

文章编号: 1001-4888(2005)04-0589-06

Hopkinson 压杆实验技术的应用进展^{*}

胡时胜

(中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230026)

摘要: SHPB 实验装置是研究各类工程材料动态力学性能的最基本实验手段,它不仅可用于测量金属、高聚物等均匀性好、变形量较大材料的冲击压缩(拉伸、剪切、扭转)应力—应变关系,经改进后还可以用于测量质地软、波阻抗小的泡沫介质材料和质地脆、均匀性差的混凝土类材料的冲击压缩应力—应变关系。此外,SHPB 实验装置因加载方式简单,加载波形易测易控制,还可以开展混凝土类材料的层裂强度研究,火工品、引信的安全性、可靠性检测,高 G 值加速度传感器的标定以及炸药材料的压剪起爆临界点的测定等。

关键词: Hopkinson 压杆实验技术

中图分类号: O347.4 **文献标识码:** A

1 前言

众所周知,SHPB 实验技术具有几个优点。一,设计思想巧妙。原来的 Hopkinson 压杆仅能用于测量应力脉冲信号,经 Kolsky 的改进,可用于测量材料在高应变率下的应力—应变关系。二,装置结构简单,操作使用方便。三,采用间接方法测量,利用电阻应变片技术即可确定试件材料的动态应力—应变曲线。而应变片技术是电测中最为成熟的实验技术。四,加载信号易测易控制。以上优点决定了 SHPB 实验技术十分容易普及推广。目前,国内外很多高校或研究单位都备有这类装置。人们不仅利用 SHPB 实测材料的动态应力—应变关系,还将 SHPB 实验技术用于其它领域,例如用于高 G 值加速度传感器的标定,火工品的安全性能检测,以及炸药材料的压剪起爆临界点的测定等。总之,SHPB 实验技术在诸多工程领域有广阔的应用前景。

2 材料动态力学性能测试

材料的动态力学性能测量是 SHPB 实验技术的最主要应用。早期我们研究的材料大多为金属和高聚物等均匀性好、变形量大的材料,因此 SHPB 实验技术的二个基本假定(一维假定和均匀假定)比较容易满足。然而,当我们需要研究泡沫铝、装甲陶瓷和混凝土等工程中常用的特殊材料,SHPB 实验技术的二个基本假定就不容易得到满足。然而当我们对这一实验技术作些改进后,仍可用于研究这些特殊材料。

2.1 多孔介质

泡沫塑料(橡胶)、泡沫铝等多孔介质大多具有很好的吸能特性,因此可广泛应用于缓冲、减振以及防爆震等方面,而所有这些应用都需要实测这些多孔介质的动态力学性能。然而在利用 SHPB 装置测定这些多孔介质的动态应力—应变关系时会遇到一些具体问题。第一,由于多孔介质的波速很低,波在这些试件内来回一次的时间较长,于是试件内部的应力不均匀性变得十分突出,需要对加载波形及数据

^{*} 收稿日期: 2005-01-24; 修订日期: 2005-09-04

通讯作者: 胡时胜(1945-),男,大学本科,教授。主要研究领域:材料动态力学性能。E-mail: sshu@ustc.edu.cn

处理等方面作些调整。第二,由于多孔介质的波阻抗 ρC 很小,因此进入透射杆中的透射波信号十分微弱,已无法用常规的电阻应变片进行记录,需要采用半导体应变片技术^[1],石英晶体薄膜压力传感器技术^[2]或采用长杆弹直接撞击试件^[3]等方法进行测量。由于半导体应变片的灵敏度系数 K 可高达 100 (电阻应变片的灵敏度系数 K 为 2),因此在相同情况下,利用半导体应变片技术测得的透射波信号的信噪比可提高 50 倍。我们已经利用半导体应变片技术成功地实测了硬质聚氨酯泡沫、泡沫铝以及波阻抗更低的泡沫硅橡胶等多孔介质的冲击压缩应力—应变曲线^[4,3]。石英晶体薄膜压力传感器的灵敏度很高,因此也可测量透射波微弱的应力信号。利用文献^[3]中介绍的方法,则可测量非常软的柔性泡沫。

2.2 脆性材料

装甲陶瓷是另一类用途广泛的工程材料,利用 SHPB 实验技术研究这一类工程材料的动态力学性能也是当前人们关心的课题。然而这类材料很脆,其破坏应变很小(小于 0.5%)。如此小的破坏应变带来的问题是作用时间短,试件内部的应力均匀性很难保证。因此要想实现试件内部的应力均匀性,需要严格控制载荷大小,并尽可能延缓上升时间,这需要采用波形整形技术。另外保证试件和压杆紧密贴合也是一个十分重要的问题,这需要采用万向头技术。相关的实验技术可参见下一节。

2.3 混凝土材料

混凝土是一种应用更为广泛的工程材料,研究混凝土材料的动态力学性能有着十分重要的现实意义。然而,混凝土材料不仅质地脆,而且其内部组份复杂,骨料尺寸大,均匀性极差,利用 SHPB 装置研究混凝土材料的动态力学性能将会遇到更为棘手的问题。为保证实验数据的有效性,试件的尺寸必须足够大,因此研究混凝土材料动态力学性能的 SHPB 装置必须是大直径的。最近二十年来,欧美等国相继研制了 $\Phi 76$ ^[5]和 $\Phi 100$ ^[6] SHPB 实验装置,我国也有了直锥变截面式 $\Phi 74$ SHPB 装置^[7]和 $\Phi 100$ SHPB 装置^[8],但是粗杆引起的波形弥散对 SHPB 实验技术又是一个很大的挑战。

常规的 SHPB 可实测材料在高应变率($10^2 \sim 10^4/s$)下的应力—应变曲线,然而混凝土类材料的破坏应变只有千分之几,要在 SHPB 装置上实现混凝土材料 $10^2 \sim 10^4/s$ 高应变率则是不可能的。若假定混凝土材料的破坏应变是千分之五,即使要实现 100/s 应变率,其加载时间也只能有 $50\mu s$ 。而这样短的作用时间仅能勉强实现混凝土试件内的应力均匀,更短的加载时间显然是没有意义了。

2.3.1 波形整形器

为使应力脉冲在混凝土试件破坏之前能有足够时间来回反射,以实现试件内部的应力均匀,我们在输入杆的被撞击端加垫了波形整形器(图 1 所示)。采用这一实验技术既可消除波头的过冲和波形的震荡,又可将上升时间拉长,这有利于混凝土材料的冲击压缩实验^[9],但是这种改进是以牺牲应变率为代价。

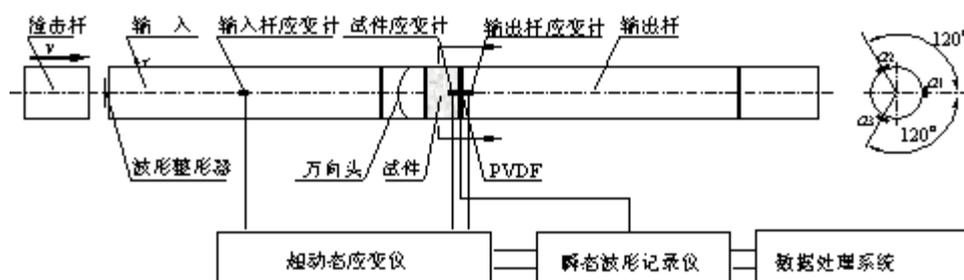


图 1 $\Phi 100$ SHPB 实验装置

Fig. 1 $\Phi 100$ SHPB experimental device

2.3.2 万向头技术

试件两端和压杆端面之间是很不容易完全贴合的,这种不完全贴合所造成的试件受力不均仅维持很短时刻,因此对金属、高聚物等变形量大的材料影响不大,然而这种情况对岩石、陶瓷和混凝土等破坏应变很小的脆性材料有明显的影。因此我们在混凝土冲击压缩实验中采用了万向头技术,即在输入

杆和试件之间加一万向头(参见图1),以确保试件两端与压杆端部完全贴合。验证实验表明,采用万向头技术,可消除接触不平而造成的误差^[9](参见图2)。

2.3.3 直接法测应力和应变

常规方法(间接法)测量材料的动态应力—应变关系是建立在一维假定和均匀假定的基础上的,然而混凝土材料的冲击压缩实验已不能满足这两个基本假定,这将导致实验结果的不可靠性。为解决这一问题,我们采用了直接法。鉴于混凝土试件的尺寸很大,又由于混凝土材料的破坏应变很小,因此我们可以很方便地采用电阻应变片技术直接测量试件的应变。另一方面,我们可在试件和透射杆之间采用 PVDF 压电薄膜直接测量试件的应力,或在紧靠试件一侧的透射杆上贴应变片间接测量试件的应力。采用直接法既可以不受一维假定和均匀假定的限制,又可以充分利用混凝土试件的尺寸大,变形小的特点,使这一原本是不利因素反而成了可直接测量应力和应变的有利因素。

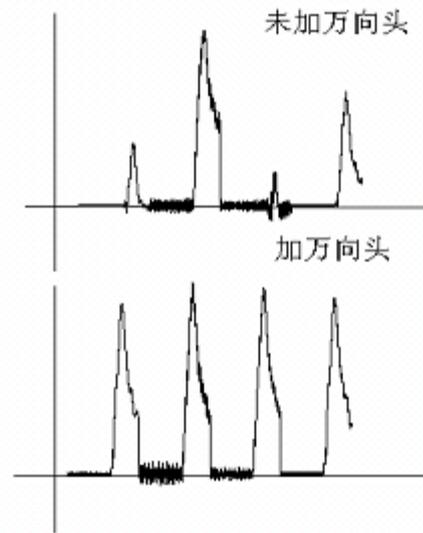


图2 有机玻璃材料应变信号比较

Fig. 2 The compare of sytain signal of PMMA material

3 混凝土材料层裂强度研究

层裂是动态破坏中的主要破坏形式。研究金属材料的层裂现象大多采用气炮(一维应变),但研究混凝土材料的层裂现象则主要靠 Hopkinson 压杆。由于混凝土材料的拉压严重不对称性(其单轴拉伸强度和压缩强度比约为 0.07~0.11)因此它的层裂现象比较金属材料等表现得更为明显,混凝土材料的动态破坏主要是层裂破坏,军事工事的坍塌均属于层裂破坏。

Hopkinson 压杆的应力状态是一维应力,实验过程中的波形易测易控制,所以利用 Hopkinson 压杆研究混凝土材料的层裂强度是一个十分有效的方法。早期已有人利用 Hopkinson 压杆来测量混凝土的层裂强度,但或是所用的 Hopkinson 压杆的杆径太小,或是未考虑应力波在混凝土试件中传播时的衰减和弥散,故所提供的数据缺乏可信度。Klepaezko 等^[10](2001)提出了一套比较成熟的实验方法,并具体测量了某种混凝土材料的层裂强度,然而他们回避了应力波在混凝土材料中的衰减特性,未在混凝土试件上贴应变片。Rubio 等^[11](2002)也曾利用类似的方法来测量陶瓷材料的层裂强度。然而,在 Rubio 的分析中仍未考虑应力波在试件中的衰减特性,且认为层裂之前经受的冲击压缩对混凝土材料的力学性能不产生影响。

我们的方法是在试件上贴应变片,直接测量混凝土试件中的入射波、反射波及其衰减特性,进而测定试件材料的层裂强度。实验装置如图3所示,其中试件尺寸为 $\Phi 74 \times 500$,远大于 Klepaezko 等人的试件尺寸。确定层裂强度的具体方法可参见文献^[12]。

混凝土材料层裂强度的研究表明:

- 1) 利用大直径的 Hopkinson 压杆、并在试件上贴片是一种研究混凝土材料层裂强度的有效方法。
- 2) 入射压缩波的波形和大小对层裂的发生有着直接的影响,因此准确测得试件中的波形并考虑其传播时的衰减、弥散以及损伤对波形的影响是十分必要的。
- 3) 混凝土的层裂强度随应变率的增加而提高。

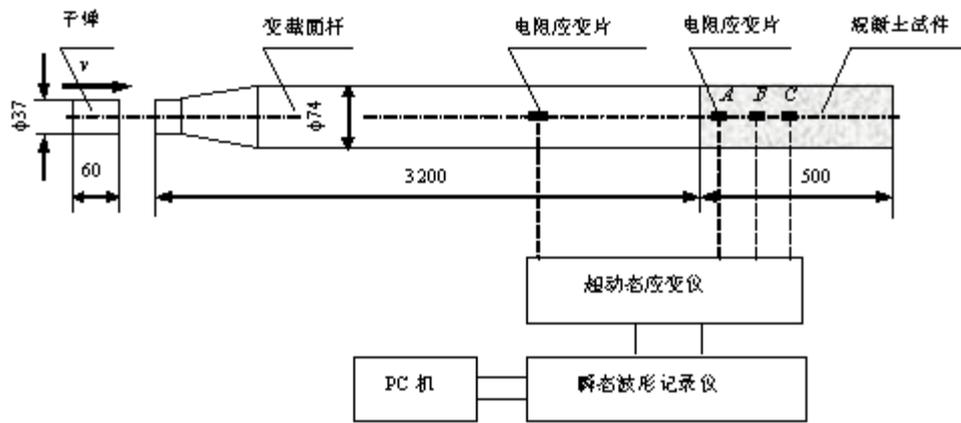


图3 用于层裂研究的实验装置

Fig. 3 Experimental device for spalling research

4 高 G 值加速度传感器的标定

加速度传感器是一种重要的惯性元件,广泛应用于国防、航空、电子、汽车和机械领域的振动和冲击测量。其中高 G 值加速度传感器更多地用于侵彻、穿甲等过程中的冲击载荷测量。为了获得准确可靠的加速度,加速度传感器的标定是必不可少的。然而通常的标定设备无法产生很高的加速度值,因此也不可能对高 G 值的加速度传感器进行标定。

Hopkinson 压杆不仅能产生几十万 G 的冲击加速度,而且加载波形可调易控制,信号测量又十分简便,因此已愈来愈被看好用于高 G 值加速度传感器的标定。

在国外 Hopkinson 压杆技术已被应用于高 G 值加速度传感器的标定^[13,14],美国 PCB 公司已有了 Hopkinson 杆高 G 值加速度传感器标定系统(参见图 4),其标定范围为 1,000G~100,000G。图 5 为 Togami 等提出的高 G 值加速度传感器标定的另一种方案。在国内也有单位进行过这方面的研究^[15]。

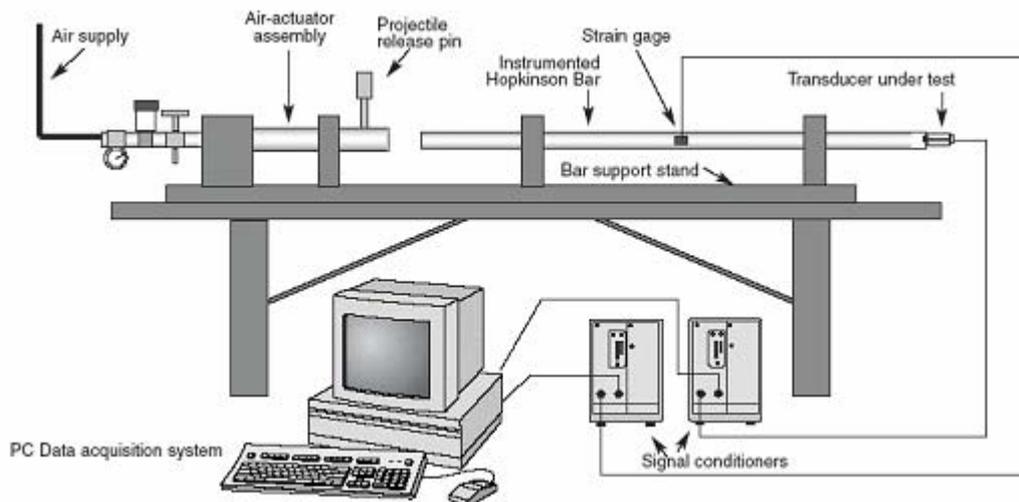


图4 高 G 值加速度传感器标定系统(PCB 公司)

Fig. 4 The calibration system of high shock acceleration sensors(PCB Co.)

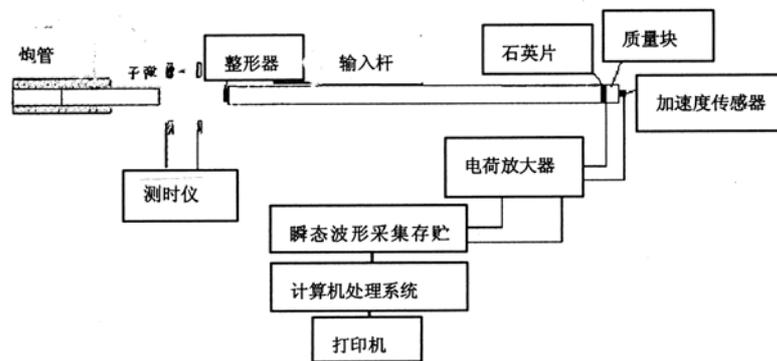


图5 高G值加速度传感器标定系统(Togami等)

Fig. 5 The calibration system of high shock acceleration sensors(Togami et al)

5 火工品抗冲击安全性和可靠性评估

目前火工品安全性的传统评估是采用马歇特锤击法,然而马歇特锤击法的过载加速度最大只能达到 30,000G,而且还无法考核火工品的结构稳定性问题。而实际情况是火工品的过载情况通常要比 30,000G 大,另外,其结构的失稳也可能导致不安全性或失效。南京理工大学张学舜等人^[16]已将 Hopkinson 压杆技术应用于火工品动态着靶模拟测试,解决了火工品超高 G 值环境模拟的难题。他们提出的自由式 Hopkinson 压杆加载方式可以考核火工品动态的过载加速度 30,000G~250,000G(类似于图 4);他们提出的分离式 Hopkinson 压杆加载方式可以考核火工品及其组件动态结构的稳定性(即将火工品置于两根压杆之间)。类似的方法也可以用于引信的安全性和结构稳定性的评估^[17]。

6 炸药材料的压剪起爆临界点的测定

由于实验手段的不足,关于爆炸物的剪切起爆准则研究进展缓慢。最近美国陆军实验室设计了一套改进的 SHPB 对炸药材料进行了剪切冲压实验,通过改变子弹速度和长度调节剪切速度和脉冲时间,进而确定炸药起爆的临界剪切速度和临界脉冲时间^[18]。

7 结束语

SHPB 因其众多的优点,除了能测量普通材料的动态应力-应变关系,还可测量泡沫铝、装甲陶瓷和混凝土等工程中应用广泛的复杂材料。另外,又由于 SHPB 实验装置的波形易测易控制,又可以用于层裂研究、高 G 值加速度传感器标定、火工品及引信的安全性评估以及炸药冲压剪切的安全性研究。随着研究工作的进一步开展,SHPB 实验技术的应用领域还会进一步拓宽。

参考文献:

- [1] 刘剑飞,王正道,胡时胜. 低阻抗多孔介质材料的 SHPB 实验技术[J]. 实验力学,1998,13(2):218~223(LIU Jianfei, WANG Zhengdao, HU Shisheng. The SHPB Experimental Technology for Low Wave Impedance Porous Materials. Journal of Experimental Mechanics, 1998,13(2):218~223(in Chinese))
- [2] Chen W, Lu F, Zhou B. A Quartz Crystal Embedded Split Hopkinson Bar for Soft Materials[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40:1~6
- [3] 宋力,胡时胜. 一种用于软材料测试的改进 SHPB 装置[J]. 实验力学, 2004, 19(4):448~452(SONG Li, HU Shisheng. A Modified SHPB Device for Soft Material Testing. Journal of Experimental Mechanics, 2004,19(4): 448~452(in Chinese))
- [4] 胡时胜,王悟,潘艺,周景,李英华. 泡沫材料的应变率效应[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1):13~18
- [5] Tang T, Malvern L E, Jenking D A. Rate effects in uniaxial dynamic compression of concrete[J]. J. Eng. Mech.,

- 1992,118(1):108~124
- [6] Ross C A, Tedesco J W, Kuennen S T. Effects of Strain Rate on Concrete Strength[J]. ACI Mater J, 1995, 92(1):37~47
- [7] 胡时胜,王道荣,刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究[J]. 工程力学,2001,18(5):115~118
- [8] 陈德兴,胡时胜,张守保等. 大尺寸 Hopkinson 压杆及其应用[J]. 实验力学,2005,20(3):398~402(CHEN Dexing, WANG Daorong, HU Shisheng. Larger Dimension Hopkinson Pressure Bar and Its Application. Journal of Experimental Mechanics, 2005,20(3):398~402(in Chinese))
- [9] 孟益平,胡时胜. 混凝土材料冲击压缩试验中的一些问题[J]. 实验力学,2003, 18(1):108~112(MENG Yiping, HU Shisheng. Some Problems in the Test of Concrete under Impact Compressive Loading. Journal of Experimental Mechanics, 2003,18(1):108~112(in Chinese))
- [10] Klepaczho J R, Brara A. An experiment method for dynamic tensile testing of concrete by spalling[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,25:387~409
- [11] Rubio F, *et al.* The Spalling of Long Bars as a Reliable Method of Measuring the Dynamic Tensile Strength of Ceramics[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27:161~177
- [12] 胡时胜,张磊,武海军. 混凝土材料层裂强度的实验研究[J]. 工程力学,2004,21(4):128~132
- [13] Robert D Sill. Testing Techniques Involved with the Development of High Shock Acceleration Sensors, ENDEVO Tech Paper, TP284
- [14] Togami T C, Baker W E, Forrestal M J. A Split Hopkinson Bar Technique to Evaluate the Performance of Accelerometers[J]. Journal of Applied Mechanics, JUNE 1996,63:353~356
- [15] 李玉龙,郭伟国,贾德新等. 高 G 值加速度传感器校准系统的研究[J]. 爆炸与冲击,1997,17(1):90~96
- [16] 张学舜. 火工品动态着靶模拟仿真技术研究[D]. 南京理工大学博士论文,2004
- [17] 朱道詮,马廷萱编. 膛炸分析技术[M]. 国防工业出版社,1995
- [18] Krzewinski B,Blake O, Lieb R, Baker P. Shear deformation and shear initiation of explosives and propellants[C]. Symposium of 12th Detonation,2003

The Application Development of Experimental Technique of Hopkinson Pressure Bar

HU Shi-sheng

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China)

Abstract: Split Hopkinson pressure bar (SHPB) is the only efficient apparatus to obtain families of stress-strain curves of engineering materials at various high strain rates. In addition to obtaining the stress-strain relationship, in compression, tension, torsion and shear for regular metals and polymers that are capable of large deformation, the modified SHPB has also been demonstrated to characterize the high-rate compressive behavior of foam materials, which are generally of low strength and mechanical impedance and brittle materials with poor repeatability, such as concretes. Since the loading pulse in a SHPB experiment is easily controlled, the SHPB has been extended to investigate the spalling strength of concretes, to evaluate the reliability and safety of detonators and fuses, to calibrate the accelerometers with high g-value as well as to measure the critical explosive value of detonators in combination of compression and shear loading.

Key words: experimental technique of Hopkinson pressure bar