蔗渣-淀粉发泡缓冲材料的本构方程及有限元仿真

李志嘉,黄崇杏,陈宜昭,张保东,朱明秀

(广西大学,南宁 530004)

摘要:目的研究蔗查-淀粉发泡缓冲材料的缓冲性能,建立此类缓冲材料的本构方程,方便此类材料的 应用。方法 对不同密度的蔗渣-淀粉复合材料,在不同湿度和应变率条件下对其进行静态压缩试验,并 在 Sherwood-Frost 本构模型的基础上加以扩展,加入湿度对应变的影响项,建立该复合材料的静态压缩 本构方程。根据实验数据,采用 Origin 拟合的数学方法确定相关系数。以该静态压缩本构方程拟合出的 应力-应变曲线作为材料特性载入 Abaqus 软件中,模拟淀粉-蔗渣纤维发泡缓冲材料并进行静态压缩试 验仿真,得到仿真曲线,并与实际试验曲线进行对比。结果 仿真实验与实际实验的数据误差较小,整 体误差在 10%以内。结论 建立的静态压缩本构方程可以很好地表征该复合材料的缓冲性能,避免了设 计缓冲衬垫时需要大量试验才能得到材料曲线的问题。

关键词: 蔗渣纤维; 发泡缓冲材料; 本构方程; 有限元仿真

中图分类号: TS206.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2017)11-0050-05

Constitutive Equation and Finite Element Simulation on Bagasse-Starch Foaming Buffer Material

LI Zhi-jia, HUANG Chong-xing, CHEN Yi-zhao, ZHANG Bao-dong, ZHU Ming-xiu (Guangxi University, Nanning 530004, China)

ABSTRACT: The work aims to study the buffer performance of bagasse-starch foaming buffer material and establish the constitutive equation of such buffer material, so as to facilitate its application. The static compression test of bagasse-starch composites of different densities was carried out under different humidity and strain rates. Based on Sherwood-Frost constitutive equation, the factors of humidity which influenced the strain were added and the equation was extended. In such case, the static compression constitutive equation of such composite was established. According to the experimental data, the correlation coefficients were identified in the mathematical method fitted by Origin. The stress-strain curves fitted by the static compression constitutive equation could be used as material characteristics and loaded into Abaqus software, to simulate starch-bagasse fiber foaming buffer material and static compression test. The simulation curves were obtained and compared with actual test curves. The difference between simulation experiment and actual experiment was very small, and the global error was within 10%. The static compression constitutive equation established can properly represent the buffer performance of the above-mentioned composite, which avoids the problem that the material curves can only be obtained by conducting a lot of experiments in the process of designing cushion pad. **KEY WORDS:** bagasse fiber; foaming buffer material; constitutive equation; finite element simulation

纤维发泡缓冲材料是一种绿色、环保、有发展潜力的材料。其主要成分为植物纤维和淀粉,是天然的高分子材料,是可再生的。同时发泡缓冲材料在自然

界中能被降解,最终成为二氧化碳和水。与传统石油 基发泡塑料相比,纤维发泡缓冲材料更环保。目前已 经有学者使用不同的方法制备了此种材料^[1-4],并对

收稿日期: 2016-10-11

基金项目: 广西自然基金(2013GXNSFFA019005)

作者简介:李志嘉(1990—),男,广西大学硕士生,主攻包装材料。

通讯作者:黄崇杏 (1977—),女,广西大学教授,主要研究方向为绿色包装材料和食品包装安全技术。

其进行了相关的性能测试,主要来说,性能测试包括 对材料的回弹性、蠕变特性、静态压缩特性和动态压 缩特性等。研究发现,此种材料在一定配比下具有较 好的缓冲性能。

由于对性能的测试需要耗费大量的人力物力,得 到的曲线也多反映材料在某一状态下的某种特性,因 此以建立数学模型的方法来表征材料的缓冲性能,找 到符合实际条件的应力-应变关系,是具有一定意义 的。一方面该模型可以从数学和物理的角度解释材料 变形过程和受力情况,表征材料的缓冲性能。另一方 面,通过对模型的使用可以大大减少实验工作量,同 时还能将实验无法达到的极端情况下的受力情况模 拟出来。

本构模型的建立方面,因素及其对应的参数数 量越多,越能逼近材料的固有性质,但因素及参数 过多,使得模型难以应用;因素及其对应的参数数 量越少,本构关系越便于应用,但数量太少,又不 能反映研究对象的本质^[5]。目前很多学者对缓冲材料 的本构模型进行了研究,例如 B. Nedjar^[6]构想了适用 于可高度压缩各向同性材料的一类本构模型。Behrad Koohbor 等^[7]用非参数的方法成功地实现了刚性的聚 合物泡沫材料在冲击载荷条件下的压缩本构响应的 准确评估。Jmal H.等^[8]使用记忆整数模型对聚氨酯泡 沫准静态行为进行了建模。Wang Z. W 等^[9]通过试验 和有限元分析,研究了纸浆模塑制品在静态压缩和动 态冲击下的力学行为,发现应变速率对纸浆模塑制品 的承载能力和吸能性能影响显著。Shariatmadari M. R.等^[10]研究了不同温度下鞋类泡沫的形变行为,发现 泡沫表现出的机械和能量吸收特性是温度的函数。 Ashab A. S. M.等^[11]研究了在压缩和剪切载荷联合作 用下铝蜂窝材料的力学行为,提出了平台应力与加载 角关系的经验公式。Jin T.等^[12]对聚甲基丙烯酸甲酯 聚合物进行了准静态剪切压缩试验,发现该材料的故 障轨迹可以用一个椭圆形的宏观破坏准则预测。
何育 朋等[13]建立了发泡聚乙烯与发泡聚苯乙烯串联系统 跌落冲击模型,并运用 Newton-Raphson 方法得到串 联结构的冲击响应。高德等[14]研究了玉米秸秆纤维复 合缓冲材料的本构关系。张秀梅等[15]建立了麦秆发泡 缓冲衬垫在动态条件下的微分型本构方程。与传统发 泡塑料相比,植物纤维类发泡缓冲材料的密度较大、 具有吸湿性,因此研究植物纤维类材料的本构方程, 可以借鉴传统发泡塑料本构模型并加以改进,使之符 合植物纤维类缓冲材料的实际情况。

文中采用蔗渣纤维和阳离子淀粉为基体材料制 备发泡缓冲材料,对制得的材料进行静态压缩测试, 结合蔗渣-淀粉发泡缓冲材料的实际特点,考虑材料 密度、湿度、应变率等因素,建立本构方程,并通过 Abaqus软件进行仿真,评估方程的有效性。

1 实验

1.1 材料

漂白蔗渣浆:工业成品级,白度为 76% (ISO), 卡伯值 13,打浆度 (SR) 20°,广西南华纸业有限公 司。阳离子淀粉:型号 CS-8,广西农垦明阳生化集 团有限公司。聚乙烯醇:规格 1788,中国石化上海 石油化工有限公司。乙酸乙烯-乙烯共聚乳液:型号 BJ-707,北京东方石油化工有限公司有机化工厂。偶 氮二甲酰胺 (发泡剂 AC):白色,工业成品级,型号 SPC300,江苏索普集团有限公司。丙三醇:分析纯, 天津致远化学试剂有限公司。四硼酸钠 (五水):分 析纯,成都科龙化学试剂厂。硬脂酸:分析纯,天津 博迪化工股份有限公司。霜化锌:分析纯,天津博迪 化工股份有限公司。滑石粉:分析纯,天津凯通化学 试剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

选用通用切割研磨机,品牌 FRITSCH,德国飞 驰科学仪器有限公司。选用微机万能电子试验机,型 号 WDW3100,长春科新公司试验仪器研究所。

1.3 实验方法

1.3.1 蔗渣-淀粉发泡缓冲材料的制备

将风干的蔗渣浆经研磨机研磨后,过 80 目网筛, 然后放在 4 ℃医用冰箱中保存。称取规定份数的阳离 子淀粉以及聚乙烯醇粉末置入烧杯中,加入定量的 水,置于 90 ℃的恒温水浴锅中,使用电动搅拌器搅 拌 30 min。待淀粉和聚乙烯醇充分溶解于热水中,称 取规定份数的四硼酸钠、硬脂酸蔗渣纤维,以及规定 体积的丙三醇和乙酸乙烯-乙烯共聚乳液加入混合溶 液中进一步搅拌 10 min,使之成为胶状体后取出。待 胶状体冷却后,加入复配发泡剂(ZnO/AC 质量比 为 1:4)和滑石粉,混合均匀,制备成发泡坯体。将 发泡坯体装入模具中,放在 135 ℃的干燥箱中发泡 20 min。待发泡完成后,使用水泥刮刀沿模具四壁轻轻划 入,取出样品后放在 115 ℃的干燥箱中干燥 48 h。

1.3.2 材料的静态压缩测试

采用万能电子试验机作为测试系统,实验方法参 考GB/T 8168—2008。实验材料横截面为117 mm×117 mm,厚度为60 mm,密度为0.2763~0.4015 g/cm³, 测试前将材料放置在25℃恒温恒湿试验箱中24 h, 分别模拟0,30%,60%,90%以及100%的相对湿度。 试验机的压缩速度选择5,12,20,25 mm/min,来模拟 不同应变率下的环境,得到不同密度、不同湿度、不 同应变率条件下材料的应力-应变曲线。

2 结果与分析

2.1 静态压缩试验结果

不同密度、不同应变率、不同湿度条件下的材料 的应力-应变曲线见图 1。





由图 1 可知, 材料本身密度、应变率以及环境湿度 的变化均对材料的应力-应变关系产生了影响, 曲线整 体走势大致不变, 但是在屈服阶段的应力值以及屈服阶 段向密实阶段转变的应变值都发生了改变, 说明密度、 应变率以及环境湿度影响了材料的力学性能。

当应变的范围为 0~10%时,材料所受应力与应变 接近一次函数关系,此阶段为线弹性阶段,受力与形 变关系遵循胡克定律;当应变进一步增大时,材料产 生塑性形变,随着应变的增大,材料所受应力也在增 大,但增大幅度减缓,此阶段称之为塑性平台区;当 材料的形变增大到 50%以上,材料的泡孔被压实,随 着应变的增大,材料所受应力值急剧增大,此阶段称 之为密实区。进入密实区后,材料被压缩明显,内部 空隙被压实,已不具有缓冲性能。由此可知,材料的 形变过程不是单纯的线性弹性形变过程,可采用分段 的方法将形变的整体趋势表达出来,故建立应力-应 变形状函数为:

 $F(\varepsilon) = a_1 \varepsilon + a_2 \arctan(a_3 \varepsilon) + a_4 \tan(a_5 \varepsilon)$ (1)

式中: $F(\varepsilon)$ 为材料应力-应变曲线的形状函数; ε 为材料的应变; a_1 — a_5 为待定系数。文中对密度为 0.2808 g/cm³,环境湿度为 0 (完全干燥的)的发泡材 料以 12 mm/min 的压缩速度,进行静态压缩测试,得 到应力-应变曲线,并采用 Origin 软件,以最小二乘 法对式(1)中的参数进行了识别,得到公式为:

 $F(\varepsilon) = -0.33103\varepsilon + 13.29018 \arctan(0.06641\varepsilon) + (2)$ 9.51477 tan(0.01836\varepsilon)

2.2 各影响项函数的建立

2.2.1 材料密度对材料应力-应变的影响

由图 1a 可知,材料密度与材料应变对材料所受 应力影响较大。根据以往的研究发现,密度是与应变 一起耦合影响材料的应力^[16-18],因此建立密度-应变 函数 *G*(*ρ*, *ε*),与形状函数一起构成本构方程(3)。

$$\sigma = G(\rho, \varepsilon) \times F(\varepsilon) = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{a_1} \times \left(0.01\varepsilon\right)^{a_2(\frac{\rho}{\rho_0}-1)} \times$$
(3)

 $[a_3\varepsilon + a_4 \arctan(a_5\varepsilon) + a_6 \tan(a_7\varepsilon)]$

式中: ρ_0 为参考密度,取材料密度较小值 0.2763 g/cm³。对密度为 0.3769 g/cm³,相对湿度为 60%的材 料以 12 mm/min 的压缩速度进行静态压缩试验,得到 应力-应变曲线,并采用 Origin 软件以最小二乘法识 别 待 定 参 数 , 结 果 为 : a_1 =0.7859, a_2 =0.016 02, a_3 =-0.332 09, a_4 =9.083 97, a_5 =0.03682, a_6 =12.317 77, a_7 =0.012 64。

2.2.2 应变率对材料应力-应变的影响

由图 1b 可知, 材料所受应变率对材料的应力-应 变关系存在影响。文中建立关于应变率的函数

Μ(ε,ε)与形状函数一起组成本构方程(4)。

$$\sigma = M(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \times F(\varepsilon) = (a_1 + a_2 \dot{\varepsilon} + a_3 \dot{\varepsilon}^2) \times [a_4 \varepsilon + a_5 \arctan(a_6 \varepsilon) + a_7 \tan(a_8 \varepsilon)]$$
(4)

式中: $M(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ 为应变率函数,为幂级数形式; $F(\varepsilon)$ 为形状函数。

对密度为 0.2763 g/cm³,相对湿度为 60%的材料 以 12 mm/min 的压缩速度进行静态压缩试验,得到应 力-应变曲线。采用 Origin 软件以最小二乘法识别待 定参数,结果为: a_1 =0.227 72, a_2 =0.092 94, a_3 =0.000 176, a_4 =-0.330 32, a_5 =2.593 05, a_6 =0.151 98, a_7 = 20.017 66, a_8 =0.011 98。

• 53 •

2.2.3 环境湿度对材料应力-应变的影响

由图 1c 可知,材料所受环境湿度对材料的应力-应变关系存在影响。文中建立关于环境湿度的函数 *R*(*H*)=*a*₁*H*+*a*₂,与形状函数一起组成本构方程(5)。

$$\sigma = R(H) \times F(\varepsilon) = (a_1 H + a_2) \times [a_3 \varepsilon + a_4 \arctan(a_5 \varepsilon) + a_6 \tan(a_7 \varepsilon)]$$
(5)

对环境相对湿度为 30%, 密度为 0.2770 g/cm³的 材料以压缩速度为 12 mm/min 进行静态压缩试验,得 到应力-应变曲线,并采用 Origin 软件以最小二乘法 识别待定参数,结果为: $a_1=0.025$ 34, $a_2=0.914$ 83, $a_3=-0.189$ 51, $a_4=3.229$ 01, $a_5=0.101$ 57, $a_6=5.808$ 58, $a_7=0.018$ 97。

对得到的应力-应变形状函数、密度应变-形状函数、应变率-形状函数、相对湿度-形状函数进行方差分析,结果见表 1。每个方程的残差平方和较小,其 复相关系数接近于 1,因此证明文中设立的关系函数 $F(\varepsilon), G(\rho, \varepsilon), M(\varepsilon, \varepsilon), R(H)可行。$

表 1 拟合方程的方差分析 Tab.1 The variance analysis of fitted equation

类型	自由度(DF)	残差平方和(RSS)	均方差(MS)	复相关系数(R ²)
应力-应变形状函数	3112	347.15178	0.11155	0.9981
密度应变-形状函数	2744	64.7352	0.02359	0.99973
应变率-形状函数	2629	101.67208	0.03867	0.99958
相对湿度-形状函数	2406	143.89437	0.05981	0.99934

综上所述,可建立蔗渣纤维发泡缓冲材料的本构 方程如下:

$$\sigma = (a_1 H + a_2) \times (a_3 + a_4 \dot{\varepsilon} + a_5 \dot{\varepsilon}^2) \times (\rho / \rho_0)^{a_6} \times$$

$$(0.01\varepsilon)^{a_7(\rho/\rho_0-1)} \times [a_8\varepsilon + a_9 \arctan(a_{10}\varepsilon)$$
 (6)

 $+a_{11}\tan(a_{12}\varepsilon)$]

式中: *a*₁—*a*₁₂为待识别参数, 可通过最小二乘法 结合实际应力-应变曲线确定。

2.3 蔗渣-淀粉发泡缓冲材料的有限元仿真

文中采用 Abaqus 软件,结合构建的本构方程对 材料进行静态压缩仿真实验。设定密度为 0.3 g/cm³, 环境相对湿度为 30%,压缩速度为 12 mm/min,得到 方程具体表达式。打开模型树材料选项卡,输入材料 密度值。在力学性质界面设定弹性和塑性 2 个参数。 其中弹性参数中的弹性模量以及塑性参数中的屈服 应力和塑性应变通过本构方程计算得到。最终完成材 料设定。在 Abaqus 部件选项卡中添加 2 个部件,一 个为该实验发泡缓冲材料的模型,试样大小为:117 mm×117 mm×60 mm,设置结构为三维实体拉伸结构, 类型为可变形。设置材料试验机上压板为解析刚性壳 结构,相对位置于缓冲材料正上方。两模型的相对位 置关系见图 2。



图 2 模型的相对位置关系 Fig.2 The relative positional relation

设定好参数后对材料进行静态压缩仿真,得到材料应力-应变关系,并与实际发泡缓冲材料的应力-应 变曲线做了对比,结果见图 3。





由图 3 可知,进行仿真模拟得到的仿真值与实际 测得的应力-应变值较为接近,进行误差分析后发现, 仿真值和实验值的整体误差在 10%以内。由于仿真试 验中用到了设立的本构方程,因此可以证明该本构方 程在给定的密度、应变率、湿度条件下得到的材料的 应力-应变关系符合实际情况,对材料的实际应力-应 变解释较好。

3 结语

在不同湿度、密度、应变率下,建立了各因素与 材料所受应力之间的函数关系,结合材料的应变、形 状函数,构建起带有湿度、密度、应变率、形状函数 共同作用的蔗渣纤维缓冲材料本构方程,并以最小二 乘法确定了相关系数。结果发现,设立的本构方程能 够很好地表达材料应力-应变关系,其残差平方和较 小,曲线的复相关系数和校正决定系数都接近1。在 建立本构方程的基础上,通过 Abaqus 有限元软件对制备的蔗渣纤维发泡缓冲材料进行了仿真分析,发现 其输出的应力-应变值与实际实验值很接近,证明了 建立的本构方程的有效性。

参考文献:

- 刘杨, 乔兆磊, 李珊珊, 等. 木薯渣纤维制备发泡缓冲 包装材料的研究[J]. 包装工程, 2012, 33(19): 39—41.
 LIU Yang, QIAO Zhao-lei, LI Shan-shan, et al. Development of Foamed Cushion Packaging Material Using Cassava Residue[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(19): 39—41.
- [2] 曹斌.木质剩余物缓冲包装材料制备工艺的研究
 [D].哈尔滨:东北林业大学,2013.
 CAO Bin. Study on Preparation Process of Foam Wood Residual Fiber Cushion Packaging Material[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
 [3] 张传伟,李方义,刘鹏,等.剑麻纤维增强热塑性淀
- [3] 张传伟,李方义,刘鹏,等. 剑麻纤维增强热塑性淀粉复合材料的制备及性能研究[J]. 生物质化学工程, 2015(6): 1—5.

ZHANG Chuan-wei, LI Fang-yi, LIU Peng, et al. Preparation and Properties of Thermopalstic Starch Composites Reinforced with Sisal Fiber[J]. Biomass Chemical Engineering, 2015(6): 1—5.

- [4] 朱琦. 微细化纤维复合淀粉制备发泡缓冲材料的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
 ZHU Qi. Study on the Preparetion of Foam Cushioning Material by Micronized Fiber and Starch[D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [5] 奚德昌,高德.缓冲包装材料的本构建模研究进展
 [J].包装工程,2011,32(1):1—4.
 XI De-chang, GAO De. The Review on Constitutive Modeling of Cushion Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 1—4.
- [6] NEDJAR B. On Constitutive Models of Finite Elasticity with Possible Zero Apparent Poisson's Ratio[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 91: 72-77.
- [7] KOOHBOR B, KIDANE A, LU W Y. Characterizing the Constitutive Response and Energy Absorption of Rigid Polymeric Foams Subjected to Intermediate-Velocity Impact[J]. Polymer Testing, 2016, 54: 48—58.
- [8] JMAL H, DUPUIS R, AUBRY E. Quasi-static Behavior Identification of Polyurethane Foam Using a Memory Integer Model and the Difference-Forces Method [J]. Journal of Cellular Plastics, 2011, 47(5): 447-65.
- [9] WANG Z W, LI X F. Effect of Strain Rate on Cu-

shioning Properties of Molded Pulp Products[J]. Materials & Design, 2014, 57: 598-607.

- [10] SHARIATMADARI M R, ENGLISH R, ROTHWELL G. Effects of Temperature on the Material Characteristics of Midsole and Insole Footwear Foams Subject to Quasi-Static Compressive and Shear Force Loading[J]. Materials & Design, 2012, 37: 543—559.
- [11] ASHAB A S M, RUAN D, LU G, et al. Quasi-static and Dynamic Experiments of Aluminum Honeycombs Under Combined Compression-Shear Loading[J]. Materials & Design, 2016, 97: 183—194.
- [12] JIN T, ZHOU Z, WANG Z, et al. Quasi-static Failure Behaviour of PMMA under Combined Shear-com pression Loading[J]. Polymer Testing, 2015, 42: 181– 185.
- [13] 何育朋,李东华,张慧. 层状泡沫缓冲系统优化设计
 [J]. 包装工程, 2014, 35(17): 19—21.
 HE Yu-peng, LI Dong-hua, ZHANG Hui. Optimization Design of Packaging Structure with Cushion Function
 [J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 19—21.
- [14] 高德,刘壮,孙智慧. 秸秆纤维 EPS 缓冲包装材料性 能的研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 201—204. GAO De, LIU Zhuang, SUN Zhi-hui. Study on the Properties of Cushioning Package Material Made of Corn Straw and EPS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 201—204.
- [15] 张秀梅,徐伟民.麦秆发泡包装衬垫非线性粘弹性 模型及参数识别[J].包装工程,2010,31(5):17—19. ZHANG Xiu-mei, XU Wei-min. Nonlinear Viscoelastic Models of the Straw Foamed Packaging Material and Parameters Identification[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5):17—19.
- [16] 胡时胜, 刘剑飞, 王梧. 硬质聚氨酯泡沫塑料本构关系的研究[J]. 力学学报, 1998(2): 151—156.
 HU Shi-sheng, LIU Jian-fei, WANG Wu. Study on Constitutive Relation of Rigid Polyurethane Foam[J]. Acta Mechanica Sinica, 1998(2): 151—156.
- [17] 饶聪超,姜献峰,李俊源,等.高密度聚乙烯结构发 泡塑料拉伸本构关系的研究[J].中国塑料,2012(7): 66—69.
 RAO Cong-chao, JIANG Xian-feng, LI Jun-yuan, et al. Research on Constitutive Relation of High-density

Polyethylene Structural Foam under Tensile[J]. China Plastics, 2012(7): 66—69.

[18] 沈训乐.发泡缓冲材料本构模型研究及其 CAD 应用
[D].西安:陕西科技大学, 2012.
SHEN Xun-le. Research and Its Cad Applications of Constitutive Model of Cushioning Packaging Materials
[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2012.