

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2022084

响应面法优化低共熔溶剂增加木材渗透性的工艺研究

邢雪峰^{1,2,3}, 李善明^{1,3}, 周永东¹, 林兰英¹, 傅峰^{1,3}

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037;

3. 南京林业大学林业资源高效加工利用协同创新中心, 江苏南京 210037)



摘要: 为了探索一种绿色高效提高木材渗透性的方法, 选取氯化胆碱(ChCl)与乳酸(LA)组成的低共熔溶剂(deep eutectic solvent, DES)作为处理液, 对轻木进行增渗处理。基于单因素试验结果, 采用响应面优化法综合探究DES中氯化胆碱与乳酸的量比, 即 $n(\text{ChCl}) : n(\text{LA})$, DES体积分数和处理时间对木材渗透性的影响, 以1 h吸水增重率作为木材渗透性的评价指标, 确定优化处理方案。试验结果表明, 各因素对响应值的影响顺序为: 处理时间>DES体积分数> $n(\text{ChCl}) : n(\text{LA})$; 优化的工艺为: $n(\text{ChCl}) : n(\text{LA}) = 1 : 10$ 、DES体积分数73%、处理时间6.6 h、处理温度90 °C, 在此条件下处理材1 h吸水增重率为416.34%, 较未处理材提高了168.81%。场发射扫描电镜与压汞测试结果表明, 纤维细胞壁结构保持完整, 但在胞间层与细胞角隅处产生大量的微观孔隙, 射线薄壁细胞与轴向排列的纤维间产生裂隙, 孔隙率较未处理材提高了7.28%。

关键词: 低共熔溶剂; 轻木; 木材渗透性; 预处理; 响应面法

中图分类号: S781

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694(2022)06-0054-07

Increasing Wood Permeability by Deep Eutectic Solvent Based on Response Surface Methodology

XING Xue-feng^{1,2,3}, LI Shan-ming^{1,3}, ZHOU Yong-dong¹, LIN Lan-ying¹, FU Feng^{1,3}

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Co-Innovation Center of Efficient Processing and Utilization of Forest Resources, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: In order to explore a green and efficient method to improve wood permeability, a deep eutectic solvent (DES) composed of the choline chloride-lactic acid was selected as the treatment solution to enhance the permeability of balsa wood (*Ochroma pyramidale*). The effects of the mole ratio of the choline chloride to lactic acid in DES, $n(\text{ChCl}) : n(\text{LA})$, DES volume fraction, and treatment time on wood permeability were comprehensively examined by the response surface optimization methodology, based on the results of single factor experiments. The 1 h water absorption weight gain rate was used as the evaluation index of permeability to determine the optimal treatment conditions. The test results showed that the effects of the factors on the response value were in the order: DES treatment time > DES

收稿日期: 2022-04-25; 修改日期: 2022-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目“强微波场作用下木材黏弹塑性响应机制研究”(31700641)。

作者简介: 邢雪峰(1994—), 男, 博士研究生。Email: nathanxxf@126.com

通讯作者: 李善明, 男, 助理研究员。Email: lishanming@caf.ac.cn

volume fraction $> n(\text{ChCl}) : n(\text{LA})$. The optimal treatment conditions were as follows: 1:10 $n(\text{ChCl}) : n(\text{LA})$, 73% DES volume fraction, 6.6 h treatment time, and 90 °C treatment temperature. Under these conditions, the 1 h water absorption weight gain rate of treated samples was 416.34%, which was 168.81% higher than the untreated samples. The results from the field emission scanning electron microscopy and mercury injection test showed that the fiber cell wall remained intact, while a large number of microscopic pores were generated in the middle lamella and the cell corner. There were cracks between the ray parenchyma cells and the axially arranged fibers. The porosity of treated samples was 7.28% higher than untreated samples.

Key words: deep eutectic solvent (DES); balsa wood; wood permeability; pretreatment; response surface methodology

轻木 (*Ochroma pyramidale*) 又称巴沙木 (Balsa wood), 具有质量轻、孔隙率高的特点。近年来学者们利用轻木优异的层级多孔结构, 采用了化学处理、生物降解等方法对其化学成分与孔隙结构进行预处理^[1], 获得孔道高度有序排列的三维“生物模板”材料。通过聚合物灌注^[2]、原位修饰^[3]等方式对“模板”进行“自上而下”或“自下而上”的多种修饰^[1], 为传统的木质材料赋予了污水净化^[2, 4-5]、绿色建筑热调节^[6-7]、可持续的能源储存等新功能^[8-9], 并开展了结构材料^[10-12]、高效的太阳能蒸汽发生装置^[3, 13-14]、可降解的柔性电子元件^[15]等产品的开发与研究。

目前预处理所使用的化学药剂主要是借鉴木浆生产环节中使用的木质素脱除液, 大致分为碱性环境下的亚硫酸盐处理液、酸性环境下的亚氯酸盐处理液以及次氯酸盐处理液等多种类别^[16]。在预处理过程中, 木质素大分子降解并从细胞壁上裂解溶出, 细胞壁上产生了大量的微/纳米级孔隙, 木材孔隙度与表面积获得了极大提高^[2], 由此扩展了木材衍生功能材料的相关研究。虽然上述多种预处理药剂具有制备简单、易于操作等优点, 但处理过程中使用的挥发性药剂与产生的不可回收性废液会对操作人员健康与环境造成危害。自2012年以来, 研究人员发现羧酸、醇、胺等氢键供体可以与季铵盐、季磷盐等氢键受体在温和条件下通过氢键作用相互连接而生成低共熔溶剂 (deep eutectic solvent, DES)。DES 不仅对木质素等化学组分具有良好的溶解性能, 还有利于保留原始的木质材料结构^[17-19], 通过调整DES中氢键受体与供体的种类、量比、处理温度与处理时间等

工艺条件, 可实现对木质材料的可控处理^[20], DES在木材软化处理^[21]、生物质材料分离与提取^[18]等领域具有应用潜力。虽然有关DES在木基功能材料领域的应用研究处于起步阶段, 但与传统预处理化学药剂相比, 其成本低、环保无毒、可循环回收、利用率高等优点^[22], 将为其带来广阔的发展潜力。

鉴于此, 本研究使用氯化胆碱与乳酸制备了DES对轻木进行处理。以改善木材渗透性作为目标, 通过单因素试验和响应面优化法, 探究增加轻木渗透性的优化处理方案, 通过分析DES处理后轻木的微观结构和孔隙变化情况, 旨在为后续利用木材的多孔性进行功能化处理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

轻木: 外购, 绝干密度 0.19 g/cm³。取纹理通直无缺陷的边材部分加工成 7 mm (L) × 15 mm (T) × 15 mm (R) 的木片试件, 烘至绝干后备用。

试剂: 氯化胆碱 (choline chloride, ChCl)、乳酸 (lactic acid, LA)、无水乙醇, 均为分析纯; 蒸馏水。均外购。

1.2 试验设备

滑走式切片机、JEOL JSM-7100F 型场发射扫描电子显微镜、Micromeritics AutoPore IV 9620 型高性能全自动压汞仪等。

1.3 试验方法

1.3.1 制备低共熔溶剂 选择ChCl为氢键受体、LA为氢键供体, 按一定的量比进行混合, 置于60 °C的恒温条件下磁力搅拌2 h后冷却至室温, 得到澄清透明的DES。

1.3.2 轻木处理工艺流程 在真空度 -0.1 MPa 下, 将轻木在 DES 处理液中真空浸渍 1 h (固-液质量比为 $1:30$) 后, 在不同时间和温度条件下进行处理。处理结束后, 用无水乙醇与蒸馏水反复清洗轻木, 最后在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻干燥 36 h 。

1.3.3 试验设计 首先进行单因素试验, 以 n (ChCl): n (LA)、DES 体积分数、处理时间和处理温度作为变量因素, 确定适宜的 DES 制备和处理工艺范围, 为下一步响应面分析缩小各因素的优化水平范围。再通过响应面优化分析, 建立各变量因素对轻木渗透性的二次多项数学模型, 确定 DES 增渗处理的优化工艺。

1) 单因素试验。试验因素列于表 1。每组称取 10 个试件与 DES 处理液混合, 按各方案进行处理。

表 1 单因素试验设计因素与水平

Tab.1 Single-factor experimental designs

变量因素	变量水平	固定试验条件
$n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$	1:4、1:7、1:10、1:13	100%, 6 h, 80 $^{\circ}\text{C}$
DES 体积分数/%	100、75、50、25、0	1:10, 8 h, 90 $^{\circ}\text{C}$
处理时间/h	4、6、8、10	1:7, 100%, 90 $^{\circ}\text{C}$
处理温度/ $^{\circ}\text{C}$	60、70、80、90	1:10, 100%, 7 h

2) 响应面优化试验。在单因素试验的基础上, 利用 Box-Behnken 方案进行 3 因素 3 水平的响应面优化试验, 以吸水增重率为响应值, 综合探究 n (ChCl): n (LA)、DES 体积分数与处理时间对轻木渗透性的影响, 并优化处理工艺。响应面试验设计因素与水平见表 2。

表 2 响应面试验设计因素与水平

Tab.2 Analytical factors and levels based on response surface methodology

水平	因素		
	$a\ n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$	$b\ \text{DES 体积分数}/\%$	$c\ \text{处理时间}/\text{h}$
-1	1:4	50	4
0	1:7	75	6
1	1:10	100	8

1.4 性能表征

1.4.1 木材渗透性 目前多数研究仍以木材吸水增重率作为木材液体渗透性性能的宏观评价指标^[23-25], 因此本研究将吸水增重率作为响应值, 表征 DES 处理对木材的渗透能力的影响效果。每组设置 10 个平行试件, 在室温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下浸泡于

蒸馏水中, 定时取出并用纸巾擦干表面多余水分后称量, 记录试件质量变化情况。按公式 1 计算试件增重率 (weight percent gain, WPG), 分别记录各组 DES 处理后样品浸水 15 min 、 20 min 、 30 min 、 1 h 、 2 h 、 3 h 与 4 h 的吸水增重率, 并从中筛选最佳浸水时间。

$$\text{WPG} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中: m_0 为试件绝干质量, g ; m_1 为试件吸水后的质量, g 。

1.4.2 木材微观结构 将在优化工艺条件下处理的试件与未处理试件加工成尺寸为 $7\text{ mm (L)} \times 5\text{ mm (T)} \times 5\text{ mm (R)}$ 的小木块, 使用滑走式切片机对木材三个切面进行修面。使用场发射扫描电子显微镜观察处理前后微观结构变化。使用压汞仪测定处理前后轻木孔隙结构的变化情况。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

图 1 为 n (ChCl): n (LA)、DES 体积分数、处理时间和处理温度四个因素对轻木吸水增重率的影响。根据图 1 可知, 相较于未处理材, DES 处理可显著提高木材的吸水增重率。随着 n (ChCl): n (LA)、DES 体积分数和处理时间水平的增长, 处理材的吸水增重率均呈现先增加后减小的趋势, 而与处理温度则呈正相关关系。

由图 1a 可知, 随时 ChCl 与 LA 的量比从 $1:4$ 增加至 $1:10$, 处理材的吸水增重率持续增长; 但当两者量比达 $1:13$ 后, 处理材的吸水增重率则大幅度降低, 其增重率小于 $1:4$ 水平处理组。由图 1b 可知, 随着 DES 体积分数从 0% 增加至 50% , 处理材的吸水增重率显著提高; 当 DES 体积分数增加至 75% 时, 其吸水增重率仅略高于 50% 水平处理组; 而经 DES 体积分数 100% 处理后, 木材吸收增重率大幅降低, 其处理效果与 25% 水平处理组相近。由图 1c 可知, 在 $4\sim 6\text{ h}$ 的处理时间内, 处理材的吸水增重率随着处理时间的增加而提高, 而当处理时间从 6 h 增加至 8 h 后, 处理材的吸水增重率却略微下降; 但进一步增加处理时间至 10 h 后, 处理材的吸水增重率大幅降低, 其处理效果仅略优于 4 h 水平处理组。此外, 随着浸水时间的

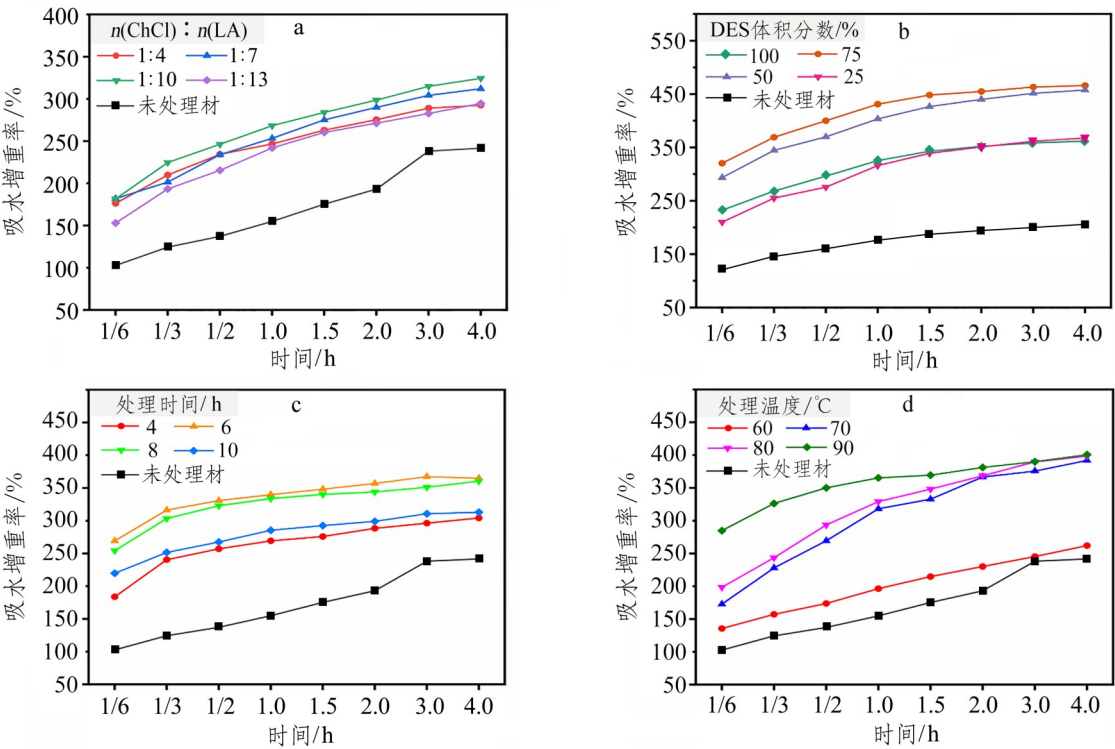


图1 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 、DES 体积分数、处理时间与处理温度对吸水增重率的影响

Fig.1 Effects of $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ (a), DES volume fraction (b), treatment time (c) and treatment temperature (d) on WPG

延长，试件吸水增重率持续增加，但由于试件内外的水分压力差减小，在浸水1 h后试件吸水增重速率逐渐减缓，因此选择1 h吸水增重率进行后续试验。综上所述，由单因素试验结果可得，在处理条件 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})=1:10$ 、DES 体积分数75%、处理时间6 h和处理温度90 °C时，试材1 h吸水增重率最高，即DES增渗处理效果最好。

2.2 响应面优化试验分析

根据图1单因素试验结果，由于1 h吸水增重率随处理温度的上升而增加，在90 °C处理温度下达到最佳增渗效果，因此按照表1三因素三水平方案，在90 °C温度下进行DES处理。利用 Design-Expert 13 软件对试验数据进行统计与响应面分析，确定优化的DES增渗处理方案。试验结果见表3。

根据表3数据进行多元回归拟合分析，建立了轻木1 h吸水增重率 (Y_{1h}) 与DES预处理工艺参数之间的二次多项回归方程，如式2所示。

$$Y_{1h}=426.05-4.13a-10.31b+43.64c-33.22ab-3.7ac+1.79bc-68.4a^2-59.66b^2-75.63c^2 \quad (2)$$

Y对拟合模型中各个因素进行显著性方差分析，结果列于表4。

表3 Box-Behnken 响应面试验方案与结果

Tab.3 Experimental design and results of Box-Behnken response surface analysis

试验号	a $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$	b DES 体积分 数/%	c 处理 时间/h	1 h吸水 增重率/%	方差
1	0	-1	-1	289.41	0.20
2	-1	1	0	339.78	0.34
3	1	1	0	270.33	0.14
4	0	1	-1	230.45	0.42
5	0	0	0	414.91	0.31
6	0	1	1	295.67	0.18
7	1	0	1	328.01	0.12
8	1	-1	0	322.64	0.49
9	-1	0	1	348.93	0.50
10	0	0	0	431.13	0.24
11	-1	0	-1	228.63	0.03
12	0	0	0	450.63	0.21
13	1	0	-1	222.50	0.19
14	0	0	0	407.33	0.12
15	-1	-1	0	259.20	0.21
16	0	0	0	426.23	0.22
17	0	-1	1	347.49	0.28

拟合模型结果的F值为13.73，P值为0.001 1<0.01，说明差异具有极显著性；失拟项P值为0.088 1>0.05，失拟误差不显著； $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 、DES 体积分数与处理时间三个因素的决定系数 R^2

表 4 响应曲面的回归模型方差分析
Tab.4 Variance analysis of regression model for response surface

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	86 297.40	9	9 588.60	13.73	0.001 1	**
a $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$	136.62	1	136.62	0.20	0.671 7	
b DES 体积分数	850.99	1	850.99	1.22	0.306 2	
c 处理时间	15 234.72	1	15 234.72	21.81	0.002 3	**
ab	4 414.94	1	4 414.94	6.32	0.040 2	*
ac	54.69	1	54.69	0.08	0.787 7	
bc	12.74	1	12.74	0.02	0.896 4	
a^2	19 698.05	1	19 698.05	28.20	0.001 1	**
b^2	14 986.84	1	14 986.84	21.45	0.002 4	**
c^2	24 084.09	1	24 084.09	34.47	0.000 6	**
残差	4 890.29	7	698.61			
失拟项	3 785.74	3	1 261.91	4.57	0.088 1	
纯误差	1 104.55	4	276.14			
总误差	91 187.69	16		$R^2=0.946$	$R^2_{\text{adj}}=0.878$	

注:*表示该项与回归模型关系显著, $P<0.05$;**表示该项与回归模型关系极显著, $P<0.01$ 。

为 0.946, 调整决定系数 R^2_{adj} 为 0.878。综合上述结果表明, 该拟合模型能够准确且可靠地体现 DES 处理轻木的 1 h 吸水增重率与处理三因素之间的关系。一次项 c 和二次项 a^2 、 b^2 、 c^2 均对 DES 处理的结果有极显著影响; 交互项中仅 ab 对结果影响显著, 而 ac 、 bc 无显著影响。此外, 根据表 4 中 F 检验结果可知, 三个单因素按照对轻木增渗效果的影响程度排序为 $c>b>a$, 即处理时间>DES 体积分数> $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 。

2.3 响应曲面交互作用及结果分析

为直观且深入地分析三个因素对轻木渗透性的交互影响, 使用 Design-Expert 13 软件绘制以 1 h 吸水增重率为响应值的响应面曲线与等高线图。图 2 所示, $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 与 DES 体积分数的响应面具有较大曲面, 同时两者的等高线图呈椭圆形, 说明 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 与 DES 体积分数两因素间对响应结果具有明显的交互作用 (ab); 而图 3~4 中的等高线形状近圆形, 说明 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 与处理时间 (ac)、DES 体积分数与处理时间 (bc) 交互作用对响应值的影响不显著 ($P>0.05$), 与表 3 显著性分析结果具有一致性。

从图 2 与图 3 可知, 当 DES 体积分数与处理时间一定的情况下, 随着 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 从 1:7 改变

到 1:13, 轻木渗透性增加较明显, 而当 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})=1:13$ 后, DES 的处理效果降低, 表明 DES 对木材渗透性的增强效果并不与 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 呈正相关性, 虽然 DES 中羧酸含量的增加可有效提高木质素的脱除率^[17-18], 但由此改变了木材细胞壁中的孔隙结构, 致使处理材在 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})=1:13$ 的工艺水平下, 响应值下降。结合图 2 与图 4 可知, 当 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 与处理时间保持一定时, 随着 DES 体积分数的增加, 轻木渗透性先增大后趋于缓和。这是由于水分子中大量的氢键破坏了 DES 处理液中原有的氢键网络, 减弱了离子间的静电引力, 在有效降低黏度的同时增加了电导率, 离子在处理液中的迁移率迅速提高, 促进了化合物的溶解^[23], 从而增加了木材的渗透性。而体积分数的进一步增加, 破坏了处理液中的氢键结构, 导致处理效果下降。由图 3 与图 4 可见, 在 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 与 DES 体积分数一定时, 随着处理时间的增加, 轻木渗透性呈现先增加后降低的趋势, 其原因可能是木材细胞壁中的化学组分过度溶解, 造成了细胞壁的收缩。

2.4 模型验证试验结果

响应面优化确定的优化处理方案为: $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})=1:9.94$ 、DES 体积分数 73.10%、处理时间 6.58 h, 处理材 1 h 吸水增重率为 432.77%。根据实际应用, 将优化工艺参数稍作调整为: $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})=1:10$ 、DES 体积分数 73%、处理时间 6.6 h, 并在此优化工艺下进行 6 次重复试验。验证试验所得 DES 处理轻木的 1 h 吸水增重率为 416.34%±0.13%, 实验值略低于模型预测值, 两者相对误差为 3.9%<5%, 验证了模型分析结果的可靠性。

2.5 微观结构分析

图 5 为优化工艺处理前后轻木的微观形貌结构, 由于 DES 对木质素的溶解作用, 处理材细胞壁中出现了不同尺度的结构变化。

在横切面上, 未处理材 (图 5a、5b) 导管、木纤维和轴向薄壁组织等结构呈圆形或卵圆形, 各组织细胞壁间紧密连接; 处理材 (图 5d、5e) 依然保持完整的细胞壁结构, 只有部分纤维的细胞壁发生皱缩, 呈现不规则多边形, 但是在胞间层和细胞壁角隅处产生大量的微观孔隙。在弦切

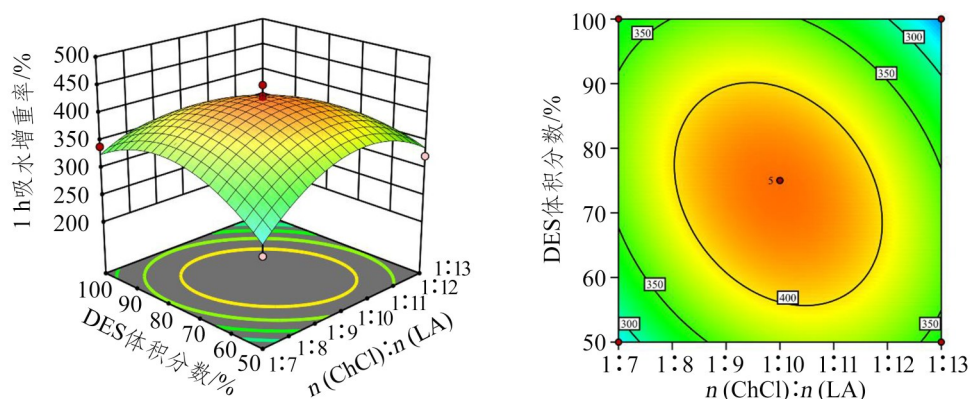
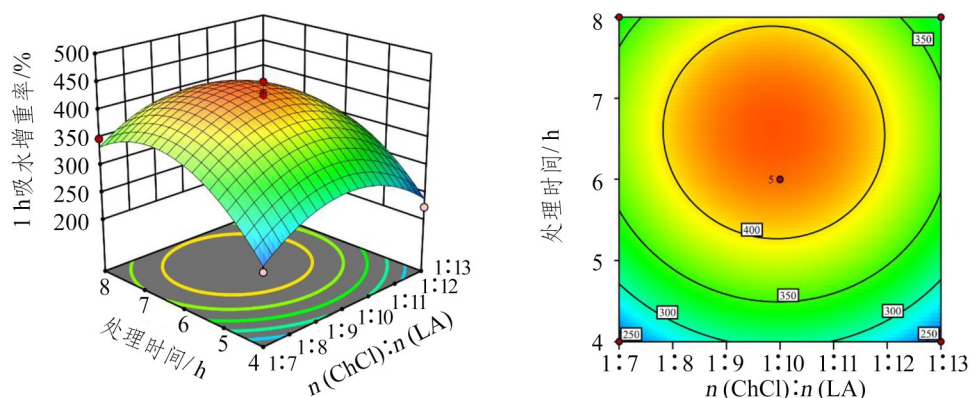
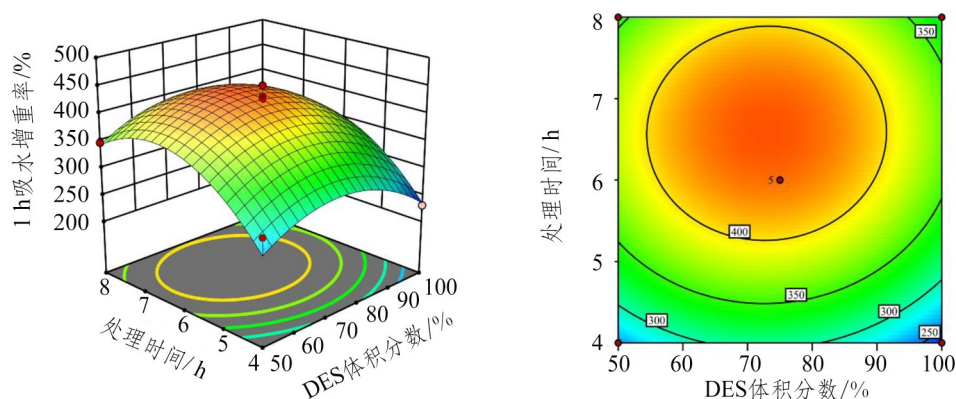
图2 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 与DES体积分数对1h吸水增重率的交互作用Fig.2 The interaction and contour of $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ and DES volume fraction on 1h WPG图3 $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 与处理时间对1h吸水增重率的交互作用Fig.3 The interaction and contour of $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ and treatment time on 1h WPG

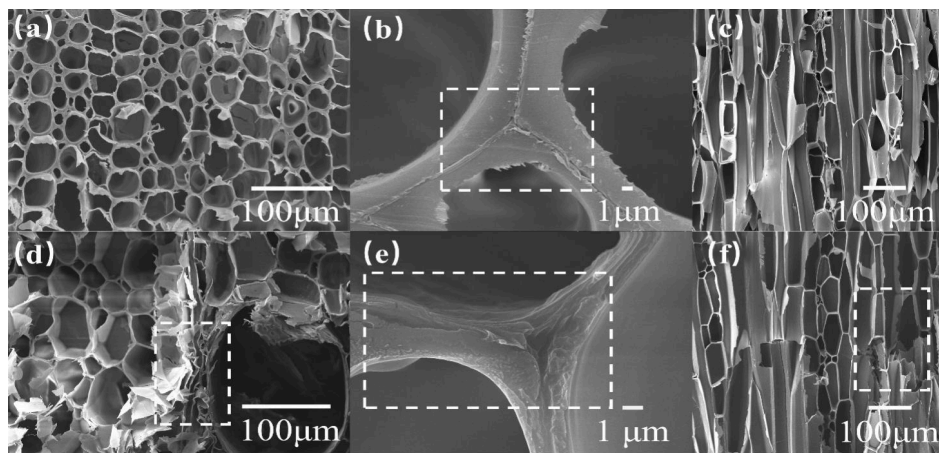
图4 DES体积分数与处理时间对1h吸水增重率的交互作用

Fig.4 The interaction and contour of DES volume fraction and treatment time on 1h WPG

面上,与未处理材(图5c)相比,DES处理材(图5f)的射线薄壁细胞与轴向排列的纤维之间产生了较明显的裂隙,从而增加了木材内部横向的渗透性。

DES处理前后轻木的孔隙结构测试结果列于表5。在优化工艺条件下进行DES处理后,轻木的总孔体积、平均孔径、堆积密度与孔隙率均发生较为明显的变化,DES处理材的总孔体积与平均

孔径分别增加了31.03%和60.09%;由于DES处理在木材细胞壁结构中产生了不同程度的破坏,孔隙率从未处理材的81.37%增加到87.29%,提高了7.28%。而在传统亚氯酸钠-醋酸钠脱木质素药剂体系中处理6h,轻木孔隙率仅提高4.90%^[2]。以上结果表明,DES处理可显著提高木材内部的孔隙情况,且处理速率优于传统脱木质素化学药剂。



注:a、b—未处理材横切面;c—未处理材弦切面;d、e—DES处理材横切面;f—DES处理材弦切面。

图5 DES处理前后扫描电镜图

Fig.5 SEM micrographs of wood samples before and after DES treatment

表5 DES处理前后孔隙结构参数

Tab.5 Pore structure parameters of wood samples before and after DES treatment

样品	总孔体积/ (mL·g ⁻¹)	平均孔径/ nm	堆积密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙率/ %
未处理材	5.84	784.65	0.14	81.37
DES处理材	7.62	1 256.16	0.11	87.29

3 结论

1) 以氯化胆碱-乳酸组成的DES作为处理液,采用单因素试验与响应面优化法综合探究了DES处理工艺对木材渗透性的影响,并建立了以1 h吸水增重率为响应值, $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})$ 、DES体积分数和处理时间为变量的二次多项拟合回归模型。验证试验结果与模型理论预测值相差3.9%,证明了该拟合模型的可靠性。优化的处理工艺为: $n(\text{ChCl}):n(\text{LA})=1:10$,DES体积分数73%,处理时间6.6 h,处理温度90℃,在此条件下处理材1 h吸水增重率为416.34%,较未处理材提高了168.81%。

2) DES处理材后轻木纤维的细胞壁结构保持完整,但在胞间层与细胞角隅处产生大量的微观孔隙,在射线薄壁细胞与轴向排列的纤维间产生裂隙。与未处理材相比,孔隙率增加了7.28%。

3) 本研究采用的绿色且高效的DES处理法为木质材料功能化应用的预处理阶段提供了技术参考。但本试验仅对单一材种进行了工艺优化,此后还需开展进一步研究,以探究DES处理对木材渗透性的可调控性、普适性及作用机理。

参考文献:

- [1] Kumar A, Jyske T, Petrič M. Delignified wood from understanding the hierarchically aligned cellulosic structures to creating novel functional materials: A review[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2021, 5(5): 2000251.
- [2] 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.
- [3] CHEN C J, LI Y J, SONG J W, et al. Highly flexible and efficient solar steam generation device[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(30): 1701756.
- [4] GUAN H, CHENG Z Y, WANG X Q. Highly compressible wood sponges with a spring-like lamellar structure as effective and reusable oil absorbents[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(10): 10365-10373.
- [5] 管浩, 戴鑫建, 王鑫, 等. 木基多孔油水分离材料研究进展[J]. *木材科学与技术*, 2022, 36(1): 1-8.
- [6] GUAN H, DAI X J, WANG X, et al. Research review of wood-based porous materials for oil/water separation[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2022, 36(1): 1-8.
- [7] LI T, ZHAI Y, HE S M, et al. A radiative cooling structural material[J]. *Science*, 2019, 364(6442): 760-763.
- [8] MI R Y, LI T, DALGO D, et al. A clear, strong, and thermally insulated transparent wood for energy efficient windows[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(1): 1907511.
- [9] HUANG W, LI H Q, LAI X J, et al. Graphene wrapped wood-based phase change composite for efficient electro-thermal energy conversion and storage[J]. *Cellulose*, 2022, 29(1): 223-232.
- [10] LIU S, WU H, DU Y, et al. Shape-stable composite phase change materials encapsulated by bio-based *Balsa* wood for thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 230: 111187.
- [11] XIAO S L, CHEN C J, XIA Q Q, et al. Lightweight, strong, moldable wood via cell wall engineering as a sustainable structural material[J]. *Science*, 2021, 374(6566): 465-471.
- [12] SONG J W, CHEN C J, ZHU S Z, et al. Processing bulk natural wood into a high-performance structural material[J]. *Nature*, 2018, 554(7691): 224-228.
- [13] SONG J W, CHEN C J, WANG C W, et al. Superflexible wood[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(28): 23520-23527.
- [14] JIA C, LI Y J, YANG Z, et al. Rich mesostructures derived from natural woods for solar steam generation[J]. *Joule*, 2017, 1(3): 588-599.