

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0434

## 不同应变率下蓝宝石透明陶瓷玻璃的力学响应\*

牛欢欢<sup>1</sup>, 闫晓鹏<sup>1,2,3</sup>, 罗浩舜<sup>1</sup>, 陈佳君<sup>1</sup>, 李志强<sup>1,2,3</sup>

- (1. 太原理工大学机械与运载工程学院应用力学研究所, 山西 太原 030024;
2. 太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024;
3. 太原理工大学力学国家级实验教学示范中心, 山西 太原 030024)

**摘要:** 蓝宝石( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )是透明陶瓷玻璃,它相较传统陶瓷( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )有优良的透光性,而且保留了陶瓷优良的力学性能。利用电子拉伸机和分离式霍普金森杆设备对试样进行准静态应变率为( $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}\text{s}^{-1}$ )和4种动态应变率(850、1 100、1 300、1 450  $\text{s}^{-1}$ )下的单轴压缩力学行为,用高速摄像机记录了蓝宝石透明陶瓷玻璃试样在准静态和动态压缩下的破坏过程。实验结果表明:从加载过程中的应力应变曲线是由加载段和失效段组成的,该材料是典型的脆性材料,并且有明显的应变率效应,随着应变率的提高,蓝宝石透明陶瓷玻璃的抗压强度也会提高;准静态和动态压缩下蓝宝石透明陶瓷玻璃都是在宏观裂纹扩展作用下失效破坏。通过分析不同应变率下蓝宝石透明陶瓷玻璃的破坏过程,分析得到该材料的失效是在加载的过程中,在蓝宝石透明陶瓷玻璃承载能力最低的区域出现裂纹源,然后裂纹成形并沿着加载方向扩展,然后裂纹之间相互交错,最终达到饱和状态破坏失效;在高应变率下,极短的时间内产生多处裂纹源,需要更大的能量去使裂纹成形、扩展,宏观上就表现为应变率效应。

**关键词:** 蓝宝石透明陶瓷玻璃; 压缩强度; 失效模式; 破坏过程; 应变率效应

中图分类号: O347.3 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

## Mechanical response of sapphire transparent ceramic glass at different strain rates

NIU Huanhuan<sup>1</sup>, YAN Xiaopeng<sup>1,2,3</sup>, LUO Haoshun<sup>1</sup>, CHEN Jiajun<sup>1</sup>, LI Zhiqiang<sup>1,2,3</sup>

- (1. Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;
2. Shanxi Key Laboratory of Material Strength & Structural Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;
3. National Demonstration Center for Experimental Mechanics Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** Sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) transparent ceramic glass has excellent light transmittance and retains the excellent mechanical properties comparing with traditional ceramics. In order to understand the relationship between strength and strain rate of sapphire transparent ceramic glass and its failure process, the electronic tensile machine and split Hopkinson bar equipment were used to load the specimen at different strain rates ( $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ , 850, 1 100, 1 300, 1 450  $\text{s}^{-1}$ ). The quasi-static and dynamic compression failure processes of specimen were recorded by high-speed camera. The experimental results show sapphire transparent ceramic glass is a typical brittle material with strain rate effect. With the increase of strain rate, the compressive strength of the sapphire transparent ceramic glass will also increase. The failure cycle of sapphire is long under quasi-static compression, and the crack will expand along the path with the weakest bearing capacity. In addition, the strength

\* 收稿日期: 2021-10-18; 修回日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(11972244)

第一作者: 牛欢欢(1996—), 男, 硕士研究生, 1137390516@qq.com

通信作者: 李志强(1973—), 男, 教授, lizhiqiang@tyut.edu.cn

curve of sapphire will decline briefly and then continue to rise, which is caused by the increase and propagation of the number of cracks. In the process of dynamic compression, the sapphire reaches the cracking strength in many places, forming more crack sources, and then the crack forms and expands to split the sapphire. When the sapphire transparent ceramic glass is subjected to compression, cracks will appear in the region with the weakest bearing capacity in the process of loading; soon after the cracks take shape and expand along the loading direction, the cracks interlace to reach a saturation state; and finally reach the compressive strength failure. Under dynamic compression, however, due to the loading rate is much higher than the propagation of the crack, several crack sources appear in the sapphirine transparent ceramic glass within a very short period of time, which requires more energy to make the crack forming and extending, exhibiting as the strain rate effect on its macro-scale performance.

**Keywords:** sapphire transparent ceramic glass; compressive strength; failure mode; failure process; strain rate effect

随着现代武器装备的不断发展,对装甲汽车和飞机的防护要求也在日益增强,前挡风玻璃和侧窗要在不影响视野的情况下,还要能够有效的抵挡子弹和炮弹的冲击,这样可以在很大程度上提高人员在现代战争中的存活率,所以针对透明装甲的研究具有很大的前景。亚微米氧化铝单晶,俗称蓝宝石,是一种众所周知的透明陶瓷材料,具有优异的光学性能和优越的力学性能<sup>[1]</sup>。研究表明,在传统氧化铝陶瓷的基础上,将其内部的残余孔隙率降低到 0.05% 以下时,就会使其变得透明<sup>[2]</sup>,所以相较传统氧化铝陶瓷,蓝宝石透明陶瓷内部的气泡和孔隙等缺陷较少。由于蓝宝石透明陶瓷具有非常高的硬度和 Hugoniot 弹性极限<sup>[3-4]</sup>以及低密度,所以单晶蓝宝石被认为是用于透明盔甲配置的最佳陶瓷之一,因此冲击载荷下蓝宝石陶瓷的破碎过程也成为了很重要的研究方向<sup>[5-6]</sup>。Krell 等<sup>[7]</sup>经过子弹冲击实验比较了单晶尖晶石和蓝宝石,得出了单晶尖晶石的性能高于蓝宝石,并表现出与亚微米氧化铝陶瓷相似的高稳定性,并且 Haney 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于机理的理论基础来描述尖晶石优于蓝宝石的性能; Kleiser 等<sup>[9]</sup>仔细比较冲击多晶氧化铝和单晶蓝宝石的冲击压缩数据结果,实验表明单晶蓝宝石和多晶氧化铝的应力-体积行为存在显著差异,证明了蓝宝石在高速冲击压缩下仍然是单晶; Edward 等<sup>[10]</sup>研究了平面蓝宝石上两个连续静态压痕对裂纹相互作用的影响,对主要压痕周围的不同径向分离和角度位置进行二次压痕,结果表明,蓝宝石的裂纹的相互作用高度依赖于相对于晶体取向的压痕的空间关系。

国内针对透明氧化铝陶瓷的研究大多集中于制备和光学性能的研究,但是对于氧化铝陶瓷的研究手段已经很完善了。易海兰等<sup>[11]</sup>总结了透明氧化铝陶瓷的研究进展主要包括亚微米透明氧化铝、晶粒定向透明氧化铝以及固态晶粒生长法获得氧化铝单晶 3 个方面; 张晓晴等<sup>[12]</sup>采用霍普金森压杆技术对单晶  $\alpha$  氧化铝(蓝宝石)的动态力学性能进行了简单的实验,得到其应力-应变曲线,得到蓝宝石的弹性模量以及高应变率下蓝宝石的抗压强度和失效应变; 刘清风等<sup>[13]</sup>采用改进的 SHPB 实验方法对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的动态力学性能进行了研究,得到了材料的动态应力应变曲线,结果表明,在较高的应变率范围内,陶瓷材料的动态应力应变关系具有应变率效应; 黄良钊等<sup>[14]</sup>研究了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷动态性能增高的机理与金属材料有所不同,它缺乏塑性变形,其破坏是裂纹产生和扩展直至脆性断裂,而且陶瓷的动态性能比其静态性能与抗弹能力的相关性更强; 谈瑞等<sup>[15]</sup>研究了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的宏观力学响应与破坏机理,揭示了动静态加载下裂纹成核与扩展模式存在明显差异,破坏模式的改变最终导致高应变率下陶瓷材料应变敏感性显著增强; Heard 等<sup>[16]</sup>对 3 种不同陶瓷材料进行了准静态的围压实验,发现峰值强度随围压的增大而增大; 王振等<sup>[17]</sup>研究飞机风挡无机玻璃在不同应变率下的力学行为,通过观察试样变形过程及变形后的形貌可知,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、沿轴向扩展与联结交错导致的失效破坏,并从微裂纹成核扩展和能量耗散的角度对材料的应变率效应做出了合理的解释; Chen 等<sup>[18]</sup>和 Ravichandran 等<sup>[19]</sup>采用改进的 SHPB 实验技术对围压条件下的玻璃陶瓷进行了动态压缩实验,发现在高围压(230 MPa)条件下,材料的破坏发生了脆性到韧性的转变现象; 冯晓伟等<sup>[20]</sup>指出陶瓷中破坏波的形成传播机制主要由细观力学行为控制,进一步基于氧化铝陶瓷的微观扫描图像,构建了含晶相、玻璃相等细观特征的力学模型,表明了陶瓷中破坏阵面的形成主要依赖于原生微缺陷在冲击载荷下的快速形核扩展过程,其传播特性满足扩散过程。

国外针对蓝宝石透明陶瓷玻璃的研究大多是对大尺寸的板状进行子弹冲击和压痕实验, 研究其动态变形和破坏过程, 缺少对小尺寸蓝宝石透明陶瓷玻璃在静态和动态压缩下的研究, 国内也大都是研究蓝宝石透明陶瓷玻璃的制备和光学性能。本文中利用电子拉伸机和分离式 Hopkinson 压杆设备对圆柱形蓝宝石透明陶瓷玻璃材料试件进行不同应变率下的加载, 研究该透明陶瓷玻璃材料在准静态和动态加载条件下的应力-应变关系, 同时利用高速摄像机记录试件的宏观破坏过程, 并分析其应变率效应和失效模式。

## 1 实 验

### 1.1 材料试样和实验方法

实验中所用的试样为圆柱形, 从其圆面看试样是透明的, 侧面是磨砂面, 2 种试样的高度都是 6 mm, 直径分别为 6 和 12 mm, 如图 1 所示, 准静态压缩实验在电子拉伸机上进行, 通过控制拉伸机横梁的速度, 来对高度和直径都是 6 mm 的试样进行应变率分别为  $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$  和  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  的轴向压缩实验, 用高速摄像机记录破坏过程, 实验设备如图 2 所示。

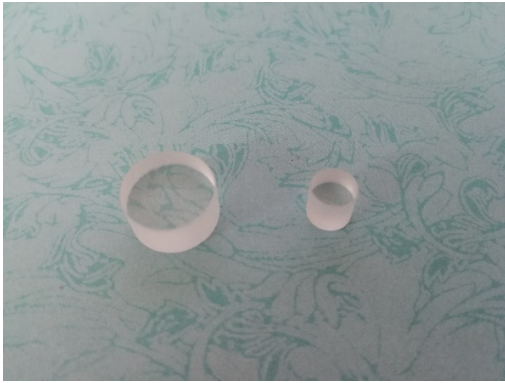


图 1 试样  
Fig. 1 Samples

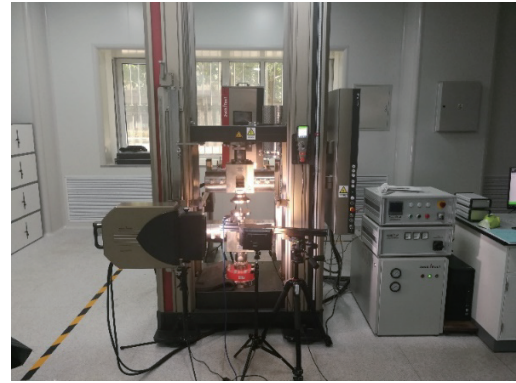


图 2 电子拉伸机实验  
Fig. 2 Electronic stretching machine and experimental equipment

动态压缩实验采用 SHPB 装置对  $\varnothing 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  和  $\varnothing 12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  试样进行高应变率加载, 实验装置示意图如图 3 所示, 由于蓝宝石透明陶瓷玻璃是脆性材料, 且强度较大, 试样破坏后形成的碎片可能会嵌入杆端面, 所以每次实验后都要用砂纸将杆的端面进行打磨, 避免端面不平整从而影响实验结果, 为了保护杆端, 在压缩实验过程中在入射杆、透射杆和试件一端加碳化钨垫块, 碳化钨垫块的直径和杆一样, 厚 5 mm, 并且涂上凡士林, 减小摩擦。根据 SHPB 的实验原理, 及一维应力波理论<sup>[21]</sup>, 试件中的平均应力为:

$$\sigma = E \frac{A}{A_0} \varepsilon_T \quad (1)$$

平均应变:

$$\varepsilon = -\frac{2c_0}{l_0} \int_0^t \varepsilon_R d\tau \quad (2)$$

平均应变率:

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{2c_0}{l_0} \varepsilon_R \quad (3)$$

式中:  $c_0$ 、 $E$  和  $A$  分别为钢杆中的弹性纵波波速、弹性模量和截面积,  $A_0$  和  $l_0$  分别为试件的初始截面积和初始长度,  $\varepsilon_R$  和  $\varepsilon_T$  试件两端面上的反射波和透射波信号。

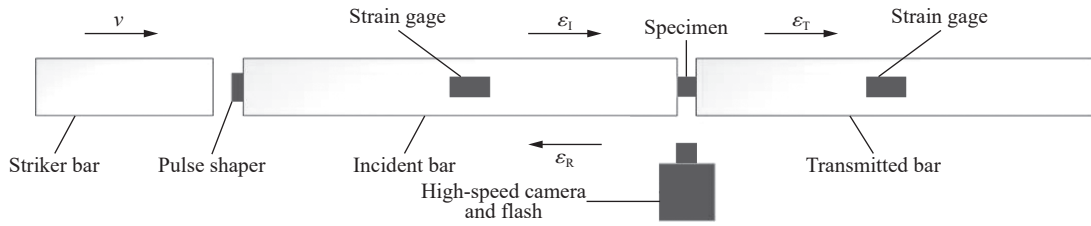


图 3 SHPB 设备示意图

Fig. 3 Schematic diagram of SHPB device

## 2 结果分析

### 2.1 准静态实验结果

在每种应变率下保证 3 组有效数据, 由于试样尺寸较小, 所以加了一个高度 20 mm 的钨钢垫块, 方便进光, 这样方便用静态高速摄像机更好的记录在压缩的过程中蓝宝石透明陶瓷玻璃的破坏过程, 实验结果如图 4 和表 1 所示。

实验结果表明, 蓝宝石透明陶瓷玻璃是脆性材料, 在达到一定的压缩强度后, 会发生脆断, 没有塑性阶段, 它应力应变曲线由加载段和失效段组成, 加载段近似是直线加载, 当试件受到的平均应力达到强度极限时, 试件失效破坏。从图 4 和表 1 可以看到, 随着应变率的提高, 蓝宝石透明陶瓷玻璃的抗压强度也会提高, 抗压强度在应变率  $10^{-2}$  和  $10^{-3} s^{-1}$  之间的增幅要比在应变率  $10^{-4}$  和  $10^{-3} s^{-1}$  的增幅大。在实验过程中, 试件所承载荷达到一定水平, 蓝宝石透明陶瓷玻璃会有响声, 达到其破坏强度时, 会发出爆炸声, 最终完全破坏, 碎片会高速飞溅, 应力曲线断崖式下降。

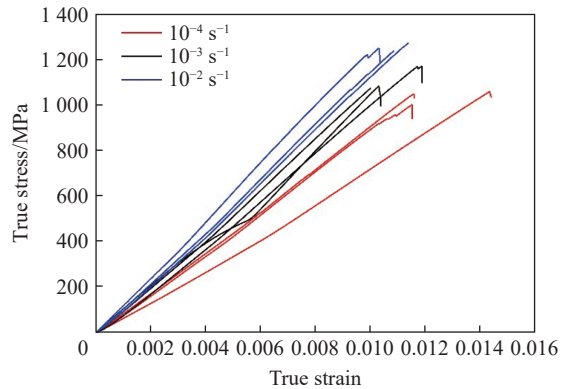


图 4 准静态实验结果

Fig. 4 Quasi static experimental results

表 1 准静态实验试样的破坏强度

Table 1 Failure strength of the specimen quasi-static test

应变率/ $s^{-1}$	破坏强度/MPa			平均破坏强度/MPa
	试件1	试件2	试件3	
$10^{-4}$	1004.635	1061.780	1051.350	1039.255
$10^{-3}$	1172.846	1074.280	1085.687	1110.937
$10^{-2}$	1251.447	1239.034	1274.610	1255.030

图 5 是试样在应变率为  $10^{-4} s^{-1}$  强度随着时间变化的曲线, 图中的插图为曲线上红圈标注曲线的放大图, 曲线上的标注的序号与图 6 中试样的破坏过程相对应, 试件在压缩过程中, 用高速摄像机

记录了其破坏过程, 帧率  $50 s^{-1}$ , 在图 6 中时刻 1, 试样在受压力的状态下没有出现损伤, 保持着最初的形貌, 在图 6 中时刻 2, 试样的上端右侧靠中的位置出现裂纹源, 而且上端出现多条沿纵向的白条, 说明蓝宝石透明陶瓷玻璃内部出现了损伤, 如图中红圈标注; 在图 6 中时刻 3, 因为试样的表面是磨砂面, 相较于内部, 其表面相对粗糙, 承载能力低, 由表面裂纹沿纵向扩展, 伴随着碎片飞出, 在试样的左侧出现明显的损伤带, 且右侧靠中的裂纹向下延伸发展, 此时圆柱形的试样已经变成了不规则柱体, 但是试样仍有承载能力; 在图 6 中时刻 4, 由于试样的不规则性, 在破坏的区域会出现应力集中效应, 所以在此区域的右侧出现了新增加的损伤区域; 在图 6 中时刻 5 和 6, 右侧靠中的裂纹沿着加载方向向下扩展; 图 6 中时刻 7, 裂纹继续向下扩展, 使得试样在加载过程中大面积表面区域脱落, 形成了局部大面积的损伤区域, 因为试样表面部分区域的脱落, 这个时候可以看到试样内部的变化, 蓝宝石透明陶瓷玻璃试样内部是透光的, 可以看的有很多白的亮条, 这是试样内部出现了裂纹, 从强度和时间曲线上看, 在这个过程中, 试样的强度出现了下降, 由此可以推测, 强度的下降是由于在此过程中裂纹的产生和扩展有关系,

裂纹的快速发展,引起了应力值的小幅度下降,然后试样继续受压,应力再次呈现上升趋势;图 6 中时刻 8 是试样强度曲线悬崖式下降的最后一刻,裂纹没有明显的增多,裂纹相互交错,达到试样的最大承载能力;图 6 中时刻 9,试样最终破坏,大量碎片沿四周飞溅。在蓝宝石透明陶瓷玻璃试样的破坏过程中,伴随着开裂的声音发出,最后发出爆炸声,试样最终失稳破坏。试样在破坏的过程中,会在上下两端和其表面出现破坏,由于试样内部应力场平衡被打破,使内部裂纹的扩展,在达到压缩强度时,蓝宝石透明陶瓷玻璃瞬间破坏,大部分形成小碎片,沿着四周高速飞溅,还有一部分成了粉末状。

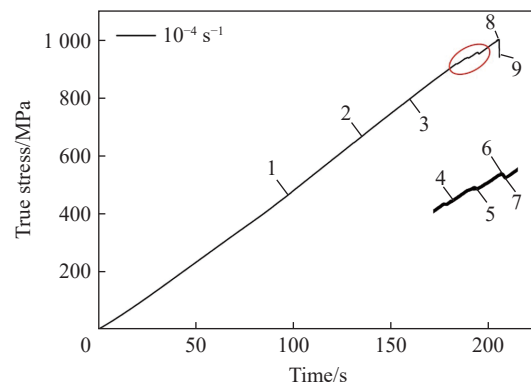


图 5 强度-时间曲线

Fig. 5 Strength time curve

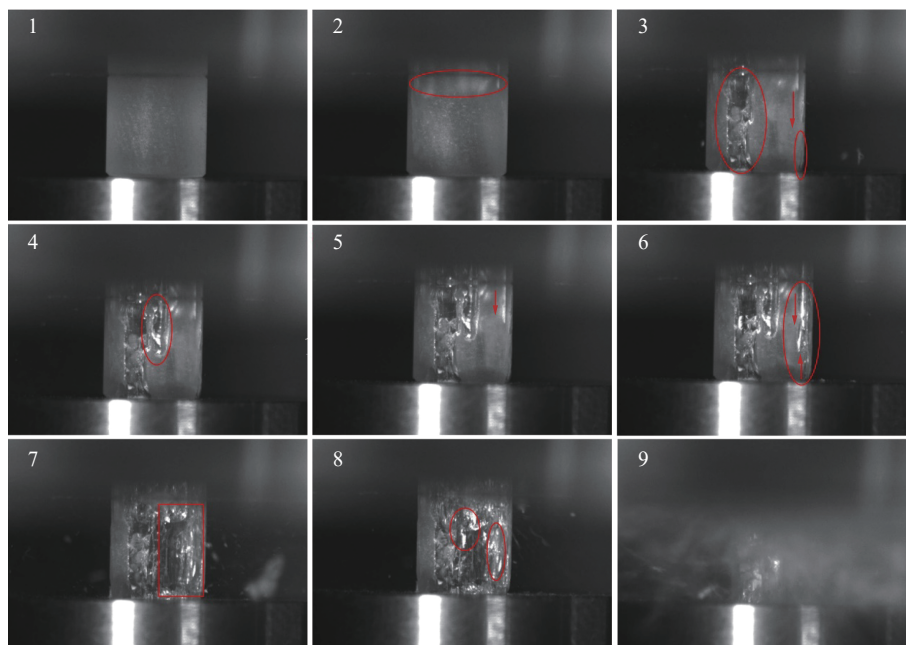


图 6 准静态下试样破坏过程

Fig. 6 Failure process of specimen under quasi-static state

在静态压缩的破坏如图 6 中时刻 3 和时刻 6, 可以看到试样脱落的形状类似于玻璃条, 说明准静态下, 裂纹的扩展方向是沿着加载方向的, 但是由于试样的不均匀性, 即试样的侧面是磨砂面, 相较于内部属于承载能力最低的区域, 所以在压缩的过程中, 试样还未达到饱和状态下出现表面区域的脱落, 这样的现象说明了, 在加载的过程中, 裂纹的扩展路径是有选择性的, 它会选择容易扩展的路径去延伸扩展, 另一方面, 在压缩的过程中, 试样表面出现了破坏区域, 造成了试样成了不规则的形状, 而且在表面损伤区域有应力集中效应, 这样会缩短试样的破坏过程, 所以综合来看, 本文准静态压缩实验得出的蓝宝石透明陶瓷玻璃抗压强度极限要低于其真实强度极限。

## 2.2 动态实验结果

图 7(a) 所示为实验前对 SHPB 设备的调试信号, 入射杆和透射杆上记录的典型矩形波应力信号, 因在调试阶段未放入试样, 所以入射波直接进入透射杆 (忽略实验中的微小误差) 形成和入射波相同的应力波脉冲, 符合实验进行条件。图 7(b) 中入射波在形成完整的脉冲后, 在某一时刻对试样进行加载, 透

射波近似为三角形, 下降沿对应着试样的加载过程, 在最低处试样达到破坏强度, 上升沿对应着试样失效卸载; 图 8 为试件在加载过程中的真实应力强度和真实应变率的变化趋势, 由图 8 可知试样在破坏前后, 应变率是趋于平缓, 说明试样在加载的过程中应变率近似恒定<sup>[22]</sup>, 试样内部应力均匀, 实验过程中基本满足霍普金森压杆中的一维应力波均匀性假设, 实验数据可靠。

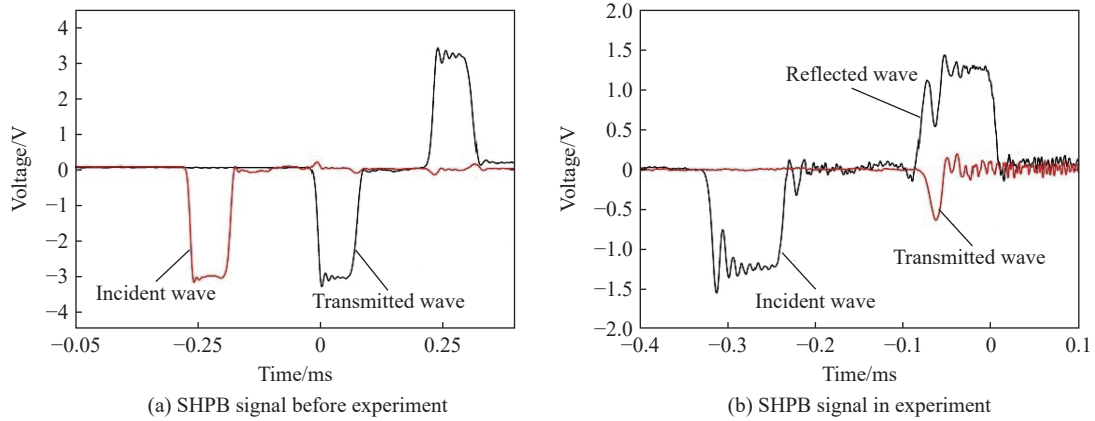


图 7 动态压缩中的经典信号

Fig. 7 Classic signals in dynamic compression

图 9 所示为试件  $\varnothing 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  在应变率为 850、1 100、1 300 和 1 450  $\text{s}^{-1}$  的真实应力-应变曲线, 从图 9 和表 2 可以得到随着应变率的提高, 蓝宝石透明陶瓷玻璃的压缩强度也越来越大, 但是失效应变越来越小。

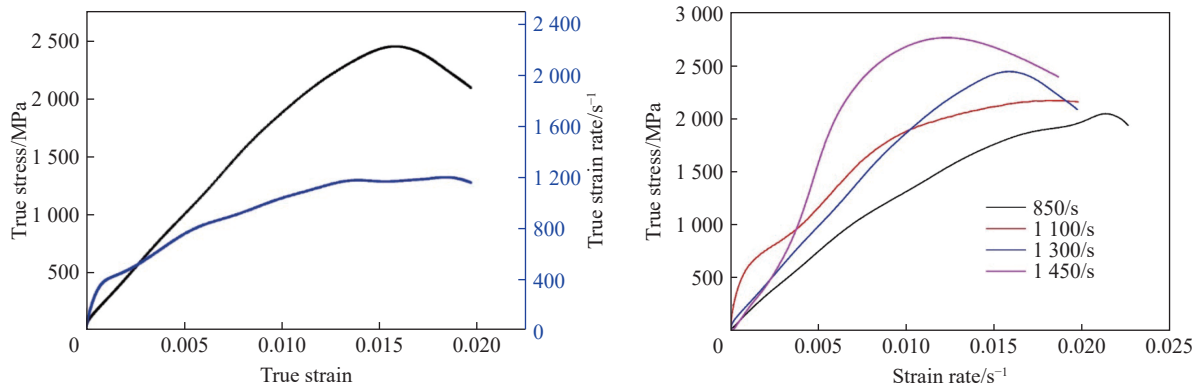


图 8 真实应力和真实应变率随真实应变的变化

Fig. 8 Variation of real stress and real strain rate with real strain

图 9 动态实验结果

Fig. 9 Dynamic experimental results

表 2 动态压缩实验结果

Table 2 Dynamic experimental results

应变率/ $\text{s}^{-1}$	强度/MPa	失效应变
850	2044.333	0.0210
1100	2168.533	0.0180
1300	2385.391	0.0155
1450	2753.909	0.0130

为了能更好的看到蓝宝石透明陶瓷玻璃动态压缩载荷下的破坏过程, 选择用  $\varnothing 12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  的试件, 并且在 SHPB 实验中对试样进行应变率为 1 000  $\text{s}^{-1}$  下的加载, 因为在较大应变率下, 蓝宝石透明陶瓷玻璃破坏过程时间很短, 不便于观察和分析。动态压缩实验过程中, 用高速摄像机记录了试样破坏过程, 图 10 试样上方是入射杆, 下方是透射杆。图 10(a) 所示为试样的初始时刻, 在图 10(b) 中第 40  $\mu\text{s}$  时刻, 应力波传播至试样, 试样两端出现小颗粒状和粉末状的碎片飞出, 试样的右侧上端出现缺陷, 产生裂纹源, 如黄色箭头所示; 45  $\mu\text{s}$  时可以明显看到试样最左侧和前端出现

裂纹源, 如黄色箭头所示; 45  $\mu\text{s}$  时可以明显看到试样最左侧和前端出现

明显的裂纹源, 并且裂纹已经成形; 50  $\mu\text{s}$  时左侧裂纹以贯穿整个试件, 前端裂纹源扩展至蓝宝石透明陶瓷玻璃的中心位置; 60  $\mu\text{s}$  时前端裂纹沿加载方向扩展至试样底部; 75  $\mu\text{s}$  时在试件的右下端出现裂纹; 80 和 95  $\mu\text{s}$  时, 裂纹源沿加载方向继续扩展, 在可以观察的表面宏观裂纹全部贯穿试样, 形成了若干蓝宝石透明陶瓷玻璃条。在压缩荷载的持续作用下, 试件的破坏过程是以生成沿加载方向的“纵向”裂纹开始, 一旦产生贯通的纵向裂纹, 试件表现为轴向劈裂<sup>[23]</sup>。

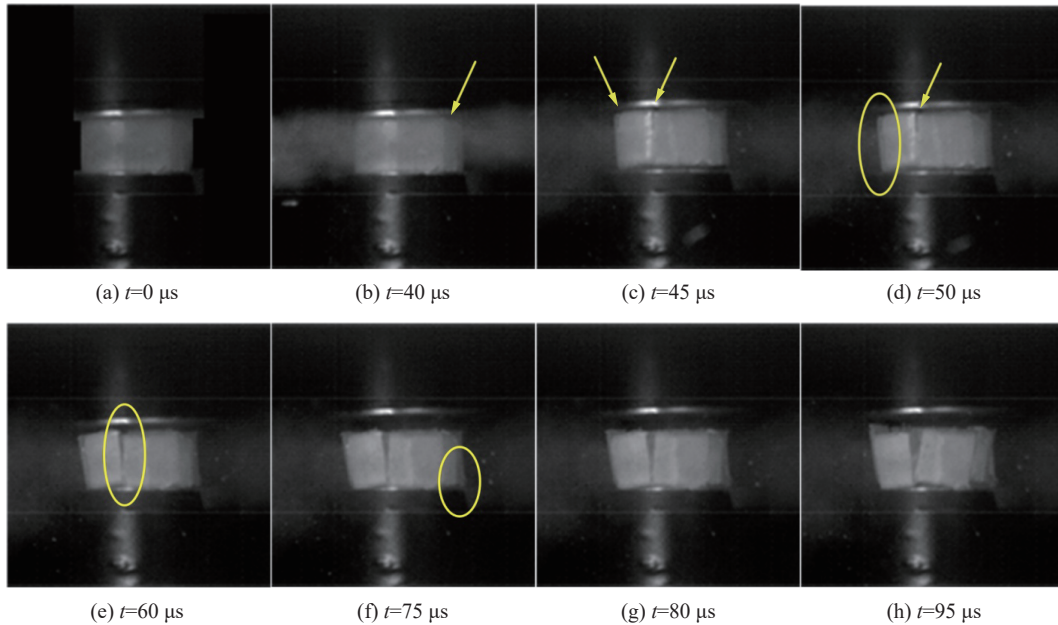


图 10 动态压缩下试件的破坏过程

Fig. 10 Failure process of specimen under dynamic compression

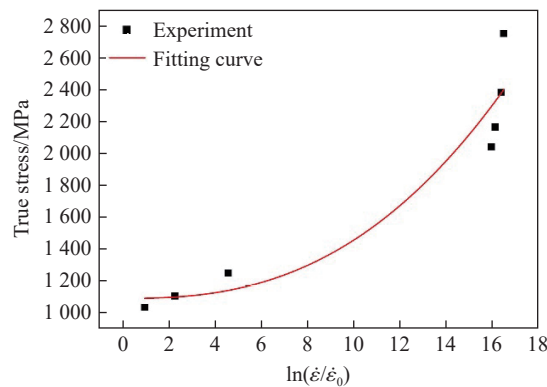


图 11 实验数据拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of experimental data

蓝宝石透明陶瓷玻璃的抗压强度随这应变率变化的关系如图 11 所示。可以用公式表达为:

$$\sigma = 1\,095.972\,7 + [\ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)]^{2.56} \quad (4)$$

破坏过程如图 12 所示。在试样压缩过程中, 会产生的横向张应力, 试样也会横向膨胀, 由于该材料是脆性材料, 这种变化很小, 不易被观察到, 随着试样应力水平的持续提高, 横向张应力会在蓝宝石陶明陶瓷玻璃的端面的产生裂纹源, 这些裂纹源会沿着试样承载能力最低的区域轴向扩展, 形成贯穿式裂纹, 如准静态压缩中裂纹在磨砂面区域扩展导致试样表面积脱落, 将整个试样劈裂成若干蓝宝石透明陶瓷玻璃条, 然后继续受压, 发生弯曲变形, 最终破坏形成小碎片<sup>[23]</sup>。

图 12 所示为破坏的过程示意图。试样的侧面的磨砂面相较试样内部可视为承载能力最低的部位, 对比准静态压缩和动态压缩的破坏过程, 相同的点是, 裂纹源均是试样的端面产生的, 且裂纹都是沿着加载的方向去扩展的; 不同的点是在准静态压缩中, 试样的加载速率要低于裂纹的扩展速率, 随着试样加载的继续, 裂纹沿着加载方向扩展, 蓝宝石透明陶瓷玻璃试样内部的裂纹越来越密集达到饱和, 以及表面脱落导致的应力集中, 最终达到压缩强度极限而破坏; 在动态压缩中, 从加载到试样的破坏只有几十微秒, 所以加载速率是要高于裂纹的扩展速率的。在试样承载能力最低处的裂纹源还未扩展时, 试样内部的其他地方就已经达到了开裂的条件, 这样就同时产生了多处裂纹源, 这就需要更多的能量去促使这些裂纹源去成形, 然后裂纹沿着加载方向扩展, 裂纹之间相互交错, 直至裂纹达到饱和状态, 试样破坏, 所以相较之下, 动态压缩实验下, 蓝宝石的强度更接近其真实强度, 因为在其破坏的过程中, 避免了表面脱落导致的应力集中效应, 宏观上体现为蓝宝石透明陶瓷玻璃的应变率效应, 即随着应变率的提高, 蓝宝石透明陶瓷玻璃的抗压强度越大。

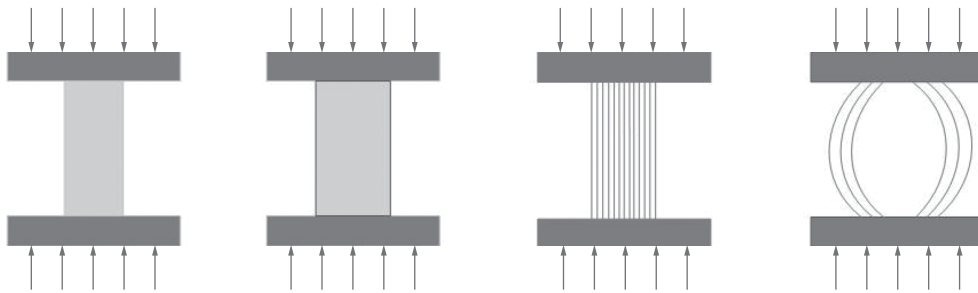


图 12 破坏原理示意图

Fig. 12 Schematic diagram of failure principle

目前研究仅对于单轴压缩, 对于蓝宝石透明陶瓷玻璃的三轴压缩研究还很少有, 但是已经有研究表明, 脆性材料的应变率效应是围压引起的<sup>[24-25]</sup>, 所以对于蓝宝石透明陶瓷玻璃应变率效应还需要进一步研究。

### 3 结 论

本文中通过电子拉伸机和 SHPB 装置对蓝宝石透明陶瓷玻璃进行准静态和动态压缩, 并用高速摄像机记录蓝宝石透明陶瓷玻璃的破坏过程, 可以得到以下结论。

(1) 蓝宝石透明陶瓷玻璃是典型的脆性材料, 准静态压缩和动态压缩下, 该材料的抗压强度会随着应变率的提高而提高, 具有明显的应变率效应; 根据不同应变率下的蓝宝石透明陶瓷玻璃的破坏过程, 分析得出在高应变率下, 加载速率远高于裂纹的扩展速率, 所以蓝宝石透明陶瓷玻璃在极短的时间内产生多处裂纹源, 这就需要更多的能量去使裂纹成形、扩展, 宏观上就表现为应变率效应。

(2) 蓝宝石透明陶瓷玻璃的失效是在加载的过程中, 由于蓝宝石透明陶瓷玻璃会在承载能力最低的区域出现裂纹源, 然后裂纹成形并且沿着加载方向扩展, 裂纹相互交错达到饱和状态, 最终达到抗压强度破坏失效。

#### 参考文献:

- [1] JOHNSON R, BISWAS P, RAMAVATH P, et al. Transparent polycrystalline ceramics: an overview [J]. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 2012, 71(2): 73–85. DOI: 10.1080/0371750X.2012.716230.
- [2] KRELL A, KLIMKE J, HUTZLER T. Advanced spinel and sub- $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  for transparent armour applications [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, 29(2): 275–281. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.03.024.
- [3] KANEL G I, NELLIS W J, SAVINYKH A S, et al. Response of seven crystallographic orientations of sapphire crystals to



- shock stresses of 16-86 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(4): 043524. DOI: 10.1063/1.3204940.
- [4] MUNSON D E, LAWRENCE R J. Dynamic deformation of polycrystalline alumina [J]. *Journal of Applied Physics*, 1979, 50(10): 6272–6282. DOI: 10.1063/1.325766.
- [5] MCCAULEY J W, STRASSBURGER E, PATEL P, et al. Experimental observations on dynamic response of selected transparent armor materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(1): 3–29. DOI: 10.1007/s11340-012-9658-5.
- [6] FORQUIN P, ZINSZNER J L. Experimental study of the dynamic fragmentation in transparent ceramic subjected to projectile impact [M]// CASEM D, LAMBERSON L, KIMBERLEY J. *Dynamic Behavior of Materials*. Cham: Springer, 2017: 165–170. DOI: 10.1007/978-3-319-41132-3\_23.
- [7] KRELL A, STRASSBURGER E, HUTZLER T, et al. Single and polycrystalline transparent ceramic armor with different crystal structure [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, 96(9): 2718–2721. DOI: 10.1111/jace.12530.
- [8] HANEY E J, SUBHASH G. Damage mechanisms perspective on superior ballistic performance of spinel over sapphire [J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(1): 31–46. DOI: 10.1007/s11340-012-9634-0.
- [9] KLEISER G J, CHHABILDAS L C, REINHART W D. Comparison of dynamic compression behavior of single crystal sapphire to polycrystalline alumina [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(6): 473–479. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.018.
- [10] HANEY E J, SUBHASH G. Analysis of interacting cracks due to sequential indentations on sapphire [J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(9): 3528–3536. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.02.026.
- [11] 易海兰, 蒋志君, 毛小建, 等. 透明氧化铝陶瓷的研究新进展 [J]. *无机材料学报*, 2010, 25(8): 795–800. DOI: 10.3724/SP.J.1077.2010.00795.
- YI H L, JIANG Z J, MAO X J, et al. New development of transparent alumina ceramics [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2010, 25(8): 795–800. DOI: 10.3724/SP.J.1077.2010.00795.
- [12] 张晓晴, 姚小虎, 宁建国, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷材料应变率相关的动态本构关系研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(3): 226–232.
- ZHANG X Q, YAO X H, NING J G, et al. A study on the strain-rate dependent dynamic constitutive equation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(3): 226–232.
- [13] 刘清风, 刘同祥, 姜峰. 冲击压缩载荷下蓝宝石的动态力学性能试验方法 [J]. *超硬材料工程*, 2014, 26(3): 14–18. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1433.2014.03.004.
- LIU Q F, LIU T X, JIANG F. The Test method for dynamic mechanical performance of sapphire under the shock compression loading [J]. *Superhard Material Engineering*, 2014, 26(3): 14–18. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1433.2014.03.004.
- [14] 黄良钊, 张安平.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的动态力学性能研究 [J]. *中国陶瓷*, 1999, 35(1): 13–15, 21. DOI: 10.16521/j.cnki.issn.1001-9642.1999.01.004.
- HUANG L Z, ZHANG A P. A study of dynamic mechanical properties on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics [J]. *China Ceramics*, 1999, 35(1): 13–15, 21. DOI: 10.16521/j.cnki.issn.1001-9642.1999.01.004.
- [15] 谈瑞, 李海洋, 黄俊宇.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷动静态压缩下碎片形貌与破坏机理分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(2): 023103. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0050.
- TAN R, LI H Y, HUANG J Y. Investigations on the fragment morphology and fracture mechanisms of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics under dynamic and quasi-static compression [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(2): 023103. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0050.
- [16] HEARD H C, CLINE C F. Mechanical behaviour of polycrystalline  $\text{BeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{AlN}$  at high pressure [J]. *Journal of Materials Science*, 1980, 15(8): 1889–1897. DOI: 10.1007/BF00550614.
- [17] 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. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0186.
- WANG Z, ZHANG C, WANG Y M. Mechanical behaviours of aeronautical inorganic glass at different strain rates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 295–301. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0186.
- [18] CHEN W N, RAVICHANDRAN G. Dynamic compressive failure of a glass ceramic under lateral confinement [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1997, 45(8): 1303–1328. DOI: 10.1016/S0022-5096(97)00006-9.
- [19] CHEN W, RAVICHANDRAN G. Failure mode transition in ceramics under dynamic multiaxial compression [J]. *International*

- Journal of Fracture*, 2000, 101(1/2): 141–159. DOI: 10.1023/A:1007672422700.
- [20] 冯晓伟, 李俊承, 常敬臻, 等. 氧化铝陶瓷受冲击压缩破坏的细观机理研究 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(12): 2472–2479. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.12.022.  
FENG X W, LI J C, CHANG J Z, et al. Investigation on mesoscale failure mechanism of alumina under shock compression [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(12): 2472–2479. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.12.022.
- [21] 王礼立. 应力波基础 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 380.
- [22] 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, 25(3): 207–216. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)03-0207-10.  
SONG L, HU S S. Stress uniformity and constant strain rate in SHPB test [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(3): 207–216. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)03-0207-10.
- [23] 张青艳. 脆性材料在准静态和冲击压缩载荷作用下的动态碎裂过程 [D]. 宁波: 宁波大学, 2019: 26-27.  
ZHANG Q Y. Fragmentations of brittle materials under quasi-static and dynamic compression [D]. Ningbo: Ningbo University, 2019: 26-27.
- [24] 李二兵, 谭跃虎, 马聪, 等. 三向压力作用下盐岩 SHPB 试验及动力强度研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 3742–3749. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0594.  
LI E B, TAN Y H, MA C, et al. Split Hopkinson pressure bar test and dynamic strength research of salt rock under three-pressure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 3742–3749. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0594.
- [25] 方秦, 洪建, 张锦华, 等. 混凝土类材料 SHPB 实验若干问题探讨 [J]. *工程力学*, 2014, 31(5): 1–14,26. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.ST07.  
FANG Q, HONG J, ZHANG J H, et al. Issues of SHPB test on concrete-like material [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(5): 1–14,26. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.ST07.

(责任编辑 王易难)