

漠河产兴安落叶松弹性模量分级与力学性能

田昭鹏,王朝晖*,王金平,张忠利,葛蓓清,吕洋波,任海青

(中国林业科学研究院 木材工业研究所,北京 100091)

摘要:以漠河产落叶松原木为材料,将其制作成锯材,利用 FFT 测试并按照弹性模量将锯材分等后,参照国家标准(GB/T 1927~1943-2009)对 3 个等级落叶松锯材清材小试样的气干密度、顺纹抗压强度、抗弯弹性模量和抗弯强度等主要物理力学性质进行比较研究,分析 3 个不同加载方向下抗弯弹性模量的差异。结果表明,利用 FFT 测试并分等漠河兴安落叶松具有可行性,分等后 M_E16 等级的落叶松其气干密度、顺纹抗压强度、抗弯弹性模量、抗弯强度的平均值比较大,分别为 $0.795\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 66.8 MPa 、 $19\,311\text{ MPa}$ 、 127.9 MPa ;漠河产兴安落叶松 3 个加载方向(T、R1、R2)下的抗弯弹性模量间无显著性差异。

关键词:落叶松;FFT 检测;木材分级;顺纹抗压强度;弹性模量;抗弯强度

中图分类号:S781.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)03-0211-05

Classification in Modulus of Elasticity and Mechanical Properties of Larch Lumber in Mohe

TIAN Zhao-peng, WANG Zhao-hui*, WANG Jin-ping, ZHANG Zhong-li, GE Bei-qing,
LYU Yang-bo, REN Hai-qing

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

Abstract: In this paper, fast fourier transform (FFT) was used to test the dynamic elastic modulus of the lumbers got from larch logs produced in Mohe, then the lumbers were classified to nine grades according their elastic modulus. The air-dry density, compressive strength parallel to grain, modulus of elasticity (MOE), and modulus of rupture (MOR) of small defect-free samples with three grades were studied with national standard (GB/T 1927~1943-2009). The results showed that FFT test was feasible to classify the grade of larch lumber growing in Mohe. The average air-dry density, compressive strength parallel to grain, MOE, and MOR of the samples of M_E16 were $0.795\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 66.8 MPa , 19311 MPa , and 127.9 MPa , respectively, higher than the others. The differences of the MOE loaded in three directions (T, R1, R2) were not significant (at 0.05 level).

Key words: larch; FFT detection; lumber grading; compressive strength; MOE; MOR

由于木材取材方便、容易加工、且具有多孔吸湿吸声等特性,被广泛应用于工业和建筑等领域,同时木材强度大密度小,和钢筋混凝土相比绿色环保可再生,在北美欧洲等国家被大量用于建造木结构建筑^[1]。木材作为一种天然的正交各项异性复合材料,其细胞和组织平行树干生长方向成轴向排列,木材的构造使其沿顺纹、横纹、径向和弦向具有不同的

力学特性^[2];木材作为一种生物材料,受其树木生长条件、内部构造、生物入侵等影响导致同一种木材的力学特性也存在很大的差异^[3]。合理利用木材的这种正交异向和材质差异能够大幅提高木材的利用价值,如通过机械分等、应力分等、目测分等的手段将木材分等后利用可以实现优材优用^[4]。利用木材不同方向力学性能的差异,可将木材通过合理的布置

收稿日期:2016-10-17 修回日期:2016-11-29

基金项目:国家林业局 948 项目(2014-4-43);“十二五”村镇建设领域国家科技计划课题(2014BAL03B02-04)。

作者简介:田昭鹏,男,硕士,研究方向:木结构工程。E-mail: tianzhaopeng1991@hotmail.com

* 通信作者:王朝晖,男,副研究员,研究方向:木结构工程。E-mail: zhwang@caf.ac.cn

用在木结构中的不同部位,实现性能最大化利用,如正交胶合木(CLT)就是通过木材的纵横向组坯胶合大大提高了木材的横向力学性能^[5]。目前,针对结构用木材的无损检测及分级和木材力学正交异性,开展了大量的研究工作。江京辉^[6]等用目测分等人工林杉木,并测试了不同等级杉木的动弹弹性模量和静态弹性模量;R. J. Ross^[7]等在 1988 年研究发现木材弹性模 E 与应力波速度 C 和木材密度 ρ 3 者之间的关系为 $E=C^2\rho$;王正^[8]等采用频率法与应力波法分别测量一批 SPF 规格材试件的频率和应力波传播速度,并推算其弹性模量值。段新芳^[8]等发现应力波无损检测可以有效的测定残余木构件的力学强度。江京辉^[10]等发现利用纵向基频震动法来评估规格材的静态弹性模量,其预测效果比横向振动和超声波更为理想。钟卫洲^[11]等研究了云杉的 3 个加载方向的静动态力学性能;刁海林^[12]等测得了红锥的 3 向(纵向、弦向、径向)弹性模量和 3 向泊松比。为了考察利用纵向基频震动法(FFT)分等后不同等级兴安落叶松的力学性能,本研究拟测试 FFT 分等后兴安落叶松无疵小试样不同加载方向的静曲弹性模量(MOE)、弦向静曲强度和顺纹抗压强度,采用数据分析方法判定落叶松等级和加载方向对其力学性能是否有显著影响,旨在为兴安落叶松结构材 FFT 分级技术提供测试数据,为兴安落叶松以及进口落叶松的作为结构用木材利用提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

落叶松(*Larix gmelini*)来自大兴安岭漠河县宜家木业有限公司,原木的直径 24~44 cm,材长为 4 m。原木经锯解、干燥后制成规格尺寸为 4 000 mm×150 mm×50 mm 的规格材坯料。使用 FFT 检测锯材的动态弹性模量,之后按照弹性模量分等并在实验室从 3 个不同等级(M_E9 、 M_E12 、 M_E16)落叶松规格材中制取尺寸为 20 mm×20 mm×300 mm(弯曲性能测试^[13])、20 mm×20 mm×20 mm(密度测试^[14])、20 mm×20 mm×30 mm(抗压强度测试^[15])的无疵小试样。试样有直纹理和无节子等要求,根据实际情况每个等级分别选取 12 个弯曲试样、12 个气干密度试样、12 个抗压强度试样,共 108 个试样。取样时弯曲试样、气干密度试样、抗压强度试样取自一根规格材的相邻部分,每根规格材最多制取 3 个弯曲试样。试样制取后在恒温($20\pm2^\circ\text{C}$)恒湿($65\%\pm3\%$)箱内放置 2 周后进行弹性模量、抗弯强度、密度、抗压强度的测试。

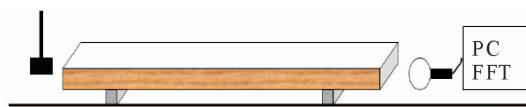
试验设备为 FFT 测试仪(FAKOPP Enterprise 公司)、量程 10 m 的卷尺、游标卡尺和量程为 50 kg 的电子秤(METTLER TOLEDO 公司生产)、Instron5580 万能力学实验机(美国 Instron 公司生产),试验加载速度为 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.2 试验方法

1.2.1 FFT 测量兴安落叶松锯材动态弹性模量并分级 用橡皮锤敲击锯材的一端,使木材内部产生应力波,在另一端利用麦克风接受应力波并将接收到的信号传送到 FFT(fast fourier transform)频谱分析仪上,分析仪上给出木材基频振动频率(图 1)。每根锯材敲击 3 次,取稳定的频率值作为试样的共振频率^[16]:

$$E_{\text{动}}=4L^2F^2\rho \quad (1)$$

式中: $E_{\text{动}}$ 为试样的动态弹性模量(Pa), L 为试件长度(m), F 为试件一阶弯曲固有频率(Hz), ρ 为试样气干是的密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。



注:FFT 与 PC 指采集纵向频率的采集器及电脑。

图 1 FFT 测定弹性模量示意图

Fig. 1 Diagram of measuring modulus of elasticity by FFT

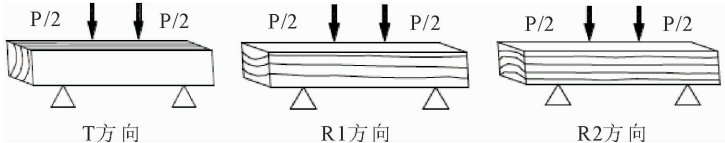
FFT 测得的动态弹性模量和静态弹性模量具有较好的相关性^[17],将 FFT 测得的 4 m 长的落叶松锯材动态弹性模量按照预备试验的测试结果调整至锯材在 18 倍跨高比下侧弯的静曲弹性模量,参照 GB/T 50708—2012《胶合木结构技术规范》^[18]和 GB/T 26899—2011《结构用集成材》^[19]胶合木层板机械弹性模量等级的划分标准,将本研究中的锯材划分为 M_E7 以下、 M_E7 、 M_E8 、 M_E9 、 M_E10 、 M_E11 、 M_E12 、 M_E14 、 M_E16 和 M_E18 10 个等级。选取其中的 3 个等级 M_E9 、 M_E12 、 M_E16 在实验室制取清材小试样。

$$E_{\text{静}}=0.787\ 88E_{\text{动}}+900.341\ 04 \quad (2)$$

1.2.2 清材小试样物理力学性能测试 在实验室分别测试所制取清材小试样的气干密度、顺纹抗压强度、弹性模量和静曲强度。气干密度测试参照 GB/T 1933—2009《木材密度测试方法》^[14],采用标准方法,测试计算所有试件的气干密度;顺纹抗压强度测试参照 GB/T 1935—2009《木材顺纹抗压强度试验方法》测试并计算落叶松的顺纹抗压强度;弹性模量测试参照 GB/T 1936.2—2009《木材抗弯弹性模量测定方法》^[13],分别测试同一根试样弦向、径向背离髓心和径向指向髓心(图 2)3 个方向的弹性模

量,测试采用标准两点加载方法(图 3),同一个试样同一方向加载 3 次,取后 2 次弹性模量平均值作为该试样该方向下测得的抗弯弹性模量;抗弯弹性模量测试完成后,根据 GB/T1936.1—2009《木材抗弯

强度试验方法》采用弦向单点加载测试落叶松小试样的抗弯强度。参照 ASTM D2915—10,抗弯强度特征值计算方法是 $\bar{x}-ks$,其中 k 是与样本容量相关的常数可在标准中查到, s 是样本的标准差。



注:P 代表加载时的荷载,P/2 表示 2 个加载点的荷载为 P/2,下同。

图 2 3 种不同加载方向测试木材弹性模量(MOE)

Fig.2 Test wood MOE with three different loading directions

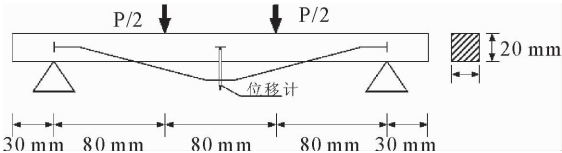


图 3 测定 MOE 试验装置

Fig.3 Testing apparatus of measuring wood MOE

2 结果与分析

2.1 落叶松无疵小试样气干密度

漠河产落叶松的密度较大, M_{E9} 、 M_{E12} 、 M_{E16} 3 种等级的落叶松清材小试样的平均气干密度分别为 0.635 、 $0.678\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 与 $0.795\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;随着落叶松规格材弹性模量等级的提高其无疵小试样的密度也随之增大, M_{E12} 和 M_{E16} 等级的落叶松的平均密度相比 M_{E9} 分别提高了 6.8% 和 25.2% ,反应出 FFT 检测分等漠河兴安落叶松具有可行性;3 个等级落叶松的气干平均密度的变异系数差别明显,其中 M_{E12} 等级的落叶松试样的平均密度变异系数最小,变异系数可以在一定程度上反映同一等级落叶松材质的好坏,变异系数小,落叶松材质相对均一,其在木结构中的使用也更可靠(表 1)。

表 2 落叶松清材小试样顺纹抗压强度

Table 2 Test results in compressive strength parallel to grain of small defect-free larch samples

试样分组	试样个数	顺纹抗压强度/(MPa)		气干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)		抗压强度和密度的相关性分析		
		平均值	变异系数/%	平均值	变异系数/%	截距	斜率	R^2
M_{E9}	12	49.2	12.5	0.649	13.9	8.07	63.01	0.877
M_{E12}	12	51.2	9.1	0.677	10.8	7.35	64.79	0.557
M_{E16}	12	66.8	6.0	0.804	12.1	44.38	27.89	0.358

注:顺纹抗压强度值已根据 GB/T 1935—2009《木材顺纹抗压强度试验方法》调整到试样含水率为 12% 时的值。

2.3 落叶松无疵小试样抗弯弹性模量和静曲强度

M_{E16} 试样的 MOE 和 MOR 明显高于 M_{E9} 、 M_{E12} , M_{E9} 、 M_{E12} 的 MOE 和 MOR 差别不是很明显, M_{E12} 的 MOE 和 MOR 略高于 M_{E9} ;3 个等级中, M_{E16} 的静曲强度变异系数最小为 7.5 ,3 个等

表 1 落叶松小试样气干密度试验结果

Table 1 Destiny test results of small defeat-free larch samples

试样分组	气干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	
	平均值	变异系数/%
M_{E9}	0.635	12.0
M_{E12}	0.678	8.0
M_{E16}	0.795	10.1

注:试样个数 12,气干密度值已根据 GB/T 1933—2009《木材密度测试方法》调整到试样含水率为 12% 时的值,下同。

2.2 落叶松无疵小试样顺纹抗压强度

M_{E9} 、 M_{E12} 、 M_{E16} 3 种等级落叶松清材小试样的密度和顺纹抗压强度随着等级的提高而逐渐增大, M_{E16} 等级的落叶松顺纹抗压强度明显高于 M_{E9} 等级落叶松的顺纹抗压强度;气干密度变异系数 M_{E12} 等级最小,但顺纹抗压强度的变异系数 M_{E16} 等级最小;对测得所有试样的数据进行抗压强度和密度的回归分析可得:回归方程截距 0.420 ,斜率 77.629 , R^2 为 0.736 ,可见,漠河产兴安落叶松的顺纹抗压强度和密度间具有一次线性相关关系;分别对各个等级进行线性回归分析,发现 3 种落叶松等级中 M_{E9} 的线性相关关系最强(其相关系数 R^2 为 0.877),其他 2 个等级的相关系数相对较小(表 2)。

级 3 个加载方向的 MOE 变异系数相对偏大;弦向(T)、背离髓心径向(R1)、指向髓心径向(R2)3 个方向加载的弹性模量不同,3 个等级 T 方向的 MOE 都大于 R1 和 R2 向加载的 MOE; M_{E12} 和 M_{E16} 等级 R1 方向的 MOE 小于 R2 方向的 MOE,但是与

此相反,M_E9 等级 R1 方向的 MOE 大于 R2 方向的 MOE,由于木材年轮的存在 R1 和 R2 方向的 MOE 会有所差别。比较 3 个等级试样 MOR 的最小值发现,其最小值逐渐增大,参照《木结构设计规范》木材

强度检验标准发现,M_E9 等级落叶松满足 TC15 强度等级的要求,M_E12、M_E16 等级落叶松满足 TC17 强度等级的要求(表 3)。M_E9 和 M_E12 等级试样的特征值明显小于 M_E16 等级试样。

表 3 抗弯强度和弹性模量分析
Table 3 Test results of MOR and MOE

试样分组	加载方向	弹性模量(MOE)/(MPa)		静曲强度(MOR)/(MPa)			气干密度/(g·cm ⁻³)	
		平均值	变异系数/%	平均值/最小值	变异系数/%	特征值	平均值	变异系数/%
M _E 9	弦向(T)	14 462	12.4	90.3/62.9	13.8	64.8	0.639	11.9
	径向(R1)	13 463	15.9					
	径向(R2)	12 922	12.6					
M _E 12	弦向(T)	14 115	13.1	91.1/75.2	13.2	66.5	0.678	6.2
	径向(R1)	13 551	14.4					
	径向(R2)	14 380	14.8					
M _E 16	弦向(T)	19 311	15.0	127.9/114.8	7.5	108.3	0.798	11.8
	径向(R1)	18 055	18.5					
	径向(R2)	18 340	16.3					

注:弹性模量值已根据 GB/T 1936.2—2009《木材抗弯弹性模量测定方法》调整到试样含水率为 12%时的值。

对所有试样 3 个方向的弹性模量进行分析可知,36 个试样中有 25 个试样的弦向弹性模量大于 R1 和 R2 的平均弹性模量,14 个试样的 R1 方向加载的弹性模量大于 R2 方向加载的弹性模量。漠河兴安落叶松在 3 种不同加载方向下测得的 MOE 无显著差异。

3 结论与讨论

不同弹性模量等级漠河兴安落叶松的密度、静曲强度、抗压强度平均值不同,且等级越高其密度、抗压强度也越大,刘振波^[21]等用声共振 FFT 方法检测表明,木材的动弹性模量与静弹性模量之间具有密切的相关性。利用 FFT 无损检测漠河产兴安落叶松并按照弹性模量分等兴安落叶松具有可行性。

弹性模量分级后 M_E9、M_E12、M_E16 等级落叶松抗弯强度的最小值分别为 62.9、75.2 MPa 与 114.8 MPa,M_E9 等级落叶松的抗弯强度超过 TC15 强度等级的要求,M_E12、M_E16 等级落叶松抗弯强度超过 TC17 强度等级的要求,其中 M_E16 的抗弯强度远大于 TC17 强度等级最低 72 MPa 的要求。

漠河产落叶松的气干密度较大,3 个等级落叶松的清材小试样的平均气干密度分别为 0.635、0.67 g·cm⁻³ 与 0.795 g·cm⁻³,高于长白落叶松^[20]气干密度 0.580~0.634 g·cm⁻³。木材的气干密度与晚材率关系密切^[22],一般木材密度与力学性质成正相关,漠河产落叶松的高密度反应出其晚材率高,可能原因在于相比长白落叶松漠河产落叶松的生长纬度高,其低温时间长,致使落叶松生长缓慢晚材含量高,因此,漠河产落叶松的强度也更好。

M_E9、M_E12、M_E16 等级漠河产落叶松顺纹抗压强度的平均值为 49.2、51.2 MPa 与 66.8 MPa,其弦向静曲强度平均值分别为 90.3、91.1 MPa 与 127.9 MPa,M_E16 等级落叶松的顺纹抗压强度和弦向静曲强度明显高于其他 2 个等级,说明 FFT 弹性模量分级后等级越高抗压强度和静曲强度也越高。通过将落叶松分等后利用,可以将 M_E16 等级的落叶松用于对力学性能要求较高的地方。

3 个等级的落叶松中,M_E12 等级落叶松的密度变异系数最小,M_E16 等级落叶松的静曲强度变异系数和顺纹抗压强度变异系数最小。对于清材小试样,抗压强度和静曲强度的变异系数和试样的纹理、材质关系密切。说明 M_E16 等级落叶松的清材小试样的材质比较均匀,力学性质也更稳定。

漠河兴安落叶松无疵试样 3 个加载下的弹性模量有所不同,弦向弹性模量大于径向的弹性模量,但 3 个加载方向弹性模量间的差异不显著,与 E. J. Biblis^[24]等对美国南方松无疵小试样的弦向 MOE 和径向 MOE 无显著差异的结果一致。E. J. Biblis^[24]认为南方松径向和弦向 MOE 差异不显著的原因是其剪切模量 G_{LT} 和 G_{LR} 之间差异不显著引起的。本试验取材漠河落叶松,测出其弦向和径向 MOE 差异不显著,推测其 G_{LT} 和 G_{LR} 之间无显著差异。R1 和 R2 方向加载的弹性模量不显著是因为在测试两者的加载方向下涉及到的剪切模量均为 G_{LR},落叶松 G_{LT} 和 G_{LR} 间无显著差异。

参考文献:

[1] 何敏娟,LAM F. 木材在北美建筑结构中的应用[J]. 特种结构,2003,20(4):48-51.
HE M J,LAM F. Introduction of wood used in building engi-

neering in north American[J]. Special Structures, 2003, 20 (4):48-51. (in Chinese)

[2] TABIEI A, WU J. Three-dimensional nonlinear orthotropic finite element material model for wood[J]. Composite Structures, 2000, 50(2):143-149.

[3] 娄万里,任海青,江京辉,等.落叶松规格材目测分等的研究[J].木材工业,2010,24(2):1-4.

LOU W L, REN H Q, JIANF J H, *et al.* Effects of major defects on dimensional larch lumber visual grading[J]. China Wood Industry, 2010, 24(2):1-4. (in Chinese)

[4] 任海青,郭伟,殷亚方.北美规格材机械分等综述[J].世界林业研究,2006,19(3):66-70.

REN H Q, GUO W, YIN Y F. Machine grading of lumber in north America [J]. World Forestry Research, 2006, 19(3):66-70. (in Chinese)

[5] 龚迎春,任海青.正交胶合木的特性及发展前景[J].世界林业研究,2016,29(3):71-74

GONG Y C, REN H Q. Characteristics and development prospect of cross-laminated timber [J]. World Forestry Research, 2016, 29(3):71-74. (in Chinese)

[6] JIANG J H, LU J X, REN H Q, *et al.* Assessment of flexural properties of different grade dimension lumber by ultrasonic technique [J]. Journal of Forestry Research, 2007, 18(4):305-308.

[7] ROSS R J, PELLERIN R F. NDE of wood based composites with longitudinal stress wave[J]. Forest Product s Journal, 1988, 38(5) :39-45.

[8] 王正,饶鑫,杨小军,等.轻型木结构规格材弹性模量的两种无损法检测与评级[J].林产工业,2013,40(5):30-33.

WANG Z, RAO X, YANG X J, *et al.* Non-destructive testing and ratings of MOE of SPF stock lumbers by the frequency method and sound velocity method[J]. China Forest Products Industry, 2013, 40(5) :30-33. (in Chinese)

[9] 段新芳,王平,周冠武,等.应力波技术检测古建筑木构件残余弹性模量的初步研究[J].西北林学院学报,2007,22(1):112-114.

DUAN X F, WANG P, ZHOU G W, *et al.* Nondestructive evaluation of dynamic moe of ancient wooden structure members by stress wave method [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(1):112-114. (in Chinese)

[10] 江京辉,吕建雄,任海青,等.3种无损检测技术评估足尺规格材的静态弹性模量[J].浙江林学院学报,2008,25(3):277-281.

JIANG J H, LU J X, REN H Q, *et al.* Evaluation of modulus of elasticity for dimension lumber by three nondestructive techniques [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25 (3):277-281. (in Chinese)

[11] 钟卫洲,宋顺成,黄西成,等.三种加载方向下云杉静动态力学性能研究[J].力学学报,2011,43(6):1141-1150.

ZHONG W Z, SONG S C, HUANG X C, *et al.* Research on static and dynamic mechanical properties of spruce wood by three loading directions [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(6):1141-1150. (in Chinese)

[12] 刁海林,蔡道雄,罗建举,等.红锥3向弹性常数研究[J].中国农学通报,2012,28(4):41-45.

DIAO H L., CAI D X, LUO J X, *et al.* Study on three elastic constants of *Castanopsis hystrix* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(4):41-45. (in Chinese)

[13] GB/T 1936.2-2009.木材抗弯弹性模量测定方法[S].北京:中国标准出版社,2009.

[14] GB/T 1933-2009.木材密度测定方法[S].北京:中国标准出版社,2009.

[15] GB/T 1935-2009.木材顺纹抗压强度试验方法[S].北京:中国标准出版社,2009.

[16] DUJU A, NAKAI T, NAGAO H. Nondestructive evaluation of mechanical strength of sarawak timbers[C]. Hungary; 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 2000.

[17] 江京辉,吕建雄,任海青,等.3种无损检测技术评估足尺规格材的静态弹性模量[J].浙江农林大学学报,2008,25(3):277-281.

JIANG J H, LU J X, REN H Q, *et al.* Evaluation of modulus of elasticity for dimension lumber by three nondestructive techniques [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25 (3):277-281. (in Chinese)

[18] GB/T 50708-2012.胶合木结构技术规范[S].北京:中国标准出版社,2012.

[19] GB/T 26899-2011.结构用集成材[S].北京:中国标准出版社,2012.

[20] 邵亚丽,邢新婷,赵荣军,等.不同林分长白落叶松木材气干密度和主要力学性质的变异性与相关性[J].中南林业科技大学学报,2012,32(2):141-146.

SHAO Y L, XING X T, ZHAO R J, *et al.* Variability and relationship between wood density and main wood mechanical properties in different stand *Larix olgensis*[J]. Journal of Central South Forestry University, 2012, 32(2):141-146. (in Chinese)

[21] 刘镇波,刘一星,于海鹏.基于声振动的木材力学性能无损检测[C].广西南宁:中国林学会木材科学分会第十次学术研讨会.2005.

[22] 栾树杰,林彦,杨彩民.人工红松木材密度与晚材率的相关关系—生长轮材质分析之二[J].东北林业大学学报,1983(2):81-98.

LUAN S J, LIN Y, YANG C M. Correlation between wood density and latewood ratio of artificial red pine—analysis of growth wheel [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1983(2) :81-98. (in Chinese)

[23] 徐明,任海青,郭伟.我国杉木材性变异研究进展[J].西北林学院学报,2008,23(1):185-189.

XU M, REN H Q, GUO W, Research progress of variations for wood properties of Chinese fir [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(1):185-189. (in Chinese)

[24] BIBLIS E J. Flexural properties of southern yellow pine small beams loaded on true radial and tangential surfaces[J]. Wood Science & Technology, 1971, 5(2):95-100.