

静态载荷下丝瓜络的能量吸收性能研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2017.06.006

谢勇 刘林
高亚芳 张诗浩

湖南工业大学
包装与材料工程学院
湖南 株洲 412007

摘要: 为了深入了解丝瓜络的力学性能、能量吸收特性及其规律,对丝瓜络进行了轴向静态压缩试验,再通过拟合试验数据得到丝瓜络的单位体积的吸能量与密度的关系式。试验结果表明:丝瓜络的应力-应变曲线有3个阶段,即弹性阶段、屈服平台阶段和密实化阶段,屈服平台阶段的平台应力在0.15~0.50 MPa之间,密实化应变在70%左右,且其平台区较长,是一种理想的吸能材料;丝瓜络是一种对密度敏感的材料,其屈服强度、平台应力和单位体积的吸能量均随密度的增加而增加,密实化应变随密度增加而减小;丝瓜络单位质量的吸能量可以与泡沫铝材料相媲美。研究结果可作为设计基于丝瓜络结构的新型超轻仿生材料结构的基础数据。

关键词: 丝瓜络; 静态压缩测试; 力学性能; 能量吸收

中图分类号: O347 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2017)06-0039-06

0 引言

生物经过亿万年的进化,形成了许多具有优异特性的结构,如多孔结构。人类受生物中多孔结构的启发,制备了多种多样的多孔材料。多孔材料由于具有较多优异的物理化学性能,如比表面积和孔隙率较高、透过性能和吸附性能较好等,因而被广泛应用于生物医药、功能材料、化工等领域。

丝瓜络是一种拥有特殊立体网状结构的多孔生物材料,虽然其密度小,但机械性能好。因此,学者们对丝瓜络的结构、物理性能及其作用机理进行了研究,并将其应用到复合材料的制备,以及包装、消声、过滤、保温、减震、抗冲击等领域^[1-4]。Chen Q.等^[5]对丝瓜络的4个不同的结构部位及单根丝瓜纤维进行了力学性能研究,研究结果表明丝瓜络纤维呈天然多孔复合结构,单根纤维的杨氏模量和断裂强度分别约为2.3 GPa和103 MPa,丝瓜络外圆周壁部位的平均力学性能约是其芯部的1.6倍。Shen J. H.等^[6]

利用动态冲击试验对丝瓜络的力学性能进行了研究,研究结果表明丝瓜络柱体的刚度、强度与部分泡沫金属相当,其压缩强度和平台应力呈现明显的应变速率效应。黎炎^[7]参照织物的测试方法,对丝瓜纤维的断裂强度、断裂伸长率、撕裂强度和顶破强度4项力学性能进行了测试,测试结果表明丝瓜络的断裂强度、撕裂强度和顶破强度较高,断裂伸长率较低,这说明丝瓜络能承受较大的外力,具有较好的坚牢度和耐久性。

综上所述,为了研究丝瓜络的能量吸收特性,本文拟对丝瓜络进行静态压缩测试,分析其机械性能,得到能量吸收的经验公式,以期研发超轻仿生材料提供理论指导。

1 试验

1.1 材料与主要设备

丝瓜络: 购买于慈溪市南园丝瓜络专业合作社;

收稿日期: 2017-09-26

基金项目: 湖南省研究生创新基金资助项目(CX2017B681), 湖南工业大学研究生创新基金资助项目(CX1701)

作者简介: 谢勇(1964-),男,湖南攸县人,湖南工业大学教授,主要从事包装防伪技术与功能包装材料方面的研究,

E-mail: hutxy@126.com

微机控制电子万能试验机, CMT6104 型, 深圳市新三思材料检测有限公司; 游标卡尺, ASIMETO343 系列, 广州安度测量仪器有限公司; 电子天平, JA1003N 型, 上海精密科学仪器有限公司; 恒温恒湿箱, HT402 型, 无锡伯乐达试验设备有限公司。

1.2 试验步骤

1) 制作丝瓜络样品。丝瓜络呈长圆柱形, 两端较细, 中间部分较粗且相对均匀。为避免样品尺寸差异过大, 本试验从每根丝瓜络的中间部分截取 3 段高度为 50 mm 的丝瓜络作为试验样品, 并将样品的两端打磨光滑且保持平行, 如图 1 所示。本试验选取了 26 个丝瓜络样品。

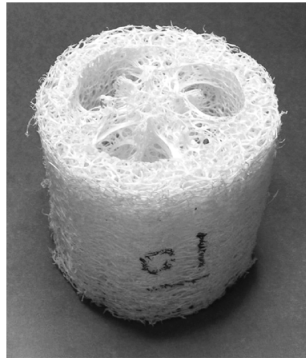


图 1 丝瓜络样品
Fig. 1 Specimen for a compressive test

2) 预处理试验样品。样品预处理参照 GB/T 4857.2—2005《包装 运输包装件基本试验第 2 部分: 温湿度调节处理》^[8] 中的方法, 将样品放置于恒温恒湿箱内处理 24 h。恒温恒湿箱的参数设置如下: 温度为 23 °C, 湿度为 50%。样品处理时间从恒温恒湿箱内的环境达到设定条件的 1 h 后开始计算。

3) 测量样品参数。将每个样品的质量、横截面直径分别测量 3 次, 取平均值, 并计算样品密度。经计算, 试验所用的 26 个丝瓜络的密度在 28~61 kg/m³ 之间。根据现有文献, 此密度范围包括了大部分天然丝瓜络。

4) 测试样品机械性能。参照 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》^[9] 中的 A 试验方法测试样品的机械性能。在室温为 25 °C, 湿度为 40% 的条件下, 用微机控制电子万能试验机以 12 mm/min 的应变速率分别对不同密度的圆柱形样品进行轴向静态压缩测试, 得到相应的力-位移数据和应力-应变曲线。

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线

本文利用 CMT6104 微机控制电子万能试验机对样品进行轴向静态压缩测试, 得到力-位移数据, 再参照 GB/T 8168—2008 中的数据处理方式, 将力-

位移数据按照式(1)~(2)计算得到应力-应变数据。

$$\sigma = F/S, \quad (1)$$

$$\varepsilon = x/h, \quad (2)$$

式中: σ 为应力;

F 为压缩载荷;

S 为样品的横截面积, 为计算方便, 假定样品的横截面是实心光滑的(忽略样品横截面的空隙);

ε 为应变;

x 为压缩位移;

h 为样品的高度。

处理数据时, 为了减少误差, 将从同一丝瓜络上截取的 3 个样品在相同条件下进行静态压缩试验, 依次得到力-位移数据, 取其平均值作为该丝瓜络的力-位移数据, 再计算相应的应力-应变数据。所有丝瓜络的应力-应变曲线均呈现 3 个阶段, 即弹性阶段、屈服平台阶段和密实化阶段。其中, 密度为 37.5 kg/m³ 的丝瓜络的应力-应变曲线如图 2 所示。

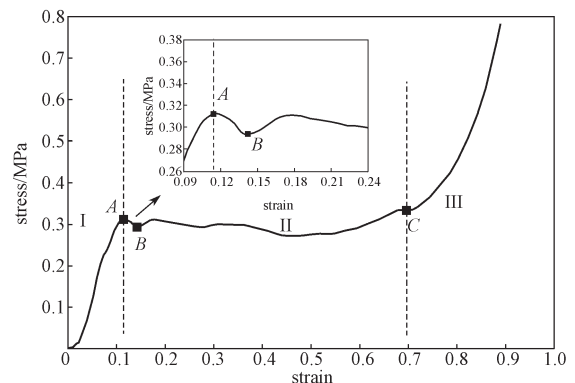


图 2 密度为 37.5 kg/m³ 的丝瓜络的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curve of luffa sponge with density 37.5 kg/m³

由图 2 可知:

1) 弹性阶段。图 2 中 A 点之前为弹性阶段, 应力与应变大致呈线性关系。弹性阶段, 丝瓜纤维发生弹性形变, 纤维间相互连接而成的网状结构发生轻微弹性畸变和旋转, 因此, 该阶段的应变值较小。试验结果表明, 大部分天然丝瓜络材料的 A 点所对应的应变值在 7%~15% 之间。

2) 屈服平台阶段。图 2 中 A、C 两点间为屈服平台阶段。A 点所对应的应力值即为样品的屈服强度, A 点则为样品的屈服点。随着压力的增加, 样品被逐渐压缩, 当应力达到 A 点的对应值后, 丝瓜络由弹性变形转变为塑性屈服, 纤维相互连接构成的立体网状结构开始发生较大程度的塑性畸变和结构坍塌,

应力值呈现先降低后回升的趋势。初始瞬时效应即 B 点后, 随着应变持续增加, 应力值虽然有轻微上下波动现象, 但整体平稳。可知, 外界输入的能量在这一阶段被转化为结构中孔穴的变形、坍塌、纤维间摩擦等形式的能量, 是丝瓜络的主要吸能阶段。

3) 密实化阶段。 C 点之后, 丝瓜络被压实, 进入密实化阶段, C 点对应的应变值为材料的密实化应变。这一阶段丝瓜络的刚度增强, 在应变增加很小的情况下应力大幅增加。

图3为5种不同密度的丝瓜络的应力-应变曲线。由图可知, 丝瓜络是一种对密度敏感的材料, 即密度对其应力-应变曲线影响较大; 随着密度的增大, 屈服强度和平台应力越大, 密实化应变越小。

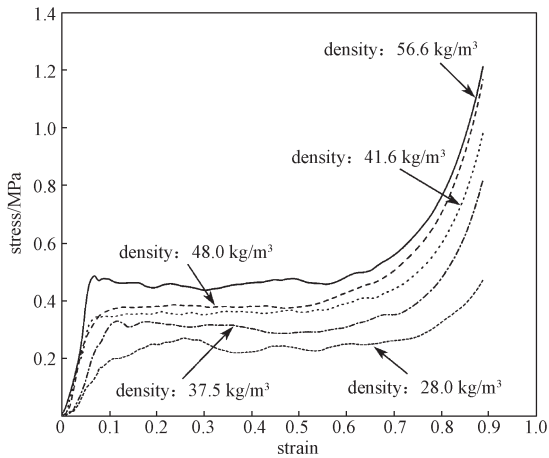


图3 密度对丝瓜络应力-应变曲线的影响

Fig. 3 Effects of density on stress-strain curves

2.2 屈服强度

从应力-应变曲线可以看出, 丝瓜络具备质轻、吸能, 以及平台区稳定、波动小等特点。因此, 丝瓜络的力学性能可以用屈服强度和平台应力来表征。

文献 [10] 表明, 多孔材料的屈服强度与密度之间服从一个幂次关系 (平台应力与密度之间服从同样的关系), 即

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_f} = A' \left(\frac{\rho_0}{\rho_f} \right)^n, \quad (3)$$

式中: σ_f 为基体材料的屈服强度;

ρ_f 为基体材料的密度;

σ_0 和 ρ_0 分别为多孔材料的屈服强度和密度;

A' 、 n 为常数, 是材料的性能因子。

由于丝瓜络本身以及构成丝瓜络的基体材料 (丝瓜纤维) 均缺乏科学有效的力学性能数据, 且作为一

种天然材料, 其单根纤维的密度值及力学性能存在个体差异。因此, 为探究丝瓜络的密度对其屈服强度的影响, 本文通过对大量试验数据的拟合, 将单根丝瓜纤维的力学性能所具有的某种未知关系包含在参数 A' 和 n 中。可得, 丝瓜络密度与屈服强度在数值上满足下列关系式

$$\sigma_0 = A' \rho_0^n. \quad (4)$$

数据拟合得到 A' 和 n 的值分别为 2.19×10^{-3} 和 1.29。丝瓜络的屈服强度与密度的拟合结果如图4所示。由图可知, 试验数据与拟合数据比较吻合。

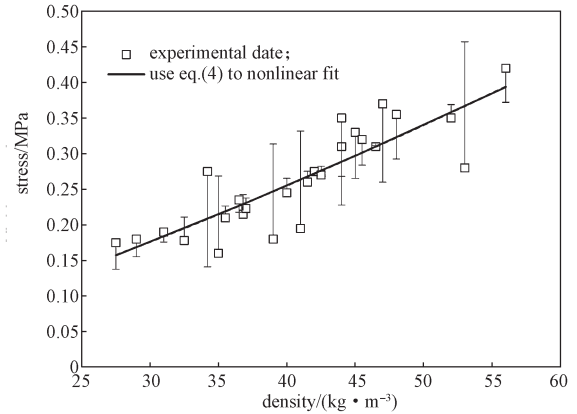


图4 屈服强度与密度的拟合结果图

Fig. 4 Relationship between yield strength and density

2.3 平台应力及密实化应变

由2.1节可知, 丝瓜络的主要吸能过程发生在屈服平台阶段。屈服强度 σ_0 为弹性阶段的应力峰值, 不能准确的表征压缩过程中材料的吸能能力和承载水平; 而平台应力 σ_{pl} 为屈服平台阶段的应力均值, 能反映材料的整体承载水平和吸能能力, 即

$$\sigma_{pl} = \frac{\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon}{\varepsilon_m - \varepsilon_0}, \quad (5)$$

式中: ε_0 为屈服应变; ε_m 为密实化应变。通常, 材料的密实化应变在应力-应变曲线的 C 点附近取值。为了避免这种不确定性, 本文将文献 [11] 所提方法吸能效率中最大吸能效率对应的应变定义为密实化应变 ε_m 。

吸能效率表征材料在轴向压缩下体积的有效利用率, 即

$$E = \frac{1}{\sigma} \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon. \quad (6)$$

密度为 56.5 kg/m^3 的丝瓜络的吸能效率曲线如图5所示。由图可知, 随着应变的增加, 吸能效率 E 先

增大后减小。可知，密实化应变处的吸能效率的导数为0，即密实化应变满足以下条件：

$$\left. \frac{dE(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon_m} = 0, 0 \leq \varepsilon_m \leq 1. \quad (7)$$

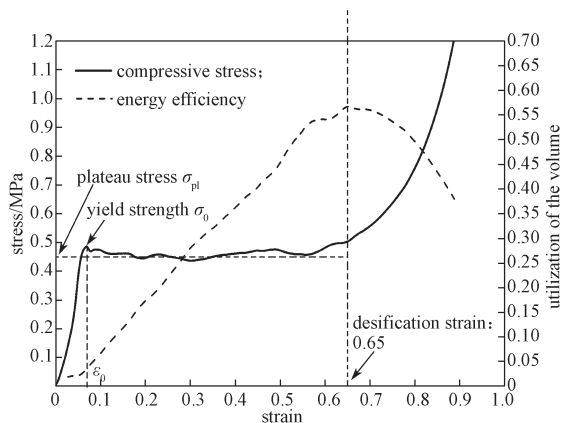


图5 密度为 56.5 kg/m³ 的丝瓜络的吸能效率曲线
Fig. 5 Absorption efficiency curves of luffa sponge with density 56.5 kg/m³

通过数据拟合得到丝瓜络的密度与密实化应变之间的经验公式为

$$\varepsilon_m = B' - D\rho_0, \quad (8)$$

式中 B' 和 D 的值分别为 0.71, 2.33×10^{-4} 。

丝瓜络的密度与密实化应变的拟合曲线如图6所示。由图可知：丝瓜络的密度与密实化应变在数值上大致呈线性关系；材料的密实化应变随密度的增大而减小，这是因为压缩过程中，高密度材料会更早地被压实。

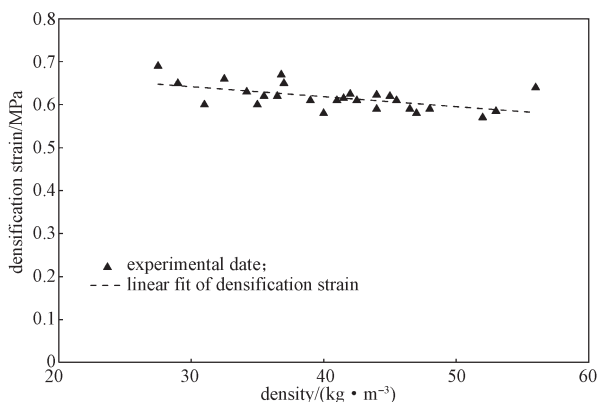


图6 密实化应变 - 密度拟合曲线

Fig. 6 Curved liner of densification strain and density

类似于屈服强度的计算方法，本文利用公式(4)拟合平台应力的试验数据，可以得到 A' 和 n 的值分别为 8.87×10^{-4} 和 1.53，拟合数据如图7所示。由图可知，丝瓜络的平台应力在 0.15~0.50 MPa 之间。

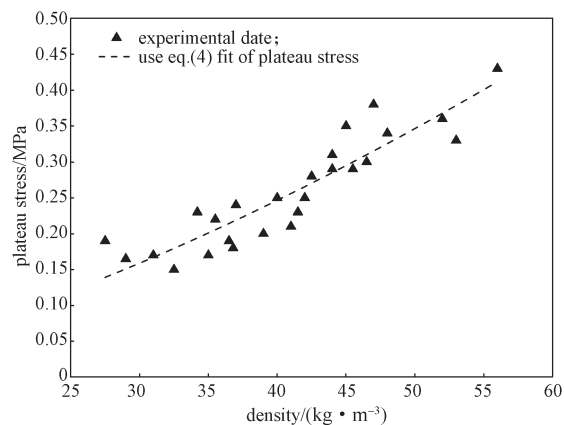


图7 密度 - 平台应力拟合曲线

Fig. 7 Curved liner of plateau stress and density

由图4和图7可知：屈服强度、平台应力均随密度增大而增大，且与密度成幂次变化，屈服强度的幂次指数为 1.29，平台应力的幂次指数为 1.53；屈服强度相对于平台应力来说，增幅较缓。

2.4 丝瓜络的能量吸收

丝瓜络的能量吸收性能可用材料单位质量的吸能量和单位体积的吸能量进行表征。假设丝瓜络被压缩过程中满足能量守恒定律，则丝瓜络被压缩至失效之前，外界对其所做的功等于力 - 位移曲线与横坐标轴所围成的面积值，即为单位体积的吸能量。因此，丝瓜络单位体积的吸能量和单位质量的吸能量的公式分别为：

$$C_V = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon, \quad (9)$$

$$C_M = \int_0^{x_m} F dx / M, \quad (10)$$

式中： x_m 为试样压缩至密实化应变时对应的压缩位移； F 为压缩载荷； M 为试样质量。

根据式(4)(5)(9)，可以得出丝瓜络的单位体积的吸能量与其密度在数值上符合经验公式(11)，即

$$C' = 8.87 \times 10^{-4} \times (0.71 \rho_0^{1.53} - 2.33 \times 10^{-3} \rho_0^{2.53}). \quad (11)$$

图8为丝瓜络的单位体积的吸能量与其密度关系图。由图可知，拟合曲线与试验数据基本吻合。

由公式(10)和试验得到的力 - 位移数据，计算得到丝瓜络单位质量的吸能量。将丝瓜络单位质量的吸能量与密度为 200~300 kg/m³ 泡沫铝^[13-15] 进行比较，结果如图9所示。由图可以看出，尽管泡沫铝的平台应力是丝瓜络材料的 4~5 倍，但丝瓜络被轴向压缩时，其单位质量的吸能量与密度为 200~300

kg/m^3 的泡沫铝相当。

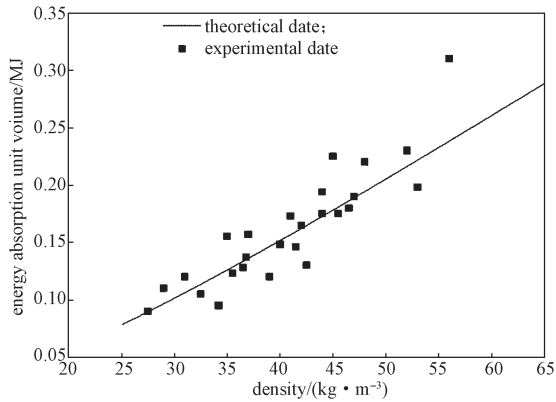


图 8 单位体积吸能量与密度关系图

Fig. 8 Relationship between energy absorption per unit volume and density

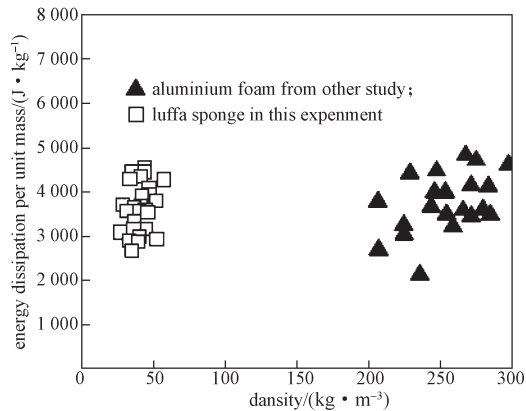


图 9 丝瓜络与泡沫铝单位质量吸能量的对比

Fig. 9 Comparison of energy absorption per unit mass between luffa sponge and aluminium foam

3 结论

本课题组对丝瓜络进行了轴向静态压缩测试, 分析丝瓜络的屈服强度、密实化应变、平台应力和能量吸收性能随材料密度变化的规律。通过对试验结果的分析, 可得如下结论:

1) 丝瓜络材料的应力-应变曲线由弹性阶段、平台阶段、密实化阶段 3 部分组成。当承受压力时, 丝瓜络能够将外界压缩产生的大部分能量通过塑性形变转换成其他形式的能, 且其平台区较长, 有较长的吸能过程, 是一种理想的吸能材料。

2) 丝瓜络是一种对密度敏感的材料, 其抗压强度、平台应力和吸能能力均随密度的增加而增加; 屈服强度、平台应力均随密度增大而成幂次增大, 且屈服强度相对于平台应力来说, 增幅较缓; 密实化应变

则随密度增加而减小。

3) 通过对试验结果进行线性拟合, 得出了丝瓜络吸能性能与密度的经验公式。根据试验验证, 试验数据与理论值基本相符。丝瓜络单位质量的吸能量可以与泡沫铝材料相媲美。

4) 丝瓜络拥有较高的孔隙率和特殊的立体网状结构, 具备质轻、承力稳定、平台区长、高吸能性能等优良特性。其吸能能力除了与其平台区稳定和高密实化应变有关外, 还与轻量化的基础材质和特殊的三维网状结构有关。丝瓜络纤维的力学性能和这种特殊网状结构的吸能原理还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] AKGÜL M, KORKUT S, ÇAMLIBEL O, et al. Some Chemical Properties of Luffa and Its Suitability for Medium Density Fiberboard (MDF) Production[J]. *Bioresources*, 2013, 8(2): 1709-1717.
- [2] SIQUEIRA G, BRAS J, DUFRESNE A. Luffa Cylindrica as a Lignocellulosic Source of Fiber, Microfibrillated Cellulose, and Cellulose Nanocrystals[J]. *Bioresources*, 2010, 5(2): 727-740.
- [3] KRUSONG W, TANTRATIAN S. Acetification of Rice Wine by Acetobacter Aceti Using Luffa Sponge in a Low-Cost Reciprocating Shaker[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2014, 117(5): 1348-1357.
- [4] ALTINISIK A, GÜR E, SEKI Y. A Natural Sorbent, Luffa Cylindrica for the Removal of a Model Basic Dye[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 179(1/2/3): 658-664.
- [5] CHEN Q, SHI Q, GORB S N, et al. A Multiscale Study on the Structural and Mechanical Properties of the Luffa Sponge from Luffa Cylindrica Plant[J]. *Journal of Biomechanics*, 2014, 47(6): 1332-1339.
- [6] SHEN J H, XIE Y M, HUANG X D, et al. Behaviour of Luffa Sponge Material under Dynamic Loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 57(9): 17-26.
- [7] 黎 炎. 丝瓜络理化性能及其多糖分离纯化和活性研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2010.
LI Yan. Research on Physical and Mechanical Properties, Isolation and Purification, Physicochemical Characteristics and Biological Activities of Polysaccharides from Luffa Sponge[D]. Nanning: Guangxi University, 2010.
- [8] 国家标准化管理委员会. 包装 运输包装件基本试验第

- 2 部分: 温湿度调节处理: GB/T 4857.2—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-2.
China National Standardization Management Committee. Packaging-Basic Tests for Transport Packages-Part 2: Temperature and Humidity Conditioning: GB/T 4857.2—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-2.
- [9] 国家标准化管理委员会. 包装用缓冲材料静态压缩试验方法: GB/T 8168—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-3.
China National Standardization Management Committee. Testing Method of Static Compression for Packaging Cushioning Materials: GB/T 8168—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-3.
- [10] MCCULLOUGH K Y G, FLECK N A, ASHBY M F. Uniaxial Stress-Strain Behaviour of Aluminium Alloy Foams[J]. *Acta Materialia*, 1999, 47(8): 2323-2330.
- [11] LI Q M, MAGKIRIADIS I, HARRIGAN J J. Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids[J]. *Journal of Cellular Plastics*, 2006, 42(5): 371-392.
- [12] SHEN J H, LU G X, DONG R. Compressive Behaviour of Closed-Cell Aluminium Foams at High Strain Rates[J]. *Composites: Part B*, 2010, 41(8): 678-685.
- [13] SCHAEGLER T A, JACOBSEN A J, TORRENTS A, et al. Ultralight Metallic Microlattices[J]. *Science*, 2011, 334(6058): 962-965.
- [14] IDRIS M I, VODENITCHAROVA T, HOFFMAN M. Mechanical Behaviour and Energy Absorption of Closed-Cell Aluminium Foam Panels in Uniaxial Compression[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 517(1): 37-45.

Study on Energy-Absorption Property of Luffa Sponge Under Static Load

XIE Yong, LIU Lin, GAO Yafang, ZHANG Shihao

(School of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A series of static-compressive tests was conducted to find out the rule of mechanical properties and energy absorption of luffa sponge with different densities. The experiments showed the stress-strain curve of luffa sponge material covered the elasticity region, the yield stage and the densification region. The plateau stress of yield stage ranged from 0.15 to 0.50 MPa, with the densification strain of luffa sponge being about 70 percent. A near constant plateau stress over a long strain range was ideal for energy absorption application. The research indicated the density had a great effect on its mechanical performance. With the increase in density, the yield strength, plateau stress and energy absorption capacity per unit volume of the luffa sponge were increased, while the densification strain was reduced. Finally, the empirical formula of energy absorption capacity varying with density was obtained by fitting test data, the theoretic result was proved well by comparison with the experimental results. Through calculation, the specific energy absorption of luffa sponge material was comparable to metallic cellular materials in a similar density range and could be used as the essential data for new ultralight biomimetic materials.

Keywords: luffa sponge; static-compressive tests; mechanical properties; energy absorption