

文章编号: 1000-5773(2010)06-0467-05

气炮加载实验中光学窗口透射率 测量技术及其应用*

李永宏, 刘福生, 程小理, 马海云, 张明建, 薛学东

(西南交通大学高温高压物理实验室, 四川成都 610031)

摘要:报道一种用于气炮加载条件的窗口透射率测量技术。该技术将一种激发电压低(4.5 V)、响应时间快(约 500 ns)、输出功率稳定的半导体脉冲光源设置在弹丸内部,在碰靶前激发出光,作为照明光源,用于观测透明样品/窗口在加载过程中的透射率变化。将该技术用于石英玻璃冲击透明性研究,发现石英玻璃在经冲击压缩再卸载到水的过程中,其透射率下降了近 30%,该结果不支持文献中所给出的液态水压致固化的解释。

关键词:光学窗口;冲击;卸载;透射率

中图分类号: O521.3 **文献标识码:** A

1 引 言

辐射测温^[1-2]、高速摄像^[3-4]、瞬态光谱^[5-6]等技术都需要用到透明的光学窗口材料,因此在加载条件下窗口本身的光学透明性变化是一个非常值得关注的问题。借助激光速度干涉仪 VISAR 测量样品反光面的速度历史,人们通常可以获得有关窗口材料的折射率^[7-8]和弹性极限^[9-10]的信息,但这种方法不能给出透明性的定量结果。

在静态条件下研究物质透明性的最可靠方法是直接测量透射率。如果将这一方法应用到冲击加载实验中,将为光学窗口透光性的研究提供一种在线测量方法,然而该项工作难度比较大。直到 1982 年 Duvall^[11]等才首先将透射测量技术应用到冲击实验中观测了 CS₂ 透射光谱。Dolan 等人^[12]利用光透射技术研究了水在多次冲击下的液-固相变。在他们的实验中都均用氙灯作为透射光源,其激发电压高达 10 kV,且光源响应时间比较慢。氙灯从激发到稳定发光需 4~5 μs 的时间,而冲击波实验的有效测试时间仅在 0~2 μs 范围内。如此长的响应时间给测试系统的同步控制带来误差,而且高电压的使用可能会引入电磁干扰,影响数据的判读。在 Dolan 的实验装置中,透射光源采用外置方式,光路较为复杂。最近 Li 等人^[13]报道了一种应用于气炮加载的透射测量方法,然而这一方法只局限于较高的压力条件。

针对在冲击实验中透射测量技术的不足,本文报道一种新的应用于气炮加载条件下的光透射测量技术,并以石英玻璃窗口为例,测量了它在 2 GPa 以下加载过程中的透射率变化情况。

2 实验原理与方法

图 1 是实验装置示意图。弹丸由一级轻气炮发射,速度通过电磁感应技术测量^[14]。冲击波产生于

* 收稿日期: 2009-02-20; 修回日期: 2009-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(10874141)

作者简介: 李永宏(1981—),男,博士研究生,主要从事高温高压相变研究. E-mail:liyonghong02721227@163.com

通讯作者: 刘福生(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事高压凝聚态物理、原子与分子物理以及冲击波技术研究. E-mail:fusheng_l@sohu.com

飞片与基板的碰撞界面,然后向内传播。飞片($\varnothing 34\text{ mm} \times 14\text{ mm}$)、基板($\varnothing 40\text{ mm} \times 4\text{ mm}$)、窗口($\varnothing 34\text{ mm} \times 14\text{ mm}$)均使用同种透明石英玻璃。加载样品的压力由速度测量值结合阻抗匹配法^[15]确定。与传统冲击实验不同的是,我们将一脉冲光源置于弹丸内部,用于直接观测透明样品在加载过程中的透光性。光源在安装过程中,尽可能使光束与弹丸中心轴重合。激发光源的电源电极安置于弹丸前端(图1中未画出),且电极前端高于飞片所在的平面。在飞片与基板碰撞前,电源的电极提前与金属靶接触,使其电路接通光源工作,光源发出的光经飞片、基板、窗口后由光纤收集并传输到光电倍增管中。光电倍增管将光信号转化为电信号,采用TDS684C型数字示波器对其记录。弹丸中的光源是一个0.5 mW的小型半导体脉冲激光器,工作电压为4.5 V、波长为 $(650 \pm 10)\text{ nm}$ 、光束直径 $d \leq 4\text{ mm}$ 。

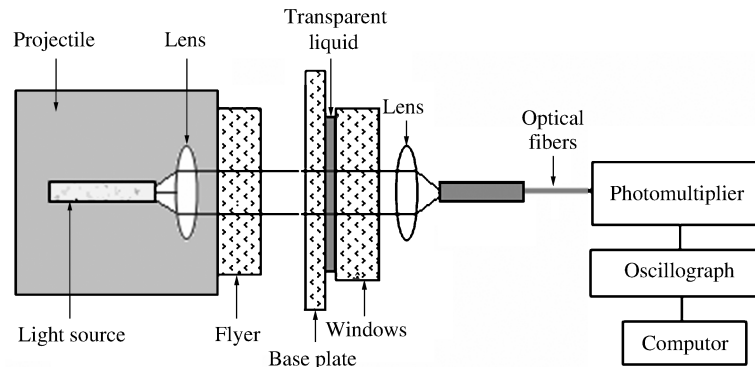


图1 光透射实验示意图

Fig. 1 Schematic view of transmission experiment

在静态环境条件下,光源的特性如图2所示,其中曲线(a)是光源被激发后输出的光信号,曲线(b)是激发光源的电压脉冲信号。曲线(a)和曲线(b)均由示波器记录。光源从激发到稳定输出的时间仅需约500 ns,出光延时约50 ns。该半导体光源的响应时间远小于氙灯($4 \sim 5\ \mu\text{s}$),而且保持了长达 $8\ \mu\text{s}$ 的稳定状态。

利用上述实验装置和方法观测了透明石英玻璃在冲击和卸载过程中的透光性。(a)冲击:在图1所示的实验装置中,在不加基板和透明液体的情况下,让飞片直接加载石英玻璃窗口,观测石英玻璃在冲击过程中的透射率。(b)卸载:将厚度为4.97 mm的蒸馏水注入基板和窗口之间,当冲击波到达蒸馏水时,在石英玻璃基板与水的界面处将会反射一左行稀疏波,使处于压缩状态的石英玻璃卸载,观测石英玻璃在卸载过程中的透射率。为了方便表述,在后文中分别用(a)和(b)代表冲击和卸载这两类实验。将透射率定义为实验条件下的光强 I_{exp} 与静态环境下的光强 I_0 的比值($T = I_{\text{exp}}/I_0$)。

3 实验结果

图3为示波器记录的实验(a)和实验(b)的原始光信号,横坐标是时间,纵坐标是表征光强的电压,向下为光强度增强方向。图3(a)为冲击实验记录结果,石英玻璃窗口的冲击压力为1.78 GPa。从图中可以看出,石英玻璃窗口在冲击压缩阶段,光信号没有明显变化。图3(b)为卸载实验记录结果,石英玻璃基板的冲击压力为1.83 GPa,卸载到水中的压力为0.34 GPa。图3中显示经冲击压缩的石英玻璃

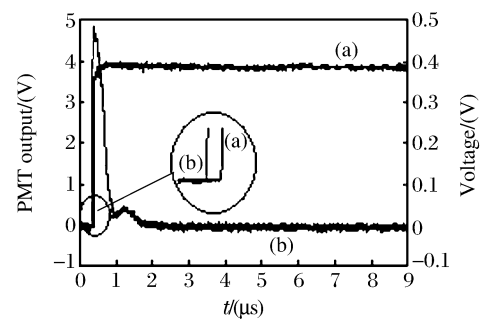


图2 光源特性曲线

((a) 输出的光信号, (b) 触发信号)

Fig. 2 Characteristic of light source

((a) Light signals, (b) Trigger signals)

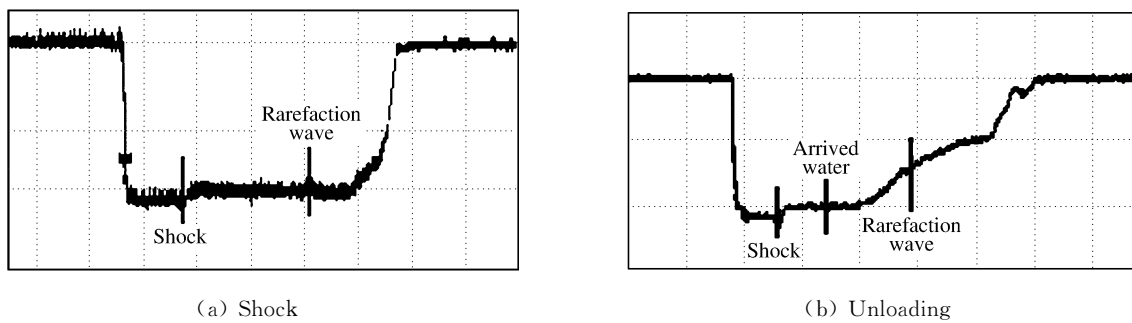


图3 典型的原始光信号
Fig. 3 Typical light signals

基板保持了良好的透明性,当卸载到水中一段时间后光信号迅速下降。为了得到透光性的定量结果,将光的强度变化转化为透射率,如图4所示。在图4中,曲线(a)显示在冲击条件下,石英玻璃在 $1.5\ \mu\text{s}$ 时间内的透射率没有明显变化,保持了其良好透明性。在曲线(b)上,以冲击波到达水与基板的界面时刻为零点,冲击波在水中传播过程中的前 $0.7\ \mu\text{s}$ 时间内透射率没有明显变化,而在随后的 $0.8\ \mu\text{s}$ 发现透射率下降了约30%。Dolan^[16-17]等曾报道过类似的实验结果,他们认为透射率的下降是由于水在多次冲击下发生了晶化,固-液共存的非均匀性导致光被散射。

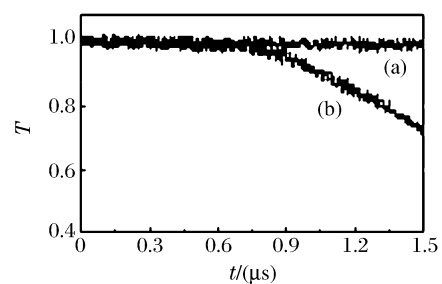
依据水的相图^[18]以及水的冲击实验报道^[19-21],在本研究的实验条件下,水还未达到液-固相变的条件。因此,在冲击和卸载过程中始终处于液相的水样品对可见光不会有散射和吸收,实验中观测到的透射率变化应归因于窗口材料的行为。在冲击阶段,透射率基本维持不变,证明在 $1.8\ \text{GPa}$ 附近处于冲击压缩状态的石英玻璃仍保持其良好的透明性。透射率下降发生在冲击压缩之后的卸载过程,而且呈现出明显的滞后效应,说明透光性变差与石英玻璃发生卸载损伤密切相关。关于石英玻璃在卸载过程中的损伤机理以及延时效应的解释仍在进一步研究中,将在随后的文章中报道。

4 结论

本文报道的在气炮加载条件下光透射测量技术与文献^[11-13]报道的相比具有以下优点。

- (1) 将半导体光源置放于弹丸中,与光源外置的方式相比,光路大大简化。
- (2) 光源的激发电压低,仅为 $4.5\ \text{V}$ 。使用低电压不会对测试系统有大的电磁干扰,不影响数据的判读。
- (3) 半导体光源的响应时间短,从激发到稳定发光需约 $500\ \text{ns}$,有利于测试系统的同步控制。
- (4) 光源输出功率稳定,有利于获取被加载样品的准确信息。
- (5) 本实验技术可以在 $2\ \text{GPa}$ 以下的低压条件使用。这种实验测量方法不仅可以用于光学窗口的透明性测量研究,还为透明物质在加载条件下的吸收率、相变、以及脆性材料的损伤度等提供了一种很好的测量方法。

利用这一实验技术以石英玻璃窗口为例,观测了它在冲击和卸载条件下的透射率。发现石英玻璃被冲击到 $1.8\ \text{GPa}$ 附近,其透射率没有明显变化,经冲击压缩再卸载到水的过程中,石英玻璃的透射率下降了近30%,并且透射率的下降有明显的弛豫特征。在本实验条件下排除了水发生液-固相变的可



(a) Shock; (b) Unloading
图4 石英玻璃的透射率特征
Fig. 4 Transmittance of quartz glass

能性,说明透射率下降是由于处于压缩状态的石英玻璃在卸载过程中损伤所致。我们的实验结果不支持 Dolan 等曾报道的水发生液-固相变的解释。石英玻璃在卸载过程中的损伤机理以及延时效应的解释将在随后的文章中报道。

References:

- [1] Hao G Y, Liu F S. Optical Emission of Directly Contacted Copper/Sapphire Interface under Shock Compression of Megabar [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(26):2619142-2619147.
- [2] Guo J L, Liu F S, Hao G Y, et al. Temperature Measurement for the Interface of the Dense Bulk Iron/Sapphire Window under Shock Compression [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2008, 22(4):414-418. (in Chinese)
郭锦良, 刘福生, 郝高宇, 等. 块状密实铁/蓝宝石界面的冲击温度测量 [J]. *高压物理学报*, 2008, 22(4):414-418.
- [3] Root S, Gupta Y M. Optical Spectroscopy and Imaging of Liquid Benzene Multiply Shocked to 13 GPa [J]. *Chem Phys Lett*, 2007, 442(2):293-297.
- [4] Zhou X M, Wang X S, Li S N, et al. Optical transparency of *z*-Cut LiF, Al₂O₃ and LiTaO₃ Single Crystals under Strong Shock Compression [J]. *Acta Phy Sin*, 2007, 56(3):4965-4970. (in Chinese)
周显明, 汪小松, 李赛男, 等. 强冲击压缩下 LiF, Al₂O₃ 和 LiTaO₃ 单晶的透光性 [J]. *物理学报*, 2007, 56(3):4965-4970.
- [5] Kobayashi T, Sekine T. *In Situ* Raman Spectroscopy of Shock-Compressed Benzene and Its Derivatives [J]. *Phys Rev B*, 2000, 65(9):5281-5284.
- [6] Matsuda A, Kondo K, Nakamura K G. Nanosecond Rapid Freezing of Liquid Benzene under Shock Compression Studied by Time-Resolved Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy [J]. 2006, *Phys Rev B*, 124(5):054501(1)-054501(4).
- [7] Jones S C, Gupta Y M. Refractive Index and Elastic Properties of Quartz Shocked to 60 kbar [J]. *J Appl Phys*, 2000, 88(10):5671-5679.
- [8] Lalone B M, Fat'yanov, Asay J R, et al. Velocity Correction and Refractive Index Changes for [100] Lithium Fluoride Optical Windows under Shock Compression, Recompression, and Unloading [J]. *J Appl Phys*, 2008, 103(9):093505(1)-093505(7).
- [9] Jones S C, Robinson M C, Gupta Y M. Ordinary Refractive Index of Sapphire in Uniaxial Tension and Compression along the *c* Axis [J]. *J Appl Phys*, 2003, 93(2):1023-1029.
- [10] Dolan D H, Ao T. Cubic Zirconia as a Dynamic Compression Window [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(2):021908(1)-021908(3).
- [11] Duall G E, Orilvie K M, Wilson R, et al. Optical Spectroscopy in a Shocked Liquid [J]. *Nature*, 1982, 296:846-847.
- [12] Dolan D H. Time Dependent Freezing of Water under Multiple Shock Wave [D]. Washington: Washington State University, 2003.
- [13] Li J, Zhou X M, Li J. A Time-Resolved Single-Pass Technique for Measuring Optical Absorption Coefficients of Window Materials under 100 GPa Shock Pressures [J]. *Rev Sci Instrum*, 2008, 79(12):123107.
- [14] Shi S C, Chen P S, Huang Y. Velocity Measurement of Magnet Induced System for Projectile [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1991, 5(3):205-214. (in Chinese)
施尚春, 陈攀森, 黄跃. 高速弹丸的磁感应测速方法 [J]. *高压物理学报*, 1991, 5(3):205-214.
- [15] Jing F Q, Chen J X. *Dynamic High-Pressure Generation Principle and Related Technologies* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. (in Chinese)
经福谦, 陈俊祥. *动高压原理与技术* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [16] Dolan D H, Gupta Y M. Time-Dependent Freezing of Water under Dynamic Compression [J]. *Chem Phys Lett*, 2003, 374(3):608-612.

- [17] Dolan D H, Gupta Y M. Nanosecond Freezing of Water under Multiple Shock Wave Compression; Optical Transmission and Imaging Measurements [J]. J Chem Phys, 2004, 121(18): 9050-9057.
- [18] Merrill L. Behavior of the AB₂ Type Compounds at High Pressures and High Temperatures [J]. J Phy Chem Ref Data, 1982, 11(4): 1005-1064.
- [19] Walsh J M, Rice M H. Dynamic Compression of Liquids from Measurements on Strong Shock Waves [J]. J Chem Phys, 1957, 26(4): 815-823.
- [20] Trunin R F. Shock Compression of Condensed Materials (Laboratory Studies) [J]. Phys-Usp, 2001, 44(4): 371-396.
- [21] Rybakov A P. Phase Transformation of Water under Shock Compression [J]. J Appl Mech Tech Phys, 1996, 37(5): 629-633.

Technique for Measuring Transmittance of Optical Windows under Dynamic Loading and Its Application

LI Yong-Hong, LIU Fu-Sheng, CHENG Xiao-Li, MA Hai-Yun,
ZHANG Ming-Jian, XUE Xue-Dong

(Laboratory of High Pressure Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A measurement technique for optical transmittance of window material under gas-gun-driven shock loading condition was developed, in which a pulsed light source of semiconductor laser was mounted in the projectile and along its central axis to measure the transmittance change of transparent sample during loading and unloading processes. The advantages of the light source over the traditional xenon lamp are: (1) the work voltage is only 4.5 V; (2) the response time is less than 500 ns; (3) the output power is stable. The improved method provides an important tool for studying the transparency change, absorption, and failure of brittle materials. Quartz glass, as an example, is found to partially lose its transparency during the unloading process after shock compression of 1.8 GPa, and the decrease of transmittance is as high as 30%. The results do not support the explanation of liquid-solid phase transition given by literature.

Key words: optical windows; shock; release; transmittance