

丝瓜络材料静态缓冲性能试验及分析

刘小静

(圣何塞州立大学 食品科学与包装工程系, 圣何塞 95192)

摘要: **目的** 研究得到丝瓜络材料的静态缓冲系数与最大应力曲线, 为应用丝瓜络作为缓冲材料的计算提供理论依据与实验数据。**方法** 参考 GB 8168—1987 包装用缓冲材料静态压缩试验方法, 在电子万能试验机上测试不同分组样件, 研究受力方向、尺寸、湿度、结构等因素对缓冲性能的影响, 以及该材料与其他缓冲材料(聚脂海绵、瓦楞纸板)静态缓冲性能的对比。**结果** 得到了丝瓜络材料力-位移曲线与应力-应变曲线, 并计算得到了缓冲系数-最大应力曲线。**结论** 丝瓜络是缓冲性能优越、环保的自然材料, 可完全降解。完整的丝瓜络圆柱体纵向受压时的缓冲性能与瓦楞纸板结构以及蜂窝纸板结构类似, 丝瓜络单层外壁材料可重叠横向受压, 其缓冲性能与聚脂海绵类似, 在大载荷情况下优于聚脂海绵。去除内芯的丝瓜络缓冲性能优于完整的丝瓜络圆柱, 丝瓜络代替其他缓冲材料完全可行。

关键词: 丝瓜络; 静态压缩试验; 应力-应变曲线; 缓冲系数-最大应力曲线; 缓冲材料

中图分类号: TB484.6; TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)13-0057-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.13.011

Static Cushion Property Tests and Analysis of Luffa Sponge Materials

LIU Xiao-jing

(Department of Nutrition, Food Science and Packaging, San Jose State University, San Jose 95192, USA)

ABSTRACT: The work aims to obtain the static $C-\delta_m$ curves of luffa sponge materials by research, to provide theoretical basis and experimental data for the calculation of the luffa sponge used as the cushion material. GB 8168—1987 testing method of static compression for package cushion materials was referred to. Different groups of specimens were tested on the electronic universal tester. The influence of such factors as force direction, size, humidity and structure on the cushion materials was studied. The static cushion properties of such materials and other cushion materials (polyester sponge and corrugated paperboard) were compared. The force-displacement curves and the stress-strain curves of the luffa sponge materials were obtained, and the $C-\delta_m$ curves were obtained by calculation. As a natural material featured by excellent cushion property and environmental protection, luffa sponge can be completely degraded. The whole luffa sponge cylinder has the similar cushion property as corrugated paperboard and honeycomb paperboard when it is under load along the axis. The single-layer outer wall material of luffa sponge can be overlapped and laterally loaded. In this case, it has the similar cushion property as polyester sponge, even better when under larger load. The cushion property of the luffa sponge with inner core removed is superior to the whole luffa sponge cylinder. It is completely feasible to replace other cushion materials with luffa sponge.

KEY WORDS: luffa sponge; static compression test; stress-strain curve; $C-\delta_m$ curves; cushion material

随着人类对环境的关注, 越来越多的研究集中于如何开发新的包装材料, 以减少对环境的危害。自然材料因其来源丰富、可生物降解和可持续再生备受关注, 如竹子、粽叶等在包装中得到了广泛应用。在缓冲材料领域, 除了纸浆模塑, 研究者更关注用稻秆、麦秆、玉米淀粉等为主料制成植物纤维

发泡衬垫^[1-4]。国内外研究者也开始关注一种天然材料——丝瓜络, 它既可作为包装容器, 又可成为缓冲材料^[5]。

丝瓜络是成熟丝瓜去除外皮和种子后获得的纤维质网状结构的天然维管束组织, 目前国内外对它的研究主要集中在药用、家庭用品、工业过滤及复

收稿日期: 2018-02-09

作者简介: 刘小静(1971—), 女, 博士, 圣何塞州立大学副教授, 主要研究方向为包装整体设计和包装材料。

合材料等领域的应用^[6-8]。丝瓜络具有体轻、质韧、耐磨、富有弹性等天然特性,并且具有惊人的回弹性。

目前,国内外研究者已深入研究了其机械物理性能^[9-13],用于制备仿生复合材料和去除环境中的重金属,虽然该材料可用于包装领域,但国内外尚无研究者对丝瓜络作为缓冲包装进行过研究。环保包装材料的研发是大势所趋,也是这里研究丝瓜络静态缓冲性能的意义。

天然晒干且未加入任何添加剂的丝瓜络呈淡黄色,为长圆筒形或长梭形,略弯曲,两端较细,长度约24~70 cm,直径为5~10 cm。丝瓜络由多层纵横交错的网状纤维组成,其横切面有3个较大的空腔,空腔周围是多层厚实的海绵状囊纤维束,纤维束间空腔大小不一,形状各异,每丛纤维束又由许多单根纤维组成,纤维表面被丰富的木质素或果胶层覆盖,表面结构粗糙,内部空间分布着密集的洞孔。丝瓜络的主要化学成分为纤维素、半纤维素和木质素,三者相对含量的高低与丝瓜络的生长条件和生长期有关,其中纤维素质量分数一般超过60%^[8],因此其质轻且孔隙结构发达,有足够的比表面积,具有优异的力学性能。

Shen 等^[9-10]对圆柱状丝瓜络样品的力学性能进行了测试,结果显示丝瓜柱状体的刚度、强度以及能量吸收性能可与泡沫铝等金属基多孔材料相媲美。Chen 等^[11]分别截取柱状丝瓜络样品的4个不同结构部位和单根纤维(长度约为30 mm,直径为0.3~0.5 mm)进行测试,其弹性模量和断裂强度与木质纤维相当,分别约为2.3 GPa和103 MPa,并得到丝瓜络外围壁部位的平均力学性能约为其芯部的1.6倍。综合文献表明,丝瓜络完全具有缓冲材料所需的特性,故可展开对其缓冲性能的研究。

1 丝瓜络静态缓冲性能试验

丝瓜天然生长的形态各异,直径、长短、厚薄不同,纤维在不同部位的强度不同。通过分析丝瓜络各处,可将其结构分为外围壁、内壁、芯等3个部分(见图1),3处的力学性能不同^[11]。外围壁厚度一般为5 mm左右,质松软。内壁层厚度为0.5 mm左右,为单向粗纤维。内芯纤维粗壮。这3个部分的纤维生长方向及聚集方向不同,丝瓜络的缓冲性能由这3个部分的纤维物理特性、密度、含水量、结构决定。在实际使用丝瓜络作为缓冲材料时可能有3种方式,即横向受力,纵向受力,以及去除内芯后的纵向受力(定义压力方向与丝瓜络圆柱体轴线平行的方向为纵向,垂直于轴线的方向为横向)。这里研究3种情况下材料的缓冲性能及其影响因素,为正确使用丝瓜络作为

缓冲材料提供依据。

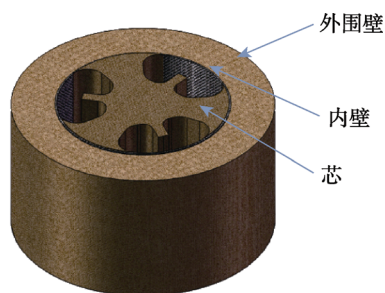


图1 丝瓜络结构

Fig.1 Loofa sponge construction

静态压缩试验主要用于评定在静态载荷作用下缓冲材料的性能,及其在流通过程中对内装物的保护能力。试验参照GB 8168—1987《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》进行,考虑到实际使用丝瓜络时大多不会经过预处理,因此试样未经预压力处理。在包装材料上以低速施加载荷,求取缓冲材料的压缩力-位移曲线。试验所用设备为电子万能实验机,见图2,材料选自同一厂家的同一批产品,挑选3根完整的不同长短和硬度的丝瓜络。丝瓜络自然长成后干燥,没有添加任何化学成分,未经漂白。试验在标准状态下完成,测试环境温度为29℃,相对湿度为82%。样品放在试验机上下压块间,压缩位移变化率为10 mm/min,可得到材料的力-位移曲线与应力-应变曲线^[14]。

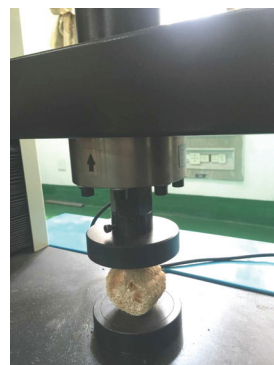


图2 电子万能实验机

Fig.2 Electronic universal tester

根据缓冲包装理论,缓冲系数-最大应力($C-\delta_m$)曲线可用于计算衬垫的面积与厚度,材料的静态缓冲系数是最大应力与弹性比能(衬垫单位体积吸收的能量)的比值。应力-应变曲线上取不同的点 σ_i ,计算不同的缓冲系数 C_i ,得到 $C-\delta_m$ 曲线以判定缓冲材料的性能。应变能增量 Δu_i 、应变能 u_i 、缓冲系数 C_i 的计算公式分别为^[14]:

$$\Delta u_i = \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_{i-1})(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \quad (1)$$

$$u_i = \Sigma \Delta u_i \quad (2)$$

$$C_i = \frac{\sigma_i}{u_i} \quad (3)$$

式中: Δu_i 为应变能增量; u_i 为应变能。

1.1 受力方向对比

2 组试样各 4 件, 分别测量其厚度、直径, 计算其质量与定量, 一组纵向施加压力, 一组横向施加压力, 见图 3, 并得到了应力-位移曲线, 见图 4—5。

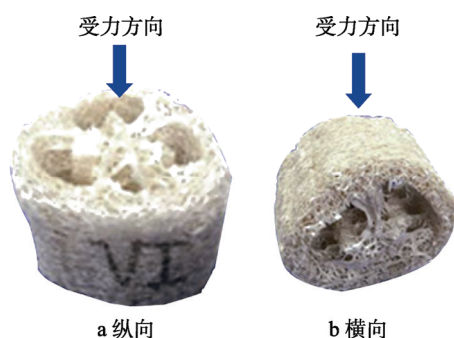


图 3 施加压力方向

Fig.3 Directions of force application

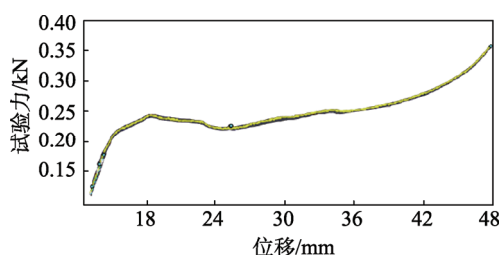


图 4 纵向压缩力-位移曲线

Fig.4 Force-displacement curve from parallel direction compression

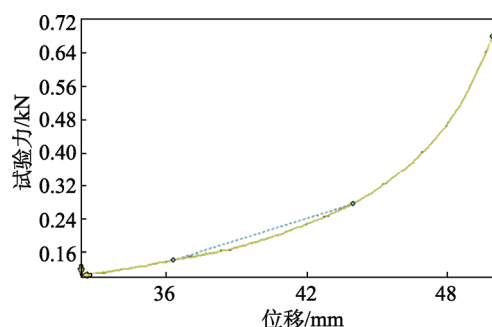


图 5 横向压缩力-位移曲线

Fig.5 Force-displacement curve from vertical direction compression

根据式 (3) 计算缓冲系数, 得到 $C-\delta_m$ 曲线, 见图 6。

1.2 相对湿度对缓冲性能的影响

2 组试样各 2 件, 一组为湿丝瓜络, 一组为干丝瓜络。每组用 2 个试样进行定性对比试验, 纵向施力,

试验测得 2 组丝瓜络的力-位移曲线, 见图 7。

1.3 外围壁与内芯对缓冲性能的影响

选取同一根丝瓜的同一直径 (直径为 7 cm), 同样高度 (高度为 5 cm) 的 2 个试件 (丝瓜纤维密度基本相同), 1 个试件为完整的圆柱丝瓜络, 质量为 6 g, 另 1 个试件去除丝瓜络内芯, 质量为 5 g, 进行静态压缩试验, 纵向施力, 得到其应力-应变曲线和缓冲系数-最大应力曲线, 见图 8。

1.4 试件高度对缓冲性能的影响

取同一根丝瓜同一段直径 (直径为 7 cm) 但不同高度的 2 件试件 (丝瓜纤维密度基本相同), 1 个试件高 3.5 cm, 质量为 3 g, 另 1 个试件高 5 cm, 质量为 7 g, 进行静态压缩试验, 纵向施力, 得应力-应变曲线和缓冲系数-最大应力曲线, 见图 9。

1.5 不同软硬丝瓜的缓冲性能

取 2 根丝瓜, 直径 (直径为 6 cm) 和高度 (高为 4 cm) 相同, 其中 1 根纤维致密, 质量为 5 g, 另 1 根松软, 质量为 3 g。比较纤维密度对缓冲性能的影响, 进行静态压缩试验, 纵向施力, 得到应力-应变曲线和缓冲系数-最大应力曲线, 见图 10。

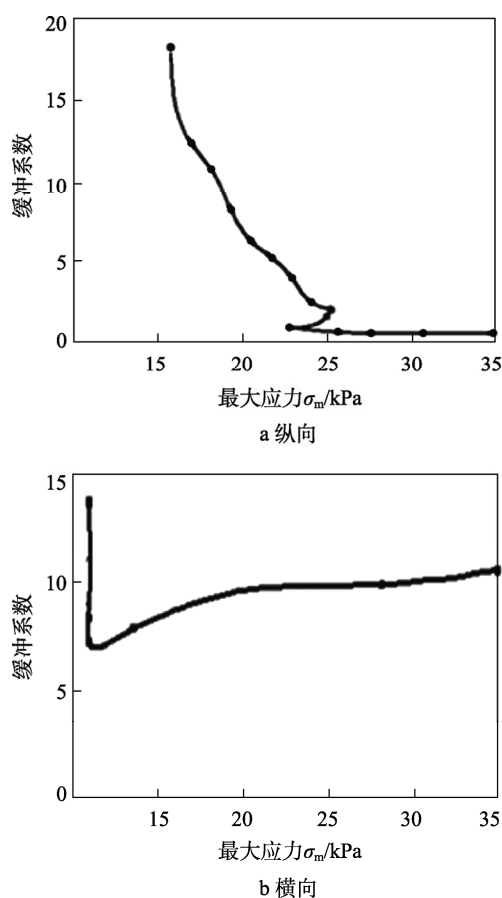


图 6 纵向与横向缓冲系数-最大应力曲线

Fig.6 Parallel and vertical $C-\delta_m$ curves

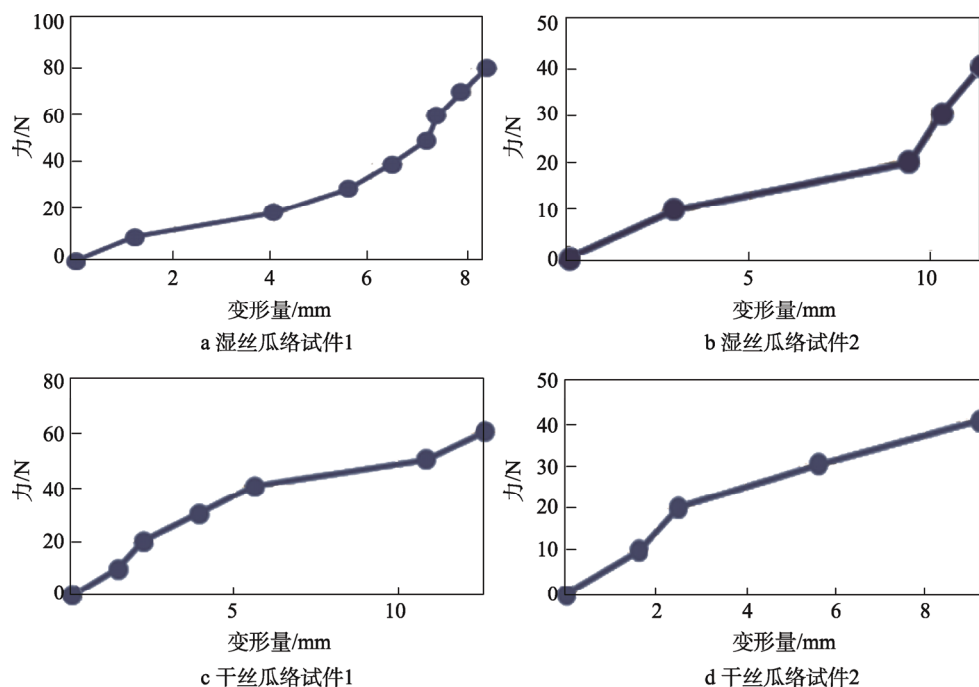


图7 干湿丝瓜络静态压缩力-位移曲线

Fig.7 Dry and wet loofa sponge static compression force-displacement curves

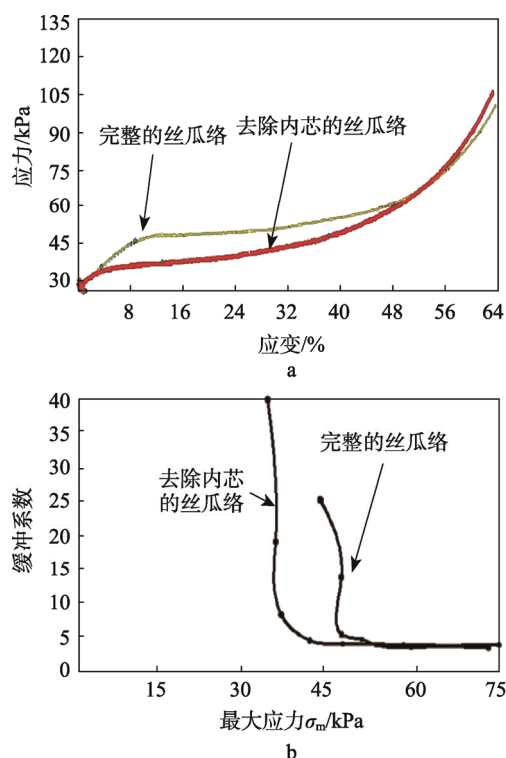


图8 完整丝瓜络和去除内芯丝瓜络的应力-应变曲线和缓冲系数-最大应力曲线对比

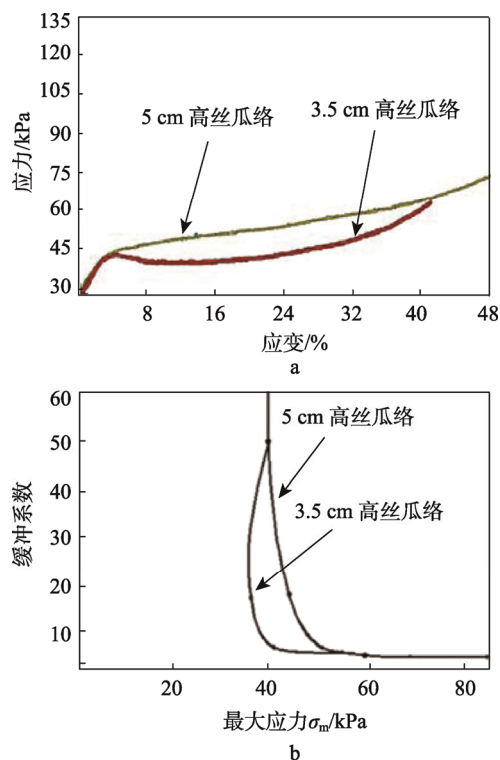
Fig.8 Comparison of stress-strain curves and $C-\delta_m$ curves of whole loofa sponge and loofa sponge with inner core removed

图9 不同高度丝瓜络的应力-应变曲线和缓冲系数-最大应力曲线的对比

Fig.9 Comparison of stress-strain curves and $C-\delta_m$ curves of loofa sponge at different heights

1.6 不同直径丝瓜络缓冲性能比较

选取同一根丝瓜(纤维密度相同)不同部位作为试件,其中1个试件直径约为7 cm,质量为6 g,

另1个试件直径约为5 cm,质量为2 g。2个试件高度均为5.5 cm,进行静态压缩试验,纵向施力,得到应力-应变曲线和缓冲系数-最大应力曲线,见图11。

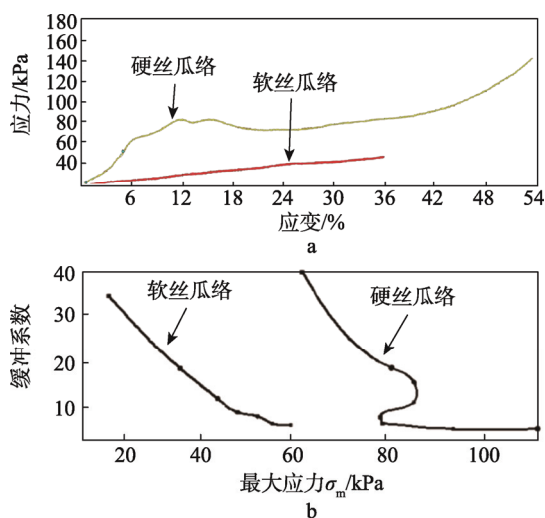


图 10 软硬丝瓜络的应力-应变曲线和缓冲系数-最大应力曲线的对比

Fig.10 Comparison of stress-strain curves and $C-\delta_m$ curves of soft and hard loofa sponges

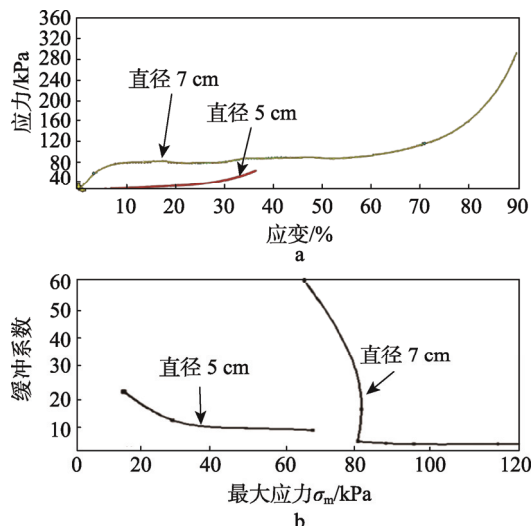


图 11 不同直径丝瓜络的应力-应变曲线和缓冲系数-最大应力曲线的对比

Fig.11 Comparison of stress-strain curves and $C-\delta_m$ curves of loofa sponge of different diameters

1.7 丝瓜络外围单层材料与海绵、双层瓦楞纸板的对比

将丝瓜络与其他缓冲材料进行对比, 首先准备试样: 单层外壁丝瓜络, 尺寸为 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ (密度为 0.0333 g/cm^3); 聚脂海绵, 尺寸为 $7\text{ cm} \times 7\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ (密度为 0.0087 g/cm^3); AB 型双层瓦楞纸板, 尺寸为 $7\text{ cm} \times 7\text{ cm} \times 0.7\text{ cm}$ (定量为 0.0571 g/cm^2)。进行静态压缩试验, 得到对应的应力-应变曲线和缓冲系数-最大应力曲线, 见图 12—13。

取从最软到最硬的丝瓜络, 编号为①—⑨, 进行静态压缩试验, 得到对应的缓冲系数-最大应力曲线见图 14 (①代表最软, ⑨代表最硬)。

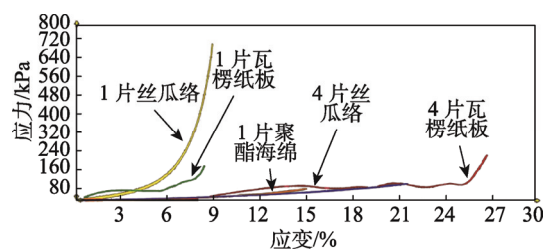


图 12 丝瓜络外壁材料与聚酯海绵、AB 瓦楞纸板的应力-应变曲线对比

Fig.12 Stress-strain curves of outer wall material of loofa sponge, polyester sponge and AB corrugated paperboard

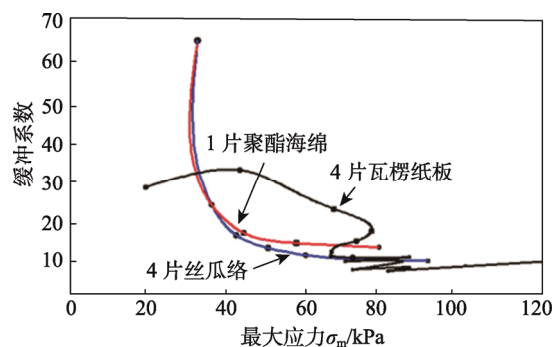


图 13 丝瓜络外壁材料与聚酯海绵、AB 瓦楞纸板的缓冲系数-最大应力曲线对比

Fig.13 Comparison of $C-\delta_m$ curves of outer wall material of loofa sponge, polyester sponge and AB corrugated paperboard

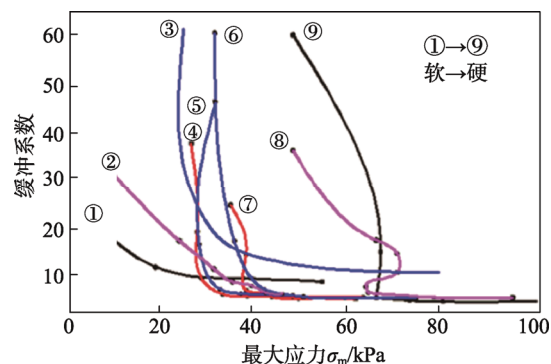


图 14 丝瓜络从软到硬的缓冲系数-最大应力曲线分布趋势

Fig.14 $C-\delta_m$ curves distribution trend from soft loofa to hard loofa

2 试验结果与分析

丝瓜络纵向压缩曲线呈现 3 个区, 即线弹性区、坍塌平台区和实化区, 丝瓜络为不规则弹性体, 力-位移曲线由双曲正切过渡到正切曲线。丝瓜络吸能特性主要体现在线弹性区和坍塌区, 其从线弹性区进入坍塌区的最大应力为临界应力。坍塌平面具有良好的吸能效果, 在这一阶段, 气孔压缩, 丝瓜络吸收大量能量, 对运输包装中的冲击和振动起到良好的缓冲作用。

对比图 4—5 可知, 丝瓜络的纵向与横向压缩缓

冲性能差异很大,横向上丝瓜络的缓冲性能接近为正切曲线弹性体。因为丝瓜络纤维本身具有方向性,丝瓜络属于结构缓冲型材料。纵向压缩时外围壁层、内壁层与内芯同时承受压力并产生变形,而横向压缩只有外围壁层受到压力先产生变形。

对比文献[15]可知,纵向丝瓜络与蜂窝双面复合纸板材料力-位移曲线、应力-应变曲线、缓冲系数曲线相似,说明丝瓜络纵向缓冲性能与蜂窝双面复合纸板材料缓冲性能基本一致。从理论上分析是因为两者都属于通过结构破坏而吸收能量,从而起到缓冲的作用。

当产生4 mm变形时,湿丝瓜络需要10~20 N的应力,干丝瓜络需要25~30 N的应力,可见湿度能改变丝瓜络的缓冲性能,湿丝瓜络明显变软,强度下降。

由图8可知,去除内芯的丝瓜络明显比有内芯的丝瓜络更软,完整的丝瓜络刚度更高,能抵抗更大的外部压力。去除内芯的丝瓜络在小压力范围内的缓冲性能比完整的丝瓜络小,在大压力范围和完整的丝瓜络一样都有好的缓冲性能。这个结论与文献[8]保持一致。

由图9可知,由于丝瓜络是天然材料,密度分布不均匀,所以不同高度的丝瓜络缓冲系数不同,但差异不大。高度过大时,丝瓜络结构在压力作用下会产生弯曲变形,从而影响缓冲性能曲线。

由图10可知,软丝瓜络与硬丝瓜络的缓冲性能差距很大,说明纤维密度的影响非常大。软丝瓜络纤维细、密度小,用于小的承载力时具有良好的缓冲性能,但外力过大时丝瓜络会完全压实而失去缓冲性能。硬丝瓜络纤维粗,密度大,刚度大,用于承载较大力时可体现出优越的缓冲性能。

由图11可知,直径大小或承载面积的大小对缓冲性能也有很大的影响。承载面积大的丝瓜络材料在大负载的情况下表现出好的缓冲性能,面积小的对于小载荷表现出好的缓冲性能。

对比分析图8—11可知,所有丝瓜络样本的缓冲性能曲线都有最小缓冲系数,与其他缓冲材料不同的是,其最小缓冲系数并不仅仅停留在一个点上,而在很大的一个应力范围内都存在,说明该材料的缓冲性能相当优越;丝瓜络的软硬以及不同直径对其缓冲性能的影响大于其内芯和高度对缓冲性能的影响。由于丝瓜络结构不同于其他海绵类缓冲材料,无法用密度来标定其缓冲系数,而应该用纤维的粗细、紧密度及承载面积来衡量丝瓜络的缓冲性能。

由图12—13可知,单层外壁丝瓜络与单层瓦楞纸板材料的缓冲性能不同,它更类似于聚脂海绵的缓冲性能,这是因为单层外壁丝瓜络与聚脂海绵的结构类似,完整的丝瓜络与多层瓦楞纸板结构类似。多层外壁丝瓜络重叠使用时与聚脂海绵非常相似,其缓冲

性能甚至优于聚脂海绵。与重叠的瓦楞纸板材料完全不同,4层瓦楞纸板的应力-应变曲线有4个最高点,缓冲性能曲线有4个拐点,这是因纸板在受压时4层瓦楞纸材料分别压溃叠加而成,这与文献[15]所述一致。受中小载荷时,4层丝瓜络比4层瓦楞纸板更软,缓冲性能优于后者,但不适合应用到受高载荷的场合。对比图13与11b(材料取自同一根丝瓜)可知,重叠单层外壁丝瓜络材料作为缓冲材料,其软硬介于硬的完整丝瓜络与软的完整丝瓜络之间,在中小受力场合下,使用完整软丝瓜络优于重叠材料,在中等受力场合下可使用重叠材料。

3 结语

丝瓜络是一种优越的缓冲材料,可自然降解,成本低,完全可以替代人工材料,具有广泛应用的前景。丝瓜络的缓冲性能具有方向性,横向使用可表现出类似聚脂海绵的缓冲特性,纵向使用与瓦楞纸板的缓冲特性类似。丝瓜络比其他缓冲材料性能更佳,可承载从小到大的很大范围的外力,具有十分优秀的吸能性能。

影响丝瓜络缓冲性能的关键因素是其纤维的本身物理特性及丝瓜络直径尺寸,去除内芯的丝瓜络具有更好的缓冲性能。受小载荷时选择软的丝瓜络,即生长时间较短、纤维细而疏松的丝瓜络,或丝瓜络端部;外载力较大时,选择硬的丝瓜络,即生长时间较长、纤维粗而密实的丝瓜络,或丝瓜络中间段。中等载荷时,也可重叠丝瓜络外壁进行缓冲设计。文中得到了丝瓜络从软到硬的缓冲系数-最大应力曲线分布趋势,设计时可参考该曲线进行选择与计算。

参考文献:

- [1] 戴宏民,戴佩燕.生态包装的基本性及其材料的发展趋势[J].包装学报,2014(7):1—9.
DAI Hong-min, DAI Pei-yan. The Basic Characteristics and Development Trend of Ecological Packaging Materials[J]. Packaging Journal, 2014(7): 1—9.
- [2] LI F, GUAN K, LIU P, et al. Ingredient of Biomass Packaging Material and Compare Study on Cushion Properties[J]. International Journal of Polymer Science, 2014(1): 1—7.
- [3] 叶舟,陈希荣.麻秆芯缓冲包装材料静态缓冲特性和蠕变性能研究[J].北京印刷学院学报,2007,15(2): 11—13.
YE Zhou, CHEN Xi-rong. The Kenaf Core Buffer Packing Material Study of Static Cushioning Property and Creep Property[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2007, 15(2): 11—13.
- [4] MOJZES Á, FÖLDESI P, BÖRÖCZ P. Define Cushion

- Curves for Environmental Friendly Packaging Foam[J]. International Journal of Engineering, 2012, 10(1): 113—118.
- [5] 向威, 刘洋. 从材料出发的丝瓜络产品设计探究[J]. 学术教育研究, 2015(6): 44—47.
XIANG Wei, LIU Yang. Exploration of Luffa Sponge Material Products Design[J]. Academic Education Research, 2015(6): 44—47.
- [6] 黎炎, 刘文嘉, 王益奎, 等. 丝瓜络化学成分分析[J]. 西南农业学报, 2011(2): 529—534.
LI Yan, LIU Wen-jia, WANG Yi-kui, et al. Analysis on Chemical Constituents of Luffa[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011(2): 529—534.
- [7] 艾小林, 陈燕丹, 黄彪, 等. 丝瓜络纤维的综合利用研究进展[J]. 化工进展, 2015, 34(6): 1708—1721.
AI Xiao-lin, CHEN Yan-dan, HUANG Biao, et al. Progress in Comprehensive Utilization of Luffa Sponge Fibers[J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2015, 34(6): 1708—1721.
- [8] 刘鹏. 抗菌、可降解丝瓜络/PVA/EVA 包装材料的制备及性能[D]. 北京: 北京印刷学院, 2014.
LIU Peng. Research on Preparation and Properties of Anti-bacterial and Biodegradable Loofah Fiber/PVA/EVA Packaging Material[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2014.
- [9] SHEN J, MIN X Y, HUANG X, et al. Mechanical Properties of Luffa Sponge[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2012, 15: 141—152.
- [10] SHEN J, XIE Y M, HUANG X, et al. Behaviour of Luffa Sponge Material under Dynamic Loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 57: 17—26.
- [11] CHEN Q, SHI Q, GORB S N, et al. A Multi-scale Study on the Structural and Mechanical Properties of the Luffa Sponge from Luffa Cylindrical Plant[J]. Journal of Biomechanics, 2014, 47(6): 1332—1339.
- [12] WANG X J, SHEN J H. Numerical Investigation of Compression Behaviour of Luffa-filled Tubes[J]. Composites: Part B, 2015, 73: 149—157.
- [13] SRIHARSHA D V, LOKESH K R, LOKESH K R, et al. Immobilized Fungi on Luffa Cylindrica: An Effective Biosorbent for the Removal of Lead[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, 80: 589—595.
- [14] 彭国勋. 物流运输包装设计(第2版)[M]. 北京: 文化发展出版社, 2012
PENG Guo-xun. Transportation Packaging (The 2th Edition)[M]. Beijing: Culture Development Press, 2012.
- [15] 刘冰, 阮红斌, 曹海斌, 等. 蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载及静态缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2012, 33(4): 4—8.
LIU Bing, RUAN Hong-bin, CAO Hai-bin, et al. Research on Outside Bearing and Static Cushioning Performance of Honeycomb-corrugated Composite Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(4): 4—8.