冲击压缩作用下 LY12 硬铝合金剪切强度的测定

张虎生　　阎敏　　戴兰宏　　沈乐天
（1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室，北京 100190）

摘要　本文采用组合飞片技术在轻气炮上实现了对 LY12 硬铝合金材料的加载-再加载和加载卸载，获得了 LY12 在不同预冲击状态下的一维平面应变波传播信息，利用 Lagrange 路径线法得到了对应状态下的应力应变曲线，进而采用上下屈服法得到了其在不同应力水平下的剪切强度。结果表明在低应力作用下，材料的剪切强度是不可忽略的，而且其随纵向应力的增加而增加。

关键词　剪切强度；上下屈服法；Lagrange 分析；加载-再加载；加载-卸载

1　引言

LY12 硬铝合金由于密度小、强度高、可塑性好，在航空航天、国防及民用领域有着广泛的应用。现有飞机、导弹的壳体材料大多是以铝合金为主， 其中长征系列火箭便采用 LY12 硬铝合金；全铝合金制汽车因其车体重量的降低，可提高整车性能同时降低油耗，目前已成为了各大汽车厂商研究的热点之一；同时，轻型坦克、装甲运兵车的防护装甲也部分采用铝合金装甲。正是由于这一系列应用的需要，使得研究 LY12 硬铝合金在冲击载荷下加卸载本构响应变得十分重要。

在经典的固体材料动态高压研究中，通常当冲击压力达到Hugoniot弹性限 8～10 倍时，可认为一维应变曲线将趋于与静水压缩曲线相重合，从而可将材料当作纯流体来对待，使用“流体模型”来近似[1]。实际上材料在由弹性变形向塑性变形、再过渡到近于静水压缩变形的过程中，材料内部不仅会有正应力，而且必然会出现切应力。然而，目前在冲击波测量中，普遍是仅仅测出垂直与波阵面方向的应力分量，用这个数据来导出热力学平衡条件下的物态方程，这在高压下是正确的，但在中低压下却不能精确地描述材料的响应特性。因此测量材料在冲击作用下，尤其压力不是很高时的剪切强度变得非常必要。剪切强度可以通过上下屈服法和直接测量横向应力的方法获得[2-3]。

本文采用组合飞片技术在轻气炮上实现了对 LY12 硬铝合金材料的加载-再加载和加载卸载，获得了 LY12 在不同预冲击状态下的一维平面应变波传播信息，利用 Lagrange 路径线法得到了对应状态下的应力应变曲线，进而采用上下屈服法得到了其在不同应力水平下的剪切强度。

2　上下屈服法

为了精确地测定材料在动高压条件下材料的强度，早期Fowls等人提出将冲击加载测得的纵向应力与静高压实验结果相比较，从而获得材料在冲击压缩状态下的剪切强度。但这一方法的准确性很差。J. R. Asay和L. C. Chhabidas[4-6]等人在 80 年代发展了一种测定材料在冲击压缩条件下剪切强度的方法，并在 90 年代作了进一步完善。他们通过对预冲击材料进行再加载或者卸载到其上、下屈服面，从而获得材料在预冲击状态下的剪切强度，这就是上下屈服法，通常也被称为AC方法。具体原理如下：

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在对各向同性材料进行平面冲击压缩时，材料的宏观应变是一维的，只在 x 方向上发生，而其应力并非一维的。无论是应用 Von Mises 还是 Tresca 屈服准则，在一维应变条件下，都有：

$$\begin{aligned}&\sigma_y=\sigma_z\\&\bar{\sigma}=\frac{1}{3}(\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z)=\frac{1}{3}(\sigma_x+2\sigma_y)\end{aligned}\tag{1}$$

在屈服面上 $$\sigma_x-\sigma_y=\pm 2\tau \tag{2}$$

因而，在屈服面上有： $$\sigma_x=\bar{\sigma}\pm\frac{4}{3}\tau \tag{3}$$

其中 σ_x 为轴向应力，σ_y 为横向应力，$\bar{\sigma}$ 为平均应力，τ 为剪切强度。

如图 1 所示，在 $\sigma_x-\sigma_y$ 平面上，上屈服面为 $\sigma_x-\sigma_y=2\tau$，下屈服面为 $\sigma_x-\sigma_y=-2\tau$。对于理想弹塑性材料，在再加载或卸载的完全塑性区部分，它们平行于静压曲线。如果 A、B 代表在某一预冲击状态的上下屈服点，由(3)式可以得到

$$\sigma_x(A)-\sigma_x(B)=\frac{8}{3}\tau \tag{4}$$

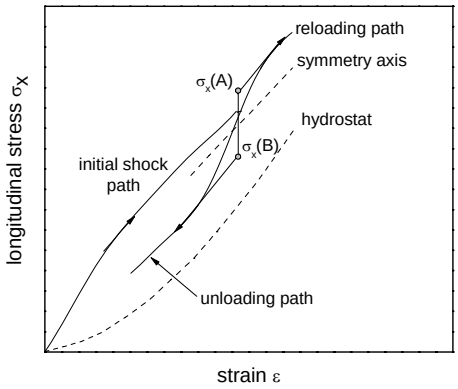


图 1　冲击作用下的应力-应变关系

Fig.1　Stress-strain relation under shock loading

这样，通过将待测材料从一预冲击状态再加载或卸载到其上下屈服面，再将其加载或卸载的纯塑性部分延长到预冲击状态，就可以得到预冲击状态下的上下屈服点。

在随动硬化模型下，塑性变形过程中屈服面中心及屈服面的大小可能会随变形的增大而变化。这时可以看到上下屈服法仍可以给出在预冲击状态下的材料强度。在随动硬化模型下(3)式可以表示成

$$\begin{cases}(\sigma_x-\bar{\sigma})-a_x=\pm\frac{4}{3}\tau\\(\sigma_y-\bar{\sigma})+\frac{1}{2}a_x=\pm\frac{2}{3}\tau\\(\sigma_x-\sigma_y)-\frac{3}{2}a_x=\pm 2\tau\end{cases}\tag{5}$$

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其中a_x为屈服面对称轴与静水压缩状态的偏移(认为$a_y=-(1/2)a_x$)。在此虽然屈服面可以随着塑性变形而移动，但仍假设其对称轴与静压线平行。由(5)式可得，引入随动硬化模型后，虽然有：

$\bar{\sigma}^{'}=(1/2[\sigma_x(A)+\sigma_x(B)])=\bar{\sigma}(e_1)+a_x(e_1)\neq\bar{\sigma}(e_1)$，但(4)式仍然成立。

上述分析过程中需要作如下假设：(1)从预冲击状态的再加载和卸载是应变率无关的，不考虑应变率效应带来的影响。(2)材料在冲击后存在屈服面，而且可以从试验中由准弹性到塑性的转变而测得。(3)虽然屈服面在冲击过程中会在应力空间中移动，但它仍然保持对称。(4)在变形过程中，屈服面存在着一个与静压线保持平行的对称轴。

3 一维应变波传播实验与 Lagrange 分析

在冲击载荷作用下材料中的惯性效应常常同应变率效应耦合在一起。材料在高应变率下的本构关系的研究离不开波传播信息的分析，往往需要利用所测得的波传播信息来推断材料的动态本构关系。目前常用的方法是利用气炮平板撞击实验来获得材料中的一维平面应变波的传播信息。

Lagrange分析方法可以由测得的波形直接推断材料的应力应变曲线。该方法是由Fowles、Cowperthwaite和Williams[7-9]等人于上世纪 70 年代提出的。它通过埋入材料内部不同Lagrange位置的传感器测量到该处的力学信息的变化历史，然后由几个普遍适用的守恒方程得到未知力学量的变化历史。这样，得到的结果不依赖于事先的本构假定，是实际过程的写照，反映了材料在的动态响应行为。

3.1 实验装置与测试系统

一维应变平面波Lagrange实验是在一级轻气炮上进行的，该炮口径为ϕ101mm，炮管长 17m，驱动弹丸最高出口速度为 1400m/s，最低速度为 20m/s，弹速误差小于 5%，碰撞角度小于 10^{-3}rad，真空度小于 1Pa，实验装置示意图如图 2 所示。为了研究应力波的传播情况，在材料内部不同位置处埋入传感器，在冲击波作用下，这些传感器将随质点速度一起运动，这样就可以测得该处的应力变化历史。

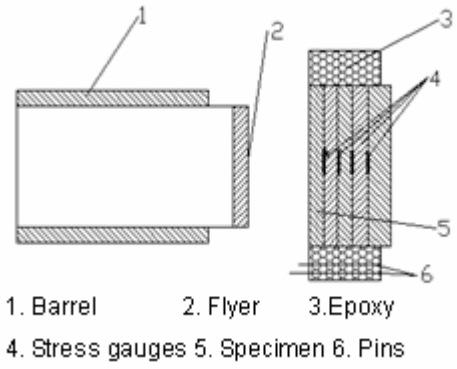


图2 轻气炮实验装置示意图

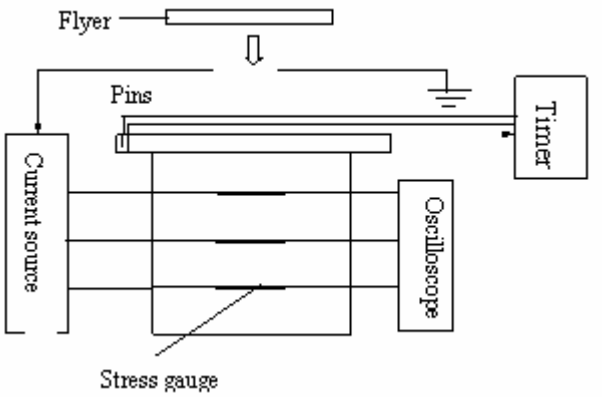


图3 测试系统示意图

Fig.2 Sketch of light gas gun experimental system Fig.3 Sketch of measurement system

测试系统包括飞片速度测量和试件中压力-时间历程的测量，如图3所示，其中飞片速度测量采用探针法，压力信号由锰铜压阻计测得。

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2 路径线法

路径线法是Lagrange分析常采用的方法之一，它的基本原理如下所述[10-13]。

在一维应变条件下，材料介质的运动满足下列方程：

质量守恒 $$(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t})_h + (\frac{\partial u}{\partial h})_t = 0 \tag{6}$$

动量守恒 $$(\frac{\partial u}{\partial t})_h + \frac{1}{\rho_0}(\frac{\partial \sigma}{\partial h})_t = 0 \tag{7}$$

能量守恒 $$(\frac{\partial E}{\partial t})_h + \frac{\sigma}{\rho_0}(\frac{\partial u}{\partial h})_t = 0 \tag{8}$$

其中u为质点速度，ε为体应变，t为时间，h为Lagrange空间坐标，E为比内能，ρ_0为初始密度，σ为应力。

要确定每个传感器上的应力，质点速度，比内能历史，就必须在实验记录线上积分(6)、(7)、(8)式，有：

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 - \int_{t_1}^{t_2} (\frac{\partial u}{\partial h})_t dt \tag{9}$$

$$u_2 = u_1 - \frac{1}{\rho_0}\int_{t_1}^{t_2} (\frac{\partial \sigma}{\partial h})_t dt \tag{10}$$

$$E_2 = E_1 - \frac{1}{\rho_0}\int_{t_1}^{t_2} \sigma(\frac{\partial u}{\partial h})_t dt \tag{11}$$

任何一个二元函数$\varphi(h, t)$的梯度都可以写成以下形式：

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial h}\right)_t = \frac{d\varphi}{dh} - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_h \frac{dt}{dh} \tag{12}$$

其中偏导数$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_h$可沿实验记录线求得，再求得$\varphi(h, t)$的沿路径线的全微分和方向导数$\frac{dt}{dh}$。这样在某一时刻 t 二元函数$\varphi(h, t)$的梯度$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial h}\right)_t$就可由(12)式求得。

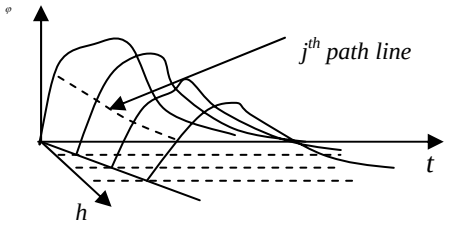


图 4 路径线连接φ–h-t 空间

Fig.4 Path lines in φ–h-t space

图4中把不同拉格朗日位置实验记录线上的对应点连成一条空间曲线，如图上的第j条，称之为路径线，全微商$\frac{d\varphi}{dh}$可沿路径线求得，$\frac{dt}{dh}$就是路径线的方向导数。选定适当的路径线，就能由实验记录求得函数梯度

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial h}\right)_t$，这样，积分方程(9)- (11)，有：

$$\varepsilon_{j+1,k}=\varepsilon_{j,k}-\frac{1}{2}\left(\frac{du_{j+1,k}}{dh}-\frac{\partial u_{j+1,k}}{\partial t}\cdot\frac{dt_{j+1,k}}{dh}+\frac{du_{j,k}}{dh}-\frac{\partial u_{j,k}}{\partial t}\cdot\frac{dt_{j,k}}{dh}\right)\cdot(t_{j+1,k}-t_{j,k}) \tag{13}$$

$$u_{j+1,k}=u_{j,k}-\frac{1}{2\rho_0}\left(\frac{d\sigma_{j+1,k}}{dh}-\frac{\partial\sigma_{j+1,k}}{\partial t}\cdot\frac{dt_{j+1,k}}{dh}+\frac{d\sigma_{j,k}}{dh}-\frac{\partial\sigma_{j,k}}{\partial t}\cdot\frac{dt_{j,k}}{dh}\right)\cdot(t_{j+1,k}-t_{j,k}) \tag{14}$$

$$E_{j+1,k}=E_{j,k}-\frac{1}{4\rho_0}(\sigma_{j+1,k}-\sigma_{j,k})\left(\frac{du_{j+1,k}}{dh}-\frac{\partial u_{j+1,k}}{\partial t}\cdot\frac{dt_{j+1,k}}{dh}+\frac{du_{j,k}}{dh}-\frac{\partial u_{j,k}}{\partial t}\cdot\frac{dt_{j,k}}{dh}\right)\cdot(t_{j+1,k}-t_{j,k}) \tag{15}$$

如果由实验得到了应力变化的历史，就可以由(14)式求解出速度场，然后由(13)式求解出体应变，进而由(15)式求解出比内能。

路径线法的具体计算步骤为：

（1）根据实验测得的波形特征，将实验记录线分为若干区

（2）采用最小二乘法拟合路径线及实验记录线，并计算$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right)_h$，$\frac{d\varphi}{dh}$，$\frac{dt}{dh}$

（3）由(14)式计算速度场分布

（4）重复过程（2），由(13)式计算体应变分布

4 加载－再加载、加载－卸载实验

为了获得预冲击 LY12 硬铝合金材料在再加载、卸载作用下的波传播信息，采用组合飞片技术，在轻气炮上对 LY12 硬铝合金进行了不同撞击速度下的加载－再加载、加载－卸载实验，图 5 为加载-再加载、加载-卸载实验示意图。

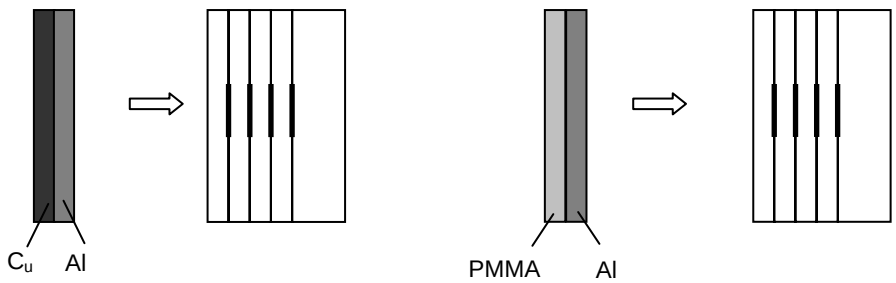


图5 加载-再加载、加载-卸载实验示意图

Fig.5 Sketch of loading-reloading and loading-unloading experiments

进行了 8 次实验，弹速范围在 100～400m/s，表 1 和表 2 给出了实验的相关参数。

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　加载-再加载实验相关参数

Table 1　Parameters for loading-reloading experiments

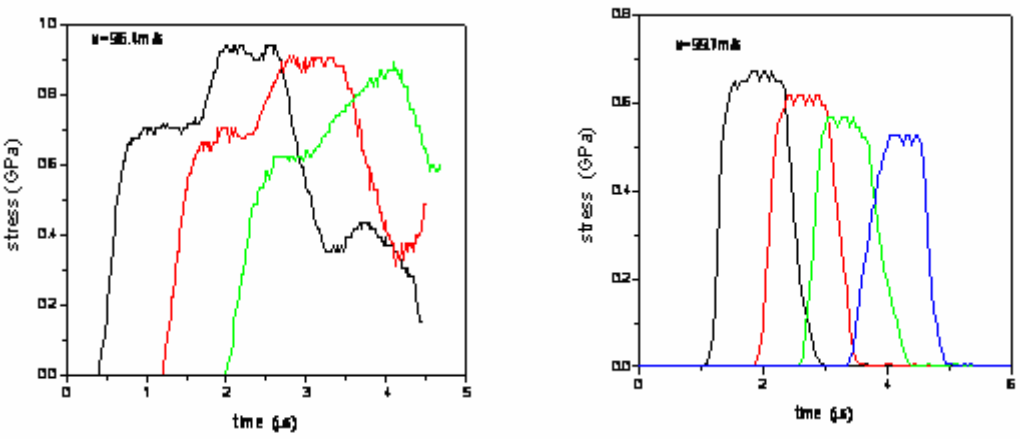
实验号	撞击速度 /(m/s)	飞板厚度 /mm		靶板厚度 /mm				
		LY12	黄铜	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5
No.04-24	96.4	3.12	2.08	3.00	4.12	4.10	4.10	15.04
No.04-25	197.8	3.06	2.12	3.00	4.06	4.02	3.98	15.12
No.04-31	312.3	3.20	1.96	3.08	4.08	4.04	4.00	15.08
No.04-33	390.8	3.22	2.02	3.12	4.12	4.00	4.02	14.92

表 2　加载-卸载实验相关参数

Table 2　Parameters for loading-unloading experiments

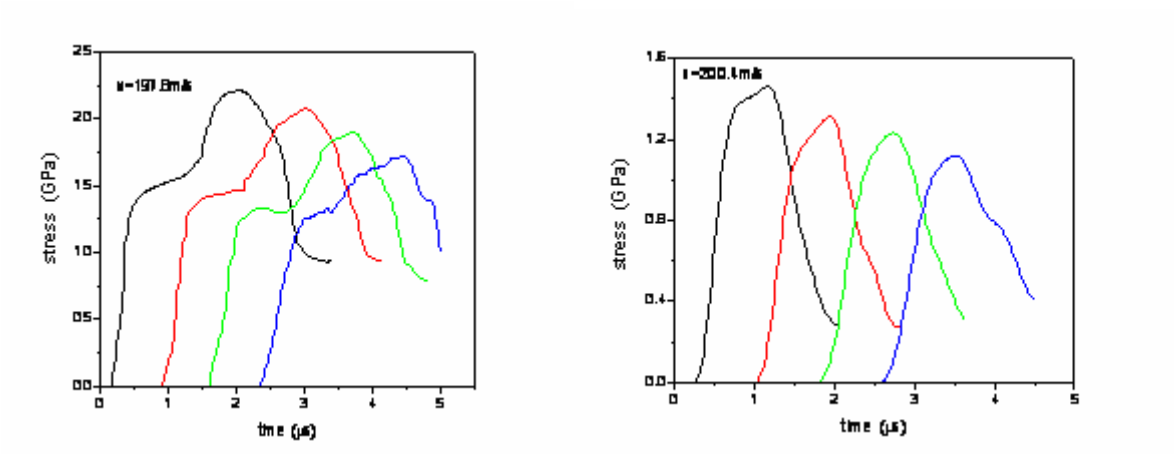
实验号	撞击速度 /(m/s)	飞板厚度 /mm		靶板厚度 /mm				
		LY12	PMMA	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5
No.04-24	99.7	3.22	2.98	3.14	3.88	3.92	3.88	15.04
No.04-25	200.4	3.20	3.02	3.06	4.10	3.98	4.02	15.10
No.04-31	301.5	3.10	3.18	2.96	4.02	4.10	4.08	14.98
No.04-33	391.5	3.12	3.06	3.02	4.04	4.08	4.12	15.20

图 6 给出了实验得到的几种撞击速度下的应力波形。

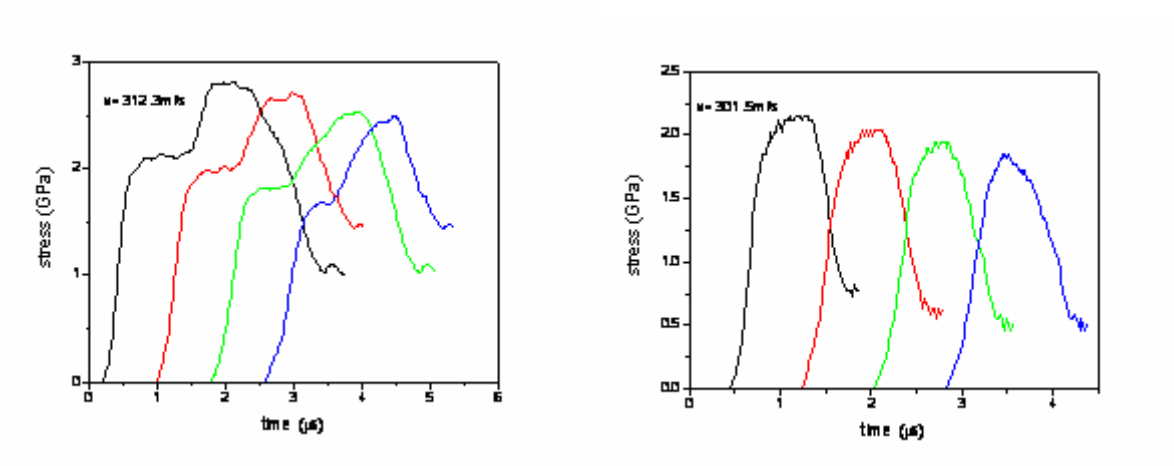


（*a*） Impact velocity about 100m/s

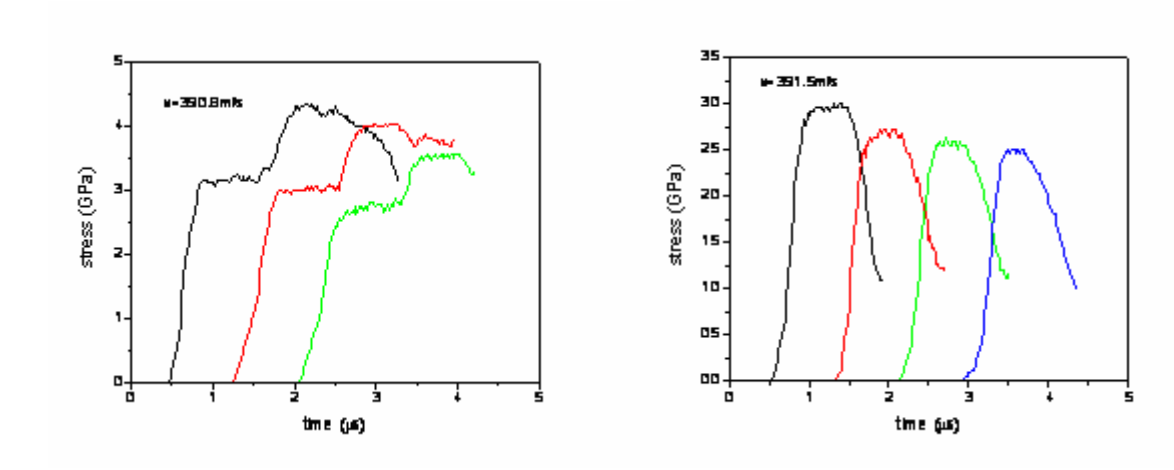
© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



（*b*）Impact velocity about 200m/s



（*c*）Impact velocity about 300m/s



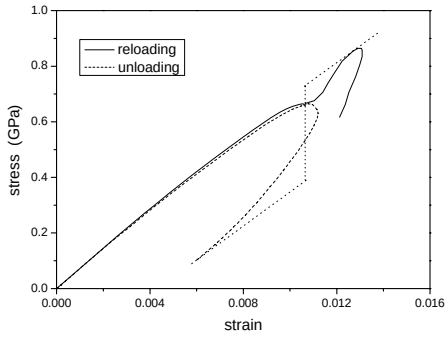
（*d*）Impact velocity about 400m/s

图 6　不同预冲击状态下的再加载和卸载应力波形

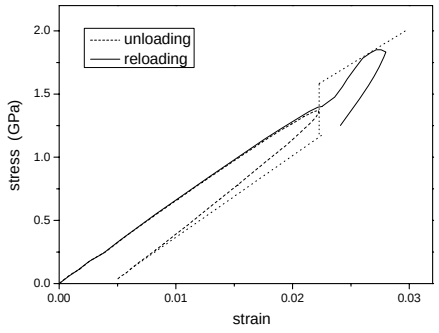
Fig.6　Stress Profiles of reloading and unloading under different pre-compression states

在得到不同预冲击状态下的再加载、卸载的多点应力波形后，应用路径线法得到 LY12 在对应状态下的应力-应变曲线，图 7 给出了计算得到的应力应变关系曲线。

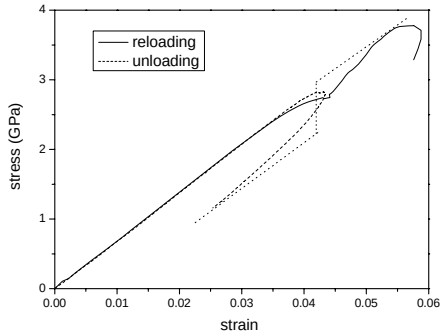
© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



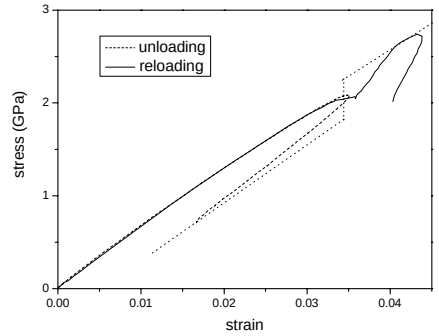
（*a*）Impact velocity about 100m/s



（*b*）Impact velocity about 200m/s



（*c*）Impact velocity about 300m/s



（*d*）Impact velocity about 400m/s

图 7　对应状态下的应力应变曲线

Fig.7　Stress-strain curves under corresponding shock states

通过前面介绍的上下屈服法得到在不同预冲击状态下的剪切强度，具体数值见表 3。

表 3　上下屈服法计算结果

Table3　Results calculated by self-consistent method

纵向应力 σ_x /GPa	上屈服点 $\sigma_x(A)$ /GPa	下屈服点 $\sigma_x(B)$ /GPa	剪切应力 τ /GPa	τ/σ_x
0.66	0.81	0.45	0.132	20.0%
1.47	1.65	1.24	0.154	9.5%
2.18	2.37	1.90	0.176	8.7%
3.05	3.24	2.62	0.232	7.6%

图 8 给出了得到的不同压力水平下剪切强度的变化情况。

从图中可以发现，剪切强度随着纵向应力的增大而增大，但它们之间的比值却随纵向应力的增大而逐渐减小。

将剪切强度拟合成纵向应力的函数，有：

$$\tau = 0.122 + 0.029\sigma_x + 0.0059\sigma_x^2 \tag{16}$$

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

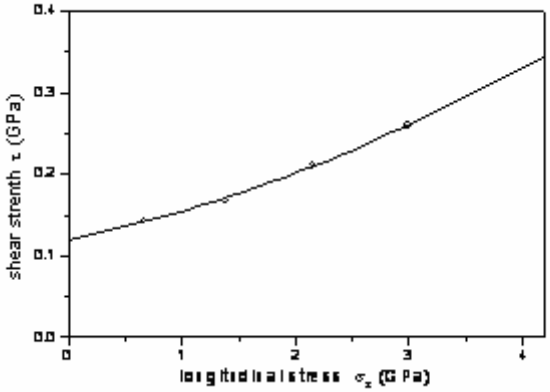


图 8 不同压力水平下剪切强度变化情况

Fig.8 Shear strength in different pressure level

5 结语

本文采用组合飞片技术在轻气炮上实现了对 LY12 硬铝合金材料加载-再加载和加载卸载，获得了 LY12 在不同预冲击状态下的一维平面应变波传播信息，利用 Lagrange 路径线法得到了对应状态下的应力应变曲线，进而采用上下屈服法得到了其在不同应力水平下的剪切强度。结果表明在低应力作用下，材料的剪切强度不可忽略，而且其随纵向应力的增加而增加。

参考文献:

1 经福谦．实验物态方程导引[M]．第二版．北京：科学出版社，1999：65—66．

Jing Fu-qian．Introduction to Experimental Equation of State[M]．Second edition．Beijing：Scientific Press，1999：65—66．

2 阎敏．冲击载荷下 LY12 硬铝合金的加卸载本构行为[D]．北京：中国科学院力学研究所，2005．

Yan Min．Loading-unloading constitutive behavior of LY12 aluminum alloy under shock loading[D]．Beijing：Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences，2005．

3 Dai Lan-hong，Yan Min，Shen Le-tian et al．Shear Strength Measurements in LY-12 Aluminum Alloy During Shock Loading[J]．Chin.Phys.Lett.，2004,21(4)：707—708．

4 Asay J R，Lipkin J J．A self-consistent technique for estimating the dynamic yield strength of a shock-loaded material[J]．J. Appl. Phys.，1978, 49(7)：4242—4247．

5 Asay J R，Chhabildas L C．Shear strength of shock-loaded polycrystalline tungsten[J]．J. Appl. Phys., 1980, 51(9)：4774—4783．

6 Chhabildas L C，Asay J R，Barker L M． Shear strength of tungsten under shock and quasi-isentropic loading to 250GPa[R]．SAND88-0306，1988．

7 Fowles R，Williams R F．Plane Stress Wave Propagation in Solids[J]．J. Appl. Phys.，1970, 41(1)：360—363．

8 Fowles R，Williams R F．Conservation Relations for Spherical and Cylindrical Stress Waves[J]．J. Appl. Phys.，1970, 41(6)：2740—2741．

9 Cowperthwaite M，Williams R F．Determination of Constitutive Relationships with Multiple Gauges in Nondivergent Waves[J]．J. Appl. Phys.，1971, 42(1)：456—462．

10 Grady D E．Experimental analysis of spherical wave propagation[J]．J. Geophys. Res.，1973, 78(8)：1299—1307．

11 Seaman L．Lagrangian analysis for multiple stress or velocity gages in attenuating waves[J]．J. Appl. Phys.，1974, 45(1)：4303-4314．

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

12 李孝兰．对一组有机玻璃粒子速度测量波形的拉格朗日分析[J]．爆炸与冲击，1985，5(4)：45—53．
Li Xiao-lan．Lagrangian analysis for a set of particle velocity profiled measured in PMMA[J]．Explosion and shock waves，1985，5(4)：45—53．

13 尚嘉兰，白以龙，沈乐天等．酚醛玻璃钢动态本构关系的实验研究[J]．爆炸与冲击，1990，10(1)：1—13．
Shang Jia-lan，Bai Yi-lonng，Shen Le-tian et al．Experimental studies of dynamical constitutive relation of glass fiber reinforced phenolic resin[J]．Explosion and shock waves，1990，10(1)：1—13．

Measurement of shear strength of LY12 aluminum alloy under shock compression

ZHANG Hu-sheng ， YAN Min ， DAI Lan-hong ， SHEN, Le-tian
(*State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics， Institute of Mechanics，*
Chinese Academy of Sciences， Beijing 100190， Anhui，China)

Abstract: Loading-reloading and loading-unloading shock experiments of the LY12 aluminum alloy are conducted in a single stage light gas gun by composite flyers method. The stress profiles of uniaxial plane strain wave propagating in LY12 aluminum alloy specimens under different pre-shock states are measured. The stress-strain curves at corresponding states are computed by Lagrangian analysis method which is path lines method. The shear strengths in different stress level are obtained by self-consistent method.. The results show that under the shock of lower stress the shear strength of material can not be ignored and it increase with the increasing of the longitudinal stress.

Keywords: Shear strength; Self-consistent method; Lagrangian analysis; Loading-reloading ; Loading-unloading

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net