

研究开发

# 木质梁的变湿蠕变及其与湿胀干缩的关系

黄宇翔, 董春雷, 张宏健

(西南林业大学材料工程学院, 云南昆明 650224)

**摘要:** 为探知木质梁变湿蠕变的基本规律、其与恒湿蠕变的区别以及与湿胀干缩的关系,以杨木实木和 LVL 为原料,测试蠕变挠度和湿胀干缩量。结果表明:2.5 个变湿周期内,实木和 LVL 的变湿蠕变总挠度,分别是同期内相对湿度为 80% 时恒湿蠕变总挠度的 1.80 和 1.46 倍;2 个周期内的厚度湿胀干缩累积量,分别占变湿蠕变总挠度的 -0.63% 和 1.27%。湿胀干缩不改变木质梁吸着蠕变的基本规律,但影响其吸湿蠕变和解吸蠕变的挠度,尤其对杨木 LVL 变湿蠕变总挠度的影响显著。

**关键词:** 木质梁; 吸着蠕变; 湿胀干缩

中图分类号: TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654(2013)03-0009-04

## Creep of Wood Beams and Its Relationship with Hygroscopic Expansion in Varying Humidity

HUANG Yu-xiang, DONG Chun-lei, ZHANG Hong-jian

(College of Material Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** The bending deflection and hygroscopic thickness expansion of solid wood and laminated veneer lumber (LVL) beams under load were monitored in various humidity conditions to approach the basic law of the creep in varying humidity and its relationship with the changing dimension and the difference from the creep in uniform humidity. Results showed that the total bending creep deflections (TBCD) after 2 cycles in RH 42%→80%→42% followed by an adsorption up to 80% were 1.80 and 1.46 times as those in the same period in the uniform RH 80% for solid and LVL samples, respectively. The accumulated thickness expansions after the 2 humidity cycles were -0.63% of the TBCD for the solid wood beams and 1.27% for the LVL beams. The thickness expansion could not alter the basic law of mechano-sorptive creep of wood beams, but affected the bending creep deflection from either adsorption or desorption, especially the TBCD of the LVL.

**Key words:** wood beam; mechano-sorptive creep; swelling and shrinkage

在室内湿度动态变化的自然环境中,木质梁实际上发生的是变湿蠕变(简称:变蠕),变蠕一直是实木梁和梁用 LVL 制造者、使用者和研究者的关注热

点<sup>[1-2]</sup>,因为其关系到木质梁设计使用寿命内,真正发生的挠度超标与否,即关乎木质梁的服役期(Service life)和服役挠度(Deflection in service)的标定。然而,现行国内外标准,如美国标准 ASTM D 6815-2002a “Standard specification for evaluation of duration of load and creep effects of wood”和我国标准 LY/T 1975-2011《木材和工程复合木材的持续负

收稿日期: 2013-01-14; 修改日期: 2013-03-15

基金项目: 国家自然科学基金“物理吸着蠕变对预组型木质工字梁服役静曲挠度的影响”(31170534)。

作者简介: 黄宇翔(1988—),男,西南林业大学硕士研究生。

通讯作者: 张宏健,男,西南林业大学教授。

载和蠕变影响评定》等,对木质梁蠕变挠度的衡量均在恒湿环境中进行,测试结果是恒湿蠕变(简称:恒蠕)下所发生的挠度。

恒蠕发生的是普通蠕变,其挠度与试件的均恒含水率始终成正相关关系。变蠕发生的是“Mechano-sorptive creep”<sup>[3]</sup>(MSC,本文称之为“吸着蠕变”),其挠度并不与试件的含水率成正相关关系。视普通蠕变发生的挠度为正挠度时,木质梁的变蠕中只有解吸蠕变(简称:解蠕)才发生正挠度,吸湿蠕变(简称:吸蠕)发生的则是负挠度(除首次吸蠕外)。

变蠕与恒蠕的另一个本质区别在于:在变蠕过程中一定伴随着木材的湿胀干缩,恒蠕则因其恒湿条件而不涉及木材的湿胀干缩。为此,自 Amstrong 首次发现木质梁的变蠕行为以来<sup>[4]</sup>,有学者认为,MSC 的起因即是木材的湿胀干缩<sup>[5-6]</sup>,继而认为,因为木质梁的静曲蠕变挠度,是以木质梁跨中下表面测得的垂直位移量为依据,而垂直位移量中一定包括了变蠕过程中必然发生的木质翼缘材料的垂向湿胀干缩量,所以吸蠕负挠度应该只是木质梁的垂向湿胀量,而解蠕正挠度应该只是木质梁的垂向干缩量<sup>[7]</sup>。这一学说引起了对木质梁变湿蠕变与木材湿胀干缩之间关系的强烈关注,因为其直接关系到 MSC 存在与否,及对木质梁(尤其是湿胀量较大的单板层积材 LVL)的蠕变挠度的评价。

为此,笔者选取杨木实木和单板层积材 2 种材料,对其在湿度变化情况下的蠕变行为进行了研究,旨在探究变蠕与恒蠕的本质区别,以及木材的湿胀干缩对变蠕的影响,为木质梁的科学设计与使用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1) 木质梁:① 四层杨木酚醛树脂 LVL,自制,密度  $0.509 \text{ g/cm}^3$ ,静曲弹性模量  $10\,370 \text{ MPa}$ 。② 意杨(*Populus euramevicana*)实木,气干密度  $0.540 \text{ g/cm}^3$ ,静曲弹性模量  $14\,730 \text{ MPa}$ ,江苏产。试件规格均为  $110 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。

2) 在杨木实木和 LVL 中,选择密度和静曲弹性模量极其相近的蠕变试件和含水率监测试件各 2 根。为保证试件厚度方向水分的一维迁移过程,全部试件

的侧面和端头用油漆涂封。将试件置入  $20^\circ\text{C}$ 、相对湿度(RH)42%的恒温恒湿箱中,至达到平衡含水率(Equivalent moisture content, EMC)后取出;用塑料薄膜封装,在  $20^\circ\text{C}$  恒温条件下,使试件处均恒含水率(Uniform moisture content, UMC)待用。

### 1.2 设备

恒温恒湿箱;恒温恒湿房(用以恒定恒温恒湿箱的环境温、湿度);5 t 万能力学试验机;存储式温湿度表;自行设计制造的蠕变试验架和计算机控制(挠度)位移测试系统。

### 1.3 试验设计

1) 在温度  $20^\circ\text{C}$ 、RH42%的恒温恒湿箱中,使 UMC 杨木实木和 LVL 试件恒蠕 48 h。

2) 在 RH 80%的恒温恒湿箱中,使试件吸蠕至达到 EMC (LVL 约 45 h;杨木约 36 h),继续恒蠕 3 h。

3) 将恒温恒湿箱 RH 调至 42%,解蠕至试件达 EMC (LVL 约 45 h;杨木亦约 36 h),继续恒蠕 3 h。

一个连续的“吸蠕→恒蠕→解蠕→恒蠕”过程,为一个变湿蠕变周期。由于首次吸蠕比较特殊,为了观察到两个正常的吸湿蠕变过程,2 个周期后增加了一段“吸蠕→恒蠕”(视为 0.5 个周期),试验全程为 2.5 个周期。

4) 取预先测定的同类试件破坏荷载的 25%为蠕变荷载。

### 1.4 性能测试

1) 静曲蠕变挠度:按 ASTM D 4761-2002a “Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material”的基本要求(图 1),用线性位移传感器连续测得试件上、下表面的位移量,以其平均值为试件的静曲蠕变挠度。以垂直向下的为正挠度,垂直向上的为负挠度。

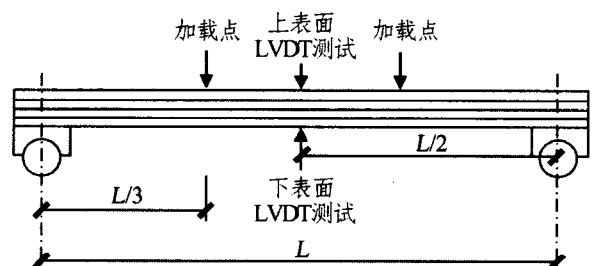


图 1 蠕变挠度及湿胀干缩的测试方法

Fig. 1 Schematics for creep, swelling and shrinkage testing

2) 湿胀干缩量:通过上述方法连续测得变蠕试件上、下表面的位移差。

3) 含水率:采用称质量法测试。在不同蠕变阶段每隔 0.5~2 h,检测含水率监测试件的质量。依据试验结束后测得试件的绝干含水率,计算试件在变湿过程中的名义含水率(Nominal moisture content, NMC)和恒湿过程中的 EMC。

2 结果与讨论

2.1 试件的变湿蠕变挠度

考虑到杨木实木与 LVL 含水率平衡时间的差异,分别将杨木实木和 LVL 试件实测数据中的恒蠕和变蠕数据分开,严格按蠕变规律作坐标平移、拼接后,得到杨木实木试件累计 180 h 内、LVL 试件累计 240 h 内发生的恒蠕和变蠕情况,如图 2 所示。

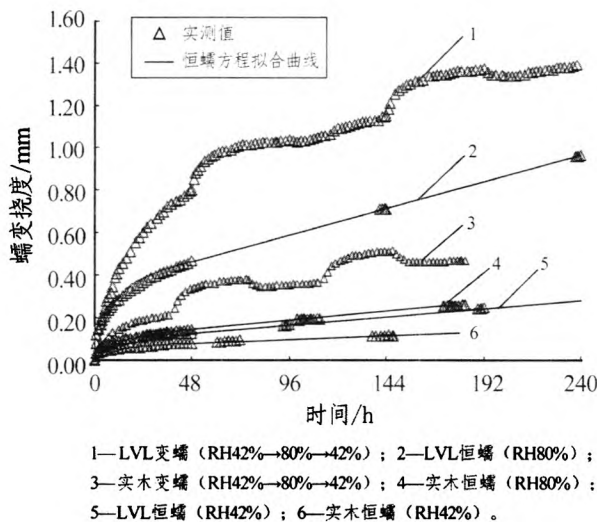


图 2 杨木实木、LVL 的变湿蠕变挠度和恒湿蠕变挠度  
Fig. 2 Creep deflection of *Populus* solid beams and LVL in varying humidity and uniform humidity conditions

图 2 中:

1) 杨木实木与 LVL 试件的变蠕曲线均为实测值。

2) RH42%恒蠕曲线:为实测值和恒蠕方程拟合的曲线。根据经典四单元勃格模型恒蠕方程,可知恒蠕挠度方程分别为:

$$D_{RH42\% \text{ 实木}} = 0.063 \times (1 - e^{-t/10.41}) + 4 \times 10^{-4}t;$$

$$D_{RH42\% \text{ LVL}} = 0.092 \times (1 - e^{-t/5.06}) + 8 \times 10^{-4}t。$$

3) RH80%恒蠕曲线:为实测值(0~48 h 的实测

值来自补充试件)和恒蠕方程拟合的曲线。恒蠕方程为:

$$D_{RH80\% \text{ 实木}} = 0.11 \times (1 - e^{-t/10.96}) + 8.5 \times 10^{-4}t;$$

$$D_{RH80\% \text{ LVL}} = 0.34 \times (1 - e^{-t/7.83}) + 2.6 \times 10^{-3}t。$$

式中: $D$  为恒蠕挠度,mm; $t$  为时间,h。实木恒蠕挠度方程中  $t$  为 0~180 h;LVL 恒蠕挠度方程中  $t$  为 0~240 h。

从图 2 可以看出,杨木实木和 LVL 试件的变蠕挠度,均大于同期 RH80%条件下的恒蠕挠度。杨木实木和 LVL 试件的变蠕总挠度,分别是 RH80%、相同时间条件下的恒蠕总挠度的 1.80 和 1.46 倍。由此得到与国外大部分研究者相似的结论:即木质梁的变蠕挠度大于恒蠕挠度<sup>[8-10]</sup>。

从图 2 亦可看出:木质梁的解蠕正挠度不被吸蠕负挠度所抵消。

两种试件在 RH80%条件下的恒蠕挠度,均大于 RH42%条件下的恒蠕挠度,这一现象同恒蠕挠度与木材 UMC 始终成正相关关系的变化规律一致。

从试件类型上看,无论是恒蠕还是变蠕,LVL 试件的蠕变挠度均大于杨木实木;原因是杨木单板受到的旋切损伤降低了 LVL 的刚性。

2.2 变湿过程中试件的湿胀干缩

在变湿过程中,杨木实木和 LVL 的初始含水率 UMC、变湿过程中的名义含水率 NMC 和变化稳定后的均衡含水率 EMC 以及恒温恒湿箱内空气中的含水量 SEMC,列于表 1。其中,UMC 和 EMC 均低于对应的 SEMC。

表 1 变湿过程中杨木实木和 LVL 的含水率情况

Tab. 1 UMC, NMC, and EMC of the *Populus* solid beams and LVL in varying humidity

| 变湿<br>时间/h | SEMC/<br>% | 实木含水率/% |       |       | LVL 含水率/% |       |       |
|------------|------------|---------|-------|-------|-----------|-------|-------|
|            |            | EMC     | UMC   | NMC   | EMC       | UMC   | NMC   |
| 0          | —          | —       | 7.70  | —     | —         | 6.60  | —     |
| 47         | 8          | 7.70    | 7.70  | —     | 6.60      | 6.60  | —     |
| 58         | 16         | —       | —     | 12.07 | —         | —     | 9.83  |
| 93         | 16         | 12.70   | 12.70 | —     | —         | —     | 11.96 |
| 96         | 16         | 12.70   | 12.70 | —     | 12.01     | 12.01 | —     |
| 108        | 8          | —       | —     | 8.07  | —         | —     | 7.86  |
| 136        | 8          | 7.70    | 7.70  | —     | —         | —     | 7.20  |
| 144        | 8          | 7.70    | 7.70  | —     | 7.16      | 7.16  | —     |

结合图 3 可知:两种试件的湿胀、干缩量与各自的 NMC 之间均为高度的线性关系。

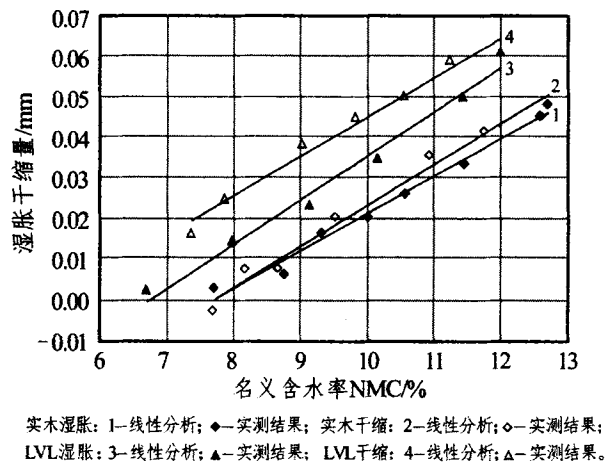


图3 杨木实木、LVL 湿胀干缩变形与 NMC 的关系  
Fig. 3 Relationship between the hygroscopic expansion and NMC of the *Populus* solid beams and LVL

- 1) 实木试件的湿胀量、干缩量为:
- $$y_{\text{实木湿胀}} = 0.90 \times \text{NMC} - 0.07 (R^2 = 0.98);$$
- $$y_{\text{实木干缩}} = 1.06 \times \text{NMC} - 0.08 (R^2 = 0.98).$$
- 2) LVL 试件的湿胀量和干缩量分别为:
- $$y_{\text{LVL湿胀}} = 1.09 \times \text{NMC} - 0.08 (R^2 = 0.98);$$
- $$y_{\text{LVL干缩}} = 0.98 \times \text{NMC} - 0.05 (R^2 = 0.98).$$

实木试件的湿胀量与干缩量之间存在微小差别,可能源于试件的吸着滞后。与实木不同,LVL 干缩后的厚度大于其初始厚度。

2.3 木质梁湿胀干缩与变湿蠕变的关系  
2.3.1 湿胀干缩与变湿蠕变行为的关系

由图 4 可知:除首次吸蠕以外,其他吸蠕(垂直向上的)负挠度中,包含了垂直向下的湿胀分量;而所有

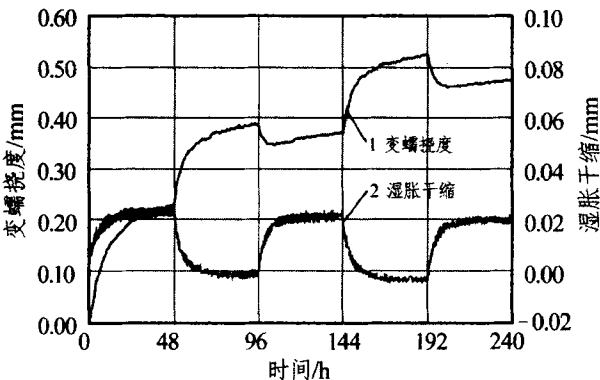


图4 杨木实木湿胀干缩与变湿蠕变的关系  
Fig. 4 Relationship between the hygroscopic expansion and creep deflection of *Populus* solid beams

的解蠕(垂直向下)的正挠度包含了垂直向上的干缩分量,即湿胀并不导致吸蠕负挠度的发生,干缩也不导致解蠕正挠度的发生;因此,木质梁的吸蠕和解蠕不是由木材的湿胀干缩引起(但可能与湿胀干缩产生的物理效应有关)。本研究的这一发现,显然与有关研究提出的“MSC 实际上是湿胀干缩的直接结果”<sup>[6]</sup>不一致。笔者认为:就现行测量方法而言,变湿条件下木质梁的湿胀、干缩,只是分别影响了吸蠕挠度和解蠕挠度的测量值。

2.3.2 湿胀干缩对木质梁变蠕挠度的影响

表 2 结果反映在 2 个变湿周期内,杨木实木和 LVL 试件的湿胀干缩量对变湿蠕变挠度的影响。

表 2 杨木实木和 LVL 的湿胀干缩及其对吸着蠕变挠度的影响

| Tab. 2 Effect of hygroscopic expansion of <i>Populus</i> solid beams and LVL on MSC deflection |              |        |        |           |        |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------|--------|-----------|--------|-----------|
| 材料                                                                                             | 指标           | 变湿周期一  |        | 变湿周期二     |        | 变蠕 (2 周期) |
|                                                                                                |              | 吸湿     | 解吸     | 吸湿        | 解吸     |           |
| 杨木<br>实木                                                                                       | 湿胀干缩<br>量/mm | 0.044  | 0.046  | 0.042     | 0.043  | -0.003    |
|                                                                                                | 变蠕挠<br>度/mm  | 0.232  | 0.155  | -0.015    | 0.152  | 0.474     |
|                                                                                                | 胀缩量/<br>挠度/% | 18.966 | 29.677 | -280.000  | 28.289 | -0.633    |
| 杨木<br>LVL                                                                                      | 湿胀干缩<br>量/mm | 0.063  | 0.052  | 0.052     | 0.048  | 0.019     |
|                                                                                                | 变蠕挠<br>度/mm  | 0.802  | 0.232  | -0.005    | 0.226  | 1.495     |
|                                                                                                | 胀缩量/<br>挠度/% | 7.855  | 21.552 | -1040.000 | 21.239 | 1.271     |

虽然杨木实木的湿胀、干缩量,分别对吸蠕挠度和解蠕挠度产生了影响,但由于湿胀量和干缩量几乎完全相互抵消,故累积量对变蠕总挠度的影响很小,仅占变蠕总挠度的-0.63%。

与杨木实木不同,除上述影响外,LVL 的湿胀、干缩量在热压压缩量完全回复以前,是不可能相互抵消的,从而导致本试验范围内,LVL 的湿胀干缩累积量占变蠕总挠度的 1.27%。

3 结论和建议

1) 2.5 个变湿周期内,杨木实木和 LVL 的变湿蠕变总挠度,分别是相同周期 RH80% 时恒湿蠕变总挠度的 1.80 和 1.46 倍。

(下转第 24 页)

所选霉菌、木腐菌均有较明显的抑制作用。

3) 虽然目标化合物合成工艺简单,但关键中间体化合物(3)的合成条件较为严格,反应中严禁混入氧气和水分,以免影响反应收率。

4) 目标化合物的应用推广,还需要进行其处理材的防腐、防霉性能的实验室和野外试验,以进一步判定该化合物是否能作为木材防腐剂。

#### 参考文献:

- [1] 曹克广, 杨夕强. 三唑类化合物杀菌剂的发展现状与展望[J]. 精细石油化工, 2007, 224(6): 82-86.
- [2] Williams G, Cornfield J A, Brown J, et al. Preservatives for wood and other cellulosic materials[P]. U. S Patent; 5527384, 1996.
- [3] Goettsche R, Borck H V. Wood preservatives[P]. U. S Patent; 6441016, 2002.
- [4] Yoshida S, Linuma M. Wood preservative[P]. U. S patent; 6827949, 2004.
- [5] 郭胜. 高效三唑类杀菌剂—戊唑醇[J]. 精细与专用化学品, 2001(6): 19-20.
- [6] 黄新辉, 张发亮, 马淑惠, 等. 新型杀菌剂戊唑醇的合成工艺[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(1): 144, 192.

- [7] Holmwood G, Regel E. Substituted triazolymethyl-oxiranes and their use as intermediates for fungicides[P]. US Patent; 4499281, 1985.
- [8] Richardson K, Whittle Peter J. Triazoles[P]. US patent; 4727159, 1988.
- [9] 吴义杰, 乔善磊, 刘超美, 等. 三唑类化合物的合成及其抗真菌活性[J]. 中国药物化学杂志, 1998, 8(3): 178-181.
- [10] 门秀峰. 1-(1H-1,2,4-三唑-1-基)-2-叔丁基-3-取代基-2-丙醇的合成及其抗真菌活性研究[D]. 上海: 第二军医大学, 2006: 1-71.
- [11] 何秋琴, 刘超美, 门秀峰, 等. 叔丁基三唑衍生物的合成及抗真菌活性研究[J]. 中国药物化学杂志, 2005, 15(5): 262-265.
- [12] 欧春艳, 陈声宗. 丙腈盐酸盐的合成工艺研究[J]. 广东海洋大学学报, 2007, 27(6): 71-73.
- [13] 张玲. 银杏树木提取物对木材防腐作用的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009: 1-48.
- [14] 叶舟, 林文雄, 陈伟, 等. 杉木心材精油抑菌活性及其化学成分研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2394-2398.
- [15] 朱昆. 新型木材防腐剂 DCP 的开发[D]. 南京: 南京林业大学, 2010: 1-66.
- [16] 杨杨, 吕文硕, 史延年, 等. 具有生物活性的 N-1 取代 1,2,4-三唑类化合物的研究与进展[J]. 化学通报, 1996(10): 6-14.

(责任编辑 张一萍、姜征)

(上接第 12 页)

2) 2 个变湿周期内, 杨木实木、LVL 的湿胀干缩累积量, 分别占其变湿蠕变总挠度的一 0.63%、1.27%。说明湿胀、干缩不改变木质梁吸着蠕变的基本规律, 但会分别影响木质梁的吸湿和解吸蠕变挠度, 尤其对 LVL 的变湿蠕变总挠度影响显著。

3) 建议我国相关标准和规范增补“恒湿蠕变”、“变湿蠕变”、“均恒含水率”、“名义含水率”等名词及其定义, 以便更接近实际地分析木质梁的变湿蠕变行为, 准确评价变湿蠕变对木质梁服役挠度的影响。

致谢: 感谢西南林业大学材料工程学院李统、蒲黄彪、方丹同学的参与, 郑云武、保昆雁老师的指导和帮助。

#### 参考文献:

- [1] A Hanhijärvi. Computational method for predicting the long-term performance of timber beams in variable climates [J]. Materials and Structures, 2000, 33(2): 127-134.
- [2] Frédéric Dubois, Jean-Marie Husson, Nicolas Sauvat, et al. Modeling of the viscoelastic mechano-sorptive behavior in wood[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2012, 16(4): 439-460.

- [3] P U A Grossman. Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour[J]. Wood Science and Technology, 1976, 10(3): 163-168.
- [4] L D Armstrong, G N Christensen. Influence of moisture changes on deformation of wood under stress[J]. Nature, 1961, 191(4791): 869-870.
- [5] Shen, Yuanhua. Evaluation of creep behavior of structural lumber in a natural environment[J]. Forest Products Journal, 1997, 47(1): 89-96.
- [6] S Srpeš, J Srpeš, M Saje, et al. Mechanical analysis of glulam beams exposed to changing humidity [J]. Wood Science and Technology, 2009, 43(1-2): 9-22.
- [7] A Martensson. Tensile behaviour of hardboard under combined mechanical and moisture loading [J]. Wood Science and Technology, 1988, 22(2): 129-142.
- [8] R F S Hearmon, J M Paton. Moisture content changes and creep of wood [J]. Forest Products Journal, 1964, 14(8): 57-59.
- [9] R H Leicester. A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams[J]. Wood Science and Technology, 1971, 5(3): 211-220.
- [10] Chika Takahashi, Yutaka Ishimaru, Ikuho Iida, et al. The creep of wood destabilized by change in moisture content. Part 1: The creep behaviors of wood during and immediately after drying [J]. Holzforschung, 2004, 58(3): 261-267.

(责任编辑 向琴、孟凡丹)