文章编号:1674-2974(2024)05-0168-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024058

考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型

刘伊津[1],谢启芳[1,2,3†],张利朋[1,2],张保壮[1],杨高杰[4]
[1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055;
2. 结构工程与抗震教育部重点实验室(西安建筑科技大学),陕西 西安 710055;
3. 东北林业大学 土木与交通学院,黑龙江 哈尔滨 150040;
4. 中冶赛迪工程技术股份有限公司,重庆 401122]

摘 要:地震作用下木结构的精细化分析应考虑木材的应变率效应.为确定地震应变率对木材单轴受压力学性能的影响,选取落叶松和樟子松两种木材,分别设计了横纹试件与顺纹试件,通过其在地震应变率$10^{-3}\ s^{-1}$、$10^{-2}\ s^{-1}$、$10^{-1}\ s^{-1}$和准静态应变率$10^{-4}\ s^{-1}$作用下的单轴受压试验,研究了木材应力-应变关系、破坏模式、弹性模量、抗压强度等的变化规律.结果表明:木材抗压强度、弹性模量的单轴受压地震应变率效应明显;随着地震应变率水平的增大,木材抗压强度提高更为显著.进一步建立了考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型,编写了相应的UMAT子程序,并将其嵌入ABAQUS有限元软件中.在此基础上,对木材进行了单轴受压数值模拟,模拟结果与试验结果吻合较好,验证了本构模型、UMAT子程序的正确性.研究成果可为木结构的抗震分析提供本构支持.

关键词:木材;地震应变率;单轴受压;本构模型;UMAT子程序
中图分类号:TU366.3 **文献标志码**:A

Uniaxial Compressive Constitutive Model for Timber Considering Seismic Strain Rate Effects

LIU Yijin[1], XIE Qifang[1,2,3†], ZHANG Lipeng[1,2], ZHANG Baozhuang[1], YANG Gaojie[4]
[1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance of Ministry of Education(Xi'an University of Architecture and Technology), Xi'an 710055, China;
3. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
4. CISDI Engineering Company Limited, Chongqing 401122, China]

Abstract: The strain rate effect of timber should be taken into account in the detailed analysis of timber structure during earthquakes. In order to investigate the impact of seismic strain rate on the mechanical properties of

* **收稿日期**:2023-05-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178303), National Natural Science Foundation of China(52178303);陕西省杰出青年科学基金资助项目(2021JC-44), Science Fund for Distinguished Young Scholars of Shaanxi Province (2021JC-44)
作者简介:刘伊津(1998—),女,陕西咸阳人,西安建筑科技大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail:xieqfgh@xauat.edu.cn

timber under uniaxial compression, two types of timber, *Larix* and *Pinus Sylvestris*, were selected, and perpendicular-to-grain and parallel-to-grain specimens were designed for each type. The stress-strain relationship, failure mode, elastic modulus, and compressive strength of the timber were investigated through uniaxial compression tests under seismic strain rates of 10^{-3} s^{-1}, 10^{-2} s^{-1}, 10^{-1} s^{-1}, as well as a quasi-static strain rate of 10^{-4} s^{-1}. The results indicated a noticeable seismic strain rate effect on the compressive strength and elastic modulus of timber under uniaxial compression. As the seismic strain rate increased, the compressive strength of timber exhibited a more significant increase. The uniaxial compression constitutive model was established, taking into account the seismic strain rate effect. Additionally, a corresponding UMAT subroutine was programmed and integrated into the ABAQUS finite element software. The numerical simulation of timber under uniaxial compression was performed. The results exhibited a strong agreement with the experimental findings, thereby validating the accuracy of both the constitutive model and UMAT subroutine. The research findings can offer constitutive support for seismic analysis of timber structures.

Key words: timber; seismic strain rate; uniaxial compression; constitutive model; UMAT subroutine

木材是人类最早使用的建筑材料之一,是天然可再生植物材料.其有着多孔性、各向异性特征[1-3],并具有复杂力学性能[4-5],表现出明显的非线性受力行为.我国地震多发,木结构在服役过程中可能遭遇不同强度的地震作用,使得木构件产生不同程度的动态变形,在材料层面,木材也相应受到不同于准静态时的地震应变率(10^{-3}~10^{-1} s^{-1})[6]作用影响.与准静态作用下木材的力学性能[7-9]相比,木材在地震应变率作用下会具有明显的应变率效应,其力学性能也存在差异[10-12].因此,研究地震应变率作用下的木材力学性能,并建立考虑地震应变率效应的木材本构模型,对木结构精细化抗震分析具有重要意义.

目前针对木材动态应变率作用下的力学性能研究,常采用 Hopkinson 压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)进行冲击试验.Widehammar[13]通过SHPB试验研究了云杉在应变率水平分别为8×10^{-3} s^{-1}、17 s^{-1}和10^{3} s^{-1}时力学性能的变化规律,并将含水率作为关键因素进行考虑应变率作用的云杉力学性能分析.窦金龙等[14]采用SHPB试验研究了干湿杨木在高应变率(10^{-4}~2×10^{3} s^{-1})作用时的力学性能,通过对比木材动态与准静态下的应力-应变曲线,发现其动态屈服应力约为准静态时的一倍.钟卫洲等[15]通过对云杉在应变率为5×10^{2}~10^{3} s^{-1}时的压缩试验,揭示了其在各纹理方向的破坏机理,并进行木材应变率效应分析.许威等[16]基于SHPB试验对桦木在一定应变率水平(10^{-4}~1.5×10^{3} s^{-1})时的力学性能进行研究,得到了该应变率水平下桦木应力-应变曲线.赵帅等[17]在500~5 000 s^{-1}的应变率范围内对俄罗斯红松进行了SHPB试验,分析了木材初始屈服应力、平台应力和吸能能力的应变率效应.可见,已有研究大多集中于木材在冲击作用等高应变率作用下的力学性能,很少涉及地震应变率作用下木材力学性能研究.

为实现木材精细化受力分析,需在掌握木材复杂受力行为基础上,采用本构模型对其进行表征.基于木材应变率下力学性能研究,在其本构模型建立方面,Tabiei等[18]指出应变率下的木材本构模型可参考Johnson等[19]在金属领域运用的应变率本构模型表征方法.许威[20]基于杨木动态应力-应变曲线,将其简化为线弹性阶段和屈服阶段,并运用本构方程对其进行表征.Xie等[21]通过进行木材顺纹受压试验,建立了木材顺纹地震应变率本构模型.可见,纹理方向成为木材本构模型的关键因素,但已有研究还未涉及考虑地震应变率效应木材各纹理方向的本构模型.

本文选取落叶松和樟子松,在木材横纹和顺纹方向进行地震应变率作用下木材单轴受压试验,研究其应力-应变关系、破坏模式、弹性模量、抗压强度等的变化规律,在此基础上建立考虑地震应变率效

应的木材单轴受压本构模型,编写相应的UMAT子程序并将其嵌入ABAQUS软件,根据试验结果对本构模型及已开发的UMAT子程序进行验证.

1 考虑地震应变率效应木材单轴受压试验

1.1 试件设计与制作

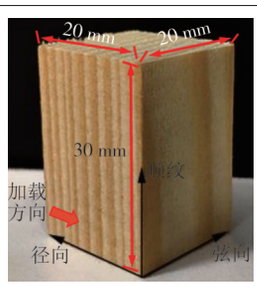
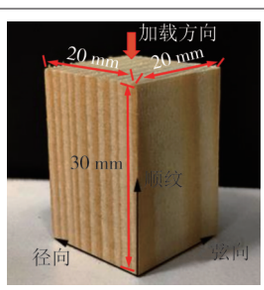
试验用材采用落叶松和樟子松.根据相关试验标准[22-23],测得落叶松含水率为12.7%、密度为590 kg/m^3,樟子松含水率为10.1%、密度为420 kg/m^3.试验由单轴受压试验和弹性模量试验构成,根据《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第2部分:取样方法和一般要求》(GB/T 1927.2—2021)[24]确定单轴受压试件和弹性模量试件设计参数,如表1、表2所示.各试件组均由6个木材纹理相同的试件构成.

1.2 试验加载

试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震实验室进行.木材单轴受压试验依据《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第11部分:顺纹抗压强度测定》(GB/T 1927.11—2021)[25]及《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第12部分:横纹抗压强度测定》(GB/T 1927.12—2021)[26]的加载方案进行加载;木材弹性模量试验依据《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第13部分:横纹抗压弹性模量测定》(GB/T 1927.13—2021)[27]的加载方案进行加载.上述试验均通过位移控制的方式采用MTS322材料疲劳试验机来实现,如图1所示.

表1 单轴受压试件设计参数

Tab. 1 Parameters of uniaxial compression specimens

纹理方向	试件组编号	试件示意图	应变率/s^{-1}	加载速率/(mm·min^{-1})	数量
横纹	CMC-L1 CMC-P1 CMC-L2 CMC-P2 CMC-L3 CMC-P3 CMC-L4 CMC-P4		10^{-4}	1.2×10^{-1}	6
			10^{-3}	1.2×10^{0}	6
			10^{-2}	1.2×10^{1}	6
			10^{-1}	1.2×10^{2}	6
顺纹	PMC-L1 PMC-P1 PMC-L2 PMC-P2 PMC-L3 PMC-P3 PMC-L4 PMC-P4		10^{-4}	1.8×10^{-1}	6
			10^{-3}	1.8×10^{0}	6
			10^{-2}	1.8×10^{1}	6
			10^{-1}	1.8×10^{2}	6

注:表中CMC-L为落叶松横纹单轴受压试件;CMC-P为樟子松横纹单轴受压试件;PMC-L为落叶松顺纹单轴受压试件;PMC-P为樟子松顺纹单轴受压试件.

另外,需将其应变率换算为位移加载速率进行加载,其位移换算方式见式(1).

$$v = 60L\cdot\dot{\varepsilon} \tag{1}$$

式中:$\dot{\varepsilon}$为应变率,s^{-1};L为试件长度,mm;v为加载速率,mm/min.

本次试验选取10^{-3} s^{-1}、10^{-2} s^{-1}、10^{-1} s^{-1}作为地震应变率,同时,为了与静态下木材单轴受压力学性能进行对比,选取10^{-4} s^{-1}作为准静态应变率.该应变率所换算而得的位移加载速率与静态受压速率非常接近,因此,可将该准静态应变率水平近似看待为静态水平.试验结果采用每组试验的平均值进行分析.

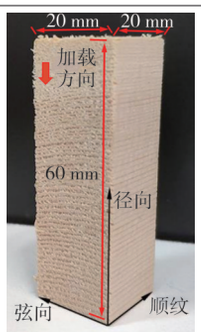
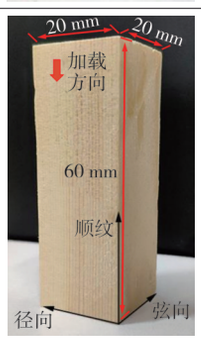
1.3 试验结果

1.3.1 试验现象与破坏模式

由于地震应变率对试件破坏形态的影响不大,在此仅给出了代表性的破坏模式.木材顺纹单轴受压破坏模式为顺纹方向的压缩变形和裂纹扩展破坏见图2(a).当应变率较小时(小于10^{-3} s^{-1})以压缩变形为主.随着应变率提高,试件中的微裂缝逐渐增多

表 2　弹性模量试件设计参数

Tab. 2　Parameters of elastic modulus specimens

纹理方向	试件组编号	试件示意图	应变率/s^{-1}	加载速率/(mm·min^{-1})	数量
横纹	CEM-L1		10^{-4}	3.6×10^{-1}	6
	CEM-P1				
	CEM-L2		10^{-3}	3.6×10^{0}	6
	CEM-P2				
	CEM-L3		10^{-2}	3.6×10^{1}	6
	CEM-P3				
	CEM-L4		10^{-1}	3.6×10^{2}	6
	CEM-P4				
顺纹	PEM-L1		10^{-4}	3.6×10^{-1}	6
	PEM-P1				
	PEM-L2		10^{-3}	3.6×10^{0}	6
	PEM-P2				
	PEM-L3		10^{-2}	3.6×10^{1}	6
	PEM-P3				
	PEM-L4		10^{-1}	3.6×10^{2}	6
	PEM-P4				

注:表中CEM-L为落叶松横纹弹性模量试件;CEM-P为樟子松横纹弹性模量试件;PEM-L为落叶松顺纹弹性模量试件;PEM-P为樟子松顺纹弹性模量试件.

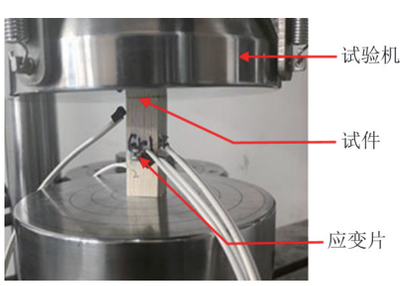


图 1　试验装置

Fig.1　Test setup



(a)顺纹　　(b)横纹

图 2　主要破坏模式

Fig.2　Main failure mode

并不断扩展,导致严重的剪切破坏.

木材微观胞元结构与纹理方向紧密相关,使得木材横纹受压破坏形态与其顺纹受压较为不同.木材横纹破坏模式为横纹压缩变形见图2(b),由于试件在加载初期时胞元间产生弹性变形,至加载中期胞元出现坍塌现象,之后坍塌胞元挤压致密造成横纹压缩变形.另外,随着应变率提高,破坏程度不断加剧,在应变率为10^{-1} s^{-1}时,试件挤压致密现象严重,横纹压缩变形量较大.

1.3.2　*考虑地震应变率效应的木材应力-应变曲线*

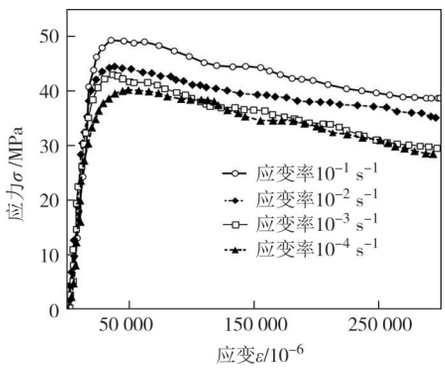
图3为不同地震应变率下木材单轴受压应力-应变曲线.由图可知:

1)落叶松及樟子松试件在不同纹理方向上具有显著的地震应变率效应.其受压过程均可分为弹性阶段和屈服阶段.随应变率增长,不同纹理方向的落叶松、樟子松试件其屈服平台整体呈抬升趋势.由于落叶松横纹试件组存在取材位置误差及木材变异性,其应力-应变随应变率的变化规律与其余情况存在差别.

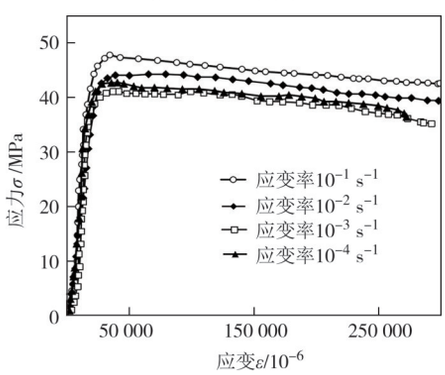
2)比较同一纹理方向不同木材单轴受压应力-应变曲线,可以发现其在各应变率作用下有相似的变化趋势,即在地震应变率范围内同一纹理方向不同木材单轴受压的应力-应变关系变化规律趋同.这一规律可通过Xie等[21]所得出的地震应变率下云杉顺纹单调受压试验结果[见图3(c)]得以验证.

3)比较地震应变率作用下与准静态下的同种木材应力-应变曲线,可知同一应变时地震应变率下与准静态下的应力强度存在差异,但差异幅度不大.由此可表征准静态下木材单轴受压应力-应变关系,再

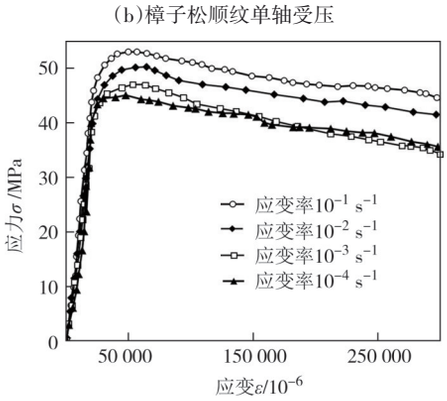
进行木材地震应变率效应分析并将其量化为应变率效应影响系数,通过该影响系数对木材准静态单轴受压本构模型进行修正,建立考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型.



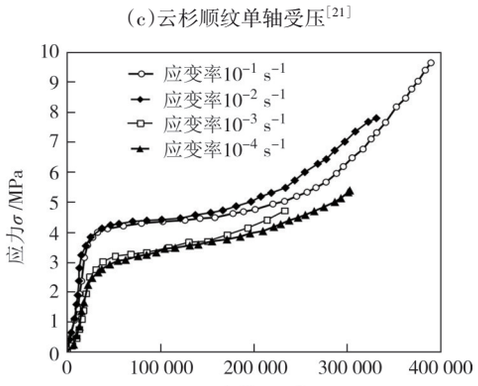
(a)落叶松顺纹单轴受压



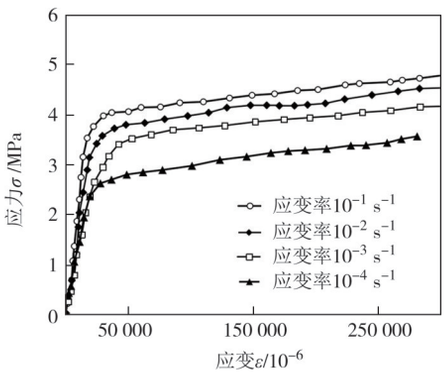
(b)樟子松顺纹单轴受压



(c)云杉顺纹单轴受压[21]



(d)落叶松横纹单轴受压



(e)樟子松横纹单轴受压

图3 木材单轴受压应力-应变关系

Fig.3 Stress-strain relationship of timber under uniaxial compression

2 木材地震应变率效应分析

为建立考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型,使其精确表征木材单轴受压应力-应变关系,亟须进行木材地震应变率效应分析.为此,首先要对木材弹性模量、抗压强度、屈服应变的地震应变率效应进行研究,分析其受地震应变率效应的影响程度;再通过实现木材地震应变率效应量化,完成木材应变率效应分析.

2.1 木材弹性模量、抗压强度和屈服应变的地震应变率效应

图4为云杉[21]、樟子松、落叶松的弹性模量、抗压强度和屈服应变在地震应变率水平与准静态应变率水平下的相对值,与地震应变率对数坐标之间呈现的变化趋势.由图可知:

1)不同木材在各纹理方向上的弹性模量在一定程度上受地震应变率效应影响.如图4(a)所示,随着地震应变率提高,多数木材弹性模量呈逐渐增大的趋势.然而,落叶松横纹试件存在取材位置误差,在木材弹性模量地震应变率效应分析时需忽略该组数据.

2)图4(a)中试件用材取自不同树种,其材性存在差异,但试件的平衡含水率均为12%.可进一步看出,不同木材在纹理方向和平衡含水率均接近时其弹性模量随应变率变化存在相似的趋势,与材性的相关性较小.

3)图4(b)中各试件处于同一地震应变率时其抗

压强度较为接近,随地震应变率的增大,其抗压强度均呈现出同步上升的趋势.可以推测出不同木材在各纹理方向上的抗压强度受地震应变率效应影响较大.

4)图 4(c)反映木材屈服应变的地震应变率效应,由于木材微观胞元孔壁开始坍塌时,已产生较大塑性变形,则可假定其应力-应变曲线屈服点为弹性极限.然而,随着应变率的提高,木材试件的屈服应变存在离散性,受应变率的影响不大.

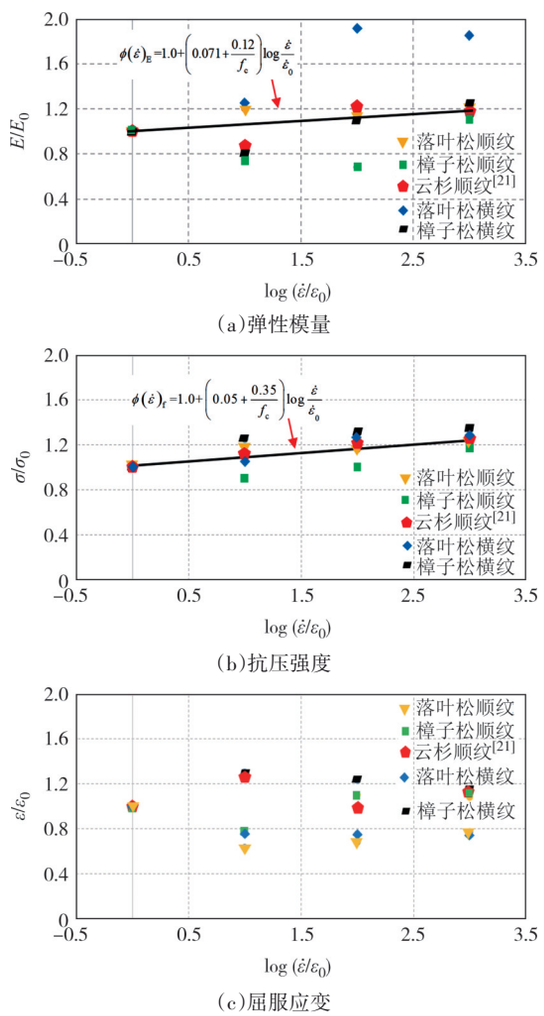


图 4　木材弹性模量、抗压强度与屈服应变的地震应变率效应

Fig.4　Seismic strain rate effects of elastic modulus, compressive strength and yield strain of timber

2.2　地震应变率效应影响系数

针对以上云杉[21]、樟子松、落叶松弹性模量、抗压强度、屈服应变的地震应变率效应变化规律,可以得出:

1)相同木材不同纹理方向的弹性模量、抗压强度,均与地震应变率对数坐标之间呈现较为相似的变化趋势.因此,在实现木材地震应变率效应的量化时,可设定将木材横纹、顺纹方向地震应变率效应进行统一考虑.

2)不同木材的弹性模量与抗压强度受地震应变率效应的影响程度较大.基于此,通过式(2)对其弹性模量、抗压强度的地震应变率效应进行量化,得到相应的地震应变率影响系数.

$$\phi(\dot{\varepsilon}) = 1.0 + \alpha \log\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \tag{2}$$

式中:α为材料参数且与木材所在纹理方向准静态下的抗压强度f_c有关;$\dot{\varepsilon}$为作用于木材的地震应变率水平;ε_0为准静态时的应变率,取$10^{-4}\ \mathrm{s}^{-1}$.

3)归纳 3 种木材的弹性模量与抗压强度,拟合得到与地震应变率效应影响系数相关材料参数α,从而推导出弹性模量和抗压强度的地震应变率影响系数,见式(3)(4).

$$\phi(\dot{\varepsilon})_{\mathrm{E}} = 1.0 + \left(0.071 + \frac{0.12}{f_c}\right)\log\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \tag{3}$$

$$\phi(\dot{\varepsilon})_{\mathrm{f}} = 1.0 + \left(0.05 + \frac{0.35}{f_c}\right)\log\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \tag{4}$$

式中:$\phi(\dot{\varepsilon})_{\mathrm{E}}$和$\phi(\dot{\varepsilon})_{\mathrm{f}}$分别为弹性模量和抗压强度的地震应变率影响系数.

3　考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型

本文基于准静态下木材单轴受压应力-应变关系,引入地震应变率效应影响系数,建立考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型,见式(5).该模型忽略材料内部受力破坏机制,立足木材宏观的力学行为,表征地震应变率作用下木材单轴受压应力-应变关系,有利于工程应用,可为有限元编程计算提供支持.

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{E}_{\mathrm{d}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_{\mathrm{L}} \quad \sigma_{\mathrm{R}} \quad \sigma_{\mathrm{T}} \quad \tau_{\mathrm{LR}} \quad \tau_{\mathrm{LT}} \quad \tau_{\mathrm{RT}}\}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_{\mathrm{L}} \quad \varepsilon_{\mathrm{R}} \quad \varepsilon_{\mathrm{T}} \quad \gamma_{\mathrm{LR}} \quad \gamma_{\mathrm{LT}} \quad \gamma_{\mathrm{RT}}\}^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{\sigma}$为地震应变率下木材应力张量;$\boldsymbol{\varepsilon}$为地震应变率下木材应变张量;$\boldsymbol{E}_{\mathrm{d}}$为地震应变率下木材刚度矩阵;$\sigma_{\mathrm{L}}$、$\sigma_{\mathrm{R}}$、$\sigma_{\mathrm{T}}$、$\tau_{\mathrm{LR}}$、$\tau_{\mathrm{LT}}$、$\tau_{\mathrm{RT}}$为木材地震应变率下顺纹、径向和弦向的应力;$\varepsilon_{\mathrm{L}}$、$\varepsilon_{\mathrm{R}}$、$\varepsilon_{\mathrm{T}}$、$\gamma_{\mathrm{LR}}$、$\gamma_{\mathrm{LT}}$、$\gamma_{\mathrm{RT}}$为木材地震应变率下顺纹、径向和弦向的应变.

3.1 考虑地震应变率效应的木材刚度矩阵推导

考虑地震应变率效应的木材刚度矩阵$\boldsymbol{E}_{\mathrm{d}}$,可由准静态下木材刚度矩阵$\boldsymbol{E}_0$引入地震应变率效应影响系数$\phi(\dot{\varepsilon})$得到:

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{d}} = \phi(\dot{\varepsilon}) \cdot \boldsymbol{E}_0 \tag{8}$$

$$\phi(\dot{\varepsilon}) = \phi(\dot{\varepsilon})_{\mathrm{E}} \tag{9}$$

式中:$\phi(\dot{\varepsilon})$为地震应变率效应影响系数;$\phi(\dot{\varepsilon})_{\mathrm{E}}$为弹性模量的地震应变率影响系数.

准静态下木材刚度矩阵$\boldsymbol{E}_0$为:

$$\boldsymbol{E}_0 = \begin{bmatrix} E_{\mathrm{L}} & -\dfrac{E_{\mathrm{R}}}{\nu_{\mathrm{LR}}} & -\dfrac{E_{\mathrm{T}}}{\nu_{\mathrm{LT}}} & & & \\ -\dfrac{E_{\mathrm{L}}}{\nu_{\mathrm{LR}}} & E_{\mathrm{R}} & -\dfrac{E_{\mathrm{T}}}{\nu_{\mathrm{RT}}} & & & \\ -\dfrac{E_{\mathrm{L}}}{\nu_{\mathrm{LT}}} & -\dfrac{E_{\mathrm{R}}}{\nu_{\mathrm{RT}}} & E_{\mathrm{T}} & & & \\ & & & G_{\mathrm{LR}} & & \\ & & & & G_{\mathrm{LT}} & \\ & & & & & G_{\mathrm{RT}} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中:E_{L}、E_{R}、E_{T}分别为准静态下顺纹、径向和弦向弹性模量;G_{LR}、G_{LT}、G_{RT}分别为准静态下径切面、弦切面和横切面的剪切模量;ν_{LR}、ν_{LT}、ν_{RT}分别为准静态下径切面、弦切面和横切面的泊松比.

另外,假定木材在单一纹理方向受压时,另一垂直方向上无相应应变产生,即忽略不同纹理方向应变与应力间的耦合作用.因此,将式(10)中的所有泊松比取零,则地震应变率下木材刚度矩阵$\boldsymbol{E}_{\mathrm{d}}$可简化为:

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{d}} = \phi(\dot{\varepsilon}) \cdot \begin{bmatrix} E_{\mathrm{L}} & & & & & \\ & E_{\mathrm{R}} & & & & \\ & & E_{\mathrm{T}} & & & \\ & & & G_{\mathrm{LR}} & & \\ & & & & G_{\mathrm{LT}} & \\ & & & & & G_{\mathrm{RT}} \end{bmatrix} \tag{11}$$

将式(3)(9)代入式(11),则考虑地震应变率效应的木材刚度矩阵$\boldsymbol{E}_{\mathrm{d}}$可表示为:

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{d}} = \left[1.0 + \left(0.071 + \frac{0.12}{f_{\mathrm{c}}}\right)\log\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right] \cdot \begin{bmatrix} E_{\mathrm{L}} & & & & & \\ & E_{\mathrm{R}} & & & & \\ & & E_{\mathrm{T}} & & & \\ & & & G_{\mathrm{LR}} & & \\ & & & & G_{\mathrm{LT}} & \\ & & & & & G_{\mathrm{RT}} \end{bmatrix} \tag{12}$$

3.2 准静态下木材弹性模量确定

为获取考虑地震应变率效应的木材刚度矩阵,除地震应变率效应影响系数外,还需确定准静态下木材弹性模量E_{L}、E_{R}、E_{T}.

图5为木材准静态下顺纹、横纹单轴受压应力-应变模型.可以看出,在加载阶段,准静态下顺纹与横纹木材弹性模量均不为常数.由于木材内部存在微弱的损伤演化,加载初期时其应力-应变曲线为非严格线弹性关系;当加载至屈服点后,木材弹性模量较初期时大幅度削弱,这与其微观胞元结构的屈曲、折断、坍塌等损伤现象有极为密切的联系,并使得木材内部产生永久塑性变形.

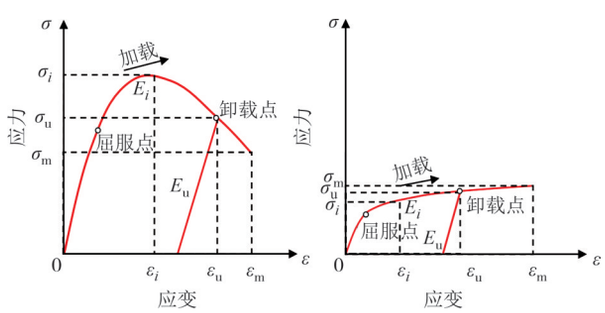


图5 木材单轴受压应力-应变模型

Fig.5 Uniaxial compression stress-strain model of timber

由于木材各向异性特征,木材横纹与顺纹受压的屈服应力差异较大,且其应力-应变曲线变化趋势不一致,具有较为不同的非线性行为.另外,在实际工程中,木材横纹受压多会引起受压损伤而非受压密实,因此可忽略木材横纹受压二次强化阶段.

木材在加载中均存在不同程度的损伤演化且产生塑性变形,出于合理性与工程应用便捷性考虑,本文假定准静态下木材卸载模量为初始弹性模量、卸载阶段木材顺纹与横纹应力-应变曲线均呈线性关系.

式(13)为非线性曲线拟合得到的准静态木材应力-应变曲线表达式,通过求导可得到该本构模型的加载阶段弹性模量,见式(14).可通过调整模型中的准静态木材材料参数,表征木材不同纹理方向的非线性受力行为,即可将木材准静态下顺纹、横纹单轴受压应力-应变曲线进行统一表征.另外,式(15)为木材在各纹理方向的卸载模量E_{u}.

$$\sigma_i = A\varepsilon_i \mathrm{e}^{(1-B\varepsilon_i)} + C\varepsilon_i^2 + D\varepsilon_i \tag{13}$$

$$E_i = A(1 - B\varepsilon_i)\mathrm{e}^{(1-B\varepsilon_i)} + 2C\varepsilon_i + D \tag{14}$$

$$E_u = Ae + D \tag{15}$$

式中:σ_i为准静态下木材纹理主向的应力值;ε_i代表对应木材纹理方向的应变值;E_i为准静态下木材各纹理主向加载阶段的弹性模量,i=L, R, T;A、B、C、D为准静态下木材材料参数;E_u为准静态下木材各纹理主向卸载模量.

已有的木材应变率本构模型[21],其适用范围受限于木材种类与纹理方向.为更大范围地推广应用考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型,如图6所示,本文基于准静态试验结果,借助3种常用木材准静态下单轴受压试验结果[14, 17, 21],拟合得到相应的准静态下木材材料参数A、B、C、D.本文引用3种木材其应变率范围均接近于假定准静态应变率10^{-4} s^{-1}.

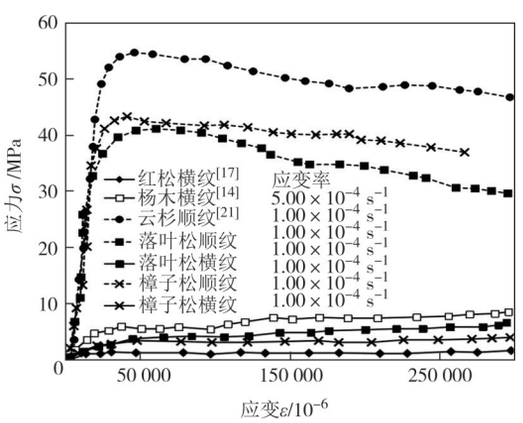


图6　准静态下木材单轴受压应力-应变曲线

Fig.6　Stress-strain curves of wood under uniaxial compression at quasi-static

分析5种常见木材抗压强度与其相应的准静态木材材料参数关系,见图7,可以发现:1)准静态木材材料参数A、B、D与木材抗压强度f_c存在较为稳定的线性关系,且与纹理方向无关;2)准静态木材材料参数B可取其平均值26.70;3)准静态木材材料参数C与木材抗压强度在同一纹理方向下存在线性关系,可以推测准静态木材材料参数C可表征木材各纹理方向非线性受力行为.

相对应的准静态木材材料参数为:

$$\begin{cases} A = 17.01 f_c + 13.57, \\ B = 26.70, \\ C = \beta_1 f_c + \beta_2, \\ D = 5.528 f_c + 13.82 \end{cases} \tag{16}$$

式中:当β_1= −3.01且β_2= −392.4时,木材处于顺纹受压状态;当β_1= −0.25且β_2= 37.42时,木材处于横纹受压状态.

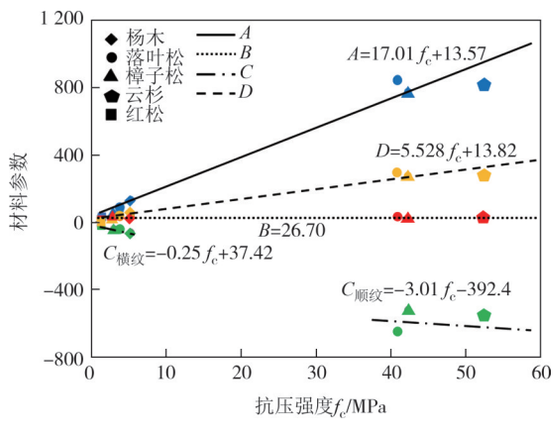


图7　准静态下木材材料参数

Fig.7　Material parameters of timber at quasi-static

因此,准静态木材材料参数均可由木材抗压强度拟合取得.不仅降低了本构模型的参数数量及参数获取难度,使准静态材料参数只与木材抗压强度f_c相关,而且该模型的应用可免于局限在特定树种的适用范围内,延伸至常用木材的单轴受压本构模型的应用中.

4　考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型UMAT子程序实现与模型验证

4.1　考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型UMAT子程序

为方便考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型应用于木结构抗震分析中,通过ABAQUS提供的Fortran程序接口,将上述非线性本构关系模型编入用户材料子程序UMAT,编写流程见图8.具体为:

1)将考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型编入UMAT,调用后计算Jacobian矩阵及应力增量.2)更新应力及状态变量.3)若此时应变小于最大应变,则可更新Jacobian矩阵并计算应力增量,进行应力及状态变量更新;若此时应变不小于最大应变,则计算结束.

4.2　考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型UMAT子程序验证

为验证考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型UMAT子程序的有效性,基于独立单元进行

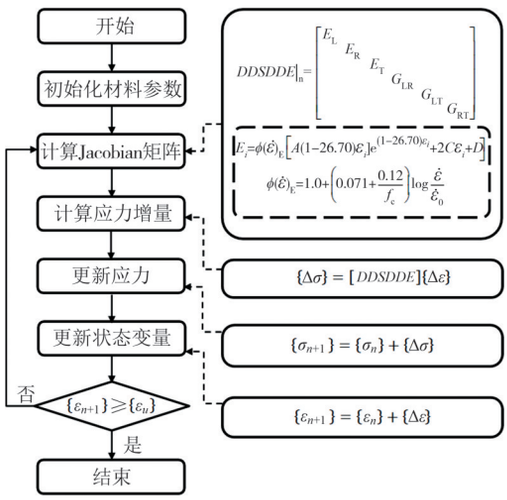


图 8 UMAT程序编写流程

Fig.8 UMAT programming process

测试.建立边长为 1 mm 的立方体单元几何模型,见图9.当木材进行顺纹受压时,x 方向代表木材顺纹方向;当木材进行横纹受压时,x 方向可根据模拟要求代表木材径向或弦向,并赋予 C3D8R 单元类型.

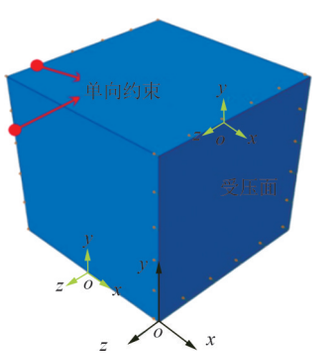


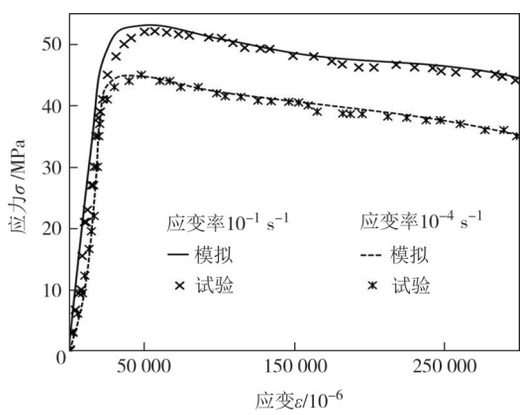
图 9 独立单元模型

Fig.9 Single element model

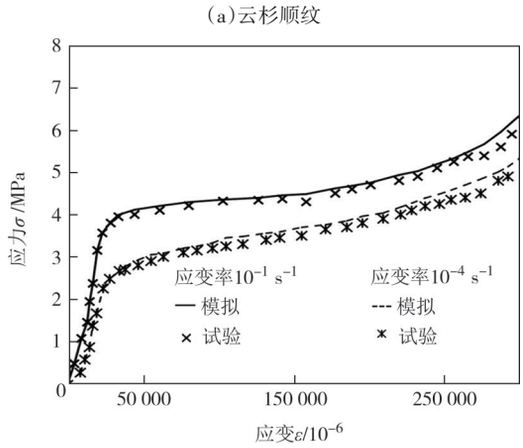
选取地震应变率为 10^{-1} s^{-1}时云杉顺纹[21]、落叶松横纹单轴受压试验结果,并应用所建立的UMAT子程序对地震应变率为 10^{-1} s^{-1}时云杉顺纹[21]方向的单轴受压力学行为及本文地震应变率为 10^{-1} s^{-1}时落叶松横纹方向的单轴受压力学行为进行模拟.在顺纹受压加载时,向受压面施加0.3 mm的位移;在横纹加载时,同样向受压面施加0.3 mm的位移.

在材料力学参数取用方面,取准静态下云杉顺纹方向的抗压强度[21]为41.85 N·mm^2,准静态下落叶松横纹方向(径向及弦向)的抗压强度为2.98 N·mm^2,剪切模量参考文献[28]取值为 G_{LR}=690 N·mm^2, G_{LT}=690 N·mm^2, G_{RT}=50 N·mm^2.

图10为所建立的UMAT子程序对地震应变率为 10^{-1} s^{-1}时云杉顺纹[21]方向的单轴受压力学行为及本文地震应变率为 10^{-1} s^{-1}时落叶松横纹方向的单轴受压力学行为的模拟结果.通过其与试验结果对比,可以看出两者吻合良好,则可确定考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型的正确性,并验证了该UMAT子程序的有效性.



(a)云杉顺纹



(b)落叶松横纹

图 10 数值模拟与试验结果对比

Fig.10 Comparison between numerical simulations and experimental results

5 结 论

1) 木材在不同纹理方向均具有显著的地震应变率效应.随着地震应变率增大,木材屈服强度提高且加剧了木材单轴受压破坏程度.同一纹理方向木材应力-应变曲线形状与准静态加载时相似,不受地震应变率水平作用影响.

2) 通过木材地震应变率效应分析,得出木材在不同纹理方向的弹性模量、抗压强度具有地震应变率效应.基于此,定义地震应变率效应影响系数,实

现了木材地震应变率效应量化.

3) 建立了考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型,开发了考虑地震应变率效应的木材单轴受压本构模型的UMAT材料子程序并将其嵌入ABAQUS软件中.运用所开发的UMAT子程序对木材进行单轴受压力学行为模拟,确定考虑地震应变率效应木材单轴受压本构模型的正确性,并验证了该UMAT子程序的有效性,其可用于木结构的抗震分析.

4) 由于木材地震应变率效应规律受到试件尺寸的影响,但目前仍缺少相关研究,若未来能对该问题开展深入研究,可使考虑地震应变率效应的木材本构模型精确度进一步提升.此外,基于木材材料层面的研究结果对木构件或节点的适用性问题,也有待进一步研究.

参考文献

[1] FOREST P L. Wood handbook: wood as an engineering material [M]. Washingdon DC: University Press of the Pacific, 2010.

[2] 樊承谋,张盛东,陈松来,等. 木结构基本原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
FAN C M, ZHANG S D, CHEN S L, et al. Basic principles of timber structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)

[3] 潘景龙,祝恩淳. 木结构设计原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
PAN J L, ZHU E C. Principle of timber structure design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)

[4] 王明谦,宋晓滨,顾祥林. 基于三维弹塑性损伤模型的木材非线性分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 22-28.
WANG M Q, SONG X B, GU X L. Nonlinear analysis of wood based on three-dimensional combined elastic-plastic and damage model [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7): 22-28. (in Chinese)

[5] 王明谦,顾祥林,宋晓滨,等. 木材非线性受力行为的表征方法研究进展[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(10): 76-86.
WANG M Q, GU X L, SONG X B, et al. State-of-the-art for description methods of nonlinear mechanical behavior of wood[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(10): 76-86. (in Chinese)

[6] BINDIGANAVILE V S. Dynamic fracture toughness of fiber reinforced concrete[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2003.

[7] OUDJENE M, KHELIFA M. Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(11): 3359-3366.

[8] 谢启芳,张利朋,王龙,等. 东北落叶松材单向顺纹受拉损伤模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11): 109-116.
XIE Q F, ZHANG L P, WANG L, et al. Damage evolution model for northeast larch wood under parallel-to-grain tension load[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11): 109-116. (in Chinese)

[9] 杨娜,张雷,秦术杰. 一种描述木材受压的非线性本构模型及试验验证[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 80-88.
YANG N, ZHANG L, QIN S J. A nonlinear constitutive model for wood compression and experimental verification [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 80-88. (in Chinese)

[10] REID S R, PENG C. Dynamic uniaxial crushing of wood [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19 (5): 531-570.

[11] VURAL M. Dynamic response and energy dissipation characteristics of Balsa Wood: Experiment and analysis [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003 (40): 147-170.

[12] 张利朋, 谢启芳, 刘伊津, 等. 考虑地震应变率效应的木材三维弹塑性损伤本构模型及其数值实现[J]. 土木工程学报, 2023,56(3):22-31.
ZHANG L P, XIE Q F, LIU Y J, et al. Elastic-plastic damage constitutive model and numerical implementation for timber considering seismic strain rate effects[J]. China Civil Engineering Journal, 2023,56(3):22-31.(in Chinese)

[13] WIDEHAMMAR S. Stress-strain relationships for Spruce Wood: Influence of strain rate, moisture content and loading direction [J]. Experimental Mechanics, 2004(44): 44-48.

[14] 窦金龙,汪旭光,刘云川. 杨木的动态力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(4): 367-371.
DOU J L, WANG X G, LIU Y C. Dynamic mechanical properties of Poplar Wood[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(4): 367-371. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 许威,花军,张绍群,等. 基于SHPB试验的桦木压缩动力学特性[J]. 林业科学, 2015, 51(5): 95-101.
XU W, HUA J, ZHANG S Q, et al. Research on dynamic

compression characteristics of Birch Wood based on SHPB test [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(5): 95-101. (in Chinese)

[17] 赵帅,赵建新,韩国柱,等. 俄罗斯红松的应变率效应及吸能特性[J]. 高压物理学报, 2017, 31(3): 271-279.
ZHAO S, ZHAO J X, HAN G Z, et al. Strain rate effect and energy absorption characteristics of Russian Pine [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(3): 271-279. (in Chinese)

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

[19] JOHNSON G R, HOEGFELDT J M, LINDHOLM U S, et al. Response of various metals to large torsional strains over a large range of strain rates part 1: ductile metals [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1983, 105(1): 42-47.

[20] 许威. 杨木静动态压缩本构模型研究[J]. 包装工程, 2019, 40(11): 86-92.
XU W. Static and dynamic compression constitutive model of Poplar Wood[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(11): 86-92. (in Chinese)

[21] XIE Q F, ZHANG L P, ZHANG B Z, et al. Dynamic parallel-to-grain compressive properties of three softwoods under seismic strain rates: tests and constitutive modeling[J]. Holzforschung, 2020, 74(10): 927-937.

[22] 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第4部分:含水率测定: GB/T 1927.4—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Test methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens part 4: Determination of moisture content: GB/T 1927.4—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[23] 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第5部分:密度测定: GB/T 1927.5—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Test methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens part 5: Determination of density: GB/T 1927.5—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[24] 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第2部分:取样方法和一般要求: GB/T 1927.2—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Test methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens part 2: Sampling methods and general requirements: GB/T 1927.2—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[25] 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第11部分:顺纹抗压强度测定 : GB/T 1927.11—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Test methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens part 11: Determination of parallel to grain compressive strength: GB/T 1927.11—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[26] 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第12部分:横纹抗压强度测定: GB/T 1927.12—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Test methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens part 12: Determination of transverse grain compressive strength: GB/T 1927.12—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[27] 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第13部分:横纹抗压弹性模量测定: GB/T 1927.13—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Test methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens part 13: Determination of elastic modulus of transverse grain compressive strength: GB/T 1927.13—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[28] 杨高杰. 低应变率下木材单轴受压率本构模型研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
YANG G J. Uniaxial compressive strain-rate constitutive model for wood under low strain rate [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. (in Chinese)