



杉木胶合木湿应力研究

岳孔, 宋旭磊, 程秀才, 赖延军, 贾翀, 陆伟东, 刘伟庆

引用本文:

岳孔, 宋旭磊, 程秀才, 等. 杉木胶合木湿应力研究[J]. 林业工程学报, 2019, 4(4): 35-40.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2019.04.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杨木和杉木横纹抗拉强度的含水率依存性

Moisture dependence of the tensile strength perpendicular to grain of poplar and Chinese fir
林业工程学报. 2019, 4(5): 34-39 <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2019.05.005>

木材干燥后养生期间含水率及应力变化特点

The study of moisture content and inner stress variation of kiln-dried wood during equalization treatment
林业工程学报. 2016, 1(2): 38-43 <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2016.02.007>

以杉木纵横交错层积材为基材的地热地板研制

Development of electrical heated wood flooring using cross-laminated Chinese fir as core layer
林业工程学报. 2015, 29(4): 75-78 <https://doi.org/10.13360/j.issn.1000-8101.2015.04.018>

进口辐射松木材主要物理性能径向变异研究

Study on radial variation of main physical properties of imported Pinus radiata wood
林业工程学报. 2019, 4(6): 48-53 <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2019.06.007>

杉木目测等级规格材足尺抗压和拉伸强度的设计值研究

Design values of compressive and tensile strength for visually graded Chinese fir dimension lumber
林业工程学报. 2017, 2(2): 22-27 <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2017.02.004>

杉木胶合木湿应力研究

岳孔¹, 宋旭磊¹, 程秀才², 赖延军¹, 贾舛³, 陆伟东¹, 刘伟庆¹

(1. 南京工业大学土木工程学院, 南京 211800; 2. 南京市产品质量监督检验院, 南京 210019;
3. 南京林业大学材料科学与工程学院, 南京 210037)

摘要:为揭示环境湿度变化引起的木材含水率非均匀性分布对胶合木构件内部湿应力的影响规律, 从材料层面测试了变湿度条件下 290 个国产杉木木材的平衡含水率, 以及横纹径向和横纹弦向干缩性、湿胀性、水分扩散系数、抗拉强度和弹性模量等物理力学性能参数, 并从理论层面利用有限元模拟分析周期性变湿度条件下层板厚度对杉木胶合木湿应力的影响。研究结果表明: 利用 Nelson 方程能够较好地拟合变湿度中杉木的平衡含水率; 杉木横纹径向干缩和湿胀性均小于横纹弦向, 横纹径向水分扩散系数、抗拉强度和弹性模量均高于横纹弦向, 这决定于横纹径向排列的木射线以及管胞径壁上大量纹孔导致的实质物质减少的微观构造; 减小层板厚度有助于降低胶合木湿应力, 当层板厚度由 40 mm 降至 20 mm 时, 构件内部最大湿应力降低 19.32%, 但其最大值仍高于木材横纹抗拉强度, 湿应力的降低程度不足以避免构件的横纹开裂; 木结构工程设计和应用中必须考虑其他有效的方法减小湿应力以避免木材横纹开裂。

关键词:杉木; 胶合木; 湿应力; 平衡含水率; 微观构造

中图分类号: TU366 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1359(2019)04-0035-06

Study on moisture stresses in Chinese fir glued laminated timber

YUE Kong¹, SONG Xulei¹, CHENG Xiucui², LAI Yanjun¹, JIA Chong³, LU Weidong¹, LIU Weiqing¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China; 2. Nanjing Institute of Product Quality Inspection, Nanjing 210019, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: It is well known that stresses caused by different moisture contents of wood affect the strength and stiffness, which influences the loading capability and durability of wood components in wooden structures. The influence of non-uniformly distributing moisture content of wood caused by varying relative humidity in the surrounding environment on moisture stress in glued laminated timber was examined and analyzed by the experimental tests and theoretical simulation in this study. A total of 290 Chinese fir wood specimens was tested to determine the influence of varying relative humidity on wood physical and mechanical properties, including equilibrium moisture content, perpendicular-to-grain tangential shrinkage, perpendicular-to-grain tangential swelling, perpendicular-to-grain radial shrinkage, perpendicular-to-grain radial swelling, perpendicular-to-grain tangential moisture diffusivity coefficient, perpendicular-to-grain radial moisture diffusivity coefficient, perpendicular-to-grain radial tensile strength, perpendicular-to-grain tangential tensile strength, perpendicular-to-grain radial modulus of elasticity, and perpendicular-to-grain tangential modulus of elasticity. The influence of laminae thickness on moisture stress in glued laminated timber manufactured with Chinese fir wood was simulated using the finite element method. The results showed that the equilibrium moisture content of Chinese fir in varying humidity could be simulated well using the conventional Nelson equation. The perpendicular-to-grain radial shrinkage and swelling properties of Chinese fir specimens were lower than the perpendicular-to-grain tangential ones, while the tangential moisture diffusivity coefficient, tensile strength and modulus of elasticity were higher than the radial ones, which were attributed to the microstructural characteristics, including wood rays and pits in radial cell walls. The reduction of laminae thickness led to a decrease in the moisture stress in glued laminated timber. When the thickness of laminate was reduced from 40 mm to 20 mm, the moisture stress decreased by 19.32%. However, the maximum moisture stress was still higher than the tensile strength, which might cause transverse fracture. Therefore, it was desired to use other additional effective methods in engineering timber design to reduce humidity stresses.

收稿日期: 2018-09-25 修回日期: 2019-01-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703501)。

作者简介: 岳孔, 男, 副研究员, 博士, 研究方向为现代木结构。E-mail: yuekong@njtech.edu.cn

Keywords: Chinese fir; glued laminated timber; moisture stress; equilibrium moisture content; microstructure

木构件暴露在外界环境中,会因为环境湿度的变化而发生水分迁移,从而产生含水率梯度。木材具有干缩湿胀各向异性,因此产生湿应力^[1]。由于木材横纹抗拉强度低,当内部湿应力高于其横纹抗拉强度时,发生横纹开裂,导致构件耐久性能下降和结构性能削弱,同时开裂引起火灾中构件受火比表面积增大,火灾隐患增加,因此在结构设计中应该尽量避免木构件横纹受拉^[2-3]。

近年来,随着木结构往大跨度、高层数方向发展,承重木构件截面尺寸不断增大,湿应力问题突出。Svensson等^[4]的研究表明木材吸湿和解吸会产生较大的湿应力。Jönsson等^[5]研究发现,木材内含水率梯度所致最大拉应力高于木材横纹抗拉强度。Liu等^[6]研究了温度、湿度和试件尺寸对干燥过程中榆木收缩应力的影响,结果表明,干燥过程中收缩应力逐渐增大,达到最大值后趋于稳定。战剑锋等^[7]对白桦干燥过程中的横纹干燥应力进行了研究,结果表明木材干燥开裂与变形为木材厚度方向收缩不均而产生的干燥应力与干燥应变所致。程曦依等^[8]研究了养生期间木材内部含水率、应变和应力的变化,结果表明对木材进行养生可降低其内应力。Gereke等^[9]的研究发现含水率变化导致内应力,并提出选用径切板层板、对外层施加压缩预应力等减小应力的措施。Angst等^[10]模拟了吸湿过程中胶合木横截面湿应力与时间关系,发现局部应力明显大于平均应力,其程度取决于层板的几何构造。陈旭等^[11]的模拟研究发现,胶合木内含水率的分布受环境温度影响小,其内应力主要取决于环境湿度。

为尽可能降低湿应力对胶合木结构性能的影响,笔者结合试验研究得到的杉木横纹物理力学指标,在Luikov^[12]传质基础上,利用ABAQUS有限元模拟了变湿度条件下层板厚度对胶合木湿应力的影响,研究结果可为木结构设计、构件加工和应用提供参考。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)锯材,锯材的厚度×宽度×长度为38 mm×140 mm×3.0 m,购自南京工大木结构科技有限公司,平均气干密度为350 kg/m³,平均年轮宽度为7 mm,初始含水率为11%~13%。

1.2 木材物理力学性能测试方法

参考文献[13]测定变湿度下木材平衡含水率。采用不同浓度的CaCl₂溶液,形成30%,50%,60%,70%,83%和90%共6种恒湿环境,试验在(22±1)℃恒温中进行。试件的厚度×宽度×长度(顺纹方向)分别为20 mm×20 mm×10 mm。每种环境下试件放置1个月后首次称质量,之后每隔1天称量所选试样1次,当最后两次称量之差不超过试样质量的0.5%时,再根据GB/T 1931—2009进行测试。每种环境重复试件数15个,总计90个。

参照GB/T 1932—2009《木材干缩性测定方法》和GB/T 1934.2—2009《木材湿胀性测定方法》,将烘至全干的试件平均分为4组,分别放入环境温度为(22±1)℃,湿度为30%,50%,70%和90%4种恒湿环境中,直至平衡,测定全干时和在一定湿度条件下平衡后的横纹径向和弦向尺寸,并计算试件从全干到某一湿度条件下的线湿胀率。每种环境下重复试件数量为15个,总计120个。

根据ASTM D143-14进行木材横纹径向和弦向的抗拉强度及弹性模量测定,试验前将横纹径向和弦向力学性能测试试件各分为4组,分别置于温度为(22±1)℃,湿度为30%,50%,70%和90%环境中,直至平衡,取出后立即进行试验。试验结束后按照GB/T 1931—2009立刻测定木材含水率。每种环境下重复试件数5个,总计40个。

根据ASTM E96/E96M-16扩散杯法测定木材横纹径向和弦向的水分扩散系数,试验环境温度为(22±1)℃,将横纹径向和弦向水分扩散系数测试试件各分为4组,分别放置在湿度为30%,50%,70%和90%4种环境中直至平衡,再将扩散杯置于85%湿度中,每24 h称量一次直至质量恒定。试验装置如图1。每种环境下重复试件数量为5个,总计40个。

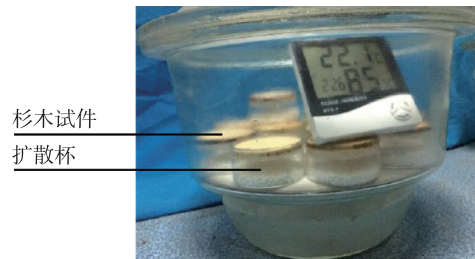


图1 水分扩散系数试验装置

Fig. 1 Set-up for moisture diffusion coefficient testing

1.3 湿应力有限元模拟方法

根据Luikov的传热传质耦合偏微分方程^[14]进

行模拟分析,并在 Luikov 模型基础上结合研究对象进行如下假定:

- 1) 单元材料为弹性变形,相同含水率变化量对应的干缩和湿胀变形相同;
- 2) 木材材质均匀,无木节等缺陷,初始状态时含水率分布均匀;
- 3) 胶合木层板间无水分传递,即胶缝对水分有阻隔作用;
- 4) 木材内传质满足 Fick 第二定律^[15];
- 5) 不考虑木材反复干缩湿胀疲劳应力下的强度衰减。

根据以上假定, Luikov 传质模型控制方程式(1)可简化为式(2)^[16]。

$$\rho C_m \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla(D_m \nabla u + \frac{D_m \delta}{C_m} \nabla T) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla(D_m \cdot \nabla u) \quad (2)$$

式中: ρ 为木材密度,kg/m³; C_m 为木材水分容量,表示单位质量全干木材中的水分含量,kg/kg; δ 为热梯度系数,kg/(kg·K); T 为温度,K; u 为木材含水率,%; D_m 为水分扩散系数,cm²/s; t 为时间,s。

根据文献[11],假定环境湿度以正弦规律在45%~85%范围内变化,变化周期 T 为 24 d,即 $R_H(t) = 0.65 + 0.2\sin \pi(t/12 + 1)$, $t=0\sim 48$ d。选取截面尺寸为 120 mm×360 mm,层板为弦切板的胶合木作为研究对象(图2)。

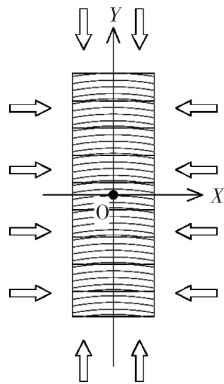


图2 胶合木水分传递方式

Fig. 2 Moisture diffusion mode in glulam

根据 GB 50005—2017《木结构设计标准》和 GB/T 50708—2012《胶合木结构技术规范》中对胶合木层板厚度的规定,选取 20,30 和 40 mm 共计 3 种厚度层板。由于胶合木常出现沿层板宽度方向的横纹开裂,因此参考文献[11]选取胶合木顶部最外层层板为测点对构件湿应力进行模拟分析。模拟采用 ABAQUS,模拟过程中所需木材平衡含水

率,以及木材横纹径向和弦向的抗拉强度、抗拉弹性模量、水分扩散系数和线湿胀率等材料属性参数由材性试验得到。对胶合木模型划分网格,指派单元类型 C3D8T,将构件截面宽度方向离散为 36 个单元、高度方向离散为 99 个单元,网格密度足以提供单元计算收敛。最终得到胶合木内含水率及湿应力分布规律,划分的网格结果如图3。

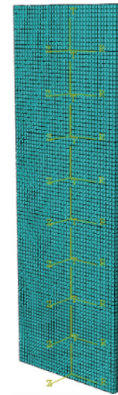


图3 胶合木截面有限元网格图

Fig. 3 Finite element mesh for cross section of glulam

2 结果与分析

2.1 环境湿度对木材物理性能的影响

研究表明^[17-18],恒温恒湿环境中木材平衡含水率可用 Nelson 方程表示,利用 Origin 对该方程中待定参数求解,杉木在 30%~90%湿度范围内的平衡含水率及拟合结果见图4和式(3)。

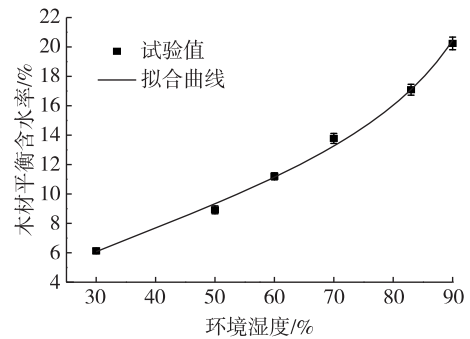


图4 环境湿度与木材平衡含水率关系曲线

Fig. 4 Relationship between equilibrium moisture content of Chinese fir and relative humidity

$$u = 36.215 \times [1 - 0.1632 \times \ln(-136.308 \times \ln R_H)] \quad (3)$$

式中: u 为木材平衡含水率,%; R_H 为环境湿度,%。

由于木材是多孔性高分子材料,内部含有大量亲水基团,对外部环境湿度的变化反应敏锐,因此木材平衡含水率随环境湿度的提高而增大。

Noack 等^[19]对相对湿度在 35%~85%条件下

湿度与木材含水率关系和湿度与木材干缩湿胀率关系的理论分析表明,木材含水率为7%~20%时,其含水率的变化量和对应干缩湿胀变形量为线性关系。杉木径、弦向湿胀率 a_r 和 a_t 与含水率 u 的线性拟合情况见图5、式(4)和(5)。

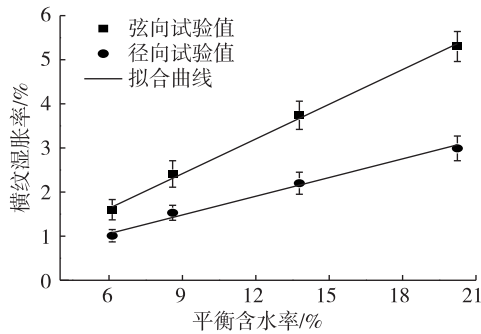


图5 横纹湿胀率与含水率关系

Fig. 5 Relationship between transverse swelling and moisture content

$$a_r = 0.2089 + 0.1413u \quad (4)$$

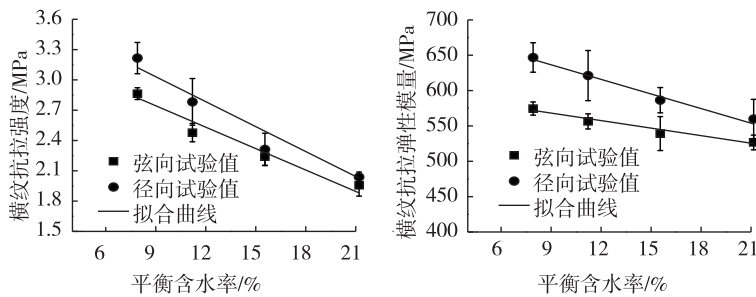


图6 杉木横纹力学性能与含水率关系

Fig. 6 Curves of transverse mechanical properties with moisture content

2.3 杉木微观构造

杉木微观构造的扫描电镜图见图8。由图可知:杉木组织较均匀,基本由沿径向整齐排列的管胞构成(图8a、b、c);作为唯一的横向组织,木射线呈单列沿径向排列(图8a、d);横切面上早材管胞腔大壁薄,外观近似为六边形(图8b),晚材管胞腔小壁厚,外观呈矩形(图8c);早材至晚材,管胞径向尺寸变化大,弦向尺寸基本恒定;管胞径面壁纹孔丰富(图8e、f),而弦面壁无纹孔(图8d)。

木材横纹方向的水分扩散,需穿越若干木材细胞壁,因此主要与其内部微观结构和水分扩散路径有关^[20]。杉木径向水分传导主要依靠木射线(图8a、d)以及纹孔及细胞壁渗透等路径,而弦向主要取决于管胞径面壁上的纹孔(图8e、f)。由于杉木弦向水分传递通道少且小,水分在径向上迁移时遇到的阻力小于弦向,因此径向水分扩散系数高于弦向。杉木管胞径面壁纹孔的存在导致实质物质减

$$a_t = 0.0563 + 0.2623u \quad (5)$$

2.2 环境温度对杉木横纹力学性能的影响

杉木的横纹抗拉强度和抗拉弹性模量与含水率关系如图6所示。图6表明,在试验范围内随着含水率的提高,杉木的横纹力学性能呈线性规律下降。拟合得到杉木径弦向抗拉强度 σ_r 和 σ_t 以及径弦向抗拉弹性模量 E_r 和 E_t 与含水率 u 的关系见式(6)~(9):

$$\sigma_t = 3.380 - 7.069u \quad (6)$$

$$\sigma_r = 3.772 - 8.232u \quad (7)$$

$$E_t = 600.067 - 354.589u \quad (8)$$

$$E_r = 698.401 - 688.045u \quad (9)$$

根据文献[16],利用指数函数对30%~90%环境温度范围内杉木径弦向水分扩散系数 D_r 和 D_t 进行非线性拟合,结果见图7、式(10)和(11)。

$$D_t = 4.536e^{0.123u} \quad (10)$$

$$D_r = 4.674e^{0.132u} \quad (11)$$

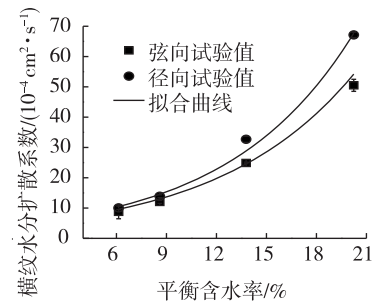


图7 水分扩散系数与含水率关系

Fig. 7 Curves of moisture diffusion coefficient with moisture content

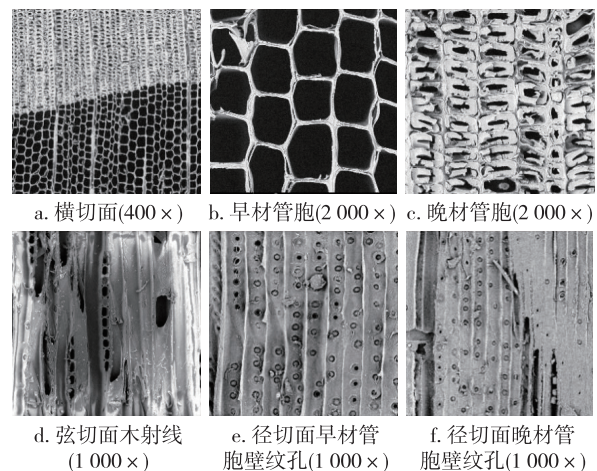


图8 杉木三切面微观构造扫描电镜

Fig. 8 Scanning electron microscope for Chinese fir along three sections

少,木射线沿径向排列,因此径向力学性能高于弦向,干缩湿胀性能则为弦向高于径向。

2.4 胶合木含水率及湿应力

根据公式(3)~(11),采用 ABAQUS 有限元软件模拟,在环境湿度以 T 为周期的变化条件下,层板厚度为 20 mm 胶合木在构件截面 X 轴上(中性轴,见图 2)各点含水率分布的时变规律,如图 9a 所示。由图 9a 可知,胶合木内含水率梯度在表层层板处最大,内部相对较小,说明湿度在构件内部的传递进行缓慢。表层和内部含水率差异较大,产生含水率梯度。造成胶合木表层与内部湿度变化

不同步的原因是水分由构件外侧向内部扩散时,木材细胞壁上供水分迁移的通道小且少,细胞壁对水分传递具有较强的阻隔作用。湿度变化导致胶合木内产生含水率梯度,因此构件内部发生不同步变形,即湿应力。厚度层板为 20 mm 的杉木胶合木内部湿应力时变规律见图 9b。图 9b 中的曲线趋势与图 9a 相近,湿应力出现在构件含水率相差较大的外侧。

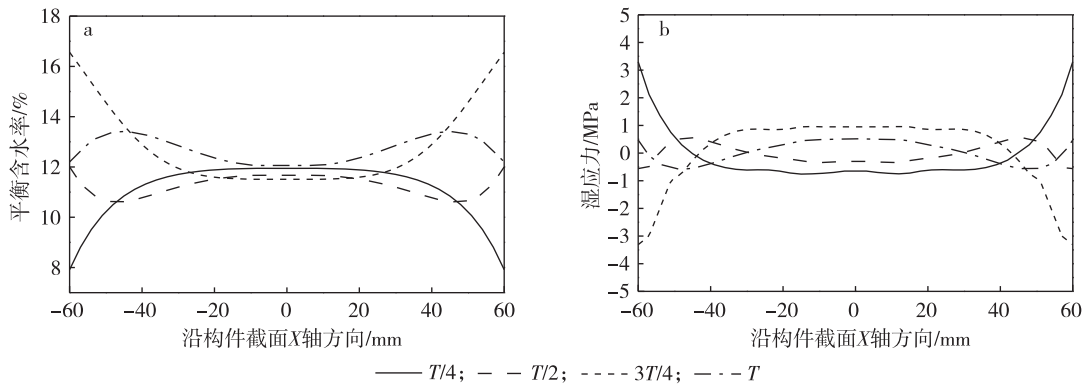


图 9 胶合木截面 X 轴方向含水率和湿应力分布时变规律

Fig. 9 Moisture content and moisture stress distribution along X axis in glulam at different periods

由 ABAQUS 有限元软件模拟得到环境湿度以 T 为周期的变化条件下,典型时刻对应的胶合木构件湿应力分布图如图 10 所示。图 10 进一步说明了沿构件截面高度和宽度方向的外侧相对内部具有更大的湿应力,并且截面宽度方向的外侧湿应力更大,这是由木材的尺寸所决定,较大的尺寸其积累的变形更大,从而导致较大的湿应力。

种厚度层板胶合木的湿应力最大值均超过对应时刻木材弦向抗拉强度,构件易出现横纹开裂,因此仅通过降低层板厚度,不足以保证胶合木的安全使用。

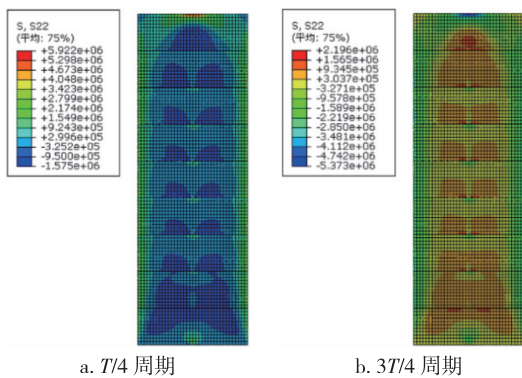


图 10 变湿度环境下典型时间构件内部湿应力分布
Fig. 10 Moisture stress distribution of glulam

当层板厚度分别为 20, 30 和 40 mm 时,胶合木湿应力随时间变化曲线见图 11。图 11 表明,层板厚度对胶合木内湿应力峰值有较明显的影响。层板厚度由 40 mm 分别降至 30 和 20 mm 时,胶合木内最大湿应力由 5.28 MPa 分别降至 4.96 MPa 和 4.26 MPa,降幅分别为 6.06% 和 19.32%。但该 3

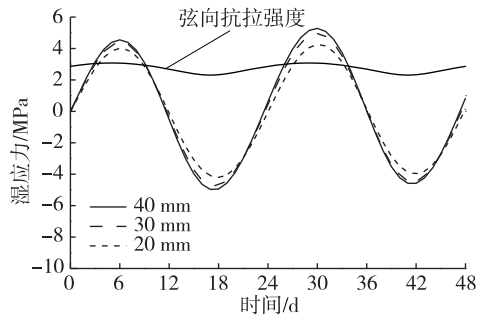


图 11 不同厚度层板胶合木湿应力时变规律
Fig. 11 Curves of moisture stress in glulam made of varied thickness laminations with time

3 结 论

1) 杉木平衡含水率随环境湿度的增大而提高,杉木的横纹干缩率、湿胀率以及水分扩散系数均随着含水率的升高逐渐增大。横纹抗拉强度与抗拉弹性模量随着木材含水率上升线性降低。杉木径向干缩和湿胀性均小于弦向,径向水分扩散系数、抗拉强度和弹性模量均高于弦向。

2) 杉木中含有径向排列的木射线,管胞径面壁上含有大量纹孔,这些微观结构和水分扩散路径

的不同导致了木材径弦向变形和力学性能的差异。

3)湿度变化会使胶合木产生较大的湿应力,减小层板厚度有助于降低湿应力,但其最大值仍高于木材横纹抗拉强度,湿应力的降低程度不足以避免构件的横纹开裂。

参考文献(References):

- [1] JAKIEŁA S, BRATASZ Ł, KOZŁOWSKI R. Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions[J]. *Wood Science and Technology*, 2008, 42(1): 21-37. DOI:10.1007/s00226-007-0138-5.
- [2] JÖNSSON J, THELANDERSSON S. The effect of moisture gradients on tensile strength perpendicular to grain in glulam[J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2003, 61(5): 342-348. DOI:10.1007/s00107-003-0405-6.
- [3] 孔祥迪. 木材横纹抗拉强度及其荷载持续时间效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
KONG X D. Investigation of the tension strength perpendicular to grain of wood and the duration of load effect[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [4] SVENSSON S, TORATTI T. Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity[J]. *Wood Science and Technology*, 2002, 36(2): 145-156. DOI:10.1007/s00226-001-0130-4.
- [5] JÖNSSON J, SVENSSON S. A contact free measurement method to determine internal stress states in glulam[J]. *Holzforschung*, 2004, 58(2): 148-153. DOI:10.1515/HF.2004.022.
- [6] LIU J X, WANG X M. Effect of drying temperature and relative humidity on contraction stress in wood[J]. *BioResources*, 2016, 11(3): 6625-6638. DOI:10.15376/biores.11.3.6625-6638.
- [7] 战剑锋, 顾继友, 艾沐野. 白桦干燥过程的横纹干燥应力[J]. *东北林业大学学报*, 2005, 33(4): 25-28. DOI:10.3969/j.issn.1000-5382.2005.04.010
ZHAN J F, GU J Y, AI M Y. Transverse drying stress of white birch wood during drying[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, 33(4): 25-28.
- [8] 程曦依, 李贤军, 黄琼涛, 等. 木材干燥后养生期间含水率及应力变化特点[J]. *林业工程学报*, 2016, 1(2): 38-43. DOI:10.13360/j.issn.2096-1359.2016.02.007
CHENG X Y, LI X J, HUANG Q T, et al. The study of moisture content and inner stress variation of kiln-dried wood during equalization treatment[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, 1(2): 38-43.
- [9] GEREKE T, NIEMZ P. Moisture induced stresses in spruce cross laminates[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(2): 600-606. DOI:10.1016/j.engstruct.2009.11.006.
- [10] ANGST V, MALO K A. Moisture induced stresses in glulam cross sections during wetting exposures[J]. *Wood Science and Technology*, 2013, 47(2): 227-241. DOI:10.1007/s00226-012-0493-8.
- [11] 陈旭, 祝恩淳. 胶合木梁中温度与湿度应力研究[J]. *工业建筑*, 2008(S1): 862-866. DOI:10.13204/j.gyz2008.s1.146.
CHEN X, ZHU E C. Moisture and thermal stresses in glulam beams[J]. *Industrial Construction*, 2008(S1): 862-866.
- [12] LUIKOV A V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1975, 18(1): 1-14. DOI:10.1016/0017-9310(75)90002-2.
- [13] 岳孔, 陈强, 贾翀, 等. 工业化高温改性木材的力学性能[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2018, 47(3): 361-366. DOI:10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2018.03.015.
YUE K, CHEN Q, JIA C, et al. Mechanical properties of industrial heat-treated wood[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2018, 47(3): 361-366.
- [14] 李文军, 于志明, 张壁光. 刨花对流干燥过程的传热传质研究动态[J]. *林业科学*, 2006, 42(8): 116-120. DOI:10.3321/j.issn:1001-7488.2006.08.019.
LI W J, YU Z M, ZHANG B G. Theory of heat and mass transfer during the process of wood particle drying with convection[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(8): 116-120.
- [15] J.R.威尔特. 动量、热量和质量传递原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 336-352.
WELTY J R. Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 336-352.
- [16] DROIN-JOSSERAND A, TAVERDET J L, VERGNAUD J M. Modelling the absorption and desorption of moisture by wood in an atmosphere of constant and programmed relative humidity[J]. *Wood Science and Technology*, 1988, 22(4): 299-310. DOI:10.1007/BF00353320.
- [17] 岳孔, 刘伟庆, 卢晓宁, 等. ACQ-D防腐处理对速生杨木力学性能和等温吸着特性的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(2): 73-76. DOI:10.3969/j.issn.1000-2006.2010.02.016.
YUE K, LIU W Q, LU X N, et al. Effect of modification with ACQ-D on mechanical and sorption isotherm performance of fast-growing poplar wood[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2010, 34(2): 73-76.
- [18] NELSON R M. A model for sorption of water vapor by cellulosic materials[J]. *Wood & Fiber Science*, 1983, 15(1): 8-22. DOI:10.1007/BF00129437.
- [19] NOACK D, SCHWAB E, BARTZ A. Characteristics for a judgment of the sorption and swelling behavior of wood[J]. *Wood Science and Technology*, 1973, 7(3): 218-236. DOI:10.1007/BF00355552.
- [20] 苗平. 马尾松木材高温干燥的水分迁移和热量传递[D]. 南京: 南京林业大学, 2000.
MIAO P. Water movement and heat transfer during high temperature drying of *Masson's pine*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2000.

(责任编辑 葛华忠)