聚乙烯醇/改性纤维素纳米纤维/纳米二氧化钛抗菌防水涂层的制备及其性能研究

张雪松[1],童华炜[2],陈 木[1],曹阳艳[1]

(1.广州职业技术大学,广东 广州 511483;2.广州大学,广东 广州 510006)

摘 要: 聚乙烯醇(PVA)涂层作为一种木材黏合剂,广泛用于多种木材的黏接。然而,PVA涂层易吸湿受潮,且易遭受细菌侵袭与污染,从而丧失防护功能。为提高木材制品的耐用性和功能性,研究开发一种抗菌防水的木材涂层。该涂层以PVA为基材,加入经苯基三甲氧基硅烷改性的纤维素纳米纤维(M-CNF)以及纳米二氧化钛(TiO_2)颗粒,以优化涂层的结构和性能。结果表明:PVA对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌几乎没有抑菌活性,而PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层样品具有优异的抗菌性能。PVA涂层防水性差,添加M-CNF和TiO_2纳米颗粒后,PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层防水性显著提升,初始接触角达81.3°,10 s后仅降至79.8°,仅降低1.5°。该涂层不仅短期防水效果显著,还具备良好的长期水稳定性。PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层与木板之间的初始黏接强度均明显高于PVA,经自然风化30 d后,PVA的黏接强度大幅下降78.6%,而上述两种复合涂层仅分别降低9.7%和4.6%。研究结果为开发高效且环境友好的木材涂层以及环保型多功能木材涂层提供有益参考。

关键词: 聚乙烯醇;二氧化钛纳米颗粒;改性纤维素纳米纤维;抗菌防水;涂料

中图分类号: TQ637; TB383 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3360(2026)09-0001-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.001

Preparation and Performance Study of Polyvinyl Alcohol/Modified Cellulose Nanofiber/Nano Titanium Dioxide Antibacterial and Waterproof Coating

ZHANG Xuesong[1], TONG Huawei[2], CHEN Mu[1], CAO Yangyan[1]

(1. Guangzhou Polytechnic University, Guangzhou 511483, China; 2. Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Polyvinyl alcohol (PVA) coatings, used as wood adhesives, were widely applied for bonding various types of wood. However, PVA coatings were susceptible to moisture absorption and bacterial contamination, which led to the loss of their protective functions. To improve the durability and functionality of wood products, an antibacterial and waterproof wood coating was developed. The coating was prepared using PVA as the matrix, incorporating phenyltrimethoxysilane-modified cellulose nanofibers (M-CNF) and titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles to optimize the coating structure and properties. The results showed that PVA exhibited almost no antibacterial activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*, whereas the PVA/M-CNF/3%TiO_2 coating samples demonstrated excellent antibacterial performance. The water resistance of the PVA coating was poor. However, after the addition of M-CNF and TiO_2 nanoparticles, the water resistance of the PVA/M-CNF/3%TiO_2 coating was significantly improved, with an initial contact angle of 81.3°, which only decreased to 79.8° after 10 s, representing a reduction of only 1.5°. This coating not only exhibited remarkable short-term waterproof performance but also demonstrated good long-term water stability. The initial adhesion strength between the PVA/M-CNF and PVA/M-CNF/3%TiO_2 coatings and the wood substrate was significantly higher than that of PVA. After 30 d of natural weathering, the adhesion strength of PVA decreased drastically by 78.6%,

收稿日期Submitted date 2025-09-20;修回日期Revised date 2025-10-14;录用日期Accepted date 2025-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51040501-0524);广东省普通高校重点领域专项(2023ZDZX4113);广州番禺职业技术学院科研项目(2021KJ06)

联系人,szzxyjh1@163.com

引用本文: 张雪松,童华炜,陈木,等.聚乙烯醇/改性纤维素纳米纤维/纳米二氧化钛抗菌防水涂层的制备及其性能研究[J].塑料科技,2026,54(9):1-6.

Citation: ZHANG X S, TONG H W, CHEN M, et al. Preparation and performance study of polyvinyl alcohol/modified cellulose nanofiber/nano titanium dioxide antibacterial and waterproof coating[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 1-6.

while that of the two composite coatings decreased by only 9.7% and 4.6%, respectively. The research findings provided a valuable reference for the development of efficient and environmentally friendly wood coatings, as well as eco-friendly multifunctional wood coatings.

Keywords: PVA; TiO_2 nanoparticles; Modified cellulose nanofibers; Antibacterial and waterproof; Coating

木材作为天然可再生资源，凭借良好的加工性能、环境友好性与生物相容性，在建筑、家具、包装等领域应用广泛[1-3]。但木材固有的易吸水性、易滋生微生物的特性以及与涂层材料间附着力不足等问题，严重制约其在高湿度、易污染等复杂场景中的进一步应用[4-6]。在建筑领域，木材制品长期暴露于自然环境中，易因水分侵入导致尺寸变形、结构腐朽。同时，细菌、霉菌等微生物的滋生不仅影响外观，还可能引发健康风险与材料性能劣化。因此，开发兼具抗菌、防水及强黏接性能的木材涂层，成为突破木材应用瓶颈的关键方向[7-9]。

当前，通过纳米技术构建木材表面功能化涂层已成为提升木材性能的主流策略。理想的木材涂层需要整合聚合物基质的成膜性、增强剂的结构支撑作用及生物活性成分的功能特性，通过各组分协同效应实现结构完整性与环境耐受性的平衡，最终以可持续方式实现木材的长期保护。聚乙烯醇(PVA)作为生物相容性优异的聚合物，具备出色的成膜性、透明性与可加工性，成为木材涂层基材的重要选择[10-12]。然而，纯PVA涂层存在显著缺陷，分子链上大量羟基易与水分子形成氢键，导致涂层在湿态环境中吸水溶胀甚至脱落，耐水性极差。同时，其力学性能薄弱，涂层较薄且耐磨性不足，易受摩擦、冲击而损坏，难以满足实际应用需求[13-14]。

为改善PVA涂层性能，研究人员尝试引入纳米增强材料。纤维素纳米纤维(CNF)拥有丰富的氢键网络与优异的机械性能，可有效增强涂层结构并提升与木材基材的附着力[15]。但其表面大量羟基导致亲水性极强，不仅无法改善涂层防水性，反而可能加剧水分吸附，限制其应用[16]。为了提高CNF的疏水性，必须对CNF进行改性处理。目前，提高CNF疏水性比较普遍的改性方法主要有酯化和乙酰化等。陈丹等[17]以乙酸、高氯酸、乙酸酐、甲苯等为原料，在CNF表面进行乙酰化改性，制得乙酸酐改性CNF，疏水性得到明显提高。此外，纳米二氧化钛(TiO_2)因光催化抗菌性能与紫外屏蔽能力，在复合涂层中应用广泛，既能抑制木材表面微生物生长，又可提升涂层耐候性[18]。例如，TiO_2与石墨相氮化碳(g-C_3N_4)复合后制备的PVA基纳米纤维膜，在可见光下对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌展现出显著抑菌效果[19]。但TiO_2本身同样具有亲水性，单独添加难以解决涂层整体防水问题，且其光催化过程中产生的强氧化性物质，如羟基自由基(·OH)、超氧阴离子自由基($\cdot O_2^-$)，可能与聚合物基质发生反应，导致涂层降解、稳定性下降[20]，这一矛盾在现有研究中尚未得到有效解决。

现有研究虽在PVA/CNF、PVA/TiO_2等二元复合体系的性能优化方面取得进展(如PVA/CNF复合膜在食品保鲜中可减少水果质量损耗[21]，PVA/CNF纳米复合材料可作为包装功能性填料[22])，但这些研究多聚焦单一功能(如抗菌、力学增强)，缺乏对“抗菌-防水-黏结-稳定性”多性能协同提升的系统设计。同时，兼具长期防水性与稳定抗菌性的三元复合涂层研究仍较为稀缺，一方面，PVA、CNF和TiO_2三者的亲水性叠加，导致涂层易吸水失效；另一方面，TiO_2光催化活性与PVA基质稳定性的平衡难题尚未突破，严重限制复合涂层在木材保护中的实际应用价值。

针对上述研究空白与技术瓶颈，本研究提出一种“组分改性-结构调控-性能协同”的设计思路，构建三元复合木材涂层。首先采用苯基三甲氧基硅烷(PTMS)对CNF进行疏水改性，降低其亲水性并增强与PVA的相容性。其次通过调控TiO_2的含量，优化其在涂层中的分散性，在保证光催化抗菌活性的同时，避免因颗粒团聚导致的防水性能下降与基质降解风险。最终通过三者的协同作用，实现涂层抗菌性、防水性、黏接强度与环境稳定性的同步提升。

1 实验部分

1.1 主要原料

PVA，分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；CNF，直径5~20 nm，长度1~5 μm，质量分数98%，山东聚芳新材料股份有限公司；TiO_2，质量分数99.9%，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；PTMS、异丙醇(IPA)、冰乙酸，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；山梨醇，质量分数99.5%，天津市开瑞斯精细化工有限公司。

1.2 仪器与设备

扫描电子显微镜(SEM)，JEM-7401，深圳市善时仪器有限公司；X射线衍射仪(XRD)，AL-Y3500，丹东奥龙射线仪器集团有限公司；傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，IRTracer-100，深圳市善时仪器有限公司；电子万能试验机(UTM)，TFW-11，上海拓丰仪器科技有限公司；接触角测量仪(CAM)，PGX，深圳市善时仪器有限公司；便捷式附着力测试仪，PosiTest AT-A，美国DeFelsko公司。

1.3 样品制备

1.3.1 PTMS改性CNF的制备

在室温条件下，按一定比例将冰乙酸滴加至搅拌中的PTMS溶液中，制得pH值为4的溶液A。按一定比例将IPA和冰乙酸加入去离子水中制得溶液B。在磁力搅拌下将溶液A缓慢滴加至溶液B中，滴加完成后继续搅拌3 h，制得澄清透明的PTMS水解液。将CNF和PTMS水解液

按质量比1∶5混合，磁力搅拌3 h，制得PTMS改性CNF(M-CNF)，备用。

1.3.2 复合涂层的制备

将4 g的PVA溶解在100 mL去离子水中，在70 ℃下持续搅拌约4 h，得到PVA溶液。随后，向该溶液中加入质量分数为30%的山梨醇，搅拌至充分溶解。接着，依次添加质量分数为3%的M-CNF以及质量分数分别为1%、3%、5%和7%的TiO_2纳米颗粒。为了确保混合物均匀，将混合溶液在35 ℃下持续搅拌45 min，形成均匀的成膜混合物。将混合物缓慢倒入培养皿中，使涂层厚度均匀，并在(45±2) ℃下干燥24 h。干燥完成后，将涂层从培养皿中取出，置于密封袋中保存，以备后续表征。同时，为方便后续对比，制备不含M-CNF和TiO_2的纯PVA薄膜，命名为PVA。添加不同质量分数的TiO_2纳米颗粒的涂层分别命名为PVA/M-CNF/1%TiO_2、PVA/M-CNF/3%TiO_2、PVA/M-CNF/5%TiO_2和PVA/M-CNF/7%TiO_2。

1.4 性能测试与表征

SEM测试：将脱水后的样品用碳胶带固定在铝柱上，在10~20 kV的加速电压下，分析涂层的表面形貌。

FTIR测试：在透射模式下，扫描16次，分辨率4 cm^{-1}，扫描范围4 000~500 cm^{-1}，获取固体干燥材料的FTIR谱图，以分析其官能团和化学特性。

XRD测试：配备Ni滤波的Cu Kα辐射(40 kV，40 mA)，扫描步长2 (°)/min，扫描范围为3°~50°。

CAM测试：测量涂层的动态水接触角，用注射泵将3.5 μL的水放置在涂层表面，在200 s的演化时间内捕获图像。每次处理至少使用4个样本，每个样本的数据读取至少3次。

抗细菌活性测试：选择革兰氏阴性大肠杆菌(*Escherichia coli*)和革兰氏阳性金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)作为试验菌。将细菌在营养琼脂平板上进行传代培养。细菌培养物标准化为0.5麦氏比浊标准，该标准近似于浓度为1.5×10^8 CFU/mL的微生物溶液。每个培养皿中有20 mL的琼脂培养基，用100 μL的测试微生物接种物涂抹琼脂培养基。等待15 min后，使用直径为8 mm的无菌软木打孔器在接种的琼脂平板上打孔。每个孔中填充100 μL的物质，这些物质在二甲基亚砜中重新配制，浓度为4.0 g/L。将平板在37 ℃下孵育24 h。使用抑菌圈读数器评估每种薄膜对测试病原体的抑菌活性，通过测量生长抑制区的大小来确定。每种生物使用3个重复平板。

黏接性能测试：将天然木材样品切割成6 cm×3 cm×1 cm的小块木板，用乙醇对木样进行超声清洗15 min，以去除杂质。在80 ℃下干燥5 h，得到绝对干燥状态的木样。用刷子将上述配制的涂层混合溶液涂覆于木材表面，分为涂层薄膜和木材两层，测得干膜厚度为(60±5) μm。将样品在(23±2) ℃、相对湿度(60±5)%的环境条件下，放置一周后用于黏接性能评估测试。依照ASTM D 4541—2022采用便携式附着力测试仪进行测试，在自然风化之前和风化30 d之后，对每个样品的3个位置进行涂层附着力评估。每次处理至少使用4个样本，每个样本数据读取3次。

2 结果与讨论

2.1 SEM分析

图1为PVA、PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/TiO_2涂层表面的SEM照片。从图1可以看出，PVA涂层表面呈现均匀光滑的形态，无明显凸起或孔隙，这与其分子链规整排列的特性相关，但也反映出PVA涂层缺乏微观粗糙结构，易受外界环境影响。添加M-CNF后，PVA/M-CNF涂层表面出现细微纹理，粗糙度略有提升，这是因为M-CNF在PVA基体中形成分散的纤维网络，不过整体仍较平整，未发生显著结构变化。当引入TiO_2纳米颗粒后，涂层表面形貌发生明显改变，随着TiO_2纳米颗粒含量的增加，表面粗糙度逐步增强。其中，PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层表面粗糙结构均匀且无明显团聚现象，TiO_2颗粒与基体结合紧密，分散性优异。而TiO_2添加质量分数增至5%或7%时，涂层表面出现颗粒团聚现象，且团聚程度随TiO_2含量升高愈发明显。

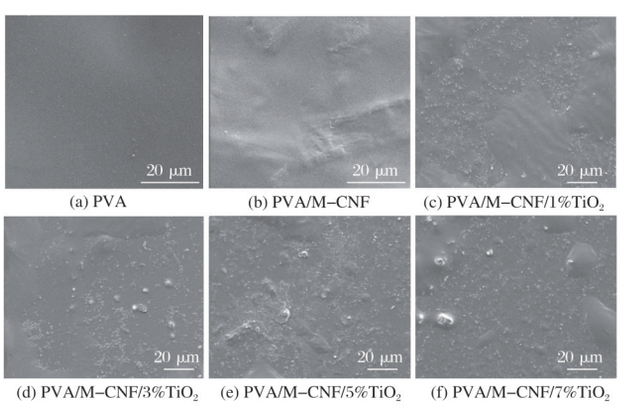


图1 PVA、PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/TiO_2涂层表面的SEM照片

Fig.1 Surface SEM images of PVA, PVA/M-CNF, and PVA/M-CNF/TiO_2 coatings

2.2 FTIR分析

图2为CNF和M-CNF的FTIR谱图。从图2可以看出，CNF改性后，在1 129 cm^{-1}和1 107 cm^{-1}处出现了新增的峰，分别对应Si—O—C特征吸收峰和Si—O—Si特征吸收峰。这表明PTMS成功接枝到CNF表面，羟基被取代，印证CNF疏水改性有效，为提升涂层防水性奠定基础。

图3为PVA、PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/TiO_2涂层的FTIR谱图。从图3可以看出，PVA及PVA/M-CNF/TiO_2涂层在3 290 cm^{-1} (—OH伸缩振动)、2 921 cm^{-1} (—CH伸缩振动)、1 418 cm^{-1} (脂肪族—CH弯曲振动)、1 084 cm^{-1} (C—O伸缩振动)和1 644 cm^{-1} (C═O伸缩振动)处均有特征峰。随着TiO_2含量增加，1 644 cm^{-1}处C═O峰强度逐渐减弱，

这是由于PVA末端羟基与TiO_2形成氢键，抑制PVA互变异构，证实PVA基体与TiO_2间存在分子间相互作用(氢键作用)，说明TiO_2成功分散并与PVA结合。

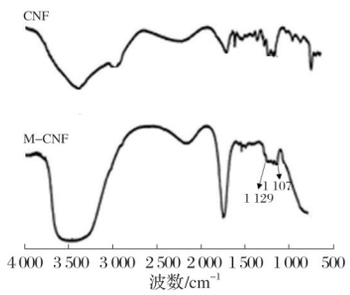


图2 CNF和M-CNF的FTIR谱图

Fig.2 FTIR spectra of CNF and M-CNF

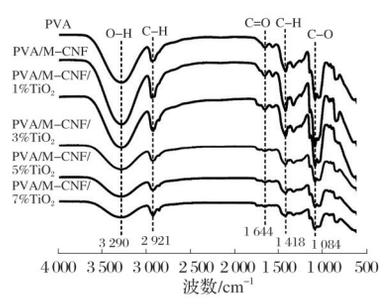


图3 PVA、PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/TiO_2涂层的FTIR谱图

Fig.3 FTIR spectra of PVA, PVA/M-CNF, and PVA/M-CNF/TiO_2 coatings

2.3 XRD分析

图4为PVA、PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/TiO_2涂层的XRD谱图。从图4可以看出，PVA涂层在19.7°处出现明显特征衍射峰，对应其分子链规整排列形成的晶区结构，峰形较尖锐，表明PVA结晶度较高。添加M-CNF后，PVA/M-CNF涂层的特征衍射峰位置未发生显著偏移，但峰强度略有降低，这是因为M-CNF在PVA基体中分散形成纤维网络，在一定程度上破坏了PVA分子链的有序排列，导致结晶度轻微下降。引入TiO_2纳米颗粒后，随其含量变化，涂层XRD谱图呈现规律变化：当TiO_2添加质量分数为3%时，在25.6°处出现TiO_2的特征衍射峰，且峰形清晰、无明显宽化，说明TiO_2在PVA/M-CNF基体中分散均匀，未发生明显团聚，与SEM结果一致。当TiO_2添加质量分数增至5%和7%时，TiO_2特征峰强度增强，峰宽略有增加，可能是因为过量TiO_2颗粒发生团聚，不仅影响自身分散性，还加剧对PVA结晶结构的破坏。此外，所有复合涂层均未出现新的杂峰，表明PVA、M-CNF与TiO_2间仅存在物理相互作用(如氢键)，未发生化学反应生成新物质，证实了复合涂层体系的稳定性。

2.4 抗细菌活性分析

为确定涂层的抗菌活性，对PVA及PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层样品进行抗菌试验，并开展对比研究。本实验选择革兰氏阴性大肠杆菌和革兰氏阳性金黄色葡萄球菌作为试验菌。图5为PVA和PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层的抗菌活性。从图5a和图5c可以看出，PVA对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌几乎没有抑菌活性，菌落几乎覆盖整个培养皿。从图5b和图5d可以看出，PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层具有优异的抗菌性能，相应培养皿中只有少量活菌。PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层样品具有抗菌性的主要原因是其涂层中含有一定量的TiO_2。TiO_2受到一定能量的光子激发后，会发生光催化反应，产生许多强氧化性物质，包括·OH、$\cdot O_2^-$和过氧化氢(H_2O_2)等。这些活性氧化物可与微生物的细胞成分发生反应，将其分解为二氧化碳和水，从而在短时间内杀死细菌，达到抗菌效果[15]。

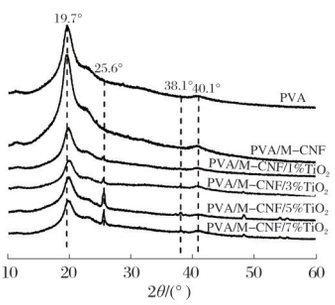
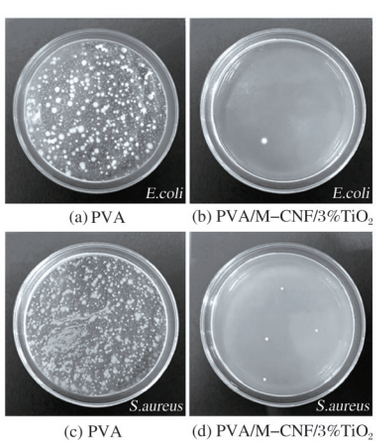


图4 PVA、PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/TiO_2涂层的XRD谱图

Fig.4 XRD patterns of PVA, PVA/M-CNF, and PVA/M-CNF/TiO_2 coatings



(a) PVA (b) PVA/M–CNF/3%TiO_2

(c) PVA (d) PVA/M–CNF/3%TiO_2

图5 PVA和PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层的抗菌活性

Fig.5 Antibacterial activity of PVA and PVA/M-CNF/3%TiO_2 coatings

2.5 防水性能分析

防水性能可通过水接触角变化来表征，接触角越大随时间变化越小，表明防水性能越优。图6为PVA和PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层的接触角。从图6可以看出，PVA涂层初始接触角仅76.6°，接触水10 s后骤降至55.6°，表现出较差的防水性。这是因为PVA分子链上含大量羟基，易与水分子形成氢键，导致涂层快速吸水，接触角显著下降。添加M-CNF和TiO_2纳米颗粒后，PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层的防水性能显著增强，初始接触角达81.3°，10 s后仅降至79.8°，仅降低了1.5°。这得益于M-CNF经PTMS改性

后疏水性增强，同时TiO_2纳米颗粒使涂层表面形成均匀粗糙结构，二者协同作用有效减少水分子与涂层表面的接触面积，从而降低吸水速率。为进一步评估涂层遇水后的防水稳定性，将PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层样品浸入水中保持一定时间，考察其防水性能的持久性。从图6c可以看出，经过水处理的PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层样品的初始接触角仅比未处理前低2.3°，这表明涂层的防水性能在遇水后仍能保持稳定。结果表明，PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层不仅短期防水性好，还具备出色的长期水稳定性，能在潮湿环境中持续发挥防水作用，能够有效解决PVA涂层易吸水失效的问题。

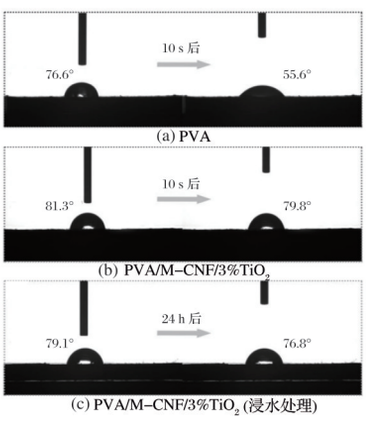


图6 PVA和PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层的接触角

Fig.6 Contact angles of PVA and PVA/M-CNF/3% TiO_2 coatings

2.6 与木材表面的黏接性能分析

图7为PVA、PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层与木材表面的黏接强度。

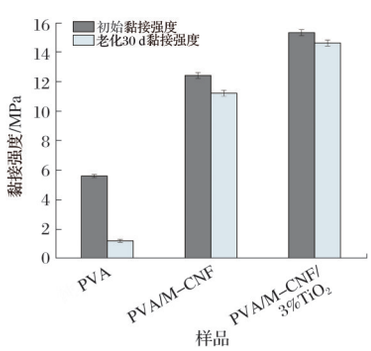


图7 PVA、PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层与木材表面的黏接强度

Fig.7 Surface adhesive strength between PVA, PVA/M-CNF, PVA/M-CNF/3%TiO_2 coatings and wood

从图7可以看出，PVA、PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层的初始黏接强度分别为5.6、12.4、15.3 MPa，后两者显著高于PVA。一方面是因为纳米TiO_2在涂层表面形成微观的粗糙结构，增加涂层与木材表面的接触面积和机械咬合作用。另一方面，纳米TiO_2表面富含羟基等活性基团，能够与木材表面的官能团及PVA分子链上的羟基发生化学键合，形成稳定的化学交联结构，从而增强界面化学黏结力[23]。此外，M-CNF的加入可以与PVA基体中形成三维网络结构，有效限制PVA分子链的运动，提升涂层的内聚强度与力学性能，进一步强化涂层与木材的黏接性能[24]。自然老化30 d后，PVA的黏接强度显著降低78.6%，而PVA/M-CNF涂层黏接强度仅降低9.7%，这可能是因为M-CNF的结构支撑作用减缓了水分破坏。PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层黏接强度降幅最小为4.6%，这可能是因为TiO_2的紫外屏蔽能力抑制PVA基体的老化降解，同时其均匀分散进一步强化涂层结构稳定性，从而实现长效的黏接性能。

3 结论

为了提高木材制品的耐用性和功能性，本研究开发一种抗菌防水的木材涂层。以PVA为基材，加入M-CNF和TiO_2纳米颗粒以改善涂层的结构和性能。系统研究复合涂层的疏水性、抗菌性能及与木材表面的黏接性能。研究结果表明：PVA对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌几乎无抑菌活性，而PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层表现出优异的抗菌性能。在防水性能方面，PVA的接触角为76.6°，接触水10 s后即降至55.6°，而PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层的初始接触角为81.3°，10 s后仅下降1.5°，且经水中浸泡24 h后仍保持较好的稳定性。在黏接性能方面，PVA/M-CNF和PVA/M-CNF/3%TiO_2涂层的初始黏接强度均显著高于PVA，经自然老化30 d后，PVA的黏接强度大幅下降了78.6%。而上述两种复合涂层仅分别降低9.7%和4.6%，表现出优异的耐久性。本研究通过开发高效且环境友好的木材涂层，为兼具环保性与高性能的木质基功能材料的设计提供了参考，同时也为木材在建筑领域的拓展应用提供了新的思路。

参考文献

[1] ABDEL BARY E M, SOLIMAN Y A, FEKRI A, et al. Aging of novel membranes made of PVA and cellulose nanocrystals extracted from Egyptian rice husk manufactured by compression moulding process[J]. International Journal of Environmental Studies, 2018, 75(5): 750-762.

[2] HUANG J D, LYU S Y, FU F, et al. Green preparation of a cellulose nanocrystals/polyvinyl alcohol composite superhydrophobic coating[J]. RSC Advances, 2017, 7(33): 20152-20159.

[3] 夏勇, 赵迎, 徐利云, 等. 抗菌防沾污生物防护材料的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2023, 44(1): 64-70.

[4] KORHONEN J T, KETTUNEN M, RAS R H A, et al. Hydrophobic nanocellulose aerogels as floating, sustainable, reusable, and recyclable oil absorbents[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(6): 1813-1816.

[5] 何铠君, 沈加加, 刘国金. 石墨烯改性蚕丝的制备方法及其应用研究进展[J]. 纺织学报, 2023, 44(9): 223-231.

[6] 季和君. 抗菌PBT材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 48-55.

[7] 孙文革, 王峰, 鲁亚云. 用于高频通信的液晶聚酰亚胺/SiO_2纳米复合材料的合成与介电性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(7): 112-116.

[8] SINGH S, GAIKWAD K K, LEE Y S. Antimicrobial and antioxidant properties of polyvinyl alcohol bio composite films containing seaweed extracted cellulose nano-crystal and basil leaves extract[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 1879-1887.

[9] 李雪, 严雨欣, 李徐辉, 等. 玉米淀粉/壳聚糖/纳米TiO_2复合膜在蓝莓保鲜中的应用研究[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(3): 165-172.

[10] EL-WAKIL N A, HASSAN E A, ABOU-ZEID R E, et al. Development of wheat gluten/nanocellulose/titanium dioxide nanocomposites for active food packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 124: 337-346.

[11] BORSE P Y, MESTRY S U, MHASKE S T. Development of nanocellulose-titanium dioxide- (3-aminopropyl) trimethoxysilane (NCC-TiO_2-APTMS) particles and their application in superhydrophilic self-cleaning coatings[J]. Polymer Bulletin, 2022, 79(11): 9371-9395.

[12] CAI J, CHEN J Y, ZHANG Q, et al. Well-aligned cellulose nanofiber-reinforced polyvinyl alcohol composite film: Mechanical and optical properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 140: 238-245.

[13] YU Z L, WANG W, SUN L, et al. Preparation of cellulose nanofibril/titanium dioxide nanoparticle nanocomposites as fillers for PVA-based packaging and investigation into their intestinal toxicity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156: 1174-1182.

[14] 韩骞. PLA-PVA/LZ抑菌垫的制备及其在即食米饭保鲜中的应用[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2025.

[15] SURYANTO H, SUSILO B D, AMINNUDIN, et al. Effect of addition cetyltrimethylammonium bromide on morphology and functional groups of composite membrane bacterial nanocellulose-titanium dioxide [C]//The 4th International Conference On Life Science and Technology (ICoLiST). Malang, Indonesia: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2023.

[16] 陈丹, 张萍, 王家俊, 等. 纳米纤维素表面乙酰化改性及其表征[J]. 化工新型材料, 2016, 44(1): 146-148.

[17] SEPAHVAND S, ASHORI A, JONOOBI M. Application of cellulose nanofiber as a promising air filter for adsorbing particulate matter and carbon dioxide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 244: 125344.

[18] 宋婷婷, 栾静敏, 孙海峰, 等. 光催化抑菌和降解有机物的聚乙烯醇/二氧化钛@氮化碳复合纳米纤维膜[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(10): 129-140.

[19] BASTI A T K, JONOOBI M, SEPAHVAND S, et al. Employing cellulose nanofiber-based hydrogels for burn dressing[J]. Polymers, 2022, 14(6): 1207.

[20] 卢攀, 安秋凤, 杨博文, 等. 基于羟基含氟丙烯酸树脂的防腐抗菌涂层的制备与性能研究[J]. 涂料工业, 2023, 53(2): 37-42.

[21] 刘琦. 纤维素纳米球和PVA/纳米纤维素复合膜的制备及性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.

[22] ANJANA KRISHNA S V, UMADEVI S, MIDHUN DOMINIC C D, et al. Biomass derived cellulose nanofiber loaded PVA-nanocurcumin coating for extending the shelf life of Mandarin oranges (*Citrus reticulata*)[J]. Hybrid Advances, 2024, 5: 100162.

[23] OISHI Y, NAKAYA M, MATSUI E, et al. Structural and mechanical properties of cellulose composites made of isolated cellulose nanofibers and poly(vinyl alcohol) [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 73: 72-79.

[24] SHARMA T, BAWA S, KUMAR S, et al. Bioactive enhancement of PVA films through CNC reinforcement and ficus auriculata fruit extract: A novel synthesis for sustainable applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275: 133338.

[启事]

征订启事

《塑料科技》杂志创刊于1973年，是中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊（中国科技核心期刊），中国期刊网、中国学术期刊（光盘版）和中国学术期刊综合评价数据库的来源期刊和全文收录期刊。《塑料科技》杂志被美国化学文摘（CA）、俄罗斯文摘期刊（AJ）、英国高分子图书馆（PL）、美国乌利希期刊指南（Ulrich PD）、美国剑桥科学文摘（材料信息）（CSA（MI））、波兰哥白尼索引（IC）收录，荣获首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖。

国内凡从事塑料制品、塑机和模具生产的重点企业、相关专业高等院校和科研院所都可订阅本刊。

主要栏目包括：理论与研究、加工与应用、生物与降解材料、计算机辅助技术、塑机与模具、理化测试、助剂、评述等。

《塑料科技》每月25日出版，全年12期，定价360元，可在全国各地邮局或通过编辑部直接订阅。

1 邮局汇款

收款单位：《塑料科技》编辑部
地　址：沈阳经济技术开发区11号街
邮　编：110142
电　话：024-31701057
QQ：2358250268
网　址：https://slkj.publish.founderss.cn
E-mail：slkjmedia@qq.com

2 银行汇款

户　名：沈阳塑科传媒有限公司
开户银行：招商银行股份有限公司沈阳长江支行
账　号：411908263210000

3 全国各地邮局订阅

邮发代号：8-177