

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.019

论文标题： 棉秸秆制人造板热压成型工艺优化

作　　者： 武星宇，周建平，许 燕，等

收稿日期： 2025-05-16

引文格式： 武星宇,周建平,许燕,等.棉秸秆制人造板热压成型工艺优化[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):190-200.

WU X Y, ZHOU J P, XU Y, Optimization of hot-pressing process for cotton-stalk-based artificial boards[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):190-200.

相关论文推荐

Recommended articles

人造板用绿色胶黏剂研究进展

Research progress of green adhesives for wood-based panels

基于响应面法优化的竹丝饰面细木工板热压工艺

Optimization hot pressing process of bamboo filament decorative blockboard process based on response surface method

地板用双秸秆板芯层复合结构材工艺优化

Process optimization of double straw board core layer composite structure use for floor

重载纤维模塑材料热压成型的传热规律研究

Study on heat transfer law of overloaded molded fiber materials under hot pressing

初含水率对白橡锯材热压干燥特性的影响

Effect of initial moisture content on hot pressing drying characteristics of *Quercus mongolica* lumber

不同热压条件下的中温酚醛树脂竹胶合板力学性能比较

Mechanical properties of intermediate temperature phenolic resin bamboo plywood under different hot-pressing conditions

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.019 http: //qks.csuft.edu.cn

棉秸秆制人造板热压成型工艺优化

武星宇[1]，周建平[1, 2]，许　燕[1, 2]，陈小康[1, 2]，张文亚[1]，王　青[3]，周李文[3]

（1. 新疆大学 机械工程学院，新疆 乌鲁木齐 830017；2. 新疆维吾尔自治区农牧机器人及智能装备工程研究中心，新疆 乌鲁木齐 830017；3. 新疆天汇康拜农业生态科技有限公司，新疆 阿克苏 842299）

摘　要：【目的】为了提高棉秸秆人造板的板材强度，优化棉秸秆制人造板热压成型工艺，以破碎筛分后的棉秸秆木质部、改性脲醛胶为主要原料制备人造板材，探讨粒径大小、施胶量、胶黏剂固含量、热压温度、热压压力、预压时间、热压时间 7 个因素对人造板性能的影响，确定显著影响因素及最优工艺参数。【方法】以板材内结合强度（Internal Bonding Strength，IB）为试验指标，采用 Plackett-Burman 试验筛选出影响板材内结合强度的显著因素；在 Plackett-Burman 试验结果基础上采用最陡爬坡试验，确定显著影响因素的最佳参数范围；开展 3 因素 3 水平 Box-Behnken 试验，构建二次多项式回归模型并开展方差分析，基于响应曲面分析关键工艺参数的交互作用及其显著性，得出最佳工艺方案并进行试验验证。【结果】1）显著影响板材内结合强度的因素依次为施胶量、热压温度及热压压力。2）利用 Design-Expert V13.0 优化得到的最佳工艺参数为粒径大小 0 ～ 1 mm、施胶量 13%、胶黏剂固含量 45%、热压温度 150 ℃、热压压力 8.8 MPa、预压时间 2.5 h、热压时间 9 min，此热压工艺参数下制得的棉秸秆人造板内结合强度为 0.64 MPa，模型计算理论值为 0.65 MPa，试验值与理论值误差为 1.54%。【结论】响应面模型准确可靠，该研究结果可为棉秸秆制人造板制板工艺研究提供参考。

关键词：棉秸秆；人造板；热压工艺；响应面法；改性脲醛胶

中图分类号：S216.2；TS653.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)05-0190-11

Optimization of hot-pressing process for cotton-stalk-based artificial boards

WU Xingyu[1], ZHOU Jianping[1,2], XU Yan[1,2], CHEN Xiaokang[1,2], ZHANG Wenya[1], WANG Qing[3], ZHOU Liwen[3]

（1.College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 2. Engineering Research Center of Agricultural and Animal Husbandry Robots and Intelligent Equipment, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 3.Xinjiang Tianhui Kangbai Agricultural Ecological Technology Co., Ltd., Aksu 842299, Xinjiang, China)

Abstract:【Objective】To enhance the board strength of cotton stalk-based composite boards and optimize the hot-pressing process, this study fabricated artificial boards using crushed and sieved cotton stalk xylem and modified urea-formaldehyde resin as the primary raw materials. The effects of seven key factors—particle size, adhesive dosage, solid content of the resin, hot-pressing temperature, hot-pressing pressure, pre-pressing time, and hot-pressing duration—on the mechanical properties of the composite boards were investigated. The significance of these factors and the optimal process parameters were systematically determined.【Method】In this study, the internal bonding strength (IB) of the composite boards was selected as the experimental indicator. A Plackett-Burman (PB) experimental design was employed to screen significant factors affecting IB. Based on the PB results, a steepest ascent experiment was conducted to determine the optimal parameter ranges for the identified significant factors. Subsequently, a three-factor, three-level Box-Behnken design (BBD) was implemented to construct a quadratic polynomial regression model. Analysis of variance (ANOVA) and response surface methodology (RSM) were applied to analyze the interactions and significance between key process parameters. Finally, the optimized process parameters were derived and validated through experimental verification. 【Result】1）The factors significantly affecting the internal bonding strength (IB) of the composite boards were ranked in the following order of significance: adhesive dosage, hot-pressing temperature, and hot-pressing pressure; 2) The optimal process parameters derived from Design-Expert V13.0 software optimization were as follows: particle size (0–1 mm), adhesive dosage (13%), solid content of the resin (45%), hot-pressing temperature (150 ℃), hot-pressing pressure (8.8 MPa), pre-pressing time (2.5 h), and hot-pressing duration (9 min). Under these conditions, the

收稿日期（Received）：2025-05-16　　**修订日期**（Revised）：2025-09-05

基金项目：新疆维吾尔自治区科技创新领军人才项目（2022TSYCLJ0044）；新疆维吾尔自治区科研创新项目（XJ2025G043）。

第一作者：武星宇（18586043212@163.com），硕士研究生。**通信作者：**周建平（linkzhou@163.com），教授，博士，博士研究生导师。

引文格式：武星宇 , 周建平 , 许燕 , 等 . 棉秸秆制人造板热压成型工艺优化 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5):190-200.

WU X Y, ZHOU J P, XU Y, et al. Optimization of hot-pressing process for cotton-stalk-based artificial boards[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):190-200.

cotton stalk-based composite board exhibited an internal bonding strength (IB) of 0.64 MPa, closely aligning with the model-predicted theoretical value of 0.65 MPa, with a minimal deviation of 1.54% between experimental and theoretical results.【Conclusion】The response surface model demonstrated high accuracy and reliability. These findings provide valuable insights for optimizing the manufacturing process of cotton stalk-based composite boards, particularly in refining hot-pressing parameters and resin application strategies.
Keywords: cotton stalk; panels; hot pressing process; response surface method; modified urea-formaldehyde adhesive

新疆作为我国棉花种植生产的主产区，截至 2024 年，全疆棉花种植面积达 244.79 万 hm^2，约占全国总量的 86.48 %。作为棉花生产的副产品，每年新疆大田产生的棉秸秆 2 700 多万 t[1-4]。目前，棉秸秆综合处理技术仍相对落后，传统棉秆处理多采用粉碎还田或就地焚烧还田。此类处理方式不仅资源利用率低下，还易引发病虫害滋生，既造成大量资源浪费，又对后续作物播种产生不利影响 [5-7]。棉秸秆由韧皮部、木质部和髓心组成，其中木质部纤维长度虽短于部分木材，但其长宽比较大，与阔叶林相似，能够通过交联形成稳定的网状结构，具有良好的力学性能 [8-11]，可作为人造板原料替代木材。新疆棉秸秆资源丰富，作为可再生资源亟待科学高效利用。推进棉秸秆综合利用，既可维护农业生态平衡，又能促进农业绿色可持续发展，实现资源利用与生态环境保护双赢。

人造板行业对森林资源依赖度高、消耗量大。依托新疆丰富的棉秸秆资源优势，将其用于制备人造板，兼具生态与经济双重价值：一方面，可有效替代木材原料，从而降低对天然森林资源的消耗，维护生态安全；另一方面，通过秸秆资源化利用，既能缓解环境压力，又能提升农业废弃物附加值，实现生态保护与资源增值的良性闭环。现有的秸秆制备人造板工艺研究多集中在玉米、稻草、麦秆等作物，针对棉秸秆制人造板的热压工艺研究仍然较少。何勋等 [12] 以去除表皮层后的完整玉米秸秆皮为原料，通过对玉米皮层积材进行性能研究，发现去除玉米秸秆皮的表皮层，能够改善玉米秸秆皮的胶合性能，穗位部及其以下的玉米秸秆皮制备的板材性能均优于穗位部以上的。李宇等 [13] 以毛竹剩余物为原料制备刨花板，研究不同施胶量、热压温度、时间、压力对超薄竹刨花板主要物理力学性能的影响，结果表明制备工艺参数会影响竹刨花板断面密度分布，进而影响板材物理力学性能。Li 等 [14] 采用蒸汽、草酸溶液对水稻秸秆进行预处理，发现 2 种处理方式均可改善稻秆刨花板的物理力学性能，提高板材尺寸稳定性。由于棉秸秆韧皮部纤维韧性很强，会给原料的切断、干燥和铺装造成困难，同时韧皮部富含硅质层，表面活性基团较少，脲醛树脂类和酚醛树脂类胶黏剂在秸秆表面浸润效果较差 [8,15-17]；髓心由薄壁细胞组成，强度低且易碎，具有较强的吸水性，施胶时吸胶量大且力学性能较差，不适用于制备人造板 [18]。故本研究以破碎筛分后的棉秸秆木质部为主要原料，利用碱法预处理，采用实验室自制改性脲醛胶为胶黏剂，制备棉秸秆人造板。

本研究基于前期试验结果，采用 Plackett-Burman 多因子筛选试验确定关键工艺参数，通过最陡爬坡路径分析逼近最优区域后，运用 Box-Behnken 中心组合设计构建工艺参数的多元回归模型 [19-23]。经二次多项式方程拟合，解析出热压工艺参数与板材内结合强度的非线性关联规律，确定最佳热压工艺参数组合，为棉秸秆人造板制备工艺的优化提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

棉秸秆木质部原料：棉秸秆来自新疆维吾尔自治区阿克苏地区沙雅县。秸秆原料含水率约为 7%，用破碎机将秸秆破碎成粒径为 0.5 ～ 1.0 cm 的小段，再通过滚筒筛将原料中的棉皮筛分出来，收集筛分后的原料用粉碎机进行细粉碎，将原料分别粉碎成粒径 1 ～ 3 mm 和 0 ～ 1 mm 的颗粒，得到棉秸秆木质部原料，碱法预处理后晾干备用。

改性脲醛胶：添加三聚氰胺改性的脲醛树脂，添加 1.5% 硫酸铵水溶液（$m_{固体硫酸铵}$ ∶ $m_{水}$为 1∶1），改性后的脲醛胶达到 E_0 级释放标准。

脱模剂：主要成分为异丙醇、乙二醇、乙醚和萘基甲醇聚合物。

1.2　仪器设备

设备主要有：实验室自制秸秆粉碎机；DJ-A1000 型电子分析天平；XMEA-6000 型电热鼓风干燥箱；实验室自研立式螺旋搅拌机；ST-25T300A 型自动平板硫化机；P300 型万能材料试验机（力传感器，0 ～ 1 000 N；精度，0.01 N；位移传感器精度，0.01 mm）。

1.3 试验方法

1.3.1 热压工艺流程

设计板材的幅面大小为 250 mm×250 mm，厚度为 18 mm。棉秸秆人造板生产工艺流程如图 1 所示。将收储打包好的棉秸秆经破碎机粉碎，利用滚筒筛分装置对破碎后的棉秸秆碎料实现除杂分离，收集筛分所得木质部碎料晾干备用。随后进入原料配比环节，按照试验设计参数精确称取胶黏剂与木质部原料，采用立式搅拌机在设定转速下实施梯度混合，搅拌原料至混合均匀，将制备好的胶料混合物铺装于专用板坯模具内，在最优热压工艺参数条件下利用平板热压机制备板材，最终制品经 24 h 恒温恒湿养护后，对制得板材进行裁剪检测。本研究设定所制备的棉秸秆人造板密度约为 630 kg/m^3。

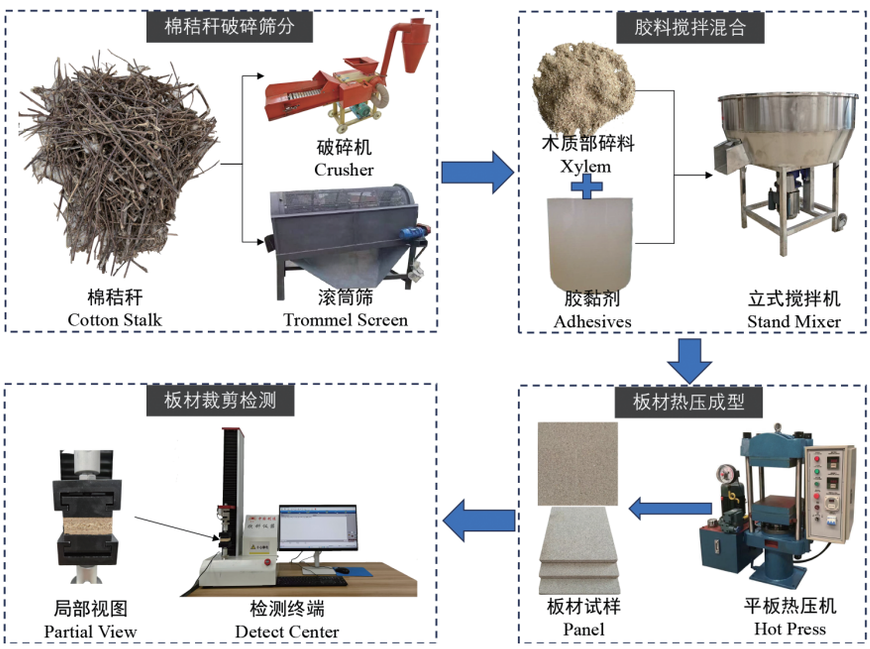


图 1 棉秸秆人造板生产工艺流程

Fig. 1 Production scheme of cotton straw panels

如图 2 所示，棉秸秆人造板的热压工艺采用连续升压、分段泄压过程，首先在 t_1 将压力升高至预设值 P，第一次泄压将压力降至设定压力一半，泄压时间 t_2–t_3，保压时间 t_3–t_4，第二次泄压将压力降至 1 MPa，泄压时间 t_4–t_5，保压时间 t_5–t_6，最后在 t_7 将压力降至 0。通过该热压工艺以排出板胚中的水汽，释放板内蒸汽压力，有效防止板材出现鼓泡、分层、爆板等现象 [24]。

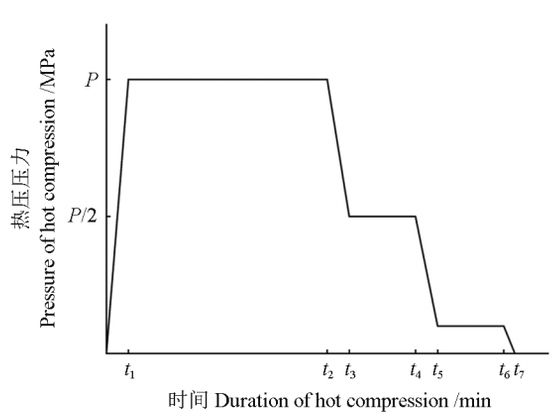


图 2 棉秸秆人造板热压工艺曲线

Fig. 2 Hot-pressing process curve of cotton straw board

1.3.2 板材内结合强度检测

板材内结合强度参照 GB/T 17657—2022《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》规定的方法检测 [25]，具体示意如图 3 所示。

板材内结合强度指在垂直于板材表面的拉力作用下，板材内部结构发生破坏时单位面积所能承受的最大拉力，即垂直于试件表面的最大破坏拉力与试件受力面积之比。试件内结合强度计算公式如下：

$$\sigma_{\perp}=\frac{F_{\max}}{l\times b}。$$

式中：$\sigma_{\perp}$ 为试件内结合强度，精确至 0.01 MPa；$F_{\max}$ 为试件破坏时最大荷载，N；l 为试件长度，mm；b 为试件宽度，mm。

1.4 试验设计

1.4.1 Plackett-Burman 试验

结合前期单因素试验结果，本研究选取粒径大小、施胶量、胶黏剂固含量、热压温度、热压压力、预压时间、热压时间 7 个因素进行分析与考察，

其中秸秆粒径分为 0 ～ 1 mm 和 1 ～ 3 mm。施胶量是指胶黏剂占预压秸秆物料总质量的百分比，前期试验结果表明：施胶量小于 6% 时，板材难以成形，考虑试验效果和生产需要，本研究的施胶量选取 6% ～ 14%[26]；施胶过程中发现胶黏剂固含量大于 60% 将难以喷出，小于 30% 则过分稀释，故胶黏剂固含量选用 30% ～ 60%。考虑机器条件和板材成形的经济性，热压温度为 120 ～ 160 ℃，热压压力为 6 ～ 10 MPa，预压时间为 1 ～ 4 h，热压时间为 6 ～ 12 min。

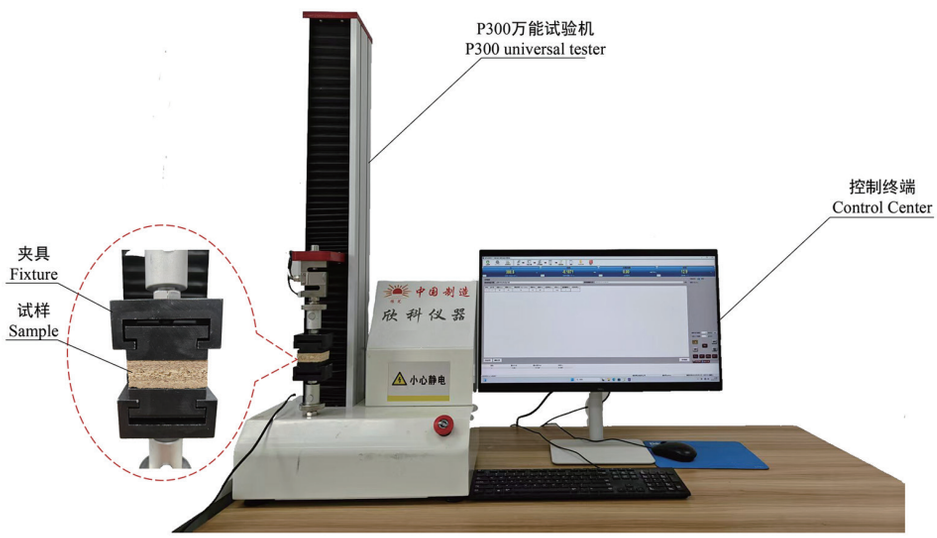


图 3　板材性能检测
Fig. 3　Plate performance testing

利用 Design-expert 软件设计 Plackett-Burman 试验，选取中心点为 3，试验次数为 15，对粒径大小、施胶量、胶黏剂固含量、热压温度、热压压力、预压时间、热压时间 7 个因素进行考察，其中虚拟变量反映试验误差，以板材内结合强度为响应值探究 7 个因素对板材性能的影响（表 1）。

表 1　Plackett-Burman 设计因子水平及编码值
Table 1　Factors and levels of Plackett-Burman design

水平 Level	秸秆粒径（A）Particle size /mm	施胶量（B）Resin content /%	固含量（C）Solids content /%	热压温度（D）Hot pressing temperature /℃	热压压力（E）Hot pressing pressure /MPa	预压时间（F）Preload time/h	热压时间（G）Hot pressing time /min	虚拟变量 Dummy variables
低 low（−1）	0 ～ 1	6	30	120	6	1	6	（H,I,J,K）
高 high（+1）	1 ～ 3	14	60	160	10	4	12	

1.4.2　最陡爬坡试验

最陡爬坡试验是沿着响应变量变化最显著的方向逐步调整因素水平，用于快速逼近多因素系统的最优区域。根据 Plackett-Burman 试验结果，选择施胶量、热压温度、热压压力 3 个最显著因素设计最陡爬坡试验，步长根据参数区间进行确定，其他非显著影响参数取平均值。

1.4.3　Box-Behnken 响应面法试验

根据最陡爬坡试验结果，利用 Design-expert V13.0 软件设计 3 因素 3 水平 Box-Behnken 试验，为了反映板材的质量与其密度的关系，以板材内结合强度为第一响应值，以板坯平均密度为第二响应值，确定目标密度下的最佳热压工艺条件（表 2）。

表 2　Box-Behnken 试验中变量及其水平
Table 2　Factors and levels of response surface experimental design

试验因素 Experimental factor	水平 Level		
	−1	0	1
X_1（B）/%	10	12	14
X_2（D）/℃	140	150	160
X_3（E）/MPa	8	9	10

1.5　数据处理

每组试验进行 3 次，结果取平均值，试验设计和数据分析采用 Design-Expert V13.0 统计软件进行，响应曲面图采用 Origin 2024 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 Plackett-Burman 试验设计筛选结果

根据前期单因素试验结果及文献总结，选取中心点为 3、试验次数为 15 的试验设计，以内结合强度（IB）为响应值。试验设计及结果如表 3 所示。

表 3 Plackett-Burman 试验设计与结果

Table 3 The experiment design and results of Plackett-Burman design

试验号 No.	A	B	C	D	E	F	G	内结合强度 IB /MPa
1	−1	−1	1	−1	1	1	−1	0.32
2	0	0	0	0	0	0	0	0.42
3	1	−1	1	1	−1	1	1	0.35
4	1	1	−1	−1	−1	1	−1	0.39
5	−1	1	−1	1	1	−1	1	0.55
6	1	1	1	−1	−1	−1	1	0.42
7	0	0	0	0	0	0	0	0.40
8	−1	1	1	1	−1	−1	−1	0.42
9	−1	−1	−1	1	−1	1	1	0.35
10	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	0.26
11	0	0	0	0	0	0	0	0.39
12	1	−1	−1	−1	1	−1	1	0.34
13	1	1	−1	1	1	1	−1	0.54
14	1	−1	1	1	1	−1	−1	0.36
15	−1	1	1	−1	1	1	1	0.41

基于试验数据的方差分析结果，采用 Lenth 法对板材内结合强度（IB）的影响因素进行显著性检验，并绘制标准化效应的半正态概率图与帕累托图[27]。由图 4 可以看出，因素 B、D、E 显著偏离拟合参考线，表明其对 IB 具有统计学显著影响。帕累托图（图 5）进一步验证了各因素的效应量值，其中因素 B、D、E 的标准化效应均超越 t 值临界线，再次确认这 3 个工艺参数为 IB 的关键影响因素。综合结果表明，施胶量、热压温度及热压压力是调控板材内结合强度的显著影响因素。

由表 4 可知，模型的 P=0.000 5 < 0.05，表明模型具有统计学可靠性，且在研究域内具有较好的拟合性能；决定系数为 R^2=0.952 4，说明了模型与试验数据的高度相关性；校正决定系数为 R^2_{adj}=0.896 8，进一步表明该模型可解释 89.68% 的试验数据变异性；变异系数（6.35%）处于较低水平，说明试验的可信度和精确度较高；信噪比指标（14.083 6）显著高于基准阈值 4.0，证明模型具备充分的预测分辨能力，能够有效区分有效信号与随机噪声。

通过对试验数据进行多元回归拟合，得到回归模型方程：

$$Y=0.3925+0.0075A+0.0625B-0.0125C+0.0358D+0.0275E+0.0008F+0.0108G。$$

式中：Y 为内结合强度；A 为秸秆粒径；B 为施胶量；C 为胶黏剂固含量；D 为热压强度；E 为热压压力；F 为预压时间；G 为热压时间。

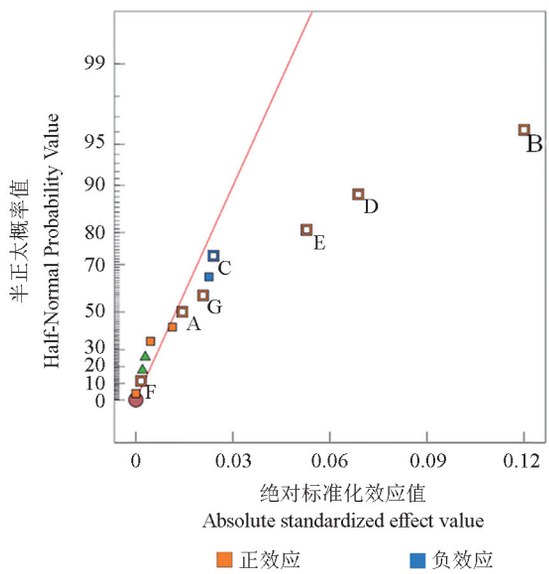


图 4 标准化效应的半正态概率效应图

Fig. 4 Half-normal plot

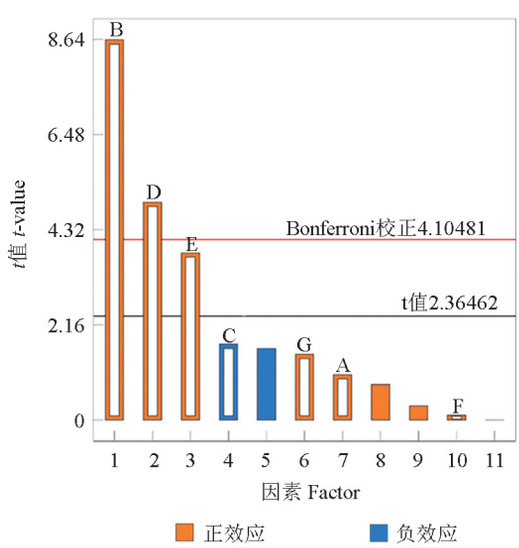


图 5 标准化效应的帕累托图

Fig. 5 Pareto chart

2.2 最陡爬坡试验

根据 Plackett-Burman 试验筛选出 B、D、E 这 3 个对板材内结合强度有显著性影响的参数进行最陡爬坡试验，综合考虑爬坡试验成本和工作量，因素 A 秸秆粒径选取 0 ～ 1 mm，因素 C 胶黏剂固含量选取 45%，因素 F 预压时间选取 2.5 h，因素 G 热压时间选取 9 min。试验设计及结果如表 5 所示。

表 4　Plackett-Burman 试验因素、水平及显著性分析 †
Table 4　Analysis of factors, levels and significance of the Plackett-Burman design

因素 Factors	自由度 Degree of freedom	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	*F* 值 *F*-value	*P* 值 *P*-value	显著性 Significance
模型 Model	7	0.075 3	0.010 8	18.61	0.000 5	*
秸秆粒径 Particle size	1	0.000 7	0.000 7	1.17	0.315 8	
施胶量 Resin content	1	0.046 9	0.046 9	81.05	＜ 0.000 1	**
固含量 Solids content	1	0.001 9	0.001 9	3.24	0.114 8	
热压温度 Hot pressing temperature	1	0.015 4	0.015 4	26.64	0.001 3	*
热压压力 Hot pressing pressure	1	0.009 1	0.009 1	15.69	0.005 5	*
预压时间 Preload time	1	8.33E-06	8.33E-06	0.01	0.907 8	
热压时间 Hot pressing time	1	0.001 4	0.001 4	2.44	0.162 6	
残差 Residual	7	0.004 0	0.0006 0			
失拟项 Lack of fit	5	0.003 6	0.000 7	3.07	0.263 8	
纯误差 Pure error	2	0.000 5	0.000 2			
总和 Total deviation	14	0.079 4				
R^2			0.952 4			
R^2_{adj}			0.896 8			
变异系数 Coefficient of variation /%			6.35			
信噪比 Adequate precision			14.083 6			

†　“**”为极显著，“*”为显著。“**”was extremely significant, “*”was significant.

表 5　最陡爬坡试验设计与结果
Table 5　The steepest climbing test design scheme and results

序号 No.	因素 Factor			内结合强度 Internal bonding strength /MPa
	施胶量（B） Resin content /%	热压温度（D） Hot pressing temperature /℃	热压压力（E） Hot pressing pressure /MPa	
1	6	120	6	0.28
2	8	130	7	0.35
3	10	140	8	0.48
4	12	150	9	0.63
5	14	160	10	0.61
6	16	170	11	0.52
7	18	180	12	0.33

由表 5 可知，试验 4 的板材内结合强度最大，选取试验 4 为响应面试验的中心点。

2.3　Box-Behnken 响应面法试验

根据最陡爬坡试验结果，选取试验 4 为中心点设计 Box-Behnken 试验，选择施胶量、热压温度、热压压力 3 个因素作为自变量，以板材内结合强度为第一响应值，板坯平均密度为第二响应值，开展 3 因素 3 水平 Box-Behnken 试验。试验设计及结果见表 6。

通过对试验数据进行二次多元回归拟合，得到如下二次多项式方程：

Y_1=0.6+0.1037X_1+0.0287X_2+0.0275X_3−0.0325X_1X_2+0.05X_1X_3+0.055X_2X_3+0.0138X_1^2−0.0712X_2^2−0.0838X_3^2。

式中：Y_1 为内结合强度；X_1 为施胶量；X_2 为热压温度；X_3 为热压压力。

Y_2=617.72+32.44X_1+2.41X_2+15.7X_3−3.57X_1X_2−0.3575X_1X_3+0.78X_2X_3−9.62X_1^2−6X_2^2−2.85X_3^2。

式中：Y_2 为板坯平均密度。

表 6　Box-Behnken 试验设计与结果
Table 6　Box-Behnken experiment design and results

试验号 No.	因素 Factor			内结合强度 Internal bonding strength /MPa	板坯平均密度 Average density of slabs /(kg·m^{-3})
	X_1	X_2	X_3		
1	1	−1	0	0.67	641.28
2	0	0	0	0.61	619.56
3	0	1	1	0.57	633.80
4	0	−1	−1	0.43	585.49
5	0	0	0	0.63	628.16
6	1	1	0	0.63	628.76
7	0	0	0	0.57	608.06
8	−1	0	1	0.41	588.40
9	−1	−1	0	0.39	568.28
10	1	0	−1	0.55	622.80
11	−1	0	−1	0.45	558.17
12	0	0	0	0.60	614.76
13	0	−1	1	0.37	617.22
14	0	1	−1	0.41	598.95
15	1	0	1	0.71	651.60
16	−1	1	0	0.48	570.05
17	0	0	0	0.59	618.05

由表 7 可知，模型显著水平 P ＜ 0.000 1，模型极显著，具有高度统计学意义，失拟项 P=0.339 4，未达显著水平，表明试验误差对结果干扰较小，

回归模型具有良好的预测能力。模型决定系数 R^2=0.976 7，校正决定系数 R^2_{adj}=0.946 7，表明回归模型呈现较高的拟合精度，可解释响应值 94.67% 的变异量，该模型适用于木质复合材料内部结合强度的预测分析。参数显著性分析表明：因素一次项 X_1、X_2、X_3 对板材内结合强度影响显著，其中 X_1（施胶量）对板材内结合强度影响极显著，说明经过碱处理，棉秸秆对水溶性胶黏剂的浸润性得到了一定的改善；交互项 X_1X_2、X_1X_3、X_2X_3 对内结合强度影响显著；二次项 X_2^2、X_3^2 影响显著，X_1^2 影响不显著。各工艺参数对板材性能的影响程度排序为 $X_1 > X_2 > X_3$，结果与 Plackett-Burman 试验显著性排序相同，进一步验证了各工艺参数与响应值间存在多元非线性关系。

表 7 Box-Behnken 试验设计二次模型方差分析 †
Table 7 Variance analysis of Box-Behnken experiment design

因子项 Factor term	内结合强度 Internal bonding strength		板坯平均密度 Average density of slabs	
	F 值 *F*-value	*P* 值 *P*-value	*F* 值 *F*-value	*P* 值 *P*-value
模型 Model	32.55	＜ 0.000 1**	20.040 0	0.000 3**
X_1	141.00	＜ 0.000 1**	136.580 0	＜ 0.000 1**
X_2	10.83	0.013 3*	0.754 5	0.413 9
X_3	9.91	0.016 2*	31.990 0	0.000 8**
X_1X_2	6.92	0.033 9*	0.828 1	0.393 1
X_1X_3	16.37	0.004 9*	0.008 3	0.930 0
X_2X_3	19.81	0.003 0*	0.039 5	0.848 2
X_1^2	1.30	0.291 1	6.330 0	0.040 1*
X_2^2	35.00	0.000 6*	2.460 0	0.160 8
X_3^2	48.36	0.000 2*	0.555 3	0.480 4
失拟项 Lack of fit	1.52	0.339 4	1.350 0	0.377 6
R^2	0.976 7		0.962 6	
R_{adj}^2	0.946 7		0.914 6	

† “**”为极显著，“*”为显著。
“**” was extremely significant, “*” was significant.

基于构建的回归模型对热压工艺参数进行响应值预测分析，为验证模型可靠性构建了预测值 - 实测值拟合曲线（图 6）。如图 6 所示，散点分布显示所有数据点紧密聚集于 $y=x$ 基准线两侧，说明模型对各热压参数工艺条件下的板材内结合强度的预测值与试验值高度相关，具备良好的参数外推能力。通过进一步进行残差正态性检验（图 7），发现全部样本点的标准化残差均位于 ±2σ 控制限内，无异常点，该误差分布特征符合 Grubbs 检验准则（α=0.05），证明该模型在试验设计空间内具有稳定的预测精度。

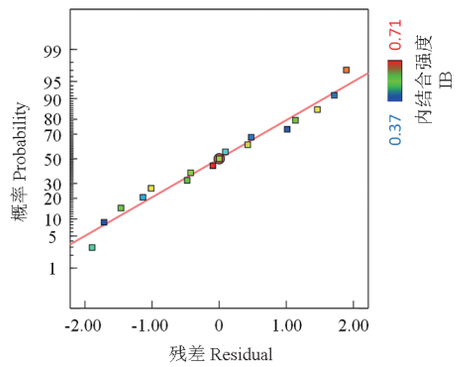


图 6 模型预测值与试验值相关图
Fig. 6 Normal plot of residuals

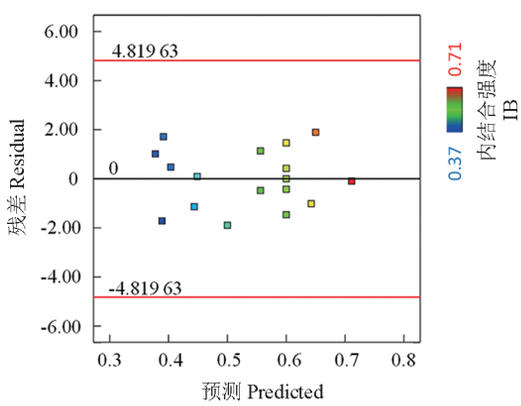


图 7 残差对模型预测散布图
Fig. 7 Residuals vs. Predicted

在人造板制备工艺中，工艺参数间的交互效应会显著影响板材力学性能，基于多元回归模型构建三维响应曲面图，分析因素交互作用对响应值的影响规律 [28-29]。依据回归方程，利用 Origin 软件绘制响应曲面图，结果见图 8、图 9。

试验因素交互作用对内结合强度影响的响应曲面如图 8 所示。内结合强度随热压温度及热压压力的增大均表现出先增大后减小的变化趋势，随着施胶量的增多先增大后趋于平缓，在施胶量 13% ～ 14%、热压温度 148 ～ 156 ℃、热压压力 9 ～ 10 MPa 的参数范围内，板材的内结合强度处于较高水平。分析原因可能是：在板材制备过程中，热压工艺温压参数的提升，显著促进了原料内部水分的蒸发与迁移，使秸秆原料内部水分得以快速排出；同时有利于胶黏剂充分发生水化反应，有效提高胶黏剂在秸秆碎料表面的浸润性，进而改善板材内部秸秆碎料与胶黏剂的胶合效果。同时，过高的热压温度会造成秸秆颗粒炭化、板材表面糊化，进而使板材内结合强度呈现先升高后降低的变化趋势。

试验因素交互作用对板坯平均密度影响的响应曲面如图 9 所示。板坯平均密度在一定范围内

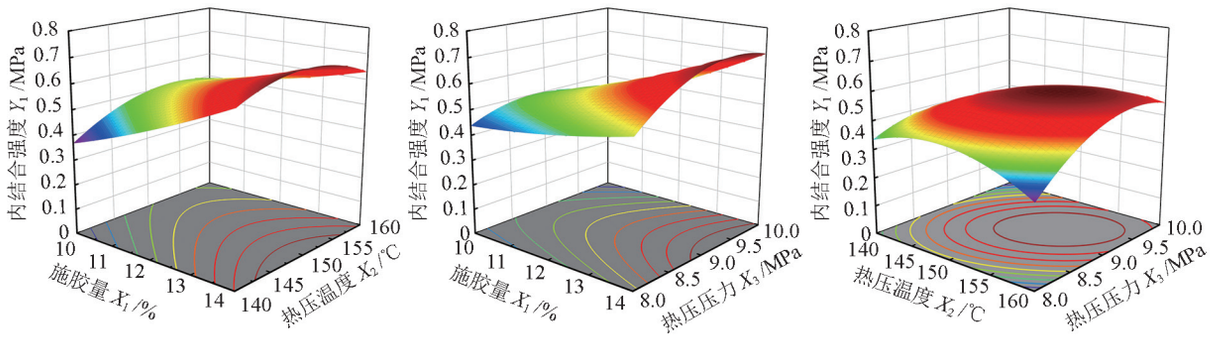


图 8　因素交互作用对板材内结合强度的影响
Fig. 8　The effect of factor interaction on internal bond strength

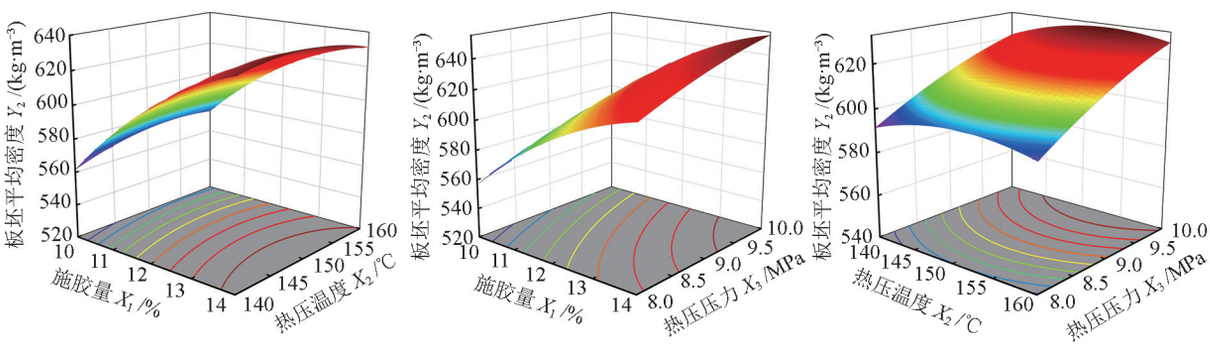


图 9　因素交互作用对板坯平均密度的影响
Fig. 9　The effect of factor interaction on average density of slabs

随施胶量和热压压力的增大而逐渐升高，随热压温度的升高则呈现先增大后减小的变化趋势。同时观察板坯平均密度与内结合强度的变化情况，可以发现在一定范围内板坯平均密度越大，板材内结合强度越高。

2.4　参数优化

利用 Design-expert 对模型进行预测分析，获取最佳热压工艺参数组合，以板坯平均密度 630 kg/m^3 为目标，以内结合强度最大值为优化目标，建立的优化目标函数和约束条件为：

$$\begin{cases} s.t.\begin{cases} 10 \leqslant X_1 \leqslant 14 \\ 140 \leqslant X_2 \leqslant 160 \\ 8 \leqslant X_3 \leqslant 10 \end{cases} \\ \max(Y_1) \\ \text{target}(Y_2) \end{cases} 。$$

得到最佳热压工艺参数：施胶量为 13.102%，热压温度为 150.003 ℃，热压压力为 8. 833 MPa，在此工艺参数下制得的板材内结合强度预测值为 0.65 MPa，板坯密度为 630 kg/m^3。

2.5　验证性试验

为了便于实际操作，结合设备的实际调节精度及要求，将工艺参数修正为施胶量 13%、热压温度 150 ℃、热压压力 8.8 MPa，针对上述优化后的工艺参数，进行验证性试验，结果如表 8 所示。根据修正后的最佳工艺参数所制备的板材内结合强度为 0.61 MPa，相较预测值误差分别为 1.54% 和 1.71%，误差值均小于 10%，说明回归模型与实际情况拟合良好，回归模型可靠，具有显著统计学意义。

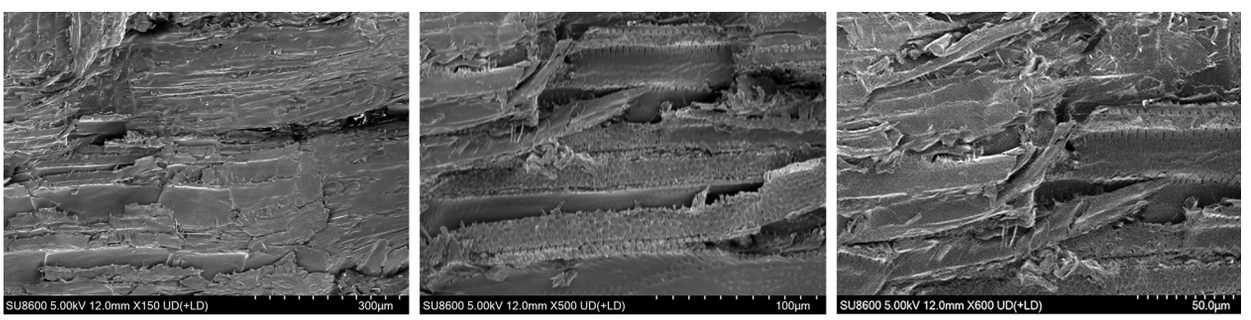
2.6　SEM 分析

扫描电子显微镜（SEM）是一种利用高能电子束扫描样品表面，通过检测电子与样品相互作用产生的信号（如二次电子、背散射电子、X 射线等）来获取样品表面形貌、成分及结构信息的高分辨率显微成像设备。

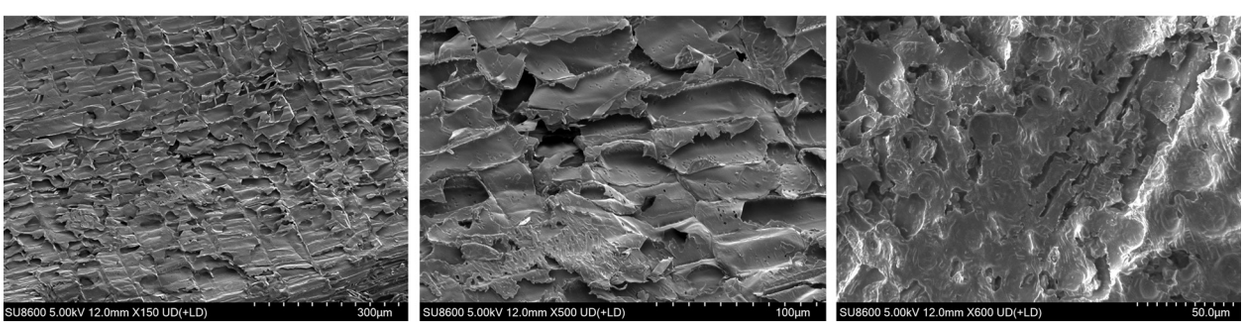
图 10（a）是第 2 组试验制得板材的横断面微观形貌。从图 10 中可以看出，胶黏剂与棉秸秆木质部浸润效果差的地方出现了分层现象，这种现象在板材中心较为明显，分析原因主要是内部水分、空气的受热作用对板材内部胶合作用产生了影响。在热压过程中，由于压力和温度由板坯两侧向中心传递，中心层易积聚水分和空气，导致受热不均，引发分层现象。为减少此类现象，除

表 8 预测值与试验值结果对比
Table 8 Comparison between predicted value and test value

数值类型 Data type	施胶量 Resin content /%	热压温度 Hot pressing temperature /℃	热压压力 Hot pressing pressure /MPa	内结合强度 Internal bonding strength /MPa	板坯平均密度 Average density of slabs /(kg·m^{-3})	相对误差 Relative error /%
预测值 Predicted value	13	150	8.8	0.65	630.00	—
试验值 1 Test value 1	13	150	8.8	0.68	636.93	4.62/1.1
试验值 2 Test value2	13	150	8.8	0.63	606.26	3.08/3.77
试验值 3 Test value3	13	150	8.8	0.61	614.56	6.15/2.45
平均值 Average value	13	150	8.8	0.64	619.25	1.54/1.71



（a）第2组板材 Cotton straw panel No. 2



（b）最佳参数对照组板材 Optimal parameters cotton straw panels

图 10 棉秸秆人造板 SEM 图
Fig. 10 SEM of cotton straw panels

提升胶合性能外，应使板坯中原料含水率在适当范围内，并通过优化热压工艺参数确保温度均匀传递，降低中心层缺陷产生概率。

图 10（b）是最佳参数试验组制得板材的断面微观形貌。从图 10 中可以看出，胶黏剂与棉秸秆木质部表面充分胶合，形成了“胶钉”，对板材力学性能起到了锚固作用或紧固作用 [30]。同时，随着热压压力的增大和施胶量的增加，棉秸秆木质部碎料内部管束状结构被破坏，秸秆碎料被压制成片状，胶黏剂与秸秆之间的胶合作用更加充分，该条件下制得的板材内部结构较为致密。

3 结 论

1）本研究采用响应面法优化设计，通过 Plackett-Burman 试验筛选出棉秸秆人造板热压成型工艺参数中影响板材内结合强度的显著因素，影响棉秸秆人造板板材内结合强度的显著因素为施胶量、热压温度和热压压力。

2）通过建立施胶量、热压温度和热压压力与板材内结合强度之间的二次多元回归模型，得到了在目标板坯密度 630 kg/m^3 的条件下，最优的热压工艺条件为粒径大小 0 ～ 1 mm、施胶量 13%、胶黏剂固含量 45 %、热压温度 150 ℃、热压压力 8.8 MPa、预压时间 2.5 h、热压时间 9 min，模型预测最优值为 0.65 MPa。

3）通过验证性试验，在预测最优工艺参数条件下制备的板材内结合强度为 0.64 MPa，试验值与理论值的误差为 1.54%，模型合理可靠，具有显著统计学意义。

参考文献：

[1] 郭慧静 , 沈从举 , 代亚猛 , 等 . 新疆棉花秸秆利用现状及发展对策 [J]. 农业工程 ,2023,13(4):48-53.
GUO H J, SHEN C J, DAI Y M, et al. Current situation and

development countermeasure of cotton straw utilization in Xinjiang[J]. Agricultural Engineering,2023,13(4): 48-53.

[2] 靳惠怡 . 水泥窑替代燃料 : 新疆棉花秸秆规模化综合利用新选择 [J]. 中国建材 ,2021(12):49.
JIN H Y. Alternative fuel for cement kilns: a new choice for large-scale comprehensive utilization of cotton stalk in Xinjiang[J]. China Building Materials,2021(12):49.

[3] KESHAV P K, BANOTH C, KETHAVATH S N, et al. Lignocellulosic ethanol production from cotton stalk: an overview on pretreatment, saccharification and fermentation methods for improved bioconversion process[J]. Biomass Conversion and Biorefinery,2023,13:4477-4493.

[4] 张建 , 周岭 . 新疆地区棉花秸秆粉碎还田及腐解现状调研 [J]. 中国农学通报 ,2025,41(3):48-58.
ZHANG J, ZHOU L. Research on status of cotton straw crushing and decomposition in Xinjiang region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2025,41(3):48-58.

[5] 白志刚 , 刘帅 , 胡启星 , 等 . 棉花秸秆利用的主要途径及存在的问题 [J]. 棉花科学 ,2021,43(5):11-15.
BAI Z G, LIU S, HU Q X, et al. Main ways and problems of cotton straw utilization[J]. Cotton Sciences,2021,43(5):11-15.

[6] ZHAO W S, CHEN M J, XIE J H, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of cotton stalk[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,204:107502.

[7] CHENG Q W, MENG F R, LI X C, et al. Effects of K_2CO_3 on pyrolysis characteristics of Xinjiang cotton stalk[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2023, 48:5069-5079.

[8] 宋孝周 , 郭康权 , 冯德君 , 等 . 农作物秸秆特性及其重组材性能 [J]. 农业工程学报 ,2009,25(7):180-184.
SONG X Z, GUO K Q, FENG D J, et al. Characteristics of crop stalks and performance of their scrimber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(7):180-184.

[9] 高黎 , 蔺焘 , 王正 , 等 . 棉秆 / 塑料复合人造板研究现状及发展趋势 [J]. 中国人造板 ,2010,17(8):4-8.
GAO L, LIN T, WANG Z, et al. Situation and developing trend of cotton stalk/plastic composites[J]. China Wood-Based Panels, 2010,17(8):4-8.

[10] 周岭 , 周福君 , 蒋恩臣 , 等 . 棉秆不同组分热解特性及动力学 [J]. 农业工程学报 ,2009,25(8):220-225.
ZHOU L, ZHOU F J, JIANG E C, et al. Pyrolysis characteristics and dynamics of different components of cotton stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(8):220-225.

[11] LU Y, LU Y T, JIN C B, et al. Natural wood structure inspires practical lithium-metal batteries[J]. ACS Energy Letters,2021,6: 2103-2110.

[12] 何勋 , 王德福 , 唐豫桂 . 玉米秸秆皮单板层积材制备工艺优化 [J]. 农业工程学报 ,2016,32(10):303-308.
HE X, WANG D F, TANG Y G. Manufacturing technology optimization of laminated veneer lumber from intact corn stalk rinds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(10):303-308.

[13] 李宇 , 吴圣众 , 吴克勤 , 等 . 基于响应面法的超薄竹刨花板制备工艺优化 [J]. 竹子学报 ,2022,41(2):7-14.
LI Y, WU S Z, WU K Q, et al. Preparation process optimization for ultra-thin bamboo particleboard via response surface methodology[J]. Journal of Bamboo Research,2022,41(2):7-14.

[14] LI X J, WU Y Q, CAI Z Y, et al. Primary properties of MDF using thermomechanical pulp made from oxalic acid pretreated rice straw particles[J]. Industrial Crops and Products,2013,41: 414-418.

[15] 肖俊华 , 左迎峰 , 刘文杰 , 等 . 秸秆人造板用胶黏剂研究进展 [J]. 材料导报 ,2016,30(17):78-83.
XIAO J H, ZUO Y F, LIU W J, et al. Research progress of adhesives for strawboard[J]. Materials Review,2016,30(17): 78-83.

[16] XIE Z Y, TIAN Z J, LIU S, et al. Effects of different amounts of cellulase on the microstructure and soluble substances of cotton stalk bark[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials,2022,5: 1294-1306.

[17] INGRAM G, NAWRATH C. The roles of the cuticle in plant development: organ adhesions and beyond[J]. Journal of Experimental Botany,2017,68(19): 5307-5321.

[18] WANG K H, LI K, GU Y C, et al. Dissolving-grade pulp and lyocell fibers prepared from cotton stalks[J]. Cellulose,2025,32: 2227-2243.

[19] GARRIDO N, MARTINS J, DAVIM J P, et al. Influence of machining parameters on edge quality of particleboards: modeling and optimization[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2024,133:5463-5482.

[20] GONÇALVES C, PEREIRA J, PAIVA N T, et al. A study of the influence of press parameters on particleboards’ performance[J]. European Journal of Wood and Wood Products,2020,78:333-341.

[21] 胡润锋 , 李浚哲 , 李鹏飞 , 等 . 响应面法优化硒化桑叶多糖的制备工艺及其体外抗氧化活性 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2022,42(8):148-157.
HU R F, LI J Z, LI P F, et al. Optimization of selenized mulberry leaf polysaccharides preparation by response surface methodology and determination of the antioxidant activity *in vitro*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2022,42(8):148-157.

[22] 李明鹏 , 李文婷 , 王翠翠 , 等 . 基于响应面法研究梁山慈竹材梯度结构理化性能的相关性 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2021,41(7):165-172.
LI M P, LI W T, WANG C C, et al. Study on the correlation of physical and chemical properties of *Dendrocalcamus farinosus* gradient structure based on response surface methodology[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021,41(7):165-172.

[23] 张新荔 , 吴义强 , 胡云楚 . 基于响应面法的木质素炭制备工艺优化 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2017,37(8):114-121.
ZHANG X L, WU Y Q, HU Y C. Optimization of preparation conditions of lignin based conductive char using response surface methodology[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2017,37(8):114-121.

[24] 刘德军 , 董彬 , 李文斌 , 等 . 无醛无毒防火秸秆人造板的制备与性能试验 [J]. 农业工程学报 ,2017,33(1):301-307.
LIU D J, DONG B, LI W B, et al. Preparation and performance test of formaldehyde-free innocuous and nonflammable straw particleboard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(1):301-307.

[25] 国家标准化管理委员会 . 人造板及饰面人造板理化性能试验方法 : GB/T 17657—2022[S]. 北京 : 中国标准出版社 ,2022.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods of evaluating the properties of wood-based panels and surface decorated wood-based panels: GB/T 17657-2022[S]. Beijing: Standards Press of China,2022.

[26] 李赐生 , 宋健 . 棉秆碎料轻质保温板性能研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2016,36(9):123-126.
LI C S, SONG J. Study on thermal insulation property of lightweight cotton stalk particle board[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2016, 36(9):123-126.

[27] 葛松涛 , 寿泉洪 , 韩文凤 , 等 . 响应面法优化酸溶蛋白发酵工艺 [J]. 饲料工业 ,2023,44(13):14-20.
GE S T, SHOU Q H, HAN W F, et al. Optimization of acid soluble protein fermentation process by response surface methodology[J]. Feed Industry,2023,44(13):14-20.

[28] 尹宁宁 , 李文珠 , 李小晴 , 等 . 基于响应曲面法的粉状竹炭密度测试方法探究 [J]. 竹子学报 ,2021,40(1):59-63.
YIN N N, LI W Z, LI X Q, et al. Density test of powdered bamboo charcoal based on response surface methodology[J]. Journal of Bamboo Research,2021,40(1):59-63.

[29] 孙晓东 , 彭亮 , 吴义强 , 等 . 基于响应面优化竹单板泡沫铝复合材料工艺研究 [J]. 林产工业 ,2021,58(7):1-5,10.
SUN X D, PENG L, WU Y Q, et al. Study on process of bamboo veneer foam aluminum composites based on response surface optimization[J]. China Forest Products Industry,2021,58(7): 1-5,10.

[30] 何勋 . 玉米秸秆皮材料特性及其制板工艺研究 [D]. 郑州 : 河南农业大学 ,2016.
HE X. Materials properties and board manufacturing process of corn stalk rind[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016.

[本文编校：谢荣秀]

（上接第 100 页）

[39] CARROLL C, LAWLER J J, ROBERTS D R, et al. Biotic and climatic velocity identify contrasting areas of vulnerability to climate change[J]. PLoS One,2015,10:e0140486.

[40] XIE C P, WU S S, LIU D W, et al. Species composition, distribution patterns, and conservation needs of large old trees in Baisha, southern China[J]. Urban Ecosystems,2024,27(6): 2381-2395.

[41] DYDERSKI M K, PAŹ S, FRELICH L E, et al. How much does climate change threaten European forest tree species distributions?[J]. Global Change Biology,2018,24(3):1150-1163.

[42] LIU J J, LINDENMAYER D B, YANG W J, et al. Diversity and density patterns of large old trees in China[J]. Science of the Total Environment,2019,655:255-262.

[43] 洪文君 , 叶永昌 , 张浩 . 香港古树名木资源特征与分布格局 [J]. 广东园林 ,2021,43(1):56-59.
HONG W J, YE Y C, ZHANG H. Resource characteristics and distribution pattern of historical tree and famous tree in Hong Kong[J]. Guangdong Landscape Architecture,2021,43(1):56-59.

[本文编校：谢荣秀]