

文章编号: 1001-1455 (2003) 05-0436-06

研究材料动态卸载的一种实验方法*

陶俊林, 张方举, 田常津, 陈裕泽

(中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在 SHPB 实验数据分析的基础上, 提出了用柱锥形弹丸代替纯柱形弹丸研究材料的动态卸载。用所提出的方法对 LF6 铝材的动态加、卸载响应进行了实验研究, 结果表明: 柱锥形弹丸可以有效地延长入射脉冲的卸载段, 可用来研究材料动态卸载行为。

关键词: 固体力学; 实验方法; SHPB; 动态卸载; LF6

中图分类号: O347.1; TB302 国标学科代码: 130°1510 文献标志码: A

1 引言

材料的卸载应力-应变曲线对确定材料的类型是非常重要的, 只有将材料的加载应力-应变曲线与材料的卸载应力-应变曲线结合起来, 才能确定材料是否是弹性材料、弹塑性材料、粘弹性材料、粘塑性材料。

结构和材料强度研究的核心问题之一是: 结构和材料到底能够承受多大的载荷而不失效^[1]。在实际工程和日常生活中, 结构和材料的失效——特别是在静态载荷作用下的失效常是在加载过程中发生的, 但在动态载荷作用下, 结构和材料的大量失效被认为是在加载过程中发生的, 但不少失效却与卸载密切相关, 层裂就是一个典型的例子, 碎甲弹就是利用的这个原理。

随着对材料动态本构关系、动态损伤研究的深入, 人们对动态卸载情况下材料的本构关系及损伤演化规律也逐渐给予了更多的关注。在压缩状态下材料的动态本构关系和损伤研究的材料参数许多是通过 SHPB 实验系统测得的, 研究材料动态卸载本构关系及损伤演化规律也需要相关的材料参数, 因此, 寻找材料动态卸载规律研究的实验方法就显得更加重要。

人们对材料在准静态下的卸载规律以及振动情况的卸载规律已经有较多的研究, 对高压高应变率下材料的动态卸载也有了一定的研究^[1], 但对低压高应变率情况下材料的动态卸载特性的研究还较少。

在本文中, 提出一种利用柱锥形弹丸代替纯柱形弹丸的 SHPB 系统来研究材料动态卸载特性的方法。

2 实验现象分析

在 SHPB 实验中, 金属材料的典型实验波形如图 1 所示^[2-4]。由于人们对动态加载下材料的力学性能更为关心, 在进行材料的动态应

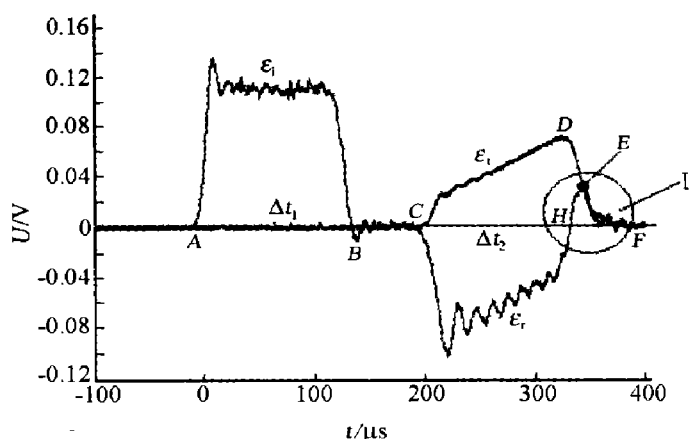


图 1 典型的 SHPB 实验波形

Fig. 1 Typical SHPB experimental waves

* 收稿日期: 2002-08-22; 修回日期: 2003-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(10232040)

作者简介: 陶俊林(1972—), 男, 博士研究生。

力-应变曲线的处理时也只关心加载段,因此,对实验数据往往只取到试件应力值最大的时刻,如图 1 中的 $D(H)$ 点处(透射波的最大值点,也是反射波回零点),对于 D 点以后尤其是 I 区的数据一般未作处理也未加以解释。经分析,认为 I 区的现象应该是由输入脉冲卸载所产生的,通过对该区进一步研究应当可以获得材料动态卸载特性的一些信息。因此,我们对此现象展开了更加深入细致的研究,并由此提出一种可供研究材料动态卸载力学性能的实验方法。

为了对图 1 所示的典型实验波形进行分析,在进行数据处理时,一般采取三个步骤进行,即先进行基本假设检验,再确定求试件应变 $\epsilon_s(t)$ 积分的起点和终点,最后求出材料的应力-应变曲线,并观察其是否具有动态卸载现象。

2.1 基本假设检验

在 SHPB 实验中有两个基本假定,即一维假定和均匀性假定^[5]。由这两个假定可得到以下公式

$$\epsilon_i = \epsilon_t - \epsilon_r \tag{1}$$

式中: ϵ_i 、 ϵ_r 、 ϵ_t 分别是应变片所记录的入射波、反射波和透射波的应变。

因为这两个假定是整个实验系统的基本假定,它对试件的加载与卸载阶段,即应力波作用的整个阶段都是适用的,因此公式(1)无论对于试件加载阶段还是卸载阶段均应成立,这样才能利用相关的公式对实验数据进行正确的处理。在进行卸载的相关研究之前,有必要对实验数据是否满足公式(1)进行检验。公式(1)包含两层意义,一是入射脉冲的宽度 Δt_1 应与 $\epsilon_t - \epsilon_r$ 波形的宽度 t_2 相等;二是各个时刻入射脉冲的幅值 ϵ_i 应与对应时刻的 $\epsilon_t - \epsilon_r$ 波形幅值相等。

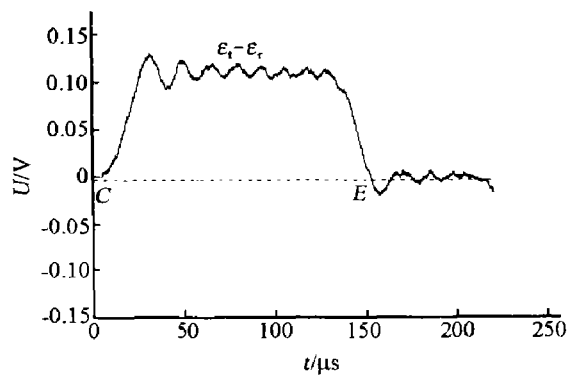


图 2 典型的 $(\epsilon_t - \epsilon_r)$

Fig.2 Typical $(\epsilon_t - \epsilon_r)$ wave

首先,根据入射脉冲的起点 A 与终点 B 求得脉冲宽度 $\Delta t_1 = \Delta t_B - \Delta t_A$,再利用反射脉冲和透射脉冲求得波形 $\epsilon_t - \epsilon_r$ (如图 2 所示),再根据这个波形的起点 C 和终点 E ,求得 $\epsilon_t - \epsilon_r$ 波形的宽度 $\Delta t_2 = \Delta t_E - \Delta t_C$ 。求出 Δt_1 和 Δt_2 的相对误差 $(\Delta t_1 - \Delta t_2) / \Delta t_1$ 的绝对值小于某一个误差限 δ_1 ,则认为 $\Delta t_1 = \Delta t_2$ 。

随后,求出入射脉冲 ϵ_i 和 $\epsilon_t - \epsilon_r$ 波形各个时刻的幅值差的平均值与入射脉冲水平段 ϵ_i 平均值的商,即 $\overline{(\epsilon_i - (\epsilon_t - \epsilon_r))} / \bar{\epsilon}_i$ 。若 $\overline{(\epsilon_i - (\epsilon_t - \epsilon_r))} / \bar{\epsilon}_i$ 小于某一个误差限 δ_2 ,则认为在脉冲宽度内的各个时刻均有 $\epsilon_i = \epsilon_t - \epsilon_r$ 成立。如果这两个条件满足,则满足 SHPB 实验中的两个基本假定。

对铝(LF6)、紫铜、镁铝合金(MB2)的 SHPB 实测波形进行检验时,均发现 $\epsilon_t - \epsilon_r$ 波形与 ϵ_i 波形重叠良好,平均波高基本相同,主要差别在于波形的振荡周期有所变化,高频部分被虑掉(见图 3)。检验结果表明:两个误差限分别取 $\delta_1 = 3\%$, $\delta_2 = 5\%$ 时,实验数据满足基本假定。可以应用公式(2)~(4)进行数据处理。

$$\dot{\epsilon}_s = 2c_0(\epsilon_t - \epsilon_r) / l_0 \tag{2}$$

$$\epsilon_s = \frac{2c_0}{l_0} \int_{t_0}^{t_1} (\epsilon_t - \epsilon_r) dt \tag{3}$$

$$\sigma_s = AE\epsilon_t / A_s \tag{4}$$

式中: c_0 为压杆的弹性波速; l_0 为试件的初始长度; E 为压杆的弹性模量; A 为压杆的横截面积; A_s 为试件的横截面积。

2.2 公式(3)中的积分上、下限的确定

在进行数据处理之前,不妨将入射波、反射波和透射波的起点迭在一起,展示成图 4 所示的情况。

公式(3)中的积分下限可取 $t_0 = t_C$; 入射波的终点 B 与反射波和透射波的第一个交点 E 对应, E 点对应的的时间也就是在数据处理中公式(3)的积分上限, 即 $t_1 = t_E$ 。

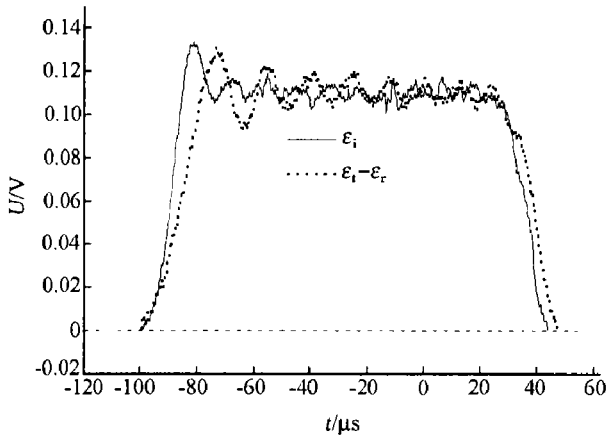


图 3 ϵ_i 与 $\epsilon_i - \epsilon_r$ 的波形比较
Fig.3 Comparison of ϵ_i and $\epsilon_i - \epsilon_r$

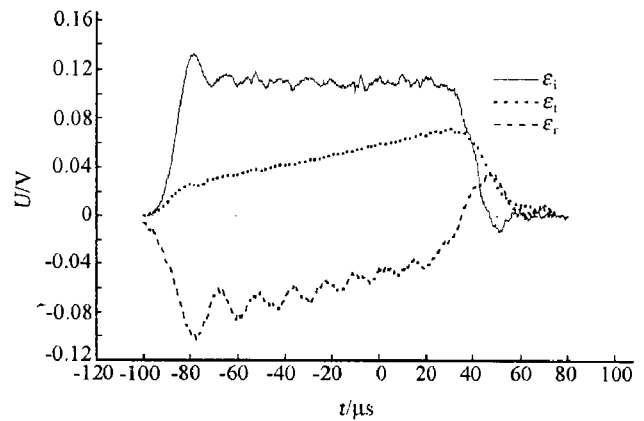


图 4 起点迭在一起的 ϵ_i 、 ϵ_t 、 ϵ_r 波形
Fig.4 The ϵ_i , ϵ_t and ϵ_r which their start points superimposed

2.3 应力-应变曲线

利用公式(2)~(4)对典型实验数据进行处理, 得到如图 5 所示的应力-应变曲线。由公式(1)和(2)可知, 每个时刻试件的应变率与反射波的值成正比, 因此, 反射波可较为直接地反映试件的应变率-时间关系。从图 4 可见, DE 段的反射波与 CD 段的反射波反向, 因此, 图 5 中 DE 段应变减小, 其趋势与准静态实验中的卸载段极为相似。在此, 可认定 DE 段是材料动态卸载所引起的响应。

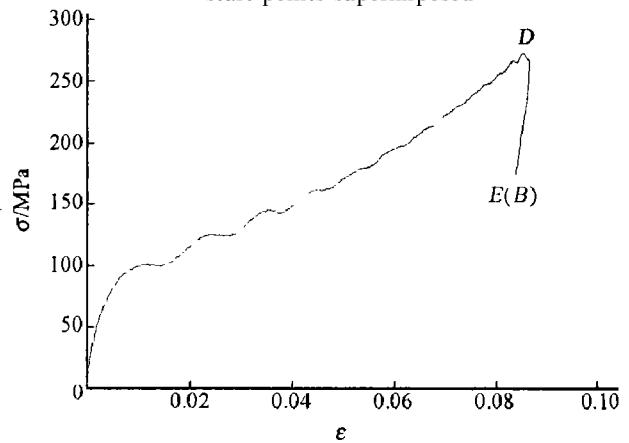


图 5 试件材料的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curve of specimen

3 卸载实验方法研究

3.1 实验研究系统

常规的 SHPB 实验系统所能获得的卸载段 DE 是较短的, 由图 4 可知 $t_D - t_E$ 约为 $10 \mu s$, 这是由于入射波的卸载段较短所造成的, 为了获得材料较为丰富的卸载响应信息, 有必要加长入射波卸载段的长度。为此, 利用柱锥形弹丸代替平头柱形弹丸来加长入射波卸载段的长度。

用柱锥形弹丸代替平头柱形弹丸的 SHPB 实验系统简图如图 6 所示, 其中弹丸的形状及尺寸示意图 7。利用这个改进的 SHPB 系统对 LF6 铝材进行了实验研究, 子弹的速度分别为 12.9 、 29.85 m/s 。

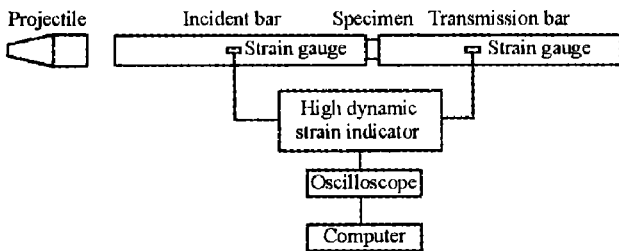


图 6 柱锥形弹丸代替平头柱形弹丸的 SHPB 实验系统
Fig.6 SHPB experimental system which cylinder projectile was replaced by cylinder-cone projectile

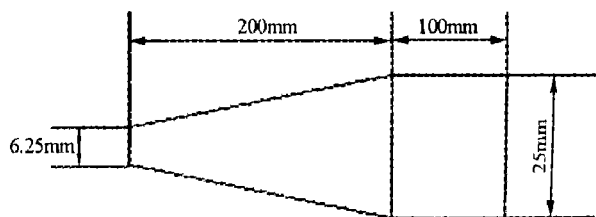


图 7 柱锥形弹丸的形状及尺寸
Fig.7 The shape and dimension of cylinder-cone projectile

3.2 理论波形与实验波形及基本假设检验

利用一维应力波动理论对柱锥形弹丸撞击细长杆进行简单分析可知,当柱锥形弹丸的柱段撞击细长杆时,在细长杆上会产生图 8 所示的应力-时间理论波形。图中的 AB 段与 BC 段分别与柱锥形弹丸柱段长度和截锥段的高度对应。在实验过程中如采用电阻应变片来记录应变信号,则图 8 中纵坐标的单位为电压的单位。

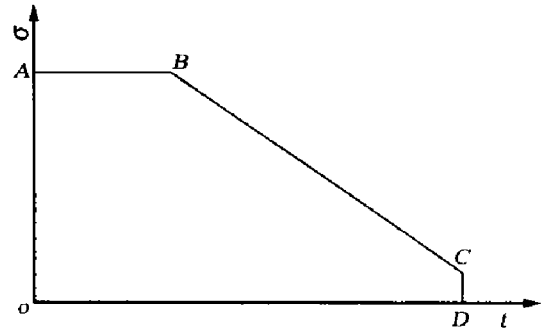


图 8 柱锥形弹丸的柱段撞击细长杆时所产生的理论波形
Fig.8 Theoretical wave in the incident bar when the cylinder of the cylinder-cone projectile impacted the incident bar

图 9 是子弹速度为 $v_0=29.85\text{ m/s}$ 时,实验所得的入射波、反射波和透射波的波形,子弹速度为 12.9 m/s 时所得的波形与此类似。图 9 中的入射波形 ϵ_i 就是柱锥形弹丸的柱段撞击细长杆时,在细长杆中测得的应力-时间波形,与理论波形大致相当。图 10 是利用有限元程序,对实验系统的 1/4 建立数值模拟模型进行数值计算所得的结果。比较图 9 与图 10 可知,数值计算和实验所得的波形非常类似,证明了实验波形的可靠性。将图 8 与图 10 的入射波形 ϵ_i 进行比较可知,利用一维应力波理论计算所得的波形与数值计算所得波形基本相同,其不同之处是由柱锥性子弹的二维效应所造成的。

由图 9 和图 10 可知,当入射波开始卸载时,透射波幅值仍然保持增加。这是因为透射波反映的是试件承受的力与试件变形关系的信息,虽然入射波开始卸载,但试件仍然承受压缩载荷的作用,试件的变形量还在增加,试件承受的力也就在增加,透射波幅值就会保持增加。当试件的变形不再增加,即应变率为零时,透射波的幅值就不再增加。

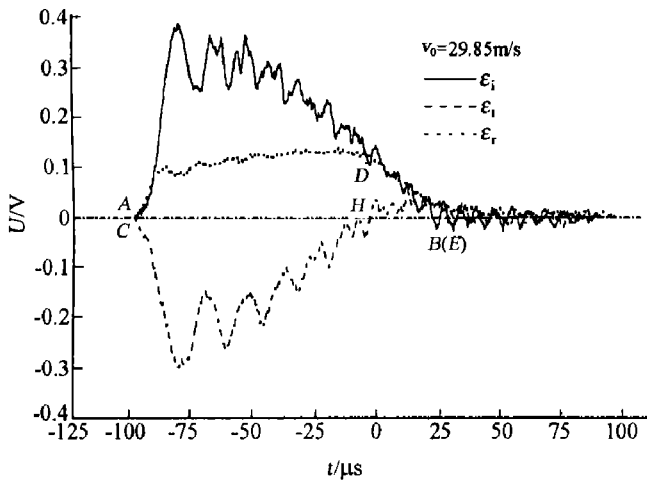


图 9 ϵ_i 、 ϵ_r 、 ϵ_t 的实验波形

Fig.9 The experimental ϵ_i , ϵ_r and ϵ_t

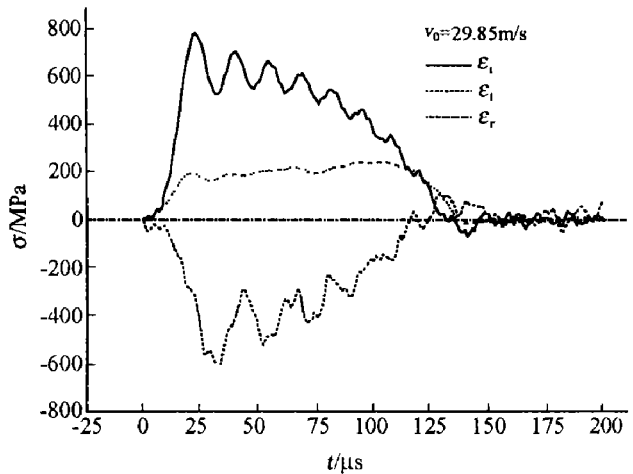


图 10 ϵ_i 、 ϵ_r 、 ϵ_t 的数值模拟波形

Fig.10 The ϵ_i , ϵ_r and ϵ_t of numerical simulation

图 11 是这两种不同子弹速度撞击下的反射波形比较,由图 11 可知,子弹速度越低,卸载段的时间 $t_D - t_E$ 就越长,但其对应波形的幅值则变小。子弹速度为 12.9 m/s 时, $t_D - t_E$ 约为 $55\ \mu\text{s}$;子弹速度为 29.85 m/s 时, $t_D - t_E$ 约为 $35\ \mu\text{s}$ 。而图 4 中的 $t_D - t_E$ 仅约为 $10\ \mu\text{s}$ (实验时的子弹速度为 18 m/s)。这也说明利用柱锥形子弹可将入射波的卸载段有效地延长,该实验方法可更好的研究材料动态卸载行为。

3.3 应力-应变曲线

图 12 是子弹速度 29.85 m/s 时的 ϵ_i 、 $\epsilon_t - \epsilon_r$ 波形,由图 12 可知入射波 ϵ_i 的脉冲宽度 $\Delta t_1 = 121.6\ \mu\text{s}$, $\epsilon_t - \epsilon_r$ 波形的脉冲宽度 $\Delta t_2 = 119.6\ \mu\text{s}$, $(\Delta t_1 - \Delta t_2) / \Delta t_1 = 1.6\% < \hat{\delta} = 3\%$,可认为入射波 ϵ_i 与 $\epsilon_t - \epsilon_r$ 波形的脉冲宽度是相等的;而入射脉冲 ϵ_i 和 $\epsilon_t - \epsilon_r$ 波形各个时刻的幅值差值的平均值与入射脉冲水平段 ϵ_i 平均值的商,即 $\overline{(\epsilon_i - (\epsilon_t - \epsilon_r))} / \overline{\epsilon_i} = 3.48\% < \hat{\delta}_2 = 5\%$ 。因此认为该实验满足 SHPB 实验中的两

个基本假定。

由于实验满足 SHPB 实验中的两个基本假定,可以利用公式(2)~(4)对实验数据进行处理,所得的应力-应变曲线如图 13 所示。子弹速度为 12.9 m/s 时,试件的最终变形很小,其加载段的准确性较差,但是,由图 13 可知,两种子弹速度所得的 LF6 材料的应力-应变曲线的卸载段基本类似,如果取子弹速度为 29.85 m/s 所对应的应力-应变关系的卸载段的前半段进行直线拟合,则该直线的斜率为每单位应变 70 GPa,这与 LF6 材料的常温静态弹性模量 68.6~71 GPa 相当^[6-7]。与图 5 比较可知,图 13 含有更加丰富的卸载信息,表明柱锥形弹丸可以用于试件的动态卸载响应研究。

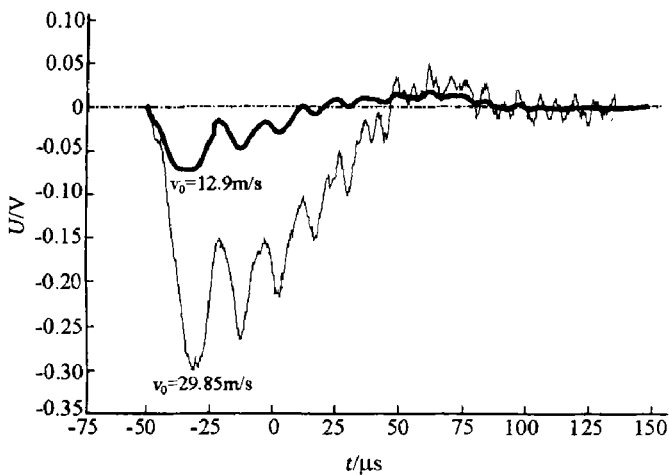


图 11 不同弹速时反射波 ϵ_r 的波形

Fig. 11 The ϵ_r of different projectile velocity

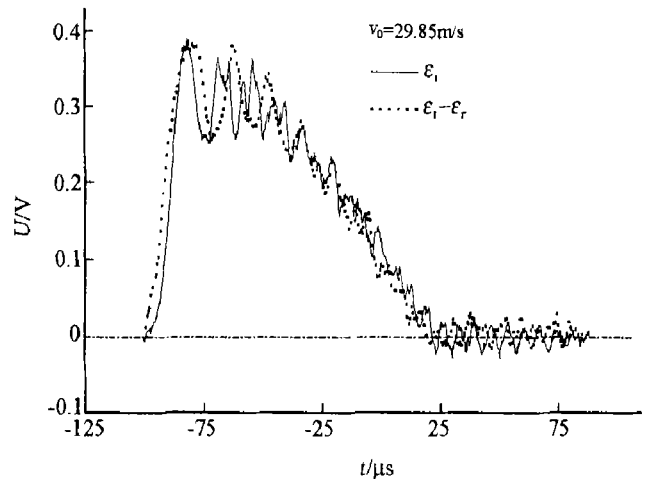


图 12 ϵ_i 、 $(\epsilon_i - \epsilon_r)$ 的波形

Fig. 12 The ϵ_i and $(\epsilon_i - \epsilon_r)$

4 结论

上述的研究结果表明,柱锥形弹丸可以有效的延长入射脉冲的卸载段,用柱锥形弹丸代替纯柱形弹丸的 SHPB 系统是用来研究材料动态卸载的有效方法。

实验中入射波的振荡比较厉害,这是由弥散效应以及柱锥子弹本身的二维效应等因素引起,这会影响到数据处理结果的准确性。但入射波的高频振荡可以用物理滤波的办法将其高频部分去掉^[8]。

因为塑性变形不可恢复,塑性功不可逆,因此,卸载过程中能量的变化应当是弹性能的变化,是加载过程中弹性能的恢复。通过对卸载过程的深入研究,不仅仅可以了解材料的动态卸载特性,还可以对材料的动态加载过程中的弹性加载特性进行深入的分析。

参考文献:

- [1] 王礼立, 李大红, 施绍裘, 等. 关于卸载波和材料动态卸载响应的研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(增刊): 153—156.
WANG Li-li, LI Da-hong, SHI Shao-qiu, et al. On studies of unloading waves and dynamic unloading response of materials[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(Supplement): 153—156.
- [2] Parry D J, Dixon P R, Hodson S, et al. Stress equilibrium effects within Hopkinson bar specimens[J]. Journal DE Physique IV, 1994, C8: 107—112.

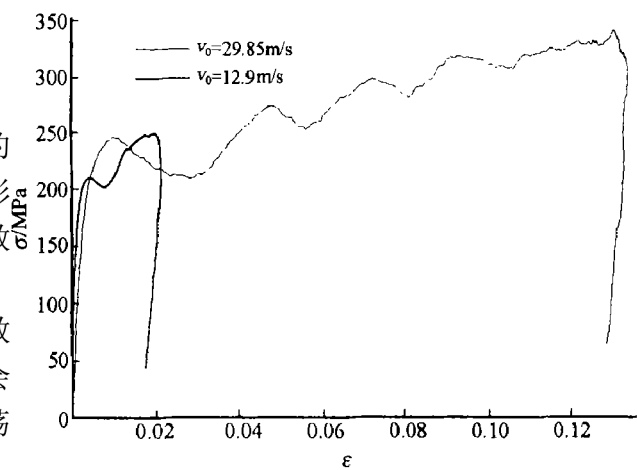


图 13 试件的应力-应变曲线

Fig. 13 The stress-strain curve of specimen

- [3] Hodowany J, Ravichandran G, Rosakis A J, et al. Partition of plastic work into heat and stored energy in metals[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(2): 113—123.
- [4] Shim V P W, Yuan J, Lee S H. A technique for rapid two-stage dynamic tensile loading of polymers[J]. *Experimental Mechanics*, 2001, 41(1): 122—127.
- [5] 王礼立, 余同希, 李永池. 冲击动力学进展[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992.
- [6] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册(第 3 卷): 铝合金、镁合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 228.
- [7] 祝燮权. 实用金属材料手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 5. 133.
- [8] Chen W, Lu F, Zhou B. A quartz crystal imbedded split Hopkinson bar for soft materials[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(1): 1—6.

An experimental method for studying dynamic unloading property of material

TAO Jun-lin^{*}, ZHANG Fang-ju, TIAN Chang-jin, CHENG Yu-zhe
(*Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: A new method is proposed to study the unloading behavior of materials, with which the conventional cylinder projectiles in SHPB tests are replaced by cylinder-cone ones. With this method, the dynamic loading and unloading responses of the LF6 aluminum are investigated. The results show that the cylinder-cone projectile is an effective way to study the unloading behavior of materials, due to its ability to prolong the unloading phase of the incident impulse.

Key words: solid mechanics; experimental method; SHPB; dynamic unloading; LF6

* Corresponding author: TAO Jun-lin E-mail address: junlintao@sina.com; Telephone: 0816-2485419