

文章编号:1007-9629(2023)06-0653-07

## 机械应力分级杉木锯材的顺纹抗拉强度

龙卫国<sup>1</sup>, 欧加加<sup>1</sup>, 陈迪<sup>1</sup>, 刘宜丰<sup>1</sup>, 钟永<sup>1,2,\*</sup>

(1. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 四川 成都 610042;

2. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

**摘要:**以杉木锯材为研究对象,对比了不同强度等级机械应力分级杉木锯材的动态弹性模量范围和试样数,探究了机械应力分级杉木锯材的顺纹抗拉强度概率分布规律,并开展了机械应力分级杉木锯材顺纹抗拉的可靠度分析.结果表明:可基于动态弹性模量对杉木锯材进行机械应力分级,机械应力分级杉木锯材位于主要强度等级材质区域 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ 的试样数占比超90.0%,其顺纹抗拉强度的最优概率分布为对数正态分布;杉木锯材顺纹抗拉强度设计值明显高于未分级和目测分级杉木锯材.

**关键词:**杉木锯材;强度等级;机械应力分级;顺纹抗拉强度;可靠度;设计值

中图分类号:TU366.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.06.011

## Tensile Strength Parallel to Grain of Chinese Fir Lumber Graded by Mechanical Stress

LONG Weiguo<sup>1</sup>, OU Jiajia<sup>1</sup>, CHEN Di<sup>1</sup>, LIU Yifeng<sup>1</sup>, ZHONG Yong<sup>1,2,\*</sup>

(1. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610042, China;

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

**Abstract:** Taking Chinese fir lumber as the research object, the dynamic elastic modulus range and the number of samples of mechanical stress graded lumber (MSGL) with different strength grades were compared, and the probability distribution and the reliability analysis for tensile strength parallel to grain of MSGL were explored. The results show that mechanical stress grading of Chinese fir lumber can be carried out based on dynamic elastic modulus. The number of samples of MSGL located in the main strength grade areas  $Q_2$ ,  $Q_3$  and  $Q_4$  exceeds 90.0%, and the optimal probability distribution for tensile strength for MSGL is the lognormal distribution. The design value of tensile strength for MSGL is significantly higher than that of ungraded and visual graded lumber.

**Key words:** Chinese fir lumber; strength grade; mechanical stress graded; tensile strength parallel to grain; reliability; design value

杉木的分布面积和蓄积量在中国人工林中均排第一,其自古以来就是中国最主要的建材之一<sup>[1]</sup>.但由于中国现代木结构发展较晚,国产结构用材体系尚未完善,结构用木材产品基本完全依靠进口,杉木等国产木材主要限制于家具、门窗等非结构用领域<sup>[2-3]</sup>.

中国现有方木与原木结构体系中的木材强度指标是以清材无疵小试件测试数据为基础构建的,其强度设计值仅取决于树种类别<sup>[4]</sup>.目前,国外一般采用目测分级或机械应力分级方法对锯材进行分等,并以足尺破坏性试件测试数据为基础<sup>[5-6]</sup>.机械应力分级方法主要有静态和无损动态2种测试方法<sup>[2-3]</sup>.

收稿日期:2022-07-09; 修订日期:2022-09-08

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2019YFD1101001)

第一作者:龙卫国(1967—),男,江西吉水人,中国建筑西南设计研究院有限公司教授级高级工程师,硕士.E-mail:xnymjg@cscec.com

通讯作者:钟永(1985—),男,湖北荆州人,中国林业科学研究院副研究员,硕士生导师,博士.E-mail:zhongyong108@163.com

锯材是最常用的现代结构用木材产品之一<sup>[2]</sup>。国产锯材的研究始于21世纪初,以中国林科院木工所团队为代表,借鉴国外先进经验开展了系列足尺破坏试验研究,主要集中于目测分级方面,同时在机械应力分级方面也开展了尝试性研究<sup>[2,3,7-8]</sup>。但与国外先进国家相比仍较落后,在构建适应于中国自身国情的机械应力分级锯材体系仍有待完善。

为此,本研究以国产人工林杉木锯材为研究对象,开展了机械应力分级杉木锯材的无损振动试验、足尺破坏性试验和可靠度分析,比较了不同分级方法对杉木锯材强度设计指标的影响,验证了机械应力分级方法的可行性。

## 1 试验

### 1.1 原材料

国产人工林杉木采自贵州省黔东南苗族侗族自治州从江县,平均胸径约25 cm。经过锯截、干燥、刨光等流程,将其加工成40 mm×140 mm×4 000 mm的锯材,随机选取杉木锯材试件220根。

### 1.2 测试方法

用Metriguard公司Model 340 E-computer对杉木锯材进行横向振动无损检测,得到其动态弹性模量 $E$ <sup>[2]</sup>:

$$E = GL^3 f^2 / (Kbt^3) \quad (1)$$

式中: $G$ 为杉木锯材所受的重力,N; $L$ 为杉木锯材的测试

跨度,mm; $f$ 为杉木锯材的基本振动频率,Hz; $K$ 为常数,取 $1.83 \times 10^6$ ;  $b$ 、 $t$ 分别为杉木锯材的宽度和厚度,mm。

由于缺乏杉木锯材机械应力分级的相关研究,参考国外标准机械应力分级规定<sup>[5]</sup>,建议分为5个材质区间且落入最高和最低材质区间的杉木锯材试件数占比不宜超过10.0%。杉木锯材动态弹性模量的统计结果及机械应力分级见图1。由图1可见:材质区间 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ 、 $Q_5$ 对应的动态弹性模量范围分别为 $E > 11.2$  GPa、 $E = 9.4 \sim 11.2$  GPa、 $E = 7.6 \sim 9.4$  GPa、 $E = 5.8 \sim 7.6$  GPa、 $E < 5.8$  GPa,其试样数占比 $P$ 分别为5.9%、25.0%、48.2%、19.5%、1.4%。后文将重点对比分析材质区间 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ (总占比超过90.0%)和未分级杉木锯材(All)的顺纹抗拉强度 $f_s$ (取平均值)指标差异,以验证机械应力分级杉木锯材制造的可行性和有效性。

根据GB/T 28993—2012《结构用锯材力学性能测试方法》进行杉木锯材足尺寸试件的顺纹抗拉测试,测试破坏时间控制在1 min内。杉木锯材足尺寸试件的顺纹抗拉强度 $f_s$ 计算式为:

$$f_s = F_{\max} / (bt) \quad (2)$$

式中: $F_{\max}$ 为杉木锯材足尺寸试件的最大承载力,N。

力学性能测试结束后,立即从试件破坏附近处截取含水率试件,根据GB/T 1931—2009《木材含水率测定方法》测试杉木锯材的含水率,得到杉木锯材的平均含水率为11.9%。

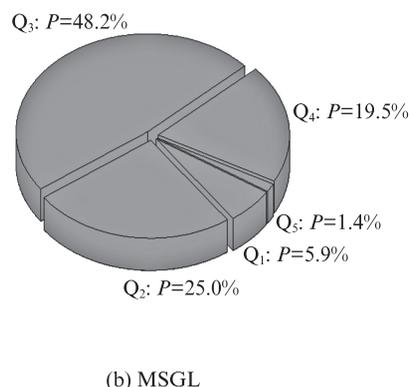
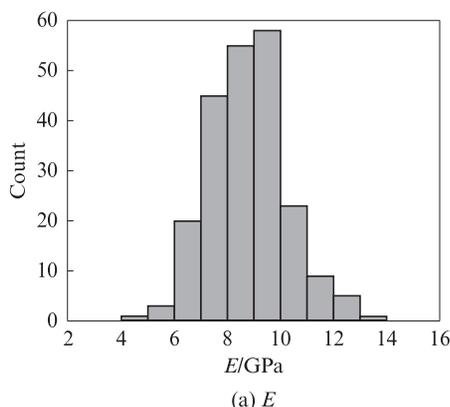


图1 杉木锯材动态弹性模量的统计结果及机械应力分级  
Fig. 1 Statistical results of  $E$  and MSG of Chinese fir lumbers

## 2 结果与分析

### 2.1 杉木锯材顺纹抗拉强度的试验结果

采用单因素方差分析方法比较不同材质区间杉木锯材的顺纹抗拉强度(显著性检验水平 $\alpha=0.05$ ),杉木锯材的顺纹抗拉强度试验统计结果见表1(表中 $N$ 为杉木锯材的数量;CV为变异系数)。由表1可见:

未分级杉木锯材的 $f_s$ 为25.59 MPa、变异系数为34.0%;经过动态弹性模量分级后,材质区间 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ 杉木锯材的 $f_s$ 存在显著差异,随着动态弹性模量的增加而增加;材质区间 $Q_2$ 的 $f_s$ 显著高于未分级杉木锯材,材质区间 $Q_3$ 、 $Q_4$ 的 $f_s$ 与未分级杉木锯材无显著差异,但材质区间 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ 杉木锯材 $f_s$ 的变异系数均显著低于未分级杉木锯材。这表明采用无损动态弹性

表1 杉木锯材的顺纹抗拉强度试验统计结果

Table 1 Test statistical results of tensile strength parallel to grain of Chinese fir lumbers

Zone	N	$f_s$ /MPa	Standard deviation/MPa	CV/%
All	220	25.59	8.69	34.0
Q <sub>2</sub>	55	30.60	7.99	26.1
Q <sub>3</sub>	106	24.47	6.39	26.1
Q <sub>4</sub>	43	18.76	4.14	22.1

模量对杉木锯材进行机械应力分级的方法,能够显著降低杉木锯材 $f_s$ 的离散性.

2.2 概率分布类型和标准值

参考文献[7,9],选用正态分布(normal)、对数正态分布(lognormal)、两参数威布尔分布(2-P-Weibull)对不同材质区间杉木锯材 $f_s$ 的概率分布进行拟合,并基于最小二乘法确定不同概率分布中的待定参数 $\theta$ .最小二乘法的理论算式为:

$$\varphi = \min \sum_{i=1}^n [F(x_i, \theta) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n [F(x_i, \hat{\theta}) - y_i]^2 \quad (3)$$

式中: $\varphi$ 为累积概率最小误差的平方和; $F(x_i, \theta)$ 、 $y_i$ 分别为杉木锯材实测 $f_s$ 点 $x_i$ 对应的理论累积概率、实

测累积概率; $\hat{\theta}$ 为最小二乘法拟合的参数; $n$ 为杉木锯材实测 $f_s$ 的总个数.

杉木锯材顺纹抗拉强度的拟合结果见图2,拟合参数见表2(表中 $f_k$ 为杉木锯材的顺纹抗拉强度标准值; $e_1$ 为误差平方和; $e_2$ 为单点最大误差; $R$ 为相关系数).由图2及表2可见,采用Lognormal拟合的不同材质区间杉木锯材 $f_s$ 结果均最佳,误差平方和与单点误差均最小,相关系数最大.因此,本文将以Lognormal拟合的参数值来确定杉木锯材的 $f_k$ (见式(4))和顺纹抗拉强度标准值设计值 $f_d$ .

$$f_k = e^{\mu - K\sigma} \quad (4)$$

式中: $\mu$ 、 $\sigma$ 分别为杉木锯材 $f_s$ 对数化后的平均值和标准差; $K$ 为标准值取值参数<sup>[10]</sup>.

中国现有的方木与原木结构体系中规定的木材强度等级直接以强度设计值来标识:强度等级TC11为木材抗弯强度设计值为11 MPa;其他现代结构用木材产品则以强度标准值来标识,如胶合木强度等级TC<sub>1</sub>24代表的是木材抗弯强度标准值为24 MPa<sup>[4]</sup>.国外则大多以强度标准值来标识结构用木材强度等级<sup>[5-6]</sup>.综上,以顺纹抗拉强度标准值来标识杉木锯材的强度等级,按照向下取整原则,未分级杉木锯材可表示为T13,材质区间Q<sub>2</sub>、Q<sub>3</sub>、Q<sub>4</sub>对应的机械应力分级锯材则可表示为T17、T14和T12.

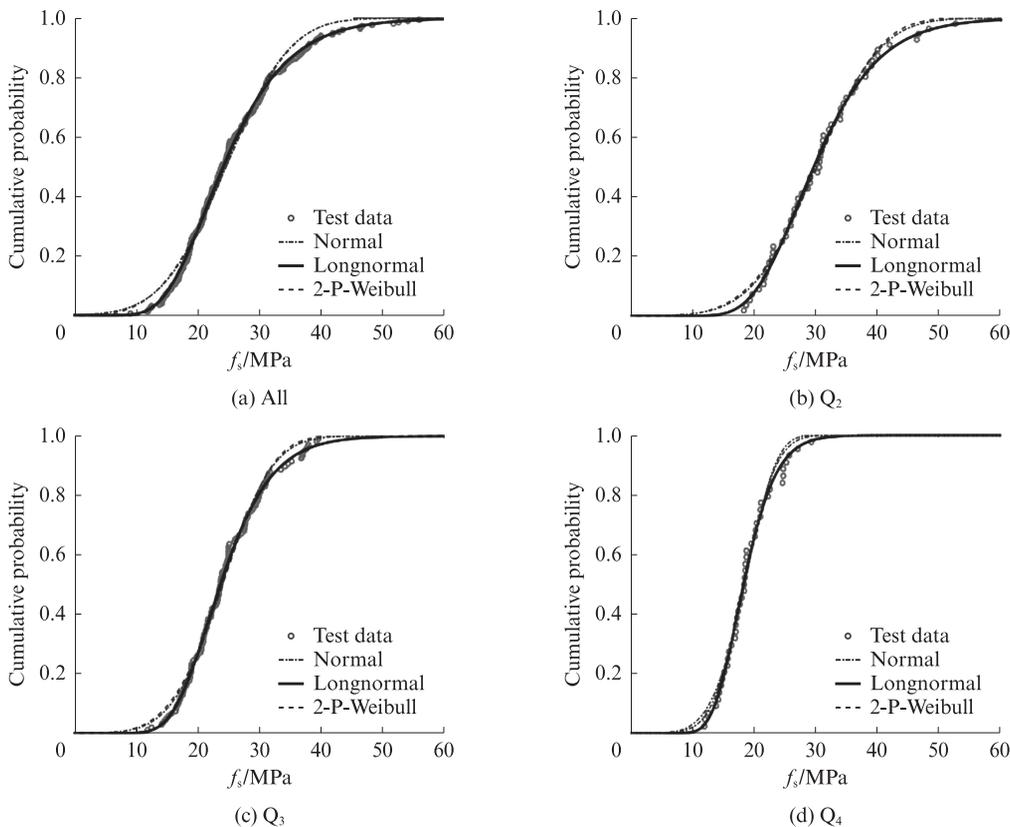


图2 杉木锯材顺纹抗拉强度的拟合结果

Fig. 2 Fitting results of tensile strength parallel to grain of Chinese fir lumbers

表2 杉木锯材顺纹抗拉强度的拟合结果

Table 2 Characteristic values and fitting results of tensile strength parallel to grain of Chinese fir lumbers

Zone	$f_k/\text{MPa}$	Method	$f_s/\text{MPa}$	Standard deviation/MPa	CV/%	$e_1$	$e_2$	R
All (T13)	13.51	Normal	24.59	8.11	33.0	0.206	0.058	0.973
		Lognormal	25.54	8.87	34.7	0.025	0.012	0.999
		2-P-Weibull	24.64	8.06	32.7	0.213	0.060	0.974
Q <sub>2</sub> (T17)	17.88	Normal	29.99	8.16	27.2	0.032	0.057	0.983
		Lognormal	30.77	8.78	28.5	0.018	0.046	0.997
		2-P-Weibull	29.85	8.08	27.1	0.041	0.037	0.977
Q <sub>3</sub> (T14)	14.69	Normal	23.98	6.45	26.9	0.072	0.066	0.989
		Lognormal	24.59	6.83	27.8	0.022	0.051	0.994
		2-P-Weibull	23.87	6.43	27.0	0.098	0.072	0.984
Q <sub>4</sub> (T12)	12.11	Normal	18.39	4.08	22.2	0.047	0.094	0.984
		Lognormal	18.73	4.27	22.8	0.025	0.065	0.995
		2-P-Weibull	18.24	4.12	22.6	0.070	0.108	0.974

## 2.3 可靠度分析

### 2.3.1 抗力和荷载统计参数

参考文献[7, 11], 杉木锯材顺纹受拉构件进行可靠度分析时, 采用功能函数  $G$  来描述其极限状态.

$$G = f_s K_1 K_2 K_3 - \frac{f_k K_D (d + \rho q) K_4}{\gamma_R (\gamma_G + \Psi \rho \gamma_Q)} \quad (5)$$

式中:  $K_1$  为荷载持续效应系数;  $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  分别为几何参数不定性、计算模式不定性和作用效应不定性的调整系数;  $K_D$  为长期荷载效应的调整系数, 其值为随机变量  $K_1$  的平均值;  $d$  为恒荷载  $L_D$  与其标准值的比值;  $q$  为活荷载与其标准值的比值;  $\rho$  为活荷载标准值与恒荷载标准值的比值;  $\gamma_R$ 、 $\gamma_G$ 、 $\gamma_Q$  分别为抗力、恒荷载、活荷载的分项系数;  $\Psi$  为荷载效应组合系数. 根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》确定  $\gamma_G$ 、 $\gamma_Q$ 、 $\Psi$  的值.

$L_R$ 、 $L_O$ 、 $L_W$ 、 $L_S$  分别为住宅楼面活荷载、办公室楼面活荷载、雪荷载和风荷载; 统计参数的名义值为其平均值与标准值的比值. 统计参数的名义值和变异系数见表3.

基于一次二阶矩验算点法开展不同强度等级杉木锯材顺纹受拉构件的可靠度分析, 探究杉木锯材顺纹受拉构件可靠度指标的影响因素. 在可靠度分析中, 主要考虑恒荷载+住宅楼面活荷载 ( $L_D+L_R$ )、恒荷载+办公室楼面活荷载 ( $L_D+L_O$ )、恒荷载+风荷载 ( $L_D+L_W$ )、恒荷载+雪荷载 ( $L_D+L_S$ ) 4种荷载组合, 荷载比值  $\rho$  为 0、0.2、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0. 参考 GB 50005—2017《木结构设计标准》, 在可靠度分析时, 结构安全等级定为二级, 设计工作年限定为 50 a. 由于杉木锯材顺纹抗拉破坏属于脆性破坏, 其受拉构件的目标可靠度  $\beta_0$  取 3.7.

表3 统计参数的名义值和变异系数

Table 3 Nominal value and CV of statistic parameters

Random variable	Probability distribution	Nominal value	CV/%
$K_1$	Normal	0.720	12.0
$K_2$	Normal	1.000	3.0
$K_3$	Normal	1.000	5.0
$K_4$	Normal	1.000	5.0
$L_D$	Normal	1.060	7.0
$L_R$	Gumbel	0.644	23.3
$L_O$	Gumbel	0.524	28.8
$L_W$	Gumbel	1.000	19.0
$L_S$	Gumbel	1.040	22.0

### 2.3.2 可靠度指标影响因素

以未分级和材质区间  $Q_3$  的杉木锯材为例, 分析杉木锯材顺纹受拉构件可靠度指标  $\beta$  的影响因素, 结果见图3、4. 由图3、4可见: 所有杉木锯材的  $\beta$  均随着  $\gamma_R$  的增大呈非线性递增, 且递增速率先快后慢; 当  $\gamma_R$  为定值时, 对于荷载组合  $L_D+L_R$ 、 $L_D+L_O$ ,  $\beta$  随着荷载比值  $\rho$  的增大而递增; 但对于其他荷载组合,  $\beta$  变化波动较小. 这主要是由各荷载变量的平均值与标准值的比值差异所导致<sup>[7, 11]</sup>.

满足目标可靠度 ( $\beta_0=3.7$ ) 要求时, 杉木锯材在不同荷载组合下的抗力分项系数见表4. 由表4可见: 当  $\rho \leq 0.2$  时, 荷载组合  $L_D+L_W$  对应的  $\gamma_R$  最大, 荷载组合  $L_D+L_O$  对应的  $\gamma_R$  最小; 当  $\rho > 0.2$  时, 荷载组合  $L_D+L_S$  对应的  $\gamma_R$  最大, 荷载组合  $L_D+L_O$  对应的  $\gamma_R$  仍然最小; 在相同荷载组合、荷载比下, 材质区间  $Q_2$ 、 $Q_3$  杉木锯材的  $\gamma_R$  基本相等, 均大于材质区间  $Q_4$  杉木锯材, 而小于未分级杉木锯材, 这与表1试验统计和表2拟合得到的各材质强度变异系数规律一致, 即强度

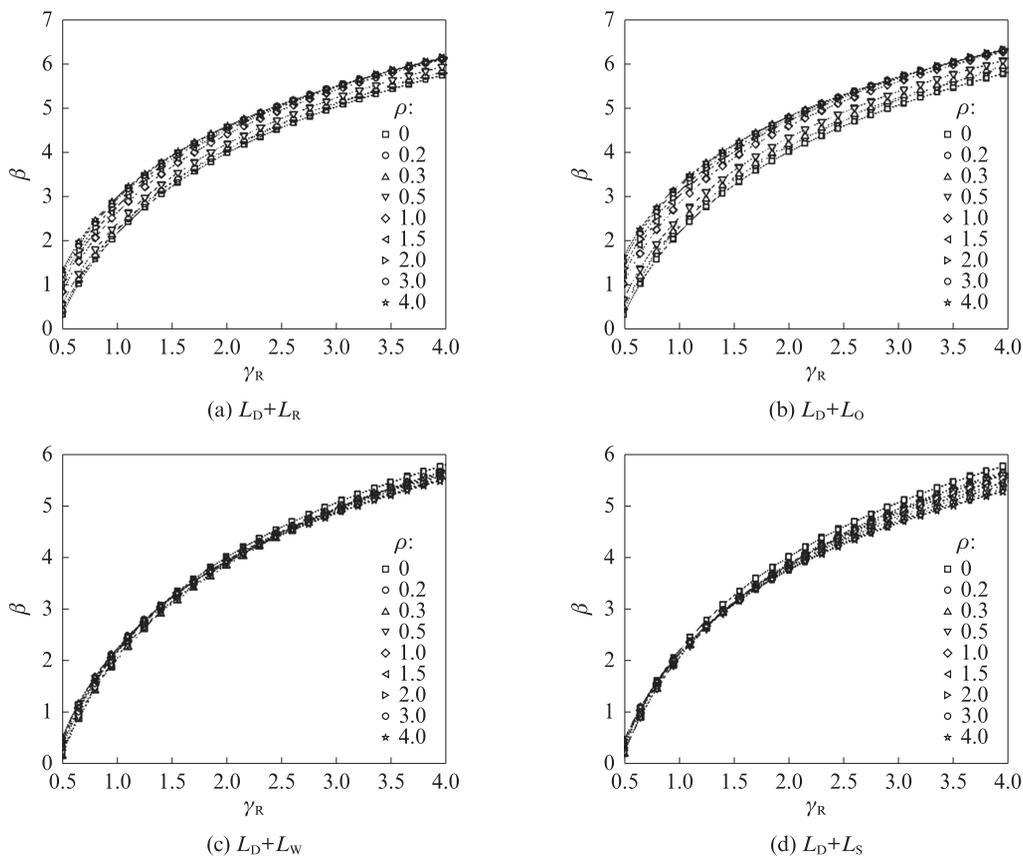


图3 未分级杉木锯材 $\beta$ 与 $\gamma_R$ 之间的关系

Fig. 3 Relation between  $\beta$  and  $\gamma_R$  of ungraded Chinese fir lumbers

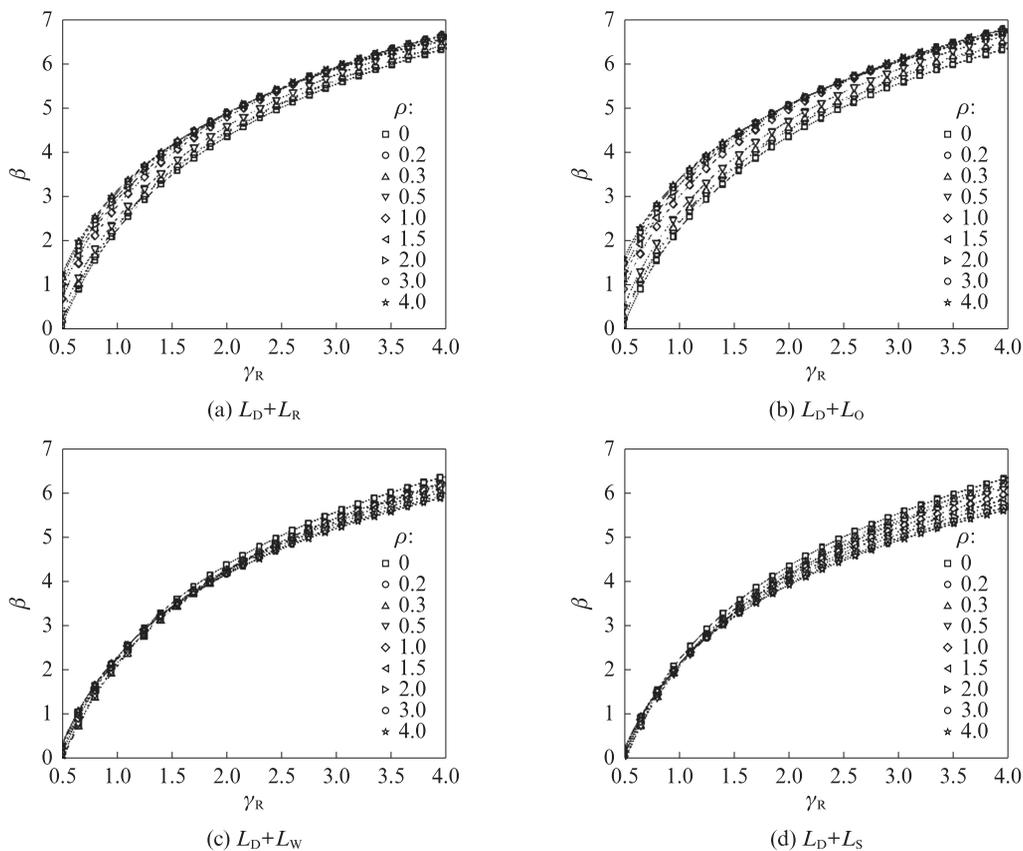


图4 材质区间 $Q_3$ 杉木锯材 $\beta$ 与 $\gamma_R$ 之间的关系

Fig. 4 Relation between  $\beta$  and  $\gamma_R$  of Chinese fir lumbers in  $Q_3$  zone

表4 杉木锯材在不同荷载组合下的抗力分项系数  
Table 4  $\gamma_R$  of lumber under different load combinations

Zone	Load combination	$\rho$								
		0	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
All (T13)	$L_D+L_R$	1.78	1.73	1.72	1.64	1.50	1.44	1.40	1.36	1.34
	$L_D+L_O$	1.78	1.70	1.67	1.58	1.41	1.33	1.29	1.24	1.22
	$L_D+L_W$	1.78	1.87	1.89	1.85	1.82	1.81	1.81	1.82	1.83
	$L_D+L_S$	1.78	1.87	1.88	1.89	1.89	1.90	1.92	1.95	1.96
Q <sub>2</sub> (T17)	$L_D+L_R$	1.60	1.56	1.54	1.48	1.36	1.30	1.28	1.25	1.23
	$L_D+L_O$	1.60	1.53	1.50	1.42	1.27	1.21	1.18	1.14	1.13
	$L_D+L_W$	1.60	1.68	1.70	1.67	1.64	1.65	1.65	1.67	1.68
	$L_D+L_S$	1.60	1.66	1.69	1.70	1.71	1.73	1.76	1.79	1.81
Q <sub>3</sub> (T14)	$L_D+L_R$	1.61	1.56	1.55	1.49	1.37	1.31	1.29	1.26	1.25
	$L_D+L_O$	1.61	1.54	1.51	1.42	1.28	1.22	1.19	1.15	1.14
	$L_D+L_W$	1.61	1.69	1.71	1.68	1.65	1.66	1.66	1.68	1.69
	$L_D+L_S$	1.61	1.67	1.70	1.71	1.72	1.74	1.77	1.80	1.83
Q <sub>4</sub> (T12)	$L_D+L_R$	1.50	1.46	1.44	1.38	1.28	1.23	1.21	1.20	1.19
	$L_D+L_O$	1.50	1.43	1.40	1.33	1.20	1.15	1.12	1.10	1.09
	$L_D+L_W$	1.50	1.57	1.59	1.56	1.55	1.56	1.57	1.59	1.60
	$L_D+L_S$	1.50	1.55	1.58	1.60	1.62	1.65	1.68	1.72	1.74

变异系数大的杉木锯材抗力分项系数大。

## 2.4 顺纹抗拉强度设计值的确定

根据结构用木材设计指标可靠度分析方法<sup>[7,11]</sup>, 杉木锯材顺纹抗拉强度设计值 $f_d$ 为:

$$f_d = \frac{f_k K_D}{\gamma_R} \quad (6)$$

需要说明的是,不同荷载组合、荷载比值的 $\gamma_R$ 波动范围较大,如果取最不利荷载组合、荷载比值下的 $\gamma_R$ 用于确定强度设计值,将导致构件的安全性偏于保守且用材浪费.参考GB 50005—2017,以 $L_D+L_R$ 、 $\rho=1.5$ 作为基准条件来确定杉木锯材的顺纹抗拉强度设计值。

不同分级方法下杉木锯材的顺纹抗拉强度设计值见表5.由表5可见,经过机械应力分级后,强度等级T17、T14、T12的杉木锯材 $f_d$ 比未分级杉木锯材提升了5%~46%,比目测分级下3个主要目测强度等级(Ic、IIc、IIIc)的杉木锯材(已转化为40 mm×140 mm

下的强度设计值)提升了3%~17%.由此表明机械应力分级方法的可行性。

另外,由于机械应力分级可以显著降低杉木锯材顺纹抗拉强度的离散性,会使机械应力分级低等级杉木锯材(如T12)的 $f_d$ 可能高于未分级杉木锯材(T13)的 $f_d$ ,而未分级足尺杉木锯材(T13)的 $f_d$ 与清材小试样(TC11-B)<sup>[4]</sup>获得的 $f_d$ 基本一致.基于此,建议在进一步制修订国内木结构设计标准过程中,可以参考欧洲标准EN 338《Structural timber-strength classes》,对于不同分级方法下的结构木材,其强度等级可基于统一强度等级表进行确认和标识,而在确定其强度设计值时,需考虑不同分级方法下对应的强度变异系数。

## 3 结论

(1)采用动态弹性模量对杉木锯材进行机械应力分级,提出了不同强度等级机械应力分级杉木锯材对应的动态弹性模量界限值。

(2)对数正态分布能够较好地拟合不同强度等级机械应力分级杉木锯材的顺纹抗拉强度概率分布,并基于参数法确定了不同强度等级机械应力分级杉木锯材的强度标准值。

(3)开展了不同强度等级机械应力分级杉木锯材顺纹抗拉的可靠度分析,结合目标可靠度要求,确定了不同荷载组合、荷载比值下的抗力分项系数值,并确定了基准条件下的顺纹抗拉强度设计指标。

表5 不同分级方法下杉木锯材的顺纹抗拉强度设计值  
Table 5 Design value of  $f_d$  of Chinese fir lumbars under different grading methods

Grading method	Strength grade	$F_d$ /MPa	Grading method	Strength grade	$F_d$ /MPa
Mechanical stress	T17	9.90	Visual grading <sup>[4]</sup>	Ic	8.45
	T14	8.07		IIc	7.80
	T12	7.09		IIIc	6.50
Ungrade	T13	6.76	Clear wood <sup>[4]</sup>	TC11-B	7.00

(4)机械应力分级方法能够显著提高杉木锯材的顺纹抗拉强度设计指标,相对于未分级足尺寸杉木锯材、目测分级杉木锯材,其顺纹抗拉强度设计指标提升幅度范围分别为5%~46%、3%~17%。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014-2018)[M]. 北京:中国林业出版社, 2019:12-35.  
National Forestry and Grassland Administration. China forestry resource report (2014-2018) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019:12-35. (in Chinese)
- [ 2 ] 周海宾,任海青,吕建雄,等. 分等方法对我国人工林杉木规格材等级的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3):296-301.  
ZHOU Haibin, REN Haiqing, LÜ Jianxiong, et al. Effects of grading methods on dimension lumber grades for Chinese fir plantation [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 296-301. (in Chinese)
- [ 3 ] 任海青,郭伟,费本华,等. 轻型木结构房屋用杉木规格材机械应力分等研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3):363-366.  
REN Haiqing, GUO Wei, FEI Benhua, et al. Mechanical stress grading of Chinese fir dimension lumber for light wood structure houses[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(3):363-366. (in Chinese)
- [ 4 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 木结构设计标准:GB 50005—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of timber structures:GB 50005—2017[S]. Beijing:China Architecture and Building Press, 2017. (in Chinese)
- [ 5 ] Technical Committee CEN/FC 124. Timber structures-strength graded structural timber with rectangular cross section-part 1: General requirements: EN 14081-1 [S]. Belgium: European Committee for Standardization, 2016.
- [ 6 ] Canadian Lumber Standards Accreditation Board Special products standard for machine graded lumber: SPS 2 [S]. Vancouver: National Lumber Grades Authority, 2019.
- [ 7 ] 钟永,武国芳,任海青. 国产结构用规格材的抗弯强度可靠度分析和设计值[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12):119-127.  
ZHONG Yong, WU Guofang, REN Haiqing. Reliability analysis and design value on bending strength of domestic dimension lumber for structural purpose[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(12):119-127. (in Chinese)
- [ 8 ] 郭伟,任海青,殷亚方. 杉木目测分等规格材缺陷类型及分布的研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4):462-465.  
GUO Wei, REN Haiqing, YIN Yafang. Study on types and distribution of visual characteristics about Chinese fir dimension lumbars[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(4):462-465. (in Chinese)
- [ 9 ] FOSCHI R O, FOLZ B R, YAO F Z. Reliability-based design of wood structures [M]. Vancouver: First Folio Printing Corporation Limited, 1989:50-60.
- [ 10 ] 钟永,武国芳,任海青,等. 基于正态随机样本确定结构用木质材料强度标准值的方法[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11):129-138.  
ZHONG Yong, WU Guofang, REN Haiqing, et al. Determination method of characteristic strength for structural wood materials based on normal distribution and random sampling[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11):129-138. (in Chinese)
- [ 11 ] 祝恩淳,牛爽,乔梁,等. 木结构可靠度分析及木材强度设计值的确定方法[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2):28-36.  
ZHU Enchun, NIU Shuang, QIAO Liang, et al. Reliability analysis of wood structures and method for determining design strength value of timber[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2):28-36. (in Chinese)