

DOI: 10.7652/xjtuxb201703014

类蜂窝结构的面内冲击特性研究

李响^{1,2,3}, 周幼辉², 童冠²

(1. 三峡大学水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室, 443002, 湖北宜昌; 2. 三峡大学机械与动力学院, 443002, 湖北宜昌; 3. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 443002, 湖北宜昌)

摘要: 以类蜂窝结构为研究对象, 讨论了不同冲击速度作用下该结构的面内冲击力学性能及能量吸收能力, 并与传统的六边形蜂窝结构在不同方向冲击作用下的变形模式、比吸收能量进行了对比。研究表明: 在低速冲击下, 类蜂窝结构先后表现出 V 形、X 形、K 形及 I 形等局部变形特征; 在中高速冲击下, 类蜂窝结构中的六边形与四边形胞元交替压溃, 并从冲击端的 I 形局部变形逐步扩展到固定端; 随着冲击速度增大, 类蜂窝表现出更强的能量吸收能力, 且与六边形蜂窝相比, 其能量吸收过程不受冲击方向的影响, 更加稳定可靠。研究结论可望为进一步研究同一结构模型不同布置方式的类蜂窝结构的动态冲击特性提供依据。

关键词: 类蜂窝; 六边形蜂窝; 冲击特性; 变形机制; 比吸收能量

中图分类号: O347.3; TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)03-0080-07

In-Plane Dynamic Impact Characteristics of the Quasi-Honeycomb Structure

LI Xiang^{1,2,3}, ZHOU Youhui², TONG Guan²

(1. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: The mechanical properties of in-plane impact and energy absorbing capabilities of the sandwich quasi-honeycomb structure at different impact speeds are discussed, and the deformation mechanisms and specific energy absorbing capabilities of the quasi-honeycomb structure and traditional hexagonal honeycomb structure under the impact from different direction are compared. Results show that: 1) under low-speed impact, the quasi-honeycomb structure exhibits the partial deformation characteristics of V-type, X-type, K-type and I-type, etc.; 2) under middle-speed impact, the hexagonal and quadrilateral cellular units in the quasi-honeycomb structure are alternately crushed and the partial deformation of I-type gradually extends from impact end to fixed; and 3) compared with hexagonal honeycomb structure, the energy absorption capability and energy absorption process of the quasi-honeycomb structure are more stable and reliable without the effect of impact direction. Conclusions derived from this study may offer a basis for further research of the dynamic impact characteristics of sandwich quasi-honeycomb structure in different structural arrangements.

Keywords: quasi-honeycomb structure; hexagonal honeycomb; impact characteristics; deformation mechanism; specific energy absorption

收稿日期: 2016-07-13。 作者简介: 李响(1979—), 男, 博士, 副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305232); 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室开放基金资助项目(2012KJX07)。

网络出版时间: 2016-12-05 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161205.1715.008.html>

蜂窝夹心结构材料是质量小、效率高、能量吸收能力强、设计性好的复合材料的典型代表,具有比强度和比刚度高、稳定性好等许多优点,在航空航天、铁路交通、船舶、建筑、机械等领域有着极其重要的应用^[1]。由于蜂窝夹层结构材料内部孔穴的存在,使其性能不仅取决于夹心结构材料的特性,而且在很大程度上依赖于夹心结构的孔穴拓扑形式和结构的排列方式。尤其在蜂窝结构材料受冲击载荷而失效的情况下,不同的胞元拓扑结构表现出不同的变形机制和动态力学性能。

目前,国内外已广泛开展了关于不同胞元拓扑结构蜂窝材料的动态力学特性分析,例如:Ruan 和 Papka 等通过数值模拟计算和实验,得到了六边形蜂窝在不同冲击方向的面内变形模式和失效机理,研究了蜂窝结构平台应力与蜂窝胞元壁厚及冲击速度之间的关系^[2-3];Sun 等采用数值仿真方法研究了多层均匀排列的圆形蜂窝在面内冲击载荷作用下的变形模式、平台应力及能量吸收特性^[4];Khan 等通过实验与数字图像相关法研究了六边形蜂窝的面内、面外能量吸收特性,发现蜂窝胶合面的能量吸收能力为非胶合面的 2 倍^[5];卢子兴、张新春、胡玲玲等采用数值模拟方法研究了四边形手性蜂窝、组合 Kagome 蜂窝、三角形蜂窝在不同冲击方向面内冲击载荷作用下的变形模式、承载能力和能量吸收特性^[6-8];王堃等研究了铝蜂窝中结构参数对冲击变形和能量吸收特性的影响^[9];Qiao 和 Zhang 等分别通过理论计算与有限元仿真方法,研究了不同的分层蜂窝单轴材料在面内、面外冲击载荷作用下的准静态应力与变形机理,发现分层蜂窝材料较传统蜂窝材料有更好的能量吸收特性^[10-11];Ashab 等研究了蜂窝材料在静态、动态压剪载荷作用下的平台应力和变形特征,指出蜂窝结构的平台应力随加载角度增大而减小,随载荷速度增大而增大^[12];张健等以多孔泡沫金属为研究对象,采用分析蜂窝夹心动态冲击特性的研究方法,定量分析了不均匀分布的不规则胞孔泡沫金属在动态压缩过程中弹塑性波的传播、惯性效应以及吸能特性,进一步扩展了在动态冲击作用下多孔泡沫金属材料的研究方法,同时也为该分析方法的进一步推广使用奠定了基础^[13]。

针对现有蜂窝结构的特点,为了获得综合力学性能更好的蜂窝结构,李响等曾提出一种超轻多孔类蜂窝夹心结构材料,并对该材料进行了静态力学性能分析^[14],但对该优化排列组合型类蜂窝结构材料在冲击载荷作用下的动态力学响应特性尚未进行

深入研究。

本文以类蜂窝结构为研究对象,讨论了不同冲击速度作用下该结构的面内冲击力学性能及能量吸收能力,并与传统的六边形蜂窝就不同方向冲击作用下的变形模式、能量吸收能力进行对比,以期为进一步研究同一结构模型具有不同布置方式的类蜂窝结构的动态冲击特性奠定基础。

1 类蜂窝结构的冲击模型

1.1 类蜂窝的胞元结构

类蜂窝的胞元形状及结构尺寸如图 1 所示,其中 l 、 h 、 t 、 θ 分别为结构的斜边长、直角边长、胞元壁厚和斜边与水平方向的夹角。本文计算的所有算例中,取 $l=2.7\text{ mm}$, $h=1.414l$, $t=0.5\text{ mm}$, $\theta=45^\circ$ 。类蜂窝结构是从仿生学和创新构型角度出发,通过优化排列六边形与四边形胞元得到的六边形、四边形胞元组合结构。进一步研究可知,类蜂窝胞元结构可由水平和竖直六边形蜂窝胞元组合而成,如图 1 所示。当胞元结构进一步沿水平、竖直 2 个方向扩展,可得如图 2a 所示的宏观拓扑结构。

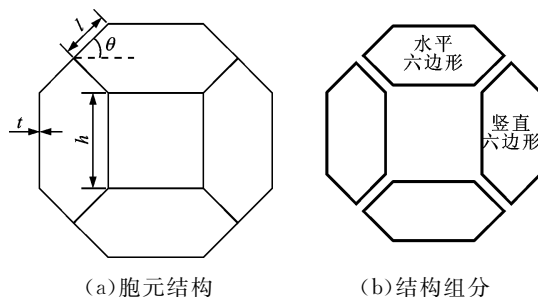


图 1 类蜂窝胞元结构及其结构组分

1.2 有限元计算模型

采用大型通用商业有限元软件 LS-DYNA 建立蜂窝结构的面内冲击加载有限元计算模型,如图 2 所示。将蜂窝结构试件置于水平放置的下端固定支撑板和上端冲击板之间,固定支撑板和冲击板均为刚性材质。蜂窝结构模型中基体材料为金属铝,属于双线性硬化材料。假定计算过程中为理想弹塑性模型,蜂窝基体材料的力学参数为:弹性模量 $E_s=69\text{ GPa}$,屈服应力 $\sigma_{ys}=76\text{ MPa}$,密度 $\rho_s=2\,700\text{ kg/m}^3$,泊松比 $\nu_s=0.3$ 。计算中蜂窝胞壁选用 SHELL 163 薄壳单元(4 节点显式结构薄壳单元),沿厚度方向(z 方向)单元数量为 3;采用全积分 Belytschko-Tsay 壳单元算法,综合考虑计算收敛性及计算资源限制,沿胞元壁厚 t 方向定义 5 个积分点。另外,仿真计算中蜂窝结构模型采用单面自动接触算法,蜂

窝结构试件外表面与刚性板表面之间采用面面接触算法,且刚性表面与蜂窝结构外表面视为光滑,两者接触无摩擦。计算中类蜂窝结构模型在 x 、 y 两个方向上均采用 10 个重复胞元,如图 2a 所示。结合上述算例尺寸 $l=2.7\text{ mm}$, $h=1.414l$, $t=0.5\text{ mm}$, $\theta=45^\circ$,可知类蜂窝结构模型在 x 、 y 方向的尺寸均为 80.18 mm,而六边形蜂窝结构模型(如图 2b、2c 所示)的单胞尺寸与类蜂窝结构中六边形胞元的尺寸相同,所以可得水平六边形蜂窝结构(即刚性板沿 x 方向冲击时)在 x 、 y 方向的尺寸分别为 80.18 和

80.27 mm。同理,可得竖直六边形蜂窝结构(即刚性板沿 y 方向冲击时)在 x 、 y 方向的尺寸分别为 80.27 和 80.18 mm。计算中上端刚性板以某一恒定速度沿竖直方向冲击蜂窝试件,为保证冲击速度范围能涵盖低速、中速、高速,文中冲击速度分别取为 7、35 和 70 m/s。另外,冲击计算过程中约束蜂窝试件所有节点的面外位移,以保证蜂窝试件的整体变形模式为平面应变状态,其中模型的面外厚度(沿 z 方向) $b=1\text{ mm}$ 。

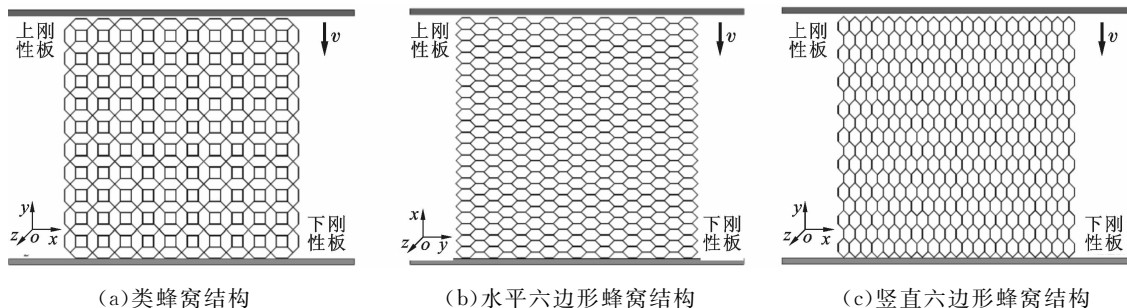


图 2 蜂窝结构冲击加载有限元模型

1.3 相对密度

蜂窝结构材料的性能主要取决于相对密度,其权重超出了所有其他的影响因素^[1]。对于本文涉及的六边形蜂窝和类蜂窝结构材料,其相对密度可分别由下式^[14]给出

$$\rho_H^* = \frac{\rho_c}{\rho_s} = \frac{(t/l)(h/l+2)}{2\cos\theta(h/l+\sin\theta)} \quad (1)$$

$$\rho_Q^* = \frac{\rho_c}{\rho_s} = \frac{4t(h+l)}{(h+2l\sin\theta)(h+2l\cos\theta)} \quad (2)$$

式中: ρ_c 为蜂窝材料的等效密度。代入数据可得: $\rho_H^* = 0.2107$, $\rho_Q^* = 0.2235$ 。根据本文的蜂窝结构模型,得到类蜂窝与六边形蜂窝的相对密度比

$$\lambda_\rho = \frac{\rho_Q^*}{\rho_H^*} = \frac{0.2235}{0.2107} = 1.06 \quad (3)$$

1.4 比吸收能量的确定

为了更好地评估蜂窝结构材料的能量吸收能力,需引入一个评价指标——比吸收能量 E_m ^[10]。比吸收能量为单位质量的能量吸收量,在结构轻量化设计中起着重要作用。蜂窝材料试件在压缩过程中所吸收的能量可用冲击过程中的压缩力对压缩位移的积分来表征,即

$$E(d) = \int_0^d F(x) dx \quad (4)$$

式中: $F(x)$ 为瞬态冲击力; d 为冲击过程中刚性板沿加载方向的位移。因此,比吸收能量可表示为

$$E_m(d) = \frac{E(d)}{m} \quad (5)$$

$$m = \rho_c V \quad (6)$$

式中: m 为蜂窝材料试件的质量; V 为蜂窝材料试件的等效体积。

2 类蜂窝与六边形蜂窝结构的变形特性

2.1 类蜂窝结构的变形模式

图 3~图 5 分别给出了类蜂窝结构在低速、中速和高速冲击作用下的整体变形模式与局部变形模式。类蜂窝结构由水平放置六边形蜂窝胞元与竖直放置六边形蜂窝胞元周期性排列组合而成,其动态压溃变形模式与一般六边形蜂窝结构的模式存在较大差异,表现出独特的变形特征。图中的 ϵ 为冲击过程中蜂窝结构的名义压缩应变^[6],即蜂窝结构上端面的压缩位移与模型冲击方向初始长度之比。

当上端刚性冲击板以恒定速度 7 m/s 的低速冲击类蜂窝结构材料时,靠近冲击端附近水平与竖直方向的六边形绕连接点处首先发生局部剪切变形,并以 V 形方式向中部扩展,形成第一个局部变形带(如图 3a 所示);紧接着,相同的剪切变形模式从类蜂窝结构中部向固定端扩展,此时结构变形从中部逐渐传递至底端并呈现为倒 V 形,形成第二个局部剪切变形带(如图 3b 所示),至此位于结构对角线方

向水平放置的六边形蜂窝结构完全被压实,从整体变形来看形成了 X 形局部变形带;随着压缩进一步加剧,类蜂窝结构上端水平方向的六边形胞元结构逐渐被压缩,而下端位于结构对角线内侧及外侧的六边形胞元未发生明显变形,此时类蜂窝结构的变形模式呈现为侧立 K 形(如图 3c 所示);随后,固定端的六边形胞元逐渐被压缩,变形进一步向中间六边形扩展,形成了如图 3d 所示的 I 形四边形胞元结构压缩模型,之后的变形模式与四边形胞元结构低速冲击时类似,类蜂窝结构的下端先被压溃,这部分胞元充分接触(如图 3e 所示),直至整体模型被压溃(如图 3f 所示)。

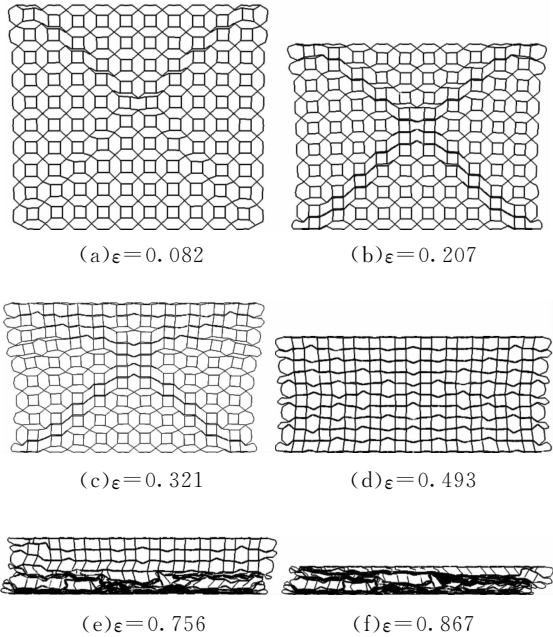


图 3 冲击速度为 7 m/s 时类蜂窝结构的变形模式

由此可知,在低速冲击作用下,类蜂窝结构的变形模式依次由以下几个阶段组成:冲击开始时的 V 形;对角六边形胞元压缩时的 X 形;上端六边形胞元完全压溃后的侧立 K 形;四边形胞元密实化开始时的 I 形。

当上端刚性冲击板的恒定冲击速度升高到 35 m/s 的中速时,类蜂窝结构的变形模式表现出很明显的惯性效应,即材料冲击端局部变形带的形成明显领先于固定端。当冲击开始时,仅在上端冲击板与类蜂窝结构之间的接触区域附近产生明显局部变形,以类蜂窝结构上端第一层水平方向的六边形胞元压溃为主(如图 4a 所示),并且这种变形由中间向两边迅速扩展至第二、第三层水平方向的六边形胞元(如图 4b 所示);在冲击载荷进一步作用下,位于类蜂窝结构对角线上的六边形胞元发生明显局部变

形,此时类蜂窝结构上端的变形明显向左右两侧扩展,形成了与低速冲击时相似的侧立 K 形变形模式(如图 4c 所示);随着加载位移的增大,位于对角线上下两侧的六边形胞元先后被压溃(如图 4d、4e 所示),这与低速冲击时的 K 形压缩模式类似;随着变形进一步扩展,蜂窝结构的变形逐步向四边形的压溃模式转换,并最终以前四边形的 I 形坍塌方式进入结构的密实化压溃阶段。

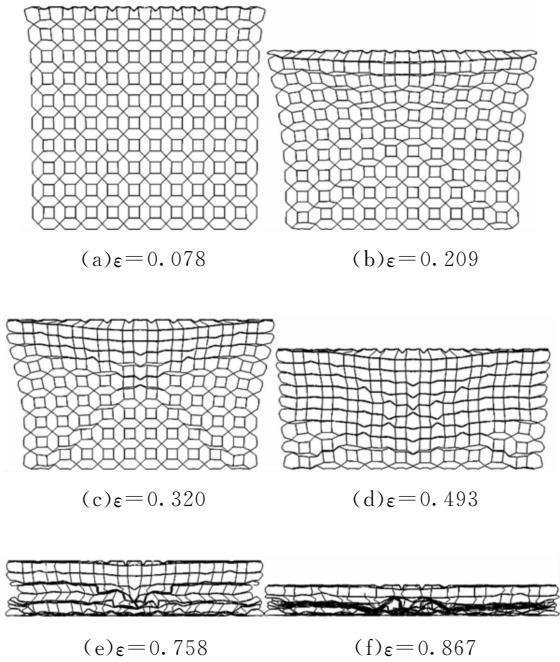


图 4 冲击速度为 35 m/s 时类蜂窝结构的变形模式

当上端刚性冲击板的恒定冲击速度增至 70 m/s 的高速时,类蜂窝结构在冲击端的惯性变形效应更加显著,变形模式以冲击端的 I 形变形带由上至下依次扩展至类蜂窝结构下端,整个过程伴随着六边形与四边形胞元的交替压溃,与低、中速冲击时先六边形胞元压溃、接着再四边形胞元压溃的情形不同,且在整个冲击过程中没有明显的 X 形和 K 形局部变形带,如图 5 所示。

综上所述,在低速冲击过程中可以明显地看到类蜂窝结构的变形模式依次为冲击接触时的 V 形、X 形、K 形,直至最后的 I 形整体压溃;在中速冲击过程中只是没有明显的 V 形变形模式,而后面的变形模式与低速冲击时类似;在高速冲击过程中仅可明显地看到冲击端的 I 形局部变形并扩展至整个结构,直至结构被压溃。

2.2 六边形蜂窝结构的变形模式

2.2.1 水平放置六边形蜂窝结构的变形模式 为了与类蜂窝结构的冲击性能进行对比,同时也为了

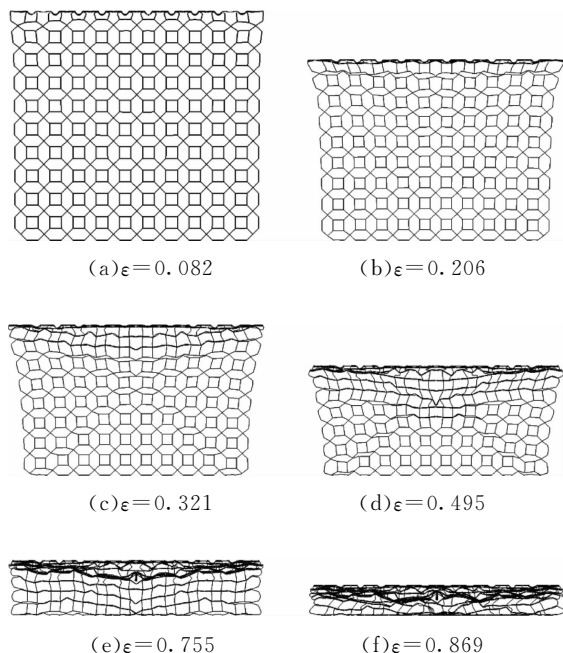


图5 冲击速度为 70 m/s 时类蜂窝结构的变形模式

验证文中计算模型的可靠性,图6、图7分别给出了与文献[2]中类似的六边形蜂窝结构在水平方向面内低速、高速冲击下的变形模式。从图6、图7所示的变形模式可以看出,水平放置六边形蜂窝在低速、高速冲击时表现出了不同的变形机制:当冲击速度为 7 m/s 的低速时,首先在冲击端附近形成了倒 V 形局部变形带,随着冲击位移增大,在模型下端附近形成了正 V 形局部剪切变形带,随后两端的 V 形变形带向蜂窝中部扩展,直至整个蜂窝被压溃;当冲击速度为 70 m/s 的高速时,整个冲击过程均未在冲击端及结构下端附近形成明显的 V 形剪切带,而是在冲击端附近产生了 I 形变形并扩展至最下端,直至

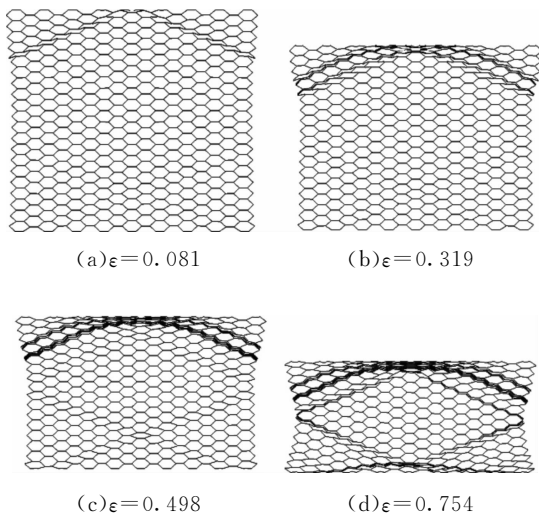


图6 冲击速度为 7 m/s 时水平六边形蜂窝结构的变形模式

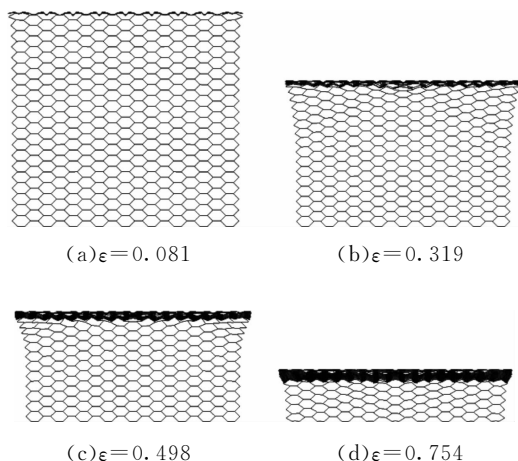


图7 冲击速度为 70 m/s 时水平六边形蜂窝结构的变形模式

蜂窝被整体压溃。

2.2.2 竖直放置六边形蜂窝结构的变形模式 图8、图9分别给出了六边形蜂窝结构在竖直方向面内低速、高速冲击下的变形模式,从中可以看出,在冲击速度相同而冲击方向发生变化时,结构的变形模式表现出非常明显的变异性:在低速冲击时($v=7$ m/s),首先冲击端附近被压缩,且蜂窝上端中部位置发生局部变形,随着压缩位移增大,蜂窝结构下端也形成局部剪切变形带,随后从冲击端及下端的变形扩展至整个结构,直至结构整体被压溃;在高速冲击时($v=70$ m/s),蜂窝结构在冲击端发生明显的 I 形变形,并且结构中间位置也形成 V 形整体变形,随着变形进一步扩展,固定端的 I 形区域越来越大,最终沿着结构中部的 V 形变形带逐渐将结构整体压溃。

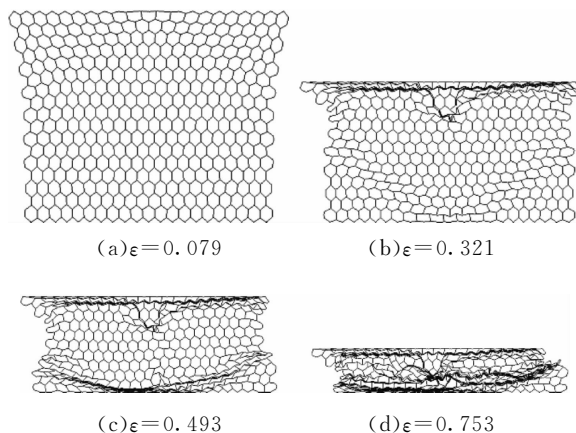


图8 冲击速度为 7 m/s 时竖直六边形蜂窝结构的变形模式

综上所述,刚性板在 2 个方向以不同速度冲击六边形蜂窝结构时,结构的变形模式明显不同。这

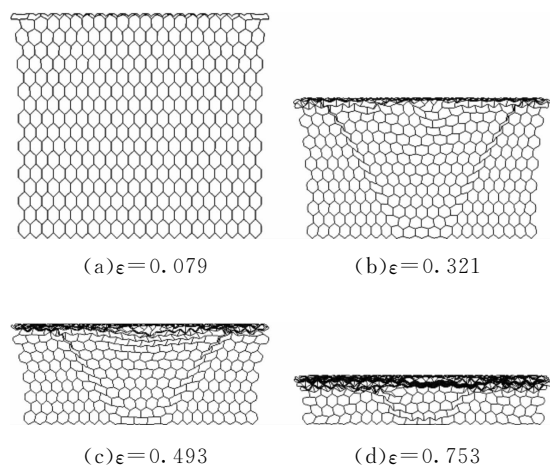


图 9 冲击速度为 70 m/s 时竖直六边形蜂窝结构的变形模式

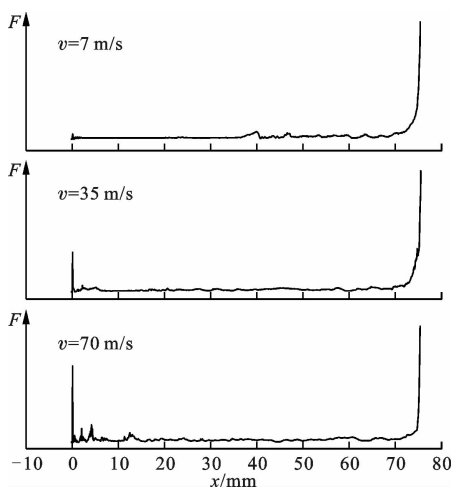


图 10 类蜂窝结构材料的压缩反力-位移曲线

样的变形模式与文献[2]中的变形模式有一定区别,而这种区别是由结构下端的约束条件及结构尺寸不同引起的。

3 冲击载荷作用下的动力响应特性

3.1 不同冲击速度下类蜂窝结构的动力响应

蜂窝结构材料之所以具有良好的缓冲性能和能量吸收能力,主要原因在于这种材料在动态冲击载荷作用下会表现出 3 个不同阶段,且其中的第二个阶段的应力平台区为能量吸收的主要区间。

图 10 是类蜂窝结构材料在 3 种不同冲击速度下的刚性板压缩反力-位移曲线,从中可以看出,类蜂窝结构材料的压缩变形过程与常见蜂窝结构材料的类似,也由 3 个阶段组成。首先是瞬态响应变形阶段,该阶段表现为弹性变形,冲击载荷由 0 迅速达到峰值,并迅速回落至稳定值附近。由图 10 可知,高速冲击的载荷峰值明显高于低速冲击的峰值,且随着冲击速度的提高,载荷峰值明显增大。在材料发生屈服后,胞元结构发生塑性坍塌,此时曲线经历一个较长的大变形平台区,刚性冲击板的压缩反力在一个范围内波动。低速冲击时的压缩反力波动主要集中于平台区中部,主要缘于固定端四边形胞元的初步压溃;随着冲击速度提高,压缩反力的波动越来越集中于平台区的开始及结束阶段,主要缘于冲击端和固定端四边形蜂窝连接被初步压溃。随着变形的进一步增大,结构中的六边形胞元完全被压溃,材料的变形模式为四边形胞元的接触变形,变形进入到密实化区,在该阶段类蜂窝结构下端四边形的微小变形导致压缩载荷的剧烈上升,且随着冲击速度的增大,压缩载荷峰值迅速增大。

3.2 不同结构蜂窝的比吸收能量特性

比吸收能量作为评价蜂窝材料在冲击载荷作用下的力学性能的重要指标,已被广泛应用于各种不同蜂窝材料的对比研究中。图 11、图 12 分别给出了六边形蜂窝受不同速度 x 、 y 方向冲击以及类蜂窝在不同速度冲击作用下的比吸收能量对比曲线,图中字母 H、Q 分别表示六边形蜂窝和类蜂窝结构。由图 11 可知,在等效质量及压缩位移相等的条件下,类蜂窝的比吸收能量比受 x 方向冲击的六边形蜂窝的高,且在中、低速冲击时,随着冲击过程的持续进行,类蜂窝表现出更强的能量吸收能力。由图 12 可知,当六边形蜂窝受冲击的方向发生改变时,其比吸收能量也发生较大改变,此时在不同冲击速度作用下的比吸收能量均高于类蜂窝的比吸收能量。

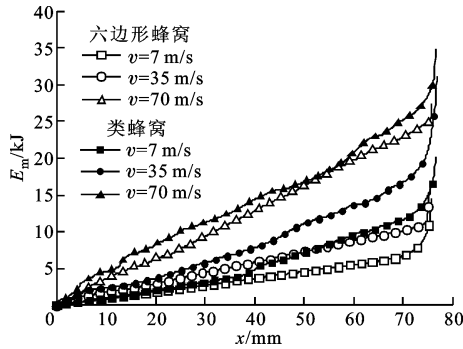


图 11 不同冲击速度下受 x 方向冲击的六边形蜂窝和类蜂窝的比吸收能量对比

从引起能量吸收情况不同的变形模式来说,类蜂窝结构的变形能量吸收过程分为 2 个阶段:①水平布置六边形的压缩变形吸能;②竖直布置六边形和四边形的密实化变形吸能。在中、低速冲击时,类

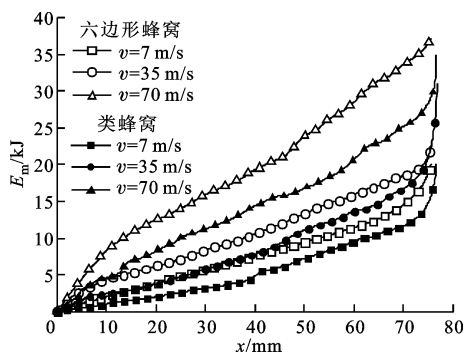


图12 不同冲击速度下受 y 方向冲击的六边形蜂窝和类蜂窝的比吸收能量对比

蜂窝通过对角线位置水平布置六边形胞元的局部变形,带动整体结构中水平布置六边形胞元发生变形,逐步形成稳定的六边形压缩吸能阶段;随着压缩位移增大,转变为稳定的竖直布置六边形及四边形胞元的压缩变形吸能阶段。类蜂窝结构的整个变形阶段融合了水平、竖直布置六边形及四边形胞元的变形模式,使整体结构的能量吸收过程更加稳定。

由此可知,合理布置不同方向上能量吸收能力不同的蜂窝结构,可以得到各方向能量吸收能力一致且吸收能力稳定的类蜂窝结构材料,这一结论可望为新型蜂窝结构材料的设计提供一个新的方向。

4 结 论

本文采用数值模拟技术,对比分析了类蜂窝结构及六边形蜂窝结构在不同冲击载荷作用下的变形模式与能量吸收特性,得到如下结论:

(1)在低速冲击作用下,类蜂窝结构的变形模式依次由以下几个阶段组成:冲击开始时的V形变形阶段,结构对角线上水平六边形胞元压缩时产生的X形变形阶段,上端六边形胞元完全压溃后产生的侧立K形变形阶段,四边形胞元密实化开始时的I形变形阶段。在中速冲击时,只是没有明显的V形变形阶段,而后面的变形模式与低速冲击时类似。在高速冲击时,仅可明显看到冲击端的I形局部变形,并不断扩展,直至整个结构被压溃。随着冲击速度的提高,结构的局部变形带越来越集中于冲击端。

(2)观察类蜂窝结构的变形特征,可知六边形蜂窝较四边形蜂窝更容易被压溃,说明在面内动态冲击过程中,六边形蜂窝的抗冲击能力较四边形蜂窝要弱,这可为后期对比讨论不同结构参数下六边形蜂窝、四边形蜂窝的抗冲击能力提供参考。

(3)针对同一种六边形蜂窝结构,在 x 、 y 两个不同的冲击方向作用下结构的变形模式有较大区

别,且在能量吸收能力上 y 方向冲击较 x 方向冲击更好。

(4)在等效质量相等的条件下,类蜂窝结构的能量吸收能力介于水平六边形蜂窝与竖直六边形蜂窝之间,但其能量吸收能力不因冲击方向变化而发生改变,保证了蜂窝结构材料能量吸收过程的整体稳定性。

参考文献:

- [1] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997: 1-12, 309-343.
- [2] 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.
- [3] PAPKA S D, KYRIAKIDES S. Experiments and full-scale numerical simulations of in-plane crushing of a honeycomb [J]. Acta Materialia, 1998, 46(8): 2765-2776.
- [4] SUN Deqiang, ZHANG Weihong, ZHAO Yucong, et al. In-plane crushing and energy absorption performance of multi-layer regularly arranged circular honeycombs [J]. Composite Structures, 2013, 96: 726-735.
- [5] KHAN M K, BAIG T, MIRZA S. Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 539: 135-142.
- [6] 卢子兴, 李康. 四边手性蜂窝动态压溃行为的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(2): 181-187.
LU Zixing, LI Kang. Numerical simulation on dynamic crushing behaviors of tetrachiral honeycombs [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(2): 181-187.
- [7] 张新春, 刘颖, 章梓茂. 组合蜂窝材料面内冲击性能的研究 [J]. 工程力学, 2009, 26(6): 220-225.
ZHANG Xinchun, LIU Ying, ZHANG Zimao. Research on dynamic properties of supercell honeycomb structures under in-plane impact loading [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 220-225.
- [8] 胡玲玲, 陈依骊. 三角形蜂窝在面内冲击荷载下的力学性能 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 226-229.
HU Ling-ling, CHEN Yi-li. Mechanical properties of triangular honeycombs under in-plane impact loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 226-229.

(下转第110页)