

文章编号: 1001-4888(2005)03-0363-07

多孔泡沫铝压缩过程中微结构演化^{*}

汪 敏, 胡小方, 蒋 锐, 伍小平

(中国科学技术大学 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230026)

摘要: 本文采用 SXR-CT 技术研究金属多孔泡沫铝材料在压缩过程中内部微结构的演化。获得了泡沫铝试件的各个断层图像, 以及各断层图像组装得到的三维结构图像, 由此计算得到不同断层的孔隙率和压缩时各断层的位移量。并给出一系列相同位置、不同压缩量状态下垂直截面图像, 通过这些图像可以直接地观察压缩过程中泡沫铝内部微结构的演化。这些研究结果将为泡沫铝制备工艺的改进和材料与结构的优化设计提供有益的参考, 并为泡沫铝压缩破坏机理的构建提供科学依据。其中 SXR-CT 技术重建图像的分辨率约为 $10.9\mu\text{m}$ 。

关键词: SXR-CT; 泡沫铝; 孔隙率

中图分类号: O348.6 **文献标识码:** A

1 引言

泡沫铝是一种以铝或铝合金为基体, 包含大量孔洞的轻质多孔材料。它具有多种优异的物理、力学和化学性能, 诸如缓冲吸能、隔声、消音、减震、隔热和电磁屏蔽且环境无污染等。基于以上优异性能, 目前在汽车工业、航空航天、建筑工业和铁路运输等领域都已获得了广泛的应用。目前, 国内关于泡沫铝的研究, 主要集中在生产工艺及各种性能, 尤其是动静态力学性能的实验研究较多^[1,2]。国外关于泡沫铝固体的研究成果不仅涉及制备工艺、性能实验, 还包括理论推演和数值模拟计算。但是数值模拟主要停留在对规则的蜂窝结构或立方体结构建模上, 甚至有些是将泡沫铝结构视为实体结构建模进行数值模拟^[3~5], 所建模型未能真实体现泡沫材料孔洞结构的高度复杂无序性。泡沫铝作为一种正在发展着的新型材料, 由于工艺和技术的不成熟, 所制备材料的性能并不稳定, 且存在较大的分散性。因此, 对同一问题的研究, 不同的研究者可能得出不同的、甚至截然相反的结论。泡沫铝工艺及性能的宏观实验研究是十分必要的, 但由于泡沫材料较之组成它的实体材料更加复杂多变, 泡沫铝的性能不仅取决于基体材料, 还与孔洞的微结构及其分布规律高度相关。因此, 有必要从微结构角度展开研究^[6]。

本文采用 SXR-CT 技术研究了泡沫铝不同压缩量下的内部结构, 以找出在不同截面上的孔隙率大小以及在不同压缩状态下气孔大小、形状的变化, 进而从微结构的角度推断泡沫铝的宏观性能。以期作为泡沫铝制备工艺的改进和材料与结构的优化设计提供有益的参考, 并为泡沫铝压缩破坏机理的构建提供科学依据。

2 实验

2.1 SXR-CT 技术原理简介

SXR-CT 技术是指采用同步辐射 X 射线作为试件投影成像的光源, 将获得的投影数据利用不同

^{*} 收稿日期: 2004-11-20; 修订日期: 2005-08-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10232030)、面上项目(10472113)和 BSRF 共同资助

通讯作者: 汪敏(1979-), 男, 中国科技大学力学和机械工程系博士研究生。主要从事实验力学研究。

算法进行运算,后重建出试件不同断层的内部结构图像^[7]。由于在获得试件的内部信息时未损伤试件,故而它是一种无损检测技术。SXR-CT 技术采用的算法主要有反投影重建算法、滤波反投影重建算法和迭代重建算法^[8]。本文采用的是迭代重建算法中的乘型迭代法,乘型迭代算法公式如下:

$$\begin{cases} x^{(0)} & \text{初始矢量(全取 1), } J \text{ 维} \\ x_j^{(k+1)} = \left[\frac{p_{i_k}}{r_{i_k, j} T_x^{(k)}} \right]^{\lambda^{(k)}} x_j^{(k)} & j = 1, 2, \dots, J \end{cases} \quad (1)$$

式中, k 表示迭代次数; J 表示维数, 本文指重建图像含有的像素数; $i_k = \left[k - \text{Int}\left(\frac{k}{I}\right)I + 1 \right]$, Int 表示取整数; $\lambda^{(k)}$ 为松弛系数 $0 < \epsilon \leq \lambda^{(k)} \leq 1$; $x_j > 0$ 为图像矢量 x 中的一个元素, 本文指重建图像中的一个像素, 为待求解的值; $r_{i_k, j}$ 为 x_j 的系数, 取值 1 或 0, 可通过射线经过的路径求得; p_{i_k} 为投影值, 由投影像直接获得。

由(1)式可知, 乘型迭代算法就是利用已知的 i_k 、 $\lambda^{(k)}$ 、 $r_{i_k, j}$ 、 p_{i_k} 迭代计算出 x_j 。可以证明: 在一定条件下, 式(1)所得的解收敛于 $Rx = p$ 的最大熵解^[8]。

2.2 实验装置及样品

实验是在北京同步辐射室进行的, 实验装置如图 1 所示。光源由同步辐射室 X 光形貌站提供, 其有效波长为 $0.3\text{\AA} \sim 2.5\text{\AA}$, 有效光斑尺寸为 $9\text{mm} \times 8\text{mm}$, 本次实验选用的 X 射线波长为 $0.7\text{\AA}$ 。试件为 56.8% 孔隙率的泡沫铝圆柱体, 试件尺寸为 $6\text{mm}(\text{d}) \times 9\text{mm}(\text{h})$ 。试件置于自研制的精密旋转加载装置上, 分别在 3 个应变状态下进行投影成像, 投影间隔 $\Delta\phi = 0.9^\circ$, 投影数为 $N_\phi = 200$ 。投影像采用 X 射线 CCD 进行采集, 其图像分辨率为 $10.9\mu\text{m}$, 曝光时间为 300ms。

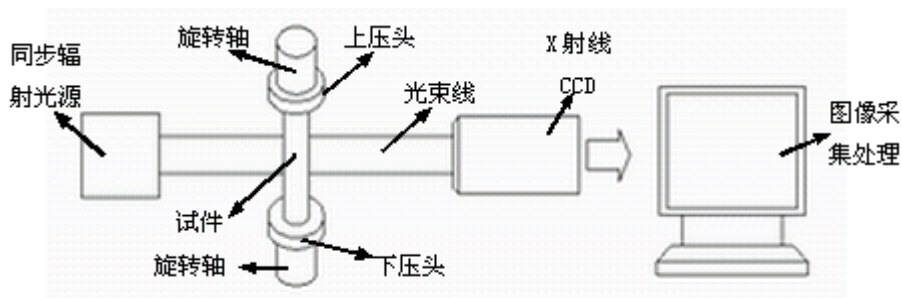


图 1 SXR-CT 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SXR-CT facilities

2.3 数字图像处理

投影像采集后, 采用乘型迭代算法进行断层重建, 将重建后的断层图像进行组装得到三维结构图像, 本文中的断层图像就是试件的横截面图像。利用截面算法即可得到三维结构图像在不同方向、层次上的截面图像。乘型迭代算法重建过程如图 2^[7]。

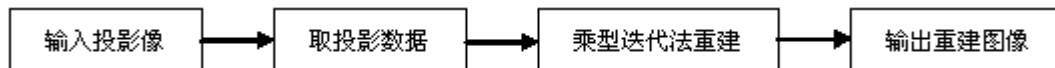


图 2 乘型迭代重建算法流程图

Fig. 2 Flow chart of multiplication algebraic reconstruction technique

3 实验结果和讨论

本次实验选用试件的尺寸、形状及材料如前所述, 将此试件分别在 3 个不同的压缩量状态下进行投影成像, 采用 ART 代数迭代重建算法进行断层重建得到 3 个状态下各横截面的重建图像。3 个状态分别用 A、B、C 表示, 其意义分别如下: A 表示初始状态, 即压缩量为 0; B 表示压缩量为 0.6mm 的状态; C 表示压缩量为 1mm 的状态。

由于重建工作量以及光场均匀性等原因,选择重建了其中的一部分高度。在3个压缩状态下,其重建部分的高度均为 $3270\mu\text{m}$ 。为了便于描述实验结果,对各状态试件的重建部分建立统一坐标,试件重建部分坐标如图3所示。平行于平面 xoy 的截面定义为试件的横截面,平行于平面 $yozy$ 的截面定义为试件的纵截面,且试件各状态重建部分的上端面对应于平面 xoy ,即 $z=0$ 的位置。由于试件各状态重建部分的高度相等,所以试件各状态重建部分的下断面对应的平面位置坐标 z 值也相等。

3.1 不同压缩量下的横截面重建图

图4、图5、图6给出3个不同状态下的横截面重建图像,图中的白色区域表示气孔,黑色区域表示基体铝。泡沫铝试件的各横截面在压缩过程中将不断发生位移与变形,这样给考察某一位置横截面在不同压缩状态的变形演化带来了困难。为此,本文通过相关算法来搜索横截面压缩变形前后的位置,成功地解决了这一问题,这样通过不同压缩状态下同一横截面的比较,即可获得各横截面在压缩过程中的变形情况。图4、5中的 a 、 b 、 c 、 d 四横截面分别是由图3中的 a 、 b 、 c 、 d 四横截面经过第一次压缩($A \rightarrow B$)及第二次压缩($B \rightarrow C$)而成,图中 z 值表示各横截面的坐标(坐标参见图3)。因此,图4、5、6分别描述了试件四个不同横截面的压缩演化过程。通过坐标值的变化可以计算得到压缩过程中各横截面沿 z 轴的位移量。同时这三组图的对比清楚地表明,多孔铝在压缩过程中其内部气孔尺寸在整体上是减小的,并且大部分气孔是沿着自己边界的法线方向进行内缩变形的。

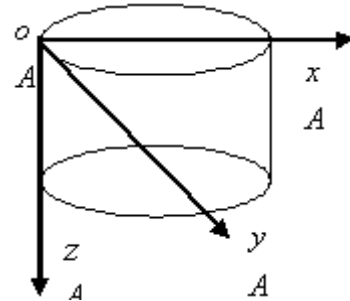


图3 重建部分三维坐标示意图

Fig. 3 Schematic diagram coordinate for 3-D reconstruction part

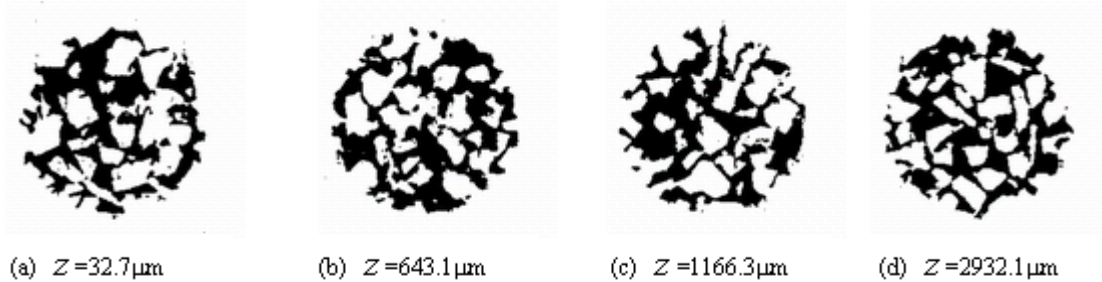


图4 A状态横截面重建图

Fig. 4 Cross-section reconstruction images in A compression state

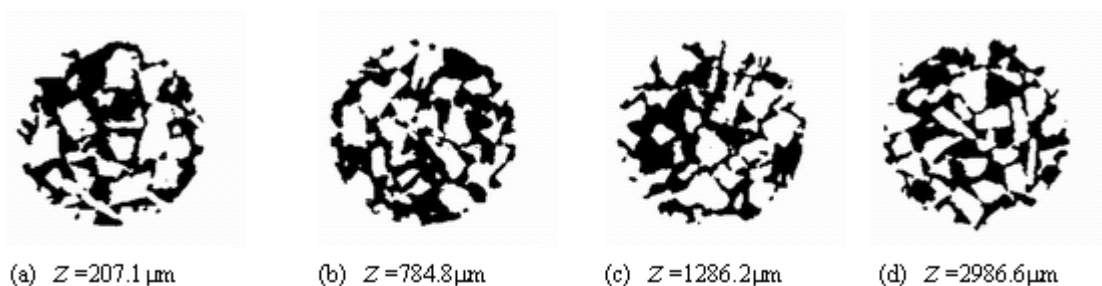


图5 B状态横截面重建图

Fig. 5 Cross-section reconstruction images in B compression state

3.2 不同压缩状态下的纵截面重建图

图7、图8、图9分别给出了A、B、C三个压缩状态下试件部分的纵截面图。同样采用相关法获得了压缩变形前后的纵截面,图8、9中的 a 、 b 、 c 、 d 四纵截面分别是由图7中的 a 、 b 、 c 、 d 四纵截面经过第一次压缩($A \rightarrow B$)及第二次压缩($B \rightarrow C$)而成,图中 x 值表示各纵截面的坐标(坐标参见图3)。因此图7、

图 8、图 9 描述了试件四个不同纵截面在压缩过程中的变形演化,由图可知试件在压缩过程中各气孔尺寸是逐渐变小的(即试件是逐渐致密的),并且在压缩过程中,逐渐有新的断层进入重建部分。

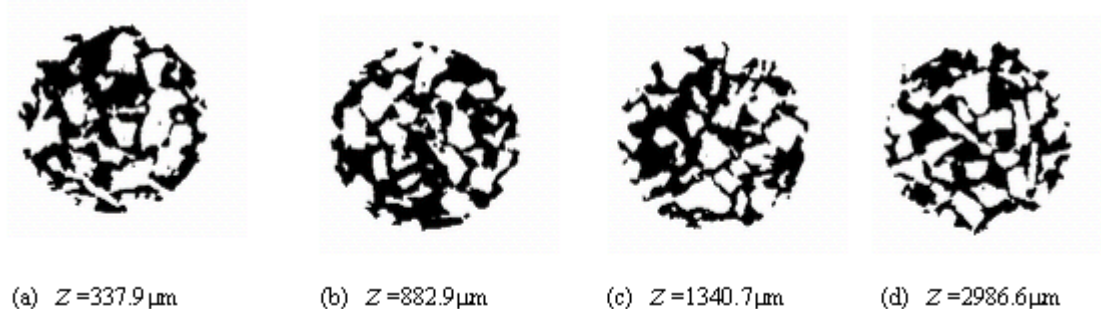


图 6 C 状态横截面重建图

Fig. 6 Cross-section reconstruction images in C compression state

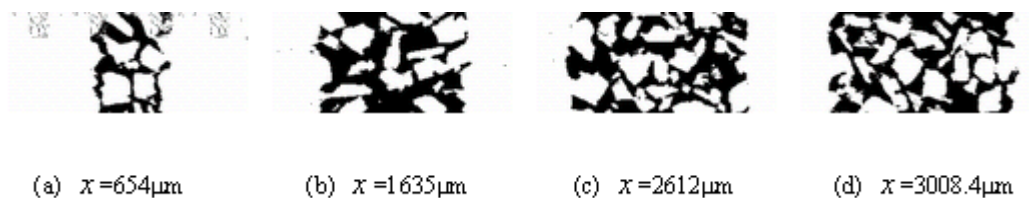


图 7 A 状态纵截面重建图

Fig. 7 Vertical-section reconstruction images in A compression state

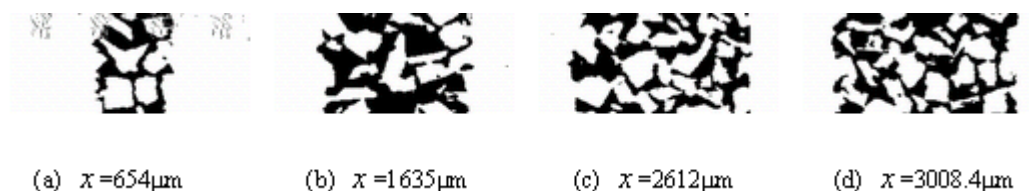


图 8 B 状态纵截面重建图

Fig. 8 Vertical-section reconstruction images in B compression state

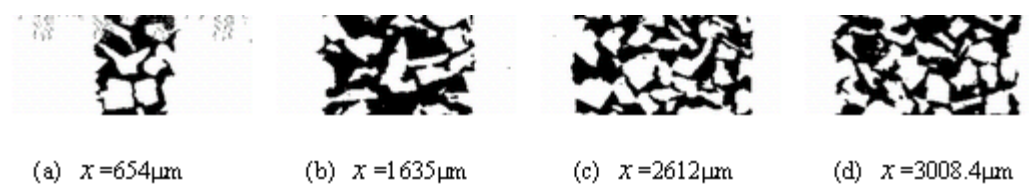


图 9 C 状态纵截面重建图

Fig. 9 Vertical-section reconstruction images in C compression state

3.3 断层孔隙率及平均孔隙率

将各横截面的气孔部分的面积除以试件横截面的总面积就可以得到横截面孔隙率。由重建结果,可得各横截面的孔隙率如下图 10 所示。

图 10 中 A、B、C 曲线分别表示三个压缩状态下不同横截面的孔隙率随高度变化的曲线。由 A、B 曲线可知,试件由初始状态压缩至 B 状态时,试件部分横截面处的孔隙率变大。由 B、C 曲线可知,试件由 B 状态压缩至 C 状态时,试件各横截面的孔隙率在整个高度上是一致性减小的。由此可知,泡沫铝

材料在压缩过程中,孔隙率在整体上是减小的,但在局部区域可能会出现孔隙率增大的现象。由图 10 的初始状态曲线 A 可知,本次试验的泡沫铝材料是比较均匀的,在其高度上,其孔隙率的差异不大,最大值为 63.6%,最小值为 54.0%。

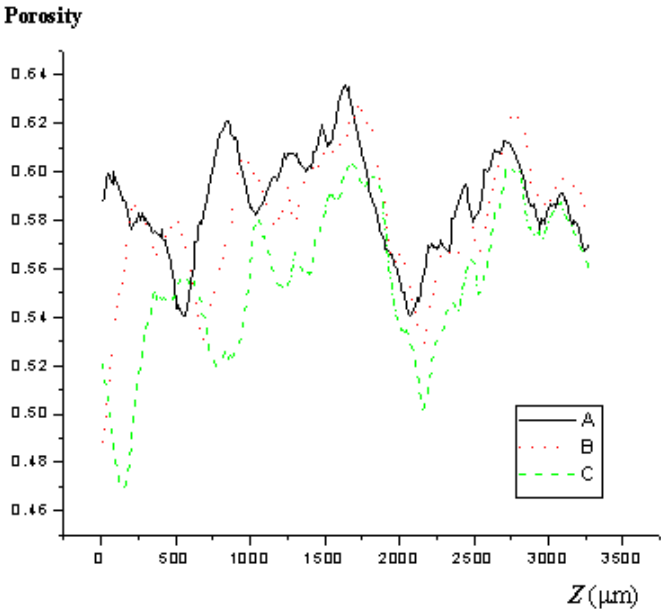


图 10 孔隙率—横截面曲线图
Fig. 10 The curve between porosity and cross-sections

将重建部分的各横截面孔隙率进行累计平均就可以得到试件重建部分的平均孔隙率。由上述方法可得三个不同压缩状态下重建部分的平均孔隙率,其结果如表 1 所示。

表 1 各状态的平均孔隙率

Tab. 1 The average porosity in different compression states

状态名称	A(初始状态)	B	C
重建部分孔隙率(%)	58.8	58.1	55.5

由表 1 可知,我们测得的初始状态的孔隙率为 58.8%,而实验试件选用的是 56.8%的泡沫铝材料,误差为 3.5%,由此可知,采用 SXR—CT 方法计算出的结果是可靠的。同时表 1 清楚地表明了泡沫铝试件在压缩过程中其平均孔隙率是逐渐变小的。

3.4 断层位移及变形量

泡沫铝试件在压缩过程中,其各横截面都会发生位移,其各横截面的位移可用下式进行描述。

$$S_1 = \Delta l_1, \quad S_i = S_{i-1} + \Delta l_i \quad (i = 2, 3, \dots, 300) \quad (2)$$

式中, S_i 表示第 i 层横截面位移; Δl_i 表示第 i 层横截面沿 z 轴的压缩变形量,各横截面的高度均为 1 像素,即 $10.9\mu\text{m}$ 。 S_i 实际意义为从第 1 层到 i 层所有横截面沿 z 轴的压缩变形量和。

泡沫铝试件的横截面位移可以通过压缩前后两状态的重建横截面图像的相关检测运算计算得出。图 11 中 A-B、B-C 曲线分别表示各横截面由状态 A→B 及状态 B→C 时沿 z 轴的位移量大小,图 11 清楚地反映了泡沫铝试件在压缩过程中各横截面的位移情况。

由于噪声及相关运算误差的存在,致使了图 11 中 A-B、B-C 曲线的尖锐化,但整体的位移趋势还是比较理想,同时 A-B、B-C 曲线局部横截面位移的剧烈变化表明,此局部横截面内的微结构在压缩前后的变形大。由图 11 可得状态 A、B 间的压缩变形总量约为 $180\mu\text{m}$,是总压缩量 $600\mu\text{m}$ 的 30%。状态 B、C 间的压缩变形总量约为 $138\mu\text{m}$,是总压缩量 $400\mu\text{m}$ 的 34.5%。而试件的重建部分为 $3270\mu\text{m}$,占试件总高的 36.3%。由此可知泡沫铝的压缩量在试件各段的分布是比较均匀的。

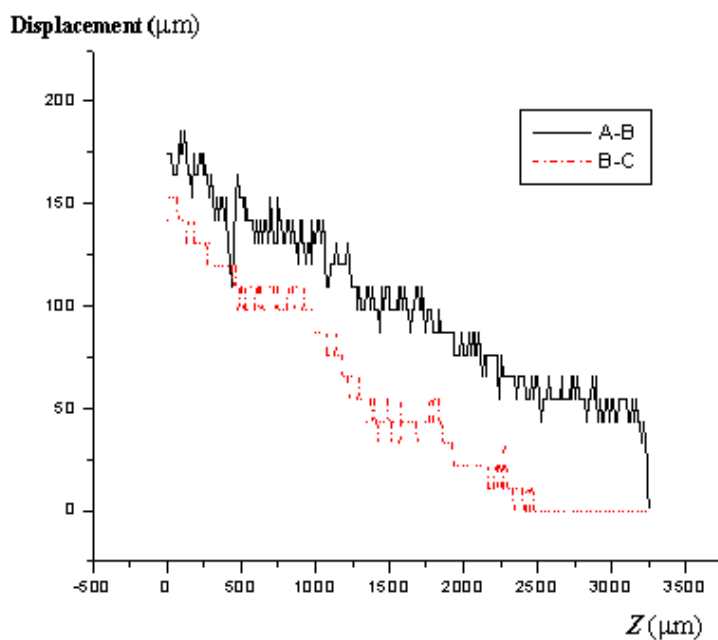


图 11 位移—横截面曲线图

Fig. 11 The curve between displacement and cross-sections

由(2)式可得各横截面的变形量如下:

$$\Delta l_i = S_i - S_{i-1} \quad (i = 2, 3, \dots, 300) \quad (3)$$

依据(3)式,将已求的横截面位移进行各层相减即可得到各横截面的变形量。由于噪声及相关运算误差的存在,求得各横截面变形量不理想,但由图 11 中 A—B、B—C 曲线整体趋势可知,泡沫铝试件重建部分内各断层的变形分布应是比较均匀的,受各横截面自身的孔隙率影响不大。

4 结论和展望

泡沫铝材料的孔隙率以及孔洞形状、大小是表征和反映泡沫铝制备工艺的重要参数,同时这些微观参量也直接影响泡沫铝材料的宏观性能。本文采用 SXR—CT 技术对泡沫铝材料内部微结构进行在线无损检测,取得了较好的测量结果,得到了试件重建部分各层及整体的孔隙率大小,同时也得出了试件重建部分的孔洞形状及其在压缩过程中的演化图,并给出了压缩时前一状态内的各断层位移量。总之,应用 SXR—CT 技术实现泡沫铝材料内部微结构的在线无损检测是行之有效的。由于泡沫铝材料中内部孔结构的尺寸及形状非常复杂,要想得出其内部结构的演化规律,必须要进行大量的实验。所以进一步工作是研究在拉伸过程中或加热过程中或两者耦合过程中泡沫铝材料内部微结构的演化规律,以期得出泡沫铝材料微结构与宏观性能之间的关系。

致谢: 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室李大应博士、夏源明教授设计并委托加工了旋转拉压装置,使得本实验得以完成,在此致以特别的感谢。北京同步辐射实验室形貌站黄万霞、袁清习、王寓越参与了本文的实验工作,一并致谢。

参考文献:

- [1] 王永刚等. 采用改进的 SHPB 方法对泡沫铝动态力学性能的研究[J]. 实验力学, 2003, 18 (2): 257~264 (Wang Y G *et al.* An improved SHPB method and its application in the study of dynamic mechanical behavior of aluminum foams. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, 18 (2): 257~264(in Chinese))
- [2] 王曦等. 泡沫铝的单向力学行为[J]. 实验力学, 2001, 16(4): 438~443 (Wang X *et al.* Uniaxial mechanical behav-

- ior of aluminum foam. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(4):438~443(in Chinese))
- [3] Gibson L J, Arshby M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. The Edinburgh Building, Cambridge CBZ ZRU, Vinited Kinglom: Cambridge University Press, 1997
- [4] Makaki A E, Clyne T W. The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium-based foams[J]. Acta Mater, 2001, 49: 1677~1686
- [5] Hanseen A G, Hopperstad O S, Langseth M, *et al.* Validation of constitutive models applicable to aluminium foams[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44: 359~406
- [6] 张红等. 泡沫铝微结构及其分布特性的数字图像分析[J]. 华南理工大学学报, 2004, 32(1):9~12 (Zhang H *et al.* Digital image analysis of foamed aluminum's microstructure and its distribution. Journal of South China University of Technology, 2004, 32 (1):8~13(in Chinese))
- [7] 胡小方等. 应用 SR-CT 技术研究陶瓷材料的孔隙结构及密度分布[J]. 实验力学, 2003, 18(4): 485~489 (Hu X F *et al.* A study on the porosity and density distribution of ceramics by using SR-CT technique. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(4): 485~489(in Chinese))
- [8] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海交通大学出版社, 1992, 30~62 (Zhuang T G. The theory and arithmetic of computed-tomography. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992, 30~62(in Chinese))

Microstructure Evolution of Porous Foamed Aluminium in Compression

WANG Min, HU Xiao-fang, JIANG Rui, WU Xiao-ping

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, P. R. China)

Abstract: The Synchrotron Radiation X-Ray Computing Tomography (SXR—CT) technology was used for the observation of foamed aluminum's internal microstructure under compression. The each layer section topography of foamed aluminum and its assembled three dimensional structures were reconstructed. The parameters of foamed aluminum, such as porosity and displacement, were also obtained. At the same time, a series of images in vertical-sections at different compression states were given. Based on the 3-D reconstructed images, the evolution of internal microstructures for foamed aluminum can be clearly shown. The results will provide a helpful reference for the improvement of the fabrication technique and the optimized design of foamed aluminum. They can also offer a scientific basis for establishing the fracture mechanism of foamed aluminum. The resolution of SXR—CT technology is about $10.9\ \mu\text{m}$.

Key word: synchrotron radiation x-ray computed tomography; foamed aluminium; porosity