基于电磁Hopkinson杆的无机玻璃动态力学性能测试技术

江斌¹, 胡嘉奕¹, 郭亚洲^{1,2*}, 李玉龙^{1,2,3}

1. 西北工业大学航空学院, 西安 710072;

2. 西北工业大学冲击动力学及工程应用陕西省重点实验室, 西安 710072;

3. 西北工业大学民航学院, 西安 710072

* 联系人, E-mail: guoyazhou@nwpu.edu.cn

2020-03-03 收稿, 2020-03-21 修回, 2020-03-23 接受, 2020-03-24 网络版发表

国家自然科学基金(11922211, 11527803, 11672354, 11832015)和高等学校学科创新引智计划(BP0719007)资助

摘要 无机玻璃作为典型的脆性材料, 其失效应变极小, 因而对其进行动态力学性能测试一直是冲击动力学和实验力学领域的难点问题. 本文提出一种全新的实验技术——电磁分离式Hopkinson压杆(electromagnetic split Hopkinson pressure bar, ESHPB)来解决这一难题, 并利用钠钙硅酸盐玻璃进行了验证. 实验结果表明, 与单向冲击加载相比, 采用双向对称ESHPB能够使玻璃试样更快地实现应力平衡和恒应变率变形, 从而获得更为精确有效的动态力学性能数据. 通过与准静态实验结果的对比发现, 该种玻璃材料在冲击载荷下压缩强度显著增大, 呈现出很强的应变率效应. 此外, 本文还利用超高速相机原位实时观测了玻璃试样的变形和破坏过程. 变形图像表明, 当裂纹不断成核、扩展并汇聚至充满整个试样时, 试样完全失去载荷承受能力.

关键词 电磁Hopkinson杆, 玻璃, 应变率效应, 应力平衡, 恒应变率

玻璃材料具有诸多优越性能, 如光学透明度好、重量轻、生产制造成本低以及抗冲击性能高等, 因而被广泛应用于各种军事和民用领域^[1]. 在使用过程中, 这些玻璃结构常常会受到冲击型载荷的作用, 为了更好地指导其结构设计, 需要对玻璃材料的动态力学性能进行深入研究.

对玻璃材料力学性能的研究主要集中在准静态领域, 目前也有一些学者对玻璃在不同应变率范围内的力学行为进行了实验研究. Sheikh等人^[2]利用机电万能试验机和改进的分离式Hopkinson压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)测试了退火和化学强化铝硅酸盐玻璃的准静态和动态压缩性能, 结果表明退火玻璃的压缩强度在准静态范围内即具有应变率敏感性, 而化学强化玻璃由于其表面存在高强度压缩层, 使其准静态压缩强度几乎不随应变率变化, 但在动态加载情形下

两种玻璃材料的压缩强度都随着应变率的提高而显著增大. Zhang等人^[3]利用改进的SHPB对退火浮法玻璃的动态压缩性能进行了实验研究, 结果表明试样的压缩强度具有应变率效应, 但其压缩弹性模量几乎不随应变率变化. Peroni等人^[4]对高纯度光学玻璃力学性能的测试结果表明, 该光学玻璃的压缩强度和弹性模量都没有明显的应变率效应. Daryadel等人^[5]对4种商业玻璃进行了SHPB实验, 结果表明在相同条件下, 硼硅酸盐玻璃相比于其他三种玻璃有着最高的破坏应变、压缩强度和能量吸收率. 此外, 他们还对表面抛光水平如何影响硼硅酸盐玻璃的压缩性能进行了研究, 并得出了“表面抛光程度越好, 试样的能量吸收率越高”的结论. Nie等人^[6]利用改进的SHPB对斜棱柱形硼硅酸盐玻璃进行了动态复合压-剪加载实验, 结果发现玻璃试样的等效破坏强度随着剪切分量比例的增加而减小, 实

引用格式: 江斌, 胡嘉奕, 郭亚洲, 等. 基于电磁Hopkinson杆的无机玻璃动态力学性能测试技术. 科学通报, 2020, 65: 3475–3484

Jiang B, Hu J Y, Guo Y Z, et al. A novel testing technique for dynamic mechanical properties of inorganic glass by electromagnetic Hopkinson bar (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3475–3484, doi: 10.1360/TB-2020-0223

验中记录的高速图像表明裂纹沿着试样轴向扩展,而非沿着加载方向扩展. Tan等人^[7]也采用改进的复合加载方式对钠钙玻璃进行了准静态和动态压-剪加载实验,结果表明钠钙玻璃的等效强度在很大程度上依赖于应变率和加载角度.

事实上,对于玻璃这类脆性材料来说,利用SHPB进行力学性能测试存在诸多难点,这也导致所测数据的有效性和可靠性常常难以得到保证,其中最典型的问题是应力平衡问题和恒应变率加载问题. 在常规的SHPB实验中,应力波是从试样的一端开始对其进行加载的. 在特定条件下,一般认为当应力波在试样中来回反射3~5次后^[8],试样两端的应力会达到平衡,在此之前的测试数据为无效数据. 应力平衡之前,试样中会存在一个累积变形,而玻璃等脆性材料的主要变形特点是它们的破坏应变非常小^[9],因此试样极易在达到应力平衡之前就发生破坏,这是脆性材料SHPB实验的最大难点. 此外,恒应变率加载问题也是脆性材料SHPB实验中的一个难点问题,实现恒应变率加载不仅可以消除试样的横向惯性效应^[10],还可以明确所测数据的应变率状态,更方便地应用于本构模型中. 因此,在脆性材料的SHPB实验中,常常采用脉冲整形技术以使试样较快地实现应力平衡状态和恒应变率变形^[11~22],但应用脉冲整形技术需要不断地进行尝试或事先进行复杂的数值计算才能确定合适的整形方案,并没有固定的标准或方法. 测试不同材料需用不同的整形技术,这给SHPB实验带来了很大的复杂性,在一定程度上制约了SHPB技术的推广.

针对以上问题,本文利用电子万能试验机和电磁分离式Hopkinson压杆(electromagnetic split Hopkinson pressure bar, ESHPB)对一种钠钙硅酸盐玻璃分别进行了准静态和动态单/双向压缩实验,以探究该种无机玻璃在不同应变率下的压缩力学性能以及双向加载技术对于脆性材料动态力学性能测试的优越性. 在动态实验过程中,还利用超高速相机进行原位实时观测,以捕获试样的裂纹萌生、扩展和破坏过程,并将高速图像和试样的力学响应联系起来,以更好地解释其动态破坏机理.

1 材料和方法

1.1 材料和试样

以便于高速相机拍照,进而观测材料的损伤演化过程,本实验所用的试样是棱长为4 mm的立方体形钠

钙硅酸盐玻璃,如图1所示,其基本物理特性为:密度 2500 kg/m^3 ,杨氏模量 75 GPa ,泊松比 0.23 . 对于玻璃这类脆性材料的压缩实验,试样端面必须具有良好的平整度和平行度以减小应力集中的影响,所以待试样切割完成后,用抛光纸对试样各面进行细致打磨以保证试样的精度.

1.2 实验设备和方法

本文的准静态压缩实验在电子万能试验机上进行. 实验过程中,以恒定速率加载以实现工程应变率为 10^{-3} s^{-1} 的加载条件,作用在试样上的压缩载荷通过试验机自带的载荷传感器记录;实验时使用硬质垫片,以降低压痕效应和保护压头. 动态实验(包含单向加载与双向加载实验)均在ESHPB上进行. ESHPB的基本结构和原理与常规的Hopkinson压杆类似,但其应力波是基于电磁能量转换原理产生的^[23]. 该装置的特点是可以将应力波的产生时间精确控制在几 μs 内,因此可以很容易地实现对试样的对称双向加载.

在单向压缩实验过程中,玻璃试样被夹在一对硬质垫块之间以降低压痕效应及防止玻璃碎片损伤杆端. 此外,为了降低试样和压杆之间的摩擦效应,实验前需在两者的接触面处涂抹少量凡士林. 若在单向加载过程中满足一定的假设和实验条件^[24],试样中的工程应力、工程应变和工程应变率历史可以分别表示为^[25]

$$\sigma_s = \frac{E_b A_b}{A_s} \varepsilon_T, \quad \dot{\varepsilon}_s = -\frac{2c_b}{L_s} \varepsilon_R, \quad \varepsilon_s = \int_0^t \dot{\varepsilon}_s d\tau, \quad (1)$$

式中, A_b 、 E_b 和 c_b 分别为弹性杆的横截面积、杨氏模量和弹性波速, A_s 和 L_s 分别为试样的初始横截面积和长度, ε_T 和 ε_R 分别为透射应变和反射应变.

图1 (网络版彩色)实验所用的立方体形玻璃试样
Figure 1 (Color online) Cubic glass specimens used in the tests

为了利用ESHPB进行单轴双向加载实验,需将两个完全相同的应力波发生器并联在同一个充电电路中,并同时安装在两根等长入射杆端,以产生两列完全一致的入射波,并从试样两端对其进行同步加载,双向加载实验的装置示意图如图2所示.实验过程中,玻璃试样也被夹在一对硬质垫块之间,并且在试样和压杆的接触面处涂抹了少量凡士林.在双向加载情形下,试样中的工程应力、工程应变和工程应变率历史可以分别表示为^[26]

$$\sigma_s = \frac{E_b A_b}{2A_s} (\varepsilon_{i1} + \varepsilon_1 + \varepsilon_{i2} + \varepsilon_2),$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{C_b}{L_s} (\varepsilon_{i1} - \varepsilon_1 + \varepsilon_{i2} - \varepsilon_2), \quad \varepsilon_s = \int_0^t \dot{\varepsilon}_s d\tau,$$

式中, ε_{i1} 和 ε_{i2} 表示两列入射波, ε_1 表示 ε_{i1} 的反射波与 ε_{i2} 的

透射波之叠加, ε_2 表示 ε_{i2} 的反射波与 ε_{i1} 的透射波之叠加.

在动态实验过程中,利用带有远心镜头的超高速相机来捕获试样的变形以及裂纹萌生、扩展和断裂过程.采用高亮点光源照明,超高速相机和点光源都通过粘贴在波导杆上的应变片触发,通过调整闪光灯的曝光时间和强度,获得高质量和高对比度的试样变形图像.此外,将超高速相机的反馈信号与数据采集系统相关联,以准确地将试样的应力历史与高速图像联系起来,深入研究其动态破坏过程.

2 结果与讨论

2.1 准静态压缩实验

准静态压缩实验在电子万能试验机上进行.实验

图2 (网络版彩色)动态双向加载装置示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of dynamic bidirectional loading set-up

过程中,通过控制压头速度实现工程应变率为 10^{-3} s^{-1} 的加载条件,三次重复性实验测得的工程应力-时间曲线如图3所示.可以看出,试样在破坏前呈现脆弹性响应特征,应力在大部分时间内都随时间线性增加,但在加载的早期阶段,应力-时间曲线上存在一段非线性段,这主要是受机器柔度和间隙的影响所致.当应力达到极限压缩强度时,试样发生破坏并立即失去承载能力.试样在应变率 10^{-3} s^{-1} 时的平均压缩强度约为 $(484 \pm 15) \text{ MPa}$.

2.2 动态单向压缩实验

动态单向压缩实验在ESHBP装置上进行,实验时采用4 mF的电容和1200 V的充电电压.从示波器上获得的典型原始波形如图4(a)所示,表明ESHBP产生的入射波波形本身具有一个近似线性的上升沿,其形状与脆性材料的透射波信号相似,因此无需使用脉冲整形技术即可使试样以近乎恒定的应变率变形,反射波上出现的平台即证实了这一结论.

前文已经提到,应力平衡是决定脆性材料Hopkinson杆实验数据有效的重要条件.在动态单向压缩实验中,可以通过动态应力平衡系数 $R(t)$ 来检查试样是否处于应力平衡状态, $R(t)$ 的定义如下^[27]:

$$R(t) = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{(\sigma_1 + \sigma_2)/2} \right| \times 100\%, \quad (3)$$

式中, σ_1 和 σ_2 分别为试样两端的应力.若从某一时刻开始 $R(t)$ 的值始终小于5%,就可以认为试样进入了动态应力平衡状态^[27].图4(b)显示了单向压缩实验中典型的动态应力平衡系数、应变率和试样应力随时间的变化曲线.可以看出,试样在被加载至约125 μs 后进入了

图3 准静态实验的应力-时间曲线

Figure 3 Stress-time curves of quasi-static tests

应力平衡状态,并且在约100 μs 达到了近似恒定的应变率,该应变率约为 300 s^{-1} .

满足动态应力平衡和恒应变率变形的5组单向压缩实验的应力-时间曲线如图5(a)所示.可以看出,此种玻璃试样在动态载荷作用下也表现出脆弹性响应特性,应力在大部分加载时间内也随时间线性增加,但与准静态加载情形类似,在加载的早期阶段,应力-时间曲线上也存在一段非线性段,其主要是入射波波形决定.一旦应力达到峰值(即压缩强度),试样的承载能力便完全消失,进而发生破坏.试样在应变率 300 s^{-1} 时的平均压缩强度约为 $(1265 \pm 58) \text{ MPa}$.

单向压缩实验过程中超高速相机拍摄的典型变形图像和对应的应力-时间曲线如图6所示,应力-时间曲线上标记的6个数字点分别对应于6张高速图像的拍摄时刻.为了便于分析,图中仅给出了试样部分,而且入

图4 动态单向压缩实验的原始波形(a)及动态应力平衡系数 $R(t)$ 、应变率和应力-时间曲线(b)

Figure 4 The original waveform (a) and the dynamic stress equilibrium factor $R(t)$, strain rate and stress-time curves (b) of dynamic unidirectional compressive tests

图5 动态单向压缩实验的应力-时间曲线(a)和动态双向压缩实验的应力-时间曲线(b)

Figure 5 Stress-time curves of dynamic unidirectional compressive tests (a) and dynamic bidirectional compressive tests (b)

图6 (网络版彩色)单向压缩实验中的玻璃试样变形破坏过程(a)和对应的应力-时间曲线(b)((a)中加载方向为从右向左)

Figure 6 (Color online) The deformation and fracture process of specimen during unidirectional compressive tests (a) and the corresponding stress-time curve (b) (the loading direction is from right to left in (a))

射杆位于试样右侧. 从试样的变形图像可以看出, 在应力波对试样进行加载的早期阶段, 试样还未产生任何裂纹. 随着加载的进行, 裂纹开始从试样的右下角产生(如图像2中虚线圆圈标记部分所示), 该时刻对应于应力-时间曲线上的数据点2, 可以看出此时试样仍处于应力上升阶段, 即试样还未失去承载能力. 在约102.5 μs 时刻, 该组裂纹扩展至试样的另一侧, 随后就几乎不再继续扩展. 与此同时, 在试样的入射端和透射端也开始萌生其他多组裂纹(如图像3和4中的虚线圆圈标记部分所示). 随着这些新裂纹在试样中不断成核、扩展和汇聚, 试样在约146.5 μs 时刻完全失去承载能力, 最终破碎成细粉颗粒. 高速原位观测表明, 此种玻璃在受到单向冲击载荷发生破坏的过程中, 裂纹的扩展不是恒速的, 也不是单调增加的. 事实上, Sheikh等人^[2]在退火铝硅酸盐玻璃的动态破坏过程中也发现了类似的现象, 这种裂纹减速甚至停止扩展的现象值得进一步

研究.

2.3 动态双向压缩实验

动态双向压缩实验与单向压缩实验一样, 在同一个ESHBP装置上进行, 不同的是它同时采用两组电磁波发生器, 每组发生器均采用4 mF的电容和800 V的充电电压. 粘贴在两根压杆中心处的应变片测得的典型原始波形如图7(a)所示. 可以看出, 实验中基本实现了对玻璃试样的对称加载, 具体表现为: (1) 应力波几乎同时到达试样; (2) 应力波形近乎完全重合. 虽然两列入射波峰值存在一定差异, 但峰值对实验结果的影响较小, 因为试样都是在入射波上升沿部分就已破坏.

动态双向实验中, 试样两端的应力、应变率及应力平衡系数 $R(t)$ 随时间的变化曲线如图7(b)所示, 表明试样在被加载至约30 μs 后进入了应力平衡状态, 并且在约80 μs 后达到了近似恒应变率加载, 该应变率约为

图7 动态双向压缩实验的原始波形(a)及试样两端应力、应变率及应力平衡系数 $R(t)$ -时间曲线(b)

Figure 7 The original waveform (a) and the stresses acted on the specimen ends, strain rate and stress equilibrium factor $R(t)$ -time curves (b) of dynamic bidirectional compressive tests

300 s^{-1} . 满足动态应力平衡和恒应变率变形的5组双向加载实验的应力-时间曲线如图5(b)所示. 从图5(b)可以看出, 钠钙硅酸盐玻璃材料在双向压缩条件下依然表现为脆弹性响应特性, 其平均压缩强度约为 $(1260 \pm 59) \text{ MPa}$.

双向压缩实验过程中超高速相机拍摄的典型变形图像和对应的应力-时间历史如图8所示, 应力-时间曲线上标记的6个数字点分别对应于6张高速图像的拍摄时刻. 类似地, 仅给出试样部分进行展示, 载荷沿水平方向. 从图8可以看出, 试样在双向加载下的破坏过程与图6所示的破坏过程类似. 在加载初期, 试样均匀变形而未产生任何裂纹. 随着加载的进行, 裂纹同样从应力集中最严重的边角处开始产生(如图像2中虚线圆圈标记部分所示), 但该组裂纹产生后并未得到充分的扩展就在试样的另一端开始有新裂纹成核了(如图像3中

虚线圆圈标记部分所示), 该组裂纹逐渐生长形成一个三角形破坏区域. 当不断有裂纹成核、扩展和汇聚至几乎充满整个试样时, 试样在约 $144 \mu\text{s}$ 时刻完全破坏, 碎成细粉颗粒.

2.4 讨论

2.4.1 应变率效应

将准静态实验结果与动态实验结果相比较可以发现, 当应变率从 10^{-3} s^{-1} 增加到 300 s^{-1} 时, 平均压缩强度由不足 500 MPa 增大到近 1.3 GPa , 提升了160%! 材料强度对应变率的依赖性可以用应变率敏感性指数来表征, 应变率敏感性指数的定义式为^[28]

$$m = \frac{\ln \sigma_d - \ln \sigma_s}{\ln \dot{\epsilon}_d - \ln \dot{\epsilon}_s}, \quad (4)$$

式中, σ 和 $\dot{\epsilon}$ 分别表示实验测得的平均压缩强度和平均工

图8 (网络版彩色)双向压缩实验过程中的试样变形破坏过程(a)和对应的应力-时间曲线(b)(a)中加载方向为水平双向加载)

Figure 8 (Color online) The deformation and fracture process of specimen during bidirectional compressive tests (a) and the corresponding stress-time curve (b) (the loading direction is horizontal bidirectional loading in (a))

程应变率,下标d和s分别表示动态加载和准静态加载。经计算,本文研究的钠钙硅酸盐玻璃材料应变率敏感性指数 $m \approx 0.08$ 。将本文玻璃的 m 值与退火铝硅酸盐玻璃的 $m \approx 0.02$ (应变率范围为 $2.5 \times 10^{-4} \sim 650 \text{ s}^{-1}$)^[2]、退火浮法玻璃的 $m \approx 0.05$ (应变率范围为 $1.33 \times 10^{-4} \sim 376 \text{ s}^{-1}$)^[3]和光学玻璃的 $m \approx 0.006$ (应变率范围为 $5 \times 10^{-4} \sim 1100 \text{ s}^{-1}$)^[4]相比可见,本文研究的钠钙硅酸盐玻璃材料的应变率效应非常显著。对于此类脆性材料应变率效应的解释,一般认为准静态加载速度低,试样有足够的时间从最薄弱处萌生裂纹并沿最弱路径扩展,而动态实验加载时间极短,裂纹萌生和扩展必须在更高的能量下才能发生,且裂纹密度也会比准静态的大,宏观上表现为准静态实验后的碎片是劈裂的柱状,而动态实验后的碎片是精细的粉末状。因此,随着加载速度的提高,玻璃试样会吸收更多的能量,导致压缩强度提高。

2.4.2 应力平衡与恒应变率加载

从图5和图8可以看出,当单向压缩和双向压缩实验的平均应变率相同时,本文所研究的钠钙硅酸盐玻璃的平均压缩强度也几乎相同,即压缩强度不明显依赖于加载方向。但由于双向压缩实验是从试样两端同时加载的,因此与传统的单向压缩实验相比,其加载过程会有一些差别,如试样在双向加载过程中可以更快地实现应力平衡和恒应变率变形。

对比图4(b)和图7(b)可以发现,两种加载方式中试样达到应力平衡和恒应变率的时间都不相同。以应力平衡为例,图4(b)中试样在被加载约125 μs 后两端应力之差才降到5%以下,即达到了应力平衡;而图7(b)中在双向加载时,试样被加载约30 μs 时两端应力之差就降

到了5%以下。事实上,对于单向加载来说,试样中应力值的最大差值源自试样与两杆接触的两个端面上,因此采用公式(3)来衡量应力平衡程度;而双向对称加载时,试样的端面与中心处的应力差值最大,因此如果仍然用公式(3),则会高估其应力平衡程度。由于试样中心处的应力无法实验测量,因此不能准确获得双向对称加载时的应力平衡时间。但是,经过一定简化后,可以理论推导出应力平衡时间与试样尺寸以及加载方式之间的联系。文献[29]中的推导表明,单向SHPB实验中应力平衡时间受到入射波波形和试样/波导杆波阻抗比值的影响。对于不同形式的入射脉冲(如矩形波、梯形波、坡形波等),其动态应力平衡系数 $R(t)$ 总体随无量纲数 k 的增大而降低($k = t/\tau_s$, t 为加载时间, τ_s 为应力波在试样中传播一次所需时间)。对于双向对称加载而言,可取试样一半进行分析,计算应力平衡时,试样长度取为单向时的1/2。在其他条件不变的情况下,达到应力平衡的 k 值不变,而所需时间 t 减小为单向加载时的1/2。再考虑到试样最小应力处(对称面)应力的增长来源于两个方向,相较于单向而言,应力增长速度更快,因而更容易达到与加载面处应力的平衡。事实上,前期关于塑性材料的数值分析结果表明^[30],双向对称加载 $R(t)$ 降到5%以下所需时间仅为单向加载的40%。表1列出了实验测得的单向加载应力平衡所需时间,平均约为107 μs ,由此可近似得出双向对称加载时应力平衡所需时间约为43 μs 。表1同时给出了两种加载方式达到恒应变率所需的时间,可以看出,双向对称加载同样更容易达到恒应变率。事实上,恒应变率加载这一条件相较于应力平衡来说更为宽松,这是由于一般材料的应变率效应并

表 1 试样实现恒应变率和应力平衡所需的时间^{a)}

Table 1 Time duration required for specimens to achieve constant strain-rate and stress equilibrium

实验类型	实验编号	恒应变率时间(μs)	平均恒应变率时间(μs)	应力平衡时间(μs)	平均应力平衡时间(μs)
单向压缩	01	100	101	125	107
	02	105		105	
	03	90		95	
	04	95		100	
	05	115		110	
双向压缩	01	80	83	-	43
	02	95		-	
	03	80		-	
	04	85		-	
	05	75		-	

a) 双向压缩时的平均应力平衡时间为计算近似值,其他数据都为实验测量值。“-”表示无数值

不显著,常常在应变率跨量级后才能显现出来。

在达到应力平衡和恒应变率之前,虽然能够采集到实验数据,但是该数据并不能准确反映出材料的真实响应。由图5可以看出,无论是单向还是双向加载,该种材料的总承载时间都在150 μs 左右。对于单向加载来说,满足应力平衡和恒应变率加载的时间是107 μs ,也就是说,整个加载期内超过2/3的数据是无效的,这就给后期的数据解读带来了极大困难,对于某些参数的计算(如弹性模量、失效应变等)会产生很大误差。而双向加载提前了应力平衡和恒应变率的时间,尤其是应力平衡条件的满足,可以获得更多有用数据,这对于脆性材料动态测试的准确性和有效性具有较大价值。

3 结论

本文利用ESHPB和电子万能试验机对钠钙硅酸盐

玻璃分别进行了动态单/双向和准静态压缩实验,通过对实验结果的分析可以得到以下几点结论:

(1) 当使用ESHPB测量钠钙硅酸盐玻璃材料的动态力学性能时,无需使用脉冲整形技术即可实现应力平衡和近似恒应变率加载,这为脆性材料的动态力学性能测试提供了一种更简便、易操作的实验技术。

(2) 采用双向对称加载ESHPB系统进行脆性材料的动态力学性能测试,相较于单向而言,可以缩短应力平衡和恒应变率等条件满足的时间,从而可以从实验结果获得更多有效信息,提升结果的准确性和可靠性。

(3) 本文研究的玻璃材料是一种典型的脆性材料,且具有明显的应变率效应。动态实验过程中,超高速相机拍摄的变形图像表明,当裂纹不断成核、扩展并汇聚至充满整个试样时,试样才完全失去承载能力并碎裂成粉末状,而准静态时试样则劈裂成长条状。

参考文献

- Patel P J, Gilde G A, Dehmer P G, et al. Transparent ceramics for armor and EM window applications. In: Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2000, 4102: 1-15
- Sheikh M Z, Wang Z, Suo T, et al. Dynamic failure of annealed and chemically strengthened glass under compression loading. *J Non-Cryst Solids*, 2018, 499: 189-200
- Zhang X, Zou Y, Hao H, et al. Laboratory test on dynamic material properties of annealed float glass. *Int J Protect Struct*, 2012, 3: 407-430
- Peroni M, Solomos G, Pizzinato V, et al. Experimental investigation of high strain-rate behaviour of glass. *Appl Mech Mater*, 2011, 82: 63-68
- Daryadel S S, Mantena P R, Kim K, et al. Dynamic response of glass under low-velocity impact and high strain-rate SHPB compression loading. *J Non-Crystall Solids*, 2016, 432: 432-439
- Nie X, Chen W W, Sun X, et al. Dynamic failure of borosilicate glass under compression/shear loading experiments. *J Am Ceram Soc*, 2007, 90: 2556-2562
- Tan S, Yao X, Long S, et al. Static and dynamic strength of soda-lime glass under combined compression-shear loading. *J Non-Crystall Solids*, 2019, 516: 14-25
- Parry D J, Dixon P R, Hodson S, et al. Stress equilibrium effects within Hopkinson bar specimens. *J Phys IV*, 1994, 4: 107-112
- Chen W, Song B. Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications. New York: Springer Science & Business Media, 2010
- Forrestal M J, Wright T W, Chen W. The effect of radial inertia on brittle samples during the split Hopkinson pressure bar test. *Int J Impact Eng*, 2007, 34: 405-411
- Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar. *Exp Mech*, 2002, 42: 93-106
- Song B, Chen W, Weerasooriya T. Quasi-static and dynamic compressive behaviors of a S-2 glass/SC15 composite. *J Compos Mater*, 2003, 37: 1723-1743
- Zhang Q B, Zhao J. Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2013, 60: 423-439
- Frew D J, Forrestal M J, Chen W. A split Hopkinson pressure bar technique to determine compressive stress-strain data for rock materials. *Exp Mech*, 2001, 41: 40-46
- Chen X, Wu S, Zhou J. Experimental and modeling study of dynamic mechanical properties of cement paste, mortar and concrete. *Constr Build Mater*, 2013, 47: 419-430
- Zou F, Fang Z, Xia M. Study on dynamic mechanical properties of limestone under uniaxial impact compressive loads. *Math Probl Eng*, 2016, 2: 1-11
- Li X B, Lok T S, Zhao J, et al. Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2000, 37: 1055-1060

- 18 Naghdabadi R, Ashrafi M J, Arghavani J. Experimental and numerical investigation of pulse-shaped split Hopkinson pressure bar test. *Mater Sci Eng-A*, 2012, 539: 285–293
- 19 Shemirani A B, Naghdabadi R, Ashrafi M J. Experimental and numerical study on choosing proper pulse shapers for testing concrete specimens by split Hopkinson pressure bar apparatus. *Constr Build Mater*, 2016, 125: 326–336
- 20 Chen X, Ge L, Zhou J, et al. Experimental study on split Hopkinson pressure bar pulse-shaping techniques for concrete. *J Mater Civ Eng*, 2016, 28: 04015196
- 21 Vecchio K S, Jiang F. Improved pulse shaping to achieve constant strain rate and stress equilibrium in split-Hopkinson pressure bar testing. *Metall Mat Trans A*, 2007, 38: 2655–2665
- 22 Lok T S, Li X B, Liu D, et al. Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate. *J Mater Civ Eng*, 2002, 14: 262–269
- 23 Nie H, Suo T, Wu B, et al. A versatile split Hopkinson pressure bar using electromagnetic loading. *Int J Impact Eng*, 2018, 116: 94–104
- 24 Li Z, Lambros J. Determination of the dynamic response of brittle composites by the use of the split Hopkinson pressure bar. *Compos Sci Tech*, 1999, 59: 1097–1107
- 25 Suo T, Fan X, Hu G, et al. Compressive behavior of C/SiC composites over a wide range of strain rates and temperatures. *Carbon*, 2013, 62: 481–492
- 26 Nie H, Suo T, Shi X, et al. Symmetric split Hopkinson compression and tension tests using synchronized electromagnetic stress pulse generators. *Int J Impact Eng*, 2018, 122: 73–82
- 27 Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar. *J Am Ceramic Soc*, 1994, 77: 263–267
- 28 Song Y Q, Cheng Y C, Wang X W. Mechanical meaning of strain-rate sensitivity index and criterion of it's measurement under tension condition (in Chinese). *Chin J Mech Eng*, 2000, 36: 33–38 [宋玉泉, 程永春, 王习文. 拉伸变形应变速率敏感性指数的力学涵义及其规范测量. 机械工程学报, 2000, 36: 33–38]
- 29 Wang L L. Foundations of Stress Waves (in Chinese). 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005 [王礼立. 应力波基础. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2005]
- 30 Nie H L, Shi X P, Chen C Y, et al. Data processing method for bidirectional-load split Hopkinson compression bar (in Chinese). *Explosion Shock Waves*, 2018, 38: 1–9 [聂海亮, 石霄鹏, 陈春杨, 等. 单轴双向加载分离式霍普金森压杆的数值处理方法. 爆炸与冲击, 2018, 38: 1–9]

Summary for “基于电磁Hopkinson杆的无机玻璃动态力学性能测试技术”

A novel testing technique for dynamic mechanical properties of inorganic glass by electromagnetic Hopkinson bar

Bin Jiang¹, Jiayi Hu¹, Yazhou Guo^{1,2*} & Yulong Li^{1,2,3}

¹ School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

² Shaanxi Key Laboratory of Impact Dynamics and Engineering Application, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

³ School of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

* Corresponding author, E-mail: guoyazhou@nwpu.edu.cn

Optical glass materials have a lot of superior properties such as outstanding optical transparency, light weight, low manufacturing cost and high impact resistance. Thus, they are widely utilized in the transparent armors, windshields of high-speed train and airplane as well as mobile phone touch screens. Glass structures are often subjected to loading, including quasi-static and dynamic loading during their service. It is well known that the mechanical properties of engineering materials under impact loading are usually much different from those under static loading. To guide the optimal design of glass structures, it is necessary to conduct a thorough and in-depth study of the mechanical properties of glass materials. However, as a kind of typical brittle material, the failure strain of inorganic glass is extremely small. Therefore, measuring the dynamic mechanical properties of glass material has always been a quite difficult problem in the fields of experimental mechanics and impact dynamics. This paper would propose a new experimental technique-electromagnetic split Hopkinson pressure bar (ESHPB) to solve the afore-mentioned problem.

In this paper, quasi-static compressive tests were first conducted using the electronic universal testing machine at a strain rate 10^{-3} s^{-1} , followed by dynamic unidirectional and bidirectional compressive tests by the ESHPB apparatus under an average strain rate of 300 s^{-1} for soda-lime silicate glass, respectively. During dynamic compressive tests, the ultra-high-speed camera and flashlights were utilized to observe the damage/crack initiation, propagation and fracture process inside the glass samples. The feedback signal of the ultra-high-speed camera is input into the digital acquisition system, aiming to associate accurately the stress history of the sample with the high-speed image and to study the dynamic failure process in depth.

The following conclusions are made based on the test results: (1) When using the ESHPB set-up to measure the dynamic mechanical properties of glass materials, stress equilibrium and approximate constant strain rate loading condition can be achieved without using the pulse shaping technique. It provides a simpler and easier test method for studying the dynamic mechanical properties of brittle materials. (2) Compared with the unidirectional loading tests, bidirectional symmetric loading experimental technique can significantly shorten the time duration for achieving the condition of stress equilibrium and constant strain rate deformation. Therefore, more effective information can be obtained from the test results and the accuracy and reliability of the test results can be greatly improved. (3) Compared with the quasi-static test results, it is found that the compressive strength of the tested glass material increases significantly under dynamic impact loading, showing a strong strain rate effect. The dependence of compressive strength on strain rate was quantitatively characterized by the strain rate sensitivity exponent. (4) The deformation images of samples captured by ultra-high-speed camera indicated that when the cracks first appeared, the specimens did not completely lose the load bearing capacity. The cracks continue to nucleate, propagate and converge. When the cracks fill almost the entire sample, the material loses the load bearing capacity completely and breaks into powders. By comparison, the samples are split into a few columns under quasi-static loading.

electromagnetic Hopkinson bar, glass, strain rate effect, stress equilibrium, constant strain rate

doi: [10.1360/TB-2020-0223](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0223)