文章编号：1000-5773(2010)05-0333-05

玻璃中失效波传播的实验研究*

张延耿，段卓平，张连生，欧卓成，黄风雷

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081）

摘要：通过轻气炮加载平面撞击实验，采用激光速度干涉仪（VISAR）测量了相同冲击载荷作用下不同厚度 Soda-Lime 玻璃试件背面的粒子速度，得到了 Soda-Lime 玻璃中失效波的传播轨迹和传播速度。结果表明：碰撞面上产生的失效波存在一定的初始时间延迟，且延迟时间随载荷增加而减小。研究结果对于深入认识失效波的产生机理及其在各类脆性材料中的传播规律具有重要作用。

关键词：失效波轨迹；延迟；激光速度干涉仪；浮法玻璃

中图分类号：O346.5 **文献标识码**：A

1 引 言

失效波现象是玻璃、陶瓷等脆性材料在冲击载荷作用下产生的一种独特的破坏传播现象。从 20 世纪 90 年代初 Rasorenov 等人[1]通过玻璃的自由面粒子速度-时间曲线上的反常再压缩信号发现失效波开始，国内外学者对玻璃、陶瓷等材料中失效波的产生机理及其传播规律进行了大量的研究[2-7]。失效波现象的产生和传播与传统上对脆性材料破坏机制的认知相冲突，针对该现象的研究对于更完善地描述脆性材料的损伤破坏机制具有重要意义；另一方面，玻璃、陶瓷等脆性材料的抗压缩强度高，同时具有较小的密度，近年来已成为非常有发展前途的工程结构材料，在民用和国防建设中发挥着重要作用。

考虑到玻璃是透明材料，Brar 等人[8]采用高速摄影技术观察了玻璃试件中失效波的传播，发现失效波产生于试件表面并向试件内部传播；压阻计测量结果表明，失效波前材料是完整无损的，而波后材料则发生破坏，造成剪切强度的减小和层裂强度的丧失。通常认为，在一维应变条件下，当材料受到的冲击载荷超过其 Hugoniot 弹性极限（σ_{HEL}）时，材料发生破坏。而目前的研究结果表明，对于玻璃材料，当冲击载荷达到某一低于 σ_{HEL} 的门槛值时即发生了破坏[9]。

针对玻璃中出现的失效波现象，虽然目前运用激光速度干涉仪（VISAR）、高速摄影、压阻计和应变计等多种测量手段开展了较系统的研究，建立了一些理论描述模型，并进行了数值计算与模拟，但是还有许多问题存在分歧，如在失效波的产生机制和传播规律上还有不同的认识，需要进一步的研究和探讨。本研究根据陈登平等人[10-11]提出的方法，采用 VISAR 实验技术测量 Soda-Lime 玻璃的粒子速度-时间曲线，并根据实验结果研究失效波在试件中的传播轨迹。

2 实验原理

目前许多学者认为，在一定范围内的冲击载荷作用下，玻璃等脆性材料会出现失效波现象。试件内

* **收稿日期**：2009-09-10；**修回日期**：2009-12-09

基金项目：国家自然科学基金（10872035）；爆炸科学与技术国家重点实验室自主研究课题（YBKT09-05）；教育部高校长江学者创新团队项目

作者简介：张延耿（1981－），男，博士研究生，主要从事脆性材料冲击动力学研究. E-mail：zhangyangeng@bit.edu.cn

通讯作者：段卓平（1965－），男，研究员，博士生导师，主要从事爆炸力学与冲击动力学研究. E-mail：duanzp@bit.edu.cn

部的应力波和失效波(Failure Wave,FW)传播以及稀疏波(源于靶板背面的反射,R)与失效波的相互作用示意图如图 1(a)所示[7,12-14]。由图 1(a)可知:t_0 时刻,加载冲击波到达靶板背面,形成速度跃升平台;t_i 时刻,靶板背面的反射稀疏波与阻抗较小的失效波相互作用后,失效波停止向试件内部传播,稀疏波反射为压缩波;t_1 时刻,压缩波到达靶板背面,形成速度再压缩信号,如图 1(b)所示。

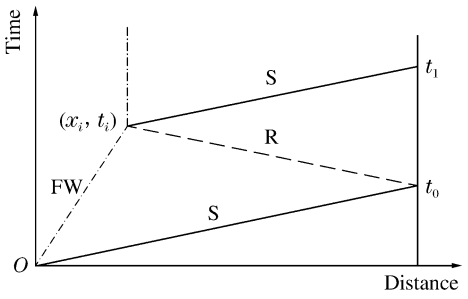


图 1(a) 试件内部应力波和失效波的传播示意图

Fig. 1(a) Schematic diagram of stress wave and failure wave propagation

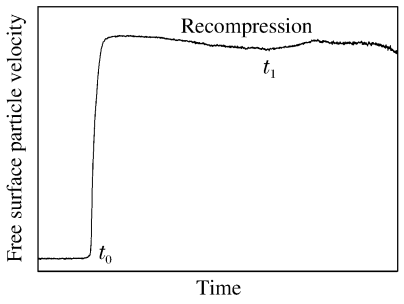


图 1(b) 包含再压缩信号的自由面粒子速度历程

Fig. 1(b) The free surface particle velocity record including the recompression signal

假设材料的纵波声速 c_1 不变,根据 VISAR 测得的粒子速度-时间曲线,得到出现再压缩信号时刻与初始起跳时刻的时间差 $\Delta t=t_1-t_0$,于是得到

$$t_0=l/c_1 \tag{1}$$

$$x_i=l-c_1\Delta t/2 \tag{2}$$

$$T_i=t_0+\Delta t/2 \tag{3}$$

式中:t_0 为一维弹性纵波到达试件背面所需的时间,l 为试件厚度,x_i 为 T_i 时刻失效波与反射稀疏波相遇时的传播距离,c_1 为试件一维弹性纵波波速。在已知 l 和 c_1 的条件下,利用(1)式~(3)式计算得到一组(x_i,T_i)值,此即为试件内部失效波传播轨迹上的一点。

为了得到冲击载荷作用下玻璃试件内部失效波的传播规律,本研究建立了以∅57 mm 轻气炮为加载平台、以 VISAR 为测试手段的一维平面撞击实验测试系统。在同一实验条件下,采用相同的飞片,以相同的速度撞击厚度分别为 $l_1,l_2,\cdots,l_n$ 的玻璃试件靶板,利用 VISAR 测量靶板背面自由面粒子速度。根据测得的粒子速度-时间曲线,得到相应的出现再压缩信号时刻与初始起跳时刻的时间差Δt_1,$\Delta t_2,\cdots,\Delta t_n$,利用(1)式~(3)式计算出一系列的($x_i$,$T_i$)值。由于每次实验的条件相同,根据 VISAR 的测量结果就可以确定失效波在试件内部不同时刻到达的位置,将这些点依次连接,即可获得厚度为 l_n 的靶板内部失效波的传播轨迹,如图 2 所示。

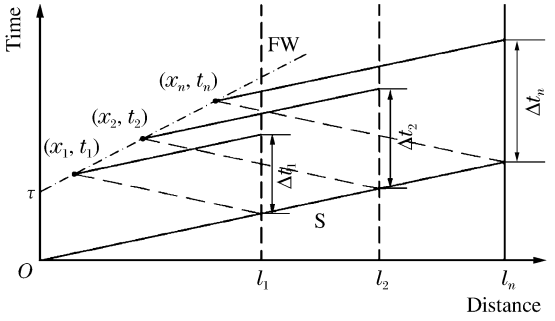


图 2 失效波传播轨迹测量原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of failure wave trajectory measurement

3 实验测试

3.1 实验装置

平板撞击实验是在北京理工大学西山实验室∅57 mm 一级气体炮上进行的。图 3、图 4 分别为实验装置示意图和靶室布置实物图。飞片和弹托粘结在一起形成弹丸,在高压气体的作用下以一定的速

度撞击固定在靶环内的靶板试件,采用 VISAR 测量试件与窗口界面处的粒子速度-时间历程。靶板材料为秦皇岛耀华玻璃股份有限公司生产的 Soda-Lime 玻璃,直径为 50 mm,厚度分别为 3.35、4.62、5.81、6.77 和 7.58 mm,材料的主要成分(质量分数)为:SiO_2(71%～72%)、Na_2O(14%)、CaO(8%)、MgO (4.5%)、Al_2O_3(1%)、其它组分(0.5%～1.5%)。Soda-Lime 玻璃的密度 $\rho_0=2.5$ g/cm^3,一维纵波波速 $c_l=5.84$ km/s。飞片材料为紫铜,尺寸为∅53 mm×6 mm。窗口材料为熔融石英,激光反射面为真空镀铝膜。飞片与试件的设计满足一维应变条件,并且确保试件与窗口界面处反射的稀疏波早于飞片背面反射的稀疏波到达碰撞界面,同时,保证测试完成前侧向稀疏波未到达测试点。采用探针法测量弹速,在炮管端面处粘结触发探针来触发示波器。

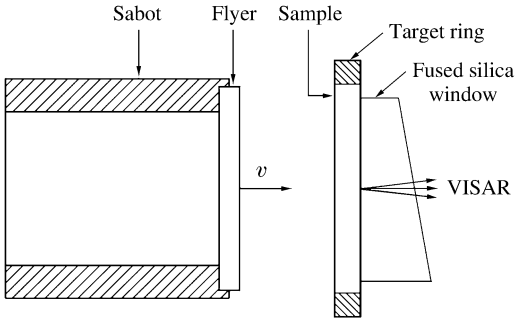


图 3　实验装置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of experimental system

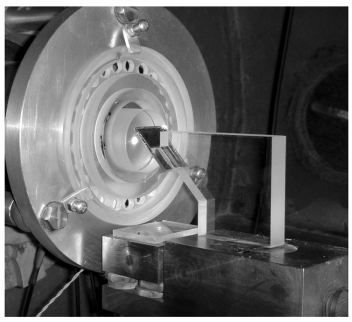


图 4　靶室布置实物图

Fig. 4　Layout of target chamber

3.2　实验结果与分析

Ginzburg 等人[15]总结得到,在一维应变条件下,冲击载荷达到 $0.5\sigma_{HEL}$ 时,玻璃等脆性材料内部会产生失效波的破坏现象。Kanel 等人[16]通过实验得到了 Soda-Lime 玻璃材料产生失效波的门槛值为 4 GPa。本实验获得了 5 发数据,加载速度为 450～454 m/s,可以近似看作同一冲击载荷,按照阻抗匹配法估算,产生的压力约为 4.7 GPa,高于产生失效波的门槛值。典型的 VISAR 测量结果如图 5 所示,图中纵轴表示试件与窗口界面处的粒子速度。从图 5 可以明显看出,在该实验条件下得到的曲线均出现了表征失效波现象的再压缩信号。

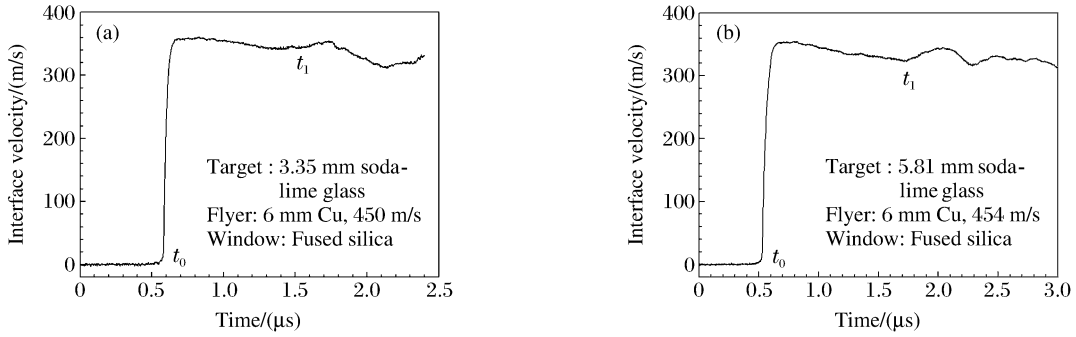


图 5　典型的 VISAR 测量结果

Fig. 5　Typical records of VISAR

根据 VISAR 的测量结果,利用(1)式～(3)式计算得到同一冲击载荷作用下 5 组不同的(x_i,T_i)值,如图 6 所示。如前所述,这 5 个点即为 7.58 mm 厚的靶板内部的失效波传播轨迹。从图 6 可以看到,这 5 个点近似在一条直线上,拟合得到的线性方程为 $t=0.694+0.395x$。由图 6 可见,直线没有通过原点,说明在冲击载荷作用下,碰撞表面上产生的失效波存在一定的初始时间延迟。由拟合方程可得,当 $x=0$ 时(即碰撞面处),$\tau=0.694$ μs,此即为失效波产生的延迟时间。由直线斜率可知失效波在试件

内部以约 2.53 km/s 的恒定速度传播。由于碰撞面上延迟时间的存在,得到的失效波速要稍大些。

Rosenberg 等人[17]进行了类似的实验,其试件也为 Soda-Lime 玻璃,厚度分别为 4.8 和 7.9 mm,施加的冲击载荷为 4.5、5.2 和 6.9 GPa。利用他们的实验数据,由(1)式～(3)式计算得到(x_i,T_i),对载荷为 4.5 和 5.2 GPa 压力下的数据点进行线性拟合,如图 7 所示。从图 7 可以看出:两条拟合直线均不经过原点,说明在试件碰撞表面上产生的失效波也存在一定时间的延迟,这与本实验结果一致;对比延迟时间发现,载荷越高,延迟时间越长。

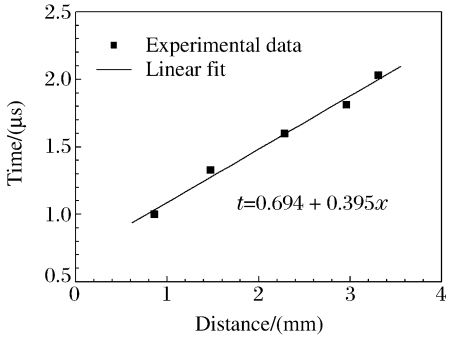


图 6 实验数据及拟合曲线

Fig. 6 Experimental data and its linear fit line

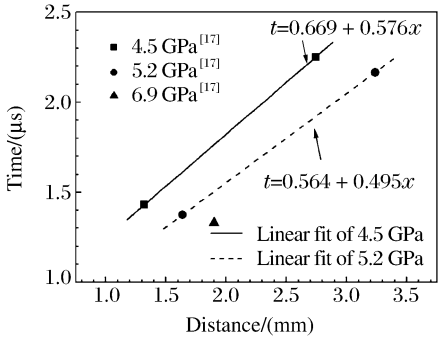


图 7 对 Rosenberg 实验数据[17]的分析结果

Fig. 7 Analysis results of Rosenberg's experimental data[17]

与陈登平等人[10-11]的平板撞击强角闪石化橄榄二辉岩样品的测量结果相比:相同的是失效波在玻璃、岩石等脆性材料内部传播的速度都保持不变,并且在碰撞表面产生的时间延迟属同一量级;不同的是,在岩石试样中失效波速与其一维弹性纵波波速近似相等,而本实验的 Soda-Lime 玻璃试样中失效波速度远小于其一维弹性纵波速度。说明 Soda-Lime 玻璃试样与岩石试样虽同属脆性材料,但其破坏机制有所不同,与两种材料不同的细观力学性质密切相关。Soda-Lime 玻璃是一种短程有序、长程无序的非晶材料,试样的表面状况在产生失效波的过程中发挥较大作用[2,7];而岩石是一种典型的非均质脆性材料,内部含有大量的微裂纹、微孔洞等微缺陷,在一维应变冲击压缩作用下,这些微缺陷在剪应力的作用下"就位"成核扩展,最终导致材料的破坏[10]。

4 结 论

在相同的冲击载荷作用下,采用 VISAR 测量技术,获得了不同厚度的 Soda-Lime 玻璃靶板背面自由面粒子速度-时间曲线,分析得到失效波在玻璃试件内部的传播轨迹。由此可以得到以下结论:

(1) 在碰撞面上,失效波现象并不是在受到冲击载荷作用时立即产生,而是存在一定时间的延迟,本实验条件下得到的延迟时间约为 0.694 μs;

(2) 在本实验施加的冲击载荷作用下,失效波以 2.53 km/s 的恒定速度在试件内传播;

(3) 根据本实验原理,对 Rosenberg 等人的实验数据进行分析,发现其与本实验结果一致,并且延迟时间随载荷的增加而减小。

References:

[1] Rasorenov S V, Kanel G I, Fortov V E, et al. The Fracture of Glass under High-Pressure Impulsive Loading [J]. High Pressure Res, 1991, 6(4): 225-232.

[2] Kanel G I. Failure Waves in Shock-Compressed Glasses [J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 845: 870-875.

[3] Cooper G A, Millett J C F, Bourne N K, et al. Delayed Failure in a Shock Loaded Alumina [J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 845: 847-850.

[4] Kanel G I, Savinykh A S, Garkushin G V, et al. Phenomenological Description of the Failure Waves in Glasses [J]. AIP Conference Proceedings, 2007, 955: 751-754.

[5] Bourne N K. The Relation of Failure under 1D Shock to the Ballistic Performance of Brittle Materials [J]. Int J Impact Eng,2008,35(8):674-683.

[6] He H L. Mechanical Properties and Microstructure Fracture on Brittle Materials under Shock Wave Loading [D]. Mianyang:Southwest Fluid Physics,1996. (in Chinese)
贺红亮. 冲击波极端条件下脆性介质的力学响应特性及其细观结构破坏特征 [D]. 绵阳:西南流体物理所,1996.

[7] Zhao J H. Experimental and Theoretical Research on Failure Waves in Glass-Like Brittle Materials under Shock Wave Loading [D]. Beijing:Institute of Mechanics,Chinese Academy of Sciences,2001. (in Chinese)
赵剑衡. 冲击加载作用下玻璃等脆性材料失效波的实验与理论分析 [D]. 北京:中国科学院力学研究所,2001.

[8] Brar N S,Bless S J,Rosenberg Z. Impact-Induced Failure Waves in Glass Bars and Plates [J]. Appl Phys Lett,1991,59(26):3396-3398.

[9] Brar N S. Failure Waves in Glass and Ceramics under Shock Compression [J]. AIP Conference Proceedings,2000,505:601-606.

[10] Chen D P,He H L,Li M F,et al. A Delayed Failure of Inhomogenous Brittle Material under Shock Wave Compression [J]. Acta Physica Sinica,2007,56(1):423-428. (in Chinese)
陈登平,贺红亮,黎明发,等. 冲击压缩下非均质脆性固体的弛豫破坏研究 [J]. 物理学报,2007,56(1):423-428.

[11] Chen D P,He H L,Jing F Q. Delayed Failure of the Shock Compressed Inhomogeneous Brittle Material [J]. J Appl Phys,2007,102(3):033519.

[12] Kanel G I,Bogach A A,Razorenov S V,et al. A Study of the Failure Wave Phenomenon in Brittle Materials [J]. AIP Conference Proceedings,2004,706:739-742.

[13] Abeyaratne R,Knowles J K. A Phenomenological Model for Failure Waves in Glass [J]. Shock Waves,2000,10(4):301-305.

[14] Liu Z F,Yao G W,Zhan X Y. A Damage Accumulating Modeling of Failure Waves in Glass under High Velocity Impact [J]. Applied Mathematics and Mechanics,2001,22(9):983-987. (in Chinese)
刘占芳,姚国文,詹先义. 高速冲击条件下玻璃中破坏波的损伤累积模拟 [J]. 应用数学与力学,2001,22(9):983-987.

[15] Ginzburg A,Rosenberg Z. Using Reverberation Techniques to Study the Properties of Shock Loaded Soda-Lime Glass [J]. AIP Conference Proceedings,1998,429:529-531.

[16] Kanel G I,Bogatch A A,Razorenov S V,et al. Transformation of Shock Compression Pulses in Glass Due to the Failure Wave Phenomena [J]. J Appl Phys,2002,92(9):5045-5052.

[17] Rosenberg Z,Ashuach Y,Dekel E. More on the Behavior of Soda Lime Glass under Shock Loading [J]. Int J Impact Eng,2008,35(8):820-828.

Experimental Research on Propergation of Failure Wave in Glass

ZHANG Yan-Geng,DUAN Zhuo-Ping,ZHANG Lian-Sheng,
OU Zhuo-Cheng,HUANG Feng-Lei

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology*,
Beijing Institute of Technology,*Beijing* 100081,*China*)

Abstract:Planar impact experiments of soda-lime glass were conducted on a 57 mm diameter one-stage gas gun,in which the free surface particle velocity histories for several different thicknesses of soda-lime glass under the same impact loading were measured by using VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector). Both the failure wave velocity and the failure wave trajectory were obtained. The experimental results showed that there is a time delay for the failure wave to form on the impact surface of the soda-lime glass,which decreases with the magnitude of the impact load. The present study plays an important role in further understanding of the formation mechanism and propagation law of failure wave in brittle materials.

Key words:failure wave trajectory;time delay;VISAR;soda-lime glass