DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0015-06

基于超高速相机的数字图像相关性全场应变分析在 SHTB 实验中的应用*

申海艇,蒋招绣,王贝壳,李成华,王礼立,王永刚
(宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室,浙江 宁波 315211)

摘要: 基于超高速相机和数字图像相关性全场应变分析方法对传统的分离式 Hopkinson 拉杆(SHTB)实验系统进行改进,获得尼龙和铝合金材料的动态拉伸应力应变曲线,验证了数字图像相关性全场应变分析在 SHTB 实验中的有效性。实验结果显示:该方法测量的平均应变与应变片测量结果一致性很好,而传统的 SHTB 实验原理计算的应变结果则明显偏大,需要对试件原始标距进行修正后才能获得有效的试件应变,并且在试件的材料和几何尺寸不变的条件下标距修正不依赖于应变率。基于数字图像相关性全场应变测量,讨论了应变均匀性问题:脆性的尼龙试件在标距范围内应变均匀性良好,而韧性的铝合金试件表现出比较严重的应变不均匀性,归因于颈缩变形的影响。

关键词: 固体力学;动态拉伸;数字图像相关性分析;SHTB;尼龙;铝合金
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)自问世起,已成为测试工程材料动态压缩力学行为的主要手段[1-3]。学者们也在一直试图发展材料动态拉伸力学行为测试手段。A. T. Owens [4]对 SHPB 进行了改进,发展了一种较为简单实用的反射式动态拉伸测试方法。随后,许多学者致力于发展套筒子弹式直接拉伸型的分离式 Hopkinson 拉杆(SHTB)实验装置[4-5]。然而,相对动态压缩,材料动态拉伸力学行为测试存在诸多困难。

在 SHTB 实验中试件与杆之间连接方式对实验结果的影响非常大,目前主要采用螺纹连接和胶粘固联[6-7]。采用螺纹连接时螺纹间隙会严重影响试件应变测量的准确性,并对透射波信号产生一些干扰[8];而采用胶粘固联方式时,粘接胶层的变形也会带来试件应变测量的不准确。除了连接方式,SHTB 实验中通常采用的“哑铃”型拉伸试件则带来试件有效标距长度难以准确确定,导致一维应力波理论计算的试件应变失真。解决此问题常规方法是在试件上粘贴应变片来直接测量,但是也存在一些问题,例如:试件直径小,应变片难以粘贴;普通弹性应变片仅适用于小应变测量。数字图像相关性(digital image correlation,DIC)全场应变分析是一种物体非接触光学全场变形测量方法[9],随着高速相机发展,该方法也逐步应用于材料动态力学性能实验研究[10-11]。

本文中拟发展基于超高速相机的 DIC 全场应变分析系统,对 SHTB 试件动态拉伸应变进行非接触测量,同时搭建同步触发系统,实现应力和试件变形图像的同步采集。以脆性的尼龙和韧性的铝合金材料为例,分析试件动态拉伸应变 DIC 测量的有效性,然后基于 DIC 全场应变信息讨论应变分布均匀性问题,获得 2 种材料的动态拉伸应力应变曲线。

1 实验方案

1.1 SHTB 实验装置及原理简介

实验采用套筒子弹型 SHTB 实验装置,如图 1 所示。实验时,通过气室内存储的高压气体突然释

* **收稿日期**: 2015-06-19; **修回日期**: 2015-10-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(11472142,11272164)
第一作者: 申海艇(1989—),男,硕士研究生; **通信作者**: 王永刚,wangyonggang@nbu.edu.cn。

放来驱动套筒子弹撞击入射杆的撞击头，在撞击面形成压缩波，经由撞击头转换后在入射杆产生向右传播的拉伸波，即入射波，当拉伸波传播到试件时，由于杆与试件之间波阻抗不匹配，一部分反射回入射杆，形成反射波，一部分穿过试件进入透射杆，形成透射波。通过粘贴在入射杆和透射杆的应变片可以获得入射波 $\varepsilon_i(t)$ 、反射波 $\varepsilon_r(t)$ 和透射波 $\varepsilon_t(t)$ 的应变信号。依据一维应力波理论以及试件中应力、应变均匀性假设，试件中的应力 σ_s、应变 ε_s 和应变率 $\dot{\varepsilon}_s(t)$ 可分别表示为[2]：

$$\sigma_s = \frac{EA}{A_s}\varepsilon_t(t) \tag{1}$$

$$\varepsilon_s = \frac{2c_0}{L_0}\int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_t(t)]\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{2c_0}{L_0}[\varepsilon_i(t) - \varepsilon_t(t)] \tag{3}$$

式中：E、A 和 c_0 分别为杆的弹性模量、横截面积和弹性纵波波速，A_s 和 L_0 分别为试件横截面积和标距段长度。

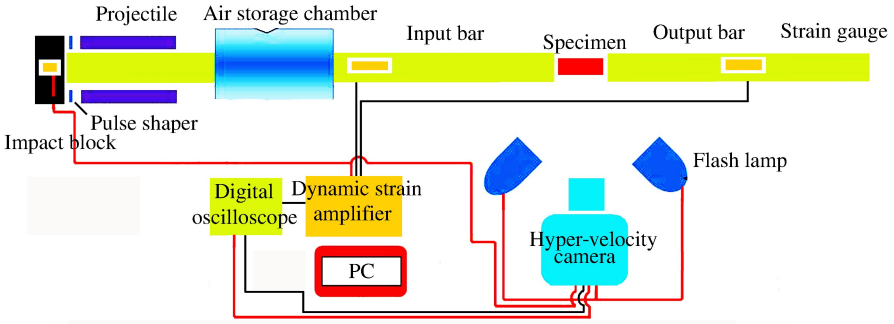

图 1 SHTB 实验装置示意图

Fig. 1 Schematics of SHTB system

1.2 DIC 全场应变分析

随着高速数字摄像技术的发展，DIC 方法也越来越多用于冲击载荷下材料瞬态变形的测量，有关 DIC 原理的详细介绍请参见文献[8-9]。采用超高速数字相机，拍摄速度是 10^6 s^{-1}，一次触发后连续拍摄 180 张照片，图像分辨率为 924×768，再通过 2 台高功率闪光灯进行照明，曝光时间为 0.5 μm。图 2 给出了典型的试件散斑照片，其中 DIC 有效分析区是 791×355，图像中像素的大小约为 6 μm。DIC 全场应变测量的精度，不仅取决于图像分辨率，还与喷涂的散斑质量密切相关，实验前需要对散斑质量进行静态标定。图 3 给出了一组静态标定获得的应变时程，从中看到 DIC 应变测量误差基本控制在±20 个微应变以内，可以为 SHTB 试件动态拉伸应变测量提供足够的精度。另外，需要说明的是，在 SHTB 实验中，全场应变分析测量窗口会随试件运动而移动，但该移动属于刚体位移，不会造成 DIC 应变分析判读的偏差。

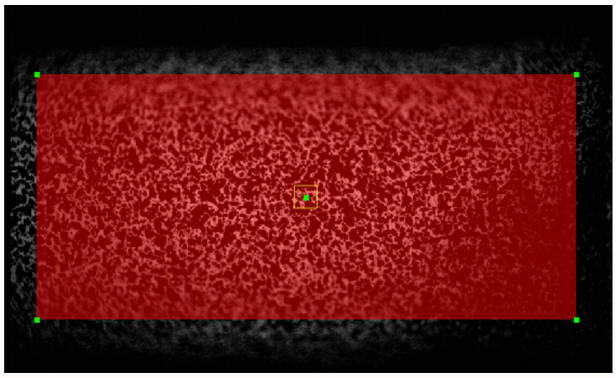

图 2 典型的试件散斑照片

Fig. 2 Typical speckle image of specimen

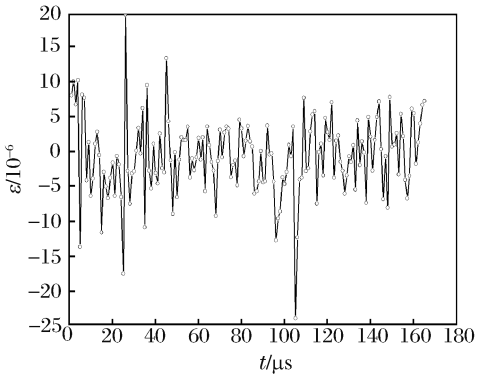

图 3 DIC 应变测量误差评估

Fig. 3 Error assessment of DIC strain measurement

1.3　时间同步性系统

在入射杆撞击头上粘贴应变片，并与超动态应变仪连接，从而组成触发信号源。当套筒子弹撞击入射杆的撞击头后，触发源发出电压脉冲信号触发超高速相机，超高速相机内置 4 个同步外触发通道，其中 2 个同步外触发信号来触发 2 个闪光灯，1 个同步触发信号来触发采集入射杆和透射杆上应变片信号的示波器，这样就实现了图像采集与 SHTB 上应变片测量信号的时间同步，从而实现基于 SHTB 原理计算的应力时程和基于 DIC 分析的应变时程同步，再经过适当的时间平移后（这里主要考虑应力波从试件传播到透射杆上应变片粘贴位置处的时间以及超高速相机延迟拍摄时间等），消除时间轴即可得到应力应变关系曲线，具体同步触发线路图参见图 1 中红色线路所示。

2　典型工程材料 SHTB 实验

采用直径为 19 mm 的 SHTB 实验装置，入射杆长 2.7 m，透射杆长 1.5 m，套筒子弹长 300 mm，材料都是高强钢，密度为 8 000 kg/m^3，弹性模量为 189 GPa。实验材料选择为脆性的尼龙和韧性的高强铝合金，试件与杆端采用螺纹连接，具体尺寸为如图 4 所示，尼龙试件直径为 6 mm，标距段为 9 mm；铝合金试件直径 3.4 mm，标距段 6.8 mm。标距段与螺纹段之间通过圆弧过渡。实验前需要在试件表面上喷涂散斑。入射杆和透射杆适当位置粘贴应变片来记录入射波、反射波及透射波，微弱透射波信号通过高灵敏度的半导体应变片进行监测。为了对比分析拉伸应变测量的有效性，在尼龙试件标距内粘贴了应变片，用于直接测量拉伸应变，而铝合金试件由于标距段直径太小，未能粘贴应变片。

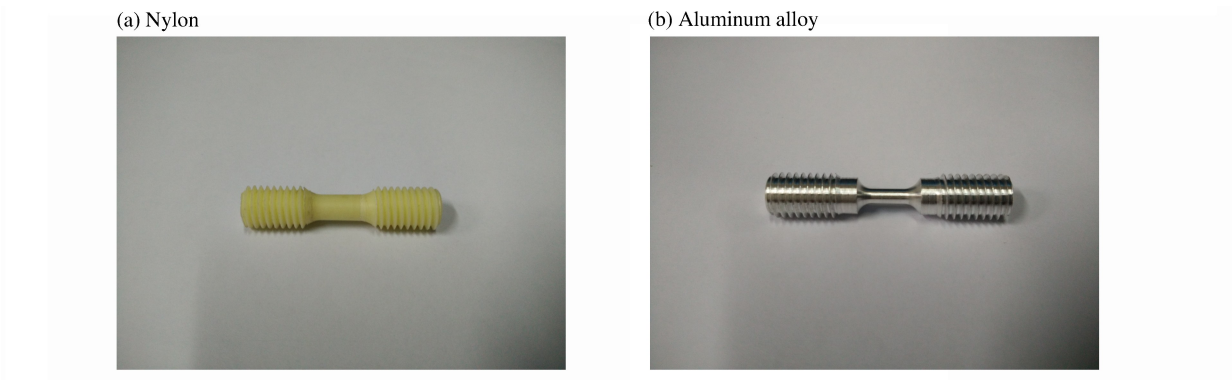

图 4　动态拉伸试件

Fig. 4　Dynamic tensile specimen

2.1　动态拉伸应变

图 5 给出了 2 组不同应变率条件下尼龙试件动态拉伸应变时程的对比。图中显示：(1)DIC 分析应变时程与应变片直接测量应变时程在小应变阶段（1%以内）一致性非常好，这一结果检验了 DIC 全场应变分析的有效性；(2)试件标距长度取设计标距 9 mm 时，由 SHTB 原理计算得到的应变值比 DIC 分析结果明显偏大，而当把尼龙试件标距长度修正为 15 mm（该值略小于标距段加两端圆弧过渡段长度）时，由 SHTB 原理计算得到应变时程与 DIC 分析结果以及应变片测量结果非常一致，这主要归因于拉伸试件的变形不局限于设计标距段内，两边圆弧过渡段也要发生变形；(3)修正标距的选取不依赖于应变率的；(4)由于受到应变片有效测量范围的制约，试件上粘贴应变片来测量动态拉伸应变难以对试件动态拉伸过程进行全程测量，但在缺乏 DIC 分析条件下，也可使用应变片的测量的结果对试件标距进行适当的修正，从而获得较准确的试件应变时程。图 6 分别给出了 2 组不同应变率条件下铝合金试件动态拉伸应变时程的对比。图中同样显示：(1)当铝合金试件标距取设计标距 6.8 mm 时，由 SHTB 原理计算得到应变时程比 DIC 分析结果明显偏大，而当把标距修正为 7.2 mm 时，两者的结果则非常一致；(2)不同应变率的实验结果同时也再次检验了修正标距不随着应变率而改变。由此看来，在传统 SHTB 实验中，为了准确地获得应力应变曲线，需要对试件设计标距进行适当的修正，在试件的材料和几何尺寸不变的条件下标距修正不依赖于应变率。

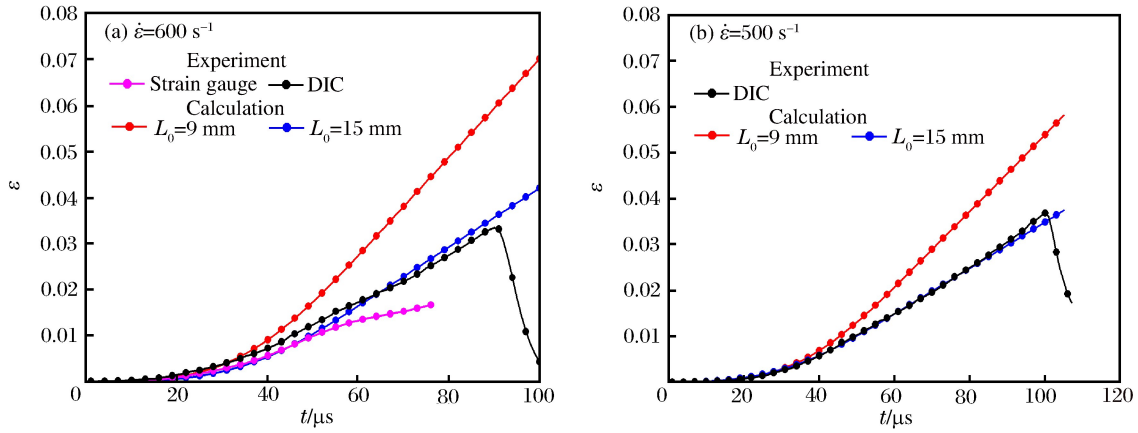

图 5 2 种应变率下不同方法获得的尼龙试件应变时程的对比

Fig. 5 Comparison of strain profiles obtained by different calculation methods at different strain rates

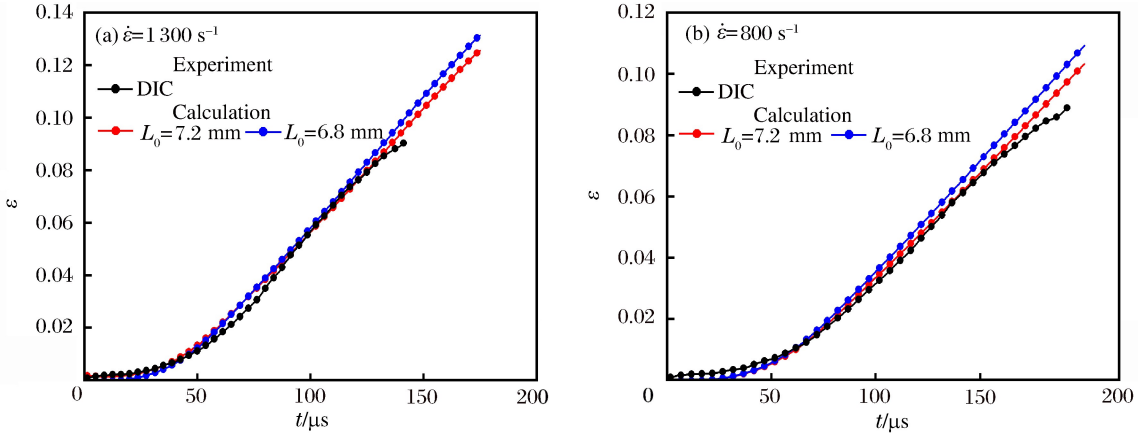

图 6 2 种应变率下不同方法获得的铝合金试件应变时程的对比

Fig. 6 Comparison of different strain rate profiles obtained by different methods at different strain rates

2.2 应变均匀性

在动态拉伸下试件应变均匀是 SHTB 实验需满足的基本假定，基于高分辨率 DIC 全场应变测量结果来讨论试件应变均匀性问题。图 7 给出不同变形时刻尼龙和铝合金试件拉伸应变在标距内的分布。

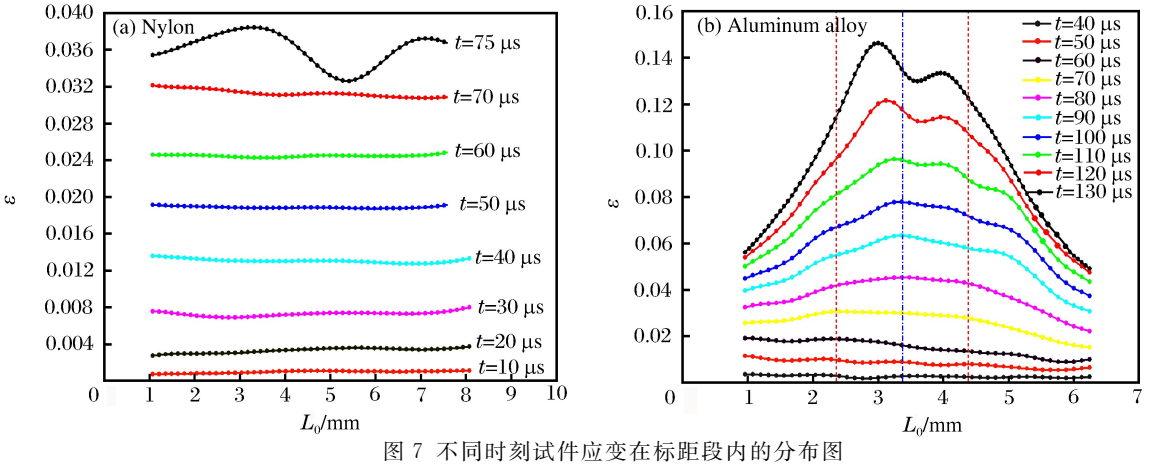

图 7 不同时刻试件应变在标距段内的分布图

Fig. 7 Progression of strain distribution along gauge length of specimen

对于尼龙试件，除了临近断裂时出现了应变局域化，其他变形时段内应变在标距内分布都比较均匀，这与云图显示结果一致。但对于铝合金试件，变形初期标距内应变均匀性较好，但在变形中后期，由

于颈缩导致了比较严重的应变不均匀性，并且颈缩几乎影响整个试件标距范围。虽然应变在铝合金试件标距内分布是不均匀的，但标距中心两侧 1 mm 范围（见图 7(b)中 2 条红色虚线之间）应变不均匀度不超过 15%，因此把该范围内平均应变近似作为试件有效应变是比较合理的。

2.3　应力应变关系

经时间同步处理，获得了一组典型的尼龙和铝合金材料动态拉伸应力应变曲线，如图 8 所示，同时也给出了传统 SHTB 原理得到的应力应变曲线以及准静态加载下实验结果。从图中看到：(1)对于尼龙试件，$L_0=9$ mm 时传统 SHTB 原理得到的应力应变曲线明显区别于 DIC 分析结果，而当 $L_0=15$ mm时得到的应力应变曲线与 DIC 分析结果一致性非常好，这说明采用 DIC 应变分析对传统 SHTB 试件标距进行修正后也可以得到比较准确应力应变曲线；(2)与准静态实验结果相比，高应变率下尼龙材料强度提高了近 50%，而断裂应变减小近 70%，表现出了严重的冲击脆化现象；(3)对于铝合金试件，虽然应变均匀性较差，但 SHTB 原理得到的应力应变曲线与 DIC 分析结果几乎重合在一起，这是因为：当应变超过 0.02 之后，应变不均匀性才开始表现出了，但此时高强铝合金材料已进入理想塑性流动，应变测量的差异在应力应变曲线上难以表现出来；(4)铝合金材料应变率效应明显低于尼龙高聚物材料，高应变率条件下其强度略有提高（约 10%）。

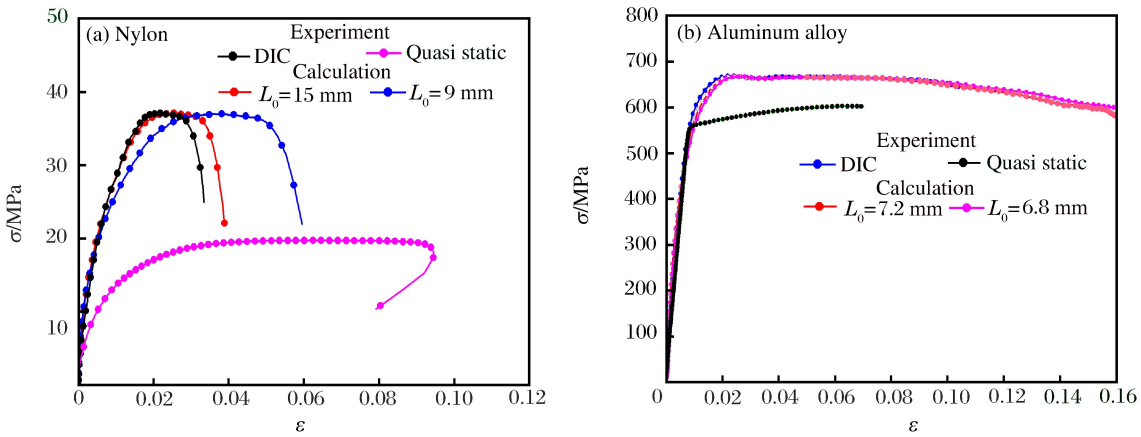

图 8　2 种应变率下尼龙和铝合金材料动态拉伸应力应变曲线

Fig. 8　Dynamic tensile stress-strain curves of nylon and aluminum at different strain rates

3　结　论

(1)在 SHTB 实验系统上搭建了基于超高速相机的 DIC 全场应变测量系统，准确获得了尼龙和铝合金两种材料的动态拉伸应力应变曲线，并与传统的 SHTB 测量方法获得的应力应变曲线进行了对比，证实了实验新方法的有效性。

(2)传统的 SHTB 实验应变测量结果与基于 DIC 全场应变分析得到的试件应变之间存在明显差异，这种差异主要源于试件标距的不确定性，需要对试件标距进行修正，在试件材料与几何尺寸不变条件下修正的标距尺寸不依赖于应变率。

(3)脆性的尼龙试件表现出良好的应变均匀性，而韧性的铝合金试件在颈缩期间表现了比较严重的应变不均匀性，并且颈缩几乎影响整个标距范围。

参考文献：

[1]　Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading loading[J]. Proceedings of the Physical Society. Section B, 1949,62(11):676-700.

[2]　Chen W, Song B. Split Hopkinson (Kolsky) bar: Design, testing and application[M]. New York: Springer, 2011.

[3]　胡时胜，王礼立，宋力，等. Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾[J]. 爆炸与冲击，2014,34(6):641-657.

Hu Shisheng, Wang Lili, Song Li, et al. Review of the development of Hopkinson pressure bar technique in China [J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(6):614-657.

[4] Owens A T, Tippur H V. A tensile split Hopkinson bar for testing particulate polymer composites under elevated rates of loading[J]. Experimental Mechanics, 2009,49(6):799-811.

[5] Gerlach R, Kettenbeil C, Petrinic N. A new split Hopkinson tensile bar design[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012,50(12):63-67.

[6] 田宏伟,郭伟国.动态拉伸试验中试样应变测试的有效性分析[J].实验力学,2008,23(5):403-410.
Tian Hongwei, Guo Weiguo. Validity analysis of sample strain measurement in dynamic tensile experiment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008,23(5):403-410.

[7] 赵磊,李玉龙,陈煊.一种绸布的冲击拉伸性能实验[J].爆炸与冲击,2014,34(4):476-482.
Zhao Lei, Li Yulong, Chen Xuan. Experimental study on dynamic tensile behavior of a kind of fiber silk[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(4):476-482.

[8] 胡时胜,邓德涛,任小彬.材料冲击拉伸实验的若干问题探讨[J].实验力学,1998,13(1):9-14.
Hu Shisheng, Deng Detao, Ren Xiaobin. A study on impact tensile test of materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998,13(1):9-14.

[9] Sutton M A, Orteu J J, Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applicants[M]. New York: Springer, 2009.

[10] Pierron F, Sutton M A, Tiwari V. Ultra high speed DIC and virtual fields method analysis of a three point bending impact test on an aluminum bar[J]. Experimental Mechanics, 2011,51(4):537-563.

[11] Liu J G, Saletti D, Pattofatto S, et al. Impact testing of polymeric foam using Hopkinson bars and digital image analysis[J]. Polymer Testing, 2014,36(6):101-109.

Full field strain measurement in split Hopkinson tension bar experiments by using ultra-high-speed camera with digital image correlation

Shen Haiting, Jiang Zhaoxiu, Wang Beike, Li Chenghua, Wang Lili, Wang Yonggang

(*Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education of China, Ningbo University, Ningbo* 315211, *Zhejiang, China*)

Abstract: In this work the digital image correlation (DIC) technique was used for the full field measurement of the dynamic tension strain in traditional split Hopkinson tension bar (SHTB) experiments using the commercial image correlation software and the digital ultra-high-speed camera. This system was used to study the dynamic tensile response of nylon and aluminum alloy. The dynamic tensile stress-strain curves of nylon and aluminum alloy were accurately obtained to verify the validity of the dynamic tensile strain measured by the DIC technique. The results show that the average strain thus determined agrees well with the strain measured with a strain gauge attached to the specimen, but the traditional SHTB experiment's analytic strain is larger than the strain measured from the DIC method, which can be rectified by using the effective gauge length in consideration of the effect of rounded fillets. The effective gauge length does not depend on the strain rate. Based on the full filed strain measurements of the specimen, the strain distribution within the gauge length is uniform for the brittle nylon specimen, but the strain distribution for the ductile aluminum alloy specimen is not uniform due to the effects of the necking.

Keywords: solid mechanics; dynamic tension; digital image correlation; SHTB; nylon; aluminum alloy

(责任编辑 王易难)