

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170266

木质基 g-C₃N₄/TiO₂复合涂层的制备及光催化性能表征

董悦 袁炳楠 姬晓迪 郭明辉
(东北林业大学生物质材料科学与技术教育部重点实验室)

摘要:为改善木材易污染,易霉变的缺点,采用真空浸渍和液相沉淀法,将 g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层负载于木材表面,对木材进行功能化改良,赋予木材光催化自清洁功能。使用扫描电镜、能谱仪、X 射线衍射、傅里叶红外光谱表征样品的表现形貌、相结构等。以罗丹明 B 为目标污染物,利用 UV-VIS 分光光度计测量降解效率,检测负载 g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层的木质基材光催化性能。结果表明: g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层成功负载于木材表面, g-C₃N₄ 与 TiO₂ 相互掺杂有效地提高了两者的光催化活性,负载 g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层的木质基材具有一定的光催化功能。

关键词:木材; g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层; 掺杂; 光催化; 自清洁

中图分类号:O643.3 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2017)12-0112-06

DONG Yue; YUAN Bing-nan; JI Xiao-di; GUO Ming-hui. **Preparation of wood-based g-C₃N₄/TiO₂ composite coating and characterization of its photocatalytic properties.** *Journal of Beijing Forestry University* (2017) **39**(12) 112-117 [Ch, 26 ref.] Key Laboratory of Bio-based Material Science and Technology of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China.

To improve the drawback of wood that is easily polluted and mildewed and impart self-cleaning property to the wood products, we made functional improvements to wood. The g-C₃N₄/TiO₂ composite coating was grown on wood surface *via* vacuum impregnation and liquid phase precipitation method. The g-C₃N₄/TiO₂ composite coating was characterized by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), X-ray diffraction (XRD), and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The photocatalytic activity of g-C₃N₄/TiO₂ composite coated wood was measured by UV-VIS spectrophotometer with Rhodamine B as a target pollutant. The results indicated that g-C₃N₄/TiO₂ composite coating was successfully immobilized on the surface of wood and the doping of g-C₃N₄ and TiO₂ effectively improved its photocatalytic activity. The wood surface is successfully endowed with self-cleaning properties.

Key words wood; g-C₃N₄/TiO₂ composite coating; doping; photocatalysis; self-cleaning

木材是一种可再生循环利用的天然高分子聚合物,具有质轻、高强度、绝热、绝缘、耐冲击、隔音、调湿等优点,在家具、建筑等领域有着广泛的应用^[1]。然而木材存在易变色,易腐朽,易被污染,尺寸稳定性差等天然缺陷,尤其在经受长时间光照雨淋后,木材材质急速下降,严重缩短木材使用寿命^[2-3]。因此,许多科研工作者致力

于木材表面功能性的改良,以期改善木材的易污染,易霉变等缺点^[4-6]。

TiO₂ 具有廉价、无毒、化学稳定性好等优点,其折射率高,分散性好,特别是在抗腐蚀、光催化、抗紫外线粉化等方面都有着优异的性能。已有学者将 TiO₂ 作为光催化剂复合于木材表面,在提高木材传统性能的同时,赋予木材疏水性、抗菌性、光催化性

收稿日期: 2017-07-20 修回日期: 2017-09-22
基金项目: 国家科技计划支撑课题(2017YFD0600204)。
第一作者: 董悦。主要研究方向:木材科学与技术。Email: 1035001496@qq.com 地址:150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 51 号东北林业大学科技楼。
责任作者: 郭明辉,教授,博士生导师。主要研究方向:木材科学与技术。Email: gmh1964@126.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学材料科学与工程学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

能等新功能^[7-9]。但 TiO_2 的低量子效应和较高的电子-空穴对复合率是限制其光催化效率的主要因素。石墨相氮化碳($g-C_3N_4$)由自然界含量丰富的碳、氮两种元素组成,是一种新型非金属半导体光催化剂,由于其热稳定性、化学惰性、较低的禁带宽度(2.7 eV)、石墨层状堆叠结构和 sp^2 杂化 π 共轭电子结构,广泛应用于降解水产氢,光解有机污染等方面^[10-11]。 $g-C_3N_4$ 具有较好的耐磨性和生物兼容性,在膜材料、复合涂层等方面也有极大的应用前景^[10]。但 $g-C_3N_4$ 有一显著缺点,即光生电荷易复合,量子效率低,这影响了它的光催化性能^[12-13]。将 $g-C_3N_4$ 与其他半导体掺杂形成异质结构是提高光催化活性的有效途径。 $g-C_3N_4$ 与 TiO_2 具有十分匹配的能带结构,互相掺杂能有效提高 $g-C_3N_4$ 与 TiO_2 的光催化活性。Tong 等^[14] 仿生制备了层状 $g-C_3N_4$ 与纳米尺寸的 TiO_2 的复合材料,具有优异的光催化性能。Gu 等^[15] 采用溶剂挥发法制备 $g-C_3N_4/TiO_2$ 复合材料,结果表明: $g-C_3N_4$ 、 TiO_2 掺杂可以有效地降低光生电子-空穴对复合率。Chen 等^[16] 将 $Ag/g-C_3N_4$ 包裹于 TiO_2 表面,通过有效的协同作用提高光催化效率。将 $g-C_3N_4$ 、 TiO_2 与木材结合可以有效赋予木制品光催化性,为光降解木材表面有机污染物,初步赋予木材自清洁性能提供可能,但目前罕有将 $g-C_3N_4/TiO_2$ 复合涂层应用于木材的报道。

通过真空浸渍和液相沉淀法在木材表面负载 $g-C_3N_4/TiO_2$ 复合涂层,利用扫描电子显微镜(SEM)、能谱分析(EDS)、X 射线衍射仪(XRD)、傅里叶红外光谱(FT-IR)和紫外可见分光光度计(UV-VIS)等检测设备,分析负载 $g-C_3N_4/TiO_2$ 复合涂层的木材表面的微观形态、晶体结构等,以罗丹明 B(RhB)为目标污染物,通过检测样品在紫外光照射下对 RhB 的降解效果,分析负载 $g-C_3N_4/TiO_2$ 复合涂层的木材的光催化性能,为光照下降解木材表面污染提供可能,初步实现木材自清洁中的重要一步。

1 材料与方法

1.1 材料

2 200 mm(长) × 130 mm(宽) × 25 mm(厚)的落叶松室干锯材,取材自黑龙江省佳木斯市,木材含水率为 11% ~ 14%,无开裂、腐朽、变色等可见缺陷。试验前将锯材加工为 30 mm(长) × 30 mm(宽) × 2 mm(厚)的试件,用蒸馏水超声清洗木材后烘干备用。试验所用三聚氰胺、无水乙醇、盐酸、

RhB、氟钛酸铵、尿素均为分析纯(购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 $g-C_3N_4$ 的制备及质子化处理

称取一定量三聚氰胺加入有盖的石英坩埚中,在管式炉中以 5 °C/min 升温至 550 °C,保持 4 h,自然冷却至室温,研磨,得到 $g-C_3N_4$ ^[12];取适量 $g-C_3N_4$ 于 50 mL 18.5% 的盐酸中,室温搅拌 4 h,将悬浊液分散于 500 mL 去离子水中,沉降 12 h,离心取沉淀,用去离子水清洗至中性,烘干。

1.2.2 $g-C_3N_4$ /木材的制备

将处理过的 $g-C_3N_4$ 分散于乙醇溶液中,超声处理 40 min,将 NaOH 活化处理过的木材试件置于其中,真空浸渍 6 h。蒸馏水冲洗后,依次用无水乙醇和蒸馏水超声清洗 3 次,烘干。

1.2.3 TiO_2 /木材与 $g-C_3N_4/TiO_2$ /木材的制备

称量一定量的尿素和氟钛酸铵,配制 1.00 mol/L 和 0.04 mol/L 的混合溶液。将 $g-C_3N_4$ /木材试件和木材试件分别放入混合溶液中并在搅拌的条件下迅速升温到 90 °C,保持 2 h。自然冷却至室温,取出木材试件,用去离子水和乙醇分别超声清洗 3 次,烘干。

1.3 性能表征

采用 Quanta200 型场发射扫描电子显微镜(荷兰 FEI 公司)观察木材样品表面微观形貌,并用能谱仪(荷兰 FEI 公司)对木材表面元素进行分析。

利用 D8Advance 型 X 射线衍射仪(德国 Bruker 公司)进行物相分析,扫描角度范围是 10° ~ 80°,步距 0.02°,扫描速度 4°/min。

选用 Nicolet6700 FT-IR 傅里叶变换红外光谱仪进行化学结构分析,扫描范围 525 ~ 1 750 cm^{-1} ,光谱分辨率为 5 cm^{-1} 。

1.4 光催化降解罗丹明 B 试验

配制 2 mg/L 的 RhB 溶液,量取一定体积 RhB 溶液置于 50 mL 玻璃烧杯中。采用光化学反应仪(上海那艾)进行光催化试验,并每隔固定时间间隔取样待测,使用紫外可见分光光度计(UV-VIS, TU-1901,中国北京)检测光催化降解效果。

2 结果与分析

2.1 SEM 和 EDS 分析

图 1 是素材与负载 $g-C_3N_4/TiO_2$ 复合涂层木材的 SEM 图。图 1a 是素材的表观形貌,可以明显地看到素材表面光滑平整,纹孔边缘清晰可见。如图 2a 所示,素材表面含有大量的 C、O 元素,Au 元素来源于电镜观察所用的导电涂层。图 1b 是负载了 $g-C_3N_4/TiO_2$ 复合涂层的木材(以下简称 $g-C_3N_4/$

TiO₂/木材),从图中可以明显地看到木材表面生长了 g-C₃N₄ 和 TiO₂,直径分别约为 200 nm 和 1 μm。负载 g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层后的木材表面能谱如图 2b 所示,能谱中增加了 N、Ti 和 F 元素,F 元素来源

于 TiO₂ 前驱体氟钛酸铵。g-C₃N₄/TiO₂/木材表面因为负载了 g-C₃N₄ 和 TiO₂,增加了 N、Ti 元素。结果表明:木材表面极可能负载上了 g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层。

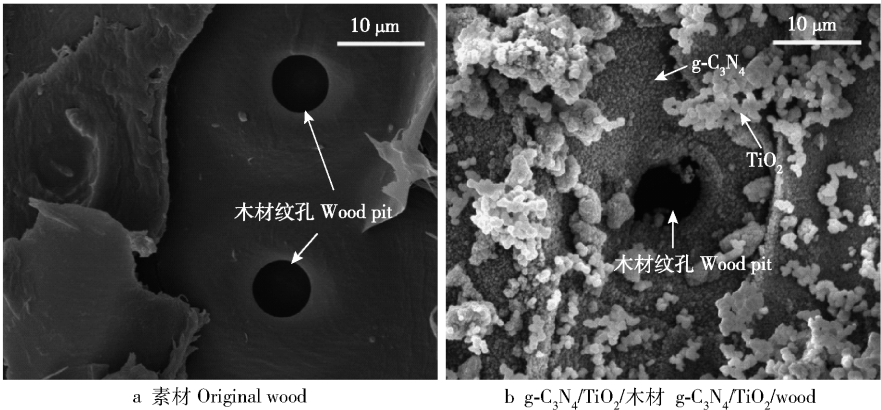


图 1 木材处理前后 SEM 形貌

Fig. 1 SEM photos of wood samples before and after treating

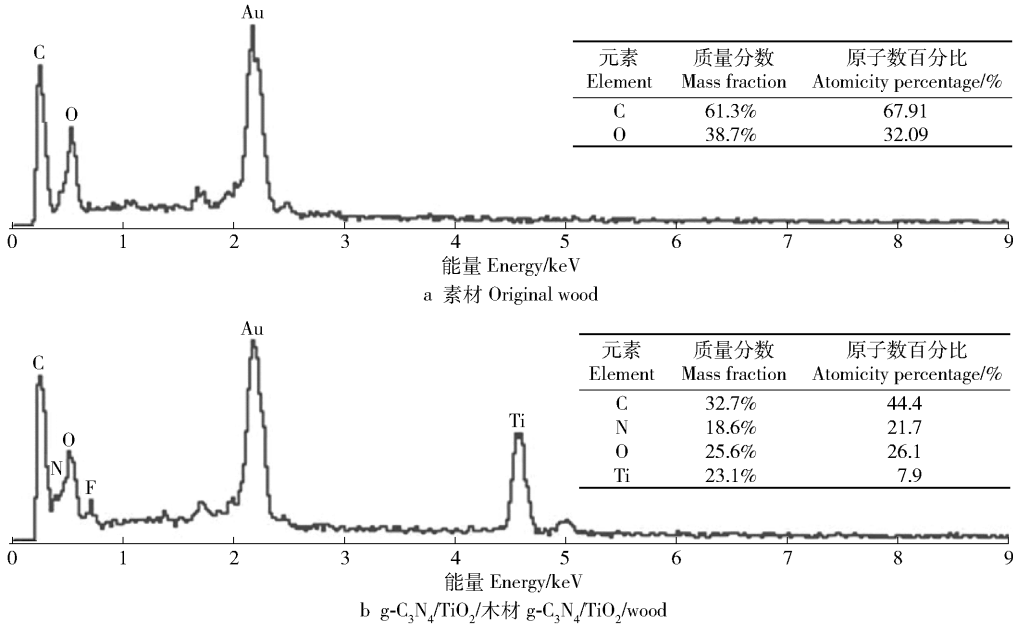


图 2 木材处理前后元素能谱图

Fig. 2 EDS spectra of wood samples before and after treating

2.2 XRD 分析

图 3 是素材与 g-C₃N₄/TiO₂/木材的 XRD 谱图。图 3a 中,14. 8°和 22. 5°处的衍射峰对应了木材中纤维素的典型晶面(001)和(002)^[17]。在图 3b 中,除纤维素典型衍生晶面外,在 2θ 为 13. 1°和 27. 4°处的衍射峰分别对应于 g-C₃N₄ 的(100)、(002) 结晶衍射面,其中(100)面对应 g-C₃N₄ 的 3-s-三嗪结构单元,(002)是芳香结构层间堆积特征峰^[12];在 2θ 为 25. 02°、37. 7°、47. 32°、53. 62°、62. 26°、69. 12°、74. 42°处的衍射峰分别对应于锐钛矿型 TiO₂ 的典型晶面(101)、(004)、(200)、(211)、(204)、(116)和(215),此结果与锐钛矿型 TiO₂ 的 PDF 卡片(JCPDS

file No. 21-1272)吻合^[18]。除此之外,没有其他杂质峰出现。结果表明:液相沉淀制备出了锐钛矿型 TiO₂,并且经真空浸渍和液相沉淀处理后,木质基材表面负载了 g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层。

2.3 FT-IR 分析

图 4 是素材、g-C₃N₄/木材和 g-C₃N₄/TiO₂/木材的红外光谱图。素材中,可以在 1 423、1 371、893 cm⁻¹处观察到纤维素的特征峰,在 1 730 cm⁻¹处有半纤维素的特征峰,在 1 596、1 509 cm⁻¹处有木质素特征峰^[19]。与素材相比,g-C₃N₄/木材的 FT-IR 谱图在 1 200 ~ 1 650 cm⁻¹之间和 808 cm⁻¹处出现了一些新峰,其中 1 200 ~ 1 650 cm⁻¹之间的峰(1 236、

1 316、1 407、1 635 cm^{-1} 等)是 C—N 与 C=N 杂环的典型伸缩振动峰(见图 5)^[14],808 cm^{-1} 处是三嗪芳香环单元结构的特征峰(见图 5)^[20],这些特征峰的出现说明成功地合成了 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ^[20]。此外,在 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /木材的 FT-IR 谱图中,原素材中纤维素、半纤维素和木质素的特征峰或者变弱,或者消失,这是因为新合成的 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 覆盖在了原木材表面,使得原木材的特征峰强度大幅度减弱。因此,结合前人的研究和 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /木材的 FT-IR 谱图,可以推测出在木材表面成功地合成了 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 。在 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材的 FT-IR 谱图中仍然可以观察到 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的特征峰,但

是与 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /木材的 FT-IR 谱图相比,1 408 cm^{-1} 处原 C—N 与 C=N 杂环的典型伸缩振动峰变宽变强,这可能是受到邻近 1 422 cm^{-1} 处峰的影响,两峰相互重叠影响所致,而 1 422 cm^{-1} 处是典型的 TiO_2 伸缩振动峰^[21];同时在 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材的 FT-IR 谱图的 590 cm^{-1} 处新出现了一个峰,对应的是 Ti—O 键^[14]。因此,这两处峰的变化说明成功地合成了 TiO_2 ,即制备出了 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材复合材料。同时,该谱图中仍然可以看到 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的特征峰,说明新合成的 TiO_2 并未完全覆盖住 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 。

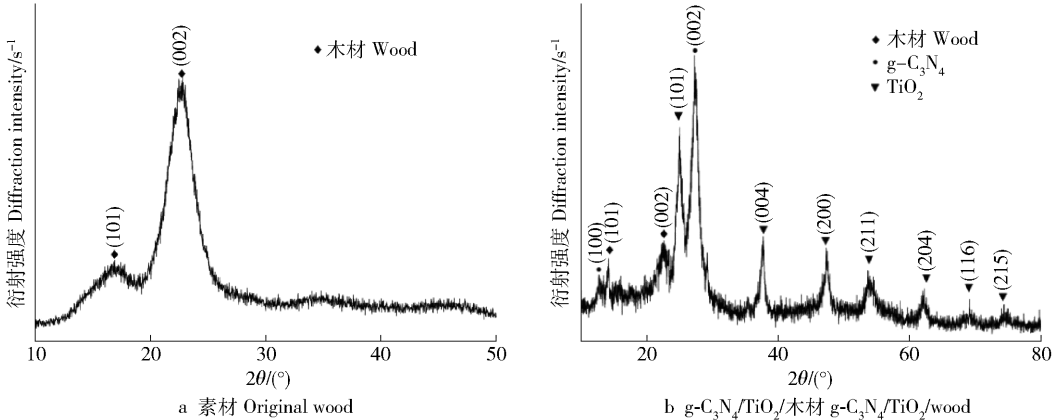


图 3 素材与 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材的 XRD 谱图

Fig. 3 XRD spectra of the original wood and $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2/\text{Wood}$

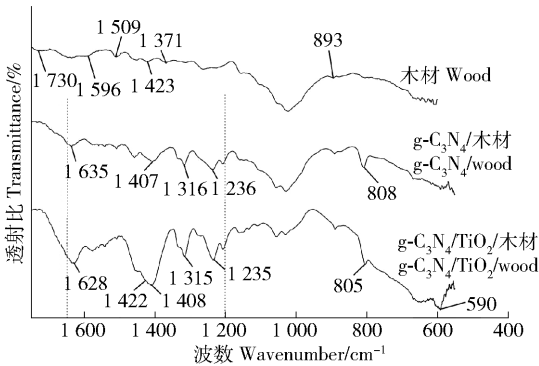


图 4 木材处理前后的红外谱图

Fig. 4 FT-IR spectra of wood samples before and after treating

2.4 紫外光降解罗丹明 B 试验

在光照的条件下, $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ 可将 RhB 降解为水和二氧化碳^[22],为表征 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材的光催化性能,选用 RhB 为目标污染物进行光降解试验。图 6 描述了在紫外光照射下,木材样品对 RhB 的降解效果。光照条件下, RhB 溶液质量浓度变化大小顺序是:素材 < TiO_2 /木材 < $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /木材 < $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材。其中,放入素材的 RhB 溶液质量浓度变化最小,460 min 时浓度变化率为 43%。这是由于木材是多孔结构,具有一定的吸附性,可以吸

附部分 RhB; $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材对 RhB 的降解率最高,460 min 时降解率达 95.5%,表明 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ 复合涂层成功赋予了木材光降解能力。图 7 为 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材、 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /木材、 TiO_2 /木材光降解 RhB 动力学曲线,三者的反应动力学常数分别为 0.006 4、0.005 1、0.004 3 min^{-1} , $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材的反应动力学常数分别是 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /木材、 TiO_2 /木材的 1.25 倍和 1.52 倍,说明 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 与 TiO_2 互相掺杂有效地提高了两者的光催化活性。在已有文献的研究中^[22-24],光照下 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ 均在 150 min 内完全降解 RhB,其中 TiO_2 颗粒均达到纳米级别。但由于粉末可以均匀地分散在溶液中,与 RhB 的接触面积远大于本试验中 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材与 RhB 的接触面积,可比性较低。Fan 等^[25]制备经 TiO_2 (40 nm)改性的棉织品,紫外光下降解 RhB,约 300 min 降解完全,光催化效果略好于本试验。结合 SEM 结果分析,本研究中 TiO_2 颗粒直径约为 1 μm ,颗粒尺寸较大, TiO_2 本身光催化效果较低,形成异质结构少,导致 $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ /木材光催化性能较低。结果表明: $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ 复合涂层成功地赋予了木材光催化活性,且 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 与 TiO_2 互相掺杂有效地提高了两者的光催化活性。

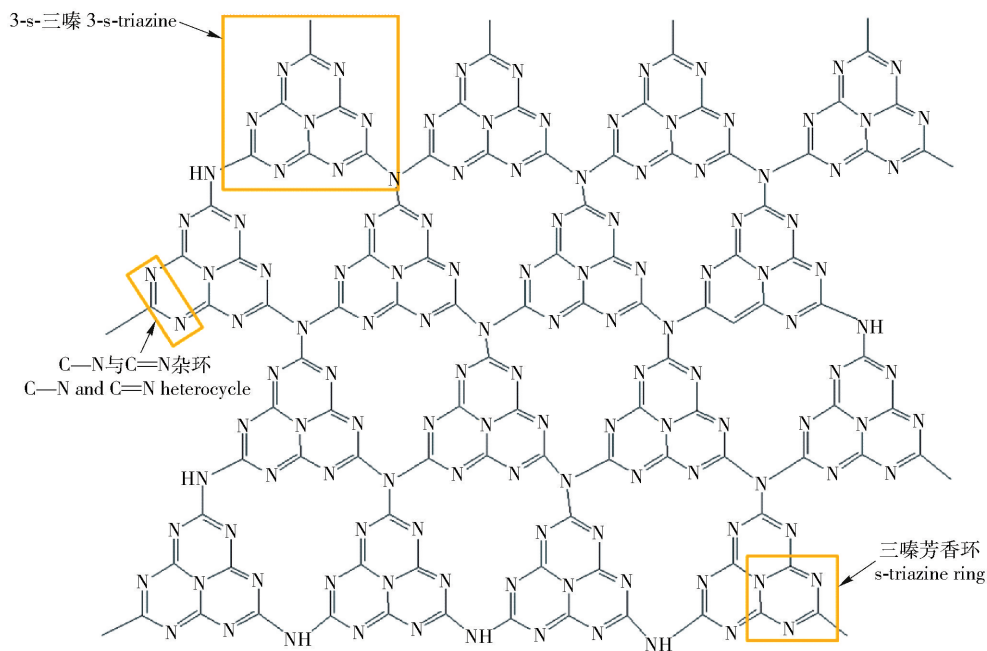
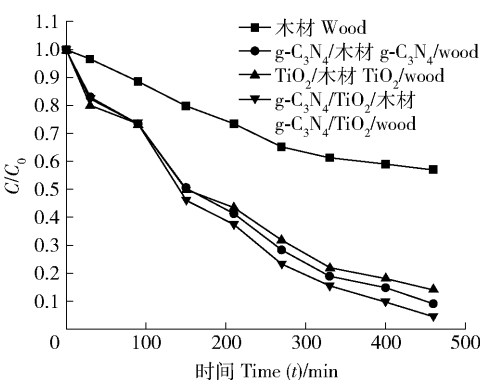


图5 g-C₃N₄ 结构图
Fig.5 Structure of g-C₃N₄



C_0 为 RhB 溶液的起始质量浓度,mg/L; C 为 RhB 溶液取样时的质量浓度,mg/L。 C_0 is the initial concentration,mg/L. C is the concentration at the time of sampling,mg/L.

图6 木材样品对 RhB 的光降解曲线

Fig.6 Photodegradation curves of Rhodamine B over wood samples

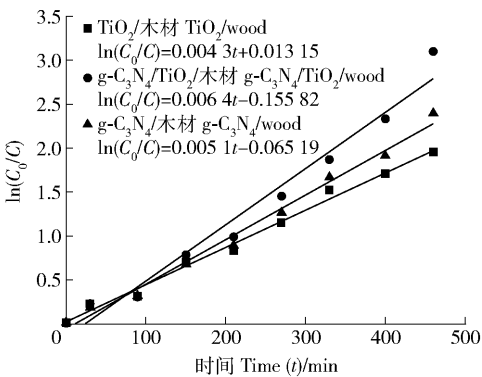


图7 光降解 RhB 的动力学曲线

Fig.7 Photodegradation kinetics of Rhodamine B over wood samples

g-C₃N₄ 与 TiO₂ 有匹配的能带结构^[26],在紫外

光的照射下,g-C₃N₄ 中由价带跃迁到导带的光生电子迁移到 TiO₂ 的导带中,而 TiO₂ 价带上留下的空穴迁移到 g-C₃N₄ 的价带上,这有效地降低了光生电子-空穴对的复合率,提高了两者单独使用时的光催化效率,赋予了木材表面良好的光催化性能。

3 结 论

采用真空浸渍法和液相沉淀法在木材表面构建 g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层,得到了具有光催化性能的木质基光催化材料。性能测试结果表明:负载g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层的木质基材的光催化性能明显优于 g-C₃N₄ 或 TiO₂ 单一涂层的木质基材。在本试验中,TiO₂ 颗粒较大且负载不够均匀,这很大程度上限制了 g-C₃N₄/TiO₂ 复合涂层光催化活性的提高,在之后研究中,将进一步优化试验方案,以赋予木质基材更优的光催化、自清洁性能。

参 考 文 献

[1] 刘一星,赵广杰. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社,2012.
LIU Y X,ZHAO G J. Wood science[M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2012.

[2] LIU Y, SHAO L, GAO J, et al. Surface photo-discoloration and degradation of dyed wood veneer exposed to different wavelengths of artificial light [J]. Applied Surface Science, 2015, 331: 353-361.

[3] 李坚,韩士杰. 木质材料的表面劣化与木材保护的研究[J]. 东北林业大学学报,1989,17(2):48-56.
LI J, HAN S J. Surface deterioration and protection of lignocellulosic material [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1989,17(2):48-56.

[4] 张国正,于海鹏,刘一星. 木材表面组装 PEI/纳米 ZnO₂/FAS 复合薄膜及其性能[J]. 林业工程学报,2017,2(3):83-89.
ZHANG G Z, YU H P, LIU Y X. Performances of PEI/nano-ZnO₂/FAS composite coatings on wood surface *via* layer-by-layer assemble method [J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(3):83-89.

[5] HUI B, LI J. Low-temperature synthesis of hierarchical flower-like hexagonal molybdenum trioxide films on wood surfaces and their light-driven molecular responses[J]. Journal of Materials Science, 2016,51(24):10926-10934.

[6] HUI B, LI Y, HUANG Q, et al. Fabrication of smart coatings based on wood substrates with photoresponsive behavior and hydrophobic performance [J]. Materials & Design, 2015, 84: 277-284.

[7] GAO L, GAN W, XIAO S, et al. A robust superhydrophobic antibacterial Ag-TiO₂, composite film immobilized on wood substrate for photodegradation of phenol under visible-light illumination [J]. Ceramics International, 2016, 42 (2): 2170-2179.

[8] HUI B, LI G, HAN G, et al. Fabrication of magnetic response composite based on wood veneers by a simple *in situ* synthesis method [J]. Wood Science & Technology, 2015, 49 (4): 755-767.

[9] 高鹤,梁大鑫,李坚,等. 纳米 TiO₂-ZnO 二元负载木材的制备及性质[J]. 高等学校化学学报,2016,37(6):1075-1081.
GAO H, LIANG D X, LI J, et al. Preparation and properties of nano TiO₂-ZnO binary collaborative wood[J]. Chemical Journal of Chinese Universities,2016,37(6):1075-1081.

[10] LI Y, WU S, HUANG L, et al. Synthesis of carbon-doped g-C₃N₄, composites with enhanced visible-light photocatalytic activity[J]. Materials Letters,2014,137:281-284.

[11] WEI C, CHENG W, TAO Y, et al. Fast photoelectron transfer in (Cring)-C₃N₄ plane heterostructural nanosheets for overall water splitting[J]. Journal of the American Chemical Society,2017,139(8):3021.

[12] 袁炳楠,董悦,郭明辉. 木材表面 g-C₃N₄ 的固定及其光降解性能表征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2017,41:1-6.
YUAN B N, DONG Y, GUO M H. Immobilized of g-C₃N₄ on wood surface and characterization of its photodegradation property [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2017,41:1-6.

[13] DANTE R C, MARTIN-RAMOS P, CORREA-GUIMARAES A, et al. Synthesis of graphitic carbon nitride by reaction of melamine and uric acid[J]. Materials Chemistry & Physics,2011,130(3):1094-1102.

[14] TONG Z, DONG Y, XIAO T, et al. Biomimetic fabrication of g-C₃N₄/TiO₂, nanosheets with enhanced photocatalytic activity toward organic pollutant degradation [J]. Chemical Engineering Journal,2015,260:117-125.

[15] GU L, WANG J, ZOU Z, et al. Graphitic-C₃N₄-hybridized TiO₂ nanosheets with reactive {001} facets to enhance the UV- and visible-light photocatalytic activity [J]. Journal of Hazardous Materials,2014,268(6):216.

[16] CHEN Y, HUANG W, HE D, et al. Construction of heterostructured g-C₃N₄/Ag/TiO₂ microspheres with enhanced photocatalysis performance under visible-light irradiation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(16):14405.

[17] ANDERSSON S, SERIMAA R, PAAKKARI T, et al. Crystallinity of wood and the size of cellulose crystallites in Norway spruce (*Picea abies*) [J]. Journal of Wood Science, 2003, 49 (6): 531-537.

[18] WANG S, QIAN H, HU Y, et al. Facile one-pot synthesis of uniform TiO₂-Ag hybrid hollow spheres with enhanced photocatalytic activity [J]. Dalton Transactions, 2013, 42 (4): 1122-1128.

[19] JI X, GUO M. Facile surface hydrophobization of medium-density fiberboard (MDF) by silver deposition[J]. Holzforschung,2017,71(4):337-340.

[20] SHI L, LIANG L, WANG F, et al. Tetraethylorthosilicate induced preparation of mesoporous graphitic carbon nitride with improved visible light photocatalytic activity [J]. Catalysis Communications,2015,59:131-135.

[21] KIWI J, NADTOCHENKO V. Evidence for the mechanism of photocatalytic degradation of the bacterial wall membrane at the TiO₂ interface by ATR-FTIR and laser kinetic spectroscopy[J]. Langmuir,2005,21(10):4631-4641.

[22] LI K, HUANG Z, ZENG X, et al. Synergetic effect of Ti³⁺ and oxygen doping on enhancing photoelectrochemical and photocatalytic properties of TiO₂/g-C₃N₄ heterojunctions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2017,9(13):11577.

[23] BOONPRAKOB N, WETCHAKUN N, PHANICHPHANT S, et al. Enhanced visible-light photocatalytic activity of g-C₃N₄/TiO₂ films[J]. Journal of Colloid & Interface Science,2014,417(3):402.

[24] HAO R, WANG G, JIANG C, et al. *In situ* hydrothermal synthesis of g-C₃N₄/TiO₂, heterojunction photocatalysts with high specific surface area for Rhodamine B degradation [J]. Applied Surface Science,2017,411:400-410.

[25] FAN T, HU R, ZHAO Z, et al. Surface micro-dissolve method of imparting self-cleaning property to cotton fabrics in NaOH/urea aqueous solution [J]. Applied Surface Science, 2016, 400: 524-529.

[26] MUNOZBATISTA M J, KUBACKA A, FERNANDEZGARCIA M. Effect of g-C₃N₄ loading on TiO₂-based photocatalysts: UV and visible degradation of toluene [J]. Catalysis Science & Technology,2014,4(7):2006-2015.

(责任编辑 吴娟
责任编辑委 赵广杰)