

废纸纤维发泡制品的静态缓冲性能及曲线拟合

曹景山, 张新昌, 赵瑞
(江南大学, 无锡 214122)

摘要: **目的** 为了促进包装废纸的再生利用, 节约自然资源和保护生态环境, 文中在优化废纸纤维发泡制品配方的基础上, 研究制品的静态缓冲性能, 并进行曲线拟合。**方法** 使用废弃瓦楞纸板, 利用微波加热发泡工艺, 通过正交试验探究发泡剂种类和配比, 以及丙三醇和碳酸钙用量对废纸纤维发泡制品性能的影响, 并据此确定废纸纤维发泡制品的优化配方。以最优配方的材料试样进行静态压缩试验, 探究材料试样的静态缓冲性能, 并使用 Matlab 进行曲线拟合。**结果** 确定了废纸纤维发泡制品的优化配方, 绝干废纸浆、碳酸氢钠、发泡剂 H、淀粉、聚乙烯醇、甘油、碳酸钙、硼砂的质量比约为 32 : 3 : 1 : 0.9 : 0.6 : 4 : 4.5 : 0.2; 最小缓冲系数在 5 左右时, 缓冲性能较好; 可采用正切加双曲正切函数方程拟合该材料试样的静态压缩曲线, 方程的残差平方和为 0.000 451, 其具有较高的精度。**结论** 经过配方优化后, 废纸纤维发泡制品具有较好的静态缓冲性能, 并且可用函数方程较好地拟合其静态压缩曲线。

关键词: 废纸纤维; 配方优化; 静态缓冲; 曲线拟合

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)09-0037-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.09.007

Static Cushioning Performance and Curve Fitting of Waste Paper Fiber Foaming Products

CAO Jing-shan, ZHANG Xin-chang, ZHAO Rui
(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to promote the recycling of packaging waste paper, save natural resources and protect the ecological environment, as well as study the static cushioning performance of the product based on the optimization of the formula of waste paper fiber foaming products, and perform curve fitting. With waste corrugated paperboard and microwave heating foaming technology, the effects of type and proportion of foaming agent and the amounts of glycerol and calcium carbonate on properties of foaming products of waste paper fiber were investigated by orthogonal test. Based on this, the optimum formula of waste paper fiber foaming products was determined. The static compression test of the material sample was carried out with the best formula, the static cushioning performance of the material sample was investigated, and the curve fitting was performed with Matlab. The optimized formulation of waste paper fiber foaming products was determined: the mass ratio of oven dry waste paper pulp, sodium bicarbonate, foaming agent H, starch, polyvinyl alcohol, glycerol, calcium carbonate and borax was about 32 : 3 : 1 : 0.9 : 0.6 : 4 : 4.5 : 0.2. When the minimum cushioning coefficient was about 5, the cushioning performance was better. The static compression curve of the material sample was fitted with tangent and hyperbolic tangent function equation. The residual sum of squares of the equation was 0.000 451, which had high precision. After optimizing the formula, the foaming products of waste paper fiber have better static cushioning performance, and the static compression curve can be fitted well by the function equation.

KEY WORDS: waste paper fiber; formula optimization; static cushioning; curve fitting

收稿日期: 2017-12-08

作者简介: 曹景山 (1992—), 男, 江南大学硕士生, 主攻植物纤维材料与制品。

通信作者: 张新昌 (1961—), 男, 江南大学教授, 主要研究方向为产品包装技术、包装材料与制品。

传统缓冲包装材料存在使用周期短、只能使用一次等缺点,其中发泡塑料在生产和生活中使用范围较广,使用量较大,具有废弃物难降解、高温环境下易生成双酚类有毒有害物质等缺点,存在“白色污染”问题^[1]。基于关税壁垒中的“绿色贸易壁垒”,研发制备对环境友好的“绿色缓冲包装材料”对于解决目前的白色污染问题非常重要^[2]。

随着社会对白色污染重视程度的提高,越来越多的研究人员开始投入到绿色缓冲包装材料的相关研发中。这类缓冲材料是以植物纤维(旧报纸、瓦楞纸板纸和农作物秸秆等)和多种助剂为基材,经原料制备、助剂相混、交联反应、发泡成型、干燥定型等工艺制成。这类缓冲材料的废弃物可生物降解,且对环境无污染,具有制备工序简单、原材料分布广泛、成本低廉、缓冲防护性能较好等特点。

国内外制备植物纤维纤维发泡制品的工艺方法存在较大差别。国外主要采用不添加化学发泡剂^[3-5]的两步法成型工艺,该工艺比采用添加化学发泡剂的工艺方法难度大,优点是制备过程对环境无污染。目前我国在该类材料制造过程中普遍选用的是添加化学发泡剂制备工艺^[6-8],在化学发泡剂作用下最终将原料转变为颗粒型发泡纸浆。从生产过程和效果来看,添加发泡剂之后能够明显提高生产效率和产品质量,但是该种工艺实施过程中如果没有进行合理的后续处理,会对环境造成一定程度的污染,未来这些问题值得进一步的研究和改进^[9]。

随着相关研究的不断深入,部分学者提出了微波高温加热成型技术^[10-11],其基本原理是:将原料置于电磁辐射的环境之中,促进分子层面上的摩擦效应,进而提升材料温度,最终达到发泡的效果。与传统技术相比,该技术能够保证加热过程的均匀性以及生产效率。考虑到原料的来源,在该次研究过程中选择废瓦楞纸板作为原料,利用笔者研究得出的微波发泡设备参数基础上,通过优化配方工艺,研究制得微波条件下纤维发泡样品,并探究其静态压缩性能。

1 材料与方法

1.1 样品的制备

研究中,废纸纤维发泡制品使用的原料主要包括废纸纤维、胶黏剂、发泡剂、增塑剂、交联剂和成核剂等。在对原有配方的分析研究中发现,增塑剂和成核剂的用量对发泡材料性能影响较为显著。通过丙三醇的使用可以有效控制材料的结晶性,提升其塑性和柔韧性;通过碳酸钙的使用能够使得产品的体积更加充实,并且保证其内成分分布的均匀性,形成数量充足的低势能点,降低起泡形成过程中所需能量的阈值,最终达到生泡的效果。

制品发泡过程中,发泡剂能够在化学反应过程中分解为气体,形成各种泡孔;所以发泡剂质量的不同会在制品品质方面有明显的体现。发泡剂选择过程中需要考虑的因素较多,其中反应过程中的分解温度、产气量及是否与其他助剂发生反应都是需要重点考虑的因素。该次研究过程中分别选择了3种无机和有机发泡剂进行对比,对比内容包括分解温度、气体产物和产气量三方面,最终结果见表1—2。

表 1 3 种常用的无机发泡剂
Tab.1 Three common inorganic foaming agents

种类	分解温度/℃	产生气体	产气量/(mL·g ⁻¹)
碳酸铵	40~120	CO ₂ , NH ₃	233
碳酸氢铵	36~60	CO ₂ , NH ₃	393
碳酸氢钠	40~65	CO ₂ , NH ₃	133

表 2 3 种常用有机发泡剂
Tab.2 Three common organic foaming agents

种类	分解温度/℃	产生气体	产气量/(mL·g ⁻¹)
AC 发泡剂	195~200	CO ₂ 、NH ₃	177~220
发泡剂 H	200~205	N ₂	265
AIBN	64 左右	N ₂	136

观察表1和表2可知,无机发泡剂的平均分解温度要普遍低于有机发泡剂,两者平均产气量相差不大。比较3种无机发泡剂,碳酸氢钠发泡温度适宜,性能稳定,保存方便,且价格较低。3种有机发泡剂中,发泡剂H产生气体对环境无害,且单位质量产气量最大。试验将探讨有机发泡剂的单独发泡效果和两者结合的发泡效果,因而选择无机发泡剂碳酸氢钠和有机发泡剂发泡剂H,并设计出有关配方优化的正交试验因素水平见表3。

表 3 配方优化正交试验因素水平
Tab.3 Formula optimization orthogonal experimental factor level

水平	因素		
	发泡剂用量/g	丙三醇用量/g	碳酸钙用量/g
1	发泡剂 H(1.5)	2	1.5
2	发泡剂 H(1)+NaHCO ₃ (3)	4	3
3	发泡剂 H(1.5)+NaHCO ₃ (3)	6	4.5

针对这3个配方成分的用量参数进行优化试验研究。在笔者研究优化出的微波发泡设备工艺参数下,即640 W的微波功率下每次间隔150 s,共4次分段发泡10 min,按照表3进行三因素三水平正交试验,制备9种不同的废纸纤维发泡样品,见图1。

1.2 测试方法

样品发泡倍率的测定。在每个样品边缘选择4个间距相等的测量点,使用精度为0.02 mm游标卡尺,

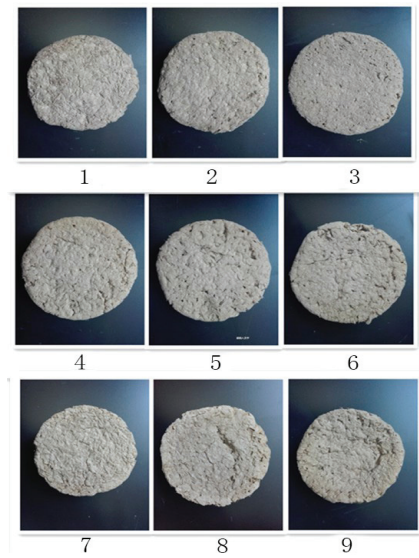


图 1 废纸纤维发泡制品
Fig.1 Waste paper fiber foaming products

测出4个测量点处的厚度值，发泡倍率可由式（1）计算得出，即：

$$\alpha = \frac{d_1}{d_2} \tag{1}$$

式中： α 为试样发泡倍率； d_1 为试样发泡前的平均厚度/mm； d_2 为试样发泡后的平均厚度/mm。

试样的密度 ρ 可由式（2）计算得出。

$$\rho = \frac{m}{L_1 \times L_2 \times d_2} \tag{2}$$

式中： ρ 为试样的密度（ g/cm^3 ）； L_1 为试样的平均长度（ cm ）； L_2 为试样的平均宽度（ cm ）； d_2 为试样发泡后的平均厚度（ cm ）； m 为试样发泡后的质量（ g ）。

根据 GB/T 8168 相关条文的要求对材料进行静态压缩试验，使用的试验仪器为万能材料试验机；试验过程中首先将低速压缩荷载作用于材料的表面上，利用监测数据分析得到其静压缩应力-应变曲线。从而拟合出材料压缩应力关于压缩应变的函数 $\sigma(\varepsilon)$ 。通过对曲线进行转换，计算求取材料的弹性比能。

利用式（3）来计算样品试验过程中的弹性比能：

$$\mu = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \tag{3}$$

试样的残余应变 ε_2 可以由式（4）计算得到，即：

$$\varepsilon_2 = \frac{d^0 - d^1}{d^0} \times 100\% \tag{4}$$

式中： ε_2 为试样的残余应变； d^0 为试样压缩前的平均厚度（ mm ）； d^1 为试样压缩后的平均厚度（ mm ）。

2 试验结果及分析

2.1 配方优化试验

按照表 4 所示进行三因素三水平正交试验，同时为了便于后续研究，利用文中所述的方法对样品进行相应的测试，最终得到样品的不同性能指标。具体结果见表 4。

表 4 配方优化正交试验结果统计
Tab.4 Statistics of formula optimization orthogonal test results

试验编号	试验因素			试验结果			
	发泡剂	丙三醇	碳酸钙	发泡倍率	密度/（ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）	弹性比能/（ $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）	残余应变/%
1	1	1	1	1.043	0.1831	0.1696	8.56
2	1	2	2	1.175	0.1743	0.1570	8.97
3	1	3	3	1.104	0.1866	0.1521	8.69
4	2	1	2	1.612	0.0947	0.1238	11.06
5	2	2	3	1.574	0.0921	0.0973	10.38
6	2	3	1	1.529	0.1144	0.0843	11.73
7	3	1	3	1.393	0.1182	0.1247	11.58
8	3	2	1	1.463	0.1130	0.1153	10.97
9	3	3	2	1.428	0.1218	0.1083	11.61

得到不同配方工艺下样品的性能指标后，从全面和综合的角度出发，确定样品不同评价指标的权重，其中发泡率权重为 10%，产品密度、弹性比能和残余应变的权重分别为 30%^[12]，最终 9 种不同配方制得样品试验结果总分见表 5，得分最高的为 5 号配方制得的样品。

由总分极差分析表 6 可知，表 6 中所列 3 种配方生成的发泡材料综合性能存在明显的差异，影响制品

综合性能的大小为发泡剂>丙三醇>碳酸钙。

3 个因素中发泡剂对发泡制品综合性能影响最大，特别是种类和剂量，相较于单独使用有机发泡剂 H，混合使用无机发泡剂和有机发泡剂能使废纸纤维发泡制品的发泡效果更好，而有机发泡剂的比例过多，会导致泡孔质量难以控制产生崩塌。丙三醇对于其影响因素为剂量，随着丙三醇用量的增加，纤维发泡制品的综合性能先升高再降低，丙三醇用量过少使

表5 配方优化正交试验结果评分

Tab.5 Scores of formula optimization orthogonal test results

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
分数	41.11	40.00	42.22	66.67	85.56	61.11	44.44	66.67	48.89

表6 总分极差分析

Tab.6 Total score range analysis

项目	因素		
	发泡剂	丙三醇	碳酸钙
水平1 均值	41.11	50.74	56.30
水平2 均值	71.11	64.08	51.85
水平3 均值	53.33	50.74	57.41
极差 R	30.00	13.34	5.56

发泡制品过硬,用量过多会使发泡制品过软,因此将丙三醇用量控制在4 g左右;碳酸钙用量为4.5 g时发泡制品的综合性能最高。

综上所述,确定了废纸纤维发泡制品的优化配方,绝干废纸浆、碳酸氢钠、发泡剂H、淀粉、聚乙烯醇、甘油、碳酸钙、硼砂的质量比约为32:3:1:0.9:0.6:4:4.5:0.2。

2.2 静态压缩性能试验

由以上综合评价分析可知,正交试验5号配方制得样品综合性能评价得分最高,故以5号配方制得一批材料试样进行静态压缩试验,并将试验数据求均值进行分析。

材料试样使用万能材料试验机进行静态压缩试验(见图3)所得应力-应变曲线见图4。由图4知,材料试样的应力-应变曲线类似于正切函数型弹性材料,根据分析可以得出试样的应力随着应变量的逐渐增加而慢慢变大;当超过材料的弹性极限时,应力急剧增加,此时的试样趋于逐渐压实的情况。

根据试验数据,利用Origin9.1积分功能,得到不同应变下应力积分,然后利用式(5)可求得材料试样缓冲系数。绘制出材料试样的缓冲系数-最大应力($C-\sigma_m$)曲线(图5)。



图3 样品静态压缩试验

Fig.3 Static compression test of samples

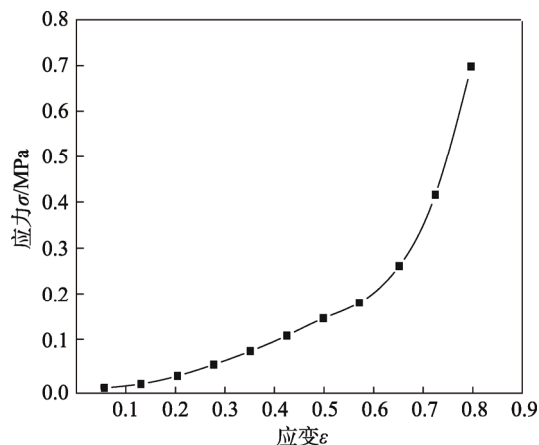
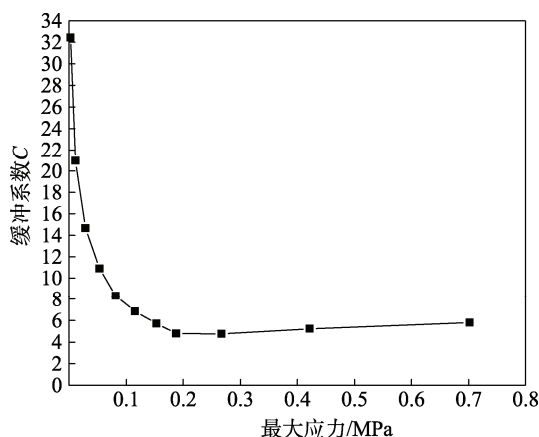


图4 样品应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of sample

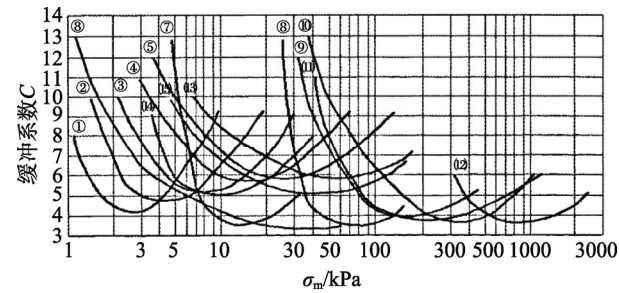
图5 样品的 $C-\sigma_m$ 曲线Fig.5 $C-\sigma_m$ curve of samples

$$C = \frac{\sigma}{\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon} \quad (5)$$

缓冲系数-最大应力($C-\sigma_m$)曲线应用较为广泛^[4],可以利用此曲线进行缓冲包装设计。故同时引入几组常用缓冲包装材料的 $C-\sigma_m$ 曲线(图6)与该试验样品得出的曲线(图5)作比较,以研究其实用性能。

由于缓冲系数是缓冲效率的倒数,缓冲系数越小,则缓冲效率越高,缓冲材料能承受的变形能就越大。由图5可以得知,对于废纸纤维发泡制品,随着应力的变化,其缓冲系数存在明显的变化。样品的缓冲系数随着应力的增大而减小,并在减小到5后逐渐趋于稳定,即该材料的最小缓冲系数在5左右,缓冲性能较好。

通过与其他常用缓冲包装材料 $C-\sigma_m$ 曲线(图6)的比较后可以发现,试验样品的最小缓冲系数与常用缓冲包装材料的最小缓冲系数相差幅度较小,且与⑤人造纤维100(密度 0.050 g/cm^3)最为接近。材料试样的最小缓冲系数与目前国内常用的发泡聚苯乙烯缓冲材料相比,数值相差不大;而在最小缓冲系数 C 下,材料试样对应的最大应力 σ_m 比发泡聚苯乙烯类缓



①发泡聚苯乙烯(密度 0.014 g/cm³); ②发泡聚苯乙烯(密度 0.020 g/cm³); ③发泡聚苯乙烯(密度 0.033 g/cm³); ④发泡聚苯乙烯(密度 0.035 g/cm³); ⑤人造纤维 100(密度 0.050 g/cm³); ⑥人造纤维 150(密度 0.06 g/cm³); ⑦人造纤维 200(密度 0.08 g/cm³); ⑧聚氨酯泡沫(密度 0.03 g/cm³); ⑨聚氨酯泡沫醚密度(0.03 g/cm³); ⑩发泡氯乙烯(密度 0.31 g/cm³); ⑪发泡氯乙烯(密度 0.42 g/cm³); ⑫泡沫橡胶; ⑬木屑密度(0.07 g/cm³); ⑭发泡聚氯乙烯碎屑(密度 0.08 g/cm³); ⑮塑料碎屑(密度 0.087 g/cm³)

图 6 几种常见缓冲包装材料的 C-σ_m 曲线^[13]

Fig.6 C-σ_m curve of several common cushioning packaging materials

冲材料大。在缓冲包装设计中，同一产品和流通环境下，所使用的缓冲包装材料的厚度与C成正比，缓冲材料的面积与σ_m成反比，因此在2种材料都符合产品的缓冲要求情况下，相比于常规发泡聚苯乙烯类缓冲材料，使用废纸纤维发泡材料可以节约缓冲材料的用量。

3 静态压缩试验结果的曲线拟合

对现有的研究成果进行分析总结得出，目前采用力学模型对植物纤维发泡材料的缓冲性能方面研究的案例和成果较为有限。该次研究过程中以经典力学模型作为基础理论^[15]，同时根据制备样品的具体特性，对其静态压缩模型方程进行了合理性假设，并根据样品试验的数据对曲线进行了拟合，得到最终的特征方程，从而最大程度上对试验材料的静态压缩特性进行描述。

截至目前，多种经典力学模型已经得到了学术界的广泛认可，根据曲线方程的不同可以分为 5 种，分别为线性型、双直线型、三次型、正切型和双曲正切型。下面分别用多项式和正切加双曲正切函数曲线拟合应力-应变数据。

首先选择使用多项式拟合法^[16]，其应用范围较广，具体实现过程为：首先确定阶数 n，假设模拟后应力的精度范围要求误差平方和小于 0.001，通过 Matlab 的 polyval 函数设计程序计算，得出 n=4，因此，对于材料试样的静态应力-应变试验数据，采用 4 阶多项式进行拟合处理，即可达到精度要求。具体方程形式见式（6）。

$$\sigma = a_1 \varepsilon^4 + a_2 \varepsilon^3 + a_3 \varepsilon^2 + a_4 \varepsilon + a_5 \tag{6}$$

其计算原理为：利用 Matlab 对试验所得数据进

行多项式函数拟合处理，其中调用的函数为 polyfit，其参数包括 ε, σ 和 n，最终计算得到一个确定幂次对应的多项式的最小二乘系数（a₁-a₅）。该次计算过程中 n=4，计算参数 ε 和 σ 都为试样的测试值，结果见表 7。

表 7 多项式拟合发静态应力-应变曲线参数值
Tab.7 Polynomial fitting static stress-strain curve parameter values

a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
12.875	-17.521	8.3317	-1.2147	0.052 169

根据试验所得数据和拟合得出的多项式方程分别绘制曲线，具体结果见图 7，拟合曲线不仅在突变点拟合较差，曲线其余部分离实测值也有明显的差距。

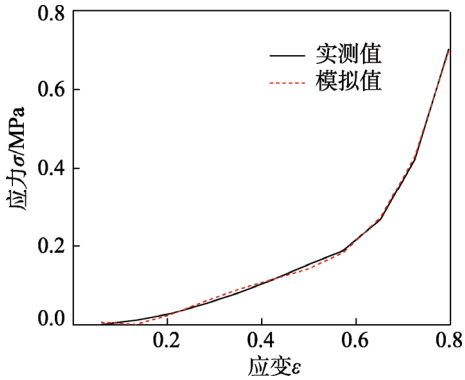


图 7 多项式拟合衬垫静态应力-应变曲线
Fig.7 Polynomial fitting liner static stress-strain curve

由以上可知，采用多项式函数拟合结果较差，故对试验数据进行分析可见，该次研究材料试样的静态压缩应力-应变曲线与既有的力学模型之间还有明显的差异，无法按照某种既定的模型进行分析，但是分割开来进行分析，部分曲线分别与正切和双曲正切型相符合，故判定其理论曲线为多种模型的综合。鉴于此，选择 2 种力学模型的组合作为其理论曲线方程，具体见式（7）。

$$\sigma = a_1 \tanh(a_2 \varepsilon) + a_3 \tan(a_4 \varepsilon) \tag{7}$$

式中：a₁, a₂, a₃ 和 a₄ 4 个参数为常数，其取值随着材料弹性特性的变化而变化。当材料确定时，根据参数的具体取值使得方程 7 中的双曲正切函数能够很好的代表曲线中的平缓部分，而用正切函数代表其中较陡的部分。

选择非线性最小二乘法对式（7）确定的曲线进行拟合，在 Matlab 环境下进行具体的计算，其中曲线定义过程和拟合识别过程分别由自带的 Function 和 lsqnonlin 函数完成^[17-18]，以材料试样的应力-应变试验数据为输入。最终拟合结果见式（8），方程的残差平方和为 0.000 451。

$$\sigma = -0.021433 \tanh(13.011\varepsilon) + 0.14291 \tan(1.7283\varepsilon) \quad (8)$$

将式(8)带入材料试样应变取值,并以此作图得到其应力-应变计算值曲线,具体结果见图8。其中,圆滑曲线表示计算值,散点线表示试验值。对图8的拟合程度进行分析,可见用该拟合公式,其应力大小的理论计算值和实测值基本一致,整个曲线所代表方程的残差平方和较小。该次拟合所得特征方程能够很好地反映实际情况,精度较高。

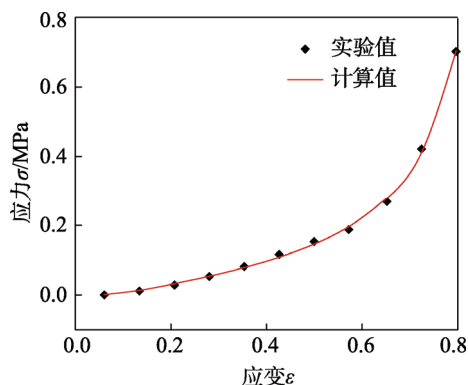


图8 正切和双曲正切函数拟合曲线

Fig.8 Tangent and hyperbolic tangent function fitting curve

对纸浆发泡制品材料试样的正切和双曲正切函数拟合曲线进行分析,结果显示:其应力与应变之间为明显的正相关关系,但是其增加速率随着应变的变化有所不同。可据此将曲线分为3个区段,第1区段曲线中材料的应变相对较小,其特性能够通过双曲正切函数进行良好的反映;第2区段曲线中材料的应变相对较大,同时应力的增长率也在不断提高;在第3区段应变应力几乎是呈直线上升,可记第2区段与第3区段交界处为压缩应变极限。

4 结语

确定了废纸纤维发泡制品的优化配方,绝干废纸浆、碳酸氢钠、发泡剂H、淀粉、聚乙烯醇、甘油、碳酸钙、硼砂的质量比约为32:3:1:0.9:0.6:4:4.5:0.2。

材料试样最小缓冲系数在5左右,缓冲性能较好,其最小缓冲系数与常用缓冲包装材料相差幅度比较小;并且在最小缓冲系数C下,材料试样对应的最大应力 σ_m 比发泡聚苯乙烯类缓冲材料大,相同条件下可以节约缓冲材料的用量。

与多项式方程拟合相比,正切和双曲正切函数作为拟合方程进行拟合时,某一应变对应应力大小的理论计算值和实测值基本一致,整个曲线所代表方程的残差平方和较小,其拟合所得特征方程能够很好地反映实际情况,方程的残差平方和为0.000 451,精度较高。

参考文献:

- [1] 莫迎华. 塑料废弃物的综合治理研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2016, 33(1): 89—92.
MO Ying-hua. Research Progress of Comprehensive Treatment of Waste Plastics Pollution[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2016, 33(1): 89—92.
- [2] 戴宏民, 戴佩燕, 周均. 欧盟新绿色壁垒的主要内容和特点及对策[J]. 包装学报, 2013, 5(1): 43—47.
DAI Hong-min, DAI Pei-yan, ZHOU Jun. The Main Contents, Characteristics of the New EU Green Barriers and Countermeasures[J]. Packaging Journal, 2013, 5(1): 43—47.
- [3] MORIANA R, VILAPLANA F, KARLSSON S, et al. Improved Thermo-mechanical Properties by the Addition of Natural Fibres in Starch-based Sustainable Biocomposites[J]. Composites: Part A, 2011, 42(1): 30—40.
- [4] SVAGAN A J, JENSEN P, DVINSKIKH S V, et al. Towards Tailored Hierarchical Structures in Cellulose Nano-composite Biofoams Prepared by Freezing/Freeze-drying[J]. Materials Chemistry, 2010, 20(31): 6646—6654.
- [5] NOGUCHI T, MIYASHITA M, INAGAKI Y, et al. A New Recycling System for Expanded Polystyrene Using a Natural Solvent Part 1 A New Recycling Technique[J]. Packaging Technology & Science, 2015, 11(1): 19—27.
- [6] 吴振增, 魏起华, 谢拥群, 等. 植物纤维基发泡材料中有机-无机两相杂化效果表征[J]. 福建林学院学报, 2014, 34(3): 283—288.
WU Zhen-zeng, WEI Qi-hua, XIE Yong-qun, et al. Characterization of Organic-inorganic Two Phase's Hybridized Effect in Plant Fiber-based Foam Materials[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2014, 34(3): 283—288.
- [7] 张磊蕾, 吴春丽, 王爱军, 等. 利用植物秸秆制备轻质填充材料的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(1): 104—108.
ZHANG Lei-lei, WU Chun-li, WANG Ai-jun, et al. Experimental Research on Lightweight Filler Materials Prepared by Plant Straw[J]. New Building Materials, 2017, 44(1): 104—108.
- [8] 陈玉芬, 钱怡, 孙昊, 等. 混合植物纤维缓冲包装材料的制备工艺研究[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(3): 10—13.
CHEN Yu-fen, QIAN Yi, SUN Hao, et al. Research on Preparation Technology of Mixed Plant Fiber Cushion Packaging Material[J]. Packaging and Food Machinery, 2015, 33(3): 10—13.
- [9] ZHANG C W, LI F Y, LI J F, et al. A New Biodegradable Composite with Open Cell by Combining Modified Starch and Plant Fibers[J]. Materials & Design, 2017, 120(15): 222—229.
- [10] 万翔, 刘东立, 郎美东. 微波发泡制备三聚氰胺甲醛

- 泡沫塑料及其性能[J]. 功能高分子学报, 2013, 26(2): 156—161.
- WAN Xiang, LIU Dong-li, LANG Mei-dong. Preparation and Properties of Melamine-Formaldehyde Deform by Microwave Foaming[J]. Journal of Functional Polymers, 2013, 26(2): 156—161.
- [11] 陈玉芬, 钱怡, 孙昊. 一种新型植物纤维发泡缓冲材料制备研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(5): 243—245.
- CHEN Yu-fen, QIAN Yi, SUN Hao. Research on the Preparation of A New Plant Fiber Foaming Cushion Material[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(5): 243—245.
- [12] 张惠莹, 张晶, 江兴亮, 等. NaOH 预处理对废纸纤维发泡材料性能的影响[J]. 包装学报, 2012, 14(3): 11—15.
- ZHANG Hui-ying, ZHANG Jing, JIANG Xing-liang, et al. Influence of Pretreatment with NaOH on Property of Waste Paper Fiber Foamed Material[J]. Packaging Journal, 2012, 14(3): 11—15.
- [13] 潘小青. 木质剩余物缓冲包装材料的力学性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- PAN Xiao-qing. Study on the Mechanical Properties of Wood Residues Cushion Packaging Material[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [14] 彭国勋. 物流运输包装设计(第2版)[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2011.
- PENG Guo-xun. Packaging Design for Logistics and Transportation(The Second Edition)[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2011.
- [15] 张书彬, 袁利军. 一种植物纤维发泡材料的静态力学性能研究[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 63—67.
- ZHANG Shu-bin, YUAN Li-jun. Static Mechanical Performance of A Plant Fiber Foaming Material[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 63—67.
- [16] 汤跃, 肖妹, 汤玲迪. 泵性能测试曲线分段最小二乘多项式拟合算法[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(9): 744—748.
- TANG Yue, XIAO Mei, TANG Ling-di. Piecewise Least Squares Polynomial Curve Fitting Algorithm for Tested Pump Performance Data[J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2017, 35(9): 744—748.
- [17] HUNTUL M J, LESNIC D. An Inverse Problem of Finding the Time-dependent Thermal Conductivity from Boundary Data[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2017, 85: 147—154.
- [18] 陈静, 陈柯, 霍雨佳, 等. 提高核电厂反应堆冷却剂系统旁路温度测量精度的方法[J]. 核动力工程, 2015, 36(2): 93—95.
- CHEN Jing, CHEN Ke, HUO Yu-jia, et al. Method to Improve Measurement Accuracy for Bypass Temperature of Reactor Coolant System in Nuclear Power Plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(2): 93—95.