装备防护

淀粉/PP 基发泡缓冲包装材料动态冲击性能研究

高文华^{1,2},寿梦伟¹,陶连豪¹,宋海燕^{1,2},王立军^{1,2}

(1.天津科技大学 轻工科学与工程学院,天津 300457;2.中国轻工业食品包装材料与技术重点实验室,天津 300457)

摘要:目的 研究不同初始应变率和湿度条件下,淀粉/PP 基发泡缓冲包装材料的动态冲击性能,并构建 基于湿度及应变率的动态本构模型。方法 应用冲击试验机对淀粉/PP 基发泡缓冲包装材料进行不同初始 应变率及相对湿度下的动态冲击实验,得到其应力-应变曲线,并构建动态本构模型。结果 动态冲击下, 材料的应变率效应较为明显,该材料的应力和能量吸收随着初始应变率的增加而增加。在相对湿度为 50%的条件下,当应变为 0.6 时,随着初始应变率由 30 s⁻¹分别增加至 34.6、38.6 s⁻¹,材料的应力分别 增加了 36.1%和 50.4%,能量吸收分别增加了 25.8%、36.4%。该材料对环境湿度较为敏感,该材料动态 冲击力学性能随着相对湿度的增加显著降低,在初始应变率为 38.6 s⁻¹条件下,当应变为 0.6 时,随着 相对湿度由 50%增加到 70%、90%,该材料的应力分别下降了 9.7%和 11.3%。另外,构建了基于初始应 变率和湿度的淀粉/PP 基发泡材料的动态冲击本构模型。结论 初始应变率与湿度对材料的缓冲性能有一 定的影响。基于初始应变率和相对湿度的动态冲击本构模型,通过实验进行了验证,实验数据和本构模 型一致性较好,该本构模型可用于预测该材料的动态冲击应力-应变曲线。 关键词:缓冲包装材料;应力-应变曲线;初始应变率;相对湿度;本构模型 中图分类号:TB484.9 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)13-0261-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.031

Dynamic Impact Properties of Starch/PP Foam Cushioning Packaging Materials

GAO Wen-hua^{1,2}, SHOU Meng-wei¹, TAO Lian-hao¹, SONG Hai-yan^{1,2}, WANG Li-jun^{1,2}

(1. School of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Key Laboratory of Food Packaging Materials and Technology of China Light Industry, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: The work aims to study the dynamic impact properties of starch/polypropylene (PP) foam cushioning packaging material under different initial strain rates and relative humidity and construct the dynamic constitutive model based on humidity and strain rate. The stress-strain curves were obtained through the dynamic impact experiments on starch/PP foam cushioning packaging material by impact test machine under different initial strain rates and relative humidity and the dynamic constitutive model was constructed. The effect of strain rate was significant under dynamic impact and the stress and energy absorption increased obviously as the initial strain rate increased. The material stress increased by 36.1% and 50.4% and the energy absorption increased by 25.8% and 36.4% as the initial strain rate increased from 30 s^{-1} to 34.6 and 38.6 s^{-1} when the strain was 0.6 under RH50%. The material was sensitive to humidity. The dynamic impact properties declined as the relative humidity increased. The stress decreased by 9.7% and 11.3% as the humidity increased from 50% to 70% and 90% when the strain was 0.6 under initial strain rate of 38.6 s^{-1} . Based on the

收稿日期: 2023-04-13

基金项目:国家自然科学基金 (32202116);天津市科技计划项目 (21YDTPJC00480)

作者简介:高文华(1979—),女,硕士,讲师,主要研究方向为功能性纸包装材料。

通信作者:王立军(1990—),女,博士,讲师,主要研究方向为运输包装动力学。

above analysis, the dynamic impact constitutive model of starch/PP foam cushioning packaging material was constructed based on initial strain rate and relative humidity. The initial strain rate and humidity have a certain impact on the cushioning performance of the material. The dynamic impact constitutive model based on the initial strain rate and relative humidity is verified by experiments. The experimental data are in good agreement with the constitutive model, and the constitutive model can be used to predict the dynamic impact stress-strain curve of the material.

KEY WORDS: cushioning packaging material; stress-strain curve; initial strain rate; relative humidity; constitutive model

随着限塑令的持续推行,石油基发泡缓冲包装材 料将逐渐被限制使用,开发绿色环保可降解缓冲包装 材料成为了运输包装领域研究的热点^[1-2]。淀粉基发 泡材料可完全降解,成本较低,在运输包装领域具有 较好的应用前景^[3]。纯淀粉基发泡材料弹性及缓冲性 能较差,添加聚丙烯(PP)成分能有效提高其回弹性 和力学性能。淀粉/PP基发泡材料可部分降解,在一 定程度上减少了对环境的污染。淀粉基发泡粒适用性 广,对异性产品也具有很好的适用性,可实现快速包 装成型,目前被广泛应用在日化用品、电子产品、药 品等产品的运输包装上^[4],具有广阔的应用前景。

目前,国内外学者对淀粉基发泡缓冲材料的制备 及其性能表征进行了研究[5-10]。通过加入少量热塑性 高分子来改善淀粉的回弹性和吸水性,获得了最佳 配比,研究了发泡倍率、甘油添加量等生产工艺对 淀粉基发泡材料性能的影响。Meng 等[11]通过研究表 明聚乙烯亚胺可有效改善淀粉基发泡材料的性能。 研究表明环境湿度对淀粉基缓冲包装材料的力学性 能具有一定的影响, Lamb 等^[12]对淀粉基发泡缓冲包 装材料的力学性能进行了研究,分析了极端温度和 极端湿度对其缓冲性能的影响,对淀粉基发泡缓冲 包装材料的研发以及包装设计具有较大的指导价 值。卢子兴等[13]研究了聚氨酯发泡粒的动态冲击性 能,得到了高应变率下的应力-应变曲线。缓冲包装 材料的本构模型可用以预测其性能,目前关于本构 模型[14]学者们进行了较为深入的研究。其中,郑梦 晨等[15]采用正弦正切函数组合构建瓦楞纸板本构方 程, 高德等^[16]基于植物秸秆纤维聚氨酯复合缓冲包 装材料的静态压缩试验,考虑了材料密度及应变率 影响因素,建立了该材料的静态压缩本构关系模型, 用数值计算方法识别了模型参数。

基于物流运输背景,产品包装件跌落现象时有 发生,并且环境湿度随地区在不断地发生变化。本文 以淀粉/PP 基发泡缓冲包装材料为研究对象,旨在探究 不同中等应变率和湿度对其动态缓冲性能的影响规律, 并构建该材料的动态本构模型。本研究对淀粉/PP 基缓 冲发泡材料的缓冲包装设计具有一定的指导价值。

1 实验

1.1 材料与设备

实验样品由广州市天乙合成材料有限公司提供,

其中 PP 质量分数为 17%, 密度为 0.057 g/cm³, 如图 1 所示。散状发泡粒可实现快速包装, 对异型产品具 有较好的适用性。

研究中所用恒温恒湿箱型号为 ETH-408-40-CP-AR,由巨贸仪器(北京)有限公司生产。冲击实 验所用设备为 DY-3 冲击试验机。



图 1 实验材料 Fig.1 Experimental material

1.2 方法

首先,参照 GB/T4857.2 - 2005《包装 - 运输包 装件基本试验第—2部分:温湿度调节》^[17]。对实验 样品进行温湿度预处理。温度为 23 ℃,相对湿度分 别为 50%、70%、90%,处理时间为 24 h。

然后,参照 GB/T 8167—2008《包装用缓冲材料 动态压缩试验方法》^[18]对经温湿度处理后的实验样品 进行不同高度下的动态冲击实验,探究初始应变率和 相对湿度对材料动态缓冲性能的影响。具体方法:将 实验样品均匀分层码放在一个直径为 15 cm 的刚性 容器中,实验样品总厚度约为 10 cm。跌落高度分别 设置为 46、61、76 cm,对应的初始应变率分别为 30.0、 34.6、38.6 s⁻¹,重锤质量为 10 kg。实验在样品从恒 温恒湿箱取出后 5 min 内完成。通过实验获得材料的 动态冲击应力–应变曲线,进而通过计算得到材料的 能量吸收,见式(1)。设置 3 次平行实验,取 3 次实 验结果的平均值进行分析。

$$W = \int_{0}^{\mathcal{E}_{0}} \sigma \mathrm{d}\varepsilon \tag{1}$$

式中: ε_0 为当前积分点的应变值; W为材料的吸能; σ 为应力; ε 为应变。

第44卷 第13期

2 结果与分析

2.1 淀粉/PP 基发泡材料应变率效应

图 2 为淀粉/PP 基发泡包装缓冲材料的动态冲击 应力-应变曲线。相同湿度下,材料的应力随着初始 应变率的增加而增加,表明该材料具有较为明显的应 变率效应。当应变为 0.6 时,随着初始应变率由 30.0 s⁻¹



冲击应力-应变曲线 Fig.2 Dynamic stress-strain curve of starch/PP foam packaging materials 分别增加至 34.6、38.6 s⁻¹, 在相对湿度为 50%条件 下,应力分别增加了 36.1%和 50.4%; 在相对湿度 为 70%的条件下应力分别增加了 23.7%和 26.5%; 在 相对湿度为 90%条件下应力分别增加了 25.2%和 43.9%。由分析可知,初始应变率对材料的动态冲击 性能有一定的影响。

在相对湿度为 50%的条件下, 淀粉/PP 基发泡缓 冲包装材料在不同初始应变率的能量吸收曲线如图 3 所示。可知当湿度一定时,随着初始应变率的增大, 材料的吸能也逐渐增强。当应变为 0.6 时,随着初始 应变率由 30.0 s⁻¹分别增加到 34.6、38.6 s⁻¹,材料吸 收的能量分别增加了 25.8%、36.4%。



相关研究表明软质聚氨酯发泡塑料、硬质聚氨酯 发泡塑料、蜂窝纸板等胞壁类缓冲包装材料也具有明 显的应变率效应^[19-21],与本文实验结果一致。对胞壁 类材料来说,当材料被压缩时,胞元内的流体被挤压。 要克服流体与胞壁之间的摩擦,需要施加更多的外 力。应变率越高,这种外力所做的功也就越大,从而 导致应力及能量吸收增加。

2.2 湿度对材料动态缓冲性能的影响

图 4 为不同湿度下材料的动态冲击应力-应变曲 线,初始应变率为 38.6 s⁻¹。由 4 图可知,随着相对 湿度的增加,应力-应变曲线呈向下移动的趋势。当 应变相同时,湿度越大对应的应力越小。应变为 0.6 时,当相对湿度由 50%分别增加至 70%、90%时,对 应的应力分别降低了 9.7%和 11.3%。

3 动态冲击本构模型构建

3.1 本构模型中形状函数构建

本文以温度为 23 ℃、相对湿度为 50%、应变率

(2)





为 30.0 s⁻¹的条件下的数据为参考值,建立该材料关于应变率的本构方程。首先建立本构方程的形状函数。根据应力-应变曲线特征用 e 指数函数来构建形状函数,如式(2)所示。

 $f=ae^{b\varepsilon}$

式中, a、b为常数。

以初始应变率 30.0 s⁻¹曲线为基准,基于最小二乘 法对形状函数进行参数拟合,结果图 5 所示。由图 5 可知,拟合度为 98.81%,拟合效果较好,参数 *a* 和 *b* 分别为 0.007 54 和 3.81。



3.2 本构模型中应变率项构建

结合形状函数,引入应变率影响项 *M*,如式(3) 所示。

$$M\left(\varepsilon,\dot{\varepsilon}\right) = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{\circ}}\right)^{m\varepsilon+n}$$
(3)

式中: ċ。为参考应变率, 取 ċ。=30.0 s⁻¹ (实验最小

值); *M*(ε,ε) 为应变率影响项; *m*、*n* 为待识别相关参数。 相对湿度为 50%、应变率为 0.05 s⁻¹ 的应力–应变 曲线采用最小二乘法对应变率函数进行参数拟合,可 得参数 m 和 n 分别为 3.71 和-0.095 221。

相对湿度为 50%条件下关于应变率的本构方程 如式(4)所示:

$$\sigma = a e^{b\varepsilon} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{m\varepsilon + n} \tag{4}$$

在相对湿度为 50%条件下,用建立的本构模型 (4)对初始应变率为 34.6 s⁻¹和 38.6 s⁻¹下材料的应 力-应变曲线实验数据进行拟合,来对所建立的应变 率项公式进行验证。拟合结果如图 6 所示,效果较好, 图 6a 和图 6b 的拟合度分别为 99.38%和 99.61%。结 果验证了所建立的应变率项公式的正确性。





3.3 本构模型中湿度项构建

探究湿度对淀粉/PP 基发泡材料力学性能的影响。 在同一应变条件下,观察不同湿度下的应力值变化趋势,并将 30.0 s⁻¹应变率下,相对湿度为 50%的应力 分别与相对湿度为 70%、90%的应力相比,得到在不 同湿度条件下应力降低倍数,结果如图 7 所示。



图 7 应力降低倍数与应变关系 Fig.7 Relationship between stress reduction multiple and strain

由图 7 可以发现在同一湿度条件下,应力降低倍数并未发生较大的波动。相对湿度为 50%、70%和 90%下的应力降低倍数平均值分别为 1.0、1.1 和 1.1。采用不同应变下应力降低倍数的平均值来描述同一湿度下力学性能降低的变化趋势。选用指数函数作为该材料本构模型的湿度影响项,表达式如式(5)所示。

$$R(h) = e^{q(\frac{h}{h_0} - 1)}$$
(5)

式中: *q* 为需要拟合的参数; *h* 为相对湿度; *h*₀ 为参考湿度(50%)。

基于最小二乘法对参数 q 进行拟合,最终结果为 q=0.141 9,湿度项的拟合结果和实验数据的对比如图 8 所示,拟合度为 92.86%。表明拟合结果和试验数据 具有较好的一致性,验证了所构建湿度项的正确性。



图 8 湿度项拟合结果和试验数据对比 Fig.8 Comparison between humidity term fitting results and test data

以淀粉基缓冲材料的应力-应变曲线为参考,计 算较高湿度条件下应力-应变数据,最终的本构模型 为湿度项的倒数,如式(6)所示。

$$\sigma = a \mathrm{e}^{b\varepsilon} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{m\varepsilon + n} \cdot \mathrm{e}^{-q(\frac{h}{h_0} - 1)} \tag{6}$$

3.4 本构模型验证

根据构建的本构方程(6)分别对初始应变率为 34.6 s⁻¹、相对湿度为 50%,初始应变率为 38.6 s⁻¹、 相对湿度为 70%,初始应变率为 38.6 s⁻¹、相对湿度 为 90%条件下的应力–应变曲线进行拟合,取得了较 好的拟合效果,结果如图 9 所示。其中图 9a、图 9b、





图 9c 的拟合度分别达到了 99.38%, 99.67%, 99.81%。 结果说明构建的本构模型可用于淀粉基/PP 发泡材料在 不同相对湿度和初始应变率下的动态冲击应力-应变 曲线的预测,所构建本构模型的正确性得到了验证。

4 结语

本文研究了初始应变率和相对湿度对淀粉/PP 基 发泡缓冲包装材料动态冲击性能的影响,基于此构建 了淀粉/PP 基发泡缓冲包装材料的动态冲击本构模 型,结论如下:

1)动态冲击下淀粉/PP 基发泡缓冲包装材料具有 较为明显的应变率效应,其应力和能量吸收随着初始 应变率的增加而增加。在相对湿度为 50%条件下,当 应变为 0.6 时,随着初始应变率由 30 s⁻¹分别增加至 34.6、38.6 s⁻¹,材料的应力分别增加了 36.1%和 50.4%,能量吸收分别增加了 25.8%、36.4%。

2)淀粉/PP 基发泡缓冲包装材料对环境湿度较为 敏感,其动态冲击的应力和能量吸收随着相对湿度的 增加而降低。在初始应变率为 38.6 s⁻¹条件下,当应 变为 0.6 时,随着相对湿度由 50%增加到 70%、90%, 该材料的应力分别下降了 9.7%和 11.3%。

3)建立了基于初始应变率和相对湿度的动态冲 击本构模型,并通过实验进行了验证。实验数据和本 构模型一致性较好,该本构模型可用于预测不同初始 应变率和湿度下该材料的动态冲击应力-应变曲线。

参考文献:

- 曾军堂,陈庆. 一种低成本高回弹性生物降解减震包装 材料及制备方法: China, 110204794A[P]. 2021-05-07.
 ZENG Jun-tang, CHEN Qing. Low-Cost and High-Resilience Biodegradable Shock-Absorbing Packaging Material and Preparation Method Thereof: China, 110204794A[P]. 2021-05-07.
- [2] 赵红,郑永杰,谭斌,等.汉麻秆芯/玉米秸秆充填缓 冲发泡材料的制备及性能研究[J].包装工程,2021, 42(13):149-156.

ZHAO Hong, ZHENG Yong-jie, TAN Bin, et al. Properties of Hemp Straw Core/Corn Straw Buffer Foaming Material[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 149-156.

- [3] 王哲,李琛. 植物纤维多孔材料泡孔分布影响因素
 [J]. 包装工程, 2022, 43(1): 26-34.
 WANG Zhe, LI Chen. Affecting Factors of Cell Distribution of Plant Fiber Porous Materials[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 26-34.
- [4] 吴彤彤,吴金卓,王卉,等.缓冲包装材料经济性与

环境影响评价研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 17-24.

- [5] WU Tong-tong, WU Jin-zhuo, WANG Hui, et al. Research Progress on Technology Economy and Environmental Impact Assessment of Buffer Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 17-24.
- [6] SHAO Ze-zheng, DUAN Qing-fei, SHI K, et al. Application of Insoluble Cross-Linked Starch Particles as Nucleation for Foaming[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019, 479(1): 012011.
- [7] SHI K, MENG Ling-han, LIN X, et al. Effect of Processing Conditions on Cell Structure of Starch-Based Foam[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019, 479(1): 012018.
- [8] MENG Ling-han, LIU Hong-sheng, YU Long, et al. How Water Acting as both Blowing Agent and Plasticizer Affect on Starch-Based Foam[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 134(13): 43-49.
- [9] ZhANG X, TENG Z, HUANG R. Biodegradable Starch/Chitosan Foam via Microwave Assisted Preparation: Morphology and Performance Properties[J]. Polymers, 2020, 12(11): 2612.
- [10] 林涛,张希娟,殷学风,等.单一/复合塑化剂制备热 塑性淀粉材料研究[J]. 陕西科技大学学报,2019, 37(2):11-16.
 LIN Tao, ZHANG Xi-juan, YIN Xue-feng, et al. Study on Preparation of Thermoplastic Starch Material by Single/Compound Plasticizer[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2019, 37(2): 11-16.
- [11] 张宇,武吉梅,王冬梅,等.缓冲包装用明胶-淀粉泡 沫的性能研究[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 25-31.
 ZHANG Yu, WU Ji-mei, WANG Dong-mei, et al. Properties of Gelatin-Starch Foam for Cushioning Packaging[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 25-31.
 MENG Ling-han, LI Sheng, YANG Wei-dong, et al. Improvement of Interfacial Interaction between Hydrophilic Starch Film and Hydrophobic Biodegradable Coating[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(10): 9506-9514.
- [12] LAMB M, ROUILLARD V, MILVERTON J. An Evaluation of the Mechanical Performance of Extruded Wheat Starch Loose Fill[J]. Packaging Technology and Science, 2019, 32(2): 511-521.
- [13] 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.

Lu Zi-xing, YUAN Ying-long. Investigation into the

Energy Absorption and Failure Characteristics of Syntactic Foams at High Strain Rates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(5): 114-117.

- [14] XU S, WANG S, ZHONG Y, et al. Compression Characteristics and Constitutive Model of Low-Exotherm Modified Polyurethane Grouting Materials[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1-9.
- [15] 郑梦晨, 王彪, 任梦成, 等. 瓦楞纸板本构模型参数 识别方法[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 186-189.
 ZHENG Meng-chen, WANG Biao, REN Meng-cheng, et al. Method to Determine Parameter Results of Constitutive Modelling of Corrugated Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 186-189.

[16] 高德,刘壮,卢富德. 植物纤维聚氨酯复合缓冲包装 材料本构关系研究[C]// 第十三届全国包装工程学术 会议论文集, 2010: 43-47.
GAO De, LIU Zhuang, LU Fu-de. Study on Constitutive Relation of Compound Plant Package Material Made of Plant Straw Texture[C]// Proceedings of the 13th National Packaging Engineering Academic Conference, 2010: 43-47.

[17] GB/T4857.2—2005,包装-运输包装件基本试验第—2
 部分:温湿度调节[S].
 GB/T 4857.2—2005, Packaging—Basic Tests for

Transport Packages—Part 2: Temperature and Humidity Conditioning[S].

[18] GB/T 8167—2008, 包装用缓冲材料动态压缩试验方 法[S].

GB/T 8167—2008, Testing Method of Dynamic Compression for Packaging Cushioning Materials[S].

[19] 王立军,张岩,王志伟. 循环压缩和冲击下聚氨酯发泡塑料的能量吸收[J]. 振动与冲击,2015,34(5):44-48.
WANG Li-jun, ZHANG Yan, WANG Zhi-wei. Energy Absorption of Expanded Polyurethane under Cycling

Compression and Impact[J]. Journal of Vibration and

[20] WANG Zhi-wei, WANG Li-jun, XU Chen-yi, et al. Influence of Low Intensity Repeated Impacts on Energy Absorption and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Technology and Science, 2016, 29(11): 585-600.

Shock, 2015, 34(5): 44-48.

[21] 刘欢,黄瑞源,蒋东,等.硬质聚氨酯泡沫塑料的应 变率效应研究[J]. 机械工程学报, 2022(58): 1-12.
LIU Huan, HUANG Rui-yuan, JIANG Dong, et al. Research on the Strain Rate Effect of Rigid Polyurethane Foam[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022(58): 1-12.

责任编辑:曾钰婵