文章编号:1000-5773(2007)04-0397-04

用作 VISAR 窗口的 LiF 晶体折射率变化修正因子*

马 云,李泽仁,胡绍楼,李加波,汪小松,陈 宏,
翁继东,刘 俊,俞宇颖,宋 萍,向曙民

(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:利用加窗 VISAR 测速方程和平面碰撞实验产生已知样品-窗口界面粒子速度的方法,对 LiF 晶体用作 VISAR(激光波长 532 nm)测速窗口时的折射率变化修正因子进行了测定。给出了 LiF 晶体窗口在冲击压力 2.7～66 GPa 范围内,折射率变化修正因子测量结果及界面粒子速度修正方法。

关键词:VISAR;LiF;折射率;冲击波
中图分类号:O521.3;O384 **文献标识码**:A

1 引 言

近几年,因为样品-窗口界面处理工艺的完善和窗体寄生干涉问题的解决[1],加窗 VISAR 测试技术在我国冲击波物理研究中得到了愈来愈广泛的应用[2-3]。但窗口材料在冲击作用(如压缩、拉伸、加热等)下,由于折射率变化将引入附加多普勒频移,因此最终的测速结果必须引入修正项。此修正项与窗口材料的折射率变化特性直接相关,而且对某些窗口材料,此修正项值还比较大[4]。因此,为获取加窗测试中正确的速度剖面测量数据,必须确定窗口材料在冲击作用下的折射率变化修正因子 $\Delta\nu/\nu_0$。

在目前所用 VISAR 窗口中,LiF 晶体因为具有中等阻抗,且在宽广的压力范围内能够保持透明性,因而使用最为普遍。本文主要介绍测量冲击载荷下 VISAR 窗口折射率变化修正因子的实验方法和技术,并给出我国生产的 LiF 晶体窗口在冲击压力 2.7～66 GPa 范围内的折射率变化修正因子测量结果及样品-窗口界面粒子速度修正方法。

2 实验方法

2.1 加窗 VISAR 折射率修正因子 $\Delta\nu/\nu_0$ 的测量

加窗 VISAR 测速方程式[4]为

$$u_{\mathrm{P}}\left(t-\frac{\tau}{2}\right)=\frac{\lambda_0 F(t)}{2\tau(1+\delta)(1+\Delta\nu/\nu_0)} \tag{1}$$

式中:t 是样品运动时间,τ 是干涉仪内两光路间的延迟时间,λ_0 是激光波长,δ 是标准具色散引入的修正项,$\Delta\nu/\nu_0$ 是因冲击压缩作用窗口折射率变化引入的附加多普勒频移(即窗口折射率变化修正因子),u_{P} 是待测样品-窗口界面粒子速度。

若要测量窗口折射率变化修正因子 $\Delta\nu/\nu_0$,由(1)式可知,只要对样品-窗口界面粒子速度 u_{P} 和 VISAR 条纹数 $F(t)$ 加以确定,就可以直接得到 $\Delta\nu/\nu_0$ 的值。

样品-窗口界面粒子速度 u_{P} 是通过飞片击靶速度的测量,根据飞片、样品和窗口的状态方程计算得

* **收稿日期**:2007-04-10;**修回日期**:2007-07-19
作者简介:马 云(1975—),男,助理研究员,主要从事高温高压光电测试技术研究. E-mail:myun102@21cn.com

出。在实验时多采用对称碰撞实验(飞片、样品和窗口材料完全一致),此时样品-窗口界面粒子速度为飞片击靶速度的一半。条纹数 $F(t)$ 直接由 VISAR 记录系统给出。

2.2 加窗 VISAR 测速结果的修正

对于加窗 VISAR 方程(1),可以改写为

$$u_{\mathrm{P}}\left(t-\frac{\tau}{2}\right)=\frac{\lambda_0 F(t)}{2\tau(1+\delta)}-\Delta u_{\mathrm{P}}=u_{\mathrm{a}}-\Delta u_{\mathrm{P}} \tag{2}$$

式中:u_{a} 为 VISAR 测量的"表观"速度,也即未经过折射率变化修正的速度,由 VISAR 记录系统记录的条纹数 $F(t)$ 直接给出。u_{P} 为实际样品-窗口界面粒子速度,由测量的飞片击靶速度和飞片、样品及窗口状态方程计算得出。Δu_{P} 为 VISAR 测量的表观速度 u_{a} 与实际待测速度 u_{P} 之差。

对于同种窗口材料,可以由测定的系列数据,用指数或多项式给出 Δu_{P}-u_{P} 的关系。

由实验得出的 Δu_{P}-u_{P} 关系和 VISAR 直接给出的"表观"速度 u_{a},即可给出某次具体实验待测样品-窗口界面粒子速度的测量结果。

3 实 验

本实验在一级轻气炮和二级轻气炮上完成。一级轻气炮口径 100 mm,空气作工作介质情况下弹丸实际最高速度可达 600 m/s,击靶平面性小于 1°。二级轻气炮口径 35 mm,弹速范围 2～7 km/s,击靶平面性约为 1°。两门炮的联合使用,可使实验覆盖较为宽广的压力范围。一级轻气炮弹丸速度采用刷子电探针和 OBR(Optical Beam Reflectance)激光反射测速方法同时测量,其测速不确定度小于 1%。二级轻气炮弹丸速度采用磁测速计测量,其测速不确定度小于 1%。

实验装置如图 1 所示。在一级轻气炮加载实验中,主要采用加窗 LiF 晶体对称碰撞。为了提高 LiF 晶体窗口内的压力,也采用了无氧铜飞片撞击无氧铜靶样品和 LiF 晶体窗口的加载方式。在二级轻气炮加载实验中,为便于飞片速度测量,主要采用 LY12 Al 飞片撞击 LY12 Al 靶样品和 LiF 晶体窗口的加载方式。

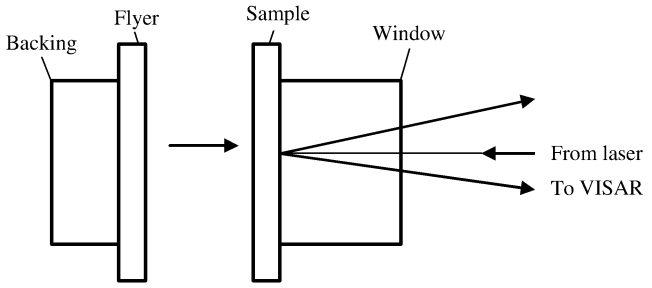


图 1 加窗 VISAR 原理图

Fig. 1 Experimental configuration for window-mounted VISAR

实验所用飞片和样品尺寸皆为∅30 mm×2 mm,所用 LiF 窗口尺寸为∅30 mm×9 mm。LiF 窗口两通光表面有 3°楔角,以便防止窗体前后表面反射光形成寄生干涉,并同时防止窗口前表面的反射光进入干涉仪。实验所用 LiF 晶体购于上海理工大学,折射率 $n_{\mathrm{D}}=1.394$,密度 2.640 g/cm^3,通光方向垂直解理面[100]面。

对于加窗 LiF 晶体对称碰撞实验,采用蒸镀高内反膜的 LiF 晶体窗口后表面作为多普勒反射面,膜材料为金属铝,膜层厚度大约 0.3 μm。对于金属飞片撞击金属靶样品和 LiF 晶体窗口实验,多普勒反射面采用金属靶样品表面,表面被处理成均匀的漫反射面。所有实验中,靶样品和窗口都是用透明环氧树脂加压粘接,飞片和靶样品也是用环氧树脂分别粘接在飞片基板和靶样品环上。

实验使用中国工程物理研究院流体物理研究所研制的 VISAR 仪器,所用激光波长为 532 nm。实验根据所测速度不同选用不同的条纹常数。本实验中使用了 102.5、234、468、808 m/(s·Fr)等多种条纹常数。每种条纹常数进行了精确标定,其测量不确定度最大不超过 1.5%。在大部分实验中,采用了双灵敏度 VISAR 测试,以找回因记录系统响应带宽限制而丢失的条纹数。实验结果表明,在本研究的压力范围内,采用双灵敏度 VISAR 测试并根据物理边界条件找回丢失的条纹数,所产生的相对误差不超过 2%。经过整数条纹的补加,所有实验中两台 VISAR 测试结果完全一致。

4　实验结果及分析讨论

4.1　实验结果

共进行了 11 发实验。样品-窗口界面粒子速度范围覆盖 194 m/s～2.80 km/s,LiF 窗口内压力范围覆盖 2.7～66 GPa。在界面粒子速度和 LiF 窗口内压力计算中使用的 LiF、无氧铜、LY12 Al 的 c_0、λ 参数来自 LASL 雨贡纽数据手册[5],详见表 1。实验参数及速度修正值 Δu_P 实验结果如表 2 所示。在表 2 中,u_f 为飞片速度,p 为 LiF 窗口内的压力。

表 1　LiF、LY12 Al 及无氧铜的雨贡纽参数[5]

Table 1　Hugoniot paramenters[5] of LiF, LY12 aluminum and copper

Material	ρ_0/(g/cm^3)	c_0/(km/s)	λ
LiF	2.640	5.15	1.35
Cu	8.394	3.91	1.51
LY12 Al	2.784	5.37	1.29

表 2　LiF 窗口折射率变化修正因子实验测量结果

Table 2　Experimental results of refractive index corrections for LiF window

Exp. No.	Flyer	Sample	Window	Flyer velocity u_f/(km/s)	Window stress p/(GPa)	Interface velocity u_P/(km/s)	Velocity measured by VISAR u_a/(km/s)	Δu_P /(km/s)	$\frac{\Delta\nu}{\nu_0}$
Exp. 1	LiF	LiF	LiF	0.388	2.77	0.194	0.237	0.043	0.222
Exp. 2	LiF	LiF	LiF	0.500	3.62	0.250	0.319	0.069	0.276
Exp. 3	LiF	LiF	LiF	0.530	3.85	0.265	0.337	0.072	0.272
Exp. 4	LiF	LiF	LiF	0.602	4.41	0.301	0.383	0.082	0.272
Exp. 5	Cu	Cu	LiF	0.607	6.53	0.432	0.548	0.116	0.269
Exp. 6	LY12	LY12	LiF	2.050	18.36	1.058	1.325	0.267	0.252
Exp. 7	LY12	LY12	LiF	2.160	19.56	1.114	1.425	0.311	0.279
Exp. 8	LY12	LY12	LiF	3.130	31.07	1.608	2.072	0.464	0.289
Exp. 9	LY12	LY12	LiF	4.110	44.41	2.105	2.684	0.579	0.275
Exp. 10	LY12	LY12	LiF	4.690	53.10	2.398	3.070	0.672	0.280
Exp. 11	LY12	LY12	LiF	5.490	66.05	2.801	3.598	0.797	0.285

根据表 2,LiF 晶体作 VISAR 窗口时,界面粒子速度修正值-实际界面粒子速度关系(Δu_P-u_P)曲线见图 2。

按指数形式拟合 Δu_P-u_P 关系的结果为

$$\Delta u_P = 0.271\,78 u_P^{1.039\,89} \tag{3}$$

按线性拟合 Δu_P-u_P 关系的结果为

$$\Delta u_P = -0.008\,36 + 0.284\,42 u_P \tag{4}$$

式中速度单位为 km/s。上述两种拟合结果在所研究的界面粒子速度范围内差别很小。为计算简单,一般采用线性拟合结果进行加窗 VISAR 测速结果处理。

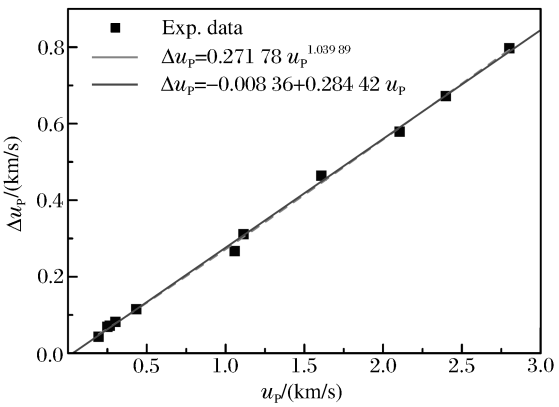


图 2　LiF 窗口的 Δu_P-u_P 关系

Fig. 2　Δu_P-u_P plot for LiF window

4.2　LiF 作 VISAR 窗口界面粒子速度的修正方法

根据加窗 VISAR 测速方程((2)式)和 LiF 窗口 Δu_P-u_P 关系((4)式),可由 VISAR 测量的表观速度 u_a,按(5)式给出 LiF 作 VISAR 窗口时实际所测量的界面粒子速度

$$u_P = \frac{u_a + 0.008\,36}{1.284\,42} \tag{5}$$

式中速度单位为 km/s。(5)式在 LiF 晶体粒子速度 194 m/s～2.80 km/s 范围内适用,向下或向上外

推使用时须谨慎。

4.3 实验结果讨论

本研究测定的折射率变化修正因子 $\Delta\nu/\nu_0$ 平均值为 0.270，与最近 Jensen 等人[6]的数据 0.257 和早期 Wise 等人[7]的数据 0.281 比较一致。三者的差异，我们认为主要来自实验测量的精确度，尤其是 VISAR 条纹常数的测量精度对结果的影响比较大。从本实验室多种实验的应用结果来看，我们的数据结果具有比较高的精度，目前统计的最大不确定度为 3%。

5 结 论

利用加窗 VISAR 测速方程和平面碰撞实验产生已知样品-窗口界面粒子速度的方法，对 LiF 晶体用作 VISAR(激光波长 532 nm)测速窗口时的折射率变化修正因子进行了测定。在 LiF 晶体粒子速度 194 m/s～2.80 km/s 范围内，LiF 晶体折射率变化修正因子 $\Delta\nu/\nu_0$ 平均值为 0.270，界面粒子速度修正值 Δu_P 与实际界面粒子速度 u_P 关系为 $\Delta u_P = -0.00836 + 0.28442 u_P$。

References:

[1] Ma Y, Hu S L, Wang X S, et al. VISAR Measurement of 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.

[2] Yu J Q, Xiao Y B, Zhou X M, et al. Study on Sound Velocity and Unloading Path for Single Crystal LiF under Shock Compression [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(3): 206-212. (in Chinese)
于锦泉，肖亚斌，周显明，等. 冲击压缩下单晶 LiF 高压声速及卸载路径研究术 [J]. 高压物理学报，2005，19(3)：206-212.

[3] Yu Y Y, Tan H, Hu J B, et al. Sound Velocity Measurements for Shock-Compressed LY12 Aluminum Alloy by Using VISAR Technique [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(2): 145-152. (in Chinese)
俞宇颖，谭 华，胡建波，等. 利用 VISAR 测量 LY12 铝在冲击压缩下的声速 [J]. 高压物理学报，2006，20(2)：145-152.

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

[5] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Datae [M]. Berkeley: University of California Press, 1980.

[6] Jensen B J, Holtkamp D B, Rigg P A, et al. Accuracy Limits and Window Corrections for Photon Doppler Velocimetry [J]. J Appl Phys, 2007, 101(1): 013523.

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

LiF Window Corrections for VISAR

MA Yun, LI Ze-Ren, HU Shao-Lou, LI Jia-Bo, WANG Xiao-Song, CHEN Hong, WENG Ji-Dong, LIU Jun, YU Yu-Ying, SONG Ping, XIANG Yao-Min

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

Abstract: Symmetric, plate-impact experiments were performed to measure LiF window correction coefficients for velocity interferometer system for any reflector (VISAR) (at 532 nm). Single crystal LiF window corrections for VISAR under shocked pressure from 2.7 GPa to 66 GPa and the methods of correcting interface velocity are presented.

Key words: VISAR; LiF; refractive index; shock wave