

工艺因素对植物纤维活性发泡材料发泡性能及力学性能的影响

李纪磊¹, 何忠², 陆星宇¹, 宋万龙¹, 孙斌¹, 赵宇², 马晓军^{1*}

(1.天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457;

2.江苏航宇重型包装有限公司, 江苏 张家港 215600)

摘要: **目的** 探究不同的原料配比、工艺参数对植物纤维发泡材料的发泡性能、力学性能的影响。**方法** 以阔叶木纤维和聚乙烯醇(PVA)为原料, 利用聚醚(F127)活性发泡和常压干燥工艺制备植物纤维发泡材料。**结果** 随着纤维含量的提升, 材料发泡倍率、孔隙率、排液率均呈现降低趋势。在纤维含量较低时, 材料拥有较好的回弹性, 反之, 材料具有较高的抗压强度。F127 的加入有效降低了体系的表面张力, 材料的泡孔尺寸逐渐减小。随着 F127 的增加, 材料的发泡倍率、孔隙率和回弹率呈现先增加后降低的趋势, 抗压强度变化不明显。湿度增加则植物纤维发泡材料的回弹性增加, 温度增加则其抗压强度增加。**结论** 当植物纤维、PVA、F127 的质量分数分别为 4%、3%、2% 时, 植物纤维发泡材料的综合性能较优异。

关键词: 植物纤维; 活性发泡; 发泡性能; 力学性能

中图分类号: TB484

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)01-0040-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.01.005

Effect of Process Factors on Foaming Properties and Mechanical Properties of Plant Fiber Active Foaming Materials

LI Jilei¹, HE Zhong², LU Xingyu¹, SONG Wanlong¹, SUN Bin¹, ZHAO Yu², MA Xiaojun^{1*}

(1. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. Jiangsu Hangyu Heavy-duty Packaging Co., Ltd., Jiangsu Zhangjiagang 215600, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects of different raw material ratios and process parameters on the foaming properties and mechanical properties of plant fiber foaming materials. Plant fiber foaming materials were prepared by the active foaming and atmospheric drying process with polyvinyl alcohol (PVA) and polyether (F127) as raw materials. As the fiber content increased, the foaming ratio, porosity, and drainage rate of the material decreased gradually. When the fiber content was low, the material had good resilience, but when it was high, the material had high compressive strength. The addition of F127 effectively reduced the surface tension of the system, and the size of the material pores gradually decreased. As F127 increased, the foaming ratio, porosity, and resilience of the material showed an increasing trend firstly and then decreased, while the compressive strength changed little. The resilience of the plant fiber foaming material increased with the increasing humidity, and its compressive strength increased with the increasing temperature. When the mass fraction of plant fiber, PVA and F127 is 4%, 3% and 2% respectively, the plant fiber foaming material has the most excellent comprehensive performance.

KEY WORDS: plant fiber; active foaming; foaming properties; mechanical properties

收稿日期: 2024-09-06

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(23JCZDJC00620); 张家港市科技计划(ZKYY2310)

*通信作者

随着现代物流的迅速发展,在运输过程中保护商品、减少损害已成为运输包装的重点。传统的石油基泡沫发泡材料,如发泡聚苯乙烯(EPS)、发泡聚乙烯(EPE)等缓冲包装材料,具有密度低、隔热性能好、力学强度高、易加工、成本低等优点,被广泛作为日常生活商品的运输缓冲包装材料^[1]。随着我国“碳达峰”“碳中和”政策的提出,绿色、可循环、可降解材料成为包装材料发展的热点^[2-3]。近年来,以植物纤维为基础的可生物降解泡沫材料逐渐取代传统的石油基泡沫材料^[4]进入市场。植物纤维发泡材料性能的优劣很大程度取决于发泡工艺,已有的物理发泡^[5-6]和化学发泡^[7-8]技术相对成熟,这 2 种技术对设备和成本的要求相对较高,且具有能耗高、污染大等缺点,急需改进。不同于其他发泡方法,活性发泡作为一种简单、高效的新型发泡工艺^[9],不需要加热或加压,可以通过机械搅拌的方法使空气进入溶液或悬浮液中,空气在其中不会逸出,从而达到发泡的效果,且其能耗较低,发泡速率较快,在确保发泡性能的同时生成的泡沫更加稳定^[10]。李金宝等^[11]使用阴离子表面活性剂(SDS)发泡,制备了阔叶木纤维发泡材料,研究发现,SDS 的质量分数为 0.2%~0.3%时,植物纤维发泡材料具有较好的力学性能。张儒静^[12]以非离子表面活性剂 F127(PEO₉₉-PPO₆₅-PEO₉₉)为起泡剂,制备了可压缩回弹的压缩应变传感器氧化石墨烯(GO)多孔材料。利用活性发泡制备的植物纤维发泡材料被广泛应用于电子工程^[13]、食品^[14]等诸多领域。

尽管植物纤维具有环保、来源广泛、可再生等优点,可作为发泡材料的主体,但在不同的工艺因素下,原料比例对植物纤维发泡材料的发泡性能(发泡倍率、孔隙率、排液率)和力学性能(抗压强度、缓冲系数、回弹率)均有一定影响。其中,多孔发泡材料的缓冲性能与泡孔密度、孔隙率和泡孔分布等均存在一定关系^[15]。目前,通过向发泡混合液体中加入各种添加剂,来控制发泡材料的泡孔尺寸、开孔率及密度,可以改善其性能^[16]。Xu 等^[17]以 CO₂、N₂ 为混合发泡剂,制备了热塑性聚酯弹性体(TPEE)发泡材料。研究发现,当 N₂ 与 CO₂ 的体积比为 2:8 时,其发泡倍率提高了 17 倍;当 N₂ 与 CO₂ 的体积比为 4:6 时,其发泡倍率提高了 9 倍,且引入 N₂ 后材料的泡孔收缩率较低,有助于保护泡孔结构的完整性。王菲等^[18]以氯化石蜡为增塑剂,研究了不同增塑剂用量对丁腈橡胶(NBR)发泡材料性能的影响。结果表明,随着氯化石蜡用量的增加,发泡倍率呈先增大后减小的趋势,发泡材料的密度先减小后增大。Zhang 等^[19]研究了不同烷基链长的烷基硫酸钠(SAS)对泡沫膜稳定性的影响,结果表明,烷基链长度的增加增强了 SAS 分子间的相互作用,改善了 SAS 分子在界面处的有序性,同时泡沫破裂所需的外力越大,则泡沫越稳定。这些研究进一步证明发泡材料组分及其配比对

最终材料的性能具有重要影响。

为此,本文以阔叶木纤维和聚乙烯醇(PVA)为原料,利用聚醚(F127)活性发泡和常压干燥工艺制备植物纤维发泡材料,并对不同工艺因素原料配比对植物纤维发泡材料的发泡性能和力学性能的影响进行系统研究,拟为绿色缓冲包装材料的发展提供借鉴和新的思路。

1 实验

1.1 材料

主要材料:聚乙烯醇 PVA1788 型,罗恩试剂厂;聚酯 F127,山东科源生化有限公司;阔叶木纤维,大连扬润贸易有限公司。

1.2 植物纤维发泡材料的制备

将 375 g 木纤维浆板泡入 23 L 去离子水中 12 h 后,使用瓦力打浆机细化 30 min,直至打浆度(°SR)为 20 后,得到阔叶木纤维。测量含水率,称取阔叶木纤维,其质量(此处质量为绝干纤维质量)分别占总悬浮液质量(120 g)的 2%、3%、4%、5%、6%,然后将聚醚 F127 加入含有植物纤维、聚乙烯醇的悬浮液中。将整个悬浮液转移到容器中,随后在高速分散器中以 5 000 r/min 的转速充分搅拌 10 min。将植物纤维湿泡沫倒入底部带有 100 目筛网的模具中排水 12 h,脱模后将湿泡沫在 100 °C 的环境下干燥 12 h,即可获得植物纤维发泡材料(F-LFFx),其中 x 为 F127 的含量(占总质量的百分比),将未添加 F127 的样品命名为 F-LF。单因素实验设计见表 1,具体制备过程如图 1 所示。

表 1 植物纤维发泡材料制备单因素实验设计
Tab.1 Single-factor experimental design of plant fiber foaming material preparation

编号	植物纤维的质量分数/%	聚乙烯醇的质量分数/%	聚醚 F127 质量/g
F1	4	3	0
F2	4	3	1.25
F3	4	3	2.5
F4	4	3	3.75
F5	4	3	5
P1	4	1	2.5
P2	4	2	2.5
P3	4	3	2.5
P4	4	4	2.5
P5	4	5	2.5
Z1	2	3	2.5
Z2	3	3	2.5
Z3	4	3	2.5
Z4	5	3	2.5
Z5	6	3	2.5

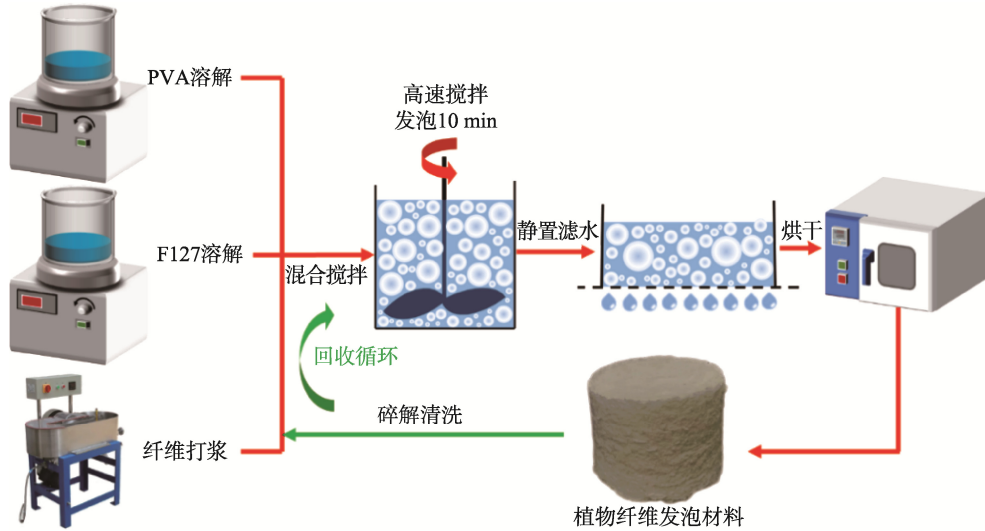


图1 植物纤维发泡缓冲材料的制备流程
Fig.1 Preparation process of plant fiber foaming cushion material

1.3 测试与表征

1.3.1 体积膨胀倍率、收缩率、表观密度、孔隙率、发泡倍率、排液率的测定

体积膨胀倍率用于体现体系形成孔隙的能力，由式(1)计算得出。

$$E_r = \frac{V_a}{V_b} \times 100\% \quad (1)$$

式中： E_r 为泡沫体积膨胀倍率； V_a 为高速分散搅拌后的泡沫体积； V_b 为高速分散搅拌前的混合物体积。

收缩率用于体现泡沫体积因干燥过程而收缩的程度，由式(2)计算得出。

$$S = \frac{V_{sb} - V_{sa}}{V_{sb}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： S 为泡沫收缩率； V_{sa} 为湿泡沫干燥后的体积； V_{sb} 为干燥前的湿泡沫体积。

用游标卡尺测量干泡沫的直径和厚度。表观密度由式(3)计算得出。

$$\rho = \frac{m}{V_{sa}} \quad (3)$$

式中： m 为干泡沫的质量。

孔隙率可以综合反映材料的发泡性能。孔隙率越高，说明材料中泡孔体积的占比越高，决定了发泡材料的缓冲性能。孔隙率 P 由式(4)计算得出。

$$P = \frac{V_f - V_0}{V_f} \quad (4)$$

发泡倍率可以直观反映单因素变量对材料发泡能力的影响。材料的发泡倍率可由式(5)计算。

$$n = \frac{V_f}{V_0} \quad (5)$$

式中： n 为发泡倍率； V_0 为发泡前混合液体的体积； V_f 为发泡后混合液体的体积。

排液率主要体现材料发泡后的含水量、保存水分的能力，以及内部纤维搭接缠绕的情况和泡孔分布情况。排液率由式(6)计算得出。

$$w_1 = \frac{V_s}{V_1} \quad (6)$$

式中： w_1 为排液率； V_1 为模具中混合液体的体积； V_s 为滤水12h后模具中发泡体的体积。

1.3.2 静态压缩与压缩回弹性测试

使用万能试验机测试(Instron engineering corporation, USA)系统测量F-LFFx的力学性能。压缩实验通过将F-LFF泡沫在轴向压缩至80%进行压溃测试。用于测试的样品为直径(70±0.7)mm、高(50±0.5)mm的圆柱形干泡沫。缓冲系数采用式(7)、(8)计算。

$$e = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \quad (7)$$

$$C = \frac{\sigma}{e} \quad (8)$$

式中： e 为材料的吸收能； σ 为应力； ϵ 为应变； C 为缓冲系数。

为了测试样品的力学性能，对同一样品进行了10次固定应变为50%的循环压缩测试，样品尺寸与之前保持一致。弹性恢复率用于表征材料在形变后的恢复能力，通过式(9)计算得出。

$$R = \frac{D_a}{D} \quad (9)$$

式中： R 为弹性恢复率； D 为材料的原始厚度； D_a 为材料回弹恢复后的厚度。

2 结果与讨论

2.1 工艺因素对发泡性能的影响

如图 2a 所示, 随着纤维含量的增加, 发泡倍率和孔隙率都呈现下降趋势。这是因为随着纤维含量的增加, 混合物的黏度增大, 发泡所需的驱动力增大, 在相同转速和搅拌时间下液体的黏度越大, 发泡倍率越低; 孔隙率与发泡倍率的变化趋势一致, 孔隙率指发泡后空气进入混合物中所占的体积, 在黏度增大后, 空气更难进入体系, 导致孔隙率下降。

如图 2b 所示, 随着聚醚 F127 含量的增大, 发泡倍率和孔隙率呈现先上升后下降的趋势。这是因为在相同的搅拌时间和转速下, 1.25~2.5 g 为聚醚 F127

的临界胶束含量, 在超过该临界胶束含量后, 体系的黏度增大, 导致发泡倍率和孔隙率呈现下降趋势。

如图 2c 所示, 在 PVA 的质量分数为 1% 时, 发泡倍率较高; 在 PVA 的质量分数为 2%~5% 时, 发泡倍率近似, 且微弱提升。这是因为在相同的搅拌时间和转速下, 随着 PVA 含量的增大, 混合物体系的黏度增大, 因此在 PVA 的质量分数为 1%~3% 时呈现下降趋势。当体系黏度继续增大时, PVA 表面活性剂的作用开始显著, 但由于黏度较高, 因此发泡倍率和孔隙率提升较小。

如图 3a 所示, 在滤水阶段, 气泡之间液膜中的水受到重力的影响会不断向下渗流, 滤水过程同样受到体系黏度的影响。随着纤维含量的增大, 排液率随之下降。这是因为纤维含量的增大, 使得每个气泡周

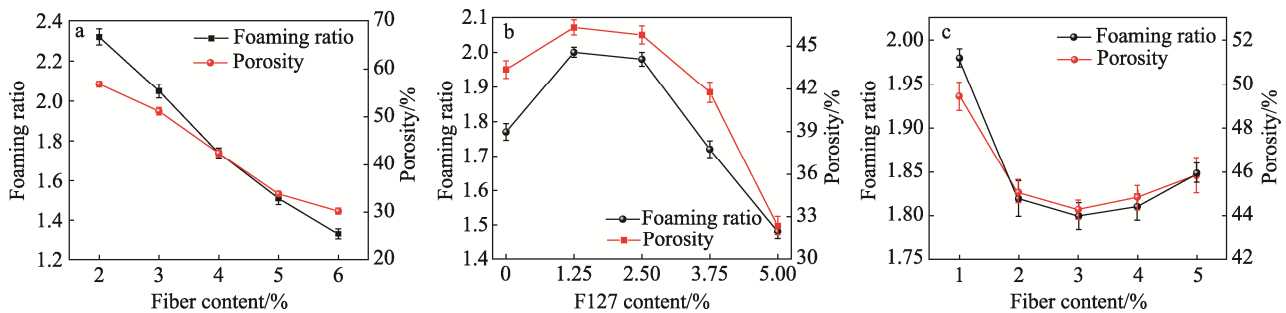


图 2 纤维 (a)、聚醚 F127 (b)、PVA 含量 (c) 对发泡倍率和孔隙率的影响
 Fig.2 Effect of content of fibers (a), polyether F127 (b) and PVA on foaming ratio and porosity

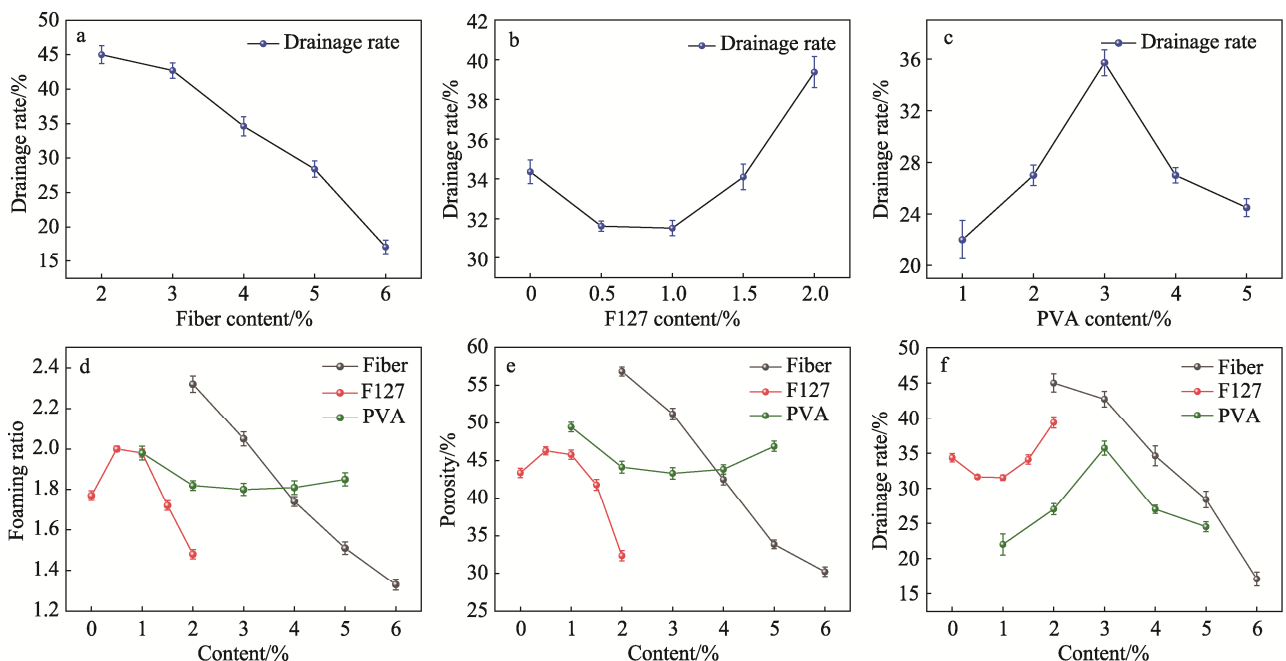


图 3 不同纤维 (a)、聚醚 F127 (b)、PVA (c) 含量下湿泡沫排液率的变化趋势及纤维、聚醚 F127 和 PVA 含量对发泡倍率 (d)、孔隙率 (e)、排液率 (f) 的单因素横向对比
 Fig.3 Drainage rate trend of wet foam under different contents of fiber (a), polyether F127 (b) and PVA (c) and single-factor horizontal comparison diagram of different contents of fiber, polyether F127, and PVA content on foaming ratio (d), porosity (e) and drainage rate (f)

围包裹的纤维含量增加,纤维分子上存在很多亲水的—OH^[20],因此纤维增多的同时提升了气泡的锁水能力,导致材料的成型速度减慢。如图 3b 所示,聚醚 F127 排液率的变化趋势随着聚醚 F127 含量的增大呈先下降后上升的趋势。这是因为在达到临界胶束含量前,体系黏度随着聚醚 F127 含量的增大而提升,排液率随之下降。在 F127 的质量为 2.5 g (占悬浮液总质量的 2%) 时,达到临界胶束含量,表面张力达到最低值,排液率也最低,此时发泡效果最好,材料的成型效果最佳。在达到临界胶束含量后,聚醚 F127 在体系中形成大量胶束,这些胶束大量存在于液膜中,使得黏度增大,受到重力的影响,排液率增大,成型效果逐渐变差。如图 3c 所示,随着 PVA 含量的上升,排液率呈先增大再减小的趋势。这是因为在 PVA 含量较低时,泡沫的含水率较低,因而排液率不高;在 PVA 含量较高时,泡沫的含水率提升,导致排液率升高;在 PVA 的质量分数为 3% 时,材料的排液率达到最高值,此时 PVA 与纤维的交联最紧密,最有利于纤维网络结构的稳定,使得材料的成型效果较好,这也印证了力学测试中 PVA 的质量分数为 3% 时性能最佳的结论。在排液烘干后,材料的水分被烘干,并不会对发泡材料的成型产生影响。对比图 3d~f 可以发现,在 3 种因素中,纤维含量对材料的影响最大,其次是 F127 含量,PVA 含量的影响最小。从排液率单因素横向对比结果可以看出,纤维含量对排液率的影响最大,F127 的含量对排液率的影响较小,PVA 的含量对排液率的影响较大。

2.2 工艺因素对材料力学性能的影响

由图 4 可以看出,在纤维的质量分数为 3% 时回弹率出现最低点。这是因为在纤维含量较低时,材料内部纤维搭接较为松散,加之孔隙率较高,导致材料内部的支撑力不够,稀疏的纤维在负载下表现出脆性大于韧性,容易发生压溃和脆性断裂现象,因此回弹率欠佳。在纤维含量较高时,材料内部纤维搭接紧密、

孔隙率较低,纤维与纤维之间的距离较近,在负载下纤维之间缠结,因此表现出较差的回弹性。在纤维的质量分数为 4% 时,回弹率出现最高点。这是因为此时纤维与 PVA 交联最为紧密,孔隙率相对适中,材料内部的支撑力显著提升,展现出良好的韧性和回弹性。在纤维的质量分数为 2%~4% 时,在 50% 负载下循环 3 次后,放置 24 h 的回弹率比单次 80% 负载下放置 24 h 的回弹率稍高。这是因为在材料被压至 50% 形变时处于屈服阶段,展现出一定的回弹性,并且卸去负载后会有一定回弹,恢复松散的纤维搭接结构,加上负载后还会出现屈服阶段,而不是直接达到密实化阶段。在纤维的质量分数为 5%~6% 时,材料的 2 种回弹率 (50%、80%) 变化基本一致。这是因为纤维内部搭接紧密,只要达到密实化阶段就很难再恢复之前的纤维搭接模式,因此展现出一致的回弹率。聚醚 F127 的质量为 2.5 g 时,2 种回弹率 (50%、80%) 最好,其性能随着孔隙率的增大而增大,减小而减小,由此推断聚醚 F127 主要通过影响材料的孔隙率来影响其回弹性能。随着 PVA 含量的增大,2 种回弹率 (50%、80%) 都呈现下降趋势,这是因为 PVA 含量的增大使得体系黏度提升,造成纤维黏结现象加重,在压溃后不易回弹,与孔隙率无显著关联。

通过以上结果可以看出,在 80% 负载下单次回弹率均小于 50% 负载下循环 3 次下的回弹率。这是因为在 80% 的负载下,材料直接达到密实化阶段,且时间较长,纤维之间更易缠结,而在 50% 负载下循环 3 次的情况下,材料逐步达到密实化阶段,此时密实化阶段较短,纤维缠结度较低,会表现出较好的回弹率。

从图 5 可以看出,随着纤维含量的增加,收缩率呈先减小后增大的趋势。在纤维的质量分数为 4% 时,收缩率最低,说明此时泡孔最稳定,在加热烘干时泡孔能够维持得更好,在加热的同时水分子蒸发、PVA 凝固。泡沫中的水分分别为液膜中的游离水分子和纤维润胀所吸收的水分子,在高温下游离水分子的蒸发

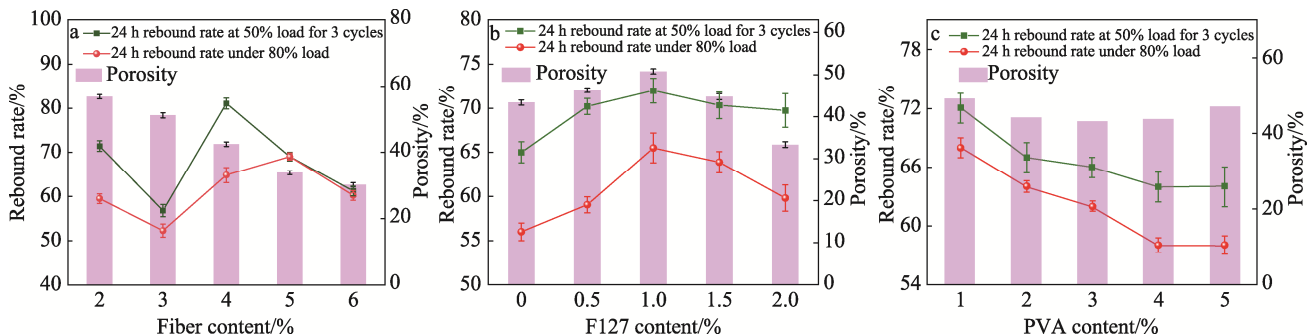


图 4 不同纤维 (a)、聚醚 F127 (b)、PVA (c) 含量、50% 负载下循环 3 次放置 24 h 的回弹率、80% 负载单次 24 h 回弹率与孔隙率的关系

Fig.4 Relationship between the 24-hour rebound rate and porosity under different contents of fiber (a), polyether F127 (b) and PVA (c), 50% load for three cycles and 80% load for single cycle

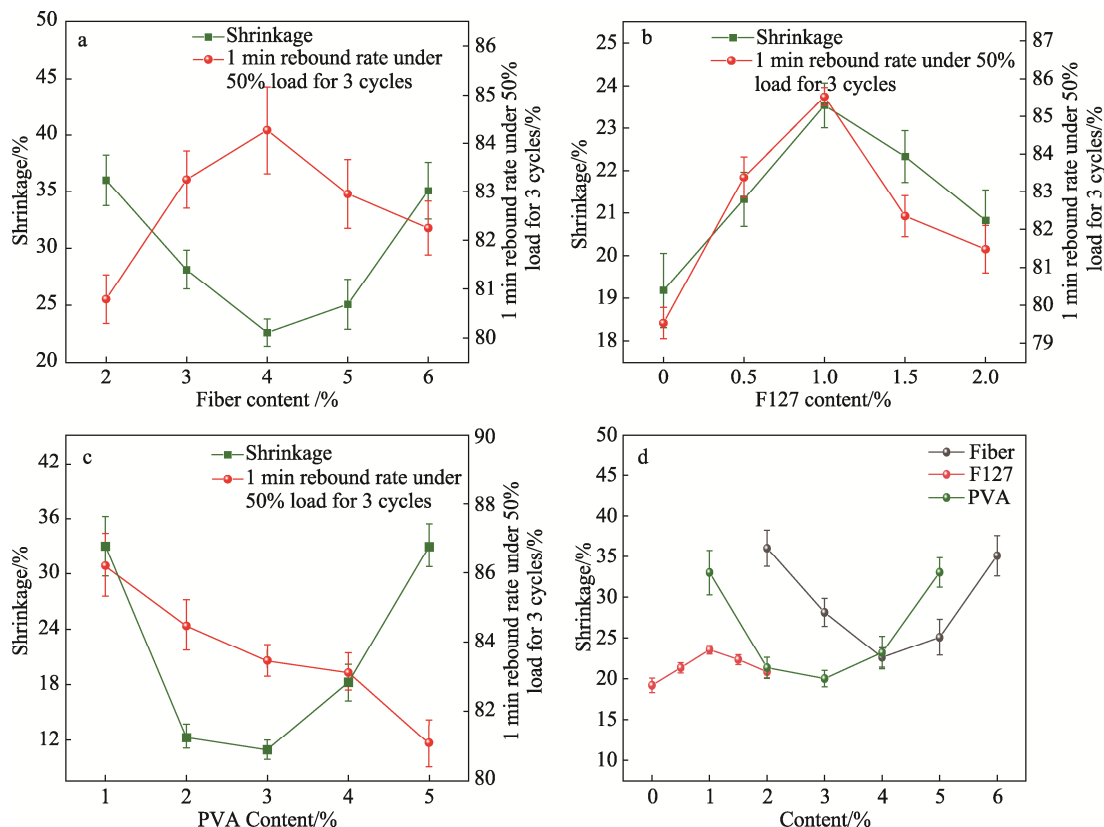


图 5 在不同纤维 (a)、聚醚 F127 (b)、PVA (c) 含量条件下收缩率 50%与负载 3 次循环 1 min 平均回弹率的关系曲线及收缩率的单因素横向对比 (d)

Fig.5 Relationship curve between shrinkage rate and 1-minute average rebound rate after 3 cycles of 50% load under different contents of fiber (a), polyether F127 (b) and PVA (c) and single-factor horizontal comparison diagram of shrinkage rate (d)

使得泡孔破裂, 形成开孔结构, 纤维中水分子的蒸发使得纤维聚集。在纤维含量较低时, 泡沫中所含的游离水含量较高, 因此随着温度的升高使得收缩率较高。在纤维含量较高时, 纤维润胀所吸收的水分子较多, 因此随着温度的升高, 水分子蒸发, 导致纤维聚结严重, 收缩率升高。在 50% 负载、3 次循环、1 min 下, 平均回弹率趋势与收缩率相反, 印证了纤维含量为 4% 时泡孔的稳定性最好。随着聚醚 F127 含量的上升, 收缩率和回弹率在很小的范围内呈现先上升后下降的趋势, 与其发泡倍率的趋势相同, 即与发泡量和孔隙率相关, 发泡倍率和孔隙率越大, 则其收缩率越大, 反之亦如此, 说明与聚醚 F127 含量的关系不大。回弹率会随着 PVA 含量的增大而降低, 原因跟之前的相同, 都是由纤维黏结加重所致。收缩率随着 PVA 含量的增加呈先减小后增加的趋势, 这是因为在 PVA 的质量分数为 2%、3% 时, 体系的黏度适中, PVA 和纤维的锁水能力最好, 纤维在 PVA 的质量分数为 3% 时的黏结度最有利于纤维网络结构的稳定, 因此在加热过程中, 随着水分子的蒸发, 对纤维网络结构的破坏程度也最小。从图 5d 可以看出, F127 的含量对收缩率的影响不大, 但是 PVA 和纤维的含量均会对收缩率造成较大影响。

从图 6 可以发现, 3 种因素对回弹率都无特别显著的影响, 影响范围较小, 在 50% 载荷、3 次循环压缩 1 min 下回弹率在 82% 左右波动; 在 80% 载荷、单次压缩 24 h 下回弹率在 62.5% 左右波动; 在 50% 载荷、3 次循环压缩 24 h 下, 回弹率在 71% 左右波动。通过分析可知, 一次性压缩 80% 直接压溃对回弹率的影响最大, 因为一次压缩使得材料直接进入密实化阶段, 材料内部纤维网络结构被严重破坏。在 50% 循环压缩下, 可以使材料缓慢进入密实化阶段, 每次压缩前纤维网络结构都有一定的时间进行恢复, 因此回弹率相对较高。50%、80% 载荷对材料回弹性能的影响与压缩时间、次数存在一定关系, 与材料组分的优化无太大关系。

如图 7 所示, 当纤维的质量分数为 2%~5% 时, 材料的力学性能随着纤维含量的提升显著提升; 当纤维质量分数为 5% 和 6% 时, 2 种材料的力学性能相似。从图 7 可以看出, 在纤维的质量分数为 5%~6% 时, 材料会先进入密实化阶段。这是因为纤维含量过高, 导致材料中的纤维更易聚结, 因此在较小应力下就会进入密实化阶段, 其回弹性会受到影响。在纤维含量较低时, 材料会较晚进入密实化阶段。这是因为纤维的密度小, 有较多的空间进行屈服, 纤维聚结的

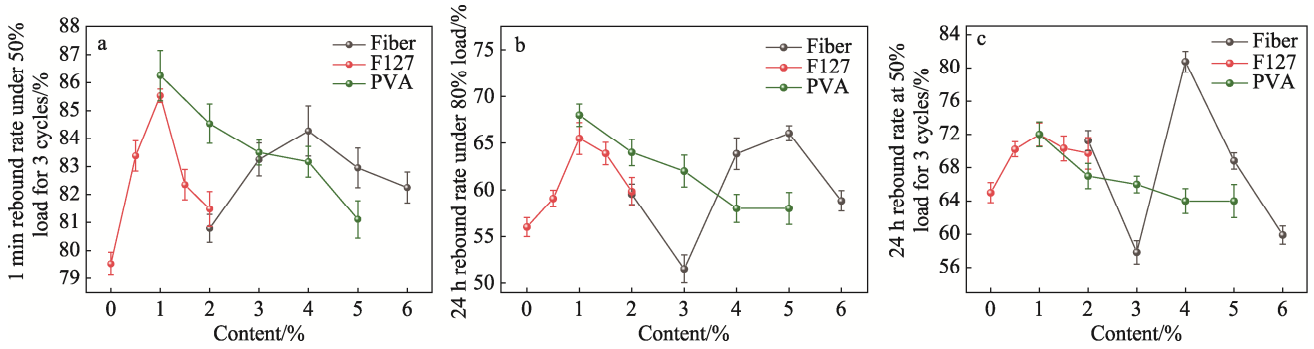


图6 50%负载3次循环1 min 平均回弹率 (a)、80%负载单次24 h 回弹率 (b)、50%负载3次循环24 h 回弹率 (c) 的单因素横向对比

Fig.6 Single-factor horizontal comparison diagram of 1-minute average rebound rate after 3 cycles of 50% load (a), 24-hour rebound rate after single cycle of 80% load (b) and 24-hour rebound rate after 3 cycles of 50% load (c)

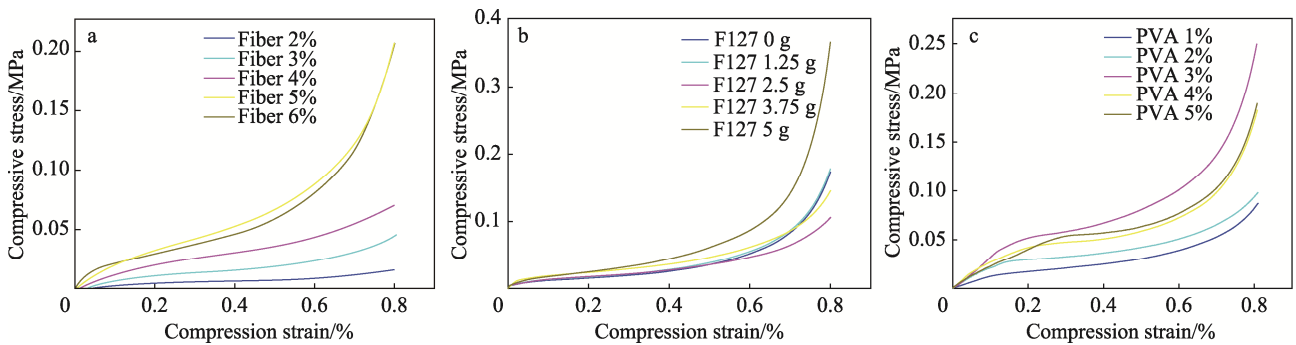


图7 不同纤维 (a)、聚醚 F127 (b)、PVA 含量 (c) 下发泡材料的应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of foaming materials under different contents of fiber (a), polyether F127 (b) and PVA (c)

情况较少，屈服阶段较长。不难发现，材料的抗压强度的总体水平还是随着纤维含量的升高而提升，因此纤维含量较低时材料的回弹性更好，纤维含量较高时材料的力学强度更高。在屈服阶段，不同的聚醚 F127 添加量对力学性能的影响不大。在聚醚 F127 添加量为 5 g 时，到达密实化阶段，曲线大幅提升，意味着密实化后材料内部密度较高，纤维之间聚结紧密，过多的游离聚醚 F127 胶束在该阶段可能充当了黏合剂的角色，大幅提升了材料的力学性能。在游离胶束较少时，聚结的聚醚 F127 胶束可能对材料的总体力学性能产生较小的负面影响。因为较少的胶束在干燥后附着在纤维表面，使得 PVA 对纤维的包覆不均匀，因此材料的力学性能稍低。PVA 含量的变化不会影响材料从屈服到密实化阶段的压缩应力，在 PVA 含量较低时，材料的力学性能较差。在 PVA 的质量分数为 3% 时，材料的力学性能更佳，能够承受的应力更大，而在 PVA 的质量分数为 4%、5% 时，材料的力学性能类似，相较于 3% 时有所降低。这是因为较高的含量会破坏材料内部纤维网络结构的稳定性，使得纤维黏结加重，在受力压缩时纤维更易聚集。

如图 8 所示，在纤维的质量分数为 2% 时缓冲系

数最小，但是材料的缓冲系数在快速达到最低点后又迅速提升一小部分，表明随着应力的增大，材料的缓冲系数得到提升。虽然该材料的发泡倍率较高，但是其力学强度很差，只适合于一些特殊轻质材料的包装填充物。在纤维的质量分数为 4% 时存在较低的缓冲系数，当达到缓冲系数最低点时不再迅速上升，在较高的应力水平下仍然具有较低的缓冲系数。随着聚醚 F127 含量的提升，缓冲系数稳定在 3~4 范围内，且随着应力的增大，缓冲系数无明显提升，说明在较高应力水平下具备较低的缓冲系数，具有稳定的缓冲性能。这可能是 F127 细化泡孔尺寸的结果，绵密的气泡使得纤维分散更加均匀，小尺寸的气泡在干燥破裂后会形成交织更紧密的纤维网络，当纵向承受载荷时单位面积内有更多的纤维分担载荷。在聚醚 F127 的含量为 2.5、3.75 g 时存在最低的缓冲系数，相比之下，2.5 g 的含量更有利于节省原料、降低成本。在 PVA 的质量分数为 3% 时，能够在更高的应力水平下保持更好的缓冲性能，不同 PVA 含量下材料的缓冲系数近似，但是在其他含量下都不具备 3% 时的应力水平。由此可知，在 PVA 的质量分数为 3% 时，材料的综合力学性能最好。

综合以上 3 种因素对发泡性能和力学性能的影响, 认为在植物纤维的质量分数 4%、聚醚 F127 的含量 2.5 g (2%)、聚乙烯醇 PVA 的质量分数 3% 的配比下, 植物纤维发泡材料具有更优异的综合性能。

2.3 环境因素对材料力学性能的影响

模拟了环境因子(温度、湿度)对 F-LFFx 力学性能的影响(图 9), 结果表明, 随着温度的上升(20~50 °C), F-LFFx 的刚性增强、回弹性减弱。这可

能因为高温下泡沫吸收环境中的水分被蒸发, 纤维展现出更大的脆性, 氢键的恢复能力有所降低。随着相对湿度的上升(50%~80%), 虽然 F-LFFx 的力学性能变差, 但是回弹性大幅提升。这可能是因为 PVA 吸湿后具备了类似水凝胶的修复性^[21], 使得断裂的氢键更易恢复。由于纤维吸湿后会发生润胀, 导致自由度增大, 刚性大幅下降, 因此将温度控制在 20~30 °C, 相对湿度控制在 60%~70% 时, F-LFFx 兼具较强的力学性能和一定的回弹性, 更适合作为缓冲材料对包装物进行保护。

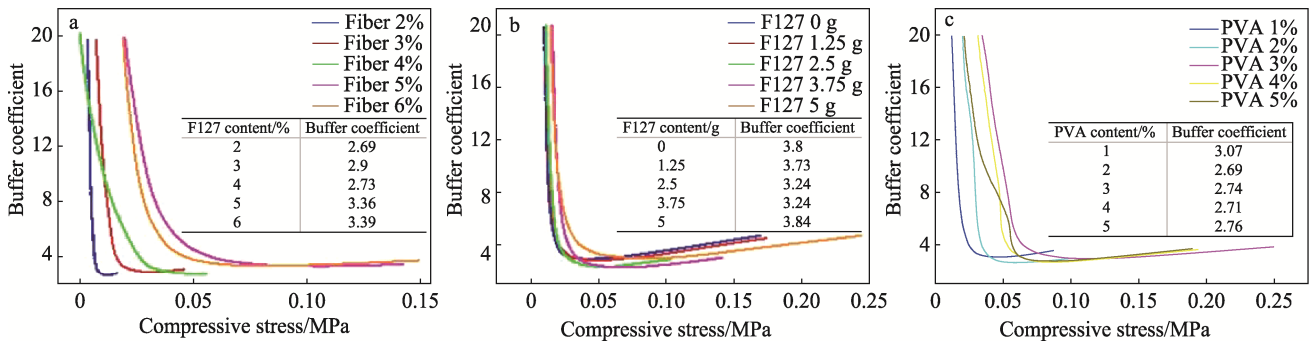


图 8 纤维 (a)、聚醚 F127 (b)、PVA 含量 (c) 下的缓冲系数曲线
Fig.8 Buffering coefficient curves under different contents of fiber (a), polyether F127 (b) and PVA (c)

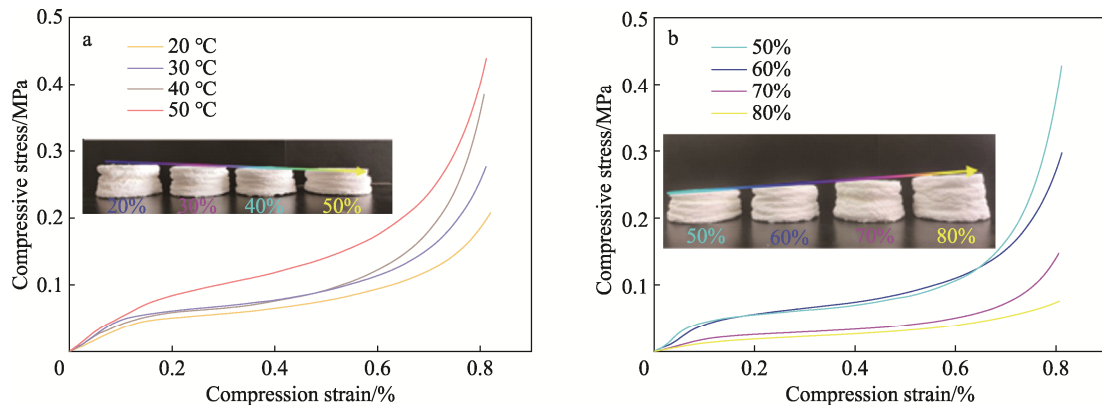


图 9 不同温度 (a)、湿度 (b) 条件下植物纤维发泡缓冲材料的力学性能
Fig.9 Mechanical properties of plant fiber foaming cushion materials under temperature (a) and humidity conditions (b)

3 结论

以阔叶木纤维和 PVA 为原料, 利用 F127 活性发泡制备了植物纤维发泡材料。在常压干燥工艺的基础上, 研究了不同比例的纤维、F127、PVA 对植物纤维发泡材料发泡性能、力学性能的影响。结果表明, 在发泡性能方面, 植物纤维的质量分数为 4% 时发泡材料具有优异的发泡性能, 同时 F127 的加入有效降低了体系的表面张力, 为纤维/氢键网络的紧密搭接提供了基础, 且在添加量为 2% 时, 材料的发泡性能最稳定。在力学性能方面, 纤维含量较低时, 材料具有较好的回弹性; 在纤维含量较高时, 材料具有较高的

力学强度。F127 含量的变化对材料在屈服阶段的影响较小, 表明在维持其结构稳定性方面具有显著优势。在 PVA 含量为 3% 时, 发泡材料具有优异的抗压强度和回弹性。综上所述, 当植物纤维的质量分数为 4%、PVA 的质量分数为 3%、F127 的质量分数为 2% 时, 植物纤维发泡材料具有较优的综合性能。

参考文献:

[1] 樊泽鹏, 王克俭. 塑料缓冲包装材料的现状与应用[J]. 塑料包装, 2022, 32(1): 7-11.
FAN Z P, WANG K J. Current Situation and Application of Cushioning Packaging Plastics[J]. Plastics Packaging,

- 2022, 32(1): 7-11.
- [2] ZHANG Y L, DUAN C, BOKKA S K, et al. Molded Fiber and Pulp Products as Green and Sustainable Alternatives to Plastics: a Mini Review[J]. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2022, 7(1): 14-25.
- [3] 赵荣钦, 黄贤金, 郟文聚, 等. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1123-1136.
- ZHAO R Q, HUANG X J, YUN W J, et al. Key Issues in Natural Resource Management under Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality Targets[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1123-1136.
- [4] KINNUNEN K, LEHMONEN J, BELETSKI N, et al. Benefits of Foam Forming Technology and its Applicability in High MFC Addition Structure[C]// *Proceedings of the 15th Pulp and Paper Fundamental Research Symposium Cambridge*, 2013: 837-850.
- [5] 杜新亚. 改性蒙脱土-植物纤维复合发泡材料的制备与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 12-15.
- DU X Y. Preparation and Study of Modified Montmorillonite-Plant Fiber Composite Foaming Material[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 12-15.
- [6] ZHAO J, ZHENG S, Xu Z, et al. Microwave Foaming of Polymers[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56: 15491-15498.
- [7] SUNGSEE P, TANRATTANAKUL V. Biocomposite Foams from Poly(lactic acid) and Rubber Wood Sawdust: Mechanical Properties, Cytotoxicity, and in vitro Degradation[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(48): e48259.
- [8] LI P, ZHU X Y, KONG M Q, et al. Fully Biodegradable Polylactide Foams with Ultrahigh Expansion Ratio and Heat Resistance for Green Packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 183: 222-234.
- [9] 赵洪凯, 肖文淇. 表面活性剂对泡沫稳定机理的研究进展[J]. *应用化工*, 2019, 48(5): 1167-1171.
- ZHAO H K, XIAO W Q. The Surfactant Is Making Progress on the Mechanism of Foam Stabilization[J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(5): 1167-1171.
- [10] XU C H. Study on Economical and Efficient Foaming Agent for Mine Dust Suppression Based on Synergistic Effect of Surfactant and Macromolecule Stabilizer[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019: 8-13.
- [11] 李金宝, 董慧玲, 杨雪, 等. SDS用量对植物纤维基泡沫材料结构与性能的影响[J]. *中国造纸*, 2018, 37(7): 1-5.
- LI J B, DONG H L, YANG X, et al. Effect of SDS Content on Structure and Properties of Plant Fiber Based Foam Material[J]. *China Pulp & Paper*, 2018, 37(7): 1-5.
- [12] 张儒静. 石墨烯基多孔材料的模板法制备及性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2017: 13-16.
- ZHANG R J. Preparation and Properties of Graphene-Based Porous Materials by Template Method[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017: 13-16.
- [13] ALDEMIR DIKICI B, DIKICI S, CLAEYSSSENS F. Synergistic Effect of Type and Concentration of Surfactant and Diluting Solvent on the Morphology of Emulsion Templated Matrices Developed as Tissue Engineering Scaffolds[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2022, 180: 105387.
- [14] SCHROËN K, DENG B X, BERTON-CARABIN C, et al. Microfluidics-Based Observations to Monitor Dynamic Processes Occurring in Food Emulsions and Foams[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2023, 50: 100989.
- [15] 陈艳娜. 木质纤维发泡材料多孔形貌及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015: 36-48.
- CHEN Y N. Study on Porous Morphology and Mechanical Properties of Wood Fiber Foamed Materials[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015: 36-48.
- [16] 张文武, 周若零, 曹贤明, 等. 聚合物吸能材料改性方法研究进展[J]. *包装工程*, 2023, 44(5): 244-254.
- ZHANG W W, ZHOU R L, CAO X M, et al. Research Progress on Modification Methods of Polymer Energy Absorbing Materials[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(5): 244-254.
- [17] XU Z R, WANG G L, ZHAO J C, et al. Anti-Shrinkage, High-Elastic, and Strong Thermoplastic Polyester Elastomer Foams Fabricated by Microcellular Foaming with CO₂ & N₂ as Blowing Agents[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, 62: 102076.
- [18] 王菲, 李长皓. 不同增塑剂用量对NBR发泡材料性能的影响[J]. *橡塑技术与装备*, 2021, 47(23): 11-15.
- WANG F, LI C H. Influence of Different Plasticizer Dosage on the Properties of NBR Foamed Materials[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2021, 47(23): 11-15.
- [19] ZHANG Z Y, QIAO M, ZHAO H X, et al. Effect of Mixed Surfactants on Foam Stabilization: a Molecular Dynamics Simulation[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 365: 120096.
- [20] WANG Z, SHEN X P, YAN Y T, et al. Facile Fabrication of a PDMS @ Stearic Acid-Al(OH)₃ Coating on Lignocellulose Composite with Superhydrophobicity and Flame Retardancy[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 450: 387-395.
- [21] 卓丽菊, 鄂玉萍, 王家俊, 等. 可调湿发泡缓冲包装材料的制备及性能研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(13): 134-140.
- ZHUO L J, E Y P, WANG J J, et al. Preparation and Properties of Adjustable Moisture Foaming Cushioning Packaging Materials[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(13): 134-140.