

汽蒸预处理白栎木材弯曲蠕变的时温等效特性

张毓格, 侯俊峰, 岑俊杰, 章卫钢, 姜志宏, 俞友明

(浙江农林大学 化学与材料工程学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】在采用 MATLAB 2019a 软件对早材导管带特征进行数字化表征的基础上, 探究汽蒸预处理和早材导管带对白栎 *Quercus alba* 木材弯曲蠕变的时温等效特性影响规律。【方法】采用饱和蒸汽 (100 °C) 及过热蒸汽 (110、120 °C) 对试样进行预处理, 利用动态热机械分析仪 (DMA-Q800) 在不同测试温度 (20~80 °C) 条件下测试试样的弯曲蠕变曲线, 最后选用测试温度 20 °C 探究试样弯曲蠕变的时温等效特性, 并运用 Williams-Landel-Ferry (WLF) 方程对水平移动因子与测试温度的关系曲线进行拟合。【结果】①试样的瞬时应变和恒定载荷 5 MPa 保持的 45 min 应变均随测试温度的升高而增大。然而, 试样的瞬时应变和 45 min 应变均随汽蒸预处理温度的升高而减小。②基于时温等效原理, 可将不同汽蒸预处理试样 45 min 的短期蠕变曲线平移得到测试温度 20 °C 下白栎木材的长期蠕变曲线。试样的水平移动因子与测试温度的关系曲线满足 WLF 方程, 回归系数 (R^2) 均大于 0.93, 用 WLF 方程可以对蠕变特性的时间与测试温度关系进行有效表达。【结论】汽蒸预处理、测试温度和早材导管带对白栎木材的弯曲蠕变性能均影响显著; 在 20~80 °C 测试温度范围和汽蒸预处理温度 (100~120 °C) 范围内, 时温等效适用于白栎木材的弯曲蠕变。图 9 表 2 参 25

关键词: 白栎木材; 弯曲蠕变; 汽蒸预处理; 早材导管带; 时温等效

中图分类号: S781.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)05-1121-09

Time-temperature equivalence in bending creep of white oak wood in steam pretreatment

ZHANG Yuge, HOU Junfeng, CEN Junjie, ZHANG Weigang, JIANG Zhihong, YU Youming

(College of Chemistry and Materials Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study, with the employment of MATLAB 2019a software, is aimed to complete the time-temperature equivalence in bending creep of white oak in steam pretreatment on the basis of digital characterization of earlywood vessel belt characteristics. [Method] First, an investigation was carried out of the creep behavior of specimens pretreated by steam at 100, 110, 120 °C using a dynamic thermo-mechanical analyzer (DMA-Q800) at the test temperature ranging from 20 to 80 °C. Then, time-temperature equivalence was applied to predict the long-term creep behavior of white oak on the basis of 45 min creep curves of tested specimens. At last, a further analysis was conducted of the relationship between horizontal shift factor and temperature in accordance with Williams-Landel-Ferry (WLF) equation. [Result] (1) Instantaneous strain and 45 min strain under the permanent load of 5 MPa for tested specimens increased with the rise of test temperature yet the strain of specimens decreased with the increase of steam treatment temperature. (2) The 45 min creep curves of specimens can be processed to obtained the long-term creep curves at the referenced test temperature

收稿日期: 2022-11-10; 修回日期: 2023-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (32201492, 31670561); 浙江农林大学科研发展基金人才启动项目 (2020FR020)

作者简介: 张毓格 (ORCID: 0000-0003-0819-069X), 从事木材物理研究。E-mail: 2020604022062@stu.zafu.edu.cn。

通信作者: 俞友明 (ORCID: 0000-0002-2184-8890), 教授, 博士生导师, 从事木材物理研究。E-mail: yuyouming@zafu.edu.cn

of 20 °C according to time-temperature equivalent. (3) The curves between horizontal shift factor and temperature of specimens met the requirements of WLF equation with R^2 greater than 0.93. (4) The WLF equation can effectively describe the relationship of creep characteristics between test time and temperature. [Conclusion] Steam pretreatment, test temperature and earlywood vessel belt affected the creep behavior of white oak wood significantly and it is feasible to predict the long-term creep behavior of white oak wood by WLF equation in test temperature of 20–80 °C and steam pretreatment temperature ranging from 100 to 120 °C. [Ch, 9 fig. 2 tab. 25 ref.]

Key words: white oak wood; bending creep; earlywood vessel belt; steam pretreatment; time-temperature equivalence

木材是一种由纤维素、半纤维素和木质素组成的复杂聚合物。木材的化学成分和多孔结构决定着其弯曲加工性能^[1-2]，已有研究发现阔叶材弯曲性能普遍优于针叶材^[3-4]。近年来，国内外学者从软化处理和顺纹压缩处理对弯曲木材微观结构、化学成分和应力-应变本构关系的影响角度开展了研究，发现压缩处理过程中导管变形对木材弯曲成型的质量影响显著^[5]。其中，张燕等^[3]研究发现：在允许的应力范围内，顺纹压缩后环孔材拉伸面和压缩面的导管壁均出现了褶皱，有利于实现木材的顺纹压缩。此外，不同早材导管带位置对白栎 *Quercus alba* 木材弯曲蠕变性能的影响研究表明：瞬时应变和 45 min 应变均随早材导管带与受力面之间距离的增加而大幅度减小^[6-7]。由此可见，弯曲压缩过程中早材导管带不仅影响细胞变形和力学特性，而且对木材的弯曲性能影响显著。

木材时温等效原理是指木材在较高温度、较短时间内的力学性质和力学行为与其在较低温度、较长时间内的力学性质和力学行为等效，可以快速预测木材在低温状态下长时间内的力学响应^[8-9]。PLACET 等^[10]在 0~95 °C 测试温度下探究饱水山毛榉 *Fagus sylvatica* 与橡木 *Quercus sessiliflora* 的黏弹性以及对时温等效原理的适用性，发现此原理只适用于小于玻璃化转变区域的温度范围。WANG 等^[11]采用时间-应力叠加原理 (time-stress superposition principle, TSSP) 和时间-温度-应力叠加原理 (time-temperature-stress superposition principle, TTSSP) 模拟了高温处理后杉木 *Cunninghamia lanceolata* 的弯曲蠕变响应特性，表明其弯曲蠕变行为的温度阈值为 180 °C。含水率、温度和纹理取向对木材静态黏弹性的影响显著^[12-14]，然而，关于汽蒸预处理对环孔材弯曲蠕变行为的时温等效特性研究未见相关报道。为此，本研究以白栎木材为研究对象，考察不同汽蒸预处理温度、测试温度及早材导管带条件下木材的弯曲蠕变特性并开展时温等效特性研究，以为木材弯曲加工提供理论和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 材 料

试材为美国产白栎木材，环孔材早材，试样取自白栎木材第 3 个年轮内侧区域，树龄为 20 a，胸径 25 cm 以上，年轮宽度为 3~5 mm，产于美国东部，购自中国浙江省湖州市南浔建材市场，其气干密度为 $(0.76 \pm 0.05) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。试验前通过恒温恒湿箱 (EL-10KA) 将其含水率调整至 $(12.0 \pm 1.0)\%$ ，然后从同一生长轮内取样并制备 $40.0 \text{ mm} \times 12.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ 的试样。根据有无早材导管带制备 2 种试样 (图 1)：试样 A 为早材导管带位于试样中间，密度为 $(0.73 \pm 0.07) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，试样 B 为对照组 (无早材导管带)，密度为 $(0.78 \pm 0.08) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。弯曲蠕变试验前，用水热合成反应釜 (MQ-200) 对试样采用 100 °C 饱和蒸汽以及 110、120 °C 过热蒸汽预处理，分别用

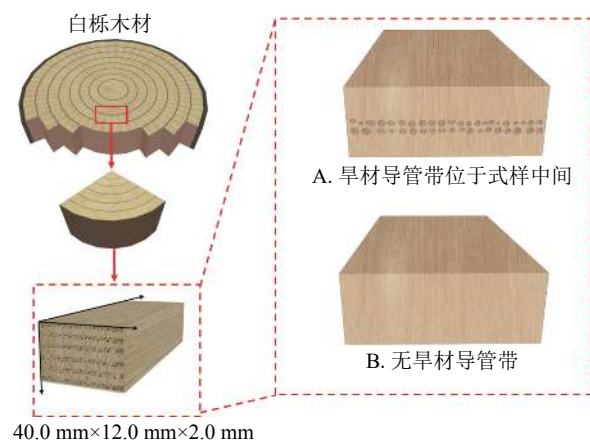


图 1 样品制备

Figure 1 Specimens preparation

$A_1(B_1)$ 、 $A_2(B_2)$ 、 $A_3(B_3)$ 表示，未处理用 $A_0(B_0)$ 表示，处理时间为 60 min，处理结束后通过恒温恒湿箱将汽蒸预处理试样的含水率调节至 $(12.0 \pm 1.0)\%$ 。

1.2 早材导管带特性的数值化表征

采用扫描电子显微镜 (SEM, TM-3 030) 研究试样 A 和 B 的横切面内早材导管带特性。阔叶树材导管直径以弦向计，在 $15 \sim 260 \mu\text{m}$ 内，导管长度为 $80 \sim 1\,700 \mu\text{m}$ ^[15]。栎木早材导管弦向直径达 $250 \mu\text{m}$ ，晚材弦向直径达 $34 \mu\text{m}$ ，环孔材早材导管分子长度为 $230 \sim 390 \mu\text{m}$ ，小于晚材导管分子长度 ($270 \sim 590 \mu\text{m}$)^[15]。以弦向直径为 $35 \sim 500 \mu\text{m}$ ，长度为 $230 \sim 390 \mu\text{m}$ 作为筛选早材导管分子参数阈值。试样 A 和 B 的横切面内早材导管带特征如图 2 所示。运用 MATLAB 2019a 软件实现对试样横切面扫描电镜 (SEM) 图像的类型转换、增强处理、分割处理以及形态学处理等操作，获取试样横切面早材导管数量、直径和面积等参数，并通过正态分布拟合表征试样横切面早材导管的分布均匀性。如图 3 所示，经过二值图像处理、结合筛选阈值进行早材导管分子优选、开运算、二次过滤以及早材导管分子标记统计等步骤统计试样和早材导管带厚度，试样的横切面面积和早材导管总面积，以及计算试样的早材导管面积比 (R_C) 和早材导管带中心到受力面距离 (R_D)，进而对试样横切面内早材导管带特征进行数值化表征。

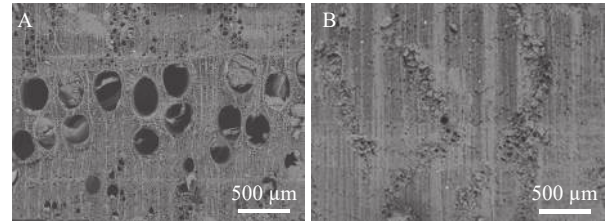


图 2 试样 A 和 B 横切面内早材导管带特征
Figure 2 Early wood vessel belt in the cross section of specimen A and B

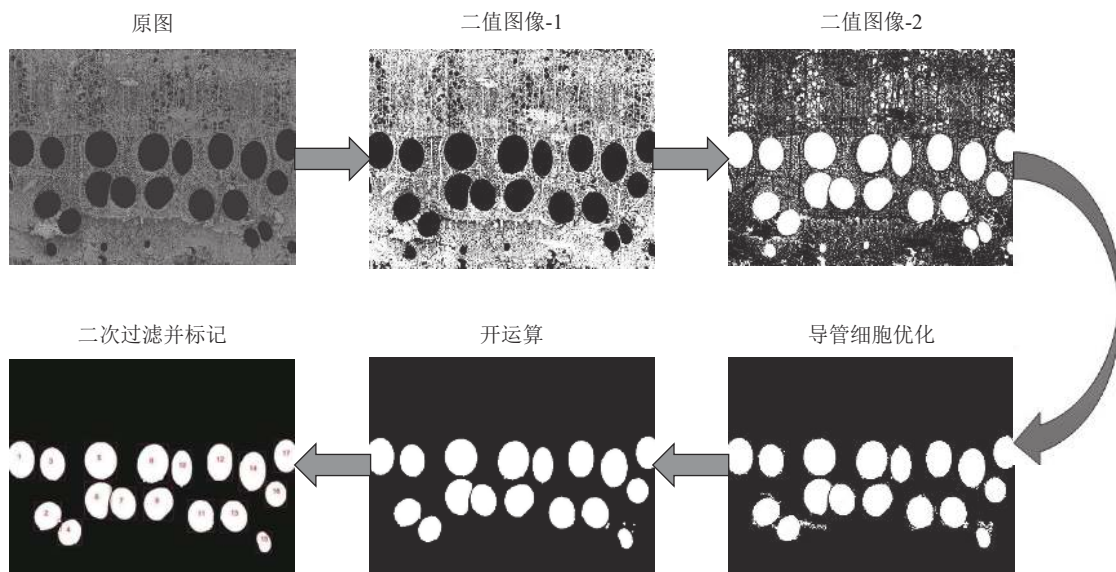


图 3 早材导管带数值化表征流程图
Figure 3 Flow diagram for numerical characterization of early wood vessel belt in specimens

1.3 弯曲蠕变测试

通过动态热机械分析仪 (DMA-Q800) 在双悬臂夹具 (跨距为 35 mm) 弯曲模式下径向加载 5 MPa 恒定载荷测试试样的弯曲蠕变特性^[16-17]，保持时间为 45 min，随后撤除恒定载荷，并保持其环境条件 45 min。测试过程中通过自带湿度附件控制试样的含水率为 $(12.0 \pm 1.0)\%$ 。动态热机械分析仪程序中预设的测试温度分别为 20、30、40、50、60、70 和 80 °C，对应的相对湿度 (RH) 依次控制为 66%、69%、72%、74%、77%、79% 和 81%，收集并记录试样弯曲蠕变数据。最后，根据早材导管带、汽蒸预处理温度和测试温度下的弯曲蠕变曲线，选取测试温度 20 °C 来绘制试样蠕变与时间对数的关系曲线，经由时温等效合成白栎木材弯曲蠕变特性的主曲线，获得相应的水平移动因子，进而对其长期蠕变行为进行预测表征。

1.4 时温等效性

选取测试温度 20 °C 来绘制试样蠕变与对数时间的关系曲线，把其余测试温度条件下的蠕变曲线水

平移动,使各曲线彼此叠合形成一定时间范围的蠕变主曲线。叠合主曲线时,水平移动因子 a_T 与测试温度的关系用 Williams-Landel-Ferry (WLF) 方程进行数学模型表征^[18]。WLF 方程的表达式为:

$$\lg a_T = \frac{-D_1 \times (T - T_0)}{D_2 + (T - T_0)} \quad (1)$$

式(1)中: $\lg a_T$ 为时温等效位移因子, T 为测试温度(K); T_0 为参考温度(K); D_1 和 D_2 为拟合所得常数。

2 结果与分析

2.1 早材导管分布特性表征统计

分别选取 40 幅典型的 SEM 图像通过 MATLAB 2019a 软件计算试样的 R_C 和 R_D 并进行正态分布统计,结果如图 4 所示:试样 A 的 R_C 和 R_D 分别为 $(18.12 \pm 0.50)\%$ 和 (1.12 ± 0.04) mm,而试样 B 的 R_C 和 R_D 分别为 $(0.03 \pm 0.04)\%$ 和 0。

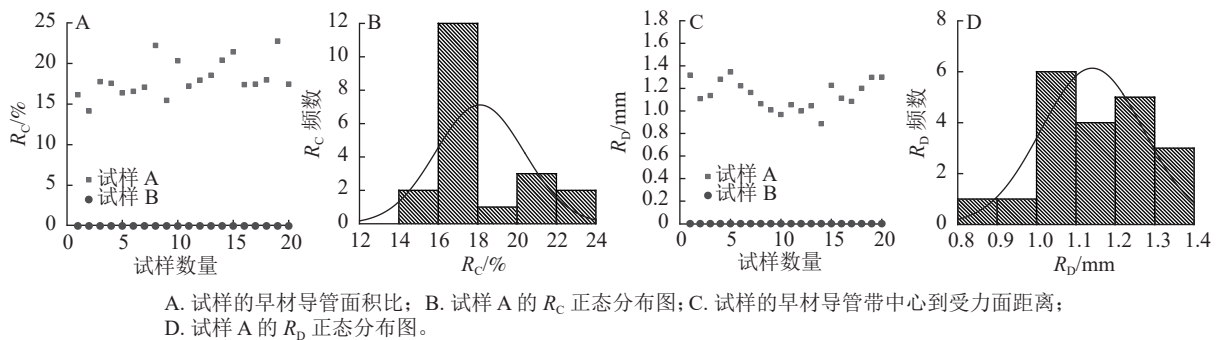


图 4 试样早材导管面积比及早材导管带中心到受力面距离

Figure 4 Earlywood vessel area ratio and the distance between vessel belt and load-bearing surface in specimens and analysis of normal distribution

由表 1 可知:试样 A 的 R_C 和 R_D 服从正态分布,试样 B 的 R_C 和 R_D 服从均匀分布,差异显著 ($P < 0.05$),其导管分子数量及分布状态一致。综上所述,含早材导管带的试样中导管分子的分布状态是相对均匀的,对照组基本上无早材导管存在。

表 1 试样 R_C 和 R_D 的正态分布检验结果

Table 1 Normality test result of R_C and R_D of tested specimens

试样	$R_C/\%$	自由度	统计量	P	R_D/mm	自由度	统计量	P
A	18.12 ± 0.50	20	0.92	0.12	1.12 ± 0.04	20	0.97	0.86
B	0.03 ± 0.04	20	-	-	0±0	20	-	-

说明: -表示无统计意义。

2.2 测试温度对白栎木材蠕变的影响

由图 5 可得:在前 45 min 内,试样的蠕变均随测试温度的升高而增大。同时,试样蠕变的增长速率随测试温度的升高而增大。当测试温度上升到 80 °C 时,所有试样的蠕变行为最明显。分析原因:木材中运动单元获得的活化能随测试温度的升高而增大,相应的分子间相互作用力减小,导致分子间距离增大,进而增大了运动单元的活动空间,试样的蠕变显著增大^[13,19]。此外,一般湿木材木质素的玻璃化转变温度为 72~128 °C^[16]。随着测试温度不断升高,白栎木材木质素分子链段的状态从冷冻状态转变为移动状态,并且在 80 °C 下发生玻璃化转变。在分子占据体积增大的基础上,随着测试温度的升高,木质素发生自由体积膨胀^[20]。因此,运动单元的运动空间增加,试样的蠕变也随之增加。

2.3 汽蒸预处理对白栎木材蠕变的影响

如图 6 所示:汽蒸预处理试样的瞬时应变和 45 min 应变整体低于未处理试样。当测试温度相同时,试样的弯曲蠕变随着汽蒸预处理温度的升高而减小。在测试温度 20、30、40、50 和 60 °C 下,相对于 A_0 ,试样 A_1 的瞬时应变分别减少了 2.14%、2.35%、10.92%、11.97% 和 1.49%。随着测试温度继续从 60 °C 升高到 80 °C,试样 A_1 的瞬时应变分别增加了 18.06% 和 2.60%;在测试温度 20、30、40、50、60、

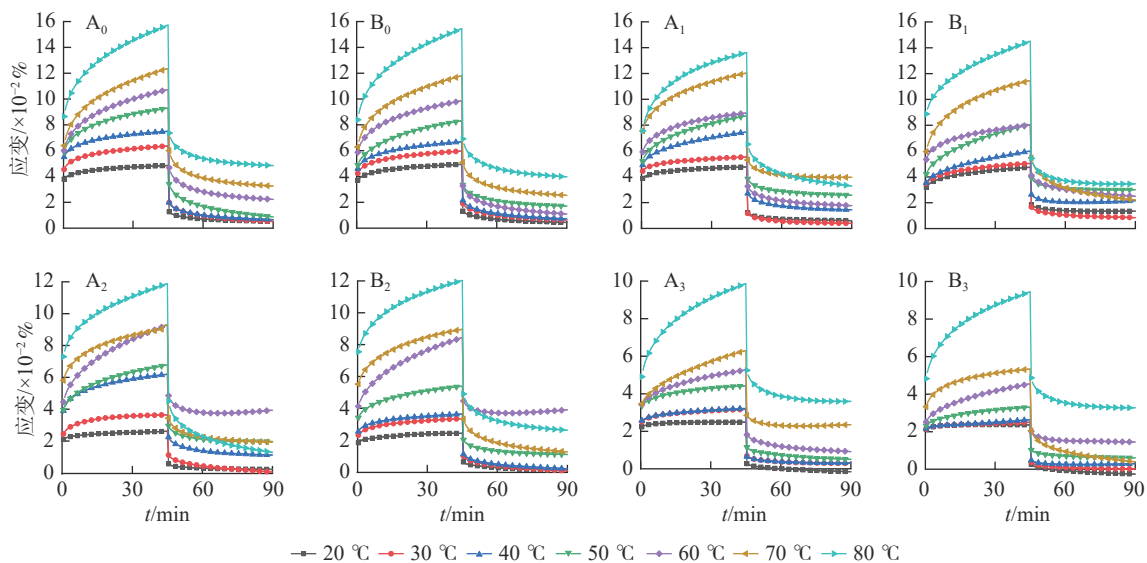


图 5 不同测试温度下试样蠕变应变曲线

Figure 5 Creep strain curves of specimens at different test temperatures

70 和 80 °C 下，试样 A₂ 的瞬时应变分别减少了 44.82%、46.21%、45.44%、33.13%、25.99%、9.15% 和 2.70%；在测试温度 20、30、40、50、60、70 和 80 °C 下，试样 A₃ 的瞬时应变分别减少了 41.11%、44.78%、53.44%、43.08%、42.99%、45.80% 和 43.24%。然而，相对于 B₀，相同条件下试样 B₁ 的瞬时应变分别减少了 13.87%、17.94%、19.40%、13.60%、8.96%、5.14% 和 21.19%，试样 B₂ 和 B₃ 表现出相同规律。在测试温度 70~80 °C 下，A₁ 的瞬时应变减少幅度随测试温度升高呈负值，说明测试温度升高，应变呈增加的趋势，而 B₁ 瞬时应变的减小幅度均呈减小趋势。A₂ 瞬时应变的减少幅度在测试温度 50~80 °C 呈逐渐减小的规律，其瞬时应变的减少幅度在测试温度升高到 80 °C 时最小。A₃ 和 B₃ 的减少幅度基本保持一致，相对于其他温度汽蒸预处理的样品更加趋于稳定。

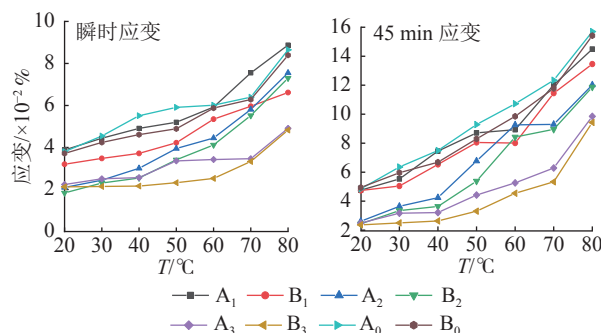


图 6 不同汽蒸预处理和测试温度下试样的瞬时应变和 45 min 应变

Figure 6 Instantaneous strain and 45 min strain of specimens at different steam pretreatment and test temperatures

在测试温度 20、30、40、50、60、70 和 80 °C 下，与 A₀ 相比，试样 A₁ 的 45 min 应变分别减少了 1.84%、13.01%、0.55%、6.18%、16.69%、2.59% 和 7.71%，试样 A₂ 和 A₃ 的 45 min 应变均存在相同的变化规律。在测试温度 20、30、40、50、60、70 和 80 °C 下，相对于 B₀，试样 B₁ 的 45 min 应变分别减少了 4.01%、15.38%、2.30%、3.01%、18.69%、2.80% 和 12.71%，试样 B₂~B₃ 的 45 min 应变均存在相同的变化规律。试样 A₁ 和 B₁ 的 45 min 应变降低幅度远小于 A₂、A₃、B₂ 和 B₃，并且 A₃ 和 B₃ 的 45 min 应变降低幅度大于 A₂ 和 B₂，特别是在测试温度 (50~80 °C) 较高时，宏观表现为蠕变程度小。这是因为无定形物质的半纤维素是组成木材主要成分之一，含有较多亲水性基团，具有较强的吸水性，是木材产生应变的因素之一^[20]。在压力蒸汽处理过程中，乙酰基在受热水解过程中会从半纤维素中脱去并生成乙酸，使处理环境的酸性增强^[21-22]。此外，半纤维素的聚合度在此水解过程中逐渐降低，产成低聚糖以及单糖，单糖中的戊糖反应产生糠醛，而已糖则反应产生羟甲基糠醛^[21-22]，这一水解过程会导致形成的乙酸进一步加剧水解反应，促使半纤维素进一步分解。另一方面，在汽蒸预处理条件下，水蒸气密度明显增加，水合氢离子的电离反应促进了乙酰基的断裂和乙酸的生成，使得半纤维素的水解效率大大提高，进而明显降低木材中游离羟基的含量。汽蒸预处理使木材的平衡含水率 (EMC) 降低，含水率低于 15% 的木材在热处理温度过程中发生物理变化，导致水分与半纤维素中游离羟基的结合能力降

低^[23]。在热作用下,半纤维素内部的一部分多糖会裂解为糖醛、糖类,这种物质通过聚合反应生成了不溶于水的聚合物,促使木材的吸水性降低,木材的尺寸稳定性显著提高^[24]。

2.4 早材导管带对白栎木材蠕变的影响

由图7可知:测试温度一定时,试样B的蠕变均小于试样A。此外,当测试温度从20℃升高到80℃时,试样A的瞬时应变和45 min应变均明显增加。同时,蠕变的增长幅度随测试温度的升高而增加。随着测试温度(20~50℃)的升高,试样A₀与B₀、A₁与B₁、A₂与B₂以及A₃与B₃的应变差值逐渐增大,应变差值在温度40~50℃时达到最大;在60~80℃内应变差值却逐渐减小。与对照组相比,20、30、40、50、60、70和80℃测试温度范围内试样A₀的瞬时应变分别增长了2.19%、7.19%、19.48%、20.82%、3.03%、2.35%和1.75%。试样A₁~A₃的瞬时应变均存在相同的变化规律。试样B₀~B₃的45 min应变均随测试温度的升高而增大。

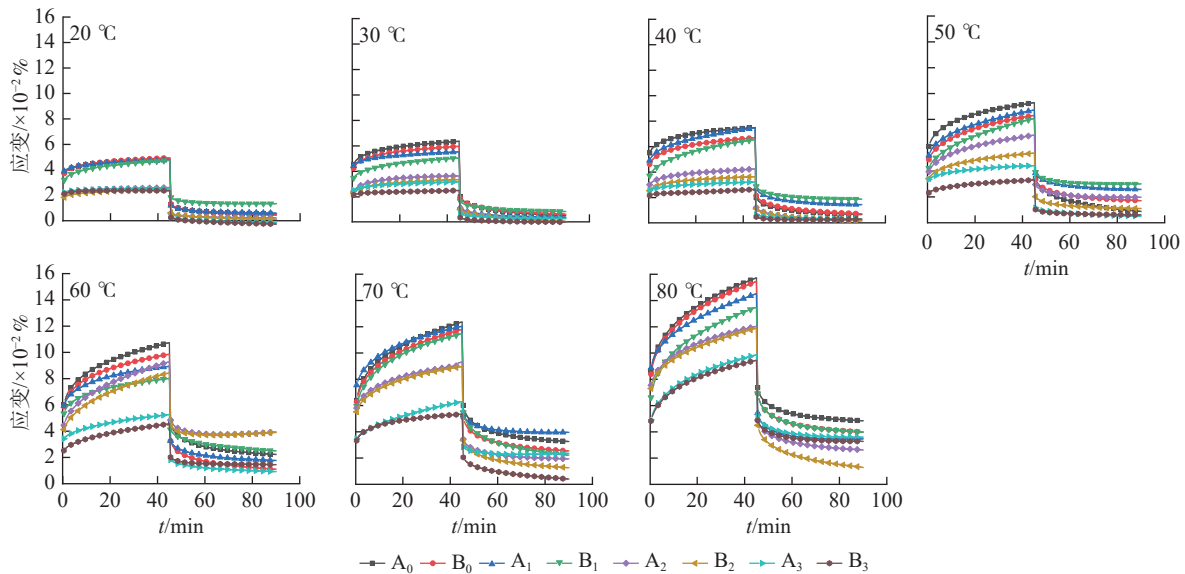


图7 早材导管带对试样蠕变曲线的影响

Figure 7 Influence of early vessel belt on creep strain curves of specimens

试样的瞬时应变和45 min应变的应变差值在测试温度40~50℃达到最大值,而在60~80℃内应变差值逐渐减小,这是因为在测试温度40~50℃内出现了“转折点”^[6-7]。当测试温度低于转折点时,早材导管带对白栎木材蠕变的影响相对于测试温度更加显著;而测试温度高于转折点时其对试样蠕变的影响比早材导管带更显著。当测试温度进一步升高到80℃时,试样A和B的瞬时弹性应变和45 min应变的应变差值相差无几;由此可知,当测试温度升高到80℃时,试样的蠕变主要受测试温度的影响。在弹性力学中的孔或圆形孔的应力集中问题中所述,在外加载荷作用下,弹性材料孔结构边缘产生应力集中效果,且孔边缘处的应力将远大于没有孔时的应力^[25],此外,含早材导管带的试样密度小于对照组密度,导致试样力学强度变弱,从而引起应变增大,因此早材导管带的存在增大了试样的蠕变。

2.5 时温等效特性

由图8可知:不同汽蒸预处理温度和早材导管带条件下的试样主曲线经过水平移动后均可获得一条较光滑的主曲线,说明在20~80℃测试温度和100℃~120℃汽蒸预处理温度范围内,时温等效适用于白栎木材的弯曲蠕变,主曲线和位移因子函数均受测试温度、早材导管带和汽蒸预处理温度的影响。利用时温等效原理,试件A₀和B₀的主曲线时间跨度分别由45 min延长至10^{6.87}和10^{6.95} s;试件A₁和B₁的主曲线时间跨度分别由45 min延长至10^{6.96}和10^{7.09} s;试件A₂和B₂的主曲线时间跨度分别由45 min延长至10^{7.63}和10^{8.14} s;试件A₃和B₃的主曲线时间跨度分别由45 min延长至10^{8.09}和10^{8.25} s。说明不同温度汽蒸预处理和早材导管带的存在一定程度上影响了主曲线的时间跨度。此外,含早材导管带的试样主曲线时间跨度小于对照组试样。原因是试样A的蠕变均大于试样B,结合孔边应力集中效应,证实了早材导管带的存在导致试样更易发生蠕变。随着时间的推移,前者的弯曲蠕变比后者更明显。此

外，试样主曲线时间跨区随着汽蒸预处理温度升高而增大。分析其原因是汽蒸预处理后的样品对木材弯曲蠕变程度减小，汽蒸预处理增强了木材的尺寸稳定性；随着时间的推移，试样蠕变变化变慢。由图 9 和表 2 可得：各组试样水平移动因子与测试温度的关系曲线在 20~80 °C 的测试温度范围内均能满足 WLF 方程，所得的拟合曲线较为光滑，相应的回归系数 (R^2) 均大于 0.93 (表 2)，用 WLF 方程可以对白栎木材弯曲蠕变特性的时间与测试温度关系进行有效表达。

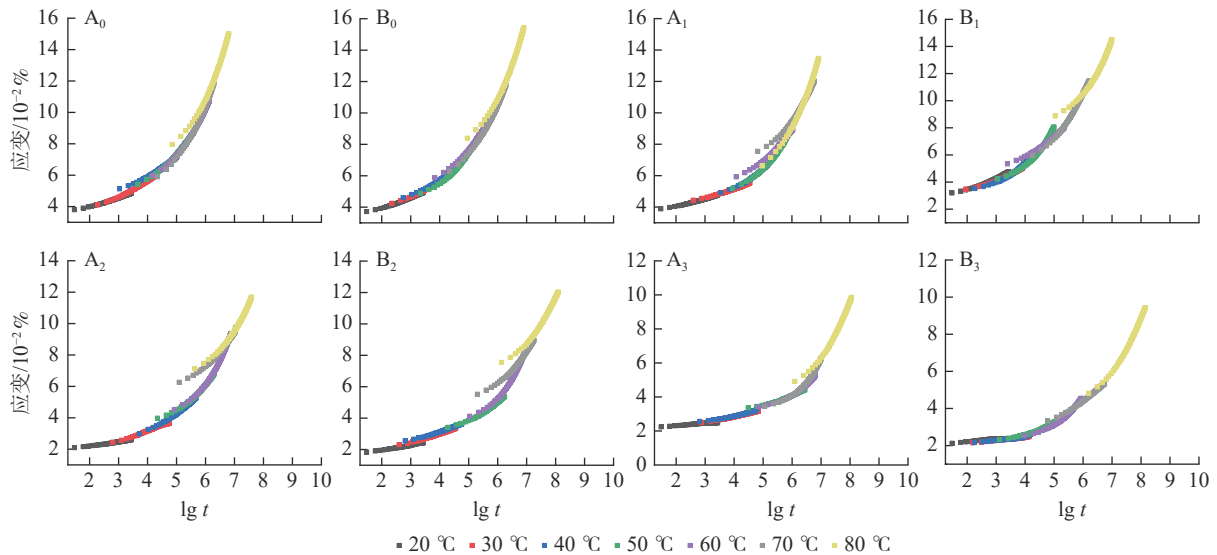


图 8 不同汽蒸预处理温度和早材导管带条件下试样的主曲线

Figure 8 Master curves of creep behavior at different steam pretreatment temperatures and vessel belt at a referenced test temperature of 20 °C

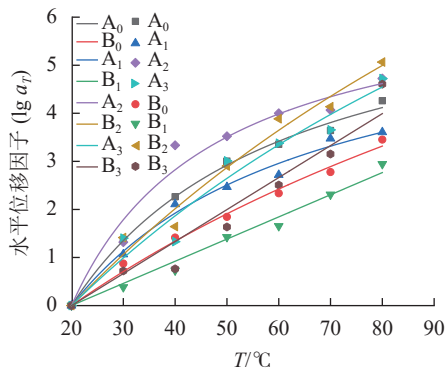


图 9 不同温度和早材导管带条件下试样的 WLF 方程拟合曲线

Figure 9 Fitting curve of WLF equation for specimens under different temperature and vessel belt conditions

表 2 不同汽蒸预处理温度和早材导管带条件下试样的 WLF 方程拟合参数与回归系数

Table 2 Fitting parameters and regression coefficients of WLF equations for specimens under different steam pretreatment temperature and vessel belt conditions

样品编号	D_1	D_2	R^2
A ₀	-6.979 24	41.669 77	0.994 59
B ₀	-12.655 52	168.871 85	0.988 92
A ₁	-6.420 71	46.817 52	0.985 34
B ₁	-6.21E+13	1.35E+15	0.979 71
A ₂	-6.770 99	27.946 09	0.960 80
B ₂	-19.201 34	170.616 94	0.976 85
A ₃	-16.148 19	153.087 92	0.946 21
B ₃	-7.66E+14	1.15E+16	0.932 01

3 结论

本研究结果表明：①试样的瞬时应变和 45 min 应变随测试温度的升高而增大；而在相同的测试温度下，试样的蠕变随着汽蒸预处理温度的升高而逐渐减小；②在 20~80 °C 测试温度和 100~120 °C 汽蒸预处理温度范围内，时温等效适用于白栎木材弯曲蠕变；③试样的时温等效水平移动因子与测试温度的关系曲线满足类 WLF 方程， R^2 均大于 0.93，可见，WLF 方程能较好地预测木材长期弯曲蠕变行为。

通过本研究可以得出：在一定范围内，测试温度、汽蒸预处理和早材导管带对白栎木材弯曲蠕变行为的影响较为明显，通过时温等效原理可以有效模拟预测白栎木材的长期蠕变特性，但是本研究仅对白栎木材弯曲蠕变特性进行了模拟预测，后续应在长期实际研究中表征白栎木材长期 (1~3 a) 的弯曲蠕变特性。

4 参考文献

- [1] MOGHADDAM M S, van den BULCKE J, WÄLINDER M E P, *et al.* Microstructure of chemically modified wood using X-ray computed tomography in relation to wetting properties [J]. *Holzforschung*, 2017, **71**(2): 119 – 128.
- [2] GAFF M, KAČÍK F, GAŠPARÍK M. Impact of thermal modification on the chemical changes and impact bending strength of European oak and Norway spruce wood [J]. *Composite Structures*, 2019, **216**: 80 – 88.
- [3] 张燕, 佟达, 宋魁彦. 水热-微波处理水曲柳顺纹压缩应力-应变本构关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, **37**(4): 105 – 109.
ZHANG Yan, TONG Da, SONG Kuiyan. Stress-strain constitutive relation of longitudinal compressed *Fraxinus mandshurica* Rupr. with hydrothermal-microwave treatment [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2013, **37**(4): 105 – 109.
- [4] BÁDER M, NÉMETH R, KONNERTH J. Micromechanical properties of longitudinally compressed wood [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2019, **77**: 341 – 351.
- [5] 宋魁彦. 木材顺纹压缩与多维弯曲技术研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
SONG Kuiyan. *Study on the Technology of Longitudinal Compressing and Multi-Dimensional Bending of Wood*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2008.
- [6] HOU Junfeng, JIANG Yinqiu, YIN Yeqiao, *et al.* Experimental study and comparative numerical modeling of creep behavior of white oak wood with various distributions of earlywood vessel belt[J/OL]. *Journal of Wood Science*, 2021, **67**: 57[2022-10-20]. doi: 10.1186/s10086-021-01989-1.
- [7] 尹业桥, 侯俊峰, 姜志宏, 等. 早材管孔分布对环孔材柎木蠕变特性的影响[J]. 林业工程学报, 2021, **6**(3): 54 – 60.
YIN Yeqiao, HOU Junfeng, JIANG Zhihong, *et al.* Effect of earlywood vessel distribution on creep characteristics of ring-porous oak wood [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, **6**(3): 54 – 60.
- [8] 吕建雄, 蒋佳荔. 木材动态黏弹性基础研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
LÜ Jianxiong, JIANG Jiali. *Foundation Study on Dynamic Viscoelastic of Wood* [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [9] 彭辉, 蒋佳荔, 詹天翼, 等. 木材普通蠕变和机械吸湿蠕变研究概述[J]. 林业科学, 2016, **52**(4): 116 – 126.
PENG Hui, JIANG Jiali, ZHAN Tianyi, *et al.* A review of pure viscoelastic creep and mechano-sorptive creep of wood [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(4): 116 – 126.
- [10] PLACET V, PASSARD J, PERRÉ P. Viscoelastic properties of green wood across the grain measured by harmonic tests in the range 0 to 95 °C: hardwood vs. softwood and normal wood vs. reaction wood [J]. *Holzforschung*, 2007, **61**(5): 548 – 557.
- [11] WANG Junfeng, WANG Xuan, HE Qian, *et al.* Time-temperature-stress equivalence in compressive creep response of Chinese fir at high-temperature range[J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2020, **235**: 117809[2023-10-20]. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117809.
- [12] MOOSAVI V, KHADEMI ESLAM H, BAZYAR B, *et al.* Bending creep behavior of Hornbeam wood [J]. *Drvna Industrija*, 2016, **67**(4): 341 – 350.
- [13] HSIEH T Y, CHANG F C. Effects of moisture content and temperature on wood creep [J]. *Holzforschung*, 2018, **72**(12): 1071 – 1078.
- [14] 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.
- [15] 刘一星, 赵广杰. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
LIU Yixing, ZHAO Guangjie. *Wood Science*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2012.
- [16] 王聪, 吴强, 林鹏, 等. 不同纹理方向柎木微小无疵试样板材蠕变特性[J]. 林业科学, 2018, **54**(4): 76 – 83.
WANG Cong, WU Qiang, LIN Peng, *et al.* Orthotropic creep performance of small flawless oak board [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, **54**(4): 76 – 83.
- [17] 杨小军. 热处理对实木地板尺寸稳定性影响的研究[J]. 林业和草原机械, 2004(6): 18 – 19.
YANG Xiaojun. Influence of thermal treatment upon dimensional stability of solid wood floors [J]. *Forestry and Grassland Machinery*, 2004(6): 18 – 19.

- [18] 彭辉, 蒋佳荔, 吕建雄, 等. 杉木正交异向蠕变行为的时温等效性[J]. *林业科学*, 2021, **57**(1): 153 – 160.
PENG Hui, JIANG Jiali, LÜ Jianxiong, *et al.* Time-temperature superposition in Chinese fir orthotropic creep response [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, **57**(1): 153 – 160.
- [19] CHANG Fengcheng, LAM F. Effects of temperature-induced strain on creep behavior of wood-plastic composites [J]. *Wood Science and Technology*, 2018, **52**(5): 1213 – 1227.
- [20] FURUTA Y, NAKJIMA M, NAKANII E, *et al.* The effects of lignin and hemicellulose on thermal-softening properties of water-swollen wood [J]. *Wood Science and Technology*, 2010, **56**(3): 132 – 138.
- [21] TJEERDSMA B F, MILITZ H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood [J]. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2005, **63**(2): 102 – 111.
- [22] BOONSTRA M. *A Two-Stage Thermal Modification of Wood* [D]. Nancy: Henry Poincare University, 2008.
- [23] HILLIS W E. High temperature and chemical effects on wood stability [J]. *Wood Science and Technology*, 1984, **18**: 281 – 293.
- [24] 齐华春, 程万里, 刘一星. 高温高压过热蒸汽处理木材的力学特性及化学成分变化[J]. *东北林业大学学报*, 2005, **33**(3): 44 – 46.
QI Huachun, CHENG Wanli, LIU Yixing. Mechanical characteristics and chemical compositions of superheated steam-treated wood under high temperature and pressure [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, **33**(3): 44 – 46.
- [25] 陈国荣. 弹性力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2005.
CHEN Guorong. *Elasticity* [M]. Nanjing: Hehai University Press, 2005.