

泡沫金属三维细观有限元建模技术研究

罗耿^{1,2}, 赵剑南¹, 陈轶嵩¹

(1. 长安大学 汽车学院, 西安 710064; 2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 针对泡沫金属复杂随机的内部结构特征, 基于计算机断层扫描技术 (CT), 开展了泡沫金属的三维细观有限元建模技术研究。对泡沫金属的断层扫描图片进行处理, 得到二值图, 并提取灰度建立其点云模型, 再对点云模型实体化得到细观数值模型。开展了泡沫金属的准静态压缩试验, 对细观有限元模型进行了验证。试验与仿真结果吻合良好, 表明建立的细观有限元模型可以准确地模拟泡沫金属的力学特性。

关键词: 泡沫金属; 细观有限元模型; CT 扫描; 准静态压缩; 力学特性

中图分类号: O347.3 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2021.06.03

Investigations and Mesoscopic Modelling of Metal Foams

LUO Geng^{1,2}, ZHAO Jiannan¹, CHEN Yisong¹

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The 3D finite element analysis was carried out for metal foams based on computer tomography (CT). Initially the tomographic images of the metal foam were processed to obtain the binary images, and the gray level was extracted to establish the point cloud model. And then the point cloud model was meshed into the finite element model. Finally, a quasi-static compression test was performed on the metal foam to verify the mesoscopic finite element model. A good agreement between the experimental data and simulation results was found, indicating that the mesoscopic finite element model established in this paper can accurately simulate the mechanical properties of metal foams.

Keywords: metal foam; mesoscopic finite element model; CT scanning; quasi-static compression; mechanics properties

泡沫金属具有比强度高、比刚度高等优异的力学性能^[1], 在压缩载荷作用下, 既能承受很大的塑性变形, 又能保持相对稳定的应力水平, 具有良

好的能量吸收特性^[2], 近年来被设计成各类防护和吸能结构, 广泛地应用于航空航天、建筑和车辆等领域。

收稿日期: 2021-03-11 改稿日期: 2021-04-09

基金项目: 陕西省自然科学基金(2021JQ220); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102220109); 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金(32015006)

参考文献引用格式:

罗耿, 赵剑南, 陈轶嵩. 泡沫金属三维细观有限元建模技术研究 [J]. 汽车工程学报, 2021, 11(6): 413-418.

LUO Geng, ZHAO Jiannan, CHEN Yisong. Investigations and Mesoscopic Modelling of Metal Foams [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11(6): 413-418. (in Chinese)



由于大多数泡沫金属采用发泡法制备,造成其随机分布且复杂的细观结构,对泡沫金属的数值研究工作带来了很大的难度。早期,由于技术手段的限制,研究人员通常将胞孔结构简化为周期性排列的单胞模型^[3],如二维的蜂窝六边形,以及三维的立方体模型^[4],但是以上两种模型过于简单,无法准确地模拟泡沫金属的变形特征和力学特性。随后,研究人员尝试通过复制一个相对复杂的几何胞体来构建相对真实的模型,由此八面体^[5]、十二面体、十四面体^[6]等模型陆续被建立起来。上述这些细观有限元模型均是周期性的单胞模型,即胞元的分布是有规律的,而非随机的。而真实的泡沫金属的细观结构则是随机分布的,胞元尺寸基本呈正态分布,所以上述单胞模型不能准确地反映泡沫金属的真实细观结构,以至于不能准确地模拟泡沫金属的实际力学性能。目前的泡沫金属 3D 细观随机分布有限元模型主要有两种:Voronoi 有限元模型,以及基于 CT 扫描图像建模的三维细观有限元模型^[7-8]。Voronoi 模型的建模过程与泡沫的发泡制备过程类似,在很多文献中被用来表征泡沫金属的细观结构。早期的研究人员通常采用二维 Voronoi 模型^[9-10],近几年的研究人员大都采用 3D Voronoi 模型来开展泡沫材料的数值研究^[11-13],ZHENG Zhijun 等^[14]在其数值模型的基础上,对泡沫材料的局部变形场进行了细致的讨论,动态压实应变随着冲击速度的增大而增加。值得注意的是,Voronoi 模型一般通过调整成核点数和胞壁厚度等参数,使其相对密度与真实材料保持一致。同时,3D Voronoi 数值模型均采用壳单元来模拟泡沫材料的胞壁,只能用来研究相对密度较小的泡沫材料^[14-15]。

随着计算机图像处理硬件技术的不断进步,基于 CT 扫描图像的泡沫材料有限元建模技术使准确模拟泡沫金属随机复杂的细观结构成为可能。采用

CT 断层扫描技术,能够在不损坏泡沫金属试样的前提下快速重构泡沫金属内部胞孔的形状和分布的三维影像,从而可以定量表征泡沫金属的形态学参数,建立有限元模型来研究泡沫金属的力学性能。基于扫描图像的 3D 三维有限元模型相较于 2D 模型复杂很多,但是近几年也取得一些突破。MICHAILIDIS 等^[16-17]建立了 3D 的开孔泡沫材料模型,该数值模型能够清晰地模拟出泡沫金属在真实情况下受到压缩时的应力场分布及其断裂机理。SUN Yongle 等^[18]则建立了 3D 闭孔泡沫金属有限元模型,通过数值模型,对泡沫材料内部胞元分布规律进行了统计,研究了在轴向压缩载荷作用下,泡沫金属的屈服位置。由于以 CT 扫描图像为基础的有限元模型采用实体单元,单元数一般较多,所以该模型在模拟泡沫金属屈服行为时具有优势。

综上所述,基于 CT 断层扫描影像信息,重新构建泡沫金属的三维几何实体模型,并划分了单元,构建了数值模型。同时,对有限元模型的几何信息,如胞孔数量、胞元大小等进行讨论,并且开展准静态压缩试验对有限元模型进行验证。

1 泡沫金属的三维细观有限元模型

1.1 CT 扫描原理

采用微 CT 断层扫描重构技术,可以在不损坏试样的前提下,快速重构泡沫金属的三维影像,其技术原理如图 1 所示。将准备好的泡沫金属试件固定在可以旋转的载物台上,用 X 射线束对试件进行扫描,由试件后的探测器接收透过样品的 X 射线,可以得到衰减后的投影数据。通过旋转平台对泡沫金属样品进行精密旋转,获取不同角度下的投影数据,采用滤波反投影重建算法,求解获得每个体素的 X 射线衰减系数或吸收系数,再排列成矩阵,即衰减系数值在断层上的分布数字矩阵把数字矩阵中的每个数字转为由黑到白不等灰度的小方块,即像素,并按矩阵排列,即构成 CT 图像。

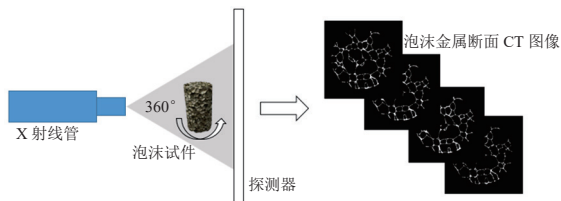
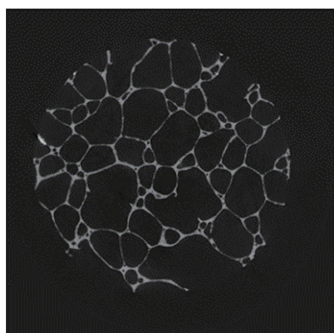


图 1 CT 扫描示意图

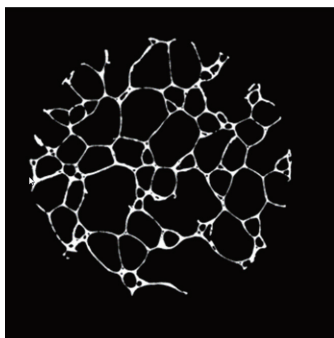
1.2 二维影像处理与分析

利用 CT 扫描设备对泡沫金属试件 ($\Phi 25 \times 20 \text{ mm}$) 进行扫描, 得到 1 271 张断面照片, 层间距尺寸为 $0.014 5 \text{ mm}$, 照片尺寸 $2\,000 \times 2\,000$ 像素, 一个像素点代表实际尺寸 $0.014 5 \text{ mm}$ 。试件的典型断面照片如图 2a 所示, 其中灰色部分为泡沫金属试件的实体孔壁, 黑色部分为中空胞孔。由图中可以清楚地看到泡沫金属试件各横截面胞孔的大小、形状及分布情况。试件孔壁非常薄, 二维胞孔呈现不规则多边形, 胞孔大小不均。

由于通过 CT 扫描得到的图像有的较暗, 有的孔壁胞孔不明显, 所以对断面图像还需要处理。在 Matlab 软件中调节 CT 扫描图像的对比度, 将灰度图像转换为二值图像。处理前后的效果如图 2 所示。



(a) 处理前



(b) 处理后

图 2 试件截面处理前后对比

可以对已经获得的二值图进行分析, 得到泡沫金属试件的相对密度沿高度方向的分布规律, 如图 3 所示。

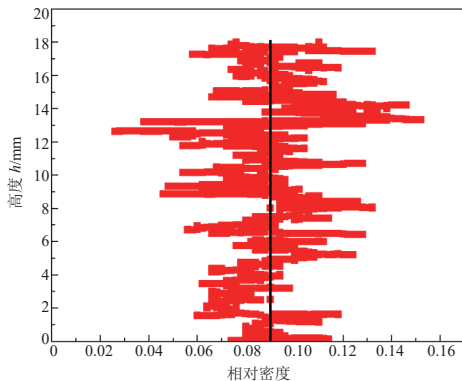


图 3 泡沫金属试样相对密度沿高度分布规律

由图可知, 泡沫金属试样相对密度随高度的分布曲线存在震荡, 这是由试样的不均匀孔壁分布导致的。经过计算得到试样的平均相对密度是 $0.089 8$, 而试样的相对密度是 $0.085 0$, 相对偏差为 5.6% 。存在偏差的主要原因是断层扫描重构横截面得到的图像是由像素点构成的, 胞孔和孔壁交界处都有一定的宽度, 而在二值化过程中确定灰度阈值时会有一部分交界区误认为是孔壁。

1.3 三维影像重构

泡沫金属的三维影像重构在商用软件 Mimics 中进行。将二值化的 CT 图像导入 Mimics 中, 生成泡沫金属三维点云模型, 如图 4 所示。

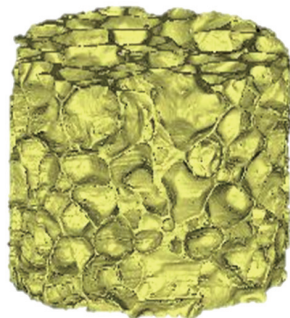


图 4 泡沫金属点云模型

对点云模型实体化, 并进行切割, 即可获得最终的立方体有限元模型 ($15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$), 如图 5 所示。

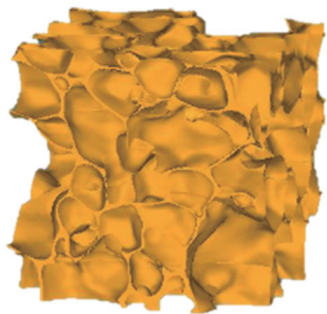


图 5 泡沫金属几何模型建模过程

对胞孔的数目、体积和表面积进行了统计。首先将泡沫金属胞孔等效为规则球体,则泡沫金属胞孔的等效直径 D_e 可通过式 (1) 进行计算:

$$D_e = (6V/\pi)^{1/3} \quad (1)$$

式中: V 为胞孔的体积, mm^3 ; D_e 为胞孔的孔径, mm 。

经过统计,得到泡沫金属胞孔总数为 149 个,孔径范围为 1.45 ~ 6.46 mm,平均孔径为 2.97 mm。厂家给出泡沫金属的平均孔径为 2.88 mm,可见模型孔径吻合很好。泡沫金属孔径分布统计结果如图 6 所示,横轴为孔径尺寸,纵轴为各孔径区间的胞孔数目占总胞孔数的比值。由图可知,试件孔径尺寸在 2.0 ~ 2.5 mm 区间内的胞孔数目最多,占到胞孔总数目的 22.8%;而孔径尺寸在 6.0 ~ 6.5 mm 区间内的孔径数目最少,仅占到胞孔总数目的 1.3%。

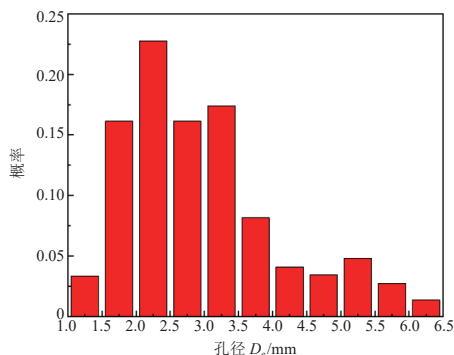


图 6 泡沫金属孔径分布统计结果

1.4 CT 扫描图像有限元模型

采用 Ansys/Icem 对泡沫金属的细观几何模型划分四面体单元,共得到单元 409 146 个。泡沫金属单轴压缩的有限元模型如图 7 所示,上下两块板都

是刚性板。将泡沫模型置于两个刚性板中间,再对上板施加竖直向下的位移载荷,下板固定为支持端。泡沫金属孔壁材料参数与准静态压缩试验中的材料参数保持一致,见表 1。

表 1 闭孔泡沫金属基体材料铝合金 (Al-Ca-Ti) 参数

组分	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	屈服强度 σ_y/MPa	泊松比 μ
Al+1.5%Ca+1.5%Ti	2 700	61.7	100 ~ 172.8	0.3

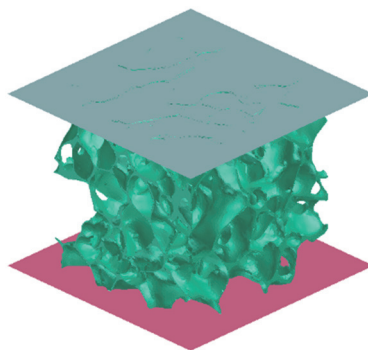


图 7 泡沫金属细观有限元模型

2 有限元模型的验证

2.1 准静态压缩试验

为了验证泡沫金属细观有限元模型的准确性,开展了泡沫金属的准静态单轴压缩试验,如图 8 所示。泡沫金属准静态单轴压缩试验使用万能试验机完成。准静态试验所用的泡沫金属试件尺寸为 50 mm × 50 mm × 70 mm,和用于 CT 扫描的泡沫金属均是从同一大块泡沫金属材料上切割下来的试样。试验采用位移控制,加载速度为 1.5 mm/min。



(a) 压缩试件



(b) 压缩试验机

图8 准静态单轴压缩试验

2.2 基于CT扫描图像细观有限元模型的验证

CT扫描图像细观有限元模型的数值仿真与试验结果对比如图9所示。由图可知, 两条曲线吻合良好, 表明所建立的细观有限元模型可以准确地对泡沫金属宏观上的力学响应做出模拟。同时, 在图9中也给出了在准静态压缩载荷作用下, 试验和数值仿真的变形过程。由图可知, 试验和数值仿真所呈现出的变形形式相似。在泡沫金属的静态压缩中, 塑性屈服起始于泡沫金属中最薄弱的部位, 然后触发了与其相邻胞元的坍塌, 形成剪切变形带, 如图9中的(b)所示。随着压缩的继续, 次薄弱区域出现塑性变形, 形成第2条剪切带, 如图9中的(c)所示。这个过程不断重复直至进入密实化, 如图9中的(d)所示。在该阶段, 泡沫金属被压实, 胞壁的相互挤压导致了应力应变曲线中应力的陡然上升现象。通过对试验和数值仿真变形模式的对比, 表明有限元模型可以准确地模拟泡沫金属的细观变形特性。

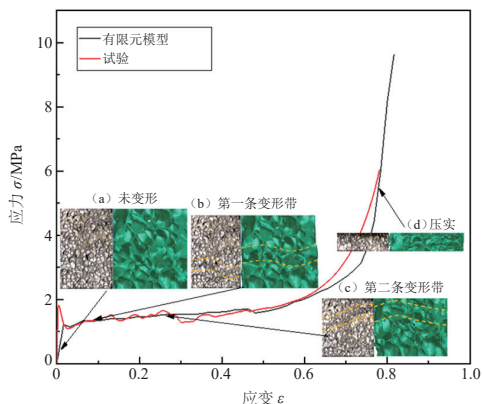


图9 数值仿真与准静态压缩试验应力-应变曲线及变形对比

3 结论

为了建立泡沫金属准确的细观模型, 本文基于计算机断层扫描技术和逆向重构技术, 开展了泡沫金属的三维细观有限元模型建模技术研究, 得到以下结论:

(1) 由于泡沫金属材料胞壁结构极其复杂, 通过对断层扫描照片进行预处理, 进而整体提取灰度, 建立了泡沫金属细观有限元模型。对胞孔尺寸进行统计分析, 其统计结果与泡沫金属实际胞元尺寸一致, 表明本文所建立的有限元模型可以准确地表征泡沫金属的真实细观结构特性。

(2) 开展准静态压缩试验, 对细观有限元模型进行了验证。对比的结果表明, 本文所建立的细观有限元模型, 无论从细观尺度的胞元变形, 或是宏观尺度的载荷-位移响应, 均能准确模拟泡沫金属的力学性能。

参考文献 (References)

- [1] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties [J]. Cambridge University Press, 2014, 33: 487-488.
- [2] LU Guoxing, YU Tongxi. Energy Absorption of Structures and Materials [J]. Energy Absorption of Structures & Materials, 2003: 385-400.
- [3] CHEN C, LU T J, FLECK N A. Effect of Imperfections on the Yielding of Two-Dimensional Foams [J]. Journal of the Mechanics Physics of Solids, 1999, 47(11): 2235-2272.
- [4] GIBSON L J, ASHBY M F. The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, 1982, 382(1782): 43-59.

- [5] LIU Peisheng. Mechanical Relation for Porous Metal Foams Under Complex Loads of Triaxial Tension and Compression [J]. *Materials & Design*, 2010, 31(4): 2264–2269.
- [6] DEMIRAY S, BECKER W, HOHE J. Numerical Determination of Initial and Subsequent Yield Surfaces of Open-Celled Model Foams [J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2007, 44(7): 2093–2108.
- [7] ISLAM M A, BROWN A D, HAZELL P J, et al. Mechanical Response and Dynamic Deformation Mechanisms of Closed-Cell Aluminium Alloy Foams Under Dynamic Loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 114: 111–122.
- [8] XI C Q, LI Q M. Meso-Scale Mechanism of Compaction Shock Propagation in Cellular Materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 109: 321–334.
- [9] LIU Y D, YU Jilin, ZHENG Zhijun, et al. A Numerical Study on the Rate Sensitivity of Cellular Metals [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(22–23): 3988–3998.
- [10] TAN P J, REID S R, HARRIGAN J J, et al. Dynamic Compressive Strength Properties of Aluminium Foams. Part II— ‘Shock’ Theory and Comparison with Experimental Data and Numerical Models [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(10): 2206–2230.
- [11] ZHENG Zhijun, WANG Changfeng, YU Jilin, et al. Dynamic Stress-Strain States for Metal Foams Using a 3D Cellular Model [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2014, 72: 93–114.
- [12] LIAO Shenfei, ZHENG Zhijun, YU Jilin. On the Local Nature of the Strain Field Calculation Method for Measuring Heterogeneous Deformation of Cellular Materials [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51(2): 478–490.
- [13] 王长峰, 郑志军, 虞吉林. 泡沫金属的微惯性效应和动态塑性泊松比 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(5): 601–607.
- WANG Changfeng, ZHENG Zhijun, YU Jilin. Micro-inertia Effect and Dynamic Plastic Poisson’s Ratio of Metallic Foams Under Compression [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(5): 601–607. (in Chinese)
- [14] ZHENG Zhijun, LIU Yaodong, YU Jilin, et al. Dynamic Crushing of Cellular Materials: Continuum-Based Wave Models for the Transitional and Shock Modes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 42: 66–79.
- [15] ZHANG Xiaoyang, TANG Liquan, LIU Zejie, et al. Yield Properties of Closed-Cell Aluminum Foam Under Triaxial Loadings by a 3D Voronoi Model [J]. *Mechanics of Materials*, 2017, 104: 73–84.
- [16] MICHAELIDIS N, STERGIODI F, OMAR H, et al. Experimental and FEM Analysis of the Material Response of Porous Metals Imposed to Mechanical Loading [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011, 382(1–3): 124–131.
- [17] MICHAELIDIS N, STERGIODI F, OMAR H, et al. An Image-Based Reconstruction of the 3D Geometry of an Al Open-Cell Foam and FEM Modeling of the Material Response [J]. *Mechanics of Materials*, 2010, 42(2): 142–147.
- [18] SUN Yongle, LI Q M, LOWE T, et al. Investigation of Strain-Rate Effect on the Compressive Behaviour of Closed-Cell Aluminium Foam by 3D Image-Based Modelling [J]. *Materials & Design*, 2016, 89: 215–224.

作者简介



罗耿 (1992–), 男, 陕西西安人, 博士, 主要研究方向为轻质材料力学特性。

Tel: 15229392345

E-mail: luogeng@chd.edu.cn

通信作者



陈轶嵩 (1988–), 男, 陕西西安人, 博士, 主要研究方向为汽车技术战略。

Tel: 13755003792

E-mail: chenysisong_1988@163.com