

大直径 SHPB 弥散效应实验研究

张 华^{1,2}, 杨 军², 高富强², 汪旭光^{1,3}

(1 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 3 北京矿冶研究总院, 北京 100088)

摘要: 实验分别采用铝片作为波形整形器和橡胶胶片作为软性介质, 通过 SHPB 冲击实验研究了 2 种方法对改善加载波波形的效果影响. 实验表明这 2 种方法都可以有效改善加载波的波形, 减小和消除应力波的弥散效应. 从加载波波形上来看, 铝片的效果要优于橡胶胶片.

关键词: 弥散效应; 大直径 SHPB 波形整形器; 岩石力学

中图分类号: TD824.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2010)01-0014-05

Experimental Research on Dispersion Behavior of Big Diameter SHPB

ZHANG Hua^{1,2}, YANG Jun², GAO Fu-qiang², WANG Xu-guang^{1,3}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100088, China)

Abstract Aluminum sheet is adopted as the pulse reshaper and rubber sheet as a flexible medium respectively in this paper to improve the wave shape of carrier wave. SHPB impact loading experiment is carried out to study the impact. It is shown through the experiment that the two methods are both effective in improving carrier wave shaper and minimizing dispersion behavior of stress wave. The effect of aluminum sheet is better than that of the rubber sheet from the shape of carrier wave.

Key words dispersion behavior; SHPB wave-form reshaper; rock mechanics

0 引言

岩石是自然界各种矿物的结合体, 是天然地质作用的产物, 经过漫长的地质运动后, 本身一般都存在大量缺陷. 岩石材料作为一种地质产物, 从古至今就在人们生活中起着非常重要的作用. 近几十年来随着国民经济建设的发展, 岩石爆破技术在水利水电、矿山、交通等领域获得了广泛的应用; 尤其象三峡工程等巨型项目的实施, 对于提高爆破质量和有效保护周围岩体安全稳定提出了更高的要求^[1]. 这样使得以岩石动态力学性能为主体的岩石力学得以迅速发展, 并且成为岩土力学理论界和工程界的热门课题. 霍普金森压杆实验是当前研究岩石材料动态力学性质广泛使用的试验方法.

1 SHPB 实验技术

1914 年 Hopkinson^[2] 第一次利用压杆测量了材料的动态力学性能, 当时仅用来测试脉冲波形, 后来许多学者发展和完善了这一冲击加载实验技术. 目前技术上较为成熟的是分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson Press Bar) 简称 SHPB 技术, 是由 Kolsky 在 1949 年提出的, 整个压杆分为撞击杆、输入杆、输出杆和吸收杆 4 个部分. 高压气体驱动撞击杆对入射杆进行撞击, 在入射杆中产生入射应力波, 入射应力波对试件作用后, 在

收稿日期: 2009-04-01. 基金项目: 国家自然科学基金 (项目编号: 50674049); 云南省自然科学基金 (项目编号: 2007D190M); 云南省教育厅基金 (项目编号: 07C10305) 联合资助.

第一作者简介: 张华 (1977-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向: 爆炸力学. E-mail: zhanghua810810@163.com

试件中产生应力波, 同时在入射杆中产生反射应力波; 同时, 试件中的应力波与透射杆作用, 在透射杆内产生透射波. 实验装置示意图如图 1 所示.

SHPB 实验是建立在 2 个假定基础上的: ①一维应力假定, 即假定压杆和试件在实验中都满足单轴应力状态, 这样在压杆和试件处的应力、应变等力学参数都可以用一维应力波的基本理论来求解. ②均匀性假定, 即假定短试件应力或应变沿其长度方向均匀分布, 且径向可以自由伸缩, 试件的径向和轴向惯性效应以及端面摩擦效应可以忽略^[3].

根据一维假定, 利用一维弹性应力波理论可以确定试件中应力、应变, 应变率如下:

$$\sigma(t) = \frac{A}{2A_0} E [\varepsilon_l(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c}{l_0} \int_0^l [\varepsilon_l(\tau) - \varepsilon_r(\tau) - \varepsilon_t(\tau)] d\tau \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C}{L} [\dot{\varepsilon}_l(t) - \dot{\varepsilon}_r(t) - \dot{\varepsilon}_t(t)] \quad (3)$$

式中: E, C, A 分别为压杆的杨氏模量、纵波波速和横截面面积; A_0 和 L_0 分别为试件的初始横截面面积和初始长度.

通过以上关系得到了材料动态应力应变曲线. 根据均匀性假设, 则有关系式

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

带入上式后, 可以得到反射脉冲和透射脉冲表示的应力应变曲线^[3]

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

$$\varepsilon(t) = \frac{2c}{l_0} \int_0^l \varepsilon_r(\tau) d\tau \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C}{L} \dot{\varepsilon}_r(t) \quad (7)$$

2 大直径 SHPB 弥散效应

1970 年代以来, SHPB 装置被广泛用于岩石材料的动态力学性能的实验研究. 由于岩石材料是一种典型的非均质材料, 内部含有大量的节理、裂隙以及微裂纹等缺陷, 为了保证测量的精度和测试的结果的可信度要求, 要求试件的尺寸要足够大到能代表岩体的整体特征, 因而用来进行冲击实验的 SHPB 装置截面直径也要足够大. 为此, 国内外很多学者对大尺寸试件的实验装置进行了大量的研究, 建立了 $\phi 50 \text{ mm}$, $\phi 74 \text{ mm}$, $\phi 100 \text{ mm}$ 大尺寸 SHPB 实验装置^[4].

这些大直径的 SHPB 装置使得传统上基于一维假定和均匀假定的 SHPB 实验技术受到了挑战. 理论分析和实验观测表明, 采用矩形波加载时, 试样内部应力应变的均匀化假定可以得到满足. 根据一维假定, 任意一个应力波的脉冲在压杆中传播的速度为定值, 仅与材料的性质有关. 但是这一假定是在忽略压杆中质点的横向惯性运动, 即忽略了压杆的横向收缩或膨胀对动能的贡献. Pochhammer, Chree, Paylegh^[5] 等人用能量法得到了考虑横向惯性效应的应力脉冲各自的相对速度近似解为

$$C_p = C_0 [1 - \pi^2 v^2 (\frac{r}{\lambda})^2 + \dots] \quad (8)$$

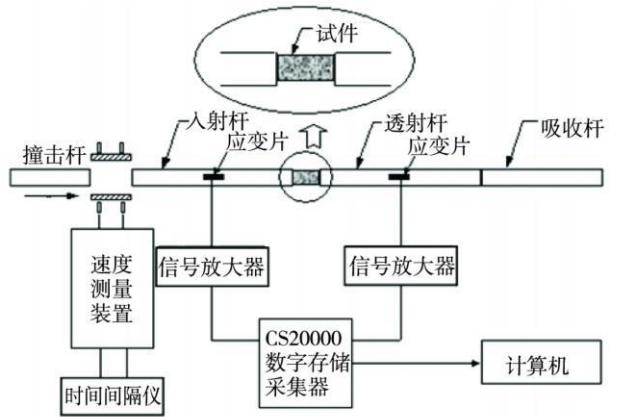


图 1 SHPB 实验装置示意图

Fig.1 A schematic illustration of the SHPB configuration

式中: λ 为组成应力脉冲某个谐波的波长; v 和 r 是弹性杆的泊松比和半径.

从公式 (8) 可以看出, 频率高的应力脉冲传播的慢, 频率低的应力脉冲传播的快, 因此在压杆中传播的任一应力波将发生弥散, 即由压杆中质点横向惯性运动引起的弥散效应^[6]. 在 SHPB 装置中, 常规的撞击杆是一直径保持不变的圆柱体, 使用它可以产生一个矩形加载波, 这个加载波的上升沿时间比较短, 由于弥散现象, 在波头处会产生一个高出其正常峰值平台的高峰值振荡区, 对于破坏应变极小的脆性岩石材料, 由于矩形波的上升沿时间比较短, 往往在试件内还没有反射 3 个来回, 使得试样内部的应力未达到均匀化之前就发生破坏, 使得实验结果的科学性和有效性成为一个问题^[5], 因此研究大直径压杆中波形弥散效应不容忽视.

3 改善波形弥散效应方法

对于脆性岩石材料, 破坏应变只有千分之几, 波头处的高频振荡波使得应力在没有达到均匀化之前试件已经破坏^[6]. 对于低强度的岩石, 如砂岩, 振荡的相对值有时甚至可以与岩石本身的强度相比拟^[7]. 因此, 用 SHPB 方法来测定岩石的动态力学性质, 特别是低强度类岩石时, 在高应变率下的动态应力-应变关系图, 采用等直径冲击的矩形加载是不合理的. 为了减小弥散效应对实验的影响, 一种方法是减小压杆的直径, 这种方法不适宜于岩石类材料的研究. 另一种方法是选择合理的加载波形来减小或消除弥散效应的影响. 李夕兵等^[7]通过研究发现带有锥形结构的冲头所对应的似钟形波是一种适用于矿岩动态应力-应变全图测定的理想的加载波形. 王鲁明等^[8]研究了采用万向头、波形整形器、异型炮弹、软性介质等方法改善应力波弥散效应. 对于等直径的 SHPB 压杆实验装置来讲, 这些改善波形弥散的技术方法实际上不是都能适用的. 改变撞击杆的形状或采用万向头等涉及到材料的加工精度以及实验设备的改造问题. 比较实际和切实可行的技术方法是采用波形整形器改良加载波形或采用软性介质滤除高频振荡波.

3.1 波形整形器

为得到上升沿时间较长的加载波形, 可以使用波形整形器改造加载波形. 孟益平等^[9]采用的方法是将一圆形薄铜片同心地贴在输入杆的撞击端, 不改变撞击杆的形状. 通过薄铜片整形后, 输入杆中的矩形加载波的上升沿时间得到延缓, 从而使加载波具有较长的加载时间. 对于脆性岩石试件, 特别是低强度岩石, 在破坏发生前, 就可以有足够的时间让应力波在试件内部反射 3~4 个来回, 满足均匀性假设要求.

3.2 软性介质

刘孝敏等^[10]在对混凝土材料进行冲击压缩实验时发现, 采用直锥变截面大直径 SHPB 实验装置时, 输入杆的加载波波头处的峰值均高出平台值 40%, 出了现严重的高频振荡波. 波头部分高频振荡的时间段基本上等于岩石等脆性材料达到破坏应变的时间, 同时也使得试样不能满足均匀性假设. 为了降低弥散现象对实验的影响, Davies 等^[5]采用在输入杆的打击端加入一定量的凡士林的方法, 入射波上升沿时间从原来的 $10 \mu\text{s}$ 增加到 $70 \sim 80 \mu\text{s}$ 且在波形中看不到波形的振荡.

4 SHPB 装置弥散效应实验研究

波形整形器实验仅仅提到采用薄铜片作为波形整形器改善了加载波的波形, 实验并没有详细研究其他薄片材料或薄片的厚度对实验结果的影响. 软性介质滤出高频振荡波实验也没有研究软性介质的材料和厚度对实验结果的影响. 为了进一步研究采用其他材料研究减小弥散效应的方法对实验结果影响, 我们采用 2mm 厚的铝片作为波形整形器和 2mm 橡胶胶片作为软性介质在 SHPB 实验装置上对砂岩进行了冲击压缩实验. 实验在中国矿业大学(北京)土木工程实验室的 $\phi 74 \text{ mm}$ SHPB 实验装置上完成的.

4.1 试件尺寸及加工

岩石的动态强度具有明显的尺寸效应和应变率依赖性, 试件的尺寸规格对测试结果有很大的影响. 一个优化的试件长径比为^[8]

$$\lambda = \frac{\sqrt{3}}{2} v \quad (9)$$

式中: ν ——试件的泊松比.

另一方面, 为了减小端部摩擦的摩擦效应影响, 试件的长径比应尽量大, 基本要求是:

$$\lambda \geq \frac{1}{2} \tag{10}$$

根据公式 (9) 和公式 (10), 试件直径加工成 74 mm. 岩石试件的长度取 50 mm, 满足实验的要求.

为避免岩石试件在成分和结构上的一致, 增强实验的可比性, 保证各试件的性质趋于一致, 岩石试件均取自同一块岩石石料. 岩石试件通过钻取岩芯的方法取出一长条岩芯后, 再切割成设计长度的岩石试件.

4.2 实验过程

实验时, 首先记录不加试件时进行空杆撞击时输入杆和输出杆的波形作为标定的波形, 为了降低弥散效应对实验结果的影响, 我们处理数据采用的是反射波和透射波的信号, 所以务必使标定信号中的反射波形清晰, 易于处理. 为了减小岩石端面摩擦效应的影响, 我们在两端面用黄油均匀地涂抹, 以减小 2 个端面不平整造成的误差, 保证压杆与试件之间的接触面更加平整. 撞击杆的撞击速度通过气室内压力和放气速度来控制. 采用光电计时仪精确计量撞击杆飞行时截断两束激光的时间间隔测量速度. 实验分成 2 组进行, 第 1 组采用常规的 SHPB 实验方法对砂岩试件进行冲击实验; 第 2 组采用在输入杆的撞击端安装波形整形器或粘贴软性介质的方法来对砂岩试件进行冲击实验. 每组实验的冲击速度控制在接近的范围内. 实验具体数据和详细信息见表 1. 图 2、3 是直接进行冲击实验的波形图, 图 4 是采用橡胶胶片滤除高频振荡波后的加载波形图; 图 5 是采用铝片整形后的波形图, 图 7 是试件 S1 和 S2 时间-应变率曲线, 图 8 是试件 S3 和 S4 时间-应变率曲线.

表 1 减小弥散效应实验对照表

Tab 1 The comparison table of reducing dispersion effect experiment

试件编号	岩石类型	冲击速度 / $(m \cdot s^{-1})$	减小弥散效应技术
S1	砂岩	4.79	无
S2	砂岩	4.65	无
S3	砂岩	8.14	橡胶薄片
S4	砂岩	8.01	铝片薄片

实验具体数据和详细信息见表 1. 图 2、3 是直接进行冲击实验的波形图, 图 4 是采用橡胶胶片滤除高频振荡波后的加载波形图; 图 5 是采用铝片整形后的波形图, 图 7 是试件 S1 和 S2 时间-应变率曲线, 图 8 是试件 S3 和 S4 时间-应变率曲线.

5 实验结果与分析

1) 对于大直径 SHPB 实验装置 (图 2、3), 加载波波头的高频振荡是客观存在的;

2) 通过在撞击杆端粘贴波形整形器 (图 4) 或软性介质 (图 5) 可以有效改善加载波的波形, 消除了加载波波头的高频振荡波, 减小了应力波的弥散问题.

3) 从试件冲击破坏后收集的碎块来分析, 为了便于比较我们选择了试件 S1 和 S3 破碎后的照片进行比较. 从图 8 (S1) 和图 9 (S3) 岩石试件破碎后的照片来分析, 我们判断不出 2 者冲击速度的差别. 从加载波的作用效果上可以得出 S1 的破坏是由加载波在波头位置的高频振荡造成的, S3 的破坏是砂岩试件对冲击作用下动态力学的合理响应.

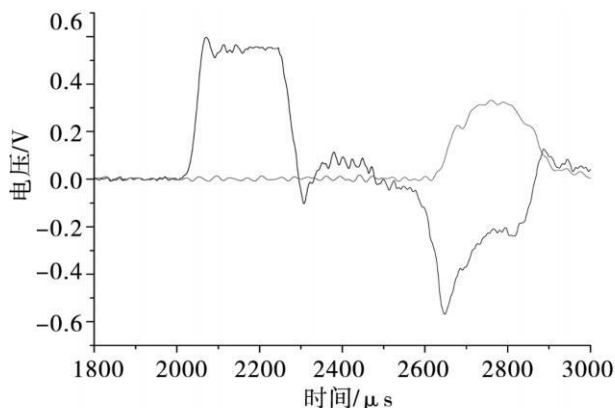


图2 常规冲击波形图(S1)

Fig.2 The common wave shape of impact loading(S1)

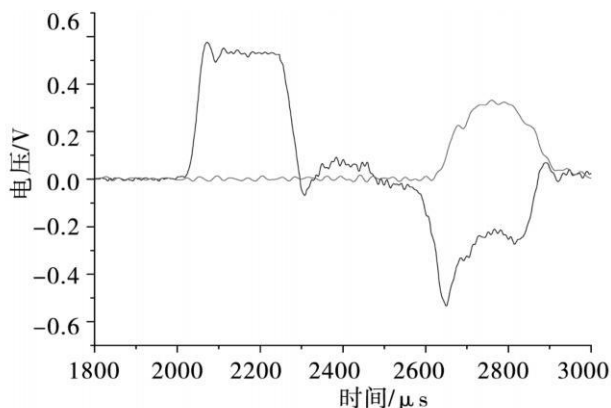


图3 常规冲击波形图(S2)

Fig.3 The common wave shape of impact loading (S2)

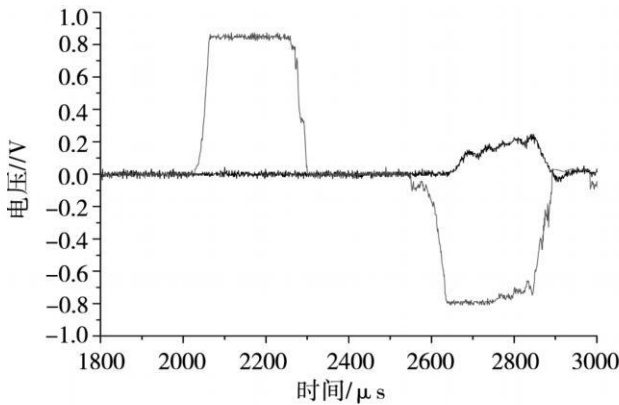


图4 软性介质滤除高频振荡波后波形图
Fig.4 The wave shape of removing high frequency surge by rubber sheet

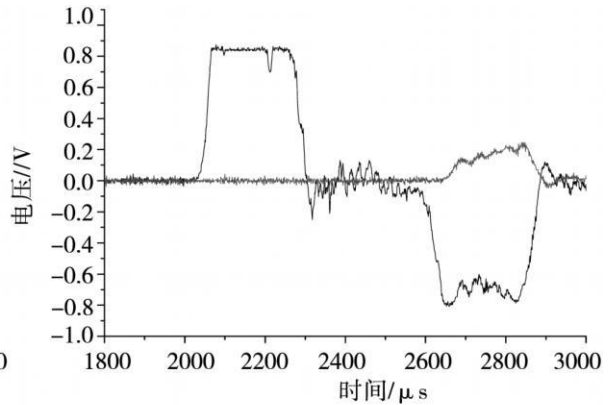


图5 铝片整形后的波形图
Fig.5 The wave shape of reshapar by aluminium sheet

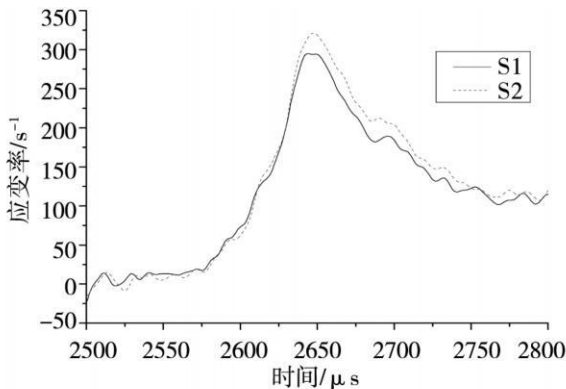


图6 S1, S2时间—应变率曲线
Fig.6 The curve of time-strain rate (S1,S2)

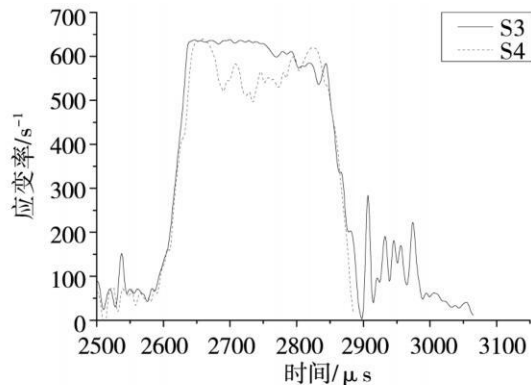


图7 S3, S4时间应变率曲线
Fig.7 The curve of time-strain rate (S3,S4)



图8 S1撞击后破坏情况 (V=4.79m/s)
Fig.8 The fragment after impact loading of S1(V=4.79m/s)



图9 S3撞击后破坏情况 (V=8.14m/s)
Fig.9 The fragment after impact loading of S3 (V=8.14m/s)

6 结 语

实验表明采用铝片作为波形整形器和采用橡胶胶片作为软性介质有效地改善了加载波的波形,从冲击后收集的试件碎块破坏情况分析消除了高频振荡的加载波是进行脆性材料动态力学实验的理想加载波.从改善波形效果上来看,铝片的效果优于橡胶胶片.另外经过整形后或滤出高频振荡波后,我们可以得到横定的时间—应变率的加载波,见图 7,这是普通冲击实验无法得到的,见图 6

(下转第 37页)

- [11] Tang H, Tsai T, Muan A. Activity-Composition Relations in the Systems CaO-MnO and MgO-MnO at 1500° and 1600° [J]. J Am Ceram Soc, 1992, 75: 1472-1475
- [12] Wu P, Eriksson G, Pelton A D. Critical Evaluation and Optimization of the CaO-MgO, CaO-MnO, FeO-MgO, FeO-MnO and MgO-MnO Systems [J]. J Am Ceram Soc, 1993, 76: 2065
- [13] Eriksson G, Pelton A D. Critical Evaluation and Optimization of Thermodynamic Properties and Phase Diagrams of the MnO-TiO₂, MgO-TiO₂, FeO-TiO₂, Ti₂O₃-TiO₂, Na₂O-TiO₂ and K₂O-TiO₂ Systems [J]. Metall Trans B, 1993, 24B: 795
- [14] Raghavan S, Iyengar G N K, Abraham K P. Determination of the Thermodynamic Properties of {xMgO + (1-x)MnO} (s) from a Solid-electrolyte Galvanic Cell in the Temperature Range 1163 K to 1318 K [J]. Chem. Thermodynamics, 1985, 17: 585-591
- [15] Rein R H, Chipman J. Activity in the Liquid Solution SiO₂-CaO-MgO-Al₂O₃ at 1600°C [J]. Trans Met Soc AIME, 1965, 233: 415-425
- [16] 德国钢铁工程师协会. 渣图集 [M]. 王俭, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- [17] Rao B K D P, Gaskell D R. The Thermodynamic Activity of MnO in Melts Containing SiO₂, B₂O₃ and TiO₂ [J]. Met Trans B, 1981, 12B: 469-477

(上接第 18 页)

参考文献:

- [1] 杨军, 金乾坤, 黄凤雷. 岩石爆破理论模型和数值计算 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1999.
- [2] Kokky H. Stress Wave in Solid [M]. Oxford Clarendon, 1963.
- [3] 王礼立. 应力波基础 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005
- [4] 冯明德, 彭艳菊, 刘永强, 等. SHPB 实验技术研究 [J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 273-278
- [5] 胡昌明. 镁铝合金的动态力学性能研究 [D]. 硕士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2003
- [6] 常列珍. SHPB 实验技术应注意的几类问题 [J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(4): 169-170
- [7] 李夕兵, 古德生, 赖海辉. 冲击荷载下岩石动态应力-应变全图测试中的合理加载波形 [J], 1993, 13(2).
- [8] 王鲁明, 赵坚, 华安增, 等. 脆性材料 SHPB 实验技术的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1798-1802
- [9] 孟益平, 胡时盛. 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
- [10] 刘孝敏, 胡时盛. 应力脉冲在变截面 SHPB 锥杆中的传播特性 [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(20): 110-114