

文章编号:1000-582x(2001)05-0067-03

高速冲击条件下玻璃材料的破坏分析*

姚国文,刘占芳

(重庆大学 资源及环境科学学院,重庆 400044)

摘要:分析了玻璃材料在高速冲击条件下的破坏波现象,对破坏波的传播机制及其动态特征以及破坏层的性质进行了研究。在实验分析的基础上提出了一种由偏应力冲量决定的损伤累积模型,并采用 Heaviside 函数来描述材料内部的破坏迟滞现象;数值模拟了破坏波的传播过程、破坏层的横向应力和纵向压缩应变的演化特征,并得出了反射稀疏波在破坏层边界再次反射后破坏波传播速度下降的结论。

关键词:高速冲击;破坏波;破坏层;损伤累积模型

中图分类号:O 347.3 O 346.5

文献标识码:A

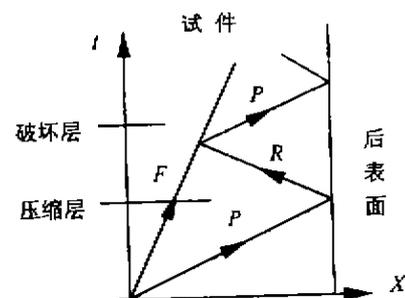
脆性材料在高速冲击条件下的力学响应和破坏行为十分复杂,是冲击动力学领域十分活跃的研究方向之一。与延性材料相比较,脆性材料以其独有的性质在国防建设领域具有重要的应用前景。如玻璃、陶瓷及其复合材料,具有压缩强度高、密度低、耐高温等特点,其在高速冲击条件下的力学行为和破坏机制的研究,特别是在穿甲力学、飞行器防护、高速冲击防护以及武器物理效应设计等军事方面具有重要意义。

1991年,Rasorenov 和 Kanel^[1]在 K19(俄罗斯牌号)玻璃高速冲击实验中发现破坏波(Failure Wave)现象的存在。这是20世纪末冲击动力学领域的一个重要发现。对这一独特物理现象的研究在国防、航天等领域具有广泛的应用前景。

1 破坏波及破坏层分析

破坏波是冲击波极端条件下玻璃介质表现出的一种独特的破坏现象。在一维应变冲击压缩下,在冲击波波阵面之后有一个以较低速度向前推进的“破坏层”(Failure Layer),其边界的传播称为“破坏波”,如图1所示。以后的许多实验^[2,9]用 VISAR 测试技术和高速摄影技术证实了破坏波的存在,并对破坏波速度与冲击波加载应力的关系,纵向应变与横向应力的变化,以及破坏层的性质等问题作了深入研究。结果表明:冲击应力在 $1/3 \sim 2\sigma_{HLL}$ (Hugoniot 弹性极限)范围内,破坏波产生于冲击表面并向试件内部传播;对于不同类型的

玻璃,破坏波传播速度为 $1.5 \sim 2.5 \text{ km/s}$;在破坏波经过的区域内(即破坏层),玻璃介质的冲击阻抗明显降低,层裂强度消失,剪切强度急剧下降;破坏波过后介质内的横向应力增加,纵向压缩应变增加。这一崭新的物理现象对描述脆性材料在高应变率下的非弹性破坏行为具有根本性的意义。



(F-破坏波,P-压缩波,R-稀疏波)

图1 破坏波的传播

1995年 Bourne 和 Rosenberg^[5]用高速摄影技术观察到破坏波波阵面上有大量的裂纹及分叉,这是对破坏波是一个运动的破碎界面最直接的实验支持。破坏波过后玻璃的层裂强度为零,表明介质发生了破碎。在一维应变压缩状态下,破碎颗粒之间发生相互挤压、滑移以及进一步破碎,导致材料的力学状态发生变化。由于破碎颗粒在压缩状态下存在摩擦力以及不规则的几何形状,破坏层的剪切强度虽减小但不会完全丧失^[9]。

* 收稿日期:2001-03-15

基金项目:国防科技重点实验室基金项目资助(99JS75.2.2.JW2001)

作者简介:姚国文(1974-),山东潍坊人,重庆大学博士生,主要从事冲击动力学和材料本构理论研究。

对于破坏波产生的物理力学机制,根据对其基本特征认识的实验积累,目前有 3 种基本假设:表面微裂纹扩展机制,剪切破坏机制,相变机制。Rasorenov 和 Kanel^[1]认为,破坏波是玻璃表面的原生微裂纹在冲击波压缩下启裂、扩展引起的,这一点基本上取得了共识^[2,6-9]。Grady^[9]的剪切破坏模型认为脆性材料在冲击压缩下的破碎现象,是由于试件表面和内部的微裂纹在剪切应力作用下形核、生长,导致材料发生剪切滑移破坏引起的。而 Clifton^[3]的相变机制则缺乏有力的实验支持,他认为破坏波是材料相变界面的传播。

迄今为止,只有在玻璃材料中发现了破坏波现象,因此需要对玻璃的微观结构进行分析。玻璃作为非晶体材料,是一种过冷的液体,具有良好的各向同性性能。玻璃表面具有保持最稳定的能量状态的趋势,表面层势必具有与内部不同的状态,以降低其不稳定性。另外,玻璃试件在加工过程中,表面会残留大量的微裂纹。在冲击波压缩下,玻璃表面的微裂纹首先失稳,向内部传播。从现象学角度出发,可以用损伤力学的方法来描述破坏波的传播以及破坏层的状态。

2 损伤演化方程

结合表面微裂纹扩展机制和剪切破坏机制,认为破坏层是由试件表面的原生微裂纹在冲击波压缩下启裂,并沿最大剪应力面向材料内部扩展、传播引起的,所形成的破坏波是一个导致材料实际损伤的运动边界。需要指出的是,破坏并不是瞬时发生的,而是一个以有限速度发展的过程,特别是在高应变率下,更呈现出明显的破坏迟滞现象。为此,采用损伤累积的原则来描述破坏波现象。注意到玻璃在极端冲击下的破坏行为强烈地依赖于与弹性畸变能相关的应力偏量第二不变量 J_2 ,因此在损伤分析中定义损伤累积方程为:

$$D = \int_0^t (\sqrt{J_2} - \alpha \sigma_{\text{HEL}})^n g(D_i) H\left(\tau - \frac{x}{C}\right) d\tau \quad (1)$$

其中, $g(D_i) = |D_{i-1} - D_{i+1}|^p$, $i-1, i, i+1$ 表示相邻的 3 个节点, $J_2 = \frac{1}{2} S_u S_v$, α, β, γ 为材料参数。

Heaviside 函数 $H\left(\tau - \frac{x}{C}\right)$ 表示一个虚拟界面 $x = Ct$ 的

传播,其中 $C = \frac{C_c C_f}{C_c - C_f}$, C_c, C_f 分别表示压缩波和破

坏传播速度。 $\Delta t = \frac{x}{C}$ 表示损伤累积时间。对节点 x_i 而言,冲击波过后损伤并没有马上开始,虚拟界面到达时损伤才开始累积,损伤累积到一定程度时材料产生破坏,即意味着破坏波的产生和传播。虚拟界面的引

人,形象地说明了破坏波在冲击表面瞬时产生而在介质内部存在越来越长的迟滞时间这一现象。

采用特征线法分析冲击波波阵面附近的应力、应变和质点速度^[10,11]。假设高速冲击形成的动态损伤是各向同性的连续场,破坏层的性质由损伤状态决定。而损伤演化过程不受应变(或应力、余能)等效性假设的限制^[12],弹性模量和剪切模量遵循不同的演化规律,即

$$E = (1 - D)E_0 \quad (2)$$

$$G = (1 - D)G_0 + DG_1 \quad (3)$$

D 为损伤参量, G_1 表示破坏后的残余模量。

采用半解耦方法,即在本构关系中引入损伤,而在平衡方程中不考虑损伤的影响,来分析结构中的应力、应变和损伤随时间或载荷的变化,从而有^[12]

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = \frac{3\rho}{4G} \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (4)$$

式中的 e 为偏应变分量。由于 G 由式(3)确定,式(4)是典型的二阶变系数双曲方程,可用差分法求解。然后结合式(2)、(3)并根据经典的损伤应力应变关系求解应力场。

3 算例

在平板冲击实验中,铜飞片以 650.0 m/s 的速度冲击 K9 玻璃(材料参数见表 1),测得破坏波速度 $C_f = 1.37 \text{ km/s}$ ^[6],式(1)中取 $\beta = 1$ 时意味着偏应力冲量决定损伤的累积。实际计算时,在冲击表面虚拟一个完全损伤单元 $D_0 = 0.9$ 。

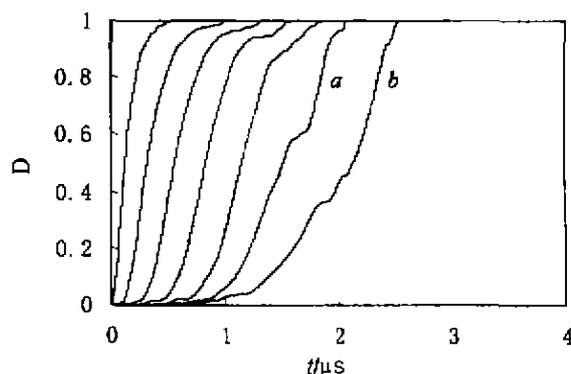


图 2 试件内部不同位置的损伤演化曲线

图 2 表示试件内部不同位置的损伤演化历程。计算结果表明,反射稀疏波在破坏层边界再次反射后损伤累积减慢,即破坏波速度下降。曲线 a, b 表示的位置位于反射稀疏波与破坏波相互作用界面之后,损伤累积到 $D = 0.9$ 的速度分别为 1.205 km/s, 1.160 km/s,

均低于实验测得的破坏波速度。由于反射稀疏波的卸载过程导致的破坏波速度下降这一结论还需要得到实验的支持。

图3、图4是距冲击表面2.0 mm处的横向应力、纵向压缩应变随时间的变化曲线。在1.13 μs 时刻,虚拟界面到达,损伤开始累积,导致横向应力、纵向压缩应变逐渐增加;在1.46 μs 时刻,横向应力、纵向压缩应变升至最大值,表示破坏波的到达。横向应力、纵向压缩

应变的数值模拟结果与实验现象具有同样的演化规律。

表1 K9玻璃的材料参数

玻璃	密度 ρ (10^3 kg/m^3)	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν	纵向波速 C_L (km/s)
K9	2.52	82.31	0.209	6.06

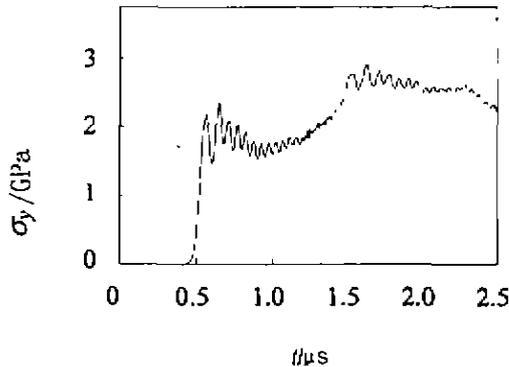


图3 2.0 mm处的横向应力历程

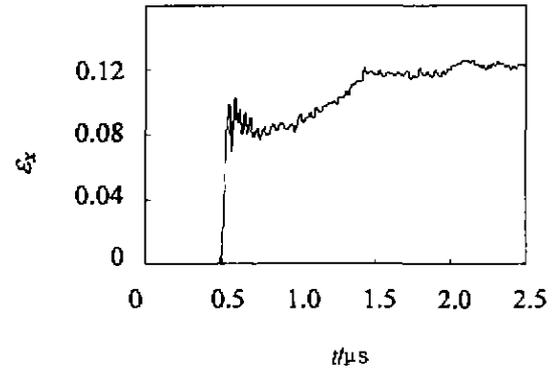


图4 2.0 mm处的纵向压缩应变历程

4 结论

分析了高速冲击条件下玻璃材料中的破坏波现象,对破坏波的传播机制及其动态特征以及破坏层的性质进行了研究。认为试件表面的原生微裂纹在冲击波压缩下扩展、传播,导致材料发生损伤,完全损伤的运动边界即破坏波的传播。在实验分析的基础上提出了一种由偏应力冲量决定的损伤累积模型,并采用Heaviside函数来描述材料内部的破坏迟滞现象;数值模拟了破坏波的传播过程、破坏层的横向应力和纵向压缩应变的演化特征,并得出了反射稀疏波在破坏层边界再次反射后破坏波传播速度下降的结论。

参考文献:

- [1] RASORENOV S V, KANEL G I, FORTOV V E, et al. The fracture of glass under high-pressure impulsive loading[J]. High Pressure Research, 1991, 6: 225-232.
- [2] BLESS S J, BRAR N S, KANEL G, et al. Failure wave in glass[J]. J Am Ceram Soc, 1992, 75(4): 1002-1004.
- [3] CLIFTON R J. Analysis of failure waves in glasses[J]. Appl Mech Rev, 1993, 46(12): 540-546.
- [4] RAISER G F, WISE J L, CLIFTON R J, et al. Plate impact response of ceramics and glasses[J]. J Appl Phys, 1994, 75

(8): 3862-3869.

- [5] BROURNE N K, ROSENBERG Z, FIELD J E. High-speed photography of compressive failure wave in glasses[J]. J Appl Phys, 1995, 78(6): 3736-3789.
- [6] HE H L. Dynamic response and microstructure damage of brittle materials under shock wave compression[D]. Si Chuan: Institute of Fluid Physics of CAEP, 1997.
- [7] HE H L, JING F Q, JIN X Q, et al. Compressive failure of brittle materials under shock wave loading[A]. In: Sino-Japanese Symp Deformation/Fracture of Solids[C], Huangshan / Cluna, 1997, 81-90.
- [8] ESPINOSA H D, XU Y P. Micromechanics of failure waves in glass: I Experiments[J]. J Am Ceram Soc, 1997, 80(8): 2061-2073.
- [9] 赵剑衡. 冲击压缩下玻璃等脆性材料中失效波的实验和理论研究[D]. 北京:中国科学院力学研究所, 2000.
- [10] 经福谦. 实验物态方程导引(第二版)[M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [11] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.
- [12] 高蕴昕, 郑泉水, 余寿文. 各向同性弹性损伤的双标量描述[J]. 力学学报, 1996, 28(5): 542-549.
- [13] PARTOM Y. Modeling failure waves in glass[J]. Int J Impact Engng, 1998, 21(9): 791-799. (下转第74页)

- [2] 于不凡. 矿井瓦斯等级分级探讨[J]. 煤炭工程师, 1992, 19 (1): 15-23.
- [3] 李洪兴, 汪培庄. 模糊数学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.

Technique of Classification of Coal and Gas Outburst Mines

LIANG Yun-pei, YU Bu-fan

(Chongqing Branch of China Coal Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: managing the coal mines according their dangerous grade determined, can decrease the engineering quantity and lessen the sightless characteristic. It has marked benefit for community and great economic benefit. The dangerous grade of outburst mines are determined. Outburst coal mines are classified into mines with serious outburst hazard, mines with middle outburst hazard and mines with ordinary outburst hazard. Twelve classification indicators are used in comprehensively evaluating the dangerous grade of outburst mines. The dangerous grade of outburst mines are determined according to the principle of the most subjection with fuzzy comprehensive evaluation method, on the basis of the classification indicators and its quantification. By the model founded, some coal mines are studied and the research results are accordant with the fact.

Key words: outburst mines ; dangerous grade classification ; fuzzy comprehensive evaluation

(责任编辑 钟学恒)

~~~~~  
(上接第 69 页)

## Analysis of Failure Behaviors in Glass under Shock Loading

YAO Guo-wen, LIU Zhan-fang

(Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The failure wave phenomena in glass media under shock loading are analyzed. The propagating mechanism and dynamic characteristics of failure wave and the property of failure layer are revealed. On the basis of experimental analysis, a damage-accumulating model determined by partial stress impulse is proposed, which describes the phenomenon of failure delay in materials being done with the Heaviside function. The propagating procedure, the evolution characters of transverse stress and longitudinal compression strain in failure layer are simulated. Furthermore a phenomenon is revealed that the failure wave velocity decreases after reflection of rarefaction wave at the boundary of failure layer.

**Key words:** high-speed shock ; failure wave ; failure layer ; damage-accumulating model

(责任编辑 钟学恒)