

缓冲与隔振

杨木静动态压缩本构模型研究

许威

(哈尔滨商业大学, 哈尔滨 150028)

摘要: **目的** 以杨木为研究对象, 研究其静动态压缩载荷作用下应力-应变曲线的变化特征, 建立适合的本构模型, 并对其进行描述。**方法** 对杨木试件进行静动态压缩加载试验, 分析静动态压缩载荷作用下杨木应力-应变曲线的变化特征, 构建适用于静动态压缩载荷作用下杨木的本构模型。**结果** 静态压缩加载杨木的应力-应变曲线分为线弹性阶段、屈服阶段和密实化阶段等 3 个部分, 动态压缩加载杨木的应力-应变曲线分为线弹性阶段和屈服阶段等 2 个部分; 静态压缩加载时, 杨木轴向屈服应力最大, 分别是径向和弦向的 5.70 倍和 7.75 倍; 动态压缩加载时, 当应变率从 400 s^{-1} 增加到 1000 s^{-1} 时, 径向、弦向和轴向的屈服应力分别增加了 1.51, 1.59, 3.12 倍, 杨木的屈服应力具有应变率敏感性; 采用包含应变率影响的本构方程来描述杨木在静动态压缩载荷作用下的本构关系是比较合适的。**结论** 杨木是一种应变率敏感材料, 静动态压缩载荷作用下杨木的应力-应变曲线均表现出多孔材料的特征, 将多孔材料本构模型应用于木材是可行的。

关键词: 杨木; 静动态压缩加载试验; 多孔材料特征; 应变率; 本构模型

中图分类号: TB484 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)11-0086-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.11.012

Static and Dynamic Compression Constitutive Model of Poplar Wood

XU Wei

(Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: The work aims to study the stress-strain variation characteristics of the poplar under the static and dynamic compression loading with the poplar as the research object, and build proper constitutive model to describe it. Through static and dynamic compression loading test on poplar specimen, the stress-strain variation characteristics of the poplar were analyzed, and the constitutive model suitable for the poplar under static and dynamic compression load was built. The study found that under static compression loading of poplar wood from the stress-strain curve was divided into three parts: linear elastic stages, yield stages and densification stage. The dynamic compression loading of poplar wood from the stress-strain curve was divided into two parts: stages of linear elastic and yield. During static compression loading, the axial yield stress of poplar was the largest, and it was 5.70 times and 7.75 times of radial and tangential yield stress respectively. During dynamic compression loading, when the strain rate was increased to 1000 s^{-1} from 400 s^{-1} , radial, tangential to yield stress and axial was respectively increased by 1.51 times, 1.59 times and 3.12 times; the yield stress of poplar wood had strong strain rate sensitivity. It is more appropriate to describe the constitutive relation under static and dynamic compression loading with constitutive equation containing the influence of strain rate. Poplar is a strain rate sensitive material. Under static and dynamic compression loading, poplar wood from the stress-strain curve shows the char-

收稿日期: 2019-01-22

基金项目: 哈尔滨商业大学校级青年创新人才培养计划 (17XN017)。

作者简介: 许威 (1986—), 男, 博士, 哈尔滨商业大学讲师, 主要研究方向为木质复合材料、人造板机械。

acteristics of the porous materials. It is feasible to apply the constitutive model of porous materials to the wood.

KEY WORDS: poplar wood; static and dynamic compression loading experiments; porous material characteristics; strain rate; constitutive model

木材纤维是以木材(木段、木片、树皮等)为原料,经机械外力作用生成的纤维板等人造板的原材料。木材纤维的制备主要采用热磨法,其是将经预蒸煮作用的木材原料在热磨机磨片之间被研磨解离成木材纤维^[1]。在木材纤维的制备过程中,热磨机磨片的磨齿与木材原料之间发生复杂的相互作用最终将木材原料解离成木材纤维,因此,磨片磨齿结构参数的优化必须结合木材原料的研磨解离机理^[2-4]。研磨时木材原料受冲击压缩载荷作用,其本构关系研究是木材原料研磨解离机理研究的重要内容之一。木材原料从木片的加工直至进入热磨机研磨解离之前都会发生加载应变率较低的压缩变形,热磨机磨片研磨破碎时的压缩加载应变率较高,约为 1000 s^{-1} ^[5]。木材由于本身优秀的力学性能,经常被直接用作运输包装材料,据统计,全球货物出口使用的运输包装中木材包装大约占 70%,木材包装承受的危险载荷主要是冲击压缩载荷^[6-10]。虽然许多学者都开展了木材准静态压缩变形力学行为及其本构关系的研究,并建立了一些理论模型^[11-17],但冲击压缩载荷作用下木材本构关系的研究鲜有报道。

文中试图对杨木进行静态压缩试验,分析静态压缩载荷作用下杨木应力-应变关系特征。随后依据静态压缩载荷作用下杨木应力-应变关系的变化特征,构建适合的本构方程对静态压缩载荷作用下杨木的力学行为进行描述,为热磨法木纤维生产设备的优化设计提供理论支撑,进一步揭示木材原料的研磨解离机理,也为木材及木质复合材料在运输包装中的进一步应用提供理论基础。

1 试验

选取东北地区纤维板生产中常用的杨木(*Populus Davidiana* Dode)作为试验材料,测量径向、弦向和轴向上杨木的静态压缩力学性能。

静态压缩加载试验在 CMT5504 万力学试验机完成,加载速度为 1.2 mm/min ,相应的应变率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。为了使试验时加载应变率能够达到实际生产中 1000 s^{-1} 的要求,动态压缩加载试验在分离式霍普金森杆(SHPB)上进行^[18]。在 SHPB 试验装置上对杨木进行 400, 700, 1000 s^{-1} 3 个应变率的压缩加载试验。

综合考虑木纤维实际生产中木片的尺寸和 SHPB 试验技术对胞元结构材料试件尺寸的要求^[19],试件尺寸选为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,其中 20 mm 方向为压缩加载方向,每种试验做 4 次重复试验,试件尺寸及

加载方向见图 1。

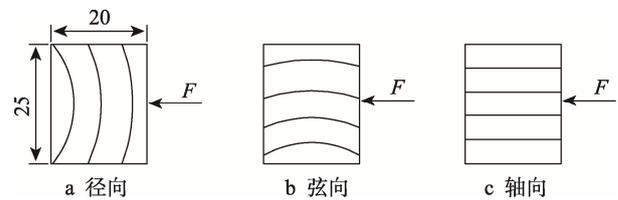


图 1 试件尺寸与加载方向

Fig.1 Specimens' size and loading direction

试验所用杨木试材含水率约为 12.81%,密度约为 0.48 g/cm^3 ,试件在同根试材的边材处截取。加工试件时对试材各表面进行刨切和砂光处理,以提高试件的尺寸精度和表面质量,并在接触面上涂抹润滑剂^[20]。

2 结果

2.1 静态压缩加载

静态压缩载荷作用下杨木试件的应力-应变曲线见图 2。由图 2 可以看出,静态压缩载荷作用下杨木的应力-应变曲线由线弹性阶段、屈服阶段和密实化阶段 3 部分组成,具有典型的多孔材料特征^[21-22]。

沿径向、弦向和轴向加载,当应变分别达到约为 4.33%, 5.93% 和 7.83% 时,试件进入塑性变形阶段,屈服应力分别约为 8.20, 6.03, 46.75 MPa,轴向加载屈服应力分别是径向加载、弦向加载屈服应力的 5.7 倍和 7.75 倍。当应变分别达到 47.65%, 45.78% 和 51.29% 时,试件进入密实化阶段。

2.2 动态压缩加载

对 SHPB 试验数据进行处理,得到每组试验杨木试件的应力-应变曲线,发现试验精度较高、试验重复性较好。杨木 400 s^{-1} 轴向加载的 4 次重复试验所得的应力-应变曲线见图 3。

为了便于对比分析每组试验,列出了 1 次试验所得的应力-应变曲线。杨木动态压缩加载试件应力-应变曲线见图 4。

1) 杨木试件动态压缩加载的应力-应变曲线由线弹性阶段、屈服阶段 2 部分组成,具有明显的多孔材料特征。加载过程中试件尚未达到密实化阶段时试件就已经被破坏,这主要由较高的加载应变率导致。加载应变率较小时,杨木试件内部的每一个胞元与整体处于相同的变形阶段。在杨木试件受载处于屈服阶段

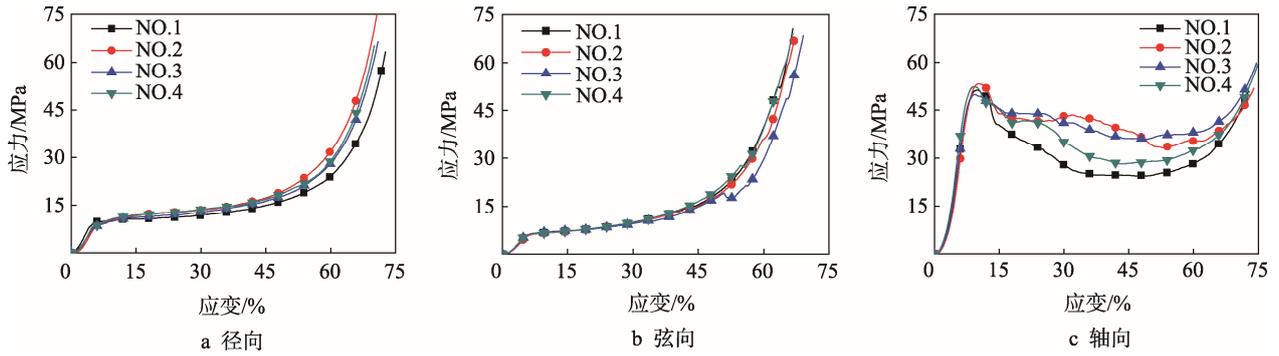


图2 静态压缩加载应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of static compression loading

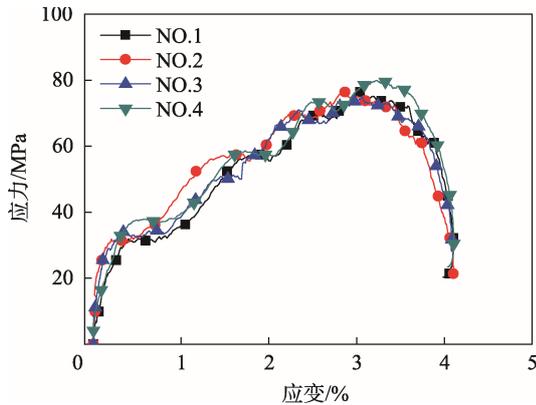


图3 轴向加载 400 s⁻¹ 重复试验应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of axial load of 400 s⁻¹ repeat test

时,杨木试件通过内部细胞的细胞壁向腔内塌陷屈曲耗散外载荷对杨木试件所做的功。杨木试件整体和内部的每一个细胞被均匀压溃,直至细胞腔被细胞壁实质物质完全填充,杨木试件整体进入密实化阶段。动态压缩加载时,受加载应变率较高的试件内部细胞变形严重不均匀。试件所表现出的变形阶段是试件内部每一个细胞变形的综合表现。事实上,试件内部的细胞只有一部分与试件整体处于相同的变形阶段,一部分细胞的变形阶段落后于试件所表现出的变形阶段,还有一部分细胞的变形阶段超过试件所表现出的变形阶段。试件内部变形的不均匀性加剧了试件内部微裂纹的萌生、扩展和连通,使得在试件整体尚未进入密实化阶段时,试件由于产生大量的宏观裂纹而失效。

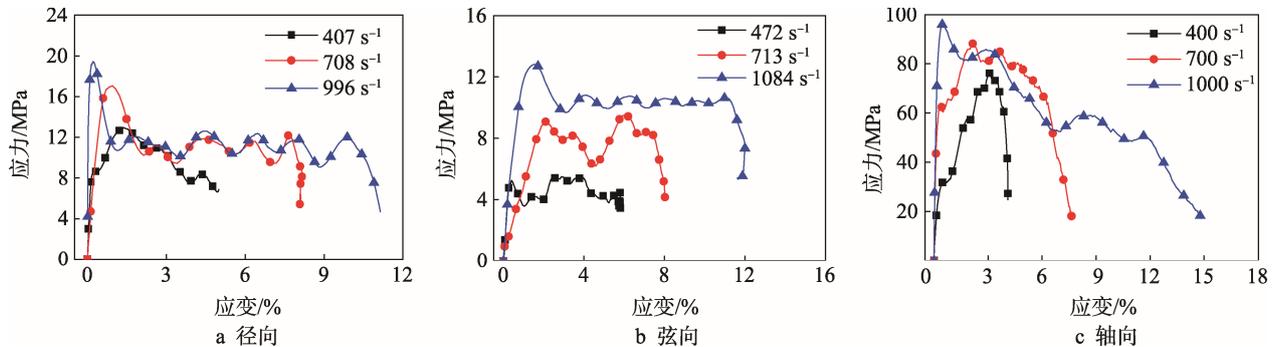


图4 应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curve

2) 杨木试件动态压缩加载的屈服应力具有应变率敏感性,当应变率约为 400~1000 s⁻¹ 时,杨木径向、弦向和轴向的屈服应力与应变率成正相关关系。当应变率从约 400 s⁻¹ 增加到 1000 s⁻¹ 时,杨木径向、弦向和轴向的屈服应力分别增加了 1.51, 1.59, 3.12 倍,因此可以判断杨木是一种应变率敏感材料。

2.3 静动态压缩载荷作用下杨木的本构模型

2.3.1 本构模型的建立

通过对杨木静动态压缩加载试验结果的分析,发现杨木在静动态压缩载荷作用下表现出的力学特性

符合多孔材料的特征。由于多孔材料具有比表面积大、能量吸收率高等优良的性质,在汽车、航空等众多领域中均得到广泛的应用^[23-26],压缩加载条件下多孔材料的力学性能和本构关系也被大量研究^[27-31]。其中, Liu 等^[32]建立的多孔材料本构方程,较好地描述和表达了静态压缩载荷作用下聚合物泡沫的压缩力学特性和宏观应力应变关系。

文中尝试借鉴 Liu 等提出的多孔材料本构方程,构建能够完整表达静动态压缩载荷作用下杨木力学行为的本构模型。Liu 等提出多孔材料本构方程的具体表达式为:

$$\sigma(\varepsilon) = A \frac{e^{\alpha\varepsilon} - 1}{B + e^{\beta\varepsilon}} + e^C (e^{\gamma\varepsilon} - 1) \quad (1)$$

式中： ε 为压应变； σ 为压应力； e 为自然对数函数的底数，是一个常数； $A, B, C, \alpha, \beta, \gamma$ 均为材料参数。

Liu 等提出的本构模型主要应用于静态压缩加载条件下。根据文中试验结果可知，杨木是一种应变率敏感材料，因此，建立杨木试件在静动态压缩载荷作用下的本构模型时不能忽略应变率对杨木力学性能的影响。

Kwang 等在研究压缩载荷作用泡沫材料的应力-应变关系模型时，提出了如式（2）的应变率影响动态项^[31]：

$$M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = 1 + (a + b\varepsilon) \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \quad (2)$$

式中： $\dot{\varepsilon}_0$ 为基准应变率； $\dot{\varepsilon}$ 为加载应变率； a, b 均为无量纲材料参数。

文中采用动态项式（2）对 Liu 等提出的多孔材料本构方程式（1）进行修正，得到静态压缩载荷作用杨木的本构模型为：

$$\sigma(\varepsilon) = \left[A \frac{e^{\alpha\varepsilon} - 1}{B + e^{\beta\varepsilon}} + e^C (e^{\gamma\varepsilon} - 1) \right] \left[1 + (a + b\varepsilon) \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \quad (3)$$

取基准应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 为静态压缩加载应变率， $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，用试验所得数据对所建立的静态压缩载荷作用下杨木的本构模型准确性进行验证，验证结

果见图 5—7。

从图 5—7 中可以看出，静动态压缩加载条件下杨木试件的应力-应变曲线与拟合曲线吻合度较高。由于较高加载应变率的影响，导致动态压缩加载条件下杨木试件的应力-应变曲线局部震荡严重，致使动态压缩加载条件下杨木试件的应力-应变关系曲线与拟合曲线的吻合度整体低于静态压缩加载。杨木试件径向加载 1000 s^{-1} 时，应力-应变曲线与拟合曲线的拟合优度 R^2 最低为 0.871，其余加载条件下 R^2 均高于 0.9。

整体上，由文中所建立的本构模型所得拟合曲线能够较完整地反映出杨木试件应力-应变曲线的宏观力学响应，拟合得到的参数值是可信的；使用建立的包含应变率影响的本构模型描述杨木在静动态压缩载荷作用下的本构关系是合适的，将多孔材料的本构模型应用于木材是可行的。

2.3.2 本构模型的进一步探讨

以图 5d 拟合得到的材料参数为基准值，对文中建立的本构模型中相关材料参数的物理意义进行分析，研究本构模型中各材料参数受材料应力-应变关系的影响。各材料参数变化受材料应力-应变曲线影响关系见图 8。

1) 材料参数 A 和 B 主要受材料屈服阶段力学性能的影响。 A 与材料的屈服强度成正比关系， B 与材料的屈服强度和弹性模量成反比关系。

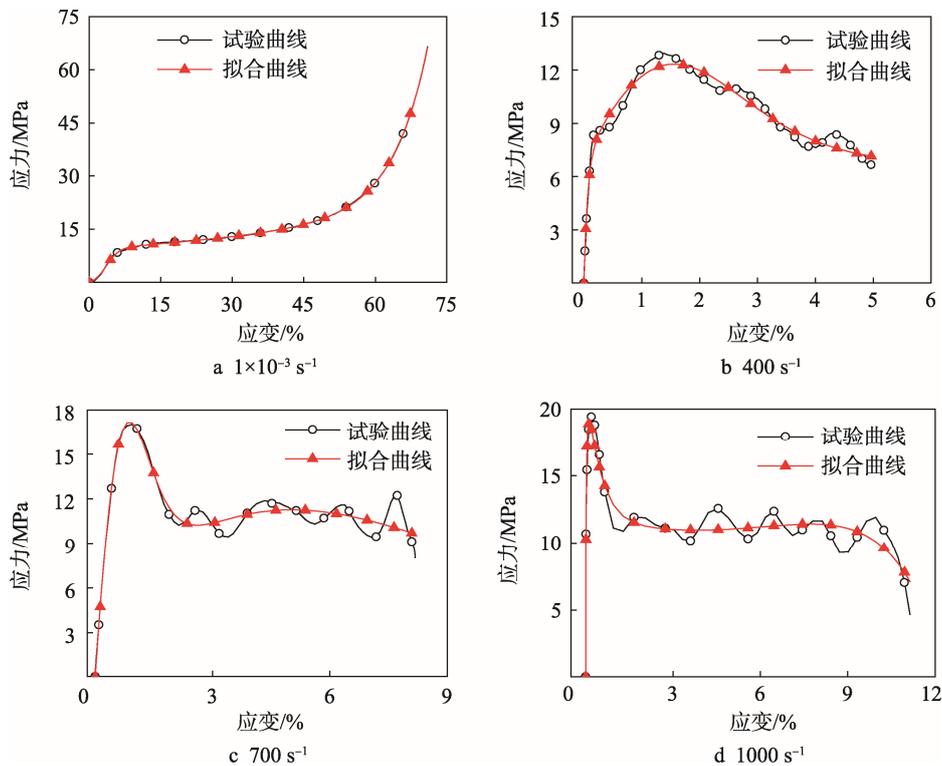


图 5 径向加载试验曲线与拟合曲线对比
Fig.5 Comparison of test curve and fitting curve in radial loding situation

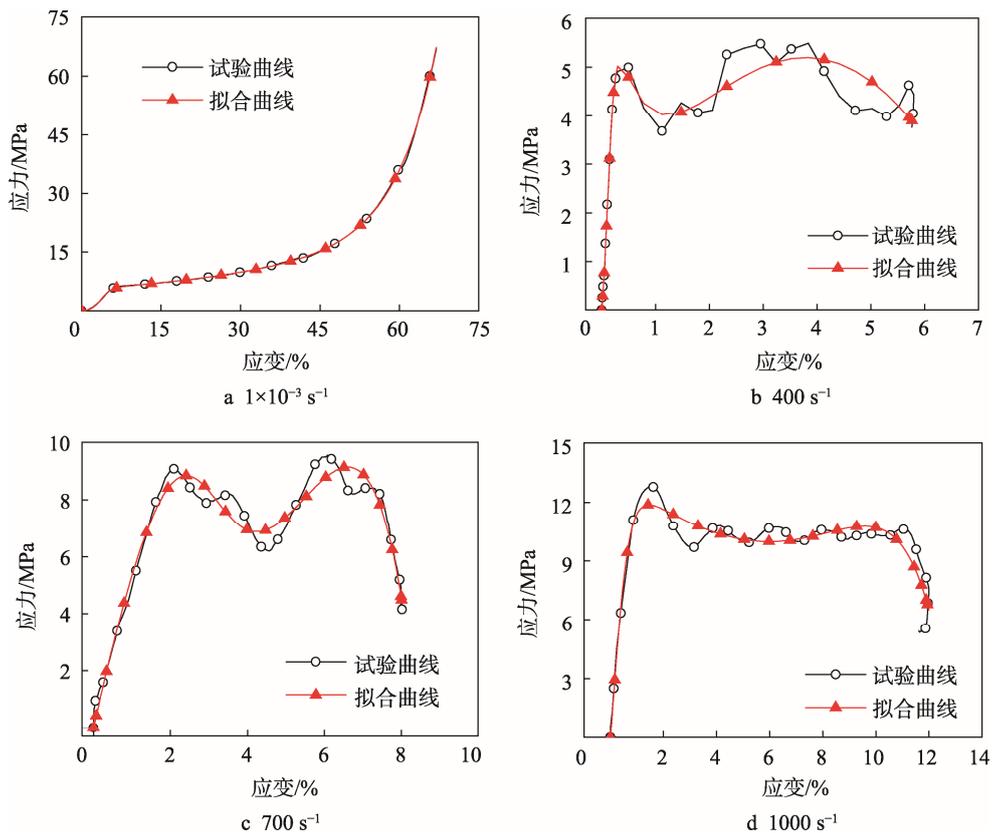


图6 弦向加载试验曲线与拟合曲线对比
Fig.6 Comparison of test curve and fitting curve in tangential loading situation

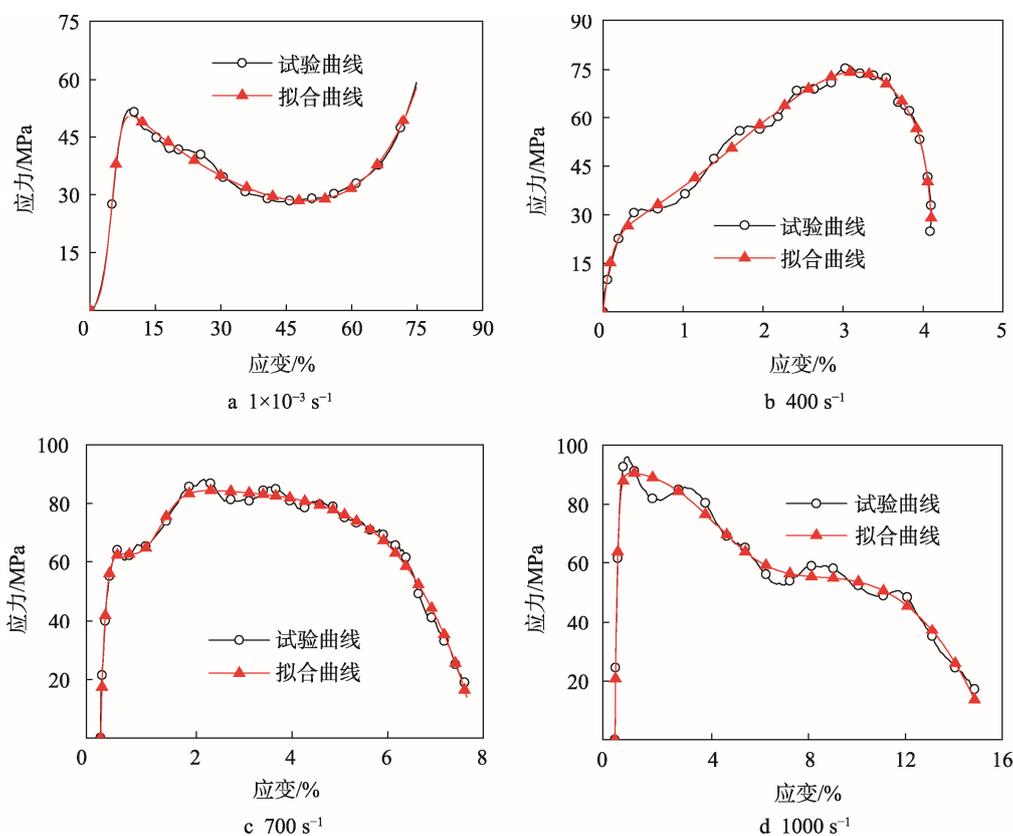


图7 轴向加载试验曲线与拟合曲线对比
Fig.7 Comparison of test curve and fitting curve in axial loading situation

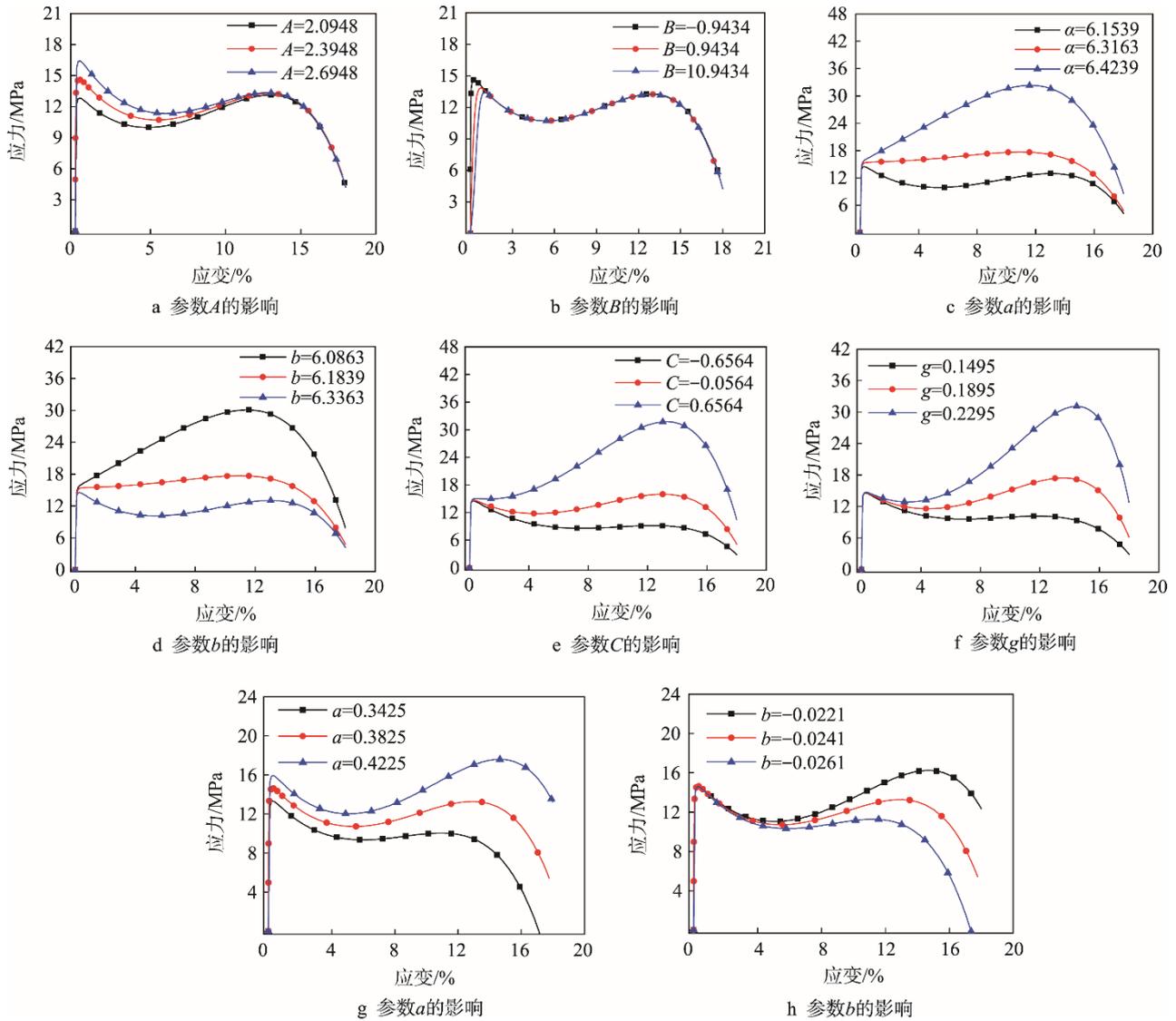


图 8 材料参数受应力-应变曲线的影响
Fig.8 Influence of stress-strain curve on parameters

2) 材料参数 α 和 β 主要受材料塑性变形阶段应力-应变曲线的软、硬化响应影响。当材料应力-应变曲线既包含软化响应又包含硬化响应时 $\alpha < \beta$ ；当材料应力-应变曲线只呈现硬化响应时 $\alpha > \beta$ ；当塑性变形阶段，材料的变形近似于理想的塑性变形时 $\alpha = \beta$ 。

3) 材料参数 C 主要受材料塑性变形阶段的影响。当材料应力-应变曲线由软化响应阶段逐渐向硬化响应转变并最终完全表现为硬化响应阶段时， C 由大逐渐变小。

4) 材料参数 γ 也主要受材料的塑性变形阶段影响。可以发现 γ 与 C 受材料塑性变形阶段的影响类似， γ 受材料应力-应变曲线硬化响应阶段的影响比 C 更加显著，受软化响应阶段的影响弱于材料参数 C 。

5) 材料参数 a 主要受材料屈服强度、材料硬化响应阶段性能的影响。 a 与材料屈服强度和硬化响应阶段曲线的斜率成正相关关系。

6) 材料参数 b 也主要受材料的硬化响应阶段影响。材料的硬化程度越大， b 也越大，硬化响应阶段对 b 的影响比对 a 显著。

3 结语

文中以杨木为试验材料，利用 CMT5504 万能力学试验机 and SHPB 试验装置对杨木进行了静、动态压缩加载试验，获得了静、动态压缩载荷作用下杨木的应力-应变关系，构建了适用于静、动态压缩载荷作用下杨木的本构模型，并用该模型对试验数据进行了拟合并确定了模型参量。研究得出以下结论。

1) 静态压缩载荷作用下杨木的应力-应变曲线由线弹性阶段、屈服阶段和密实化阶段 3 部分组成，具有典型的多孔材料特征。轴向加载时的屈服应力分别是径向和弦向的 5.70 倍和 7.75 倍。

2) 在较高的加载应变率下, 杨木试件动态压缩加载的应力-应变曲线由线弹性阶段、屈服阶段 2 部分组成, 同时表现出了多孔材料的特征。

3) 杨木试件动态压缩加载的屈服应力具有应变率敏感性。当应变率从约 400 s^{-1} 增加到 1000 s^{-1} 时, 杨木径向、弦向和轴向的屈服应力分别增加了 1.51, 1.59, 3.12 倍, 杨木是一种应变率敏感材料。

4) 由于静动态压缩载荷作用下杨木试件的应力-应变曲线具有多孔材料的特征, 因此对 Liu 等提出的本构方程进行了修正, 建立了包含应变率影响的本构模型, 其描述杨木在静动态压缩载荷作用下的本构关系是比较合适的。拟合曲线与试验曲线的吻合度较高, 拟合曲线能够真实地反映杨木试件的宏观应力-应变曲线特征, 也说明将多孔材料的本构模型应用于木材是可行的。

文中建立的静动态压缩载荷作用下杨木的本构模型虽可以为热磨法纤维分离设备及磨片齿形结构优化设计和木材及木质复合材料在运输包装中的进一步应用提供理论参考, 但考虑到拟合模型参数所用的试验数据是在一定的树种、密度、含水率和温度下得到的, 因此, 该模型材料参数的物理意义还有待进一步研究完善, 其适用范围还有待进一步拓展。

参考文献:

- [1] HUA J, CHEN G W, SHI S Q. Effect of Incorporating Chinese Poplar in Wood Chips on Fiber Refining[J]. Forest Products Journal, 2010, 60(4): 362—365.
- [2] 张秀丽, 梁迎春. 机械结构的多目标模糊优化方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(5): 14—17.
ZHANG Xiu-li, LIANG Ying-chun. Multiobjective Fuzzy Optimization of Mechanical Structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(5): 14—17.
- [3] 邓斌, 黄洪钟, 王金诺. 多目标模糊优化的数学模型及其求解原理和方法[J]. 机械设计与研究, 1996, 7(1): 8—13.
DENG Bin, HUANG Hong-zhong, WANG Jin-nuo. Mathematical Model of Multi-objective Fuzzy Optimization and Its Solving Principle and Method[J]. Mechanical Design and Research, 1996, 7(1): 8—13.
- [4] RUNKLERA T A, GERSTORER E. Modelling and Optimization of a Refining Process for Fiber Board Production[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11: 1229—1241.
- [5] SANTE W. Stress-strain Relationships for Spruce Wood: Influence of Strain Rate, Moisture Content and Loading Direction[J]. Society for Experimental Mechanics, 2004, 44(1): 44—48.
- [6] 赵彬. 基于木材包装存在的主要问题及对策研究[J]. 包装工程, 2016, 37(23): 196—202.
ZHAO Bin. Main Problems Existing in Wooden Pack-
- aging and Solution[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(23): 196—202.
- [7] 徐朝阳, 徐德良, 贾翀, 等. 硬松类木材横纹压缩时能量吸收特性研究[J]. 包装工程, 2014, 35(17): 11—14.
XU Zhao-yang, XU De-liang, JIA Chong, et al. Energy Absorption Characteristics of Hard Pine during Across-compression[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 11—14.
- [8] 高晨超, 张洋, 王超. 高温热水处理对刨花制板性能的影响[J]. 包装工程, 2015, 36(7): 36—39.
GAO Chen-chao, ZHANG Yang, WANG Chao. Effect of High-temperature Hydrothermal Treatment on Properties of Particle Board[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7): 36—39.
- [9] 何淑芬, 王伟. 弹药木包装箱阻燃处理的研究[J]. 包装工程, 2011, 32(23): 20—22.
HE Shu-fen, WANG Wei. Study on Fire Retarding Treatment of Ammunition Wood Packaging Box[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(23): 20—22.
- [10] 张承革, 石友强, 郭睦基, 等. 新型木塑复合材料及其制备方法研究[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 137—142.
ZHANG Cheng-ge, SHI You-qiang, GUO Mu-ji, et al. A New Type of Wood-plastic Composite Material and Its Preparation Method[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 137—142.
- [11] 刘一星. 木材横纹压缩大变形应力-应变关系的定量表征[J]. 林业科学, 1995, 31(5): 436—442.
LIU Yi-xing. Quantitative Expression on the Large Transverse Compressive Deformation Relationships between Stress and Strain of Wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1995, 31(5): 436—442.
- [12] 陶俊林, 蒋平, 余作生. 木材静压大变形本构关系研究[J]. 力学与实践, 2000, 22(5): 25—27.
TAO Jun-lin, JIANG Ping, YU Zuo-sheng. On the Static Constitutive Relation of Wood with Large Deformation[J]. Mechanics in Engineering, 2000, 22(5): 25—27.
- [13] 张红为, 胡兵, 邵卓平. 杨木压缩应力-应变关系研究[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(4): 665—668.
ZHANG Hong-wei, HU Bing, SHAO Zhuo-ping. Stress Strain Relationship with Compression of Poplar[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2010, 37(4): 665—668.
- [14] BODIG J. Stress-strain Relationship for Wood in Transverse Compression[J]. Journal of Materials, 1966, 1(3): 645—666.
- [15] ADALIAN C, MORLIE P. Wood Model for the Dynamic Behavior of Wood in Multiaxial Compression[J]. Holz Roh-Werkst, 2002, 60: 433—439.
- [16] OUDENE M, KHELIFA M. Elasto-plastic Constitutive Law for Wood Behavior under Compressive Loadings[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23:

- 3359—3366.
- [17] MARTIN N, JRGEN H, BERNHARD O, et al. Compressive Behavior 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.
- [18] 姜凤春, 沙桂英, 张晓欣, 等. Hopkinson压杆实验技术的应用研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 1999, 20(4): 56—60.
JIANG Feng-chun, SHA Gui-ying, ZHANG Xiao-xin, et al. The Study of Hopkinson Compression Bar Experimental Technique[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 1999, 20(4): 56—60.
- [19] BREZNY R, GREEN D J. The Effect of Cell Size on the Mechanical Behavior of Cellular Materials[J]. *Acta Metall Mater*, 1990, 38: 2517—2526.
- [20] 原璐, 杨慧, 黄庆国, 等. 芳纶纤维增强复合材料约束混凝土的动态压缩韧性试验研究[J]. *工业建筑*, 2012, 42(9): 116—119.
YUAN Lu, YANG Hui, HUANG Qing-guo, et al. Study on Dynamic Compressive Toughness of Arfp Confined Concrete[J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(9): 116—119.
- [21] GIBSON L J, ASHBY M F. *Cellular Solids Structure and Properties*[M]. Pergamon Press, Oxford, 1988.
- [22] ZHOU C, SMITH G D, DAI C. Characterizing Hydro-thermal Compression Behavior of Aspen Wood Strands[J]. *Holzforschung*. 2009, 63(5): 609—617.
- [23] BANHART J. *Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams*[J]. *Progress in Materials Science*, 2001, 46: 559—632.
- [24] AKTAY L. Quasi-static Axial Crushing of Extruded Polystyrene Foam-filled Thin-walled Aluminum Tubes: Experimental and Numerical Analysis[J]. *Materials and Design*, 2006, 27: 556—565.
- [25] ZHIHUA W. Studies on the Dynamic Compressive Properties of Open-cell Aluminum Alloy Foams[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54: 83—87.
- [26] SUNGSOO L, FRANCOIS B, NICOLAIE M, et al. Deformation Rate Effects on Failure Modes of Open-cell in Foams and Textile Cellular Materials[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43: 53—73.
- [27] GIBSON L J, ASHBY M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1997.
- [28] 王二恒, 虞吉林, 王飞. 泡沫铝材料准静态本构关系的理论和实验研究[J]. *力学学报*, 2004, 36(6): 674—676.
WANG Er-heng, YU Ji-lin, WANG Fei. Theoretical and Experimental Study on the Quasistatic Constitutive Model of Aluminum Forms[J]. *Acta Mechanical*, 2004, 36(6): 674—676.
- [29] 胡玲玲, 黄小青, 张红, 等. 泡沫铝材料的一维粘塑性本构关系[J]. *华南理工大学学报*, 2004, 32(4): 87—90.
HU Ling-ling, HUANG Xiao-qing, ZHANG Hong. Matlab/Simulink Simulation Model of the Three Phase Induction Motor in Stator Winding ABC Frame[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2004, 32(4): 87—90.
- [30] AVALLE M, BELINGARDI G, IBBA A. Mechanical Models of Cellular Solids: Parameters Identification from Experimental Tests[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34: 23—27.
- [31] KWANG Y J, SEONG S C, MAHBUBUL B M. A Constitutive Model for Polyurethane Foam with Strain Rate Sensitivity[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(7): 2033—2038.
- [32] LIU Q, SUBHASH G. A Phenomenological Constitutive Model for Foams under Large Deformation[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2004, 44(5): 463—473.