

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0292

边缘冲击(EOI)作用下透明陶瓷破坏特性研究*

韩国庆, 张先锋, 谈梦婷, 包 阔, 李 逸

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 相较于传统透明材料, 相同面密度下透明陶瓷具有更优异的抗冲击性能, 使其成为极具应用前景的透明装甲防护材料。研究透明陶瓷在冲击下的破坏响应及损伤演化规律, 对透明陶瓷装甲的结构设计及防护能力的提高起到至关重要的作用。为了比较传统透明材料与典型透明陶瓷材料在冲击过程中的破坏特性差异, 利用 9 mm 弹道枪发射平台进行了浮法玻璃、YAG 透明陶瓷及镁铝尖晶石透明陶瓷 3 种透明材料的边缘冲击试验, 破片发射速度为 200~300 m/s。通过高速摄影捕捉破片的撞击过程, 分析了粉碎区及主裂纹扩展距离随时间的变化规律。结果表明, 3 种材料在不同速度破片的冲击作用下, 粉碎区面积与材料强度呈负相关性。对同种材料, 在 200~300 m/s 速度范围内, 破片撞击速度对主裂纹的扩展速度没有影响。同时比较了玻璃与透明陶瓷在宏观尺度上的损伤演化特征差异: 玻璃在粉碎区两侧产生三角形的次裂纹区域, 陶瓷材料则会产生细长的次裂纹簇, 并会产生较明显的裂纹“分叉”现象。利用扫描电子显微镜对回收到的陶瓷碎片进行观测, 并分析了 2 种透明陶瓷材料在细观尺度破坏特征的异同。2 种透明陶瓷的径向裂纹断面上会出现从沿晶断裂到穿晶断裂的过渡变化, 而环向断面上几乎都是沿晶和穿晶混合断裂。2 种透明陶瓷中, 仅 YAG 透明陶瓷在沿晶断裂时会出现晶体“剥落”现象。

关键词: 透明陶瓷; 边缘冲击试验; 宏观断裂特征; 沿晶断裂; 穿晶断裂

中图分类号: O385 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Failure characteristics of three transparent ceramics materials under the edge-on impact loading

HAN Guoqing, ZHANG Xianfeng, TAN Mengting, BAO Kuo, LI Yi

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: Compared with traditional transparent materials, transparent ceramics have excellent impact resistance at the same areal density, which contributes to its giant potential in the field of transparent armor protection. The studies of the damage response and damage evolution law of transparent ceramics under impact play a vital role in the structural design and protection of transparent ceramic armors. In order to compare the difference between traditional transparent materials and typical transparent ceramic materials under the impact damage process, a 9 mm-ballistic gun launch platform was used to conduct edge-on impact (EOI) tests on three transparent materials, including float glass, YAG transparent ceramics and magnesium aluminum spinel transparent ceramics. The impact process of the fragments was captured by a high-speed video camera, and the change rule of the crushing zone and the propagation distance of the main crack over time was analyzed. The results show that the area of the crushing zone in three materials was negatively correlated with the strength of the material when the fragment impact velocity ranged from 200 to 300 m/s. For the same material, within this velocity range, the impact velocity of the fragments had no significant effect on the propagation velocity of the main crack. Besides, the macroscale differences on the damage evolution characteristics of three materials are investigated. Through the scanning electron microscope (SEM) observation on the recovered ceramic fragments, the similarities and differences on the damage

* 收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2022-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(11772159)

第一作者: 韩国庆(1996—), 男, 博士研究生, 758571417@qq.com

通信作者: 张先锋(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, lynx@njjust.edu.cn

characteristics of the two transparent ceramic materials at the mesoscale are analyzed in detail. The change that intergranular fracture transformed into transgranular fracture on the radial crack occurred in both spinel and YAG transparent ceramics, while the ring fracture surfaces were almost all along the intergranular fracture. Compared with the magnesium aluminum spinel transparent ceramics, YAG transparent ceramics possessed “peel off” phenomenon that fracture occurred along the grain boundary. Besides, the transgranular fracture surface in MgAl_2O_4 transparent ceramics was in jagged irregular shape, while that of YAG transparent ceramics was smooth.

Keywords: transparent ceramics; edge-on impact test; macroscopic fracture characteristics; intergranular fracture; transgranular fracture

反装甲武器的高速发展对坦克、装甲车辆及武装直升机等高战略价值目标的防护性能提出了更高的要求^[1], 尤其是装甲车辆观察窗口、武装直升机挡风玻璃及雷达天线罩等脆弱部位, 在保证良好透光率的前提下, 需尽可能地提高其抗弹能力。透明陶瓷具有优异的耐腐蚀、耐高温等特性。同时, 相较于传统透明材料, 透明陶瓷具有轻量化的特征, 相同面密度下透明陶瓷往往具有更好的防护性能。典型的透明陶瓷材料有氧化铝(Al_2O_3)、氮氧化铝(AION)、氧化钇(Y_2O_3)、氟化镁(MgF_2)等。除了具备优异的抗冲击性能外, 钇铝石榴石(YAG)透明陶瓷^[2]制备技术成熟, 能够实现批量生产, 而镁铝尖晶石(MgAl_2O_4)透明陶瓷^[3]则具有密度低、透光性宽等特点, 这些优势使得这两种材料在透明装甲中得到了广泛应用。

为推动透明陶瓷在装甲防护上的运用, 需对其冲击破坏机理进行深入研究。目前运用较广泛的动态冲击试验方法主要有分离式霍普金森压杆试验、平板冲击试验、Taylor 杆撞击试验等。相较于其他测试方法, 边缘冲击(edge-on impact, EOI)试验方法^[4-6]可以通过改变冲头几何形状、尺寸及材料, 控制动态加载的输入波形。由于 EOI 试验中垂直于撞击方向的材料厚度较小, 因此可以结合材料的光弹特性, 观察材料受冲击过程中内部应力的变化。同时, EOI 试验并不局限于陶瓷类脆性材料, 在混凝土^[7]及岩石^[8]等非均质材料中均有应用。这些优势使得 EOI 试验成为研究材料动态响应与裂纹扩展的主流研究手段。此外, EOI 试验测得的材料破坏行为能在一等程度上反映陶瓷装甲的抗侵彻破坏过程^[9]。相较于子弹侵彻陶瓷装甲及破片撞击陶瓷复合靶, EOI 试验也会产生着弹点附近的粉碎区、主裂纹扩展区以及两侧的次裂纹区域。Strassburger 等^[4]开展了柱形破片以 20~1 000 m/s 速度撞击 SiC、 TiB_2 及 Al_2O_3 3 种陶瓷材料的 EOI 试验, 通过对回收的碎片进行细观观测, 对比了不同陶瓷的损伤演化特征。Strassburger^[5]将光弹技术与 EOI 试验相结合, 探索了 EOI 试验中应力波在 AION 透明陶瓷材料内部的传播规律。Grujicic 等^[6]基于大量的玻璃抗弹性能文献, 建立了钠钙玻璃(soda-lime glass)在高应变率下的本构模型, 并通过 EOI 试验与数值模拟结果对比, 验证了模型的可靠性。国内有关 EOI 试验下陶瓷材料损伤演化过程的研究较少, 杨岳峰等^[10]基于动接触力二步法及有限元原理, 对 SiC 陶瓷 EOI 试验中的裂纹扩展进行了数值模拟研究。尽管相关学者针对 EOI 试验开展了数值模拟及损伤演化过程方面的研究^[11-13], 但是目前关于 EOI 试验下传统透明材料与透明陶瓷在宏观尺度下破坏模式差异性的研究鲜有报道。

冲击作用下, 脆性材料在细观尺度上的破坏特征往往可以反映材料本身的物理性能及损伤演化特性。陶瓷材料在细观尺度下具有滑移、孪晶、断裂等响应形式。Subhash 等^[14]给出了 B_4C 及 ZrB_2 -SiC 复合材料在静动态压痕试验中断口处细观特征的差异, 并与破片冲击 SiC 撞击粉碎区内的陶瓷碎片断面上的细观破坏结构进行了比较, 发现脆性材料的裂纹会由加工中的固有缺陷诱发产生。Ghosh 等^[15]在对 ZrB_2 -5%SiC 复合材料表面进行纳米划痕试验中发现, 由于最大剪应力的存在, 划痕前端将产生滑移带; 微裂纹则由于划痕后方的最大拉应力产生。包阔等^[16]在破片冲击 YAG 透明陶瓷复合靶试验中观察到, 随着裂纹扩展, 径向、环向和锥裂纹中沿晶断裂比例会逐渐增大, 且穿晶比例也会随破片撞击速度的提高而增加。但是, 针对两种典型透明陶瓷材料(YAG 透明陶瓷与镁铝尖晶石透明陶瓷)在高速冲击作用下细观结构的破坏响应有何不同, 还需进行深入研究。

本文中, 拟开展 3 种不同透明材料(普通浮法玻璃、YAG 透明陶瓷以及镁铝尖晶石透明陶瓷)在不同破片撞击速度(200~300 m/s)下的 EOI 试验。通过高速摄影捕获的靶体冲击破坏过程, 计算裂纹扩展

速度;统计试验后破片的破碎情况及粉碎区面积,分析浮法玻璃与透明陶瓷在宏观尺度下破坏特征差异;使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对回收的样品进行细观观测,分析 YAG 透明陶瓷与镁铝尖晶石透明陶瓷在细观尺度下破坏特征差异。

1 EOI 试验

1.1 弹靶材料

如图 1 所示,试验所用弹体为直径 9 mm、质量 5.7 g 的高硬度碳化钨球型破片,具体参数如表 1 所示。试验中破片冲击速度为 200~300 m/s。试验所用靶体分别为普通浮法玻璃、YAG 透明陶瓷及镁铝尖晶石透明陶瓷 3 种材料,图 2 为镁铝尖晶石透明陶瓷靶体。将试验所用试样的前后表面进行抛光处理以便于高速摄影的拍摄。3 种材料中,YAG 透明陶瓷与镁铝尖晶石透明陶瓷均由上海硅酸盐研究所提供,具体参数如表 2 所示,表中浮法玻璃的层裂强度为未测量参数。



图 1 碳化钨弹体

Fig. 1 Tungsten carbide projectile

表 1 碳化钨弹体尺寸及材料参数

Table 1 Tungsten carbide projectile size and material parameters

弹体直径/mm	钴质量分数/%	密度/(g·cm ⁻³)	洛氏硬度	弹性模量/GPa	抗弯强度/GPa	泊松比
9	8	14.9	90.5	621	1.84	0.24



图 2 镁铝尖晶石透明陶瓷靶

Fig. 2 A MgAl₂O₄ spinel transparent ceramic target

表 2 靶体尺寸和材料参数

Table 2 Target size and material parameters

靶体	靶体尺寸/ (mm×mm)	靶体厚度/ mm	材料密度/ (kg·m ⁻³)	杨氏模量/ GPa	泊松比	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	Hugoniot弹性 极限/GPa	层裂强度/ MPa
浮法玻璃	70×70	8	2 480	92.76	0.159	45.4	40.0	5.95	
YAG透明陶瓷	90×90	9	4 550	282.00	0.250	188.0	112.8	12.00	548
镁铝尖晶石透明陶瓷	70×70	6	3 573	281.00	0.277	210.0	110.0	13.50	528

1.2 试验布局

图 3 为试验布局示意图及靶体固定照片。使用 9 mm 弹道枪作为试验平台, 该平台由高压气瓶、发射室、枪管、回收箱及靶架等部分组成。试验过程中使用高压气体对破片进行加速, 并撞击固定在靶架上的试样。高速摄影机透过回收箱上的观察窗拍摄撞击过程中的破片冲击及靶体破坏过程, 分析不同速度破片撞击各材料的损伤演化过程, 拍摄帧频为 $7.9 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。

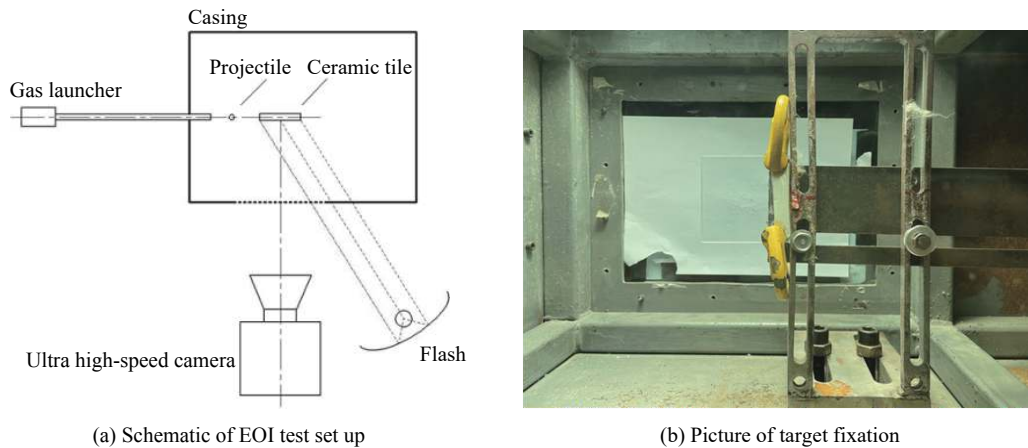


图 3 试验布局示意图及靶体固定照片

Fig. 3 Schematic of EOI test set up and target fixation

1.3 试验结果

表 3 为试验参数及弹体破碎情况, 图 4 为高速摄影机拍摄的 3 种材料(材料参数见表 2)在破片冲击下典型的破坏过程。从高速摄影结果来看, 破片稳定撞击到靶体的侧边中心位置, 如图 4 所示。通过回收撞击后的破片, 发现当破片正撞击玻璃材料时, 未发生破碎现象; 当破片正撞击 YAG 透明陶瓷及镁铝尖晶石透明陶瓷的试样边缘时, 破片均会发生破碎情况。这是由于透明陶瓷材料的抗压强度大于浮法玻璃的抗压强度所导致的。由图 4 还可以看出, 由于裂纹在不同材料中的传播速度有所不同, 导致 3 种材料从开始受到冲击到完全破碎经历的时间存在差异。其中普通浮法玻璃在约 $100 \mu\text{s}$ 完成裂纹扩展, YAG 透明陶瓷与镁铝尖晶石透明陶瓷在约 $60 \mu\text{s}$ 完成裂纹扩展。3 种材料受到破片撞击后, 均会在接触区域产生粉碎区(高速摄影画面中破片周围的白色高亮区域)。高速撞击使陶瓷产生大量粉末并向破片四周飞散。随着时间的增加, 3 种靶体的主裂纹扩展速度均大于粉碎区的扩展速度, 而环形的粉碎区在某一时刻后不再向外扩展。当主裂纹扩展到靶体边缘后, 靶体的破坏过程结束。

图 5 为碳化钨破片以不同速度撞击镁铝尖晶石透明陶瓷过程中的破碎情况, 其破碎程度随着撞击速度的提高而增大。这与包阔等^[16]在破片冲击 YAG 透明陶瓷复合靶中破片均未发生破碎的现象存在明显不同。这是由于陶瓷在破片撞击方向上厚度的增加导致试样整体刚度增强, 进而使破片在冲击过程中发生破碎现象。

表 3 试验参数及弹体破碎情况

Table 3 Test parameters and fragmentation of the projectile

靶体	靶体编号	靶体尺寸/ (mm×mm×mm)	破片撞击速度/ (m·s ⁻¹)	破片撞击情况	破片破碎情况
浮法玻璃	Glass-1	70.10×70.10×7.76	198	正撞击	未破碎
	Glass-2	70.06×63.36×7.78	262	正撞击	未破碎
	Glass-3	70.08×69.98×7.78	287	正撞击	未破碎
YAG透明陶瓷	YAG-1	90.08×90.10×9.06	142	偏撞击	未破碎
	YAG-2	90.04×90.12×9.04	237	正撞击	破碎
	YAG-3	90.06×90.10×9.04	284	偏撞击	未破碎
镁铝尖晶石透明陶瓷	Spinel-1	70.04×70.02×6.04	202	正撞击	破碎
	Spinel-2	70.02×70.20×6.04	250	正撞击	破碎
	Spinel-3	70.02×70.04×5.96	280	正撞击	破碎

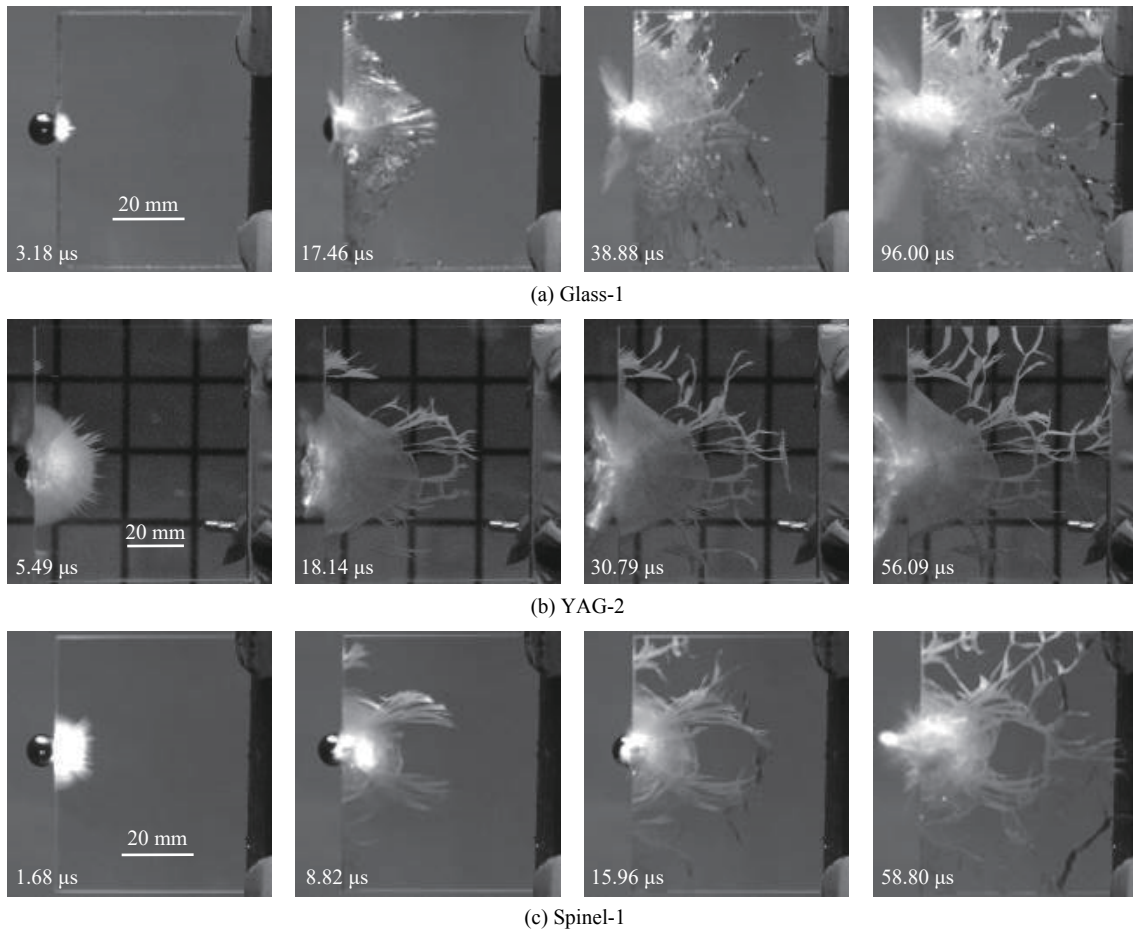


图 4 三种材料在破片冲击下的破坏过程

Fig. 4 Damage process of three transparent materials impacted by the tungsten carbide fragments

试验后 3 种靶体的破碎结果如图 6 所示, 结合高速摄影及回收后的试样碎片, 发现浮法玻璃相较于透明陶瓷的粉碎程度更大, 且玻璃的断裂面相较于透明陶瓷颗粒感更加明显。这说明由于不同材料的微观结构不同, 导致破坏特征存在差异。

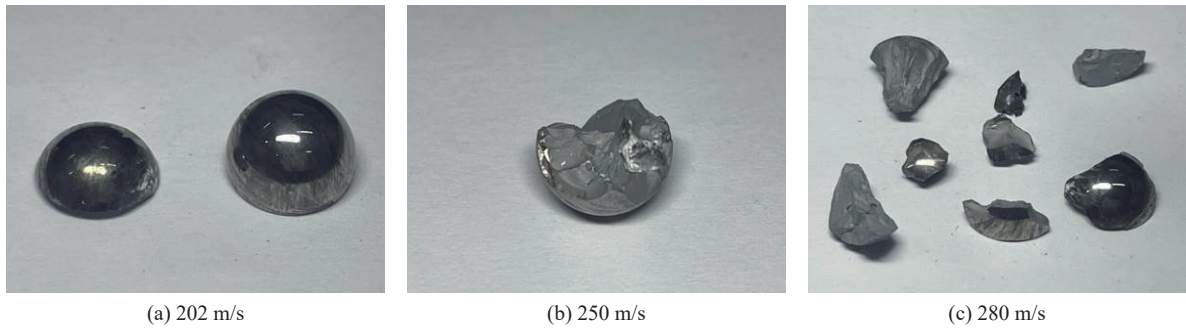


图 5 碳化钨破片以不同速度撞击镁铝尖晶石透明陶瓷的破碎情况

Fig. 5 Fragmentation of tungsten carbide fragments impacting $MgAl_2O_3$ transparent ceramics with different impact velocities

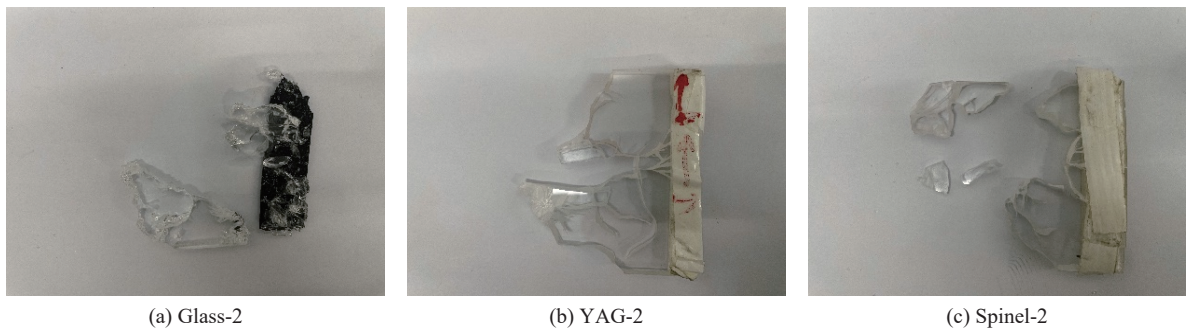


图 6 回收试样

Fig. 6 Recovered samples

1.4 数据分析

通过高速摄影捕获的画面, 确定各时刻材料的粉碎区面积(S)与裂纹扩展距离, 如图 7 所示。选择撞击结束时所有主裂纹中扩展距离最长、扩展路径最清晰的一条裂纹, 将该裂纹的长度定义为主裂纹扩展距离(l)。

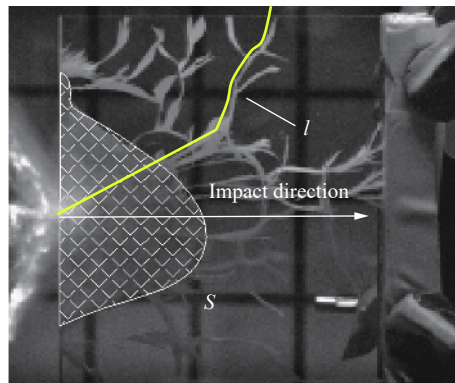


图 7 粉碎区及主裂纹扩展距离

Fig. 7 Crush zone and main crack propagation distance

图 8 为粉碎区面积 S 随时间 t 的变化规律。其中 YAG-1 与 YAG-3 两发试验由于破片撞击时着靶点未在边缘正中心, 导致弹体发生偏撞击, 两者的粉碎区面积与正撞击相比误差较大, 因此未将其列入粉碎区面积分析结果中。从图 8 可以看出, 随着时间的增加, 粉碎区面积逐渐增大, 且增大速度逐渐变缓。两种透明陶瓷材料粉碎区趋于稳定的时间均比浮法玻璃材料的短, 表明两种陶瓷材料相较于玻璃能够更快地吸收破片的撞击动能。对比 3 种材料的最终粉碎区面积, 发现浮法玻璃的最终粉碎区域最

大, YAG 透明陶瓷次之, 镁铝尖晶石透明陶瓷的最终粉碎区域最小。与弹丸侵彻陶瓷靶板^[17]情况类似, 材料所承受的最大应力超过材料强度极限时, 将导致粉碎区域的产生。图 9 为主裂纹扩展距离 l 与时间 t 的关系, 将裂纹扩展距离拟合为过坐标原点的直线, 可以发现, 3 种材料的主裂纹扩展速度基本恒定, 且拟合直线的斜率即为主裂纹的扩展速度。同样由于 YAG-1 试验破片着靶点未在边缘正中心, 导致弹体发生偏折, 因此其裂纹扩展速度较 YAG-2、YAG-3 略有偏差。通过拟合可得, 浮法玻璃、YAG 透明陶瓷、镁铝尖晶石透明陶瓷的裂纹扩展速度分别为 1 428.0、

1 999.3、2 090.8 m/s。由于主裂纹基本为 I 型裂纹^[18], 其裂纹产生与材料的断裂韧性 K_{IC} 密切相关。3 种材料断裂韧性的差异导致主裂纹扩展速度不同。在 200~300 m/s 撞击速度范围内, 不同撞击速度下, 同种材料的主裂纹扩展速度并无显著差异。这与 Strassburger 等^[4]对 SiC 陶瓷的 EOI 试验的研究结果类似。在较低的破片撞击速度范围内, SiC 陶瓷平均主裂纹传播速度随撞击速度的提高出现较明显的“平台段”。

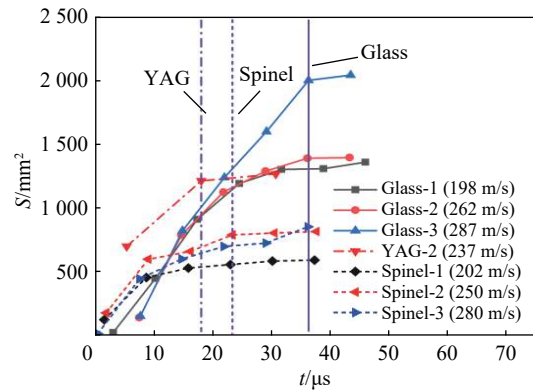


图 8 粉碎区面积随撞击时间的演化

Fig. 8 Evolution of the crushing zone area with impact time

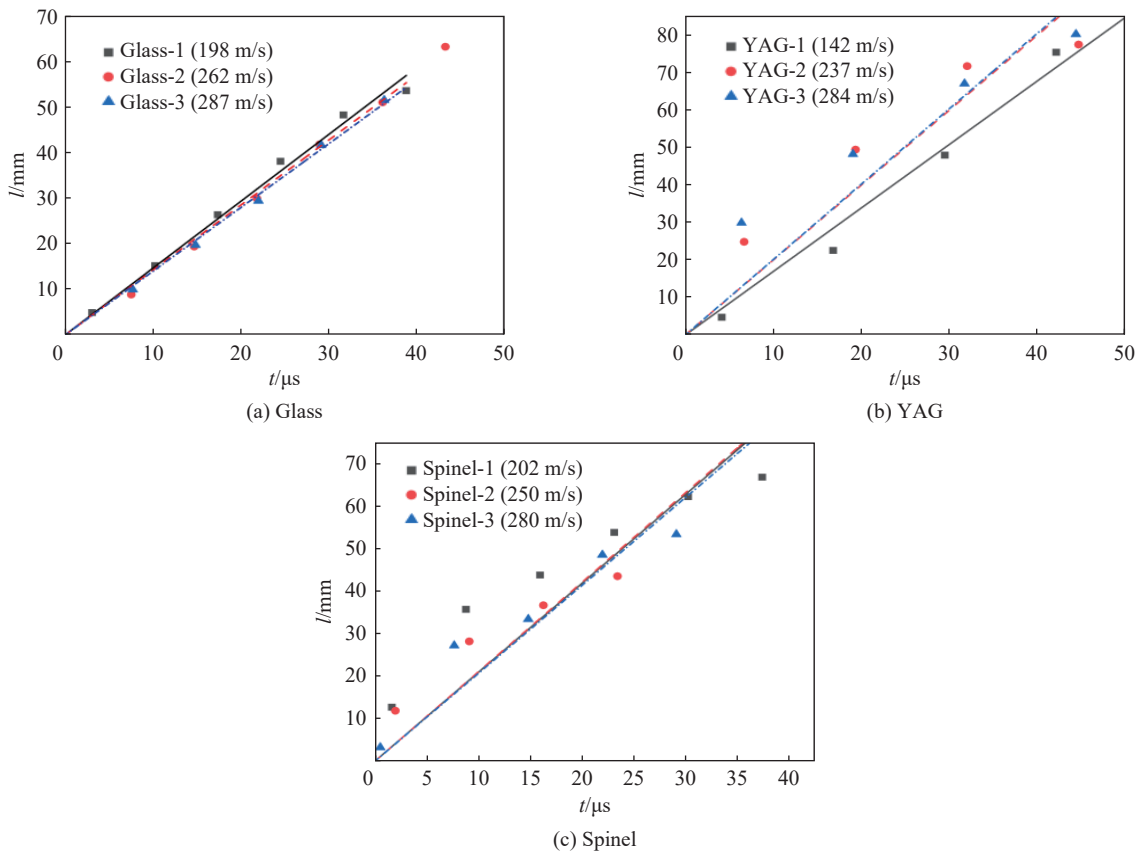


图 9 主裂纹扩展距离随时间演化过程

Fig. 9 Distance of the main crack propagation as a function of impact time

2 透明材料边缘冲击宏观破坏特征分析

虽然浮法玻璃与透明陶瓷的破坏过程趋势相同, 但反映在具体的损伤演化过程中会有较显著的差

异。通过 2.3 节的高速摄影照片对浮法玻璃、YAG 透明陶瓷及镁铝尖晶石透明陶瓷在球形破片 EOI 试验下的宏观破坏特征及损伤演化规律进行分析。EOI 试验中, 试样内部应力波传播过程如图 10 所示。其中 \widehat{ABC} 为弹体撞击引起的纵波 L, 纵波波速为 c_L 。在纵波波后的 \widehat{DEF} 为横波 T, 其速度为 c_T 。如图 11 所示, 在 EOI 试验中使用光弹仪^[5], 可以很清晰地观察到纵波与横波在材料中的传播。在横波后为粉碎区 \widehat{GHIJ} , 其扩展速度为 v_C 。同时, 横波 T 在传播过程中, 会在试样边缘 AC 上引起材料的拉伸破坏, 在粉碎区两侧三角形形状的次裂纹区域 $\triangle DHJ$ 以及 $\triangle FHJ$ 。

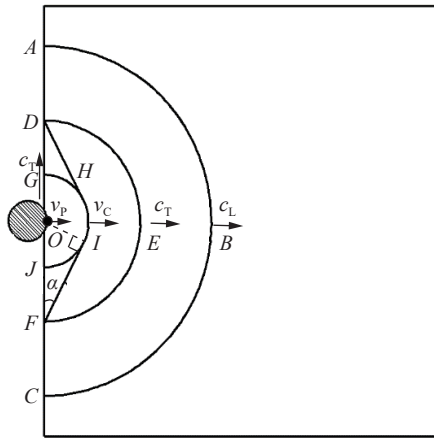


图 10 EOI 试验中波以及裂纹扩展示意图

Fig. 10 Schematic of wave and crack propagation in a plate caused by EOI test

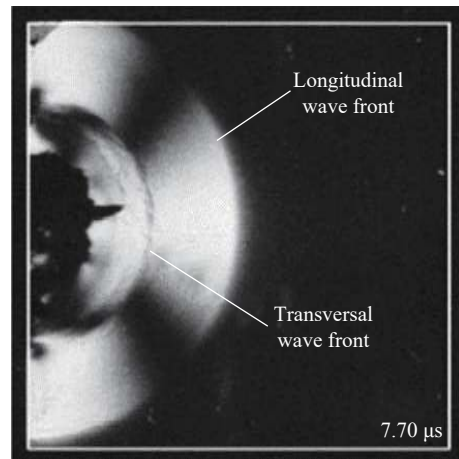


图 11 超白玻璃的球型破片 EOI 试验^[5]

Fig. 11 EOI test on starphire glass with steel sphere^[5]

分别定义浮法玻璃与透明陶瓷破坏过程中的损伤特征。如图 12 所示, 浮法玻璃在破片撞击初始阶段会产生环形的粉碎区, 粉碎区前方伴有少量主裂纹, 同时在粉碎区两侧会有十分明显的次裂纹区域。随着时间的增加, 粉碎区不再延伸, 主裂纹将继续向外扩展直至试样边缘, 整个冲击破坏过程基本结束。浮法玻璃容易在主裂纹过于密集的地方形成新的粉碎区。同时, 相较于透明陶瓷材料, 其主裂纹断裂面在扩展过程中往往会发生严重变向, 导致断裂面不再垂直于材料上表面, 反映到高速摄影结果上为主裂纹变成一条白色高亮的“断裂带”。次裂纹区域的产生是由于破片撞击玻璃边缘时, 在试样表面产生的 Rayleigh 波及横向应力波^[5]共同作用导致的。通过对比不同撞击速度下浮法玻璃中次裂纹区域的扩展情况, 发现随着破片撞击速度的提升, 次裂纹区域会逐渐扩大至试样的上下边缘, 如图 13 所示。

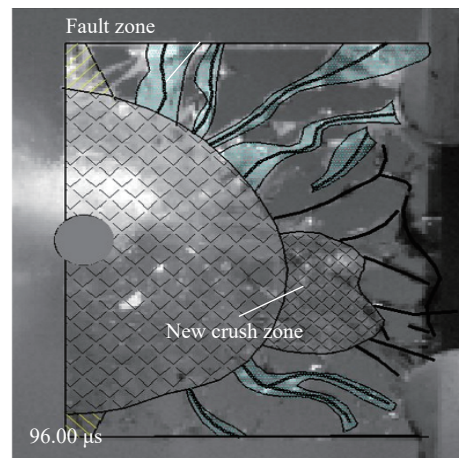
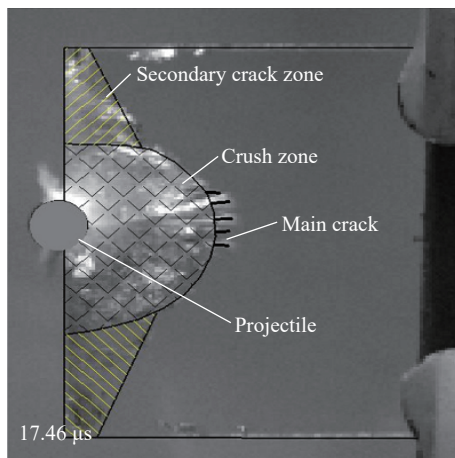


图 12 浮法玻璃 (Glass-1) 在 EOI 试验下的破坏特征

Fig. 12 Failure characteristics of float glass (Glass-1) under EOI test

通过对冲击过程中应力波的传播进行分析,可以得到次裂纹区域尖端到破片撞击初始点 O 的距离 DO 的扩展速度,即为材料的横波波速 c_T 。对浮法玻璃的 3 组高速摄影结果进行分析,得到浮法玻璃的次裂纹尖端扩展速度为 3 372 m/s,浮法玻璃的横波波速 c_T 一般约为 3 500 m/s,表明理论分析具有可靠性。

随着撞击过程的继续,应力波在试样中的传播如图 14 所示,当传播速度较快的纵波 L 到达试样的上下边缘时会发生反射,产生拉伸纵波 L' 。如图 15 所示,相较于浮法玻璃,透明陶瓷材料在受到破片撞击的初始阶段同样会在撞击点附近产生环状的粉碎区域,环形粉碎区前方伴有主裂纹产生,且主裂纹并非呈直线扩展,而是发生“弯折”。该现象可能是由于陶瓷试样上下表面的边界效应所造成,具体的主裂纹“弯折”机理还需利用大尺寸靶体开展进一步研究。同时,在粉碎区两侧会出现较明显的次裂纹扩展,这是由于陶瓷材料强度高于浮法玻璃,在较低的破片撞击速度下,单纯的 Rayleigh 波及横波并不能使陶瓷产生明显的次裂纹区。当反射的拉伸纵波 L' 与横波 T 相互叠加,如图 14 中的 XYZ 以及 PQR 区域。2 种波叠加作用使得陶瓷边缘产生次裂纹簇,而非三角形的次裂纹区域。与浮法玻璃的裂纹变向不同,透明陶瓷的主裂纹与次裂纹在传播过程中极易在裂纹末端发生分叉现象,这种宏观断裂现象使陶瓷产生类似于破片冲击试验下的环向裂纹断裂面与径向裂纹断裂面。从回收的试样与高速摄影结果分析,相较于浮法玻璃,透明陶瓷材料试样在粉碎区内均匀性破碎为小块无规则的碎片。

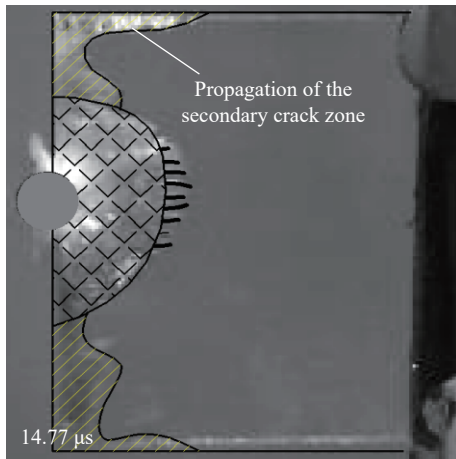


图 13 浮法玻璃(Glass-2)的次裂纹区域沿边缘扩展
Fig. 13 Secondary crack zone of float glass (Glass-2) extends along the edge with higher velocity

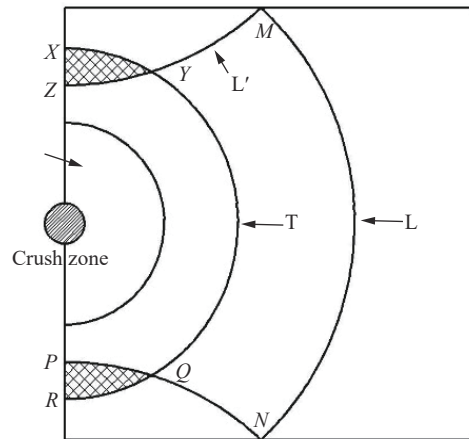


图 14 EOI 试验中纵波的反射
Fig. 14 Reflecton of longitudinal waves in the EOI test

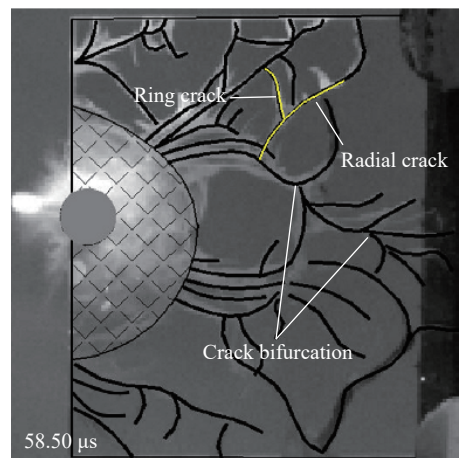
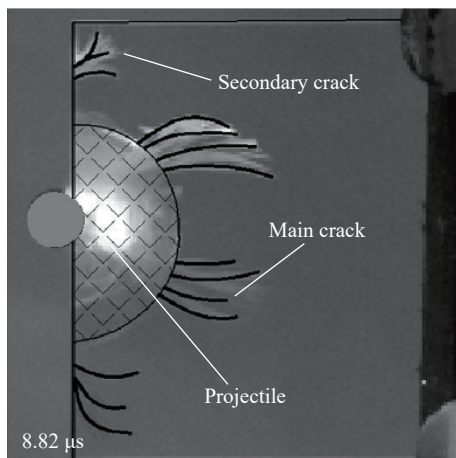


图 15 透明陶瓷 (Spinel-1) 在 EOI 试验下的破坏特征
Fig. 15 Failure characteristics of transparent ceramics (Spinel-1) under EOI test

3 透明陶瓷材料边缘冲击细观破坏特征分析

虽然两种透明陶瓷材料在宏观尺度上的破坏特征类似,但由于二者在晶格结构、制备工艺及微观结构等方面存在较大差异,使两种透明陶瓷反映到细观尺度上的破坏有所不同。通过扫描电子显微镜对 EOI 试验后回收的陶瓷碎片进行细观观测,比较两种透明陶瓷材料受破片冲击后其细观破坏特征的差异。选取陶瓷破碎过程中粉碎区内碎片的层裂裂纹断面、粉碎区外碎片的径向裂纹断面及环向裂纹断面进行细观观测,如图 16 所示。

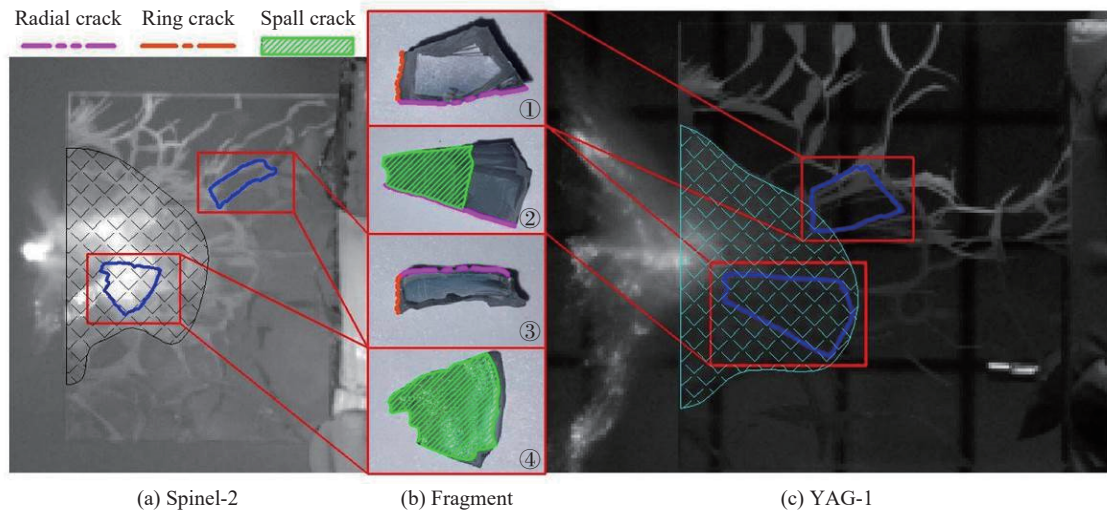


图 16 镁铝尖晶石透明陶瓷与 YAG 透明陶瓷中被测碎片的位置

Fig. 16 Location of fragments in the $MgAl_2O_3$ spinel ceramics and YAG ceramics

图 17 为 YAG 透明陶瓷与镁铝尖晶石透明陶瓷裂纹断面在细观尺度上的典型特征,两种透明陶瓷材料无论在径向裂纹断面、环向裂纹断面及层裂裂纹断面上均可以观察到 A 处的沿晶断裂、B 处的穿晶断裂以及 C 处的滑移带 3 种典型断裂特征^[19-20]。如图 18 所示,在 EOI 试验中,YAG 透明陶瓷与镁铝尖晶石透明陶瓷在径向裂纹断裂面上均会从自由面边缘的穿晶断裂较多逐步向断面中心过渡为沿晶和穿晶混合断裂,在某些区域甚至会出现沿晶穿晶分界线。这与包阔等^[11]在破片冲击 YAG 透明陶瓷复合靶板中发现的规律类似。但是这种过渡在 2 种材料的环向裂纹断面上表现得并不明显,环向裂纹断面的大部分区域均为沿晶与穿晶混合断裂的细观特征。

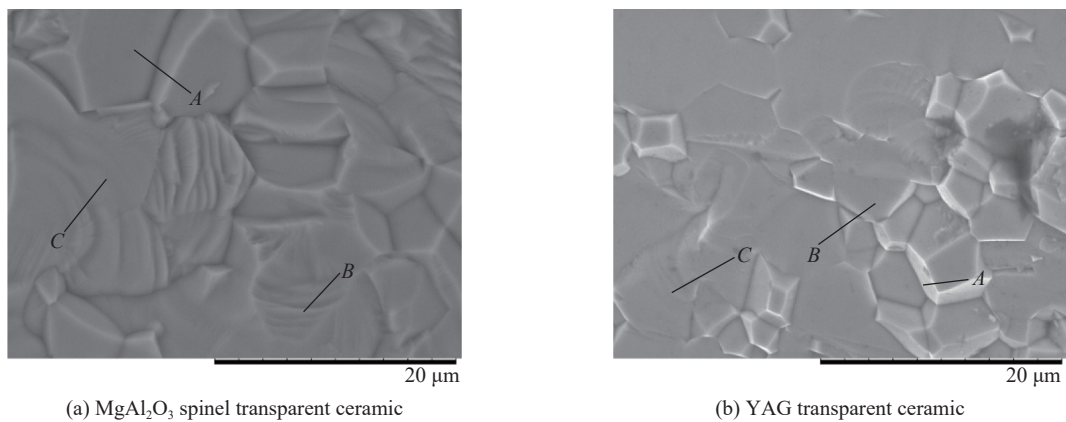


图 17 镁铝尖晶石透明陶瓷与 YAG 透明陶瓷断面典型细观特征

Fig. 17 Typical fracture characteristics of cross-sections of $MgAl_2O_3$ spinel transparent ceramic and YAG transparent ceramic

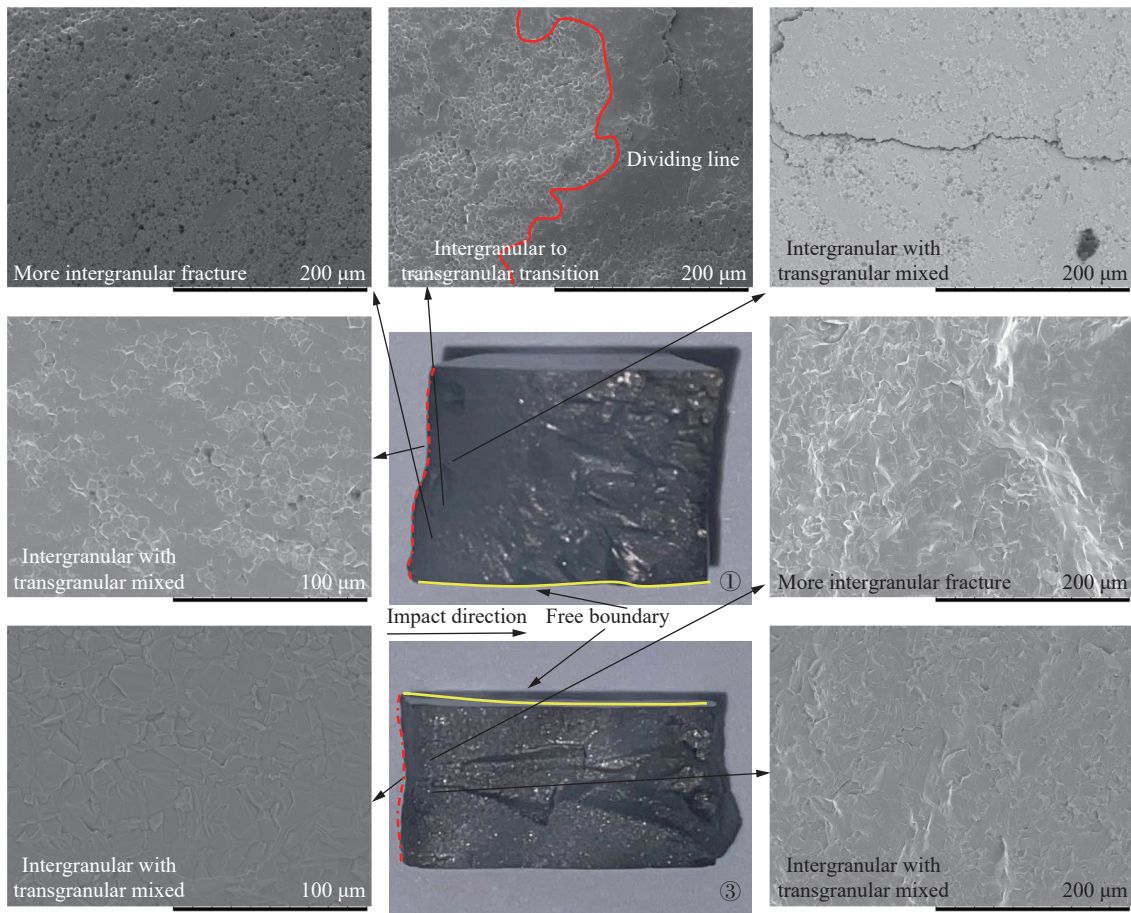


图 18 YAG 透明陶瓷碎片(①)与镁铝尖晶石透明陶瓷(③)径向及环向断裂面上沿晶及穿晶变化

Fig. 18 Intergranular with transgranular changes of YAG transparent ceramics (①) and $MgAl_2O_3$ spinel transparent ceramics (③) on the radial and ring fracture surfaces

无论在径向裂纹断裂面还是环向裂纹断裂面上, YAG 透明陶瓷相较于镁铝尖晶石透明陶瓷均会产生晶体的“剥落”现象, 反映在 SEM 图像上即为黑色的“凹坑”, 如图 19~20 所示。这种晶体的“剥落”现象会随着距破片撞击位置距离的减小而逐渐增大, 甚至产生聚集现象。这表明 YAG 透明陶瓷的晶界结合力不及镁铝尖晶石透明陶瓷强。如图 21 所示, 镁铝尖晶石透明陶瓷在穿晶断裂中, 往往会产生锯齿状的断裂特征, 对比 YAG 透明陶瓷的穿晶断裂则较平滑。对于两种材料在穿晶断裂特征上的区

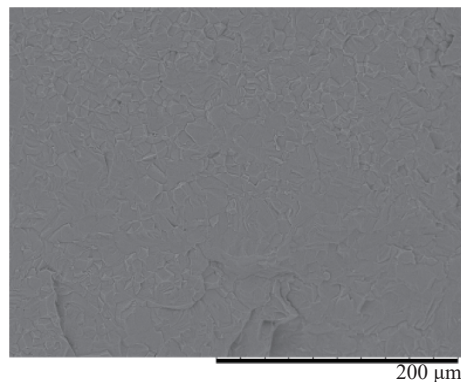


图 19 镁铝尖晶石透明陶瓷穿晶断裂

Fig. 19 Transgranular fracture in $MgAl_2O_3$ spinel transparent ceramics

别, 如图 21 所示, 通过调整 SEM 图像的观测倍数, 发现镁铝尖晶石透明陶瓷在穿晶断裂中, 往往会产生锯齿状的断裂特征, 对比 YAG 透明陶瓷的穿晶断裂则较平滑。

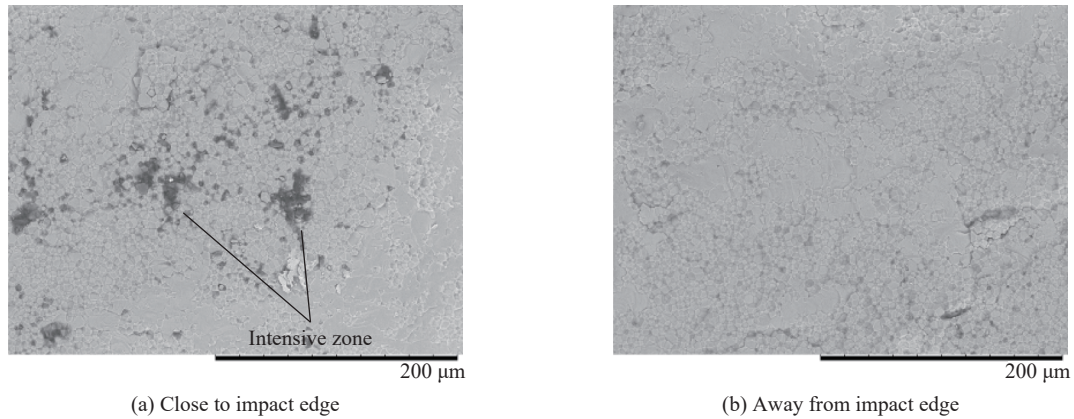


图 20 YAG 透明陶瓷晶体“剥落”现象

Fig. 20 Peeling-off phenomenon in YAG transparent ceramic crystal

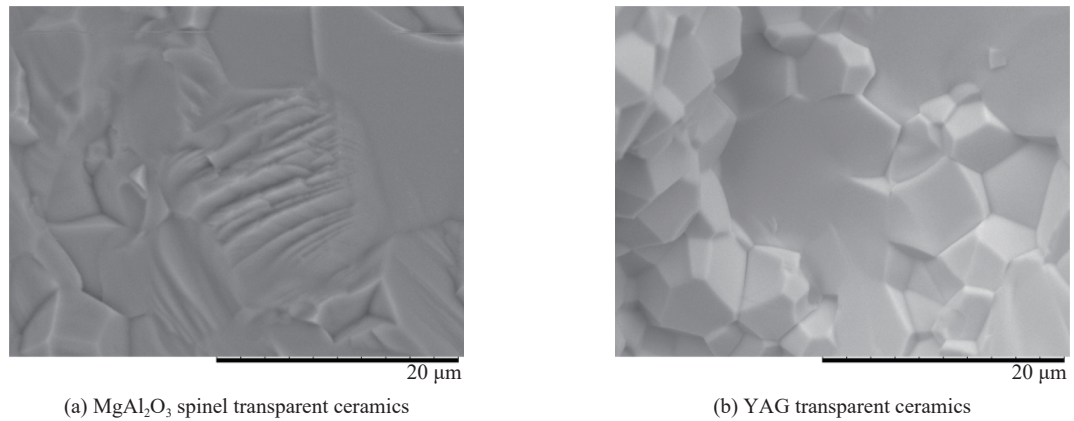


图 21 镁铝尖晶石透明陶瓷与 YAG 透明陶瓷的穿晶断裂

Fig. 21 Transgranular fracture in MgAl_2O_3 spinel transparent ceramics and YAG transparent ceramics

4 结 论

开展了球型碳化钨破片在撞击速度为 200~300 m/s 范围内浮法玻璃、YAG 透明陶瓷和镁铝尖晶石透明陶瓷的 EOI 试验。通过高速摄影获得 3 种材料的冲击破坏及损伤演化过程, 计算了 3 种材料粉碎区面积、主裂纹扩展距离随撞击时间的变化规律; 对比了浮法玻璃与透明陶瓷在宏观破坏特性上的区别。对撞击后的陶瓷碎片进行回收, 通过扫描电镜观察了 YAG 透明陶瓷与镁铝尖晶石透明陶瓷径向裂纹面、环向裂纹面及层裂裂纹面在细观尺度上的破坏特征, 得到如下主要结论。

(1) EOI 试验中, 浮法玻璃的粉碎区面积最大, 其次为 YAG 透明陶瓷, 镁铝尖晶石透明陶瓷的粉碎区最小。3 种材料的主裂纹扩展速度为恒定值, 且在 200~300 m/s 破片撞击速度范围内, 同种材料的主裂纹扩展速度与撞击速度的关联性不大。

(2) 浮法玻璃与透明陶瓷在 EOI 试验中宏观破坏特性存在明显差异: 浮法玻璃会在粉碎区两端产生较明显的三角形次裂纹区, 其主裂纹会出现“变向”扩展。而透明陶瓷的主裂纹在传播过程中有明显的“分叉”现象, 且会产生少量细长状次裂纹簇。

(3) YAG 透明陶瓷与镁铝尖晶石透明陶瓷的径向裂纹、环向裂纹及层裂裂纹断面在细观上会呈现

不同的破坏特征, 2 种材料径向裂纹面上的沿晶与穿晶比例会随着其距陶瓷自由面的远近发生改变, 由靠近自由面的沿晶断裂逐渐变化为断裂面中心的沿晶与穿晶混合分布。而在 2 种材料的环向裂纹面的大部分区域上均为沿晶穿晶混合分布; 同时 YAG 透明陶瓷在沿晶断裂区域会产生晶体“剥落”现象, 而镁铝尖晶石透明陶瓷在穿晶断裂面上呈现锯齿状的断裂特征。

参考文献:

- [1] 马建. 某单兵制导破甲战斗部威力性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.
MA J. Research on the penetration of the portable guidance shaped charge warhead [D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [2] 陈贝贝, 张先锋, 邓佳杰, 等. 弹体侵彻 YAG 透明陶瓷/玻璃的剩余深度 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(8): 083301. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0372.
CHEN B B, ZHANG X F, DENG J J, et al. Residual penetration depth of a projectile into YAG transparent ceramic/glass [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(8): 083301. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0372.
- [3] 赫延明. 防弹装甲用透明镁铝尖晶石陶瓷研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
HAO Y M. Investigation on transparent $MgAl_2O_4$ spinel ceramic for bulletproof armor [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003
- [4] STRASSBURGER E, SENF H, ROTHENHUSLER H. Fracture propagation during impact in three types of ceramics [J]. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 1994, 4(C8): 653–658. DOI: 10.1051/jp4:1994899.
- [5] STRASSBURGER E. High-speed photographic study of wave propagation and impact damage in transparent aluminum oxynitride (AION): ARL-CR-605 [R]. Warren, Michigan, USA: Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground, 2006.
- [6] GRUJICIC M, PANDURANGAN B, COUTRIS N, et al. A simple ballistic material model for soda-lime glass [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 36(3): 386–401. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.08.001.
- [7] ERZAR B, FORQUIN P. Experiments and mesoscopic modelling of dynamic testing of concrete [J]. *Mechanics of Materials*, 2011, 43(9): 505–527. DOI: 10.1016/j.mechmat.2011.05.002.
- [8] GRANGE S, FORQUIN P, MENCACCI S, et al. On the dynamic fragmentation of two limestones using edge-on impact tests [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(9): 977–991. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.07.006.
- [9] STRASSBURGER E, SENF H, DENOUAL C, et al. An experimental approach to validate damage evolution laws for brittle materials [J]. *Journal de Physique IV*, 1997, 7: 909–914.
- [10] 杨岳峰, 唐春安, 梁正召. 非均匀脆性材料 EOI 试验模拟中的动接触法 [J]. *计算力学学报*, 2013, 30(6): 849–853. DOI: 10.7511/jslx201306016.
YANG Y F, TANG C A, LIANG Z Z. A dynamic contact method in the EOI test for heterogeneous brittle materials [J]. *Chinese Journal of Computation Mechanics*, 2013, 30(6): 849–853. DOI: 10.7511/jslx201306016.
- [11] DENOUAL C, COTTENOT C E, HILD F. Analysis of the degradation mechanisms in an impacted ceramic [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1998, 429(1): 427–430. DOI: 10.1063/1.55543.
- [12] STRASSBURGER E. Visualization of impact damage in ceramics using the edge-on impact technique [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2010, 1(3): 235–242. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2004.tb00175.x.
- [13] RIEDEL W, HIERMAIER S, THOMA K. Transient stress and failure analysis of impact experiments with ceramics [J]. *Materials Science & Engineering B*, 2010, 173(1): 139–147. DOI: 10.1016/j.mseb.2009.10.038.
- [14] SUBHASH G, MAITI S, GEUBELLE P H, et al. Recent advances in dynamic indentation fracture, impact damage and fragmentation of ceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, 91(9): 2777–2791. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02624.x.
- [15] GHOSH D, SUBHASH G, RADHAKRISHNAN R, et al. Scratch-induced microplasticity and microcracking in zirconium diboride-silicon carbide composite [J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(13): 3011–3022. DOI: 10.1016/j.actamat.2008.02.038.
- [16] 包阔, 张先锋, 王桂吉, 等. 破片撞击下 YAG 透明陶瓷复合靶的破坏特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(3): 031402. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0339.

- BAO K, ZHANG X F, WANG G J, et al. Fracture characteristics of YAG transparent ceramic composite targets subjected to impact of sphere fragments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(3): 031402. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0339.
- [17] 谈梦婷, 张先锋, 包阔, 等. 长杆弹撞击装甲陶瓷界面击溃/侵彻特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(3): 031406. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0338.
- TAN M T, ZHANG X F, BAO K, et al. Characteristics of interface defeat and penetration during the impact between a ceramic armor and a long-rod projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(3): 031406. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0338.
- [18] 龚江宏. 陶瓷材料断裂力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 23–24.
- [19] HANEY E J, SUBHASH G. Edge-on-impact response of a coarse-grained magnesium aluminate spinel rod [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 40/41: 26–34. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.10.001.
- [20] LASALVIA J C, NORMANDIA M J, MILLER H T, et al. Sphere impact induced damage in ceramics: II. armor-grade B₄C and WC [M] // SWAB J J. *Advances in Ceramic Armor: A Collection of Papers Presented at the 29th International Conference on Advanced Ceramics and Composites*. 2005. DOI: 10.1002/9780470291276. ch21.

(责任编辑 曾月蓉)