

〈100〉LiF 的低压冲击响应和 1550 nm 波长下的窗口速度修正*

李雪梅[†] 俞宇颖 张林 李英华 叶素华 翁继东

(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, 绵阳 621900)

(2011 年 11 月 18 日收到; 2012 年 1 月 11 日收到修改稿)

利用平板撞击和激光干涉测试技术对 〈100〉LiF 在 40 GPa 内的冲击力学和光学特性进行了精密实验测量和理论分析. 获得了该压力范围内 LiF 的冲击雨贡纽关系和 1550 nm 波长下的窗口速度修正, 为相关加窗激光干涉测速实验的数据分析提供了直接依据. LiF 在 20.3 GPa 内均表现出弹性-塑性双波特性的, 预计其单波响应冲击压力下限约为 22—23 GPa; 低于此压力时, 以 LiF 为窗口的精密剖面测量实验需考虑其强度影响.

关键词: LiF, 弹塑性, 冲击雨贡纽, 速度修正

PACS: 62.20.-x, 78.20.-e, 64.30.-t, 62.20.D-

1 引言

高温、高压、高应变率等极端加载条件下材料将经历弹塑性、相变、熔化等典型冲击动力学过程^[1-3]. 以透明窗口紧贴在靶样品背面, 利用 VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector^[4]), DISAR (Displacement Interferometer System for Any Reflector^[5]), DPS (Doppler Pin System^[6]) 等激光干涉测试技术进行的加窗界面速度剖面测量则是研究上述冲击动力学特性的一种基本方法.

冲击波作用下, 由于窗口材料的折射率改变, 加窗激光测速系统中将引入附加多普勒频移, 导致实测速度是包含窗口速度修正项在内的表观速度^[7], 必须已知冲击加载下窗口光学特性, 通过恰当的理论修正方可获得界面速度的真实值. 不过, 由于窗口与待测样品冲击阻抗失配, 它仍不能反映样品内部的真实状态, 还必须已知窗口的冲击雨贡纽等力学特性, 利用阻抗匹配法^[8]反演方可得到

样品内部的真实粒子速度历史.

单晶氟化锂 (LiF) 由于具有阻抗适中、韧性好、保持透明压力范围宽 (~160 GPa^[9]) 等优点, 是当前广泛使用的一种窗口材料. LiF 在低压下具有弹塑性双波响应特性, 作为窗口时其强度效应对待测材料强度的影响可高达 10%^[10,11], 因此, 确定 LiF 的单波响应压力范围, 在 LiF 单波区开展加窗测量对于精密物理实验十分重要. 现有文献对 LiF 低压冲击力学特性的研究集中在 0—4 GPa 压力下弹性前驱波衰减、应力松弛等现象^[12-15], 更高压力下的弹塑性响应特性有待研究. 对 LiF 光学特性的研究主要针对 532 nm 波长的传统 VISAR 技术^[4,7,16-18]. 由于窗口折射率与波长相关^[19], 而目前针对以 1550 nm 为波长的新型 DISAR, DPS 等剖面测试技术的 LiF 窗口修正数据却十分少有^[20]. 精密物理实验和新型测速技术的广泛使用对精确测量 1550 nm 波长下窗口光学特性参数提出了强烈需求.

本文利用平板撞击和“原位”激光干涉测速技术, 对国产 〈100〉LiF 在 40 GPa 内的冲击力学特性

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2010B0101002, 2011B0101002, 2009A0101001), 冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金 (批准号: 9140C6701021102) 和国家自然科学基金 (批准号: 11172281) 资助的课题.

[†] E-mail: lxm023@yahoo.com.cn

和 1550 nm 波长下的窗口速度修正特性开展精密测量和理论分析.

2 实验装置和原理

实验在火炮和二级轻气炮上进行. 根据不同压力设计了两类装置: 对称和非对称碰撞实验装置. 前者以 2.5 mm 厚 LiF 飞片去撞击 LiF 样品/LiF 窗口复合靶, 样品厚 3.0 mm; 飞片碰靶面和窗口前表面镀铝膜, 并在 LiF 样品和 LiF 窗口后界面布置 DPS 探针 (测试原理见文献 [1]), 实现对 LiF 冲击特性的精密测量 (见图 1(a)). 后者以无氧铜或锡为飞片, 去撞击 LiF 复合靶或 LiF 窗口 (见图 1(b)), 并用 DPS 探针和磁测速分别监测碰撞面速度历史和飞片速度. 全部 LiF 试件为上海光学仪器研究所提供的 (100) 向单晶, 其常态密度为 2.638 g/cm³, 各部件尺寸可确保在本文关注时间内无边侧稀疏影响.

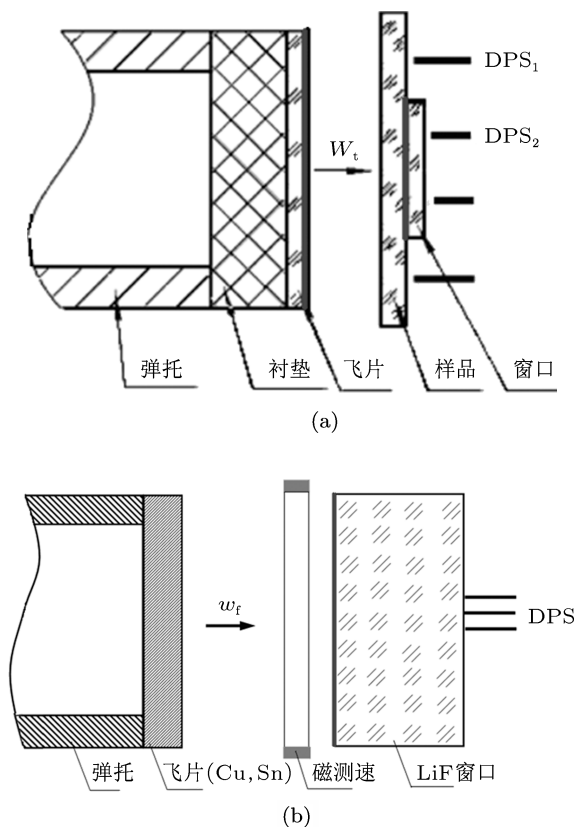


图 1 实验装置原理图 (a) 对称碰撞装置; (b) 非对称碰撞装置

对称碰撞时, 单根 DPS 探针便可给出多个界面速度信息 [20]. 图 2 给出了对 DPS₁ 测量信号的典型频谱分析 (图 2(a)) 和得到的多界面速度剖面

面 (图 2(b)). 其中图 2(b) 虚线代表碰撞面, 它给出了弹速 w_f 和碰靶后的表观粒子速度 u_a , 以及碰靶时刻 t_0 , 弹性、塑性冲击波到达样品自由面时刻 t_1 , t_2 等时间序列的“原位”测量值; 图 2(b) 实线为样品自由面速度 (低速段采用非线性回归分析 [21]), 它给出了加载波到达自由面后 LiF 的动态响应. 诊断加载波结构的另一手段是利用图 1(a) 的 DPS₂ 直接测量样品/窗口界面粒子速度剖面.

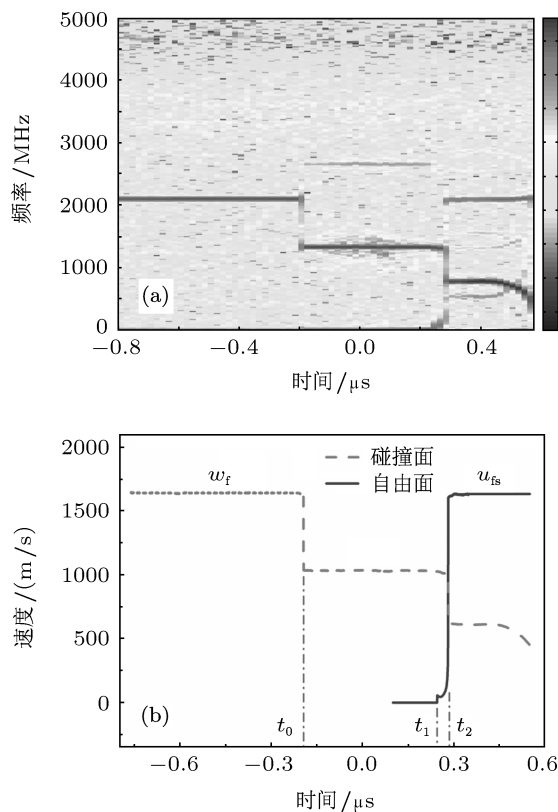


图 2 DPS 典型信号及处理结果 (实验编号: SN05) (a) 时间-频谱图; (b) 速度剖面

3 实验结果与分析

共进行 8 发实验, 压力为 3.1—37.6 GPa. 高于 14 GPa 的压力点采用非对称碰撞, 其余均为对称碰撞实验. 弹速 w_f 、表观粒子速度 u_a 、样品内波走时 Δt 等冲击参数由实验直接测量. 弹性前驱波速度 D_e 和单波响应区的塑性冲击波速度 D_p 分别由 $D_e = h/\Delta t_1$ 和 $D_p = h/\Delta t_2$ 计算, 其中 h 为样品厚度, $\Delta t_1 = t_1 - t_0$, $\Delta t_2 = t_2 - t_0$ (t_0 为碰靶时刻, t_1 为弹性波到达时刻, t_2 为 1/2 倍峰值速度对应时刻, 见图 2(b)), 弹塑性双波区的 D_p 计算采用 3.2 节方法计入波系相互作用. 对称碰撞时, 真实粒子速度 u_p

等于 1/2 倍弹速, 即 $u_p = w_f/2$; 非对称碰撞时, u_p 根据实测 D_p 和 w_f 由阻抗匹配法计算或者由自由面

速度倍增定律计算($u_p = u_{fs}/2$)^[8]. 冲击峰值压力由 $P = \rho_0 D_p u_p$ 计算. 主要实验结果见表 1.

表 1 LiF 冲击参数测量结果

实验编号	$w_f/m \cdot s^{-1}$	$u_{HEL}/m \cdot s^{-1}$	$D_e/m \cdot s^{-1}$	$u_p/m \cdot s^{-1}$	$D_p/m \cdot s^{-1}$	P/GPa	ρ/ρ_0	$u_a/m \cdot s^{-1}$	$\Delta u/m \cdot s^{-1}$
SN01 ^{a)}	423.8	21.6	6832.3	211.9	5506	3.08	1.0400	266.4	54.5
SN02 ^{a)}	1277.6	18.8	6814.0	638.8	6066	10.22	1.1177	805.7	166.9
SN03 ^{a)}	1321.6	19.6	6820.7	660.8	6069	10.58	1.1222	832.7	171.9
SN04 ^{a)}	1624.3	23.2	68162	812.2	6331	13.56	1.1472	1024.8	212.6
SN05 ^{a)}	1641.5	27.1	6816.8	820.8	6337	13.72	1.1488	1033.8	213.0
SN06 ^{b)}	1619.3	27.8	6857.1	1137	6757	20.27	1.2023	1442.5	305.5
SN07 ^{c)}	2837.0	—	—	1693.4	7469	33.24	1.2947	2163.4	470.0
SN08 ^{c)}	3057.0	—	—	1848.6	7727	37.61	1.3153	2360.7	512.1

a) 对称碰撞实验, 飞片 \ 样品 \ 窗口均为 LiF; b) 非对称碰撞实验, 飞片为无氧铜, u_p 由阻抗匹配法获得; c) 非对称碰撞实验, 飞片为锡, u_p 由自由面速度倍增定律获得.

3.1 LiF 加载波结构特性

LiF 加载波结构的典型波形见图 3, 其中 SN01—SN05 为样品/窗口界面直接测量结果, 其余由样品自由面粒子速度剖面反推获取. 在本文约 20.3 GPa 冲击压力范围内 (SN01—SN06), LiF 均表现出明显的弹性 - 塑性双波响应特征, 加载压力越低, 则塑性波上升前沿越缓, 反之亦然. 随着压力进一步增加 (SN07), 塑性冲击波追赶上弹性前驱波, 加载波演变为单波结构. 3mm 厚样品在冲击压力由 3.1 GPa 增至 20.3 GPa 时, 加载波宽度由 140 ns 减至 12 ns, 以此外推, 则 LiF 为单波响应的冲击压力下限约为 22—23 GPa.

LiF 的弹性 Hugoniot 极限 σ_{HEL} 可由下式计算:

$$\sigma_{HEL} = \rho_0 D_e u_{HEL}, \quad (1)$$

其中, ρ_0 为初态密度, D_e 为弹性前驱波速度, u_{HEL} 为弹性 Hugoniot 极限对应的真实粒子速度. D_e 和 u_{HEL} 的实测结果见表 1. SN01—SN06 等 6 发不同压力实验测得的 D_e 为 6.814—6.857 km/s, 平均值 6.826 km/s, 各测量值基本一致, 相对差小于 1%. u_{HEL} 为 18.8—27.8 m/s, 平均值为 23 m/s; 整体看来, u_{HEL} 值随压力增加略有增大, 但并不敏感, 其分散性主要由低速下材料分散性和数据处理误

差所致. 将 D_e 和 u_{HEL} 代入 (1) 式, 得到 LiF 平均 σ_{HEL} 值为 0.41 GPa. LiF 弹性前驱波具有应力松弛、幅值随传播距离衰减等特性, 并与缺陷含量和分布、温度、压力等相关^[12-15], 这里不做讨论.

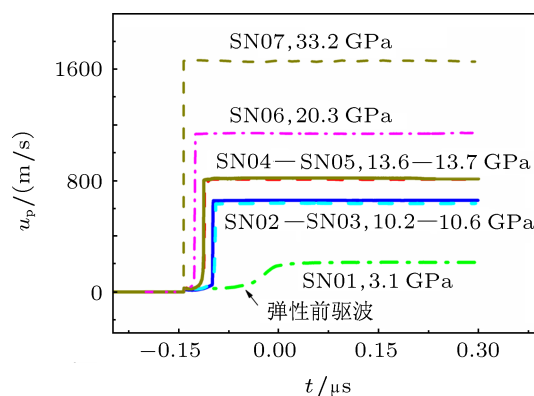


图 3 LiF 加载波结构测量

3.2 LiF 的塑性冲击 Hugoniot 关系

在 0—20.3 GPa 内, 由于 LiF 为弹 - 塑性双波响应, 塑性冲击波速度 D_p 采用 Ahrens 方法^[22] 计算以考虑波系相互作用. 如图 4 所示, 以波速 D_e 传播的弹性前驱波在 t_1 时刻到达样品自由面, 自由面以速度 u_{1fs} 运动. 假设反射波仍为弹性波, 并

以速度 D_1 传播, 右行塑性加载波与它相遇后分裂为弹性波和塑性波, 其中弹性波以 D_2 传播, 并在 t_2 时到达自由面, 使其速度由 u_{1fs} 增至 u_{2fs} .

设 $D_1 = D_e - u_{1fs}/2$, $D_2 = D_e + u_{1fs}$, 同时, 令

$$\bar{D} = [h + u_{1fs}(t_2 - t_1)] / (t_2 - t_0), \quad (2)$$

则有

$$D_P = \frac{(D_1 \bar{D}(D_e - u_{1fs}) + D_2 D_e (\bar{D} - u_{1fs}) - D_1 D_2 (D_e - \bar{D}))}{D_1 (\bar{D} - u_{1fs}) + D_2 (D_e - u_{1fs}) - u_{1fs} (D_e - \bar{D})}. \quad (3)$$

由 (2), (3) 式计算得到的 D_P 值见表 1. D_P 随 u_p 的变化规律见图 5, 图中还包括 Jensen^[20] 及 LASL 实验室^[23] 的实验数据. 整体看来, 本文考虑弹塑性修正后的冲击数据与 Jensen^[20] 的低压实验结果具有较好的一致性, LASL 数据则偏低.

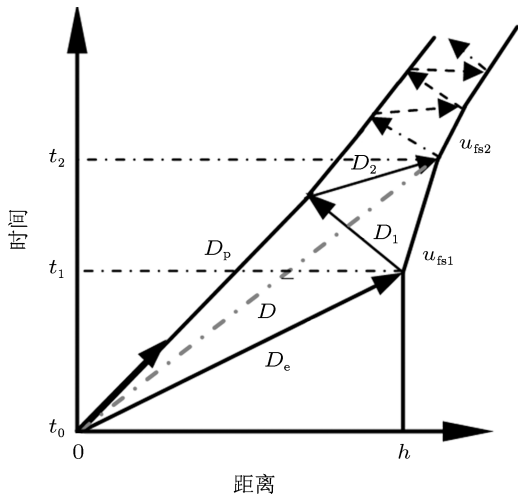


图 4 弹-塑性双波区塑性波速度 D_p 的估算原理

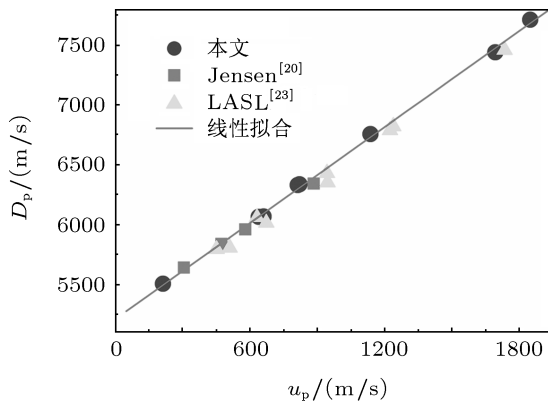


图 5 LiF 的塑性冲击 Hugoniot (D_p-u_p 关系)

为此, 这里采用本文和 Jensen^[20] 实验数据进行冲击 Hugoniot 关系分析. D_p 随 u_p 的变化较好地满足线性函数关系, 上述数据的最佳线性拟合

方程为

$$D_P = 5214 + 1.336u_p, \quad (4)$$

其中, u_p 和 D_P 单位均为 m/s. 利用 (4) 式及实测弹性波波速 D_e (D_e 平均值为 6.826 km/s), 并令 $D_P = D_e$, 则可从理论上预估 LiF 单波响应的冲击压力下限为 21.7 GPa, 这与本文 3.1 节利用加载波宽度随压力变化得到的预估值 22—23 GPa 具有较好的自洽性.

3.3 1550 nm 波长下 LiF 的窗口速度修正

加窗剖面测量实验测得的速度为窗口折射率改变后的表观粒子速度, 而非真实粒子速度. 对单次冲击加载, 其速度修正量可表示为^[24]

$$\Delta u = u_a - u_p = (n - 1)u_p - (n - n_0)D_P, \quad (5)$$

其中 n_0 和 n 分别为常态和冲击态下的窗口折射率. 由于 n 无法实测, 显然, 直接应用 (5) 式计算真实粒子速度并不方便. 一种直观方法是通过一系列不同压力冲击实验获得窗口的表观速度和真实粒子速度, 建立窗口在特定波长下的速度修正关系.

表 1 和图 6 给出了不同真实粒子速度 u_p 对应的实测速度修正 Δu , 同时示于图中的还包括 Jensen^[20] 的 4 个数据点, 这也是当前 LiF 在 1550 nm 下速度修正的仅有数据, 以上两类实验数据一致性非常好. 研究表明^[24], 对于同种光学窗口, $\Delta u-u_p$ 关系可采用指数函数描述. 图 6 两类数据给出的最佳指数型拟合方程为

$$\Delta u = 0.180u_p^{1.0575}, \quad (6)$$

其中, u_p 和 Δu 单位均为 m/s. 采用线性近似得到的速度修正关系则为

$$\Delta u = -11.581 + 0.2817u_p. \quad (7)$$

两种拟合曲线与实验结果的比较见图 6. 在本文实验压力范围内, 线性近似便可很好地给出 LiF

在 1550 nm 下的速度修正. 这时, 由于 $u_p = u_a - \Delta u$, 加窗剖面测量实验测得的表观速度 u_a 可直接转换为样品 - 窗口界面的真实粒子速度 u_p : $u_p = (u_a + 11.581)/1.2817$, 避免了指修正时的反复迭代.

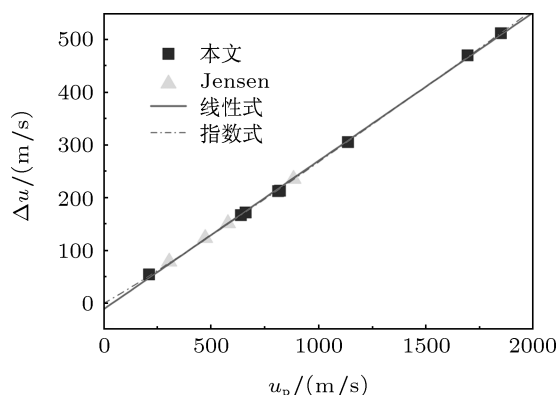


图 6 1550 nm 波长时 LiF 的速度修正 ($\Delta u-u_p$) 关系

上述结果是在冲击加载下获得的. 不过对 LiF 而言, 冲击加载下获得的窗口修正关系可应用于斜

波加载等任意波形加载实验 [17,25].

4 结论

利用平面碰撞和激光干涉测试技术, 对 $\langle 100 \rangle$ LiF 在 40 GPa 内的冲击力学特性和 1550 nm 波长下的窗口修正进行了精密实验测量和理论分析:

1. 直接加载波形测量和分析表明, LiF 在 20.3 GPa 内均表现出明显的弹性 - 塑性特性, 预计其单波响应冲击压力下限约为 22—23 GPa; 低于此压力时, 以 LiF 为窗口的精密剖面测量实验需考虑其强度影响.

2. 获得了 1550 nm 波长下 $\langle 100 \rangle$ LiF 的窗口速度修正关系. 通过考虑弹塑性双波区波系相互作用对冲击波速度计算的影响, 建立了 40 GPa 内 LiF 冲击 Hugoniot 关系. 研究结果为 LiF 应用于材料强度、融化、相变等加窗 DISAR 速度剖面测量实验提供了依据.

- [1] Li X M, Yu Y Y, Li Y H, Zhang L, Ma Y, Wang X S, Fu Q W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2691 (in Chinese) [李雪梅, 俞宇颖, 李英华, 张林, 马云, 汪小松, 付秋卫 2010 物理学报 **59** 2691]
- [2] Li J, Zhou X M, Li J B, Li S N, Zhu W J, Wang X, Jing F Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6557 (in Chinese) [李俊, 周显明, 李加波, 李赛男, 祝文军, 王翔, 经福谦 2007 物理学报 **56** 6557]
- [3] Song P, Wang Q S, Dai C D, Cai L C, Zhang Y, Weng J D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 046201 (in Chinese) [宋萍, 王青松, 戴诚达, 蔡灵仓, 张毅, 翁继东 2011 物理学报 **60** 046201]
- [4] Barker L M, Hollenbach R E 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 4669
- [5] Weng J D, Tan H, Hu S L 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 093301
- [6] Wang Xiang 2010 *Technical Stand of China Academy of Engineering Physics ZWB325-2010* (in Chinese) [王翔 2010 中国工程物理研究院技术标准 **ZWB325-2010**]
- [7] Barker L M, Hollenbach R E 1970 *J. Appl. Phys.* **41** 4208
- [8] Jin F Q 1999 *Introduction to Experimental Equation of State* (2th ed) (Beijing: science Press) p82-83 (in Chinese) [经福谦 1999 实验物态方程导引 (第二版) (北京: 科学出版社) 第 82-83 页]
- [9] Furnish M D, Chhabildas L C, Reinhart W D 1999 *Int. J. Impact Eng.* **23** 261
- [10] Asay J R, Ao T, Davis J P 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 083514
- [11] Ao T, Asay J R, Davis J P 2008 *Shock Compression of Condensed Matter- 2007* (New York: American Institute of Physics) p1157
- [12] Jensen B J, Gupta Y M 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 053512
- [13] Yukio Sano, Tomokazu Sano 2008 *Shock Compression of Condensed Matter- 2007* (New York: American Institute of Physics) p263
- [14] Asay J R, Gupta Y M 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 2220
- [15] Gupta Y M 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 3395
- [16] Wise J L, chhabildas L C 1985 *U.S. Gov. Report SAND-85-0310C*
- [17] LaLone B M, Fat'yanov O V, Asay J R 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 093505
- [18] Ma Y, Li Z R, Hu S L 2007 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **21** 397 (in Chinese) [马云, 李泽仁, 胡绍楼 2007 高压物理学报 **21** 397]
- [19] Hayes D 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 6484
- [20] Jensen B J, Holtkamp D B 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 013523
- [21] Li X M, Zhang L, Li Y H, Yu Y Y, Wang X, Ma Y 2010 *Explosion and Shock Waves* **30** 80 (in Chinese) [李雪梅, 张林, 李英华, 俞宇颖, 王翔, 马云 2010 爆炸与冲击 **30** 80]
- [22] Ahrens T J, Gust W H, Royce E B 2002 *J. Appl. Phys.* **39** 4610
- [23] Stanley P M 1980 *LASL Shock Hugoniot Data* (Berkeley: University of California Press) p296
- [24] Setchell R E 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 2833
- [25] Hayes D 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 6484

Elastic-plastic response of shocked $\langle 100 \rangle$ LiF and its window correction at 1550 nm wavelength*

Li Xue-Mei[†] Yu Yu-Ying Zhang Lin Li Ying-Hua Ye Su-Hua Weng Ji-Dong

(National Key Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 18 November 2011; revised manuscript received 11 January 2012)

Abstract

By using plate impact and laser interferometry technology, careful experiments and theoretical analysis for $\langle 100 \rangle$ LiF are carried out for its dynamic mechanical response and optical characteristics under shock pressures up to 40 GPa. The accurate shock Hugoniot relation and velocity correction at 1550 nm wavelength are then obtained. Moreover, the direct wave-profile measurements show that LiF keeps an obvious elastic-plastic response within 20.3 GPa, and the estimated lower limit pressure for single-wave shock response is about 22–23 GPa. The strength influence of LiF window on the dynamic behavior of the sample should be taken into account in precise experiments with shock pressure lower than this range. The results above establish foundations for the design and data post-processing of shock experiments in which LiF is used as an optical window for the dynamic material properties such as elasto-plasticity, phase transition and melting.

Keywords: LiF, elastic-plastic response, shock Hugoniot, velocity correction

PACS: 62.20.-x, 78.20.-e, 64.30.-t, 62.20.D-

* Project supported by the Foundation of China Academy of Engineering Physics, China (Grant Nos. 2010B0101002, 2011B0101002, 2009A0101001), the Foundation of National Key Laboratory for Shock wave and Detonation Physics (Grant No. 9140C6701021102), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11172281).

[†] E-mail: lxm023@yahoo.com.cn