

文章编号: 1000-4750(2012)08-0372-06

# 密度梯度蜂窝材料动力学性能研究

张新春<sup>1</sup>, 刘 颖<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学机械工程系, 河北, 保定 071003; 2. 北京交通大学土建学院力学系, 北京 100044)

**摘 要:** 利用显式动力有限元方法数值研究了具有密度梯度六边形蜂窝材料的面内冲击动力学性能。根据功能梯度材料的概念, 首先建立了具有密度梯度的蜂窝材料模型。基于此模型, 具体讨论了密度梯度和冲击速度对六边形蜂窝材料变形模式和能量吸收性能的影响。研究表明, 通过恰当地选择蜂窝材料的密度梯度, 初始应力峰值明显减小, 材料的能量吸收能力能够有效地得到控制。此结论为实现多胞材料动力学性能的多目标优化设计提供了新的设计思路。

**关键词:** 蜂窝材料; 密度梯度; 变形模式; 能量吸收; 冲击

中图分类号: O347 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.12.0872

## RESEARCH ON THE DYNAMIC CRUSHING OF HONEYCOMBS WITH DENSITY GRADIENT

ZHANG Xin-chun<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China;

2. Department of Mechanics, School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The in-plane dynamic crushing of hexagonal honeycombs with density gradients is numerically studied by using explicit dynamic finite element method. Based on the concept of functionally graded materials, the density graded honeycomb mode is firstly established. And then the effects of density gradient and impact velocity on the deformation modes and the energy absorption capacities of hexagonal honeycombs are discussed in detail. Research results show that through the proper choice of the density gradient of honeycombs, the initial stress peak could be reduced significantly, and the energy absorption could be controlled effectively. The results will provide some useful guides in the multi-objective optimization design of impact dynamic properties of cellular materials.

**Key words:** honeycomb; density gradient; deformation modes; energy absorption; impact

为了保护乘客和贵重物品的安全, 设备以及各种交通工具(如汽车、飞机等)的能量吸收过程应该以一种和缓的形式进行。如何设计高效的能量吸收装置一直是工程师们关注的热点领域。近年来, 作为一种新型的轻质多胞材料, 以微结构弹性屈曲和脆性断裂为特征的平台变形特性使蜂窝材料成为一种理想的吸能材料, 并被广泛地应用于各种能量吸收器的设计中<sup>[1]</sup>。研究表明, 在冲击荷载作用下, 蜂窝材料的动态响应总是伴随着一个很大的初

始应力峰值, 并且初始应力峰值远远高于平台应力值, 这对于蜂窝材料在能量吸收方面的应用是极其不利的。因此, 如何降低初始应力峰值和控制材料能量吸收能力是多胞材料能量设计的重要目标之一。

作为一种简单的能量吸收结构, 六边形蜂窝材料已被广泛地应用于各种能量吸收装置中。关于六边形蜂窝材料的大量研究业已展开, Gibson 和 Ashby<sup>[2]</sup>系统地分析了准静态压缩荷载作用下蜂窝

收稿日期: 2010-12-03; 修改日期: 2011-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(10972028); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(11QG63)

通讯作者: 张新春(1980—), 男, 河北人, 讲师, 博士, 主要从事冲击动力学方面的研究(E-mail: zhangxinchun551@sina.com.cn).

作者简介: 刘 颖(1973—), 女, 山东人, 教授, 博士, 主要从事冲击动力学方面的研究(E-mail: yliu5@bjtu.edu.cn).

结构的弹性模量、塑性坍塌和弹性屈曲应力。然而，与静态及准静态压缩不同，在冲击荷载作用下，结构和惯性效应将主要影响试件的动态特性。当冲击速度超过其临界值之后，局部变形带将首先在冲击端或固定端开始启动<sup>[3]</sup>。Ruan 等<sup>[4]</sup>数值讨论了面内冲击荷载作用下规则六边形蜂窝材料的动态变形模式。考虑到边界效应的影响，Zou 等<sup>[5]</sup>研究了六边形蜂窝体的面内动态冲击响应和冲击波前特性。Zheng 等<sup>[6]</sup>分析了胞体不规则性和冲击速度对蜂窝材料整体变形模式和平台应力的影响。但这些研究主要集中在对均匀蜂窝结构的分析。以上研究表明，胞元的微几何尺寸(例如：壁厚或壁厚等)对蜂窝材料的能量吸收能力起到决定性作用。在胞元壁厚长一定的前提下，增加壁厚可以有效地提高平台应力值，但平台阶段长度相应的减小，并且初始应力峰值也会增加。虽然减小壁厚可以降低初始应力峰值并延长平台阶段长度，但平台应力值却被降低了。因此，使用均匀蜂窝材料很难达到多目标优化设计的目的。基于功能梯度材料的概念，一些学者还提出了具有密度梯度的多胞材料模型用以改善材料的力学性能<sup>[7-9]</sup>。但密度梯度和冲击速度与蜂窝材料宏观动力学响应特性间的关系还远未建立。

本文以具有密度梯度的六边形蜂窝材料为研究对象，讨论了密度梯度和冲击速度对蜂窝材料动态冲击响应的影响，以期建立材料的动态能量吸收特性与密度梯度和冲击速度之间的内在关联。

## 1 计算模型

### 1.1 有限元模型

面内冲击荷载作用下具有密度梯度六边形蜂窝材料(Density Graded Hexagonal Honeycomb, DGHH)计算模型如图 1 所示。试件由四层具有相同壁厚，但不同壁厚的六边形蜂窝组成。采用显式动力学软件 LS-DYNA 对蜂窝材料进行动力学特性分析。文中保证胞壁长度  $l=2.7\text{mm}$  不变，试件尺寸为  $L_1 \times L_2=62.1\text{mm} \times 75\text{mm}$ 。基体材料为金属铝，采用理想弹塑性模型，弹性模量  $E_s=69\text{GPa}$ ，泊松比  $\mu=0.3$ ，屈服应力  $\sigma_{ys}=76\text{MPa}$ ，基体材料的密度  $\rho_s=2700\text{kg/m}^3$ 。计算中使用 SHELL163 壳单元(4 节点四边形壳单元)进行离散，每条棱边单元数为 6。为了保证收敛，沿厚度方向取 5 个积分点。对于变形过程中可能的接触，采用单面自动接触算法。另外，刚性板表面与蜂窝试件的外表面均视为光滑，两

者接触无摩擦。采用了与文献[4-6]相同的边界条件，即当刚性板沿  $y$  方向冲击蜂窝试件时，试件的底端固定，左右两侧自由。另外，为保证变形的平面应变状态，试件中所有节点异面方向位移均被限制。

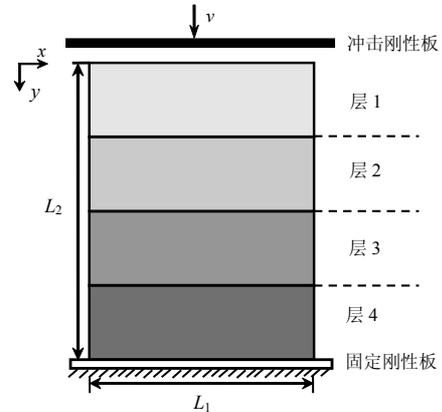


图 1 密度梯度六边形蜂窝材料计算模型示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of the calculating model for density graded hexagonal honeycomb

密度梯度六边形蜂窝材料的相对密度可由下式给出，即：

$$\Delta\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\sum_{i=1}^N lh_i}{L_1 L_2} \quad (1)$$

其中： $h_i$  为第  $i$  层胞壁的厚度； $N$  为总层数。根据式(1)，不同密度梯度蜂窝材料的性能参数由表 1 给出。针对某一特定排布结构(如试件 S1234 和试件 S4321)，试件 S1234 表示从胞壁厚度最薄层进行冲击；而试件 S4321 表示从最厚层冲击。

表 1 不同密度梯度六边形蜂窝材料的性能参数

Table 1 Characteristic parameters for hexagonal honeycombs with different density gradients

样本	$h_1/\text{mm}$	$h_2/\text{mm}$	$h_3/\text{mm}$	$h_4/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$\Delta\rho$
S1234	0.1	0.2	0.3	0.4		0.1094
S4321	0.4	0.3	0.2	0.1	2.7	0.1108
S2431	0.2	0.4	0.3	0.1		0.1099
S4213	0.4	0.2	0.1	0.3		0.1108

### 1.2 模型的可靠性分析

为了验证有限元模型的可靠性，图 2 给出了准静态压缩荷载作用下( $v=1\text{m/s}$ )均匀蜂窝材料的名义应力-应变曲线。其中，名义应力  $\sigma$  为刚性板作用在试件上的压缩反力  $F$  与初始横截面积  $A(62.1 \times 1\text{mm}^2)$  的比值，名义应变  $\varepsilon=\delta/L_2$  为  $y$  方向的相对压缩量，而  $\delta$  为冲击方向刚性板的压缩位移。作为对比，图 2 中还给出了准静态荷载作用下蜂窝材料的塑性坍塌应力<sup>[2]</sup>：

$$\sigma_0 = \frac{2}{3} \sigma_{ys} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \quad (2)$$

图中显见，二者结果吻合较好，从而有效地证明了有限元模型的可靠性。

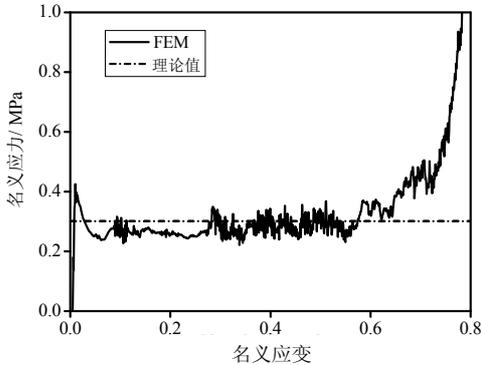


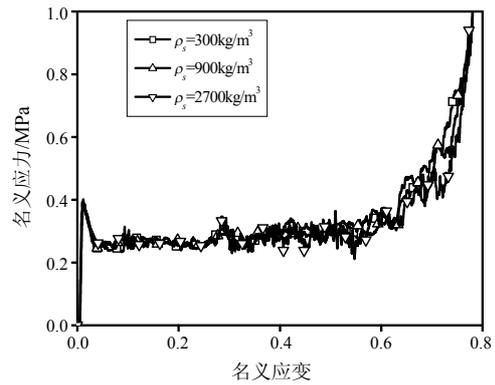
图2 均匀六边形蜂窝材料的名义应力-应变曲线( $v=1\text{m/s}$ )  
Fig.2 Nominal stress-strain curve of uniform hexagonal honeycombs ( $v=1\text{m/s}$ )

图3(a)给出了胞壁厚度  $h=0.2\text{mm}$  时，不同基体密度蜂窝材料在低速冲击( $v=1\text{m/s}$ )时的名义应力-应变曲线。其动态响应曲线基本重合，表明惯性影响相对微弱。通过改变胞壁的厚度( $h=0.1\text{mm}$ 、 $0.2\text{mm}$ 、 $0.3\text{mm}$  和  $0.4\text{mm}$ )，图4(b)给出了基体材料密度相同，但不同相对密度蜂窝材料在低速冲击( $v=1\text{m/s}$ )时的动态响应曲线。图中显见，随着相对密度的增加，应力平台显著提高。可见，相对密度(即胞壁厚度)对蜂窝材料的平台应力有很大影响。于是本文通过改变胞壁的厚度，提出了分层递变蜂窝材料模型，系统地分析了密度梯度对六边形蜂窝材料动态冲击响应特性的影响。

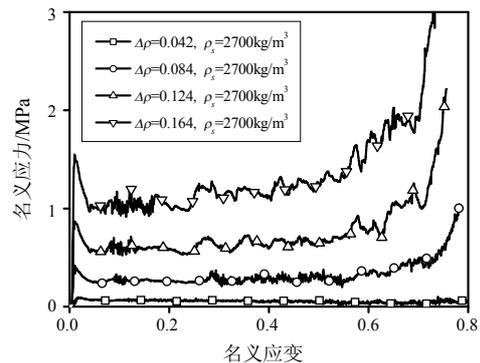
## 2 计算结果与分析

### 2.1 密度梯度蜂窝材料的动力响应

图4~图6分别给出了不同冲击速度下试件在名义应变  $\epsilon=0.4$  时的变形模式。计算结果表明，在低速冲击时( $v=7\text{m/s}$ )，试件并未表现出“X”型局部剪切变形带。随着名义应变的增加，试件表现为从较薄层( $h=0.1\text{mm}$ )到较厚层( $h=0.4\text{mm}$ )的逐层压缩变形模式(图4)。随着冲击速度的增加( $v=35\text{m/s}$ )，局部变形带在冲击端及较弱胞元层处同时发生，也未表现出“V”型变形带。随着刚性板压缩位移的增加，较弱胞元逐渐向前扩展且以较弱胞元层变形为主。当冲击速度接近或超过冲击波速时( $v=100\text{m/s}$ )，惯性效应增强，变形带主要集中在冲击端，对应着从冲击端到固定端的“I”型逐层压溃变形模式，这与均匀蜂窝材料类似。



(a) 基体密度的影响



(b) 相对密度的影响

图3 均匀蜂窝材料冲击端的动态响应曲线( $v=1\text{m/s}$ )  
Fig.3 Dynamic response curve of uniform honeycombs at the crushing end ( $v=1\text{m/s}$ )

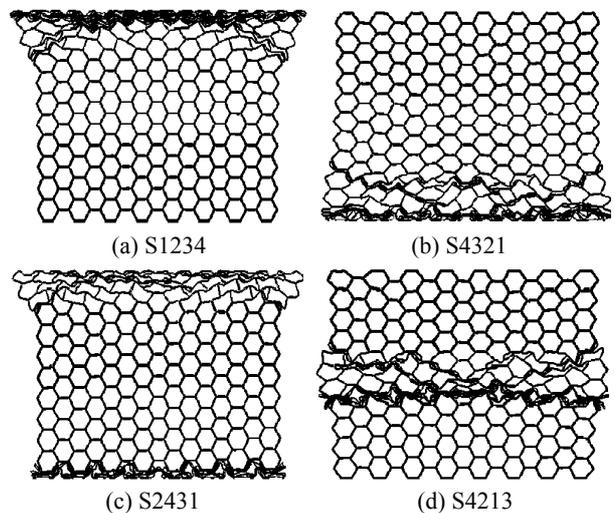
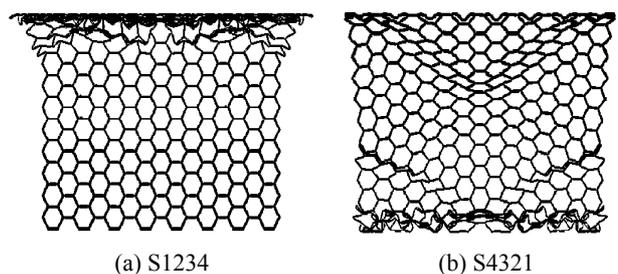


图4 冲击速度  $v=7\text{m/s}$  时密度梯度蜂窝材料的变形模式  
Fig.4 Deformation modes of density graded hexagonal honeycombs at  $v=7\text{m/s}$



(a) S1234

(b) S4321

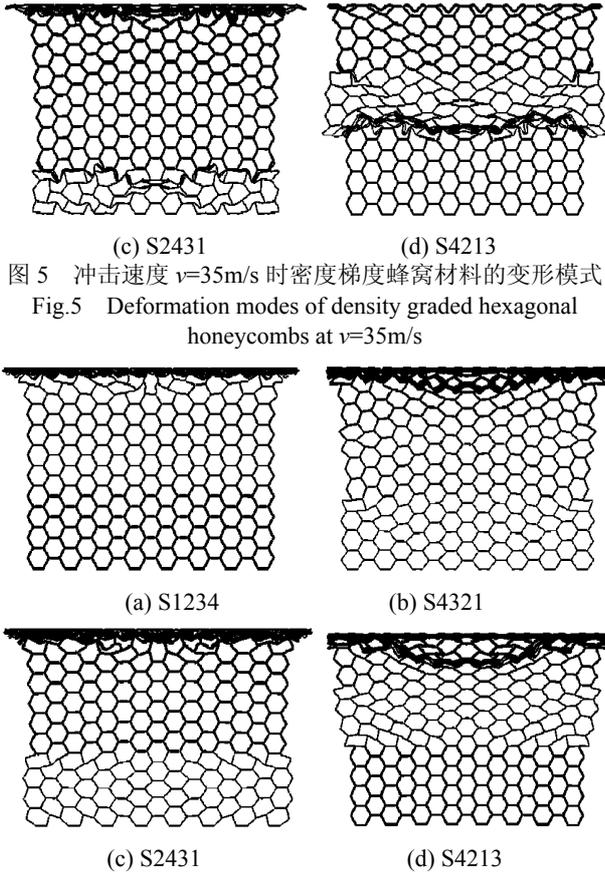


图 5 冲击速度  $v=35\text{m/s}$  时密度梯度蜂窝材料的变形模式  
Fig.5 Deformation modes of density graded hexagonal honeycombs at  $v=35\text{m/s}$

图 6 冲击速度  $v=100\text{m/s}$  时密度梯度蜂窝材料的变形模式  
Fig.6 Deformation modes of density graded hexagonal honeycombs at  $v=100\text{m/s}$

图 7 给出了密度梯度蜂窝材料冲击端的动态响应曲线。在低速冲击荷载作用下( $v=7\text{m/s}$ ), 由于试件表现为从最薄层( $h=0.1\text{mm}$ )到最厚层( $h=0.4\text{mm}$ )的逐层压缩变形。密度梯度的影响较弱, 不同密度梯度蜂窝材料的动态响应基本相同, 表现为逐渐递增的 4 个分段平台。分段平台阶段的相对长度为:

$$\Delta S = (1 - \Delta\rho)\Delta L \quad (3)$$

其中:  $\Delta L$  为每层的相对长度;  $\Delta\rho$  为该层蜂窝材料的相对密度。图 4 中右侧的 4 个应力水平分别为试件 S1234 相应每层(即  $h=0.1\text{mm}$ 、 $0.2\text{mm}$ 、 $0.3\text{mm}$  和  $0.4\text{mm}$ )的平台应力。

随着冲击速度的增加( $v=35\text{m/s}$ ), 密度梯度的影响增强。对于相对密度逐渐增加的试件(S1234), 仍表现为逐渐增加的 4 个平台阶段。但对于其他试件(如 S4321、S2431 和 S4213), 由于变形主要集中在较弱胞元层, 且在各层间交替变形。随着名义应变的增加, 第 2 平台、第 3 平台阶段长度相应被拉长了(图 7(b))。随着冲击速度的继续增加( $v=100\text{m/s}$ ), 由于试件表现为从冲击端到固定端的逐层压缩变形模式, 密度梯度对平台应力的影响相对明显。另

外如图 7 所示, 当把较弱层(如 S1234 或 S2431)放置在冲击端时, 初始应力峰值明显降低。

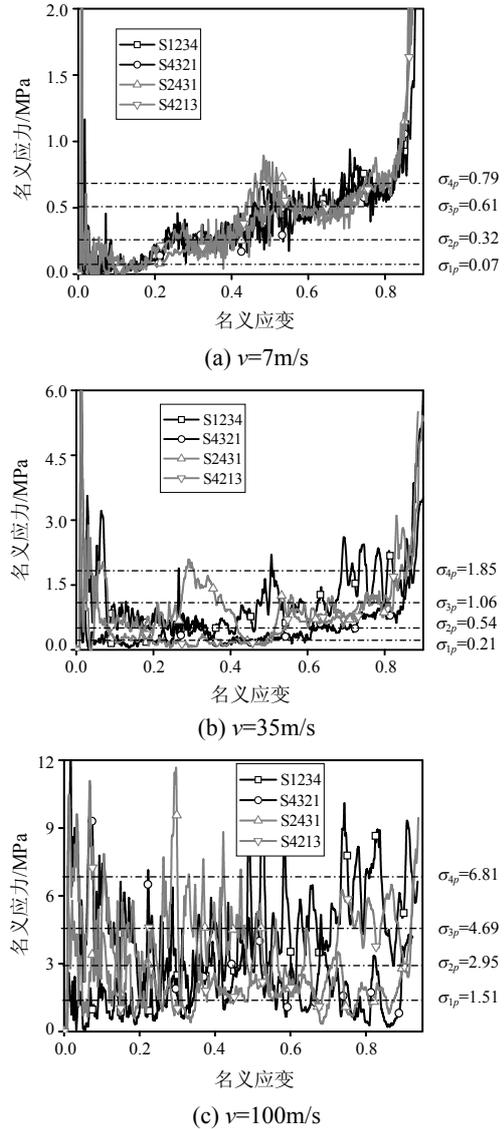


图 7 密度梯度蜂窝材料在冲击端的名义应力-应变曲线  
Fig.7 Nominal stress-strain curves for density graded honeycombs at the impact end

图 8 给出了密度梯度蜂窝材料固定端的名义应力-应变曲线。在低速冲击荷载作用下( $v=7\text{m/s}$ ), 对于某一特定的排布结构, 密度梯度对其固定端的动态响应影响很小。但随着冲击速度的增加, 将较弱层(如 S4321 和 S2431)放置在固定端, 其刚性板的压缩应力明显要低于将较厚层(如 S1234 和 S4213)放置在固定端的情况。尤其在高速冲击荷载作用下, 这种现象更为显著(图 8(c))。这说明把相对弱的蜂窝层放置在固定端可以降低传递到被保护结构中的应力水平, 从而达到有效保护结构构件的目的。

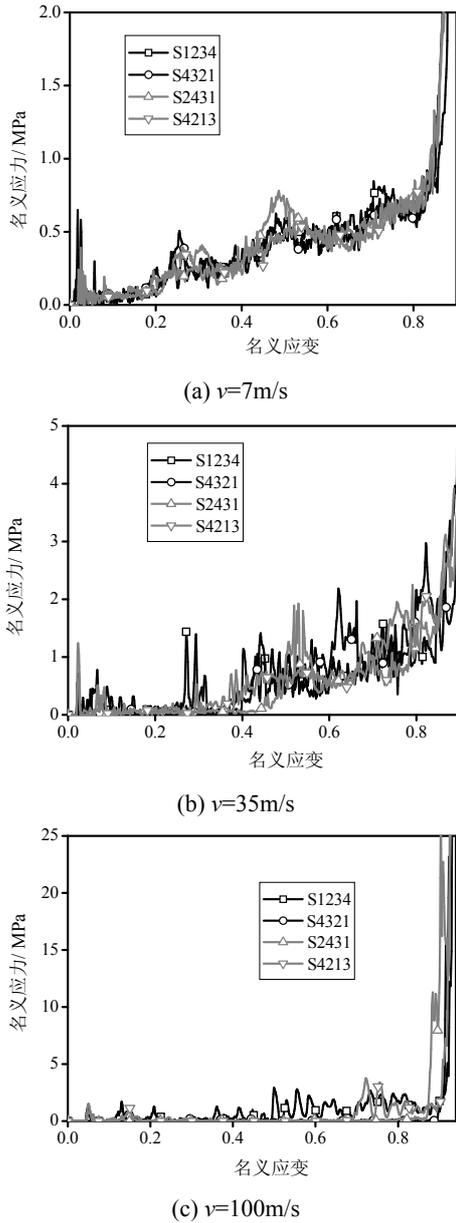


图 8 密度梯度蜂窝材料在固定端的名义应力-应变曲线  
Fig.8 Nominal stress-strain curves for density graded honeycombs at the supporting end

2.2 密度梯度蜂窝材料的能量吸收特性

高的能量吸收能力是多胞金属的重要特性之一。而评估多胞材料能量吸收能力大小的一个重要指标就是单位质量的能量吸收率(即比能量)。单位质量材料所吸收的能量  $W_m$  可定义为<sup>[10]</sup>:

$$W_m = \frac{W_v}{\Delta\rho\rho_s} \tag{4}$$

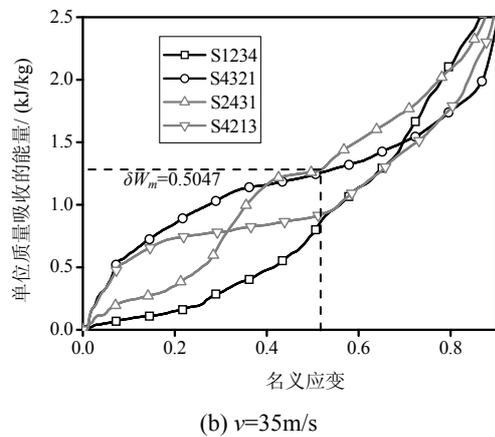
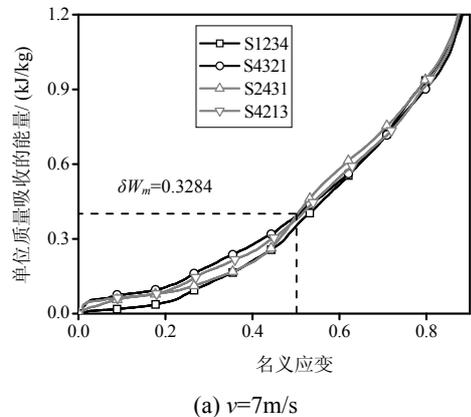
其中:

$$W_v = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon)d\varepsilon \tag{5}$$

为材料单位体积所吸收的能量;  $\Delta\rho$ 为多胞材料的相对密度;  $\rho_s$ 为基体材料的密度;  $\varepsilon_d$ 为密实应变, 可

由名义应力再次达到初始应力峰值时所对应的应变确定。

基于式(4)和式(5), 图 9 给出了不同密度梯度蜂窝材料单位质量的能量吸收率与名义应变的关系。如图 9(a)所示, 在低速冲击荷载作用下( $v=7m/s$ ), 密度梯度对蜂窝材料的能量吸收影响很小。随着冲击速度的增加, 惯性效应增强, 不同密度梯度蜂窝材料能量吸收情况发生了变化。但由于各试件相对密度不变(表 1), 单位质量蜂窝材料所吸收总的能量基本相同。此外, 在高速冲击时, 把较厚层(如 S4321 和 S4213)放置在冲击端能够提高初始压缩阶段材料的能量吸收能力(图 9), 但此时初始应力峰值也相应的提高了(图 7)。而对于试件 S2431, 在低速冲击荷载作用下( $v=7m/s$ ), 当名义应变  $\varepsilon=0.5$  时, 试件仅吸收了整体能量的 32.84%( $\delta W_m$ =所吸收的能量/整体吸收的能量)。随着冲击速度的增加( $v=35m/s$ ), 试件已吸收了整体能量的 50.47%。当冲击速度超过或接近冲击波速度( $v=100m/s$ )时, 试件却吸收了整体能量的 66%。计算结果表明, 冲击速度的增加将提高蜂窝材料初始冲击阶段的能量吸收能力。通过调整密度梯度的变化, 材料的能量吸收能力可以得到有效的控制。



(a)  $v=7m/s$   
(b)  $v=35m/s$

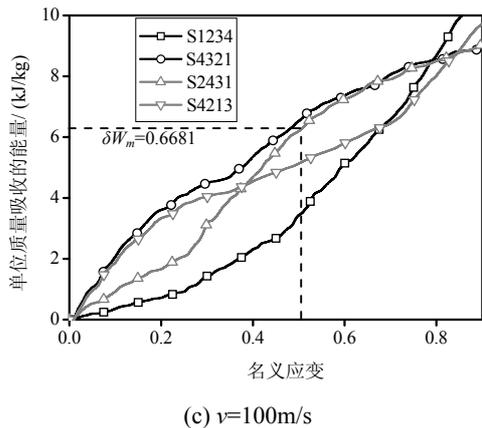


图9 不同冲击速度下密度梯度蜂窝材料的能量吸收特性  
Fig.9 Energy absorption per mass for density graded honeycombs under different impact velocities

### 3 结论

本文讨论了不同冲击荷载作用下密度梯度对六边形蜂窝材料面内冲击特性的影响, 计算结果表明:

(1) 密度梯度的不同, 使得蜂窝材料的局部变形模式发生了变化。

(2) 在面内冲击荷载作用下, 密度梯度蜂窝材料的动力响应表现出分段特性。将较弱胞元层放置在冲击端能够有效地降低初始应力峰值, 避免结构的过载破坏; 将较弱胞元层放置在固定端能够降低传递到被保护构件中的应力水平, 达到保护结构构件的目的。

(3) 单位质量蜂窝材料的能量吸收与密度梯度有关。在低速冲击荷载作用下, 密度梯度的影响可以忽略。随着冲击速度的增加, 通过调整密度梯度的变化, 可以有效地控制材料的能量吸收特性。

本文对密度梯度蜂窝材料的动态响应以及能量吸收特性的研究为蜂窝材料的动力学优化设计提供了参考, 但关于密度梯度与多胞材料动态响应特性更深层的探讨还有待于进一步展开。

### 参考文献:

- [1] Lu G X, Yu T X. Energy absorption of structures and materials [M]. Cambridge: CRC Press, Woodhead Publishing Limited, 2003: 8—18.
- [2] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structure and properties [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 87—148.
- [3] Hönig A, Stronge W J. In-plane dynamic crushing of honeycombs. Part I: Crush band initiation and wave trapping [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(8): 1665—1696.
- [4] 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.
- [5] Zou Z, Reid S R, Tan P J, et al. Dynamic crushing of honeycombs and features of shock fronts [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 165—176.
- [6] Zheng Z J, Yu J L, Li J R. Dynamic crushing of 2D cellular structures: A finite element study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1/2/3/4): 650—664.
- [7] Ajdaria A, Canavanb P, Nayeb-Hashemia 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.
- [8] Gupta N. A functionally graded syntactic foam material for high energy absorption under compression [J]. Materials Letters, 2007, 61(4/5): 979—982.
- [9] Liang C, 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.
- [10] Kooistra G W, Deshpande V S, Wadley H N G. Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminum [J]. Acta Materialia, 2004, 52(14): 4229—4237.