

文章编号: 1000-4750(2011)12-0033-06

应力不均匀性对混凝土材料动态实验结果的影响

尚 兵¹, 吴立朋², *庄 茁¹

(1. 清华大学航天航空学院, 北京 100084; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 利用直径 75mm 的 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)装置对混凝土做动态冲击实验, 然后利用自编程序对数据进行分析。该程序可以直观地显示试件两端面的应力不均匀水平, 在实验过程中进行应力均匀性检查, 从而调整整形器, 改变波形, 提高应力的均匀性。由于不能消除这种不均匀性, 因此三波法与两波法得到的应力-应变关系不一致, 造成实验数据处理结果不确定。该文采用经验和理论相结合的三波校核法得到相对可信的唯一性应力-应变曲线。

关键词: 应力不均匀性; 动态实验; SHPB; 混凝土; 三波校核法

中图分类号: TU528.01 **文献标志码:** A

THE EFFECT OF STRESS HETEROGENEOUS ON TEST DATA OF CONCRETE USING SHPB

SHANG Bing¹, WU Li-peng², *ZHUANG Zhuo¹

(1. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The dynamic response of concrete is investigated using a 75-mm-diameter Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test. The data of the experiment are analyzed through our developed program. The program can display the stresses on the two end surfaces of the specimen. Thusly we can examine the difference of the stresses, then, adjust the pulse shaper in order to change the shape of the incident wave and reduce the difference. But the difference does exist, causing the different stress-strain curves obtained from two wave method or three wave method. There are a numbers of critical issues pertaining to the method. In this paper, combining theory and experience, we get a comparatively creditable stress-strain curve using Three Waves Checking Method.

Key words: stress heterogeneous; dynamic experiment; SHPB; concrete; three waves checking method

自 1949 年 Kolsky H 提出分离式 Hopkinson 标杆实验装置以来, 基于一维假定及均匀性假定的测试数据处理方法(两波法)一直被采用作为标准的方法, 广泛用于各种材料测试结果的处理。但是经典二波法的一个关键问题就是在对齐透射波与反射波波头过程中存在处理数据的误差及人为性, 导致人们对 SHPB 技术的怀疑^[1]。唐志平^[2]对波头斜率进行特殊化的线性处理, 可以消除波形被反常记

录。但是, 这是一种经验性的方法, 没有足够的理论说明波头是否真正被对齐。另一种方法是在试件上直接贴应变片测应变, 但是它不能记录试件的完整应变。同时它是用一点的变形代替整个试件的变形, 这会引入新的误差^[3-4]。目前, 有些研究者通过测量入射杆和透射杆应变计的距离, 结合实测压杆波速及预估的试样波速计算三波之间的波头差^[5], 在理想条件下, 该方法得到的实验结果的精

收稿日期: 2010-03-12; 修改日期: 2010-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(90815026)

作者简介: 尚 兵(1979-), 男, 湖北十堰人, 博士生, 主要从事材料的动态力学性能方面的研究(E-mail: shang@mail.ustc.edu.cn);

吴立朋(1982-), 男, 河北石家庄人, 博士生, 主要从事土木工程研究(E-mail: wulp08@mails.tsinghua.edu.cn);

*庄 茁(1952-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 博导, 主要从事固体力学研究(E-mail: zhuangz@tsinghua.edu.cn).

度较高,但是当实验材料是混凝土时,由于试件本身的尺寸比较大和骨料级配的非均匀性,应力均匀性难以满足^[6],用不同的方法处理同一实验,结果的差别很大,特别是峰值应变,相差更大。那么哪一种方法处理的结果更合理呢?不同的处理方法之间有什么异同呢?能否找到一条唯一可信的动态应力-应变曲线呢?带着这些问题,我们编写了动态可调,界面友好的 SHPB 数据程序。本程序以 Hopkinson 实验的基本假定为依据,首先由波速及距离关系对齐波头,再分别用“两波法”(入射波与反射波,入射波与透射波)和“三波法”处理数据,得到 3 条应力-应变曲线,且波形和应力-应变曲线分别显示在同一界面的两个窗口。应用此方法可以方便的发现 3 种不同方法处理结果的差异,从理论上讲,这 3 条应力-应变曲线都是正确的,但是这个结果并不唯一,不能满足工程需要。于是结合经验,我们提出了三波校核对齐波头的方法,即调整入射波、透射

波和反射波的相对位置。同时,程序自动用两波法和三波法算出 3 条应力-应变曲线,当 3 条应力-应变曲线基本一致时,说明正确的对齐了波头。否则再次移动波的相对位置,直至 3 种方法得到的峰值应变一致。但是这种重合是一种在理论基础上的经验总结,是对结果的平均化。这符合实验数据处理的一般原则,同时对于结果的唯一性有重要意义。

1 实验装置及原理

冲击压缩实验采用 $\phi 75\text{mm}$ 的 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)装置,实验装置如图 1 所示,入射杆、透射杆为 $\phi 75$ 的合金钢杆。入射杆和透射杆上分别粘贴应变计。试样为 $\phi 75 \times 50\text{mm}$ 的钢纤维增韧高强混凝土。为了减小试件两端的应力不均匀性,在入射杆端采用 $\phi 15 \times 1\text{mm}$ 的紫铜作为波形整形器^[7]。一方面用来减小波的弥散失真,另一方面增加加载波上升段时间,尽可能实现应力均匀^[8]。

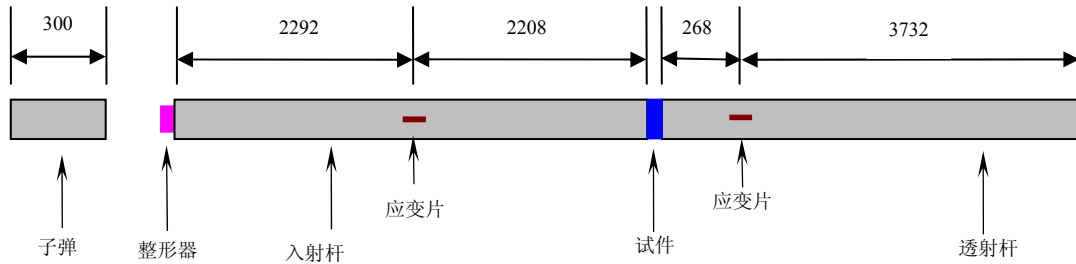


图 1 SHPB 实验装置图 /mm

Fig.1 Overview of SHPB test setup

根据 SHPB 实验的一维假定,可以用式(1)~式(3)所示的三波法^[9]确定试件材料的应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 和应力 $\sigma(t)$ 。式中 ε_i 、 ε_r 、 ε_t 分别为杆上应变计记录的入射波、反射波与透射波; A_0 、 l_0 为试样的面积与厚度; A 、 C 、 E 为杆的横截面面积、波速与弹性模量。

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C}{l_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A}{2A_0} E (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (3)$$

根据均匀假定,有如下关系成立:

$$\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t) \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)~式(3),可得到更为简单的两波法形式^[10]:

1) 用入射波和透射波计算应力、应变、应变率:

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_0} E \varepsilon_i(t) \quad (5)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2C}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_t(t)) dt \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C}{l_0} (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_t(t)) \quad (7)$$

2) 用入射波和反射波计算应力、应变、应变率:

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_0} E (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)) \quad (8)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_r(t)) dt \quad (9)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C}{l_0} \varepsilon_r(t) \quad (10)$$

对于金属材料应力均匀性问题,许多学者都已进行了深入细致的研究,应力均匀性假定是可以接受的^[4,11-12],因此用上述的三波法与两波法得出的结果基本一致。但是对于混凝土这类应力均匀性假

定难以满足的材料,三波法和两波法处理的结果一致吗?相差有多远?结果可靠吗?以下的内容将讨论这些问题。

2 实验数据及分析

当加载速度达到 11.2m/s 时,钢纤维混凝土开裂但未破碎,实验所得原始波形如图 2 所示。曲线 1 为入射杆应变片得到的波形,曲线 2 为透射杆应变片得到的波形。然后编写程序,利用应变片、试件的位置关系(如图 1 所示),和实测的杆波速(5195m/s)将波形移到试件端面(此过程没有考虑波的弥散),如图 3(a)所示。程序界面包含了两个窗口,图 3(a)显示入射波 1、入射波与反射波之和 2、透射波 3、反射波 4、透射波与入射波之差 5。曲线 2 反映的是试件与入射杆相接触面的应力,曲线 3 反映的是试件与透射杆相接触面的应力,把这两条曲线画在一起是为了显示试件两端的应力均匀性情况。曲线 5 与曲线 4 相对比,则是为了反映动量守恒情况。图 3(b)显示的是由图 3(a)的曲线及其相对位置求得的应力-应变曲线:1 是用入射波与反射波所求得的应力-应变曲线;2 是用三波法求得的应力-应变曲线;3 是用入射波与透射波求得的应力-应变曲线。

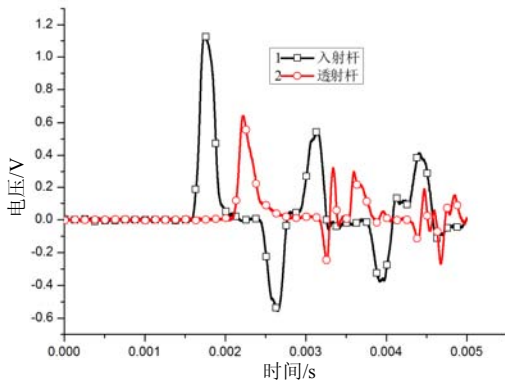


图 2 加载速度 11.2m/s 时的原始波形图

Fig.2 The origin wave of Loading velocity 11.2m/s

从图 3(a)的曲线 2 和曲线 3 可以明显的发现,在实际的实验过程中,加载上升段存在应力不均匀的现象,这是由于波的传播需要时间引起的,因此无法避免(经过波形整形器可以有效降低这种不均匀)。这也就导致了不同方法所得到应力-应变不一致(如图 3(b)所示)。同一种材料只能有一个本构,图 3(b)应力-应变曲线的差异来源于应力均匀性假定。

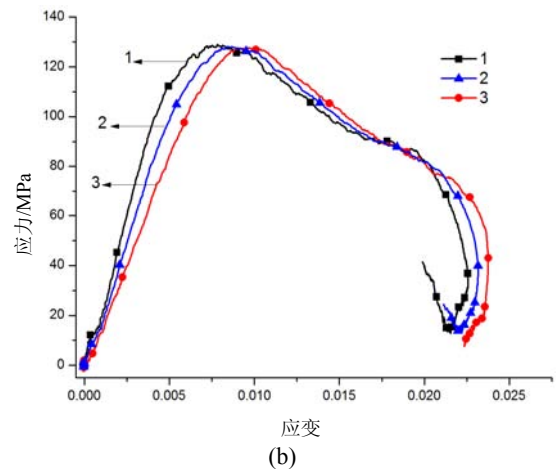
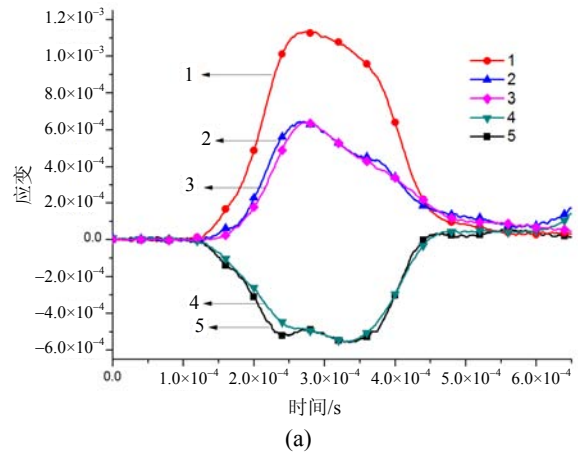
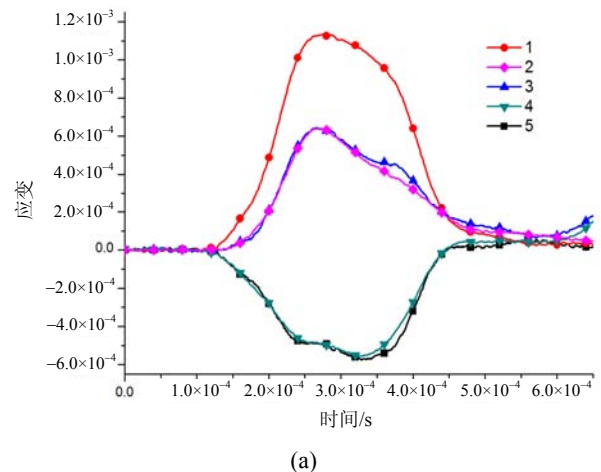


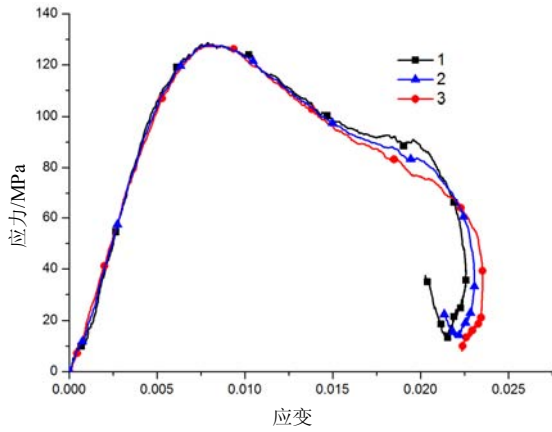
图 3 程序截图

Fig.3 The select figure of the program

为了得到唯一有效的应力-应变曲线,对图 3(a)中的曲线进行了平移,结果如图 4(a)所示。再分别用 3 种方法计算应力-应变曲线,得到的结果如图 4(b)所示。3 种方法得到的应力-应变曲线基本一致。这种方法的实质是一种取平均值的方法,符合处理数据的原则。最重要的是提供了一种校核机制,避免了对齐波头的随机性。



(a)



(b)
图 4 程序截图

Fig.4 The select figure of the program

当加载速度达到 14.2m/s 时，钢纤维混凝土被打碎，实验所得原始波形如图 5 所示。曲线 1 为入射杆应变片得到的波形，曲线 2 为透射杆应变片得到的波形。再次利用程序将波形移到试件端面，如图 6(a)所示。图 6(a)显示入射波 1、入射波与反射波之和 2、透射波 3、反射波 4、透射波与入射波之差 5。图 6(b)显示的是由图 6(a)的曲线及其相对位置用 3 种方法求得的应力-应变曲线。

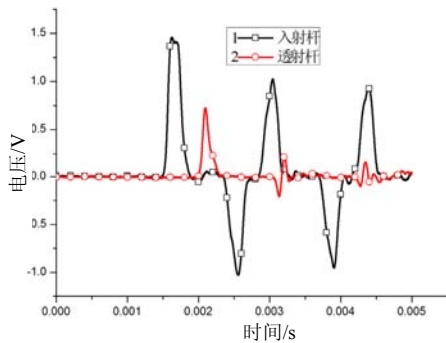
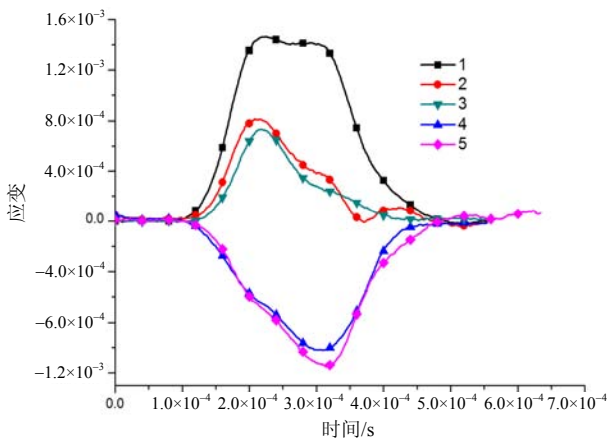
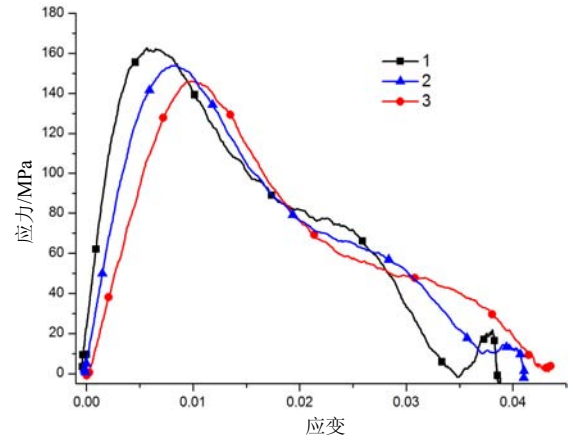


图 5 加载速度 14.2 m/s 时的原始波形图

Fig.5 The origin wave of Loading velocity 14.2 m/s



(a)



(b)
图 6 程序截图

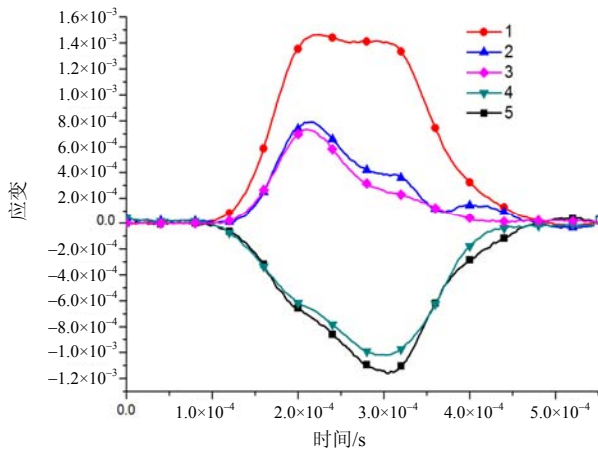
Fig.6 The select figure of the program

图 6 显示：在整个实验过程中，试件中的应力始终没有平衡。与此同时得到的应力-应变曲线的差异也要比图 3 的大。经分析认为，如果试件破碎，那么造成本构曲线差异的原因有两个：1) 由于波的传播需要时间造成的应力不均匀；2) 动量不守恒造成的应力不均匀。

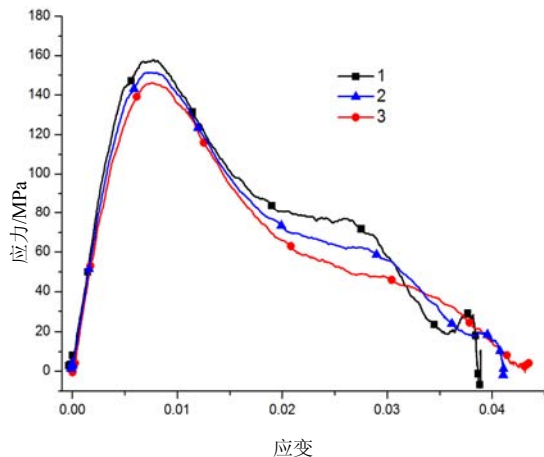
动量不守恒的主要表现在于透射波减去入射波不等于反射波。这从图 6(a)、图 7(a)的曲线 4 和曲线 5 可以体现出来。如果动量守恒，曲线 4 和曲线 5 应该是重合的。出现这一现象的原因，经分析认为：当混凝土被击碎时，部分碎片会飞出，并且在沿杆的轴向有一个分量，带走了一部分动量，从而导致动量不守恒，最终导致不同方法得到的峰值应力不同。当加载速度为 11.2m/s 时，混凝土试件有裂缝，但未碎，按上面的分析动量应该守恒。波形如图 4 所示，曲线一致性比较好，但仍有一小段不能完全重合，这一部分我们将其归结为实验误差。因为标定，对齐基线，以及系统本身都会存在误差。

最后仍采取理论与经验相结合的做法，通过移动 3 个波的相对位置，使 3 种方法得到的应力-应变曲线的峰值应变相一致，这时取三波法得到的应力-应变曲线作为试件的最终应力-应变曲线。暂时把这种方法称为“三波校核法”。最终的结果如图 7 所示。图 4 也是用这种方法移动波的相对位置之后得到的结果。之所以采用这种方法来确定最终的应力-应变曲线，原因如下：杆中的波速与应变片之间的距离关系存在较大的人为误差；不同的人对齐波头的处理方法有差异，导致结果差异大；两波法与三波法的结果有差异；采用平均值的方法，符

合实验习惯；最重要的是这种方法提供了一种校核机制，可以得到相对唯一性的结果。



(a)



(b)

图7 程序截图

Fig.7 The select figure of the program

综上所述，SHPB 实验本身不能说明用那种方法处理实验结果有效，因为上述不同的结果都符合 SHPB 实验的基本原理。而要解决这一问题，可以把得到的结果结合有限元分析^[13-15]，与工程实际相对照，在实践中检验结果的可靠性。相对来说，本文提出的三波校核法对于数据处理结果的唯一性与可靠性具有重要的意义。而且这种方法可以用于各种脆性材料与金属材料，具有普遍性的意义。

3 结论

(1) 在混凝土类材料实验过程中试件两端面应力不均匀是数据处理结果存在差异的主要原因。而这种不均匀主要来源于两个方面：一是波在试件中的传播需要时间导致的不均匀；二是由于试件碎裂

沿杆轴向飞出导致动量不守恒带来的不均匀。

(2) 利用入射波、反射波、透射波的内在联系，提出了具有校核作用的数据处理方法：三波校核法，对于数据处理结果的唯一性与可靠性具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 368—373.
Song Li, Hu Shisheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 368—373. (in Chinese)
- [2] 唐志平, 王礼立. SHPB 实验的电脑化数据处理系统[J]. 爆炸与冲击, 1986, 6(4): 320—327.
Tang Zhiping, Wang Lili. A computerized system of data processing used in SHPB experiments [J]. Explosion and Shock Waves, 1986, 6(4): 320—327. (in Chinese)
- [3] 巫绪涛, 胡时胜, 孟益平. 混凝土动态力学量的应变计直接测量法[J]. 实验力学, 2004, 19(3): 319—323.
Wu Xutao, Hu Shisheng, Meng Yiping. Strain gauge measurement method of dynamic behavior for concrete [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(3): 319—323. (in Chinese)
- [4] 巫绪涛, 胡时胜, 陈德兴, 等. 钢纤维高强混凝土冲击压缩的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(2): 125—131.
Wu Xutao, Hu Shisheng, Chen Dexing, et al. Impact compression experiment of steel fiber reinforced high strength concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(2): 125—131. (in Chinese)
- [5] Mohr D, Gary G, Lundberg B. Evaluation of stress-strain curve estimates in dynamic experiments [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(2): 161—169.
- [6] Zhu J, Hu S S, Wang L L. An analysis of stress uniformity for concrete-like specimens during SHPB tests [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 61—72.
- [7] Song B, Chen W N, Luk V. Impact compressive response of dry sand [J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(6): 777—785.
- [8] 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)
- [9] 王礼立. 应力波基础[M]. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005.
Wang Lili. Foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 胡昌明. 镁铝合金动态力学性能研究[D]. 合肥: 中国

- 科学技术大学, 2003.
- Hu Changming. Study of dynamic mechanical properties of the magnesium-aluminum alloy [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2003. (in Chinese)
- [11] 刘瑞堂, 果春焕, 张智峰. 分离式 Hopkinson 压杆系统冲击压缩过程中试样的应力均匀化过程[J]. 机械工程材料, 2009, 33(2): 25—27.
- Liu Ruitang, Guo Chunhuan, Zhang Zhifeng. Stress uniformization process in specimens during compression process with split Hopkinson pressure bar system [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33(2): 25—27. (in Chinese)
- [12] 毛勇建, 李玉龙. SHPB 试验中试件的轴向应力均匀性[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(5): 448—454.
- Mao Yongjian, Li Yulong. Axial stress uniformity in specimens of SHPB tests [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(5): 448—454. (in Chinese)
- [13] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- Zhuang Zhuo, You Xiaochuan, Liao Jianhui, et al. Finite element analysis and application based on ABAQUS [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [14] Kim D J, Sirijaroonchai K, El-Tawil S, et al. Numerical simulation of the split hopkinson pressure bar test technique for concrete under compression [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(2): 141—149.
- [15] Zhang M, Wu H J, Li Q M, et al. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part I: Experiments [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(12): 1327—1334.
-
- (上接第 32 页)
- [7] 周勇, 朱彦鹏. 黄土地区框架预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 3115—3122.
- Zhou Yong, Zhu Yanpeng. Sensitivity analysis of design parameters of grillage supporting structure with prestressed anchor in loess slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3115—3122. (in Chinese)
- [8] 朱彦鹏, 郑善义, 张鸿, 等. 黄土边坡框架预应力锚杆支护结构的设计研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增 1): 1582—1585.
- Zhu Yanpeng, Zheng Shanyi, Zhang Hong, et al. Design of frame supporting structure with pre-stressed anchor bars on loess slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Supp.1): 1582—1585. (in Chinese)
- [9] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005.
- Gu Weici. Calculating instructions of retaining wall [M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [10] 董曾南, 章梓雄. 非粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- Dong Zengnan, Zhang Zixiong. Nonviscous fluid mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [11] 帕兹 M. 结构动力学理论与计算[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- Parz M. Structure dynamics theory and calculating [M]. Beijing: Earthquake Press, 1993. (in Chinese)
- [12] 董建华, 朱彦鹏. 地震作用下土钉支护边坡动力分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(6): 90—95.
- Dong Jianhua, Zhu Yanpeng. Seismic behavior of a slope protected by a soil nailing retaining wall during an earthquake [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(6): 90—95. (in Chinese)
- [13] 朱彦鹏, 董建华. 土钉支护边坡动力模型的建立及地震响应分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1013—1022.
- Zhu Yanpeng, Dong Jianhua. Dynamic calculation model and seismic response for slope protected by soil nailing under earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1013—1022. (in Chinese)
- [14] Chopra Anil K. Dynamics of structures: Theory and application to earthquake engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [15] 董建华, 朱彦鹏. 框架锚杆支护边坡地震响应分析[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(2): 118—122.
- Dong Jianhua, Zhu Yanpeng. Analysis of response of slope supported with framed anchor to earthquake [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(2): 118—122. (in Chinese)