

引文格式: 乔及森, 李明, 苗红丽. 串联梯度蜂窝结构的面内力学性能 [J]. 塑性工程学报, 2020, 28 (11): 115-123. QIAO Jisen, LI Ming, MIAO Hongli. In-plane mechanical property of tandem gradient honeycomb structures [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 28 (11): 115-123.

## 串联梯度蜂窝结构的面内力学性能

乔及森<sup>1,2</sup>, 李明<sup>1,2</sup>, 苗红丽<sup>1,2</sup>

- (1. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃兰州 730050;  
2. 兰州理工大学省部共建有色金属加工与再利用国家重点实验室, 甘肃兰州 730050)

**摘要:** 根据仿生学骨骼, 通过改变六边形蜂窝壁角的方法来达到变化六边形蜂窝构型的目的。建立了串联梯度蜂窝结构的设计模型和有限元模型, 设计了线性串联梯度理论, 并从变形模式、平台应力和吸能性 3 方面在同体积不同压缩速度条件下分析了串联梯度蜂窝与均匀蜂窝的准静态及动态面内压缩过程, 并分析了力学响应。研究表明: 通过改变梯度率  $\lambda$  可以改变串联梯度蜂窝变形模式, 当梯度率  $\lambda = -0.0088$  时, 在等效应变前期, 平台应力低速动态强化效果较为显著, 但是并没有明显达到改善比吸能的效果。

**关键词:** 线性串联梯度; 蜂窝结构; 面内性能; 有限元分析

**中图分类号:** V214.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2021) 11-0115-09

**doi:** 10.3969/j.issn.1007-2012.2021.11.016

## In-plane mechanical property of tandem gradient honeycomb structures

QIAO Ji-sen<sup>1,2</sup>, LI Ming<sup>1,2</sup>, MIAO Hong-li<sup>1,2</sup>

- (1. College of Materials Science and Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;  
2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Based on the bionic skeleton, the hexagon honeycomb structure was changed by changing the angle of hexagonal honeycomb wall. The design model and the finite element model of tandem gradient honeycomb (TGH) structures were established and the linear tandem gradient theory was designed, and the quasi static and dynamic in-plane compression process, as well as the mechanical response of tandem gradient honeycomb and homogeneous honeycomb were analyzed under the conditions of same volume and different compression speeds from three aspects, namely deformation mode, nominal stress and energy absorption. The research results show that the deformation mode of tandem gradient honeycomb can be changed by changing the gradient rate  $\lambda$ . The low-speed dynamic strengthening effect of nominal stress in the early equivalent strain stage when gradient rate  $\lambda = -0.0088$ , but the specific energy absorption is not improved obviously.

**Key words:** linear tandem gradient; honeycomb structure; in-plane performance; finite element analysis

### 引言

蜂窝结构因具有质量轻、强度高、成本低以及优良的抗冲击性和吸能特性被应用于众多实际工程领域<sup>[1-4]</sup>, 随着经济的发展和科技的进步, 交通工

具的时效性和普及性远超历史任何时期, 交通事故的发生频率也在逐年增加。传统的蜂窝结构已经不能满足当下交通工具发生碰撞时吸收大量动能以保障乘客安全的要求, 因此, 具有更强吸能特性的蜂窝结构成为科研工作者的研究重点<sup>[5-6]</sup>。

蜂窝结构的研究重点主要分为两种, 第 1 种是

**基金项目:** 沈阳材料科学国家研究中心 - 有色金属加工与再利用国家重点实验室联合基金培育项目 (18LHPY007)

**第一作者:** 乔及森 (通信作者), 男, 1973 年生, 博士, 教授, 主要从事轻量化结构研究, E-mail: qjisen@163.com

**收稿日期:** 2021-06-30; **修订日期:** 2021-09-16

人们以自然界为灵感改进蜂窝结构，并且大多通过数值模拟的方法来分析力学性能及吸能特性，发现多数新型蜂窝结构的力学性能及吸能特性优于常规蜂窝。如 TSANG H H 等<sup>[7]</sup>通过观察生物微观结构，如肌肉、肌腱，引入层次结构，使材料的吸能能力有了明显提高，并且使高阶层次结构吸能性得到了更大的增强。YANG X F 等<sup>[8]</sup>以马蹄形为灵感提出了一种新型的仿生马蹄形铝蜂窝结构。通过数值模拟的方法研究了准静态压缩时的面外力学行为。相较于传统蜂窝结构，马蹄形蜂窝大大提高了平台应力及比能吸收。因此引入自然灵感可以提高蜂窝结构能量吸收的潜能。第 2 种是人们在传统蜂窝的基础上引入梯度的概念。而相对密度<sup>[9]</sup>则是影响蜂窝结构力学性能的最主要因素，所以相对密度梯度成为研究梯度蜂窝的重中之重。传统相对密度梯度蜂窝是通过改变每级蜂窝结构的壁厚来实现。李振等<sup>[10]</sup>借鉴并联弹簧系统的连接机制和功能梯度的概念，建立了变壁厚的并联梯度蜂窝结构的理论和有限元模型，并且在准静态和动态平压下分析了其力学性能及吸能特性，得出并联梯度可以提高蜂窝吸能特性的结论。HOU Y 等<sup>[11]</sup>根据六边形蜂窝和负泊松比蜂窝，将两种蜂窝串联在一起，并使用环氧树脂制作试样，进行面内准静态平压试验，分析了该新型结构的力学性能，得出相同名义应变下该新型蜂窝具有更高的名义应力值，证明了不同规格蜂窝连接时能表现出比传统单一蜂窝更好的吸能特性。BOLDRIN L 等<sup>[12]</sup>将六边形蜂窝和蝶形蜂窝连接时将梯度分成了两类，分别为内部蜂窝角度和蜂窝胞壁长宽比的连续变化，并采用全尺寸有限元法和构件模态综合法对两种梯度蜂窝结构的动力学行为进行了数值模拟，并分析了力学性能及声振性。同时，阐明了串联梯度蜂窝研究的必要性。XU M C 等<sup>[13]</sup>则将六边形蜂窝和负泊松比蜂窝组合为一个胞元结构的新型蜂窝材料，通过数值模拟和实验的方法对该新型蜂窝在 X 方向和 Y 方向进行准静态平压，观察其变形模式，并分析力学性能及吸能特性，得出该新型组合蜂窝的 SEA 比传统蜂窝提高了 38%。证明了不同规格蜂窝串联时在提高能量吸收方面的巨大潜力。LI Z 等<sup>[14]</sup>基于六边形蜂窝提出了以 4 层相同蜂窝规格为一级的分段分级串联梯度蜂窝结构，同时以改变壁角关系来达到改变梯度的目的，在准静态平压下表现出比传统蜂窝在名义应变后期更好的吸能特性，同时在吸收能量时表现

出节约时间的独特性，再次说明了研究分段串联梯度蜂窝的必要性。

本文以自然界中的骨骼为设计出发点，通过相对密度梯度来达到近似骨骼的目的，相对密度梯度主要通过改变各层胞元壁厚得到，但对于不同蜂窝规格的分段分级蜂窝的研究较少，且都是围绕具有明显不同规格蜂窝结构进行串联及多层相同规格蜂窝为一级的研究，针对具有线性梯度规律且一层为一级的蜂窝研究较少。因此本文将主要讨论在准静态及动态冲击平压下线性串联梯度对于蜂窝结构的力学性能和吸能特性的影响，为蜂窝结构的优化创新设计和应用提供参考依据。

## 1 串联梯度蜂窝结构

传统的梯度蜂窝主要是改变蜂窝结构的壁厚，将不同壁厚的蜂窝进行并联或者串联，使具有不同力学性能的蜂窝结构作为一个整体，在压缩过程表现出比未加梯度的蜂窝更好的力学性能及吸能特性。而串联梯度蜂窝 (Tandem Gradient Honeycomb, TGH) 是通过改变壁角关系来达到改变梯度的目的，TGH 只改变侧边长  $H_i$  就可以改变相对密度，减少了其他蜂窝参数对相对密度的影响，胞元结构示意图见图 1，图中  $L$  为上、下边长， $t$  为壁厚， $H_i$  为左、右 4 条边边长， $h_i$  为胞元半高。假定 TGH 胞元上、下边长  $L$  不变，左右两侧的 4 条边  $H_i$  随着层数的增加逐渐增大，使得每层胞元的相对密度不同。设计思路为第 1 层设定为正六边形蜂窝，第 2 层蜂窝增加胞元左右两边的  $H_i$  达到改变相对密度的目的，假定  $H_{i+1} - H_i = \Delta$ ，即每一层相较于前一层增加  $\Delta$ 。本文中，为了提高有限元模拟效率，设定  $L = 0.1 \text{ mm}$ ，

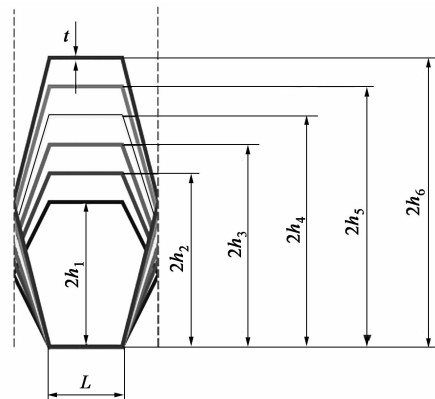


图 1 胞元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cellular structure

$t = 0.02 \text{ mm}$ ,  $H_1 = 0.1 \text{ mm}$ ,  $h_1 = 0.0866 \text{ mm}$ 。

## 2 串联梯度蜂窝理论模型

### 2.1 TGH 相对密度的计算

六边形蜂窝因具有良好的结构性和吸能性, 被广泛应用于吸能材料。本文所研究的 TGH 是基于六边形蜂窝结构改变的, 对  $n$  层结构的蜂窝进行上、下边叠加串联, 故每层的相对密度不同, 采用单壁厚设计。TGH 拓扑结构如图 2a 所示, 阴影部分的尺寸如图 2b 所示。

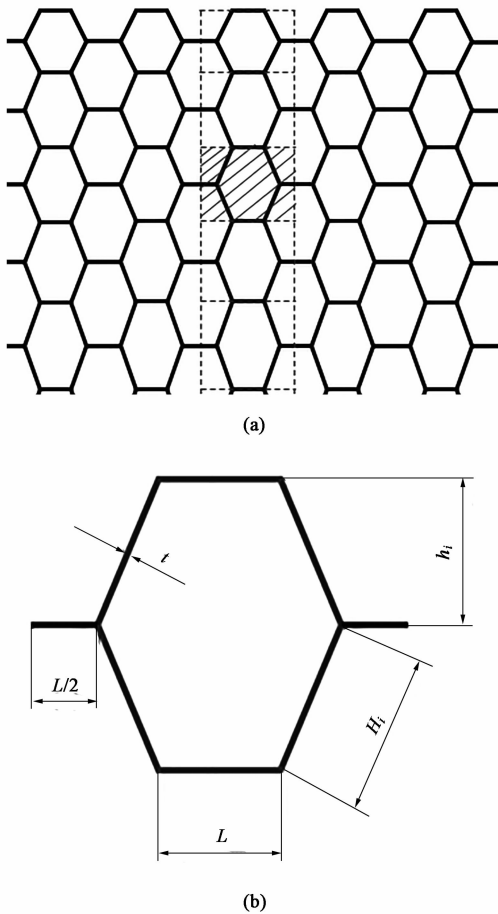


图 2 TGH 的结构 (a) 和阴影部分的尺寸 (b)  
Fig. 2 Structure of TGH (a) and size of shaded area (b)

描述蜂窝结构材料特性最重要的一个参数是相对密度<sup>[9]</sup>。定义相对密度为  $\rho'/\rho_{ce}$ , 其中  $\rho'$  为多胞材料的表观密度,  $\rho_{ce}$  为构成多胞材料壁厚的固体材料的密度。为了计算方便, 将  $H_i$  转化成为  $h_i$ , 则每一层胞元的相对密度  $\rho_i$  如式 (1) 所示。

$$\rho_i = \frac{\rho'}{\rho_{ce}} = \frac{(3L + 4\sqrt{0.0025 + h_i^2})t}{3L\sqrt{0.01 + 4h_i^2} - L^2} \quad (1)$$

但是通过式 (1) 所求得相对密度并不是

TGH 整个模型的相对密度, 整个模型的相对密度是随着层数的增加不断变化的, 如式 (2) 所示, 整个模型的相对密度  $\rho$  为:

$$\rho = \frac{\sum_i^n \rho_i}{n} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

### 2.2 梯度率的定义

根据上述设计思路, 每一层胞元具有一个相对密度数值, 且相对密度在整个模型中呈现分段非线性变化的趋势。分层梯度蜂窝的研究, 重点为线性梯度的设计, 将非线性的分段相对密度转变成线性分段的相对密度。而关于梯度率的研究, 科研工作者已经做的较为详尽, 但是针对梯度率对力学性能及吸能特性影响的研究相对较少。定义梯度率  $\lambda$  为<sup>[15]</sup>:

$$\lambda = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{h_{i+1} + h_i} \quad (3)$$

### 2.3 理论计算模型

TGH 胞元结构为中心对称结构, 其几何中心为质心。通过观察梯度率曲线横纵坐标的关系, 采用最小二乘法<sup>[16]</sup>进行线性梯度率的设计。

设  $x_i$  为每相邻两层胞元质心之间的距离 (质心距),  $y_i$  为每层胞元的相对密度。求取质心距的平均值及相对密度的平均值为:

$$x = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (4)$$

$$y = \sum_{i=1}^n y_i / n \quad (5)$$

直线方程的斜率, 即梯度率为:

$$\lambda = da = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (6)$$

将第 1 层的相对密度与质心距带入式 (7), 拟合后的直线模型为:

$$y = 0.02459x + 0.2694 \quad (7)$$

计算得到相应的质心距和相对密度, 并将其作为数据点进行最小二乘法拟合, 得到梯度率值 (斜率), 再通过逆向计算出在该斜率下各层的相对密度及胞元结构尺寸, 图 3a 所示为质心距示意图, 图 3b 所示为当  $\Delta = 0.02 \text{ mm}$  时根据最小二乘法拟合得到的梯度率变化曲线。根据同样的方法可以得到  $\Delta$  为 0.01、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.08 和

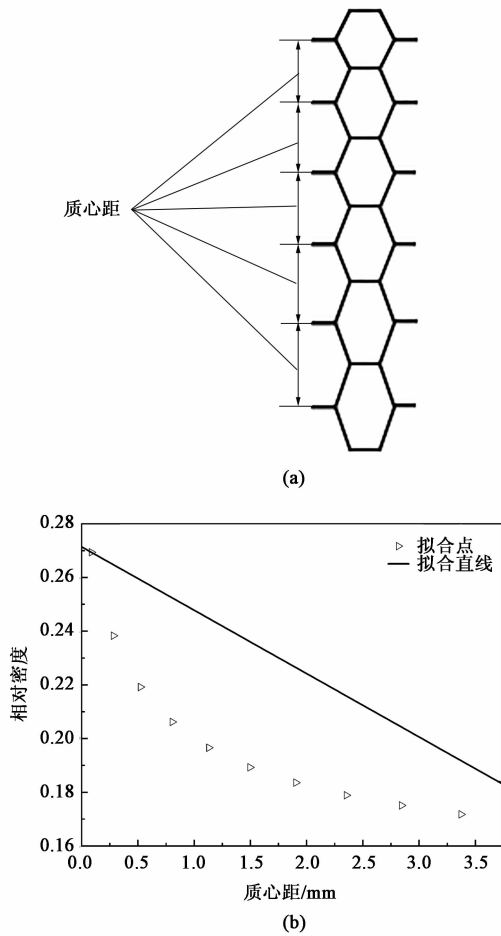


图 3 质心距示意图 (a) 及相对密度变化曲线 (b)  
Fig. 3 Schematic diagram of centroid distance (a) and relative density curve (b)

0.09 mm 时对应的梯度率值, 见表 1 所示。

表 1  $\Delta$  与体积和梯度率的关系

Tab. 1 Relationship between  $\Delta$  and volume and gradient rate

$\Delta$ /mm	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
体积/mm <sup>3</sup>	27.90	28.05	30.00	29.55	27.23	27.83	28.73	27.98	27.45	28.73
梯度率 $\lambda$	0	-0.0028	-0.0236	-0.0199	-0.0163	-0.0136	-0.0116	-0.0101	-0.0088	-0.0079

另外, 在同体积下分别比较  $\Delta$  为 0、0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.08 和 0.09 mm 时的面内力学性能, 且全部模型的厚度为 0.02 mm。但考虑到 TGH 的受力问题, 如严格按照同体积时, 则 TGH 上下面与刚性板的接触面积有所变化, 为了使其一致, 保证其最大的体积误差为 9.25%。

### 4 结果与分析

#### 4.1 TGH 的变形模式

为了研究在准静态及动态压缩速度下的 TGH 变

### 3 有限元模型

考虑到 TGH 结构的复杂性, 制作试样难度较大, 建立了  $\Delta$  为 0、0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.08 和 0.09 mm 时的 TGH 结构有限元模型, 其中均匀蜂窝为特殊的 TGH 蜂窝。不考虑壁厚影响, 采用 ABAQUS/EXPLICIT 动力学软件进行面内压缩模拟。准静态压缩时, TGH 芯子的基体材料为 AL3003H18, 密度  $\rho_s = 2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 杨氏模量  $E = 69 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.33$ , 屈服强度为  $R_{p0.2} = 123 \text{ MPa}$ , 设定各向同性且不考虑应变率对 TGH 变形速度的影响, 采用壳单元进行计算, 厚度偏移设置为中面, 确定了网格尺寸为 0.05 mm, 刚性面板的网格单元尺寸为 1 mm, 单元类型选择指派为 standard 进行有限元求解, 单元形状以四边形为主, S4R 为四结点曲面薄壳、缩减积分、沙漏控制和有限膜应变。模拟中将 TGH 放置在上下刚性板中间, 将下刚性板作为支撑板, 约束全部自由度, 同时考虑了压缩过程中摩擦的影响, 设置上下刚性板与 TGH 接触属性为切向行为, 同时设置“罚”, 摩擦系数为 0.2。法向行为设置为“硬”接触。进行动态压缩时, TGH 蜂窝的尺寸、材料属性、划分网格及各部件的约束情况以准静态模型为准, 并且设定冲击端的离散刚体的质量为 2 kg, 只设定 Y 方向的自由度, 并以某一指定的速度  $V$  向 Y 的负方向冲击, 并且约束其他方向的自由度, 以达到保证 TGH 变形的平面应变状态, 上刚性板作为冲击端在装配时与 TGH 之间保留一段距离。有限元模型示意图见图 4a, 压缩示意图见图 4b。

形模式, 分析力学性能, 得到准静态压缩速度为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时的变形模式, 如图 5 所示, 动态压缩速度为 50 和  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时的变形模式见图 6 和图 7。从图 5 变形模式中可以看出, 均匀蜂窝在等效应变为 0.3 时呈现“X”形塑性坍塌带, 与文献 [17] 所述一致。而 TGH 的变形模式表现出了较大的不同, 随着  $\lambda$  的变化, 在等效应变  $\epsilon = 0.3$  时出现倒“V”形塑性坍塌带, 随着等效应变的增加, 在相对密度较小的层级先出现压溃, 直到当  $\lambda = -0.0136$  时, 在倒“V”形的上部则出现了 2 条微小的塑性坍塌变形带。 $\lambda$  越小的 TGH 在倒“V”形下部相对

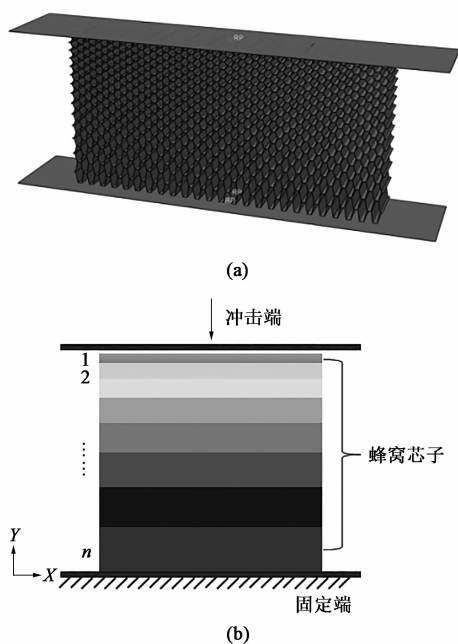


图 4 有限元模型 (a) 及压缩示意图 (b)  
Fig. 4 Finite element model (a) and compression schematic diagram (b)

密度小的层级先发生压溃, 直至压实。但随着  $\lambda$  逐渐增大, 这种现象越不明显, 原因是相对密度的变化值在减小, 使得每层蜂窝的强度差减小。综上所述, 在准静态压缩速度下, TGH 蜂窝与均匀蜂窝的变形模式明显不同, 同时也未出现理想的逐层压溃的变形模式, 则  $\lambda$  对 TGH 的变形模式的影响是显著的。

动态压缩速度为  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时 (图 6), 由于 TGH 相对密度的特性, 在动态压缩过程中出现了较大的差异。当  $\lambda = -0.0288$  且等效应变  $\varepsilon = 0.5$  时, 在倒“V”形塑性坍塌带的下部出现更加复杂的塑性坍塌, 贯穿梯度方向的坍塌带不再是直线状, 呈现多、短且碎的特点。产生的原因是: TGH 的变形模式因为惯性效应及强度差的影响, 使得胞元在水平方向上的作用力变大, 甚至在  $\lambda = -0.0163$  时, 在倒“V”形的下部出现“X”形的变形带。随着相对密度变化的减小, 变形模式逐渐相趋于均匀蜂窝。

当压缩速度达到  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时 (图 7), 均匀蜂窝和 TGH 在等效应变  $\varepsilon = 0.3$  时都呈现自冲击端到固定

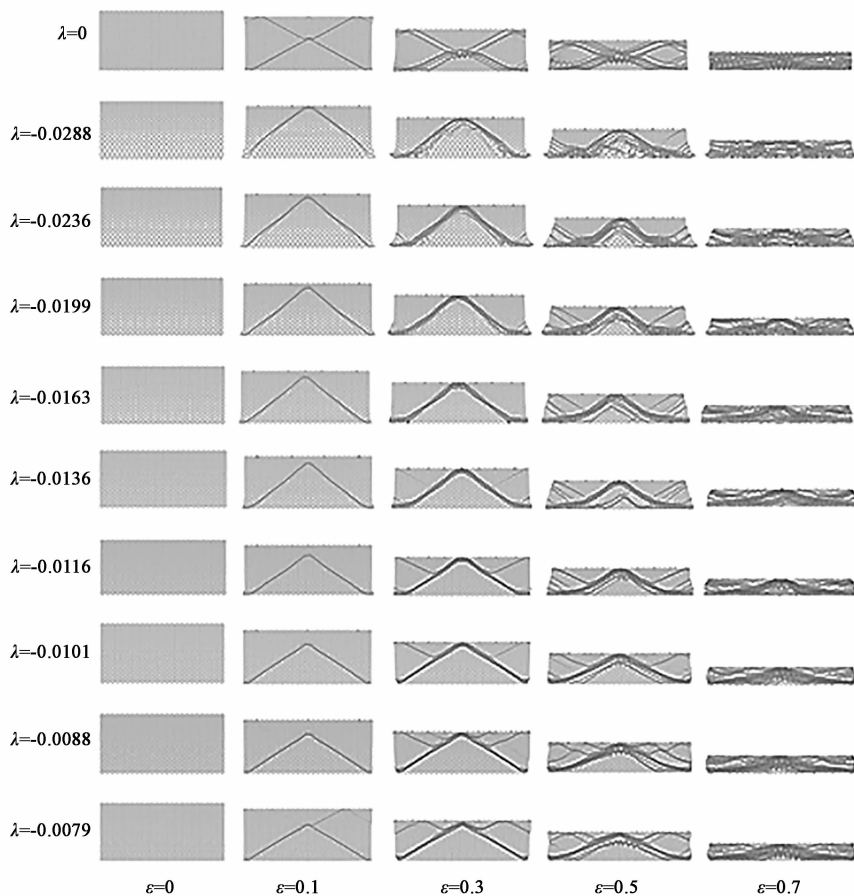


图 5 准静态压缩速度为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时的变形模式  
Fig. 5 Deformation mode at quasi-static compression speed of  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

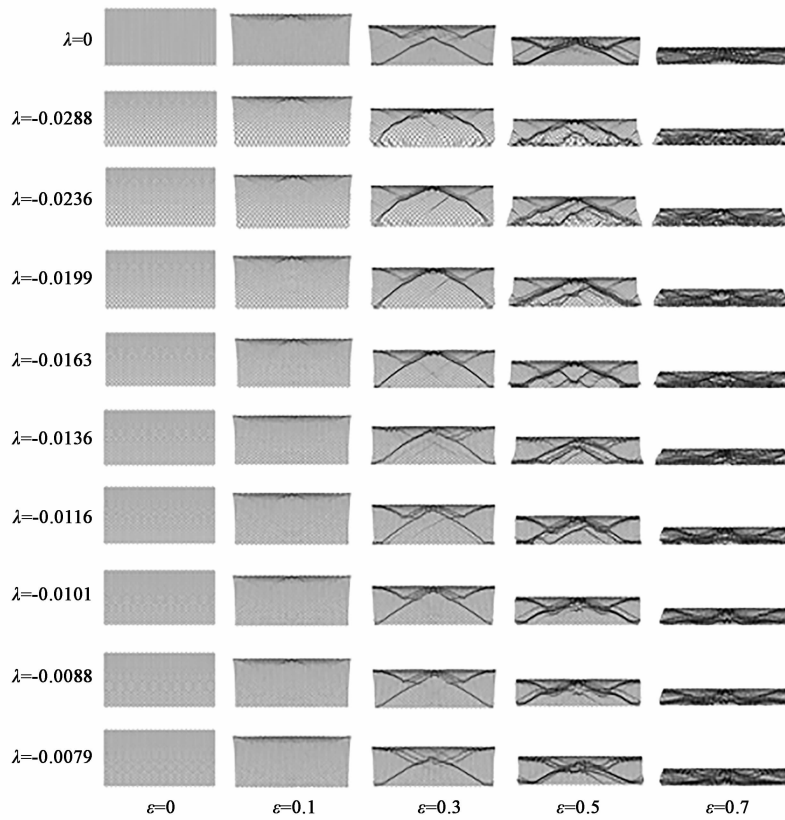


图 6 动态压缩速度为  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的变形模式

Fig. 6 Deformation mode at dynamic compression speed of  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

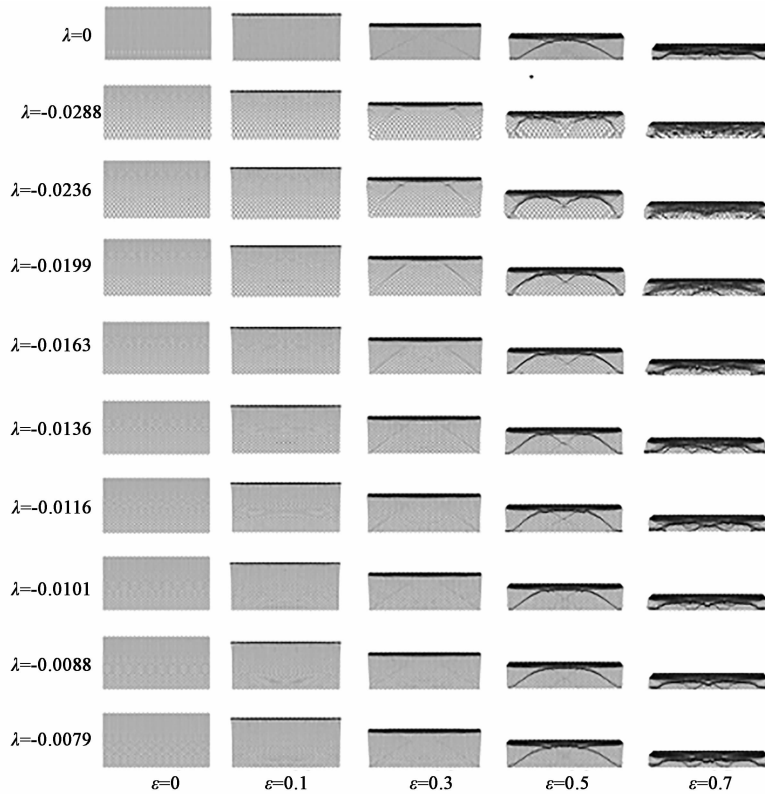


图 7 动态压缩速度为  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的变形模式

Fig. 7 Deformation mode at dynamic compression speed of  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

端的逐层坍塌的“1”形塑性变形坍塌带, 贯穿梯度方向的塑性坍塌带已经非常不明显, 在 TGH 变形模式中也并未在相对密度低的地方先开始压溃, 而是在接近冲击端处最先变形, 主要原因是在高速压缩下, 惯性效应占主导地位。在等效应变  $\varepsilon = 0.5$  时, 在水平塑性变形带的下部出现了贯穿梯度方向的塑性变形带, 并且随着  $\lambda$  增大, 塑性坍塌带逐渐从“M”形向倒“V”形变化。

### 4.2 平台应力

均匀蜂窝的静态平台应力理论模型为<sup>[9]</sup>:

$$\sigma_0 = \frac{2}{3} \left( \frac{t}{L} \right)^2 Y_{ce} \quad (8)$$

式中:  $Y_{ce}$  为胞壁材料的屈服应力;  $\sigma_0$  为静态压缩时的平台应力。

对于均匀蜂窝结构的动态平台应力  $\sigma_d$ , TAN P J 等<sup>[18]</sup> 提出了一种基于连续介质力学和一维冲击波理论的简化模型表达式为:

$$\sigma_d = \sigma_0 + kv^2 = \sigma_0 + \frac{\rho^0}{\varepsilon_d} v^2 \quad (9)$$

式中:  $\sigma_d$  为动态压缩应力;  $\rho^0$  为均匀蜂窝的表征密度;  $\sigma_0$  为静态部分;  $kv^2$  为动态部分, 其中  $v$  为压缩速度,  $k$  为常数;  $\varepsilon_d$  为蜂窝发生密实时应变;  $v$  为压缩速度。静态部分主要是由塑性较的塑性变形决定的, 动态部分是由惯性效应决定的。均匀蜂窝的理论平台应力和有限元模拟的平台应力对比见表 2, 最大相对误差为 9.54%, 吻合度较好, 验证了有限元模型的准确性。

表 2 平台应力的有限元模拟结果及理论结果 (MPa)

Tab. 2 Finite element simulation results and theoretical results of nominal stress (MPa)

压缩速度 / (m · s <sup>-1</sup> )	理论结果	有限元结果
1	3.2800	3.4822
50	5.5320	6.0599
100	11.4680	11.3896

图 8 为均匀六边形蜂窝与 TGH 在准静态压缩及动态压缩速度下的应力 - 应变曲线, 曲线分为弹性变形阶段、塑性变形平台阶段及密实阶段, 但是动态曲线有明显的峰值。对于吸能材料来说, 主要通过塑性变形来吸收能量, 同时, 密实阶段没有研究价值。由图 8a 可知, 均匀蜂窝与 TGH 的区别不太明显, 串联梯度并没有提高平台区域, 并且大部分 TGH 低于均匀蜂窝, 由图 8b 可知, 当动态压缩速度为 50 m · s<sup>-1</sup> 时, 串联梯度对于平台应力的影响更加显著, 可以明显看出, 在等效应变前期, 即

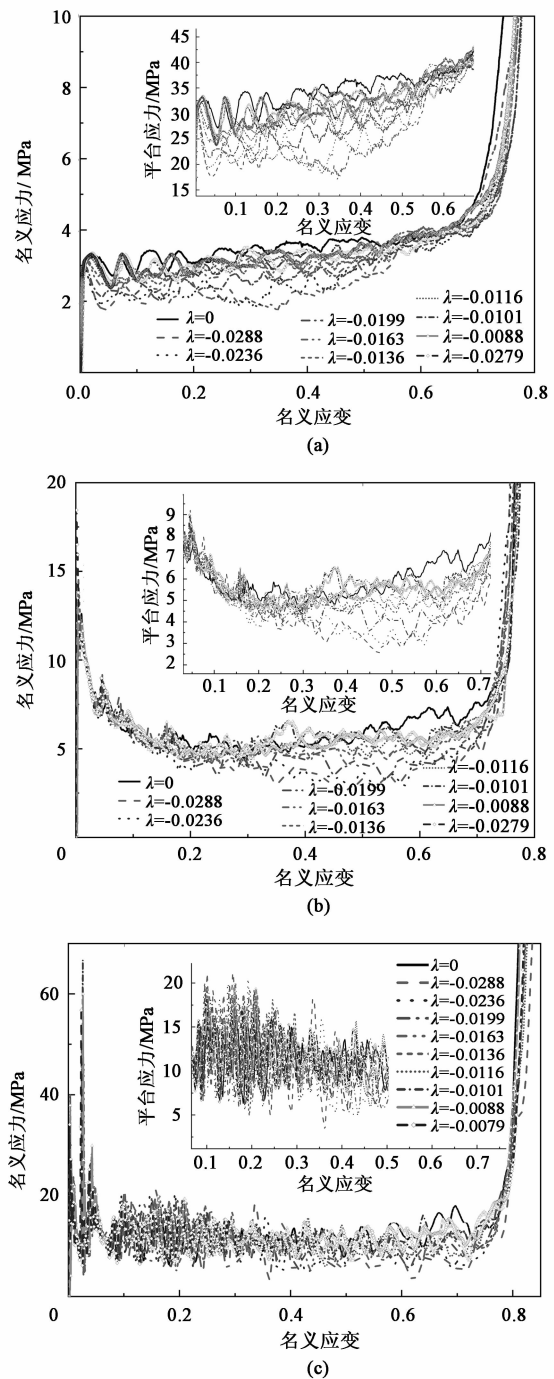


图 8 不同压缩速度下的应力 - 应变曲线

(a) 1 m · s<sup>-1</sup> (b) 50 m · s<sup>-1</sup> (c) 100 m · s<sup>-1</sup>

Fig. 8 Stress-strain curves at different compression speeds

$\varepsilon < 0.5$  时, 有多个 TGH 的应力高于均匀蜂窝, 且  $\lambda = -0.0088$  和  $-0.0101$  时增加最大。而在  $\varepsilon > 0.6$  时, 均匀蜂窝的应力稍高于 TGH 结构。由图 8c 可知, 当动态压缩速度增加到 100 m · s<sup>-1</sup> 时, 可以明显看出平台区域有众多的波峰波谷, 原因在于高速压缩下是逐层压溃, 在每层压溃时则会出现峰值及波谷, 同时发现 TGH 对于平台应力的影响并不大,

说明串联梯度并没有在  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  压缩速度下出现动态增强效果, 产生的原因主要是, 蜂窝结构在动态压缩下的应力增强主要来源于惯性效应。综上所述, 串联梯度对 TGH 的强化主要是等效应变前期的低速动态强化, 且  $\lambda$  越小, 强化效果越不明显。

TGH 的平台应力的有限元模拟结果通过对等效应力 - 应变曲线积分可得, 即:

$$\sigma = \frac{\int_{\varepsilon_{cr}}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_d - \varepsilon_{cr}} \quad (10)$$

表 3 不同  $\Delta$  不同压缩速度下的平台应力 (MPa)

Tab. 3 Nominal stress at different  $\Delta$  and different impact velocities (MPa)

压缩速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\Delta/\text{mm}$									
	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
1	3.4822	2.5768	2.6679	2.8746	3.0386	3.1354	3.1808	3.2064	3.2473	3.3205
50	6.0599	4.5853	4.6721	4.9366	5.4736	5.4291	5.5967	5.8657	5.8681	5.7689
100	11.3896	10.4625	10.2708	10.5261	11.1466	11.1993	11.3244	11.8712	12.0571	12.0524

做的总功, 即结构在冲击过程中吸收的总能量, 其数学表达式为:

$$EA = \int_0^d F(x) dx \quad (11)$$

式中:  $d$  为有效压缩行程的位移量;  $F(x)$  为当前压缩位移处的载荷。

比吸能  $SEA$  是评价不同材料或结构在压缩过程中吸能性的重要指标, 考虑了结构质量, 是能量与结构质量之比, 其数学表达式为:

$$SEA = \frac{EA(d)}{m} \quad (12)$$

式中:  $EA(d)$  为在压缩位移  $d$  时所吸收的总能量;  $m$  为蜂窝结构的质量。

图 9a 和图 9b 为不同压缩速度下均匀蜂窝和 TGH 的  $EA$  和  $SEA$  对比。可以明显看出, 均匀蜂窝和 TGH 结构的  $EA$  和  $SEA$  均随压缩速度的增加而增大。对于  $\lambda = -0.0088$  时等效应变前期低速动态特性强化较为显著, 在等效应变前期的  $SEA$  比均匀蜂窝高 9%。但对于同一压缩速度下不同  $\lambda$  下的能量吸收情况分析可知, 串联梯度并没有达到改善  $SEA$  的效果, 并且随着  $\lambda$  的增加, TGH 结构的吸能能力逐渐接近于均匀蜂窝。

### 5 结论

(1) 建立了串联梯度蜂窝的准静态及动态压缩有限元模型, 有限元模拟结果和理论计算结果的最

式中:  $\varepsilon_{cr}$  为屈服应变, 即达到第 1 个峰值所对应的名义应变。不同压缩速度下均匀蜂窝与 TGH 平台应力结果见表 3, 直观地看出平台应力随着压缩速度的增加而增大, 产生的原因是在动态压缩的条件下, 应力的增加主要是惯性效应的影响, 且串联梯度并没有显著的增强效果。

### 4.3 吸能性能

总吸能  $EA$  被广泛应用于确定结构的能量吸收能力, 表示初始状态变形到当前状态下外界载荷所

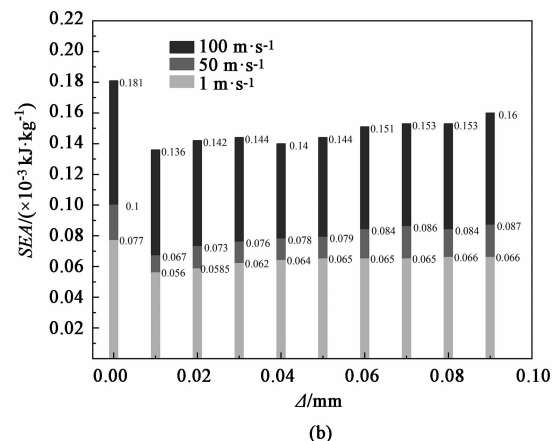
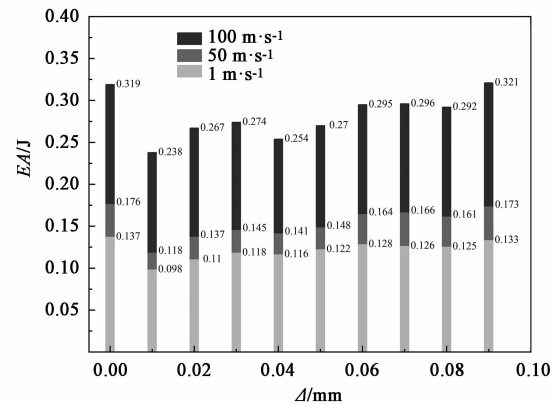


图 9 总吸能 (a) 及比吸能 (b) 的变化

Fig. 9 Variation of total energy absorption (a) and specific energy absorption (b)

大相对误差为 9.54%, 能够较为精确地反映串联梯



度蜂窝的力学性能及吸能特性。

(2) 在准静态及低速动态压缩过程中, 串联梯度蜂窝与均匀蜂窝的变形模式具有显著的不同, 并随着梯度率的增大, 两者的变形模式逐渐趋于相同。在高速动态压缩下, 串联梯度蜂窝的变形主要受冲击惯性的影响, 变形模式与准静态下的变形模式存在明显的不同。

(3) 串联梯度对静态特性的强化不是很明显。但对于  $\lambda = -0.0088$  时等效应变前期低速动态特性强化较为显著, 在等效应变前期的 SEA 比均匀蜂窝高 9%, 且当梯度率越小时, 强化效果越不明显。这是串联梯度蜂窝所具有的独特现象。

#### 参考文献:

- [1] 陈仕光, 邱亮洋, 许晓冰, 等. 蜂窝仿生结构在海绵化透水铺装中的应用展望 [J]. 给水排水, 2020, 56 (S1): 995 - 997.  
CHEN Shiguang, QIU Liangyang, XU Xiaobing, et al. Application prospect of honeycomb bionic structure in sponge permeable pavement [J]. Water Supply and Wastewater, 2020, 56 (S1): 995 - 997.
- [2] AVV S, BMV S, AVA M, et al. Using highly porous aluminum alloys and honeycomb structures in spacecraft landing gear [J]. Acta Astronautica, 2021, 180: 105 - 109.
- [3] 龚情, 何志平, 黄建萍, 等. 吸声蜂窝结构材料及其在直升机上的应用展望 [J]. 高科技纤维与应用, 2020, 45 (5): 1 - 7.  
GONG Qing, HE Zhiping, HUANG Jianping, et al. Sound-absorbing honeycomb structural materials and their application prospects in helicopters [J]. High-tech Fiber & Application, 2020, 45 (5): 1 - 7.
- [4] 钟鹏. 蜂窝及其夹芯结构在桥墩防撞中的应用 [J]. 四川水泥, 2019, (4): 72.  
ZHONG Peng. Application of honeycomb and sandwich structure in bridge pier anti-collision [J]. Sichuan Cement, 2019, (4): 72.
- [5] 魏思瑶, 李荣隆, 王一, 等. 六边形铝蜂窝共面力学行为与缓冲性能分析研究 [J]. 机械设计与制造, 2020, (10): 126 - 128, 132.  
WEI Siyao, LI Ronglong, WANG Yi, et al. Research on coplanar mechanical behavior and cushioning performance of hexagon aluminum honeycomb [J]. Machinery Design and Manufacture, 2020, (10): 126 - 128, 132.
- [6] 孙晓旺, 陶晓晓, 王显会, 等. 负泊松比蜂窝材料抗爆炸特性及优化设计研究 [J]. 爆炸与冲击, 2020, 40 (9): 66 - 76.  
SUN Xiaowang, TAO Xiaoxiao, WANG Xianhui, et al. Study on anti-explosion characteristics and optimal design of negative Poisson's ratio honeycomb material [J]. Explosion and Shock, 2020, 40 (9): 66 - 76.
- [7] TSANG H H, RAZA S. Impact energy absorption of bio-inspired tubular sections with structural hierarchy [J]. Composite Structures, 2018, 195: 199 - 210.
- [8] YANG X F, SUN Y X, YANG J L, et al. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructure [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 125: 1 - 11.
- [9] 余同希, 卢国兴, 张雄. 能量吸收: 结构与材料的力学行为和塑性分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.  
YU Tongxi, LU Guoxing, ZHANG Xiong. Energy absorption: Analysis of mechanical behavior and plasticity of structures and materials [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [10] 李振, 丁洋, 王陶, 等. 新型并联梯度蜂窝结构的面内力学性能研究 [J]. 复合材料学报, 2020, 37 (10): 156 - 163.  
LI Zhen, DING Yang, WANG Tao, et al. Research on in-plane mechanical properties of a novel parallel gradient honeycomb structure [J]. Chinese Journal of Composites, 2020, 37 (10): 156 - 163.
- [11] HOU Y, NEVILLE R, SCARPA F, et al. Graded conventional-auxetic Kirigami sandwich structures: Flatwise compression and edgewise loading [J]. Composites: Part B, 2014, 59: 33 - 42.
- [12] BOLDRIN L, HUMMEL S, SCARPA F, et al. Dynamic behaviour of auxetic gradient composite hexagonal [J]. Composite Structures, 2016, 149: 114 - 124.
- [13] XU M C, XU Z R, ZHANG Z, et al. Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 159: 43 - 57.
- [14] LI Z, YI J, WANG T, et al. In-plane crushing behaviors of piecewise linear graded honeycombs [J]. Composite Structures, 2019, 207: 425 - 437.
- [15] 乔及森, 孔海勇, 苗红丽, 等. 梯度铝合金蜂窝夹芯板复合材料的力学响应 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (3): 183 - 189.  
QIAO Jisen, KONG Haiyong, MIAO Hongli, et al. Mechanical behavior of composite materials of aluminum alloy honeycomb sandwich panel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (3): 183 - 189.
- [16] 丁可良, 沈云中, 欧吉坤. 整体最小二乘法直线拟合 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2010, 29 (10): 44 - 47.  
DING Keliang, SHEN Yunzhong, OU Jikun. Integral least square linear fitting [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2010, 29 (10): 44 - 47.
- [17] RUAN D, LU G, WANG B, et al. In-plane dynamic crushing of honeycombs: A finite element study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28 (2): 161 - 182.
- [18] TAN P J, REID S R, HARRIGAN J J, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams Part: 'Shick' theory and comparison with experimental data and numerical models [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2005, 53 (10): 2203 - 2230.