

文章编号: 1001-1455(2008)06-0494-09

胞元微拓扑结构对蜂窝材料面内冲击性能的影响*

刘颖, 张新春

(北京交通大学土木工程学院力学系, 北京 100044)

摘要: 研究了面内冲击载荷作用下胞元微拓扑结构对蜂窝材料动态冲击性能的影响。首先, 在胞元边长、厚度一致的条件下, 讨论了不同形状胞元、以及胞元形状相同但排列方式不同的蜂窝材料的动态冲击性能, 并给出了试件及其微结构的动态演化过程。在此基础上, 讨论了胞元微观排列方式对蜂窝材料的能量吸收能力的影响。计算结果表明, 除了胞元基本结构参数(边长、壁厚等), 胞元形状及排布方式也是影响蜂窝材料动态性能的重要因素。由于三角形单胞的稳定性, 三角形填充蜂窝材料与四边形填充蜂窝材料相比, 表现出更强的能量吸收能力。而交错排布则对应着更加均匀的变形和稳定的平台区。同时, 局部拓扑结构的变化, 交错排布的试件在冲击压缩的过程中表现出独特的颈缩现象。此结论将为蜂窝材料微结构的动力学优化设计提供指导和依据。

关键词: 固体力学; 蜂窝材料; 微观排布; 胞元; 变形机制; 冲击性能

中图分类号: O347 **国标学科代码:** 130·15 **文献标志码:** A

1 引言

作为一种轻质的、物理功能与结构功能一体化的新型工程材料, 蜂窝材料被广泛应用于国防、化工、电子、建筑、交通等领域^[1-2]。和实体材料不同, 蜂窝材料的性能不仅取决于基体材料的特性, 而且在很大程度上依赖于胞元的几何拓扑结构。如何建立材料微拓扑结构与其性能间的关系, 进而依据使用需求, 实现蜂窝材料微结构及性能的自主设计, 一直是材料学家和力学家们关注的前沿课题^[1]。研究表明, 一方面, 蜂窝材料的力学性能依赖于胞元的结构几何参数, 例如边长和壁厚等^[2], 另一方面, 胞元的空间拓扑参数, 如棱和面的连接因子、相邻孔穴的数量等, 将随着一种结构到另一种结构的变化而发生变化, 并以重要的方式影响材料的力学行为。尤其是在冲击载荷的作用下, 载荷的高频成分将控制结构的动力响应, 胞元的空间拓扑结构对于材料局部动态应力演变的影响变得越来越显著。因此, 除了结构几何参数外, 如何建立胞元在局部空间的拓扑参数与材料动力学响应间的关系, 也是蜂窝材料力学特性描述中的一个重要课题。

目前, 关于蜂窝材料微拓扑结构和材料静态及准静态宏观响应间的关系已基本建立。例如, L. J. Gibson 等^[2] 依托离散微孔结构模型, 在单一孔单元的基础上获得了关于蜂窝材料的基本力学参数; J. L. Grenstedt^[3] 给出了规则周期性多孔体弹性性能的分析模型; J. Hohe 等^[4-5] 研究了六边形、三角形、四边形蜂窝结构的弹性响应; S. Gu 等^[6] 建立了蜂窝材料热耗散系数与胞元拓扑结构的关系等。然而, 关于蜂窝材料的动力学性能, 尽管大量的研究也已展开, 如张铨钊等^[7] 探讨了非均匀泡沫金属材料在冲击载荷作用下的变形模式; Z. J. Zhen 等^[8] 数值研究了不规则性的随机蜂窝结构在面内冲击下的动态力学性能; S. D. Papka 等^[9] 研究了具有圆形截面的聚碳酸酯蜂窝材料的面内压缩特性; D. Ruan 等^[10] 数值讨论了面内冲击荷载作用下六边形填充蜂窝材料的动力学变形机制; Z. Xue 等^[11] 研究了正方形蜂窝内芯的面外动态压缩特性等, 但蜂窝材料微拓扑结构与其动力学响应间的关系还远未建立。胞元空间拓扑结构变化引起的材料中丰富的动力学演化特性还有待进一步研究。

* 收稿日期: 2007-05-09; 修回日期: 2007-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(10302002, 10672018)

作者简介: 刘颖(1973—), 女, 博士, 副教授。

本文中针对具有相同结构几何参数(边长和壁厚)、不同空间拓扑参数(棱边连接因子)的蜂窝材料,数值讨论了其不同冲击速度下独特的变形模式,以及微拓扑结构对材料能量吸收特性的影响,以期揭示蜂窝材料的宏观动力学响应与胞元微排布方式之间的内在联系。

2 计算模型

蜂窝材料的刚性板冲击计算模型如图 1 所示。蜂窝试件的尺寸为 $a \times b = 58.5 \text{ mm} \times 70.2 \text{ mm}$, 分别用规则及交错排布的三角形和正方形胞元填充, 填充过程中保证胞元边长和厚度一致。图 2 为蜂窝试件胞元填充方式示意图。对于三角形填充试件, x 、 y 方向的胞元数目分别为 13、18; 对于正方形填充试件, x 、 y 方向的胞元数目为 13、16。其中, 胞元边长 $l = 4.5 \text{ mm}$, 胞壁厚度 $h = 0.5 \text{ mm}$ 。基体材料为金属铝, 采用理想弹塑性模型, 弹性模量为 69 GPa, 屈服应力为 76 MPa。本文中应用 ANSYS/LSDYNA 进行蜂窝材料冲击动力学特性计算。计算中选用壳单元 SHELL163。胞元的每条边由 12 个单元构成。计算中采用单面自动接触算法。为了收敛的需要, 沿厚度方向定义 5 个积分点。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。

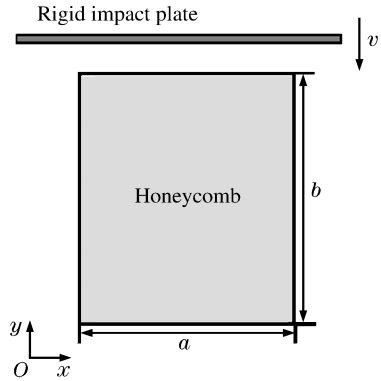


图 1 蜂窝材料的冲击加载示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch for honeycombs under in-plane impacting

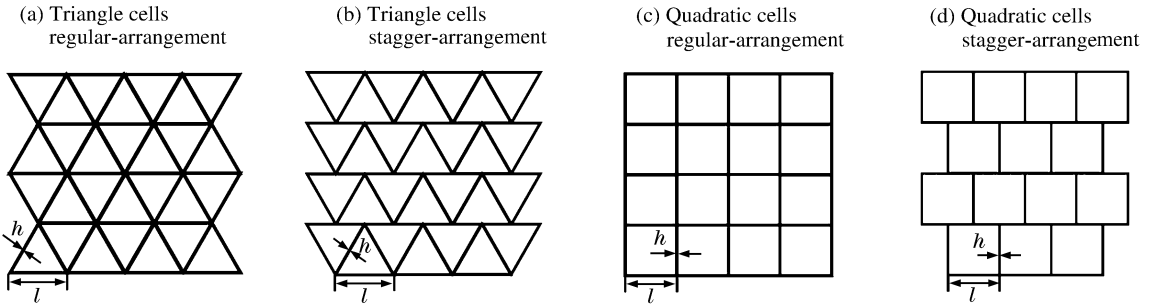


图 2 蜂窝材料胞元填充方式示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of cell filling modes in honeycombs

为了研究加载速度对蜂窝材料动态力学性能的影响, 计算中采用了不同的加载速度 v 。为了和正六边形填充蜂窝材料的计算结果进行对比, 计算中采用了与文献[10]相同的边界条件, 即当刚性板沿 y 方向冲击蜂窝试件时, 蜂窝试件的底端固定, 左侧和右侧为自由面。由于胞元的排布方式不同, 蜂窝材料的棱边连接因子发生了变化。对于三角形胞元规则排列(图 2(a)), 棱边连接因子为 6; 而三角形胞元交错排布时(偶数排左移半个边长, 图 2(b)), 连接因子变为 4。对于正方形胞元规则排列(图 2(c)), 棱边连接因子也为 4, 但是边与边之间的夹角为 90° ; 而正方形胞元交错排布时(偶数排左移半个边长, 图 2(d)), 棱边连接因子变为 3, 与正六边形填充的蜂窝材料的棱边连接因子数相同, 但此时边与边之间夹角为 90° , 而不是 120° 。

3 计算结果和讨论

基于此计算模型, 探讨了胞元形状不同, 或胞元形状相同但排布方式不同的蜂窝材料在刚性板不同冲击速度(5~200 m/s)下的动态响应。综合不同速度下蜂窝材料的变形特征, 图 3~14 中分别给出了速度为 35、70 m/s 时蜂窝材料的动态响应。由于变形规律基本一致, 其他速度下的变性特征在这里不

再具体给出。图中 F 为刚性板作用在试件上的压缩力, $\bar{\delta} = \delta/b$ 为试件沿 y 向的相对压缩量, δ 为沿 y 向试件的压缩位移。计算结果表明, 三角形或四边形填充的蜂窝材料冲击响应规律与一般的多胞材料相同。开始阶段, 材料响应近似于线性, 每个胞元沿对称轴均匀变形。随着材料应力水平的增加, 试件中胞元局部应力超过胞壁的弹性屈曲(或材料的塑性)极限, 弹性屈曲(或塑性铰)形成, 此时达到试件的弹性极限应力峰值。随后, 变形进入平台区, 直至材料逐渐压缩密实^[2]。为了清楚显示试件平台区的应力演化特征, 图中只给出了 $\bar{\delta} = 0 \sim 0.7$ 区间的材料响应。从图中可以看出, 蜂窝材料微拓扑结构的不同引起材料内部局部应力水平演化过程的显著差异, 蜂窝材料的冲击动力学响应表现出不同的特性。

3.1 三角形胞元填充蜂窝材料

3.1.1 三角形胞元规则排布

三角形胞元规则排布蜂窝材料的响应特性如图 3 所示。当应力水平超过弹性极限时(第 1 个峰值), 靠近加载端的三角形胞元斜边中点处逐渐形成塑性铰, 第 1 行胞元发生塑性变形, 蜂窝试件局部软化, 形成局部变形区。随后, 在三角形胞元逐渐变形至近四边形的过程中(图 4), 胞元刚性增加, 应力幅值又逐渐升高, 直至近四边形沿加载方向的孔壁形成塑性铰, 应力达到第 2 个峰值。同时, 第 2 行胞元开始变形。因此, 图 3 中曲线($v = 35 \text{ m/s}$)上第 2~4 个峰值表示靠近加载端的前 3 行胞元进入局部变形区时的应力值。当第 4 行胞元开始变形时, 由于塑性压缩波在固定端反射, 第 2 个局部变形带开始在靠近固定端的 2 层胞元中形成。此时能量几乎完全被材料的二次局部变形带吸收, 试件发生软化, 应力峰值降低, 直至这 2 行胞元完全压缩, 第 1 局部变形带才重新开始压缩, 因此应力峰值间间距加大(第 6、7 个峰值)。随后, 第 1、2 局部变形区中的胞元交替变形。第 1 局部变形区中的胞元处于半压缩状态时, 第 2 局部变形区中的胞元开始变形。第 1 局部变形区内的胞元完全压溃后, 第 2 变形区内的胞元逐渐压溃, 形成新的应力峰值, 直至试件完全压缩密实。

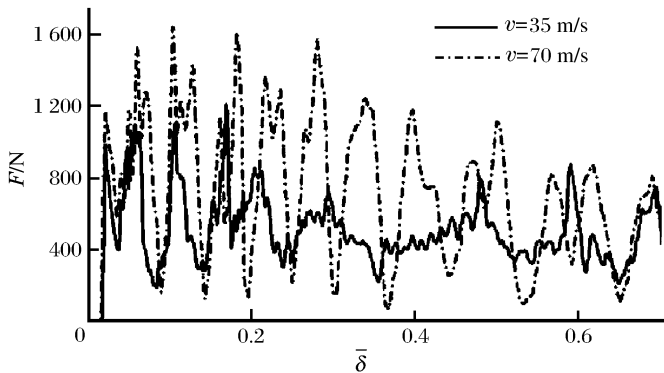


图 3 刚性板不同冲击速度下三角形胞元规则填充蜂窝材料的反力与相对压缩量曲线

Fig. 3 Variation of the reaction forces with the relative compression quantities for honeycombs with regularly-arranged triangle cells under different impact velocities

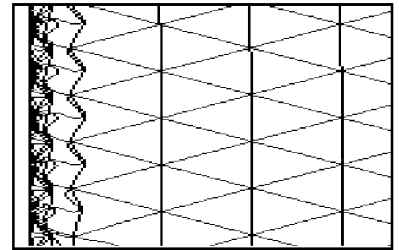


图 4 规则排布填充的蜂窝材料三角形胞元局部变形图

Fig. 4 Local deformation modes for honeycombs regularly-arranged with triangle cells

当刚性板冲击速度 $v = 70 \text{ m/s}$ 时, 蜂窝材料的动态变形过程基本一致, 但变形主要集中在冲击端。这是由于塑性压缩波的波速($v_p \approx 160 \text{ m/s}$)与刚性板的冲击速度的差值减小, 反射塑性波引起的第 2 局部变形区的形成相对向后延迟的结果。如图 3 所示, $v = 70 \text{ m/s}$ 时, 靠近加载端的第 6 行胞元被压溃之后, 二次局部变形带才形成。此外, 二次局部变形带引起的软化阶段亦不如低速冲击时明显。这是由于第 2 局部变形带的形成不能吸收所有的冲击能量, 第 1 局部变形带在第 2 局部变形带变形过程中保持持续压缩的结果。如果冲击速度持续增加, 变形逐渐以第 1 变形区的变形为主, 变形模式不再发生变化。图 5 给出了蜂窝试件不同压缩阶段的典型变形图。冲击速度不同引起的基本变形特性的变化在图中可明显看出。

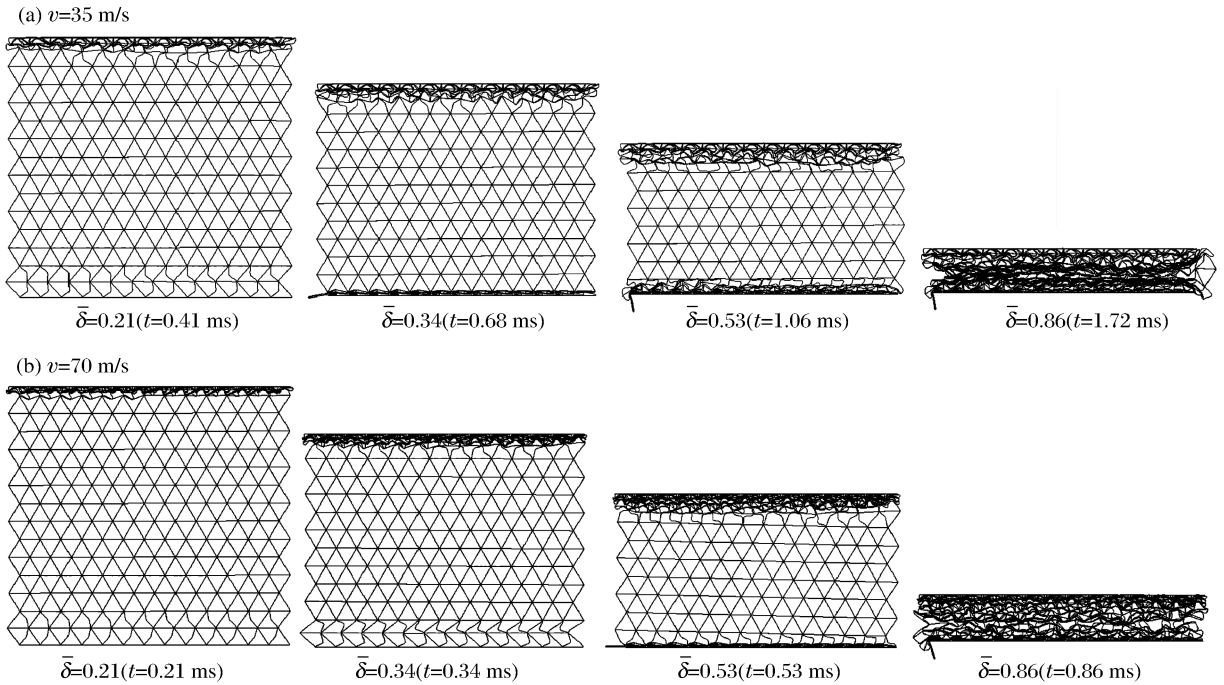


图 5 三角形胞元规则排布蜂窝材料的变形过程

Fig. 5 Full-scale crushing of honeycombs with regularly-arranged triangle cell

3.1.2 三角形胞元交错排布

对于三角形胞元交错排布的蜂窝材料,由于胞元微拓扑结构发生变化(连接因子由规则排列时的 6 变为 4),局部应力分布明显不同(图 6)。对于三角形胞元规则排布蜂窝材料,塑性铰在三角形斜边中点处形成。而当三角形胞元交错排布时,塑性铰在三角形胞元底边形成(图 7)。如图 6 所示,刚性板冲击速度 $v=35\text{ m/s}$ 时,当临界应力值达到弹性极限应力之后,试件开始进入了稳定的平台应力阶段。这是冲击过程中蜂窝材料稳定的变形模式的结果(图 7(a))。在整个变形过程中,能量由胞元的塑性变形吸收,没有明显的局部变形带形成(图 8(a)-II)。另外,与一般蜂窝材料压缩中凸的性质不同,试件在靠近加载端附近发生明显的颈缩现象(图 8(a)-III)。随着冲击速度的增加($v=70\text{ m/s}$),变形亦集中在冲击端。应力应变曲线上的峰值对应于下一行胞元被嵌入上一行胞元时的应力值。但由于靠近固定端第 2 局部变形带的形成(图 8(b)-II),应力峰值逐渐减小。此时,颈缩的位置更靠近冲击端。而随着冲击速度的进一步提高($v=110\text{ m/s}$),颈缩现象不再发生。垂直于冲击方向的局部变形带一层一层地向前传播,直至固定端(图 8(c))。

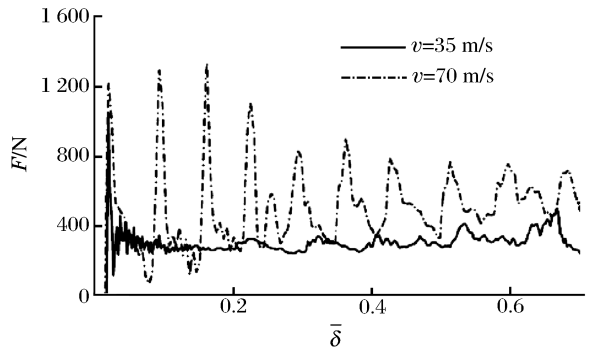


图 6 刚性板不同冲击速度下三角形胞元交错填充蜂窝材料的反力与相对压缩量曲线

Fig. 6 Variation of the reaction forces with the relative compression quantities for honeycombs with staggerly-arranged triangle cells

对比图 3、6 可知,蜂窝材料三角形胞元规则排布相对于胞元交错排布,对应着较高的弹性极限以及平台应力值,而三角形胞元交错排布的蜂窝材料表现出更加均匀的变形模式,其动力响应相对稳定。此外,胞元交错排布时,蜂窝材料除了沿 y 方向的压缩密实以外,沿 x 方向亦表现出横向收缩的特性。

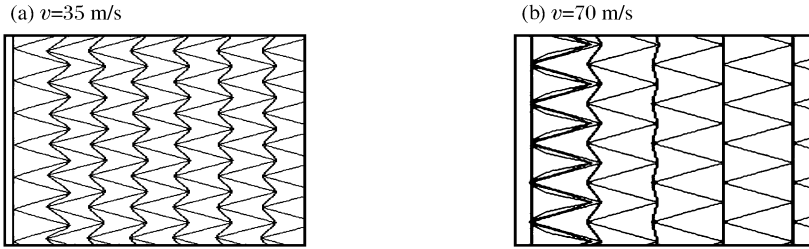


图 7 交错排布填充的蜂窝材料三角形胞元局部变形图

Fig. 7 Local deformation modes for honeycombs with triangle cells stagger arrangement

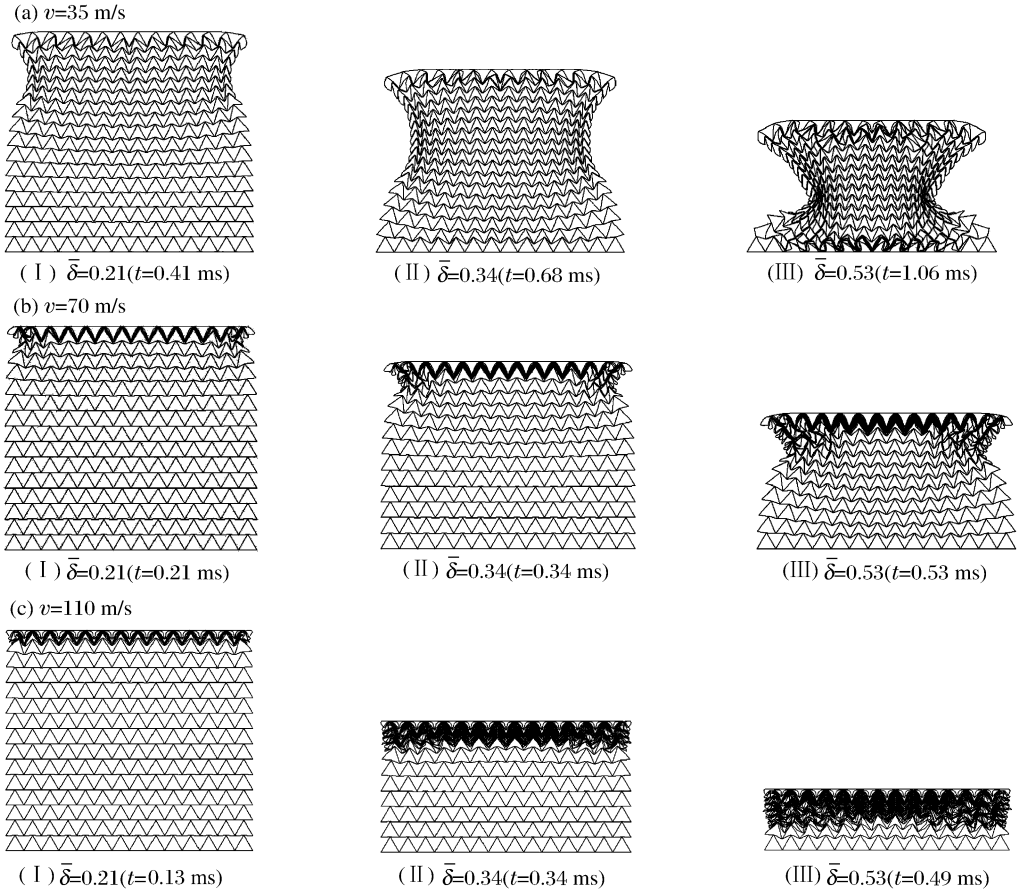


图 8 三角形胞元交错排布蜂窝材料的变形过程

Fig. 8 Full-scale crushing of honeycombs with staggerly-arranged triangle cells

3.2 正方形胞元填充蜂窝材料

3.2.1 正方形胞元规则排布

正方形胞元填充蜂窝材料的冲击动力学响应如图 9 所示。在应力达到第 1 个峰值前,材料整体均匀变形,表现为材料的整体弹性响应。随后材料进入平台响应区。和三角形胞元不同,四边形胞元塑性铰在与加载方向平行的侧边靠近节点处形成(图 10)。应力波在试件中沿横向(x 方向)及纵向(y 方向)的传播及在边界的反射,引起了试件中应力分布的局部化。材料整体表现为沿着纵向对称轴附近的刚性增强,因此局部变形区呈弧形(图 11(a))。同时,随着变形的增加,塑性波在固定端的反射使得靠近固定端的第 2 行单胞开始变形,形成第 2 局部变形区(图 11(b)-II)。而随着进一步的压缩,临近局部变形区的胞元依次发生变形,直至材料密实。由于第 2 局部变形区的形成吸收了一部分能量,应力峰值逐渐变小,且峰值间距增加(图 9)。

当刚性板冲击速度 $v=70\text{ m/s}$ 时(图 9),和三角形蜂窝材料相似,变形集中在靠近加载端的第 1 变形区。当第 6 行胞元完全压缩后,在固定端才开始形成第 2 局部变形区。由于第 2 局部变形区吸收了冲击能量,结构软化,应力峰值降低,峰值应力间的间距增大(图 9)。随后,第 1、2 局部变形区同时变形,直至材料压实(图 11(b))。计算结果表明,随着冲击速度的增加,试件局部硬化区域加宽(图 11(b))。对比 $v=35、70\text{ m/s}$ 的曲线表明,速度的增加使得变形更加稳定。这是由于单胞胞壁变形模式由弹性屈曲完全转化为塑性变形的结果。随着能量的逐渐消耗,振荡幅值逐渐减小。

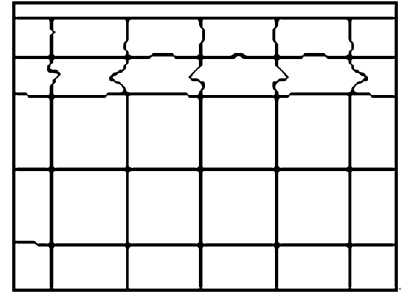
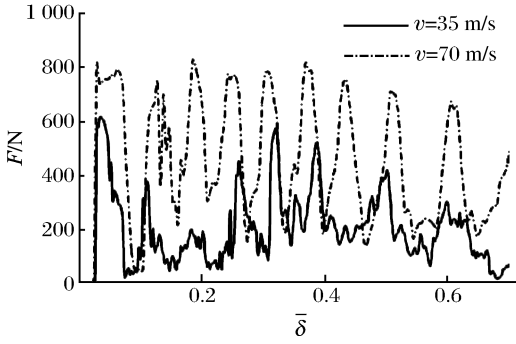


图 9 刚性板不同冲击速度下正方形胞元规则填充蜂窝材料的反力与相对压缩量曲线

图 10 规则填充蜂窝材料试件四边形胞元局部变形图

Fig. 9 Variation of the reaction forces with the relative compression quantities for honeycombs with regularly-arranged quadratic cells

Fig. 10 Local deformation modes for honeycombs with quadratic cells regular arrangement

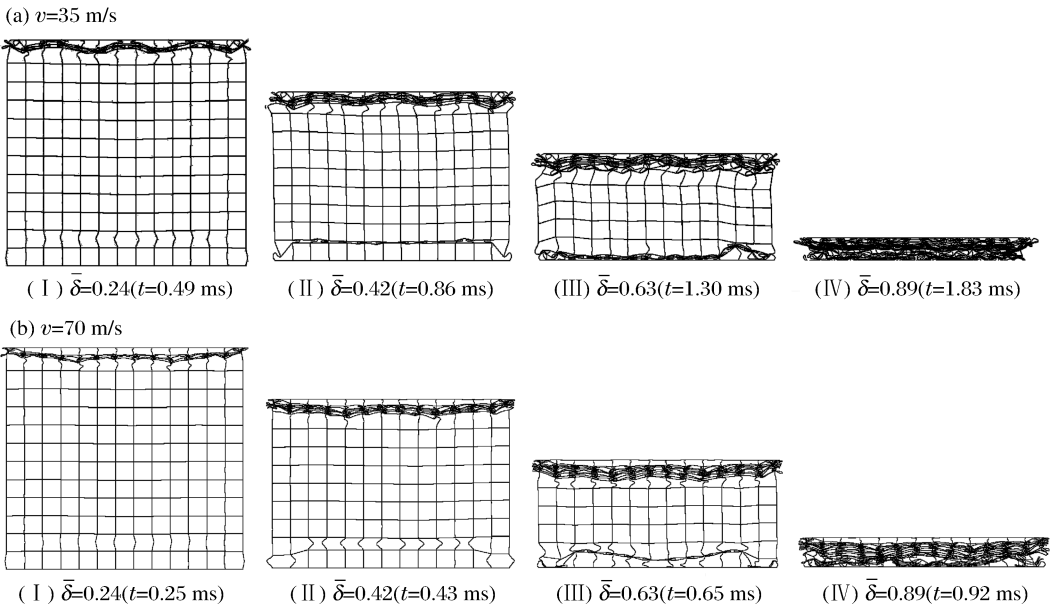


图 11 正方形规则排列蜂窝材料的变形过程

Fig. 11 Full-scale crushing of honeycombs with regularly-arranged quadratic cell

3.2.2 正方形胞元交错排布

对于正方形胞元交错排布的蜂窝材料,由于棱边连接方式的变化,材料表现出与正方形规则排列时不同的变形特性。当应力超过弹性极限以后,第 1 行胞元底边节点附近形成塑性铰(图 13(a))。随后,相邻各行胞元也开始发生塑性变形,形成局部峰值。在第 5 行胞元底边形成塑性铰时,应力应变曲线达到第 2 个峰值。随后,第 6~12 行胞元底边逐渐形成塑性铰,伴随着曲线上新的局部峰值的形成。当第

12 行胞元底边形成塑性铰时,应力应变曲线达到第 3 个峰值。同时,由于塑性变形引起的结构软化,靠近固定端的胞元相对刚度增加。每当新的一层胞元发生变形时,都会产生新的应力峰值。但是由于能量的重新分布,应力峰值的幅值降低(图 12)。而加载速度的增加($v=70\text{ m/s}$),使得变形集中在加载端(图 14(b))。图 14 表明,正方形交错排布蜂窝材料沿 y 方向表现出梯度特性。从加载端到固定端,试件纵向局部刚度增加。这是与正方形胞元规则排布蜂窝材料所不同的。对于正方形胞元交错排列蜂窝材料,在压缩过程中亦会形成颈缩现象,但由于棱边连接方式的不同,颈缩形成过程与三角形胞元交错排布的蜂窝材料表现出不同的特性(图 8(a)、(b),图 14)。另外需要指出的是,在交错排布四边形胞元变形的过程中,压溃区域的胞体形成菱形(图 13(b)),菱形区胞壁厚度的加倍。在材料的压实过程中,变形更加困难,试件的锁定应变降低。

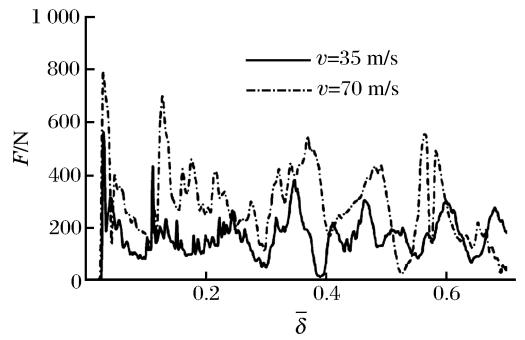


图 12 刚性板不同冲击速度下正方形胞元交错填充蜂窝材料的反力与相对压缩量曲线
Fig. 12 Variation of the reaction forces with respect to the relative compression quantities for honeycombs with staggerly-arranged quadratic cells

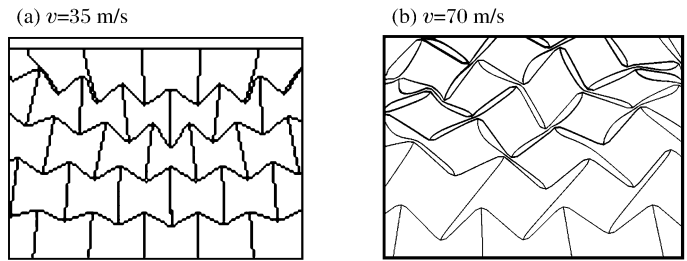


图 13 交错填充蜂窝材料试件四边形胞元局部变形图
Fig. 13 Local deformation modes for honeycombs with quadratic cells stagger arrangement

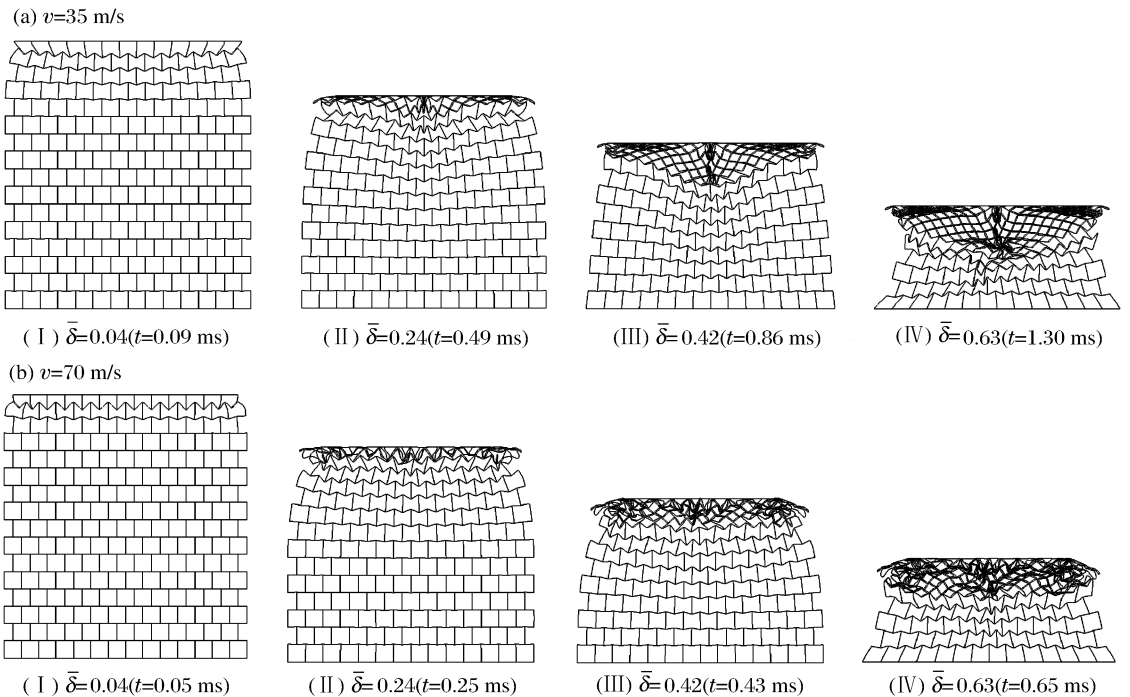


图 14 正方形胞元交错排布蜂窝材料的变形过程
Fig. 14 Full-scale crushing of honeycombs with staggerly-arranged quadratic cells

3.3 不同胞元填充蜂窝材料能量吸收特性的比较

胞元变形机制、冲击平台应力以及能量吸收率是多胞材料冲击动力学性能的重要指标。当多胞材料压缩变形到某一变形量 δ 时,其能量吸收能力的大小可用压缩曲线以下所围成的面积来表征,即

$$W = \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma(\epsilon) d\epsilon \approx F\delta/V \quad (1)$$

式中: ϵ_{\max} 为试件密实前的最大应变, σ 为压缩应力, V 为试件的体积。

基于公式(1),图 15 给出了正三角形以及正四边形规则或交错排布时单位质量蜂窝材料的能量积分曲线。图中实线和 R 代表胞元规则排布,虚线和 S 代表胞元交错排布。字母 T 和 Q 分别表示正三角形和正四边形,而数字表示刚性板冲击速度。

从图中可以看出,在胞元边长、壁厚、以及试件尺寸一致,冲击速度一定以及材料的压缩量一定的条件下,单位质量的三角形填充蜂窝材料的能量吸收能力强于四边形填充蜂窝材料。而对于同样形状的胞元,交错排布降低了材料的能量吸收性能。可见,胞元的形状以及排布方式都会对蜂窝材料的冲击动力学性能产生较大影响。对于三角形和四边形胞元规则排布,其变形都是侧边变形的结果。但是,四边形胞元侧边平行于加载方向,而三角形侧边与加载方向成 30° 。另外,三角形单胞具有更稳定的结构,这些导致了四边形的变形临界应力要低于三角形。因此,在压缩量一定的情况下,三角形胞元填充蜂窝材料就表现出更强的能量吸收特性。而当三角形或四边形胞元交错排布时,其变形归于胞元底边塑性变形的结果。由于能量由材料整体的变形吸收而没有明显的局部变形区形成,因此平台应力相对稳定,因而在压缩量一定的情况下,相对胞元规则排布的材料能量吸收能力有所减弱。另外,图 15 也表明,由于惯性效应,随着冲击速度的提高,在变形量一定的条件下,蜂窝材料表现出更强的能量吸收能力。

4 结 论

对胞元微拓扑结构对蜂窝材料冲击动力学特性影响的研究结果表明,除了胞元基本结构参数(边长,壁厚等),蜂窝材料的动力学响应亦取决于胞元的空间拓扑结构,例如棱边连接因子等。微拓扑结构的不同改变了蜂窝材料中应力波的传播特性,材料局部的动态变形模式发生变化,进而影响了材料的整体动力学响应。在边长、壁厚以及试件尺寸一致的情况下,单位质量三角形填充蜂窝材料与四边形填充蜂窝材料相比,具有更高的平台应力,因此表现出更强的能量吸收能力。而当排布方式不同时,交错排布对应着更加均匀的变形和稳定的平台区,能量吸收性能较规则排布时有所下降。同时,由于局部拓扑结构的变化,蜂窝材料表现出独特的变形机制。对于交错排布的试件,在冲击压缩的过程中表现出颈缩现象,且由于微结构以及局部应力的动态演化,试件刚度表现出横向(三角形交错排布)或纵向(四边形交错排布)的不均匀性,变形表现出明显的局部化特征。对蜂窝材料变形模式以及能量吸收特性的研究为蜂窝材料冲击动力学特性的微拓扑结构优化设计提供了参考,但关于微拓扑结构与材料冲击动力学响应间的更深层次的探讨还有待于进一步展开。

参考文献:

- [1] Evans A G, Hutchinson J W, Ashby M F. Multifunctionality of cellular metal systems[J]. Process in Materials Science, 1999,43(3):171-221.
- [2] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

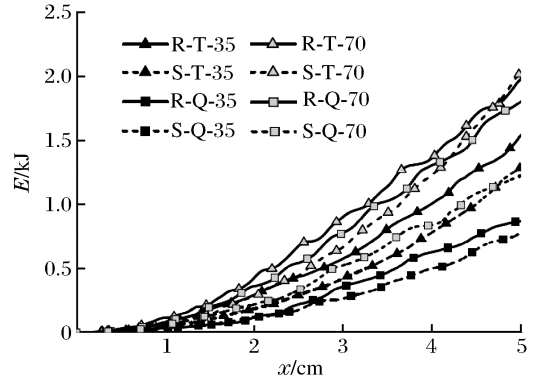


图 15 不同填充方式蜂窝材料能量吸收特性比较图
Fig. 15 Comparison of energy absorption ability of honeycombs with different filling modes

- [3] Grenestedt J L. Effective elastic behavior of some models for perfect cellular solids[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1999,36(10):1471-1501.
- [4] Hohe J, Becker W. Effective elastic properties of triangular grid structures[J]. *Composite Structures*, 1999,45(2):131-145.
- [5] Hohe J, Beschorner C, Becker W. Effective elastic properties of hexagonal and quadrilateral grid structures[J]. *Composite Structures*, 1999,46(1):73-89.
- [6] Gu S, Lu T J, Evans A G. On the design of two-dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001,44(11):2163-2175.
- [7] 张银钊,赵隆茂. 非均匀泡沫金属材料在冲击载荷下的变形模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2006,26(1):33-38.
ZHANG Yi-fen, ZHAO Long-mao. A numerical simulation on the deformation of heterogeneous metallic foams subjected to impact loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006,26(1):33-38.
- [8] 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(1-4):650-664.
- [9] Papka S D, Kyriakides S. In-plane crushing of a polycarbonate honeycomb[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1998,35(3-4):239-267.
- [10] 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.
- [11] Xue Z, Hutchinson J W. Crushing dynamics of square honeycomb sandwich cores[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006,65(13):2221-2245.

Influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic properties of honeycombs

LIU Ying^{*}, ZHANG Xin-chun

*(Department of Mechanics, School of Civil Engineering,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)*

Abstract: Effects of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing properties of honeycombs were numerically studied. The dynamic crushing of the honeycombs filled with the differently micro-arranged cells was discussed in case of these cells with the same side length and thickness. The full-scale deformation of the specimen and the micro-structure dynamic evolution were given. Influences of the cell micro-arrangements on the energy absorption mechanism of the honeycombs were clarified. Results show that except for the basic structural parameters (e. g. side length and thickness) of the cells, the cell shape and its arrangement pattern are important to determine the dynamic responses of honeycombs. Due to the structural stability of triangular cells, the honeycombs with triangular cells display stronger energy absorption ability than those with square cells. Stagger arrangement of the cells yields to more uniform deformation and stable plateau stresses. Owing to the variation of the micro-topology, the honeycombs with the staggerly-arranged cells reveal particular necking phenomena during the in-plane crushing.

Key words: solid mechanics; Honeycomb; micro-arrangement; cell; deformation mechanism; crush property

* Corresponding author: LIU Ying
E-mail address: yliu5@bjtu.edu.cn
Telephone: 86-10-51682094