DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0401-08

含随机填充孔圆形蜂窝结构的面内冲击性能*

何 强,马大为,张震东
(南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要: 研究多孔材料细观结构与宏观力学性能之间的关系,建立具有固定相对密度的含随机固体填充孔的圆形蜂窝结构模型。在此模型的基础上具体讨论了不同孔洞填充比和冲击速度对圆形蜂窝结构变形模式、动态冲击平台应力以及能量吸收性能的影响。研究结果表明:填充孔在蜂窝变形过程中有局部牵制作用,蜂窝材料变形模式仍为准静态模式、过渡模式、动态模式;当变形模式为过渡模式或动态模式时,结构的平台应力与速度的平方成线性关系,存在明显的速度效应;高速冲击下,含固体填充孔的蜂窝结构单位质量吸收的能量高于规则蜂窝结构。研究结果可为蜂窝材料的研究和设计提供参考。

关键词: 固体力学;变形模式;能量吸收;平台应力;填充孔;圆形蜂窝
中图分类号: O347 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

蜂窝及多孔泡沫材料作为具有重量轻、比强度和比刚度高 、稳定性好 、隔热隔声性好等一系列优点的复合材料,已经广泛应用在航空、航天 、建筑 、包装等很多领域[1-2]。多孔材料的力学性能除了与密度和基体材料特性有关外,还与胞元的排列方式、孔壁的缺失等细观结构密切相关。因此,研究多孔材料细观结构与宏观力学性能之间的关系,对于蜂窝及多孔材料的研究和设计都具有很重要的意义。

在蜂窝及多孔材料的实际生产过程中,由于孔壁的坍塌或发泡不完全导致材料中存在实体堆积的现象并不少见,开孔泡沫金属制备中也存在颗粒堆积不理想或未完全消除导致材料密实的情况[3-4],但是目前关于这方面缺陷对多孔材料力学性能影响的研究还很有限。O. Prakash 等[5]对蜂窝材料的实验研究表明,部分孔的实体填充导致蜂窝局部强化,其弹性模量和应变强化也因此提高,同时结构的密实化应变减小。C. Chen 等[6]用有限元方法研究了二维蜂窝结构准静态单向和平面静水压加载下实体填充孔对结构弹性模量和屈服应力的影响,发现实体填充孔使蜂窝结构弹性模量略有提高,但对单向屈服强度和平面静水屈服强度影响不大。I. Jeon 等[3]则通过实验研究发现因泡沫垮塌而出现实体堆积的闭孔泡沫铝弹性模量低于相同密度的无垮塌缺陷泡沫铝,材料的塑性垮塌应力则基本不受影响。H. Nakamoto 等[7-8]研究了具有线性排列填充孔的六边形蜂窝结构的面内冲击性能,并将其得出的结论与实验数据进行了对比。

目前关于含固体填充孔蜂窝结构的研究主要集中在其静态及准静态力学性能方面,本文中利用有限元分析软件 Abaqus 对冲击载荷下具有随机固体填充孔的圆形蜂窝结构变形过程进行数值模拟,并从蜂窝结构的变形模式、动态冲击平台应力及能量吸收能力 3 个方面研究随机固体填充孔对蜂窝结构动态力学性能的影响,研究结果可为蜂窝材料的研究和设计提供参考。

1 有限元模型

面内冲击载荷作用下的规则圆形蜂窝材料计算模型如图 1 所示。为了消除尺寸效应,本文所选的规则蜂窝材料结构与 Sun De-qiang 等[9]提出的多层规则排布圆形蜂窝模型相似。试件由具有相同半径和壁厚的圆形蜂窝胞元方形堆列而成。其中单个胞元的半径 $R=3$ mm,壁厚 $t=0.15$mm,试件的尺寸为 $L_1\times L_2=96$ mm$\times 96$ mm。基体材料为金属铝,采用理想弹塑性模型,泊松比 $\nu=0.3$,杨氏模量 E

* **收稿日期**: 2013-09-17; **修回日期**: 2014-02-21
第一作者: 何 强(1989—),男,博士研究生,18260098162@163.com。

=69 GPa，密度 $\rho_s=2\ 700\ \mathrm{kg/m^3}$，则圆形蜂窝材料结构的密度 $\rho_0=\pi/2(t/R)\rho_s=212\ \mathrm{kg/m^3}$。采用显示动力学软件 Abaqus/Explicit 对蜂窝材料进行动力学特性分析，计算中选用 S4R 单元(4 节点减缩积分壳单元)。为了收敛和计算精度的需要，沿壳厚度方向定义 5 个高斯积分点。整个压缩过程中所有可能接触的表面均定义为自由接触表面，且无摩擦。采用与文献[9]相同的边界条件，即当顶端刚性板沿 y 方向冲击蜂窝试件时，底端刚性板固定，结构所有面外位移均被限制以保证其处于平面应变状态。上下刚性板与蜂窝试件的外表面均视为光滑，两者接触无摩擦。模型的面外(沿 z 方向)厚度 $b=10$ mm。

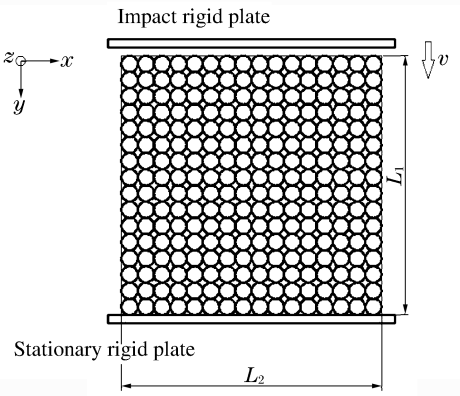

图 1 规则圆形蜂窝材料计算模型

Fig. 1 Calculation model of regular circular honeycombs

在规则蜂窝中引入随机固体填充孔，假定结构的相对密度保持不变，定义孔洞填充比为：

$$\alpha=m/N \tag{1}$$

式中：m 为蜂窝结构中的随机固体填充数，N 为蜂窝结构中的胞元总数。容易得到孔洞填充比为 α 时未填充胞孔的壁厚 t 满足下面的方程，即：

$$\rho L_1 L_2-ms_0=(N-m)\left[\pi R^2-\pi(R-t)^2\right] \tag{2}$$

式中：$s_0=\pi R^2$ 为单个胞孔的面积，ρ 为蜂窝结构相对密度，即：$\rho=\rho_0/\rho_s=\pi/2(t/R)$。

为简化模型，固体填充孔的细观结构与未填充胞孔相同，将固体填充孔质量均匀分布于胞壁上，可以算得相应的固体填充孔胞元胞壁材料密度为：

$$\rho_e=\rho_s s/s_0=\frac{R^2}{t(2R-t)}\rho_s \tag{3}$$

式中：$s=\pi R^2-\pi(R-t)^2$，为胞壁的面积。不同孔洞填充比 α 的蜂窝结构与未填充胞孔壁厚 t 及胞壁材料密度 ρ_e 的对应关系如表 1 所示。

本文中所研究的二维蜂窝结构的相对密度为 0.1，其刚度和强度远低于固体填充孔。因此，固体填充孔可通过改变胞壁材料杨氏模量和屈服强度为规则蜂窝结构胞壁材料相应值的 1 000 倍引入，与 C. Chen 等[6]的有限元模型相同。本文中对同一孔洞填充比计算了 3 组不同随机样本的含随机固体填充孔圆形蜂窝结构。

表 1 含随机固体填充孔蜂窝结构参数

Table 1 Parameters of honeycombs with randomly arranged solid inclusions

α	t/mm	$\rho_e/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$
0.02	0.125	33.106
0.04	0.096	42.650
0.06	0.066	61.490
0.08	0.036	114.130

2 计算结果与分析

2.1 变形模式

限于篇幅，图 2 仅给出了 $\alpha=0$，0.04 时，不同冲击速度下圆形蜂窝结构的变形模式图。当冲击速度为 3 m/s 时，蜂窝结构冲击端和固定端的应力基本相同，变形模式均为准静态模式，在初始压缩变形阶段，整个蜂窝试件的变形是均匀的，各个胞元均具有横向扩张。紧接着，变形不再是均匀的，部分胞元开始交替平行地发生坍塌，很多胞元被 4 个椭圆坍塌胞元围住，结构总体变形呈现“分布崩塌带”模式，结构中的填充孔对崩塌带的分布有微弱影响，所有固体填充孔必然会被坍塌的椭圆形胞元包围。随着相对压缩量的增大，胞元逐层压缩直至蜂窝材料密实化。

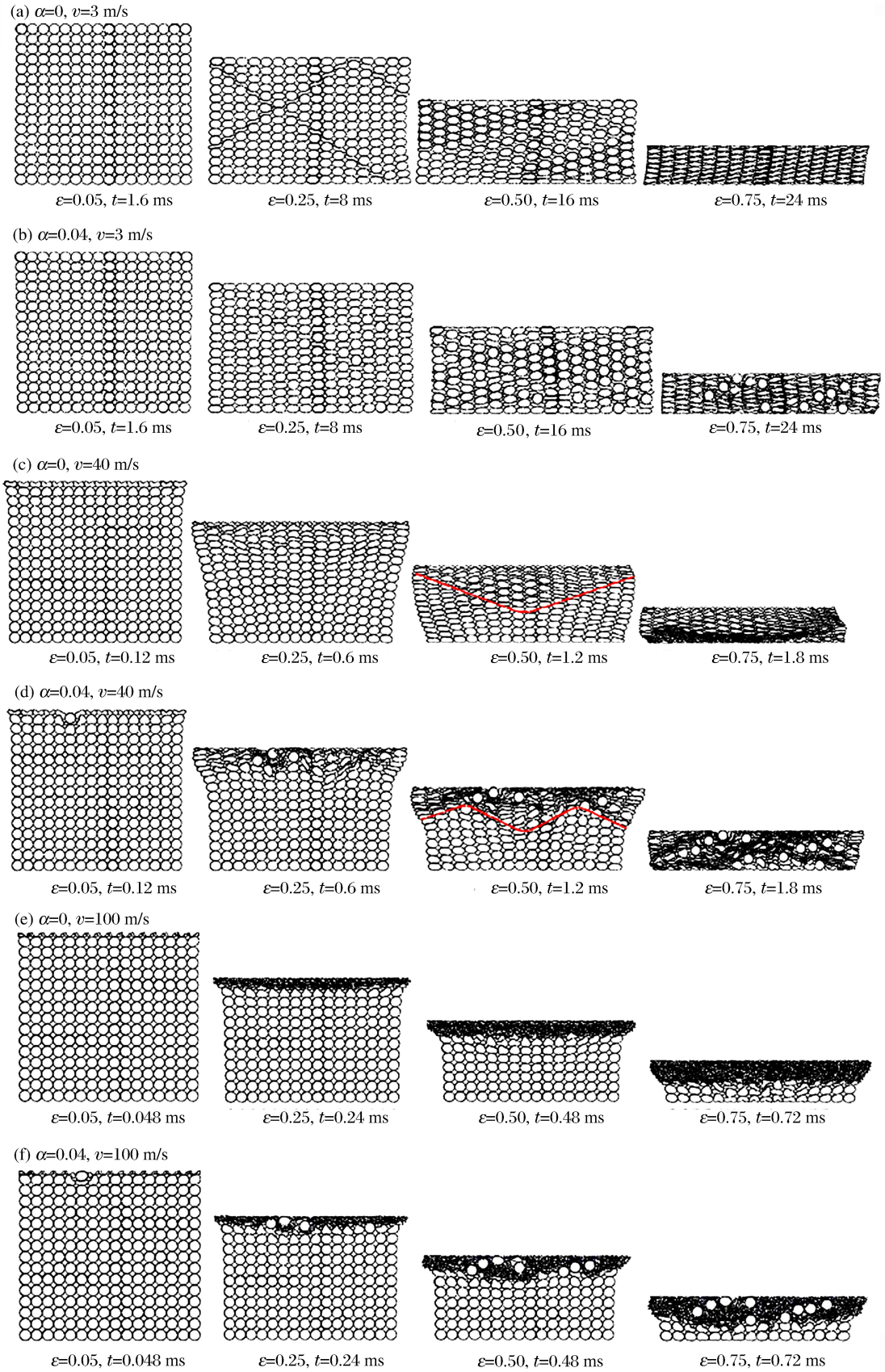

图 2　圆形蜂窝材料变形轮廓图

Fig. 2　Deformation profile of circular honeycomb

随着冲击速度的提高($v=40$ m/s),规则蜂窝结构变形由准静态模式转变为过渡模式。变形初始阶段,惯性效应使得蜂窝结构在靠近冲击端处出现变形局部化,结构冲击端应力处于应力应变曲线的压实应变侧,因此高于准静态模式下的压缩应力值。随着相对压缩量的增大,规则圆形蜂窝结构中部的胞元变形要早于蜂窝结构两边的胞元,使得蜂窝结构整体变形出现"V"形变形带,而固体填充孔在变形过程中具有一定的牵制效应[5],使含填充孔蜂窝结构靠近冲击端的变形局部化现象更加明显,且变形带向结构两侧扩展,呈现出倒置"W"形。

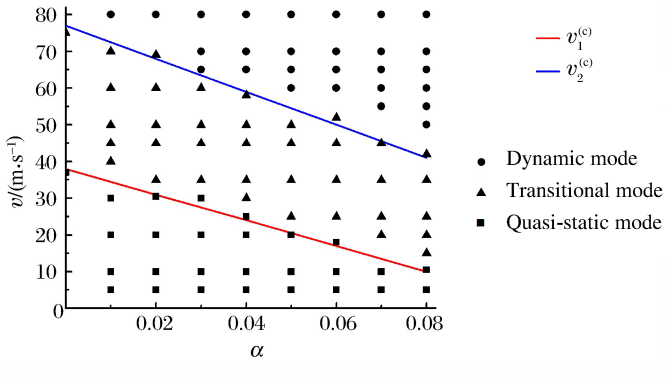

图 3 圆形蜂窝结构的变形模式

Fig. 3 Deformation mode of the circular honeycomb

冲击速度进一步增加为 100 m/s 时,含填充孔的圆形蜂窝结构的变形过程与规则蜂窝材料的变形模式类似,只产生一个呈"I"形状的局部变形带,对应着从冲击端到固定端的逐层压溃变形模式。与含随机固体填充孔六边形蜂窝结构的动态压缩变形模式不同[7],圆形蜂窝结构密实化时,所有的胞元(除填充孔外)均被压实,并没有出现渗漏效应(当蜂窝结构压缩至密实化应变时,部分被固体填充孔包围的未完全坍塌的胞元将不再发生变形)。

研究不同填充比的蜂窝结构在不同冲击速度下的变形模式,结果表明随机填充孔圆形蜂窝材料的变形模式包括准静态模式、过渡模式及动态模式,即固体填充孔并没有改变圆形蜂窝结构 y 方向动态冲击时的变形模式。图 2 则给出了这几种典型变形模式的变形轮廓图。

图 3 则给出了不同填充比下蜂窝结构变形模式转变时的冲击速度值。填充孔的引入对临界速度有一定的影响,根据图 3 中的数据,得到含填充孔蜂窝结构由准静态变形模式向过渡模式转变的临界速度 $v_1^{(c)}$ 和由过渡模式向动态模式转变的临界速度 $v_2^{(c)}$ 的近似公式:

$$v_1^{(c)} = -350\alpha + 38 \tag{4}$$

$$v_2^{(c)} = -450\alpha + 77 \tag{5}$$

2.2 冲击端平台应力的速度效应

作为表征多胞材料能量吸收能力大小的重要参数,平台应力 σ_p 定义为冲击端刚性板压缩应力从第 1 个应力峰值到试件密实化前最大应变所对应的压缩反力的平均名义应力[10],即定义平台应力为:

$$\sigma_p = \frac{1}{\varepsilon_d - \varepsilon_y}\int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon_d}\sigma \mathrm{d}\varepsilon \tag{6}$$

式中:名义应力 σ 为刚性板作用在试件上的压缩反力 F 与初始横截面积 $A(L_2\times b)$ 的比值,名义应变 ε 定义为试件在 y 方向的压缩量与初始长度 L_1 之比,ε_d 为蜂窝结构的密实化应变值,ε_y 为屈服应变,本文中取 $\varepsilon_y=0.02$[9]。

分析可得,当冲击速度大于由准静态变形模式向过渡模式转变的临界速度 $v_1^{(c)}$ 时,平台应力 σ_p 与 v^2 呈线性关系,并且可以由以下公式拟合:

$$\sigma_p = a_1 + a_2 v^2 \tag{7}$$

式中:a_1 和 a_2 为拟合系数。

图 4(a)给出了含填充孔的圆形蜂窝结构冲击端平台应力与速度参量 v^2 之间的关系,图 4(b)所示为局部放大图。从局部放大图中也能够看出,当冲击速度小于临界速度 $v_1^{(c)}$,即蜂窝结构的变形仍处于准静态模式时,冲击端平台应力曲线表现出明显的非线性。S. R. Reid 等[11]基于一维冲击波理论建立了均匀多孔材料动态冲击平台应力σ_p与冲击速度之间的关系,并指出当冲击速度大于一定值时,规则蜂

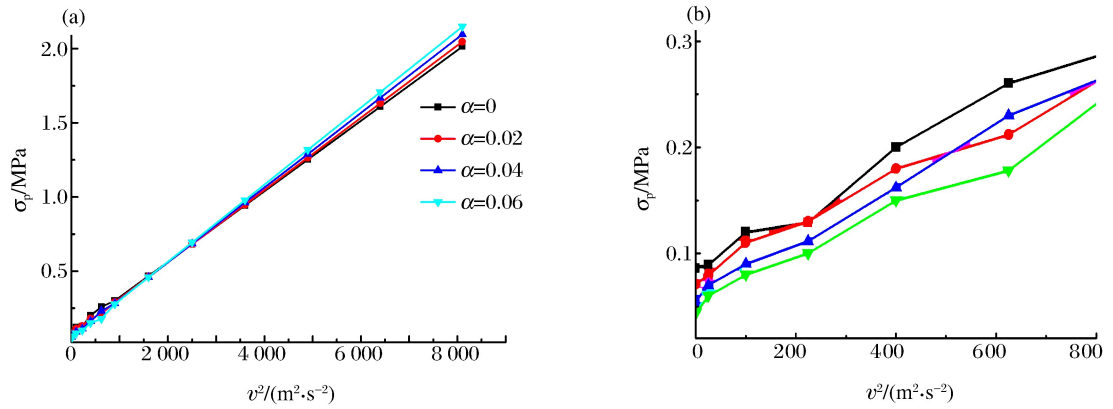

图 4　冲击速度对平台应力的影响

Fig. 4　Effect of impact velocity on the plateau stress of honeycombs

窝结构的平台应力存在速度效应，平台应力值与速度的平方成线性关系。各蜂窝结构的拟合参数值如表 2 所示，本文中的拟合结果表明，当蜂窝结构中含有随机固体填充孔时这样的速度效应同样存在，但此时拟合参数与填充比的大小有关。从表中可知，随着填充比的增大，拟合参数 a_2 也有所增大，这说明填充比的增加使得圆形蜂窝结构冲击端平台应力的速度效应更加明显。

表 2　平台应力拟合关系式中的系数

Table 2　Coefficients in fitting equation of plateau stress

α	a_1/MPa	a_2/(Pa·s^2·m^{-2})
0.00	0.086	0.238
0.02	0.071	0.244
0.04	0.055	0.252
0.06	0.043	0.260

2.3　固体填充孔对冲击端平台应力的影响

图 5 给出了低速冲击时(v=3 m/s)4 种蜂窝结构冲击端的名义应力应变曲线。研究的蜂窝结构模型相对密度保持不变，随着孔洞填充比的增大，变形胞元孔的壁厚明显变薄，圆形蜂窝结构冲击端的应力平台降低。此时蜂窝结构均处于准静态变形模式，规则蜂窝冲击端压缩应力曲线较为平缓，含固体填充孔的圆形蜂窝结构因为填充孔附近的崩塌变形以及变形局部化区域的宏观密度突然提高，使得蜂窝结构的应力明显变大，冲击端应力应变曲线出现了应力尖峰值，当固体填充孔与冲击面的速度一致时，应力幅值回落。另外，随着孔洞填充比的增大，蜂窝结构的密实化应变值变小，由于未出现渗漏现象，其密实化应变值减小的幅度小于含随机固体填充孔的六边形蜂窝结构[7]。

定义相对平台应力为含固体填充孔圆形蜂窝结构冲击端平台应力 σ_p^* 与规则圆形蜂窝结构冲击端平台应力 $\sigma_p^{(0)}$ 之比。图 6 所示为蜂窝结构在 y 方向上受冲击时冲击端相对平台应力随冲击速度的变化关系。低速冲击下，随着孔洞填充比的增大，变形胞孔壁厚的减小使得蜂窝结构冲击端的承载能力显著下降，如图中所示，冲击速度为 3 m/s 时，α=0.06 的蜂窝结构平台应力约为相同相对密度的规则蜂窝结构平台应力的 50%。

随着冲击速度的增大，蜂窝结构变形向冲击端附近移动，惯性效应引起的变形局部化使得结构平台应力增加。对于 α=0.04，0.06的蜂窝结构，填充比的增大使得胞元壁厚变薄，一定程度上会导致结构压缩应力的下降，但是固体填充孔的牵制效应使得动态冲击的惯性效应影响增强，导致蜂窝结构冲击端应力应变曲线中出现应力尖峰，提高了蜂窝结构的吸能能力，这一增强效应很明显，因而在冲击速度小于 40 m/s 时，随着冲击速度的提高，相对平台应力会显著增强。当冲击速度达到 40 m/s 时，含固体填充孔蜂窝结构的平台应力与规则蜂窝结构平台应力基本相同。继续加大蜂窝结构的冲击加载速度(v>80 m/s)，惯性效应的影响起主要作用，胞元的主要变形由低速时的交替平行胞元坍塌变为由接触点处开始向内凹陷崩塌的逐层压缩变形，且蜂窝结构的变形开始慢慢地集中在冲击端附近，这就使得规则蜂窝结构的平台应力也明显增强，从而削弱了相对平台应力的增长，当速度达到 100 m/s 时候，相对平台应力甚至有下降的趋势。

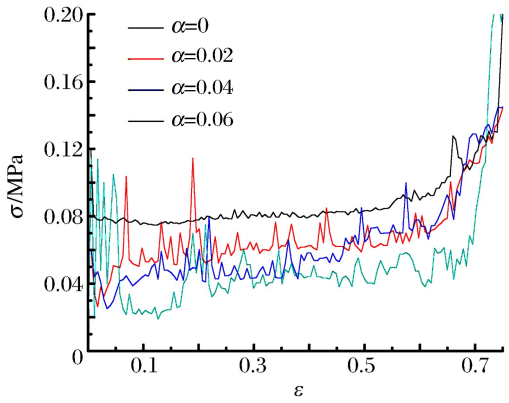

图 5 低速冲击下圆形蜂窝上材料冲击端动态响应曲线

Fig. 5 Dynamic response curve of circular honeycomb at the crushing end

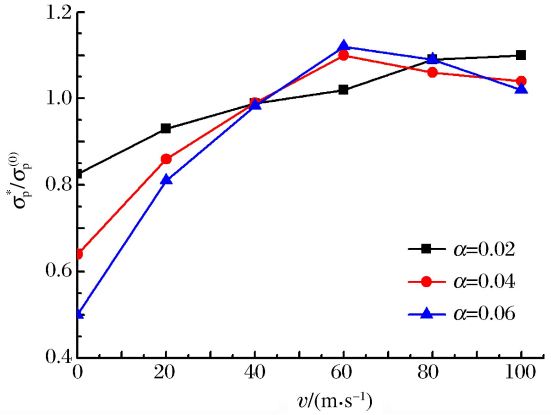

图 6 固体填充孔对 y 方向相对平台应力的影响

Fig. 6 Effect of solid inclusions on the relative plateau stress in y direction

2.4 随机填充孔对能量吸收特性的影响

作为一种高效的阻尼材料，多孔胞元材料已被广泛地应用于各种能量吸收结构中。评价多胞材料与结构能量吸收能力大小的重要指标就是单位质量吸收的能量大小[12]：

$$W_{\mathrm{m}}=\frac{W_{\mathrm{v}}}{\rho\rho_{\mathrm{s}}} \tag{8}$$

式中：$W_{\mathrm{v}}=\int_{\varepsilon_{\mathrm{y}}}^{\varepsilon_{\mathrm{d}}}\sigma\mathrm{d}\varepsilon$ 为蜂窝材料单位体积吸收的能量(用名义应力应变曲线下所围成的面积来表征)。图 7 给出了不同填充比的蜂窝材料单位质量吸收的能量与相对压缩量之间的关系。

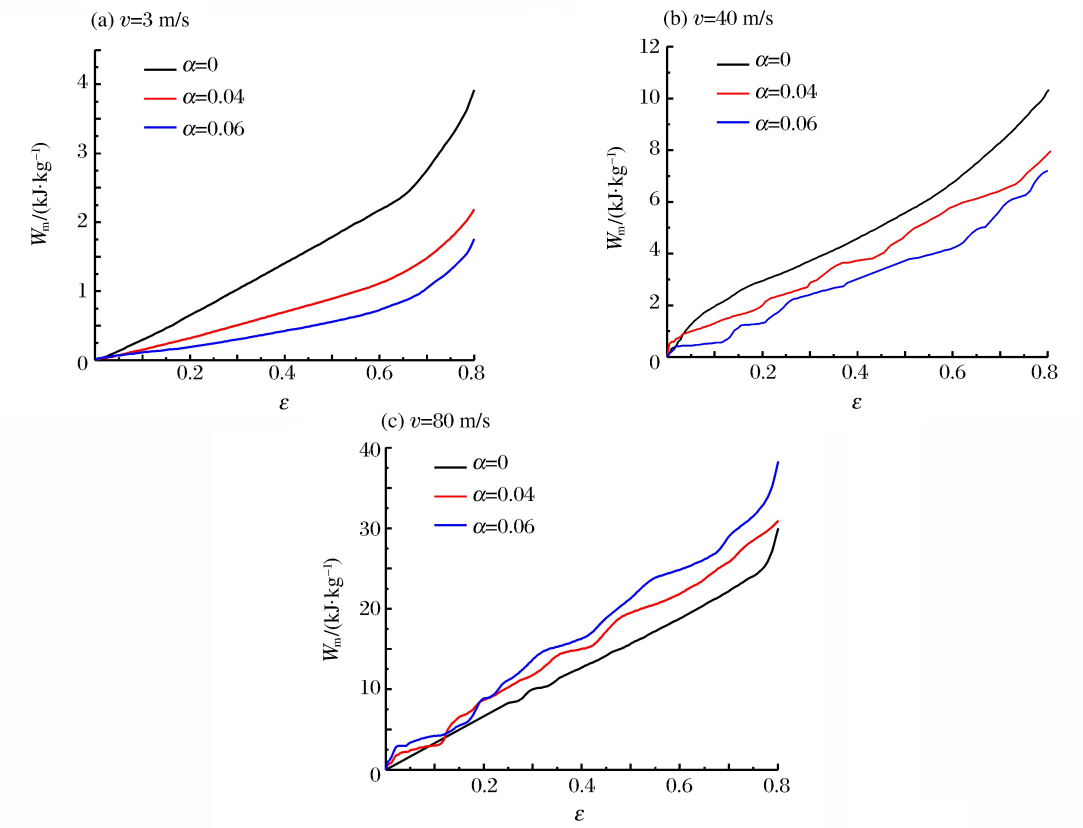

图 7 不同冲击速度下蜂窝结构单位质量吸收能量

Fig. 7 Energy absorption of honeycombs structures at different impact velocities

由图 7 可见，低速冲击下($v=3$ m/s)因为各蜂窝结构均处于准静态压缩模式，单位质量能量吸收曲线较为平滑，固体填充孔并没有提高蜂窝结构的能量吸收能力，相反，胞元孔壁厚度的减小降低了冲击端的应力值，导致含填充孔蜂窝结构的吸能能力下降，当 $\varepsilon=0.8$ 时，$\alpha=0.06$ 的蜂窝结构单位质量吸收能量大小仅为规则圆形蜂窝结构的37.5%。当冲击速度为40 m/s时，蜂窝结构的单位质量吸收能量与低速冲击时相比均有所提高，固体填充孔的存在提高了蜂窝结构的吸能能力，减小了与规则蜂窝结构单位质量吸收能量大小之间的差距，当 $\varepsilon=0.8$ 时，$\alpha=0.06$ 的蜂窝结构单位质量吸收能量大小为规则圆形蜂窝结构的 72%。当冲击速度为 80 m/s 时，蜂窝结构都处于动态冲击模式，惯性效应起到了主要的作用，固体填充孔的牵制效应使得蜂窝结构的变形局部化更加明显，尽管含随机固体填充孔的蜂窝结构胞壁较薄，但是其冲击端应力值仍大于规则圆形蜂窝结构，单位质量吸能能力大大提升。由图 7(b)～(c)也能看出，含随机固体填充孔蜂窝结构冲击端应力应变曲线中出现的应力峰值使得单位质量吸收能量曲线体现了局部的凹凸性。

3　结　论

本文中讨论了随机固体填充孔对圆形蜂窝结构材料的面内冲击性能的影响。计算结果表明：

(1)含固体填充孔的圆形蜂窝结构与相同相对密度的规则圆形蜂窝结构具有相同的变形模式，即准静态模式、过渡模式及动态模式，但填充比对变形模式的临界速度有影响。

(2)当含随机固体填充孔的圆形蜂窝结构变形处于准静态模式时，冲击端平台应力曲线表现出明显的非线性，冲击速度大于由准静态变形模式向过渡模式转变的临界速度 $v_1^{(c)}$ 时，平台应力 σ_p 与 v^2 呈线性关系，存在明显的速度效应。

(3)低速冲击下，含固体填充孔的蜂窝结构平台应力随孔洞填充比的增大而显著降低，导致含填充孔蜂窝结构的吸能能力下降，冲击速度为 3 m/s 时，$\alpha=0.06$ 的蜂窝结构平台应力约为相同相对密度的规则蜂窝结构平台应力的 50%，单位质量吸收能量大小仅为规则圆形蜂窝结构的 37.5%。随着冲击速度的提高，固体填充孔的牵制效应使得动态冲击的惯性效应影响增强，冲击端应力应变曲线出现明显的应力尖峰，提高了蜂窝结构的单位质量吸能能力。

本文中对含随机固体填充孔的圆形蜂窝结构的面内冲击性能的研究可为有缺陷蜂窝材料的研究提供参考，但关于随机固体填充孔与蜂窝结构动态响应特性更深层次的探讨还有待进一步展开。

参考文献：

[1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties[M]. 2nd ed, Cambridge: Cambridge University Press, 1997:93-147.

[2] 卢天健，何德坪，陈常青，等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展，2006，36(4)：517-535.
Lu Tian-jian, He De-ping, Chen Chang-qing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. Advances in Mechanics, 2006,36(4):517-535.

[3] Jeon I, Asahina T. The effect of structural defects on the compressive behavior of closed-cell A1 foam[J]. Acta Materialia, 2005,53:3415-3423.

[4] Kepets M, Lu T J, Dowling A P. Modeling of the role of defects in sintered FeCrAlY foams[J]. Acta Mechanica Sinica, 2007,23(5): 511-529.

[5] Prakash O, Bichebois P, Brechet Y, et al. A note on the deformation behaviour of two-dimensional model cellular structures[J]. Philosophical Magazine A: Physics of Condensed Matter Structure Defects and Mechanical Properties, 1996,73:739-751.

[6] Chen C, Lu T J, Fleck N A. Effect of inclusions and holes on the stiffness and strength of honeycombs[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001,43(2):487-504.

[7] Nakamoto H, Adachi T, Araki W. In-plane impact behavior of honeycomb structures randomly filled with rigid inclusions[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(1):73-80.

[8] Nakamoto H, Adachi T, Araki W. In-plane impact behavior of honeycomb structures filled with linearly arranged inclusions[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(8):1019-1026.

[9] Sun De-qiang, Zhang Wei-hong. In-plane crushing and energy absorption performance of multi-layer regularly arranged circular honeycombs[J]. Composite Structures, 2013,96:726-735.

[10] Tan P J, Reid S R, Harrigan J J, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminum foams: Part Ⅰ: Experimental data and observations[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005,53(10):2174-2205.

[11] Reid S R, Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(5/6):531-570.

[12] 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.

In-plane impact behavior of circular honeycomb structures randomly filled with rigid inclusions

He Qiang, Ma Da-wei, Zhang Zhen-dong

(*School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: The model of circular honeycomb structures randomly filled with rigid inclusions which keeps the relative density as a constant is developed. And then the effects of impact velocity and packing ratio on the deformation modes, dynamic plateau stress and energy absorption capacities are discussed in detail. Research results show that the rigid inclusions have pinning effect in the process of deformation and the deformation modes can still be classified as quasi-static mode, transitional mode and dynamic mode. The plateau stress is proportional to the square of the impact velocity when the honeycombs are deformed at transitional mode or dynamic mode, which shows obvious speed effect. The energy absorption capacities of circular honeycombs are higher than these of the regular honeycombs at high-velocity impact. These results can provide valuable suggestions in the study and design of the functionally gradient honeycombs.

Key words: solid mechanics; deformation modes; energy absorption; plateau stress; inclusions; circular honeycomb

(责任编辑 王易难)