

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025130

# 自致密透明木材膜的制备及性能

何鸿庆, 张显权, 戚后娟

(东北林业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)



**摘要:** 为在保持木材结构完整的前提下实现自致密, 采用亚氯酸钠 ( $\text{NaClO}_2$ ) 与氢氧化钠 ( $\text{NaOH}$ ) 处理脱除轻木 (*Ochroma lagopus*) 木质素与半纤维素, 结合大气干燥制备自致密透明木材膜 (transparent wood film, TWF)。研究脱木质素过程中亚氯酸钠质量分数、加热时间与温度对 TWF 成膜率的影响, 确定最佳条件为: 亚氯酸钠溶液质量分数 2%、加热时间 2 h、温度 90 °C。在此条件下制备的自致密 TWF 密度达 0.79 g/cm<sup>3</sup>, 分别为天然木材 (natural wood, NW) 的 3.76 倍和脱木质素木材 (delignified wood, DW) 的 4.39 倍; 光学透过率达 60.37%, 分别为 NW 的 10.74 倍和 DW 的 5.4 倍; 拉伸强度为 306.03 MPa, 分别为 NW 的 19.80 倍和 DW 的 8.84 倍。采用折叠耐力测试仪, 在 4.91 N 载荷条件下对厚度均为 0.1 mm 的 TWF 与 A4 纸进行循环折叠对比测试, 以长度平行纤维方向的木片制备的纵向自致密透明木材膜 (TWF-L) 的循环折叠次数达 231 次, 为 A4 纸的 1.56 倍。扫描电子显微镜 (SEM) 与傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 表征显示, 脱木质素处理保留木材细胞壁多孔结构并暴露更多羟基, 有利于自致密化。该自致密透明木材膜兼具优异的光学性能和力学性能, 且具有可折叠性、可染色性、可书写性及生物降解性, 为透明木材的制备提供新思路, 展现出在智能包装、柔性传感器、光电器件等领域的应用前景。

**关键词:** 轻木; 脱木质素; 大气干燥; 自致密; 透明木材膜

中图分类号: TS653; S785 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 01-0057-10

## Preparation and Performance of Self-Densified Transparent Wood Film

HE Hongqing, ZHANG Xianquan, QI Houjuan

(College of Materials Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:** To achieve self-densification while preserving the integrity of the wood structure, a combined sodium chlorite ( $\text{NaClO}_2$ ) and sodium hydroxide ( $\text{NaOH}$ ) treatment was employed to remove lignin and hemicelluloses from balsa wood (*Ochroma lagopus*), followed by air drying to obtain self-densified transparent wood films (TWF). The effects of sodium chlorite concentration, heating time, and temperature during delignification on the film formation yield of the TWF were systematically investigated. The optimal delignification conditions were determined to be 2% of sodium chlorite solution mass fraction, a 2 h heating time, and a temperature of 90 °C. Under these conditions, the resulting self-densified TWF exhibited a density of 0.79 g/cm<sup>3</sup>, which is 3.76 times higher than that of natural wood (NW) and 4.39 times higher than that of delignified wood (DW). The optical transmittance

收稿日期: 2025-11-24; 修改日期: 2025-12-20

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目“纳米纤维素复合抗菌膜的抗粘附性界面设计与调控机制研究”(LH2024C045)。

作者简介: 何鸿庆 (1999—), 女, 硕士研究生。Email: hhq990107@163.com

通讯作者: 戚后娟, 女, 副教授。Email: 15006383472@163.com

reached 60.37%, representing 10.74 times that of NW and 5.4 times that of DW. The tensile strength was 306.03 MPa, which is 19.80 times higher than that of NW and 8.84 times higher than that of DW. Cyclic folding endurance tests were performed using a folding endurance tester under a load of 4.91 N on specimens with a uniform thickness of 0.1 mm. The longitudinally oriented self-densified transparent wood film (TWF-L), prepared from wood slices with fibers aligned parallel to the length direction, endured 231 folding cycles—1.56 times that of A4 paper. Scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analyses revealed that the delignification treatment preserved the porous structure of the wood cell walls while exposing additional hydroxyl groups, thereby facilitating self-densification during drying. The obtained self-densified transparent wood film exhibits excellent optical and mechanical properties as well as good biodegradability. This approach provides a novel strategy for the preparation of transparent wood and shows promising potential for applications in dyed paper, writing paper, and flexible electronics.

**Key words:** Balsa wood; delignification; air drying; self-densification; transparent wood film

随着石化资源日益枯竭以及由此产生的全球环境污染问题,开发环境友好型生物质可再生、可降解材料替代石油基塑料成为当务之急<sup>[1]</sup>。木材膜作为一种生物质基材料,通过对天然木材进行脱木质素、致密化、表面功能化等物理或化学处理制备而成,其生产不依赖有限的化石燃料资源,有助于实现资源的可持续利用<sup>[2]</sup>。与石油基塑料相比,木材膜具有密度低、强度高、可降解、可再生等优势,在绿色包装、柔性电子器件、光学器件、建筑节能等领域展现出广阔的应用前景<sup>[3-7]</sup>。

致密化是赋予木材膜高强度与功能特性的关键环节<sup>[8]</sup>,目前主要形成热压致密化<sup>[9]</sup>和毛细管驱动自密实化<sup>[10]</sup>制备方法。其中,热压法通过热与压力协同作用促使细胞壁塌陷与纤维素紧密堆积,存在能耗较高的问题。近年来,研究者提出一种无需外力的自致密方法,木材先经过脱木质素和脱半纤维素处理,再通过大气干燥实现纤维素微纤维致密排列,为制备致密化木材膜提供新思路<sup>[11]</sup>。大气干燥具有无需高温高压设备、工艺简单、能耗低等优势,但也存在一些局限性,如薄膜类材料在干燥过程中易出现不均匀收缩,导致翘曲或开裂等缺陷<sup>[12]</sup>,同时干燥后的致密化程度受木材种类、脱木质素程度、干燥条件等多种因素影响<sup>[8, 10-11, 13]</sup>。因此,探究木材脱木质素的处理条件对于调控木材膜大气干燥致密化过程具有重要意义。

本研究以轻木为原料,采用亚氯酸钠与乙酸脱木质素,氢氧化钠脱半纤维素,通过大气干燥促进水分蒸发,实现纤维素微纤维自致密。通过系统对比透明木材膜与天然木材、脱木质素木材在密度、厚度、结晶度、光学透过率、拉伸强度等性能指标的差异,揭示其结构调控机制,为低能耗、高性能、多功能透明木材膜的制备提供新的技术路径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

轻木 (*Ochroma lagopus*), 气干密度为 0.22 g/cm<sup>3</sup>, 加工两种规格木片: 一种规格为 5 cm×5 cm×1 mm (长度×宽度×厚度), 用于自致密木材膜样品制备; 另一种规格为 10 cm×1.5 cm×1 mm (长度×宽度×厚度), 供循环折叠测试用自致密木材膜样品制备。依据木片长度方向与纤维取向的关系, 将木片分为两类: 长度平行于纤维方向的木片, 制得纵向自致密透明木材膜 (TWF-L); 长度方向垂直于纤维方向的木片, 制得横向自致密透明木材膜 (TWF-T)。

化学试剂: 亚氯酸钠 (NaClO<sub>2</sub>)、乙酸 (CH<sub>3</sub>COOH)、氢氧化钠 (NaOH)、无水乙醇 (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) 和叔丁醇 (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>COH 等, 均外购。去离子水, 实验室自制。

## 1.2 试验设备与仪器

恒温水浴锅、真空冷冻干燥机、场发射扫描电镜、傅里叶变换红外光谱仪、X射线衍射仪、紫外分光光度计、万能力学试验机、折叠耐力测试仪 (YN-MIT 135)。

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 自致密透明木材膜制备流程 脱木质素→脱半纤维素→气干自致密化→多功能木材膜

1) 脱木质素。配制一定质量分数的亚氯酸钠溶液, 用乙酸将亚氯酸钠溶液的pH值调至4.6, 将天然木材 (natural wood, NW) 试样浸渍于亚氯酸钠溶液中, 在设定温度条件下加热一段时间。处理后用去离子水反复冲洗试样, 以去除残留试剂。

2) 脱半纤维素。将脱木质素试样浸渍于质量分数为2%的氢氧化钠溶液中, 在室温条件下浸渍处理2 h脱半纤维素, 并进一步脱木质素<sup>[11]</sup>。处理后用去离子水反复冲洗试样以去除残留试剂, 获得脱木质素基材。将脱木质素基材先放入无水乙醇溶液置换24 h, 再放入叔丁醇置换24 h, 之后经真空冷冻干燥, 获得脱木质素木材 (delignified wood, DW)。

3) 大气干燥自致密。将脱木质素基材平铺于洁净玻璃片上, 在温度20~25 °C、相对湿度55%~65%条件下进行大气干燥12 h, 形成自致密透明木材膜 (transparent wood film, TWF)。

4) 制备多功能木材膜。分别将一定质量的甲基橙、胭脂红、刚果红、孔雀绿、紫罗兰、甲基蓝等6种染料置于100 mL去离子水中, 充分搅拌, 待染料溶解, 制备成质量分数为5%的染料溶液。将脱木质素基材放入不同颜色的染料溶液中浸渍2 h, 再置于洁净玻璃片上, 经大气干燥12 h, 获得色彩斑斓的木材膜。将脱木质素基材放入二维过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物的二维纳米材料 (MXene) 悬浊液中浸渍2 h, 再置于洁净玻璃片上, 经大气干燥12 h, 获得负载MXene的导电木材膜。

1.3.2 试验设计 采用单因素试验, 探究脱木质素关键处理条件对TWF成膜率的影响, 优化筛选脱木质素条件。每组条件下制备20片试样, 每组试验重复5次, 统计完整致密化薄膜的数量占总试

验样品数量的百分比 (即成膜率)。试验因素与水平列于表1。

表1 脱木质素因素与水平

Tab.1 Delignification factors and levels

变量因素	变量条件	固定试验条件
亚氯酸钠溶液质量分数	0%、1%、2%、3%、4%	加热温度90 °C、加热2 h
加热温度	80、90和100 °C	亚氯酸钠溶液质量分数2%、加热2 h
加热时间	1.0、1.5、2.0、2.5和3.0 h	亚氯酸钠溶液质量分数2%、加热温度90 °C

## 1.4 性能表征

### 1.4.1 结构与组成表征

1) 微观形貌。使用场发射扫描电镜 (SEM) 观察样品截面微观形貌结构。使用导电胶将样品固定在样品台上, 并在真空条件下对其进行喷金处理, 喷涂时间为200 s。

2) 官能团表征。采用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 表征样品表面官能团。在衰减全反射模式下扫描, 扫描范围为4 000~4 00  $\text{cm}^{-1}$ , 分辨率为4  $\text{cm}^{-1}$ , 扫描次数32次。

3) 晶体结构表征。采用X射线衍射仪对样品进行表征, 设置扫描速率为5°/min, 扫描范围为 $2\theta=5^\circ\sim 50^\circ$ , 以此计算分析样品晶体结构的变化。

4) 化学成分测定。木材样品的 $\alpha$ -纤维素、半纤维素和酸不溶性木质素含量, 根据ASTM D1104-56 “Standard method of test for holocellulose in wood”、TAPPI T 429 “Alpha-cellulose in paper”和TAPPI T 222 “Acid-insoluble lignin in wood and pulp”测定, 每组样品测试3次。

### 1.4.2 使用性能分析

1) 密度。样品密度 (在温度20 °C和相对湿度65%下调节24 h后) 通过质量和体积确定。

2) 光学透过率。采用紫外分光光度计在400~780 nm的可见光波长范围内, 测定样品的透过率。以该波长范围内的平均透过率作为数据基础, 进行柱状图分析。

3) 力学性能。使用万能力学试验机以2.0 mm/min的加载速率进行拉伸试验。样品在温度20 °C、相对湿度65%条件下调节24 h后, 切割规格为2.5 cm×0.5 cm (长度×宽度)。每组重复测试5次。采用应力-应变曲线面积积分法计算样品韧性。

4) 耐折叠性能。为确保对比结果的可靠性,循环折叠测试的对比材料选取定量为 $80\text{ g/m}^2$ 、厚度为 $0.1\text{ mm}$ 的A4纸,选用厚度同样为 $0.1\text{ mm}$ 的TWF作为测试样品。将样品切割为 $10\text{ cm}\times 1.5\text{ cm}$ (长度 $\times$ 宽度),使用折叠耐力测试仪,在 $4.91\text{ N}$ 载荷条件下,测试纵向自致密透明木材膜(TWF-L)和横向自致密透明木材膜(TWF-T)与A4纸的耐折叠性能。每组样品重复5次。

5) 生物降解性。在土壤生物降解性测试中,将TWF样品置于哈尔滨地区自然环境条件深度为 $10\text{ cm}$ 的土壤中测试,测试时间在7月,每组5个样品,重复3次,每7天取样观察一次,用数码相机记录样品形态变化。

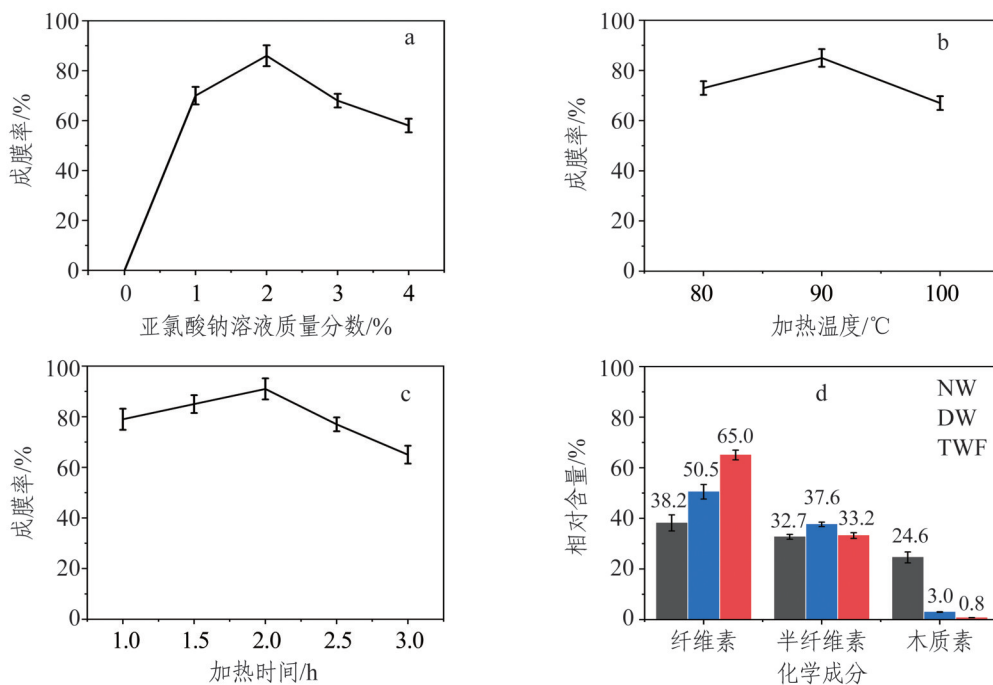
## 2 结果与分析

### 2.1 脱木质素条件对自致密TWF成膜率的影响

木材主要由纤维素、半纤维素和木质素构成,其中木质素作为一种复杂有机聚合物,在细胞壁中起填充和交联作用,赋予木材刚性和结构完整性<sup>[14]</sup>。采用亚氯酸钠处理木材,其核心目的是选择性脱木质素,同时尽量保留纤维素组分。如图1a所示,随着亚氯酸钠质量分数的增加,TWF成膜

率呈现先上升后下降的趋势。在亚氯酸钠溶液质量分数为2%时,TWF成膜率最高为91%。在亚氯酸钠溶液质量分数为1%时成膜率为70%,原因是在较低的亚氯酸钠浓度下,体系对木材中木质素的脱除效率不足。残留的木质素会阻碍纤维素分子链的有效排列和氢键的形成,影响脱木质素基材在大气干燥过程中的致密化,导致成膜率降低。在亚氯酸钠质量分数为3%和4%时,TWF成膜率分别为68%和58%,TWF成膜率下降主要归因于亚氯酸钠的强氧化性对纤维素本身造成的负面效应,表现为纤维素降解、官能团破坏、晶体结构改变<sup>[15-16]</sup>。尽管高浓度试剂能更彻底地去除木质素,但过量的活性氯酸根离子( $\text{ClO}_3^-$ )会非选择性地攻击并氧化纤维素分子链<sup>[16]</sup>。同时,较短的分子链和受损的纤维结构,使其在成膜过程中作为骨架材料的纤维素链机械强度下降。这些被削弱的纤维无法有效承受干燥过程中产生的毛细管应力,从而导致薄膜更易收缩、卷曲或破裂<sup>[17]</sup>。

图1b显示,在温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 时成膜率最高(85%),加热温度为 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时成膜率分别为73%、67%,具有显著差异。在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 成膜率低是因为温度较低,部分脱木质素处理样品脱木质



注:d测试TWF样品制备条件为亚氯酸钠溶液质量分数2%,加热温度 $90\text{ }^\circ\text{C}$ ,加热时间2h。

图1 不同脱木质素条件下的自致密成膜率

Fig.1 Film formation yield of self-densification under various delignification conditions

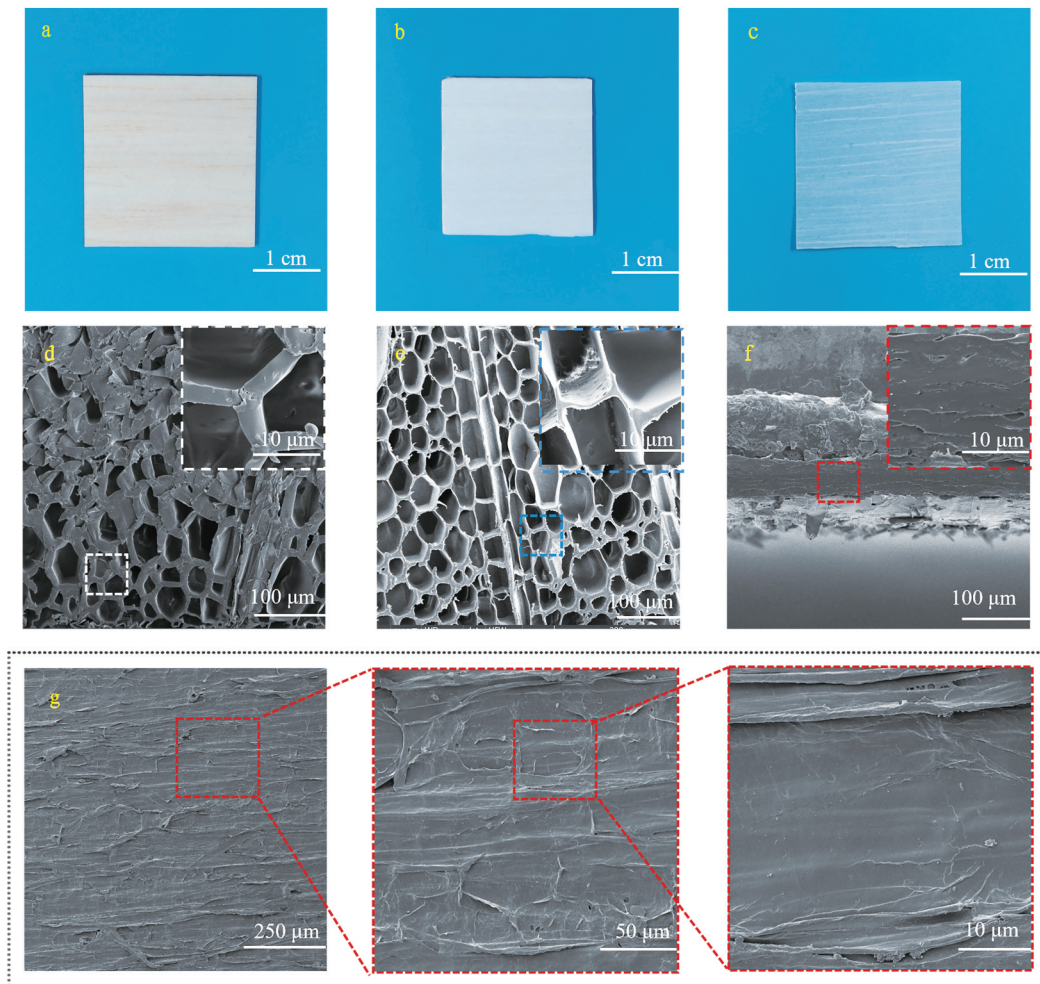
素不彻底, 导致在大气干燥过程中发生卷曲, 不能形成平整的自致密膜, 且透明度较差; 在 100 °C 成膜率低是因为经过 100 °C 处理, 脱木质素相对彻底, 再经过脱半纤维素处理, 木材结构完整性被破坏, 在大气干燥过程中容易发生开裂, 导致成膜率降低。

由图 1c 可知, 加热时间为 2 h 时, 成膜率最高 (91%)。在加热 1 h 和 1.5 h 时成膜率较低, 分别为 79% 和 85%, 其原因与加热温度较低相同, 均是脱木质素相对不够彻底, 脱木质素基材在大气干燥过程中容易发生卷曲。加热 2.5 h 和 3 h 时成膜率也较低, 分别为 77%、65%, 其原因与加热温度过高一致, 均是脱木质素相对彻底, 脱木质素基材在大气干燥过程中容易发生开裂。

综上所述, 当亚氯酸钠质量分数为 2%、加热温度为 90 °C、加热时间为 2 h 时, 可获得最高成膜率 (91%)。该条件下制备的自致密木材膜 (TWF) 与天然木材 (NW) 和脱木质素木材 (DW) 相比, TWF 木质素相对含量和半纤维素相对含量降低, 而  $\alpha$ -纤维素相对含量上升。表明经过上述处理条件, 成功脱除了部分木质素与半纤维素, 为后续大气干燥过程中水分蒸发实现纤维素微纤维自致密提供有利条件。

## 2.2 宏观和微观形貌

天然木材 NW (图 2a) 经过脱木质素和脱半纤维素处理, 颜色由自然黄色变为白色, 得到白色的脱木质素木材 DW (图 2b)。大气干燥导致结构致密化, 形成自致密透明木材膜 TWF (图 2c)。天



注: 从上至下, 第一行为试样实物照片, 第二行为试样横截面 SEM 图 (插图为局部放大); 试样从左至右依次为 NW、DW、TWF。g 为 TWF 不同放大倍数的表面 SEM 图。

图 2 天然木材、脱木质素木材、自致密透明木材膜的宏观和微观形貌

Fig.2 Macroscopic and microscopic morphologies of natural wood, delignified wood, and transparent wood film

然木材的横截面SEM图(图2d)显示多孔结构,细胞壁和孔隙结构特征明显。脱木质素木材的SEM图像(图2e),可见更丰富的多孔结构。这一结构变化,结合处理后暴露的丰富纤维素羟基,使得大气干燥过程中水分蒸发产生的毛细管力能够驱动纤维素纳米纤维紧密聚集,并通过羟基间形成的高密度氢键,实现细胞壁彻底坍塌与材料自致密化。最终得到的TWF呈现高密度、孔隙较小的层状结构(图2f),其宏观形态透明且平整。

采用SEM对TWF表面进行多尺度观察(图2g),其表面呈现明显的纵向褶皱结构。该褶皱分布均匀,褶皱之间未见明显裂纹、孔隙或缺陷,表明材料表面结构完整,致密性良好。上述形貌特征说明TWF在制备过程中形成了紧密的微观结构,有利于其力学性能与功能稳定性的保持。

### 2.3 结构与组成表征

FTIR光谱分析结果(图3a)显示,TWF样品中木质素与半纤维素特征峰消失。经脱木质素处理后,木质素在1595、1507和1462  $\text{cm}^{-1}$ 处的振动峰消失,表明木质素被大部分去除。碱处理后,

1733  $\text{cm}^{-1}$ 和1240  $\text{cm}^{-1}$ 处的半纤维素特征峰消失,无定形半纤维素部分脱除。通过去除部分木质素,木材细胞壁变得更加柔韧和可塑。这使得在后续的自致密过程中,木材细胞壁更容易发生塌陷和致密化,形成更紧密、更均匀的结构。FTIR光谱分析,在纤维素中O-H伸缩振动峰通常出现在3500~3200  $\text{cm}^{-1}$ 范围内<sup>[18]</sup>。与NW和DW相比,TWF的吸收峰显著增宽且强度最高,表明TWF中存在更强的氢键(图3b)。XRD测试表明,(110)和(200)衍射峰(图3c)同时存在,表明所有样品均保持纤维素I晶型,根据峰高法计算出NW、DW和TWF的结晶度指数分别为72.23%、75.72%和84.08%(图3d)。脱木质素处理通常会导致纤维素结晶度增加,这是因为木质素的去除使纤维素微纤丝充分暴露,从而增强纤维素结构对后续处理(如润胀、干燥等)的响应性。在后续处理过程中,无定形纤维素可能发生重排与结晶,同时纤维素微纤丝间的排列趋于紧密,从而提高纤维素的整体结晶度。

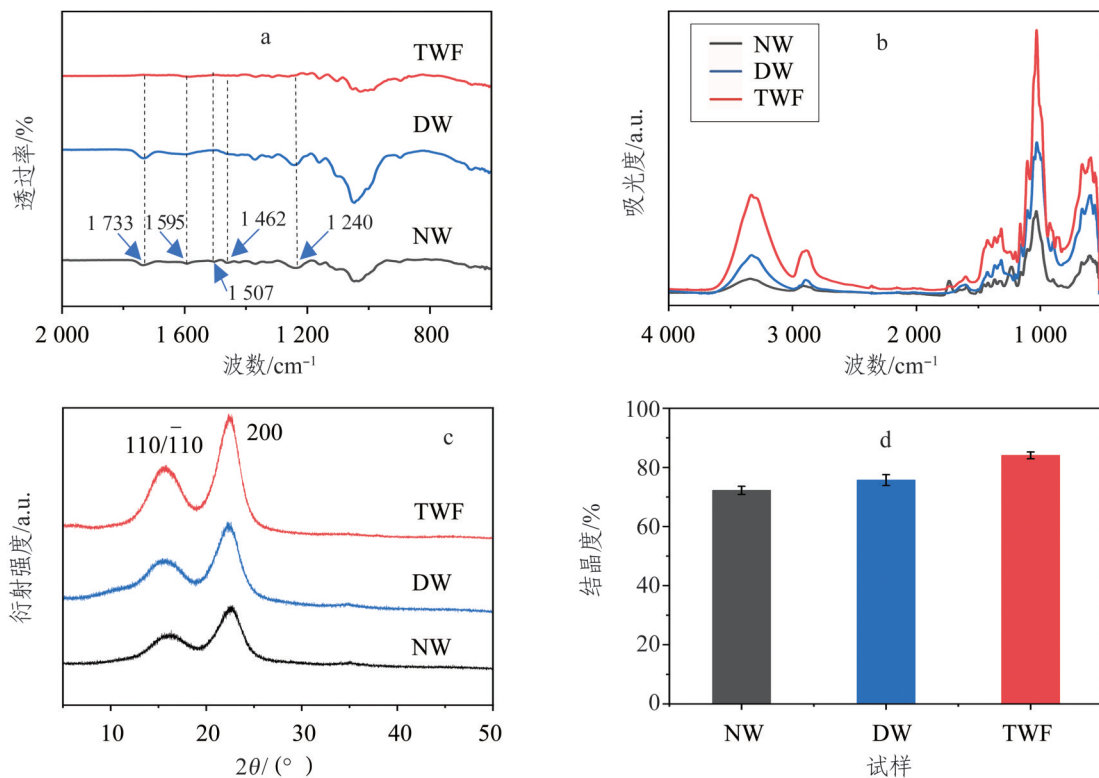


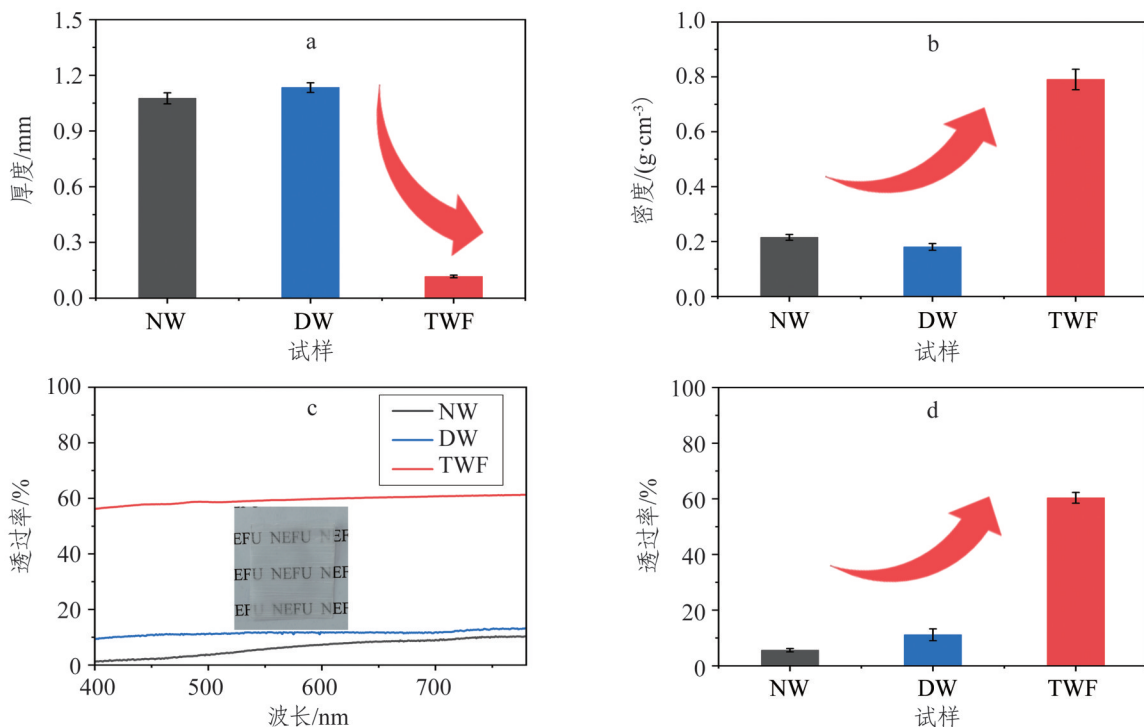
图3 天然木材、脱木质素木材、自致密透明木材膜的成分及结晶度

Fig.3 Chemical composition and crystallinity of natural wood, delignified wood, and transparent wood film

## 2.4 使用性能分析

**2.4.1 致密化程度及光学性能** 厚度与密度数据(图4a、4b)可直观反映致密化程度: TWF厚度为0.12 mm, 仅为NW (1.07 mm)的11.21%、DW (1.33 mm)的9.02%。TWF密度为0.79 g/cm<sup>3</sup>, 是为NW (0.21 g/cm<sup>3</sup>)的3.76倍、DW (0.18 g/cm<sup>3</sup>)的4.39倍。与NW和DW相比, TWF厚度大幅降低, 密度增大, 表明其自致密程度良好。与毛细管驱动自密实化制备的木质薄膜<sup>[10]</sup>(厚度0.6 mm、密度0.8 g/cm<sup>3</sup>)相比, 本研究制备的TWF厚度更薄, 二者密度相当, 表明脱除木质素条件确实对

大气干燥自致密程度具有影响。这种高度致密化减少光散射界面, 使TWF的光学透光率高达60.37%, 是NW的10.74倍、DW的5.4倍(图4c、4d)。NW因其细胞结构复杂, 密度较低且具有不透明性, 木质素能够强烈吸收和散射可见光, 因此其光学透过率极低。DW因木质素脱除, 密度相应降低, 孔隙率增加, 光线穿透难度减小, 但其内部仍存在大量散射界面(如细胞壁与空气的界面), 导致光学散射严重, 透明度不高。TWF经过致密化处理, 其密度增加, 厚度减小, 光学透过率提升。



注:图4c插图为TWF的透明度展示照片。

图4 天然木材、脱木质素木材、自致密透明木材膜的厚度、密度及透过率

Fig.4 Thickness, density, and optical transmittance of natural wood, delignified wood, and transparent wood film

**2.4.2 力学性能** 由于氢键诱导自致密作用, 与NW和DW相比, TWF展现出优异的拉伸性能和韧性。图5a为NW、DW、TWF在纤维方向的应力-应变曲线, 三者都在拉伸破坏之前都表现出线性变形行为。图5b显示, TWF拉伸强度为306.03 MPa, 是NW (15.45 MPa)的19.80倍、DW (34.61 MPa)的8.84倍。本研究制备的TWF拉伸强度, 亦高于毛细管驱动自密实化制备的木质薄膜 (282 MPa)<sup>[10]</sup>, 分析其原因, 可能与脱除木质素方式有关。本研究采用亚氯酸钠脱木质素, 在实现木质素高效脱

除的同时, 能够最大程度保留纤维素骨架的完整性, 从而赋予TWF较高的拉伸强度。图5c表明, TWF杨氏模量达16.23 GPa, 为NW (1.95 GPa)的8.32倍、DW (3.45 GPa)的4.70倍。图5d显示, TWF韧性为10.82 GPa·cm<sup>3</sup>/g, 为NW (1.14 GPa·cm<sup>3</sup>/g)的8.32倍、DW (1.30 GPa·cm<sup>3</sup>/g)的4.70倍。结合拉伸强度、杨氏模量与韧性的数据对比结果, 均呈现TWF > DW > NW的趋势, 证实氢键增强、结晶度提高与结构致密化的协同增强效应, 增强了TWF其承受拉伸载荷的能力。

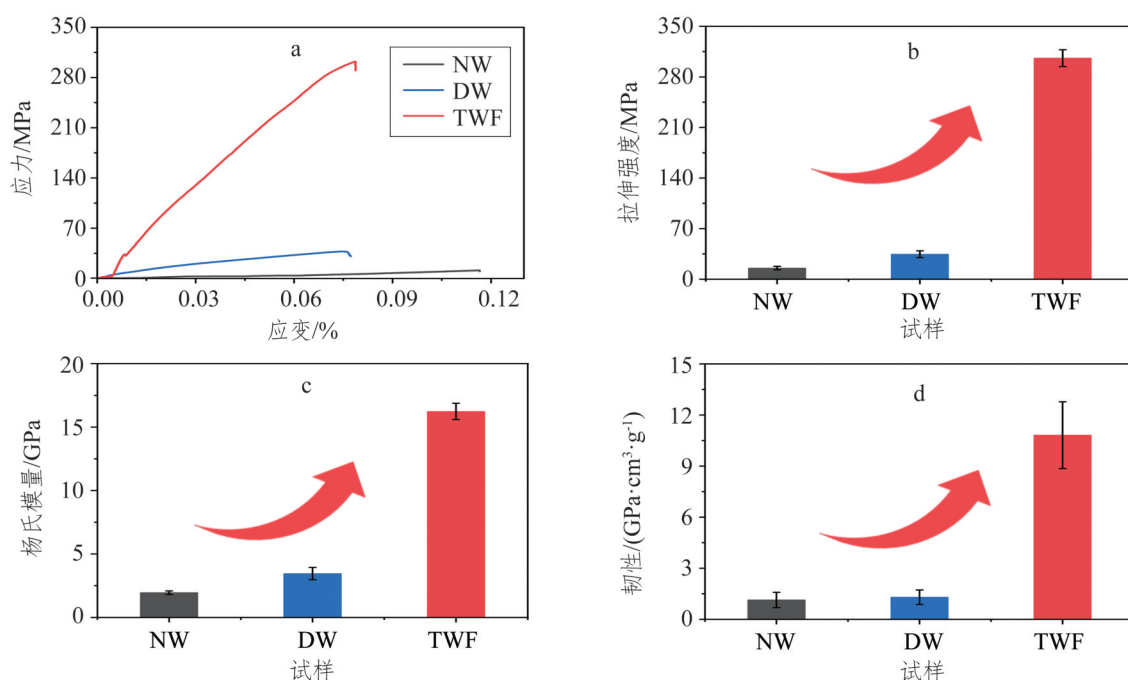


图5 天然木材、脱木质素木材、自致密透明木材膜的力学性能  
 Fig.5 Mechanical properties of natural wood, delignified wood, and transparent wood film

**2.4.3 耐折叠性能** 图6a与图6c分别展示了A4纸与TWF-L采用相同手工玫瑰折叠方法的成型效果。该折叠工艺对材料的机械性能，尤其是强度与韧性提出了较高要求。如图6b与图6d所示，折叠后展开观察发现，A4纸表面出现明显折痕，且两端中间位置均发生撕裂；相比之下，TWF-L未见明显撕裂，仅留有轻微折痕，显示出更优的耐折叠性。为定量评估材料的耐折叠性能，在4.91 N载荷条件下，利用折叠耐力测试仪对其进行循环折叠测试。图6e表明，TWF-L的循环折叠次数达到231次，TWF-T的循环折叠次数达到95次，TWF-L的耐折叠次数为TWF-T的2.43倍，表明TWF的纵向耐折叠性能显著优于横向耐折叠性能；而A4纸为148次，TWF-L的耐折叠次数为A4纸的1.56倍，进一步证实TWF-L在反复弯折情况下具有优异的耐折叠性能。

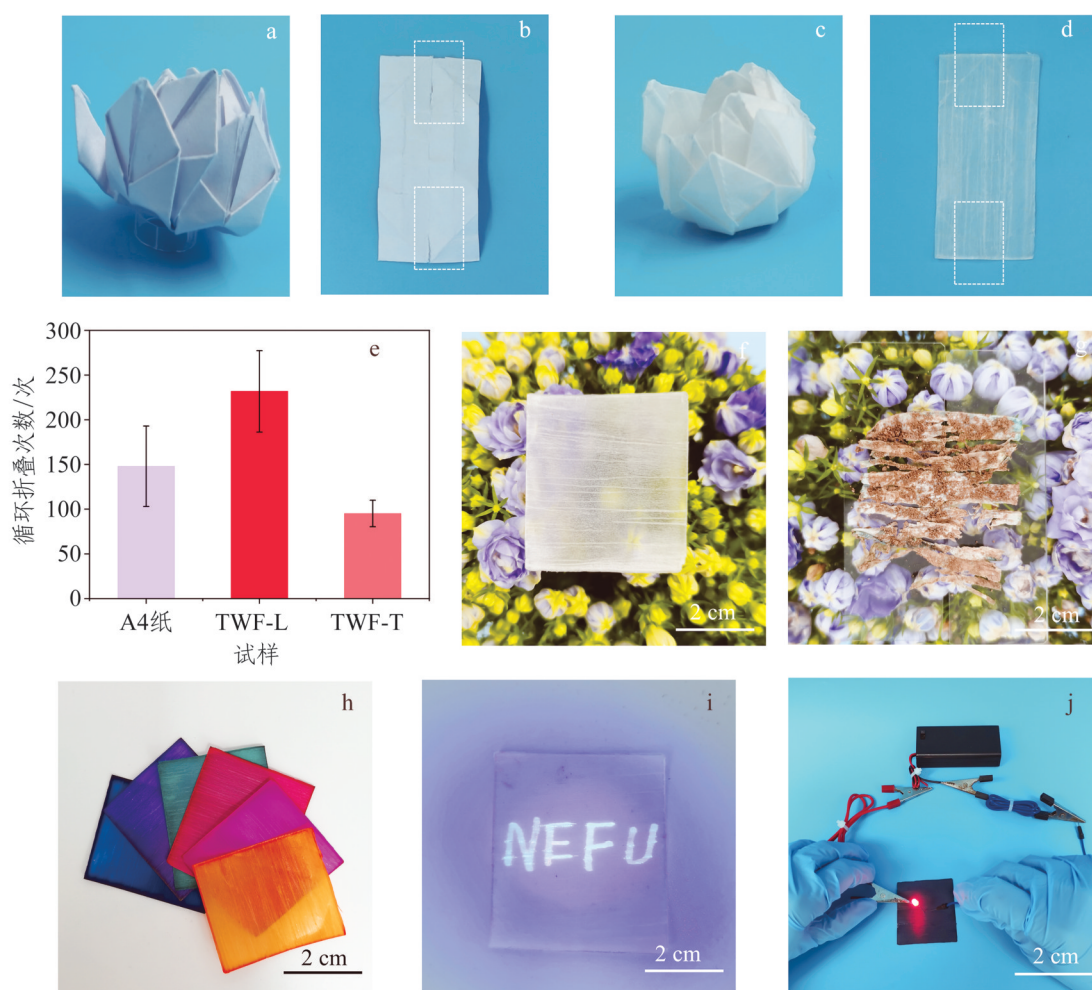
**2.4.4 生物降解性** 作为环境友好型材料，TWF的生物降解性能是关键指标。为此，将TWF样品置于中国黑龙江省哈尔滨市自然土壤环境中（平均温度28℃，平均湿度65%）开展了为期14天的自然土壤掩埋实验。降解前后的形貌对比显示（图6f, g），经过14天降解后，TWF样品出现明显破碎与结构瓦解，表明其已进入初步生物降解阶

段，证实该材料具有生物降解性，为其在绿色材料领域的应用提供了重要依据。

## 2.5 自致密膜的应用展示

为拓展自致密TWF的功能化应用，从多角度对其进行性能设计。首先，在进行大气干燥前，将TWF浸渍于不同染料中，可以实现材料的均匀染色，获得了色彩丰富的彩色TWF样品（图6h），显示出优异的可染色性，可拓展其在装饰与包装领域的应用。其次，在功能性表面处理方面，TWF表现出良好的可书写性能，特别是在使用防伪笔书写后，材料在紫外光照射下呈现清晰荧光图案（图6i），表明其在防伪标识方面具备应用潜力。为进一步赋予TWF功能性，将MXene纳米材料负载于TWF表面，成功制备得到负载MXene的TWF。为验证其导电性能，将负载MXene的TWF作为导线接入闭合电路中进行电灯发光实验。如图6j所示，电路中小灯泡可正常点亮且亮度稳定，表明MXene在TWF表面负载均匀且导电通路完整，材料具备良好的导电性能。

综上所述，TWF在可染色性、书写性、导电以及可折叠成型性方面均表现出色，同时具备生物降解性能，在多功能纸张、柔性电子器件及可持续材料等领域展现出广阔的应用前景。



注:a,b为A4纸手工折叠花样品、折叠后展开图;c,d为TWF手工折叠花样品、折叠后展开图。

e为A4纸与纵向、横向TWF的循环折叠次数;f,g分别为TWF未经土壤降解处理时、经14天土壤降解处理后的展示。

h为染色TWF样品;i为TWF荧光书写展示图;j为负载MXene的TWF导电性能展示。

图6 自致密透明木材膜的耐折叠性能、降解性能和应用展示

Fig.6 Folding durability, biodegradability, and application demonstrations of transparent wood film

### 3 结论与展望

1) 通过脱木质素结合大气干燥处理, 成功将天然轻木转化为高性能透明木材膜, 确定适宜自致密成膜的脱木质素条件为: 亚氯酸钠溶液质量分数2%、加热时间2 h、温度90 °C。该条件组合能够有效去除木质素, 同时保持纤维素骨架的完整性, 使得纤维素纳米纤维在大气干燥过程中通过氢键作用自发致密化, 形成连续均匀的膜结构。

2) 在上述脱木质素条件下制备的TWF, 其密度(0.79 g/cm<sup>3</sup>)、光学透明度(透过率60.37%)、力学性能(拉伸强度306.03 MPa、杨氏模量16.23 GPa、韧性10.82 GPa·cm<sup>3</sup>/g)均比NW、DW提升; 耐折叠测试显示, 在4.91 N载荷作用下, TWF-L的循

环折叠次数达231次。TWF具有可折叠性、可生物降解性、可染色性和可书写性等多重特性。

3) 本研究成功制备综合性能优异的透明木材膜, 未来可从如下方面深入研究: 一是解析大气干燥过程中氢键网络重构的微观机制, 以及自致密化过程中分子间相互作用对材料性能的影响; 二是探究功能化改性策略(如表面疏水处理、导电涂层等), 以拓展其在智能包装、柔性传感器、光电器件等领域的应用; 三是评估TWF在不同温湿度、紫外老化等环境下的长期稳定性, 开展生命周期评价, 为其规模化生产和应用提供理论依据和技术支撑。

