

文章编号: 1001-4888(2013)05-0607-07

陶瓷材料 SHPB 实验的改进垫块法*

段士伟, 李永池, 李平

(中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230027)

摘要: 高强度陶瓷材料 SHPB 实验中, 利用圆柱或圆台形垫块可避免压杆的端面塑性变形, 但存在陶瓷试件中轴向的应力不均匀现象, 从而影响实验结果的有效性。本文通过数值模拟分析了两种垫块方式引起的试件中轴向应力分布的特点, 并以此为基础提出了一种更为合理的垫块方法。利用商业软件 LS-DYNA, 数值模拟了改进垫块方法的陶瓷材料 SHPB 实验。结果显示, 基本上消除了陶瓷试件中轴向应力不均匀现象。应用一维应力波理论, 分析了实验中的波传播过程, 得到了对实验数据的修正处理方法, 并证明了所提的修正方法是可行有效的。

关键词: 霍普金森压杆; 陶瓷; 垫块

中图分类号: O385

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-025

0 引言

SHPB(分离式霍普金森压杆)最初是由 Kolsky 设计^[1], 现已被广泛地应用于测试材料高应变率下的动态力学性能。实验装置示意图如图 1 所示。

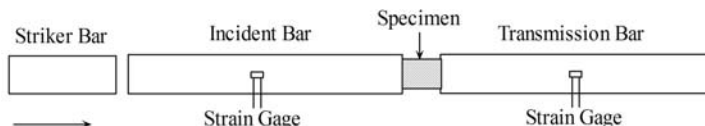


图 1 SHPB 装置简图

Fig. 1 Schematic of the SHPB

SHPB 实验技术建立在两个基本假定基础上: ①杆中一维弹性应力波假定; ②短试件应力/应变沿其长度均匀分布。具体可分为以下几点^[2]:

- (1) 杆中传播的入射、反射、透射应力脉冲的弥散应尽可能小, 即满足一维应力波假设;
- (2) 实验过程中入射杆、透射杆必须始终处于弹性变形状态;
- (3) 杆与试件接触的两端面必须分别始终是平面且相互平行;
- (4) 在有效测试时间段内, 试件处于轴向应力均匀及恒应变率状态。

在满足以上基本原则基础上, 试件中的应力、应变以及应变率历史可以由以下三式确定:

$$\sigma_s(t) = \frac{E_0 A_0}{2A_s} [\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t) + \epsilon_T(t)] = \frac{E_0 A_0}{A_s} \epsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_s(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^t (\epsilon_I(t) - \epsilon_T(t)) dt = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^t \epsilon_R(t) dt \quad (2)$$

* 收稿日期: 2013-03-06; 修订日期: 2013-04-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10632080), 中国博士后科学基金项目(2011M501394)、(20100480685)资助

通讯作者: 李永池(1941-), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: ycli@ustc.edu.cn

$$\dot{\epsilon}_s(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \epsilon_R(t) \quad (3)$$

其中 E_0 、 A_0 和 C_0 分别为压杆弹性模量、横截面积和弹性纵波波速; A_s 和 l_s 分别为试件的初始横截面积和初始长度; ϵ_L 、 ϵ_R 和 ϵ_T 分别为试件左右端面上的入射、反射和透射波应变信号。

由于陶瓷的高强度,要想在 SHPB 实验中测试陶瓷材料的应力并保持压杆处于弹性应力状态,必须缩小陶瓷材料试件的尺寸,这会造成试件的横截面积与压杆截面积相差过大;实验过程中陶瓷试件会引起杆端面发生弹性或塑性的凹陷,破坏了杆的一维平面弹性波假定;当试件的破坏应变很小时,会造成应变测量数据的误差增大;由于凹陷,会造成试件中严重的轴向应力不均匀,造成试件的提前破坏,降低材料的真实应力。这些原因使得陶瓷材料难以直接利用 SHPB 实验技术对其动态力学性质进行测试,因此必须对 SHPB 实验设备进行必要的改进,才能对陶瓷材料的动态力学性质进行测试。

为了避免压杆在实验过程中的塑性变形,以及降低试件中轴向的应力不均匀性,可以在试件与杆之间加高强度、高硬度的垫块,如碳化钨(WC)等。许多学者对垫块形状的选取进行了广泛的研究:包括与压杆广义波阻抗相匹配的圆柱形垫块^[3,4,7]、与压杆和试件端面面积分别相等的圆台形垫块^[4,5],以及哑铃状垫块^[4,6]。具体形状如图 2 所示。

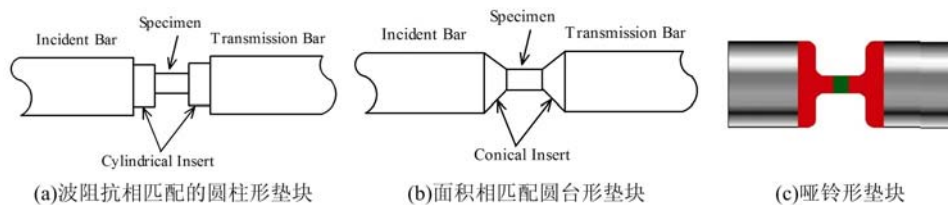


图 2 各种形状垫块示意图

Fig. 2 Schematic of various inserts

文献[4,6]证明,哑铃形垫块对于减小试件中轴向的应力不均匀性现象最为明显,但是由于哑铃形垫块制作工艺的复杂性,可操作性低,故下文没有对哑铃形垫块进行分析。圆柱形垫块和压杆的广义波阻抗相同,在处理实验数据时有其简便性,圆台形垫块广义波阻抗和压杆并不相同,处理实验数据时便增加了难度。虽然这两种形状的垫块可以避免压杆在实验过程中受到破坏,但并不能明显降低试件中轴向的应力不均匀性。因此有必要寻求一种装置简便、可操作性高的垫块形状。

本文数值模拟了陶瓷材料 SHPB 实验中圆柱形垫块和圆台形垫块对陶瓷试件中轴向应力均匀性的影响,分析了两种垫块的优缺点,提出了一种更为合理地添加垫块的方法。同时应用一维应力波理论,得到了对实验数据的修正处理方法。

1 圆柱形垫块和圆台形垫块下试件中轴向应力分布的数值模拟

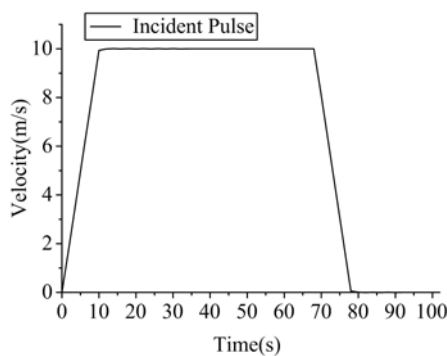


图 3 施加速度时间历史

Fig. 3 The loading curve

利用商业软件 LS-DYNA3D 数值模拟了 SHPB 实验过程中试件在纯弹性变形情况下,试件内的轴向应力分布。数值模拟计算中应用 ANSYS 软件进行前处理,由于问题的对称性,采用 1/4 建模,cm-g- μ s 单位制。在入射杆自由端施加速度时间历史代替子弹所施加的外载,载荷情况如图 3 所示,载荷历时 78μ s,上升沿历时 10μ s,下降沿 10μ s,速度峰值 10m/s ,计算时间 600μ s。数值计算中所用压杆、垫块以及陶瓷材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material properties of the bar, inserts and ceramic specimens

材料	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比
钢压杆	7900	210	0.3
WC 垫块 ¹⁾	14500	565.8	0.2
陶瓷试件 ²⁾	3640	293	0.24

1) 参数选自文献[4]; 2) 参数选自文献[7]。

对以下 4 种情况进行计算比较,如表 2 所示。4 种情况下压杆、垫块以及试件的网格划分如图 4 所示。

表 2 4 种计算情况

Tab. 2 Four different calculation conditions

Case	材料	长度/半径(cm)	网格划分 长度方向(段)×半径方向(段)
(1)	钢压杆(入射、透射)	100/0.725	2000×10
(2)	钢压杆(入射、透射)	100/0.725	2000×(10+10)
	陶瓷试件(无垫块)	0.50/0.275	20×10
(3)	钢压杆(入射、透射)	100/0.725	2000×(10+5+5)
	圆柱垫块	0.50/0.486	20×(10+5)
	陶瓷试件	0.50/0.275	20×10
(4)	钢压杆(入射、透射)	100/0.725	2000×10
	圆台垫块	1.00/0.725~0.275	40×10
	陶瓷试件	0.50/0.275	20×10

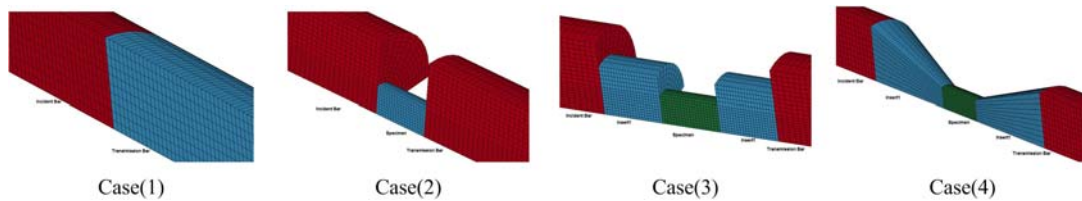


图 4 网格划分

Fig. 4 Computer grid of various cases

情况 1,通过两杆空对撞,考察入射杆中反射波的大小,检验数值模拟的有效性。通过观察入射杆中部外表面一单元的应变历史,来代替实验过程中贴在入射杆上的应变片信号,入射杆中部外表面一单元的应变历史如图 5 所示。由图 5 可以看出,计算时间内没有反射波的存在。证实了计算方法的可靠性。

峰值载荷作用下,情况(2)、(3)、(4)试件轴向应力分布情况如图 6 所示。定义应力均匀性系数 α 为试件中的最大轴向应力 σ_{max} 与试件中部轴向应力 σ^* 的比值,即 $\alpha = \sigma_{max} / \sigma^*$,应力均匀性系数越大,则试件上的局部应力相对越高,这样就会造成试件的提前破坏,降低材料的实际破坏强度。情况(2)、(3)、(4)应力均匀性系数如表 3 所示。情况(2)、(3)、(4)下,试件端部与试件中部应力时间历史如图 7 所示。

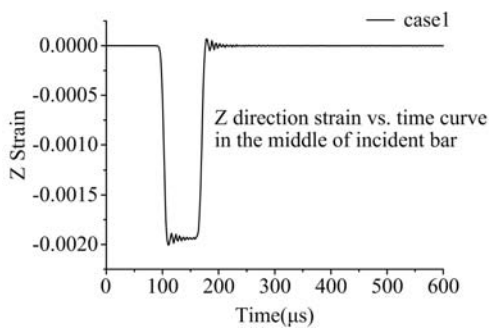


图5 入射杆中部单元应变时间历史
Fig.5 Strain-time history in the middle of the incident bar

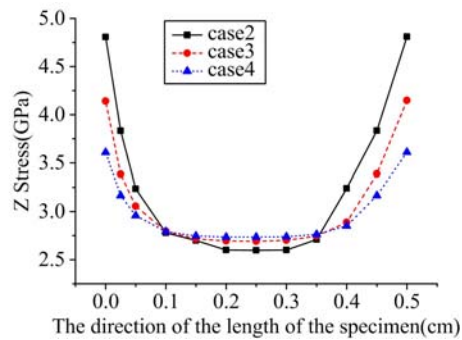


图6 试件轴向应力分布情况
Fig.6 Axial stress distribution within the specimen

表3 试件中的应力均匀性系数

Tab.3 The stress uniformity factor in the specimen

Case	试件中的最大轴向应力 σ_{max} (GPa)	试件中部轴向应力 σ^* (GPa)	应力均匀性系数 α
(2)	4.657	2.579	1.806
(3)	4.138	2.691	1.538
(4)	3.611	2.735	1.32

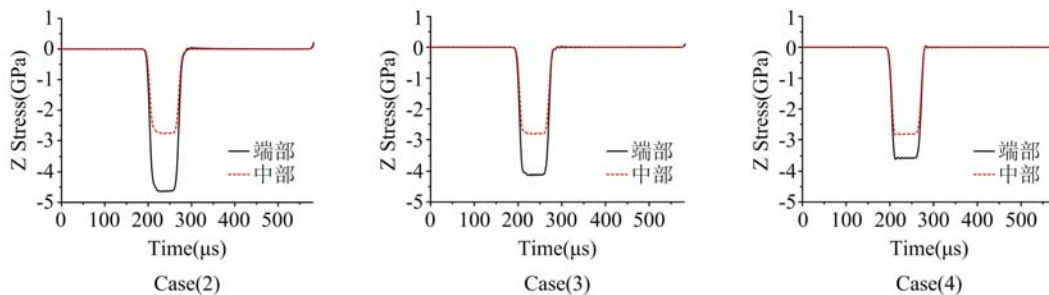


图7 不同情况下试件端部与试件中部应力时间历史
Fig.7 Stress-time history in the specimen

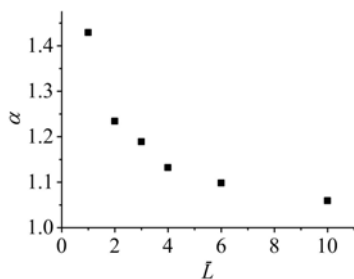


图8 圆台垫块下应力均匀性系数与无量纲圆台长度之间的关系
Fig.8 The relationship between the stress uniformity factor and the dimensionless length of the conical insert

由表3及图7可见圆台垫块下,试件中的应力均匀性系数最小,通过改变圆台垫块长度,可得圆台垫块下应力均匀性系数与无量纲圆台长度 $\bar{L} = L_i / L_s$ 之间的关系,其中 L_i 为垫块长度、 L_s 为试件长度。如图8所示。

由图8可见,随着圆台长度的增加,试件上应力均匀性系数随之减小。但是随着垫块长度的增加,垫块重量随之增加,实验过程中很难固定,这样就增加了实验的难度。综合比较以上分析,各种情况并不能明显减小试件中轴向的应力不均匀现象。

2 新型垫块组合下试件轴向应力分布的数值模拟

由图6可见,试件中轴向应力不均匀只发生在接触面1到2个单元厚度以内,受此启发,提出如下的新型垫块组合方案,在原圆柱垫块和试件中增加另外两块 WC 垫块,垫块直径同试件一般大,考虑到实验中的易操作性,厚度不宜过薄,取为 1mm。压杆长度方向划分 2000 段,径向划分 10+5+5 段,两大垫块长度方向分别划分 20 段,径向划分 10+5 段,两小垫块长度方向分别划分 4 段,径

向划分 10 段,试件长度方向划分 20 段,径向划分 10 段。建模及网格划分情况如图 9 所示,峰值载荷作用下试件轴向应力分布情况如图 10 所示。

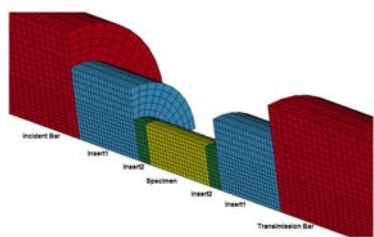


图 9 网格划分
Fig. 9 Computer grid

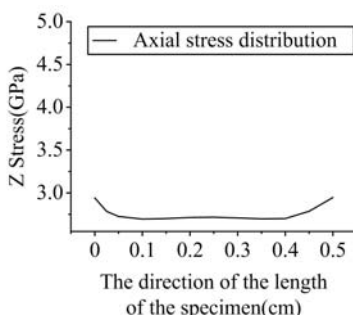


图 10 试件轴向应力分布
Fig. 10 Axial stress distribution

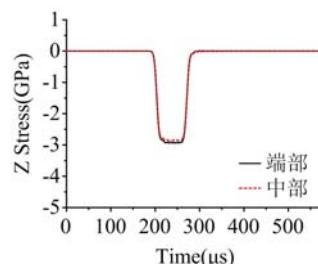


图 11 试件端部与试件中部应力时间历史
Fig. 11 Stress-time history

此时试件最大轴向压应力 $\sigma_{\max} = 2.989\text{GPa}$,试件中部轴向应力 $\sigma^* = 2.868\text{GPa}$,此时试件中应力均匀性系数为 $\alpha = \sigma_{\max} / \sigma^* = 1.042$ 。试件端部与试件中部应力时间历史如图 11 所示。由图 10 和图 11 可见,增加一个与试件相同直径的小圆柱垫块之后,试件中轴向的应力不均匀现象基本消除。

3 新型垫块组合下,对实验数据的修正处理方法

具体现场实验过程中,由于试件太小,应变片不宜直接贴到试件上,还应采用传统方法,即通过测量入射杆和透射杆中部所贴应变片记录的信号来进行数据处理,但是此时记录的信号并非试件端面上的信号,而是经过左右两端垫块反射和透射以后的信号,因此必须对数据处理方法进行修正,以此来得到合理的实验结果。以下分析中忽略试件中的应力波效应(均匀化假定)。

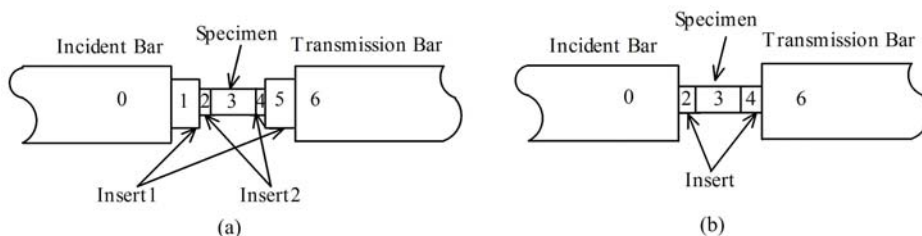


图 12 实验装置示意图
Fig. 12 Schematic of inserts

由于入射杆 0、透射杆 6 和垫块 1、5 广义波阻抗相同,即

$$\rho_0 C_0 A_0 = \rho_1 C_1 A_1 = \rho_5 C_5 A_5 = \rho_6 C_6 A_6$$

忽略掉 1、5 垫块对入射、透射和反射波的影响,图 12(a)可以简化为图 12(b)。

1) 0-2 界面,广义波阻抗之比 $n_{0-2} = \frac{\rho_0 C_0 A_0}{\rho_2 C_2 A_2} = \frac{\rho_1 C_1 A_1}{\rho_2 C_2 A_2} = \frac{A_1}{A_2}$ (下标 0-2 表示入射波由 0 介质到 2 介

质,下同),反射系数 $F_{0-2} = \frac{1-n_{0-2}}{1+n_{0-2}}$,透射系数 $T_{0-2} = \frac{2}{1+n_{0-2}}$,则 0-2 界面反射波和透射波扰动为:

$$\begin{cases} (\Delta\sigma_R)_{0-2} = F_{0-2} (\Delta\sigma_I)_{0-2} = \left[\frac{1-n_{0-2}}{1+n_{0-2}} \right] (\Delta\sigma_I)_{0-2} \\ (\Delta\sigma_T)_{0-2} = T_{0-2} (\Delta\sigma_I)_{0-2} \frac{A_0}{A_2} = \left[\frac{2}{1+n_{0-2}} \right] \frac{A_0}{A_2} (\Delta\sigma_I)_{0-2} \end{cases} \quad (4)$$

2) 2-3 界面,广义波阻抗之比 $n_{2-3} = \frac{\rho_2 C_2 A_2}{\rho_3 C_3 A_3}$,反射系数 $F_{2-3} = \frac{1-n_{2-3}}{1+n_{2-3}}$,透射系数 $T_{2-3} = \frac{2}{1+n_{2-3}}$,此时 2-3 界面入射波即为 0-2 界面透射波,即:

$$(\Delta\sigma_I)_{2-3} = (\Delta\sigma_T)_{0-2} = \left[\frac{2}{1+n_{0-2}} \right] \frac{A_0}{A_2} (\Delta\sigma_I)_{0-2}$$

2-3 界面反射波扰动为:

$$(\Delta\sigma_R)_{2-3} = F_{2-3} (\Delta\sigma_I)_{2-3} = \left[\frac{1-n_{2-3}}{1+n_{2-3}} \right] (\Delta\sigma_T)_{0-2} = \left[\frac{1-n_{2-3}}{1+n_{2-3}} \right] \left[\frac{2}{1+n_{0-2}} \right] \frac{A_0}{A_2} (\Delta\sigma_I)_{0-2} \quad (5)$$

(5)式即为试件左端面真实反射波信号。

3) 2-0 界面, 广义波阻抗之比 $n_{2-0} = \frac{\rho_2 C_2 A_2}{\rho_0 C_0 A_0} = \frac{A_2}{A_1}$, 透射系数 $T_{2-0} = \frac{2}{1+n_{2-0}}$, 此时 2-0 界面入射波即为 2-3 界面反射波, 即:

$$(\Delta\sigma_I)_{2-0} = (\Delta\sigma_R)_{2-3}$$

2-0 界面透射波扰动为:

$$\begin{aligned} (\Delta\sigma_T)_{2-0} &= T_{2-0} (\Delta\sigma_I)_{2-0} \frac{A_2}{A_0} = \left[\frac{2}{1+n_{2-0}} \right] \frac{A_2}{A_0} \left[\frac{1-n_{2-3}}{1+n_{2-3}} \right] \left[\frac{2}{1+n_{0-2}} \right] \frac{A_0}{A_2} (\Delta\sigma_I)_{0-2} \\ &= \left[\frac{2}{1+n_{2-0}} \right] \left[\frac{1-n_{2-3}}{1+n_{2-3}} \right] \left[\frac{2}{1+n_{0-2}} \right] (\Delta\sigma_I)_{0-2} \end{aligned}$$

入射杆上测得的反射信号即为 $(\Delta\sigma_T)_{2-0}$ 和 $(\Delta\sigma_R)_{0-2}$ 的叠加:

$$(\Delta\sigma_R)_b = \left[\frac{1-n_{0-2}}{1+n_{0-2}} \right] (\Delta\sigma_I)_{0-2} + \left[\frac{2}{1+n_{2-0}} \right] \left[\frac{1-n_{2-3}}{1+n_{2-3}} \right] \left[\frac{2}{1+n_{0-2}} \right] (\Delta\sigma_I)_{0-2} \quad (6)$$

4) 4-6 界面, 广义波阻抗之比 $n_{4-6} = \frac{\rho_4 C_4 A_4}{\rho_6 C_6 A_6}$, 透射系数 $T_{4-6} = \frac{2}{1+n_{4-6}}$, 此时试件端面 3-4 透射波应力脉冲信号 $(\Delta\sigma_T)_{3-4}$ 即为 4-6 界面入射脉冲信号 $(\Delta\sigma_I)_{4-6}$ 。

由透射杆上应力脉冲信号:

$$(\Delta\sigma_T)_{4-6} = T_{4-6} (\Delta\sigma_I)_{4-6} \frac{A_4}{A_6} = \left[\frac{2}{1+n_{4-6}} \right] \frac{A_4}{A_6} (\Delta\sigma_T)_{3-4}$$

可得试件右端面真实透射应力脉冲信号:

$$(\Delta\sigma_T)_{3-4} = \left[\frac{1+n_{4-6}}{2} \right] \frac{A_6}{A_4} (\Delta\sigma_T)_{4-6} \quad (7)$$

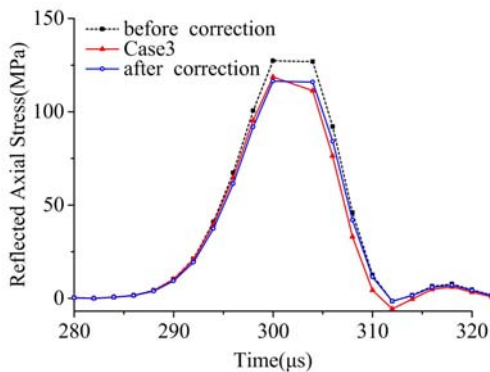


图 13 反射应力波信号的修正

Fig. 13 The correction of reflected stress wave

应用(5)、(6)式对入射杆上的反射应力波信号进行修正, 并与上文数值模拟时情况 3(波阻抗相匹配的圆柱垫块)时的反射波信号进行比较, 如图 13 所示。

由图 13 可见, 经过修正, 反射脉冲基本与添加波阻抗相匹配垫块时的信号重合。修正证实了数据修正方法的有效性。应用(7)式同样可以对透射波信号进行修正, 证明这个方法也是有效的, 由于篇幅所限这里并未画出相应的曲线。

4 结论

基于以上数值分析及讨论, 可以得到如下结论:

(1) 陶瓷材料 SHPB 实验中圆柱形垫块和圆台形垫块对陶瓷试件中的轴向应力不均匀现象并没有太明显改善。

(2) 文中所提出的新的添加垫块法基本上消除了试件中的轴向应力不均匀现象。

(3) 应用一维应力波理论, 得到了对实验数据的修正处理方法, 通过比较确定了数据修正方法的有效性。

本文通过数值模拟和理论分析, 证明了所提出的新的添加垫块法在陶瓷材料性能的 SHPB 实验中的有效性, 故本文主要是对实验方法改进的一种探索性研究。由于时间上的限制尚未完成对有关材料实验的具体应用, 这是正在进行的工作。

参考文献:

- [1] Kolsky H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading[C]. Proc. Phys. Soc. B, 1949, 62:676—700.
- [2] Subhash G, Ravichandran G. Split-Hopkinson pressure bar testing of ceramics. American Society for Materials Handbook, 8th edn. American Society for Metals International, Materials Park, OH, 2000:1114—1134.
- [3] Subhash G, Nemat-Nasser S. Dynamic Stress-Induced Transformation and Texture Formation in Uniaxial Compression of Zirconia Ceramics[J]. J. Am. Ceram. Soc., 1993, 76(1):153—165.
- [4] Chen W, Subhash G. Evaluation of ceramic specimen geometries used in split Hopkinson pressure bar[J]. Dymat. J., 1994:193—210.
- [5] Anderson C, O'Donoghue P, Lankford J, Walker J. Numerical simulations of SHPB experiments for the dynamic compressive strength and failure of ceramics[J]. Int. J. Frac., 1992, 55:193—208.
- [6] Sunny G, Yuan F, Prakash V, Lewandowski J. Design of Inserts for Split-Hopkinson Pressure Bar Testing of Low Strain-to-Failure Materials[J]. Experimental Mechanics, 2009, 49:479—490.
- [7] 李英雷, 胡时胜, 李英华. A95 陶瓷材料的动态压缩测试研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3):233—239 (LI Yinglei, HU Shisheng, LI Yinghua. Research on dynamic behavior of A95 ceramics under compression [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(3):233—239(in Chinese))

An Improved Inserts form in SHPB Experiment for Ceramic Material

DUAN Shi-wei, LI Yong-chi, LI Ping

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In SHPB experiment of high-strength ceramic materials, the use of cylindrical inserts or conical shape inserts can avoid plastic deformation of pressure bar end face. However, both inserts may cause uneven axial stress in ceramic specimens, which affects the validity of experimental result. Numerical simulation of axial stress distribution characteristics in specimen due to above mentioned inserts was carried out, based on which, a more reasonable inserts approach is proposed in this paper. By using commercial software LS-DYNA, SHPB experiment of ceramic material with improved inserts was numerically simulated. Results show that the uneven axial stress in ceramic specimen is basically eliminated. Applying one-dimensional stress wave theory, the wave propagation process in experiment was analyzed, the correction method of experimental data was obtained, and the feasibility and effectiveness of correction method was proved.

Keywords: Split Hopkinson pressure bar(SHPB); ceramic; inserts