

聚甲基丙烯酸甲酯的冲击破碎扩散特性*

苗春贺¹⁾ 袁良柱¹⁾ 陆建华¹⁾ 王鹏飞¹⁾ 徐松林^{1)2)†}

1) (中国科学技术大学, 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027)

2) (中国地震局地震预测研究所, 高压物理与地震科技联合实验室, 北京 100036)

(2022年4月18日收到; 2022年7月5日收到修改稿)

应用霍普金森压杆 (SHPB) 实验装置, 通过改变透射杆为钢杆和铝杆, 对立方体聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 试样和两种梯台 PMMA 试样进行动态压缩实验. 利用高速摄影记录试样的压缩过程, 并结合力位移曲线分析试样的破碎过程, 探讨了冲击载荷作用下 PMMA 试样变形和广义扩散阻力的演化. 结果表明: 试样的破坏模式主要为接触端局部产生失效阵面, 然后失效阵面向试样内部扩展. 立方体试样在低速冲击下, 失效阵面优先在透射端产生; 在高速冲击下, 失效阵面在入射端先产生. 通过改变试样形状和透射杆材质后, 阵面的产生存在明显的弛豫现象, 并且失效阵面仅在入射端产生. 梯台试样破碎前的压缩变形是非均匀的, 试样内部应力状态和变形状态随着截面增加逐渐变小, 并且呈线性扩散分布. 通过应变分布结合剪切激活扩散方程, 得到失效阵面扩散过程中的广义扩散阻力分布情况; 失效阵面前后广义扩散阻力先增加后减小, 阻力的幅值与局部应变能的释放有关.

关键词: 冲击动力学, 应力调整, 聚甲基丙烯酸甲酯, 应力扩散**PACS:** 62.25.Mn, 62.20.-x, 66.70.Hk, 66.30.-h**DOI:** 10.7498/aps.71.20220740

1 引言

脆性材料如陶瓷、石英玻璃、有机玻璃等材料广泛应用于军事和民用工程中. 脆性材料的破坏行为及相关机制的研究在航空航天、建筑、汽车、医疗等多个行业领域都有重要的理论和应用价值^[1-4]. 材料在破坏过程中, 材料内部的变形场和应力场并不是均匀分布的^[5], 并且不均匀程度与材料所受应力状态有着密切联系, 尤其是在冲击过程中. 因此, 探究应力状态改变对脆性材料变形演化和破碎过程的影响具有重要意义.

脆性材料在冲击作用下的破坏过程非常复杂, 通常脆性材料的破坏模式主要源于垂直于冲击方向的拉应力和剪切应力引起的局部变形, 两种破坏

模式在低应变率和高应变率下相互转化^[6]. 材料在变形过程中, 应变状态分布和应力状态分布是不均匀的, 内部存在复杂的“力链网”, 载荷、应力状态、变形状态等主要通过“力链”传递, 微裂纹扩展成核等破坏过程总是出现在某些主要的“力链”上. Potapov 和 Campbell^[7]对固体颗粒材料的破碎过程进行模拟, 其模拟结果表明颗粒材料破坏过程中内部存在复杂的“力链”体系, 裂纹的产生和扩展主要出现在力链体系上, 并且随着冲击速度的增加, 力链体系复杂程度增加.

失效阵面由材料局部产生破碎颗粒和微裂纹共同组成, 是脆性材料在高速冲击下的共同特性^[8-10]. Anderson 等^[11]通过对裂纹扩展和失效阵面传播速度进行测量, 结果表明裂纹扩展的传播与冲击速度无关, 失效阵面的传播与冲击速度有关. Huang

* 高压物理与地震科技联合实验室开放基金 (批准号: 2019HPPE01) 和国家自然科学基金 (批准号: 11672286, 11872361, 11602267) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: slxu99@ustc.edu.cn

等^[12]通过聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 试样的平板撞击实验观察到破坏阵面的产生和传播过程, 失效阵面的产生滞后于冲击波, 且其传播过程倾向于扩散过程. 脆性材料中失效阵面的产生与传播过程在动态压缩实验中同样被观测到, 阵面的产生和传播同样与冲击速度有关^[13].

应力状态的改变对试样的变形和破坏过程有着重要作用, 然而关于试样内部应力调整的研究较少, 目前试样应力调整相关研究, 主要体现在颗粒材料压缩实验中^[14–16]. 由于颗粒材料主要为球形试样, 一方面, 试样内部应力分布会随着试样截面的变化而改变; 另一方面, 颗粒体系中颗粒数量的改变, 也在调整试样内部的应力分布情况. Miao 等^[17]通过改变透射杆材质和双玻璃球试样, 实现对玻璃球试样内部应力状态的改变. 当透射杆变为铝杆和有机玻璃杆时, 载荷明显下降, 破碎阵面仅在入射端产生, 试样的破坏机制发生改变. Liu 等^[18]通过对 10 个玻璃珠链体系进行高应变率下的冲击实验, 结果表明第一或第二玻璃珠的破坏先后, 取决于冲击速度和颗粒体系内部应力传递过程. 简世豪等^[19]通过采用双玻璃珠试样实现应力在双球中的调整, 探讨了低速冲击对双玻璃球破坏次序的变化. 结果表明: 破碎阵面的扩展存在一种临界扩散阻力, 当外载荷超过临界扩散阻力阈值时, 破碎过程可以自主完成. 目前, 通过调整试样和透射杆已初步实现了对颗粒材料内部应力调整, 并实现了对玻璃珠破碎过程的控制. 但是, 压缩过程中的试样的应力状态分布情况仍然不是很清楚, 并且调整过程的影响因素相对较多, 相关物理机制仍需要进一步深入分析.

基于此, 本文以有机玻璃作为实验材料, 基于分离式霍普金森压杆 (SHPB) 实验装置, 通过改变 PMMA 试样的形状和改变透射杆材质, 以实现

对试样内部应力状态分布的调整, 并结合高速摄影技术探讨冲击载荷作用下, 研究应力状态对有机玻璃破坏机制的影响和破碎扩散的特性.

2 实验部分

2.1 实验材料

实验材料为应用最为广泛的无色透明的聚甲基丙烯酸酯, 俗称有机玻璃 (PMMA). 试样采用激光切割而得, 各个表面光滑无损伤和划痕, 试样内部也没有损伤, 透明度较高. 试样采用立方体试样和梯台试样两类试样, 如图 1 所示. 其中, 立方体尺寸分别为 $7.5\text{ mm} \times 7.5\text{ mm} \times 7.5\text{ mm}$ (立方体试样); 梯台试样高度为 11.5 mm , 上截面为 $7.5\text{ mm} \times 7.5\text{ mm}$, 下截面为 $7.5\text{ mm} \times L$, 其中, 对于梯台试样 I 和 II 的 L 分别为 9.5 mm 和 11.5 mm .

2.2 冲击实验

动态冲击实验在 SHPB 实验装置上进行. 实验装置见图 2, 撞击杆长 300 mm , 入射杆和透射杆的长度均为 1200 mm , 杆直径均为 14.50 mm . 为调整 PMMA 试样中的应力状态, 在梯台试样的冲击实验中, 透射杆分别采用钢杆、铝杆. 同时, 为保证有足够长的加载脉宽, 在入射杆端部添加一定尺寸的整形器, 使入射波上升沿变缓.

由于在冲击速度较低时试样不会发生破碎, 因此, 对试样 $7.5\text{ mm} \times 7.5\text{ mm} \times 7.5\text{ mm}$ (立方体试样 I) 施加 $8.0\text{—}18.0\text{ m/s}$ 的冲击速度; 对试样 $(7.5\text{ mm} + 9.5\text{ mm}) \times 7.5\text{ mm}$ (梯台试样 I) 施加 $10.0\text{—}18.0\text{ m/s}$ 的冲击速度; 对试样 $(7.5\text{ mm} + 11.5\text{ mm}) \times 7.5\text{ mm}$ (梯台试样 II) 施加 $9.0\text{—}20.5\text{ m/s}$ 的冲击速度. 每个冲击速度下, 均开展 5 次以上重复实验, 选取重复性较好的 3 次结果进行分析.

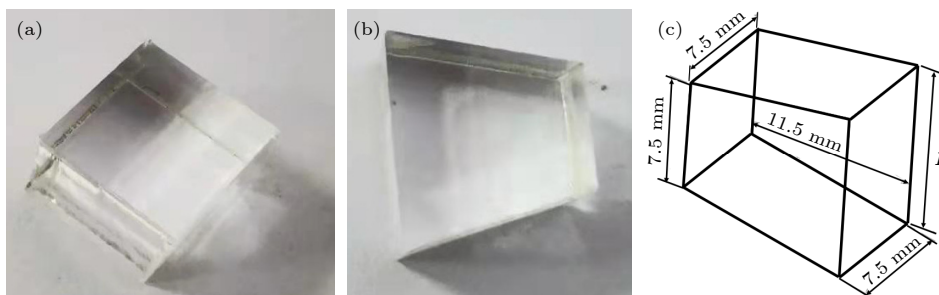


图 1 试样规格 (a) 立方体试样; (b) 梯台试样; (c) 梯台试样简图

Fig. 1. Sample specifications: (a) Cube sample; (b) trapezoid sample; (c) diagram of the trapezoid sample.

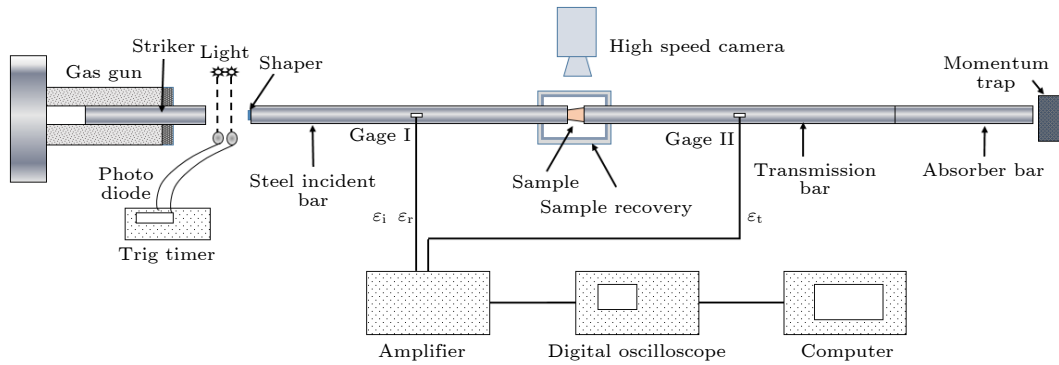


图 2 SHPB 实验装置

Fig. 2. Schematic diagram of the modified SHPB device.

在冲击压缩实验中,使用 Phantom V12.1 高速相机拍摄试样破碎过程,相机前放置有机玻璃板对相机和镜头进行保护.对立方体、梯台 I、梯台 II 试样,拍摄频率分别选为 4.8, 10, 10 μs^{-1} . 实验中使用两个 2000 W 新闻灯以提供足够的光源.

3 应力调整下的破坏过程实验结果

实验中在立方体试样的压缩过程,入射杆和透射均采用钢杆;对于梯台试样,透射杆分别采用钢杆、铝杆.对于立方体试样,试样两端应力差异较小,满足均匀性假定;然而,对于梯台试样,截面的变化增大试样两端的应力差异;同时,透射杆为铝杆时也会加剧梯台试样两端应力差异,具体统计结果如表 1 所列,因此,传统 SHPB 实验中试样两端载荷均匀性要求很难得到满足.由于试样两端应力差异较大,试样变形过程难以实现恒定应变率,因此用平均应变率来近似表征试样的应变率.应变率计算公式如下: $\dot{\epsilon} = \frac{C_{in}}{l_s}(\epsilon_i - \epsilon_r) - \frac{C_{tr}}{l_s}\epsilon_t$, 式中 C_{in} 为入射杆波速, C_{tr} 为透射杆波速, l_s 为试样长度, ϵ_i , ϵ_r , ϵ_t 分别对应入射波、反射波和透射波的应变信号.为了描述破坏过程,下面基于载荷与位移的关系进行讨论.

表 1 试样两端应力差统计
Table 1. Statistics of stress differences between two ends of sample.

试样	透射杆	应变率/ s^{-1}	应力差异
立方体		600	<2.5%
梯台 I	钢杆	500	20.4%—22.1%
梯台 II		600	33.8%—35.2%
梯台 I	铝杆	600	23.3%—25.5%
梯台 II		750	37.2%—43.1%

图 3 为不同冲击速度下作用在试样上的透射载荷位移曲线和破碎过程高速摄影结果. PMMA 试样在冲击载荷作用下呈现出脆性破坏模式,并且没有明显的应变率效应,材料强度约为 250 MPa. 试样由立方体试样变为梯台试样,或透射杆变为铝杆,力位移曲线载荷峰值基本不变,约为 15 kN. 表明试样形状的变化和透射杆的调整对试样强度基本没有影响.通过改变透射杆材质和试样形状实现了对试样内部应力的调整,对试样破坏过程的影响需要结合高速摄影过程进行综合分析.

如图 3(a2) 所示,试样在变形过程中接触端局部产生微裂纹,形成黑色失效区 (52.8 μs 时).随着压缩过程的进行,此区域向试样中部扩散,并充满整个试样导致试样破坏 (91.2 μs 时),同时此时载荷也基本达到峰值.对不同冲击速度下的立方体试样的高速摄影结果分析,结果表明:在低速冲击下(如 7.8 m/s),失效阵面在透射端产生;随着冲击速度增加(如 9.2 m/s),失效阵面在入射端产生.其原因为:压缩过程中试样内部变形存在一定的非均匀性,试样局部存在较大的变形.在低速冲击下,由于 PMMA 试样波阻抗低于透射杆,应力波在试样与透射杆的接触界面处存在反射增强作用,会进一步加剧试样的局部变形程度,导致试样局部应变达到临界失效应变,并产生失效阵面;在高速度冲击下,应力波由入射端输入试样内,此时试样入射端变形程度较大,并且试样从开始变形至达到临界失效应变对应的弛豫时间较短,因此试样入射端优先产生失效阵面.

试样变为梯台试样后,如图 3(b2) 所示,失效阵面仅在冲击端产生,这主要因为:在压缩过程中,试样两端载荷向载荷平衡的趋势调整,在这个过程中试样内部的应力随着截面积的增加而减小.试样

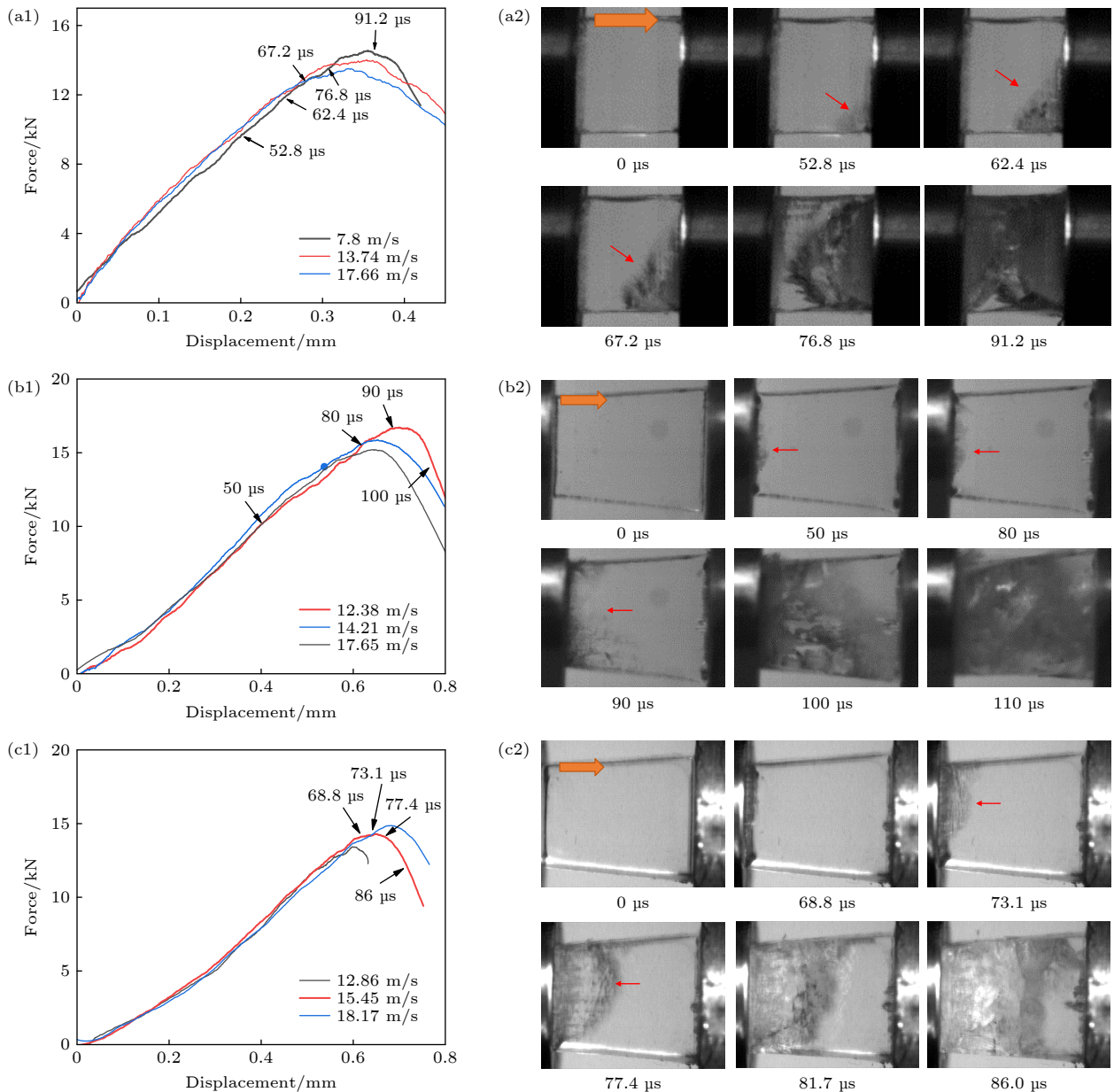


图 3 冲击过程中的载荷位移曲线和破碎过程 (a1) 透射杆为钢杆时立方体试样的力位移曲线; (a2) 冲击速度为 7.8 m/s 时立方体试样的破坏过程; (b1) 透射杆为钢杆时梯台试样 I 的力位移曲线; (b2) 梯台试样 I 的破坏过程 (冲击速度为 12.38 m/s); (c1) 透射杆为铝杆时梯台试样 I 的力位移曲线; (c2) 透射杆为铝杆时梯台试样 I 的破坏过程 (冲击速度为 15.45 m/s). 橙色箭头表示冲击方向

Fig. 3. Load displacement curve and crushing process during impact: (a1) Load displacement curve of cube sample under steel transmission bar; (a2) cube sample deformation process under impact velocity of 7.8 m/s; (b1) load displacement curve of trapezoid sample I under steel transmission bar; (b2) trapezoid sample I under steel transmission bar (impact velocity of 12.38 m/s); (c1) load displacement curve of trapezoid sample I under aluminum transmission bar; (c2) trapezoid sample I under aluminum transmission bar (impact velocity of 15.45 m/s). The orange arrow denotes the impact direction.

的变形也是非均匀分布的, 入射端的应变高于透射端, 入射端优先达到临界失效应变, 失效阵面优先在入射端产生. 在 50—80 μs 中, 失效发展较为缓慢, 该过程中从左端至右端随着截面增大, 试样变形逐渐变小, 内部存在变形梯度, 失效阵面的扩展存在较大阻力. 在 80—110 μs 中, 随着载荷进一步增大, 试样整体变形变大, 失效阵面逐渐扩展, 并

扩散至整个试样内部, 导致试样破坏. 当透射杆变为铝杆后 (图 3(c1)), 试样两端应力差异增大, 试样内部存在较大的变形梯度, 失效阵面产生时间进一步延迟, 在压缩过程中未产生失效阵面. 当载荷到达峰值时 (73.1 μs 时), 在入射端产生失效阵面, 此时试样整体变形程度较高, 失效阵面迅速扩展至整个试样使得试样破坏.

结合图 3(c2) 高速摄影可以看出, 试样开始变形至产生失效阵面存在一个明显的变形积累的过程, 并且当透射杆变为铝杆后, 该过程对应的时间明显延长. 这个产生阵面的弛豫时间与冲击速度和应力差异有关, 随着冲击速度的增加和应力差异的减小而减小. 试样的破坏过程主要为试样变形接触端局部产生微裂纹失效阵面, 并向试样内部扩展最终导致试样破坏. 在破坏过程中, 失效阵面传播速度随着试样形状改变和透射杆的调整是变大的, 其受试样变形程度和变形梯度控制.

由于试样形状改变或透射杆变为铝杆时, 试样变形分布是非均匀的, 内部存在较大的变形梯度, 此时试样的平均应变已不能准确表征出试样的压缩过程中变形情况. 为进一步分析阵面产生和传播机制, 下面将对试样破坏之前的压缩过程的变形演化进行分析.

4 变形分布与破碎扩散

4.1 冲击过程中的变形演化

在计算试样全场应变中, 数字图像相关法 (DIC)

是一种非常有力的计算工具, 并在金属、岩石等材料中有着广泛应用, 其准确性和可靠性已经得到验证 [20,21]. 试样在产生阵面和破坏之前, 产生了一定程度的变形, 为了准确获得试样压缩过程中的应变场分布, 对有机玻璃试样表面喷涂了人工散斑场, 并通过高速摄影对变形过程追踪拍摄. 由于试样为变截面的梯形试样, 为了保证计算结果的准确性, 如图 4(a) 红色虚线框所示, 选取散斑均匀分布的中间区域作为 DIC 计算区域. 当试样破坏后, 试样表面散斑被破坏, 此时无法得到准确的变形, 因此, 选取破坏前的高速摄影图片用于计算分析压缩过程的变形场, 并选取其中六张计算结果来说明变形过程和应变分布.

由于压缩过程是一个压剪耦合的复杂过程, 因此可以利用等效剪应变 ϵ_e 来进一步进行讨论. 图 4 为冲击速度为 13.3 m/s 时梯台试样 I 的变形过程和等效剪应变 $\epsilon_e(x, y, t)$ 分布. 试样在 100 μs 时入射端开始出现破坏, 并向透射端扩展. 从图 4(c) 等效剪应变场分布可以看出, 在前期压缩过程中 (0—40 μs), 试样变形程度较小, 并且均匀变形; 随着加载进行 (60—80 μs), 应变增大, 同时变形的非

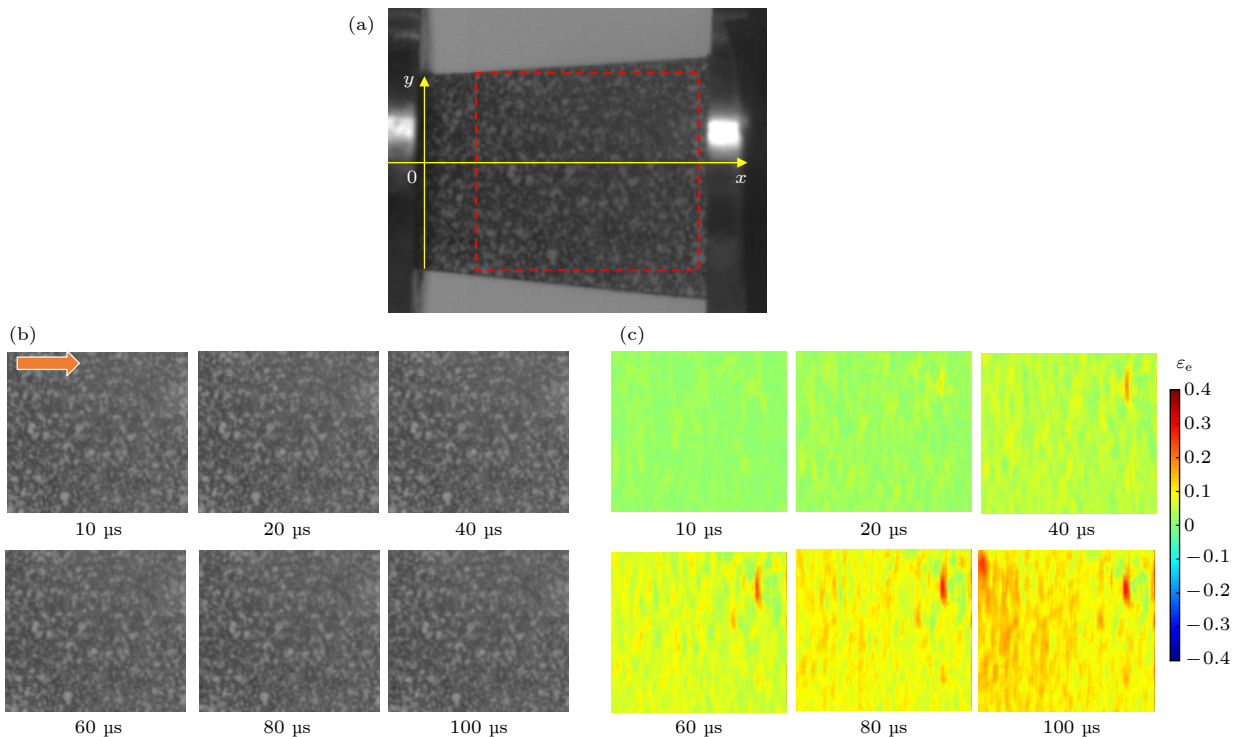


图 4 梯台试样 I 在钢杆下的应变分布 (冲击速度 13.3 m/s) (a) DIC 计算区域; (b) 高速摄影图片; (c) 2D 等效剪应变场 (箭头表示冲击方向)

Fig. 4. Strain distribution of trapezoid sample I under steel transmission bar (impact velocity of 13.3 m/s): (a) Area of DIC calculation; (b) high speed images; (c) 2D equivalent shear strain field (The arrow denotes the impact direction).

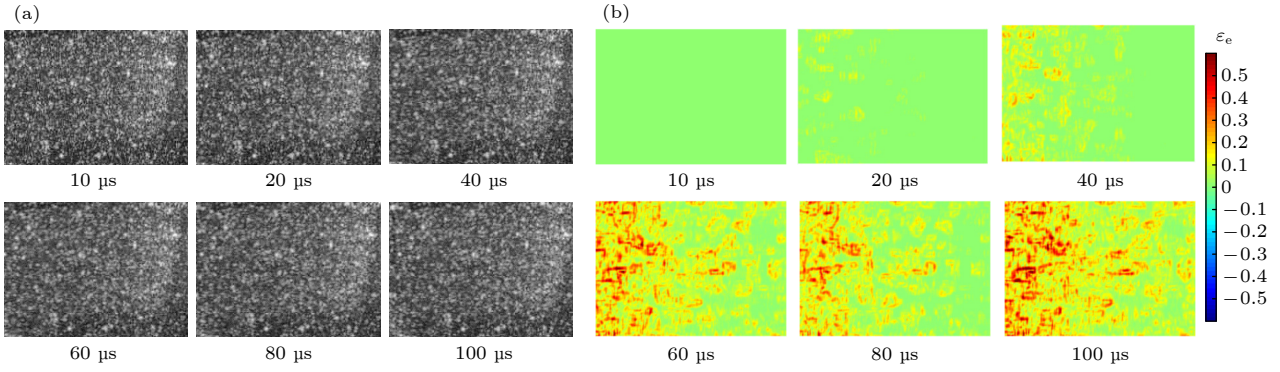


图 5 梯台 I 试样在铝杆下的应变分布 (冲击速度 16.21 m/s) (a) 高速摄影图片; (b) 2D 等效剪应变场 (箭头表示冲击方向)
 Fig. 5. Strain distribution of trapezoid sample I under aluminum transmission bar (impact velocity of 16.21 m/s): (a) High speed images; (b) 2D equivalent shear strain field. (The arrow denotes the impact direction.).

均匀程度增加, 入射端变形程度逐渐大于透射端; 试样发生破坏时 (100 μs), 试样入射端局部出现明显的大变形, 且显著高于透射端变形程度. 当试样尺寸改变, 试样两端应力差异增大后, 压缩过程的应变场分布与梯台 I 类似, 试样前期压缩过程基本为均匀变形; 随着加载进行, 应变差异增大, 应变非均匀分布.

当透射杆变为铝杆后 (如图 5 所示), 试样两端载荷进一步加大, 试样变形分布与透射杆为钢杆时呈现较大差异. 如图 5(b) 所示, 等效剪应变分布在前期压缩 (0—40 μs) 过程就呈现出较大的变形差异, 而且应变分布非常不均匀, 沿着冲击方向, 随着截面增大, 应变降低; 随着加载过程的进行, 试样变形增加, 应变分布非均匀程度明显增加, 入射端应变明显高于透射端应变分布.

为了进一步分析试样沿着冲击方向的应变分布情况, 对 DIC 计算的等效剪应变场 $\varepsilon_e(x, y, t)$ 沿着 y 方向取平均值, 即 $\bar{\varepsilon}_e(x, t) = \int_{-b/2}^{b/2} \varepsilon_e(x, y, t) dy / b$, 其中 b 为 DIC 计算的宽度. 试样沿着冲击方向的等效剪应变分布图如图 6 所示. 当透射杆为钢杆时, 梯台试样 I 和梯台试样 II 在前期的压缩过程中, 沿着冲击方向试样的各位置的平均应变幅值基本一致, 并维持在较低水平; 随着冲击加载的进行, 试样整体变形缓慢增加, 变形差异逐渐增大, 沿着冲击方向随着截面增加应变逐渐降低. 梯台试样 I 与梯台试样 II 两端的最大变形差异分别约为 30% 和 40%. 当透射杆变为铝杆时, 试样两端的应力差异进一步增大, 沿着冲击方向的平均应变分布如图 6(b) 所示. 在整个压缩过程中, 变形分布基本上都是非均匀分布, 随着加载的进行非均匀程度增

加, 入射端变形程度远高于透射端, 最大变形差异约为 60%.

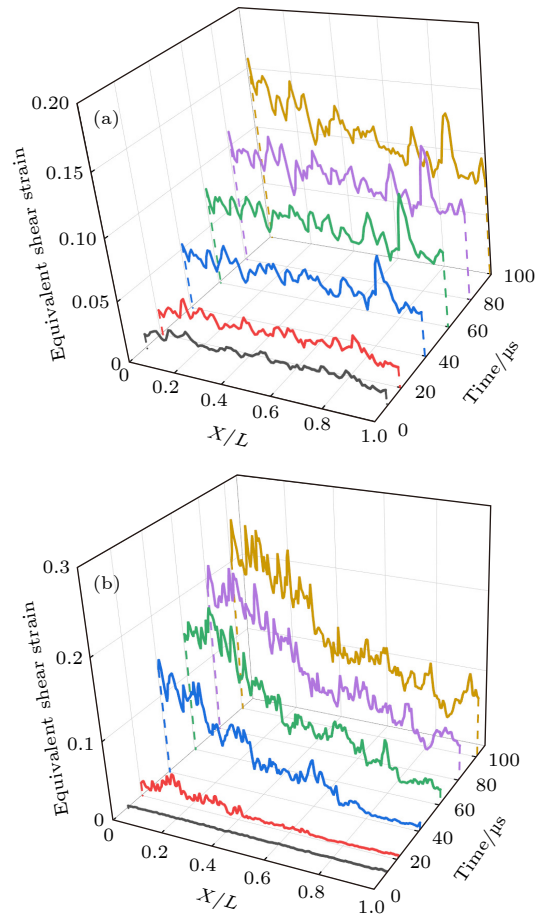


图 6 沿冲击方向平均等效剪应变分布 (a) 梯台试样 I 在冲击速度为 13.3 m/s、透射杆为钢杆时的应变分布; (b) 梯台试样 I 在冲击速度为 16.21 m/s、透射杆为铝杆时的应变分布

Fig. 6. Average equivalent shear strain distribution along impact direction: (a) Trapezoid sample I under steel transmission bar (impact velocity of 13.3 m/s); (b) trapezoid sample I under aluminum transmission bar (impact velocity of 16.21 m/s).

4.2 扩散控制的应力状态分布

材料内部的应力分布是难以直接获得的, 需要结合其他方式得到. Grady^[22] 和 Mott^[23] 分别采用线性应力扩散方程描述了一维脆性拉伸断裂过程中材料内部的应力分布. 基于此应力分布思想, 并结合 PMMA 试样的变形分布情况, 构建边界具有外载荷源的线性应力扩散方程, 用于分析破坏前的压缩过程中试样内部的应力分布情况:

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} - \frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

式中, $k = \mu \frac{Y}{2\rho\dot{\varepsilon}}$ 为扩散系数, 其中 Y 为材料强度; ρ 为材料密度; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; μ 为系数, 与试样截面积 A 和杆波阻抗有关, $\mu = \frac{1}{A} \frac{(\rho C_0)_{tr}}{(\rho C_0)_{in}}$. 在压缩前, 试样各处初始应力为 0; 且压缩载荷由入射端输入, 并向透射方向扩散. 因此, 方程应满足初始条件: $\sigma(0, x) = 0$, 和边界条件: 外载荷源 $\sigma(t, 0) = f(t)$.

基于边界条件和初始值, 对方程 (1) 求解可得

$$\sigma(x, t) = \frac{x}{2\sqrt{k\pi}} \int_0^t \frac{f_0(t')}{(t-t')^{3/2}} \exp\left[-\frac{x^2}{4k(t-t')}\right] dt'. \quad (2)$$

以透射杆杆为铝杆, 梯台试样 I 在冲击速度 16.21 m/s 实验结果为例, 对应力分布进行计算. 试样在 x 处截面积 $A = 7.5 \times (7.5 + 0.17x)$, 则系数 $\mu = \frac{1}{22.5(7.5 + 0.17x)}$, 代入 $k = \mu \frac{Y}{2\rho\dot{\varepsilon}}$ 得

$$k = \frac{1}{45(7.5 + 0.17x)} \cdot \frac{Y}{\rho\dot{\varepsilon}}. \quad (3)$$

并取 PMMA 材料强度 $Y = 250$ MPa, 密度 $\rho = 1800$ kg/m³, 应变率为 500 s⁻¹. 为方便计算, 以正弦函数代替矩形作为入射波, 由于入射端钢杆和试样的广义波阻抗不同, 输入试样的载荷被修正为

$$f(t) = 300 \sin\left(\frac{\pi}{240}t\right) \quad 0 \leq t \leq 120 \mu\text{s}. \quad (4)$$

将 (3) 式和 (4) 式代入 (2) 式, 并分别求出不同 t 时刻试样内部的应力分布结果. 具体计算结果如图 7 所示.

试样在压缩过程中, 载荷由入射端向透射端方向呈扩散形式分布, 入射端载荷明显高于入射端, 并且其分布情况与试样的变形分布基本吻合. 这表明了通过改变试样尺寸和透射杆对试样进行应力调整后的, 线性扩散方程可以很好地描述压缩前期试样内部的应力和应变分布情况.

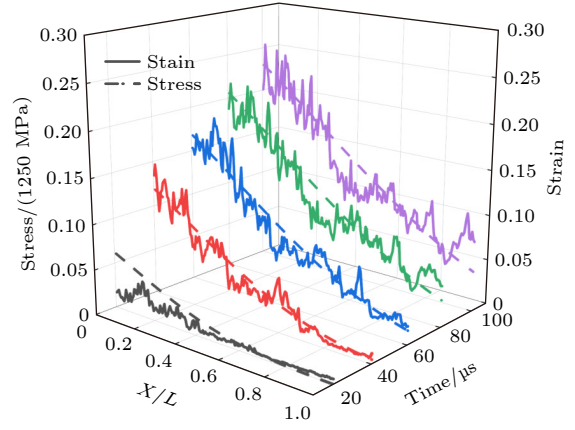


图 7 不同时刻试样内的应力分布

Fig. 7. Stress distribution in sample at different time.

4.3 破碎过程的广义扩散阻力

失效阵面主要为微裂纹和细碎颗粒组成, 其产生与局部变形梯度有关, 并且阵面的传播过程为扩散方程所控制. Feng^[24] 以剪切引起的孔隙体积 (V_d) 为扩散变量, 构建一种剪切激活扩散方程描述破碎阵面的传播控制方程; 刘占芳等^[25] 以微裂纹浓度 (N) 为扩散变量, 构建玻璃材料中破坏波的传播控制方程. Jiang 等^[5] 采用等效剪应变 (ε_e) 为变量, 描述多孔六方氮化硼材料的剪切激活扩散方程. 在此基础上, 本文考虑试样截面积的变化, 对等效剪应变 (ε_e) 为变量的剪切激活扩散方程加以修正:

$$\frac{\partial \varepsilon_e}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, t) \frac{\partial (A \varepsilon_e)}{\partial x} \right) + F(x, t), \quad (5)$$

其中

$$D(x, t) = \lambda [\varepsilon_e(x, t) - \varepsilon_{e\text{THD}}], \quad (6)$$

$$F(x, t) = \frac{\varepsilon_e(x, t) - \varepsilon_{e\text{THD}}}{t_d} \cdot \frac{Y(x, t) - Y_{\text{THD}}}{Y_M - Y_{\text{THD}}}, \quad (7)$$

式中, $D(x, t)$ 为扩散系数函数, $F(x, t)$ 为广义扩散阻力, A 为位置 x 处的截面面积, λ 为材料参数, $\varepsilon_{e\text{THD}}$ 为局部失效的临界剪应变, $Y(x, t)$ 为 t 时刻 x 位置的应力, Y_M 为试样的强度, Y_{THD} 为试样的临界强度.

失效阵面的传播与试样内部的应变梯度有关, 失效阵面产生后试样内部的应变能向外释放. 试样的变形为非均匀分布, 沿着传播方向应变逐渐降低, 阵面的扩散速度逐渐减小, 扩散过程存在广义扩散阻力. 由 (6) 式可以得到基于应变场 ε_e 表示的广义扩散阻力 $F(x, t)$:

$$F(x, t) = \frac{\partial \varepsilon_e}{\partial t} - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, t) \frac{\partial (A \varepsilon_e)}{\partial x} \right). \quad (8)$$

结合试样变形破碎过程的应变场,可以得到失效阵面传播过程中的广义扩散阻力分布.以冲击速度为 15.45 m/s 透射杆为铝杆时梯台试样 I 破碎结果为例,通过对高速摄影图片进行 DIC 处理得到变形场,并通过试样的应变进行校正得到试样破碎过程中的应变场.基于应变场计算的广义扩散阻力结果如图 8 所示,在失效阵面产生之前,试样内部的阻力较小,且分布均匀;阵面产生后,阵面附近阻力迅速增大.广义扩散阻力随着阵面的传播,由入射端向透射端移动,并且阵面的附近阻力可主要分为变形区 AB 段、阵面处 BC 段、破碎区 CD 三个阶段.阵面前锋的变形区 (AB 段),应变能缓慢释放,广义扩散阻力缓慢增大;在失效阵面上 (BC 段),应变能迅速释放,试样发生碎裂,广义扩散阻力迅速增大;阵面传播过后 (CD 段),试样发生破碎,广义扩散阻力逐渐降低,最后降为 0.

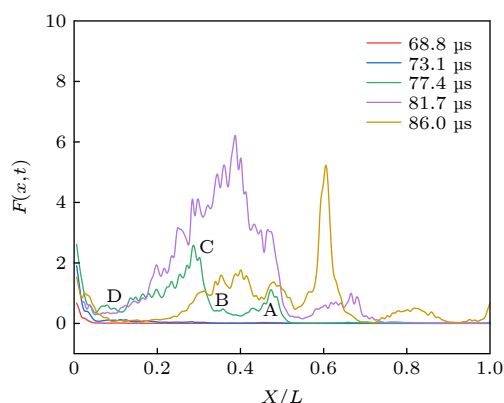


图 8 破碎时试样内的广义扩散阻力分布

Fig. 8. Generalized diffusion resistance force distribution in the sample during breakage.

5 结 论

基于高速摄影技术和 DIC 技术,通过改变试样形状和透射杆材质两种调整应力的方式对试样进行了系统的冲击压缩实验,探索其冲击破碎机制,得到的主要结论如下:

1) 试样的破坏主要为接触端局部产生失效阵面,然后失效阵面向试样内部扩展导致试样破碎.立方体试样失效阵面的产生与冲击速度有关,在低速冲击时,透射端先产生失效阵面;而冲击速度较高时,入射端先产生失效阵面.当试样变成梯台试

样后,失效阵面仅在入射端产生.应力调整后,阵面的产生存在明显的弛豫现象,传播过程中存在明显的广义扩散阻力.

2) 改变试样形状和改变透射杆材质加剧对试样两端应力差异,增大变形差异和变形的非均匀性.试样的应变沿着冲击方向逐渐变小,并且试样的应变状态和应力状态分布基本符合具有边界源项的线性扩散分布.通过应变分布结合剪切激活扩散方程,得到阵面扩散过程中的广义扩散阻力分布情况.未破坏区,阻力较小;破坏过程中,失效阵面前后广义扩散阻力先增加后减小.广义扩散阻力的幅值与应变能的释放有关.

参考文献

- [1] Xu S L, Shan J F, Wang P F 2020 *Mod. Appl. Phys.* **11** 30101 (in Chinese) [徐松林, 单俊芳, 王鹏飞 2020 *现代应用物理* **11** 30101]
- [2] Ma Q Q, Xiong X, Zheng Y X, Zhou F H 2019 *Chin. J. High Pressure Phys.* **33** 044101 (in Chinese) [马棋棋, 熊迅, 郑宇轩, 周风华 2019 *高压物理学报* **33** 044101]
- [3] Huang J, Xu S, Hu S 2013 *Rock Mech. Rock Eng.* **47** 1727
- [4] Chen X, Ma G, Zhou W, Lai G W, Lai Z Q 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 146102 (in Chinese) [陈兴, 马刚, 周伟, 赖国伟, 来志强 2018 *物理学报* **67** 146102]
- [5] Jiang H B, Xu S L, Shan J F, Wang D R, Liu Y G, Zhou L J, Wang P F 2019 *Powder Technol.* **353** 359
- [6] Shan J, Xu S, Liu Y G, Zhou L J, Wang P F 2018 *Powder Technol.* **330** 317
- [7] Potapov A V, Campbell C S 1997 *Powder Technol.* **93** 13
- [8] Rasorenov S V, Kanel G I, Fortov V E, Abashov M M 1991 *Int. J. High Pressure Res.* **6** 225
- [9] Espinosa H D 1998 *Mech. Mater.* **29** 219
- [10] Feng X W, Li J C, Wang H B, Chang J Z 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 166201 (in Chinese) [冯晓伟, 李俊承, 王洪波, 常敬臻 2016 *物理学报* **65** 166201]
- [11] Anderson Jr C E, Bigger R P, Weiss C E 2014 *Int. J. Appl. Glass Sci.* **5** 374
- [12] Huang J Y, Li Y, Liu Q C, Zhou X M, Liu L W, Liu C L, Zhu H M, Luo S N 2015 *Phys. Rev. B* **92** 144101
- [13] Sheikh M Z, Atif M, Li Y L, Zhou F H, Raza M A, Dar U A, Gao G Z, Wang Y M 2021 *Constr. Build. Mater.* **288** 123088
- [14] Yi H S, Xu S L, Shan J F, Zhang M 2017 *Explosion and Shock Waves* **37** 913 (in Chinese) [易洪昇, 徐松林, 单俊芳, 张鸣 2017 *爆炸与冲击* **37** 913]
- [15] Song Y P, Miao C H, Shan J F, Wang P F, Xu S L 2022 *Explosion and Shock Waves* **42** 073103 (in Chinese) [宋一平, 苗春贺, 单俊芳, 王鹏飞, 徐松林 2022 *爆炸与冲击* **42** 073103]
- [16] Fang J S, Wang Z, Xiong X, Zheng Y X, Zhou F H 2020 *Chin. J. High Pressure Phys.* **34** 014101 (in Chinese) [方继松, 王珠, 熊迅, 郑宇轩, 周风华 2020 *高压物理学报* **34** 014101]
- [17] Miao C H, Xu S L, Song Y P, Xie Y S, Yuan L Z, Wang P F 2022 *Powder Technol.* **397** 117081
- [18] Liu D, Shen L, Guillard F, Einav I 2016 *Int. J. Impact Eng.* **93** 222
- [19] Jian S H, Miao C H, Zhang L, Shan J F, Wang P F, Xu S L 2021 *Chin. J. High Pressure Phys.* **35** 024202 (in Chinese) [简

- 世豪, 苗春贺, 张磊, 单俊芳, 王鹏飞, 徐松林 2021 高压物理学报 **35** 024202]
- [20] Xing H Z, Zhang Q B, Braithwaite C H, Pan B, Zhao J 2017 *Rock Mech. Rock Eng.* **50** 1611
- [21] Zhou L, Xu S, Shan J, Liu Y, Wang P 2018 *Mech. Mater.* **123** 1
- [22] Grady D 2017 *Phys. Shock Impact* (Vol. 1) (London: IOP Publishing) pp2-57-2-68
- [23] Mott N F 1947 *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **189** 300
- [24] Feng R 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 1693
- [25] Liu Z F, Chang J Z, Yao G W, Zhang K, Li J P 2006 *Chin. J. Theor. Appl. Mech.* **38** 626 (in Chinese) [刘占芳, 常敬臻, 姚国文, 张凯, 李建鹏 2006 力学学报 **38** 626]

Deformation evolution and diffusion characteristics of polymethyl methacrylate under impact loading*

Miao Chun-He¹⁾ Yuan Liang-Zhu¹⁾ Lu Jian-Hua¹⁾

Wang Peng-Fei¹⁾ Xu Song-Lin^{1)2)†}

1) (CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

2) (United Laboratory of High-Pressure Physics and Earthquake Science, Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

(Received 18 April 2022; revised manuscript received 5 July 2022)

Abstract

Dynamic compression experiments on cubic polymethyl methacrylate (PMMA) specimens and two kinds of trapezoid PMMA specimens are carried by changing the transmission bars into steel bar and aluminum bar on the experimental device of split Hopkinson pressure bar (SHPB). The compression processes of PMMA specimens are recorded by high-speed photography, and the breakage processes of PMMA specimens are analyzed based on the force displacement curves and high-speed images. The evolutions of deformation and diffusion resistances of PMMA specimens under impact loading are discussed. The results show that the failure of the sample is caused mainly by the partial failure front at the contact end, and then the failure front propagates to the inside of the sample, leading the sample to break. The failure front of cubic sample is generated preferentially at the transmission end under low speed impact and at the incident end under the higher speed impact. After changing the shape of the specimen and the material of the transmission bar, the relaxation phenomenon is prominent, and the failure front occurs only at the incident end. The compressive deformation of the trapezoid sample before breakage is non-uniform, and the stress and strain in the sample gradually decrease with the increase of the cross section, and show a linear diffusion distribution. The strain distribution and shear activation diffusion equation are used to obtain the generalized diffusion resistance distribution of the failure front. The generalized diffusion resistance increases first in front of the failure front and decreases after the failure front, and the amplitude of the generalized diffusion resistance is related to the release of local strain energy.

Keywords: impact dynamics, stress-state adjustment, polymethyl methacrylate, stress diffusion

PACS: 62.25.Mn, 62.20.-x, 66.70.Hk, 66.30.-h

DOI: 10.7498/aps.71.20220740

* Project supported by the Opening Foundation of the United Laboratory of High-Pressure Physics and Earthquake Science, China (Grant No. 2019HPPES01) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11672286, 11872361, 11602267).

† Corresponding author. E-mail: slxu99@ustc.edu.cn



聚甲基丙烯酸甲酯的冲击破碎扩散特性

苗春贺 袁良柱 陆建华 王鹏飞 徐松林

Deformation evolution and diffusion characteristics of polymethyl methacrylate under impact loading

Miao Chun-He Yuan Liang-Zhu Lu Jian-Hua Wang Peng-Fei Xu Song-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 216201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220740

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220740>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚甲基丙烯酸甲酯与碳纳米管纳米复合材料玻璃化转变及其非线性力学行为的分子动力学模拟

Molecular dynamics study of glass transition and nonlinear mechanical behavior of poly(methyl methacrylate)/carbon nanotubes nanocomposites

物理学报. 2021, 70(21): 218101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210752>

聚甲基丙烯酸甲酯间隔的金纳米立方体与金膜复合结构的表面增强拉曼散射研究

Surface-enhanced Raman scattering effect of composite structure with gold nano-cubes and gold film separated by polymethylmethacrylate film

物理学报. 2019, 68(3): 037301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190054>

一种同步研究透明材料折射率和动力学特性的实验方法

An experimental method of simultaneously studying refractive index and dynamic properties of transparent materials

物理学报. 2021, 70(17): 176201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210414>

三维金字塔立体复合基底表面增强拉曼散射特性

Surface enhanced Raman scattering characteristics of three-dimensional pyramid stereo composite substrate

物理学报. 2020, 69(5): 058103 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191636>

入射光照对典型光刻胶纳米结构的光学散射测量影响分析

Influence of incident illumination on optical scattering measurement of typical photoresist nanostructure

物理学报. 2020, 69(3): 030601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191525>

石墨烯晶体管优化制备工艺在单片集成驱动氮化镓微型发光二极管中的应用

Applications of graphene transistor optimized fabrication process in monolithic integrated driving gallium nitride micro-light-emitting diode

物理学报. 2021, 70(19): 197801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210122>