

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1066

基于 3D-ILC 含水平内裂纹脆性固体 三点弯断裂特性研究

王海军¹, 乐成军^{2,3}, 汤雷¹, 赵初², 李汉章¹, 戚海棠²

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 四川省岷源水利水电工程设计有限公司, 四川 成都 610072)

摘 要: 断裂力学是固体力学的重要分支, 三点弯试验是力学领域的一个经典试验, 含裂纹的三点弯研究多集中于穿透或表面裂纹, 含纯封闭内裂纹的三点弯断裂研究较少。基于 3D-ILC 技术, 在对试样表面无任何影响的情况下, 生成任意参数的纯封闭内裂纹, 开展含不同深度共勉内裂纹试样及完整试样三点弯断裂试验, 分析应力双折射规律、破坏荷载、断口特征、断口特征区尺寸及破坏形态。通过对含不同深度内裂纹的试样进行数值模拟, 得到裂纹尖端 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分布规律。结果表明: (1) 内裂纹改变了完整试样的应力双折射规律, 云纹在裂纹上端呈半圆状, 色差对比显著。(2) 内裂纹的存在显著降低了试样三点弯破坏荷载, 含深度 10、20、30 mm 单内裂纹试样及含深度 20 mm 双、三内裂纹试样与完整试样破坏荷载相比, 下降百分比分别为 11.8%、19.5%、78.4%、30.9%、35.5%。(3) 内裂纹深度 10、20 mm 试样与完整试样破坏形态均为动态裂纹分叉破坏, 呈现出镜面雾化羽毛平纹特征; 含深度 30 mm 单内裂纹试样发生 I-II-III 型复合扩展, 断口为光滑的翼状扩展。(4) 得到了破坏断口特征区尺寸与内裂纹深度关系的拟合公式。(5) K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 与内裂纹深度成反比关系; 裂纹越远离试样中心, K_I 越小, K_{II} 、 K_{III} 越大; 左右侧裂纹对中间裂纹的 K 值不影响。该研究表明 3D-ILC 可为研究断裂力学中的内裂纹及复合裂纹问题的重要工具。

关 键 词: 类岩石材料; 3D-ILC; 内置裂纹; 岩石断裂; 应力场可视化; 断裂路径模拟

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)10-2773-12

Three-point bending fracture characteristics of brittle solid with horizontal internal cracks based on 3D-ILC

WANG Hai-jun¹, LE Cheng-jun^{2,3}, TANG Lei¹, ZHAO Chu², LI Han-zhang¹, QI Hai-tang²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Sichuan Minyuan Water Conservancy and Hydropower Engineering Design Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: Fracture mechanics is an important branch of solid mechanics. The three-point bending test is a classic test in the field of mechanics. Most of previous studies on three-point bending tests with cracks focus on either through-wall or surface cracks, while limited studies have been performed on internal cracks. Based on the 3D-internal laser-engraved crack (3D-ILC) method, without any damage on the surface, the internal crack was created. Experiments were performed on specimens with horizontal internal cracks at different depths and intact specimens. The stress-induced birefringence, failure load, fracture characteristics, fractography size and fracture morphology were analyzed. The distribution of K_I , K_{II} , K_{III} around crack front was obtained by numerical simulation. The results show that: i) The internal crack changes the stress birefringence law of the intact sample, the moire is semi-circular at the upper end of the crack, and the color difference is significant. ii) The existence of internal cracks significantly reduce the failure load of the specimens. Compared with that of intact specimen, the failure loads of the single crack specimens with depths of 10, 20, and 30 mm and the double and triple crack specimens with depth of 20 mm, decrease by 11.8%, 19.5%, 78.4%, 30.9% and 35.5% respectively. iii) The fracture morphology of the specimens containing cracks with depths of 10 and 20 mm are similar to that of the intact specimen, all of which is belonged to dynamic crack-branching fracture, showing the characteristics of mirror atomization

收稿日期: 2019-06-17

修回日期: 2021-07-26

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51409170, No. 51739008, No. U1765204)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51409170, 51739008, U1765204).

第一作者简介: 王海军, 男, 1985 年生, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事岩石断裂力学研究。E-mail: hjwang@nhri.cn

通讯作者: 汤雷, 男, 1971 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事结构工程方面的研究工作。E-mail: leitang@nhri.cn

feather plain grain. The mixed mode I-II-III fracture occurs in the specimen with single internal crack with a depth of 30 mm, the characteristic of fracture is a smooth wing-like extension. iv) A fitting formula of the relationship between the fractography size and the crack depth is obtained. v) The K_I , K_{II} , K_{III} are inversely proportional to the depth of internal crack. The farther away the crack is from the center of the specimen, the smaller the value of K_I and the larger the value of K_{II} and K_{III} . The cracks on the left or right side have no effect on the value of K of the middle crack. This study shows that 3D-ILC is an important tool for studying internal cracks and mixed mode in fracture mechanics.

Keywords: rock-like material; 3D-ILC; internal cracks; rock fracture; visualization of stress; simulation of crack path

1 引言

断裂力学是研究材料裂纹起裂、扩展、破坏的科学,是固体力学的重要分支,在航空、机械、土木等领域发挥了巨大作用。

三点弯试验是经典力学试验之一,伴随断裂力学的发展,含裂纹的三点弯研究得到大量关注。理论方面, Crouch^[1]通过有限元模拟研究了裂纹尖端曲率及侧边开槽对三点弯试样断裂韧性的影响;高洪等^[2]用边界配位法求解了含裂纹三点弯圆轴的应力强度因子 K_I ;黄明利等^[3]利用岩石破裂过程分析(RFPA)程序,对含偏置裂纹三点弯曲梁在动载荷作用下的破坏过程进行了数值模拟;李兴权等^[4]对含有初始裂纹的素混凝土梁在三点弯曲载荷作用下的完整断裂过程进行了三维数值模拟。试验方面, Chattopadhyay 等^[5]对含沿壁环状裂纹的直管试样进行了三点弯试验;左建平^[6]研究了含偏置缺口玄武岩原位三点弯曲细观断裂; Haeri^[7]对含预制裂纹混凝土类试样的裂纹扩展过程进行了探讨。

内裂纹或内缺陷是材料的固有属性,对其性能影响巨大,是材料及工程不可回避的问题。但是,当前研究多集中在表面或穿透型裂纹,极少涉及含内裂纹的三点弯试验研究。其原因在于制作真实内裂纹这一瓶颈问题。不经表面的情况下,在物质内部如何生成内裂纹,从传统机械力学来看,是不可能实现的。另一方面,即使通过一些模拟方法在混凝土或其他水泥石膏相似材料中浇注金属薄片以模拟内裂纹,首先裂纹真实性存疑,其次无法观测内裂纹的扩展断裂过程。如采用透明树脂材料(通常用来模拟类岩石透明材料)浇注金属片^[8-10],虽然能解决观测问题,但是其树脂成型后脆性度较差,只能达到 1/10,与岩石、陶瓷、部分金属等脆性材料差距极大。

针对此问题,本文将基于 3D-ILC 技术(3D-internal laser-engraved crack)^[11-14],在不经表面前提下,在玻璃内部“凭空”生成宏观闭合内裂纹,结合应力双折射材料观测应力分布。基于此,将开展含不同深

度的水平内裂纹脆性固体的三点弯试验,得到破坏形态、断口特征、应力双折射规律及抗弯强度规律等,并通过三维数值模拟得到裂纹尖端 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分布规律,对推动断裂力学中内裂纹问题的研究提供试验、理论基础。

2 试样的制备与试验方法

2.1 3D-ILC 方法与试验材料

3D-ILC 基本原理是通过激光作用于材料内部,形成等离子体,进而制作宏观疲劳闭合内裂纹。具体原理参见文献[11],此处不再赘述。

试验材料为玻璃,其优势在于,玻璃是脆性固体断裂力学领域中一百年来使用最多的经典材料^[15],相比于 3D 打印树脂或浇注树脂,玻璃在脆性度指标上更接近岩石。《岩石断裂力学》^[16]中也指出“固体力学的所有开拓性试验都是采用玻璃作为基本样品材料,断裂力学也不例外”。玻璃的试验结果显然可以为岩石提供参考。

2.2 试验方案与试样设计制作

为对比起见,设计 6 种脆性固体试样:A 组为完整试样,B、C、D、E、F 组为 5 类含不同深度内裂纹的试样,试验方案如表 1 所示。B~F 系列试样如图 1、2 所示。

(1) A 组完整试样:试样为长方体,尺寸为 250 mm×40 mm×40 mm,不含内裂纹,用于对比分析,共 3 个试样,编号为 A-1~A-3。

(2) B、C、D 组为含不同深度内裂纹的试样:试样为长方体,尺寸为 250 mm×40 mm×40 mm,内裂纹形状为圆形,直径为 15 mm。B、C、D 组内裂纹深度分别为 10、20、30 mm,对应编号分别为 B-1~B-3、C-1~C-3、D-1~D-3。

(3) E、F 组为含相同深度、不同个数内裂纹试样:试样尺寸、内裂纹尺寸均与上述试样相同。E、F 组试样分别为含 20 mm 深双内裂纹、三内裂纹试样,内裂纹直径为 15 mm,对应编号分别为 E-1~E-3、F-1~F-3,用于对比试验。

内裂纹采用 3D-ILC 方法实现,如图 3 所示。

表 1 试样编号及试验方案
Table 1 Specimen number and test scheme

试样分类	组别	编号	内裂纹			示意图	目的	分析内容				
			深度/mm	直径/mm	个数			云纹	荷载	形态	断口	仿真
完整试样	A	A-1	—	15	0		为含内裂纹试样提供对比	√	√	√	√	×
		A-2										
		A-3										
含裂纹试样	B	B-1	10	15	1		含不同深度单裂纹试样断裂特性	√	√	√	√	√
		B-2										
		B-3										
	C	C-1	20	15	1			√	√	√	√	√
		C-2										
		C-3										
	D	D-1	30	15	1			√	√	√	√	√
		D-2										
		D-3										
对比组	E	E-1	20	15	2		为 20 mm 深单裂纹试样提供对比	√	√	√	√	√
		E-2										
		E-3										
	F	F-1	20	15	3			√	√	√	√	√
		F-2										
		F-3										

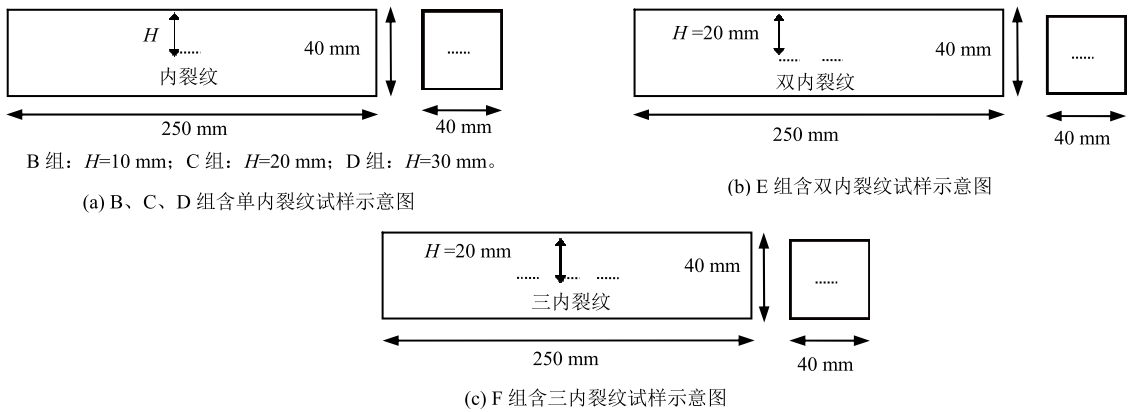


图 1 试样设计图
Fig.1 Specimen design

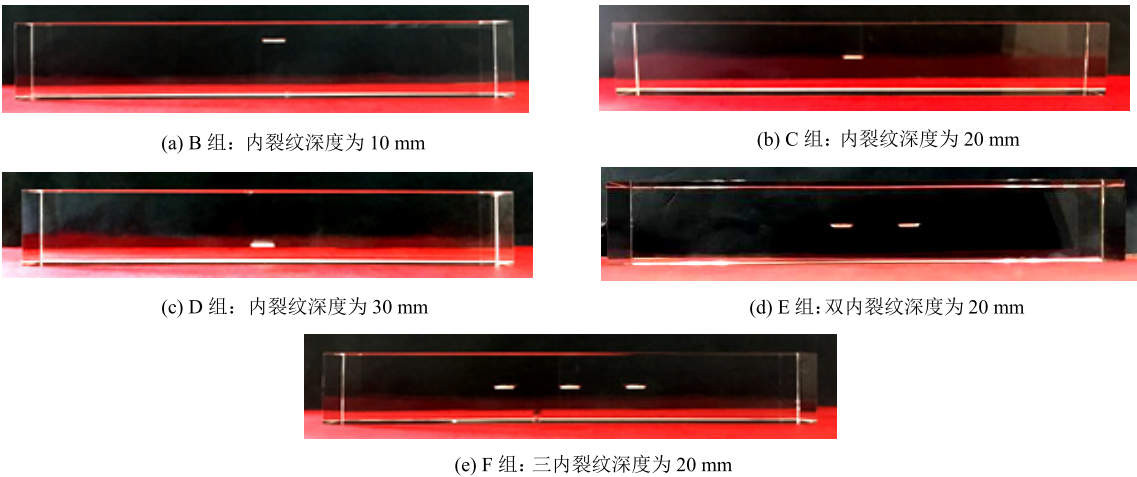


图 2 含内裂纹试样
Fig.2 Specimens with internal cracks

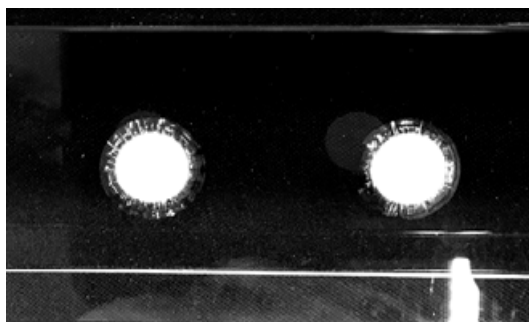


图3 3D-ILC 制作的双内裂纹图俯视图

Fig.3 Double internal crack fabricated by 3D-ILC

2.3 试验仪器

试验采用 WHY-3000 伺服压载系统, 设置摄像头监测裂纹路径, 照明灯调节试样光线。加载速率为 0.05 kN/s。试验仪器布置如图 4 所示, 三点弯试验加载方式如图 5 所示。



图4 加载系统

Fig.4 Loading system

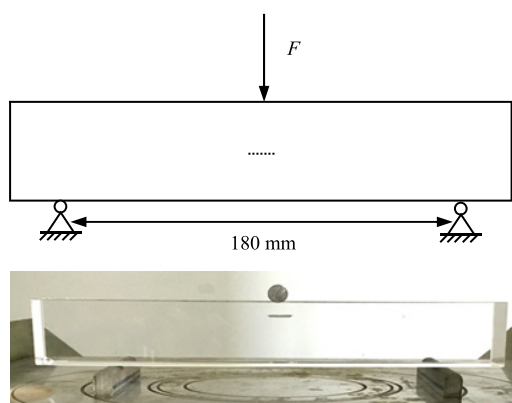


图5 三点弯加载方式

Fig.5 Three-point bending test

2.4 双折射效应观测系统

玻璃是典型的应力双折射材料, 且无需激光光

源。玻璃的应力双折射是指玻璃受到力的作用时, 光在入射玻璃后, 会出现折射各向异性, 将产生传播速度不同的两束光线, 即寻常光 o 和非常光 e , 此为应力双折射现象^[17]。两者产生干涉, 由干涉条纹计算实现应力分析。应力双折射试验也成为光弹性试验。同时对于识别应力集中、试验偏心具有重要价值。

3 试验结果分析

本节将从不同深度下内裂纹对应力双折射规律、破坏荷载、断口特征、特征区尺寸和破坏形态的影响 5 个方面给出分析。为对比起见, 先给出完整试样结果, 后给出含裂纹试样结果。

3.1 应力双折射规律初探

试验过程中的应力双折射现象如图 6 所示。整体来看, 开始施压时, 应力集中在上部施压处, 随着荷载逐渐增大逐步传递到下方。由于长方体试样上部受压, 下部受拉, 在加压过程中, 内部云纹逐步呈现上下对称“虹拱状”, 并在顶部接触点处产生贯穿鸿沟。随着荷载的增加, 条纹级数逐渐变多, 条纹颜色逐渐清晰。内裂纹改变了完整试样的云纹特征, 云纹处在裂纹上方呈现半圆状, 显示应力朝向内裂纹周边集中。随着荷载增加, 内部应力增大, 应力云纹级数增多, 同时出现了“消光效应”, 云纹颜色逐渐变淡。

3.2 破坏荷载分析

试样破坏荷载柱状图如图 7 所示, 试样破坏呈现出以下特点:

(1) 整体规律: 完整试样 A 组平均破坏荷载为 15.48 kN, 含内裂纹试样 B、C、D、E、F 组破坏荷载与 A 组相比, 分别下降了 11.8%、19.5%、78.4%、30.9%、35.5%, 内裂纹极大降低了试样的强度。

(2) 内裂纹深度影响规律: 破坏荷载随内裂纹深度的加深而减小。含有深度为 30 mm 内裂纹试样的破坏荷载远低于其余试样, 是由于处在试样下部的内裂纹发生 I、II、III 型复合裂纹扩展, 将在下文详细讨论。

(3) 内裂纹数量影响规律: 对比 C、E、F 组, 可见破坏荷载随内裂纹个数的增多而略微递减。

3.3 断口特征分析

观察各组试样的断口特征, 可分为两种形态: 镜面—雾化—羽毛—平纹型破坏断口 (后文简称镜

面型断口)和预制内裂纹扩展型破坏断口。镜面型 断口细节图见图 8, 全部试样断口见图 9。

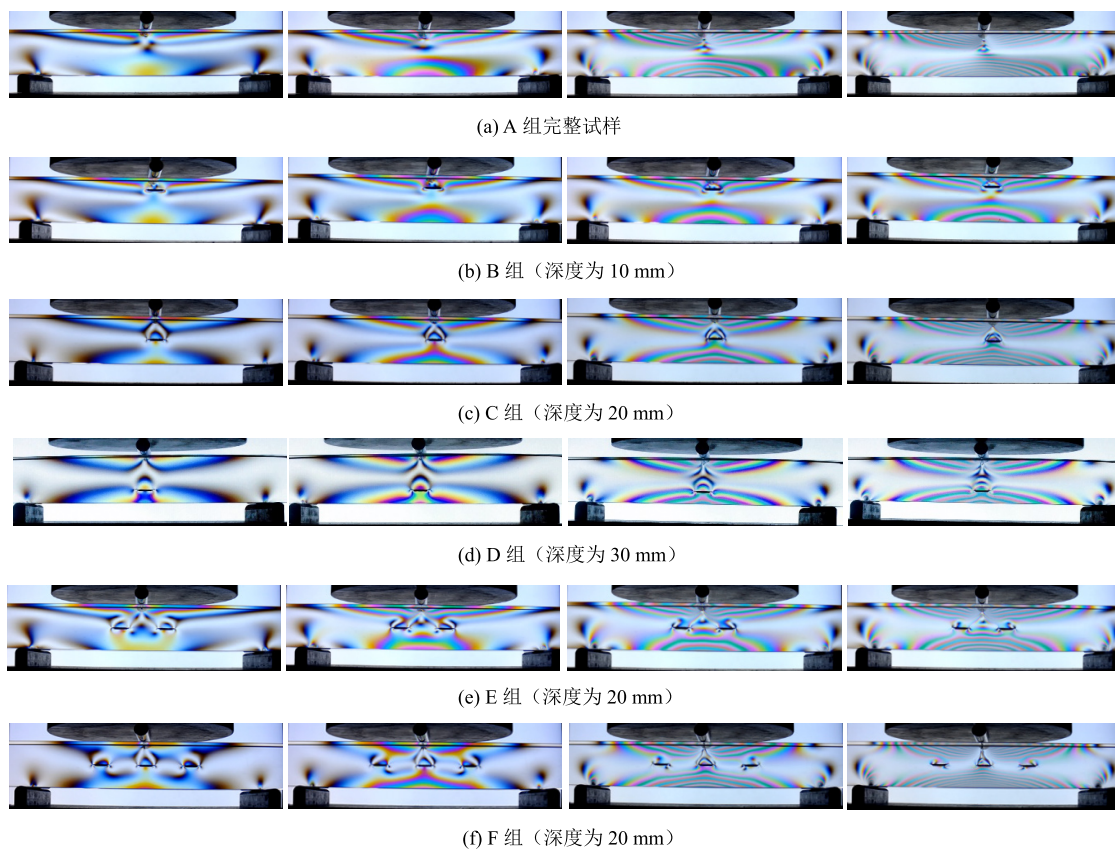


图 6 三点弯试验应力双折射
Fig.6 Stress birefringence of the three-points bending tests

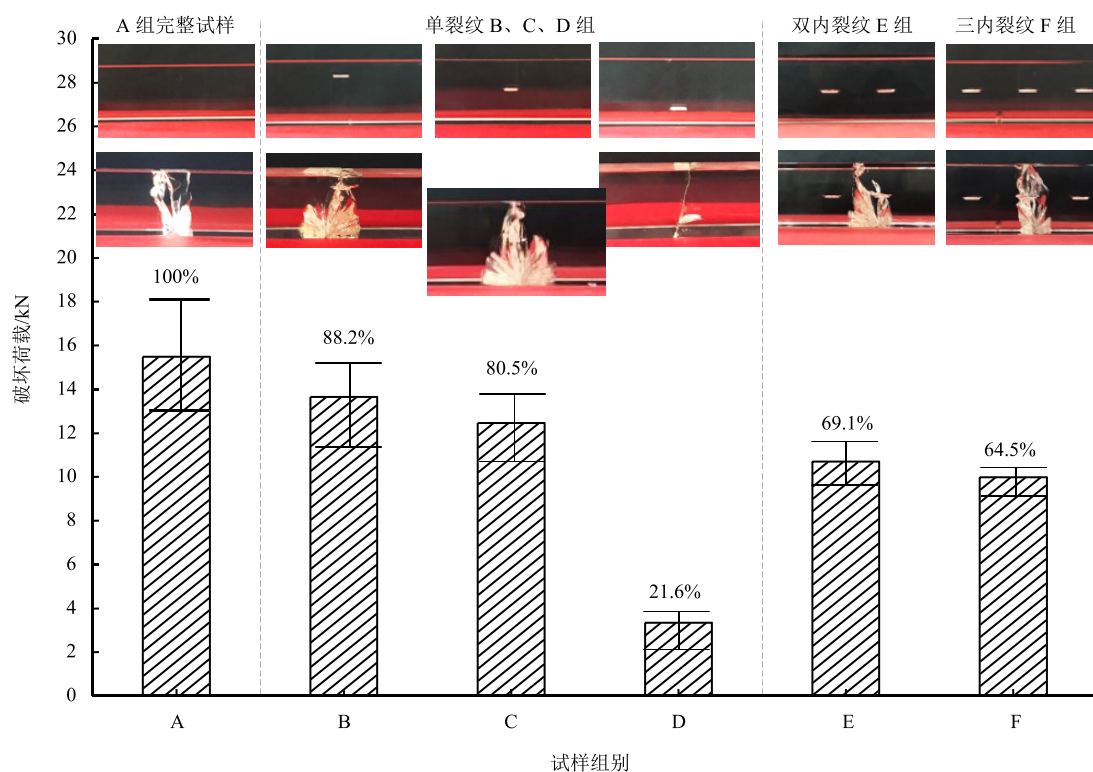


图 7 A~F 组试样破坏荷载柱状图
Fig.7 Failure loads of groups A-F

3.3.1 镜面型断口

(1) 基本特征

完整试样与含 10、20 mm 深裂纹试样 (A、B、C、E、F 组) 的断口形貌相似, 都为镜面型特征, 包括镜面区、雾化区、羽毛区, 说明从裂纹源向外扩展的速度相同, 如图 8 所示。

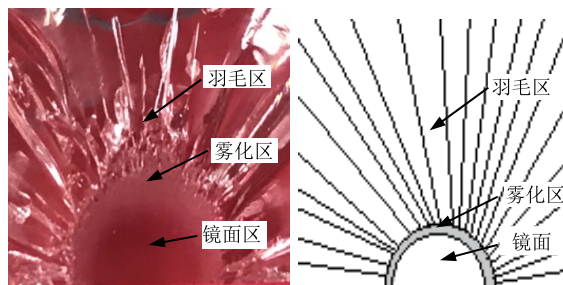


图 8 镜面区、雾化区以及羽毛区

Fig.8 Fracture zones of mirror, atomization and feather

镜面区呈半圆状, 较为平滑, 以裂纹源为中心, 是裂纹稳定扩展的区域。羽毛区呈放射状, 是裂纹快速扩展区, 放射条纹的收敛处为裂纹源。在镜面区与羽毛区之间为雾化区, 是粗糙度稍大、反射率

有所下降的圆环状区域, 是裂纹扩展由缓慢到快速过渡的区域。在羽毛区的外侧可见断面较平滑, 有些许横状条纹, 为平纹区, 为压破坏特征。此种类型断口特征表明试样为动态断裂。裂纹扩展特征出现的顺序为: 镜面到雾化到羽毛区再到平纹区。由此判断, A、B、C、E、F 试样都是从底部开始起裂, 逐渐扩展到顶部破坏。

(2) 动态裂纹分叉

从镜面区到雾化区再到羽毛区, 体现了裂纹扩展的方向, 裂纹分叉记录了动能耗散的不同阶段^[18]。文献[19]对试样断口出现镜面雾化羽毛特征进行了解释, 当底面裂纹所受应力达到一临界点时, 裂纹开始扩展。在恒定载荷条件下, 裂纹扩展意味着断裂存在能驱动裂纹扩展的额外能量。当 K_I 超过 K_{IC} 时, 裂纹以更快的速度扩展, 能量释放的速率也迅速增加, 导致裂尖的微观力学活性加剧, 并使得断口表面粗糙度逐渐增加。在三点弯试验中, 试样上部受压, 下部受拉, 因此, 最终的断口形貌有两个不同的特征区: 拉伸区和压缩区。A 组完整试样的断面形貌如图 9(a)所示, 在拉伸区可见镜面区、雾化区和羽毛区 3 个区域, 在压缩区可见平纹区。

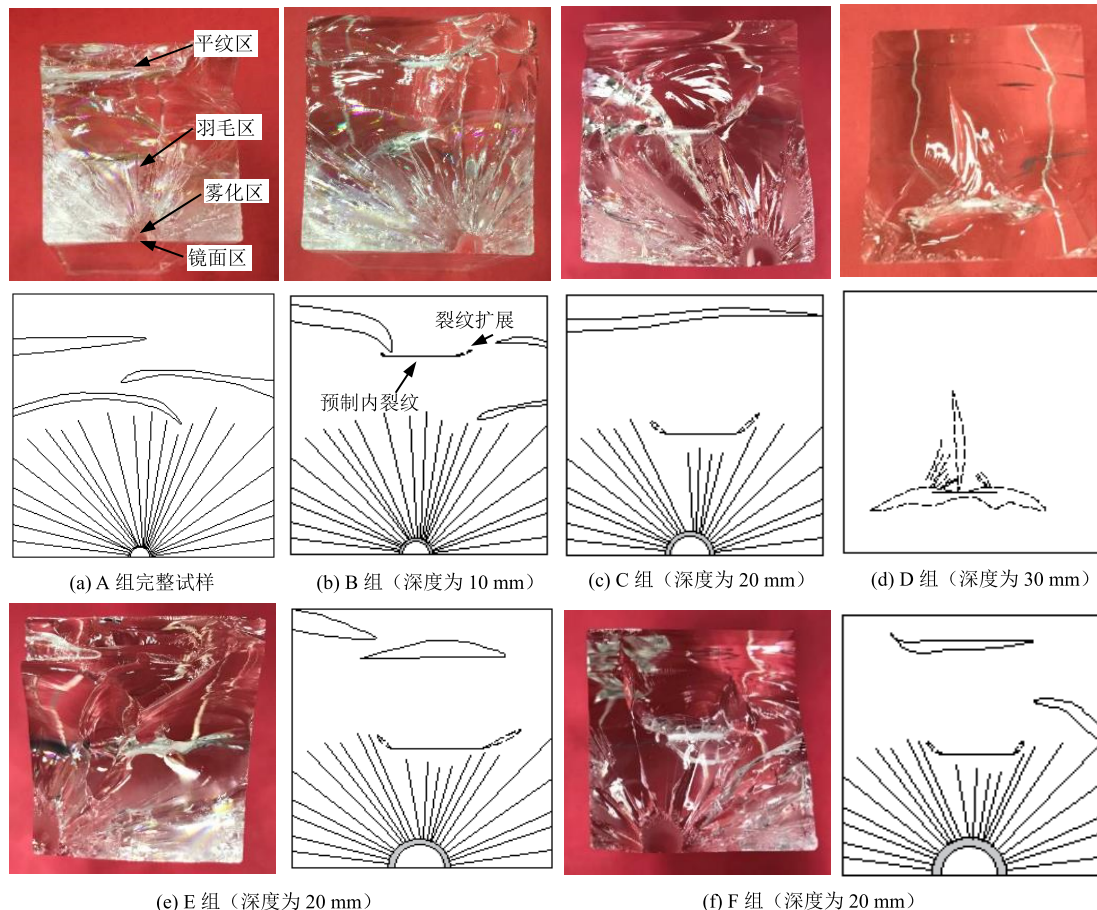


图 9 断口形貌图

Fig.9 Fracture morphology

(3) 镜面起裂与裂纹源分布的随机性

在三点弯试验中, 试样底部中线所受拉应力最大, 在不考虑偏心作用下, 在底边中心该线上任意一点所受应力相同。如图 9(b)、9(c)、9(e)、9(f)所示, 试样断口的镜面区并不位于中心, 此现象的原因在于缺陷源在材料为随机分布, 在底部中线所有位置都具有相同的应力状态下, 镜面起裂位置随微裂纹源或缺陷源分布具有随机性, 表现为镜面区裂纹源位置并不都是发生在底面中心线处。

3.3.2 预制裂纹扩展型断口

观察含深度为 30 mm 内裂纹 D 组试样的断口形貌, 如图 9(d)所示, 与上文所述断口呈现出的特征不同, 为预制裂纹扩展型断口。因该类试样内裂纹靠近底部, 可见其断口较光滑, 内裂纹有较明显的扩展, 扩展成为翼型裂纹。同时内裂纹中部出现竖向条纹向上部延伸, 并且预制裂纹周围出现少量撕拉状裂纹, 裂纹之间以台阶分隔, 说明在 I 型扩展下伴有少量 III 型模式。预制裂纹扩展导致试样低应力脆断, 破坏荷载大幅降低。

3.4 内裂纹作用下荷载-特征区尺寸关系修正

目前尚未见到内裂纹对断口特征区尺寸影响的

相关文献。传统上认为在拉应力作用下, 特征区尺寸与破坏荷载成反比, 镜面区、雾化区、羽毛区的半径 r 与破坏荷载 F 满足以下关系^[20]:

$$Fr^{1/2} = \text{常数} \quad (1)$$

本研究发现, 内裂纹不改变特征区的基本形态, 但对特征区尺寸有影响。对于 A 组试样, 符合式(1)规律。而在内裂纹作用下, $Fr^{1/2}$ 与内裂纹深度呈线性关系。完整试样和含内裂纹试样的特征区尺寸见表 2, $Fr^{1/2}$ 与内裂纹深度的关系如图 10 所示。

B、C 组试样的特征区尺寸与破坏荷载的关系并不满足传统式 (1), 而是满足以下公式:

$$Fr^{1/2} = ah + b \quad (2)$$

式中: h 为内裂纹深度 (mm); a 、 b 为常数。可以看出, $Fr^{1/2}$ 与内裂纹深度呈一次线性关系。

对于镜面区、雾化区、羽毛区, 公式如下:

$$Fr_m^{1/2} = 0.17h + 12.01 \quad (3)$$

$$Fr_{mt}^{1/2} = 0.0059h + 7.66 \quad (4)$$

$$Fr_h^{1/2} = -0.61h + 73.07 \quad (5)$$

式中: r_m 、 r_{mt} 、 r_h 分别代表镜面区、雾化区、羽毛区尺寸。

表 2 特征区平均半径与平均破坏荷载值

Table 2 Average radius of characteristic area and average failure load

试样分类	组别	内裂纹深度 /mm	破坏荷载 /kN	特征区尺寸					
				镜面区半径/mm		雾化区半径/mm		羽毛区半径/mm	
				r_m	$r_m^{1/2}$	r_{mt}	$r_{mt}^{1/2}$	r_h	$r_h^{1/2}$
完整试样	A	—	15.48	0.60	0.77	0.25	0.49	22.60	4.75
	B	10	13.65	1.02	1.01	0.32	0.57	23.30	4.83
	C	20	12.46	1.54	1.24	0.39	0.62	24.20	4.92
含裂纹试样	D	30	3.34	—	—	—	—	—	—
	E	20	10.70	3.12	1.77	1.20	1.10	25.10	5.01
	F	20	9.99	3.48	1.87	1.58	1.26	25.60	5.06

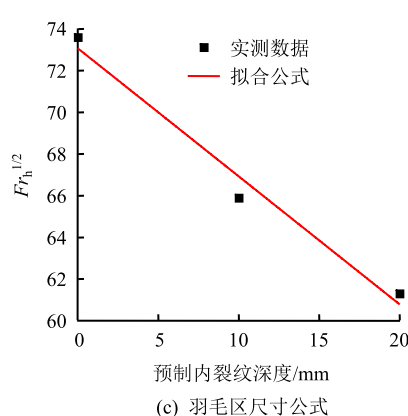
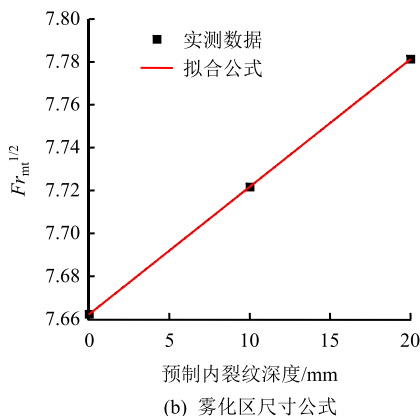
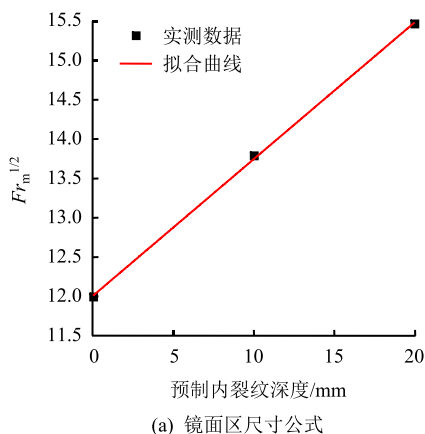


图 10 特征区面积公式

Fig.10 Area of fracture zone vs. crack depth

3.5 破坏形态分析

综合观察各类试样的破坏形态, 如图 11 所示,

可分为动态裂纹分叉破坏、沿内裂纹扩展破坏两种形式, 两者特征差别显著。

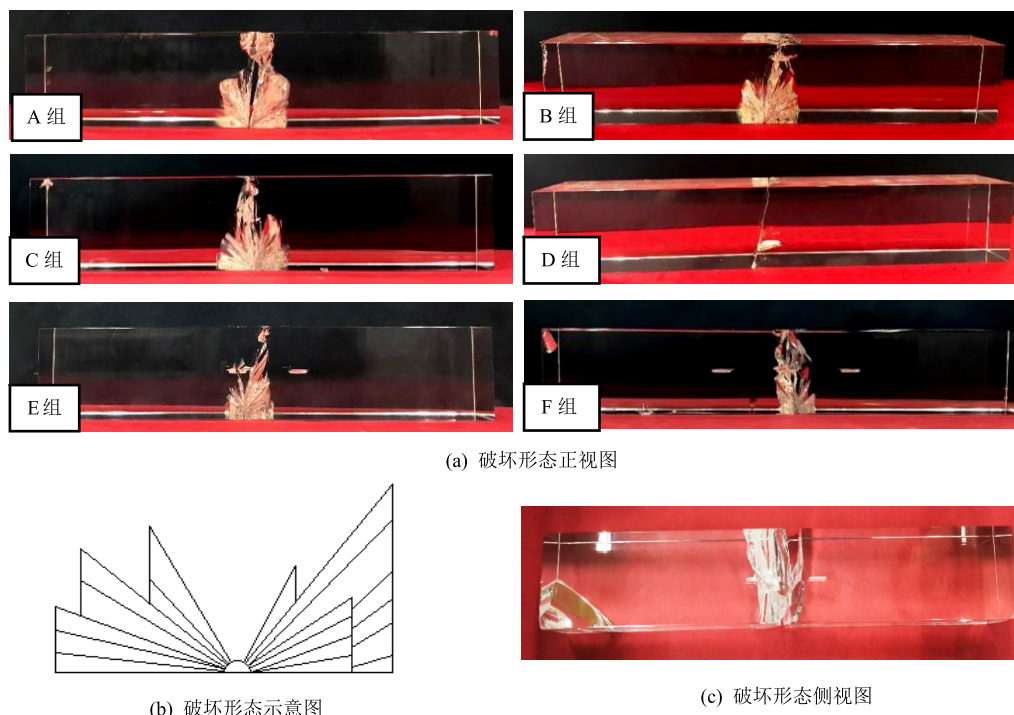


图 11 破坏形态图

Fig.11 Failure pattern diagram

3.5.1 动态裂纹分叉

试样的最终破坏形态图见图 11, 呈现出动态分叉破坏。

A 组试样底部出现裂纹源向四处扩展, 产生分叉形成书页状条纹, 与断面拉伸区的羽毛区相对应, 如图 11(b)所示。每一页“书页”大小不同, 由许多相对面积较大且具有不规则取向的小平面组成; 在试样中部, 为拉压过渡区, 主裂纹呈直线状; 由于试样上部受压, 可见顶部条纹为若干平行于荷载的直线, 与平纹区相对应, 如图 11(c)所示。B、C、E、

F 组试样的破坏形态与 A 组试样特征相似, 底部均有书页状分叉。同时在试样上部, 主裂纹呈直线状贯穿预制内裂纹。同时, A、B、C、E、F 组断口为均有镜面、雾化、羽毛、平纹区。

3.5.2 沿内裂纹扩展破坏

D 组含深度为 30 mm 内裂纹试样的最终破坏形态, 如图 12 所示。处在试样底部的预制内裂纹先于试样底部裂纹萌生, 而发生了扩展, 导致试样沿预制裂纹扩展面贯通断裂。主裂纹呈直线状上下贯通, 并与内裂纹相连。

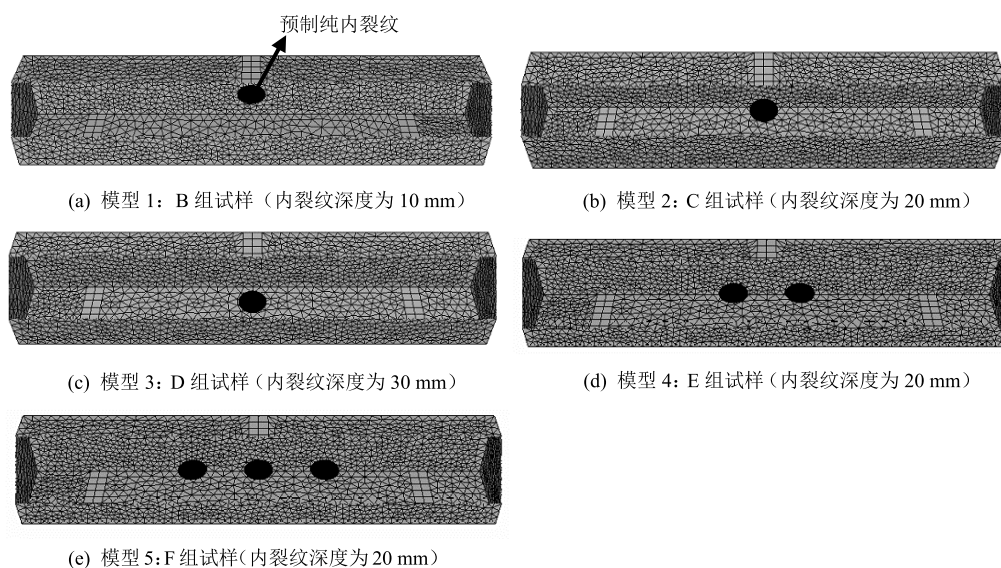


图 12 数值模型网格图

Fig.12 Grid diagram of numerical model

4 数值模拟

4.1 数值模型与参数

使用 ABAQUS 与 FRANC3D 软件联合开展建模计算, 计算原理参见文献[13]。设置材料为各向同性线弹性, 参数见表 3。建立含单内裂纹试样模型, 尺寸与真实试样一致。裂纹面摩擦系数 $\mu=0$, 三点弯试样下部两处支撑采用固定位移边界条件, 竖向位移 $U_2=0$ 。B~F 组试样的数值模型如图 12 所示。

表 3 模型材料力学参数

Table 3 Mechanical parameters of simulation model		
弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g · cm ⁻³)
82	0.2	2.54

4.2 结果分析

4.2.1 不同深度单内裂纹 K 值分析

裂纹尖端相对周长如图 13 所示, K 值分布规律如图 14 所示。以 B 组试样最大应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 为基准, 定义 $|K_{in}|/|K_B|$ 为归一化应力强度因子, 其中 $i=I、II、III$, 当 $n=1、2、3$ 时分别对应 C 组、D 组、B 组。绘制 I、II、III 型归一化 K 沿裂纹尖端一周的曲线图见图 14。 K 沿裂纹尖端一周变化曲线存在下规律:

(1) 随预制内裂纹深度的加深, B、C、D 组的 K 值均逐渐降低。在试验过程中观察到处在中上部的内裂纹远没有处在下部的内裂纹扩展程度大, 说明在受压状态下的内裂纹比受拉状态下的内裂纹更难扩展。

(2) B、C、D 组的 K 值变化曲线呈现相同的趋势: 当裂纹尖端越靠近试样中心时, K_I 越大; 当裂纹尖端越远离试样中心时, K_{II} 越大; 在裂纹尖端相对周长 0、0.25、0.5、0.75 处的 K_{III} 值近似为 0。

4.2.2 相同深度不同数量内裂纹 K 值分析

(1) 双内裂纹分析 (E 组)

E、F 试样裂纹示意图如图 15 所示。以含相同深度单、双内裂纹试样 C 组、E 组内裂纹尖端的最大应力强度因子 $K_{I\max}$ 、 $K_{II\max}$ 、 $K_{III\max}$ 为基准, 定义 $|K_i|/|K_{i\max}|$ 为归一化应力强度因子, 其中 $i=I、II、III$ 。绘制 I、II、III 型归一化 K 沿裂纹尖端一周的曲线图见图 16, 裂纹尖端位置示意图同图 13, 得出如下规律:

C 组单裂纹的 K_I 值大于 E 组双内裂纹的 K_I 值, 可见裂纹越靠近试样中心, 其所受压应力增大, 相对应的 K_I 也逐渐增大; C 组单裂纹的 K_{II} 、 K_{III} 值小于 E 组双内裂纹的 K_{II} 、 K_{III} 值, 可见裂纹越远离试样中心, 其受到的剪应力越大。

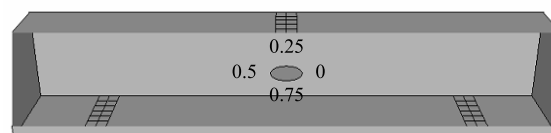
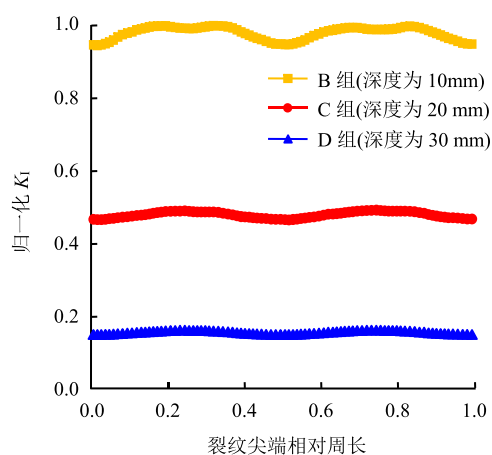
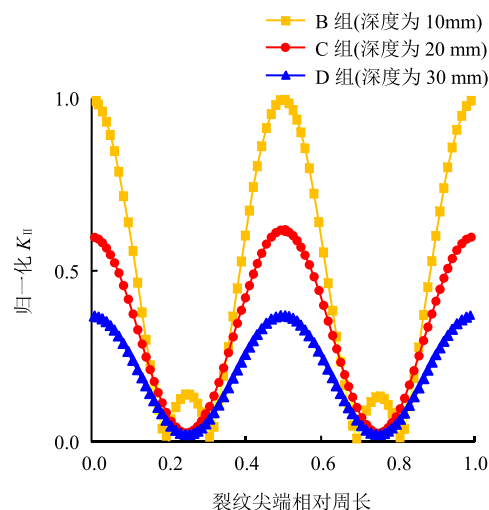


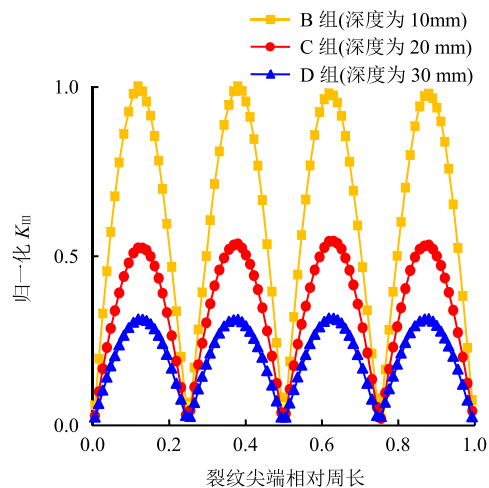
图 13 裂纹尖端
Fig.13 Crack front



(a) 归一化 K_I 分布



(b) 归一化 K_{II} 分布



(c) 归一化 K_{III} 分布

图 14 归一化应力强度因子分布

Fig.14 Distribution of generalized stress intensity factor

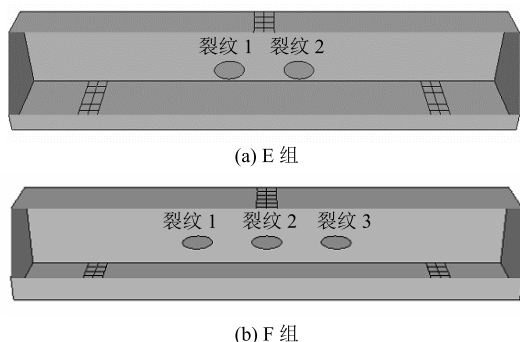


图 15 E 组、F 组裂纹示意图

Fig.15 Cracks diagram of specimens E and F

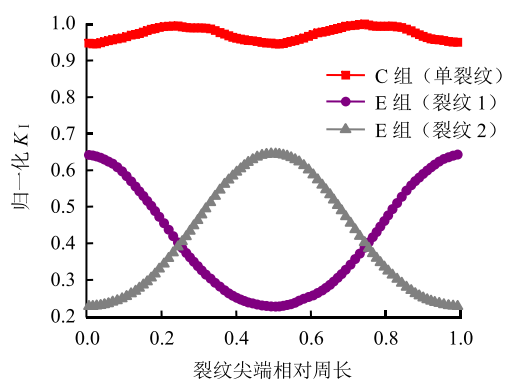
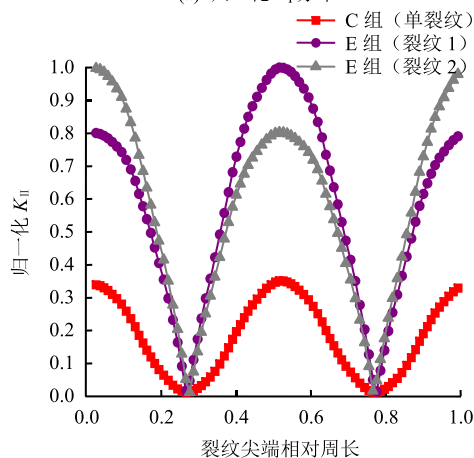
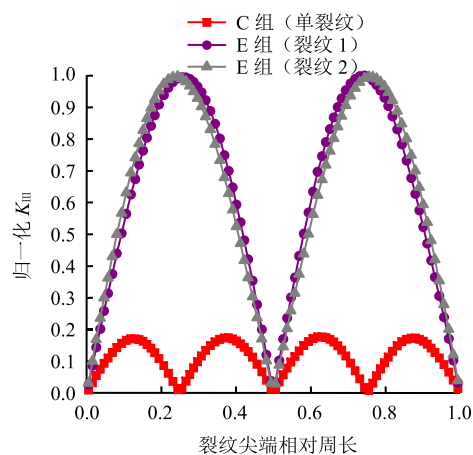
(a) 归一化 K_I 分布(b) 归一化 K_{II} 分布(c) 归一化 K_{III} 分布

图 16 C 组、E 组相对应力强度因子

Fig.16 Relative stress intensity factors of group C and group E

E 组双内裂纹尖端的 K 值变化曲线呈现相对应的趋势：裂纹尖端越靠近试样中心， K_I 越大；裂纹尖端越远离试样中心， K_{II} 、 K_{III} 越大。

(2) 三内裂纹分析 (F 组)

以含相同深度单、三内裂纹试样 C 组、F 组内裂纹尖端的最大应力强度因子 $K_{I\max}$ 、 $K_{II\max}$ 、 $K_{III\max}$ 为基准，定义 $|K_i|/|K_{i\max}|$ 为归一化应力强度因子，其中 $i=I$ 、II、III。绘制 I、II、III 型归一化 K 沿裂纹尖端一周的曲线见图 17，裂纹尖端示意图同图 13，得出如下规律：

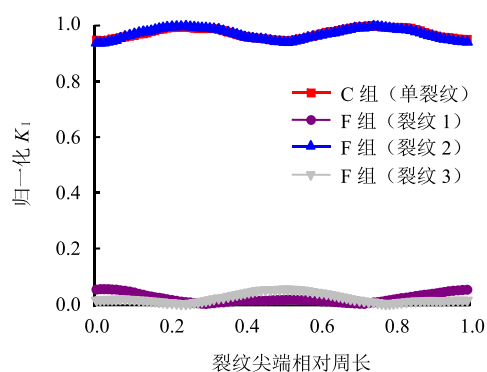
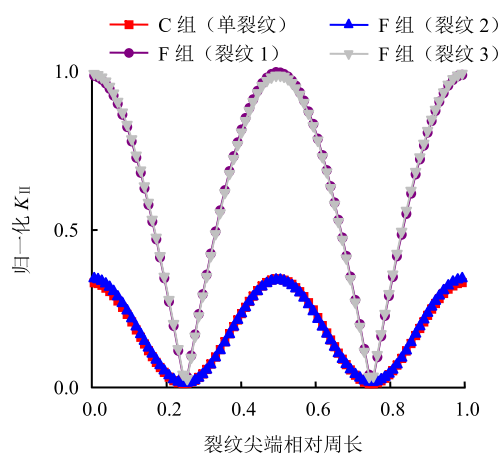
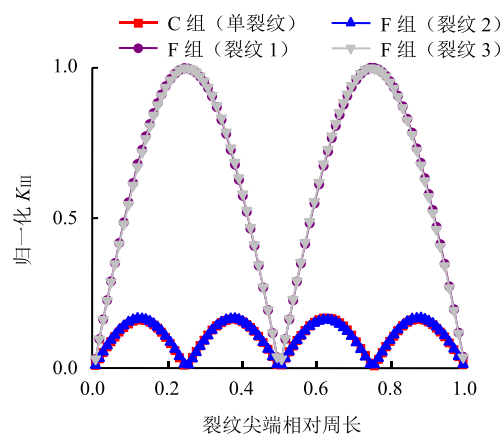
(a) 归一化 K_I 分布(b) 归一化 K_{II} 分布(c) 归一化 K_{III} 分布

图 17 C 组、F 组相对应力强度因子

Fig.17 Relative stress intensity factors of group C and group F

C 组单裂纹的 K 值与 F 组中间裂纹即裂纹 2 的 K 值基本一致, 说明在本次裂纹尺寸和裂纹间距下, 裂纹间的相互作用较弱; C 组单裂纹的 K_I 值远大于 F 组左右裂纹即裂纹 1、2 的 K_I 值, C 组单裂纹的 K_{II} 、 K_{III} 值远小于 F 组左右裂纹的 K_{II} 、 K_{III} 值, 也验证了裂纹越远离试样中心, 其 K_I 值越小, K_{II} 、 K_{III} 值越大。

F 组左右裂纹尖端的 K 值变化曲线也呈现相对应的趋势, 也验证了裂纹尖端越远离试样中心, K_I 越小, K_{II} 、 K_{III} 越大。

5 结 论

(1) 试验结果表明 3D-ILC 在脆性材料断裂力学试验中的适用性。

(2) 对于完整试样, 应力双折射云纹呈“虹拱状”对称分布于整个试样; 不同深度下内裂纹改变了试样云纹分布规律, 云纹分布在内裂纹周边, 在裂纹上端呈半圆状, 色差对比显著。

(3) 内裂纹显著降低试样破坏荷载。深度 10~30 mm 内裂纹试样与完整试样破坏荷载相比, 下降百分比分别为 11.8%、19.5%、78.4%。含相同深度双、三内裂纹试样 (深度 20 mm) 与完整试样破坏荷载相比, 下降百分比分别为 30.9%、35.5%。

(4) 内裂纹改变了试样的破坏形态。含单内裂纹试样 B、C (深度 10、20 mm), 含双内裂纹试样 E (深度 20 mm), 三内裂纹试样 F (深度 20 mm) 与完整试样的破坏形态相近, 均为动态裂纹分叉破坏, 断口形貌呈现出镜面雾化羽毛平纹特征; 含单内裂纹试样 D (深度 30 mm) 的预制内裂纹发生扩展贯通破坏, 断口形貌为光滑的翼状扩展。

(5) 内裂纹改变了荷载-特征区尺寸关系: 内裂纹降低了试样的破坏荷载, $Fr^{1/2}$ 不再是某一固定数值, 而是与内裂纹深度呈线性关系。

(6) 通过数值模拟得出: 含不同深度单内裂纹试样的 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 均随着内裂纹深度加深而逐渐降低; 比较含相同深度不同个数内裂纹试样, 裂纹越远离试样中心, K_I 越小, K_{II} 、 K_{III} 越大; 左右侧裂纹对中间裂纹的 K 值不影响。

参 考 文 献

[1] CROUCH B A. The effect of crack front curvature and side-grooving on three-point bend specimen fracture toughness measurements[J]. *International Journal of Fracture*, 1991, 52(4): 275-292.

[2] 高洪, 吕新生. 用数值方法求三点弯圆轴的应力强度因子 K_I [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2002, 25(4): 590-594.

GAO Hong, LÜ Xin-sheng. Expression for the stress intensity factor K_I of the three-point bending bar by the numerical method[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2002, 25(4): 590-594.

[3] 黄明利, 朱万成, 逢铭彰. 动载荷作用下含偏置裂纹三点弯曲梁破坏过程的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3384-3389.

HUANG Ming-li, ZHU Wan-cheng, PANG Ming-zhang. Numerical simulation of dynamic failure processes of three-point bending beam with offset notch[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Suppl. 1): 3384-3389.

[4] 李兴权, 孙晓燕, 尹子燕. 含初始裂缝的素混凝土梁三点弯数值模拟[J]. 公路, 2012(7): 221-224.

LI Xing-quan, SUN Xiao-yan, YIN Zi-yan. Three-point bending numerical simulation of concrete beam with initial crack[J]. *Highway*, 2012(7): 221-224.

[5] CHATTOPADHYAY J, DUTTA B K, KUSHWAHA H S. Experimental and analytical study of three-point bend specimen and through wall circumferentially cracked straight pipe[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000, 77(8): 455-471.

[6] 左建平, 黄亚明, 刘连峰. 含偏置缺口玄武岩原位三点弯曲细观断裂研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 740-746.

ZUO Jian-ping, HUANG Ya-ming, LIU Lian-feng. Investigation on meso-fracture mechanism of basalt with offset notch based on in-situ three-point bending tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(4): 740-746.

[7] HAERI H. Experimental and numerical study on crack propagation in pre-cracked beam specimens under three-point bending[J]. *Journal of Central South University*, 2016, 23(2): 430-439.

[8] 朱珍德, 林恒星, 孙亚霖. 透明类岩石内置三维裂纹扩展变形试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 913-921, 928.

ZHU Zhen-de, LIN Heng-xing, SUN Ya-lin. An experimental study of internal 3D crack propagation and coalescence in transparent rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*,

- 2016, 37(4): 913-921, 928.
- [9] FU J W, LIU S L, ZHU W S, et al. Experiments on failure process of new rock-like specimens with two internal cracks under biaxial loading and the 3-D simulation[J]. **Acta Geotechnica**, 2018, 13(4): 853-867.
- [10] WANG H Y, DYSKIN A, PASTERNAK E, et al. Effect of the intermediate principal stress on 3-D crack growth[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2018, 204: 404-420.
- [11] 王海军, 张九丹, 任然, 等. 基于激光-介质损伤的三维内裂纹 3D-ILC 实现[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2345-2352.
- WANG Hai-jun, ZHANG Jiu-dan, REN Ran, et al. Embedded cracks in brittle solids induced by laser-medium interaction (3D-ILC) [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(12): 2345-2352.
- [12] 王海军, 郁舒阳, 任然, 等. 基于 3D-ILC 含内裂纹孔口脆性固体断裂特性试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2200-2212.
- WANG Hai-jun, YU Shu-yang, REN Ran, et al. Study on fracture of brittle solids with circular hole and internal crack based on 3D-ILC[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(6): 2200-2212.
- [13] 张志韬, 王海军, 汤雷, 等. 基于 3D-ILC 含偏心内裂纹半圆弯拉断裂特性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 111-122, 131.
- ZHANG Zhi-tao, WANG Hai-jun, TANG Lei, et al. Study of fracture characteristics of semi-circular bending with internal crack based on 3D-ILC. [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(1): 111-122, 131.
- [14] 王海军, 张九丹, 任然, 等. 基于 3D-ILC 含不同角度内裂纹圆盘断裂特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1636-1644.
- WANG Hai-jun, ZHANG Jiu-dan, REN Ran, et al. Fracture characteristics of Brazilian disc with fully internal cracks based on 3D-ILC[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(9): 1636-1644.
- [15] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- FAN Tian-you. Fracture theory foundation[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [16] 李世愚. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- LI Shi-yu. Introduction of rock fracture mechanics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.
- [17] 雷振坤. 结构分析数字光测力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2012.
- LEI Zhen-kun. Structure analysis digital photo-mechanics[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2012.
- [18] LAWN B. 脆性固体断裂力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- LAWN B. Fracture of brittle solids[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [19] HULL D. 断口形貌学[M]. 李晓刚等译. 北京: 科学出版社, 2009.
- HULL D. Fractography[M]. Translated by LI Xiao-gang et al. Beijing: Science Press, 2009.
- [20] JOHNSON J W, HOLLOWAY D G. On the shape and size of the fracture zones on glass fracture surfaces[J]. **Philosophical Magazine**, 1966, 14(130): 731-743.