软木材料力学行为及其缓冲吸能特性 研究进展综述

李继承,张斌,谢若泽,钟卫洲

(1.中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621900; 2.工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室,四川 绵阳 621900)

摘要: 综述了软木材料的力学行为及其缓冲吸能特性方面的研究进展,首先从密度、含水率、温度、构造与缺陷、服役时间等方面阐述了不同因素对木材力学性能的影响。然后从宏观观测和微细观分析两方面概述了软木材料力学性能试验的研究进展,从宏观本构模型和细观模拟方面阐述了数值仿真分析进展,并简述了理论建模方面的研究成果。最后从多方面给出了未来相关工作的一些建议。

关键词: 软木材料; 力学行为; 变形; 破坏; 能量吸收

中图分类号: TJ04 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)05-0068-11

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.011

Research Advance on the Mechanical Behaviors and Energy Absorption of Soft Wood

LI Ji-cheng, ZHANG Bin, XIE Ruo-ze, ZHONG Wei-zhou

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, 621900, China; 2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang, 621900, China)

ABSTRACT: In this paper, the research advance on the mechanical behavior and energy absorption characteristics of soft wood is reviewed. Firstly, the effects of various factors, including density, moisture content, temperature, microstructure as well as defect, service time, etc., on the mechanical properties are discussed. Then the experimental investigation progress is summarized from the two aspects of macro-observation and micro-analysis, and the development in numerical simulation analysis is reviewed from the two aspects of constitutive model and mesoscale geometrical model, furthermore, related theoretical work in is also briefly introduced. Finally, some suggestions for future work are given.

KEY WORDS: soft wood; mechanical behavior; deformation; failure; energy absorption

冲击和碰撞现象广泛存在于生产和生活当中,如 设备在运输、迁移等过程中的跌落以及其他异常环境

收稿日期: 2021-03-30; 修订日期: 2021-04-12 **Received**: 2021-03-30; **Revised**: 2021-04-12

基金项目:中国工程物理研究院创新发展基金培育项目(PY20210044)

Fund: Innovation and Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (PY20210044)

作者简介:李继承(1984—),男,博士,副研究员,主要研究方向为冲击动力学。

Biography: LI Ji-cheng (1984—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: impact dynamics.

通讯作者: 钟卫洲 (1978—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为冲击动力学。

Corresponding author: ZHONG Wei-zhou (1978—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: impact dynamics.

引文格式:李继承,张斌,谢若泽,等. 软木材料力学行为及其缓冲吸能特性研究进展综述[J]. 装备环境工程,2021,18(5):068-078.

LI Ji-cheng, ZHANG Bin, XIE Ruo-ze, et al. Research advance on the mechanical behaviors and energy absorption of Soft wood[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 068-078.

冲击现象。冲击作用容易导致结构和材料的损伤破坏,因此,设计高效的缓冲防护结构至关重要。从能量吸收角度看,冲击能量应该耗散于防护材料和结构中,且能量吸收过程应以缓和的方式进行^[1-2]。近年来,多孔材料在缓冲防护结构设计中得到越来越多的应用。多孔材料广泛存在于自然界中,同时人造多孔材料也得到快速发展,主要有3种典型结构:蜂窝材料、开孔泡沫材料和闭孔泡沫材料^[3-5]。天然木材的内部结构特征为蜂窝结构特性,其中软木材料得到最广泛使用。特别是木材防护结构,除具有缓冲吸能作用外,还具有良好的隔热能力,因此在工程应用中具有其余金属多孔材料难以企及的优势^[6-9]。

软木材料的力学行为和吸能特性与其变形和破坏特征密切相关,且具有显著的各向异性特征,其顺纹(加载方向平行于胞孔面)和横纹(加载方向垂直于胞孔面)的力学性能显著不同^[3]。目前针对天然木材力学性能的研究显著少于人造蜂窝材料。在研究方法方面,试验研究是理论分析和数值模拟的基础,也是目前最主要的研究手段,包括宏观观测和微细观结构分析等。随着计算机技术的发展,数值仿真也得到广泛应用,其中有限元模拟可成为试验研究的良好补充。此外,国内外研究者也一直在开展相关理论建模工作,并已取得有意义的成果,但仍然缺乏系统性。

文中基于重大装备包装防护结构冲击安全评估和预测的工程应用背景,针对软木材料力学行为及其缓冲吸能特性的研究现状进行了综述。缓冲吸能特性主要与木材屈服应力、平台应力区间长度等力学性能相关,其中应力幅值体现木材的缓冲能力,而应力应变曲线包络面积则决定木材的吸能特征。因此,文中将主要阐述软木材料力学性能方面的研究进展,包括试验研究、数值仿真和理论建模等方面,并结合相关进展给出未来工作的一些展望。

1 力学性能影响因素

软木材料包括多类树种^[10-12],其力学性能主要包括弹性模量、泊松比、屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、硬度、刚度和冲击韧性等方面。木材的内部微结构具有各项异性特征,如图 1 所示^[13],在轴向、径向和弦向 3 个方向上的微观组织存在明显差异。内部结构在宏观上呈同心圆状年轮的层次形状,并具有纵向和横向组织,其中大多数细胞和组织呈轴向排列,射线组织呈径向排列,如图 2a 所示^[14]。相应地,木材力学性能也呈现各向异性特征。例如在强度方面,木材的压缩、拉伸、弯曲及冲击韧性等均在轴向取得最大值,随着应力与木材纤维方向之间的夹角变大而减小,如图 2b 所示^[15]。

另外, 木材的力学性能还受到包括生长地域在 内的多方面因素的影响, 不同因素的主要影响大致 如下。

1)密度。木材密度是决定其强度和刚度的物质基础。一般来说,密度越大,木材的弹性模量越大,强度和刚度越高,韧性也越优良。

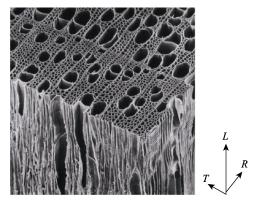


图 1 软木材料典型微细观结构形貌^[13] Fig.1 Typical microstrucuture of soft wood^[13]

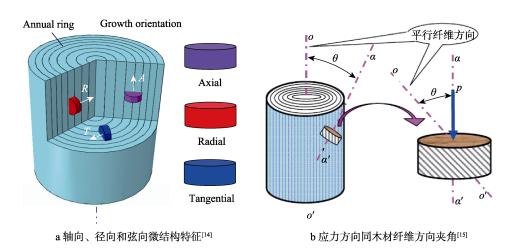


图 2 木材内部不同方向微结构特征和应力方向夹角示意图

Fig.2 Microstructures of wood in different directions and directional scheme of intercepting wood: a) microstructures of wood in different directions^[14]; b) directional scheme of intercepting wood^[15]

- 2)含水率。木材内部单位体积纤维素和木素分子的数目减少时,分子间的结合力将会减弱。因此,含水率增加时,木材的强度将逐渐降低。当含水率高于纤维饱和点时,强度不再随自由水含量的增加而减小,而是基本保持恒定。
- 3)温度。温度对木材力学性能影响比较复杂。一般来说,在室温范围内的影响相对较小,而在高温和极端低温条件下,影响则较显著。温度的变化将导致木材含水率及其分布产生变化,同时还使得木材内部产生预应力和干燥缺陷等。总体来说,温度升高常引起木材强度下降,其冲击韧性也将发生显著削弱。
- 4)木材构造与缺陷。同一树种的早材与晚材其力学性能存在差异,木材的年轮宽度、木材内部的节子等也具有影响。另外,湿材在气干过程中还容易发生开裂和挠曲等干燥缺陷。一般来说,早材密度小于晚材,其弹性模量、强度和刚度等也相对较弱。若木材内部有节子,受外力作用时,节子及其周围区域将产生应力集中,进而弱化木材弹性模量。此外,干燥缺陷也容易使得木材力学性能弱化。
- 5)服役时间。木材在服役过程中其材质也将逐渐发生老化,进而导致内部结构和相应力学性能发生退化,可用耐久性来衡量服役时间的影响。

2 试验研究

针对软木材料的力学性能,国内外学者开展了众

多卓有成效的试验研究。在产品和建筑等领域,主要侧重于准静态力学性能、抗弯性能、耐久性和温/湿度环境下力学行为变化等方面,通过实验测试获取木材的基本力学性能参数和环境适应能力^[1-3,13,16-21];在包装结构防护设计中,则主要关心木材在中高应变率下的冲击性能、能量耗散特性、力学性能应变率敏感性和各向异性特征等^[1-3,14-15,22-31]。在试验宏观观测方面,一般采用材料试验机测试准静态和低应变率力学性能和失效行为,采用中应变率加载设备开展中应变率拉压试验,运用 Hopkinson 设备测试材料高应变率条件下的力学性能^[1-3,13-31]。试验前后常对试件开展微细观结构检测和分析,一般通过扫描电镜观察木材胞元结构尺寸、排列分布在试验前后的变化特征^[13,32-41]。以下将对宏观观测和微细观分析两方面展开阐述。

2.1 宏观观测

美国能源部对不同树种木材开展了系统的力学性能试验,并进行了分析和整理,共涉及密度、体积收缩率、弯曲强度、压缩强度、硬度、刚度、冲击韧性、干燥松弛、加工难易程度和耐久性等方面^[10],相应的力学性能指标分级标准见表 1,在该分级标准条件下,几种典型软木材料的指标取值见表 2。相对来说,国内目前还未见正式出版的类似研究报告,相关资料主要为学位论文和期刊文章^[42],研究数据也较为零散。

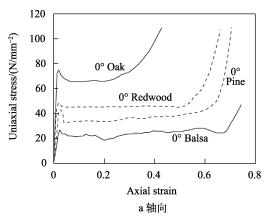
表 1 美国木材力学性能指标分级标准^[10]
Tab.1 Classification standard for mechanical properties of American wood^[10]

| | | | _ | • | | | | | |
|------|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--|--|
| 木材性能 | | 分级标准 | | | | | | | |
| | <u>元</u> ·91 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | | |
| 弯曲强度 | 生材强度(大气压) | | <6000 | ≥6000 | ≥7000 | ≥8000 | ≥11000 | | |
| 压缩强度 | 生材强度(大气压) | | <2200 | ≥2200 | ≥3000 | ≥3600 | ≥4500 | | |
| 硬度 | 生材侧面硬度(磅) | | < 400 | ≥400 | ≥600 | ≥900 | ≥1200 | | |
| 刚度 | 弯曲刚度(1000大气压) | | <800 | ≥800 | ≥1000 | ≥1300 | ≥1500 | | |
| 冲击韧性 | 50 磅榔头冲击后高度(英寸) | | ≥15 | ≥25 | ≥35 | ≥50 | ≥70 | | |
| 耐久性 | 阻力退化程度 | 无 | 非常低 | 低 | 中等 | 较长 | 持久 | | |

表 2 典型软木材料力学性能指标^[10]
Tab.2 Mechanical properties of typical soft woods^[10]

| | | | | 1 1 | J 1 | | | | | |
|-------|--------------------------|------|-----------------|------|------|----|-------|------|-----------|------|
| 树种 | 密度/(g·cm ⁻³) | | 收缩率/% | 弯曲强度 | 压缩强度 | 硬度 | 刚度 | 冲击韧性 | 耐久性 | 产地 |
| 4341 | 新材 | 老材 | X- - -/ -/ 0 | 马岡丛及 | 压机丛及 | 火火 | 111/2 | пщюц | 1017 (17. |) 20 |
| 黑云杉 | 0.38 | 0.43 | 11.3 | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 6 | 北美 |
| 红云杉 | 0.36 | 0.40 | 12.9 | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 6 | 北美 |
| 白云杉 | 0.37 | 0.41 | 11.5 | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 6 | 北美 |
| 大冷杉 | 0.35 | 0.39 | 11.0 | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 6 | 北美 |
| 白冷杉 | 0.37 | 0.41 | 9.8 | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 6 | 北美 |
| 东部白皮松 | 0.34 | 0.38 | 8.2 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 北美 |
| 西部白皮松 | 0.36 | 0.40 | 11.8 | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 5 | 北美 |
| 红松 | 0.41 | 0.46 | 11.5 | 5 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 北美 |
| 老红木 | 0.38 | 0.43 | 26.5 | 3 | 2 | 4 | 3 | 5 | 2 | 北美 |
| 幼红木 | 0.30 | 0.34 | 21.0 | 5 | 3 | 5 | 4 | 5 | 2 | 北美 |

研究者也分析了不同木材在力学试验中的具体 响应特征[1-3,13-31],其中中国工程物理研究院总体工程 研究所对云杉材料的力学性能开展了系统研究,包括 准静态直至高应变率范围内的变形条件[8-9,14-15,29-31]。 云杉在不同方向准静态压缩条件下的典型应力-应变 曲线和破坏形貌如图 3 所示[14]。可以看出,响应曲线 均主要包括 3 个阶段: 弹性阶段、稳定塑性变形阶段 和密实变形阶段。在径向和弦向加载条件下,稳定塑 性变形阶段的应力-应变曲线呈现出较长的近似平台 应力区间,待进入密实变形阶段后,应力急剧升高; 而在轴向加载条件下,变形和破坏形貌同前两种情形 显著不同,尽管应力-应变曲线也显示出一定平台应 力特征,但应力幅值大幅提高,且呈现波动特征。图 4进一步给出了不同种类软木材料的准静态单轴压缩 应力-应变曲线[24]。可以看出,不同树种材料也呈现 相似响应特性, 且均表现出显著的各项异性特征。



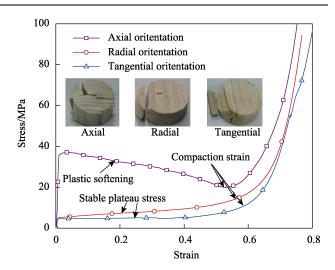


图 3 云杉在不同方向准静态压缩条件下的应力-应变关系 $^{[14]}$ Fig.3 Stress-strain response of spruce under the quasi-staic compression with different orientations $^{[14]}$

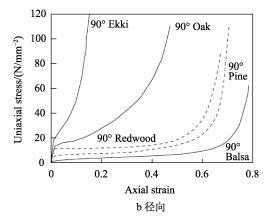
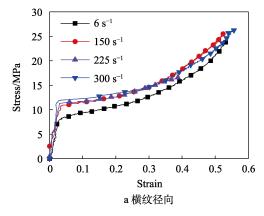


图 4 不同树种软木材料的准静态单轴压缩应力-应变曲线[24]

Fig.4 Quasi-static uniaxial compressive stress-strain curves corresponding to different woods: a) axial orientation; b) radial orientation^[24]

研究还表明,随着加载应变率的增大,软木材料的变形模式逐渐发生改变,应力幅值也有所提高,呈现出应变率效应^[14-15,26-31]。云杉在不同应变率和不同加载方向条件下的应力-应变曲线以及不同方向压缩

屈服强度随应变率的变化规律如图 5 所示^[15]。可以看出,随着应变率的增大,应力幅值逐渐升高,且不同加载方向之间的应力幅值差异较准静态变形情形更为明显。特别是在轴向加载条件下,还显示出极高的



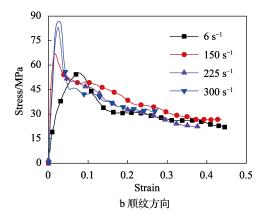


图 5 云杉在不同应变率和不同加载方向条件下的应力-应变曲线[15]

Fig.5 Stress-strain curves of spruce subjected to different strain rates and loading direction conditions: a) radial orientation; b) axial orientation^[15]

初始应力峰值。

试验观测还发现,随着加载方向由顺纹朝横纹径(弦)向变化,材料的屈服强度逐渐减小,应力-应变曲线塑性流动段由"塑性软化"向"塑性硬化"转变,屈服强度仍然表现出较强应变率敏感性^[15]。此外,宏观破坏模式也逐渐发生变化。不同方向压缩条件下,云杉试件的破坏形貌如图 6 所示^[15]。可以看出,沿顺纹方向加载时,试件中部向外膨胀,产生褶皱,纤维屈曲折断;当载荷方向与顺纹夹角增大时,材料的失效模式逐渐转变为木材纤维分层滑移、撕裂。由此可知,软木材料在斜加载条件下呈现出复杂的压剪复合变形和破坏行为。

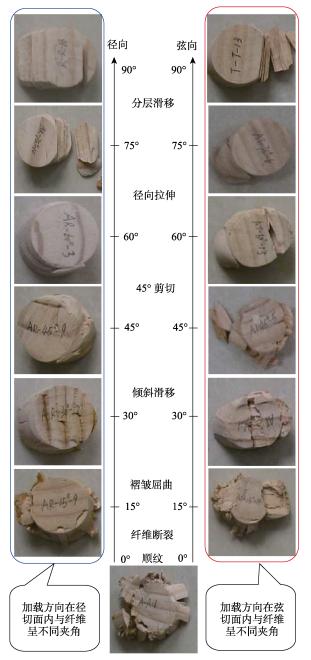


图 6 不同方向压缩条件下云杉试件破坏形貌^[15] Fig.6 Compressive failure morphologies of spruce specimens under different loading orientations^[15]

2.2 微细观分析

材料宏观力学性能与其微细观结构特征密切相 关。软木材料中,由于树种、含水率和内部几何缺陷 等因素,导致其变形和破坏模式较为复杂。因此,研 究宏观力学性能与材料微细观结构特征之间的关系 具有重大意义。

近年来,国内外研究者针对材料宏观力学性能与 微观组织成分、结构排列的关系,采用宏观力学性能 实验测试与微结构显微观察相结合的方法进行了大量 研究[13,32-40], 进而更为深入地讨论了不同内外部因素 的影响机制,包括加载方式(准静态、蠕变和疲劳加 载)[36]、木质素含量和水分[37]、具体微观结构[32-35,38-40] 等。杉木在不同方向准静态压缩条件下的应力-应变 曲线以及相应加载时刻的材料微结构形貌如图 7 所 示^[3]。可以看出,宏观力学响应特征为材料微结构变 形和破坏的综合表现。随着测试技术的发展,目前还 可观察材料三维微结构形貌特征[39-40]。木材实际微观 结构的三维扫描图像结果如图 8 所示[39], 可看出扫描 技术能够较好地再现材料的实际结构细节,这对于研 究材料内部几何缺陷等因素的影响将具有很好的促 进作用。相对来说,对于软木材料动态力学试验,要 观测加载过程中的微结构变化历程仍然具有较大挑 战性,目前还未见相关公开报道,仍然局限于对试验 之后试件破坏形貌的微细观检测[14,30]。

3 数值仿真分析

随着计算技术的发展,数值仿真手段在针对木材力学行为的研究中也逐渐得到广泛应用^[8-9,14,30,43-56]。有限元模拟可获得详细的变形和破坏历程,并可得到应力、应变等内变量的演变过程,还可系统地讨论材料结构特征和载荷条件等不同内外部因素对材料力学性能的影响,成为试验研究的良好补充。目前的有限元仿真主要有宏观和细观模拟 2 种方式,其中宏观模拟主要在于构建合理的本构模型,而细观模拟主要取决于能体现材料实际微结构特性的几何模型。

3.1 宏观本构模型

工程数值分析中,针对木材本构模型常直接沿用实验所测得的真实应力-应变曲线^[8-9],尽管也可获得与实验现象较为一致的模拟结果,但难以针对相关机理开展深入分析。初期宏观本构模型相对简单,在将木材简化为均质材料的前提下,建立相应的应力-应变关系式,涉及木材的弹塑性变形^[43-45]、疲劳^[49]、蠕变^[46]和断裂行为^[47-49]等,但相关表达式均相对简单。后期发展过程中,本构模型也逐渐涉及木材变形和破坏的微观机制^[50-52],并逐步扩展到包含宏观因素和微观参量的多尺度本构模型^[53-55]。尽管如此,基于本构模型的宏观有限元模拟较难准确刻画木材宏观力学

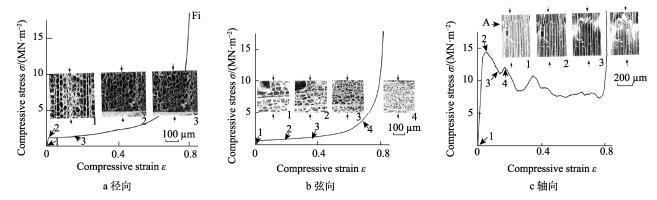


图 7 杉木在不同方向准静态压缩条件下的应力-应变曲线以及相应微结构变形和破坏形貌[3]

Fig. 7 Stress-strain curves as well as deformation and failure morphologies of spruce under the quasi-static compresson with with different loading orientations: a) radial orientation; b) tangential orientation; c) axial orientation

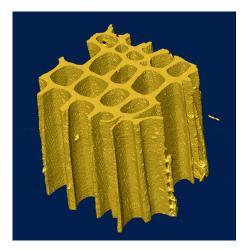


图 8 杉木材料微结构的三维扫描图像^[39] Fig. 8 3D reconstruction for microstructure of spruce^[39]

行为与微细观变形和破坏之间的关联。

3.2 细观有限元模拟

为更好地探讨软木材料宏观力学特性与微细观

结构之间的关联,近年来,研究者逐步开展了细观模拟分析,甚至多尺度有限元分析^[14,30,56]。如上所述,天然木材的内部结构呈现蜂窝结构特性,相应微结构示意如图 9 所示^[3]。另外,考虑到横纹径向与弦向的力学性能基本相似,可将微结构胞孔近似为正六边形,进而建立相应的代表体积元模型,如图 10 所示^[14,30],模型中忽略孔壁上的纹孔。

细观有限元模拟可获得不同加载方向下的应力平台形状和材料细观结构失效模式,其中横纹准静态压缩变形形貌的细观有限元模拟结果与试验观测结果的对比如图 11 所示^[56],两者符合较好。此外,还可在数值仿真中改变加载速率和加载方向等,对软木材料的大变形行为进行模拟和预测。云杉材料在 500 m/s 范围内不同速度顺纹、横纹压缩条件下的变形和破坏情况如图 12 和 13 所示^[14]。可以看出,顺纹压缩的主要失效模式为剪切滑移和屈曲塌陷,而横纹压缩的体现为胞墙褶皱和循序塌陷。同时,加载速率对顺纹压缩特性的影响高于横纹压缩情形,低速加载条件下,木材的变形也相对更均匀和

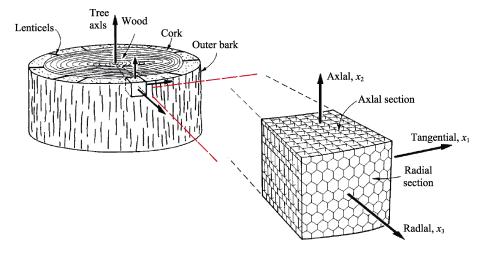


图 9 天然木材微结构示意^[3] Fig.9 Sketch of microstructure in natural wood^[3]

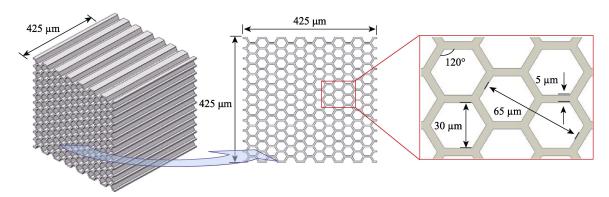


图 10 细观有限元模拟代表体积元模型[14]

Fig.10 Representative volume model in the mesoscale finite element method (FEM) simulation^[14]

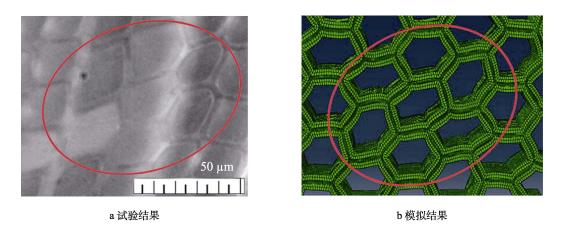


图 11 软木材料横纹准静态压缩变形形貌试验观测结果和细观有限元模拟结果[56]

Fig.11 Experiment result and mesoscale finite element method (FEM) simulation result for the deformation morphology of soft wood under quasi-static compression with radial orientation^[56]: a) experiment result; b) simulation result

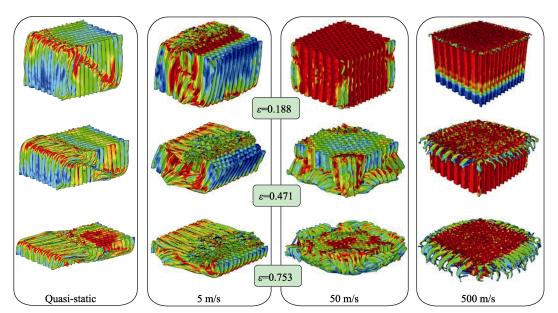


图 12 不同速度顺纹压缩条件下云杉破坏形貌细观有限元模拟结果[14]

Fig.12 Breaking morphologies of spruce under compresson with axial orientation at different loading velocities^[14]

平稳。然而,目前细观模拟主要基于均匀胞孔构型假设,且未考虑材料的几何缺陷,因此难以完全体

现天然木材的细观结构特征,有必要进一步结合真实细观结构开展研究。

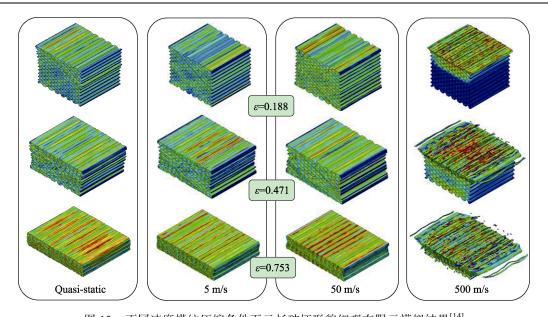


图 13 不同速度横纹压缩条件下云杉破坏形貌细观有限元模拟结果^[14] Fig.13 Breaking morphologies of spruce under compresson with radial orientation at different loading velocities^[14]

4 理论建模

在软木材料力学行为理论分析方面,国内外研究 也取得有意义的进展,但相关工作多为以实验为基础 的唯象研究,仍缺乏可以准确描述材料力学性能的理 论体系。

4.1 屈曲和塌陷变形

针对云杉等软木材料静、动态变形和破坏特性的分析发现,木材耗散能量的主要方式为纤维间的脱离和相对滑移^[29]。在顺纹压缩条件下,纤维胞壁通常发生屈曲失效,因此可将单个木材胞元简化为圆筒结构来分析其屈曲行为。胞元结构在轴向压缩条件下的内外褶皱力学模型如图 14a 所示^[29],结合其中塑性铰的弯曲塑性能和材料塑性变形能理论公式,可推导出木材胞元结构完全内褶皱和外褶皱屈曲时的平均外力,其大小由材料屈服应力、胞元结构尺寸和褶皱半长决

定。相对应地,在横纹压缩条件下,可视为正六边形木材胞元堆砌结构承受横向载荷。相应单胞结构压缩前后的变形情况如图 14b 所示^[29],结合其中塑性铰弯曲耗散能和胞壁压缩塑性变形能的理论公式,可推导得到单个木材胞元结构产生完全压缩情况时的平均外力,其大小也取决于胞元材料屈服应力、胞元结构壁厚度及长度参量等。

4.2 空间屈服面

对于软木材料在不同加载方向下的屈服强度准则,可借鉴 Hill 各向异性材料强度准则来描述其空间屈服面,其中忽略剪应力对材料初始屈服的影响。依据该强度准则,可绘制得到不同应变率下的空间屈服面和相应"π"平面投影图示,如图 15 所示^[15]。其中"π"平面为主应力空间内通过坐标原点,且以 3 个主应力相等的等倾线为外法线的平面,"π"平面上椭圆环内

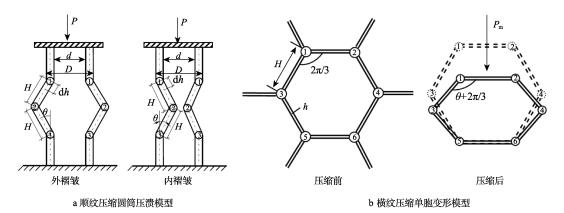


图 14 木材顺纹和横纹压缩变形理论模型[29]

Fig.14 Sketch of theoretical models for the deformation in wood under compression: a) cylinder failure model with axial orientation; b) single cell model with radial orientation^[29]

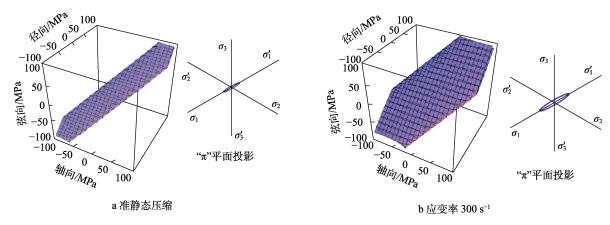


图 15 不同应变率条件下云杉木材的压缩屈服面[15]

Fig.15 Compressive yielding surface of spruce corresponding to different strain rates: a) quasi-static condition; b) 300 s^{-1} strain rate^[15]

径为屈服面的投影。可以看出,由于软木材料顺纹强度远高于横纹径/弦向强度,在不同应变率条件下的空间屈服面均为椭圆柱面,且其尺寸随着应变率的增加而增大。

5 结语

软木材料广泛应用于缓冲防护结构中,其力学行为和相应缓冲吸能特性与多种内外部因素密切相关。 文中从试验观测、数值仿真和理论建模等多个方面, 综述了软木材料力学行为及其缓冲吸能特性方面的 研究进展。通过相关文献调研,笔者认为,目前关于 软木材料力学性能的研究中尚存在动态试验观察和 测试精度较低、细观仿真模型难以完全体现天然木 材微结构特征、理论模型局限于唯象研究并缺乏系 统性等方面的不足。今后有必要加强以下方面的研 究工作。

- 1)发展试验技术,尤其是动态试验中观察和测试系统的改进,以期能得到材料变形过程中内部细观变形和微裂纹形核及扩展全过程的清晰物理图像,这对相应的理论研究至关重要。
- 2)开展软木材料在不同加载方向、加载速率条件下的更多试验研究,以期更为全面和准确地分析材料力学行为的各向异性特征和应变率效应等。
- 3)发展从微细观尺度到宏观尺度的变形和破坏 机理研究,探索材料宏观力学行为与微细观结构特征 之间的关联,研究树种材质、胞孔构型和结构缺陷等 内外部因素对变形和破坏行为的具体影响。
- 4)发展有限元建模技术,包括多尺度耦合材料本构模型、细观有限元几何模型中的界面处理方法和随机结构缺陷构建方法等,以便实现更为符合实际材料变形特征的有限元仿真。

参考文献:

[1] 余同希, 卢国兴. 材料与结构的能量吸收: 耐撞性·包

装·安全防护[M]. 华云龙译. 北京: 化学工业出版社, 2006

YU Tong-xi, LU guo-xing. Energy absorption of structures and materials[M]. HUA Yun-long, Translate. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

- [2] 余同希, 卢国兴, 张雄. 能量吸收: 结构与材料的力学行为和塑性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2019. YU Tong-xi, LU Guo-xing, ZHANG Xiong. Energy absorption: Mechanical behaviours of structures as well as materials and plasticity analysis[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [3] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solid: Structure and properties[M]. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [4] GIBSON L J. The hierarchical structure and mechanics of plant materials[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2012, 9: 2749-2766.
- [5] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2012.

 LIU Pei-sheng. Introduction to porous materials[M]. Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [6] GB/T 18926—2008, 包装容器-木构件[S]. GB/T 18926—2008, Packaging containers—Wood members[S].
- [7] 汤伯森. 运输包装学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

 TANG Bo-sen. Transportation packaging[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [8] 徐伟芳,谢若泽,钟卫洲. 抗事故包装箱的跌落冲击分析技术[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 25-30. XU Wei-fang, XIE Ruo-ze, ZHONG Wei-zhou. Drop impact analysis technique of accident-resistant container[J]. Packaging engineering, 2017, 38(21): 25-30.
- [9] 谢若泽, 钟卫洲, 黄西成, 等. 吸能包装模型结构的冲击响应[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(10): 103103-1-9. XIE Ruo-ze, ZHONG Wei-zhou, HUANG Xi-cheng, et al. Impact response of scaled models of an energy- absorbing container[J]. Explosion and shock waves, 2019,

- 39(10): 103103-1-9.
- [10] TOENNISSON R L. A collection of wood properties[R]. Washington: Tennessee Valley Authority, 1992.
- [11] GB/T 16734—1997, 中国主要木材名称[S]. GB/T 16734—1997, Names of Chinese main woods[S].
- [12] GB/T 36870—2018, 主要商品木材树种代号[S]. GB/T 36870—2018, Code names of the main commercial timbers[S].
- [13] THIBAUT B, GRIL J, FOURNIER M. Mechanics of wood and trees: some new highlights for an old story[J]. Comptes rendus de l'académie des sciences-series iib-mechanics, 2001, 329(9): 701-716.
- [14] 钟卫洲, 邓志方, 魏强, 等. 不同加载速率下木材失效 行为的多尺度数值分析[J]. 中国测试, 2016, 42(10): 79-84.
 - ZHONG Wei-zhou, DENG Zhi-fang, WEI Qiang, et al. Multi-scale numerical analysis on failure behavior of wood under different speed loading conditions[J]. China measurement & test, 2016, 42(10): 79-84.
- [15] 钟卫洲, 邓志方, 黄西成, 等. 中应变率加载下云杉各向异性力学行为研究[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 25-32. ZHONG Wei-zhou, DENG Zhi-fang, HUANG Xi-cheng, et al. Investigation on anisotropic behavior of spruce mechanical properties under medium strain rate loading conditions[J]. Engineering mechanics, 2016, 33(5): 25-32.
- [16] RENAUD M, RUEFF M, ROCABOY A C. Mechanical behaviour of saturated wood under compression, Part 2: Behavior of wood at low rates of strain[J]. Wood science and technology, 1996, 30(3): 153-164.
- [17] WIDEHAMMAR S. Stress-strain relationships for spruce wood: Influence of strain rate, moisture content and loading direction [J]. Experimental mechanics, 2004, 44(1): 44-48.
- [18] STEFFEN O, ULRIKE G K W, EDUARD A. The elastic modulus of spruce wood cell wall material measured by an in situ bending technique[J]. Journal of materials science, 2006, 41(16): 5122-5126.
- [19] YILDIZ S, GEZER E D, YILDIZ U C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat[J]. Building and environment, 2006, 41(12): 1762-1766.
- [20] MARTIN N, JÜRGEN H, BERNHARD D, et al. Compressive behaviour of axially loaded spruce wood under large deformations at different strain rates[J]. European journal of wood and wood products, 2011, 69(3): 345-357.
- [21] JÄGER A, BADER T, HOFSTETTER K, et al. The relation between indentation modulus, microfibril angle, and elastic properties of wood cell walls[J]. Composites part A: Applied science & manufacturing, 2011, 42(6): 677-685.
- [22] JOHNSON W. Historical and present-day references concerning impact on wood[J]. International journal of impact engineering, 1986, 4(3): 161-174.
- [23] RENAUD M, RUEFF M, ROCABOY A C. Mechanical

- behaviour of saturated wood under compression, Part 1: Behavior of wood at high rates of strain[J]. Wood science and technology, 1996, 30(3): 153-164.
- [24] REID S R, PENG C. Dynamic uniaxial crushing of wood[J]. International journal of impact engineering, 1997, 19(5): 531-570.
- [25] LANDIS E N, VASIC S, DAVIDS W G, et al. Coupled experiments and simulations of microstructural damage in wood[J]. Experimental mechanics, 2002, 42(4): 389-394.
- [26] VURAL M, RAVICHANDRAN G. Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: experiment and analysis[J]. International journal of solids and structures, 2003, 40(9): 2147-2170.
- [27] 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 Jin-long, WANG Xu-guang, LIU Yun-chuan. Dynamic mechanical behaviors of poplar wood[J]. Explosion and shock waves, 2008, 28(4): 367-371.
- [28] 窦金龙, 汪旭光, 刘云川, 等. 干、湿木材的动态力学性能及破坏机制研究[J]. 固体力学学报, 2008, 29(4): 348-353.

 DOU Jin-long, WANG Xu-guang, LIU Yun-chuan, et al. The dynamic characteristics and failure mechanism of dry and wet eucalyptus wood [J]. Chinese journal of solid

mechanics, 2008, 29(4): 348-353.

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

 ZHONG Wei-zhou, SONG Shun-cheng, HUANG Xi-cheng, et al. Research on static and dynamic mechanical properties of spruce wood by three loading directons[J]. Chineses journal of theoretical and applied Mechanics, 2011, 43(6): 1141-1150.
- [30] ZHONG W, RUSINEK A, JANKOWIAK T, et al. Experimental and numerical investigation on compression orthotropic properties of spruce wood in axial and transverse loading directions[J]. Engineering transactions, 2014, 62: 381-401.
- [31] UHMEIER A, SALMÉN L. Influence of strain rate and temperature on the radial compression behavior of wet spruce[J]. Journal of engineering materials and technology, 1996, 118(3): 289-294.
- [32] JANSEN S, KITIN P, DE PAUW H, et al. Preparation of wood specimens for transmitted light microscopy and scanning electron microscopy[J]. Belgian journal of botany, 1998: 41-49.
- [33] REITERER A, LICHTENEGGER H, FRATZL P, et al. Deformation and energy absorption of wood cell walls with different nanostructure under tensile loading[J]. Journal of materials science, 2001, 36(19): 4681-4686.
- [34] LANDIS E N, VASIC S, DAVIDS W G, et al. Coupled experiments and simulations of microstructural damage in wood[J]. Experimental mechanics, 2002, 42(4): 389-394.
- [35] KECKES J, BURGERT I, FRÜHMANN K, et al.

- Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood[J]. Nature materials, 2003, 2(12): 810-813.
- [36] GONG M, SMITH I. Effect of load type on failure mechanisms of spruce in compression parallel to grain[J]. Wood science and technology, 2004, 37(5): 435-445.
- [37] GINDL W, TEISCHINGER A. Axial compression strength of Norway spruce related to structural variability and lignin content[J]. Composites part A: Applied science and manufacturing, 2002, 33(1): 1623-1628.
- [38] MAGISTRIS F D, SALMÉN L. Deformation of wet wood under combined shear and compression[J]. Wood science and technology, 2005, 39(6): 460-471.
- [39] TRTIK P, DUAL J, KEUNECKE D, et al. 3D imaging of microstructure of spruce wood[J]. Journal of structural biology, 2007, 159(1): 46-55.
- [40] XU P, DONALDSON L A, GERGELY Z R, et al. Dual-axis electron tomography: A new approach for investigating the spatial organization of wood cellulose microfibrils[J]. Wood science and technology, 2007, 41(2): 101-116.
- [41] 边明明. 连续压缩载荷下木材力学性能及微观结构变化定量表征[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
 BIAN Ming-ming. Effects of micro-structure on wood mechanical properties under continuous compression[D].
 Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [42] 刘星雨. 高温热处理木材的性能及分类方法探索[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010. LIU Xing-yu. The properties changes and classification explore of heat treatment wood[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [43] TABIEI A, WU J. Three-dimensional nonlinear orthotropic finite element material model for wood[J]. Composite structures, 2000, 50(2): 143-149.
- [44] ADALIAN C, MORLIER P. A model for the behavior of wood under dynamic multiaxial compression[J]. Composites science and technology, 2001, 61(3): 403-408.
- [45] OUDJENE M, KHELIFA M. Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings [J]. Construction and building materials, 2009, 23(11): 3359-3366.
- [46] DUBOIS F, RANDRIAMBOLOLONA H, PETIT C. Creep in wood under variable climate conditions: Numerical modeling and experimental validation[J]. Me-

- chanics of time-dependent materials, 2005, 9(2-3): 173-202
- [47] VASIC S, SMITH I. Bridging crack model for fracture of spruce[J]. Engineering fracture mechanics, 2002, 69(6): 745-760.
- [48] VASIC S, SMITH I, LANDIS E. Finite element techniques and models for wood fracture mechanics[J]. Wood science and technology, 2005, 39(1): 3-17.
- [49] DOURADO N, DE MOURA M F S F, DE JESUS A. Fatigue-fracture characterization of wood under mode I loading[J]. International journal of fatigue, 2019, 121: 265-271.
- [50] HOFSTETTER K, HELLMICH C, EBERHARDSTEI-NER J. Development and experimental validation of a continuum micromechanics model for the elasticity of wood[J]. European journal of mechanics, 2005, 24(6): 1030-1053.
- [51] CHEN W, YU H, LIU Y, et al. Individualization of cellulose nanofibers from wood using high-intensity ultrasonication combined with chemical pretreatments[J]. Carbohydrate polymers, 2011, 83(4): 1804-1811.
- [52] FLORES E I S, FRISWELL M I. Ultrastructural mechanisms of deformation and failure in wood under tension[J]. International journal of solids and structures, 2013, 50(13): 2050-2060.
- [53] MACKENZIE-HELNWEIN P, EBERHARDSTEINER J, MANG H A. A multi-surface plasticity model for clear wood and its application to the finite element analysis of structural details[J]. Computational mechanics, 2003, 31(1-2): 204-218.
- [54] SAAVEDRA FLORES E I, FRISWELL M I. Multi-scale finite element model for a new material inspired by the mechanics and structure of wood cell-walls[J]. Journal of the mechanics and physics of solids, 2012, 60(7): 1296-1309.
- [55] SAAVEDRA FLORES E I, DE SOUZA NETO E A, PEARCE C. A large strain computational multi-scale model for the dissipative behavior of wood cell-wall[J]. Computational materials science, 2011, 50(3): 1202-1211.
- [56] FORTINO S, HRADIL P, SALMINEN L I, et al. A 3D micromechanical study of deformation curves and cell wall stresses in wood under transverse loading[J]. Journal of materials science, 2015, 50(1): 482-492.