

基材属性对铝蜂窝共面力学性能的影响

张志娟，孙德强

(陕西科技大学，西安 710021)

摘要：目的 研究不同属性的基体材料对铝蜂窝共面压缩力学性能的影响。**方法** 在保持正六边形蜂窝结构参数不变的情况下，改变基材属性，基体材料模型分别选择不同应变强化参数的双线性各向同性强化模型和理想弹塑性模型，建立相关可靠的有限元模型并进行大量的模拟计算。获得相应的变形模式和应力-应变曲线，对曲线进一步处理得到蜂窝共面静动态峰应力，并将结果以图表形式展示并分析。**结果** 随着冲击速度的增加，样品依次出现了“X”，“V”，“—”字型3种变形模式，基体材料的应变强化效应使变形趋于均匀化；基体材料的应变强化效应显著增加了蜂窝的静态峰应力，对动态峰应力增量的影响可以忽略，对计算数据处理后得到了应变强化参数与动态峰应力的计算公式。**结论** 基材具有强化特性的蜂窝，其共面静态力学性能优于基材为弹性理想塑性材料模型的蜂窝；在利用数值模拟的方法来研究蜂窝结构共面静态力学行为时，需要考虑基体材料的强化效应。

关键词：正六边形蜂窝；应变强化；峰应力；力学性能

中图分类号：TB484.1；TB487 文献标识码：A 文章编号：1001-3563(2018)05-0038-06

DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.008

Influence of Cell Wall Material Properties on Aluminum Honeycomb In-plane Mechanical Property

ZHANG Zhi-juan, SUN De-qiang
(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of cell wall material properties on the in-plane compressive mechanical property of aluminum honeycomb. With the structural parameter of regular hexagonal honeycomb unchanged, the cell wall material property was changed, the cell wall material models respectively selected the bilinear isotropic hardening model and ideal elastic-plastic model with different strain hardening parameters, the relevant reliable finite element model was established and a lot of simulation computation was done. The corresponding deformation mode and stress-strain curves were obtained to further process the curves, so as to obtain the honeycomb in-plane static and dynamic peak stresses. Moreover, the results were displayed and analyzed in a graphical form. These results showed that three kinds of deformation modes, such as the "X"-shaped, "V"-shaped and "I"-shaped samples were observed with the increasing impact velocities. The strain hardening effect of cell wall material made the deformation tend to be homogeneous and significantly increased the static peak stress of honeycomb, but the impact of dynamic peak stress increment could be ignored. The calculation formula of strain hardening parameter and dynamic peak stress was derived after the calculating data were processed. The honeycomb with hardening properties of cell wall material has better in-plane static mechanical properties than that with the perfectly elastoplastic material model of cell wall material. For the use of numerical simulation method to study the in-plane static mechanical behavior of honeycomb structure, the hardening effect of cell wall material needs to be considered.

KEY WORDS: regular hexagonal honeycombs; strain hardening; peak stress; mechanical property

收稿日期：2017-07-26

基金项目：国家自然科学基金（51575327）；陕西省教育厅专项研究计划（11JK0534）

作者简介：张志娟（1993—），女，陕西科技大学硕士生，主攻蜂窝芯材力学性能的模拟仿真。

通信作者：孙德强（1976—），男，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。

蜂窝材料作为一种典型的二维多孔材料, 具有密度小、比模量高、比强度大、压缩变形能力大且变形可控等优点, 是理想的减振和吸能材料, 在各种防撞结构和缓冲结构中被广泛应用^[1]。近年来, 很多学者通过实验、有限元法对蜂窝材料的静力学和动力学性能进行了广泛的研究, 涉及到蜂窝材料结构参数^[2]、胞元形状^[3]、冲击速度^[4]、惯性^[5]等影响因素, 但关于基体材料对蜂窝芯材的力学性能以及缓冲性能的影响研究较少。Liu^[6]对4种基体材料模型的金属泡沫进行冲击载荷下的仿真模拟, 得出基体材料的应变强化效应对多孔金属材料力学性能的影响小于惯性效应带来的影响。谭思博^[7]等对几何参数相同而基体材料不同的2种蜂窝材料分别进行了单轴异面静动态压缩实验, 发现材料的应变硬化率会增加铝蜂窝的动态强化率, 并证明了基体材料对蜂窝力学性能有着重要影响。赵国伟等^[8]对金属蜂窝结构异面压缩峰应力进行了研究, 证明了蜂窝基体材料的应变强化效应对蜂窝结构静态峰应力的影响较大, 考虑应变强化效应蜂窝结构坍塌应力的计算结果更接近于实验结果。Mousanezhad^[9]等的研究表明, 增加基体材料的应变强化模量, 蜂窝的塑性耗散能也随之增加。上述研究充分说明, 研究基材的应变强化效应对蜂窝力学性能的影响是很有必要的。文中将通过有限元法来研究不同属性的基体材料模型对铝蜂窝共面压缩力学性能的影响。

1 理论模型

1.1 基体材料模型

该研究中, 蜂窝基体材料属双线性应变强化材料模型^[10], 其应力-应变曲线见图1, 对应的应力 σ 和应变 ε 关系式为:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma_{ys} + E_T(\varepsilon - \varepsilon_y) & \varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为基材的弹性模量; σ_{ys} 为屈服应力; ε_y 为屈服应变; ε_f 为断裂应变; E_T 为用来表示应变强化效应的正切模量。为了方便起见, 定义无量纲参数 \bar{E} ($\bar{E} =$

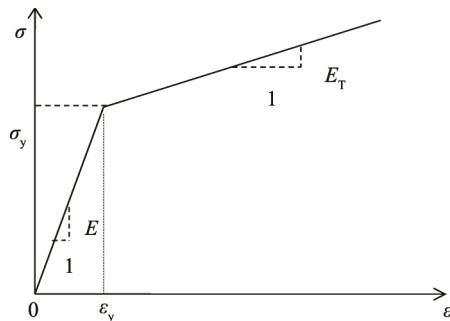


图1 双线性应变强化材料的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curve of bilinear strain hardening material

E_T/E) 为基材应变强化参数^[9], 分别取0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.1, 当 $\bar{E}=0$ 时, 基材即为弹性理想塑性材料, 其余均为弹性-线性应变强化材料。

1.2 蜂窝芯材共面冲击有限元模型

文中基于Ruan^[11]、Zheng^[12]、Ali^[13]、孙德强^[14]等的研究模型, 利用Ansys/LS-DYNA软件建立正六边形蜂窝共面压缩的有限元计算模型, 见图2, 基体材料为双线性应变硬化铝合金, 其相关力学参数为^[14]: 密度 $\rho_s=2700\text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E=70\text{ GPa}$, 屈服应力 $\sigma_{ys}=292\text{ MPa}$, 泊松比 $\nu_s=0.35$ 。 x_1 、 x_2 方向上的单元数量均为15, 蜂窝单元结构参数恒定, 其边长 $l=3\text{ mm}$, 胞壁厚度 $d=0.1\text{ mm}$, 沿异面方向(垂直于 x_1x_2 平面)的厚度 $b=10\text{ mm}$ 。采用4节点四边形Shell 163壳单元对模型进行划分, 有限单元边长为0.5 mm; 蜂窝样品夹在上压板(P_1)和支撑板(P_2)之间, 两板均为刚性, 支撑板固定, 样品异面方向的位移约束为0, 设定蜂窝体与两刚板间接触面自动接触, 摩擦因数为0.02, P_1 板沿 x_1 方向以恒定速度 v 向下冲压, 直至蜂窝芯材被压溃。

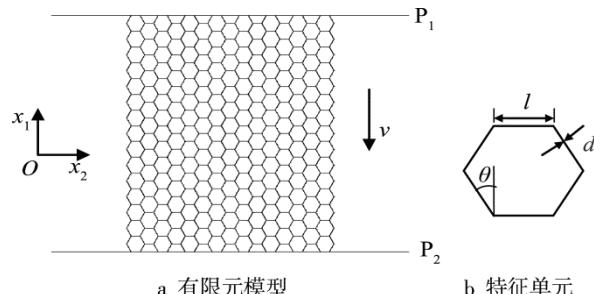


图2 正六边形蜂窝芯材共面压缩有限元模型
Fig.2 The finite element model of regular hexagonal honeycomb cores under in-plane compression loadings

1.3 动态峰应力的计算方法

对于六边形蜂窝芯材来说, 其典型的共面响应应力-应变曲线见图3, 在开始加载时, 斜边孔壁弯曲, 产生线弹性, 应力首先达到一个初始峰值, 称为初始峰应力 σ_0 , 其对应的应变为初始应变 ε_0 。这一阶段样

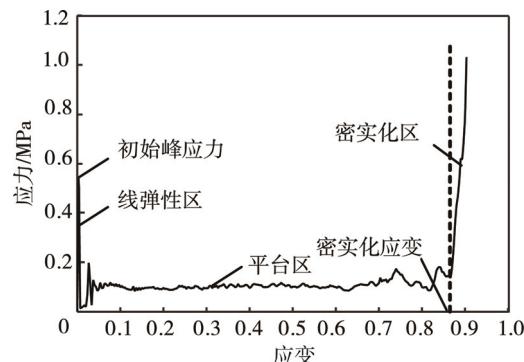


图3 蜂窝共面压缩典型应力-应变曲线

Fig.3 Typical stress-strain curve under honeycomb in-plane compression

品形变非常小,能量吸收也非常小。当达到临界应力时,孔穴开始坍塌,出现一个应力变化不大但应变持续增大的平台区,平台区的平均应力称为动态峰应力 σ_p 。最后,当处于高应变时,孔穴充分坍塌以致相对孔壁发生接触,导致了应力-应变曲线最后陡然上升的部分,应力开始急剧增加时对应的应变为密实化应变 ε_D ,标志着密实化的开始。这一阶段应力-应变曲线几乎呈直线上升,能量吸收并不多。由此,外部施加的冲击载荷主要靠平台区吸收,动态峰应力作为该过程的一个重要力学参数,可以根据式(2)得到^[14]:

$$\sigma_p = \frac{1}{\bar{E} - \varepsilon_0} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

2 结果分析与讨论

2.1 变形模式

不同的冲击速度下,正六边形蜂窝表现出不同的

变形模式,不同强化特性的蜂窝样品分别在低、中、高速压缩载荷下的变形见图4—6。低速压缩载荷下,变形初期的样品在靠近压缩端出现“X”型局部变形带,增大基体材料的强化参数,“X”型变形带上的孔穴坍塌程度有所减小,强化参数较大时,已不能观察到“X”型局部变形带,蜂窝样品趋向于整体变形。当应变 $\varepsilon=0.3$ 时,交叉的“X”型上半部分变形为“一”字型,随着强化参数的增大,这种趋势减小并且“X”型变形带变宽,靠近支撑端也出现了“X”型变形带。应变较大时($\varepsilon=0.6$),支撑端和上压板端有些变形的“X”型变形带随着基体材料强化参数的增加变形为一对反向的楔形变形带。

中速压缩载荷下,应变较小时,靠近压缩端出现“V”型局部变形带,随着上压板的下压,出现了与原有变形带反向交叉开口朝下的“V”型变形带,应变进一步增大,“V”型开口变大,蜂窝被逐层压溃。同一应变下,强化参数 \bar{E} 越大,“V”型变形带越宽,变形

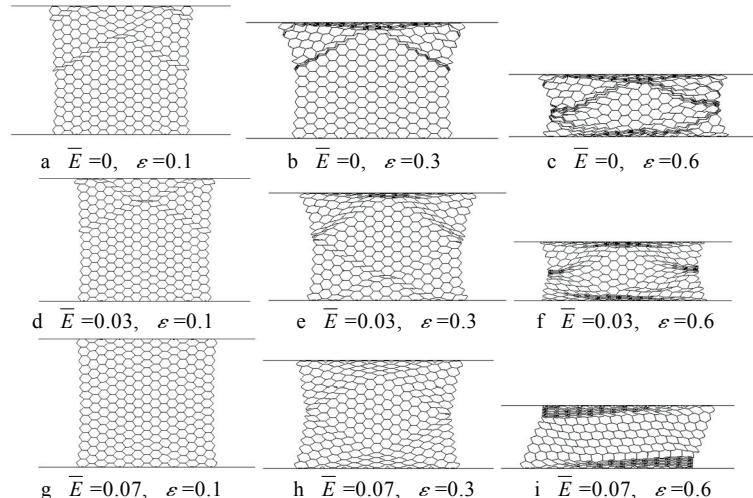


图4 基材强化特性不同的蜂窝样品在低速压缩载荷下的变形模式

Fig.4 The deformation modes of honeycomb samples with different hardening properties of cell wall material at low-speed compression load

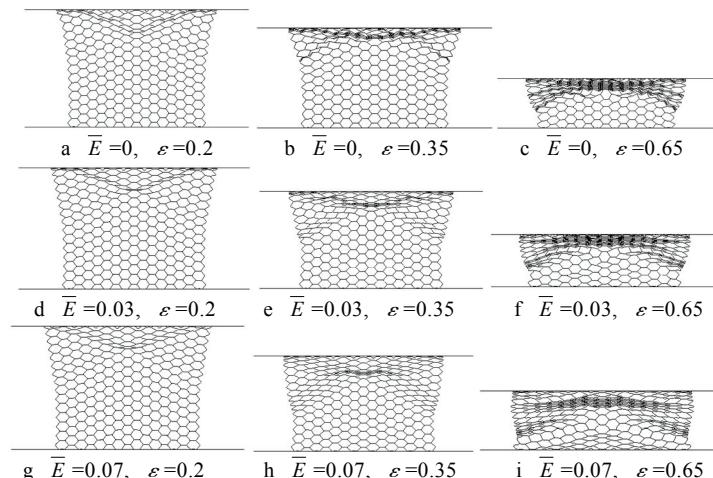


图5 基材强化特性不同的蜂窝样品在中速压缩载荷下的变形模式

Fig.5 The deformation modes of samples with different hardening properties of cell wall material at medium-speed compression load

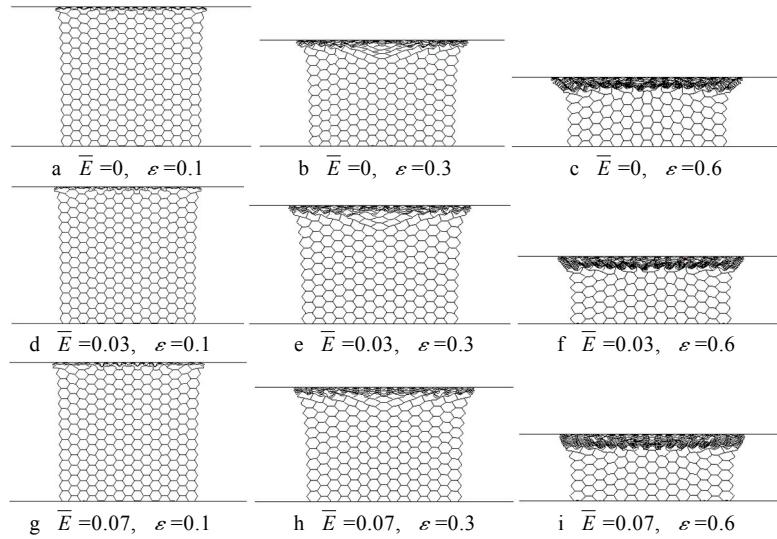


图6 基材强化特性不同的蜂窝样品在高速压缩载荷下的变形模式
Fig.6 The deformation modes of samples with different hardening properties of cell wall material at high-speed compression load

带上的胞元坍塌程度减小，即基材的应变强化效应使得变形趋于均匀化。高速压缩载荷下，整个变形过程中不再看到明显的“X”型或者“V”型变形带，从上压板的一端开始，蜂窝样品就以近乎“一”字型的变形带开始延伸，直至被完全压溃。同一应变下，增加基材的强化参数，蜂窝变形未发生变化。

综上，正六边形蜂窝在低、中、高速压缩载荷下分别对应3种不同的变形模式，依次是“X”型的类静态模式、“V”型的过渡模式和“一”字型的动态模式，这与Ruan^[11]、范晔^[15]等的模拟结果一致，验证了文中模型的可靠性。对于类静态模式和过渡模式，增加基材的强化参数，蜂窝的变形趋于均匀化，局部坍塌扩散到更多的胞元，发生局部坍塌所需的应变越来越大，对于动态模式，基材的应变强化效应几乎对变形不产生影响。

2.2 峰应力

基材强化特性不同的样品分别在低速和高速压缩载荷下的应力-应变响应曲线见图7。可以看出，低速下平台区的曲线较为平稳，且基材强化参数较大的曲线平台区较高，也就是说，增加基材的强化参数能够引起蜂窝样品静态峰应力的增加，进而提高蜂窝的能量吸收特性。

压缩速度较高时，不同强化参数的曲线在平台区几乎重合，即动态模式下，基材的应变强化效应对蜂窝的能量吸收影响甚微，与2.1节中得到的结论一致。这主要是因为高速压缩载荷下，蜂窝的惯性效应（主要与密度和速度有关，文中样品的密度恒定）更加明显^[16]，而基体材料的应变强化效应产生的微弱影响几乎可以被忽略。

为了定量分析基体材料的应变强化效应对蜂窝动静态峰应力的影响，通过有限元处理获得样品变形

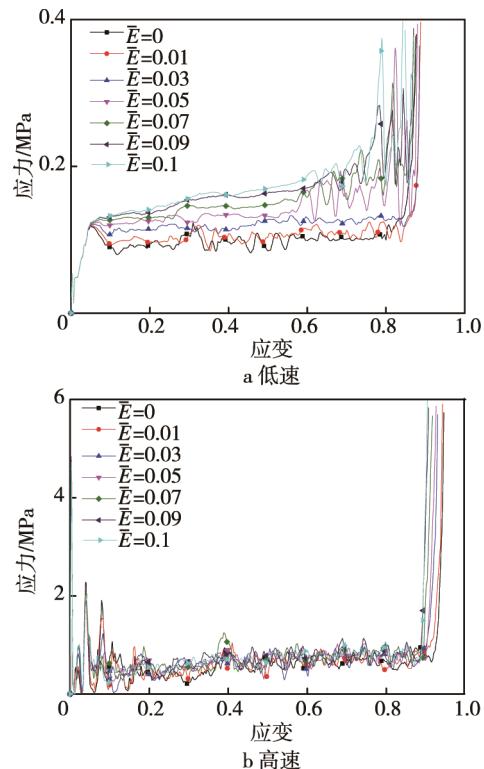


图7 基材强化特性不同的蜂窝样品在低速（3 m/s）和高速（70 m/s）压缩载荷下的应力-应变响应曲线

Fig.7 The stress-strain curves of honeycomb samples with different hardening properties of cell wall material at low-speed (3 m/s) and high-speed (70 m/s) compression loads

过程中的部分力学参数后，根据式(2)计算得到不同强化特性的蜂窝样品在不同加载速度下的峰应力，见表1。压缩速度 $v=3$ m/s时对应的峰应力为静态峰应力，同一压缩速度下，对比分析不同强化参数下蜂窝样品的静动态峰应力^[17]，可以看到静态峰应力随基材强化参数的增加有明显的增大趋势，随着速度的增

表1 基材强化特性不同的正六边形蜂窝在不同的冲击速度下的动态峰应力

Tab.1 Dynamic peak stress of the regular hexagonal honeycomb with different properties of cell wall material hardening under different impact velocities

MPa

$v/(m \cdot s^{-1})$	$\bar{E}=0$	$\bar{E}=0.01$	$\bar{E}=0.03$	$\bar{E}=0.05$	$\bar{E}=0.07$	$\bar{E}=0.09$	$\bar{E}=0.1$
3	0.097 61	0.104 01	0.118 04	0.130 83	0.149 84	0.160 1	0.170 97
10	0.1061	0.107 67	0.123 43	0.136 79	0.151 02	0.159 72	0.166 71
30	0.184 59	0.195 52	0.187 14	0.180 84	0.188 81	0.203 93	0.210 67
50	0.361 49	0.374 29	0.397 51	0.3949	0.391 21	0.389 88	0.387 04
70	0.603 61	0.616 21	0.653 51	0.685 64	0.697 78	0.703 47	0.700 95
90	0.823 32	0.826 65	0.906 14	1.000 09	1.018 54	1.027 59	1.012 24
120	1.420 14	1.359 18	1.444 08	1.5181	1.516 29	1.538 76	1.541 06

大, 这种趋势逐渐减弱, 当 $v=120\text{ m/s}$ 时, 可以忽略动态峰应力的变化, 这与分析图 7 得到的结论一致。

Reid 和 Peng^[17] 在研究木材的冲击峰应力时提出:

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + Av^2 \quad (3)$$

式中: σ_{p0} 为共面静态峰应力; A 为其动态峰应力与冲击速度的关系系数。Ruan^[11]、Ali^[13]、孙德强^[14]等研究证明了该公式同样适用于规则蜂窝。利用 Matlab 根据式(3)对表 1 中的数据进行处理得到拟合曲线, 见图 8, 为了便于观察, 仅显示了 \bar{E} 取 0, 0.03, 0.07 和 0.09 时动态峰应力与冲击速度之间的关系曲线。可以看出, 动态峰应力的增量与压缩速度的二次方成正比, \bar{E} 值较大时, 拟合曲线位于上方, 证明基材材料的应变强化效应引起了蜂窝动态峰应力的增加。图 8 中的 4 条曲线的系数 A 都近似为 0.0001, 说明 \bar{E} 的取值对系数 A 未产生影响。结合式(3)与图 8 的分析可知, 基材材料的应变强化效应显著增加了蜂窝的静态峰应力, 但对动态峰应力增量的影响可以忽略。

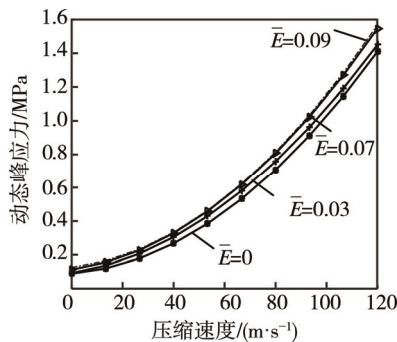


图 8 动态峰应力-冲击速度拟合曲线

Fig.8 The fitting curves of dynamic peak stress-impact velocity

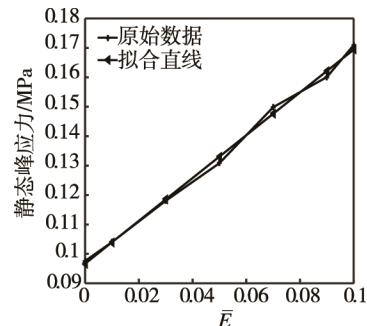
在压缩速度为 3 m/s 的条件下, 蜂窝芯材的动能很小, 不论 \bar{E} 为多少, 模拟结果显示蜂窝芯材发生密实化前其动能占总能量吸收的比例相对很小, 最大不超过 2%, 此时的动态峰应力等于相应的静态峰应力^[18]。Wang 等^[19]研究得到典型周期性二维蜂窝结构的共面

静态峰应力均与蜂窝相对密度的平方成比例:

$$\sigma_{p0} = k \sigma_{ys} \bar{\rho}^{-2} \quad (4)$$

式中: k 为与蜂窝种类及其结构参数相关的系数; $\bar{\rho}$ 为蜂窝芯材的相对密度。根据前文中的讨论可知基材的应变强化效应对蜂窝静态力学性能影响较大, 分析表 1 中的静态峰应力, 得到蜂窝共面静态峰应力与应变强化参数 \bar{E} 的关系曲线, 见图 9。可以看出, 蜂窝共面静态峰应力与 \bar{E} 呈一次线性关系, 计算得到拟合直线关系式为:

$$\sigma_{p0}' = 0.7275 \bar{E} + \sigma_{p0} \quad (5)$$

图 9 蜂窝静态峰应力 σ_{p0} 与 \bar{E} 的关系曲线Fig.9 The curve of relationship between honeycombs' static peak stress σ_{p0} and \bar{E}

式中: σ_{p0}' 为不同 \bar{E} 下的静态峰应力; 0.7275 为共面静态峰应力与基材应变强化参数的一次线性关系系数。拟合得到 $\sigma_{p0}=0.0967\text{ MPa}$, 其值近似等于基材为弹性理想塑性材料 ($\bar{E}=0$) 时蜂窝的共面静态峰应力。

为了提高理论模型的计算精度, 使其更接近于实际工程应用, 需要考虑基材的应变强化效应对金属蜂窝结构性能的影响, 对于基材为双线性应变强化材料的正六边形蜂窝, 结合式(3—5)得到其共面动态峰应力的计算公式为:

$$\sigma_p = k \sigma_{ys} \bar{\rho}^{-2} + K \bar{E} + Av^2 \quad (6)$$

式中: K 为与蜂窝基材材料应变强化参数相关的

系数, 此处 $K=0.7275$ 。

3 结语

对结构参数固定而基体材料应变强化效应不同的正六边形蜂窝进行共面压缩载荷下的模拟计算, 获得各自的变形模式图, 并对计算数据进行后处理获得相关力学曲线和蜂窝动静态峰应力, 分析讨论得到结论: 低、中、高速下分别出现“X”、“V”和“—”字型变形模式, 随着基材应变强化效应的增强, 蜂窝的局部变形更分散, 发生局部坍塌所需的应变越来越大; 基体材料呈现出的应变强化效应显著增加了蜂窝的静态峰应力, 对蜂窝动态峰应力增量的影响可以忽略, 蜂窝共面静态峰应力与双线性应变强化基材的应变强化参数呈一次线性关系。基材具有强化特性的蜂窝, 其共面静态力学性能优于基材为弹性理想塑性材料模型的蜂窝, 而大多数工程材料在初始屈服之后都呈现出应变强化特性, 因此在利用数值模拟的方法来研究蜂窝结构共面静态力学行为时, 需要考虑基体材料的强化效应。

参考文献:

- [1] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [2] 唐勇, 黄利强. 蜂窝结构对蜂窝纸板平压性能影响的研究[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 56—58.
TANG Yong, HUANG Li-qiang. Influence of Honeycomb Structure on Flatwise Compressive Performance[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 56—58.
- [3] 梁森, 陈花玲. 常见蜂窝胞元轴向承载能力研究[J]. 兵器装备工程学报, 2011, 32(1): 65—69.
LIANG Sen, CHEN Hua-ling. Investigation on Axial Load Support Capability for an Ordinary Honeycomb Cell[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2011, 32(1): 65—69.
- [4] MAHMOUDABADI M Z, SADIGHI M. A Study on the Static and Dynamic Loading of the Foam Filled Metal Hexagonal Honeycomb Theoretical and Experimental[J]. Materials Science & Engineering A, 2011(12): 333—343.
- [5] HOU B, ZHAO H, PATTOFATTO S, et al. Inertia Effects on the Progressive Crushing of Aluminum Honeycombs under Impact Loading[J]. International Journal of Solids & Structures, 2012, 49(19): 2754—2762.
- [6] LIU Y D, YU J L, ZHENG Z J, et al. A Numerical Study on the Rate Sensitivity of Cellular Metals[J]. International Journal of Solids & Structures, 2009, 46(22): 3988—3998.
- [7] 谭思博, 侯兵, 李玉龙, 等. 基体材料对铝蜂窝动态强化特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 16—21.
TAN Si-bo, HOU Bing, LI Yu-long, et al. Effect of Base Materials on the Dynamic Enhancement of Aluminum Honeycombs[J]. Explosion & Shock Waves, 2015, 35(1): 16—21.
- [8] 赵国伟, 白俊青, 祁玉峰, 等. 异面冲击下金属蜂窝结构平均塑性坍塌应力模型[J]. 振动与冲击, 2016, 35(12): 50—54.
ZHAO Guo-wei, BAI Jun-qing, QI Yu-feng, et al. Average Plastic Collapse Stress Model of Metallic Honeycomb Structure under Out-of-plane Impact Load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(12): 50—54.
- [9] MOUSANEZHAD D, GHOSH R, AJDARI A, et al. Impact Resistance and Energy Absorption of Regular and Functionally Graded Hexagonal Honeycombs with Cell Wall Material strain Hardening[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 89: 413—422.
- [10] 余同希, 卢国兴, 华云龙. 材料与结构的能量吸收: 耐撞性包装安全防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
YU Tong-xi, LU Guo-xing, HUA Yun-long. Energy Absorption of Structures and Materials[J]. Beijing: Energy Absorption of Structures & Materials, 2006.
- [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.
- [12] ZHENG Z, YU J, LI J. Dynamic Crushing of 2D Cellular Structures: A Finite Element Study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1): 650—664.
- [13] ALI M, QAMHIYAH A, FLUGRAD D, et al. Theoretical and Finite Element Study of a Compact Energy Absorber[J]. Advances in Engineering Software, 2008, 39(2): 95—106.
- [14] 孙德强. 多孔缓冲材料有限元结构分析与设计方法 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
SUN De-qiang. Finite Element Structure Analysis and Design Method of Cellular Cushioning Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [15] 范晔. 蜂窝材料在面内冲击下的变形模式与能量吸收 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
FAN Ye. Deformation Modes and Energy Absorption Capability of Honeycombs under In-plane Impact[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [16] 胡玲玲, 余同希. 惯性效应对蜂窝能量吸收性能的影响[J]. 兵工学报, 2009(S): 24—27.
HU Ling-ling, YU Tong-xi. Influence of Inertia Effect on the Energy Absorption of Hexagonal Honeycombs[J]. Acta Armamentarii, 2009(S): 24—27.
- [17] REID S R, PENG C. Dynamic Uniaxial Crushing of Wood[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(5): 531—570.
- [18] 王青春, 范子杰. 利用 LS-DYNA 计算结构准静态压溃的改进方法[J]. 力学与实践, 2003, 25(3): 20—23.
WANG Qing-chun, FAN Zi-jie. Improvement in Analysis of Quasi-static Collapse with LS-DYNA[J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25(3): 20—23.
- [19] WANG Q, FAN Z, GUI L. A Theoretical Analysis for the Dynamic Axial Crushing Behavior of Aluminum Foam-filled Hat Sections[J]. International Journal of Solids & Structures, 2006, 43(7): 2064—2075.