

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.002

不同裂纹高度的三点弯曲梁动态焦散线实验*

李清, 许博文, 黄晨, 于冰冰, 王凯, 袁琿

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了探究不同高度条形缺陷的梁构件动态裂纹扩展规律, 在三点弯曲梁中设计高度分别为 22 mm、28.5 mm、35 mm 的条形缺陷, 通过数字激光动态焦散线实验系统和落锤冲击试验系统进行研究。结果表明: 不同高度条形缺陷的三点弯曲梁在落锤冲击实验中, 裂纹扩展速度和应力强度因子受缺陷高度影响分两个阶段。第一阶段随着缺陷高度的增加, 裂纹最大扩展速度分别为 247.49 m/s、292.49 m/s 与 284.99 m/s, 呈现先上升后趋于稳定的态势, 起裂应力强度因子随着缺陷高度的增加而变大, 分别为 1.480 MPa/m^{3/2}、1.665 MPa/m^{3/2}、1.812 MPa/m^{3/2}; 第二阶段随着缺陷高度的增加, 裂纹起裂扩展速度逐步减小分别为 634.42 m/s、524.97 m/s、377.67 m/s, K_I 型起裂应力强度因子逐步减小分别为 3.281 MPa/m^{3/2}、3.192 MPa/m^{3/2}、2.876 MPa/m^{3/2}, K_{II} 型起裂应力强度因子逐步增大分别为 1.254 MPa/m^{3/2}、1.319 MPa/m^{3/2}、1.398 MPa/m^{3/2}, K_I-K_{II} 复合型应力强度因子经偏转化为 K_I 型应力强度因子。研究结果可为不同形状和不同位置的缺陷构件的动态响应问题提供理论参考。

关键词: 焦散线实验系统; 条形缺陷; 裂纹扩展速度; 应力强度因子

中图分类号: O346.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)04-0013-07

Dynamic Caustic Line Experiment of Three-point Bending Beam with Different Crack Heights

LI Qing, XU Bo-wen, HUANG Chen, YU Bing-bing, WANG Kai, YUAN Hui

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

Abstract: In order to explore the dynamic crack propagation law of beam members, bar defects with the heights of 22 mm, 28.5 mm and 35 mm were designed in a three-point bending beam, and then tested by the digital laser dynamic caustic line experiment system and the drop weight impact test system. The results show that the crack propagation rate and stress intensity factor are affected by the defect height in two stages in the drop weight impact experiment. In the first stage, the maximum growth rates of crack propagation have a trend of first rising and then stabilizing as 247.49 m/s, 292.49 m/s and 284.99 m/s with the increase of defect height, and the cracking stress intensity factor was respectively 1.480 MPa/m^{3/2}, 1.665 MPa/m^{3/2} and 1.812 MPa/m^{3/2}, which increased with the increase of defect height. Meanwhile, the crack initiation and propagation rates respectively decreased by 634.42 m/s, 524.97 m/s and 377.67 m/s, the cracking stress intensity factors of K_I type respectively decreased by 3.281 MPa/m^{3/2},

收稿日期 (Date of reception): 2022-11-15

网络首发日期 (Published online): 2023-04-06

作者简介: 李清 (1969-), 男, 博士、教授, 从事爆破工程及岩土工程方面的研究, (E-mail) liq@cumtb.edu.cn.

通讯作者: 许博文 (1998-), 男, 硕士研究生, 从事爆破工程方面的研究工作, (E-mail) 1305984867@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金 (51374212)

About the author: LI Qing (1969-), male, Ph. D, Professor, mainly engaged in research in blasting engineering and geotechnical engineering, (E-mail) liq@cumtb.edu.cn.

Corresponding author: XU Bo-wen (1998-), male, postgraduate, mainly engaged in research work in blasting engineering, (E-mail) 1305984867@qq.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (51374212)

3. 192 MPa/m^{3/2} and 2. 876 MPa/m^{3/2}, and the cracking stress intensity factors of K_{II} type respectively increased by 1. 254 MPa/m^{3/2}, 1. 319 MPa/m^{3/2}, and 1. 398 MPa/m^{3/2}. Furthermore, the K_I - K_{II} composite stress intensity factor was transformed into a K_I type stress intensity factor by deflection.

Key words: caustic line experiment system; stripy flaw; crack propagation speed; stress intensity factor

在地下工程中,岩体通常存在大量缺陷,当其受开挖等工程扰动影响,内部缺陷附近就会产生应力集中现象,致使其应力场发生改变,严重时会影响围岩的完整性,甚至造成岩体力学性质的削弱,最终导致围岩结构失稳^[1-4]。因此,对冲击荷载下含缺陷介质的动态断裂行为进行深入研究具有重要的工程意义。

很多学者应用动态焦散线实验系统在该方面做了许多研究,取得大量成果。王雁冰利用数字激光动态焦散线试验系统^[5],进行双孔爆破爆炸应力波作用下缺陷介质裂纹扩展试验。研究了含水平预制裂纹和竖直预制裂纹的介质裂纹扩展路径、速度、加速度和裂尖动态应力强度因子变化规律。李清采用新型数字激光动态焦散线试验系统^[6],对含孔洞缺陷和预制边裂纹的半圆盘试件进行三点弯曲梁动态冲击实验,从裂纹扩展速度与应力强度因子两个方面对其影响性进行分析。李清等采用新型数字激光动态焦散线试验系统^[7],将裂纹缺陷介质相互垂直或共线为变量,以有机玻璃(PMMA)为试验材料,研究其在动荷载作用下的动态断裂特性。杨立云运用新型数字激光动态焦散线试验系统以及施加动载系统完成了动态焦散线试验^[8],得到了裂纹的焦散线图片与主裂纹的起裂时间。杨仁树采用数字激光动态焦散线试验方法^[9],进行了含圆形孔缺陷的冲击试验,从裂纹轨迹、扩展速度、动态应力强度因子三个方面研究了运动裂纹与圆形孔缺陷的相互作用机制。赵勇为了研究冲击荷载作用下脆性材料中运动裂纹与静止裂纹的相互作用^[10],采用数字激光动态焦散实验系统选取有机玻璃(PMMA)作为实验材料进行三点弯曲实验,并结合几何分形理论进行研究。杨仁树为了研究预制裂纹不同偏移距离时运动裂纹与空孔的相互作用规律^[11],采用动态焦散线实验系统,将预制裂纹的偏移距离设定为唯一变量,对含空孔的有机玻璃(PMMA)试件进行冲击三点弯实验。

在裂纹扩展规律和应力强度因子研究方面,亦有许多学者展开了大量研究。郑昌达为了探究冲击荷载下巷道围岩不同角度径向裂纹的破坏机制^[12],采用落锤冲击加载平台和数字激光动态焦散线实验系统,以有机玻璃(PMMA)为试验材料,进行冲击荷

载下半圆孔上不同角度裂纹的三点弯曲梁动态断裂试验。梅比为了研究三点弯曲梁中不同直径和位置的圆孔形缺陷对裂纹扩展的影响^[13],采用动态焦散线实验系统对含圆孔型缺陷的有机玻璃(PMMA)材料进行冲击断裂力学实验,从圆孔直径、裂纹扩展速度、动态应力强度因子三个方面进行了分析。张召冉为了研究空孔及其缺陷在爆炸荷载作用下的扩展行为和作用机理^[14],以有机玻璃(PMMA)为试验材料,借助动态焦散线系统和理论分析为手段研究不同间距下空孔、空孔处预制裂纹、爆生裂纹动态扩展规律及机理。杨立云采用动静组合加载试验装置和焦散线实验系统^[15],以有机玻璃(PMMA)为试验对象,从裂纹扩展模式、应力集中程度进行分析,得到了切槽与水平方向呈不同角度(0°、45°、90°)下的初始应力场对爆生裂纹扩展规律的影响效应。杨仁树采用数字激光动态焦散线实验系统^[16],研究了爆炸荷载作用下空孔缺陷对裂纹扩展的作用以及规律。

然而,目前研究缺陷的形状以圆孔形为主,条形缺陷研究较少,并且对不同位置的裂纹缺陷影响研究深度不足,对动态裂纹断裂的研究还不够全面和系统,需要进一步实验分析与探讨。本文利用数字激光动态焦散线实验系统和落锤冲击实验系统,以有机玻璃(PMMA)作为实验材料,将条形裂纹缺陷的高度作为变量,研究不同高度下三点弯曲梁构件的动态裂纹扩展规律。

1 动态焦散线实验原理

1.1 实验原理

类似于光的反射和折射等原理,当试件表面存在不同程度的凹陷或其他变化,平行光射入材料厚度变化的区域会发生偏移,形成一个空间三维包络面,于试件一定距离放一个与试件表面平行的参考平面用来捕捉包络面,则能在参考平面上看到三维包络面在该位置的横截面图像,图像中的明亮曲线就是焦散线,它所包围着的阴影区就是焦散斑,如图1所示。

1.2 实验系统

数字激光动态焦散线实验系统能够实时记录裂纹动态起裂、扩展的全过程,图2为其示意图,实验中落锤与加载头接触的同时触发高速摄像机开关。

光源采用绿色激光光源,光强范围在 0 ~ 200 mW 之间,实验光强设置为 100 mW。高速摄像机最大拍摄速度为 150 000 fps,照片分辨率为 192 pixel × 184 pixel。

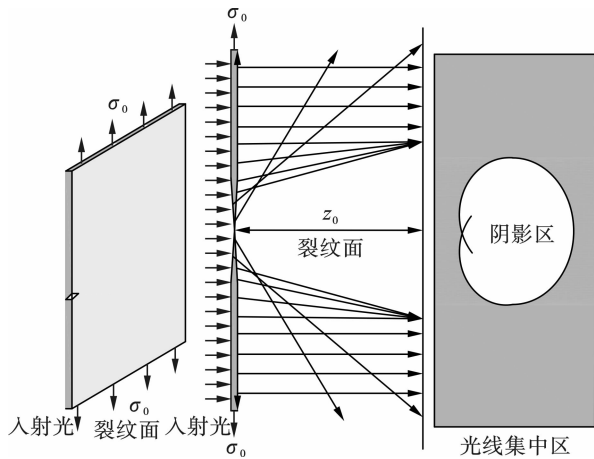


图1 焦散线成像示意图

Fig. 1 Caustic line imaging schematic

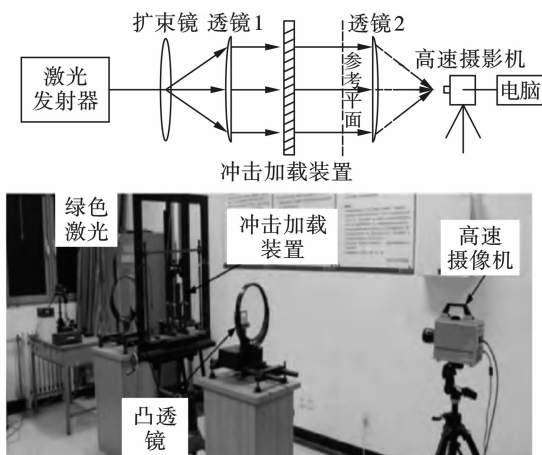


图2 数字激光动态焦散线实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of digital laser dynamic caustic line experiment system

本实验冲击加载装置采用落锤冲击加载系统,用夹具将试件固定充当支座,试件距两端 10 mm,落锤高度 45 cm,位于试件中间正上方,落锤冲击加载速度大概为 2.97 m/s,示意图如图 3 所示。

1.3 实验设计

试验采用 PMMA 即有机玻璃作为实验材料,材料尺寸为 220 mm × 60 mm × 5 mm。设计不同高度条形缺陷梁构件以研究其高度变化对动态断裂行为的影响。在试件底部中央设有 8 mm 长的预制裂纹,切缝宽度为 0.6 mm,裂尖宽度为 0.3 mm,居中设置不同高度的条形缺陷,条形缺陷宽度 3 mm,长度为 30 mm,缺陷底部距梁底边分别为 22 mm、

28.5 mm、35 mm,如图 4 所示。

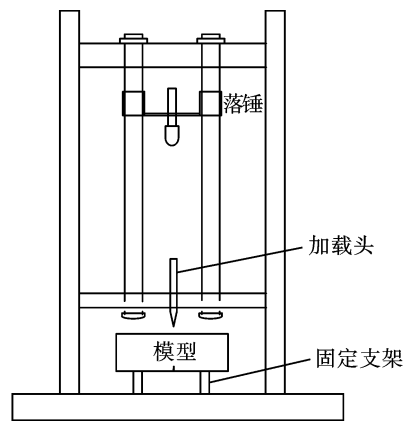


图3 落锤加载系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the drop weight loading system

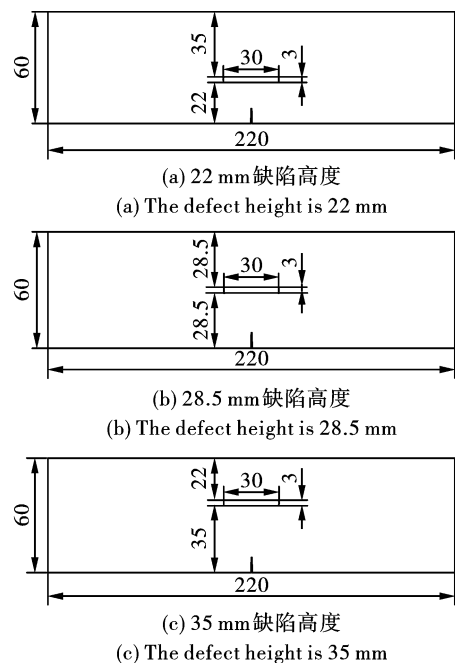


图4 试验模型示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental model(unit:mm)

2 实验结果与分析

2.1 裂纹运动轨迹分析

为了保证实验结果的可靠性,每类试件试验 6 次,选取实验结果最好的试件进行分析。如图 5 所示分别为缺陷高度 22、28.5、35 mm 的裂纹扩展图像。

三种情况下,应力波到达裂纹尖端的时间非常接近,均为 80 μs 左右,说明条形缺陷的高度对应力波的传播影响不大。三种情况下裂纹起裂时间接近,均为 190 μs 左右,起裂时焦散斑直径均为 7.9 mm。

裂纹起裂后焦散斑直径增大,位置高度为 22、28.5、35 mm 的构件在第一阶段焦散斑直径最大值分别为

8.3、8.7、9 mm,当焦散斑扩展至缺陷位置,其直径开始减小,整个阶段均为 I 型裂纹。

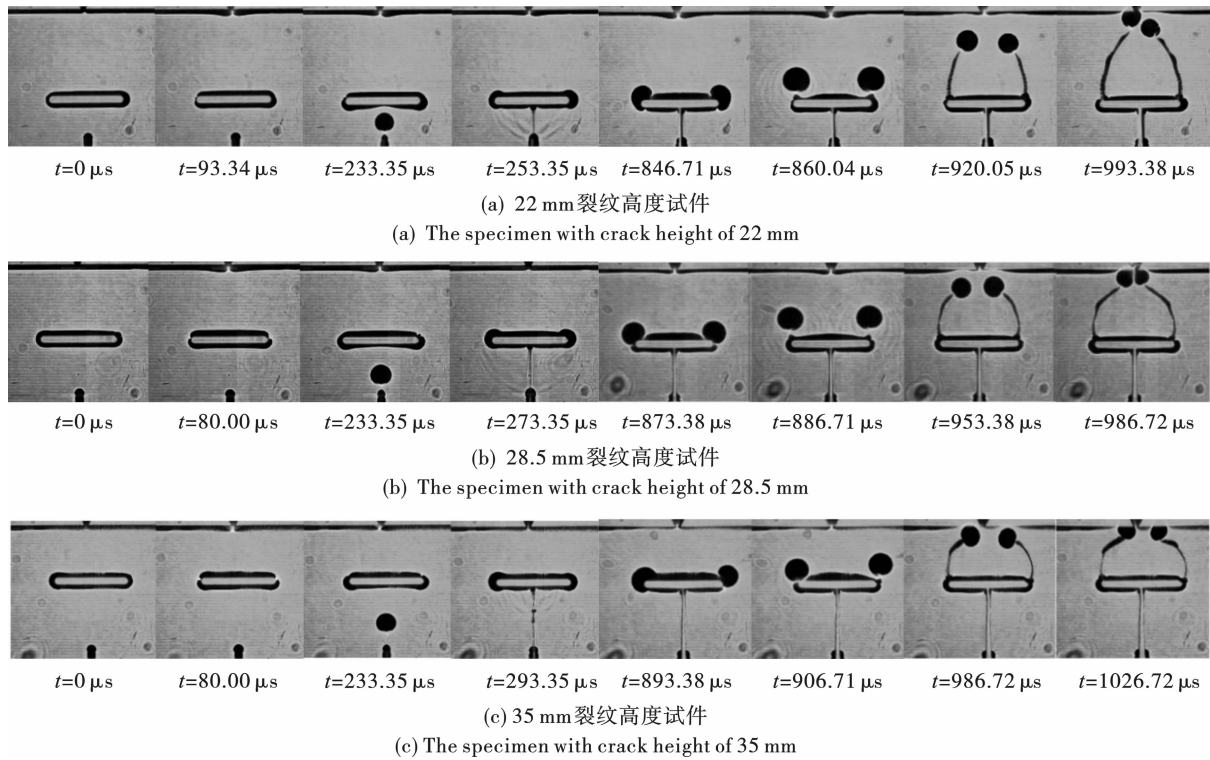


图 5 裂纹扩散的焦散线图片

Fig. 5 Caustic line Picture of crack propagation

观察构件裂纹贯通处的亮斑变化,在第二阶段当裂纹贯通后,能量在缺陷两侧位置积累并释放焦散斑,致其直径不断增大且两侧对称。经过 600 μs 左右,焦散斑直径达到起裂前最大值,此时焦散斑脱离阴影区呈现鸭蛋状,为 I-II 复合型裂纹,裂纹同时受正应力和剪切力作用。裂纹扩展时,焦散斑最大直径分别为 11.5、11.2、10.1 mm,最小直径分别为 10.4、10.1、8.8 mm,随着裂纹的扩展,焦散斑直径先增大后不断减小,并在最后阶段有所波动。

2.2 裂纹扩展速度分析

2.2.1 裂纹扩展速度计算公式

动态焦散线试验采用数字摄影机对焦散线的图像进行捕捉,后用计算机软件 PS 准确地量出随时间推移裂纹尖端的相对坐标。

利用“中点公式”法计算裂纹的扩展速率,该算法精度高且计算过程便捷,裂纹扩展在某一时刻速率表达式如下

$$V(t) = \frac{dL(t)}{dt} \approx \frac{L(t+1) - L(t-1)}{2\Delta t} \quad (1)$$

式中: t 为裂纹扩展的相对时间; $L(t+1)$ 和 $L(t-1)$ 表示焦散斑图像中 t 时刻前后两幅图片裂

纹尖端焦散斑的位置。

2.2.2 裂纹扩展速度变化规律

不同高度条形缺陷的梁构件在落锤冲击下裂纹扩展速度和距离的关系如图 6 所示。

对比缺陷高度 22 mm、28.5 mm、35 mm 的三个试件。第一阶段最大速度分别为 247.49 m/s、292.49 m/s 和 284.99 m/s,平均速度分别为 230 m/s、267.49 m/s 和 258 m/s,由数据可知,缺陷高度为 28.5 mm 的梁构件比缺陷高度为 22 mm 的梁构件最大速度和平均速度分别增加 18.18%、16.3%,这说明随着缺陷高度增加,预制裂纹的扩展速度呈上升趋势,这是由于增加的缺陷高度对裂纹扩展的抑制作用逐渐减弱;缺陷高度为 35 mm 的梁构件较缺陷高度为 28.5 mm 的梁构件最大速度和平均速度相差不大,说明即使抑制作用减弱,裂纹扩展速度也不会无限制地增加,会在一定范围内波动。原因可能为当裂纹扩展速度超过一定值时,裂纹尖端的能量释放率大于裂纹扩展所需要的表面能,使得裂纹尖端产生了次裂纹,增加了粗糙程度,进而增加了裂纹尖端的韧度,抑制了扩展速度。

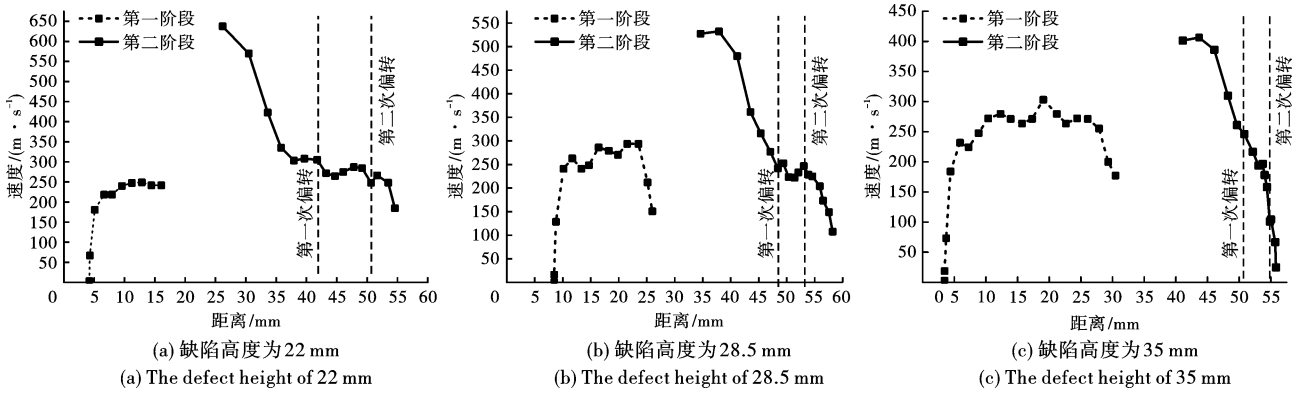


图 6 裂纹扩展速度随距离变化图像

Fig. 6 Crack propagation velocity with distance image

第二个阶段分为速度下降、速度振荡、临近断裂三个区间,其分界点与裂纹扩展偏转点大致相同。速度下降区间裂纹扩展初始速度分别为 634.42 m/s、524.97 m/s、377.67 m/s,随着缺陷高度的增加,裂纹初始扩展速度逐渐减小。第一区间的裂纹扩展轨迹分别在 41 mm、51 mm、56 mm 位置处出现第一个偏转点,此时裂纹扩展轨迹大幅度向冲击荷载作用点处倾斜;进入第二区间,裂纹扩展速度平均值分别为 275 m/s、237 m/s、169 m/s,随着缺陷高度的增加,裂纹扩展速度逐渐减小,对于缺陷高度为 22 mm 和 28.5 mm 的试件,裂纹扩展速度发生振荡,这是应力波和裂纹尖端相互作用的结果,对于缺陷高度为 35 mm 的试件,裂纹扩展速度在第二阶段仍旧急速下降。当裂纹分别扩展到 56 mm、58 mm、58 mm 处时,裂纹开始逐步增加向上扩展的幅度,出现第二个偏转点;进入第三区间,裂纹扩展速度大幅下降,试件逐渐断裂。

2.3 应力强度因子分析

2.3.1 应力强度因子计算公式

根据相关文献资料^[17],焦散线应力强度因子的

计算公式表示为

$$K_I = \frac{2 \sqrt{2\pi} F(v)}{3g^{5/2} z_0 d |C_1|} (D_{max})^{5/2} \quad (2)$$

$$K_{II}^d = \mu K_I^d \quad (3)$$

式中: D_{max} 为焦散线的最大直径; z_0 为试件到参考平面的距离; d 为试件的实际厚度; E_d 为动态弹性模量; λ 为动态泊松比; g 为应力强度数值因子; μ 为应力强度因子比例系数。

有机玻璃试件的动态力学参数如表 1 所示。

表 1 有机玻璃的动态力学参数
Table 1 Dynamic mechanical parameters of plexiglass

参数	$C_p / (m \cdot s^{-1})$	$C_s / (m \cdot s^{-1})$	E_d / GPa	ν	$C_I / (m^2/N)$
数值	2 320	1 260	6.1	0.31	0.86×10^{-10}

2.3.2 应力强度因子变化规律

根据公式(2)与(3)计算出长条形缺陷裂纹的应力强度因子,其与距离关系曲线如图 7 所示。

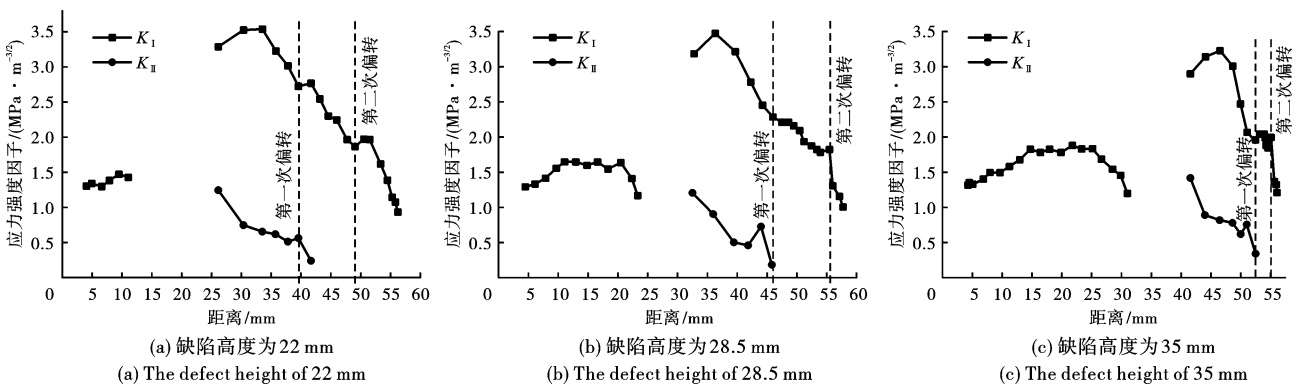


图 7 应力强度因子随距离变化图像

Fig. 7 Image of stress intensity factor as a function of distance

比较缺陷高度为 22 mm、28.5 mm、35 mm 的三组实验。第一阶段,预制裂纹的起裂韧度相同,说明

缺陷高度对预制裂纹的断裂韧度没有影响。随着缺陷高度的增加,三组实验振荡区间的应力强度因子平均值分别为 1.480 MPa/m^{3/2}、1.665 MPa/m^{3/2}、1.812 MPa/m^{3/2},提升了 12.5%、8.83%,这说明缺陷高度的增加使裂纹尖端的能量越来越大,但速度却并没有一直增加,验证了之前的推测。

第二阶段的应力强度因子变化可分为三个区间。第一个区间,起裂时 I 型应力强度因子分别为 3.281 MPa/m^{3/2}、3.192 MPa/m^{3/2}、2.876 MPa/m^{3/2},分别比第一阶段的起裂韧度增加了 121.69%、91.7%、58.72%,受缺陷位置钝化效应的影响,I型韧度随着缺陷高度的增加而减小。II型起裂韧度分别为 1.254 MPa/m^{3/2}、1.319 MPa/m^{3/2}、1.398 MPa/m^{3/2},随着缺陷高度的增加而变大,II型起裂韧度在第一区间逐渐减小至零,I-II复合型裂纹转变为 I 型裂纹,进入第二区间;第二区间的 II 型起裂应力强度因子几乎为零,说明该区间轨迹中正应力占据主导地位,剪切力较小,I型应力强度因子减小速率放缓,在偏转点处有所增加之后开始振荡变化,应力强度因子平均值分别为 2.596 MPa/m^{3/2}、2.074 MPa/m^{3/2}、1.941 MPa/m^{3/2},随着缺陷高度的增加,应力强度因子逐渐减小;进入第三区间,应力强度因子快速下降,直至断裂。

3 结论

利用数字激光动态焦散线实验系统和落锤冲击试验系统,针对不同高度的条形缺陷三点弯曲梁构件,从裂纹运动轨迹、扩展速度和应力强度因子三个方面进行分析,研究结果表明:

1) 含条形缺陷梁构件的断裂分为两个阶段,第一阶段是构件起裂到贯通缺陷,裂纹类型为 I 型裂纹;第二阶段是缺陷起裂到梁构件整体断裂,裂纹类型由 I-II 复合型裂纹经偏转化为 I 型裂纹。

2) 裂纹扩展速度受缺陷高度的影响,随着缺陷高度的增加,第一阶段裂纹扩展速度先增大后在 300 m/s 附近波动,第二阶段裂纹扩展速度呈现减小趋势。

3) 裂纹应力强度因子受缺陷高度影响,第一阶段裂纹起裂应力强度因子随着缺陷高度的增加而变大;第二阶段 I 型应力强度因子随着缺陷高度的增加而减小,II型应力强度因子则增大。

4) 通过比较裂纹扩展速度和应力强度因子的图像可以看出,二者相似度极高。裂纹的扩展速度是动能的体现,而应力强度因子是应变能的体现,由于裂纹扩展的复杂性,速度的增加往往会引起裂纹

尖端次裂纹的产生或者主裂纹发生偏转,裂纹的粗糙程度增加,导致表面能产生变化,因此二者不能保证完全相同的变化规律。

参考文献 (References)

- [1] 王雁冰,雷 谦,杨仁树,等. 爆炸荷载下缺陷介质裂纹扩展规律数值分析研究[J]. 爆破,2017,34(3):1-6,24.
- [1] WANG Yan-bing, LEI Qian, YANG Ren-shu, et al. Numerical simulation research of crack propagation in media containing flaws under explosive load[J]. *Blasting*, 2017, 34(3):1-6,24. (in Chinese)
- [2] 李 清,杨 阳,杨仁树,等. 内爆法建筑倒塌过程和局部构件破坏数值模拟[J]. 爆破,2015,32(1):32-37.
- [2] LI Qing, YANG Yang, YANG Ren-shu, et al. Numerical simulation of structure collapse by implosion method and local component failure analysis [J]. *Blasting*, 2015, 32(1):32-37. (in Chinese)
- [3] 杨仁树,丁晨曦,杨立云,等. 动态爆生裂纹相互影响的试验研究[J]. 爆破,2016,33(2):1-5,73.
- [3] YANG Ren-shu, DING Chen-xi, YANG Li-yun, et al. Tests for interaction of unilateral offset cracks [J]. *Blasting*, 2016, 33(2):1-5,73. (in Chinese)
- [4] 刘 康,郭东明,陈亮亮,等. 爆炸荷载下邻近巷道围岩破坏规律试验研究[J]. 爆破,2020,37(3):15-20.
- [4] LIU Kang, GONG Dong-ming, CHEN Liang-liang, et al. Experimental study on surrounding rock failure law of adjacent roadway under explosive loading [J]. *Blasting*, 2020, 37(3):15-20. (in Chinese)
- [5] 王雁冰,商禹智,石震鑫,等. 定向断裂双孔爆破含缺陷介质裂纹扩展的动焦散试验[J]. 爆破,2018,35(1):15-20,48.
- [5] WANG Yan-bing, SHANG Yu-zhi, SHI Zhen-xin, et al. Dynamic caustics experiment on crack propagation in defective medium by directional breaking with double hole blasting [J]. *Blasting*, 2018, 35(1):15-20,48. (in Chinese)
- [6] 李 清,郭 洋,韩 通,等. 冲击荷载作用下含孔洞缺陷介质断裂行为研究[J]. 中国矿业,2016,25(8):126-129.
- [6] LI Qing, GUO Yang, HAN Tong, et al. Study on dynamic fracture behavior of specimen containing empty holes flaws under impact loading [J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(8):126-129. (in Chinese)
- [7] 李 清,郭 洋,田 策,等. 不同角度裂纹缺陷对材料动态断裂行为的影响[J]. 科学技术与工程,2016,16(28):1-5.
- [7] LI Qing, GUO Yang, TIAN Ce, et al. Effect of crack defects at different angles on dynamic fracture behavior of

- materials[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(28):1-5. (in Chinese)
- [8] 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.
- [8] YANG Li-yun, ZHANG Yong-jin, SUN Jin-chao, 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. (in Chinese)
- [9] 杨仁树,许鹏,岳中文,等. 圆孔缺陷与 I 型运动裂纹相互作用的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6):1597-1602.
- [9] YANG Ren-shu, XU Peng, YUE Zhong-wen, et al. Laboratory study of interaction between a circular hole defect and mode I moving crack [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6):1597-1602. (in Chinese)
- [10] 赵勇,肖成龙,杨立云,等. 动、静裂纹作用偏置效应的动焦散冲击实验[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(7):85-96.
- [10] ZHAO Yong, XIAO Cheng-long, YANG Li-yun, et al. Dynamic caustics experiments on offset effects between dynamic and static cracks [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(7):85-96. (in Chinese)
- [11] 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):16-24.
- [11] YANG Ren-shu, XIAO Cheng-long, DING Chen-xi, et al. Experimental study on dynamic caustics of interaction between void and running crack [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(5):16-24. (in Chinese)
- [12] 郑昌达,杨立云,丁晨曦,等. 含倾斜裂纹三点弯动态断裂试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(8):165-171.
- [12] ZHENG Chang-da, YANG Li-yun, DING Chen-xi, et al. Dynamic fracture experiments of specimens containing inclined crack under impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(8):165-171. (in Chinese)
- [13] 梅比. 含圆孔缺陷三点弯曲梁的裂纹扩展特性实验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(5):74-80, 96.
- [13] MEI Bi. Tests for crack propagation characteristics of three-point bending beam with circular hole defect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(5):74-80, 96. (in Chinese)
- [14] 张召冉,左进京,郭义先,等. 爆炸载荷下空孔缺陷与爆生裂纹扩展行为研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(3):111-119.
- [14] ZHANG Zhao-ran, ZUO Jin-jing, GUO Yi-xian, et al. Crack propagation behavior of empty hole defects under blast load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(3):111-119. (in Chinese)
- [15] 杨立云,王青成,丁晨曦,等. 深部岩体中切槽爆破机理实验分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(2):40-46.
- [15] YANG Li-yun, WANG Qing-cheng, DING Chen-xi, et al. Experimental analysis on the mechanism of slotting blasting in deep rock mass [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(2):40-46. (in Chinese)
- [16] 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.
- [16] YANG Ren-shu, ZUO Jin-jing, FANG Shi-zheng, 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. (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.

英文编辑:陈东方

《爆破》论文网络首发及著作权使用声明

《爆破》为使录用论文首发权及时获得确认,自2019年12月起与中国知网合作启动“网络首发”在线优先数字出版项目,即《中国学术期刊(网络版)》(简称CAJ-N),连续出版物号ISSN 2096-418、CN 11-6037/Z。

作者稿件经审稿录用后,将会以“录用定稿”模式第一时间上传至中国知网“网络首发”平台发布。每篇网络首发论文均可下载一份“中国知网学术期刊网络首发论文出版证书”,其效力等同于纸质出版论文。

为避免出现一稿多投的现象,凡已投《爆破》的稿件,在未确认录用或退稿前,请勿再投他刊!

《爆破》为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《中文科技期刊数据库》、“万方数据——数字化期刊群”、维普网和超星学术期刊“域出版”平台收录期刊。本刊已许可上述机构以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。