

包装材料

竹纤维/淀粉发泡复合材料制备及性能研究

赵月圆¹, 鄂玉萍^{1,2}, 蒋玥彤¹

(1. 浙江理工大学, 杭州 310018;

2. 纺织纤维材料与加工技术国家地方联合工程实验室, 杭州 310018)

摘要: **目的** 研究竹纤维/淀粉发泡复合缓冲材料的制备方法, 分析组分含量变化对发泡材料力学性能的影响规律, 确定最佳的组分配比和最佳配比条件下竹纤维/淀粉发泡复合材料的能量吸收性能。 **方法** 将按一定比例配置的竹纤维、淀粉、碳酸氢铵、丙三醇和水置于模具中, 采用烘焙发泡法制备竹纤维/淀粉发泡复合材料, 并从能量吸收的角度分析了发泡剂、胶黏剂、增塑剂对竹纤维/淀粉复合发泡材料缓冲性能的影响规律, 从而确定各组分的最优配比。 **结果** 随着发泡剂和淀粉含量的增加, 竹纤维/淀粉发泡复合材料的平台应力和总吸收能量呈现出先增加后减小的趋势, 增塑剂含量的增加可改善制品的弹塑性, 但降低了制品的平台应力和能量吸收能力; 竹纤维、淀粉、水、碳酸氢铵、丙三醇最佳质量比为1:2:3:1:0.8。 **结论** 最佳质量配比条件下的竹纤维/淀粉发泡复合材料具有一定的缓冲吸能效果, 其静态缓冲性能与EPS接近, 可用于产品的物流防护。

关键词: 竹纤维; 发泡材料; 能量吸收

中图分类号: TB485.1; TB484.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2016)09-0001-06

Preparation and Properties of Bamboo Fiber/Starch Foam Composites

ZHAO Yue-yuan¹, E Yu-ping^{1,2}, JIANG Yue-tong¹

(1. Zhejiang Sci-Tech University College, Hangzhou 310018, China; 2. National & Local United Engineering Laboratory of Textile Fiber Materials and Processing Technology, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: Preparation and performance of bamboo fiber/starch foam composites were studied in this paper. The influencing law of different component contents on the mechanics and properties of the foam materials was analyzed, in order to determine the energy absorption performance of bamboo fiber/starch foam composites prepared under the optimal composition and conditions. Bamboo fiber, starch, ammonium bicarbonate, glycerol and water were mixed at a certain ratio to prepare bamboo fiber/starch foam composites using baking foaming method, and the influencing law of the contents of foaming agent, starch and plasticizer on the performance of the bamboo fiber/starch foam materials was explored from an energy absorption standpoint, thus the optimal foaming condition was determined. With increasing foaming agent and starch contents, the plateau stress and total energy absorption capability showed a tendency of first increasing and then decreasing. The increasing content of plasticizer could improve the plasticity of the product, but reduce the plateau stress and energy absorption capability of the product. The optimal ratio of bamboo fiber:starch:demonized water:ammonium bicarbonate:glycerol was determined to be 1:2:3:1:0.8. The bamboo fiber/starch foam composites prepared under the optimal condition had a certain cushioning energy absorption capacity, and its static cushioning performance was similar to that of EPS. Therefore, the composites could be used in logistics protection of products.

KEY WORDS: bamboo fiber; foam materials; energy absorption

收稿日期: 2015-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(51303160); 浙江理工大学521人才培养计划; 产品包装与物流广东普通高校重点实验室开放基金(1101712-N); 浙江省高校重中之重学科优秀青年人才培养基金(2014YXQN04)

作者简介: 赵月圆(1990—), 女, 河南周口人, 浙江理工大学本科生, 主攻缓冲包装。

通讯作者: 鄂玉萍(1982—), 女, 河南南阳人, 博士, 浙江理工大学讲师, 主要研究方向为环保缓冲包装材料性能。

泡沫塑料普遍应用带来的白色污染和石油匮乏正日益受到社会广泛关注,开发新型可降解绿色包装材料成为当前的研究热点。淀粉和植物纤维都是可降解材料研究和应用的重要原料^[1]。以天然淀粉或改性淀粉为基体,添加发泡剂/发泡助剂及其他助剂制备的发泡材料,存在材料表面粗糙、膨胀率低、回弹性差等问题,通过添加各种增强纤维制备的纤维/淀粉发泡复合材料可以克服上述缺陷,目前国内外学者已经对采用玉米秸秆^[2]、废纸纤维^[3-5]、蔗渣^[6]、黄麻/亚麻纤维^[7]、杂交狼尾草^[8]、中药残渣^[9]等制备各种发泡淀粉复合缓冲材料的配方、工艺及性能进行了研究。竹纤维是植物纤维中的一大类,可作为增强体系制备发泡缓冲材料^[10],也可拓展竹纤维的新用途。文中从能量吸收的角度探究各组分含量和工艺参数等对竹纤维/淀粉发泡复合材料的力学和缓冲性能的影响,确定最佳的组分配比和工艺参数。

1 实验

1.1 材料

材料:竹纤维,采用竹浆纤维,本色半化学浆,英德市创美秸秆纤维有限公司提供;淀粉,小麦淀粉,食用级,重庆市华友商贸有限责任公司;碳酸氢铵,分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;丙三醇,分析纯,杭州高晶精细化工有限公司。

1.2 试样制备

1) 竹纤维预处理。为了消除水分对发泡效果的影响,实验前先将竹浆纤维原料放入鼓风干燥箱(DHG-9140A,上海精宏实验设备有限公司)中于75℃烘干2h;同时为了使纤维原料在制品体系内分布更加均匀,使用高速万能粉碎机(DFT-50型,温岭市林大机械有限公司)对纤维进行粉碎处理,转速25 000 r/min,粉碎时间为20 s。利用质量分数为7%的NaOH溶液浸泡竹浆纤维原料2h后清洗至中性,室温下干燥备用。

2) 竹纤维/淀粉发泡复合材料制备工艺。向预糊化后的胶黏剂中依次加入称量好的发泡剂、增塑剂、竹纤维等,搅拌均匀;将经过充分搅拌的混合物料放入自制模具中,并将其压实整平;将其放入电蒸锅内,在100℃下发泡20 min;待实验样品发泡完全,将其取出,冷却脱模;脱模后,再将样品放入鼓风干燥箱中,在65℃条件下干燥20 min,去除其表面多余的水分,再取出置于通

风处干燥,即可得到竹纤维/淀粉发泡复合材料。

1.3 性能测试

1) 表观密度。参考GB 8168—2008的测定方法:用游标卡尺测量发泡缓冲材料的长度、宽度及厚度,用精度为0.01 g以上的天平测量发泡材料的质量,再根据式(1)计算得到样品的密度。

$$\rho = \frac{m}{L_1 L_2 t} \quad (1)$$

式中: ρ 为样品密度(g/mm³); m 为样品的质量(g); L_1 为样品长度(mm); L_2 为样品宽度(mm); t 为样品厚度(mm)。

2) 发泡倍率。发泡倍率为试样发泡前后的体积之比。由于该实验中试样是在圆形模具中进行半自由发泡,试样只能沿模具壁向上膨胀,因此试样的发泡倍率可简单认为是发泡前后试样的厚度之比:

$$\alpha = \frac{t_a}{t_b} \quad (2)$$

式中: α 为试样的发泡倍率; t_b 为试样发泡之前的厚度(mm); t_a 为试样发泡之后的厚度(mm)。

3) 静态压缩实验。实验前参照GB 4857.2—2005对试样进行预处理(30℃,相对湿度85%条件下预处理24 h),将预处理后的试样置于万能材料试验机(RGL-20A,深圳市瑞格尔仪器有限公司)下压板中心,设定上压板以(12±3) mm/min的速度对试样施加压力,每个试样进行5次重复实验得到平均载荷-位移数据。发泡复合材料试样在压缩过程中的泊松效应不明显,因此可根据以下公式将载荷-位移数据转换成工程应力-工程应变数据:

$$\sigma = F(t)/A \quad (3)$$

$$\varepsilon = x(t)/t_0 \quad (4)$$

式中: $F(t)$, $x(t)$ 分别为实验过程中记录的载荷和位移数据; A , t_0 分别为试样的横截面积和原始厚度。

根据应力-应变曲线可求取发泡复合材料的平台应力(近似平台阶段应力的均值)、密实化应变(平台阶段与密实化阶段交接处对应的应变,通常借助2个阶段曲线切线的交点来确定^[12-13])和单位体积总吸收能量(应力-应变曲线下包围的面积,可采用数值积分的方法,利用编译好的Matlab程序计算得出^[14])。

2 竹纤维/淀粉发泡复合材料性能影响因素研究

2.1 发泡剂的影响

发泡剂是控制发泡材料的密度及结构形态的决

定因素,最终决定发泡材料的使用性能^[15]。发泡剂的种类按照发泡原理可分为物理发泡剂和化学发泡剂,化学发泡剂又可分为有机发泡剂和无机发泡剂。考虑发泡剂的环保性和发泡效果,研究选择使用无机发泡剂 NH_4HCO_3 进行发泡。

为探讨发泡剂用量对发泡效果和发泡材料性能的影响,实验研究了发泡剂与纤维原料质量比分别为 0.6:1, 0.8:1, 1:1, 1.2:1 和 1.4:1 时的发泡效果。实验得到 NH_4HCO_3 分别为 3, 4, 5, 6, 7 g, 竹纤维 5 g, 淀粉 10 g, 水 15 mL, 丙三醇 4 mL 时,制备的竹纤维/淀粉发泡复合材料的主要力学性能见表 1。

表 1 不同发泡剂含量对发泡制品的影响

Tab.1 Effect of different foaming agent contents on the foaming product

发泡剂与纤维原料质量比	制品密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	发泡倍率	平台应力/ ($\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$)	密实化应变	单位体积总吸收能量/ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)
0.6:1	0.50	1.60	1.99	0.69	11 929
0.8:1	0.49	1.84	2.65	0.67	13 720
1:1	0.47	1.98	2.97	0.64	15 232
1.2:1	0.45	2.13	2.02	0.53	55 004
1.4:1	0.42	2.35	1.57	0.63	48 423

由表 1 可知,随着发泡剂含量的增加,制品密度逐渐减小,相应的发泡倍率逐渐增加,这是因为发泡剂 NH_4HCO_3 在适当温度下可分解产生大量气体,为制备发泡竹纤维/淀粉发泡复合材料提供气泡向外膨胀的动力。当发泡剂含量较少时,产生的气体量偏少,因此气泡膨胀动力较小,导致气泡向外膨胀受阻,气泡直径小,发泡制品密度相对较大。产气量随着发泡剂含量的增加而增加,气泡膨胀动力增加,泡孔直径逐渐增大,制品密度逐渐降低而发泡倍率逐渐提高。但当其添加量过大时,产生大量的气体导致熔体强度大大降低,泡孔膨胀动力大于膨胀阻力,导致气泡稳定性降低,增加了泡孔发生破裂或合并的可能性,所制备的发泡材料虽然密度较小,但由于泡孔塌陷、并泡分层而导致材料力学强度和缓冲效果受到严重影响。不同发泡剂含量制备的发泡材料横切面泡孔形态印证了上述规律,见图 1。

由表 1 还可以看出,竹纤维/淀粉发泡复合材料的平台应力和总吸收能量随着发泡剂添加量的增加,均呈现出先增加后减小的趋势。其原因是,当发泡剂添加量较少时,发泡材料的泡孔较少,密度较大,材料质感较硬,在压缩时其应力平台较低,吸收的能量较少;当发泡剂添加量过大时又造成泡孔的塌陷和合并,不

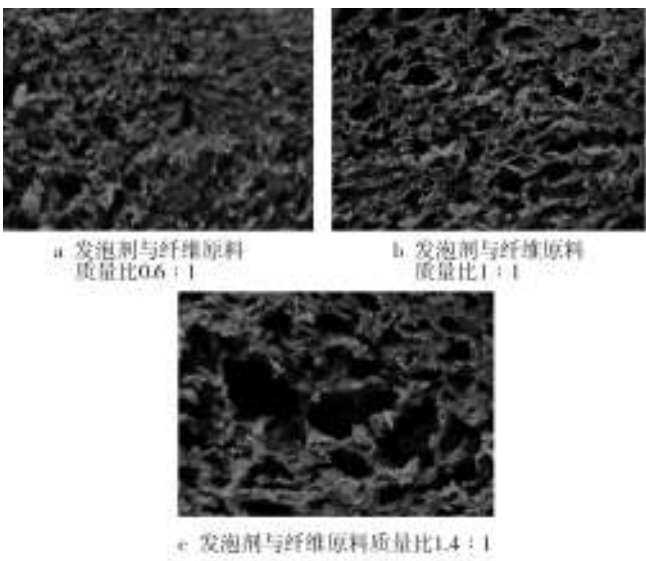


图 1 发泡剂用量对发泡效果的影响

Fig.1 Influence of foaming agent content on foaming result

利于其平台应力和总吸收能量的提高,因此,发泡剂含量适当才有利于制得的发泡材料力学性能和能量吸收性能的提高。结合表 1 和图 1 可知,在发泡剂与纤维原料质量比为 1:1 时出现平台应力和单位体积总吸收能量的最大值,此时发泡材料的泡孔较多,且较为均匀。

由图 2 亦可知,发泡剂与纤维原料质量比为 1:1 和 1.2:1 时的应力-应变曲线几近重合,均位于其他各条曲线之上,具有较高的应力平台和更好的承载性能,能够在近乎恒定的应力作用下持续发生变形而吸收能量,缓和冲击。从成本和发泡效果综合考量,可优选发泡剂与纤维原料质量比为 1:1 的发泡剂最佳用量。

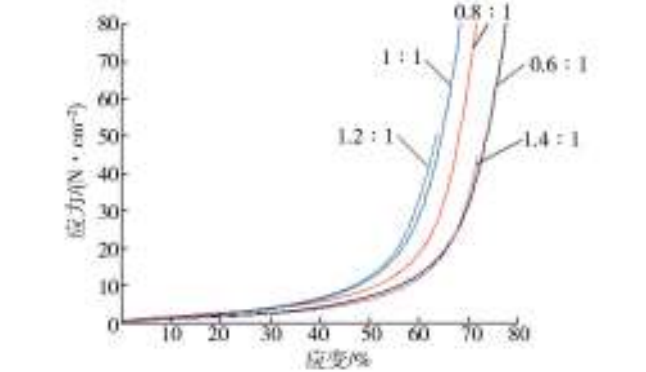


图 2 不同发泡剂含量样品的应力-应变曲线

Fig.2 The stress-strain curves of specimens fabricated with different contents of foaming agent

2.2 胶黏剂的影响

胶黏剂主要作用在于将体系内的纤维相互粘合

形成网络,使其在泡孔膨胀过程中能够承受气体的膨胀压力,并最终形成均匀分布的稳定泡孔结构,因此胶黏剂的含量对发泡材料的发泡效果和性能极为重要。前期实验研究发现,既要保证混合物料具有一定的黏度还要保证各助剂均匀分散,配置胶黏剂时淀粉与水的最佳质量比为2:3,即配置质量分数为40%的淀粉溶液进行预糊化后即得实验所需的胶黏剂。

为探讨淀粉用量对发泡效果和发泡材料性能的影响,实验研究了淀粉与纤维原料质量比分别为1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1和3:1时发泡材料的发泡效果。实验得到当淀粉含量分别为5, 7.5, 10, 12.5, 15 g, NH_4HCO_3 为5 g, 竹纤维5 g, 丙三醇4 mL时,制备的竹纤维/淀粉发泡复合材料的主要力学性能见表2。

由表2可知,随着淀粉含量的增加,制品的表观密

表2 不同淀粉含量对发泡制品的影响
Tab.2 Effect of different starch contents on the foaming product

淀粉与纤维 原料质量比	表面 状态	截面 状态	制品密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	发泡 倍率	平台应力/ ($\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$)	密实化 应变	单位体积总吸收 能量/($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)
1:1	不平整、有开裂	截面不均匀、气孔很少	0.73	1.17	1.65	0.29	8432.8
1.5:1	较平整、较均匀	截面较质密、少量气孔	0.55	1.48	1.96	0.59	8354.1
2:1	表面平整均匀	截面均匀,质疏松,气孔较多且大小适宜	0.47	1.87	2.65	0.64	15 232
2.5:1	表面平整、较柔软	截面稍有团聚,稍有空	0.40	1.96	1.51	0.75	12 366
3:1	柔软	截面团聚较大,内部有空	0.36	2.25	0.99	0.64	45 861

度逐渐减少而发泡倍率逐渐增加,平台应力和单位体积总吸收能量则随着淀粉含量的增加而呈现出先增加后减少的趋势。当淀粉含量较少时,粘结强度有限,原材料之间不能有效连结,造成发泡体系无法形成,制品较松散,泡孔也较少。随着淀粉含量增加,竹纤维之间的连结增强,基体网状结构形成较好,泡孔较多也较均匀,制品发泡效果良好,承载和吸收能量的能力逐渐增加。当淀粉用量过大时,竹纤维与淀粉之间粘结较严重,网状结构的空隙被胶黏剂所占,气体无法进入形成泡孔,发泡效果不理想,同时淀粉用量增加使得竹纤维之间的交织点减少,胶黏剂不能很好发挥其粘接作用,反而造成材料内部分层,泡孔分布不均匀,材料的整体压缩性能下降,缓冲性能不佳。结合表2可知,在淀粉与纤维原料质量比为2:1时,平台应力值和单位体积总吸收能量均达到最大值,发泡效果亦为最佳。

由图3亦可知,淀粉与纤维原料质量比为1:1时的应力-应变曲线位于其他各条曲线之上,然而该制品的应力平台较短且应力随应变的增加而急剧增加,密实化应变较小,吸收的能量也极为有限。而淀粉与纤维质量比为2:1时,制品的应力-应变曲线具有更好的承载性能和能量吸收性能,此时发泡效果也为最佳,泡孔均匀,较少出现泡孔塌陷、合并的现象。

2.3 增塑剂的影响

由于竹纤维以及淀粉分子之间氢键结合紧密,所制备的发泡材料完全干燥后较硬较脆,柔韧性不佳,

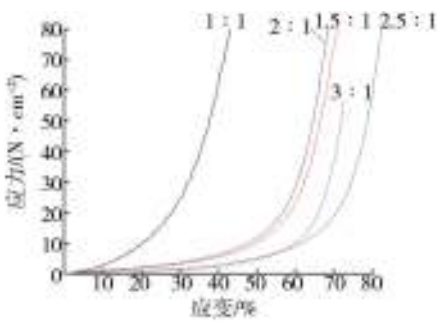


图3 不同淀粉含量样品的应力-应变曲线
Fig.3 The stress-strain curves of specimens fabricated with different content of starch

因此选用一些多元醇作为增塑剂,有利于增加物料的流动性,有助于气泡成长和扩散,形成均匀稳定的泡孔,提高定型后材料的弹性和柔韧性。本实验中选用丙三醇作为增塑剂,并继续采用控制变量法研究增塑剂与纤维原料质量比分别为0:1, 0.2:1, 0.4:1, 0.6:1, 0.8:1, 1:1, 1.2:1和1.4:1时的发泡效果。实验得到丙三醇含量分别为0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 mL, NH_4HCO_3 为5 g, 竹纤维5 g, 淀粉10 g, 水15 mL时,制备的竹纤维/淀粉发泡复合材料的主要力学性能见表3。

由表3可知,随着丙三醇添加量的增加,发泡材料的密度呈现出先增大后减小的趋势。产生这种变化的原因在于,当丙三醇用量较少时,增塑效果不明显,而增塑剂的增加使得材料质量增加,从而导致发泡体密度的增加。随着丙三醇用量的增加,增塑效果逐渐明显且有效,材料变得柔软且发泡均匀适当,发泡倍率也随之增加,发泡制品的缓冲性能达到最佳。丙三

表3 不同增塑剂含量对发泡制品的影响

Tab.3 Effect of different plasticizer contents on the foaming product

增塑剂与纤维原料质量比	制品密度/ (g·cm ⁻³)	发泡倍率	平台应力/ (N·cm ⁻²)	密实化应变	单位体积总吸收能量/ (kJ·m ⁻³)
0:1	0.38	1.49	19.75	0.65	59 688
0.2:1	0.41	1.71	10.28	0.70	46 668
0.4:1	0.45	1.86	6.62	0.67	36 916
0.6:1	0.51	1.96	4.70	0.67	35 952
0.8:1	0.57	2.03	4.79	0.73	15 232

醇含量过大则导致发泡体系内部网状结构不稳定,甚至出现泡孔塌陷,材料缓冲性能受到严重影响。由图4可知,不同增塑剂含量制备的发泡材料横切面泡孔形态印证了上述规律。

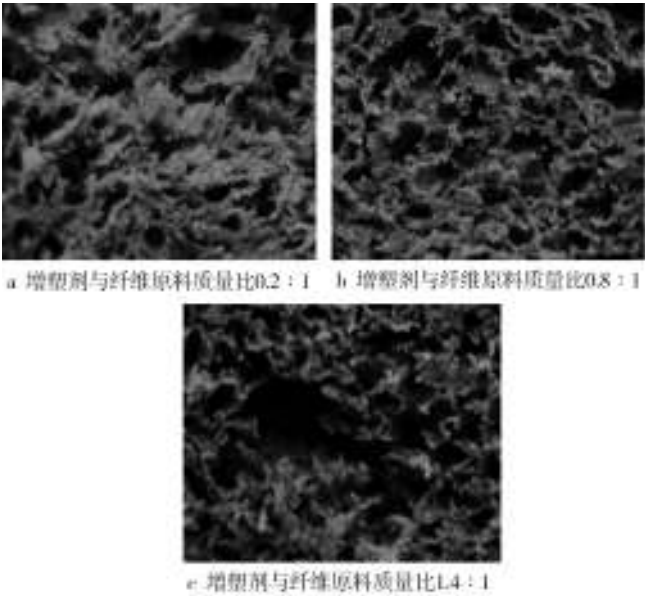


图4 增塑剂含量对发泡效果的影响

Fig.4 Influence of plasticizer content on foaming result

由图5亦可知,当未使用增塑剂或用量较少时(即增塑剂与纤维原料质量比为0:1和0.2:1),所制得的发泡材料的泡孔不均匀,表面粗糙,刚性较大,弹塑性较差,应力随着应变的增加而急剧提高,缓冲性能不佳。随着增塑剂含量的增加(增塑剂与纤维原料质量比为0.4:1,0.6:1,0.8:1和1:1),所制得的发泡材料的应力-应变曲线逐渐向右下方偏移,应力平台逐渐趋于平缓,平台应力逐渐降低而密实化应变逐渐增加;增塑剂与纤维原料质量比为0.8:1与1:1的2条曲线的平台应力较为接近,而前者的密实化应变较大,因此总吸收能量略优于后者。当增塑剂含量继续增加时(增塑剂与纤维原料质量比为1.2:1和1.4:1),混料体系

内部分子间的作用力过小,泡孔增长速度过快,导致泡孔合并甚至塌陷现象发生,平台应力和总吸收能量下降,严重影响发泡材料的力学性能和缓冲性能。因此,丙三醇添加量为4 mL,即增塑剂与纤维原料质量比为0.8:1时,制得的发泡材料综合性能较好。

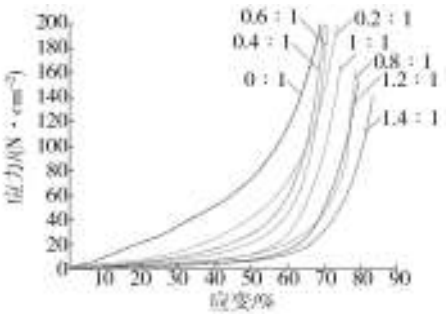


图5 不同增塑剂含量样品的应力-应变曲线

Fig.5 The stress-strain curves of specimens fabricated with different content of plasticizer

2.4 竹纤维/淀粉发泡复合材料缓冲性能

由上述研究结果可知,实验条件下竹纤维/淀粉发泡复合材料中竹纤维、淀粉、水、碳酸氢铵、丙三醇的最优质量比为1:2:3:1:0.8。据此最佳配比,实验选取竹纤维5 g,淀粉10 g,水15 mL,NH₄HCO₃为5 g,丙三醇4 mL,制备竹纤维/淀粉发泡复合材料,测得发泡制品的表观密度为0.57 g/cm³,发泡倍率为2.03倍。将最佳配比条件下制得的竹纤维/淀粉发泡复合材料进行准静态压缩实验,得到其应力-应变曲线和缓冲系数-最大静应力曲线见图6。

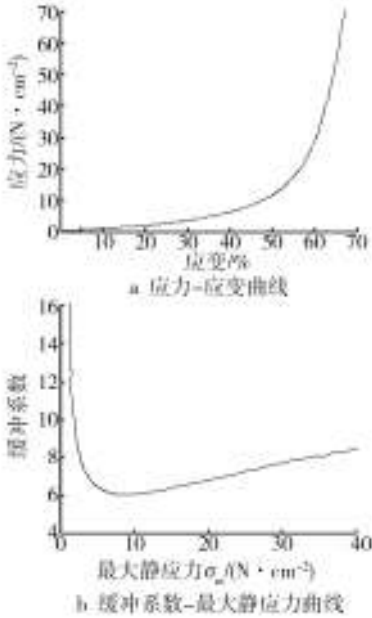


图6 最佳配比条件下竹纤维/淀粉发泡复合材料性能曲线

Fig.6 Performance curves of bamboo fiber/starch foam composites with the optimal ratio

由图6可知,最佳配比条件下竹纤维/淀粉发泡复合材料的缓冲系数为6.04,参照文献[11]所示各种常用缓冲材料缓冲系数-最大静应力曲线可以看出,该发泡制品的静态缓冲系数与密度 0.08 g/cm^3 泡沫聚苯乙烯的缓冲系数值接近。通过对应力-应变数据的分析计算,可得最佳配比条件下竹纤维/淀粉发泡复合材料的平台应力为 4.79 N/cm^2 ,密实化应变为0.73,单位体积总吸收能量为 1.52 MJ/m^3 。

3 结语

实验条件下竹纤维/淀粉发泡复合材料中竹纤维、淀粉、水、碳酸氢铵、丙三醇的最优质量比为1:2:3:1:0.8,采用水热发泡结合高温热风干燥模式,使用电蒸锅在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 下发泡20 min,将发泡材料放入烘箱内将制品表面水分烘干后,自然晾干后制得发泡成品。最佳配比条件下制得的竹纤维/淀粉发泡复合材料的缓冲系数为6.04,单位体积总吸收能量为 1.52 MJ/m^3 ,具有一定的能量吸收性能,可起到吸收能量,缓和冲击的作用。

参考文献:

- [1] 林瑞珍. 废纸纤维/淀粉发泡复合材料的制备及其性能研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2013.
LIN Rui-zhen. Investigation in Preparation and Properties of Waste Corrugated Paperboard Fiber/Starch Foam Composites [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2013.
- [2] 高德,常江,巩雪. 玉米秸秆缓冲包装材料的研究[J]. 包装工程,2007,28(1):27—29.
GAO De, CHANG Jiang, GONG Xue. Research on Corn Straw Cushion Packaging Material[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(1):27—29.
- [3] 曾广胜,林瑞珍,郑良杰. 废纸板纤维/淀粉发泡复合材料加工流变特性及泡孔形态[J]. 复合材料学报,2013,30(5):107—112.
ZENG Guang-sheng, LIN Rui-zhen, ZHENG Liang-jie. Processing Rheological Property and Cell Morphology of Waste Paper Pulp/Starch Foam Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(5):107—112.
- [4] 张惠莹,张晶,孙昊,等. 基于NaOH预处理的废纸纤维发泡材料工艺及配方研究[J]. 包装工程,2012,33(19):61—66.
ZHANG Hui-ying, ZHANG Jing, SUN Hao, et al. Study on Formulation and Process of Waste Paper Fiber Foaming Materials Based on Pretreatment with NaOH[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(19):61—66.
- [5] 巨杨妮,张新昌. 基于复配发泡剂的纸纤维发泡缓冲包装材料制备工艺[J]. 包装工程,2012,33(5):43—46.
JU Yang-ni, ZHANG Xin-chang. The Process of Paper Fiber Foaming Packaging Material Based on Composite Foaming Agent[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5):43—46.
- [6] 江道海,黄祖强,胡华宇,等. 机械活化甘蔗渣制备缓冲包装材料的研究[J]. 包装工程,2011,32(3):1—4.
JIANG Dao-hai, HUANG Zu-qiang, HU Hua-yu, et al. Research on Cushion Packaging Material Prepared by Mechanically Active Bagasse[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3):1—4.
- [7] SOYKEABKAEW N, SUPAPHOL P, RUJIRAVANIT R. Preparation and Characterization of Jute-and Flax-reinforced Starch-based Composite Foams[J]. Carbohydrate Polym, 2004, 58(1):53.
- [8] 母军,张德荣,范希峰,等. 杂交狼尾草发泡缓冲材料的制备及性能研究[J]. 包装工程,2011,32(19):43—46.
MU Jun, ZHANG De-rong, FAN Xi-feng, et al. Preparation of Hybridized Pennisetum fom Cushioning Material and Study of Its Performance[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19):43—46.
- [9] 潘小青,王桂英,曹斌. 药用植物剩余物发泡缓冲包装材料的制备及性能研究[J]. 包装工程,2013,34(5):37—40.
PAN Xiao-qing, WANG Gui-ying, CAO Bin. Development and Performance Investigation of Foaming Cushion Material For Medical Plant Residues[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(5):37—40.
- [10] 周盛华,刘晔. 竹纤维发泡缓冲包装材料的静态力学性能建模[J]. 包装工程,2009,30(6):16—18.
ZHOU Sheng-hua, LIU Ye. Modeling of Static Mechanical Performance of Bamboo Fiber Cushion Packaging Material[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(6):16—18.
- [11] 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.
- [12] PAUL A, RAMAMURY U. Strain Rate Sensitivity of a Closed-Cell Aluminum Foam[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A(281):1—7.
- [13] E Yu-ping, WANG Zhi-wei. Plateau Stress of Paper Honeycomb as Response to Various Relative Humidities[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(4):203—216.
- [14] 鄂玉萍. 湿度和应变率对纸质缓冲材料能量吸收特性的影响[D]. 无锡:江南大学,2010.
E Yu-ping. Influence of Relative Humidity and Strain Rate on the Energy Absorption Properties of Paper-Based Cushioning Materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [15] 李琛. 木质剩余物纤维多孔型材料制备及缓冲特性研究[D]. 沈阳:东北林业大学,2013.
LI Chen. Research on Preparation and Cushioning Properties of Wood Residues Fiber Porous Material[D]. Shenyang: North Forestry University, 2013.