

DOI: 10.3901/JME.2020.16.078

铝圆管蜂窝材料制备及其准静态压缩性能研究*

张金山^{1,2} 乔及森^{1,2} 孔海勇^{1,2} 苗红丽^{1,2}

(1. 兰州理工大学材料科学与工程学院 兰州 730050;

2. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室 兰州 730050)

摘要: 圆管蜂窝的制备是制约其发展和应用的一个关键问题。采用钎焊方法,设计钎焊工艺流程,制备铝圆管蜂窝材料,为蜂窝材料的生产提供了一种方法。对制备的蜂窝材料进行了准静态压缩试验,研究圆管的变形特征和力学响应。采用有限元对试验进行模拟,考虑钎焊焊缝和制备缺陷影响,建立圆管蜂窝的有限元模型,发现有限元模拟应力-应变曲线和变形过程与试验结果吻合良好。制备缺陷导致蜂窝提前密实化,对力学性能的影响不可忽略。在此基础上对不同壁厚圆管蜂窝进行了准静态压缩模拟,同时基于弹塑性理论推导了蜂窝的等效弹性模量和塑性初始屈服应力的计算公式,结果表明考虑焊缝影响时解析解和模拟结果相近,都要高于相同条件下不考虑焊缝的理想解,且随着相对密度的增加,焊缝的影响作用增大。

关键词: 圆管蜂窝; 准静态压缩; 钎焊; 有限元; 相对密度

中图分类号: TB331

Fabrication and Quasi-static Compression Performance of Aluminum Circular Honeycomb

ZHANG Jinshan^{1,2} QIAO Jisen^{1,2} KONG Haiyong^{1,2} MIAO Hongli^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050;

2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: The fabrication and manufacturing of circular honeycomb is a critical technology that has play an important role on its development and application of industry. Aluminum circular honeycombs have been made by brazing method with specific processes and parameters, which is an invention for the porous structure manufacturing. Quasi-static compression performance testing of the honeycombs is carried out to study the deformation characteristics and mechanical behaviors of the circular tubes of honeycombs. The finite element model of circular honeycomb is established considering the influence of brazing seam and fabrication defects. It is found that the stress-strain curves and deformation processes simulated by the finite element method are in good agreement with the test results. The welded defects causes the honeycomb to be dense ahead of time, and the effect of defects on the mechanical properties cannot be ignored. On this basis, the quasi-static compression simulation of the circular honeycombs is carried out with different wall thickness, and the calculation formulas of the equivalent elastic modulus and the plastic initial yield stress of the honeycomb are derived based on the elastic-plastic theory. The results show that the analytical solution is agreed with that of numerical cases, with considering the influence of the welded joints, which is higher than the ideal solution without considering the welded joints. In addition, the influence of welded joints on the mechanical behavior of circular honeycomb is more and more obvious with the increasing of material relative density.

Key words: circular honeycomb; quasi-static compression; brazing; FEA; relative density

* 沈阳材料科学国家研究中心-有色金属加工与再利用国家重点实验室联合基金(18LHPY007)和甘肃省科技厅中小企业创新基金(17CX2JA026)资助项目。20191207 收到初稿, 20200509 收到修改稿

0 前言

圆管蜂窝是蜂窝结构中一种重要的拓扑构型, 由薄壁圆管的周期阵列构成, 多孔轻质且成本低, 当在面内压缩时具有较长的应变区域和几乎恒定的应力水平, 现已被证明在能量吸收方面具有优势, 是较为理想的吸能材料^[1-3]。SHIM 等^[4]试验研究了铝管阵列在侧向约束条件下的面内准静态压缩的变形过程, 分别对正方形和六边形排布的阵列的变形模式进行了阐述, 该研究中圆管之间并未有效连接, 若两侧没有固壁约束大变形过程中会发生溃散, 所以作者只是研究了有侧向约束的情况。CHUNG 等^[5]对聚碳酸酯圆管蜂窝面内单轴加载的静态及动态破坏过程做了试验和模拟分析, 作者所用材料受强度和温度的影响较大且塑性变形能力相比金属较差, 难以更有力发挥其吸能效果。KARAGIOZOVA 等^[6]对比了圆形蜂窝双轴压缩和准静态等轴压缩的变形过程, 阐释了变形局部化和变形模式之间的联系, 为深入理解蜂窝材料的变形提供了理论和试验指导。CHUNG 等^[7]基于 PURC 方法和弹性力学推导了圆管蜂窝面内等效弹性模量、剪切模量、泊松比。LIN 等^[8-9]在 CHUNG 研究的基础上, 更加详细地对圆管蜂窝的弹性性能、塑性屈服和坍塌破坏进行了理论分析, 其结果与有限元计算相近, 使得理论公式同样能够更好地适用于相对密度较大的材料。GOTKHINDI 等^[10]分别采用薄壁圆环理论、曲梁理论、弹性理论以及有限元方法对圆管结构的面内弹性模量和泊松比进行了预测, 给出了详细的理论公式, 并且对比了每一种方法的结果, 指出了三种理论预测方法的优势和劣势, 丰富和发展了圆管蜂窝的计算方法, 为蜂窝材料的设计和应用提供了理论依据。在 SUN 等^[11]的研究中, 采用有限元对多层规则排列的圆管蜂窝(MRACHs)的面内冲击过程进行了大量计算, 分别就变形模式、冲击平台应力以及能量吸收性能做了具体分析, 为圆管蜂窝材料在包装、军事、建筑等吸能场合的应用指明了方向。

大多文献仅从有限元的角度去分析, 没有考虑到材料制备过程中带来的诸多问题, 如圆管的可靠连接, 材料并非理想弹塑性以及连接部位对材料整体性能的影响等。鉴于此, 本文首先提出一种制备圆管蜂窝材料的钎焊工艺流程, 然后采用试验、模拟和理论分析相结合的方式对圆管蜂

窝材料在准静态条件下的面内变形过程和力学性能进行研究。

1 圆管蜂窝材料制备

本文采用钎焊法制备圆管蜂窝材料, 基体材料为退火态纯铝管, 塑性良好, 受热影响较小, 加工硬化特性不明显、性能接近于理想的弹塑性材料。圆管的直径为 8 mm, 初始壁厚为 0.3 mm, 由于圆管的材料属性难以直接获取, 采用退火态的 0.5 mm 厚的板材来替代圆管材料。退火态 1060 铝板拉伸试样如图 1 所示。通过对两个相同试样即试样 1 和 2 的准静态拉伸试验得到应力-应变关系如图 2 所示。钎料为直径 1.2 mm 的药芯 Zn-Al 焊丝, 熔点为 470 °C, 钎焊设备为箱式电阻炉。

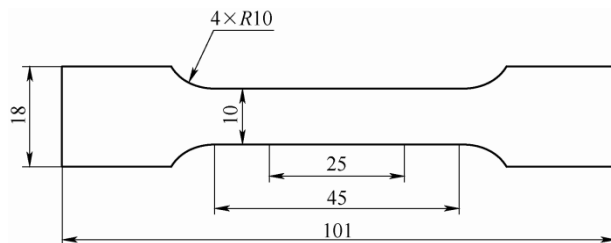


图 1 退火态 1060 铝板拉伸试样

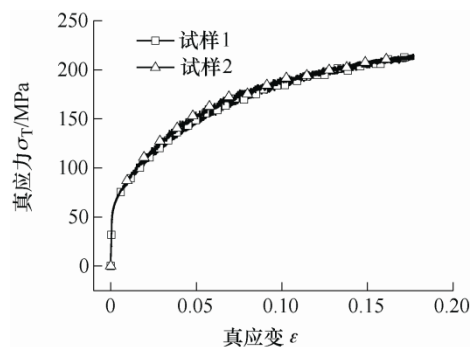


图 2 基体材料真应力-应变关系

如图 3 所示是钎焊法制备圆管蜂窝的整个工艺流程, 首先是预处理, 打磨铝管的氧化膜并将其和钎料一同装配在刚性夹具内; 其次就是将装配件置于炉中进行钎焊并空冷至室温, 经过工艺优化, 确定了加热温度和保温时间为 500 °C+10 min 为宜。最后是热处理, 消除冷拔圆管残留的硬化, 退火温度和时间 350 °C+30 min。由于钎焊过程中圆管上下和左右在形成焊缝时所受力不同, 焊缝尺寸也不相同, 因此在试验之前需要将试样旋转 90° 放置, 防止后续压缩时材料失稳。

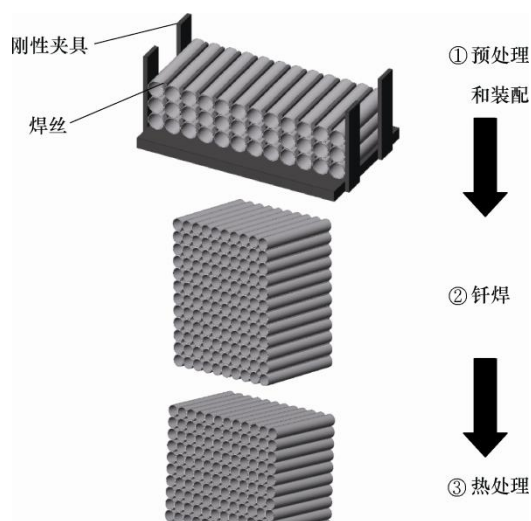


图3 钎焊工艺流程

2 准静态压缩

2.1 试验

基于上述方法成功制备了钎焊铝圆管蜂窝材料如图4所示,焊缝外观成形良好,圆管之间的焊缝分布均匀。经过测量试样的整体尺寸为 $80\text{ mm} \times 96\text{ mm} \times 29.8\text{ mm}$,管壁厚平均为 0.27 mm ,上下圆管之间横向焊缝的宽度为 3 mm ,左右圆管间的纵向焊缝宽度较小,可以忽略不计。对钎焊接头进行了显微硬度测试,得出焊缝的硬度介于 $70 \sim 80\text{ HV}$,而母材的硬度为 22 HV ,其值明显高于母材。



图4 钎焊铝圆管蜂窝试样

采用 SHIMADZU-10TA 型材料力学万能试验

机对试样进行压缩,压缩速率为 10 mm/min ,试验过程中连续拍摄蜂窝的面内变形过程,直至试样的载荷曲线急剧上升达到密实化为止。从试验机上采集压头的载荷和位移,并转化成相应的应力-应变曲线,其中应力为载荷除以试样的初始长度和厚度,应变为位移除以试样的初始高度。

2.2 有限元模拟

基于 ABAQUS/EXPLICIT 对试验进行模拟,假定各向同性并忽略应变率的影响,焊缝的弹性模量和泊松比与基体材料相同均为 69 GPa 和 0.3 ,屈服强度通过硬度转化为 120 MPa 。由于焊缝处的屈服强度要远高于基体(66 MPa),在压缩过程中几乎不发生变形,但焊缝尺寸会影响壳的变形,因此可近似将焊缝简化为壳,材料属性仍采用焊缝参数。统一基体壳的法线方向向内,厚度设置为向内偏移。通用摩擦因数为 0.1 ,网格大小为 0.75 mm ,共 $144\,960$ 个 S4R 单元,模型尺寸为 $79.4\text{ mm} \times 89.6\text{ mm} \times 29.8\text{ mm}$ 。蜂窝置于两个离散刚体之间,下面板固定,上面板施加位移边界条件,压缩位移为 60 mm 。此外,为了更加准确地模拟试验过程,模型还引入了试样的缺陷,对缺陷部位处理是通过施加刚体约束实现,模型示意图如图5所示。

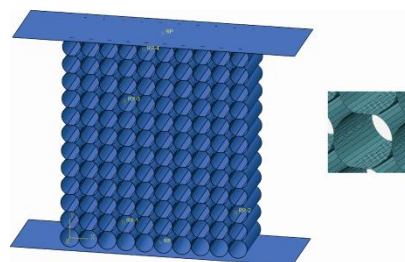


图5 有限元模型和网格设置

2.3 试验及模拟结果

如图6所示是铝圆管蜂窝在准静态面内压缩过程中的变形情况,可以发现钎焊铝圆管蜂窝的变形

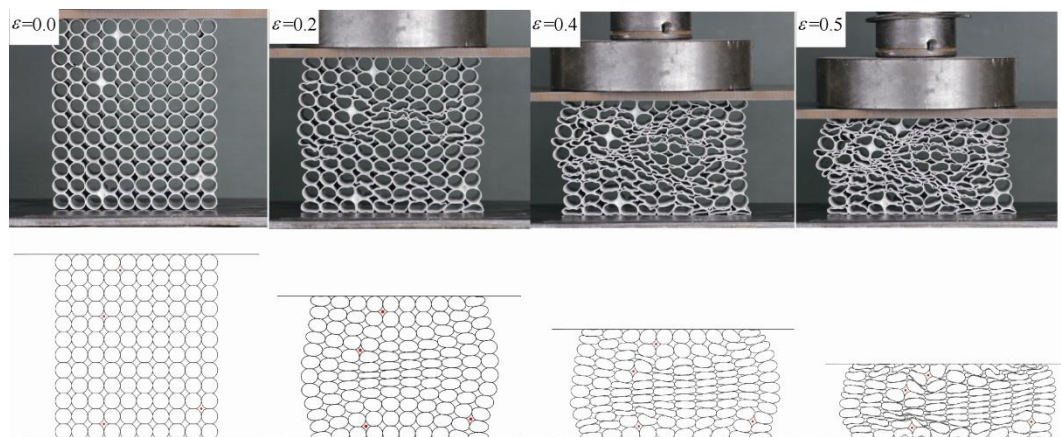


图6 钎焊铝圆管蜂窝准静态压缩变形过程

具有明显的局部化特征。压缩初期试样内部形成了一个对顶的双“V”变形带,紧接着“V”带两侧圆管不断闭合,试样高度减小,上下“V”型带相互错开,并且在试样靠下部分又形成了一条倾斜的变形带。随着压缩的进行,试样发生了倾斜,整个内部圆管都有了明显的变形,已经闭合的圆管在内部形成了一种“<”状分布。最后靠近密实区的圆管不断闭合,蜂窝趋于密实。对比有限元结果可以发现,模拟变形过程与试验基本相同,缺陷处的圆管的变形也相互一致。图 7 是蜂窝的应力-应变曲线,当考虑缺陷时的模拟曲线与试验曲线相互吻合,说明了有限元模拟结果的有效性。此外,图 7 还进一步说明了硬质缺陷对于弹性变形段以及塑性变形前部分影响较小,但使得圆管较早地发生密实化,减小了塑性变形段的区间。

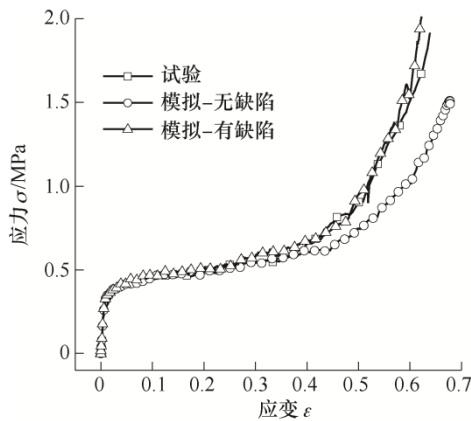


图 7 铝圆管蜂窝压缩应力-应变曲线

3 力学性能

3.1 相对密度

圆管蜂窝的相对密度主要取决于圆管的几何参数和排布形式,当考虑制备方法时,钎焊焊缝也会对其有影响。如图 8 所示是钎焊铝圆管蜂窝的代表体单元,其中 t 是指圆管的壁厚, r 为内径, R 为外径, ρ 是薄壁中心到原点的距离, α 表示横向焊缝的位置,相对密度 ρ^* 是指结构密度 ρ_c 除以材料本征密度 ρ_s 。由于纵向焊缝的长度较小,可以忽略不计,

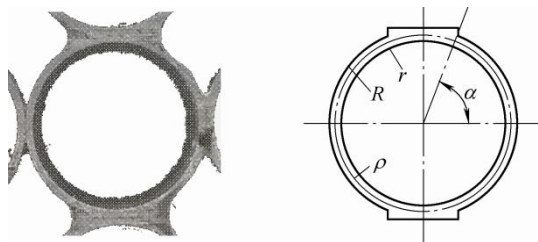


图 8 代表体单元

因此圆管蜂窝的相对密度可以表示如式(1)所示^[12]。该式中焊缝的位置通常是与圆管的半径有关,而圆管的壁厚对其影响较小。

$$\rho^* = \frac{\rho_c}{\rho_s} = \frac{2\pi R t - \pi t^2 + R^2 (4\cos\alpha - \sin 2\alpha)}{4R^2} - \frac{\arcsin(\cos\alpha)}{2} \quad (1)$$

如表 1 所示是外径都为 8 mm 而壁厚不同时蜂窝的相对密度,基于有限元模型分别对这六种壁厚的蜂窝进行准静态压缩模拟,得到了相应的应力-应变曲线,如图 9 所示。

表 1 不同壁厚蜂窝的相对密度

圆管外径/mm	壁厚/mm	相对密度
8	0.20	0.085
8	0.25	0.104
8	0.30	0.122
8	0.35	0.140
8	0.40	0.158
8	0.45	0.176

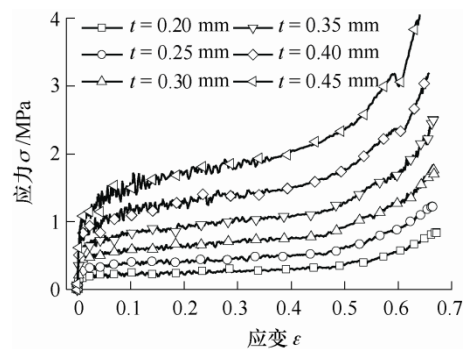


图 9 不同壁厚蜂窝的准静态压缩应力-应变曲线

3.2 等效弹性模量

等效弹性模量是蜂窝的重要弹性力学参数, GOTKHINDI 等^[10]就已经对正方形排列的圆环蜂窝的面内等效弹性模量进行了理论分析,得到式(2)。本文以此为基础研究了考虑焊缝影响时的圆管蜂窝的等效弹性模量,如图 10 所示是圆管在弹性变形段的受力示意图, p 是整个圆管上所受的力,初始弯矩为 M_0 ,圆管任意处所受的弯矩为 $M(\theta)$,圆弧段的弹性变形能 U 如式(5)所示,其中 E 和 I 是圆管的弹性模量和惯性矩。根据卡式定理求出弹性位移为 δ ,进一步可以得到弹性应变的大小为 ε ,而应力的大小为 σ ,假定圆管的外径为 8 mm,焊缝的尺寸不会因为圆管壁厚而发生变化,根据实际测量得到 $\alpha=1.19$,则等效弹性模量可以表示如式(6)所示。

$$E^* = \frac{4EI\pi}{(\pi^2 - 8)\rho^3} \quad (2)$$

$$M_0 = \frac{p\rho(\sin\alpha - \alpha)}{2\alpha} \quad (3)$$

$$M(\theta) = \frac{p\rho}{2} \left(\frac{\sin\alpha}{\alpha} - \cos\theta \right) \quad (4)$$

$$U = \int_0^\alpha \frac{[M(\theta)]^2}{2E'I} d\theta \quad (5)$$

式中, $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$, $I = \frac{t^3}{12}$ 。

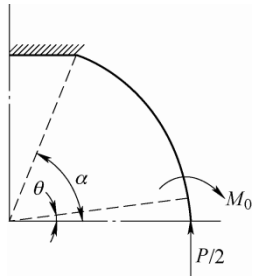


图 10 弹性变形受力示意图

由卡式定理可知

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial (p/2)}$$

又因为 $\varepsilon = \frac{\delta}{\rho \sin\alpha}$, $\sigma = \frac{p/2}{\rho(1-\cos\alpha)}$, 则

$$\frac{E^*}{E} = \frac{1.92}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{\rho} \right)^3 \quad (6)$$

如图 11 所示是不同相对密度下蜂窝等效弹性模量, 可以发现考虑焊缝时的解析解与模拟结果能够较好地吻合, 并且要高于不考虑焊缝时的 GOTKHINDI 解。由此说明, 钎焊焊缝导致蜂窝的等效弹性模量增大, 并且随着相对密度的增加, 增大作用越显著。刚性焊缝的存在使得能够发生变形的圆弧段减小, 因此导致结构的刚度增加。

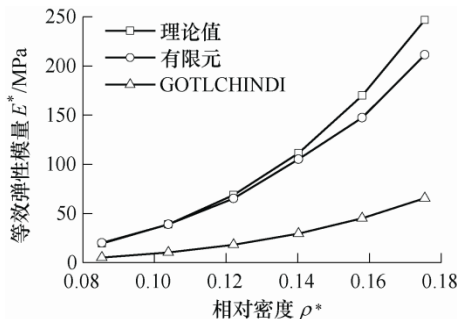


图 11 等效弹性模量与相对密度的关系

3.3 塑性初始屈服应力

从蜂窝的变形过程可知, 准静态压缩时会经历较长的塑性变形阶段, 但是由于材料硬化和相对密度的原因, 蜂窝的应力是不断增大的。塑性初始屈

服应力是蜂窝从弹性变形到塑性变形的转变点, 对于明确蜂窝的应力水平具有重要意义。如图 12 所示是圆管的破损模式, 由式(4)可以得到点 A 和点 B 的弯矩分别为 M_A 和 M_B , 假定点 A 和点 B 处都达到塑性极限弯矩 M_p , 则根据下界定理可以得到极限载荷如式(7)所示。 θ_A 和 θ_B 分别是 A 和 B 处的转角, 应用能量平衡可以得到极限载荷的上界如式(8)所示。

$$M_A = \frac{1}{2} p\rho \left(\frac{\sin\alpha}{\alpha} - \cos\alpha \right)$$

$$M_B = \frac{1}{2} p\rho \left(\frac{\sin\alpha}{\alpha} - 1 \right)$$

$$M_A - M_B = 2M_p$$

即

$$p \leq \frac{4M_p}{\rho(1-\cos\alpha)} \quad (7)$$

由能量平衡可知

$$\frac{1}{2} p\Delta = M_p(\theta_A - \theta_B)$$

$$\theta_A = -\theta_B = \frac{\Delta}{\rho(1-\cos\alpha)}$$

则

$$p \geq \frac{4M_p}{\rho(1-\cos\alpha)} \quad (8)$$

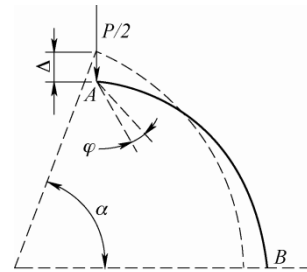


图 12 塑性变形机制

因此, 破损载荷

$$p = \frac{4M_p}{\rho(1-\cos\alpha)}$$

式中, $M_p = \frac{1}{4} \sigma_s t^2$, σ_s 是基体材料的屈服强度。

若取 $\alpha = 1.19$, 则塑性初始屈服应力 σ_0 可以表示为式(9); 当 $\alpha = \pi/2$ 表示无焊缝的理想圆管, 则塑性初始应力为式(10)。

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_s} = \frac{4}{5} \left(\frac{t}{\rho} \right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_s} = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{\rho} \right)^2 \quad (10)$$

如图 13 所示是不同壁厚蜂窝的初始屈服应力,

当考虑焊缝时理论计算值与有限元结果接近并且高于不考虑焊缝时的理想解, 说明钎焊焊缝使得蜂窝的塑性初始屈服明显增大, 而且随着相对密度的增大, 焊缝的影响作用越显著。

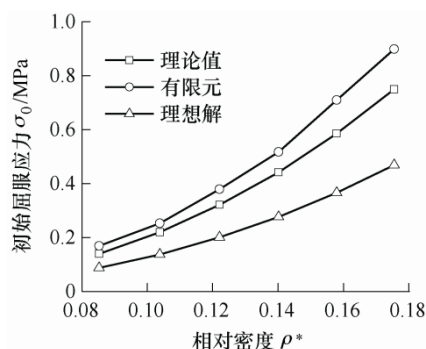


图 13 塑性初始屈服应力与相对密度的关系

4 结论

(1) 采用钎焊法能够制备铝圆管蜂窝材料, 加热温度和保温时间为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}+10\text{ min}$ 时可以获得良好的焊缝成形。

(2) 钎焊铝圆管蜂窝在准静态压缩过程分别会经历对顶双“V”到交错的双“V”再到“<”状变形局部特征, 应力-应变曲线在塑性变形段有一定硬化而向上翘起。

(3) 建立了考虑焊缝和缺陷时的圆管蜂窝的准静态压缩模型, 发现模拟所得圆管的变形特征和应力-应变曲线与试验结果趋于一致。同时还表明了钎焊的硬质缺陷会使得蜂窝较早发生密实。

(4) 给出了考虑焊缝影响时圆管蜂窝等效弹性模量和塑性初始屈服应力的理论公式, 并结合有限元结果说明了焊缝使得蜂窝的等效弹性模量和塑性初始屈服应力增大。

参 考 文 献

- [1] ORUGANTI R K, GHOSH A K. FEM analysis of transverse creep in honeycomb structures[J]. Acta Materialia, 2008, 56(4): 726-735.
- [2] ZHANG D, FEI Q, ZHANG P. In-plane dynamic crushing behavior and energy absorption of honeycombs with a novel type of multi-cells[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 117: 199-210.
- [3] 何强, 马大为, 张震东. 含随机填充孔圆形蜂窝结构的

面内冲击性能[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(3): 401-408.

HE Qiang, MA Dawei, ZHANG Zhendong. In-plane impact performance of circular honeycomb structures with random filling holes[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3): 401-408.

- [4] SHIM P W, STRONGE W J. Lateral crushing in tightly packed arrays of thin-walled metal tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1986, 28(10): 709-728.
- [5] CHUNG J, WAAS A M. Compressive response and failure of circular cell polycarbonate honeycombs under inplane uniaxial stresses[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1999, 121(4): 494.
- [6] KARAGIOZOVA D, YU T X. Strain localization in circular honeycombs under in-plane biaxial quasi-static and low-velocity impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8): 753-770.
- [7] CHUNG J, WAAS A M. The in-plane elastic properties of circular cell and elliptical cell honeycombs[J]. Acta Mechanica, 2000, 144: 29-42.
- [8] LIN T C, CHEN T J, HUANG J S. In-plane elastic constants and strengths of circular cell honeycombs[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(12): 1380-1386.
- [9] LIN T C, HUANG J S. In-plane mechanical properties of elliptical cell honeycombs[J]. Composite Structures, 2013, 104: 14-20.
- [10] GOTKHINDI T P, SIMHA K R Y. In-plane elastic responses of circular cell honeycombs and bundled circular tubes in a diamond array structure[J]. Composite Structures, 2015, 134: 311-330.
- [11] SUN D, ZHANG W, ZHAO Y, et al. In-plane crushing and energy absorption performance of multi-layer regularly arranged circular honeycombs[J]. Composite Structures, 2013, 96(4): 726-735.
- [12] AJDARI A, NAYEB-HASHEMI H, VAZIRI A. Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(3-4): 506-516.

作者简介: 张金山, 男, 1993 年出生。主要研究方向为金属点阵材料。
E-mail: 1220759345@qq.com
乔及森(通信作者), 男, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。
主要研究方向为轻金属材料、材料大变形与损伤。
E-mail: qiaojisen@lut.cn