

文章编号:1001-4888(2017)04-0463-09

冲击载荷下含空孔三点弯曲梁的动态断裂行为^{*}

岳中文, 胡庆文, 王煦, 张旺

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 为得到圆孔缺陷对运动裂纹扩展过程的影响规律,采用动态焦散线实验方法进行模型实验,研究了冲击载荷下含空孔三点弯曲梁的动态断裂行为。研究表明:空孔对裂纹扩展有极大的阻碍作用,在一定范围内,空孔直径越大,阻碍作用越明显。裂纹扩展到空孔附近时,扩展速度会下降。裂纹在空孔上部再次起裂后,最大扩展速度远远大于裂纹与空孔贯通前的最大扩展速度。裂纹扩展至空孔附近时,裂纹尖端动态应力强度因子 K_{\perp}^d 和 K_{\parallel}^d 均会下降。裂纹在空孔上部再次起裂后,裂尖的应力强度因子 K_{\perp}^d 和 K_{\parallel}^d 均大于裂纹与空孔贯通前裂尖的 K_{\perp}^d 和 K_{\parallel}^d 。在整个扩展过程中,裂纹尖端的动态应力强度因子 K_{\parallel}^d 远小于 K_{\perp}^d ,说明 K_{\perp}^d 在裂纹扩展过程中起主要作用。

关键词: 冲击载荷; 动态应力强度因子; 动态焦散线; 空孔

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-025

0 引言

岩体是经历漫长复杂地质运动的产物,一般存在大量的内部缺陷,如裂纹、断裂面、孔洞、节理、断层等。由于这些缺陷的存在,导致岩体在动态载荷作用下的破坏过程十分复杂,其中,冲击载荷下含孔洞岩体的断裂力学问题一直是热点和难点。目前,国内外已有一些学者对含缺陷体的动态断裂行为进行了相关研究。Kawagishi 等^[1]研究了含倾斜裂纹与不同尺寸切口的有机玻璃试件裂纹尖端的应力集中问题。杨仁树等^[2-5]采用焦散线实验方法研究了爆炸载荷下裂纹扩展相关规律。林鹏^[6]采用实验室实验和 RFPA2D 数值软件研究了多缺陷介质在静力加载条件下的贯通与裂纹扩展机理。岳中文等^[7-9]对岩石冲击断裂进行了模型实验,研究了三点弯曲梁的动态裂纹扩展规律。岳中文等^[10]采用动态焦散线方法研究了爆炸载荷下裂纹的扩展规律。姚学锋等^[11]对动载下裂纹起始扩展的条件和方向进行了分析与研究。姚学锋等^[12]对各向异性复合材料在面内载荷作用下的裂尖应力集中问题也进行了相应的实验研究。肖同社等^[13]研究了爆炸载荷下初始裂纹与节理面夹角不同情况下裂纹尖端的应力强度因子。苏先基等^[14]分析了裂纹扩展速度对焦散斑和初始曲线的形状、大小的影响。姚学锋等^[15]用焦散线理论和复合材料力学的弹性理论封闭解,对集中载荷作用下半无限正交复合材料板的奇异应力场进行了光力学可视化分析。然而,目前针对含孔洞缺陷岩体的动态断裂行为的研究成果较少,仍需进一步深入研究。

本文采用动态焦散线实验方法对含空孔三点弯曲梁进行冲击实验研究,分析圆孔缺陷对复合型裂纹扩展的影响规律,实验结果可丰富含缺陷岩石动态断裂机理的研究内容。

* 收稿日期: 2017-02-17; 修回日期: 2017-04-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51374210)资助; 开放自然科学基金面上项目(KFJJ17-01M)资助

通讯作者: 岳中文(1975-),男,博士,副教授,主要研究领域:动态断裂力学。Email: zwyue75@163.com

1 透射式焦散线实验原理

1.1 实验原理

一束平行光入射到试件表面,试件因受力导致裂纹尖端区域的厚度和折射率发生改变,使裂纹尖端附近的透射光线发生偏转,在距试件 z_0 处的参考平面上形成焦散斑,如图 1 所示^[16]。I 型与 II 型裂纹尖端形成的焦散曲线如图 2 所示。

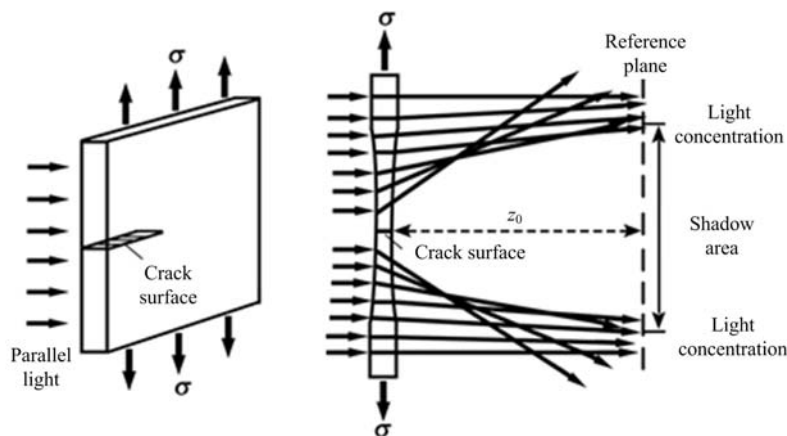


图 1 焦散法实验原理图

Fig. 1 Principle of the method of caustics for transparent materials

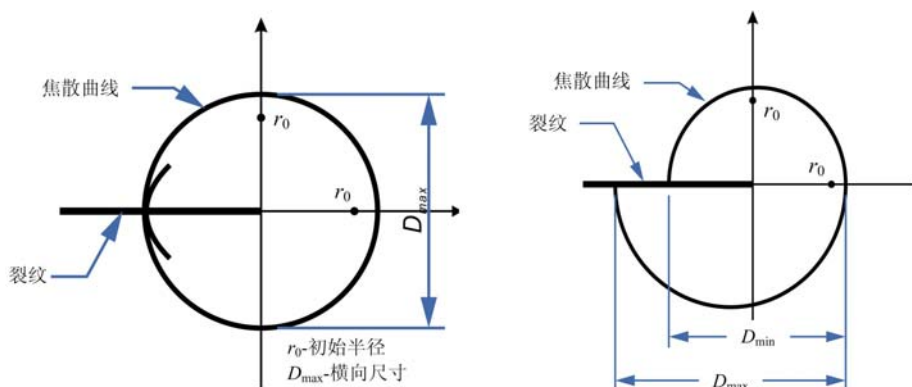


图 2 裂纹尖端 I 型与 II 型焦散线

Fig. 2 Caustic curves of mode-I and mode-II

1.2 应力强度因子表达式

复合型裂纹尖端的动态应力强度因子^[17]可表示为

$$K_{\perp}^d = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2\pi} F(v)}{g^{5/2} z_0 c d_{eff}} D_{max}^{5/2} \quad (1)$$

$$K_{\parallel}^d = \mu K_{\perp}^d \quad (2)$$

式中, z_0 为参考平面到试件平面的距离; c 为材料的应力光学参数; v 为裂纹扩展速度; d_{eff} 为试件的有效厚度; $F(v)$ 为动态裂纹扩展速度的校正因子; D_{max} 为裂纹尖端焦散线的最大直径; μ 为复合型裂纹尖端动态应力强度因子 K_{\parallel}^d 与 K_{\perp}^d 的比值; K_{\perp}^d 与 K_{\parallel}^d 为复合型裂纹尖端的 I 型、II 型应力强度因子。

2 动态焦散实验系统及实验描述

2.1 实验系统

实验采用透射式数字激光动态焦散线实验系统,如图 3 所示。实验系统主要包括激光光源、扩束镜、场镜组合、冲击加载系统、高速相机与计算机。

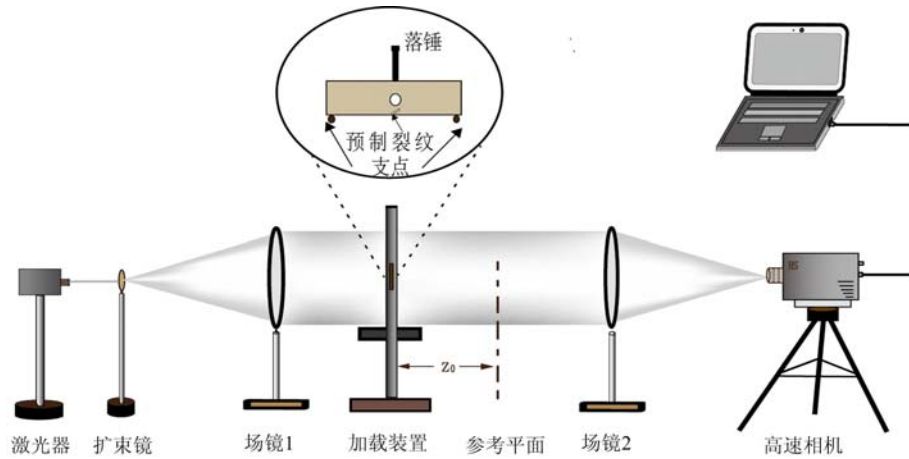


图 3 透射式动态焦散线实验系统

Fig. 3 Dynamic caustic experimental system for transparent

2.2 实验描述

实验采用有机玻璃试件,其动态力学参数见表 1。早期已有大量的学者研究证明^[18-20] PMMA 适合作为研究动态断裂行为的实验材料,且 PMMA 同样适用于模拟脆性岩石断裂行为的研究。因为 PMMA 材料具有良好的透光性,所以在应用高速摄像机和动态焦散线方法的实验中,可以直观地得到裂纹的扩展行为。此外,有研究表明^[16],采用均匀的岩石块体试件中的爆生裂纹扩展行为与实验室中由 PMMA 材料构成的模拟试件所测得的结果具有很高的一致性。由此可见,PMMA 材料既可以很好地模拟岩石的断裂行为,又能简化实验结果的处理过程,可以作为模拟岩石断裂的实验材料。本文试件的几何尺寸为 220mm×50mm×5mm,试件中心设置一空孔,如图 4 所示。试件底部预制裂纹长度为 5mm,宽度为 0.3mm,与试件下边缘夹角为 45°。预制裂纹的中点与空孔圆心的连线垂直于下边缘。试件共分三组,每组三个试件,第一组试件圆孔直径为 6mm,记为 D6-x,第二组试件圆孔直径为 9mm,记为 D9-x,第三组试件圆孔直径为 12mm,记为 D12-x。实验时,将高速相机拍摄频率设置为 10⁵ fps,拍摄照片的分辨率为 320×192pixels。落锤下落高度为 331mm,质量为 0.82kg。

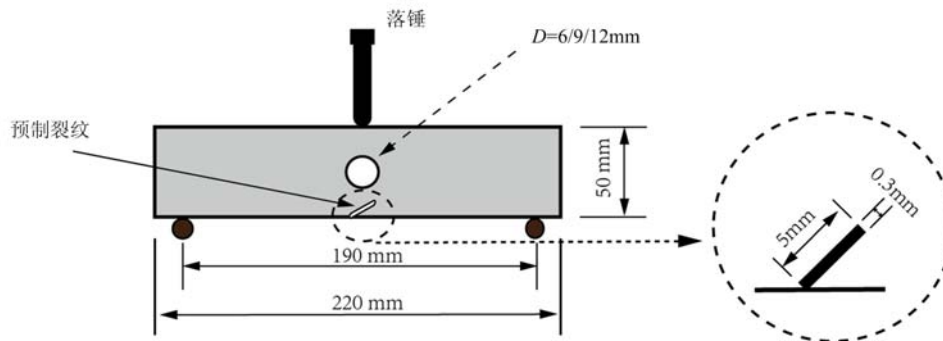


图 4 试件几何尺寸示意图

Fig. 4 Schematic illustration of specimen sizes

表 1 有机玻璃试件的动态力学参数

Tab. 1 Dynamic mechanical parameters of PMMA

材料	弹性模量(GPa)	剪切模量(GPa)	泊松比 ν	$c \times 10^{-10} (m^2/N)$
PMMA	3.33	1.23	0.35	0.85

3 试验结果及分析

3.1 裂纹扩展轨迹

图 5 为试件 D6-1、D9-1、D12-1 的实验结果图。裂纹扩展过程分为两个阶段,裂纹到达空孔前为第一阶段,裂纹在空孔上部再次扩展为第二阶段。由图 5 可见,三种试件第一阶段的裂纹扩展轨迹大致相同。试件均从预制裂纹尖端起裂,竖直向上扩展,并轻微向左偏移,然后与空孔贯通。可见空孔直径变化对第一阶段的裂纹扩展轨迹并无明显影响。第二阶段裂纹均从空孔上部中间处起裂,开始向上扩展。在裂纹接近试件边缘时,向右发生偏移。空孔直径越大,裂纹在接近试件边缘时向右偏移程度越大。

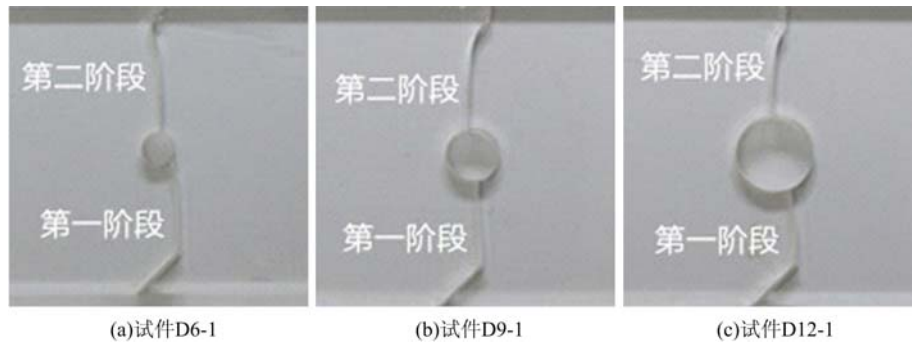


图 5 不同试件实验结果图

Fig. 5 Picture of experimental results of specimens

3.2 动态焦散斑图像

图 6 为试件 D6-1、D9-1、D12-1 的焦散斑变化系列图片。 $t=0\mu\text{s}$ 时,落锤击中试件。 $t=53.3\mu\text{s}$ 时,试件 D6-1、D9-1、D12-1 预制裂纹尖端开始出现焦散斑。在冲击荷载作用下,预制裂纹尖端的焦散斑不断振荡增大,当预制裂纹尖端的能量聚集到一定程度,即达到材料断裂强度,裂纹起裂。随后焦散斑随着裂纹尖端不断向上运动,直到运动裂纹与空孔贯通。试件 D6-1 在 $t=680\mu\text{s}$ 时运动裂纹与空孔贯通,试件 D9-1 在 $t=653.3\mu\text{s}$ 时运动裂纹与空孔贯通,试件 D12-1 在 $t=446.6\mu\text{s}$ 时运动裂纹与空孔贯通。当运动裂纹与空孔贯通后,空孔上方不会立刻起裂,而是经过相当长的一段时间积累能量,当能量积累到一定值时,裂纹从空孔上方再次起裂。在能量积累过程中,空孔上方逐渐出现阴影,阴影面积随时间推移不断变大,阴影从空孔上部逐渐向空孔周围延伸。试件 D6-1 在 $t=800\mu\text{s}$ 时在空孔上方再次起裂,试件 D9-1 在 $t=1706.6\mu\text{s}$ 时在空孔上方再次起裂,试件 D12-1 在 $t=2340\mu\text{s}$ 时在空孔上方再次起裂。试件 D6-1 第一阶段结束与第二阶段开始的间隔时间为 $120\mu\text{s}$,试件 D9-1 第一阶段结束与第二阶段开始的间隔时间为 $1053.3\mu\text{s}$,试件 D12-1 第一阶段结束与第二阶段开始的间隔时间为 $1893.4\mu\text{s}$ 。说明空孔对裂纹扩展有极大的阻碍作用,空孔直径越大,阻碍作用越明显。

图 7 表示焦散斑最大直径与最小直径随时间的变化图。为了直观表示直径随时间的变化,选取了空孔直径为 6mm 的试件 D6-1 作为代表试件。由图 7 可看出焦散斑直径随时间的增长基本成振荡增加趋势,裂纹与空孔贯通时焦散斑消失;第二阶段,裂纹扩展贯通空孔之后焦散斑直径迅速增大,达到峰值之后,焦散斑最大与最小直径均随时间的增长逐渐减小,最终焦散斑直径减小为零。

3.3 裂纹扩展速度变化规律

图 8 为三种试件裂纹扩展速度随裂纹扩展长度的变化曲线。由图 8 可见,在第一阶段,三种试件起裂后,裂纹扩展速度变化趋势相似,均迅速增大。试件 D6 在 $L=10\text{mm}$ 处裂纹扩展速度达到峰值 375m/s ,试件 D9 在 $L=9\text{mm}$ 处裂纹扩展速度达到峰值 325m/s ,试件 D12 在 $L=8\text{mm}$ 处裂纹扩展速度达到峰值 335m/s 。随后三种试件的裂纹扩展速度均发生下降,试件 D6 由峰值时速度 375m/s 减小到 326m/s ,试件 D9 由峰值时速度 325m/s 减小到 253m/s ,试件 D12 由峰值时速度 335m/s 减小到 226m/s ,由速度的变化可得知,空孔直径越大,速度下降幅度越大。这是由于裂纹尖端扩展到空孔附近时产生的反射波使裂纹扩展速度受到限制,因而扩展速度下降。当裂纹与空孔贯通时,裂纹扩展速度消

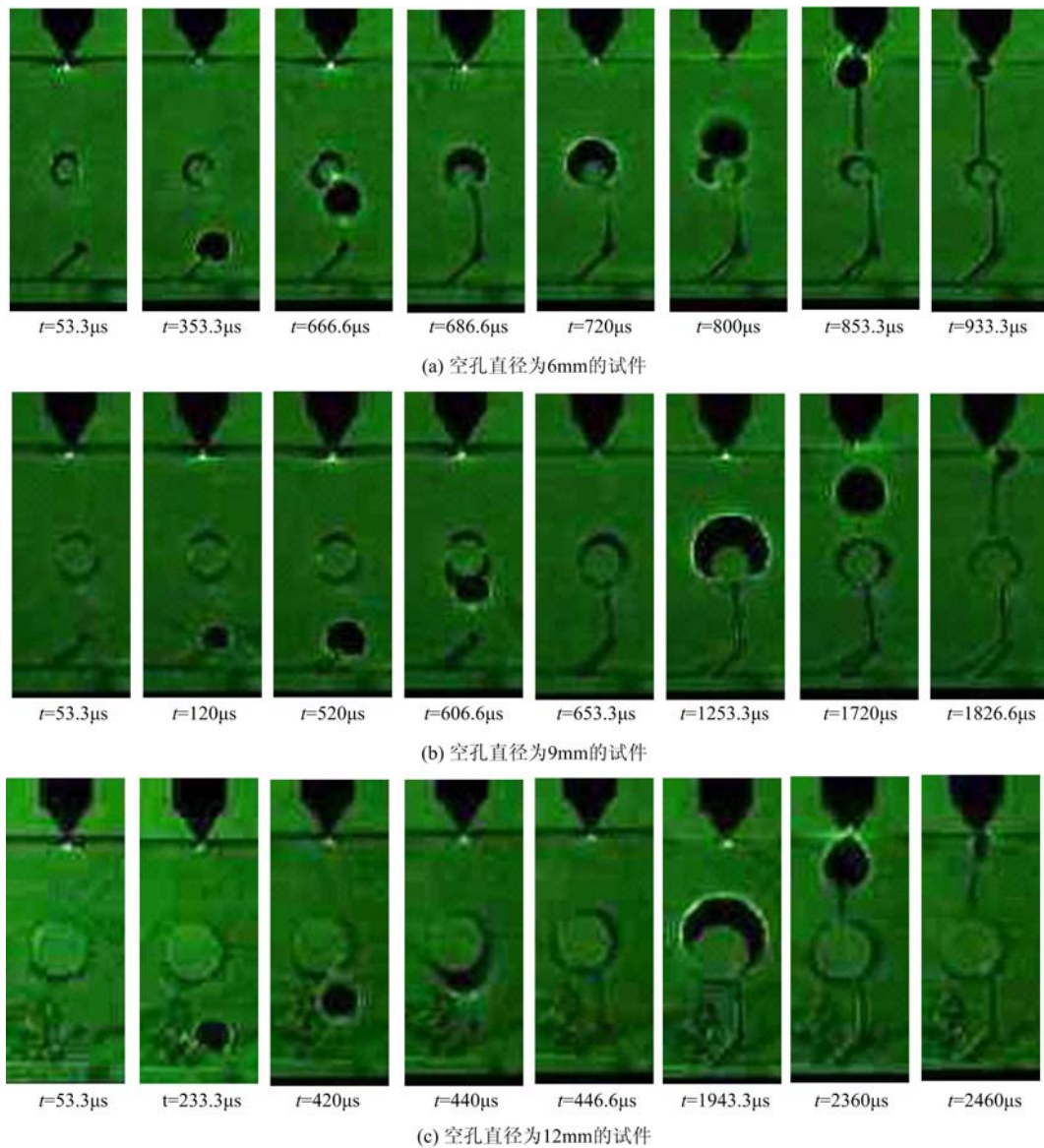


图 6 运动裂纹尖端焦散斑系列变化图片

Fig. 6 Dynamic caustic images of specimens

失,随后空孔上方开始聚集弹性应变能,当能量聚集到一定程度时,裂纹再次起裂。在第二阶段,三种试件的裂纹扩展速度变化趋势基本相似,均为裂纹扩展速度先迅速增大至峰值,然后开始急剧下降。当试件完全断裂时,三种试件的裂纹扩展速度均变为0m/s。在第二阶段中,试件 D6 的裂纹扩展速度峰值为 649m/s,试件 D9 的裂纹扩展速度峰值为 634m/s,试件 D12 的裂纹扩展速度峰值为 653m/s。由于空孔区域能量的聚集,第二阶段裂纹最大扩展速度明显大于第一阶段。

3.4 动态应力强度因子变化规律

图 9 为裂纹尖端动态应力强度因子 K_{II}^d 与裂纹扩展长度的关系曲线。从图9可以看出,在第一阶段,裂纹起裂后,裂纹尖端动态应力强度因子 K_{II}^d 基

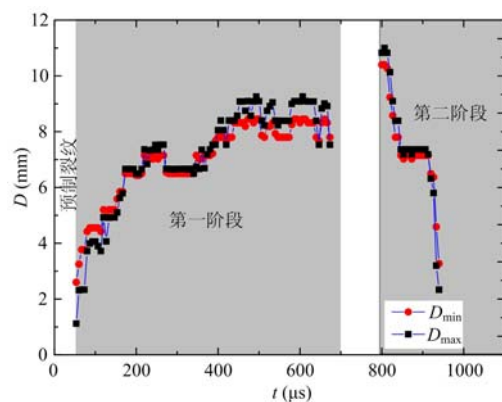
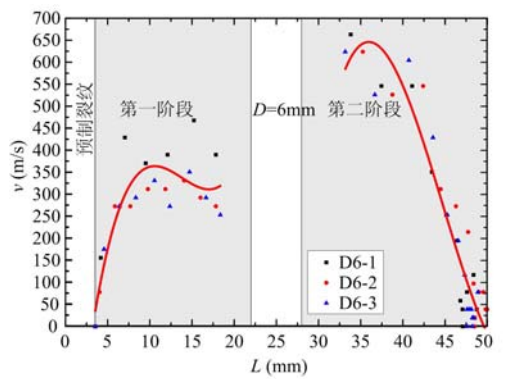


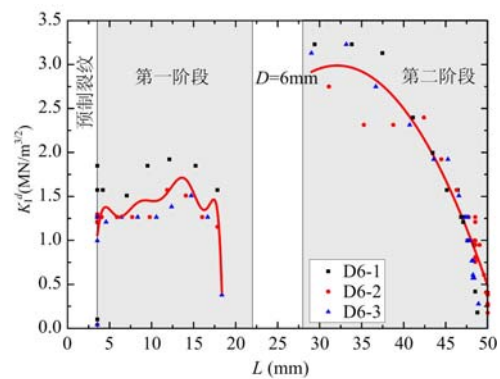
图 7 裂纹尖端焦散斑直径随时间的变化曲线

Fig. 7 Time evolution with diameters of crack tips

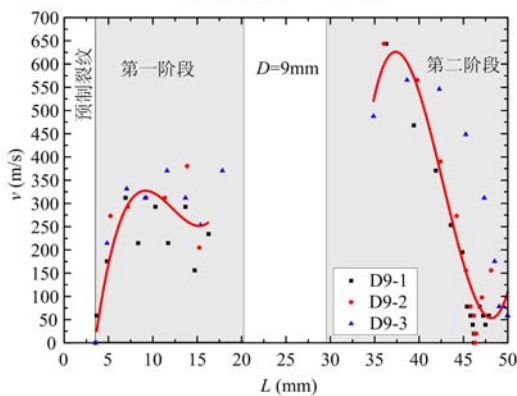
由于空孔区域能量的聚集,第二阶段裂纹最大扩展速度明显大于第一阶段。



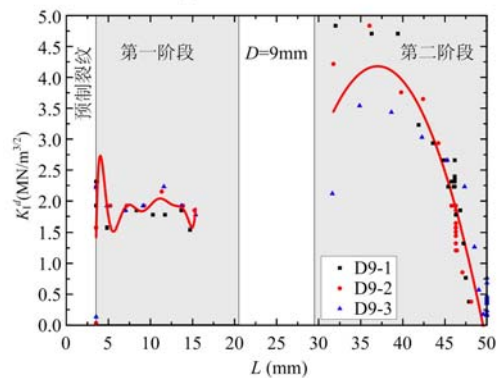
(a) 空孔直径为6mm的试件



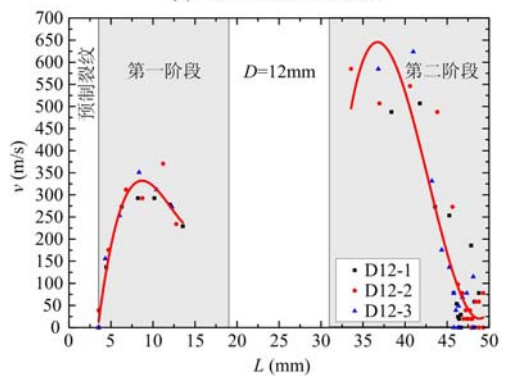
(a) 空孔直径为6mm的试件



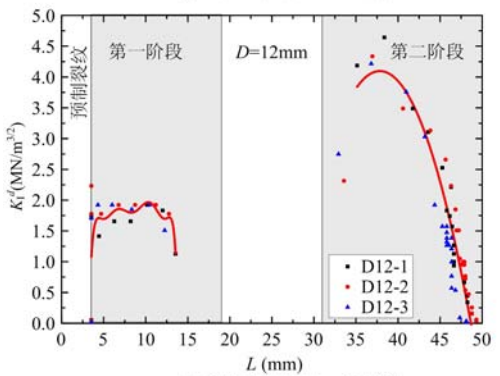
(b) 空孔直径为9mm的试件



(b) 空孔直径为9mm的试件



(c) 空孔直径为12mm的试件



(c) 空孔直径为12mm的试件

图8 裂纹扩展速度与裂纹长度的关系曲线

Fig. 8 Curves of velocity vs. crack length

图9 裂纹尖端 K_I^d 与裂纹扩展长度的关系曲线

Fig. 9 Curves of K_I^d vs. crack length

本保持稳定。试件 D6 的应力强度因子 K_I^d 在 $1.5 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 附近上下振荡；试件 D9 的应力强度因子 K_I^d 在 $1.75 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 附近上下振荡；试件 D12 的应力强度因子 K_I^d 在 $1.8 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 附近上下振荡；随后当裂纹扩展至空孔附近时，动态应力强度因子 K_I^d 会下降；当裂纹扩展与空孔贯通时，动态应力强度因子 K_I^d 消失。第二阶段，裂纹再次起裂后，试件 D6 的应力强度因子 K_I^d 约为 $2.75 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ ，试件 D9 的应力强度因子 K_I^d 约为 $3.3 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ ，试件 D12 的应力强度因子 K_I^d 约为 $3.75 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。第二阶段起始动态应力强度因子 K_I^d 明显高于第一阶段。这是因为裂纹贯通空孔时，在空孔上方积聚了大量能量。Theocaris 等^[21]研究得到过类似结论，进一步验证了实验的正确性。随后，应力强度因子 K_I^d 随着裂纹的扩展逐渐下降，直到试件完全断裂。

图 10 为裂纹尖端动态应力强度因子 K_{II}^d 与裂纹扩展长度的关系图。由图 10 可以看出，在第一阶段，试件起裂后，动态应力强度因子 K_{II}^d 先下降，然后随着裂纹扩展不断振荡。当裂纹扩展至空孔附近时， K_{II}^d 会下降。在第二阶段，裂纹起裂后，动态应力强度因子 K_{II}^d 随着裂纹扩展不断下降，直到试件完

全断裂。从图 10 可见,空孔直径越大,第一阶段和第二阶段裂纹起裂时的动态应力强度因子 K_{II}^d 越大。在第二阶段,裂纹起裂后的动态应力强度因子 K_{II}^d 远远大于第一阶段。由图 9、图 10 可见,在整个扩展过程中裂纹尖端的应力强度因子 K_{II}^d 远小于 K_I^d 。

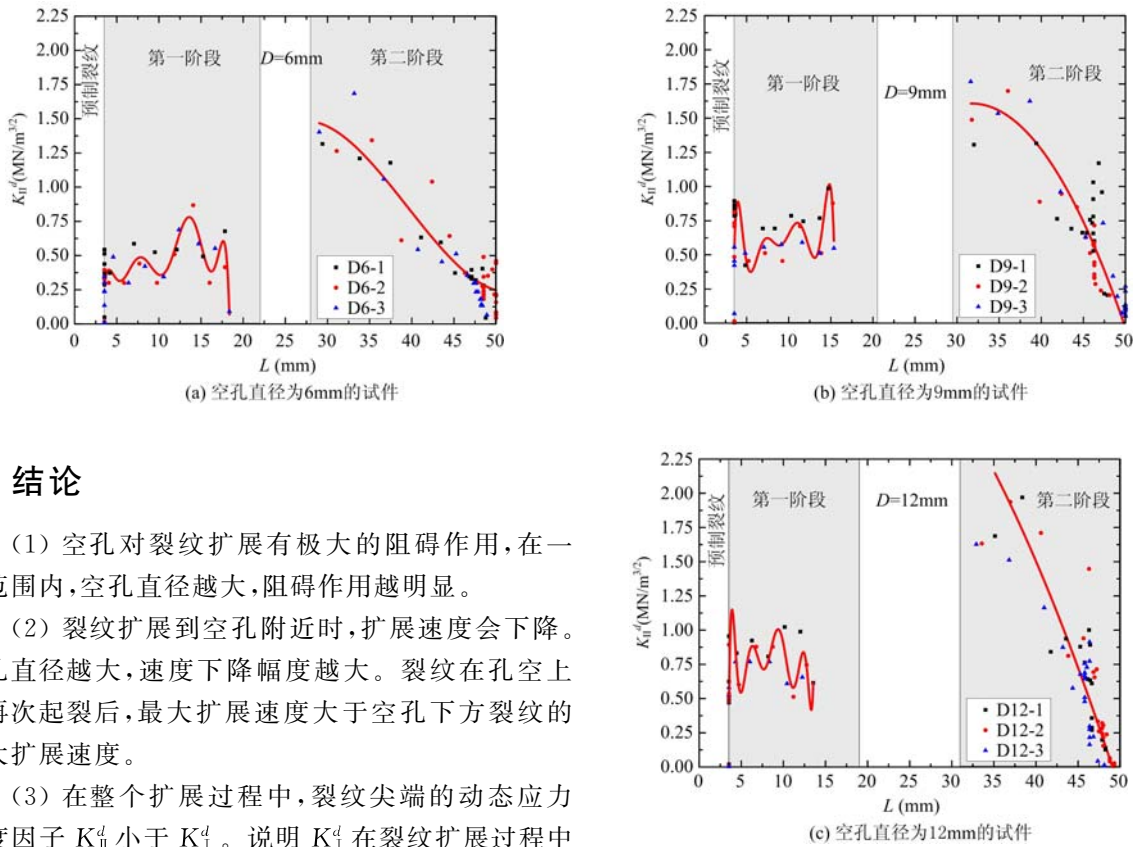


图 10 裂纹尖端 K_{II}^d 与裂纹扩展长度的关系曲线

Fig. 10 Curves of K_{II}^d vs. crack length

4 结论

(1) 空孔对裂纹扩展有极大的阻碍作用,在一定范围内,空孔直径越大,阻碍作用越明显。

(2) 裂纹扩展到空孔附近时,扩展速度会下降。空孔直径越大,速度下降幅度越大。裂纹在孔空上部再次起裂后,最大扩展速度大于空孔下方裂纹的最大扩展速度。

(3) 在整个扩展过程中,裂纹尖端的动态应力强度因子 K_{II}^d 小于 K_I^d 。说明 K_I^d 在裂纹扩展过程中起主要作用。

(4) 裂纹扩展至空孔附近时,裂纹尖端动态应力强度因子 K_I^d 和 K_{II}^d 均会下降。裂纹在空孔上部起裂后,应力强度因子 K_I^d 和 K_{II}^d 均大于空孔下方裂纹的 K_I^d 和 K_{II}^d 。空孔直径越大,预制裂纹处和空孔上部裂纹起裂时的动态应力强度因子 K_{II}^d 越大。

参考文献:

[1] Kawagishi Y C, Masayuki S, Yukio H. Experimental evaluation of stress field around crack tip by caustic method [J]. Mechanics of Materials, 2001(33):741-754.

[2] 杨仁树,岳中文,肖同社,等. 节理介质断裂控制爆破裂纹扩展的动焦散试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2):244-250 (YANG Renshu, YUE Zhongwen, XIAO Tongshe, et al. Dynamic caustics experiment on crack propagation of jointed medium fracture with controlled blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2):244-250 (in Chinese))

[3] 杨仁树,丁晨曦,王雁冰,等. 爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2):3502-3506 (YANG Renshu, DING Chenxi, WANG Yanbing, et al. Action-effect study of medium under loading of explosion stress wave and explosion gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2):3502-3506 (in Chinese))

[4] 肖同社,杨仁树. 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, 2006, 27(2):159-164 (XIAO Tongshe, YANG Renshu. Dynamic caustics model experiment of blasting crack developing on sandwich rock[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 27(2):159-164 (in Chinese))

[5] 杨仁树,杨立云,岳中文,等. 爆炸载荷下缺陷介质裂纹扩展的动焦散试验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2):187-192 (YANG Renshu, YANG Liyun, YUE Zhongwen, et al. Dynamic caustics experiment of crack

- propagation in material containing flaws under blasting load[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2):187—192 (in Chinese))
- [6] 林鹏. 含裂纹与孔洞缺陷介质的脆性破坏行为[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8):1283 (LIN Peng. Brittle failure behavior of medium containing flaws and pores[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8):1283 (in Chinese))
- [7] 岳中文, 王煦, 许鹏, 等. 含圆孔缺陷三点弯曲梁动态焦散实验[J]. 实验力学, 2015, 30(3):340—347 (YUE Zhongwen, WANG Xu, XU Peng, et al. Dynamic caustics experiment of three-point bending beam with circular hole defect[J]. Journal of Experiment Mechanics, 2015, 30(3):340—347 (in Chinese))
- [8] 岳中文, 杨仁树, 孙中辉, 等. 含倾斜边裂纹岩石冲击断裂模拟实验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9):1457—1460 (YUE Zhongwen, YANG Renshu, SUN Zhonghui, et al. Simulation experiment of rock fracture containing inclined edge crack under impact load[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9):1457—1460 (in Chinese))
- [9] 岳中文, 杨仁树, 杨立云, 等. 爆炸载荷下边界锐 V 型切口尖端裂纹扩展行为[J]. 工程爆破, 2011, 17(1):8—11 (YUE Zhongwen, YANG Renshu, YANG Liyun, et al. Crack growth behavior of an edge sharp v-notch tip under blasting load[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(1):8—11 (in Chinese))
- [10] Yue Zhongwen, Yang Liyun, Wang Yanbing. Experimental study of crack propagation in polymethyl methacrylate material with double holes under the directional controlled blasting [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2013, 36(8):827—833.
- [11] Yao Xuefeng, Meng L B, Yeh H Y. Influence of material orientation on crack tip stress singularity in orthotropic composites[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13:1047—1056.
- [12] Yao Xuefeng, Xu W. Recent application of caustics on experimental dynamic fracture studies[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2011, 34(6):448—459.
- [13] 肖同社, 杨仁树, 边亚东, 等. 含节理岩体爆生裂纹扩展的动焦散模型实验研究[J]. 实验力学, 2006, 21(4):539—545 (XIAO Tongshe, YANG Renshu, BIAN Yadong, et al. Dynamic caustics model experiment of blasting crack propagating on joint rock[J]. Journal of Experiment Mechanics, 2006, 21(4):539—545 (in Chinese))
- [14] 刘成, 苏先基. 裂纹扩展速度对焦散线的影响和动态应力光学常数的测定[J]. 实验力学, 1988, 3(2):109—118 (LIU Cheng, SU Xianji. On the caustics by the crack propagating speed and determination of the dynamic stress optical constants [J]. Journal of Experiment Mechanics, 1988, 3(2):109—118 (in Chinese))
- [15] 姚学锋, 许尉, 徐曼琼, 等. 集中载荷作用下正交复合材料板奇异应力场的焦散线模拟实验[J]. 实验力学, 2003, 18(3):350—354 (YAO Xuefeng, XU Wei, XU Manqiong, et al. Caustic simulation for the stress singularities in orthotropic composite material under concentrated loads[J]. Journal of Experiment Mechanics, 2003, 18(3):350—345 (in Chinese))
- [16] 高尔新, 杨仁树. 爆破工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999 (GAO Erxin, YANG Renshu. Blasting engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999 (in Chinese))
- [17] Theocaris P S, Andrianopoulos N P. Dynamic three-point bending of short beams studied by caustics[J]. International Journal of Solids and Structures, 1981, 17(7):707—715.
- [18] Kutter H K, Fairhurst C. On the fracture process in blasting[C]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, 8(3):181—188.
- [19] Rossmann H P, Daehnke A, Nasmillner R E K, et al. Fracture mechanics applications to drilling and blasting [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1997, 20(11):1617—1636.
- [20] Nakagawa K, Sakamoto T, Yoshikai R. Model study of the guide hole effect on the smooth blasting[J]. J. Jpn. Exp. Soc., 1982, 43:75—82.
- [21] Theocaris P, Milios J. Crack arrest modes of a transverse crack going through a longitudinal crack or a hole[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1981, 103(2):177—182.

On the Dynamic Fracture Behavior of Three-Point Bending Beam with Empty Hole and Subjected to Impact Loading

YUE Zhong-wen, HU Qing-wen, WANG Xu, ZHANG Wang

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

Abstract: In order to understand the influence pattern of circular hole defect on crack propagation process, by using dynamic caustics method, a model experiment was carried out to study the dynamic fracture behavior of three-point bending beam with empty hole. Experimental results indicate that empty hole has a significant impediment effect on crack propagation. In a certain range, the larger the empty hole diameter is, the more obvious the impediment. When a crack extends to the vicinity of an empty hole, its propagation rate decreases. When the crack appears again in the upper part of the empty hole, its maximum expansion velocity is much larger than that before the crack and the empty hole coalescence. When a crack extends to the vicinity of an empty hole, both dynamic stress intensity factors at crack tip K_{\perp}^d and K_{\parallel}^d decrease. When the crack appears again in the upper part of the empty hole, both dynamic stress intensity factors at crack tip K_{\perp}^d and K_{\parallel}^d are larger than that before the crack and the empty hole coalescence. In whole crack propagation process, the dynamic stress intensity factor K_{\parallel}^d is always less than K_{\perp}^d , which indicates that K_{\perp}^d plays a main role in crack propagation process.

Keywords: impact loading; dynamic stress intensity factor; dynamic caustics; empty hole