

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2022.1107

增材制造曲边蜂窝结构的力学行为和吸能特性

郎晓明¹, 陈斐洋², 阮班超², 王永刚^{2*}

(1.舟山市大桥建设管理中心, 浙江 舟山 316021; 2.宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要:针对直边蜂窝结构进行优化, 提出了一种S形曲边蜂窝结构. 基于激光选区熔化增材制造技术, 以GP1不锈钢为基材, 制备了直边和曲边蜂窝结构, 实验结合有限元计算模拟研究曲边蜂窝结构的力学响应、变形模式和吸能特性, 并讨论了加载应变速率和相对密度的影响规律. 结果表明: (1)S形曲边蜂窝结构的载荷—位移曲线出现2次平台区, 其原因是S形曲边蜂窝结构出现从六角变形模式向四角变形模式的转变; (2)在相同体积条件下, 相比直边蜂窝结构, S形曲边蜂窝结构的吸收总能量和吸能有效率均得到一定提升; (3)随着加载应变速率增大, S形曲边蜂窝结构二次平台载荷均增大, 第2次平台载荷对加载应变速率更为敏感, 同时还发现加载应变速率不影响S形曲边蜂窝结构的变形模式; (4)随着相对密度的增加, S形曲边蜂窝结构二次平台载荷均呈线性增长, 压实临界位移量减小.

关键词:蜂窝结构; GP1 不锈钢; 金属增材制造; 力学行为; 吸能

中图分类号: O347.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 06-0017-07

多孔结构是自然界中常见的材料结构, 如竹子、蜂窝和动物骨骼等, 这些材料内部都存在特殊的微孔洞结构, 具有优异的力学和生物性能^[1-3]. 金属多孔结构材料不仅具有低密度、高比强度和比刚度及优异的缓冲吸能性等结构性能^[4-6], 还兼具消声减振等功能性作用^[7-11], 在航空航天、汽车工业和电子通信等领域都得到了广泛应用^[12-13].

针对蜂窝结构金属材料的物理性能, 国内外学者进行了大量研究. Hu 等^[14]基于竹子结构提出一种仿生蜂窝状管状嵌套结构, 通过落锤实验研究结构的吸能和破碎特性. Ingrole 等^[15]对直边正六边形蜂窝结构进行拓扑优化, 提出一种具有负泊松比的拉胀蜂窝体, 新的蜂窝结构具有优异的力学性能, 比传统增材支撑结构的抗拉强度高出约300%, 且由于泊松比较低, 在承受压缩载荷时能够吸收更多能量. Zhang 等^[16]研究了蜂窝夹层结构在低速冲击下的力学行为, 使用高速摄像系统记录冲击器加速度衰减过程, 再通过投影轮廓系统

获得压痕深度, 结果表明, 黏结层对吸能的影响不可忽视, 蜂窝芯在吸能中起主导作用, 且蜂窝夹层板吸收的能量大部分以塑性耗散形式消耗, 而其余部分转化为应变能. 虽然通过力学实验能够探究材料真实的变形机理, 但同时也需耗费大量的人力和物力. 对此, 许多研究者使用计算机建立高精度有限元模型, 以深入分析材料变形过程中的微观机制, 为优化材料性能提供准确的参数. 李响等^[17]采用多目标遗传算法研究厚度参数对蜂窝夹层结构力学性能的影响, 并对结构工艺参数进行优化, 较好地改善了蜂窝夹层结构的各项力学性能. Lu 等^[18]在内凹六边形蜂窝结构内增加一根窄肋, 以获得一种优化结构, 并对其单轴载荷下平面内的泊松比和弹性模量进行分析和有限元模拟, 结果表明, 优化后的结构弹性模量得到增强, 且新结构的泊松比和弹性模量与窄肋厚度密切相关.

随着蜂窝结构材料在缓冲吸能领域应用越来越广泛, 人们对其力学性能和吸能特性提出了更

收稿日期: 2022-11-09.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11972202); 宁波市重点研发项目(2022Z188).

第一作者: 郎晓明(1992-), 男, 浙江舟山人, 硕士, 主要研究方向: 桥梁建设. E-mail: zsdqjs_gov@foxmail.com

*通信作者: 王永刚(1976-), 男, 江苏涟水人, 博士/教授, 主要研究方向: 工程力学. E-mail: wangyonggang@nbu.edu.cn

高的要求. 本文拟对正六边形蜂窝进行结构优化设计, 提出 S 形曲边蜂窝结构, 并采用激光选区增材制造技术进行试件制备, 开展准静态单向压缩实验, 同时讨论了曲边蜂窝结构的压缩力学性能、吸能特性及变形机制, 并与直边蜂窝结构进行对比分析. 同时基于实验结果建立有限元模型, 研究变形速度、壁厚对曲边蜂窝结构材料力学性能和吸能特性的影响规律, 以期对拓展蜂窝结构在缓冲吸能领域的应用具有一定参考价值.

1 实验

1.1 曲边蜂窝结构材料优化设计与试件制备

直边蜂窝结构材料具有良好的吸能特性, 但对于一些缓冲吸能结构来说, 希望在有限体积内吸收更多能量. 本文将对直边蜂窝结构进行结构优化, 在保证空间体积不变的条件下, 将蜂窝结构从直边变为 S 型弧线曲边, 直边蜂窝边长 l 为 2 mm, 胞壁厚 h 为 0.4 mm, 曲边蜂窝 S 型曲边的割线长度与直边蜂窝的边长相同(2 mm), 胞壁厚 h 同样为 0.4 mm, 圆心角 θ 为 150° , 直边蜂窝结构和曲边蜂窝结构的横截面积相同, 蜂窝单胞结构及其进行排列组合后的蜂窝结构如图 1 所示. 相对密度 ρ'/ρ_s 是蜂窝结构材料的一个重要参数, 其中, ρ' 和 ρ_s 分别为蜂窝材料的表观密度和构成蜂窝材料胞壁固体材料的密度.

直边蜂窝胞元的相对密度计算公式为:

$$\frac{\rho'}{\rho_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{h}{l} \quad (1)$$

曲边蜂窝胞元的相对密度计算公式为:

$$\frac{\rho'}{\rho_s} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\pi \theta}{180 \cos(90 - \theta/2)} \frac{h}{l} \quad (2)$$

在 $l = 2 \text{ mm}$, $h = 0.4 \text{ mm}$, $\theta = 150^\circ$ 条件下, 根据式(1)和(2)可得直边蜂窝单胞相对密度为 23.1%, 曲边蜂窝单胞相对密度为 31.4%.

以 GP1 不锈钢为母体材料(成分见表 1), 采用 EOSINT M280 金属 3D 打印机制备尺寸为 $28 \text{ mm} \times 28 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的直边蜂窝和曲边蜂窝结构材料试样, 激光选区熔化的技术参数见表 2.

1.2 准静态压缩实验

采用 MTS-810 万能材料试验机对直边和曲边蜂窝结构的材料试件进行加载, 压缩应变速率设为

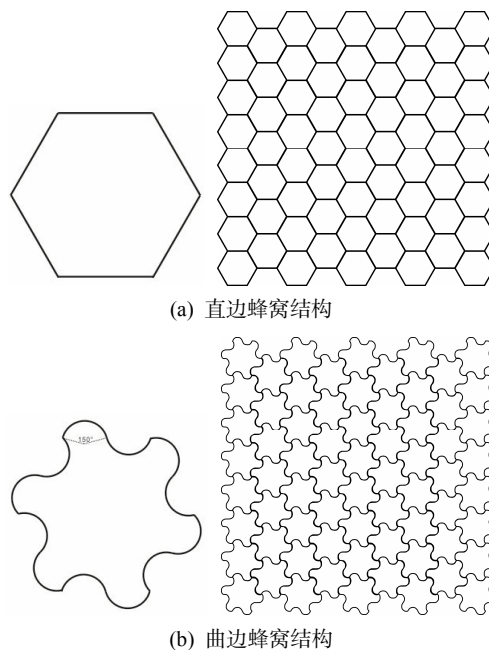


图 1 2 种蜂窝结构横截面图

表 1 GP1 不锈钢材料成分 %

元素	含量
Fe	70~74
Cr	15.0~17.5
Ni	3~5
Cu	3~5
Mn	≤ 1
Si	≤ 1
Mo	≤ 1
Nb	0.15~0.45
C	≤ 0.07

表 2 激光选区熔化技术参数

参数	数值
激光功率/W	195
扫描速度/(mm·s ⁻¹)	1 000
铺粉速度/(mm·s ⁻¹)	80
层厚/ μm	20
预热温度/ $^\circ\text{C}$	80

10^{-2} s^{-1} . 在压缩过程中, 采用高速相机拍摄蜂窝结构材料的变形模式, 拍摄帧频为 $60 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$, 为保证数据准确性, 每次试验重复 3 次, 取平均值. 另外, 在压缩夹具与试样接触端面处喷涂黑白散斑, 采用高速相机进行拍摄, 对记录照片开展数字图像相关性分析, 从而准确获得试件的压缩位移.

2 实验结果与分析

2.1 压缩力学性能

图2为直边蜂窝结构材料3次重复压缩实验得到的载荷—位移曲线,结果显示,3次实验得到的曲线具有很好一致性.图3为一组直边蜂窝和曲边蜂窝结构材料压缩的载荷—位移曲线.由图可知,直边和曲边结构在压缩力学响应存在明显差异,直边蜂窝结构变形行为体现为典型的多孔结构材料三阶段变形特征,即弹性阶段、平台阶段和压实阶段,而曲边蜂窝结构变形行为则显示五阶段变形特征,即初始弹性阶段、平台阶段、强化阶段、第2次平台阶段和压实阶段.曲边蜂窝结构的第1次平台载荷低于直边蜂窝结构,但第2次平台载荷则远远高于直边蜂窝结构.另外,曲边压实位移要明显低于直边的压实位移.

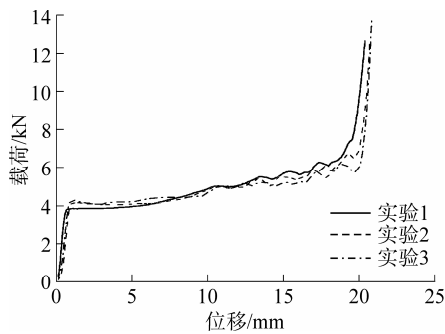


图2 直边蜂窝结构3次重复实验的载荷—位移曲线

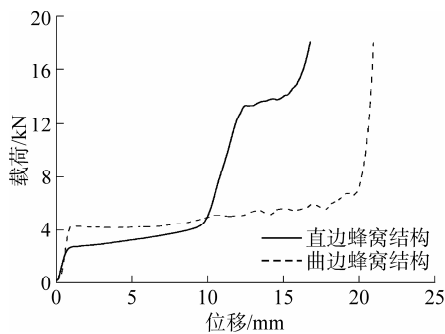


图3 直边和曲边蜂窝结构的载荷—位移曲线

为定量分析直边蜂窝和曲边蜂窝结构的缓冲吸能特性,余同希等^[19]引入吸能效率、比吸能和吸能效率几个评估指标.

多胞结构的吸能效率 f 由下式定义:

$$f = \frac{\int_0^s F(s)ds}{F_{\max}}, \quad (3)$$

式中: s 为压缩位移; F 为压缩载荷; $F_{\max}$ 为除初始峰

值载荷 F_p 外 $[0, s]$ 区间的最大压缩载荷. 通常情况下, 吸能效率 f 会随位移的增加出现一个最大值, 这里我们将吸能效率最大值所对应的压缩位移记录定义为有效压缩行程 s_{ef} .

比吸能(Specific Energy Absorption, SEA)是一个有量纲评估指标, 用来衡量单位质量的能量吸收能力, 表达式如下:

$$Z = \frac{W_{\text{ef}}}{G} = \frac{\int_0^{s_{\text{ef}}} F(s)ds}{G}, \quad (4)$$

式中: Z 为比吸能; W_{ef} 为有效压缩行程 s_{ef} 之内所吸收的总能量; G 为结构总质量.

吸能有效率(Energy Efficiency Absorbing, EEA)是一个无量纲的评估指标, 表达式如下:

$$E = \frac{W_{\text{ef}}}{VY} = \frac{\int_0^{s_{\text{ef}}} F(s)ds}{AYL} = \frac{F_m \cdot s_{\text{ef}}}{AYL}, \quad (5)$$

式中: E 为吸能有效率; V 为结构净体积; Y 为材料屈服应力; A 为截面净面积; L 为特征长度; F_m 为平均压缩力.

基于图2给出的实验数据, 分别计算2种结构的吸收总能量、比吸能和吸能效率, 结果见表3, 结果显示: 在相同空间体积下, S形曲边蜂窝结构吸收总能量、吸能效率均高于直边蜂窝结构, 比吸能低于直边蜂窝结构, 说明优化后的S形曲边蜂窝结构吸能特性得到了部分改善.

表3 2种蜂窝结构吸能特性

结构	质量/g	相对密度/%	体积/mm ³
直边蜂窝结构	12.83	23.1	8 118.75
S形曲边结构	17.46	31.4	8 118.75
结构	吸收总能量/J	比吸能/(J·g ⁻¹)	吸能效率/%
直边蜂窝结构	94.61	7.37	2.15
S形曲边结构	112.75	6.46	2.53

2.2 变形模式

在实验过程中, 采用高速相机对试件变形过程进行拍摄, 揭示2种蜂窝结构压缩过程中变形模式的差异. 图4(a)和(b)分别为2种蜂窝结构下3个典型压缩量的试件变形图片, 观察可见两者变形模式差异明显. 直边蜂窝结构变形主要分为三个阶段, 开始时胞壁发生弹性弯曲, 随着压缩行程增大, 胞壁弯曲变形在试件中间出现局域化, 压缩后期阶段, 试件中间出现左右基本对称的鼓形现象,

最后蜂窝结构进入逐层压溃模式,胞壁间发生接触,直至整个结构被完全压实。S形曲边蜂窝结构变形则分为五个阶段,开始时所有胞壁发生小挠度弹性弯曲;接着S形曲边斜对角的2条(图4(c)中圈标识)曲边发生变形局域化,产生严重塑性弯曲,胞壁发生接触,此变形阶段对应于图3中第1个载荷平台阶段;随着压缩量继续增大,S形曲边蜂窝结构则逐渐从六角变形模式变化为四角变形模式(图4(c)中方框标识),变形在试样对角线方向出现集中;四角变形模式的承载力明显高于六角变形模式,对应于图3中的载荷强化阶段,试样整体变形出现左右不对称鼓形现象;最后蜂窝结构进入逐层压溃模式,直至整个结构被完全压实。

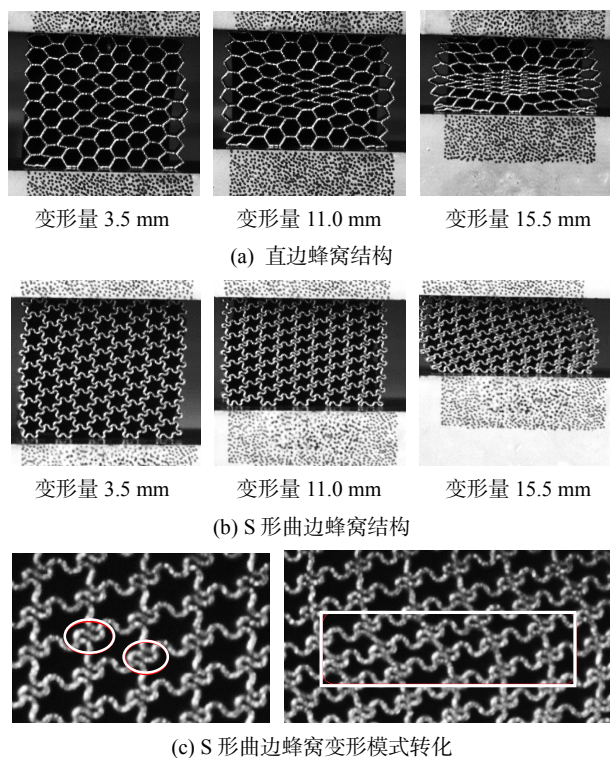


图4 准静态压缩过程中2种蜂窝结构的变形模式

3 数值模拟

3.1 计算模型及可靠性验证

基于实验结构,采用数值模拟手段进一步讨论加载应变速率和相对密度对S形曲边蜂窝结构力学性能的影响。采用Ls-Dyna有限元软件,蜂窝结构的胞壁采用壳单元进行建模,网格划分完成几何模型(图5)。采用压板方式进行加载,下压板固定,对上压板施加速度边界条件,压缩速度分别

为0.28、2.80和28.00 m·s⁻¹,对应加载应变速率分别是10、100、1000 s⁻¹。曲边蜂窝结构胞壁厚度分别为0.2、0.3和0.4 mm,对应相对密度分别15.7%、23.6%、31.4%。基体材料GP1不锈钢动态本构关系采用Johnson-Cook本构模型,等效屈服应力表达式如下^[20-21]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0))(1 - T^{*m}), \quad (6)$$

式中: σ 为等效应力; ε 为等效应变; $\dot{\varepsilon}$ 和 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为应变速率和参考应变速率; $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$,其中, T_0 为参考温度, T_m 为熔化温度, T 为实验温度; A 为初始屈服强度; B 、 C 、 n 和 m 均为材料参数。数值模拟采用GP1不锈钢材料本构参数^[21]:密度 $\rho = 7830 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,弹性模量 $E = 163 \text{ GPa}$, $A = 550 \text{ MPa}$, $B = 510 \text{ MPa}$, $n = 0.26$, $m = 1$, $C = 0.014$, $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$, $T_m = 1800 \text{ K}$, $T_0 = 300 \text{ K}$ 。

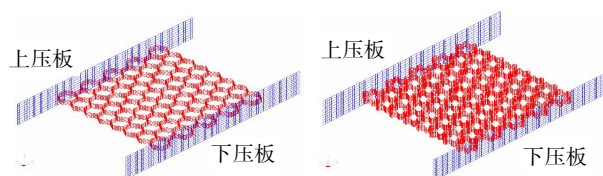


图5 有限元计算模型

为验证有限元模型计算的可靠性,首先对直边蜂窝结构试样在准静态加载下的实验结构进行数值模拟,计算边界条件与实验保持一致。图6为数值模拟得到的载荷—位移曲线与实验数据的对比,可见两者基本一致,验证了有限元计算模型的可靠性。图7为不同压缩量下数值计算得到的直边蜂窝结构变形过程,整体来看,结构变形也分为弹性弯曲变形、局域化塑性弯曲及压实三个典型阶段,与图4(a)显示实验结果非常接近。但变形细节方面也显示出一定的差异性,主要原因是激光选区熔化增材制造的蜂窝结构胞壁不可避免地存在一些

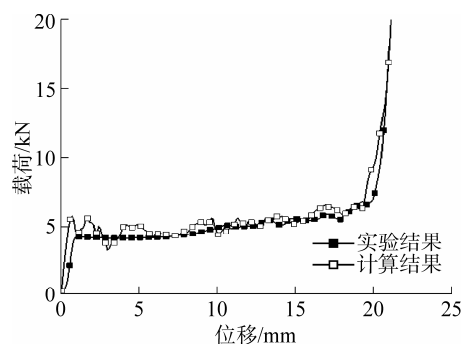


图6 直边蜂窝结构载荷—位移曲线实验与计算结果对比

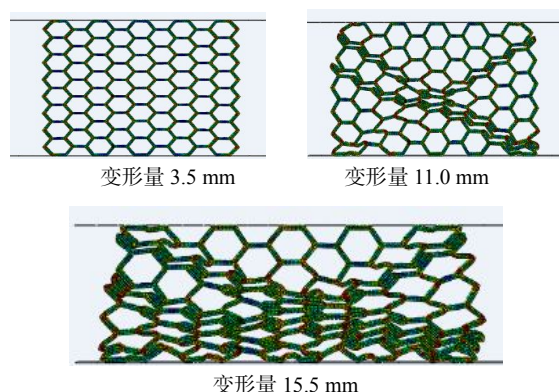


图7 有限元计算得到的直边蜂窝结构变形过程缺陷, 这些缺陷对胞壁变形模式会带来一定影响, 而数值计算模型中蜂窝结构是无缺陷的。

3.2 加载应变速率对 S 形曲边蜂窝结构力学性能的影响

采用上述有限元计算模型, 胞壁厚度 0.4 mm 保持不变, 在加载应变速率分别为 10、100、1000 s^{-1} 条件下, 得到 S 形曲边蜂窝结构在压缩过程中的载荷—位移曲线(图 8)。从图 8 可见, S 形蜂窝结构力学性能表现出显著的应变速率敏感性, 随着应变速率的增加, 第 1 次平台载荷和第 2 次平台载荷均增大, 其中第 2 次平台载荷对应变速率更为敏感。可见应变速率对 S 形蜂窝结构变形模型的影响比较弱, 对强化阶段和压实阶段对应位移量几乎没有影响。图 9 为不同加载应变速率条件下试件变形过程。当变形量为 5 mm 时, 加载应变速率 10 s^{-1} 和 100 s^{-1} 的试样出现 1 条局域化斜角变形带, 而加载应变速率 1000 s^{-1} 的试样则出现 2 条局域化斜角变形带; 当变形量为 10 mm 时, S 形蜂窝结构刚好完成从六角变形模式变化为四角变形模式, 这与图 4(b)和(c)给出的实验观察结果一致, 加载应变速率对变形模式转变过程无影响; 当变形量为 14 mm

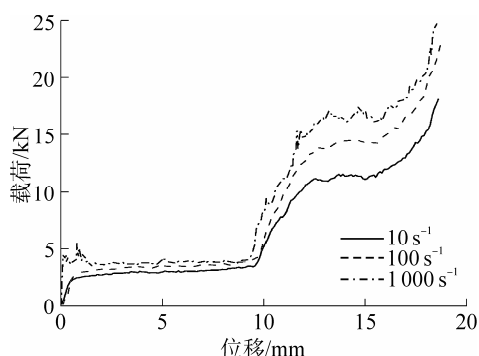


图8 不同加载应变速率 S 形蜂窝结构的载荷—位移曲线

时, S 形蜂窝结构在四角变形模式发生整体压实变形, 没有观察到明显局域化压溃现象, 同时加载应变速率对此阶段变形也没有影响。

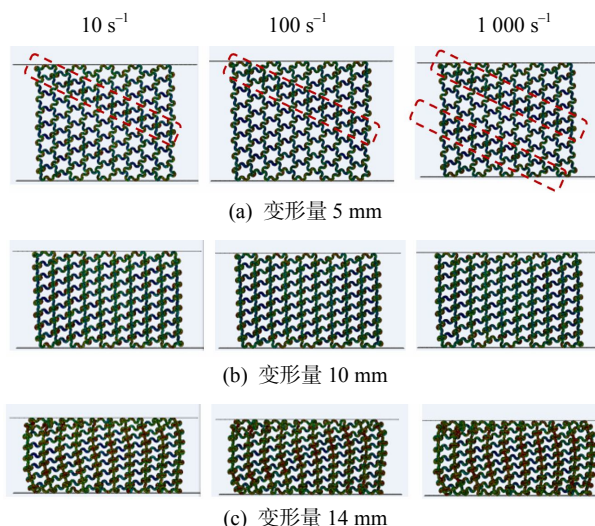


图9 不同加载应变速率条件下试件变形过程

3.3 相对密度对 S 形曲边蜂窝结构力学性能的影响

相对密度是描述多胞材料特性的一个重要参数, 这里可通过改变胞壁厚度来调整 S 形曲边蜂窝结构的相对密度。加载应变速率 10 s^{-1} 保持不变, 对胞壁厚度分别 0.2、0.3 和 0.4 mm 的 S 形曲边蜂窝结构的压缩变形过程进行数值计算。图 10 即为不同胞壁厚度条件下得到的载荷—位移曲线, 由图可知, 胞壁厚度对 S 形曲边蜂窝结构力学性能影响非常显著。如图 11 所示, 随着胞壁厚度的增加, S 形曲边蜂窝结构的第 1 次平台载荷和第 2 次平台载荷均呈线性增长, 而压实临界位移量随着胞壁厚度增大而减小。图 12 则为不同胞壁厚度条件下试件变形过程。当变形量为 5 mm 时, 胞壁厚度 0.2 mm 和 0.3 mm 的试样出现 2 条局域化斜角变形带, 而胞壁厚度 0.3 mm 的试样则出现 1 条局域化斜角变形带; 当变形量为 10 mm 时, 壁厚度 0.2 mm 和 0.3 mm 的试样中部分单胞从六角变形模式转变为四角变形模式, 表现出明显的局域化现象, 处于第 1 个平台区域, 这与图 10 的载荷—位移曲线特征是一致的; 当变形量为 15 mm 时, S 形蜂窝结构完成了六角变形模式向四角变形模式的转变, 随后在四角变形模式胞壁发生塑性弯曲变形, 并在载荷—位移曲线中出现第 2 个平台区, 最后进入所有胞孔被压实的阶段。

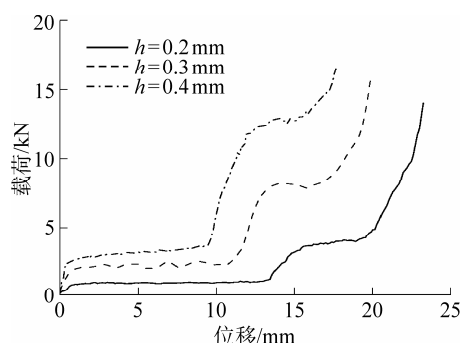


图10 不同胞壁厚度下S形曲边蜂窝结构载荷—位移曲线

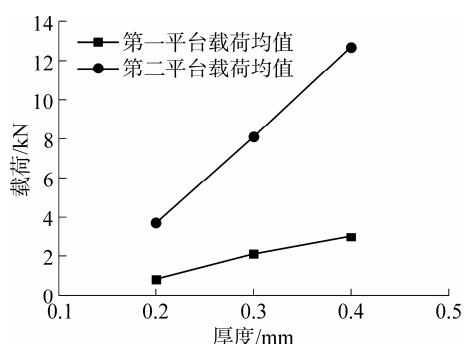


图11 平台载荷均值随着胞壁厚度的变化曲线

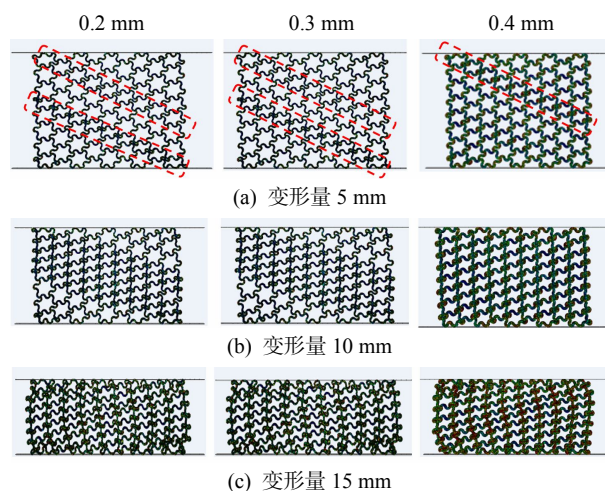


图12 不同胞壁厚度条件下试件变形过程

4 结论

以直边蜂窝和曲边蜂窝结构为研究对象,采用激光选区增材制造技术制备实验样品,开展准静态单轴压缩实验,讨论2种蜂窝结构的力学响应和变形模式及吸能特性的影响.基于实验结果,建立有限元数值计算模型,并重点讨论了加载应变速率和相对密度对曲边蜂窝结构力学性能的影响,取得以下主要结论:

(1)准静态压缩实验结果显示,相比直边蜂窝结构,曲边蜂窝结构的力学行为、变形模式及吸能特性明显不同,出现了2次平台区,其原因是压缩过程中的试件出现了从六角变形模式向四角变形模式的转变,在相同体积条件下,S形曲边蜂窝结构的吸收总能量和吸能有效率均得到一定的提升.

(2)加载应变速率对S形曲边蜂窝结构的力学性能的影响比较显著,随着应变速率的增加,第1次平台载荷和第2次平台载荷均增大,其中第2次平台载荷对应变速率更为敏感,但应变速率对S形曲边蜂窝结构的变形模式的影响较弱.

(3)胞壁厚度对S形曲边蜂窝结构力学性能的影响也非常显著,随着胞壁厚度的增加,S形曲边蜂窝结构的第1次平台载荷和第2次平台载荷均呈线性增长,压实临界位移量随着胞壁厚度增大而减小.

参考文献:

- [1] 朱震刚. 金属泡沫材料研究[J]. 物理, 1999, 28(2):24-28.
- [2] 王永刚, 施绍裘, 王礼立. 低阻抗多孔材料动态弹性模量和剪切模量实验测定[J]. 宁波大学学报(理工版), 2002, 15(4):22-26.
- [3] 赖家美, 阮金琦, 王森, 等. 缝合泡沫复合材料弯曲性能研究[J]. 材料导报, 2020, 34(18):18165-18170.
- [4] 田陈, 黄磊, 刘韡, 等. 多胞管增强泡沫铝复合结构的压缩和吸能性能研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(5): 958-964.
- [5] 张光成, 郭超群, 闫治坤, 等. 泡沫钢填充管的准静态压缩变形模式、力学性能及吸能特性[J]. 材料导报, 2021, 35(24):24158-24163.
- [6] 孙亚东, 周芸, 汪天尧, 等. 泡沫钢的制备及压缩吸能特性[J]. 材料科学与工艺, 2019, 27(5):44-51.
- [7] 李道兵. 柴油发动机噪声控制试验研究[J]. 农机化研究, 2007, 29(11):217-219.
- [8] 韩冬, 张俊红, 张英, 等. 金属铝纤维的性能研究及其应用进展[J]. 轻金属, 2007(12):67-70.
- [9] 冯苗锋, 吕玉恒. 吸声材料的市场需求及发展趋势探讨[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(5):9-12.
- [10] Zhang C J, Feng Y, Zhang X B. Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(8):1380-1386.
- [11] 何德坪, 何思渊, 顾菲菲, 等. 铝合金熔体在多孔介质中的渗流过程及多孔铝合金[J]. 中国科学(B 辑: 化学),

- 2009, 39(1):22-30.
- [12] 陈惠秀. 浅谈多孔泡沫金属材料的性能及其应用[J]. 石化技术, 2017, 24(9):52.
- [13] 梁继超, 张光成, 宋少威, 等. 泡沫钢的制备、性能及应用研究进展[J]. 航空材料学报, 2022, 42(4):16-27.
- [14] Hu D Y, Wang Y Z, Song B, et al. Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 162:21-32.
- [15] Ingrole A, Hao A Y, Liang R. Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement[J]. Materials & Design, 2017, 117: 72-83.
- [16] Zhang D, Jiang D, Fei Q, et al. Experimental and numerical investigation on indentation and energy absorption of a honeycomb sandwich panel under low-velocity impact[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2016, 117:21-30.
- [17] 李响, 潘志宇, 李锐, 等. 轻质高强类蜂窝夹层结构力学性能分析及优化[J]. 机械, 2021, 48(11):1-9.
- [18] Lu Z X, Li X, Yang Z Y, et al. Novel structure with negative Poisson's ratio and enhanced Young's modulus [J]. Composite Structures, 2016, 138:243-252.
- [19] 余同希, 卢国兴, 张雄. 能量吸收: 结构与材料的力学行为和塑性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [20] 史同亚, 刘东升, 陈伟, 等. 激光选区熔化增材制造 GP1 不锈钢动态拉伸力学响应与层裂破坏[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(7):52-63.
- [21] 李鉴石, 王永刚, 史同亚, 等. 增材制造八角桁架点阵结构材料的力学行为[J]. 宁波大学学报(理工版), 2022, 35(1):82-89.

Mechanical behavior and energy absorption characteristics of additively manufactured curved edge honeycomb structure

LANG Xiaoming¹, CHEN Feiyang², RUAN Banchao², WANG Yonggang²

(1.Zhoushan Bridge Construction Management Center, Zhoushan 316021, China; 2.Key Laboratory of Impact and Safety Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: An S-shaped curved honeycomb structure is proposed to optimize the straight edge honeycomb structure. Based on laser selective melting additive manufacturing technology, straight edge and curved edge honeycomb structures were prepared with GP1 stainless steel as the base material. Quasi static compression properties were carried out. Combined with finite element simulation, the mechanical response, deformation mode and energy absorption characteristics of curved edge honeycomb structures were studied, and the effects of loading strain rate and relative density were discussed. The results show that: (1) The load displacement curve of S-shaped curved edge honeycomb structure has a plateau area twice, which is due to the transformation of S-shaped curved edge honeycomb structure from hexagonal deformation mode to quadrangular deformation mode; (2) Under the same volume condition, compared with the straight edge honeycomb structure, the total energy absorption and energy absorption efficiency of the S-shaped curved edge honeycomb structure are improved to some extent; (3) With the increase of the loading strain rate, the secondary platform load of the S-shaped curved edge honeycomb structure increases, and the second platform load is more sensitive to the loading strain rate. At the same time, it is found that the loading strain rate does not affect the deformation mode of the S-shaped curved edge honeycomb structure; (4) With the increase of relative density, the secondary platform load of S-shaped curved edge honeycomb structure increases linearly, and the compaction critical displacement decreases.

Key words: honeycomb structure; GP1 stainless steel; metal additive manufacturing technology; mechanical behavior; energy absorption

(责任编辑 章践立)