

# 铝的动态屈服强度测量及再加载弹性前驱波的形成机理分析\*

胡建波<sup>1)</sup> 谭 华<sup>1)</sup> 俞宇颖<sup>1)</sup> 戴诚达<sup>1)</sup> 冉宪文<sup>1)2)</sup>

1) 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆炸物理实验室, 绵阳 621900)

2) 国防科学技术大学理学院技术物理研究所, 长沙 410073)

(2007 年 2 月 8 日收到, 2007 年 4 月 23 日收到修改稿)

利用激光干涉测速技术(VISAR)测量 LY12 铝合金在 20—34 GPa 冲击压力下经历加载-卸载和加载-再加载过程的样品/窗口界面粒子速度剖面, 采用 AC 方法确定了具有较高精度的动态屈服强度值. 实验结果和文献发表的数据具有较好的一致性. 通过以平面焊接方式制作组合飞片, 克服了组合飞片在气炮发射过程中可能发生分离的技术困难, 使铝的动态屈服强度测量压力范围从 22 GPa 扩展到了 34 GPa. 同时, 根据对不同实验条件下的加载-再加载过程的比较, 对再加载弹性前驱波的形成机理进行了讨论, 认为位错是形成该现象的主要原因.

关键词: 动态屈服强度, AC 方法, 弹性前驱波, VISAR

PACC: 6220F, 6250

## 1. 引 言

高压本构关系的建立通常需要材料在动态加载下的屈服强度和剪切模量信息<sup>[1]</sup>. 在一维应变加载条件下, 材料屈服强度和剪切模量与轴向应力、冲击温度等密切相关<sup>[2,3]</sup>, 因此测量材料在高温高压下的屈服强度和剪切模量对于动态响应研究具有重要意义. 其中, 剪切模量的测量已经取得较大进展<sup>[3]</sup>, 但到目前为止, 还没有严格的理论模型和实验技术可以用于材料动态屈服强度的测量. 相比较而言, Asay 等人提出的双屈服面法<sup>[4-6]</sup> (AC 方法) 具有较好的近似性, 可以得到较为合理的屈服强度测量结果. 但由于采用 AC 方法进行强度测量时实验技术的复杂性, 该技术的应用受到一定限制, 尤其是双层组合飞片的使用给实验带来了较大困难. 这是因为在轻气炮对双层组合飞片加速过程中, 飞片内部存在较强的拉应力作用, 使双层组合飞片经常发生分离, 以致不能得到预期的实验结果. 这种拉伸应力随飞片击靶速度的增加趋于严重, 使得较高冲击压力下屈服强度的实验测量不能顺利开展.

本研究对文献报道的用黏结剂黏结双层组合飞

片的方法进行了改进, 通过采用平面焊接的方式制作组合飞片, 使飞片界面间的结合力得到较大的提高, 从而能够用于较高碰撞速度下的强度测量实验, 并获得了较高精度的实验结果. 在该工作基础上, 对再加载过程中弹性前驱波的发生机理也进行了初步讨论.

## 2. 实验方法及结果

### 2.1. 实验方法

AC 方法的基本原理已在前面的文章<sup>[7]</sup>中作了较为详细的介绍, 本文不再赘述. 概括地说, AC 方法就是通过加载-再加载和加载-卸载实验分别得到对应于同一冲击状态的上、下屈服面上的应力值, 并由 Von Mises 屈服准则得到强度测量结果. 其中 AC 方法引入了以下基本假定<sup>[8]</sup>:

- 1) 受冲击材料的屈服面存在并可以在实验中由材料从准弹性响应到塑性响应的转变而得到.
- 2) 屈服函数与塑性应变以及压力密切相关.
- 3) 冲击加载后的再加载和卸载过程都是率无关的.

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号:10232040)资助的课题.

4)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.

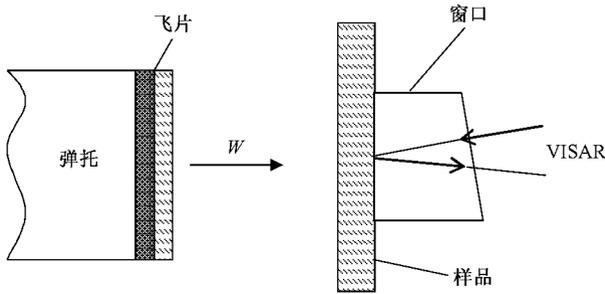


图1 加载-再加载和加载-卸载实验装置示意图

根据 AC 方法的基本原理,本研究采用如图 1 所示装置.对于加载-卸载实验,采用单层飞片.对于加载-再加载实验,则采用双层组合飞片,其中后飞片的阻抗要高于前飞片,使前飞片击靶产生的冲击波在前、后飞片界面处反射压缩波,对样品产生再加载作用.为了尽量避免前、后飞片在气炮发射过程中发生分离,采用了平面焊接方式制作组合飞片以提高飞片间的结合力.由组合飞片的背散射电子像(见图 2)可以估计,前、后飞片焊接过渡层约为  $10 \mu\text{m}$ ,对实验影响较小.与原有装置设计中双台阶样品不同,本实验仅采用单台阶样品.这种实验装置的简化使得数据处理过程中不得不把再加载产生的压缩波近似为中心波.经实验证实<sup>[8]</sup>,该近似会引入一定误差,但误差值较小,约为  $1\% - 2\%$ ,在实验测量误差范围内.为分析方便,实验都采用了对称碰撞,即加载-卸载实验的飞片和加载-再加载实验的前飞片均采用与样品相同的材料.整个碰撞过程的波系分析如图 3 所示,其中粗黑线为冲击波,虚线为稀疏波,点划线根据飞片结构不同可能为压缩波或稀疏波.当进行加载-再加载实验时,界面  $CD$  处反射的为压

缩波,使前飞片和样品以冲击状态为初态再次被冲击. $AB$  界面将产生一个中心稀疏波,追赶前面的压缩波.当进行加载-卸载实验时,在界面  $CD$  处反射中心稀疏波.考虑到实验中采用的铝样品和  $\text{LiF}$  窗口间的阻抗极为匹配,可以忽略入射波在样品/窗口界面的发射对后续波系的干扰.实验采用激光干涉测速系统<sup>[9]</sup>(VISAR)记录样品/窗口界面的粒子速度剖面.

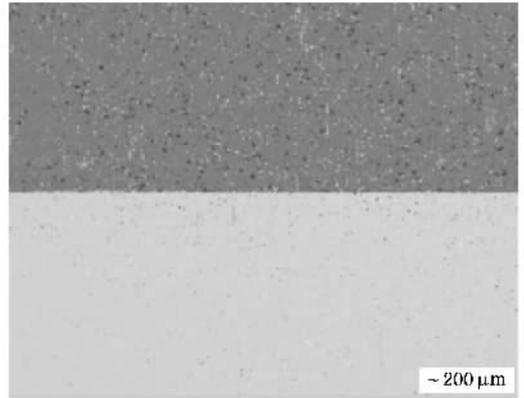


图2 组合飞片的背散射电子像图中上层材料为 LY12 铝合金,下层材料为 TC4 钛合金

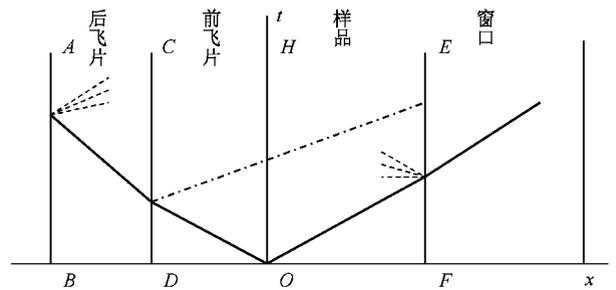


图3 实验波系分析图

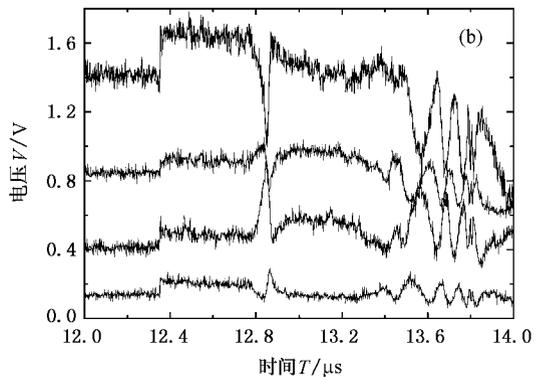
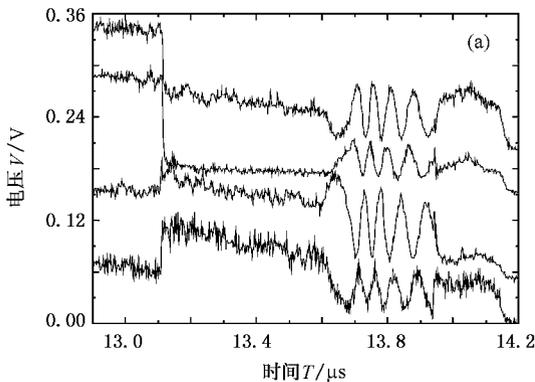


图3 加载-卸载实验(a)和加载-再加载实验(b)典型 VISAR 干涉条纹信号

## 2.2. 实验结果

实验样品为未经退火处理的 LY12 铝合金. LY12 铝的化学组分和国外的 2024 铝组分基本一致, 因此方便对实验结果进行比较. 对称碰撞实验在流体物理所的二级轻气炮上进行, 飞片的速度范围约为 2.0—4.8 km/s.

两类实验得到的典型 VISAR 干涉条纹如图 3 所示. 图 3(a) 为加载-卸载实验信号, 图 3(b) 为加载-再加载实验信号. 从干涉条纹波形图可以看到, 在冲击前沿两者都有明显的条纹丢失现象. 这是因为一般强冲击实验的上升前沿的信号频率要远大于 VISAR 测速系统的带宽, 所以系统不能完全记录下冲击前沿的干涉条纹变化. 但根据实验边界条件, 我们能够通过理论方法对上升前沿丢失的条纹进行修正<sup>[10,11]</sup>, 获得加载波剖面平台部分的速度信号幅值.

由干涉条纹信号得到样品/窗口界面的粒子速度剖面如图 4 所示. 由于再加载过程和卸载过程速度变化速率较低, 再加载和卸载过程的速度历史能够直接从实验测量的干涉条纹获得. 可见, 采用烧结方式制作的组合飞片解决了再加载波到达样品/窗口界面前的粒子速度下落现象<sup>[12,13]</sup>, 减少了因飞片黏合工艺对实验结果的影响. 如图 5 所示, 组合加载-卸载和加载-再加载实验的粒子速度和拉氏声速关系曲线, 通过积分关系<sup>[14]</sup>

$$\tau_0 + \tau_c = -\frac{3}{4}\rho_0 \int_{u_0}^{u_1} \frac{C_L^2 - C_B^2}{C_L} du, \quad (1)$$

$$\tau_c - \tau_0 = \frac{3}{4}\rho_0 \int_{u_0}^{u_2} \frac{C_L^2 - C_B^2}{C_L} du \quad (2)$$

可以得到临界剪应力  $\tau_c$  和冲击状态下的剪应力  $\tau_0$  值. 式中  $C_L, C_B, u$  分别为拉氏纵波声速、拉氏体积声速和样品中的粒子速度,  $\rho_0$  为样品初始密度, 积分限中的下标 0 代表初始冲击态, 1 和 2 分别代表卸

载过程和再加载过程的弹塑性转折点处状态. 实验结果见表 1. 在两发独立的实验中, 很难实现加载-卸载和加载-再加载实验的碰撞速度完全相同, 也就不能得到完全一致的初始冲击状态, 从而给实验数据处理带来一定的影响. 在数据处理中, 我们对卸载结果做外推以得到两发实验一致的初始冲击状态.

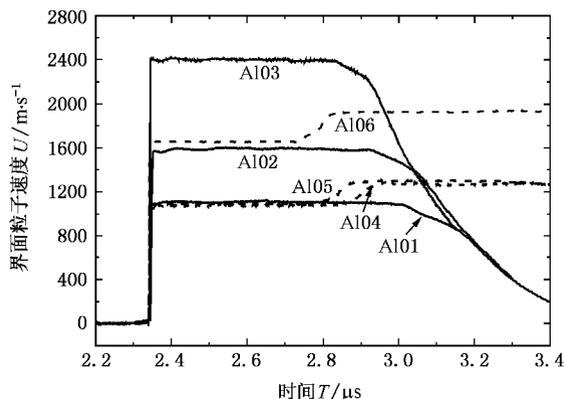


图 4 样品/窗口界面的粒子速度剖面

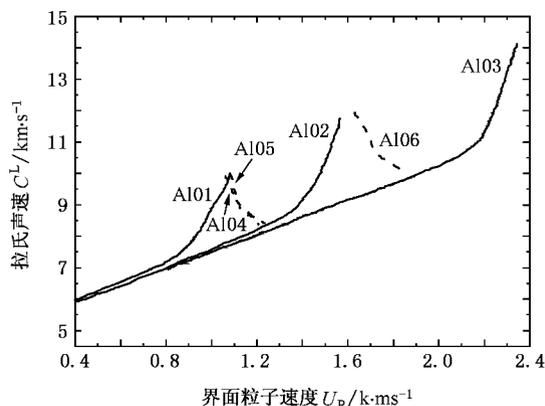


图 5 拉氏声速和粒子速度关系曲线

表 1 实验条件及结果

实验编号	飞片结构	飞片厚度/mm	样品厚度/mm	碰撞速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	轴向应力/GPa	$\tau_0 + \tau_c$ /GPa	$\tau_c - \tau_0$ /GPa
Al01	Al	2.959	1.516	2.159	20.29	0.746	
Al02	Al	2.980	1.518	3.132	32.16	0.852	
Al03	Al	2.951	1.481	4.689	54.69	1.045	
Al04	Al/TC4	2.360/2.508	1.511	2.118	19.82		0.338
Al05	Al/TC4	2.265/2.510	2.505	2.160	20.30		0.296
Al06	Al/TC4	2.402/2.508	2.513	3.262	33.88		0.702

如图 6 所示, 经比较可见实验结果与文献发表的数据具有较好的一致性, 并且落在理论计算的屈服强度的上、下限范围内. 在较低压力范围内(0—40

GPa) 屈服强度值( $Y = 2\tau_c$ )随着冲击压力的增加而增大. 但随着冲击引起的温度的增加, 材料的高温软化效应更为明显, 从而使材料强度随压力的增加而

增加的趋势有所变缓,但在本文研究的压力范围内也可认为是一种近似的线性关系,需要做进一步的实验研究屈服强度在更高压力下的变化趋势。

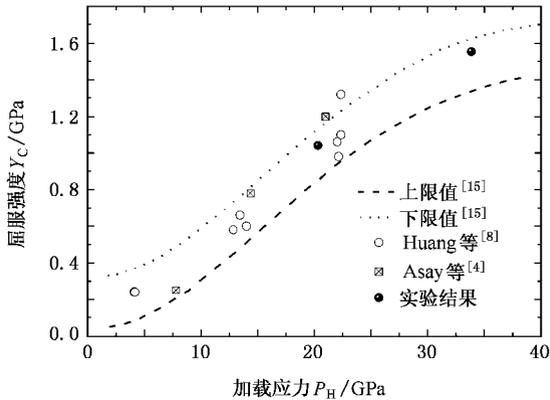


图6 铝的屈服强度随冲击压力的变化关系

### 3. 讨 论

实验进行了组合飞片在 4.7 km/s 速度下的加载-再加载实验,但未能得到理想的结果,得到的 VISAR 信号如图 7 所示.分析该信号可知,在再加载波到达样品/窗口界面,样品已经受到明显的稀疏波作用,样品中的粒子速度显著下降.在再加载波到达后,样品又受到了一次稀疏作用.因此可以判断在组合飞片加速过程中,前、后飞片已经分离.我们认为这是因为二级炮高压段的破膜压力过高导致组合飞片内部的拉伸应力过大所致.解决该方法有两种:一是改变二级炮的弹道参数,降低破膜压力,使弹丸缓慢加速;二是进一步增加飞片间的结合力.

在加载-再加载实验中,再加载过程出现明显的

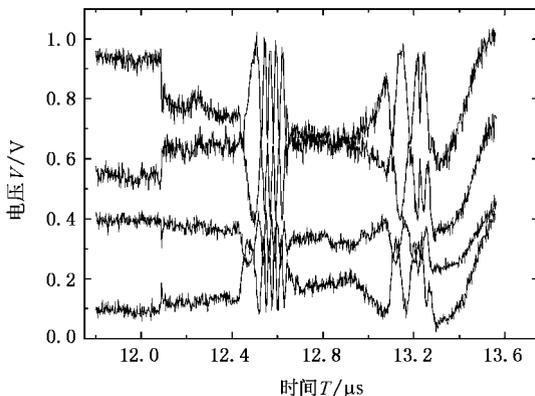


图7 组合飞片脱离后的加载-再加载实验信号

弹性前驱波.对该现象存在以下几种解释:

1) Swegle 和 Grady<sup>[16]</sup>认为在较高冲击压力下,由于一次冲击引起材料在介观尺度上的能耗局域化,导致局部出现温度接近熔化温度的不均匀现象或微剪切带.冲击波过后,这些热点与周围达到热平衡而快速冷却,从而强度得到部分恢复,能够承受进一步的剪应力作用.

2) Lipkin 和 Asay<sup>[17]</sup>则认为可能是由于受冲击的多晶材料内部位错滑移不一致和晶粒指向不同,导致在晶粒或更小区域内出现剪应力分布不均匀,从而使得晶粒内的剪应力发生松弛.

3) Ruggiero 和 Bonora<sup>[18]</sup>根据数值模拟的结果,认为弹性前驱波的出现是因为冲击波在传播过程中的衰减引起的,并且该前驱波不是弹性的,而是塑性前驱.

虽然以上三种观点的本质存在差异,但根据这些观点建立的模型都再现了再加载过程中的弹性前驱波.为此,我们需要通过不同实验的比较,对以上三个观点进行检验,探讨形成再加载弹性前驱波的本质原因.首先比较金属材料(如钨合金<sup>[5]</sup>、铝合金<sup>[4,7,8]</sup>、铍<sup>[19]</sup>等)和有机材料(如 PMMA<sup>[20,21]</sup>)的实验结果可知,冲击波的衰减并不是形成弹性前驱波的真正原因,因为在 PMMA 中也存在冲击波衰减,但在再加载过程中并未出现弹性前驱波.其次 Huang 和 Asay 等人<sup>[8]</sup>对不同铝样品的大量实验表明,沉淀物、晶粒大小等因素对弹性前驱波的影响也极为有限.而且实验得到的冲击状态剪应力在较低压力范围内随冲击温度升高而增大,与 Swegle 和 Grady 的观点矛盾.再根据退火及未退火铝合金的加载-再加载比较实验发现,由于退火引起样品内部的位错减小同时保持晶粒大小不变,样品的再加载过程出现较大的差异.由此可以初步判断位错或者缺陷是影响弹性前驱波的主要因素,而晶界对其影响很小.对弹性前驱波发生的机理,需要设计单晶样品的加载-再加载实验进行进一步的验证.

### 4. 结 论

实验采用平面焊接的组合飞片对铝样品进行加载-再加载实验,把屈服强度测量的压力范围扩展到了 34 GPa.通过 VISAR 测量加载-卸载和加载-再加载实验的样品/窗口界面粒子速度剖面,利用 AC 方法得到了 LY12 铝在冲击压力为 20.30 GPa 和 33.88

GPa 时的屈服强度值 和文献发表的结果较为一致. 对于更高压力下的强度测量,则需要改变二级轻气炮的弹道参数或是加强飞片间的结合力来实现.

对有机玻璃以及各种铝样品的加载-再加载实验比较可以发现,样品中的冲击波衰减、沉淀物、晶粒大小以及晶界对再加载过程中的弹性前驱波影响非常小,而位错和缺陷是形成弹性前驱波的主要因

素,进一步的验证则需要设计单晶材料的加载-再加载实验.

感谢武汉理工大学功能梯度材料研究室的罗国强、沈强在组合飞片烧结工作中的大力帮助,同时感谢陈宏、叶素华、王为、李加波、向耀民、方茂林等人在实验测试和气炮运行中给予的帮助.

- [ 1 ] Steinberg D J , Cochran S G , Guinan M W 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 1498
- [ 2 ] Peng J X , Jing F Q , Wang L L , Li D H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2194 ( in Chinese ) [ 彭建祥, 经福谦, 王礼立, 李大红 2005 物理学报 **54** 2194 ]
- [ 3 ] Hu J B , Yu Y Y , Dai C D , Tan H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5750 ( in Chinese ) [ 胡建波、俞宇颖、戴诚达、谭 华 2005 物理学报 **54** 5750 ]
- [ 4 ] Asay J R , Chhabildas L C 1981 *Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals* ( New York : Plenum Press ) p417
- [ 5 ] Asay J R , Chhabildas L C , Dandekar D P 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 4774
- [ 6 ] Asay J R , Lipkin J 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 4242
- [ 7 ] Hu J B , Dai C D , Yu Y Y , Tan H 2006 *Explosion and Shock Waves* **26** 516 ( in Chinese ) [ 胡建波、戴诚达、俞宇颖、谭 华 2006 爆炸与冲击 **26** 516 ]
- [ 8 ] Huang H , Asay J R 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 033524
- [ 9 ] Barker L M , Hollenbach R E 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 4669
- [ 10 ] Li Z R , Yao J Q 1999 *Explosion and Shock Waves* **19** 182 ( in Chinese ) [ 李泽仁、姚建铨 1999 爆炸与冲击 **19** 182 ]
- [ 11 ] Tan H 2007 *Introduction of Experimental shock wave physics* ( Beijing : National Defense Industry Press ) ( in Chinese ) [ 谭 华 2007 实验冲击波物理导引 ( 北京 : 国防工业出版社 ) ]
- [ 12 ] Vogler T J , Reinhart W D , Chhabildas L C 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 4173
- [ 13 ] Vogler T J , Reinhart W D , Chhabildas L C , Dandekar D P 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 023512
- [ 14 ] Hu J B 2005 *M. S. Thesis* ( Beijing : Graduate School of Chinese Academy of Engineering Physics ) ( in Chinese ) [ 胡建波 2005 硕士学位论文 ( 北京 : 中国工程物理研究院北京研究生部 ) ]
- [ 15 ] Kubota A , Reisman D B , Wolfer W G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 241924
- [ 16 ] Swegle J W , Grady D E 1985 *Metallurgical applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena* ( Amsterdam : Elsevier Science ) p705
- [ 17 ] Lipkin J , Asay J R 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 182
- [ 18 ] Ruggiero A , Bonora N 2006 *Shock compression of condensed matter-2005* ( New York : AIP Conference Proceeding 845 ) p347
- [ 19 ] Chhabildas L C , Wise J L , Asay J R 1982 *Shock waves in condensed matter-1981* ( Amsterdam : Elsevier Science ) p422
- [ 20 ] Schuler K W , Nunziato J W 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 2995
- [ 21 ] Reinhart W D , Chhabildas L C 2006 *Shock compression of condensed matter-2005* ( New York : AIP Conference Proceeding 845 ) p131

# Measurements of dynamic yield strength of aluminum alloy and mechanism analysis of elastic precursor during reloading \*

Hu Jian-Bo<sup>1)†</sup> Tan Hua<sup>1)</sup> Yu Yu-Ying<sup>1)</sup> Dai Cheng-Da<sup>1)</sup> Ran Xian-Wen<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

<sup>2)</sup> *Physical Institute of Technology, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

( Received 8 February 2007 ; revised manuscript received 23 April 2007 )

## Abstract

Dynamic yield strength is one of the key variables in construction of the constitutive relationship for solids under shock loading. This paper reports the yield strength of LY12 aluminum alloy which was measured experimentally on the basis of the method proposed by J. R. Asay and L. C. Chhibildas, in which the test sample underwent a load-reload process and a load-unload process, and the particle velocity history at the LY12 Al sample/LiF transparent window interface was observed by velocity interferometer system for any reflecting surface (VISAR). Improvement in fabrication of the layered flyer plate made these experiments successful. The measured yield strength data at shock stresses of 22GPa and 34GPa are consistent with the reported data at relatively lower pressures. Moreover, physical mechanism of the elastic precursor emerging in the reloading-process was discussed briefly. It is concluded that dislocations is the principal factor resulting in the elastic precursor.

**Keywords** : dynamic yield strength, AC-method, elastic precursor, VISAR

**PACC** : 6220F, 6250

\* Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10232040 ).

† E-mail : wangfanhjb@hotmail.com