊，旨在拓展水性丙烯酸涂料的功能，开发出具有改善室内环境质量的多功能环保涂料。**【方法】**采用 Pickering 乳液模板法与界面聚合法，以海藻酸钠和 TiO_2 作为微胶囊壁材，α-蒎烯作为芯材，制备 α-蒎烯微胶囊，并将其引入水性丙烯酸涂料中，开发一种兼具植物精气缓释和光催化特性的新型环保涂料，采用 SEM、FTIR、光电分析仪等，系统地表征微胶囊及其改性涂料的各项性能和精油缓释效果。**【结果】**(1)本研究制备的 α-蒎烯微胶囊结构稳定，分散性佳，同时展现出卓越的缓释性能；在静置 8 d 后其精油保留率高达 84.5%，相比于 α-蒎烯的 15.5%，α-蒎烯微胶囊有效延长了释放周期。(2)微胶囊掺杂量 6% 的涂膜在拉伸强度和韧性方面表现出色，能够满足多样化的应用需求；8% 掺杂量时改性涂料疏水性更优；α-蒎烯微胶囊掺杂使涂料黏度最大提高到 89.85 mPa·s，且其流平性良好；涂膜从透明逐渐变为半透明，既起到防护作用，又能保留木材天然纹理；当掺杂量为 10% 时，涂膜的紫外吸光度提升了约 6.1%，板材的耐光老化性能得到一定程度改善。(3)α-蒎烯微胶囊及其改性涂料均具备稳定的光催化性能，改性涂料在光照条件下最大光电流达到 2.5 μA/cm^2，且具备良好的催化活性，可以提升室内空气质量。(4)改性涂料形成的漆膜呈哑光效果，表面硬度高，且对松木、白橡木和刨花板等常见基材均有良好的适应性；不同基材对漆膜的其他表面性能影响较小，因此该涂料在室内装饰和家具涂饰领域具有广阔的应用前景。**【结论】**本研究聚焦于微胶囊制备及改性涂料开发，有效解决了 α-蒎烯过度挥发和传统涂料功能单一的问题。通过集成缓释植物精气和光催化净化空气等功能，显著提升了涂料的综合性能，使其在改善室内环境、提升健康水平方面展现出优势。

关键词：α-蒎烯；微胶囊化；水性涂料；光催化；植物精气；负氧离子；包埋

中图分类号：TQ631.6；TU56+1.6 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)06−0162−10

引文格式：张涵，孙书冬，于志明. α-蒎烯精油缓释型水性丙烯酸多功能环保涂料［J］. 北京林业大学学报，2025，47(6)：162−171. Zhang Han, Sun Shudong, Yu Zhiming. Multifunctional eco-friendly water-based acrylic coatings with sustained-release of α-pinene essential oil［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6): 162−171.

Multifunctional eco-friendly water-based acrylic coatings with sustained-release of α-pinene essential oil

Zhang Han[1] Sun Shudong[2,3] Yu Zhiming[1]

(1. School of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. National Furniture Quality Inspection Center, Beijing 100176, China;
3. Key Laboratory of Furniture Health and Intelligent Quality Safety, State Administration for Market Regulation, Beijing 100176, China)

Abstract: ［**Objective**］ With the enhancement of environmental protection and health awareness, the development of multifunctional eco-friendly coatings to improve indoor environmental quality and meet

收稿日期: 2025−03−21 **修回日期:** 2025−05−30

基金项目: 国家市场监督管理总局重点实验室开放基金（KLFHIQS2025-03）。

第一作者: 张涵。主要研究方向：木质复合材料与胶黏剂。Email: 13811562337@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料科学与技术学院。

责任作者: 于志明，教授。主要研究方向：木质复合材料。Email: yuzhiming@bjfu.edu.cn 地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

health-preserving needs has become a key direction for value-added innovation in the coating industry. Although traditional waterborne acrylic coatings offer environmental advantages, they exhibited significant limitations in functional expansion. While α-pinene had the potential to release plant essential oils, its excessive volatility restricted application efficacy, and existing slow-release technologies struggle to effectively enhance its long-acting performance. In response, this study employed microencapsulation technology to prepare α-pinene microcapsules using sodium alginate and TiO_2 as wall materials, aiming to expand the functionality of waterborne acrylic coatings and develop multifunctional eco-friendly coatings for improving indoor environmental quality. [**Method**] The Pickering emulsion templating method and interfacial polymerization were used to prepare α-pinene microcapsules with sodium alginate and TiO_2 as wall materials and α-pinene as the core material. These microcapsules were incorporated into waterborne acrylic coatings to develop a new type of eco-friendly coating with both plant essential oil slow-release and photocatalytic properties. SEM, FTIR, photoelectric analyzers, and other techniques were systematically applied to characterize the properties of microcapsules and modified coatings, as well as the slow-release effect of essential oils. [**Result**] (1) The prepared α-pinene microcapsules exhibited stable structure, good dispersibility, and excellent slow-release performance. The essential oil retention rate reached as high as 84.5% after 8 d of static storage, which was significantly higher than that of α-pinene (15.5%). This indicated that the α-pinene microcapsules effectively extended the release cycle. (2) Coatings with 6% microcapsule doping showed superior tensile strength and toughness, meeting diverse application requirements. 8% doping improved the hydrophobicity of modified paint films. The doping of α-pinene microcapsules increased coating viscosity to a maximum of 89.85 mPa·s with good leveling properties, and the paint film transitioned from transparent to translucent, preserving the natural texture of wood while providing protection. The ultraviolet absorbance of 10% doped paint film increased by approximately 6.1%, enhancing light aging resistance of the panel to some extent. (3) Both α-pinene microcapsules and modified coatings demonstrated stable photocatalytic performance. The modified coating achieved a maximum photocurrent of 2.5 μA/cm^2 under light irradiation, with good catalytic activity, capable of improving indoor air quality. (4) The modified coating films exhibited a matte finish, high surface hardness, and strong substrate adaptability, suitable for common substrates such as pine, white oak, and particleboard. Different substrates had minimal impact on other surface properties of paint film, indicating broad application prospects in indoor decoration and furniture coating fields. [**Conclusion**] This study focuses on microcapsule preparation and modified coating development, effectively addressing the issues of excessive α-pinene volatility and single-functionality of traditional coatings. It achieves multifunctional integration of coatings, including slow-release of plant essential oils and photocatalytic air purification, significantly enhancing comprehensive coating performance. The developed coatings demonstrate advantages in improving indoor environments and promoting health.

Key words: α-pinene; microencapsulation; water borne coatings; photocatalysis; plant essence; negative oxygen ions; embeddings

水性丙烯酸涂料因其环保、安全、无污染、价格低廉、施工便捷和透气性好等优势[1]，被广泛用于木器涂料装饰[2]和保护[3]。随着人们对生活品质要求的提升，传统的水性丙烯酸涂料仅能提供基本的装饰和保护功能，缺少改善环境质量的附加功能，难以满足人们对健康养生的需求。在涂料中添加有利于环境改善的物质可以更好地增强和保持室内空气质量[4]，更符合现代人对健康家居生活的要求。

植物精气与负氧离子在促进人体健康、改善环境质量等方面均具有良好效果。其中，α-蒎烯是一种常见的植物精油，主要来自杜松等针叶植物[5]，挥发后通过嗅觉系统进入人体，具有镇静放松[6]、抗菌消炎[7]等作用，被广泛应用于癌症治疗[8]、呼吸道感染治疗[9]等领域。然而，α-蒎烯的高挥发性使其无法长时间发挥作用，限制了其在实际应用中的效果和范围。负氧离子作为一种带有负电荷的氧分子，可以在一定程度上改善环境质量[10]，提高人体免疫力，缓解压力和疲劳[11]。随着环保健康意识的增强，在保留传统装饰和保护功能的基础上，开发兼具植物精气缓释和负氧离子产生功能的涂料，不仅能显著提升

涂料的附加值，还能增强其市场竞争力和经济价值。

微胶囊技术为实现以上目标提供了有效的技术途径。微胶囊部分壁材具有半透性[12]或智能响应性[13]，能够对芯材起到调控释放的作用。同时，不同的微胶囊壁材具有不同的功能特性，使微胶囊在负载特定功能方面具有显著优势。在木材工业领域，已有研究将微胶囊添加到涂料之中，用于改善涂料性能。例如：Yan 等[14]利用紫胶树脂微胶囊改性水性涂料，提升了漆膜的耐老化性能。这一成果表明，微胶囊技术能够有效增强涂料的耐久性和稳定性，从而延长其使用寿命。Peng 等[15]通过优化桐油微胶囊的制备，提升了木材漆膜的韧性。这些研究不仅验证了微胶囊技术在木材涂料领域的应用潜力，还为后续的研究提供了重要的参考。利用微胶囊技术，设计出芯材为植物精油，壁材具有光催化功能的微胶囊，能够赋予微胶囊精气缓释和负氧离子产生的双重功能。因此，制备植物精油微胶囊并改性水性丙烯酸涂料，具有广阔的市场前景。基于此，本研究提出利用微胶囊技术，设计一种以植物精油（如 α-蒎烯）为芯材，具有光催化功能壁材的微胶囊，以实现精气缓释和负氧离子产生的双重功能。这种设计有望克服 α-蒎烯高挥发性的缺点，并通过光催化功能进一步改善室内环境质量。

本研究拟采用 Pickering 乳液模板法[16]、界面聚合法[17]的微胶囊技术，使用 TiO_2 颗粒和海藻酸钠共同作为微胶囊壁材，包埋 α-蒎烯植物精油，制备得到兼具 α-蒎烯缓释功能与光催化特性的微胶囊，将其掺杂到水性丙烯酸涂料之中，应用于木质材料涂饰。通过对 α-蒎烯微胶囊及其改性涂料的各项表征，探讨微胶囊不同掺杂比例的涂料、涂膜性能，研发出能够改善室内环境质量[18]，满足健康养生需求的环保木器涂料。本研究旨在拓展木材涂料的多功能开发，为木材涂料行业的发展提供了新的思路与技术支持。

1 材料与方法

1.1 材 料

α-蒎烯购自安耐吉化学，CAS 为 80-56-8，纯度 98%；纳米 TiO_2 购自上海麦克林生化科技股份有限公司，化学纯（99.8%）；海藻酸钠购自北京迈瑞达科技有限公司；甲基橙指示剂购自国药集团化学试剂有限公司；无水氯化钙购自上海迈瑞尔生化科技有限公司，纯度 96%；水性丙烯酸涂料（765 型）购自绿联（济宁）化学科技有限公司；成膜助剂（醇酯 12）购自深圳市吉田化工有限公司；耐酸碱型超级润湿剂（9316）、有机硅交联剂（9302）、水性放涂鸦剂（UAX-5695）均购自北京佰源化工有限公司；松木（*Pinu lignum*）购自江苏苏州，白橡木（*Quercus alba*）购自江苏南通，均制成 10 cm（径向）× 10 cm（轴向）× 1 cm（弦向）试样；刨花板购自百锐木业，制成幅面为 10 cm × 10 cm，厚度为 1 cm 的试样。

1.2 微胶囊结构设计

为使 α-蒎烯微胶囊具有长效缓释和光催化特性，研究中选用磺酸基偶氮染料（甲基橙）为偶联体，利用其亲水基团（SO^{3}-）与 TiO_2 相连，亲油基团与 α-蒎烯相连，形成以 TiO_2 为壁材骨架的 TiO_2@α-蒎烯 Pickering 乳液。然后在外层封装海藻酸钠，形成复合壁层，得到海藻酸钠@TiO_2@α-蒎烯微胶囊（以下简称 α-蒎烯微胶囊）。这样的结构（图 1），既能对 α-蒎烯精油起到控释作用，又能借助 TiO_2 赋予微胶囊

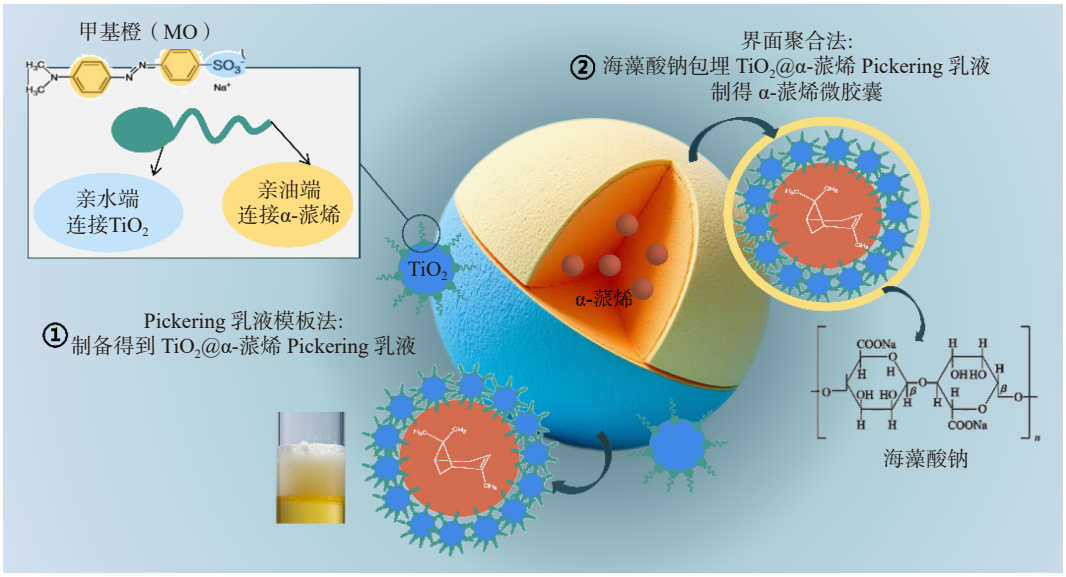


图 1 α-蒎烯微胶囊结构设计

Fig. 1 Structural design of α-pinene microcapsules

光催化特性，同时解决了海藻酸钠强度低，TiO_2 成膜能力差的问题，使微胶囊结构更加稳定。

1.3　α-蒎烯微胶囊及其改性涂料的制备

称量 56 mg TiO_2 粉末加入到 28 mL 甲基橙水溶液（0.002 4%），避光震荡 12 h，并超声分散均匀后，加入 4 mL α-蒎烯精油，经过超声、摇匀、静置后，得到 TiO_2@α-蒎烯 Pickering 乳液。量取 100 mL 的 $CaCl_2$ 溶液（1 g/L），加入 4 mL 乳液，使其均匀分散后，滴加 200 mL 海藻酸钠水溶液（2.5 g/L），使海藻酸钠在乳液外层聚合形成壁层，经抽滤洗涤，得到 α-蒎烯微胶囊湿囊，28 ℃ 干燥得到固体 α-蒎烯微胶囊。

按照表 1，在烧杯中依次加入水性丙烯酸涂料、成膜助剂、超级润湿剂、水性防涂鸦剂、有机硅交联剂、α-蒎烯微胶囊、去离子水搅拌，混合均匀后，经纱网过滤得到不同微胶囊掺杂比例的改性涂料。

以“两底两面”的刷涂工艺制备漆膜，每遍底漆和面漆涂刷量分别为 100 和 120 g/m^2。每层涂刷后均放置在温度（23 ± 2）℃、相对湿度（50 ± 5）% 下干燥 24 h。

1.4　α-蒎烯微胶囊及其改性涂料的性能表征

1.4.1　结构表征

为了表征其结构特点，探究微胶囊的形貌及结构，使用光学显微镜、激光共聚焦显微镜（Olympus FV1 200）表征 TiO_2@α-蒎烯 Pickering 乳液微观形貌。使用高分辨场发射扫描电镜（Regulus 8 100）表征 α-蒎烯微胶囊、改性漆膜的微观形貌，电压为 15.0 kV。

为了表征微胶囊的包埋情况，使用紫外可见分光光度计（GENESYS 150），根据不同质量分数 α-蒎烯乙醇溶液（x）在其最大吸收波长 207 nm 处的吸光度（y），绘制得到 α-蒎烯标准曲线方程（$y = 0.024\ 55x + 0.286\ 56$，$R^2 = 0.999\ 2$）。在无水乙醇中加入一定质量微胶囊，破壁使内含的 α-蒎烯完全溶解，经过滤、定容，测试其在 207 nm 处的吸光度，带入标准曲线方程得到此时的 α-蒎烯乙醇溶液的质量分数，再计算其质量与微胶囊包埋率。包埋率计算公式为

$$E = \frac{m_0}{m} \times 100\% \tag{1}$$

式中：E 为微胶囊包埋率，m_0 为微胶囊内 α-蒎烯的质量（g），m 为微胶囊制备过程中的 α-蒎烯使用量（g）。

为了表征微胶囊的粒径分布情况，分析微胶囊的化学结构，使用激光粒度仪（Mastersizer 3 000）测试 α-蒎烯微胶囊粒径，利用傅里叶变换红外光谱仪（TENSOR Ⅱ）分别扫描 TiO_2@α-蒎烯 Pickering 乳液和 α-蒎烯微胶囊，光谱范围为 500 ~ 4 000 cm^{-1}，每个样品采集 32 次。

1.4.2　微胶囊缓释性能表征

为了表征微胶囊的缓释性能，使用紫外可见分光光度计（GENESYS 150），根据 1.4.1 的测试方法得到微胶囊内 α-蒎烯的质量，再计算得到微胶囊内 α-蒎烯的保留率。保留率计算公式为

$$E_n = \frac{m_n}{m_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中：E_n 为静置 n 天后微胶囊内 α-蒎烯的保留率，m_n 为静置 n 天后微胶囊内 α-蒎烯的质量，m_0 为初始微胶囊内 α-蒎烯的质量。未经微胶囊包埋的 α-蒎烯保留率测试与计算方法同上。

为了表征微胶囊的热稳定性能，利用热重分析仪（TG 209 F3 Tarsus）对微胶囊粉末的热稳定性进行分析，升温速率为 10 ℃/min，升温范围为 35 ~ 950 ℃。

1.4.3　微胶囊及其改性涂料光催化特性表征

为了表征微胶囊及其改性涂料的光催化特性，利用光电性能测试仪（CHI760E）表征微胶囊及其改性涂料的光电流变化，使用氙灯照射工作电极，在 0.5 V 下进行 6 次开/关灯循环（每个循环为开灯 20 s，关灯 20 s），测试电极有效面积为 1 cm × 1 cm。同时利用线性扫描伏安法评估改性涂料的电化学稳定性。均以 Na_2SO_4 溶液作为电解质溶液。

1.4.4　改性涂料基本性能表征

为了表征微胶囊改性对涂料黏度、pH 的影响，使用旋转流变仪（HAAKE Roto Visco 1）测试改性涂料的黏度，剪切速率为 1 ~ 60 s^{-1}，每个样品测试 1 min，取 100 个数据。使用 pH 计（pB-10）测试改性涂料的酸碱度。

为了表征改性涂膜的力学性能和硬度变化，将改性涂料制成哑铃型试件，利用万能力学拉伸试验机（WDW-50）测试其拉伸力学性能。使用数显硬度计（TH210）测试涂膜表面硬度情况，每个样品测试 5 次，结果取平均值。

1.4.5　改性涂料的漆膜性能表征

为了表征改性漆膜的硬度变化情况，依据 GB/T

表 1　改性涂料材料配比

Tab. 1　Ratios of modified coating materials

材料	质量分数
水性丙烯酸乳液（765型）	75%
成膜助剂（醇酯12）	2%
耐酸碱型超级润湿剂（9316）	0.5%
水性防涂鸦剂（UAX-5695）	0.3%
有机硅交联剂（9302）	0.5%
α-蒎烯微胶囊	0、2%、4%、6%、8%、10%
去离子水	21.7%、19.7%、17.7%、15.7%、13.7%、11.7%

6739—2022《色漆和清漆 铅笔法测定漆膜硬度》，使用手推式铅笔硬度计（单用型）测试改性漆膜的铅笔硬度等级，不会使漆膜出现缺陷的最高铅笔硬度即为漆膜硬度。

为了表征改性漆膜的表面疏水性，采用接触角测量仪（SDC-200S）测试改性漆膜表面水接触角。

为了表征微胶囊改性对漆膜光泽度、表面粗糙度的影响，依据 GB/T 4893.6—2013《家具表面漆膜理化性能试验 第 6 部分：光泽测定法》，使用光泽度仪（LS195）测定改性漆膜光泽度，以 60°入射角的光源在不同区域随机选取 10 个测试点，结果取平均值。利用表面粗糙度测试仪（TR200）测量不同基材（松木、白橡木、刨花板）上的改性漆膜表面粗糙度，每组试件测量 3 次，结果取平均值。

2 结果与讨论

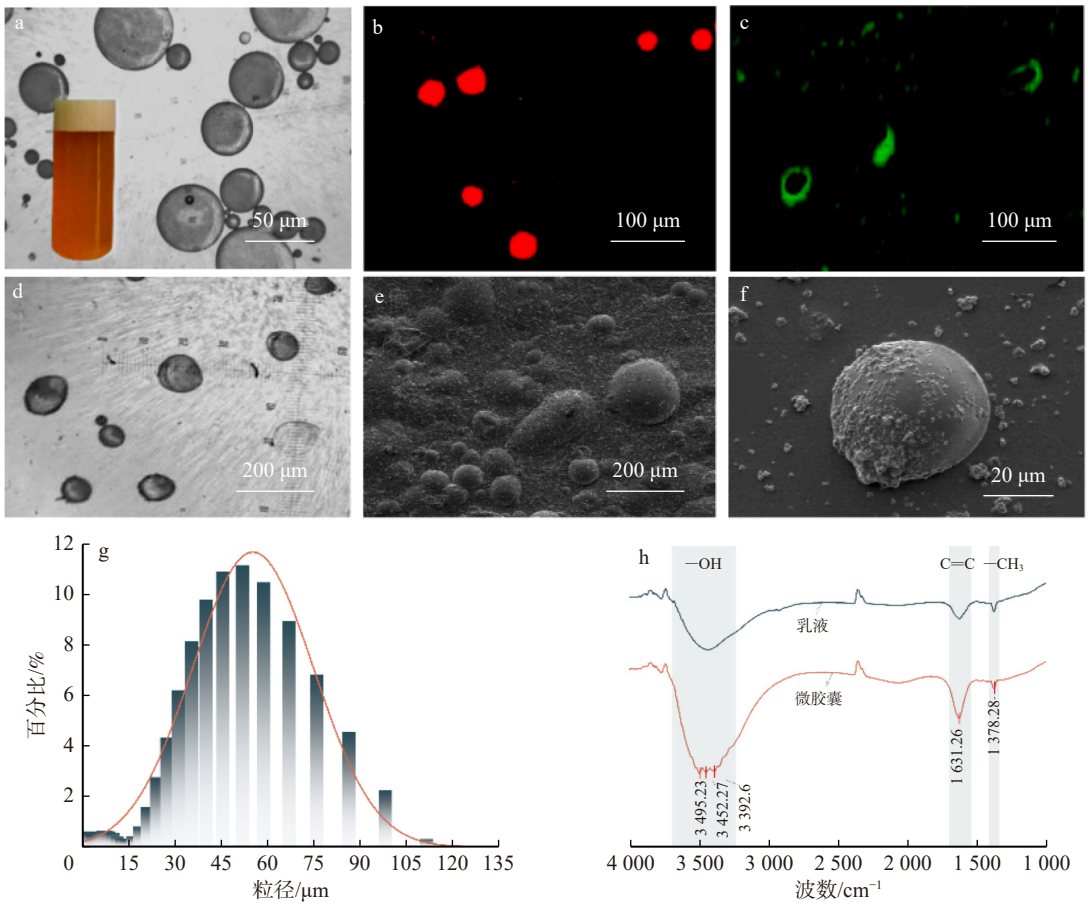
2.1 α-蒎烯微胶囊结构与性能

2.1.1 微胶囊包埋状态

TiO_2@α-蒎烯 Pickering 乳液体系呈现球形离散形态，其粒径为 15 ~ 100 μm（图 2a）。在室温封闭环境下观察，15 d 内乳液体系未出现破乳等形态变化，具有较强的抗聚并能力，体系稳定。同时，尼罗红染色后的乳液内部出现明显红色荧光反应（图 2b），荧光素 FITC 标记 TiO_2 后制备的乳液周围呈现明显绿色荧光反应（图 2c），证明 TiO_2@α-蒎烯 Pickering 乳液外侧为 TiO_2 颗粒，内部为油状物质，乳液的结构特征为 TiO_2 颗粒包埋 α-蒎烯的水包油型乳液。

α-蒎烯微胶囊湿态和干态，均为离散球形（图 2d，e），粒径分布为 0.767 ~ 111.473 μm，59.45% 处于 35.3 ~ 66.9 μm 范围内（图 2g），具有良好的分散性和稳定性，其囊壁刚性能够有效维持微胶囊结构的完整性。在海藻酸钠壁层封装过程中，TiO_2 颗粒的分布使微胶囊外壁不均匀突起（图 2f），但整体来看微胶囊形态完整，包埋率达到 85.3%。

乳液和微胶囊均在 1 378 cm^{-1} 处出现峰，此处的—CH_3 的单键振动峰证明了乳液与微胶囊中均含有的甲基橙结构，同时，两者主要原材料 α-蒎烯结构中存在的 C═C 和—CH_3 也导致了此处峰的出现。



a. 乳液光学显微镜图像和照片（插图）；b. 添加尼罗红的 TiO_2@α-蒎烯 Pickering 乳液激光共聚焦显微镜图像；c. TiO_2@α-蒎烯 Pickering 乳液中荧光素 FITC 标记的 TiO_2 颗粒的激光共聚焦显微镜图像；d. 湿态微胶囊光学显微镜图片；e, f. 干态微胶囊扫描电镜图片；g. 微胶囊粒径分布；h. 乳液与微胶囊红外光谱图

图 2 TiO_2@α-蒎烯 Pickering 乳液与微胶囊的形貌结构图

Fig. 2 Morphology and structure of TiO_2@α-pinene Pickering emulsion and microcapsules

相较于乳液，微胶囊在 3 400 cm^{-1} 左右出现了波动，且微胶囊在此处的伸缩振动强度大于乳液。海藻酸钠中含有的大量—OH，这说明海藻酸钠成功封装了乳液。在 1 631 cm^{-1} 处，微胶囊的伸缩振动峰相较于乳液有明显增强。这一现象与甲基橙分子中苯环的存在密切相关。同时，烯烃的双键伸缩振动峰在 1 540 ~ 1 695 cm^{-1} 之间。因此，1 631 cm^{-1} 处的振动峰可能是苯环与双键共同作用的结果（图 2h）。

2.1.2　缓释性能

在室温下放置 8 d 后，未经包埋的 α-蒎烯剩余 15.5%，微胶囊化的 α-蒎烯保留率为 84.5%（图 3a）。α-蒎烯微胶囊化减缓了其挥发速度。

微胶囊的热稳定曲线显示：在 75 ~ 130 ℃ 阶段样品出现第一个质量快速下降阶段，随着温度升高到 230 ℃，出现第二个质量快速下降阶段（图 3b，c）。这与 α-蒎烯挥发有关。与 α-蒎烯本身的沸点 156 ℃ 相比，微胶囊结构使得 α-蒎烯大量挥发的临界温度推迟至 230 ℃，并在 290 ℃ 挥发最快（图 3c），热稳定性显著提升。

2.1.3　光催化特性

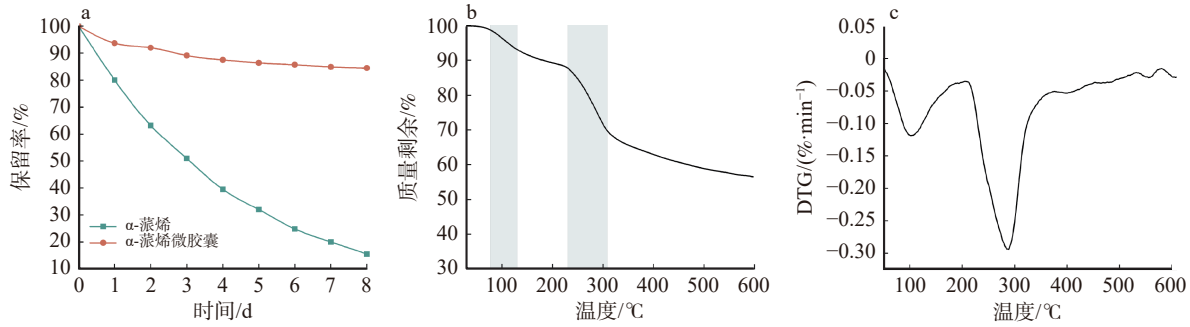
微胶囊在光照条件下能产生光电流，每个周期内，光电流迅速上升到 1.4 ~ 1.5 μA·cm^{-2} 左右，且光电流呈现稳定的周期性变化（图 4）。这个现象说明微胶囊具备稳定的光催化活性。TiO_2 作为一种低成本，绿色环保，稳定性强的光催化剂[19]，赋予了微胶囊光催化性能。同时，微胶囊制备过程中使用的甲基橙可能会占据 TiO_2 纳米结构中的可用空间，从而使 TiO_2 更多地接收光子，使微胶囊在光照下产生更多的电子−空穴对[20]。

2.2　不同掺杂量对改性涂料各项性能的影响

2.2.1　基本性质

随着微胶囊掺杂量（本文指的是质量分数）的增加，改性涂料的黏度呈现出逐渐上升的趋势（见表 2）。这一现象的出现，主要是由于微胶囊掺杂量的上升导致去离子水的用量相应减少，同时微胶囊中的 α-蒎烯在释放过程中会发生一定程度的水合作用，这两者共同作用促使涂料黏度有所提高。不过，黏度的上升在宏观表现上并未对涂料的流平性造成不良影响。此外，微胶囊掺杂后涂料的 pH 值虽有轻微降低，但这种变化并未产生显著影响。

当微胶囊掺杂量达到 6% 时，涂膜的拉伸强度达到峰值，相比未掺杂时提升了 86%，同时断裂伸长率达到 112.5%。然而，当掺杂量进一步增至 8% 和 10% 时，拉伸强度却出现了下降（见图 5a）。综合分



a.α-蒎烯和 α-蒎烯微胶囊的精油保留率对比；b. α-蒎烯微胶囊的 TG 曲线；c. α-蒎烯微胶囊的 DTG 曲线

图 3　α-蒎烯微胶囊缓释性能表征

Fig. 3　Characterization of sustained-release performance of α-pinene microcapsules

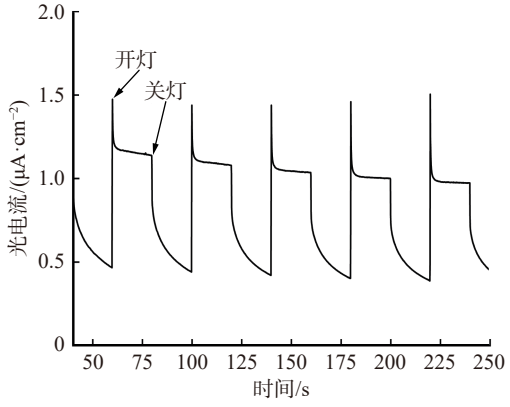


图 4　α-蒎烯微胶囊光电流

Fig. 4　Photocurrent of α-pinene microcapsules

表 2　改性涂料的黏度与 pH 值

Tab. 2　Viscosity and pH value of modified coatings

微胶囊掺杂量（质量分数）	黏度/(mPa·s)	pH值
0	32.92	7.90
2%	40.02	7.90
4%	52.89	7.88
6%	63.94	7.87
8%	71.22	7.84
10%	89.95	7.84

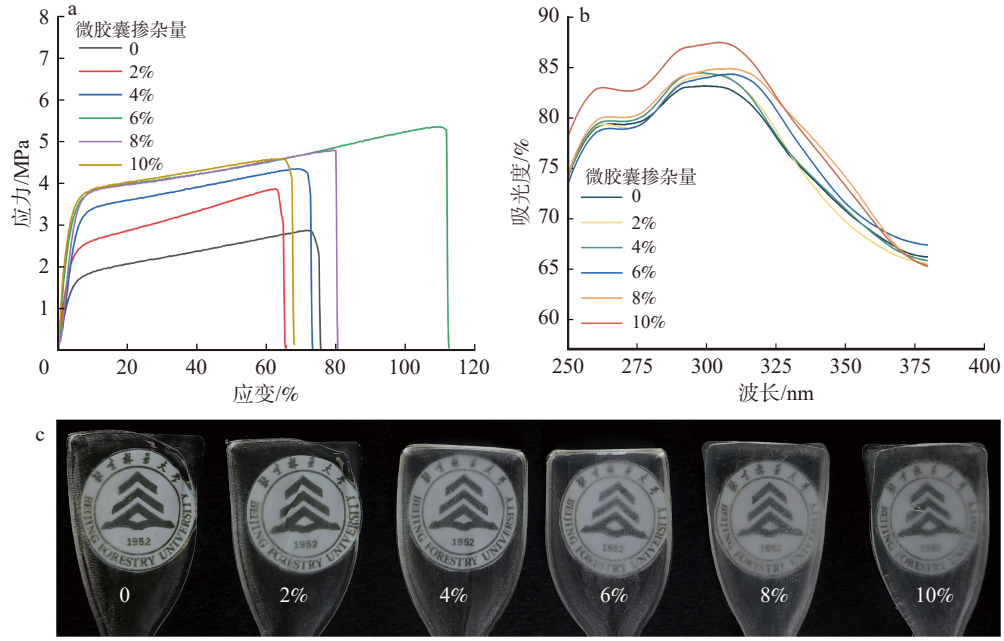
析，微胶囊掺杂量为 6% 的涂膜在拉伸强度和韧性方面表现出色，能够满足多样化的应用需求。此外，微胶囊改性还赋予了涂膜良好的紫外吸收性能(图 5b)，其中 10% 微胶囊掺杂的涂膜在紫外波段的吸光度上升了约 6.1%，这在一定程度上提升了板材的耐光老化性能[21]。同时，随着微胶囊掺杂比例的提高，涂膜的透明度逐渐降低，从透明变为半透明(图 5c)。因此，涂膜在起到防护作用的同时，还能保留木材的天然纹理。

2.2.2 光电性能

微胶囊掺杂比例与光电流峰值呈正相关关系(图 6a)。在涂料成膜后，微胶囊中的 TiO_2 仍可发挥光催化作用。当微胶囊掺杂量达到 10% 时，光电流的峰值最高可达 2.5 μA/cm^2，而未掺杂时，光电流几乎无上升。同时，在黑暗条件下施加线性电压后，10% 微胶囊掺杂量的改性涂料的最大电流密度可达 48 μA/cm^2(图 6b)。这表明 10% 掺杂量的样品具有更优异的光催化活性，更有利于光生载流子的生成，且其产生的光生电子能更高效地与氧气反应，生成超氧自由基[22]等产物(图 6c)，在产生负氧离子的性能方面表现最为出色。

2.2.3 漆膜性能

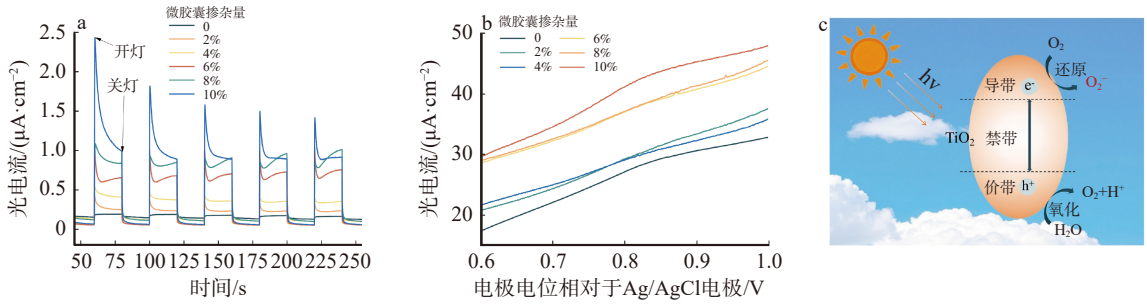
改性涂料成膜后，可清晰观察到完整的球形微胶囊(图 7a)，这不仅证实了微胶囊在掺杂入涂料后仍能保持其结构稳定性，同时也验证了将微胶囊掺杂进涂料再进行表面涂饰这一工艺的可行性。此外，基材种类(包括松木、白橡木和刨花板)对漆膜的形貌并无明显影响。然而，随着微胶囊掺杂量的增加，漆膜的表面平整度有所下降。这一现象可能源于涂料体系中微胶囊掺杂量的持续增加，导致微胶囊颗粒间的间距不断缩小，从而使得大分子链的活动空间被进一步压缩。这种空间限制改变了漆膜的



a. 力学性能；b. 紫外吸光度；c. 透明度

图 5 改性涂料的力学性能与光学性能

Fig. 5 Mechanical and optical properties of modified coatings



a. 光电流；b. 电流−电位曲线；c. 负氧离子产生机理。hv 为入射光能量。

图 6 改性涂料光电性能及负氧离子产生机理

Fig. 6 Photoelectric properties of modified coatings and negative oxygen ion generation mechanism

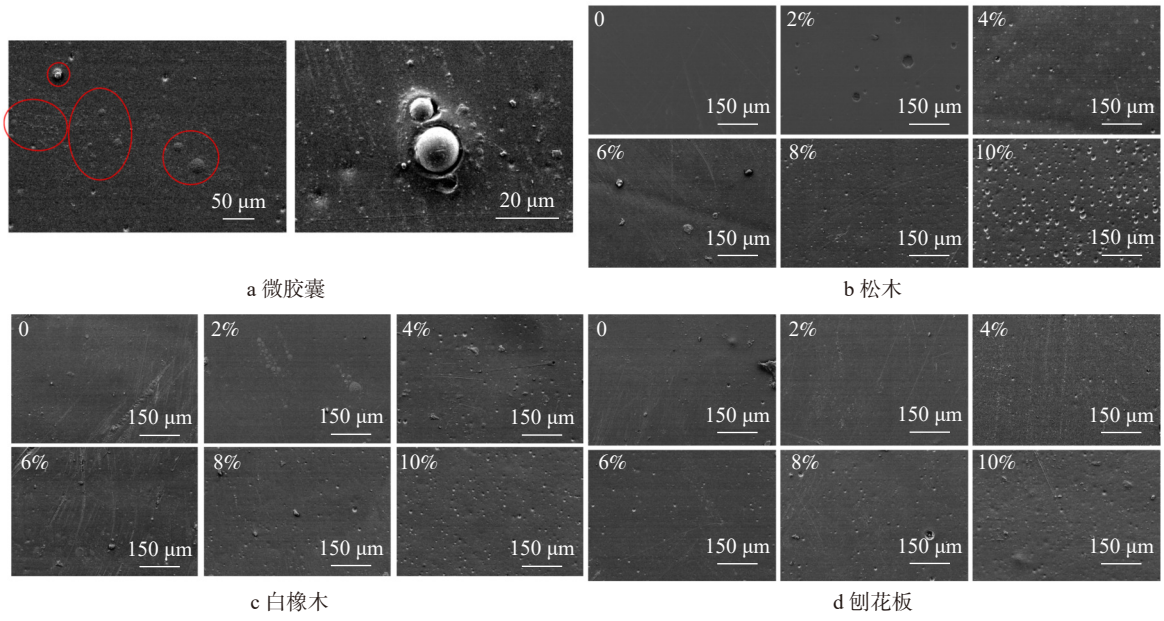


图 7　不同基材和微胶囊掺杂量的改性涂料漆膜的微观形貌

Fig. 7　Microscopic morphology of paint film of modified coatings on different panels and with different microcapsule doping

表面粗糙度和表面质量[23]。

微胶囊的掺杂提升了漆膜的硬度(表 3)，使其能够有效抵御外力作用下的压陷、刮擦和切划等，从而增强了漆膜的抗变形能力[24]。然而，基材的硬度对漆膜硬度也有影响。当微胶囊掺杂量为 0 时，白橡木由于其自身较高的硬度，其漆膜铅笔硬度可达 2H；而刨花板和松木的硬度相对较低，其漆膜硬度测量值为 H，随着微胶囊掺杂量的增加，刨花板和松木表面漆膜的铅笔硬度分别在掺杂量为 4% 和 8% 时提升至 2H。这表明基材的硬度越高，漆膜的硬度也越高[25]。

随着微胶囊掺杂量的增加，漆膜的光泽度逐渐降低。当微胶囊掺杂量达到 10% 时，松木、白橡木和刨花板基材上的改性漆膜光泽度分别从 92.41、82.14、88.29 GU 下降至 58.89、60.32、60.19 GU，漆膜的哑光性增强，且 3 种基材对光泽度变化的影响均不明显(图 8a，b，c)。这种光泽度降低的主要原因是：微胶囊与纯丙烯酸树脂的折光率存在差异，导致光线在漆膜中发生折射和散射，原本规则的反射光线向不同方向散射，从而使漆膜呈现出哑光状态；同时，微胶囊中的 TiO_2 能够吸收光子能量[26]，从而减弱反射光的强度，降低漆膜的光泽度。

漆膜的表面粗糙度也会对漆膜光泽度产生影响[27]。随着微胶囊掺杂量的增加，漆膜表面粗糙度不断增大。当微胶囊掺杂量达到 10% 时，基材为松木、白橡木和刨花板时的改性漆膜表面粗糙度 R_a 值分别增大到 0.53、0.38、0.60，增幅分别为 121%、58%、200%，表面粗糙程度明显增强(图 8d，e，f)。这是因为：微胶囊作为固体颗粒，其引入必然会破坏丙烯酸膜的平整度，导致漆膜表面粗糙度提升。

当微胶囊掺杂量在 0～8% 范围内时，漆膜的表面水接触角逐渐增大，展现出更显著的疏水特性，且基材差异对漆膜表面水接触角的变化趋势无明显影响(见图 8g、h、i)。漆膜表面粗糙度的增加，使水与漆膜的实际接触面积扩大，微观上增大了水在其表面的停留难度，宏观上则表现为接触角增大，疏水性增强。微胶囊内的 TiO_2 在漆膜表面构筑了类似荷叶的微纳结构效应，形成微小空气层[28]。同时，TiO_2 的光催化活性可吸附有机污染物[29]，减少因污染物吸附产生的吸水位点，从而进一步增大了漆膜的水接触角。

表 3　不同基材的改性涂料漆膜的铅笔硬度

Tab. 3　Pencil hardness of paint film of modified coatings on different panels

微胶囊掺杂量（质量分数）	铅笔硬度		
	松木	白橡木	刨花板
0	H	2H	H
2%	H	2H	H
4%	H	2H	2H
6%	H	2H	2H
8%	2H	2H	2H
10%	2H	2H	2H

3　结　　论

本研究通过使用海藻酸钠和 TiO_2 作为微胶囊壁材，α-蒎烯作为芯材，成功制备了具有缓释特性的 α-蒎烯微胶囊，并将其引入水性丙烯酸涂料中，开发

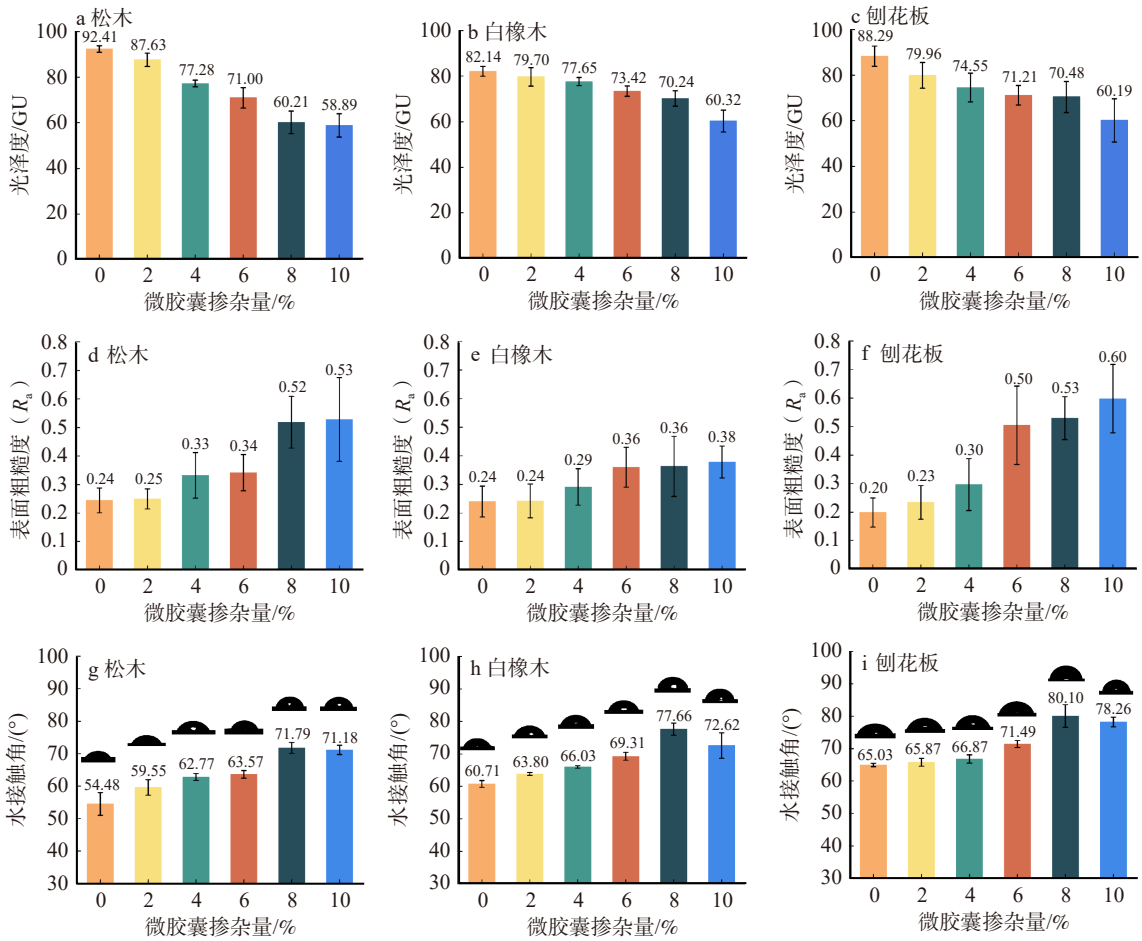


图 8 不同基材的改性涂料漆膜的表面光泽度、表面粗糙度和表面水接触角

Fig. 8 Surface gloss, surface roughness, and surface water contact angle of paint film of modified coatings on different panels

出一种兼具植物精气缓释和光催化特性的新型环保涂料。研究系统地表征了微胶囊和改性涂料的各项性能，并分析了微胶囊改性对水性丙烯酸涂料的影响，取得了以下主要成果。

（1）α-蒎烯微胶囊的结构稳定性和分散性良好，同时具备良好的缓释特性。α-蒎烯微胶囊在 8 d 后的精油保留率高达 85.5%，相较于未经微胶囊包埋的 α-蒎烯（15.5%）大幅提升。这表明微胶囊化技术有效延长了 α-蒎烯的释放时间，提高了其在实际应用中的持久性。

（2）微胶囊掺杂量 6% 的涂膜在拉伸强度和韧性方面表现出色，能够满足多样化的应用需求。微胶囊掺杂量为 8% 时，改性涂料疏水性更好。10% 微胶囊掺杂的涂膜在紫外波段的吸光度上升了约 6.1%，微胶囊改性赋予了涂膜良好的紫外吸收性能，提升了板材的耐光老化性能。

（3）α-蒎烯微胶囊改性在一定程度上赋予涂料光催化特性。改性涂料在光催化方面表现出色，10% 的微胶囊掺杂量使涂料的光催化性能达到最优，光生电荷分离后产生的电流密度最高可达 2.5 μA/cm^2，施加线性电压产生的最大电流密度为 48 μA/cm^2。光照后激发的光电子与空气中的氧气分子结合，有利于形成负氧离子，从而有效提升室内空气质量。

（4）改性涂料的漆膜呈现哑光状态，表面硬度和基材适应性表现出色，适用于多种常用基材（松木、白橡木和刨花板），且不同基材对漆膜的其他表面性能影响不明显。这使得该涂料在室内装饰和家具涂饰领域具有广阔的应用前景。

总体而言，本研究在微胶囊制备和改性涂料开发方面取得了一定成果，不仅提升了涂料的功能性，还为环保涂料的研发提供了可参考的技术路径。这种多功能涂料有望在室内装饰、家具涂饰、医疗、教育和办公场所等多个领域得到广泛应用，不仅能够提供美观的装饰效果，还能通过释放植物精气和产生负氧离子改善室内环境，提升人们的舒适感和健康水平。随着技术的进一步优化和成本的降低，这种涂料有望在更广泛的市场中推广，为环保涂料行业的发展注入新的活力，推动行业向更环保、更高效的方向发展。

参 考 文 献

[1] 陈刚, 王金欢, 陈浩生, 等. 水性漆在木制品涂饰中的应用进展 [J]. 家具, 2020, 41(2): 71−74.

Chen G, Wang J H, Chen H S, et al. Application progress of waterborne coating in wood products[J]. Furniture, 2020, 41(2): 71−74.

[2] 韩岩. 木材表面黄铜粉−水性丙烯酸装饰涂层的制备及其自修复性能研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
Han Y. Preparation and self-repairing performance of brass powder-waterborne acrylic decorative coating on wood surface[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.

[3] Copak A, Jirous-Rajkovic V, Zivkovic V, et al. Water vapour transmission properties of uncoated and coated wood-based panels[J]. Wood Material Science & Engineering, 2023, 18(3): 1086−1093.

[4] Zouari M, Marrot L, Devallance D B. Functional biocarbon-based coatings for wood protection and indoor air depollution[J]. Building and Environment, 2024, 261: 111716.

[5] Allenspach M, Steuer C. α-pinene: a never-ending story[J]. Phytochemistry, 2021, 190: 112857.

[6] Ikei H, Song C, Miyazaki Y. Effects of olfactory stimulation by α-pinene on autonomic nervous activity[J]. Journal of Wood Science, 2016, 62(6): 568−572.

[7] Ben Akacha B, Michalak M, Mekinic I G, et al. Mixture design of α-pinene, α-terpineol, and 1, 8-cineole: a multiobjective response followed by chemometric approaches to optimize the antibacterial effect against various bacteria and antioxidant activity[J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(1): 574−589.

[8] Han E J, Choi E Y, Jeon S J, et al. Anticancer effects of α-pinene in AGS gastric cancer cells[J]. Journal of Medicinal Food, 2024, 27(4): 330−338.

[9] Mitic Z S, Stojanovic-Radic Z, Cvetkovic V J, et al. *Pseudotsuga menziesii* (Pinaceae): volatile profiles, antimicrobial activity and toxicological evaluation of its essential oil[J]. Chemistry & Biodiversity, 2021, 18(9): 2100424.

[10] Weng H, Zhang Y, Huang X, et al. Pilot study on the production of negative oxygen ions based on lower voltage ionization method and application in air purification[J]. Atmosphere, 2024, 15(7): 860.

[11] 王振光, 梁可. 浅谈负氧离子环境对人体健康的影响 [J]. 建设科技, 2022(21): 24−26.
Wang Z G, Liang K. Influence of negative oxygen ion environment on human health[J]. Construction Science and Technology, 2022(21): 24−26.

[12] Nabavi S A, Vladisavljevic G T, Gu S, et al. Semipermeable elastic microcapsules for gas capture and sensing[J]. Langmuir, 2016, 32(38): 9826−9835.

[13] Wang S, Liu H, Wu D, et al. Temperature and pH dual-stimuli-responsive phase-change microcapsules for multipurpose applications in smart drug delivery[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 583: 470−486.

[14] Yan X, Zhao W, Wang L. Preparation and performance of thermochromic and self-repairing dual function paint film with lac resin microcapsules and fluorane microcapsules[J]. Polymers, 2021, 13(18): 3109.

[15] Peng W, Yan X. Preparation of tung oil microcapsule and its effect on wood surface coating[J]. Polymers, 2022, 14(8): 1536.

[16] Li Q, Zhao T, Li M, et al. One-step construction of Pickering emulsion via commercial TiO2 nanoparticles for photocatalytic dye degradation[J]. Applied Catalysis B-Environmental, 2019, 249: 1−8.

[17] Liao Z, Xue D, Li H, et al. Fragrance-containing microcapsules based on interfacial thiol-ene polymerization[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(36): 43905.

[18] Chen Y, Du Z, Zhang J, et al. Personal microenvironment management by smart textiles with negative oxygen ions releasing and radiative cooling performance[J]. Acs Nano, 2023, 17(14): 13269−13277.

[19] Nishikiori H, Matsunaga S, Iwasaki M, et al. Formation of silica nanolayer on titania surface by photocatalytic reaction[J]. Applied Catalysis B-Environmental, 2019, 241: 299−304.

[20] Chetia L, Kalita D, Ahmed G A. Enhanced photocatalytic degradation by diatom templated mixed phase titania nanostructure[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology a-Chemistry, 2017, 338: 134−145.

[21] Pakhomova E, Emelyanov S, Yartsev V, et al. The influence of climatic aging on the performance of wood-based panels[J]. Civil Engineering Journal-Tehran, 2023, 9(6): 1491−1508.

[22] Chen X, Sheng X, Zhou H, et al. Hydrophobicity promoted efficient hydroxyl radical generation in visible-light-driven photocatalytic oxidation[J]. Small, 2024, 20(24): 2310128.

[23] Okamoto S, Oishi A. Relationship between spatial variations in static skin deformation and perceived roughness of macroscopic surfaces[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2020, 13(1): 66−72.

[24] Li X C, Pang M. Research on the effect of the variation of laser power on the contour control and performance control of laser cladding Ni60CuMo/IN718 coating on RuT300[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107856.

[25] Morita T, Noda S, Kagaya C. Influence of hardness of substrates on properties of surface layer formed by fine particle bombarding[J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2013, 574: 197−204.

[26] Wang L, Chow T H, Oppermann M, et al. Giant two-photon absorption of anatase TiO_2 in Au/TiO_2 core-shell nanoparticles[J]. Photonics Research, 2023, 11(7): 1303−1313.

[27] Yong Q, Chang J, Liu Q, et al. Matt polyurethane coating: correlation of surface roughness on measurement length and gloss[J]. Polymers, 2020, 12(2): 326−332.

[28] Pan A, Mei X, Wang W, et al. In-situ deposition of oxidized porous metal nanoparticles on the surface of picosecond laser-induced micro/nano structures: a new kind of meta-surface equipped with both super-hydrophobicity and anti-reflectivity[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 460: 141582.

[29] Barisic I, Brucculeri R, Airoldi L, et al. Fast sintering of titania monoliths for photocatalytic degradation of organic micropollutants[J]. Applied Materials Today, 2024, 38: 102172.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　许　凤）