

DOI: 10.11779/CJGE201909007

基于 3D-ILC 含不同角度内裂纹圆盘断裂特性研究

王海军¹, 张九丹², 任然³, 汤雷^{1*}, 郁舒阳², 钟凌伟², 张珂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. 香港城市大学, 香港 999077)

摘要: 巴西圆盘试验是力学领域的一个经典试验, 含裂纹的圆盘试验多集中于二维或表面裂纹, 但含内裂纹的 I-II-III 型断裂研究一直较为落后。基于 3D-ILC 技术, 在对巴西圆盘试样表面无任何影响的情况下, 凭空生成任意参数的内裂纹, 开展含不同角度内裂纹的及完整巴西圆盘试样试验, 对裂纹扩展过程、应力双折射规律、裂纹起裂及破坏荷载进行分析, 并与已有文献进行对比, 开展三维内裂纹 I-II-III 型断裂数值模拟, 分析 K_I , K_{II} , K_{III} 分布规律及实现裂纹扩展全过程模拟, 规律与试验相符。结果表明: ①3D-ILC 在断裂力学试验中的优势得到证明, 为断裂力学中的内裂纹及 I-II-III 型断裂问题的研究奠定了基础。②与完整试样匀称连续的应力云纹分布相比, 含内裂纹试样应力云纹集中于内裂纹尖端, 呈花瓣状, 色差对比显著。③30° 内裂纹被括弧状破坏面切断; 60° 内裂纹上下尖端出现 I-II 型翼裂纹扩展, 侧面出现 III 型裂纹叠加; 90° 内裂纹试样, 沿内裂纹面扩展破坏, 为纯 I 型破坏。④与完整试样破坏荷载相比, 含 30°, 60°, 90° 内裂纹试样破坏荷载分别下降 10.7%, 60.6%, 89.2%; 30°, 60°, 90° 内裂纹起裂与破坏荷载比分别为 100%, 11.7%, 15.6%。⑤数值模拟与物理试验特征一致。结论与成果对断裂力学领域的三维内裂纹、I-II-III 型断裂问题的研究提供了试验与理论基础。

关键词: 3D-ILC; 断裂力学; 巴西圆盘; 脆性固体; 三维内裂纹; 应力双折射

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)09-1636-09

作者简介: 王海军(1985—), 男, 博士, 主要从事断裂力学及岩石力学相关科研工作。E-mail: hjwang@nhri.cn。

Fracture characteristics of Brazilian disc with fully internal cracks based on 3D-ILC

WANG Hai-jun¹, ZHANG Jiu-dan², REN Ran³, TANG Lei¹, YU Shu-yang², ZHONG Ling-wei², ZHANG Ke²

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

210029, China; 2. Hohai University, College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Nanjing 210098, China; 3. City

University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The fully internal crack is created in the Brazilian disc based on the 3D-ILC method, without any effect on the surface. The uniaxial compression experiments are performed on the Brazilian discs with internal cracks at different angles. The experimental results are compared with the existing literatures. The propagation of the fully internal crack, the distribution of the stress-induced birefringence, the initiation of the crack and the failure stress and the fracture surface characteristics are investigated. Then the numerical simulations are carried out. The results show that: (1) The validity of the 3D-ILC is proved in the fracture mechanics researches. (2) The stress birefringence of the cracked specimen is discontinuous at the internal crack. (3) Compared to the intact specimens, the internal cracks greatly reduce the strength of the Brazilian disc, with decrease of 10.7%, 60.6% and 89.2% for the specimens with 30°, 60° and 90°. The stresses of crack initiation are 100%, 11.7% and 15.6% of the failure stress for the specimens with 30°, 60° and 90°. (4) The internal crack is penetrated by the primary crack for the Brazilian disc with crack of 30°. The mode I-II 3D wing cracks occur at the crack tip, while the mode III cracks occur at the sides of discs with internal crack of 60°. The primary crack is mode I crack for the disc with internal crack of 90°. (5) Numerical simulations are carried out on the Brazilian discs. The results may provide experimental support for the corresponding theoretical researches.

Key words: 3D-ILC; fracture mechanics; Brazilian disc; brittle

solid; 3D internal crack; stress-induced birefringence

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401801); 国家自然科学基金项目(51409170, 51739008); 江苏省自然科学基金项目(BK20171130); 中央级公益性科研院所基本科研业务费重点项目(Y419005)

收稿日期: 2018-05-21

*通讯作者(E-mail: leitang@nhri.cn)

0 引言

20 世纪初期, 一系列“低应力脆性断裂”工程事

故撼动了以传统强度理论为中心的设计理念。1920 年 Griffith^[1]以热力学能量平衡理论建立的裂纹扩展判据奠定了现代断裂力学的基础, 随后断裂力学理论不断发展, 逐渐广泛应用于诸如岩石力学、航空航天、机械能源等领域。

巴西圆盘试验是断裂力学研究中的重要试验手段之一^[2-3]。裂纹按照几何分布特征, 分为表面裂纹、穿透裂纹、纯封闭内裂纹, 按照裂纹的所受荷载形式, 分为 I、II、III型及复合裂纹。但是无论是理论还是试验方面, 含裂纹巴西圆盘断裂力学研究主要集中在表面裂纹或贯穿裂纹, 如经典的人字型切槽巴西圆盘试样 (CCNBD)^[4]、直切槽式巴西圆盘 (CSTBD)^[5]、孔槽式巴西圆盘 (HCBD)^[6]逐渐成为断裂力学标准试验。理论上, 陈枫等^[7]利用权函数推导了 CSTBD 在对径加载下的应力强度因子公式; 李念斌等^[8]利用权函数推导了考虑裂纹面摩擦因子下的 CSTBD 应力强度因子表达式; 试验上, 崔智丽等^[9]针对 CSTBD 试样在纯 I 型加载条件下的断裂韧度进行了研究; 戴峰等^[10]对 CCNBD 试样在纯 I 型加载下裂纹扩展进行了探讨; 许媛等^[11]研究了 CCNBD 试样 I、II 型复合型破坏过程。此类研究几乎都局限于二维穿透型裂纹, 而实际裂纹往往以三维内裂纹形态存在于材料中, 是一个普遍的问题, 同时也是一个难点问题^[12]。造成内裂纹研究较为落后的原因有两方面:

(1) 内裂纹制作问题: 可以想象, 在一完整脆性固体内部形成“内科手术式”精确生成任意参数可控的宏观裂纹, 又同时对表面不造成任何影响, 以常规机械力学理论判断, 甚至是不可能实现的。目前对于内裂纹制作基本上是预埋-浇注法^[13], 首先在模具中预埋金属或云母等薄片, 然后浇注水泥、树脂等成型, 预埋的薄片认为是内裂纹, 显然这并不是真实的裂纹。另一方面, 浇注法形成试样, 需要在恒定低温下开展试验以保证试样的脆性度, 但即使低温下, 目前也只能达到 1/6.6 的脆性度, 与天然脆性材料如岩石等相差甚远, 且不稳定。

(2) 观测问题: 内裂纹与试样表面不相交, 使得观测较为不便。在以往以不透明材料为主的试验中, 人们往往采用观察断口^[14]、CT 扫描^[15]、核磁共振^[16]、X 射线^[17]、AE 声发射^[18]等手段去观测三维内裂纹, 但是这些方法存在实时性不足, 定位较差, 试验成本高等缺点。

本文将克服以上问题, 基于王海军等^[19]首次提出的 3D-ILC 技术, 在对表面无任何影响的情况下, 在脆性材料内部“凭空”生成宏观封闭内裂纹, 解决了三维内裂纹生成问题, 所选用的透明性光学双折射材料一并解决了裂纹扩展以及应力分布的实时观测问题。基于此, 展开含不同角度的内裂纹巴西圆盘压缩

试验, 得到内裂纹扩展过程、应力双折射规律、破坏形态、断口特征等, 通过三维数值模拟得到裂纹尖端 K_I , K_{II} , K_{III} 分布规律及实现裂纹扩展全过程模拟, 对推动断裂力学中的内裂纹问题、I-II-III 型复合断裂问题的研究提供试验、理论基础。

1 试样的制备与试验方法

1.1 3D-ILC

3D-ILC 是王海军等^[19]于 2017 年首次提出, 实现了在对表面无任何影响的情况下, 在材料内部制作任意内裂纹。

纯封闭内裂纹制作难度较高, 可以想象, 在一完整物体内部形成“内科手术式”精确结构改变而对其他部分不造成影响, 以常规机械力学理论判断, 是不可能实现。但是, 电磁及波等物理场可以穿透物体并作用于内部, 王海军等^[19]通过甄别各类场作用, 最终提出 3D-ILC 通过电磁场作用于材料内部, 形成电浆 (物质第四态) 爆破, 进而制作宏观纯封闭内裂纹。目前已成功应用于含内裂纹孔口问题研究^[20]。

1.2 试样材料

材料选用玻璃, 具有以下优势: ①玻璃因均质, 各向同性, 在裂纹扩展之前严格遵循胡克定律, 是脆性固体断裂力学中的经典材料^[14]; ②玻璃是应力双折射光敏材料, 为直接观察应力分布提供基础。

正如李世愚等在《岩石断裂力学》一书中指出: “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。”现代断裂力学基础 Griffith 断裂判据^[1]就是以玻璃为试验材料, 其后, 许多学者进行了许多以玻璃为基础的经典试验, 如: Roesler^[21]利用玻璃材料进行了三维 Hertz 接触破裂试验; Knauss^[22]运用玻璃进行了纯III型裂纹研究, 得到“准螺旋形”破坏特征; Sommer^[23]开展玻璃试验得到 I-III 型“双矛头”经典破裂形态, 也成为了国际期刊 *Engineering Fracture Mechanics* 的永久封面 (章节 3 将给出本文结果与“双矛头”经典破裂形态对比)。

1.3 试样设计与方案

为研究含有不同角度内裂纹的巴西圆盘在单轴应力状态下的断裂特性, 一共设置 6 组试验, 编号 A1~A6, 其中 A1 为无裂纹巴西圆盘试样, A2~A6 为含内置裂纹巴西圆盘试样。预制内裂纹由 3D-ILC 制作, 包括主裂纹与次裂纹, 次裂纹包括上裂纹与下裂纹, 裂纹控制参数如下: α_1 , α_2 , α_3 分别为上裂纹尖端、主裂纹、下裂纹尖端与水平方向的夹角, c_1 , c_2 , c_3 分别为上裂纹尖端、主裂纹、下裂纹尖端的裂纹长度, b 为裂纹宽度。巴西圆盘侧边缺口为 3D-ILC 制作内裂纹的电磁场入射口, 缺口长度为 20 mm, 巴西圆盘直

表 1 预制内裂纹参数

Table 1 Parameters of internal cracks by 3D-ILC

试样类型	试样编号	上裂纹尖端倾角 $\alpha_1/^\circ$	主裂纹倾角 $\alpha_2/^\circ$	下裂纹尖端倾角 $\alpha_3/^\circ$	裂纹宽度 b/mm	上裂纹尖端长度 c_1/mm	主裂纹长度 c_2/mm	下裂纹尖端长度 c_3/mm
完整试样	A1	—	—	—	—	—	—	—
含裂纹试样	A2	45	30	15	20	9	18	8
	A3	75	60	45	20	9	18	8
	A4	105	90	75	20	9	18	8

径为 80 mm。厚度为 40 mm。无裂纹巴西圆盘试样与含内置裂纹巴西圆盘试样见图 1 与图 2。

巴西圆盘试样的试样编号, 裂纹参数及试验方案见表 1。

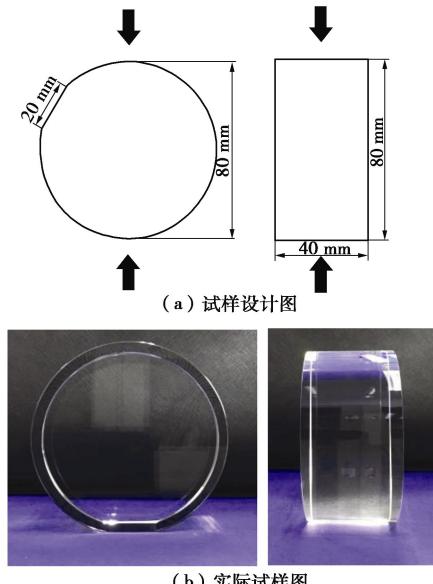


图 1 无裂纹巴西圆盘试样 (试样 A1)

Fig. 1 Brazilian disc specimen without cracks (A1)

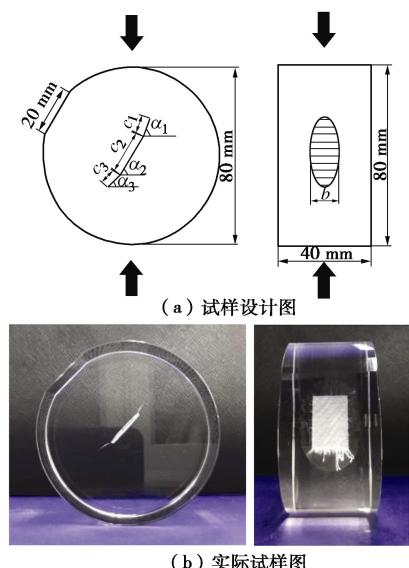


图 2 含裂纹巴西圆盘试样

Fig. 2 Brazilian disc specimen with cracks

1.4 试验仪器

试验采用 WHY-3000 伺服压载系统, 设置摄像头分监测裂纹的萌生及扩展动态变化, 照明灯调节试样

光线。采用单轴压缩加载, 力值控制模式, 速率为 0.05 kN/s。为了直接观测试样应力试验仪器布置如图 3。

脆性试验中应力集中较为敏感, 端部不平整或不光滑会导致试样端部由应力集中而形成裂纹, 影响试验质量。为避免这一现象, 在顶部与底部放置光滑 PMMA 板。

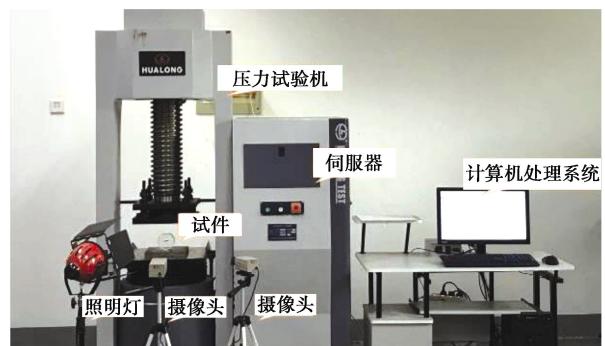


图 3 加载系统

Fig. 3 Loading system

1.5 双折射效应观测系统

玻璃等非晶体介质在无应力状态下通常呈现光学各向同性, 当受到应力作用时, 折射率特征发生改变, 显示光学各向异性, 即当一束光线通过有内应力的玻璃时, 将产生传播速度不同的两束光线, 遵循折射定律的寻常光 o 和不遵循折律的非常光 e , 此为应力双折射现象。 o 和 e 的频率、振动方向相同, 存在固定相位差, 可产生干涉条纹, 由此效应可实现试样应力场分布动态变化观测, 判定应力集中, 并纠正试验偏心。依据应力-光学定律^[24]: 当入射光入射试验对象时, 由于双折射效应, 主应力与相应的折射率有如下关系:

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

式中, σ_1 与 σ_2 分别为试样在压载作用下主应力, n_1 , n_2 分别为 σ_1 , σ_2 方向的折射率, C_1 , C_2 为材料应力-光学系数。偏振光通过试样产生的光程差为

$$\Delta = (n_1 - n_2)h \quad (2)$$

其中 h 为介质厚度, 由式 (1), (2) 建立应力与光学量的对应关系:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \Delta / h C \quad (3)$$

2 试验结果分析

本节将从不同角度的内裂纹对裂纹扩展过程、起裂与破坏荷载、破坏形态、断口特征 4 个方面给出结

果和分析。为对比起见, 先给出完整试样结果, 后给出含裂纹试样结果。单轴压缩下, 试样 A1~A4 破坏过程如图 4 所示。

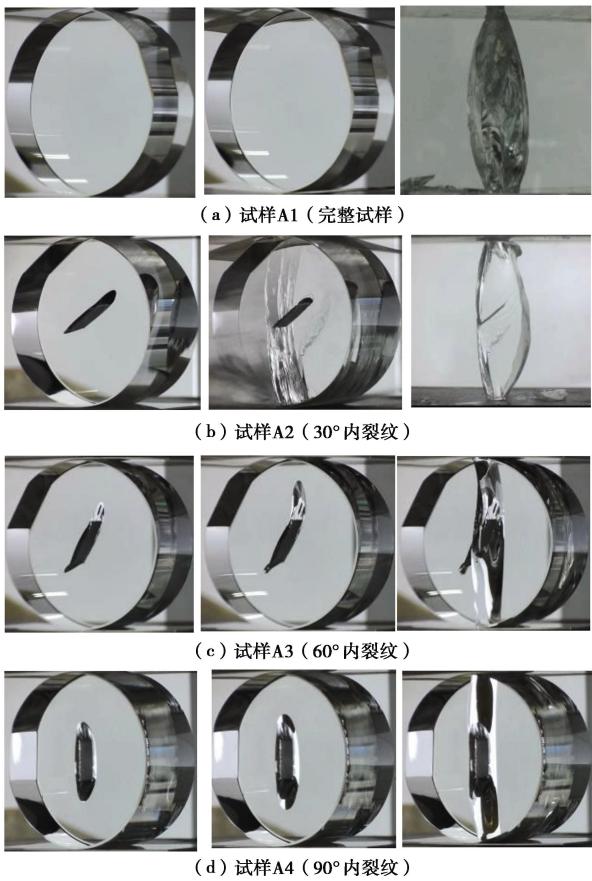


图 4 巴西圆盘内裂纹扩展过程

Fig. 4 Crack propagation and failure process of Brazilian disc tests

2.1 裂纹扩展过程分析

(1) 试样 A1 (完整试样)

如图 4 (a) 所示, 完整试样 A1 在前期无裂纹产生, 当荷载达到 47.15 kN 时, 试样从底部开始破坏, 呈现对称括弧状破坏。最终试样爆裂为“碎屑状”, 此特征为刚性试验机压载脆性材料破坏的典型特征。

(2) 试样 A2 (主裂纹倾角 $\alpha_2=30^\circ$)

如图 4 (b) 所示, 试样 A2 在受载下裂纹尖端并无扩展, 当荷载达到 42.11 kN 时, 与试样 A1 一样出现对称括弧状破坏, 同时可观察到在内裂纹所在平面出现明显的剪切错动, 最终试样呈“碎屑状”。与完整试样最终破坏形态相比, 30° 的内裂纹影响不大。

(3) 试样 A3 (主裂纹倾角 $\alpha_2=60^\circ$)

如图 4 (c) 所示, A3 上裂纹尖端首先开始扩展, 起裂应力为 4.93 kN, 之后裂纹逐渐向上扩展, 当扩展到 10.8 mm 时, 下裂纹尖端起裂, 此时力值为 14.67 kN。之后裂纹继续扩展, 在荷载为 16.46 kN 时, 试样贯穿破坏, 产生较为平整的竖直裂纹。值得注意的是, 此时下裂纹尖端出现了一条次生裂纹, 出现在主裂纹的

下端。

(4) 试样 A4 (主裂纹倾角 $\alpha_2=90^\circ$)

如图 5 (d) 所示, 试样 A 在受载下上下裂纹尖端裂纹同时开始扩展, 起裂荷载为 0.79 kN, 之后裂纹逐渐向外自相似扩展, 等达到峰值荷载 5.08 kN 时, 裂纹贯穿试样表面, 巴西圆盘被分割成为对称的两半。

2.2 应力双折射规律初探

加载过程中的典型应力云纹分布如图 5 所示: ①加载后, 完整试样上下端首先出现圆弧状应力云纹, 显示此处开始出现应力, 随后向周围扩散, 外侧呈现“括弧状”, 并且随荷载增加, 条纹级数增多、颜色变淡, 云纹分布较为对称和连续; ②含裂纹试样, 应力云纹分布于预制裂纹周边, 在裂纹尖端呈现“花瓣状”, 显示出裂纹尖端的应力集中; ③内裂纹的存在改变了完整试样应力云纹的连续特征, 随着内裂纹倾角的增大, 巴西圆盘内部云纹逐渐由从经过上下加载点的大“括弧状”变为经过上下加载点与预制内裂纹尖端的小“括弧状”; ④破坏后应力云纹表明裂纹面存在残余应力。

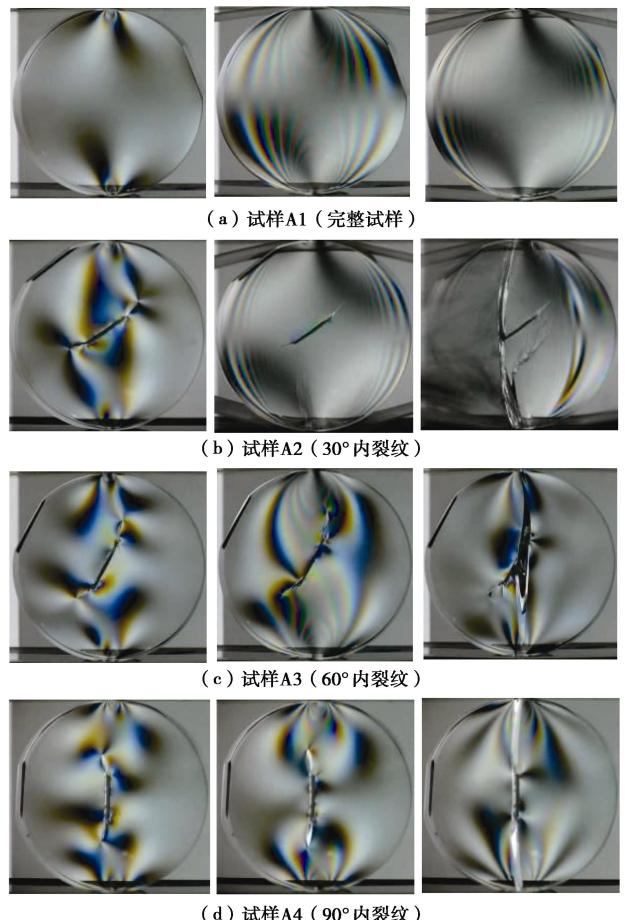


图 5 巴西圆盘试验应力云纹分布规律

Fig. 5 Stress birefringence of Brazilian discs

2.3 起裂与破坏荷载

起裂与破坏荷载统计如图 6, 呈现出以下特点:

①试样 A2~A4 起裂荷载与完整巴西圆盘试样起裂荷

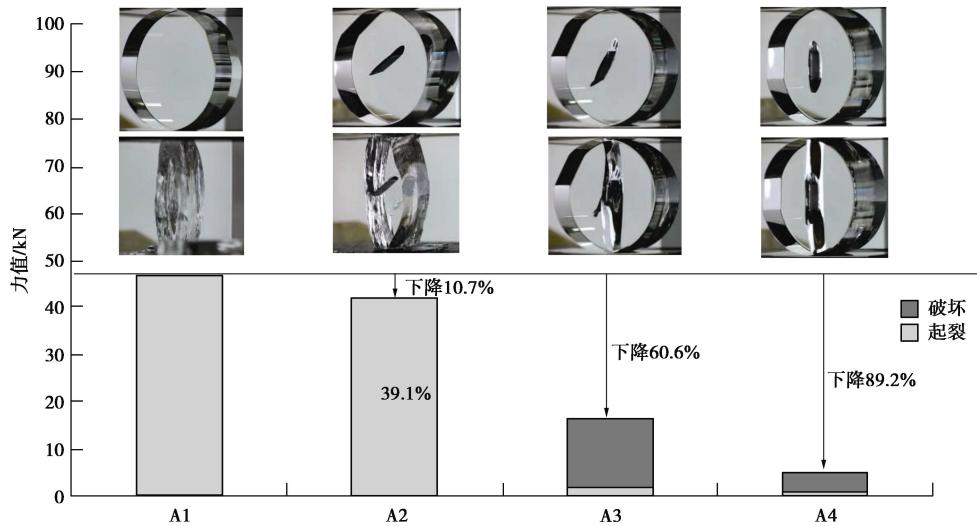


图 6 巴西圆盘起裂与破坏荷载

Fig. 6 Forces for crack propagation and failure loads

载相比下降百分比分别为 10.69%, 95.92%, 98.32%。可见起裂荷载大小与内裂纹和加载方向的夹角 ($|90^\circ - \alpha_1|$) 成正比, 夹角越小, 起裂荷载越小; ②内裂纹的存在极大降低试样的强度, 含 30°, 60°, 90° 内裂纹试样破坏荷载与完整试样相比, 分别为 10.7%, 60.6%, 89.2%; ③对于各组试样起裂荷载与最终的破坏荷载比例分别为 (A2~A4): 100%, 11.7%, 15.6%。

3 与文献试验成果对比

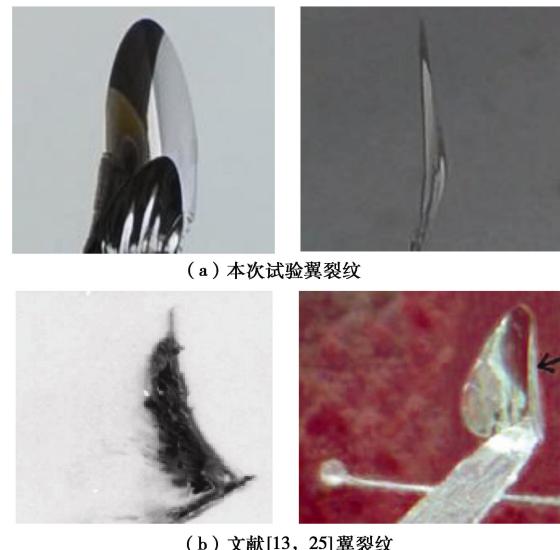
目前涉及含内裂纹巴西圆盘相关研究较少, 首先与树脂预埋浇注法制作的含内裂纹立方体试样的试验成果进行对比。此方法是在 3D-ILC 之前通用的模拟含内裂纹的类岩石材料的方法, 在模具中放置金属或云母等薄片, 然后浇注液体树脂, 氧化成型, 金属等薄片在成型后的树脂内部, 被认为是内裂纹。

本文 A3 预制内裂纹尖端出现的典型翼裂纹在以往试验中较多出现, 文献[13, 25]为单轴压缩下方块树脂材料内裂纹扩展形态, 对比如图 7 所示。

A3 内裂纹起裂初期, 形成翼型裂纹, 与原预制裂纹存在一定角度, 裂纹扩展面光滑且尖端圆滑, 由此排除 III 型裂纹(下文详述)的参与。对于脆性材料, 裂纹总是倾向于寻找一个能够使得剪切荷载最小的方向发生扩展。当 II 型裂纹叠加 I 型裂纹时, 脆性裂纹面方向会慢慢回到一个与外加场引起的最大主拉应力相垂直的一个稳定的一个平面上来, 最终由 I-II 混合型朝向纯 I 型转变, 裂纹扩展轨迹在三维空间上也呈现为渐变的“翼型包裹”状曲面, 判断本文裂纹扩展在未出现矛状特征时为 I-II 型裂纹。

随着翼型裂纹扩展, 在 A3 裂纹侧面出现典型 III 型裂纹参与形态, “针刺”状特征, 在裂纹断口上呈现

矛状裂纹面, 如图 8 所示, 此处发生裂纹面错动, 形成 III 型撕开裂纹。断口特征与 Sommer^[23] I-II 型复合裂纹经典试验的“双矛头”裂纹断口相似。侧面形态为“针刺”状, 如图 9 (a), 此特征发生在 I-II 型翼型裂纹面上, 结合后文应力强度因子分布, 矛状区域为 I-II-III 型复合裂纹。

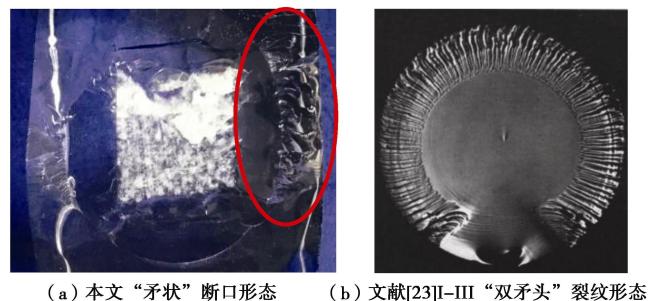


(a) 本次试验翼裂纹

(b) 文献[13, 25]翼裂纹

图 7 翼裂纹对比图

Fig. 7 Comparison of wing cracks



(a) 本文“矛状”断口形态

(b) 文献[23]I-II “双矛头”裂纹形态

图 8 III 型参与复合裂纹形态对比

Fig. 8 Comparison of patterns of mode III composite cracks

但是, 树脂材料预埋浇注法, 呈现出较大不同, 此位置描述为“花瓣形”, 如图 9 (b), 难以体现 III型裂纹特征。

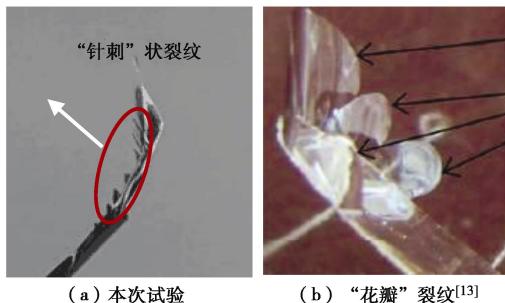


图9 “花瓣形”裂纹与“针刺状”裂纹

Fig. 9 "Petal-shaped" and "needle-like" cracks

传统上通用的预埋浇注法以金属片、云母片等异质体“作为”内裂纹, 并非真实裂纹, 如文献[17]最终破裂形态可以看到, 扩展的大裂纹并没有真正的穿透预制内裂纹(见图 10 (a)), “异质体”仍作为一个完整体。而本次试验扩展的竖直裂纹使得预制内裂纹分割成两半(图 10 (b)), 体现了真实裂纹的特性, 这也是 3D-ILC 方法的优越性之一。

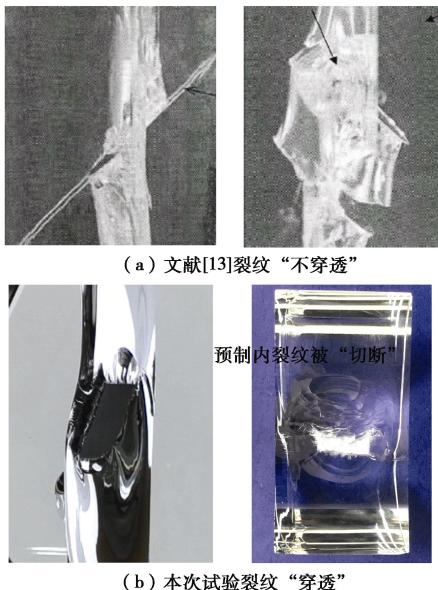


图10 裂纹“穿透”与“不穿透”

Fig. 10 "Penetration" and "non-penetration" cracks

4 数值模拟

4.1 模型与参数

本文采用 FRANC3D 及 ABAQUS 软件进行数值模拟研究。建立数值盘模型进行巴西圆盘劈拉等效计算。图 11 给出了完整巴西圆盘与含 30° 裂纹巴西圆盘裂纹试样的有限元模型网格图。

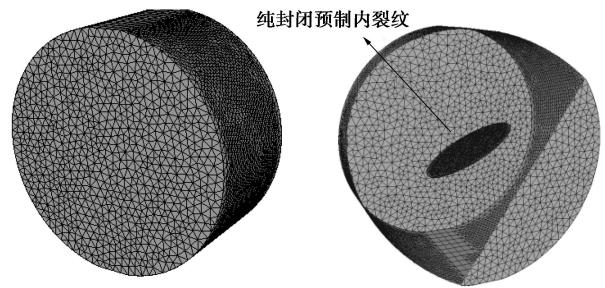


图11 数值模型网格图与裂纹透视图

Fig. 11 Numerical model for the disc with a crack

4.2 SIF 计算原理

应力应变理论不再赘述, 对于应力强度因子 SIF 采用 M 积分的方法来计算^[26-27], 三维 J 积分^[28]:

$$J = \int_{\Gamma} \left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x} - \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \delta_{1j} \right) \frac{\partial q}{\partial x} d\Gamma \quad , \quad (4)$$

式中, δ_{1j} 为克罗狄克符号, q 为光滑函数, Γ 为积分域, J 积分与应力强度因子的关系可以表达为

$$J = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 + \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^2 + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \quad . \quad (5)$$

试验材料为理想线弹性:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(1)} + \sigma_{ij}^{(2)} \quad , \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{(1)} + \varepsilon_{ij}^{(2)} \quad , \quad (7)$$

$$u_i = u_i^{(1)} + u_i^{(2)} \quad , \quad (8)$$

$$K_i = K_i^{(1)} + K_i^{(2)} \quad . \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (5), 可得

$$J = J^{(1)} + J^{(2)} + M^{(1,2)} \quad , \quad (10)$$

$$J^{(1)} = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^{(1)})^2 + \frac{1-\nu^2}{E} (K_{II}^{(1)})^2 + \frac{1+\nu}{E} (K_{III}^{(1)})^2 \quad , \quad (11)$$

$$J^{(2)} = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^{(2)})^2 + \frac{1-\nu^2}{E} (K_{II}^{(2)})^2 + \frac{1+\nu}{E} (K_{III}^{(2)})^2 \quad , \quad (12)$$

$$M^{(1,2)} = 2 \left[\frac{1-\nu^2}{E} K_I^{(1)} K_I^{(2)} + \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^{(1)} K_{III}^{(2)} \right] \quad . \quad (13)$$

状态方程: ① $K_I^{(2a)} = 1$, $K_{II}^{(2a)} = 0$, $K_{III}^{(2a)} = 0$; ② $K_I^{(2b)} = 0$, $K_{II}^{(2b)} = 1$, $K_{III}^{(2b)} = 0$; ③ $K_I^{(2c)} = 0$, $K_{II}^{(2c)} = 0$, $K_{III}^{(2c)} = 1$ 。代入式 (13):

$$K_I^{(1)} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} M^{(1,2a)} \quad , \quad (14)$$

$$K_{II}^{(1)} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} M^{(1,2b)} \quad , \quad (15)$$

$$K_{III}^{(1)} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} M^{(1,2c)} \quad . \quad (16)$$

将式 (14) ~ (16) 代入式 (4), 可得

$$M^{(1,2)} = \int_{\Gamma} \left(\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x} - \sigma_{ij}^{(1)} \varepsilon_{ij}^{(2)} \delta_{ij} - \sigma_{ij}^{(2)} \varepsilon_{ij}^{(1)} \delta_{ij} \right) \frac{\partial q}{\partial x} d\Gamma \quad (17)$$

由式 (14) ~ (17) 得到裂纹尖端应力强度因子。

4.3 应力强度因子分布

方便对比起见, 以试样 A2 最大应力强度因子 K_I , K_{II} , K_{III} 为基准, 定义 $K_{in}/|K_{imax}|$ 为相对应力强度因子, 其中 $i=I, II, III$, $n=2 \sim 4$ 为含不同角度内裂纹试样编号, 绘制 I, II, III 型相对 K 沿裂纹尖端一周的分布见图 12。可以得到如下规律:

(1) 含 30° 内裂纹试样 K_I 为负值, 即内裂纹处于受压闭合状态, 因此对试样影响较小, 破坏形态和空白试样类似。随内裂纹角度从 60° 变为 90° , K_I 变为正值, 为受拉状态, 且逐渐增大, 试样越易发生 I 型扩展, 对破坏强度影响越大, 与试验结论一致。

(2) 随内裂纹角度的增大, K_{II} 逐渐减小, 在内裂纹的上、下端达到最大, 即此处错动趋势最强, 可见翼裂纹的萌生主要是由于 II 型裂纹的错动引起的, 随后在逐渐朝向纯 I 型裂纹发展过程中, 形成三维空间上的翼型包裹裂纹扩展轨迹。

(3) 随内裂纹角度增大, K_{III} 逐渐减小, 预制内裂纹上下端 $K_{III}=0$, 而在预制内裂纹两侧 K_{III} 达到最大, 同时 K_I 也达到最大, 验证了第 3 节观察到的矛状错台裂纹断口为 I, III 型断裂模式。

(4) 预制内裂纹角度为 90° 时, $K_{II}=0$, $K_{III}=0$, 为纯 I 型裂纹扩展, 沿原预制裂纹所在平面扩展, 扩展面光滑, 复合纯 I 型裂纹扩展特征, 与试验一致。

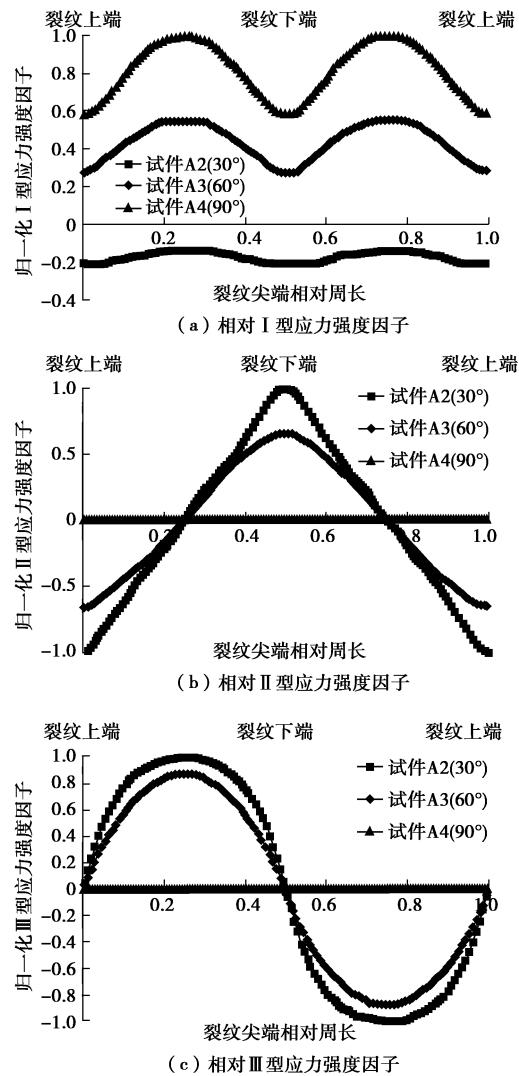


图 12 相对应力强度因子

Fig. 12 Intensity factors of corresponding stress

4.4 裂纹扩展准则

裂纹扩展准则采用最大拉应力准则 (MTS), 裂

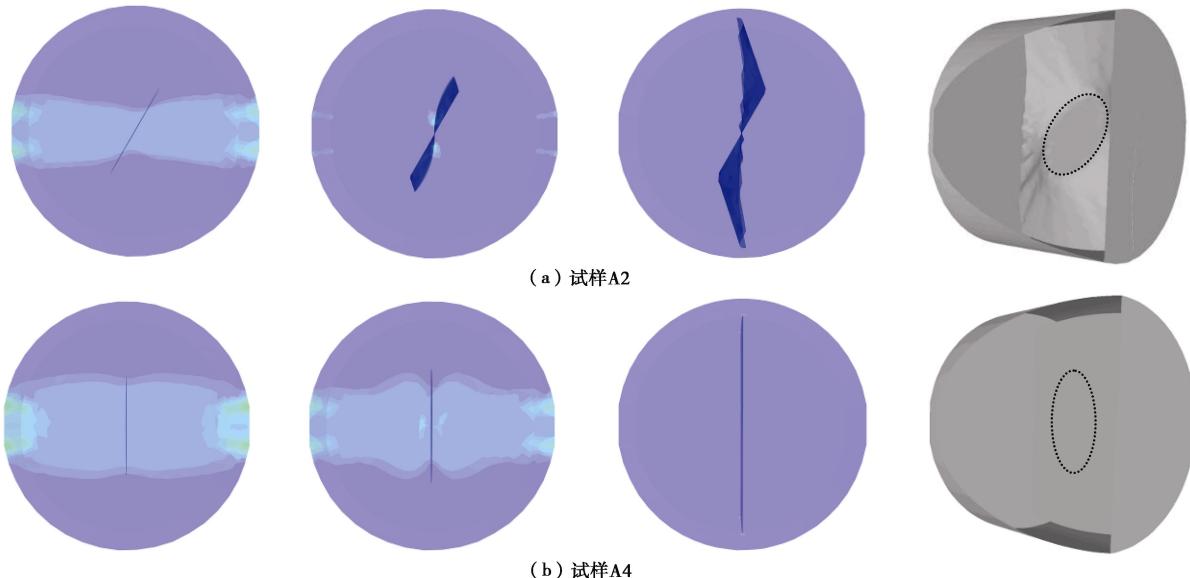


图 13 数值模拟结果

Fig. 13 Numerical results

纹将沿着最大周向应力 $\sigma_{\theta\max}$ 方向进行扩展, 而环向应力则与 I 型应力强度因子有关, 可以表示为

$$K_I^r(\theta) = \sigma_{\theta\theta} \sqrt{2\pi r} = \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right]。 \quad (18)$$

$$\text{令 } \frac{\partial K_I^r(\theta)}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial K_I^r(\theta)^2}{\partial \theta^2} \leq 0, \text{ 可得开裂角}$$

$$\theta_0 = \arccos \frac{3K_{II}^2 \pm \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2}。 \quad (19)$$

4.5 裂纹扩展过程

典型试样 A2, A4 扩展过程如图 13。预制内裂纹角度分别为 30° 时, 裂纹扩展呈现较好的反对称特征。预制内裂纹扩展前期仍为内裂纹, 与表面不相交, 之后均贯穿试样前后表面, 形成穿透裂纹, 最终沿最大主应力方向扩展, 变为纯 I 型拉裂。预制内裂纹倾角越小, 翼型包裹状裂纹越明显, 这与试验中观察到的翼裂纹形态一致。预制内裂纹角度为 90° 情况下, 裂纹为纯 I 型裂纹破坏, 之后变沿着最大主应力方向发展, 最终破裂形态为一平整光滑的裂纹面。

5 结 论

(1) 3D-ILC 可实现含内裂纹的脆性试样制作, 与传统方法相比, 裂纹特征更为真实, 为断裂力学中内裂纹扩展问题、三维问题、I-II-III型断裂等问题的研究提供了有力工具。

(2) 完整巴西圆盘试样出现脆性破坏。含 30° 内裂纹试样, 破坏裂纹从内裂纹贯穿, 含 60° 内裂纹试样裂纹上下尖端出现 I-II 型翼型包裹裂纹, 侧面出现 I-II-III 型裂纹, 90° 内裂纹试样沿内裂纹面扩展出现纯 I 型破坏。

(3) 含 30°, 60°, 90° 预制内裂纹试样与完整试样破坏荷载相比, 下降百分比分别为 10.7%, 60.6%, 89.2%。30°, 60°, 90° 预制内裂纹起裂荷载与最终破坏荷载比分别为 100%, 11.7%, 15.6%。

(4) 对于完整试样, 应力云纹分布于整个试样, 分布匀称协调, 而对于含内裂纹试样, 应力云纹集中在内裂纹周边, 特别是裂纹尖端呈花瓣状云图, 色差对比显著。

(5) 基于 M 积分得到内裂纹尖端应力强度因子 K_I , K_{II} , K_{III} 分布规律, 基于最大周向应力准则 MTS 进行等效计算, 得到了内裂纹的起裂和扩展路径, 与物理试验一致。

(6) 本文最重要价值在于含内裂纹巴西圆盘脆性材料断裂特性规律试验成果, 为后续的理论研究及修正提供了试验依据。由于三维内裂纹问题、I-II-III型断裂的理论及数值模拟都是目前断裂力学领域的难点问题, 因此, 未来工作将在试验基础上, 进一步进行理论研究。

参考文献:

- [1] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Philtransrsoca, 1921, **221**(2): 163 - 198.
- [2] 李夕兵, 罗琳, 黎崇金. 考虑岩石交界面方向效应的巴西劈裂试验研究[J]. 工程科学学报, 2017, **39**(9): 1295 - 1304. (LI Xi-bing, LUO Lin, LI Chong-jin. Experimental study of Brazilian splitting considering the directional effect of rock interface[J]. Journal of Engineering Science, 2017, **39**(9): 1295 - 1304. (in Chinese))
- [3] HONDROS G. The evaluation of Poisson's ratio and modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete[J]. Aust J Appl Sc, 1959, **112**(6): 68 - 71.
- [4] FOWELL R J. Suggested method for determining mode I fracture toughness using Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD) specimens[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 2007, **32**(7): 57 - 64.
- [5] TANG Tianxi, BAŽANT ZDENEK P, YANG Sungchul, et al. Variable-notch one-size test method for fracture energy and process zone length[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, **55**(3): 383 - 404.
- [6] 张盛, 王启智. 用 5 种圆盘试样的劈裂试验确定岩石断裂韧度[J]. 岩土力学, 2009, **30**(1): 12 - 18. (ZHANG Sheng, WANG Qi-zhi. Fracture toughness of rock was determined by splitting test of 5 kinds of disc specimens[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(1): 12 - 18. (in Chinese))
- [7] 陈枫, 孙宗祺, 徐纪成. 单轴压缩下中心裂纹巴西试样的权函数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(5): 599 - 603. (CHEN Feng, SUN Zong-qi, XU Ji-cheng. Weight function analysis of Brazilian specimens with central crack under uniaxial compression[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(5): 599 - 603. (in Chinese))
- [8] 李念斌, 董世明, 华文. 裂纹面接触对中心裂纹圆盘应力强度因子影响分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(8): 2395 - 2401. (LI Nian-bin, DONG Shi-ming, HUA Wen. Analysis of the effect of crack surface contact on the stress intensity factor of the central crack disc[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(8): 2395 - 2401. (in Chinese))
- [9] 崔智丽, 宫能平, 经来旺. 岩石非理想裂纹圆盘试样动态断裂韧性测试的有限元分析及试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(3). (CUI Zhi-li, GONG Neng-ping, JING Lai-wang. Finite element analysis and experimental study on dynamic fracture toughness test of non-ideal cracked disk specimen of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(3). (in Chinese))

[10] 戴 峰, 魏明东, 徐奴文. 人字形切槽巴西圆盘 I 型渐进断裂数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(增刊 2): 3906 – 3914. (DAI Feng, WEI Ming-dong, XU Nu-wen. Numerical simulation of type I progressive fracture of Brazilian disk with herringbone groove[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(S2): 3906 – 3914. (in Chinese))

[11] 许 媛, 戴 峰, 徐奴文. 人字形切槽巴西圆盘岩石试样复合型断裂渐进过程数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2189 – 2197. (XU Yuan, DAI Feng, XU Nu-wen. Numerical simulation of mixed-mode fracture evolution of Brazilian disc rock specimen with herringbone groove[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2189 – 2197. (in Chinese))

[12] 李术才, 杨 磊, 李明田. 三维内置裂隙倾角对类岩石材料拉伸力学性能和断裂特征的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 281 – 289. (LI Shu-cai, YANG Lei, LI Ming-tian, et al. Effect of three-dimensional built-in fracture dip angle on tensile mechanical properties and fracture characteristics of rock-like materials[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 281 – 289. (in Chinese))

[13] 付金伟, 朱维申, 罗祥宇. 含三维内置断裂面新型材料断裂体破裂过程研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(9): 3257 – 3263. (FU Jin-wei, ZHU Wei-shen, LUO Xiang-yu. Study on fracture process of a new material fracture body with 3-D built-in fracture plane[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2014(9): 3257 – 3263. (in Chinese))

[14] 李世愚. 岩石断裂力学导论[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2010. (LI Shi-yu. Introduction to rock fracture mechanics[M]. Beijing: China University of Science and Technology Press, 2010. (in Chinese))

[15] 李廷春, 吕海波, 王 辉. 单轴压缩载荷作用下双裂隙扩展的 CT 扫描试验[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 9 – 14. (LI Ting-chun, LÜ Hai-bo, WANG Hui. CT scanning test of double crack propagation under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 9 – 14. (in Chinese))

[16] 王 萍. 基于核磁共振的脆硬性泥页岩水化损伤演化研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 687 – 693. (WANG Ping. Study on hydration damage evolution of brittle-hard shale based on NMR[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 687 – 693. (in Chinese))

[17] 陈厚群, 丁卫华, 蒲毅彬. 单轴压缩条件下混凝土细观破裂过程的 X 射线 CT 实时观测[J]. 水力学报, 2006, 37(9): 1044 – 1050. (CHEN Hou-qun, DING Wei-hua, PU Yi-bin. Real-time X-ray CT observation of mesoscopic fracture process of concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Water Conservancy, 2006, 37(9): 1044 – 1050. (in Chinese))

[18] 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 单轴荷载作用下盐岩声波与声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2107 – 2116. (LI Hao-ran, YANG Chun-he, LIU Yu-gang, et al. Experimental study on acoustic and acoustic emission characteristics of salt rock under uniaxial loading[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2107 – 2116. (in Chinese))

[19] 王海军, 张九丹, 任 然, 等. 基于电磁场-介质损伤的三维深埋裂纹 3D-ILC 实现[J]. 岩土工程学报, 待刊. (WANG Hai-jun, ZHANG Jiu-dan, REN Ran, et al. Embedded cracks in materials induced by 3D-ILC[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, in press. (in Chinese))

[20] 王海军, 郁舒阳, 任 然, 等. 基于 3D-ILC 含三维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. Based on the test of brittle solid fracture characteristics of 3D-ILC with 3-D internal crack orifice[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2200 – 2212. (in Chinese))

[21] ROESLER F C. Brittle fracture near equilibrium[J]. Proceedings of the Physical Society, 2002, 69(10): 981 – 992.

[22] KNAUSS W G. An observation of crack propagation in anti-plane shear[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1970, 6(2): 183 – 187.

[23] SOMMER E. Formation of fracture 'lances' in glass[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1969, 1(3): 539.

[24] 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. Digital photometric mechanics for structural analysis[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2012. (in Chinese))

[25] DYSKIN A V, JEWELL R J, JOER H, et al. Experiments on 3-D crack growth in uniaxial compression[J]. International Journal of Fracture, 1994, 65(4): R77 – R83.

[26] BANKS-SILLS LESLIE, WAWRZYNEK PAUL A, CARTER BRUCE, et al. Methods for calculating stress intensity factors in anisotropic materials: Part II Arbitrary geometry[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74(8): 1293 – 1307.

[27] 孙 欣, 朱哲明, 谢凌志, 等. 基于 SENDB 试样的砂岩复合脆性断裂行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2884 – 2894. (SUN Xin, ZHU Zhi-ming, XIE Ling-zhi, et al. Study on composite brittle fracture behavior of sandstone based on SENDB specimen[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2884 – 2894. (in Chinese))

[28] LI F Z, SHIH C F, NEEDLEMAN A. A comparison of methods for calculating energy release rates[J]. Engfractmech, 1985, 21(2): 405 – 421.