

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0403

冲击载荷下径向密度排布对泡沫金属力学性能影响的研究*

王根伟^{1,2}, 刘冕^{1,2}, 宋辉^{1,2}, 王彬^{1,3}

- (1. 太原理工大学机械与运载工程学院应用力学研究所, 山西太原 030024;
2. 太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西太原 030024;
3. 伦敦布鲁内尔大学机械航空工程系, 英国伦敦 UB8 3PH)

摘要: 参照层状密度梯度泡沫模型实现方法, 利用3D-Voronoi技术设计了新型径向密度梯度泡沫模型, 并用有限元软件, 对它在不同冲击载荷下的力学行为进行数值模拟。研究冲击速度、密度梯度和平均相对密度对金属泡沫冲击端、支撑端应力和能量吸收能力的影响, 发现: 径向正梯度泡沫与层状正、负梯度泡沫相比, 其两端的应力值均较小, 可同时保护冲击端、支撑端物体; 径向负梯度泡沫两端应力变化幅度较小, 能够保证物体受力稳定; 几种泡沫金属的能量吸收能力在不同冲击速度下发生交替变化。对于径向梯度泡沫, 能量吸收能力对密度梯度大小不敏感, 对梯度方向敏感, 径向负梯度泡沫的能量吸收能力始终大于径向正梯度泡沫; 平均相对密度越大, 径向正、负梯度泡沫两端应力越大、吸能效果越好。

关键词: 梯度泡沫金属; 3D-Voronoi技术; 密度梯度参数; 能量吸收

中图分类号: O347.3 **国标学科代码:** 13015 **文献标志码:** A

Influence of radial density arrangement on mechanical properties of metal foam under impact loading

WANG Genwei^{1,2}, LIU Mian^{1,2}, SONG Hui^{1,2}, WANG Bin^{1,3}

- (1. *Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*
- 2. Shanxi Key Laboratory of Material Strength & Structural Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*
- 3. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, London Brunel University, London UB8 3PH, UK)*

Abstract: Based on the generation method of layered density graded foam, new radial density graded foam models were designed by 3D-Voronoi technique, and their mechanical behavior under different impact loads was numerically simulated by finite element software. By analyzing the effects of impact velocity, density gradient and average relative density on the stress of impact end and support end, and energy absorption capacity of metal foams, it is found that the radial positive graded foam has smaller stress values at both ends than the layered positive and negative graded foams, which can simultaneously protect objects at any ends. The stress fluctuation of radial negative graded foam is small, which can ensure the stability of the force received by the object, and the energy absorption values of four metal foams vary alternately at different impact velocities. For the radial graded foam, energy absorption capacity is insensitive to density gradient, but sensitive to gradient direction. The energy absorption capacity of radial negative graded foam is always greater than radial positive graded foam. The larger the average relative density, the greater the stress at both ends, and the energy absorption effect is also enhanced.

Keywords: graded metal foam; 3D-Voronoi technique; density gradient parameter; energy absorption

* 收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2020-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(11872265); 山西省自然科学基金(201901D2111087)

第一作者: 王根伟(1974—), 男, 博士, 副教授, gwang@tyut.edu.cn

材料与结构的轻量化是科技发展的重要趋势,其中泡沫金属材料由于轻质化、孔隙率高和可变量大等,被广泛应用于能量吸收和抗冲击减振的保护结构。为了提高泡沫材料的力学性能,研究人员提出了具有密度梯度的泡沫材料^[1-3],以实现多目标优化设计。

由于材料制造技术的局限性,在实际应用中还不容易获得具有特定相对密度分布的梯度泡沫样本,也无法直接观察加载情况下胞元内部的变形情况,研究人员转而应用有限元方法研究梯度泡沫材料的力学响应^[4-9]。研究结果显示,冲击载荷下梯度泡沫材料存在3种变形模态^[10-12],且具有特定密度梯度的泡沫金属可以降低受保护结构的最大冲击应力,改善材料的能量吸收和抗冲击性能^[13-19]。Zeng等^[20]测试了密度梯度空心球金属泡沫的动态响应,将最硬层作为第1冲击层,将最弱层与受保护结构接触,可以减少传输力并获得更多的吸收能量。Ajdari等^[21]研究了具有规则和不规则排列的功能梯度多胞结构的动态压溃,表明沿加载方向降低相对密度,可以增强蜂窝在压溃初期的能量吸收。Zhang等^[22]建立了分层递变梯度蜂窝模型,建议把最弱的层放置在冲击端或输出端,最强的层被放置在中间阶段,以达到更高的能量吸收效率。Zheng等^[23]从理论和数值计算两方面发现,均匀泡沫的能量吸收效果可能最好,密度梯度较大的正、中高梯度泡沫可以在撞击端保护物体,密度梯度较小的负梯度泡沫可以在支撑端保护物体,而大梯度的中低、中高、正梯度泡沫可以提高吸能效率。

目前,对梯度泡沫金属材料的研究主要集中在密度单向变化,为了进一步研究梯度泡沫金属材料密度在非单向变化下的变形及能量吸收机理,我们设计了一种密度径向连续排布的梯度泡沫材料,研究它在冲击载荷作用下的动态力学性能。首先,利用3D-Voronoi技术构建密度排布不同的层状、径向梯度泡沫结构;然后,导入有限元分析软件中生成梯度泡沫金属的冲击模型,观察他们在不同恒定冲击速度下的变形特点,比较他们的抗冲击性能和能量吸收能力,考察不同梯度泡沫材料在工程防护上的优劣;最后,分析密度梯度和相对密度参数对径向梯度泡沫材料力学性能的影响。

1 数值模拟

1.1 三维随机Voronoi技术

3D-Voronoi模型是将 N 个成核点完全随机分布在体积为 V_0 的立方体区域内生成,为了防止Voronoi模型产生过小胞元,立方体内任意两相邻核点之间的最小距离为:

$$\delta = (1-k)d_0 = (1-k)\frac{\sqrt{6}}{2}\left(\frac{V_0}{\sqrt{2}N}\right)^{1/3} \quad (1)$$

式中:无量纲变量 k 为不规则度, d_0 为正十四面体模型中任意两相邻成核点间的最小距离^[24]。将成核点复制到周围区域内,编程生成Voronoi构型,并通过切割算法得到原先指定区域中的Voronoi结构作为最后的计算模型。

1.2 密度梯度

为了研究密度排布对泡沫金属力学性能的影响,基于密度沿着厚度方向上单向变化的层状梯度泡沫模型(见图1(a)),设计了一种径向梯度泡沫模型,即以正方形中心点出发密度沿着半径方向渐进变化,如图1(b)所示。

层状梯度泡沫的密度梯度 γ 可描述为:

$$\frac{\Delta\mu}{\Delta L} = \gamma \frac{\bar{\mu}}{L} \quad (2)$$

由此,推演径向梯度泡沫密度梯度 γ 的定义为:

$$\frac{\Delta\mu}{\Delta V} = \gamma \frac{\bar{\mu}}{V} \quad (3)$$

式中: γ 为无量纲参数, $\bar{\mu}$ 为材料的平均相对密度, $\Delta\mu = \mu_{i+1} - \mu_i$, μ_i 为第 i 层的相对密度, L 为沿梯度方向的总长度, V 为泡沫模型的总体积。将泡沫模型平均分为 N 等份, ΔL 、 ΔV 分别表示每个等份的长度和体积。当 $\gamma > 0$ 时,为径向正梯度泡沫,表示从冲击端至中心处密度逐渐增加,相反则为径向负梯度泡沫。

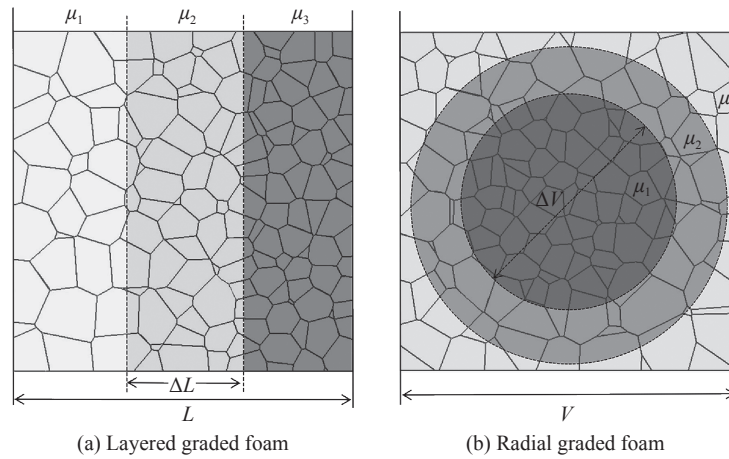


图 1 密度梯度泡沫模型

Fig. 1 Density gradient foam models

曹国剑等^[25]介绍了利用离心沉积法制备梯度泡沫铝的方法,可直接用来生产本文中提出的径向负梯度泡沫。

1.3 有限元模型

表 1 为层状正、负梯度与径向正、负梯度 4 种泡沫金属模型的材料参数。4 种泡沫金属的冲击加载模型如图 2 所示,垂直于所示平面方向泡沫密度均匀,冲击加载沿梯度方向进行。模型尺寸为 50 mm×50 mm×25 mm,不规则度为 0.3,有限元模型的核心点个数为 900,胞壁厚度由给定的相对密度确定。在有限元收敛分析后,泡沫模型使用 S3R 和 S4R 壳单元进行混合网格划分,网格尺寸设置为 0.2 mm。在左端固定一个刚性板,右端的刚性板以给定的恒定速度撞击泡沫模型。基体材料设为双线性应变强化模型,密度 $\rho=2\ 700\ \text{kg/m}^3$,弹性模量 $E=69\ \text{GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,屈服应力 $\sigma_y=76\ \text{MPa}$,切线模量为 0.69 GPa。泡沫模型定义为自接触,两端刚性板和泡沫模型之间定义为面面接触,设定动摩擦因数为 0.2。

表 1 模型材料参数

Table 1 Model material parameters

泡沫模型	平均相对密度 $\bar{\mu}$	密度梯度 γ
层状正梯度	0.12	0.8
层状负梯度	0.12	-0.8
径向正梯度	0.12, 0.09	0.8, 0.4
径向负梯度	0.12, 0.09	-0.8, -0.4

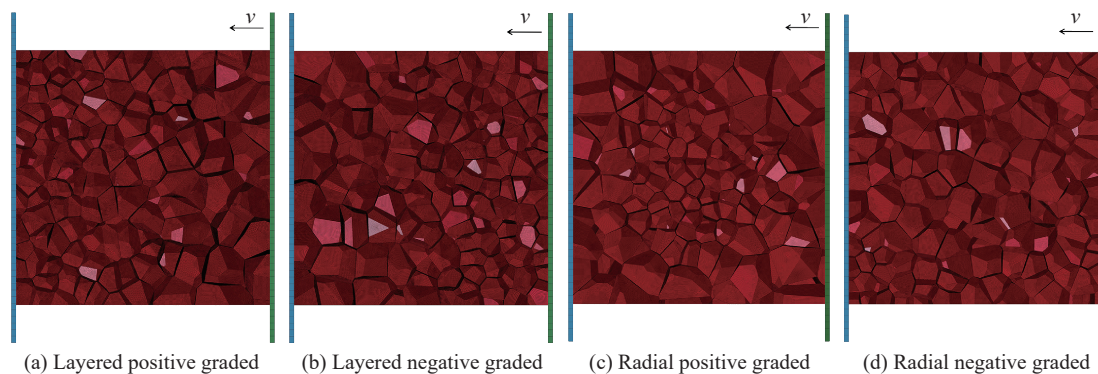


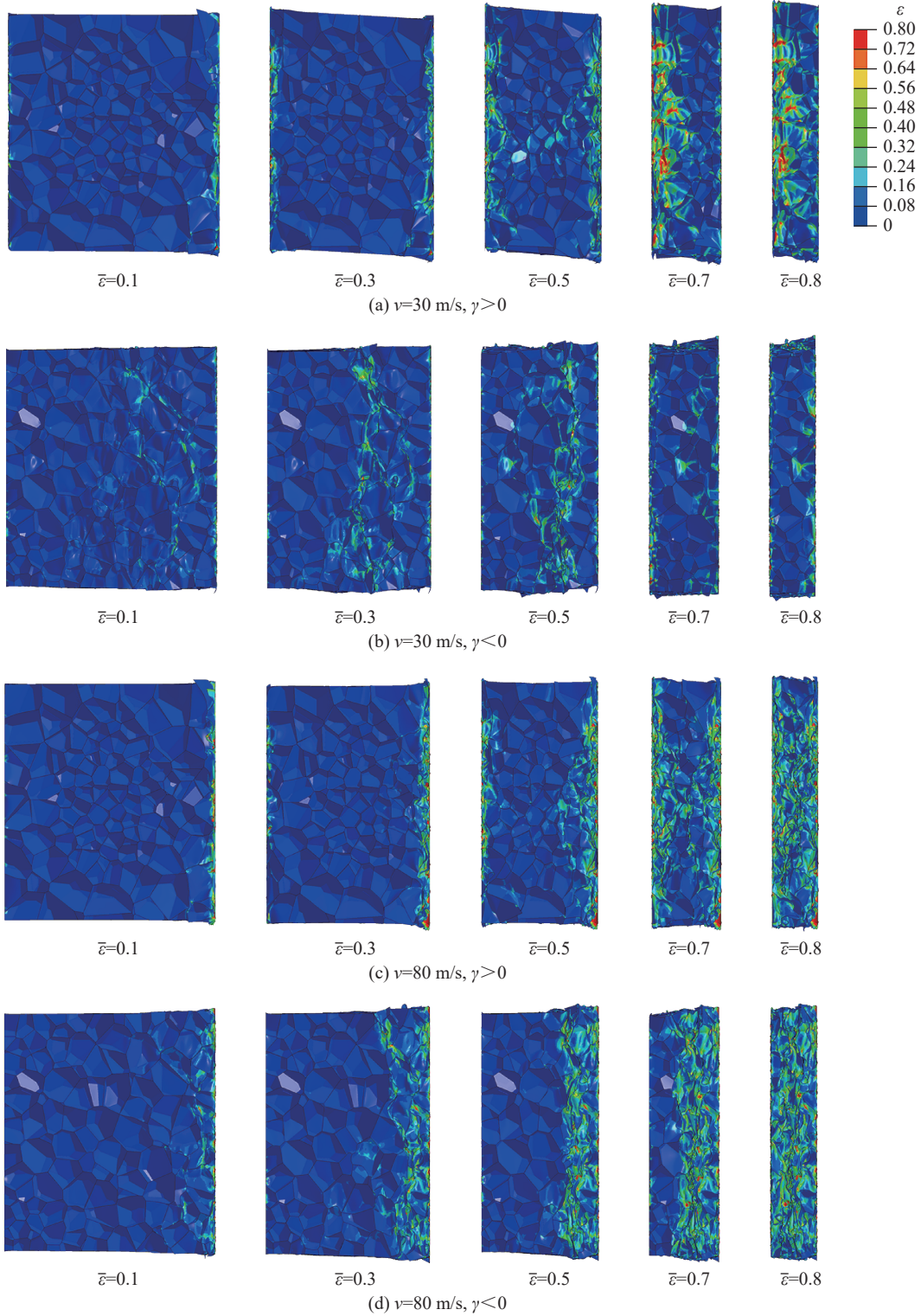
图 2 层状和径向的梯度泡沫

Fig. 2 Layered and radial graded foams

2 结果与讨论

2.1 变形特点和名义应力应变曲线

根据梯度泡沫在不同冲击速度下的准静态模式、过渡模式和冲击模式^[26-27], 将冲击速度设置为 30、80 和 200 m/s。其中, 层状正、负梯度泡沫的变形特点与以往文献描述的相似。图 3 为径向梯度泡沫在不同冲击速度下的应变云图。



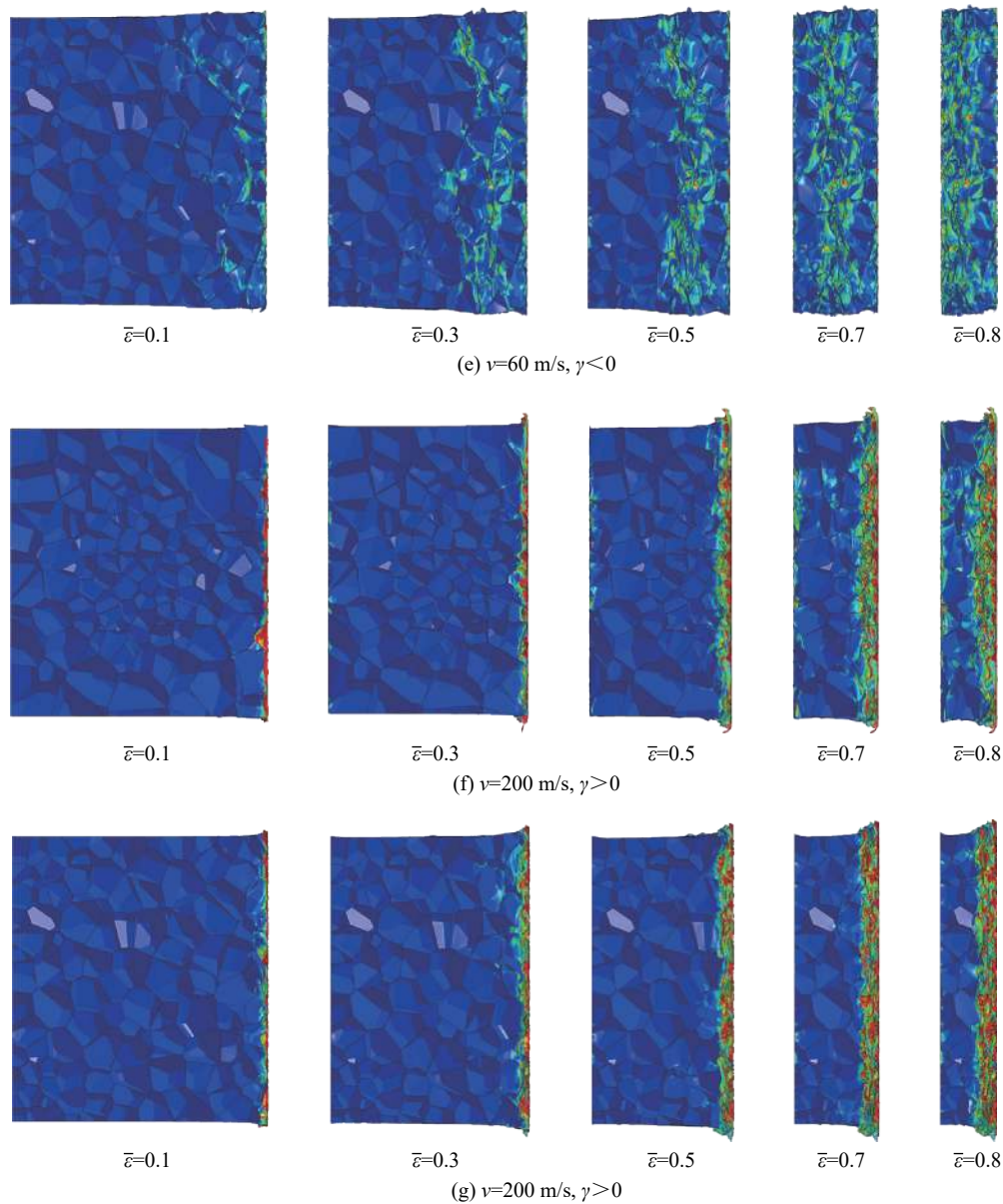


图 3 应变云图

Fig. 3 Strain distributions

当冲击速度较小 ($v=30 \text{ m/s}$) 时, 变形属于准静态模态。径向正梯度泡沫先在冲击端变形(低密度), 随后支撑端(低密度)的胞元发生变形。这是由于, 当速度相对较低时, 泡沫内部处于均匀的应力状态, 两端首先达到准静态屈服应力。正梯度泡沫中间区域的密度较高, 且模型结构并不完全对称, 在 $\varepsilon > 0.5$ 后出现沿支撑板两个切线方向滑移现象。径向负梯度泡沫因中间密度较小, 变形先从中间区域处产生, 两端在后期同样出现滑移现象。

当冲击速度中等 ($v=80 \text{ m/s}$) 时, 变形受准静态屈服应力和惯性效应两个因素的影响。径向正梯度泡沫的变形特点属于典型的过渡模态, 而径向负梯度泡沫没有表现明显的过渡模态。负梯度泡沫先在冲击端发生变形, 随后中间区域变形, 并逐渐向支撑端传播, 此现象与冲击模态类似。发现在冲击速度为 60 m/s 时, 径向负梯度泡沫处于过渡模态。冲击端先发生少量变形, 接着中间区域持续发生变形, 待中间区域压实后, 变形继续向支撑端传播, 直到支撑端完全压实。从变形特点可以看出, 径向负梯度泡沫比径向正梯度泡沫在更低速度下进入冲击模态。

当冲击速度较高 ($v=200\text{ m/s}$) 时, 惯性作用成为了控制变形的主导因素, 其影响效果远超过准静态屈服应力, 泡沫进入冲击模态。径向正梯度泡沫在冲击端发生大量变形后, 仅在支撑端发生少量变形; 而径向负梯度泡沫只在冲击端发生变形, 并逐渐变形至压实。

图4为不同冲击速度下4种泡沫冲击端与支撑端的名义应力应变曲线。随着冲击速度的增大, 4种泡沫冲击端应力与压实应变逐渐增大, 支撑端比冲击端越来越晚达到初始屈服应力, 且应力平台区越来越长, 应力值差异逐渐明显。层状正梯度泡沫的冲击端初始峰值应力较小, 到达峰值应力后曲线逐渐上升, 但支撑端曲线应力值高于层状负梯度泡沫, 初始屈服应力较大。层状负梯度泡沫的冲击端初始峰值应力较大, 到达峰值应力后曲线逐渐下降。层状梯度泡沫的数值模拟结果与其他文献描述相似, 佐证了有限元模型的合理性。

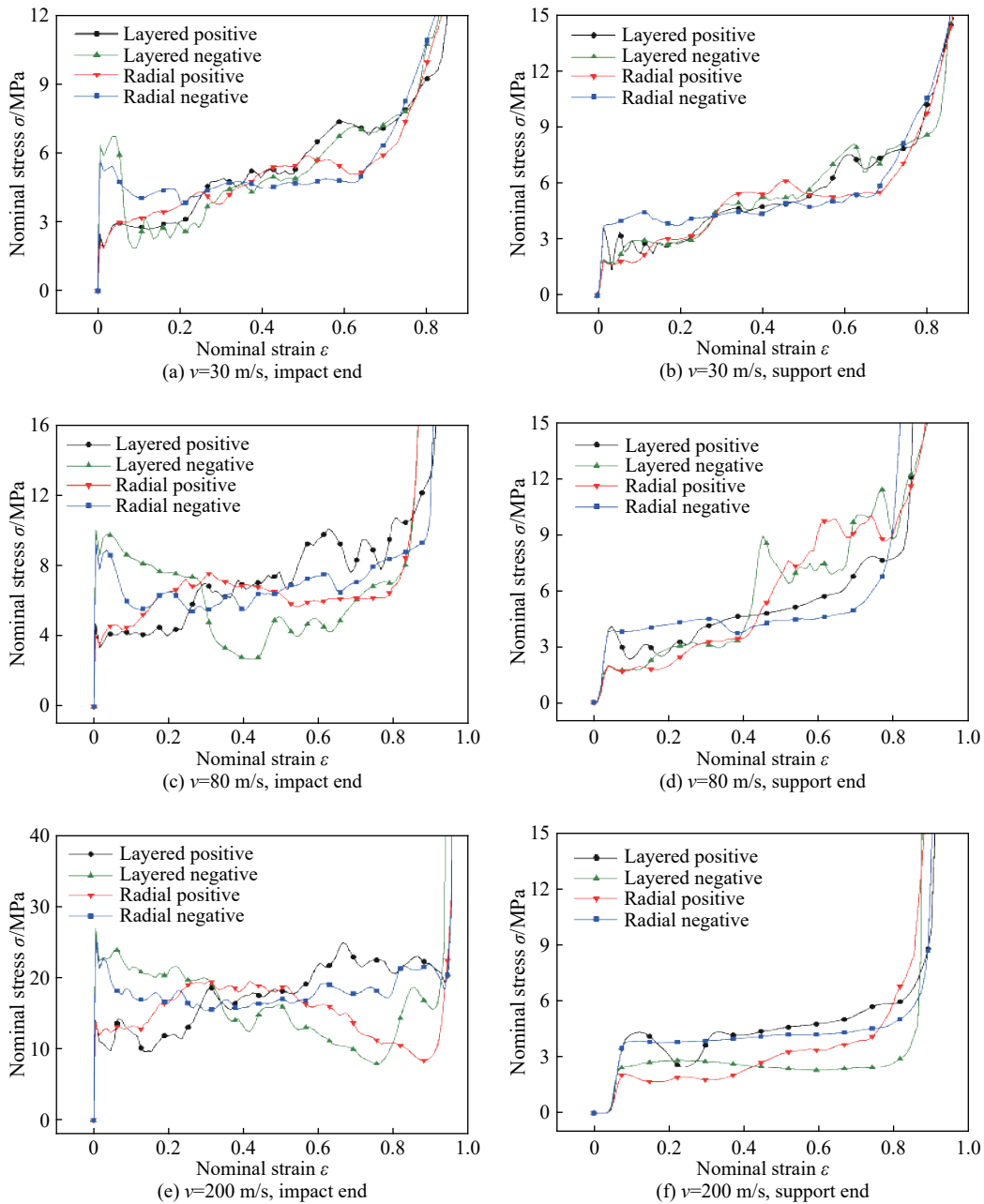


图4 4种梯度泡沫冲击端和支撑端的名义应力应变曲线

Fig. 4 Nominal stress-strain curves of impact end and support end of four graded foams

与其他 3 种泡沫相比, 径向正梯度泡沫由于两端密度小、相对较“软”, 冲击端初始峰值应力和支撑端初始屈服应力均最低。径向正梯度泡沫中间区域密度大、强度高, 冲击端曲线在应变 0.2~0.6 区间时先上升后下降。径向负梯度泡沫因两端密度大、中间区域密度小, 冲击端曲线在应变 0.2~0.6 区间时先下降后上升, 而支撑端曲线始终保持基本稳定。

图 5 为 4 种梯度泡沫冲击端与支撑端的最大应力和标准差。最大应力表示泡沫达到密实化应变前冲击端或支撑端所承受的最高载荷; 标准差表示数据之间的离散程度, 离散程度越小, 曲线波动幅度越小。通过比较发现: 冲击速度越高, 4 种泡沫冲击端的最大应力与波动幅度呈整体增加趋势; 径向正梯度泡沫冲击端的最大应力在 4 种泡沫中最小; 径向负梯度泡沫的两端应力波动幅度明显小于其他 3 种, 支撑端应力尤其稳定。

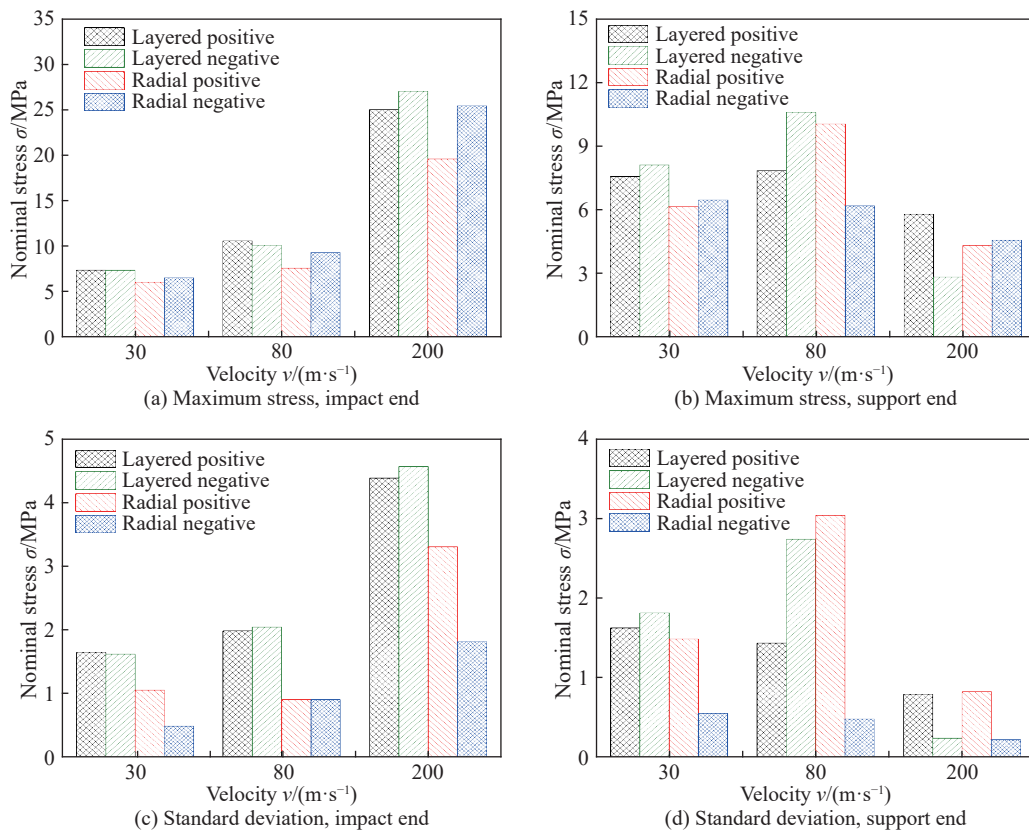


图 5 4 种梯度泡沫冲击端和支撑端的最大应力和应力标准差

Fig. 5 Maximum stresses and stress standard deviations of impact end and support end of four graded foams

2.2 能量吸收能力

能量吸收能力是判断泡沫材料抗冲击性能的一个典型指标。可以用材料压缩至某个变形量时所吸收的能量来衡量吸收能力的强弱, 定义为:

$$W = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

图 6 和表 2 为 4 种梯度泡沫能量吸收能力, 可以看出, 几种泡沫的能量吸收能力在变形过程中呈现交替变化的现象。

当速度为 30 m/s 时: 在压缩初期, 径向负梯度泡沫表现出优异的能量吸收能力; 在压缩后期, 径向负梯度泡沫与层状正、负梯度泡沫几乎相同, 而径向正梯度泡沫能量吸收值相对较小。当速度提高到 80 和 200 m/s 时: 在压缩初期, 层状、径向负梯度泡沫的能量吸收能力大于层状、径向正梯度泡沫; 在压缩后期, 径向负梯度泡沫的能量吸收值仍较高, 层状正梯度泡沫的能量吸收能力增长加快。

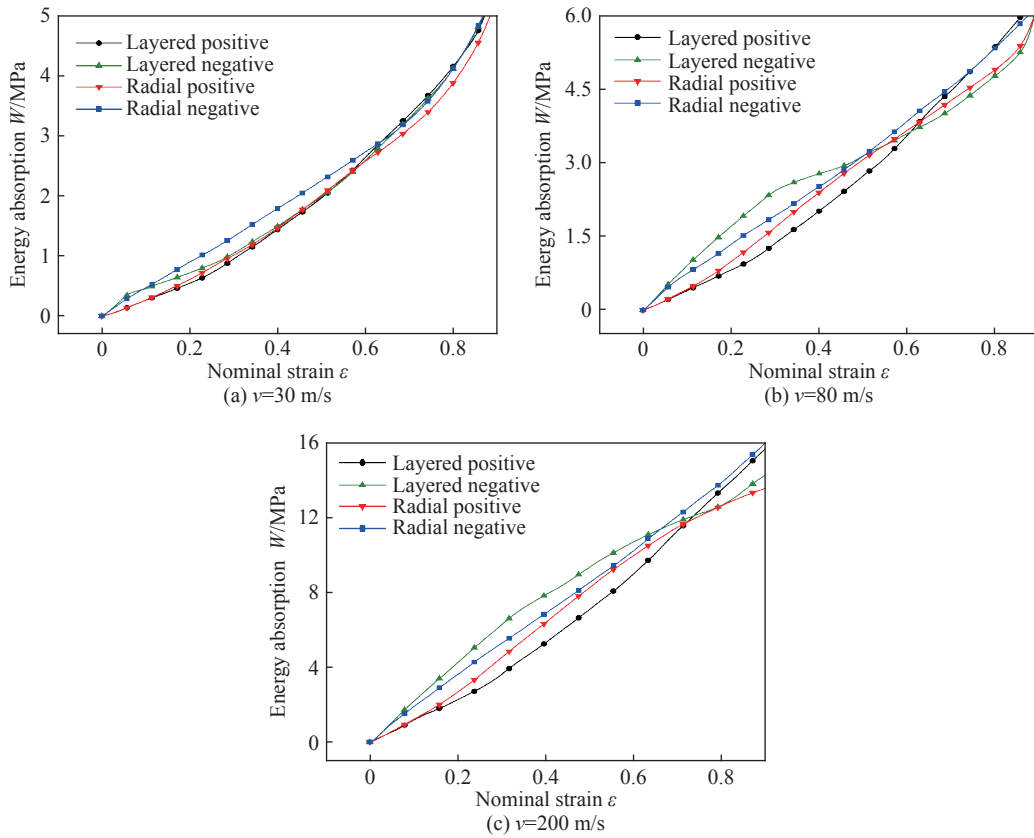


图 6 不同冲击速度下 4 种梯度泡沫的能量吸收能力

Fig. 6 Energy absorption capacities of four graded foams at different impact velocities

表 2 4 种梯度泡沫的能量吸收能力

Table 2 Energy absorption capacities of four graded foams

泡沫模型	W/MPa								
	v=30 m/s			v=80 m/s			v=200 m/s		
	$\bar{\varepsilon}=0.2$	$\bar{\varepsilon}=0.5$	$\bar{\varepsilon}=0.8$	$\bar{\varepsilon}=0.2$	$\bar{\varepsilon}=0.5$	$\bar{\varepsilon}=0.8$	$\bar{\varepsilon}=0.2$	$\bar{\varepsilon}=0.5$	$\bar{\varepsilon}=0.8$
层状正梯度	0.55	1.98	4.22	0.82	2.73	5.36	2.36	7.18	13.51
层状负梯度	0.73	1.96	4.24	1.72	3.14	4.78	4.41	9.43	12.67
径向正梯度	0.62	2.00	3.97	1.00	3.06	4.91	2.84	8.34	12.63
径向负梯度	0.91	2.25	4.22	1.35	3.14	5.36	3.74	8.60	13.89

比较 4 种梯度泡沫的力学响应发现, 径向正梯度泡沫不仅拥有层状正梯度泡沫冲击端应力较小、保护冲击端冲击物体的特点, 而且继承了层状负梯度泡沫支撑端应力较小、保护支撑端受冲击物体的特点。径向负梯度泡沫的两端应力波动幅度较小, 曲线变化趋势较为平缓, 能够保证被保护物体受力稳定, 同时它的能量吸收能力始终处于较高水平, 在低速冲击或大变形工况下是最优的吸能结构。因此, 径向梯度泡沫是缓冲减压吸能装置的良好选择。

2.3 径向密度梯度的影响

为了分析径向正、负梯度泡沫对密度梯度的敏感程度, 图 7~8 分别给出了 $|\gamma|=0.4$ 、 0.8 时的应力应变曲线和能量吸收曲线。

从图 7 可以看出: 对于冲击端, 当密度梯度改变时, 泡沫初始峰值应力和密实化时的应力变化明显; 对于支撑端, 径向正梯度泡沫在两种密度梯度下的曲线出现分离, 而负梯度泡沫曲线几乎相同。对于径

向正梯度泡沫, γ 越大, 冲击端初始峰值应力与支撑端初始屈服应力越小; 对于径向负梯度泡沫, 当 $|\gamma|$ 增加, 冲击端初始峰值应力与支撑端初始屈服应力增大。

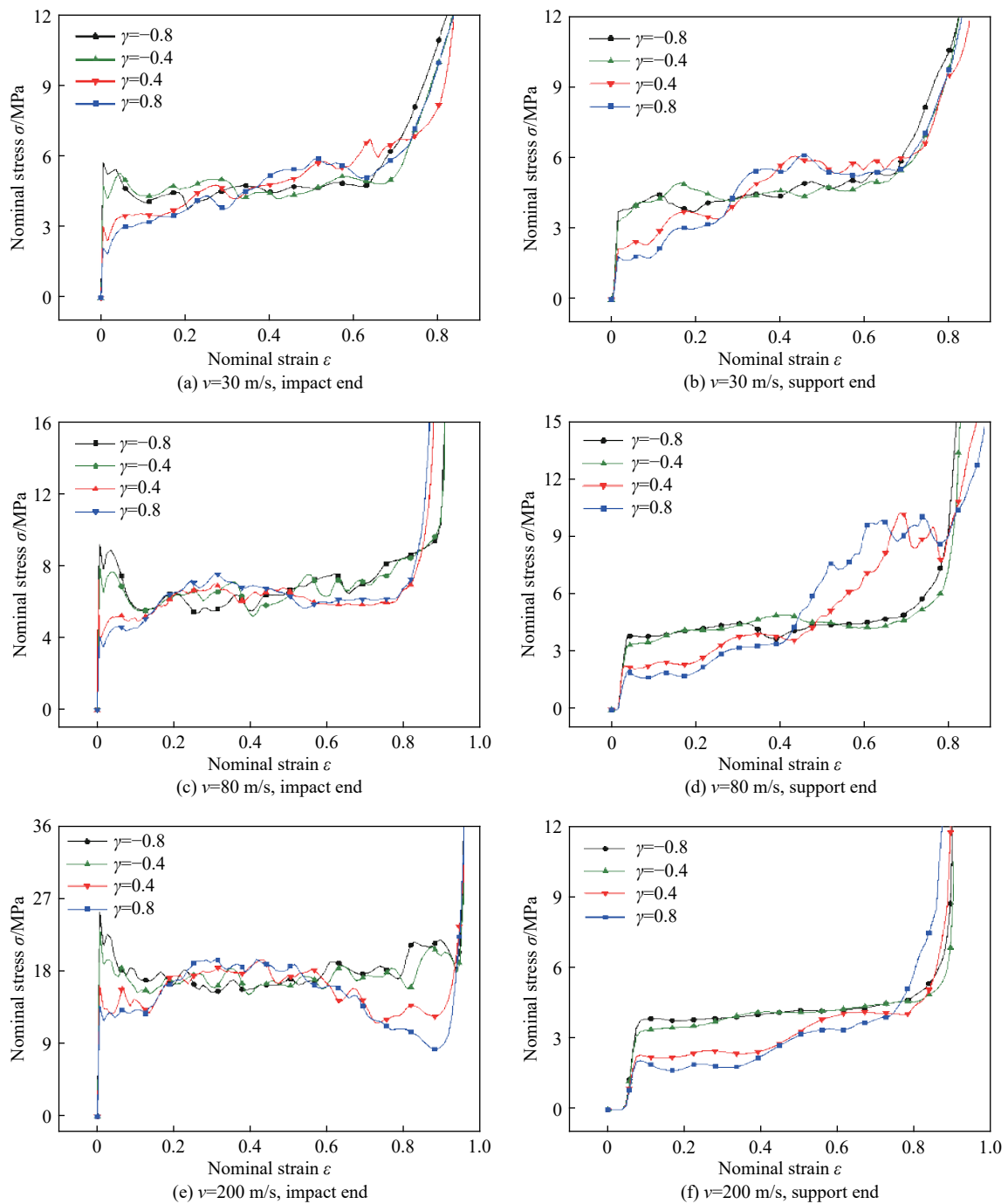


图 7 在不同密度梯度下径向梯度泡沫的名义应力应变曲线

Fig. 7 Nominal stress-strain curves of radial graded foams with different density gradients

从图 8 可以看出, 泡沫的能量吸收能力对密度梯度大小不敏感、对梯度方向敏感。当密度梯度改变时, 两种梯度下的泡沫所吸收的能量几乎相同; 在达到完全密实化前, 径向负梯度泡沫的能量吸收能力始终大于径向正梯度泡沫。由于试样具有相同的平均相对密度, 不同梯度泡沫完全密实化后所吸收的总能量基本相同。

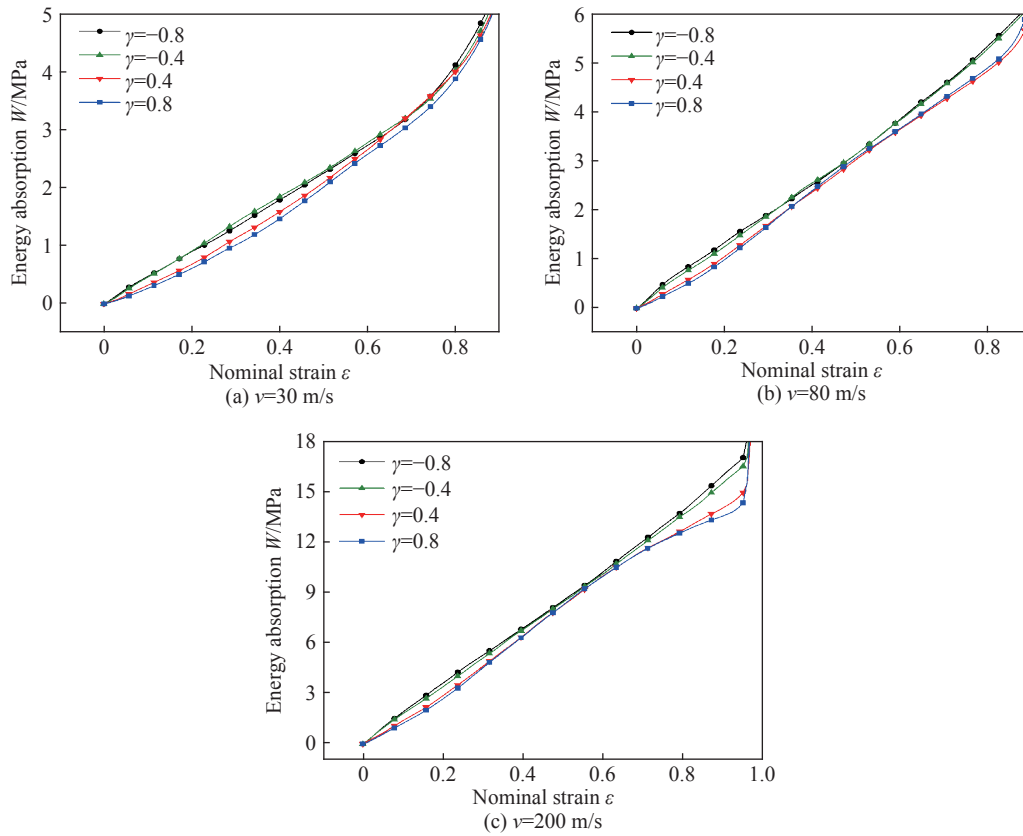


图8 在不同密度梯度下径向梯度泡沫的能量吸收能力

Fig. 8 Energy absorption capacities of radial graded foams with different density gradients

2.4 平均相对密度的影响

图9为不同平均相对密度下径向正、负梯度泡沫的名义应力应变曲线。可以发现,相对密度对金属泡沫的冲击响应具有显著影响,其影响程度远大于密度梯度。当相对密度 $\bar{\mu}$ 由0.09上升到0.12时,泡沫金属的两端应力值都明显增大,而应力变化趋势并不发生改变。

引入单位质量材料吸收的能量 w 和能量吸收效率 η_w ^[28],分别为:

$$w = \frac{W}{\bar{\mu}\rho} \tag{5}$$

$$\eta_w = \frac{w}{w_f} \tag{6}$$

式中: w_f 是单位质量泡沫的总吸收能量。由式(5)~(6),不同密度下泡沫材料吸收的能量如图10所示。随着相对密度增大,径向梯度泡沫能量吸收增长趋势加快,能量吸收效率提高,材料的吸能效果更好;冲击速度越大, w 和 η_w 越大,泡沫材料初始冲击阶段所吸收的能量越多。

当 $v=30$ m/s、 $\bar{\epsilon}=0.5$ 时: $\bar{\mu}=0.12$ 的径向负梯度泡沫吸能最多, η_w 为0.240; $\bar{\mu}=0.09$ 的径向正梯度泡沫吸能最少, η_w 为0.225。当 $v=30$ m/s、 $\bar{\epsilon}>0.5$ 时, $\bar{\mu}=0.12$ 的径向正梯度泡沫吸能超过 $\bar{\mu}=0.09$ 的径向负梯度泡沫。

当 $v=80$ m/s、 $\bar{\epsilon}=0.5$ 时, $\bar{\mu}=0.12$ 的径向负梯度泡沫 η_w 上升到0.404, $\bar{\mu}=0.09$ 的径向正梯度泡沫 η_w 上升到0.357。当 $v=80$ m/s、 $\bar{\epsilon}>0.35$ 时, $\bar{\mu}=0.12$ 的径向正梯度泡沫与 $\bar{\mu}=0.09$ 的径向负梯度泡沫的吸能优势发生交换。

当 $v=200$ m/s时,两种密度下泡沫的能量吸收差异性逐渐消失,径向负梯度泡沫的能量吸收值始终大于径向正梯度泡沫。

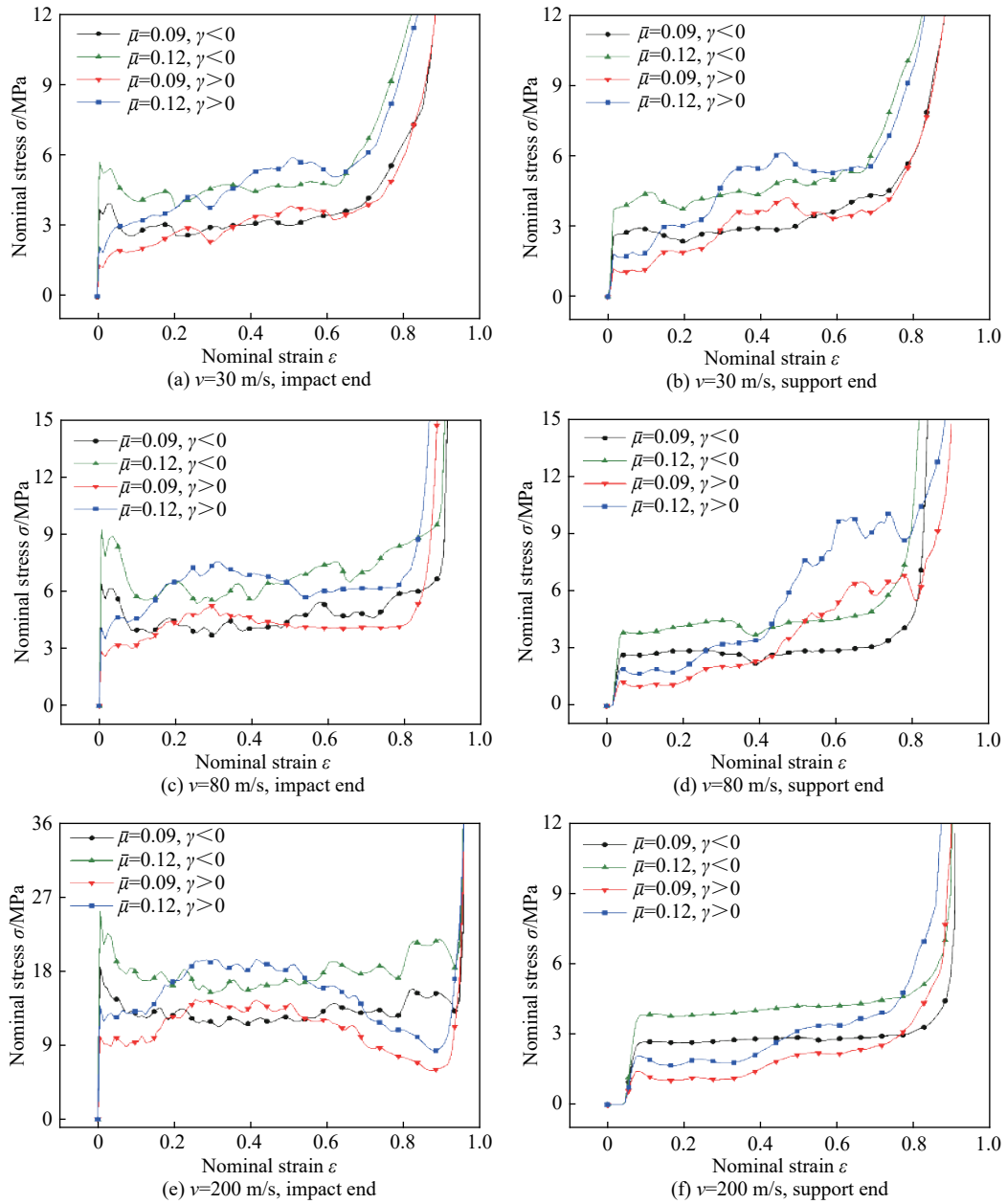
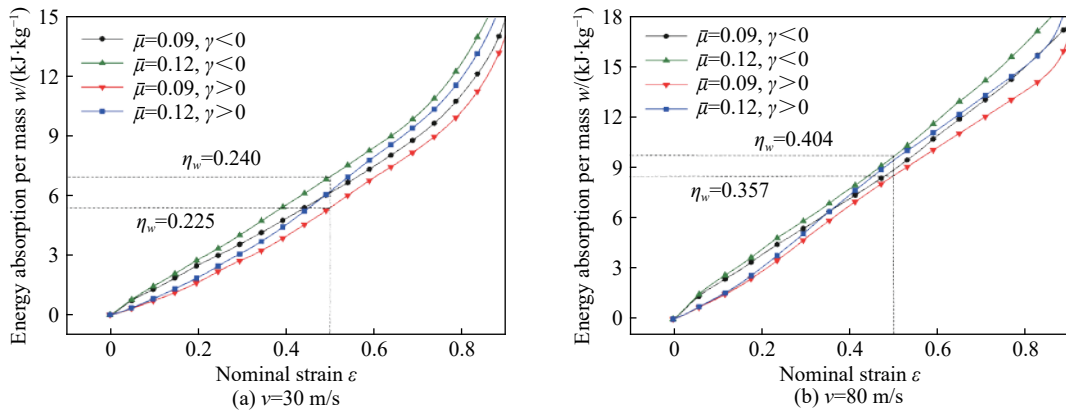


图 9 在不同相对密度下径向梯度泡沫的名义应力应变曲线

Fig. 9 Nominal stress-strain curves of radial graded foams with different relative densities



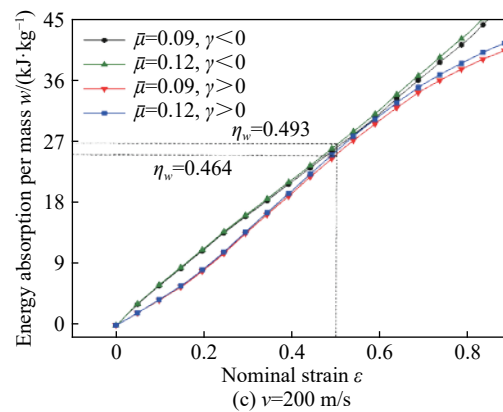


图10 在不同相对密度下径向梯度泡沫的能量吸收特性

Fig. 10 Energy absorption per mass of radial graded foams with different relative densities

3 结论

利用 3D-Voronoi 技术设计了层状正、负梯度与径向正、负梯度 4 种密度排布不同的梯度泡沫模型, 通过有限元分析软件分别从变形特点、载荷响应历程及能量吸收机理比较了 4 种梯度泡沫金属在恒速冲击载荷下的动态响应结果, 同时探讨了径向梯度泡沫中密度梯度、相对密度参数对力学性能的影响, 得到如下结论。

(1) 径向正梯度泡沫与层状正、负梯度泡沫相比冲击端与支撑端的应力值均处于较低水平, 不仅保护冲击端冲击物体, 而且保护支撑端受冲击物体; 径向负梯度泡沫两端应力应变曲线平缓, 波动幅度较小, 能够保证被保护物体受力稳定。

(2) 在不同冲击速度下, 4 种梯度泡沫金属的能量吸收能力交替变化, 其中径向负梯度泡沫能量吸收能力始终处于较高水平, 在低速冲击或大变形工况下是最优的吸能结构。

(3) 能量吸收能力对密度梯度大小不敏感、对梯度方向敏感, 在达到完全密实化前, 径向负梯度泡沫的能量吸收能力始终大于径向正梯度泡沫; 平均相对密度越大, 径向正、负梯度泡沫两端应力越大, 吸能效果越好。

参考文献:

- [1] BEALS J T, THOMPSON M S. Density gradient effects on aluminium foam compression behaviour [J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32(13): 3595–3600. DOI: 10.1023/A:1018670111305.
- [2] GUPTA N. A functionally graded syntactic foam material for high energy absorption under compression [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(4–5): 979–982. DOI: 10.1016/j.matlet.2006.06.033.
- [3] BROTHERS A H, DUNAND D C. Mechanical properties of a density-graded replicated aluminum foam [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 489(1–2): 439–443. DOI: 10.1016/j.msea.2007.11.076.
- [4] BRUCK H A. A one-dimensional model for designing functionally graded materials to manage stress waves [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(44): 6383–6395. DOI: 10.1016/S0020-7683(99)00236-X.
- [5] AJDARI A, CANAVAN P, NAYEB-HASHEMI H, et al. Mechanical properties of functionally graded 2-D cellular structures: a finite element simulation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499(1–2): 434–439. DOI: 10.1016/j.msea.2008.08.040.
- [6] ZHANG J J, WEI H, WANG Z H, et al. Dynamic crushing of uniform and density graded cellular structures based on the circle arc model [J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2015, 12(6): 1102–1125. DOI: 10.1590/1679-78251630.
- [7] LIANG M Z, ZHANG G D, LU F Y, et al. Blast resistance and design of sandwich cylinder with graded foam cores based on the Voronoi algorithm [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 112: 98–106. DOI: 10.1016/j.tws.2016.12.016.
- [8] 王根伟, 王江龙. 负梯度闭孔泡沫金属的力学性能分析 [J]. *固体力学学报*, 2017, 38(1): 85–92. DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2017.01.008.

- WANG G W, WANG J L. Mechanical properties of closed-cell metal foam with negative density gradient under impact loading [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2017, 38(1): 85–92. DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2017.01.008.
- [9] DING Y Y, ZHENG Z J, WANG Y G, et al. Impact resistance and design of graded cellular cladding [J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2018, 10(10): 1850107. DOI: 10.1142/S1758825118501077.
- [10] LIU Y D, YU J L, ZHENG Z J, et al. A numerical study on the rate sensitivity of cellular metals [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(22–23): 3988–3998. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2009.07.024.
- [11] MA G W, YE Z Q, SHAO Z S. Modeling loading rate effect on crushing stress of metallic cellular materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(6): 775–782. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.11.013.
- [12] FAN J H, ZHANG J J, WANG Z H, et al. Dynamic crushing behavior of random and functionally graded metal hollow sphere foams [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 561: 352–361. DOI: 10.1016/j.msea.2012.10.026.
- [13] CUI L, KIERNAN S, GILCHRIST M D. Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 507(1–2): 215–225. DOI: 10.1016/j.msea.2008.12.011.
- [14] 吴鹤翔, 刘颖. 梯度变化对密度梯度蜂窝材料力学性能的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(2): 163–168. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)02-0163-06.
- WU H X, LIU Y. Influences of density gradient variation on mechanical performances of density-graded honeycomb materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(2): 163–168. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)02-0163-06.
- [15] WANG X K, ZHENG Z J, YU J L. Crashworthiness design of density-graded cellular metals [J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2013, 3(3): 031001. DOI: 10.1063/2.1303101.
- [16] YANG J, WANG S L, ZHENG Z J, et al. Impact resistance of graded cellular metals using cell-based finite element models [J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 703: 400–405. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.703.400.
- [17] CHEN D, KITIPORNCHAI S, YANG J. Dynamic response and energy absorption of functionally graded porous structures [J]. *Materials & Design*, 2018, 140: 473–487. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.12.019.
- [18] LAN X K, FENG S S, HUANG Q, et al. Blast response of continuous-density graded cellular material based on the 3D Voronoi model [J]. *Defence Technology*, 2018, 14(5): 443–440. DOI: 10.1016/j.dt.2018.06.003.
- [19] 常白雪, 郑志军, 赵凯, 等. 具有恒定冲击载荷的梯度泡沫金属材料设计 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(4): 3–11. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0431.
- CHANG B X, ZHENG Z J, ZHAO K, et al. Design of gradient foam metal materials with a constant impact load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(4): 3–11. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0431.
- [20] ZENG H B, PATTOFATTO S, ZHAO H, et al. Impact behaviour of hollow sphere agglomerates with density gradient [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010, 52(5): 680–688. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2009.11.012.
- [21] AJDARI A, NAYEB-HASHEMI H, VAZIRI A. Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(3–4): 506–516. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.10.018.
- [22] ZHANG X C, AN L Q, DING H M. Dynamic crushing behavior and energy absorption of honeycombs with density gradient [J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2014, 16(2): 125–147. DOI: 10.1177/1099636213509099.
- [23] ZHENG J, QIN Q H, WANG T J. Impact plastic crushing and design of density-graded cellular materials [J]. *Mechanics of Materials*, 2016, 94: 66–78. DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.11.014.
- [24] ZHU H X, WINDLE A H. Effects of cell irregularity on the high strain compression of open-cell foams [J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(5): 1041–1052. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00402-5.
- [25] 曹国剑, 张一思, 刘东戎, 等. 制备梯度多孔材料的方法: CN101418391A [P]. 2009-04-29.
- [26] 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(4): 464–470. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)04-0464-07.
- LI Y Y, ZHENG Z J, YU J L, et al. Finite element analysis on deformation modes of closed-cell metallic foam [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(4): 464–470. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)04-0464-07.
- [27] WANG J L, LI X, WANG G W. Deformation modes of the graded closed-cell foam under impact loading [C] // Proceedings of 2016 International Conference on Applied Mechanics, Electronics and Mechatronics Engineering. Beijing, 2016. DOI: 10.12783/dtettr/ameme2016/5803.
- [28] KOOISTRA G W, DESHPANDE V S, WADLEY H N G. Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(14): 4229–4237. DOI: 10.1016/j.actamat.2004.05.039.

(责任编辑 丁峰)