

文章编号: 1000-4750(2016)02-0172-07

功能梯度蜂窝材料的面内冲击性能研究

何 强, 马大为, 张震东, 姚 琳

(南京理工大学机械工程系, 江苏, 南京 210094)

摘 要: 根据功能梯度特性的概念, 建立了具有递变屈服强度梯度特性的圆形蜂窝结构数值仿真模型。在此模型的基础上详细讨论了递变屈服强度梯度和冲击速度对圆形蜂窝材料面内冲击性能的影响。研究结果表明递变梯度值对蜂窝结构的变形模式有较大影响。通过合理地选择蜂窝结构的递变屈服强度梯度值, 进入被保护结构的应力值明显降低, 蜂窝材料的能量吸收能力也得到有效控制。该结果能为完善屈服强度梯度蜂窝材料的研究和设计提供理论指导。

关键词: 蜂窝材料; 屈服强度梯度; 平台应力; 变形模式; 能量吸收

中图分类号: O347 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.0392

RESEARCH ON THE IN-PLANE DYNAMIC CRUSHING OF FUNCTIONALLY GRADED HONEYCOMBS

HE Qiang, MA Da-wei, ZHANG Zhen-dong, YAO Lin

(Department of Mechanical Engineering, NanJing University Of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: Based on the concept of functionally gradient characteristics, a numerical simulation model of honeycombs with graded yield stress is developed. The effects of graded yield stress and impact velocity on the in-plane impact performance are discussed in detail. The research results show that the deformation modes are dependent on the values of graded yield stress. Through proper adjustment of the yield stress gradient, the values of the stress transmitted into the structures can be greatly reduced and the energy absorption can be controlled effectively. These results can provide theoretical guidance for the study and design of yield stress graded honeycombs.

Key words: honeycomb; graded yield stress; plateau stress; deformation modes; energy absorption

多孔金属材料具有很好的能量吸收特性, 所以它可以用来制造能量吸收器、减震缓冲器等应用于机械工程和车辆工程。当它们受到突然的冲击时, 蜂窝材料能够吸收大量的冲击能量。近年来, 研究人员开始关注对功能梯度蜂窝材料动力学特性的研究。Karagiozova 等^[1-2]、Hu 等^[3]通过对圆形蜂窝结构变形特征的研究发现圆形胞元的几何尺寸(壁厚和半径)对其动力学特性有较大影响; Ali 等^[4]研

究了低速冲击下密度梯度六边形蜂窝材料的面内冲击性能; 刘颖和张新春等^[5-7]通过改变单个胞元的结构尺寸来实现梯度大小和排布的控制, 讨论了密度梯度对蜂窝结构能量吸收性能的影响; 吴鹤群等^[8]研究了密度梯度的大小对相同密度排布蜂窝材料吸能特性的影响; Ajdari 等^[9]运用有限元和理论方法研究了密度梯度 Voronoi 蜂窝结构在单轴和双轴面内冲击下的力学性能。

收稿日期: 2014-05-14; 修改日期: 2014-08-04

基金项目: 国防基础科研项目(B2620110005)

通讯作者: 何 强(1989—), 男, 江苏人, 博士生, 主要从事冲击动力学研究(E-mail: 18260098162@163.com).

作者简介: 马大为(1953—), 男, 北京人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构动力学研究(E-mail: ma-dawei@mail.njust.edu.cn);

张震东(1988—), 男, 河南人, 博士生, 主要从事冲击动力学研究(E-mail: zzd1157@163.com);

姚 琳(1988—), 男, 山东人, 博士生, 主要从事结构动力学研究(E-mail: yaolinxueshu@126.com).

蜂窝的动力学特性与材料的屈服强度值密切相关,而铝质材料特性受制备方法及其制备工艺等因素影响。随着生产工艺的逐步成熟,能够通过一定的工艺方法改变它的加工性能和强度(主要为屈服强度)^[10],这就为实现蜂窝结构吸能特性的控制提供了可能。Shen 等^[11-12]对具有屈服强度梯度特性的六边形胞元杆进行了轴向压缩力学性能研究。何强等^[13]研究了分层屈服强度梯度圆形蜂窝材料的面内冲击性能。本文建立了具有递变屈服强度梯度特性的圆形蜂窝结构数值仿真模型,详细讨论了递变屈服强度梯度和冲击速度对圆形蜂窝材料面内冲击性能的影响,以期进一步完善屈服强度梯度蜂窝材料的研究和设计理论。

1 计算模型

如图 1 所示是递变屈服强度梯度蜂窝结构受面内冲击载荷作用的计算模型。试件由半径和壁厚相同的圆形胞元组成。每个胞元的壁厚为 $t=0.15\text{ mm}$,半径为 $R=3\text{ mm}$,整体尺寸 $L_1 \times L_2=96\text{ mm} \times 96\text{ mm}$,面外厚度为 $b=10\text{ mm}$ 。蜂窝材料为金属铝,采用理想弹塑性模型。材料的主要参数为:密度 $\rho_s=2700\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E_s=69\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。运用有限元分析软件 ABAQUS 对蜂窝材料进行面内冲击特性研究,使用 S4R 壳单元进行离散,共有 50827 个网格单元。吸能过程中可能接触的表面全部设置为自接触表面。蜂窝外表面及上、下刚性板均视为光滑,相互接触且无摩擦。当上部刚性板以定速 V 沿 y 方向运动时,约束材料节点面外方向(z 方向)位移^[6-8]及下部刚性板的各方向自由度。

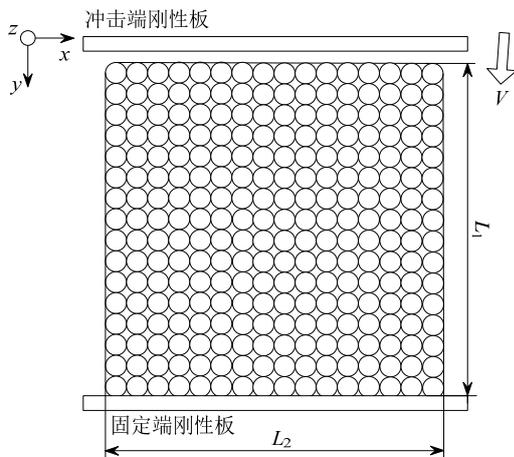


图 1 递变屈服强度梯度蜂窝计算模型示意图
Fig.1 Diagrammatic sketch of yield stress gradient circular honeycombs

本文假设蜂窝材料各层胞元的屈服强度值呈梯度变化,递变屈服强度梯度值由下式给出,即:

$$g = \frac{\Delta\sigma_{ys}}{\sigma_{ave} l_{layer}} \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma_{ys}$ 为相邻层材料的屈服强度差值; σ_{ave} 为蜂窝结构各层材料屈服强度的平均值; l_{layer} 是单个胞元在 y 方向的长度。

为方便揭示递变屈服强度梯度变化给蜂窝材料动力冲击特性带来的影响,需先定义相关无量纲参数,即:

$$\theta \equiv gL_1 = n \frac{\Delta\sigma_{ys}}{\sigma_{ave}} \quad (2)$$

式中, n 是蜂窝材料的层数,无量纲梯度值在此处定义为冲击端胞元层和固定端胞元层材料屈服强度差值与平均屈服强度值的比值。

梯度蜂窝材料的特征速度 C_p :

$$C_p \equiv \sqrt{\sigma_0 / \rho_0} \quad (3)$$

将准静态塑性坍塌应力 σ_0 和圆形蜂窝结构密度 ρ_0 ^[14], 即:

$$\sigma_0 = N \left(\frac{t}{R} \right)^2 \sigma_{ys} \quad (4)$$

$$\rho_0 = \frac{\pi t}{2R} \rho_s \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(3), 得:

$$C_p \equiv \sqrt{\frac{0.906}{\pi} \left(\frac{t}{R} \right) \frac{\sigma_{ave}}{\rho_s}} \quad (6)$$

其中: σ_{ys} 为屈服强度值,参考文献[13],取特定参数 $N=0.453$ 。

无量纲速度 v , 即:

$$v = V / C_p = V / \sqrt{\frac{0.906}{\pi} \left(\frac{t}{R} \right) \frac{\sigma_{ave}}{\rho_s}} \quad (7)$$

根据选定的不同 θ 值分别进行分析计算,为蜂窝结构各层母体材料赋呈梯度变化的屈服强度值,平均屈服强度 $\sigma_{ave}=76\text{ MPa}$,将其代入式(6),得到 $C_p=20.1\text{ m/s}$ 。

2 计算结果与分析

对撞击刚性板施加恒定的速度撞击蜂窝材料,获得蜂窝结构的撞击变形轮廓图,从而研究递变屈服强度梯度圆形蜂窝结构在动力载荷作用下的变形模式。

2.1 递变屈服强度梯度蜂窝变形模式

2.1.1 正梯度变形模式

当递变梯度值为正的时候，从冲击端到固定端，各层蜂窝材料的屈服强度值逐渐变大。图 2~图 3 给出了 $\theta=1.5$ 时，不同冲击速度下蜂窝材料的变形模式。低速冲击时($V=3$ m/s)，其变形主要受各层蜂窝材料准静态平台应力的分布影响。因为最弱层位于冲击端，初始坍塌变形发生在冲击端。随着相对压缩量的增加，蜂窝材料中部距离冲击端较远层的胞元将发生变形，使得整个变形模式呈正置“V”型。当冲击速度进一步增加，惯性效应明显增强，局部变形带呈“1”型，从冲击端到固定端的蜂窝胞元逐层发生压溃变形，与均匀圆形蜂窝受面内低速冲击载荷作用下的变形模式相似。

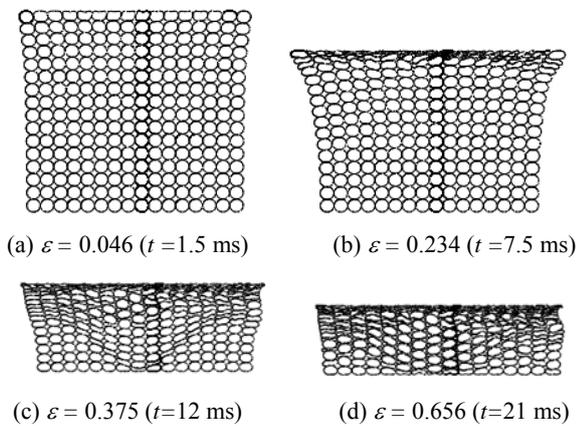


图 2 $\theta=1.5, V=3$ m/s 时蜂窝变形轮廓图
Fig.2 Deformation profiles of honeycomb when $\theta = 1.5, V=3$ m/s

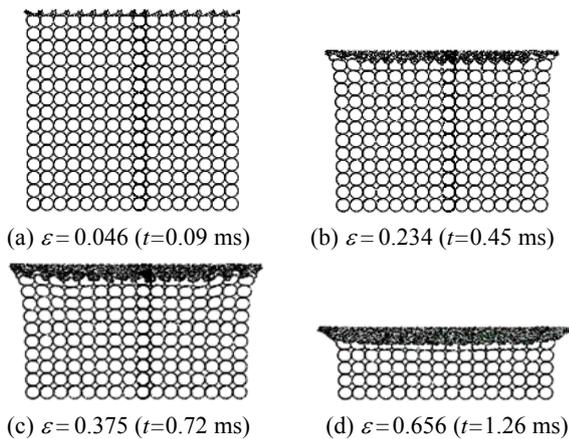


图 3 $\theta=1.5, V=50$ m/s 时蜂窝变形轮廓图
Fig.3 Deformation profiles of honeycomb when $\theta = 1.5, V=50$ m/s

2.1.2 负梯度变形模式

当递变梯度值为负的时候，屈服强度最大的蜂窝材料层位于冲击端，此时蜂窝材料的变形模式比

正屈服强度梯度蜂窝材料复杂。图4~图6给出了 $\theta=-1.5$ 时，蜂窝材料在不同冲击速度下的变形模式。低速冲击时($V=3$ m/s)，塑性坍塌首先发生在固定端，靠近冲击端的胞元未发生变形。随着刚性板的下压，出现一个倒置的“V”型变形带，当冲击端刚性板继续下压至变形带的顶部时，胞元将从固定端到冲击端不断坍塌变形直到整个蜂窝结构被压实。 $V=30$ m/s时，虽然靠近冲击端的蜂窝胞元具有最大的屈服强度，但初始塑性坍塌变形仍然发生在冲击端，固定端胞元却未发生变形。紧接着，固定端的胞元也发生坍塌变形，并且出现了两个局部变形带，蜂窝试件的整体变形呈现出一个正置的“V”型，“V”型变形带不断下移，当其最底部接触到固定端刚性板后，蜂窝材料从固定端到冲击端被逐层压实。当冲击速度增大为150 m/s时，与正屈服强度梯度蜂窝变形模式相同，只有一个呈“1”型状的局部变形带，从冲击端到固定端的蜂窝胞元逐

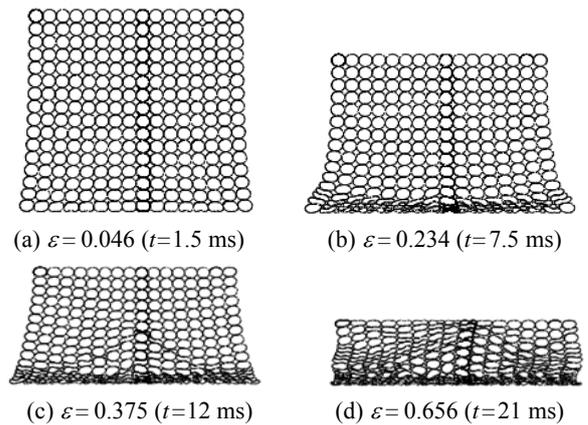


图 4 $\theta = -1.5, V=3$ m/s 时蜂窝变形轮廓图
Fig.4 Deformation profiles of honeycomb when $\theta = -1.5, V=3$ m/s

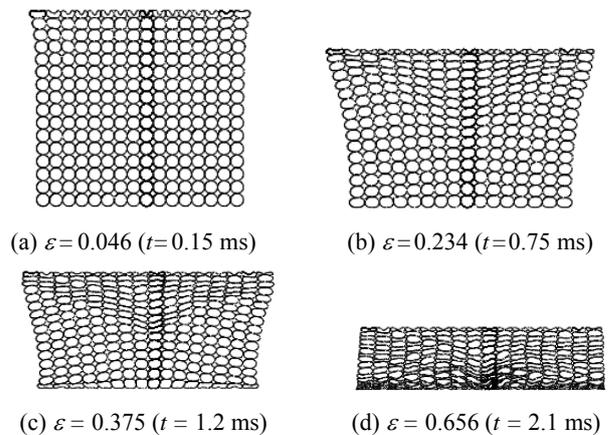


图 5 $\theta = -1.5, V=30$ m/s 时蜂窝变形轮廓图
Fig.5 Deformation profiles of honeycomb when $\theta = -1.5, V=30$ m/s

层发生压溃变形。而此时仍能发现靠近固定端的胞元也产生了微小的塑性坍塌变形。

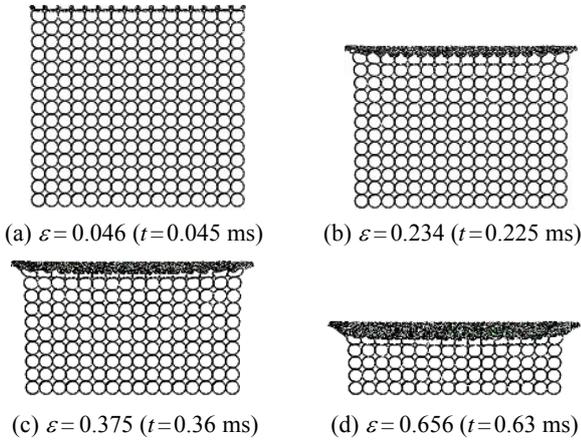


图 6 $\theta = -1.5, V=100$ m/s 时蜂窝变形轮廓图
Fig.6 Deformation profiles of honeycomb when $\theta = -1.5, V=100$ m/s

2.1.3 变形模式分类图

通过对不同 θ 值递变梯度蜂窝结构受不同冲击速度作用下变形模式的研究, 结果表明正屈服强度梯度蜂窝材料的变形模式分为两种, 而负屈服强度梯度蜂窝材料的变形模式有三种。图2~图6则给出了几种典型的变形轮廓图。

图7中能够查找出不同无量纲梯度值下, 蜂窝变形模式发生转变时的无量纲临界速度值。

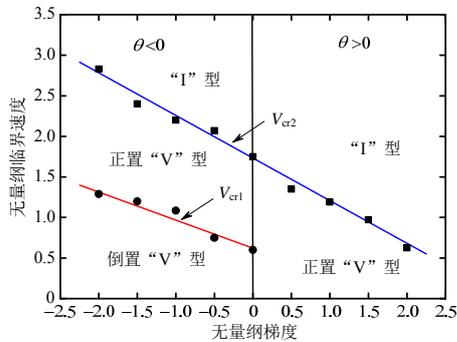


图 7 无量纲临界速度与梯度值关系图

Fig.7 Dimensionless critical velocities versus gradients

根据无量纲梯度、厚径比、平均屈服强度以及基体材料密度得到变形模式转变时临界速度的经验公式:

$$V_{cr1} = (-0.346\theta + 0.621) \sqrt{\frac{0.906 \left(\frac{t}{R}\right) \sigma_{ave}}{\pi \rho_s}} \quad (8)$$

$$V_{cr2} = (-0.525\theta + 1.732) \sqrt{\frac{0.906 \left(\frac{t}{R}\right) \sigma_{ave}}{\pi \rho_s}} \quad (9)$$

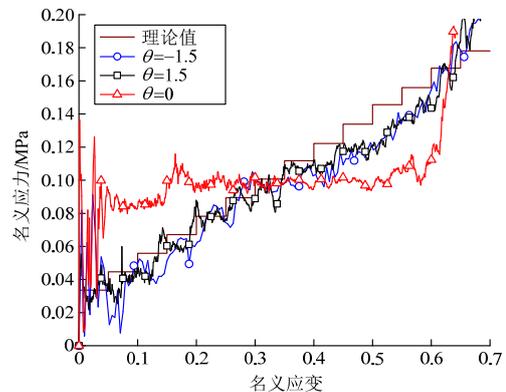
2.2 递变屈服强度梯度蜂窝冲击端动态应力

如图8所示为蜂窝冲击端名义应力-应变曲线。

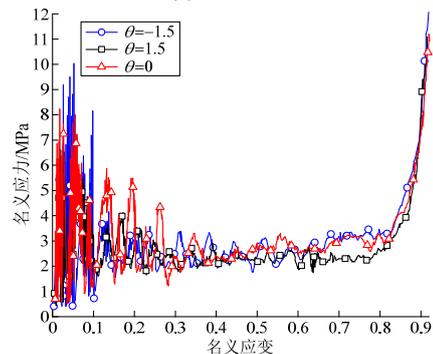
图中名义应力 σ 为上部刚性板作用在蜂窝材料上的压缩反力 F 与初始截面积 $A(L_2 \times b)$ 之比, 名义应变 ϵ 为冲击方向压缩位移与初始长度 L_1 的比值。理论值则根据冲击载荷作用下蜂窝材料塑性坍塌应力的理论公式^[13]计算得出, 即:

$$\sigma_d = 0.453 \left(\frac{t}{R}\right)^2 \sigma_{ys} + \frac{\rho_0}{1 - 0.7\pi \frac{t}{R}} V^2 \quad (10)$$

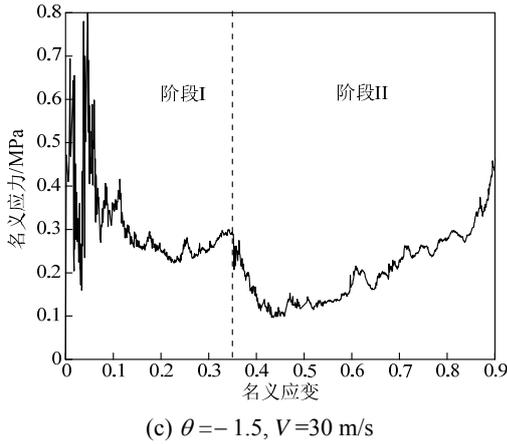
在低速冲击载荷作用下 ($V=3$ m/s), $\theta = 1.5$ (正置“V”型) 与 $\theta = -1.5$ (倒置“V”型) 两种工况下的变形模式不同, 但此时惯性影响相对微弱, 试件均表现为从最弱层到最强层逐层压缩变形, 因此两种工况下名义应力-应变曲线基本相同, 无量纲梯度 θ 几乎无影响。蜂窝结构各层胞元的屈服强度值不同, 因此每一层胞元的准静态塑性坍塌应力均发生变化。随着刚性板相对压缩量的增加, 冲击端的名义应力值呈梯度增大。在蜂窝结构压缩变形的最后阶段, 冲击端应力值小于理论计算值, 其主要原因是 $\theta = 1.5$ 时梯度蜂窝材料变形带下方一些靠近固定端的胞元以及 $\theta = -1.5$ 时梯度蜂窝材料变形带上方一些靠近冲击端的胞元也发生了变形(图2(d)和图4(d))。式(10)得出的理论分析值与有限元分析结果能够较好地吻合, 说明此时一维冲击波理论对递变屈服强度梯度蜂窝材料同样适用。



(a) $V=3$ m/s



(b) $V=100$ m/s



(c) $\theta = -1.5, V = 30 \text{ m/s}$

图 8 递变屈服强度梯度蜂窝冲击端动力学响应
Fig.8 Dynamic properties of yield stress graded circular honeycombs at crushing end

随着冲击速度的继续增加($V=100 \text{ m/s}$), 惯性效应影响显著, $\theta=1.5$ 与 $\theta=-1.5$ 两种工况下局部变形带均呈“I”型, 从冲击端到固定端的蜂窝胞元逐层发生压溃变形, 冲击端名义应力-应变曲线变化趋势皆与 $\theta=0$ 时相似。根据理论公式(10)计算出高速冲击下(确保蜂窝材料变形模式为“I”型)递变梯度蜂窝材料动态冲击平台应力的理论值如图9中实线所示, 通过比较可以发现理论公式(10)得到的应力值略大于仿真值, 但能够近似预测递变梯度蜂窝受高速冲击载荷作用下的平台应力, 表明经典一维冲击波理论在递变屈服强度梯度蜂窝处于“I”型变形模式时同样也适用。

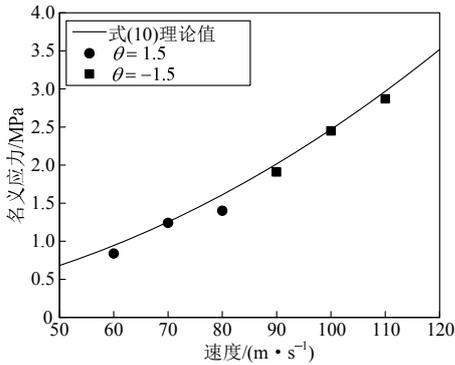


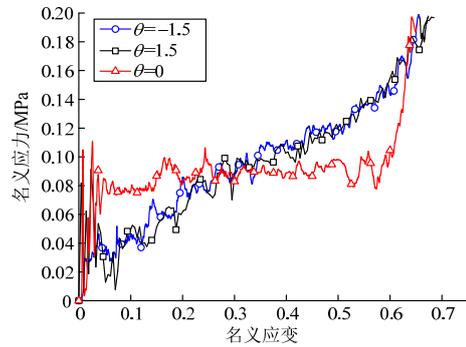
图 9 不同冲击速度下递变屈服强度梯度蜂窝平台应力值
Fig.9 Plateau stress of yield stress graded circular honeycombs under different loading velocities

当 $\theta = -1.5, V = 30 \text{ m/s}$ 时, 递变屈服强度梯度蜂窝材料变形模式为过渡的正置“V”型。图8(c)给出了此时冲击端的名义应力-应变曲线, 相应的变形轮廓图如图5所示。整个压缩变形过程可以分为两个阶段。起初, 变形发生在冲击端(较强层), 冲击端应力值较大。随着相对压缩量的增大, 冲击端胞元

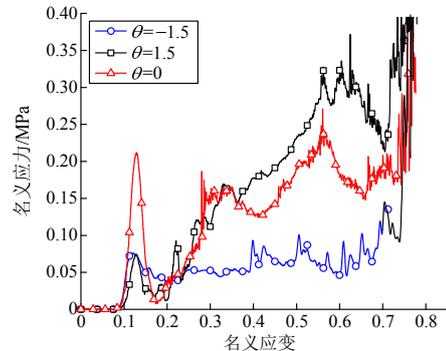
几乎停止变形, 固定端的胞元(较弱层)开始发生坍塌变形, 形成了一个新的变形带。因此, 在进入阶段II时, 冲击端应力值突然减小, 其值与新变形带(紧靠固定端)的准静态平台应力值接近。变形过程中出现两个变形带, 此时通过式(10)计算得出的动态冲击平台应力理论值与有限元分析值无法吻合。

2.3 递变屈服强度梯度蜂窝固定端动态应力

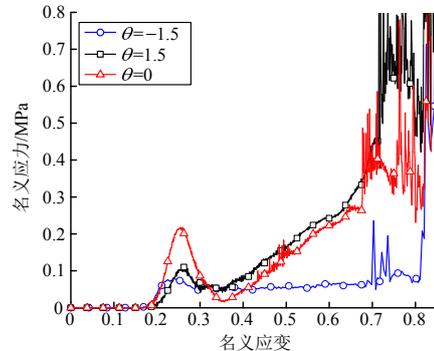
图10给出了动态冲击作用下固定端的名义应力-应变曲线。由图可知, 固定端出现了小的应力波峰, 且其响应滞后于冲击端, 并且这种滞后效应会随着冲击速度的增大而变得更加明显。受低速冲击载荷作用时($V=3 \text{ m/s}$), 递变梯度的影响几乎可以忽略。



(a) $V = 3 \text{ m/s}$



(b) $V = 30 \text{ m/s}$



(c) $V = 100 \text{ m/s}$

图 10 递变屈服强度梯度蜂窝固定端动力学响应
Fig.10 Dynamic properties of yield stress graded circular honeycomb at supported end

当 $V=30\text{ m/s}$ 时, 负屈服强度梯度蜂窝结构固定端刚性板的压缩反力要低于正屈服强度蜂窝结构。这种现象在高速冲击时会变得更加明显。这说明通过合理地选择蜂窝结构的递变屈服强度梯度值, 能够使进入被保护结构的应力值明显降低, 从而起到有效保护结构的目的。

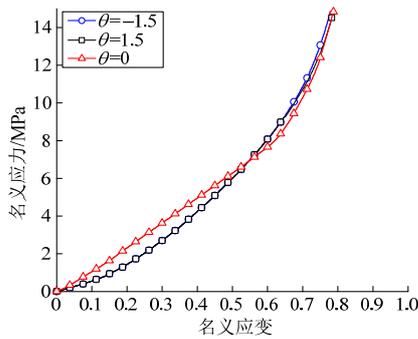
2.4 递变屈服强度梯度蜂窝能量吸收特性

图 11 为单位质量材料吸收的能量 W_m ^[15], 即:

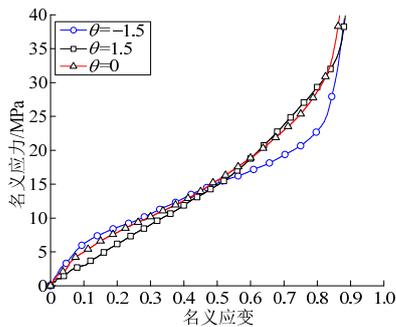
$$W_m = \frac{W_V}{\nabla \rho \rho_s} \quad (11)$$

式中, $W_V = \int_0^{\epsilon_d} \sigma d\epsilon$ 为单位体积吸收能量, ϵ_d 为密实应变。低速冲击时($V=3\text{ m/s}$), 惯性效应的影响几乎可以忽略, 梯度蜂窝材料均表现为由最弱层到最强层的逐层压缩变形模式。在初始冲击压缩变形阶段, 均匀蜂窝材料的能量吸收要强于递变梯度蜂窝。

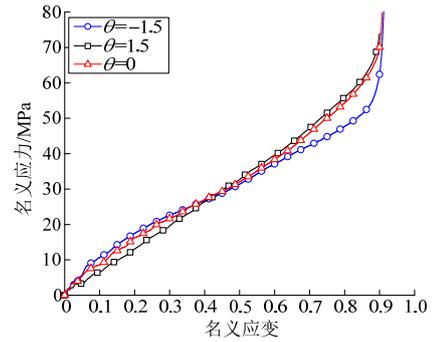
当冲击速度进一步增大($V=50\text{ m/s}$), 惯性效应对蜂窝结构变形模式的影响增强。负屈服强度梯度蜂窝材料的变形首先发生在冲击端(最强层), 导致初始压缩变形阶段, 其能量吸收能力要强于均匀蜂窝材料; 正屈服强度梯度蜂窝材料的变形也首先发生在冲击端(最弱层), 初始压缩变形阶段, 其能量吸收能力较均匀蜂窝材料要弱。图11同样能观察到, 由于各梯度蜂窝材料的相对密度保持不变, 不同冲击速度作用下, 单位质量蜂窝材料所吸收总的能量基本相同。



(a) $V=3\text{ m/s}$



(b) $V=50\text{ m/s}$



(c) $V=100\text{ m/s}$

图 11 不同冲击速度下递变屈服强度梯度蜂窝吸收的能量

Fig.11 Absorbed energy with respect to impact velocity for yield stress graded circular honeycombs

3 结论

本文主要从变形模式、动态冲击平台应力以及能量吸收能力3个方面研究了递变屈服强度梯度和冲击速度对圆形蜂窝结构动力学特性的影响, 得到以下结论:

(1) 冲击载荷作用下, 正屈服强度梯度蜂窝材料的变形模式可归纳为正置“V”型和“I”型, 而负屈服强度梯度蜂窝材料的变形可归纳为倒置“V”型、正置“V”型和“I”型3种变形模式。并通过分析大量仿真结果得到变形模式转变时临界速度的经验公式。

(2) 低速冲击时, 梯度蜂窝结构冲击端名义应力-应变曲线呈梯度变化, 且平台应力值与理论值吻合较好; 高速冲击时, 主要受惯性影响, 其平台应力值也能与理论值很好地吻合; 当负梯度蜂窝材料处于正置“V”型变形模式时, 其应力曲线分为两个阶段, 此时, 理论分析值无法预测其平台应力。

(3) 高速冲击载荷作用下, 当梯度蜂窝材料变形模式中只具有一个局部变形带时, 一维冲击波理论同样适用。

(4) 屈服强度梯度值为负时, 进入被保护结构的应力值明显降低, 从而起到有效保护结构的目的。通过调整屈服强度梯度值, 可有效控制能量吸收过程, 当 $\theta < 0$ 时, 屈服强度梯度蜂窝材料以前程吸能为主; 当 $\theta > 0$ 时以后程吸能为主。

参考文献:

[1] Karagiozova D, Yu T X. Post-collapse characteristics of ductile circular honeycombs under in-plane compression [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47(4/5): 570-602.
 [2] Karagiozova D, Yu T X. Strain localization in circular

- honeycombs under in-plane biaxial quasi-static and low-velocity impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(8): 753–770.
- [3] Hu L L, Yu T X, Gao Z Y, et al. The inhomogeneous deformation of polycarbonate circular honeycombs under in-plane compression [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2008, 50(7): 1224–1236.
- [4] Ali M, Qamhiyah A, Flugrad D, et al. Theoretical and finite element study of a compact energy absorber [J]. *Advances in Engineering Software*, 2008, 39(2): 95–106.
- [5] 刘颖, 何章权, 吴鹤翔, 等. 分层递变蜂窝材料面内冲击性能的研究[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(3): 225–231.
Liu Ying, He Zhangquan, Wu Hexiang, et al. In-plane dynamic crushing of functionally layered metal honeycombs [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(3): 225–231. (in Chinese)
- [6] 张新春, 刘颖. 密度梯度蜂窝材料动力学性能研究[J]. *工程力学*, 2011, 29(8): 372–377.
Zhang Xinchun, Liu Ying. Research on the dynamic crushing of honeycombs with density gradient [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 29(8): 372–377. (in Chinese)
- [7] Liu Ying, Wu Hexiang, Wang Bin. Gradient design of metal hollow sphere (MHS) foams with density gradients [J]. *Composites: Part B*, 2012, 43(3): 1346–1352.
- [8] 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): 163–167.
Wu Hexiang, Liu Ying. Influence of density gradient variation on mechanical performance of density-graded honeycomb materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(2): 163–167. (in Chinese)
- [9] Ajdari A, Canavan P K. Mechanical properties of functionally graded 2D cellular structures: A finite element study [J]. *Material Science Engineering A*, 2009, 499(1/2): 434–439.
- [10] 肖亚庆. 铝加工技术实用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社发行部, 2005: 3–32.
Xiao Yaqing. *Manual of aluminum processing technology* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Publishing Department, 2005: 3–32. (in Chinese)
- [11] Shen C J, Yu T X, Lu G. Double shock mode in graded cellular rod under impact [J]. *International Journal of Solids and Structure* 2013, 50(1): 217–233.
- [12] Shen CJ, Lu G, Yu T X. Dynamic behavior of graded honeycombs-A finite element study [J]. *Composite Structure* 2013, 98: 282–293.
- [13] 何强, 马大为, 张震东. 分层屈服强度梯度蜂窝材料的动力学性能研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(4): 191–196.
He Qiang, Ma Dawei, Zhang Zhendong. Research on dynamic crushing of layered yielding stress-gradient circular honeycombs [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(4): 191–196. (in Chinese)
- [14] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular solids: Structures and properties* [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 87–148.
- [15] 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.