

生物复合包装材料专题

## 化学活性胶合界面增强生物质胶黏剂的木材胶合性能

刘同达<sup>1</sup>, 杜官本<sup>1</sup>, 黄腾华<sup>2</sup>, 潘礼成<sup>3</sup>, 杨龙<sup>1\*</sup>

(1.西南林业大学, 云南省木材胶黏剂及胶合制品重点实验室/生物质材料国际联合研究中心, 昆明 650224; 2.广西壮族自治区林业科学研究院, 南宁 530002; 3.崇左广林迪芬新材料科技有限公司, 广西 崇左 532203)

**摘要:** **目的** 开发生物质胶黏剂并将其应用于木质复合材料的制备, 并深入探究化学活性胶合界面构建对胶合性能的影响。**方法** 对单宁进行氧化处理, 同时对纤维素进行氨基功能化改造, 以二者为原料设计单宁-纤维素生物质胶黏剂, 并通过 3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷对天然木材表面接枝, 构建富含环氧基团的活性木材表面。在热压过程中, 活化木材表面上的环氧基团与胶黏剂中的—NH<sub>2</sub>基团发生反应, 从而构建化学活性胶合界面。通过 DSC、DMA 以及力学性能等测试, 深入探究了化学活性胶合界面构建对胶合性能的影响。**结果** 成功构建了超强、耐水型全生物质的木材胶合界面, 胶合试件的干强度、热水强度和沸水强度分别为 3.27、2.15 和 1.85 MPa, 热水强度和沸水强度实现了从 0 到 2.15 MPa 和从 0 到 1.85 MPa 的显著提升。**结论** 胶黏剂与木材表面的相互作用, 即胶黏剂与化学活性木材表面之间形成的化学胶合界面, 显著提升了胶合产品的胶合强度和耐水性能。

**关键词:** 活化木材表面; 生物质基胶黏剂; 化学胶合界面; 耐水性

中图分类号: TB32; TB33; TB48 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)23-0001-09  
DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.23.001

## Wood Bonding Properties of Biomass Adhesives Enhanced by Chemically Active Bonding Interface

LIU Tongda<sup>1</sup>, DU Guanben<sup>1</sup>, HUANG Tenghua<sup>2</sup>, PAN Licheng<sup>3</sup>, YANG Long<sup>1\*</sup>

(1. Yunnan Province Key Lab of Wood Adhesives and Glued Products/International Joint Research Center for Biomass Materials, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530002, China; 3. Chongzuo Guanglin Difen New Material Technology Co., Ltd., Guangxi Chongzuo 532203, China)

**ABSTRACT:** The work aims to develop a bio-based adhesive, apply it to the preparation of wood-based composites and further investigate the effect of chemical activated bonding interface construction on the bonding properties. Tannin was oxidized and cellulose was modified with amino group, and a tannin-cellulose biomass-based adhesive was designed, and an activated wood surface rich in epoxy groups was constructed by grafting 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane to the natural wood surface. A chemical activated bonding interface was constructed by reacting the epoxy groups on the activated wood surface with the —NH<sub>2</sub> groups in the adhesive during the hot-pressing process. The effect of chemical activated bonding interface construction on the bonding properties was explored by DSC, DMA, and mechanical properties tests. A ultrastrong, water-resistant, all-biomass wood bonding interface was constructed, and the dry, hot, and boiling water bonding strengths of the bonding specimens were 3.27, 2.15, and 1.85 MPa, respectively. The wet

收稿日期: 2024-10-23

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2201500); 云南省重大科技专项 (202402AE090027)

\*通信作者

strength increased significantly from 0 MPa to 2.15 MPa and 1.85 MPa. The interaction between the adhesive and the wood surface, i.e., the formation of a chemical bonding interface between the adhesive and the chemical activated wood surface, significantly enhances the bonding properties and water resistance of the bonding products.

**KEY WORDS:** activated wood surface; biomass-based adhesive; chemical bonding interface; water resistance

在当今全球化的商业环境中,包装材料的选择对于产品的保护、运输以及包装行业的可持续发展起着至关重要的作用。传统的包装材料,如塑料、泡沫等虽然在一定程度上满足了产品的包装需求,却也引发了一系列严峻的环境问题<sup>[1-2]</sup>:塑料包装难以降解,会对生态环境造成长期污染<sup>[3-5]</sup>;泡沫包装在生产过程中会消耗大量的能源,且废弃后处理困难<sup>[6-7]</sup>。此外,部分金属包装材料成本较高、重量较大,增加了运输成本<sup>[8-9]</sup>。随着国家可持续发展要求以及人们环境保护意识的不断提高,开发既具备优良性能又符合可持续发展理念的包装材料成为大势所趋。

木材是一种极为重要的自然资源,其用途极为广泛。木材不仅具有较高的强度、出色的耐久性与抗震性,而且具备良好的装饰性与可塑性,因而广泛应用于建筑、家具、造纸、音乐器材等诸多领域,木质复合材料也是优良的包装材料<sup>[10-12]</sup>。木质复合材料将木材的天然特性与现代材料科学的先进技术相结合,展现出诸多令人瞩目的特点<sup>[13]</sup>。采用绿色可持续的生物基胶黏剂以及先进的复合手段制备的木质复合材料,在实现超强的耐水性能的同时,也成为符合当下可持续发展大趋势的优质材料,拥有广阔的应用前景<sup>[14-16]</sup>,可以应用于食品、电子产品、医疗器械、工艺品等众多领域的产品包装。木质复合材料良好的强度和缓冲性能

能够有效保护产品在运输和储存过程中免受损坏,其天然的外观和质感也为产品增添了一份绿色环保的属性。然而,制备绿色可持续型木质复合材料所用的生物质胶黏剂仍存在一些问题,许多生物质材料溶解性不佳,由生物质胶黏剂制备的复合材料的胶合强度和耐水性较差<sup>[17-20]</sup>。因此,提升由生物质胶黏剂制备的木质复合材料的胶合性能显得尤为重要。

胶黏剂是通过自身的内聚作用以及与基材之间的复杂相互作用,使基材粘接在一起,从而达到胶合效果<sup>[21]</sup>。研究者们对胶黏剂的研究众多,然而对胶黏剂与基材之间相互作用的研究相对较少。如图1所示,本文以单宁和功能纤维素为原料,通过酚胺化学反应设计出单宁-纤维素全生物质胶黏剂。此外,将3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷接枝到天然木材表面(NWS),构建出富含环氧基团的环氧功能化木材表面(EFWS),增强了木材基材与胶黏剂之间的化学反应活性。这有助于在热压过程中形成牢固的化学键,进而产生强大的胶接力。木质复合材料分别使用EFWS和NWS进行制备。对胶合性能的分析表明,胶黏剂与基材之间的相互作用,即胶黏剂与化学活性木材表面之间形成的化学胶合界面,显著提升了产品的胶合性能。本项工作所设计和制备的无醛添加、防潮、防水的木质复合材料在绿色可持续包装材料领域具有较大的推广应用前景。

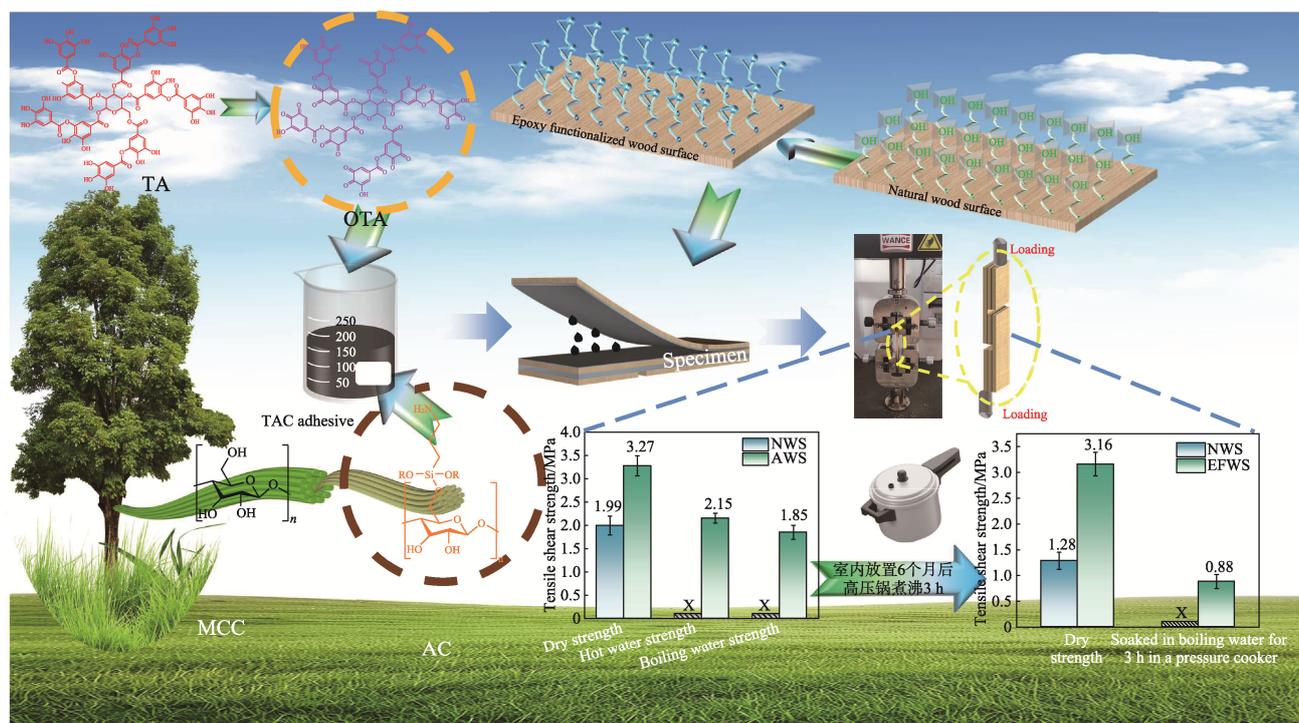


图1 制备单宁-纤维素胶黏剂及环氧木材表面示意图

Fig.1 Schematic diagram for preparation of tannin-cellulose based adhesive and construction of epoxy functionalized wood surface

## 1 实验

### 1.1 化学品及材料

单宁酸 (TA, 试剂级)、微晶纤维素 (MCC, 试剂级)、过氧化氢 ( $H_2O_2$ , 30%, 试剂级)、(3-氨丙基)三乙氧基硅烷 (APTES, 试剂级)、3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷 (试剂级)、氢氧化钠 (NaOH, 试剂级), 均购买于上海阿达玛斯试剂有限公司。使用的去离子水由超纯水净化装置 (ELGA Lab Water) 制备。木材使用速生杨木, 用于制备胶合试件的杨木单板购买于中国山东。

### 1.2 样品的制备与测试

#### 1.2.1 胺化纤维素 (AC) 的制备

取 16.2 g MCC 分散于 30 g 去离子水中, 然后加入 18.5 g APTES, 在室温条件下搅拌 24 h。反应结束后过滤, 并用去离子水反复冲洗, 以去除多余试剂。最后经过冷冻干燥, 得到胺化纤维素 (AC) 粉末。

#### 1.2.2 氧化单宁酸 (OTA) 的制备

取 10 g TA 分散到 23.3 g 去离子水中,  $80\text{ }^\circ\text{C}$  加热搅拌 10 min, 直至完全溶解, 从而得到 30% TA 水溶液。随后, 加入 2 ml  $H_2O_2$  溶液, 在室温条件下搅拌 1 h, 以诱导酚羟基氧化为醌基, 进而形成氧化单宁酸 (OTA)。

#### 1.2.3 单宁-纤维素 (TAC) 胶黏剂的制备

将 AC 分散于 8% NaOH 水溶液中, 配制成固含量为 20% 的黏稠液体, 在冰箱中冷冻 2 h 后取出溶解并搅拌均匀。随后使用 OTA 与冻融后的 AC 进行混合, 分别按照 OTA 和 AC 的质量比为 1:1、1:2、1:3 进行配制 (固含量 20%), 根据需要添加去离子水。混合液体在室温条件下搅拌 3 h, 颜色由棕色变为黑色且更加黏稠, 即可制备 TAC 胶黏剂。

### 1.2.4 环氧功能化木材表面 (EFWS) 的制备

在 NWS 上喷洒少量水, 使木材表面处于润湿状态, 然后将 3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷喷涂在润湿后的 NWS (喷涂量为  $40\text{ g/m}^2$ ), 待自然风干后, 便得到环氧功能化木材表面 (EFWS)。

### 1.2.5 胶合试件的制备与性能测试

将胶黏剂均匀涂抹在 EFWS, 施胶量为  $180\text{ g/m}^2$ 。将涂有胶黏剂的杨木单板按照纹理方向交叉层叠, 形成 3 层结构。设定热压时间 6 min、压力 1.5 MPa, 且试件的胶合区域始终保持为  $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 。热压后的产品被裁剪为胶合试件 (尺寸为  $100\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ ), 胶合强度的测定按照《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》(GB/T 17657—2022) 执行, 使用力学试验机 (ETM 10B, 中国深圳) 对胶合试件进行干强度、 $63\text{ }^\circ\text{C}$  热水强度以及沸水胶合强度测试, 拉伸速度为  $3\text{ mm/min}$ , 每个试样均在 30 s 内被拉伸断裂。

## 2 结果与讨论

### 2.1 AC 与 TAC 的表征

AC 由 MCC 与 APTES 通过一步法反应制得, 这是一种简单有效的接枝方法。MCC 和 AC 的傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 结果如图 2a 所示。在 MCC 的光谱中,  $3\ 200\sim 3\ 600\text{ cm}^{-1}$  处的宽信号峰值归因于 O—H 伸缩振动;  $2\ 904$ 、 $1\ 651$  和  $1\ 055\text{ cm}^{-1}$  处的峰值分别归因于 C—H 伸缩振动、O—H 弯曲振动和  $\text{CH}_2\text{—O—CH}_2$  伸缩振动<sup>[22]</sup>, 与 MCC 在  $3\ 345\text{ cm}^{-1}$  附近的峰值相比, AC 中 O—H 和 N—H 的伸缩振动在  $3\ 360\text{ cm}^{-1}$  附近出现了一个更宽的峰;  $1\ 644\text{ cm}^{-1}$  和  $1\ 205\text{ cm}^{-1}$  处的振动峰分别归因于 N—H 的弯曲振动和 C—N 的伸缩振动; 由于 APTES 与 MCC 中 C6 上的—OH 反应转化为— $\text{NH}_2$ , 因此  $1\ 200\sim 1\ 500\text{ cm}^{-1}$  区域的振动减弱。

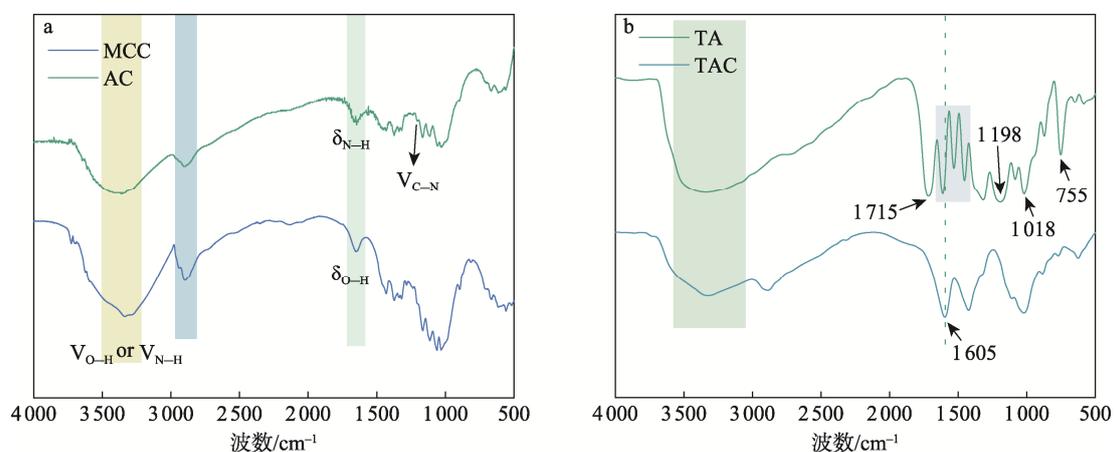


图 2 (a) MCC 和 AC 的 FT-IR; (b) TA 和 TAC 胶黏剂的 FT-IR  
Fig.2 FT-IR spectra of MCC and AC (a) and FT-IR spectra of TA and TAC adhesive (b)

TAC由TA与AC共混反应制得,TA及TAC的FT-IR结果如图2b所示。在TA的光谱中,3 320  $\text{cm}^{-1}$ 附近及1 198  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰分别与酚羟基—OH和C—O的拉伸振动有关;对于芳香环上的红外特征峰,其范围在3 000~3 100  $\text{cm}^{-1}$ ,在1 018  $\text{cm}^{-1}$ 和755  $\text{cm}^{-1}$ 处的振动峰分别归因于芳香氢的拉伸振动和弯曲振动,1 715  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰对应芳香酯中C=O的拉伸振动;1 421~1 650  $\text{cm}^{-1}$ 范围内的峰与芳香族环骨架中C=C的拉伸振动有关<sup>[23]</sup>。

形成了TAC交联网络后,除了TA和AC的骨架特征官能团外,谱图还呈现了一些差异。首先,在3 000~3 500  $\text{cm}^{-1}$ 范围内,峰值变宽,可能是由于—NH<sub>2</sub>与—OH的特征峰重叠形成的;其次,在1 605  $\text{cm}^{-1}$ 处的振动峰归因于C=N的伸缩振动,这证明了席夫碱反应的发生。

通过X射线光电子能谱(XPS)进一步对TA和TAC进行分析,如图3a所示,与TA的XPS光谱相比,TAC的XPS光谱中出现了一个新的元素信号峰,即N 1s峰。由于TAC中加入了AC的成分,因此引入N元素,出现了新的N 1s信号峰。TA的高分辨C 1s光谱如图3b所示,在284.6、286.3、288.7和291.8 eV有4个峰,分别对应于C—C/C=C、C—O、O—C=O以及 $\pi$ - $\pi^*$ 跃迁<sup>[24]</sup>,其中C=O的存在是TA氧化造成的。与TA相比,TAC的C 1s光谱中,在285.5 eV的新峰归因于C—N(图3d),287.1 eV(图3d)和398.9 eV(图3f)处的新峰归因于C=N,C=N的出

现说明TA与AC的共价反应成功。相比TA的谱图,TAC的谱图中C—C增加、C—O减少,这归因于TAC交联网络中的席夫碱反应<sup>[23]</sup>,TAC胶黏剂的交联网络以及化学胶合界面示意图如图4所示。

## 2.2 EFWS的表征

通过XPS对NWS和EFWS进行分析,元素形态分布结果如图5所示。NWS和EFWS的XPS如图5a所示,EFWS谱中出现了Si 2p的信号峰,这是由于3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷对NWS进行环氧基团接枝改性的同时,引入了Si元素。EFWS的C 1s高分辨光谱中283.55 eV(图5d)和Si 2p高分辨谱中100.9 eV(图5f)都归因于Si—C,O 1s高分辨光谱中533.3 eV(图5e)和Si 2p高分辨谱中102.2 eV(图5f)都归因于Si—O<sup>[25]</sup>。上述实验结果表明,3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷在NWS上成功接枝,即EFWS的成功构建。

## 2.3 胶合性能和耐水性分析

胶合试件的胶合强度是反映其胶合性能最为直观的数据。通过改变制备胶黏剂或基材的条件,如热压温度、胶黏剂的配比等,从数据反馈中得出影响胶合性能的因素并进行优化。从而探索出最佳的胶合条件,制备出最优的胶合产品。为减小误差,每个胶合强度进行测试时设置4组、每组4个试件,从而得到16个平行胶合数据,最后计算平均值。

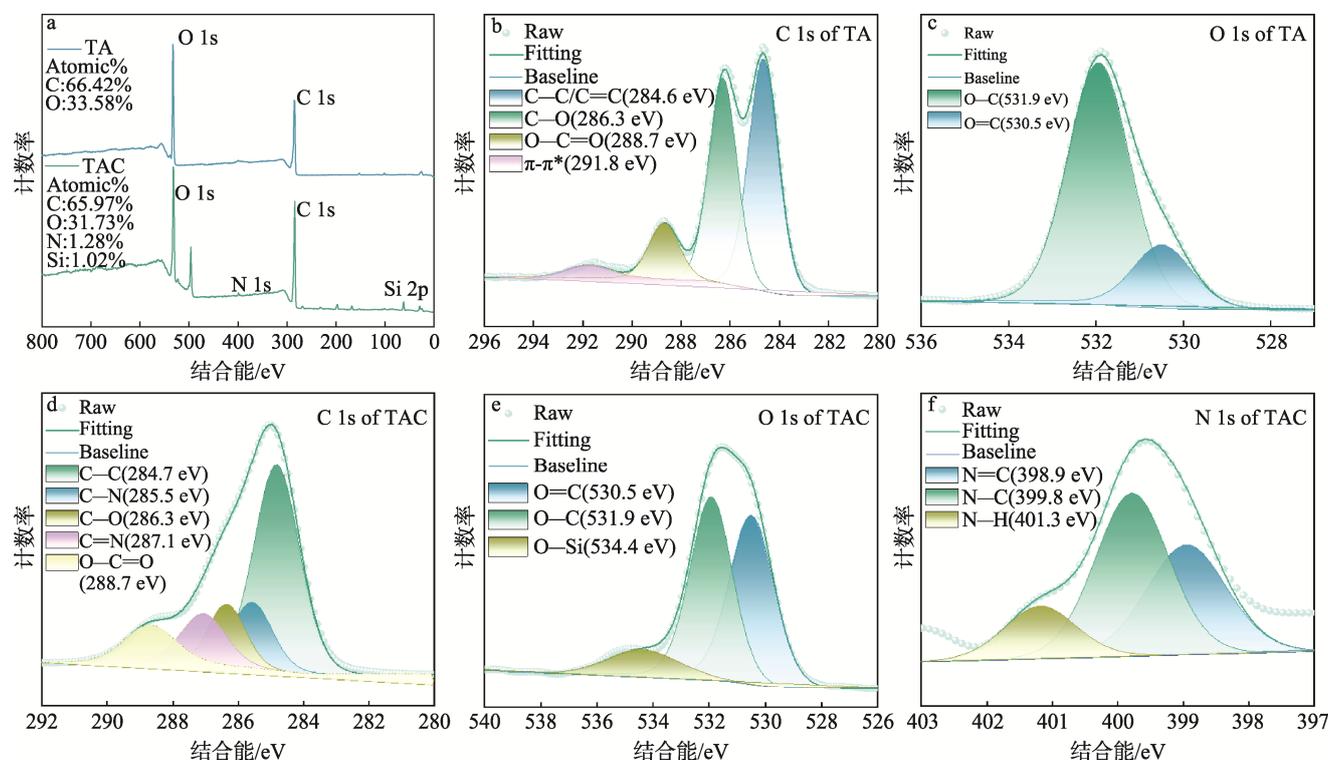


图3 (a) TA和TAC的XPS光谱;(b)~(c) TA的高分辨C 1s和O 1s光谱;(d)~(f) TAC的高分辨C 1s、O 1s和N 1s光谱

Fig.3 XPS spectra of TA and TAC (a), high-resolution C 1s, and O 1s spectra in TA (b)~(c) and high-resolution C 1s, O 1s, and N 1s spectra in TAC (d)~(f)

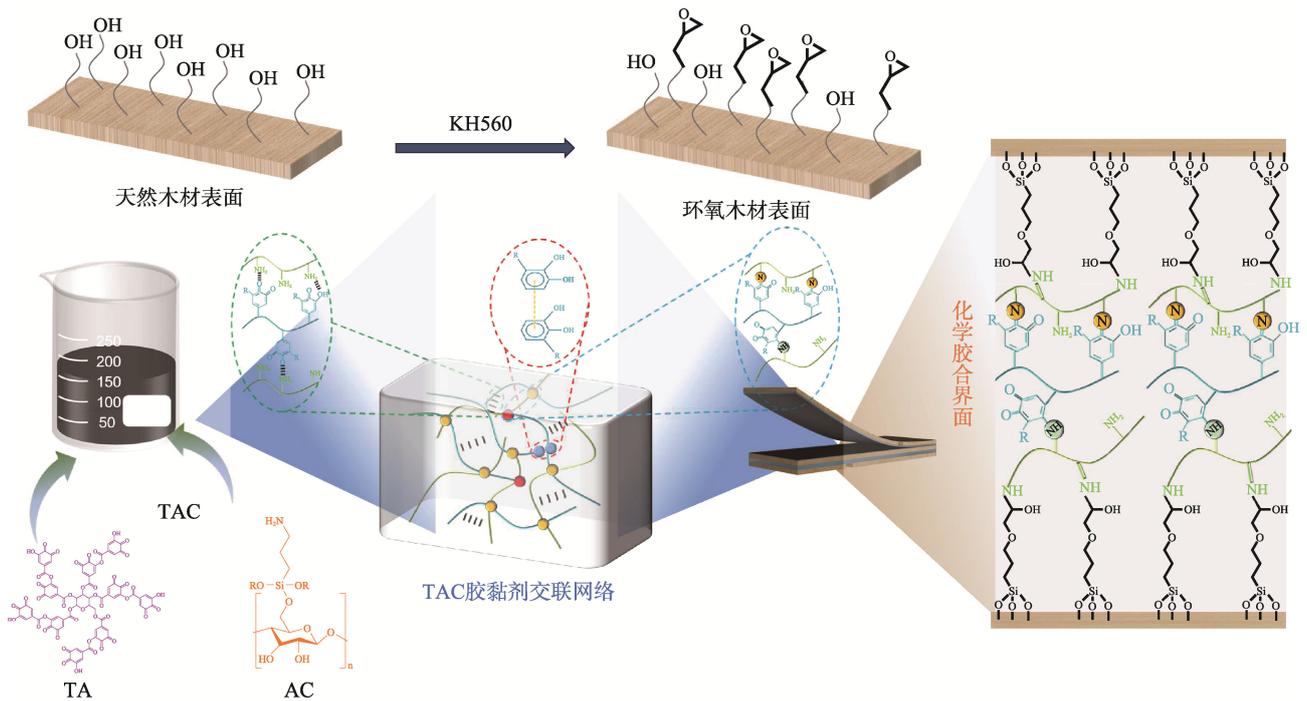


图 4 TAC 胶黏剂的交联网络及化学胶合界面示意图

Fig.4 Cross-linking network diagram of TAC adhesive and chemical bonding interface

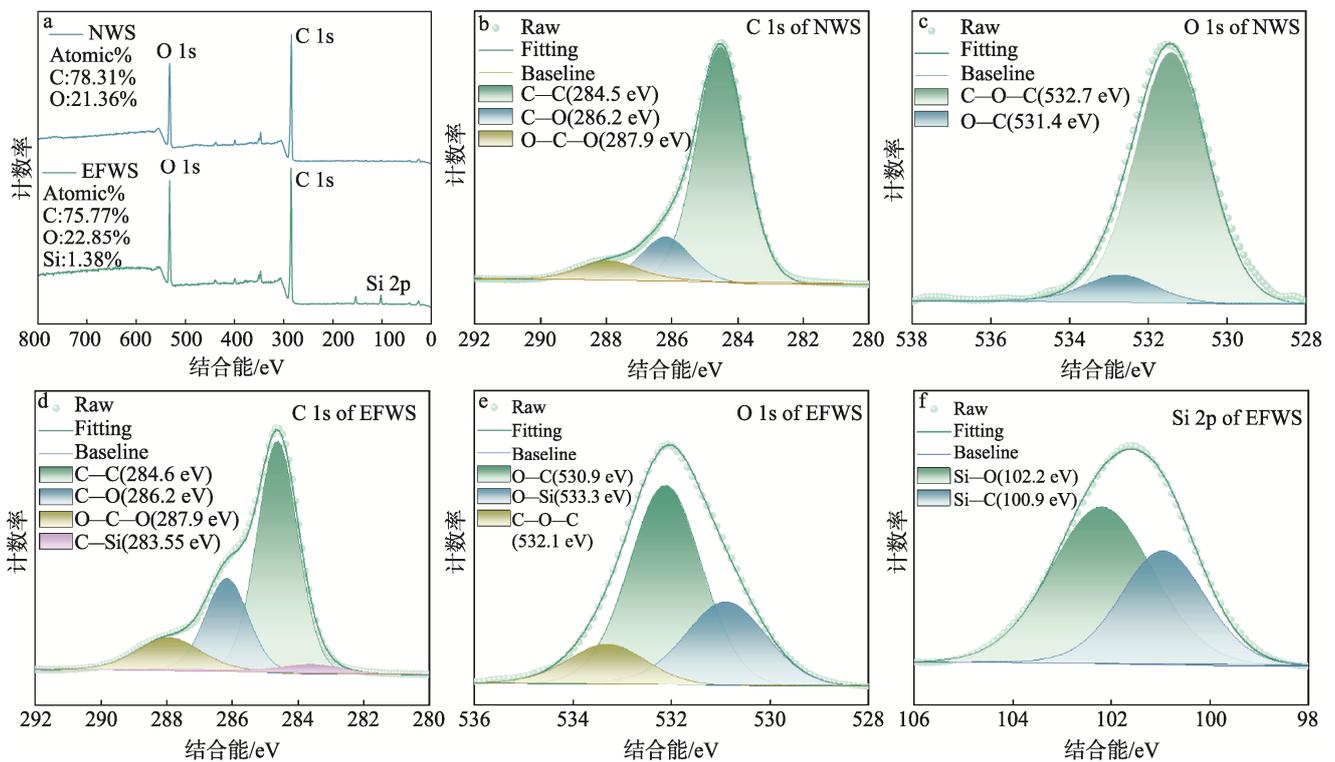


图 5 (a) NWS 和 EFWS 的 XPS; (b) 和 (c) NWS 的高分辨 C 1s 和 O 1s 光谱;

(d) ~ (f) EFWS 的高分辨 C 1s、O 1s 和 Si 2p 光谱

Fig.5 XPS spectra of NWS and EFWS (a), high-resolution C 1s, and O 1s spectra in NWS (b), (c), and high-resolution C 1s, O 1s, and Si 2p spectra in EFWS (d)~(f)

首先, 使用控制变量法探究了温度对胶合性能的影响。采用  $m(\text{TA}) : m(\text{AC}) = 1 : 2$  的配比制备 TAC 胶黏剂, 并以 EFWS 为胶合实验的基材, 热压时间控制为 6 min, 压力为 1.5 MPa, 分别在热压温度为 120、

140、160 °C 条件下进行热压试验。如图 6a 所示, 在 120 °C 条件下得到的试件的干强度、热水强度、沸水强度分别为 2.36、1.71 和 1.45 MPa, 140 °C 条件下的强度分别为 2.51、1.81、1.69 MPa, 160 °C 条件下

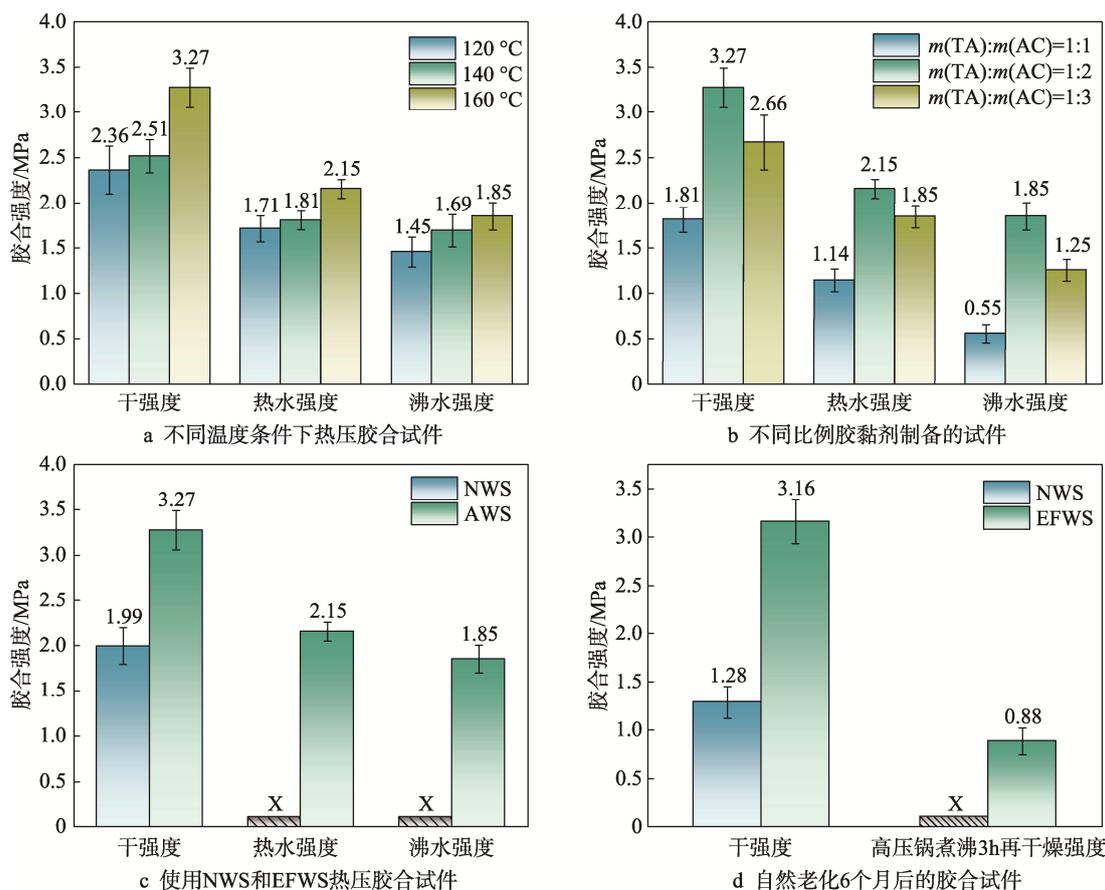


图6 胶合试件的胶合强度

Fig.6 Bonding strengths of bonding specimens

的强度分别为 3.27、2.15、1.85 MPa。由上述实验得到的胶合强度数据表明, 160 °C 条件下试件的胶合强度相对最佳。因此, 设定 160 °C 作为胶合实验的最佳热压温度。

在最佳温度的条件下, 进一步探究了胶黏剂比例对胶合性能的影响。分别使用  $m(\text{TA}):m(\text{AC})=1:1$ 、 $m(\text{TA}):m(\text{AC})=1:2$ 、 $m(\text{TA}):m(\text{AC})=1:3$  的比例制备 TAC 胶黏剂。如图 6b 所示,  $m(\text{TA}):m(\text{AC})=1:2$  的 TAC 胶黏剂制备的胶合试件的胶合强度相对最佳, 干强度、热水强度、沸水强度分别为 3.27、2.15、1.85 MPa,  $m(\text{TA}):m(\text{AC})=1:1$  的 TAC 胶黏剂制备胶合试件的胶合强度相对最差,  $m(\text{TA}):m(\text{AC})=1:3$  的 TAC 胶黏剂制备胶合试件的胶合强度略低于相对最佳胶合强度。由此可见, TAC 胶黏剂相对最佳配比为  $m(\text{TA}):m(\text{AC})=1:2$ 。这是由于  $m(\text{TA}):m(\text{AC})=1:1$  时, AC 上的  $-\text{NH}_2$  基团与 TA 制备 TAC 胶黏剂时, 大部分被反应消耗掉, 因此制备的 TAC 胶黏剂暴露的  $-\text{NH}_2$  基团较少, 这就导致胶黏剂无法与 EFWS 上的环氧基团反应。虽然制备的胶黏剂具有有效的交联网络、较好的内聚力, 但是胶黏剂与木材之间无法形成有效的化学键合界面, 导致该条件下胶合性能较低; 随着 AC 比例的增加, 达到  $m(\text{TA}):m(\text{AC})=1:2$  时, AC 上的  $-\text{NH}_2$  基团与 TA 氧化形成  $\text{C}=\text{O}$  充分反

应, AC 与 TA 充分交联, 且 AC 稍过量, 形成强力的交联网络, 产生强大内聚力的同时有大量的  $-\text{NH}_2$  基团暴露在 TAC 胶黏剂的外面, 热压过程中 TAC 胶黏剂暴露出大量的  $-\text{NH}_2$  基团会与 EFWS 上的环氧基团充分反应, 使得胶黏剂与木材之间进行有效化学键合, 生成强力的化学键, 从而形成超强的木材胶合界面, 因此该条件下胶合性能相对最佳; TA 和 AC 的质量比达到 1:3 时, AC 上的  $-\text{NH}_2$  基团与 TA 充分反应, 制备的 TAC 胶黏剂形成强力的交联网络, 且产生了强大内聚力。然而, 当 TA 上有效官能团完全消耗以后, 由于 AC 的过量添加, 剩余较多的 AC 会存在于交联网络之外, 处于游离状态, 热压过程中, 游离的  $-\text{NH}_2$  基团与 TAC 胶黏剂暴露出的  $-\text{NH}_2$  基团都会与 EFWS 上的环氧基团进行反应, 而游离的  $-\text{NH}_2$  基团会消耗掉一部分环氧基团, 与 TAC 交联网络上的  $-\text{NH}_2$  基团呈现竞争关系。因此, TAC 胶黏剂暴露出的  $-\text{NH}_2$  基团仅与 EFWS 上部分的环氧基团发生反应, 部分形成了有效的化学键合, 从而形成的木材胶合界面相对较弱, 使得该条件下胶合性能略低于最佳胶合性能。从上述结果可以得出, 胶黏剂与基材之间的相互作用力对胶合性能具有显著的影响。

在上述实验的基础上, 分别使用 NWS 与 EFWS 作为胶合实验的基材, 进一步对胶黏剂与基材之间的

相互作用力对胶合性能的影响进行探究。如图 6c 所示, 使用 NWS 制备的试件, 其干强度为 1.99 MPa, 然而经过水浸泡处理以及沸水浸泡处理后, 所有的胶合试件均已破坏, 即耐水性能较差; 使用 EFWS 制备的试件的 3 种强度分别达到 3.27、2.15、1.85 MPa, 干强度有显著提升的同时, 热水强度以及沸水强度分别实现了从 0 到 2.15 MPa 和从 0 到 1.85 MPa 的显著提升。使用 NWS 制备的胶合试件中, 胶黏剂与 NWS 之间没有形成有效的化学键合作用力, 因此未能通过胶黏剂与界面间的相互作用增强胶合性能, 耐水性差, 干强度也相对较低。通过该部分实验进一步证明了胶黏剂与基材之间的相互作用对胶合性能的重要贡献。

将胶合试件在室内自然老化 6 个月以后, 使用 NWS 制备的试件的干强度仅为 1.28 MPa, 下降了 35.7%, 而构建了化学胶合界面的试件的干强度仍高达 3.16 MPa, 仅下降了 3.4%, 并且经过高压锅煮沸 3 h 后其强度仍能达到 0.88 MPa。由此进一步证明了构建化学胶合界面对胶合性能的显著增强作用。

综上所述, 进一步验证了优异的胶合性能需要胶黏剂内聚作用力以及胶黏剂与基材之间的键合作用力共同发挥作用, 尤其是胶黏剂与基材之间的相互作用力对胶合产品耐水性能有着显著的影响。本研究的最佳实验方案为: 使用  $m(\text{TAC}) : m(\text{AC}) = 1 : 2$  比例配制的 TAC 胶黏剂, 以 EFWS 为胶合的基材, 控制热压时间为 6 min, 压力为 1.5 MPa, 热压温度为 160 °C。

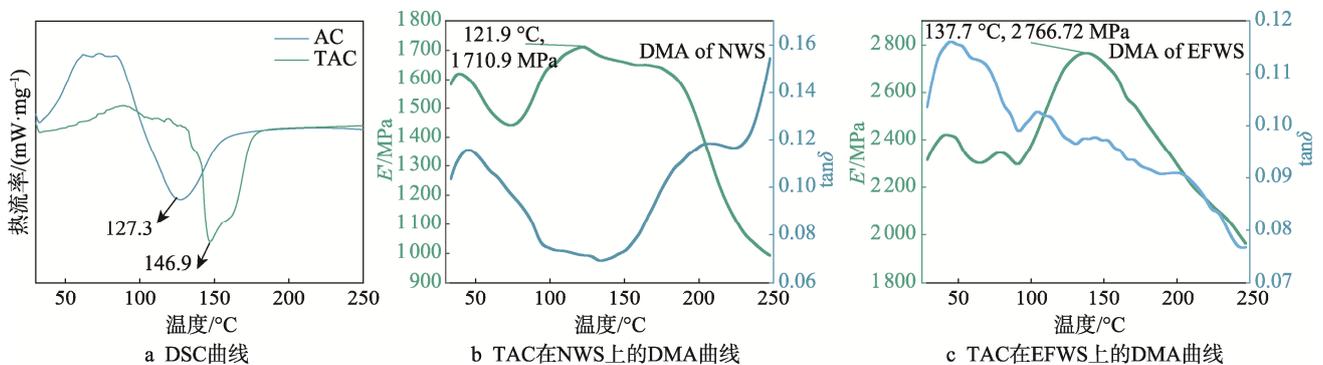


图 7 TAC 固化的热力学性质

Fig.7 Thermodynamic properties of cured TAC

### 3 结语

本研究以氧化单宁与胺化纤维素为原料制备了单宁-纤维素生物质基胶黏剂, 同时对 NWS 进行环氧官能化处理。热压过程中, 活化木材表面上与胶黏剂形成化学活性胶合界面。制备的胶合试件的干强度、热水强度和沸水强度分别达到 3.27、2.15 和 1.85 MPa, 热水强度和沸水强度实现了从 0 到 2.15 MPa 和从 0 到 1.85 MPa 的显著提升。所开发的木质复合材料具备全生物质、无醛添加、高强度、高耐水性等诸多优

由此条件下制备出胶合产品的性能最佳, 其干强度为 3.27 MPa、热水强度为 2.15 MPa、沸水强度为 1.85 MPa, 在防水、防潮方面有潜在的应用价值。

### 2.4 热力学分析

为了研究胶黏剂体系在加热过程中的构象转变, 采用差示扫描量热法 (DSC) 在 30~250 °C 的温度范围内进行监测, DSC 曲线如图 7a 所示。AC 和 TAC 胶黏剂的 DSC 曲线呈现出明显的吸热峰, 这些吸热峰对应于 AC 和 TAC 中结晶相的熔融。当 DSC 温度加热到熔融温度时, 材料的结晶区被破坏, 导致聚合物网络发生结构重排和交联, 即 TAC 胶黏剂在热压过程中的交联与固化行为。

通过模拟胶合板试样热压固化过程, 采用动态力学分析 (DMA) 研究温度对模量的影响, 监测了试样的存储模量 ( $E'$ )、损耗模量 ( $E''$ ) 和  $\tan\delta$  ( $E''/E'$  比值)。存储模量又称弹性模量, 是指材料可逆弹性变形所存储的能量, 反映了材料的弹性或刚性<sup>[26]</sup>。图 7b 显示了 TAC 胶黏剂在 NWS 基材上的  $E'$ , 图 7c 显示了 TAC 胶黏剂在 EFWS 基材上的  $E'$ 。通过对比可知, TAC 胶黏剂在 EFWS 上的  $E'$  明显高于在 NWS 上的  $E'$ , 说明使用 EFWS 与 TAC 模拟制备胶合试件的性能高于使用 NWS 模拟的性能, 再一次证明了胶黏剂与基材之间的相互作用对胶合性能的显著增强作用。

势, 不仅满足了对环保材料的需求, 还为产品提供了更可靠的性能保障, 在包装、建筑及家具制造等众多相关领域展现出了广阔的潜在应用前景。同时, 本研究在材料设计方面的创新探索, 为类似高性能生物质复合材料的研发提供了全新的思路与实用方法, 具有一定的开创性意义。

### 参考文献:

- [1] 黄品歌, 张艳, 孟毅, 等. 生物质基天然纤维包装材料的研发现状及发展趋势[J]. 包装学报, 2022, 14(5):

- 66-74.
- HUANG P G, ZHANG Y, MENG Y, et al. Biomass-Derived Nature Fibers for Packaging Materials: The State-of-the-Art and Future[J]. *Packaging Journal*, 2022, 14(5): 66-74.
- [2] 许霞, 张彦粉, 邱赞业, 等. 稻壳填充聚苯乙烯复合包装材料重复回收再加工过程性能研究[J]. *包装工程*, 2024, 45(15): 52-58.
- XU X, ZHANG Y F, QIU Z Y, et al. Investigation of Variation for Comprehensive Performance for Rice Husk Filled Polystyrene Packaging Composites During Repeat Thermal Recycling Process[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(15): 52-58.
- [3] 潘洵, 肖乃玉, 胡心宽, 等. 生物基包装材料的制备及其在果蔬保鲜中应用[J]. *包装工程*, 2023, 44(23): 84-93.
- PAN X, XIAO N Y, HU X K, et al. Preparation of Bio-Based Packaging Materials and Their Application in Fruit and Vegetable Preservation[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(23): 84-93.
- [4] 吕湘月. 食品接触塑料包装材料安全性[J]. *塑料助剂*, 2024(1): 74-77.
- LYU X Y. Research on the Hygiene and Safety Analysis of Plastic Packaging Materials in the Food Industry[J]. *Plastics Additives*, 2024(1): 74-77.
- [5] 唐胜男, 张安琪. 塑料包装材料降解方法与回收研究现状[J]. *上海包装*, 2024(7): 13-15.
- TANG S N, ZHANG A Q. Research Status of Degradation Methods and Recycling of Plastic Packaging Materials[J]. *Shanghai Packaging*, 2024(7): 13-15.
- [6] 杨健根, 单志华, 陈慧, 等. 环境友好生物质泡沫包装材料现状[J]. *皮革科学与工程*, 2018, 28(3): 37-40.
- YANG J G, SHAN Z H, CHEN H, et al. Status of Environmentally Friendly Biomass Packaging Materials[J]. *Leather Science and Engineering*, 2018, 28(3): 37-40.
- [7] 景晓辉, 杨静新. 植物纤维泡沫包装材料的研究[J]. *包装工程*, 1999, 20(6): 12-14.
- JING X H, YANG J X. A Study of Foam Packing Material of Plant Fibres[J]. *Packaging Engineering*, 1999, 20(6): 12-14.
- [8] 韩明睿, 郑司南, 李宾, 等. 可用于包装的纤维素基电磁屏蔽材料研究进展[J]. *包装工程*, 2022, 43(23): 9-17.
- HAN M R, ZHENG S N, LI B, et al. Research Progress on Cellulose-Based Electromagnetic Interference Shielding Materials for Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(23): 9-17.
- [9] 李乐, 侯存霞, 付亚波, 等. 金属包装覆膜技术的研究与应用进展[J]. *包装工程*, 2021, 42(7): 99-107.
- LI L, HOU C X, FU Y B, et al. Research and Application Progress of Polymer-Coated Metal Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(7): 99-107.
- [10] RAMAGE M H, BURRIDGE H, BUSSE-WICHER M, et al. The Wood from the Trees: The Use of Timber in Construction[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 333-359.
- [11] DING Y, PANG Z Q, LAN K, et al. Emerging Engineered Wood for Building Applications[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(5): 1843-1888.
- [12] CHUTTURI M, GILLELA S, YADAV S M, et al. A Comprehensive Review of the Synthesis Strategies, Properties, and Applications of Transparent Wood as a Renewable and Sustainable Resource[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 864: 161067.
- [13] 潘明珠. 火情预警策略与木质复合材料阻燃防火研究进展[J]. *材料工程*, 2024, 52(10): 1-14.
- PAN M Z. Research Progress in Fire Warning Strategies and Flame Retardancy of Wood Composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(10): 1-14.
- [14] 王家宇, 杜官本, 杨红星, 等. 聚乙烯亚胺与尿素合成高支化聚脲及其胶接性能[J]. *林业工程学报*, 2022, 7(2): 97-102.
- WANG J Y, DU G B, YANG H X, et al. Synthesis and Adhesive Properties of Highly Branched Polyurea with Polyethyleneimine and Urea[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2022, 7(2): 97-102.
- [15] 刘思辰, 杨红星, 冉鑫, 等. 纸浆基木材胶黏剂的合成及其性能[J]. *林业工程学报*, 2022, 7(6): 132-139.
- LIU S C, YANG H X, RAN X, et al. Synthesis, Structure and Performance of Pulp-Based Wood Adhesives[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2022, 7(6): 132-139.
- [16] 杨龙, 毛顺国, 陆铜华, 等. 我国刨花板工业技术进步回顾与展望[J]. *木材科学与技术*, 2024, 38(1): 1-12.
- YANG L, MAO S G, LU T H, et al. Review and Outlook of Technology Development in China's Particleboard Industry[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2024, 38(1): 1-12.
- [17] PENA C A, SOTO A, KING A W T, et al. Improved Reactivity of Cellulose *via* Its Crystallinity Reduction by Non-

- dissolving Pretreatment with an Ionic Liquid[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(10): 9164-9171.
- [18] ZHANG H, LIU P W, MUSA S M, et al. Dialdehyde Cellulose as a Bio-Based Robust Adhesive for Wood Bonding[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(12): 10452-10459.
- [19] LIU T D, DU G B, WU Y C, et al. Activated Wood Surface and Functionalized Cellulose Co-Building Strong Chemical Wood Bonding Performance[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 305: 120573.
- [20] ZHAO R, LIU T D, RAN X, et al. Imitation Expansion Bolts Structural Bonding Interface: Enhancing the Bonding Properties of Bamboo Composites Through Host-Guest Molecular Recognition[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 500: 156771.
- [21] LIU T D, DU G B, YANG H X, et al. Cellulose-Based Ultrastrong Wood Adhesive and Composites Constructed Through "Sandwich" Profile Bonding Interface[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 271: 111169.
- [22] LIU S C, DU G B, YANG H X, et al. Developing High-Performance Cellulose-Based Wood Adhesive with a Cross-Linked Network[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(49): 16849-16861.
- [23] LIU S C, WU Y C, DU G B, et al. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Mediated Tannin Bio-Based Wood Adhesive Inspired by Starfish Structure and Phenol-Amine Synergy[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 188: 115714.
- [24] BEN AMOR S, JACQUET M, FIOUX P, et al. XPS Characterisation of Plasma Treated and Zinc Oxide Coated PET[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(9): 5052-5061.
- [25] LAOHAROJANAPHAND P, LIN T J, STOFFER J O. Glow Discharge Polymerization of Reactive Functional Silanes on Poly(methyl methacrylate)[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1990, 40(3/4): 369-384.
- [26] DENG S D, DU G B, LI X H, et al. Performance and Reaction Mechanism of Zero Formaldehyde-Emission Urea-Glyoxal (UG) Resin[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, 45(4): 2029-2038.