

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026049

低温 NaOH 预处理对毛白杨木材 细胞壁孔隙结构的影响

张小力^{1,2}, 戴鑫建¹, 李 珠¹, 王 鑫¹, 王小青¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 南京林业大学, 江苏南京 210037)



摘要: 针对天然木材细胞壁密实、孔隙率低导致其功能化应用受限的问题, 采用低温NaOH水溶液对毛白杨 (*Populus tomentosa*) 木材进行润胀处理, 并结合超临界干燥实现木材细胞壁原位造孔, 以调控木材细胞壁孔隙结构并提升其比表面积。采用扫描电镜、傅里叶变换红外光谱、¹³C核磁共振谱等表征处理材的微观形貌与化学组成, 氮气吸附法研究木材细胞壁孔隙结构随处理时间的演变过程, 并通过动态水蒸气吸附仪及毛细管上升法探究木材细胞壁原位造孔对其吸湿性与渗透性的影响。结果表明: 经低温NaOH处理后, 毛白杨木材细胞壁发生充分润胀, 其厚度增加约1倍, 并形成大量孔径为3~10 nm的介孔; 累计孔体积与比表面积均随处理时间的延长呈先增加后降低的趋势, 18 h低温NaOH处理木材的比表面积(110.14 m²/g)和累计孔体积(0.22 cm³/g)达到峰值, 分别为天然木材的约72倍和44倍; 低温NaOH处理木材的吸湿性与渗透性较天然木材明显提升。本研究采用低成本绿色溶剂预处理实现国产速生杨木细胞壁原位造孔并提升其可及性, 为木材细胞壁纳米结构调控及其功能化应用提供新思路。

关键词: 毛白杨木材; 低温NaOH预处理; 细胞壁; 孔隙结构; 可及性

中图分类号: S781.7; S792.117 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 04-0037-08

Effect of Low-Temperature NaOH Pretreatment on the Porous Structure of *Populus tomentosa* Wood Cell Walls

Zhang Xiaoli^{1,2}, Dai Xinjian¹, Li Zhu¹, Wang Xin¹, Wang Xiaoqing¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: To address the issue that the compact cell walls and low porosity of natural wood limit its functional applications, poplar (*Populus tomentosa*) wood was subjected to swelling treatment with a low-temperature NaOH aqueous solution, combined with supercritical drying to achieve *in situ* pore formation within the wood cell walls, thereby tailoring the porous structure of the wood cell walls and enhancing their specific surface area. The microstructure and chemical composition of the treated wood were characterized by the scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, and ¹³C nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy. The nitrogen adsorption method was used to investigate the evolution of the porous structure of wood cell walls with the treated time. The

收稿日期: 2026-04-13; 修改日期: 2026-07-10

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题“木竹材细胞壁多层级结构与构效调控机制”(2023YFD2200501)。

作者简介: 张小力(1999—), 女, 硕士研究生。Email: zxlzhangxiaoli126@163.com

通讯作者: 王小青, 男, 研究员。Email: wangxq@caf.ac.cn

effects of *in situ* pore formation in wood cell walls on their hygroscopicity and permeability were explored using dynamic vapor sorption (DVS) and capillary rise method. The results showed that the low-temperature NaOH treatment induced pronounced swelling of the wood cell walls, resulting in a doubled cell wall thickness, and the formation of numerous mesopores with the diameter ranging from 3 to 10 nm. Both the cumulative pore volume and the specific surface area showed a trend of first increasing and then decreasing with prolonged treatment time. The specific surface area and cumulative pore volume of the 18-h-treated wood reached peak values of 110.14 m²/g and 0.22 cm³/g, respectively, approximately 72 and 44 times those of untreated wood. Moreover, the low-temperature NaOH-treated wood showed a significant improvement in hygroscopicity and liquid permeability over the untreated wood. This study employed a low-cost green solvent pretreatment to achieve *in situ* pore formation in domestic fast-growing poplar wood cell walls and enhanced their accessibility, providing new insights for regulating the nanostructure of wood cell walls and advancing their functional applications.

Key words: *Populus tomentosa* wood; low-temperature NaOH pretreatment; wood cell wall; porous structure; accessibility

木材作为一种生物质多孔材料,具有从宏观、介观到微观的多级孔隙结构,这些孔隙结构为木材改性和功能化处理提供物质传输的通道以及改性剂固着与反应的场所^[1-2]。然而,天然木材细胞壁较为致密,孔隙结构相对复杂且分布不均^[3-4],限制了木材细胞壁的可及性及改性剂的渗透与均匀分布^[5-6]。预处理是调控木材细胞壁孔隙结构,提升其功能性改良效果的有效方法^[7-8]。目前,常用的预处理方法主要包括物理法、化学法和生物法三类。其中,化学法是通过化学处理调控木材的化学组分及孔隙结构,在木材细胞壁中创造大量的微孔和介孔,进而为后续功能化改性提供更多传质通道和反应位点,主要包括脱木质素^[9-10]、氧化^[11-12]、离子液体^[13-14]及低共熔溶剂^[7,15]处理等。化学法因其处理效率高、可控性强、适用性广等诸多优势,受到学者的广泛关注。然而,化学处理普遍存在试剂成本高、环境危害等问题,因此有必要选择一种低成本且绿色环保的预处理方法对木材细胞壁孔隙结构进行有效调控。

NaOH水溶液作为一种低成本且相对环境友好的绿色溶剂,在木质纤维素化学预处理中具有显著优势。研究表明,质量分数为6%~10%的NaOH水溶液在低温下(−10~−4℃)可以破坏纤维素分子链之间的氢键,从而润胀并逐步溶解纤维素^[16]。Chen等^[17]采用低温NaOH溶液预处理轻木(*Ochroma lagopus*),通过润胀木材细胞壁中纤维

素微纤丝并结合超临界干燥方法,实现细胞壁的原位造孔。与低温NaOH处理纤维素不同,由于木材细胞壁中基质成分对纤维素骨架的保护,低温NaOH溶液仅能对微纤丝进行有限润胀而非溶解。这种微纤丝的有限润胀在木材细胞壁中创造了丰富的介孔结构,处理材比表面积高达204 m²/g(为天然木材的约26倍),显著提升了木材细胞壁对改性剂的容纳空间,为木材功能化改良提供了有利条件。尽管如此,目前采用低温NaOH预处理提升木材渗透性的研究仅局限于细胞壁较薄的轻木,而对细胞壁较厚的国产速生材树种的研究较为缺乏。轻木细胞壁较薄,NaOH溶液诱导的细胞壁润胀受到的结构约束相对较小;而对于细胞壁较厚的木材,NaOH溶液的扩散、渗透以及细胞壁介孔结构的形成可能受到更强的结构约束,由此产生的细胞壁润胀规律与造孔效果存在差异,因此有必要开展相关研究。

基于此,本研究采用低温NaOH水溶液对国产速生材树种毛白杨(*Populus tomentosa*)木材进行润胀处理,并结合超临界干燥方法实现木材细胞壁的原位造孔,提升木材细胞壁可及性。研究低温NaOH处理对木材细胞壁微观结构和化学组成的影响,探讨木材细胞壁孔隙结构随处理时间的演变规律,并分析木材细胞壁孔隙结构变化对其吸湿性与渗透性的影响,以期对木材细胞壁纳米结构调控及其功能化应用提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

毛白杨 (*Populus tomentosa*): 外购, 初始含水率约为12%, 气干密度为0.53 g/cm³, 分别制备规格尺寸为10 mm×10 mm×10 mm和8 mm×3 mm×50 mm (径向×弦向×轴向)的试样备用。

试剂: 氢氧化钠 (NaOH)、乙醇、去离子水等, 均外购。

1.2 试验设备与仪器

低温恒温槽、超临界CO₂流体萃取仪、场发射扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱仪、比表面积及孔隙度分析仪、动态水蒸气吸附分析仪、超导核磁共振仪。

1.3 试验方法

将毛白杨天然木材 (natural wood, NW) 试样浸没于4 °C去离子水中静置24 h, 随后将试样转移至-6 °C、质量分数为7%的NaOH溶液中, 处理不同时间 (6 h、12 h、18 h、24 h)^[17]; 处理后用去离子水反复冲洗试样至溶液呈中性, 去除残留药剂。随后将试样放入质量分数为99.5%的乙醇溶液中置换48 h, 并将置换后的试样置于超临界CO₂流体萃取仪中干燥8 h, 获得低温NaOH处理木材, 含水率为1%~3%。

1.4 性能表征

1.4.1 比表面积和孔径分布 以氮气作为吸附介质, 将木材试样在120 °C下脱气8 h, 采用比表面积及孔隙度分析仪对试样的孔隙结构进行表征。根据BET (Brunauer-Emmett-Teller) 法计算不同木材试样的比表面积, 并结合BJH (Barrett-Joyner-Halenda) 法分析材料的孔径分布。每组数据重复测试3个试样。

1.4.2 化学组成与结构分析

1) 化学组分含量测定。将处理前后的木材试样研磨成40~60目的木粉备用。参照GB/T 2677.10—1995《造纸原料综纤维素含量的测定》测定综纤维素含量; 参照GB/T 744—2004《纸浆 抗碱性的测定》测定 α -纤维素含量; 根据综纤维素与 α -纤维素含量计算半纤维素含量; 参照GB/T 2677.8—1994《造纸原料酸不溶木素含量的测定》测定酸不溶木质素含量。每组数据重复测试3个试样。

2) 官能团分析。采用傅里叶变换红外光谱仪, 在衰减全反射模式下对低温NaOH处理前后木材试样进行扫描, 扫描范围为4 000~400 cm⁻¹, 分辨率为4 cm⁻¹, 扫描32次。

3) 固体核磁共振分析。将处理前后的木材试样研磨成60~100目的木粉备用。固体核磁共振分析 (CP/MAS ¹³C NMR) 谱图采用布鲁克400M超导核磁共振仪进行测定。将试样装在4 mm氧化锆转子中, 检测时采用交叉极化脉冲程序, 匹配时间为2 ms, 延迟时间为5 s, 转速为10 kHz。

1.4.3 微观形貌表征 先对试样表面进行喷金处理, 再采用扫描电镜对处理前后试样的微观形貌进行观察。通过Image J软件对低温NaOH处理前后试样的细胞壁厚度进行统计分析。

1.4.4 渗透性测试 采用毛细管上升法^[6]表征处理前后试样的渗透性。将尺寸为8 mm×3 mm×50 mm (径向×弦向×轴向)、不同处理时间的试样采用砂纸打磨去除表面毛刺, 使用铁架台将试样固定在同一高度, 保证其底端面可以同时接触到下方液体。为增强视觉效果, 采用墨水对试样下方培养皿中的去离子水进行染色, 当试样底端面接触到染液液面时开始计时, 记录染液爬升高度和试样的吸液量。每组数据重复测试3个试样。

1.4.5 动态水蒸气等温吸附测定 采用动态水蒸气吸附仪测定试样的水蒸气吸湿-解吸等温线。将30 mg固体木材试样载入样品盘, 并在相对湿度 (relative humidity, RH) 为0%、温度为25 °C的条件下进行平衡处理, 获得干态质量。随后按阶梯程序进行吸附与脱附: 吸附阶段RH由0%升至90%, 递增梯度为10%, 再由90%增至95%; 脱附阶段, RH由95%降至90%, 再由90%递减至0%, 降低梯度为10%。当10 min内试样质量变化小于0.002%即认为试样在该RH下达到含水率平衡态, 进而调节RH到下一级阶段进行测试。

2 结果与分析

2.1 孔隙结构

采用氮气吸附法对低温NaOH预处理木材的孔隙结构进行表征, 不同预处理试样的氮气吸附-脱附曲线如图1a所示。

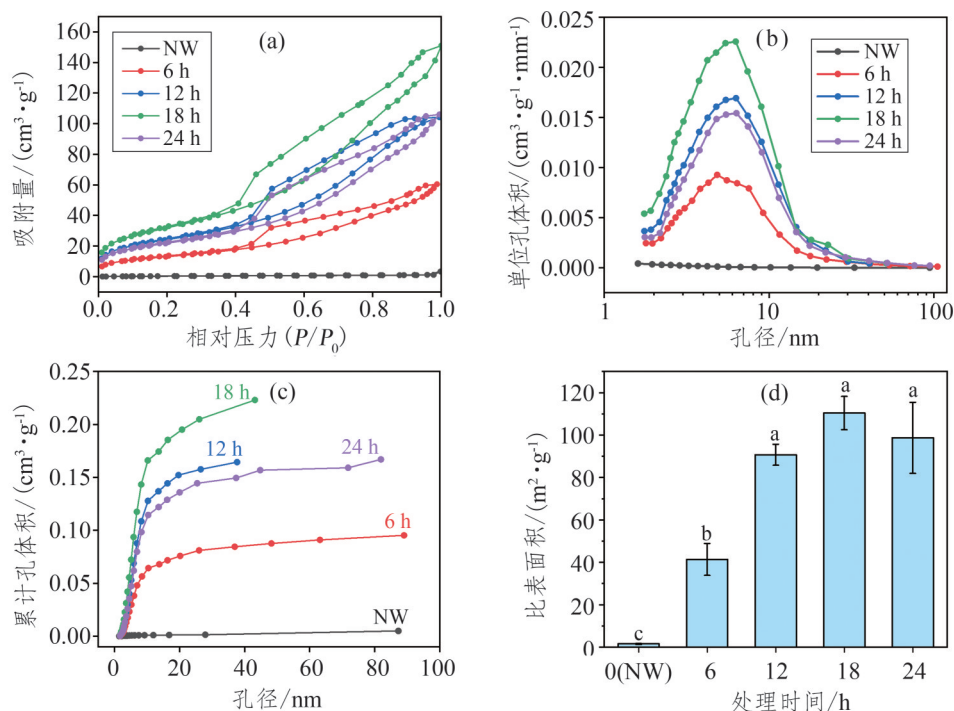


图1 低温NaOH预处理前后毛白杨木材的孔隙结构

Fig.1 Porous structure of *Populus tomentosa* wood samples before and after low-temperature NaOH pretreatment

与天然木材相比, 低温NaOH预处理木材试样的氮气吸附量显著增加, 且随处理时间的延长, 其氮气吸附量呈先增加后降低的趋势, 当处理时间为18 h时其氮气吸附量达到峰值 (151 cm³/g)。根据国际纯粹与应用化学联合会关于气体吸附等温线及迟滞环的分类, 低温NaOH处理木材的吸附-脱附等温线属于典型的IV型等温线并具有H3型迟滞环, 表明低温NaOH处理可充分润胀木材细胞壁, 形成大量呈狭长裂口状的介孔。

图1b为不同预处理时间试样的孔径分布。天然木材的孔径分布曲线较为平缓, 未出现明显的峰值, 且单位孔体积较低, 表明天然木材细胞壁中纳米孔隙有限。与之相比, 预处理木材细胞壁中3~10 nm范围的介孔数量明显增加, 且在6 nm孔径附近的单位孔体积增量变化尤为显著。随着处理时间的延长, 孔径在3~10 nm范围内的孔隙数量呈先增加后减少的趋势, 当处理时间为18 h时其介孔数量达到峰值。

图1c为木材细胞壁累计孔体积与孔径的关系。天然木材的累计孔体积较低, 经低温NaOH处理后, 试样孔径在0~10 nm范围内的累计孔体积显著增加, 而大于10 nm的孔径缓慢增加并趋于稳定,

说明低温NaOH处理木材细胞壁内主要形成了小于10 nm的介孔。18 h预处理木材的累计孔体积 (0.22 cm³/g) 达到峰值, 为天然木材的约44倍。

根据BET方法计算木材试样的比表面积, 结果如图1d所示。天然木材细胞壁结构致密, 比表面积仅为1.53 m²/g。与之相比, 随着处理时间的延长, 低温NaOH预处理木材试样的比表面积显著增加, 且呈现先增加后降低的趋势。当处理时间为18 h时其比表面积达到峰值 (110.14 m²/g), 为天然木材的约72倍。这可能是由于在18 h内随着处理时间延长, 木材细胞壁基质成分逐渐脱除且纤维素微纤丝持续润胀, 因而产生丰富的纳米孔隙; 而处理时间进一步增加, 导致木材细胞壁骨架结构遭受一定程度的损坏, 从而使其比表面积略有降低^[17]。

由此可见, 低温NaOH预处理可显著增加木材中介孔的数量, 具有良好的细胞壁造孔效果。这种丰富的细胞壁纳米孔隙为木材功能化改性创造了有利条件。轻木经低温NaOH溶液润胀处理后, 其比表面积高达204 m²/g^[17], 其润胀程度与造孔效果明显优于毛白杨木材, 这与后者细胞壁较厚形成更强的结构约束有关。

2.2 化学组成

图2a展示不同预处理试样的主要化学组分相对含量(质量分数)变化。与天然木材相比, 6 h预处理木材的半纤维素相对含量显著降低, 延长处理时间对含量变化影响较小, 表明半纤维素主要在处理前6 h内发生降解。处理材半纤维素相对含量的降低, 使木质素和纤维素的相对含量整体呈上升趋势。

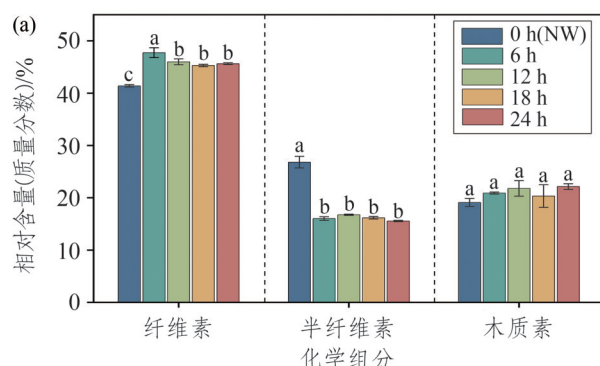


图2 低温NaOH预处理前后毛白杨试样的化学组成分析

Fig.2 Chemical composition of *Populus tomentosa* wood samples before and after low-temperature NaOH pretreatment

天然木材和18 h预处理木材试样的 ^{13}C 固体核磁共振图谱, 如图3所示。与天然木材相比, 18 h预处理木材的纤维素碳信号峰(C1~C6)和木质素的芳香环及甲氧基($-\text{OCH}_3$)碳信号峰强度无明显变化, 而 $\delta=172.7$ 和 21.3 处归属于半纤维素中乙酰基的羰基和甲基的碳信号峰强度显著降低^[18-19]。上述结果与主要化学组分相对含量的变化规律及红外光谱图相吻合, 进一步表明低温NaOH预处理可选择性脱除木材中部分半纤维素, 而对纤维素和木质素含量影响较小。

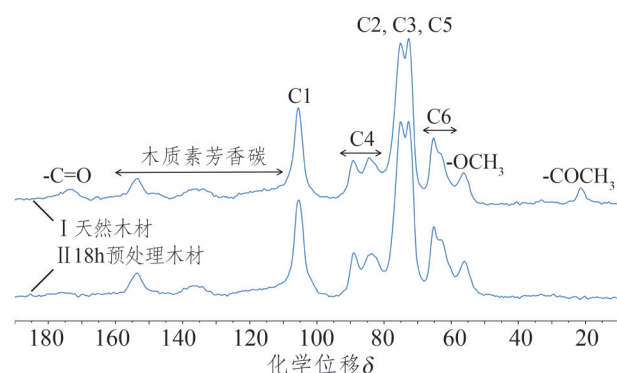
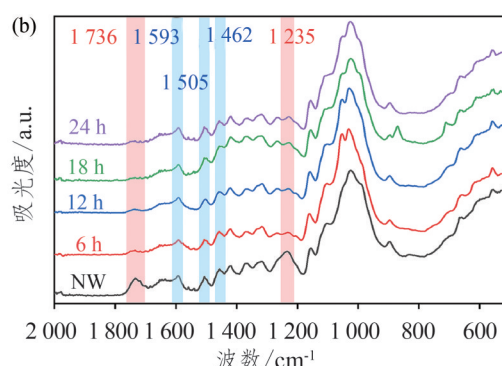


图3 天然木材和低温NaOH预处理18 h木材试样的固体核磁共振波谱图

Fig.3 The solid-state CP/MAS ^{13}C NMR spectra of NW and low temperature NaOH treated wood samples (18 h)

不同预处理试样的傅里叶红外光谱如图2b所示。与天然木材相比, 预处理木材的木质素特征峰(1593 、 1505 、 1462 cm^{-1})强度无显著变化。当处理时间为6 h时, 预处理木材的半纤维素特征峰(1736 和 1235 cm^{-1})强度明显降低, 继续延长处理时间其峰强无明显变化。这表明6 h低温NaOH预处理即可选择性脱除木材中大部分半纤维素, 且预处理对木质素无显著影响。



2.3 微观形貌

图4为天然木材和18 h预处理试样早/晚材的横截面扫描电镜图。

天然木材的早材纤维细胞腔大壁厚(平均壁厚约 $1.8\text{ }\mu\text{m}$), 而晚材纤维细胞腔小壁厚(平均壁厚约 $2.2\text{ }\mu\text{m}$)。与天然木材相比, 18 h预处理木材的早/晚材纤维细胞壁均显著增厚, 其平均壁厚分别增加至 $3.9\text{ }\mu\text{m}$ 和 $4.2\text{ }\mu\text{m}$, 细胞腔明显缩小。预处理木材早材和晚材细胞壁增厚幅度接近, 壁厚约为天然木材的2倍, 表明低温NaOH预处理可充分润胀木材细胞壁。这种显著的细胞壁润胀效果主要源于以下两个因素: 一方面, 低温NaOH预处理选择性脱除了木材细胞壁中部分半纤维素, 一定程度上暴露出纤维素骨架中的微纤丝束, 为细胞壁润胀创造了有利条件; 另一方面, 低温NaOH水溶液中形成的水合离子($[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_n]^+$ 和 $[\text{OH}(\text{H}_2\text{O})_n]^-$)会破坏纤维素分子链间的氢键网络, 使分子链发生润胀并增大其间距, 进而在宏观上表现为细胞壁增厚^[20]。值得注意的是, 与细胞壁相对较薄的轻木相比, 本研究中毛白杨木材细胞壁的润胀程度表现出明显差异。轻木经低温NaOH溶液润胀处理后, 其细胞壁厚度为天然木材的

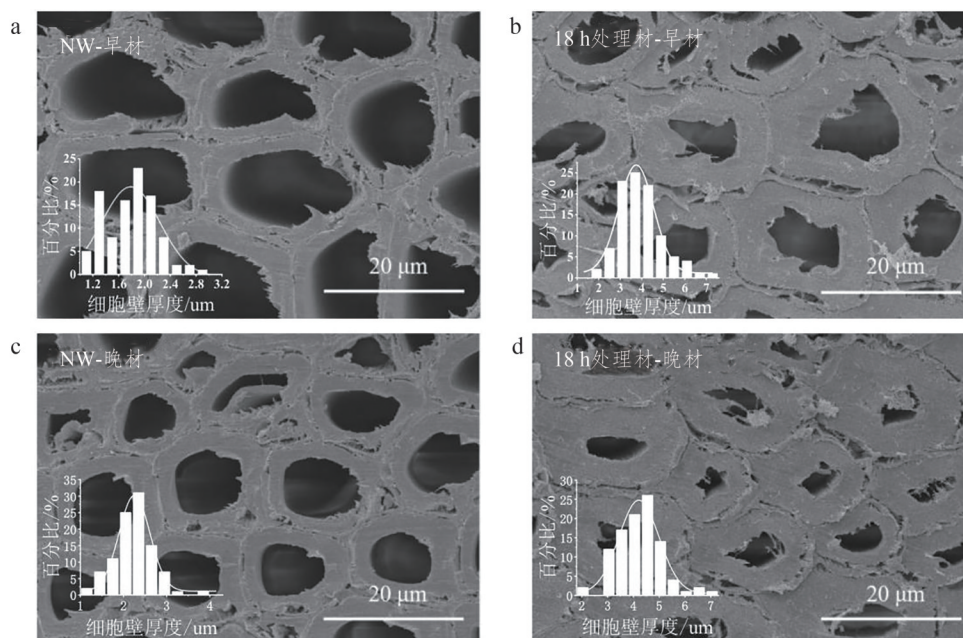


图4 天然木材和低温 NaOH 预处理 18 h 木材试样早材和晚材的横截面扫描电镜图

Fig.4 SEM images of the cross-section of NW and low temperature NaOH treated wood samples (18 h)

约 5 倍^[17]；而本研究中处理后毛白杨木材细胞壁厚度为天然木材的约 2 倍，明显低于轻木。这说明低温 NaOH 溶液处理对木材细胞壁的润胀作用受木材密度、细胞壁厚度及化学组成等因素的影响。

2.4 渗透性与吸湿性

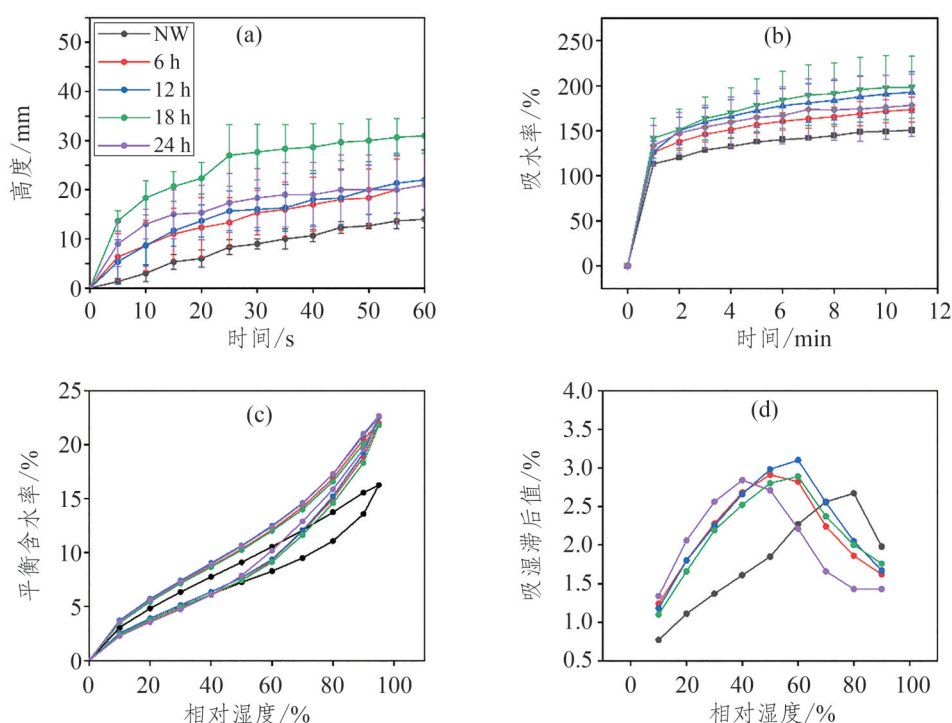
细胞壁增厚及孔隙结构变化势必影响木材液体渗透性与吸湿性。采用毛细管上升法表征木材渗透性，图 5a 展示不同预处理试样的表面染液毛细管上升高度随时间的变化。

与天然木材相比，同一时刻低温 NaOH 预处理木材试样的水上升高度明显增加，且随着处理时间延长，试样表面水上升高度整体呈现先增加后降低的趋势，当处理时间为 18 h 时试样表面水上升高度达到峰值，表明其渗透性最优。这是由于天然木材细胞壁结构致密且纳米孔隙有限，其内部的液体渗透主要依赖于微米级的细胞腔孔道和细胞壁上的纹孔，毛细作用相对较弱^[21]；而低温 NaOH 预处理可在木材细胞壁中形成丰富的纳米孔隙，增加纳米级液体传输通道，从而增强毛细效应，改善木材渗透性。当处理时间过长（24 h），木材细胞壁中纳米孔隙数量减少，毛细作用相应减弱，因而其水上升高度较 18 h 处理木材有所降低。图 5b 展示不同预处理试样吸水率随时间的变

化趋势。与天然木材相比，预处理木材的吸水率明显增加，且 18 h 处理材的吸水率增幅最高可达 36.66%，表明低温 NaOH 预处理显著改善了木材的渗透性。这主要得益于预处理木材细胞壁中丰富的纳米孔隙及高比表面积为水分提供了充足的传输通道和容纳空间。

图 5c 为不同预处理试样的吸湿-解吸等温线。所有木材试样水分吸着等温线均呈“S”型，属于第 II 类吸着等温线^[22]。在各相对湿度条件下，预处理木材的吸湿平衡含水率均高于天然木材。当相对湿度为 95% 时，6、12、18 和 24 h 预处理材的平衡含水率分别为 22.00%、22.55%、21.76% 和 22.65%，与天然木材平衡含水率（16.25%）的差值达到最大。这主要是因为低温 NaOH 预处理在木材细胞壁中创造了丰富的纳米孔隙，且部分基质成分的脱除提高了羟基、羧基等亲水性位点的可及性，从而增强了木材的吸湿性。

对比试样渗透性与吸湿性的测试结果可以发现，尽管 18 h 预处理木材的比表面积和在短期内（10 min）基于毛细管上升法测得的液体渗透性高于 24 h 预处理材，但其在 95% 相对湿度下的平衡含水率却低于 24 h 预处理材。这可能是因为 24 h 预处理材细胞壁的高润胀度不可避免地弱化了细



a 木材表面染液上升高度随时间的变化; b 吸水率; c 等温吸湿-解吸曲线; d 吸湿滞后值。

图5 低温NaOH预处理对毛白杨木材渗透性与吸湿性的影响

Fig.5 Effect of low-temperature NaOH pretreatment on *Populus tomentosa* wood permeability and hygroscopicity

胞壁结构^[17], 使其孔隙在干燥时更易闭合或塌陷, 因而其干态比表面积低于18 h预处理材。然而, 在动态水蒸气等温吸附测试中, 由于木材试样长期暴露在湿度环境下, 干燥状态的细胞壁骨架可发生水分诱导的二次润胀, 使部分闭孔重新开放, 提高吸湿位点的可及性, 因此在高相对湿度下24 h预处理材平衡含水率高于18 h预处理材。任意相对湿度下, 天然木材与预处理木材的吸湿平衡含水率均高于解吸平衡含水率, 表现出明显的吸湿滞后行为。天然木材和预处理木材试样的吸湿滞后值随相对湿度的变化均呈现先增大后减小的趋势(图5d), 但其吸湿滞后峰值对应的相对湿度值有所不同。天然木材的吸湿滞后峰值(2.67%)出现在80% RH时, 而6、12、18和24 h预处理木材试样的吸湿滞后峰值对应的相对湿度分别移至50%、60%、60%和40% RH, 整体表现为向低湿区移动。这可能是由于预处理后木材细胞壁孔隙结构较天然木材更为丰富, 水分进入细胞壁的阻力减小, 湿度敏感性增强, 使其吸湿滞后峰值向低湿区移动^[23]。

3 结论

1) 采用低温NaOH水溶液预处理毛白杨木材, 并结合超临界干燥, 可实现木材细胞壁的充分润胀, 早材与晚材细胞壁增厚约1倍。低温NaOH处理主要引起半纤维素降解, 对木质素和纤维素含量的影响较小。

2) 由于木材细胞壁部分基质成分被脱除以及纤维素微纤丝束的润胀, 低温NaOH预处理显著提升了木材细胞壁孔径在3~10 nm范围内的介孔数量, 具有良好的造孔效果; 低温NaOH处理时间显著影响木材孔隙结构, 18 h处理材的累计孔体积可达0.22 cm³/g, 比表面积高达110.14 m²/g, 分别为天然木材的约44倍和72倍。

3) 低温NaOH预处理实现了毛白杨木材细胞壁增厚及原位造孔, 提升了细胞壁的水分可及性, 使处理后木材吸湿性增强、液体渗透性提高, 为国产速生杨木功能化改良(如树脂浸渍、纳米负载)提供了有利条件。后续还需从孔隙结构调控、结构稳定性提升、树种普适性验证、功能化应用等方面开展深入研究。

参考文献:

- [1] Chen C J, Kuang Y D, Zhu S Z, et al. Structure-property-function relationships of natural and engineered wood[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(9): 642-666.
- [2] 王成毓, 杨照林, 王鑫, 等. 木材功能化研究新进展[J]. *林业工程学报*, 2019, 4(3): 10-18.
Wang Chengyu, Yang Zhaolin, Wang Xin, et al. New research progress of functional wood[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2019, 4(3): 10-18.
- [3] Acosta A P, de Avila Delucis R, Santos O L, et al. A review on wood permeability: influential factors and measurement technologies[J/OL]. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2024, 21(1): 175-191. <https://doi.org/10.1007/s13196-024-00335-4>.
- [4] 卢芸, 王凯, 付宗营, 等. 木材孔隙结构的调控与利用研究进展[J]. *木材科学与技术*, 2023, 37(6): 1-11, 60.
Lu Yun, Wang Kai, Fu Zongying, et al. Research progress on the regulation and utilization of wood pore structure[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2023, 37(6): 1-11, 60.
- [5] 王箫笛, 杨琳. 木材渗透性及其物理改善方法研究进展[J]. *世界林业研究*, 2023, 36(4): 59-63.
Wang Xiaodi, Yang Lin. Research progress in wood permeability and its physical methods for improvement[J]. *World Forestry Research*, 2023, 36(4): 59-63.
- [6] 吕建雄, 林志远, 蒋佳荔, 等. 不同干燥方法对杉木人工林木材浸注性的影响[J]. *林业科学*, 2006, 42(10): 85-90.
Lyu Jianxiong, Lin Zhiyuan, Jiang Jiali, et al. Effect of different drying methods on the liquid impregnation of Chinese fir plantation wood[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(10): 85-90.
- [7] 柯梦庆, 张肖凯, 周廷, 等. 低共熔溶剂预处理对北美赤杨木材性的影响[J]. *林业工程学报*, 2025, 10(3): 33-38.
Ke Mengqing, Zhang Xiaokai, Zhou Ting, et al. Effects of deep eutectic solvents pretreatment on wood properties of *Alnus japonica* wood[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2025, 10(3): 33-38.
- [8] 彭婷婷, 杨兆哲, 符启良, 等. 木材预处理技术的研究进展与应用综述[J]. *材料导报*, 2025, 39(18): 258-272.
Peng Tingting, Yang Zhaozhe, Fu Qiliang, et al. Review on research progress and application of wood pretreatment technology[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(18): 258-272.
- [9] Li J G, Chen C J, Zhu J Y, et al. In situ wood delignification toward sustainable applications[J]. *Accounts of Materials Research*, 2021, 2(8): 606-620.
- [10] Fu Q L, Ansari F, Zhou Q, et al. Wood nanotechnology for strong, mesoporous, and hydrophobic biocomposites for selective separation of oil/water mixtures[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(3): 2222-2230.
- [11] Wang S N, Li L W, Zha L, et al. Wood xerogel for fabrication of high-performance transparent wood[J/OL]. *Nature Communications*, 2023, 14: 2827. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38481-x>.
- [12] 吴明月, 戴鑫建, 王鑫, 等. TEMPO氧化处理调控轻木细胞壁纳米结构[J]. *木材科学与技术*, 2024, 38(6): 1-7.
Wu Mingyue, Dai Xinjian, Wang Xin, et al. Regulating *Balsa* wood cell wall nanostructure via TEMPO oxidation[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2024, 38(6): 1-7.
- [13] Chen F, Ritter M, Xu Y F, et al. Lightweight, strong, and transparent wood films produced by capillary driven self-densification[J/OL]. *Small*, 2024, 20(38): e2311966. <https://doi.org/10.1002/smll.202311966>.
- [14] Garemark J, Perea-Buceta J E, Rico Del Cerro D, et al. Nanostructurally controllable strong wood aerogel toward efficient thermal insulation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(21): 24697-24707.
- [15] Ran Y, Li J, Zhang S, et al. Super-stable modified wood for enhanced autonomous indoor humidity regulation[J/OL]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 488: 150814. DOI: 10.1016/j.cej.2024.150814.
- [16] Liebert T. Cellulose solvents-remarkable history, bright future[M]// *Cellulose solvents: For analysis, shaping and chemical modification*. Washington, DC: American Chemical Society, 2010: 3-54.
- [17] Chen H, Garemark J, Li L W, et al. Green nanotechnology of cell wall swelling for nanostructured transparent wood of high optical performance[J/OL]. *Small*, 2025, 21(5): 2406749. <https://doi.org/10.1002/smll.202406749>.
- [18] 肖领平. 木质生物质水热资源化利用过程机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [19] Popescu C M, Larsson P T, Vasile C. Carbon-13 CP/MAS solid state NMR and X-ray diffraction spectroscopy studies on lime wood decayed by *Chaetomium globosum*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 83(2): 808-812.
- [20] 熊碧. 纤维素在碱/尿素体系中溶解机理的核磁共振研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [21] Siau J F. Transport processes in wood[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1984.
- [22] Simpson W. Sorption theories applied to wood[J]. *Wood and Fiber Science*, 1980, 12(3): 183-195.
- [23] Englund E T, Thygesen L G, Svensson S, et al. A critical discussion of the physics of wood-water interactions[J]. *Wood Science and Technology*, 2013, 47(1): 141-161.

(本文编校 向琴)

广告索引

广 1: 杭州太克干燥设备有限公司

封三: 北京欧立华科技发展有限公司

封二: 中国林业科学研究院木材工业研究所

封底: 国家竹产业研究院