

基于 X-CT 的泡沫铝孔隙结构及变形行为分析

牛杰¹, 和西民^{2*}, 曹少俊², 刘雄飞²

(1. 常州工程职业技术学院 建筑工程学院, 江苏 常州 213164;

2. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: **目的** 探究孔隙结构对泡沫铝力学性能及变形失效模式的影响。**方法** 以均质泡沫铝(L型、M型、H型)及梯度泡沫铝(LMH型)为研究对象,通过X-CT统计分析不同密度泡沫铝的支柱厚度、孔径分布、面孔隙率、球形度和分形维数,进一步结合数值仿真方法研究均质及梯度泡沫铝结构的静态变形失效模式。**结果** 不同密度泡沫铝支柱厚度主要集中在0.2~1.0 mm,且0.6~0.8 mm厚度的支柱数量约占总量的1/3。泡沫铝孔径主要分布在0~0.5 mm,不同密度泡沫铝在不同方向的面孔隙率较为均匀。梯度泡沫铝在静态压缩下的变形失效呈逐层压溃破坏模式,而均质泡沫铝主要在内部胞孔壁厚较薄区域首先出现裂纹,然后向四周延伸直至破坏。**结论** 支柱厚度显著影响泡沫铝力学性能;泡沫铝分形维数值越大,孔隙结构越复杂;从数值仿真角度再现泡沫铝压缩的过程,为梯度泡沫铝的优化设计提供一定参考。

关键词: 泡沫铝; 孔隙结构; 变形行为; X-CT; 数值模拟

中图分类号: TB30

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)05-0265-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.034

Analysis of Pore Structure and Deformation Behavior of Aluminum Foam Based on X-CT

NIU Jie¹, HE Ximin^{2*}, CAO Shaojun², LIU Xiongfei²

(1. School of Architectural Engineering, Changzhou Vocational Institute of Engineering, Jiangsu

Changzhou 213164, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering,

Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the influence of pore structure on the mechanical properties and deformation failure modes of foam aluminum. Focusing on homogeneous foam aluminum (L, M, and H) and gradient foam aluminum (LMH), an X-ray computed tomography (X-CT) statistical analysis was conducted to examine the column thickness, pore size distribution, surface porosity, roundness, and fractal dimension of foam aluminum with varying densities. Additionally, numerical simulation methods were applied to analyze the static deformation failure modes of both homogeneous and gradient foam aluminum structures. The results indicated that the column thickness of foam aluminum, across different densities, was predominantly concentrated between 0.2 and 1.0 mm, with approximately one-third of the column thicknesses falling within the range from 0.6 to 0.8 mm. The pore size distribution of foam aluminum was mainly observed to range from 0 to 0.5 mm. Surface porosity was found to be relatively uniform across all directions for foam

收稿日期: 2024-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(52278252); 河北省自然科学基金(E2023202258); 江苏省建设系统科技项目(2024ZD048); 常州工程职业技术学院科研基金(11130300124001)

*通信作者

aluminum with different densities. Under static compression, the deformation failure mode of gradient foam aluminum was characterized by layer collapse, whereas the failure mode of homogeneous foam aluminum primarily involved crack formation in the thin-walled regions of internal cellular pores, followed by the propagation of these cracks to the surrounding areas, ultimately leading to structural failure. In conclusion, the thickness of the struts significantly influences the mechanical properties of aluminum foam. The larger the fractal dimension value of aluminum foam, the more complex its pore structure. Reproducing the compression process of aluminum foam through numerical simulation can provide some reference for the optimization design of gradient aluminum foam.

KEY WORDS: foamed aluminum; pore structure; deformation behavior; X-CT; numerical simulation

泡沫铝是在纯铝或铝合金中加入添加剂后,经过发泡工艺制备而成的一种新型材料,兼有金属和气泡的特征。近年来,泡沫铝在工程防护领域得到广泛应用,对其性能的研究成为目前学者关注的焦点^[1-5]。X射线计算机断层成像(X-Ray Computed Tomography, X-CT)是一种无损检测技术,可在不破坏样品情况下对样品内部缺陷进行检测。Hangai等^[6]通过X-CT连续观察压缩实验过程中梯度泡沫铝内部孔隙结构的变形行为和孔体积的变化,并通过改变孔隙结构,实现平台应力的可控性。Morankar等^[7]利用CT技术综合分析了聚氨酯泡沫铝的结构特征,主要在长度方向进行深入表征。Xiao等^[8]研究不同胞孔直径泡沫铝的变形行为、损伤模式和损伤机理;结果表明,泡沫铝的抗压性能随着胞孔直径的变化发生显著的变化;随着胞孔直径的增加,归一化初始损伤应力和弹性模量增大,导致能量吸收增强;胞孔直径的增加会对能量吸收效率产生负面影响,导致不稳定性增加。Shen等^[9]研究不同密度泡沫铝的压缩情况,发现峰值应力和能量吸收能力随着密度的增加而增加。结果表明,密度对泡沫铝的动态力学性能和能量吸收能力起着显著的作用,且呈正相关关系。还有一些研究表明,胞孔几何形状^[10-13]对泡沫铝的力学性能及变形失效模式具有十分重要的影响。

目前对泡沫铝变形失效模式的研究更多是从泡沫铝密度和宏观变形形貌来判别,虽能得到一定研究结论,但这些并非研究的重点。此研究最重要的是分析不同密度泡沫铝的孔隙结构与变形失效模式之间的关系,并从泡沫铝微细观角度探索不同密度泡沫铝变形失效模式差异产生的原因。

本文基于3种不同密度的泡沫铝(L型、M型、H型)和梯度泡沫铝(LMH型),通过X-CT、压缩测试、压缩数值仿真等方法对泡沫铝孔隙结构(支柱厚度、孔径分布、球形度)进行分析,并研究孔隙结构对泡沫铝变形失效模式的影响,从数值仿真角度再现泡沫铝压缩的过程,为梯度泡沫铝优化设计提供一定的参考。

1 实验及测试方法

1.1 试样制备

本研究所需泡沫铝包括均质泡沫铝、梯度泡沫铝2种,涉及低(L型, 0.30 g/cm^3)、中(M型, 0.39 g/cm^3)和高(H型, 0.50 g/cm^3)3种密度,包括L型、M型、H型、LMH型4种泡沫铝试样。其中,均质泡沫铝是将不同密度的泡沫铝板加工成尺寸为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的正方体;梯度泡沫铝是将L型、M型、H型泡沫铝利用界面黏结剂沿厚度方向粘贴在一起组成夹芯面板结构。

1.2 测试方法

1.2.1 X-CT测试

泡沫铝的孔壁厚度、孔径分布、孔隙形态对其力学性能具有重要的影响。为在不破坏样品的前提下探究不同密度泡沫铝的孔隙结构,本文采用X-CT无损测试技术。设备型号为YXLON FF35-CT,系统配置参数如下:探测器像素分辨率为 $139 \mu\text{m}$,图像为16位灰度数据,分辨率约为 $15 \mu\text{m}$,切片数量为1080片,扫描时间约为30 min。将测试的二维切片通过Avizo软件进行三维结构重建,分析泡沫铝 xy 面、 xz 面、 yz 面的面孔隙率和分形维数,并进一步分析不同密度泡沫铝的孔隙形态,以期探究泡沫铝在压缩过程中的变形失效机理提供一定的参考。

1.2.2 压缩测试

由文献[14]可知,准静态压缩实验在WAW-300型电子万能试验机上进行,压缩应变率为 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。为保证实验结果的可靠性,每种不同密度的泡沫铝在相同应变率下进行3次压缩实验,然后取平均值作为最终的实验数据。

1.2.3 孔隙结构评估方法

为分析不同密度泡沫铝的三维孔隙结构,使用Avizo软件的阈值分割命令对泡沫铝骨架和孔隙进行分离,将提取的骨架结构进行图像叠加,得到不同密度泡沫铝的三维重建结构,如图1所示^[15]。

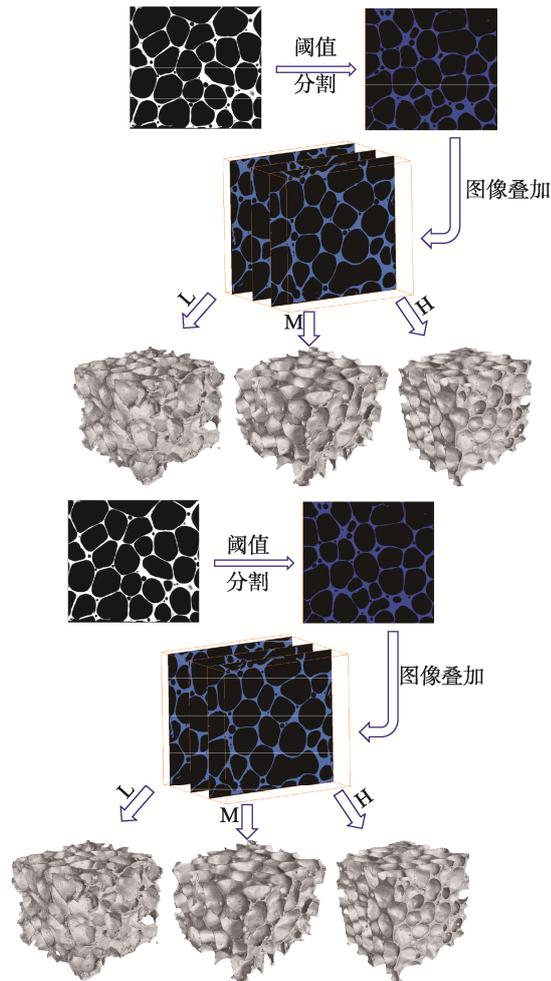


图 1 X-CT 三维重建方法

Fig.1 X-CT three-dimensional reconstruction method

重建完成后, 分析不同密度泡沫铝的孔隙结构, 主要对支柱厚度、孔径分布、分形维数、球形度展开具体分析, 探究孔隙结构与泡沫铝力学性能之间的关系。

2 实验结果与讨论

2.1 支柱厚度分析

影响泡沫铝力学性能的因素除孔径外, 还包括支柱厚度。支柱厚度是指相邻两孔之间的壁厚, 常用的计算方法为球体法。图 2a 为不同密度泡沫铝的支柱厚度分布, 可见不同密度泡沫铝支柱厚度主要集中在 0.2~1.0 mm, 且支柱厚度在 0.6~0.8 mm 的数量约占总数的 1/3。支柱厚度 > 1 mm 的区域随泡沫铝密度的增加而增大, 说明 H 型泡沫铝壁厚大的区域较 L、M 型多。在 L、M、H 型泡沫铝中, 支柱厚度 < 0.6 mm 的频率分别为 48%、47%、37%, 说明 L 型泡沫铝壁厚小的区域大于 M、H 型, 而 M 型泡沫铝介于 L、H 型之间。

2.2 孔结构分析

2.2.1 孔径分布及均匀性

图 3a 为泡沫铝孔径分布, 可见泡沫铝的孔径主要集中在 0~0.5 mm。L、M 和 H 型泡沫铝中, 孔径在 0~0.5 mm 的数量分别占总数的 71.00%、88.58% 和 82.42%, 而孔径 > 5.0 mm 的数量分别占总数的 3.2%、1.0%、1.8%, 说明 L、M、H 型泡沫铝均以小孔为主, 但 L 型泡沫铝中大孔的数量明显高于 M、H 型泡沫铝。由图 2 可知, L 型泡沫铝的壁厚较 M、H 型小, 进一步说明 L 型泡沫铝大孔附近存在大量的微孔, 导致 L 型泡沫铝的壁厚较小。

在保证轻量化的前提下, 各向同性是影响泡沫铝力学性能的重要因素, 而泡沫铝的各向同性可用面孔隙率的均匀性来表征。为分析泡沫铝孔隙分布的均匀性, 沿 x 、 y 、 z 3 个方向对泡沫铝的面孔隙率进行统计分析, 结果如图 3b~d 所示。由图 3b~d 可知, L、M、H 型泡沫铝在 xy 、 xz 、 yz 面的面孔隙率范围分别为 81.00%~82.00%、79.00%~81.67%、76.00%~80.41%, 说明不同密度泡沫铝在不同方向的面孔隙率较均匀, 进一步说明均质泡沫铝 (L、M、H 型) 受压缩方向的影响很小。

分形维数的建立为描述不规则几何形状的复杂程度提供了重要理论基础和有效方法, 分形维数理论是定量描述二维、三维空间孔隙结构复杂性的有效工具。本研究利用 Avizo 软件统计 L、M、H 型泡沫铝在 xy 、 xz 、 yz 面的分形维数, 结果如图 3b~d 所示。由图 3b~d 可知, 对于同一种泡沫铝, 3 个面的分形维数数值接近, 误差控制在 1.5% 左右。对不同泡沫铝的分形维数进行统计并取平均值, 发现 L、M、H 型泡沫铝的分形维数分别为 1.30、1.32、1.34。分形维数的数值越大, 表明孔隙结构越复杂, 说明 L 型泡沫铝中大孔附近的微孔数量较 M、H 型泡沫铝少, 而 H 型泡沫铝中大孔附近附着的微孔数量最多, 且微孔与大孔之间的距离较 L、M 型大, 这也是导致 H 型泡沫铝壁厚较 L 型泡沫铝大的原因。

2.2.2 球形度

孔隙形状对泡沫铝的力学性能具有重要影响, 可用球形度表征。球形度是定量表征孔隙性状和实球体接近程度的指标, 物理意义是与孔隙体积相同的球体表面积和孔隙表面积之比^[15], 具体见式 (1)。

$$\phi = \frac{\sqrt[3]{\pi(6V)^2}}{A} \quad (1)$$

式中: V 为孔隙体积; A 为孔隙表面积。

不同密度泡沫铝的球形度分布如图 4 所示, 可见 L、M、H 型泡沫铝的球形度主要分布在 0.59~0.60、0.63~0.64、0.66~0.68。H 型泡沫铝的球形度最大, 说明其内部接近圆形的胞孔数量高于 L、M 型。胞

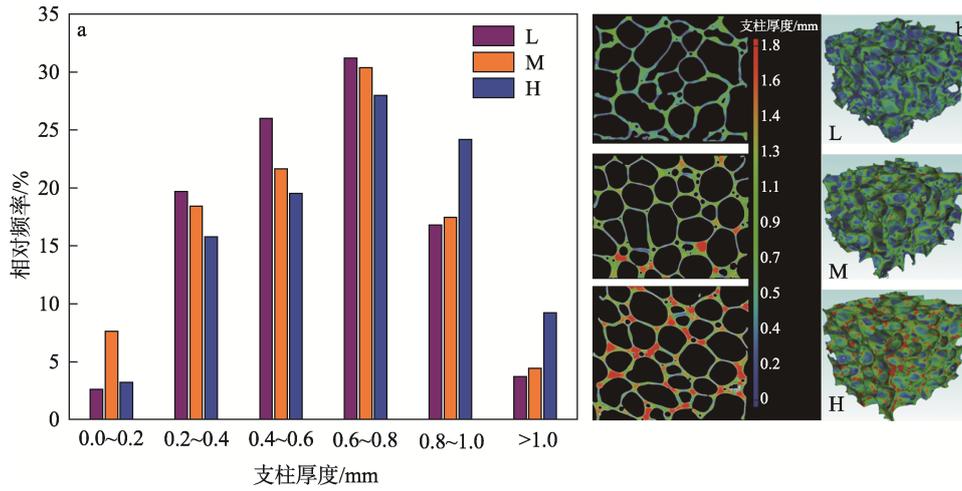
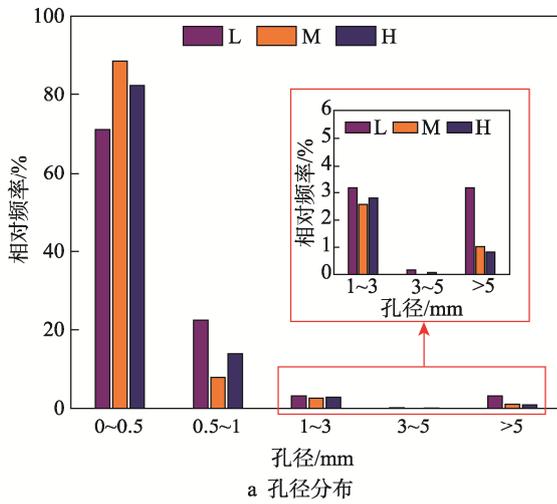
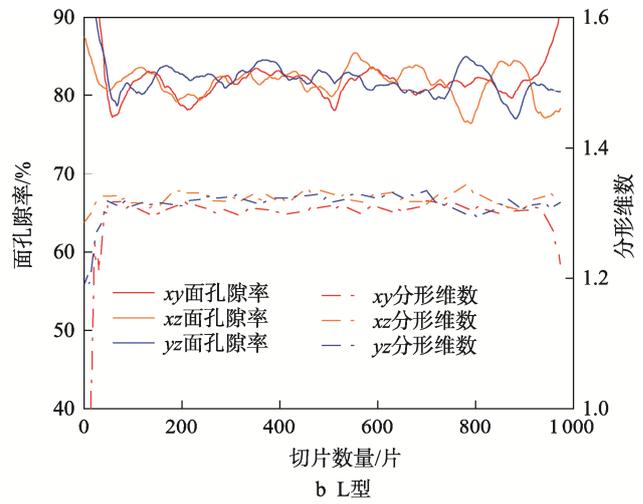


图2 支柱厚度分布图 (a)、三维图像 (b)

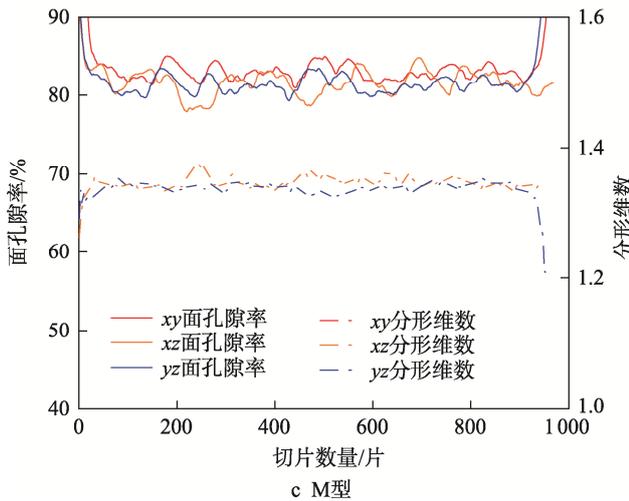
Fig.2 Distribution of pillar thickness (a) and three-dimensional images (b)



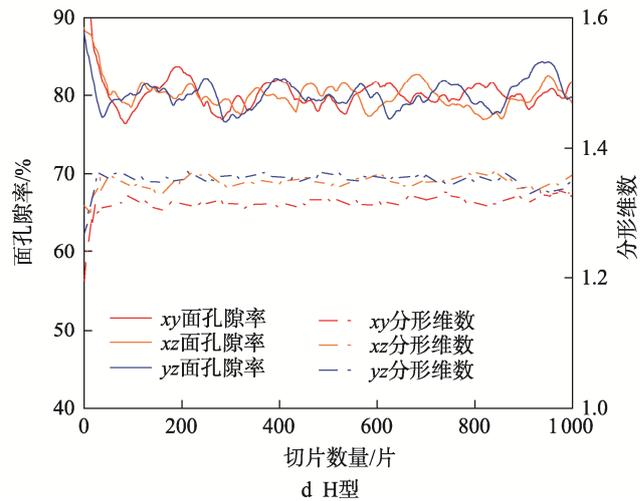
a 孔径分布



b L型



c M型



d H型

图3 孔径分布及均匀性参数统计

Fig.3 Pore diameter distribution and uniformity parameter statistics

孔直径越小, 呈现圆形的概率越大, 说明 H 型泡沫铝内部以小孔为主, 且小孔的数量明显高于 L、M 型。L 型泡沫铝的球形度 <0.6 , 说明其内部可能存在较大孔与小孔连通, 导致球形度较小, 进而造成其壁厚较小。

2.3 梯度泡沫铝在压缩过程中的变形行为

研究泡沫铝在压缩过程中的变形失效模式对泡沫铝夹芯面板结构的优化设计具有重要意义。本研究采用工业 CT+Mimics 软件重建泡沫铝实体模型, 并

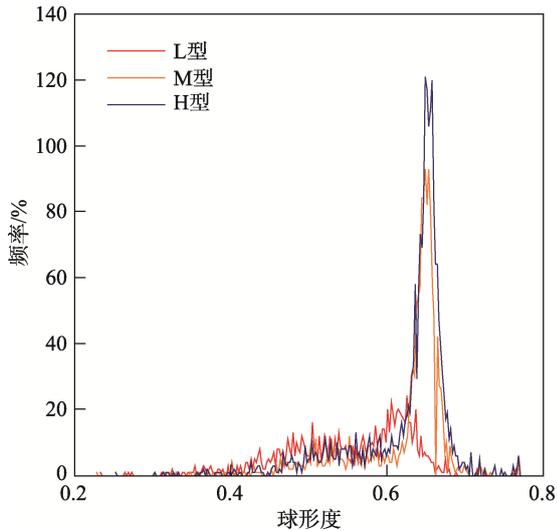


图 4 球形度分布
Fig.4 Sphericity distribution

将该模型导入 ANSYS LS-DYNA 软件 (导入前已划分网格, 网格尺寸为 0.28 mm)。

材料本构模型对数值模拟十分重要, 为了更好地模拟泡沫铝力学性能, 本研究基于相关文献研究^[16], 采用 LS-DYNA 中的 3 号材料 (Plastic Kinematic), 其密度为 2 700 kg/m³, 弹性模量为 70 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服应力为 170 MPa, 切线模量为 4.58 GPa。上、下钢板采用 LS-DYNA 中的 20 号材料, 其密度为 7 850 kg/m³, 泊松比为 0.3, 弹性模量为 210 GPa, 上钢板向下加载速度为 5.4 mm/min。边界条件设置为下钢板固定约束, 上钢板只产生向下的位移。上、下钢板与试样上、下端面间采用自动面对面接触, 摩擦因数为 0.15。

图 5 为仿真与实验数据应力-应变曲线, 平台应力可反映不同密度泡沫铝的力学性能。可以发现, 仿真与实验数据基本吻合, 但存在一定误差, M、LMH 型泡沫铝的平台应力实验及仿真数据误差分别为 7.72%、2.10%。分析原因如下: 首先, 数值计算模型与实际压缩模型在尺寸上会存在一定误差, 数值模型为经过处理后所得, 模型内部存在的一些锐利三角形面片会被平滑, 模型表面同样会被平滑; 其次, 上、下钢板与数值计算模型之间的接触与压缩实验存在一定误差。

图 6 为均质及梯度泡沫铝在应变率为 3×10⁻³ 时不同应变 ϵ 下的应力云图, 可见 LMH 型泡沫铝呈现逐层压溃破坏, 即 L 层发生压溃失效破坏、致密后, H 层开始压溃失效破坏、致密。L 层首先在基体厚度小的位置出现屈服 ($\epsilon=0.2$), 随着不断加载, 载荷逐层向下传播, 传播方向为沿胞孔裂缝开展方向, 但由于 L 层基体厚度小、平台应力低等, 载荷会迅速达到 L 层平台应力, 导致大量胞孔发生屈曲变形、折叠、致密 ($\epsilon=0.4$)。待 L 层致密后, 载荷会迅速向下传播至 M 层, 由于 M 层平台应力介于 L、H 层之间, 首先沿着壁厚小的区域发生屈曲变形, 随载荷不断向下传播, 进一步带动周围胞孔继续发生屈曲变形直至致密 ($\epsilon=0.6$)。待 M 层致密后, 已经有部分载荷传至 H 层, 当 $\epsilon=0.8$ 时开始卸载, 此时未达到 H 层的平台应力, 从而无法造成 H 层大量胞孔发生屈曲变形。M 型泡沫铝在压缩过程中载荷传播方式与 LMH 型泡沫铝类似, 即从压缩端向支撑端传播。加载初期, M 型泡沫铝会在壁厚小的地方首先出现屈曲破坏 ($\epsilon=0.2$)。随着不断加载, 内部胞孔裂缝会继续延伸, 带动周围胞孔发生屈曲变形, 但由于 M

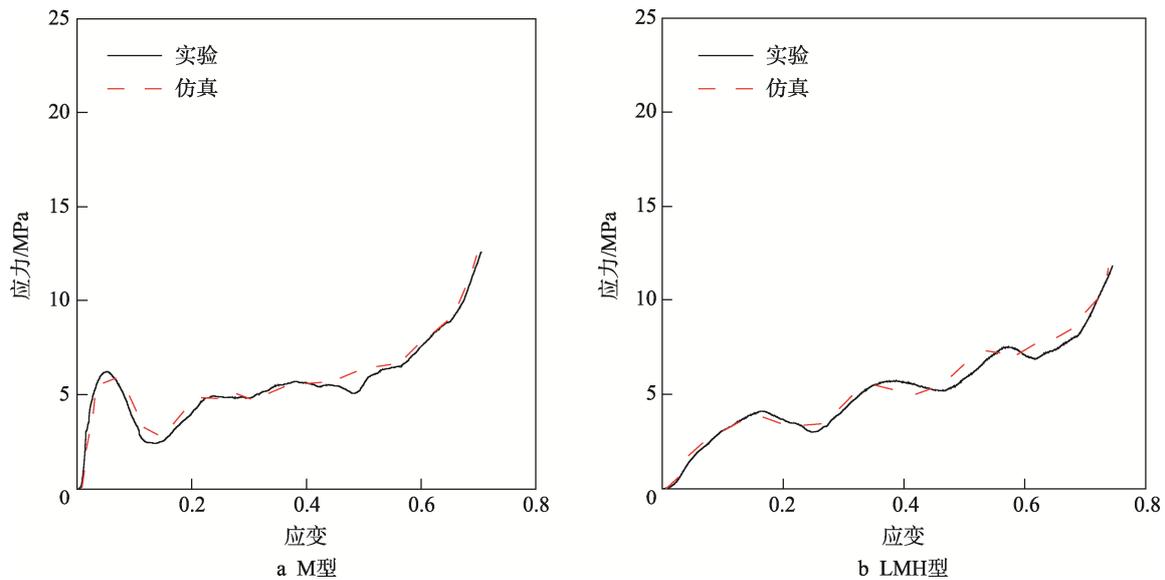


图 5 静态压缩仿真与实验结果应力-应变曲线对比
Fig.5 Comparison of stress-strain curves between static compression simulation and experimental results

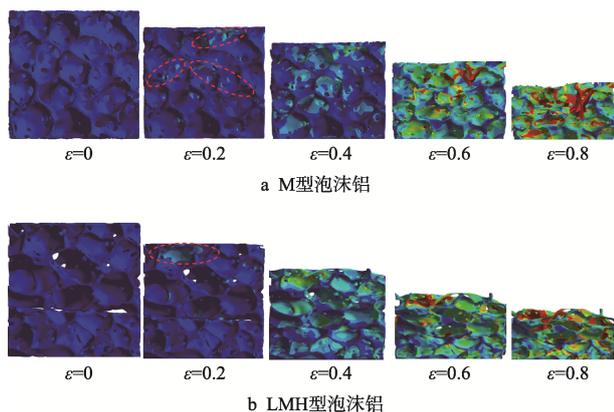


图6 静态压缩仿真结果
Fig.6 Static compression simulation results

型泡沫铝的孔径主要集中在0.5~1.0 mm,且大孔数量较L型少,在同等载荷作用下,M型泡沫铝内部胞孔不像L型泡沫铝在短时间内发生大面积屈曲变形($\varepsilon=0.4$)。加载后期,随着载荷不断减小,剩余载荷无法使M型泡沫铝内部胞孔继续发生屈曲变形($\varepsilon=0.6$),因此加载结束时M型泡沫铝内部还有大量细小胞孔未发生变形($\varepsilon=0.8$)。

3 结论

采用X-CT无损测试技术和数值仿真方法综合探究均质及梯度泡沫铝结构的受压变形失效模式,主要研究结论如下。

- 1) 支柱厚度对泡沫铝力学性能具有重要影响。不同密度泡沫铝的支柱厚度主要集中在0.2~1 mm,且0.6~0.8 mm厚度的支柱数量约占总量的1/3。
- 2) 不同密度泡沫铝在不同方向的面孔隙率较为均匀,泡沫铝内部孔径主要分布在0~0.5 mm。
- 3) 通过建立分形维数探究泡沫铝孔隙结构的复杂性。不同密度泡沫铝的分形维数分别为1.30、1.32、1.34,数值越大,表明孔隙结构越复杂。L型泡沫铝大孔附近的微孔数量较M、H型少,H型泡沫铝大孔附近附着的微孔数量最多,且微孔与大孔之间的距离较L、M型大。
- 4) 均质及梯度泡沫铝在静态压缩下的变形失效模式不同。梯度泡沫铝在静态压缩下呈逐层压溃破坏模式,均质泡沫铝在内部胞孔壁厚较小区域首先出现裂纹,然后向四周延伸直至破坏。

参考文献:

[1] 边小华,石少卿,康建功,等.一种新型防护结构对爆炸冲击波衰减特性的研究[J].后勤工程学院学报,2005,21(4):39-41.

BIAN X H, SHI S Q, KANG J G, et al. Research on Attenuation Characteristics of Blast Wave for a New Protective Structure[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2005, 21(4): 39-41.

- [2] 杨旭东,成莹,郑远兴,等.梯度泡沫铝的制备及力学性能研究进展[J].热加工工艺,2019,48(12):16-20.
YANG X D, CHENG Y, ZHENG Y X, et al. Research Development of Preparation and Mechanical Properties of Graded Aluminum Foam[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(12): 16-20.
- [3] 张红英,欧阳八生,朱国军.泡沫铝材料的研究与应用[J].粉末冶金技术,2021,39(1):69-75.
ZHANG H Y, OUYANG B S, ZHU G J. Research and Application of Aluminum Foam Materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2021, 39(1): 69-75.
- [4] 张子晨,许涛,武艺卿,等.泡沫铝三明治板材的研究现状[J].材料导报,2021,35(23):23121-23130.
ZHANG Z C, XU T, WU Y Q, et al. Research Progress of Aluminum Foam Sandwich[J]. Materials Reports, 2021, 35(23): 23121-23130.
- [5] 张伟,齐明思,赵志芳,等.泡沫铝-聚氨酯静态压缩特性及吸能特性分析[J].包装工程,2018,39(11):72-76.
ZHANG W, QI M S, ZHAO Z F, et al. Static Compression Characteristics and Energy Absorption Properties of Aluminum Foam-Polyurethane[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(11): 72-76.
- [6] HANGAI Y, TAKAHASHI K, YAMAGUCHI R, et al. Nondestructive Observation of Pore Structure Deformation Behavior of Functionally Graded Aluminum Foam by X-Ray Computed Tomography[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 556: 678-684.
- [7] MORANKAR S, MORT R, CURTZWILER G, et al. Structural Features of Biobased Composite Foams Revealed by X-Ray Tomography[J]. RSC Advances, 2024, 14(27): 19528-19538.
- [8] XIAO Y C, LIU H M, DONG X Y, et al. Effect of Cell Diameter Variations on the Mechanical Behavior of Aluminum Foams: Experiments and Modeling[J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 109090.
- [9] SHEN J H, LU G X, RUAN D. Compressive Behaviour of Closed-Cell Aluminium Foams at High Strain Rates[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(8): 678-685.
- [10] RAMAMURTY U, PAUL A. Variability in Mechanical Properties of a Metal Foam[J]. Acta Materialia, 2004,

- 52(4): 869-876.
- [11] ZHENG Z J, YU J L, LI J R. Dynamic Crushing of 2D Cellular Structures: A Finite Element Study[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1/2/3/4): 650-664.
- [12] KOOHBOR B, RAVINDRAN S, KIDANE A. Effects of Cell-Wall Instability and Local Failure on the Response of Closed-Cell Polymeric Foams Subjected to Dynamic Loading[J]. *Mechanics of Materials*, 2018, 116: 67-76.
- [13] KADER M A, HAZELL P J, ISLAM M A, et al. Strain-Rate Dependency and Impact Dynamics of Closed-Cell Aluminium Foams[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 818: 141379.
- [14] 刘雄飞, 和西民. 低应变率荷载作用下梯度泡沫铝力学性能研究[J]. *材料导报*, 2023, 37(7): 198-204.
- LIU X F, HE X M. Study on Mechanical Properties of Gradient Aluminum Foam under Low Strain Rate Loading[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(7): 198-204.
- [15] GUO Y Z, CHEN X D, CHEN B, et al. Analysis of Foamed Concrete Pore Structure of Railway Roadbed Based on X-Ray Computed Tomography[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 121773.
- [16] 李侯贞强, 张亚栋, 张锦华, 等. 基于 CT 的泡沫铝三维细观模型重建及应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(1): 160-168.
- LI H Z Q, ZHANG Y D, ZHANG J H, et al. Reconstruction and Application of Three-Dimensional Mesoscopic Model of Aluminum Foam Based on CT[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(1): 160-168.