

文章编号: 1001-1455(2006)02-0134-06

SHPB 实验中端面摩擦效应研究*

王晓燕^{1,2}, 卢芳云^{1,2}, 林玉亮¹

(1. 国防科技大学理学院应用物理系, 湖南 长沙 410073;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 选取硅橡胶、聚氨酯泡沫、Comp. B 炸药、PBX-HMX(97%)炸药以及 6061-T6 铝合金五种材料试样, 对分离式霍普金森压杆(SHPB)实验技术中的端面摩擦效应进行了研究。实验结果表明, SHPB 实验技术中的端面摩擦效应与材料的性质相关。另外, 基于各向同性弹性理论, 运用能量守恒法对 SHPB 实验中的端面摩擦效应进行了机理分析, 研究表明, 材料泊松比、端面摩擦系数、试样长径比、轴向应变是 SHPB 实验中影响端面摩擦效应的四个因素。

关键词: 固体力学; 端面摩擦效应; SHPB 实验; 材料性质; 能量守恒法

中图分类号: O348 **国标学科代码:** 130·15 **文献标志码:** A

1 引 言

SHPB 技术^[1]是当今用于获得材料在 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内本构关系(一维应力应变曲线)的主要实验手段。该实验技术建立在一维应力传播和试样受力均匀两个基本假定基础上, SHPB 实验结果的准确性和可靠性与实验过程是否遵守两个基本假定密切相关。

实验中端面摩擦效应破坏了局部一维应力状态, 导致实验结果不能正确反映材料的一维应力本构关系, 目前随着新型材料的不断涌现, SHPB 的研究对象不断拓展, 端面摩擦效应对实验精度的影响成为研究者们关心的问题。但是精确地描述摩擦效应很困难, 一些学者采用数值模拟方法, 结合惯性效应以及试样长径比对它进行了一些研究, 研究中选取的材料是退火铝或钢^[2~4], 没有考虑端面摩擦效应与材料性质的关系, 另外应用 SHPB 实验方法研究端面摩擦效应的实验结果目前也未见报导。

本文中采用 SHPB 实验方法, 选取硅橡胶、聚氨酯泡沫、Comp. B 炸药、PBX-HMX(97%)炸药、金属铝合金五种材料试样, 在二硫化钼润滑、干摩擦、粘接三种端面摩擦条件下进行实验, 同时, 基于各向同性弹性理论, 运用能量守恒法对端面摩擦效应的主要影响因素进行理论分析。

2 SHPB 实验

SHPB 实验装置如图 1 所示。该装置主要由撞击杆、入射杆、透射杆组成。附属设备包括气枪、测速装置、应变片、示波器、缓冲装置等, 应变测试采用 KD205-1A 超动态应变仪, 数字存储示波器用于采集实验信号。

实验中选取硅橡胶、聚氨酯泡沫(密度为 0.280 g/cm^3)、Comp. B 炸药、PBX-HMX(97%)炸药、6061-T6 铝合金五种材料试样。根据材料性质可分为软材料(硅橡胶与聚氨酯泡沫)、脆性材料(Comp. B 炸药与 PBX-HMX(97%)炸药)、金属铝合金材料。在软材料与脆性材料的实验中, 压杆采用直径 20 mm 的 LY12 铝杆装置; 6061-T6 铝合金实验中, 压杆采用直径 20 mm 的钢杆装置。同种材料试样的实验中, 选取相同的撞击杆, 相同的试样尺寸, 在保证得到实验结果的条件下选取较合理的长径比, 通过二硫化钼润滑、干摩擦(不加任何润滑剂)、粘接三种方式实现不同端面摩擦条件。

* 收稿日期: 2005-01-25; 修回日期: 2005-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(10276038)

作者简介: 王晓燕(1978—), 女, 硕士。

另外,实验中采用了入射波整形技术,一方面解决实验中脆性材料的应力平衡问题;另一方面,通过调整撞击速度和整形器的大小,对同种材料试样实现同一常应变率加载,排除材料的应变率效应对实验结果的影响。图 2 给出 PBX-HMX(97%)炸药试样在润滑条件下采用入射波整形技术的实验原始波形,图中通道 1 记录入射波和反射波,通道 2 为透射波。从图 2 中的波形可看出,在 PBX-HMX(97%)炸药试样破坏或材料弱化前(箭头所指处),反射波基本为一平台,说明试样在破坏以前为常应变率加载。图 3 是 PBX-HMX(97%)炸药分别在润滑、干摩擦、粘结三种端面摩擦条件下的实验原始入射波形和反射波形,三种端面条件下的反射波形基本重合,说明实验中实现了同种材料试样在不同端面摩擦条件下同一常应变率加载的要求。

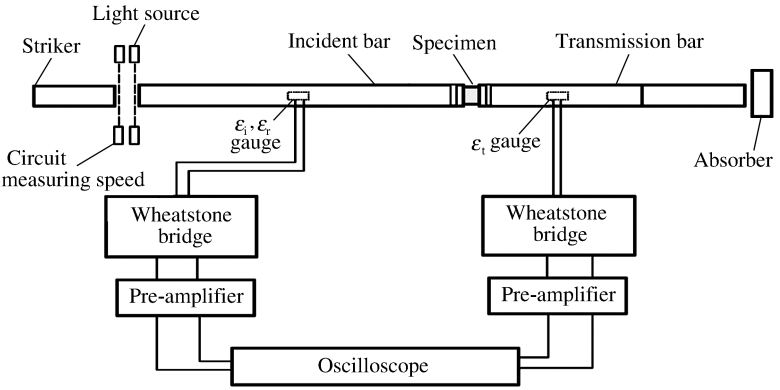


图 1 SHPB 实验装置示意图
Fig. 1 Schematic of the SHPB set-up

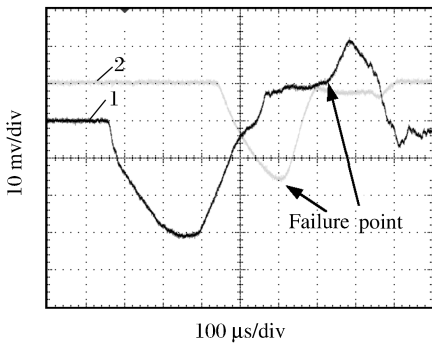


图 2 润滑条件下的实验原始波形

Fig. 2 Oscilloscopic records under lubrication conditions

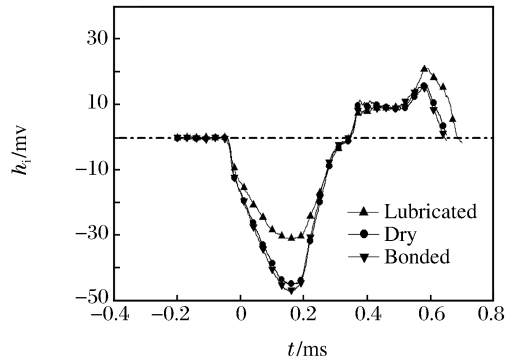


图 3 三种端面条件下的入射、反射波形
Fig. 3 Incident and reflected waves under three interfacial conditions

3 实验结果

图 4 至图 8 是五种材料试样分别在三种端面摩擦条件下的实验结果,图中数据点对应实验原始数据,曲线由实验数据点的多次多项式拟合而得。

从这五种材料试样的实验结果可看出, SHPB 实验中的端面摩擦效应与材料性质相关。硅橡胶和聚氨酯泡沫同属于软材料,但是聚氨酯泡沫材料试样几乎不受端面摩擦效应的影响,而硅橡胶试样是五种材料试样中端面摩擦效应影响最大的,粘结条件下的最高应力几乎是端面润滑条件下最高应力的 9 倍。端面摩擦效应对 Comp. B 和 PBX-HMX(97%)两种炸药试样的失效力和失效应变都有影响。对于 6061-T6 铝合金,由于没有找到强度很高,可以约束铝合金变形的粘接剂,只进行了二硫化钼润滑和干摩擦两种端面条件的实验,从图 8 可看出,干摩擦条件下铝合金的屈服应力明显提高。

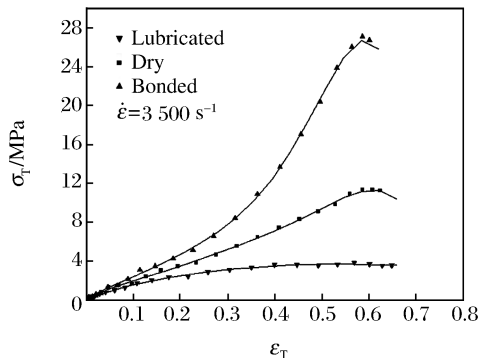


图 4 硅橡胶在不同端面摩擦条件下的真实应力应变曲线

Fig. 4 True stress-strain curves of rubber under three interfacial conditions

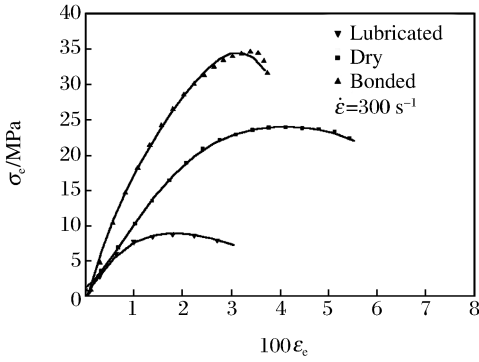


图 5 Comp. B 炸药在不同端面摩擦条件下的工程应力应变曲线

Fig. 5 Engineering stress-strain curves of Comp. B under three interfacial conditions

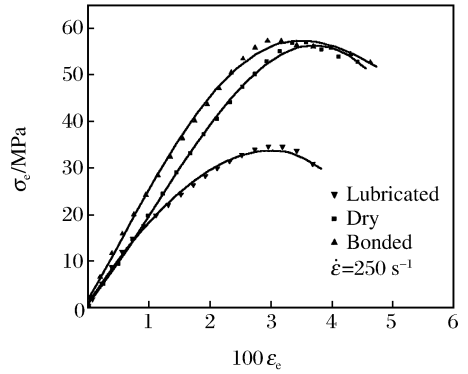


图 6 PBX-HMX 炸药在不同端面摩擦条件下的工程应力应变曲线

Fig. 6 Engineering stress-strain curves of PBX-HMX under three interfacial conditions

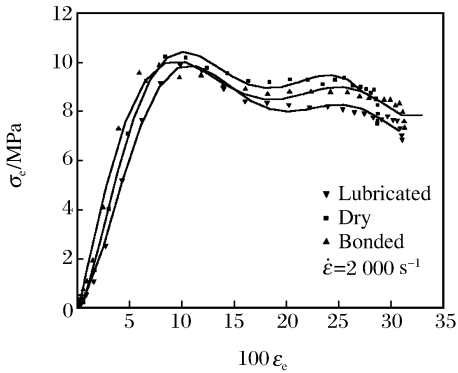


图 7 聚氨酯泡沫在不同端面摩擦条件下的工程应力应变曲线

Fig. 7 Engineering stress-strain curves of foam under three interfacial conditions

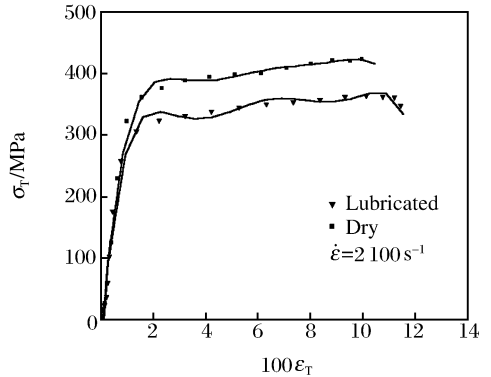


图 8 铝合金在不同端面摩擦条件下的真实应力应变曲线

Fig. 8 True stress-strain curves of aluminum alloy under three interfacial conditions

4 端面摩擦效应机理探讨

基于各向同性弹性理论,运用能量守恒法对 SHPB 实验中端面摩擦效应机理进行了初步探讨。图 9 表示存在端面摩擦时试样的变形过程(由于实验中所用试样为圆柱形,在这里采用柱坐标)。原始试样长 l ,直径 d ,试样总体积为 Ω 。由图 9(b)可知存在端面摩擦时,试样变形不再均匀。由于存在端面摩擦时,试样内受力情况很复杂,存在多个应力分量,不满足一维假定。为了便于分析,做以下简化假定:

(1) 试样受力变形过程中,只在端面附近的一区域受端面摩擦影响,称之为不均匀变形区,宽度为 Δl ,体积为 Ω' ;区域 $l-2\Delta l$ 为均匀变形区。

(2) 在不均匀变形区 Δl 内,只考虑轴向应力和端面剪切力。假定端面处的轴向应力为 $\bar{\sigma}_z$,是实验中所测得的应力。而 Δl

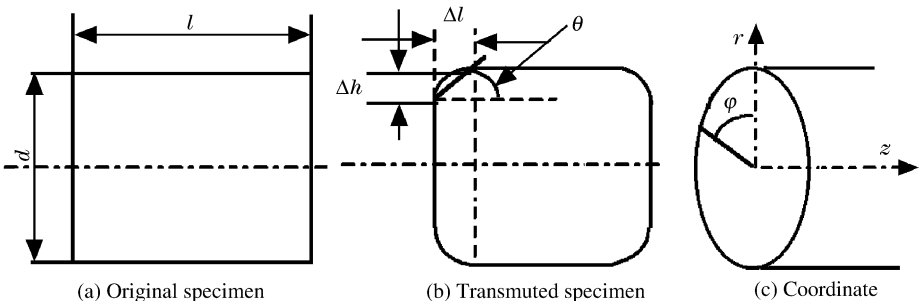


图 9 存在端面摩擦时的试样变形图

Fig. 9 Schematic diagrams of transmuted specimens under the interfacial friction conditions

内部的轴向应力为 $\sigma_0 (= E \epsilon_z)$, 是不存在端面摩擦时试样内真实的一维轴向应力, 同时假定由于端面摩擦而引起的剪切力 τ_{rp} 在整个 Δl 内均匀分布, 为一常数, $\tau_{rp} = \mu \bar{\sigma}_z$ 。

(3) SHPB 实验是动态实验, 试样变形过程中不考虑它与外界的热交换, 认为是绝热过程, 外力所做的功, 一部分将变成动能, 一部分将变成应变能。

(4) 对于同种材料, 在不同端面摩擦条件下试样的动能相等。如图 10 所示, 在端面摩擦效应明显的材料试样的实验结果中, 在相同的应变增量 $\Delta \epsilon$ 内, 存在端面摩擦时, 试样内的能量比润滑条件下的多出 ΔE 。由假定三, 可认为由于端面摩擦的存在, 摩擦力对试样做功, 造成试样内动能和应变能增加。由于实验中对同种材料试样实现同一常应变率加载, 另外, 上面假定均匀变形区的应力状态与润滑条件下的一样, 不均匀变形区只在端面附近, 区域宽度小, 所以这里忽略不均匀变形区中由于试样质点速度的变化而带来的动能变化, 认为不同端面摩擦条件下, 试样的动能相等, 端面摩擦力所做的功全部转变为试样的应变能。

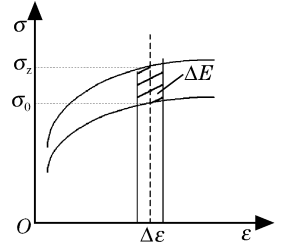


图 10 端面摩擦下能量示意图
Fig. 10 Energy change with interfacial frictions

存在端面摩擦的情况下, 试样变形过程中内部储存的应变能 U 由两部分组成: 一部分是由于轴向应变 ϵ_z 带来的轴向应变能, 记为 U_ϵ ; 一部分是由于端面摩擦的存在, 产生的剪切力 τ_{rp} 作用引起剪切应变 γ_{rp} 所带来的剪切应变能, 记为 $U_\gamma, U_\gamma = \Delta E$, 试样中的应变能可写为

$$U = U_\epsilon + U_\gamma \tag{1}$$

$$U = \iiint_{\Omega} \frac{1}{2} \bar{\sigma}_z \epsilon_z d\Omega \quad U_\epsilon = \iiint_{\Omega} \frac{1}{2} \sigma_0 \epsilon_z d\Omega \quad U_\gamma = 2 \iiint_{\Omega'} \frac{1}{2} \tau_{rp} \gamma_{rp} d\Omega' \tag{2}$$

根据线弹性理论

$$\gamma_{rp} = \frac{\tau_{rp}}{G} = \frac{2\mu(1+\nu)\bar{\sigma}_z}{E} \tag{3}$$

式中: G 为材料的剪切模量, E 为材料的弹性模量, ν 为材料的泊松比。在不均匀变形区内, 假定在变形不大的情况下

$$\tan\theta = \gamma_{rp} \tag{4}$$

存在端面摩擦时, 忽略端面的径向变形

$$\tan\theta = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{\nu \epsilon_z d}{2 \Delta l} \tag{5}$$

把式(3)、(5)代入式(4), 可得到不均匀变形区的宽度

$$\Delta l = \frac{\nu d \sigma_0}{4\mu(1+\nu)\bar{\sigma}_z} \tag{6}$$

至于不均匀变形区的体积 Ω' , 运用圆台体积公式, 可得

$$\Omega' = \frac{1}{3} \pi \frac{d^2}{4} [1 + (1 + \nu \epsilon_z) + (1 + \nu \epsilon_z)^2] \frac{\nu d \sigma_0}{4\mu(1+\nu)\bar{\sigma}_z} \tag{7}$$

试样的总体积

$$\Omega = \frac{1}{4} \pi d^2 l \tag{8}$$

把式(2)、(3)、(7)、(8)代入式(1), 可得

$$\bar{\sigma}_z \left\{ 1 - \frac{\nu \nu d}{3l} [1 + (1 + \nu \epsilon_z) + (1 + \nu \epsilon_z)^2] \right\} = \sigma_0 \tag{9}$$

式(9)即为 SHPB 实验中, 端面摩擦效应的理论分析所得公式。从式(9)可看出, 端面摩擦效应的影响与材料性质关系很大, 端面摩擦系数 μ 、材料泊松比 ν 、试样的长径比 l/d 以及实验中轴向应变 ϵ_z 的大小是其主要影响因素。对于同种材料试样, 端面摩擦条件不同时, 端面摩擦系数是摩擦效应影响大小的决定因素。对于不同材料性质的试样, 如果某种材料的泊松比大, 在实验中它与压杆之间的端面摩擦系数大, 轴向应变大, 而试样长径比小, 则该材料在 SHPB 实验中的端面摩擦效应影响较大。

5 实验结果分析

五种材料试样的实验结果表明, SHPB 实验中端面摩擦效应与材料性质相关, 下面对这五种试样的实验结果进行初步分析。

对 Comp. B 炸药与 PBX-HMX(97%) 炸药, 根据它的小变形力学特性可定义为脆性材料, 它们有效应力应变曲线大部分处于弹性变形阶段(见图 5、图 6), 较满足公式(9), 下面应用式(9)所得结论对这两种炸药试样的端面摩擦效应作简单分析。Comp. B 与 PBX-HMX(97%) 都是由炸药颗粒与粘接剂粘结而成, 其中炸药颗粒属于弹脆性材料, 高分子粘接剂可承受较大变形, 表现为粘弹性, 二者结合使其力学特征表现为小变形和粘弹性。文献[5]中认为具有粘弹性的材料在接触中摩擦力来自粘附摩擦和滞后摩擦, 粘附是一个接触问题, 粘附摩擦力的大小与两表面的接触面积成正比。在压缩变形中, 随负荷的增加而产生的横向变形使材料与摩擦表面的粘接密度增加, 从而使摩擦力增加, 特别对于干摩擦情况, 实际接触面积的大小是决定摩擦系数的重要因素。所以在两种炸药的受力变形过程中, 端面摩擦系数逐渐增大。另外, Comp. B 炸药的泊松比 $\nu=0.34$, PBX-HMX(97%) 炸药的泊松比 $\nu=0.24$ [6]。笔者认为, 泊松比和端面摩擦系数是使两种炸药试样端面摩擦效应明显的主要影响因素。

从两种炸药比较来看, Comp. B 炸药的端面摩擦效应比 PBX-HMX(97%) 炸药的明显。这是因为, 首先, Comp. B 炸药的泊松比比 PBX-HMX(97%) 炸药的大; 其次, 文献[7]表明, 在高应变率下, PBX-HMX(97%) 炸药中的炸药颗粒和聚合物基体的性能同时对材料的本构响应发挥作用, 而 Comp. B 炸药主要由聚合物基体的力学性能控制本构响应, 其粘弹性特征比 PBX-HMX(97%) 炸药的明显。由此推断, 在 Comp. B 炸药端面摩擦实验中, 端面摩擦系数变化比 PBX-HMX(97%) 炸药实验中的端面摩擦系数变化大。两影响因素相结合, 体现为 Comp. B 炸药端面摩擦效应比 PBX-HMX(97%) 炸药的明显。

聚氨酯泡沫几乎不受端面摩擦影响, 这与其材料结构以及在动态冲击载荷下的破坏机制有关。聚氨酯泡沫属多孔介质, 抗压抗剪能力都极低, 在动态冲击载荷下, 材料的破坏主要是基体材料的脆裂以及胞体结构的塌陷。泡沫材料一旦受挤压, 孔穴发生坍塌, 破坏开始出现, 压缩过程中几乎不产生明显横向膨胀(有效泊松比几乎为 0), 端面摩擦几乎没有影响。所以泊松比接近于零是聚氨酯泡沫在 SHPB 实验中不受端面摩擦影响的决定因素。

硅橡胶是五种材料试样中端面摩擦效应影响最大的材料, 这与其特殊的材料力学性能密不可分。硅橡胶是一种典型高聚物, 高聚物力学性能的最大特点是高弹性和粘弹性。由于硅橡胶的高弹性, 在外力作用下弹性形变大, 在前面实验中, 硅橡胶轴向应变达到 0.6。另外, 对橡胶类高聚物, 在单向拉伸和压缩时, 体积改变相对其形状改变可忽略, 可近似看作不可压缩材料, 它们的泊松比接近 0.5, 实验中所用的硅橡胶泊松比为 0.47。与前面两种炸药相似, 硅橡胶所具有的粘弹性本质决定了其在干摩擦实验中, 摩擦系数随橡胶横向变形的增大而增大, 这与实验中(见图 4)应力幅值随轴向应变的增大变化越来越快的实验结果相符。另外, 由于硅橡胶属于软材料, 波阻抗低, 为了满足 SHPB 实验要求, 实验中选取试样长径为 0.29。这几个因素综合影响使硅橡胶在 SHPB 实验中受端面摩擦效应影响最大。

至于 6061-T6 铝合金端面摩擦效应表现为屈服应力提高, 可能是因为金属之间的摩擦主要发生在塑性变形阶段。焊合剪切摩擦理论[8]认为, 当两金属接触表面相互压紧时, 它们只在微凸体的顶端接触, 由于接触面积很小, 微凸体上压力很高, 足以引起塑性变形和冷焊现象。如果这样形成的焊合点因表面的相对滑动而被剪断时, 这部分力就称为摩擦力。该理论说明, 在 6061-T6 铝合金 SHPB 干摩擦实验中, 只有当其表面发生塑性变形时端面摩擦才会形成, 摩擦力的影响才会体现。

对对五种材料试样端面摩擦效应结果的分析, 初步认为, 材料在 SHPB 实验中端面摩擦效应的大小与材料力学性能、摩擦机理及破坏机制相关, 具有粘弹性、泊松比大、轴向应变大, 而试样长径比小的材料在 SHPB 实验中端面摩擦效应明显。

6 结束语

对硅橡胶、聚氨酯泡沫、Comp. B 炸药、PBX-HMX(97%) 炸药、6061-T6 铝合金五种材料试样进行

了端面摩擦效应实验。结果表明, SHPB 实验中端面摩擦效应与材料性质相关。同时基于各向同性弹性理论, 运用能量守恒法对端面摩擦机理进行了初步探讨, 认为具有粘弹性质、材料泊松比大、轴向应变大, 而试样长径比小的材料在 SHPB 实验中端面摩擦效应明显。应该指出本文中对端面摩擦效应机理的探讨是初步的, 假定中试样材料性质及受力情况与真实情况存在差异, 工作有待完善。

参考文献:

- [1] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. Proc. of Phys. Soc., 1949, 62(B): 676-700.
- [2] Bell J F. An experiment diffraction grating study of the quasi-static hypothesis of the split Hopkinson bar experiment [J]. Journal of Mech. Phys. Solids, 1966, 14: 309-327
- [3] 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.
- [4] Malinowski J Z, Klepaczko J R. Dynamic frictional effects as measured from the split Hopkinson pressure bar[A]. High velocity deformation of solids [C]. Berlin: Springer, 1978: 403-416.
- [5] 王贵一. 橡胶的摩擦及试验[J]. 特种橡胶制品, 2000, 21(3): 55-62.
WANG Gui-yi. Friction and testing of rubbers[J]. Special Purpose Rubber Products, 2000, 21(3): 55-62.
- [6] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及其相关物性[M]. 北京, 科学出版社, 1989.
- [7] 卢芳云, 吴会民, 王晓燕, 等. 两种炸药材料本构行为的应变率效应分析[A]. 2004 年全国含能材料发展与应用学术研讨会[C]. 厦门, 2004: 280-285
- [8] 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.

Study on interfacial friction effect in the SHPB tests

WANG Xiao-yan^{*1,2}, LU Fang-yun^{1,2}, LIN Yu-liang¹

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

2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Interfacial friction effects between specimens and bars in SHPB technique were studied. Five materials with different features, silicon rubber, polyurethane foam, Comp. B explosive, PBX-HMX (97%) polymer bonded explosive and 6061-T6 aluminum alloy, were chosen as specimens. Experimental results show that interfacial friction effects in SHPB tests are related with the tested material properties. Based on the isotropic elastic hypothesis, a theoretic analysis is made on an energy conservation consideration. The reduced theoretic formulations show that material Poisson's ratio, interfacial friction coefficient, length-to-diameter ratio of the specimens and axial strains are four influent factors for the friction effects.

Key words: solid mechanics; interfacial friction effect; SHPB experiment; material properties; energy conservation

* Corresponding author: WANG Xiao-Yan
E-mail address: wxy_7846@163.com
Telephone: 0816-2493325