文章编号：1000-5773(2006)02-0145-08

利用 VISAR 测量 LY12 铝在冲击压缩下的声速*

俞宇颖[1]，谭 华[1]，胡建波[1]，戴诚达[1]，马 云[1]，陈大年[2]

(1. 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；
2. 宁波大学力学与材料科学研究中心，浙江宁波 315211)

摘要：介绍了利用 VISAR 技术测量受冲击压缩 LY12 铝的高压声速的方法。平板对称碰撞实验在冲击波物理与爆轰物理实验室的二级轻气炮上进行，峰值应力约为 20、32、55 和 71 GPa。每发实验中，VISAR 同时使用三种条纹常数测量 LY12 铝和单晶 LiF 窗口的界面粒子速度剖面。从三种条纹常数计算的界面粒子速度剖面相互符合，完全一致。实验信号具有很高的信噪比，表明样品与窗口之间的界面连结和处理技术非常成功。这种测量技术不仅能够得到初始加载应力下的纵波声速，而且能够得到声速沿着卸载路径的变化。将声速的塑性段外推到初始冲击加载压力即得到该压力下的体积声速。LY12 铝的声速测量结果与假定 $\rho\gamma$ 为常数条件下用 Mie-Grüneisen 状态方程计算的结果符合得很好。

关键词：VISAR；追赶稀疏波；声速；粒子速度剖面；LiF 窗口；LY12 铝

中图分类号：O347.5 **文献标识码**：A

1 引 言

高压声速不仅与高压下材料的力学性质相关，也与材料的高压物理特性或热力学状态密切相关。通过高压声速的研究可以获得体积模量、剪切模量和屈服强度等力学量与温度和压力的关系，这对于建立具有明确物理含义的高压本构方程有重要意义[1-3]。在确定金属材料的高压熔化压力区时，声速测量也是一种重要的手段[4-5]。

Al'tshuler 等首先进行了铝、铜、铅、铁等金属材料在高达 100 GPa 压力下的纵波声速测量[6]。此后 McQueen 等[7]和 Brown 等[8]提出了可用于兆巴以上冲击压力状态声速测量的“光分析法”。“光分析法”的测量精度相对较高，但实验装置较复杂，而且声速的测量结果往往因样品和作为光分析器的窗口材料之间的阻抗失配造成较大误差，有时甚至得不到体积声速，仅能够得到纵波声速。最近，随着 VISAR 技术的广泛应用[9-10]，Duffy 等[11]开展了利用加窗 VISAR 技术测量高压声速的研究。相比较而言，加窗 VISAR 技术实验装置简单，只需一块样品，并具有较高的测量精度。不但可以得到冲击压缩高压状态的声速，而且可以得到从冲击态到零压附近的整个卸载过程的声速。谭华[12]对高压声速测量方法进行了全面评述，提出利用加窗 VISAR 结合纵波在界面反射的阻抗匹配法，可以得到卸载过程中的声速及卸载路径。为确保测量精度，应用加窗 VISAR 进行高压声速测量有一些关键技术需要解决，其中窗口材料的选择及加工、样品和窗口的表面处理及其连接技术、安装工艺等尤为重要。

针对以上问题，本研究对加窗 VISAR 测量高压声速的实验技术进行了探索，对 LY12 铝在 20～71 GPa冲击压缩状态下的声速及冲击压缩卸载过程的声速进行了测量。

* **收稿日期**：2005-01-27；**修回日期**：2005-03-22
基金项目：国家自然科学基金重点项目(10232040)；中国工程物理研究院基金项目(2002-4210501-1-03)
作者简介：俞宇颖(1976—)，男，博士研究生，主要研究方向为高压物理与力学.

2 实验原理及设计

2.1 实验基本原理

热力学声速是小扰动的传播速度。受冲击压缩材料的声速测量就是确定冲击波后的追赶稀疏波的传播速度。原则上可以通过适当的实验设计，通过观测稀疏波到达空间某一位置时引起的状态量(如压力、温度、粒子速度等)的变化来确定稀疏波到达的时间，进而计算声速。利用加窗 VISAR 技术测量声速就是通过测量稀疏波到达“样品/窗口”界面时引起的界面粒子速度变化，进而获得声速的。其基本原理如图 1 所示(为简单起见，假定为对称碰撞并形成单一冲击波结构)。当飞片与样品发生碰撞时，在样品中形成右行冲击波，飞片中形成左行冲击波。样品中的右行冲击波到达“样品/窗口”界面时(A 点，$t=t_0$)，界面的粒子速度发生突变，由 0 变为 $u_I=u_A$。当飞片中的左行冲击波到达飞片后表面时，立即反射右行中心稀疏波。当该稀疏波(纵波)到达“样品/窗口”界面时(C 点，$t=t_1$，$u_I=u_C$)，将使界面速度下降。当塑性卸载波到达界面时(E 点，$t=t_2$，$u_I=u_E$)，界面速度再次突变，在速度剖面上又形成拐点。由波系作用图所示的几何关系可得

$$\Delta t_{AC}=t_1-t_0=\left(\frac{h}{D}+\frac{h+d}{C}\right)-\frac{d}{D} \tag{1}$$

式中：D 为飞片和样品中的冲击波速度，$C=C_{\mathrm{L}}$ 为 Lagrange 声速，h 和 d 分别为飞片和样品的厚度。由此可得 Lagrange 纵波声速 C_{L}

$$C_{\mathrm{L}}=\frac{h+d}{D(t_1-t_0)-(h-d)}D \tag{2}$$

相应地塑性声速 C_{B} 为

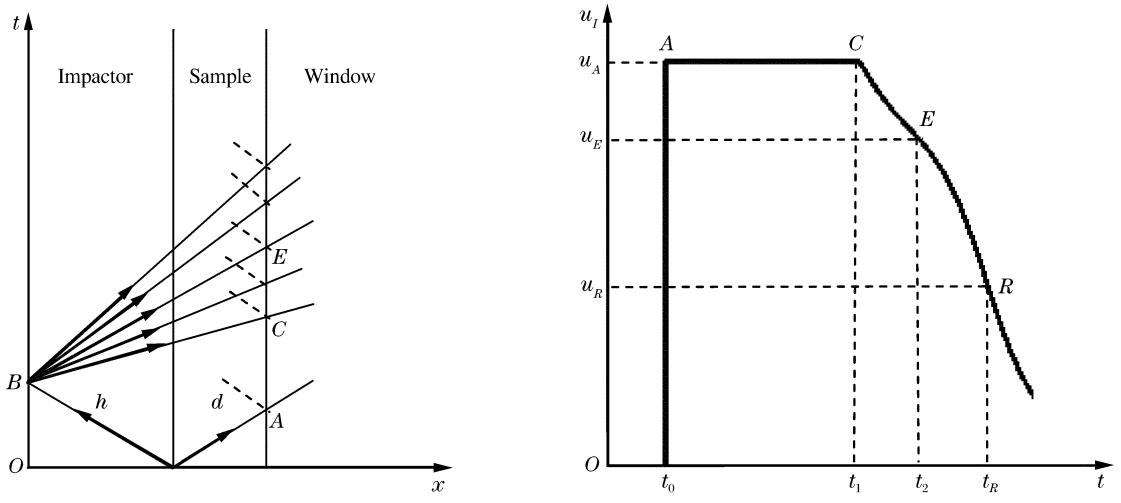
$$C_{\mathrm{B}}=\frac{h+d}{D(t_2-t_0)-(h-d)}D \tag{3}$$

同样，在任意时刻 t_R，与速度剖面上任意一点 R 对应的界面速度为 u_R，该点对应的声速 C_R 可表示为

$$C_R=\frac{h+d}{D(t_R-t_0)-(h-d)}D \tag{4}$$

考虑冲击压缩引起的状态变化时，可得到实验室坐标系中的热力学声速或 Euler 声速 c

$$c=\rho_0 C_R/\rho \tag{5}$$



(a) Lagrangian x-t diagram showing wave propagation in the impactor, sample and window

(b) Interface particle velocity profile between sample and window

图 1 加窗 VISAR 测量声速示意图

Fig. 1 Schematic of sound velocity measurement using VISAR technique

式中:ρ_0 为材料的初始密度,ρ 为与追赶波的速度 C_R 对应的密度,这一密度是入射波阵面未与界面发生作用时的样品密度,可以利用阻抗匹配原理得到。

应该指出,以上计算的声速没有考虑追赶稀疏波与入射冲击波在"样品/窗口"界面的反射波相互作用造成的影响。只有当样品与窗口之间的阻抗相差很小时,才可以不考虑这种影响。LY12 铝与 LiF 的阻抗十分接近,属于这种情况。如果金属样品与窗口之间的阻抗相差较大,则需要采用逆向撞击法[11-12]减小上述反射波的影响。

2.2　实验设计

实验在二级轻气炮上进行。采用了对称碰撞方法,实验装置如图 2 所示。由于高压声速中需要观测冲击波到达"样品/窗口"界面以后、界面粒子速度剖面在追赶稀疏波作用下的变化历史,因此实验测量时间相对较长。在实验装置的设计中,窗口必须有足够的厚度和宽度,以避免来自窗口边侧和自由面的稀疏波对"样品/窗口"界面的干扰;同时要求样品有足够的宽度,以避免样品的边侧稀疏对界面粒子速度剖面的影响[13]。首先利用冲击波速度(D)与粒子速度(u)的线性拟合关系

$$D = C_0 + \lambda u$$

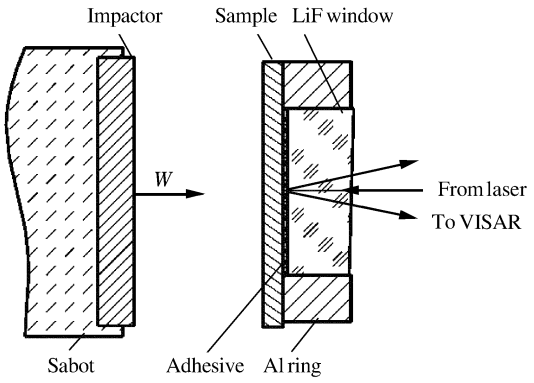


图 2　实验装置示意图

Fig. 2　Schematic of experiment set-up

和 Grüneisen 状态方程计算沿着冲击绝热线的体积声速 C_H[14]

$$\begin{aligned} C_H^2 &= -V^2 \frac{\mathrm{d}p_H}{\mathrm{d}V}\left(1 - \frac{\gamma V_0}{V}\frac{\eta}{2}\right) + \frac{p_H}{2}\left(\frac{\gamma}{V}\right)V^2 \\ \frac{\mathrm{d}p_H}{\mathrm{d}V} &= -\rho_0^2 C_0^2 \frac{1+\lambda\eta}{(1-\lambda\eta)^3} \end{aligned} \tag{6}$$

式中:冲击压力 p_H 和压缩比 η 可表示为

$$\begin{aligned} p_H &= -\rho_0 C_0^2 \frac{\eta}{(1-\lambda\eta)^2} \\ \eta &= 1 - \frac{V}{V_0} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{u}{D} \end{aligned} \tag{7}$$

实验的冲击压力在 LY12 铝的冲击熔化压力(120 GPa)以下[7],追赶稀疏波中包含弹性纵波和体波两部分。在实验装置设计需要考虑弹性纵波波速与流体力学声速的差异对实验装置设计的影响。弹性纵波速度通常可达流体力学声速 C_H 的 1.1～1.3 倍[14],在本研究中采用 1.25 C_H 作为弹性纵波波速来设计飞片和样品尺寸,结果见表 1。

表 1　实验装置基本参数

Table 1　Experimental parameters

Shot	Impact velocity /(km/s)	Sample peak stress /(GPa)	Impactor(LY12Al) /(mm×mm)	Sample(LY12Al) /(mm×mm)	Window(LiF) /(mm×mm)
1	2.16	20.3	∅32×2.959	∅48×1.517	∅20×8
2	3.13	32.1	∅32×2.978	∅48×1.515	∅20×8
3	4.69	54.7	∅32×2.952	∅48×1.480	∅20×8
4	5.64	70.6	∅32×2.936	∅48×1.485	∅20×8

选择合适窗口是应用加窗 VISAR 技术测量高压声速的一个关键问题。一方面,窗口应尽可能与待测样品的阻抗相匹配,另一方面要求窗口材料在所研究的冲击压力范围内能保持透明。在目前应用的窗口材料中,LY12 铝合金阻抗($\rho_0=2.779$ g/cm^3,$C_0=5.370$ km/s,$\lambda=1.29$)与单晶 LiF 窗口的阻抗($\rho_0=2.64$ g/cm^3,$C_0=5.148$ km/s,$\lambda=1.358$[15])非常接近,可以认为冲击波在"样品/窗口"界面的反射波对后继追赶稀疏波的影响很小。而且 LiF 窗口材料在冲击压缩下的透明性可以保持到 200 GPa 的压力范围内[16]。另外一个重要问题是必须考虑窗口材料在冲击载荷下折射率的变化。由于冲击载荷作用将使窗口材料折射率发生改变,进而引起的附加多普勒频移,需要对最终的测速结果引入修正。对 LiF 晶体窗口,Wice[17]测得其修正值为 0.281。

为了测得从冲击压缩状态及卸载到零压附近的全过程的声速,必须对加载卸载的全过程进行测量。为使信号光反射面在较长的测量时间内保持足够的反射率,必须对"样品/窗口"界面进行处理。马云等[18]采用了两种方法:一是在 LiF 晶体窗口与样品接触的表面镀铝膜;另一种是直接以样品表面作信号光反射面。在较低压力的实验中,这两种方法获得信号光的反射率都较高。我们采用前一种方法,并将窗口的自由面加工成锲角,以避免窗口表面的反射光形成寄生干涉,造成对 VISAR 信号的干扰。

样品表面进行研磨处理,与 LiF 晶体窗口之间用透明粘接剂粘接,胶层厚度应为微米量级。为了提高实验测量的可靠性,在同一发实验的 VISAR 测量中采用了 234、468 和 837 m/(s·Fr) 三种不同条纹常数进行测量。

3 实验结果与分析

在二级轻气炮上对 LY12 铝进行了冲击压力为 20.3、32.1、54.7 和 70.6 GPa 四个压力点的对称碰撞实验,铝飞片速度分别为 2.16、3.13、4.69 和 5.64 km/s。图 3 给出了 LY12 铝飞片以速度为 4.69 km/s撞击 LY12 铝靶板时,在"LY12 铝样品/LiF 窗口"界面的 VISAR 干涉条纹示波器记录。VISAR 干涉条纹清晰,信噪比较高。图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)分别记录了对应于条纹常数为 234、468 和 837 m/(s·Fr)三种情况的信号。从 VISAR 干涉条纹得到的"LY12 铝样品/LiF 窗口"界面粒子速度剖面如图 3(d)所示。从三种条纹常数分别计算的界面粒子速度剖面相互之间具有良好的符合性。图 3(d)给出的界面粒子速度剖面尚未对 LiF 窗口折射率的改变进行修正。

应用 Wice[17]给出的 LiF 折射率的修正,图 4 给出了经过折射率修正的 4 个不同初始冲击压力下"LY12 铝样品/LiF 窗口"界面粒子速度剖面。图中显示了 LY12 铝明显的弹-塑性卸载特征,而且随着加载压力的提高,弹性卸载区的宽度逐渐减小。

由粒子速度剖面,根据公式(4)可以获得从冲击压缩状态卸载到零压过程中对应任一粒子速度的拉格朗日声速。应该指出,由于样品窗口之间存在阻抗失配,VISAR 测得的是追赶稀疏波在界面发生反射以后的物理状态对应的粒子速度。利用实验测量的界面粒子速度和声速计算样品中原始入射波后应力 σ_1 和粒子速度 u_1 的增量公式[12,19]为

$$\begin{aligned} \mathrm{d}u_1 &= \frac{1}{2}\left[\mathrm{d}u_\mathrm{w} + \frac{\mathrm{d}\sigma_\mathrm{w}}{(\rho_0 C)_1}\right] \\ \mathrm{d}\sigma_1 &= \frac{1}{2}\left[\mathrm{d}\sigma_\mathrm{w} + (\rho_0 C)_1 \mathrm{d}u_\mathrm{w}\right] \end{aligned} \tag{8}$$

式中:ρ_0 为样品材料的初始密度,$C=C_\mathrm{L}(t)$是实验中实测的 Lagrange 声速剖面,$u_\mathrm{w}=u_\mathrm{w}(t)$是实测界面粒子速度剖面,窗口中的应力剖面 $\sigma_\mathrm{w}(t)$与粒子速度 $u_\mathrm{w}(t)$由窗口的卸载路径确定。由于冲击压力较低时,在本研究中利用冲击绝热线近似等熵卸载线。由此按照(8)式可获得 LY12 铝原始入射波的应力剖面 $\sigma_1(t)$与粒子速度剖面 $u_1(t)$。图 5 给出了 LY12 铝在不同初始冲击压缩状态下卸载过程的 Largrange 声速与粒子速度之间的关系。弹-塑性转变在声速-粒子速度图上得到明显反映,不同压力点卸载时,塑性声速段相互基本重合。利用实验测得的 Largrange 声速剖面,结合阻抗匹配法不仅可以获得卸载过程的应力和粒子速度,还可以获得卸载过程的比容、应变和欧拉声速,即材料从冲击压缩状态到零压附近的卸载路径。

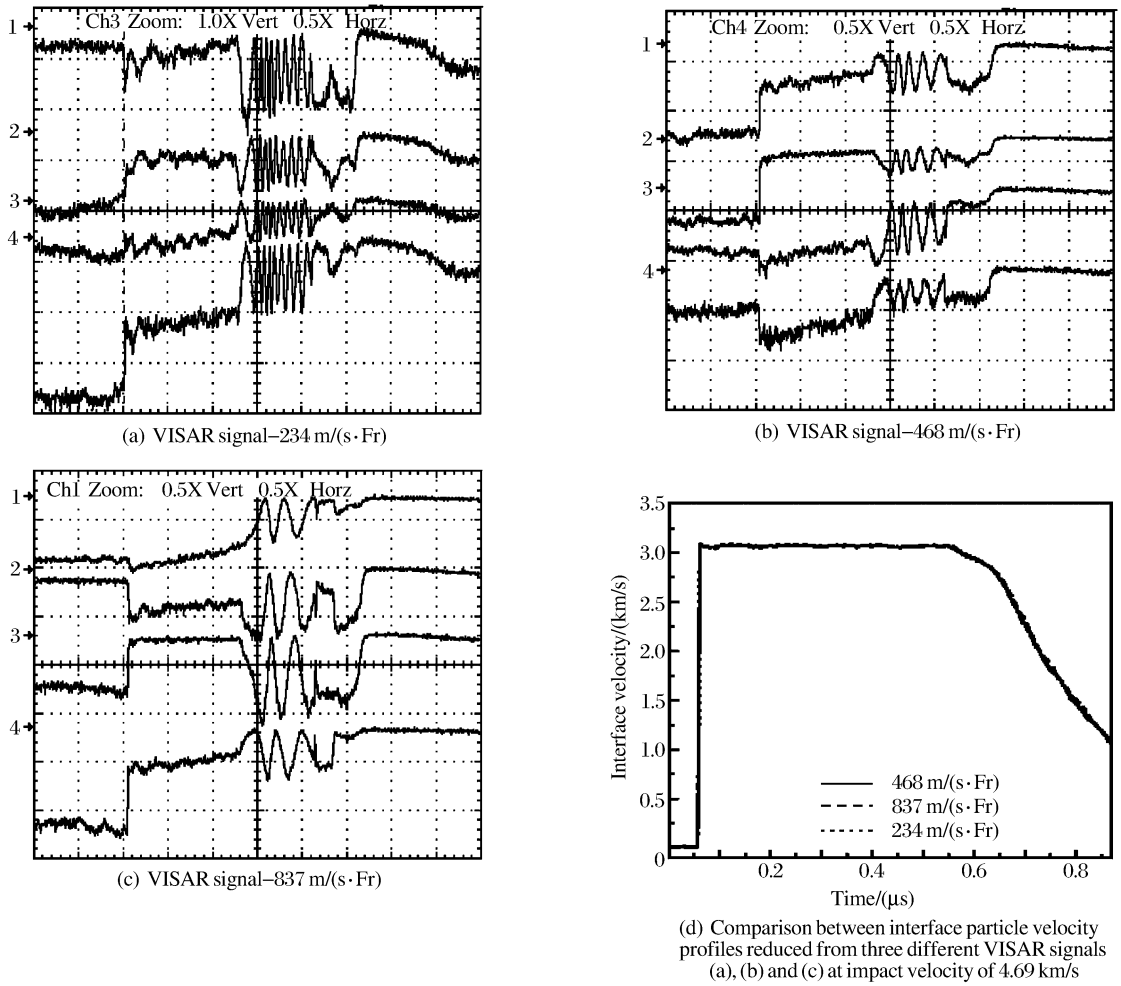


图 3　实验测量得到的 VISAR 干涉条纹图及根据条纹计算的界面粒子速度剖面

Fig. 3　VISAR records obtained with three different fringes-constants and interface velocity profiles reduced from these VISAR signals

应用“光分析法”和加窗 VISAR 技术均可直接测得冲击波后的纵波声速(图 6 所示的点 1)和经过弹性卸载后的塑性声速(图 6 所示的点 2)。此时塑性声速对应的压力是经过弹性卸载后的压力，低于初始冲击压缩状态的压力。需将塑性声速外推至初始冲击状态来得到对应的塑性声速，或体波声速[1](图 6 所示的点 3)。但是“光分析法”无法确定塑性卸载的压力状态，因此难以对声速进行压力修正。使用加窗 VISAR 技术可以对卸载过程声速和粒子速度进行连续测量，并按(8)式获得沿着卸载过程的应力-声速关系，从而可以利用外推法获得初始冲击状态下的体波声速。由公式(5)和公式(7)得到的 LY12 铝在 20.3、32.1、54.7 和 70.6 GPa 四个冲击压力下的欧拉纵波声速、体积声速列于表 2。体积声速与利用公式(6)并假定 $\rho\gamma=\rho_0\gamma_0$ 计算的流体力学声速有很好的一致性。由表 2 可以看出，在 20～

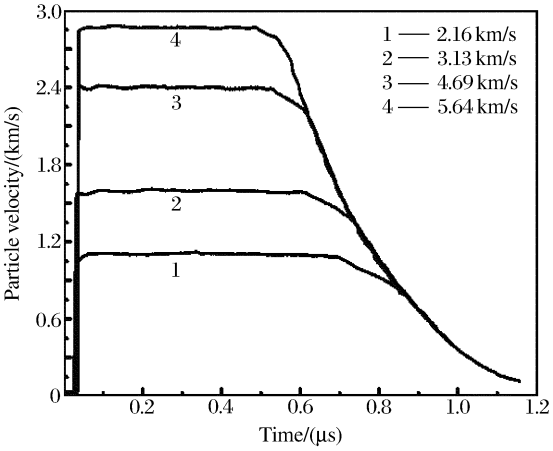


图 4　不同冲击速度下得到的“LY12 铝/LiF 窗口”界面速度剖面

Fig. 4　Particle velocity profiles obtained at different impact velocity

71 GPa 压力范围内，采用 1.25 倍流体力学声速作为弹性卸载波速进行样品设计基本合理。

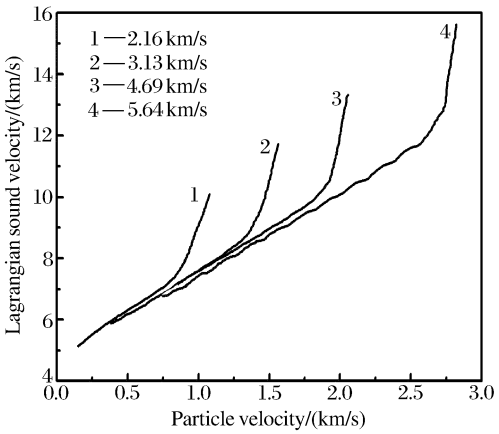


图 5 沿着卸载路径 LY12 铝的拉格朗日声速随粒子速度的变化

Fig. 5 Lagrangian sound velocities versus particle velocities along unloading path in LY12 Al at different impact velocity

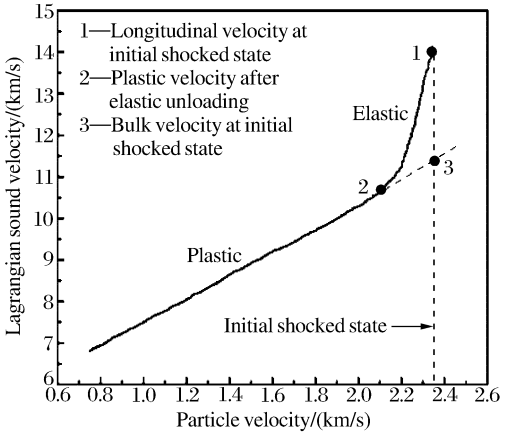


图 6 应用外推塑性声速获得 LY12 铝的在初始冲击压缩态的体积声速 (4.69 km/s)

Fig. 6 Analytic techniques for determining bulk velocity at initial shocked state by extrapolation of plastic velocity along unloading path

表 2 LY12 铝在初始冲击压缩态下的欧拉声速

Table 2 Euler sound velocities in shock-compressed LY12 aluminum

Shot	Impact velocity /(km/s)	Sample peak stress /(GPa)	Longitudinal sound velocity /(km/s)	Bulk sound velocity /(km/s)	C_H /(km/s)
1	2.16	20.3	8.48	6.79	6.81
2	3.13	32.1	9.24	7.36	7.35
3	4.69	54.7	10.19	8.20	8.14
4	5.64	70.6	10.73	8.61	8.59

Note: C_H is calculated according to Eq. (6) under the assumption of $\rho\gamma=\rho_0\gamma_0$.

4 结 论

(1) 利用加窗 VISAR 技术，在二级轻气炮上进行了 LY12 铝的声速测量。在同一发实验的 VISAR 测量中采用了 234、468 和 837 m/(s·Fr)三种不同条纹常数。通过改进样品与窗口之间界面的连接和安装工艺，获得了具有高信噪比的 VISAR 干涉信号。实验装置的设计方法能确保在实验观测时间内，样品/窗口界面粒子速度剖面不受边侧稀疏效应的影响。按照三种条纹常数计算的“样品/窗口”界面粒子速度剖面相互之间具有良好符合性。

(2) 由“样品/窗口”界面粒子速度剖面得到了 LY12 铝沿卸载过程的声速。弹塑性转变在声速-粒子速度图上得到明显反映，不同压力点卸载时，塑性声速段相互基本重合。此外还得到了在初始冲击压缩状态下的纵波声速和体波声速。为获得 LY12 铝的卸载路径并进一步开展高压本构研究提供了基础。

感谢汪小松、陈 宏、王 为、方茂林、向曙民、卢 敏、叶素华和翁继东等在实验中给予的支持！

References:

[1] Asay J R,Chhabildas L C. Determination of the Shear Strength of Shock Compressed 6061-T6 Aluminum [A]. //Meyers M M,Murr L E. Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals [C]. New York:Plenum Publishing Corp,1981:417-431.

[2] Chhabildas L C,Asay J R,Barker L M. Shear Strength of Tungsten under Shock and Quasi-Isentropic Loading to 250 GPa [R]. SAND-88-0306,1988.

[3] Zhang J Y,Tan H,Yu J L. The Determination of Lagrangian Sound Velocity for 93W Alloy under Shock Loading and Its Applications [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,1999,13(1):42-49. (in Chinese)
张江跃,谭　华,虞吉林. 动高压拉格朗日声速的测定及其应用 [J]. 高压物理学报,1999,13(1):42-49.

[4] Asay J R,Chhabildas L C,Kerley G I,et al. High Pressure Strength of Shocked Aluminum [A]. //Gupta Y M. Shock Waves in Condensed Matter-1985 [C]. New York:Plenum Press,1986:145-149.

[5] Asay J R. The Use of Shock-Structure Methods for Evaluating High-Pressure Material Properties [J]. Int J Impact Eng,1997,20:26-61.

[6] Trunin P Φ. The Properties of Condensed Matter under High Pressure and High Temperature [M]. Translated by Han J W. Mianyang:Institute of Fluid Physics,CAEP,1996:172-192. (in Chinese)
特鲁宁 P Φ. 高温高压下凝聚态物质的性质 [M]. 韩钧万,译. 绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所,1996:172-192.

[7] Mcqueen R G,Fritz J N,Morris C E. The Velocity of Sound behind Strong Shock Waves in 2024 Al [A]. //Asay J R,Graham R A,Straub G K. Shock Waves in Condensed Matter-1983 [C]. Amsterdam:North-Holland,1984:95-98.

[8] Brown J M,Shaner J W. Rarefaction Velocities in Shocked Tantalum and the High Pressure Melting Point [A]. //Asay J R,Graham R A,Straub G K. Shock Waves in Condensed Matter-1983 [C]. Amsterdam:North-Holland,1984:91-94.

[9] Barker L M,Hollenbach R E. Shock-Wave Studies of PMMA,Fused Silica,and Sapphire [J]. J Appl Phys,1970,41(10):4208-4226.

[10] Barker L M,Hollenbach R E. Laser Interferometer for Measuring High Velocities of Any Reflecting Surface [J]. J Appl Phys,1972,43:4669-4675.

[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(B1):529-542.

[12] 谭　华. 高压声速测量与卸载路径 [J]. 爆轰波与冲击波,2003,2:60-70.

[13] Asay J R,Chhabildas L C,Barker L M. Projectile and Impactor Designs for Plate-Impact Experiments [R]. SAND-85-2009,1985.

[14] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. Beijing:Scientific Press,1986. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 北京:科学出版社,1986.

[15] Carter W J. Hugoniot Equation of State of Some Alkali Halides [J]. High Temperatures-High Pressures,1973,5:313-318.

[16] Furnish M D,Chhabildas L C,Reinhart W D. Time-Resolved Particle Velocity Measurement at Impact Velocities of 10 km/s [J]. Int J Impact Eng,1999,23:261-270.

[17] Wise J L,Chhabildas L C. Laser Interferometer Measurements of Refractive Index in Shock-Compressed Materials [R]. SAND-85-0310C,1985.

[18] Ma Y,Hu S L,Wang X S,et al. VISAR Measurement on Interface Velocity between Shocked Specimen and Window [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2003,17(4):290-294. (in Chinese)
马　云,胡绍楼,汪小松,等. 样品-窗口界面运动速度的 VISAR 测试技术 [J]. 高压物理学报,2003,17(4):290-294.

[19] Asay J R,Chhabildas L C. Shear Strengths of Shock-Loaded Polycrystalline Tungsten [J]. J Appl Phys,1980,51(9):4774-4783.

Sound Velocity Measurements for Shock-Compressed LY12 Aluminum Alloy by Using VISAR Technique

YU Yu-Ying[1], TAN Hua[1], HU Jian-Bo[1], DAI Cheng-Da[1], MA Yun[1], CHEN Da-Nian[2]

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *Mechanics & Materials Science Research Center, Ningbo University, Ningbo* 315211, *China*)

Abstract: The experimental method to measure the high-pressure sound velocity of shock-compressed LY12 aluminum alloy by VISAR technique is described. Symmetrical plate impact experiments were conducted with the two-stage light-gas gun and at peak stresses about 20, 32, 55 and 71 GPa, respectively. In each shot, a VISAR system with three different fringe-constants was used to measure the particle-velocity profile at the interface between the test sample and the single crystal LiF window. The particle velocity histories deduced from three fringe numbers in each shot coincided with each other excellently. The high signal to noise experimental records also demonstrated that the joint and the treatment of the interface between the sample and the window were very successful. Beside the longitudinal sound velocities at the initial shock stresses, also produced were the sound velocity histories along the release paths, from which the bulk sound velocities at the initial shock stresses were determined by extrapolating the plastic portion of the sound velocity history. These results were consistent with the calculations obtained through Mie-Grüneisen equation of state under the assumption that $\rho\gamma$=constant.

Key words: VISAR; catch-up release wave; sound velocity; particle velocity profile; LiF window; LY12 aluminum