

基于湿度影响的蜂窝纸板静态压缩能量吸收图

王军¹, 卢立新^{1,2}, 王军^{1,2}

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 中国包装总公司食品包装技术与安全重点实验室, 无锡 214122)

摘要: 基于不同厚跨比蜂窝纸板在不同湿度条件下的静态压缩应力应变曲线, 构建含应变速率、蜂窝结构等信息的能量吸收图。结果表明: 随厚跨比的增大, 蜂窝纸板最佳能量吸收点向右上方偏移, 其单位体积吸收能量的能力增强; 随着相对湿度的增大, 蜂窝纸板最佳能量吸收点向左下方偏移, 其单位体积吸收能量的能力减弱。

关键词: 蜂窝纸板; 相对湿度; 厚跨比; 静态压缩; 能量吸收图

中图分类号: TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)01-0005-03

Energy-absorption Diagrams of Honeycomb Paperboards under Static Compression in Different Relative Humidity

WANG Jun¹, LU Li-xin^{1,2}, WANG Jun^{1,2}

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Key Laboratory of Food Packaging Techniques and Safety of China National Packaging Corporation, Wuxi 214122, China)

Abstract: Based on stress-strain curves of honeycomb paperboards with different thickness-to-length ratios under static compression in different relative humidity, the energy-absorption diagrams were molded and constructed, which included the information of strain rates, honeycomb structures and relative humidity conditions. The results showed that the best energy-absorbing point shifts to the upper right with the increasing thickness-to-length ratio of honeycomb paperboard, and the energy-absorption capacity per unit volume increased; the energy-absorption point shifts to the lower left and the energy-absorption capacity per unit volume decreases with the relative humidity increases.

Key words: honeycomb paperboard; relative humidity; thickness-to-length ratio; static compression; energy-absorption diagram

蜂窝纸板作为一种结构新颖、承载量大、质量小且具有良好缓冲性能的绿色包装材料, 受到了包装界的广泛关注, 并已应用于包装、建筑、农业等诸多领域。

在实际运输过程中, 蜂窝纸板作为产品的缓冲包装材料^[1], 主要是通过吸收冲击和振动所引起的能量(通常是动能)进而保护产品, 能量吸收图法是表征材料缓冲性能的实验与物理模型相结合的经验方法^[2], 是通过确定不同规格缓冲材料在不同应变速率下的最佳能量吸收点而绘制的曲线图, 它优化了材料相对密度, 考虑环境因素影响, 与传统缓冲性能表征方法

相比具有很大优势。

国外 Maiti S K^[3]最早基于 3 种泡沫材料(弹性、塑性和脆性)的应力应变曲线, 采用能量吸收图法对其进行吸能特性表征, 为最佳泡沫材料的选择和设计提供了最初的理论方法, 并认为木材和蜂窝材料也适用于同一模式。之后国内外出现了大量将能量吸收图法应用于泡沫材料的缓冲评价文献, 为不同泡沫材料的选择提供经验数据: 卢子兴^[4]、王斌^[5]、胡时胜^[6]分别对复合泡沫塑料、泡沫铝合金和硬质聚氨酯泡沫塑料的缓冲吸能特性进行了评估; Haijun Yu^[7]对准静态压缩下闭孔泡沫铝的机械性能和变形机理进行

收稿日期: 2010-09-27

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划课题(2006BAD30B02); 江南大学创新团队发展计划资助课题

作者简介: 王军(1985—), 男, 山东泰安人, 江南大学硕士生, 主攻产品运输包装。

通讯作者: 卢立新(1966—), 男, 江苏宜兴人, 博士, 江南大学教授、博士生导师, 主要从事包装动力学与包装材料等的研究。

研究,并得到了解孔径对其能量吸收特性的影响。

对纸蜂窝材料能量吸收性能的研究,国外文献很少涉及,国内王冬梅^[8-9]基于纸蜂窝夹层结构的压缩试验,考虑孔穴结构因素的影响,构建了能量吸收图,得出随着蜂窝胞壁厚度与长度比值的增加,其能量吸收性能将随之增大;王志伟^[10]采用分段函数的方法建立了静态压缩条件下纸蜂窝能量吸收与环境湿度及蜂窝结构参数之间的关系模型,并与试验结果进行比较验证,得出了模型的可靠性。

1 试验

1.1 材料

蜂窝纸板为青岛某公司提供,样品采用3种蜂窝材料分别为:200/120/200-30,200/150/200-30,200/170/200-30(3种蜂窝纸板的面纸均为200 g/m²的箱板纸,蜂窝纸芯为正六边形,定量分别为120,150和170 g/m²的瓦楞原纸,对应厚度分别为0.246,0.257和0.275 mm,其胞壁边长均为8.5 mm,蜂窝纸板的厚度均为30 mm)。

1.2 方法

将蜂窝原纸试样在标准环境条件(23℃,相对湿度50%)下分别预处理48 h后,参照JB/T 6544-93塑料拉伸和弯曲弹性模量试验方法,在LRXPlus电子材料试验机上测量各蜂窝原纸的纵向固体模量,每个试样从恒温恒湿箱取出后5 min内完成测试。试样尺寸为125 mm×12.7 mm,电子材料试验机的拉伸标距是65 mm,拉伸速度为1 mm/min,进行10次重复试验,取平均值。

将蜂窝纸板试样在温度为(23±2)℃,相对湿度为50%,65%,80%和90%下分别预处理48 h后,参照GB/T 1453-2005夹层结构或芯子平压性能试验方法进行静态压缩试验,每个试样从恒温恒湿箱取出后5 min内完成测试。对蜂窝纸板施加恒定轴向加载速度(12±3) mm/min,试样尺寸100 mm×100 mm,对各种试验条件均做5次重复试验(各用一个试样)。

2 结果与讨论

2.1 基于标准环境条件的蜂窝原纸纵向固体模量

对经过预处理的蜂窝原纸进行拉伸试验,测试并

计算标准环境条件下蜂窝原纸纵向固体模量,实测数据见表1。 E_{s0} 为标准环境条件下(23℃,相对湿度50%)蜂窝原纸纵向固体模量。

表1 标准环境条件下蜂窝原纸纵向固体模量

Tab.1 Longitudinal solid modulus of honeycomb paper under standard conditions

原纸定量/(g·m ⁻²)	120	150	170
固体模量 E_{s0} /GPa	1.401	2.262	2.392

2.2 蜂窝纸板静态压缩缓冲特性分析

蜂窝纸板静态压缩缓冲特性,大多是通过其应力应变曲线进行评价。标准环境条件下3种不同规格蜂窝纸板静态压缩应力应变曲线见图1;不同相对湿度条件下蜂窝纸板(200/120/200-30)的静态缓冲曲线见图2。

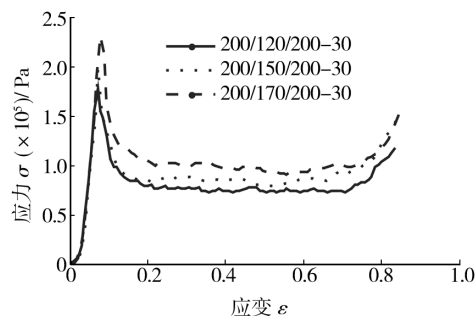


图1 标准环境下不同规格蜂窝纸板静态压缩应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of honeycomb paperboard with different specifications under standard conditions

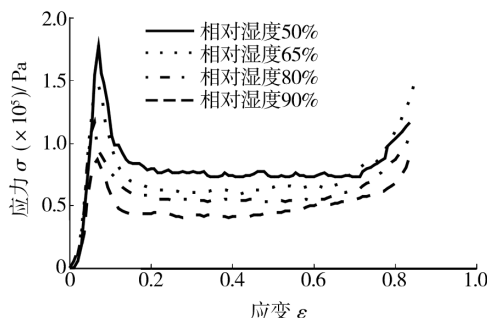


图2 不同相对湿度条件下蜂窝纸板应力-应变曲线(23℃)

Fig.2 Stress-strain curves of honeycomb paperboard under different relative humidity conditions(23℃)

从图1和2可以看出,在线弹性阶段,曲线斜率变化都不大,这说明蜂窝纸板的弹性模量主要取决于蜂窝芯层结构,材质和环境湿度对其影响很小;在弹塑性和塑性阶段,随芯层定量的增加,蜂窝纸板的临

界应力和平台应力都逐渐增大,其能量吸收性能随之提高;随环境相对湿度的增大,蜂窝纸板临界应力和平台应力都明显减小,其能量吸收性能随之下降。

2.3 蜂窝纸板静态压缩能量吸收图的构建

由不同厚跨比(蜂窝芯层胞壁厚度 t 与蜂窝芯层胞壁边长 l 之比)蜂窝纸板在不同湿度条件下的静态压缩应力应变曲线,通过计算机编程,利用 MATLAB 程序得到其能量吸收图。

标准环境条件下不同厚跨比蜂窝纸板的静态压缩能量吸收图见图 3。可知,随厚跨比的逐渐增大,

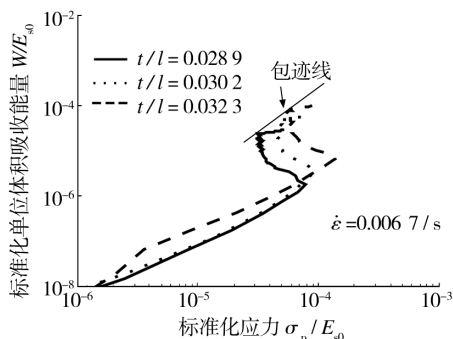


图 3 标准环境下不同厚跨比蜂窝纸板静态压缩能量吸收图

Fig. 3 Energy-absorption diagrams of honeycomb paperboard with different thickness-to-length ratios under standard conditions

蜂窝纸板最佳能量吸收点(包迹线所连接的曲线肩点)向右上方偏移,其单位体积吸收能量的能力增强。23℃下相对湿度对同种蜂窝纸板静态压缩能量吸收的影响见图 4。蜂窝纸板随湿度的增大,其最佳能量

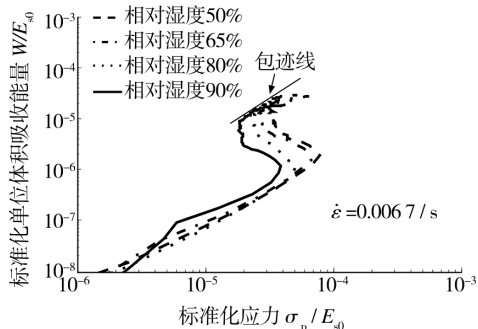


图 4 不同相对湿度下蜂窝纸板的
(厚跨比为 0.0289)能量吸收图

Fig. 4 Energy-absorption diagrams of honeycomb paperboard ($t/l=0.0289$) under different relative humidity conditions

吸收点(包迹线所连接的曲线肩点)向左下方偏移,其单位体积吸收能量的能力减弱。

不同相对湿度条件下,不同厚跨比蜂窝纸板的包

迹线汇总于同一坐标系,使得在同一张能量吸收图中包含了应变速率、蜂窝结构及环境湿度等信息,见图 5,借助该静态压缩能量吸收图,利用插值法可进行蜂

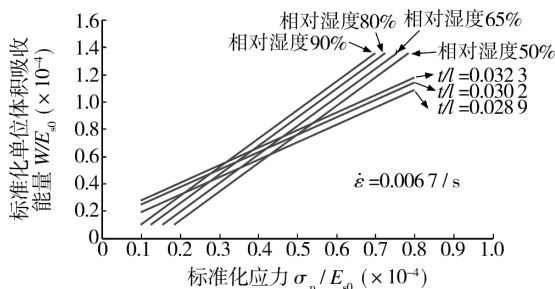


图 5 不同相对湿度下不同厚跨比
蜂窝纸板静态压缩能量吸收图

Fig. 5 Summary of compression energy-absorption diagrams of honeycomb paperboards with different thickness-to-length ratios under different relative humidity conditions

窝结构和材质的优选,进而指导缓冲包装设计。

3 结论

蜂窝纸板的弹性模量主要取决于蜂窝芯层结构,材质和环境湿度对其影响很小;随芯层原纸定量的增加,蜂窝纸板的临界应力和平台应力都逐渐增大,其能量吸收性能随之提高。构建不同厚跨比蜂窝纸板的静态压缩能量吸收图,随厚跨比的增大,蜂窝纸板最佳能量吸收点(包迹线所连接的曲线肩点)向右上方偏移,其单位体积吸收能量的能力增强;随湿度的增大,蜂窝纸板最佳能量吸收点向左下方偏移,其单位体积吸收能量的能力减弱。

参考文献:

- [1] 郭彦峰,许文才,王梅. 蜂窝纸板缓冲性能的实验研究[J]. 包装工程,1999,20(2):12-15.
- [2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [3] MAITI S K, GIBSON L J, ASHBY M F. Deformation and Energy Absorption Diagrams for Cellular Solids[J]. Acta Metal, 1984, 32(11):1964-1975.
- [4] 卢子兴,袁应龙. 高应变率加载下复合泡沫塑料的吸能特性及失效机理研究[J]. 复合材料学报, 2002, 19(5): 114-117.

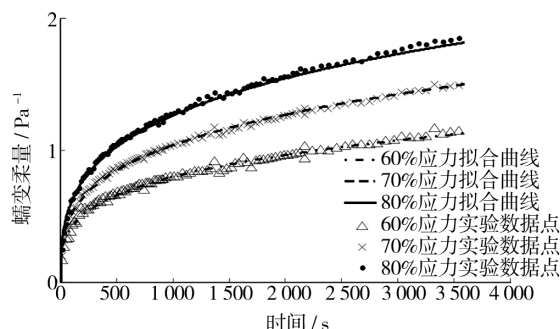


图2 苹果果柱蠕变试验结果与理论模型结果对比

Fig. 2 Test curves of apple samples compared to the result of the model

较长加载历程中准确描述苹果果柱的蠕变现象,适用于描述苹果果柱的蠕变。研究结果为果品蠕变特性的表征提供了一种新的方法和模型,为果品减损包装设计提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 卢立新,王志伟. 果品运输中的机械损伤机理及减损包装设计研究进展[J]. 包装工程,2004,25(4):131-134.
- [2] 杨晓清,王春光. 果品静载流变特性的研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(9):178-182.
- [3] DINTWA E, Van ZEEBROECK M, TIJSKENS E, et al. Determination of Parameters of a Tangential Contact Force Model for Viscoelastic Spheroids (fruit) Using a Rheometer Device[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(3):321-327.
- [4] 冯能莲. 苹果在静载作用下的变形规律[J]. 安徽工学院学报,1995,22(2):74-80.
- [5] 冯能莲. 苹果在静载作用下的损伤规律[J]. 安徽工学院学报,1996,23(1):55-58.
- [6] 卢立新,王志伟. 基于准静态压缩的果实黏弹塑性模型[J]. 农业工程学报,2005,21(2):30-33.

- [7] 张谦益,吴洪华. 梨果实蠕变基本流变特性研究[J]. 现代食品科技,2006,22(4):46-48.
- [8] 李小昱,朱俊平. 苹果蠕变特性与静载损伤机理的研究[J]. 西北农业大学学报,1997,25(6):64-68.
- [9] ENELUND Mikael, OLSSON Peter. Damping Described by Fading Memory-analysis and Application to Fractional Derivative Models[J]. International Journal of Solids and Structures, 1999,36:939-970.
- [10] 刘林超,杨骁. 基于分数导数模型的粘弹性桩振动分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2009,17(2):303-308.
- [11] ROSSI KHIN Yu A, SHITIKOVA M V. Application of Fractional Operators to the Analysis of Damped Vibrations of Viscoelastic Single-mass Systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997,199(4):567-586.
- [12] BAGLEY R L, TORVIK P J. A Theoretical Basis for the Application of Fractional Calculus to Viscoelasticity[J]. Journal of Rheology, 1983,27(3):201-210.
- [13] DAVIS G B, KOHANDEL M, SIVALOGANATHAN S, et al. The Constitutive Properties of the Brain Parenchyma Part2. Fractional Derivative Approach[J]. Medical Engineering & Physics, 2005,2006(28):455-459.
- [14] SHAH S Hyder Ali Muttaqi. Unsteady Flows of a Viscoelastic Fluid with the Fractional Burgers' Model[J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2010, 11(3):1714-1721.
- [15] 林孔容. 关于分数阶导数的几种不同定义的分析与比较[J]. 闽江学院学报,2003,24(5):3-6.
- [16] 孙海忠,张卫. 分数算子描述的粘弹性材料的本构关系研究[J]. 材料科学与工程学报,2006,24(6):926-930.
- [17] KOELLER R C. Applications of Fractional Calculus to the Theory of Viscoelasticity[J]. ASME, 1984,51: 299-307.
- [18] 陈宏善,李明明,康永刚,等. Mittag-Leffie 函数及其在粘弹性应力松弛中的应用[J]. 高等学校化学学报,2008,29(6):1271-1275.

(上接第7页)

- [5] 王斌,何德,舒光冀. 泡沫 Al 合金的压缩性能及能量吸收[J]. 金属学报,2000,36(5):1037-1040.
- [6] 胡时胜,刘剑飞,王悟. 硬质聚氨酯泡沫塑料的缓冲吸能特性评估[J]. 爆炸与冲击,1998,18(6):42-47.
- [7] YU Hai-jun, GUO Zhi-qiang, LI Bing, et al. Research into the Effect of Cell Diameter of Aluminum Foam on Its Compressive and Energy Absorption Properties[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A454-455(25): 542-546.
- [8] WANG Dong-mei. Impact Behavior and Energy Absorp-

tion of Paper Honeycomb Sandwich Panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(1):110-114.

- [9] WANG Dong-mei. Energy Absorption Diagrams of Paper Honeycomb Sandwich Structures[J]. Packaging Technology and Science, 2009,22(2):63-67.
- [10] WANG Zhi-wei, E Yu-ping. Mathematical Modeling of Energy Absorption Property for Paper Honeycomb in Various Ambient Humidities[J]. Materials and Design, 2010,31(9):4321-4328.