

文章编号: 1001-4888(2013)05-0629-06

基于数字图像相关方法对冲击载荷下 泡沫铝全场变形过程的测试

章超, 徐松林*, 王鹏飞

(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, 安徽合肥 230027)

摘要: 应用分离式霍普金森压杆(以下简称 SHPB)和高速摄影装置研究了冲击载荷下泡沫铝试件全场变形的测量方法。使用 SHPB 对泡沫铝试件进行冲击压缩实验,同时用高速摄影装置对实验过程进行全程跟踪拍摄。将得到的高速摄影图像采用数字图像相关方法进行分析,由此可得到冲击压缩过程中泡沫铝试件全场应变的分布和变化规律。此研究揭示了冲击载荷下泡沫铝试件局部化变形的发展过程,为研究泡沫铝在不同冲击载荷下不同变形模式的内在机制提供了新的可靠的方法。

关键词: 冲击动力学; 泡沫铝; 数字图像相关方法; 位移场; 应变场

中图分类号: O383+.3

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-102

0 引言

多孔材料由胞孔组成,胞孔的变形与其动态力学行为有很大的联系。在不同的冲击速度下,胞孔的变形特性各不相同,导致多孔材料宏观动态力学性能不一致。Zheng 等^[1]和刘耀东等^[2]基于数值模拟分析,认为多孔材料随冲击速度的增加,其变形表现出三种模式,即所谓的准静态模式、过渡模式和冲击模式。王鹏飞等^[3]利用 SHPB 实验验证了上述三种变形模式,并利用高速摄影获得了相应的泡沫铝试件高速变形过程的动态图像。动态图像表明:即使在准静态模式下,试件内部仍表现出明显的变形不均匀性。

为了揭示泡沫铝试件在冲击压缩过程中的变形特性,近年来许多学者做了大量的工作。主要在以下几个方面:(1)常规的电测方法仅能测试试件的平均应变,无法测量其中的不均匀性^[4]。(2)数值模拟能够从规律上进行解释,但是与真实实验仍有一定差距^[1,2]。(3)单纯的高速摄影只能提供一种直观的判断,是一种定性的测量手段,而且对于微小的变形无法判断^[3]。因此如何从高速冲击实验中定量地测试全场应变就变成了困扰学者的难题。

数字图像相关方法是光测力学中的一种简单方便、精度高的测试手段,在 Peters 和 Ranson^[5]提出后,经过多年的发展,已经在生物力学、岩石力学、纳米力学等众多场合得到广泛的应用。近年来也有人将这一方法用于泡沫铝的研究,但主要集中在准静态实验方面。Bastawros 等^[6]讨论了闭孔泡沫铝的准静态变形过程;Wang 等^[7]研究了多孔聚合物准静态压缩下的不均匀变形,并认为局部变形带的发展过程是由小区域内的成核和生长组成的。

动态性能方面研究相对较少,主要有:Lee 等^[8]和 Elnasri 等^[9]分别研究了开孔和闭孔泡沫铝高速

* 收稿日期: 2013-07-02; 修订日期: 2013-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(No:11272304, 11102206),高等学校博士学科点专项科研基金(2011340, 2110008)资助

通讯作者: 徐松林(1971-),男,博士,副教授。E-mail: slxu99@ustc.edu.cn

变形过程中的全场应变;LuO 等^[10]在试件表面粘上带有格子的“标签”测量了泡沫非晶金属材料。然而,在这些实验过程中所使用的高速相机只能拍摄少量的照片,所记录的图像非常少,仅能够分析整个变形过程中的几个点,因而无法得到各应变带在试件中的发展过程。而且文献[9]中的“标签”并不具有散斑的特征,使得其对计算结果有一定影响。在国内,杨宝等^[11]和魏志强等^[12]通过图像处理分别测量了整个试件的平均应变和试件沿着加载方向上一系列点的应变,分析了对应的标记点处的变形发展,并不具有“场”的分析。

基于此,本文将在前人的工作基础上,结合 SHPB 实验和高速摄影技术,研究高速冲击载荷下泡沫铝的全场应变及其变化趋势。

1 泡沫铝的冲击实验

1.1 实验装置

本文实验是在中国科学技术大学材料力学行为与设计实验室中直径为 37mm 的 Hopkinson 实验装置上进行的(示意图如图 1)。选用的试件为直径 32mm,高度为 32mm 的闭孔泡沫铝,密度介于 $0.315\sim 0.335\text{g/cm}^3$ 之间。

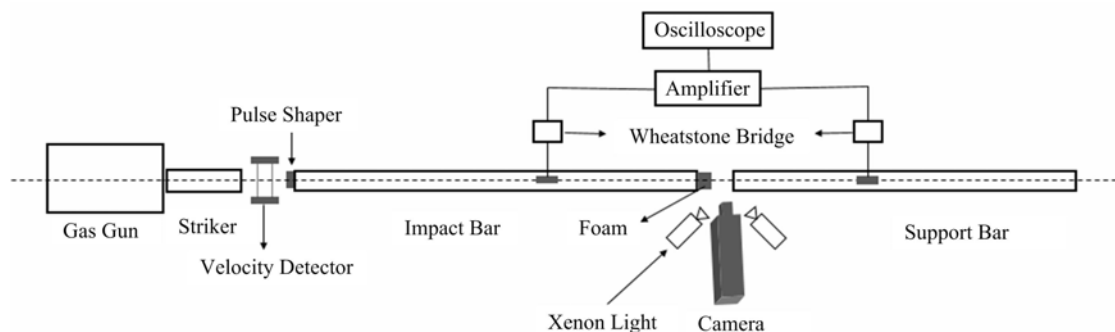


图 1 SHPB 和高速摄影实验装置

Fig. 1 Experimental setup of SHPB and camera system

实验所用高速摄影机为 Phantom V12.1,其全画幅分辨率为 1280×800 像素,全画幅拍摄速率可达 6242 幅/秒,最高拍摄速率可达到 100000 幅/秒。实验中使用了两个脉冲氙灯来提高曝光量。本文实验中帧间隔 $13.5\mu\text{s}$,对应的拍摄画幅分辨率为 288×232 像素。

1.2 实验过程

实验前先在泡沫铝试件上喷涂哑光漆,这样既可以增加进光量,缩短曝光时间,也可以使泡沫铝试件具有“散斑”的特征。

泡沫铝表面凹凸不平,给试件表面的应变测量带来极大的困难。文献[10]中使用了在试件表面贴乳胶膜的方式解决这个问题,但一方面,膜与试件间的接触问题使得膜的应变并不能完全反映试件的应变,而且贴膜的质量影响到测量的精度;另一方面,从泡沫铝的变形机制来看,它不像一般连续介质,需要给出连续的点的位移场,泡沫铝的位移场主要由凸起部分,即基体铝部分进行描述,而不需要使用凹进部分即孔洞部分来描述。当然严格意义上,孔洞的位移场对宏观性能也是有影响的。因此本文未采用类似方法,而主要对凸起部分即基体铝部分进行处理。从实验测试的结果来看,这能够反映试件的局部变形特性,与宏观测试的结果相比,也比较吻合。

本实验中子弹速度为 17m/s ,试件放在打击杆(见图 1)的后端、打击支撑杆。变形前后的图像如图 2 所示,其中图 2(a)中试件还未接触到支撑杆;图 2(b)中试件刚好接触到支撑杆,取此刻时间为 $0\mu\text{s}$;图 2(c)是变形过程中一个变形图;图 2(d)为变形结束时刻。(b)(c)(d)两两之间分别相差 24 帧、40 帧图像,根据帧间隔时间可计算得(c)和(d)的时刻分别为 $324\mu\text{s}$ 和 $864\mu\text{s}$ 。即在 $864\mu\text{s}$ 的实验过程中得到了 64 帧图像,比以往工作有了较大的进步。

2 数字散斑相关方法分析结果

2.1 全场应变

比较图 2(b)、(c)和(d)可以直观地发现:图 2(b)中,在图 2(c)中发生了较大变形,即形成了两个局部变形带。变形带中部分完整的胞孔,其面积变化达到了 50%甚至更大,而 1,2 区域外的其他胞孔的面积变化却不大(更清晰的彩图可到编辑部网站查询下载)。

利用本文所述的数字图像相关方法对泡沫铝高速摄影图像进行处理,即可以得到试件变形的位移场和应变场。对图 2(c)时刻($324\mu\text{s}$)图片处理即可得到该时刻的位移场(图 3(a))和应变场(图 3(b)),可以看出试件左边部分的位移几乎为 0,而右边部分有较大的位移。从图 3(b)中可以看出试件的应变主要集中在两个应变带上。

比较高速摄影和数字图像相关方法的结论即可发现两者是非常吻合的。为了说明其吻合程度,从未变形时刻取了两帧图像进行处理。理论上,此时应变场应为 0,实际处理得到的位移场和应变场如图 3(c)和图 3(d)。位移和应变的标准差分别为 7.4×10^{-5} 像素和 3.3×10^{-7} ,该误差足够小,不会影响实验过程中全场应变的测量,因此是可以接受的。

2.2 局部变形带的发展过程

对于某些研究,知道某一时刻下的全场应变还不够,还需知道全场应变的发展过程,如文献[7]中讨论的准静态压缩下多孔聚合物中局部变形带的发展过程。

图 4 中的结果揭示了两个局部变形带 a 和 b 的发展过程:开始时变形带 a 和 b 所在区域都不存在变形,随着时间的发展,变形带所在区域的变形逐渐局部化,在变形集中区域成核然后逐渐发展成一条完整的变形带,产生了较大的局部塑性变形。最后,变形带逐渐变小直至消失。可以看出,变形带 a 和 b 展示了局部变形带发展和消亡的过程。其发展的过程与文献[7]中的描述是一样的,而在高速冲击实验中还未有相关的研究报道。

局部变形带的产生是由于泡沫铝试件中存在局部缺陷,当冲击速度不高时,变形从局部缺陷处开始,并发展成局部变形带。当局部变形带密实到一定程度后,该区域的刚度变大,大于试件其他的局部缺陷,此时试件的变形转移到其他局部缺陷处并产生新的局部变形带,而原有的局部变形带的变形就开始进入消亡期。

随着局部变形带的发展与消失,不断有新的变形带产生,也有变形带消失。在本文实验过程中,较明显的四个时刻的变形带如图 5 所示。可以看出局部应变带的产生具有随机性的特征,产生的位置不具有规律性。其形状主要有“斜 I”型和“V”型,这与图像中观察到的变形带形状一致,也与数值模拟结果相似(文献[2,3])。不过文献[2,3]中的模型并未考虑真实试件的局部缺陷,所以其数值模拟的结果与图像处理结果即真实的实验结果存在一定的差异。

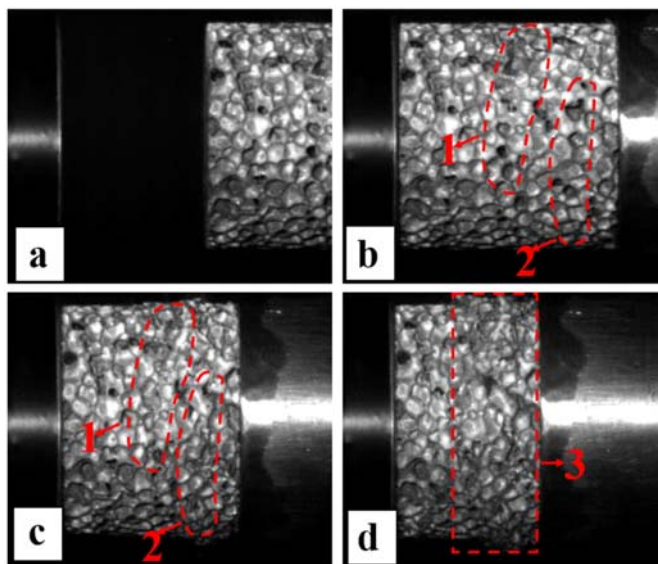


图 2 不同时刻下试件的变形图:

(a)撞击前,(b) $0\mu\text{s}$,(c) $324\mu\text{s}$,(d) $864\mu\text{s}$

Fig. 2 Specimen photos of different time:

(a) before impact, (b) $0\mu\text{s}$, (c) $324\mu\text{s}$, (d) $864\mu\text{s}$

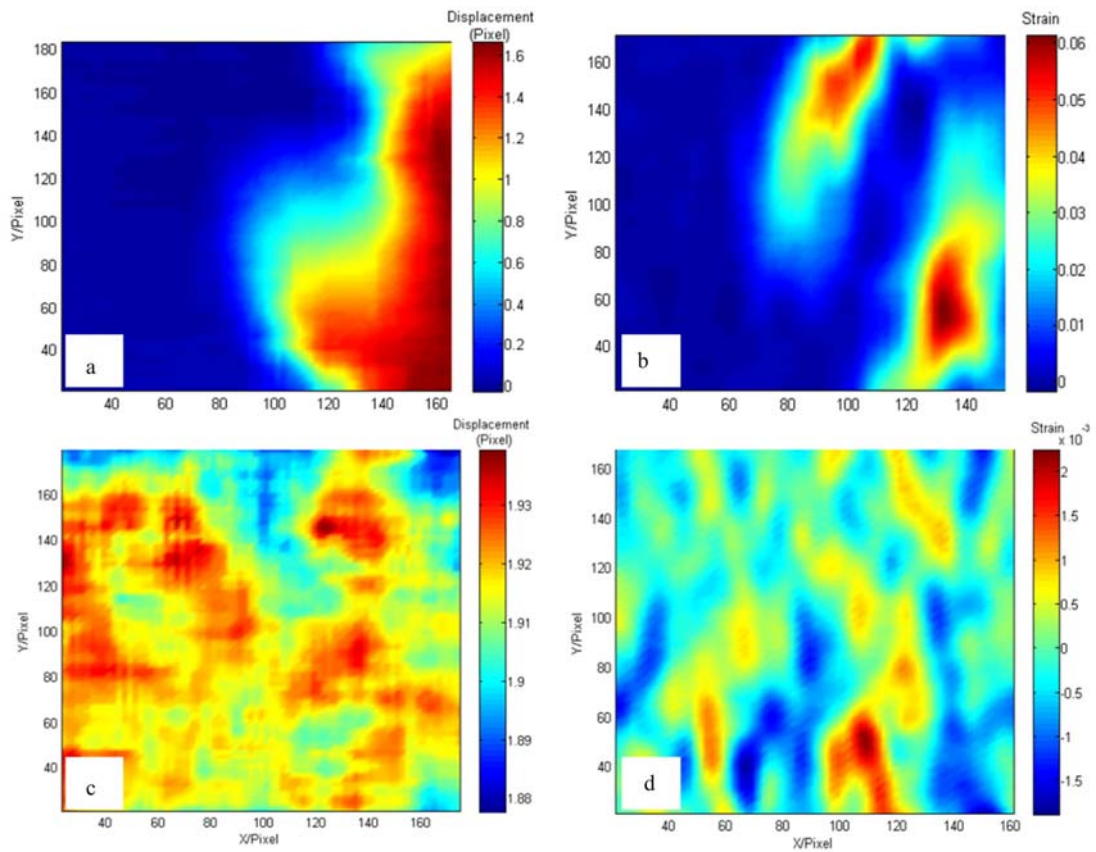
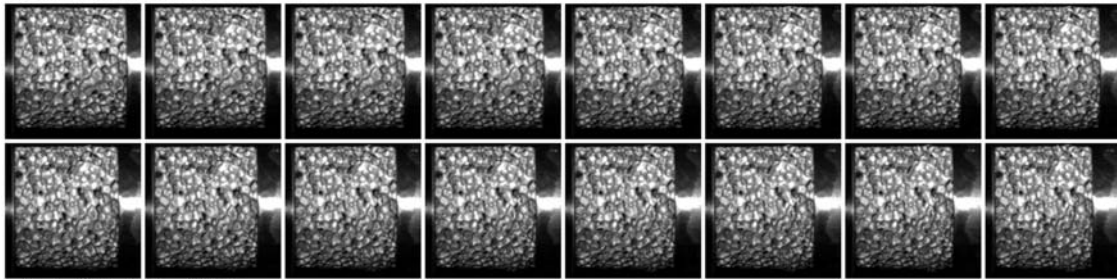


图 3 (a)324 μ s 时刻的位移场,(b)324 μ s 时刻的应变场,
(c)变形前某时刻的位移场,(d)变形前某时刻的应变场

Fig. 3 (a)Displacement field at 324 μ s, (b) Strain field at 324 μ s, (c) Displacement field before deformation and (d) Strain field before deformation

Frame:40.5 μ s~256.5 μ s



Strain field:40.5 μ s~256.5 μ s

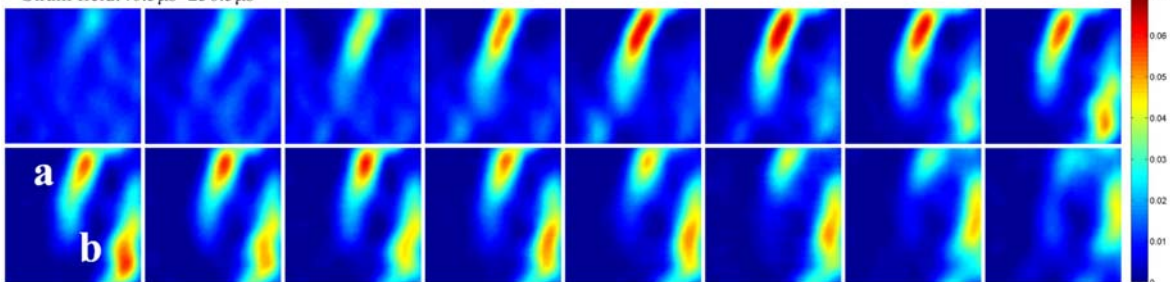


图 4 局部变形带的发展过程:图像和应变场

Fig. 4 Development process of localized deformation band:frame and strain field

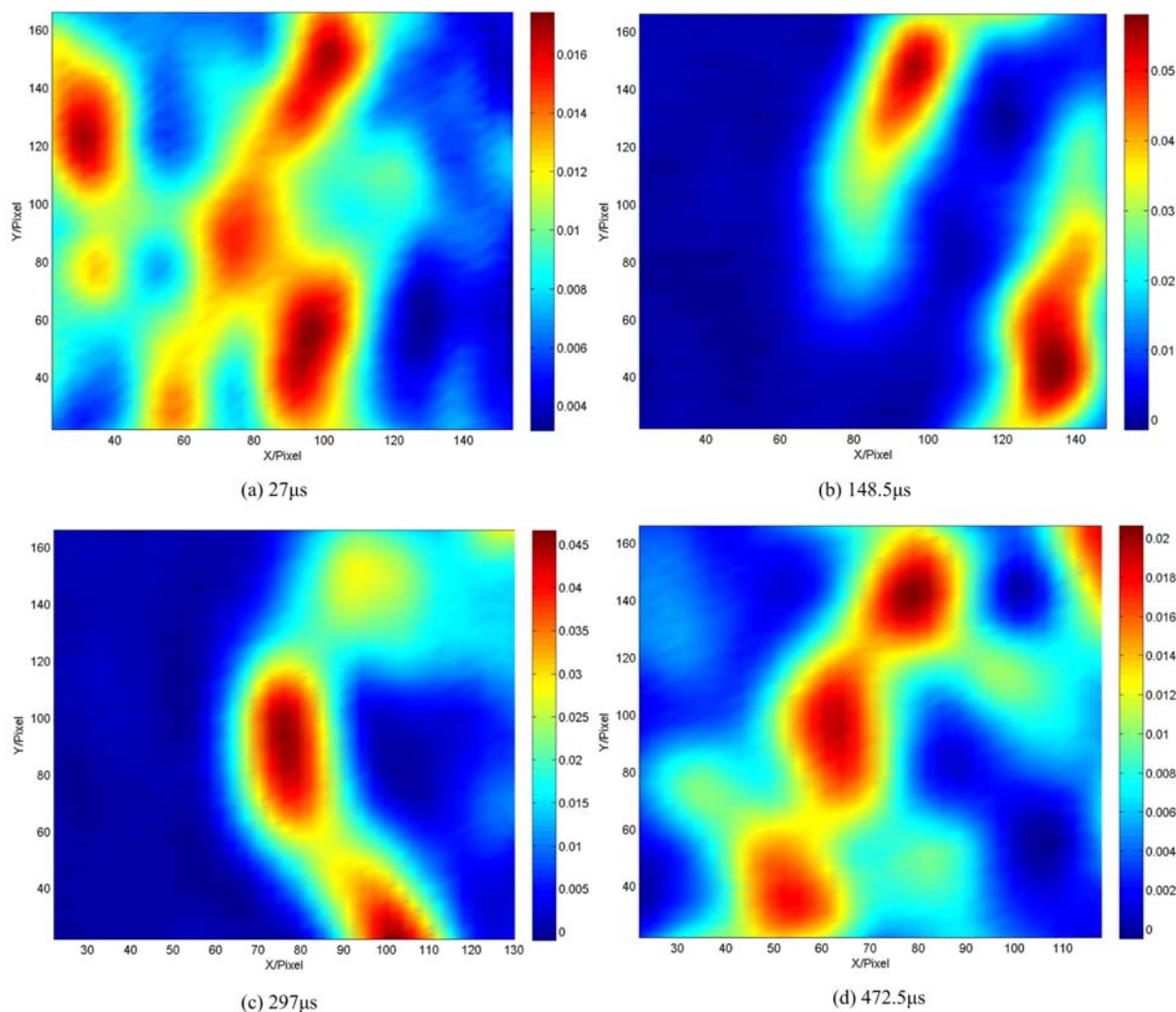


图5 实验过程中出现的局部变形带

Fig. 5 Localized deformation bands during the experiment

3 总结

本文基于数字图像相关方法的原理对泡沫铝冲击变形过程的高速摄影图像进行处理,得到了泡沫铝冲击载荷下的应变场,并进一步分析了冲击过程中的细观变形,为研究冲击载荷下局部变形对泡沫铝动态力学行为的影响提供了新的方法。

1) 利用高速摄影机记录了泡沫铝试件的完整变形过程,得到了 64 帧图像,比以往的工作有了明显的提高。

2) 利用数字散斑相关方法对上述图像进行处理,得到了泡沫铝冲击载荷下的应变场,其结果与高速摄影图像十分吻合,误差在可接受范围之内。

3) 分析了试件中局部变形带的发展过程和消失过程,其发展过程与文献[7]中准静态变形情况一致。比较表明,本文采用的数字图像相关方法对高速动态实验和准静态都能很好的处理。

4) 结果表明实验过程中会产生多个局部变形带,而且是随机产生的。其形状主要有“斜 I”型和“V”型,并与图像中观察到的变形带形状一致,也与数值模拟结果相似。

参考文献:

- [1] Zheng Z, Yu J, Li J. Dynamic crushing of 2D cellular structures: A finite element study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1):650—664.

- [2] 刘耀东, 虞吉林, 郑志军. 惯性对多孔金属材料动态力学行为的影响[J]. 高压物理学报, 2008, 22(2):118—124 (Liu Yaodong, Yu Jilin, Zhen Zhijun. Effect of Inertia on the Dynamic Behavior of Cellular Metal[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(2):118—124(in Chinese))
- [3] 王鹏飞, 徐松林, 郑航 等. 变形模式对多孔金属材料 SHPB 实验结果的影响[J]. 力学学报, 2012, 44(5):928—932 (Wang Pengfei, Xu Songlin, et al. Influence of deformation modes on SHPB experimental results of cellular metal[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(5):928—932(in Chinese))
- [4] 王鹏飞. 多孔金属的动态力学响应及其温度相关性研究[D]. 中国科学技术大学, 2012 (Wang Pengfei. Research on Dynamic Mechanical Response of Cellular Metals and Temperature Dependency [D]. University of Science and Technology of China, 2012(in Chinese))
- [5] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3):427—431.
- [6] Bastawros A F, Bart-Smith H, Evans A G. Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2000, 48(2):301—322.
- [7] Wang Y, Cuitiño A M. Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(13):3777—3796.
- [8] Lee S, Barthelat F, Moldovan N, et al. Deformation rate effects on failure modes of open-cell Al foams and textile cellular materials[J]. International journal of solids and structures, 2006, 43(1):53—73.
- [9] Elnasri I, Pattofatto S, Zhao H, et al. Shock enhancement of cellular structures under impact loading: Part I Experiments[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(12):2652—2671.
- [10] Luo H, Bhat A, Demetriou M D, et al. Dynamic Compressive Behavior of Bulk Metallic Glass Foam[C]//High Speed Full-field Optical Measurements I SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics, 2009:392.
- [11] 杨宝, 汤立群, 刘逸平 等. 冲击条件下泡沫铝的细观变形特征分析[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4):399—403 (Yang Bao, Tang Liqun, Liu Yiping, et al. Meso deformation characteristics analysis of aluminum foam under impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(4):399—403(in Chinese))
- [12] 魏志强, 黄小清, 杨宝 等. 应用高速摄影机对泡沫铝在 SHPB 实验过程的变形跟踪与分析[J]. 实验力学, 2011, 26(2):1—7 (Wei Zhiqiang, Huang Xiaoqing, Yang Bao, et al. Tracking and analysis of aluminum foam deformations in SHPB experiment by using high speed camera[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(2):1—7(in Chinese))

Test of Aluminum Foam Deforming Process under Impact Load Based on Digital Image Correlation Method

ZHANG Chao, XU Song-lin, WANG Peng-fei

(CAS Key Laboratory for mechanical behavior and design of materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Full field deformation measurement method of aluminum foam under impact loading was studied by using split Hopkinson Pressure Bar (hereinafter referred to as SHPB) and high speed camera. Impact pressure experiment of aluminum foam specimen was carried out based on SHPB, at the same time the whole experimental process was tracked by high speed camera. The resulting high speed photographic images were analyzed by digital speckle method. Thus, the strain distribution and variation in deformation field of aluminum foam specimen during impact pressure loading process were obtained. Results reveal the development process of internal localized deformation of aluminum foam specimen under impact loading, which offers a new and reliable method for studying the internal mechanism of different deformation mode of aluminum foam under impact loading.

Keywords: impact dynamics; aluminum foam; digital speckle method; displacement field; strain field