

动态冲击与准静态加载下节理角度对裂纹扩展行为的影响*

王启升¹, 李润鹏¹, 王鑫¹, 邱鹏², 雷建银^{1, 3, 4}, 刘志芳¹

(1. 太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

3. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006;

4. 新疆智能装备研究院, 新疆 阿克苏 843104)

摘要: 为揭示节理角度对不同加载条件下 PMMA 裂纹扩展行为的影响规律, 采用数字激光焦散线系统, 结合霍普金森压杆动态冲击试验和准静态三点弯曲试验, 开展了含 15°、30°、45°、60° 和 75° 节理缺陷试样的对比研究。结果表明: 含节理缺陷试样的裂纹扩展可划分为预制裂纹起裂、裂纹-节理界面相互作用和界面再起裂 3 个阶段。在动态冲击加载下, 阶段 1 结束点至阶段 3 再起裂点的水平投影距离由 15° 试样的 6.0 mm 增至 75° 试样的 30.0 mm; 而在准静态加载下该水平投影距离由 7.2 mm 增至 26.0 mm, 表明节理角度改变了裂纹与界面的作用范围和再起裂位置。以焦散斑畸变程度、应力强度因子幅值、裂纹扩展速度峰值及反射焦散斑可识别特征为评价指标, 定量表征裂尖拉-剪耦合效应。在动态再起裂阶段, 30° 试样的裂纹速度峰值为 638.4 m/s, 为 75° 试样 (208.3 m/s) 的 3.06 倍; I 型应力强度因子峰值由 15° 试样的 2.31 MPa·m^{1/2} 降至 75° 试样的 2.03 MPa·m^{1/2}, II 型应力强度因子在低-中角度试样中更明显, 30° 试样峰值达到 2.05 MPa·m^{1/2}。在准静态加载下, 裂纹失稳后仍具有动态传播特征, 但剪切分量明显减弱, 裂纹扩展更趋于 I 型张开主导。分形维数分析显示, 动态冲击加载下裂纹路径分形维数整体高于准静态加载, 其中动态 30° 试样的分形维数最大, 为 1.2072。阶段 2 中, 可观察到 15°、30° 和 45° 试样沿既有裂纹路径反向传播的反射焦散斑, 其传播速度接近 PMMA 的理论瑞利波速度 1105 m/s, 最大相对误差为 15.4%, 表明该反射应力波具有瑞利波近表面传播特征。研究结果可为含节理缺陷的工程结构断裂机理分析与抗裂设计提供试验依据。

关键词: 焦散线法; 裂纹扩展速度; 应力强度因子; 分形维数; 瑞利波

中图分类号: O521.9; O347 **文献标识码:** A

岩体、混凝土等工程结构在服役及受载过程中, 内部常存在原生或加工缺陷。节理型缺陷具有明显非连续性, 极易在外部载荷作用下引起局部应力集中, 诱发裂纹起裂、扩展甚至失稳破坏, 从而降低结构安全性与服役寿命^[1-4]。因此, 揭示节理角度对裂纹扩展路径、应力强度因子及再起裂行为的影响规律, 分析其在不同加载条件下的作用差异和力学机制, 对含缺陷工程结构的断裂评估与安全设计具有重要意义。

为分析裂纹与节理界面相互作用过程, 需要对裂纹扩展路径和裂尖局部应力场演化进行观测与定量分析。焦散线法能够将裂纹尖端附近的应力集中效应转化为可观测的光学图像, 是研究材料裂纹动态扩展行为的重要实验手段。自 Manogg 和 Theocaris 等开展相关理论及实验研究以来, 焦散线法已广泛用于 I 型、II 型及 I-II 复合型裂纹断裂行为研究^[5-7]。与准静态裂纹扩展相比, 动态裂纹扩展过程通常伴随惯性效应、应力波传播等复杂现象, 并且还和几何边界及裂尖局部能量释放机制密切相关。Ravi-Chandar 和 Knauss^[8] 以 Homalite-100 薄板为研究对象, 通过动态断裂实验揭示

*收稿日期: 2026-05-12; 修回日期: 2026-05-30

基金项目: 国家自然科学基金 (12372363, 12272254)

作者简介: 王启升 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: 2023510033@link.tyut.edu.cn

通信作者: 雷建银 (1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事人体损伤与防护以及冲击动力学研究.

E-mail: lejianyin@tyut.edu.cn

了裂纹起裂、扩展和止裂过程中裂尖响应的非稳态特征，并发现随着加载率升高，裂纹起裂所需的应力强度因子明显增大，且裂纹止裂过程具有突发性。Fineberg 等^[9]采用动态断裂实验研究了脆性聚合物中快速裂纹扩展行为，发现裂纹在高速扩展过程中会出现速度振荡和动态失稳现象，并认为这种失稳与裂纹尖端附近的微分支演化密切相关。Sharon 等^[10]进一步针对 PMMA 等脆性材料中的裂纹局部分叉现象开展研究，指出当裂纹扩展速度达到一定临界水平后，主裂纹附近容易产生微分支，导致裂纹路径和断裂表面形貌发生复杂变化。Arakawa 等^[11]采用焦散线法结合高速摄影技术，对 PMMA 等透明脆性聚合物试样的动态裂纹扩展及卸载行为进行了研究，获得了裂纹扩展速度和动态应力强度因子的变化规律，表明裂纹速度、卸载过程和材料局部破坏行为之间存在密切联系。上述研究表明，动态裂纹扩展过程受加载速率、裂尖应力场、裂纹速度及应力波传播等因素共同影响。

研究发现，缺陷形状、缺口几何参数和边界条件等因素均会改变裂纹尖端应力分布，并进一步影响裂纹扩展速度、扩展路径和断裂模式。Yao 等^[12]采用动态焦散线法研究了含偏置裂纹三点弯梁在横向冲击下的断裂行为，分析了无量纲偏置参数对 I-II 复合应力强度因子、裂纹扩展速度和扩展轨迹的影响。结果表明，裂纹偏离梁中心线后，裂尖拉—剪耦合作用增强，裂纹扩展轨迹发生弯曲和偏转，说明裂纹相对位置变化会改变裂尖应力配比并影响动态扩展路径。Li 等^[13]利用动态焦散线实验研究了单侧开半圆孔 PMMA 试件中 I 型及 I-II 复合型裂纹的动态扩展过程，结果表明，半圆孔缺陷会改变裂纹与局部应力集中区之间的相对作用角度，使裂纹靠近孔洞后发生偏转，并影响应力强度因子的演化，说明缺陷几何形态可调制裂纹扩展方向和断裂模式。Liang 等^[14]以预制裂纹张开角为变量开展动态断裂实验，发现运动裂纹经过预制裂纹区域时会发生滞留、偏转和再起裂；随着张开角增大，裂纹扩展滞后作用增强，表现为贯穿时间延长、速度峰值降低。再起裂阶段中，裂尖应力强度因子呈快速增大后迅速降低的变化规律。该研究说明，裂纹角度是影响裂纹偏转、再起裂及裂尖动力学响应的重要几何因素。Washabaugh^[15]以 PMMA 动态断裂为研究对象，分析了高速裂纹扩展过程中的非稳态周期性扩展行为。结果发现，PMMA 中高速裂纹扩展并非稳定连续过程，而会出现速度波动和阶段性失稳现象。Kazarinov 等^[16]对不同厚度 PMMA 试样的动态裂纹扩展行为进行了对比研究，发现试样几何尺寸会影响裂纹扩展距离和传播速度，说明几何结构对裂尖能量释放及应力强度因子演化具有重要影响。纪哲等^[17]采用数字激光动态焦散线系统和分形理论，研究了不同割缝宽度下爆生裂纹扩展行为。结果表明，割缝宽度会影响爆生裂纹扩展长度、主裂纹发展方向和裂纹路径复杂程度；随着割缝宽度变化，主裂纹扩展长度、分形维数、应力强度因子和速度峰值均表现出差异，说明缺陷几何尺度会影响应力波能量聚集、裂纹扩展路径及裂尖动力学响应。现有研究多聚焦缺陷形态、偏置位置及张开角度对裂纹行为的影响，针对动态冲击与准静态两种加载条件下，节理倾角调控裂纹扩展轨迹、应力强度因子及界面再起裂机制的对比研究仍较为匮乏。

为此，本文以含 15° ~ 75° 节理缺陷的 PMMA 三点弯梁为研究对象，基于数字激光焦散线系统，结合霍普金森压杆动态冲击试验与准静态加载试验，开展不同加载条件下裂纹扩展行为的对比研究。重点从裂纹扩展轨迹、焦散斑演化、应力强度因子、扩展速度、裂纹路径复杂度及反射波效应等方面，分析节理角度对裂纹扩展行为的影响规律，进一步阐明动态冲击与准静态加载条件下裂纹—节理相互作用及拉—剪耦合破坏机制。

1 实验与方法

1.1 焦散线理论

焦散线法基于材料受载后试样厚度和折射率变化所引起的光线偏折，在成像平面上形成焦散斑图像，并据此获得裂纹尖端应力强度因子，其成像原理如图 1 所示。焦散斑的形态、尺寸及演化过程与裂尖应力状态密切相关，因此可用于裂纹尖端应力场的定性识别与定量表征。当裂尖以张拉应力作用为主时，焦散斑轮廓通常较为规则，对应 I 型断裂特征，当剪切应力分量增强时，焦散斑则会出现开口偏移、轮廓偏斜或局部畸变等现象，反映出 II 型或 I-II 复合型断裂特征。

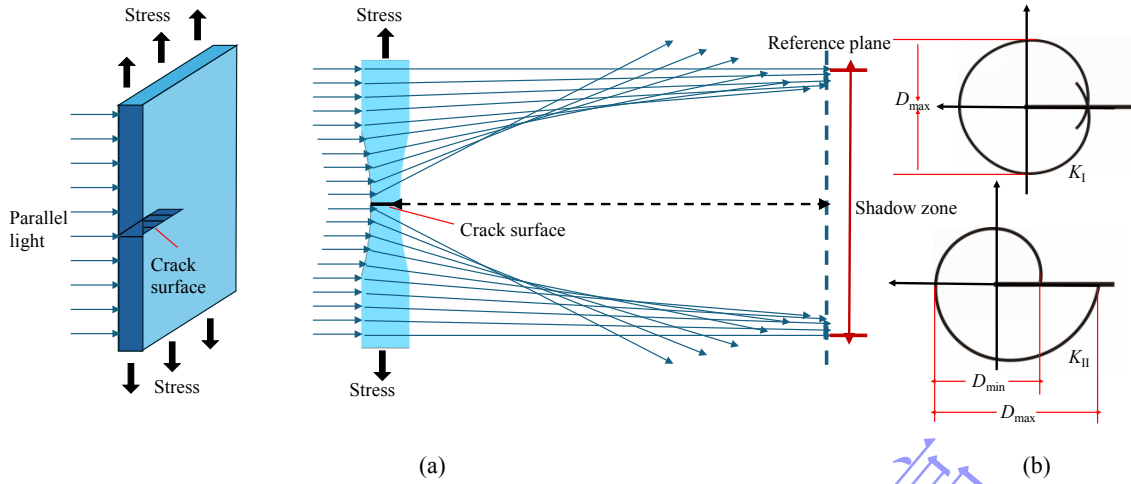


图 1 焦散线成像原理: (a) 成像原理, (b) 焦散斑图案

Fig. 1 Principle of caustic imaging: (a) schematic diagram; (b) caustic pattern

裂纹尖端应力强度因子可通过焦散斑几何尺寸及相关光学系统参数获得。采用 I - II 复合型裂纹应力强度因子计算式, 分别提取裂纹扩展过程中的 K_I 和 K_{II} 型分量来表征裂纹尖端受力状态^[18-19]。I 型应力强度因子可表示为:

$$K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}F(v)}{5} D_{\max}^{\frac{5}{2}} \#(1)$$

$$3g^2 z_0 C d_{\text{eff}}$$

II 型应力强度因子为:

$$K_{II} = \mu K_I \#(2)$$

其中, 焦散斑尺寸比例参数为

$$\lambda = (D_{\max} - D_{\min}) / D_{\max} \#(3)$$

式中, K_I 和 K_{II} 分别为 I 型和 II 型应力强度因子, $F(v)$ 为考虑裂纹扩展速度影响的动态修正因子。由于主要比较不同节理角度试样在相同光学与加载条件下的相对变化规律, 且裂纹速度处于 PMMA 动态焦散线实验常用修正范围内, 参考已有焦散线试验^[18-20]的处理方法, $F(v)=1.0$ 。实验系统放大系数 g 的取值, 取决于标定尺分别在试样平面与成像平面上的长度比例。经标定, 本成像系统的图像尺寸与试样平面实际尺寸呈 1:1 关系, 因此令 $g=1.0$ 。 z_0 为试样中间平面至参考平面距离, 由光路布置直接测量; C 为 PMMA 的应力光学常数, 用于表征应力变化引起的折射率变化; d_{eff} 表示试样的有效厚度, 试样厚度为 5 mm, 故 $d_{\text{eff}}=5$ mm。 D_{\max} 和 D_{\min} 分别为焦散斑沿裂纹扩展方向的最大直径和最小直径, 由高速图像标定后测得。 λ 为焦散斑几何畸变参数, 用于表征焦散斑偏离 I 型对称形态的程度。 λ 越大, 说明裂尖附近 II 型剪切分量的影响越强。 μ 为 I - II 复合型裂纹应力强度因子的比例系数, 其值由 λ 对应的标定关系确定。

1.2 实验系统与试样制备

数字激光焦散线实验系统用于记录试样卸载过程中裂纹尖端焦散斑和裂纹扩展路径的演化过程, 如图 2 所示。该系统主要由光学成像系统、加载系统和计算机组成。光学成像系统包括激光光源、反射镜 1、反射镜 2 和 i-speed 超高速摄像机。加载系统为霍普金森压杆装置和准静态三点弯曲加载装置。实验过程中, 激光束经反射镜 1 后形成平行光场并照射试样表面。试样卸载后, 裂纹尖端附近的应力集中引起透射光偏折, 偏折光经成像光路通过反射镜 2 进入超高速摄像机, 从而获得裂纹扩展过程中焦散斑的时序图像。本实验中, 两组反射镜直径均为 200 mm, 焦距为 2000 mm。高速摄像机采样率设定为 1×10^5 fps, 图像分辨率为 672×216 pix。

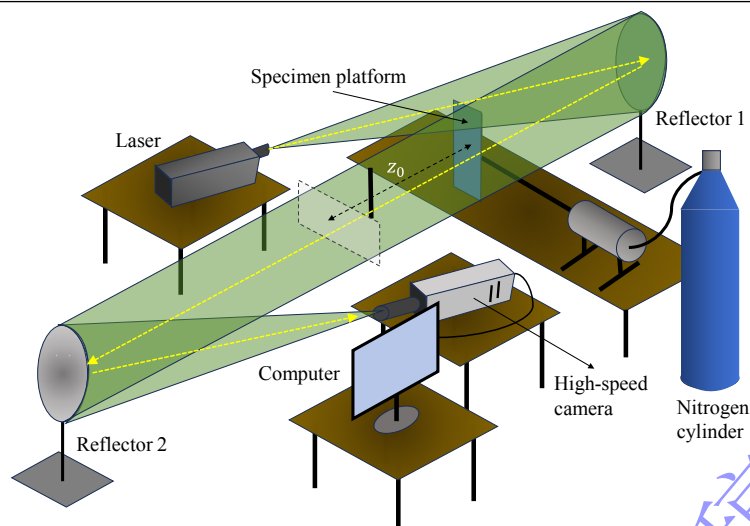


图 2 动态焦散线实验系统

Fig. 2 Dynamic caustic experimental system

试样采用透明 PMMA 板材加工而成。PMMA 具有良好的透光性和加工成形性，能够满足焦散线实验对光学观测和缺陷加工精度的要求。其主要力学参数如表 1 所示。

表 1 PMMA 材料主要力学参数

Table 1 Main mechanical parameters of PMMA

| Parameter | Elastic modulus(GPa) | Shear modulus(GPa) | Poisson's ratio | Density(kg/m ³) | Rayleigh wave velocity(m/s) |
|-----------|----------------------|--------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Value | 3.1 | 1.148 | 0.35 | 1.18×10 ³ | 1105 |

试样尺寸为 220 mm × 60 mm × 5 mm，在距试样下边界 35 mm 的位置加工节理缺陷，并在试样下边界中心位置采用激光切割方式预制一条长度为 8 mm 的初始裂纹。节理缺陷长度为 30 mm，宽度为 3 mm，所有试样的三点弯曲加载跨距均设置为 180 mm。节理角度设置为 $\theta = 15^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° 和 75° ，如图 3 所示。选取 $15^\circ \sim 75^\circ$ 、间隔 15° 的节理倾角，可覆盖低、中、高典型倾角工况，规避 $0^\circ/90^\circ$ 等边界效应，同时保证缺陷位于观测有效区域，便于不同工况规律对比。

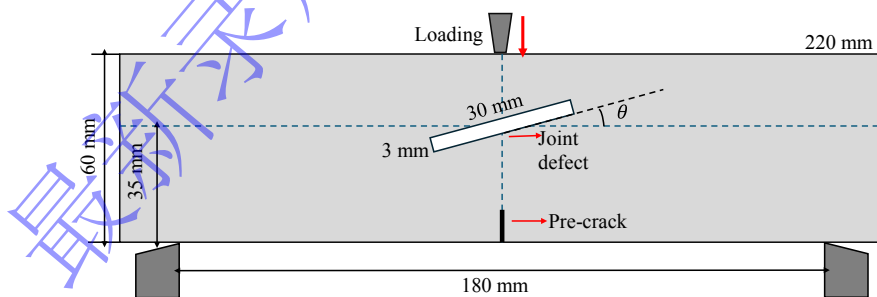


图 3 试样的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the specimen

2 结果与分析

2.1 裂纹扩展路径特征

含节理缺陷试样受载后，裂纹扩展过程可划分为三个阶段，如图 4 所示。阶段 1 为预制裂纹尖端起裂并扩展到达节理界面；阶段 2 为裂纹到达节理界面后与节理界面发生相互作用的阶段；阶

段 3 为裂纹从节理界面另一侧再起裂并继续扩展至贯通破坏的过程态冲击加载下, 不同节理角度试样裂纹尖端应力强度因子随时间表现出明显阶段性。为研究节理角度对裂纹扩展的影响, 以阶段 1 结束点与阶段 3 再起裂点之间的水平方向投影距离作为表征参数。

动态冲击加载下, 不同节理角度试样的裂纹扩展路径存在明显差异, 主要体现在阶段 1 的传播路径、阶段 2 的界面作用范围以及阶段 3 的裂纹路径复杂程度等方面, 如图 4(a)所示。阶段 1 中, 各组裂纹均由预制裂纹尖端起裂, 并向节理界面扩展。进入阶段 2 后, 裂纹与节理界面发生相互作用, 并在界面另一侧形成再起裂点。阶段 1 结束点至阶段 3 再起裂点之间的水平投影距离随节理角度由 15° 试样的 6.0 mm 逐渐增至 75° 试样的 30.0 mm , 表明节理角度会改变裂纹在界面附近的作用范围和再起裂位置。阶段 3 中, 裂纹在节理界面另一侧再起裂并继续扩展, 其中 45° 及以下角度试样裂纹路径弯折更明显, 表明低—中角度节理对裂纹扩展方向具有更明显的调制作用, 该现象可能与界面附近拉—剪应力分量重新分配有关。相比之下, $60^\circ\sim 75^\circ$ 节理试样再起裂后路径相对平缓。

准静态加载下, 裂纹扩展仍表现出与动态冲击加载相同的三阶段特征, 如图 4(b)所示。与动态冲击加载相比, 准静态加载下外部载荷和裂尖应力积累过程较为平缓, 节理界面附近的突变和波动较小, 因此裂纹路径整体更为平直。不同角度试样投影距离仍表现出角度依赖性, 表明节理角度会改变裂纹在界面附近的作用范围和再起裂位置。进一步对比可知, 动态冲击加载下裂纹—节理界面的相互作用更强, 裂纹更易发生偏转和路径复杂化; 准静态加载下裂尖应力场演化相对平缓, 其路径波动程度弱于动态冲击加载工况。综上, 节理角度通过改变裂纹—节理界面的相对作用位置, 影响裂纹在界面附近的作用范围、偏转程度和再起裂位置。动态冲击加载下, 该作用更加显著, 裂纹更易发生偏转和路径复杂化; 准静态加载下, 裂尖应力场演化较为平缓, 节理角度对裂纹路径的调控作用相对较弱。

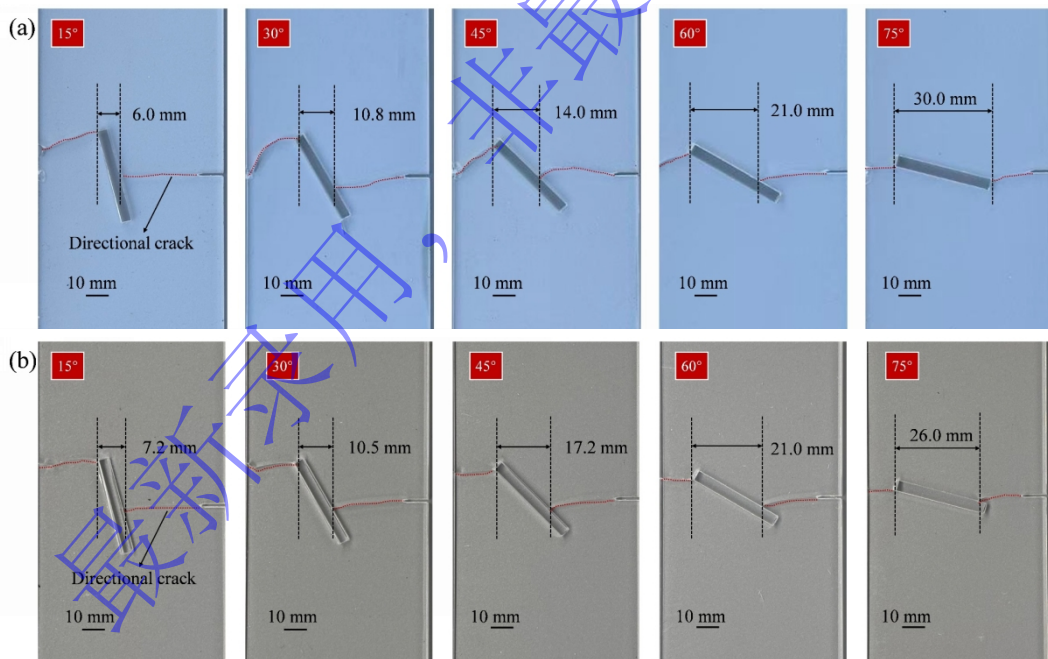


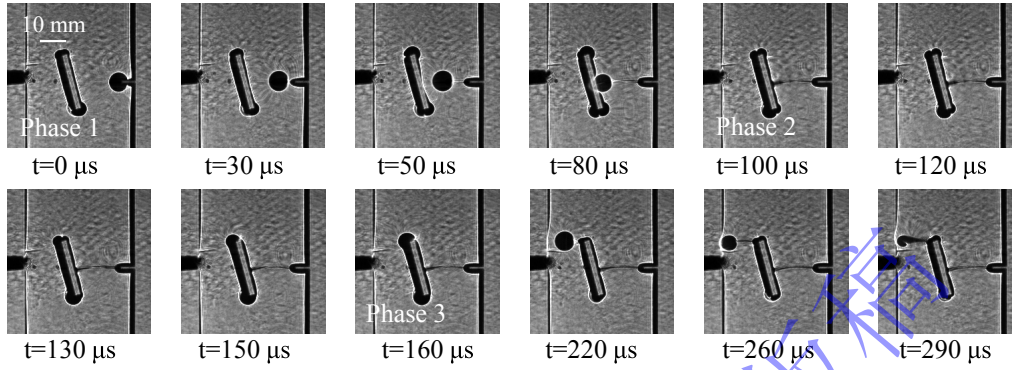
图 4 加载后裂纹路径, (a) 动态冲击加载; (b) 准静态加载

Fig. 4 Crack path after loading: (a) dynamic impact loading; (b) quasi-static loading

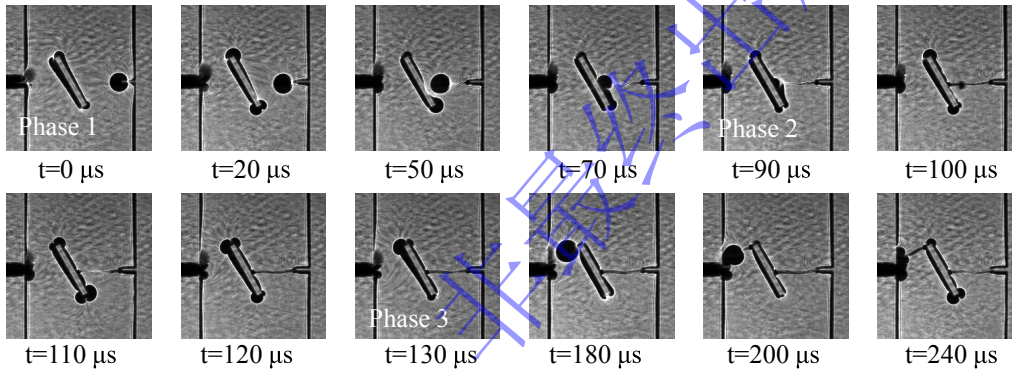
2.2 焦散斑演化特征

动态冲击加载下, 含 $15^\circ\sim 75^\circ$ 节理缺陷试样的裂纹尖端焦散斑随裂纹扩展经历起裂阶段规则焦散斑、界面附近畸变及再起裂后逐渐衰减 3 个过程, 如图 5 所示。加载初期, 焦散斑轮廓相对规则, 呈现典型 I 型断裂特征, 表明裂尖应力场以拉应力为主, 裂纹以张开模式起裂并扩展。随着裂纹逐渐靠近节理界面, 裂尖焦散斑由初期较规则形态逐渐转变为拉长、开口偏移和局部不对称等形态, 说明裂纹尖端应力场受到节理界面扰动, 裂尖附近剪切应力分量逐渐增强, 裂纹断裂模式由 I

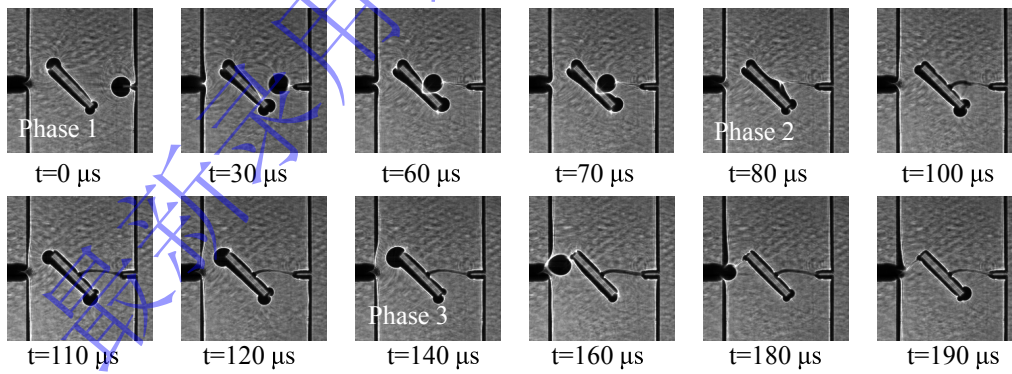
型向 I - II 复合型转变。节理角度对裂纹到达节理界面的时间及界面附近焦散斑形态具有明显影响。阶段 1 结束时间由高速摄影序列中裂纹尖端到达节理界面，或焦散斑前缘与节理界面发生明显相互作用的时刻确定。高速摄像机采样率为 1×10^5 fps，相邻两帧时间间隔为 $10 \mu\text{s}$ ，因此 $15^\circ \sim 75^\circ$ 节理试样阶段 1 结束时间主要分布在 $50 \sim 100 \mu\text{s}$ 范围内，说明节理角度会影响裂纹到达节理界面的时间及界面附近焦散斑形态。



(a)



(b)



(c)

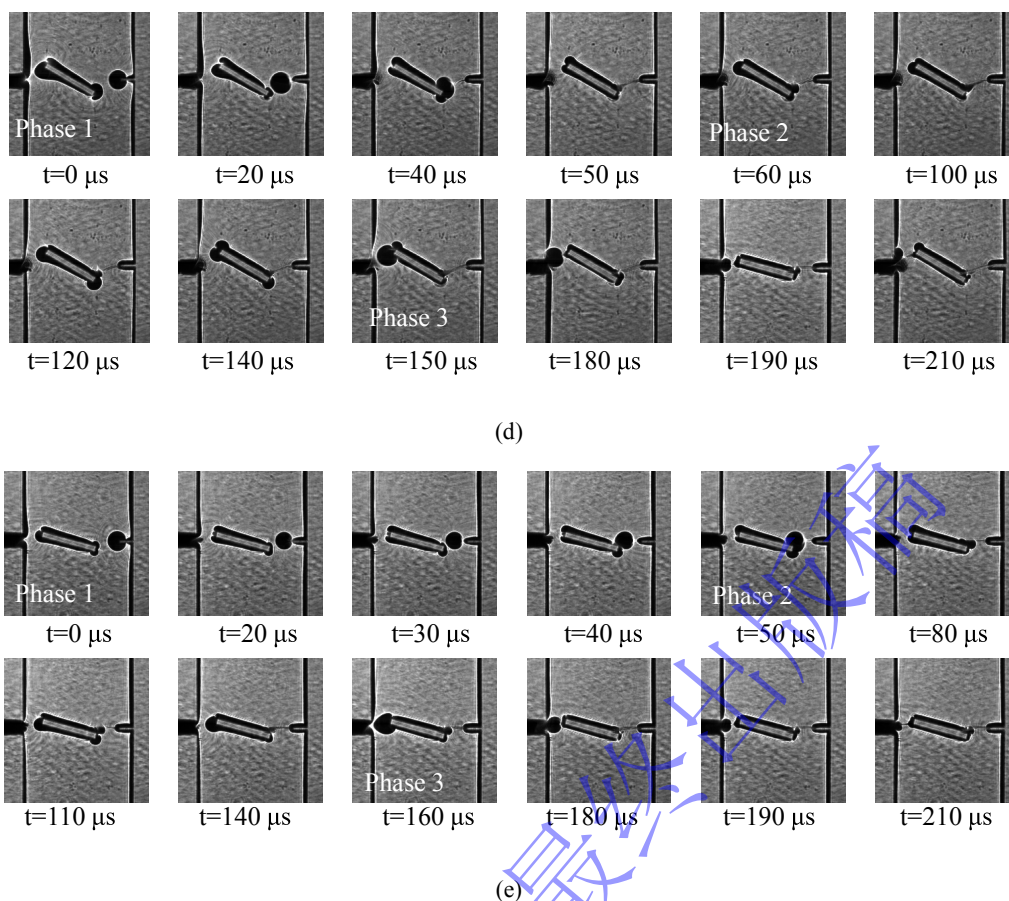
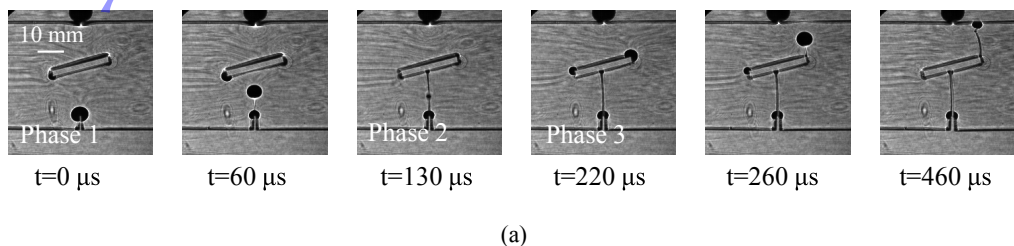


图 5 动态冲击加载下的焦散斑图像: (a) 15°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 75°。阶段 1 为预制裂纹起裂并向节理界面扩展, 阶段 2 为裂纹与节理界面相互作用, 阶段 3 为界面再起裂并继续扩展

Fig. 5 Caustic pattern images under dynamic impact loading: (a) 15°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 75°. Phase 1 denotes crack initiation and propagation toward the joint interface, Phase 2 denotes crack-joint interaction, Phase 3 denotes crack re-initiation and subsequent propagation across the joint interface

准静态加载下, 不同节理角度试样在各典型阶段的焦散斑图像如图 6 所示。阶段 1 中, 各组试样起裂期的焦散斑轮廓较为规则, 主要表现为 I 型断裂特征。随着裂纹向节理界面扩展, 焦散斑在界面附近出现一定畸变, 说明节理界面对裂尖应力场产生扰动。15°~75°节理试样的阶段 1 结束时间约为 70~130 μs, 整体晚于动态冲击加载工况。

进入阶段 3 后, 准静态加载下不同节理角度试样的焦散斑形态差异进一步显现。15° 和 30° 节理试样的焦散斑仍具有一定非规则特征, 表明裂纹再起裂后裂尖仍受剪切应力分量影响。随着节理角度增大, 焦散斑逐渐恢复为较规则轮廓, 说明裂纹尖端剪切扰动及 II 型应力分量逐步减弱, 裂纹扩展表现出以 I 型张开为主的特征。最终, 在 240~460 μs 内, 裂尖附近能量逐渐释放并耗散, 焦散斑随之缩小直至消失。



(a)

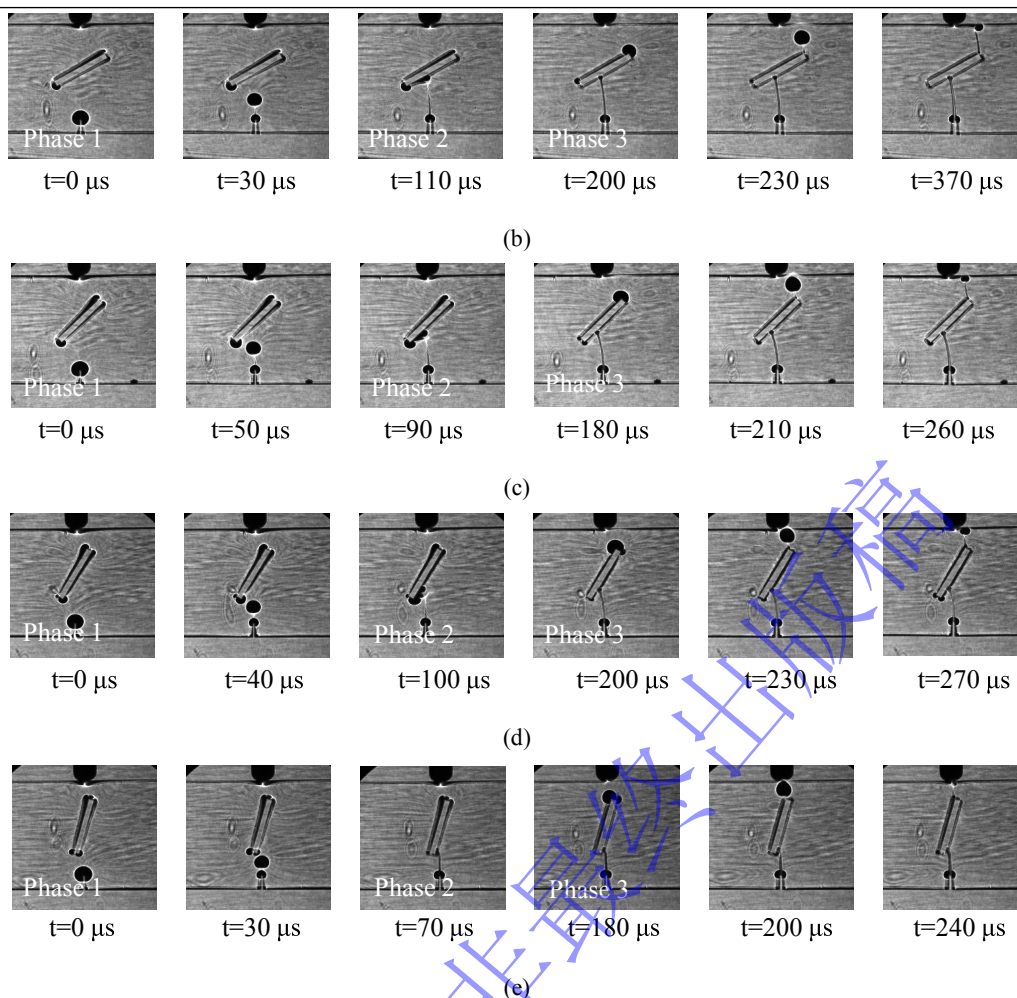


图 6 准静态加载下的焦散斑图像: (a) 15°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 75°

Fig. 6 Caustic pattern images under quasi-static loading: (a) 15°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 75°

综合图 5 和图 6 可知, 动态冲击和准静态加载条件下裂纹尖端焦散斑整体经历了由较规则形态向 I-II 复合型形态转化, 并逐渐衰减消失的过程, 但二者在演化速率上存在明显差异。动态冲击加载下焦散斑演化更快、形态变化更剧烈, 表明裂尖应力扰动更强。准静态加载下焦散斑演化相对平缓, 高角度节理条件下更接近规则轮廓, 说明剪切作用影响相对较弱。

2.3 裂纹尖端应力强度因子

动态冲击加载下, 不同节理角度试样裂纹尖端应力强度因子随时间表现出明显阶段性演化特征, I 型和 II 型应力强度因子分别如图 7(a)和图 7(b)所示。阶段 1 中, 各组试样 I 型应力强度因子起裂峰值较为接近, 为 $2.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 说明裂纹起裂主要受张拉应力场控制, 表现出以 I 型张开为主的扩展特征。随后, I 型应力强度因子在振荡中逐渐衰减, 其高水平持续时间随节理角度增大而缩短: 15°节理试样持续时间最长, 为 $100 \mu\text{s}$, 75°节理试样在 $40 \mu\text{s}$ 后已降至较低水平, 这表明随节理角度增大, 裂尖张拉应力场的高幅值持续时间缩短, 再起裂阶段裂尖张拉与剪切驱动力随节理倾角增大逐渐衰弱。

与 I 型应力强度因子相比, 阶段 1 中 II 型应力强度因子的显著响应主要出现在 30°、45° 和 60° 节理试样中, 其峰值分别为 0.96 、 1.24 和 $1.15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。其中, 45° 节理试样对应的 II 型应力强度因子最大, 说明该角度下裂尖剪切分量最强, 15° 和 75° 节理试样 II 型响应较弱, 表明中等节理角度更容易增强裂尖拉-剪耦合作用。

阶段 3 为裂纹经节理界面作用后在另一侧再起裂并继续向试样边界扩展的过程。各试样 I 型应力强度因子峰值随节理角度增大依次为 2.31 、 2.22 、 2.14 、 2.05 和 $2.03 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 整体呈降低趋势, 表明节理角度增大后再起裂阶段的张拉驱动力有所减弱。II 型应力强度因子主要出现在

15°、30°、45° 和 60° 节理试样中, 对应峰值分别为 1.94、2.05、1.72 和 1.46 MPa·m^{1/2}。该结果并非随节理角度单调变化, 而是表现为低—中角度条件下响应更明显, 其中 30° 试样达到最大值, 随后随角度进一步增大而减弱。这说明界面再起裂瞬间裂尖附近存在局部剪切扰动, 但高角度节理条件下剪切分量对再起裂扩展的贡献明显降低。需要说明的是, K_{II} 主要表示剪切分量的幅值, 其峰值反映界面再起裂瞬间的局部剪切扰动增强, 并不意味着裂纹扩展全过程均由 II 型断裂主导。结合裂纹整体路径和 K_I 的持续响应可知, 裂纹扩展仍以 I 型张开作用为基础, 并在局部阶段受到剪切分量调制^[20]。

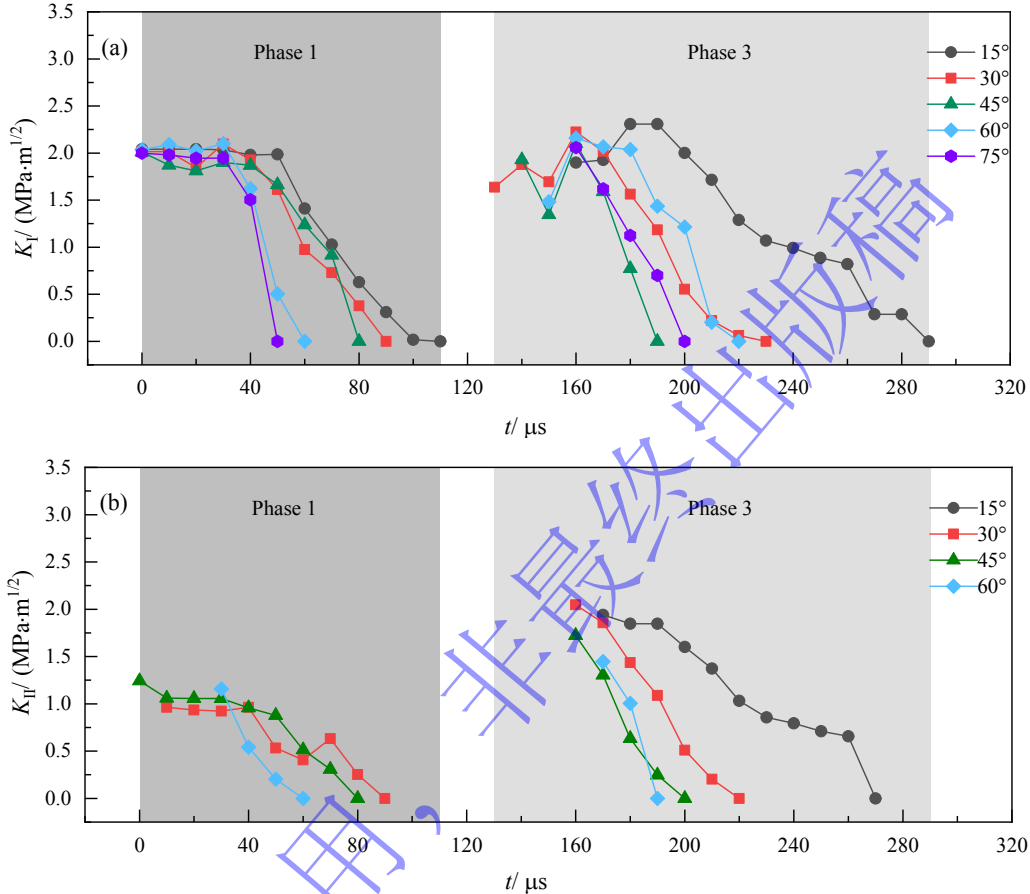


图 7 动态冲击加载下裂纹尖端应力强度因子: (a) I 型应力强度因子 K_I ; (b) II 型应力强度因子 K_{II}
Fig. 7 Crack-tip stress intensity factors under dynamic impact loading: (a) mode I stress intensity factor K_I ;
(b) mode II stress intensity factor K_{II}

准静态加载下, 不同节理角度试样裂尖应力强度因子的变化规律如图 8 所示。与动态冲击加载相比, 准静态加载下外部载荷输入和裂尖应力积累过程较为平缓, 裂尖应力强度因子整体幅值较低、持续时间较长。阶段 1 中, 各试样 I 型应力强度因子随预制裂纹起裂后逐渐减小, 峰值为 1.25 MPa·m^{1/2}, 未观测到明显 II 型应力强度因子响应, 说明该阶段裂纹扩展主要受 I 型张开作用控制。

阶段 3 中, 裂纹由节理界面另一侧再起裂并继续向试样边界扩展, 各试样 I 型应力强度因子均表现出再起裂后的衰减特征。随节理角度增大, 高幅值持续时间整体缩短, 但峰值水平并非严格单调变化。其中, 15° 和 30° 节理试样分别出现 1.20 和 0.61 MPa·m^{1/2} 的二次峰值, 且衰减过程相对平缓, 而 45°、60° 和 75° 节理试样则快速衰减, 未出现明显二次增强。II 型应力强度因子仅在 15° 和 30° 节理试样中具有明显响应, 其峰值分别为 1.07 和 0.76 MPa·m^{1/2}, 且与 I 型应力强度因子的二次峰值时段基本对应, 表明小角度节理条件下裂纹再起裂后仍存在一定拉—剪耦合作用。相比之下, 中高角度节理试样在阶段 3 中 II 型分量明显减弱, 裂纹扩展逐渐回归为以 I 型张开为基础的扩展状态。

综上, 准静态加载下裂尖应力场演化相对平缓, 裂纹扩展仍以 I 型张开作用为主, II 型剪切分量仅在局部阶段出现弱响应。该结果与焦散斑畸变程度较弱、裂纹路径整体较为平直的现象相一致。

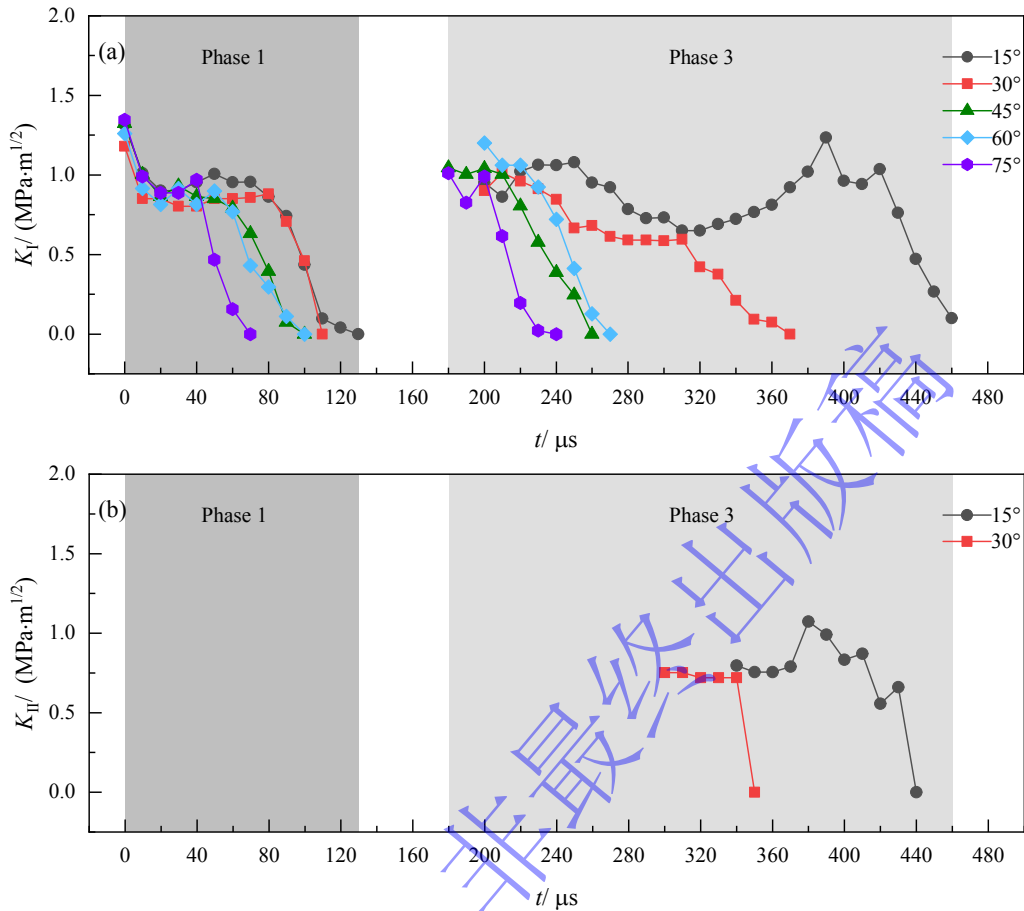


图 8 准静态加载下裂纹尖端应力强度因子: (a) I 型应力强度因子 K_I ; (b) II 型应力强度因子 K_{II}

Fig. 8 Crack-tip stress intensity factors under quasi-static loading: (a) mode I stress intensity factor (K_I); (b) mode II stress intensity factor K_{II}

2.4 裂纹扩展速度

基于数字激光焦散线系统获得的裂纹扩展时序位置, 采用图像处理方法提取裂尖坐标, 并通过中心差分法计算裂纹扩展速度。动态冲击加载下, 不同节理角度试样裂纹扩展速度随时间的演化曲线如图 9 所示。阶段 1 中, 裂纹由预制裂纹尖端起裂并向节理界面扩展。当节理角度由 15° 增至 75° 时, 裂纹速度峰值整体呈先增大后减小的变化趋势。其中, 30° 节理试样峰值速度最高, 为 494.4 m/s , 75° 节理试样最低, 为 303.5 m/s , 前者较后者提高 62.9% 。该现象表明, 在动态冲击加载初期, 中等节理角度更有利于增强裂尖局部应力扰动和能量释放, 促进裂纹扩展, 而高角度节理对张拉应力场的削弱作用更强, 使裂纹扩展驱动力降低。

阶段 3 中, 裂纹由节理界面另一侧再起裂并向试样边界扩展。随着节理角度由 15° 增至 75° , 裂纹扩展速度峰值依次为 469.8 、 638.4 、 486.6 、 276.8 和 208.3 m/s , 整体呈先增大后减小趋势, 其中 30° 节理试样速度最高。与阶段 1 相比, 15° ~ 45° 节理试样在阶段 3 中的峰值速度整体有所提高, 而 60° 和 75° 节理试样则明显降低。裂纹扩展速度的变化与图 7 中动态冲击加载下应力强度因子的演化规律基本一致。低—中角度节理试样在再起裂阶段的 II 型应力强度因子响应相对明显, 裂纹速度峰值和波动幅度较高; 高角度节理试样中 II 型应力强度因子响应减弱, 裂纹速度峰值整体降低。

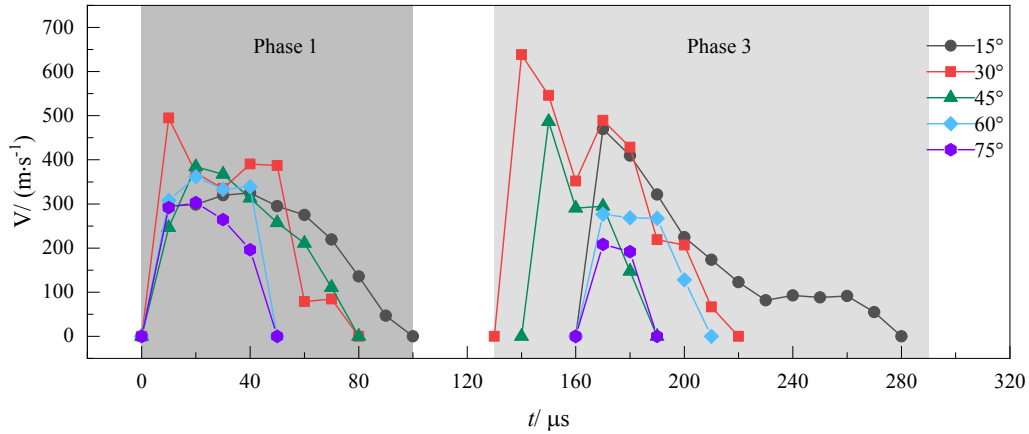


图 9 动态冲击加载下裂纹扩展速度

Fig. 9 Crack propagation velocity under dynamic impact loading

准静态加载下, 不同节理角度试样裂纹扩展速度随时间的变化曲线如图 10 所示。准静态加载下, 外部载荷输入过程较动态冲击加载更平缓, 裂纹起裂前的应力积累过程更稳定, 但裂纹失稳扩展后仍具有明显动态传播特征。阶段 1 中, $15^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 节理试样的速度峰值分别为 302.2、318.5、325.0、288.9 和 295.3 m/s, 其中 45° 节理试样最高。整体来看, 裂纹扩展速度随节理角度增大呈先增大后降低并伴随小幅波动的趋势, 说明准静态加载下节理角度对裂纹初始扩展仍有一定调控作用, 但弱于动态冲击加载工况。

阶段 3 中, 裂纹扩展速度峰值整体低于或接近阶段 1, 但速度响应持续时间明显长于动态冲击加载工况。 15° 和 30° 节理试样均出现两次速度峰值, 分别为 294.5、140.9 m/s 和 285.2、151.9 m/s, 而 45° 、 60° 和 75° 节理试样仅出现一次主要峰值, 分别为 298.6、296.7 和 271.3 m/s。该结果表明, 小角度节理试样在再起裂阶段仍存在一定拉—剪耦合作用, 速度曲线呈现阶段性波动; 随着节理角度增大, II 型分量减弱, 裂纹扩展逐渐转为张拉应力场主导, 难以诱发明显的二次速度增强。

综上所述, 裂纹扩展速度演化规律与应力强度因子变化趋势基本一致, 二者相互印证。动态冲击加载下, 节理角度对裂纹扩展速度的调控作用更显著, 低—中角度节理条件下裂尖拉—剪耦合作用增强, 其裂纹扩展速度更高且阶段性波动更明显。准静态加载下, 外部加载过程更平缓, 裂纹失稳后速度峰值低于动态冲击加载工况, 说明裂尖能量释放过程相对缓和。

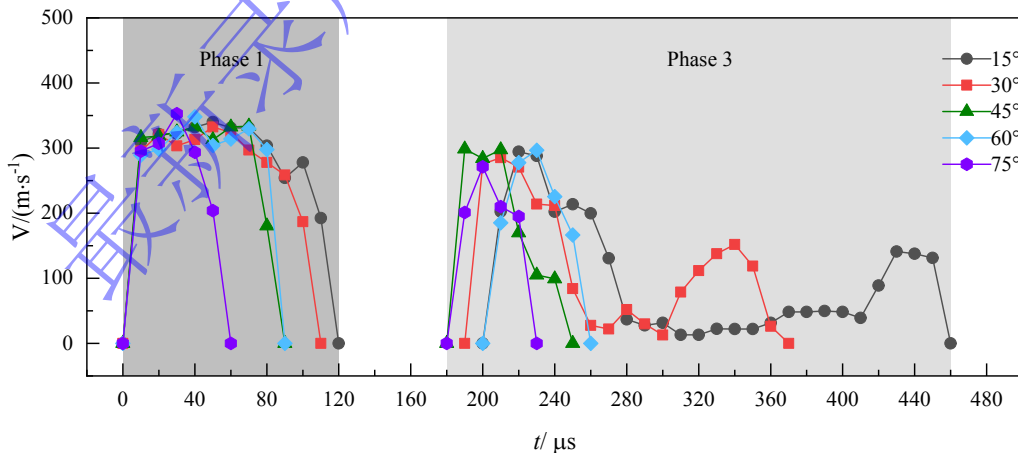


图 10 准静态加载下裂纹扩展速度

Fig. 10 Crack propagation velocity under quasi-static loading

2.5 裂纹路径分形维数分析

为直观展示不同节理角度及加载方式下裂纹扩展路径的几何形貌特征, 提取裂纹扩展完成后的最终裂纹轨迹, 如图 11 所示。可以看出, 不同工况下裂纹路径在弯折程度和偏转幅度方面存在明

显差异。其中，裂纹路径越曲折、偏转越明显、局部绕折现象越突出，其几何形貌越复杂，反之，若裂纹路径整体较平直，则其几何复杂程度较低。

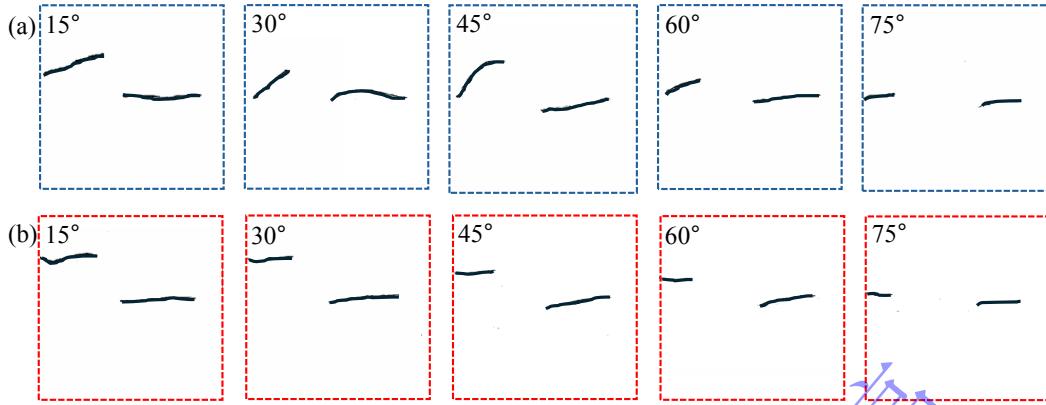


图 11 裂纹扩展完成后的裂纹轨迹提取图：(a) 动态冲击加载；(b) 准静态加载

Fig. 11 Extracted crack paths after crack propagation completion: (a) dynamic impact loading; (b) quasi-static loading

为定量表征裂纹路径的几何复杂程度，采用分形维数描述裂纹路径的弯折、分支及平面空间占据特征。分形维数越接近 1，表明裂纹路径越趋于平直；分形维数越大，说明裂纹路径越曲折复杂。计算时，首先对裂纹扩展完成后的图像进行灰度化和二值化处理，提取裂纹路径轨迹；随后采用不同边长 δ_k 的方格覆盖裂纹轨迹，统计覆盖裂纹轨迹所需的最少方格数 $N_{\delta k}$ ；最后对 $\lg N_{\delta k}$ 与 $\lg \delta_k$ 进行线性拟合，拟合直线斜率的相反数即为裂纹路径分形维数 D 。分形维数计算式为：

$$\lg N_{\delta k} = -D \times \lg \delta_k + b \quad (4)$$

式中， D 为裂纹轨迹的分形维数， δ_k 为方格边长， $N_{\delta k}$ 为覆盖裂纹轨迹所需的最少方格数， b 为拟合常数。随着方格边长 δ_k 减小，若覆盖裂纹轨迹所需方格数 $N_{\delta k}$ 增长越快，则说明裂纹轨迹越复杂，对应分形维数越大。

不同节理角度试样在裂纹扩展完成后分形维数计算结果如图 12 所示。图 12 给出了不同加载条件下各角度试样裂纹轨迹的 $\lg N_{\delta k} - \lg \delta_k$ 拟合关系。可以看出，各组数据点与拟合直线具有较好的线性一致性，说明采用分形维数法表征裂纹路径复杂度具有一定可靠性。动态冲击加载下，15°~75°节理试样的分形维数依次为 1.1931、1.2072、1.1889、1.1812 和 1.1046，其中 30°试样最大，75°试样最小，表明中等节理角度下裂纹路径复杂程度较高。准静态加载下，15°~75°节理试样的分形维数依次为 1.1371、1.1712、1.0968、1.0899 和 1.0751，整体低于动态冲击加载结果，说明准静态加载下裂纹路径更趋于平缓。总体来看，动态冲击加载更易诱发裂纹偏转和路径复杂化，且节理角度对裂纹路径复杂性的影响呈非单调特征。

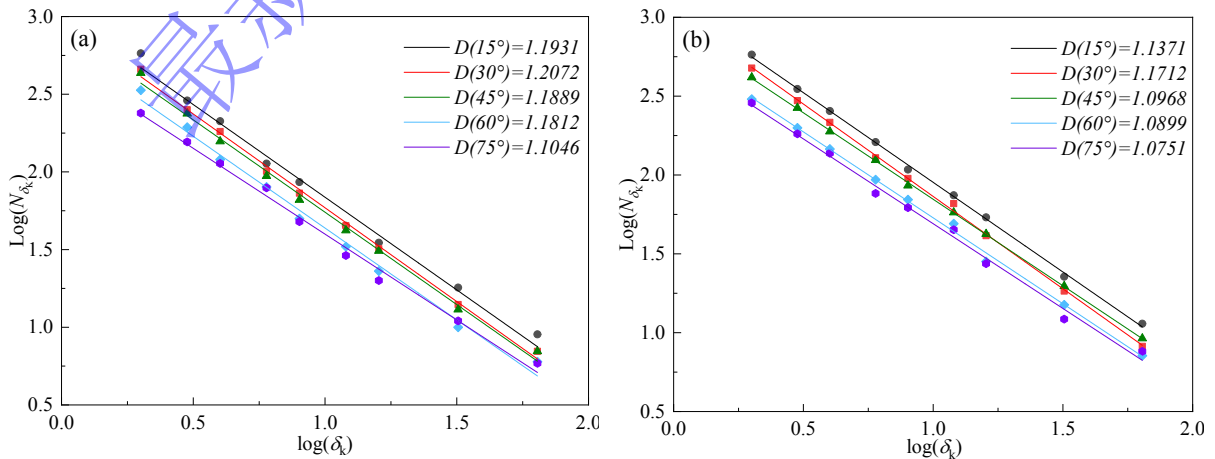


图 12 裂纹路径的分形维数：(a) 动态冲击加载；(b) 准静态加载

Fig. 12 Fractal dimension of crack path: (a) dynamic impact loading; (b) quasi-static loading

由图 12 可知，动态冲击加载下裂纹路径分形维数整体高于准静态加载，说明冲击载荷条件下裂尖拉—剪耦合作用和应力波扰动更明显，裂纹路径更易发生偏折、再起裂及局部复杂化。不同节理角度试样的分形维数并未随角度增大呈单调变化，其中动态冲击加载下 30° 节理试样分形维数最大，75° 节理试样分形维数最小；准静态加载下各角度试样分形维数整体较低，表明裂纹路径更趋于平缓。上述结果说明，节理角度对裂纹路径复杂性的影响具有非单调特征，主要与裂纹—节理界面作用范围、裂纹偏转程度及再起裂过程有关。

2.6 反射应力波特征分析

在阶段 2 中，15°、30°和 45°节理缺陷试样均观测到较为明显的反射应力波特征，60°和 75°试样中未观测到清晰、可连续追踪的反射焦散斑，如图 13 所示。当裂纹尖端接近节理界面时，裂纹扩展诱发的局部应力波传播至节理界面，并在界面附近发生反射。该反射应力波在焦散斑图像中表现为沿既有裂纹路径反向传播的细小局部焦散斑。

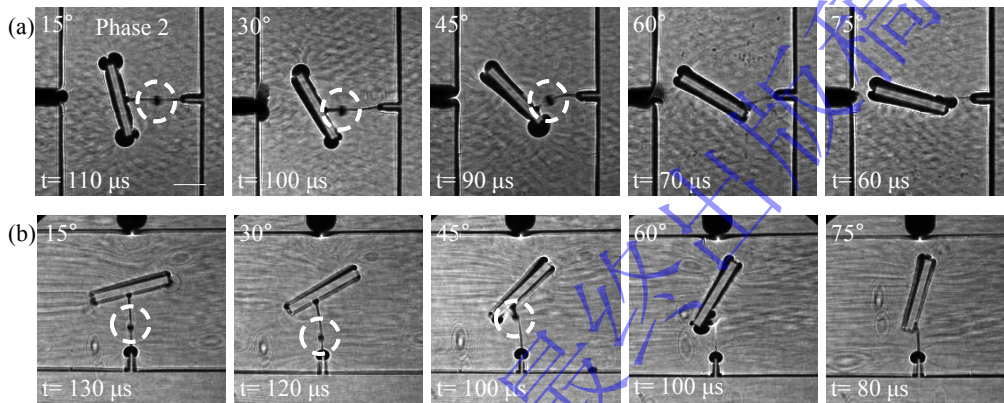


图 13 不同节理角度试样在阶段 2 中的应力波反射现象：(a) 动态冲击加载；(b) 准静态加载

Fig. 13 Stress-wave reflection phenomena in phase 2 for specimens with different joint angles: (a) dynamic impact loading; (b) quasi-static loading

该现象与已有焦散线实验结果具有一致性，表明阶段 2 中局部焦散斑变化可能与裂纹扩展过程中的反射波作用有关^[23-25]。具体而言，已有研究表明，当裂纹扩展诱发的应力波遇到自由边界、缺陷界面或弱面结构时，部分波能会发生反射，并在焦散斑图像中表现为局部小焦散斑或亮暗扰动区域；该局部扰动通常沿既有裂纹路径或界面附近区域反向传播，并可能与裂尖应力场发生叠加。结合图 13 可知，反射波的传播方向由节理界面指向预制裂纹尖端。瑞利波通常沿自由表面传播，具有传播过程中衰减较快、对近表面应力状态影响显著等特点。基于上述传播路径和焦散斑图像特征，将图 13 中观测到的反射焦散斑解释为由节理界面反射引起的瑞利波近表面传播现象。

为进一步分析近表面反射应力波的传播特征，采用中心差分法测量反射焦散斑的传播速度，并将其与 PMMA 材料中的理论瑞利波速度进行对比分析。根据表 1 的材料参数，PMMA 中理论瑞利波速度取为 $C_R = 1105$ m/s。反射应力波速度相对误差可表示为：

$$\delta_i = \left| \frac{C_i - C_R}{C_R} \right| \times 100\% \quad (5)$$

式中， δ_i 为反射波速度相对误差， C_i 为不同试样阶段 2 中测得的反射波传播速度， C_R 为 PMMA 材料中的理论瑞利波速度。公式中采用绝对值是为了表征测量速度与理论瑞利波速度之间的偏离程度，而不区分测量值高于或低于理论值。由图 14 可见，不同试样中测得的近表面反射应力波速度与 PMMA 理论瑞利波速度较为接近。最大偏差出现在准静态加载下 15° 试样中，其测得波速较理论值高 170.2 m/s，对应相对误差为 15.4%。因此，将速度对比作为判断该近表面反射应力波具有瑞利波传播特征的辅助依据，并结合其沿既有裂纹路径反向传播的图像特征，对其传播机制进行分析。

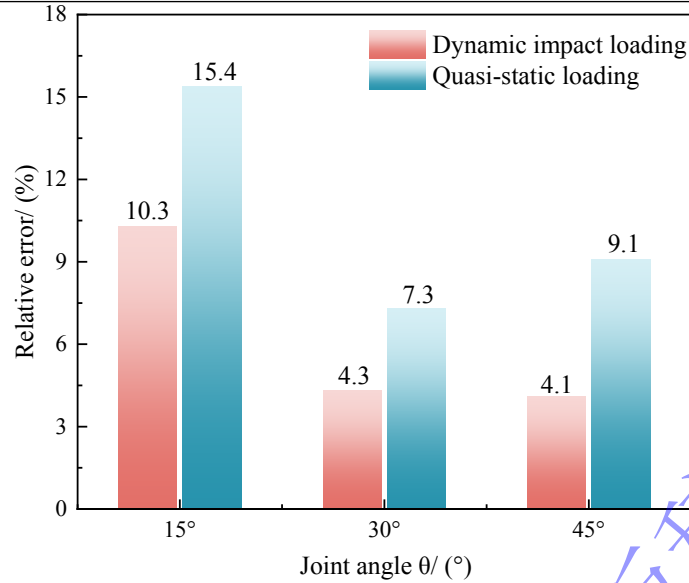


图 14 不同节理角度下反射应力波速度相对误差

Fig. 14 Relative errors of reflected stress-wave velocity under different joint angles

考虑到高速摄影采样时间间隔为 $\Delta t=10 \mu\text{s}$ ，前后两帧之间的时间跨度为 $2\Delta t$ ，从而进一步估算了前后两帧时间跨度内由速度偏差引起的反射焦散斑空间位移偏差及其对应像素偏差：

$$\Delta l = 2\Delta t \times |\Delta v| = 3.40 \text{ mm} \#(6)$$

$$\Delta p = \Delta l \times k = 3.40 \times \frac{164}{60} \approx 9.29 \text{ pix} \#(7)$$

式中， Δl 为空间位移偏差， Δv 为测得反射焦散斑传播速度与理论瑞利波速度之间的最大绝对偏差； Δp 为将该空间位移换算到图像坐标后的像素偏差； k 为图像标定比例系数。由式（6）和式

（7）可知，在当前图像采集与标定条件下，该速度偏差对应的空间位移偏差约为 3.40 mm ，换算到图像坐标中约为 9.29 pix 。该像素偏差相对于焦散斑整体特征尺寸较小，主要影响反射焦散斑位置的量级判断，不改变其反向传播趋势及速度接近瑞利波速度的基本判断。

综上所述，节理角度主要通过改变裂纹与节理界面的相对作用位置及裂尖拉—剪应力配比，影响裂纹扩展行为。随着节理角度变化，裂纹到达节理界面后的作用位置和再起裂位置发生改变，使不同角度试样在裂纹路径弯折程度、水平投影距离及路径复杂度方面表现出差异。低—中角度节理条件下，裂纹路径弯折更明显，Ⅱ型应力强度因子响应、焦散斑畸变和速度波动相对较强，表明裂尖拉—剪耦合作用更明显；高角度节理条件下，剪切分量减弱，裂纹再起裂后路径相对平缓。与准静态加载相比，动态冲击加载下应力波作用更明显，裂尖应力场扰动更强，因此裂纹速度峰值、应力强度因子波动及路径复杂程度整体更高。

3 结 论

采用数字激光焦散线系统，结合动态冲击与准静态三点弯曲试验，研究了 $15^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 节理缺陷PMMA三点弯梁的裂纹扩展行为，得到以下结论。

(1) 含节理缺陷试样的裂纹扩展均经历预制裂纹起裂、裂纹—节理界面相互作用和界面再起裂3个阶段。随节理角度增大，裂纹在界面附近的水平方向投影距离总体增加，说明节理角度能够改变裂纹—节理界面作用范围和再起裂位置。

(2) 动态冲击加载下裂尖拉—剪耦合作用更明显。再起裂阶段，Ⅰ型应力强度因子峰值由 15° 试样的 $2.31 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 降至 75° 试样的 $2.03 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ；Ⅱ型应力强度因子在低—中角度节理试样中响应更强，其中 30° 试样峰值为 $2.05 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

(3) 裂纹扩展速度与裂尖应力强度因子演化具有对应关系。动态再起裂阶段， 30° 试样速度峰值达到 638.4 m/s ，明显高于 75° 试样的 208.3 m/s ；准静态加载下剪切分量较弱，裂纹扩展更趋于

I 型张开主导。

(4) 裂纹路径分形维数随节理角度变化呈非单调特征, 且动态冲击加载下整体高于准静态加载。阶段 2 中 15° 、 30° 和 45° 试样观测到沿既有裂纹路径反向传播的反射焦散斑, 其传播速度接近 PMMA 理论瑞利波速度, 表明该反射应力波具有瑞利波近表面传播特征。

综上, 节理角度通过改变界面作用范围、裂尖拉—剪应力状态及反射波作用, 影响动态冲击与准静态加载下裂纹扩展行为的差异。

参考文献

- [1] 许永祥, 何振江, 郑兴博, 等. 裂隙网络对岩体试件单轴压缩力学特性影响研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(7): 31-37.
XU Y X, HE Z J, ZHENG X B, et al. Study on effect of fracture network on mechanical properties of rock specimens in uniaxial compression [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7): 31-37.
- [2] 阮杰, 张金龙, 张成辉, 等. 离散裂隙网络对岩体力学特性影响数值模拟研究 [J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 40-46.
RUAN J, ZHANG J L, ZHANG C H, et al. Numerical simulation of the influence of discrete fracture network on the mechanical parameters of rock mass [J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2021, 38(1): 40-46.
- [3] 于建新, 炊锦涛, 张浩, 等. 节理倾角与孔间参数对层状岩体爆破裂纹扩展的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(10): 3-16.
YU J X, CHUI J T, ZHANG H, et al. Effect of joint dip angle and inter-hole parameters on blasting crack propagation in layered rock mass [J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(10): 3-16.
- [4] 吴延梦, 李洪伟, 苏洪, 等. 单向围压下切槽爆破裂纹扩展规律研究 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(6): 129-139.
WU Y M, LI H W, SU H, et al. Crack propagation law of notch blasting under unidirectional confining pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(6): 129-139.
- [5] MANOGG P. Anwendung der Schattenoptik zur Untersuchung des Zerzeissvorganges von Platten [D]. Freiburg: University of Freiburg, 1964.
- [6] THEOCARIS P S, KATSAMANIS P. Response of cracks to impact by caustics [J]. International Journal of Impact Engineering, 1978, 10: 197-210.
- [7] PAPAPOULOS G A. Dynamic caustics and its applications [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1990, 13(3/4): 211-249.
- [8] RAVI-CHANDAR K, KNAUSS W G. An experimental investigation into dynamic fracture: I. Crack initiation and arrest [J]. International Journal of Fracture, 1984, 25(4): 247-262.
- [9] FINEBERG J, GROSS S P, MARDER M, et al. Instability in dynamic fracture [J]. Physical Review Letters, 1991, 67(4): 457-460.
- [10] SHARON E, GROSS S P, FINEBERG J. Local crack branching as a mechanism for instability in dynamic fracture [J]. Physical Review Letters, 1995, 74(25): 5096-5099.
- [11] ARAKAWA K, NAGO D, TAKAHASHI K. Dynamic crack propagation and unloading behavior of brittle polymers [J]. International Journal of Fracture, 1999, 96(4): 347-360.
- [12] 姚学锋, 熊春阳, 方竞. 含偏置裂纹三点弯曲梁的动态断裂行为研究 [J]. 力学学报, 1996, (6): 22-30.
YAO X F, XIONG C Y, FANG J. Study of dynamic fracture behaviour on three-point-bend beam with off-center edge-crack [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1996, (06): 22-30.
- [13] 李成孝, 张渊通, 安晨. 单侧开半圆孔 PMMA 试件 I 型和 I-II 混合型裂纹动态扩展及数值模拟研究 [J]. 矿业科学学报, 2020, 5(05): 490-501.

- LI C X, ZHANG Y T, AN C. Study on the dynamic propagation and numerical simulation of mode I and mixed mode I - II cracks in PMMA specimens with unilateral semicircular holes [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(5): 490-501.
- [14] 梁欣桐, 肖成龙, 范嘉宾, 等. 含不同张开角度裂纹结构的动态断裂试验研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(18): 130-137.
- LIANG X T, XIAO C L, FAN J B, et al. Dynamic fracture experiment on the structures with open cracks with different open angles [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(18): 130-137.
- [15] WASHABAUGH P D, KNAUSS W G. Non-steady, periodic behavior in the dynamic fracture of PMMA [J]. International Journal of Fracture, 1993, 59(2): 189-197.
- [16] KAZARINOV N, SMIRNOV I, SUDENKOV Y, et al. Experimental investigation of dynamic crack propagation in PMMA plates [J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 6: 83-89.
- [17] 纪哲, 岳文豪, 苏洪, 等. 不同割缝宽度爆生裂纹扩展行为研究 [J]. 高压物理学报, 2024, 38(6): 91-101.
- JI Z, YUE W H, SU H, et al. Study on the behavior of blasting crack propagation under different crack widths [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(6): 91-101.
- [18] GAO G Y, ZHOU J, LI Z. Experimental investigation of dynamic fracture behaviors of polymethyl methacrylate [J]. Macromolecular Symposia, 2016, 365(1): 180-190.
- [19] JAFARI A, MONFARED M M, BAGHERI R. Mixed-mode computation of the transient dynamic stress intensity factor for multiple interface cracks [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 41(12): 573.
- [20] THEOCARIS P S, PAPADOPOULOS G A. The influence of geometry of edge-cracked plates on K_I and K_{II} components of the stress intensity factor, studied by caustics [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1984, 17(12): 2339-2349.
- [21] SARKAR N, CHAUDHURI B B. An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(1): 115-120.
- [22] JU Y, ZHENG J T, EPSTEIN M, et al. 3D numerical reconstruction of well-connected porous structure of rock using fractal algorithms [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2014, 279: 212-226.
- [23] THEOCARIS P S. Elastic energies carried with Rayleigh wave fronts determined by caustics [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1989, 34(3): 709-720.
- [24] QIU P, YUE Z W, YANG R S, et al. Effects of vertical and horizontal reflected blast stress waves on running cracks by caustics method [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 212: 164-179.
- [25] 邱鹏, 岳中文. 自由边界影响下定向断裂爆破裂纹尖端应力分布与扩展机理 [J]. 高压物理学报, 2024, 38(5): 152-162.
- QIU P, YUE Z W. Stress distribution and propagation mechanism of crack-tip in directional fracturing blasting under the influence of free boundary [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(5): 152-162.

Effects of Joint Angle on Crack Propagation Behavior under Dynamic Impact and Quasi-Static Loading

WANG Qisheng¹, LI Runpeng¹, WANG Xin¹, QIU Peng², LEI Jianyin^{1, 3, 4},
LIU Zhifang¹

- (1. *Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*
2. *Key Laboratory of In-Situ Property-Improving Mining, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*
3. *China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, Shanxi, China;*
4. *Xinjiang Institute of Intelligent Equipment, Aksu 843104, Xinjiang, China)*

Abstract: To reveal the effect of joint angle on the crack propagation behavior of PMMA under different loading conditions, a digital laser caustics system was combined with Hopkinson pressure bar impact tests and quasi-static three-point bending tests. PMMA specimens containing joint defects with angles of 15°, 30°, 45°, 60°, and 75° were investigated. The results show that crack propagation in the jointed specimens can be divided into three phases: pre-crack initiation, crack-joint interface interaction, and crack re-initiation. Under dynamic impact loading, the horizontal projected distance between the end point of phase 1 and the re-initiation point of phase 3 increases from 6.0 mm for the 15° specimen to 30.0 mm for the 75° specimen; under quasi-static loading, it increases from 7.2 mm to 26.0 mm, indicating that the joint angle changes the crack-interface interaction range and the re-initiation position. In this study, caustic-pattern distortion, stress intensity factor amplitude, crack propagation velocity peak, and the identifiable features of reflected caustic patterns were used as evaluation indices to quantitatively characterize the crack-tip tension–shear coupling effect. In the dynamic re-initiation phase, the peak crack velocity of the 30° specimen reaches 638.4 m/s, which is 3.06 times that of the 75° specimen (208.3 m/s). The peak mode I stress intensity factor decreases from 2.31 MPa·m^{1/2} for the 15° specimen to 2.03 MPa·m^{1/2} for the 75° specimen, while the mode II stress intensity factor is more pronounced in low-medium-angle specimens, with a peak value of 2.05 MPa·m^{1/2} for the 30° specimen. Under quasi-static loading, the crack still exhibits dynamic propagation after instability, but the shear component is significantly weakened and crack propagation tends to be dominated by mode I opening. Fractal dimension analysis shows that the crack-path fractal dimensions under dynamic impact loading are generally higher than those under quasi-static loading, and the 30° specimen under dynamic impact loading has the largest fractal dimension of 1.2072. In phase 2, reflected caustic patterns propagating backward along the existing crack path are observed in the 15°, 30°, and 45° specimens. Their propagation velocities are close to the theoretical Rayleigh wave velocity of PMMA (1105 m/s), with a maximum relative error of 15.4%, indicating that the reflected stress wave exhibits Rayleigh-wave near-surface propagation characteristics. The results provide an experimental basis for fracture-mechanism analysis and crack-resistant design of engineering structures containing joint defects.

Keywords: caustic method; crack propagation speed; stress intensity factors; fractal dimension; Rayleigh wave