

一种立式分离式霍普金森压杆实验装置研制*

尚 兵¹, 王彤彤²

(1. 广州航海学院航务工程学院, 广东 广州 510725;

2. 广州航海学院基础部, 广东 广州 510725)

摘要: 低波阻抗材料通常可以用于吸能、缓冲等领域。用分离式霍普金森压杆实验装置测量这类材料的动态本构关系时,并不需要子弹拥有太高的冲击速度,但要求速度稳定,每次实验过程中的速度偏差要小。为此,依据自由落体原理,研制立式分离式霍普金森压杆,通过下落高度精确控制子弹撞击速度。通过夹持入射杆的摩擦力与入射杆重力相等的方法消除入射杆自重对实验结果的影响。通过对 PVA(聚乙烯醇)纤维增韧混凝土的动态压缩实验验证该实验装置的可靠性。

关键词: 分离式霍普金森压杆; 纤维混凝土; 动态力学性能; 应变率

中图分类号: O347.4

文献标识码: A

霍普金森压杆技术源于 J. Hopkinson 和 B. Hopkinson 父子俩的工作^[1-2]。1949 年, Kolsky^[3] 在此基础上提出了分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB), 用于测量金属材料在高应变率下的动态力学性能。又经过半个多世纪的发展, SHPB 技术已成为测量各种材料动态力学性能^[4-8]的重要手段。研究人员对 SHPB 实验装置进行了不断改进, 发展了霍普金森拉杆(Split Hopkinson Tensile Bar, SHTB)^[9]和扭杆等实验技术, 并获得了广泛的应用。传统的 SHPB 和 SHTB 技术大多采用气动方式加载, 当加载速度较高时, 子弹出口速度非常稳定, 但在低速加载时, 子弹出口速度容易出现偏差。

电磁发射技术利用电磁力提升和推动物体, 在高速或超高速发射方面具有很好的应用前景。按发射原理可分为导轨式和线圈式。磁阻式线圈发射方式属于线圈式的一种, 具有结构简单、可控性好、可靠性和抗破坏性高的优点^[10], 国内许多学者在 SHPB 的电磁驱动技术方面取得了成果^[11]。常规电磁驱动装置有诸多优点, 但要求子弹为铁磁材料, 否则需在子弹外缠绕线圈, 不仅对磁场强度提出了更高要求, 而且会对入射波形产生干扰, 而当前对软材料的测试需要用到模量较低的非铁磁材料子弹和杆件。鉴于此, 汤立群等^[12]研发了一种用于霍普金森压杆的双子弹电磁驱动装置, 可以实现对非铁磁材料的子弹进行发射和控制, 取得了良好的效果。

当 SHPB 实验技术被用于研究高波阻抗材料的动态力学性能时, 要求子弹具有较高的撞击速度; 当用于研究较低波阻抗材料(如泡沫铝、肌肉、混凝土等)的动态力学性能时, 并不需要子弹有太高的撞击速度, 通过 2 m 左右的自由落体加速即可使子弹获得所需的加载速度。鉴于此, 研发了基于自由落体的立式分离式霍普金森压杆装置。

1 SHPB 的基本原理

传统的 SHPB^[13-14]是将试样放置在入射杆和透射杆之间, 撞击杆(子弹)以一定的速度同轴撞击入射杆的自由端面, 在入射杆中产生压应力脉冲, 并沿入射杆向试样传播。当压应力脉冲传播到入射杆与

* 收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2017-12-14

基金项目: 广州航海学院创新强校基金

作者简介: 尚 兵(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: shang@mail.ustc.edu.cn

试样的界面时,一部分返回入射杆,另一部分传入试样,在试件内发生多次透/反射,并对试样进行加载,同时通过试样与透射杆的界面传入透射杆。因此,通过粘贴在入射杆和透射杆上的应变片可得到杆中的应变历史,从杆的应变历史中可以得到入射波 $\epsilon_i(t)$ 、反射波 $\epsilon_r(t)$ 和透射波 $\epsilon_t(t)$ 。再由一维应力波理论确定试样上的应变率 $\dot{\epsilon}$ 、应变 ϵ 及应力 σ

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{C}{l_0}(\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = \frac{C}{l_0} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A}{2A_0} E(\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \quad (3)$$

式中: A_0 、 l_0 为试样的面积和厚度, A 、 C 、 E 分别为杆的横截面面积、波速和杨氏模量。

根据均匀假定,有如下关系成立

$$\epsilon_i + \epsilon_r = \epsilon_t \quad (4)$$

代入(1)式~(3)式,可得到更为简单的两波法形式。

用入射波和反射波计算应力、应变、应变率

$$\sigma(t) = E(A/A_0)[\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t)] \quad (5)$$

$$\epsilon(t) = -(2C/l_0) \int_0^t \epsilon_r(t) dt \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -(2C/l_0) \epsilon_r(t) \quad (7)$$

用入射波和透射波计算应力、应变、应变率

$$\sigma(t) = E(A/A_0) \epsilon_t(t) \quad (8)$$

$$\epsilon(t) = -(2C/l_0) \int_0^t [\epsilon_i(t) - \epsilon_t(t)] dt \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -(2C/l_0) [\epsilon_i(t) - \epsilon_t(t)] \quad (10)$$

由(3)式可知,在子弹速度一定的情况下,作用在试件两端的应力与杆的弹性模量成正比。杆中的应变信号与子弹的撞击速度成正比。对于强度低的材料,则需要较低的子弹速度。鉴于此,研制了基于自由落体的立式 SHPB 装置。

2 立式 SHPB 装置

立式 SHPB 装置示意如图 1 所示。子弹手动释放后,在加速导管中自由下落,获得一定初速度后撞击入射杆。加速导杆有长度为 1 m 和 2 m 两种型号,根据需要选用或者接长。速度精准仪分长度为 0.1、0.2、0.5 m 的 3 种型号,也可以根据需要互换接长。速度精准仪安装在加速导杆的上端,是一段带有刻度的透明杆,用于精确确定子弹的起始下落位置,从而获得所需的初始撞击速度。摩擦力夹夹在入射杆端部,位置固定,杆与夹之间的摩擦力可以调节,直至摩擦力与入射杆的重力相等。采用空打的方式研究了摩擦夹对波的传播的影响,结果发现,波形并没有因摩擦夹的存在而发生可检测的衰减,因此认为摩擦夹对实验结果无影响。减震吸能装置目前采用钢筒装细沙来吸收子弹撞击后透射的能量。

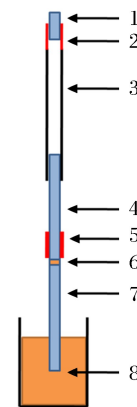


图 1 立式 SHPB 装置(1. 子弹;2. 速度精准仪;3. 加速导管;4. 入射杆;5. 摩擦力夹;6. 试件;7. 透射杆;8. 减震吸能装置)

Fig. 1 Schematic of vertical SHPB system (1. Bullet; 2. Speed adjustment; 3. Guide-bar; 4. Incident bar; 5. Friction clasp; 6. Specimen; 7. Transmission bar; 8. Shock-absorption device)

子弹的撞击速度 v 根据(11)式计算

$$v = \sqrt{2gH} \tag{11}$$

式中: g 是重力加速度,为 9.8 m/s^2 ; H 是子弹自由落体的高度。当 $H=2 \text{ m}$ 时,子弹的最终撞击速度 $v=6.26 \text{ m/s}$,可以满足多数软材料动态加载的需要。如果需要更高的加载速度,只需将加速导管接长即可。

为了获得一定的加载速度,采用传统的气压驱动需要多次调整才能达到想要的速度;当所需速度较低时,还可能出现无法调节的情况。即便在相同的气压驱动下,所得到的子弹速度也会发生偏离。图 2 是某气体发射装置在 0.30 MPa 气压驱动下所得到的子弹速度,并与自由落体 2.21 m 得到的子弹速度进行对比。

分析图 2 中的数据可知,气体发射子弹产生的速度标准差是 0.268 m/s ,而自由落体产生的速度标准差是 0.008 m/s 。由此可见,利用自由落体的方式可以获得更加稳定的加载速度。

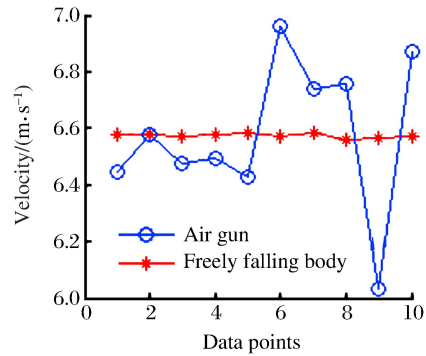


图 2 气枪发射子弹与子弹自由落体得到的速度对比

Fig. 2 Comparison on the bullet velocities of air gun shooting and freely falling

3 实验装置验证

聚乙烯醇纤维(Polyvinyl Alcohol Fiber, PVA)

是一种价格低廉、高强度和高弹性模量的合成纤维,具有良好的亲水性,纤维表面能够吸附少量自由水,与水泥基体的黏结强度很高。由于 PVA 本身具有较高的强度和弹性模量,不但能够有效地抑制混凝土早期的塑性裂缝,而且可以提高混凝土的韧性及抗冲击性能。研究低速撞击时混凝土的力学响应并不需要多高的加载速度,而立式 SHPB 装置可以精确控制加载速度。

利用立式 SHPB 装置对 PVA 增韧的混凝土试件进行实验。该装置采用 $\varnothing 35 \text{ mm}$ 的不锈钢杆制作,入射杆长 4.5 m ,透射杆长 2.0 m ,子弹长 300 mm ,纤维混凝土试件尺寸为 $\varnothing 35 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。采用 $\varnothing 10 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$ 的整形器对波形进行整形。整个实验装置安装在一个极少有人走动的楼梯间。子弹的释放采用人工手动释放。

自由落体高度为 2.41 m ,加载速度为 6.87 m/s 。所得入射波及透射波的波形如图 3 所示。信号 A 是入射杆上应变片记录的信号,信号 B 是透射杆上应变片记录的信号。图 4 是采用三波校核^[15-16]的方法分离出来的入射波、透射波和反射波。

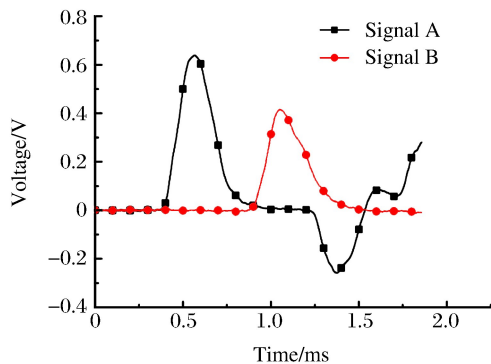


图 3 入射杆和透射杆上的原始波形
Fig. 3 Original signal waves in incident and transmission bars

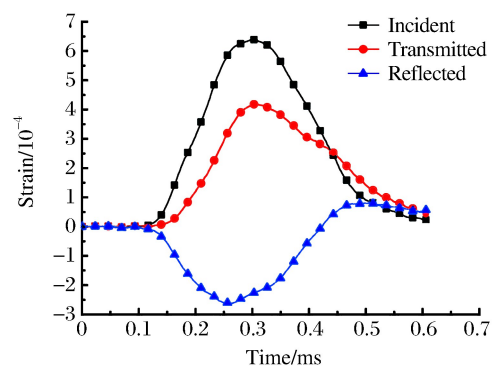


图 4 通过三波校核法分离的基本波形
Fig. 4 Basic waves selected by three-wave mutual-checking method

图5是由三波校核法得到的应力-应变曲线,曲线a由入射波与透射波得到,曲线b由入射波与反射波得到,曲线c由三波法得到。不同方法得到的应力-应变曲线基本一致。实验结果表明,立式 SHPB 装置用于低速加载实验是可行的。

4 结论

立式 SHPB 具有稳定的加载速度,可以满足低速加载需要。当所需加载速度比较大时,需要较大的净空高度,这是立式 SHPB 的缺点;但相对于传统 SHPB 的占地面积小很多。同时,立式 SHPB 不存在高压气体,无需电磁控制,在安全性和经济性上比传统 SHPB 优越。采用 PVA 增韧的混凝土试件进行了立式 SHPB 实验,实验结果良好,充分证明了立式 SHPB 用于低速加载的可行性。

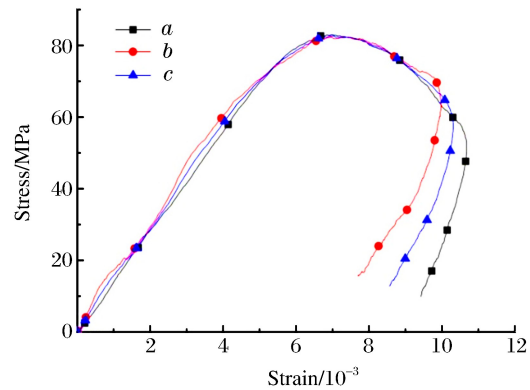


图5 通过三波校核法得到的应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves obtained using three-wave mutual-checking method

参考文献:

- [1] HOPKINSON J. On the rupture of iron wire by a blow [C]//Proceedings of the Literary and Philosophical Society of Manchester. Manchester, 1872:40-45.
- [2] HOPKINSON B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London; Series A; Containing Papers of a Mathematical and Physical Sciences, 1914, 213:437-456.
- [3] 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):676-700.
- [4] 尚兵, 盛精, 王宝珍, 等. 不锈钢材料的动态力学性能及本构模型 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6):527-531.
SHANG B, SHENG J, WANG B Z, et al. Dynamic mechanical behavior and constitutive model of stainless steel [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6):527-531.
- [5] 王宝珍, 周相荣, 胡时胜. 高应变率下橡胶的时温等效关系及力学形态 [J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(8):5-8.
WANG B Z, ZHOU X R, HU S S. Dynamic mechanical behavior and rate-temperature equivalence of rubber [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(8):5-8.
- [6] 王宝珍, 胡时胜. 猪后腿肌肉的冲击压缩特性实验 [J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(1):33-38.
WANG B Z, HU S S. Dynamic compression experiments of porcine ham muscle [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1):33-38.
- [7] 王鹏飞. 多孔金属的动态力学响应及其温度相关性研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学, 2012.
WANG P F. Research on dynamic mechanical response of cellular metals and temperature dependency [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [8] 朱珏, 胡时胜, 王礼立. 率相关混凝土类材料 SHPB 试验的若干问题 [J]. 工程力学, 2007, 24(1):78-87.
ZHU J, HU S S, WANG L L. Problems of SHPB technique used for rate-dependent concrete-sort materials [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1):78-87.
- [9] 王鹏飞, 罗斌强, 胡时胜. 套管式冲击拉伸实验装置的研制 [J]. 实验力学, 2009, 24(6):513-518.
WANG P F, LUO B Q, HU S S. Development of the casing type impact tension experimental device [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(6):513-518.

- [10] 刘战伟,吕新涛,陈喜民,等.基于多级电磁发射的 mini-SHPB 装置 [J].实验力学,2013,28(5):557-562.
LIU Z W, LÜ X T, CHEN X M, et al. On the mini-SHPB device based on multi-level electromagnetic emissions [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(5): 557-562.
- [11] 郭伟国,赵融,魏腾飞,等.用于 Hopkinson 压杆装置的电磁驱动技术 [J].实验力学,2010,25(6):682-689.
GUO W G, ZHAO R, WEI T F, et al. Electromagnet ali driving technique applied to split-Hopkinson pressure bar device [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(6): 682-689.
- [12] 汤立群,谢倍欣,史景伦,等.一种用于霍普金森压杆的双子弹电磁驱动装置:105319124A [P]. 2016-02-10.
TANG L Q, XIE B X, SHI J L, et al. A dual-bullet electromagnetic drive device for SHPB: 105319124A [P]. 2016-02-10.
- [13] 王礼立.应力波基础 [M].第 2 版.北京:国防工业出版社,2005:380.
WANG L L. Foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 380.
- [14] 郭伟国,李玉龙,索涛.应力波基础简明教程 [M].西安:西北工业大学出版社,2007.
GUO W G, LI Y L, SUO T. A brief tutorial on foundation of stress waves [M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 2007.
- [15] 尚兵,胡时胜,姜锡权.金属材料 SHPB 实验数据处理的三波校核法 [J].爆炸与冲击. 2010,30(4):429-432.
SHANG B, HU S S, JIANG X Q. A three-wave coupling method for data treatment in SHPB experiments with metal samples [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(4): 429-432.
- [16] 张军徽,尚兵.基于数值模拟的 SHPB 实验数据处理方法 [J].高压物理学报,2016,30(3):213-220.
ZHANG J H, SHANG B. Numerical study of the data processing methods in SHPB experiments [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2016, 30(3): 213-220.

Development of a Vertical Split Hopkinson Pressure Bar

SHANG Bing¹, WANG Tongtong²

(1. School of Harbor Engineering, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China;

2. Department of Basic Courses, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China)

Abstract: Measuring the dynamic constitutive relation of low-impedance materials which are usually used in the field such as energy absorption and cushion by using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) device generally does not require a high impact velocity of bullet but a stable one with little error in the experiments. In this study, based on the principle of free fall, we developed a vertical split Hopkinson pressure bar. We can precisely control the bullet impacting speed through the height of the free fall. In order to eliminate the gravity effects on the experiment, we held the incident bar by the friction force, and let the friction force equals the incident bar gravity. We carried out dynamic compression experiments of polyvinyl alcohol (PVA) fiber concrete to verify the reliability of the experimental device.

Keywords: split Hopkinson pressure bar (SHPB); fiber concrete; dynamic mechanical property; strain rate