

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240277

不同温度、载荷下应压木和正常木的拉伸蠕变特性

李珠 蒋佳荔 吕建雄

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要:【目的】探究马尾松应压木和正常木的拉伸蠕变特性对温度和载荷的响应规律,旨在为马尾松木材的高附加值利用提供数据参考和基础理论依据。【方法】以应压木和正常木早材组织切片为研究对象,分别采用X射线衍射仪和动态力学分析仪测定试材的微纤丝角和拉伸应力-应变曲线;在50~170℃范围内,利用动态力学分析仪分别获得3个应力水平和不同恒定温度水平下应压木和正常木的拉伸蠕变曲线。【结果】与正常木相比,应压木的基本密度、微纤丝角、拉伸应变、拉伸蠕变柔量和最终残余应变均较大,而拉伸应力和弹性模量较小。应压木或正常木的瞬时应变均略大于瞬时应变恢复应变。应压木与正常木试样的瞬时应变、瞬时应变恢复量、60 min蠕变应变量和30 min蠕变恢复量均分别随温度、施加载荷的增大而增加;最终残余应变随温度升高而增加,而对施加载荷的响应无明显规律。在50~170℃范围内,单位应力增加引起应压木与正常木试样的瞬时应变增加量分别为0.063%~0.076%和0.016%~0.020%,拉伸黏弹变形增加量分别为0.078%~0.095%和0.019%~0.028%。【结论】与正常木相比,单位应力对应压木的拉伸瞬时应变和黏弹变形增加量影响更为明显,应压木中较大的微纤丝角导致其抵抗外力变形的能力较弱。升高温度加剧了单位应力对应压木与正常木瞬时应变和拉伸黏弹变形的影响。

关键词: 拉伸应变; 蠕变; 载荷; 应力; 黏弹性; 马尾松; 应压木

中图分类号: S781 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2024)12-0138-08

引文格式: 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 Zhu, Jiang Jiali, Lü Jianxiong. 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.

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

Li Zhu Jiang Jiali Lü Jianxiong

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] This research was carried to explore the difference in tensile creep behavior between compression wood (CW) and normal wood (NW) from masson pine (*Pinus massoniana*) under different temperature and load levels, aiming to provide the data reference and theoretical basis for high value-added utilization of plantation wood. [Method] The tissue sections of earlywood (EW) between CW and NW were used as research objects, and the microfibril angle (MFA) and tensile stress-strain curve were characterized by X-ray diffraction and dynamic mechanical analyzer, respectively. Dynamic mechanical analyzer was also used to determine tensile creep for CW and NW specimens in the temperature range of 50 to 170 °C and at three stress levels. [Result] Compared with NW, the basic density, MFA, tensile strain, creep compliance and creep strain at stable stage of CW were larger, while the tensile stress and modulus of elasticity were smaller. The instantaneous strain of CW or NW specimens was slightly higher than instantaneous recovery strain. The instantaneous strain, instantaneous recovery strain, 60 min creep strain,

收稿日期: 2024-08-26 修回日期: 2024-10-10

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2023MA019), 科技创新 2030—重大项目课题(2023ZD0405905)。

第一作者: 李珠, 博士, 助理研究员。主要研究方向: 木材黏弹性。Email: lizhu@caf.ac.cn 地址: 100091 北京市海淀区香山南路东小府1号林科院木工所。

责任作者: 蒋佳荔, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 木材物理。Email: jialiwood@caf.ac.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

and 30 min creep recovery of CW and NW specimens increased with increasing temperature and stress level, respectively. Furthermore, the creep strain at stable stage increased with increasing temperature, while its response to load level was not obvious. In the temperature range from 50 to 170 °C, the increase of instantaneous strain caused by per unit stress for CW and NW was 0.063%–0.076% and 0.016%–0.020%, respectively. And the increase of creep strain in 60 min caused by per unit stress for CW and NW was 0.078%–0.095% and 0.019%–0.028%, respectively. [Conclusion] Compared with NW, per unit stress shows obvious influence on the increase of tensile instantaneous strain and viscoelastic deformation, and CW with larger MFA has less ability to resist external deformation. The increasing temperature intensifies the effect of per unit stress on instantaneous strain and tensile viscoelastic deformation for NW and CW specimens.

Key words: tensile strain; creep; loads; stresses; viscoelasticity; masson pine; compression wood

当木材顺纹拉伸时,其细胞壁层内的变形主要包括了纤维素分子链沿长度方向上伸长变形^[1],纤维素与 Matrix(半纤维素和木质素)之间的剪切滑移变形^[2],以及垂直于纤维长度方向上的变形^[3]。木材细胞壁的变形随时间延长而逐渐增大,即产生宏观的蠕变现象。木材蠕变是影响木制品或木质工程构件质量及结构设计安全性的一个关键特性。因此,研究木材拉伸蠕变特性,对深入认识木材拉伸力学性质,进而为木材高附加值利用提供数据参考和基础理论依据。

在拉伸变形过程中,细胞壁是木材的实际承载结构^[4],其壁层中微纤丝角是影响拉伸力学的决定因素之一^[5]。Roszyk^[5]等研究了微纤丝角对欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)拉伸蠕变的影响,结果表明:微纤丝角在 10°~18°之间,试样的拉伸蠕变变形与微纤丝角之间呈线性正相关;当微纤丝角高于 18°时,拉伸蠕变变形显著增加。与正常木相比,应压木具有微纤丝角大^[6]、管胞壁厚^[7]、纤维素含量低^[8]和木质素含量高^[9]等特征。应压木中较大的微纤丝角导致纤维素分子链长度方向的变形较小,但微纤丝与 Matrix 之间的剪切变形较大,进而造成应压木在拉伸过程中产生较大的屈服变形^[6];此外,应压木中木质素的排列定向性比正常木更为明显,应压木中木质素参与了轴向拉伸的应力传递,且木质素的贡献比例随着施加载荷的增加而增大^[7]。

除木材自身构造差异,环境的温湿度、施加载荷大小、含水率水平和状态等参数均会影响木材拉伸蠕变行为。随着测量温度升高,木材细胞壁中运动单元分子获得能量,分子链发生伸展或滑移,分子间作用力减弱,使得分子间的运动单元空间范围增大,宏观表现为拉伸蠕变速率增加,蠕变变形量增大。Engelund 等^[10]研究了不同温度水平(10、25 和 40 °C)下云杉(*Picea abies*)的拉伸蠕变特性,结果表明:温度水平对瞬时弹性变形的影响较大,而对拉伸蠕变

变形几乎无影响。邓彪等^[11]研究发现:在恒定的温度和含水率下,桉树(*Eucalyptus spp.*)的拉伸蠕变变形随着施加荷载的增加而增大,在较低荷载水平下拉伸蠕变曲线无明显加速蠕变阶段。截至目前,在细胞组织水平探究不同温度或应力水平对具有不同微纤丝角的应压木和正常木拉伸蠕变行为的影响规律鲜有报道。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南部地区的主要材用树种,在建筑、家具、纸浆等方面用途广泛。在正常木中,马尾松早晚材急变,而应压木中早材与晚材之间界限不明显,早晚材缓变。此外,马尾松早材在应压木和正常木中占比分别为 66% 和 79%^[12]。鉴于此,本研究以马尾松应压木与正常木早材组织切片为研究对象,考察试样在不同温度和应力水平下的拉伸蠕变行为,以期为马尾松木材合理加工和高效利用提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

20 年生马尾松,采自广西南宁林场。选择弯曲率最大部分的应压木,并截取其受拉侧第 7 个年轮的早材为试验材料,基本密度约为 0.58 g/cm³;正常木选择同一批造林的马尾松早材,基本密度约为 0.32 g/cm³。利用轮转式切片机(Leica RM2235)制得尺寸为 35 mm(轴向)×6 mm(弦向)×50 μm(径向)的无疵早材试样,将其置于两个载玻片之间,并放置于装有 P₂O₅ 的干燥器中,直至试样质量不再发生变化,测得全干材含水率约为 0.7%。全干材试样用于后续的微纤丝角和拉伸力学的测定。

1.2 微纤丝角测定

利用 X 射线衍射仪(D8 Advance)分别测试应压木与正常木早材的微纤丝角。试验前,使用胶纸将 50 μm 厚的试样轴向平行于测试台面固定在样品窗口上。主要参数设置:2θ = 22.14°,电压 40 kV,电流

40 mA, 扫描步进宽度 1.0°, 试样旋转角度范围 0° ~ 360°。用商用 Origin 软件对 X 射线吸收强度曲线进行双峰高斯拟合, 采用 0.6T 法计算试样的微纤丝角。试样重复数为 3 个, 结果取平均值。

1.3 拉伸应力-应变曲线测定

采用动态力学分析仪(DMA 2980)测定拉伸应力-应变曲线, 预张力为 0.01 N, 加载速率为 1 N/min, 加载至最大值 18 N, 获得应压木和正常木早材试样的轴向弹性模量。试样重复数为 3 个, 结果取平均值。

1.4 拉伸蠕变参数测定

采用动态力学分析仪测定试样拉伸蠕变, 拉伸夹具的上下夹持端头之间的跨距为 17 mm, 夹具的上紧力矩为 50 N·cm。为防止试样在蠕变测试过程中发生扭曲, 施加 0.01 N 的预张力。根据轴向拉伸应力-应变测试结果, 设置应压木的蠕变测试应力值分别为 3、6 和 9 MPa, 应压木试样分别命名为 CW-3、CW-6 和 CW-9; 正常木的蠕变测试应力值分别为 12、15 和 18 MPa, 正常木试样分别命名为 NW-12、NW-15 和 NW-18。应力施加时间为 60 min, 应力撤除后恢复时间为 30 min。在室温 30 °C 时, 仪器难以精确控制测试温度恒定; 此外, 当测试温度低于 180 °C 时, 试样表现出线性蠕变行为^[13]。因此, 本试验选择的温度范围为 50 ~ 170 °C, 测定 7 个恒定温度水平(50、70、90、110、130、150 和 170 °C)下应压木与正常木试样的拉伸蠕变行为。

2 结果与分析

2.1 微纤丝角

应压木早材的微纤丝角范围为 34.50° ~ 35.87°, 均值为 35.34°; 正常木早材的微纤丝角范围为 16.96° ~ 21.08°, 均值为 19.81°(图 1)。可知, 应压木早材的微纤丝角大于正常木, 约为其 1.78 倍。

2.2 拉伸力学性能

应压木与正常木的早材拉伸弹性模量值分别为 1 164 和 2 680 MPa; 当加载至最大力 18 N 时, 应压木与正常木早材的应力值分别为 15.97 和 19.38 MPa; 应变分别为 1.47% 和 0.65%(表 1)。在相同载荷作用下, 应压木早材的应力小于正常木, 而其拉伸变形大于正常木^[14]。与正常木相比, 应压木较大的微纤

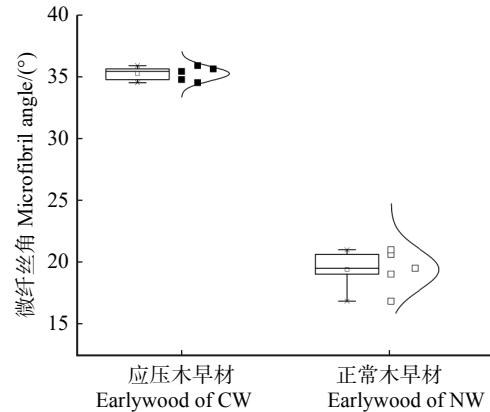


图 1 马尾松应压木(CW)和正常木(NW)早材试样微纤丝角的箱线-正态图

Fig. 1 Boxplots of microfibril angle of earlywood between compression wood (CW) and normal wood (NW) from masson pine

丝角使得沿微纤丝方向的应力分量较小, 进而导致 Matrix 对细胞轴向拉伸变形的约束力减弱; 微纤丝与 Matrix 之间更容易发生剪切滑移, 从而造成应压木的拉伸变形更大^[7]。一般而言, 试样的拉伸弹性模量与其密度呈正相关关系, 而与细胞壁 S₂ 层的微纤丝角呈负相关关系。马尾松应压木早材的基本密度和微纤丝角均大于正常木。此外, 应压木早材的拉伸弹性模量小于正常木, 约为正常木的 43%(表 1), 这表明较大的微纤丝角是引起应压木拉伸弹性模量较低的主要原因。

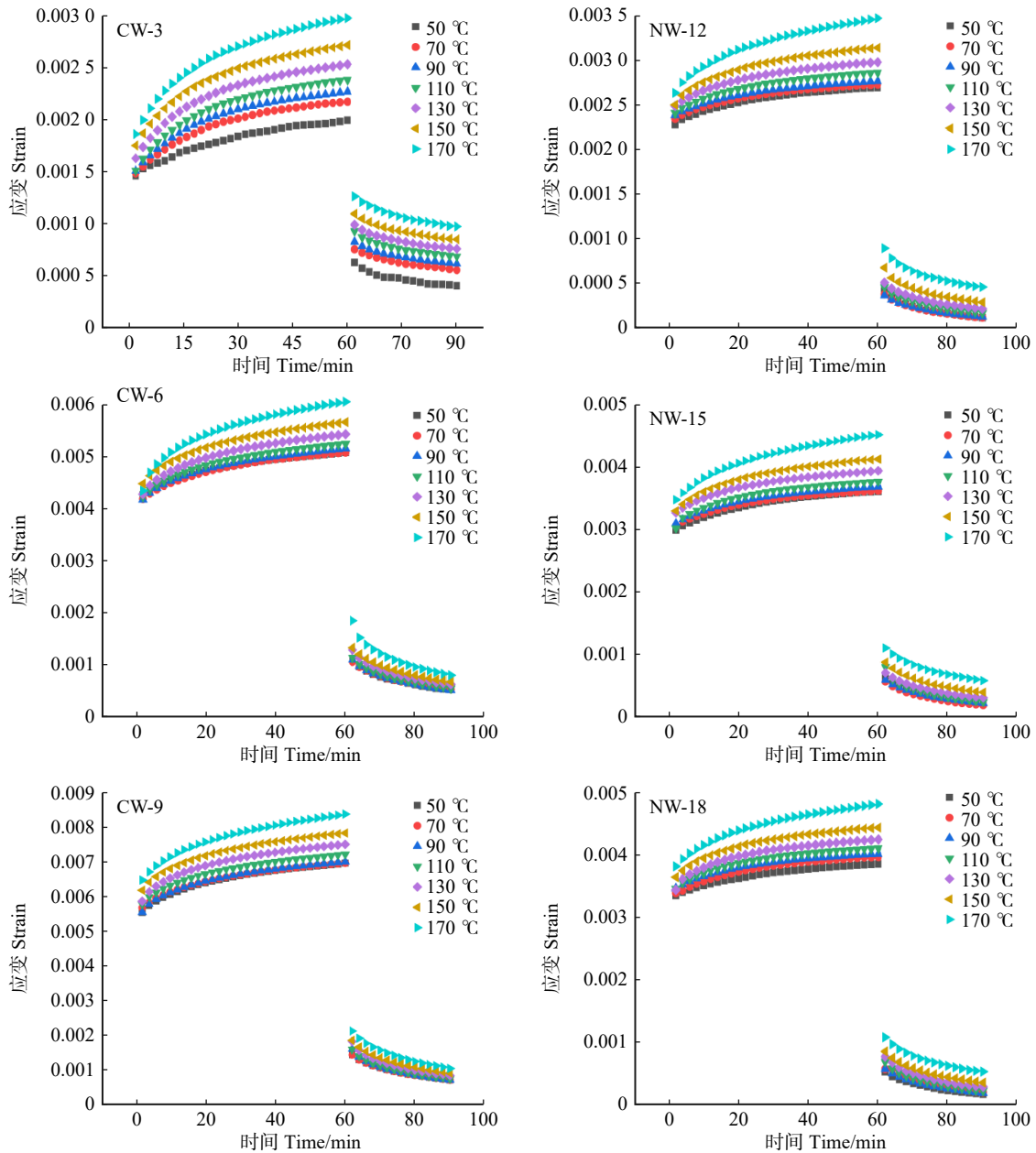
2.3 温度对拉伸蠕变的影响

无论是应压木还是正常木, 试样的瞬时弹性应变值均较为接近(图 2)。受到恒定外载应力作用时, 木材发生的瞬时弹性应变主要是细胞壁中纤维素微纤丝弹性变形和纤维素与 Matrix 间的剪切滑移变形^[1]。随着测量温度升高, 应压木与正常木的 60 min 短期蠕变应变值均随之增大(图 2)。木材细胞壁中运动单元分子随着温度升高而获得能量, 使其由基态向激发态跃迁, 细胞壁中分子链发生伸展或滑移, 分子间作用力减弱, 使得分子间的运动单元空间范围增大, 宏观表现为拉伸蠕变变形增大^[15]。此外, 温度升高使得细胞壁中纤维素微纤丝发生热膨胀, 纤维素分子间的内聚力降低, 进而导致木材试样拉伸蠕变现象更为明显^[16]。应压木与正常木的最终残余应变均随温度升高而增加。

表 1 马尾松应压木和正常木早材试样拉伸力学参数

Tab. 1 Tensile mechanical parameters of earlywood between CW and NW from masson pine

试样 Specimen	拉伸弹性模量 Tensile elastic modulus		应力 Stress		应变 Strain	
	均值 Mean value/MPa	CV/%	均值 Mean value/MPa	CV/%	均值 Mean value/%	CV/%
应压木早材 Earlywood of CW	1 164	10.98	15.97	0.30	1.47	14.65
正常木早材 Earlywood of NW	2 680	5.06	19.38	1.66	0.65	7.53



CW-3、CW-6 和 CW-9 分别代表蠕变应力值 3、6 和 9 MPa 的应压木。NW-12、NW-15 和 NW-18 分别代表蠕变应力值 12、15 和 18 MPa 的正常木。下同! CW-3, CW-6, and CW-9 represent compressive wood with creep stress values of 3, 6, and 9 MPa, respectively. NW-12, NW-15, and NW-18 represent normal wood with creep stress values of 12, 15, and 18 MPa, respectively. The same below!

图 2 不同温度水平下应压木和正常木早材试样拉伸蠕变曲线

Fig. 2 Tensile creep curves of earlywood between CW and NW at different temperature levels

为进一步探究试样拉伸蠕变行为对温度的响应规律, 排除对应压木和正常木施加载荷不一的影响, 绘制出应压木与正常木早材的拉伸蠕变柔量与时间的变化曲线。随着温度升高, 应压木与正常木的拉伸蠕变柔量均随之增大(图 3)。当温度从 50 °C 升高至 170 °C 时, CW-3、CW-6、CW-9、NW-12、NW-15 和 NW-18 试样的 60 min 拉伸蠕变柔量分别从 661、846、768、223、239 和 214 $\mu\text{m}^2/\text{N}$ 增加至 983、1 011、930、288、300 和 267 $\mu\text{m}^2/\text{N}$ 。与正常木相比, 马尾松应压木的拉伸蠕变柔量较大。应压木与正常木早材的拉伸蠕变柔量均随测量温度升高而增大。

应压木和正常木试样在 50 °C 时拉伸蠕变柔量的均值分别为 758 和 225 $\mu\text{m}^2/\text{N}$, 应压木的 60 min 拉伸蠕变柔量约为正常木试样的 3.4 倍。结合密度和微纤丝角的测定数据可知, 具有较大微纤丝角的应压木抵抗外力变形的能力较弱, 导致其拉伸蠕变柔量较大。这表明微纤丝角是影响试样拉伸蠕变柔量的主要因素。

试样的瞬时应变和瞬时应变恢复均随温度升高而略有增大(图 4)。无论是应压木或正常木, 试样的瞬时应变略大于瞬时应变恢复, 与尹业桥等^[16]对栎木(*Quercus* spp.)和王聪等^[17]对白栎(*Quercus fabri*)

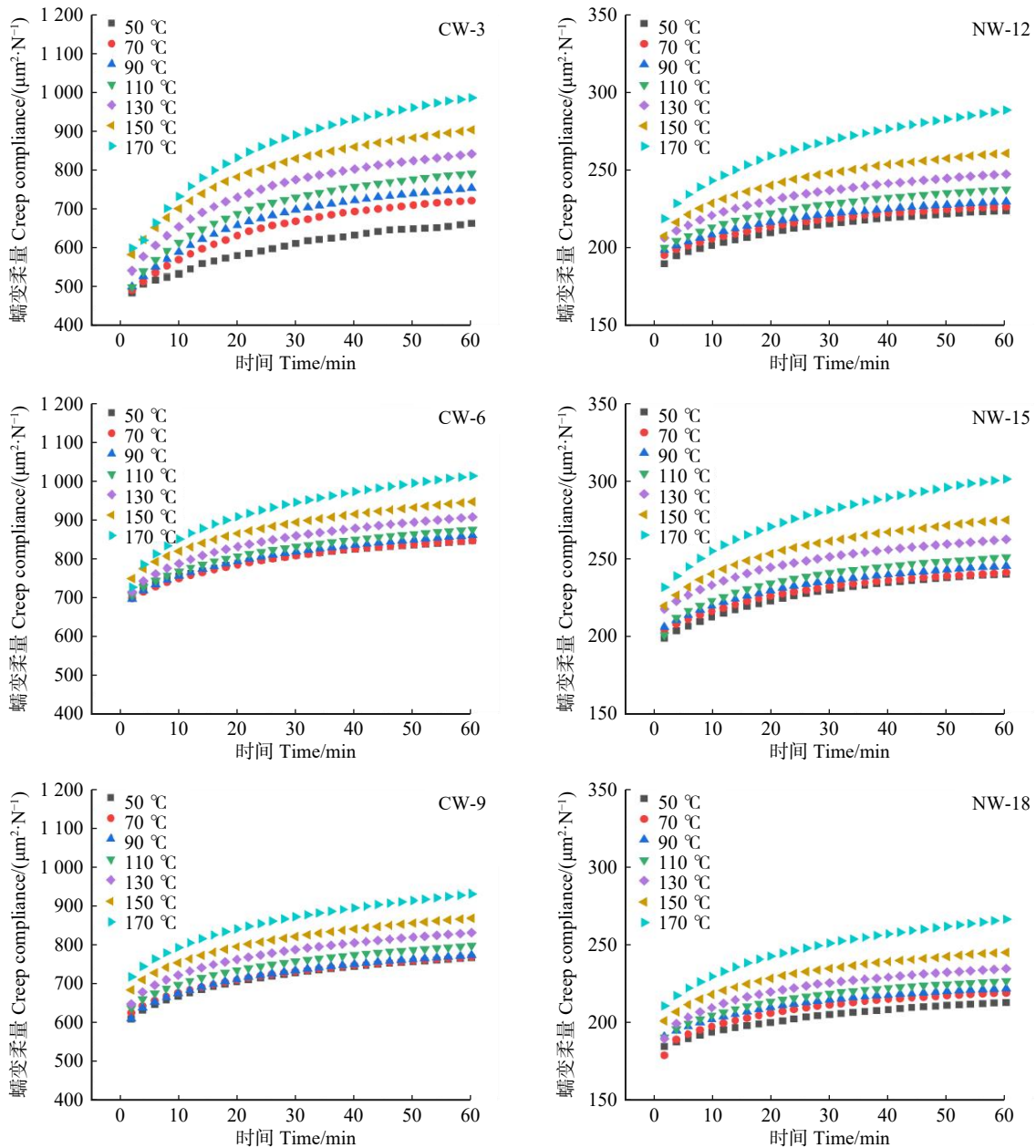


图3 不同温度水平下应压木和正常木早材试样拉伸蠕变柔量

Fig. 3 Tensile creep compliance of EW between CW and NW at different temperature levels

在不同温度水平测得结果相一致。当温度从 50 °C 升高至 170 °C 时, CW-3、CW-6、CW-9、NW-12、NW-15 和 NW-18 试样的 60 min 短期蠕变应变分别从 1.99×10^{-3} 、 5.07×10^{-3} 、 6.92×10^{-3} 、 2.68×10^{-3} 、 3.60×10^{-3} 和 3.84×10^{-3} 升高至 2.94×10^{-3} 、 6.04×10^{-3} 、 8.32×10^{-3} 、 3.46×10^{-3} 、 4.51×10^{-3} 和 4.80×10^{-3} (图 4)。随着温度升高,木材细胞壁中运动单元分子获得热能量,分子链发生伸展或滑移,分子间作用力减弱,宏观表现为拉伸蠕变变形增大^[18]。与正常木相比,马尾松应压木的 60 min 蠕变应变较大。在测定温度范围内,应压木与正常木试样的 30 min 短期蠕变恢复量随温度升高而增大(图 4)。应压木与正常木的最终残余应变均随温度升高而增加,在任一温度水平下,与正常木相比,应压木试样的最终

残余应变较大(图 4),这可能与应压木具有较大的微纤丝角和较多的木质素含量有关^[19]。

2.4 载荷对拉伸蠕变的影响

应压木或正常木试样的瞬时弹性应变,60 min 蠕变应变和瞬时应变恢复量均随着施加应力的增大而增加(图 5)。当应力撤除后,弹性变形基本恢复,木材细胞壁中伸展/卷曲的分子链重新卷曲/伸展,因此,试样的瞬时弹性应变和瞬时应变恢复量与应力水平成正相关。应压木 CW-3、CW-6 和 CW-9 试样的 30 min 蠕变恢复应变分别为 0.22×10^{-3} 、 0.58×10^{-3} 和 0.72×10^{-3} ;正常木 NW-12、NW-15 和 NW-18 试样的 30 min 蠕变恢复应变分别为 0.30×10^{-3} 、 0.41×10^{-3} 和 0.36×10^{-3} (图 5)。应压木的 30 min 蠕变恢复应变随着施加应力的增大而增加,而正常木

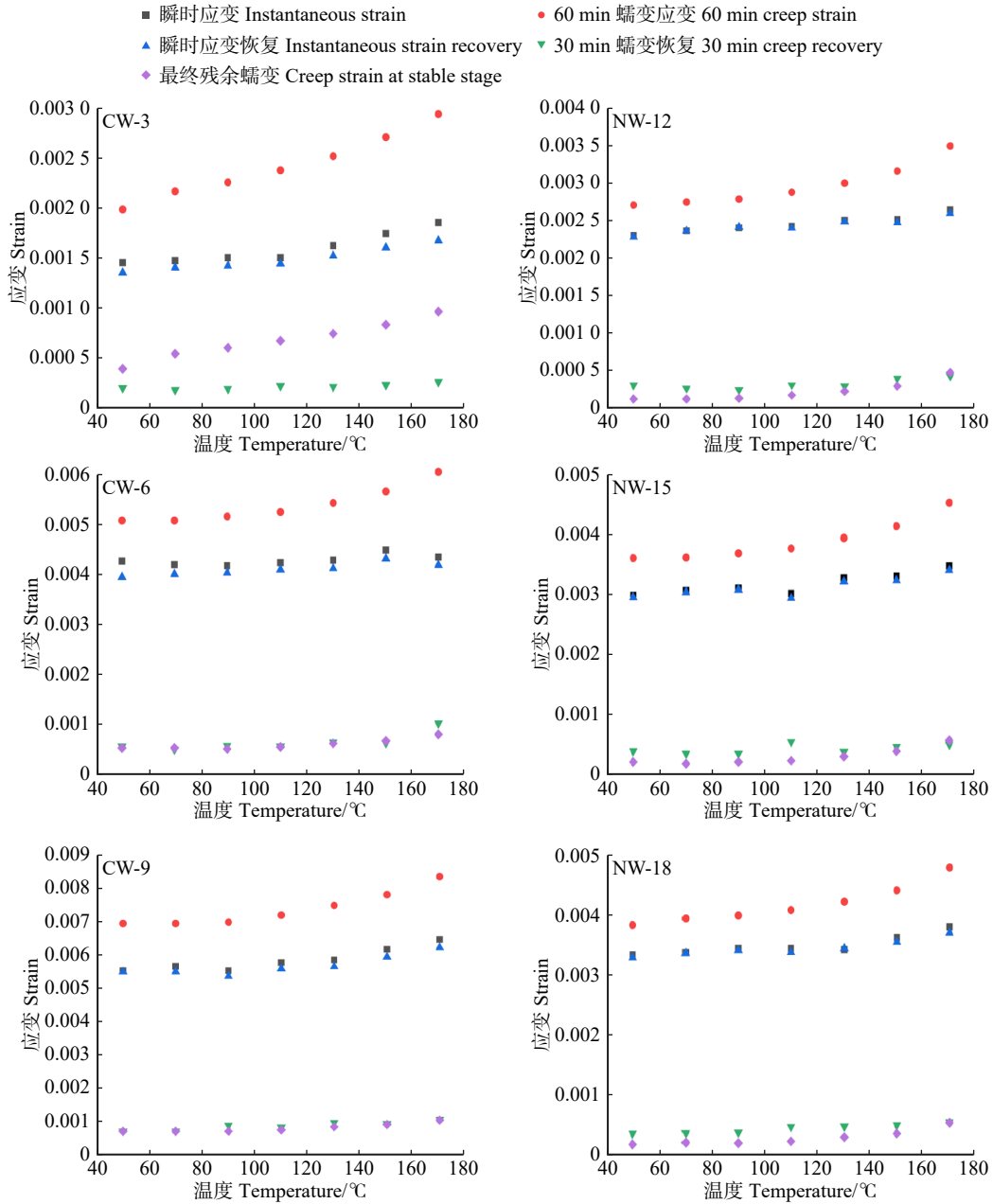


图 4 不同温度水平下应压木和正常木早材试样拉伸蠕变参数

Fig. 4 Tensile creep parameters of EW between CW and NW at different temperature levels

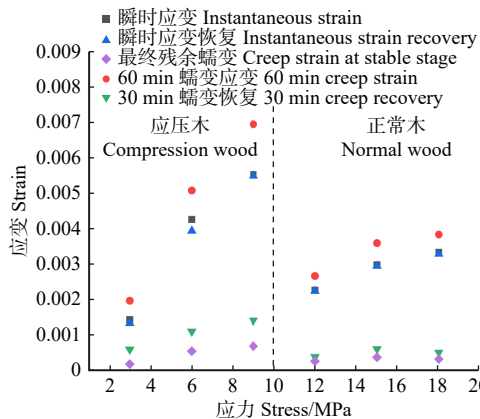


图 5 不同应力水平下应压木和正常木早材试样拉伸蠕变参数(50 °C)

Fig. 5 Tensile creep parameters of EW between CW and NW at different stress levels at 50 °C

的 30 min 蠕变恢复应变对应力响应无明显规律 (图 5)。此外, 试样最终残余应变对施加载荷的响应无明显规律。

在任一温度水平下, 应压木或正常木试样的瞬时弹性应变, 60 min 蠕变应变和瞬时应变恢复量均随着施加应力的增大而增加; 应压木和正常木试样的最终残余应变对施加载荷的响应无明显规律 (图 6)。当木材受到外部拉伸载荷作用时, 其细胞壁层内纤维素分子链逐渐伸展/卷曲, 纤维素与 Matrix 之间发生剪切滑移。当应力撤除后, 弹性变形基本恢复, 而细胞壁胞间层发生一定程度的剪切滑移, 产生不可逆变形, 进而产生最终残余应变^[20]。

为进一步探究施加载荷水平对应压木和正常木

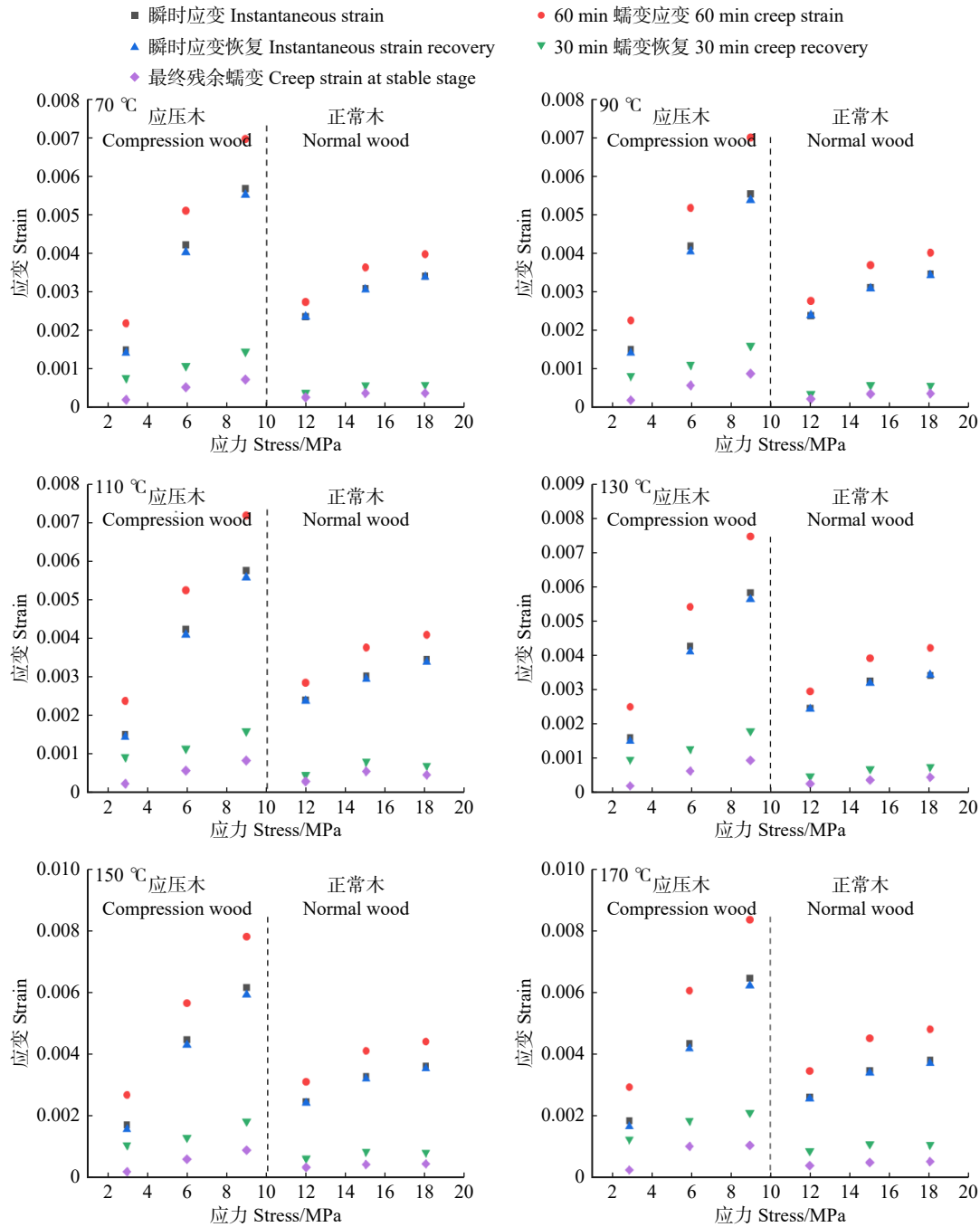


图6 不同应力水平下应压木和正常木早材试样拉伸蠕变参数(70~170 °C)

Fig. 6 Tensile creep parameters of EW between CW and NW at different stress levels in the temperature range of 70 to 170 °C

早材试样的瞬时弹性应变或 60 min 蠕变应变的影响, 将施加载荷的应力值与瞬时应变或 60 min 蠕变应变进行线性拟合分析。在 50、70、90、110、130、150 和 170 °C 温度水平下单位应力引起应压木的瞬时应变增加量分别为 0.063%、0.069%、0.067%、0.071%、0.070%、0.073% 和 0.076%; 单位应力引起正常木的瞬时应变增加量分别为 0.018%、0.017%、0.018%、0.018%、0.016%、0.019% 和 0.020%。与正常木相比, 单位应力对应压木瞬时应变增加量影响更为明显。随着测量温度的升高, 单位应力引起试样的瞬时应变增加量均增大, 表明升高温度加剧了

单位应力对试样瞬时应变的影响。在 50、70、90、110、130、150 和 170 °C 温度水平下单位应力引起应压木的 60 min 蠕变应变增加量分别为 0.082%、0.079%、0.078%、0.080%、0.082%、0.085% 和 0.095%; 单位应力引起正常木的瞬时应变增加量分别为 0.019%、0.021%、0.021%、0.021%、0.021%、0.022% 和 0.028%。与正常木相比, 单位应力对应压木拉伸黏弹变形增加量影响更为明显。随着测量温度的升高, 单位应力引起试样的 60 min 蠕变应变增加量均增大, 表明升高温度也同样加剧了单位应力对拉伸黏弹变形的影响。

3 结 论

本研究以马尾松应压木和正常木为研究对象, 从细胞组织层面探究早材拉伸蠕变行为对温度和载荷的响应规律。研究得到以下主要结论。

(1) 马尾松应压木和正常木早材的微纤丝角分别为 35.34° 和 19.81° 。应压木和正常木早材的拉伸弹性模量分别为 1 164 和 2 680 MPa, 而应压木拉伸应变 (1.47%) 约为正常木 (0.65%) 的 2.3 倍。应压木较大的微纤丝角是引起其拉伸弹性模量较低的主要原因。

(2) 应压木与正常木试样的瞬时应变、瞬时应变恢复量、60 min 蠕变应变和最终残余应变均随温度水平增加而增大。无论是应压木或正常木, 试样的瞬时应变略大于瞬时应变恢复应变。与正常木相比, 应压木的拉伸蠕变柔量和最终残余应变均较大。

(3) 试样的瞬时应变、瞬时应变恢复量和 60 min 蠕变应变均随施加载荷增大而增加; 最终残余应变对施加载荷的响应无明显规律。在 $50 \sim 170^\circ\text{C}$ 范围内, 单位应力增加引起应压木与正常木试样的瞬时应变增加量分别为 $0.063\% \sim 0.076\%$ 和 $0.016\% \sim 0.020\%$, 拉伸黏弹变形增加量分别为 $0.078\% \sim 0.095\%$ 和 $0.019\% \sim 0.028\%$ 。与正常木相比, 单位应力对应压木拉伸瞬时应变或黏弹变形增加量影响更为明显。升高温度加剧了单位应力对应压木与正常木瞬时应变和拉伸黏弹变形的影响。

本研究考察了应压木和正常木的拉伸蠕变特性对温度和载荷的响应差异, 量化了单位应力对拉伸瞬时弹性形变和黏弹形变的影响规律, 对促进应压木的开发利用具有一定的理论价值和现实意义。

参 考 文 献

- [1] Stevanic J S, Salmén L. Molecular origin of mechano-sorptive creep in cellulosic fibres[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 230: 115615.
- [2] Salmén L, Stevanic J S, Olsson A M. Contribution of lignin to the strength properties in wood fibres studied by dynamic FTIR spectroscopy and dynamic mechanical analysis (DMA)[J]. Holzforschung, 2016, 70(12): 1155–1163.
- [3] Peng H, Salmén L, Stevanic J S, et al. Structural organization of the cell wall polymers in compression wood as revealed by FTIR microspectroscopy[J]. Planta, 2019, 250(1): 163–171.
- [4] Salmén L, Bergström E. Cellulose structural arrangement in relation to spectral changes in tensile loading FTIR[J]. Cellulose, 2009, 16: 975–982.
- [5] Roszyk E, Mania P, Moliński W. The influence of microfibril angle on creep of Scotch pine wood under tensile stress along the grains[J]. Wood Research, 2012, 57(3): 347–358.
- [6] 王东, 林兰英, 傅峰, 等. 傅里叶变换红外光谱研究拉伸过程中应压木主要化学组分的响应规律[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(11): 3585–3589.
Wang D, Lin L Y, Fu F, et al. Chemical construction changes of compression wood main components in longitudinal tension by the FTIR analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(11): 3585–3589.
- [7] Peng H, Salmén L, Jiang J L, et al. Creep properties of compression wood fiber[J]. Wood Science and Technology, 2020, 54: 1497–1510.
- [8] Purusatama B D, Choi J K, Lee S H, et al. Microfibril angle, crystalline characteristics, and chemical compounds of reaction wood in stem wood of *Pinus densiflora*[J]. Wood Science and Technology, 2020, 54(1): 123–137.
- [9] 李珠, 殷方宇, 蒋佳荔, 等. 杉木应压木和对应木的水分吸附特性比较研究[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(5): 37–42.
Li Z, Yin F Y, Jiang J L, et al. Comparative studies on water vapor sorption characteristics between compression wood and opposite wood of Chinese fir[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(5): 37–42.
- [10] Englund E T, Salmén L. Tensile creep and recovery of Norway spruce influenced by temperature and moisture[J]. Holzforschung, 2012, 66(8): 959–965.
- [11] 邓彪, 罗迎社, 李贤军, 等. 荷载、含水率及温度对桉树木材抗弯蠕变性能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(5): 142–131.
Deng B, Luo Y S, Li X J, et al. Effects of load, moisture content and temperature on flexural creep behavior of *Eucalyptus*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(5): 142–131.
- [12] 林金星, 李正理. 马尾松正常木与应压木的比较解剖[J]. 植物学报, 1993, 35(3): 201–205.
Lin J X, Li Z L. Comparative anatomy of normal wood and compression wood of masson pine (*Pinus massoniana*)[J]. Acta Botanica Sinica, 1993, 35(3): 201–205.
- [13] Wang J F, Wang X, He Q, et al. Time-temperature-stress equivalence in compressive creep response of Chinese fir at high-temperature range[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117809.
- [14] Li Z, Zhan T Y, Eder M, et al. Comparative studies on wood structure and microtensile properties between compression and opposite wood fibers of Chinese fir plantation[J]. Journal of Wood Science, 2021, 64(1): 12.
- [15] Hou J F, Jiang Y Q, Yin Y Q, et al. Experimental study and comparative numerical modeling of creep behavior of white oak wood with various distributions of earlywood vessel belt[J]. Journal of Wood Science, 2021, 67(1): 57.
- [16] 尹业桥, 侯俊峰, 姜志宏, 等. 早材管孔分布对环孔材柃木蠕变特性的影响[J]. 林业工程学报, 2021, 6(3): 54–60.
Yin Y Q, Hou J F, Jiang Z H, 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.
- [17] 王聪, 吴强, 林鹏, 等. 不同纹理方向柃木微小疵试样板材蠕变特性[J]. 林业科学, 2018, 54(4): 76–83.
Wang C, Wu Q, Lin P, et al. Orthotropic creep performance of small flawless oak board[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(4): 76–83.
- [18] Peng H, Zhan T Y, Jiang J L, et al. Comparison of the time-moisture and time-temperature equivalences in the creep properties of Chinese fir[J]. Wood Material Science & Engineering, 2022, 17(6): 911–917.
- [19] 蔡绍祥, 李延军, 王思群, 等. 马尾松木材轴向管胞细胞壁黏弹性变异研究[J]. 林产工业, 2021, 58(11): 1–7.
Cai S X, Li Y J, Wang S Q, et al. Study on the variation of viscoelasticity of cell wall of masson pine tracheid at axial direction[J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(11): 1–7.
- [20] Keckes J, Burgert I, Klaus F, et al. Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood[J]. Nature Materials, 2003, 2(12): 810–814.

(责任编辑 吴娟
责任编委 曹金珍)