文章编号:1000-5773(2012)06-0645-08

缺陷对金属蜂窝材料面内冲击性能的影响*

张新春[1],刘 颖[2]

(1.华北电力大学机械工程系,河北保定 071003;
2.北京交通大学力学系,北京 100044)

摘要:利用显式动力有限元 ANSYS/LS-DYNA,数值研究了缺陷(胞元缺失)的分布位置及其尺寸对金属蜂窝材料面内冲击性能的影响。考虑到理想六边形蜂窝材料在不同冲击速度下的变形特征,将试件划分成 9 个子区域,讨论了缺陷集中位置、缺陷尺寸和冲击速度对蜂窝材料面内冲击变形模式和能量吸收性能的影响。研究发现,蜂窝材料的面内冲击性能依赖于缺陷的分布位置和缺陷尺寸,且在中低速时表现出较高的敏感性,但冲击速度的增加将弱化缺陷分布不均匀性的影响。由于缺陷的存在,蜂窝材料的能量吸收能力明显降低,但与缺陷分布位置相比,蜂窝材料单位体积所吸收的能量更敏感于缺陷尺寸。研究结果将为多胞材料的安全性评估及能量吸收设计提供理论指导和依据。

关键词:蜂窝材料;胞元缺失;变形机制;能量吸收;冲击
中图分类号:O347.3 **文献标识码**:A

1 引 言

近年来,蜂窝材料由于具有低密度、优良的力学性能和潜在的多功能集成设计的优势,在工程领域得到了广泛的应用,也引起了国内外学者浓厚的研究兴趣[1-2]。然而,由于加工工艺等因素的影响,蜂窝材料中的缺陷不可避免。常见的缺陷包括:胞壁质量分布不均匀、胞壁弯曲、胞壁缺失、胞壁错位、孔径尺寸不均匀和胞元缺失等等[3]。因此,如何评估缺陷对蜂窝材料力学性能的影响是当前研究的重点之一。

关于缺陷对蜂窝材料力学性能影响的研究已在国内外广泛展开。例如:Silva 等[4]讨论了胞元非周期性及缺陷对 Voronoi 蜂窝失效性能的影响;Guo 等[5]分析了胞元缺失对六边形蜂窝杨氏模量和后屈曲行为的影响;Wang 等[6]考虑到缺陷率对不同形状蜂窝体的敏感性,研究了胞壁缺失对蜂窝材料面内有效弹性模量和初始屈服应力的影响;Li 等[7]讨论了胞元形状不规则性和胞壁分布不均匀两种缺陷共存时对蜂窝材料强度的影响;Ajdari 等[8]数值分析了不同几何缺陷对规则六边形蜂窝和 Voronoi 蜂窝杨氏模量和屈服应力的影响,等等。但这些研究主要集中于建立不同形式的几何缺陷与蜂窝材料静态及准静态响应间的关系。由于描述蜂窝材料动态响应特性的复杂性,不同类型缺陷对蜂窝材料动力学响应特性影响的研究存在很大的困难。Zheng 等[9]讨论了微结构不规则性和冲击速度对蜂窝材料变形模态和平台应力的影响。Zhu 等[10]在周期性边界和高应变率压缩条件下,研究了胞元不规则性对二维

* **收稿日期**:2011-04-15;**修回日期**:2011-06-30
基金项目:国家自然科学基金(10972028);中央高校基本科研业务费专项基金(11QG63)
作者简介:张新春(1980—),男,博士,讲师,主要从事冲击动力学方面的研究. E-mail:zhangxinchun551@163.com

低密度 Voronoi 蜂窝结构杨氏模量和残余应力的影响。Li 等[11]使用有限元方法，分析了胞元不规则性和胞壁厚度不均匀两种缺陷共存时，对蜂窝材料面内冲击性能的影响，研究结果表明，平台应力和密实应变能都随胞体不规则性和胞壁分布不均匀程度的增加而减小；但当两种缺陷共存时，蜂窝结构会展示出复杂的变形模态，对平台应力和密实应变能有非线性影响。Nakamoto 等[12-13]研究了随机填充刚性夹杂蜂窝结构的面内冲击性能，澄清了夹杂对蜂窝材料变形模式、平台应力和能量吸收能力的影响。这些研究结果在一定程度上揭示了缺陷对蜂窝材料的动态力学特性有重要影响，但主要集中在对缺陷形式和缺陷率方面的讨论，并没有深入考虑胞元缺失分布位置的影响。然而，在冲击荷载作用下，蜂窝材料面内动态响应的一个重要特征就是变形局部化，也就是说应该考虑缺陷分布区域的影响。随着多胞金属在一些极端条件下的应用(例如高速列车、航空航天器和轮船等)，局部胞元的缺失所引起的材料中丰富的动力学演化特性还有待于深入探讨。

本工作针对理想六边形蜂窝材料的动态变形特征，采用数值模拟的方法，研究了含有缺陷(胞元缺失)金属蜂窝材料的动态冲击性能。用刚性板对其进行面内冲击，研究了冲击速度、胞元缺失的分布位置及尺寸，对蜂窝材料局部和整体动力学响应和能量吸收能力等的影响。

2 计算模型

2.1 有限元模型

对于理想六边形蜂窝体，随着冲击速度的增加，可能出现 3 种局部变形模式(“X”型、“V”型和“I”型)[14]。基于此，将试件分成 9 个子分布区域，如图 1 所示。“X”型局部变形带分布在子区域 1、5、9 和 3、5、7 内；“V”型局部变形带分布在子区域 1、5 和 7 内；而“I”型局部变形带分布在子区域 1、4 和 7 内。考虑到试件的对称性，仅讨论缺陷(胞元缺失数目为 1)集中分布在子区域 1 至 6 时，胞元缺失的位置对蜂窝材料面内冲击力学性能的影响。此外，还研究缺陷集中分布于试件的中央(即子区域 5)时，胞元缺失的大小对试件动力学特性的影响，胞元缺失模式如图 2 所示。

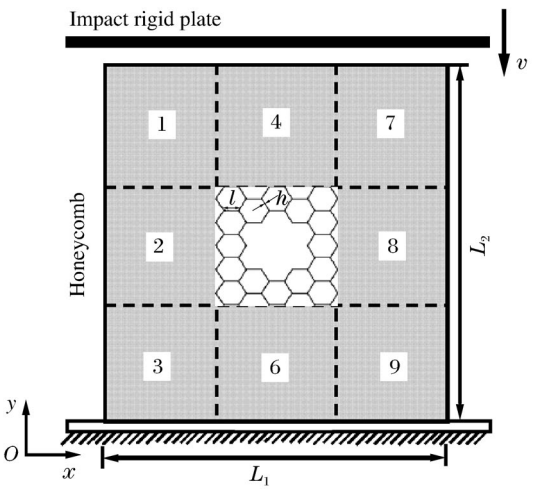


图 1 计算模型及缺陷集中子区域划分示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of computational model and defect concentration sub-domains

试件尺寸为 $L_1 \times L_2 = 62.1\ \text{mm} \times 70.2\ \text{mm}$。在 x 和 y 方向分别用 15 个胞元所填充，填充过程中保证壁长 $l = 2.7$ mm、壁厚 $h = 0.3$ mm 不变。基体材料为金属铝[9,14]，采用理想弹塑性模型，杨氏模量 $E_s = 69$ GPa，泊松比 $\mu = 0.3$，屈服应力 $\sigma_{ys} = 76$ MPa，基体材料的密度 $\rho_s = 2\,700\ \text{kg/m}^3$。采用 LS-DYNA对金属蜂窝材料的动态响应特性进行模拟。计算中胞壁使用 SHELL163 壳单元(4 节点四边形壳单元)进行离散，每条棱边单元数为 6。为了保证收敛，沿厚度方向取 5 个积分点。对于变形过程中可能的接触，采用单面自动接触算法。此外，刚性板与蜂窝试件的外表面均视为光滑，两者接触无摩擦。计算中，采用了与文献[9,11-14]相同的边界条件，即当刚性板沿 y 方向冲击蜂窝体时，试件的底端固定，左右两侧自由。为保证变形的平面应变状态，试件中所有节点面外位移均被限制。

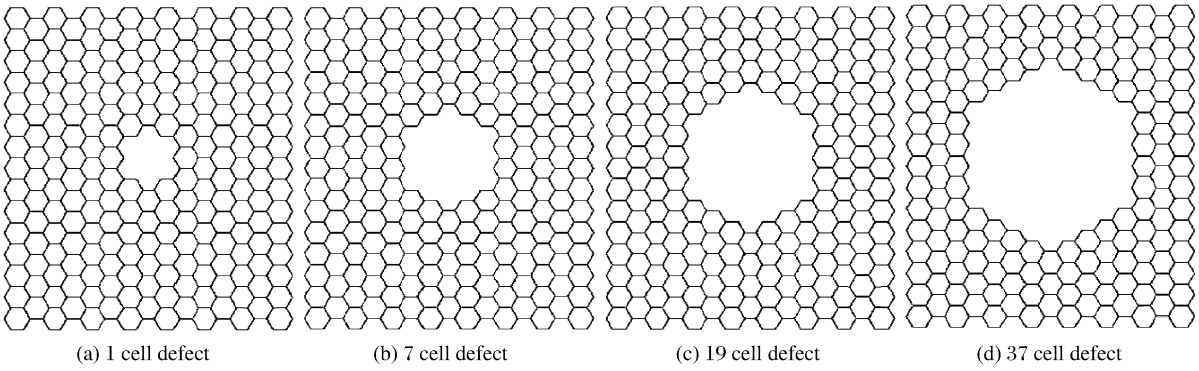


图 2　不同缺陷尺寸蜂窝材料模型

Fig. 2　Honeycomb models with single defect of different sizes

2.2　模型的可靠性分析

为了验证有限元模型的可靠性,图 3 给出了准静态压缩荷载下理想六边形蜂窝材料的名义应力-应变曲线。其中,名义应力 σ 为刚性板作用在试件上的压缩反力 F 与初始横截面面积 A(62.1 mm×1.0 mm)的比值,名义应变 $\varepsilon=\delta/L_2$ 为试件沿 y 方向的相对压缩位移,而 δ 为刚性板沿冲击方向的压缩位移。作为对比,图 3 还给出了静态荷载作用下六边形蜂窝结构的塑性坍塌应力[1]

$$\sigma_{\mathrm{pl}}=\frac{2}{3}\sigma_{\mathrm{ys}}\left(\frac{h}{l}\right)^2 \tag{1}$$

由图 3 可见,数值计算结果与塑性坍塌应力理论值基本吻合,从而证明了有限元模型的可靠性。基于此,研究胞元缺失的分布位置和大小对六边形蜂窝材料面内冲击力学性能的影响。

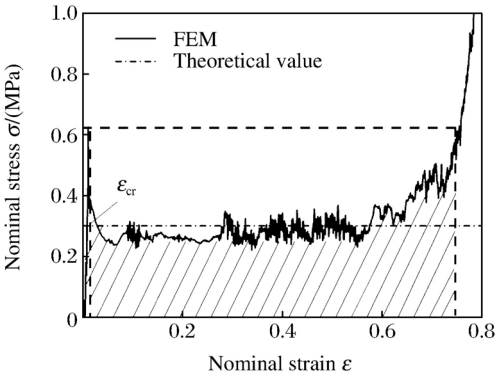


图 3　准静态荷载作用下理想六边形蜂窝材料的名义应力-应变曲线

Fig. 3　Nominal stress-strain curve of a perfect hexagonal honeycomb under quasi-static loading

3　计算结果与讨论

3.1　蜂窝材料的面内冲击响应

Ruan 等[14]已经系统研究了理想六边形蜂窝材料在不同冲击荷载下的变形模态,这里不再具体讨论。图 4、图 5、图 6 分别给出了不同冲击速度下,胞元缺失的位置对蜂窝材料面内变形模式的影响。图中(a)～(f)分别对应着缺陷集中分布于子区域 1 至区域 6 时的情况。计算结果表明,在低速冲击作用下(v=7 m/s),缺陷的分布位置对蜂窝材料的面内冲击响应有较大的影响。尽管冲击试件也形成了“X”型局部剪切变形带,但由于局部缺陷的引入,剪切变形带表现出不对称性。当缺陷集中分布于变形带内(即子区域 1、3 或 5)时,对材料的局部变形模式影响较小。但当缺陷集中在变形带外(即子区域 2、4 或 6)时,缺陷为局部剪切变形带的启动源,并将改变整体的变形模式(见图 4(b),由“X”型转化为“<”型),或者以其为中心生成二级“X”型剪切带(见图 4(d)),或者对材料的整体变形模式影响较小(见图 4(f))。随着冲击速度的增加(比如 v=20 m/s),局部胞元的缺失对蜂窝材料的变形模式亦有较大的影响(见图 5)。但缺陷的存在提高了六边形蜂窝材料变形模式转变的临界速度(对于理想六边形蜂窝材料,从“X”型到“V”型的转变速度约为 14 m/s[14])。随着冲击速度的进一步增加(v=75 m/s),惯性效应增强,变形带主要集中在冲击端,缺陷集中分布位置对蜂窝材料变形模式的影响减弱(见图 6)。可见,蜂窝材料的局部变形模式主要依赖于缺陷的分布位置和冲击速度。

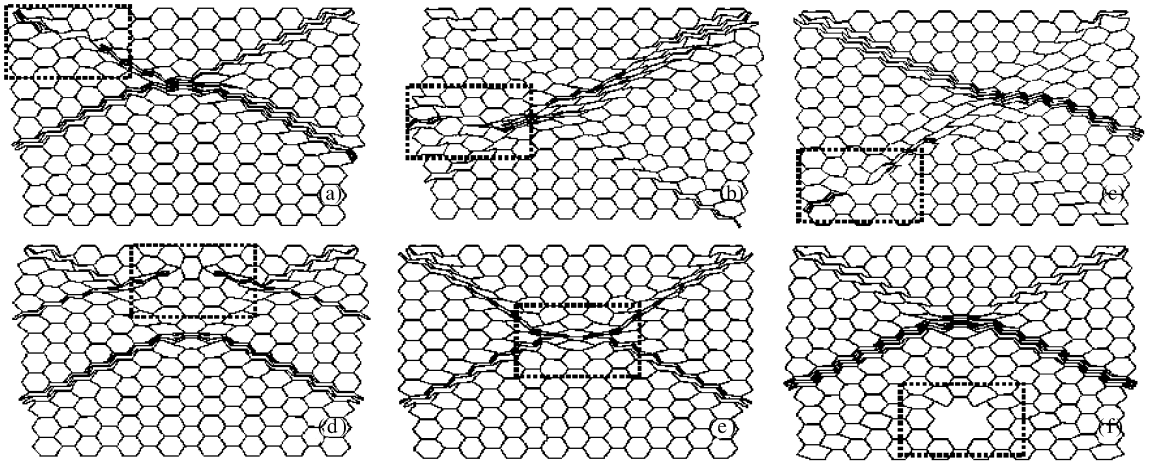


图 4 不同子区域胞元缺失时蜂窝材料的变形模式(冲击速度 $v=7$ m/s,名义应变 $\varepsilon=0.3$)
Fig. 4 Deformation modes of honeycomb with missing cell distributed in different sub-domains (The impact velocity $v=7$ m/s, the nominal strain $\varepsilon=0.3$)

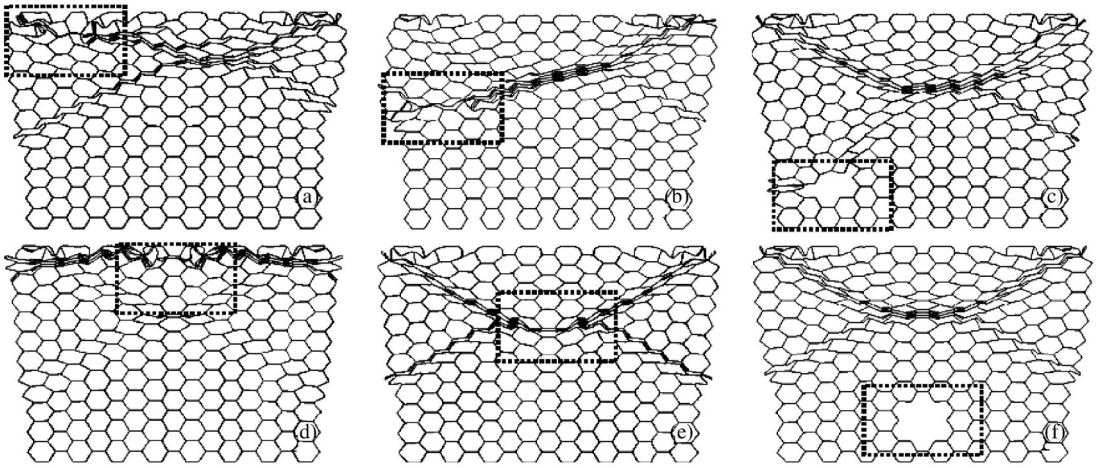


图 5 不同子区域胞元缺失时蜂窝材料的变形模式(冲击速度 $v=20$ m/s,名义应变 $\varepsilon=0.3$)
Fig. 5 Deformation modes of honeycomb with missing cell distributed in different sub-domains (The impact velocity $v=20$ m/s, the nominal strain $\varepsilon=0.3$)

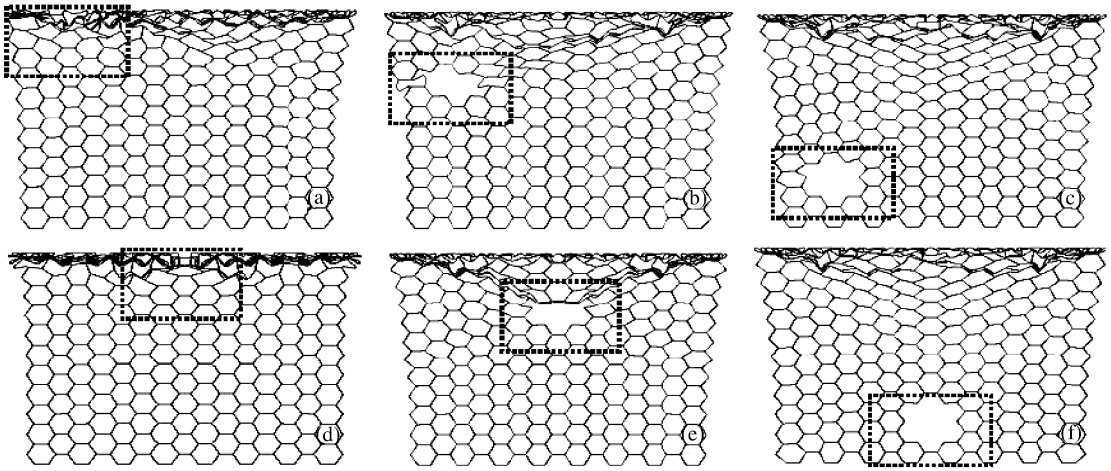


图 6 不同子区域胞元缺失时蜂窝材料的变形模式(冲击速度 $v=75$ m/s,名义应变 $\varepsilon=0.3$)
Fig. 6 Deformation modes of honeycomb with missing cell distributed in different sub-domains (The impact velocity $v=75$ m/s, the nominal strain $\varepsilon=0.3$)

图 7 给出了在冲击速度一定的条件下,缺陷大小对蜂窝材料整体变形模式的影响。限于篇幅,文中仅给出冲击速度 $v=20$ m/s 时的情况。图 7(a)～图 7(d)分别对应着胞元缺失数目为 1、7、19 和 37。研究结果表明,试件的局部变形模式对缺陷大小较敏感。局部变形带首先在缺陷集中子区域内形成,并向远处延伸,逐渐形成"X"型剪切变形带。随着胞元缺失数目的增加,试件逐渐由"X"型变为弱"X"型,试件抗冲击能力明显降低。

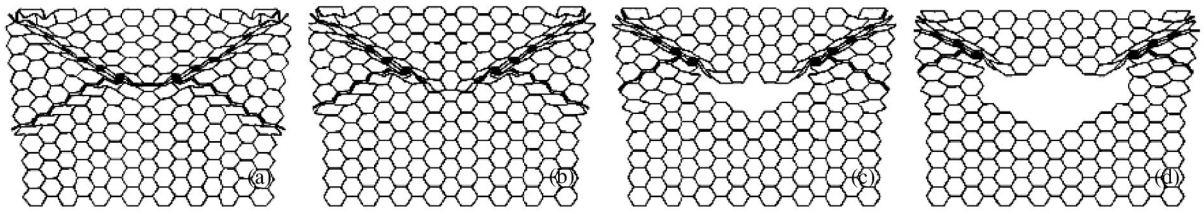


图 7　胞元缺失数目不同时蜂窝材料的变形模式(冲击速度 $v=20$ m/s,名义应变 $\varepsilon=0.3$)

Fig. 7　Deformation modes of honeycomb with different number of missing cell (The impact velocity $v=20$ m/s, the nominal strain $\varepsilon=0.3$)

3.2　平台应力与单位体积的能量吸收

高的能量吸收能力是多胞金属材料的重要特性之一。评估多胞材料能量吸收能力大小的一个重要指标是,单位体积所吸收的能量 W_V(即应变能密度),其值可由名义应力-应变曲线下方所围成的面积求得(如图 3 阴影部分),即

$$W_V = \int_{\varepsilon_{cr}}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon)\,\mathrm{d}\varepsilon \tag{2}$$

式中:ε_d 为锁定应变(其值理论上应当等于蜂窝试件的孔隙度),可由名义压缩应力再次达到初始应力峰值时所对应的名义应变来确定;ε_{cr} 为名义压缩应力达到第一个应力峰值时的名义应变;$\sigma(\varepsilon)$ 为随名义应变而变化的名义应力。考虑到缺陷集中分布的影响,取 $\varepsilon_{cr}=0.02$,以达到较高的计算精度。显然,单位体积所吸收的能量与平台应力和锁定应变有关。蜂窝材料的平台应力可表示为

$$\sigma_p = \frac{1}{\varepsilon_d - \varepsilon_{cr}} \int_{\varepsilon_{cr}}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon)\,\mathrm{d}\varepsilon \tag{3}$$

根据方程(1)和方程(3),图 8 给出了胞元缺失数目为 1 时,不同冲击速度下蜂窝材料的名义平台应力 σ_p/σ_{pl} 随胞壁厚度(相对密度)的变化。研究结果表明,在低速冲击作用下($v=7$ m/s),由于缺陷的存在,蜂窝材料的平台应力将低于其静态塑性坍塌应力。

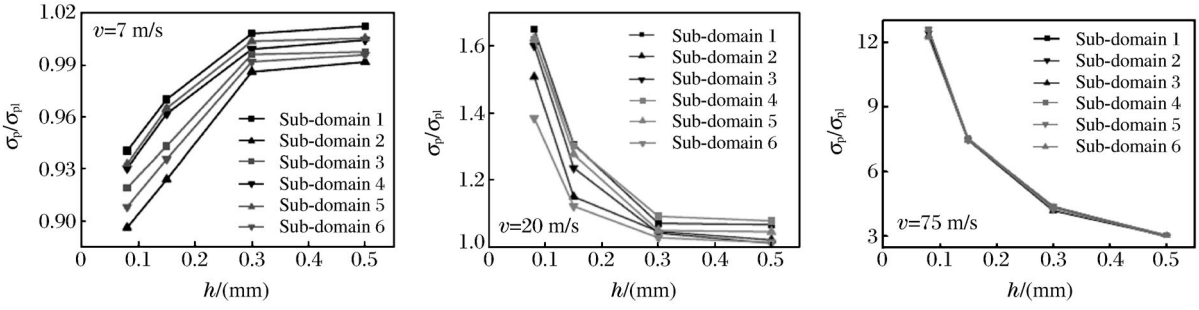


图 8　不同冲击速度下名义平台应力随胞壁厚度的变化

Fig. 8　Variation of the normalized plateau stress with respect to the cell wall thickness under different impact velocities

但随着相对密度的增加，平台应力逐渐升高，并接近于塑性坍塌应力。当胞壁厚度大于某一临界值时($h=0.3$ mm)，相对密度(胞壁厚度)的影响减弱，见图 8(a)。随着冲击速度的进一步增加，平台应力高于静态塑性坍塌应力，并且冲击速度越大，名义平台应力 σ_p/σ_{pl} 越高，见图 8(b)和图 8(c)。但随着相对密度(胞壁厚度)的增加，名义平台应力反而逐渐减小，当胞壁厚度大于某一临界值($h=0.3$ mm)时，下降趋势减缓。图 8 亦表明，相对密度和冲击速度的增加，将弱化胞元缺失分布不均匀性的影响。

图 9 给出了缺陷随机分布在不同子区域时，冲击速度对相对平台应力 $\sigma_p/\sigma_{perfect}$ 的影响，其中 $\sigma_{perfect}$ 为相应理想蜂窝材料的平台应力。考虑到缺陷的影响，不同分布子区域胞元缺失时相对平台应力分别由相应的标准误差标出。由图 9 明显可见，不同冲击载荷下，平台应力值都随胞元的缺失而减小。在低速冲击作用下($v=7$ m/s)，缺失胞元分布在变形带内(子区域 1、3 和 5)时对应于更高的平台应力。但随着冲击速度的增加($v=75$ m/s)，惯性效应增强，胞元缺失分布位置的影响相对减弱。$\sigma_p/\sigma_{perfect}$ 的比值趋近于胞元缺失数目相同条件下缺陷均匀分布蜂窝材料的平台应力值。

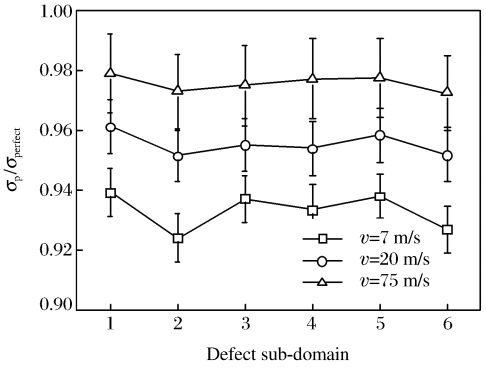


图 9 不同冲击荷载作用下相对平台应力随缺陷位置的变化

Fig. 9 Variation of the relative plateau stress with defect sub-domain under different impact velocities

基于方程(2)，图 10 给出了不同子区域胞元缺失时蜂窝材料单位体积的能量吸收积分曲线。作为对比，图 10 中还给出了相应理想蜂窝材料的能量吸收特性，用黑色实线表示。由图 10 明显可见，由于局部胞元的缺失，蜂窝试件的能量吸收能力明显降低。在低速冲击作用下($v=7$ m/s)，当缺陷集中分布在变形带内时，单位体积所吸收的能量要高于缺陷分布在变形带外，但都低于理想蜂窝试件所吸收的能量。随着冲击速度的增加($v=75$ m/s)，惯性效应进一步增强，局部变形带主要集中在冲击端，缺陷集中分布位置影响减弱。

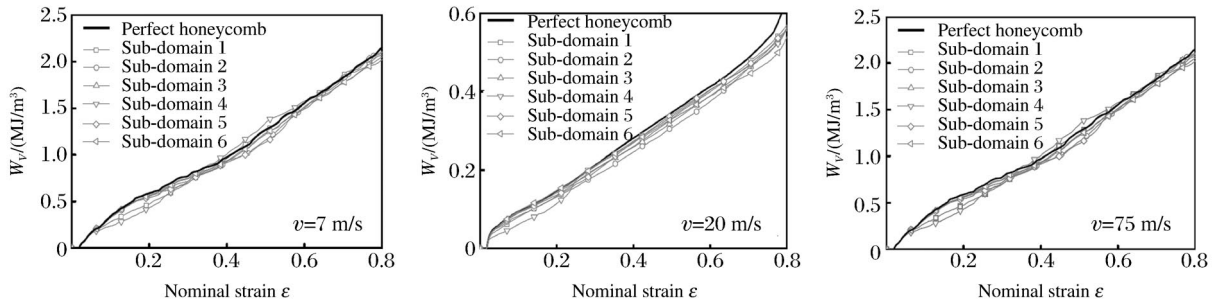


图 10 不同子区域胞元缺失时蜂窝材料的能量吸收性能比较

Fig. 10 Comparison of energy absorption ability of honeycomb with different defect sub-domains

图 11 给出了胞元缺失的大小对蜂窝材料面内冲击能量吸收性能的影响。与缺陷的集中分布位置类似，由于缺陷的存在，试件的能量吸收能力明显降低。但与缺陷分布位置相比，蜂窝材料单位体积的能量吸收能力可能更敏感于缺陷尺寸。尤其在中低速冲击作用下，胞元缺失的数目越多，试件的能量吸收能力越低。随着冲击速度的增加($v=75$ m/s)，惯性效应增强，初始压缩阶段胞元缺失数目的影响相对减弱。

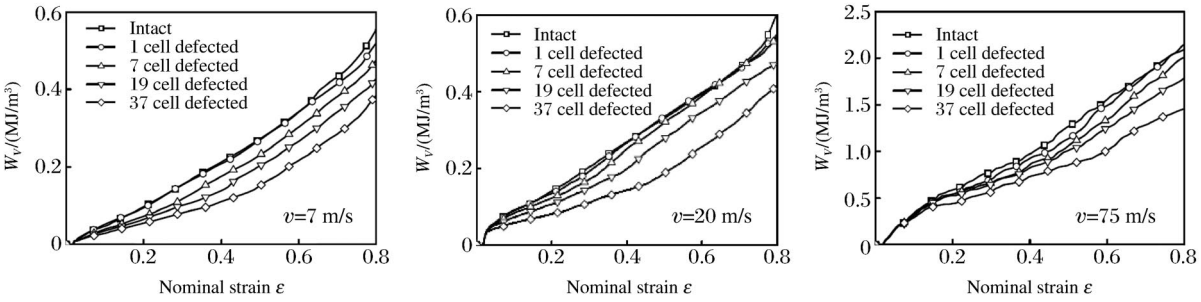


图 11　缺陷尺寸对蜂窝材料的能量吸收性能的影响

Fig. 11　Effects of single defect with different sizes on energy absorption ability of honeycomb

4　结　论

基于显式动力有限元方法,研究并讨论了胞元缺失的分布位置及其尺寸对蜂窝材料面内冲击动力学性能的影响,得出以下主要结论。

(1) 含有缺陷蜂窝材料的局部变形模式,主要依赖于缺陷分布位置和冲击速度。在低速冲击作用下,当缺失胞元分布在局部变形带内(即子区域 1、3 或 5)时,变形模式对缺陷不敏感;当缺失胞元分布在局部变形带外(即子区域 2、4 或 6)时,缺陷的分布位置对局部变形模式有重要影响。随着冲击速度的增加,惯性效应增强,胞元缺失分布不均匀性的影响相对减弱。

(2) 由于缺陷的存在,蜂窝材料的平台应力和能量吸收能力明显降低。当胞元缺失数目相同时,缺陷分布在局部变形带内(即子区域 1、3 或 5)对应着更高的平台应力。随着冲击速度的增加,胞元缺失分布位置对平台应力的影响相对减弱。在冲击速度相同时,胞壁厚度(相对密度)的增加将弱化平台应力对缺陷分布位置的依赖性。此外,与缺陷集中分布位置相比,蜂窝材料的能量吸收能力更敏感于缺陷的尺寸。胞元缺失数目越多,试件能量吸收能力越低。

References:

[1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 87-148

[2] Lu T J, He D P, Chen C Q, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 517-535. (in Chinese)
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.

[3] Chen C, Lu T J, Fleck N A. Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams [J]. J Mech Phys Solids, 1999, 47(11): 2235-2272.

[4] 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]. Int J Mech Sci, 1997, 39(5): 549-563.

[5] Guo X E, Gibson L J. Behavior of intact and damaged honeycombs: A finite element study [J]. Int J Mech Sci, 1999, 41(1): 85-105.

[6] Wang A J, McDowell D L. Effects of defects on in-plane properties of periodic metal honeycombs [J]. Int J Mech Sci, 2003, 45(11): 1799-1813.

[7] 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]. Int J Solids Struct, 2005, 42(5-6): 1777-1795.

[8] Ajdari A, Nayeb-Hashemi H, Canavan P, et al. Effect of defects on elastic-plastic behavior of cellular materials [J]. Mater Sci Eng A, 2008, 487(1-2): 558-567.

[9] Zheng Z J, Yu J L, Li J R. Dynamic crushing of 2D cellular structures: A finite element study [J]. Int J Impact Eng,

2005,32(1-4):650-664.

[10] Zhu H X, Thorpe S M, Windle A H. The effect of cell irregularity on the high strain compression of 2D voronoi honeycomb [J]. Int J Solids Struct, 2006, 43(5): 1061-1078.

[11] Li K, Gao X L, Wang J. Dynamic crushing behavior of honeycomb structures with irregular cell shapes and non-uniform cell wall thickness [J]. Int J Solids Struct, 2007, 44(14-15): 5003-5026.

[12] Nakamoto H, Adachi T, Araki W. In-plane impact behavior of honeycomb structures randomly filed with rigid inclusions [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(1): 73-80.

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

[14] Ruan D, Lu G, Wang B, et al. In-plane dynamic crushing of honeycombs—A finite element study [J]. Int J Impact Eng, 2003, 28(2): 161-182.

Effect of Defects in-Plane of Metal Honeycomb on Its Dynamic Impact Properties

ZHANG Xin-Chun[1], LIU Ying[2]

(1. *Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding* 071003, *China*;
2. *Department of Mechanics, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044, *China*)

Abstract: The influence of defects on the dynamic performance of honeycomb is widely studied, but it is mainly focused on the effect of defect type and defect ratio, and the influence of defect distribution has not yet been fully developed. Effect of defect (the cell missing) distribution domain and its size on the in-plane dynamic impact properties of metal honeycomb was numerically investigated in this work based on explicit dynamic finite element simulation by ANSYS/LS-DYNA. Considering the deformation characteristics of perfect hexagonal honeycomb at different impact velocities, the specimen was divided into nine different sub-domains. Then, the influence of defect location, the size of single defect and the impact velocities on in-plane deformation modes and the energy absorption abilities of honeycomb were explored in detail. Results show that the in-plane dynamic impact properties of honeycomb depend on defect location as well as defect size. The dependence displays higher sensitivity especially at intermediate and lower impact velocities. With the increase of the impact velocity, the influence of defect location is weakened. Due to the existence of local defects, the in-plane energy absorption ability of honeycomb decreases obviously. However, comparing with the defect distribution, the absorbed energy per volume of honeycomb displays a higher sensitivity on the single defect size. The results potentially provide theoretical guides for the safety evaluation and energy absorption design of cellular materials.

Key words: honeycomb; the cell missing; deformation mechanism; energy absorption; impact