

装备防护

基于纤维解离水曲柳压缩解离特征与能量耗散机制研究

许威^{1,2}, 曹军¹, 花军^{1*}, 陈光伟¹

(1.东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040; 2.哈尔滨商业大学 轻工学院, 哈尔滨 150028)

摘要: **目的** 以水曲柳为研究对象, 研究高应变率压缩载荷作用下水曲柳试件的解离特征和能量耗散机制。**方法** 利用压缩加载试验分析应变率、加载方向对受载水曲柳的形态特征影响和动力学特性, 并利用弹塑性基本原理分析其受压解离的能量耗散机制。**结果** 解离后径向加载试件主要呈火柴棍状, 弦向加载试件主要呈片状, 轴向加载试件主要呈不规则块状, 试件的解离程度随应变率的增大而增大; 当应变率在 400~1 000 s⁻¹ 时, 水曲柳试件的应力-应变曲线由弹性阶段和屈服后弱线性强化阶段两部分组成; 水曲柳试件的屈服强度随应变率的增大而增大, 当应变率从 400 s⁻¹ 增加到 1 000 s⁻¹ 时, 径向、弦向和轴向加载试件的屈服强度分别增加了 0.45 倍、1.34 倍和 0.71 倍; 木材原料沿径、弦向解离时主要依靠木材细胞的压缩变形来耗散能量, 沿轴向解离时主要依靠木材细胞纵向结构的弯曲来耗散能量。**结论** 弦向最易解离, 轴向最难解离; 水曲柳是一种应变率敏感材料; 木材原料径、弦向解离主要依靠压缩变形来耗散能量, 轴向解离主要依靠弯曲变形来耗散能量, 木材原料解离能够耗散能量的多少主要受加载方向、木材细胞的结构尺寸和力学性能的影响。

关键词: 木材; 纤维解离; 应变率; 解离特征; 能量耗散机制

中图分类号: TB484; S781; TS624 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)03-0284-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.033

Compression Dissociation Characteristics and Energy Dissipation Mechanism of Fraxinus Mandshurica Based on Fiber Dissociation

XU Wei^{1,2}, CAO Jun¹, HUA Jun^{1*}, CHEN Guangwei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. College of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: The work aims to study the dissociation characteristics and energy dissipation mechanism of fraxinus mandshurica specimens under high strain rate compression loading with the fraxinus mandshurica as the research object. The effect of strain rate and loading direction on the morphological and dynamic characteristics of the loaded fraxinus mandshurica was analyzed by compression loading experiments, and the energy dissipation mechanism of its compression dissociation was analyzed by the basic principles of elastic-plasticity. After dissociation, the radial loaded specimens were mainly in the shape of matchstick, the tangential loaded specimens were mainly in the shape of chips, and the axial loaded specimens were mainly in the shape of irregular blocks. The dissociation degree of the specimens increased with the increase of strain rate. When the strain rate was in the range of 400 s⁻¹ to 1 000 s⁻¹, stress-strain curve of fraxinus

收稿日期: 2023-09-10

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)课题(20130062110005); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2020216)

*通信作者

mandshurica specimens consisted of two parts: the elastic stage and the weakly linear strengthening stage after yielding. The yield strength of fraxinus mandshurica specimens increased with the increase of strain rate. When the strain rate increased from 400 s^{-1} to $1\,000 \text{ s}^{-1}$, the yield strength of specimens subject to radial, tangential and axial loading increased by 0.45 times, 1.34 times and 0.71 times, respectively. When wood raw materials dissociated along the radial and tangential directions, they mainly depended on the compression deformation of wood cells to dissipate energy, and when dissociating along the axial direction, they mainly depended on the bending of the longitudinal structure of wood cells to dissipate energy. The tangential-loading specimens are the most easy to dissociate and the axial-loading specimens are the most hard to dissociate. Fraxinus mandshurica is a material sensitive to strain rate. When wood raw materials dissociate along the radial and tangential directions, they mainly depend on the compression deformation to dissipate energy, and when dissociating along the axial direction, they mainly depend on the bending deformation to dissipate energy. The amount of energy that wood raw material dissociation can dissipate is mainly affected by the loading direction, structural size of wood cells, and mechanical properties.

KEY WORDS: wood; fiber dissociation; strain rate; dissociation characteristics; energy dissipation mechanism

原木、木材加工边角料和树皮等均是纤维板生产的基础原材料, 纤维板产业提升了木材资源的综合利用, 1 m^3 纤维板与 3 m^3 原木使用效果相当, 纤维板的使用大大节约了森林资源^[1-2]。纤维板生产中纤维分离消耗大量能源, 直接影响了纤维板产品的生产成本和利润。优化磨片齿形结构参数, 提高木纤维生产中合格纤维的比例, 降低纤维板生产中的能量消耗是提升纤维板产品市场竞争力的重要途径, 也是学者们研究的重点内容^[3-4]。

国外学者利用试验对热磨条件下木材原料解离的动力学特性及其影响因素进行了全面研究^[5-7]。国内学者对准静态加载条件下木材的断裂力学开展了大量研究, 对热磨条件下木材原料解离动力学特性和能量耗散机制的研究相对较少^[8]。李猛等^[9]利用声发射技术和数字图像相关技术研究了 0.2 mm/s 压缩加载条件下不同含水率杉木试件的损伤过程, 探究了不同含水率下木材裂纹的萌生规律以及起裂载荷。张美林等^[10]对 1 mm/min 三点弯曲断裂木材试件内部断裂损伤状态进行了评估, 分析了熵值和波形特征参数与木材内部损伤与断裂过程的关系。骆雪等^[11]利用原位纳米力学测试系统探究了 $50 \mu\text{N/s}$ 加载时含水率对樟子松细胞壁弹性模量和硬度的影响规律。木材作为一种天然多孔材料具有优良的力学性能和吸能特性, 经常被用作运输包装材料。全球货物出口中使用的包装材料超过一半都是木材, 特别是在大重型装备的运输更是广泛采用木材作为包装材料^[12]。在运输中包装材料主要的作用就是吸收冲击功防止货物被损坏, 因此掌握高应变率加载条件下木材的能量耗散机制具有重要意义^[13]。

本文试图通过对水曲柳试件进行高应变率压缩加载试验, 模拟木材原料受压缩载荷作用解离的过程, 探究木材原料解离的形态变化特征和动力学特性, 分析木材原料解离过程中的能量耗散机制。本文

的研究结果可为热磨机磨片等纤维分离设备的结构优化设计提供理论依据, 也为木材及木质复合材料在运输包装中的进一步应用及新型木质包装材料的设计提供理论基础。

1 材料与方法

试验材料选择纤维板生产中常用的硬木水曲柳 (*Fraxinus mandshurica* Rupr.), 试材产自黑龙江省, 试件气干含水率约为 12.53% , 气干密度约为 0.93 g/cm^3 。加载试验在分离式 Hopkinson 杆 (SHPB) 试验装置上完成。试验所用 SHPB 试验装置为哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心的设备, 试验环境温度约为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[14]。试件尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 其中 20 mm 方向为加载方向。如图 1 所示, 测量了 400 、 700 和 $1\,000 \text{ s}^{-1}$ 3 个应变率, 径向、弦向和轴向 3 个加载方向上水曲柳试件的压缩动力学特性, 每个加载方向做 4 次重复试验。利用高速摄影机记录试件受载变形的全过程, 利用数码相机采集加载后试件的解离形态特征。

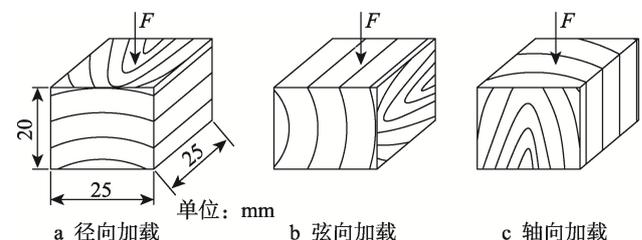


图 1 试件尺寸和加载方向示意图
Fig.1 Diagram of specimen size and loading direction

为解决水曲柳试材与 SHPB 杆材料波阻抗的匹配问题, 试验选用密度和弹性模量较低的铝杆, 并在入、透射杆分别采用普通应变片和半导体应变片测量脉冲信号, 试验所用 SHPB 试验装置结构如图 2 所示。

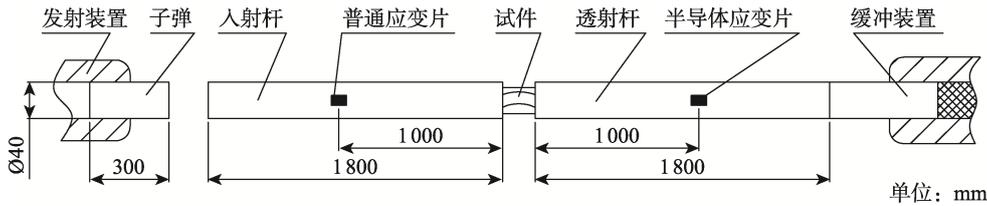


图2 SHPB试验装置
Fig.2 SHPB experimental device

2 结果与分析

试验过程中各组试验采集到的应力波波形清晰，特别是应变率相对较低的 400 s^{-1} 的各组试验采集到的透射波波形清晰、幅值大，试验取得了较好的效果，如图3所示。

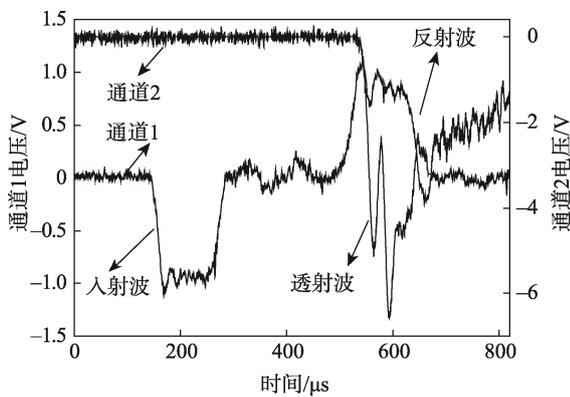


图3 径向加载应变率为 400 s^{-1} 时的应力波形
Fig.3 Stress wave of the radial loading 400 s^{-1}

2.1 试件受载后的形态变化与解离特征

利用高速摄影机记录试件受载形态变化的全过程，并利用数码相机采集解离后试件的形态特征。每种加载试验中较具有代表性的试件解离图像和解离过程如图4所示，可知：

1) 径向加载时，沿加载方向早晚材呈串联交替分布，随着加载的进行试件沿加载方向早晚材由圆弧状趋于平直，早晚材被均匀压缩且变形量较大；加载过程中试件上的宏观裂纹首先产生在早晚材分界面处，并沿早晚材分界面和加载方向进行扩展，试件解离后主要呈火柴棍状。

2) 弦向加载时，沿加载方向早晚材呈并联分布，随着加载的进行，试件被较大程度压缩，早晚材沿加载方向进一步弯曲；加载过程中试件在早晚材分界面处产生宏观裂纹，裂纹主要沿着早晚材分界面进行扩展，靠近自由端处的试件由于裂纹的分离作用使得试件呈晚材片状解离，试件解离后主要呈片状。

3) 轴向加载时，沿加载方向上早晚材呈交替立式分布，木纤维与加载方向平行，随着加载的进行，木

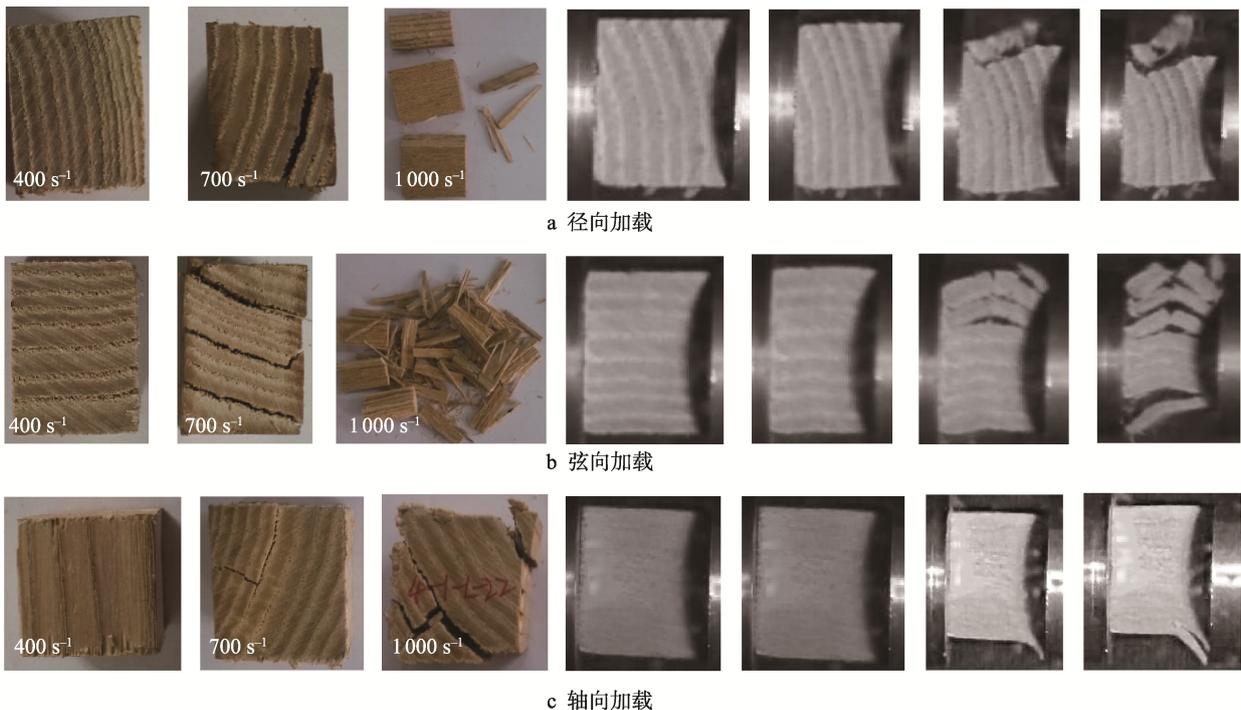


图4 水曲柳试件的解离图像和解离过程
Fig.4 Split image and process of fraxinus mandshurica specimens

纤维发生弯曲, 试件的压缩变形量较小; 随着加载的进一步加剧木纤维弯曲加剧, 在与入射杆接触试件表面的早晚材分界处产生宏观裂纹, 裂纹主要沿着早晚材分界面扩展; 试件解离后主要呈不规则块状。

综合对比径向、弦向和轴向加载试件可以发现, 加载方向对试件的解离形态变化特征有较大影响, 其中弦向最易解离, 轴向最难解离, 试件的解离程度随应变率的增大而增大。

2.2 试件解离的应力-应变关系

对采集到的应力波信号进行处理得到各组试验试件的应力-应变关系曲线如图 5 所示, 可以发现:

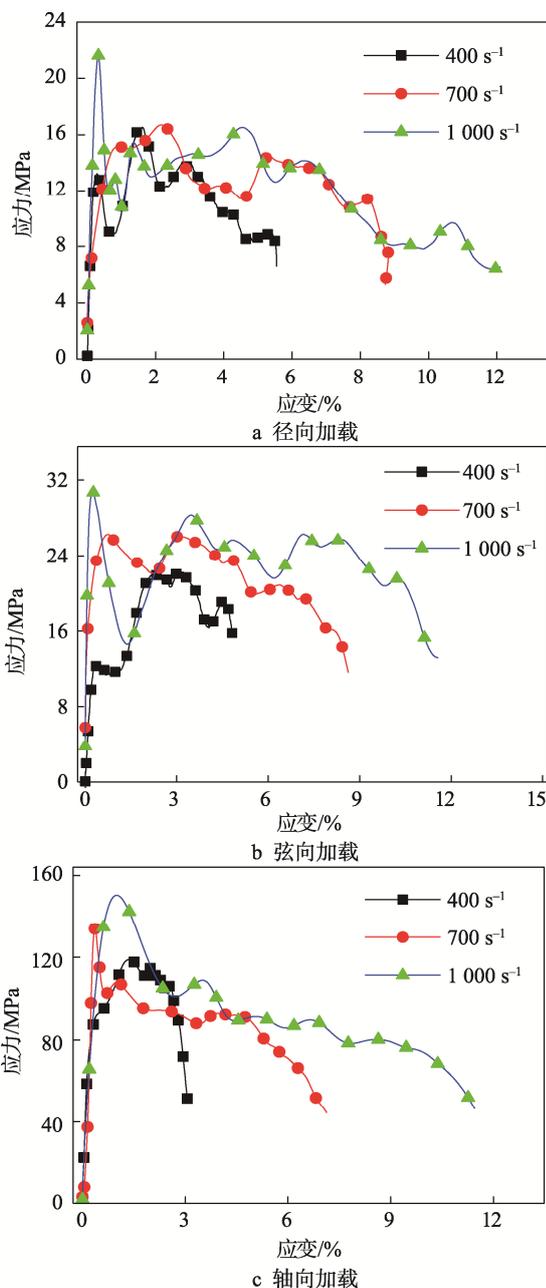


图 5 水曲柳试件应力-应变关系
Fig.5 Stress-strain relationship of fraxinus mandshurica specimens

1) 当应变率为 $400\sim 1\ 000\ s^{-1}$ 时, 水曲柳试件的应力-应变曲线由弹性阶段和屈服后弱线性强化阶段两部分组成。这主要是由于加载应变率较高, 加载功无法在水曲柳试件内部均匀耗散, 致使水曲柳试件内部变形严重不均匀, 最终导致水曲柳试件在屈服后弱线性强化阶段产生大量贯穿性裂纹而发生破碎解离。

2) 径、弦向加载应力-应变曲线在屈服后弱线性强化阶段振荡严重, 而轴向加载则相对平滑, 说明在径、弦向加载时试件内部变形剧烈。这主要是径、弦向加载时, 木材试件主要通过细胞被压缩细胞壁产生变形来耗散能量, 随着加载的进行细胞壁变形加剧细胞腔被逐渐压缩, 试件内部细胞变形及体积变化剧烈, 应力-应变曲线在屈服后弱线性强化阶段振荡严重; 轴向加载时, 木材试件主要通过木材细胞轴向结构的弯曲来耗散能量, 因此形变及体积变化相对较小, 应力-应变曲线在屈服后弱线性强化阶段相对平稳, 波动小。

3) 当应变率从 $400\ s^{-1}$ 增加到 $1\ 000\ s^{-1}$ 时, 径向、弦向和轴向加载试件的屈服强度分别增加了 0.45 倍、1.34 倍和 0.71 倍, 如图 6 所示。水曲柳是一种应变率敏感材料, 水曲柳试件的屈服强度随着应变率的增加而增加。径向加载屈服强度最小, 轴向加载屈服强度最大。

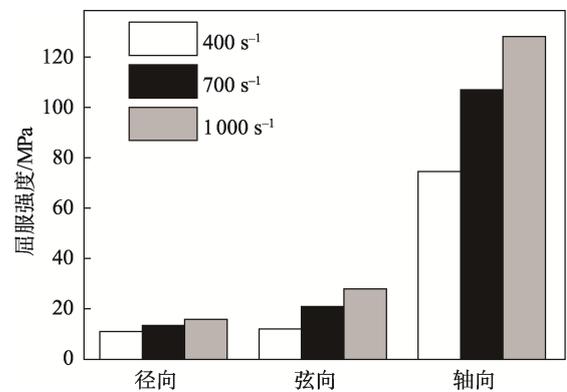


图 6 水曲柳试件屈服强度
Fig.6 Yield strength of fraxinus mandshurica specimens

3 木材原料受压缩载荷作用解离能量耗散机制分析

木材是一种具有正交各向异性的材料, 在木材原料解离过程中不同加载方向上木材的能量耗散机制不同。木材受载过程中的宏观力学行为是木材试件内部每一个细胞力学行为的综合表现, 在径、弦向上木材原料主要是通过木材细胞横截面的变形来耗散能量, 在轴向上木材原料主要通过木材轴向结构的弯曲来耗散能量。

3.1 径、弦向解离木材原料能量耗散机制分析

对径、弦向解离木材原料的能量耗散机制进行分析,将木材横断面细胞的形状简化为等壁厚的正六边形^[15],如图7所示。

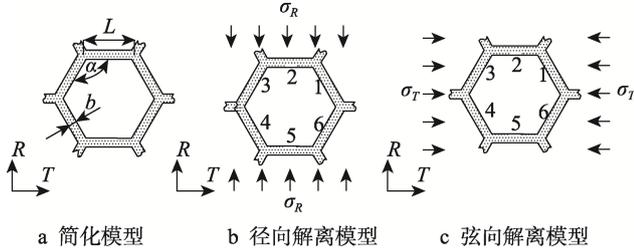


图7 木材细胞模型
Fig.7 Wood cell model

3.1.1 弹性变形阶段

当木材原料解离应力-应变曲线处于弹性变形阶段时,木材细胞的变形也处于弹性变形阶段。当沿径向或弦向解离时,木材细胞主要通过细胞壁1、3、4和6的弹性变形来耗散能量,而细胞壁2和5的变形相对较小,如图8所示。分析时作出如下假设:细胞壁之间为刚性连接;细胞壁发生扭转变形时,转动中心为细胞壁的中点;细胞壁2和5的变形忽略不计;细胞卸载均匀,细胞壁1、3、4、6受载变形情况相同。

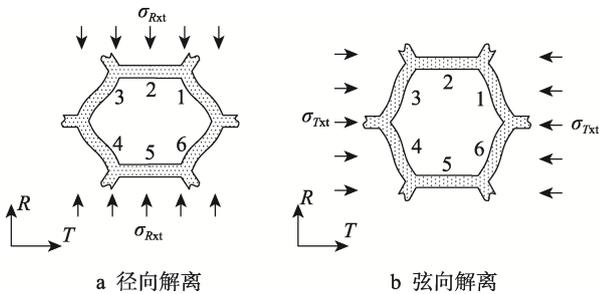


图8 径、弦向加载木材细胞弹性变形
Fig.8 Elastic deformation of wood cells under radial and tangential loading

以细胞壁1为研究对象,径、弦向解离时其所受解离载荷可分解为径向解离力和弦向解离力,如图9所示。径向解离时,细胞壁1的弹性变形主要由径向解离力 F_{RRxt} 作用产生,弦向解离力 F_{TRxt} 作用很小,可忽略不计;弦向解离时,细胞壁1的弹性变形主要由弦向解离力 F_{TTxt} 作用产生,径向解离力 F_{RTxt} 作用很小,可忽略不计。根据假设条件,可得径向解离时径向解离力 F_{RRxt} 和弦向解离时弦向解离力 F_{TTxt} 分别为:

$$F_{RRxt} = \sigma_{Rxt} Lh(1 - \cos \alpha) \quad (1)$$

$$F_{TTxt} = \sigma_{Txt} Lh \cos(\alpha - \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

式中: σ_{Rxt} 为径向解离应力,MPa; σ_{Txt} 为弦向解离应力,MPa; L 为木材细胞壁横截面六边形的边长,

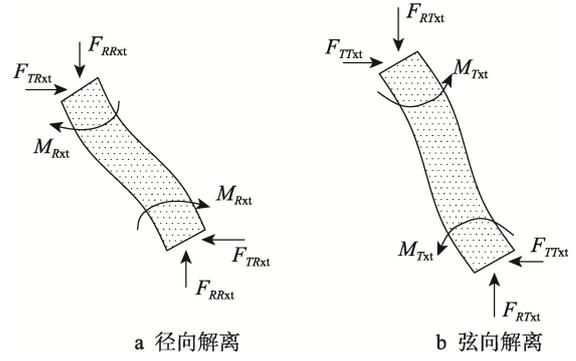


图9 细胞壁1受力分析
Fig.9 Stress analysis of cell wall 1

mm; h 为木材细胞壁轴向长度,mm; α 为木材细胞壁径向内角, $(^\circ)$ 。

将细胞壁1简化为梁,可得径向解离时细胞壁1的挠度在径向上的分量 w_{R1} 和弦向解离时细胞壁1的挠度在弦向上的分量 w_{T1} ,分别见式(3)和式(4)^[16]。

$$w_{R1} = -\frac{F_{RRxt} L^3 \cos \alpha \sin(\alpha - \frac{\pi}{2})}{12EI} \quad (3)$$

$$w_{T1} = \frac{F_{TTxt} L^3 \sin \alpha \cos(\alpha - \frac{\pi}{2})}{12EI} \quad (4)$$

式中: I 为木材细胞壁的惯性矩, mm^4 , $I = hb^3/12$ ^[17]; b 为木材细胞壁横截面的厚度,mm; E 为木材细胞壁弹性模量,MPa。

在弹性变形阶段,沿径、弦向解离时解离应力对木材细胞所做的功 W_{RRxt} 和 W_{TTxt} 分别为:

$$W_{RRxt} = \frac{2\sigma_{Rxt}^2 L^5 h \cos^2 \alpha (1 - \cos \alpha)^2}{Eb^3} \quad (5)$$

$$W_{TTxt} = \frac{2\sigma_{Txt}^2 L^5 h \cos^3(\alpha - \frac{\pi}{2}) \sin \alpha}{Eb^3} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知,径、弦向解离时在弹性变形阶段木材细胞主要通过细胞壁的弹性变形来耗散能量,木材细胞耗散能量的多少主要受细胞的弹性模量和结构尺寸的影响。细胞壁的弹性模量越大弹性越差,细胞壁能够耗散的能量越少。当解离应力一定时,木材细胞壁的 L 、 h 越大, b 越小,细胞壁能够耗散的能量越多。径向解离时 α 越大,弦向解离时 α 越小,木材细胞壁能够耗散的能量越多,木材原料越难于解离。

3.1.2 塑性变形阶段

随着木材原料解离程度的加剧,木材原料内部细胞的弹性变形进一步加大,木材细胞的横截面不再是规则的正六边形,此时解离应力主要由与解离方向近似平行的木材细胞壁承载。当木材细胞壁承受的解离

载荷超过 Euler 屈曲载荷时, 木材细胞就会发生塑性变形, 木材原料解离进入塑性变形阶段。在塑性变形阶段, 主要依靠细胞壁的屈曲来耗散能量。忽略加载过程中 α 的变化所带来的影响, 则细胞壁的 Euler 屈曲载荷为^[16]:

$$F_{qq-crit} = \frac{hb^3 E \beta^{*2}}{3L^2} \quad (7)$$

式中: β^{*2} 为积分系数, 对于正六边形, $\beta^{*2}=0.343\pi$ 。

假设此时解离应力的作用仅引起细胞壁的屈曲, 则细胞壁的解离力 F_{qq} 与解离应力 σ_{qq} 的关系为:

$$F_{qq} = 2\sigma_{qq} Lh \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

当 $F_{qq}=F_{qq-crit}$ 时细胞壁发生屈曲变形, 则细胞壁发生屈曲变形的应力 $\sigma_{qq-crit}$ 为:

$$\sigma_{qq-crit} = \frac{b^3 E \beta^{*2}}{6L^3 \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 当木材细胞壁应力大于 $\sigma_{qq-crit}$ 时, 木材原料进入塑性变形阶段。在塑性变形阶段木材原料的能量耗散机制与弹性阶段类似, 主要受细胞的弹性模量和结构尺寸影响。

3.1.3 塑性坍塌阶段

随着木材原料解离程度的进一步加剧, 木材细胞的变形进一步增大。当细胞壁的弯矩达到完全的塑性弯矩时, 木材细胞就会发生塑性坍塌, 此时在木材细胞壁的转角处形成塑性铰, 如图 10 所示, 其中 $a_R \sim f_R$, $a_T \sim f_T$ 均为塑性铰。在塑性坍塌阶段细胞壁上会产生微裂纹, 随着塑性坍塌的加剧, 微裂纹逐渐增多, 最后微裂纹连通扩展形成宏观裂纹, 使细胞壁出现断裂, 实现木材原料的破碎解离。

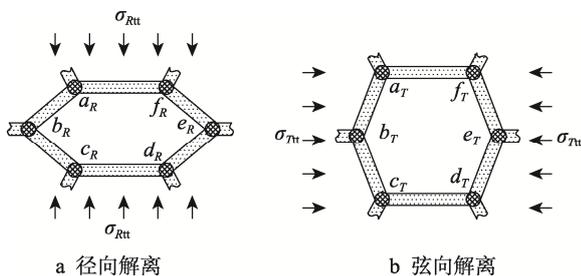


图 10 径、弦向加载木材细胞塑性坍塌模型
Fig.10 Plastic collapse model of wood cell under radial and tangential loading

假设木材细胞壁为理想刚塑性梁, 则解离力所做的功完全转化为塑性铰所消耗的塑性功, 发生塑性坍塌时能量耗散只发生在细胞壁上离散的塑性铰处。木材细胞壁上塑性铰所消耗的能量 W_j 为^[18]:

$$W_j = \sum_{i=1}^n M_p |\varphi_i| \quad (10)$$

式中: φ_i 为第 i 个塑性铰处的相对转角, ($^\circ$); n 为细胞壁上塑性铰的数目; M_p 为木材细胞壁塑性极限弯矩, $N \cdot mm$ 。

径、弦向解离木材细胞发生塑性坍塌时, 细胞壁发生塑性旋转的角度分别为 φ_{Rtt} 和 φ_{Ttt} , 则塑性坍塌过程中径向和弦向木材细胞所耗散的能量 W_{Rtt} 和 W_{Ttt} 分别见式 (11) 和式 (12)。

$$W_{Rtt} = 4M_{RP} \varphi_{Rtt} = 2\sigma_{Rtt} L^2 h \varphi_{Rtt} \left[1 + \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right] \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \quad (11)$$

$$W_{Ttt} = 4M_{TP} \varphi_{Ttt} = 2\sigma_{Ttt} L^2 h \varphi_{Ttt} \cos^2\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \quad (12)$$

由式 (11) 和式 (12) 可知, 在塑性坍塌阶段木材细胞能够耗散能量的多少主要受木材细胞的结构尺寸和细胞壁塑性旋转角度的影响。当解离强度一定时, 木材细胞壁的 L 、 h 和 φ 越大, 细胞壁能够耗散的能量越多; 径向解离时 α 越大, 弦向解离时 α 越小, 则木材细胞能够耗散的能量越多, 木材原料越难以解离。

综合上述分析可知, 径、弦向解离时木材原料在弹性变形、塑性变形和塑性坍塌变形阶段主要依靠木材细胞的弹性变形、屈曲变形和塑性坍塌来耗散能量, 能够耗散能量的多少主要受木材细胞的结构尺寸和弹性模量等的影响。从整体上看, 木材细胞壁的 L 、 h 越大, b 、 E 越小, 径向解离时 α 越大, 弦向解离时 α 越小, 木材原料解离所需要的能量越多, 木材原料越难以解离。

3.2 轴向加载木材原料能量耗散机制

木材原料沿轴向解离时, 在弹性变形阶段木材原料通过木材细胞壁微纤丝之间产生滑移和细胞层发生弹性变形来耗散能量。

随着解离程度的增加木材细胞的变形进一步加大, 木材原料进入塑性变形阶段。在塑性变形阶段, 木材原料主要通过木材细胞沿轴向发生弯曲变形来耗散能量。此时, 可以将木材细胞轴向结构简化为一端固定一端自由的长圆柱杆, 如图 11 所示。从弹性变形阶段进入塑性变形阶段时, 木材细胞轴向结构挠曲线的微分方程为:

$$\frac{d^2 w_z}{dh_z^2} = \frac{F_z w_z}{E_z I_z} \quad (13)$$

式中: E_z 为木材轴向结构弹性模量, MPa ; I_z 为木材细胞轴向结构截面惯性矩, mm^4 ; F_z 为轴向解离应力, MPa ; h_z 为研究截面与 O 点的距离, mm ; w_z 为研究截面的挠度, mm 。

当木材细胞轴向结构所受应力大于临界应力 σ_{z-crit} 时, 木材细胞轴向结构开始进入塑性变形阶段。木材细胞轴向结构弯曲变形的边界条件为 $h_z=0$ 和 $h_z=h$ 时, $w_z=0$ 。根据边界条件, 由式 (13) 可得

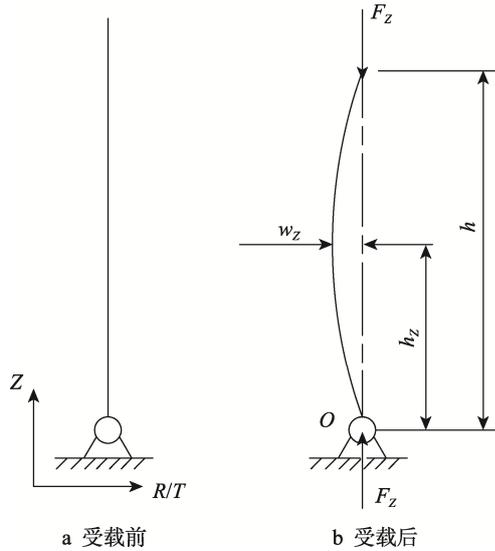


图 11 木材细胞轴向结构简化模型
Fig.11 Simplified axial structure model of wood cells

轴向解离时，木材原料进入塑性变形阶段的临界应力 σ_{Z-crit} 见式 (14)。

$$\sigma_{Z-crit} = \frac{E_z \pi^2 [L^4 - (L-b)^4]}{2h^2 b (2L-b)} \quad (14)$$

当木材细胞轴向结构的弯矩达到完全的塑性弯矩时，木材细胞轴向结构就会发生褶皱而引起塑性坍塌，此时在木材细胞轴向结构上形成塑性铰，如图 12 所示。

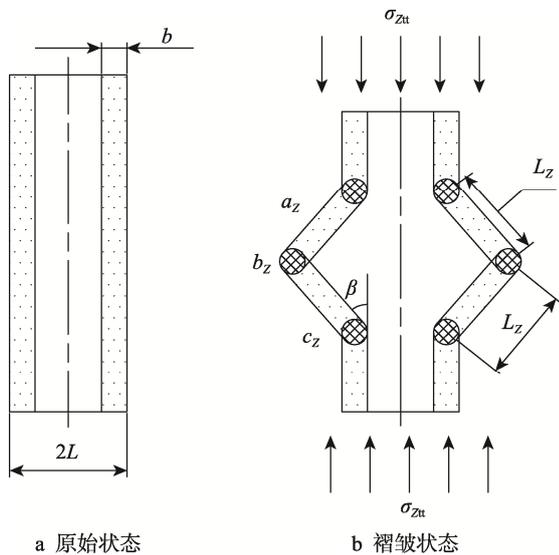


图 12 木材细胞轴向结构塑性坍塌力学模型
Fig.12 Mechanical model of plastic collapse of axial structure of wood cells

此时，在木材细胞轴向结构产生褶皱的区域形成了 3 个塑性铰，如图 12b 中的 a_z 、 b_z 、 c_z 。假设木材细胞轴向结构为理想刚塑性，则解离力所做的功全部转变为褶皱区域离散塑性铰消耗的塑性功。塑性铰 a_z 和 b_z 耗散的能量 W_{zaZ} 和 W_{zbZ} 分别为^[19]：

$$W_{zaZ} = M_{zP} \beta \pi (2L - b) \quad (15)$$

$$W_{zbZ} = 2M_{zP} \int_0^\beta \pi (2L - b + 2L_z \sin \beta) d\beta \quad (16)$$

式中： M_{zP} 为木材细胞纵向结构单位宽度的塑性极限弯矩， $N \cdot mm$ ， $M_{zP} = Y_{zS} b^2$ ， Y_{zS} 为木材细胞纵向结构屈服应力， MPa ； β 为塑性转角， $(^\circ)$ ； L_z 为褶皱半长， mm 。

褶皱过程中塑性铰 c_z 和 a_z 耗散的能量相同，则木材细胞纵向结构产生褶皱过程中耗散的总能量 W_{zt} 为：

$$W_{zt} = W_{zaZ} + W_{zbZ} + W_{zcZ} = 2M_{zP} \beta \pi (2L - b) + 2M_{zP} \int_0^\beta \pi (2L - b + 2L_z \sin \beta) d\beta = 4Y_{zS} b^2 \pi [\beta (2L - b) + L_z (1 - \cos \beta)] \quad (17)$$

由式 (17) 可知，在塑性坍塌阶段木材细胞主要通过细胞壁上的塑性铰来耗散能量，能量耗散的多少主要受木材细胞的结构尺寸和塑性转角 β 的影响。当 Y_{zS} 一定时，木材细胞壁的 L 、 b 、 L_z 、 β 越大，木材细胞壁能够耗散的能量越多，木材原料越难于解离。

4 结语

利用 SHPB 试验模拟了压缩载荷作用下木材原料的解离过程，获得了不同应变率和加载方向下木材原料解离的形态特征和动力学特性。利用力学模型分析了解离过程中木材原料的能量耗散机制。结果表明，水曲柳试件沿弦向加载最易解离，沿轴向加载最难解离，解离过程中宏观裂纹首先在早晚材分界面产生，并主要沿着早晚材分界面扩展；解离时水曲柳试件的应力-应变曲线由弹性阶段和屈服后弱线性强化阶段两部分组成，水曲柳是一种应变率敏感材料。径、弦向解离时木材原料主要依靠木材细胞的弹性变形、塑性变形和塑性坍塌来耗散能量，轴向解离时木材原料主要依靠木材细胞纵向结构的弯曲来耗散能量，解离过程中木材原料能够耗散能量的多少主要受木材原料微观结构特征的影响。若能够根据木材原料的动力学特性、微观结构特征结合木材原料的能量耗散机制，合理设计进料螺旋和热磨机磨片齿形结构参数，则可以有效降低研磨过程中的能量消耗，减小磨片磨齿的磨损，延长磨片的使用寿命。本文的研究结果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指导。本文仅研究了径向、弦向和轴向受载的情况，当加载方向与木材纹理方向相倾斜时，倾斜角度等因素对木材原料的解离特征和能量耗散机制的影响还有待进一步研究完善。

参考文献：

[1] 张震宇. 中国纤维板产业发展现状分析[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(7): 11-15.

- ZHANG Z Y. Analysis of the Development Situation of the Fiberboard Industry in China[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2022, 50(7): 11-15.
- [2] 曹玉昆, 张蕊, 朱震锋. 中国人造板产业竞争力驱动研究[J]. *林业经济问题*, 2022, 42(2): 132-141.
- CAO Y K, ZHANG R, ZHU Z F. Research on the Competitiveness Drive of China's Wood-Based Panel Industry[J]. *Issues of Forestry Economics*, 2022, 42(2): 132-141.
- [3] 王雨, 张忠涛, 王琪. 我国人造板产业高质量发展成效显著[J]. *中国人造板*, 2022, 29(5): 1-6.
- WANG Y, ZHANG Z T, WANG Q. Achievements of High-Quality Development of China Wood-Based Panels Industry[J]. *China Wood-Based Panels*, 2022, 29(5): 1-6.
- [4] 陈光伟, 花军, 纪伟, 等. 磨片结构对纤维分离过程中能量转换机理的影响分析[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(8): 109-114.
- CHEN G W, HUA J, JI W, et al. Effects of Abrasive Disc Structure on Energy Transformation During Fiber Separation[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(8): 109-114.
- [5] SADATNEZHAD S, KHAZAEIAN A, SANDBERG D, et al. Continuous Surface Densification of Wood: A New Concept for Large-Scale Industrial Processing[J]. *Bio-Resources*, 2017, 12(2): 3122-3132.
- [6] HAMDAN H, NORDAHLIA A S, ANWAR U M K, et al. Anatomical, Physical, and Mechanical Properties of Four Pioneer Species in Malaysia[J]. *Journal of Wood Science*, 2020, 66(1): 59.
- [7] TALEBJEDI B, KHOSRAVI A, LAUKKANEN T, et al. Energy Modeling of a Refiner in Thermo-Mechanical Pulping Process Using ANFIS Method[J]. *Energies*, 2020, 13(19): 5113.
- [8] 赵艳华, 李征, 常建梅. 木材I/II复合型断裂破坏研究进展[J]. *力学与实践*, 2017, 39(1): 7-17.
- ZHAO Y H, LI Z, CHANG J M. A state-of-the-Art Review of Failure of Wood under I/II Mixed Mode Fracture[J]. *Mechanics in Engineering*, 2017, 39(1): 7-17.
- [9] 李猛, 陈迪, 田康, 等. 不同含水率下木构件起裂荷载试验研究[J]. *森林工程*, 2022, 38(4): 69-81.
- LI M, CHEN D, TIAN K, et al. Experimental Study on Cracking Load of Wood Members under Different Moisture Content[J]. *Forest Engineering*, 2022, 38(4): 69-81.
- [10] 张美林, 李俊菽, 张晴晖, 等. 基于熵和波形特征的木材损伤断裂过程声发射信号处理[J]. *林业工程学报*, 2022, 7(2): 159-166.
- ZHANG M L, LI J Q, ZHANG Q H, et al. Acoustic Emission Signal Processing and Analysis of Wood Damage and Fracture Process Based on Entropy and Waveform Characteristics[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2022, 7(2): 159-166.
- [11] 骆雪, 赵栋梁, 薛振华, 等. 含水率对樟子松细胞弹性模量和硬度的影响规律[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(5): 218-222.
- LUO X, ZHAO D L, XUE Z H, et al. Influence Law of Moisture Content on Elastic Modulus and Hardness of *Pinus Sylvestris* var *Mongolica* Cell Wall[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(5): 218-222.
- [12] 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): 68-78.
- LI J C, ZHANG B, XIE R Z, et al. Research Advance on the Mechanical Behaviors and Energy Absorption of Soft Wood[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(5): 68-78.
- [13] 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 B. Main Problems Existing in Wooden Packaging and Solution[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(23): 196-202.
- [14] 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.
- [15] 马岩. 木材横断面六棱规则细胞数学描述理论研究[J]. *生物数学学报*, 2002, 17(1): 64-68.
- MA Y. Research on Mathematical Model of Wood Horizontal Section Hexagon Standard Cell[J]. *Journal of Biomathematics*, 2002, 17(1): 64-68.
- [16] LORNA J G, MICHAEL F A. 多孔固体结构与性能[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 92, 145.
- LORNA J G, MICHAEL F A. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 92, 145.
- [17] SPURR A R. A Low-Viscosity Epoxy Resin Embedding Medium for Electron Microscopy[J]. *Journal of Ultrastructure Research*, 1969, 26(1): 31-43.
- [18] 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]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- YU T X, LU X G. *Energy Absorption of Structures and Materials*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [19] 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.