DOI: 10.11883/bzycj-2017-0116
文章编号: 1001-1455(2018)05-1165-07

基于激光干涉测试技术的分离式 Hopkinson 压杆实验测试系统*

张 振,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: 分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)实验的传统测试技术是基于应变片的电测技术,测试结果的可靠性强烈依赖于应变片与杆之间粘贴质量,受到人为因素的影响较大。本文中采用基于多普勒频移原理的双探头全光纤激光干涉测速技术,以粒子速度为监测目标,借助应力波传播理论,换算成试件的应变和应力,从而建立了 SHPB 实验的非接触光学测试系统。针对韧性和脆性两类材料,分别提出了激光正入射和激光斜入射两种测试技术。再以铝合金和 PZT 陶瓷为例,通过与传统的应变片测试结果以及 DIC 测量结果的对比分析,验证了两种测试技术的有效性。与传统的应变片测试技术相比,新的激光干涉测试技术具有免标定、抗干扰、可靠性高等许多优点,有助于实现 SHPB 实验测试系统标准化。

关键词: 分离式 Hopkinson 压杆;激光干涉技术;粒子速度;铝合金;PZT 陶瓷
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 1303530 **文献标志码**: A

分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)技术由 Kolsky[1] 于 1949 年提出,也被称为 Kolsky 杆实验技术,该技术已广泛应用于研究材料在高应变率下动态力学性能[2-4]。目前,很多高校或研究单位都有 SHPB 实验装置。在 SHPB 实验中,一直存在一个困惑的问题,就是实验结果的可靠性一直受到质疑,这大大制约了 SHPB 实验技术的发展。

SHPB 实验受到许多技术因素影响,如试件尺寸、端面的摩擦效应、试件的应力/应变均匀性、加载波形等[5-8]。除了上述这些技术因素,测试系统的人为因素影响也非常关键。传统的 SHPB 测试系统是应变片电测法,但测量准确性强烈依赖于应变片与杆之间粘接状态、灵敏度系数动态标定以及位置的准确性等因素。这些因素显然与操作人员的技能密切相关。为了实现 SHPB 实验中测试系统标准化,需要尽量消除人为因素的干扰。近年来,非接触式光学应变测量技术发展迅速。基于超高速相机和数字图像相关性方法(digital image correlation, DIC),试件全场应变测量技术被逐渐应用于 SHPB 实验[9-11]。该技术不仅可获取试件应变信息,还可检验试件应变分布均匀性问题。以平行激光作为光源,有学者提出了非接触式激光应变测量技术,即通过监测加载过程中试件的直径变化,再基于体积不可压缩假定,进而求得试件的轴向应变[12-13]。相比传统的应变片测试技术,非接触光学应变测量技术可以较好地实现试件应变的准确测量,但该技术不能解决试件中应力实时测量问题,还需借助应变或应力传感器来监测试件中应力时程,最终得到试件的应力应变曲线。

其实,在 SHPB 实验过程中,除了监测应变、应力,还有一个非常重要的物理量即粒子速度可以监测。根据应力波传播理论,由粒子速度可以方便求出应力或应变。基于光学多普勒频移,人们发展了任意反射面激光粒子速度干涉仪(velocity interferometer system for any reflector, VISAR)[14],监测试件表面的粒子速度时程,VISAR 适用于测量高速运动的粒子,如在气炮或炸药爆轰加载条件下的粒子运动。然而,在 SHPB 实验中,杆与试件中粒子运动速度较低,VISAR 并不适用。近年来,发展了全光纤激光干涉测速仪[15](在我国称为 displacement interferometer system for any reflector, DISAR;国际上

* **收稿日期**: 2017-04-11; **修回日期**: 2017-05-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(11472142)
第一作者: 张 振(1991—),男,硕士研究生; **通信作者**: 王永刚,wangyonggang@nbu.edu.cn。

称为 photonics Doppler velocimetry，PDV)，具有体积小、结构紧凑、环境适应性强、易于使用和维护等优点，特别在 VISAR 的测试盲区(几米每秒至毫米每秒的低速)，全光纤激光干涉测速仪的表现也能令人满意。因此，许多学者尝试把全光纤激光干涉测速仪应用于 SHPB 实验中。Wu 等[16]把 PDV 技术与 PVDF 应力计相结合，作为 SHPB 实验的测试系统，以铝合金材料为例，验证了测试方法的有效性。Lea 等[17]把 PDV 技术应用于直接撞击 Hopkinson 压杆实验中。

本文中，拟基于双探头的全光纤激光干涉测速技术，搭建 SHPB 实验的非接触式光学测试系统。以典型的韧性材料铝合金和脆性材料 PZT 铁电陶瓷为例，通过与传统的应变片电测技术以及 DIC 技术的测量结果对比分析，验证全光纤激光干涉测速系统在 SHPB 实验中应用的有效性和可靠性。新的激光干涉测试技术可减小人为因素的影响，这有助于 SHPB 实验测试系统标准化。

1 激光多普勒测速原理

如图 1 所示，从 He-Ne 激光器中发出频率为 f_0(波长 633 nm)的激光进入 1×2 光纤分束器耦合器 1 后被分成 2 路。一部分激光作为参考光经由声光调制器直接进入耦合器 2，频率不变；而另一部分激光通过光纤环行器 2 端注入探头，并从探头照射到待测移动目标上，探测光在目标上发生反射，部分反射光被探头收集，反射信号光发生多普勒频移，频率变为 f_s，再次进入环形器后，作为信号光从端口 3 进入耦合器 2。信号光和参考光合束后产生干涉，干涉光进入探测器，经光电转换后由高带宽的示波器记录。多普勒频移 f_d 和目标运动速度之间关系为：

$$u(t)=\lambda(f_s-f_0)/2=\lambda f_d/2 \tag{1}$$

式中：λ 是激光的波长。对示波器记录的激光干涉信息采用短时傅里叶变换方法进行频域分析，提取出多普勒频移，即可用式(1)得到被测目标的运动速度。通过声光调制器，可实现对速度方向的判断。速度时程是隐藏在激光干涉信号的频域中，与光强变化无关，因此测试系统的抗干扰能力较强。

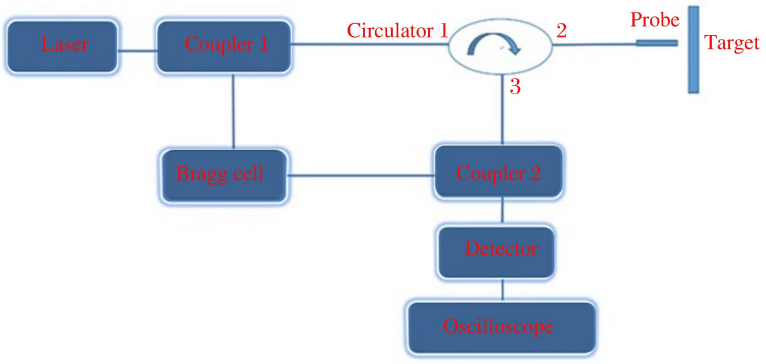


图 1 激光多普勒测速原理示意图

Fig. 1 Scheme of photonics Doppler velocimetry

2 实验方案

传统的 SHPB 实验装置通常由输入杆、输出杆与吸收杆组成，如图 2 所示。通过粘贴在输入杆和输出杆的应变片可获得入射波 $\varepsilon_i(t)$、反射波 $\varepsilon_r(t)$ 和透射波 $\varepsilon_t(t)$ 的应变信号，在满足杆中一维弹性应力波的假设以及短试件应力/应变沿其长度均匀分布假定条件下，根据一维弹性应力波理论[18]，可计算试样的工程应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$、工程应变 $\varepsilon(t)$ 与工程应力 $\sigma(t)$：

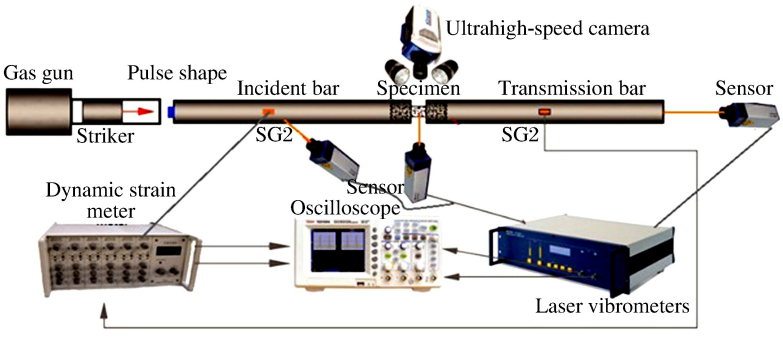


图 2 SHPB 实验装置和测试系统示意图

Fig. 2 Setup of SHPB with different measurement systems

$$\dot{\varepsilon}(t)=-\frac{2c_0}{L_s}\varepsilon_r(t),\qquad \varepsilon(t)=-\frac{2c_0}{L_s}\int_0^t\varepsilon_r(t)\mathrm{d}t,\qquad \sigma(t)=\frac{EA}{A_s}\varepsilon_t(t) \tag{2}$$

式中：E、A 和 c_0 分别是杆的弹性模量、横截面积和弹性纵波波速，A_s 和 L_s 分别为试件横截面积和高度。传统的应变片电测技术测量准确性受到粘贴技术、动态标定、电磁干扰等许多因素的影响。这里，基于 Polytec HSV-100-V40 型双探头全光纤激光干涉测速仪，搭建 SHPB 实验的非接触式光学测试系统。该测速仪的量程为 0～40 m/s，最高带宽 250 kHz，满足了 SHPB 实验中速度测量的要求。干涉信号由高采样率的示波器采集。

采用激光干涉测速技术替代应变片电测技术，获得输入杆和输出杆中轴向粒子速度 $v(t)$。根据一维弹性应力波理论，可知：

$$\varepsilon(t)=v(t)/c_0 \tag{3}$$

将式(3)代入式(2)，得：

$$\dot{\varepsilon}(t)=-\frac{2}{L_s}v_r(t),\qquad \varepsilon(t)=-\frac{2}{L_s}\int_0^t v_r(t)\mathrm{d}t,\qquad \sigma(t)=\frac{EA}{A_sc_0}v_t(t)=\frac{A}{A_s}\rho c_0 v_t(t) \tag{4}$$

式中：$v_r(t)$ 和 $v_t(t)$ 分别是反射波和透射波的轴向粒子速度。翁继东等[19]、杨军等[20]采用激光探头正对着杆端部的横截面来监测杆中轴向粒子速度，检验了全光纤激光干涉测速技术在低速测量时的有效性。在 SHPB 实验中，输入杆和输出杆之间夹持着试件。对于输出杆来说，激光探头可以正对着杆自由端横截面中心处，根据应力波理论可知杆自由端测得的粒子速度 $v_f(t)$ 是杆中粒子速度 $v_t(t)$ 的 2 倍。对于输入杆而言，激光不能正入射横截面，难以获取入射波和反射波的轴向粒子速度，导致不能利用式(4)来计算试件的应变。这里，我们采用激光沿径向正入射试件来监测试件在动态压缩过程中径向膨胀速度 $v_R(t)$，然后换算成试件的轴向应变。在弹性变形阶段，试件的径向工程应变 $\varepsilon_R(t)$ 与轴向工程应变 $\varepsilon_e(t)$ 之间满足泊松比关系，即：

$$\varepsilon_e(t)=-\frac{1}{\mu}\varepsilon_R(t)=-\frac{1}{\mu}\frac{\int_{t_0}^{t_e}v_R(t)\,\mathrm{d}t}{R_s} \tag{5}$$

在塑性变形阶段，基于塑性变形体积不变的假定，有：

$$\frac{V}{V_s}=\frac{\pi R^2(t)}{\pi R_s^2}\frac{L(t)}{L_s}=\frac{R^2(t)}{R_s^2}\frac{L_s-\Delta L}{L_s}=1 \tag{6}$$

由此，得到塑性变形阶段的试件轴向工程应变为：

$$\varepsilon(t)=\varepsilon_e+\left(\frac{R_s}{R_s+\int_{t_e}^{t_f}v_R(t)\,\mathrm{d}t}\right)^2-1 \tag{7}$$

式中：μ 是试件材料的泊松比，R_s 和 R 分别是试件的初始半径和实时变径，t_e 和 t_f 分别是试件弹性变形结束时间点和总变形结束时间点。由式(5)和(7)得到试件的工程应变时程，再由式(4)得到试件的工程应力，经时间同步处理后，消去时间，即得试件的应力应变曲线。上述的激光沿径向正入射于试件外表面的测试技术，称为激光正入射测试技术，比较适用于塑性变形能力强的金属材料。

对脆性的陶瓷或混凝土材料而言，试件的轴向压缩破坏应变很小，径向膨胀变形能力很弱，激光干涉测速技术难以有效地监控微弱的径向膨胀速度，需要另辟蹊径。在简述全光纤激光干涉测速原理中，速度隐藏在激光干涉信号的频域中，与光强变化无关。激光照射在运动物体表面上时，不需要发生镜面反射，因此激光可以斜入射于输入杆表面测量点。通过在测量点粘贴漫反射薄膜，提高反射激光被探头吸收的效率，使得部分带频移信息的激光被接受，通过频谱分析可以测得沿激光照射方向的粒子速度 $v_{meas}(t)$。如果激光入射方向与杆的轴向夹角为 α，则输入杆中沿轴向的粒子速度 $v_{axial}(t)$ 为：

$$v_{axial}(t)=\frac{v_{meas}(t)}{\cos\alpha} \tag{8}$$

由此来看，可以采用激光斜入射方法来解决输入杆上轴向粒子速度测量问题，再利用式(4)，可获得试件的应力应变曲线。该测试技术称为激光斜入射测试技术。

整个 SHPB 实验的非接触光学测试方案示意图，如图 2 所示。激光干涉测试系统主要是由激光干涉仪和两个激光探头组成。采用激光正入射测试技术时，一个激光探头正入射试件，另一个探头正入射透射杆自由面；而采用激光斜入射测试技术时，则把正入射试件的探头前移到入射杆中部，并以一定的角度斜入射入射杆。同时，为了对比分析，还通过超高速相机实时监测了试件的变形散斑图像，再结合 DIC 分析得到试件的应变信息。

3 典型实验结果分析

3.1 激光正入射测试技术

使用直径为 14.5 mm 的 SHPB 实验装置，输入杆和输出杆的长度均为 1.2 m，子弹长为 300 mm，材料都是高强钢，密度为 7 850 kg/m^3，弹性模量为 206 GPa。实验材料选择 2024 高强铝合金，圆柱形试件的高度和直径均为 6 mm。为了对比分析测试结果的有效性，实验中采用 3 种独立方法来监测试件的变形，即激光干涉测速技术、传统的应变片电测技术和基于超高速相机的数字图像相关性的全场应变测量技术，具体的测试方案如图 2 所示。实验前，在试件一侧喷涂散斑，通过超高速相机对试件变形过程进行监测，拍摄频度为 10^6 s^{-1}，图像分辨率为 924 像素×768 像素；对试件另一侧进行适当抛光处理或粘贴漫反射薄膜，提高激光照射时反射效果。

图 3 给出了激光干涉法实测的试件径向膨胀速度 v_R 和输出杆自由端粒子速度 v_f 曲线。在 v_R 曲线观察到的上升沿的中下部出现了明显的转折点，该点可能是试件从弹性变形向塑形变形转变点，所对应的时间定义为 t_e。v_f 曲线本质上反映了试件的应力变化，相对于 v_R 进行时间同步处理，发现 v_f 曲线上反映材料屈服的特征点所对应的时间也恰好在 t_e，这就验证了上述猜测的正确性。另外，对比 v_R 和 v_f 曲线可以看到，在试件塑性变形阶段 v_R 基本恒定，这表明试件在塑性变形过程中基本维持了恒应变率。基于 v_R 曲线，根据式(5)和(7)，计算得到试件的轴向应变曲线，如图 4 所示。基于 v_f 曲线，根据 $v_f=2v_t$ 和式(4)，计算得到试件的工程应力曲线，如图 5 所示。图 6 给出了应变片电测法得到的输入杆和输出杆上的 $\varepsilon_i(t)$、$\varepsilon_r(t)$和$\varepsilon_t(t)$，由式(2)计算得到试件的工程应变和工程应力也显示在图 4～5 中。激光干涉法的测量结果和应变片电测法的测量结果一致。采用商业 DIC 软件(Correlated Solutions 公司 VIC2D)对高速相机拍摄的试件高速变形过图像进行处理，得到了试件全场工程应变结果，然后提取出试件中部(与激光测量的位置相对应)的平均应变，如图 4 所示。对比图 4 中 3 组试件工程应变测量结果，显然 3 种方法的测量结果是自洽的。图 5 给出了工程应力曲线对比，清楚地显示激光干涉测试技术比应变片电测技术具有更好的抗干扰能力。由此看来，对于塑性变形能力强的材料，激光正入射测试技术是完全可行的。

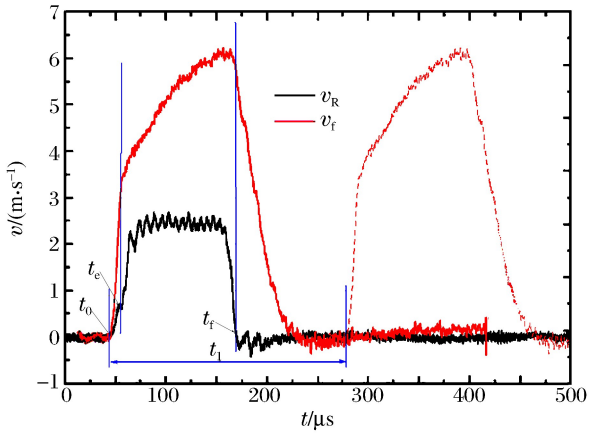


图 3 径向膨胀速度和自由端粒子速度曲线

Fig. 3 Radial velocity profile of specimen and free surface velocity profile of transmission bar

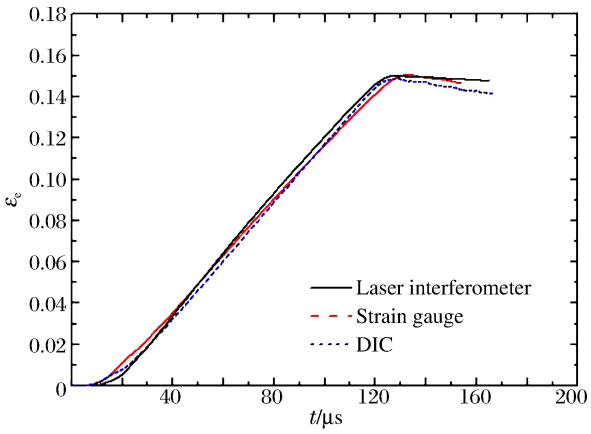


图 4 工程应变曲线对比

Fig. 4 Comparison of engineering strain profiles measured by different methods

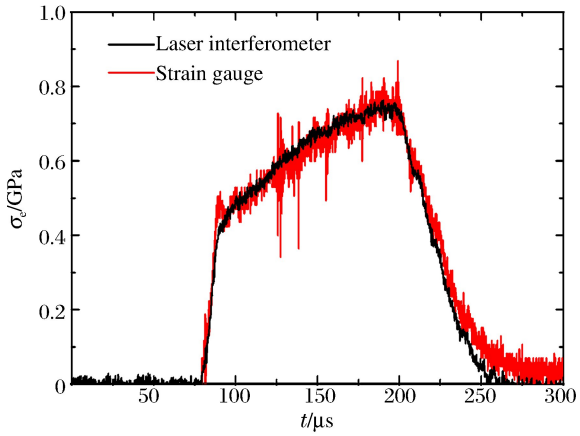


图 5　工程应力曲线对比

Fig. 5　Comparison of engineering stress profiles measured by laser and strain gauge

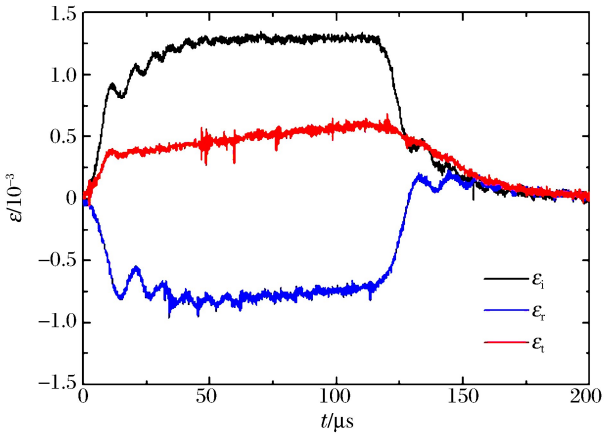


图 6　入射波、反射波和透射波的应变曲线

Fig. 6　Strain profiles of incident wave, transmitted and reflected wave

3.2　激光斜入射测试技术

实验材料选用 PZT 铁电陶瓷，圆柱形试件的高度和直径均为 6 mm。一个激光探头以约 60°倾角照射在输入杆上来监测杆中粒子速度时程，另一个探头仍然采用正入射法来监测输出杆自由端粒子速度，如图 2 所示。图 7 给出了激光干涉法得到的原始粒子速度。根据式(8)，把输入杆上测得原始粒子速度换算成轴向粒子速度，而输出杆自由端粒子速度减半后为杆中粒子速度，再由式(3)(钢杆的 c_0 = 5 190 m/s)换算得到应变曲线，如图 8 所示。图 8 中同时给出了应变片的测量结果。从图 8 中可以清楚地看到，激光干涉测速法和应变片电测法两种方法测得的入射波、反射波和透射波的应变信息完全一致，这证明了斜入射测试技术的可行性。激光斜入手测试技术的适用性并不局限于脆性材料，对金属材料、泡沫材料、高分子材料、复合材料等也是适用的。

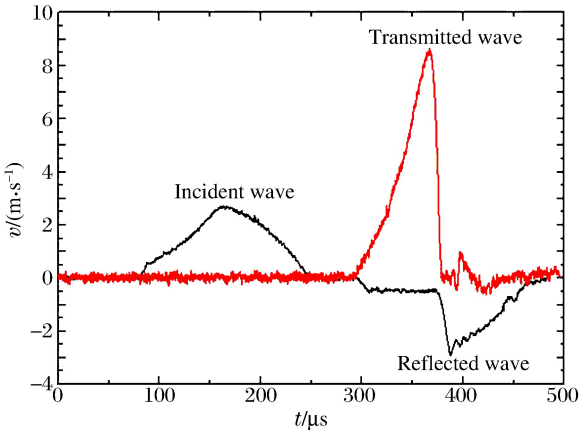


图 7　激光干涉法测得的粒子速度曲线

Fig. 7　Particle velocity profiles measured by laser interferometer

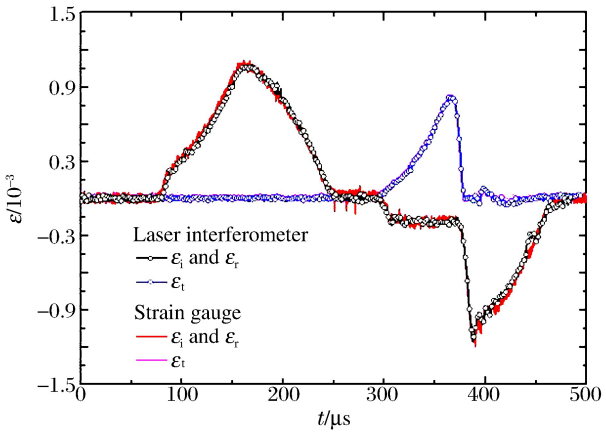


图 8　激光干涉法和应变片法得到的应变曲线对比

Fig. 8　Comparison of strain profiles measured by laser interferometer and strain gauge

与传统的应变片电测法相比，基于激光干涉测速原理的 SHPB 实验非接触光学测试技术具有独特的优势，总结归纳为：(1)测试系统免标定，减少了人为因素的影响；(2)速度测量与激光光强无关，系统具有较好的抗干扰能力；(3)应变片在子弹高速撞击时，容易发生损坏或应变片与杆之间粘贴性能改变，影响测量的结果重复性和可靠性，而激光干涉测试技术是非接触式的，不会受到子弹撞击的影响，实验结果的重复性和可靠性高；(4)使用方便，没有耗材。具有上述这些优势的激光干涉测试技术，非常有助于实现 SHPB 实验测试系统标准化。

4 结 论

(1)在 SHPB 实验系统上,搭建了基于双探头全光纤激光干涉测速技术的非接触光学测试系统。由激光干涉法实时测量试件和杆中的粒子速度,再借助应力波传播理论,计算得到试件的应变和应力。

(2)针对韧性材料,采用激光沿径向正入射试件外表面的测试技术,监测了试件径向膨胀速度,建立了径向膨胀速度与轴向应变之间换算关系。实验结果显示,激光干涉法的测量结果与应变片电测法以及 DIC 的测量结果是自洽的,从而验证了测试技术的有效性。

(3)针对脆性材料,采用激光斜入射输入杆的测试技术,监测了输入杆中粒子速度曲线,再根据粒子速度与应变之间换算关系,得到了入射波、反射波和透射波应变曲线,它与传统的 SHPB 测试结果一致,这表明该测试技术是可行的。

(4)与传统的应变片测试技术相比,基于激光干涉技术的非接触光学测试系统具有免标定、抗干扰、可靠性高等优点,为 SHPB 实验测试系统标准化提供了一条有效的途径。

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 of London: B, 1949,62(1):676-700.

[2] 李玉龙,郭伟国,徐绯,等. Hopkinson 压杆技术的推广应用[J]. 爆炸与冲击,2006,26(5):385-394.
LI Yulong, GUO Weiguo, XU Fei, et al. The extended application of Hopkinson bar technique[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(5):385-394.

[3] 陈荣,卢芳云,林玉亮,等. 分离式 Hopkinson 压杆实验技术研究进展[J]. 力学进展,2009,39(5):576-587.
CHEN Rong, LU Fangyun, LIN Yuliang, et al. A critical review of split Hopkinson pressure bar technique[J]. Advances in Mechanics, 2009,39(5):576-587.

[4] 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.

[5] CHEN W, SONG B. Split Hopkinson (Kolsky) bar: Design, testing and application[M]. New York: Springer, 2011.

[6] IWAMOTO T, YOKOYAMA T. Effects of radial inertia and end friction in specimen geometry in split Hopkinson pressure bar tests: A computational study[J]. Mechanics of Materials, 2012,51:97-109.

[7] LU F Y, LI Y L, WANG X Y, et al. A theoretical analysis about the influence of interfacial friction in SHPB tests [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015,79:95-101.

[8] YANG L M, SHIM V P W. An analysis of stress uniformity in split Hopkinson bar test specimens[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(2):129-150.

[9] LIU J, SALETTI D, PATTOFATTO S, et al. Impact testing of polymeric foam using Hopkinson bars and digital image analysis[J]. Polymer Testing, 2014,36:101-109.

[10] SATO K, YU Q, HIRAMOTO J, et al. A method to investigate strain rate effects on necking and fracture behaviors of advanced high-strength steels using digital imaging strain analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015,75:11-26.

[11] 申海艇,蒋招绣,王贝壳,等. 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[J]. 爆炸与冲击,2017,37(1):15-20.
SHEN Haiting, JIANG Zhaoxiu, WANG Beike, et al. Full field strain measurement in split Hopkinson tension bar experiments by using ultra-high-speed camera with digital image correlation[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(1):15-20.

[12] RAMESH K T, NARASIMHAN S. Finite deformations and the dynamic measurement of radial strains in compression Kolsky bar experiments[J]. International Journal of Solids and Structures, 1996,33(25):3723-3738.

[13] LI Y, RAMESH K T. An optical technique for measurement of material properties in the tension Kolsky bar[J].

International Journal of Impact Engineering, 2007,34(4):784-798.

[14] BARKER L M, HOLLENBACK R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface [J]. Journal of Applied Physics, 1972,43(11):4469-4675.

[15] WENG Jidong, TAN Hua, HU Shaolou, et al. New all-fiber velocimeter[J]. Review of Scientific Instruments, 2005,76(9):093301.

[16] WU X, WANG X, WEI Y, et al. An experimental method to measure dynamic stress-strain relationship of materials at high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014,69(4):149-156.

[17] LEA L J, JARDINE A P. Application of photon Doppler velocimetry to direct impact Hopkinson pressure bars [J]. Review of Scientific Instruments, 2016,87(2):023101.

[18] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京：国防工业出版社，2005.

[19] 翁继东，谭华，陈金宝，等. 光纤任意反射面速度干涉系统在高压物理中的应用[J]. 高压物理学报，2004，18(3)：225-230.
WENG Jidong, TAN Hua, CHEN Jinbao, et al. Application of fiber velocity interferometer system for any reflector in high pressure physics[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004,18(3):225-230.

[20] 杨军，王克逸，徐海斌，等. 光纤位移干涉仪的研制及其在 Hopkinson 压杆实验中的应用[J]. 红外与激光工程，2013,42(1):102-107.
YANG Jun, WANG Keyi, XU haibin, et al. Development of an optical-fiber displacement interferometer and its application in Hopkinson pressure bar experiment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(1):102-107.

Measurement system for split Hopkinson pressure bar apparatus based on laser interferometry technique

ZHANG Zhen, WANG Yonggang

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

Abstract: Conventional measurements in SHPB are based on recording the strain profiles on the incident and transmitted bars with strain gauges, and require good adhesion between the strain gauge and bars, which strongly depends on the skill of an operator. In this paper, the all fiber laser interferometry technique with two fiber focusers based on the principle of Doppler frequency shift is used to establish a non-contact optical measurement system for SHPB. The monitoring objective of the new measurement system is the particle velocity that can be easily converted into strain and stress by means of stress wave propagation. For the ductile and brittle materials, two measurement methods by using of laser normal irradiation and laser obliqueirradiation were proposed, respectively. Taking aluminum alloy and PZT ceramics as examples, the validity of the two optical measurement systems was verified by comparing with the traditional SHPB measurement results and the DIC measurement results. The laser interferometry technique has several advantages over traditional strain gauge measurements. It is non-calibrating, high repeatable and high reliability, which is helpful to realize the standardization of SHPB measurement system.

Keywords: split Hopkinson pressure bar; laser interferometry; particle velocity; aluminum alloy; PZT ceramics

（责任编辑　丁　峰）