

文章编号:1007-9629(2011)06-000-00

# 竹木复合地板变形有限元模拟

虞华强<sup>1</sup>, 袁 东<sup>2</sup>, 张训亚<sup>1</sup>, 费本华<sup>3</sup>, 刘红征<sup>4</sup>

(1. 中国林业科学研究院 木材工业研究所, 北京 100091; 2. 国家林业局 北京林业机械研究所, 北京 100029; 3. 国际竹藤网络中心, 北京 100102; 4. 浙江大庄实业集团有限公司, 浙江 杭州 311251)

**摘要:** 以表层为竹材、芯层为杉木拼板、背层为杨木单板的竹木复合地板为对象, 利用 ANSYS 有限元软件, 采用湿热类比法模拟表层和芯层厚度不同的竹木复合地板在干燥环境中的含水率变化, 然后进行热结构耦合分析, 研究由含水率变化引起的竹木复合地板的翘曲变形. 结果表明: 胶层能够起到水分屏障的作用, 胶层内部木材的含水率变化很小, 在使用中受空气湿度变化影响的主要是表层的竹材部分, 而且表层竹材越薄的竹木复合地板其含水率越早与环境达到平衡; 芯层厚度对竹木复合地板翘曲变形率有较大影响, 而表层厚度对其翘曲变形率影响较小. 该研究可为竹木复合地板的制造设计提供依据.

**关键词:** 竹木复合地板; 变形; 含水率; 有限元

**中图分类号:** TU366. 3      **文献标志码:** A      **doi:** 10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2011. 00. 000

## Finite Element Analysis on the Deformation of Bamboo-Wood Composite Flooring

YU Hua-qiang<sup>1</sup>, YUAN Dong<sup>2</sup>, Zhang Xun-ya<sup>1</sup>, FEI Ben-hua<sup>3</sup>, Liu Hong-zheng<sup>4</sup>

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing100091, China;  
2. Beijing Forestry Machinery Research Institute, State Forestry Administration, Beijing 100029, China;  
3. Research Institute of International Center for Bamboo and Rattan(ICBR), Beijing 100102, China;  
4. Dasso Industrial Group Co., Ltd., Hang zhou 311251, China)

**Abstract:** Change of moisture content in the ambient air results in non-uniform cross-section moisture profiles and generates warping deformation because of asymmetry of hygro-expansion. In order to support the design of bamboo-wood composite flooring, the moisture content(MC) changes and the deformation ratio of bamboo-wood composite flooring was investigated in dry conditions using thermal-structure Coupled Analysis with ANSYS software. Wood and bamboo are assumed to be orthotropic materials, and adhesive layer is assumed to be homogeneous material in this model. The influence of the core layer thickness and surface layer thickness of the bamboo-wood composite flooring is taken into consideration in the model. The simulation results showed that the adhesive layer between the surface and the core layer acts as a water vapor barrier because lower moisture diffusion coefficient, so the MC of the surface layer changes with the environment condition, however, the MC of the core and backing layer remains stable. The thickness of the surface has an impact on the time needed for the floor to reach the equilibrium MC and the maximum cupping deformation. Thickness of the core layer but not the surface has great effect on the cupping deformation ratio of bamboo-wood composite flooring.

收稿日期:2010-07-06; 修订日期:2010-12-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(30730076),公益性行业科研专项(200810580,200904034).

第一作者:虞华强(1972—),男,安徽安庆人,中国林科院木材工业研究所工程师,博士. E-mail:yuhq@caf. ac. cn

通信作者:费本华(1964—),男,安徽六安人,国际竹藤网络中心研究员. E-mail:feibenhua@icbr. ac. cn

**Key words:** bamboo-wood composite flooring; deformation; moisture content; finite element

竹木复合地板是以竹代替实木复合地板表层的木材所生产的新型地板产品,2008 年其产量已经达到 1 368 万 m<sup>2</sup><sup>[1]</sup>. 以竹材为面板的竹木复合地板可使竹材和速生木材资源得到高效充分利用. 目前竹木复合地板主要是以竹单板为表层,速生杉木或松木作芯层,旋切杨木或松木单板作为底层胶合而成的三层结构地板. 竹木复合地板在使用中存在的问题主要是开裂或变形,而变形问题尤为突出,根本原因在于板材的含水率随着环境条件的变化发生变化,使材料发生干缩湿胀,如果结构不合理,就会导致竹木复合地板开裂或变形,影响其正常使用. 目前,竹木复合地板的结构考虑基本是借鉴实木复合地板的生产方法,通过反复实验、摸索而来,缺乏科学设计. 因此,模拟竹木复合地板在使用环境中的水分扩散及其变形对于竹木复合地板结构设计非常必要.

过去 40 年来有限元法已在木材和木制品物理力学现象分析方面得到了广泛应用,其中在木地板方面有限元法较多地被用于木地板结构的静态和动态影响研究<sup>[2]</sup>. 利用有限元法对木地板结构优化设计仅有少量研究,如,Blanchet 等<sup>[3]</sup>用有限元法模拟研究表层和芯层的厚度、芯层树种对实木复合地板变形影响,表明表层厚度、芯层树种和芯层厚度对实木复合地板的翘曲变形有重要影响. 但是,对于表层为横向干缩率和湿胀率较高的竹材所组成的竹木复合地板有限元模拟研究则未见报道. 本文将借助有限元工具,模拟一种干燥环境条件下,竹木复合地板内的水分扩散及其变形过程,以增进对该过程的了解,为其结构设计提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 竹木复合地板的结构和几何尺寸

本文分析的竹木复合地板包括 3 层结构:表层为竹材,芯层为木材拼板(以杉木为例),背层为单板作为平衡层(以杨木为例). 地板宽度 120 mm,长度 240 mm. 芯层的纹理方向与表层和背板的纹理方向垂直,各层之间通过脲醛胶黏剂胶合. 本文用此模型研究表层和芯层厚度对变形的影响,选择 4 种表层厚度、3 种芯层厚度、1 种背层厚度,总共 12 种结构的地板,其编号及几何参数见表 1. 编号中 B 指竹材,F 指杉木芯板,P 指杨木背板(厚度为 2 mm). 字母后面数字指该层厚度.

进行竹木复合地板有限元模拟所需木材和竹材的物理力学性质参数见表 2. 其中:UF 胶黏剂的参

表 1 竹木复合地板的几何参数  
Table 1 Geometrical parameters of bamboo-wood composite flooring

Number	Surface	Corer layer thickness
	thickness(bamboo)	
B2F4P2	2	4
B2F6P2	2	6
B2F8P2	2	8
B3F4P2	3	4
B3F6P2	3	6
B3F8P2	3	8
B4F4P2	4	4
B4F6P2	4	6
B4F8P2	4	8
B5F4P2	5	4
B5F6P2	5	6
B5F8P2	5	8

表 2 用于有限元计算的材料物理力学性质参数  
Table 2 Finite element parameters

Parameter	Surface (bamboo)	Core (Chinese fir)	Backing (poplar)	Binder (UF resin)
Density/ (kg · m <sup>-3</sup> )	620	316	356	1 500
D/(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )				1.0 × 10 <sup>-14</sup>
D <sub>l</sub> /(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	1.09 × 10 <sup>-9</sup>	4.56 × 10 <sup>-9</sup>	4.09 × 10 <sup>-9</sup>	
D <sub>e</sub> /(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	1.49 × 10 <sup>-11</sup>	6.82 × 10 <sup>-11</sup>	5.97 × 10 <sup>-11</sup>	
D <sub>r</sub> /(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	1.49 × 10 <sup>-11</sup>	6.82 × 10 <sup>-11</sup>	5.97 × 10 <sup>-11</sup>	
H/(kg · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> · % <sup>-1</sup> )	3.2 × 10 <sup>-4</sup>	3.2 × 10 <sup>-4</sup>	3.2 × 10 <sup>-4</sup>	3.2 × 10 <sup>-4</sup>
M <sub>0</sub> /%	8	8	8	8
M <sub>∞</sub> /%	5	5	5	5
β/(mm <sup>-1</sup> · % <sup>-1</sup> )				1.9 × 10 <sup>-2</sup>
β <sub>L</sub> /(mm <sup>-1</sup> · % <sup>-1</sup> )	2 × 10 <sup>-4</sup>	1.86 × 10 <sup>-4</sup>	1.47 × 10 <sup>-4</sup>	
β <sub>R</sub> /(mm <sup>-1</sup> · % <sup>-1</sup> )	2.55 × 10 <sup>-3</sup>	1.15 × 10 <sup>-3</sup>	1.13 × 10 <sup>-3</sup>	
β <sub>T</sub> /(mm <sup>-1</sup> · % <sup>-1</sup> )	2.13 × 10 <sup>-3</sup>	2.57 × 10 <sup>-3</sup>	2.46 × 10 <sup>-3</sup>	
E/GPa				9
E <sub>L</sub> /GPa	10.350	9.400	9.100	
E <sub>R</sub> /GPa	0.500	0.752	0.728	
E <sub>T</sub> /GPa	0.690	0.470	0.455	
G <sub>LR</sub> /GPa	0.830	0.671	0.650	
G <sub>RT</sub> /GPa	0.290	0.067	0.065	
G <sub>LT</sub> /GPa	0.900	0.631	0.611	
μ				0.350
μ <sub>LT</sub>	0.341	0.420	0.500	
μ <sub>RT</sub>	0.308	0.470	0.670	
μ <sub>LR</sub>	0.390	0.370	0.370	
μ <sub>TL</sub>	0.023	0.021	0.025	
μ <sub>TR</sub>	0.425	0.294	0.419	
μ <sub>RL</sub>	0.019	0.030	0.030	

数、对流传质系数来源于文献[3],竹材密度、三个方向的干缩系数来源于文献[4],竹材的弹性常数和泊松比来源于文献[5],竹材的水分扩散系数根据 Siau 提出的理论<sup>[7]</sup>推导得到,木材密度、干缩系数、顺纹方向弹性模量的数据来源于文献[6],木材的水分扩散系数也是根据 Siau 提出的理论<sup>[7]</sup>推导得到,除了顺纹方向弹性模量,木材的其他弹性常数均根据 Bodig 提出的木材各种弹性常数的比例关系推导而来,泊松比则是源于现在已经测定的针叶材和阔叶材泊松比的平均值<sup>[8]</sup>。

1.2 有限元计算数学模型

1.2.1 竹木复合地板中水分扩散计算方法

竹木复合地板中水分扩散过程符合 Fick 扩散第二定律,由于热分析的控制方程和水分扩散方程形式类似,因此本文采用类比法,用有限元分析软件中的热分析模块来计算水分的扩散。

1.2.2 描述力学变形方面的控制方程

假设竹木复合地板体作用力为 0,由于木材和胶黏剂都被认为是弹性体,因此可以用胡克定律来描述应力和应变之间的关系: $\sigma_{ij} = C_{ijkl}(\epsilon_{kl} - \beta_i \Delta M)$ ,其中, $C_{ijkl}$ 为刚度张量; $\epsilon_{kl}$ 为正应变和剪应变; $\beta_i$ 为干缩/湿胀系数( $\%^{-1}$ ); $\Delta M$ 为含水率的变化量。

1.3 模拟假设条件

模拟竹木复合地板在干燥季节(假设温度和相对湿度分别为 20℃,30%)的含水率分布及其变形情况,与其相对应的竹材和木材的平衡含水率大约为 5%。根据竹木复合地板铺装后在使用过程中的实际情况,并参照 Blanchet 等<sup>[9]</sup>对实木复合地板的研究方法,做如下假设:1)地板四边和底部不能渗透水分,地板变形是由于地板上表面的对流引起木材干缩引起的;2)地板初始含水率为 8%,这与用于我国北方干燥地区的竹木复合地板出厂时的含水率一致;3)假设竹材和木材是正交各向异性弹性材料,不考虑机械吸附蠕变的影响,并假设初始时地板是平的,不受任何应力;4)模型不考虑木材和胶线之间的界面层;5)模型假设木材、竹材和胶线吸湿性相同,具有相同的对流传质系数;6)模型关于力学方面边界条件的规定:假设地板块初始条件下没有受到任何应力,没有变形;假设沿长度方向,地板变形受到限制,不允许伸长;沿地板的宽度方向,地板一个面的变形受到限制,不允许有沿宽度方向的位移;靠地面的地板底面没有上下方向的位移。在上述假设条件下,地板将在宽度方向发生凹翘变形(如图 1 所示)。

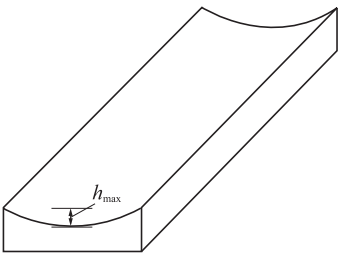


图 1 宽度方向凹翘曲面测量图  
Fig. 1 Measurement of the cupping deformation rate in the width

1.4 模拟步骤

利用 ANSYS 软件进行热结构耦合分析,选择 Thermal solid 中 8 节点六面体单元(SOLID70)。

建立规则的网格,长度和宽度方向单元边长设置为 20 mm,厚度方向竹材和木材部分单元边长设置为 1 mm,假设胶层厚度 0.1 mm,胶层单元的厚度设置为 0.1 mm,胶层单元长度、宽度与竹材和木材的单元一致。

以有限元分析软件中的热分析模块来计算各部位的含水率,然后,转换单元类型为结构单元,施加含水率载荷以及力学方面的边界条件,求得对象各部位的位移,根据位移值,并参照 GB/T 15036.2—2009《实木地板第 2 部分:检验方法》的规定即可计算其翘曲度。GB/T 15036.2—2009 规定地板宽度方向的凹翘曲面测量方法为(见图 1):将地板凹面(地板表面)向上放置在水平实验台面上,把钢板尺紧靠地板两长边,用塞尺量取其最大弦高  $h_{max}$ ,则最大弦高与地板实测宽度之比值即为宽度方向凹翘曲度,以百分数表示,精确至 0.01%。

2 结果与讨论

2.1 含水率分布随时间的变化

图 2 表示的是竹木复合地板(以 B2F8P2 为例)经过不同处理时间后的水分分布云图,图 3 表示的是 A,B,C,D 等 4 个部位含水率随处理时间变化的情况。A,B,C,D 指地板的不同部位(见图 2),其中 A,B 分别指竹材表面和靠近胶层的部位;C,D 分别指胶层内部的杉木芯板和杨木背板部位。

从图 2,3 可以看出:刚刚置于干燥环境时,竹材表层部位 A 的含水率很快与环境达到平衡;随着处理时间的增加,由于空气湿度较低而使水分逐渐向外扩散,竹材靠近胶层部位 B 的含水率逐渐降低,直至达到平衡。另外,在 90 d 的处理时间内,胶层内部的杉木芯板 C 和杨木背板 D 的含水率基本不变,

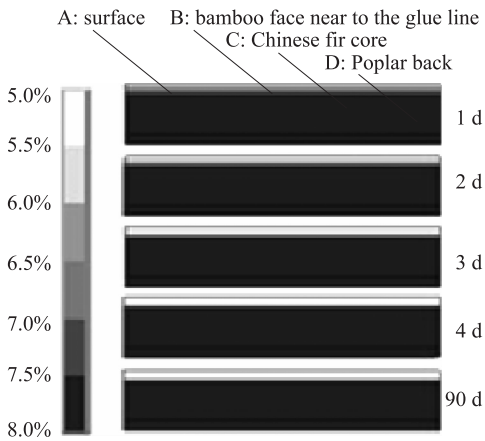


图 2 B2F8P2 厚度方向水分分布云图

Fig. 2 Cloud contour for moisture content distribution in the direction of thickness of B2F8P2

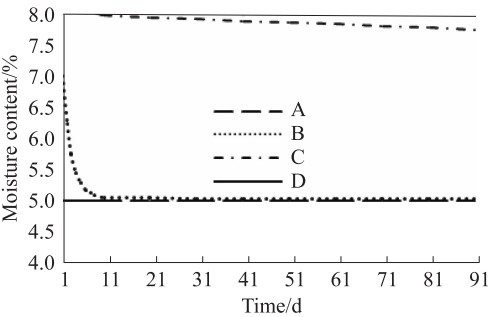


图 3 B2F8P2 不同部位含水率与时间关系

Fig. 3 Moisture content change with time in B2F8P2

这是由于胶层的水分扩散系数很低,胶线起到了水分扩散的屏障作用所致。

对于竹材表层厚度不同的地板,表层竹材含水率达到平衡的时间存在较大差异.如图 4 所示,表层竹材为 2 mm 的地板在较短时间内(大约 10 d)靠近胶层部位的竹材含水率就降至 5.0%;而表层竹材为 5 mm 的地板在经过约 15 d 后靠近胶层部位的竹材含水率才降至 5.5%左右,在 40 d 后才与环境接近平衡(含水率降至 5%)。

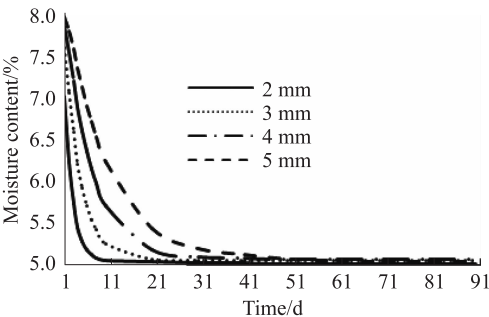


图 4 地板靠近胶层部位 B 含水率与时间关系

Fig. 4 Moisture content change with time in B

2.2 翘曲度随时间的变化规律

图 5 表示的是竹木复合地板(以 B2F8P2 为例)

在干燥环境下 90 d 后的翘曲变形图,图 6 表示的是不同表层与芯层厚度的竹木复合地板置于干燥环境下其翘曲度随时间的变化规律。

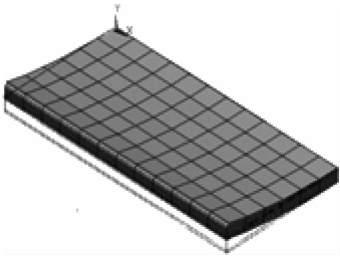


图 5 B2F8P2 的翘曲变形

Fig. 5 Cupping deformation of B2F8P2

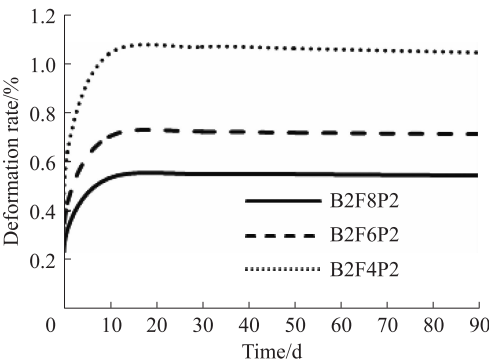


图 6 表层 2 mm 芯层厚度不同地板翘曲度

Fig. 6 Cupping deformation rate of the floor with the different core thickness(surface thickness 2 mm)

由图 6 可见:

1)翘曲度在初期增加很快,大约 10~15 d 之后基本保持不变或变化很小.这是由于地板表层的竹材含水率开始降低很快,然后基本不变,而地板变形是由含水率变化引起的湿应力导致的,其变形与含水率随时间的变化趋势一致。

2)表层厚度相同、芯层厚度不同的竹木复合地板,其翘曲度存在较大差异,且芯层越厚变形越小.该结果与 Blanchet 等<sup>[3]</sup>的模拟研究结果一致.以 4 mm 厚表层的地板为例,在干燥环境下 90 d 后芯层为 4 mm 地板(B4F4P2)的翘曲度与芯层为 8 mm 地板(B4F8P2)的翘曲度分别为 1.04%,0.62%,前者比后者高 68%。

芯层杉木的纹理方向与表层竹材的干缩方向一致,而且木材顺纹理方向的强度和模量较大,芯层对表层竹材的干缩起到限制作用.因此,芯层越厚竹木复合地板的翘曲度越低.为了提高竹木复合地板的尺寸稳定性,在设计时应该在成本许可的条件下考虑尽量增加芯层厚度。

3)表层厚度不同、芯层厚度相同的竹木复合地

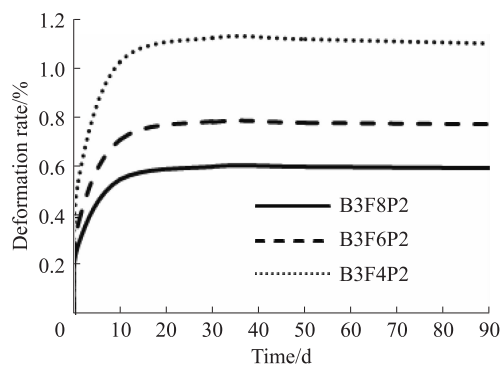


图 7 表层 3 mm 芯层厚度不同地板翘曲度  
Fig. 7 Cupping deformation rate of the floor with the different core thickness(surface thickness 3 mm)

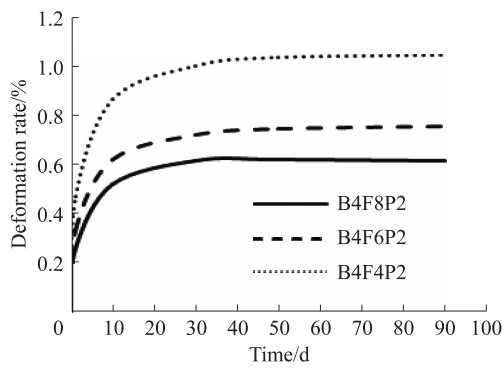


图 8 表层 4 mm 芯层厚度不同地板翘曲度  
Fig. 8 Cupping deformation rate of the floor with the different core thickness(surface thickness 4 mm)

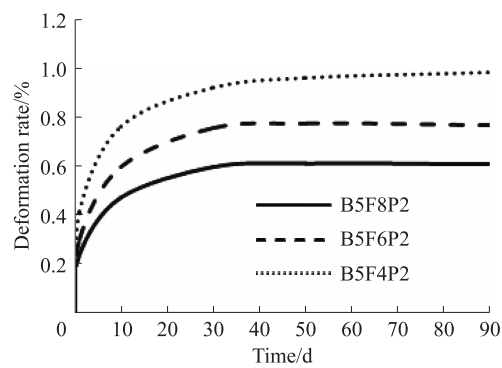


图 9 表层 5 mm 芯层厚度不同地板翘曲度  
Fig. 9 Cupping deformation rate of the floor with the different core thickness(surface thickness 5 mm)

板,其翘曲度差异较小。例如,芯层厚度同为 8 mm 的竹木复合地板在干燥环境下 90 d 之后,表层厚度为 2 mm 的地板(B2F8P2)翘曲度为 0.54%,表层厚度为 4 mm 的地板(B4F8P2)翘曲度为 0.62%,后者比前者仅高 15%。该结果与 Blanchet 等<sup>[3]</sup>的模拟研究结论“表层厚度对实木地板变形的影响很小”一致。在进行竹木复合地板设计制造时,改变表层竹材厚度虽然对地板的尺寸稳定性影响很小,但是可能

会影响竹木复合地板的强度、耐用性等。

3 结论

(1)在本研究设定的模拟使用环境及边界条件下,胶层能够起到水分屏障作用,表层竹材部分的含水率受空气湿度变化影响较大,而其内部木材的含水率变化甚微。

(2)芯层厚度对地板宽度方向上的翘曲度影响较大,且芯层越厚变形越小;而表层厚度对地板翘曲度影响不大。

(3)随着竹木复合地板这类新型产品产量的增加,对其性能和设计也提出了新的要求,本文的工作表明有限元法可以模拟该产品在特定使用条件下的含水率变化和变形情况,该研究对竹木复合地板的设计将起到辅助作用,也可以为其他类似的竹、木复合产品的设计提供借鉴。

参考文献:

[1] 中国林学会木材工业分会秘书处. 2008 年我国人造板和木地板产量[J]. 木材工业, 2009, 23(4): 50.  
Secretariat of Chinese Society of Wood Industry. The output of wood-based panel and wood flooring in China[J]. Wood Industry, 2009, 23(4): 50. (in Chinese)

[2] MACKERLE J. Finite element analyses in wood research: a bibliography[J]. Wood Science and Technology, 2005, 39(7): 579-600.

[3] BLANCHET P, CLOUTIER A, GENDRON G, et al. Engineered wood flooring design using the finite element method [J]. Forest Prod J, 2006, 56(5): 59-65.

[4] 周芳纯, 张春霞. 竹材力学性质测定报告[J]. 竹类研究, 1991, 10(1): 7-12.  
ZHOU Fang-chun, ZHANG Chun-xia. Report on the test of bamboo mechanical properties[J]. Bamboo Research, 1991, 10(1): 7-12. (in Chinese)

[5] BAI Xue-song, LEE W C, THOMPSON L L, et al. Finite element analysis of Moso bamboo-reinforced southern pine OSB composite beams[J]. Wood and Fiber Science, 1999, 31(4): 403-415

[6] 成俊聊. 中国木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985: 1258, 1318.  
CHENG Jun-qing. Chinese wood science[M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 1985: 1258, 1318. (in Chinese)

[7] SIAU J F. Transport processes in wood[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1984: 151-171.

[8] JOZSEF B, JAYNE B A. 木材与木材集成品之力学[M]. 陈周宏译. 台北: 全贤图书出版有限公司, 1991: 103, 106.  
JOZSEF B, JAYNE B A. Mechanics of wood and wood composites[M]. Translated by CHEN Zhou-hong. Taipei: Quaxian Book Publishing Co., Ltd, 1991: 103, 106. (in Chinese)