

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0242

[100]LiF 单晶在 60 GPa 以内冲击加载下的高压屈服强度特性*

谭叶, 李雪梅, 俞宇颖, 南小龙, 甘元超, 叶想平, 胡建波, 王倩男

(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重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 获取光学窗口自身的高压强度特性是开展材料高压高应变率冲击响应行为精密测量和数据反演的重要基础。利用平板撞击和双屈服面法, 通过冲击-卸载、冲击-再加载原位粒子速度剖面精细测量和数据反演, 获得了约 60 GPa 范围内 [100]LiF 屈服强度特性随冲击压力的变化规律。结果表明: 在实验压力范围内, [100]LiF 的屈服强度随加载压力的提高而显著提高, 压力硬化效应显著; 同时, LiF 在冲击加载下的屈服强度高于磁驱动等熵加载结果, 应变率硬化效应强于热软化效应。采用 Huang-Asay 模型确定了可描述冲击加载 [100]LiF 强度特性的本构模型参数, 为 LiF 在强度、相变、层断裂等加窗测量实验中的深入应用和数据准确解读提供了重要支撑。

关键词: [100]LiF; 屈服强度; 冲击加载; 双屈服面法

中图分类号: O389 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Yield strength of [100] LiF under shock compression up to 60 GPa

TAN Ye, LI Xuemei, YU Yuying, NAN Xiaolong, GAN Yuanchao,

YE Xiangping, HU Jianbo, WANG Qiannan

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: The dynamic properties of metals are of importance in shock wave physics, and the time-resolved velocity profile measurement at the interface between the sample and the optical window is often used to decrease the waveform aberrations arising from free-surface reflecting and to obtain the in-situ particle velocity profile in the studied sample. In such cases, the yield strength behavior of the optical window should be taken into account for precise data processing. Among kinds of optical window materials, [100] lithium fluoride (LiF) single crystal is the most widely used window, and little work has been done for its yield strength behavior under dynamic loadings, especially planar shock. In this paper, by using the plate impact and Asay self-consistent technique for high-pressure yield strength, in-situ velocity profiles of the [100] LiF single crystal from shock-release and shock-reshock loading at different pressures were carefully measured by a displacement interferometer system for any reflector (DISAR). Then, the yield strengths under shock compression up to about 60 GPa were deduced and found to markedly increase with the increasing of shock pressure, showing a notable pressure-hardening effect. Moreover, by comparing with the results from magnetically-driven isentropic loading in literatures which were the scanty public reports for the high-pressure yield strength of LiF, it was also found that the yield strengths of the [100] LiF under shock compression were higher than those obtained from isentropic loading at the same pressures. This indicates that LiF's yield strength is more sensitive to strain rate than to temperature up to 60 GPa, and the higher strain rate under shock compression and the dominant strain rate

* 收稿日期: 2021-06-21; 修回日期: 2022-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(11772312, 11802285); 冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金(6142A0302010317)

第一作者: 谭叶(1986—), 男, 硕士, 副研究员, typpku@163.com

通信作者: 李雪梅(1975—), 女, 硕士, 副研究员, lixuem@caep.cn

hardening effect results in a higher yield strength. At last, the constitutive model parameters for the [100] LiF were determined to fit to our shock experiments well by using the Huang-Asay equation form. The result above shows that the [100] LiF owns an unignorable flow strength under shock pressures at least to 60 GPa. Moreover, it provides important constitutive parameters for educing the in-situ velocity profiles more accurately in experiments where LiF is used as an optical window, which is essential for researches such as flow strength, phase transition, and shock melting of metal materials.

Keywords: [100] LiF; yield strength; shock compression; Asay self-consistent technique

材料高压高应变率冲击响应特性作为冲击波物理的重要研究内容, 往往借助于速度剖面测量进行诊断和分析。加窗测量由于可以有效减弱自由面波反射的影响, 对于获取波形畸变尽可能小的速度剖面十分重要, 在高压强度、冲击相变、熔化等研究中发挥了重要作用^[1-3]。这时, 样品内原位波剖面反演依赖于光学窗口自身的冲击特性参数, 需要分别描述其应力球量(P)和偏量(S)特性的状态方程和本构方程, 后者特指描述材料屈服强度特性的函数, 如 SCG 模型^[4]、PTW 模型^[5]等。然而, 当前相关研究在进行原位波剖面反演时往往忽略光学窗口的强度特性, 而只采用状态方程近似描述其应力状态。这种流体近似处理在数百万大气压的高压区是合理的, 但在光学窗口尚具有抗剪切能力的中低压力区将导致数据反演精度降低。以氟化锂(LiF)窗口为例, 忽略其强度特性可能导致待测材料屈服强度偏离 $\sim 10\%$ ^[6-7], 这对于精密实验是不可忽略的影响。另外, 笔者在 Sn 相变特性研究中也发现, LiF 窗口屈服强度差异可导致锡相变特征拐点相差 ~ 60 m/s。

LiF 单晶由于波阻抗适中、光学透明压力范围宽(冲击: ~ 210 GPa^[8]; 准等熵: ~ 800 GPa^[9])等优点, 是最常用的光学窗口材料。针对 LiF 冲击特性已有较多报道, 但集中于光学特性^[10-12]、状态方程^[8, 10, 13-14]、弹性波衰减及塑性变形机理^[15-17], 高压强度特性研究十分缺乏。Ao 等^[18]对 [100]LiF 单晶开展了磁驱准等熵加载屈服强度特性研究, 发现在 5 \sim 114 GPa 范围内其强度随压力提高而显著提高, 最高至 5 倍常压值。Brown 等^[19]也对 10 GPa 以内磁驱加载下 [100]LiF 的屈服强度进行过实验测量。而材料高压强度具有显著的路径相关性^[20-22], 目前尚未见到平面冲击加载下 LiF 强度特性的文献报道。

本文中, 利用平面撞击技术对 ~ 60 GPa 压力内 [100]LiF 的强度特性开展系统的实验研究, 获得平面冲击加载下 LiF 屈服强度随压力的变化规律, 确定可描述冲击加载 [100]LiF 强度特性的本构模型和参数, 比较分析冲击和准等熵 2 种加载路径下的强度差异, 以期对 LiF 窗口在材料本构关系和冲击相变等精密实验中的应用提供重要支撑。

1 实验原理和方法

采用双屈服面法^[23]开展 [100]LiF 强度测量, 其基本原理见图 1。对于冲击加载, 完备的双屈服面法需同时获得相近压力下的冲击-卸载、冲击-再加载速度剖面, 使样品从预冲击 Hugoniot 态(B)经过准弹性再加载(\widehat{BE})或准弹性卸载(\widehat{BC})后分别进入上、下屈服面。由实测界面速度剖面反演获得样品的声速 C -原位粒子速度 u_p 曲线($C-u_p$)后(见图 1(c)), 按下式:

$$\begin{cases} \tau_c + \tau_0 = -\frac{3}{4}\rho_0 \int_{u_B}^{u_c} [C_L^2(u) - C_B^2(u_i)] \frac{du}{C_L(u)} & \text{卸载} \\ \tau_c - \tau_0 = \frac{3}{4}\rho_0 \int_{u_{B'}}^{u_E} [C_L^2(u) - C_B^2(u)] \frac{du}{C_L(u)} & \text{再加载} \end{cases} \quad (1)$$

对准弹性段进行积分, 便得到 Hugoniot 压力对应的临界屈服强度 Y 。式 (1) 中: ρ_0 为材料初始密度; τ_c 、 τ_0 分别为临界剪应力和预冲击态剪应力, 屈服强度 $Y=2\tau_c$; C_L 和 C_B 分别为沿卸载/再加载路径的拉氏纵波和体波声速; u_B (或 $u_{B'}$)、 u_c (或 u_E) 为准弹性卸载或准弹性再加载段起始点和终点的原位粒子速度。

[100]LiF 单晶在 22 GPa 以内冲击加载下具有弹塑性双波响应^[10]。为了尽可能减小弹塑性双波导致的复杂波系干扰, 提高强度测量精度, 采用图 1(d) 所示的“正碰+LiF 台阶样品布局+LiF 窗口”方式开

展冲击-卸载、冲击-再加载速度剖面测量, 图中 DPS 为多普勒探针系统 (Doppler pins system)。这时, 由于样品/窗口界面无波反射 (波阻抗相同), 弹性前驱波不会对塑性冲击波及追赶卸载/再加载波造成干扰而引起速度剖面畸变, 实测界面速度即为样品原位粒子速度, 由台阶样品的实测界面速度剖面 and 拉氏分析方法即可准确反演沿卸载 (再加载) 路径的声速 (C)-原位粒子速度 (u_p) 剖面, 而无需考虑波直线弯曲和飞片冲击参数的影响。在 LiF 为单波响应的更高压力区, 也可采用 LiF 飞片撞击 LiF 窗口的反碰方式。由于 LiF 单晶波阻抗低、脆性大, 以上述正碰方式为主, 在低压区可排除弹塑性双波影响, 在单波压力区可以降低弹速要求, 从而避免高弹速反碰时 LiF 飞片出现损伤而导致的界面速度剖面测量失效。

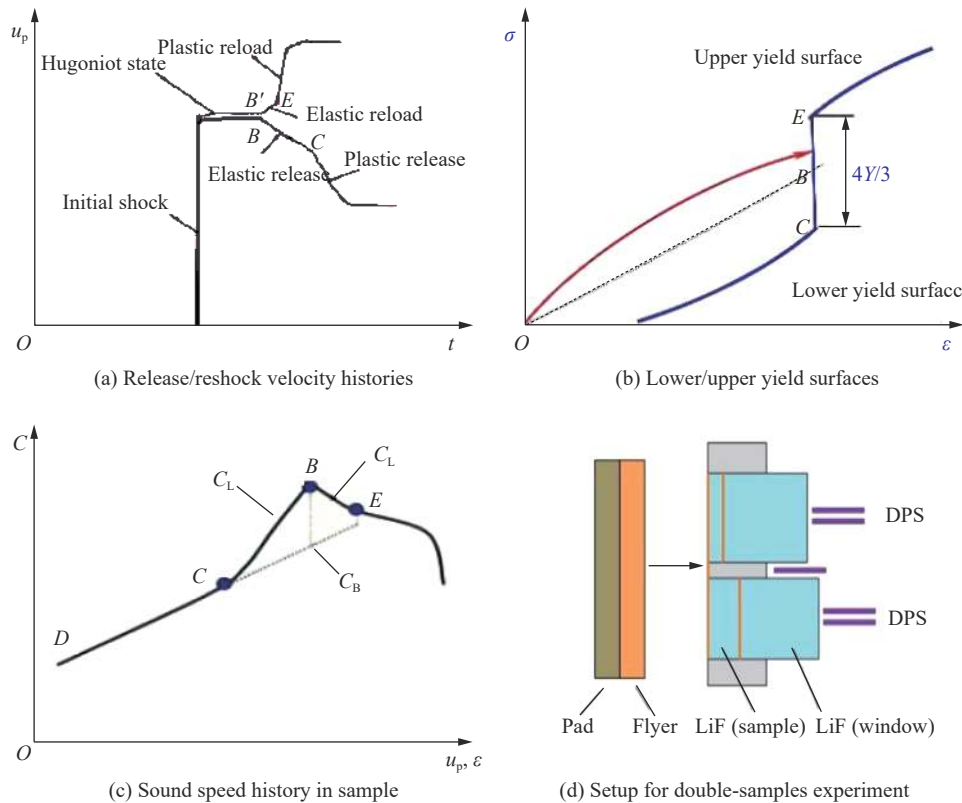


图 1 冲击加载下双屈服面法强度测量基本原理

Fig. 1 Schematic illumination for the Asay self-consistent method of strength determination

2 实验基本参数

共开展 60 GPa 以内 6 个压力点的平面冲击加载 LiF 强度测量实验。除 $p=32.8$ GPa 的压力点只进行了冲击-卸载实验外, 其余压力点均包括冲击-卸载和冲击-再加载实验各 1 发, 基本参数见表 1。表 1 中 PC 为聚碳酸酯 (polycarbonate), OFHC 为无氧铜 (oxygen free high-conductivity copper); w_f 为飞片速度, 即弹速, h_f 为飞片厚度, h_s 为 LiF 样品厚度; 实验 S-09 中无配对的相近弹速再加载实验, ($\tau_c - \tau_0$) 以实验 S-06 和 S-08 的线性外插值 (0.35 GPa) 近似; 实验 S-11 和 S-12 为反碰实验, 其余为正碰; 压力 p 取同一组配对冲击-卸载、冲击再加载实验的平均值。实验采用火炮/气炮加载技术, 以双台阶样品正碰为主, 无氧铜飞片 ($p < 10$ GPa 时飞片材料为 z -切石英) 以预定弹速 w_f 撞击由 [100]LiF 台阶样品和 [100]LiF 窗口组成的物理靶, 飞片、LiF 台阶样品直径分别为 56 和 26 mm; 第 1 块 LiF 样品厚度 $h_s=0$ (碰靶面), 以增大台阶样品厚度差从而提高声速测量精度。反碰实验的飞片和物理靶均为 [100]LiF, 直径为 28 mm。飞片和样品尺寸可确保不小于 500 ns 的界面速度剖面平台, 且卸载/再加载段主体不受边侧稀疏影响。卸载或再加载追赶波则通过飞片背面的低阻抗或高阻抗衬垫分别引入。[100]LiF 单晶纯度高于 99.99%, 常态密度为 2.638 g/cm³, 抽样超声测量得到的常压纵波声速 C_L 为 6.643 km/s、横波声速 C_B 为 5.143 km/s。

表 1 主要实验参数及结果

Table 1 Main experimental parameters and results

实验	飞片/衬垫	$w_p/(m \cdot s^{-1})$	h_p/mm	h_s/mm	$(\tau_c + \tau_0)/GPa$	$(\tau_c - \tau_0)/GPa$	Y/GPa	p/GPa
S-01	z-切石英/PC	789	3.0	0, 3.066	0.11		0.18	6.4
S-02	z-切石英/Cu	765	3.0	0, 3.083		0.07		
S-03	OFHC/PC	1 262	1.533	0, 2.573	0.29		0.47	14.7
S-04	OFHC/Ta	1 233	1.497	0, 2.604		0.17		
S-05	OFHC/PC	1 684	1.507	0, 3.082	0.53		0.97	21.4
S-06	OFHC/Ta	1 735	1.529	0, 3.087		0.44		
S-07	OFHC/PC	2 055	1.528	0, 3.013	0.61		1.01	26.4
S-08	OFHC/Ta	1 993	1.520	0, 2.995		0.40		
S-09	OFHC/PC	2 394	1.551	0, 3.021	0.84		1.19	32.8
S-11	LiF/PC	4 920	2.633	12.0(窗口)	1.46		1.69	55.9
S-12	LiF/LY12	5 040	2.621	12.0(窗口)		0.23		

实验中采用激光干涉测速技术 DISAR (displacement interferometer system for any reflector)^[24] 测量 LiF 样品/LiF 窗口界面速度剖面。由于正碰实验的第 1 块样品测试面以及反碰实验的测试面为飞片/LiF 窗口界面, 为了防止碰靶时窗口表面微损伤引起的光学不透明或透明性下降, LiF 窗口的碰靶面采用了贴 Al 箔(厚约 8 μm)工艺, 以确保飞片/LiF 窗口界面速度干涉条纹信号的有效获取。而样品/窗口界面则通过在 LiF 窗口测试面镀 Al 膜(厚约 1 μm)的方式提高其反光性能, 以获取高信噪比的界面速度干涉条纹信号。

3 实验结果与分析

不同加载压力下测得的 LiF 双台阶样品/LiF 窗口界面(样品厚度 $h_{s1}(=0)$, h_{s2})的典型原位粒子速度剖面如图 2~4 所示, 其中由于窗口折射率效应引起的速度修正采用文献 [10] 给出的公式进行。最高压力点(55.9 GPa)实验数据由二级轻气炮反碰加载获得, 由于弹速较高, 速度剖面质量略差, 主要是由高弹速发射时脆性 LiF 飞片内部出现局部非均匀损伤所致。其余几个压力点均采用正碰方式, 由于相同压力下正碰加载所需弹速显著降低, 实验采用碰靶姿态较优的火炮作为加载平台, 速度剖面质量整体较优, LiF 样品/窗口界面准弹性卸载/再加载特征信号明显, 再加载信号前端未出现飞片局部脱开引起的非预期速度回跳, 确保了完备双屈服面法框架下 LiF 屈服强度的求取。

在图 2~4 所示的正碰实验中, 利用飞片/LiF 窗口界面(样品厚度 $h_{s1}=0$)、LiF 样品/LiF 窗口界面(样品厚度 h_{s2})的实测粒子速度剖面, 由下式:

$$\begin{cases} u_p = u_w \\ C(u_p) = dh_s/(t'_4 - t_4) \end{cases} \quad (2)$$

可以计算样品沿卸载/再加载路径的声速(C)-粒子速度(u_p)曲线。式(2)中: $dh_s = h_{s2} - h_{s1}$, t'_4 、 t_4 分别为厚度为 h_{s2} 、 $h_{s1}(=0)$ 的 LiF 样品界面速度剖面上 u_w 对应的时刻。

为了消除飞片碰靶姿态倾斜和测试时间同步性的影响, 声速改写为:

$$C(u_p) = \frac{dh_s}{(t'_4 - t'_1) - (t_4 - t_1) + dh_s/D_s} = \frac{dh_s}{(dr' - dt) + dh_s/D_s} \quad (3)$$

式中: D_s 为 LiF 样品的冲击波速度, 弹塑性双波响应时为塑性波速度, 由实测弹速、飞片和样品冲击 Hugoniot 关系^[10, 25-26] 估算; t'_1 、 t_1 分别为厚度 h_{s2} 、 $h_{s1}(=0)$ 的 LiF 样品界面速度剖面的塑性波起跳时刻, dr' 、 dt 分别为对应的波走时。

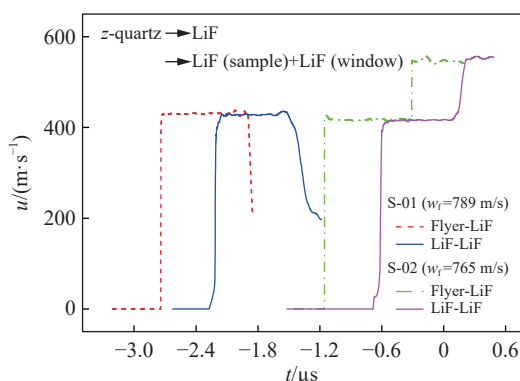


图 2 典型的 LiF 样品卸载、再加载界面速度剖面测量结果 ($p=6.4$ GPa, z -切石英飞片)

Fig. 2 Typical release/reshock velocity profiles measured at the sample-window interfaces for [100] LiF ($p=6.4$ GPa, z -quartz flyer)

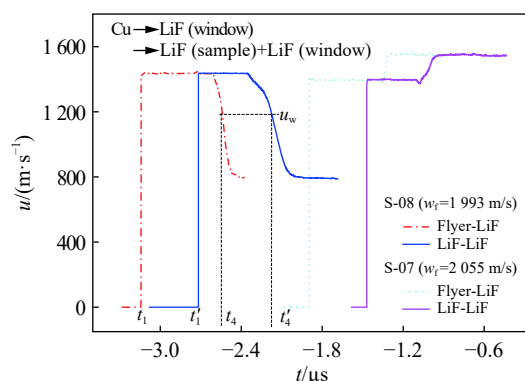


图 3 典型的 LiF 样品卸载、再加载界面速度剖面测量结果 ($p=26.4$ GPa, Cu 飞片)

Fig. 3 Typical release/reshock velocity profiles measured at the sample-window interfaces for [100] LiF ($p=26.4$ GPa, Cu flyer)

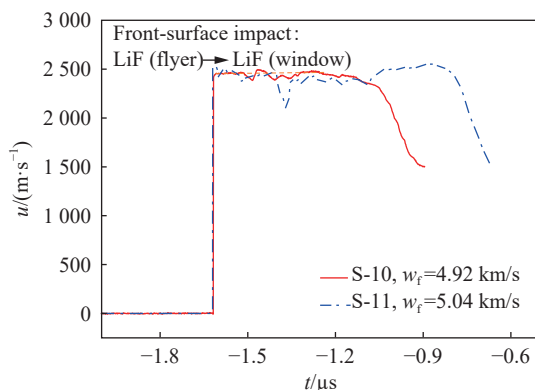


图 4 典型的 LiF 样品卸载、再加载界面速度剖面测量结果 ($p=55.9$ GPa, LiF 飞片)

Fig. 4 Typical release/reshock velocity profiles measured at the sample-window interface for [100] LiF ($p=55.9$ GPa, LiF flyer)

利用上述分析方法对实测台阶样品(反碰时方法较简单, 故略)的界面速度剖面进行数据反演, 可获得声速-原位粒子速度曲线($C-u_p$), 详见图 5(a)。在本文实验压力范围内, 全部 $C-u_p$ 曲线均有显著的准弹性特征; 卸载进入下屈服面后, 各曲线体波声速的走势基本一致, 与理论近似线(点画线, $C_B \approx C_0 + 2\lambda u_p$) 偏离较小。32.8 GPa 压力点由于仅有冲击-卸载速度剖面, $(\tau_c - \tau_0)$ 以 21.4 和 26.4 GPa 等 2 个压力点的线性外插值(0.35 GPa)近似, 在图 5(b) 中以空心“○”表示, 得到的 Y 值以空心“□”表示。

整体看来, 冲击加载下, [100]LiF 单晶在 ~ 60 GPa 压力范围内仍维持显著的固体强度特性, 屈服强度 Y 随压力提高而显著提高, 强度效应不可忽视。另外, 在该压力范围内, $(\tau_c - \tau_0)$ 均显著大于零, 若仅以卸载实验求取屈服强度而忽略 τ_c 与 τ_0 的差异将导致屈服强度 Y 偏低 ($Y = 2\tau_c > \tau_c + \tau_0$), 而本文完备的冲击-卸载、冲击-再加载实验数据获取显著地提升了双屈服面法强度测量的准确性。

将本文冲击加载 [100]LiF 屈服强度数据与文献 [18-19] 给出的磁驱准等熵加载数据进行汇总比较, 如图 6 所示。尽管磁驱数据存在一定的分散性, 但整体看来, 在 ~ 60 GPa 压力范围内, 冲击加载下的 [100]LiF 屈服强度高于磁驱准等熵加载结果。

材料高压屈服强度与加载条件、材料微结构均密切相关。加载条件方面, 应变率、压力、温度是影响材料屈服强度特性的重要因素。从加载应变率来看, 文献 [18-19] 中的磁驱加载平均应变率为 $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, 低于本文平面冲击加载(加载前沿 $\sim 10^8 \text{ s}^{-1}$); 相应地, 磁驱加载时材料的温升较小, 冲击加载的温升较高。从图 6 给出的 2 种加载路径下 [100]LiF 屈服强度差异来看, 若排除材料微结构差异, 则在本文加载压力范围内, [100]LiF 的应变率硬化效应更明显, 而温升引入的软化效应相对较弱。

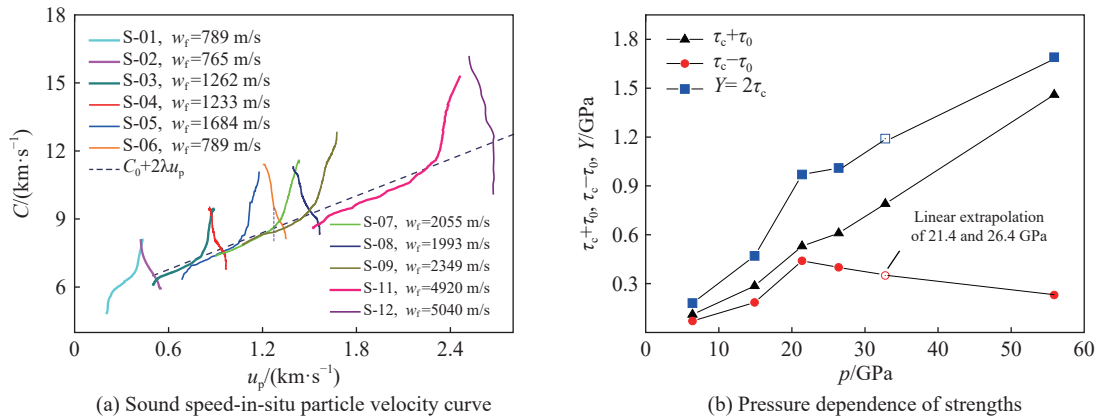


图 5 数据反演获得的 [100]LiF 声速-原位粒子速度曲线及屈服强度-压力关系

Fig. 5 Sound speed-in-situ particle velocity profiles and pressure dependence of strengths for [100] LiF educed from experimental data

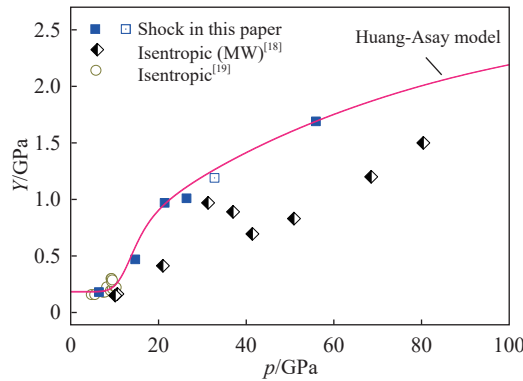


图 6 不同加载路径下 [100]LiF 的屈服强度比较

Fig. 6 Comparison of yield strengths between planar shock and isentropic loading for [100] LiF

暂不考虑应变率因素, 采用下式:

$$Y - Y_0 = \frac{a}{1 + (\epsilon_p/b)^n} \left[1 + \frac{G'_p}{G_0} \frac{p}{(V_0/V)^{1/3}} - \frac{G'_T}{G_0} \Delta T \right] \quad (4)$$

给出的改进型 SCG 本构模型—Huang-Asay 模型^[22]对本文中获得的冲击加载 LiF 强度结果进行参数确定, 得到的 $Y-p$ 曲线见图 6 中的实线。式 (4) 中: $Y_0=0.18$ GPa, $a=0.68$ GPa, $b=0.142$, $n=-8.7$, $G'_p/G_0 = 0.0545$ GPa⁻¹, $G'_T/G_0 = 8.68 \times 10^{-4}$ K⁻¹; p 、 T 、 V 、 $\epsilon_p (= \ln(V/V_0))$ 等参数由 Grüneisen 状态方程进行计算, 其中 $C_0=5.148$ km/s, $\lambda=1.353$, $\gamma_0=2.0$, $c_{T0}=1.5$ J/(g·K), 假设 $\gamma_0/V_0=\gamma/V$ 。

从图 6 可以看出, 方程 (4) 可较好地对本文的冲击加载 LiF 强度特性进行描述。但由于未考虑应变率效应, 尚无法用同一套参数对磁驱准等熵加载数据进行统一描述。另外, 本文在 30~60 GPa 压力范围内的数据点偏少, 由此获得的冲击加载下 LiF 屈服强度随压力的变化规律还是初步的, 更准确地表征有待更多实验数据支撑。此外, 后续工作将进一步补充复杂路径实验数据, 深入分析压力、应变率、温度对 [100]LiF 强度特性的影响规律, 为适用性更强的高压-高应变率本构模型研制提供支撑。

4 小 结

利用平板碰撞和双屈服面法, 结合原位剖面测量技术, 获得了 60 GPa 以内冲击加载下典型光学窗口材料 [100]LiF 屈服强度随压力的变化规律, 分析了冲击加载和磁驱准等熵加载 2 种不同路径下的 LiF 屈服强度特性差异, 得到主要结论如下:

(1) 在 ~60 GPa 压力范围内, [100]LiF 具有明显的抗剪切变形能力, 屈服强度随加载压力提高而显著提高, 压力硬化效应明显;

(2) 相同压力时, 冲击加载下的 LiF 屈服强度高于磁驱准等熵加载, 在 ~60 GPa 压力范围内应变率硬化效应占主导, 温度软化效应相对较弱;

(3) 采用以 SCG 模型为基础的 Huang-Asay 本构模型可较好地描述本文冲击加载下的 LiF 强度特性, 并由此确定了模型参数。

LiF 在实际应用中往往被作为冲击实验的光学窗口使用。本文结果为 LiF 窗口在材料本构关系和冲击相变等精密实验中的应用提供了重要支撑, 数据反演时通过加入 LiF 窗口自身的本构模型, 可以排除窗口强度效应的影响, 提高非透明样品内部的本构响应、相转变等数据的反演精度。后续工作拟补充开展基于阻抗梯度飞片提供的复杂可控路径加载强度实验, 进一步比较不同加载路径下 [100]LiF 的屈服强度特性, 深入分析压力、应变率、温度对其强度特性的影响规律, 为适用性更强的高压-高应变率本构模型研制提供更丰富的基础实验数据。

参考文献:

- [1] EDWARDS R J, ROTHMAN S D, VOGLER T J, et al. Inferring the high-pressure strength of copper by measurement of longitudinal sound speed in a symmetric impact and release experiment [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(14): 145901. DOI: 10.1063/1.5068730.
- [2] SMITH R F, EGGERT J H, SACULLA M D, et al. Ultrafast dynamic compression technique to study the kinetics of phase transformations in bismuth [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(6): 065701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.065701.
- [3] 李雪梅, 俞宇颖, 谭叶, 等. Bi 在固液混合相区的冲击参数测量及声速软化特性 [J]. *物理学报*, 2018, 67(4): 046401. DOI: 10.7498/aps.67.20172166.
LI X M, YU Y Y, TAN Y, et al. Softening of sound velocity and Hugoniot parameter measurement for shocked bismuth in the solid-liquid mixing pressure zone [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(4): 046401. DOI: 10.7498/aps.67.20172166.
- [4] STEINBERG D J, COCHRAN S G, GUINAN M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(3): 1498–1504. DOI: 10.1063/1.327799.
- [5] PRESTON D L, TONKS D L, WALLACE D C. Model of plastic deformation for extreme loading conditions [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(1): 211–220. DOI: 10.1063/1.1524706.
- [6] AO T, ASAY J R, DAVIS J P, et al. High-pressure quasi-isentropic loading and unloading of interferometer windows on the veloce pulsed power generator [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 955(1): 1157–1160. DOI: 10.1063/1.2832924.
- [7] ASAY J R, AO T, DAVIS J P, et al. Effect of initial properties on the flow strength of aluminum during quasi-isentropic compression [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(8): 083514. DOI: 10.1063/1.2902855.
- [8] DAVIS J P, KNUDSON M D, SHULENBURGER L, et al. Mechanical and optical response of [100] lithium fluoride to multi-megabar dynamic pressures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(16): 165901. DOI: 10.1063/1.4965869.
- [9] FRATANDUONO D E, BOEHLI T R, BARRIOS M A, et al. Refractive index of lithium fluoride ramp compressed to 800 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(12): 123521. DOI: 10.1063/1.3599884.
- [10] 李雪梅, 俞宇颖, 张林, 等. [100] LiF 的低压冲击响应和 1550 nm 波长下的窗口速度修正 [J]. *物理学报*, 2012, 61(15): 156202. DOI: 10.7498/aps.61.156202.
LI X M, YU Y Y, ZHANG L, et al. Elastic-plastic response of shocked [100] LiF and its window correction at 1550 nm wavelength [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(15): 156202. DOI: 10.7498/aps.61.156202.
- [11] RIGG P A, KNUDSON M D, SCHARFF R J, et al. Determining the refractive index of shocked [100] lithium fluoride to the limit of transmissibility [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(3): 033515. DOI: 10.1063/1.4890714.
- [12] JENSEN B J, HOLTKAMP D B, RIGG P A. Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(1): 013523. DOI: 10.1063/1.2407290.
- [13] LIU Q C, ZHOU X M, ZENG X L, et al. Sound velocity, equation of state, temperature and melting of LiF single crystals under shock compression [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(4): 045901. DOI: 10.1063/1.4906558.
- [14] SEAGLE C T, DAVIS J P, KNUDSON M D. Mechanical response of lithium fluoride under off-principal dynamic shock-

- ramp loading [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(16): 165902. DOI: 10.1063/1.4965990.
- [15] VORTHMAN J E, DUVAL G E. Dislocations in shocked and recovered LiF [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53(5): 3607–3615. DOI: 10.1063/1.331140.
- [16] MEIR G, CLIFTON R J. Effects of dislocation generation at surfaces and subgrain boundaries on precursor decay in high-purity LiF [J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 59(1): 124–148. DOI: 10.1063/1.337044.
- [17] SANO Y, SANO T. Evaluation of the precursor decay anomaly in single crystal lithium fluoride [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(2): 023534. DOI: 10.1063/1.3159655.
- [18] AO T, KNUDSON M D, ASAY J R, et al. Strength of lithium fluoride under shockless compression to 114 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(10): 103507. DOI: 10.1063/1.3259387.
- [19] BROWN J L, ALEXANDER C S, ASAY J R, et al. Extracting strength from high pressure ramp-release experiments [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(22): 223518. DOI: 10.1063/1.4847535.
- [20] 谭华. 实验冲击波物理导引 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 186–192.
- [21] VOGLER T J, CHHABILDAS L C. Strength behavior of materials at high pressures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1): 812–825. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.069.
- [22] HUANG H, ASAY J R. Compressive strength measurements in aluminum for shock compression over the stress range of 4–22 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(3): 033524. DOI: 10.1063/1.2001729.
- [23] ASAY J R, CHHABILDAS L C. Determination of the shear strength of shock compressed 6061-T6 aluminum [M]//MEYERS M A, MURR L E. *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*. Boston, MA, USA: Springer, 1981: 417–431. DOI: 10.1007/978-1-4613-3219-0_26.
- [24] WENG J D, TAN H, HU S L, et al. New all-fiber velocimeter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(9): 093301. DOI: 10.1063/1.2008989.
- [25] 李雪梅, 俞宇颖, 李英华, 等. 冲击压缩下 z-切石英的弹性响应特性和折射率 [J]. *物理学报*, 2010, 59(4): 2691–2696. DOI: 10.7498/aps.59.2691.
- LI X M, YU Y Y, LI Y H, et al. Elastic properties and refractive index of shocked z-cut quartz [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(4): 2691–2696. DOI: 10.7498/aps.59.2691.
- [26] MITCHELL A C, NELLIS W J. Shock compression of aluminum, copper, and tantalum [J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52(5): 3363–3374. DOI: 10.1063/1.329160.

(责任编辑 张凌云)