DOI:10.12326/j.2096-9694.2024116

糠醇/丙烯酰胺复合改性杨木的制备与性能研究

朱 涵，邹楚文，马荣花，程佳龙，谢延军，王海刚

（东北林业大学材料科学与工程学院；木质新型材料教育部工程研究中心，黑龙江哈尔滨 150040）

摘要：为提高速生材的附加值，以速生大青杨（*Populus ussuriensis*）为原料，使用不同质量分数的糠醇低聚物溶液和不同物质的量比的糠醇/丙烯酰胺改性剂处理木材，分析改性剂的分布情况以及对改性材物理和力学性能的影响。结果表明：当糠醇低聚物溶液质量分数为30%时，低聚物的分子量小于1 000，能够进入细胞壁中。糠醇改性材的尺寸稳定性较未处理材有所改善。添加丙烯酰胺后，糠醇/丙烯酰胺处理材的增重率和密度随着糠醇低聚物溶液添加量的增加而提升，抗湿胀系数可达37.51%。当糠醇与丙烯酰胺的物质的量比为4∶1时，改性材的抗弯强度为83.54 MPa，抗弯模量为14.83 GPa，冲击强度为28.64 kJ/m²，冲击强度比单独糠醇（质量分数为30%）改性材提高44.43%。添加的丙烯酰胺影响糠醇的自交联反应，降低糠醇树脂网络结构的致密程度，提高糠醇/丙烯酰胺改性材的冲击强度。

关键词：木材改性；糠醇改性；丙烯酰胺；冲击性能；尺寸稳定性

中图分类号：S781.7 文献标识码：A 文章编号：2096-9694（2025）02-0012-09

Study on Preparation and Properties of Poplar Wood Modified with Furfuryl Alcohol/Acrylamide

ZHU Han，ZOU Chuwen，MA Ronghua，CHENG Jialong，XIE Yanjun，WANG Haigang

（School of Materials Science and Engineering，Northeast Forestry University；Engineering Research Center of Advanced Wooden Materials Ministry of Education，Haerbin 150040，Heilongjiang，China）

Abstract: In order to add value to the fast-grown wood species, *Populus ussuriensis* was selected as the raw material in this study. Different mass fractions of furfuryl alcohol (FA) oligomer solutions and varying ratios of furfuryl alcohol/acrylamide (AM) modifiers were applied to treat the wood. The distribution of the modifiers and their effects on the physical and mechanical properties of the modified wood were analyzed. The results showed that when the mass fraction of FA was 30% and the molecular weight of oligomers was less than 1 000, the modify solution entered the cell wall. The dimensional stability of furfuryl alcohol modified materials improves with the increase of FA mass fraction. After adding acrylamide, the weight gain rate and density of the FA/AM treated samples increased as the increase of AM addition. The anti-swelling coefficient reached 37.51%. When the ratio of FA to AM substances was 4∶1, the flexural strength of the modified material was 83.54 MPa, the flexural modulus was 14.83 GPa, and the impact strength was 28.64 kJ/m². The impact strength was 44.43% higher than

收稿日期：2024-11-07；修改日期：2025-02-03
基金项目：“十四五”国家重点研发计划“木质材料同质重组/异质复合增强关键技术”（2023YFD2201404）。
作者简介：朱涵（2001—），女，硕士研究生。Email：2790054866@qq.com
通讯作者：王海刚，男，副教授。Email：hgwang@nefu.edu.cn

that of the modified material with furfuryl alcohol alone (mass fraction of 30%). The acrylamide affects the self-crosslinking reaction of furfuryl alcohol, reduces the density of the network structure of furfuryl alcohol resin, and improves the impact strength of FA/AM modified materials.

Key words: wood modification; furfuryl alcohol modification; acrylamide; impact performance; dimensional stability

人工速生林生长周期短、产量高，速生木材在建筑、家具和装饰等领域展现出巨大的应用潜力。但由于生长迅速，速生材通常存在材质软、密度低和易变形等问题，从而限制其在高附加值产品领域的应用。采用物理或化学手段对人工速生林木材进行改性处理，可以提升其物理性能或赋予其更多功能。

目前，常见的木材化学改性方法包括乙酰化处理[1-2]、氮羟甲基树脂改性[3-4]、脲醛树脂处理[5-6]、糠醇树脂处理[7-8]、有机单体处理[9]以及溶胶-凝胶法处理[10]等。根据改性剂与木材的作用机理，木材化学改性主要通过与细胞壁组分接枝、填充细胞壁或细胞腔实现性能优化，不同方法也可以复合使用[11-12]，以实现更好的改性效果。

糠醇是一种由农林废弃物（如甘蔗渣、秸秆和玉米芯等）衍生的极性有机单体[13]，相较于其他改性剂更为环保。糠醇单体能发生脱水缩合反应，形成共轭短链，共轭链之间继续交联，可形成高度聚合的糠醇树脂。糠醇单体分子量为98，能够轻松渗透到木材细胞壁，并原位聚合形成树脂填充在木材细胞壁中，实现木材的密实化。经过糠醇改性的木材展现出良好的尺寸稳定性[14]、耐久性[15]、耐腐性[16]和耐霉菌能力[16]，部分力学强度也得到提升，但糠醇改性材存在一个较为突出的问题，就是改性后木材韧性明显降低[17]。主要是因为糠醇树脂固化后形成的三维网络分子结构太过致密，严重限制了分子的移动，从而使糠醇改性材受到冲击载荷时，分子链难滑移，无法及时分散吸收的能量。另外，糠醇树脂的玻璃态转化温度在70~130 ℃之间，在室温下处于玻璃态[18]，脆性较大，进一步加剧了改性材整体的脆性。这在很大程度上限制了改性材在对韧性要求较高的场景中使用。

鉴于此，本研究采用亲水性的有机小分子丙烯酰胺为增韧剂，选取速生大青杨为研究对象，以糠醇与丙烯酰胺复配的溶液为改性剂，经过真空-加压浸渍处理使改性剂进入木材内部，加热固化得到尺寸稳定性好、吸水率低、韧性好的改性木材，为速生材的高附加值利用提供研究基础。

1　材料与方法

1.1　试验材料

大青杨（*Populus ussuriensis*）木材：尺寸为2 000 mm（L）×150 mm（R）×60 mm（T），平衡含水率约为7.5%，绝干密度为0.47 g/cm^3，试材无开裂、变色和腐朽等缺陷。购于绥芬河。

试剂：糠醇（furfuryl alcohol，FA），质量分数为98%，CAS号98-00-0，分析纯。马来酸酐，CAS号108-31-6，分析纯。四硼酸钠，CAS号1303-96-4，分析纯。丙烯酰胺（acrylamide，AM），CAS号79-06-1，分析纯。均为外购。

1.2　仪器设备

真空压力浸渍罐（定制型号）；空气压缩机（W-0.6/20）；旋片式真空泵（定制型号）；数显测厚仪；傅里叶变换红外光谱仪（Nicolet iN10）；激光扫描共聚焦显微镜（LSM800 with Airyscan）；凝胶液相色谱仪（Agilent 1100 Infinity）；X射线衍射仪（X’Pert^{3}Powder）；扫描电子显微镜（EM-30 Plus）；万能力学试验机（CMT5504）；摆锤式冲击试验机（JC-5）。

1.3　试验方法

1.3.1　糠醇低聚物溶液的制备　在容器中加入质量分数为2%的马来酸酐与4%的硼砂，加去离子水后升温至60 ℃，持续搅拌至完全溶解。再向容器中加入糠醇，使糠醇单体溶液的质量分数分别为10%、20%、30%、40%、50%和60%。在60 ℃下持续加热并搅拌60 min，制得糠醇低聚物溶液。

1.3.2　糠醇改性木材的制备　将绝干木材（尺寸分别为20 mm（L）×20 mm（R）×20 mm（T）、180 mm（L）×10 mm（R）×10 mm（T）、125 mm

（L）×13 mm（R）×13 mm（T））浸泡在糠醇低聚物溶液中进行真空-加压浸渍处理，−0.08 MPa保持30 min，然后0.7 MPa加压保持3 h。卸压后将木材试样取出，擦干表面多余浸渍液，使用铝箔包裹试样后在95 ℃下固化3 h。固化结束后，拆除铝箔，将试材在103 ℃下烘至绝干。

制得的试件按照处理液中FA的质量分数依次标记为：FA10、FA20、FA30、FA40、FA50、FA60，未处理材记为W。

1.3.3 糠醇/丙烯酰胺复合改性木材的制备 选取质量分数为30%的糠醇低聚物溶液，并向其中加入丙烯酰胺（FA与AM的物质的量比分别为2∶1、4∶1和6∶1），充分搅拌后，采用与1.3.2节相同的方法处理同规格的木材，固化、烘干后制备的试件分别标记为FA_2AM、FA_4AM和FA_6AM。处理工艺示意图，见图1。

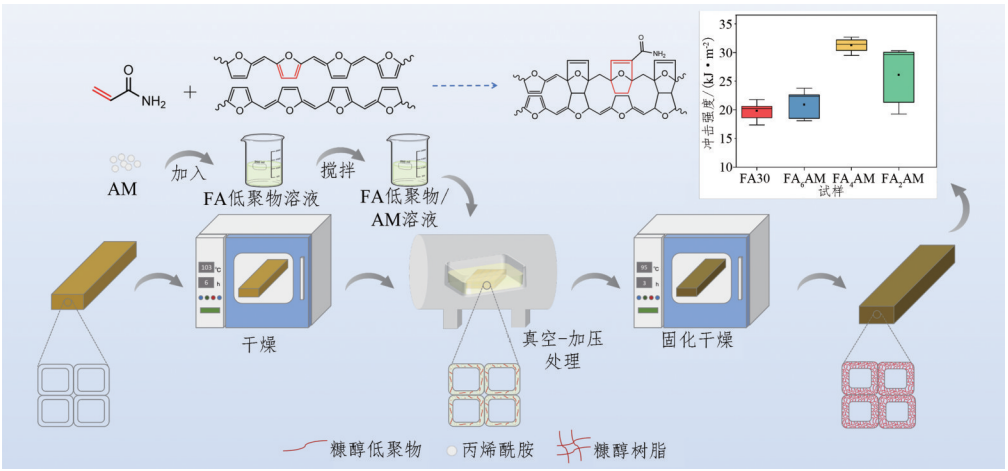


图1 FA/AM协同改性木材制备工艺

Fig.1 Preparation process of FA/AM synergistic modified wood

1.4 性能测试

1.4.1 物理性能

1）增重率和密度 试样的密度和增重率反映木材中改性剂的含量。将未处理试件烘至绝干，称质量，以改性剂浸渍试件，绝干后称质量，使用游标卡尺测量其纵向、弦向和径向的尺寸，精确至0.01 mm。试件密度参照GB/T 1927.5—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第5部分：密度测定》进行测定。增重率（weight percent gain，WPG）按照公式（1）计算。试件重复数为10，结果取平均值。

$$WPG = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：m_1、m_0分别为改性材、未处理材的绝干质量，g。

2）增容率 试样尺寸为20 mm（L）×20 mm（R）×20 mm（T），每组平行试样10个。试样增容率（B）可以从体积变化的角度反映改性剂对木材的影响，其计算公式为：

$$B = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中：V_0和V_1分别为改性处理前后的绝干体积，mm^3。

3）抗湿胀系数（anti-swelling efficiency，ASE） 参考GB/T 1927.8—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第8部分：湿胀性测定》，首先测定试材绝干状态时径向、弦向和纵向尺寸，然后将试材在室温下浸泡于蒸馏水中，直至尺寸不再变化时再次测定。按照公式（3）计算试材的体积ASE。试件重复数为8。

$$ASE = \frac{a_v - a_v^*}{a_v} \times 100\% \quad (3)$$

式中：a_v为未处理材的体积湿胀率，%；a_v^*为改性材的体积湿胀率，%。

4）吸水性 根据GB/T 1927.7—2021《无瑕疵小试样木材物理力学性质实验方法 第7部分：吸水性测定》，将样品在室温下浸泡于蒸馏水中，在不同的时间称质量，测量厚度的变化。吸水率（WU）根据公式（4）计算。

$$WU = \frac{m' - m'_0}{m'_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中：m'为样品吸水后的质量，g；m'_0为样品吸水前的绝干质量，g。

1.4.2　微观形貌

1）激光扫描共聚焦显微镜（CLSM）　利用切片机制备约 25 μm 厚的改性材切片，以质量分数为 0.5% 的甲苯胺蓝溶液对切片染色 10 min，再用蒸馏水漂洗切片，直至漂洗液为无色。选择 488 nm 激发光，500～550 nm 发射光，40 倍物镜，观察切片并拍照。

2）扫描电子显微镜（SEM）　利用切片机制备厚度为 200 μm 的木材横切面切片，对样品表面进行喷金处理。采用 12～15 kV 加速电压获得图像，观察试样微观形貌，利用 Image J 软件对图像中细胞壁厚度进行测量。

1.4.3　化学结构

1）凝胶渗透色谱（GPC）　测试低聚物的分子量，G1362A 型示差检测器，流动相为 *N*, *N*-二甲基甲酰胺（色谱纯），常温，流量为 1.0 mL/min，以聚苯乙烯为参比物。

2）傅里叶变换红外光谱（FTIR）　将试样磨成粉末（粒径 150～180 μm）烘至绝干。测定范围 4 000～400 cm^{-1}，分辨率 4 cm^{-1}，扫描次数 32 次。

3）X 射线衍射（XRD）　将粒径为 150～180 μm 的粉末试样烘至绝干。采用 X 射线衍射仪进行扫描测试，扫描范围晶面角为 5°～40°，X 光管为铜靶，Ni 片滤波，步进扫描为 2°/min，λ=0.154 nm，辐射管电流和电压分别为 40 mA 和 40 kV。利用 Segal 法对木粉的相对结晶度（I_{Cr}）进行计算。

1.4.4　力学性能

1）抗弯性能　试样尺寸为 180 mm（L）× 10 mm（R）×10 mm（T），每组平行试样 10 个。将试件气干一周后，利用万能力学试验机，依据 DIN 52186-1978 “*Testing of wood; bending test*” 测定抗弯强度（modulus of rupture，MOR）和抗弯弹性模量（modulus of elasticity，MOE）。

2）冲击性能　试样尺寸 125 mm（L）×13 mm（R）×13 mm（T），依据 DIN 52189-1-1981 “*Testing of wood; Impact bending test; Determination of impact bending strength*” 测试，每组平行试样 10 个。将试件气干一周后，使用 15 J 摆锤以 3.5 m/s 的速度冲击试样并破坏，利用公式（5）计算试样的冲击强度（A_w）。

$$A_w = \frac{1\,000Q}{bh} \quad (5)$$

式中：Q为试样单位面积吸收的能量，kJ/m^2；b为试样宽度，mm；h为试样高度，mm。

2　结果与分析

2.1　FA 低聚物改性木材性能分析

2.1.1　增重率和密度　不同质量分数糠醇溶液处理材的增重率和密度测试结果，如图 2 所示。

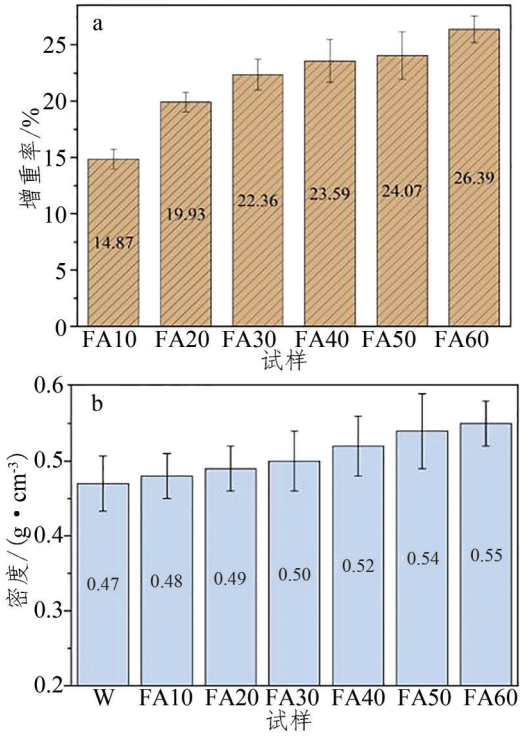


图 2　糠醇质量分数的变化对试样增重率和密度的影响

Fig.2　Effect of changes in the mass fraction of furfuryl alcohol on the weight gain rate and density of the sample

图 2a 显示，随着糠醇溶液质量分数的增加，改性材的增重率逐渐递增，从 14.87% 提升至 26.39%。这是因为糠醇质量分数越高，聚合反应越充分，降低了固化过程中糠醇单体的挥发。随着糠醇溶液质量分数的增加，改性材的密度与增重率的变化趋势一致（图 2b），FA 改性材密度最高达到 0.55 g/cm^3，使杨木的厚重感接近硬杂木。

2.1.2　ASE 和吸水率　不同质量分数糠醇溶液处理材的 ASE 和吸水率测试结果，如图 3 所示。

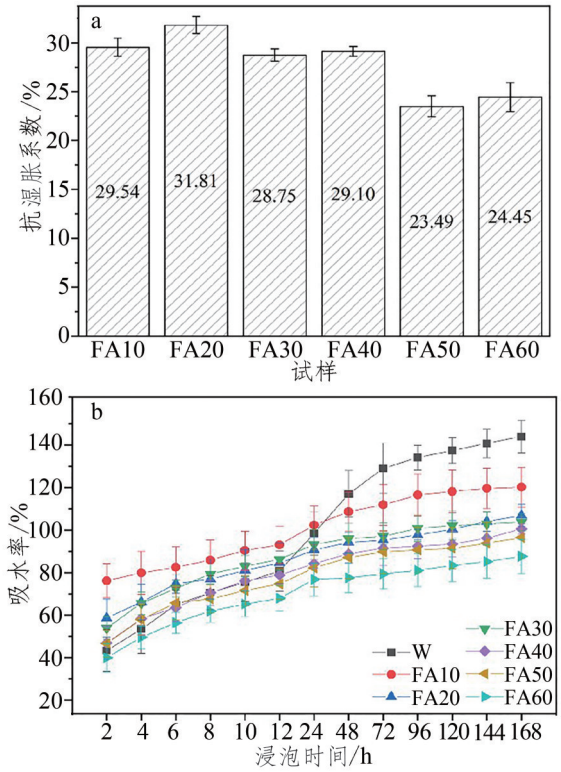


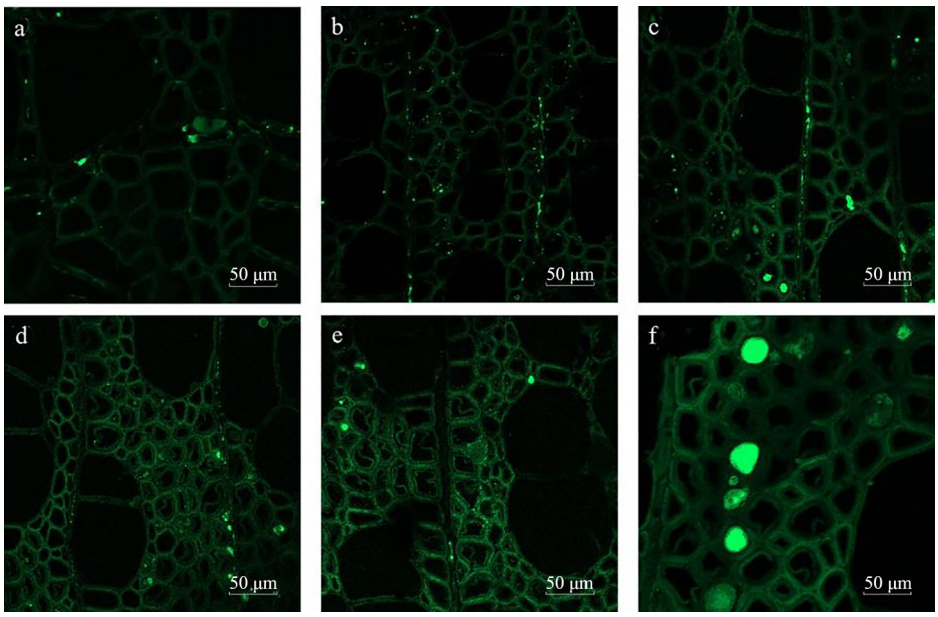
图3 糠醇质量分数的变化对试样ASE和吸水率的影响

Fig.3 Effect of changes in the mass fraction of furfuryl alcohol on the ASE and water absorption of the sample

图3a显示，当FA质量分数为20%时，处理材的ASE可以达到31.81%。这是由于糠醇在木材细胞壁中的自交联，以及与木材组分之间形成稳定的三维网络结构[19]，均能有效抑制木材在吸湿膨胀或者干燥收缩过程中细胞壁的形变，从而进一步抑制木材的干缩湿胀。

随着糠醇溶液质量分数的增加，改性材的吸水率呈现持续下降的趋势。特别是FA质量分数为60%的改性材，经过168 h的浸泡，其吸水率比FA10降低了32.52%。一方面是因为更多的糠醇树脂填充到木材细胞腔和细胞壁中，减少对水分子的吸收；另一方面是由于糠醇树脂与木材之间的交联作用，减少细胞壁膨胀[20]。随着浸泡时间的延长，木材的吸水率均有所增加。在浸泡初期（0~48 h），吸水率增幅较大；在浸泡后期（48~168 h），吸水率趋于稳定，表明此时改性材的吸水率达到相对平衡的状态。

2.1.3 微观形貌 不同质量分数糠醇溶液处理材的荧光显微图，如图4所示。



a~f 10%~60%。

图4 不同质量分数糠醇溶液处理材的荧光显微图

Fig.4 Fluorescence micrographs of materials treated with furfuryl alcohol solutions at different mass fractions

图4显示，糠醇质量分数为10%时，仅细胞壁处有较弱的荧光；随着糠醇溶液质量分数的提高，荧光强度渐强，当糠醇质量分数大于30%时，荧光强度不再随糠醇质量分数的变化而变化；同时，在细胞腔中可以观察到较强的荧光。糠醇首先进入细胞壁，当细胞壁中糠醇树脂含量达到一定程度时，就会填充细胞腔。其原因在于细胞壁内部具有较强的空间位阻效应，阻碍了糠醇聚合时的

链式增长；而细胞腔中的空间位阻效应弱于细胞壁，更有利于糠醇聚合[21]。

2.1.4 化学结构　测试得到的糠醇溶液（质量分数为30%）的数均分子量（*M*n）、重均分子量（*M*w）和最高峰分子量（*M*p）分别为965、983、959，多分散指数（polydispersity index，PDI）为1.01。PDI反映分子尺寸分布的均匀性，此处测得的数值接近1，意味着分子量分布窄、比较均匀[22]，对于糠醇的聚合，还说明前期低聚物分子接近线性[23]。聚合后的糠醇低聚物分子量大多在1 000以内，表明可以进入到木材细胞壁中[24]。

综合考虑增重率以及GPC数据分析，后续采用质量分数为30%的糠醇进行试验。为进一步验证改性剂在试材中的聚合情况，对处理材进行红外光谱和X射线衍射扫描分析（图5）。

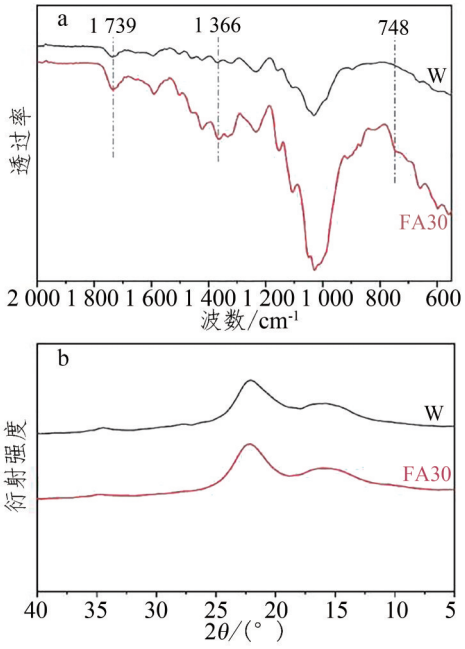


图5　未处理材及FA30改性材的FTIR及XRD谱图
Fig.5　FTIR and XRD spectra of untreated and FA30 modified materials

图5a显示，1 739 cm^{-1}处表示半纤维素的C=O，经过FA处理后，发现1 739 cm^{-1}处峰强变强，这归因于呋喃开环上γ-二酮的C=O伸缩振动，表明糠醇低聚物在木材中成功固化为糠醇树脂，填充于木材细胞壁孔隙以及细胞腔中，强化了木材的整体结构。1 366 cm^{-1}处有较高的谱带，归属于糠醇树脂末端甲基和木材中C–H键对称变形振动，以及纤维素和半纤维素中–CH弯曲振动[25]。748 cm^{-1}处的峰来源于共轭C=C的振动，这表明经过糠醇处理后，糠醇单体在木材内部成功实现原位聚合，形成糠醇树脂[20]。

X射线衍射谱图中（图5b），在2θ=22°左右存在（002）晶体表面的衍射峰，在2θ=18°左右为无定形区的衍射峰。采用FA改性处理材的相对结晶度下降，未处理材的相对结晶度为50%，FA30样品的相对结晶度为44.54%。原因在于改性溶液中的酸性物质使木材组分发生酸解，部分结晶结构被破坏；且小分子功能单体渗入木材内部，形成非结晶型高分子，使木材中的无定形区增加，相对结晶度下降。

2.2　FA/AM复合改性木材性能分析

2.2.1 增重率、密度和增容率　使用FA和AM对木材进行复合改性后，FAAM试样的增重率随丙烯酰胺含量增大而递增，介于28.41%~36.86%之间（图6a）。相对于FA30组，FAAM试样增重率最高提升14.5%，且加入丙烯酰胺后，改性试样的密度有所增加，其变化趋势与增重率的变化趋势一致（图6b）。加入丙烯酰胺后改性材的增容率变化不明显（图6c），说明丙烯酰胺的加入并不影响糠醇树脂对细胞壁的充胀作用。

2.2.2 ASE和吸水率　FA30改性材及FAAM改性材的ASE和吸水率测试结果，如图7所示。

图7a显示，相较于FA30组，FAAM试样的ASE最高提升30.47%。加入AM后，一方面AM中的氨基与木材中的羟基结合形成氢键[26]，削减木材亲水性位点，强化组分间的结合力，稳固细胞壁结构，减少因外界环境变化导致的细胞壁变形，进而提高木材的尺寸稳定性；另一方面FA和AM协同作用形成的三维网络结构堵塞水分传输通道，限制水分流动，阻碍水分扩散，使木材受水分影响的程度降低，有助于提高木材的尺寸稳定性。

然而，引入AM之后试样的吸水率随着其添加量的增多呈现出上升趋势（图7b）。这是由于AM分子中含有的酰胺基团（–$CONH_2$）具有较强的亲水性，酰胺基中的氮原子和氧原子都能够与水分子形成氢键[27]。当AM加入木材后，这些亲水性的酰胺基会增加木材整体的亲水性。丙烯酰胺的加

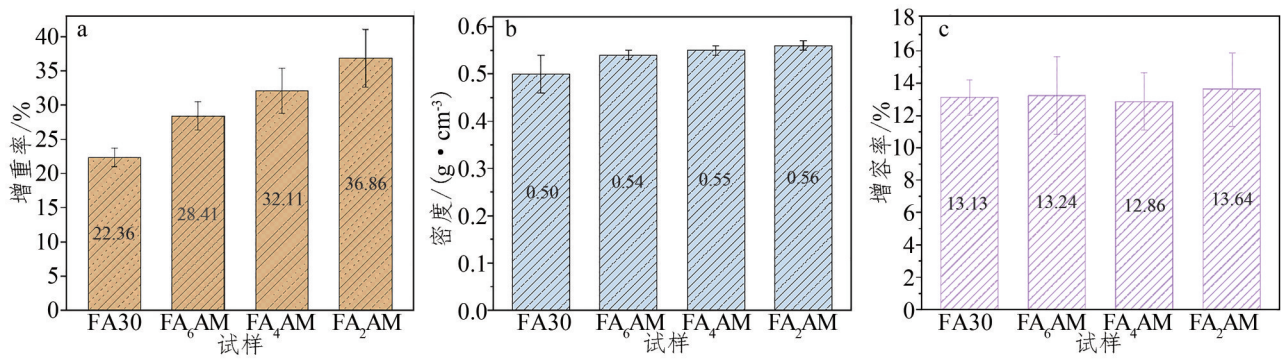


图 6　FA30 改性材及 FAAM 改性材的增重率、密度和增容率

Fig.6　Weight gain rate, density, and capacity expansion rate of FA30 modified materials and FAAM modified materials

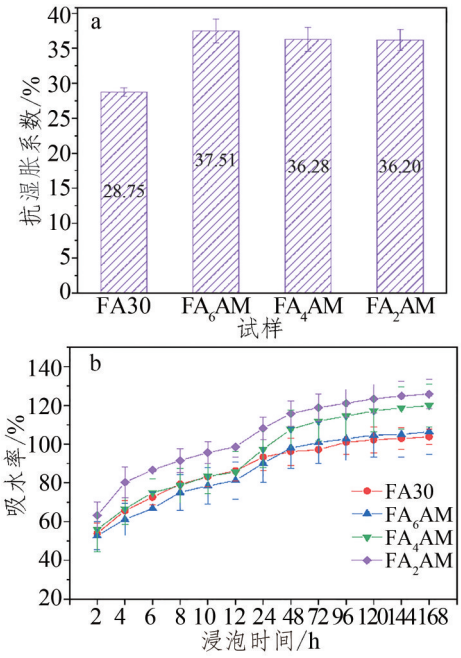


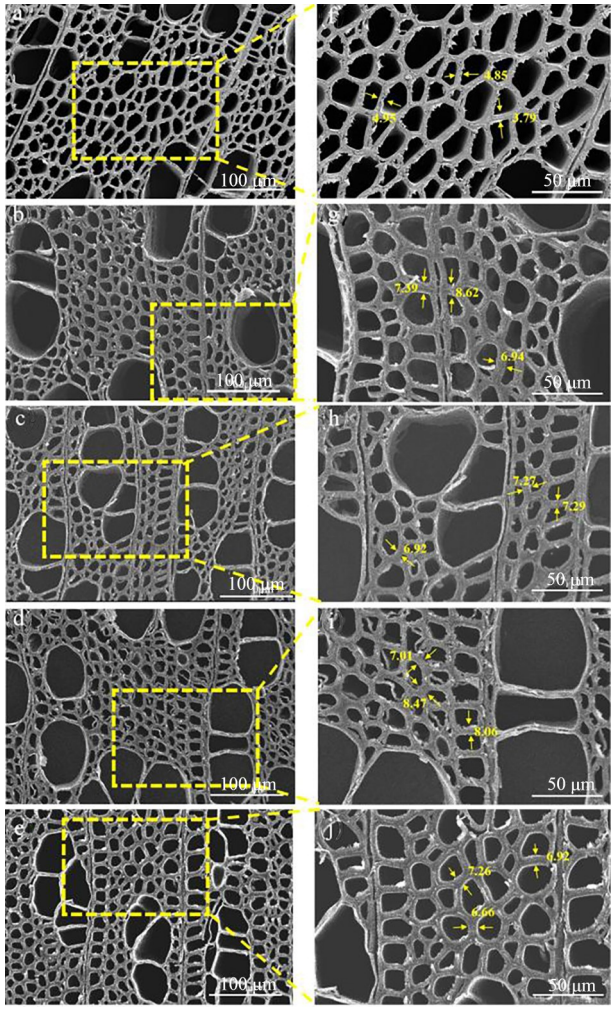
图 7　FA30 改性材及 FAAM 改性材的尺寸稳定性

Fig.7　Dimensional stability of FA30 modified materials and FAAM modified materials

入虽然提高了改性材的吸水率，但并不影响改性材的 ASE。

2.2.3　微观形貌　改性剂处理前后试样的扫描电镜图，如图 8 所示。

经过 FA 和 AM 改性处理后，木材细胞壁明显增厚（图 8），说明糠醇树脂成功实现对细胞壁的充胀。糠醇在细胞壁内发生聚合后形成的糠醇树脂（polyfurfuryl alcohol，PFA）有效固着在木材细胞壁中，使细胞壁的结构更加紧密。部分 PFA 树脂附着于细胞壁上，这说明 PFA 树脂倾向沉积在导管、射线附近纤维状的细胞壁上。原因是 FA 渗透进入细胞腔，但 FA 单体易挥发，加热固化时，



a, f-未处理材；b, g-FA_6AM；c, h-FA_4AM；d, i-FA_2AM；e, j-FA30。

图 8　未处理材及改性材的扫描电镜图

Fig.8　SEM of untreated and modified wood

导管和细胞腔内的 FA 单体挥发，从而导致导管和细胞腔内的 PFA 树脂填充量较低[28]。

2.2.4　化学结构　对处理前后的试材进行红外光谱扫描，结果见图 9。

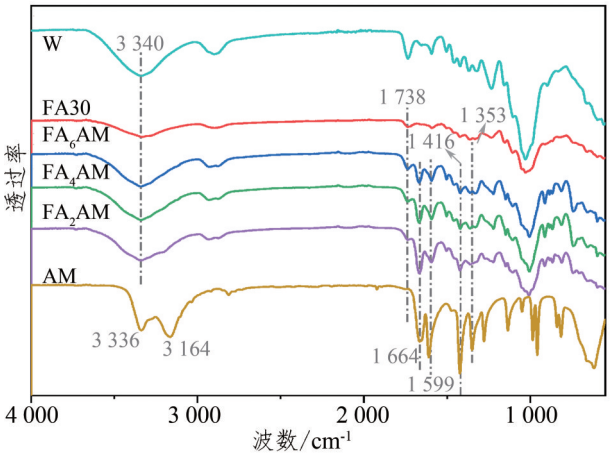


图9　未处理材、FA30改性材及FAAM改性材的FTIR谱图

Fig.9　FTIR spectra of untreated, FA30 modified wood and FAAM modified wood

图9显示，谱图中3 336及3 164 cm^{-1}处为AM分子中–NH基团的对称和不对称伸缩振动吸收峰，表明改性剂成功渗透到木材内部。1 416 cm^{-1}处为$–CH_2$的弯曲振动吸收峰，1 353 cm^{-1}处为=CH的摇摆振动吸收峰，1 664 cm^{-1}处为C=O的伸缩振动吸收峰，1 599 cm^{-1}处为C=C的伸缩振动吸收峰，将AM引入后，1 599 cm^{-1}处的峰强度降低，是由于AM和FA发生双烯加成反应，降低了糠醇树脂原本致密的网络结构。随着AM添加量的增加，FAAM试样中上述特征峰的强度逐渐变强，表明改性剂已经渗透到木材内部，与FA形成牢固结合，二者协同作用，实现对木材的有效改性[29]。

2.2.5　力学性能　改性剂处理前后试样的力学性能测试结果，如图10所示。

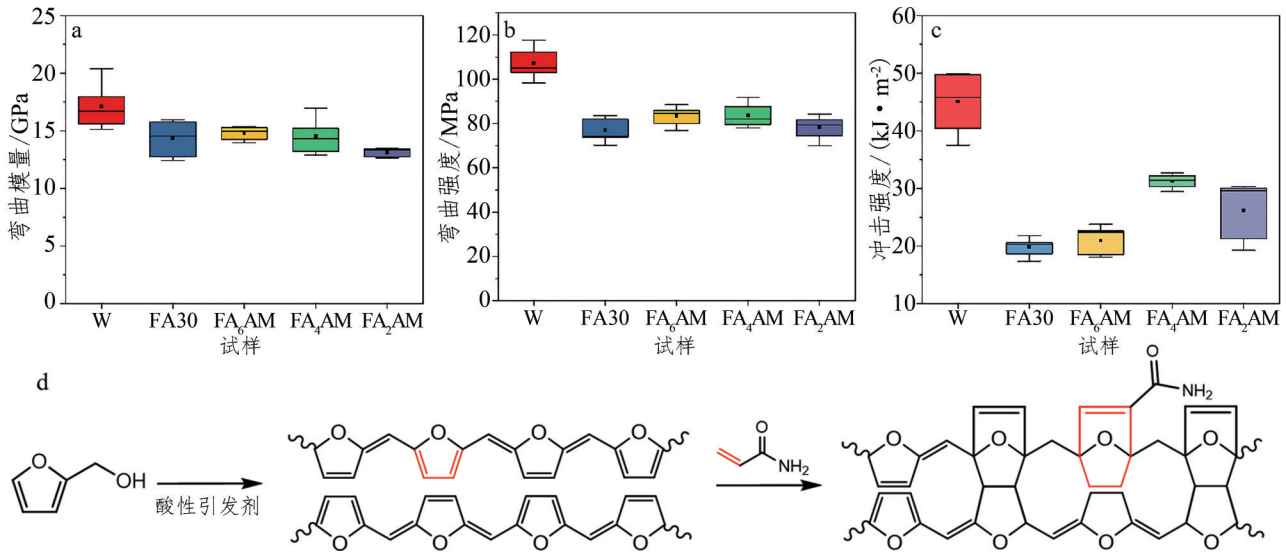


图10　未处理材、FA30改性材及FAAM改性材的力学性能及糠醇/丙烯酰胺反应结构式

Fig.10　Mechanical properties of untreated, FA30 modified wood, and FAAM modified wood and structural formula of furfuryl alcohol/acrylamide reaction

1）弯曲性能　与未处理材相比，经糠醇溶液（质量分数为30%）处理后，MOR降低30.82%；MOE降低14.34%（图10a、10b）。这是由于改性剂显酸性，使纤维素、半纤维素部分水解，对细胞壁组分及结构造成破坏，而树脂对细胞壁的增强效果与酸性物质对细胞壁水解的效果部分相互抵消，因此，糠醇树脂改性木材的MOE和MOR略有降低。当改性剂中加入丙烯酰胺后，改性材的MOR和MOE较糠醇树脂改性材略有提高。这是因为加入的丙烯酰胺阻碍了糠醇的部分自交联反应，降低了糠醇树脂网络结构的致密程度，从而提高了改性材的弯曲性能。

2）冲击性能　经过糠醇溶液改性后，试样的冲击强度降低了56.96%（图10c）。加入丙烯酰胺后，改性材的冲击强度得到改善，当糠醇与丙烯酰胺的物质的量比为4∶1时，试样的冲击强度提升效果最好，较单独糠醇改性材提高了44.43%。

根据以上结论及单体自身的化学性质，改性剂在木材内可能发生的反应机理如图10d所示。丙烯酰胺利用自身的碳碳双键作为亲双烯体，与糠醇中的双烯基团进行双烯加成反应[30-31]，阻碍糠醇的自交联反应，降低糠醇树脂交联的致密程度，

使分子链有了更多的活动空间。当受到外力冲击时，疏松的网络结构可以更好地分散和吸收能量，不易产生由于应力集中而导致的迅速断裂。

3 结论

1）随着糠醇溶液质量分数的增加，改性材的增重率、密度增加，尺寸稳定性得到改善。CLSM观察发现糠醇树脂首先聚合在细胞壁内，使细胞壁增厚，后附着在细胞腔内。

2）当糠醇质量分数为30%、聚合条件为60 ℃/60 min时，糠醇树脂的数均分子量、重均分子量、最高峰分子量均未超过1 000，多分散指数为1.01，这为糠醇树脂进入木材细胞壁提供了前提条件。

3）采用丙烯酰胺/糠醇处理改性材的密度和尺寸稳定性得到改善，密度最高达0.56 g/cm^3，抗湿胀系数最高达37.51%。相较单独糠醇改性材，丙烯酰胺/糠醇改性材的冲击强度最高提升44.43%。丙烯酰胺/糠醇处理拓宽了改性材在建筑领域及承重类家具中的应用前景。

参考文献：

[1] SANDAK A, FÖLDVÁRI-NAGY E, POOHPHAJAI F, et al. Hybrid approach for wood modification: characterization and evaluation of weathering resistance of coatings on acetylated wood[J]. Coatings, 2021, 11(6): 658.

[2] GUO J H, WANG C, LI C, et al. Effect of acetylation on the physical and mechanical performances of mechanical densified spruce wood [J]. Forests, 2022, 13(10): 1620.

[3] MILITZ H, SCHAFFERT S, PETERS B C, et al. Termite resistance of Dmdheu-treated wood[J]. Wood Science and Technology, 2011, 45(3): 547-557.

[4] 黄政, 王政, 肖泽芳, 等. 氮羟甲基树脂/蔗糖改性木材的耐候性能[J]. 林业工程学报, 2019, 4(5): 60-69.
HUANG Z, WANG Z, XIAO Z F, et al. Weathering performance of wood modified with an agent containing N-methylol resin/sucrose[J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(5): 60-69.

[5] WENG M Y, ZHU Y T, MAO W G, et al. Nano-silica/urea-formaldehyde resin-modified fast-growing lumber performance study [J]. Forests, 2023, 14(7): 1440.

[6] 元海广, 杨丽虎, 孙照斌, 等. 脲醛树脂浸渍改性杨木胶合及涂饰性能[J]. 轻工科技, 2019, 35(3): 28-30, 58.
YUAN H G, YANG L H, SUN Z B, et al. Bonding and finishing properties of modified poplar impregnated with urea-formaldehyde resin[J]. Light Industry Science and Technology, 2019, 35(3): 28-30, 58.

[7] ACOSTA A P, BELTRAME R, MISSIO A L, et al. Juvenile and mature woods from pine subjected to in situ polymerization with furfuryl alcohol[J]. Wood Material Science & Engineering, 2022, 17 (3): 151-156.

[8] 何莉, 余雁, 喻云水, 等. 糠醇树脂改性杉木的尺寸稳定性及力学性能[J]. 木材工业, 2012, 26(3): 22-24, 28.
HE L, YU Y, YU Y S, et al. Stability and mechanical performance of furfurylated Chinese fir[J]. China Wood Industry, 2012, 26(3): 22-24, 28.

[9] 王永贵, 于凡钧, 赵怡杰, 等. 浸渍改性提高速生材尺寸稳定性的研究进展[J]. 木材科学与技术, 2025, 39(1): 10-21.
WANG Y G, YU F J, ZHAO Y J, et al. Research progress on impregnation to improve the dimensional stability of fast-growing wood[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2025, 39 (1): 10-21.

[10] 孙敏洋, 曹金珍. SiO_2溶胶在欧洲赤松和火炬松边材中的渗透性[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(9): 85-90.
SUN M Y, CAO J Z. Penetration of SiO_2 sols in sapwood of Scots pine and loblolly pine[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(9): 85-90.

[11] 曹智金. 第伦桃木材的尺寸稳定性与抗菌协同处理技术研究[D]. 杭州：浙江农林大学, 2023.

[12] 徐康, 张晓萌, 李中昊, 等. 木材低分子量树脂浸渍改性与干燥研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(6): 223-229.
XU K, ZHANG X M, LI Z H, et al. Research progress of wood low molecular weight resin impregnation modification and its drying[J]. Materials Reports, 2022, 36(6): 223-229.

[13] 黄腾华, 王军锋, 宋恋环, 等. 马尾松木材性质特点及改性研究现状[J]. 世界林业研究, 2023, 36(6): 45-50.
HUANG T H, WANG J F, SONG L H, et al. Current research on properties and modification of Masson pine wood[J]. World Forestry Research, 2023, 36(6): 45-50.

[14] EPEEIER H, WESTIN M, RAPP A. Differently modified wood: comparison of some selected properties[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2004, 19(5): 31-37.

[15] LANDE S, EIKENES M, WESTIN M. Chemistry and ecotoxicology of furfurylated wood[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2004, 19(5): 14-21.

[16] ESTEVES B, NUNES L, PEREIRA H. Properties of furfurylated wood (*Pinus pinaster*) [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2011, 69(4): 521-525.

[17] LANDE S, EIHENES M. Changes in mechanical properties of furfurylated wood[C]. The Secind European Conference on Wood Modification, Gottingen, Germany, 2005: 283-289.

[18] ZELINKA S L, ALTGEN M, EMMERICH L, et al. Review of wood modification and wood functionalization technologies[J]. Forests, 2022, 13(7): 1004.

[19] 孔丽琢. 糠醇树脂/磷酸二氢铵复合改性杨木性能研究[D]. 北京：中国林业科学研究院, 2018.

[20] MOGHADDAM M S, WÅLINDER M E P, CLAESSON P M, et al. Wettability and swelling of acetylated and furfurylated wood analyzed by multicycle Wilhelmy plate method[J]. Holzforschung, 2016, 70(1): 69-77.

[21] 杨季雨. 糠醇在饱水古木加固中的应用与机理研究[D]. 南京：南京林业大学, 2024.

[22] 王翔, 代加林, 杨梦. 高分子表面活性剂的发展及应用现状[J]. 塑料工业, 2007, 35(S1): 22-24, 35.
WANG X, DAI J L, YANG M. Present situation of development and application of polymer surfactant[J]. China Plastics Industry, 2007, 35 (S1): 22-24, 35.

（下转第29页）