

文章编号: 1001-4888(2011)02-0117-07

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^{*}

魏志强, 黄小清, 杨宝, 汤立群, 和郁伟

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: SHPB 技术虽然能方便地得出材料的动态应力应变关系, 但却不能直观地揭示材料在经受冲击荷载时的变形特征, 而这恰恰是泡沫金属力学性能研究的重要方面。为此, 本文设计了一套 SHPB—高速摄影机系统, 借此系统对 SHPB 实验中的泡沫铝试件进行了实时的变形跟踪拍摄, 然后应用图像处理软件对泡沫铝试件的动态变形进行分析并提取了位移信息, 得出了泡沫铝试件的变形历时曲线。此外也通过 SHPB 后处理得到了试件变形信息, 最后对比了这两种方法得到的变形信息, 发现用这两种方法得出的数据能较好地吻合在一起。这表明, 本文设计的实验方法能对泡沫铝试件在 SHPB 实验过程中的变形进行有效跟踪。

关键词: 分离式霍普金森压杆(SHPB)实验; 高速摄影系统; 泡沫铝; 动态变形

中图分类号: O341

文献标识码: A

0 引言

泡沫铝材料作为一种新型结构功能一体化材料, 除了具有轻质、高比强度、高比刚度等结构特点外, 还具有隔音、降噪、减震、隔热、缓冲吸能等功能特点。基于泡沫铝的上述结构功能特点, 对泡沫铝性能的研究越来越多, 由于泡沫铝的静态力学实验技术已趋于成熟, 故目前国内外对泡沫铝力学性能的实验研究主要集中于对其动态力学性能的研究^[1-6], 而这方面的实验方法较单一, 主要是分离式霍普金森压杆(SHPB)以及落锤实验技术。其中霍普金森压杆技术具有简单、实用等特点, 能够方便得到试件在高应变率下的动态应力应变曲线, 是目前研究材料动态力学性能的常用方法, 但是这种实验方法不能直观地观察试件的高速变形情况, 而实验材料的冲击变形及破坏情况极可能跟其准静态的情况有所不同, 所以很有必要对材料的动态变形情况进行一些直观的了解。

图像技术作为一种直观的实验研究方法, 目前已应用于材料微变形特征的研究, 但仅仅局限于材料在准静态实验下的变形特征研究^[7-11], 而对于 SHPB 动态实验下的材料微变形特征研究却很少, 这主要是由于满足图像处理要求的材料动态实验变形图像难于获取造成的。而目前用于获取物体高速运动图像的方法主要是高速摄影技术, 但这种方法现在主要是用于宏观物体高速运动图像的获取, 如汽车的撞击实验、手机跌落实验等, 对 SHPB 实验中动态微变形过程的跟踪拍摄目前国内外的相关报道较少。

综上所述, SHPB 实验技术虽然能方便地得到材料动态应力应变曲线, 但却不能给予实验试件变形的直观认识, 另外目前用于研究材料变形分析的图像处理技术虽已用于材料实验的微变形特征研究,

^{*} 收稿日期: 2010-09-10; 修订日期: 2010-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10872070, 90916026)

通讯作者: 汤立群, 男, 教授, 博导。主要研究方向: 冲击动力学、材料本构关系和结构损伤和长期健康监测技术。E-mail: lqtang@scut.edu.cn

但却仅局限于准静态实验,并未涉及到动态实验。为了更好地研究泡沫材料的动态变形特征,本研究试图通过设计一套 SHPB—高速摄影机系统来整合上述两种实验方法的优点,拍摄泡沫铝经受 SHPB 冲击加载的微变形过程,并分析泡沫铝经受冲击加载的变形特点,然后通过对比用图像处理办法以及 SHPB 传统后处理方法得出的试件变形信息,来验证 SHPB—高速摄影机系统用于研究 SHPB 冲击实验中泡沫铝材料动态微变形的可行性,并通过图像初步分析泡沫铝试件在 SHPB 实验中的变形特点,为泡沫铝动态力学性能的数值模拟提供一些参考信息。

2 实验方案设计

2.1 SHPB—高速摄影机系统

本实验设计的 SHPB—高速摄影机系统主要由分离式霍普金森压杆装置系统和高速摄影机系统两大部分组成。其中分离式霍普金森压杆装置的压杆是直径为 $\Phi 74\text{mm}$ 的锥形钢杆,入射杆和透射杆长度分别为 320cm 和 200cm ,子弹长度为 80cm ,子弹由空气炮发射;高速摄影机系统由高速摄影机和辅助照明装置组成,其中高速摄影机为美国 RedLake 公司的 HG-100K 高速摄影机,该摄影机的最高拍摄速度为 100000 帧/秒,辅助照明装置由功率为 1000W 的高速摄影机专用金卤灯及其配套整流器组成。

SHPB—高速摄影机系统的示意图和实物图分别如图 1 和图 2 所示。该系统与一般的 SHPB 系统相比,除增加了高速摄影机系统外,另外还在入射杆上多贴了一个应变片 3 以及安装了一个用于实现高速摄影机自动触发的继电器。高速摄影机自动触发实现的大致工作原理如下:当有冲击波经过应变片 3 时,应变片 3 把冲击波信号转换为电压信号,此时的电信号较小,然后再经由超动态应变仪把信号放大到足够使继电器激活的水平,从而实现高速摄影机的自动触发。由于所用高速摄影机在本实验条件下所拍摄图像的时间总跨度只有 2 秒左右,且经超动态应变仪输出的电压较低(通常为几伏),为了使该系统能够较好地实现自动触发并完整地记录下整个撞击过程,所以实验所选用的继电器必须要具有低延迟、低触发电压的特点。本实验选用的继电器是延迟为 ms 级,最低触发电压约为 $2\text{V}\sim 3\text{V}$ 的固态继电器。

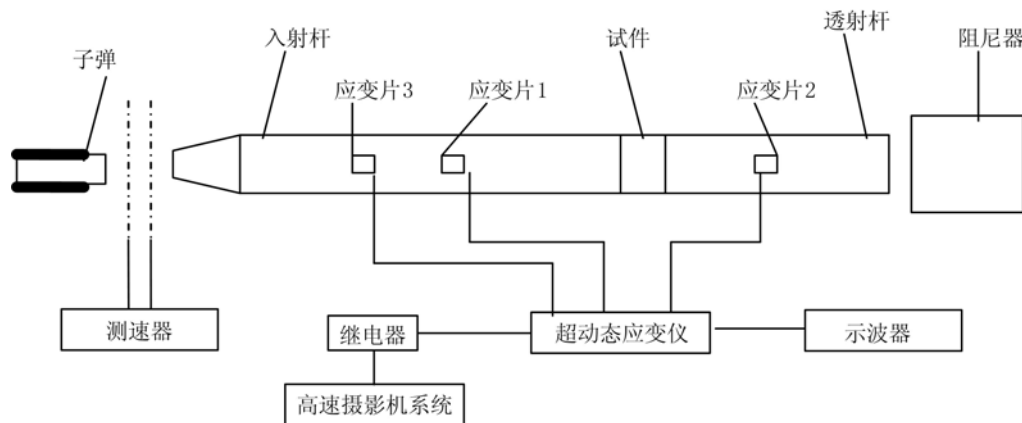


图 1 SHPB—高速摄影机系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SHPB-High speed Camera system

2.2 试件与预处理

本实验所用试件为大孔径(约为 3mm)泡沫铝材料的 $\Phi 70\text{mm}\times 35\text{mm}$ 圆柱形试件。为了在拍摄时试件有较强的反光以获取较清晰的图像,在所拍摄区域事先涂上不易掉落的反光材料。本实验用白油漆作为反光材料。试件照片如图 3 所示。

2.3 实验方案

为了能更好地了解泡沫铝试件在 SHPB 实验中的变形情况,本次试验选取了 7 个试件进行实验。实验前分别对试件进行编号,测量各个试件冲击前的厚度(在三个不同位置分别测量然后取平均值),最后给试件即将要被拍摄的位置喷上白油漆。实验完成后测量各试件冲击后的厚度,以便得到试件实验

后的残余应变。



图 2 带高速摄影机系统的 SHPB 系统实物图
Fig. 2 SHPB-High speed Camera system



图 3 实验试件
Fig. 3 Aluminum foam specimen

为了使高速摄影机所拍图像具有较高的清晰度且能较完整地观察到试件在冲击过程中的变形情况,本实验采用 20000 帧/秒的拍摄速度对实验过程进行了拍摄。所拍效果见图 4、图 5。另外由于本实验中的用于触发的线路存在一定的延迟(延迟主要是由于固态继电器、超动态应变仪以及跟触发有关的线路造成,一般为几十至一百 ms 之内),所以为了能完整捕捉到试件变形的整个过程,特别是刚开始冲击的瞬间,需要设置高速摄影机的预采集时间,本实验所用预采集时间为 200ms。

本实验的应变片均采用具有灵敏度高、抗噪音能力强等特点的半导体应变片。另外实验中应变信号采集的频率为 1MHz;发射子弹的气炮气压均为 0.50MPa,子弹速度约为 6m/s。

3 实验结果与处理

用于本实验的试件为 7 个,最后能用于后续图像分析的有 4 个。表 1 给出了这 4 个试件的相关信息。

表 1 冲击前后试件信息
Tab. 1 The information of specimen before and after impacted

试件编号	孔隙率	冲击前厚度(mm)	冲击后厚度(mm)	冲击后被压缩厚度(mm)
1	69.56	35.53	34.09	1.45
2	70.31	35.62	34.12	1.50
3	68.15	35.60	34.27	1.33
4	69.85	35.62	34.47	1.15

3.1 试件位移与变形跟踪

3.1.1 变形测点的选择

图 4 是高速摄影机用 20000 帧/秒拍摄速度所拍的多张图片中的一张,在后续的实验处理中都是通过测定图片中的两个特定点(如图中红点或黄点)的相对水平位移变化的方法来研究试件变形。根据所拍图像的特点和研究的内容,本文所用测点主要有下面两种:

(1) 试件两端测点

试件两端测点的选择应在试件两端的最端部或者是入射和透射杆靠近试件端部的任一点,如图 4 中的黄点。这样就可以通过对试件两端测点相对位移的测量来有效计算整个试件在试件两端与入射和透射杆紧密相连的每次撞击过程的变形。

(2) 试件内部测点

试件内部测点(如图 4 中的红点)是为了研究试件在整个冲击过程中的变形趋势而设定的。原则上由试件最端部的测点能准确地计算试件在整个冲击过程的变形,但是由于图 4 中试件两端部阴影的存

在,严重影响了此种方法对试件在每次撞击间隔之间的应变测量精度,因为此时试件会跟其本来接触的钢杆分离,造成两端阴影的扩大,从而影响测量精度。为了避免这种情况,只好选择试件内部测点来研究整个冲击过程的大概变形特点,虽然可能由于泡沫铝试件变形的不均匀性导致测量出的试件平均应变与实际的平均应变有较大差异,但是就单单研究试件在整个冲击过程的大概变形特点的定性分析来说,对试件内部测点的测量是完全能满足要求的。为了能较好地得到试件内部测点的相对水平位移,本文所用试件内部测点均应布置在有明显黑白边界且不易受两端阴影影响的地方(如图 4 中两红点)。图 5 给出各个试件内部测点的布置情况。

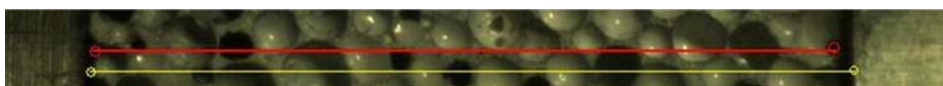
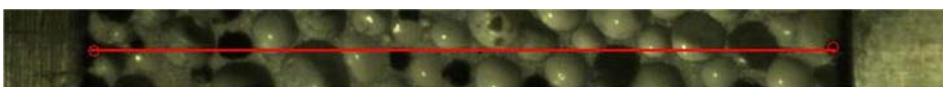


图 4 试件变形测点布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measuring point



(a) 试件1 测点示意图(图片大小 768*64 像素)



(b) 试件2 测点示意图(图片大小 768*64 像素)



(c) 试件3 测点示意图(图片大小 928*64 像素)



(d) 试件4 测点示意图(图片大小 928*64 像素)

图 5 各个试件的内部测点示意图(从左往右看)

Fig. 5 Measuring points in each specimen (from left to right)

3.1.2 位移测量结果

为了能较精确地提取所拍图像蕴含的位移应变信息,本实验采用本课题组开发的数字散斑相关分析法软件^[12]对选定的测点进行位移跟踪,进而计算试件的平均应变。

图 6 给出了由图像处理方法得到的试件内部测点在 SHPB 实验中的变形历时曲线。

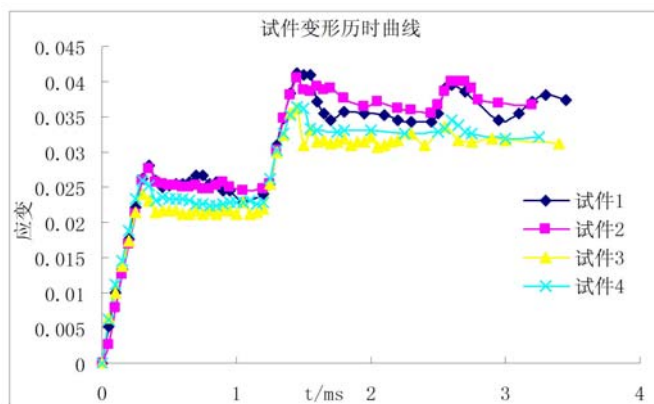


图 6 各试件在空气炮为 0.50MPa 气压时 SHPB 实验中的变形历时曲线

Fig. 6 Dynamic deformation of each specimen during SHPB experiment

3.2 变形结果分析

3.2.1 变形总体变化特点

(1) 由图 6 可知,各试件的变形历时曲线都呈台阶变化,且每个台阶都包含应变上升、回复、平台三个阶段。图中的每一个上升段代表一次撞击过程,可见试件在 SHPB 实验中经受了多次撞击;台阶的回复段代表的是每次撞击后试件的弹性回复;而每个台阶的平台数值代表的就是试件经受每次撞击后的残余应变。

曲线的第一个上升段对应的是试件经受入射杆第一次冲击加载的过程,理论上该上升段历时等于应力脉冲历时,由图 6 可知,该上升段历时 t_1 约为 $0.30\text{ms}\sim 0.35\text{ms}$,而本实验理论上的应力波加载历时 $t_2=0.32\text{ms}$ (假设应力波速为 5000m/s)。考虑到高速摄影机拍摄图片的最小时间间隔为 0.05ms ,这表明测量结果是合理的。

另外从图中可知第一次加载开始到第二次加载开始的时间间隔 $t_3=1.25\text{ms}\sim 1.30\text{ms}$,本实验所用入射杆长为 3.2m ,故理论上两次加载的间隔 $t_3=1.28\text{ms}$ 。

由此可知,无论是单次冲击的加载历时和相邻两次冲击的时间间隔,从高速摄影机拍摄图像提取出的信息都与其理论结果相一致,这从侧面反映出 SHPB—高速摄影机系统较好地捕捉到了试件的变形情况。

(2) 从图 6 中也可以清晰地看出试件与杆的第二次撞击都给试件造成了较大的残余变形,而第三次以后的撞击对试件造成的残余变形却基本上可以忽略。

3.3.2 不同测量方法所测应变的对比分析

图 7 是分别经图像处理和 SHPB 后处理得到的第一次冲击过程中的试件应变历时曲线的比较,从图中可知,两曲线基本上能较好地重合在一起,这也说明了 SHPB—高速摄影机系统所拍图片较好地跟踪到了试件在冲击过程中的变形情况。

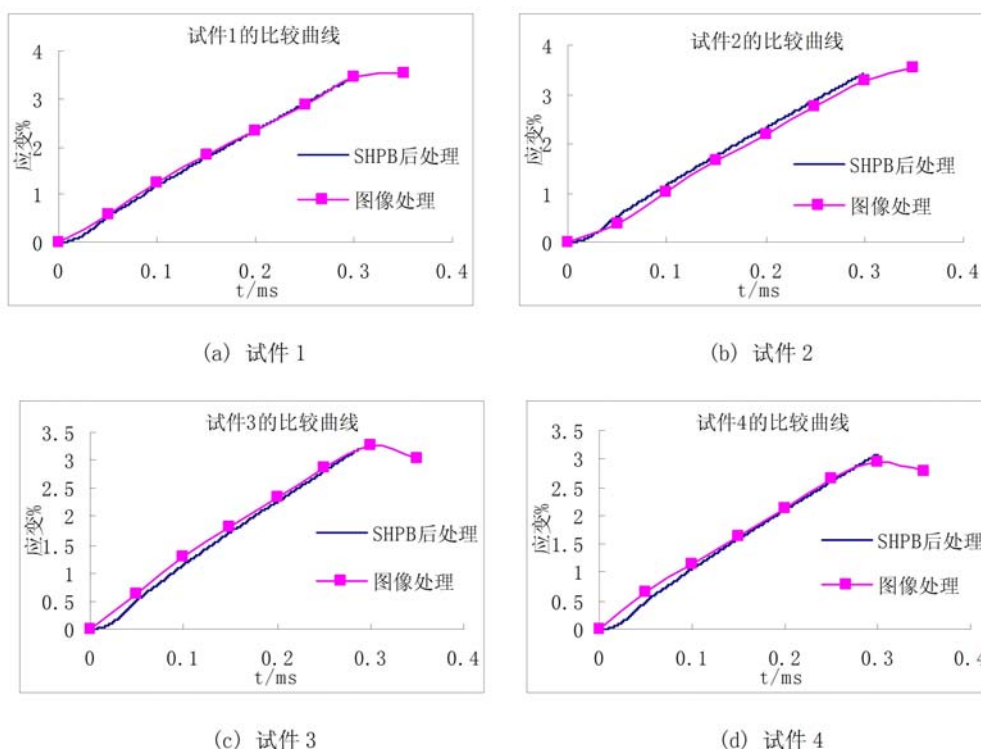


图 7 分别经图像处理和 SHPB 后处理得到的第一次冲击过程中的试件应变历时曲线比较

Fig. 7 Dynamic deformations from the two different methods during the first impact in SHPB experiments

表 2 是试件实际残余应变与由图像处理得出的残余应变的比较情况,表中图像处理得出的残余应变实际上是由第二次冲击完成后的图片提取出的试件残余应变,由图 6 的变形历时曲线可知第二次冲

击完成后试件的残余应变完全可以代表试件实验完成时的残余应变。故由表 2 易知,由图像处理得出的残余应变跟试件实际残余基本一致(最大相对误差约为 4%),这也说明本实验较好地跟踪到了试件的变形。

表 2 试件实际残余应变与由图像处理得出的残余应变比较
Tab. 2 Comparison of the residual strain from two different methods

试件编号	实际残余应变	由图像处理得到的残余应变
试件 1	0.041	0.039
试件 2	0.042	0.043
试件 3	0.037	0.037
试件 4	0.032	0.034

4 结 论

本文通过自行设计的 SHPB—高速摄影机系统跟踪了 SHPB 实验中泡沫铝的变形过程,并利用相关图像处理软件提取出试件的变形信息,最后与 SHPB 后处理软件得到的应变进行了对比,得出以下结论:

(1) 泡沫铝的 SHPB 实验中存在二次以上的撞击过程,且第二次撞击对泡沫铝试件残余变形的贡献不能忽略,而 SHPB 数据处理一般仅采用一次撞击的数据分析,所以由 SHPB 分析得到的塑性应变不能作为试件的残余应变;

(2) SHPB—高速摄影机系统基本上能捕捉到试件在 SHPB 实验中的冲击变形过程,通过图像处理软件提取出的变形信息也能较好地还原试件的应变过程,但拍摄帧数和图像清晰度有待提高,且需继续开发相关的高精度图像分析软件,以期进一步揭示泡沫铝在冲击过程中的变形规律和特点。

感谢国家自然科学基金项目(批准号:10872070,90916026)的资助。

参考文献:

- [1] 陈永涛,楼志华,郑钢铁. 开孔和闭孔泡沫铝的力学与吸能特性研究[J]. 高能量密度物理,2006,6(2):47—49 (Chen Zhitao, Lou Zhihua, Zheng Gangtie. The Studies of the Mechanics and Energy—Absorption Properties in Open and Closed Aluminum Foams[J]. High Energy Density Physics,2006,6(2):47—49(in Chinese))
- [2] 王礼立. 应力波基础[M]. 国防工业出版社,2005: 52—60 (Wang Lili. Foundation of stress waves[M]. National Defense Industry Press,2005:52—60(in Chinese))
- [3] 凤仪,朱震刚,潘艺,胡时胜. 泡沫铝的动态力学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程,2005,34(4):545—548(Feng Yi, Zhu Zhengang, Pan Yi, Hu Shisheng. Dynamic Mechanical Properties of Aluminum Alloy Foams[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2005,34(4):545—548(in Chinese))
- [4] 胡时胜,王悟,潘艺等. 泡沫材料的应变率效应[J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):13—18(HU Shisheng, WANG Wu, PAN Yi, et al. Strain rate effect on the properties foam materials[J]. Explosion and Shock Waves,2003,23(1):13—18(in Chinese))
- [5] 黄小清,刘逸平,汤立群等. 基于相对即时密度的泡沫铝材料力学性能研究[J]. 实验力学,2004,19(2):171—177 (HUANG Xiaoqing, LIU Yiping, TANG Liqun, et al. An Experimental Study on the Mechanic Behaviors of Aluminum Foam Based on the Relative Current Density[J]. Journal of Experimental Mechanics,2004,19(2):171—177(in Chinese))
- [6] Baker W E, Togami T C, Weydert J C. Static and Dynamic Properties of High Density Metal Honeycombs[J]. Impact Engineering,1998, 21(3):149—163.
- [7] 张红,黄小清,汤立群等. 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(自然科学版), 2004, 32(1): 9—13 (Zhang Hong, Huang Xiaoqing, Tang Liqun, et al. Digital Image Analysis of Foamed Aluminium's Microstructure and Its Distribution[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(1): 9—13)

- Science Edition), 2004, 32(1): 9—13(in Chinese))
- [8] 胡玲玲, 黄小清, 汤立群 等. 利用数字图像处理技术研究泡沫铝的变形特性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 93—111 (Hu Lingling, Huang Xiaoqing, Tang Liqun, et al. Investigation into Deformation Characteristics of Aluminum Foam Using Digital Image Processing Technology[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(2): 93—111(in Chinese))
- [9] 张怀清, 蒲琪, 代祥俊 等. 基于数字散斑相关方法的微位移测量[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2009, 23(1): 49—52 (ZHANG Huaiqing, PU Qi, DAI Xiangjun, et al. Measurement of micro displacement based on digital speckle correlation method[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 23(1): 49—52(in Chinese))
- [10] 甄志强, 闫海涛, 汤正新. 基于数字散斑自相关技术的微位移测量[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2006, 27(4): 95—97 (ZHEN Zhiqiang, YAN Haitao, TANG Zhengxin. Measuring Minute Displacement Based on Digital Speckle Autocorrelation Technology[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2006, 27(4): 95—97(in Chinese))
- [11] 李文炳, 冯平, 蔡增伸 等. 基于数字图像处理的位移测量[J]. 浙江工业大学学报, 2004, 32(6): 688—691 (LI Wenbing, FENG Ping, CAI Zengshen, et al. Displacement measuring based on digital image processing. [J]. Journal of Zhejiang University of Technology (Natural Science), 2004, 32(6): 688—691(in Chinese))
- [12] 和郁伟. 数字散斑相关法软件实现与应用[D]. 广州: 华南理工大学土木与交通学院, 2010 (He Yuwei. The Development and Application of Digital Speckle Correlation Method Software[D]. Guangzhou: South China University Of Technology, 2010(in Chinese))

Tracking and Analysis of Aluminum Foam Deformations in SHPB Experiment by Using High-speed Camera

WEI Zhi-qiang, HUANG Xiao-qing, YANG Bao, TANG Li-qun, HE Yu-wei

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Dynamic stress-strain relation of material can be easily obtained by using SHPB system, but the dynamic deformation characteristics of material, which are just important aspect of metal foam's mechanical properties, can not be directly revealed by SHPB method. Therefore, a SHPB- high-speed camera system was designed to track the dynamic deformation of aluminum foam specimen in SHPB experiment, and the deformation information contained in images was derived and analyzed by using image processing software. Furthermore, the displacement-time curve was obtained, and the deformation was also obtained from the post-process of SHPB. Then, above -mentioned two kinds of deformation were compared. Results show that the data obtained from image processing software agree with that of SHPB post-processing, which indicates that high-speed camera system designed to track the deformation process in aluminum foam SHPB experiment of is feasible.

Keywords: Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) experiment; high-speed camera system; aluminum foam; dynamic deformation