

EVA 闭孔泡沫静动态压缩与冲击的仿真分析

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.3005

叶润杰 孙德强
马兴元 司博涵

陕西科技大学
轻工科学与工程学院
陕西 西安 710021

摘要: 对 EVA 闭孔泡沫材料进行静态压缩试验及有限元仿真, 探究不同密度 EVA 闭孔泡沫的缓冲性能与仿真分析的可靠性。通过闭孔泡沫材料的静态和动态压缩试验得到应力-应变曲线等数据, 以此进一步分析其力学性能。选择 LS-DYNA 中 Mat83 本构模型, 建立 EVA 闭孔泡沫的有限元模型, 将仿真结果与同工况的试验结果进行对比。在静态与动态压缩试验中, 随着密度变大, 相同应变的 EVA 闭孔泡沫的应力会提高, EVA 闭孔泡沫的最大能量吸收也会变大, 但不同工况下, 会有一个中间密度的 EVA 闭孔泡沫缓冲效果最理想。在仿真方面, LS-DYNA 中 Mat83 本构模型仿真曲线与试验曲线吻合较好。LS-DYNA 中 Mat83 本构模型能很好地模拟 EVA 闭孔泡沫在动态冲击下的力学行为。

关键词: EVA 闭孔泡沫; 静态压缩; 力学性能; 有限元; LS-DYNA

中图分类号: TB484.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)03-0036-10

引文格式: 叶润杰, 孙德强, 马兴元, 等. EVA 闭孔泡沫静动态压缩与冲击的仿真分析 [J]. 包装学报, 2025, 17(3): 36-45.

1 研究背景

泡沫材料是气体较均匀地分散于基体物质中所形成的以基体物质为连续相、气体为分散相的两相体系, 是由大量泡孔构成的三维网络^[1]。泡沫材料被视作一种多孔材料, 每个孔洞可近似为多面体, 具有较好的规则性, 气泡孔平均面数、边数相对固定^[2]。目前, 针对泡沫材料的力学试验与仿真研究较多。卫亚明^[3]对不同发泡倍率的闭孔聚丙烯泡沫进行压缩力学试验, 将试验结果与仿真结果进行对比, 以证明有限元模型的合理性。M. F. Alzoubi^[4]、D. A. Apostol^[5]等在不同条件下对不同密度的聚氨酯 (PU) 闭孔泡沫样品进行压缩测试, 发现吸收和耗散能量在很大

程度上取决于泡沫密度和应变率。F. A. O. Fernandes 等^[6]对发泡聚苯乙烯 (EPS) 和发泡聚丙烯 (EPP) 进行准静态压缩试验, 以评估材料吸收能量的能力, 并分析泡沫材料的应力-应变行为。陈诚^[7]依据硬质 PU 泡沫试验数据, 对有限元软件 LS-DYNA 中 Mat163、Mat83、Mat75 等 3 种泡沫材料模型进行了评估, 发现 Mat75 材料模型仿真曲线更接近试验曲线。A. Krundaeva 等^[8]对 EPS 进行了静态和动态压缩及压碎试验, 并表征了在高应变率下材料获得不同温度和密度的应力-应变曲线。P. Rumianek 等^[9]通过试验和有限元分析, 发现提高荷载应变速率和泡沫密度可提高闭孔 EPP 泡沫的吸能能力。

发泡材料在压缩过程中会呈现 3 个阶段: 线性弹

收稿日期: 2025-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51575327); 陕西省科技厅陕西省创新能力支撑计划项目 (2025JC-GXPT-022); 陕西省科技厅中试基地建设项目 (2023ZSJD-06)

作者简介: 叶润杰, 男, 硕士生, 主要研究方向为包装工程, E-mail: yrt201120@163.com

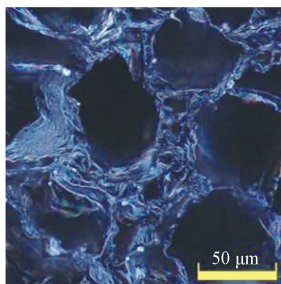
通信作者: 马兴元, 男, 教授, 主要从事环保型聚氨酯新材料的合成与应用研究, E-mail: maleather@163.com

性阶段、塑性平台阶段及密实化阶段。针对这一特点, 任梦成^[10]和饶聪超^[11]分别对低密度和高密度的聚乙烯开展力学试验, 得出低密度发泡聚乙烯的二阶 Ogden 本构模型和高密度聚乙烯的弹塑性本构关系。

使用乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)制成的闭孔泡沫材料具有优异的隔热性、防水性和缓冲性能。故本研究通过EVA闭孔泡沫试样的静态压缩试验, 分析不同密度EVA闭孔泡沫在不同工况下的缓冲性能, 并利用LS-DYNA提供的Mat83泡沫材料本构模型进行落锤动态冲击仿真, 将试验结果与仿真结果进行对比, 以验证此本构模型的可行性。



a) EVA 闭孔泡沫试样



b) EVA 局部扫描电子显微镜图



c) EVA 立体多孔结构

图1 EVA 闭孔泡沫试样及其扫描电子显微镜图像

Fig. 1 EVA foam specimen and scanning electron microscope image

2.2 静态压缩试验

依据 GB/T 4857.2—2005《包装 运输包装件基本试验 第2部分: 温湿度调节处理》^[12]对全部试验样品进行预处理, 温度设置为 23 °C, 相对湿度为 50%, 时间为 24 h。在相同环境条件下, 利用电子万能试验机对 5 种密度共 25 块样品进行静态压缩。依据 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》^[13], 静态压缩速率设定为 12 mm/min。

2.3 动态冲击试验

与静态压缩试验一致, 对样品进行预处理。在相同环境条件下, 利用缓冲材料试验机进行 5 种密度共 25 块样品的动态冲击试验。依据 GB/T 8167—2008《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》^[14], 落锤质量为 13.125 kg, 落锤接触泡沫表面的瞬时速度设置为 1.071 m/s。

3 结果与分析

缓冲性能评价指标有能量吸收效率、单位体积能量吸收、峰值应力、动态加速度和能量回馈等。本研

2 试验

2.1 材料和设备

EVA 闭孔泡沫有 80.0, 95.0, 105.6, 124.0, 180.0 kg/m³ 等 5 种密度, 裁切尺寸为 100 mm × 100 mm × 30 mm, 如图 1 所示。每种密度准备 5 个试样, 重复 5 组试验, 以保证数据的可靠性。去除差异点、排除偶然误差后, 拟合得到每种密度的应力-应变曲线。

电子万能试验机, CMT4304 型, 最大力为 30 kN, 功率为 1 kW, 美特斯工业系统(中国)有限公司; 缓冲材料试验机, XG-HC 型, 台面尺寸 210 mm × 210 mm, 西安广博检测设备有限公司。

究结合静态压缩和动态冲击试验, 综合分析 EVA 闭孔泡沫的缓冲性能, 探究不同工况下理想的缓冲效果。

3.1 不同密度 EVA 闭孔泡沫静态压缩试验

3.1.1 应力与应变分析

图 2 为不同密度 EVA 闭孔泡沫样品在 12 mm/min 下静态压缩到最低点所得的应力-应变曲线。此低应变率的应力-应变曲线将用于 LS-DYNA 仿真。

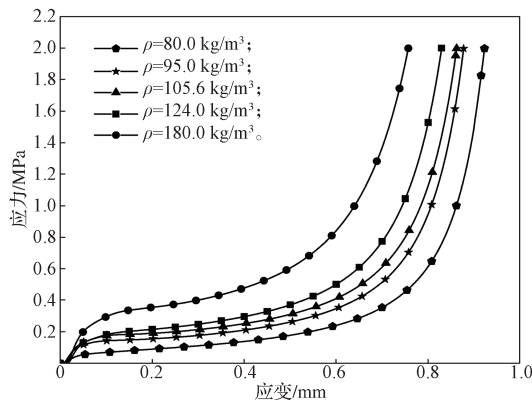


图2 不同密度 EVA 闭孔泡沫的静态压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain of EVA foams under static compression at different densities

观察图2不同密度曲线发现:应变小于0.05时,曲线呈线性。随后曲线开始偏离直线,其偏离的转折点称为屈服点(也可采用0.2%偏移法确定),对应的应力值称为屈服应力。屈服点标志着材料开始从弹性变形转向塑性变形,曲线进入一个相对的平台区。在这个阶段,泡沫结构内部的气泡孔壁逐渐变形并压缩,但应力保持相对恒定。平台区的面积代表了材料吸收能量的能力。此后来到了更高应变的阶段,气泡孔壁进一步压缩,曲线迅速上升,这一转折点对应密实化点。高密度EVA闭孔泡沫在相同应变时的应力始终高于低密度的,此现象说明高密度样品具有更高的压缩强度^[15]。

3.1.2 缓冲性能分析

图3为静态压缩试验的线弹性、塑性平台和密实化3个阶段。

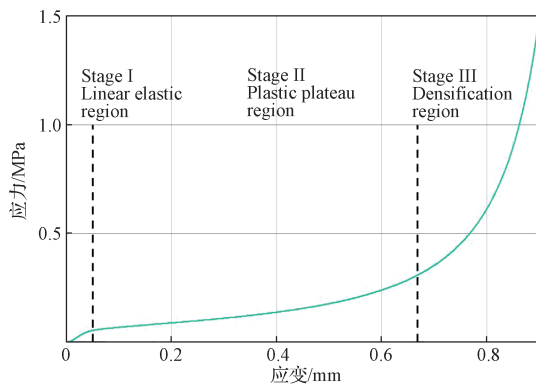


图3 EVA闭孔泡沫静态压缩应力-应变曲线及变形阶段标注

Fig. 3 Stress-strain curve and deformation stages of EVA closed cell foam under static compression

线弹性阶段:5种密度EVA闭孔泡沫的弹性模量和屈服应力如表1所示。

表1 不同密度EVA闭孔泡沫的弹性模量与屈服应力
Table 1 Elastic modulus and yield stress at different densities of EVA closed cell foam

密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	屈服应力/MPa
80.0	1.59	0.051
95.0	3.45	0.122
105.6	4.39	0.146
124.0	4.58	0.150
180.0	7.62	0.267

塑性平台阶段:此阶段是EVA闭孔泡沫静态压缩过程的主要能量吸收阶段。此阶段可用能量吸收效率、缓冲系数评价材料的缓冲性能。能量吸收效率

是单位厚度吸收的变形能与外力之比。应变相同时,能量吸收效率越高,说明在一定外力作用下材料能更高效地吸收能量,缓冲效果越理想。能量吸收效率的倒数是缓冲系数,缓冲系数越小,缓冲性能越好^[16]。

缓冲材料变形能为

$$E_c = \int_0^x F dx; \quad (1)$$

能量吸收效率为

$$\eta = \frac{E_c}{Ft}; \quad (2)$$

缓冲系数为

$$C = \frac{1}{\eta} = \frac{Ft}{E_c}. \quad (3)$$

式(1)~(3)中: F 为外力; x 为位移; t 为缓冲材料厚度。

通过5种密度EVA闭孔泡沫的能量吸收效率曲线峰值(见图4)得到密实化应变 ε_d ^[17, 18],进而得到缓冲系数-静应力曲线,如图5所示。

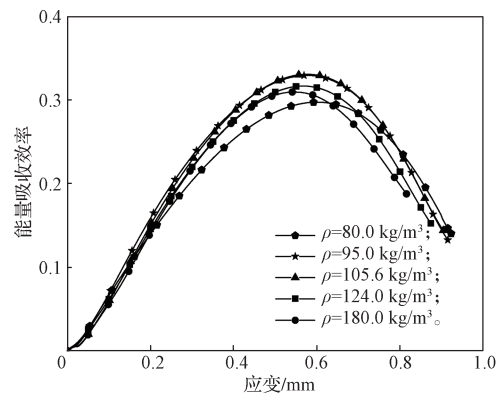


图4 不同密度缓冲系数-静应力曲线

Fig. 4 Static stress curves of cushioning coefficient at different densities

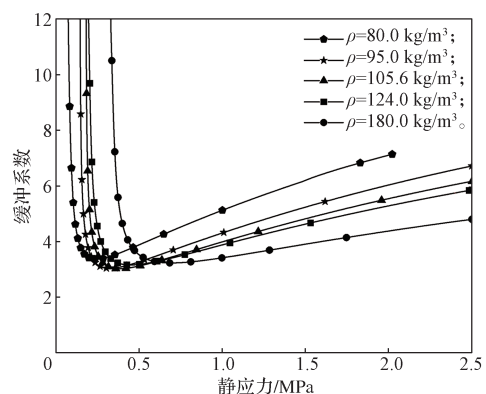


图5 不同密度能量吸收效率曲线

Fig. 5 Energy absorption efficiency curves at different densities

由图 5 可知, 当静应力小于 0.21 MPa 时, 密度为 80.0 kg/m³ 的样品缓冲系数最小; 当静应力为 0.21~≤0.32 MPa 时, 密度为 95.0 kg/m³ 的样品缓冲系数最小; 当静应力为 >0.32~≤0.60 MPa 时, 密度为 105.6 kg/m³ 的样品缓冲系数最小; 当静应力大于 0.60 MPa 时, 密度为 180.0 kg/m³ 的样品缓冲系数最小。

密实化阶段: 当应变进入较大范围时, EVA 闭孔泡沫应力迅速上升, 进入密实化阶段。此阶段可用最大单位体积能量吸收评价材料的缓冲性能。最大单位体积能量吸收越大, 缓冲性能越好; 当单位体积能量吸收相同时, 峰应力较小会对产品有更理想的缓冲效果。不同密度 EVA 闭孔泡沫的密实化点和最大单位体积能量吸收 ($\eta_{\max}$) 如表 2 所示。

最大单位体积能量吸收为

$$E_0 = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = \frac{E_c}{At} \quad (4)$$

式中, A 为缓冲材料受力横截面积。

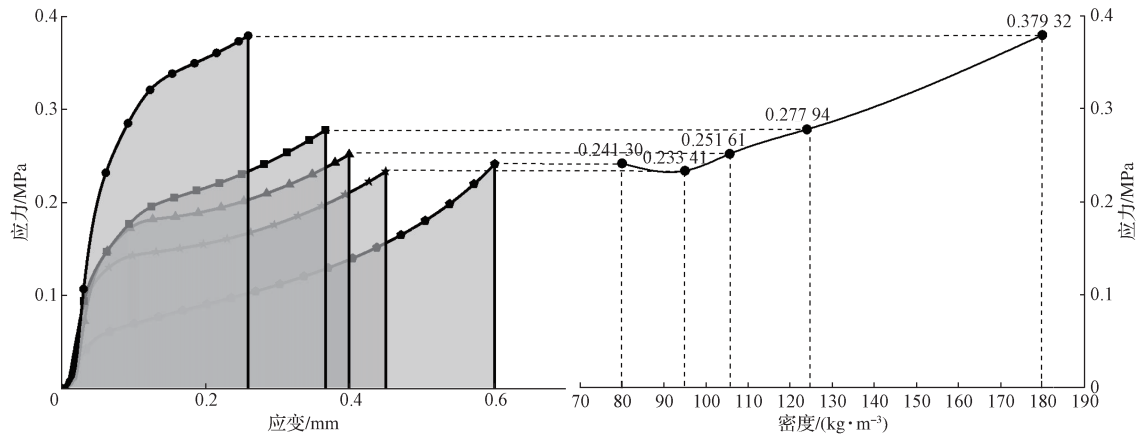


图 6 相同单位体积能量吸收与应变和密度的关系

Fig. 6 Relationship between strain, density, and energy absorption per unit volume

3.2 不同密度 EVA 闭孔泡沫动态冲击试验

3.2.1 应力与应变分析

图 7 为不同密度 EVA 闭孔泡沫样品在动态落锤冲击试验中应变达到最大时, 泡沫样品的应力-应变曲线。同样, 此高应变率曲线将用于 LS-DYNA 仿真。

由图 7 可知, 随着密度从 80.0 kg/m³ 逐步增加到 180.0 kg/m³, 应力-应变曲线整体向上移动, 同应变下应力值随密度增加而提高。在此工况下, 随密度升高, 相应的平台应力也逐渐提高。高密度 EVA 闭孔泡沫只出现较短塑性平台区, 这说明高密度的 EVA 闭孔泡沫内部泡孔较少或泡孔壁较厚导致结构强度较高。

表 2 不同密度样品的密实化点

Table 2 Densification point data at different densities of specimens

密度/(kg·m ⁻³)	$\eta_{\max}$	ε_d /mm	E_0 /(J·cm ⁻³)
80.0	0.297	0.601	0.0717
95.0	0.329	0.576	0.106
105.6	0.331	0.572	0.125
124.0	0.317	0.565	0.141
180.0	0.309	0.548	0.216

以密度为 80.0 kg/m³ 样品的 $E_0=0.0717$ J/cm³ 为参考, 当 5 种密度材料的变形能都为此值时, 不同密度 EVA 闭孔泡沫的峰应力与应变、密度的关系如图 6 所示。由图 6 可知, 在相同单位体积能量吸收下, 较低密度的 EVA 闭孔泡沫的压缩变形范围更大, 较大密度的 EVA 闭孔泡沫在较小应变时具有更强的能量吸收能力。峰应力随密度的增加先减小后增大, 通过曲线可以在不同工况找到合适的密度, 使峰应力处于较小值。

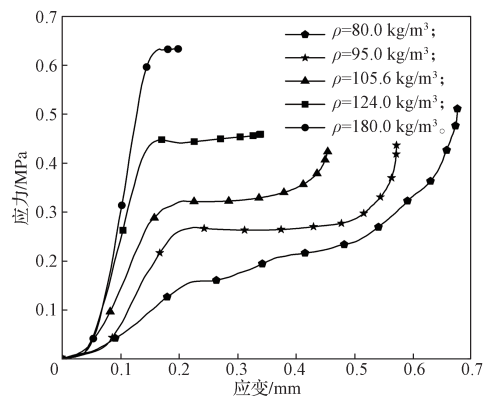
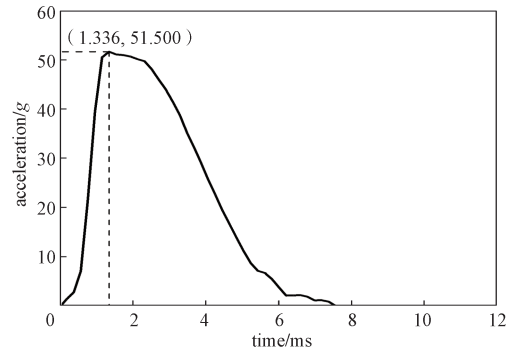
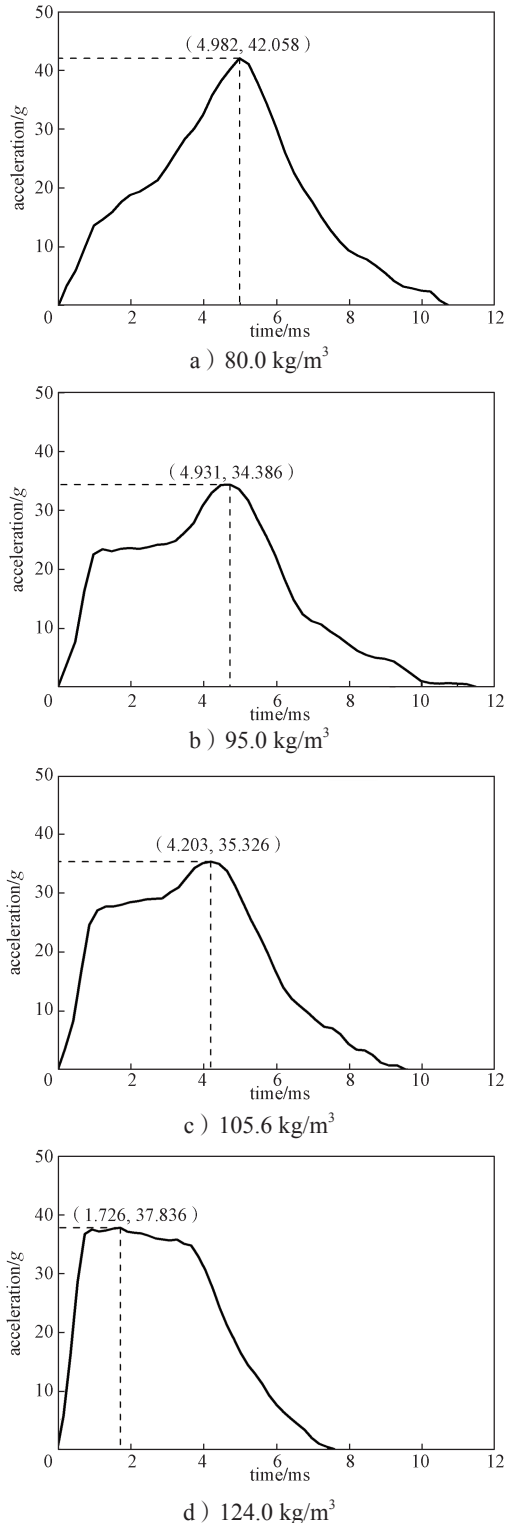


图 7 不同密度样品的动态压缩 EVA 泡沫应力-应变图

Fig. 7 Stress-strain of EVA foams under dynamic compression at different densities

3.2.2 缓冲性能分析

落锤动态冲击 EVA 闭孔泡沫试验的加速度 - 时间曲线如图 8 所示。最大加速度在动态冲击中可作为缓冲效果评价的指标, 其值越小, 对产品的缓冲效果越理想。



e) 180.0 kg/m³

图 8 不同密度样品的加速度 - 时间曲线

Fig. 8 The acceleration-time curve of EVA closed cell foams at different densities

由图 8 可得, 密度为 180.0 kg/m³ 的 EVA 闭孔泡沫重锤加速度最大, 为 51.500g; 密度为 95.0 kg/m³ 的 EVA 闭孔泡沫重锤加速度最小, 为 34.386g, 说明适中密度的 95.0 kg/m³ 泡沫缓冲效果最优。

落锤质量为 m , 加速度为 a , 则接触力 F 为

$$F=ma_0. \quad (5)$$

若经历时间为 t , 落锤速度为 v , 那么泡沫在此过程的能量吸收为

$$E=\int_0^t F(t) \cdot v(t) dt. \quad (6)$$

动态落锤冲击试验中, 采集卡记录接触力所产生的加速度, 数据采集的终止准则是落锤与泡沫的接触力归零。落锤从下落接触泡沫开始产生接触力, 直至回弹接触力归零, 这标志着材料已完成能量吸收。测试数据可能会受到温度、泡沫厚度等因素的影响, 故本研究严格控制这些变量, 使其影响可以忽略不计。动态落锤冲击试验中, 不同密度 EVA 闭孔泡沫的能量变化如图 9 所示。

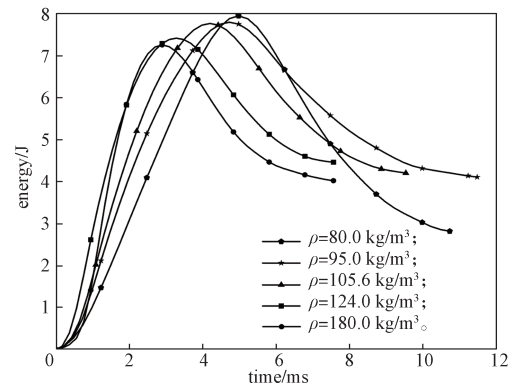


图 9 不同密度 EVA 闭孔泡沫能量变化图

Fig. 9 Energy curves of EVA closed cell foam with different densities

由图 9 可知, 落锤与泡沫接触后泡沫迅速吸收冲击能量至峰值, 随后泡沫开始释放部分能量。

峰值能量为落锤冲击对泡沫造成的最大能量吸收, 最终能量为泡沫吸收耗散的能量, 峰值能量减去最终能量即为闭孔泡沫对外释放的回馈能量。5 种密度的 EVA 闭孔泡沫能量变化如表 3 所示。

表 3 不同密度样品的能量变化

Table 3 The energy variation at different densities

密度 / (kg·m ⁻³)	峰值能量 / J	最终能量 / J	回馈能量 / J
80.0	7.950	2.820	5.130
95.0	7.800	4.109	3.691
105.6	7.769	4.205	3.564
124.0	7.417	4.462	2.955
180.0	7.258	4.024	3.234

由表 3 可知, 80.0 kg/m³ 的小密度闭孔泡沫回馈能量最大为 5.130 J, 而 124.0 kg/m³ 的闭孔泡沫吸能效果最优, 回馈能量仅为 2.955 J。可见, 对于闭孔泡沫材料, 密度对能量吸收效果的影响并非简单的“密度越大, 能量吸收效果越好”, 故在分析吸能性时, 需综合考虑泡沫的应变范围、冲击工况等因素。

4 动态冲击有限元仿真

LS-DYNA 提供了众多泡沫材料模型, 如 Mat57 本构模型可用于模拟高度可压缩低密度泡沫的压缩及卸载全过程仿真^[19], Mat83 非线性黏弹性泡沫材料模型是在 Mat57 本构模型的基础上考虑了应变率效应的影响^[20]。本仿真采用 Mat83 本构模型。为保证模型在动态落锤冲击试验有限元仿真中的可行性, 要预先对输入的应力和应变数据进行仿真验证, 只有通过验证的数据, 才能被输入 TBID 用于后续的动态落锤冲击仿真。

4.1 Mat83 本构模型

Mat83 本构模型将应变分成线性和非线性两部分, 即

$$E(t) = E^L(t) + E^N(t), \quad (7)$$

相应的应变率为

$$\dot{E}(t) = \dot{E}^L(t) + \dot{E}^N(t)。 \quad (8)$$

本构方程为

$$\sigma(t) = \int_{\tau=0}^{\infty} [E^N(\tau), S(t)] d\tau, \quad (9)$$

式中: τ 是关于时间的参数; $S(t)$ 是状态变量; $E^N(\tau=\infty) \Leftrightarrow$ 初始原材料,

$$E^N(\tau) = E^N(t-\tau)。 \quad (10)$$

假设材料只有最近的加载记忆, 即时间参数 $\tau=0$ 时, 对应屈服的泰勒级数表达式为

$$E^N(\tau) = E^N(0) + \frac{\partial E^N}{\partial t}(0) dt, \quad (11)$$

故将 $\dot{E}^N$ 代替 $\frac{\partial E^N}{\partial t}$, 得到假设的本构方程, 即

$$\sigma(t) = \sigma^*[E^N(t), \dot{E}^N(t), S(t)]。 \quad (12)$$

式中 σ^* 代表含有参数的函数。特殊情况下式 (12) 简化为

$$\sigma(t) = \sigma^*(E^N(t), S(t))。 \quad (13)$$

非线性应变率可以写成

$$\dot{E}^N = f(S(t), s(t)), \quad (14)$$

式中 $s(t)$ 代表当前的应力幅值。

非线性应变率是应力和状态变量的函数, 表示加载的过程。因此, 具体的非线性关系动力方程是

$$\dot{E}^N = \frac{\sigma}{\|\sigma\|} D_0 \exp \left\{ -c_0 \left[\frac{\sigma : S}{\|\sigma\|^2} \right]^{2n_0} \right\}, \quad (15)$$

式中 D_0 、 c_0 、 n_0 是材料常量。如果 $D_0=0$ 或 $c_0 \rightarrow \infty$, 那么非线性部分的应变率会消失。

$$\dot{S}_{ij} = \left[c_1 (a_{ij} R - c_2 S_{ij}) P + c_3 W^{n_1} (\|\dot{E}^N\|)^{n_2} I_{ij} \right] R, \quad (16)$$

$$R = 1 + c_4 \left[\frac{\|\dot{E}^N\|}{c_5} - 1 \right]^{n_3}, \quad (17)$$

$$P = \sigma : \dot{E}^N, \quad (18)$$

$$W = \int \sigma : (dE), \quad (19)$$

式 (16) ~ (19): $\dot{S}_{ij}$ 是状态变量随时间的变化速率; R 是加载历史修正因子, 反映了非线性应变率的影响; P 是应力和非线性应变率的内积, 反应非线性塑性变形的能量变化; W 是耗散能, 表示材料在加载过程消耗的能量; $c_1 \sim c_4$ 、 $n_1 \sim n_3$ 、 a_{ij} 是材料常量。

应力、应变率和非线性应变率的模如下:

$$\|\sigma\| = (\sigma_{ij} \sigma_{ij})^{\frac{1}{2}}, \quad (20)$$

$$\|\dot{E}\| = (\dot{E}_{ij} \dot{E}_{ij})^{\frac{1}{2}}, \quad (21)$$

$$\|\dot{E}^N\| = (\dot{E}_{ij}^N \dot{E}_{ij}^N)^{\frac{1}{2}}。 \quad (22)$$

公式推导者 Fu C. 简化了上述过程, 将常数 a_{ij} 和状态变量 S_{ij} 视为标量。

4.2 有限元模型的建立

用 ANSYS/LS-DYNA 对泡沫试样和试验仪器上下平面进行建模, 并划分网格, 单元尺寸为 5 mm, 如图 10 所示。使用 LS-PREPOST 调用 Mat83 模型, 输入密度、弹性模量、TBID 等数据, 泡沫有限元模型下表面使用 Boundary SPC 进行约束, 试验仪器上下平面简化为 Rigidwall Planar, 单元类型选用 EQ-1 八面体单元, 以保证计算的稳定性。为避免负体积, 将时间步长中的 TSSFAC 参数调整为 0.6。

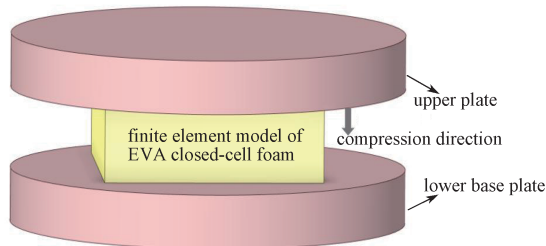


图 10 EVA 闭孔泡沫压缩有限元模型

Fig. 10 Finite element simulation model of static and dynamic compression

4.2.1 低应变率下的应力-应变曲线验证

利用静态压缩试验的低应变率进行仿真, 验证低应变率的静态压缩应力-应变曲线的可行性。试验与仿真的应力-应变对比如图 11 所示。从曲线整体趋势来看, 仿真结果与试验结果基本一致。只在密实化阶段曲线出现略微分歧, 所以此低应变率下的应力-应变曲线可输入 LS-DYNA 的 Mat83 本构模型。

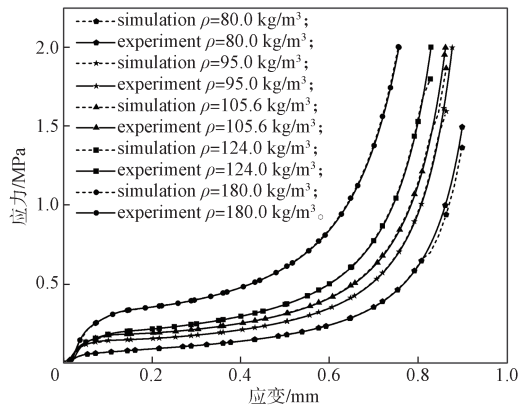


图 11 静态压缩试验与仿真对比

Fig. 11 Comparison between experimental and simulation results of quasi-static compression

4.2.2 高应变率下的应力-应变曲线验证

利用落锤动态压缩所得高应变率的 EVA 闭孔泡

沫应力-应变曲线进行仿真验证。动态冲击加载段的试验与仿真应力-应变对比如图 12 所示。

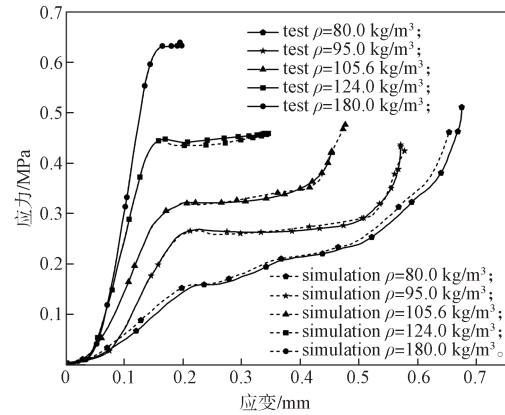


图 12 动态冲击试验与仿真对比

Fig. 12 Comparison between experimental and simulation results of dynamic compression

由图 12 可知, 5 种密度的 EVA 闭孔泡沫在应变较小时, 仿真与试验结果基本吻合。在后续塑性平台阶段和密实化阶段会出现较小的数值差异, 但是整体趋势一致, 所以此高应变率下的应力-应变曲线可用于落锤动态冲击的加载与卸载仿真。

4.3 EVA 闭孔泡沫落锤冲击压缩及卸载仿真

将上述低应变率和高应变率的应力-应变曲线输入 Mat83 本构模型的 TBID, 落锤接触泡沫初速度输入 Rigidwall Planar, 并引入卸载相关参数 $HU(H_u)$ 、 $SHAPE(S_{HAPE})$ [21-23]。HU 是滞后卸载系数, SHAPE 是卸载形状系数。当 HU 为非零值时被激活, 小于 1 将减少泡沫卸载阶段的能量耗散, 大于 1 则增加能量耗散。卸载指数 EXPON (E_{XPON}) 在 HU 为非零值时会被激活, 默认值为 1.0。此仿真中 HU 大于 0, 这种情况卸载响应中的主要应力损伤公式为

$$\sigma_i = (1-d)\sigma_i, \quad (23)$$

式中 d 为损伤参数,

$$d = (1-H_u) \left[1 - \left(\frac{W_{cur}}{W_{max}} \right)^{S_{HAPE}} \right]^{E_{XPON}}, \quad (24)$$

其中 W_{cur} 为每单位未变形体积的超弹性能量当前值, W_{max} 是每单位体积变形的超弹性能量最大值。通常 HU 与 SHAPE 通过多次基于工程经验的仿真进行校准 [24]。全部密度输入 HU 为 0.1, 低密度的 80, 95 kg/m³ 闭孔泡沫设置 SHAPE 为 1.5, 高密度的 105.6, 124.0, 180.0 kg/m³ 闭孔泡沫设置 SHAPE 为 3, 保持 EXPON 为默认的 1.0。

图 13 为 5 种密度的力 - 位移曲线压缩与卸载过程的试验仿真对比图。由图 13 可知, 只有 180.0 kg/m^3 的高密度 EVA 闭孔泡沫卸载过程完全恢复, 小密度的闭孔泡沫存在较小的残余变形, 而 LS-DYNA 在仿真时将卸载过程视为完全弹性。试验中压缩与卸载过程由小到大的 5 个密度的峰值力分别为 5413.4, 4425.8, 4546.8, 4839.9, 6628.7 N, 最大位移分别为 20.5, 17.5,

14.7, 10.0, 9.5 mm; 仿真峰值力分别为 5409.6, 4566.3, 4682.8, 4804.1, 6383.4 N, 最大位移分别为 20.5, 17.4, 15.0, 9.4, 9.7 mm。引入皮尔逊相关系数来比较试验与仿真数据的相关性, 得到试验与仿真峰值力的皮尔逊相关系数 $r=0.997\ 593$, 试验与仿真最大位移的皮尔逊相关系数 $r=0.997\ 494$ 。可见, 试验与仿真数据的相关程度极高。

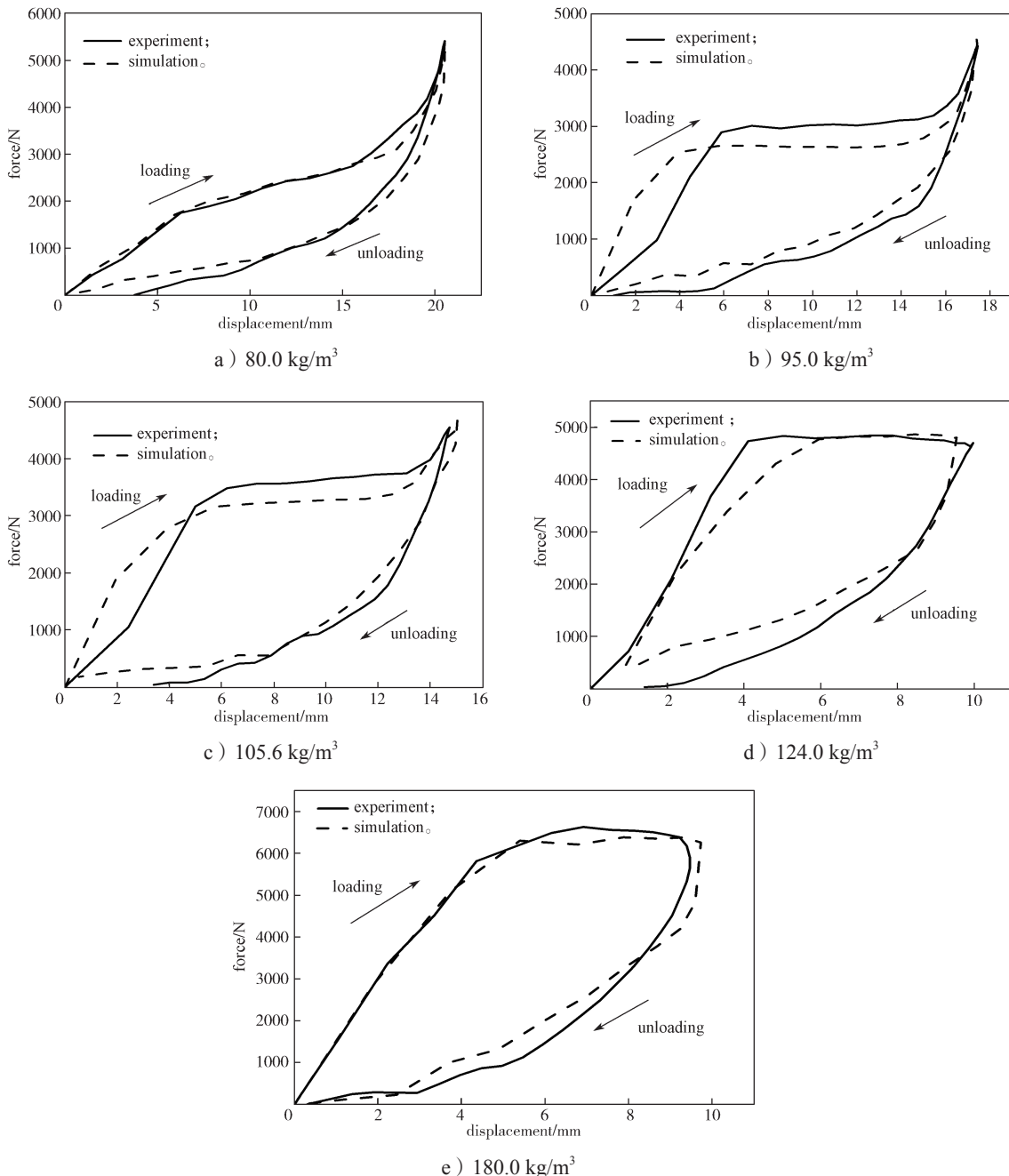


图 13 不同密度的力 - 位移试验与仿真对比

Fig. 13 Experimental and simulation comparison of force-displacement behavior for different densities

5 结论

本研究利用万能试验机与缓冲材料试验机研究了不同密度的EVA闭孔泡沫材料的静动态压缩的力学特性,并利用有限元方法仿真EVA闭孔泡沫动态冲击过程的加载与卸载过程。获得的主要结论如下:

1) EVA闭孔泡沫在静动态压缩载荷下的应力-应变曲线分为线弹性阶段、塑性平台阶段与密实化阶段3部分。应变相同时,应力值随密度提高而变大,这一现象在屈服点之后更为明显。

2) EVA闭孔泡沫密度越大,弹性模量与屈服应力越大,最大单位体积能量吸收也越大,但是密实化点对应的应变反而更小。不同密度泡沫在单位体积能量吸收相同时,缓冲效果并不与密度正相关,会存在一个合适的中间密度使该种工况的应力峰值最小。

3) 将LS-DYNA的Mat83泡沫本构模型用于仿真EVA闭孔泡沫的静动态压缩。经数据对比发现,该模型在预测EVA闭孔泡沫的静态压缩与动态冲击的加载阶段,应力-应变曲线吻合程度较高,并且在动态冲击工况的完整加载与卸载阶段的相似度很高。

参考文献:

- [1] 梁书恩. 聚氨酯泡沫塑料泡孔结构与力学性能关系的研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2005.
- [2] 张 赋, 李旭东. 泡沫材料微结构设计及弹性性能分析[J]. 材料工程, 2014, 42(2): 39-44, 50.
- [3] 卫亚明. 聚丙烯泡沫动态力学性能仿真与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [4] ALZOUBI M F, TANBOUR E Y, AL-WAKED R. Compression and Hysteresis Curves of Nonlinear Polyurethane Foams Under Different Densities, Strain Rates and Different Environmental Conditions[C]// International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Denver: ASME, 2012: 101-109.
- [5] APOSTOL D A, CONSTANTINESCU D M, MARSAVINA L, et al. Analysis of Deformation Bands in Polyurethane Foams[J]. Key Engineering Materials, 2014, 601: 250-253.
- [6] FERNANDES F A O, JARDIN R T, PEREIRA A B, et al. Comparing the Mechanical Performance of Synthetic and Natural Cellular Materials[J]. Materials & Design, 2015, 82: 335-341.
- [7] 陈 诚. 车用硬质聚氨酯泡沫力学实验及有限元仿真[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [8] KRUNDAEVA A, DE BRUYNE G, GAGLIARDI F, et al. Dynamic Compressive Strength and Crushing Properties of Expanded Polystyrene Foam for Different Strain Rates and Different Temperatures[J]. Polymer Testing, 2016, 55: 61-68.
- [9] RUMIANEK P, DOBOSZ T, NOWAK R, et al. Static Mechanical Properties of Expanded Polypropylene Crushable Foam[J]. Materials, 2021, 14(2): 249.
- [10] 任梦成. 低密度聚乙烯高弹泡沫材料宏观本构关系研究及应用[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2022.
- [11] 饶聪超. 高密度聚乙烯结构发泡材料弹塑性本构及损伤特性的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [12] 全国包装标准化技术委员会. 包装 运输包装件基本试验 第2部分: 温湿度调节处理: GB/T 4857.2—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-2.
- [13] 全国包装标准化技术委员会. 包装用缓冲材料静态压缩试验方法: GB/T 8168—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-2.
- [14] 全国包装标准化技术委员会. 包装用缓冲材料动态压缩试验方法: GB/T 8167—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-2.
- [15] 郝发义, 胡 丹, 张自聪. 基于常温干燥法的纤维素基泡沫制备及性能分析[J]. 包装学报, 2023, 15(6): 9-16.
- [16] 孙 刚, 曾广胜. 淀粉基生物质发泡塑料的缓冲性能研究[J]. 包装学报, 2017, 9(3): 31-35.
- [17] 孙德强, 高璐璐, 刘晓晨, 等. 闭孔EVA泡沫类静态缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2023, 44(21): 62-69.
- [18] 苏兴亚, 周 伦, 敬 霖, 等. 软质聚氨酯泡沫的动态压缩力学性能和本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(9): 155-165.
- [19] 卢伟锋, 刘志刚, 李祖吉, 等. 泡沫EPS非线性粘弹性本构模型在LS-DYNA空调跌落仿真中的研究[J]. 包装工程, 2020, 41(17): 133-138.
- [20] CHANG F S. Constitutive Equation Development of Foam Materials[D]. Wayne: Wayne State University, 1995.
- [21] 吕孟宽, 杨 欣, 许述财, 等. 儿童安全座椅侧面碰撞头部保护研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(9): 1360-1366.
- [22] 张晓忠, 曾 斌, 徐 戎, 等. 基于霍普金森压杆试验研究闭孔泡沫铝的动态压缩力学性能[J]. 机械材料, 2025, 49(4): 69-73.

- [23] 苏兴亚, 周 伦, 敬 霖, 等. 软质聚氨酯泡沫的动态压缩力学性能和本构模型 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(9): 155-165.
- [24] OZTURK U E, ANLAS G. Finite Element Analysis of Expanded Polystyrene Foam Under Multiple Compressive

Loading and Unloading[J]. Materials & Design, 2011, 32(2): 773-780.

(责任编辑: 邓 彬)

Simulation Analysis of Static and Dynamic Compression and Impact of EVA Closed Cell Foam

YE Runjie, SUN Deqiang, MA Xingyuan, SI Bohan

(College of Bioresources Chemical and Materials Engineering,
Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Static and dynamic compression tests and finite element simulations are conducted on EVA closed cell foam materials to investigate the cushioning performance of EVA closed cell foam with different densities and the reliability of the simulations. Data such as stress-strain curves are obtained from static and dynamic compression tests of closed cell foams as a way to further analyze their mechanical properties. The Mat83 intrinsic model in LS-DYNA is selected to establish the finite element model of EVA closed cell foam, and the simulation results are compared with the test results under the same working condition. In the static and dynamic compression tests, as the density becomes larger, the stress of the EVA closed cell foam with the same strain increases, and the maximum energy absorption of the EVA closed cell foam becomes larger, while there will be an intermediate density of the EVA closed cell foam with the best cushioning effect under different working conditions. In terms of simulation, the simulation curves of Mat83 intrinsic model in LS-DYNA are in good agreement with the experimental curves. The Mat83 intrinsic model in LS-DYNA can well simulate the mechanical behavior of EVA closed cell foam in dynamic impact.

Keywords: EVA closed cell foam; static and dynamic compression; mechanical analysis; finite element; LS-DYNA