

冲击速度和应变率对六边形蜂窝共面缓冲性能的影响

张菲菲, 孙德强

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 通过改变压缩方向的厚度, 即共面方向的蜂窝层数, 来研究冲击速度和应变率对六边形蜂窝共面缓冲性能的影响。**方法** 借助软件 Ansys/LS-DYNA 来模拟六边形蜂窝在应变率恒定时冲击速度对蜂窝共面缓冲性能的影响, 以及六边形蜂窝在速度值恒定时应变率对蜂窝共面缓冲性能的影响。**结果** 设定 3 组应变率恒值 (300, 500, 1000 s^{-1}) 研究不同冲击速度对蜂窝动态峰应力的影响, 随着速度的增加, 动态峰应力也增加。设定 3 组冲击速度恒值 (3, 50, 100 m/s) 研究不同应变率对蜂窝动态峰应力的影响, 随着应变率增加, 动态峰应力基本不变。**结论** 在试件材料选用双线性硬化的铝基材料, 壁材视为应变率不敏感模型下, 应变率对正六边形蜂窝的动态力学性能和缓冲性能基本无影响。

关键词: 六边形蜂窝; 缓冲性能; 冲击速度; 应变率; 有限元分析

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0043-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.009

The Effect of Impact Velocity and Strain Rate on the In-plane Cushioning Properties of Hexagonal Honeycomb

ZHANG Fei-fei, SUN De-qiang

(Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of impact velocity and strain rate on the in-plane cushioning properties of hexagonal honeycomb by changing the thickness in the compression direction, namely, the number of honeycomb layers. Software Ansys/LS-DYNA was used to simulate the effect of impact velocity on the in-plane cushioning properties of honeycomb under constant strain rate, and the effect of strain rate on the in-plane cushioning properties of honeycomb under constant velocity value. Three sets of strain rate constants (300, 500, 1,000 s^{-1}) were set to study the effects of different impact velocities on the dynamic peak stress of the honeycomb. The dynamic peak stress increased with the increase of the velocity. Three sets of strain rate constants (3, 50, 100 m/s) were set to study the effects of different strain rates on the dynamic peak stress of the honeycomb. The dynamic peak stress remained basically unchanged with the increase of strain rate. When the tested material is bilinear hardened aluminum substrate, and the wall material is not sensitive to the strain rate, the strain rate basically has no influence on the dynamic mechanical property and cushioning property of the regular hexagonal honeycomb.

KEY WORDS: hexagonal honeycomb; cushioning properties; impact velocity; strain rate; finite element analysis

六边形蜂窝是一种二维多孔缓冲材料, 具有质量轻、比强度高、比刚度大、能量吸收性好等特点, 在产品防护方面可起到良好的防振、隔热、隔音等作用, 广泛应用于包装、家具、建筑、军事以及航空航天等

诸多领域。目前, 对二维多孔材料的力学性能进行试验和模拟已成为人们研究的热点。孙德强等^[1-3]借助软件 Ansys/LS-DYNA 对三角形蜂窝和正方形蜂窝芯材的共面冲击动力学进行了研究, 基于冲击波理论得

收稿日期: 2017-07-31

作者简介: 张菲菲 (1993—), 女, 陕西科技大学硕士生, 主攻多孔材料力学性能测试与仿真。

通信作者: 孙德强 (1976—), 男, 博士, 陕西科技大学教授, 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。

出在三角形蜂窝结构参数固定时,共面动态峰应力与冲击速度的关系曲线及其系数,并且拟合出动态峰应力关于壁厚边长比和冲击速度的经验公式。孙玉瑾和骆光林^[4]也利用有限元法分析软件分析研究了六边形金属蜂窝的异面冲击性能。Yamashita 和 Gotoh^[5]利用试验和有限元法研究铝蜂窝在异面低速冲击载荷作用下的力学性能。Ma 等^[6]采用数值模拟 Voronoi 模型进行了加载速率对不规则二维多孔材料压缩行为的影响。Tao 等^[7]研究了基于应变率影响的铝蜂窝板的异面动态压缩行为,依据 rate-independent 和 rate-dependent 理论以及试验数据,得出铝蜂窝为应变率敏感性材料,并将平台应力分为名义静态阶段、惯性阶段、应变率阶段这 3 部分,揭示出应变率在较大的速率范围内对铝蜂窝板的动态力学性能增强起重要意义。Wang 等^[8-9]讨论了蜂窝纸板的动态力学性能,建立了相应的数学模型,提出了不同变形阶段的应力,并描述了蜂窝结构的能量吸收特性。Sebastian 等^[10]研究应变率对酚醛复合材料和酚醛浸渍蜂窝板的影响,分析了在不同加载速率下复合材料的弹性模量、拉伸强度、剪切模量、剪切强度以及蜂窝板的力学行为。Zou 等^[11]研究平面冲击载荷作用下蜂窝材料动态力学性能,得到铝合金蜂窝板高应变率下的动态力学响应。Alavi Nia 和 Sadeghi^[12]研究了低应变率下的六边形蜂窝力学性能,结果表明平均抗压强度是高度依赖于应变率。Remy 等^[13]演示泡沫密度和应变率对初始坍塌应力的影响。Wang 等^[14-15]通过试验研究湿度和应变率对纸质缓冲材料能量吸收特性的影响,得出蜂窝纸板在中等应变率作用下的平台应力和单位体积吸收能量较之准静态压缩有较大的提高。国内外学者在研究应变率时,多用名义应变率=速度/厚度的公式,通过改变速度来获取不同范围的应变率值,并对其力学行为进行探究,未区分速率效应和应变率效应。其次,研究领域多集中于静动态力学行为,未涉及包装缓冲领域,因此,文中针对力学行为和包装缓冲领域展开研究。

1 共面冲击分析的有限元方法

1.1 冲击速度与应变率

冲击速度指蜂窝材料所承受的恒定加载速度,应变率表征材料的变形速度是应变对时间的导数。由于试验中难以获取数值,故采用名义应变率研究应变率 ε 对材料力学影响,见式(1)。

$$\varepsilon = v/d \quad (1)$$

式中: v 为冲击速度; d 为压缩方向的厚度。

1.2 参数设定

这里研究对象为均匀壁厚正六边形蜂窝,其结构

见图 1。试件材料选用双线性硬化的铝基材料,壁材视为应变率不敏感。材料属性: $\rho_{Al}=2700 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E=68.9 \text{ GPa}$, 屈服强度为 292 MPa , 切线模量为 68.9 GPa , 泊松比为 0.35 ; 上下压板材料为钢,各向同性并设定为刚体。其模型参数: $l=3\text{e}^{-3}$, $t=0.1\text{e}^{-3}$, $\theta=30^\circ$, $b=10\text{e}^{-3}$ 。借助于软件 Ansys/LS-DYNA 进行建模,使用 5 个积分点的 Belytschko-Tsay 壳单元 Shell163 进行网格划分,整个模型定义为无摩擦的单面接触。

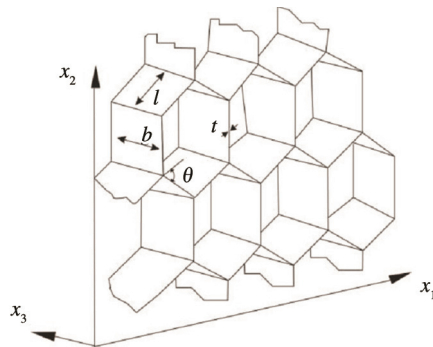


图 1 六边形蜂窝结构

Fig.1 The structure of hexagonal honeycomb

1.3 有限元模型

六边形蜂窝共面冲击分析有限元模型见图 2,蜂窝模型夹在冲击板 P_1 和支撑板 P_2 之间,设定样品在 x_3 方向的自由度为 0。支撑板 P_2 固定,冲击板 P_1 以恒定速度均匀冲击样品,直至样品处于密实化状态。

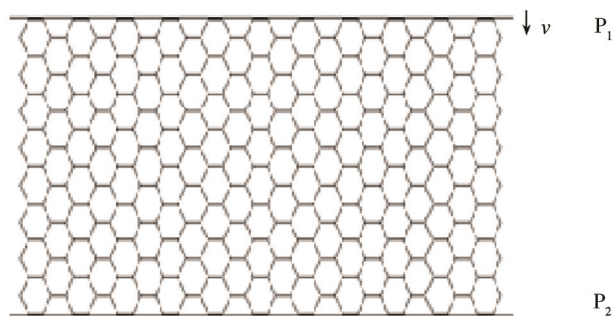


图 2 六边形蜂窝共面冲击分析有限元模型

Fig.2 Finite element model for in-plane impact analysis of hexagonal honeycomb

通过建立有限元分析模型,改变冲击方向蜂窝层数,探索应变率恒定,不同冲击速度或冲击速度恒定时不同应变率对六边形蜂窝异面缓冲性能的影响,确认六边形蜂窝的共面缓冲性能与冲击速度、应变率的关系,在共面方向建立从 1 层到 20 层的有限元模型,见图 3。

1.4 分析方法

借助 Ansys/LS-DYNA 模拟完成后,通过后处理软件 LSPREPOSTD 对计算结果处理,得到相应的变

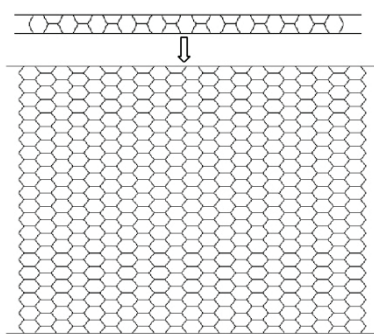


图 3 六边形蜂窝有限元模型

Fig.3 Finite element model of hexagonal honeycomb

形模式图和变形曲线 ($F-t$ 曲线, $s-t$ 曲线), 其中 F 为冲击板与蜂窝间的冲击力, s 为冲击板位移。再经过 Excel 数据处理, 得到动态峰应力 σ_p 等数值并拟合出相应的关系曲线。

1.5 变形模式

六边形蜂窝样品进行仿真, 经过处理后, 可得到相应的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线。速度 $v=3$ m/s, 层数为 15 的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线见图 4。样品的响应曲线与一般二维多孔材料的共勉动态冲击响应一样, 经历 4 个阶段: 线弹性变形阶段, $\sigma-\varepsilon$ 曲线呈线性变化, 且应变值快速增加至初始峰应力 σ_0 ; 屈服变形阶段, 因屈服使初始峰应力 σ_0 下降至一水平值; 平台变形阶段, 应力值围绕水平值动态峰应力 σ_p 上下波动; 密实化变形阶段, 应力从密实化点 ε_D 急剧上升, 进入密实化阶段。

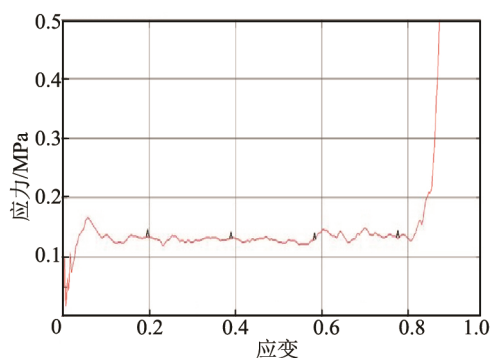
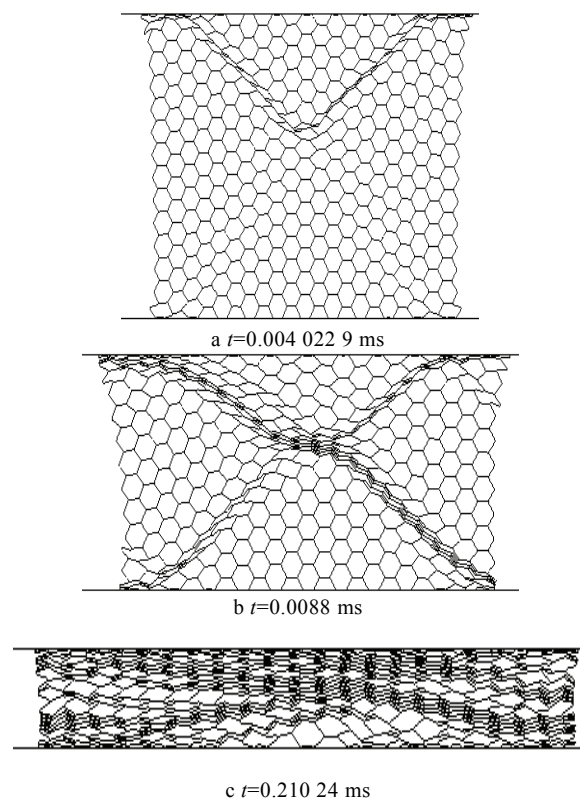
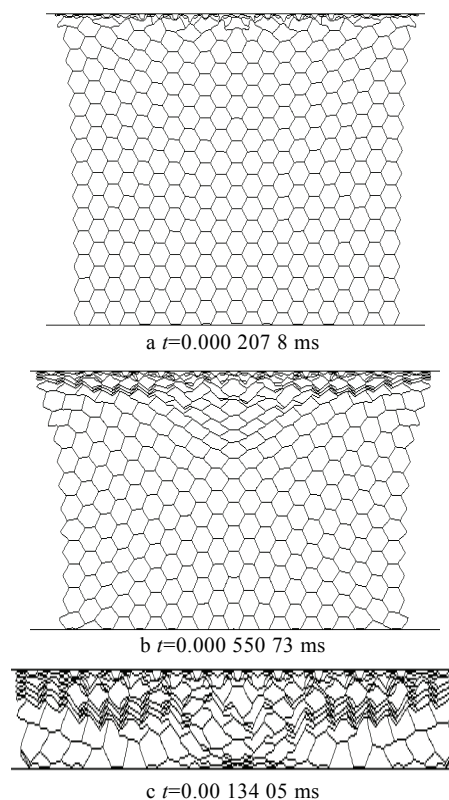


图 4 应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve

六边形蜂窝样品在 3 种不同速度下的变形见图 5—7, 层数均为 15。从图 5—7 可以看出, 不同速度下呈现不同的变形模式, 分别为均匀模式、过度模式和动态模式。均匀模式: 在低速冲击状态下, 一个随机倾斜出现在蜂窝薄弱部位, 最终形成“X”型变形带, 直至压制密实。过度模式: 在中等速度冲击下, 首先出现一个波浪状类“T”型变形带, 随着压缩的进行, 左右两端竖直细胞出现倾斜, 在中间细胞的簇拥下形成“V”型变形带, 并向下压缩。动态模式: 高速冲击

条件下, 同样出现一个“T”型变形带, 随着压缩的进行逐层传递下去。

图 5 $v=3$ m/s 时的变形模式Fig.5 Deformation pattern ($v=3$ m/s)图 6 $v=50$ m/s 时的变形模式Fig.6 Deformation pattern ($v=50$ m/s)

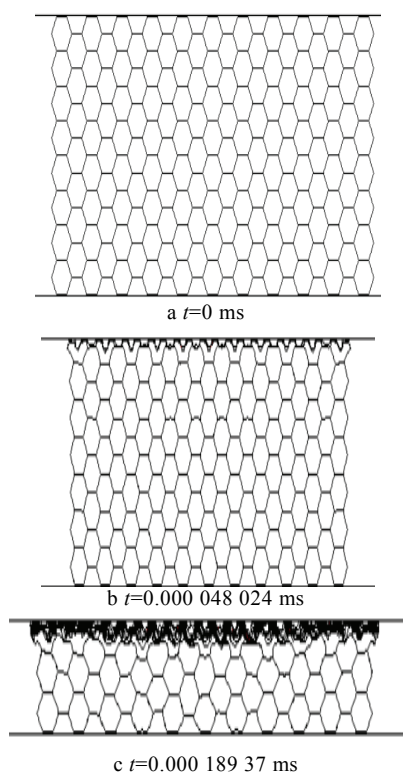


图 7 $v=100$ m/s 时的变形模式
Fig.7 Deformation pattern ($v=100$ m/s)

2 结果分析

2.1 冲击速度的影响

六边形蜂窝的共面动态峰应力为:

$$\sigma_p = \frac{\int_{s_0}^{s_D} F(s) ds}{A_0(s_D - s_0)} \quad (2)$$

式中: A_0 为共面压缩方向的压缩面积; F , s_0 , s_D 分别为冲击板与蜂窝间的冲击力、初始位移、密实化位移。

设定 3 组应变率恒值分别为 300, 500, 1000 s^{-1} , 研究不同冲击速度对蜂窝动态峰应力的影响结果见表 1。

在应变率值恒定时, 随着层数的增加, 速度也在增加, 由图 8 可知, 在动态冲击过程中, 随着速度增大, 六边形蜂窝的动态峰应力增加。应变和单位体积应变能曲线开始急剧上升的拐点称为样品的最佳能量吸收点。拐点过后进入密实化区域, 在能量吸收不多的情况下应力也会急剧增加, 会导致保护对象的破损, 因此, 样品的最佳能量吸收点对应的最佳单位体积吸收能是评价二维多孔材料缓冲性能的重要指标。在应变率值为 300, 500, 1000 s^{-1} 下各选取 3 组不同冲击速度, 样品对应的应变和单位体积应变能曲线见图 9。在应变率值恒定时, 随着冲击速度的增大, 最佳单位体积吸收能也在增加。

表 1 同一应变率下冲击速度不同时动态峰的应力值
Tab.1 Dynamic peak stress under different impact velocities and constant strain rate MPa

层数	应变 ε/s^{-1}		
	300	500	1000
1	0.11	0.11	0.18
2	0.12	0.14	0.19
3	0.13	0.14	0.20
4	0.13	0.17	0.20
5	0.14	0.16	0.20
6	0.13	0.16	0.26
7	0.14	0.16	0.34
8	0.14	0.17	0.39
9	0.16	0.17	0.45
10	0.16	0.20	0.53
11	0.16	0.24	0.59
12	0.16	0.30	0.70
13	0.17	0.31	0.80
14	0.18	0.33	0.86
15	0.17	0.39	0.92
16	0.20	0.42	0.98
17	0.21	0.47	1.07
18	0.25	0.48	1.14
19	0.27	0.52	1.23
20	0.28	0.56	1.39

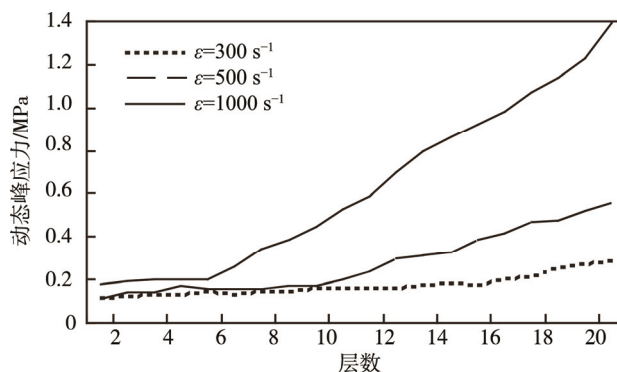


图 8 应变率恒定时动态峰应力-层数曲线
Fig.8 Dynamic peak stress-layer curve (constant strain rate)

2.1 应变率的影响

设定 3 组冲击速度恒值分别为 3, 50, 100 m/s, 研究不同应变率对蜂窝动态峰应力的影响, 结果见表 2。

设置 1—5 层模型时, 由于尺寸过小, 造成尺寸效应, 取值可忽略。在 x_1 方向由 20—1 层变化时, 相应的应变率值增大。由图 10 可知在速度恒为 3, 50, 100 m/s 时, 随着应变率的增大, 动态峰应力基本不变。各取速度恒为 3, 50, 100 m/s 时, 3 组不同应变率下, 应力-应变曲线见图 11, 动态峰应力值基本围绕同一水平线波动, 进一步直观表示应变率的增大, 动态峰应力基本不变。

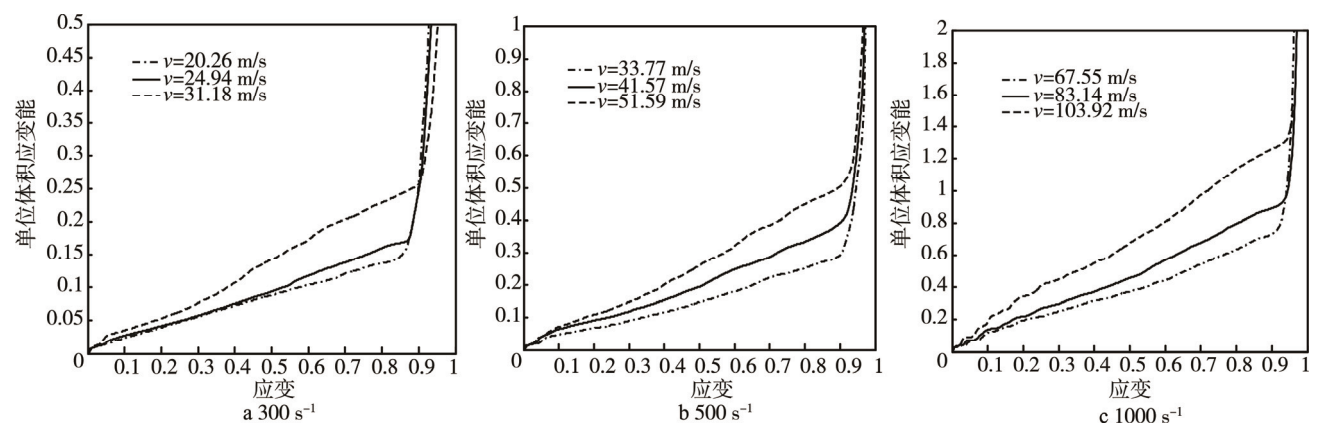


图 9 应变率恒定时应变-单位体积能量吸收曲线
Fig.9 Curve of strain-capacity absorption per unit volume (constant strain rate)

表 2 同一速度应变率不同时动态峰的应力值
Tab2. Dynamic peak stress under different strain rates and constant velocity MPa

层数	速度/(m·s ⁻¹)		
	3	50	100
1	0.14	1.73	3.47
2	0.12	0.68	1.82
3	0.13	0.67	1.93
4	0.13	0.61	1.80
5	0.13	0.54	1.66
6	0.13	0.49	1.54
7	0.13	0.51	1.48
8	0.13	0.51	1.40
9	0.13	0.50	1.34
10	0.13	0.51	1.29
11	0.13	0.53	1.32
12	0.13	0.51	1.30
13	0.13	0.51	1.28
14	0.13	0.52	1.27
15	0.13	0.52	1.26
16	0.13	0.52	1.25
17	0.14	0.52	1.22
18	0.13	0.53	1.20
19	0.14	0.52	1.22
20	0.14	0.52	1.23

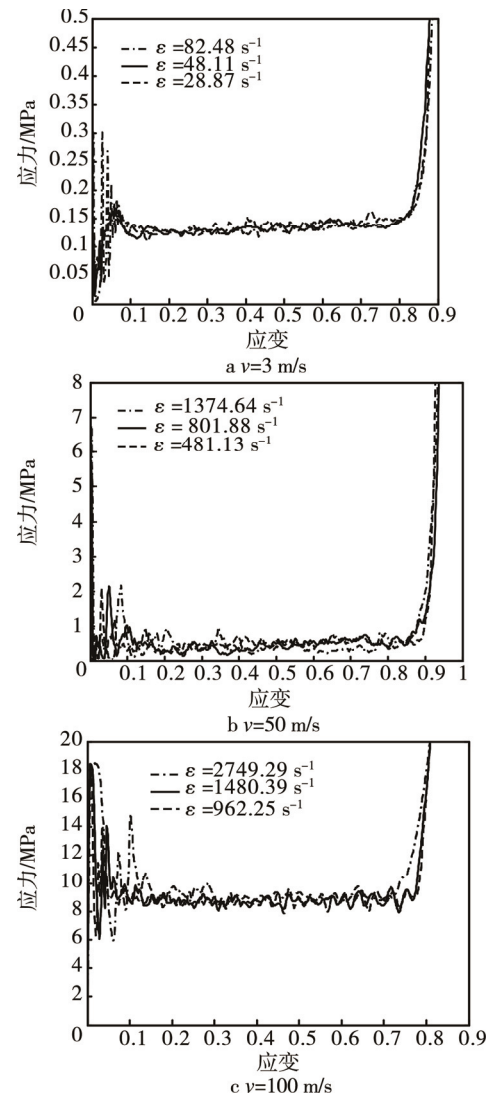


图 11 应力-应变曲线
Fig.11 Stress-strain curve

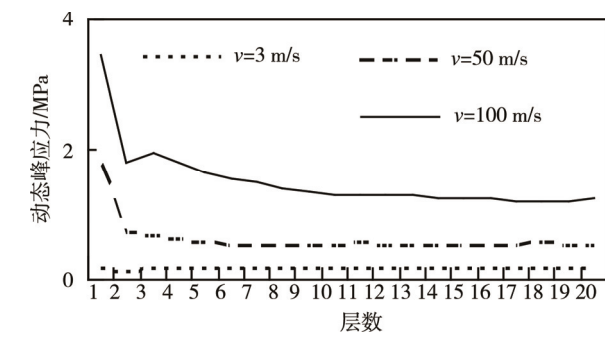


图 10 动态峰应力-层数曲线
Fig.10 Dynamic peak stress-layer curve

3 结语

借助软件 Ansys/LS-DYNA，通过改变压缩方向的厚度(在蜂窝的共面方向而言即共面方向的蜂窝层

数)模拟六边形蜂窝在应变率恒定时冲击速度对蜂窝的共面缓冲性能的影响,以及六边形蜂窝在速度值恒定时应变率对蜂窝的共面缓冲性能的影响。结果表明,在试件材料选用双线性硬化的铝基材料,壁材视为应变率不敏感模型下,应变率对正六边形蜂窝的动态力学性能和缓冲性能基本无影响。加载速度增大时,六边形蜂窝力学性能增强是由于冲击速度造成的,并非是应变率速率影响的。

参考文献:

- [1] SUN De-qiang, GUO Yan-feng, XIA Rong-hou. In-plane Crushing of Triangular Honeycomb Cores, Part II: Under Dynamic Loadings[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 476/477/478: 2481—2484.
- [2] 孙德强, 宫凯, 李国志. 三角形蜂窝的共面冲击动力学[J]. *陕西科技大学学报*, 2013, 31(1): 98—105.
SUN De-qiang, GONG Kai, LI Guo-zhi. In-plane Impact of Triangular Honeycomb[J]. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology*, 2013, 31(1): 98—105.
- [3] 孙德强, 郭玉瑾, 郑波波. 正方形蜂窝芯材共面冲击力学性能[J]. *包装工程*, 2014, 35(3): 1—5.
SUN De-qiang, GUO Yu-jin, ZHENG Bo-bo. Mechanical Properties of Square Honeycomb Core Under In-plane Impact[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(3): 1—5.
- [4] 孙玉瑾, 骆光林. 六边形蜂窝芯材异面冲击性能的有限元研究[J]. *包装工程*, 2012, 33(17): 60—62.
SUN Yu-jin, LUO Guang-li. Finite Element Study on the Impact Properties of Hexagonal Honeycomb Core [J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(17): 60—62.
- [5] YAMASHITA M, GOTOH M. Impact Behaviour of Honeycomb Structures with Various Cell Specifications-numerical Simulation and Experiment[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1/2/3/4): 618—630.
- [6] MA G M, YE Z Q, SHAO Z S. Modeling Loading Rate Effect on Crushing Stress of Metallic Cellular Materials[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(6): 775—782.
- [7] TAO Yong, CHEN Ming-ji, CHEN Hao-sen. Strain Rate Effect on the Out-of-plane Dynamic Compressive Behavior of Metallic Honeycombs: Experiment and Theory[J]. *Composite Structures*, 2015, 132: 644—651.
- [8] WANG Dong-mei, BAI Zi-you. Mechanical Property of Paper Honeycomb Structure under Dynamic Compression[J]. *Materials & Design*, 2015, 77: 59—64.
- [9] WANG Dong-mei, BAI Zi-you, XU Zhuo-fei. Model Creation of Strain Rate-dependent Energy Absorption for Paper Honeycomb Sandwich Structure[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2015, 17(4): 359—375.
- [10] SEBASTAIN H, SEBASTAIN S, PETER M. Strain Rate Effects in Phenolic Composites and Phenolic-impregnated Honeycomb Structures[J]. *Composites Science & Technology*, 2007, 67(13): 2827—2837.
- [11] ZOU Guang-ping, CHANG Zhong-liang, LIANG Jun. The Study of Honeycomb Material Dynamic Mechanical Properties Which under Out-plane Impact Load[C]// 12th International Conference on Fracture, 2009: 3649—3652.
- [12] ALAVI N A, SADEGHI M Z. An Experimental Investigation on the Effect of Strain Rate on the Behaviour of Bare and Foam-filled Aluminium Honeycombs[J]. *Materials & Design*, 2013, 52(24): 748—756.
- [13] REMY B, PHILIPPE V, JEAN-LUC L. Rolypropylene Foam Behaviour under Dynamic Loadings: Strain Rate, Density and Microstructure Effects[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(2): 392—342.
- [14] 王志伟, 鄂玉萍. 纸质缓冲材料能量吸收特性研究进展[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(5): 40—45.
WANG Zhi-wei, E Yu-ping. Research Progress of Energy Absorption Characteristics of Paper Buffering Materials[J]. *Vibration and Impact*, 2010, 29(5): 40—45.
- [15] WANG Zhi-wei, LI Xiao-fei. Effect of Strain Rate on Cushioning Properties of Molded Pulp Products[J]. *Materials & Design*, 2014(57): 598—607.