

文章编号: 1001-4888(2008)02-0162-07

数字图像相关方法在闭孔 泡沫铝压缩试验中的应用

房 亮¹, 唐兆琛¹, 杨福俊^{1*}, 何思渊², 何德坪²

(1. 东南大学 土木工程学院工程力学系, 南京 210096; 2. 东南大学 材料科学与工程学院, 南京 210096)

摘要: 为了了解相对密度与胞孔结构对闭孔泡沫铝力学性能的影响, 本文采用放大成像及数字图像相关技术对两种不同密度的泡沫纯铝试样进行了实验研究。利用数字图像相关方法对泡沫纯铝变形前后的图像进行相关计算, 获得了弹性范围内静态压缩情况下闭孔泡沫铝材料表面的全场变形及局部孔结构的变形, 同时根据试验结果计算了试件的名义弹性模量。实验结果表明泡沫铝整体孔结构的变形与泡沫金属材料相对密度有关, 而单个孔结构的变形主要与孔壁面光滑程度和皱褶有关。实验结果还表明图像相关方法能够有效地应用于闭孔泡沫金属的力学性测量和评估的研究。

关键词: 闭孔泡沫铝; 数字图像相关方法; 静态压缩试验; 名义弹性模量; 孔结构变形

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A

0 引言

泡沫金属是一种以金属或金属合金为基体包含大量孔洞的轻质多孔材料, 因其独特的结构而具有许多优异的性能。其在军事、航天航空、汽车工业、潜艇舰船及生物工程等领域的应用日益受到人们的重视^[1-3]。泡沫铝是一种以铝或铝合金为金属骨架, 包含大量孔洞的低密度、高比表面积多孔金属材料。它是一种功能和结构一体化的新型材料, 自上世纪九十年代以来, 引起人们的广泛关注。作为功能材料, 泡沫铝的力学性能是材料得以安全、可靠和有效利用的重要因素之一。近几年来, 有关泡沫铝在静态、动态荷载作用下的力学行为研究报道不断增多。研究结果也表明^[4-6]: 泡沫铝的力学性能还取决于分布在基体金属中的孔洞特征, 包括孔的类型(开孔、闭孔)与形态及分布、孔壁、孔面的缺陷等有关。

鉴于传统的测试方法只能对泡沫金属材料的力学性能进行宏观尺度上的整体测量, 而很少跟踪个别或者少数几个孔洞在加载过程中的变形情况。数字图像相关方法^[7-8](DICM)则是现代先进的光电子技术、图像处理技术和计算机技术相结合的产物。作为一种非接触、无损光学测量方法, 数字图像相关方法还具有如下突出优点: 1) 光路简单, 仅需要一套普通的数字化图像采集设备; 2) 测量范围和灵敏度只与拍摄系统的物面分辨率有关, 因而可以根据测量的对象和需要进行调整; 3) 数据处理方法简单, 可以获得全场信息等优点。本文利用放大成像技术, 以泡沫金属表面的自然纹理特征作为数字图像相关测量技术中的位移信息载体, 对试件表面的孔洞变形进行跟踪测量。

1 数字图像相关方法

数字图像相关方法是一种从物体表面随机分布的斑点或伪随机分布的人工散斑场中, 直接提取变

* 收稿日期: 2008-02-04; 修订日期: 2008-03-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2006CB601201)资助项目

通讯作者: 杨福俊(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光测实验力学研究。E-mail: yang-fj@seu.edu.cn

形信息的全场、非接触的光测方法。其基本原理是匹配物体表面不同状态下的数字化散斑图像上的几何点,跟踪点的运动从而获得物体表面的变形信息。给定物体变形前的图像 $f(x, y)$ 和变形后的图像 $g(x, y)$,要求在变形后的图像中识别出对应于变形前的图像场中某一图像子区(模板)的那个图像子区。相关搜索的示意图如图1所示。

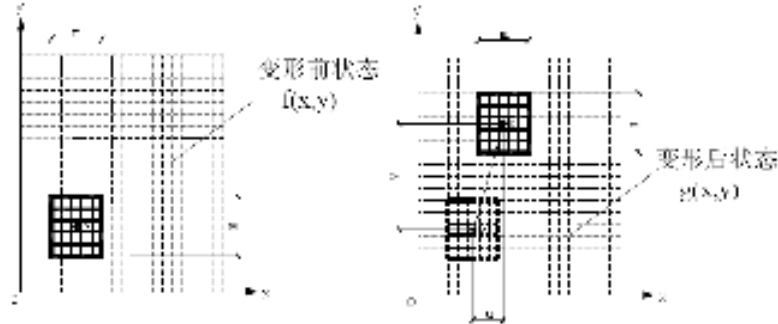


图1 相关搜索示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the search method

由于散斑分布的随机性,散斑场上的每一点周围的一个小区域中的散斑分布与其他点是不一样的,这样的小区域通常称为子集。散斑场上以某一点为中心的子集可作为该点位移的信息载体,通过分析和搜索该子集的移动和变化,便可以获得该点的位移。取 P 点为待测点,以 P 为中心取子集 A ,其大小为 $m \times m$ 个像素,当靶面发生位移或变形后,子集 A 移至子集 B 的位置。由统计学知, A 与 B 这两个样本空间的相关系数取得最大值。因此可以根据相关函数的峰值以确定子集 B 的位置,由子集 B 的位置即可确定 P 点变形后的位置,从而得到该点的位移。这就是数字散斑相关测量的基本原理。

识别的依据是两幅图像子区之间的相似程度,一般用以下的相关公式来衡量:

$$C(u, v) = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}] \cdot [g(x_i + u, y_j + v) - \bar{g}] \right\}^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x_i + u, y_j + v) - \bar{g}]^2}$$

上式表示在变形前后的图像上,各取大小为 $m \times m$ 的子区域,计算相关系数 C ,改变 u, v 的值,即在变形后的图像上移动子区域,可以得到不同的 C 值。使得 C 取最大值的 u, v ,即是子区域中心的位移。其中, $\bar{f}, \bar{g}$ 为计算子区域的平均灰度值, u, v 为子区域中心的位移。为了获得亚像素的位移精度,对图像的灰度进行双线性插值。相关搜索过程中,假设灰度连续,且在小应变下子区域形状不发生变化。通过上述方法,可以确定物体表面的位移值,而应变则可以通过对位移求差分得到。

2 试验结果

2.1 试验过程

本文中所用闭孔泡沫铝材料由东南大学材料科学与工程学院制备,试件的密度分别为 $0.38\text{g}/\text{cm}^3$ (见图2)和 $0.45\text{g}/\text{cm}^3$,相对密度分别为 0.140 和 0.166 。经由线切割得到,几何尺寸分别为 $95\text{mm} \times 70\text{mm} \times 40\text{mm}$ 和 $100\text{mm} \times 70\text{mm} \times 29\text{mm}$,放到如图3所示的加载装置上进行试验。试件放置在钢制刚性加载架上,将加载装置的压头连接到一个事先经过标定的传感器上,通过一个刚性压板对试件进行加载,传感器的另一头接到可以显示读数的应力应变计上,以便实时监控加载过程中力的大小。图3中带有光学放大镜头的 CCD 用于采集试件表面的图像,固定好实验装置的位置以后,将游标卡尺放在试件的位置对测量系统进行标定,如图4所示。图像大小与试件几何尺寸转换关系为:图像上 1pixel 单元相当于试件上 $0.017 \times 0.017\text{mm}^2$ 的面积。加载过程中由置于试件正前方的 CCD 实时采集试件中心的变形过程,由于被 CCD 所拍摄的位置处于试件的中心,因此可以最大限度地降低边缘效应的影响。

试件采用分级单调递增加载,加载过程中用 CCD 实时采集试件变形前后的表面图像,并经图像卡数字化为分辨率 $768 \times 576\text{pixel}$ 的数字图像存入计算机。图像的灰度变化范围在 $0 \sim 255$ 。采用 VC 编

制的数字图像处理程序对采集到的图像进行数据处理,该程序的计算精度为 0.01pixel ,因此实际的位移测量精度可以达到 $0.17\mu\text{m}$ 。

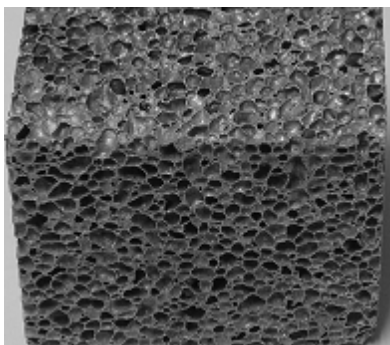


图 2 泡沫铝试件

Fig. 2 Tested closed-cell Al foam specimen

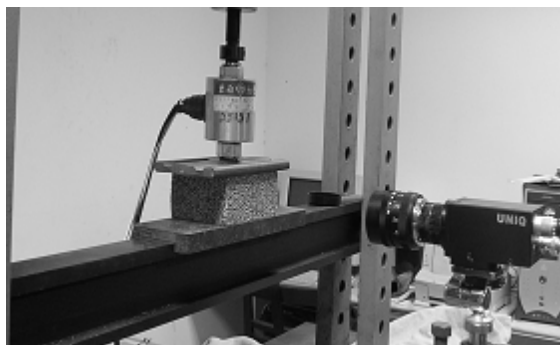


图 3 试验装置图

Fig. 3 Experimental set-up

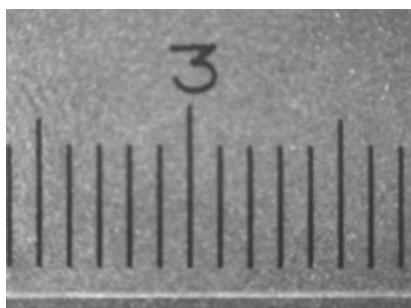


图 4 系统标定图像

Fig. 4 Image with scale for calibration of test system (Size: 768×576 pixels)

2.2 试验结果

本文试验采用手动分级加载,先对相对密度为 0.14 的试件预加载一定大小的力,待应力应变计读数稳定后,以步长为 100N 进行逐级加载,共加载 40 次,最大受力为 4kN 。由文献[8]中所使用的同样由东南大学材料科学与工程学院制备的相对密度为 0.127 的闭孔泡沫铝材料的应力—应变曲线可知,弹性范围内的最大应力可达 4MPa 。因此,可以保证整个过程中泡沫铝材料都是在弹性范围内受压。图 5 为加载前泡沫铝试件表面的图像;图 6 为第 20 次加载后实时拍摄的图像与加载前图像相减之后灰度绝对值得到的图像,可以清楚地看到孔洞在荷载作用下产生的轴向位移;图 7、图 8 为进行数字图像相关计算后的载荷方向以及垂直于载荷方向(横向)位移三维分布图。

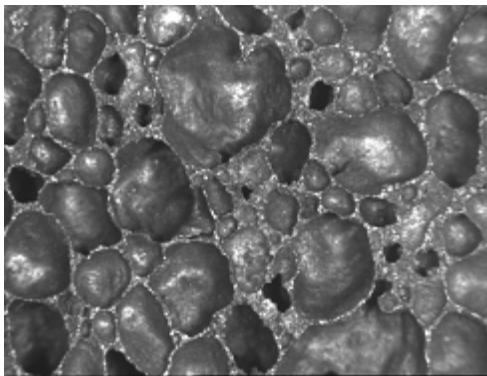


图 5 加载前测试试件的表面图片

Fig. 5 Image of the foam surface
before loading

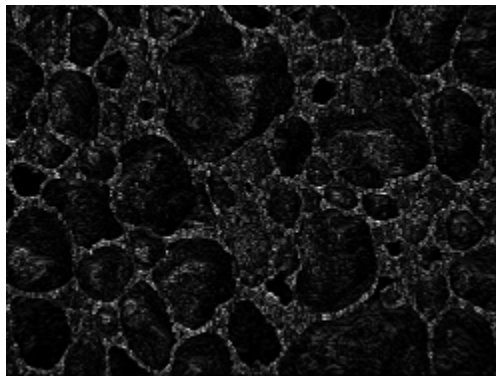


图 6 第 20 次加载后与原始图像相减取绝对值

Fig. 6 Subtracted Image from those of
the 20th loading and initiated state

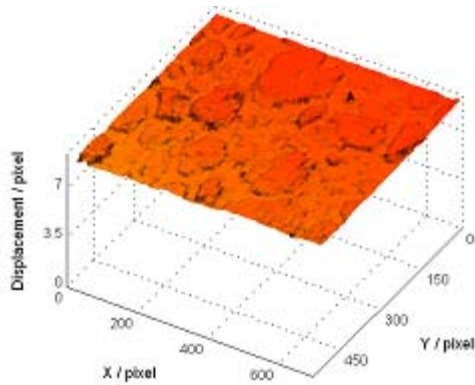


图7 进行数字图像相关计算后的载荷方向的位移场
Fig. 7 3-D displacement distribution along the loading direction

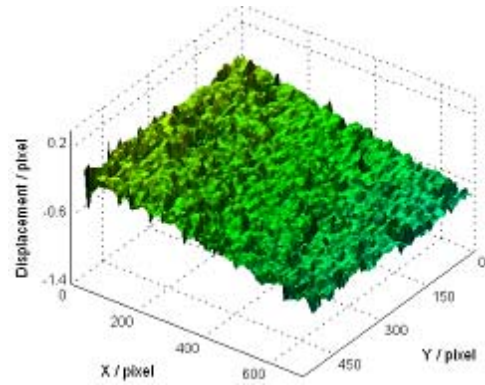


图8 进行数字图像相关计算后的横向位移场
Fig. 8 3-D displacement distribution along the horizontal direction

经过数字图像相关计算后可以看出,较大孔洞内部及其孔壁边界在载荷方向的位移比较大,这一点可以从图7所示的三维位移分布看到的表面孔洞的轮廓得到证明。

本文还对相对密度为0.166的试件进行类似的试验,以步长为200N进行逐级加载,共加载40次,最大受力为8kN。图9为加载前该试件的测试表面的图像;图10、图11分别为载荷方向及横向位移的三维分布图。

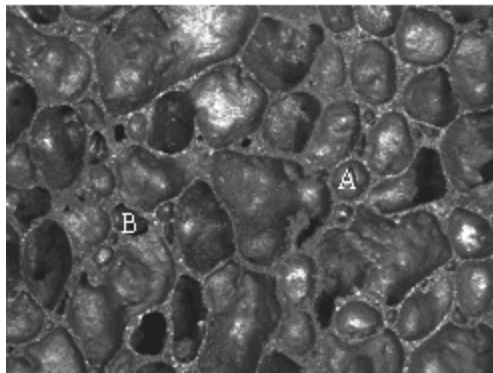


图9 加载前相对密度为0.166试件的表面图
Fig. 9 Image of the foam surface before loading ($\rho/\rho_0=0.166$)

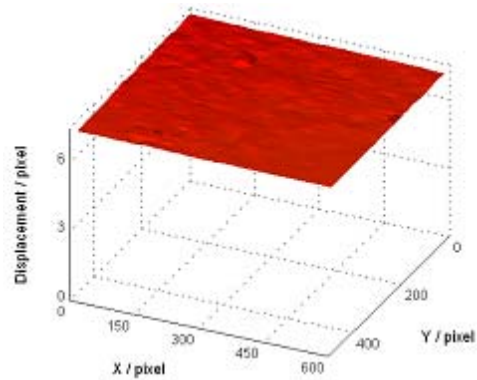


图10 试件2的载荷方向位移场分布
Fig. 10 Displacement distribution along the loading direction of specimen 2

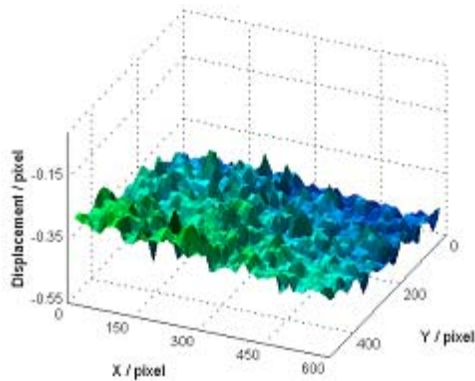


图11 试件2的横向位移场
Fig. 11 Displacement distribution along the horizontal direction of specimen 2

为了研究泡沫铝材料在弹性范围内加载时压力与位移的线性程度,本文以相对密度为0.140的闭孔泡沫铝试件为例,在纵坐标为120pixel的水平线上以60pixel为间隔选取了12个点,分别编号为A、B、C、…、J、K和L,其中点A坐标为(60pixel,120pixel),点L坐标为(720pixel,120pixel)。初始预加压力为4000N,然后再以步长为500N进行逐步加载,共加载32次,第32次加载完毕后泡沫铝所受的最大压力为20000N。每次加载完毕后,都用CCD实时采集泡沫铝变形后的表面图像,待全部加载完毕后,用图像相关方法对从A到L的12个点进行跟踪计算,所得结果见图12。

图中最长的线段为线性拟合后生成的直线,方程为:

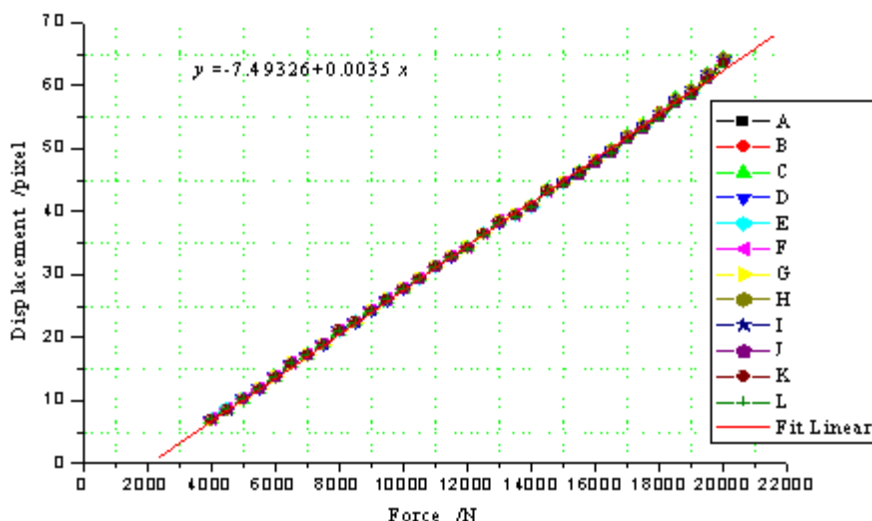


图 12 对 12 个点跟踪计算后位移随压力变化的曲线图

Fig. 12 Plot of Displacement-force of 12 points: from A to L

$$y = -7.49326 + 0.0035x$$

其中 x 为荷载大小, y 为位移大小。由图 11 中所计算出来的泡沫铝材料在压力作用下位移随压力变化的曲线图可以看出, 泡沫铝材料在弹性范围内随着压力而产生的变形的线性度是非常高的。由上式可以认为在弹性范围内, 每加载 1N, 变形增加 0.0035 个像素。利用下式可以计算得出泡沫铝的名义弹性模量:

$$E = \frac{N \cdot l}{A \cdot \Delta l} = \frac{1 \times 40}{95 \times 70 \times 0.0035 \times 0.017} = 101 \text{ MPa}$$

为了研究闭孔泡沫铝材料在荷载作用下单个孔洞的变形特征, 对前文所述的以相对密度为 0.166 的试件为研究对象所做的试验进行了进一步的研究。利用图像相关方法分别计算了图 8 中 A、B 两截孔的边界位移矢量, 结果分别如图 13 和图 14 所示。图 13 和图 14 分别为加载第 20 次后与加载前试件表面孔 A、B 两孔边界各点的位移矢量图。

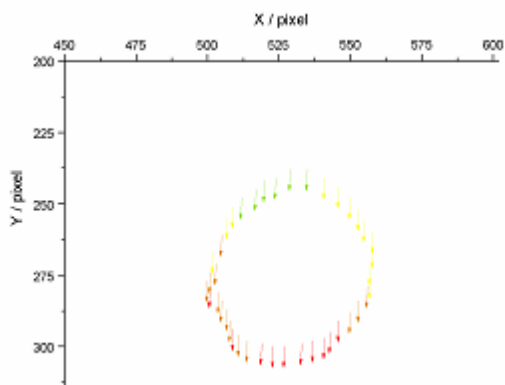


图 13 A 孔的位移示意图

Fig. 13 Displacement vector of cell A

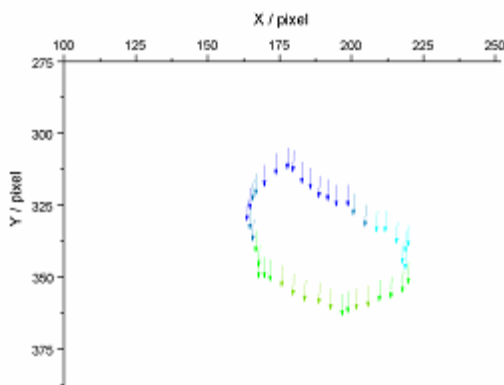


图 14 B 孔的位移示意图

Fig. 14 Displacement vector of cell B

图 13 和图 14 中的位移的大小是按红橙黄绿蓝的顺序由小到大显示, 即红色箭头代表的位移值最小, 蓝色箭头代表的位移值最大, 图中箭头的方向表示位移的方向。其中, 图 14 中的位移大小范围分布在 13.76~13.88 pixel, 位移矢量与水平方向夹角分布在 1.618~1.621 弧度; 图 14 中的位移大小范围分布在 13.68~13.78 pixel, 位移矢量与水平方向夹角分布在 1.628~1.633 弧度。由图中可以看出, 由

于加载尚处在弹性范围内, A、B 两孔边界各点的位移方向基本均沿着载荷的方向。

2.3 结果讨论

由对单个试件整体加载后得到的位移场分布图的对比中可以看出, 相对密度为 0.166 的试件在加载过程中沿着压力方向的位移变化情况与相对密度为 0.140 的试件不同, 试件表面的孔洞边界在载荷方向的位移大小似乎是围绕在某一值附近随机分布。或者说, 相对密度为 0.166 的试件在加载过程中沿着压力方向的测试表面各点位移是比较均匀的, 而并不像相对密度为 0.140 的试件那样孔洞内部的载荷方向位移大小与孔洞大小有关。造成这种情况的原因与受压试件的相对密度有关。相对密度较大的试件, 孔壁的平均厚度一般较之相对密度较小的试件要厚, 因此在受压的时候能够承受更大的压力, 从而使得整体的闭孔结构受力较为均匀。

图 12 所显示的试件上各点位移随荷载变化的曲线表明, 闭孔泡沫铝试件在弹性范围内加载的后期具有很高的线性度, 并且利用该图所计算出来的名义弹性模量也与其他文献中使用传统实验手段得到的数据大致符合。文献[9]利用 CSS2002 电子万能试验机对闭孔泡沫铝合金和泡沫纯铝进行准静态压缩试验, 得出相对密度为 0.14 的泡沫纯铝的名义弹性模量约为 140MPa。文献[10]通过试验得出孔径大小对泡沫铝的名义弹性模量也有影响, 但没有指出孔径与弹性模量对应的具体关系。

而对于单个孔洞来说, 由图 13 和图 14 中可以看出, 当孔洞截面的边缘线相对比较光滑的时候, 其变形矢量的大小及方向相对来说就比较连续, 而当孔洞截面的边缘线出现突然的拐点时, 其变形矢量的大小及方向就会出现不太连续的跳跃, 因此位移的大小还跟孔洞的形状有关。由于是在弹性范围内加载, 因此随着加载的进行, 试件表面的孔洞形状并没有发生显著的改变, 且位移的方向均为沿着荷载作用的方向, 位移的大小则是沿着荷载作用的方向逐渐减小。

3 结论

利用数字图像相关方法实现了对闭孔泡沫铝材料受压时力学特性参数的测量, 在弹性范围内, 闭孔泡沫铝材料受压后同一水平面上各个点的变形情况基本保持一致, 即闭孔泡沫铝材料在弹性受压时具有很高的线性度。对于相对密度较小的试件, 由图 7 可以明显看出, 闭孔泡沫铝材料在弹性范围内受压时较孔洞内部的在载荷方向位移比较大; 而对于相对密度较大的试件, 由图 10 可以看出, 试件在受压时沿着压力方向的变形情况比较均匀。同时由对单个孔洞变形情况的分析, 得知对于同一个孔洞来说, 位移沿着荷载作用的方向从上到下逐渐减小。鉴于孔结构材料的特性, 其局部变形不可能采用传统的测试手段进行测量, 而仅仅测量构件的整体变形又很难把握和揭示孔结构材料的力学性能与孔结构形态参数变化之间的对应关系, 更难以对孔结构材料制备工艺改进提供科学的依据。因此, 本文运用现代光学测量方法与计算机图像处理技术, 探索了一种适用于孔结构形态特征及变形测量的新的实验方法, 这对于优化孔结构材料的制备以及对孔结构材料的力学本构模型的建立与实验验证来说是十分必要的。

参考文献:

- [1] 康颖安, 张俊彦. 泡沫金属的力学性能研究综述[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2005, 23(1): 11—16 (KANG Ying-an, ZHANG Junyan. Review of mechanical properties of metallic foams. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2005, 23(1): 11—16 (in Chinese))
- [2] Torquato S, et al. Effective mechanical and transport properties of cellular solids [J]. Int. J. Mech. Sci, 1998, 40 (1): 71—82.
- [3] 卢子兴, 郭宇. 金属泡沫材料力学行为的研究概述[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(11): 978—983 (LU Zixing, GUO Yu. Brief review of studies on the mechanical behavior of metallic foams. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(11): 978—983 (in Chinese))
- [4] Onck P R, Andrews E W, Gibson L J. Size effects in ductile cellular solids, Part I: Modeling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43: 681—669.
- [5] Nieh T G, Higashi K, Wadsworth J. Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams [J]. Materials Science and Engineering, 2002, A283: 105—110.

- [6] 潘艺, 胡时胜, 凤仪等. 泡孔尺寸对开孔泡沫铝合金力学性能的影响[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 171—175 (PAN Yi, HU Shisheng, FENG Yi, et al. Cell-size effect on mechanical property of open-cell aluminum alloy foam. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 171—175 (in Chinese))
- [7] Schreier Hubert W. Investigation of two and three-dimensional image correlation techniques with applications in experimental mechanics [D]. Doctor dissertation, University of South Carolina, 2003:1—4.
- [8] 金观昌, 孟利波, 陈俊达等. 数字散斑相关技术进展及应用[J]. 实验力学, 2006, 21(6): 689—702 (JIN Guanchang, MENG Libo, CHEN Junda, et al. The progress and application of digital speckle correlation method. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(6): 689—702 (in Chinese))
- [9] 郑明军, 何德坪. 胞状纯铝与胞状铝合金的准静态压缩性能[J]. 机械工程材料, 2005, 29(5): 57—60 (ZHENG Mingjun, HE Deping. The static compressive properties of cellular Al and cellular alloy. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29(5): 57—60 (in Chinese))
- [10] 王曦, 虞吉林. 泡沫铝的单向力学行为[J]. 实验力学, 2001, 16(4): 438—443 (WANG Xi, YU Jilin. Uniaxial mechanical behavior of aluminum foam. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(4): 438—443 (in Chinese))

Compressive Test of Closed-cell Aluminum Foam Based on Digital Image Correlation Method

FANG Liang¹, TANG Zhao-chen¹, YANG Fu-jun¹, HE Si-yuan², HE De-ping²

(1. Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: This paper primarily concerns the role of relative densities and cellular structures in influencing on the mechanical behaviour of closed-cell aluminum foams. Two closed-cell pure aluminum foams have been investigated by use of optical observation at large magnification. Based on calculating correlation of the images captured before and after deformation, digital image correlation method (DICM) was employed to measure the displacement of closed-cell aluminum foam materials under uniaxial compression. The whole-field deformation and displacement distribution of cells are presented in this paper, and the nominal Young's modulus of the tested specimen is also obtained. Experimental results show that the static mechanical properties of closed-cell aluminum foam is depended on the relative density, and the cell deformation is related to its shape and change with its wavy wall. Experimental results also indicate that DICM is an effective approach to investigate and evaluated the mechanical behavior of closed-cell aluminum foam materials.

Keywords: closed-cell aluminum foam; digital image correlation method (DICM); static compressive test; nominal Young's modulus; cellular deformation