第17卷 第2期 高 压 物 理 学 报 Vol. 17, No. 2
2003年6月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS June, 2003

文章编号：1000-5773(2003)02-0081-07

铝锂合金材料状态方程的研究*

李永池，郭 扬，谭福利，朱林法

（中国科学技术大学，安徽合肥 230027）

摘要：多数材料是应变率正敏感的，其屈服应力随着应变率的增加而提高；但是在应变率相关的动力学实验中，发现铝锂合金是应变率负敏感的，具有明显的冲击韧性特征。为了全面认识该种材料的动态力学行为，有必要进一步研究其在较高压力下的冲击压缩性能。通过轻气炮实验，测量了靶板自由面质点速度时程曲线等相关参量，得到了材料的 D-u 型 Hugoniot 线。实验揭示了在突加载荷作用之下，在应变率负敏感的铝锂合金材料中可出现类似于弹塑性材料中的双波结构，从而证明了所提出的“极限应变率负敏感粘塑性材料”这一概念的合理性。最后，在弱激波假设的前提下，推导了材料 Hugoniot 方程与 Murnagham 状态方程之间的关系，并以实验数据为基础得到了材料的状态方程参数。

关键词：铝锂合金；Hugoniot 线；Murnagham 状态方程

中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

铝锂合金具有低密度、高比强度、高比刚度等优点，尤其是其良好的冲击韧性和良好的高温性能，使其作为新型材料在航空、航天等广泛的国防和高科技领域得到了日益广泛的应用。国内外已陆续有人对不同类型的铝锂合金的力学性能作了不少研究[1]，但所有研究加载范围限于低压段，未见中高压段的研究报告，较少有其力学性能比较全面的研究工作，因而也缺乏较全面的铝锂合金力学性能参数。而且不同元素含量，不同制备方法及不同热处理过程都对材料力学特性有显著影响。故国内外已有文献无法满足我国有关高科技领域对其性能参数的需要。我们对我国特制的铝锂合金材料进行了系列 MTS 准静态实验、波速测量实验、SHPB 动态应力应变关系测量实验、轻气炮上的层裂自由面质点速度时程曲线测量实验[2]，并在相关实验数据的基础上，以波动力学和材料本构关系理论为指导，对其动静态力学性能进行了系统分析和总结，并给出其相关力学性能参数、动态本构关系、状态方程、损伤演化方程和层裂准则，本文是对其 Hugoniot 曲线和状态方程研究工作的总结。

MTS 和 SHPB 本构实验表明[3]：中低压下，铝锂合金在某一应变率范围内(10^{-4}～10^{3}/s)有较明显的应变率负敏感效应，且具有明显的冲击韧性特征，即随着应变率的提高，其屈服应力将下降，而塑性流动趋势将增强；但当应变率再提高时，应变率负敏感效应趋于不明显，而当应变率趋于无穷大时，其本构关系趋于一个有限的、但非零的弹塑性本构关系。故可预言，在不是特别强的(中低压)突加载荷作用之下，这种粘塑性材料中可出现弹塑性双波结构，这种材料我们称之为极限应变率负敏感的粘塑性材料。

我们通过轻气炮实验，测量了靶板自由面质点速度时程曲线等相关参量，证实在突加载荷作用之下，在极限应变率负敏感的粘塑性材料铝锂合金中确实出现了弹塑性双波结构，在弱激波假设的前提

* **收稿日期**：2002-10-11；**修回日期**：2003-01-16

基金项目：国家自然科学基金(10272097)

作者简介：李永池(1941—)，男，教授，工程力学博士研究生导师.

下，我们推导了材料 Hugoniot 方程与 Murnagham 状态方程之间的关系，并以实验数据为基础得到了材料在中低压段的 D-u 型 Hugoniot 线和 Murnagham 状态方程参数。

2 试验装置及试验方法

实验样品为我国特制的铝锂合金材料，研究方案采用平面对称碰撞方法，通过撞靶速度、冲击波速度、样品后自由面粒子速度时程曲线的测量，以得到材料的 Hugoniot 曲线及有关参数。实验是在中国工程物理研究院流体物理研究所的 100 mm 口径一级轻气炮上进行的。由于飞片直径大、厚度薄，容易在飞行过程中变形，为此专门设计加工了一个飞片托架，材料为 LY12 铝；飞片撞靶速度由铜质刷子探针在撞靶前测量，样品后自由面粒子速度时程曲线由 VISAR 测量。整个测量系统如图 1 所示。

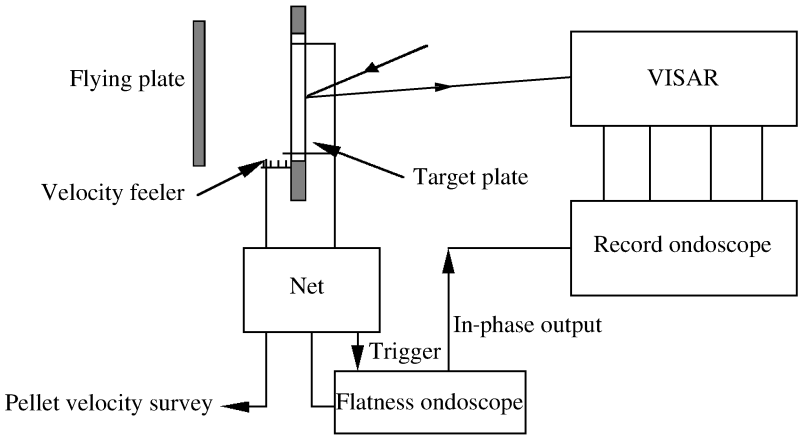


图 1 实验装置系统示意图

Fig. 1 Diagram of system of the experimental setup

试验中根据预设碰撞速度，选择 100 m/(F·s)、32 m/(F·s)、16 m/(F·s) 三种 VISAR 速度灵敏度，并选用了 f40 双透镜标准探头和 ϕ0.6 mm×10 m 不过渡斜头传输光纤。TDS 684B 型数字示波器的 1～4 号通道记录 VISAR 信号，垂直灵敏度为 10 mV/div，采样率为 10^9/s，采样长度为 15 μs，延迟时间为负延 10%，触发在上升沿，触发门限为 1 V，触发信号来源为平面性记录示波器的同步 TTL 输出孔。

3 试验结果

我们共进行了 6 发实验，飞片撞击速度分别为 100 m/s、300 m/s、500 m/s、600 m/s、800 m/s 和 1100 m/s。除撞击速度为 100 m/s 的实验由于探针触发问题没有记录到结果以外，其它皆记录到结果。图 2～图 6 给出后 5 次有效实验 VISAR 记录的样品后自由面粒子速度时程曲线，图中标明了实际撞击速度。图 7 为撞击速度 1092 m/s 的样品后自由面粒子速度时程曲线局部细化图，明显可见典型的双波结构，即塑性冲击波之前有弹性前驱波。其它速度撞击试验得到的自由面粒子速度-时间剖面同样可见双波结构。这与参考文献中关于铝锂合金材料极限负应变率敏感粘塑性本构关系的分析和预言是一致的。

气炮实验是在一级炮上进行的，其速度和压力范围对于金属材料属于中、低压段，由于探针技术等原因，中、低压下激波速度 D 的直接测量是不成熟的，有待于进一步研究和改进，故我们放弃了塑性激波速度 D 的直接测量法，而利用样品自由面粒子速度时程曲线的双波结构对其间接测量。这一方法的基本思想是[4]：在常压下精确测量材料的弹性纵波波速，将其作为标准，在样品自由面粒子速度时程曲

线上读出弹性前驱波和塑性冲击波到达样品自由面的时间差,进而求出激波速度 D。飞片速度 U 则由测速计直接测量,所以我们实际测量的是双波结构中塑性激波的 Hugoniot 关系。表 1 给出了 5 次有效实验的试件尺寸及结果。

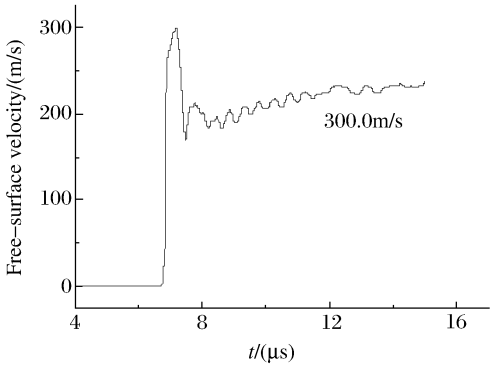


图 2　自由面粒子速度时程曲线

Fig. 2　Free-surface velocity history

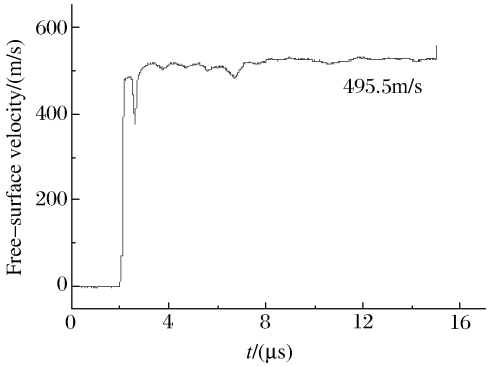


图 3　自由面粒子速度时程曲线

Fig. 3　Free-surface velocity history

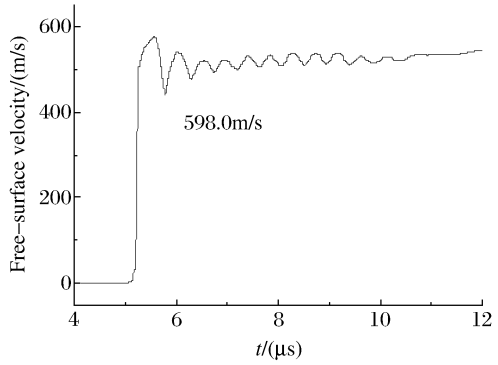


图 4　自由面粒子速度时程曲线

Fig. 4　Free-surface velocity history

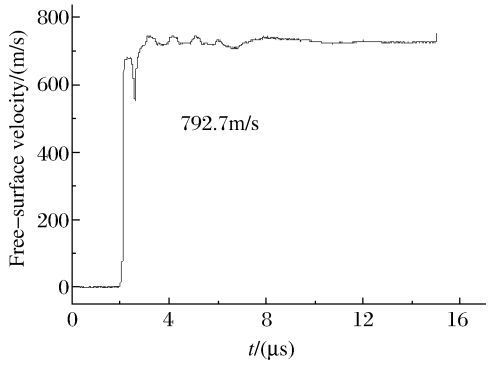


图 5　自由面粒子速度时程曲线

Fig. 5　Free-surface velocity history

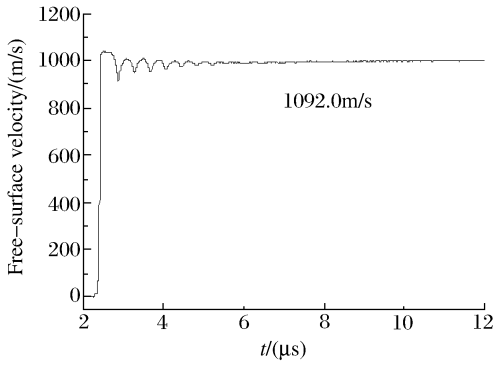


图 6　自由面粒子速度时程曲线

Fig. 6　Free-surface velocity history

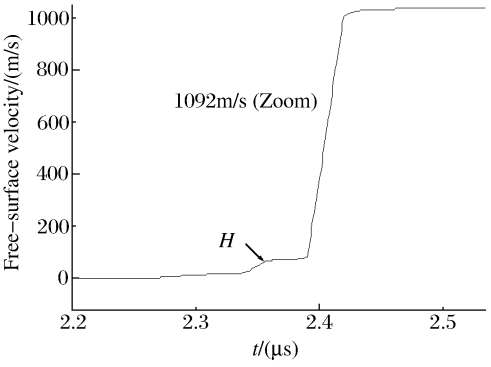


图 7　自由面粒子速度时程曲线局部细化

Fig. 7　Local focus on velocity history

表 1 实验的试件尺寸及实验结果

Table 1 Dimensions of specimen and the experimental results

Exp. No.	Thickness of flyer h/(mm)	Thickness of target H/(mm)	Impact velocity U/(m/s)	Shock velocity D/(m/s)	Particle velocity u/(m/s)
VT-1	1.606	2.993	495.5	5660.8	247.7
VT-2	1.601	3.000	792.7	5715.0	396.3
VT-3	1.618	3.000	1092.0	5924.9	546.0
VT-5	1.613	2.999	598.0	5683.3	299.0
VT-6	1.563	3.003	300.0	5458.3	150.0

4 铝锂合金材料的 D-u 型 Hugoniot 线

材料 Hugoniot 线,亦称冲击绝热线,代表对于一定的平衡初态通过不同强度的冲击突跃所可能达到的平衡终态点。对绝大部分材料,在压力不太高的情况下,其激波速度 D 和波后质点速度 u 之间满足如下线性关系[2]

$$D-u_1=c_1+b(u-u_1) \tag{1}$$

式中:u_1 代表激波前方的质点速度,c_1 代表激波前方的局部声速,b 为材料常数。在高压下,固体材料中也将显现单一的流体动力激波;而在中低压段则分裂为双波结构,其中对塑性激波将有 $u_1=u_{\mathrm{H}}$,其中 u_{H} 为弹性前驱波向塑性波过渡点所对应的质点速度,即与 Hugoniot 初始屈服应力 Y_{H} 对应的质点速度。具体到本次轻气炮实验我们读取如图 7 中 H 点对应的质点速度,结果列于表 2。

表 2 对应于 Hugoniot 屈服应力 Y_{H} 的质点速度

Table 2 Particle velocity at the Hugoniot yield stress Y_{H}

Impact velocity U/(m/s)	300.0	495.5	792.7	1092.0	Average
Particle velocity u_{H} at Hugoniot yield stress/(m/s)	31.07	30.93	30.83	33.21	31.51

由实验数据平均得到

$$u_{\mathrm{H}}=31.51\ \mathrm{m/s} \tag{2}$$

此值也即是塑性激波前方的质点速度 u_1。与大多数金属材料比起来此值偏低,这可能恰恰是此种材料冲击韧性特征的具体表现。在此前的材料动静态力学参数试验中已测出杆中弹性波速 5638.5 m/s 和泊松比 0.32 等参数,由它们推出一维应变弹性纵波波速 c^* 和体波波速 c_0

$$c^*=6899.2\ \mathrm{m/s},\ c_0=5549.7\ \mathrm{m/s} \tag{3}$$

而材料密度 $\rho_0=2.47\ \mathrm{kg/m^3}$,故得铝锂合金材料的 Hugoniot 弹性极限 Y_{H} 和一维应力动态屈服应力 Y,分别为

$$Y_{\mathrm{H}}=\rho_0 c^* u_{\mathrm{H}}=536.96\ \mathrm{MPa} \tag{4}$$

$$Y=\frac{1-2\nu}{1-\nu}Y_{\mathrm{H}}=284.27\ \mathrm{MPa} \tag{5}$$

此 Y 值比材料准静态实验测得的比例极限 $Y_{\mathrm{P}}=242.04$ MPa 略高,工程应用中我们将采用 $Y=284.27$ MPa 作为铝锂合金材料的一维应力动态屈服应力。

根据表 1 列出的实验结果及 u_{H} 值,用最小二乘法拟合可得材料的 D-u 型 Hugoniot 线方程如下,其回归系数为 0.9296。

$$D=5376.20+1.051(u-31.51)\qquad u\geqslant 31.51\ \mathrm{m/s} \tag{6}$$

即 $u_1=31.51$ m/s,$c_1=5376.20-31.51=5344.69$ m/s,$b=1.051$。

平板撞击的 Hugoniot 实验数据及 D-u 线拟合结果见图 8,图 9 为其示意图,含义是:AH 表示低压段弹性前驱波的 Hugoniot D-u 线,代表在 $u\leqslant u_{\mathrm{H}}=31.51$ m/s 的低压撞击时只存在等波速的弹性前驱

波 $D=c^*$;BP 段表示中低压塑性激波的 D-u 线,其中 B 点对应无穷小塑性激波状态 $u_1=u_H$、$D_1=u_1+c_1$,P 点为塑性激波转化为高压流体激波的转化点,此状态下恰有 $D=c^*$;在 $u\geqslant u_P$ 的高压撞击段,将只产生单一的流体动力激波,其 Hugoniot D-u 线由图中的 PF 示意地表示出,这有待今后在二级轻气炮上去完成。图中 P 点对应的 $u=1482$ m/s,由公式(2)可求出 P 点对应的撞击应力为 $p=25.14715$ GPa,如假设整个双波区中塑性激波的 D-u 线由直线 BP 表示的话,则这一压力即给出了我们的 D-u 线的适用范围。

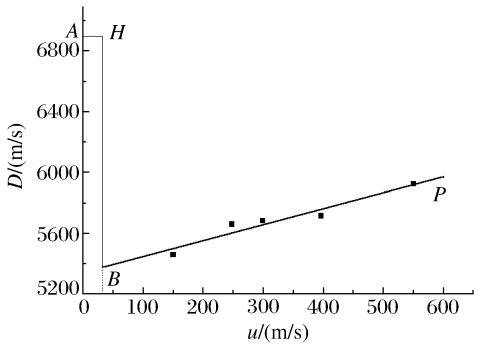


图 8　铝锂合金中低压塑性激波的 D-u 线

Fig. 8　D-u relation for Al-Li alloy at middle-low shock pressure

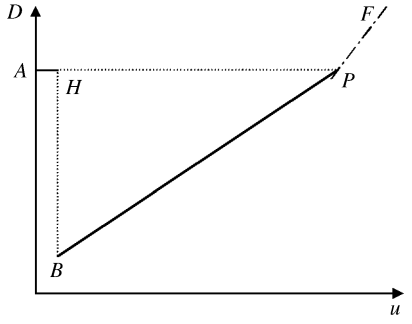


图 9　中低压塑性激波的 D-u 线示意图

Fig. 9　Sketch of D-u relation of plastic wave for Al-Li alloy

5　铝锂合金材料的 Murnagham 状态方程

从理论上和实验上精确得到材料状态方程的形式和其中的相关参数是十分困难的事,因为尚缺乏坚实的物理依据和测试技术,但实践表明,在相当高的压力范围内,许多材料的状态方程可以用 Murnagham 状态方程来表达,而且在弱激波的近似下,Murnagham 材料参数与材料 Hugoniot D-u 线参数间有一定的转换关系[5],故我们将假设铝锂合金材料的状态方程具有 Murnagham 状态方程的形式,并将利用前面所得到的 D-u 曲线参数取得其 Murnagham 材料参数。但对塑性激波须作一些附带的说明。

Murnagham 状态方程的形式为

$$p=\frac{k_0}{\gamma}\left[\left(\frac{v_0}{v}\right)^{\gamma}-1\right]=\frac{k_0}{\gamma}\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)-1\right] \tag{7a}$$

式中:p、v、ρ 分别为压力、比容和密度,v_0、ρ_0、k_0 和 γ 为常数。由之易求出其 Euler 体积压缩模量为

$$k=-v\,\mathrm{d}p/\mathrm{d}v=k_0+\gamma p \tag{7b}$$

故其 Murnagham 流体的物理含义是:体积压缩模量为压力的线性函数,故 k_0 可称为零压模量,ρ_0 可称为零压密度,γ 可称 Murnagham 指数。

固体中激波引起的熵增和体积压缩比都是相当小的,故通常可以认为是弱激波,故可采用弱激波近似。有各种各样数学表达形式的弱激波近似,我们指的弱激波近似可以概括为两条:

(1) 激波波速近似等于激波阵面前后方介质的连续波特征波速的平均值

$$D\approx(1/2)(c_0+u_0+c+u) \tag{8}$$

式中:u_0 和 u 分别为激波前后方的介质质点速度,c_0 和 c 分别是激波前后方的局部声速,即波相对于介质的波速。这条的依据是所谓的 Lax 关系 $c_0+u_0\leqslant D\leqslant c+u$,即稳定的冲击波对前方介质是超声速的,对于后方介质是亚声速的。

(2) 激波跳跃关系可以由对微幅增量波关系积分得到的连续简单波关系代替。激波跳跃关系可写

为$[\rho u]=D[\rho]$,其中[]表示量的跳跃。当其为无穷小增量时即有

$$\mathrm{d}(\rho u)=(u+c)\mathrm{d}\rho,\text{或 }\mathrm{d}u=c\mathrm{d}\rho/\rho \tag{9}$$

对 Murnagham 介质,可求得局部声速 c 为

$$c^2=\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\rho}=\frac{k_0}{\rho_0}\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma-1},\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho}=\frac{2}{\gamma-1}\frac{\mathrm{d}c}{c} \tag{10}$$

代入(9)式有

$$\mathrm{d}u=\frac{2}{\gamma-1}\mathrm{d}c \tag{11}$$

积分得连续简单波关系

$$u-u_1=\frac{2}{\gamma-1}(c-c_1) \tag{12}$$

按照弱激波近似含义,我们把(12)式近似视为弱激波的 Hugoniot u-c 关系。将(12)式代入(8)式即得

$$D-u_1=c_1+\frac{\gamma+1}{4}(u-u_1) \tag{13}$$

即 Murnagham 流体弱激波的 Hugoniot D-u 关系为线性关系。(13)式中的 u_1 和 c_1 分别是激波前方介质的质点速度和局部声速。

将(13)式和实验得到的 D-u 线性关系(1)式对比可见,两式中的 u_1 和 c_1 含义分别相同,而 Murnagham 指数 γ 与实验系数 b 的关系为 $b=(\gamma+1)/4$。因此由实验参数 c_1 和 b 求参数 γ 和 k_0 的换算公式为

$$\gamma=4b-1,\ k_0=k_1-\gamma p_1=\rho_0 c_1^2-\gamma p_1 \tag{14}$$

式中 p_1 和 c_1 分别代表激波前方的压力和声速。特别当激波前方为零压状态 $p_1=0$ 时,$c_1=c_0$ 为零压声速,则(14)式成为

$$\gamma=4b-1,\ k_0=\rho_0 c_0^2 \tag{15}$$

因此也可以通过由各种方法得到的零压声速即弹性体波波速 c_0 求得 k_0。

以上是对流体中的激波及流体状态方程所作的论述。如果是对塑性激波及固体中的状态方程,当材料的塑性硬化效应不太明显而接近理想塑性材料时(如铝锂合金),由于 $p_x=p+(4/3)\tau$,而应力偏量 $(4/3)\tau=(2/3)Y$ 近似为常数,轴向应力的改变也即等于压力的改变。所以,塑性波速也即是体波波速,故以上分析仍然是有效的,只需将 u_1、c_1、p_1 等分别理解为 Hugniot 弹性极限对应的状态即可。表 3 列出了平板撞击实验所得的铝锂合金材料的有关动态力学参数。

表 3 铝锂合金动态力学参数

Table 3 Dynamic parameters for Al-Li alloy

Parameters	Experimental values
Longitudinal wave speed at one-dimensional strain state c^*/(m/s)	6899.2
D-u curve parameter c_1/(m/s)	5344.69
D-u curve parameter b	1.051
Hugoniot yield velocity u_1/(m/s)	31.51
Murnagham exponent γ	3.204
Bulk modulus at zero pressure k_0/(MPa)	70557.3
Dynamic yield stress at one-dimensional stress state Y/(MPa)	284.27
Dynamic yield stress at one-dimensional strain state Y_H/(MPa)	536.96

6 结 论

我们通过测量靶板自由面粒子速度时程曲线及双波结构的特性,以及间接得到激波波速,从而得到

了材料的 D-u 型 Hugoniot 关系,如图 8 和公式(6)所示,实验撞击速度所对应的最高冲击压力约为 8×10^3 MPa。故可以认为图 8 和公式(6)给出的结果在比 8×10^3 MPa 略高的压力范围内都可以较好地反映材料的冲击压缩特性;如果假设线性的 D-u 关系在整个双波结构段都成立的话,则可以认为由图 8 和公式(6)表达的 D-u 关系在双波结构的消失点(塑性激波速度等于弹性波速的状态)以前都近似成立,其相应的压力约为 2.5×10^4 MPa;而材料在更高压力范围的冲击压缩特性有待通过更高撞击速度的实验进一步研究。

应用弱激波近似下 Murnagham 材料参数与材料 Hugoniot D-u 线参数间的转换关系,我们得到了铝锂合金材料 Murnagham 状态方程(7)中的相关系数,其它有关参数也列于表 3 中。我们将结果应用于研究材料的层裂及损伤演化方程取得了令人满意的结果,对此我们将另文讨论。

References:

[1] Kobayashi T. Strength and Fracture of Aluminum Alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2000, a280: 8－16.

[2] Jing F Q. Introduction to the Expremental Equations of State. 2nd [M]. Beijing: Science Press, 1999. 199－210. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导论(第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 199－210.

[3] Li Y C, Guo Y, Wang X J, et al. The Experimental and Theoretical Research on the Static and Dynamic Mechanical Properties of Al-Li Alloy [R]. Hefei, Anhui: USTC, 2001. (in Chinese)
李永池, 郭　扬, 王肖钧, 等. 铝锂合金动静态力学性能的试验和理论研究 [R]. 合肥: 中国科学技术大学, 2001.

[4] Zhang L, Cai L C, Wang W, et al. The Response Feature for Shock Loading of Tantalum [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(4): 265－270. (in Chinese)
张　林, 蔡灵仓, 王　悟, 等. 钽在冲击载荷下的动态力学特性 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(4): 265－270.

[5] Wang L L. Foundation on Stress Waves [M]. Beijing: Press of the National Defence Industry, 1985. 159－175. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985. 159－175.

[6] Li M S, Chen D Q. A Constitutive Model for Materials under High-Temperature and Pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(1): 24－31. (in Chinese)
李茂生, 陈栋泉. 高温高压下材料的本构模型 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(1): 24－31.

Equation of State for Al-Li Alloy

LI Yong-Chi, GUO Yang, TAN Fu-Li, ZHU Lin-Fa

(*University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: The most materials have the positive strain-rate sensitivity, the yield stresses of which will increase with the strain-rate increasement. However, based on the dynamic experiments we found that the Al-Li alloy has the negative strain-rate sensitivity and the impact ductility. In this paper, by means of the gas gun experiments, the free-surface velocity history and other related parameters are measured, and the D-u Hugoniot curve of Al-Li alloy is obtained. The experiments reveal that under the impact loading the double wave structure similar to that in elastoplastic materials will occur in this strain-rate sensitive material, which shows that our concept about "the material of limited negative strain-rate sensitivity" is reasonable. Finally, under the hypothesis of weak shocks, we deduced the relationship between the D-u Hugoniot curve and the Murnagham equation, and the parameters of Murnagham equation of Al-Li alloy are obtained based on the experimental data.

Key words: Al-Li alloy; Hugoniot curve; Murnagham equation