

缓冲与隔振

胞元缺失对六边形蜂窝共面缓冲性能的影响

孙德强, 朱桢洁

(陕西科技大学 陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究胞元缺失的分布位置和大小对六边形蜂窝结构共面缓冲性能的影响。**方法** 利用有限元分析软件 Ansys/LS-DYNA 建立六边形蜂窝在共面动态压缩载荷作用下可靠的动力学计算模型, 动态压缩的速度在 100 m/s 以下。由计算结果进一步分析得到缓冲性能各评价指标。胞元缺失在样品中的分布位置根据其对称性有 6 种情形, 针对单元缺失居于样品中央的情形, 研究缺失大小对性能的影响。**结果** 中低速冲击时, 胞元缺失降低了结构的密实化应变值; 高速冲击时, 胞元缺失会增加六边形蜂窝结构的密实化应变。随着壁厚的增加, 缺失位置对动态峰应力的影响先增大后减小。与完整六边形蜂窝相比, 胞元缺失使得单位质量能量吸收随着应变的增加呈先大于后小于完整蜂窝单位质量能量的变化趋势, 且随着冲击速度的增加, 这种变化趋势越明显。在低速冲击下对于任一缺失类型, 随着胞元缺失数目的增加, 单位质量能量吸收明显减弱。**结论** 相较于胞元缺失的分布位置, 胞元缺失尺寸对六边形蜂窝共面缓冲性能的影响更大。

关键词: 蜂窝结构; 胞元缺失; 共面缓冲性能

中图分类号: TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)01-0017-07

Influence of Cell Defects on the In-plane Cushioning Property of Hexagonal Honeycomb

SUN De-qiang, ZHU Zhen-jie

(Shaanxi Provincial Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper Development, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to discuss the effect of cell defect distribution location and its size on the in-plane cushioning property of regular hexagonal honeycomb cores (RHHCs). Based on the finite element analysis software Ansys/LS-DYNA, a reliable dynamic calculation model of RHHCs under the action of in-plane dynamic compression load was established, and the velocity of dynamic compression was below 100 m/s. Evaluation indicators of cushioning property were obtained by further analysis on the computed results. There were six kinds of cell defect distribution locations in the specimens because of their symmetry. The effect of the defect size was studied in the case of missing cell clustering in the center of the specimen. The cell defect reduced the value of densification strain for the intermediate/low-velocity impact and increased such value of the RHHCs for the high-velocity impact. With the increase of cell wall thickness, the influence of defect location on the dynamic peak stress first increased and then decreased. The cell defect made the energy absorbed per unit mass show the trend of being less after being greater than the complete honeycomb unit mass energy which was increasingly obvious with the increase of velocity. At low-velocity impact, the value of the energy absorbed per unit mass decreased significantly with the increase of the number of missing cells for any defect type. Compared with the

收稿日期: 2017-07-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51575327); 陕西省教育厅重点实验室及基地项目 (16JS014); 陕西省教育厅 2014 陕西本科高校专业综合改革试点子项目 (陕教高[2014]16 号)

作者简介: 孙德强 (1976—), 男, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为多孔材料力学性能测试与仿真、计算机辅助技术与软件开发。

cell defect distribution location, its size has a greater effect on the in-plane cushioning property of RHHCs.

KEY WORDS: honeycomb structure; cell defect; in-plane cushioning property

蜂窝材料由于比强度、比模量高,具有优良的抗冲击能力、耐热防腐、导电、吸能减震、电磁屏蔽等特点,广泛应用于航天航空、交通运输、环保、能源、建筑等各领域^[1-2]。在研究蜂窝结构力学性能时,大多数学者常以完整无胞元缺失的理想化蜂窝结构为研究对象,然而,由于加工工艺等因素的影响,蜂窝中的缺陷不可避免,且对蜂窝结构的力学性能影响较大,因此国内外很多学者关于缺陷对蜂窝材料力学性能的影响进行了研究^[3]。Guo 和 Gibson^[4]分析了胞元缺失对规则六边形蜂窝结构弹性模量和后屈曲行为的影响。Wang 和 McDowell^[5]考虑到缺陷率对不同形状蜂窝体轴向压缩性能的敏感性,分析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。Zheng 等^[6]应用有限元法分析了随机蜂窝微结构的不规则性和冲击速度对蜂窝材料变形模式和平台应力的影响。Li 等^[7]讨论了胞元形状不规则性和胞壁分布不均匀这两种缺陷共存时对蜂窝材料强度的影响。Wang 等^[8]研究了胞壁缺失对金属蜂窝板的共面有效弹性模量、剪切模量和初始屈服强度的影响。Fan 和 Zhang^[9]研究了缺陷对共面动态能量吸收的影响,发现单一或分离的缺陷都减少了金属材料的能量吸收,两个缺陷的间距对动态能量吸收有部分影响,但是单一缺陷的尺寸对其有显著影响。Liu 和 Zhang^[10]讨论了胞壁缺失分布不均匀性对蜂窝材料面内冲击性能的影响。Zhang 等^[11]研究了胞壁缺失对金属蜂窝共面动态压缩性能的影响。张新春等^[12]利用显式动力有限元研究了三角形和四边形蜂窝材料中集中缺陷对其共面冲击性能的影响。张新春和刘颖^[13]还研究了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。寇东鹏等^[14]研究了胞壁随机移除的蜂窝结构的动态变形过程,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 2 个加载方向上的变形模式图及不同模式间的转换临界速度,分析了缺陷对蜂窝结构平台应力的影响。

这里在以上文献的基础上,拟研究胞元缺失对六边形蜂窝结构共面缓冲性能的影响,利用 Ansys/LS-DYNA 有限元分析软件,研究在不同冲击速度下胞元缺失的分布位置及尺寸对六边形蜂窝材料共面缓冲性能的影响。

1 计算模型

研究表明,规则六边形蜂窝样品在 x 和 y 方向内包含 10~20 个胞元,力学行为关于样品尺寸的敏感性

可忽略^[15-17]。文中采用的计算模型见图 1, x 和 y 方向上包含的胞元数均为 15 个,胞元边长 $l=3$ mm,胞壁厚度 $d=0.1$ mm。用 Ansys/LS-DYNA 对含有胞元缺失的二维蜂窝结构的动态压缩特性进行有限元建模,基体材质为双线性应变硬化的理想弹塑性模型,典型材料是铝合金,其弹性模量 $E_s=69$ GPa,泊松比 $\mu=0.3$,基材密度 $\rho_s=2700$ kg/m³,网格划分采用壳单元 Shell 163。冲击端以恒定的冲击速度 v 沿 y 方向压缩,冲击端和固定端与试样自动接触无摩擦。为保证变形的平面应变状态,试样中所有节点异面位移均被约束为 0。对于变形过程中可能的接触,采用单面自动接触算法。

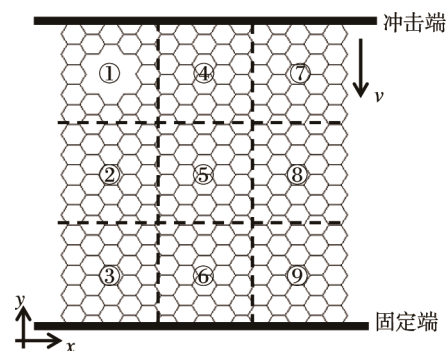


图 1 计算模型

Fig.1 Computational model

随着冲击速度的增加,理想的六边形蜂窝结构会依次出现 3 种局部变形模式,分别为“X”、“V”和“T”型。基于此,将试样分成 9 个子分布区域(见图 1)。考虑到其对称性,文中仅研究胞元缺失分布在子区域①~⑥中心情形下胞元缺失的位置对蜂窝材料共面缓冲性能的影响。此外,文中还将针对情形 4 进一步研究胞元缺失的大小对试样缓冲性能的影响。定义胞元缺失数目与完整蜂窝胞元数之比为缺失率 φ 。具有不同缺失率的试样见图 2,胞元缺失的数目分别为 1, 7, 19 和 37,对应的缺失率 φ 分别为 1.7%, 5.9%, 12.6% 和 21.9%。

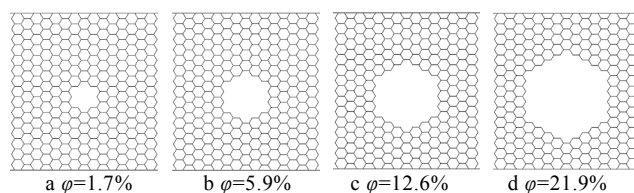


图 2 不同胞元缺失尺寸材料的结构模型

Fig.2 Honeycomb models for materials of different cell defect sizes

2 计算结果与分析

2.1 应力-应变曲线及变形模式

当壁厚为 0.1 mm，胞元缺失个数为 1 时，六边形蜂窝结构在不同冲击载荷作用下的应力-应变 (σ - ε) 曲线见图 3。在低速冲击作用下 ($v=4$ m/s)，胞元缺失位置对蜂窝结构共面冲击响应有较大影响，尤其在初始压缩阶段。胞元缺失对蜂窝结构共面冲击响应的影响随速度的增加逐渐减小。不同冲击速度下 ($\varepsilon=0.2$)，不同子区域胞元缺失时六边形蜂窝的变形模式见图 4，胞元缺失的引入改变了共面冲击下蜂窝结构的整体变形模式，且变形带均从胞元缺失区周边胞元启动 (见图 4a)。胞元在子区域①，②，③缺失时，变形带分别呈现“^”，“<”，“V”型。胞元缺失位于子区域②情形下，剪切变形带表现出不对称性。随着冲击速度的增加 (见图 3b, $v=20$ m/s)，胞元缺失对蜂窝结构共面冲击响应在初始压缩阶段的影响相对减弱，六边形蜂窝的变形模式转换为过渡模式“V”型，胞元缺失成为次生剪切变形带的启动源 (见图 4b)。根据一维冲击波理论，随着冲击速度的增加，惯性效应增强，变形模式转化为“I”型 (见图 4c)，胞元缺失的分布位置对共面冲击响应的影响逐渐减小。冲击速度增加到 100 m/s 后，胞元缺失在初始压缩阶段对六边形蜂窝应力基本没有影响，见图 3c。

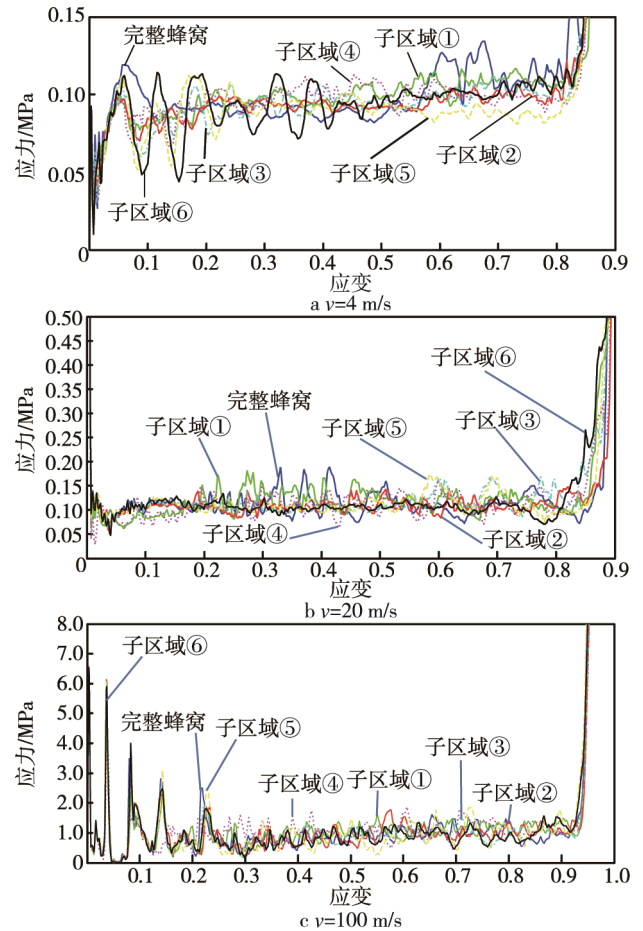


图3 六边形蜂窝的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of RHHCs

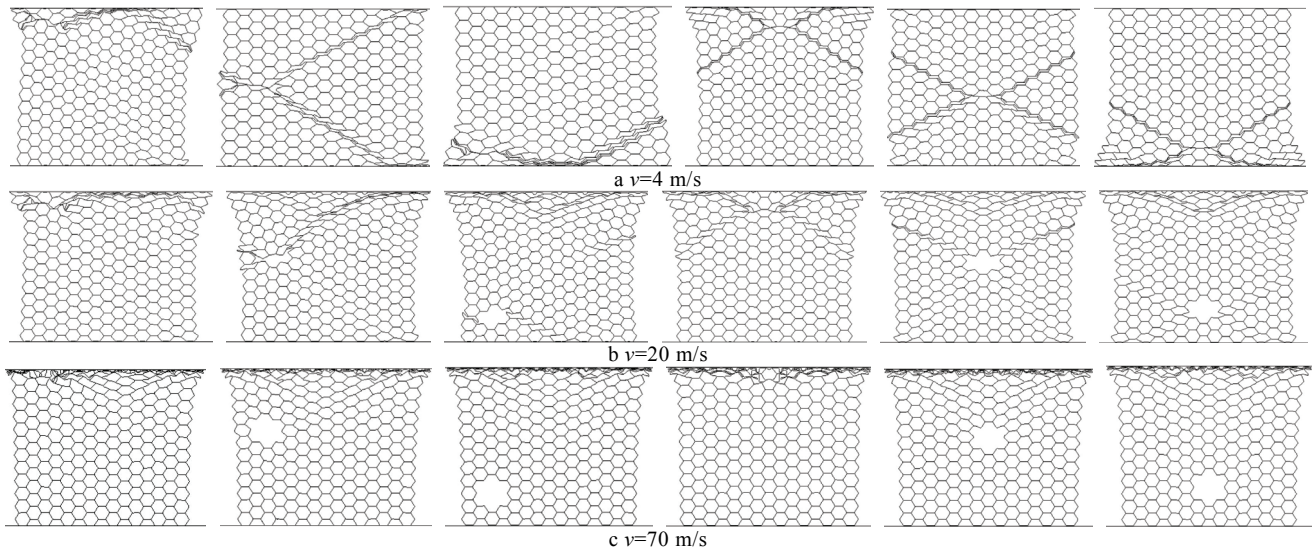


图4 不同冲击速度下不同子区域胞元缺失的六边形蜂窝变形模式

Fig.4 Deformation models of the RHHCs with missing cell clustering in different sub-domains under different shock speed

2.2 密实化应变

由图 3 可见，应力-应变曲线包含明显的 3 个阶段：初始弹性阶段、塑性崩塌阶段和密实化阶段。六边形蜂窝的吸能过程主要发生在塑性崩塌阶段，即平台应力阶段。曲线急剧上升，密实化开始时的应变称为密实化应变 ε_D 。

不同子区域中 ($d=0.1$ mm)，胞元缺失数目为 1

时的密实化应变随速度变化的趋势见图 5。低速冲击时，当胞元在子区域③，⑥，即靠近固定端处缺失时，胞元缺失的位置对密实化应变值影响最大。高速冲击时，当胞元在子区域①，④，即靠近冲击端处缺失时，胞元缺失的位置对密实化应变值影响最大，胞元在子区域⑥处缺失对密实化应变值影响最小。

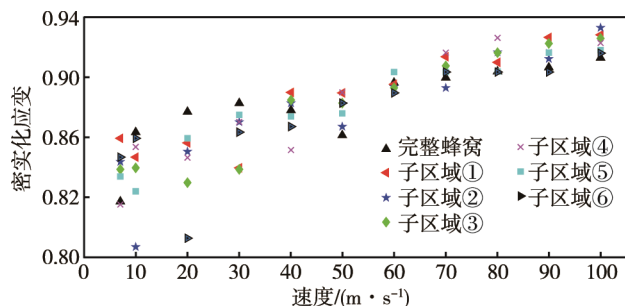


图 5 不同子区域胞元缺失时密实化应变-速度曲线

Fig.5 Densification strain-velocity curve of the RHCs with missing cell clustering in different sub-domains

缺失情形 5 下 ($d=0.1$ mm), 胞元缺失数目对六边形蜂窝密实化应变在不同冲击速度下的影响见图 6。相较于高速共面冲击, 当六边形蜂窝速度受中低速 ($v \leq 30$ m/s) 冲击时, 胞元缺失对密实化应变的影响较大, 缺失降低了结构的密实化应变值。胞元缺失数目为 19 个时, 其降低幅度最大, 但是当胞元缺失数目增大到 37 时, 其对密实化应变的影响反而有所减小。冲击速度为 30~50 m/s 时, 相较于完整的六边形蜂窝, 缺失使密实化应变有增有减, 处于过渡阶段。

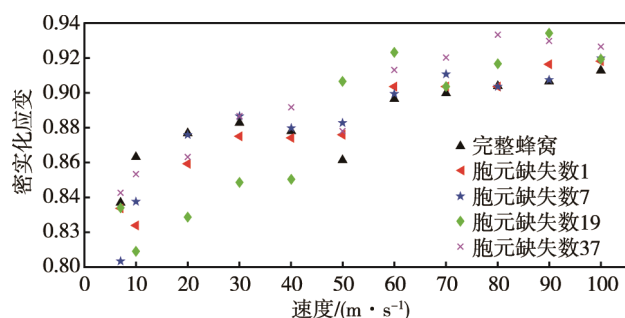


图 6 不同胞元缺失数目时密实化应变-速度曲线

Fig.6 Densification strain-velocity curve of the RHCs with different numbers of missing cells

当速度高于 50 m/s 后, 胞元缺失数目不同, 对应的密实化应变与完整的六边形蜂窝的密实化应变相比均有不同幅度增加。其中缺失数目为 1 和 7 时, 密实化应变增加幅度较小; 缺失数目为 19 和 37 时, 密实化应变增加幅度较大。与高速冲击相比, 在中低速冲击时, 密实化应变受胞元缺失的影响更大。

2.3 相对密度

完整六边形蜂窝的相对密度为 $\Delta\rho$, 由参考文献[18]给出:

$$\Delta\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{d}{l} \left(1 - \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{d}{l}\right) \quad (1)$$

式中: ρ^* 为六边形蜂窝的密度; ρ_s 为基体材质密度。含胞元缺失的六边形蜂窝的缺失率为:

$$\varphi = \frac{n}{N} \quad (2)$$

式中: n 为胞元缺失造成的胞壁缺失数目; N 为完整六边形蜂窝的胞壁数目。由式 (1—2) 可得含胞元缺失的六边形蜂窝的相对密度:

$$\Delta\rho(\varphi) = (1 - \varphi) \Delta\rho \quad (3)$$

2.4 动态峰应力

六边形蜂窝在不同冲击载荷作用下的应力-应变曲线进入平台区阶段后, 应力绕某一水平值上下波动, 该水平值称为动态峰力 σ_p , 其计算公式为:

$$\sigma_p = \frac{1}{\varepsilon_D - \varepsilon_0} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

式中: ε_0 为应力-应变曲线中在弹性变形末出现初始峰应力时对应的初始应变; ε_D 为密实化应变。胞元缺失数目为 1 时, 通过改变壁厚可得不同相对密度下胞元缺失位置对动态峰应力的影响见表 1。随着相

表 1 不同相对密度时不同子区域胞元缺失时的动态峰应力

Tab.1 Dynamic peak stress with different defect sub-domains and different values of relative density

冲击速度/ 胞壁厚度/ (m·s ⁻¹) mm		动态峰应力/GPa					
		子区域①	子区域②	子区域③	子区域④	子区域⑤	子区域⑥
7	0.1	101.909	95.2582	98.0960	96.6920	93.1643	94.0183
	0.15	222.926	203.760	222.342	224.674	212.428	215.185
	0.20	410.197	348.917	408.189	392.335	357.870	383.816
	0.30	1720.62	1714.43	1728.85	1727.90	1701.37	1724.79
	0.50	4700.04	4732.55	4723.12	4691.67	4674.92	4754.02
30	0.1	186.580	184.642	184.429	187.532	187.333	177.532
	0.15	3720.33	368.269	395.374	375.336	397.314	356.265
	0.20	660.357	644.138	702.024	611.373	687.439	638.684
	0.30	1981.08	1942.54	2187.29	2026.30	1935.35	1825.04
	0.50	5488.14	5362.77	5342.80	5524.11	5283.49	5200.03
100	0.1	1010.80	951.373	938.244	1033.44	920.221	913.584
	0.15	1764.22	1784.02	1735.60	1803.40	1664.67	1652.23
	0.20	2654.32	2668.39	2523.12	2803.13	2511.74	2532.95
	0.30	4896.19	4732.39	4706.74	4876.15	4691.73	4649.32
	0.50	9975.91	1008.95	1000.51	1012.58	9927.02	9781.35

对密度的增加,缺失位置对动态峰应力的影响先增大而后减小。当壁厚 $d=0.2$ mm 时,动态峰应力随胞元缺失位置的波动最大。随着壁厚的进一步增加,动态峰应力趋于平稳,即弱化了胞元缺失分布不均匀性的影响。在低速冲击 ($v=7$ m/s) 下,胞元缺失位于变形带内部时(如子区域①,③,④,⑥)对应较大的动态峰应力,位于变形带外部时(如子区域②和⑤)对应较小的动态峰应力。在高速冲击阶段 ($v=100$ m/s),胞元缺失距离冲击端较近,即位于子区域①和④时,其动态峰应力最大。随着胞元缺失远离冲击端,对应的动态峰应力逐渐减小,如胞元缺失处于子区域③和⑥时,对应的动态峰应力最小。在过渡阶段 ($v=30$ m/s),相对密度较小(如 d 为 0.10, 0.15 和 0.20 mm)时,胞元缺失位于子区域①,③,⑤时六边形蜂窝有更高的动态峰应力。随着冲击速度的增加,引起动态峰应力发生波动的样品壁厚越来越大,高速 ($v=100$ m/s) 冲击条件下, $d=0.5$ mm 时六边形蜂窝动态峰应力也出现了波动。

2.5 单位质量能量吸收

单位质量蜂窝材料吸收的能量为^[19]:

$$W_m = \frac{W_v}{\Delta \rho \rho_s} \quad (5)$$

式中: $W_v = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$, 为单位体积吸收能量。

胞元缺失使得单位质量能量吸收随应变的增加呈先大于后小于完整蜂窝单位质量能量吸收的变化趋势,且随着冲击速度的增加,这种变化趋势更加明显。胞元缺失数目不同时,不同共面冲击速度下六边形蜂窝的单位质量吸收能量随应变的变化曲线见图 7。在低速冲击下,随着胞元缺失数目的增加,六边形蜂窝的能量吸收能力明显减弱,且由于胞元缺失导致的局部软化效应使曲线在中部呈现下凹趋势,见图 7a。随着冲击速度的增加,胞元缺失使六边形蜂窝在应变初始阶段的单位质量能量吸收能力有所提升,曲线高于完整的六边形蜂窝单位质量能量吸收曲线,呈上凸趋势,但是在应变后期,胞元缺失使得能量吸收能力明显低于完整的六边形蜂窝,曲线呈下凹趋势,各条曲线在应变为 0.3 左右交于一点,交点值随冲击速度的增加而增加,见图 7b。当冲击速度进一步提升 ($v=100$ m/s),该现象更加明显。由此,胞元缺失使得六边形蜂窝前程吸能特性更加突出。随着胞元缺失数目的增加,六边形蜂窝单位质量能量吸收曲线上凸或下凹的程度加剧,即在六边形蜂窝受压缩前半程,胞元缺失越多,其单位质量能量吸收越多。这可为以后的缓冲设计提供一定思路。

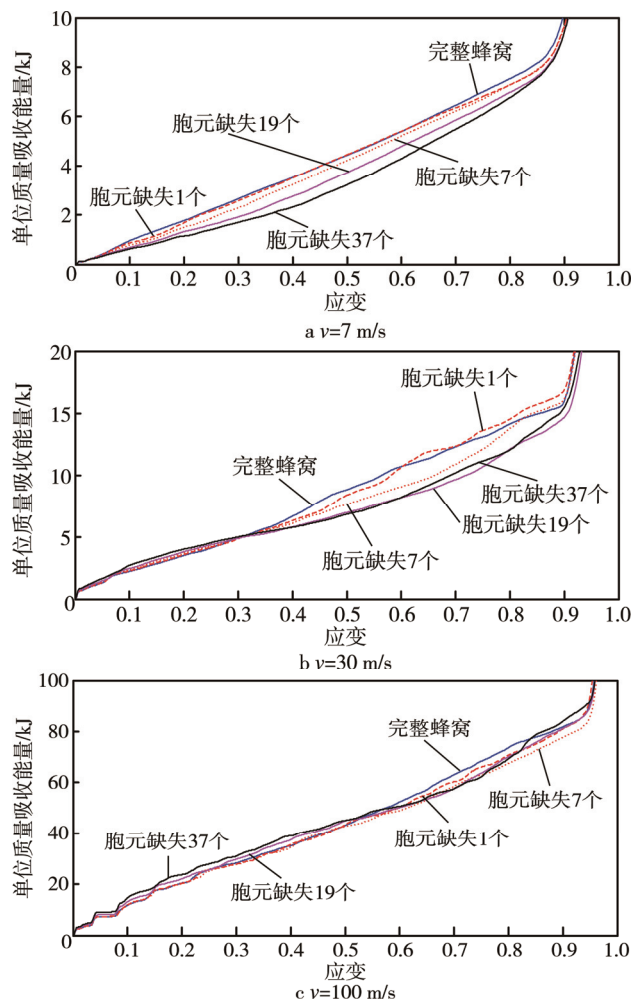


图7 不同共面冲击速度下六边形蜂窝单位质量吸收能量-应变曲线

Fig.7 The energy absorbed per unit mass-strain curve of the RHHCs at different in-plane impact velocities

不同胞元缺失情形下胞元缺失数为 1 时的单位质量能量吸收特性曲线见图 8,作为对比并给出了完整六边形蜂窝的相应曲线。显然,胞元缺失所在位置不同,六边形蜂窝的能量吸收特性也不同。当胞元缺失在子区域①和④时,胞元缺失区域更靠近冲击端,试样吸收的能量更多,六边形蜂窝的单位质量能量吸收能力反而有所提升。当胞元缺失集中分布于子区域⑥时,缺陷位置最靠近固定端,即距冲击端最远且不在局部变形带上,六边形蜂窝的单位质量能量吸收最少。低速冲击时,胞元缺失位置靠近冲击端的六边形蜂窝在冲击后期表现出更强的吸能特性。高速冲击时,缺陷集中区域靠近冲击端时,曲线在应变较低时呈下凹趋势,后期吸能特性更突出。通过改变壁厚,对不同相对密度的六边形蜂窝在不同胞元缺失情形下的单位质量能量吸收进行计算,结果表明在同一胞元缺失率和同一冲击速度下,相对密度对六边形蜂窝单位质量能量吸收的影响可忽略不计。

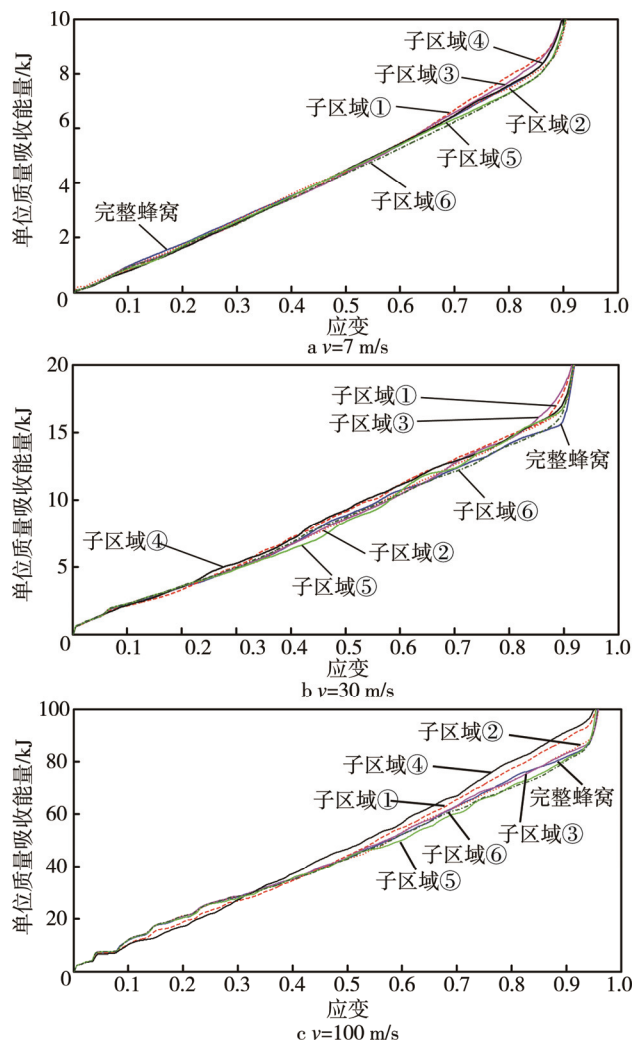


图8 不同共面冲击速度下六边形蜂窝单位质量能量吸收-应变曲线

Fig.8 The energy absorbed per unit mass-strain curve of the RHHCs at different in-plane impact velocities

3 结语

通过有限元仿真研究了胞元缺失对六边形蜂窝共面缓冲性能的影响,得出以下主要结论。

1) 胞元缺失的位置对六边形蜂窝共面应力的影响主要体现在响应曲线的初始阶段,胞元缺失改变了六边形蜂窝共面变形模式。随着冲击速度的增加,胞元缺失引起次生剪切变形带。高速冲击下,惯性效应增强,胞元缺失对共面冲击响应的影响逐渐减小,最终可忽略。

2) 中低速冲击条件下,胞元缺失降低了结构的密实化应变值,对密实化应变的影响比在高速冲击下更大,越靠近固定端对密实化应变值影响越大。高速冲击时,胞元缺失会增加六边形蜂窝的密实化应变,越靠近冲击端对密实化应变值影响越大。

3) 随壁厚的增加,胞元缺失对动态峰应力的影响先增大后减小。当厚度为 0.2 mm 时,动态峰应力

随缺陷位置的波动较大;随着壁厚进一步的增加,动态峰应力随缺陷位置的波动减弱。低速冲击下,胞元缺失处于冲击两端时可引起较大的动态峰应力。在高速冲击下,胞元缺失越靠近冲击端时,对应的动态峰应力越大。过渡冲击阶段,相对密度较小时,缺陷位于变形带上的六边形蜂窝有更高的动态峰应力。随着冲击速度的增加,引起动态峰应力发生波动的样品壁厚越来越大。

4) 胞元缺失的引入改变了六边形蜂窝的单位质量能量吸收特性。在低速冲击下,随着胞元缺失数目的增加,六边形蜂窝单位质量吸收能量变小。胞元缺失使得单位质量吸收能量随应变的增加呈先大于后小于完整蜂窝单位质量能量吸收的变化趋势,且随着冲击速度的增加这种变化趋势越明显。随着冲击速度的增加,含胞元缺失的六边形蜂窝前程吸能特性更加突出。当胞元缺失越靠近冲击端时,六边形蜂窝单位质量能量吸收越大。缺陷位置越靠近冲击端的蜂窝表现出越强的后程吸能特性。

参考文献:

- [1] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] LIU Pei-sheng. Introduction to Cellular Materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [3] GIBSON L J, ASHBY M F, SCHAJER G S, et al. the Mechanics of Two-dimensional Cellular Materials[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1982, 382: 25—42.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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): 650—664.
- [8] 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 Solids and Structure, 2005, 42(5): 1777—1795.
- [9] 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.
- [9] FAN Wei-li, ZHANG Xin-chun. Effects of Defects on the In-plane Dynamic Energy Absorption of Metal Honeycombs[C]// International Conference on Digital Manufacturing & Automation. IEEE Computer Society, 2010.
- [10] LIU Y, ZHANG X C. Effects of Inhomogeneous Distribution of Defects on In-plane Dynamic Properties of Honeycombs[J]. Explosion & Shock Waves, 2009, 29(3): 237—242.
- [11] ZHANG X C, LIU Y, WANG B, et al. Effects of Defects on the In-plane Dynamic Crushing of Metal Honeycombs[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52(10): 1290—1298.
- [12] 张新春, 刘颖, 章梓茂. 集中缺陷对蜂窝材料面内动力学性能的影响[J]. 工程力学, 2011, 5(6): 239—244. ZHANG Xin-chun, LIU Ying, ZHANG Zi-mao. Effect of Concentrated Defects on the In-plane Dynamic Properties of Honeycombs[J]. Engineering Mechanics, 2011, 5(6): 239—244.
- [13] 张新春, 刘颖. 缺陷对金属蜂窝材料面内冲击性能的影响[J]. 高压物理学报, 2012, 12(6): 645—642. ZHANG Xin-chun, LIU Ying. Effect of Defects In-plane of Metal Honeycomb on Its Dynamic Impact Properties[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 12(6): 645—642.
- [14] 寇东鹏, 虞吉林, 郑志军. 随机缺陷对蜂窝结构动态行为影响的有限元分析[J]. 力学学报, 2009, 46(6): 859—868. KOU Dong-peng, YU Ji-lin, ZHENG Zhi-jun. Effect of Randomly Cell Walls on the Dynamic Crushing Behavior of Honeycomb Structures[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 46(6): 859—868.
- [15] 刘颖, 张新春. 缺陷分布不均匀性对蜂窝材料面内冲击性能的影响[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(3): 237—242. LIU Ying, ZHANG Xin-chun. Effect of Inhomogeneous Distribution of Defects on In-plane Dynamic Properties of Honeycombs[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(3): 237—242.
- [16] SILVA M J, GIBSON L J. The Effects of Non-periodic Microstructure and Defects on the Compressive Strength of Two-dimensional Cellular Solids[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1997, 35(5): 549—563.
- [17] 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.
- [18] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [19] KOOISTRA G W, DESHPANDE V S, WADLEY H N G. Compressive Behavior of Age Hardenable Tetrahedral Lattice Truss Structures Made From Aluminium [J]. Acta Materialia, 2004, 52(14): 4229—4237.

《智能包装与活性包装》特色栏目征稿函

智能包装与活性包装是包装工程技术领域的发展趋势,也是全球包装行业研发和应用的焦点。智能包装新技术与活性包装新材料的应用,能改善包装物条件的体系(通过释放物质、排除或抑制SU),延长包装物使用寿命;提高卫生安全性;改善气味和口感特性的同时保证其品质不变。利用新型的包装材料、结构与形式对商品的质量和流通安全性进行积极干预与保障,通过信息收集、管理、控制与处理技术完成对运输包装系统的优化管理等。

鉴于此,本刊拟围绕“智能包装与活性包装”这一主线,作系列专项报道。本刊编辑部特邀请相关专家为该栏目撰写稿件,以期进一步提升本刊的学术质量和影响力。稿件以研究论文为主,也可为综述性研究,请通过网站投稿,编辑部将快速处理并优先发表。

编辑部电话: 023-68792294 网址: www.packjour.com

《包装工程》编辑部