

文章编号: 1001-4888(2014)06-683-06

基于数字图像的分离式霍普金森压杆实验中 试件应变及两端应力的同步测量法^{*}

谢倍欣, 汤立群, 张晓阳, 刘逸平, 张泳柔, 程经纬, 蒋震宇, 刘泽佳

(华南理工大学土木与交通学院、亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 本文提出一种基于高速摄像和数字图像相关方法(DIC)的分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)测量技术, 从而实现试件应变和两端应力的同步测量。即在与试件接触的输入输出杆两端制作散斑, 通过高速摄像获取 SHPB 实验过程中的散斑变形图像, 由 DIC 测得各时刻试件的应变、输入输出杆端的应变(可直接换算为试件两端的应力)。由于试件和杆端的应变都是从同一张高速摄影的图像上分析得到的, 因此它们是同步的。应用该方法对钢纤维混凝土试件(SHPB 试验)进行了测量, 测量结果与传统应变片测量结果吻合, 验证了该方法的可行性。该技术不仅实现了 SHPB 实验中试件应变和应力的同步测量, 还将有助于直接检验各材料在 SHPB 实验中试件两端的力在实验过程中是否平衡。

关键词: 分离式霍普金森压杆(SHPB); 数字图像相关法; 高速摄影系统; 同步测量

中图分类号: O348.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-14-109

0 引言

分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)技术是一种测试材料动态力学性能的实验方法, 自 1949 年由 Kolsky 提出^[1]以来, 已经普遍应用于工程材料在高应变率下的力学性能测试。传统的 SHPB 实验方法首先在入射杆和透射杆上贴上应变片, 然后根据实验过程中应变片所采集的信号换算得到试件的应力—应变数据^[2]。由于记录入射波、反射波和透射波的时间往往不相同, 所以在数据处理中这三个波形的时间起点是人为选择的, 如果选取的时间起点不一致就会导致应力—应变数据的误差, 尤其是在测试某些所需达到应力均匀时间很长的材料(如软材料等^[3-5])时, 选取透射波和反射波的时间起点变得较为困难, 难以评估试件两端的力是否满足平衡条件。

数字图像相关方法(DIC)是一种测量材料表面变形场的非接触式方法, 其基本原理是匹配物体表面在不同状态下的数字化散斑图像上的图像子区, 跟踪该图像子区的运动获得材料表面的变形信息。该方法自 20 世纪 80 年代提出^[6,7]以来得到了迅速发展, 已经广泛应用于实验固体力学领域。在 SHPB 动态实验中可以结合高速摄影技术来获得实验图片, 进而直观地观测试件的变形特征^[8-11]或者基于数字图像相关方法来分析试件的变形场^[12-14]。而上述这些研究工作仅将高速摄影技术应用于研究试件本身的变形, 应力—应变历史仍由传统 SHPB 数据处理方法得出。

本文结合 SHPB 实验装置和高速摄像技术, 提出一种基于数字图像相关方法的试件应力—应变历

^{*} 收稿日期: 2014-06-12; 修订日期: 2014-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助(11472109, 11202081, 11272124)

通讯作者: 汤立群(1977—), 男, 博士, 教授, 博导。主要研究领域包括: (1)非均质材料微观结构与破坏机理; (2)结构损伤与长期健康监测; (3)冲击动力学等。E-mail: lqtang@scut.edu.cn

史获取方法,试图避免选择波形时间起点的困难。并以钢纤维混凝土的 SHPB 实验为例,用高速摄影机系统拍摄冲击实验的过程,用数字图像相关方法测量得到不同时刻试件的应力—应变数据,评估试件两端应力平衡情况,最后与传统 SHPB 实验方法得到的数据进行了比较。

1 实验原理

实验前预先在入射杆及透射杆靠近试件部分的表面上制作散斑,在实验过程中使用高速摄影机捕捉包括试件及散斑在内的区域的运动过程,示意图如图 1 所示。

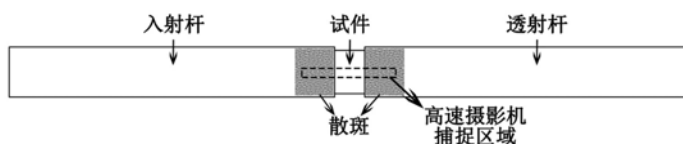


图 1 实验原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment principle

在高速摄影机拍摄的图片中,可于入射杆的散斑区域内取相距较远的 A、B 两测点,于透射杆的散斑区域内取相距较远的 C、D 两测点,其中 B、C 两点非常接近试件,对这四个测点周围的散斑子区进行跟踪分析,如图 2 所示。

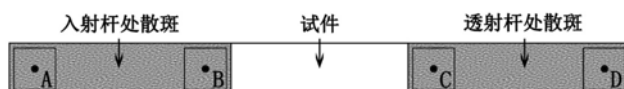


图 2 测点选择示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring points

通过分析透射杆的标记区域运动图像得到 C、D 两点距离的增量,然后用增量除以 C、D 两点之间的初始距离得到透射杆与被测试件接触一端的应变;通过分析入射杆标记区域的运动图像得到 A、B 两点距离的增量,然后用这个增量除以 A、B 两点之间的初始距离得到入射杆与被测试件接触一端的应变。利用一维应力假设,求得杆件这两个区域的应力,进而换算得到试件两端的应力。这样不但得到了试件的应力,而且可以实现试件两端应力平衡状态的同步监测。由于 B、C 点均离试件很近,这两点距离的增量可以近似看作试件沿冲击方向的长度增量,用它除以试件原始长度就可以推出试件的应变。需要注意 A、B 的距离和 C、D 的距离不能过大或者过小,如果距离过大会导致整体平均应变不能代表局部的应变,如果距离过小又会使得图像分析得到的应变与真实值间存在较大误差。

值得一提的是,仅仅取 A、B、C、D 四个点作为测点是建立在散斑质量与图片质量都非常好的基础上的理想状况,实际上进行这三段距离的跟踪测量时可以分别取不同的 B 点和 C 点以达到更好效果。

2 实验方案设计

2.1 实验系统

本实验系统主要由 SHPB 装置和高速摄影机系统两大部分组成。其中,SHPB 装置采用的杆件是直径为 74mm 的钢杆,子弹、入射杆和透射杆的长度分别为 80cm、320cm 和 200cm;高速摄影机系统使用的是 Phantom v1610 系统,使用一个金卤灯和新闻灯来提高曝光量,实验装置的示意图和实物图如图 3 和图 4 所示。

2.2 实验方案

实验前在入射杆及透射杆上离端面约 5cm 远处做好标记线,然后将从标记线到端面部分的杆件表面清洁干净,喷涂哑光黑油漆作为散斑,散斑效果如图 5 所示。结合考虑拍摄距离、散斑分析效果、图片大小与拍摄速度及曝光时间的制约关系,本实验采用 100000 帧/秒的拍摄速度,图片大小为 1280×64pixels。实验中使用的试件是经受过多冲击的圆柱型钢纤维混凝土,其直径为 70.2mm,高度为 31.6mm,如图 6 所示。子弹冲击速度为 13.0m/s。

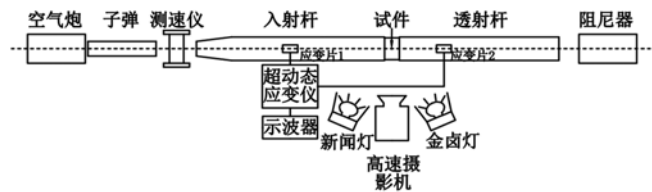


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment system



图 4 SHPB-高速摄影机系统

Fig. 4 SHPB-high speed camera system



图 5 杆件上的散斑

Fig. 5 Speckle patterns on the bars



图 6 钢纤维混凝土试件

Fig. 6 Steel fiber concrete specimen

3 实验结果与处理

3.1 图像概况

在散斑分析中,提取的系列图片必须完全覆盖冲击波经过该拍摄区域前后的整个过程,最终选用了 100 帧图片,部分实验中选取的图片如图 7 所示。

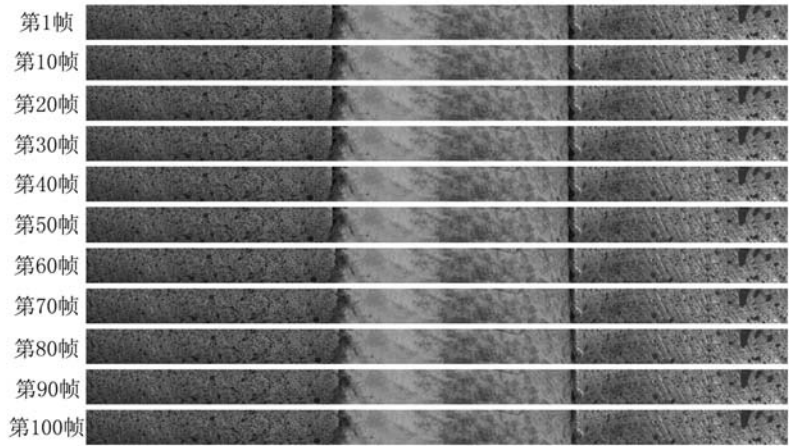


图 7 部分选取的图片

Fig. 7 Some selected images from the experiment

3.2 散斑分析方案

将第 1 帧图片作为参考图像,每次散斑分析前在参考图像上面选定要跟踪的测点及相应的散斑子区,运行分析程序后,其他 99 帧图片会与第 1 帧分别进行所选定散斑子区的匹配,从而跟踪每张图片对应时刻测点的运动状况。如图 8 所示,在测量不同部位的应变时选择了不同的测点及散斑子区,子区间

大小为 45×45 pixels。

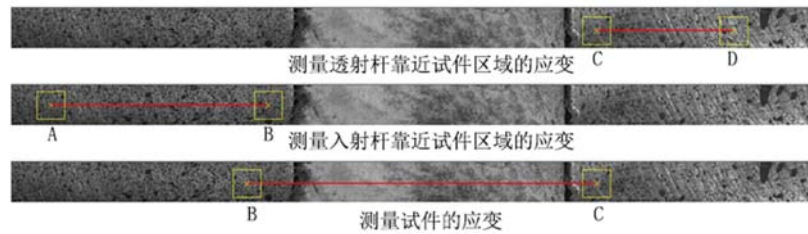


图 8 测点及散斑子区的选择

Fig. 8 Selection of the measuring points and corresponding speckle subsets

3.3 测量结果及分析

3.3.1 透射杆靠近试件区域的应变

C、D 间的初始距离约为 1.6 cm, 按照杆中弹性波速为 5000 m/s 估算, 波经过 CD 段所需时间约为 0.0032 ms, 远小于脉冲宽度 (约 0.32 ms), 故用 CD 段的平均应变来代替杆端局部应变造成的误差不会太大。图 9 对比了用本文实验方法测得的透射杆靠近试件区域 (即 CD 段) 的应变及应变片 2 采集的透射杆应变信号。从图 9 中可以发现, 利用 DIC 分析得到的透射杆应变历史基本上能体现实际波形的特征, 在数值上也很接近。

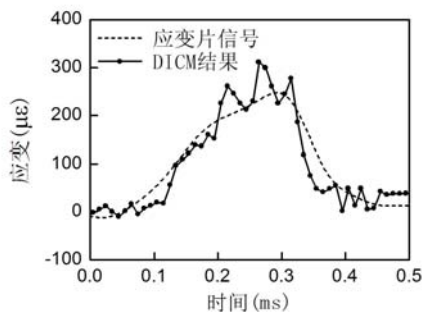


图 9 DIC 得到的 CD 段应变与透射杆应变片采集信号对比图

Fig. 9 Comparison curves of strain history of Part CD obtained by DIC and strain signals of the gauge on the transmission bar

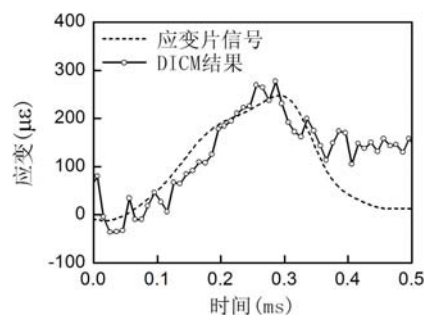


图 10 DIC 得到的 AB 段应变与透射杆应变片采集信号对比图

Fig. 10 Comparison curves of strain history of Part AB obtained by DIC and strain signals of the gauge on the transmission bar

3.3.2 入射杆靠近试件区域的应变

A 点与试件和入射杆的接触面很近, 其距离约为 3 cm, 可以算得弹性波从 A 点传播至入射杆端面再反射回 A 点的时间约为 0.012 ms, 远小于脉冲宽度 (约 0.32 ms), 所以可将 AB 段的应变波形视作入射波与反射波的同步叠加, 与透射波进行比较检验。图 10 对比了用本文实验方法测得的入射杆靠近试件区域 (即 AB 段) 的应变及应变片 2 采集的透射杆应变信号。从图 10 中可以看出, 利用 DIC 得到的入射杆靠近试件区域的应变历史能较好地与透射杆应变信号相匹配, 这是由于钢纤维混凝土的波速较大, 所需达到应力平衡的时间很短, 同时也验证了这种方法用来监控试件两端应力平衡状况的可行性, 但波形尾部的误差较大。

3.3.3 试件应变

由于脉冲宽度约为 0.32 ms, 在之后的时间卸载波已经到来, 用应变片采集的入射波、透射波信号换算的试件应变已经不能代表真实值, 故图 11 只对比了 0.3 ms 内用本文实验方法测得的试件应变及利用应变片 1、应变片 2 采集的信号换算得到的试件应变。从图 11 中可以看出, 散斑分析的结果能非常好地拟合出试件的应变历史, 这与试件应变的量级比较大、图像分析产生的误差相对较小有关系。由于

该试件是一个经过霍普金森压杆多次重复撞击的试件,所以产生的应变会比常规钢纤维混凝土的大一些。

4 结论

本文在 SHPB 装置的入射杆及透射杆靠近试件的部分上制作散斑,并通过高速摄影机系统跟踪了实验中入射杆及透射杆的散斑部分和试件的运动过程,利用相关图像处理软件提取出透射杆、入射杆靠近试件区域和试件的应变历史,最后与传统 SHPB 方法处理的应变进行了对比,得出以下结论:

(1) 基于数字图像相关法的 SHPB 实验方法能较好地获得透射杆、入射杆靠近试件区域及试件的应变波形,与基于应变片信号的传统 SHPB 实验方法相比,主要的优点在于无需在应变片信号的后处理中考虑时间的同步性,并且能实现试件两端应力平衡状况的评估。

(2) 虽然实现和检验了本文提出的新测量方法,但是测量精度方面仍有待于完善,如在更高拍摄速度条件下,合理设计光源及其位置、改进散斑质量、提高图像质量等,均需要深入探索。

(3) 因为 B、C 点位于杆端的圣维南区域内,其应力是不均匀的,而圣维南区域的大小跟试件与杆件的波阻抗比有关,这一点需要细致考察以尽量消除不均匀性影响。在本文中,实验结果对比证实了此次采用的取点方案对该实验的钢纤维混凝土试件与钢杆接触的情况有效,而不同的试件材料与杆件材料组合下要怎么取点才能保证不均匀性带来的误差足够小则有待进一步的分析。

需要指出的是,本文采用散斑相关方法来进行应变的测量只是用了散斑图像中有限的区域信息,在未来的工作中可以考虑简化或者细化此思路:可能简单地在杆端表面不喷涂散斑而是设置标记点也可行,之后再对图像中的标记点进行跟踪得到应变,其原理与本文相同;或者在每根杆的散斑区域中不仅仅取两个点,而是取一系列点进行跟踪分析,进而得到拍摄区域内的更多杆件应变信息。

致谢 本文得到国家自然科学基金(No. 11472109, 11202081, 11272124)资助,同时感谢约克科技公司和谢锐凯先生在高速摄影机系统及其使用方面给予的支持!

参考文献:

- [1] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society (Section B), 1949, 62(11): 676.
- [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] Chen W, Lu F, Zhou B. A quartz-crystal-embedded split Hopkinson pressure bar for soft materials [J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(1): 1—6.
- [4] 卢芳云, Chen W, Frew D J. 软材料的 SHPB 实验设计[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(1): 15—19 (Lu Fangyun, Chen W, Frew D J. A design of SHPB experiments for soft materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(1): 15—19 (in Chinese))
- [5] 宋力, 胡时胜. 软材料的霍普金森压杆测试新技术[J]. 工程力学, 2006, 23(5): 24—28 (Song Li, Hu Shisheng. A new technique for testing soft material using a modified Hopkinson pressure bar[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(5): 24—28 (in Chinese))
- [6] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427—431.
- [7] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14(11): 1270—1273.

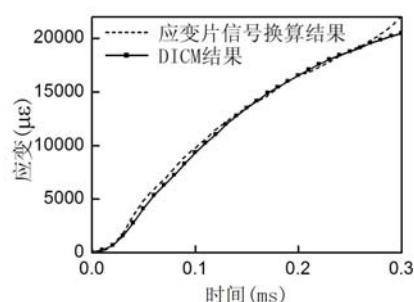


图 11 试件应变对比图

Fig. 11 Strain history curves of the specimen obtained by different methods

- [8] Liu J G, Lu F Y, Fang D N, et al. Impact testing of cellular materials with field measurement-A review[J]. International Journal of Protective Structures, 2011, 2(4): 401—416.
- [9] Yang B, Tang L, Liu Y, et al. Localized deformation in aluminium foam during middle speed Hopkinson bar impact tests[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 560: 734—743.
- [10] Yang B, Tang L, Liu Y, et al. The deformation measurement and analysis on meso-structure of aluminum foams during SHPB test[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2014. Doi: 10.1520/JTE20120254.
- [11] 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): 117—123 (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): 117—123 (in Chinese))
- [12] 章超, 徐松林, 王鹏飞. 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[J]. 实验力学, 2013, 28(5): 629—634 (Zhang Chao, Xu Songlin, Wang Pengfei. Test of aluminum foam deforming process under impact load based on digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(5): 629—634 (in Chinese))
- [13] 周忠彬, 陈鹏万, 黄风雷. 高聚物粘结炸药模拟材料动态变形破坏的实验研究[J]. 兵工学报, 2010, 31: 288—292 (Zhou Zhongbin, Chen Pengwan, Huang Fenglei. Experimental study of dynamic deformation and fracture of polymer bonded explosive simulant[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31: 288—292 (in Chinese))
- [14] 傅华, 李俊玲, 谭多望. PBX 炸药动态 Brazilian 试验及数值模拟研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(002): 148—154 (Fu Hua, Li Junling, Tan Duowang. Dynamic Brazilian test and simulation of plastic-bonded explosives[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(002): 148—154 (in Chinese))

On the Synchronized Measurement of Specimen's Strain and Stress at Both Ends in SHPB Tests Based on Digital Image

XIE Bei-xin, TANG Li-qun, ZHANG Xiao-yang, LIU Yi-ping,
ZHANG Yong-rou, CHENG Jing-wei, JIANG Zhen-yu, LIU Ze-jia

(School of Civil Engineering and Transportation, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A measurement technique used in split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment is proposed in this paper based on high-speed photography and digital image correlation method (DIC), which enables the specimen's strain and stress at both ends to realize synchronized measurement. In this technique, speckle is made first on surfaces of incident and transmission bar which are contact with specimen; the speckle image deformation during impact process of SHPB experiment is recorded by high-speed photography system, then the strains at each moment and at both ends of specimen are obtained by DIC, the strains at both ends of specimen can be converted into corresponding stress directly. Since the specimen's strain and strain at both ends are obtained from the same photography image, so they are synchronous. Applying this measurement technique, an impact experiment for steel fiber concrete specimens was carried out on SHPB. Measured results agree well with that from traditional strain gauge signal, which validates the feasibility of this measurement technique. This technique not only realizes the synchronized measurement of specimen's strain and stress at both ends of specimen, but also helps to inspect the equilibrium of forces acted on both ends of specimen during SHPB experiment.

Keywords: split Hopkinson pressure bar (SHPB); digital image correlation method; high-speed photography system; synchronized measurement