

文章编号: 1000-5773(2004)03-0231-06

入射波整形技术的实验和理论研究^{*}

赵习金^{1,2,3}, 卢芳云^{1,2}, 王 悟¹, 李英华¹, 林玉亮²

(1. 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;

2. 国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073; 3. 解放军汽车管理学院, 安徽蚌埠 233011)

摘要:在硅橡胶材料的分离式霍普金森压杆实验中, 实验研究了如何实现常应变率加载, 并且得到了整形器尺寸与加载应变率之间, 以及加载应变率与试样厚度之间的定量关系。根据预估入射波形的理论模型, 给出了采用 H62 黄铜整形器整形后入射波形的计算结果和实验结果, 二者基本上是一致的。

关键词:入射波; 整形技术; 分离式霍普金森压杆; 常应变率

中图分类号: O347.3; O385

文献标识码: A

1 引言

硅橡胶材料中的波速很低, 即使对于很薄的试样, 波在试样中传播所需要的时间也比较长。G. Ravichandran 等^[1]的研究表明, 加载波在试样中来回反射三次以上才可以达到试样中应力平衡的要求。所以在相当长的时间内, 试样处于应力不均匀状态, 此时在数据处理中经常采用的应力均匀性假定不再成立, 而这是分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, 简称 SHPB)实验方法的前提。因此对于硅橡胶材料, 运用传统的 SHPB 技术不能够获得准确可靠的实验结果。于是, 入射波整形技术被提出来了。

入射波整形技术最初用来过滤加载波中由于直接碰撞而引起的高频分量, 从而减小波传播过程中的弥散效应^[2]。通过在撞击杆前端的中心位置粘贴一个组合型的整形器, 可以达到改善入射波形的效果。在实验中, 入射波整形技术主要用来保证实验时试样中的应力平衡和变形均匀, 以及实现常应变率加载。应变率是界定材料动态性能的一个关键参量, 在以往的 SHPB 实验中对试样的常应变率加载问题一直未能引起足够的关注。入射波经过整形以后, 通过合理的整形器设计, 可以很方便地获得常应变率加载^[3]。

在实验中, 通过适当地调整加载条件, 所有实验都获得了近似常应变率加载, 并且得到了加载应变率与整形器直径之间, 以及加载应变率与试样厚度之间的定量关系, 这对今后进行这类软材料高应变率的动态压缩实验有一定的参考和指导意义。但是实验中要得到常应变率加载, 仍需要进行实验尝试。D. J. Frew 等^[4]讨论了脆性材料 SHPB 实验中整形器的设计, 可以很好地指导脆性材料的 SHPB 实验。根据预估入射波形的理论模型, 本研究给出了黄铜 H62 整形器的拟合函数关系及具体参数的值, 并且进行了多组计算, 计算结果与实验结果基本上是一致的。

2 入射波整形技术的实验研究

实验是在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国防科技重点实验室完成

^{*} 收稿日期: 2003-08-22; 修回日期: 2004-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(10172092); NASF 联合基金(10276038);
国防科技重点实验室基金(51478030201-KG0103)

作者简介: 赵习金(1975—), 男, 硕士, 主要研究方向为材料的动态力学性能。

E-mail: zxxj@sohu.com

的, SHPB 实验装置的简图如图 1 所示。压杆的材料为 LC4 铝合金, 撞击杆、输入杆和输出杆的直径都是 14.5 mm, 撞击杆的长度为 113 mm, 输入杆和输出杆的长度均为 793 mm。压杆的弹性模量 $E=71$ GPa, 密度 $\rho=2.85$ g/cm³, 泊松比 $\mu=0.31$ 。试样的材料是硅橡胶, 密度 $\rho=1.18$ g/cm³。针对直径为 14.5 mm 的压杆, 将试样加工成直径为 10 mm、端面平行度小于 10 μ m 的薄圆柱形, 试样的厚度分别为 2.1 mm、3.4 mm 和 4.8 mm。

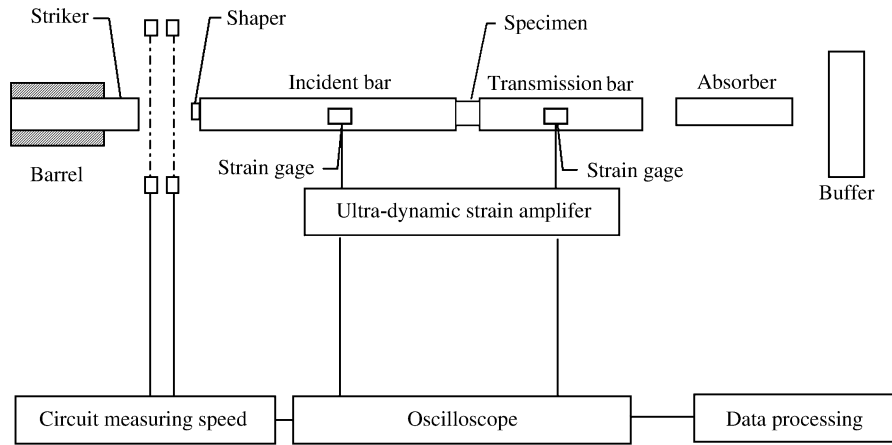


图 1 霍普金森压杆实验装置简图

Fig. 1 The schematic of split Hopkinson pressure bar setup

实验中一般采用黄铜来作为整形器材料, 但对于像硅橡胶这类特别软的材料, 仅用一个整形器对波形的改善效果仍不能满足试样中变形均匀和应力平衡的要求。为了进一步延长加载波形的上升时间, 实验时采用了组合型的整形器, 即在较大尺寸的黄铜整形器的基础上, 再叠加一个由硅橡胶制成的更小的整形器。

我们知道, 反射波形反映了应变率的状态, 平的反射波形意味着常应变率加载。传统的 SHPB 实验技术中由于子弹直接撞击加载, 所得入射波形是一不可调的方波, 反射波的波形由于受入射波和透射波的制约, 也是不可调的。因此很难有效地控制加载过程的应变率情况, 尤其是获得常应变率状态。实验中根据反射波形的情况, 需要合理地调整加载速度, 以保证反射波是一个平台波, 从而实现常应变率加载。具体来说, 如果反射波从第一拐点处继续爬升, 需要降低加载速度; 相反, 如果反射波从第一拐点处开始下降, 则需要增加撞击速度, 最终实现反射波持续一平台过程。图 2 给出了按照这一设计思想进行常应变率加载的实现过程。其中, 整形器的直径不变, 通过调整加载速度使得反射波接近于平台, 图中当速度为 7.9 m/s 时实现了常应变率加载。

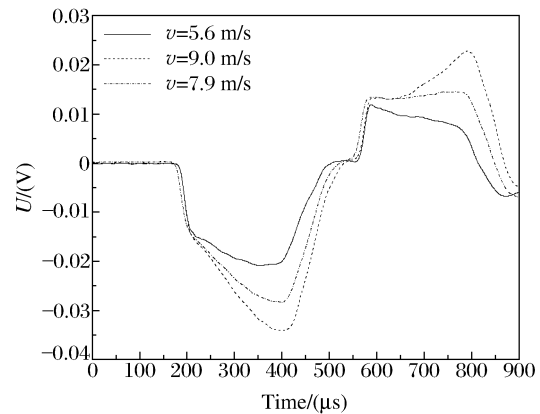


图 2 常应变率加载的实现过程

Fig. 2 The process of loading under constant strain rate

实验中, 首先不加整形器进行直接加载; 然后再粘贴上组合型整形器进行加载。图 3 给出了硅橡胶试样未加整形器和加了组合型整形器后的原始入射波形和反射波形。从图 3 中可以清楚地看出, 加了整形器以后, 原来加载波中由于直接碰撞引起的高频分量已经被过滤了, 这样减少了波在长距离传播中的弥散失真; 另外, 加了整形器以后, 入射波的上升前沿变得平缓, 上升时间明显增加, 从而保证了试样中应力和变形的均匀性。同时, 反射波基本上是一个平台波, 这表明实验中实现了常应变率加载。

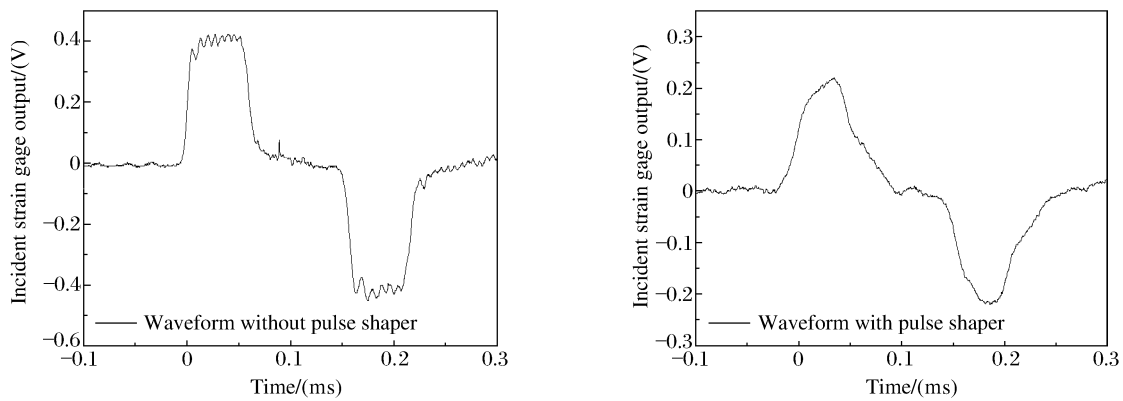


图3 整形前后入射和反射波形的比较

Fig. 3 Incident and reflect waveform without pulse shaper and with pulse shaper

针对三种尺寸的硅橡胶试样进行了实验,试样的直径均为 10 mm,厚度分别为 2.1 mm、3.4 mm 和 4.8 mm。根据软材料的试样尺寸设计原则^[5],重点针对 2.1 mm 厚度的试样改变整形器的直径(3.5~10.5 mm)做了一系列实验,对每一直径的整形器通过适当地调整加载速度,都获得了常应变率加载,应变率从 $1\,000 \sim 4\,000\text{ s}^{-1}$,并且从中得到了整形器直径与加载应变率之间的定量关系,图 4 直观地表达整形器直径和应变率值之间的关系。图中实心圆代表实验结果,直线是线性拟合的结果,拟合公式为: $\dot{\epsilon} = -462.9 + 434.4D_s$, 式中 D_s 表示整形器的直径,单位为 mm。从图 4 中容易看出:对同一尺寸的试样来说,动态加载过程中所达到的应变率与整形器(同一种材料)直径之间基本上成线性增长的关系。以上只考虑了同一尺寸的试样,对于不同尺寸的试样,也有类似的结论:对于不同尺寸的试样,动态加载过程中应变率和试样厚度的乘积与整形器(同一种材料)直径之间基本上成线性增长的关系;整形器直径相同时,试样厚度与应变率的乘积基本上是不变的^[6]。

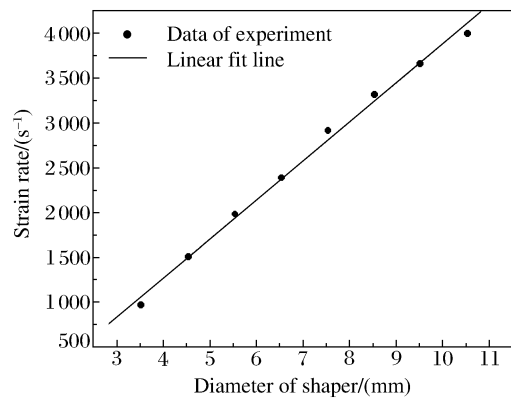


图4 整形器直径与应变率的关系

Fig. 4 The relationship between the diameter of pulse shaper and strain rate

另外,为了研究应变率与试样厚度之间的关系,对于同一直径的整形器,分别针对三种厚度的硅橡胶试样做了常应变率实验。实验结果表明:对于同一直径的整形器,试样的厚度越大,相应的应变率值越低,具体两者之间成反比关系,这与 SHPB 实验的理论结果是相一致的。

3 入射波整形技术的理论研究

在 SHPB 实验中,入射波形的设计对常应变率加载至关重要。虽然通过实验合理地设计入射波形,可以达到常应变率加载,但是在实验中要得到常应变率加载,仍需要进行多次尝试。如果实验前能够预估出入射波形,那么便可以减少实验的尝试,从而有效地指导设计 SHPB 实验。根据 D.J. Frew 等建立的单个整形器整形以后入射波形的理论预估模型,加载阶段和卸载阶段的入射应力分别计算如下

$$\text{加载时} \quad \sigma_i(t) = \frac{a_0}{A[1 - \epsilon_p(t)]} \sigma_p(t) = \frac{\sigma_0 a_0}{A} \cdot \frac{f(\epsilon_p)}{1 - \epsilon_p(t)} \quad (1)$$

$$\text{卸载时} \quad \sigma_i(t) = \frac{a_0}{A[1 - \epsilon_p(t)]} \sigma_p(t) = \frac{a_0}{A[1 - \epsilon_p(t)]} \{ \sigma_p^* - E_p[\epsilon_p^* - \epsilon_p(t)] \} \quad (2)$$

式中: $\sigma_p = \sigma_0 f(\epsilon_p)$, 为加载时整形器材料的应力应变函数关系, σ_0 为整形器的实验拟合常数; $\sigma_p = \sigma_p^* - E_p(\epsilon_p^* - \epsilon_p)$, 为卸载时整形器的应力应变关系, 其中 σ_p^* 和 ϵ_p^* 分别是卸载时刻的应力和应变, E_p 为整形器材料的弹性卸载模量; a_0 和 A 分别为整形器的初始横截面积和入射杆的横截面积。

因此, 要得到应力时程曲线 $\sigma_i(t)$, 首先必须要计算出加载和卸载时整形器的应变时间函数 $\epsilon_p(t)$ 。根据一维弹性应力波的传播理论可以导出, 加载时 $[n\tau, (n+1)\tau]$ 时段内的应变率时间函数为

$$\frac{h_0}{v_0} \dot{\epsilon}_p(t) = 1 - K \frac{f[\epsilon_p(t)]}{1 - \epsilon_p(t)} - K \left[\frac{f[\epsilon_p(t - \tau)]}{1 - \epsilon_p(t - \tau)} + \dots + \frac{f[\epsilon_p(t - n\tau)]}{1 - \epsilon_p(t - n\tau)} \right] \quad (3)$$

式中: $K = 2\sigma_0 a_0 / \rho c A v_0$, $\tau = 2L/c$, h_0 、 L 分别表示整形器的初始厚度和撞击杆的长度, ρ 、 c 分别为杆材料的密度和声速, v_0 为撞击速度。

如果整形器在 $[n\tau, (n+1)\tau]$ 范围内某一时刻 t^* 处开始卸载, 整形器在 $[n\tau, (n+1)\tau]$ 时段内的应变率时间函数需要分段表示, 分别按下述两式进行计算

$$\begin{aligned} \frac{h_0}{v_0} \dot{\epsilon}_p(t) = & 1 - K \left[\frac{\sigma_p^* - E_p[\epsilon_p^* - \epsilon_p(t)]}{\sigma_0[1 - \epsilon_p(t)]} + \dots + \frac{\sigma_p^* - E_p\{\epsilon_p^* - \epsilon_p[t - (n-2)\tau]\}}{\sigma_0\{1 - \epsilon_p[t - (n-2)\tau]\}} \right] - \\ & K \left[\frac{f[\epsilon_p[t - (n-1)\tau]]}{1 - \epsilon_p[t - (n-1)\tau]} + \frac{f[\epsilon_p(t - n\tau)]}{1 - \epsilon_p(t - n\tau)} \right] \quad n\tau \leq t < (n-1)\tau + t^* \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{h_0}{v_0} \dot{\epsilon}_p(t) = & 1 - K \left[\frac{\sigma_p^* - E_p[\epsilon_p^* - \epsilon_p(t)]}{\sigma_0[1 - \epsilon_p(t)]} + \dots + \frac{\sigma_p^* - E_p\{\epsilon_p^* - \epsilon_p[t - (n-1)\tau]\}}{\sigma_0\{1 - \epsilon_p[t - (n-1)\tau]\}} \right] - \\ & K \frac{f[\epsilon_p(t - n\tau)]}{1 - \epsilon_p(t - n\tau)} \quad (n-1)\tau + t^* \leq t < (n+1)\tau \quad (5) \end{aligned}$$

分别根据上述加载和卸载段内的应变率时间函数, 将等式左边化为差分形式, 通过迭代求解出相应时段内整形器中的应变时间函数, 然后通过(1)式和(2)式, 便可以计算出入射应力。

通过上述应变计算模型可以看出, 要计算出应变时间函数 $\epsilon_p(t)$, 还需要知道整形器材料的应力应变函数以及一些参数的值。实验中取不同厚度的整形器, 以不同的速度撞击。实验后根据每一个整形器的变形, 算出相应的工程应变 ϵ_p 。另外通过测量出入射波形的最高幅值, 计算最大入射应力, 从而可以计算出相应的 σ_p 值: $\sigma_p = A(1 - \epsilon_p)\sigma_i/a_0$ 。对于 H62 黄铜整形器, 用函数 $\sigma_p = \sigma_0 f(\epsilon_p) = \sigma_0 \epsilon_p^n / (1 - \epsilon_p^m)$ 来拟合这组应力应变值, 拟合的结果如图 5 所示, 图中的数据点为实验结果, 实线是拟合曲线, 相应的拟合参数 σ_0 、 m 和 n 分别为 650 MPa、4.5 和 0.12。图 6 给出了 H62 黄铜三种应变率下的应力应变曲线, 根据卸载段的情况可以得到 H62 黄铜的弹性卸载模量 E_p 为 102 GPa。

根据拟合得到的应力应变函数和具体参数的值, 针对使用的 H62 黄铜整形器进行了多组计算。图 7 给出了两组计算结果和实验结果的比较, 左图中黄铜整形器的直径为 4.5 mm, 撞击速度为 7.3 m/s; 右图中黄铜整形器的直径为 6.5 mm, 撞击速度为 10.5 m/s。

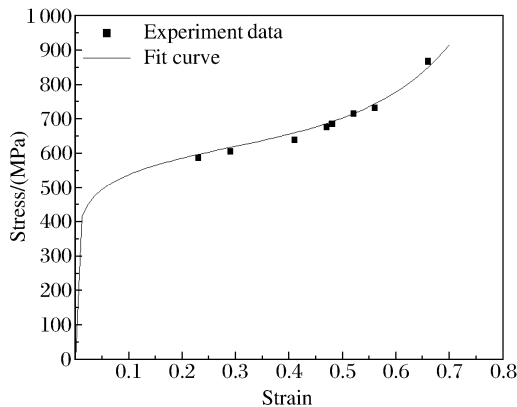


图 5 H62 黄铜的实验数据和拟合曲线

Fig. 5 Data and fit curve of H62 brass

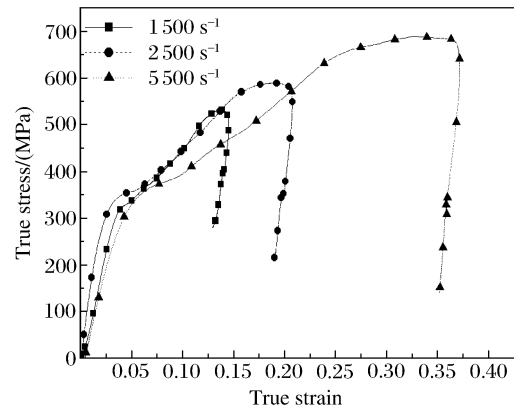


图 6 H62 黄铜的动态压缩应力应变曲线

Fig. 6 Dynamic $\sigma\epsilon$ curves of H62 brass

从图 7 中可以看出,对于同一材料的整形器,直径越大,整形后入射波形第一拐点处的值越大;撞击速度越大,入射波形的峰值也越大。计算结果与实验结果都反映了这一主要特征,并且两者在相应关键点处的值基本上也是一致的。为了进一步验证这一理论模型的准确性和可靠性,表 1 给出了 H62 黄铜整形器整形以后,最大入射应力及整形器的相关数据实验结果与理论预估值的比较。结果表明,计算结果基本上反映了实验的真实情况,上面的理论预估模型是准确、可靠的。

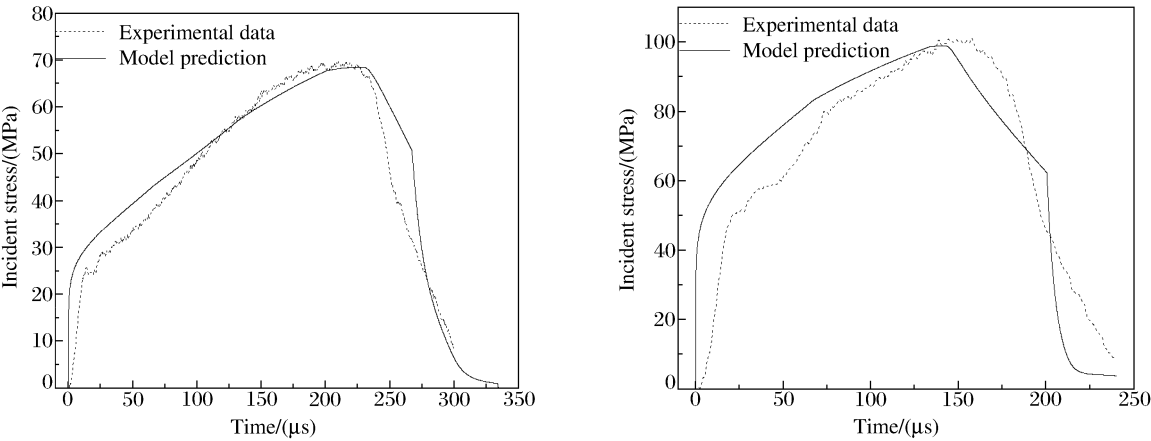


图 7 H62 黄铜整形器整形后入射波形计算结果和实验结果的比较
Fig. 7 Comparison of the results between computation and experiment

表 1 H62 黄铜整形器实验数据与理论预估值的比较
Table 1 Comparison of the results between computation and experiment

Impact velocity /(m/s)	Initial diameter /(mm)	Initial thickness /(mm)	Final* diameter /(mm)	Final* thickness /(mm)	The strain* of shaper	The maximum* incident stress /(MPa)
10.53	6.48	2.50	7.71/7.67	1.75/1.78	0.300/0.287	101.0/100.5
14.46	10.46	2.46	11.79/11.66	1.96/1.98	0.203/0.195	188.5/189.6
11.43	6.42	2.52	7.82/7.83	1.69/1.69	0.329/0.328	106.2/105.4
14.29	10.32	2.44	11.32/11.52	1.96/1.96	0.197/0.197	185.6/185.2
10.62	6.44	2.56	7.68/7.61	1.81/1.84	0.293/0.283	98.5/98.4
14.63	10.36	2.48	11.66/11.5	1.98/1.97	0.202/0.193	196.2/197.4
11.54	6.48	2.42	7.88/7.93	1.66/1.62	0.314/0.331	107.8/109.2
14.32	10.44	2.42	11.75/11.68	1.94/1.94	0.218/0.198	188.6/187.4

Note: * — Experimental results/computational results.

4 结 论

采用入射波整形技术后,获得的入射波形具有较长的上升时间,且上升前沿平缓,从而保证了硅橡胶试样在实验过程中处于应力平衡和变形均匀的状态。改变整形器的直径,通过适当地调整加载速度,获得了常应变率加载,并且得到了加载应变率与整形器直径之间以及加载应变率与试样厚度之间的定量关系,这对今后进行软材料高应变率的动态压缩实验有一定的参考和指导意义。根据单个整形器整形以后入射波形的理论预估模型,针对 H62 黄铜整形器,实验得到了它的拟合函数及相关参数。根据这一模型的计算结果与实验结果的比较表明,计算结果能准确地反映实验情况,上面的理论预估模型是可靠的,能够有效地指导设计 SHPB 实验。

References:

- [1] Ravichandran G, Subhash G. Critical Appraisal of Limiting Strain Rates for Compression Testing of Ceramics in a Split Hopkinson Pressure Bar [J]. American Ceramic Society, 1994, 77(1): 263–267.
- [2] Nemat-Nasser S, Isaacs J B, Starrett J E. Hopkinson Techniques for Dynamic Recovery Experiments [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1991, 435(A): 371–391.
- [3] Lu F Y, Chen W, Frew D J. A Design of SHPB Experiments for Soft Materials [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(1): 15–19. (in Chinese)
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.
- [4] 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.
- [5] Lin Y L, Lu F Y. An Analysis of Specimen Size Design for Soft Material in SHPB [A]. The Dissertation Collections of the No. 3 Learned Activity Festival for Graduate Students of National University of Defense Technology [C]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. 343–349. (in Chinese)
林玉亮, 卢芳云. Hopkinson 压杆实验中软材料试样的尺寸设计原则分析 [A]. 国防科技大学第三届研究生学术活动节论文集 [C]. 长沙: 国防科技大学, 2003. 343–349.
- [6] Zhao X J. The Improvement and Applience of SHPB Technique [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
赵习金. 分离式霍普金森压杆实验技术的改进和应用 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.

The Experimental and Theoretical Study on the Incident Pulse Shaping Technique

ZHAO Xi-Jin^{1,2,3}, LU Fang-Yun^{1,2}, WANG Wu¹, LI Ying-Hua¹, LIN Yu-Liang²

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research ,
Institute of Fluid Physics ,CAEP,Mianyang 621900,China ;*

2. *College of Science ,National University of Defense Technology ,
Changsha 410073,China ;*

3. *Automobile Management Institute ,Bengbu 233011,China)*

Abstract: We modified the conventional Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) technique by shaping the incident pulse such that the samples are in dynamic stress equilibrium and in homogeneous deformation during the tests of silicon rubber. According to the method of pulse shaper designing, we had the samples loaded under constant strain rate, and we got the direct relation between the size of pulse shaper and strain rate. A model to predict the incident waveform in the SHPB experiment by use of a single pulse shaper is built according to the theory of stress wave. Incident waveform from experiment and model prediction with H62 brass shaper are obtained. Model predictions are in good agreement with experimental results.

Key words: incident waveform; pulse shaping technique; Split Hopkinson Pressure Bar; constant strain rate