

聚苯乙烯泡沫材料的动态压缩特性

雷忠琦¹, 姚小虎¹, 龙舒畅¹, 常建虎², 王海波²

(1. 华南理工大学土木与交通学院力学系, 广东 广州 510640;

2. 合肥美的电冰箱有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要: 通过万能材料试验机和落锤式冲击试验装置, 对发泡聚苯乙烯泡沫材料进行准静态和动态压缩试验, 探讨密度和加载速率对材料动态压缩特性的影响。基于落锤试验数据, 考虑密度相关性, 通过修正得到恒定应变率下材料动态本构关系的经验公式。基于 LS-DYNA 中的 MAT57 和 MAT163 以及 ABAQUS 中的 Low Density Foam 和 Crushable Foam 4 种材料模型, 建立了适用于有限元仿真的发泡聚苯乙烯泡沫本构模型。通过模拟落锤冲击过程, 对比试验结果发现: MAT163 和 Crushable Foam 模型能较好地预测材料动态响应和能量吸收性能, 验证了动态本构模型的可靠性, 并且这两种特定的材料模型在模拟发泡聚苯乙烯泡沫冲击碰撞时具有良好的适用性。

关键词: 聚苯乙烯泡沫; 应变率; 密度; 动态压缩特性; 本构模型

中图分类号: O347.1

文献标识码: A

聚合物泡沫材料作为一种在冲击碰撞中起增强防护作用的优质缓冲吸能材料被广泛应用于汽车碰撞、物流包装、运动装备以及军事应用中^[1]。聚合物泡沫的最重要特性是密度低、能量吸收效率高。在使用聚合物泡沫进行防护以及应用有限元技术进行工程设计时, 需要深入了解其力学性能, 尤其是冲击载荷下的压缩力学性能^[2]。聚合物泡沫应用于家电的物流包装时, 有诸多类型, 而发泡聚苯乙烯 (Expanded Polystyrene, EPS) 泡沫材料作为大多数家电包装的选择, 具有隔热性能好、防潮、耐久性好、导热系数低、成本低等诸多特点^[3]。随着人们对 EPS 泡沫材料的不断研究, 对其力学性能有了较深的了解。EPS 是一种典型的闭孔泡沫材料, 其力学响应可通过三段式变形区间^[4]表征。第 1 阶段为线性弹性区, 变形较小 (应变小于 5%), 通常以胞壁弯曲或扭曲以适应变形; 第 2 阶段为平台区, 在较稳定的应力下材料的应变范围很大, 主要与胞壁屈曲有关, 对应受压过程中大部分能量吸收; 第 3 阶段为密实区, 此时胞元被压实, 胞壁之间彼此接触, 应变的持续增加导致应力急剧上升, 材料刚度也发生显著增大。聚合物泡沫材料的密度是影响其性能的重要因素, 密度的不同导致泡沫微观结构的差异性^[5]。同样, 大多数聚合物泡沫也表现出变形速率敏感性, 研究表明该速率敏感性与基体材料的黏弹性有关^[1,6]。对于结构碰撞、包装跌落等冲击事件, 材料的应变率一般在 $1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 之间; 而军事应用中, 应变率可能超过 10^3 s^{-1} ^[1]。因此, 需要对 EPS 泡沫材料在不同应变率下的动态压缩特性展开深入研究。

王志亮等^[7]采用霍普金森压杆对 3 种不同密度的 EPS 泡沫进行冲击试验, 获得了材料在高应变率下的动态特性曲线、能量吸收性能和破坏特征, 结果表明泡沫的密度和加载应变率对 EPS 泡沫的吸能和压缩特性有较大影响。Chen 等^[6]对 EPS 泡沫进行了静/动态压缩和拉伸试验, 获得了大量的试验数据, 得到了中、低不同应变率下两种不同密度 EPS 泡沫的应力-应变曲线、弹性模量和能量吸收系数

* 收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-11-12

基金项目: 国家自然科学基金 (11672110)

作者简介: 雷忠琦 (1993—), 男, 硕士, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: lzq000@foxmail.com

通信作者: 姚小虎 (1974—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事冲击动力学及纳米力学研究.

E-mail: yaoxh@scut.edu.cn

等,并在试验数据的基础上得到了一些经验关系,但没有解释如何运用这些试验数据。Ling 等^[8-10]基于万能材料试验机和落锤试验装置开发了一种新的试验平台,独立获得了EPS泡沫材料的压缩和剪切力分量,实现了压-剪联合加载试验,获得了大量数据,并与纯压缩加载下的材料响应特性进行了对比;同时采用有限元分析方法进行数值模拟,对比实验结果发现,准静态数值模型很好地预测了EPS泡沫材料的变形响应,但在动态加载条件下,只有屈服应力的预测相对准确。Shah 等^[11]通过对EPS泡沫进行准静态压缩试验,获得了材料在低应变率($8.3 \times 10^{-3} \sim 8.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)下的压缩特性曲线,应用该结果,通过LS-DYNA模拟长杆弹冲击EPS泡沫试验,较准确地预测了材料变形和失效响应。Ozturk 等^[12]用LS-DYNA和ABAQUS模拟EPS泡沫在压缩载荷下循环加-卸载过程,利用试验结果校准LS-DYNA中MAT57材料的形状因子和滞回效应参数,预测出较精确的结果。然而,这些泡沫材料模型并未考虑应变率效应。姚小虎等^[13]通过落锤试验,基于ABAQUS中的Low Density Foam材料模型,建立了发泡聚乙烯(EPE)的本构模型,该模型适用于密度低、压缩弹性高的聚合物泡沫材料,并由此预测了冰箱跌落过程中聚合物泡沫包装材料的能量吸收以及冰箱的抗跌落冲击能力。

本研究通过准静态和动态压缩试验,探讨EPS泡沫材料特性与密度、应变率的关系。考虑密度相关性,通过修正获取材料在恒定应变率下动态本构关系的经验公式。基于有限元软件LS-DYNA中的MAT57和MAT163以及ABAQUS中的Low Density Foam和Crushable Foam 4种不同材料模型,建立适用于有限元仿真的EPS泡沫材料本构模型,最后通过模拟落锤冲击试验进行对比验证。

1 试验

对于不同的应变率范围,需要采用不同的试验方法确定材料的力学特性。传统的伺服液压装置能够测试的应变率范围为 $10^{-5} \sim 1 \text{ s}^{-1}$,一般用于材料的准静态力学性能测试;落锤式冲击试验装置通过控制下落物体的释放高度,可获得 $1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 的中应变率;对于 10^3 s^{-1} 以上的高应变率,则需要应用分离式霍普金森压杆(SHPB)等技术^[14]。

考虑到EPS泡沫作为包装缓冲吸能材料的应用背景,本研究主要探讨材料在中低应变率下的力学特性。为此,利用INSTRON万能材料试验机、落锤式冲击试验装置,分别进行准静态和动态压缩试验,探讨不同密度EPS泡沫材料(EPS20(20 kg/m^3)、EPS25(25 kg/m^3)、EPS28(28 kg/m^3))的准静态和动态压缩力学特性。

1.1 准静态压缩试验

所有准静态压缩测试都在万能材料试验机上进行,试样尺寸均为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。准静态单轴压缩试验在 10^{-3} s^{-1} 和 10^{-2} s^{-1} 两种应变率下进行,对应的横梁移动速率分别为 3 mm/min 和 30 mm/min 。为了获取材料密实阶段的特性曲线,所有试样的轴向压缩应变均达到80%以上。根据试验获得的力-位移数据,利用试样尺寸将其转换为名义应力-应变数据。每种试验工况取3块试样进行测试,结果取平均值。

1.2 动态压缩试验

动态压缩试验在落锤式冲击试验装置上进行。固定落锤质量,调节落锤下落高度 H 以控制冲击速率。落锤冲头的下接触面需覆盖试样表面,使试样内部受力均匀。采用加速度传感器进行数据采集,获得EPS泡沫的力-位移曲线。选用尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的立方体试样。表1列出了落锤冲击试验工况。每种试验工况取3块试样进行测试,结果取平均值。

表1 EPS落锤试验工况
Table 1 Experimental conditions of EPS

Size of specimen/(mm×mm×mm)	Density of EPS/(kg·m ⁻³)	Mass of drop-hammer/kg	Drop height/m
100×100×20	20, 25, 28	9.8648	0.2, 0.5, 0.8

2 试验结果与讨论

2.1 准静态压缩力学性能

图 1 显示了准静态压缩试验前后试样变形情况。对比发现, 试验后 EPS 泡沫材料未出现横向膨胀现象, 并且横截面积始终保持不变, 验证了 EPS 泡沫材料的弹性泊松比和塑性泊松比均接近零、压缩时材料体积不守恒等性质。卸载后, EPS 泡沫存在残余变形。

不同应变率准静态压缩下 EPS28 泡沫材料的典型应力-应变曲线如图 2 所示。准静态压缩结果符合预期, 具有较强的可重复性。从图 2 中可以看出: EPS 泡沫材料存在典型的三段式变形区域, 即线弹性区、平台区、密实区; EPS 泡沫表现出一定程度的应变率相关性, 随着应变率的增大, 平台区相同应变处应力值增加, 密实区相同载荷下应变值减小, 材料更早出现强化特征进入密实阶段。

如图 3 所示, EPS 泡沫材料的应力-应变曲线表现出密度相关性。不同密度的 EPS 泡沫展示出变化趋势相似的平台区和密实区; 但是, 与应变率相关性不同, 密度增大时, 材料的弹性模量增大。可见, 密度是影响 EPS 泡沫弹性模量的重要因素。

2.2 动态压缩力学性能

每种落锤试验工况重复 3 次, 得到 EPS 泡沫在冲击下的力-位移数据。由于在较大的冲击速率下, 测试系统结构的惯性效应使载荷值出现显著的波动现象, 因此利用 Origin 采用多点平均法对原始数据进行处理, 得到合理、平滑的应力-应变曲线。尽管这种测试方法存在一定限制, 但是该方法为中等应变率下材料动态力学压缩特性研究提供了关键数据。典型的冲击速度下 EPS25 泡沫的应力-应变曲线如图 4 所示。3 种高度对应 3 种初始冲击速度: $H=0.2\text{ m}$ (1.980 m/s)、 $H=0.5\text{ m}$ (3.132 m/s)、 $H=0.8\text{ m}$ (3.960 m/s)。随着冲击速度的增加, 泡沫材料的平台应力值增大, 表现出动态压缩行为的应变率相关性, 但是弹性模量并没有明显变化。

3 种不同密度 EPS 泡沫在同一冲击速度 (3.960 m/s, $H=0.8\text{ m}$) 下的应力-应变曲线如图 5 所示。随着密度增大, 材料表现出更大的弹性模量和更高的平台区应力值, 说明密度是影响 EPS 泡沫动态压缩特性的重要因素。EPS 材料单位体积吸收能量的计算公式如下

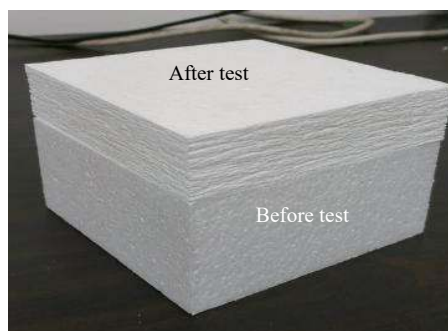


图 1 试样变形前后对比

Fig. 1 Comparison of deformation before and after test

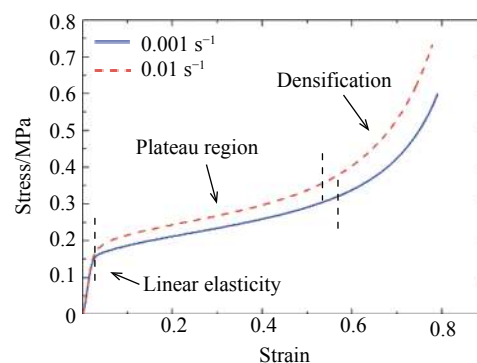


图 2 在不同应变率准静态压缩下 EPS28 泡沫的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of EPS28 foam under quasi-static compression test with different strain rates

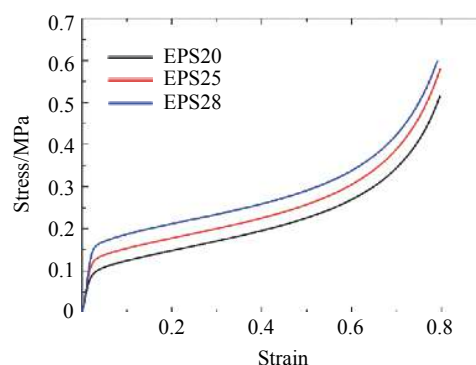


图 3 不同密度 EPS 泡沫在准静态 (0.001 s^{-1}) 压缩下的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of EPS foam with different densities under quasi-static compression test (0.001 s^{-1})

$$\frac{E_a}{V} = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

式中: E_a 为材料吸收的总能量, 单位体积的能量吸收即为当前变形下应力-应变曲线所围成的几何面积。密度较小的泡沫(EPS20)的平台应力较低, 在相同冲击动能作用下, 更容易进入致密段, 即需要更大的变形吸收相同的能量; 相反, 密度较大的泡沫(EPS28)的平台区应力值更大, 在较小的变形下便能吸收相同的能量。对比图 4 和图 5, 以 EPS25 为参考发现: 在动态加载条件下, 随着密度增大, 平台应力的增量更大, 说明密度对 EPS 泡沫材料的影响较应变率更显著。

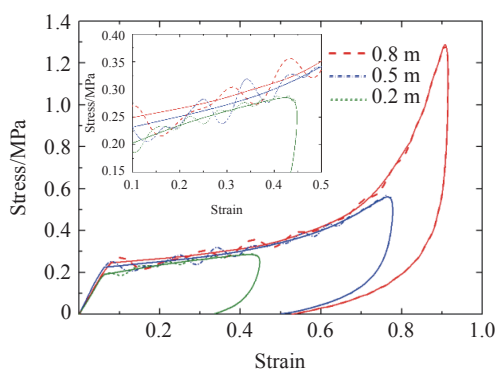


图 4 EPS25 在不同速度冲击下的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of EPS25 under different impact velocities

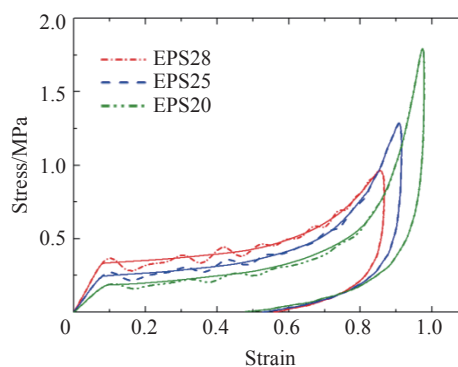


图 5 不同密度 EPS 泡沫在 3.960 m/s 冲击下的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of EPS foam with different densities under the impact velocity of 3.960 m/s

2.3 恒定应变率下的动态压缩力学性能

为了表征 EPS 泡沫材料的动态压缩特性, 需要对其动态本构关系进行研究。然而, 在落锤冲击试验中, 从冲头下落挤压泡沫, 到 EPS 泡沫的反作用下减速直至停止, 试验测得的应变率在初始接触时为最大值, 随后不断减小直至趋于零, 整个加载过程中不同时刻试样的应变率是变化的。为了准确地建立 EPS 泡沫在动态加载下的本构关系, 需要以恒定应变率形式定义应力-应变关系曲线。根据 Nagy 等^[15]、Zhang 等^[16]的工作, 任意应变处的应力 σ 可以表示为应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的函数, 即

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0(\varepsilon) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{n(\varepsilon)} \quad (2)$$

$$n(\varepsilon) = a + b\varepsilon \quad (3)$$

式中: $\sigma_0(\varepsilon)$ 为参考准静态应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 下的名义应力响应, 本试验中参考准静态应变率 $\dot{\varepsilon}_0 = 0.001 \text{ s}^{-1}$; $n(\varepsilon)$ 是与应变相关的幂指数; a 和 b 为材料常数。为了得到材料常数 a 和 b , 绘制不同应变水平下的应力-应变率关系。由于大部分能量在平台区耗散, 且不同应变率下应力平台段以自相似形式向外发展, 因而在不考虑密实段后期的情况下对该模型作进一步简化, 并引入压缩动态增长因子 (Compression Dynamic Growth Factor, CDIF)

$$\text{CDIF} = \frac{\sigma(\varepsilon)}{\sigma_0(\varepsilon)} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^n \quad (4)$$

CDIF 即动态应力与准静态应力的比值, 表示高应变率下应力的增加。在本研究中, $\sigma(\varepsilon)$ 选取应力-应变曲线平台段 20% 应变和 30% 应变处的应力, 分别为 $\sigma_{0.2}$ 和 $\sigma_{0.3}$, 在该应变下材料已经进入稳定的平台区, 并且远离致密区。通过确定动态增长因子与应变率之间的函数关系, 可以确定材料在不同应变率下的本构关系。

Ouellet 等^[1] 给出了 EPS 泡沫材料在高应变率下的测试结果; Chen 等^[6] 结合试验发现几种密度不同的泡沫材料的 CDIF 呈现相似的变化趋势, 并认为被测 EPS 材料的 CDIF 与密度无关。这种做法可能忽略了密度是 EPS 泡沫材料性能的重要影响因素这一事实。表 2 和表 3 列出了本试验中 3 种不同密度 EPS 泡沫材料的 CDIF 测试结果。

表 2 EPS 在 20% 应变处的应力与压缩动态增长因子

Table 2 Stress and CDIF of EPS at 20% strain

EPS28			EPS25			EPS20		
Strain rate/s ⁻¹	Stress/MPa	CDIF	Strain rate/s ⁻¹	Stress/MPa	CDIF	Strain rate/s ⁻¹	Stress/MPa	CDIF
0.001	0.212	1.000	0.001	0.178	1.000	0.001	0.144	1.000
0.01	0.244	1.147	0.01	0.197	1.102	0.01	0.159	1.100
76.50	0.282	1.325	80.25	0.235	1.319	87.00	0.170	1.180
140.50	0.314	1.478	144.00	0.251	1.408	148.50	0.182	1.262
184.75	0.352	1.657	188.25	0.266	1.492	191.00	0.199	1.379

表 3 EPS 在 30% 应变处的应力与压缩动态增长因子

Table 3 Stress and CDIF of EPS at 30% strain

EPS28			EPS25			EPS20		
Strain rate/s ⁻¹	Stress/MPa	CDIF	Strain rate/s ⁻¹	Stress/MPa	CDIF	Strain rate/s ⁻¹	Stress/MPa	CDIF
0.001	0.235	1.000	0.001	0.201	1.000	0.001	0.162	1.000
0.01	0.269	1.144	0.01	0.222	1.104	0.01	0.177	1.095
54.75	0.305	1.298	63.25	0.261	1.302	76.00	0.195	1.201
129.00	0.335	1.427	134.75	0.273	1.358	142.00	0.207	1.280
174.75	0.371	1.580	181.50	0.285	1.422	185.75	0.221	1.362

通过拟合发现 CDIF 与应变率的对数呈双线性关系, 如图 6 所示。随着密度的增大, CDIF 越大, 应变率效应越显著。CDIF 与应变率的关系可用如下经验公式表示。

$$CDIF_{(EPS28)} = \begin{cases} 1.2043 + 0.068 \lg \dot{\epsilon}, & 10^{-3} \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} < 112 \text{ s}^{-1} \\ -1.4545 + 1.364 \lg \dot{\epsilon}, & \dot{\epsilon} \geq 112 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

$$CDIF_{(EPS25)} = \begin{cases} 1.1966 + 0.065 \lg \dot{\epsilon}, & 10^{-3} \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} < 118 \text{ s}^{-1} \\ -0.0389 + 0.661 \lg \dot{\epsilon}, & \dot{\epsilon} \geq 118 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

$$CDIF_{(EPS20)} = \begin{cases} 1.1233 + 0.041 \lg \dot{\epsilon}, & 10^{-3} \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} < 122 \text{ s}^{-1} \\ -0.5837 + 0.858 \lg \dot{\epsilon}, & \dot{\epsilon} \geq 122 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

通过对该经验公式进行插值, 得到不同应变率下的 CDIF, 利用参考准静态应变率下的应力-应变曲线, 得到恒定应变率下动态压缩应力-应变曲线。以 EPS28 为例, 其动态压缩本构曲线如图 7 所示。

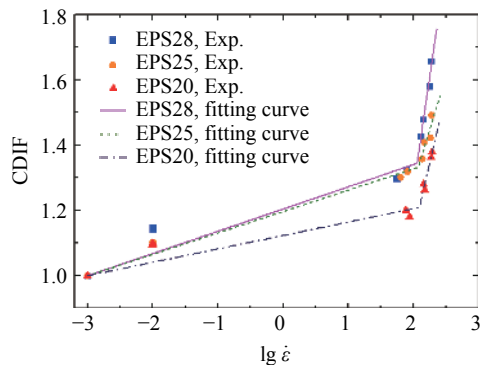


图 6 不同密度 EPS 的应变率与 CDIF 的关系

Fig. 6 Strain rate vs. CDIF for EPS with different densities

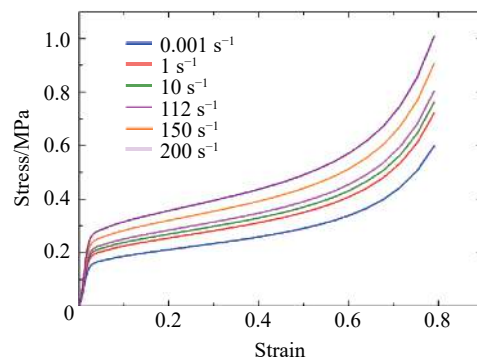


图 7 恒定应变率下 EPS28 的动态压缩本构曲线

Fig. 7 Dynamic compression constitutive curve of EPS28 under constant strain rate

3 本构模型

ABAQUS 和 LS-DYNA 是两种常用于处理冲击问题的有限元程序包, 其内置诸多聚合物泡沫材料模型。本研究选用 4 种不同的材料模型, 以模拟 EPS 泡沫材料的冲击试验, 并将模拟结果与试验数据进行对比。

3.1 基于 ABAQUS 的本构模型

在 ABAQUS 材料库中选择 Low Density Foam 和 Crushable Foam 作为 EPS 泡沫的材料模型。

Low Density Foam 模型能够较好地模拟低密度、高压压缩的弹性体泡沫, 泡沫材料加/卸载后无残余变形。加载时, 该模型要求输入材料的单轴拉伸和压缩名义应力-应变曲线, 同时考虑率相关性, 还需给出不同应变率下的应力-应变曲线。根据试验结果, 输入图 7 所示率相关动态加载曲线。典型的率相关应力-应变曲线如图 8 所示, 其中包含加载和卸载曲线。模型默认泡沫材料的泊松比为零。另外 Low Density Foam 提供材料拉伸失效截止应力, 当最大主应力达到拉伸失效截止应力时, 材料失效, 单元删除, 从而为拉伸失效提供一种可行的方法。材料拉伸失效应力见表 4。

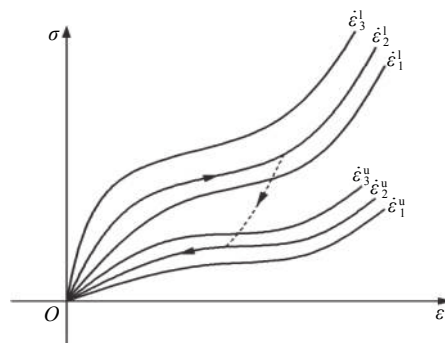


图 8 率相关加/卸载应力-应变曲线

Fig. 8 Rate-dependent loading/unloading stress-strain curves

表 4 基于 Crushable Foam 模型的 EPS28 材料参数

Table 4 EPS28 material parameters based on crushable foam model

Elastic parameters			Plastic parameters				
Poisson's ratio	Modulus/MPa	Density/(kg·m ⁻³)	Plastic Poisson's ratio	Stress/MPa	Plastic strain	Yield stress ratio	Strain rate/s ⁻¹
0	6.213	28	0	0.168	0	1	0.001
				0.219	0.227	1.204	1
				0.265	0.498	1.273	10
				0.341	0.871	1.343	112
				0.446	1.186	1.514	150
				0.599	1.465	1.685	200

Crushable Foam 模型能够较好地模拟可压碎泡沫, 模型默认材料所产生的变形不是瞬时可恢复的, 将其理想化为短时间内的塑性变形。该模型假定材料为各向同性硬化, 即材料在单轴拉伸和压缩时具有相同的力学行为。同时 Crushable Foam 模型需要静水压作用下的初始屈服应力, 以确定任意应力加载下的三维屈服曲面。屈服面代表了偏应力平面内的一系列米塞斯圆。在 p - q 子午应力平面中(其中 p 为静水压应力, q 为米塞斯应力), 屈服面表示中心在原点的椭圆。各向同性硬化模型的屈服面函数定义为

$$F = \sqrt{q^2 + \alpha^2 p^2} - B = 0 \quad (8)$$

该屈服面以几何自相似方式演化, 如图 9 所示。椭圆在 q 轴上的大小 $B = \alpha p_c$, 其中 p_c 为静水压屈服应力。形状因子 α 由单轴压缩的初始屈服应力 σ_c^0 和静水压的初始屈服应力 p_c^0 通过下式计算得到

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{9 - k^2}} \quad (9)$$

$$k = \frac{\sigma_c^0}{p_c^0} \quad (10)$$

屈服面的演化受等效塑性应变控制, 因此硬化曲线需由单轴压缩屈服应力-塑性应变关系描述。该关系通过单次加载试验测得的名义应力-应变曲线转化得到。根据试验结果(见 图 1), 认为泡沫弹性段和塑性段的泊松比为零, 故屈服应力即工程应力, 则单轴塑性应变 $\varepsilon_{\text{axial}}^p$ 可通过下式计算得到

$$\varepsilon_{\text{axial}}^p = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) - \frac{\sigma}{E} \quad (11)$$

式中: ε_{nom} 为工程应变 (压缩为负), E 为准静态下

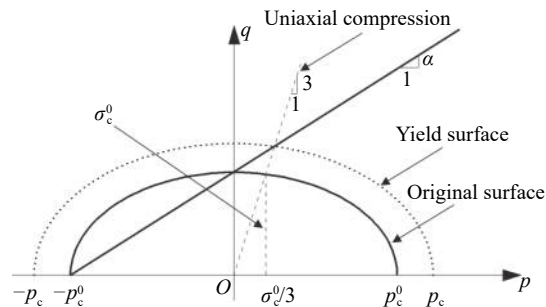


图 9 各项同性硬化模型的屈服面演化

Fig. 9 Evolution of yield surface for isotropic hardened models

的弹性模量。Crushable Foam 模型需与线弹性材料模型共同使用。卸载行为为完全弹性卸载, 存在残余变形。Crushable Foam 模型给出了两种描述材料率相关行为的方法^[17]: 一种是利用 Cowper-Symonds 幂律关系, 拟合塑性应变率 $\dot{\varepsilon}^p$ 与屈服应力比之间的关系曲线, 获得材料的动态本构模型; 另一种则以表格形式输入材料的动态本构模型。本研究采用第 2 种方法, 具体参数由试验测出, 详见 表 4。根据 Ozturk^[18] 的研究, 测定 EPS30 的压缩屈服应力比为 1.1, 将该值用于 EPS28。

3.2 基于 LS-DYNA 的本构模型

LS-DYNA Version 970 为聚合物泡沫材料提供了多种计算用材料模型^[19]。考虑 EPS 的应变率相关性, 选择 MAT57(Mat Low Density Foam)和 MAT163(Mat Modified Crushable Foam)材料模型。

MAT57 模型与 ABAQUS 中的 Low Density Foam 模型相似, 对低密度高压缩性泡沫的模拟效果较好, 可定义拉伸失效破坏, 并通过形状因子和滞后因子控制卸载行为, 通过线性黏弹性定义应变率效应, 表达式如下

$$\sigma_{ij}^t = \int_0^t g_{ijkl}(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial \tau} d\tau \quad (12)$$

式中: $g_{ijkl}(t-\tau)$ 为松弛函数; σ_{ij}^t 为应力张量的增量, σ_{ij}^f 为上一时刻应力张量, 故该时刻的应力张量为 $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^f + \sigma_{ij}^t$ 。定义松弛函数 $g(t) = E_d e^{-\beta_1 t}$, 其中 E_d 为杨氏松弛模量, β_1 为衰减系数。故一维材料动态本构方程为

$$\sigma = \frac{E_d}{\beta_1} \dot{\varepsilon} (1 - e^{-\frac{\beta_1 \varepsilon}{\dot{\varepsilon}}}) + \sigma_0 \quad (13)$$

该模型中材料密度、弹性模量、名义应力-应变曲线由试验数据直接给出, 拉伸失效应力、粘滞阻尼系数、形状因子、卸载滞后因子由文献 [8-9] 获得, 杨氏松弛模量 E_d 和衰减系数 β_1 通过试验数据拟合 (13) 式得到, 详见 表 5。

表 5 基于 LS-DYNA MAT57 模型的 EPS28 材料参数

Table 5 EPS28 material parameters based on LS-DYNA MAT57 model

Density/ (kg·m ⁻³)	Modulus/ MPa	Poisson's ratio	Tension cut-off stress/MPa	Viscous coefficient	Shape factor	Hysteretic unloading factor	E_d /MPa	β_1
28	6.213	0	1	0.1	10	0.1	0.36	169.23

Mat163 与 ABAQUS 中的 Crushable Foam 模型类似, 应用于可压碎泡沫建模, 其中考虑了应变率效应, 并且卸载为完全线弹性。材料的率效应通过一系列率相关的应力-应变曲线定义。如图 10 所示, 每条曲线定义了不同应变率下的屈服应力与体积应变的关系。单轴加载下, 体积应变-屈服应力曲线即名义应力-应变曲线, 由 图 7 给出。表 5 列出了其他所需材料参数。

3.3 本构模型验证

建立如图 11 所示的落锤冲击试验有限元模型, 选择 3 种不同冲击速度工况进行计算。EPS 泡沫下

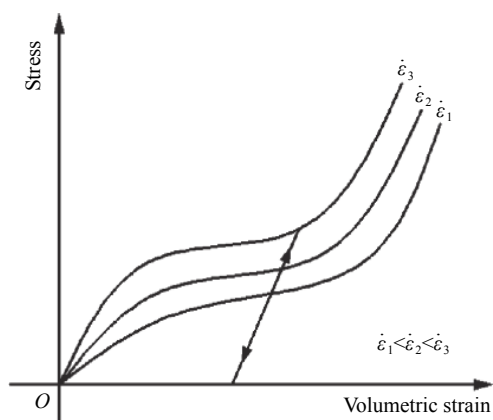


图 10 率相关加载应力-应变曲线及弹性卸载行为

Fig. 10 Rate-dependent loading stress-strain curves and elastic unloading behavior

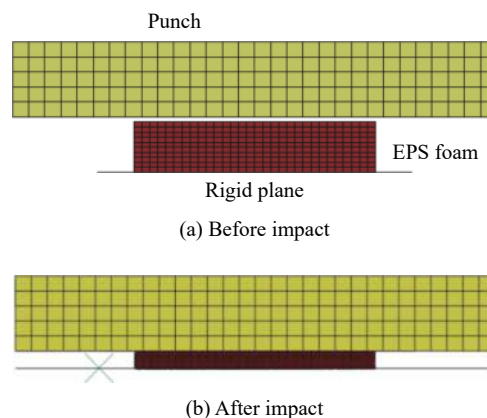
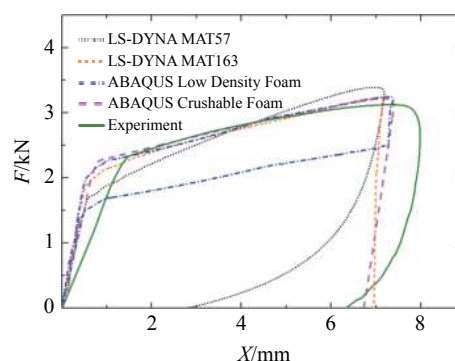
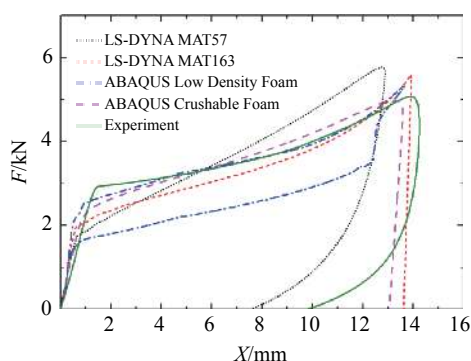
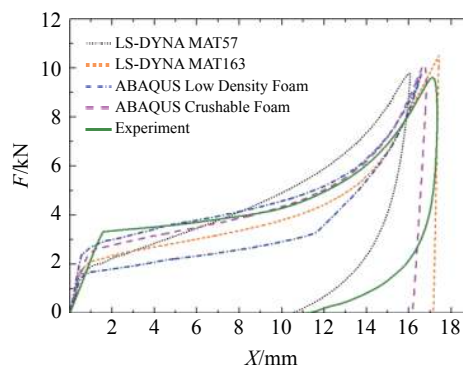


图 11 EPS 泡沫有限元模型变形前后对比

Fig. 11 Comparison of EPS foam FEA model before and after deformation

表面与地面接触,上表面与冲头接触,两种接触面均采用自动面面接触算法。将冲头视为刚体,质量与试验工况一致。LS-DYNA 分析中,为了避免高压下材料局部单元出现畸变,导致负体积错误而计算终止,在泡沫材料内部设置单元间接触,并采用常应力单元。ABAQUS 分析中,采用线性减缩积分单元,并增强沙漏控制。

图 12、图 13 和图 14 给出了各工况下力-位移响应曲线的试验与计算结果对比。响应曲线可分为两部分:加载段和卸载段。在加载段, MAT163、Low Density Foam、Crushable Foam 3 种模型的本构关系均基于 EPS 泡沫在恒定应变率下的动态本构曲线,因此所获得的动态响应曲线吻合较好,能很好地预测峰值载荷,验证了所建立材料动态本构模型的正确性。然而,对于 MAT57 模型,因其通过黏弹性物理模型导出材料的率相关本构关系,因此对于预测 EPS 泡沫材料的加载行为有一定差异。在卸载段,4 种材料模型在预测 EPS 卸载响应时明显不同,其原因在于: MAT57 模型使用卸载滞回因子和形状因子的

图 12 $H=0.2$ m 时 EPS28 仿真结果与试验结果对比
Fig. 12 Simulated and experimental results comparison of $H=0.2$ m for EPS28图 13 $H=0.5$ m 时 EPS28 仿真结果与试验结果对比
Fig. 13 Simulated and experimental results comparison of $H=0.5$ m for EPS28图 14 $H=0.8$ m 时 EPS28 仿真结果与试验结果对比
Fig. 14 Simulated and experimental results comparison of $H=0.8$ m for EPS28

校准方法,通过修正其参数,卸载曲线趋势基本一致;Low Density Foam 默认卸载沿着输入的最低应变率加载曲线进行,同时变形可全部恢复,对比可知该方法不能预测真实试验时 EPS 泡沫存在残余变形的行为;Crushable Foam 和 MAT163 模型默认材料为弹性卸载,保留部分残余变形,与试验结果吻合。因此 LS-DYNA MAT163 和 ABAQUS Crushable Foam 在预测 EPS 泡沫材料的冲击响应特性和加/卸载行为方面具有良好的适用性。

利用 LS-DYNA MAT163 和 ABAQUS Crushable Foam 两种较优模型,模拟 EPS 泡沫材料的缓冲吸能特性,对于预测其他受保护结构的抗冲击破坏能力尤为重要。表 6 列出了 EPS 能量吸收计算值与试验测试值的对比,可见相对误差在 7% 以内,证明了吸能特性预测结果的可靠性。

表 6 MAT163 和 Crushable Foam 预测的吸收能量与试验结果对比

Table 6 MAT163 and Crushable Foam predicted results compared with the test results for absorbed energy

H/m	Absorbed energy/J			Relative error/%	
	Test	MAT163	Crushable Foam	MAT163	Crushable Foam
0.2	19.192	17.949	18.416	6.48	4.04
0.5	46.172	45.087	46.479	2.35	0.66
0.8	71.514	71.308	72.410	0.29	1.25

4 结 论

采用万能材料试验机、落锤式冲击试验装置,对 3 种不同密度的 EPS 泡沫材料进行准静态和动态压缩试验,结果表明:EPS 泡沫材料表现出密度相关性和应变率相关性;随着密度和应变率的增大,应力-应变曲线的平台区应力值增大,而密实区在相同载荷下的应变值减小;密度对平台应力的影响相较于应变率更显著;弹性模量随密度增大变化明显,但随应变率增大几乎不发生变化。基于准静态和动态试验数据,发现不同密度 EPS 泡沫材料的动态增长因子均与应变率的对数呈双线性关系,考虑密度相关性,通过修正获得了 EPS 泡沫材料在恒定应变率下动态本构关系的经验公式。

基于 LS-DYNA 中的 MAT57 和 MAT163 以及 ABAQUS 中的 Low Density Foam 和 Crushable Foam 4 种材料模型,建立了 EPS 泡沫的本构模型,并用于落锤试验仿真计算。对比试验数据发现, MAT163 和 Crushable Foam 模型在预测 EPS 泡沫的冲击特性响应和材料加/卸载行为时吻合较好,所得材料吸能特性的相对误差均在 7% 以内。该结果验证了材料动态本构模型的可靠性,所建立的本构模型能较好地描述材料动态压缩特性,同时表明这两种特定的材料模型在模拟 EPS 泡沫冲击碰撞时具有良好的适用性。

参考文献:

- [1] OUELLET S, CRONIN D, WORSWICK M. Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions [J]. *Polymer Testing*, 2006, 25(6): 731–743.
- [2] CRONIN D S, OUELLET S. Low density polyethylene, expanded polystyrene and expanded polypropylene: strain rate and size effects on mechanical properties [J]. *Polymer Testing*, 2016, 53: 40–50.
- [3] HORVATH J S. Expanded polystyrene (EPS) geofoam: an introduction to material behavior [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1994, 13(4): 263–280.
- [4] GIBSON L, ASHBY M. Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [5] SAINT-MICHEL F, CHAZEAU L, CAVAILLÉ J Y, et al. Mechanical properties of high density polyurethane foams: I. effect of the density [J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(15): 2700–2708.
- [6] CHEN W, HAO H, HUGHES D, et al. Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene [J]. *Materials & Design*, 2015, 69: 170–180.
- [7] 王志亮, 诸斌. EPS 泡沫冲击压缩和吸能特性试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(4): 630–636.

- WANG Z L, ZHU B. Experimental study on impact compression and energy-absorbing property of expanded polystyrene foam [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(4): 630–636.
- [8] LING C, IVENS J, CARDIFF P, et al. Deformation response of EPS foam under combined compression-shear loading. Part I: experimental design and quasi-static tests [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 144: 480–489.
- [9] LING C, IVENS J, CARDIFF P, et al. Deformation response of EPS foam under combined compression-shear loading. Part II: high strain rate dynamic tests [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 145: 9–23.
- [10] LING C, CARDIFF P, GILCHRIST M D. Mechanical behaviour of EPS foam under combined compression-shear loading [J]. *Materials Today Communications*, 2018, 16: 339–352.
- [11] SHAH Q H, TOPA A. Modeling large deformation and failure of expanded polystyrene crushable foam using LS-DYNA [J]. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2014: 1.
- [12] 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.
- [13] 姚小虎, 任会兰, 林荣, 等. 聚合物泡沫材料动态力学性能及其能量吸收研究 [J]. *高压物理学报*, 2012, 26(5): 531–536.
- YAO X H, REN H L, LIN R, et al. Study on dynamic mechanical properties and energy absorption of polymeric foams [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(5): 531–536.
- [14] 郭伟国, 李玉龙, 索涛. 应力波基础简明教程 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 120–154.
- [15] NAGY A, KO W L, LINDHOLM U S. Mechanical behavior of foamed materials under dynamic compression [J]. *Journal of Cellular Plastics*, 1974, 10(3): 127–134.
- [16] ZHANG J, KIKUCHI N, LI V, et al. Constitutive modeling of polymeric foam material subjected to dynamic crash loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, 21(5): 369–386.
- [17] ABAQUS analysis user's manual version 2017 [M]. ABAQUS Inc., 2017.
- [18] OZTURK U E. Mechanical behavior of low density polymeric foams under multiple loading and unloading [D]. Turkey: Bogazici University, 2008.
- [19] LS-DYNA theory manual version Vol. R7.1 [M]. Livermore: Livermore Software Technology, 2006.

Dynamic Compression Characteristics of Polystyrene Foam Materials

LEI Zhongqi¹, YAO Xiaohu¹, LONG Shuchang¹, CHANG Jianhu², WANG Haibo²

(1. *Department of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering and Transportation,*

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Hefei Midea Refrigerator Division, Hefei 230601, China)

Abstract: The quasi-static and dynamic compression tests of expanded polystyrene (EPS) foam material were carried out through a universal material tester and a drop-weight impact machine. The density and loading rate effects of the dynamic compression characteristics for the polystyrene foam material were discussed. By considering the density correlation, the empirical formula of dynamic constitutive relation under constant strain rate was modified based on the drop-weight test data. The constitutive model of EPS foam was established based on the material finite element models of MAT57, MAT163 in LS-DYNA, and Low Density Foam and Crushable Foam in ABAQUS. By simulating the impact process of drop-weight and comparing with the test results, it shows that MAT163 and Crushable Foam model can predict the dynamic response and energy absorption performance better. The results verify the reliability of the dynamic constitutive model. Meanwhile, it shows that these two specific material models have good applicability in simulating the impact problem of EPS foam.

Keywords: polystyrene foam; strain rate; density; dynamic compression characteristics; constitutive model