

文章编号: 1001-4888(2018)06-0851-11

## 闭孔泡沫铝动态材料参数的实验研究<sup>\*</sup>

黄苏南<sup>1</sup>, 丁圆圆<sup>1</sup>, 王士龙<sup>1</sup>, 何思渊<sup>2</sup>, 郑志军<sup>1</sup>, 虞吉林<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学近代力学系中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 东南大学生物科学与医学工程学院生物电子学国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 泡沫金属在高速冲击下表现为变形局部化, 采用传统的分离式 Hopkinson 杆技术进行动态实验测试可能存在问题。本文以动态、刚性-塑性硬化(D-R-PH)模型为理论基础, 对闭孔泡沫铝开展 Taylor-Hopkinson 冲击实验, 结合高速摄影技术和数字图像相关技术(DIC), 获得了冲击速度的历史曲线。通过运用冲击波理论, 提出了冲击速度与冲击时间的隐函数拟合方法, 确定了动态初始压溃应力和应变硬化参数等两个动态材料参数。利用冲击端的应力历史曲线检验了结果的有效性, 分析了动态材料参数对相对密度的敏感性, 发现动态初始压溃应力和应变硬化参数均与相对密度近似呈幂函数关系。实验表明泡沫铝的应力-应变行为呈现明显的冲击速率敏感性。

**关键词:** 泡沫铝; 泰勒冲击; 高速摄影仪; 隐函数拟合; 相对密度

**中图分类号:** O347.3      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-211

## 0 引言

泡沫铝作为优异的吸能缓冲材料, 在航空航天、船舶、汽车等领域都有着广泛的应用。近年来, 采用材料试验机和分离式 Hopkinson 杆(SHPB)技术<sup>[1]</sup>等实验测试手段, 已经对泡沫材料的准静态和动态力学性能开展了大量的研究, 但关于泡沫铝的动态率敏感性问题还存在着广泛的争议。

Deshpande 等<sup>[2]</sup>利用 SHPB 技术和直接撞击技术对开孔和闭孔泡沫铝进行了动态实验, 他们认为二者的平台应力对应变率均不敏感。王永刚等<sup>[3]</sup>利用改进的 SHPB 方法, 通过调整加载波形, 使试样加载过程中保证均匀变形及应力平衡, 对泡沫铝进行了高应变率的动态实验。采用 SHPB 技术分析材料的应力-应变关系是建立在一维性和应力/应变均匀性这两条基本假设的基础上的, 然而对于泡沫金属, 均匀性可能得不到保证, 实验中很有必要采用高速摄影系统来分析动态变形特征。王鹏飞等<sup>[4]</sup>利用高速摄影仪记录了泡沫铝在不同温度下动态压缩的变形过程, 观察到与常温高应变率下屈曲失稳、撕裂不同, 高温高应变率下, 泡沫铝动态变形主要表现为塑性弯曲且几乎无碎片飞出。杨宝等<sup>[5]</sup>利用 SHPB-高速摄影系统拍摄到泡沫铝细观结构在 SHPB 中的变形, 通过研究表明泡沫铝在不同时间、不同区域的应变率表现出明显不同。

为了实现更高应变率的冲击实验, Zhao 等<sup>[6]</sup>和 Tan 等<sup>[7]</sup>利用直接撞击的方法分别对多胞金属和泡沫铝进行了动态实验的研究。Zhao 等<sup>[6]</sup>得出折叠变形中微惯性的作用是宏观率敏感性的潜在因素的结论; Tan 等<sup>[7]</sup>认为高于临界速度的冲击下, 试件的尺寸和拓扑结构的影响很小, 动态应力增强的主要原因是由于跟变形局部化关联的惯性效应。近年来, Elnasri 等<sup>[8]</sup>和 Barnes 等<sup>[9]</sup>在直接冲击实验中结

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-10-16; 修回日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(11372308, 11372307, 11572087)资助

通讯作者: 郑志军(1979-), 男, 副教授, 博士, 从事冲击动力学研究。Email: zjzheng@ustc.edu.cn

合高速摄影和数字图像相关方法(DIC)的技术,获得了瞬时冲击速度。直接撞击法可用于获得泡沫金属试件在较高应变率加载下的力学性能,虽然较早被提出,但是并未得到广泛应用,主要是该方法只能依靠冲击波相关理论结合冲击速度和材料变形前后的尺寸推导材料的应力-应变关系和参数值。而为了对动态临界应力进行精确研究,Lopatnikov等<sup>[10]</sup>提出了利用直接冲击和Hopkinson杆技术相结合的Taylor-Hopkinson冲击实验技术对泡沫铝类低阻抗材料进行动态实验。Wang等<sup>[11]</sup>利用高速摄影仪定量测量轴向位移,进而利用数字图像相关技术得到各个拉格朗日位置对应的局部速度,将动态和准静态应力-应变曲线对比,他们认为应变率效应不能被忽略。

以往的动态冲击实验对动态材料参数的测定并未提出简单易行的实验方法。Zheng等<sup>[12]</sup>于2014年建立了基于3D Voronoi技术的闭孔泡沫有限元模型,采用基于离散变形梯度的方法计算局部应变场,通过对每一个拉格朗日位置的应力-应变状态的确定获得动态应力-应变关系,即动态、刚性-塑性硬化(D-R-PH)模型:

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_0^d + \frac{D\epsilon}{(1-\epsilon)^2} \quad (1)$$

式中, $\sigma_0^d$ 为动态初始压溃应力; $D$ 为动态应变硬化参数。进而,文献<sup>[12]</sup>基于D-R-PH冲击波模型,提出了通过对冲击应力和瞬时冲击速度的测量确定动态材料参数的方法。

本文采用Taylor-Hopkinson冲击实验技术对泡沫铝材料的动态材料参数进行研究,基于D-R-PH模型,通过结合未变形区域的牛顿运动定律以及跨波阵面的守恒关系,得出冲击速度和冲击时间的函数关系,结合高速摄影技术和图像相关技术获得冲击速度历史曲线。运用冲击速度与冲击时间的隐函数拟合方法,对模型中的两个动态材料参数进行确定,利用实验方法对该材料模型研究泡沫铝动态冲击情形下应力-应变关系进行测试,就该模型的两个材料参数对于相对密度的敏感性进行讨论;并将动态实验结果与准静态实验的相关参数进行比较,对泡沫铝材料的率敏感性进行考察。

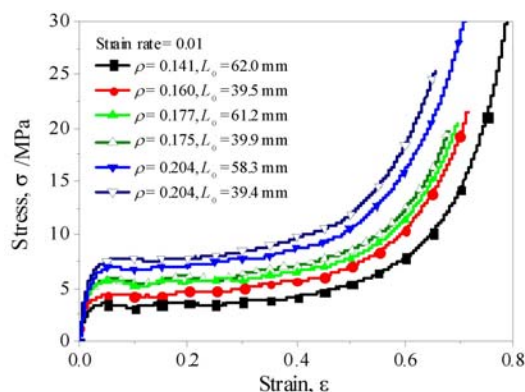


图1 准静态下泡沫铝的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of aluminum foam under quasi-static compression

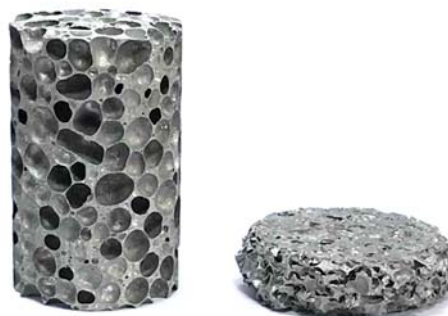


图2 准静态压缩前后的泡沫铝试件

Fig. 2 A specimen of aluminum foam before and after quasi-static compression

## 1 材料和实验测试

### 1.1 泡沫铝材料和准静态实验测试

本实验用的闭孔泡沫铝材料,由江苏中天科技股份有限公司生产,采用溶体发泡工艺制备。制备的原料为99.7%的高纯铝锭,添加剂为纯度为98.5%的Ca以及含有94.5%Ti元素的TiH<sub>2</sub>。原材料为三块具有不同相对密度的闭孔泡沫铝,尺寸为500mm×500mm×40mm,泡沫孔径约在3mm至5mm之间,将每种相对密度取若干加工成Φ37mm×60mm和Φ37mm×40mm的试件,试件具体的尺寸和相对密度如图1。准静态轴压实验是在中国科学技术大学工程与材料科学实验中心的MTS810材料试验系统上进行的,图2为相对密度为0.175的泡沫铝压缩前后的试件状态。图1是该泡沫铝在准静态压

缩下不同相对密度的应力—应变曲线,可以看出该泡沫铝变形经历了典型的弹性区、平台区、硬化区三段式变形阶段。

1.2 动态实验测试

图 3 为动态实验的装置示意图,主要由高速摄影系统、放大器-应变仪系统和 Taylor-Hopkinson 杆装置组成。采用中国科学技术大学冲击动力学实验室的 37mm 的 Hopkinson 压杆装置开展动态冲击实验。动态实验试件也是从上述三块不同相对密度的闭孔泡沫铝中经由线切割系统加工出来的,试件的直径  $d$  为 36.5mm,长度  $L_0$  为 100mm,相对密度  $\bar{\rho}$  为  $0.127 \pm 0.006$ 、 $0.171 \pm 0.002$ 、 $0.207 \pm 0.003$  的闭孔泡沫铝试样,通过控制氮气罐的气压值,分别做了 6 次、5 次和 5 次不同初始冲击速度的动态实验,实验所涉及的全部试件的参数见表 1。

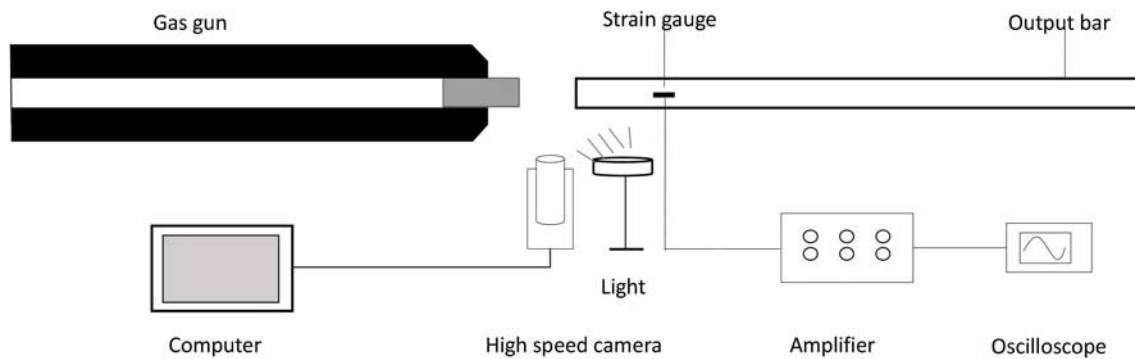


图 3 Taylor-Hopkinson 杆实验系统

Fig. 3 Taylor-Hopkinson experiment system

表 1 试件的具体参数和初始冲击速度

Tab. 1 Parameters of specimens and their initial impact velocities

Sample No.	Diameter $d$ /mm	Length $L_0$ /mm	Relative density $\rho$	Initial impact velocity $V_0$ / (m/s)
1	36.22	100.10	0.133	163.4
2	36.20	99.94	0.126	175.7
3	36.22	99.98	0.130	171.9
4	36.22	100.08	0.126	182.7
5	36.20	99.92	0.123	195.6
6	36.18	99.94	0.126	172.1
7	36.74	100.38	0.170	142.2
8	36.68	100.26	0.171	162.7
9	36.20	99.84	0.173	163.4
10	36.20	99.82	0.173	186.8
11	36.21	99.86	0.169	195.2
12	36.38	99.72	0.207	148.5
13	36.70	99.96	0.210	162.7
14	36.60	99.88	0.208	168.4
15	36.38	99.86	0.207	178.0
16	36.24	100.00	0.205	183.4

本文动态实验是利用 Taylor-Hopkinson 中的弹性输出杆测量泡沫铝冲击端应力,用高速摄影系统记录撞击过程中的变形历史和变形模式,并由数字图像相关技术得出泡沫铝的速度时程曲线。通过对泡沫铝的应力速度关系或者速度时间关系进行拟合以确定动态材料参数。由于泡沫铝塑性波阻抗几乎等于弹性杆的波阻抗,使得泡沫铝打到刚性靶和打到弹性靶的区别影响很小,用弹性靶代替刚性靶不会对结果产生很大影响<sup>[11]</sup>。

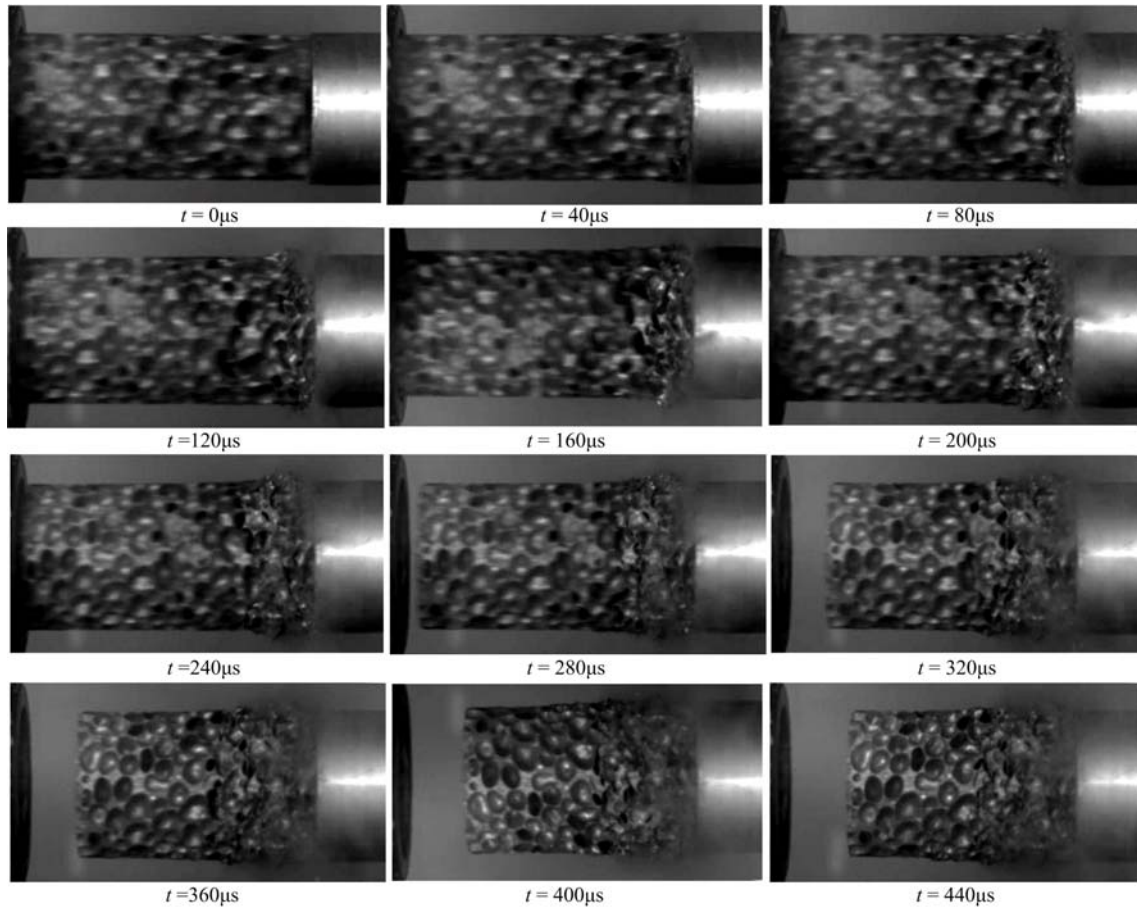


图 4 试件在初始冲击速度为 163m/s 下的变形模式

Fig. 4 The deformation patterns of a specimen under the initial impact velocity of 163m/s

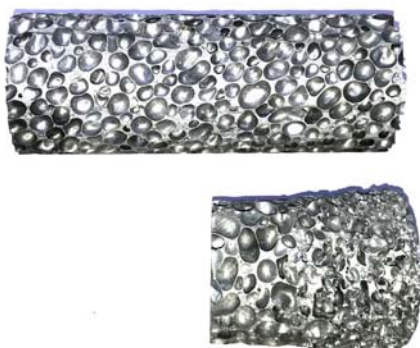


图 5 动态冲击前后的泡沫试件

Fig. 5 A specimen of aluminum foam before and after dynamic impact

本实验用高速摄影仪的最高拍摄速度是 50000 帧/秒,即每间隔  $20\mu\text{s}$  拍一张照片。利用高速摄影仪可以记录泡沫铝试样在动态情形下的变形,如图 4 所示。从图中可观察到,冲击端发生急剧的形变,而冲击波未到达的区域未发生明显的变形。

图 5 是动态实验前后泡沫铝试件的对比图,可见泡沫铝在直接冲击下,冲击端的直径会略微有所膨胀,但是由于实验中试件尺寸略小于输入杆的直径,故而动能均以轴向变形消耗为主,横向效应可以忽略不计。冲击端呈现压溃的情形,而冲击波未到达的区域并未发生明显变形。需要说明的是试件撞击之前的直径略小于输出杆的直径,撞击过程中的微小膨胀依然是在输入杆的容许范围内,故而认为输入杆测量的应力数据是真实可

靠的。

结合数字图像相关技术,得到从撞击开始后各个不同时刻对应的泡沫铝未变形区域,即冲击波未到达区域的冲击速度。在早年就有学者利用 Taylor-Hopkinson 系统做过材料动态实验的研究<sup>[7,8]</sup>,与将泡沫铝试件粘贴在输入杆前端不同,本文实验将试件当作子弹直接撞击在输入杆上面,也称为直接撞击实验。

## 2 分析模型

考虑泡沫铝试件作为子弹直接撞击输入杆的情形,泡沫铝试件首先在撞击端发生压溃,表现出变形局部化的特征,进而压溃界面向自由端传播,可以采用冲击波理论来描述压溃界面的传播行为<sup>[12]</sup>。将波后方作为刚性体处理,由输入杆记录边界应力,即为波后应力。图 6 是泡沫铝直接撞击刚性壁的冲击波模型。

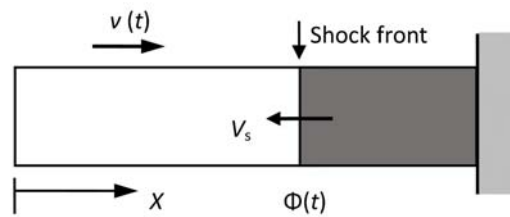


图 6 Taylor 冲击和冲击波模型

Fig. 6 Taylor impact and shock model

冲击波波阵面前方 A 和后方 B 的应变、应力和粒子速度分别为  $\{\epsilon_A, \sigma_A, v_A\} = \{0, \sigma_0^d, v\}$  和  $\{\epsilon_B, \sigma_B, v_B\} = \{\epsilon_B, \sigma_B, 0\}$ , 其中  $v$  为冲击速度,其值在冲击过程中逐渐减少。波阵面上的质量和能量守恒关系<sup>[13]</sup>分别给出:

$$v_B - v_A = -V_s(\epsilon_B - \epsilon_A) \tag{2}$$

$$\sigma_B - \sigma_A = -\rho_f V_s(v_B - v_A) \tag{3}$$

式中,  $V_s$  为冲击波波速;  $\rho_f$  为泡沫的密度。联立式(2)和(3),得

$$\sigma_B = \sigma_0^d + \rho_f v^2 / \epsilon_B \tag{4}$$

由式(1)和(4),可得

$$\epsilon_B = \frac{v}{v + c} \tag{5}$$

式中,

$$c = \sqrt{D/\rho_f} \tag{6}$$

将式(5)代入式(4),消去波后应变可得<sup>[12]</sup>

$$\sigma_B = \sigma_0^d + v \sqrt{\rho_f D} + \rho_f v^2 \tag{7}$$

Zheng 等<sup>[12]</sup>提出可以利用式(7)拟合波后应力与冲击速度的关系获得动态材料参数。原则上,在实验中只需要将速度历史曲线和冲击端应力的历史曲线,分别通过高速摄影和应变仪等方法记录下来,即可得到波后应力与冲击速度的关系。但是,在实际操作中,由于波后应力的震荡较大,由此确定的材料参数具有较大的离散性,故而本文提出如下的修正方案。

将式(2)和式(5)结合可得冲击波速度:

$$V_s = v + c \tag{8}$$

用冲击波模型求解多胞材料的动态力学响应时,将波阵面前方区域视为未变形区域,由牛顿运动定律,有

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\sigma_0^d}{\rho_f(L_0 - \Phi(t))} = -\frac{\sigma_0^d}{\rho_f[L_0 - \int_0^t (v(\tau) + c) d\tau]} \tag{9}$$

式中,  $\Phi(t)$  为冲击波波阵面在拉格朗日坐标系下的位置。结合初始条件  $v(0) = V_0$ , 式(8)可以给出:

$$t = \frac{L_0}{b^2} \int_0^{V_0-v} e^{-\frac{1}{2b^2} \xi(2V_0+2\xi-v)} d\xi \tag{10}$$

式中,

$$b = \sqrt{\alpha_0^d / \rho_f} \tag{11}$$

式(10)给出了冲击速度随冲击时间变化的隐函数表达式。因此,我们提出可以通过高速摄影仪记录变形的全过程,并结合数字图像相关技术得出冲击速度历史曲线(即通过对试件未发生压溃变形的区域进行跟踪,记录并计算前后照片中该区域的移动像素的大小,然后计算出瞬时冲击速度),通过隐函数表达式(10),采用非线性拟合来确定材料参数。进一步可以由输出杆记录的应力曲线验证该方法的有效性和可靠性。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 利用 D-R-PH 模型研究泡沫铝动态力学行为

图 7(a)是结合高速摄影仪和数字图像相关技术获得的冲击速度历史曲线。考虑到冲击速度低于某一临界值时,泡沫铝试件的压溃阵面可能不再局限在一个胞元的尺度上,冲击波模型不再适用,因此冲击速度低于该临界值的实验数据不用来参与拟合式(10),本文临界速度取为  $V_c = 52\text{m/s}$ <sup>[14]</sup>。通过图 7(b)、(c)和(d)可见,在实验考查的三种相对密度下,式(10)的拟合效果很好。拟合获得的参数  $b$  和  $c$  见表 2。由式(11)和式(6),可以进一步获得动态初始压溃应力  $\alpha_0^d$  和动态应变硬化参数  $D$ ,见表 2。

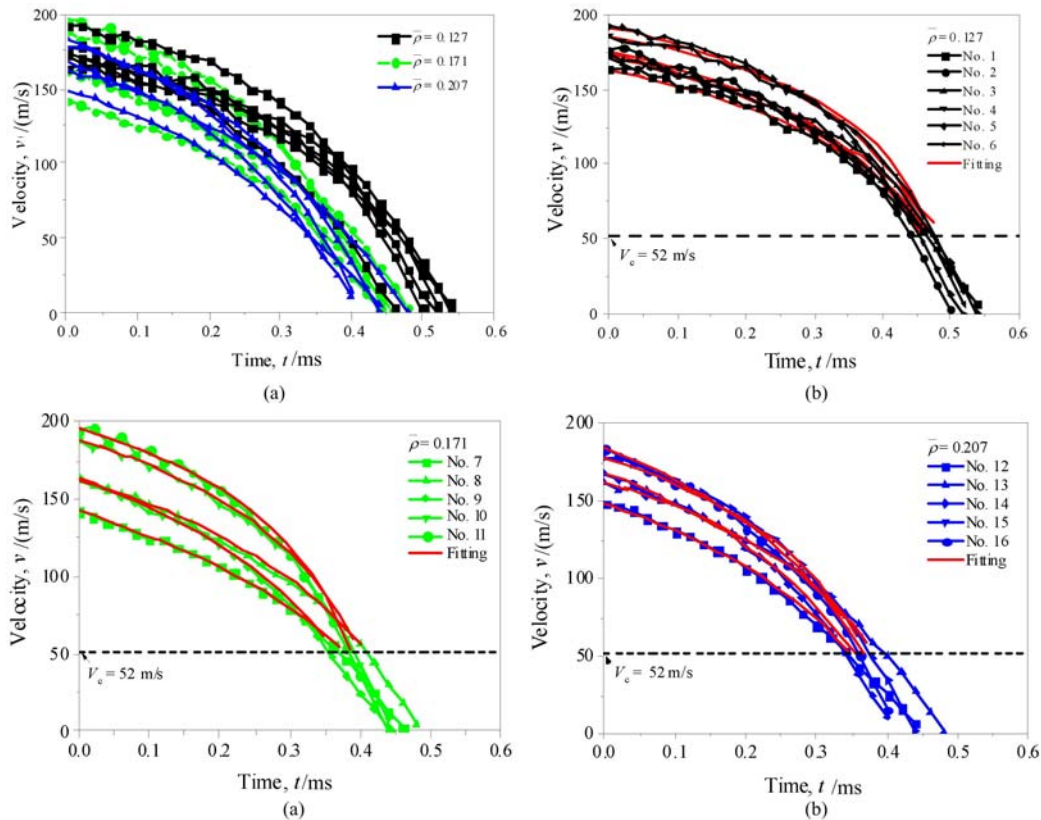


图 7 冲击速度历史曲线和拟合结果

Fig. 7 The time history curves of impact velocity and the fitting results

将拟合得到的两个目标参数代入 D-R-PH 模型可以得到冲击波波后应力随时间的变化曲线,如图 8,与实验测量的边界应力基本一致,由此说明上述确定材料参数的方法的可行性和有效性,可见尽管实验得到的应力曲线由于数据的震荡并不能和模型曲线完全一致,但是该模型对于不同的相对密度的泡沫铝均能很好地吻合应力的峰值和应力的变化趋势。

表 2 D-R-PH 模型中的拟合参数  
Tab.2 The fitting parameters of D-R-PH model

Sample No.	Relative density $\rho$	$b/(m/s)$	$c/(m/s)$	$\sigma^d/MPa$	$D/MPa$
1	0.133	97.59	59.94	3.42	1.29
2	0.126	101.71	56.60	3.52	1.09
3	0.130	101.13	46.83	3.59	0.77
4	0.126	107.62	48.80	3.94	0.81
5	0.123	98.62	52.63	3.23	0.92
6	0.126	106.79	38.34	3.88	0.50
7	0.170	119.91	63.311	6.60	1.84
8	0.171	121.27	56.43	6.79	1.47
9	0.173	127.47	74.46	7.59	2.59
10	0.173	118.60	71.08	6.57	2.36
11	0.169	116.38	80.00	6.18	2.92
12	0.207	126.19	79.81	8.90	3.56
13	0.210	120.70	80.45	8.26	3.67
14	0.208	132.23	81.39	9.82	3.72
15	0.207	120.46	89.93	8.11	4.52
16	0.205	132.11	75.68	9.66	3.17

### 3.2 动态材料参数对相对密度的敏感性

相对密度作为多胞材料最重要的参数,讨论相对密度对于泡沫铝材料的动态力学性能的影响具有重要的意义。图 9(a)和(b)分别为三种相对密度下的动态初始压溃应力和应变硬化参数随初始冲击速度的变化曲线。由图可见随着冲击速度的不同,不同相对密度的泡沫铝会在某一个值附近上下震荡,但对于同一相对密度的泡沫铝可以认为两个参数均固定不变。

图 10(a)(b)分别给出了动态初始压溃应力和动态应变硬化参数随泡沫铝相对密度的变化。我们采用如下幂函数形式分别进行拟合:

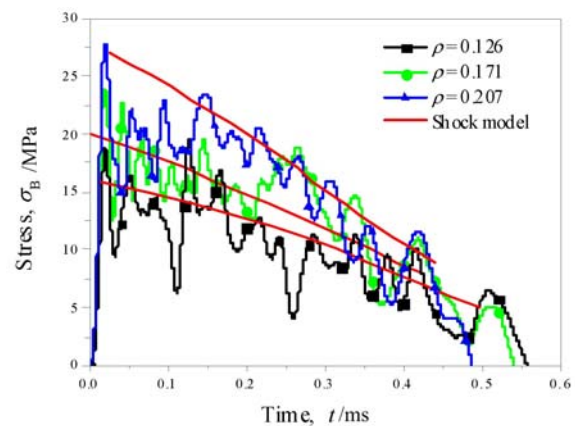


图 8 冲击端应力历史曲线和冲击波模型的预测结果  
Fig.8 The history curves at the impact end and the predictions of shock model

$$\begin{cases} \sigma^d = \alpha \rho^m \\ D = \beta \rho^n \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $m$  和  $n$  为拟合参数。拟合曲线见图 10, 拟合值分别为  $\alpha = 170MPa$ ,  $m = 1.86$  和  $\beta = 323 MPa$ ,  $n=2.84$ 。需要说明的是本文使用的泡沫铝的相对密度在 0.1~0.2 之间,对于更小或更大的相对密度可能需要进一步的研究。

相对密度较大的多胞材料,其壁厚较大或者孔径较小,冲击波经过时造成胞壁发生完整屈曲的可能性较小,需要相对更长的区域以消耗能量,故而在相对密度更大的多胞材料中,波阵面传播得更快。从

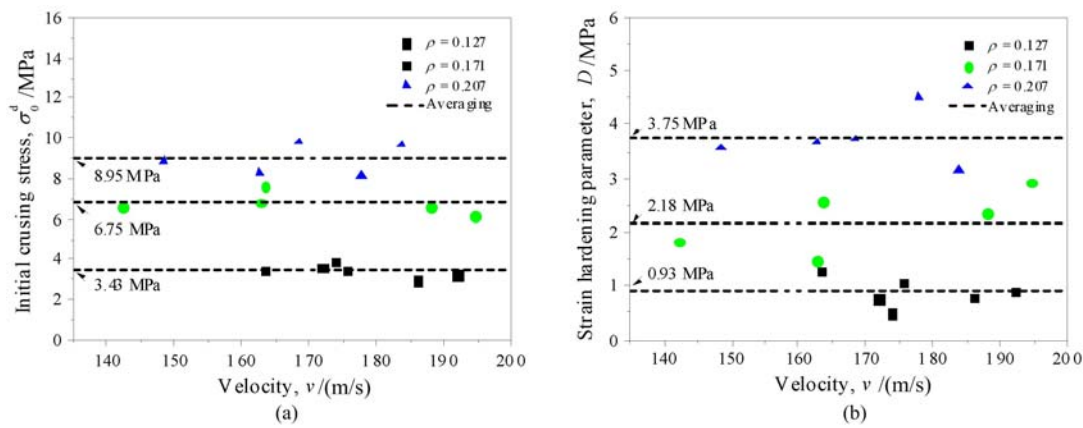


图9 不同初始冲击速度下测量的动态初始压溃应力  $\sigma_0^d$  和应变硬化参数  $D$   
 Fig. 9 The dynamic initial crushing stress  $\sigma_0^d$  and the strain hardening parameter  $D$  measuring at different initial impact velocities

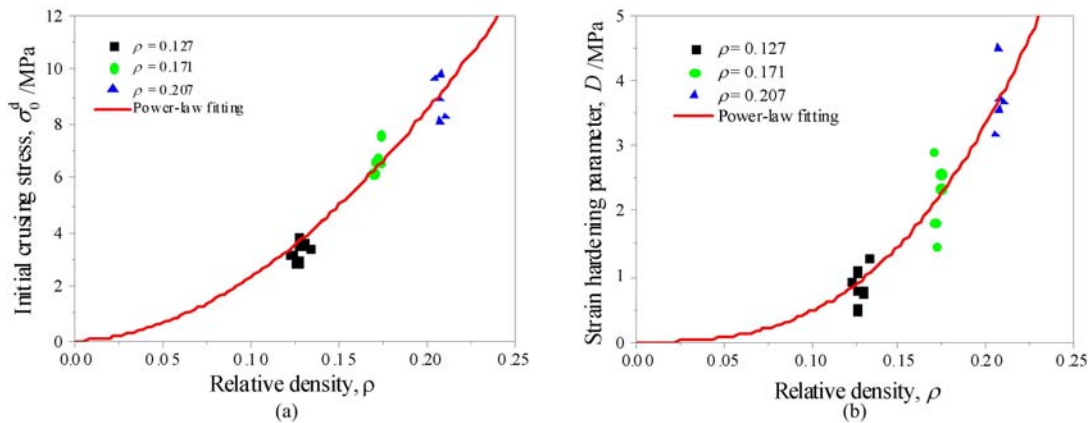


图10 动态初始压溃应力  $\sigma_0^d$  和应变硬化参数  $D$  随相对密度的变化  
 Fig. 10 The variations of the dynamic initial crushing stress  $\sigma_0^d$  and the strain hardening parameter  $D$  with the relative density of aluminum foam

应变硬化参数随相对密度的关系,并结合(8)式冲击波速度与冲击速度的关系,也可以得出上述的结果。该实验结果也在一定程度上从实验方面验证了 Wang 等<sup>[15]</sup>利用速度场方法得到的应变硬化参数随着相对密度增大而变大的结论。

### 3.3 准静态与动态应力-应变关系的比较

文献中存在许多种函数形式用于描述泡沫金属在准静态压缩下的应力-应变关系。Zheng 等<sup>[12]</sup>提出了与式(1)形式类似的函数关系,称为刚性-塑性硬化(R-PH)模型,记为

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_0 + \frac{C\epsilon}{(1 - \epsilon)^2} \quad (13)$$

式中,  $\sigma_0$  为初始压溃应力;  $C$  为应变硬化参数。该关系仅包含两个材料参数,分别表征了多胞材料初始压溃和应变硬化行为,未考虑弹性阶段。直接采用该关系对准静态应力-应变曲线进行拟合,需要注意两点:(1)弹性段的数据应去掉,否则初始压溃应力的数值偏小;(2)硬化阶段的应变不能太大,否则对平台段的描述将不够准确。在尝试多种方案后,我们采用如下方案来获得相关的材料参数。首先,采用目前认可度高的方法来确定泡沫铝的平台应力  $\sigma_{pl}$  和压实应变,即压实应变取为对应能量吸收效率曲线最大值时的应变<sup>[16, 17]</sup>,平台应力取为从屈服应变到压实应变之间的所有应力的平均值。其次,考虑到泡沫铝的准静态应力-应变曲线在到达初始峰值应力之后存在应力降特征,本文取  $\sigma_0 = 0.8\sigma_{pl}$ 。最后,采



用最小二乘法进行拟合以得到应变硬化参数,拟合的参数见表 3,拟合的应力—应变关系如图 11。

由式(1)和式(12),可得

$$\sigma = \alpha \rho^n + \beta \rho^m \frac{\epsilon}{(1 - \epsilon)^2} \tag{14}$$

可以由此计算对应于准静态压缩下的三种相对密度的动态应力—应变曲线,如图 12。由动态和准静态应力—应变曲线的比较可以看出,对于泡沫铝材料,相同密度下的准静态和动态的材料参数的变化趋势相似,且较低密度时的准静态的应变硬化参数值要稍高于动态值,但是随着密度变大,动态下的硬化参数增加得更快,且超过了准静态下的应变硬化参数。但是无论何种相对密度,动态下的初始压溃应力或者是平台应力均较准静态情形下要高,且动态与准静态的变形模式和模型参数均有较大差别,反映出泡沫铝是一种冲击速率敏感的材料。

表 3 R-PH 模型中的拟合参数

Tab. 3 The fitting parameters of R-PH model

Sample No.	Relative density $\rho$	$\alpha_0$ /MPa	C/MPa
1	0.141	3.00	1.42
2	0.175	4.80	1.90
3	0.204	6.22	2.68

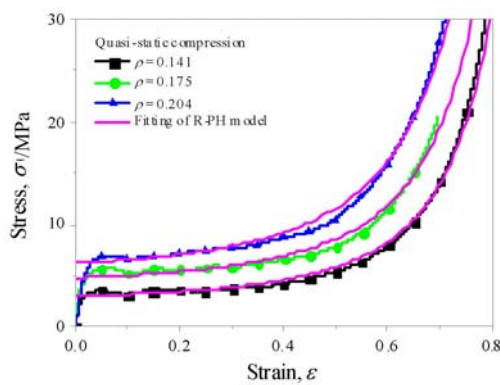


图 11 泡沫铝准静态名义应力—应变曲线和 R-PH 模型的拟合结果

Fig. 11 Quasi-static nominal stress-strain curves of aluminum foam and the fitting of R-PH model

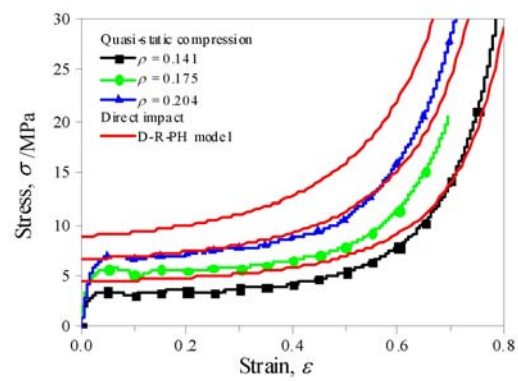


图 12 泡沫铝准静态与动态应力—应变关系的比较

Fig. 12 Comparison of the stress-strain curves of aluminum foam under quasi-static and dynamic loadings

## 4 结论

本文利用 Taylor-Hopkinson 实验方法,结合数字图像相关技术,通过对圆柱形泡沫铝材料的速度时程曲线进行研究,提出了一种速度历史曲线的隐函数拟合方法,进而对 D-R-PH 冲击波模型中的两个重要参数动态初始压溃应力和应变硬化参数进行了确定。

进一步研究了动态初始压溃应力和应变硬化参数的相对密度敏感性。结果表明,两个参数均随着相对密度的增大而增大,可以使用幂函数进行拟合。利用实验的方法得到了一个显含相对密度的 D-R-PH 模型,可以给研究不同相对密度泡沫铝动态力学性能提供相关的实验依据。

通过对比实验得到的冲击端应力曲线和 D-R-PH 模型的结果,表明了利用该方法对于确定泡沫材料的动态参数具有较高的可行性和准确性。通过对比准静态实验的应力—应变曲线,可以从实验的角度得到不管泡沫铝是何种相对密度,它都是一种冲击速率相关的材料的结论。

## 参考文献:

- [1] Kolsky H. An Investigation of The mechanical properties of material at very high rates of loading[J]. Proceeding of The Physical Society of London, 1949, 62:676—701.
- [2] Deshpand V S, Fleck N A. High strain rate compressive behavior of aluminium alloy foams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24:277—298.
- [3] 王永刚, 施绍裘, 王礼立. 采用改进的 SHPB 方法对泡沫铝动态力学性能的研究[J]. 实验力学, 2003, 18(2): 257—264 (WANG Yonggang, SHI Shaoqiu, WANG Lili. An improved SHPB method and its application in the study of dynamic mechanical behavior of aluminum foams[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(2): 257—264(in Chinese))
- [4] 王鹏飞, 徐松林, 李志斌, 等. 泡沫铝在 SHPB 高温动态下的变形过程研究[J]. 实验力学, 2013, 28(4):447—452 (WANG Pengfei, XU Songlin, LI Zhibin, et al. Deformation process study of aluminum foam at high dynamic temperature based on SHPB[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(4):447—452 (in Chinese))
- [5] 杨宝, 汤立群, 刘逸平, 等. 冲击条件下泡沫铝的细观变形特征分析[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4):399—403 (YANG Bao, TANG Liqun, LIU Yiping, et al. Meso deformation characteristics analysis of aluminum foam under impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(4):399—403 (in Chinese))
- [6] Zhao H, Elnasri I, Abdennadher S. An experimental study on the behaviour under impact loading of metallic cellular materials[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47:757—774.
- [7] Tan P J, Reid S R, Harrigan J J, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I-experimental data and observations[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53:2174—2205.
- [8] Elnasri I, Patoatto S, Zhao H, et al. Shock enhancement of cellular structures under impact loading: Part I Experiments[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solid, 2007, 55:2652—2671.
- [9] Barnes A T, Ravi-Chandar K, Kyriakides S, et al. Dynamic crushing of aluminum foams; Part I-Experiments[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51:1631—1645.
- [10] Lopatnikov S L, Gama B A, Haque M J, et al. Dynamic of metal foam deformation during Taylor cylinder-Hopkinson bar impact experiment[J]. Composite Structure, 2003, 61:61—71.
- [11] Wang L L, Ding Y Y, Yang L M. Experimental investigation on dynamic constitutive behavior of aluminum foams by new inverse methods from wave propagation measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 62:48—59.
- [12] Zheng Z J, Wang C F, Yu J L, et al. Dynamic stress-strain states for metal foam using a 3D cellular model[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solid, 2014, 72:93—114.
- [13] 王礼立. 应力波基础(2版)[M]. 北京:国防工业出版社, 2005 (WANG Lili. Foundation of stress wave (2nd Edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005 (in Chinese))
- [14] 李妍妍, 郑志军, 虞吉林, 等. 闭孔泡沫金属变形模式的有限元分析[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34:464—470 (LI Yanyan, ZHENG Zhijun, YU Jilin, et al. Finite element analysis on deformation modes of closed-cell metallic foam[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34:464—470 (in Chinese))
- [15] Wang S L, Ding Y Y, Wang C F, et al. Dynamic material parameters of closed-cell foams under high-velocity impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 99:111—121.
- [16] Tan P J, Harrigan J J, Reid S R. Inertia effects in uniaxial dynamic compression of a closed cell aluminium alloy foam[J]. Materials Science and Technology, 2002, 18:480—488.
- [17] Avalu 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, 25:455—472.

## Experimental investigation on dynamic material parameters of closed-cell aluminium foam

HUANG Su-nan<sup>1</sup>, DING Yuan-yuan<sup>1</sup>, WANG Shi-long<sup>1</sup>, HE Si-yuan<sup>2</sup>, ZHENG Zhi-jun<sup>1</sup>, YU Ji-lin<sup>1</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. State Key Laboratory of Bioelectronics, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Foam metal exhibits deformation localization under high speed impact. There may be some problems in dynamic experimental measurement of foam metal by using traditional split Hopkinson pressure bar (SHPB). Based on dynamic rigid-plastic hardening (DR-PH) model, Taylor-Hopkinson impact experiment for closed-cell aluminum foam with different relative densities was carried out. Combining with high speed photography and digital image correlation (DIC) technique, the time-history curve of impact speed is obtained and presented in this paper. By applying shock wave theory, an implicit function fitting method of impact speed and impact time is proposed, and two dynamic material parameters, including dynamic initial crushing stress and the strain hardening parameter, are determined. The validity of this analysis method was verified by the stress time-history curve at the impact end of specimen. The sensitivity of dynamic material parameters to relative density was analyzed. It is found that the dynamic initial crushing stress and strain hardening parameter have an approximate power function relationship with relative density. Experimental results show that the stress-strain behavior of aluminum foam presents apparent impact rate sensitivity.

**Keywords:** Aluminum foam; Taylor impact; high-speed camera; implicit function fitting; relative density