

冲击压缩下石英玻璃柱的破坏实验研究和数值模拟

徐 振, 熊 迅, 李天密, 吕文银, 周风华*

(宁波大学 教育部冲击与安全工程重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 本文开展了一维应力冲击压缩下玻璃圆柱的压缩破坏实验研究. 利用高速气枪装置发射石英玻璃圆柱试件垂直撞击刚性壁(Taylor 撞击), 采用超高速摄像机拍摄试件的冲击压缩破坏现象. 实验中观测到一个产生于碰撞边界, 向圆柱内部传播的移动破碎阵面, 即失效波. 在冲击压缩区内失效波的传播速度介于 $2\sim 4\text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 之间, 随着冲击压缩载荷的增大而增大, 随传播距离的增加而减小. 经过一定时间, 在试件的对向自由端区域, 产生一个拉伸应力主导的碎裂区; 与玻璃柱试件两端严重的破碎区域相比, 试件中部产生一个相对透明区, 其破碎程度较低. 采用应力波分析方法说明了试件内部不同破碎特征区域的形成机理; 采用离散元方法对实验过程进行数值模拟, 取得了与实验现象一致的结果.

关键词: 失效波; Taylor 撞击; 石英玻璃柱; 破坏和破碎; 数值模拟

中图分类号: O346.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 02-0037-07

脆性材料由于其独特的力学、物理和化学特性, 被广泛用于各种严峻环境下的民用和军事工程中. 玻璃作为一种脆性材料, 硬度和脆性非常高, 对变形高度敏感, 经常在应变不到 1%时就发生破坏. 20 世纪 90 年代, Rasorenov 等^[1]对玻璃材料进行了平板撞击实验, 当冲击加载应力低于或接近于 Hugoniot 弹性极限时, 在 K19 玻璃中观测到远离冲击压缩波阵面之后紧跟着一个以较低速度向压缩区扩展的破坏面, 这个移动的破坏面称为“失效波”, 是在一维平面冲击压缩下, 在玻璃等脆性材料中发生的一种独特的失效或破坏现象. 国内外许多研究人员开展了失效波实验研究, 失效波的一些基本力学性质逐渐被人们认识, 比如它是一个移动破碎界面, 从碰撞面处萌生, 在冲击波后的纯压缩区内以 $1\sim 2\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度扩展, 其速度随传播距离的增大而衰减, 失效波阵面后的声阻抗变小, 强度下降为 0, 失效波前后纵向应力变化不大, 失效波后横向应力变大, 材料的折射率发生永久变化, 且不透光^[2-11].

由于受冲击实验加载手段与测试设备精度的限制, 以及鉴于测试技术的难度和失效波现象的复杂性, 现有的实验结果之间还颇有争议, 甚至存在相反的结论. 到目前为止失效波形成的物理机制仍不明确. 相对于一维应变的平板撞击实验, 对细长玻璃杆进行一维应力撞击实验, 采用高速摄影技术, 也能观察到试件中存在一种高速传播的破坏阵面. 高速摄影作为一种直观、有效的实验观察手段, 尤其适用于对透明材料中冲击破坏、应力波传播的研究. Bourne 等^[12]用高速阴影技术观测到碱石灰玻璃和硼硅酸盐玻璃中有移动的破碎界面, 认为这就是 Kannel 等发现的失效波; 赵剑衡等^[11]通过高速阴影技术观测到失效波首先产生于玻璃表面, 认为失效波的萌生与玻璃材料表面的结构和微裂纹有关. 这些研究探索对于以后采用高速摄影技术观测失效波和玻璃等透明材料的破坏过程提供了很好的参考.

近年来, 关于玻璃材料的研究主要集中于玻璃的动态力学行为和本构破坏^[13-16], 针对失效波

收稿日期: 2017-05-03.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11272163, 11390361).

第一作者: 徐振(1990-), 男, 河南信阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: xuzhenchina1@163.com

*通信作者: 周风华(1964-), 男, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: zhoulfenghua@nbu.edu.cn

的研究不多. 为了对失效波传播速度和传播机制进一步研究, 我们开展了一维应力冲击压缩下石英玻璃柱试件的破坏实验, 分析研究了不同冲击载荷下石英玻璃柱的破坏面貌以及失效波的萌生和传播机制.

1 实验装置和测试技术

实验装置如图 1 所示. 利用高压气枪加速玻璃圆柱体试件, 以一定的速度垂直碰撞一个镶嵌大块碳化钨(WC)块体的钢靶, WC 的压缩强度为 17.3 GPa, 弹性模量为 720 GPa, 密度为 $15.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. 采用激光测速仪测量玻璃试件碰撞前的冲击速度, 并通过高分辨率超高速摄像机对冲击碰撞过程进行拍摄; 采用高强度光源进行照明; 采用金属丝断路方式触发相机, 触发时间误差在 100 ns 以内. 通过研究摄像记录, 观察和分析试件在撞击过程中的变形、内部损伤发展以及整体破碎和碎片飞散情况.

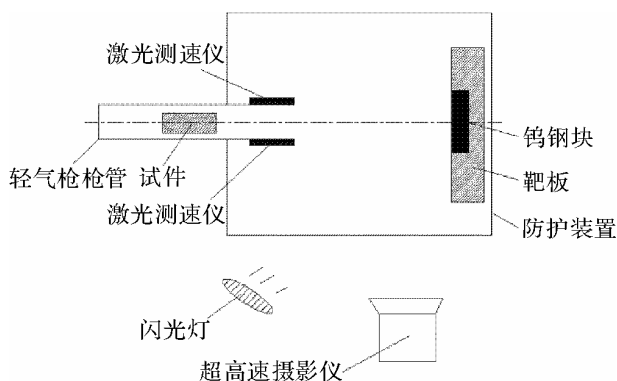


图 1 实验装置示意图

关于高速摄像机说明如下: Bourne 等^[12]采用的是 Ultrance FS501 分幅变相管相机, 其幅频为 $2.5 \times 10^6 \text{ 幅}\cdot\text{s}^{-1}$, 其动态空间分辨率为 6 线对 $\cdot\text{mm}^{-1}$, 视场大小为 $10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$; 赵剑衡等^[11]利用了高速阴影技术, 在相近的幅频下, 其空间分辨率为 24 线对 $\cdot\text{mm}^{-1}$, 视场大小为 $74 \text{ mm} \times 54 \text{ mm}$, 每幅相片曝光时间仅为 100 ns. 本实验采用了 Kirana 超高速摄影仪, 拍摄幅频为 $2.0 \times 10^6 \text{ 幅}\cdot\text{s}^{-1}$, 每幅相片的曝光时间为 500 ns, 空间分辨率为 17 线对 $\cdot\text{mm}^{-1}$, 观察视场为 $175 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$.

实验选用了多个尺寸规格的玻璃圆柱体, 图 2 所示石英玻璃柱试样直径为 11 mm, 长度为 150

mm. 玻璃的密度 $\rho=2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 弹性模量 $E=77.8 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.16$. 根据应力波理论, 石英材料的一维应力弹性波波速为 $c=\sqrt{E/\rho}=5950 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 波阻抗 $\rho c=13.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}$. 与此对比, 作为靶板的 WC 的弹性波速为 $6790 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 波阻抗为 $106 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}$, 因此 WC 靶板可以视为刚性壁. 玻璃材料的抗冲击压缩强度 $\sigma_b=1.08 \text{ GPa}$, 根据应力波理论, 自由不受力玻璃杆撞击刚性壁产生的压缩应力为 $\sigma=\rho cv$, 当 $v_c=\sigma_b/(\rho c)=82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的临界值时, 玻璃圆柱试件撞击端将发生破坏.

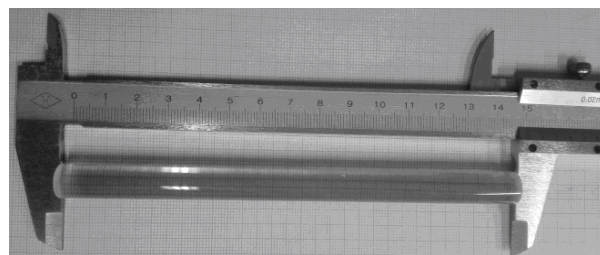


图 2 石英玻璃棒样品

首先进行了 4 发垂直冲击实验(Taylor 实验), 试件采用直径 11 mm, 长度 150 mm 的玻璃圆柱, 采用超高速相机在 $2.0 \times 10^6 \text{ 幅}\cdot\text{s}^{-1}$ 拍摄帧率(时间间隔 500 ns)下记录玻璃圆柱的破坏图像. 实验加载条件如表 1 所示, 所产生的冲击载荷均超过压缩强度, 试件破碎.

表 1 实验加载条件

实验号	加载气压 p/MPa	冲击速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	冲击载荷 σ/GPa
1	0.5	93	1.22
2	1.0	126	1.65
3	1.5	148	1.94
4	2.0	162	2.12

2 实验结果分析

2.1 破坏区域的扩展

图 3 展示了石英玻璃柱初始破坏过程(冲击载荷为 1.22 GPa), 视场中央的亮斑为照明灯反射, 观察试件右端的撞击端区域, 可以看到 4 个典型时刻的石英玻璃柱破坏区域: 图 3(a) $t=0 \mu\text{s}$ 为试件与刚性壁碰撞时刻, 此时失效波尚未产生; 在 $t=3 \mu\text{s}$ 时刻, 靠近刚性壁的玻璃柱压缩区域发生破碎, 破碎区产生大量裂纹, 导致材料折射率发生永久变化,

透光性急剧下降,反射增强,在影像上表现为亮区,如图3(b)所示;在 $t=6\mu\text{s}$ 时刻,破碎区阵面继续向前传播,大量的微裂纹在阵面后方产生并汇聚,如图3(c)所示;在 $t=9\mu\text{s}$ 时刻,破碎区区域进一步扩展,同时试件-刚性壁界面不断产生新的裂纹并往前发展,加剧破碎程度,如图3(d)所示.实验观察分析认为,玻璃圆柱的破碎区具有一定的结构性,破碎程度在发展,而破碎阵面持续向未破坏区域发展,类似于一个不断移动的失效波.

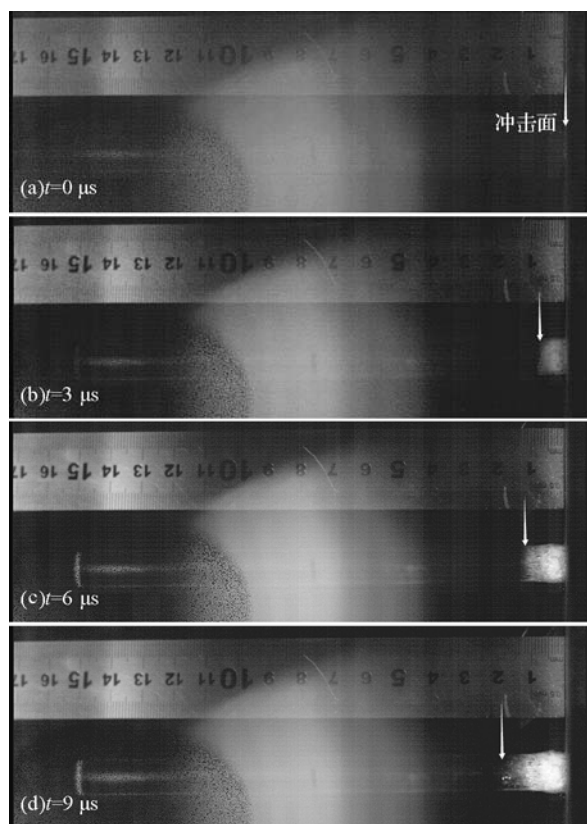


图3 长度为150 mm石英玻璃柱样品中传播的失效波

2.2 破坏阵面传播

对所有的4发实验结果进行测量,图4(数据点)给出了撞击开始早期($8\mu\text{s}$ 以内),破坏区阵面传播距离随时间的变化关系,从这些数据点可以看出:(1)冲击速度越高(冲击压力越大),失效波阵面在相同时间传播距离越长;(2)图4的数据点不是一个严格直线,说明失效波阵面的传播速度不是常数.

采用二次多项式 $x = at^2 + bt + 3.158$ 对图4所示的原始数据进行拟合, x 为传播距离,mm; t 为传播时间, μs .得到以下拟合参数:对于 $\sigma=1.22\text{ GPa}$ 冲击压力, $a=-0.08291\text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-2}$, $b=2.39946\text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$;

对于 $\sigma=1.65$ 、 1.94 和 2.12 GPa 的冲击压力,分别是 $a=-0.07510$, $b=2.75705$; $a=-0.13270$, $b=3.72753$ 和 $a=0.05638$, $b=3.15296$,单位同上.这些拟合数据较好地拟合了测量数据点,如图4所示.

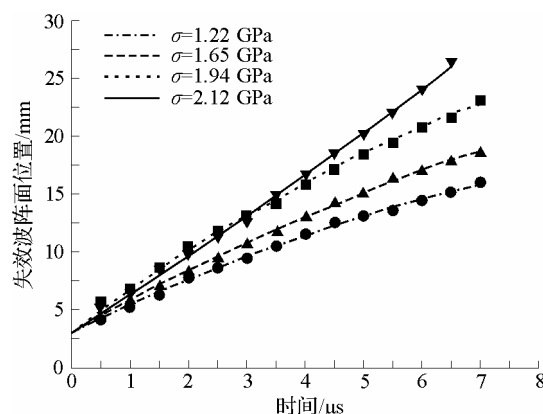


图4 石英玻璃中失效波传播距离和时间的变化关系

对图4所得到的拟合多项式进行导数计算,得到失效阵面传播速度的数值,如图5所示.对速度统计取平均值可得:在加载载荷分别为1.22、1.65、1.94和 2.12 GPa 的4种实验条件下,失效波阵面的平均速度分别为 1.8 、 2.3 、 3.1 和 $3.3\text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$.除了 2.12 GPa 的冲击压力情况,失效波阵面速度随着失效区域的深度增加而降低;但是在高压撞击(2.12 GPa)情况下,这个趋势相反.由于对波阵面位置的判读存在一定的观测误差, 2.12 GPa 冲击压力下的破坏区阵面传播速度可以看做接近于常数($\sim 3.3\text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$).

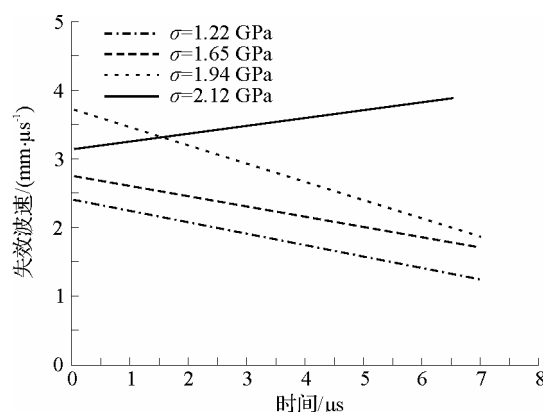


图5 石英玻璃中速度和时间的变化关系

2.3 石英圆柱试件的全体破坏形状

高速摄像记录显示,撞击发生后约 $20\mu\text{s}$,在试件自由端附近发生破坏,该破坏区域从自由端

向试件内部传播. 到 $34\ \mu\text{s}$ 时刻, 石英圆柱试件已经整体破碎, 如图 6 所示, 此时可以看到, 试件的两端破碎程度较高, 呈现密集裂纹的反射亮色, 而试件中段损伤程度不高, 相对透明. 实验还观察到, 试件中段的透明区会在一定的时间内持续存在, 随着时间增加, 试件继续破坏, 该透明区逐渐破碎, 强度降低, 透光性降低.

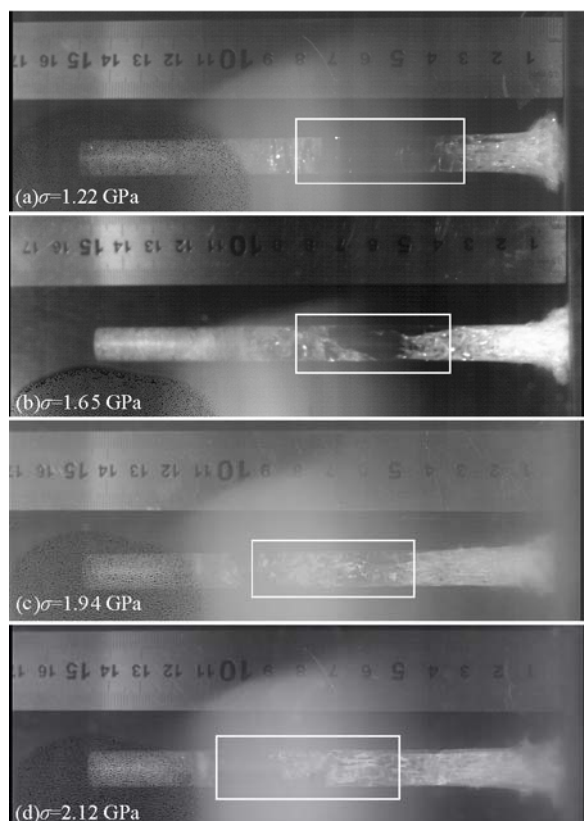


图 6 不同冲击载荷下石英玻璃棒试样中的透明区

从实验观察现象可知, 石英玻璃圆柱的冲击破碎现象是一个相当复杂的过程, 涉及到应力波传播和反射、以及材料的复杂破坏及破碎机理. 图 7 定性地描绘了石英玻璃冲击破碎过程中的复杂应力波作用过程. 试件自右向左撞击到刚性壁面, 在碰撞开始时刻, 从冲击碰撞面产生一系列右行压缩波, 以大约 $5.95\ \text{mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 的速度向自由端传播, 到达试件自由端后向回反射成为卸载波. 在压缩端面, 经历过一定弛豫时间(ns 数量级)后, 在 t_1 时刻裂纹以及破碎区域从碰撞面上起始, 向右侧压缩区域传播, 其传播速度约为 $2.0\sim 3.5\ \text{mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$, 且可能随着传播深度增加而下降. 对于一维应力加载实验, 由于圆柱侧向表面的卸载和碎片飞散, 破碎

区的压缩应力幅值降低, 因此产生了右行卸载波. 来自破碎区的右行卸载波与压缩波在自由表面反射回来的卸载波相互叠加, 在试件内部产生局部轴向拉伸应力, 造成层裂破坏(石英玻璃的拉伸强度在 $40\sim 70\ \text{MPa}$ 程度). 这种复杂的多波叠加作用来自试件两端破碎区域的扩展速度减缓, 在圆柱试件形成冲击端破坏区、自由端附近拉伸层裂破坏区、中部损伤程度较低的破坏形貌. 通过冲击波波速与失效波波速的比值, 可以近似计算透明区位置; 随着冲击载荷的增大, 该区域逐渐偏向自由端方向, 和实验观察一致.

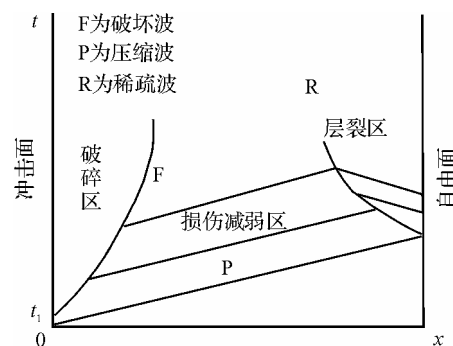


图 7 玻璃试件中波系

2.4 不同破碎区域碎片的运动飞散

与平板撞击实验不同, 在一维应力玻璃杆的 Taylor 撞击实验中, 试件不受侧向约束, 因此破碎区域可以向侧向飞散. 为了观察破碎区域试件的碎片飞散情况, 对长度为 $100\ \text{mm}$ 的短圆柱试件进行了 Taylor 撞击实验, 如图 8 所示, 撞击速度为 $103\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 压缩载荷为 $1.35\ \text{GPa}$. 从该图可以看到以下过程: (a)在 $0\ \mu\text{s}$ 时刻冲击压缩发生; (b)在 $6\ \mu\text{s}$ 时刻试件的压缩区(即冲击碰撞端)已经呈塌陷式破坏, 折射率显著降低, 形成不透光的破碎区, 碎片沿靶板平面往侧向飞散; (c)在 $12\ \mu\text{s}$ 时刻, 压缩破坏阵面尚无法到达自由面, 但是圆柱的自由端破碎区域明显, 显然这是一个由于拉伸载荷作用产生的层裂破碎区, 层裂起始区域在靠近自由端的区域内部并向两端扩展, 相对而言, 在 $12\ \mu\text{s}$ 时刻试件的中心区域损伤程度较低, 试件呈现透明状; (d)在 $86\ \mu\text{s}$ 时刻, 试件已经全面破碎, 但是碎片的飞散方向不同, 压缩破碎区域的碎片紧贴刚性壁, 向侧向飞散, 而自由端的层裂破碎区碎片以与试件入射方向相反的方向扩张飞散.

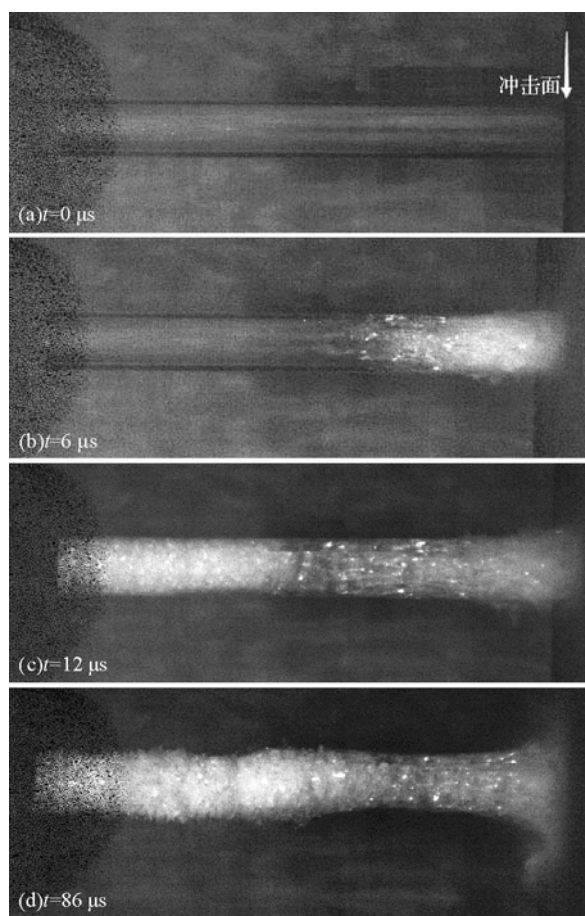


图 8 短石英玻璃柱试件的宏观破坏形态

3 数值模拟及其与实验结果的对比分析

无论是静态还是动态的脆性材料压缩实验, 试件的破坏过程都很短暂, 实验难以捕捉到材料破坏的全部过程和内部细节. 即使使用高速摄像机, 也只能观察到表面的破损, 对其内部的破坏现象仍难以得到. 为此采用数值模拟方法进一步研究脆性玻璃圆柱的冲击破碎过程.

3.1 模型细观参数的标定与数值模拟

为了建立合适的离散元模型, 首先需要对颗粒间的细观参数进行标定. 表 2 为文献报道的玻璃宏观参数和模拟所得到的宏观结果, 所采用的主要细观参数如表 3 所示. 模拟得到玻璃材料的宏观参数与文献报道中基本一致, 说明该模型和其细观参数能够用于玻璃材料的冲击变形和破坏的模拟.

标定完成后, 对石英玻璃圆柱模型进行 Taylor 撞击的数值模拟实验. 计算模型为 2D 平面应力问

题, 数值模拟采用 1:5 缩小的几何模型, 试件为长 30 mm、宽 2 mm 的矩形区域, 粒子数目为 27 109 个, 以 $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度撞击右端刚性壁.

表 2 玻璃主要力学性能参数

玻璃主要参数	文献参数	离散元模拟结果
弹性模量 E/GPa	77.8	76.6
泊松比 ν	0.17	0.17
抗压强度 σ_c/MPa	800	650
抗拉强度 σ_t/MPa	49	49
抗弯强度 σ_b/MPa	60~70	70
断裂韧性 $K_{\text{I}}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	0.81	0.78

表 3 主要细观参数

参数	数值
接触连接模量/Pa	6.8×10^{10}
接触刚度比	2.1
孔隙率	0.1
最小颗粒半径/m	0.2×10^{-4}
最大最小粒径比	1.5
粘结模量/Pa	6.8×10^{10}
粘结刚度比	2.1
粘结拉伸强度/Pa	7.3×10^7
粘结剪切强度/Pa	35×10^7

3.2 数值模拟与实验结果的对比

作为对比, 我们给出了冲击速度为 $126 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (冲击压缩载荷 1.65 GPa) 的实验结果, 即不同时刻下圆柱试件的损伤破坏过程, 如图 9 所示. 对比发现: 数值模拟中圆柱内部发生的冲击压缩、压缩区破碎及破坏阵面传播、卸载及自由端附近的层裂区形成及扩展, 各种破坏机制的发生时序与实验中观察到的现象完全一致, 反映了应力波作用下的脆性材料的复杂破坏和破碎过程; 试件破坏后, 不同部分的碎片飞散方向也与实验观察一致. 另一方面, 在定量角度数值模拟所得到的压缩区域破坏阵面破碎波速度偏高, 超过 $5 \text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$, 这可能和数值模型参数误差以及实际实验中碳化硅壁面条件不是理想刚性有关.

4 结论

采用实验方法研究了玻璃圆柱对刚性壁进行 Taylor 撞击时的破碎过程, 观察到以下现象:

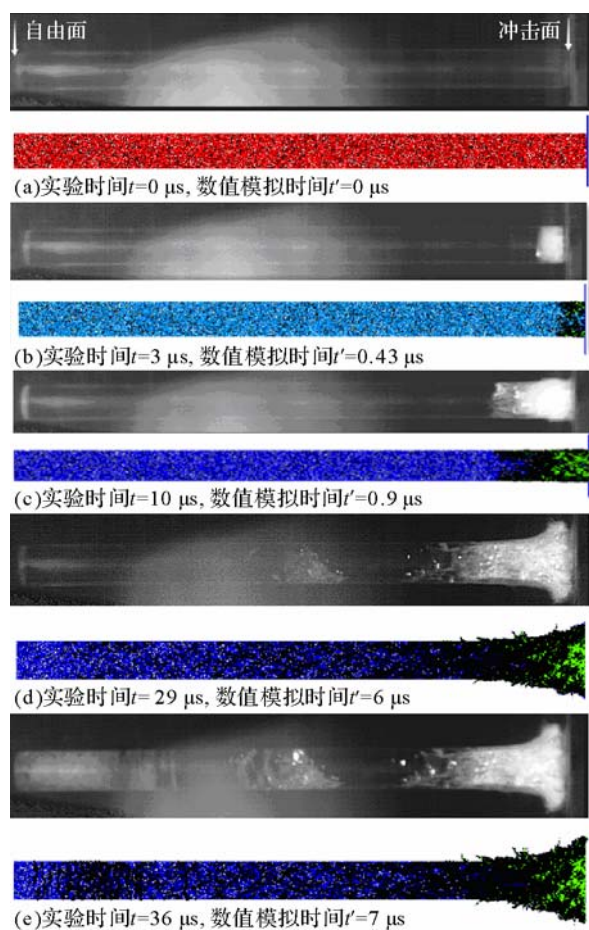


图9 圆柱试件的破坏现象以及与1:5缩比模型数值实验结果的对比

冲击在圆柱内部产生了一维压缩应力波,在压缩载荷作用下试件与刚性壁面的接触区产生压缩裂纹,诱发出向试件内部扩展的破碎区域,破碎区域阵面类似于一个失效波阵面,具有一定的传播速度;随冲击载荷的增大,失效波的传播速度增大,平均波速在 $2\sim 4\text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 范围;随着失效波传播距离的增加,失效波在传播的过程中不断消耗应变能,其波速减小甚至可能降为0.

在压缩破碎区域,由于侧向约束的消失,压缩区的轴向压缩应力降低,所产生的追赶卸载波与前驱压缩波在自由端反射产生的反射卸载波相互作用,在自由端附近产生拉伸应力,导致圆柱的自由端附近出现层裂破碎区.随着破碎导致的能量损耗,压缩破碎区阵面以及层裂破碎区阵面的传播速度逐渐衰减,造成圆柱试件出现“压缩破碎区-低损伤区-层裂破碎区”的破坏结构,这个现象与试件碎片飞散特征一致.

实验观察到的“压缩破碎区-低损伤区-层裂破碎区”的破坏结构,符合一维应力波分析,也与数值模拟结果一致.

从上述实验现象可以得知,玻璃圆柱杆在高速Taylor撞击实验中的破坏是一个复杂的过程,包括了撞击端区域的压缩破碎和自由端区域的层裂拉伸破碎,涉及和应力波相互作用的机制.一方面,撞击端的压缩破碎区以一定的阵面(失效波)向试件内部传播;另一方面,传播破碎阵面上发生的弹性卸载波将与自由面反射卸载波共同作用,导致试件的远端(自由端)发生层裂和拉伸破碎.对脆性玻璃圆杆撞击破碎的现象的研究有助于揭示脆性材料的压缩破坏、拉伸破坏和破碎的复杂机理.针对实验的进一步分析和数值模拟工作正在进行.

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(4):225-232.
- [2] 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, 2001.
- [3] 章冠人. 冲击压缩脆性材料中破碎波的几个问题[J]. 高压物理学报, 1998, 12(2):81-85.
- [4] 贺红亮. 冲击波极端条件下脆性介质的力学响应特性及其微观结构破坏特征[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1999.
- [5] Bourne N, Millett J, Rosenberg Z. On the origin of failure waves in glass[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(10):6670-6674.
- [6] Raiser G F, Wise J L, Clifton R J, et al. Plate impact response of ceramics and glasses[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 75(8):3862-3869.
- [7] Clifton R J. Analysis of failure waves in glasses[J]. Applied Mechanics Reviews, 1993, 46(12):540-546.
- [8] Grady D E. Dynamic failure in brittle solids[EB/OL]. [2016-10-16]. <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/10136168>.
- [9] Kanel G I, Razorenov S V, Savinykh A S, et al. A study of the failure wave phenomenon in glasses compressed at different levels[EB/OL]. [2016-11-24]. <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2139829>.
- [10] Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V, et al. Influence of the load conditions on the failure wave in glasses[J]. High Pressure Research, 1998, 16(1):27-44.
- [11] 赵剑衡, 谭显祥, 孙承纬, 等. 用高速阴影技术研究

- K9 玻璃中的失效波[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2):150-156.
- [12] Bourne N K, Rosenberg Z, Mebar Y, et al. A high speed photographic study of fracture wave propagation in glass [J]. Journal de Physique IV, 1994, 4(C8):635-640.
- [13] 李磊, 安二峰, 杨军. 典型建筑玻璃力学性能的 SHPB 实验[J]. 硅酸盐学报, 2010, 29(2):390-394.
- [14] Franks L P, Salem J, Zhu D. Dynamic failure of a borosilicate glass under compression/shear loading[J]. Advances in Ceramic Armor III: Ceramic and Engineering Science Proceedings, 2009, 28(5):103-111.
- [15] Liu W, Sun X, Chen W, et al. Modeling and characterization of dynamic failure of soda-lime glass under high-speed impact[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2012, 21:577-598.
- [16] 巴明芳, 王婕斐, 杨莹莹, 等. 改性硫氧镁胶凝材料的配制及性能研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2014, 27(2):83-87.

Experimental and numerical investigations on failure of quartz glass rod under impact compression

XU Zhen, XIONG Xun, LI Tian-mi, LÜ Wen-yin, ZHOU Feng-hua *

(Key Laboratory of Impact and Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In this paper we investigate the compressive failure of quartz glass rods vertically impacted on a rigid wall at high velocity (Taylor impact). The glass rod projectile is launched using a high-pressure gas gun. An ultra-high speed video camera is used to record the failure process of the glass rod. The impact creates a compressive region in the rod. It is found that starting at the impact face, a failure zone is developed in the compressive region and expands toward the far end of the projectile. The moving front of this failure zone can be viewed as a kind of “failure wave”, which travels at the rate of $2\sim 4\text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$. The speed of the failure front increases with the compressive pressure, and may decrease with the propagation depth. After the impacting process, a spallation failure zone is occasionally identified which expands in the region of near the far end of the projectile. This spallation zone is attributed to the interactions between the unloading stress wave reflected from the free end of the projectile, and the longitude unloading wave initiated at the failure zone. Compared with the compressive failure zone in the impact end region, and the spallation zone in the free end region, relatively less damage is observed in the middle region of the projectile. The experimental observations can be explained from the stress wave analysis. Numerical simulations using the discrete element method are conducted, which give the results consistent qualitatively to the experimental observations.

Key words: failure wave; Taylor impact; quartz glass rod; failure and fragmentation; numerical simulation

(责任编辑 韩 超)