

文章编号: 1000-0887(2001) 09-0983-05

高速冲击条件下玻璃中破坏波的 损伤累积模拟*

刘占芳, 姚国文, 詹先义

(重庆大学 工程力学系, 重庆 400044)

(张汝清推荐)

摘要: 分析了玻璃介质在高速冲击条件下低于 Hugoniot 应力弹性极限时的破坏波现象, 在实验现象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, 模型中采用了 Heaviside 函数来描述材料内部的破坏延迟现象, 分析了玻璃介质中破坏层的性质、破坏波的传播机制及其动态特征, 并发现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现象。

关键词: 高速冲击; 破坏波; 损伤累积模型

中图分类号: O347.3; O346.5 文献标识码: A

引 言

破坏波是冲击波极端条件 ($v \geq 1.2 \text{ km/s}$, $\varepsilon \geq 10^5/\text{s}$) 下玻璃介质表现出的一种独特的破坏现象。1991 年 Rasorenov^[1] 在 K19 玻璃平板高速冲击实验中首次观测到在低于 Hugoniot 应力弹性极限 σ_{HEL} 时, 在远离冲击波波阵面之后有一个以较低速度推进的“破坏层”(Failure Layer), 其边界的传播称为“破坏波”(Failure Wave); 破坏波过后, 介质的冲击阻抗和层裂强度急剧下降。以后的许多实验^[2-7] 对玻璃中的破坏波现象进行了深入研究, 结果发现在低于 σ_{HEL} 时, 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, 破坏波速度约为 $1.2 \sim 2.5 \text{ km/s}$; 破坏层介质的层裂强度几乎下降为零, 剪切强度急剧下降。

对这一独特的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 损伤累积模型

关于玻璃中破坏波传播的物理机制, Rasorenov^[1] 提出的“表面微裂纹扩展”机制认为在极端冲击条件下, 冲击应力在低于 σ_{HEL} 时, 破坏层是由试件表面的原生微裂纹(由扫描电镜观察, 其密度为 $10^{10} \sim 10^{12}/\text{m}^2$)^[3] 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。为描述破坏波现象, Espinosa^[4] 等提出了一个微裂纹多面模型, 认为该现象是由于币形缺陷从试件表面启裂并向内部扩展所致。而 Clifton^[5] 则建议了一个相变模型, 他把破坏波现象归结为高压下的非均匀相变

* 收稿日期: 2000.09.25; 修订日期: 2001.04.08

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

作者简介: 刘占芳(1963—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士。

机制。应该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着的过程, 特别是在高应变率下, 更呈现出明显的破坏迟滞现象。只有冲击应力超过阈值并维持一定时间后材料才会产生破坏。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 , 因此在损伤分析中假设:

- 1) 损伤演化由当前的应力水平和损伤状态决定, 即 $D = f(\sigma, D)$;
- 2) 损伤增量的方向与最大剪应力面即最大滑移面方向一致^[3], 其值 ΔD 与弹性畸变能对应的应力偏量第二不变量 J_2 有关。

基于上述假设, 定义损伤累积方程为

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

其中, $g(D_i) = |D_{i-1} - D_{i+1}|^{\gamma}$, $i-1, i, i+1$ 表示相邻的三个节点, $J_2 = 0.5S_{ij}S_{ij}$, α, β, γ 为材料参数。Heaviside 函数 $H(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ 1 & (t \geq 0) \end{cases}$, $\Delta t = \frac{x}{C}$ 表示损伤累积时间。常数 C 可以用反演法来确定, 如图 1 所示。设 C_s 为冲击波速度, C_f 为破坏波速度, 那么冲击波和破坏波的波阵面方程分别为

$$x = C_s t, \quad (2)$$

$$x = C_f t. \quad (3)$$

图 1 中 x 点的累积时间为

$$\Delta t = t_f - t_s = \frac{x}{C_f} - \frac{x}{C_s} = \frac{x}{C}, \quad (4)$$

从而有

$$C = \frac{C_s C_f}{C_s - C_f} \quad (5)$$

式(1)中的函数 $H\left[\tau - \frac{x}{C}\right]$, 表示一个虚拟界面 $x = Ct$ 的传播, $C_f < C < C_s$ 。对节点 x 而言, 冲击波到

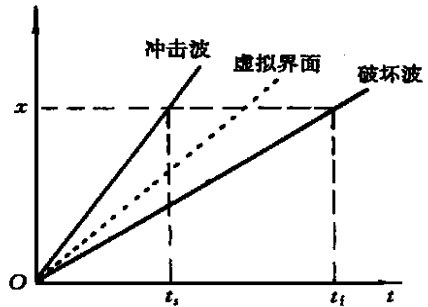


图 1 冲击波、破坏波与虚拟界面的传播

达时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($D = 1$) 时材料产生破坏, 即意味着破坏波的产生和传播。虚拟界面的引入, 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孕育时间这一现象。

采用物征线法分析冲击波波阵面附近的应力、应变和质点速度^[8,9]。冲击波波动方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad (6)$$

由特征线微分方程

$$dx = \pm C dt \quad (7)$$

以及特征线上的相容关系

$$dv = \pm C d\varepsilon \quad (8)$$

并结合初始条件

$$v(x, 0) = \varepsilon(x, 0) = 0 \quad (9)$$

以及边界条件

$$v(0, t) = v_0(t) \quad (10)$$

可以得到冲击波前为 $v = \varepsilon = 0$ 的恒值区, 波后区域恒有 $v = -C\varepsilon = v_0 \left(t - x/C \right)$ 。这说明 τ 时刻加于表面的扰动 v_0 以速度 C 在平板中传播, 于 t 时刻到达 x 截面。

2 损伤本构关系

玻璃是一种无序、均匀的脆性介质, 设初始无损态是各向同性弹性的, 在极端冲击条件下, 试件表面的原生微裂纹在冲击波压缩下启裂、扩展, 假设所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。

与古典各向同性弹性损伤理论不同的是, 极端冲击下玻璃介质中的损伤演化过程并不受应变(或应力、余能)等效假设的限制, 弹性模量和剪切模量遵循不同的演化规律^[10], 即

$$E = (1 - D)E_0 \quad (11)$$

$$G = (1 - D)G_0 + DG_1, \quad (12)$$

D 为损伤参量, G_1 表示 $D = 1$ 时的残余模量。

采用半解耦方法, 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。Partom^[2]认为, 冲击应力在低于 10GPa 时可忽略静水压力的影响。此时, 弹性范围内一维应变条件下的几何方程、本构关系、平衡方程分别为:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (13)$$

$$s = 2Ge, \quad (14)$$

$$\frac{\partial s}{\partial x} = \rho \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (15)$$

其中, e 为偏应变, s 为偏应力, v 为质点速度, 从而有

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = \frac{3\rho}{4G} \frac{\partial^2 e}{\partial t^2}, \quad (16)$$

由于 G 由式(12)来确定, 式(16)是典型的二阶变系数双曲方程, 可以通过差分法来求解。然后由

$$s = \alpha_x - P = \frac{2}{3}(\alpha_x - \alpha_y) \quad (17)$$

来确定应力场的分布。

3 算 例

在平板冲击实验中, 铜飞片以 650.0m/s 速度冲击 K9 玻璃, 测得破坏波速度为 1.37km/s^[7], K9 玻璃的材料参数见表 1。式(1)中取 $\beta = 1$ 意味着偏应力冲量决定损伤的累积; 根据 Ginzburg 和 Rosenberg 的统计结果^[2], 可取 $\alpha = \sqrt{2}/4$ 。现在根据测得的破坏波速度来确定 γ 的值, 遵循的原则是: 材料完全损伤边界的传播速度与破坏波速度一致。实际计算中认为达到 $D = 0.9$ 时材料已经完全损伤, 由此可以得到 $\gamma = 3.837$ 。计算损伤累积时, 在冲击表面虚拟一个完全损伤单元 D_0 ^[2]。

图 2 表示试件内部不同位置的损伤演化历程。结果发现, 反射稀疏波在破坏层边界再次反射后损伤累到 $D = 0.9$ 的速度减小, 即破坏波速度下降。曲线 a 、 b 所在的节点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、1.160km/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现象还

需要得到实验的支持· 图3 为破坏波与冲击波传播的示意图· 冲击波 S 在自由表面反射为稀疏波 R , 与破坏波 F 相互作用后破坏波传播轨迹发生偏折·

表 1 K9 玻璃的材料参数

玻璃	密度 ρ ($\times 10^3 \text{kg/m}^3$)	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν	纵向波速 C (km/s)
K9	2.52	82.31	0.209	6.06

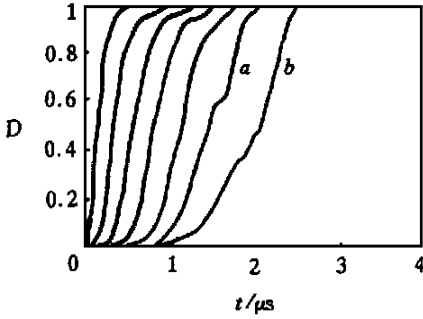


图 2 试件内部不同位置的损伤演化曲线

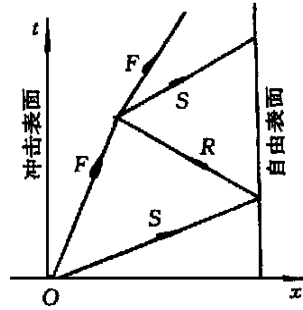


图 3 破坏波与冲击波的传播

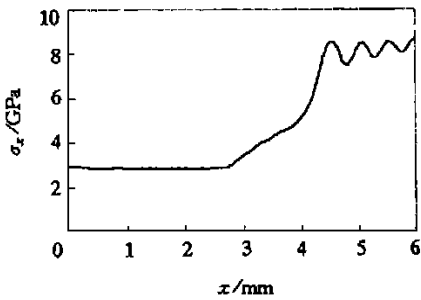


图 4 $t = 2.0\mu\text{s}$ 时的轴向应力分布曲线

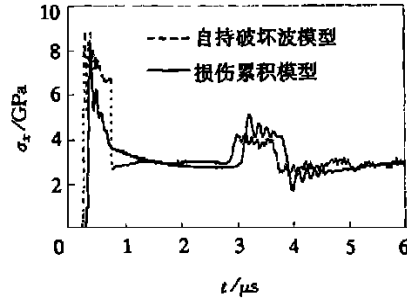


图 5 $x = 1.0\text{mm}$ 处的轴向应力历程

图 4 表示 $t = 2.0\mu\text{s}$ 时刻试件内部轴向应力的分布, 取压应力为正· $x \leq 2.74\text{mm}$ 区域为破坏层, 损伤为 $D = 0.9$; 2.74mm 处为 $t = 2.0\mu\text{s}$ 时的破坏波波阵面; $x \geq 2.74\text{mm}$ 区域为压缩区域, 该区域内的累积损伤呈连续分布状态, 应力由完全损伤时的 2.83GPa 逐渐上升至无损时的 8.1GPa 左右· Partom^[2] 在用自持续破坏波模型描述破坏波现象时, 构造了波动方程形式的损伤演化方程· 图 5 根据损伤累积模型和自持续破坏波模型对 $x = 1.0\text{mm}$ 处的轴向应力历程进行比较· 可以发现, 在模拟材料从无损态到完全损伤的过程时自持续破坏波模型存在一个幅值较大的阶跃, 而损伤累积模型模拟的轴向应力是连续变化的, 比较接近材料真实的破坏过程·

4 结 语

分析了高速冲击条件下玻璃介质中的破坏波现象, 认为试件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,所形成的破坏波即完全损伤的运动边界。根据定义的损伤演化方程提出了一种损伤累积模型,采用 Heaviside 函数来表征破坏延迟现象,描述了极端冲击条件下玻璃介质中破坏波的演化特征。与 Partom 的自持续破坏波模型相比较,损伤累积模型具有明确的物理意义,得到的损伤场、应力场更接近真实情况。

[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] Partom Y. Modeling failure waves in glass[J]. Int J Impact Engng, 1998, 21(9): 791—799.
- [3] Espinosa H D, Xu Y P. Micromechanics of failure waves in glass: I Experiments[J]. J Am Ceram Soc, 1997, 80(8): 2061—2073.
- [4] Espinosa H D, Xu Y P. Micromechanics of failure waves in glass: II Modeling[J]. J Am Ceram Soc, 1997, 80(8): 2074—2085.
- [5] Clifton R J. Analysis of failure waves in glasses[J]. Appl Mech Rev, 1993, 46(12): 540—546.
- [6] HE Hong-liang, JING Fu-qian, JIN Xiao-gang, et al. Compressive failure of brittle materials under shock wave loading[A]. In: Sino-Japanese Symp Deformation /Fracture of Solids [C]. Huangshan/ China, 1997, 81—90.
- [7] HE Hong-liang. Dynamic response and microstructure damage of brittle materials under shock wave compression[D]. Ph D Thesis. Chengdu: Institute of Fluid Physics, CAEP, 1997.
- [8] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [9] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [10] 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.

A Damage Accumulating Modeling of Failure Waves in Glass under High Velocity Impact

LIU Zhan-fang, YAO Guo-wen, ZHAN Xian-yi

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

Abstract: The failure wave phenomenon was interpreted in glass media under the high velocity impact with the stress levels below the Hugoniot elastic limit. In view of the plate impact experimental observations a damage accumulating model predominated by the deviatoric stress impulse was proposed while Heaviside function was adopted in the damage accumulating model to describe the failure delay in the interior of materials. Features of the failure layer and propagation mechanism as well as their dynamic characteristics were further presented. The reduction in failure wave propagation speed is pointed out as the reflected rarefaction waves reflect again from the failure layer boundary.

Key words: high velocity impact; failure wave; damage accumulating model