

含偏置裂纹试件单轴拉伸试验 数值模拟研究

盛丹¹, 张敏²

(1. 广西理工职业技术学院土木工程(建筑材料)学院, 广西 崇左 532200;
2. 江西科技师范大学建筑工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为研究不同岩桥长度及不同预制裂纹倾角下单轴拉伸三维表面裂纹试件裂纹扩展及相互作用规律, 利用Franc3d软件对不同裂纹倾角和不同岩桥长度进行数值模拟。结果表明, 单轴拉伸作用下, 三维表面裂纹试件尖端首先出现翼裂纹, 最终贯穿试件的表面, 内侧裂纹扩展速率小于外侧, 不同岩桥长度及不同预制表面裂纹倾角试件裂纹之前裂纹存在不同程度的吸引作用; 裂纹尖端内侧的扩展速率大于裂纹短轴尖端, 同时也大于裂纹尖端外侧; 岩桥长度越大、预制裂纹倾角越大, I型、II型应力强度因子越小, III型应力强度因子越大。

关键词: 三维表面裂纹; 单轴拉伸; 裂纹扩展; 数值模拟; 应力强度因子; Franc3d

Numerical Simulation on Uniaxial Tension Test of Specimen with Bias Cracks

SHENG Dan¹, ZHANG Min²

(1. Civil Engineering (Construction Material) College, Guangxi Institute of Technical, Chongzuo 532200, Guangxi, China;
2. Institute of Civil Engineering, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: In order to study the crack propagation and interaction law of three dimensional surface cracks with different rock bridge lengths and different prefabricated crack inclination angles in specimen, the uniaxial tension test is simulated by Franc3d software. The results show that, (a) the crack tip of prefabricated surface first appears wing crack under uniaxial tension and finally penetrates the surface of specimen, the inner crack propagation rate of prefabricated 3D surface crack is smaller than that of outside, and there are different degrees of interaction among the cracks in specimen with different rock bridge length and different prefabricate surface crack inclination angle; (b) the growth rate of the inside of crack tip is larger than that of the short axis tip of crack and the outside of crack tip; (c) the larger the length of rock bridge and the larger the prefabricated crack inclination, the smaller the model I and II stress intensity factor and the larger the model III stress intensity factor.

Key Words: 3D surface crack; uniaxial tension; crack propagation; numerical simulation; stress intensity factor; Franc3d

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2019)03-0125-06

0 引言

在水利、土木、岩土工程中, 节理裂隙普遍存在于材料结构中^[1-3], 这些节理裂隙极大制约了相应材料的力学行为。在复杂荷载作用下, 裂隙容易发生扩展, 相互贯通, 导致灾难性的后果。对工程中的岩体来说, 抗拉强度要远远小于抗压强度, 一般岩体的抗拉强度约为抗压强度的 $1/10^{[4]}$, 因而含缺陷岩体在拉应力作用下更容易发生破坏。岩体的抗拉强度是岩体的重要参数之一, 研究多裂纹试件在单轴

拉伸下的裂纹扩展规律对认识岩体特性十分重要。

针对拉伸应力条件下含裂纹(缺陷)构件裂纹扩展试验或数值模拟大多集中于对穿透型裂纹(二维)的研究, 对三维情况(表面裂纹, 内裂纹)的研究相对较少。汪微微^[5]对平行偏置裂纹相互作用及其合

收稿日期: 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479014)

作者简介: 盛丹(1982—), 男, 辽宁锦州人, 讲师, 研究方向为建筑施工技术。

并条件进行了理论性研究; Horri^[6] 推导了平行双裂纹在轴拉情况下的应力强度因子公式, 研究了平行双裂纹在拉伸荷载下的裂纹相互贯通机制; Dalbe、Fender^[7-8] 对双平行裂纹在不同竖直与水平间距下的裂纹相互吸引与排斥现象进行了试验研究。然而, 实际情况中三维裂纹相当普遍, 将三维简化为二维会丢失很多信息^[9-10]。黄凯珠^[11] 用含有预制半圆形三维表面裂纹的冷冻透明有机玻璃材料研究了裂纹的扩展机制, 发现表面裂纹与二维穿透型裂纹相比扩展规律差异较大; 李术才等^[12] 在对三维内裂纹试件单轴压缩试验中观察到了包裹状翼裂纹的形态; 李明田^[13] 对含三维表面裂纹的类岩石材料进行了直接拉伸试验, 发现裂纹在厚度方向扩展会发生偏转的规律。上述研究阐明了三维裂纹在荷载作用下的裂纹扩展较二维裂纹更加复杂, 也更加贴合实际情况。

本文利用 Franc3d 软件, 对轴拉情况下的含单条表面裂纹试件进行数值模拟研究, 并与试验结果进行对比, 验证数值模拟的合理性; 对不同预制裂纹角度及不同岩桥角, 2 条偏置三维表面裂纹在单轴拉伸情况下的裂纹扩展规律, 以及裂纹尖端应力强度因子进行了数值模拟分析, 可为研究类似含裂纹岩体的裂纹扩展特性提供参考。

1 计算理论

1.1 M 积分计算应力强度因子

M 积分可用如下形式表达^[14]

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

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

$$K_{II}^{(1)} = \frac{E}{2(1-v^2)} M^{(1,2b)} \quad (3)$$

$$K_{III}^{(1)} = \frac{E}{2(1-v^2)} M^{(1,2c)} \quad (4)$$

式中, K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分别为 I 型、II 型、III 型应力强度因子; E 为弹性模量; v 为泊松比; (1)、(2) 为 2 种独立的线弹性状态; a 、 b 、 c 分别为 M 积分的 I 型、II 型、III 型应力强度因子分量。利用 M 积分便可计算出 3 个应力强度因子。

1.2 最大能量释放率准则

Franc3d 采用最大能量释放率准则来计算裂纹的扩展方向。对于三维裂纹来说, 裂纹尖端的能量释放率可用如下形式表示

$$G(\theta) = \frac{4}{E} \left(\frac{1}{3 + \cos^2 \theta} \right)^2 \left(\frac{1 - \theta/\pi}{1 + \theta/\pi} \right)^{2n} \times [(1 + 3\cos^2 \theta) K_I^2 + 8\sin\theta\cos\theta K_{II} K_{III} + (9 - 5\cos^2 \theta) K_{III}^2] \quad (5)$$

式中, $G(\theta)$ 为能量释放率; θ 为裂纹尖端角度。

而裂纹则会沿着应变能释放率达到最大的方向扩展^[14], 即 $\frac{\partial G(\theta)}{\partial \theta} = 0$, $\frac{\partial G(\theta)}{\partial \theta} \leq 0$ 。由此可以得出裂纹尖端各点的扩展方向。

2 模拟计算

2.1 计算模型

计算模型及网格剖分见图 1。图中, A、B、C 为预制裂纹特征点, 分别位于半钱币形表面裂纹的长轴上端、短轴端与长轴下端。试件尺寸为标准立方体试件尺寸, 长 × 宽 × 高为 50 mm × 50 mm × 100 mm, 岩桥长度为 L , 裂纹倾角为 α , 插入三维内裂纹尺寸为半圆、直径 $2a = 20$ mm 的半钱币形裂纹, 材料的弹性模量为 $E = 17.92$ GPa, 泊松比 $v = 0.192$, 密度 $\rho = 2.3$ g/cm⁻³。

计算边界条件为: 模型底部施加固定 3 个方向的位移约束, 模型上部施加固定 x 与 z 方向的位移约束, 同时 y 方向施加应力边界。

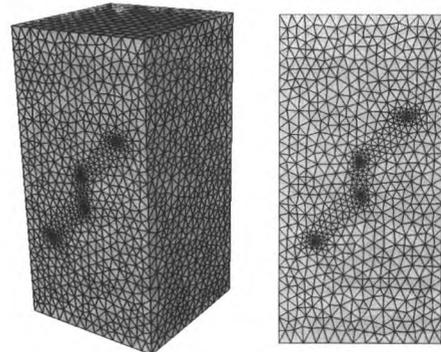
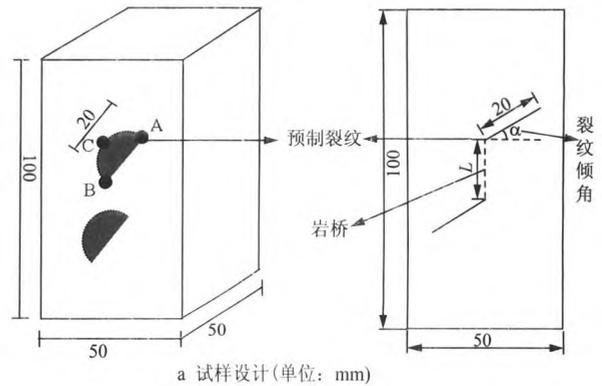


图 1 计算模型及网格剖分

2.2 计算方案

为对比验证本文数值模拟的合理性以及对不同岩桥长度及不同裂纹倾角下偏置表面裂纹扩展规律的研究, 本文采取以下 3 个方案进行数值模拟:

方案 1。预制单表面裂纹, 倾角 α 分别为 0° 与 45° , 与室内试验进行对比验证。

方案 2。预制双表面裂纹, 倾角 $\alpha = 45^\circ$, 岩桥长度 L 分别为 5、10、15 mm 和 20 mm。

方案 3。预制双表面裂纹, 岩桥长度 $L = 10$ mm, 倾角 α 分别为 0° 、 30° 、 45° 和 60° 。

3 室内试验验证

为验证本次数值模拟的合理性, 对比文献[14]含单条表面裂纹的标准立方体试件的单轴拉伸试验结果, 分别对水平 ($\alpha = 0^\circ$)、 $\alpha = 45^\circ$ 半钱币形表面裂纹进行数值模拟研究, 室内试验结果与本文数值模拟对比见图 2。从图 2 可知, 倾角为 0° 的半钱币形表面裂纹在单轴拉伸作用下裂纹面发生自相似扩展, 即裂纹沿着原裂纹面扩展, 最终裂纹面水平贯穿试件, 试件破坏, 数值模拟结果与试验高度吻合。 $\alpha = 45^\circ$ 时, 在预制裂纹周围存在一个“扭结区”, 即裂纹尖端出现翼裂纹, 最终试验的断口与本文的数值模拟也高度相似。因此, 利用本文数值模拟方法可精确模拟三维表面裂纹在拉伸荷载下的裂纹扩展过程。

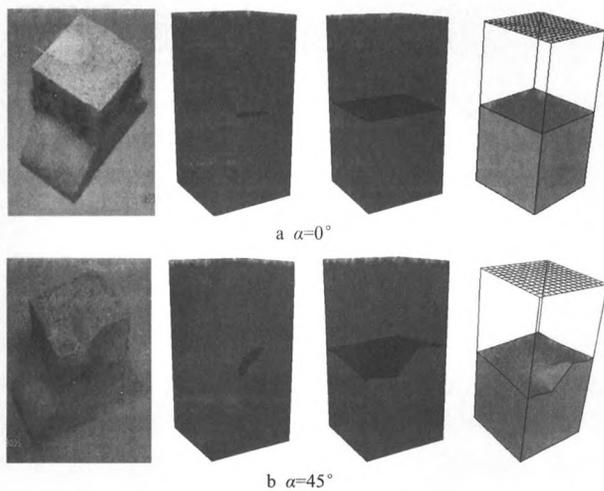


图 2 数值模拟与室内试验结果

4 数值模拟结果分析

4.1 裂纹扩展过程

(1) 方案 2 裂纹扩展过程见图 3。从图 3 可知, 表面裂纹在单轴拉伸作用下半圆形裂纹长轴上下尖端首先出现翼裂纹, 而短轴尖端翼裂纹则几乎沿着原裂纹面扩展, 与原预制裂纹呈现一定的角度; 随着裂纹的扩展, 翼裂纹与短轴尖端的裂纹逐渐偏向于垂直最大主拉应力方向扩展, 最终裂纹贯穿试件表面形成破坏。双裂纹内尖端的裂纹扩展速率要小于外部尖端。双裂纹在拉伸作用下翼裂纹尖端扩展

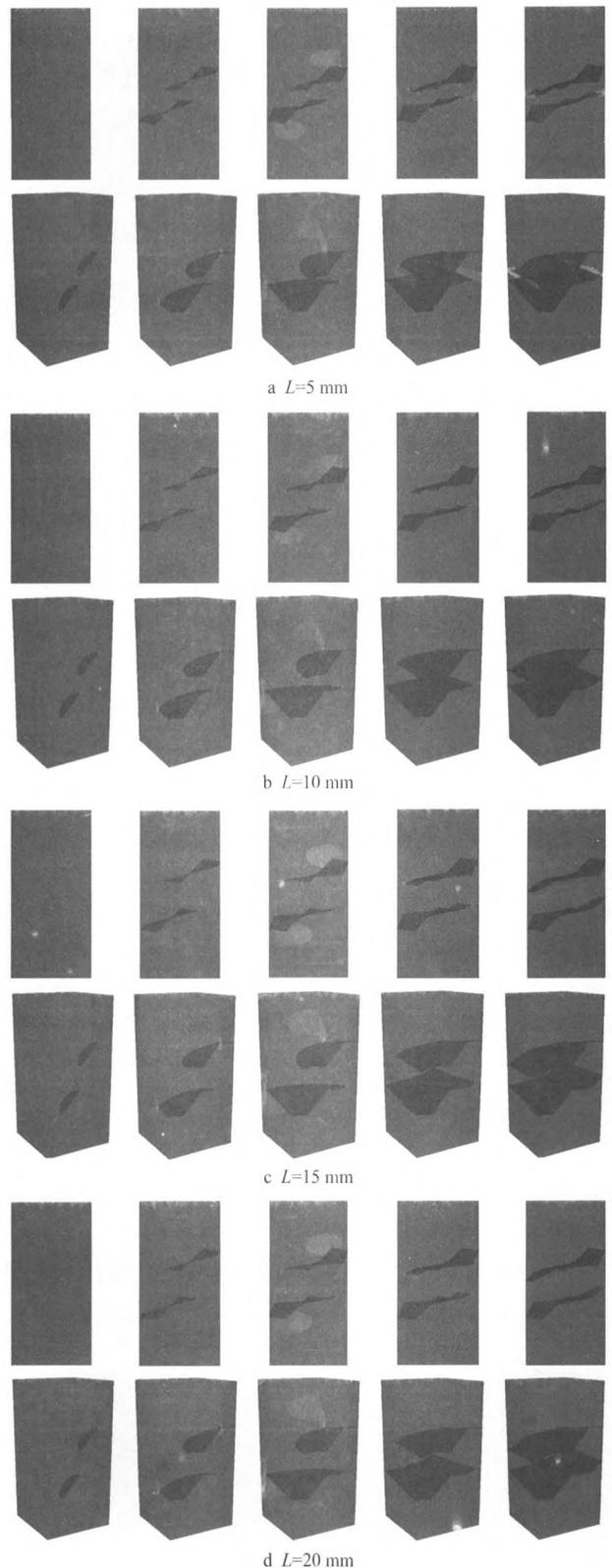


图 3 裂纹扩展

过程呈现相互吸引作用, 且预制裂纹的岩桥长度越短, 吸引作用越明显; 岩桥长度越长, “吸引”作用不明显。

(2) 方案 3 裂纹扩展过程见图 4。从图 4 可知, 裂纹之间的相互作用随着预制裂纹倾角的增大而减

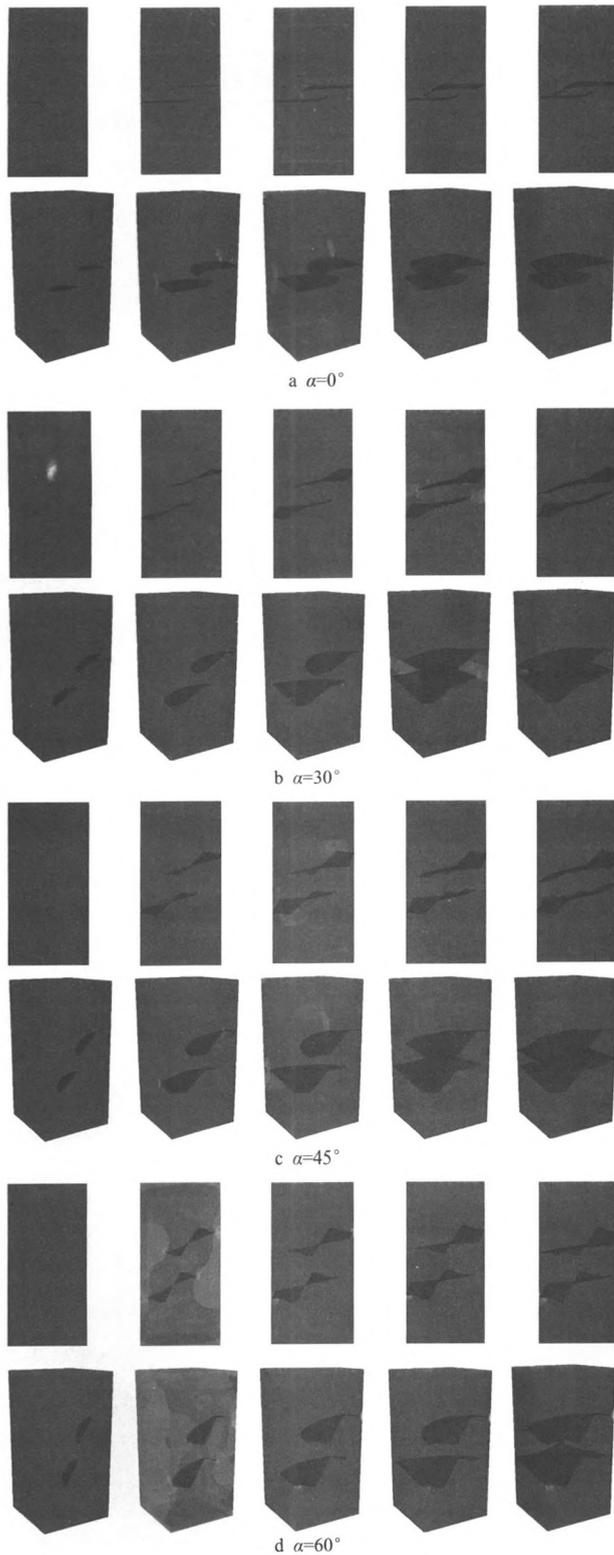


图4 裂纹扩展

小, $\alpha = 0^\circ$ 时, 预制裂纹一开始扩展就存在相互吸引作用; 而预制裂纹倾角不为 0° 时, 预制裂纹先经历翼裂纹扩展到一定长度后, 裂纹尖端才相互吸引, 且随着预制裂纹角度的增大, 吸引作用变得越来越不明显, 即翼裂纹扩展长度达到一定程度后才出现

吸引作用。 $\alpha = 60^\circ$ 时, 裂纹尖端几乎不出现相互吸引作用。

4.2 裂纹扩展长度分析

为定量观测预制裂纹在每一荷载步不同裂纹尖端位置的裂纹扩展长度, 根据对称性, 选 A、B、C 这 3 个点对每一荷载步的裂纹扩展长度进行记录, 方案 2、3 特征点裂纹扩展长度随着裂纹的计算步的规律见图 5。

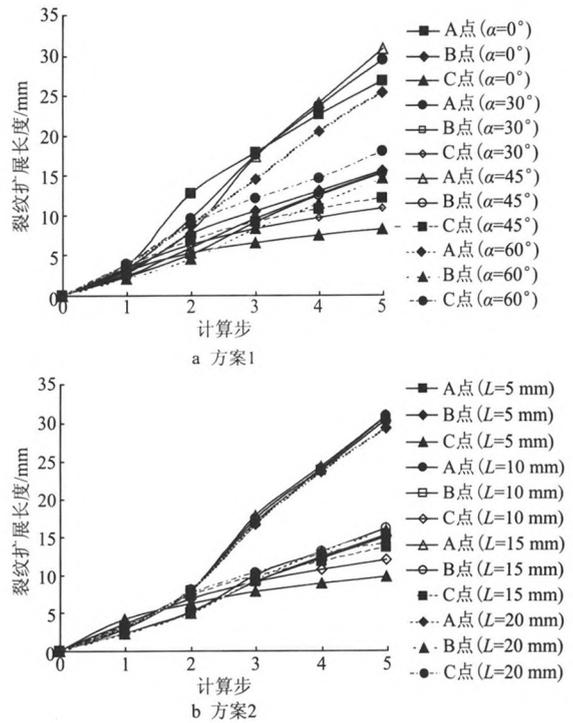


图5 特征点裂纹扩展长度

从图 5a 可知, 对同一裂纹不同监测点来说, 裂纹的外侧尖端 (A 点) 的扩展速率 (单位步长的扩展长度) 大于裂纹中部 (B 点), 也大于裂纹的内侧尖端 (C 点); 对不同预制裂纹角度来说, 不同监测点对不同角度的响应不同, 裂纹的外侧尖端 (A 点) 的裂纹扩展速率大小为: $45^\circ \geq 30^\circ \geq 0^\circ \geq 60^\circ$; 裂纹中部 (B 点) 裂纹扩展速率几乎一致; 裂纹的内侧尖端 (C 点) 裂纹扩展速率大小为: $60^\circ \geq 45^\circ \geq 30^\circ \geq 0^\circ$ 。从图 5b 可知, 对同一裂纹不同监测点与图 5a 存在同样的规律。对不同监测点来说, 监测点 A 在不同岩桥长度下裂纹的扩展速率几乎一致, 而监测点 B、C 裂纹的扩展速率差异较大。

4.3 应力强度因子分析

为直观描述裂纹尖端的应力强度因子随预制裂纹角度的变化规律, 定义图 1 中和 ACB 的路径相对长度单位为 1, 则根据 M 积分即可得出裂纹尖端 3 个应力强度因子随路径的变化规律。为便于分析, 对所有应力强度因子进行无量纲化, 即 K_I 、 K_{II} 、

K_{II} 同时除以 K_R , 其中 $K_R = \sigma_0 \sqrt{\pi a/Q}$, $Q = 1 + 1.464(a/b)^{1.65}$, 式中, σ_0 为模型边界上的拉伸应力; a 、 b 分别为裂纹的长、短半轴长度。由此即可得出归一化的应力强度因子随裂纹尖端路径的变化规律。方案 2、3 中 3 个归一化应力强度因子随裂纹尖端相对距离的变化规律见图 6、7。

从图 6 可知, 裂纹尖端(从 B 点到 A 点)对应距离为 0~1, 归一化 I 型应力强度因子呈现先减小后增大再减小的规律, 值得注意的是, 在裂纹尖端 B 点归一化 I 型应力强度因子达到最大, 且随着岩桥距离的减小, 归一化 I 型应力强度因子越大, 体现了双裂纹之间的吸引作用, 同时, 裂纹尖端内侧(B 点)的归一化 I 型应力强度因子要大于裂纹尖端的外侧(A 点), 在裂纹短半轴处(C 点)归一化 I 型应力强度因子达到最小, 体现了数值模拟中裂纹尖端内侧的裂纹扩展速率大于裂纹尖端外侧这一规律。归一化 II 型应力强度因子绝对值总体上随着距离的增加(从 B 点到 A 点)呈现先减小后增大的趋势, 在裂

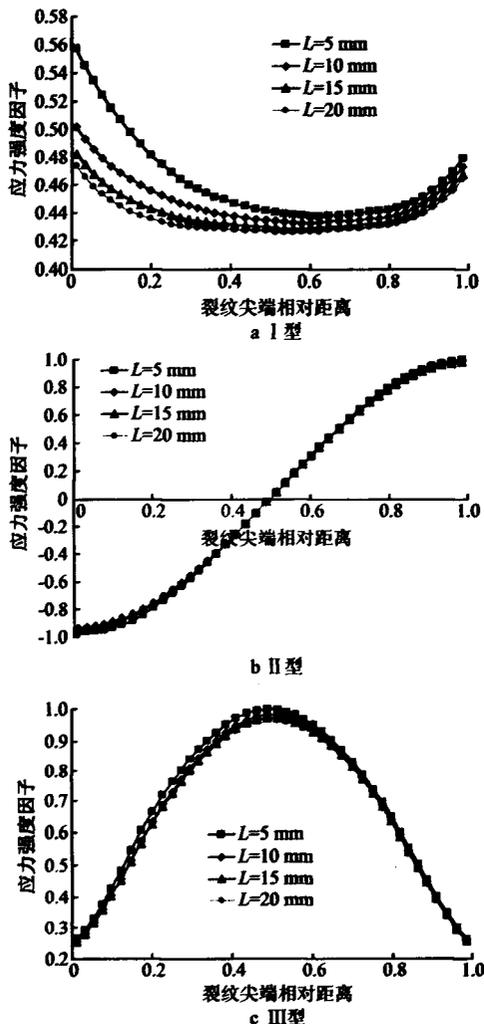


图 6 方案 2 归一化应力强度因子

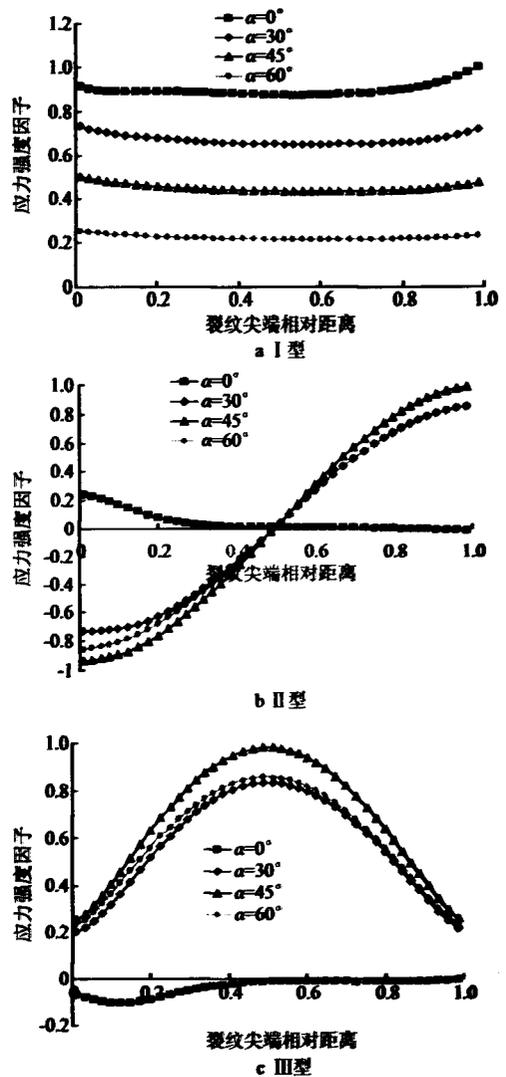


图 7 方案 3 归一化应力强度因子

纹的上下尖端达到最大, 而在短轴处(B 点)达到最小为 0, 不同预制裂纹岩桥长度下的归一化 II 型应力强度因子几乎一致。归一化 III 型应力强度因子随着距离的变化(从 B 点到 A 点)呈现先增大后减小的规律, 在裂纹上下尖端(A、B 点)达到最小, 而在裂纹的短半轴处(C 点)达到最大, 同时, 岩桥长度越大, 归一化 III 型应力强度因子也越大。

从图 7 可知, 归一化 I 型应力强度因子随着裂纹尖端距离的变化(从 B 点到点 A)呈现先减小后增大的规律, 在裂纹上下尖端(A、B 点)达到最大, 而在裂纹尖端的短半轴处(C 点)达到最小, 不同裂纹倾角下的归一化 I 型应力强度因子总体上差别较方案 2 大, 随着预制裂纹倾角的增大, 归一化 I 型应力强度因子总体上越来越小。归一化 II 型应力强度因子在预制裂纹倾角为 0°时在预制裂纹内侧部分不为 0, 而在预制裂纹其他部位为 0, 说明在预制裂纹内侧裂纹间存在着相互吸引作用, 对于倾角不为 0°的情况, 预制裂纹倾角越大, 归一化 II 型应力强

度因子的绝对值越大。归一化Ⅲ型应力强度因子在预制裂纹倾角为0°的情况下在预制裂纹尖端的内侧不为0，而在其他部位则为0，体现了预制裂纹之间的相互吸引作用，对于预制裂纹倾角不为0的情况，预制裂纹倾角越大，归一化Ⅲ型应力强度因子也越大。

5 结 语

本文利用 Franc3d 软件，对含不同预制裂纹角度(0°、30°、45°和 60°)以及不同岩桥长度(5、10、15 mm 和 20 mm)三维表面裂纹试件单轴拉伸下的裂纹扩展过程、扩展形态、应力强度因子进行了数值模拟分析，得出了以下结论：

(1) Franc3d 软件可对任意三维裂纹进行裂纹扩展、应力强度因子的计算模拟，计算结果与室内试验较为一致，体现了 Franc3d 软件在模拟三维裂纹的优越性，可在岩土工程中进行推广应用。

(2) 在单轴拉伸作用下，预制表面裂纹尖端首先出现翼裂纹，随后翼裂纹逐渐沿着垂直于最大主应力方向扩展，最终贯穿试件的表面；预制三维表面裂纹的内侧裂纹扩展速率小于外侧，不同岩桥长度及不同预制表面裂纹倾角试样裂纹前裂纹存在着不同程度的吸引作用。

(3) 对预制表面裂纹尖端的特征点裂纹扩展长度的监测表明，裂纹尖端内侧(B点)的扩展速率大于裂纹短轴尖端(C点)，也大于裂纹尖端外侧(A点)；不同岩桥长度及不同预制裂纹角度下的相同监测点，裂纹扩展速率无明显差异。

(4) 岩桥长度越大，预制裂纹倾角越大，Ⅰ型、Ⅱ型应力强度因子越小，Ⅲ型应力强度因子越大，不同岩桥长度裂纹之前的吸引作用体现在Ⅰ型应力强度因子上表现为在预制裂纹内侧尖端变大，不同预制裂纹倾角的裂纹间的相互吸引作用体现在Ⅱ型、Ⅲ型应力强度因子上也表现为在预制裂纹内侧尖端变大。

参考文献：

- [1] 秦洪远, 黄丹, 刘一鸣, 等. 基于改进型近场动力学方法的多裂纹扩展分析[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 31-38.
- [2] 应鹏, 朱哲明, 周磊, 等. 中低速冲击下Ⅰ型裂纹的动态断裂韧度研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S2): 338-345.
- [3] 杨, 袁安营. 不同岩性煤岩体声发射特征参数及破坏前兆信息研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(12): 86-89.
- [3] 崔臻, 侯靖, 吴旭敏, 等. 脆性岩体破裂扩展时间效应对引水隧洞长期稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 983-995.
- [4] 汪微微, 赵建平. 平行偏置裂纹相互作用及其合并条件[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2009, 31(4): 27-31.
- [5] HORII H, NEMAT-NASSER S. Elastic fields of interacting inhomogeneities[J]. International Journal of Solids and Structures, 1985, 21(7): 731-745.
- [6] DALBE M J, KOIVISTO J, VANEL L, et al. Repulsion and attraction between a pair of cracks in a plastic sheet[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(20): 21-23.
- [7] FENDER M L, LECHENAULT F, DANIELS K E. Universal shapes formed by two interacting cracks[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(12): 88-90.
- [8] 滕春凯, 尹祥础, 李世愚, 等. 非穿透裂纹平板试件三维破裂的实验研究[J]. 地球物理学报, 1987(4): 43-50.
- [9] 尹祥础, 李世愚, 李红, 等. 闭合裂纹面相互作用的实验研究[J]. 地球物理学报, 1988, 31(3): 306-314.
- [10] 黄凯珠, 黄明利, 焦明若, 等. 三维表面裂纹扩展特征的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(Z1): 2145-2148.
- [11] 李术才, 李廷春, 王刚, 等. 单轴压缩作用下内置裂隙扩展的CT扫描试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 484-492.
- [12] 李明田, 李术才, 杨磊, 等. 类岩石材料中表面裂纹扩展模式的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(1): 21-26.
- [13] 宋俐, 黄松梅. 用杂交有限元法计算三维裂纹的应力强度因子[J]. 机械强度, 1999, 11(4): 313-315.
- [14] 李明田, 李术才, 张敦福, 等. 类岩石材料表面裂纹复合型断裂准则探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 22(S1): 3326-3333.

(责任编辑 杨 健)

广告目录

水电水利规划设计总院	封二
中国水利水电第十一工程局科研设计院	前插 1
北京华科同安监控技术有限公司	前插 2、3
北京中水科海利工程技术有限公司	前插 4、5

基康仪器股份有限公司	前插 6
南京科明自动化设备有限公司	前插 7
北京中元瑞讯科技有限公司	前插 8
北京木联能工程科技有限公司	封底