DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.08.005

蜂窝铝材料的铸造工艺和压缩性能研究

李开妍,王　晗,郝　海
(大连理工大学 材料科学与工程学院,辽宁 大连 116024)

摘　要:通过数值模拟的方法对孔径尺寸分别为 10、8、6 mm 的 3 种蜂窝铝试样进行铸造工艺和压缩性能的模拟分析,并通过压缩性能测试对模拟结果进行验证。采用 ProCAST 软件对蜂窝铝的浇注过程进行数值模拟分析,对铸造工艺进行优化改进。采用 ABAQUS 软件分析孔径尺寸对蜂窝铝材料压缩性能的影响,并通过实验加以验证。结果表明:蜂窝铝材料压缩曲线共包括 3 个部分:弹性变形区、平台区和密实化区。随着孔径尺寸的减小,蜂窝铝材料抗压性能增强。孔径尺寸越大,蜂窝铝材料在弹性变形区和受力平台区停留的时间越长。

关键词:蜂窝铝;孔径尺寸;数值模拟;压缩性能

中图分类号:TB334　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)08-0772-06

Study on Casting Process and Compressive Property for Aluminum Honeycomb

LI Kaiyan, WANG Han, HAO Hai
(Material Science and Engineering School, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: This study simulated the casting process and the compressive performance of three aluminum honeycomb samples with pore sizes of 10, 8 and 6 mm were simulated, and the simulation results were validated by experimental data. ProCAST software was used to numerically simulate the filling and solidification process of aluminum honeycomb, and the casting process was optimized and improved by analyzing simulation results. The effect of pore size on the compressive performance of aluminum honeycomb was analyzed by ABAQUS software with reliable results under experimental verification. The results show that the compression curve of aluminum honeycomb includes three parts: elastic deformation zone, platform zone and compaction zone. The compressive load would increase with the decrease of the pore size and the increase of the relative density. And duration of elastic deformation zone and platform zone would increase in pace with the raising of the pore size.

Key words: aluminum honeycomb; pore size; numerical simulation; compressive property

人类对蜂窝结构材料的研究来源于对蜂窝巢穴和木材等的长期观察,这种结构材料不仅有较好的抗压缩、抗冲击性能,同时耐高温、耐腐蚀,具备良好的电磁波屏蔽性能、良好的导电、隔热、隔音等特性,在能源清洁、环境保护、汽车制造、航空航天、国防军事以及装饰装修等领域都有广泛的应用[1-3]。比如德国大众、日本本田、德国宝马等公司都已经围绕蜂窝铝材料展开研究,奥迪 A8 则已经利用这种材料生产汽车保险杠。

蜂窝材料传统的制备方法主要以钎焊和胶膜连接为主[4, 5],但是通过这两种方法制备的材料容易受到粘结强度的影响,不能保证力学性能的稳定。相比之下,渗流铸造法制备的材料成分均匀、抗压性能更好[6],但是铸模制作工艺复杂,成本较高,对于结构复杂的铸件,制备难度较大。除此之外,对蜂窝铝材料的研究多围绕冲击载荷下的受力分析[7, 8],欧阳昊[9]等利用 LS-DYNA 计算模拟软件,分析双臂厚蜂窝铝在冲击条件下的面内变形模式和能量吸收规律。吴晖[10]等利用落锤装置进行蜂窝铝芯冲击试验,并用 ABAQUS 软件分析同种载荷条件下蜂窝铝夹芯的力学性能。力学性能数值模拟研究,不仅可以降低实验成本,还可以分析蜂窝材料在不同条件下的力学性能表现,提高研究效率。

1　蜂窝铝材料结构设计

对于同样孔径尺寸的蜂窝铝材料,正六边形的结构密合度高于正方形、正三角形等其他形状,制备过程中所需材料最少且可使用空间最大[2],因此本实验对具有不同孔径尺寸的正六边形蜂窝铝材料进行研究,三维几何结构如图 1,其中周期性单元孔径尺寸为 l,内壁厚度为 t,根据 Gibson L J 等的研究,

收稿日期:2019-04-12
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0701204)
作者简介:李开妍(1994-),女,辽宁鞍山人,硕士生.研究方向:蜂窝铝的制备及性能研究.电话:0411-84709458,E-mail:494492842@qq.com

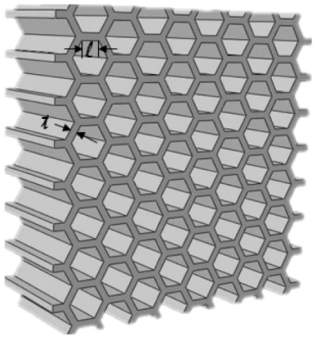


图 1 蜂窝铝结构示意图
Fig.1 Aluminum honeycomb structure diagram

正六边形蜂窝材料的相对密度为[2]

$$\frac{\rho^*}{\rho_s}=2\sqrt{3}\,t/l\left(1-\frac{\sqrt{3}}{2t}/l\right) \qquad (1)$$

式中，ρ^* 和 ρ_s 分别为正六边形蜂窝铝材料的实际密度和基体材料的密度。为了更好地比较不同孔径尺寸和相对密度对材料压缩性能的影响，本实验将 t 固定为 4 mm，分别选取 l 为 10、8、6 mm 进行研究，则根据公式(1)可得这 3 个实验样品的相对密度分别为 0.41、0.49、0.62。具体的实验试样尺寸如表 1。

表1 蜂窝铝材料试样尺寸
Tab.1 Aluminum honeycomb sample size

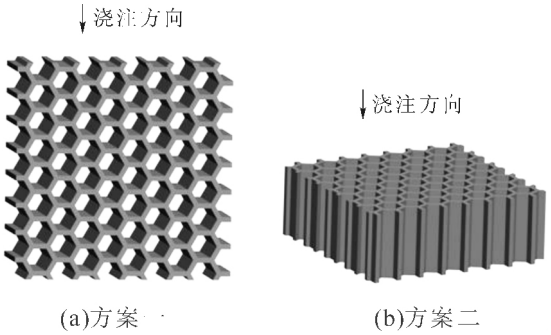
试样编号	孔径边长 l/mm	内壁厚度 t/mm	相对密度
1	10	4	0.41
2	8	4	0.49
3	6	4	0.62

2 铸造工艺设计及数值模拟分析

本实验采用渗流铸造法进行蜂窝铝材料制备。这种铸造工艺成本较低，与金属型铸造相比，砂型的导热系数较小，可以减慢温度下降速度，保证金属液能够长时间停留在高温范围内，提高充型质量。同时，砂型铸造可以通过去除型砂获得铸件，操作简单方便。但是由于材料的胞孔数量较多，孔隙率较大，凝固后容易出现冷隔和浇不足的缺陷，因此需要设计合理的浇注系统。

2.1 浇注位置设计

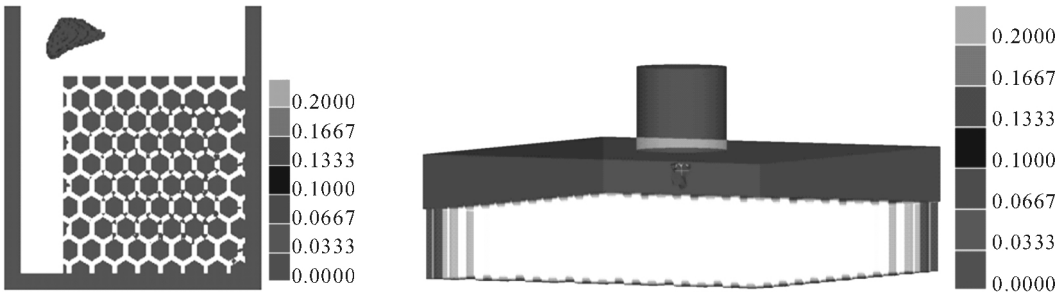
蜂窝材料浇注位置的选择对铸件的质量会产生很大的影响，如图 1 所示，所设计的蜂窝材料尺寸为 170 mm×170 mm×25 mm，有两个大小不同的截面，因此提出两种浇注方案：方案一和方案二，如图 2 所示。方案一为将蜂窝材料竖直放置，顶部浇注金属液，依靠其重力，金属液进行纵向和横向流动并充满型腔。这种条件下，金属液流动距离过长，流经胞孔数量较多，流动阻碍更大，容易形成较多的缩孔等缺陷。方案二是将蜂窝材料水平放置，金属液从顶部充填铸型，在重力作用下，通过其纵向和横向流动充满型腔。对于这种方法，金属液在充型过程中流动距离较短，流经胞孔数量较少，遇到的阻碍较小，铸件凝固后形成的缩孔等缺陷较少。



(a)方案一　　(b)方案二

图 2 浇注位置示意图
Fig.2 Pouring position design diagram

采用 ProCAST 软件对以上两个方案分别进行数值模拟。由于本次实验中砂型和铸件均出现薄壁设计，为保证边界处网格接触良好，将砂型和铸件的网格尺寸分别设定为 5 mm 和 2 mm，得到四面体网格数分别为 202 342 和 113 580。模拟计算得到两种方案下的铸件缩松缩孔分布图，如图 3 所示。从图中可以观察到，方案一中大量的薄壁结构会对金属液的流动造成更大阻碍，影响铸件的完整性，铸件凝固后更容易出现缩孔等缺陷。而在方案二中，缩孔主要集中在冒口部位，得到的铸件形状完整，因此选择方案二的浇注位置进行本次实验的铸造设计。



(a)方案一　　(b)方案二

图 3 不同方案的缩松缩孔分布图
Fig.3 Distribution diagram of shrinkage porosity in different projects

2.2 铸造工艺数值模拟

通过查阅铸造手册[11]，结构尺寸为 170 mm×170 mm×25 mm 的纯铝铸件，浇注系统的高度为 50 mm（如图 4），冒口的尺寸为 20 mm，浇口的尺寸为 ϕ40~ϕ70 mm。通过 Pro/Engineer 软件对蜂窝铝材料 3 个试样进行实体建模，将模型导出为.ans 格式的文件，然后将其分别导入 ProCAST 软件中进行铸造工艺模拟。其中，选用的金属材料为 Pure Al，铸型材料为 Sand，砂型和铸件间的换热系数为 500 W/m^2·℃，预热温度为 200 ℃，浇注温度为 750 ℃，浇注时间为 5 s。

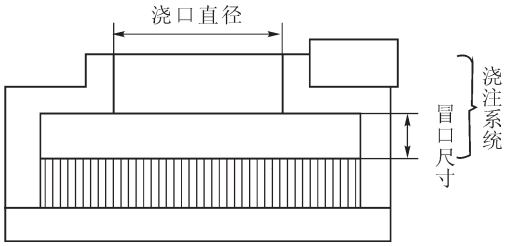
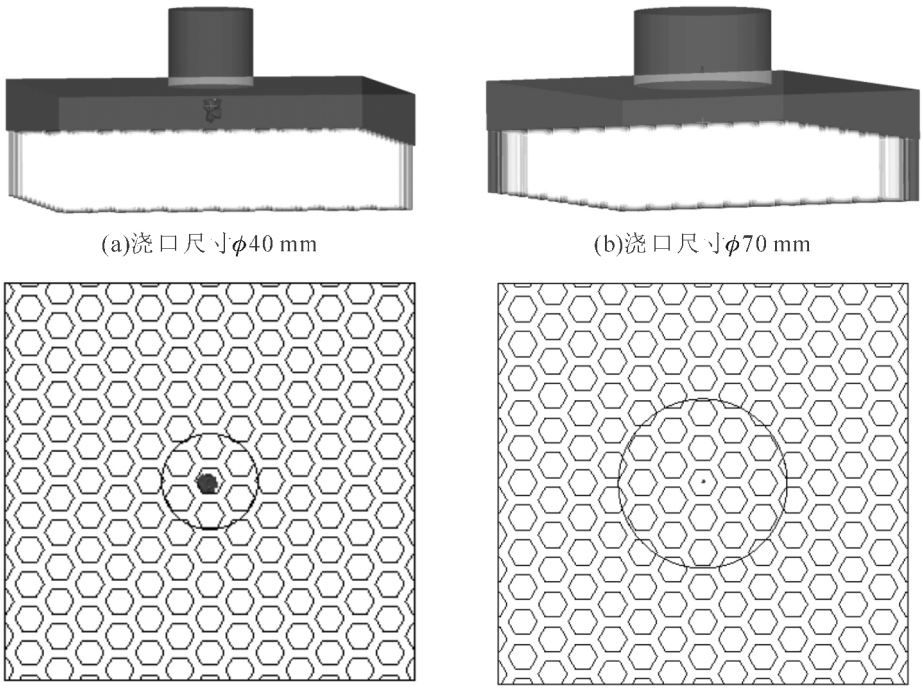


图 4 浇注系统结构示意图
Fig.4 Gating system structure diagram

为了降低实验成本，提高研究效率，本次实验对浇口尺寸为 ϕ40 mm 和 ϕ70 mm 的模型分别进行铸造模拟，得到两个模型的缩松缩孔模拟分布图（如图 5）。从图中看出，浇口尺寸为 ϕ40 mm 的模型，缩孔位置靠近蜂窝铝且体积较大，容易破坏铸件的完整性。而浇口尺寸为 ϕ70 mm 的模型，缩孔位置集中在浇口处，且体积较小。结合模型的凝固时间分布图（如图 6），可以观察到在浇口尺寸为 ϕ40 mm 的模型凝固过程中，靠近铸件芯部位置凝固时间最长，与图 5(1)的结果一致。而对于浇口尺寸为 ϕ70 mm 的模型，浇口位置凝固时长最长，且涉及的部位体积较小，对蜂窝铝凝固成型影响较小，得到完整铸件的可能性更大，因此确定浇口尺寸为 ϕ70 mm。

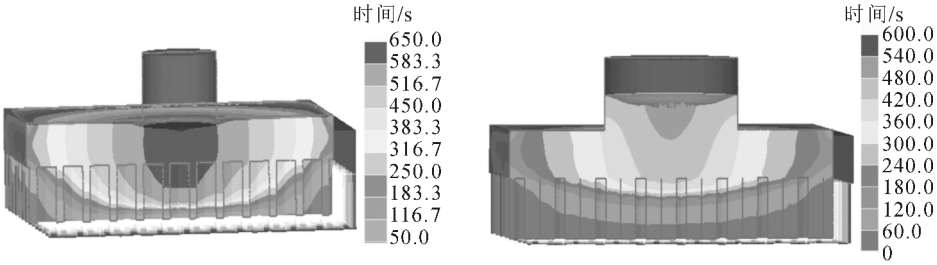
按照确定好的铸造工艺参数对 3 个试样分别进行铸造工艺模拟，并得到缩松缩孔分布图（如图 7），



(a)浇口尺寸ϕ40 mm　(b)浇口尺寸ϕ70 mm

(c)浇口尺寸ϕ40 mm模型俯视图　(d)浇口尺寸ϕ70 mm模型俯视图

图 5 不同浇口尺寸模型的缩松缩孔分布图
Fig.5 Distribution diagram of shrinkage porosity with different gate sizes



(a)浇口尺寸ϕ40 mm　(b)浇口尺寸ϕ70 mm

图 6 不同浇口尺寸模型的凝固时间分布图
Fig.6 Distribution diagram of solidification time with different gate sizes

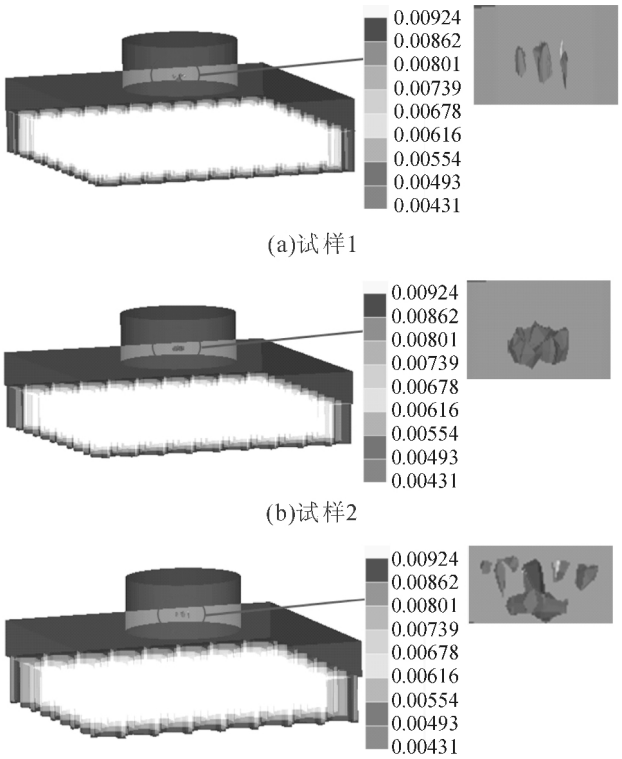


图 7 铸造工艺模拟缩松缩孔分布图

Fig.7 Shrinkage porosity simulation results in casting process

图例表示单位体积铸件内缩松缩孔所占比率。从图中看出，缩孔体积随着孔径尺寸减少逐渐增大，且在单位体积铸件中所占比率不断增大，对于试样 3，局部缩孔体积分数可达到 0.008~0.009。可以得出结论：对于蜂窝铝铸件，孔径尺寸越小，铸件的缩孔体积越大，浇注难度越大。

3 力学性能数值模拟及分析

采用 ABAQUS 软件对 3 个试样进行压缩模拟分析，计算模型如图 8 所示，蜂窝铝材料被放置在上下刚性板 A、B 之间，下刚板 B 固定，使上刚板 A 沿纵向发生位移。基体材料选为金属铝，杨氏模量为 69 GPa，泊松比为 0.33，密度为 2 700 kg/m^3，接触类型选择自接触，网格类型为 C3D8R，网格尺寸为 2 mm，网格数量是 10 990。

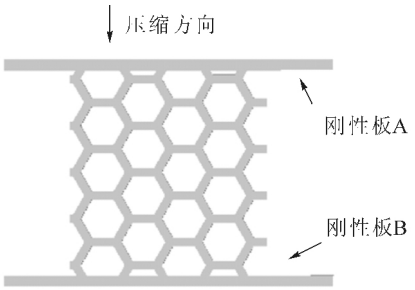


图 8 蜂窝铝材料压缩实验示意图

Fig.8 Aluminum honeycomb compression test diagram

利用计算机进行数值模拟，可以分析得出孔径尺寸和相对密度对蜂窝铝材料压缩性能的影响。图 9 是试样 1 的压缩过程数值模拟结果图，从图中可以发现，在压缩受力初期，蜂窝铝材料中间部分开始发生挤压变形，随着压缩过程的持续进行，变形逐渐延伸到上下两端，直至整个多孔材料被完全压实。试样 2 和试样 3 的结果与此类似。分别取 3 个试样上刚性板 A 的中心作为参考点，并导出其承受的作用力随变形量的变化曲线，进行分析比较，如图 10，从图中可以发现，每个试样的压缩曲线均可以分为 3 个部分：弹性变形区、平台区和密实化区。在弹性变形区阶段，蜂窝铝材料受力随着变形量的增加呈线性增长，材料发生弹性变形；在受力平台区中，随变形量的增加，材料受力增加比较平缓，发生塑性变形；直到变形至密实化区，蜂窝铝材料的孔壁相互接

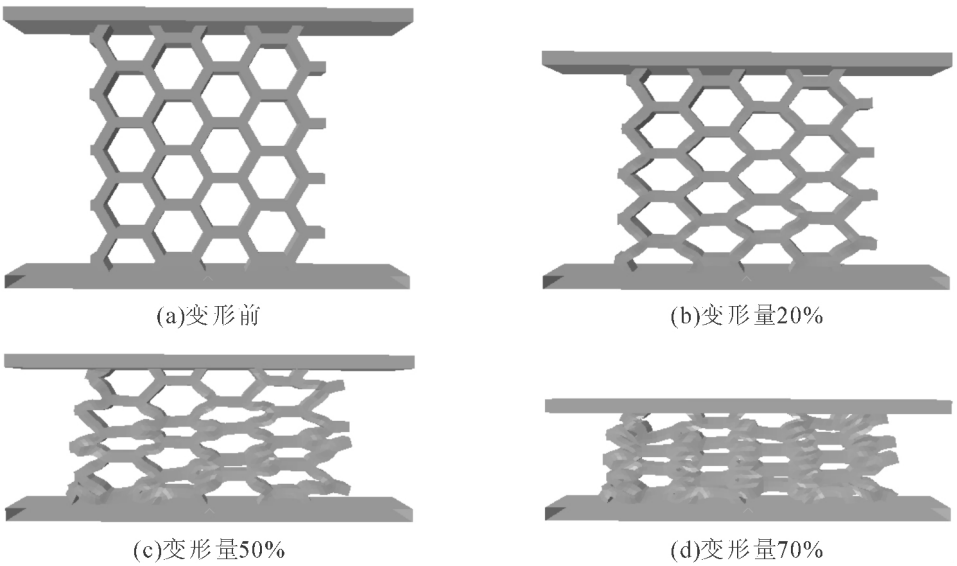


图 9 试样 1 压缩过程数值模拟结果图

Fig.9 Numerical simulation process of sample 1

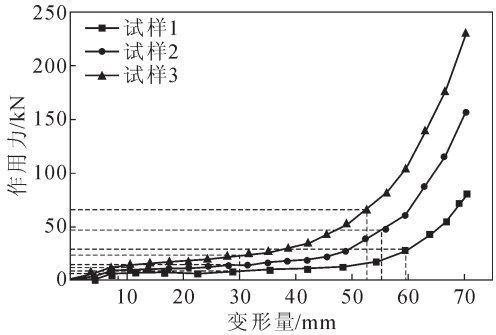


图 10 试样 1.2.3 模拟压缩作用力–变形量曲线对比图
Fig.10 Comparison graph of simulated compression deformation curves of samples 1.2.3

触，被完全压实。

由图 10 可知，随着孔径尺寸的减小和相对密度的增加，蜂窝铝材料进入受力平台区所承受的力逐渐提高，抗压性能不断增强。在 3 个试样受力达到平台期，变形量均为 30 mm 时，试样 1 受力为 8.9 kN，试样 2 受力为 14.5 kN，而试样 3 受力可达到 23.9 kN。这是由于孔径尺寸越小，蜂窝铝材料中孔的数量越多，对力在蜂窝材料中的传播阻碍越大，从而提高了材料整体的抗压性能。同时，孔径尺寸越大，蜂窝铝材料在弹性变形区和受力平台区停留的时间越长，进入受力平台区和密实化区域时间越晚，这与 Mohamed ShehataAly[12]等的研究结果类似。

4 压缩力学性能实验及分析

与试样 2 和 3 相比，试样 1 的孔径尺寸最大，为 10 mm，铸造砂型制备过程最简单，浇注工艺可行性最大。因此本次实验以试样 1 为例，将其按照 ProCAST 软件设计的铸造工艺方案进行制备，得到蜂窝铝铸件，如图 11 所示。并将铸件的下端固定，保证在 ABAQUS 数值模拟的同等条件下进行压缩力学性能测试，得到压缩过程示意图，如图 12。

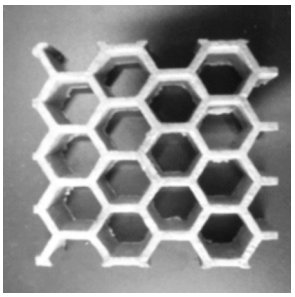
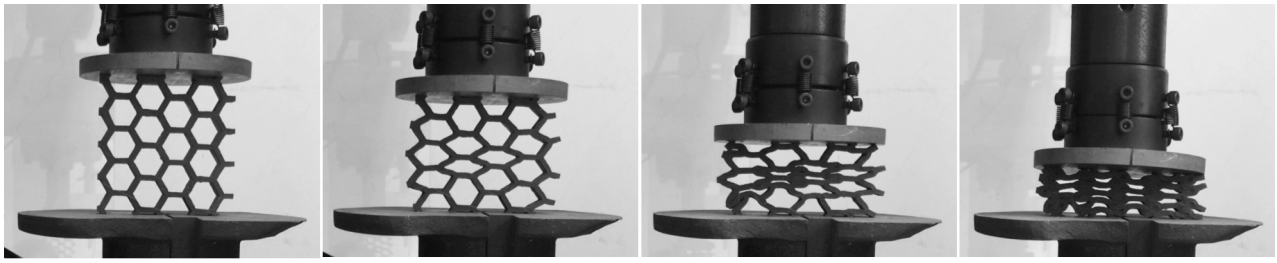


图 11 试样 1 蜂窝铝铸件图
Fig.11 Aluminum honeycomb casting for sample 1

从图 12 中可以看出，蜂窝铝在压缩过程中，中间部分率先开始发生塑性变形，随着变形量的增加，变形逐渐延伸至上下两端，最后蜂窝形状被完全压实。与图 9 进行对比后可以发现，实验结果与模拟预测结果基本吻合。

将实验过程中得到的作用力–变形量曲线与模拟得到的曲线进行对比分析，得到图 13，图中可以发现，两条曲线基本吻合，但是在一些地方仍存在偏差。在初期的弹性变形阶段，实验得到的曲线斜率明显高于模拟得到的结果，这是因为实验所用的蜂窝铝铸件制备过程存在误差，与模拟所用的模型在尺寸上略有偏差。如图 14 所示，铸件的壁厚实际测量尺寸为 5.04 mm，比结构设计的尺寸 4 mm 大，因此



(a)变形前　(b)变形量20%　(c)变形量50%　(d)变形量70%

图 12 蜂窝铝材料压缩过程变形图
Fig.12 Deformation diagrams of aluminum honeycomb during compression

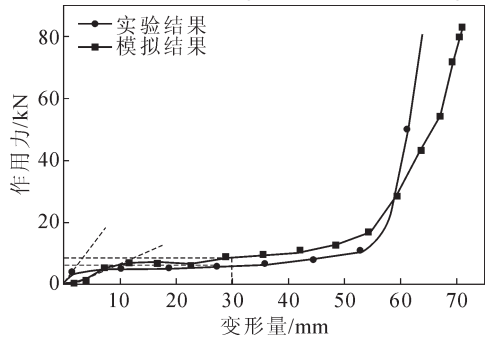


图 13 试样 1 压缩性能模拟和实验结果对比图
Fig.13 Comparison graph of compression simulation and experimental results for sample 1

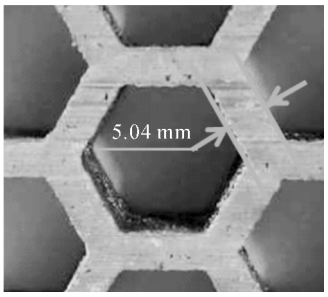


图 14 蜂窝铝材料单元结构图
Fig.14 Unit structure of aluminum honeycomb

铸件实体体积较大，相对密度较大，导致蜂窝铝材料在弹性变形阶段的受力随着变形量增加而增长较快。在受力平台区，数值模拟结果始终略高于实验所得数据，这是由于样品在制备中存在缺陷和误差，在进行力学实验过程中也受到来自实验设备和操作上的误差影响，但是总体变化趋势保持一致。总之，蜂窝铝的压缩力学实验结果与数值模拟结果基本吻合，可以证明 ABAQUS 软件模拟计算结果具有可靠性，本研究可为后续蜂窝铝材料的结构设计和性能优化工作提供基础。

5　结论

本次实验对蜂窝铝材料进行孔径尺寸为 10、8、6 mm 的结构设计，采用 ProCAST 软件选择合理的浇注位置，并进行铸造过程的模拟分析，发现铸件缩孔体积随着孔径尺寸的减少逐渐增大。采用 ABAQUS 软件对 3 个试样进行压缩力学性能模拟分析，结果表明，蜂窝铝材料压缩曲线共包括 3 个部分：弹性变形区、平台区和密实化区。随着孔径尺寸的减小和相对密度的增加，蜂窝铝材料抗压性能不断增强，平台区受力大小不断提高。孔径尺寸越大，蜂窝铝材料在弹性变形区和受力平台区停留的时间越长，进入受力平台区和密实化区域时间越晚。将铸件的压缩性能测试结果与模拟结果进行比较后发现，实验数据与模拟结果基本吻合，ABAQUS 数值模拟计算结果具有可靠性。

参考文献：

[1] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al. Metal Foams: A Design Guide[M]. Worburn:Butterworth-Heinemann, 2000.

[2] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solid: Structure and Properties [M]. Cambridge: Cambridge University Press,1997.

[3] Fotsing, E.R., et al.. Mechanical properties of composite sandwich structures with core or face sheet discontinuities [J]. Composites Part B: Engineering, 2016(88): 229-239.

[4] 张敏，于九明. 金属夹芯复合板及其制备技术的发展[J]. 焊接技术, 2003(6): 21-23.

[5] 刘艳辉，杜鹏. 金属蜂窝夹层板的研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2013(1): 9-11，15.

[6] 王宏伟，李庆芬，朱兆军，等. 钛蜂窝体制备及压缩性能研究[J]. 宇航材料工艺，2007(4):42-45.

[7] 胡玲玲，蒋玲. 胞孔构型对金属蜂窝动态力学性能的影响机理[J]. 爆炸与冲击，2014，34(1):41-46.

[8] 刘颖，张新春. 胞元微拓扑结构对蜂窝材料面内冲击性能的影响[J]. 爆炸与冲击, 2008(6): 494-502.

[9] 欧阳昊，成伟. 基于 LS-DYNA 的双壁厚蜂窝铝变形模式和能量吸收[J]. 材料导报，2015(s2):160-163.

[10] 吴晖，邹广平，刘岚，等. 基于落锤装置的蜂窝铝夹芯结构动力学特性[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2018, 32(4): 268-273.

[11] 黄天佑，柳百成. 铸造成型手册 [M]. 北京: 化学工艺出版社, 2009.

[12] Mohamed Shehata Aly. Behavior of closed cell aluminium foams upon compressive testing at elevated temperatures: Experimental results[J]. Materials Letters, 2007(66)：3138-3141.

新书邮购

《消失模铸造工艺学》

《消失模铸造工艺学》由化学工业出版社2019年5月20日出版发行。（书号：ISBN978-7-122-34175-4）

《消失模铸造工艺学》作者刘立中，历经三十多年现场实践经验的总结和理论的升华。全书总结136个案例，选用1718帧彩色照片，撰写583千字创造性的提出了消失模铸造“三场理论”，详细解读在“流场、热场、负压场”理论指导下的“消失模铸造浇注系统设计原则”，提出了“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”新的理念，在国内外均属首创。奠定了消失模铸造的理论基础，提出了消失模铸造研究与发展的方向。

定价：498元

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　微信：13991824906