

文章编号: 1001-4888(2010)04-0451-06

应力脉冲在 SHPB 实验中弥散效应的数值模拟与频谱分析^{*}

罗鑫¹, 许金余^{1,2}, 李为民³, 张军⁴

(1. 空军工程大学 工程学院 机场建筑工程系, 西安 710038; 2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安 710072;
3. 中南航空港建设公司 预算科, 广州 510403; 4. 北京军区空军后勤部, 北京 100720)

摘要: 在评判不同材料的整形器对加载波形的改进效果的应用背景下, 对比研究了不同形态的应力脉冲在霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)中的弥散效应。利用有限元软件 LS-DYNA 建立了杆件的三维有限元模型, 在杆端分别施加矩形、三角形和半正弦形的应力脉冲, 分析了波形振荡、前沿升时和应力峰值随传播距离的变化规律, 并运用频谱分析的方法进行了理论解释。结果表明: 三角应力脉冲和半正弦应力脉冲在各个方面都比传统的矩形应力脉冲表现出了更小的弥散效应; 半正弦应力脉冲在传播过程中比三角应力脉冲更能控制其形态, 能有效地减少弥散效应, 提高 $\Phi 100\text{mm}$ SHPB 实验精度, 是岩石类非均质材料的理想加载波形; 频谱分析的方法能从理论方面有效地解释应力脉冲信号在 SHPB 实验中的弥散现象。由此可见, 波形整形设计的理想目标为具有较宽历时的半正弦应力脉冲。

关键词: 弥散效应; 数值模拟; 频谱分析; 半正弦应力脉冲; 三角应力脉冲; 霍普金森压杆
中图分类号: O347.4 **文献标识码:** A

0 引言

基于一维应力波理论的 SHPB 技术^[1]是测试材料在高应变率下的冲击力学性能的主要手段。随着材料科学的发展, SHPB 研究范围由金属等均质材料扩展到岩石^[2,3]、混凝土^[4,5]类非均质材料, 为使试件能基本反应材料的真实力学性能, 大尺寸条件需得到满足, 这就相应地要求压杆的直径增大。传统的矩形应力脉冲在杆中传播时的几何弥散效应随杆径的增大而越加明显^[6], 而且大直径 SHPB 的弥散效应^[7]对测试结果有很大的影响, 必须考虑。

国内外学者从不同的角度对弥散效应进行研究, 并取得了一定的成果。理论方面, Pochhammer^[8]和 Chree^[9]根据圆柱弹性杆波动方程给出了圆柱杆中谐波传播速度与频率之间的关系, Rayleigh^[10]采用能量法也得到了相同的结果; 实际应用方面, 波形整形技术^[11-13]已经成功应用到多种材料的 SHPB 实验中, 同时被验证能够有效地减少弥散效应, 提高试验精度。

为深入研究该技术, 在 $\Phi 100\text{mm}$ SHPB 实验中应用了黄铜、紫铜、橡胶、铝片等材料的整形器, 对比发现, 整形后的应力脉冲, 均具有 $200\mu\text{s}$ 左右的前沿升时和光滑特性, 保证了应力均匀性, 但在形态方面存在差异, 可主要归纳为类三角形和类半正弦形。为能准确地评判不同材料的整形效果, 本文从数值模拟和频谱分析的角度出发全面地研究了三角形应力脉冲和半正弦应力脉冲在 $\Phi 100\text{mm}$ SHPB 实验中

* 收稿日期: 2010-01-20; 修订日期: 2010-03-24

基金项目: 陕西省自然科学基金(SJ08E210)

通讯作者: 许金余(1963-), 男, 教授, 博导, 主要从事结构工程、防护工程研究。E-mail: jinyuxu@263.net

的弥散效应, 并与传统的矩形应力脉冲进行了对比分析, 同时指出了波形整形设计的目标。

1 弥散效应基本情况

SHPB 实验原理主要是建立在二个基本假定的基础上, 一是杆在变形时横截面保持为平面, 沿截面只有均布的轴向应力(即平面假定), 另一个是应力均匀假定。

考虑质点横向运动的惯性效应, 针对半径为 r 的圆柱杆, Rayleigh 得到以下关系:

$$C_p = C_0 \left[1 - \nu^2 \pi^2 \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \right] \tag{1}$$

其中 ν 为杆的泊松比; λ 为波长; $C_0 = \sqrt{E/\rho}$ 为初等理论计算波速。式(1)表明, 相速 C_p 将随谐波频率的变化而变化, 而任意形态的加载波均可由 Fourier 变换为不同频率的谐波的组合, 故波形在传播过程中不能再保持原形而散开, 出现了几何弥散现象。分析该式可知, 在直径保持不变的情况下, 应力脉冲中的高频成分对波形弥散影响很大, 为能有效降低弥散效应, 加载波成分应以低频波为主。

2 数值模拟

LS-DYNA^[14] 是一款通用显式动力学有限元分析软件, 适合求解各种非线性结构的高速碰撞、爆炸等冲击动力学问题。本文模拟的对象为应力脉冲在弹性杆中的传播过程。弹性杆长度为 10.0m, 直径为 100mm。从保证数值模拟结果精度的角度出发, 不对杆件进行二维简化和轴对称处理, 利用程序中的 SOLID164 实体单元建立完整的弹性杆有限元模型, 如图 1 所示。

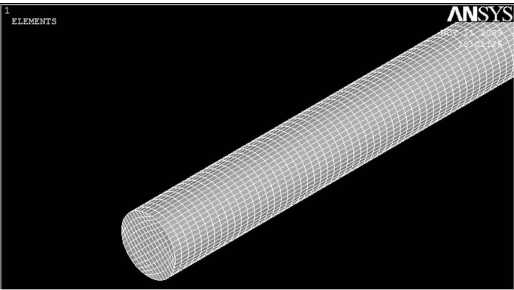


图 1 Φ100mm 弹性杆有限元模型
Fig. 1 The finite element model of 100mm diameter elastic bar

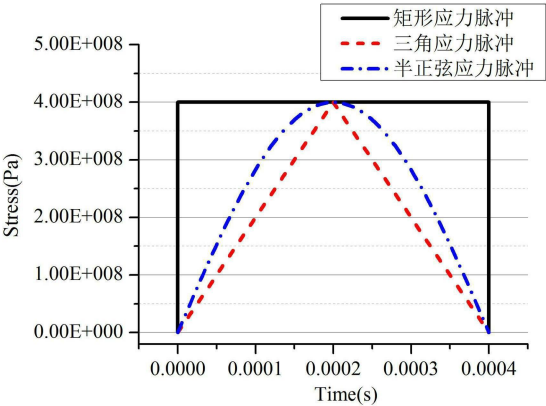


图 2 施加在杆端的三种应力脉冲
Fig. 2 Three kinds of stress pulse applied on the head of bar

计算中采用单点积分算法, 同时施加沙漏粘性阻尼力以控制零能模式, 该方法求解速度较快并在大变形条件下保证结果的正确性。材料采用线弹性本构模型: 密度 7850kg/m^3 , 弹性模量 $E = 210\text{GPa}$, 泊松比为 0.3。对模型施加三种应力脉冲: 矩形、三角和半正弦应力脉冲, 为保证可对比性, 历时 τ 、应力水平 σ_0 一致, 为 $4 \times 10^{-4}\text{s}$ 、 $4 \times 10^8\text{Pa}$, 如图 2 所示。

从波形振荡、前沿升时(指由应力脉冲的零点到达峰值所经历的时间)、应力峰值(σ_m)三方面对比研究了三种形态应力脉冲在 Φ100mm 弹性杆中的弥散效应。

2.1 波形振荡

提取离杆端 1m、3m 和 5m 处单元的应力脉冲波形数据, 得到图 3。

由图 3 可以看出, 三角应力脉冲和半正弦应力脉冲在整个传播过程中均能很好地保持其原始形态, 而不会发生像传统的矩形应力脉冲那样发生强烈的应力峰值波动现象。

2.2 应力脉冲前沿升时随传播距离变化规律

图 4 给出了应力脉冲前沿升时增量 t_r 随传播距离 g 的变化曲线。

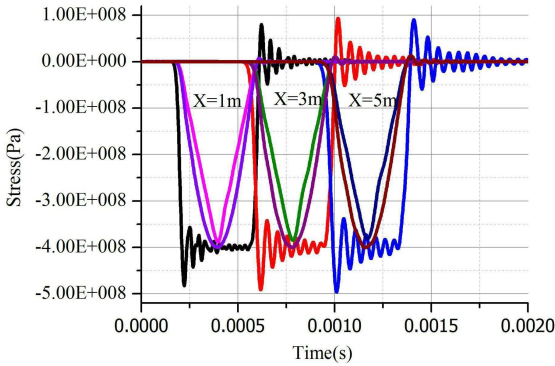


图 3 $X = 1\text{m}, 3\text{m}, 5\text{m}$ 处应力脉冲的形态对比
Fig. 3 Comparison of the form of stress pulse at $X = 1\text{m}, 3\text{m}$ and 5m

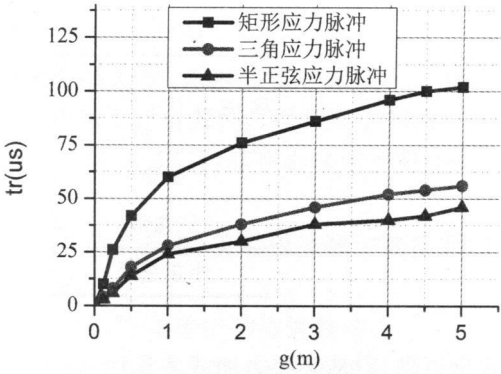


图 4 应力脉冲前沿升时增量随传播距离变化曲线
Fig. 4 Increment of the rising time of stress pulse vs propagation distance

由图 4 可知, 三种应力脉冲的前沿升时增量均随着传播距离的增加而逐渐增加, 而且这种变化在传播早期尤其明显, 之后逐渐趋于稳定。对比分析, 就 t_r 变化程度而言, 矩形应力脉冲的最高, 三角应力脉冲次之, 半正弦应力脉冲的最低; 而且后两者的变化曲线基本处于同一水平, 相差不是很大, 与矩形应力脉冲的相比, 变化幅度较小, 更能控制其形态。

2.3 应力峰值随传播距离的变化规律

提取传播不同距离下的应力脉冲峰值数据, 对矩形应力脉冲而言, 指在波形振荡时应力峰值的波动上限 σ_1 和下限 σ_2 , 如图 5 所示。

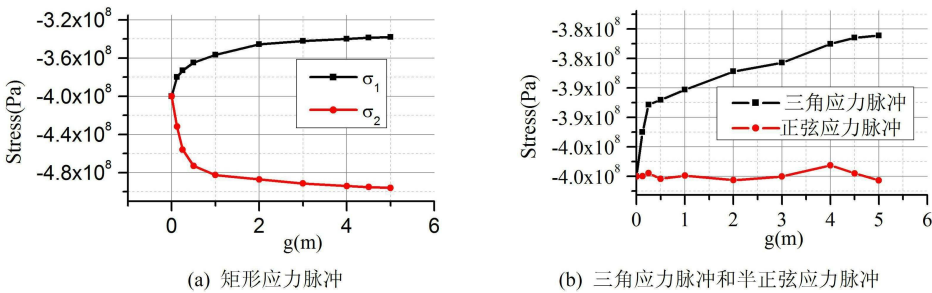


图 5 应力脉冲峰值随传播距离的变化曲线
Fig. 5 Peak of stress pulse vs propagation distance

对矩形应力脉冲而言, 出现了波形振荡现象, σ_m 处于波动状态, 且随着传播距离的增大, 偏离原始输入应力峰值的幅度越大, 在传播的早期尤为强烈。

对三角应力脉冲而言, σ_m 随着传播距离的增大而在不断衰减, 但这种衰减主要集中在离杆端 0.25m 的范围之内。

在半正弦应力脉冲传播过程中, σ_m 在 $4 \times 10^8 \text{ Pa}$ 上下很小的范围内波动, 传播的距离越远, 偏离幅度越明显。

对比分析, 定义应力峰值相对变化指标 $f = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \times 100\%$ ($\Delta\sigma = |\sigma_m - \sigma_0|$, 对矩形应力脉冲而言, $\Delta\sigma = |\sigma_2 - \sigma_1|$), 当应力脉冲的传播距离为 $1\text{m}, 3\text{m}$ 和 5m 时, 得到相关数据如表 1。

由此可见, 从传播过程中应力峰值变化幅度的角度而言, 矩形应力脉冲的最高, 三角应力脉冲次之, 半正弦应力脉冲的最低, 这与 t_r 随传播距离变化规律是一致的。

表 1 不同传播距离下应力脉冲的 f 值

Tab. 1 The value f of stress pulse in different propagation distance

应力脉冲形态	1	3	5
矩形	31.49%	37.30%	39.48%
三角形	2.94%	3.86%	4.78%
半正弦形	0.19%	0.24%	0.51%

有学者^[15-17]从某些方面或者其他角度得到了与本文相类似的该三种应力脉冲在传播过程中的弥散规律,这验证了文中数值模拟的正确性。综合以上三个方面的结论,可以知道,传统的矩形应力脉冲的弥散现象比其余两种应力脉冲的要明显地多,但半正弦应力脉冲比三角应力脉冲更能保持其原有的形态(前沿升时和应力峰值),可以有效地减少 $\Phi 100\text{mm}$ SHPB 中的弥散效应,提高试验精度,是岩石类非均质材料的理想加载波形。

3 频谱分析

从数值模拟中可知,三种形态应力脉冲在弹性杆中传播表现出了不同程度的弥散效应,为深入探究原因,本文运用频谱分析的方法对三种应力脉冲信号进行 FFT 处理,将信号由时域变换到频域,分解为一系列不同频率的正弦信号的加权和,图 6 给出了各应力脉冲相对应的频谱图。

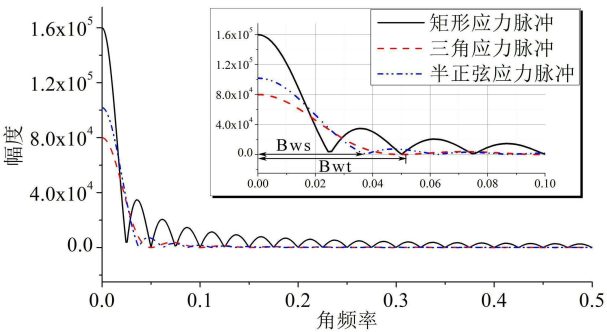


图 6 不同形态应力脉冲的频谱图

Fig. 6 The spectrums of various stress pulse

由图 6 分析可知,各应力脉冲频谱中的各条谱线的高度总的趋势是随着频率的增加而逐渐减小,矩形应力脉冲中谐波幅度减小的趋势较慢,谐波的成分中包含较多的高频波,而三角应力脉冲和半正弦应力脉冲中随着频率的增加,相比而言,很快地趋向于零;对比三角应力脉冲和半正弦应力脉冲的频谱图可知,半正弦应力脉冲信号的频带宽度 B_{ws} 小于三角应力脉冲信号的频带宽度 B_{wt} ,信号能量集中在更小的低频范围内,有利于消除弥散效应。

由 Fourier 变换中的尺度变换特性^[18]可知,应力脉冲信号的带宽和信号的脉宽存在反比关系,两者的乘积是一常数,即 $B_w \times \tau = \text{Constant}$ 。随着 τ 的减小,幅度为零的谐波频率均升高,则主要谐波成分集中的低频段也会变大,导致弥散效应更加明显,故在 $\Phi 100\text{mm}$ SHPB 实验中,对于同一种形态的应力脉冲而言,较大的脉宽也利于消除弥散效应。

综合以上分析可知,波形整形设计的理想目标为具有较宽历时的半正弦应力脉冲。

4 总结

利用 LS-DYNA 建立了杆件的三维有限元模型, 在杆端施加矩形、三角形和半正弦应力脉冲, 对比分析了其在传播过程中的弥散效应, 并运用频谱分析的方法进行了理论探究。得到以下结论:

- (1) 三角应力脉冲和半正弦应力脉冲在各个方面都比传统的矩形应力脉冲表现出了更小的弥散效应。
- (2) 半正弦应力脉冲在传播过程中比三角应力脉冲更能控制其形态, 能有效地减少弥散效应, 提高 $\Phi 100\text{mm}$ SHPB 的实验精度, 是岩石类非均质材料的理想加载波形。
- (3) 频谱分析能从理论方面有效地分析应力脉冲信号在 SHPB 实验中的弥散效应。
- (4) 波形整形设计的理想目标为具有较宽历时的半正弦应力脉冲, 这为评判不同材料的整形器对加载波形的改进效果提供了依据。

参考文献:

- [1] 王礼立, 朱兆祥. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005 (Wang Lili, Zhu Zhaoxiang. Foundation of Stress Waves[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005 (in Chinese))
- [2] Li X B, Lok T S, Zhao J, Zhao P J. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress strain curves for rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, 37: 1055–1060.
- [3] Zhou Z L, Li X B, Zuo Y J, Hong L. Fracture characteristics of rock fragmentation at strain rate of $100\sim 102\text{ s}^{-1}$ [J]. J. Cent. South Univ. Technol., 2006, 13(3): 290–294.
- [4] 李为民, 许金余, 沈刘军, 李庆. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能[J]. 复合材料学报, 2008, 25(2): 135–142 (Li Weinmin, Xu Jinyu, Shen LiuJun, Li Qing. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2): 135–142 (in Chinese))
- [5] Li W M, Xu J Y. Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 505(1–2): 178–186.
- [6] 王永刚, 王礼立. 大直径 SHPB 几何弥散效应及其表现的数值分析研究[J]. 爆炸与冲击(增刊), 2003(23): 131–132 (Wang Yonggang, Wang Lili. Numerical analysis research of dispersal effect and its expression in large diameter SHPB[J]. Explosion and Shock Waves (supplement), 2003(23): 131–132 (in Chinese))
- [7] 刘孝敏, 胡时胜. 大直径 SHPB 弥散效应的二维数值分析[J]. 实验力学, 2000, 15(4): 371–376 (Liu Xiaomin, Hu Shisheng. Two-dimensional numerical analysis for the dispersion of stress waves in large diameter SHPB [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(4): 371–376 (in Chinese))
- [8] Pochhammer L. J. Reine Angew. Math., 1876, 81: 324–336.
- [9] Chree C. The equations of an isotropic elastic solid in polar and cylindrical coordinates: Their solution and application [J]. Transaction Cambridge Philosophical Society, 1889, 14: 250–369.
- [10] Rayleigh, Lord, Theory of Sound [M]. London: Macmillan Co., 1894.
- [11] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar [J]. Experimental Mechanics, 2002, 42(1): 93–106.
- [12] Li W M, Xu J Y. Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100mm diameter split Hopkinson pressure bar [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 513–514: 145–153.
- [13] 李为民, 许金余, 沈刘军 等. $\Phi 100\text{mm}$ SHPB 应力均匀及恒应变率加载试验技术研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 129–133 (Li Weinmin, Xu Jinyu, Shen LiuJun, et al. Study on 100mm Diameter SHPB Experimental Techniques of Dynamic Stress Equilibrium and Nearly Constant Strain Rate Loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(2): 129–133 (in Chinese))
- [14] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005 (Bai Jinze. Theoretical Basis and Case Study of LS-DYNA3D[M]. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese))
- [15] 左宇军, 唐春安, 朱万成 等. 岩石类介质 SHPB 试验加载波形的数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(6): 859–862 (Zuo Yujun, Tang Chun'an, Zhu Wancheng, et al. Numerical Analysis of Loading

- Waveform in SHPB Tests of Rock Like Medium[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2007, 28(6): 859– 862(in Chinese)
- [16] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994 (LI Xibing, GU Desheng. Rock impact dynamics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994(in chinese))
- [17] 周子龙, 李夕兵, 赵国彦 等. 岩石类 SHPB 实验理想加载波形的三维数值分析[J]. 矿冶工程, 2005, 25 (3) : 18 – 20 (Zhou Zilong, Li Xibing, Zhao Guoyan, et al. Three dimensional numerical analysis of perfect loading wave form of rock with SHPB [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2005, 25 (3): 18– 20(in Chinese))
- [18] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997 (Hu Guangshu. Digital Signal Process[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997(in Chinese))

Numerical Simulation and Spectrum Analysis of Dispersion Effect of Stress Pulse in SHPB Experiment

LUO Xin¹, XU Jir yu^{1,2}, LI Wei min³, ZHANG Jun⁴

(1. Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University Engineering College, Xi'an 710038, China;

2. College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China;

3. Department of budget, Central South Airport Construction Company, Guangzhou 510403, China;

4. Air Force Logistic Department of Beijing Military Area, Beijing 100720, China)

Abstract: In the background of evaluating the improving effect of pulse shaper on loading waveform, stress pulse dispersion effect of different waveforms was compared and studied based on a split Hopkinson pressure bar (SHPB). Three-dimensional finite element model of the bar was established with the help of software LS-DYNA, and rectangle, triangle and half-sine stress pulse were applied on end of bar. The wave oscillation, peak stress and wave rising time vs. propagation distance were analyzed, a theoretical explanation about this relation was presented by means of spectrum analysis. Results indicate that the triangle stress pulse and half-sine stress pulse show less dispersion effect than rectangle stress pulse in every respect; half-sine stress pulse keeps its characteristics better than triangle stress pulse. So half-sine stress pulse may effectively reduce dispersion effect and improve accuracy of 100 mm diameter SHPB experiment, and is an appropriate loading waveform for brittle materials such as rocks. Spectrum analysis can effectively explain the stress pulse dispersion phenomenon in SHPB experiment from aspect of theory. This shows that the ideal goal of waveform shaping is half-sine stress pulse with a wider period of time.

Keywords: dispersion effect; numerical simulation; spectrum analysis; half-sine stress pulse; triangle stress pulse; split Hopkinson pressure bar (SHPB)