

先进材料

树种与心边材含量对超薄高密度纤维板 物理力学性能的影响

杨春梅¹, 王婷婷¹, 田心池¹, 闵德秀², 孙成文^{1*}

(1.东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040; 2.山东新港企业集团有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要: **目的** 研究树种与心边材含量对超薄高密度纤维板物理力学性能的影响。**方法** 以不同树种(杨木、桉木和松木)及大径级杨木的心材与边材纤维为原料, 以酚醛树脂(Phenol Formaldehyde, PF)为胶黏剂制备超薄高密度纤维板, 深入探究不同树种与心边材含量对板材物理力学性能的影响, 并根据实验结果建立心材含量、边材含量与超薄高密度纤维板物理力学性能的数学模型。**结果** 在不同树种中, 杨木纤维板的物理力学性能最优, 其静曲强度为 54.61 MPa, 弹性模量为 4.967 GPa, 吸水厚度膨胀率为 27.87%, 表面粗糙度为 2.361 μm 。在本实验范围内, 当心材含量为 30%、边材含量为 50%时, 超薄高密度纤维板的物理力学性能最佳, 其静曲强度为 57.69 MPa, 弹性模量为 5.812 GPa, 吸水厚度膨胀率为 27.43%, 表面粗糙度为 2.719 μm 。上述纤维板的物理力学性能均超过《超薄高密度纤维板》(T/CNFPIA 3007—2019)规定的性能标准。**结论** 可根据实际需要调整板材的树种和心边材含量, 制备满足生产工艺和使用要求的超薄高密度纤维板产品。

关键词: 超薄高密度纤维板; 树种; 心边材; 物理力学性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)03-0001-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.001

Effect of Tree Species and Heartwood-sapwood Content on the Physical and Mechanical Properties of Ultra-thin High-density Fiberboard

YANG Chunmei¹, WANG Tingting¹, TIAN Xinchu¹, MIN Dexiu², SUN Chengwen^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. Shandong Xingang Enterprise Group Co., Ltd., Shandong Linyi 276000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of tree species and heartwood-sapwood content on the physical and mechanical properties of ultra-thin high-density fiberboard. Ultra-thin high-density fiberboard was prepared with fibers from different tree species (poplar, eucalyptus and pine) and heartwood-sapwood fibers from large-diameter poplar as raw materials and phenol formaldehyde (PF) resin as the adhesive. The effects of different tree species and heartwood-sapwood contents on the physical and mechanical properties of the fiberboard were investigated in depth. Based on the experimental results, the mathematical model of the relationship between heartwood content, sapwood content and the physical and mechanical properties of ultra-thin high-density fiberboard was established. Among different tree species, the physical and mechanical properties of poplar fiberboard were the best, with a bending strength of 54.61 MPa, an elastic modulus of 4.967 GPa, a water absorption thickness swelling rate of 27.87%, and a surface roughness of 2.361 μm . Within the range of this experiment, when the heartwood content was 30% and the sapwood content was 50%, the physical and

收稿日期: 2024-12-02

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD220060404); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572023CT14-01)

*通信作者

mechanical properties of the ultra-thin high-density fiberboard were the best, with a bending strength of 57.69 MPa, an elastic modulus of 5.812 GPa, a water absorption thickness swelling rate of 27.43%, and a surface roughness of 2.719 μm . The physical and mechanical properties of the above fiberboard all exceeded the performance standards stipulated in "Ultra-thin High-density Fiberboard" (T/CNFPIA 3007-2019). The tree species and heartwood-sapwood content of the fiberboard can be adjusted according to actual needs to prepare ultra-thin high-density fiberboard products that meet the production process and usage requirements.

KEY WORDS: ultra-thin high-density fiberboard; tree species; heartwood and sapwood; physical and mechanical properties

超薄高密度纤维板是纤维板的创新产品,其厚度 $<1.5\text{ mm}$,密度 $>0.8\text{ g/cm}^3$,具有厚度小、表面光洁、柔韧性强及绿色低碳等优点,成为市场上备受瞩目的新型材料。超薄高密度纤维板一方面可作为胶合板和高档家具的饰面板^[1-2],解决家具表面碳化、不平整、易龟裂等问题,另一方面可用于线路板底板、汽车夹板和包装盒等领域^[3-6]。超薄高密度纤维板作为一种环保材料,可替代塑料、纸板等传统包装材料,有助于推动包装工程的绿色化和可持续发展。因此,超薄高密度纤维板在实际应用中既要满足相应的物理力学性能,还需兼顾美观性和光洁度的要求。

在超薄高密度纤维板的生产过程中,纤维原料的品种和质量是决定板材质量的关键因素^[7-13]。研究表明^[14-16],树种是影响纤维质量和纤维板性能的重要因素。不同树种因其纤维形态和化学成分的差异,会对纤维质量产生重要影响,进而影响纤维板的物理力学性能。在重组木领域,研究分析新西兰辐射松的心边材对重组木性能的影响,发现心材重组木性能优于边材重组木^[17]。由于超薄高密度纤维板是一种新产品,大多数研究集中在工艺优化方面,对树种和心边材方面的研究较少。

本研究以酚醛树脂(Phenol Formaldehyde, PF)为胶黏剂,以不同树种(杨木、桉木和松木)及大径级杨木的心材与边材纤维为原料制备1 mm厚超薄高密度纤维板,深入探究不同树种与心边材含量对超薄高密度纤维板物理力学性能及表面粗糙度的影响,旨在为超薄高密度纤维板的制备工艺研究提供参考。

1 实验

1.1 材料

杨木纤维、桉木纤维和松木纤维分别从杨树、桉树与松树中提取,其中杨树树种为毛白杨(*Populus tomentosa*),桉树树种为大叶桉(*Eucalyptus robusta*),松树树种为落叶松(*Larix gmelinii*),均为小径材,平均含水率为5%。心材纤维、边材纤维以大径级杨木旋切后的加工剩余物(即碎单板和木芯)为原料制备纤维,碎单板处理后为边材纤维,木芯处理后为心材纤维,平均含水率为5%。PF胶黏剂在25 $^{\circ}\text{C}$ 下的黏度为68 mPa·s,固体含量为4.52%。固化剂的配制浓度为20%。以上材料均由山东新港企业集团有限公司提供。

1.2 设备

主要设备:1 mm厚超薄高密度纤维板连续平压制生产线,山东新港企业集团有限公司;AGS-X-100 kN万能力学试验机,日本岛津制作所;TR200表面粗糙度测量仪,北京时代之峰科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 设计

1) 树种。采用单因素实验,选择4种不同的树种纤维,即桉木、松木、桉木+松木和杨木。不同树种的纤维形态如图1所示。



图1 不同树种的纤维形态

Fig.1 Fiber morphology of different tree species

2) 心材含量和边材含量。采用双因素实验。根据实际生产经验和成本控制的需求,心材含量选择0%、15%、30%共3个水平,边材含量选择30%、40%、50%、60%、65%、70%共6个水平,其余纤维采用杨木纤维。具体实验方案如表1所示。不同实验方案的纤维含量和超薄高密度纤维板试样如图2所示。

1.3.2 超薄高密度纤维板的制备

超薄高密度纤维板的制备在山东新港企业集团有限公司生产的1 mm厚超薄高密度纤维板连续平压制生产线上进行。

1) 剥皮、削片、筛选、水洗、蒸煮和热磨。木材剥皮后送入削片机切削成木片,然后经过筛选机去除杂物,送至水洗系统。水洗后的木片经过脱水处理后进行预热,再被送入蒸煮缸进行蒸煮处理。最后,将木片送至热磨机进行热磨,得到分离后的纤维。

2) 施胶、干燥、铺装、预压、热压和锯切。设定施胶量为10%,将胶黏剂、固化剂等调制后与纤维混合。施胶后将纤维送入干燥机,干燥处理至含水率为5%左右。设定密度为1.0 g/cm^3 ,厚度为1 mm,

表 1 实验方案
Tab.1 Experimental schemes

编号	纤维含量/%				
	桉木	松木	杨木	边材	心材
1	100	0	0		
2	0	100	0		
3	50	50	0		
4	0	0	100		
5			40	60	0
6			15	70	15
7			20	65	15
8			25	60	15
9			20	50	30
10			30	40	30
11			40	30	30

注: 编号 1~4 为桉木含量和松木含量的实验方案, 编号 5~11 为杨木含量、心材含量和边材含量的实验方案。

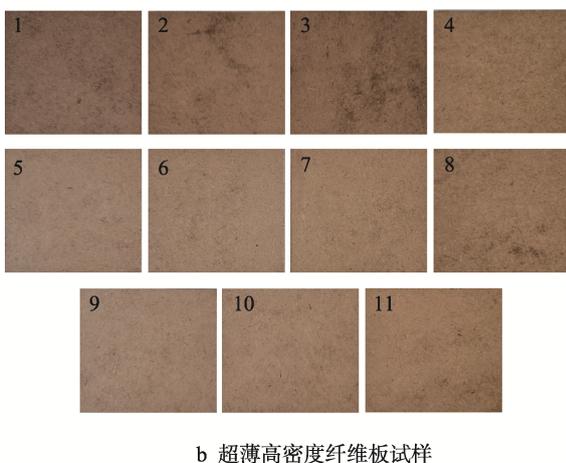
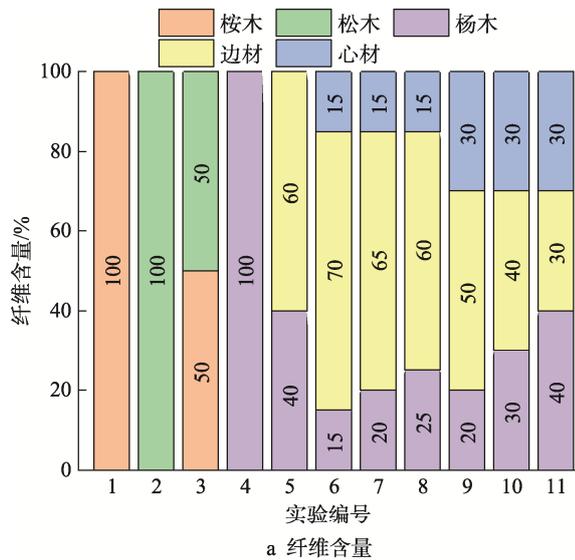


图 2 不同实验方案的纤维含量和超薄高密度纤维板试样

Fig.2 Fiber contents and ultra-thin high-density fiberboard samples under different experimental schemes

将纤维送入铺装机铺装, 再进入预压机预压。预压后的板坯送入连续平压热压机, 通过不同区段的连续热压 (各区段的温度、压力各不相同), 最终热压成板材, 再将板材锯切成 500 mm×500 mm 的纤维板。每个实验方案取样 3 块板材。

1.3.3 性能测试

热压成型的超薄高密度纤维板放置保养后, 参照《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》(GB/T 17657—2022) 测定板材的物理力学性能。

1) 静曲强度和弹性模量。每块纤维板锯切成 3 个试样, 试样尺寸为 150 mm×50 mm×1 mm, 采用三点弯曲法测量静曲强度 (Modulus of Rupture, MOR) 和弹性模量 (Modulus of Elasticity, MOE)。力学试验机的加载速度为 10 mm/min, 跨距为 100 mm, 测量结果取平均值。

2) 吸水厚度膨胀率。每块纤维板锯切成 3 个试样, 试样尺寸为 50 mm×50 mm×1 mm, 测量 24 h 吸水厚度膨胀率 TS。测量方法如下: 在温度为 (20±1) °C 的水中浸泡 24 h 后测量其厚度变化, 测量结果取平均值。

3) 表面粗糙度。每块纤维板锯切成 3 个试样, 试样尺寸为 50 mm×50 mm×1 mm, 采用表面粗糙度测量仪测量表面粗糙度 R_a 。探针在试样表面划过微小间距后, 即可显出 R_a 。表面粗糙度测量仪的滑行速度为 1 mm/s, 测力 < 4 mN, 测量结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 树种对超薄高密度纤维板物理力学性能的影响

不同树种的超薄高密度纤维板物理力学性能测试结果见图 3。对树种的实验结果进行方差分析, 其结果见表 2。当 $P < 0.05$ 时, 表明该实验结果在统计学上具有显著性。

由表 2 可知, 树种对超薄高密度纤维板的 MOR 值、MOE 值、TS 值和 R_a 的影响显著。由图 3 可知: 不同树种的超薄高密度纤维板的 MOR 值和 MOE 值从高到低依次为杨木、桉木+松木、松木、桉木; TS 值从高到低依次为杨木、松木、桉木+松木、桉木; R_a 从高到低依次为桉木+松木、桉木、杨木、松木。

实验结果表明, 树种中杨木纤维板的综合性能最优, 板材的 MOR 值为 54.61 MPa, MOE 值为 4.967 GPa, TS 值为 27.87%, R_a 为 2.361 μm , 其物理力学性能超过《超薄高密度纤维板》(T/CNFPIA 3007—2019) 规定的性能标准。造成这种现象的原因如下。

2.1.1 纤维形态分析

桉木是阔叶材, 纤维细胞导管较细且密, 木质较软, 木材纤维较碎, 胶合强度稍差, 导致桉木纤维板

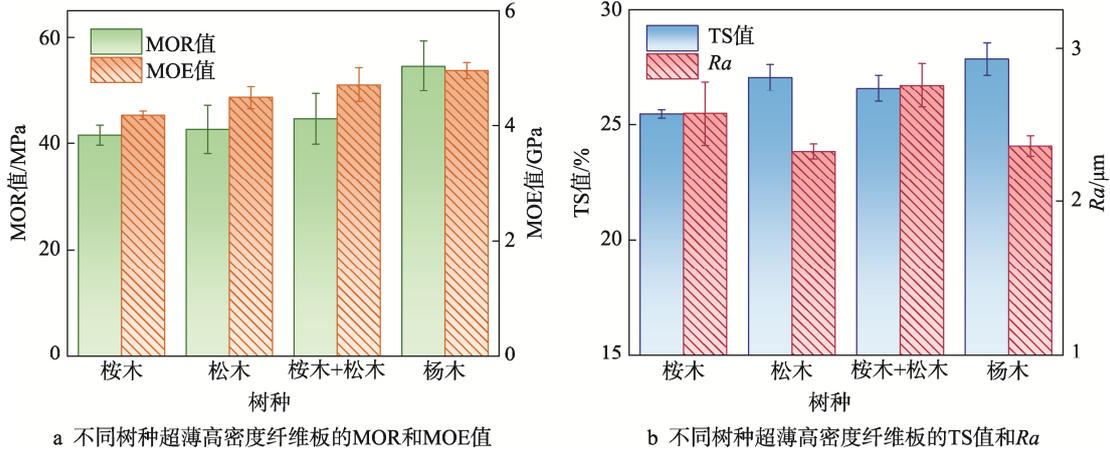


图3 不同树种的超薄高密度纤维板物理力学性能
Fig.3 Physical and mechanical properties of ultra-thin high-density fiberboard from different tree species

表2 树种的实验结果方差分析
Tab.2 Analysis of variance of experimental results for tree species

因变量	差异源	平方和	自由度	均方	F	P
MOR	组间	321.767	3	107.256	4.153	0.048
	组内	206.610	8	25.826		
	共计	528.377	11			
MOE	组间	1.016	3	0.339	5.849	0.020
	组内	0.463	8	0.058		
	共计	1.479	11			
TS	组间	9.162	3	3.054	6.928	0.013
	组内	3.527	8	0.441		
	共计	1.689	11			
Ra	组间	0.365	3	0.122	4.575	0.038
	组内	0.213	8	0.027		
	共计	0.578	11			

的强度低 (MOR 值为 41.54 MPa, MOE 值为 4.178 GPa)、表面粗糙度高 (Ra 为 2.573 μm)。另外, 桉木的纤维束细小, 细胞壁较薄^[18-19], 纤维间的接触面积增大, 纤维表面的游离羟基数量减少, 使得桉木纤维的吸附能力较低, 板材耐水性较高 (TS 值为 25.45%)。

松木作为针叶材, 其特点是纤维长度大, 长宽比大, 细胞壁厚^[20], 纤维本身的强度高。同时, 松木管胞较大, 孔隙较多, 有助于胶黏剂填满管胞的孔隙, 因此松木纤维板强度较高 (MOR 值为 4.64 MPa, MOE 值为 4.488 GPa)。基于松木材质较脆、易变性开裂的特性, 虽然其纤维黏结良好, 但是胶合强度还是低于杨木。松木纤维的细胞壁腔比大, 对水压的承受力较高, 且细胞内多含树脂和芳香油, 使得板材的 TS 值和 Ra 较低 (TS 值为 27.07%, Ra 为 2.325 μm)。

桉木+松木的混合纤维是将针叶材与阔叶材搭配

使用。一方面, 针叶材纤维本身强度高, 但管胞壁厚呈管状, 壁腔比大, 导致纤维间的接触面积较小; 另一方面, 阔叶材的纤维细胞是薄壁结构且呈带状, 长宽比小, 使得纤维间的接触面积增大, 交织结合力强^[21]。利用针、阔叶材各自不同的材性进行搭配, 可以更好地填补纤维的空隙、扩大接触面, 提高纤维板的强度和耐水性 (MOR 值为 44.61 MPa, MOE 值为 4.720 GPa, TS 值为 26.59%), 比单独使用针、阔叶材的板材性能更优。

杨木的纤维素及木质素总量并不低, 且聚戊糖含量较高^[22-23], 吸湿膨胀能力强, 易导致板材 TS 值增大 (TS 值为 27.87%)。另外, 杨木作为阔叶材, 其纤维长度较松木短, 但纤维宽度和壁腔比小, 细胞壁薄^[24], 易被压扁变成带状, 塑性和柔软性较好, 交织性能较强。与桉木相比, 杨木纤维的长度和长宽比更大, 纤维本身强度更高, 因此杨木纤维板的强度最高 (MOR 值为 54.61 MPa, MOE 值为 4.967 GPa)、表面粗糙度较低 (Ra 为 2.361 μm)。

2.1.2 化学成分分析

木材的主要化学成分为纤维素、半纤维素及木质素, 它们是构成细胞壁的物质基础。查阅资料可知 3 种木材的主要化学成分的含量^[25], 见表 3。

表3 3种木材的主要化学成分含量
Tab.3 Content of the main chemical components of three types of wood

树种	质量分数/%		
	纤维素	半纤维素	木质素
大叶桉	50.05	20.65	30.68
落叶松	5.63	1.18	26.46
毛白杨	60.02	24.61	23.03

注: 纤维素为“贝克纤维素”, 为除去木质素后的剩余物质, 实际上其为纤维素和部分半纤维素的混合物, 有时还含有少量的木质素。

在细胞壁中, 纤维素分子链形成的微纤丝沿着细胞的轴向排列, 起着支撑骨架的作用。随着纤维素含量的提升, 纤维板的强度会相应增强。和纤维素相比, 半纤维素具有更强的吸湿性和润胀能力^[26]。当半纤维素含量较高时, 纤维更易润胀, 增大了纤维的比表面积, 有助于促进氢键的形成, 进而增强纤维的交织性能, 提高板材强度。半纤维素的含量过高时, 虽然一定程度上提高了纤维的结合强度, 但是也相对减少了纤维素的含量, 从而降低了板材强度。因此, 板材强度从高到低依次为杨木、松木、桉木。

由于半纤维素无法形成结晶区, 水分子容易进入, 且半纤维素含量的增大也会导致吸水率升高。在高温作用下, 由于多糖易裂解成糠醛并与其他糖类及木质素聚合成不吸水的树脂, 降低板材的吸湿性, 木质素含量的增加, 可以在一定程度上降低纤维板的 TS。因此, 板材 TS 从高到低依次为杨木、松木、桉木。

2.2 心边材含量对超薄高密度纤维板物理力学性能的影响

不同心边材含量的超薄高密度纤维板物理力学性能测试结果, 见图 4。对不同心边材含量的实验结

果进行方差分析, 其结果见表 4。

由表 4 可知, 心材含量对超薄高密度纤维板 MOR、MOE 和 TS 值的影响显著, 对 *Ra* 的影响不显著; 边材含量对超薄高密度纤维板 MOE 和 TS 值的影响显著, 对 MOR 和 *Ra* 的影响不显著。

由图 4 可知: 在本实验范围内, 心材含量不变时, 随着边材含量的增加, 超薄高密度纤维板的 MOR、MOE 和 TS 值逐渐增大, *Ra* 先减小后增大; 随着心材含量的增加, MOR 和 MOE 值逐渐增大, TS 值和 *Ra* 先减小后增大; 单独加入边材纤维时, 超薄高密度纤维板的性能反而下降。

实验结果表明, 当心材含量为 30%、边材含量为 50% 时, 超薄高密度纤维板的综合性能最佳, 板材的 MOR 值为 57.69 MPa, MOE 值为 5.812 GPa, TS 值为 27.43%, *Ra* 为 2.719 μm , 其物理力学性能超过《超薄高密度纤维板》(T/CNFPIA 3007—2019) 规定的性能标准。造成这种现象的原因如下。

纤维长度是影响板材强度的重要因素。碎单板的厚度较小, 通常为几毫米, 部分纤维可能在切割过程中受到损伤, 导致边材纤维的长度不如原木纤维长。单独加入边材纤维 (心材的质量分数为 0%、边材的

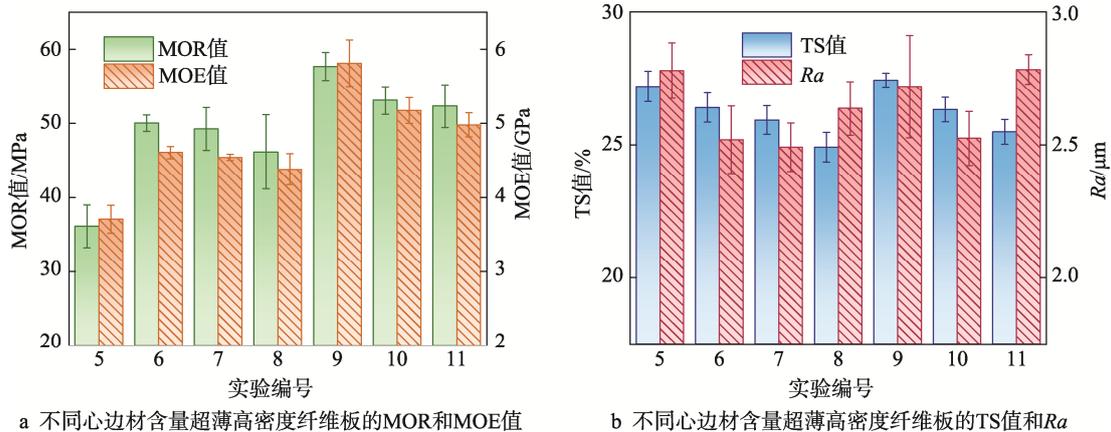


图 4 不同心边材含量的超薄高密度纤维板物理力学性能
Fig.4 Physical and mechanical properties of ultra-thin high-density fiberboards with different heartwood-sapwood contents

表 4 心边材含量的实验结果方差分析
Tab.4 Analysis of variance of experimental results for heartwood-sapwood content

因子	因变量	平方和	自由度	均方	F	P
心材含量	MOR 值	149.900	1	149.900	1.074	0.004
	MOE 值	0.681	1	0.681	1.091	0.003
	TS 值	7.820	1	7.820	21.257	0.000
	<i>Ra</i>	0.031	1	0.031	1.496	0.241
边材含量	MOR 值	75.809	4	18.952	1.527	0.248
	MOE 值	1.226	4	0.306	5.893	0.005
	TS 值	9.164	4	2.291	6.227	0.004
	<i>Ra</i>	0.145	4	0.036	1.763	0.192

质量分数为 60%) 时, 大量短纤维可能导致纤维间的结合力减弱, 从而使得板材的性能下降 (MOR 值为 36.15 MPa, MOE 值为 3.709 GPa, TS 值为 27.19%, Ra 为 2.778 μm)。当同时加入心边材纤维时, 心材与边材的混合使用起到了互补作用。心材纤维更易与其他纤维形成交织和互锁, 从而提高了纤维结合力。虽然边材纤维较短, 但其可以填补心材纤维间的空隙, 提高板材的强度。另外, 边材细胞含有较多的水分和营养物质, 使得边材含量过大, 可能导致纤维板的 TS 值增大。

杨木主要由木纤维、导管和轴向薄壁组织等组成。由于心材已经停止生长, 其内部的维管束排列相对较为紧密, 导管和轴向薄壁组织较为细小, 木纤维相对发达, 且具有较高的强度和韧性。与边材相比, 心材细胞紧密、实质密度大, 纤维板的力学性能随着心材含量的增加而改善。通过调整心边材含量的比例, 可以优化纤维间的相互作用与结合力, 进一步提升纤维板性能。

2.3 心边材含量与超薄高密度纤维板物理力学性能的数学模型

根据不同心边材含量的 11 组实验方案及每组 3 次的平行实验结果, 建立心材含量、边材含量与超薄高密度纤维板物理力学性能的数学模型。令心材含量和边材

含量分别为自变量 x 和 y , $x \in [0, 30]$, $y \in [30, 70]$, 板材的静曲强度、弹性模量、吸水厚度膨胀率和表面粗糙度分别为因变量 z_{MOR} 、 z_{MOE} 、 z_{TS} 和 z_{Ra} , 对数据进行多项式回归拟合, 并保持方程的健壮性, 得到的回归方程如式 (1) ~ (4) 所示。

$$z_{MOR} = 116.9 - 2.172x - 2.27y + 0.01712x^2 + 0.0436xy + 0.01539y^2 \quad (1)$$

$$z_{MOE} = 18.03 - 0.4899x - 0.3597y + 0.003789x^2 + 0.008003xy + 0.002017y^2 \quad (2)$$

$$z_{TS} = 20.3 - 0.2748x + 0.07302y + 0.01281x^2 - 0.001051xy + 0.000698y^2 \quad (3)$$

$$z_{Ra} = 20.84 - 0.5427x - 0.4414y + 0.002038x^2 + 0.008366xy + 0.00234y^2 \quad (4)$$

使用插值法对该模型进行曲面拟合, 得到心材含量、边材含量与超薄高密度纤维板物理力学性能的关系, 见图 5。

代入表 1 中设置的不同心边材含量条件, 可以得到纤维板的物理力学性能预测值, 其与实测值的对比结果如图 6 所示。由图 6 可知, 模型预测值基本沿着对角线均匀分布, 表明建立的数学模型可以较好地预测心边材含量对超薄高密度纤维板物理力学性能的影响。

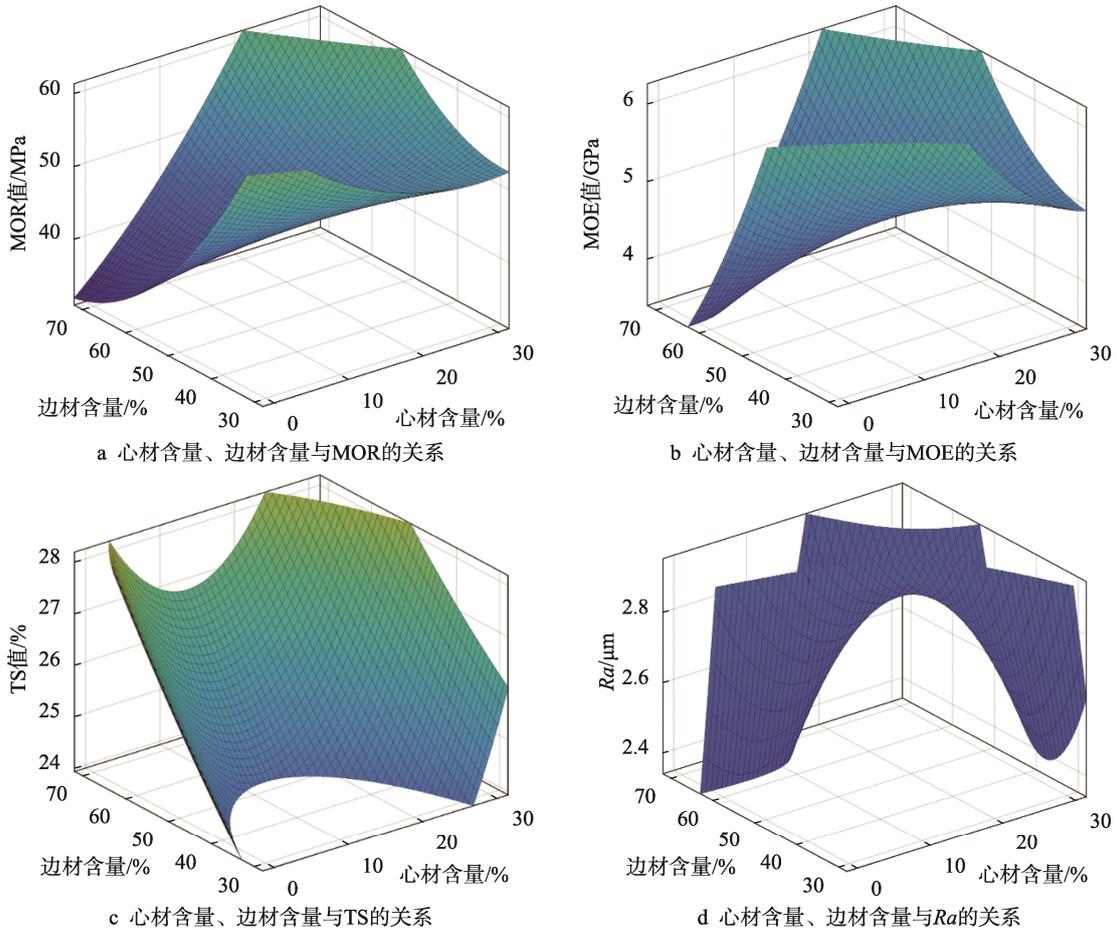


图 5 心边材含量与超薄高密度纤维板物理力学性能的关系
 Fig.5 Relationship between heartwood content, sapwood content and the physical and mechanical properties of ultra-thin high-density fiberboard

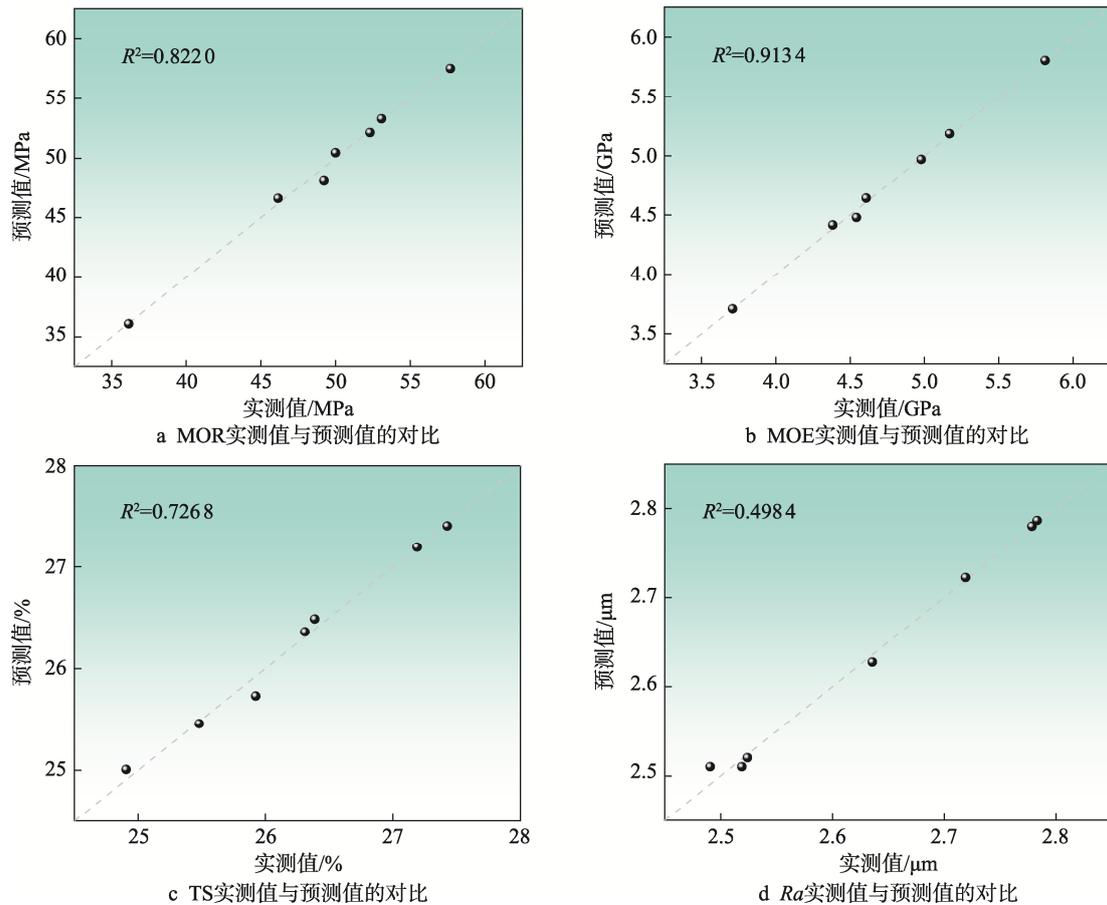


图 6 超薄高密度纤维板物理力学性能的实测值与预测值的对比
Fig.6 Comparison chart of actual and predicted physical and mechanical properties of ultra-thin high-density fiberboard

该模型的决定系数 R^2 见图 6。一般认为, R^2 越接近 1, 模型对数据的拟合程度越好。式 (1)~(4) 对应的 R^2 分别为 0.822 0、0.913 4、0.726 8、0.498 4, 因此上述模型对超薄高密度纤维板的 MOR、MOE 和 TS 值的拟合度较好, 而对 Ra 的拟合度不佳。

3 结语

探究了不同树种与心边材含量对超薄高密度纤维板物理力学性能的影响, 并建立了数学模型, 主要得出以下结论。

1) 不同树种的超薄高密度纤维板的 MOR 值和 MOE 值从高到低依次为杨木、桉木+松木、松木、桉木; TS 值从高到低依次为杨木、松木、桉木+松木、桉木; Ra 从高到低依次为桉木+松木、桉木、杨木、松木。由此可见, 树种中杨木纤维板的综合性能最优。

2) 在本实验范围内, 心材含量不变时, 随着边材含量的增加, 超薄高密度纤维板的 MOR 值、MOE 值和 TS 值逐渐增加, Ra 先减小后增大; 随着心材含量的增大, MOR 值和 MOE 值逐渐增大, TS 值和 Ra 先减小后增大; 单独加入边材纤维时, 超薄高密度纤维板的性能反而下降。当心材的质量分数为 30%、边

材的质量分数为 50%时, 超薄高密度纤维板的综合性能最佳。

3) 在本实验条件下, 除部分桉木纤维板和心材的质量分数为 0%、边材的质量分数为 60%的纤维板, 其余纤维板的物理力学性能均超过《超薄高密度纤维板》(T/CNFPIA 3007—2019) 规定的性能标准。可根据实际需要调整板材的树种和心边材含量, 生产满足生产条件和使用要求的超薄高密度纤维板。

参考文献:

- [1] 何明明, 邵雪靖, 王雅慧, 等. 应用响应面法优化超薄高密度纤维板饰面胶合板的热压工艺参数[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(10): 137-141.
HE M M, SHAO X J, WANG Y H, et al. Optimization of Hot-Pressing Process Parameters for Ultra-Thin High-Density Fiberboard Veneer Plywood Using Response Surface Methodology[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(10): 137-141.
- [2] 邵雪靖. 覆贴超薄高密度纤维板的可饰面胶合板工艺优化研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.

- SHAO X J. Study on Process Optimization of Veneer Plywood Covered with Ultra-Thin High-Density Fiberboard[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023.
- [3] 杨春梅, 李昱成, 田心池, 等. 基于筛分配比的超薄纤维板物理力学性能研究[J]. 林业机械与木工设备, 2024, 52(1): 20-24.
- YANG C M, LI Y C, TIAN X C, et al. Research on Mechanical Properties of Ultrathin Fiberboard Based on Screening Ratio[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2024, 52(1): 20-24.
- [4] 张镭, 邹森, 唐启恒, 等. 热压时间和温度对酚醛树脂型超薄高密度纤维板性能的影响[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(1): 68-73.
- ZHANG L, ZOU M, TANG Q H, et al. Effects of Hot-Pressing Time and Temperature on Properties of Phenolic Resin Ultra-Thin High Density Fiberboards[J]. Wood Science and Technology, 2023, 37(1): 68-73.
- [5] 周伟, 何红兵. 不同功能型纤维板的应用[J]. 中国人造板, 2024, 31(2): 22-24.
- ZHOU W, HE H B. Application of Different Functional Fiberboard[J]. China Wood-Based Panels, 2024, 31(2): 22-24.
- [6] 郑胜军. 超薄型高密度纤维板智能化生产技术与设备研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(2): 81-83.
- ZHENG S J. Research on Intelligent Production Technology and Equipment for Ultra Thin High Density Fiberboard[J]. Papermaking Equipment and Materials, 2023, 52(2): 81-83.
- [7] 潘青青, 吴定橙, 单伟雄, 等. 添加花生秸秆的无胶纤维板的制备工艺及优化[J]. 包装工程, 2020, 41(11): 127-134.
- PAN Q Q, WU D C, SHAN W X, et al. Preparation Technology and Optimization of Peanut Straw Fiberboard without Adhesive[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(11): 127-134.
- [8] 王凯文, 杨蕊, 叶芑, 等. 大豆与木片共磨制备无胶纤维板的工艺研究[J]. 包装工程, 2019, 40(7): 81-87.
- WANG K W, YANG R, YE P, et al. Process of Preparing Glueless Fiberboard by Co-Milling of Soybean and Wood Chips[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 81-87.
- [9] ESMAILPOUR A, TAGHIYARI H R, MAJIDI R, et al. Nano-Wollastonite to Improve Fire Retardancy in Medium-Density Fiberboard (MDF) Made from Wood Fibers and Camel-Thorn[J]. Wood Material Science & Engineering, 2021, 16(3): 161-165.
- [10] WU J G, JIN C, LIU T T, et al. Optimization of Poplar Wood Shavings Bio-Pretreated with *Coriolus Versicolor* to Produce Binderless Fiberboard Using Response Surface Methodology[J]. BioResources, 2024, 19(3): 6178-6189.
- [11] KUQO A, KODDENBERG T, MAI C. Use of Dry Mixing-Spraying Process for the Production of Geopolymer-Bonded Wood and Seagrass Fibreboards[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 248: 110387.
- [12] PATIL H, SUDAGAR P I, SUDHA P, et al. Studies on Water Absorption Properties of Fiber-Board Prepared Using Sugarcane Bagasse with Natural Resins[J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2022, 12(11): 377-382.
- [13] MOEZZIPOUR B, MOEZZIPOUR A. Thermal Behavior of Insulation Fiberboards Made from MDF and Paper Wastes[J]. Drvna Industrija, 2021, 72(3): 245-254.
- [14] 周伟. 中密度纤维板抗压性能研究[J]. 中国人造板, 2021, 28(8): 6-10.
- ZHOU W. Study on Compressive Properties of Medium Density Fiberboard[J]. China Wood-Based Panels, 2021, 28(8): 6-10.
- [15] BENTHIEN J T, HELDNER S, OHLMEYER M. Investigation of the Interrelations between Defibration Conditions, Fiber Size and Medium-Density Fiberboard (MDF) Properties[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2017, 75(2): 215-232.
- [16] 何爽爽. 小径级竹柳特性及其纤维板性能的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
- HE S S. Study on the Characteristics of Small-Diameter Bamboo Willow and Its Fiberboard Properties[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.
- [17] 魏金光, 韦亚南, 张亚慧, 等. 心、边材及重组木密度对辐射松重组木性能的影响[J]. 木材工业, 2017, 31(6): 43-45.
- WEI J G, WEI Y N, ZHANG Y H, et al. Effect of Heartwood and Sapwood of *Pinus Radiata* as Well as Scrimber Density on Scrimber Properties[J]. China Wood Industry, 2017, 31(6): 43-45.
- [18] 吴章康, 张宏健, 黄素涌, 等. 桉树中密度纤维板性能研究[J]. 云南林业科技, 2001, 30(1): 58-60.
- WU Z K, ZHANG H J, HUANG S Y, et al. Study on Property of Eucalyptus Medium Density Fiber Board[J]. Yunnan Forestry Science and Technology, 2001, 30(1): 58-60.
- [19] 邓凤伟, 林本平, 刘永丰. 樟木、构木和桉木材性及硫酸盐法制浆性能对比研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(5): 43-45.

- DENG F W, LIN B P, LIU Y F. Comparative Study on Wood Properties and Kraft Pulping Properties of *Cinnamomum Camphora*, *Broussonetia Papyrifera* and *Eucalyptus*[J]. *Papermaking Equipment and Materials*, 2024, 53(5): 43-45.
- [20] 周强, 武兰义, 于中华, 等. 原料与中密度纤维板性能关系的研究与探讨[J]. *辽宁林业科技*, 2006(6): 46-48.
- ZHOU Q, WU L Y, YU Z H, et al. Research and Discussion on the Relationship between Raw Materials and Properties of Medium Density Fiberboard[J]. *Liaoning Forestry Science and Technology*, 2006(6): 46-48.
- [21] 王天佑. 木材工业实用大全 纤维板卷[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 71-97.
- WANG T Y. Practical Guide to Wood Industry, Fiberboard Rolls [M]. Beijing: China Forestry Press, 2001: 71-97.
- [22] 盛笑雨. 物理属性对杨木高密度纤维板性能的影响规律研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- SHENG X Y. Study on the Influence of Physical Properties on the Properties of Poplar High Density Fiberboard[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [23] 巩建厅, 鲍逸培. 意杨轻质中密度纤维板的研制[J]. *木材加工机械*, 2005(5): 24-27.
- GONG J T, BAO Y P. Development of the Poplar Light MDF[J]. *Wood Processing Machinery*, 2005(5): 24-27.
- [24] 陆仁书. 纤维板制造学[M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 1993: 1-6.
- LU R S. Fiberboard Manufacturing[M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993: 1-6.
- [25] 徐有明. 木材学[M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2019: 94-115.
- XU Y M. Wood Science[M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019: 94-115.
- [26] 唐忠荣. 人造板制造学-上册[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 42-54.
- TANG Z R. Wood-Based Panel Manufacturing-I[M]. Beijing: Science Press, 2015: 42-54.