

多段填充复合蜂窝结构的动态响应特性研究

张新春^{1†}, 沈振峰¹, 吴鹤翔², 白江畔¹, 曹应平³

(1. 华北电力大学 机械工程系, 河北 保定 071003; 2. 东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;
3. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:基于多胞材料独特的力学性能和微结构可设计性强的优势,提出一种多段三角形和六角形蜂窝填充能量吸收复合结构模型.利用显式动力有限元方法对该模型的动力响应特性和比吸能进行研究,重点讨论了不同恒定冲击速度下,蜂窝结构的排布及其相对密度对复合蜂窝结构宏观变形、动态平台应力、冲击载荷一致性和能量吸收能力的影响.研究结果表明,所设计的多段填充复合蜂窝结构能够让轴力和弯曲变形共同参与整体变形,实现 I 类和 II 类能量吸收结构的优势互补.通过对各段内微结构及段长的合理选择,复合蜂窝结构的冲击载荷效率明显提高,冲击应力波动幅度明显降低,能够有效地提高并控制蜂窝结构能量吸收效率.本文对完善多胞结构的耐撞性设计方法和控制能量吸收过程具有指导意义.

关键词:固体力学;蜂窝材料;冲击载荷一致性;能量吸收;有限元分析

中图分类号: O347

文献标志码: A

Study on Dynamic Response Characteristics of Multi-segment Filled Composite Honeycombs

ZHANG Xinchun^{1†}, SHEN Zhenfeng¹, WU Hexiang², BAI Jiangpan¹, CAO Yingping³

(1. Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the potential advantages of unique mechanical performance and the micro-structure better design ability for cellular materials, this paper proposes a multi-segment energy absorption composite model filled with triangular and hexagonal honeycomb. Then, the dynamic response characteristic and the specific energy absorption of this model are numerically investigated by using explicit dynamic finite element (EDFE) method. The effects of honeycomb structure arrangement and relative density on the deformation mode, dynamic plateau stress, crushing load uniformity, and energy absorption capacity of the composite honeycombs are discussed in detail under different constant impact velocities. Research results show that the multi-segment filled honeycombs can realize the complementary advantages of type I and type II structures, which enables the axial force and bending deformation to participate

* 收稿日期:2019-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11402089), National Natural Science Foundation of China(11402089); 河北省自然科学基金资助项目(A2017502015), Natural Science Foundation of Hebei Province (A2017502015); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2017MS153), Fundamental Research Funds for the Central Universities(2017MS153)

作者简介:张新春(1980—),男,山东德州人,华北电力大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: xc Zhang@ncepu.edu.cn

in the overall deformation. Through the proper choice of cell micro-structures in each segment and the segment length, the crushing load efficiency of composite honeycomb is obviously improved and the fluctuation range of impact stress is significantly reduced. Composite honeycomb can effectively improve and control its energy absorption efficiency. These results are useful for the crashworthiness design and energy absorption controllable properties of cellular materials.

Key words: solid mechanics; honeycombs; crushing load uniformity; energy absorption; finite element (FE) analysis

随着材料制备工艺和机械加工业的快速发展,多孔材料及其夹芯结构在高速列车、超高速飞行器、装甲车和舰船等高能耗装备中得到广泛应用,并引起国内外学者的广泛关注^[1-2]。与其他材料不同,蜂窝材料具有千变万化的微结构和高孔隙率,使之具有独特的力学性能和可设计性强等优势,能够在保持较低的应力水平下吸收大量的冲击动能,被广泛应用于各种冲击防护构件中。这对蜂窝材料的耐撞性设计提出了更高的要求,如冲击峰值应力的抑制、冲击应力增强的控制和能量吸收率的提高等。因此,如何提高并有效控制材料的能量吸收效率是蜂窝材料及其结构耐撞性设计的关键问题之一。

事实上,在冲击载荷下,蜂窝材料的胞壁可能分别承受轴力、弯矩或剪力作用。根据冲击变形机制的不同,蜂窝材料^[3]可分为弯曲主导型结构(六角形、圆形、菱形或正方形结构等)和拉伸主导型结构(三角形、Kagome 结构或混合型结构等)。前者称之为第 I 类能量吸收结构,后者称之为第 II 类能量吸收结构。目前,关于这两类结构的冲击响应特性和能量吸收方面的研究已经展开。Ruan 等^[4]讨论了相对密度和冲击速度对六角形蜂窝结构面内变形模式和平台应力的影响;Liu 和 Zhang 等^[5-6]讨论了微结构及密度梯度对蜂窝材料动态响应特性和能量吸收能力的影响;Qiu 等^[7]综合分析了一些平面蜂窝结构的冲击动力学响应特性,指出拉伸主导型结构的平台应力要高于弯曲主导型;Chen 等^[8]研究了密度梯度对三角形和六边形网格薄壁管结构峰值载荷和能量吸收能力的影响;Zhang 等^[9-10]讨论了胞元微结构对负泊松比蜂窝结构面内动力响应特性的影响,给出了拉伸蜂窝结构的平台应力经验公式;Boldrin 等^[11]研究了六角形填充梯度复合蜂窝结构的动态响应特性;白中浩等^[12]讨论了不同截面形状和结构参数对正八边形多胞薄壁管吸能特性的影响。研究表明^[5-7],

在相同的相对密度下,第 II 类能量吸收结构(即拉伸主导型结构)具有较高的塑性坍塌强度,在一定程度上强化了结构,提高了冲击能量吸收能力,但在能量吸收方面表现出不受欢迎的高的冲击峰值应力;而第 I 类能量吸收结构(即弯曲主导型结构)却能调动试件发生整体变形,表现为一条相对"平坦"的曲线。可见,以上两类结构在作为能量吸收构件单独使用时均不理想,如果设计一种能量吸收结构,让轴力/膜力也参与整体变形,则比单纯利用弯曲塑性变形所吸收冲击能量的效率要高。

基于复合材料的概念,通过改变不同填充段胞元微结构,将不同类型的能量吸收结构相互耦合,本文提出了一种多段填充复合蜂窝结构模型。采用非线性动力有限元方法,研究了不同恒定冲击速度下各段结构排布和相对密度对复合蜂窝材料宏观变形模式、动态平台应力、冲击载荷一致性和能量吸收效率的影响。

1 计算模型

1.1 有限元模型

多段填充复合蜂窝结构的能量吸收设计模型如图 1 所示。计算模型由 4 段胞元层构成,每段分别由第 I 类能量吸收结构(六角形胞元)或第 II 类能量吸收结构(三角形胞元)所填充。两类能量吸收结构的典型荷载-位移曲线如图 2 所示,填充过程中保证蜂窝材料的相对密度和胞壁长度不变。试件沿 x 和 y 方向的尺寸分别为 $L_1 = 54 \text{ mm}$, $L_2 = 74.8 \text{ mm}$,模型的面外厚度为单位厚度。利用显式动力有限元方法并借助 ABAQUS/EXPLICIT 进行冲击动力学特性模拟,胞壁采用 S4R 壳单元(4 节点,缩减积分单元)进行离散。为了保证收敛和计算精度,沿厚度方向取 5 个积分点。

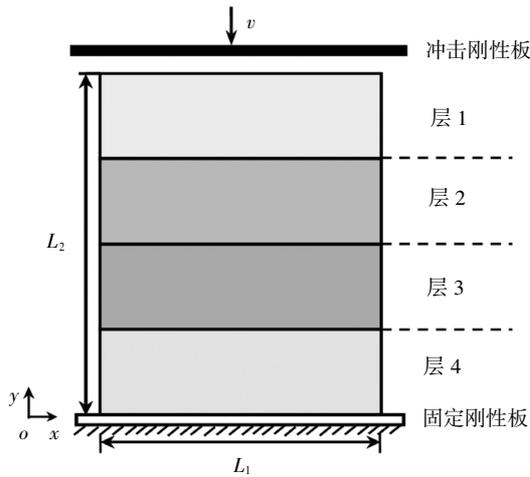


图 1 多段填充复合蜂窝结构能量吸收设计模型
Fig.1 Energy absorbed design model for multi-segment filled composite honeycomb

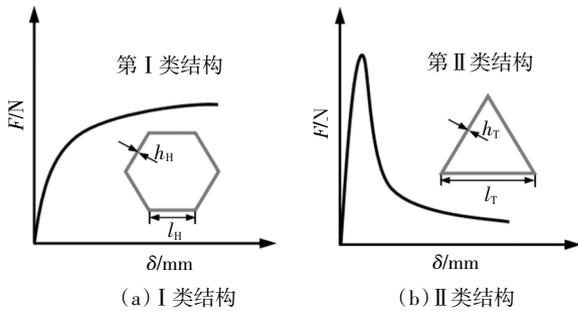


图 2 两类能量吸收结构的荷载-位移曲线
Fig.2 Load-displacement curves of two kinds of energy absorption structures

图 3 为多段填充复合蜂窝结构设计示意图。针对某一特定的结构排布（如试件 HHTT, H 表示六角形结构; T 表示三角形结构），试件 HHTT 表示六角形结构靠近冲击端, 三角形结构靠近固定端。基体材料为金属铝, 并假定为理想弹塑性模型, 服从 Mises 屈服准则。主要材料参数为^[10]: 杨氏模量 $E_s=69 \text{ GPa}$, 屈服应力 $\sigma_{ys} = 76 \text{ MPa}$, 密度 $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 取强化模量为零。对于计算中可能的接触, 将刚性板与试件间定义为面-面自动接触, 摩擦系数为 $0.02^{[10]}$; 试件内部各胞元间定义为通用接触, 且无摩擦。采用与文献[3-7]相同的边界条件, 即蜂窝试件置于底端固定刚性板上, 试件左右两侧自由。为保证变形的平面应变状态, 在计算过程中, 约束所有节点沿面外方向的位移以防止面外屈曲的发生。另外, 本文在大变形冲击过程中不考虑材料损伤对多段填充复合蜂窝结构动态响应特性和能量吸收能力的影响。

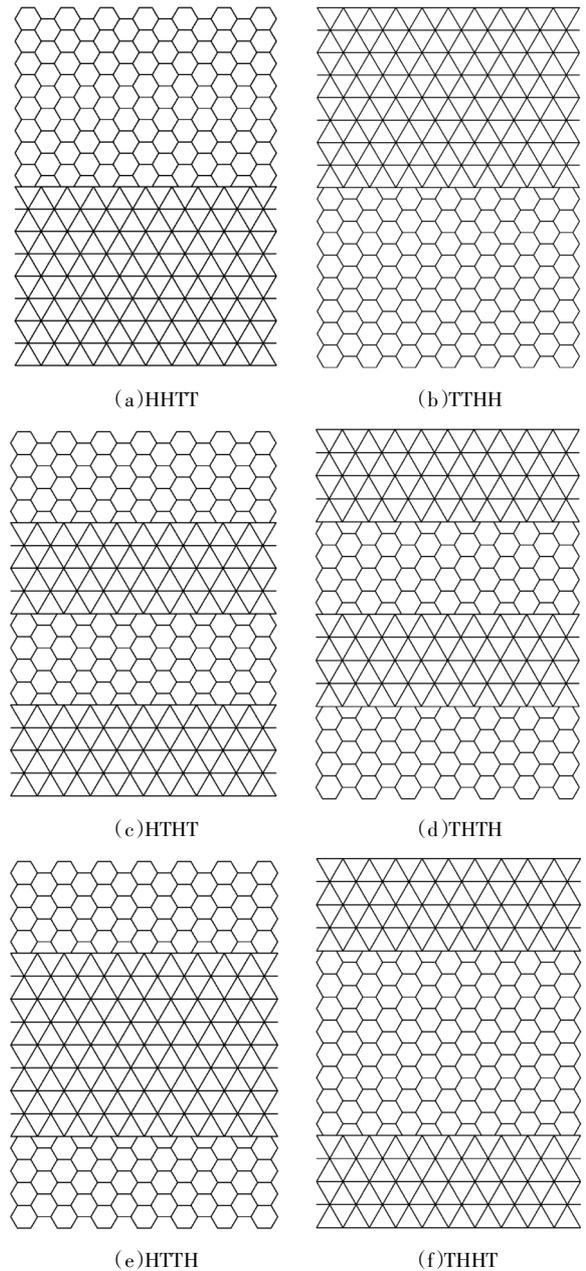


图 3 多段填充复合蜂窝结构设计示意图
Fig.3 Diagrammatic sketch for multi-segment filled composite honeycombs

1.2 相对密度

相对密度是描述多胞材料及结构力学性能的一个重要指标, 其权重超出了其他影响参数。对于规则三角形蜂窝, 相对密度为^[1]:

$$\Delta\rho_T = \rho_T^*/\rho_s = 2\sqrt{3} \frac{h_T}{l_T} \quad (1)$$

对于规则六角形蜂窝, 其相对密度为^[1]:

$$\Delta\rho_H = \rho_H^*/\rho_s = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{h_H}{l_H} \quad (2)$$

式中: $\Delta\rho_T$ 、 $\Delta\rho_H$ 分别表示三角形蜂窝和六角形蜂窝的

相对密度; ρ_T^* 、 ρ_H^* 分别表示相应蜂窝结构的密度; h_T 、 h_H 分别表示相应蜂窝结构的壁厚; l_T 、 l_H 分别表示相应蜂窝结构的壁长。

不同相对密度下三角形和六角形蜂窝结构的计算参数如表1所示.本文所提出的多段复合蜂窝结构各段蜂窝的相对密度相等,其相对密度为:

$$\Delta\rho_C = \rho_C^*/\rho_s = n_T\Delta\rho_T + n_H\Delta\rho_H \quad (3)$$

式中: $\Delta\rho_C$ 为复合蜂窝结构的相对密度; ρ_C^* 为复合蜂窝结构的密度; ρ_s 为基体材料的密度; n_T 、 n_H 分别为三角形和六角形蜂窝结构填充层的面积比。

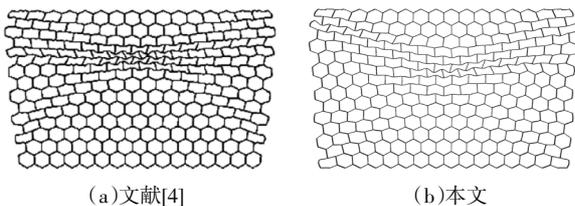
表1 多段填充复合蜂窝结构几何参数

Tab.1 Geometric parameters for multi-segment filled composite honeycombs

试件编号	填充结构	l/mm	h/mm	$\Delta\rho$
1	三角形	5.4	0.072	0.046
	六角形	2.7	0.108	0.046
2	三角形	5.4	0.103	0.066
	六角形	2.7	0.154	0.066
3	三角形	5.4	0.134	0.086
	六角形	2.7	0.200	0.086
4	三角形	5.4	0.165	0.106
	六角形	2.7	0.248	0.106
5	三角形	5.4	0.196	0.126
	六角形	2.7	0.295	0.126

1.3 模型可靠性分析

为验证有限元模型的可靠性,基于文献[4],图4给出了正六角形蜂窝在冲击速度 $v=7\text{ m/s}$ 时的变形模式.在基体材料、边界条件和冲击速度完全相同的条件下,计算结果与文献[4]吻合较好,证明了有限元模型的可靠性.另外,有限元模型的可靠性还依赖于网格尺寸的大小.网格尺寸对六角形蜂窝平台应力和计算时间的影响如图5所示.由图5可知,当网格尺寸为 0.35 mm 时,模型的平台应力趋近于稳定,计算时间较短.考虑到计算效率和计算结果的精确性,本文模型的网格尺寸选用 0.35 mm .



(a)文献[4]

(b)本文

图4 六角形蜂窝的面内冲击变形模式

Fig.4 In-plane crushing deformation for hexagonal honeycombs

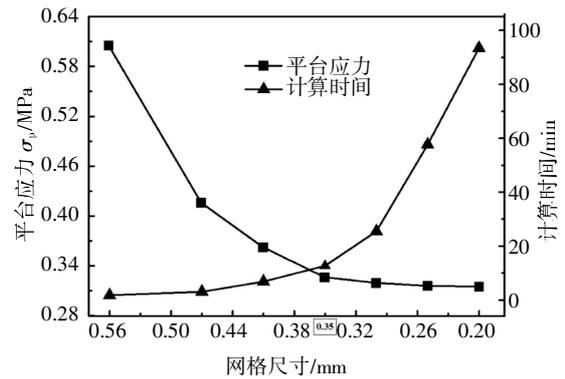


图5 网格尺寸对六角形蜂窝平台应力和计算时间的影响

Fig.5 Effect of the meshing length on the plateau stress and computing time for hexagonal honeycombs

2 计算结果与讨论

2.1 变形模式

对于I类和II类能量吸收结构,大量学者已对其冲击变形模式进行了研究^[4-7,13].研究表明,胞元微结构和冲击速度是影响蜂窝材料变形模式的重要因素.然而,与I类和II类蜂窝结构不同,多段填充复合蜂窝结构由不同微拓扑结构蜂窝胞元层组成,冲击过程中可以实现I类和II类能量吸收结构的优势互补.在冲击荷载作用下,复合蜂窝结构的变形模式更加复杂.

图6给出了不同冲击速度下两种复合蜂窝结构(HTHT和THTH)在名义应变 $\varepsilon=0.32$ 时的宏观变形模式.低速冲击载荷下($v=3\text{ m/s}$),与规则填充蜂窝不同,试件没有发生明显整体变形.复合蜂窝结构的六角形填充蜂窝层首先发生局部变形,出现“X”型变形带,如图6(a)所示.这是因为在低速冲击下,塑性坍塌强度对蜂窝材料变形模式的影响起主导地位.六角形蜂窝填充层的塑性坍塌强度较低,三角形蜂窝填充层的塑性坍塌强度较高;随着冲击速度的增加($v=20\text{ m/s}$),惯性效应相对增强,结构排布对破坏的引导作用减弱.塑性坍塌强度和冲击速度同时影响复合蜂窝结构的变形模式,试件局部变形总是从冲击端开始形成,如图6(b)所示.随着压缩位移的增加,两种复合蜂窝的变形模式差异明显.靠近冲击端为六角形结构的复合蜂窝(HTHT)的变形主要集中在首层塑性坍塌强度较低的六角形结构,而反向布置的复合蜂窝(THTH)的变形出现在首层结构的同时也蔓延至塑性坍塌强度较低的六角形结构处,三角形蜂窝和六角形蜂窝结构相互耦合,试件发生整体变形;随着冲击速度的进一步提高($v=120\text{ m/s}$),

惯性效应占主导地位,不同复合蜂窝结构的变形模式趋于类似,从冲击端到固定端发生逐层压溃变形模式,呈现出“I”形的变形带,如图 6(c)所示.

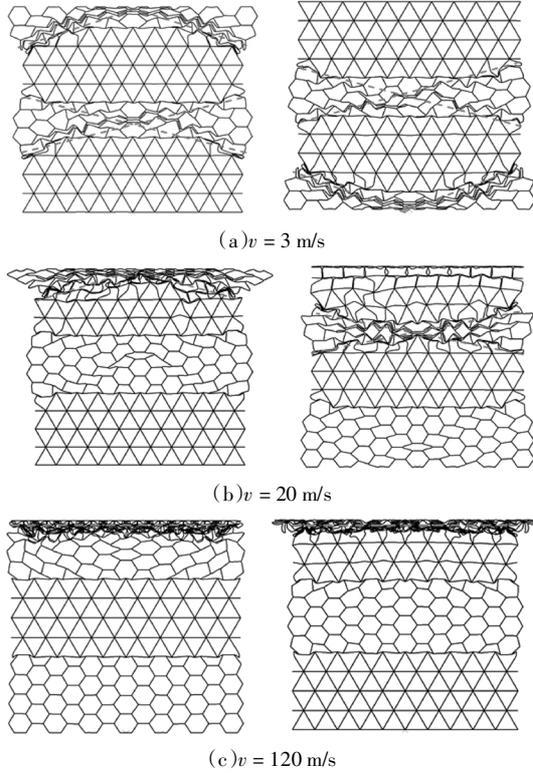


图 6 不同冲击速度下多段三角形和六角形填充复合蜂窝的变形模式

Fig.6 Macroscopic deformation modes of multi-segment composite honeycombs filled with triangular and hexagonal cells under different impact velocities

综上所述,在低速冲击下,塑性坍塌强度对变形模式的影响占主导地位,结构排布对破坏的发生具有一定的引导作用,复合蜂窝结构中塑性坍塌强度低的填充层首先发生局部变形;在高速冲击下,惯性效应占主导地位;在中速冲击下,试件的变形将受到冲击速度和塑性坍塌强度的影响,变形模式与蜂窝材料层的排布方式有关.因此,复合蜂窝材料面内冲击变形模式主要依赖于蜂窝材料的塑性坍塌强度,各段填充层排布方式和冲击速度.

2.2 平台应力

平台应力和密实应变是描述多胞材料动态吸能特性的重要指标.平台应力 σ_p 为:

$$\sigma_p = \frac{1}{\varepsilon_d - \varepsilon_{cr}} \int_{\varepsilon_{cr}}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

式中: ε_{cr} 为初始应变,其与准静态塑性坍塌应力 σ_{cr} 有关,在整个冲击过程中, ε_{cr} 的值很小,文中取 $\varepsilon_{cr} =$

0.02,以达到更高的计算精度; ε_d 为密实化应变,为避免人为选取的随机性,本文由能量吸收效率方法得到^[9],

$$\left. \frac{dE(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_d} = 0 \quad (5)$$

其中,能量吸收效率 $E(\varepsilon)$ 为:

$$E(\varepsilon) = \frac{\int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \quad (6)$$

实际上,在能量吸收效率曲线中有几个局部最大值(图 7).本文定义最后的最大值点为蜂窝材料的绝对密实点.

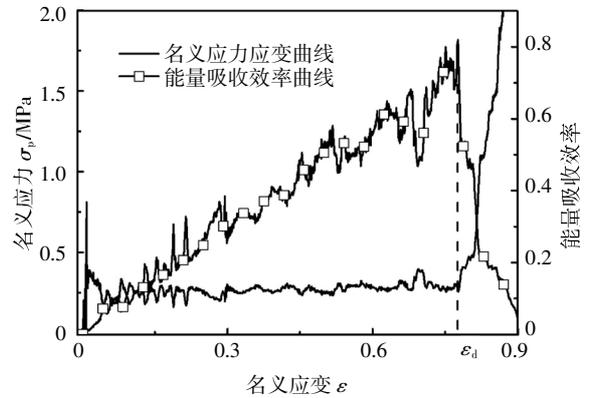


图 7 名义应力-应变曲线和相应的能量吸收效率曲线

Fig.7 Nominal stress-strain curve and the corresponding energy absorption efficiency-strain curve

基于一维冲击波理论,Reid 等^[14]建立了蜂窝材料的平台应力与冲击速度间的关系,即:

$$\sigma_p = \sigma_{cr} + \frac{\Delta\rho\rho_s}{\varepsilon_d} v^2 \quad (7)$$

式中: σ_{cr} 为准静态塑性坍塌应力; v 为冲击端刚性板的冲击速度.

研究表明,蜂窝材料的准静态平台应力同微拓扑结构的壁厚和壁长之比的平方成正比.三角形和六角形蜂窝材料的准静态平台应力为^[4-5]:

$$\sigma_{T0} = 2.3 \left(\frac{h_T}{l_T} \right)^2 \sigma_{ys} \quad (8)$$

$$\sigma_{H0} = \frac{2}{3} \left(\frac{h_H}{l_H} \right)^2 \sigma_{ys} \quad (9)$$

式中: σ_{T0} 、 σ_{H0} 分别表示三角形和六角形蜂窝材料的准静态平台应力.将式(8)(9)代入式(7)中,不同冲击速度条件下,三角形蜂窝材料和六角形蜂窝材料的动态平台应力分别为:

$$\sigma_{Tp} = 2.3\sigma_{ys} \left(\frac{h_T}{l_T} \right)^2 + \frac{\Delta\rho\rho_s}{\varepsilon_d} v^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{Hp} = \frac{2}{3} \sigma_{ys} \left(\frac{h_H}{l_H} \right)^2 + \frac{\Delta \rho \rho_s}{\varepsilon_d} v^2 \quad (11)$$

式中： σ_{Tp} 和 σ_{Hp} 分别表示三角形和六角形蜂窝材料的动态平台应力。

基于规则蜂窝材料的平台应力方程，多段填充复合蜂窝材料平台应力方程为：

$$\sigma_{cp} = n_T \sigma_{Tp} + n_H \sigma_{Hp} \quad (12)$$

式中： σ_{cp} 表示复合蜂窝材料的动态平台应力。

图 8 给出了不同冲击速度下 6 种排布方式复合蜂窝材料平台应力的数值计算结果(图中不同符号)和式(12)得到的复合蜂窝材料平台应力(图中黑色实线)的对比结果. 其中,FE 表示有限元,由图 8 可知,两者吻合较好,证明了式(12)的有效性. 但是,在中低速冲击作用下,相比于数值计算结果,式(12)得到的理论平台应力值偏低。

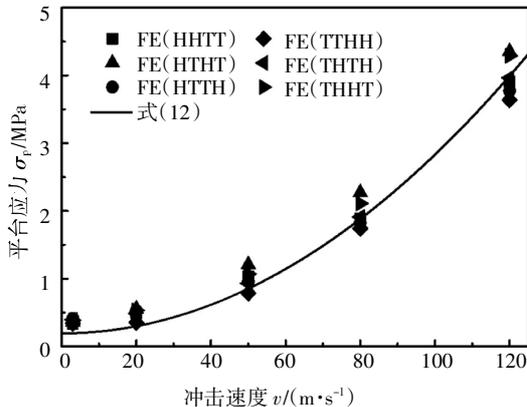


图 8 不同冲击速度多段三角形和六角形填充复合蜂窝的动态平台应力

Fig.8 Dynamic plateau stress of multi-segment composite honeycombs filled with triangular and hexagonal cells under different impact velocities

以 HTHT 复合蜂窝结构为例，图 9 给出了不同冲击速度下相对密度对多段填充复合蜂窝试件动态平台应力影响. 图 9 中显见，对于相同的相对密度，多段填充复合蜂窝结构的平台应力随冲击速度的增大而增大,与冲击速度的平方几乎成正比. 在同一冲击速度下,相对密度越大,复合蜂窝结构的平台应力越大。

2.3 冲击载荷一致性

能量吸收结构应当在能量耗散的过程中保持良好的载荷一致性，这就要求其反作用力的峰值应低于引起损伤的临界值,避免引起被保护构件的破坏. 同时,蜂窝材料的反作用力应尽可能维持恒定. 评价蜂窝材料载荷一致性^[9]的两个指标分别为冲击载荷

效率 CLE 和平均应力波动幅度 $\Delta\sigma$,分别为:

$$CLE = \frac{\sigma_p}{\sigma_{max}} \times 100\% \quad (13)$$

$$\Delta\sigma = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_d} |\sigma - \sigma_p| d\varepsilon / (\varepsilon_d - \varepsilon_0) \quad (14)$$

式中： σ_{max} 表示蜂窝材料的最大峰值应力. 对于良好的能量吸收结构，应具有相对较高的冲击载荷效率 CLE 和较小的平均应力波动幅度 $\Delta\sigma$. 在理想状态下,蜂窝材料的冲击载荷效率为 1,平均应力波动幅度为 0.

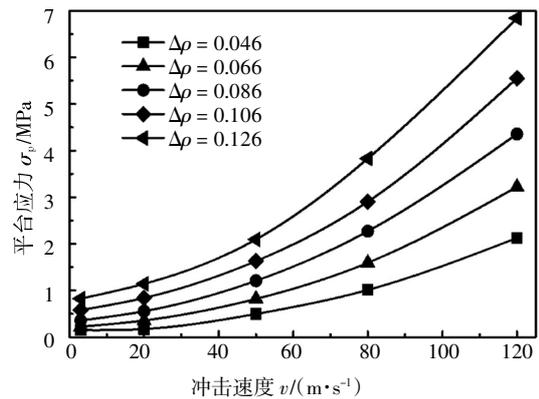
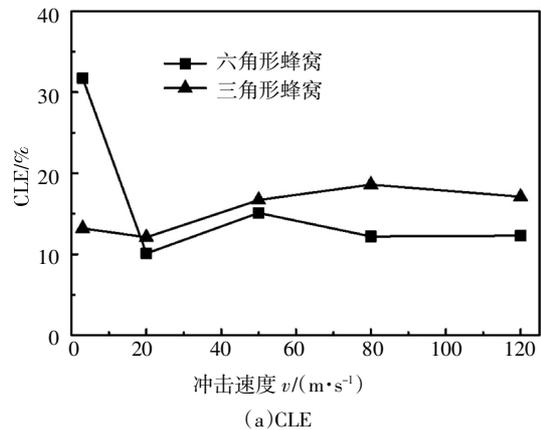


图 9 相对密度对多段填充复合蜂窝材料的动态平台应力的影响(HTHT)

Fig.9 Effects of relative density on the dynamic plateau stress of multi-segment filled composite honeycombs (HTHT)

图 10 给出了不同冲击速度下两类典型蜂窝结构的冲击载荷一致性比较. 在相同相对密度下,当冲击速度大于 20 m/s 时,三角形蜂窝的冲击载荷效率高六角形蜂窝材料(图 10(a)),因为在相同冲击速度下拉伸主导型结构的平台应力要高于弯曲主导型结构^[9]. 不同冲击速度下三角形蜂窝的应力波动幅度大于六角形蜂窝,且随冲击速度的增大波动幅度变化越大(图 10(b)),这充分体现拉伸主导型结构具有较强的波动性,不适宜作为理想能量吸收结构。



(a)CLE

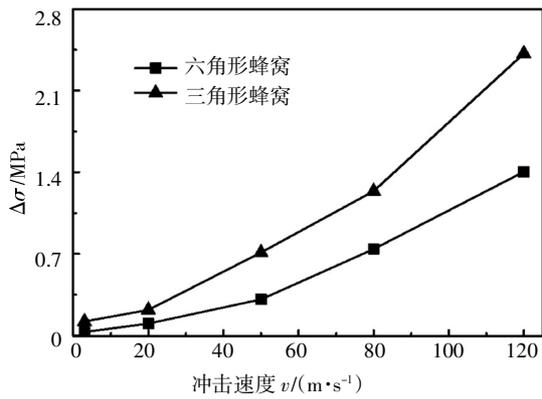
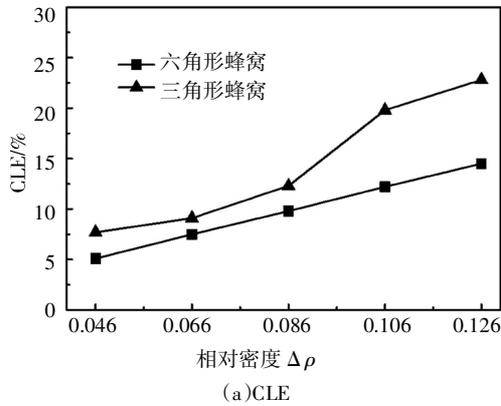


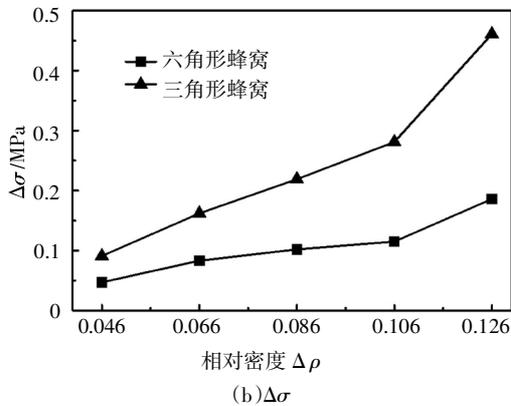
图 10 不同冲击速度下两类规则蜂窝材料的冲击载荷一致性比较 ($\Delta\rho = 0.086$)

Fig.10 Comparison of crushing load uniformity for two regular honeycombs under different impact velocities ($\Delta\rho = 0.086$)

在给定冲击速度下 ($v = 20 \text{ m/s}$), 图 11 给出了相对密度对三角形和六角形蜂窝的冲击载荷效率和平均应力波动幅度的影响. 从图 11 中可以看出, 两类典型蜂窝结构的冲击载荷效率和平均应力波动幅度随相对密度的增加有增大的趋势, 并且三角形蜂窝的冲击载荷效率和平均应力波动幅度要大于六角形蜂窝.



(a) CLE

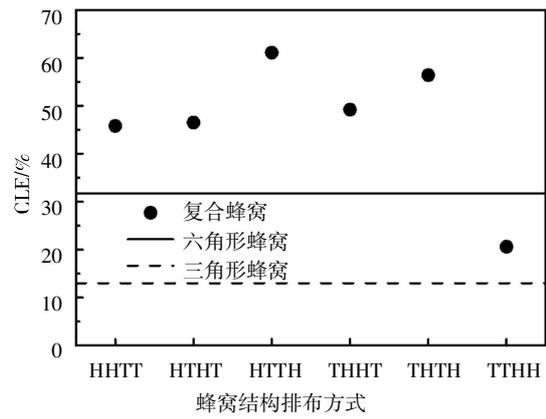


(b) $\Delta\sigma$

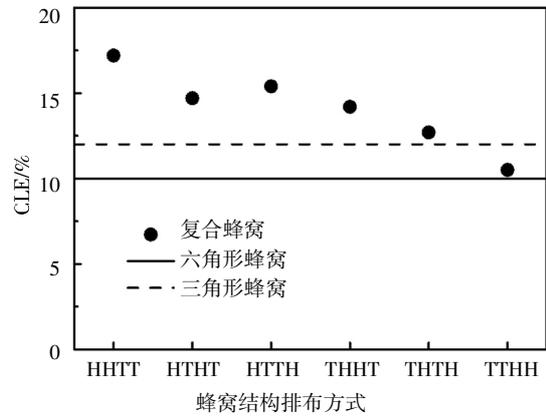
图 11 不同相对密度下两类规则蜂窝材料的冲击载荷一致性比较 ($v = 20 \text{ m/s}$)

Fig.11 Comparison of load uniformity for two regular honeycombs under different relative densities ($v = 20 \text{ m/s}$)

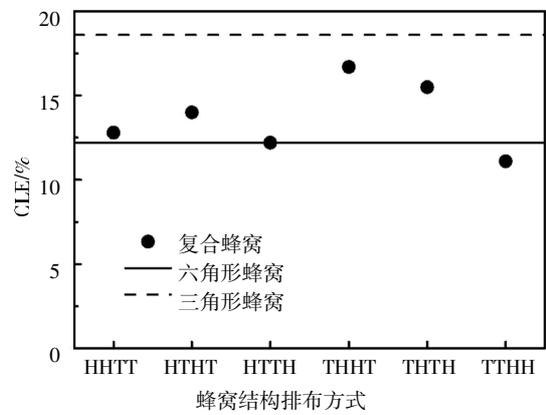
图 12 给出了多段填充复合蜂窝结构在不同冲击速度下的冲击载荷效率比较. 作为对比, 图中还给出了相同相对密度下两类规则蜂窝材料 (三角形和六角形) 的计算结果比较. 在低速冲击载荷下 ($v = 3 \text{ m/s}$), 胞元结构排布是影响复合蜂窝材料冲击载荷效率的主要因素. 复合蜂窝材料的变形首先集中在塑性坍塌强度较低的六角形填充结构段处, 试件的最大峰值应力降低. 随着压缩位移的增加, 变形向塑性坍塌强度较高的三角形填充结构扩展, 引起平台



(a) $v = 3 \text{ m/s}$



(b) $v = 20 \text{ m/s}$



(c) $v = 120 \text{ m/s}$

图 12 多段填充复合蜂窝材料的冲击载荷效率
Fig.12 Crushing load efficiency of multi-segment filled composite honeycombs

应力的逐步提高. 由于弯曲主导型结构和拉伸主导型结构的耦合, 多段复合蜂窝材料(除 TTHH)的冲击载荷效率明显高于普通三角形和六角形蜂窝; 随着冲击速度的增加($v = 20 \text{ m/s}$), 多段复合蜂窝材料(除 TTHH)的冲击载荷效率仍高于普通蜂窝材料. 但与低速冲击相比, 冲击载荷效率将降低, 如图 12(b)所示. 惯性效应增强对顶端填充层的影响作用变大, 靠近冲击端为六角形的复合蜂窝(HHTT、HTHT、HTTH)的冲击载荷效率略高于靠近冲击端为三角形的试件(TTHH、THTH、THHT). 可见, 将塑性坍塌强度低的蜂窝结构置于冲击端处, 可提高蜂窝材料的冲击载荷效率; 随着冲击速度的进一步提高($v = 120 \text{ m/s}$), 惯性效应增强, 在高速冲击下试件的冲击应力上下振荡明显, 多段复合蜂窝材料的冲击载荷效率介于三角形和六角形蜂窝结构之间, 如图 12(c)所示.

图 13 给出了多段填充复合蜂窝材料在不同冲击速度下的平均应力波动幅度比较. 从图中可以看出, 在不同冲击速度下, 复合蜂窝材料的平均应力波动幅度基本位于三角形和六角形蜂窝之间. 可见, 由于弯曲主导型结构的引入, 多段填充复合蜂窝材料的平均应力波动幅度明显降低. 随着冲击速度的增加, 复合蜂窝材料的平均应力波动幅度相应增大.

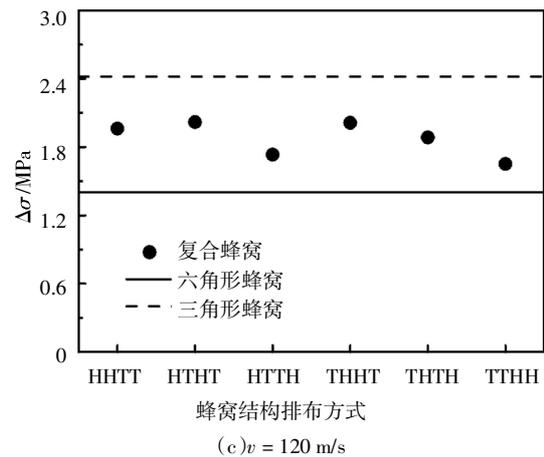
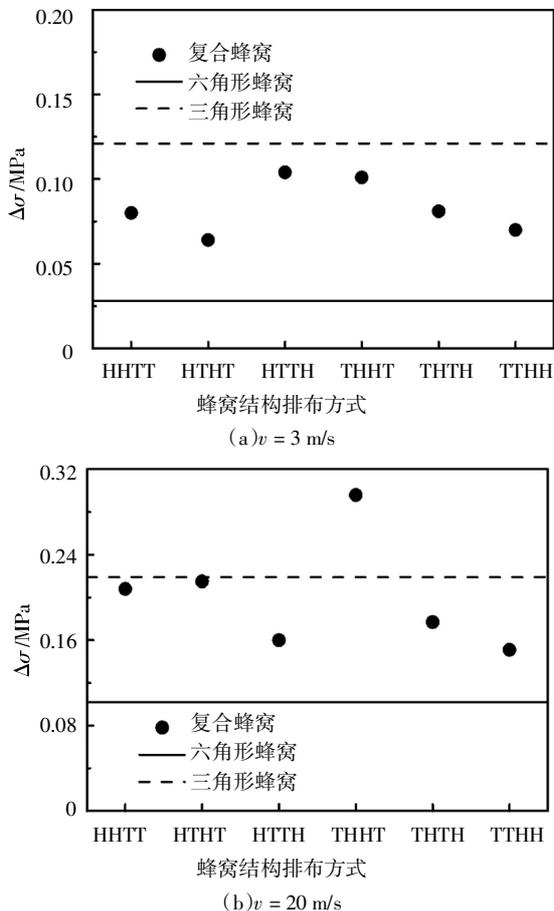


图 13 多段填充复合蜂窝材料的平均应力波动幅度
Fig.13 Average stress fluctuation of multi-segment filled composite honeycombs

2.4 能量吸收特性

对于多孔材料与结构, 通常采用单位质量的能量吸收 E_m 来评估吸能特性, 可表示为:

$$E_m = \frac{E_v}{\Delta\rho\rho_s} \quad (15)$$

式中: E_v 为单位体积所吸收的能量, 即应变能密度,

$$E_v = \int_{\varepsilon_{cs}}^{\varepsilon_a} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (16)$$

图 14 给出了多段填充复合蜂窝材料(HTHT、THTH)在不同冲击速度下的单位质量能量吸收情况. 作为对比, 图中还给出了三角形和六角形蜂窝材料比能量吸收特性. 由图 14 可知, 多段填充复合蜂窝材料的单位质量能量吸收能力介于六角形蜂窝和三角形蜂窝之间. 在低速冲击下($v=3 \text{ m/s}$), 微结构排布将主导宏观结构变形, 两种复合蜂窝材料的比能量吸收差别不大, 在冲击的初始阶段与六角形蜂窝的吸能效果一致, 随着压缩的进一步增加, 比能量吸收曲线逐渐靠近三角形蜂窝(图 14(a)); 随着冲击速度的增加($v=20 \text{ m/s}$), 塑性坍塌强度和冲击速度同时影响复合蜂窝材料宏观变形, 不同排布复合蜂窝的比能量吸收有了明显的差异(图 14(b)). 在初始冲击阶段, 试件 HTHT 的比能量吸收接近于六角形蜂窝, 而试件 THTH 的比能量吸收接近于三角形蜂窝, 这与复合蜂窝材料的变形规律基本吻合; 在高速冲击载荷($v=120 \text{ m/s}$), 惯性效应增强, 微结构排布的影响减弱, 多段填充复合蜂窝材料的比能量吸收趋近于六角形蜂窝和三角形蜂窝(图 14(c)). 可见, 在高速冲击载荷下, 多段填充复合蜂窝材料的比能量吸收主要取决于冲击速度和相对密度.

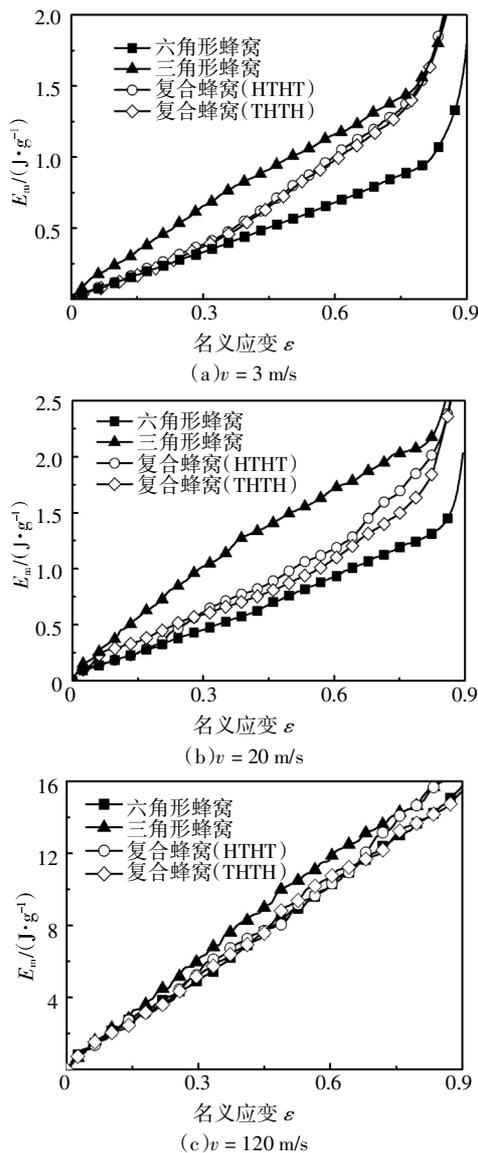


图14 不同蜂窝材料的比能量吸收比较

Fig.14 Comparison of the specific energy absorption for different honeycombs

3 结论

基于复合材料的概念,通过弯曲主导型和拉伸主导型结构两类能量吸收结构的相互耦合,本文提出了一种多段填充复合蜂窝材料模型.利用显式非线性动力有限元方法,对多段填充复合蜂窝结构动态响应特性和冲击载荷一致性进行了研究.得出如下结论:

1)多段填充复合蜂窝材料的变形模式主要依赖于各段填充层塑性坍塌强度和冲击速度.在低速冲击下,多段填充复合蜂窝材料的冲击变形模式取决于各段填充层的塑性坍塌强度;在中速冲击下,多段填充复合蜂窝材料的宏观变形与各段的塑性坍塌强度和冲击速度有关;在高速冲击下,惯性效应将主导多段填充复合蜂窝材料的变形模式.

2)所设计的多段填充复合蜂窝材料能够实现拉伸主导型结构和弯曲主导型结构的优势互补.复合蜂窝材料具有良好的冲击载荷一致性,在中低速冲击载荷下,复合蜂窝材料的冲击载荷效率要高于三角形和六角形蜂窝.由于弯曲主导型结构的引入,多段填充复合蜂窝材料的平均应力波动幅度明显降低.

3)基于一维冲击波理论,给出了多段填充复合蜂窝材料平台应力经验公式,理论计算结果与数值模拟结果吻合较好.此外,通过对各段内微结构及段长的合理选择,能够有效地提高并控制蜂窝材料能量吸收效率,达到控制蜂窝材料能量吸收能力的目的.

参考文献

- [1] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 5—35.
- [2] SUN Y L, LI Q M. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: a review of phenomenon, mechanism and modeling [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 112: 74—115.
- [3] WU H X, LIU Y, ZHANG X C. In-plane crushing behavior and energy absorption design of composite honeycombs [J]. Acta Mechanica Sinica, 2018, 34: 1108—1123.
- [4] 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.
- [5] LIU Y, ZHANG X C. The influence of cell micro topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 98—109.
- [6] ZHANG X C, AN L Q, DING H M. Dynamic crushing behavior and energy absorption of honeycombs with density gradient [J]. Journal of Sandwich Structures and Materials, 2014, 16(2): 125—147.
- [7] QIU X M, ZHANG J, YU T X. Collapse of periodic planar lattices under uniaxial compression, part II: dynamic crushing based on finite element simulation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36: 1231—1241.
- [8] CHEN L M, ZHANG J, DU B, et al. Dynamic crushing behavior and energy absorption of graded lattice cylindrical structure under axial impact load [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 127: 333—343.
- [9] ZHANG X C, AN L Q, DING H M, et al. Influence of cell micro structure on the in-plane dynamic crushing of honeycombs with negative Poisson's ratio [J]. Journal of Sandwich Structures and Materials, 2015, 17(1): 26—55.
- [10] 韩会龙, 张新春, 王鹏. 负泊松比蜂窝材料的动力学响应及能量吸收特性[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(1): 013103. HAN H L, ZHANG X C, WANG P. Dynamic responses and energy absorption properties of honeycombs with negative Poisson's ratio [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(1): 013103. (In Chinese)
- [11] BOLDRIN L, HUMMEL S, SCARPA F, et al. Dynamic behaviour of auxetic gradient composite hexagonal honeycombs [J]. Composite Structures, 2016, 149: 114—124.
- [12] 白中浩, 王飞虎, 郭厚锐. 正八边形多胞薄壁管吸能特性仿真和优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(10): 16—22. BAI Z H, WANG F H, GUO H R. Simulation and optimization of octagon multi-cell thin-walled tubes for energy absorption character [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(10): 16—22. (In Chinese)
- [13] WANG H, LU Z X, YANG Z Y, et al. In-plane dynamic crushing behaviors of a novel auxetic honeycomb with two plateau stress regions [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 151: 746—759.
- [14] REID S R, PENG C. Dynamic uniaxial crushing of wood [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(5/6): 531—570.