

文章编号: 1001-1455(2009)03-0237-06

缺陷分布不均匀性对蜂窝材料 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: 利用显式动力有限元方法数值讨论了缺陷(胞壁缺失)分布不均匀性对蜂窝材料面内冲击性能的影响。首先,参考理想六边形蜂窝材料在不同冲击速度下的变形特性,将蜂窝材料划分成9个区域,在此基础上讨论了缺陷分布在不同区域时对蜂窝材料面内冲击性能的影响。研究表明,在冲击载荷作用下,除了缺失率以外,蜂窝材料的面内冲击性能也依赖于缺陷的分布,且在中低冲击速度时表现出更高的敏感性。随着缺失率的增加,蜂窝材料的平台应力明显减小,而平台应力对缺失率及冲击速度的敏感性依赖于缺陷的位置。该结论对蜂窝材料的安全性评估及动力学优化设计具有一定的指导意义。

关键词: 固体力学;胞壁缺失;有限元法;蜂窝材料;变形机制;平台应力;面内

中图分类号: O347

国标学科代码: 130·1515

文献标志码: A

1 引言

近年来,蜂窝材料以其优良的力学性能、良好的多功能性和较强的可设计性引起了国内外学者的广泛关注^[1]。准确描述蜂窝材料的动力学性能是合理应用蜂窝材料的前提。考虑到规则蜂窝结构宏观周期分布的特点,在单胞基础上已建立了大量细观力学模型以预测多孔固体的宏观力学性能^[1-2]。然而,由于加工工艺等原因,在实际多孔材料中缺陷是不可避免的。如何评估缺陷对多孔材料性能的影响成为目前的研究重点之一。M. T. Silva等^[3]讨论了胞元非周期性及其缺陷的影响,计算结果表明弹性模量和塑性抗压强度对胞壁缺失有很强的依赖性。X. E. Guo等^[4]分析了胞元缺失对规则六边形蜂窝的弹性模量和后屈曲行为的影响。C. Chen等^[5]考虑到蜂窝材料中不同的缺陷形态,系统地研究了6种缺陷对二维蜂窝材料的面内屈服性能的影响。K. Li等^[6]讨论了胞元形状不规则性和壁厚不均匀分布对二维多孔材料弹性模量的影响。A. J. Wang等^[7]考虑到缺陷率对不同形状蜂窝体的敏感性,分析了四边形和三角形金属蜂窝中胞壁缺失对蜂窝体面内有效弹性模量和初始屈服应力的影响。另外,关于缺陷对蜂窝材料动力学性能影响的研究业已展开。例如,A. Hönl等^[8]研究了蜂窝材料中局部初始冲击带的产生和波的传播。Z. J. Zheng等^[9]讨论了多孔材料的微结构不规则性对蜂窝材料能量吸收特性的影响。K. Li等^[10]分析了胞元不规则性和胞壁厚度不均匀对蜂窝材料冲击动力学性能的影响。这些结论在一定程度上揭示了缺陷对蜂窝材料动力学性能的影响。但是由于动力学问题的自身特征,以及静态和准静态问题不同,除了缺陷形式及缺失率,缺陷的分布也会对蜂窝材料的动力学响应产生重大影响。随着多孔材料在一些极端条件下的应用(如高速列车、航天器等),关于缺陷分布不均匀性的影响亟待展开。

本文中基于胞壁缺失率对不同形状蜂窝体面内力学性能的敏感性^[7]及理想六边形蜂窝材料的动态变形特征^[11],讨论了缺陷(胞壁缺失)分布区域与蜂窝材料局部及整体动力学响应之间的关系,以期揭示蜂窝材料宏观动力学响应与微观缺陷分布不均匀性间的内在联系。

2 计算模型

2.1 有限元模型

采用的计算模型如图1所示。对规则六边形蜂窝材料的研究表明,在 x 和 y 方向内填充10~20个单胞即可反映其动力学特性^[3-4]。在本文的计算中, x 、 y 方向胞元的填充数目均为15个,其中胞元的边长为2.7 mm,胞壁厚度0.3 mm。

* 收稿日期: 2008-01-17; 修回日期: 2008-06-17

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。

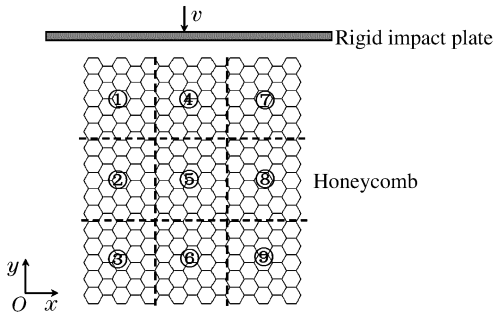


图 1 有限元模型及缺陷分布区域划分

Fig. 1 The FE model and the division of the defects region

的对称性,对缺陷分别分布在区域①~⑥时材料的动力学响应特性进行了讨论。

在实际的加工过程中,缺陷(胞壁缺失)的模式是随机的。为了消除缺陷模式随机性的影响,计算中不同区域内采用相同的缺陷形式,其中随机移除胞壁得到的不同缺失率下的缺陷模式如图 2 所示。图中胞壁局部缺失率 $\bar{\delta} = \bar{N}/N$, \bar{N} 表示该位置胞壁缺失的数量, N 表示该位置胞壁数目的总和。研究表明,当从六边形网格中去掉 35% 的胞壁时,就会沿着缺失胞壁从材料的一端到另一端出现一条连续的通道(图 2(d)), 形成一个大的连通孔隙, 此时的情况与蜂窝体中胞元缺失的情况相似^[4-5]。由于本文中主要讨论缺陷(胞壁缺失)分布不均匀性对蜂窝材料的动力学性能的影响, 因此局部缺失率不超过 35%。

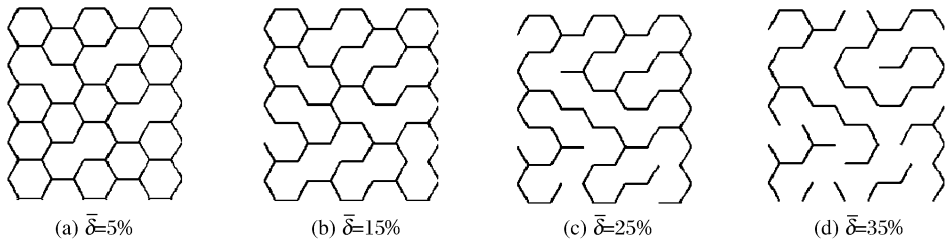


图 2 随机胞壁缺失方式示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketches of random cell wall missing patterns

2.2 网格划分敏感性

对于蜂窝材料动力学特性的模拟,网格划分的数目对模拟结果有一定的影响。如何有效捕捉其动态变形特性并保证计算效率,在动态问题的计算中十分重要。本文中采用与文献[11]相同的边界条件,讨论了网格划分数目对蜂窝材料面内冲击动力学响应的影响。如图 3 所示(图中 d 表示压缩位移, F 为刚性板反力),当蜂窝材料在 y 方向受到冲击时,胞壁单元数大于等于 6 个单元后,计算结果基本稳定。因此在本文的计算中,每个胞壁划分为 6 个壳单元,以达到更高的计算效率及精度。

3 计算结果与分析

3.1 变形模式

3.1.1 缺陷分布位置的影响

刚性板以不同速度沿 y 方向冲击时缺陷分布区域对蜂窝试件变形模式的影响如图 4 所示,图中压缩位移 $\delta = 21$ mm,胞壁缺失率 $\bar{\delta} = 15\%$ (如图 2(b))。对比理想蜂窝材料相应的冲击变形特征可知^[11],缺陷的位置对材料的局部变形模式有较大影响,表现出更加复杂的变形模态。从图 4(a)可以看出,在低速冲击时六边形蜂窝材料仍以 X 型剪切带的形成为主要变形特征。当缺陷位于理想蜂窝材料 X 型剪切变形带中时(如区域①和⑤)对材料的局部变形模式影响较小,但由于缺陷的存在,剪切带表现出不对称性(图 4(a)中区域①和⑤)。而当缺陷位于 X 型剪切变形带外时(如区域

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,泊松比为 0.3,密度为 2.7 g/cm³。计算中选用 SHELL 163 壳单元,接触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。为保证试件处于平面应变状态,当刚性板沿 y 方向冲击试件时,模型中所有沿 z 方向的节点位移均被限制。当刚性板沿 y 方向冲击蜂窝试件时,蜂窝试件的底端固定,左侧和右侧为自由边。由文献[11]可知,对于理想六边形蜂窝材料,随着冲击速度的不同,会出现 X、V 或 I 型 3 种局部变形模式。为了反映缺陷分布区域对材料局部变形模式的影响,结合理想蜂窝材料的冲击变形特征,并考虑到变形的

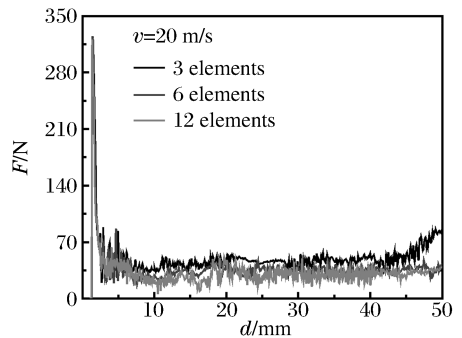


图 3 蜂窝材料的动力响应

Fig. 3 Dynamic response of honeycombs

②、③、④和⑥), 缺陷成为局部剪切变形带的启动源, 以其为中心将生成二级 X 型剪切带(图 4(a)中区域④和⑥), 甚至会对整体的局部变形带产生较大的影响(图 4(a)中区域②和③)。在中等冲击速度下, 缺陷的存在及分布对材料的变形模式有较大的影响。如图 4(b)所示, 当缺陷集中在 V 型区域内时, 蜂窝材料亦表现出 V 型变形模式(图 4(b)中区域①), 但当缺陷分布在 V 型局部变形带外时, 以缺陷为启动源将生成 X 型局部变形带(图 4(b)中区域③、④、⑤和⑥)。其中缺陷位于区域②时, 表现出倾斜的 I 型剪切变形带(图 4(b)中区域②), 位于区域⑤时, 表现为 X 型变形模式。随着冲击速度的进一步提高($v=75 \text{ m/s}$), 蜂窝材料对缺陷及其分布的敏感性降低, 并且随着缺陷集中区域离加载端距离的增加, 影响减小(如图 4(c)中区域②、③和⑥), 但缺陷位于区域⑤时, 将以缺陷为启动源生成 V 型局部变形带。

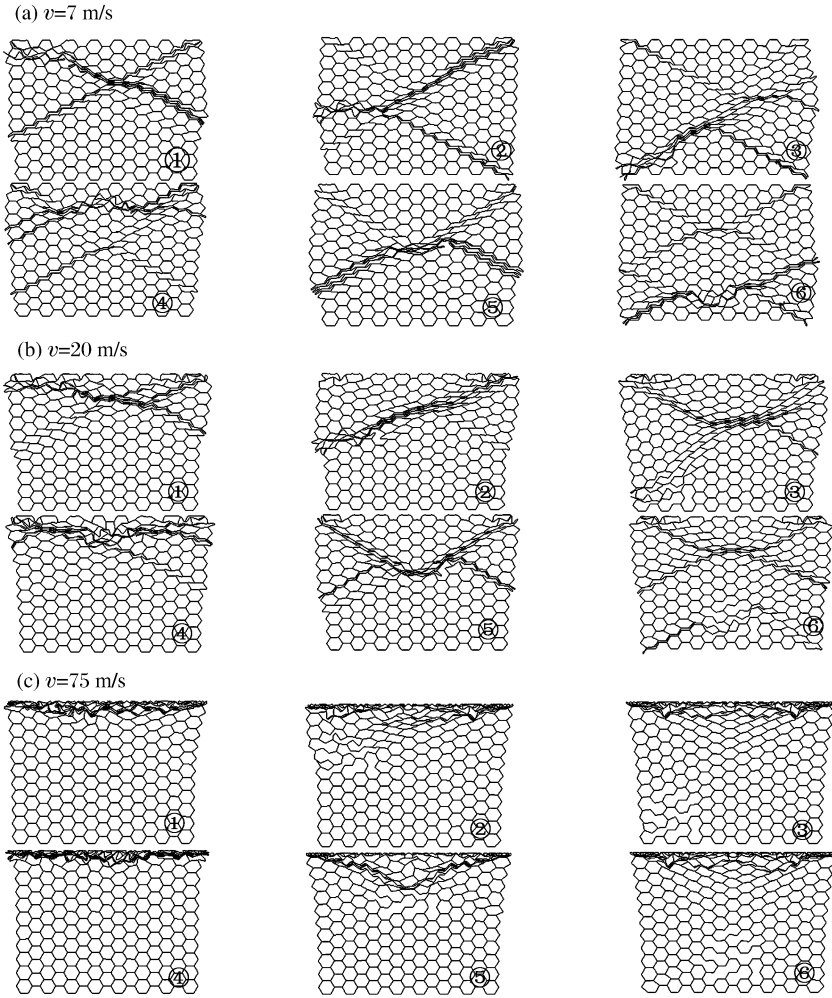


图 4 缺陷位于不同区域时蜂窝材料的变形模式

Fig. 4 The deformation modes of honeycombs with defects distributed in different regions

3.1.2 胞壁缺失率的影响

当考虑缺陷对材料性能的影响时, 缺陷率是一个必须考虑的因素。为了研究不同区域内胞壁缺失率对蜂窝材料变形模式的影响, 图 5 给出了冲击速度 $v=20 \text{ m/s}$ 时不同缺失率下蜂窝材料的变形模式, 图中压缩位移 $\delta=21 \text{ mm}$ 。计算结果表明, 缺陷位于不同区域时, 试件变形模式对缺失率变化的敏感性不同。缺陷集中在区域①、④和⑥时试件的变形模式对胞壁缺失率的变化最为敏感(图 5(a)、(d)和(e))。

随着胞壁缺失率的变化, 试件表现出不同的变形模态。对于区域①, 随着胞壁缺失率的增加, 靠近冲击端处的几行胞体由弱 X 变形带逐渐向倾斜的 I 变形带变化(图 5(a))。而当区域④处胞壁缺失率超过 25% 时, 将在靠近冲击端形成 I 型局部变形带(图 5(d))。缺陷位于区域⑥时, 胞壁缺失率的变化对试件变形模式的影响最大。随着缺失率的增加, 以缺陷为中心将形成二次局部剪切变形带, 并逐渐向冲击端扩展(图 5(f))。而当缺陷分布在区域②、③和⑤时, 试件变形模式对胞壁缺失率的变化不敏感。

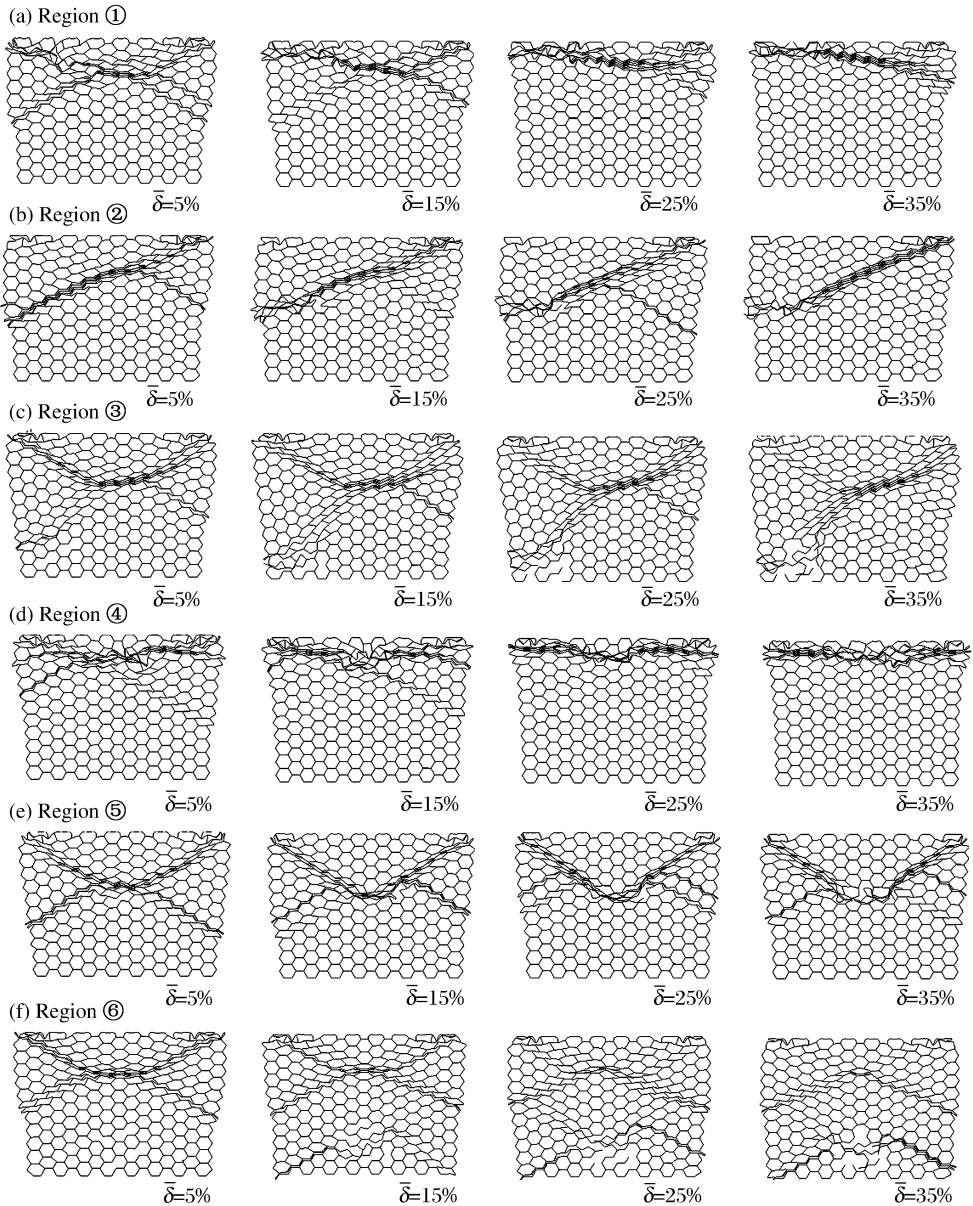


图5 $v=20$ m/s时蜂窝材料变形模式随缺失率的变化

Fig. 5 The deformation modes of honeycombs with the variation of missing ratios at $v=20$ m/s

3.2 缺陷分布在不同区域时蜂窝材料的面内吸能性能

胞元变形机制,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。作为表征多孔材料能量吸收能力大小的一个重要参数,平台应力定义为刚性板压缩应力从第1个应力峰值到试件密实前最大应变所对应的压缩应力的平均名义应力。平台应力 σ_p 可由下式求得

$$\sigma_p = \frac{1}{\epsilon_d - \epsilon_0} \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

式中: ϵ_d 为试件密实前的最大应变, ϵ_0 为压缩应力达到第1个应力峰值时的名义压缩应变, $\sigma(\epsilon)$ 为随应变而变化的名义压缩应力。基于此,计算了缺陷分布及缺陷率对平台应力的影响。

3.2.1 缺陷位置的影响

图6给出了3种冲击速度下,缺陷位于不同区域时平台应力随胞壁缺失率的变化。计算结果表明,随着缺失率的增加,平台应力逐渐降低,但缺陷处于不同位置时,平台应力对胞壁缺失率变化的敏感性不同。低速冲击时,缺陷位于区域①、④和⑤时蜂窝材料的平台应力受缺失率的影响较小;而缺陷位于区域②时对胞壁缺失率的变化最敏感。当刚性板以中等速度($v=20$ m/s)冲击时,由于区域④不在剪切变形带内且靠近冲击端,平台应力对缺失率的敏感性降低;缺陷位于

区域⑤时随缺失率的增加平台应力变化减缓;缺陷位于区域②时平台应力对缺失率的变化最为敏感。当冲击速度 $v = 75 \text{ m/s}$ 时,由于惯性效应的影响,冲击端处胞体首先被压溃,并逐渐向固定端传播,蜂窝材料的平台应力随着缺失率的增加变化减缓,且当缺陷位于区域②和③处时,平台应力随胞壁缺失率的增加迅速降低。

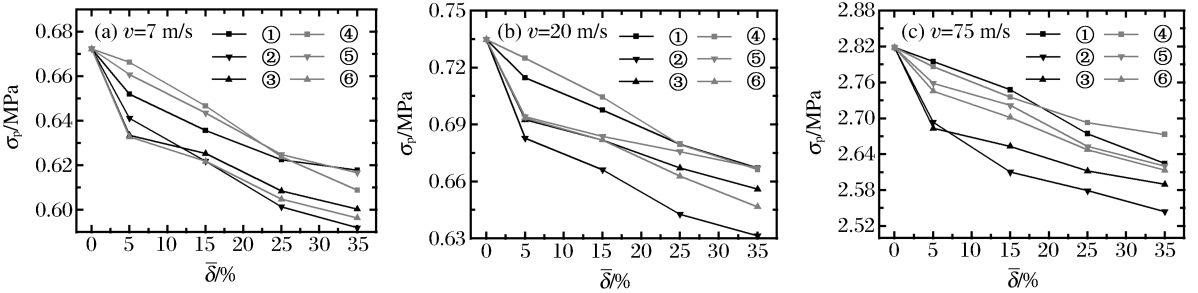


图 6 缺陷位于不同位置时平台应力随胞壁缺失率的变化

Fig. 6 Variations of plateau stresses with deflection ratios in case of defects distributed in different regions

3.2.2 冲击速度的影响

图 7 给出了缺陷位于不同区域时相对平台应力 σ_p/σ_{pe} 随冲击速度的变化情况,其中 σ_{pe} 为理想蜂窝体的平台应力。图 7 表明缺陷位于不同区域时蜂窝材料在中低冲击速度下 σ_p/σ_{pe} 的变化趋势不同。这也在一定程度上反映了在中低速时,蜂窝材料的变形模式对缺陷分布位置的敏感性。值得注意的是,缺陷集中在区域②和⑤时,相对平台应力将随着冲击速度的增加先减小后升高。图 7 也表明,随着冲击速度的升高,其相对平台应力基本稳定,这主要是因为高速冲击的情况下蜂窝材料的变形模式对缺陷分布位置的敏感性降低。此外,随着胞壁缺失率的增加,相同速度下不同区域内蜂窝材料的平台应力减小,但不同区域蜂窝体的平台应力减小程度不同。缺陷位于区域④时蜂窝材料的平台应力对缺失率的敏感性最弱,对缺失率最敏感的是区域②,其次是区域③和⑥。

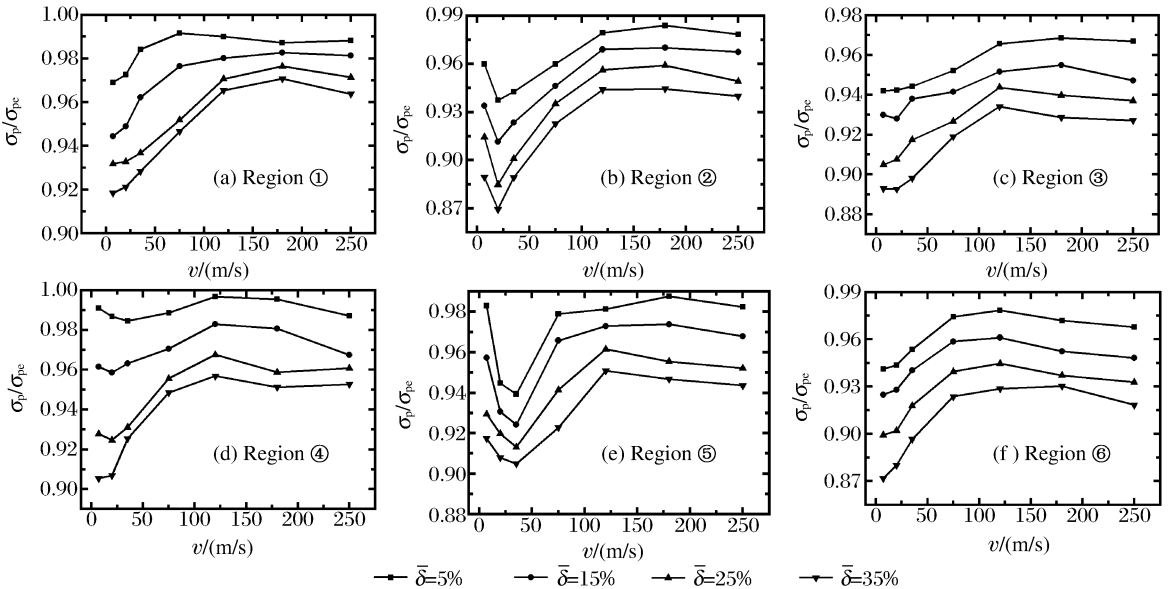


图 7 缺陷位于不同区域时蜂窝材料的平台应力随冲击速度的变化

Fig. 7 Variations of plateau stresses with impact velocities in case of defect distributed in different regions

4 结论

研究表明,缺陷分布区域以及缺失率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。缺陷处于不同区域时蜂窝材料的变形模式对胞壁缺失率变化的敏感性不同。当缺陷集中于区域②、③和⑤时,试件变形模式相对不敏感于缺失率的变化;而处于区域①、④和⑥时蜂窝体随缺失率的增加表现出独特的变形模式。对于蜂窝材料的平台应力,其将随着缺失率的增加明显减小。当缺陷位于区域②时,平台应力对缺失率的变化最敏感,而当缺陷位于区域④时,平台应力对缺失率的变化最不敏感。但随着冲击速度的增加,缺陷分布的不均匀性对蜂窝材料冲击性能的影响将减弱。

参考文献:

- [1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [2] Wang A J, McDowell D L. In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004,126(2):137-156.
- [3] Silva M J, Gibson L J. The effects of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of the two-dimensional cellular solids[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1997,39(5):549-563.
- [4] Guo X E, Gibson L J. Behavior of intact and damaged honeycombs: A finite element study[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1999,41(1):85-105.
- [5] Chen C, Lu T J, Fleck N A. Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1999,47(11):2235-2272.
- [6] Li K, Gao X L, Subhash G. Effects of cell shape and cell wall thickness variations on the elastic properties of two-dimensional cellular solids[J]. International Journal of Solids and Structure, 2005,42(5-6):1777-1795.
- [7] Wang A J, McDowell D L. Effects of defects on in-plane properties of periodic metal honeycombs[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003,45(11):1799-1813.
- [8] Hönig A, Stronge W J. In-plane dynamic crushing of honeycombs. Part I: Crush band initiation and wave trapping [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002,44(8):1665-1696.
- [9] 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.
- [10] Li K, Gao X L, Wang J. Dynamic crushing behavior of honeycomb structures with irregular cell shapes and non-uniform cell wall thickness[J]. International Journal of Solids and Structure, 2007,44(14-15):5003-5026.
- [11] 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.

Effects of inhomogeneous distribution of defects on 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: Numerical investigations were conducted by using the explicit dynamic finite element method. In numerical simulations, the honeycomb specimen was divided into nine regions by referring the local deformation modes of a perfect hexagonal honeycomb under different impact velocities. Based on the above treatment, the influences of the defects (cell wall missing) in different regions on the in-plane dynamic properties of honeycombs were discussed. The results show that except for the cell wall missing ratio, the dynamic performance of the honeycomb relies on the defect location. Especially under middle or low impact velocities, it displays higher sensitivity. The plateau stress relates to the cell wall missing ratio and the impact velocity, whose sensitivity is determined by the defect location.

Key words: solid mechanics; cell wall missing; FEM; Honeycomb; deformation mechanism; plateau stress; in-plane

* Corresponding author: LIU Ying
Telephone: 86-10-51682094

E-mail address: yliu5@bjtu.edu.cn