

动态荷载下石英玻璃的透光性及损伤演化研究*

李永宏 刘福生[†] 马海云 程小理 马小娟 孙燕云 张明建 薛学东

(西南交通大学高温高压物理实验室, 成都 610031)

(2009 年 6 月 4 日收到; 2009 年 6 月 25 日收到修改稿)

在一级轻气炮上, 利用光透射测量技术观测了石英玻璃在冲击(低于它的 Hugoniot 弹性极限)以及冲击后再卸载过程中的透射率随时间变化特征. 发现石英玻璃在 1.8 GPa 附近的冲击条件下, 1.5 μs 内保持了良好的透明性. 但处于压缩透明状态的石英玻璃在卸载波的作用下其透明状态仅维持约 0.7 μs , 透射率在随后的 0.8 μs 内下降了约 30%. 这一现象是由石英玻璃在卸载波的作用下发生损伤所致. 透光性的时间效应与玻璃中局部损伤及演化特性密切相关, 球状粒子的生长和散射模型对这一现象给出了合理解释. 对 Dolan 等人 [*J. Chem. Phys.* **121** 9050] 提出的水冲击晶化解释提出质疑. 本文结论对冲击实验中其他窗口材料的透明性研究具有重要的参考价值.

关键词: 石英玻璃, 冲击, 卸载, 散射

PACC: 7847, 6250, 6114D

1. 引 言

在冲击波实验中, 光测技术(如辐射测温^[1,2]、高速摄像^[3,4]、瞬态光谱^[5,6]等技术)是常用的测试手段之一, 其中光学窗口是样品靶不可缺少的结构部件. 在动态加载或卸载过程中窗口材料的光学透明性直接关系到对所获信号的准确判断和解读, 因此, 对光学窗口的冲击透明性研究成为人们非常关注的问题之一. 比如, Jones 等^[7]在冲击状态下对石英的折射率和弹性特性作了研究, 结果显示石英作为光学窗口的适用压力不超过 6 GPa; Fat'yanov 等^[8]通过光的透射办法在 11.9—26.0 GPa 的冲击压力范围内研究了蓝宝石的透光性, 发现蓝宝石的透明性与冲击压力以及晶向的选取有关; 周显明等人^[4]用高速照相技术在百万以上的冲击压力下研究了 LiF, Al₂O₃ 和 LiTaO₃ 的透光性. 实验结果表明 LiF 在 102 GPa 的冲击条件下仍维持长时间的良好透明性, LiTaO₃ 在 139 GPa 就基本不透明, Al₂O₃ 在 131 GPa 表现为透明性逐渐下降的趋势. Dolan 等人^[9]报道了一种新的用于冲击实验的光学窗口材料——立方氧化锆, 研究表明氧化锆作为光学窗口的适用压力可以达到 9 GPa, 是蓝宝石窗口的优先替代者. 上述工作主要集中在研究光学窗口冲击压缩

状态下的特性, 对冲击后再卸载过程中窗口材料的光学透明性研究较少.

石英玻璃在常温常压下因其具有良好的透明性和比较宽的光谱透射范围(185—3500 nm), 因此在低压段人们常选择它作为光学窗口材料^[11—14]. 文献[10—15]用光透射测量方法研究了透明物质(水、苯、以及二硫化碳等)在多次冲击压缩过程中发生化学反应或相变, 其前提是认为光学窗口(石英和蓝宝石)在整个加载过程中保持良好的光学透明性. 在他们的实验中, 飞片、基板、和窗口都选用透明材料, 样品置于基板和窗口之间. 当冲击波到达样品时, 在基板与透明样品(阻抗小于窗口)的界面处会反射一行卸载稀疏波. 在卸载波所到之处, 不仅压力随之降低, 而且处于压缩状态的光学窗口材料将经历一定的体积膨胀. 事实上, 这种卸载稀疏过程是否影响窗口材料的透明性还是一个有待解研究的问题.

本文利用一级轻气炮加载技术结合光透射测量方法, 在低于水的相变压力条件下研究了石英玻璃在冲击以及冲击压缩后再卸载过程中的光学透明性.

2. 实验方法

图 1 实验结构示意图. 分别用图 1(a), (b) 两种

* 国家自然科学基金(批准号:10874141)资助的课题.

[†] E-mail: fusheng_l@sohu.com

装配方式观测石英玻璃在冲击以及冲击后再卸载过程中的透光性. 弹丸由一级轻气炮发射, 速度由磁测速技术测量. 冲击波产生于飞片与基板的碰撞界面, 然后向内传播. 加载样品的压力由速度测量值结合阻抗匹配法^[16]确定. 用于透射测量的光源是发光稳定的小型半导体脉冲激光器. 光源波长为 650 ± 10 nm, 实验前被置于弹丸中的中心轴上. 飞片与石英玻璃碰撞前光源被激发, 发出的平行光束经飞片、石英玻璃后由光纤收集传输到光电倍增管中, 并由示波器对其记录. 在图 1(b) 中的两块石英玻璃之间注入 4.97 mm 的蒸馏水. 由于水的阻抗低于石英玻璃, 当冲击波到达石英玻璃与水的界面处将会反射一左行卸载稀疏波, 使处于压缩状态的石英玻璃卸载. 从而观测到石英玻璃在冲击后再卸载过程中的透光性. 透射率被定义为实验条件下的光强 I_{exp} 与静态环境下光强 I_0 的比值 ($T = \frac{I_{\text{exp}}}{I_0}$), 若 $T = 1$, 表明石英玻璃的透光性没有变化, 保持了良好的透明性; 若 $T < 1$, 则表明石英玻璃的透明性变差.

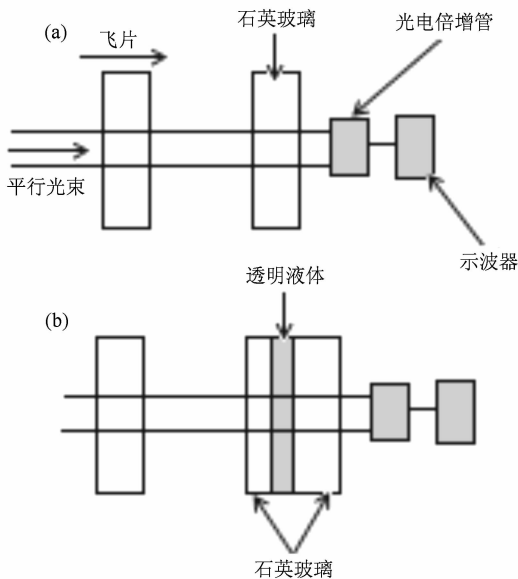


图 1 实验结构示意图 (a) 冲击; (b) 卸载

3. 实验结果与讨论

图 2 为实验 (a), (b) 的透射率随时间变化特征. 实验 (a): 石英玻璃中的冲击压力约为 1.78 GPa, 1.5 μs 内其透射率没有明显变化, 表明石英玻璃在冲击条件下保持了良好透明性. 实验 (b): 石英玻璃中的冲击压力为 1.83 GPa, 卸载到水中的

压力为 0.34 GPa. 冲击波到达水与基板的界面时刻为 $t = 0$, 冲击波在水中传播过程中的前 0.7 μs 内透射率没有明显变化, 而在随后的 0.8 μs 内下降了约 30%. Dolan 等^[12,13]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.

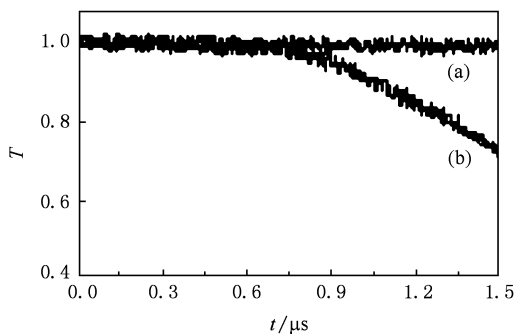


图 2 石英玻璃的透射率随时间的变化特征 (a) 冲击; (b) 卸载

依据水的相图^[17]以及水的冲击实验报道^[18,19], 本文的实验条件还没有达到使水发生液-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入射光不会有散射或吸收, 实验中观测到的透射率变化应归因于石英玻璃的行为. 在冲击阶段, 透射率基本维持不变, 证明在 1.8 GPa 附近处于冲击压缩状态的石英玻璃还保持其良好透明性. 透射率下降发生于冲击压缩之后的卸载过程, 说明透光性变差与石英玻璃发生卸载损伤相关. 因此, 本文对 Dolan 等报道的液固相变解释是质疑的.

关于材料的损伤问题, 文献[20—22]发现在冲击下材料损伤与破坏波的产生有关. 在本文的实验中可能是由于冲击压力低, 没有观测到破坏波的存在. 我们观测到的石英玻璃损伤是发生于冲击后的卸载过程. 透射率下降是由石英玻璃中发生局域性损伤所致. 损伤区域的产生可能是以下两个原因: 1) 石英玻璃本身内部散布着一些微观缺陷. 处于压缩状态的石英玻璃在卸载波的作用下不仅使得压力降低而且还伴随着一定的体积膨胀. 这些缺陷在压缩再膨胀的过程中被激活, 并逐渐变大. 随着卸载波的行进被激活的缺陷不断增多、扩展. 2) 经冲击压缩后石英玻璃在内部出现了微观破碎点. 破碎点在卸载波的诱导下逐渐长大、成核.

石英玻璃开始出现损伤以后, 在其内部出现两个部分, 一部分为卸载波还没有到达的压缩区, 仍然保持着良好的透明性. 另一部分为卸载波经过的区

域一卸载区,发生了局域性损伤.对于入射光来说损伤区域就是散布在透明石英玻璃内的光散射源.当入射光经卸载区的散射源时,因其折射率的变化导致一部分光被散射,使的入射光的强度减弱透射率下降.在最初,所产生散射元的体积与入射光波长相比太小对入射光没有散射或散射较弱,因此透射率在延时后才开始明显下降.

对于卸载损伤导致石英玻璃透射率下降的现象,本文试图用球状粒子生长以及光散射模型^[23]进行解释.如图3是卸载波行进过程中石英玻璃损伤模型示意图,某一时刻卸载波行进的距离 $S = Ct$, (C 卸载波速度),把 S 看成是由厚度为 l 的 m 薄层组成.入射光每经过一层就要被散射粒子散射掉一部分.入射光 T_0 经过 m 薄层后变为 T .我们假定:1) 散射粒子的形状近似为球体;2) 每一薄层内散射粒子的体积近似相等;3) 只考虑光的一级散射;4) 第 k 层散射粒子的大小随时间的变化关系为 $R_k = at_k^\alpha$, 其中 a, α 分别为长大系数和增长指数.透射率的变化遵从指数关系^[24]:

$$T = T_0 \exp(-\gamma h), \quad (1)$$

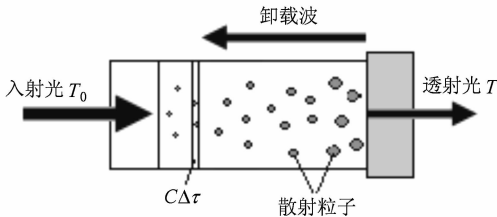


图3 卸载损伤模型示意图

其中 T_0 入射光强度, γ 为散射系数, h 为散射样品的厚度. 散射系数 γ 的表达式^[23]为

$$\gamma = N\sigma_{\text{scat}}, \quad (2)$$

其中 N 为单位体积的散射粒子数, σ_{scat} 为散射粒子的散射横截面. σ_{scat} 的表达式^[23]为

$$\sigma_{\text{scat}} = \frac{8\pi^3 R^4}{\lambda^2} \left(\frac{\Delta n}{n_1} \right)^2, \quad (3)$$

其中 R 为散射粒子的半径, λ 为入射光的波长, n_1 为石英玻璃的折射率, n_2 为散射粒子的折射率, $\Delta n = n_2 - n_1$. 第 k 层粒子在 t 时刻时长大所用时间为

$$t_k = t - \frac{(k-1)l}{C}, \quad (4)$$

令 $l = C\tau$, $B = \frac{8\pi^3}{\lambda^2} \left(\frac{\Delta n}{n} \right)^2$, $H(P) = NaC$, 定义 $H(P)$ 为损伤度, P 代表压力. 把(2)–(4)式代入(1)式得

$$\begin{aligned} T &= T_0 \exp \left[\left(-H(P) \int_0^t (t-\tau)^{4\alpha} d\tau \right) \right] \\ &= T_0 \exp \left(\frac{-H(P)}{4\alpha+1} t^{4\alpha+1} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

将(5)式变形为

$$\ln \frac{T}{T_0} = \frac{-H(P)}{4\alpha+1} t^{4\alpha+1}. \quad (6)$$

波长为 650 nm 对应的石英玻璃折射率 $n_1 = 1.456$, 在 1.8 GPa 的加载条件下石英玻璃折射率的变化量为 $\Delta n \approx 0.01$ ^[25]. 采用指数关系对(b)实验中的透射率对数拟合如图4所示, 从而可以确定出损伤度 $H(P) \approx 0.320$ 和增长指数 $\alpha = 0.75$ 的值. 在本文中难以测得单位体积的散射粒子数 N , 因此不能得到长大系数 a 的值. 拟合所得到的增长指数 $\alpha = 0.75$ 介于扩散长大 0.5^[26] 与线性均匀长大 1.0 之间. 表明我们所观测到的石英玻璃损伤演化可能是两种机理的综合效应.

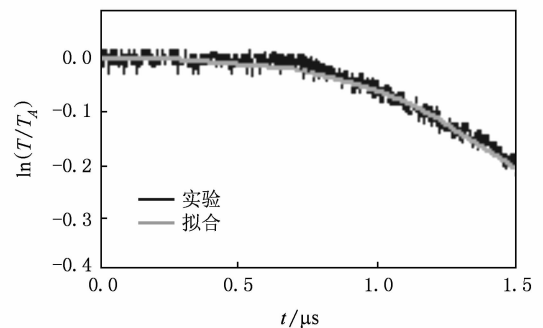


图4 模型计算与实验拟合结果

4. 结 论

采用光透射测试技术对石英玻璃在冲击以及冲击后再卸载过程中的透明性作了研究. 发现冲击到 1.8 GPa 附近石英玻璃保持了良好的透明性. 但经冲击压缩后的透明石英玻璃, 在卸载波的作用下良好透明性仅能维持约 0.7 μs , 在随后的 0.8 μs 内透射率下降了约 30%. 我们认为透射率的下降是由于处于压缩状态下的石英玻璃在卸载过程中出现局域性损伤所致. 通过球状粒子的生长和光散射模型很好地解释了石英玻璃损伤引起透射率变化的特征. 基于本文实验结果对 Dolan 等人^[10,11]将透射率下降解释为水的冲击晶化所致表示质疑. 我们认为经受更高冲击压力后的石英玻璃, 卸载波对其透明性的影响会更为明显, 弛豫时间将缩短. 而且其他窗口材

料也可能出现类似的现象.

- [1] Tan H, Dai C D, Zhang L Y, Xu C H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 221905
- [2] Hao G Y, Liu F S 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 2619142
- [3] Root S, Gupta Y M 2007 *Chem. Phys. Lett.* **442** 293
- [4] Zhou X M, Wang X S, Li S N, Li J, Li J B, Jing F Q 2007 *Acta Phy. Sin.* **56** 4965 (in Chinese) [周显明、汪小松、李赛男、李俊、李加波、经福谦 2007 物理学报 **56** 4965]
- [5] Kobayashi T, Sekin T 2000 *Phys. Rev. B* **65** 5281
- [6] Matsuda A, Kondo K, Nakamura K G 2006 *Phys. Rev. B* **124** 054501
- [7] Jones S C, Gupta Y M 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 5671
- [8] Fat'Yanov O V, Webb R L, Gupta Y M 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 123529
- [9] Dolan D H, Ao T 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 021908
- [10] Duall G E, Orilvie K M, Wilson R, Bellamy P M, Wel P S P 1982 *Nature* **296** 846
- [11] Yoo C S, Gupta Y M 1990 *J. Phys. Chem.* **94** 2857
- [12] Dolan D H, Gupta Y M 2003 *Chem. Phys. Lett.* **374** 608
- [13] Dolan D H, Gupta Y M 2004 *J. Chem. Phys.* **121** 9050
- [14] Root S, Gupta Y M 2009 *J. Phys. Chem. A* **113** 1268
- [15] Dolan D H, Knudson M D, Hall C A, Deeney C 2007 *Nat. Phys.* **3** 339
- [16] Jing F Q, Chen J X 2006 *Dynamic High - Pressure Generation Principle and Related Technologies* (Beijing: National Defense Industry Press) p34 (in Chinese) [经福谦、陈俊祥 2006 (北京:国防工业出版社) 第 34 页]
- [17] Merrill L 1982 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **11** 1040
- [18] Walsh J M, Rice M H 1957 *J. Chem. Phys.* **26** 815
- [19] Trunin R F 2001 *Phys. -Usp.* **44** 371
- [20] Espinosa H D, Xu Y P 1997 *J. Am. Ceram. Soc.* **80** 2061
- [21] He H L, Jing F Q, Jin X G, G I Kanel 1998 *Chin. J. High Press. Phys.* **12** 241 (in Chinese) [贺红亮、经福谦、金孝刚、G I Kanel 1998 高压物理学报 **12** 241]
- [22] Chen D P, He H L X S, Li M F, Jing F Q 2007 *Acta Phy. Sin.* **56** 0423 (in Chinese) [陈登平、贺红亮、黎明发、经福谦 2007 物理学报 **56** 0423]
- [23] Apetzb R, VanBbruggen M P B 2003 *J. Am. Ceram. Soc.* **86** 480
- [24] Yao Q J 1989 *Optical Tutorial* (Beijing: Higher Education Press) p412 (in Chinese) [姚启钧 1989 光学教程 (北京:高等教育出版社) 第 412 页]
- [25] Setchell R E 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 8188
- [26] Xu Z Y 1988 *Principle of phase-change* (Beijing: Science Press) p290 (in Chinese) [徐祖耀 1988 相变原理 (北京:科学出版社) 第 290 页]

Optical transparency and development of failure in quartz glass under dynamic load^{*}

Li Yong-Hong Liu Fu-Sheng[†] Ma Hai-Yun Cheng Xiao-Li Ma Xiao-Juan
Sun Yan-Yun Zhang Ming-Jian Xue Xue-Dong

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

(Received 4 June 2009; revised manuscript received 25 June 2009)

Abstract

Optical transmission of quartz glass is measured during loading and unloading process, and the stress was kept below their Hugoniot elastic limit. The results show that the quartz glass maintains good transparency for more than 1.5 μs under loading processes of 1.8 GPa, then it starts to lose its transparency about 0.7 μs after unloading, with 30% decrease of transmittance. This phenomenon, which reflects the growth and evolution of failure induced by unloading process in quartz glass, has been explained reasonably by the growth of spherical particles and the scattering model. The results are different from the explanation of liquid-solid phase transition given in literature [*J. Chem. Phys.* 2004, **121** 9050]. This paper is significant for studying the transparency of other transparent material.

Keywords: quartz glass, shock, unloading, scattering

PACC: 7847, 6250, 6114D

^{*} Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 10874141).

[†] E-mail: fusheng_l@sohu.com