

# 随机缺陷对蜂窝结构动态行为影响的有限元分析<sup>1)</sup>

寇东鹏\* 虞吉林<sup>\*,2)</sup> 郑志军<sup>\*,†</sup>

\* (中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027)

† (中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 通过对胞壁随机移除的蜂窝结构动态变形过程的有限元模拟, 分析了随机缺陷对蜂窝结构变形模式的影响, 得到蜂窝结构在两个加载方向上的变形模式图及不同模式间转换的临界速度. 对含缺陷蜂窝结构平台应力的研究发现, 当变形模式为过渡模式或动态模式时结构平台应力与冲击速度的平方成线性关系. 相同密度下, 低缺陷蜂窝结构的平台应力在由过渡模式向动态模式转变的临界速度附近高于规则蜂窝结构, 较高的随机缺陷则使蜂窝结构的平台应力在由准静态模式向过渡模式转变的临界速度附近显著下降.

**关键词** 多孔材料, 蜂窝, 缺陷, 平台应力, 有限元分析

中图分类号: O39 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2009)06-0859-10

## 引 言

蜂窝及多孔泡沫材料作为轻质、高强韧、吸能性能优异的多功能工程材料在交通、航空航天、海洋采油等领域得到广泛应用. 除密度与基体材料特性外, 多孔材料力学性能还与胞孔几何排列、孔壁材料分布、缺陷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, 对于理解其变形的细观力学机制及指导材料的设计优化具有重要的意义.

Gibson 等<sup>[1]</sup> 采用规则蜂窝、简单立方等单胞模型, 获得了一系列多孔材料力学性能的半经验公式. 实际多孔材料中除非规则性外, 还有因制备工艺造成的孔壁弯曲、孔壁破裂、空洞及固体填充孔等缺陷<sup>[2,3]</sup>. 由于实验条件及观测手段的限制, 实验研究存在一定困难, 有限元方法成为研究细观结构对材料性能影响及机理的重要手段. Silva 等<sup>[4,5]</sup> 建立了二维 Voronoi 蜂窝的数值模型, 通过移除胞壁研究空洞对材料准静态压缩强度的影响, 他们发现移除 10% 的胞壁使材料的塑性垮塌应力降低 40%. 对闭孔泡沫铝的实验研究也发现空洞缺陷显著降低材料的刚度及塑性垮塌应力<sup>[2]</sup>. Guo 等<sup>[6]</sup> 研究发现分布的空洞缺陷之间相互作用的尺寸范围约为孔径的 10 倍. Chen 等<sup>[7,8]</sup> 在 Silva 的 Voronoi 蜂窝模型基础上提出了更为合理的加载边界条件, 并系统地研究了各

种缺陷对材料准静态力学性能的影响及作用机理. 蜂窝结构的动态性能同样引起了研究者的广泛兴趣, Ruan 等<sup>[9]</sup> 通过有限元模拟研究了各种密度的规则蜂窝结构在不同冲击速度下的变形模式, 并给出了蜂窝结构平台应力的经验公式. 但是, 目前关于结构缺陷对多孔材料动态力学性能影响的研究还很有限. Zheng 等<sup>[10]</sup> 研究了胞孔形状不规则对蜂窝结构动态力学行为的影响, 发现低速冲击下不规则蜂窝吸能能力优于规则蜂窝. 刘耀东等<sup>[11]</sup> 对二维 Voronoi 蜂窝的动态性能研究发现惯性导致结构宏观变形不均匀, 是高速冲击下结构平台应力提高的主要原因. Li 等<sup>[12]</sup> 对中等冲击速度下壁厚随机分布的蜂窝结构动态力学性能进行了数值模拟, 发现随着壁厚分布随机性的增加蜂窝结构的平台应力下降.

本文使用 ABAQUS/Explicit 有限元程序<sup>[13]</sup> 对胞壁随机移除的蜂窝结构动态变形过程进行数值模拟以研究随机移除胞壁对蜂窝结构动态力学行为的影响. 通过计算不同冲击速度下含缺陷蜂窝结构的平台应力, 研究了平台应力的速度效应. 最后, 对含缺陷蜂窝结构与规则蜂窝结构的平台应力进行了比较, 讨论了缺陷影响蜂窝结构动态力学性能的机理.

## 1 有限元模型

规则蜂窝结构的有限元模型如图 1(a) 所示,  $X_1$

2008-04-11 收到第 1 稿, 2008-10-21 收到修改稿.

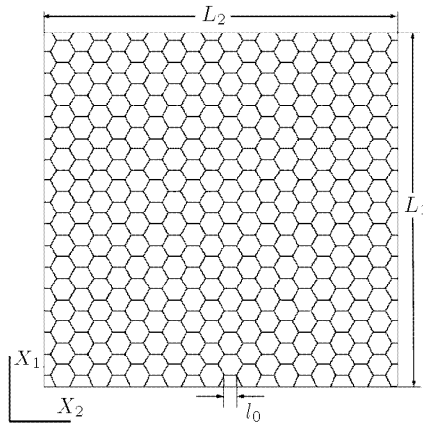
1) 国家自然科学基金资助项目 (10672156, 10532020, 90205003).

2) E-mail: jlyu@ustc.edu.cn

和  $X_2$  方向的长度  $L_1, L_2$  均为 100 mm, 厚 1 mm. 蜂窝结构棱长  $l_0 = 3.5$  mm, 结构总胞壁数  $N = 947$ , 其中棱长为  $l_0$  的胞壁数  $N_1 = 915$ . 为模拟外围胞孔的自接触, 在模型四条边界上定义边界胞壁, 其壁厚取为结构胞壁厚度的 1/10, 此时边界胞壁对结构响应的的影响可以忽略<sup>[10]</sup>. 缺陷通过随机移除规则蜂窝的胞壁引入<sup>[8]</sup>, 为表征结构缺陷的大小, 定义胞壁移除比  $\alpha$  为

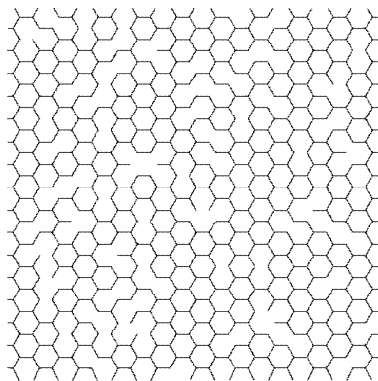
$$\alpha = \frac{m}{N_1} \quad (1)$$

其中  $m$  为移除的胞壁数. 图 1(b) 给出了胞壁移除比为 0.09 的一个含缺陷蜂窝结构样本. 为简化接触定义, 移除的结构胞壁厚度被设为与边界胞壁壁厚相同, 则模型中胞壁移除比为  $\alpha$  的蜂窝结构壁厚  $t$  为



(a) 规则蜂窝结构模型

(a) Regular honeycomb structure



(b) 胞壁移除比为 0.09 的含缺陷蜂窝结构模型

(b) Imperfect honeycomb structure with  $\alpha = 0.09$

图 1 二维蜂窝有限元模型

Fig.1 FE models of honeycomb structures

$$t = \frac{\rho L_1 L_2}{(2L_1 + 2L_2 + N_1 \alpha l_0)/10 + \sum_1^{N-N_1 \alpha} l_i} \quad (2)$$

其中  $l_i$  为蜂窝结构第  $i$  段胞壁棱长,  $\rho$  为蜂窝结构相对密度. 本文中所有蜂窝结构相对密度都为 0.1.

模型中胞壁为弹性 - 理想塑性材料, 其弹性模量和屈服应力分别为 69 GPa 和 76 MPa, 泊松比 0.3, 密度为 2700 kg/m<sup>3</sup>. 胞壁棱长平均划分为 6 个 S4R 单元 (四节点减缩积分壳单元), 单元横截面上有 5 个积分点, 整个有限元模型共 6305 个单元. 结构加载时, 沿加载方向一端由刚性面支承, 另一端刚性面以恒速度  $v$  加载, 加载及支承面上节点可沿刚性面滑动 (摩擦系数 0.02), 垂直于加载方向的结构边界节点可在面内自由移动, 模型的每个胞元内及边界胞壁间定义自接触, 所有节点离面位移约束为零, 单元处于平面应变状态.

平台应力是衡量多孔材料吸能性能的重要参数, Tan 等在文献 [14] 中详细介绍了通过应力应变曲线获得结构平台应力的方法. 定义压实应变  $\epsilon_D$  为对应于  $\max \left( \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon / \sigma_{\epsilon=\epsilon_0} \right)$  的工程应变, 结构平台应力可定义为

$$\sigma_p = \frac{1}{\epsilon_D - \epsilon_y} \int_{\epsilon_y}^{\epsilon_D} \sigma d\epsilon \quad (3)$$

其中  $\epsilon_y$  是屈服应变, 本文中取  $\epsilon_y = 0.02$ . 为考察样本随机性对蜂窝结构平台应力的影响, 计算了胞壁移除比为 0.04 的两组蜂窝结构相对平台应力 (含缺陷蜂窝结构平台应力  $\sigma_p^*$  与规则蜂窝结构平台应力  $\sigma_p^0$  之比) 随冲击速度的变化曲线, 如图 2 所示, 每组曲线由 4 个不同的随机样本统计平均获得. 从图中可以看到, 尽管随随机样本不同平台应力计算值

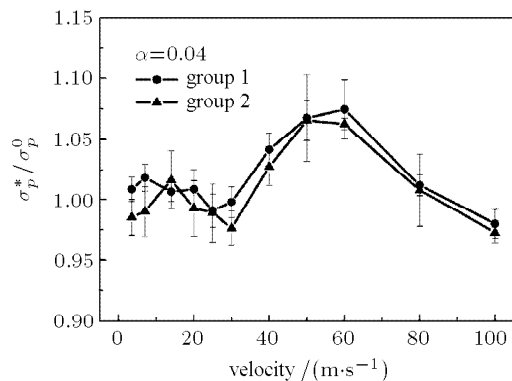


图 2 样本随机性对蜂窝结构平台应力的影响

Fig.2 Effect of randomness of samples on the plateau stress in  $X_1$  direction

存在一定的标准差，但两组曲线的平台应力统计平均值吻合较好，因此，在本文的计算中，对每一胞壁移除比将取 4 个不同的随机样本进行计算分析。

### 2 结果与分析

#### 2.1 变形模式图

图 3 为数值模拟得到的冲击速度为 7 m/s 时蜂窝结构的名义应力应变曲线。图 4 为蜂窝结构  $X_1$  方向冲击速度为 7 m/s 时的变形演化过程。从图 4 可以看到，在  $\alpha = 0$  (规则蜂窝结构) 及  $\alpha = 0.04$  的蜂窝结构中，均出现明显的 X 形变形带。随着应变的增加，新的变形带由边界向中心扩展 (图 4(b))，蜂窝结构逐层变形使应力维持在一个较为恒定的水平 (图 3 曲线 1,2)，结构变形为 X 模式。在  $\alpha = 0.09$  及  $\alpha = 0.18$  的蜂窝结构中，结构变形首先在各胞壁移除处发生，变形初始阶段结构应力较低 (图 3 曲线 3,4)，随着应变的增大，变形带由胞壁移除处向周围扩展，但很快与其它变形带相接，变形带不再为规则的 X 形，而是随机分布的多个变形带。胞孔形状不规则及壁厚随机分布的蜂窝结构在低速冲击下也具有相同的变形模式 [10,12]。较多的随机缺陷使蜂窝结构变形由逐层崩塌的倾斜变形带转变为同时变形的多个变形带，蜂窝结构应力逐渐增大，甚至超过规则蜂窝结构，在之后的论述中我们称这一变形模式为分布崩塌带模式。需要指出的是，蜂窝结构变形为 X 模式和分布崩塌带模式时，结构冲击面和支承

面应力基本相同，即两种模式可看作准静态模式。关于不同变形模式下结构冲击面和支承面应力的讨论，可以参见文献 [11]。当冲击速度为 30 m/s 时 (图 5)， $\alpha = 0, 0.04, 0.09$  的蜂窝结构在冲击面附近均出现明显的 V 形变形带，结构变形模式为过渡模式，在这一模式下，结构冲击面应力明显高于支承面应力。相对地， $\alpha = 0.18$  的蜂窝结构初始变形带比低速时更为靠近冲击面 (比较图 5(m),(n) 及图 6(m),(n))，但其冲击面附近材料压实并不明显，结构变形仍为分布崩塌带模式。冲击速度达到 60 m/s 时 (图 6)， $\alpha = 0, 0.04, 0.09$  的 3 种蜂窝结构的变形都集中在冲击面附近，随着应变的增加，结构几乎为冲击面下方的逐层崩塌变形，冲击面应力远高于支承面应力，

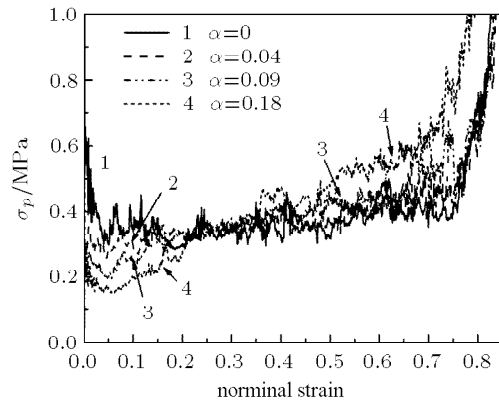


图 3 低速冲击下 ( $v = 7 \text{ m/s}$ ) 蜂窝结构的名义应力应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curves of honeycombs under impact velocity  $v = 7 \text{ m/s}$

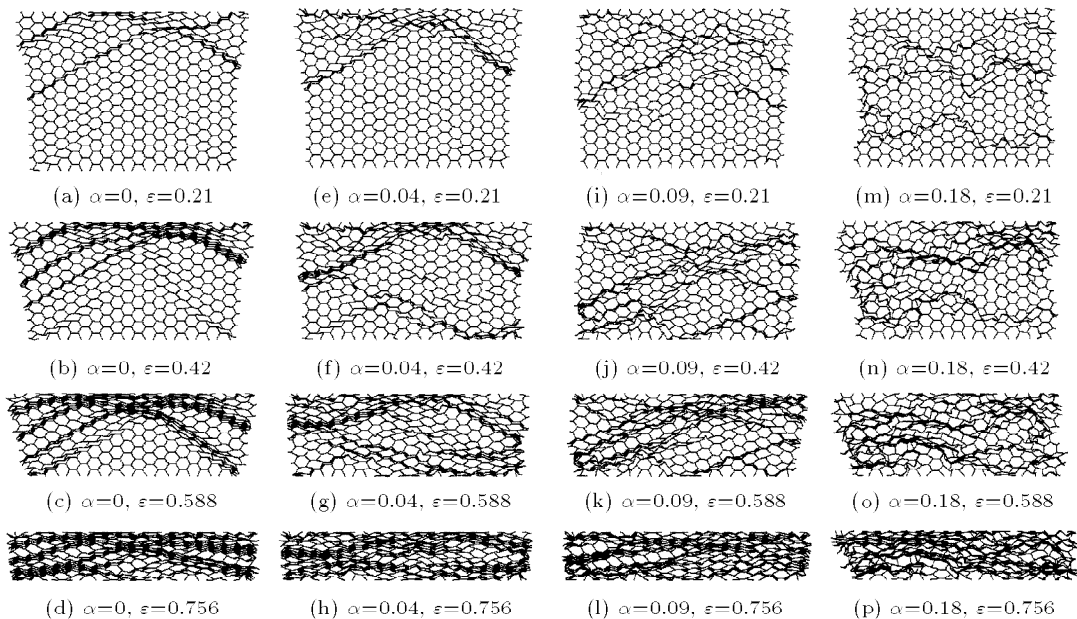


图 4  $X_1$  方向上蜂窝结构动态变形演化过程， $v = 7 \text{ m/s}$   
Fig.4 Crushing of honeycombs in the  $X_1$  direction,  $v = 7 \text{ m/s}$

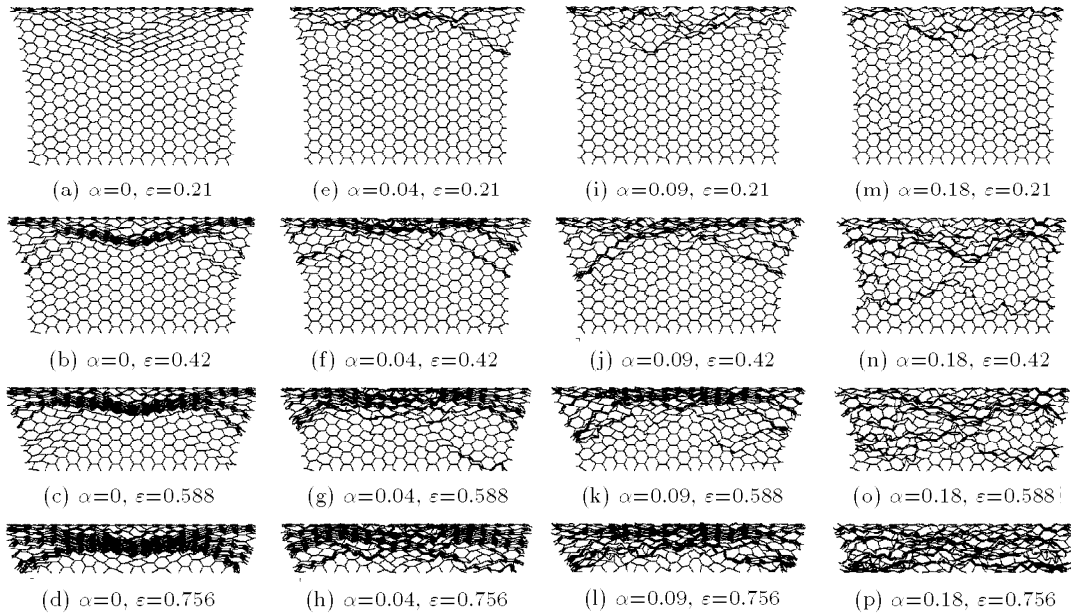


图 5  $X_1$  方向上蜂窝结构动态变形演化过程,  $v = 30 \text{ m/s}$

Fig.5 Crushing of honeycombs in the  $X_1$  direction,  $v = 30 \text{ m/s}$

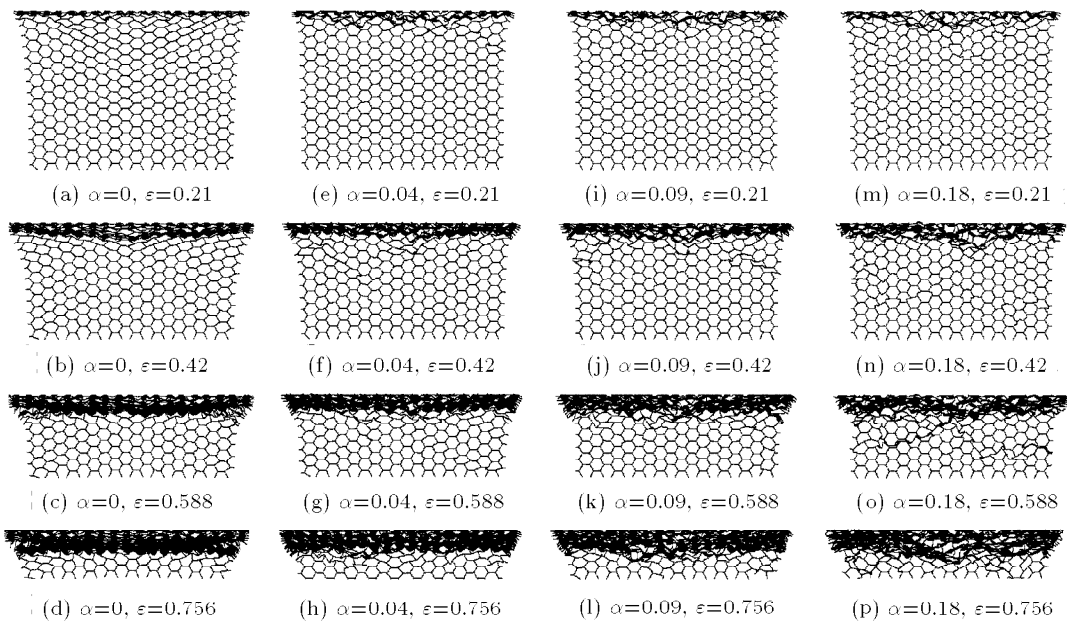


图 6  $X_1$  方向上蜂窝结构动态变形演化过程,  $v = 60 \text{ m/s}$

Fig.6 Crushing of honeycombs in the  $X_1$  direction,  $v = 60 \text{ m/s}$

蜂窝结构的变形模式为 I 模式 (动态模式);  $\alpha = 0.18$  的蜂窝结构除冲击面附近的压实变形外, 在远离冲击面的缺陷处, 还同时存在崩塌变形带 (图 6(o)), 结构的变形模式仍为过渡模式。

图 7 为蜂窝结构  $X_1$  方向上受冲击时的变形模式图。图中同时给出了蜂窝结构变形模式间的临界速度的近似公式。蜂窝结构由准静态模式 (包括 X

模式及分布崩塌带模式) 向过渡模式转变的临界速度  $v_{c1} = 11 + 128\alpha(\text{m/s})$ ; 由过渡模式向动态模式转变的临界速度  $v_{c2} = 55 + 55\alpha(\text{m/s})$ 。随着胞壁移除比的增大, 临界速度提高, 尤其在由准静态模式向过渡模式转变时临界速度提高较为明显, 而在 Voronoi 蜂窝结构中, 改变胞孔形状的不规则度对变形模式转换的临界速度没有明显影响 [10]。

图 8~ 图 10 分别给出了  $X_2$  方向上冲击速度为 7 m/s, 30 m/s, 80 m/s 时蜂窝结构的变形过程. 随着冲击速度的提高, 规则蜂窝结构变形由 V 模式 (图 8(a)~(c)), 过渡模式 (图 9(a)~(c)), 逐渐转变为 I 模式 (图 10(a)~(c)). 低速冲击下, 即使很小的胞壁移除比也对蜂窝结构变形产生很大的影响 (图 8(d)~(i)), 结构变形为分布崩塌带模式. 随着冲击速度的提高,

蜂窝结构变形带向冲击面一侧集中,  $v = 30$  m/s 时, 3 种含缺陷蜂窝结构在冲击面一侧出现压实变形带 (图 9), 结构变形为过渡模式,  $\alpha = 0.09$  及  $\alpha = 0.18$  的蜂窝结构变形区厚度明显大于规则蜂窝结构. 当冲击速度达到 80 m/s 时, 所有的蜂窝结构均为 I 形崩塌变形, 即动态模式 (图 10).

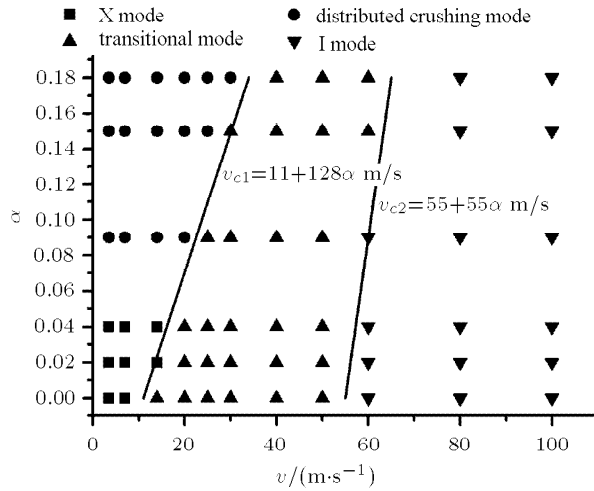


图 7  $X_1$  方向上蜂窝结构变形模式图

Fig.7 Deformation mode map of honeycombs in the  $X_1$  direction

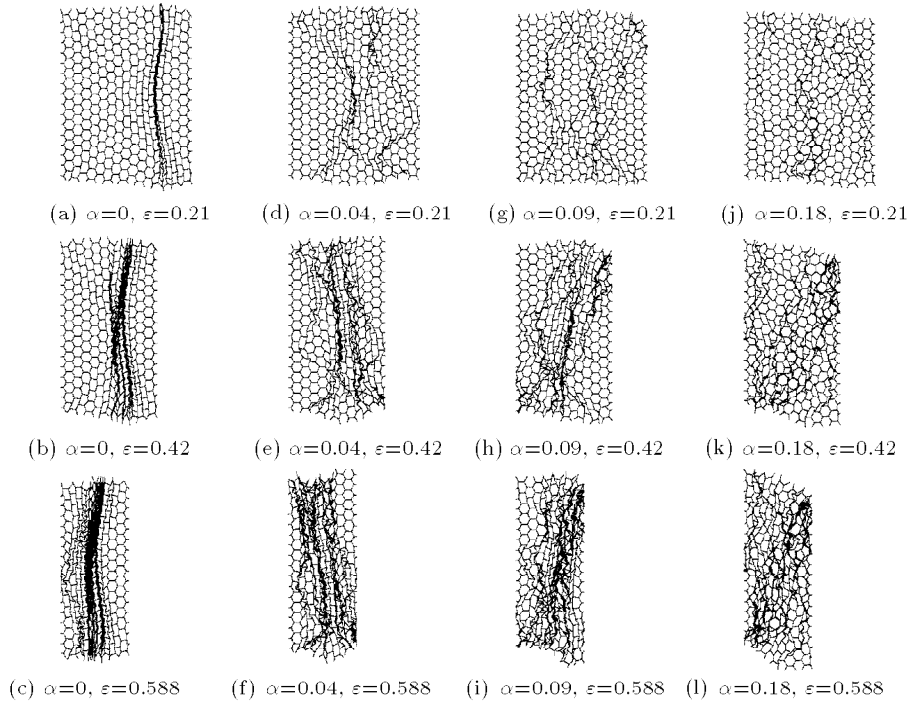


图 8  $X_2$  方向上蜂窝结构动态变形演化过程,  $v = 7$  m/s

Fig.8 Crushing of honeycombs in the  $X_2$  direction,  $v = 7$  m/s

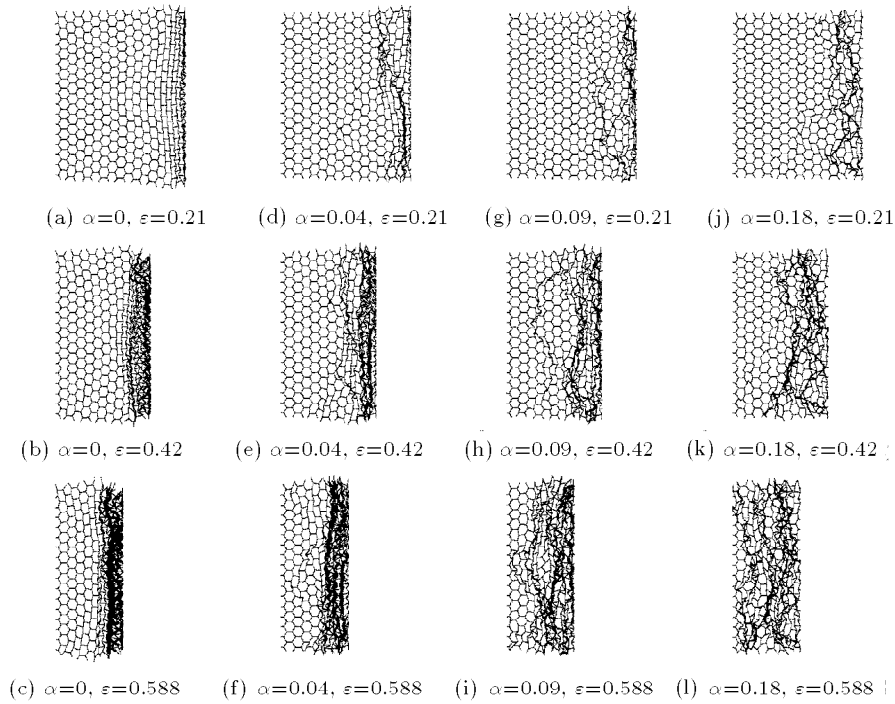


图 9  $X_2$  方向上蜂窝结构动态变形演化过程,  $v = 30 \text{ m/s}$

Fig.9 Crushing of honeycombs in the  $X_2$  direction,  $v = 30 \text{ m/s}$

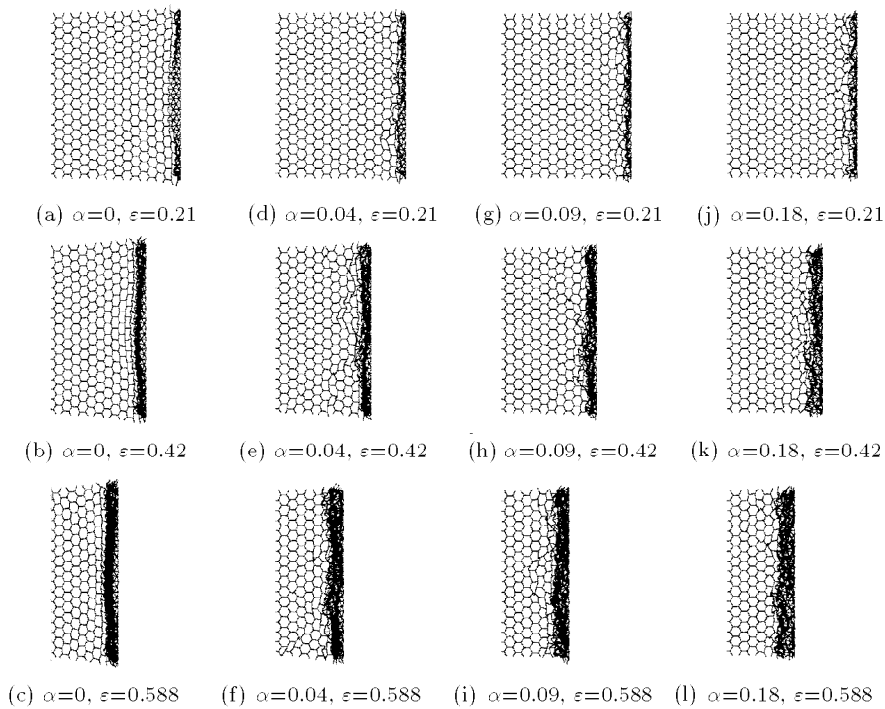


图 10  $X_2$  方向上蜂窝结构动态变形演化过程,  $v = 80 \text{ m/s}$

Fig.10 Crushing of honeycombs in the  $X_2$  direction,  $v = 80 \text{ m/s}$

图 11 给出了蜂窝结构  $X_2$  方向受冲击时的变形模式图. 蜂窝结构由准静态模式 (包括 V 模式及分

布崩塌带模式) 向过渡模式转变的近似临界速度为  $v_{c1} = 16 + 100\alpha(\text{m/s})$ ; 由过渡模式向动态模式转变

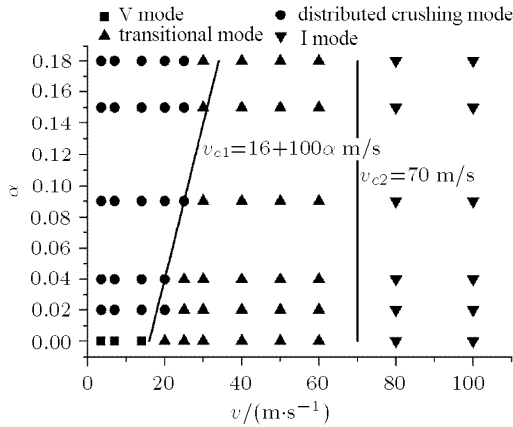


图 11  $X_2$  方向上蜂窝结构变形模式图

Fig.11 Deformation mode map of honeycombs in the  $X_2$  direction

的近似临界速度为 70 m/s.

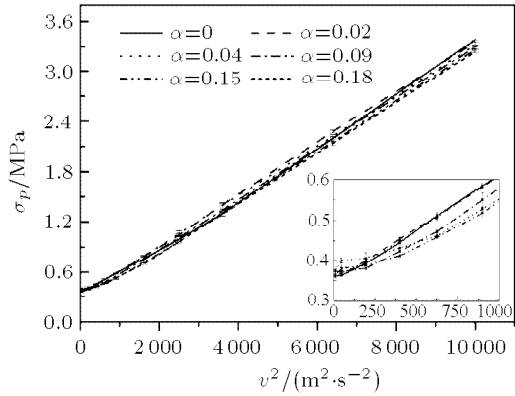
从图 7 和图 11 的变形模式图中可以看出，冲击速度及结构的细观缺陷均对蜂窝结构的变形模式产生影响。一方面，随着冲击速度的提高，惯性效应将导致蜂窝结构在冲击面附近发生变形局部化；另一方面，缺陷的存在使结构内部出现更多的变形带，两种机制的共同作用使胞壁随机移除的蜂窝结构呈现出比规则蜂窝结构更为复杂多样的变形特征，变形模式的转变也给结构动力学性能带来影响，这将在第 2.3 节和 2.4 节中进行讨论。

2.2 平台应力的速度效应

图 12(a) 和 12(b) 分别给出了  $X_1$  和  $X_2$  方向上蜂窝结构平台应力与速度参量  $v^2$  之间的关系，当冲击速度高于准静态模式与过渡模式的临界速度  $v_{c1}$  时，蜂窝结构平台应力  $\sigma_p$  在两个方向上均与  $v^2$  成线性关系，可用下式进行拟合

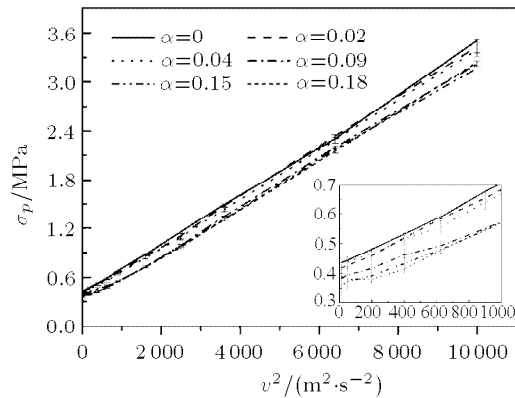
$$\sigma_p = c_1 + c_2 v^2 \quad (4)$$

式中， $c_1$  和  $c_2$  为拟合系数。从图 12 中可以看到， $v < v_{c1}$  时，通孔蜂窝结构曲线表现出明显的非线性。 $v \geq v_{c1}$  时，蜂窝结构平台应力曲线的拟合系数  $c_1$  和  $c_2$  及相关系数  $R$  如表 1 所示。Ruan 等<sup>[9]</sup>指出高于一定冲击速度时规则蜂窝结构的平台应力存在速度效应，平台应力与速度的平方成线性关系。本文的拟合结果表明，相同的效应在随机移除胞壁的蜂窝结构中仍然存在，但拟合系数与缺陷大小有关。从表 1 中可以看到，缺陷对系数  $c_2$  影响较小，而当  $\alpha > 0.09$  时，系数  $c_1$  相比规则蜂窝结构明显减小。



(a)  $X_1$  方向

(a)  $X_1$  direction



(b)  $X_2$  方向

(b)  $X_2$  direction

图 12 冲击速度对平台应力的影响

Fig.12 Effect of impact velocity on the plateau stress of honeycombs

表 1 蜂窝结构平台应力拟合关系式 (4) 中的系数

Table 1 Coefficients in Eq.(4)

	$\alpha$	$c_1/\text{MPa}$	$c_2/(\text{MPa}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-2})$	$R$
$X_1$	0	0.309 25	3.002 02	0.997 2
	0.02	0.310 32	3.044 07	0.999 7
	0.04	0.317 11	2.992 20	0.999 9
	0.09	0.270 09	3.014 71	0.999 9
	0.15	0.227 32	3.025 96	0.999 8
	0.18	0.207 72	3.023 59	0.999 9
$X_2$	0	0.408 35	3.053 83	0.999 8
	0.02	0.407 36	3.000 64	0.999 5
	0.04	0.348 76	3.036 07	0.999 8
	0.09	0.258 66	2.982 02	0.999 5
	0.15	0.264 79	2.953 95	0.999 4
	0.18	0.217 22	3.023 59	0.999 9

### 2.3 随机缺陷对 $X_1$ 方向平台应力的影响

图 13 给出了  $X_1$  方向上蜂窝结构相对平台应力随冲击速度的变化关系曲线. 当冲击速度较低 ( $v \leq 7\text{ m/s}$ ) 时, 胞壁移除比  $\alpha \geq 0.09$  的蜂窝结构平台应力高于规则蜂窝结构, 缺陷的引入使蜂窝结构出现更多的变形带是导致这一现象的原因. 随着冲击速度的提高 ( $7\text{ m/s} < v \leq 30\text{ m/s}$ ), 对规则蜂窝及  $\alpha \leq 0.04$  的蜂窝结构, 结构变形为过渡模式, 惯性效应引起的变形局部化使结构冲击面应力处于应力应变曲线的压实应变侧, 结构应力比准静态模式下应力显著提高, 蜂窝结构吸能能力增强. 但对于  $\alpha \geq 0.09$  的蜂窝结构, 较大的缺陷使变形分散至远离冲击面的更大区域, 蜂窝结构变形仍为准静态模式, 其平台应力比规则蜂窝下降可达 10% 以上. 当冲击速度大于  $30\text{ m/s}$  时, 一方面胞壁移除使冲击面附近胞元由较为规则的层状崩塌转变为移除胞壁附近胞元的区域崩塌, 更大的变形区域 (图 6(a),(e),(i),(m)) 使含缺陷蜂窝结构平台应力增加高于规则蜂窝结构, 另一方面  $\alpha \geq 0.09$  的蜂窝结构变形由准静态模式转变为过渡模式, 惯性效应的影响越来越显著, 因此含缺陷蜂窝结构相对平台应力显著提高. 冲击速度大于  $60\text{ m/s}$  时, 蜂窝结构变形均为动态模式, 惯性效应对各蜂窝结构的影响基本一致, 但由于移除胞壁后蜂窝结构的变形塑性较数目少于规则蜂窝结构, 图 13 中相对平台应力逐渐下降, 至冲击速度为  $100\text{ m/s}$  时, 含缺陷蜂窝结构平台应力均低于规则蜂窝结构. Zheng 等<sup>[10]</sup> 在胞孔形状不规则的蜂窝结构中也发现了不规则性引起的增强效应, 但需要指出的是, 与他们的结果不同, 胞元的随机缺失一方面使变形分散从而导致平台应力提高, 另一方面, 过多的结构缺陷也直接导致平台应力的下降, 两种不同的

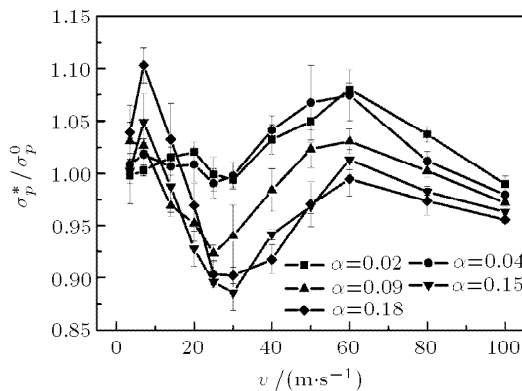


图 13 缺陷对  $X_1$  方向平台应力的影响: 相对平台应力 vs. 冲击速度  
Fig.13 Effect of imperfection on the plateau stress in the  $X_1$  direction: relative plateau stress vs. impact velocity

效应使移除胞壁后的蜂窝结构表现出更为复杂的冲击力学行为.

图 14 给出了 4 种不同冲击速度下胞壁移除比对蜂窝结构相对平台应力的影响, 从图中可以看到, 冲击速度为  $30\text{ m/s}$  时移除胞壁使蜂窝结构平台应力低于规则蜂窝结构, 并且随着缺陷的增加, 蜂窝结构平台应力下降, 这一结论与 Li 等<sup>[12]</sup> 对  $34\text{ m/s}$  冲击速度下壁厚随机分布蜂窝结构的研究结论一致, 然而在冲击速度为  $60\text{ m/s}$  时, 尽管随着胞壁移除比的增加蜂窝结构平台应力下降, 所有的含缺陷蜂窝结构平台应力均高于规则蜂窝结构. 冲击速度为  $100\text{ m/s}$  时, 含缺陷蜂窝结构平台应力下降也远小于冲击速度为  $30\text{ m/s}$  时的情况.

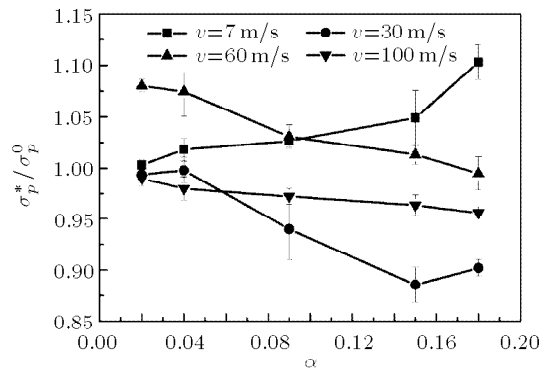


图 14 缺陷对  $X_1$  方向平台应力的影响: 相对平台应力 vs. 胞壁移除比

Fig.14 Effect of imperfection on the plateau stress in the  $X_1$  direction: relative plateau stress vs.  $\alpha$

### 2.4 随机缺陷对 $X_2$ 方向平台应力的影响

图 15 为蜂窝结构  $X_2$  方向上受冲击时相对平台应力随冲击速度的变化关系. 低速冲击时规则蜂窝

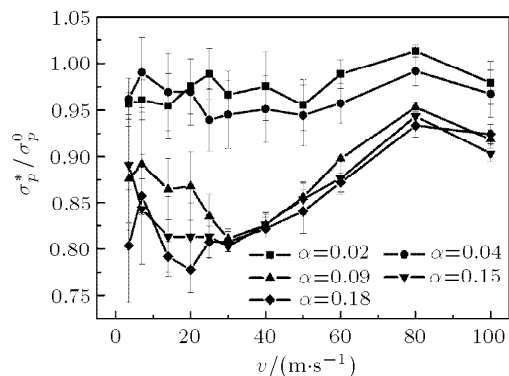


图 15 缺陷对  $X_2$  方向平台应力的影响

Fig.15 Effect of imperfection on the plateau stress in the  $X_2$  direction



结构形成垂直于冲击方向的崩塌带，随着应变的增加，结构逐层崩塌。随机移除胞壁使蜂窝结构在缺陷处崩塌，缺陷附近变形为吸能较少的 V 形斜变形带 (图 15(d),(g),(j))，因此，含缺陷蜂窝结构平台应力低于规则蜂窝结构。冲击速度高于 14 m/s 时，规则蜂窝结构在冲击面附近开始出现压实应变带，结构平台应力随冲击速度的提高逐渐增大，但  $\alpha \geq 0.09$  的蜂窝结构直至冲击速度为 30 m/s 时惯性效应影响仍然很弱 (图 15(i),(l))，其平台应力相比规则蜂窝结构下降高达 20%。当冲击速度高于 30 m/s，惯性效应的

影响逐渐增强， $\alpha \geq 0.09$  的含缺陷蜂窝结构平台应力逐渐提高，冲击速度为 80 m/s 时，平台应力约为规则蜂窝结构的 93%。

比较  $X_1$  及  $X_2$  两个方向上的结构平台应力可以发现，随机缺陷对结构在  $X_2$  方向上的性能影响较为显著。图 16 给出了不同速度下蜂窝结构平台应力随胞壁移除比的变化趋势，可以看到：当  $\alpha > 0.09$  时，含缺陷蜂窝结构在  $X_1$  及  $X_2$  方向上平台应力基本一致，即缺陷的存在消除了蜂窝结构动态吸能能力的方向性。

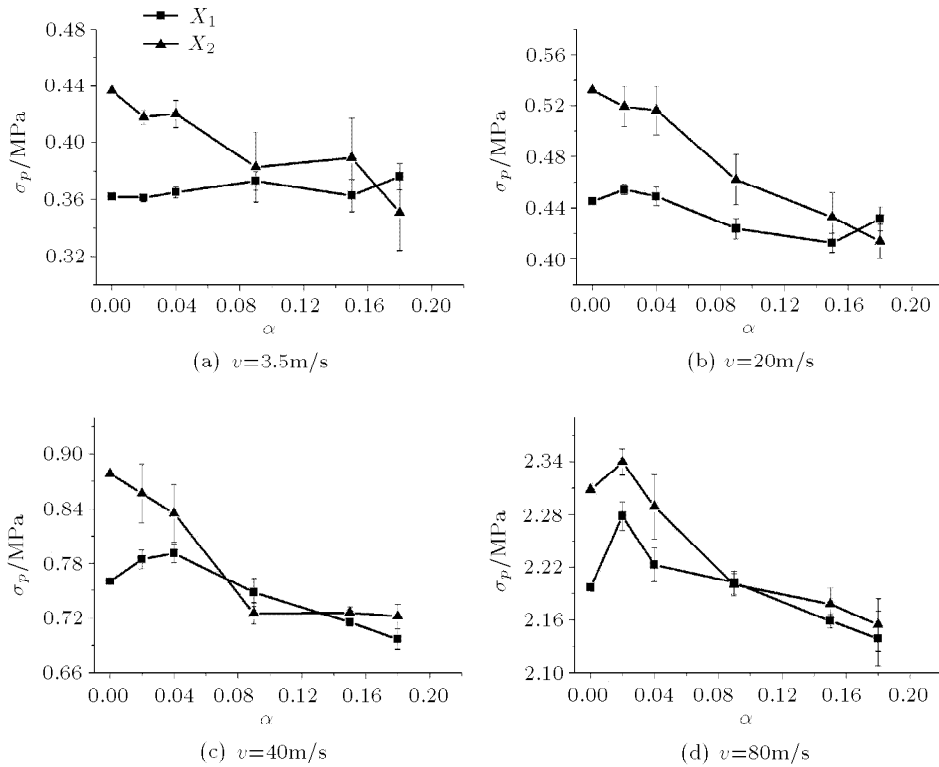


图 16 蜂窝结构平台应力随胞壁移除比的变化

Fig.16 A comparison of plateau stress of honeycombs in different direction with different  $\alpha$

### 3 结 论

本文对不同胞壁移除比的蜂窝结构的动力学行为进行了有限元模拟，得到了各蜂窝结构的变形模式图，发现冲击速度及结构缺陷均对蜂窝结构变形模式产生显著影响。从变形机理上分析，胞壁随机移除的蜂窝结构变形模式是由两种机制，即惯性效应引起的冲击面附近变形局部化和缺陷引起的多个变形带随机分布 (变形分散化)，共同作用所决定的。对蜂窝结构变形模式间临界速度的分析发现：随机移除胞壁使蜂窝结构在  $X_1$  方向上由准静态模式 (包括 X 模式和分布崩塌带模式) 向过渡模式及由过渡模式向动态模式 (I 模式) 转变的临界速度提

高。缺陷还使蜂窝结构  $X_2$  方向上由准静态模式 (包括 V 模式和分布崩塌带模式) 向过渡模式转变的临界速度提高。

对含缺陷蜂窝结构平台应力的研究发现，当变形模式为过渡模式和动态模式时，蜂窝结构平台应力与冲击速度的平方成线性关系。与相同密度的规则蜂窝结构相比， $X_1$  方向上，胞壁移除比低于 0.04 的蜂窝结构平台应力在临界速度  $v_{c2}$  附近高于规则蜂窝结构。更高的胞壁移除比使蜂窝结构在临界速度  $v_{c1}$  附近平台应力明显下降。 $X_2$  方向上随机移除胞壁使蜂窝结构平台应力下降，胞壁移除比大于 0.09 的蜂窝结构在临界速度  $v_{c1}$  附近平台应力下降

高达 20%.

### 参 考 文 献

- 1 Gibson LJ, Ashby MF. Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- 2 Jeon I, Asahina T. The effect of structural defects on the compressive behavior of closed-cell Al foam. *Acta Materialia*, 2005, 53: 3415~3423
- 3 Kepets M, Lu TJ, Dowling AP. Modeling of the role of defects in sintered FeCrAlY foams. *Acta Mechanica Sinica*, 2007, 23: 511~529
- 4 Silva MJ, Hayes WC, Gibson LJ. The effects of non-periodic microstructure on the elastic properties of two-dimensional cellular solids. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1995, 37: 1161~1177
- 5 Silva MJ, Gibson LJ. The effects of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of two-dimensional cellular solids. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1997, 39: 549~563
- 6 Guo XE, Gibson LJ. Behavior of intact and damaged honeycombs: a finite element study. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1999, 41: 85~105
- 7 Chen C, Lu TJ, Fleck NA. Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1999, 47: 2235~2272
- 8 Chen C, Lu TJ, Fleck NA. Effect of inclusions and holes on the stiffness and strength of honeycombs. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43: 487~504
- 9 Ruan D, Lu G, Wang B, Yu TX. In-plane dynamic crushing of honeycombs—a finite element study. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28: 161~182
- 10 Zheng ZJ, Yu JL, Li JR. Dynamic crushing of 2D cellular structures: A finite element study. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32: 650~664
- 11 刘耀东, 虞吉林, 郑志军. 惯性效应对多孔金属材料动态力学行为的影响. *高压物理学报*, 2008, 22: 118~124 (Liu Yaodong, Yu Jilin, Zheng Zhijun. Effect of inertia on the dynamic behavior of cellular metal. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2008, 22: 118~124 (in Chinese))
- 12 Li K, Gao XI, Wang J. Dynamic crushing behavior of honeycomb structures with irregular cell shapes and non-uniform cell wall thickness. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44: 5003~5026
- 13 ABAQUS/Explicit User's Manual. Karlsson & Sorensen Inc, 2002
- 14 Tan PJ, Reid SR, Harrigan JJ, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I—experimental data and observations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53: 2174~2205

(责任编辑: 刘希国)

## EFFECT OF RANDOMLY REMOVING CELL WALLS ON THE DYNAMIC CRUSHING BEHAVIOUR OF HONEYCOMB STRUCTURES<sup>1)</sup>

Kou Dongpeng\* Yu Jilin\*,<sup>2)</sup> Zheng Zhijun\*,<sup>†</sup>

\*(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

<sup>†</sup>(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Finite element simulations are performed to study the effect of randomly removing cell walls on the dynamic crushing behaviour of honeycomb structures. The influences of the imperfection and impact velocity on the deformation mode and plateau stress are investigated. Simulation results reveal that both imperfection and impact velocity affect the deformation modes as well as the critical velocities of mode transition. It is found that the plateau stress is proportional to the square of the impact velocity when the imperfect honeycombs are deformed at transitional mode or dynamic mode. When the impact velocity is near the critical velocity between transitional mode and dynamic mode, honeycombs with small fraction of imperfection exhibit higher plateau stress, comparing to those of regular honeycombs having the same relative density. However, when the imperfection further increases, the plateau stress decreases obviously near the critical velocity between quasi-static mode and transitional mode.

**Key words** cellular materials, honeycombs, imperfections, plateau stress, finite element analysis

Received 11 April 2008, revised 21 October 2008.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10672156, 10532020, 90205003).

2) E-mail: jlyu@ustc.edu.cn