文章编号：1000-5773(2005)03-0206-07

冲击压缩下单晶 LiF 高压声速及卸载路径研究*

于锦泉[1,2]，肖亚斌[2]，周显明[1]，谭 华[1]

(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. 国防科技大学理学院，湖南长沙 410073)

摘要：采用二级轻气炮加载手段，在 5～79.1 GPa 冲击压力范围内，利用加窗 VISAR 技术对氟化锂(LiF)单晶样品进行了研究，得到了不同冲击压力下的纵波声速、体积声速以及卸载路径。实验结果显示：单晶 LiF 沿冲击绝热线的 Lagrange 纵波声速随粒子速度呈线性变化；在 5～79.1 GPa 冲击压力下，单晶 LiF 并未发生熔化及其它相变；卸载路径及速度剖面弹塑性明显。

关键词：LiF；逆向碰撞；高压声速；卸载路径；VISAR
中图分类号：O521.2 **文献标识码**：A

1 引 言

测量高压声速，探索声速与加载压力的关系，建立适用的实验技术和数据处理方法，不仅能够为研究和测量材料的高压声速、强度、弹性模量等提供关键技术，而且能够为冲击熔化压力的测量提供重要方法。这些研究对于建立精细的状态方程是非常重要的[1]。

由于声速及卸载路径测量的重要性，20 世纪 60 年代以来，国内外学者已做了不少探索工作，形成了较完整的高压声速及卸载路径测量技术。主要有这样几种方式：利用化爆加载方法[2,3]测量同一冲击压力下的各个不同的卸载压力点，得到不连续的卸载路径；使用加窗 VISAR 技术[4,5]测量从冲击压力卸载到零压附近的卸载路径；在研究材料强度[6]的工作中同时研究材料的声速及卸载路径。

单晶 LiF 是一种常用的窗口材料，国内外对它已经做了不少研究工作[7,8]，动态性质的研究主要是测量其 Hugonoit 状态，它的高压声速及卸载路径的研究尚未有报道。本研究在上述工作的基础上，用加窗 VISAR 技术初次测量了单晶 LiF 的等熵卸载路径，得到了弹性声速和体积声速随粒子速度变化的关系，总结出单晶 LiF 窗口卸载路径的经验表达式。

2 实验方法及技术

2.1 实验原理

在一维应变实验中，利用加窗 VISAR 技术测量高压声速及卸载路径的基本原理见图 1 和图 2。由于研究的样品作为窗口材料，因而样品、靶板及窗口由同种材料制成。飞片(样品)碰撞靶板后，分别向靶板及样品传播两个相反方向的冲击波，冲击波速度均为 D(Lagrange 坐标系中)。靶板中的冲击波到达“靶板/窗口”界面时刻 t_0，界面速度突然增大，VISAR 形成条纹移动。飞片中的冲击波到达样品后界面时，由于弹托材料为低阻抗材料，便由样品后界面向右传播一个中心稀疏波，在稀疏波到达“靶板/窗口”界面前，界面粒子速度保持不变，VISAR 不产生干涉条纹移动。中心稀疏波波头到达“靶板/窗口”界面时刻 t_1，界面粒子速度开始下降，VISAR 重新产生条纹干涉移动。对于 t_1 后的任意时刻 t_R，在速

* **收稿日期**：2004-01-17；**修回日期**：2005-01-13
基金项目：国家自然科学基金(42105103-256)
作者简介：于锦泉(1980—)，男，硕士研究生，主要研究方向为冲击波物理. E-mail：tt_zn@126.com

度剖面上对应的任意一点 R,其界面速度为 u_R,对于该点对应的 Lagrange 声速 $c_1^{\mathrm{L}}=c_1^{\mathrm{L}}(t)$ 为

$$c_1^{\mathrm{L}}=\frac{h+d}{D(t_R-t_1)-(h-d)}D \tag{1}$$

式中:h 为飞片(样品)厚度,d 为靶板厚度。

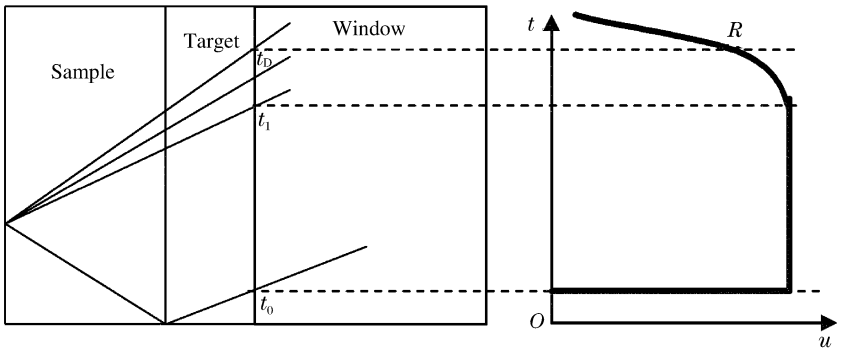


图 1　波系作用示意图

Fig. 1　A wave schematic illustration

图 2　速度-时间剖面

Fig. 2　Velocity-time profile

按声速定义及特征线理论[9,10]得到卸载过程中的应力 $\sigma_R=\sigma_R(t)$ 及比容 $v_R=v_R(t)$

$$\mathrm{d}\sigma_R=\rho_0 c_1^{\mathrm{L}}\mathrm{d}u \tag{2}$$

$$\mathrm{d}v_R=-\mathrm{d}u_R/\rho_0 c_1^{\mathrm{L}} \tag{3}$$

由于窗口受冲击压缩后其折射率发生变化,实验观测到的是表观界面速度 $u_{\mathrm{a}}(t)$,需进行折射修正[11],才能得到(2)式及(3)式中的界面速度 $u_R=u_R(t)$。马云给出了 $u_{\mathrm{a}}(t)$与 $u_R(t)$之间的关系[12]

$$u_{\mathrm{a}}(t)=1.243u_R(t) \tag{4}$$

卸载初始应力 σ_0 为飞片击靶后的冲击压力 p_{H}[13]:

$$p_{\mathrm{H}}=\rho_0 c_0^2\eta/(1-\lambda\eta)^2 \tag{5}$$

式中:$\eta=1-v'_0/v_0=(1-c_0/D)/\lambda$,为冲击压缩比;$v_0$为单晶 LiF 在常压零温时的比容;$v'_0$ 为卸载初始比容,其倒数为卸载初始密度;c_0 及 λ 为材料常数,可以由材料的 Hugonoit 数据[7]给出。

在对称碰撞条件下,飞片(样品)击靶后,靶板及样品中的粒子速度 u_{H} 均为飞片速度 w 的一半。在使用磁测速[1]测得飞片速度后,由 $D=c_0+\lambda u$ 可以得到样品及飞片中的冲击波速度 D,将 D 代入(1)式,再对(2)式和(3)式进行逐步积分,即可得到单晶 LiF 的卸载路径及沿卸载路径的高压声速。

2.2　实验装置

采用二级轻气炮作为动态加载手段,以四探头系统即推-挽速度干涉仪(VISAR)[11]为诊断技术,进行卸载路径及高压声速测量。实验装置如图 3 所示,样品、靶板和窗口均为单晶 LiF,初始密度为 2.64(2) g/cm^3,Hugonoit 材料常数 c_0、λ 分别为 5.148 km/s、1.358[7,8],零压下的屈服强度 Y_0 为 0.2 GPa[14,15]。为了保证达到实验目的,综合考虑了以下 5 点:(1) 由于样品和靶板均为透明材料,为可使用 VISAR 测量"样品/窗口"界面速度剖面,将约 5 μm 厚的金属 Al 反射膜镀在窗口的前界面上,金属 Al 的冲击阻抗和单晶 LiF 较为接近,与单晶 LiF 的亲和力较强,不易脱落;(2) 用环氧树脂将窗口压粘于靶板后界面,环氧树脂为 5～10 μm 厚,避免弹丸前方的前冲气体对镀膜层的破坏,并获得较高的信噪比;(3) 为避免窗口后界面的反射光进入光电倍增管,造成对 VISAR 信号的干扰,将∅28 mm

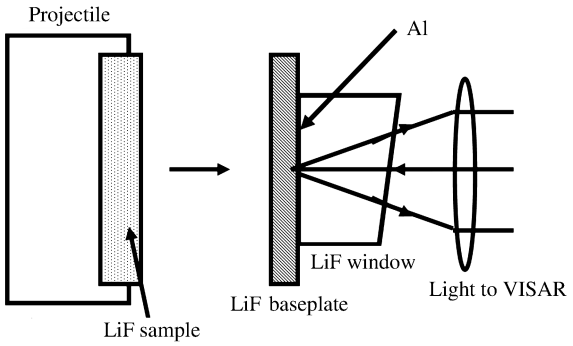


图 3　实验装置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of experiment

×7 mm 的窗口加工成锲形，后界面为斜角 5°；(4) 后界面传入的稀疏波，要先于由靶板的边侧稀疏波到达“靶板/窗口”界面上的测量范围，而且要有一定的提前量，使后界面反射的稀疏波波形记录能清晰判读；(5) 靶板中的冲击波先于由样品后界面传入的稀疏波到达“靶板/窗口”界面。

本工作亦对使用样品直接撞击窗口的可行性进行了初步尝试。在 LiF-A04 号实验中，窗口前表面使用环氧树脂粘接 22 μm 厚的漫反射铝箔，环氧树脂为 5～10 μm 厚。

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

在中国工程物理研究院流体物理研究所∅35 mm 二级轻气炮上共进行了 4 发实验。其中，LiF-A01、LiF-A02 和 LiF-A03 实验使用对称碰撞法，均取得 VISAR 干涉条纹信号(图 4)，信号表现出良好的位相关系；在 LiF-A04 实验中，由于环氧树脂在高压下可能变得不透明或者产生强的自发光[12]，未能获得 VISAR 干涉条纹信号，只获得了光强信号(图 5)，使用“光分析法”[16,17]确定了该冲击压力下的纵波声速，未能得到该冲击压力下的卸载路径。

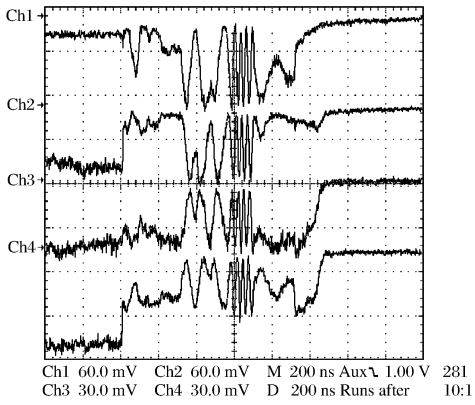


图 4 VISAR 典型实验波形

Fig. 4 Typical VISAR waveform

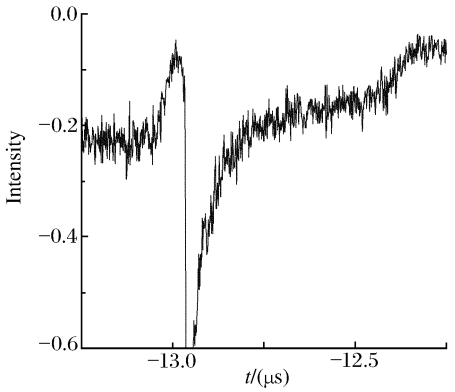


图 5 光强信号

Fig. 5 Waveform of optical strength

对 VISAR 干涉条纹信号进行数据处理，得到“靶板/窗口”界面粒子速度-时间剖面图(经折射率修正)，见图 6。如图 6 所示，卸载开始前有一个先下降后上升的过程，在速度-时间历史剖面图上表现为一个小“凹坑”，形成这样波形的具体原因目前尚不清楚。

按(1)式～(4)式对速度-时间剖面进行分析，得到了单晶 LiF 的卸载路径(见图 9)及 Lagrange 纵波声速 $c_{\mathrm{l}}^{\mathrm{L}}$，纵波声速 $c_{\mathrm{l}}^{\mathrm{L}}$ 对应图 7 中弹性卸载开始点的声速。如图 7 所示，仿照 Asay[6] 的做法，将卸载路径塑性段声速线性外推到冲击后粒子速度 u_{H}，可获得与冲击压力对应的 Lagrange 体积声速 $c_{\mathrm{b}}^{\mathrm{L}}$。实验测到的 4 个压力点的数据列于表 1。

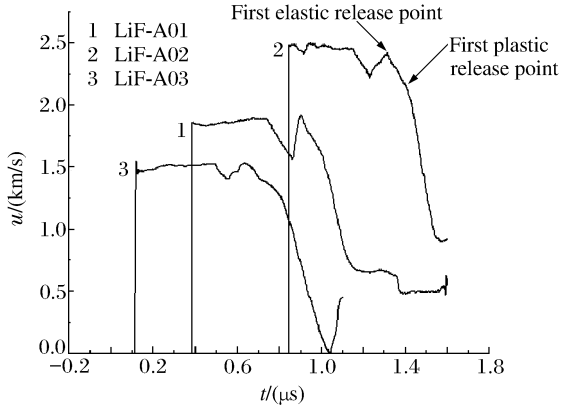


图 6 速度-时间剖面

Fig. 6 Velocity-time profile

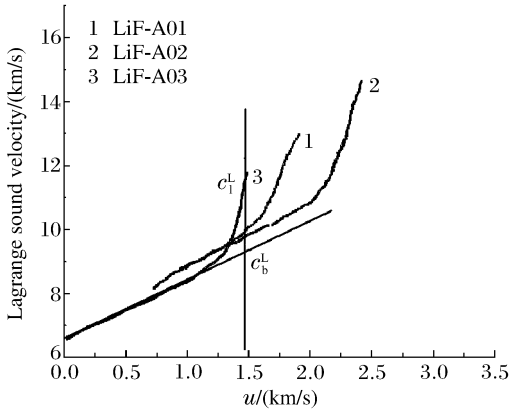


图 7 单晶 LiF 的卸载路径

Fig. 7 The LiF unloading path from experiments

表 1　LiF 声速实验结果

Table 1　Experimental results of LiF sound speed measurement

Shot No.	h_1/(mm)	h_2/(mm)	w/(km/s)	p_H/(GPa)	u_H/(km/s)	c_b^L/(km/s)	c_l^L/(km/s)
LiF-A01	3.035	1.965	3.81	38.5	1.91	10.65	12.96
LiF-A02	3.006	2.001	4.84	53.7	2.42	11.75	14.64
LiF-A03	3.001	1.985	2.97	27.7	2.48	9.30	11.77
LiF-A04	2.987	0	6.24	79.1	3.12	—	16.50

Note: h_1 and h_2 is the thickness of the sample and baseplate, respectively.

3.2　实验数据分析

利用特征线理论计算样品在卸载过程中的应力-应变关系，计算结果如图 8 所示。图中的静水压线由 Birch-Murnagham 状态方程[13]得到

$$p=\frac{3K_0}{2}\left(\frac{v_0}{v}\right)^{\frac{5}{3}}\left[\left(\frac{v_0}{v}\right)^{\frac{2}{3}}-1\right]\left\{1+\frac{3}{4}(K'_0-4)\left[\left(\frac{v_0}{v}\right)^{\frac{2}{3}}-1\right]\right\} \tag{6}$$

式中：$K_0=\rho_0 c_0^2$，$K'_0=4\lambda-1$。图中 $p\pm(2/3)Y_0$ 为上下屈服面。

从图 8 看出，卸载过程中，3 个压力点的应力-应变关系均在下屈服面之下，冲击压缩后的屈服强度高于零压下的拉伸屈服强度，说明单晶 LiF 中仍然存在着支撑强度，未发生熔化及其它相变，同时说明在冲击压缩下样品受到应变硬化及应变率硬化等硬化效应；冲击压力为 53.7 GPa 下卸载路径的应力-应变关系在其它两个压力点之上，在该冲击压力下，单晶 LiF 的屈服强度小于其它两个冲击压力点下的屈服强度，说明在该冲击压力下，瞬间的绝热温升引起明显的应力软化。

将表 1 中 Lagrange 纵波声速及体积声速进行线性拟合，如图 9 所示，Lagrange 纵波声速及体积声速均随冲击压缩后的粒子速度呈线性变化，其关系式如下

$$c_l^L=7.66+2.84u \tag{7}$$

$$c_b^L=5.43+2.70u \tag{8}$$

两条直线基本平行，在 0～79.1 GPa 压力范围内，弹性声速与体积声速没有接近的趋势，和单晶 LiF 在该冲击压力范围内未发生熔化及其它相变的结论相吻合。

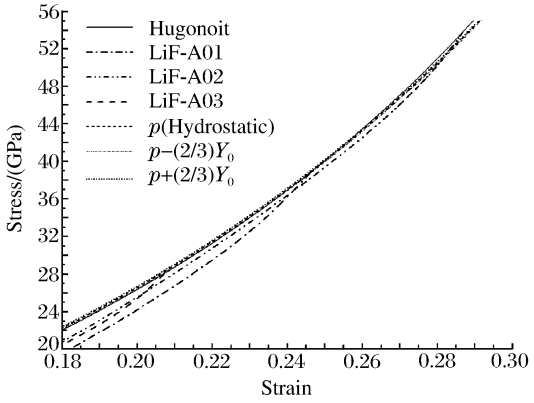


图 8　应力-应变关系

Fig. 8　The relation between stress and strain

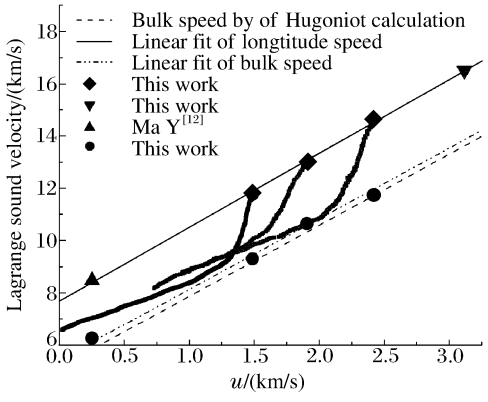


图 9　Lagrange 声速及卸载路径

Fig. 9　Lagrange sound velocity and unloading path

目前，通常使用镜像线近似窗口中的卸载路径[15]

$$\mathrm{d}\sigma=\rho_0(c_0+2\lambda u)\mathrm{d}u \tag{9}$$

如图 8 及图 9 所示，单晶 LiF 的卸载路径偏离于 Hugonoit 状态。为了能使利用单晶 LiF 窗口测量其它样品的卸载路径时得到材料中更精确的卸载路径，对不同冲击压力下的 Lagrange 卸载声速随粒子速度

的变化进行分段线性拟合(暂不考虑弹性转变为塑性区域的影响),得到以下关系式,式中弹性区域为准弹性卸载过程,其中包含了材料的粘性耗散效应及波的弥散效应。

$p_H=27.7$ GPa 时

$$\begin{cases} c_l^L=-11.68+15.72u & \text{弹性区域} \\ c_b^L=6.53+1.92u & \text{塑性区域} \end{cases} \tag{10}$$

$p_H=38.5$ GPa 时

$$\begin{cases} c_l^L=-12.53+14.05u & \text{弹性区域} \\ c_b^L=6.63+2.20u & \text{塑性区域} \end{cases} \tag{11}$$

$p_H=53.7$ GPa 时

$$\begin{cases} c_l^L=-13.72+11.70u & \text{弹性区域} \\ c_b^L=6.69+1.92u & \text{塑性区域} \end{cases} \tag{12}$$

从上述 3 个压力点数据总结出全区卸载路径的经验表达式如下

$$\begin{cases} c_l^L=(-9.51-0.078p_H)+(20.00-0.15p_H)u & \text{弹性区域} \\ c_b^L=6.62+2.01u & \text{塑性区域} \end{cases} \tag{13}$$

(11)式给出了单晶 LiF 窗口中 Larange 声速 c^L 和粒子速度的关系式,窗口中的应力与粒子速度之间的关系可以写成下式

$$\mathrm{d}\sigma=\rho_0 c^L \mathrm{d}u \tag{14}$$

在使用单晶 LiF 窗口材料测量其它样品的声速时,样品中的应力及粒子速度可由下列两式给出

$$\mathrm{d}u_I=\frac{1}{2}\left[\mathrm{d}u_W+\frac{\mathrm{d}\sigma_W}{(\rho c)_I}\right] \tag{15}$$

$$\mathrm{d}\sigma_I=\frac{1}{2}[\mathrm{d}\sigma_W+(\rho c)_I \mathrm{d}u_W] \tag{16}$$

式中:下标 I 代表窗口前物质即待测样品的状态,下标 W 代表窗口中状态。

用本工作获得的单晶 LiF 卸载路径对“样品/窗口”界面速度剖面重新进行计算,可以得到样品中严格的原位粒子速度剖面。对铝[18]和无氧铜[19]“样品/窗口”界面速度剖面分别做了计算,窗口中的冲击压力分别为 21 GPa 和 9.6 GPa。图 10 中给出了计算结果与原始数据及镜像法反演计算得到的原位粒子速度的比较。从图 10 看出:窗口中冲击压力在 10 GPa 以下时,使用镜像法近似卸载路径反演得到的粒子速度剖面和原位粒子速度剖面差异不大,使用镜像法近似卸载路径是可行的;窗口中冲击压力达到 21 GPa 以上时,原位粒子速度剖面和使用镜像法近似卸载路径反演得到的粒子速度剖面存在着明显差异,此时对即使是和单晶 LiF 窗口阻抗比较接近的 Al 样品来说,进行窗口材料的卸载路径修正也是必要的。

在较高冲击压力下测量与单晶 LiF 冲击阻抗差异较大的其它样品的卸载路径时,使用镜像法近似卸载路径反演样品中的粒子速度剖面与原位粒子速度剖面之间可能会存在着更大的差异。

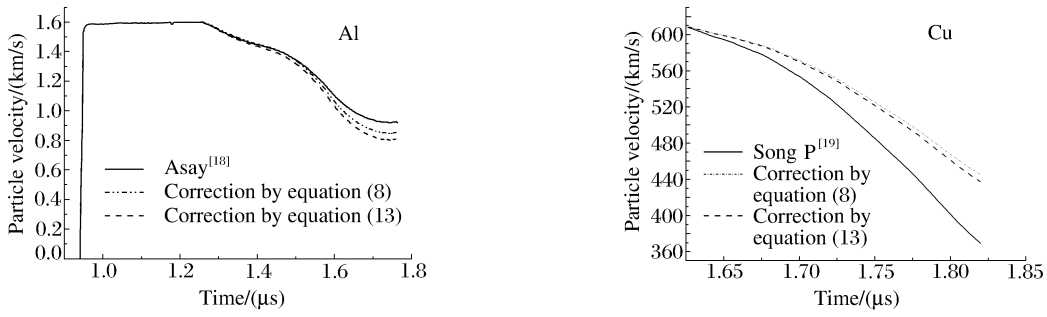


图 10 对粒子速度-时间剖面的修正

Fig. 10 Correction of the particle velocity-time profile

4 结　论

通过本研究的实验及分析,可以得到以下结论:

(1) 卸载路径在理论计算的下屈服面之下,材料中仍然存在着支撑强度,说明在 0～80 GPa 压力范围内,单晶 LiF 并未发生熔化及其它相变。

(2) 单晶 LiF 样品 Lagrange 纵波声速及体积声速随粒子速度的变化呈线性变化,线性关系式分别为 $c_l^L = 7.66 + 2.84u$ 和 $c_b^L = 5.43 + 2.70u$ 。

(3) 实验中得到了单晶 LiF 在 27.7、38.5 和 53.7 GPa 3 个冲击压力点下的卸载路径,并总结出卸载路径随冲击压力变化的一般经验表达式;使用全区卸载路径对铝和铜"样品/窗口"界面粒子速度剖面,严格反演原位粒子速度剖面,原位粒子速度剖面和镜像法反演得到的粒子速度剖面之间存在着明显差异。

References:

[1] Kerleym G I. Multiphase Equation of State for Iron [R]. SAND 93-0027,1993.

[2] Zhernokletov M V, Simakv G V, Stutulov Y N, et al. Expansion Isentropes of Aluminium, Iron, Molybdenum, Lead, and Tantalum [J]. Teplofizika Temperatur,1995,33(1):40－43.

[3] Song P, Cai L C, Zhou X M, et al. Experimental Investigation of the Release Isentropes for OFHC Copper [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2005,19(2):174－178. (in Chinese)
宋　萍,蔡灵仓,周显明,等. 无氧铜等熵卸载路径的实验研究 [J]. 高压物理学报,2005,19(2):174－178.

[4] 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.

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

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

[7] Wise J L, Chhabildas L C. Window Material Studies for Shock-Wave Experiments [J]. Bul Am Phys Soc,1980,25(4):566－567.

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

[9] Tan H. Sound Velocity Measurement and Unloading Path under High Pressure [J]. Detonation and Shock Wave,2003,(2):60－71. (in Chinese)
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.

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

[11] Hu S L. Laser Interferometry for Measuring Velocities [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.

[12] Ma Y. Refractive Index Investigation of Crystal LiF under Shock Compression [D]. Mianyang: China Academy of Enginrreing Physics,2003. (in Chinese)

马 云. 冲击载荷下 LiF 晶体折射率研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2003.

[13] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State(2nd ed) [M]. Beijing:Science Press,1999. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引(第二版) [M]. 北京:科学出版社,1999.

[14] Weber M J. Handbook of Optical Materials [Z]. Baca Taton:CRC Press,2003.

[15] Duffy T S,Ahrens T J. Dynamic Compression of an Fe-Cr-Ni Alloy to 80 GPa [J]. J Appl Phys,1997,82(9):4259—4269.

[16] McQueen R G,Hopson J W,Fritz J N. Optical Technique for Determining Rarefaction Wave Velocities at Very High Pressure [J]. Rev Sci Instrum,1982,53(2):245—250.

[17] Brown 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 Wave in Condensed Matter-1983 [C]. Oxford:Elsever Science Publishers B V, 1984. 91—94.

[18] Asay J R. Measurement for Material Properties to Mbar Pressures Using Time-Resolved Shock Wave Techniques [R]. SAND-84-2657,1985.

[19] Song P. Investigation of the Release for OFHC Copper under High Pressure [D]. Mianyang:China Academy of Enginrreing Physics,2003. (in Chinese)
宋 萍. 无氧铜高压卸载研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2003.

Study on Sound Velocity and Unloading Path for Single Crystal LiF under Shock Compression

YU Jin-Quan[1,2],XIAO Ya-Bin[2],ZHOU Xian-Ming[1],TAN Hua[1]

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *College of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*)

Abstract: Symmetrical impact experiments for single crystal LiF were conduced at two-stage light-gas gun with a VISAR diagnostic. Longitudinal and bulk sound velocities, and unloading path of LiF were obtained up to 79.1 GPa shock pressure. Experimental results indicate a good linearity between the Lagrangian longitudinal sound velocity and the particle velocity . There is no evidence of shock-induced melting or phase transition for LiF in the present pressure range. The LiF unloading path and velocity profiles show a clear transformation from the elastic release to the plastic unloading.

Key words: LiF; reverse-impact; sound velocity; unloading path; VISAR