北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

面向家具工程设计的搁板蠕变变形预测模型

廉河源 常乐 张帆 康露璐 许诗怡 王玉洁 梁爽

A creep deformation prediction model for shelf boards in furniture engineering design

Lian Heyuan, Chang Le, Zhang Fan, Kang Lulu, Xu Shiyi, Wang Yujie, Liang Shuang

引用本文:
廉河源, 常乐, 张帆, 康露璐, 许诗怡, 王玉洁, 梁爽. 面向家具工程设计的搁板蠕变变形预测模型[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):183-192. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250464
Lian Heyuan, Chang Le, Zhang Fan, Kang Lulu, Xu Shiyi, Wang Yujie, Liang Shuang. A creep deformation prediction model for shelf boards in furniture engineering design[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):183-192. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250464

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250464

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同温度、载荷下应压木和正常木的拉伸蠕变特性

Tensile creep characteristics of compression wood and normal wood under different temperatures and loads

北京林业大学学报, 2024, 46(12): 138-145. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240277

基于贝叶斯模型平均法的森林火灾预测模型构建研究

Construction of forest fire prediction model based on Bayesian model averaging method: taking Dali Prefecture, Yunnan Province of southwestern China as an example

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 44-52. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200173

基于TCN-BiLSTM与LSTM模型对比预测北洛河径流

Comparative prediction of runoff in the Beiluo River, Shaanxi Province of northwestern China based on TCN-BiLSTM and LSTM models

北京林业大学学报, 2024, 46(4): 141-148. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230267

基于3种时间序列模型的北京市每日花粉浓度预测

Prediction of daily pollen concentration in Beijing based on three time series models

北京林业大学学报, 2025, 47(6): 90-100. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230232

吉林蛟河不同树种储水量分配特征与预测模型

Allocation characteristics and prediction models of water storage capacity among different tree species in Jiaohe, Jilin Province of northeastern China

北京林业大学学报, 2024, 46(9): 11-25. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230248

森林土壤有机质预测模型阈值优化

Threshold optimization for forest soil organic matter prediction model: a case study of Guangdong Province of southern China

北京林业大学学报, 2025, 47(2): 32-39. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240314

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250464

面向家具工程设计的搁板蠕变变形预测模型

廉河源[1]　常　乐[1]　张　帆[1]　康露璐[1]　许诗怡[1]　王玉洁[2]　梁　爽[2]
（1. 北京林业大学材料科学与技术学院，北京 100083；2. 北京金隅天坛家具股份有限公司，北京 100013）

摘要:【目的】为提升实木家具搁板的长期使用安全性与设计可靠性，以黑胡桃木(*Juglans nigra*)直拼板为研究对象，探究其在长期载荷下的蠕变行为，构建适用于搁板耐久性设计与变形预测的蠕变本构模型及性能预测方法。**【方法】**通过为期 42 d 的三点弯曲蠕变试验，研究材料在 2%f_m、6%f_m 和 10%f_m(f_m 为平均抗弯强度)应力水平下的黏弹性行为；采用非线性拟合方法，对比评估幂律模型、标准线性固体模型与 Burgers 模型的拟合优度；基于参数演化分析，建立考虑应力影响的广义蠕变本构方程，并提出一套基于长期变形控制阈值的实木搁板结构参数优化设计方法。**【结果】**(1)Burgers 模型为最优本构模型($R^2 > 0.992$，RMSE 为 $1.88 \times 10^{-6} \sim 7.71 \times 10^{-6}$)，可完整表征瞬时弹性、延迟弹性与稳态黏性流动。(2)模型参数呈现显著应力相关性：延迟弹性模量随应力呈指数增长，弛豫时间呈幂律衰减，材料行为由低应力下的准线性蠕变向高应力下的非线性蠕变过渡；所构建的广义本构模型可准确预测 2%f_m ~ 10%f_m 应力范围内的长期变形。(3)基于该模型开发的参数优化方法，可根据目标使用年限与许用变形量，为家具搁板提供确定关键尺寸(如厚度、跨度)的科学方案，实现性能导向的精准设计。**【结论】**本研究建立了从材料蠕变参数到家具构件设计参数的映射方法，所提出的模型与优化方法为实木家具搁板的耐久性设计与安全评估提供了理论工具，有助于推动家具工程设计从经验模式向预测性能模式的转变。

关键词：家具设计；实木搁板；蠕变；本构模型；Burgers 模型；耐久性设计；变形预测
中图分类号：TS664.01；TB332　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)04−0183−10
引文格式：廉河源，常乐，张帆，等. 面向家具工程设计的搁板蠕变变形预测模型［J］. 北京林业大学学报，2026，48(4)：183−192. Lian Heyuan, Chang Le, Zhang Fan, et al. A creep deformation prediction model for shelf boards in furniture engineering design[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 183−192.

A creep deformation prediction model for shelf boards in furniture engineering design

Lian Heyuan[1]　Chang Le[1]　Zhang Fan[1]　Kang Lulu[1]　Xu Shiyi[1]　Wang Yujie[2]　Liang Shuang[2]
(1. School of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. BBMG Tiantan Furniture Co., Ltd, Beijing 100013, China)

Abstract: ［**Objective**］To enhance the long-term service safety and design reliability of solid wood furniture shelves, this study investigates the creep behavior of black walnut (*Juglans nigra*) edge-glued boards under sustained loading and develops a creep constitutive model and performance prediction methodology suitable for shelf durability design and deformation forecasting. ［**Method**］We conducted a 42-day three-point bending creep test to examine the viscoelastic response of the material under characteristic stress levels of 2%f_m, 6%f_m, and 10%f_m (f_m is the average modulus of rupture). Using nonlinear fitting, we comparatively evaluated the goodness-of-fit of the power-law model, the standard linear solid model, and the

收稿日期: 2025−11−18　**修回日期:** 2026−03−02
基金项目: 实木定制家具柜类产品的用户研究与产品设计系统搭建策略项目(2025HXZXCLXY027)，北京市级大学生创新创业训练计划项目(202510022370)。
第一作者: 廉河源。主要研究方向：家具结构。Email: heyuan.lian@foxmail.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料学院。
责任作者: 常乐，讲师。主要研究方向：家具设计与工程。Email: changle@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

Burgers model. Based on parameter evolution analysis, we established a generalized creep constitutive equation that accounts for stress dependence and proposed an optimized structural parameter design method for solid wood shelves grounded in long-term deformation control thresholds. [**Result**] (1) The Burgers model emerged as the optimal constitutive model (R^2 > 0.992; RMSE ranging from 1.88 × 10^{-6} to 7.71 × 10^{-6}), effectively capturing instantaneous elasticity, delayed elasticity, and steady-state viscous flow. (2) Model parameters exhibited pronounced stress dependence: the delayed elastic modulus increased exponentially with stress, while the relaxation time decayed following a power law, indicating a transition from quasi-linear creep at low stress to nonlinear creep at high stress. The proposed generalized constitutive model accurately predicted long-term deformation across the stress range of 2%f_m to 10%f_m. (3) The parameter optimization method derived from this model enables scientific determination of critical dimensions (such as thickness and span) for furniture shelves based on target service life and allowable deformation, thereby facilitating performance-driven precision design. [**Conclusion**] This study establishes a mapping framework from material-level creep parameters to component-level design parameters. The proposed model and optimization methodology offer theoretical tools for the durability design and safety assessment of solid wood furniture shelves, supporting a paradigm shift in furniture engineering from empirical practices toward predictive performance-based design.

Key words: furniture design; solid wood shelf; creep; constitutive model; Burgers model; durability design; deformation prediction

实木定制家具凭借其独特的天然质感、环保特性与个性化设计优势，近年来在国内市场快速发展[1]。随着市场规模的扩大及消费者对高品质家具需求的提升，产品的长期使用稳定性日益成为衡量其品质的关键指标。在此背景下，实木搁板作为柜类家具核心承重部件，其长期力学性能与使用安全性受到业界广泛关注[2]。木材作为典型的黏弹性材料，在持续载荷作用下会产生时间依赖的蠕变变形，导致搁板出现可见挠曲，从而降低其使用功能与美观价值，成为制约实木家具品质提升的关键技术问题[3−4]。

在实木材料中，黑胡桃木(*Juglans nigra*)以其优异的力学性能和独特的装饰价值，成为中高端实木家具的首选材料之一[5]。其直拼板结构通过长度方向的板材拼接，在保持木材纹理连续性的同时，也因材料各向异性与拼接工艺的复合效应，使蠕变行为呈现出复杂的非线性特征。木材的蠕变过程通常包含瞬时弹性变形、延迟弹性变形和黏性流动三个典型阶段，其中延迟弹性行为与稳态蠕变速率对家具的长期使用性能具有决定性影响[6]。

当前木材蠕变研究已建立了较为完善的理论框架，Kelvin 模型、Maxwell 模型、Burgers 模型等经典流变学模型在描述木材黏弹性行为方面取得了显著进展[7−8]。然而，现有研究仍存在局限，主要表现在：多数研究采用高温与高应力水平的加速试验条件[9−10]，与家具实际使用的常温低应力环境存在显著差异；同时，研究重点集中于材料层面的本构关系建立[11−12]，缺乏与家具工程设计需求的有效衔接，尚未建立能够预测家具搁板长期变形量的科学方法。特别是针对家具搁板材料在典型使用应力范围内的蠕变特性研究尚不系统，本构模型的遴选缺乏充分的试验验证，导致无法在设计阶段对搁板的长期变形进行量化预测，难以支撑家具搁板的耐久性评估与精细化设计。

针对上述问题，本研究以黑胡桃木直拼板为研究对象，采用试验研究与理论建模相结合的方法，基于家具真实使用条件开展蠕变试验，获取关键试验数据；基于多指标评价体系，遴选最能准确描述黑胡桃木直拼板蠕变行为的本构模型；建立模型参数与应力水平的函数关系，构建可直接指导家具设计的参数优化模型，并基于性能预测优化搁板参数。本研究旨在融合材料蠕变特性与家具工程设计需求，实现对家具构件长期使用性能的量化评估，进而建立一种面向性能预测的实木家具设计方法，为家具行业从经验设计向科学设计的转型提供理论依据与实用工具。

1 材　　料

本研究以 FAS 级(first and second grade)北美产黑胡桃木直拼板为研究对象，尺寸设计参照 GB/T 31291—2014《木材和木基产品的荷载持续时间效应和蠕变性能评定》[13]。

原材经去缺陷、锯切加工后，形成宽度为 80 mm 的木条，采用日本爱克 F 四星木工胶进行横向拼接，

形成拼板毛坯后，再经定尺裁切，最终加工成规格为 924 mm × 300 mm × 18 mm 的标准试件。木条的宽材面均为弦向纹理，拼板时采用对称拼接方式，以保证其美观性、尺寸稳定性与力学性能均匀性，拼板具体结构形式如图 1 所示。本研究将黑胡桃直拼板视为宏观均质材料，不考虑木材各向异性以及胶合界面的影响。

为控制材料变异性对试验结果的影响，所有试件均经过窑干处理，并在试验前置于恒温恒湿环境（(25 ± 2)℃，(55 ± 5)% RH）中进行平衡处理，直至质量恒定。此环境参数模拟了北方地区典型室内环境条件。

2　研究方法

2.1　蠕变试验设计与数据获取

为获取黑胡桃直拼板的性能参数，并建立适用于多种应力水平的搁板长期变形量预测模型，本研究开展了黑胡桃直拼板的短期破坏试验与蠕变试验。试验方案参照 GB/T 17657—2022《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》[14]与 GB/T 31291—2014《木材和木基产品的荷载持续时间效应和蠕变性能评定》[13]。

蠕变试验设计模拟了柜类家具搁板的真实使用条件，旨在系统获取黑胡桃直拼板在典型使用工况下的蠕变行为数据，为构建具备工程预测能力的本构模型奠定基础。首先对 12 个试件进行四点弯曲短期破坏性试验。采用岛津 AG-IS 系列电子万能试验机，以连续加载方式在 2 min 内将试件加载至破坏，记录载荷－挠度曲线，据此计算材料的抗弯强度（modulus of rupture，MOR）与弹性模量（modulus of elasticity，MOE）。

选取材料平均抗弯强度（f_m）的 2%、6% 与 10% 作为蠕变试验的 3 个特征应力水平，分别对应搁板

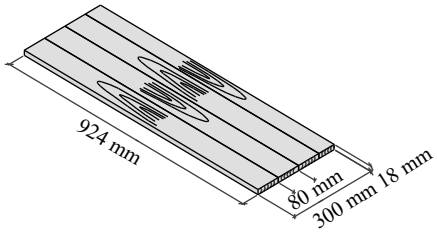


图 1　黑胡桃直拼板结构示意图

Fig. 1　Schematic of the black walnut edge-glued panel structure

的典型工况，覆盖从空载到过载的完整载荷范围。同时设立零载荷对照组，用于监测并修正环境温湿度波动引起的本底变形。具体试验分组及其工程意义如表 1 所示。

蠕变试验在钢制简支梁装置上进行，如图 2 所示，支撑点间距为 864 mm。加载点间距为 288 mm。载荷通过柔性金属绳悬挂精密浇筑的水泥块施加，并在加载接触点垫置 20 mm 厚松木块，以避免应力集中。试验在恒温恒湿环境（(25 ± 2)℃，(55 ± 5)% RH）下进行，以模拟稳定的家具室内使用环境。

蠕变试验过程中，采用百分表测量黑胡桃直拼板跨中挠度，数据采集频率根据蠕变速率动态调整：加载初期（第 1 h 内）每分钟记录 1 次，随后过渡至每小时 1 次，进入稳态蠕变阶段后调整为每日 1 次。试验持续 42 d，以确保完整捕捉蠕变全过程。

试验前后，分别采用表面测定法与绝干法（参

表 1　蠕变试验分组设计

Tab. 1　Experimental design of creep tests

组别	应力水平	模拟家具使用场景	试件数量
对照组	0	空置状态，用于环境修正	3
低载组	2%f_m	放置杂物、装饰品等轻载工况	3
中载组	6%f_m	满载书籍、文件等承重工况	3
高载组	10%f_m	1.5倍过载工况	3

注：f_m为材料平均抗弯强度，单位为MPa。

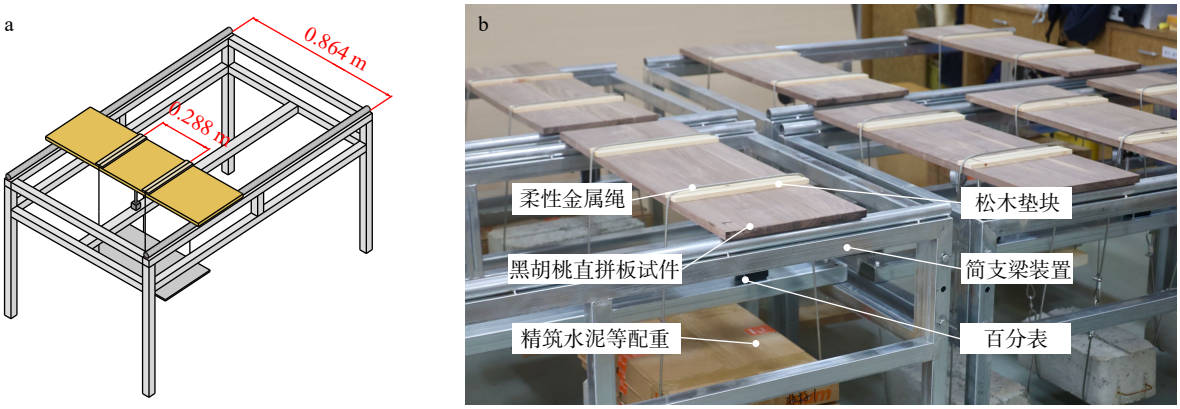


图 2　实验用简支梁示意图

Fig. 2　Schematic of the test simply-supported beam

照 GB/T 1927.4—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 4 部分：含水率测定》[15])测定试件含水率，测试结果如表 2 所示。由于测试方法原理不同，试件试验前后的含水率结果存在约 3% 的系统误差。

蠕变试验结束后，对试验数据进行处理。基于梁的纯弯曲理论，利用试件几何关系与跨中挠度值计算试件跨中位置的表面应变。

$$\varepsilon = \frac{12h\delta}{3L_1^2 - 4a^2} \tag{1}$$

式中：ε为跨中位置表面应变，h 为试件厚度，δ为试验测得的跨中挠度，L_1为支撑跨距，a 为支撑点与加载点的间距。

据此绘制黑胡桃直拼板的应变–时间关系曲线，为后续蠕变本构模型的拟合奠定基础。

2.2 蠕变本构模型的遴选

蠕变本构模型是描述材料在恒定载荷下应变随时间演化的数学物理关系，为预测工程结构长期变形与使用寿命提供了关键的理论基础[16]。

本研究选取 3 种在理论基础与表征能力上具有代表性的蠕变模型，通过系统的拟合优度评价，遴选出最适合描述黑胡桃直拼板蠕变行为的本构模型：幂律模型形式简洁，适用于近似描述蠕变应变与时间的关系[17]；标准线性固体模型能够表征材料的瞬时弹性与延迟弹性[18]；Burgers 模型通过串联 Maxwell 单元与 Kelvin 单元，能够完整刻画蠕变三阶段的全过程[19]。

基于蠕变试验数据，采用 Origin 2021 软件中的非线性拟合工具，分别建立幂律模型、标准线性固体模型及 Burgers 模型的模型函数，对各应力水平下的蠕变曲线进行数值拟合。为客观评价各模型的拟合效果，本研究选取决定系数（R^2）与均方根误差（root mean square error，RMSE）作为评价指标，分别反映本构模型的拟合优度与预测偏差。通过对各应力水平下拟合结果的综合对比，最终确定最能准确描述黑胡桃直拼板蠕变行为的本构模型，为后续建立应力依赖型本构方程奠定基础。

2.3 应力依赖型本构模型的构建方法

根据上述模型拟合结果，蠕变模型的各个参数在不同应力水平下呈现显著差异。若仅采用单一应力水平下的常参数模型，将无法准确预测材料在不同载荷条件下的长期变形行为。

为将模型的应用范围从特定应力水平拓展至更完整的家具工程设计应力区间，构建能够预测黑胡桃直拼板在不同载荷水平下长期蠕变行为的本构模型，本研究基于遴选的 Burgers 模型，进一步建立考虑应力水平影响的广义本构方程。

$$\begin{aligned}\varepsilon(\sigma,t) &= J_1(\sigma) + J_2(\sigma)[1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau(\sigma)}}] + \dot{m}_s(\sigma)t \\ &= \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2}\left[\left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{E_2}{\eta_2}t}\right)\right] + \frac{\sigma_0}{\eta_1}t\end{aligned} \tag{2}$$

式中：$J_1(\sigma)$为瞬时柔量，表征材料加载瞬间的弹性变形能力；$J_2(\sigma)$为延迟弹性柔量，反映材料延迟弹性变形能力；$\tau(\sigma)$为弛豫时间，表征延迟弹性行为发生的快慢；$\dot{m}_s(\sigma)$为稳态蠕变速率，决定材料在稳态蠕变阶段的变形速率。σ_0 为应力，E_1 为瞬时弹性模量，η_1 为流动黏性系数，E_2 为延迟弹性模量，η_2 为延迟黏性系数，t 为时间。

研究基于各应力水平下 Burgers 模型的拟合结果，提取出 3 种应力水平下各模型参数对应的参数值，引入相应的经验模型中，对参数–应力关系进行回归分析，进而确定各参数随应力水平演化的数学表达形式；将上述参数–应力关系式代入 Burgers 模型表达式，构建出能够反映应力依赖性的广义蠕变本构方程。该方程将材料本构关系的适用范围从离散状态拓展至连续应力区间，为后续将模型应用于不同家具使用场景下的长期变形预测提供理论基础。

2.4 基于模型的家具工程设计方法探索

为将应力依赖型蠕变本构模型应用于实际家具搁板的长期变形预测，需建立从材料性能向构件设计转化的理论框架。为此，本研究提出以下基本假设：在材料层面，采用应力等效原理，假定材料的弯曲破坏由其承受的最大拉应力控制，且该临界应力值与加载方式无关[20]；在结构层面，采用小挠度假设，并忽略剪切效应对弯曲变形的影响，将搁板简化为符合欧拉–伯努利梁理论的简支梁模型[21]，同时暂不考虑搁板边界条件对搁板挠度的影响。

基于上述假设，搁板在均布载荷作用下的跨中挠度可由以下公式描述。

表 2 黑胡桃直拼板含水率测试结果

Tab. 2 Moisture content test results of black walnut edge-glued panels

项目	试件数量/件	试验前含水率/%	试验后含水率/%	试件密度/(kg·m^{-2})
短期试验	12	13.57（SD：0.85；CV：6.20%）	10.19（SD：0.26；CV：2.59%）	599.16
蠕变试验	12	13.94（SD：0.99；CV：7.09%）	9.93（SD：0.72；CV：7.27%）	603.92
平均值	12	13.76	10.06	601.54

$$\sigma_{\max}=\frac{M_{\max}}{S}=\frac{3qL^2}{4bh^2} \tag{3}$$

$$\delta_{\max}=\frac{M_{\max}y}{I}=\frac{5L^2\varepsilon_{\max}}{24h} \tag{4}$$

式中：$\sigma_{\max}$为直拼板受到的最大弯曲应力，$M_{\max}$为截面最大弯矩，S为截面模量，q为线均布载荷量，L为跨距，b为板宽，h为板厚，$\delta_{\max}$为跨中挠度，y为应力点到中性轴的距离，$\varepsilon_{\max}$为表面最大应变，I为截面惯性矩。

通过式(2)、(3)、(4)的耦合分析，可定量描述搁板几何尺寸(跨度、厚度)、均布载荷与使用年限对跨中挠度的综合影响。该耦合模型将作为后续参数化分析的核心工具，通过预测典型使用条件下家具搁板的长期变形量，以可视化形式为设计师提供基于性能目标的(跨度，厚度)参数选择依据，从而为家具设计从经验依赖向科学决策的转变奠定理论基础。

3　结果与讨论

3.1　黑胡桃直拼板基本力学性能

通过四点弯曲试验对黑胡桃直拼板试样的力学性能进行测定，绘制位移–载荷曲线如图 3 所示。根据试验数据计算出各试样的抗弯强度与弹性模量，以其算术平均值作为该批次材料的代表性力学参数。结果如表 3 所示。

力学性能的变异系数表明，抗弯强度与最大弯曲载荷呈现中等程度的变异性，而弹性模量的一致性相对较高，符合实木材料因天然缺陷与生长变异所导致的性能离散规律。上述结果为蠕变试验中应力水平的选取提供了关键依据。

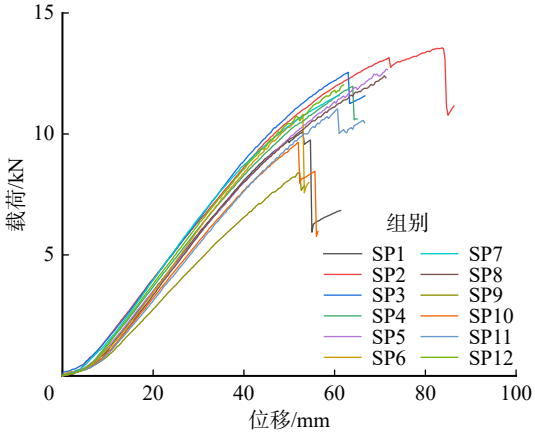


图 3　四点弯曲试验位移–载荷曲线

Fig. 3　Displacement-load curve from the four-point bending test

表 3　黑胡桃直拼板基本力学性能测试结果

Tab. 3　Basic mechanical properties of black walnut edge-glued panels

项目	最大弯曲载荷/kN	抗弯强度/MPa	弹性模量/GPa
平均值	11.40	101.3	18.76
标准差	1.46	13.02	1.47
变异系数/%	12.85	12.85	7.81

3.2　黑胡桃直拼板蠕变曲线特征

根据蠕变试验数据，绘制黑胡桃直拼板材料的时间–应变关系曲线，如图 4 所示。为表征各应力水平下的整体变形行为，取同组试件表面应变的算术平均值作为该应力水平的代表值，据此绘制的平均时间–应变曲线如图 5 所示。

所有应力水平下的蠕变曲线均呈现黏弹性材料的典型三阶段特征：初始加载后发生瞬时弹性变形，随后进入应变速率逐渐减缓的减速蠕变阶段，最终演化至应变速率趋于恒定的稳态蠕变阶段。

蠕变行为表现出显著的应力依赖性：在 2%f_m 的低应力水平下，材料变形发展缓慢，全程应变增量有限；当应力增至 6%f_m 与 10%f_m 时，减速蠕变阶段的应变速率显著增大；在 10%f_m 应力水平下，观察到更为明显的非线性变形演化。在所有试验条件下均未观察到加速蠕变阶段，表明材料在既定应力范围(2%f_m ~ 10%f_m)内具有良好的结构稳定性与使用安

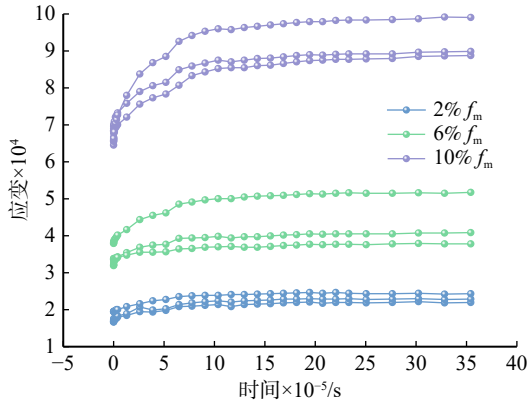


图 4　蠕变时间–应变曲线

Fig. 4　Creep strain-time curves

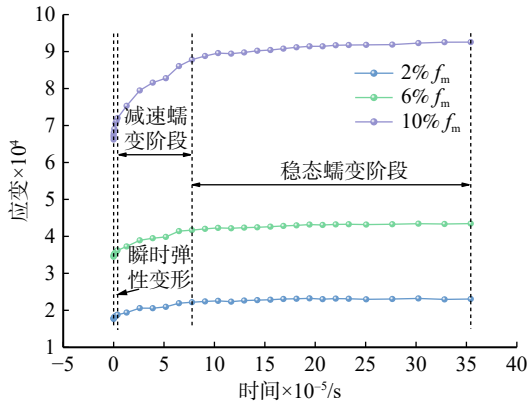


图 5　平均蠕变应变–时间曲线

Fig. 5　Average creep strain-time curves

全性。

3.3 本构模型拟合与遴选

基于黑胡桃直拼板在 3 种应力水平下的时间−应变关系，对 3 种蠕变本构模型分别进行参数拟合。结果表明，不同模型对黑胡桃直拼板蠕变行为的表征能力存在显著差异，拟合结果如图 6～8 所示。采用决定系数与均方根误差作为模型评价指标，各模型的拟合参数如表 4～6 所示。

拟合结果显示，在对比模型中，Burgers 模型表现出最优的综合性能（R^2：0.992～0.994；RMSE：1.88 × 10^{-6}～7.71 × 10^{-6}）；标准线性固体模型在低应力条件下与 Burgers 模型结果接近，但整体略逊（R^2：0.992～0.993；RMSE：1.87 × 10^{-6}～8.35 × 10^{-6}）；幂律模型的拟合能力明显不足（R^2：0.963～0.974；RMSE：3.91 × 10^{-6}～1.52 × 10^{-5}），反映出纯经验模型在描述长期蠕变行为时的局限性。

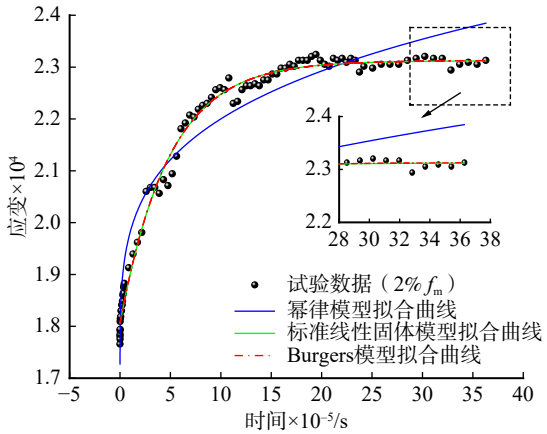


图 6 2%f_m 应力水平下蠕变模型拟合结果

Fig. 6 Fitting results of the creep model at the 2%f_m stress level

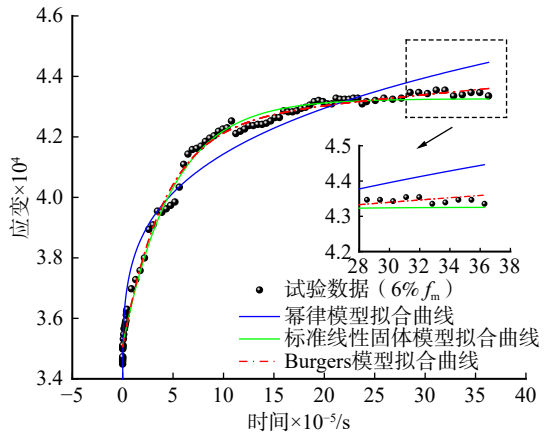


图 7 6%f_m 应力水平下蠕变模型拟合结果

Fig. 7 Fitting results of the creep model at the 6%f_m stress level

应力水平对模型性能具有显著影响。在 2%f_m 应力条件下，Burgers 模型与标准线性固体模型的 RMSE 极为接近，表明此时黏性流动机制尚未被充

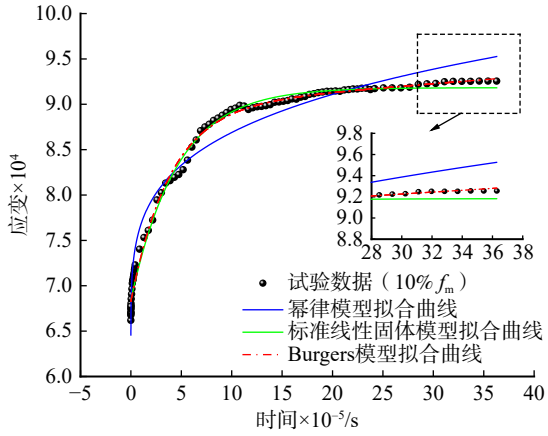


图 8 10%f_m 应力水平下蠕变模型拟合结果

Fig. 8 Fitting results of the creep model at the 10%f_m stress level

表 4 幂律模型在不同应力水平下的拟合参数

Tab. 4 Fitted parameters of the power-law model under different stress levels

应力水平	a	b	c	R^2	RMSE
2%f_m	1.67 × 10^{-4}	2.11 × 10^{-6}	0.232 95	0.963	3.91 × 10^{-6}
6%f_m	3.31 × 10^{-4}	3.04 × 10^{-6}	0.239 77	0.973	5.44 × 10^{-6}
10%f_m	6.17 × 10^{-4}	1.17 × 10^{-5}	0.222 36	0.974	1.52 × 10^{-5}

注：a、b、c分别代表蠕变系数、时间指数、初始应变偏移。

表 5 标准线性固体模型在不同应力水平下的拟合参数

Tab. 5 Fitted parameters of the standard linear solid model under different stress levels

应力水平	E_1/MPa	E_2/MPa	η_2/(MPa·s)	R^2	RMSE
2%f_m	11 242	40 091	1.95 × 10^{10}	0.992	1.87 × 10^{-6}
6%f_m	17 316	74 634	3.66 × 10^{10}	0.993	2.74 × 10^{-6}
10%f_m	14 757	43 183	1.99 × 10^{10}	0.992	8.35 × 10^{-6}

注：E_1、E_2、η_2分别代表瞬时弹性模量、延迟弹性模量、延迟黏性系数。

表 6 Burgers 模型在不同应力水平下的拟合参数

Tab. 6 Fitted parameters of the burgers model under different stress levels

应力水平	E_1/MPa	E_2/MPa	η_1/(MPa·s)	η_2/(MPa·s)	R^2	RMSE
2%f_m	11 242	40 251	2.50 × 10^{13}	1.94 × 10^{10}	0.992	1.88 × 10^{-6}
6%f_m	17 340	82 334	1.91 × 10^{12}	3.37 × 10^{10}	0.994	2.50 × 10^{-6}
10%f_m	14 786	47 311	1.16 × 10^{12}	1.83 × 10^{10}	0.994	7.71 × 10^{-6}

注：η_1代表流动黏性系数。

分激发。随着应力水平升高至 6%f_m 与 10%f_m，Burgers 模型的 RMSE 较标准线性固体模型降低约 8.3%，体现出 Burgers 模型在较高应力下对稳态蠕变行为的准确捕捉能力。

从理论结构角度，Burgers 模型因兼具 Kelvin 体与 Maxwell 体而具备完整的黏弹性表征能力，能够同时描述瞬时弹性、延迟弹性与稳态黏性流动。该模型在多重应力水平下的一致优良性能，为其作为后续参数分析与本构建模的基础提供了充分依据。下文将基于 Burgers 模型，进一步探究其参数随应力的演化规律，以构建适用于家具工程设计的应力依赖型蠕变本构模型。

3.4　应力依赖型本构模型的构建与参数分析

基于 2.3 节所述方法，为构建能够预测黑胡桃直拼板在 2%f_m ~ 10%f_m 应力范围内任意水平下的蠕变行为的本构模型，本研究将 3 个应力水平下 Burgers 模型的 4 个关键参数（瞬时柔量、延迟柔量、弛豫时间、稳态蠕变速率）引入相应的经验模型进行回归分析。各参数随归一化应力水平的演化规律如图 9 所示。

各响应参数与应力水平的函数关系清晰地揭示了黑胡桃直拼板的蠕变行为机制。瞬时柔量与应力呈线性正比（$R^2 > 0.99$），表明瞬时弹性模量 E_1 在试验应力范围内保持稳定，符合线弹性理论的基本假设，反映出木材细胞壁在微应变范围内纤维素微纤丝与基质的协同弹性响应[22]。

延迟弹性柔量随应力呈现指数增长趋势（$R^2 > 0.97$），说明延迟弹性模量 E_2 具有显著的应力依赖性，其原因为木材高分子聚合物网络在较高应力下更多黏弹性单元的逐渐激活，导致其等效刚度下降。同时，弛豫时间随应力升高呈幂律衰减（$R^2 > 0.99$），呈现出典型的应力加速弛豫现象，表明外部载荷有效降低了木材细胞壁聚合物链段运动的结构势垒，显著加快了其微观结构调整速率[23]。

稳态蠕变速率与应力保持线性关系（$R^2 > 0.97$），证实了材料在稳态阶段的黏性流动符合牛顿流体特性。其等效黏度在试验应力范围内未出现显著的应力软化效应，说明在研究的应力区间内，木材细胞层面的黏性滑移机制尚未发生本质转变。

上述参数演化规律表明：随着应力水平升高，黑胡桃直拼板的蠕变机制从以弹性变形为主导，逐渐转变为黏弹性机制的协同作用，展现出典型的非线性黏弹性特征。

将拟合得到的响应参数–应力关系式，代入式（2），即可得到应力依赖型黑胡桃直拼板蠕变本构

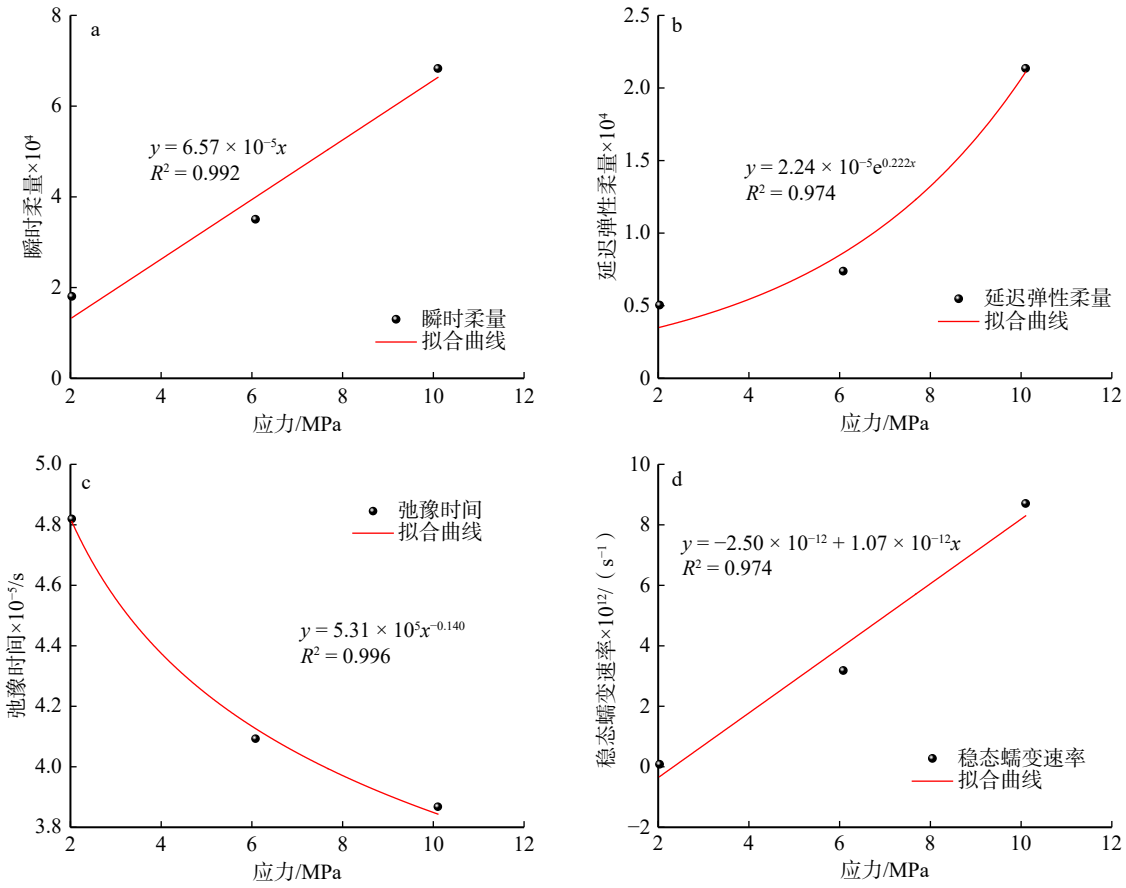


图 9　Burgers 模型参数随应力水平的变化

Fig. 9　Variation of Burgers model parameters with stress level

方程。

$$\varepsilon(\sigma,t)=6.57\times10^{-5}\sigma+2.24\times10^{-5}\mathrm{e}^{0.222\sigma}[1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{5.31\times10^{5}\sigma-0.140}}]+(-2.50\times10^{-12}+1.07\times10^{-12}\sigma)t \tag{5}$$

式中：$\varepsilon(\sigma,t)$为应力σ、时间 t 时的总应变，σ为施加的弯曲应力，t 为蠕变时间。

基于 2.4 节建立的搁板在均布载荷作用下跨中挠度的计算公式，令式(3)、式(4)、式(5)相耦合，构建了能够定量描述搁板几何尺寸、均布载荷与使用年限对跨中挠度综合影响的预测模型。该模型实现了对材料在不同应力水平下长期蠕变行为的预测，并具备向超试验周期外推的模拟能力，为后续家具搁板长期变形模拟与参数优化设计奠定了基础。

3.5 面向搁板耐久性设计与参数优化的模型预测

基于上述构建的耦合预测模型，本研究对黑胡桃直拼板搁板在典型使用工况下的长期变形进行了模拟分析。预测结果如图 10、图 11 所示，系统表征了蠕变行为随应力与时间的演化规律。

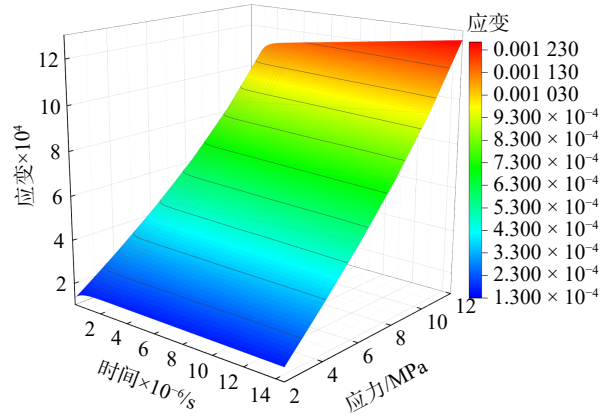


图 10 时间、应力与应变关系的三维曲面图

Fig. 10 Three-dimensional relationship of time, stress and strain

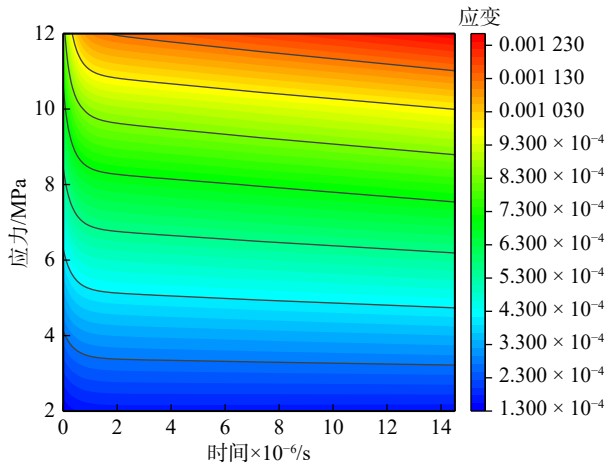


图 11 时间、应力与应变关系的等高线图

Fig. 11 Contour plot of strain as a function of time and stress

分析表明，材料表面应变随弯曲应力水平的提升呈现显著增长趋势，其时间演化规律清晰地展现出蠕变典型的三阶段特征。同时，稳态蠕变速率表现出明显的应力依赖性，随应力水平的提高而增大。

研究结果验证了所建模型在黑胡桃直拼板蠕变行为表征方面的有效性，能够准确描述试验应力范围内的变形规律，并展现出对长期变形趋势的可靠预测能力。该模型特性为后续家具搁板的耐久性设计与尺寸优化提供了重要的理论工具和分析基础。

为验证所构建模型在工程实践中的应用价值，本研究选取典型书柜搁板工况进行模拟分析。设定搁板宽度为 300 mm，线均布载荷为 0.2 kN/m，模拟其持续受载两年的使用条件。绘制了该工况下不同跨距与板厚组合的挠度及相对变形等高线图(图 12、图 13)。

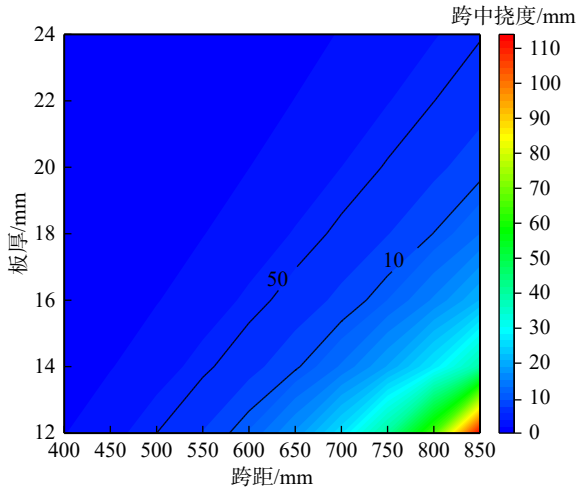


图 12 搁板跨距、板厚与跨中挠度关系等高线图(受载两年)

Fig. 12 Contour plot of mid-span deflection as a function of shelf span and thickness (under two-year load)

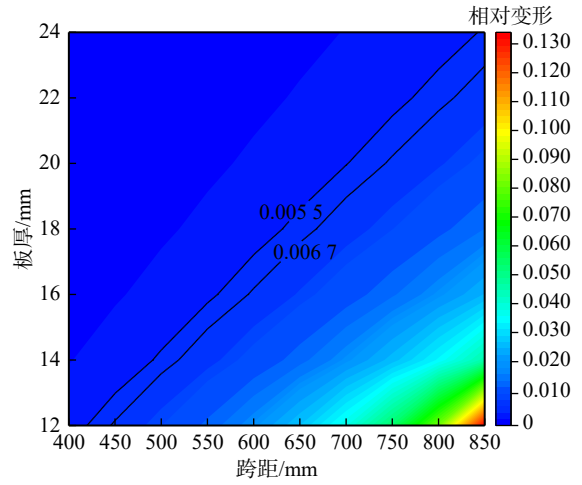


图 13 搁板跨距、板厚与相对变形关系等高线图(受载两年)

Fig. 13 Contour plot of relative deformation as a function of shelf span and thickness (under two-year load)

分析表明，黑胡桃直拼板在长期载荷作用下表现出良好的抗蠕变性能；通过科学的尺寸配置，可有效控制使用期间的变形发展。在既定载荷与时间条件下，跨距对挠度的影响尤为显著，即跨距的微小增加将导致挠度呈非线性增长。相比之下，增加板厚可有效抑制变形发展，显著提升构件的长期使用性能。

本研究提出的设计工具为家具设计师提供了科学实用的搁板参数设计依据，设计师可根据预期变形限值从等高线图中确定可行的（板厚，跨距）参数组合。例如，当以 $L/180$（相对变形 0.005 5）为变形限值时[24]，为确保在常规使用条件下搁板使用两年后变形不超过限值，若柜体跨距需求为 800 mm，则搁板厚度应不小于 23 mm。

该设计工具在材料本构行为与工程设计要求之间建立了明确的量化关联，验证了所建模型在家具设计工程中的适用性，为实木家具搁板的耐久性设计与参数优化提供了可靠的理论支撑，也为实木家具从经验设计向性能预测设计的转变提供了可行路径。

4　结　　论

为解决实木家具搁板设计长期依赖经验、缺乏科学预测依据的工程问题，本研究以黑胡桃木直拼板为研究对象，系统开展了多应力水平长期蠕变试验，通过本构模型遴选与参数演化分析，构建了考虑应力影响的蠕变预测模型，并进一步将其转化为设计参数优化工具，推动了家具工程设计从经验模式向性能预测模式的转变。研究得出以下主要结论。

（1）Burgers 模型是候选模型中描述黑胡桃木直拼板材料蠕变行为的最优模型。基于 R^2 与 RMSE 多指标评价体系验证，Burgers 模型具备最优拟合精度（$R^2 > 0.992$，RMSE 为 $1.88 \times 10^{-6} \sim 7.71 \times 10^{-6}$），能够完整表征瞬时弹性、延迟弹性与稳态黏性流动的耦合作用。

（2）黑胡桃直拼板的蠕变行为具有显著应力依赖性。在 $2\%f_m \sim 10\%f_m$ 应力范围内，Burgers 模型延迟弹性柔量随应力呈指数增长（$R^2 > 0.97$），弛豫时间随应力升高呈幂律衰减（$R^2 > 0.99$），表现出材料典型的非线性黏弹性特征，即材料由低应力下的准线性响应逐渐过渡到中高应力下的非线性蠕变。

（3）提出了面向搁板长期变形控制的参数化设计工具。通过构建考虑长期变形约束的耦合分析模型，实现了对材料在不同应力水平下长期蠕变行为的预测，并具备向超试验周期外推的模拟能力，使设计师能够基于搁板使用要求科学确定板厚、跨距等关键参数，提升了产品使用安全性与设计科学性，推动了搁板尺寸设计从经验依赖向理论依据驱动的转变。

本研究构建了从材料蠕变表征到家具结构设计应用的完整研究体系，为实木家具搁板的耐久性参数设计提供了科学的解决方案。后续研究可拓展至多变环境条件下的本构模型构建、家具搁板边界约束条件的影响分析、多家具材料的对比研究，并通过真实试验验证模型的有效性，进一步完善实木家具耐久性设计理论体系。

参　考　文　献

[1] Li X, Zhang M, Yang L, et al. Current state and development trend of China's customized home furnishing industry [J]. Wood Material Science & Engineering, 2025, 20(3): 721−733.

[2] 陈敏珊. MDF/刨花板搁板结构设计研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2021.
Chen M S. Research on MDF/particleboard shelf structure design[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021.

[3] Arriaga F, Wang X, Íñiguez-González G, et al. Mechanical properties of wood: a review [J]. Forests, 2023, 14(6): 1202.

[4] 吴琼尧. 木材的荷载持续作用效应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
Wu Q Y. Investigation of duration of load effect of wood[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[5] Najafian Ashrafi M, Shaabani Asrami H, Vosoughi Rudgar Z, et al. Comparison of physical and mechanical properties of beech and walnut wood from Iran and Georgian beech [J]. Forests, 2021, 12(6): 801.

[6] Du Y, Yan N, Kortschot M T. An experimental study of creep behavior of lightweight natural fiber-reinforced polymer composite/honeycomb core sandwich panels [J]. Composite Structures, 2013, 106: 160−166.

[7] Shimazaki K, Ando K. Analysis of shear creep properties of wood via modified Burger models and off-axis compression test method [J]. Wood Science and Technology, 2024, 58(4): 1473−1490.

[8] Liu Y, Wang W, Xu S, et al. Characterization and modeling of creep behavior of glued laminated bamboo [J]. Polymer Composites, 2024, 45(4): 2954−2964.

[9] 李珠, 蒋佳荔, 吕建雄. 不同温度、载荷下应压木和正常木的拉伸蠕变特性 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(12): 138−145.
Li Z, Jiang J L, Lü J X. Tensile creep characteristics of compression wood and normal wood under different temperatures and loads [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(12): 138−145.

[10] 刘娇, 周爱萍, 盛宝璐, 等. 温度对重组竹短期受压蠕变性能的影响 [J]. 林业工程学报, 2021, 6(2): 64−69.
Liu J, Zhou A P, Sheng B L, et al. Effect of temperature on short-term compression creep property of bamboo scrimber [J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(2): 64−69.

[11] Chen W, He X, Sun C, et al. A thermodynamically consistent creep constitutive model considering damage mechanisms [J].

International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 276: 109373.

[12] Trcala M, Suchomelová P, Bošanský M, et al. A constitutive model considering creep damage of wood [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2024, 28(1): 163−183.

[13] 国家标准化管理委员会. 木材和木基产品的荷载持续时间效应和蠕变性能评定: GB/T 31291—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for evaluation of duration of load and creep effects of wood and wood-based products: GB/T 31291−2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

[14] 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.

[15] 国家标准化管理委员会. 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 4 部分: 含水率测定: GB/T 1927.4—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens Part 4 determination of density: GB/T 1927.4−2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

[16] 陆斌辉, 陆伟东, 马晋, 等. 不同受力状态下木材本构模型研究进展 [J]. 南京工业大学学报 (自然科学版), 2024, 46(4): 355−367.
Lu B H, Lu W D, Ma J, et al. Research progress on the constitutive models of timber under different stress states [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 46(4): 355−367.

[17] Clouser W S . Creep of small wood beams under constant bending load: FPL Report No. 2150[R]. Madison: U.S. Forest Products Laboratory, 1959.

[18] Zener C M, Siegel S. Elasticity and anelasticity of metals [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1949, 53(9): 1468−1468.

[19] Pierce C B, Dinwoodie J M. Creep in chipboard: part 1 fitting 3- and 4-element response curves to creep data [J]. Journal of Materials Science, 1977, 12(10): 1955−1960.

[20] Hosseini S M, Shakiba M, Bazli M, et al. Using four-point flexure test to investigate effects of temperature and bar size on the tensile properties of GFRP bars [J]. Polymer Testing, 2022, 112: 107627.

[21] Chen Y. Error analysis based on Euler-bernoulli beam theory: an example of a simply supported beam bending model [J]. Applied and Computational Engineering, 2025, 155(1): 17−24.

[22] Alméras T, Gronvold A, van der Lee A, et al. Contribution of cellulose to the moisture-dependent elastic behaviour of wood [J]. Composites Science and Technology, 2017, 138: 151−160.

[23] Nakai T, Toba K, Yamamoto H. Creep and stress relaxation behavior for natural cellulose crystal of wood cell wall under uniaxial tensile stress in the fiber direction [J]. Journal of Wood Science, 2018, 64(6): 745−750.

[24] 国家标准化管理委员会. 家具力学性能试验第 5 部分: 柜类强度和耐久性: GB/T 10357.5—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test of mechanical properties of furniture Part 5 Strength and durability of storage units: GB/T 10357.5−2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 曹金珍）