文章编号：1000-5773(2007)03-0327-05

金属材料再加载“准弹性”响应的实验验证*

宋 萍，周显明，袁 帅，李加波，汪小松

（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）

摘要：用波反射法设计了一维应变冲击实验，由时间分辨 VISAR 系统（Velocity Interferometer System for Any Reflection）测量了镁铝合金的冲击-再加载速度波剖面。结果显示，在排除窗口反射稀疏波的情况下，从 24 GPa 冲击态开始的再加载存在明显的“准弹性”响应，证实了 Asay 等报道的二次压缩“准弹性”响应是材料本征特性。并对金属材料高压本构参量实验测量的关键技术进行了探讨。

关键词：波反射；再加载；准弹性

中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

高压本构方程研究是材料动态响应特性研究的基础课题，在武器工程中有重要的应用。材料的剪切模量和动态屈服强度是构建本构方程的两个重要参量。前者可在冲击实验中通过测量高压声速获得[1-5]；后者的实验测量则相对较难，目前只有 Asay 等人发展的双屈服法[1-5]。Asay 方法是利用时间分辨加窗 VISAR 技术，测量冲击-再加载和冲击加载-卸载两种实验中的粒子速度波剖面，并对实测的波剖面进行拉氏分析来获得冲击态的屈服强度。Asay 方法的核心是，假设冲击压缩后的材料并非处于上屈服面，由此开始的卸载或再加载过程可观测到弹-塑性转变。

但从连续介质力学理论来看，当冲击压力超过材料的雨贡纽弹性极限（σ_{HEL}）后，即进入塑性变形区，材料发生屈服后应该处于上屈服面[6]，如图 1 中“1”所示。对处于上屈服面的材料进行再加载，将沿着上屈服面，依然发生塑性流动，如图 1 中“1－2”所示，不可能存在弹性响应。国内也有学者对上述 Asay 方法的核心假设提出了质疑[6]，部分人认为，实验观测到的弹性响应可能是由 LiF 窗口（其冲击阻抗低于 Al 或其它高阻抗样品的冲击阻抗）反射的稀疏波所致。

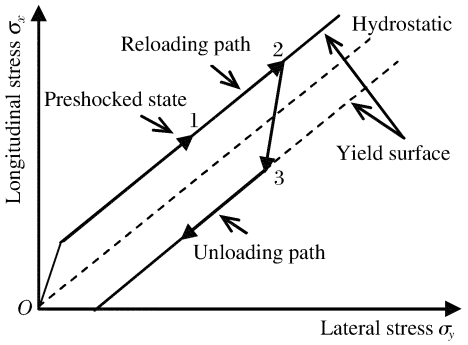


图 1 理想弹-塑性材料的加载-再加载模型

Fig. 1 Shock loading-reloading model of perfect elastic-plastic material

本工作通过低阻抗样品的冲击实验，在消除冲击波在样品/窗口界面反射的稀疏波干扰的情况下，对样品/窗口界面的粒子速度进行时间分辨测量和研究，获取再加载过程“准弹性”响应的实验证据，以澄清对上述问题的认识。

* **收稿日期**：2006-04-26；**修回日期**：2007-01-04

作者简介：宋 萍（1974—），女，硕士，主要研究方向为高压物理与力学. E-mail：songp1024@yahoo.com.cn

2 实验方法

实验选择镁铝合金(牌号为 MB2)作为样品材料,其冲击阻抗比 LiF 窗口和无氧铜飞片都低,因而在平板碰撞冲击实验中,从样品/窗口界面(a 界面)和样品/飞片界面(b 界面)反射的都是压缩波,不会存在反射稀疏波的问题。

典型的平板碰撞实验装置结构参见图 2,图 3(a)则给出了其波系作用过程的示意图。由飞片碰撞靶样品产生冲击波(S),到达 a 界面时(t_0 时刻),将向处于冲击态的样品中反射一左行压缩波,如果材料此时存在弹塑性响应,则此压缩波应分解为弹性(图中 E)和塑性(图中 P)波。压缩波到达 b 界面时反射一右行压缩波,对材料进行二次再加载,以此类推,因界面反射的压缩波还会对材料进行多次压缩,各次再加载波后的应力增幅是逐渐减小的,最终将趋于飞片/窗口的平衡压力(参见图 3(a))。

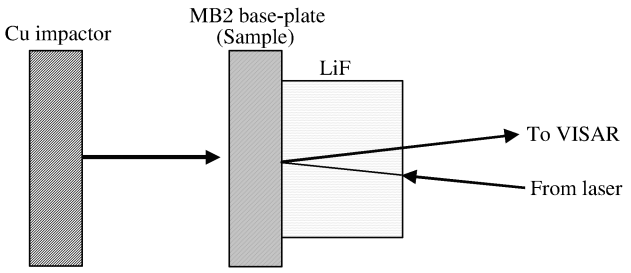


图 2 实验装置结构示意图

Fig. 2 Experimental impact configuration

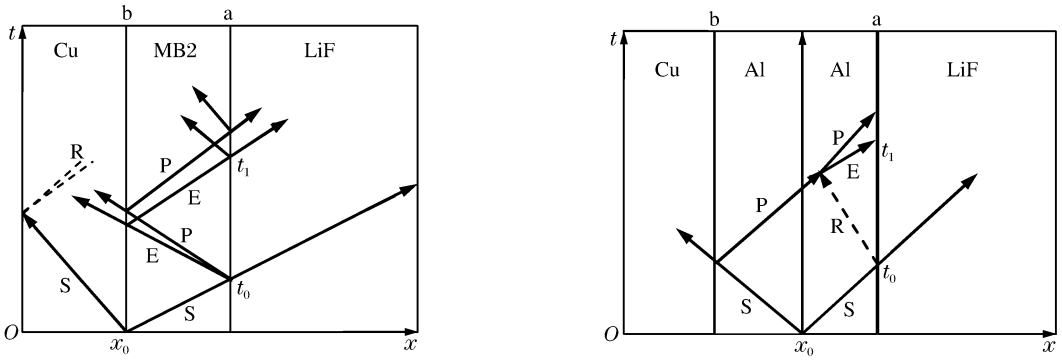


图 3 波系作用示意图

Fig. 3 x-t diagram depicting the wave interaction

对于采用冲击阻抗大于 LiF 窗口的材料作样品时(如铝等),选择的飞片为背负有一高阻抗材料的组合飞片,在冲击波到达样品/窗口界面时,会反射一稀疏波(R),该稀疏波与来自飞片后界面的压缩波相遇,将反射一弹性波,如图 3(b)所示。在连续介质力学理论中,飞片后界面反射的压缩波为塑性波,由稀疏波反射引起的弹性波将会干扰对再加载过程中出现弹性响应的正确判断。

通过设计适当的飞片和样品厚度,可以确保在再加载波到达 a 界面(t_1 时刻)后的一段时间里,不会受到来自飞片后界面的稀疏波的干扰,以便对再加载过程进行观测和记录。同时,通过设计镁铝样品中的一次加载压力,避免镁铝样品中在一次加载时形成冲击波的双波结构。

实验利用二级轻气炮(发射管口径 35 mm)进行冲击加载。铜飞片后的弹托材料为聚碳酸脂,弹速用磁测速系统测量。样品与窗口用环氧胶粘接,其胶层厚度小于 4 μm。实验所用速度剖面诊断系统为 VISAR 系统[7],其条纹常数为 234 Fr/(m/s),时间分辨力为 1 ns,所用激光波长为 532 nm。用高速数字存储示波器(带宽 500 MHz)记录 VISAR 条纹波形。实验样品规格、碰撞速度及 MB2 中的压力参数列入表 1 中。MB2 中的压力采用 IMPACT 程序由碰撞速度计算所得。

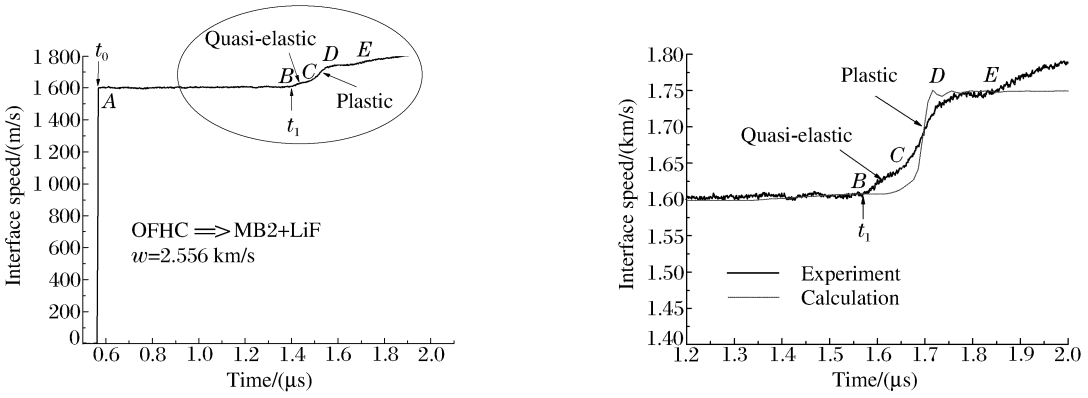
表 1　实验样品规格、碰撞速度及 MB2 中压力参数

Table 1　Sample size, impact velocity and the pressure in MB2 in the experiment

OFHC	MB2	LiF	Impact velocity/(km/s)	Pressure/(GPa)
∅33 mm×5.04 mm	∅33 mm×4.98 mm	∅25 mm×8 mm	2.56	24

3　实验结果与讨论

由 VISAR 测得的速度波剖面结果如图 4 所示。由图 4 看出,从样品/窗口界面观测到的速度波剖面(速度-时间变化曲线)可以分为 *A-B-C-D-E* 几段明显不同的过程。*A* 点为信号起跳(对应第一次冲击波到达 a 界面的 t_0 时刻),*AB* 段速度值基本恒定。*B* 点(对应 t_1 时刻)以后的界面速度再次增加,为反射压缩波到达 a 界面后的再加载过程。在第一次反射压缩波的再加载过程(*BD* 段)中,*BC* 段与 *CD* 段具有明显不同的斜率,显示出明显的弹-塑性转折点(图中 *C* 点)。即在我们对镁铝合金单纯的再加载实验中观测到了明确的弹性响应(*BC* 段),对应 Asay 等报道的二次压缩过程"准弹性"响应(Quasi-Elastic,参见图 5)。由此,在图 3(a)的波系分析中弹性波是存在的,这也证实了 Asay 等以前从铝等金属样品中观察到的再加载过程弹性响应现象,是材料本征特性的反应。



(a)　　(b) Partial magnifying of Fig. 4(a) and numerical simulation

图 4　界面粒子速度剖面

Fig. 4　Interface particle velocity history

对一次冲击后已进入塑性状态的材料进行再次压缩,再加载过程中弹性波的存在表明,材料在一次冲击后仍有一定强度,而并非完全塑性流动状态,这是流体弹塑性应力波理论无法解释的。引起材料一次冲击屈服后强度恢复的机理有待深入研究。

另外,用 LS-DYNA 三维程序和流体弹塑性模型对上述实验进行了数值模拟计算,所用参数见表 2。从计算曲线与实验结果的比较(见图 4(b))来看,从冲击态开始的再加载过程与实验结果存在明显差异,计算速度剖面不具备弹塑性转变过程。这表明在所用流体弹塑性本构模型中,目前还未考虑到材料再加载弹性响应的本征特性,在以后发展材料本构方程时应加入对此的描述。

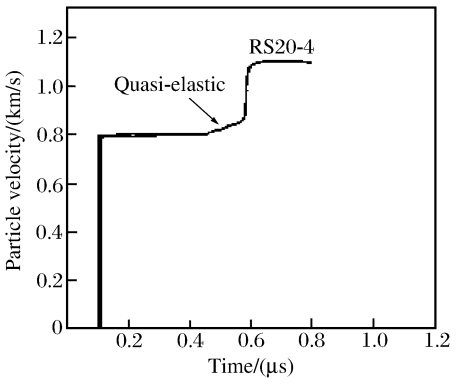


图 5　铝的再加载实验速度波剖面

Fig. 5　Particle velocity history for reshock experiment on aluminum

应当指出，用波反射法实验实现的再加载波剖面测量对于澄清材料动态弹塑性响应的概念是准确无误的，但由于第一次再加载波到达样品/窗口界面时，样品已在冲击态之后经历了两次再压缩过程，因而上述实验并不能用于确定材料冲击态的临界剪应力和屈服强度。因此，仍需采用 Asay 提出的组合飞片技术，即用飞片背负高阻抗材料来实现对处于冲击态材料的单一再加载。

表 2 计算所用材料参数

Table 2 Parameters used in the calculation

Material	Density ρ_0/(g/cm^3)	Hugoniot parameter c_0/(km/s)	Hugoniot parameter S	Grüneisen parameter γ_0	Shear modulus G_0/(GPa)	Yield strength Y_0/(GPa)	Viscosity cofficient Q_1	Viscosity cofficient Q_2	Ref.
OFHC	8.93	3.933	1.50	1.99	47.7	0.12			[9-10]
LiF	2.64	5.148	1.35	1.63	1.2	0.1	1.5	0.06	[9-11]
MB2	1.77	4.497	1.219	1.54	16.56	0.062			[9-10]

4 结 论

通过上述研究得到如下认识：

(1) 在实验压力下，镁铝合金样品冲击态后的再加载过程确实存在弹性响应和弹-塑性转变，这样的弹性响应并非由界面反射稀疏波引起。

(2) 从冲击态开始的再加载弹性响应是金属材料的本征响应特性，材料在一次冲击后仍有一定强度。引起材料一次冲击屈服后强度恢复的机理有待深入研究。

(3) 材料强度效应在动压实验中是不能被忽略的，应包含在材料本构描述中，才可能对实验波剖面进行更好的模拟和复现。

感谢经福谦院士、张万甲研究员和李大红研究员对本文提出的宝贵意见，感谢彭建祥副研究员对本文的帮助。

References:

[1] Asay J R, Chhabildas L C, Dandekar D P. Shear Strength of Shock-Loaded Polycrystalline Tungsten [J]. J Appl Phys, 1980, 51: 4774-4783.

[2] Duffy T S, Ahrens T J. Compressional Sound Velocity, Equation of State, and Constitutive Response of Shock-Compressed Magnesium Oxide [J]. J Geophys Res, 1995, 100: 529-542.

[3] Asay J R, Chhabildas L C. Determination of the Shear Strength of Shock Copressed 6061-T6 Aluminum [A]//Proceedings of International Conference on the Metallurgical Effects of High Strain Rate Determination and Fabrication [C]. Albuquerque, 1980: 417-429.

[4] Chhabildas L C, Wise J L, Asay J R. Reshock and Release Behavior of Berylium [R]. SAND-80-2864C, 1980.

[5] Huang H, Asay J R. Compressive Strength Measurements in Aluminum for Shock Compression over the Stress Range of 4～22 GPa [J]. J Appl Phys, 2005, 98: 033524(1)-033524(16).

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

[7] Hu Sh L. Laser Interferometry for Measuring Velocity [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. (in Chinese)
胡绍楼. 激光干涉测速技术 [M]. 北京：国防工业出版社，2001.

[8] Zhou X M, Jing F Q. VISAR's Data Processing VEX 2.0 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13 (Supplement): 286-290. (in Chinese)
周显明，经福谦. VISAR 数据处理软件 VEX 2.0 [J]. 高压物理学报，1999，13(增刊)：286-290.

[9] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [Z]. US: Univercity of California Press, 1980.

[10] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A Constitutive Model for Metals Applicable at High Strain Rate [J]. J Appl Phys, 1980, 51(3): 1498-1504.

[11] Duffy T S, Ahrens T J. Compressional Sound Velocity, Equation of State, and Constitutive Response of Shock-Compressed Magnesium Oxide [J]. J Geophys Res, 1995, 100: 529-542.

Experimental Validation of "Quasi-Elastic" Response of Metal during Reloading Process

SONG Ping, ZHOU Xian-Ming, YUAN Shuai, LI Jia-Bo, WANG Xiao-Song

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

Abstract: An uniaxial strain experiment of a magnesium alloy (brand: MB2) disk under shock loading and reloading was designed by a wave reflection method. Time-resolved interfacial velocity between the MB2 sample and a LiF window was measured by a VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflection) probe during the dynamic loading. Our result reveals that, under a better test condition with no rarefaction disturbing from the window (present in previous experiments), an elastic-plastic response does exist in the process of reloading from an initial shock state (24 GPa). This validates that the "quasi-elastic" response of metals under recompression, which had been reported by Asay et al, is an intrinsic character of the materials. Some discussion about the experimental technique for measuring the constitutive parameters of metals at high pressures will be presented also.

Key words: wave reflection; reloading; quasi-elastic