

文章编号: 1001-1455(2008)04-0367-05

杨木的动态力学性能*

窦金龙^{1,2}, 汪旭光², 刘云川¹

(1. 北京科技大学, 北京 100083;

2. 北京矿冶研究总院, 北京 100044)

摘要: 应用分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 研究了干、湿速生杨木在高应变率加载条件下的动态力学性能, 并同准静态压缩实验的结果进行了比较, 论述了干、湿杨木在高应变率载荷条件下破坏的机制。结果表明: 杨木的应力应变曲线与多孔固体相似, 经历弹性、屈服以及致密 3 个阶段; 冲击后, 干杨木试样纤维因胞壁坍塌而压实, 湿杨木试样由于胞管内水的作用而产生垂直于纤维轴向的拉应力, 使纤维沿轴向相互分离, 并且应变率对杨木的力学性能的影响明显。

关键词: 固体力学; 力学性能; Hopkinson 杆; 杨木; 应变率效应;

中图分类号: O345

国标学科代码: 130 · 1515

文献标志码: A

1 引言

木材是一种天然可再生性生物能源材料, 具有多孔性、非均匀性和各向异性, 广泛应用于建材、包装、制浆造纸等领域。对木材的静态力学性能已做了很多研究, 其中 L. J. Gibson 等^[1]最有代表性, 对木材的结构和各种理化性能进行了系统的总结, 给出了许多有益的经验公式, 并在大量实验观测与理论分析的基础上建立了木材在准静载荷下的破坏形式及机理。

S. R. Reid 等^[2]、M. Vural^[3]对橡木、红木、松木、软木加限变环的准静态和 SHPB 研究表明, 木材压缩的应变率效应很明显, 木材总是发生类似多孔材料的局部变形, 这个局部区域耗散了一定的能量后, 其余的区域可能只发生弹性变形。SEM 观察显示, 动态压缩引起的局部变形比准静态下的更显著, 破坏形式包括屈曲、褶皱两种。M. Renaud 等^[4]对几种湿硬木静态和动态的弹性模量、平台应力等力学性质进行了讨论, 但对于浸湿木片在高应变率载荷下的破坏机制方面的研究, 未见报道。因此本文中以杨木为对象, 对干、湿杨木在 SHPB 冲击载荷下的动态性能开展必要的基础研究, 旨在探索干、湿木材动态压缩的应力应变响应特征、应变率效应及相关破坏机制。

2 实验材料及方法

实验所用的杨木由中国林业科学院提供, 属速生毛白杨, 采自山西省临汾市。试样包括轴向(沿纤维走向)和弦向(垂直于纤维走向)两种。准静态压缩实验利用 MTS810.23 万能试验机完成, 试件尺寸为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 加载速率为 1 mm/min , 相应的应变率为 $1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。动态压缩实验在 SHPB 设备上完成, 干杨木试件尺寸为 $\varnothing 25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 湿杨木室温下浸泡时间为 12 h, 膨胀后试件的尺寸约为 $\varnothing 26 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。

木材是一种软材料, 具有密度低、质地软, 波阻抗低、波速低等特点, 因此, 利用 SHPB 装置测试其动态力学性能时, 以下几个问题必须解决: (1) 试样阻抗与输出杆阻抗相差太大(低 2~3 个量级), 使输出杆中透射波信号与外界干扰信号的幅值处于同一量级, 从而严重影响了实验的测量精度; (2) 木材试件的波速很低(弹性波速为约 500 m/s), 使应力波在试件中往返一次的时间明显增长, 这样会引起试件

* 收稿日期: 2007-02-28; 修回日期: 2007-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50474075)

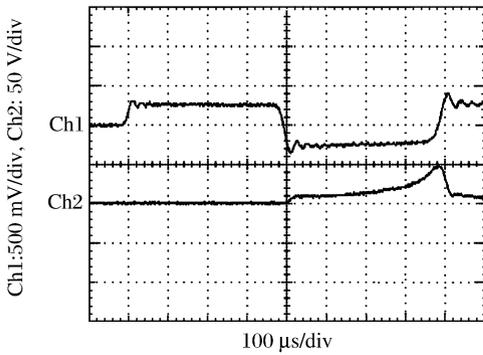
作者简介: 窦金龙(1977—), 男, 博士。

内沿其长度在相对较长时间内的应力不均匀性,导致试件左右两端面应力不相等;(3) 木材作为多孔固体,试样的尺寸要大于管胞孔径的 10 倍时,才能获得有效的力学特性^[5]。

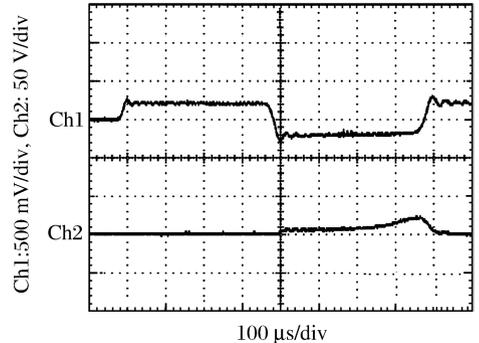
利用 SHPB 技术测试泡沫塑料、橡胶、泡沫铝等多孔软材料动态力学性能的方法,已经相当成熟^[6-9]。因此,实验选用大直径($\varnothing 37$ mm)铝杆;采用电阻应变片和半导体应变片相结合的方法,即输入杆上用电阻应变片,输出杆上用半导体应变片,以获得准确可靠的透射信号;选用长子弹(1 m)、短试件($\varnothing 25$ mm \times 5 mm),输入、输出杆的长度均为 2 m,使冲击波在试样中充分反射,保证试样中变形均匀。

3 实验结果及分析

干、湿杨木 SHPB 冲击过程实测到的入射波、反射波及透射波的典型应力波形如图 1 所示。可以看出入射波和反射波都近似为矩形波,透射波的应力幅值很小,约为入射波的 1/80,说明木材在应力波加载的条件下具有很好的缓冲吸能作用。



(a) Dry fast-growing poplar wood



(b) Wet fast-growing poplar wood

Ch1: Incident wave and reflected wave recorded by a resistance foil gauge;
Ch2: Transmission wave recorded by a semiconductor foil gauge

图 1 弦向试件的应力波形图

Fig. 1 The stress oscillogram of test specimens in the chord direction

图 2 为轴向和切向干速生杨木试样在不同平均应变率条件下的准静态、动态压缩应力应变曲线。线 1 为准静态曲线,其余均为动态曲线(下同)。图 3 为相应条件下试样的破坏形态。

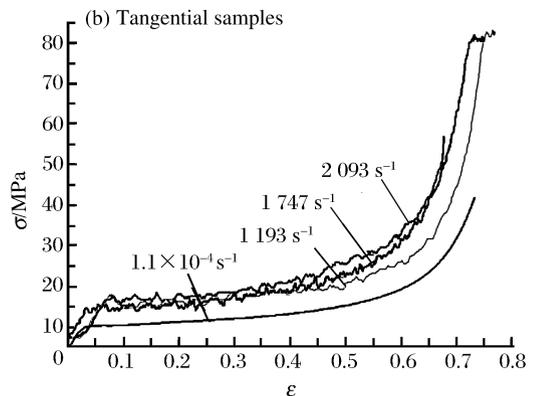
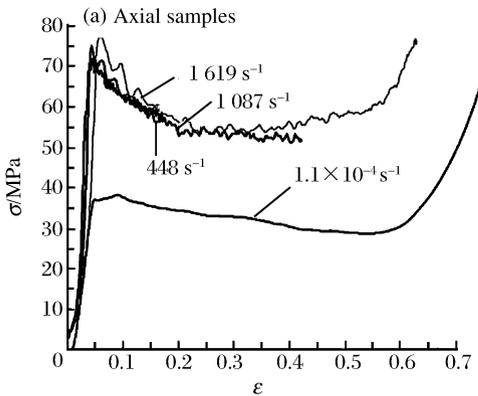


图 2 不同应变率条件下干杨木应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of the axial and tangential dry fast-growing poplar wood specimens under quasi-static and dynamic compression

由图 2、3 可以看出,干杨木压缩时具有如下特性:(1) 干杨木的准静态压缩曲线与动态压缩曲线相类似,应力应变响应具有多孔材料弹性、塑性坍塌和致密化的 3 阶段特性。材料的动态屈服应力增加,约比准静态屈服应力高一倍,应变率效应明显。(2) 试件的破坏形态相同,即,试样都因胞壁坍塌而压

实,随着冲击的速度增加,坍塌的程度也增大。
 (3) 轴向试样压缩后,试样截平面呈圆形;而切向试样压缩后,试样在被压扁的同时,轴向纤维沿切向扩展,呈现为椭圆形,这体现了木材多胞各向异性的特点。

图 4 为轴向和切向湿速生杨木试样的准静态、动态压缩的应力应变曲线。图 5 为相应条件下产生的破坏形态。

由图 4、5 可以看出,湿杨木压缩时具有如下特性:(1) 湿杨木静态曲线与动态曲线差别很大,三阶段特征仍然存在,但是动态曲线在平台部分存在许多较明显的应力峰,这些应力峰值表明木片中裂纹的产生过程,应变率越大,该峰越明显,峰值最大处表明试件已经从整体上

(a) Axial samples



(b) Tangential samples

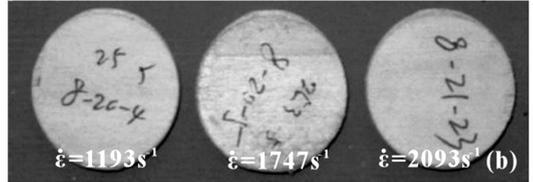


图 3 干杨木片 SHPB 冲击破坏形态

Fig. 3 Damage patterns of dry poplar wood by SHPB

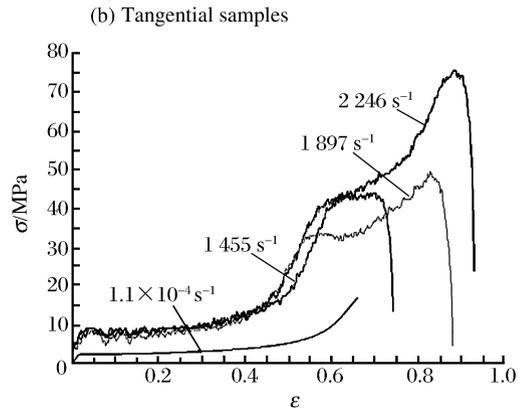
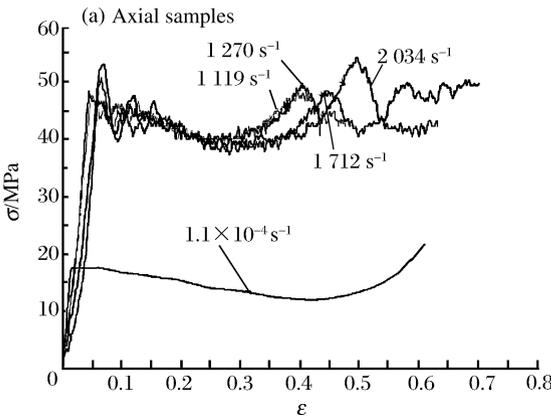


图 4 不同应变率条件下湿杨木应力-应变曲线

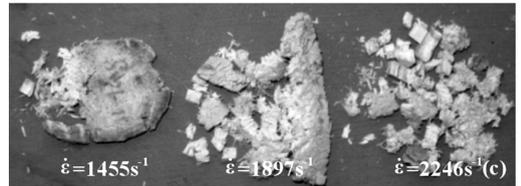
Fig. 4 Stress-strain curves of saturated fast-growing poplar wood specimens under quasi-static and dynamic compression

发生崩裂。(2) 动态屈服应力比其准静态下的结果提高近 3 倍,表现出比干杨木更强的应变率敏感性。
 (3) 动载荷下试件纤维束沿纤维轴向断裂分离,冲击速度越大,破坏越严重。
 (4) 在高应变率下干、湿杨木试件压缩的破坏效果不同,如图 4(b),湿杨木轴向纤维不再沿切向扩展,而是沿轴向断开,破坏平面仍保持圆形,横观各向异性的效果消失,这是高应变率下,破坏分离作用远大于纤维侧向移动作用所致。

轴向试样的屈服强度、平台应力比切向试样的高得多,是由材料的各向异性所决定的。沿着纤维轴向压缩时,纤维发生屈曲、褶皱;垂直纤维压缩时,纤维的胞壁坍塌、堆积。

湿杨木试样由于水的作用,屈服应力比干杨木试样的低很多,且静态加载下,试件蠕变性能作用明

(a) Axial samples



(b) Tangential samples

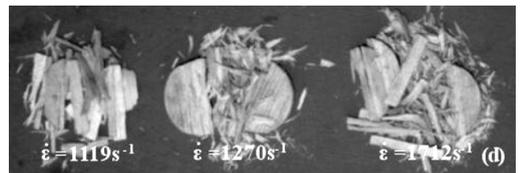


图 5 湿杨木片 SHPB 冲击破坏形态

Fig. 5 Damage patterns of saturated poplar wood specimens by SHPB

显,缓慢恢复形变的能力很强。水分进入木材组织后,破坏组织内的氢键结构,屏蔽大分子间的相互作用力,从而增加了大分子的柔顺性,使蠕变柔量增大^[10]。

4 破坏机制分析

根据 L. J. Gibson 等^[1]的实验观测与理论分析,干木材受压破坏机制可以概括为:加载的初期,试件弹性变形;随着应变的增加,试件非线性变形,在胞孔薄弱区出现局部变形带(屈曲或坍塌),变形带的应变率远大于表观应变率,导致试件在较小范围内被迅速压实,引起屈服应力的陡然升高,使变形集中到临近承载力的其他软化带上;随着载荷的继续增加,坍塌胞壁不断挤压而致密化。

干、湿杨木的动态压缩破坏形式的巨大反差,表明在惯性效应和应变率效应影响下水在木材纤维破坏过程中起着决定性的作用。准静态压缩时,水有足够的时间从胞孔中流出,表现出很强的蠕变恢复性能。而在动态压缩条件下,水的不可压缩性体现出来,水没有足够的时间从纤维空腔中排出,而发生侧向膨胀,产生垂直于纤维轴向的拉应力,使纤维束沿纤维轴向分离。水与纤维之间的摩擦力,在一定程度上抑制着侧向变形的产生,从而使应变率效应表现得更加明显。

5 结 论

克服了低阻抗木材的 SHPB 实验难点,成功地获得了干、湿杨木的动态应力应变曲线,与静态结果相比,屈服应力明显提高,应变率效应明显。干、湿木样动态曲线差别较大,主要原因是两者产生的破坏形式不同:干杨木动态压缩,纤维局部在两端弯矩的影响下弯曲、压实^[3],所以曲线平缓上升,而湿杨木在水的侧向拉应力下,纤维束沿轴向断裂分离,曲线振荡峰值较多。

参考文献:

- [1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structures and Properties[M]. London: Cambridge University, 1997.
- [2] Reid S R, Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(5-6):531-570.
- [3] Vural M. Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: Experiment and analysis[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003(40):2 147-2 170.
- [4] Renaud M, Rueff M, Rocaboy A C. Mechanical behaviour of saturated wood compression[J]. Wood Science and Technology, 1996,30:153-164.
- [5] Brezny R, Green D J. The effect of cell size on the mechanical behaviour of cellular materials[J]. Acta Metall Mater, 1990,38:2 517-2 526.
- [6] 胡时胜,王悟,潘艺,等. 泡沫材料的应变率效应[J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):13-18.
HU Shi-sheng, WANG Wu, PAN Yi, et al. Strain rate effect on the properties foam materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(1):13-18.
- [7] 卢芳云,Chen W, Frew D J. 软材料的 SHPB 实验设计[J]. 爆炸与冲击,2002,22(1):15-19.
LU Fang-yun, Chen W, Frew D J. A design of SHPB experiments for soft materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(1):15-19.
- [8] 宋力,胡时胜. 一种用于软材料测试的改进 SHPB 装置[J]. 实验力学,2004,19(4):448-452.
SONG Li, HU Shi-sheng. A modified SHPB device for soft material testing[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004,19(4):448-452.
- [9] 胡时胜,刘剑飞,冯建平. 硬质聚氨酯泡沫塑料动态力学性能的研究[J]. 爆炸与冲击,1996,16(4):373-376.
HU Shi-sheng; LIU Jian-fei, FENG Jian-ping. Study of the dynamic mechanical behaviour of rigid polyurethane foam[J]. Explosion and Shock Waves, 1996,16(4):373-376.
- [10] 史贵荣. 木材的粘弹性及其蠕变模型[J]. 北京林业大学学报,1988,10(2):88-94.
SHI Gui-rong. Viscoelasticity and creep strain model of wood[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1988,10(2):90-94.

Dynamic mechanical behaviors of poplar wood

DOU Jin-long^{1,2*}, WANG Xu-guang², LIU Yun-chuan¹

(1. *University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*

2. *Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044, China*)

Abstract: The dynamic mechanical properties of dry and water-saturated fast-growing poplar wood under dynamic compression was investigated by the split Hopkinson bar technique and compared with the quasi-static compression experiment. The failure mechanism of the poplar wood discussed at high strain rates. Results show the following characters: (1) the compressive stress-strain curves of poplar wood are similar to those of other cellular solids which are characterized by three distinct region: elastic region, collapse region and densification region; (2) the fibers of the dry poplar samples after shock occur local bucking and collapse, but the fiber bundles of the water-saturated poplar samples detach along the grain direction due to the water in the cellular lumens which is incompressible and can not be extruded at high strain rates. (3) the strain rate effect of the poplar wood is evident.

Key words: solid mechanics; mechanical behavior; split Hopkinson bars; poplar wood; strain rate effect

* Corresponding author: DOU Jin-long

E-mail address: djlbkd@163.com

Telephone: 86-10-62348535

本刊关于稿件、版权等声明

在投稿、稿件处理、发表等过程中,作者需注意如下问题:

1. 稿件是作者独立取得的原创性研究成果,无抄袭,无一稿多投,未在国内外公开发表过。

2. 稿件无政治错误,不涉及保密和拟申请专利的内容,已经过作者单位保密审查。

3. 作者署名和排序无异议,单位署名和排序无争议,且无知识产权纠纷。在稿件处理过程中,如有作者或单位署名变更,需有全体作者亲笔签名和全部单位盖章同意的书面声明。

4. 稿件由编辑部组织审稿。自收稿之日时,编辑部将在4个月内反馈处理结果。若超过4个月未答复的,作者有权另行处理稿件,但需事先通知编辑部。

5. 对录用的稿件,在尊重稿件内容的基础上,编辑部有权作必要的修改和删减,按规定进行标准化和规范化。

6. 稿件录用后,稿件的所有出版权归编辑部。

7. 稿件发表后,编辑部赠送样刊,并一次性付给作者稿酬及版权转让费。

爆炸与冲击

2008年7月25日