

包装材料

静态径向加载速率对樟子松吸能特性的影响

江向东, 徐朝阳, 李健昱

(南京林业大学, 南京 210037)

摘要: **目的** 研究樟子松在不同静态径向加载速率作用下的能量吸收特性。**方法** 采用横纹径向压缩实验。**结果** 在不同加载速率的作用下, 应力-应变曲线都呈现出 3 个阶段, 即弹性阶段, 应力平台阶段以及密实化阶段。樟子松存在明显的应变速率敏感性, 随着加载速率的增加, 应力-应变曲线的应力平台阶段不断上升。当应变为 0.06, 加载速率为 1 mm/min 时, 应力为 4.38 MPa; 当加载速率为 10 和 30 mm/min 时, 对应的应力分别为 4.71 和 6.56 MPa。樟子松具有优良的吸能能力, 其能量吸收效率可以达到 0.7~0.8。其缓冲系数曲线呈“L”型, 随着应变的增加缓冲系数不断减小, 但受加载速率的影响不大。**结论** 不同加载速率对樟子松的能量吸收特性有一定的影响。

关键词: 樟子松; 加载速率; 能量吸收; 缓冲系数

中图分类号: TB484.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)11-0016-04

Impact of Radial Static Loading Rate on the Scotch Pine Energy Absorption Characteristics

JIANG Xiang-dong, XU Zhao-yang, LI Jian-yu

(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: This work aimed to study the Scotch pine energy absorption characteristics under the effect of different radial static loading rate. Across-compression radial tests were carried out. Under different loading rates, the stress-strain curves showed three stages: elastic stage, stress stage and densification stage. There was obvious strain rate sensitivity of Scotch pine, with the increase of loading rate, the plateau stage of stress-strain curves rose gradually. At the strain rate of 0.06, the loading rate was 1 mm/min, the stress was 4.38 MPa; When the loading rates was 10 mm/min and 30 mm/min, the corresponding stress was 4.71 MPa and 6.56 MPa, respectively. Scotch pine had excellent energy absorption capacity, the energy absorption efficiency of samples could reach 0.7~0.8. The cushioning coefficient curves of the samples were "L" type, and the cushioning coefficient curves decreased with the increase of the strain, but the load rate had little effect. The energy absorption capacity of wood was influenced by different loading rates.

KEY WORDS: Scotch pine; loading rate; energy absorption; cushioning coefficient

多孔性材料在受到加载作用时, 会发生孔穴的坍塌和塑性变形而消耗大量的能量。多孔性材料的这个特点赋予其优良的吸能特性, 因此它作为缓冲材料得到广泛使用, 比如泡沫铝^[1-2]、蜂窝纸板^[3-4]、泡沫塑料^[5-6]等。

木材是一种典型的生物质多孔性固体^[7], 与人工合成的多孔性材料相比, 木材具有绿色环保、可再生、强重比高等诸多优点。目前国内外学者对多孔性材料的能量吸收机制的研究集中于人工合成的多孔性材料, 而对木材的能量吸收原理和吸能特性的

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助(31300483); 江苏省自然科学基金(BK20130971); 江苏高校优势学科建设工程资助

作者简介: 江向东(1991—), 男, 安徽人, 南京林业大学研究生, 主攻生物质材料。

通讯作者: 徐朝阳(1979—), 男, 江苏人, 博士, 南京林业大学副教授, 主要研究方向为生物质材料。

研究相对较少。影响木材能量吸收的自身因素有含水率、早晚材等,还与外界因素,如温度、湿度、加载速率等均有一定关系。在实际生产中,人们常利用木材的能量吸收特性将其作为缓冲包装材料,如机电产品的托盘或精密仪器的外包装等。当木材作为这些产品的包装材料时,会受到不同速率的静态径向加载作用,而不同速率对多孔性材料能量吸收能力有一定的影响。这里尝试研究樟子松在高、中、低 3 种静态径向加载速率作用下的应力-应变关系以及加载速率对能量吸收机制的影响。

1 实验材料与方法

主要实验设备: CMT5 型电子万能力学试验机 (MTS 工业系统 (中国) 有限公司)。

实验材料: 樟子松 (0.502 g/cm^3), 气干含水率为 13.2%, 试件标准尺寸为 $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 购于市场, 每种加载速率实验重复 8 次。

实验方法: 参照 GB/T 1939—2009 木材横纹抗压实验方法进行, 加载方向为径向, 加载速率分别为 30, 10, 1 mm/min。

2 实验结果与讨论

2.1 不同径向加载速率应力-应变曲线

试件在不同径向加载速率作用下的应力-应变曲线见图 1, 可知, 在不同径向加载速率作用下, 试件受压变形的过程可以分成 3 个阶段, 即弹性阶段、应力平台阶段以及密实化阶段。

在弹性阶段, 应力随着应变的增加快速上升到屈服点。主要原因是在该阶段试件受到径向压缩时首先出现的是细胞孔壁的均匀弯曲, 这个过程吸收了极少的能量, 应力变化比较大。在应力平台阶段, 此阶段应力的变化很小, 随着应变的增加, 应力缓慢增加。在这个阶段, 细胞壁的弯曲形变已经达到极限, 从而发生细胞壁的塑性坍塌, 渐进压溃, 木材纤维在压力的作用下以复杂的方式拉出和解开。这个过程中试件将所受到的挤压能量转换为胞壁变形、压溃所需要的能量。这种渐进压溃的模式正是能够高效吸能的方式, 因此应力-应变曲线在这一阶段的表现随着应变的增加, 应力呈现缓慢上升的趋势。在密实化阶段, 应力随着应变的增加急速上升, 直到实验结束。出现这一现象的主要原因是经过第 2 阶段的塑性坍塌, 试件的所有细胞壁已经紧

密地贴合在一起, 已经无法再吸收试件因受挤压而产生的能量。在这个阶段随着应变的增加应力急速上升。

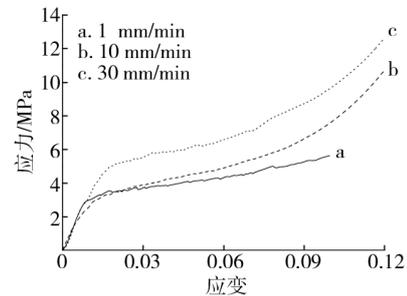


图 1 不同径向加载速率应力-应变曲线

Fig.1 Stress strain curves with different radial loading rate

随着加载速率的增大, 曲线的应力平台阶段呈现不断上升的趋势, 说明了樟子松是一种应变率敏感材料。如当应变为 0.06, 加载速率为 1 mm/min 时, 应力为 4.38 MPa; 当加载速率为 10 mm/min 和 30 mm/min 时, 对应的应力分别为 4.71 MPa 和 6.56 MPa。这一现象主要是由阻尼作用引起的。在此阶段, 试件的胞壁发生塑性坍塌、被压溃等现象。在这个过程中木材纤维相互作用、摩擦而产生阻尼作用, 消耗了大量的能量。阻尼力的大小直接由变形速度决定, 加载速率越大, 试件的变形速度也随之变快, 这直接导致试件的阻尼力增大, 吸收的能量增加。在相同的应变下, 加载速度越大, 应力也越大。这一现象也出现在与木材具有类似结构的泡沫塑料^[8]、蜂窝纸板^[9]等多孔性材料中。

2.2 不同径向加载速率能量吸收特性

当试件承受径向加载时, 施加在试件上的作用力就会做功。在线性阶段, 试件吸收了很少的能量。在应力平台阶段, 由于细胞壁的塑性坍塌, 吸收了大量能量, 因此在这个阶段会出现应变持续增加而应力变化很小的情况。应力-应变曲线与坐标轴之间所包含的面积就是试件在压缩过程中所吸收的能量。试件单位体积能量吸收能力的计算公式为^[10]:

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

式中: W 为单位体积能量吸收能力, σ 为应变为 ϵ 时的应力。

试件在不同径向加载速率作用下能量吸收曲线见图 2, 可知, 试件在加载过程中吸收的能量随着应变的增大而呈现逐步增加的趋势。当应变为 0.08, 加载速率为 1 mm/min 时, 能量吸收值为 $0.29 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$; 当加载速率为 10 mm/min 和 30 mm/min, 能量吸收

值为 $0.32 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.43 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这说明应变相同时, 在较高加载速率的作用下, 试件吸收的能量比较低速率加载时吸收的多。

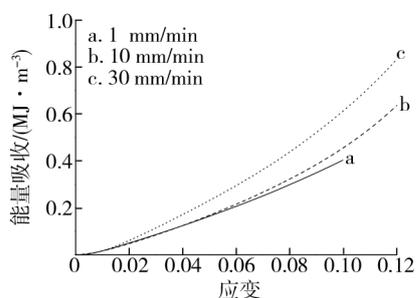


图2 不同径向加载速率能量吸收曲线

Fig.2 Energy absorption curves with different radial loading rate

2.3 不同径向加载速率吸能效率

能量吸收效率是木材吸能的另 1 个重要评定参数, 通过对木材吸能效率的评定可以判断出木材在不同加载速率的作用下的最佳工作状态^[11]。试件在不同加载速率的作用下的能量吸收效率: 实际条件下木材在径向加载速率的作用下的能量吸收与理想状态下能量吸收的比值。其计算公式为^[12-13]:

$$\eta = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon}{\sigma_{\max} \varepsilon} \quad (2)$$

式中: η 为能量吸收效率, σ_{\max} 为应变从 0 到 ε 时的最大应力。

试件在不同径向加载速率作用下的能量吸收效率曲线见图 3, 可知, 随着应变的增加, 能量吸收效率缓慢增加, 并逐渐到达峰值。能量吸收效率的高低表现在应力-应变曲线上, 即曲线的平缓阶段的长度^[14]。由图 1 可知, 加载速率为 1 mm/min 时曲线的应力平台阶段最长, 因此其能量吸收效率能够达到 0.8 左右, 并高于其他加载速率作用下的能量吸收效率。从应变 ε_1 到应变 ε_2 这个阶段能量吸收效率值一直保持在 0.7 及以上, 而这个阶段正好对应于应力-应变曲线的平台阶段, 充分说明在应力平台阶段, 试件的吸能效果最佳。主要原因是胞壁的塑性坍塌和渐进压溃模式高效的能量吸收模式。当进入第 3 阶段, 即应变从 ε_2 到应变结束, 正好对应应力-应变曲线的密实化阶段, 试件的细胞孔壁都被紧密地压合在一起, 几乎无法吸收试件受到挤压而产生的能量, 因此该阶段的实际能量吸收占理想能量吸收的比例逐渐减小。试件的最大能量吸收效率能够达到 0.7~0.8 之间, 这表示樟子松具有良好的吸能效果, 是优质的缓冲材料^[15]。

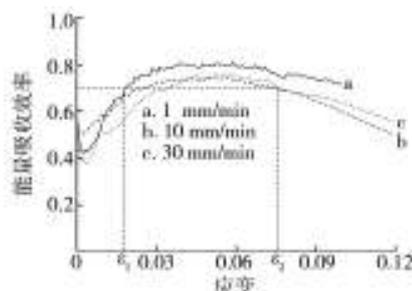


图3 不同径向加载速率能量吸收效率曲线

Fig.3 Energy absorption efficiency curves with different radial loading rate

2.4 不同径向加载速率缓冲系数

缓冲系数是评定缓冲性能优劣的重要指标之一。缓冲材料在外力的作用下会产生变形能, 每单位厚度缓冲材料吸收的能量与冲击力的比值即为缓冲材料的缓冲效率。缓冲效率很少直接利用, 而是经常使用缓冲系数来表达, 即缓冲效率的倒数^[16]。在包装设计中, 缓冲材料的缓冲系数总小于产品的缓冲系数。木材经常作为一种包装材料来使用, 因此, 探究木材在不同加载速率作用下缓冲系数的变化趋势很有必要。

试件在不同径向加载速率作用下的缓冲系数曲线见图 4, 可知, 不同径向加载速率作用下的缓冲系数曲线呈“L”型, 而且随着应变的逐渐增大, 缓冲系数逐渐减小, 并逐渐趋于平缓。利用樟子松的缓冲特性, 可以将其用来制作机电产品的托盘或精密仪器的外包装。在相同的应变下, 不同加载速率作用下的试件的缓冲系数差异不大。这是因为材料的缓冲系数在动态加载时与材料的阻尼作用有较大关系, 这里所采用的加载速率大小虽不同, 但是仍属于静态加载的范畴, 这时材料的阻尼特性对缓冲系数的影响很小, 因此会出现应变相同, 缓冲系数差异不大的情况。

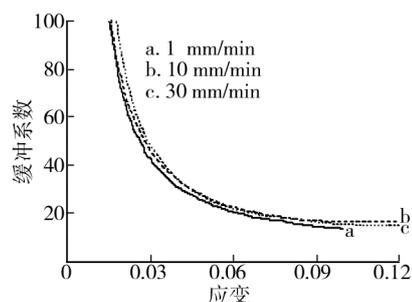


图4 不同径向加载速率缓冲系数曲线

Fig.4 Cushioning coefficient curves with different radial loading rate

3 结语

在相同的应变下, 随着加载速率的增大, 试件的平台应力逐渐上升, 这说明樟子松具有明显的应变率敏感性。试件的阻尼作用导致在相同的应变下, 加载速度越大, 试件的应力越大。

试件在应力平台阶段能够吸收大量能量, 能量吸收效率能够达到 0.7~0.8, 这表示樟子松具有优良的能量吸收特性。

试件的缓冲系数随着应变的增加先急剧减小, 然后趋于平缓。加载速率对试件的缓冲系数影响不大。

参考文献:

- [1] 程和法, 黄笑梅, 许玲. 泡沫铝的动态压缩性能特性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(5):37—42.
CHENG He-fa, HUANG Xiao-mei, XU Ling. Research on Dynamic Compressive Properties and Energy Absorption of Aluminum Foam[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(5):37—42.
- [2] 曾斐, 潘艺, 胡时胜. 泡沫铝缓冲性能评估及其特性[J]. 爆炸与冲击, 2012, 22(4):358—361.
ZENG Fei, PAN Yi, HU Shi-sheng. Evaluation of Cushioning Properties and Energy-absorption Capability of Foam Aluminium[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 22(4):358—361.
- [3] 鄂玉萍, 王志伟. 纸质缓冲材料的能量吸收特性研究进展[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5):40—44.
E Yu-ping, WANG Zhi-wei. Advance in Study on Energy-Absorbing Property of Paper-Based Cushion Packing Materials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 40—44.
- [4] 张宇, 王志伟. 蜂窝纸板动态缓冲特性的试验研究[J]. 包装学报, 2012, 4(4):9—11.
ZHANG Yu, WANG Zhi-wei. Experimental Research on Dynamic Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Journal, 2012, 4(4):9—11.
- [5] 余晓崎, 石少卿, 李季, 等. 硬质聚氨酯泡沫塑料填充薄壁钢管横向压缩吸能特性分析[J]. 后勤工程学院报, 2015, 3(2):17—21.
YU Xiao-qi, SHI Shao-qing, LI Ji, et al. Energy Absorption Characteristics of Rigid Polyurethane Foam Filling Thin walled Steel Tube under Lateral Compression[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2015, 3(2): 17—21.
- [6] 马玉峰, 张伟, 王春鹏, 等. 酚醛泡沫力学性能及密度-力学性能模型研究[J]. 材料导报, 2012, 12(6):137—140.
MA Yu-feng, ZHANG Wei, WANG Chun-peng, et al. Research on Mechanical Properties and Densities- Mechanical Properties Model of Phenolic Foam[J]. Materials Review, 2012, 12(6):137—140.
- [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):12—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): 12—14.
- [8] 明星, 赵燕, 卢杰, 等. 基于静态压缩试验的缓冲包装材料性能对比分析[J]. 包装工程, 2006, 27(2):59—61.
MING Xing, ZHAO Yan, LU Jie, et al. Contrast and Analysis of Packaging Material Buffering Performance Based on Static Compression Testing[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2):59—61.
- [9] 徐秋月, 刘晓霞, 林兰天, 等. 低速冲击下缓冲材料压缩行为与能量吸收分析[J]. 上海纺织科技, 2013, 42(12):4—7.
XU Qiu-yue, LIU Xiao-xia, LIN Lan-tian, et al. Compression Behavior and Energy Absorption of Buffer Materials under Low Speed Impact[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2013, 42(12):4—7.
- [10] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Oxford:Pergamon Press, 1997.
- [11] 王志亮, 诸斌. EPS 泡沫冲击压缩和吸能特性研究[J]. 建筑材料学, 2013, 16(4):630—636.
WANG Zhi-liang, ZHU Bin. Experimental Study on Impact Compression and Energy Absorption Property of Expanded Polystyrene Foam[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4):630—636.
- [12] MILTZ J, GEUNBAUM G. Evaluation of Properties of Plastic Foams Compressive Measurements[J]. Polymer Engineering & Science, 1981, 21(15):1010—1014.
- [13] EVANS A G, HUTCHINSOM J W, ASHBY M F. Multifunctionality of Cellular Metal Systems[J]. Progress in Materials Science, 1999, 43(3):171—221.
- [14] 王斌, 何德平, 舒光冀. 泡沫 Al 合金的压缩性能及其能量吸收[J]. 金属学报, 2000, 36(10):1037—1040.
WANG Bin, HE De-ping, SHU Guang-ji. Compressive Property and Energy Absorption of Foamed Al Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(10):1037—1040.
- [15] 杨永顺, 杨哲, 虞跨海, 等. 闭孔泡沫铝缓冲性能及其变形失效机理研究[J]. 功能材料, 2014, 45(8):87—91.
YANG Yong-shun, YANG Zhe, YU Kua-hai, et al. Study on the Cushioning Property and Deformation Failure Mechanism of Close-cell Aluminum Foam[J]. Functional Material, 2014, 45 (8):87—91.
- [16] 唐朝发, 杨庚, 刘彦龙. 木质纤维缓冲材料的缓冲性能[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(7):130—131.
TANG Zhao-fa, YANG Geng, LIU Yan-long. Buffering Capacity of Wood Fiber Buffering Materials[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(7):130—131.