DOI: 10.11858/gywlxb.20190719

# 无机玻璃动态压缩破坏的离散元模拟

马棋棋,熊 迅,郑宇轩,周风华

(宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室,浙江 宁波 315211)

摘要:利用离散元软件PFC<sup>2D</sup>(Particle Flow Code)建立了分离式霍普金森压杆(SHPB)系统, 模拟了无机玻璃圆柱和圆盘试件在冲击压缩下的动态力学行为和失效破坏模式。结果表明:无 机玻璃作为典型的脆性材料,其抗压强度具有明显的应变率效应,而杨氏模量则对应变率不敏 感;无机玻璃圆柱的破坏过程受纵向压力、端面摩擦力以及横向惯性力的影响,初期微裂纹呈三 角状分布,随着纵向应力水平的提高,出现明显的泊松效应,产生横向张应力,致使微裂纹沿纵 向扩展,最终试件发生沿轴向的劈裂断裂;摩擦系数和泊松比对试件破坏模式及强度有一定影 响。将建立的 SHPB 数值实验平台用于模拟无机玻璃巴西圆盘试验,揭示了圆盘发生中心开裂 的拉伸特征及拉伸强度的应变率相关性。

关键词:无机玻璃;离散元;动态压缩;破坏模式;巴西圆盘;强度率相关性

#### 中图分类号:O347 文献标识码:A

无机玻璃因其良好的透光性以及相对较高的强度特性而广泛应用于风挡玻璃、建筑物玻璃窗、装 甲防护等领域。在无机玻璃的使用过程中,不可避免地受到冲击载荷作用,例如汽车或飞机的风挡玻 璃在冲击载荷作用下发生破坏碎裂,从而直接威胁人员生命和财产安全。脆性材料在冲击压缩下的破 坏碎裂在采矿、挖掘、航天等诸多领域都是重点关注的问题。无机玻璃作为典型的透明脆性材料,对 其动态压缩破坏行为进行研究将有助于加深对脆性材料冲击破坏物理机制的理解。

关于无机玻璃的动态力学性能和失效破坏模式的研究有很多。在实验方面, Zhang 等<sup>[1]</sup> 对玻璃在 不同应变率下的失效强度和杨氏模量进行了研究,认为玻璃试件在拉、压载荷作用下的失效强度与应 变率呈正相关,而其杨氏模量表现为应变率不敏感性。Peroni等<sup>[2]</sup> 认为玻璃压缩强度和杨氏模量对应 变率不敏感,而拉伸强度则随加载速率的提高而显著提高。王振等<sup>[3]</sup> 对玻璃进行了静态和动态单轴压 缩实验,认为玻璃的压缩强度具有明显的应变率效应,并从能量角度解释了这一现象;他们还利用高速 摄像技术进行观测,指出玻璃在压缩载荷下的破坏模式为横向张应力引起的裂纹成核、沿轴向扩展、 联结交错,但并未从细观角度对此过程进行深入研究。Chen等<sup>[4–6]</sup> 通过实验研究发现,玻璃的压缩强 度具有应变率效应,且与试件表面粗糙度有关,剪应力的引入会降低玻璃强度。在数值模拟方面, Zhang等<sup>[7]</sup> 采用 JH-2 模型描述玻璃的本构关系,并修正了材料参数,通过将有限元数值模拟与实验结 果相对比,验证了模型的准确性;研究结果表明,改进的 JH-2 模型能较好地反映退火钠钙玻璃的性能, 并较好地预测玻璃在冲击载荷作用下的破坏行为。Sun等<sup>[8]</sup> 采用显式有限元分析方法,基于连续损伤 力学(CDM)的本构模型,描述了玻璃的初始破坏和随后的刚度降低,研究了动态压缩和剪切载荷对玻 璃失效破坏模式的影响。臧孟炎等<sup>[9–10]</sup> 通过离散元法(DEM)对夹层玻璃的冲击破坏过程进行了数值 模拟,获取了在不同情况下冲击子弹的最大冲击力和贯穿能。

传统的有限元方法作为一种连续力学方法被广泛应用于分析固体力学和结构力学问题,取得了良 好的效果,然而在分析某些非连续性问题时却存在一些局限性,特别当涉及断裂(裂纹萌生、裂纹扩

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-03-07
基金项目:国家自然科学基金(11390361)
作者简介:马棋棋(1993-),男,硕士研究生,主要从事冲击动力学研究.E-mail: 737488513@qq.com
通信作者:郑宇轩(1986-),男,博士,副教授,主要从事冲击动力学研究.E-mail: zhengyuxuan@nbu.edu.cn

展、具有复杂裂纹模式的分支裂纹)问题时,往往需要对已有单元进行删除,或者通过加入特殊单元 (如内聚力单元)实现材料分离。离散元方法是美国学者 Cundall<sup>[11]</sup>在 1971 年基于分子动力学原理首次 提出的,其基本思想是把不连续体分离为刚性元素的集合,将连续介质处理为相互接触的毫米或微米 量级颗粒,考虑颗粒之间法向和切向的连接键,通过这些连接键的刚度、强度以及摩擦特性,以表征连 续体的宏观弹性、拉伸/剪切强度、破坏特性。由于连续介质被当作颗粒的聚合,因此离散元方法十分 适合求解大位移和非线性问题。PFC(Particle Flow Code)是一款基于离散元的商用软件,在模拟玻璃等 脆性材料的裂纹扩展、冲击破坏等方面具有明显的优势<sup>[12]</sup>。

本研究通过离散元方法模拟和分析脆性材料在动态载荷作用下的压缩破碎现象。首先建立一个 分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)数值实验平台,模拟冲击导致弹性应力波在杆 中的传播、透射和反射特性;在此基础上对圆柱和圆盘形状的有机玻璃试件进行数值冲击实验,模拟和 分析试件的变形、破坏特性及其动态力学行为;并与已发表的圆柱试件动态压缩实验现象进行比较,分 析破坏规律和导致破坏的主要因素;最后,进一步分析圆盘试件的压缩破坏现象,为进行巴西圆盘劈裂 实验提供参考。

# 1 SHPB 数值模型实验平台

参考文献 [13-14], 通过离散元构建二维 SHPB 结构模型, 如图 1 所示。子弹长度 L<sub>s</sub>=90 mm, 入射杆 长度 L<sub>i</sub>=300 mm, 透射杆长度 L<sub>t</sub>=150 mm, 圆杆直径 D=12.7 mm。圆柱形无机玻璃试件位于入射杆和透 射杆之间, 其尺寸为Ø8 mm×8 mm, 为了使试件与杆间能更好地接触, 分别将试件左右两侧与杆接触处 的边界颗粒细化两层, 并与杆中的细化颗粒对齐, 如图 1 中左侧插图所示。圆柱试块由 28 838 个圆形 颗粒组成, 包括两侧细化对齐颗粒各 320 个(共 640 个)以及内部通过随机生成的 28 198 个颗粒; 随机 生成颗粒的半径和位置在限定范围内服从均匀分布。在接触方面: 玻璃试件两端与左右杆之间、子弹 与入射杆之间均采用线性接触模型, 以模拟接触而不粘结的接触状态; 子弹、入射杆、玻璃试件、透射 杆的内部均采用粘结接触中的 Flat-Joint 模型, 以模拟材料的整体粘结状态。将子弹与入射杆接触处的 边界颗粒也进行细化对齐处理。此外, 在入射杆和透射杆上均设置一定数量的测量圆: 杆上测量圆的 半径均为 4 mm, 且测量圆 1 和测量圆 2 的圆心分别距离玻璃试件中心点 51 和 125 mm, 测量圆 2 ~测量 圆 5 的圆心之间分别相距 15 mm, 以此监测应力波的传播情况, 如图 1 所示。



Fig. 1 Structure of discrete element model of SHPB

采用与三维无机玻璃模拟相同的标定方式<sup>[15]</sup>,利用无机玻璃的宏观力学参数,以及 Hopkinson 压杆 (材料为钢)的弹性模量和泊松比进行模型微观参数的标定: Hopkinson 压杆的杨氏模量、密度、泊松比 分别为 210 GPa、7800 kg/m<sup>3</sup>、0.3;由于压杆在波传播过程中处于弹性状态,且离散元在标定弹塑性材料 的强度方面比较复杂,为节约计算成本,将颗粒间的拉伸和剪切强度赋予极大值(1 TPa)<sup>[14]</sup>;玻璃的宏 观参数取自文献 [16–17],综合考虑标定结果、数值模拟精确性及计算量,选取如表 1 所示的无机玻璃 和 Hopkinson 压杆的主要细观参数;标定所得的玻璃材料宏观参数与文献数据<sup>[16–17]</sup>的比较如表 2 所示 (其中  $\rho_e$  为等效密度,  $K_{le}$ 为断裂韧性),数值模拟得到的材料压缩强度  $\sigma_e$ 和拉伸强度  $\sigma_t$ 分别为 610 MPa 和 47 MPa,杨氏模量 *E* 为 72.5 GPa, 泊松比 v为 0.17, 抗弯强度 $\sigma_b$ 为 67.5 MPa。

Table 1 Main incroscopic parameters of discrete element model in numerical experiments of SHFB											
Material	Effective modulus of linear contact/ GPa	Normal-to-shear stiffness ratio of linear contact	Minimum radius of particles/mm	Size ratio of maximum and minimum particles	Porosity						
Steel bar	190	4.0	4.0 0.100		0.15						
Inorganic glass	63	2.1	0.026	1.5	0.10						
Material	Effective modulus of flat-joint contact/ GPa	Normal-to-shear stiffness ratio of flat-joint contact	Tensile strength of flat-joint contact/ GPa	Shear strength of flat-joint contact/GPa	Density of particles/ (kg·m <sup>-3</sup> )						
Steel bar	190	4.0	1000	1000	8800						
Inorganic glass	63	2.1	0.073	0.35	2444						

表 1 SHPB 数值实验的离散元模型的主要微观参数

表 2 石英玻璃宏观参数的数值模拟结果与文献数据的对比

Table 2 Macroscopic parameters of quartz glass: comparison of simulation results with ones published in the literatures

Method	E/GPa	$\rho_{\rm e}/(\rm kg{\cdot}m^{-3})$	$\sigma_{ m c}/{ m MPa}$	$\sigma_{\rm t}/{ m MPa}$	$\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$	$K_{\rm Ic}/({\rm MPa}\cdot{\rm m}^{1/2})$	ν
DEM simulation	72.5	2200	610	47	67.5	0.96	0.17
Refs.[16–17]	72.5	2200	500-1100	49	60-70	0.81	0.17

利用 SHPB 对脆性材料进行高速冲击压缩 时,为了避免试件端面破损,尽可能达到恒定应 变率加载[18],学者们提出了很多有效的方法,包 括采用双试件、添加紫铜片整形入射波形、使用 特殊形状子弹打击等[19-20],均可将入射矩形波转 变为带有斜坡的三角形或梯形波,延长了上升 沿,增加了试件的有效加载时间。本研究采用将 子弹做成锥形的方法,以达到试件恒应变率加载 的目的。子弹的具体尺寸见图2。在空杆状态 (不插入试件)下,子弹以18m/s的速度由右至左 撞击入射杆后,在位置1~位置5产生应力波形, 如图3所示。可见,锥形子弹的撞击产生了接近 半正弦波的波形,峰值约为 570 MPa,上升沿和下 降沿均约为18 us,与同样长度的直杆子弹相比, 采用锥形子弹产生的波形上升沿和有效加载时 间都得到了延伸。自右向左,测量圆5、4、3、2、 1测得的各个位置的应力时程曲线均无明显的弥 散现象,且透射波和入射波的幅值基本一致,与



图 2 子弹的形状和尺寸







实验波形十分相似,由此可以判断所建立的 SHPB 系统模型基本可靠。

## 2 无机玻璃动态压缩过程数值模拟

在验证 SHPB 模型的合理性之后,模拟尺寸为Ø8 mm×8 mm的无机玻璃圆柱的冲击压缩实验。采用石英玻璃进行模拟,玻璃的主要参数列于表1。锥形子弹以18 m/s 的速度撞击入射杆,产生如图3 所示的入射波形对试件进行加载,玻璃试件与钢杆之间的摩擦系数设为0.1,所产生的入射波、反射波和透射波如图4 所示:锥形子弹撞击入射杆,在入射杆上产生向左传播的压缩应力波,至入射杆末端,应

力波一部分在交界面处反射回入射杆,一部分进入玻璃试件,对玻璃试样施加冲击载荷,从而达到动态 压缩的目的。从图 4 中可以观察到:反射波上有一个明显的平台段,意味着在此阶段试件处于近似恒 定应变率加载状态,经计算该应变率约为 700 s<sup>-1</sup>;反射波平台末端突然跳跃加强,此时对试件的加载尚 未结束,表明试件发生了脆性破坏,导致其承载能力突然下降,该破坏现象从透射波的下降时刻也能

在玻璃试件上设有一定数量的测量圆,中间测量圆的半径均为1.3 mm,左右测量圆与玻璃左右端面 相切,半径为0.4 mm,且3个测量圆圆心在同一水平线上,如图5所示,以此监测试件中的应力和应变变化。



图 6 显示玻璃圆柱试件在加载过程中应力 和应变率随应变的变化曲线,其中应力和应变率 通过分布在玻璃圆柱试件上的中间测量圆监测 得到,而应变则通过监测玻璃试件上最左、右两 排颗粒的相对位移与试件初始长度的比值得 到。从图 6 中可以看到:在加载的绝大部分时间 内,试件的应变率保持在 700 s<sup>-1</sup> 附近,基本达到 恒应变率加载状态。事实上,采用 SHPB 对脆性 试件进行加载时,应力波会在试件中多次来回反 射,直至应力平衡。为了检验 SHPB 测试的有 效性,引入试件内部应力不均匀系数*a*,其表达 式为

$$\alpha(t) = \frac{2[\sigma_1(t) - \sigma_2(t)]}{\sigma_1(t) + \sigma_2(t)} \tag{1}$$

式中:  $\sigma_1(t)$ 和 $\sigma_2(t)$ 分别为试件靠近入射杆和透射 杆接触面处的应力。由于左右测量圆的半径较 小,因此不考虑由此带来的时间误差。图 7 给出 了靠近入射杆和透射杆端面上的应力(试件上左 右测量圆监测得到)随时间变化关系,以及根据 (1)式计算得到的应力不均匀系数 $\alpha$ 。可以看出, 加载过程中试样两端面的应力时程曲线几乎重 叠,  $\alpha$ 在加载阶段基本维持在较低水平,说明在整



图 5 玻璃试样中测量圆的分布













个阶段玻璃试件基本保持应力平衡状态,从而验证了实验数据的可靠性。

看出。

### 2.1 无机玻璃试件的动态压缩失效过程及分析

# 2.1.1 圆柱的动态压缩失效过程

对无机玻璃在 SHPB 上测试的可行性验证 之后,下面对无机玻璃在高应变率加载下的失 效破坏过程进行探讨。图 8 给出了摩擦系数 μ 为 0.1、应变率  $\varepsilon$  为 700 s<sup>-1</sup>时试件内部的应力时 程曲线,该曲线与图 7 所示的试件左右端应力 时程曲线的平均值一致。对应于每个特征时 刻,试件内部的裂纹演化和失效破坏形貌见图 9, 试件右端为入射杆,左端为透射杆。图 9(a)中 黑色和绿色分别表示拉伸裂纹和剪切裂纹, 图 9(b)中不同颜色代表大小不一的碎块。

由图 8 和图 9 可以得到:当 t=65.5 μs 时, 玻





璃试件中产生微裂纹, 左右两端面受力处以及上下自由表面处均有少许微裂纹产生, 此时玻璃试件尚 且完整, 并没有碎块产生; t=70.0 μs 时, 微裂纹的分布大致呈上下两个对称三角形, 如图 9 中粉红色阴影 部分以及箭头处所示, 且试件 4 个尖角处微裂纹密集, 已经产生小碎块; 随着加载进程的推进, 微裂纹 逐渐向左右两侧边界扩展, 当 t=72.5 μs 时, 在靠近上下自由面裂纹较密集处形成宏观裂纹, 如图 9 椭圆 处所示; t=77.0 μs 时, 在靠近两侧受力端以及上下自由表面处萌生新的裂纹形核, 相应地周边有较多小 碎块生成; t=80.5 μs 时, 玻璃试件上下侧形成多个条带状碎片, 逐渐剥离试件主体, 即轴向劈裂(Axial Splitting); 当 t=86.8 μs 时, 原先生成的轴向长条碎块进一步破碎, 形成更多更小的碎块, 伴随大量剪切 断裂, 此时试件已经完全丧失承载能力。模拟结果与已有文献报道的实验现象<sup>[1]</sup>完全一致。





#### 2.1.2 无机玻璃失效机理

在玻璃试件的动态压缩过程中,因左右端面为直接受力面,而玻璃外层对内层有围压作用,相对于 内层较薄弱,故微裂纹先从左右两端面受力处以及上下自由表面附近部位产生。由于应力集中的影 响,尖角处微裂纹较密集,更易形成小碎块。在人/透射杆与玻璃试件接触面之间的摩擦力以及纵向压 力的双重作用下,加载初期微裂纹呈上下对称的三角状分布;随着加载的进行,应力水平提高,纵向压 应力逐渐增大,开始对整个加载过程起主导作用,使得微裂纹逐渐向左右受力端面扩展。受泊松效应 的影响,在压缩过程中,纵向压应力产生横向张应力;由于拉伸强度远小于压缩强度,在横向张应力的 作用下,玻璃试件内会局部形核,产生宏观裂纹扩展源,生成沿轴向扩展的宏观裂纹。随着宏观裂纹的 增多,进一步交错贯通,导致试件的承载能力不断降低,最终产生大量剪切裂纹而失稳破坏。

## 2.2 无机玻璃动态力学行为的应变率效应

在分析了无机玻璃的失效破坏模式之后,通过改变子弹的撞击速度,研究不同应变 率下无机玻璃的动态力学行为和破坏强度。 图 10 给出了子弹撞击速度分别为 18、24、 29 和 33 m/s 时不同应变率下无机玻璃试件的 应力-应变曲线。从图 10 中可以发现:无机玻 璃在动态压缩作用下表现为典型的脆性材 料;曲线的上升沿基本重叠在同一直线上,其 斜率表现出的杨氏模量与材料在准静态下的 数值基本一致;试件在载荷压力达到峰值时 迅速破坏,峰值压力(即抗压强度)具有明显 的应变率效应,在 690、875、1125 和 1250 s<sup>-1</sup> 应变率下,压缩强度分别为 1.20、1.27、1.39





和 1.41 GPa, 比准静态强度 0.61 GPa 显著提高; 此外, 试件破坏后应力-应变曲线的下降沿斜率也随着应 变率的升高而提高, 表示试件破坏前积累的能量快速释放。图 10 还给出了试件在峰值应力下的破坏 形态, 应变率越高, 破坏点内部裂纹越密集, 剪切裂纹越多(插图中红色虚线部分), 产生的碎块越小。

## 2.3 端面摩擦和泊松比对压缩破坏过程的影响

为了进一步了解无机玻璃材料的冲击压缩破坏过程,通过调整微观参数,研究了试件与 SHPB 之间的摩擦力以及试件泊松比对实验结果的影响。

#### 2.3.1 端面摩擦力对失效破坏模式的影响

从前面讨论可知,试件的端面摩擦效应 对其破坏模式有较大的影响,为了研究端面 摩擦力对无机玻璃动态压缩过程的影响,设 定端面摩擦系数 μ=0,模拟相同子弹撞击速 度下试件的破坏过程。图 11为无摩擦时试件 内部的真实应力时程曲线,其中标注了主要 特征时间,相应时刻玻璃试件的破坏形貌如 图 12 所示。

从图 11 和图 12 可以看出,端面摩擦系数为零时试件的失效破坏模式与常摩擦情况明显不同:在加载初期,由于只受纵向压力的作用,且左右端面为直接接触面,故裂纹主要





从左右两个受力端面产生(时刻1);随着纵向应力水平的提高,由于泊松效应产生了横向张应力,随着 横向张应力的增大,左右端面丛生的裂纹迅速向玻璃中部扩展(如图12中红色箭头所示,时刻2);受横 向张应力的进一步影响,在试件薄弱处微裂纹逐渐形核,形成局部宏观裂纹,且局部宏观裂纹不仅在靠 近无机玻璃与压杆左右接触面处产生,也在无机玻璃内部产生(如图12中白色椭圆所示,时刻3);在时 刻4,生成的局部宏观裂纹在横向张应力的影响下,逐渐沿纵向左右扩展,中间宏观裂纹首先贯通,分成 上下两个碎块,即已经出现轴向劈裂(Axial Splitting);在时刻5,试件薄弱部位不断有新的宏观裂纹产 生并向两侧扩展;在时刻6~时刻8,宏观裂纹增多,进一步交错贯通,导致试件的承载能力不断降低, 最终产生大量剪切裂纹而失稳破坏。模拟现象与在端面润滑情况下的实验现象基本一致<sup>[3,6]</sup>。

#### 2.3.2 材料泊松比对失效破坏模式的影响

修改材料的微观参数,使其宏观泊松比 v≈0,其他力学指标不变,模拟试件的压缩破碎过程,结果

044101-6



图 12 无摩擦时试件内部的破坏模式

Fig. 12 Evolution of internal damage process inside a specimen without the boundary friction

如图 13 所示。可见, $\nu \approx 0$ 时的失效破坏模式与 上述破坏模式有较大不同,此时无机玻璃试件的 横向位移不大,弱化了端面摩擦力对材料的影 响,使得初期微裂纹分布不再呈现出三角区形 状,而是在试件各部位均有较多分布。与此同时, 试件横向惯性效应也大大削弱,其破坏模式与  $\mu = 0$ 时不同,不会产生明显的横向张应力使得 裂纹源向左右端面扩展并在试样内部贯穿,产生 碎块;裂纹更多地沿斜向呈 45°角扩展,伴随拉伸



图 13  $\nu \approx 0$  时材料的失效破坏演化 Fig. 13 Evolution of material failure when  $\nu \approx 0$ 

裂纹与剪切裂纹的产生,材料逐渐失效破坏。由此验证了泊松比是影响横向张应力产生的原因之一。

#### 2.3.3 摩擦力和泊松比对测试压缩强度的影响

通过分布在无机玻璃试样上测量圆,测得 上述 3 种工况下的应力时程曲线,如图 14 所 示。在此 3 种计算条件下,试件的应变率基本 一致,约为 700 s<sup>-1</sup>。从图 14 可以观察到以下趋 势:(1)在正常泊松比(v=0.17)情况下,端面摩 擦力的存在将显著抑制试件两端起始裂纹的扩 展,从而改变破坏模式,提高动态压缩强度; (2) 泊松比对材料破坏模式有较大影响,若v=0, 则试件内部发生大量剪切断裂,形成剪切网络, 试件以剪切破碎形式失去承载能力,其宏观压 缩强度介于上述两种情况之间。

本研究只针对有限个模型进行了初步分 析。事实上,由于每个模型的建立可能导致颗 粒之间的构型发生随机变动,计算结果会出现







一定程度分布,因此有必要对每种算例进行系统的、更详细的参数分析,以便排除随机分散的影响。

## 3 无机玻璃动态劈裂破坏过程数值模拟

在成功模拟无机玻璃动态压缩过程之后,为揭示无机玻璃在巴西圆盘试验时的拉伸特征以及所建 立 SHPB 平台的可靠性,采用颗粒流软件 PFC<sup>2D</sup>,基于上述已建立的 SHPB 结构,模拟了无机玻璃的动态 劈裂破坏过程。 无机玻璃巴西劈裂 SHPB 离散元模型结构如图 15 所示。无机玻璃圆盘半径 R=4.05 mm,为了与现实 实验相对应,同时更好地模拟圆盘劈裂效果,分别将圆盘左右两边割去 0.05 mm,形成两个端面平台,且采 用与动态压缩模拟相同的处理方法,在端面平台部位均进行一层颗粒细化。模拟中,无机玻璃圆盘由 23 622 个圆形颗粒组成,包括两侧细化对齐颗粒各 100 个(共 200 个)、内部通过随机生成的颗粒 23 422 个。



图 15 SHPB 离散元模型结构 Fig. 15 Structure of discrete element model of SHPB

图 16 为通过模拟得到的在子弹撞击速度 v<sub>0</sub>=9 m/s 时无机玻璃动态巴西劈裂破坏过程,以及对应的 压力时程曲线,这里压力 F(t)的数值来自与入射杆和透射杆相邻的端面记录数据的平均值,以压缩为 正。从图 16 可以看出:随着加载进行,玻璃圆盘颜色更新,说明有碎块生成(不同颜色代表着不同的碎 块);裂纹从玻璃圆盘的中间位置开始起裂,系由于竖直方向的拉应力将其拉裂,随着加载的进行,裂纹 逐渐向左右两侧扩展;拉伸裂纹贯通之后,圆盘承受的压力达到峰值 775 kN(圆盘的厚度设为 1,单位 m, 因此直接给出的载荷幅值读数很大);圆盘承受的压力达到峰值之后发生破坏,盘内应力迅速卸载,由 于左右两侧压力的持续作用,致使圆盘产生周向拉应力,最终将圆盘外侧拉裂,在圆周处产生向内扩展 的微裂纹;随着加载的进一步进行,从劈裂过程中明显观察到圆盘被分成上下两个不同颜色的碎块。 图 16 所给出的玻璃圆盘动态劈裂破坏模式与实验现象<sup>[21]</sup>基本一致。





对构筑的巴西圆盘试件继续以12、14、16和18 m/s的子弹冲击速度进行加载,获得了试件两端的 平均压力时程曲线,如图17 所示。随着撞击速度的提升,玻璃圆盘所受的压力时程曲线前移,表明对 试件的加载速率提高;相应地,试件所承受的最大加载压力也随之增大,表明试件强度提高。图17 中 还给出了峰值压力点所代表的破坏时刻圆盘的破坏形貌,在所有加载速度下,巴西圆盘试件都发生中 心开裂,且随着加载速度的提高,盘中的裂纹更多、更密集。

在巴西圆盘实验中,试件内部沿横向的拉伸应力 $\sigma_1$ 和沿轴向的压缩应力 $\sigma_1$ 按照下式计算

$$\begin{cases} \sigma_{t}(t) = \frac{2F(t)}{\pi DL} \\ \sigma_{1}(t) = -\frac{6F(t)}{\pi DL} \end{cases}$$
(2)

式中: F(t) 为轴向加载力, 以压缩为正; 圆盘直径 D=8.1 mm, 试件厚度 L=1(单位)。在巴西圆盘实验中,

试件实际上处于轴向压缩、横向拉伸的双轴应力状态。作为一个估计值,本研究根据加载速率计算巴 西圆盘试件的横向拉伸应变率 *ɛ*,即

$$\dot{\varepsilon}_{t}(t) = \frac{\dot{\sigma}_{t}}{E} = \frac{2\dot{F}(t)}{\pi E D L}$$
(3)

式中:杨氏模量 *E*=72.5 GPa, *ò*<sub>1</sub>为横向应力加载率,按照图 16(a)和图 17 中压力时程曲线加载段的平均 斜率计算。综合图 16(a)和图 17 的结果,得到拉伸应变率为 97、148、160、168 和 182 s<sup>-1</sup> 时试件的劈裂 强度分别为 61.4、76.7、78.2、81.0 和 82.5 MPa。

基于准静态时无机玻璃的抗压强度(610 MPa)和抗拉强度(47 MPa),获得了无机玻璃压缩强度与 拉伸强度的动态增强因子(DIF),其与应变率之间的关系如图 18 所示。可见,当 *ἐ*≈1000 s<sup>-1</sup> 时,无机玻 璃的抗压强度达到准静态时的 2 倍;而当*ἐ*≈100 s<sup>-1</sup> 时,无机玻璃的抗拉强度相较于准静态时提升了 近 25%。



图 17 不同冲击速度下巴西圆盘试件的加载压力时程曲线 Fig. 17 Pressure histories of the specimens under different impact velocities





#### 4 结 论

基于离散元算法,使用颗粒流软件 PFC<sup>2D</sup> 建立了 SHPB 的数值实验平台,通过调整子弹形状产生不同类型的入射波,对不同形状的脆性材料试件进行压缩破碎实验的数值仿真。通过对二维情况下压杆和石英玻璃微观参数的标定,建立了与宏观参数相对应的微观参数数据库,采用锥形子弹撞击方式实现了 SHPB 对无机玻璃圆柱试件的应力均匀性及恒应变率加载检验。在此基础上模拟了无机玻璃圆柱试件在不同应变率下的动态压缩力学行为,与已发表的实验结果进行对比,验证了模拟结果的准确性。进一步研究了端面摩擦系数和材料泊松比对试件失效模式和宏观压缩强度的影响。数值模拟结果表明:

(1)无机玻璃材料在动态压缩下表现为典型的脆性材料,其抗压强度随应变率的提高而显著上升, 其杨氏模量对应变率不敏感;

(2)圆柱形试件在动态轴向压力作用下,初期由于压力和端面摩擦力的作用,形成三角状分布微裂 纹,随着加载水平的提高,由于横向惯性效应产生张力,导致微裂纹沿轴向贯通扩展,试件出现轴向劈 裂,由外向内逐层剥落,承载能力降低,最终产生大量破碎;

(3)端面摩擦的变化将影响无机玻璃的动态破坏过程和压缩强度,如果没有端面摩擦,微裂纹在加载初期从轴向受力端面向试件中间扩展,无明显的三角区,随后由于横向张应力促使微裂纹沿纵向融合扩展,导致轴向劈裂,摩擦力约束了轴向裂纹的发展,使得试件的表观压缩强度增加;

(4)材料的横向泊松效应对试件的破坏模式有显著影响,泊松比为零时,材料的横向位移和端面摩

第33卷

擦力不会产生,使得初期微裂纹并不呈现三角区形状,与此同时试件没有横向惯性效应,不会产生明显的横向张应力;

(5)使用建立的 SHPB 数值实验平台进行了无机玻璃巴西圆盘数值实验,揭示了圆盘中心开裂和断裂演化特征,以及劈裂拉伸强度的应变率相关性,为今后开展实验研究提供支持。

## 参考文献:

- ZHANG X, ZOU Y, HAO H, et al. Laboratory test on dynamic material properties of annealed float glass [J]. International Journal of Protective Structures, 2012, 3(4): 407–430.
- [2] PERONI M, SOLOMOS G, PIZZINATO V, et al. Experimental investigation of high strain-rate behaviour of glass [C]// Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2011, 82: 63–68.
- [3] 王振,张超,王银茂,等. 飞机风挡无机玻璃在不同应变率下的力学行为 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 295–301.
   WANG Z, ZHANG C, WANG Y M, et al. Mechanical behaviours of aeronautical inorganic glass at different strain rates [J].
   Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 295–301.
- [4] NIE X, CHEN W W, WERESZCZAK A A, et al. Effect of loading rate and surface conditions on the flexural strength of borosilicate glass [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2009, 92(6): 1287–1295.
- [5] NIE X, CHEN W W. Rate and surface treatment effect on the strength of boro-glass [C]//11th International Congress and Exhibition on Experimental and Applied Mechanics. Orlando, Florida: Society for Experimental Mechanics, 2008: 122–123.
- [6] NIE X, CHEN W W, SUN X, et al. Dynamic failure of borosilicate glass under compression/shear loading experiments [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2007, 90(8): 2556–2562.
- [7] ZHANG X, HAO H, MA G. Dynamic material model of annealed soda-lime glass [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 77: 108–119.
- [8] SUN X, LIU W, CHEN W, et al. Modeling and characterization of dynamic failure of borosilicate glass under compression/shear loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(2): 226–234.
- [9] 臧孟炎, 李军, 雷周. 基于 DEM 的两层结构夹层玻璃冲击破坏特性研究 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9(3): 549–553. ZANG M Y, LI J, LEI Z. Study on impact fracture behavior of Bi-layer laminated glass based on DEM [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(3): 549–553.
- [10] 臧孟炎, 雷周, 尾田十八. 汽车玻璃的静力学特性和冲击破坏现象 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 268–272.
   ZANG M Y, LEI Z, ODA J. Static characteristic and impact fracture behavior of automobile glass [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 268–272.
- [11] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system [C]//Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics, 1971: 129–136.
- [12] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329–1364.
- [13] CHEN W W, SONG B. Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2011: 37–49.
- [14] LI X, ZOU Y, ZHOU Z. Numerical simulation of the rock SHPB test with a special shape striker based on the discrete element method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1693–1709.
- [15] 熊迅, 李天密, 马棋棋, 等. 石英玻璃圆环高速膨胀碎裂过程的离散元模拟 [J]. 力学学报, 2018, 50(3): 622-632.
   XIONG X, LI T M, MA Q Q, et al. Discrete element simulations of the high velocity expansion and fragmentation of quartz glass rings [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(3): 622-632.
- [16] 王玉芬, 刘连城. 石英玻璃 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
   WANG Y F, LIU L C. Quartz glass [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [17] 王承遇, 卢琪, 陶瑛. 玻璃的脆性 (一) [J]. 玻璃与搪瓷, 2011, 39(6): 37-43.
   WANG C Y, LU Q, TAO Y. Brittleness of glass [J]. Glass & Enamel, 2011, 39(6): 37-43.
- [18] 宋力, 胡时胜. SHPB 测试中的均匀性问题及恒应变率 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 5(3): 207-216.
   SONG L, HU S S. Stress uniformity and constant strain rate in SHPB test [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 5(3):

207-216.

[19] 邓志方,黄西成,谢若泽. SHPB 实验入射波形分析 [C]//中国计算力学大会, 2010.

DENG Z F, HUANG X C, XIE R Z. Analysis of incident wave in SHPB experiments [C]//Chinese Conference on Computational Mechanics, 2010.

- [20] 陶俊林,田常津,陈裕泽,等. SHPB 系统试件恒应变率加载实验方法研究 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 413-418.
   TAO J L, TIAN C J, CHEN Y Z, et al. Investigation of experimental method to obtain constant strain rate of specimen in SHPB
   [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5): 413-418.
- [21] SHEIKH M Z, WANG Z, DU B, et al. Static and dynamic Brazilian disk tests for mechanical characterization of annealed and chemically strengthened glass [J]. Ceramics International, 2019, 45(6): 7931–7944.

# Discrete Element Simulations of Dynamic Compression Failure of Inorganic Glass in SHPB Tests

MA Qiqi, XIONG Xun, ZHENG Yuxuan, ZHOU Fenghua

(MOE Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Based on the discrete element algorithm (DEM), a numerical split Hopkinson pressure bar (SHPB) platform is established by the mean of particle flow code software (PFC<sup>2D</sup>), and the feasibility of the system has been verified. The failure mode and the dynamic compressive strength of an inorganic glass specimen at different strain rates are investigated. The numerical simulation shows that the inorganic glass exhibits typical brittle characteristics during dynamic compression, and its compressive strength is significantly affected by the strain rate. The Young's modulus, however, is strain rate insensitive. The failure mode of the specimen is affected by the boundary friction as well as the Poisson ratio. In the case of frictional contact, the initial micro-cracks within the specimen are distributed in a triangular zone due to the combined effect of longitudinal pressure and frictional force. With the increase of the longitudinal stress, the transverse tensile stress creates the longitudinal cracks, resulting in the axial splitting. The failure mode in the case of frictionless contact differs from the frictional case, in which no triangular crack zone exists. Moreover, the value of Poisson ratio affects the failure mode as it results in the transverse tensile stress during dynamic loading. Numerical simulations of dynamic Brazilian compression are also conducted to support future experimental works. It shows that Brazilian disk starts failure at the center in the moderate strain rate and the macroscopic splitting tensile strength is strain rate dependent.

**Keywords:** inorganic glass; discrete element method; dynamic compression; failure mode; Brazilian test; rate dependency of strength