

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0358

## 节理充填物厚度对运动裂纹扩展的影响\*

宋彦琦, 李向上, 刘济琛, 王鹏懿

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为研究冲击载荷作用下节理充填物厚度对裂纹扩展行为的影响, 以石膏为有机玻璃预制裂纹充填物, 利用新型数字激光动态焦散线实验系统, 对 3 种不同节理充填物厚度的有机玻璃进行三点弯冲击实验。实验结果表明, 相同冲击载荷作用下, 竖向预制裂纹均竖直向上扩展, 是典型的 I 型裂纹, 充填物越厚, 竖向裂纹越容易起裂。竖直裂纹扩展至水平预制裂纹后, 充填物厚度为 1、3、5 mm 的试件的水平预制裂纹汇聚能量的时间分别为 433、2 200、2 580  $\mu\text{s}$ , 起裂时的应力强度因子分别为 635.2、742.4、906.8  $\text{kN/m}^{3/2}$ , 表明充填物越厚, 水平裂纹越难起裂。水平预制裂纹扩展过程中共发生 2 次曲裂, 是典型的 I - II 复合型裂纹, 节理充填物越厚, 其扩展轨迹越弯曲; 当裂纹扩展至距离试件上边界 3 mm 时, 扩展方向偏离第 1 次裂纹曲裂切线而朝向试件上边界扩展, 试件最终断裂, 测量发现充填物厚度为 1、3、5 mm 的试件的断裂点与冲击载荷作用点的距离分别为 16.5、11.0、6.0 mm。

**关键词:** 节理充填物; 动焦散线; 冲击载荷; 应力强度因子

中图分类号: O346.1 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

## Effects of joint filling thickness on crack propagation behaviors

SONG Yanqi, LI Xiangshang, LIU Jichen, WANG Pengyi

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing),  
Beijing 100083, China)

**Abstract:** To explore the effects of the thickness of joint-filling material on the dynamic fracture properties of cracks under impact load, the gypsum was used as the material filled into the prefabricated cracks in polymethyl methacrylate (PMMA) specimens, three-point bending impact tests were conducted on the PMMA specimens with different joint filling thicknesses by using a novel digital laser dynamic caustics experimental system. The experimental results show that the vertical prefabricated cracks propagate vertically upward toward the free surface under the same impact load, which is a typical mode-I crack, and the thicker the filling, the easier the vertical crack initiation. When the vertical crack propagates to the horizontal prefabricated crack, the energy gathering times of the horizontal prefabricated cracks in the specimens with a filling thickness of 1, 3 and 5 mm are 433, 2 200 and 2 580  $\mu\text{s}$ , respectively. And the stress intensity factors of crack initiation are 635.2, 742.4 and 906.8  $\text{kN/m}^{3/2}$ , respectively. It indicates that the thicker the filling, the more difficult the horizontal crack initiation. The horizontal prefabricated crack is a typical I - II composite crack. The thicker the joint filler, the more curved the propagation path of the horizontal prefabricated crack. When the distance between the crack and the upper boundary of the specimen is 3 mm, the horizontal crack propagates towards the upper boundary of the specimen, and the specimen finally breaks. It is found that the distances between the fracture points and the impact load points of the specimens with the filling thicknesses of 1, 3 and 5 mm are 16.5, 11.0 and 6.0 mm, respectively.

**Keywords:** joint filler; dynamic caustics; impact load; stress intensity factor

\* 收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1704242); 国家重点研发计划(2018YFC0808402)

第一作者: 宋彦琦(1969—), 女, 博士, 教授, [songyq@cumt.edu.cn](mailto:songyq@cumt.edu.cn)

通信作者: 李向上(1991—), 男, 博士研究生, [xiangshang\\_li@126.com](mailto:xiangshang_li@126.com)

岩体经历了漫长的地质作用过程,由各种各样的岩石组成<sup>[1]</sup>,其内部存在着大量弱面和地质构造,比如断层、褶皱及节理等,这些缺陷造成了岩体的不连续性、非均质性及各向异性<sup>[2]</sup>。在实际工程中,岩体往往受到冲击打钻、爆破等动载荷的作用<sup>[3]</sup>。工程实践表明,含缺陷岩体的动态断裂行为与静态断裂行为为差异明显<sup>[4]</sup>。因此,研究动载荷作用下含缺陷介质的动态断裂行为具有重要意义。

针对含缺陷介质的动态断裂行为已进行了大量研究。Kalthoff等<sup>[5]</sup>利用动焦散实验分析了动载荷对裂纹止裂韧性及冲击断裂韧性的影响。Kawaqishi等<sup>[6]</sup>通过焦散线实验研究了不同厚度斜裂纹和不同断口形貌对试件裂纹尖端附近应力场的影响。姚学锋等<sup>[7]</sup>对含偏置裂纹的有机玻璃进行落锤冲击实验,采用动焦散系统得到了裂纹尖端应力强度因子及裂纹扩展速度与应力波传播的关系。杨鑫等<sup>[8]</sup>以空气、黏土和水作为有机玻璃的预制裂隙充填材料,研究了充填裂隙岩石动态断裂时的裂纹扩展规律。岳中文等<sup>[9]</sup>采用动态光弹性实验,研究了简支深梁的冲击断裂行为。杨仁树等<sup>[10]</sup>改变预制裂纹的长度,研究了静止裂纹与运动裂纹相互作用的规律。李清等<sup>[11]</sup>采用动态焦散线实验系统,研究了有机玻璃在冲击载荷作用下的I型和I-II复合型裂纹的动态断裂特性。杨立云等<sup>[12]</sup>通过预制两条异长双裂纹,研究了偏置裂纹对含双裂纹有机玻璃试件动态断裂的影响。

自然界岩体中不同厚度的节理往往被软泥、沙子等物质充填,称为节理充填物,充填物的存在将改变岩体的静动力学性能<sup>[13]</sup>。目前鲜有运动裂纹与不同厚度节理充填物作用规律的研究,因此,本文中对含不同厚度节理充填物的有机玻璃试样进行落锤冲击实验,结合数字激光动焦散系统分析节理充填物厚度对裂纹动态断裂行为的影响。

## 1 实验原理及实验系统

### 1.1 焦散线实验原理

含裂纹缺陷的试件受到外载荷冲击作用时,裂纹尖端及其附近部位的厚度发生变化,裂纹尖端出现明显的应力集中,试件折射率发生改变。当一束平行光源透射入介质,由于试件各部位折射率不同,因此发生不同方向的折射。如果在与试件表面相距 $z_0$ 的位置放置一个与试件平行的参考平面,将看到一个由很亮的曲线包围的暗区,很亮的线称为焦散线,暗区即为焦散斑<sup>[14]</sup>,焦散线实验原理如图1所示。

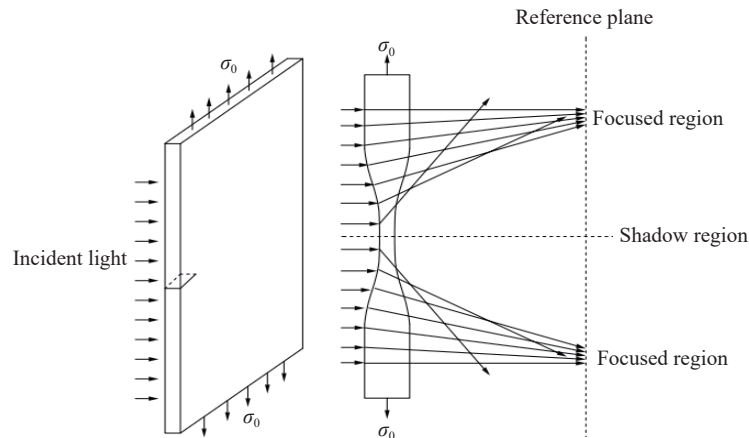


图1 焦散线成像原理

Fig. 1 The principle of caustics formation

动态应力强度因子表征裂纹尖端受载和变形的强度,是裂纹扩展推动力及裂纹扩展趋势的度量<sup>[15]</sup>。动态焦散线实验通过高速摄影拍摄的图片测量得到焦散斑的直径 $D$ ,利用焦散斑直径计算裂纹尖端应力强度因子,I-II复合型裂纹尖端应力强度因子表达式如下<sup>[16]</sup>:

$$K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3g^{5/2}cz_0d} D_{\max}^{5/2}, \quad K_{II} = \mu K_I \quad (1)$$

式中:  $K_I$ 、 $K_{II}$  分别为裂纹尖端的 I 型和 II 型应力强度因子;  $c$  为试件应力光学常数;  $z_0$  为参考平面到试件的平面距离, 本实验中取 0.8 m;  $d$  为试件厚度, 为 5 mm;  $D_{\max}$  为焦散斑最大直径;  $\mu$  为  $K_I$ 、 $K_{II}$  的比例系数, 可由  $(D_{\max} - D_{\min})/D_{\max}$  计算,  $D_{\min}$  为焦散斑最小直径;  $g$  为应力强度因子数值, 可由  $\mu$  确定。

### 1.2 加载方式

实验采用落锤冲击加载, 如图 2 所示。落锤质量为 1 kg, 高 15 cm, 为保证冲击应力波在试件中的传播和产生的应力效应相同, 严格保证每次实验时落锤下落的高度相同。落锤下落的同时, 点击录像按钮, 保证整个加载过程被完整记录。

### 1.3 动态焦散线系统

新型数字激光动态焦散系统由激光器、扩束镜、场镜、落锤冲击加载平台及高速相机组成, 实验具体光路如图 3 所示。高速相机的拍摄频率为  $150\,000\text{ s}^{-1}$ , 相邻图片之间的时间间隔为  $6.67\ \mu\text{s}$ 。

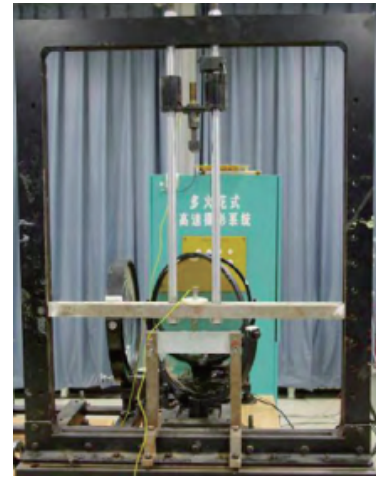


图 2 落锤冲击加载平台

Fig. 2 Drop-weight impact loading platform

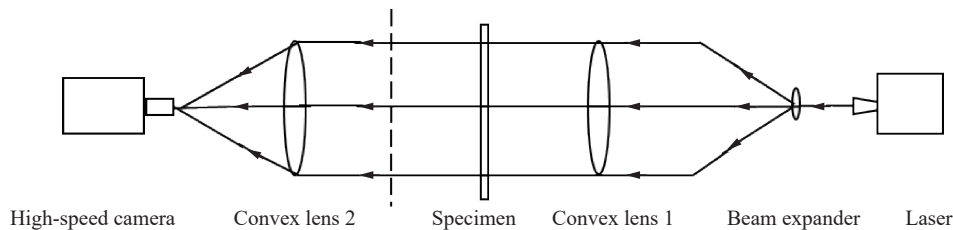


图 3 动态焦散系统光路

Fig. 3 Optical light path of experimental system of dynamic caustics

## 2 落锤冲击动焦散实验

### 2.1 试样参数

实验材料选用有机玻璃 (polymethyl methacrylate, PMMA), 该材料具有较高的焦散光学常数且光学各向同性, 被广泛用于研究冲击断裂及爆破致裂等问题<sup>[17]</sup>。PMMA 的动态力学常数如下: 膨胀波波速为 2 320 km/s, 剪切波波速为 1 260 km/s, 泊松比为 0.31, 动态弹性模量为  $6.1\text{ GN/m}^2$ , 动态应力光学常数为  $85\ \mu\text{m}^2 \cdot \text{N}^2$ <sup>[18]</sup>。

### 2.2 动焦散实验方案

试件尺寸为  $220\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ , 在试件底部中间位置预制一条长 10 mm、宽 0.5 mm 的垂直裂纹, 裂纹尖端记为  $O$ 。在试件中心位置预制一条长 40 mm 的水平裂纹, 左右两端点分别记为  $M$ 、 $N$ , 如图 4 所示。共设计 3 组实验, 各组实验水平裂纹宽度分别为 1、3、5 mm, 用石膏充填裂纹 (石膏和水的质量之比为 2.5 : 1)。每组方案 3 个试件, 共计 9 个试件, 试件编号依次记为  $S_{1,X}$ 、 $S_{3,X}$  及  $S_{5,X}$  ( $X=1, 2, 3$ ), 以此研究节理充填物厚度对裂纹扩展行为的影响。

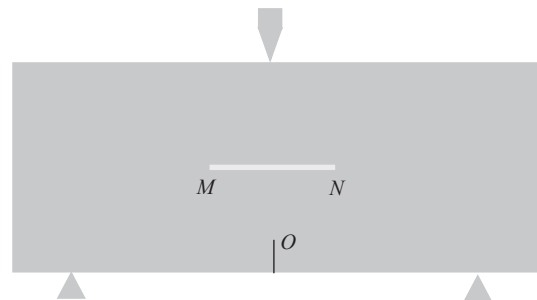


图 4 试件模型

Fig. 4 Specimen model

### 3 实验结果分析

#### 3.1 裂纹扩展路径

对 3 组方案共 9 个试件进行冲击加载, 观察组内试件断裂形貌并对实验数据进行处理, 发现组内试件实验结果基本一致, 说明了实验结果准确可靠。每组方案随机选取一个试件进行详细分析, 试件裂纹扩展路径如图 5 所示。由  $O$  点起裂至水平裂纹的裂纹记为裂纹 A, 由  $M$  点起裂至贯通试件的裂纹记为裂纹 B。

预制裂纹在动态载荷作用下起裂扩展, 3 种方案的裂纹 A 均竖直向上扩展, 是典型的 I 型裂纹, 说明改变充填物石膏的厚度并不影响裂纹 A 的扩展路径。裂纹 B 扩展过程共发生 2 次曲裂, 第 1 次曲裂方向朝落锤冲击作用点, 试件  $S_{5.2}$  弯曲程度最大, 试件  $S_{3.1}$  次之, 试件  $S_{1.3}$  弯曲程度最小。当裂纹 B 扩展至与试件上边界相距约 3 mm, 其扩展方向偏离第 1 次裂纹曲裂切线而朝向试件上边界扩展, 最终与试件上边界贯通, 试件断裂破坏, 裂纹 B 为典型的 I - II 复合型裂纹。测量发现, 试件  $S_{1.3}$ 、 $S_{3.1}$  及  $S_{5.2}$  断裂点与冲击载荷作用点的距离分别为 16.5、11.0 和 6.0 mm。这说明, 充填物石膏越厚, 试样断裂点越靠近冲击载荷作用点。

#### 3.2 裂纹扩展时程特征

用高速摄像机记录整个试件的断裂破坏过程, 落锤与试件上表面接触的时间记为  $0 \mu\text{s}$ , 整个实验过程落锤始终与试件上表面接触, 并无二次碰撞, 各试件动焦散斑照片如图 6~8 所示。

落锤冲击试件, 竖向预制裂纹尖端  $O$  处焦散斑直径不断增大, 表明能量在  $O$  处不断汇聚; 当其应力强度因子达到材料断裂韧度, 竖向预制裂纹起裂扩展形成裂纹 A; 当裂纹 A 扩展至水平裂纹时, 在水平裂纹  $M$ 、 $N$  两端各形成一个焦散斑, 焦散斑直径随着能量的汇聚不断变大, 随后在  $M$  点处起裂扩展形成裂纹 B; 当焦散斑运动至距试件上边界约 3 mm 时, 出现第 3 次能量汇聚, 随后焦散斑朝向试件上边界运动直至试件断裂。

根据裂纹焦散斑运动图, 设定裂纹 A 开始起裂的时刻为  $t_1$ , 裂纹 A 扩展至水平裂纹的时刻为  $t_2$ , 裂纹 B 起裂的时刻为  $t_3$ , 裂纹 B 第 2 次起裂的时刻为  $t_4$ , 试件完全断裂的时刻为  $t_5$ 。3 组试件断裂破坏的各阶段起始时刻如表 1 所示。

表 1 试件断裂破坏各阶段对应的开始时刻

Table 1 Start times corresponding to different stages of fracture failure of specimens

试件	$t_1/\mu\text{s}$	$t_2/\mu\text{s}$	$t_3/\mu\text{s}$	$t_4/\mu\text{s}$	$t_5/\mu\text{s}$
$S_{1.3}$	500	527	960	1 107	1 360
$S_{3.1}$	507	541	2 741	2 847	3 067
$S_{5.2}$	493	533	3 113	3 166	3 312

由表 1 可知, 各组试件在  $O$  处起裂的时刻  $t_1$  约为  $500 \mu\text{s}$ , 扩展至水平预制裂纹的时刻  $t_2$  约为  $530 \mu\text{s}$ , 说明改变充填物的厚度对裂纹 A 的扩展速度影响较小。随后裂纹扩展至水平预制裂纹, 进入第 2 次能

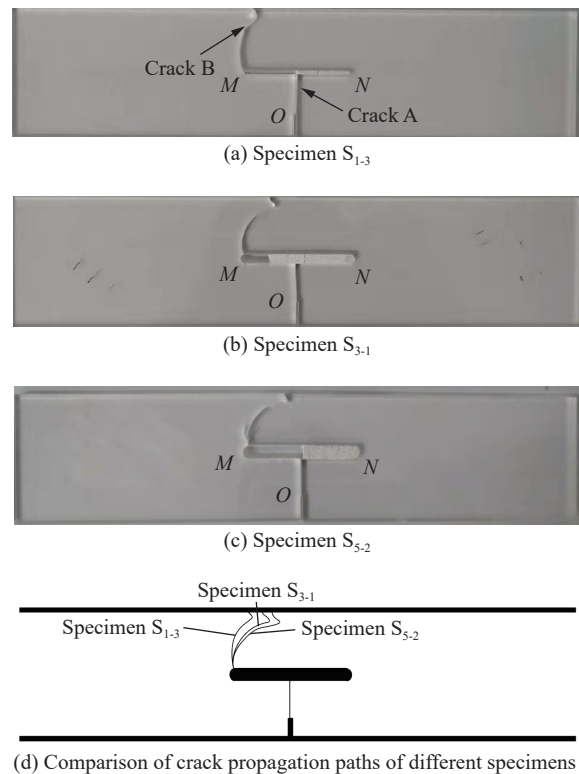


图 5 各试件断裂示意图

Fig. 5 Fracture patterns of experimental specimens

量汇聚期, 试件  $S_{1-3}$ 、 $S_{3-1}$  及  $S_{5-2}$  在  $M$  端起裂的时刻分别为 960、2 741 及 3 113  $\mu\text{s}$ , 其第 2 次能量汇聚期时长( $t_3-t_2$ )分别为 433、2 200 及 2 580  $\mu\text{s}$ , 说明充填物越厚, 水平裂纹起裂所需能量越大, 汇聚能量的时间越长。3 组试件裂纹 B 扩展至试件断裂的时间( $t_5-t_3$ )分别为 400、326 及 199  $\mu\text{s}$ , 这是因为之前试件  $S_{1-3}$  第 2 次能量汇聚的最少, 试件  $S_{3-1}$  汇聚能量居中, 试件  $S_{5-2}$  第 2 次汇聚的能量最多, 这一阶段试件  $S_{5-2}$  的裂纹扩展速度最快。

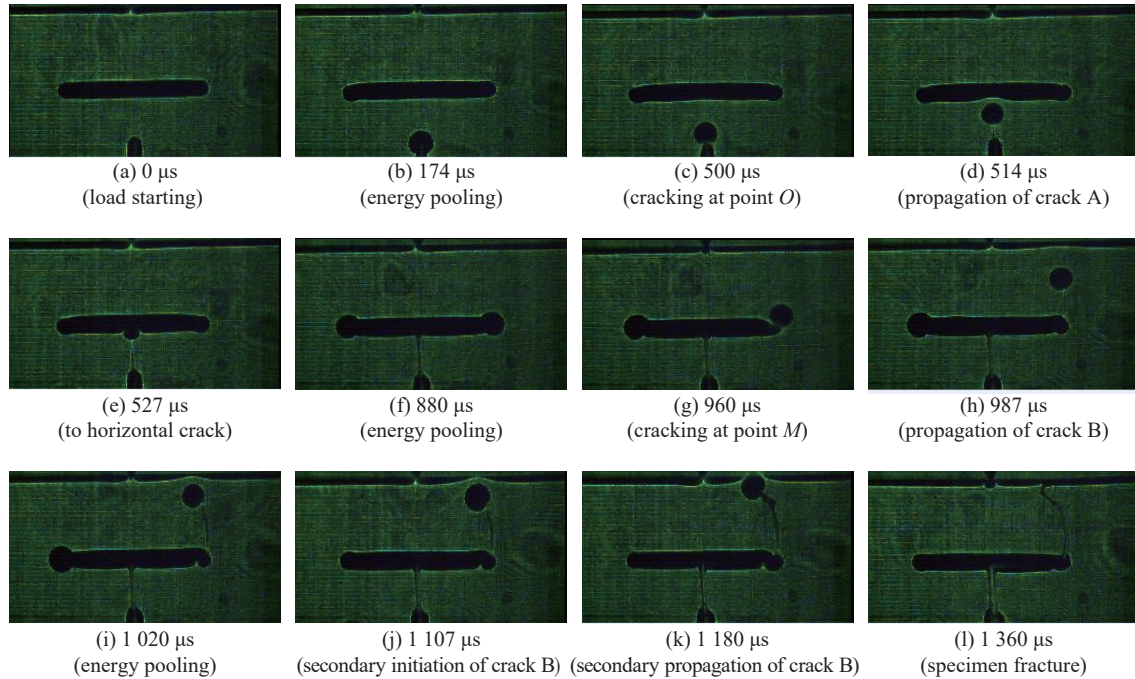


图 6 试样  $S_{1-3}$  中裂纹扩展过程动焦散斑图片

Fig. 6 Photos of dynamic caustic spots in specimen  $S_{1-3}$  during crack growth

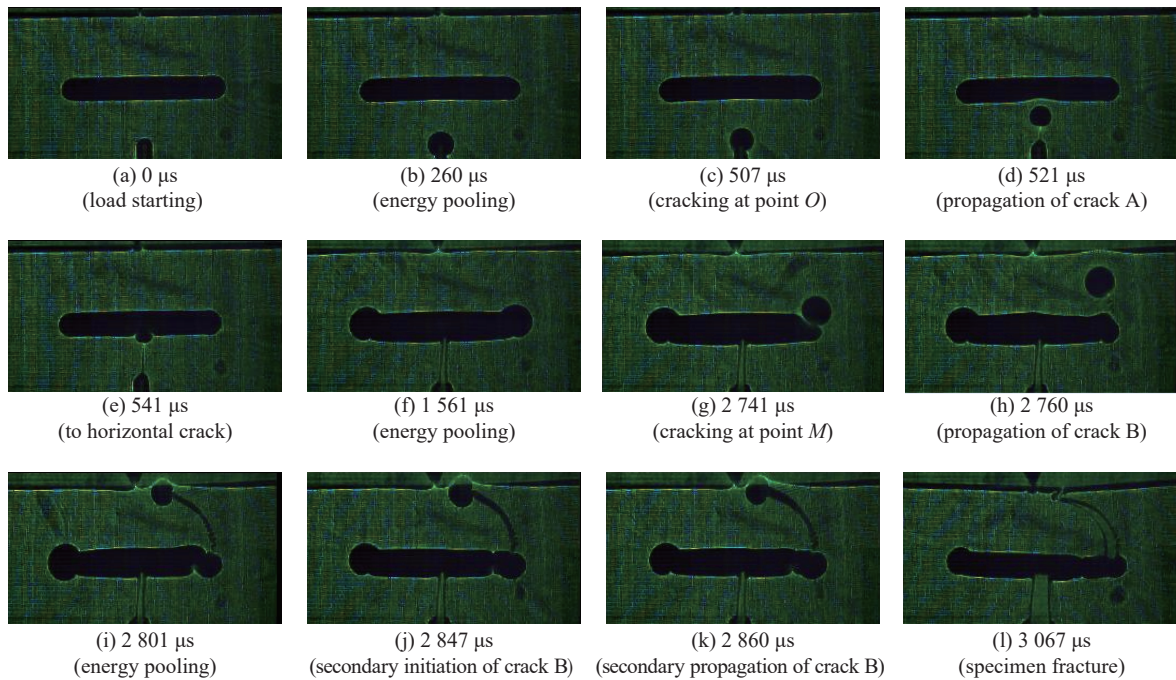
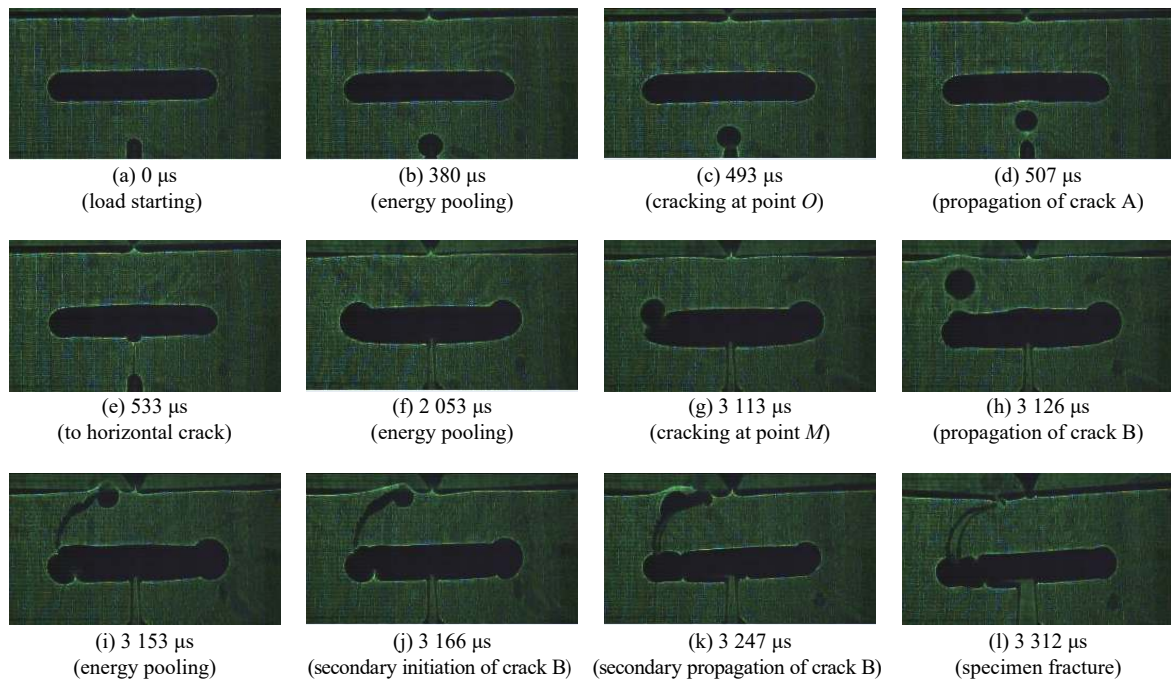


图 7 试样  $S_{3-1}$  中裂纹扩展过程动焦散斑图片

Fig. 7 Photos of dynamic caustic spots in specimen  $S_{3-1}$  during crack growth

图8 试样  $S_{5.2}$  中裂纹扩展过程动焦散斑图片Fig. 8 Photos of dynamic caustic spots in specimen  $S_{5.2}$  during crack growth

试件  $S_{1.3}$ 、 $S_{3.1}$  及  $S_{5.2}$  裂纹贯穿试件的时刻  $t_5$  分别为 1 360、3 067、3 312  $\mu\text{s}$ ，试件整体贯穿时间随着填充物厚度的增大呈现增长的趋势。这是因为试件  $S_{5.2}$  填充物最厚，水平裂纹起裂所需能量最多，能量汇聚时间最长，导致  $S_{5.2}$  整体贯穿时间最长。

### 3.3 动态应力强度因子

图9为各试件动态应力强度因子随时间的变化曲线。

由图9可知，试件  $S_{1.3}$ 、 $S_{3.1}$  及  $S_{5.2}$  的  $O$  端起裂的应力强度因子依次为 865.8、732.6、662.8  $\text{kN/m}^{3/2}$ ，表明竖向预制裂纹  $O$  端的断裂韧度随着填充物厚度的增加逐渐降低，即填充物越厚，竖向裂纹越容易起裂。随后裂纹  $A$  竖直向上扩展，尖端  $O$  处  $K_I$  不断减少，直至裂纹  $A$  扩展至水平预制裂纹。随着填充物厚度的增大，各试件在此阶段的  $K_I$  平均值分别为 581.8、523.5、435.8  $\text{kN/m}^{3/2}$ ，而裂纹尖端应力强度因子是裂纹推动力的度量，说明此阶段的能量传递随着填充物厚度的增大逐渐减少。这是因为应力波传播至竖直裂纹前要经过水平预制裂纹，应力波在水平裂纹处会发生反射、折射及绕射，消耗一部分能量。水平裂纹填充物越厚，消耗的能量越多，对应应力波传播阻碍越明显，因此裂纹  $A$  传播的能量随着填充物厚度的增大逐渐减少。

当裂纹  $A$  扩展至水平裂纹时，随后在  $M$ 、 $N$  两端处各形成一个焦散斑，水平预制裂纹起裂前，试件  $S_{1.3}$ 、 $S_{3.1}$  的  $M$ 、 $N$  两端  $K_I$  先增大随后减小然后继续增大，但整体趋势是增大的；试件  $S_{5.2}$  的  $M$ 、 $N$  两端  $K_I$  一直增大。同时发现各试件  $M$ 、 $N$  两端的  $K_I$  在水平预制裂纹起裂前变化趋势基本相同，只存在微小差异，这是由于预制水平裂纹及填充石膏时不能保证两端绝对的一致。随着两端  $K_I$  的不断增大，当一端应力强度因子达到材料断裂韧度时，水平裂纹起裂扩展。随着填充物厚度的增大，各试件  $M$  端起裂时的  $K_I$  分别为 635.2、742.4、906.8  $\text{kN/m}^{3/2}$ ，说明填充物越厚，水平预制裂纹越难起裂扩展。 $M$  端起裂后，需要能量推动其扩展， $M$  端附近形成能量负压区， $N$  端之前汇聚的能量将重新分配，其能量不断向  $M$  端汇聚， $N$  端  $K_I$  不断减小，促使裂纹  $B$  向前扩展，同时抑制  $N$  端起裂扩展，此阶段裂纹  $B$  扩展轨迹为曲线，是典型的 I - II 复合型裂纹。裂纹  $B$  止裂前，各试件  $M$  端  $K_I$  不断减小， $K_{II}$  不断增大，表明裂纹  $B$  第一次扩展过程中 II 型应力强度因子所占比例越来越大，相当于裂纹  $B$  扩展过程越来越受  $K_{II}$  控

制。裂纹 B 第一次扩展结束时, 试件  $S_{1-3}$ 、 $S_{3-1}$ 、 $S_{5-2}$  的  $M$  端  $K_I$  分别为 480.9、419.7、657.3  $\text{kN}/\text{m}^{3/2}$ ;  $M$  端  $K_{II}$  分别为 473.2、559.4、1 096.0  $\text{kN}/\text{m}^{3/2}$ 。各试件  $M$  端  $K_{II}/K_I$  分别为 0.98、1.33、1.67, 说明试件充填物越厚, 裂纹 B 第一次扩展过程中  $K_{II}$  所起作用越大, 这就是试件  $S_{1-3}$ 、 $S_{3-1}$ 、 $S_{5-2}$  的断裂点越来越靠近冲击载荷作用点的原因。

裂纹 B 扩展一段距离后停止, 试件进行第 3 次能量汇聚, 这一阶段各试件  $K_I$  增大,  $K_{II}$  急剧减小, 随后裂纹 B 朝着试件上边界第 2 次扩展, 直至试件断裂破坏。

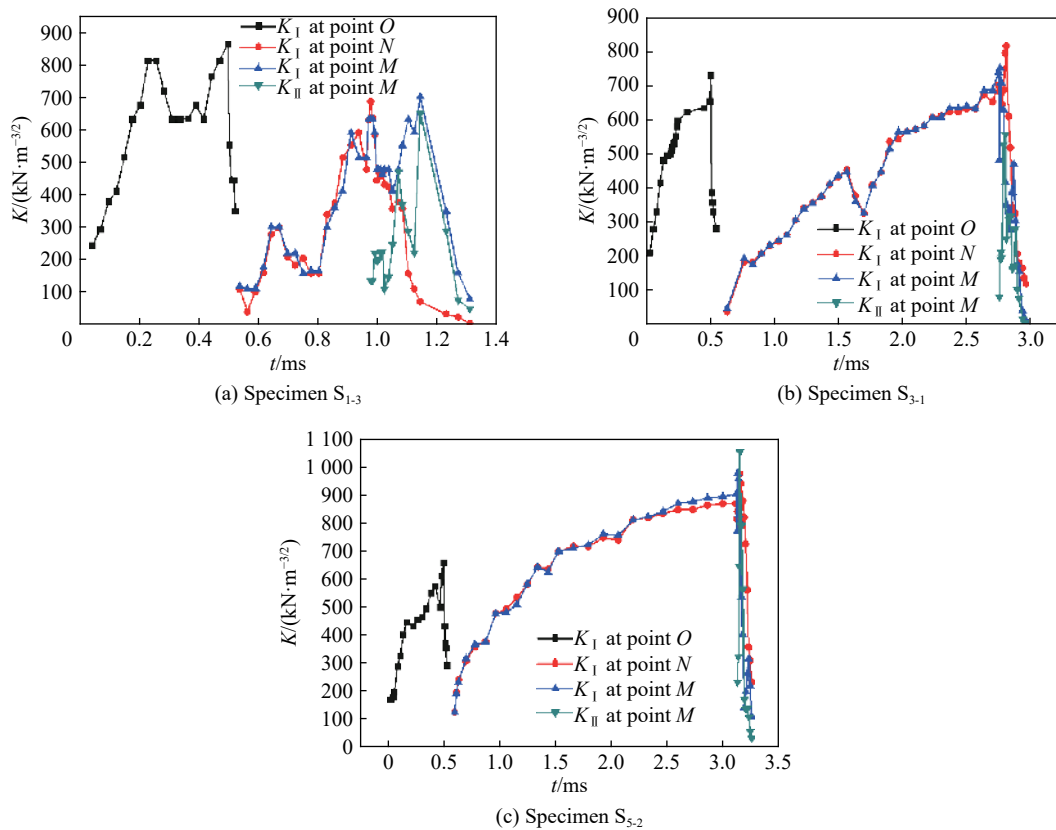


图 9 不同试样不同部位动态应力强度因子随时间的变化

Fig. 9 Change of dynamic stress intensity factors at different positions of different specimens with time

### 4 结 论

利用动焦散线实验研究了充填物厚度对有机玻璃冲击断裂动态行为的影响, 发现试件的动态断裂特性随节理充填物厚度的变化发生显著改变, 具体结论如下:

(1) 改变充填物厚度, 裂纹 A 均竖直向上扩展, 裂纹 B 扩展轨迹发生显著变化。裂纹 B 扩展过程发生 2 次断裂, 第 1 次断裂朝落锤冲击点扩展, 充填物越厚, 裂纹 B 弯曲程度越大。当裂纹 B 扩展至距试件上边界约 3 mm 时, 其扩展方向偏离第 1 次裂纹断裂切线而朝试件上边界扩展, 试件断裂破坏, 测量发现试件  $S_{1-3}$ 、 $S_{3-1}$ 、 $S_{5-2}$  断裂点与冲击载荷作用点的距离分别为 16.5、11.0 和 6.0 mm, 充填物石膏越厚, 断裂点越靠近冲击载荷作用点。

(2) 改变充填物厚度, 试件  $S_{1-3}$ 、 $S_{3-1}$ 、 $S_{5-2}$  的  $O$  端起裂时应力强度因子  $K_I$  依次为 865.8、732.6、662.8  $\text{kN}/\text{m}^{3/2}$ , 充填物越厚, 竖向裂纹越容易起裂。试件  $S_{1-3}$ 、 $S_{3-1}$ 、 $S_{5-2}$  的  $M$  端起裂时的  $K_I$  分别为 635.2、742.4、906.8  $\text{kN}/\text{m}^{3/2}$ , 充填物越厚, 水平预制裂纹越难起裂扩展。裂纹 B 第 1 次扩展结束时, 试件  $S_{1-3}$ 、 $S_{3-1}$ 、 $S_{5-2}$  的  $M$  端  $K_{II}/K_I$  分别为 0.98、1.33、1.67, 试件充填物越厚, 裂纹 B 第 1 次扩展过程中  $K_{II}$  所起

作用越大。

(3) 试件  $S_{1-3}$ 、 $S_{3-1}$ 、 $S_{5-2}$  裂纹贯穿试件的时间分别为 1 360、3 067、3 312  $\mu\text{s}$ , 试件整体贯穿时间随着填充物厚度的增大呈现增长的趋势。

感谢中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室杨仁树教授团队对落锤冲击实验的悉心指导。

## 参考文献:

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 125-128.
- [2] 韩智铭, 乔春生, 涂洪亮. 含一组贯通节理岩体强度的各向异性分析 [J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(5): 1073-1083. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.000741.  
HAN Z M, QIAO C S, TU H L. Analysis of strength anisotropy of rock mass with a set of persistent joints [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2017, 46(5): 1073-1083. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.000741.
- [3] 范勇, 江璐, 卢文波, 等. 圆形隧洞爆破荷载与瞬态卸荷作用围岩应变能效应研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(8): 1855-1866. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0081.  
FAN Y, JIANG L, LU W B, et al. Strain energy characteristics of surrounding rock under blasting load and transient release of geostress during excavation of circular tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(8): 1855-1866. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0081.
- [4] 杨仁树, 左进京, 方士正, 等. 圆孔缺陷对爆生裂纹扩展行为影响的试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(12): 174-178. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.12.026.  
YANG R S, ZUO J J, FANG S Z, et al. An experimental study on the effect of circular hole defect on crack propagation behavior of blast loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(12): 174-178. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.12.026.
- [5] KALTHOFF J F, WINKLER S, BEINERT J. The influence of dynamic effects in impact testing [J]. *International Journal of Fracture*, 1977, 13(4): 528-531. DOI: 10.1007/BF00034256.
- [6] KAWAGISHI Y, SHOZU M, HIROSE Y. Experimental evaluation of stress field around crack tip by caustic method [J]. *Mechanics of Materials*, 2001, 33(12): 741-757. DOI: 10.1016/S0167-6636(01)00077-1.
- [7] 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, 28(6): 661-669. DOI: 10.3321/j.issn:0459-1879.1996.06.003.  
YAO X F, XIONG C Y, FANG J. Study of dynamic fracture behaviour on three point bend beam with off center edge crack [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1996, 28(6): 661-669. DOI: 10.3321/j.issn:0459-1879.1996.06.003.
- [8] 杨鑫, 蒲传金, 廖涛, 等. 含不同充填物预制裂隙对爆炸裂纹扩展的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(3): 370-378. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0370-09.  
YANG X, PU C J, LIAO T, et al. Effect of prefabricated crack with different fillings on blasting cracks propagation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(3): 370-378. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0370-09.
- [9] 岳中文, 宋耀, 杨仁树, 等. 冲击荷载下深梁动态断裂行为的光弹性实验 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(19): 236-241. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.19.036.  
YUE Z W, SONG Y, YANG R S, et al. Photoelastic experiments on deep beam fracture behaviors under impact load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(19): 236-241. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.19.036.
- [10] 杨仁树, 苏洪, 龚悦, 等. 冲击作用下静止裂纹与运动裂纹相互作用的试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(8): 107-112. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.08.017.  
YANG R S, SU H, GONG Y, et al. Experimental study of interaction between stationary crack and moving crack under impact [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(8): 107-112. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.08.017.
- [11] 李清, 于强, 徐文龙, 等. 应变片法确定 I 型裂纹动态应力强度因子试验研究 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(4): 1211-1218. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1581.



- LI Q, YU Q, XU W L, et al. Experimental research on determination of dynamic stress intensity factor of type-I crack using strain gage method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(4): 1211–1218. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1581.
- [12] 杨立云, 张勇进, 孙金超, 等. 偏置裂纹对含双裂纹 PMMA 试件动态断裂影响效应研究 [J]. *矿业科学学报*, 2017, 2(4): 330–335. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2017.04.003.
- YANG L Y, ZHANG Y J, SUN J C, et al. The effect of offset distance on dynamic fracture behavior of PMMA with double cracks [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 2(4): 330–335. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2017.04.003.
- [13] 杨仁树, 岳中文, 董聚才, 等. 断续节理介质爆生裂纹扩展的动焦散实验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(4): 467–472. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1964.2008.04.007.
- YANG R S, YUE Z W, DONG J C, et al. Dynamic caustics experiment of blasting crack propagation in discontinuous jointed material [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 37(4): 467–472. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1964.2008.04.007.
- [14] TAKAHASHI K, ARAKAWA K. Dependence of crack acceleration on the dynamic stress-intensity factor in polymers [J]. *Experimental Mechanics*, 1987, 27(2): 195–199. DOI: 10.1007/BF02319474.
- [15] 何庆芝, 酆正能. 工程断裂力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993.
- [16] 肖同社, 杨仁树, 庄金钊, 等. 节理岩体爆生裂纹扩展动态焦散线模型实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(2): 159–164. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)02-0159-06.
- XIAO T S, YANG R S, ZHUANG J Z, et al. Dynamic caustics model experiment of blasting crack developing on sandwich rock [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(2): 159–164. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)02-0159-06.
- [17] 郭东明, 刘康, 杨仁树, 等. 动静荷载对邻近巷道裂纹缺陷扰动的模拟实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(3): 297–304. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0297-08.
- GUO D M, LIU K, YANG R S, et al. Simulated experiment of disturbance effect on crack defects of adjacent tunnel under dynamic and static load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(3): 297–304. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0297-08.
- [18] 杨仁树, 肖成龙, 丁晨曦, 等. 空孔与运动裂纹相互作用的动焦散线实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(5): 052202. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0091.
- YANG R S, XIAO C L, DING C X, et al. Experimental study on dynamic caustics of interaction between void and running crack [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(5): 052202. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0091.

(责任编辑 张凌云)