

文章编号: 1001-1455(2003)03-0235-06

SHPB 实验中试件内早期应力平衡分析*

徐明利^{1,2}, 张若棋^{1,2}, 张光莹²

(1. 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 分析了影响 SHPB 实验试件中早期应力平衡的外部因素, 如光滑入射波及其上升时间、压杆波阻抗及压杆与试件横截面积之比等。研究表明, 当用传统的 SHPB 装置产生的入射波加载试件时, 宜采用与试件波阻抗接近的压杆; 在相同的试验条件下, 直径较大的试件, 其内部应力达到均匀分布的状态快于小直径的试件, 最后给出了改善试件早期应力均匀性的方法。

关键词: 固体力学; 应力平衡; SHPB 试验; 上升时间

中图分类号: O348

国标学科代码: 130·1575

文献标志码: A

1 引言

作为研究材料在高应变率下力学性能的一种方法, 霍普金森压杆技术应用时作了杆中一维波及试件中应力、应变沿轴向均匀分布等假设。压杆的长径比选取得足够大, 近似满足杆中一维波的假设。当入射波的宽度远远大于应力波通过试件的时间, 加载波在较高阻抗样品中来回反射二次以上时, 试件内应力、应变沿其轴向均匀分布的假设基本得到满足^[1]。因此, 霍普金森压杆技术广泛地被用来研究金属、复合材料以及其他波阻抗较高的材料的力学性能。

随着材料科学的发展, 新型工程材料不断涌现并获得广泛应用, 如低波阻抗的材料。利用 SHPB 装置研究这类材料的动态力学性能, 往往遇到试件早期应力不均的问题。低波阻抗材料(主要是橡胶、泡沫类)的 SHPB 试件的尺寸一般做得较大, 因此应力波通过试件的时间较长, 如果再作试件中应力均匀的假设, 会影响结果的可信度。此外, 利用霍普金森压杆技术研究脆性材料的力学性能时, 试件往往在很短的加载时间内发生脆性破坏, 此时常规 SHPB 实验技术难以保证试件中早期应力的均匀性。因此, 试件早期应力不均匀问题的分析方法及其解决措施, 引起广泛关注。

L. D. Bertholf 等^[2]发现, 惯性使重构的应力应变曲线出现振荡, 而试件与压杆之间的摩擦, 会导致应力应变的不均匀性。周风华等^[3]在高聚物的 SHPB 实验中发现了时间不均匀性和空间不均匀性, 并分析了试件早期应力不均匀性对实验结果的影响。目前, 普遍采用入射波平滑技术, 即扩展入射波的上升沿, 同时还可以减轻高频振荡。如 W. Chen 等^[4]在撞击杆与输入杆之间设置 shaper, D. J. Parry^[5]采用带有前置加载杆的三杆 SHPB 装置。作者采用前一种方法获得了较好的效果^[6]。

SHPB 实验均采取润滑措施以克服试件与杆之间的摩擦, 因此本文中忽略实际摩擦带来的对早期应力不均匀性的影响。同时暂不考虑试件的长径比带来的影响, 依据 R. M. Davies 等^[7]的设计方法, 通过选取最优试件长径比把试件的惯性效应减至最小程度。

在初始加载期间, 应力波在试件与两压杆的接触面之间来回反射, 容易产生早期应力不均的现象。而这期间, 实验材料的动态响应假设为弹性响应是合适的^[8]。本文中从弹性波的角度来分析入射波、压杆阻抗以及压杆与试件的截面积之比等因素, 对早期试件中应力应变的不均匀性的影响, 并分析可采取的改进措施。

* 收稿日期: 2002-06-18; 修回日期: 2002-10-10

基金项目: 冲击波物理与爆轰物理国防重点实验室基金项目(97JS752.2KG0107)

作者简介: 徐明利(1973—), 男, 博士研究生。

本文中分析了采用波形整形技术的高分子材料 SHPB 实验中在试件内的早期应力均匀性。分析中假设试件早期阶段的动态响应是线弹性的。该材料的平均密度为 1240kg/m^3 ，一维弹性应力波速度为 2342m/s ，波阻抗明显比金属材料低，但高于一般的低阻抗材料(橡胶等)。试件几何尺寸为 $\varnothing 12\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。

2 弹性波传播的分析

图 1 为带有整形器 (Shaper) 的 SHPB 实验装置, 由于压杆与试件的截面不匹配, 采用波阻抗 $Z = \rho c A$, 其中 ρ, c, A 分别是密度、声速和截面积。在试件的线弹性动态响应范围内, 声速 $c_s = \sqrt{E_s / \rho_s}$, 其中 E_s 是试件的杨氏弹性模量。本文中下标 s 代表试件, b 代表压杆。

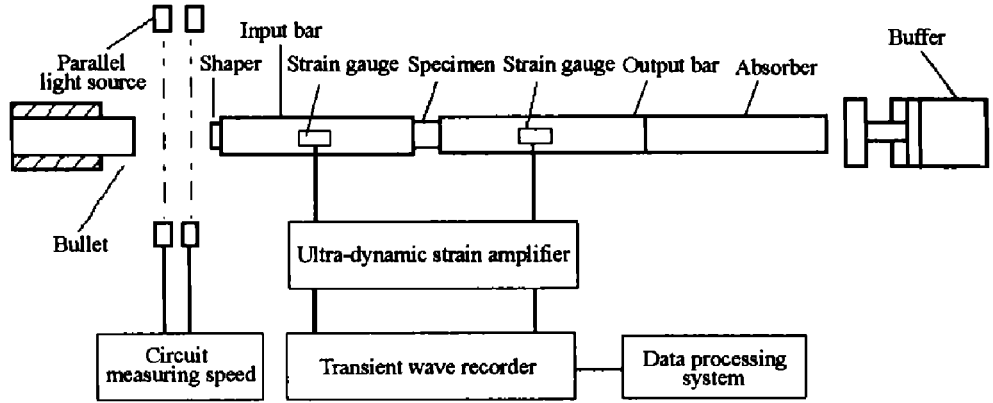


图 1 带整形器的 SHPB 装置

Fig.1 Schematic of SHPB with shaper

SHPB 实验中, 与两个量计相连接的记录仪器的通道同时触发, 因而两条信号时间起点相同。依据一维波和试件中应力均匀分布的假设, 当考虑透射波与入射波延迟时间时^[8 \setminus]

$$\epsilon_R(t) = \epsilon_T(t + \tau) - \epsilon_I(t) \tag{1}$$

试件中的平均应力

$$\sigma_s(t) = \frac{1}{2} E_b \left[\frac{A_b}{A_s} \right] (\epsilon_I(t) + \epsilon_T(t + \tau) + \epsilon_R(t)) \tag{2}$$

试件中的平均应变

$$\epsilon_s(t) = - \frac{2c_b}{L_{s0}} \int_0^t \epsilon_R(\xi) d\xi \tag{3}$$

式中: L_{s0} 为试件初始长度。 τ 是透射波相对于反射波的延迟时间, 也就是应力波穿越试件的时间, 其确定方法参见文献[9]。

以入射波到达界面 B_1 (见图 2) 时刻为时间零点, 当试件中的应力波尚未传播到界面 B_2 , 即 $0 < t < \tau$ 时的透射系数、反射系数分别为

$$\begin{cases} T_1 = \frac{2A_b Z_s}{A_b Z_b + A_s Z_s} \\ R_1 = \frac{A_s Z_s - A_b Z_b}{A_b Z_b + A_s Z_s} \end{cases} \tag{4}$$

同样, 当试件中的应力波在界面 B_2 向输出杆中传播时, 透射系数、反射系数分别为

$$\begin{cases} T_2 = \frac{2A_s Z_b}{A_b Z_b + A_s Z_s} \\ R_2 = \frac{A_b Z_b - A_s Z_s}{A_b Z_b + A_s Z_s} \end{cases} \tag{5}$$

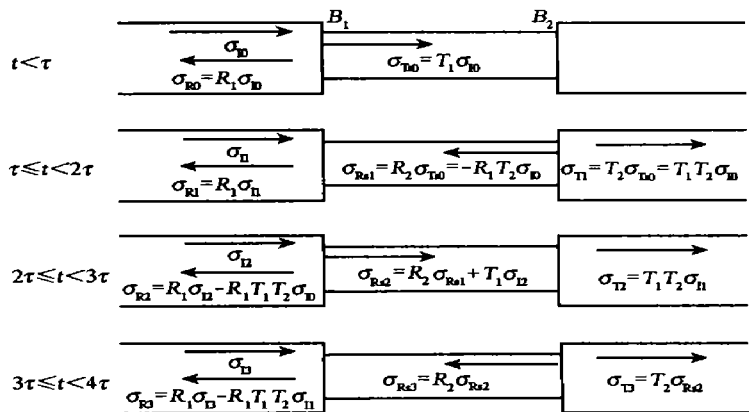


图 2 弹性波在试件中前三次反射时透射波和反射波的起建
Fig.2 The build-up of the transmitted and reflected pulses up to the first three traverse-time

可以看出 $R_1 = -R_2$ 。通常, $A_s Z_s < A_b Z_b$, 因此, $R_1 < 0, R_2 > 0, T_1 > 0, T_2 > 0$ 。在加载的早期, 应力波在试件内的多次

反射如图 2 所示。第 n 次反射后,输出杆中的透射波、输入杆中的反射波分别为^[9]

$$\begin{cases} \sigma_{Tn} = R_1^2 \sigma_{T(n-1)} + T_1 T_2 \sigma_{I(n-1)} \\ \sigma_{Rn} = R_1 (\sigma_{In} - \sigma_{T(n-1)}) \end{cases} \quad n \geq 3 \quad (6)$$

考虑两种入射波,一个是矩形波, $\sigma_I(t) = \sigma_0 H(t)$;另一个是光滑入射波^[10]

$$\sigma_I(t) = \sigma_0 \frac{t^3 H(t) - 3(t - \zeta)^3 H(t - \zeta) + 3(t - 2\zeta)^3 H(t - 2\zeta) - 3(t - 3\zeta)^3 H(t - 3\zeta)}{6\zeta^3} \quad (7)$$

式中: $H(t)$ 是 Heaviside 函数。文献[10]给出了不同 ζ 所对应的不同上升时间的光滑波(图 7 中的入射波所示的即是其波形)。

定义应力平衡因子^[9]

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_T}{\sigma_I + \sigma_R} \quad (8)$$

当平衡因子等于 1 时,试件中应力应变达到完全平衡。

3 应力平衡分析

3.1 不同波阻抗的压杆对应力平衡的影响

实验中用到两类压杆,第一种压杆为钢杆($\rho = 7.58 \text{Mg/m}^3, E = 198.6 \text{GPa}, c = 5120 \text{m/s}$),另一种为铝杆($\rho = 2.784 \text{Mg/m}^3, E = 71.4 \text{GPa}, c = 5065 \text{m/s}$)。应力波穿越试件($L_{s0} = 6 \text{mm}$)的时间 $\tau = 2.56 \mu\text{s}$ 。压杆与试件的截面积之比为 2。当加载波为矩形波(上升时间为零)、压杆分别为钢杆和铝杆时的预估透射波、反射波,以及应力平衡因子的时间变化如图 3~4 所示。

由图可见,在 $t = \tau$ 之前透射波为零,而反射波并不为零,并且有明显的早期应力不均匀现象,即在应力达到平衡之前,平衡因子均在 $\sigma_{eq} = 1.0$ 上下振荡。用铝杆时的平衡因子的振荡幅度小于用钢杆时的振荡幅度。对于铝杆,大约在 6τ 时,试件中的平衡因子已经达到 0.93;而对于钢杆,直到 8τ 时,平衡因子才达到 0.92。因此,对于波阻抗较低的材料,当用传统的 SHPB 装置产生的入射波加载试件时,采用波阻抗较为接近的铝杆作压杆时,试件中的应力达到平衡状态所需要的时间,明显比用钢杆时的小。

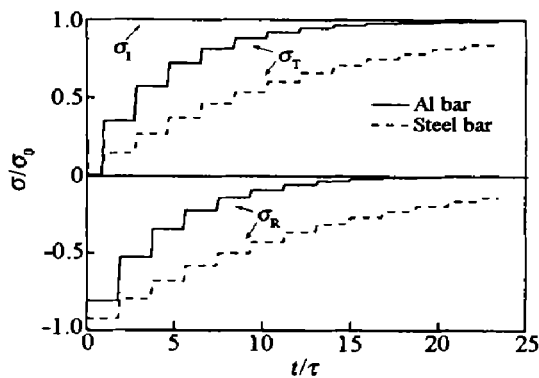


图 3 矩形波加载下预估透射波、反射波的比较

Fig.3 Comparison of predicted transmitted waves and reflected waves under loading of rectangular stress wave

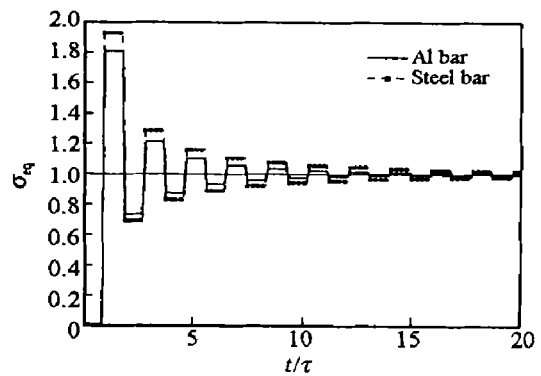


图 4 矩形波加载下应力平衡因子的比较

Fig.4 Comparison of stress equilibrium factors under loading of rectangular stress wave

3.2 不同压杆/试件截面积之比对应力平衡的影响

压杆为铝杆,考虑截面积比分别为 2 和 4 两种情形,在矩形波加载下预估透射波、反射波,以及应力平衡因子的时间变化如图 5~6 所示。由图可见,相同的压杆,杆/试件截面积之比越大,反射波的幅度越大,透射波的幅度越小,试件中应力达到平衡的时间越长。截面积之比等于 2 时,试件中的平衡因子大约在 6τ 时已经达到 0.93;而截面积之比等于 4 时,平衡因子在大约 8τ 时也达到 0.93。

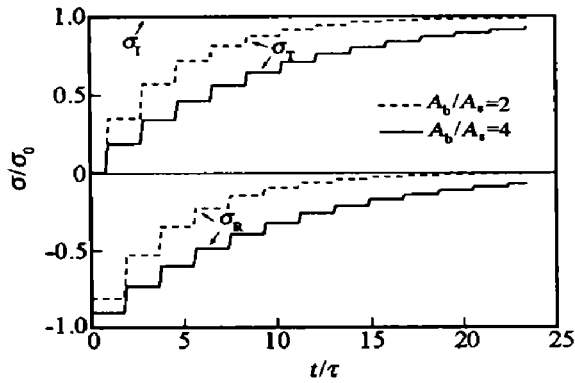


图5 矩形波加载下不同的杆/试件截面积比时
预估透射波、反射波的比较

Fig.5 Comparison of predicted transmitted waves and reflected waves under loading of rectangular stress wave with different bar/specimen area ratios

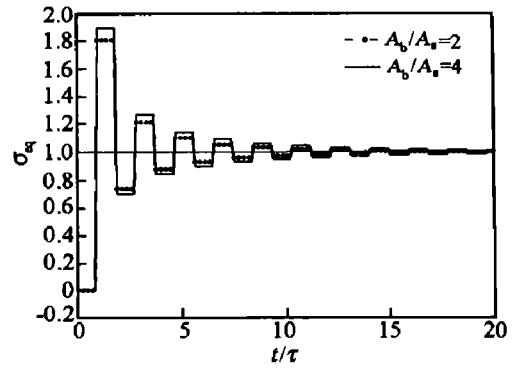


图6 矩形波加载下不同的杆/试件截面积比时
应力平衡因子的比较

Fig.6 Comparison of stress equilibrium factors under loading of rectangular stress wave with different bar/specimen area ratios

3.3 不同入射波上升时间对应力平衡的影响

自从 Davies 分析了 SHPB 中 Pochhammer-Chree 振荡的起因和传播之后, 逐渐地采用平滑入射波的方法来尽量消除入射波的高频振荡。并不是象 Follansbee、Gorham 和 Gong 等那样单纯利用傅立叶变换来消除波的弥散效应。可是, 分析光滑入射波及其上升时间对早期应力平衡的影响的报道很少。

图 3~6 中的矩形入射波导致试件中的应力阶跃式的上升, 而实验中的入射波一般呈梯形^[11], 典型的入射波上升时间为约 $10\mu\text{s}$ ^[8]。图 7 为入射波为光滑波、压杆为铝杆时预估透射波、反射波以及应力平衡因子的时间变化。

上升时间为 $3\mu\text{s}$ 的光滑入射波加载试件, 当入射波在 $t = 3\mu\text{s}$ 时, 已达到其峰值, 而应力平衡因子的振荡在 $t = 20\mu\text{s}$ 后仍清晰可见, 局部振荡幅度可以与矩形波加载时的振荡幅度相比。上升时间为 $6\mu\text{s}$

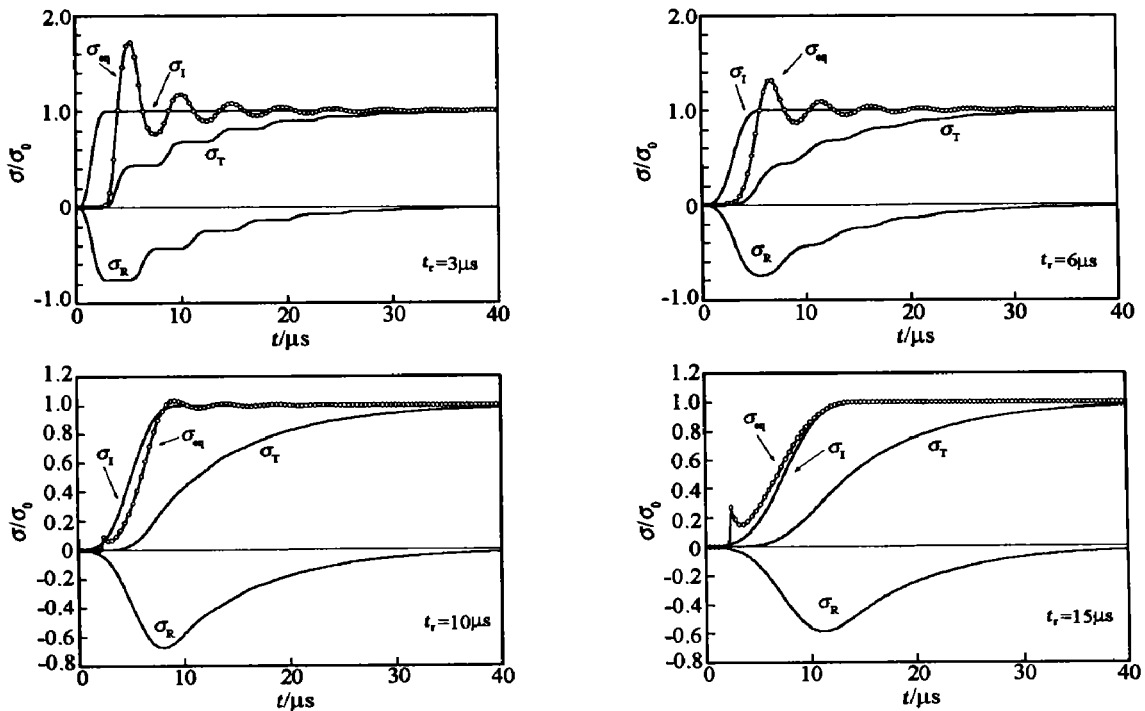


图7 不同上升时间的光滑入射波加载下的预估透射波、反射波及平衡因子

Fig.7 The predicted transmitted wave, reflected wave and equilibrium factor under loading of smooth incident wave with different rise time

的光滑入射波, 大约在 $t=12.5\mu\text{s}$ 后, 平衡因子基本上在 1 ± 0.1 范围内振荡, 应力均匀性分布好于前者。上升时间为 $10\mu\text{s}$ 的光滑入射波, 当入射波达到其峰值 96% 时, 平衡因子也达到 0.96, 并于 $8.4\mu\text{s}$ 时达到 1.0, 此时入射波达到峰值的 98%。此后, 平衡因子在 1 ± 0.03 范围内振荡, 因此, 应力均匀性又进一步得到了改善。上升时间为 $15\mu\text{s}$ 的光滑入射波, 平衡因子在 $10\mu\text{s}$ 左右达到 0.90, 而此时入射波还不到峰值的 90%, 更需要注意的是平衡因子基本上没有出现振荡, 说明这种入射波加载时的应力均匀性得到了更好的满足。

需要指出的是, 比较上升时间为 $10\mu\text{s}$ 和 $20\mu\text{s}$ 的光滑入射波, 前者加载时应力达到均匀性的绝对时间虽然要早于后者, 但是考虑到入射波的增长速度, 后者达到应力均匀的相对时间要早。

上升时间为 $3\mu\text{s}$ 时, 可以发现反射波和透射波中有一系列平台, 这不同于文献[12]中为得到均匀性较好的应变率而使反射波接近于平台时的情况。因为这种情况下, 试件内应力远没有达到均匀性要求。可以预料, 利用此图中的入射波及透射波计算得到的应力-应变曲线将出现振荡^[2], 显然是违背事实的。上升时间为 $6\mu\text{s}$ 时的情形也同样。

3.4 应用举例

图 8 为采用在撞击杆与输入杆之间叠加 shaper 的方法^[6]获得的入射波、反射波和透射波。入射波的上升时间为约 $80\mu\text{s}$, 采用了钢杆并且压杆/试件截面积之比为 1.46, 试件长径比 L_s/D_s 为 0.5。图 9 为相应的预估反射波、透射波以及平衡因子。当 $t=3\tau$ 时, 平衡因子已经达到 0.92, 当 $t=4\tau$ 时, 平衡因子非常接近 1。表明应力波在试件内来回反射 2 次之后已经接近均匀分布状态。

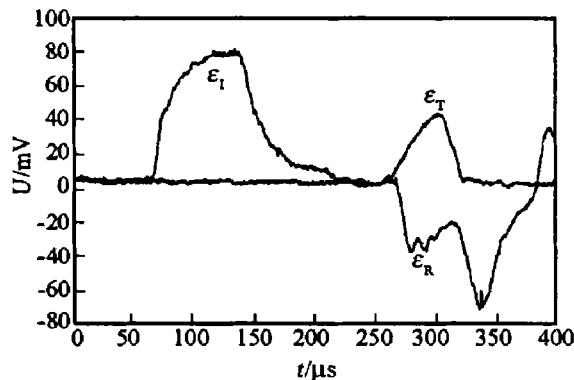


图 8 采用 shaper 技术后的入射波、反射波及透射波
Fig.8 Three waves obtained with shaper technique

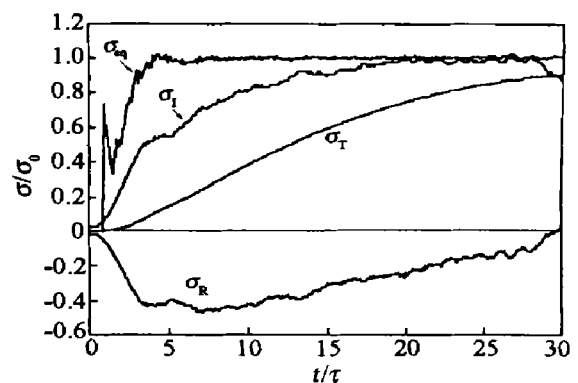


图 9 光滑入射波加载时的预估透射波、反射波及平衡因子
Fig.9 The predicted transmitted wave, reflected wave and equilibrium factor under loading of smooth incident wave

4 结 论

由以上分析可得到下面几个结论:

- (1) 用传统的 SHPB 装置产生的入射波加载试件时, 宜采用与试件波阻抗接近的压杆。
- (2) 相同的试验条件下, 直径较大的试件, 其内部应力达到均匀分布的状态快于小直径的试件。
- (3) 光滑入射波有利于改善试件早期应力的均匀性; 其上升时间可以适当加宽, 使得在入射波的上升段就可以实现试件内部应力的均匀分布, 并使能应力均匀状态保持更长的时间。

参考文献:

- [1] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1994, 77: 263-267.
- [2] Bertholf L D, Karnes C H. Two-dimensional analysis of the split Hopkinson pressure bar system [J]. J Mech Phys Solids, 1975, 23: 1-19.
- [3] 周风华, 王礼立, 胡时胜. 高聚物 SHPB 试验中试件早期应力不均匀性影响[J]. 实验力学, 1992, 7(1): 23-29.

- ZHOU Feng-hua, WANG Li-li, HU Shi-sheng. On the effect of stress nonuniformness in polymer specimen of SHPB tests[J]. *Exp Mech*, 1992, 7(1):23–29.
- [4] Chen W, Lu F, Zhou B. A quartz-crystal-embedded split Hopkinson pressure bar for soft materials[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(1):1–6.
- [5] Parry D J. The effect of strain rate on the compressive stress-strain properties of PEEK and epoxy carbon fibre composites[J]. *J Phys IV*, 1997, 7(C3):605–610.
- [6] 徐明利, 张若棋, 王悟, 等. 波形整形器在酚醛树脂的霍普金森压杆实验中的应用[J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(4):377–380.
- XU Ming-li, ZHANG Ruo-qi, WANG Wu, et al. Application of wave shaper in SHPB experimental study of phenolic resin[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(4):377–380.
- [7] Davies R M, Hunter S C. The dynamic compression test of solid by the method of the split Hopkinson pressure bar[J]. *J Mech Phys Solids*, 1963, 11:155.
- [8] Parry D J, Dixon P R, Hodson S, et al. Stress equilibrium effects within Hopkinson bar specimens[J]. *J Phys IV*, 1994, (C8):107–112.
- [9] 徐明利, 张若棋, 张光莹. 确定 SHPB 试验中延迟时间的曲线拟合法[J]. *高压物理学报*, 2003, 17(2):153–156.
- XU Ming-li, ZHANG Ruo-qi, ZHANG Guang-ying. Curve-fitting method in determining the delay-time in SHPB experiment[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2003, 17(2):153–156.
- [10] 徐明利, 张若棋, 张光莹. 用元胞法研究层合材料中的应力波[J]. *高压物理学报*, 2000, 14(3):182–188.
- XU Ming-li, ZHANG Ruo-qi, ZHANG Guang-ying. Study of stress wave propagation in laminated media using MOC I[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2000, 14(3):182–188.
- [11] Bragov A M, Lomunov A K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the kolsky method[J]. *Int J Impact Engng*, 1995, 16(2):321–330.
- [12] 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 Fang-yun, Chen W, Frew D J. A design of SHPB experiments for soft materials[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(1):15–19.

Analysis of early stage specimen stress equilibrium in SHPB experiment

XU Ming-li^{1,2}, ZHANG Ruo-qi^{1,2}, ZHANG Guang-ying²

(1. *Science College, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, Hunan, China;*

2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: The effects of external factors on the stress equilibrium in early stage specimen were analyzed. When loading the specimen with incident wave generated by a traditional SHPB device, experimental results indicate that pressure bar with matching impedance to that of the specimen performs better, and the stress in specimen of larger diameter reaches equilibrium faster than that of smaller diameter.

Key words: solid mechanics; stress equilibrium; SHPB experiment; rise time