

闭孔 EVA 泡沫类静态缓冲性能的研究

孙德强¹, 高璐璐¹, 刘晓晨^{1*}, 陈红娟², 王倩¹, 张艺行¹, 叶润杰¹, 周兴荣¹

(1. 陕西科技大学 a. 轻工科学与工程学院 b. 轻化工程国家级实验教学示范中心

c. 3S 包装新科技研究所, 西安 710021; 2. 陕西科技大学 设计与艺术学院, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究密度与应变率对闭孔 EVA 泡沫材料类静态缓冲性能的影响规律。**方法** 基于包装用缓冲材料静态压缩试验法和能量吸收图法, 对密度为 80、95、106、124 和 180 kg/m³ 的闭孔 EVA 泡沫试样在不同应变率下进行类静态压缩试验, 得到应力-应变曲线, 基于此进一步处理得到相应的单位体积能量吸收、能量吸收效率、缓冲系数和最大比吸能等曲线, 同时绘制试样类静态压缩过程中的能量吸收图。**结果** 闭孔 EVA 泡沫材料的密度越高, 密实化应变越小, 最大单位体积能量吸收越大; 在压缩应变相同时, 应变率越大, 应力、单位体积能量吸收、能量吸收效率、最大比吸能越大; 得到了 5 种密度闭孔 EVA 泡沫材料的本构方程和闭孔 EVA 泡沫材料的能量吸收图及其斜率与应变率的关系式; 通过分析密实化应变与相对密度的关系, 得到相关拟合公式。**结论** 密度与应变率对闭孔 EVA 泡沫材料的缓冲性能有着非常大的影响, 在一定的应力水平下会有一个最佳的密度使得刚好能吸收完能量, 并保护产品不破损, 该最佳密度受应变率的影响, 因此可以通过能量吸收图进行相关的缓冲包装优化设计。

关键词: 闭孔 EVA 泡沫; 类静态压缩; 密度; 应变率; 能量吸收图

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)21-0062-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.008

Quasi-static Cushioning Properties of Closed-cell EVA Foam

SUN De-qiang¹, GAO Lu-lu¹, LIU Xiao-chen^{1*}, CHEN Hong-juan², WANG Qian¹,
ZHANG Yi-xing¹, YE Run-jie¹, ZHOU Xing-rong¹

(1. a. School of Light Industry Science and Engineering, b. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, c. 3S Research Institute of Novel Packaging Science and Technology, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. School of Design and Art, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of density and strain rate on the quasi-static cushioning properties of closed-cell EVA foam. Based on the static compression test for cushioning materials and the energy absorption diagram method used in packaging, closed-cell EVA foam samples with densities of 80, 95, 106, 124, and 180 kg/m³ were subject to quasi-static compression tests at different strain rates, and the stress-strain curves were obtained. Based on further processing, the corresponding curves of energy absorption per unit volume, energy absorption efficiency, cushioning coefficient and maximum specific energy absorption were obtained. Simultaneously, an energy absorption diagram during the static quasi-compression process of the sample was drawn. The results showed that, the higher the density of closed-cell EVA foam, the smaller the densification strain and the larger the maximum energy absorption per unit volume; At the same compression strain, the larger the strain rate, the greater the stress, energy absorption per unit volume, energy

收稿日期: 2023-06-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51575327); 国家级一流专业建设项目 (包装工程 2022); 陕西科技大学课程思政建设项目 (包装技术基础 (双语) 2022)

*通信作者

absorption efficiency, and maximum specific energy absorption; The constitutive equations of five density closed-cell EVA foam materials, the energy absorption diagram of closed-cell EVA foam materials and the relationship between slope and strain rate were obtained; By analyzing the relationship between densification strain and relative density, relevant fitting formulas were obtained. The density and strain rate have a great impact on the cushioning performance of closed-cell EVA foam materials. Under a certain stress level there is an optimal density that can right absorb energy and protect the product from damage. The optimal density is affected by the strain rate, so the design of relevant cushioning packaging can be optimized with the energy absorption diagrams.

KEY WORDS: closed-cell EVA foam; quasi-static compression; density; strain rate; energy absorption diagram

闭孔 EVA 泡沫 (Ethylene Vinyl acetate, EVA) 是一种新型的环保包装材料, 该材料拥有优良的缓冲和隔振性能、良好的回弹性、防潮隔热、易加工、无毒等优点, 因此被广泛地应用于电子设备、出口产品、贵重物品以及高精密仪器等的防护包装^[1]。相较于发泡聚乙烯 (EPE)、发泡聚苯乙烯 (EPS) 等常见的发泡材料, 目前国内外将闭孔 EVA 泡沫材料的研究重心置于其生产制备工艺上, 但对此材料的力学性能的研究较少, 在类静态缓冲性能的研究方面较为欠缺。因此, 研究类静态压缩下闭孔 EVA 泡沫材料的能量吸收性能是非常有必要的。

Rumianek 等^[2]和 Duncan 等^[3]指出泡沫材料的缓冲性能与应变率密切相关。Liu 等^[4]通过准静态压缩试验以及跌落冲击试验确定了 EVA 泡沫材料在不同比应变率下的应力-应变行为。信支援^[5]和 Wen 等^[6]分析了不同凝胶含量的 EVA 发泡材料的往复压缩性能。叶晨炫等^[7]探讨了动态载荷下 EPE 和 EVA 泡沫能量吸收能力的差异。Lutfi 等^[8]研究了 EVA 组合泡沫的压缩和拉伸行为。Verdejo 等^[9]采用有限元分析法研究了冲击过程中 EVA 跑鞋的耐久性, 发现低密度的 EVA 泡沫体积模量更低, 并表明空气压缩在泡沫中提供了主要的减震机制。Lam 等^[10]研究了连续 6 次冲击下厚度对 EVA 泡沫防撞缓性能的影响, 研究指出 EVA 泡沫的峰值接触力随着材料厚度的增大而减小。

由上述文献可知, 已经有众多学者投身于 EVA 泡沫材料缓冲防护性能的研究当中。但目前国内外还没有研究深入地分析闭孔 EVA 泡沫材料在类静态压缩下的缓冲性能。因此, 本文考虑应变率的影响, 根据 Zhang 等^[11]和 Sun 等^[12]采用的能量法及能量吸收图法, 建立以吸能为核心的类静态缓冲性能评价体系, 分析材料密度和应变率对其力学行为和吸能特性的影响, 生成能量吸收图, 为缓冲材料的缓冲包装优化设计提供依据, 同时, 为此材料的进一步研究与推广提供有益借鉴。

1 试验

1.1 材料与仪器

主要材料: 本文采用密度分别为 80、95、106、124

和 180 kg/m³ 的闭孔 EVA 泡沫材料, 对材料进行裁切, 裁切后的试验样品尺寸为 100 mm×100 mm×30 mm, 每种密度试样各裁 27 个, 试样数量共 135 个。

主要仪器: CMT4303 型万能材料试验机, 长春新试验机有限公司; HWS-350 恒温恒湿培养箱, 常州杰博森仪器有限公司; SL01-3 型碳纤维游标卡尺, 德清盛芯电子科技有限公司。

1.2 方案

试验前参考 GB/T 4857.2—2005^[13]在培养箱中对试验样品预处理 24 h, 设置温度为 23 °C, 相对湿度为 50%, 随后在相同的环境条件下进行试验。在研究密度对材料类静态缓冲性能的影响时, 压板采用 12 mm/min 的速度对试验样品施加压力, 试验机自动采集压缩力与位移数值; 在研究应变率对材料类静态缓冲性能的影响时, 假设应变率为 $\dot{\epsilon}$, 压板的压缩速度为 v , 根据压板速度加载范围和材料厚度确定最小应变率为 0.024 min⁻¹, 最大应变率为 25 min⁻¹, 在此范围内将应变率划分为 8 等份, 通过计算得到 8 种应变率对应的压缩速度, 进而对试样进行压缩。

2 数据处理方法

压缩载荷下, 闭孔 EVA 泡沫孔穴弯曲变形, 试样内部产生相互作用的内力, 用以抵抗外力, 与此同时, 试样逐渐被压实。用应力-应变曲线来衡量其单位面积上的内力与试样厚度方向的变形程度, 该曲线下方的积分面积即为试样每单位体积吸收的能量, 密实化点对应最佳的能量吸收点。由于密实化点后材料防护性能急剧下降, 因此认为此时每单位体积吸收能量最多。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{x}{T} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_0 = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \quad (3)$$

式中: σ 为试样产生的应力; F 为压力; A 为冲击滑台与试样的接触面积; ϵ 为应变; x 为材料轴向变形量; T 为试样厚度; E_0 为单位体积能量吸收。

Miltz 等^[14-15]提出使用能量吸收效率来评估聚合物多孔材料的能量吸收特性。缓冲系数为缓冲效率的倒数,指缓冲材料应力与单位体积能量吸收的比值,用 C 表示。

$$E_f(\varepsilon_D) = \frac{\int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_D} \quad (4)$$

$$C = \frac{\sigma}{E_0} = \frac{1}{E_f} \quad (5)$$

式中: E_f 为能量吸收效率; σ_D 为密实化应变所对应的应力。

比吸能是用于比较材料单位质量的能量吸收能力,为试样吸收的总能量与试样质量之比,密实化应变对应的比吸能称为最大比吸能 S_M 。

$$S_M = \frac{E_D}{m} \quad (6)$$

式中: S_M 为应变 ε_D 的比吸能; E_D 为试样的总能量吸收; m 为材料质量。

材料的变形速度称为应变率,它是应变对时间求导的结果,如式(7)所示。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{T} \quad (7)$$

3 试验结果与分析

3.1 闭孔 EVA 泡沫类静态压缩下的 σ - ε 曲线

3.1.1 密度的影响

5 种不同密度的闭孔 EVA 泡沫材料在压力作用下,其应力-应变关系见图 1。由图 1 可知,曲线包括弹性阶段、屈服阶段和密实化阶段。

1) 弹性阶段 ($0 < \varepsilon < \varepsilon_1$)。闭孔 EVA 泡沫材料的弹

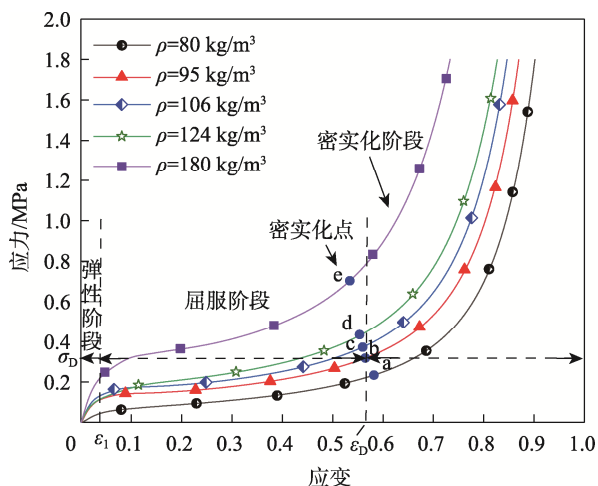


图 1 各种密度 EVA 材料的应力-应变图
Fig.1 Stress-strain diagrams of EVA materials with various densities

性阶段持续时间较短且曲线呈现线性特征。这是由于泡沫材料在类静态压缩时,孔穴的棱弯曲,进而使形成孔的面产生延展,并以线弹性的方式产生变形。随着载荷的增加,开始通过弹性屈曲的方式坍塌,进入屈服阶段。此阶段可以用式(8)来描述^[16]。

$$\frac{W}{E_s} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_D}{E_s} \right)^2 \frac{1}{(\rho^* / \rho_s)^2} \quad (8)$$

式中: W 为泡沫压缩时吸收的能量; E_s 为固体材料的弹性模量; ρ^* 为泡沫材料的密度; ρ_s 为构成泡沫材料的固体材料的密度。

2) 屈服阶段 ($\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_D$)。由图 1 可见,曲线没有明显的屈服点,从弹性阶段过渡到屈服阶段较为平缓,因此可过坐标轴原点做直线 $y=kx$ 与曲线相切,开始与切线分离的点为屈服点,该点为弹性阶段与屈服阶段的分界点。此阶段也是闭孔 EVA 泡沫材料吸收能量的主要阶段,式(9)和式(10)可以很好地描述此阶段^[17]。

$$\frac{\sigma}{E_s} = 0.05 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + \frac{P_0}{E_s} \left[\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon - (\rho^* / \rho_s)} \right] \quad (9)$$

$$\frac{W}{E_s} = 0.05 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \varepsilon + \frac{P_0}{E_s} \left\{ \left(1 - \rho^* / \rho_s \right) \ln \left[\frac{1 - \rho^* / \rho_s}{1 - \varepsilon - (\rho^* / \rho_s)} \right] - \varepsilon \right\} \quad (10)$$

式中: P_0 为孔穴中的大气压。

3) 密实化阶段。随着闭孔 EVA 泡沫材料逐渐被压缩,相对的孔壁相遇并接触,应力急剧增加,平缓过渡到密实化阶段。密实化点可由能量吸收效率曲线的最高点确定,通过曲线最高点得到密实化应变,进而得到对应的密实化应力,该密实化点为屈服阶段与密实化阶段的分界点。图 1 中 a、b、c、d 和 e 点分别为密度 80、95、106、124 和 180 kg/m³ 的应力-应变曲线的密实化点。

由于 EVA 泡沫材料具有非线性特征,因此,其应力应变曲线的本构方程可以用 Rusch 公式来拟合, R^2 均为 0.997,具有较高的拟合度。Rusch 拟合公式^[18]为 $\sigma = A\varepsilon^m + B\varepsilon^n$ 。

拟合得到厚度为 30 mm,密度为 80、95、106、124 和 180 kg/m³ 闭孔 EVA 泡沫的本构方程分别为:

$$\begin{aligned} \sigma &= 4.39131\varepsilon^{10.7175} + 0.36174\varepsilon^{0.92183} \\ \sigma &= 4.47567\varepsilon^{8.28207} + 0.33147\varepsilon^{0.42692} \\ \sigma &= 4.94057\varepsilon^{7.62799} + 0.36295\varepsilon^{0.37357} \\ \sigma &= 5.37569\varepsilon^{7.34726} + 0.45004\varepsilon^{0.457} \\ \sigma &= 7.54217\varepsilon^{5.91918} + 0.62411\varepsilon^{0.32815} \end{aligned} \quad (11)$$

3.1.2 应变率的影响

与固体金属材料相比,闭孔聚合物泡沫往往表现

出非常高的应变率依赖性, 这种依赖性主要是由原材料的特性和泡沫孔穴中空气的存在造成的。

图 2 为 8 种应变率下 80 kg/m^3 闭孔 EVA 泡沫的应力应变图。从图 2 中可以看出, 在 8 种应变率下, 应力应变曲线趋势是相同的, 并且比较紧密。应变率为 0.024 min^{-1} 时的曲线与其他应变率的曲线相比差距较大。在压缩应变相同时, 应变率越大, 材料的变形速度越快, 因此应力越大。

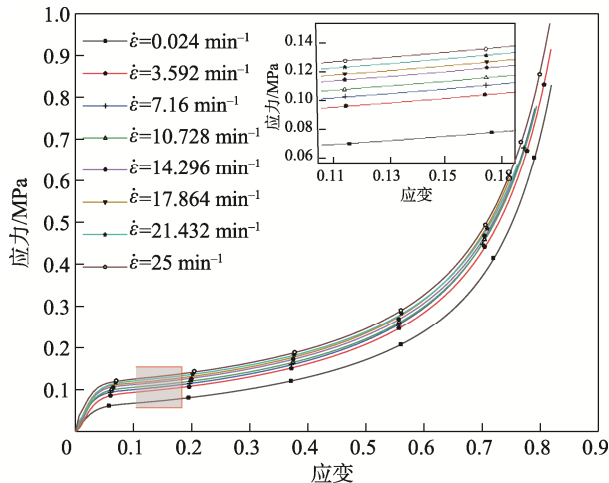


图 2 8 种应变率下 80 kg/m^3 闭孔 EVA 泡沫的应力-应变

Fig.2 Stress-strain diagram of 80 kg/m^3 closed cell EVA foam at eight strain rates

3.2 闭孔 EVA 泡沫类静态压缩下的缓冲性能

3.2.1 密度的影响

不同密度的闭孔 EVA 泡沫材料在类静态压缩下

的能量吸收效率曲线见图 3a, 曲线最高点即为材料的密实化点, 测得 5 种密度材料的密实化应变分别为 0.580、0.565、0.560、0.554 和 0.534。可以看出密度越大, 密实化点对应的应变越小, 这是由于密度越大材料硬度越高。图 3b 给出了不同密度下的缓冲系数-静应力曲线图, 在相同静应力下, 缓冲系数越小, 材料的缓冲性能越好。由图 3b 可看出各种密度材料的最小缓冲系数差异较小。在静应力为 0.51 MPa 时, 密度为 80 kg/m^3 材料的最小缓冲系数最大, 缓冲性能最差, 密度为 106 kg/m^3 材料的最小缓冲系数较小, 缓冲性能最好。缓冲系数-静应力曲线可用于缓冲包装的优化设计, 确定缓冲材料的最佳厚度。

由于厂家提供的固体材料密度为 0.95 g/cm^3 , 因此计算可得材料的相对密度分别为 0.08、0.1、0.11、0.13 和 0.19。将密实化应变与相对密度在同一坐标系中进行拟合, 如图 4 所示, 拟合系数 $R^2=0.96$, 拟合系数接近于 1, 说明曲线拟合程度很高。对于厚度为 30 mm 的闭孔 EVA 泡沫, 密实化应变可以用式 (12) 表示。

$$\varepsilon_D = 0.61 - 0.39 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (12)$$

式中: ε_D 为密实化应变; ρ^*/ρ_s 为材料的相对密度。

闭孔 EVA 泡沫材料的吸能特性可以用材料压缩至一定变形量后所吸收的能量来描述。采用式 (3) 与式 (4) 对数据进行计算处理, 得到 5 种不同密度试样压缩至密实化应变时每单位体积吸收的能量, 将此时的能量吸收称为最大单位体积能量吸收, 如图 5 所示。由图 5 可知, 在本次研究的 5 种不同密度中, 密度越大, 最大单位体积能量吸收越大。能量吸收是衡量材料吸收冲击能大小的指标, 能量吸收值越大, 材料缓冲性能越好; 传递给被防护产品上的力越小, 被防护产品将越安全。

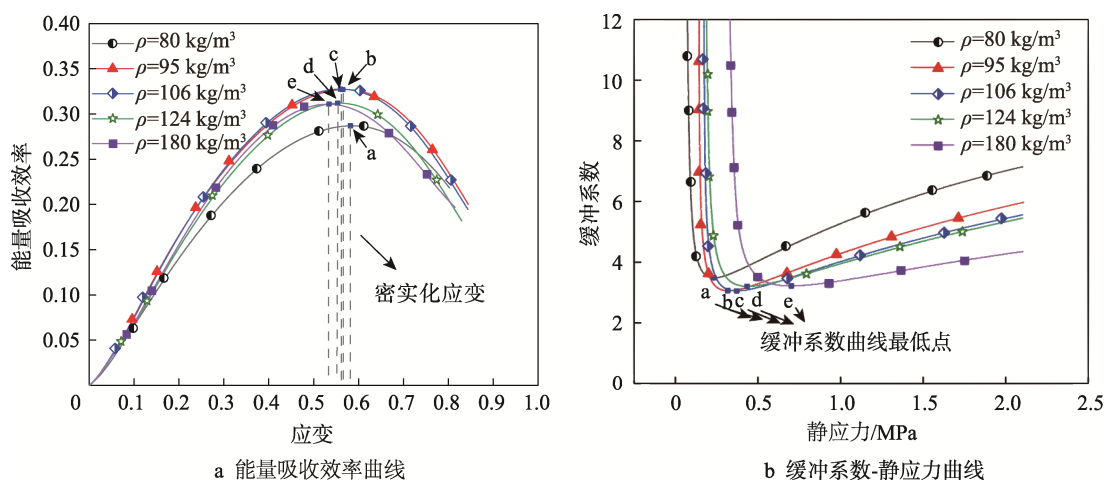


图 3 不同密度材料的能量吸收效率曲线与缓冲系数-静应力曲线

Fig.3 Energy absorption efficiency curve and buffering coefficient-static stress curve of materials with different densities

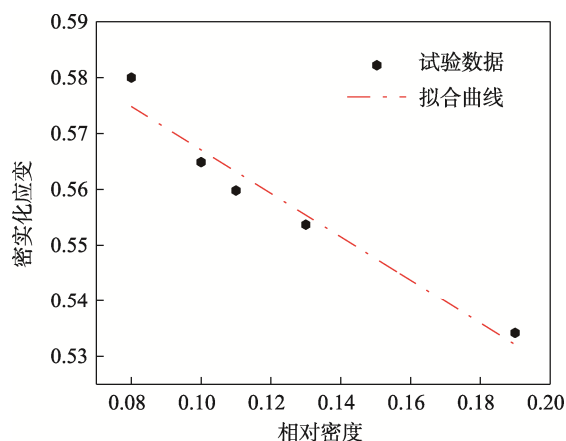


图4 相对密度与密实化应变拟合图

Fig.4 Fitting diagram of relative density and densification strain

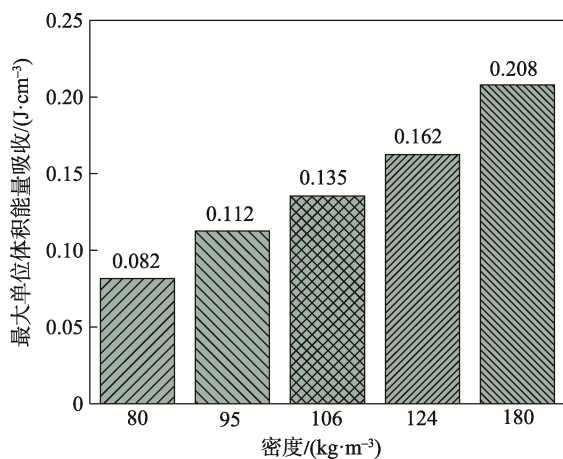
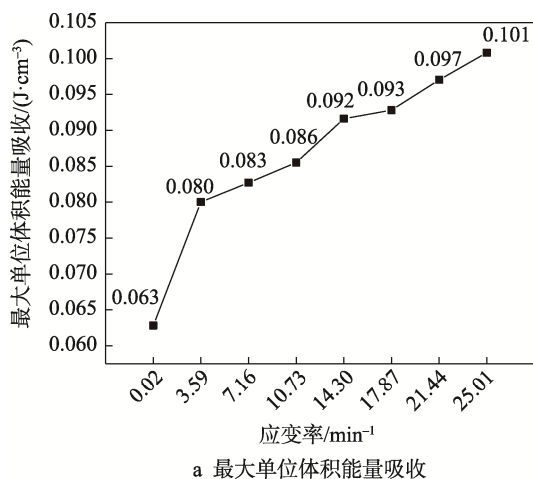


图5 不同密度闭孔 EVA 泡沫的最大单位体积能量吸收

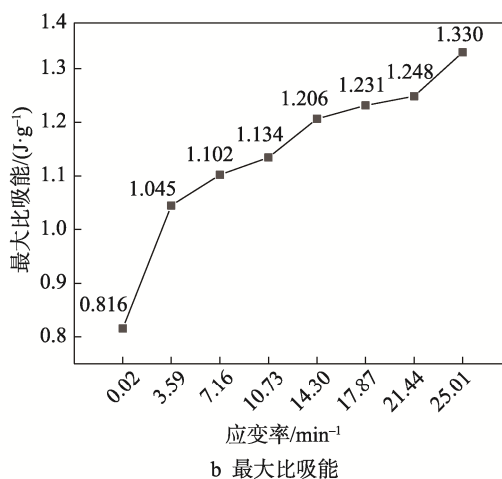
Fig.5 Maximum energy absorption per unit volume of closed cell EVA foam with different densities

3.2.2 应变率的影响

在8种应变率下对密度为80 kg/m³的试样进行压



a 最大单位体积能量吸收

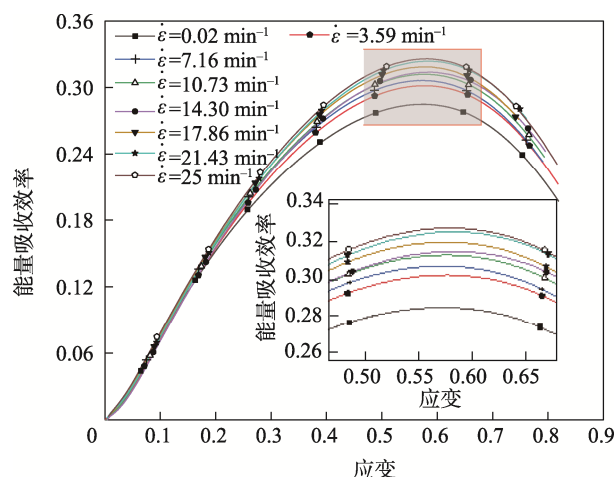


b 最大比吸能

图7 密度为80 kg/m³ EVA 在不同应变率下的最大单位体积能量吸收、最大比吸能Fig.7 Energy absorption per unit volume, maximum specific energy absorption of 80 kg/m³ EVA at different strain rates

缩,得到能量吸收效率如图6所示。从图6中可以看出,闭孔 EVA 泡沫的能量吸收效率曲线呈相似趋势,曲线首先增长至峰值点,接着急剧下降,不同应变率的曲线最高处密实化点对应的应变几乎是相等的,这与材料自身的性能有关。由对应的应力应变图可以看出,弹性区和应力强化阶段很长,这导致能量吸收曲线上升阶段较长,随后由于应变率不同,材料能量吸收效率显现出较大的差异,密实化阶段孔穴被压实,能量吸收效率迅速降低。应变率从 0.02 min⁻¹ 到 25 min⁻¹ 时,对应的能量吸收效率依次为 0.285、0.302、0.306、0.311、0.315、0.319、0.324 和 0.326,其中应变率为 25 min⁻¹ 的能量吸收效率最大。

密度为 80 kg/m³ 的试样,在不同应变率下,材料被压至密实化的单位体积能量吸收、最大比吸能见图7。由图7可见,随着应变率的增大,密实化阶段的单位体积能量吸收、最大比能量吸收逐渐增大。压缩速度越快,材料孔穴内气体的反作用力越大,因此能量吸收越多。

图6 不同应变率下 80 kg/m³ 的闭孔 EVA 泡沫的能量吸收效率图Fig.6 Energy absorption efficiency diagram of 80 kg/m³ closed cell EVA foam at different strain rates

3.3 闭孔 EVA 泡沫类静态压缩下的能量吸收

3.3.1 密度的影响

能量吸收图由材料的应力-应变曲线生成, 克服了传统缓冲包装设计方法数据获取复杂、很难优化材料的相对密度等弊端, 闭孔 EVA 泡沫是具有黏滞性的泡沫材料, 其应力-应变曲线受到应变率影响, 因此传统方法就很难完成复杂的优化设计。图 8a 为密度 80 kg/m^3 、厚度 30 mm 的闭孔 EVA 泡沫材料在不同应变率下的单位体积能量吸收图。由图 8a 可见, 弹性阶段的单位体积能量吸收较小, 随着应力的增加, 屈服平台阶段的单位体积能量吸收急剧增加, 在此阶段材料吸收较多的能量来保护被防护物品。图 8a 中蓝色的点为密实化点, 密实化点之后进入密实化区, 曲线斜率变小, 能量吸收能力变弱。图 8b 为 5 种相对密度试样对应的能量吸收图。由图 8b 可见

不同相对密度材料包迹线斜率相差不大。

密度为 80 、 95 、 106 、 124 和 180 kg/m^3 的材料应力与单位体积能量吸收的关系式分别为 $E_0 = 0.41758\sigma - 0.03329$ 、 $E_0 = 0.42471\sigma - 0.03165$ 、 $E_0 = 0.43693\sigma - 0.03947$ 、 $E_0 = 0.39751\sigma - 0.04362$ 和 $E_0 = 0.41032\sigma - 0.07269$ 。

3.3.2 应变率的影响

在压缩应变率为 25 min^{-1} 、温度为 23°C 的条件下测试厚度为 30 mm 的 5 种不同密度材料的单位体积能量吸收曲线如图 9a 所示。对于给定的产品, 最好的缓冲材料是上升至产品最大许用应力时吸收能量最多的材料。密度过高或过低都会在能量吸收完之前产生一个较高的峰应力, 造成产品损坏^[19]。不同密度曲线的肩部点与该密度材料最佳的许用应力相对应, 肩部点的连线为此材料在该应变率下的包迹线。重复上述操作, 得到不同应变率下的能量吸收图, 如图 9b 所示。

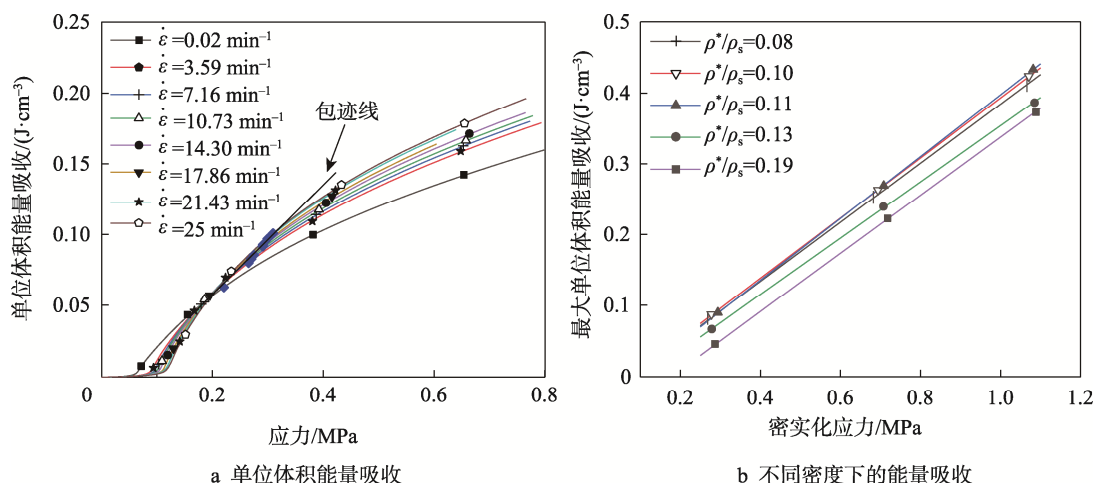


图 8 密度为 80 kg/m^3 的 EVA 在不同应变率下的单位体积能量吸收曲线与能量吸收图
Fig.8 Energy absorption curves and energy absorption diagrams per unit volume of 80 kg/m^3 EVA at different strain rates

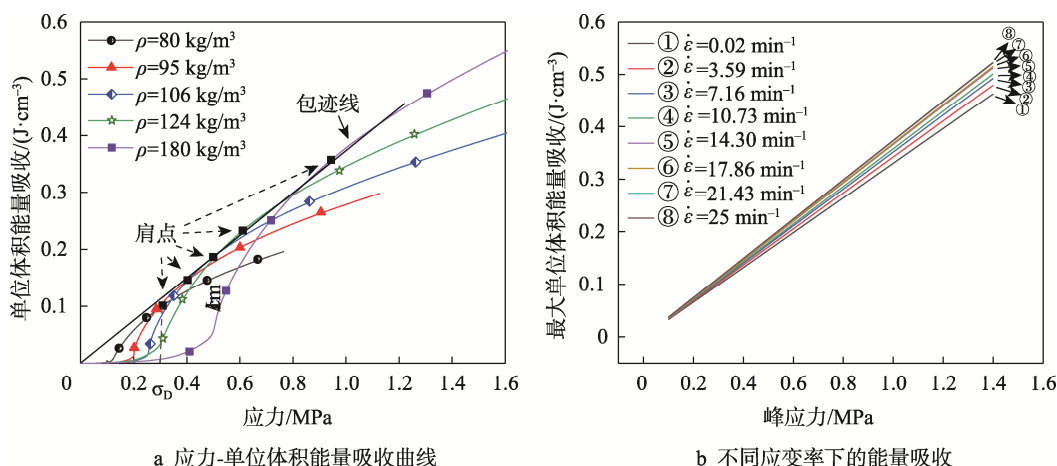


图 9 不同密度材料在应变率为 25 min^{-1} 下的单位体积能量吸收曲线与能量吸收图
Fig.9 Energy absorption curves and energy absorption diagrams per unit volume of materials with different densities at a strain rate of 25 min^{-1}

应变率为 0.02、3.59、7.16、10.73、14.30、17.86、21.43、25 min^{-1} 时, 应力与最大单位体积能量吸收的关系式分别为 $E_0 = 0.33041\sigma$ 、 $E_0 = 0.3424\sigma$ 、 $E_0 = 0.35176\sigma$ 、 $E_0 = 0.35786\sigma$ 、 $E_0 = 0.36632\sigma$ 、 $E_0 = 0.36813\sigma$ 、 $E_0 = 0.37302\sigma$ 、 $E_0 = 0.37385\sigma$ 。可根据此进行缓冲优化设计。将应变率与斜率进行多项式拟合, 如图 10 所示。在所研究的应变率范围内, 应变率与能量吸收图的斜率可以用式 (13) 表示, $R^2 = 0.99$, 具有很好的拟合度。

$$K = 0.00312\dot{\epsilon} - 6.11293(\dot{\epsilon})^2 + 0.33348 \quad (13)$$

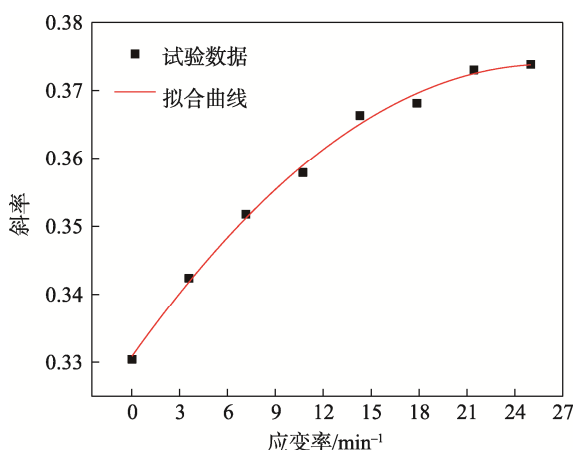


图 10 应变率与斜率的关系
Fig.10 Relationship between strain rate and slope

4 结 语

本文总结了类静态压缩下密度和应变率对闭孔 EVA 泡沫材料缓冲性能的影响规律。分析了材料的应力-应变、能量吸收效率、缓冲系数、最大单位体积能量吸收与最大比吸能等指标, 得到了材料的本构方程、密实化应变与相对密度之间的关系式、能量吸收图及能量吸收图的应变率与斜率之间的关系式, 得出结论如下:

1) 闭孔 EVA 泡沫材料的应力-应变曲线也分为 3 个阶段, 但与典型泡沫材料最明显地区别为此材料的屈服阶段并不是一段长长的平台, 而是应力值随着应变增加而缓慢增加, 这可能与原材料的性能有关。

2) 试验结果表明, 闭孔 EVA 泡沫材料密度越大, 密实化点处每单位体积吸收的能量越多, 说明密度对闭孔 EVA 泡沫材料的力学性能起着重要作用。对材料的密实化应变和相对密度进行分析发现, 材料密度越大, 密实化应变越小。

4) 在压缩应变相同时, 应变率越大, 应力、单位体积能量吸收、能量吸收效率、最大比吸能越大。因此, 闭孔 EVA 泡沫材料密度的选择受应变率的影响。能量吸收图综合了密度和应变率, 可根据能量吸

收图进行以闭孔 EVA 泡沫材料为缓冲材料的缓冲包装设计。

参考文献:

- [1] ROSA V B, ZATTERA A J, POLETTI M. Evaluation of Different Mechanical Recycling Methods of EVA Foam Waste[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2021, 53(7): 841-860.
- [2] RUMIANEK P, DOBOSZ T, NOWAK R, et al. Static Mechanical Properties of Expanded Polypropylene Crushable Foam[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2021, 14(2): 249-264.
- [3] DUNCAN O, BAILLY N, ALLEN T, et al. Effect of Compressive Strain Rate on Auxetic Foam[J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 1-13.
- [4] LIU D S, CHEN Z H, TSAI C Y, et al. Compressive Mechanical Property Analysis of Eva Foam: Its Buffering Effects at Different Impact Velocities[J]. Journal of Mechanics, 2017, 33(4): 435-441.
- [5] 信支援. 弹性体发泡材料的往复压缩性能及其寿命预测[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021: 1-5.
XIN Zhi-yuan. Reciprocating Compressibility and Life Prediction of Elastomeric Foam Materials[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2021: 1-5.
- [6] WEN Shi-bao, XIN Zhi-yuan, PHULE A D, et al. Microcellular Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Foam: Life Prediction under Reciprocating Compression[J]. Advanced Engineering Materials, 2022, 24(5): 1-5.
- [7] 叶晨炫, 王志伟. EPE 和 EVA 发泡缓冲材料吸能特性表征[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 40-45.
Ye Chen-xuan, Wang Zhi-wei. Characterization of Energy Absorption Characteristics of EPE and EVA Foaming Cushioning Materials[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 40-45.
- [8] LUTFI S N N, ABD RAZAK N A, ALI S, et al. Compression and Tension Behavior of the Prosthetic Foam Materials Polyurethane, EVA, Pelite™ and a Combination of Polyurethane and EVA: A Preliminary Study[J]. Biomedizinische Technik, 2021, 66(3): 317-322.
- [9] VERDEJO R, MILLS N J. Heel-Shoe Interactions and the Durability of EVA Foam Running-Shoe Midsoles[J]. Journal of Biomechanics, 2004, 37(9): 1379-1386.
- [10] LAM C, KWAN J S H, SU Y, et al. Performance of Ethylene-Vinyl Acetate Foam as Cushioning Material for Rigid Debris-Resisting Barriers[J]. Landslides, 2018,

- 15(9): 1779-1786.
- [11] ZHANG Xiao-tian, WANG Rui-qing, LI Xiao-gang, et al. Energy Absorption Performance of Open-Cell Aluminum Foam and Its Application in Landing Buffer System[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(8): 6132-6145.
- [12] SUN De-qiang, SUN Yu-jin, BEN Jin-cui, et al. Energy Absorption Characteristics of Circular-Celled Honeycombs under In-Plane Quasi-Static Compressive Loadings[J]. International Journal of Materials Research, 2021, 112(7): 565-577.
- [13] GB/T 4857.2—2005, 包装-运输包装-温湿度处理条件[S].
GB/T 4857.2-2005, Packaging-Transport Packaging-the Temperature and Humidity Processing Conditions[S].
- [14] MILTZ J, GRUENBAUM G. Evaluation of Cushioning Properties of Plastic Foams from Compressive Measurements[J]. Polymer Engineering & Science, 1981, 21(15): 1010-1014.
- [15] MIRALBES R, HIGUERA S, RANZ D, et al. Comparative Analysis of Mechanical Properties and Energy Absorption Capabilities of Functionally Graded and Non-Graded Thermoplastic Sheet Gyroid Structures[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 29(26): 5142-5155.
- [16] AVALLE M, BELINGARDI G, MONTANINI R. Characterization of Polymeric Structural Foams under Compressive Impact Loading by Means of Energy-Absorption Diagram[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(5): 455-472.
- [17] LINUL E, ȘERBAN D A, MARSAVINA L, et al. Assessment of Collapse Diagrams of Rigid Polyurethane Foams under Dynamic Loading Conditions[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17(3): 457-466.
- [18] 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: 110-111.
Peng Guo-xun. Logistics Transport Packaging Design Second Edition[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2011: 110-111.
- [19] 孙德强. 基于能量吸收图法的缓冲包装材料优化设计[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(4): 411-414.
Sun De-qiang. Optimal Design of Materials for Cushioning Packaging Based on Energy Absorption Diagrams[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(4): 411-414.

责任编辑: 曾钰婵