

doi:10.3969/j.issn.1006-7175.2019.06.002

## 含内裂纹试件水 - 力耦合裂纹扩展研究

胡必成

(惠州市水电建筑工程有限公司, 广东 惠州 516001)

[摘要] 为研究三维内裂纹在水 - 力耦合下的裂纹扩展规律, 利用著名断裂力学计算软件 Franc3d 对双轴条件下含内裂纹标准立方体试件水力压裂进行数值模拟, 得到了裂纹的扩展过程以及裂纹尖端的应力强度因子的分布。计算结果表明: ①利用三维断裂有限元计算软件 Franc3d 对水 - 力耦合下的裂纹扩展过程进行了数值模拟, 可见 Franc3d 软件在模拟水 - 力耦合下的裂纹扩展问题上具有很大的优越性; ②裂纹扩展沿着预制裂纹尖端进行萌生, 沿着最大主应力方向进行扩展, 最终裂纹与最大主应力方向呈现一定的夹角; ③对裂纹尖端的应力强度因子进行了计算, 可以发现水 - 力耦合下的内裂纹扩展为 I - II - III 型复合。

[关键词] 三维内裂纹; 双轴; 水 - 力耦合; 裂纹扩展

[中图分类号] P554; TU452 [文献标识码] A [文章编号] 1006-7175(2019)06-0006-05

## Study on Crack Propagation of Water - Force Coupling in Specimen with Internal Crack

HU Bi - cheng

(Huizhou Hydropower Construction Co. Ltd., Huizhou 516001, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to study the crack propagation law of three - dimensional internal crack under water - force coupling, the hydraulic fracturing of standard cube specimen with internal crack under biaxial condition was numerically simulated by using the famous fracture mechanics calculation software Franc3d. The crack propagation process and the distribution of stress intensity factor at the crack tip are obtained. The results show that: ①the crack propagation process under the coupling of water and force is numerically simulated by using the three - dimensional fracture finite element software Franc3d. It can be seen that the Franc3d software has great superiority in simulating the crack propagation problem under hydro - mechanical coupling. ②crack propagation along the The crack tip is initiated and propagated along the direction of the maximum principal stress, and the crack and the maximum principal stress direction show a certain angle. ③the stress intensity factor at the crack tip is calculated. It can be found that the internal crack propagates to I - II - III type composite under the water - force coupling.

**Key words:** three - dimensional internal crack; biaxial; water - force coupling; crack propagation

[收稿日期] 2019 - 03 - 05

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51569004)

[作者简介] 胡必成(1983 - ), 男, 水利水电工程测量工程师, 主要研究方向为土木工程。

裂隙广泛存在于岩体中<sup>[1-2]</sup>, 作为岩石的一种固有属性, 为岩土工程界所关注。其不同应力状态下的扩展演化规律一直是一个共性问题, 同时也是一个难点问题<sup>[3-4]</sup>。而水力压裂技术在页岩气、地热、水利方面有着广泛的应用<sup>[5-6]</sup>, 对于水力压裂-应力耦合下的岩体破碎研究, 国内外学者展开了大量的试验研究。如 M. A. Kayupov 等<sup>[7]</sup>对含孔洞的立方体试件进行了注水破坏试验; 徐世烺<sup>[8]</sup>对楔入式紧凑拉伸试件在不同注水压下的裂纹扩展规律进行了研究。但是以上规律仅仅针对于二维平面裂纹研究, 然而在真实的岩体中三维裂隙普遍存在, 但是现有研究很少涉及三维裂纹。

本文基于 M 积分的方法, 利用最大拉应力准则对水-力耦合下的三维内裂纹试件在双轴应力作用下的裂纹扩展规律展开研究, 以期能为相应的三维裂纹水-力耦合分析研究提供一定的参考。

## 1 计算原理

$$J^{(1)} = \frac{1-\nu^2}{E}(K_I^{(1)})^2 + \frac{1-\nu^2}{E}(K_{II}^{(1)})^2 + \frac{1+\nu}{E}(K_{III}^{(1)})^2 \quad (7)$$

$$J^{(2)} = \frac{1-\nu^2}{E}(K_I^{(2)})^2 + \frac{1-\nu^2}{E}(K_{II}^{(2)})^2 + \frac{1+\nu}{E}(K_{III}^{(2)})^2 \quad (8)$$

$$M^{(1,2)} = 2\left[\frac{1-\nu^2}{E}K_I^{(1)}K_I^{(2)} + \frac{1-\nu^2}{E}K_{II}^{(1)}K_{II}^{(2)} + \frac{1+\nu}{E}K_{III}^{(1)}K_{III}^{(2)}\right] \quad (9)$$

其中:

$$K_I^{(1)} = \frac{E}{2(1-\nu^2)}M^{(1,2a)} \quad (10)$$

$$K_{II}^{(1)} = \frac{E}{2(1-\nu^2)}M^{(1,2b)} \quad (11)$$

$$K_{III}^{(1)} = \frac{E}{2(1-\nu^2)}M^{(1,2c)} \quad (12)$$

$$M^{(1,2)} = \int_A \left( \sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x} - \sigma_{ij}^{(1)} \varepsilon_{ij}^{(2)} \delta_{ij} - \sigma_{ij}^{(2)} \varepsilon_{ij}^{(1)} \delta_{ij} \right) \frac{\partial q}{\partial x} dA \quad (13)$$

所以, 利用 M 积分便可以计算出三维裂纹尖端的 3 个应力强度因子。

### 1.2 最大拉应力准则

最大拉应力准则假设裂纹沿着拉应力最大的方向进行扩展, 即根据 M 积分计算所得的 I 型应力强度因子最大方向进行扩展。

### 1.1 M 积分

对于 I 型、II 型、III 型的应力强度因子  $K_I$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$ , 用 J 积分可以表示为<sup>[15]</sup>:

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

式中:  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比。

同时, 应力应变的线弹性状态可以表示为:

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

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{(1)} + \varepsilon_{ij}^{(2)} \quad (3)$$

$$u_i = u_i^{(1)} + u_i^{(2)} \quad (4)$$

$$K_i = K_i^{(1)} + K_i^{(2)} \quad (5)$$

其中, 表达式中的上脚标“(1)”和“(2)”表示两种独立的线弹性状态, 将式(5)代入式(1)可得:

$$J = J^{(1)} + J^{(2)} + M^{(1,2)} \quad (6)$$

式中:  $J^{(1)}$ 、 $J^{(2)}$ 、 $M^{(1,2)}$  可以表达成为:

## 2 计算模型及参数

计算模型为含倾角为  $45^\circ$  的单裂隙试件, 长轴长 20 mm, 短轴长 10 mm, 试件为标准立方体试件, 长  $\times$  宽  $\times$  高 = 50 mm  $\times$  50 mm  $\times$  50 mm, 材料的弹性模量为  $E = 16$  GPa, 泊松比  $\mu = 0.21$ , 密度  $\rho = 2.3$  g/cm<sup>3</sup>。计算模型见图 1。

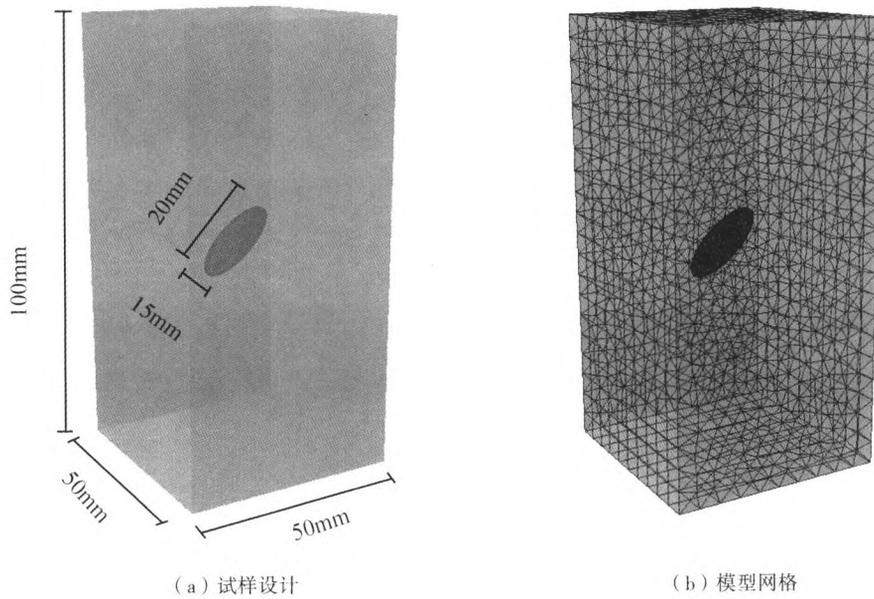


图1 计算模型

Fig. 1 Computational model

### 3 计算结果分析

#### 3.1 裂纹扩展过程

对裂纹内部施加10 MPa的内水压力,同时,

双轴应力  $\sigma_1 = 10 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_2 = 2 \text{ MPa}$ , 利用断裂力学专业分析软件 Franc3d 进行数值模拟, 得到裂纹扩展过程, 不同计算时间步下的裂纹扩展过程见图2。

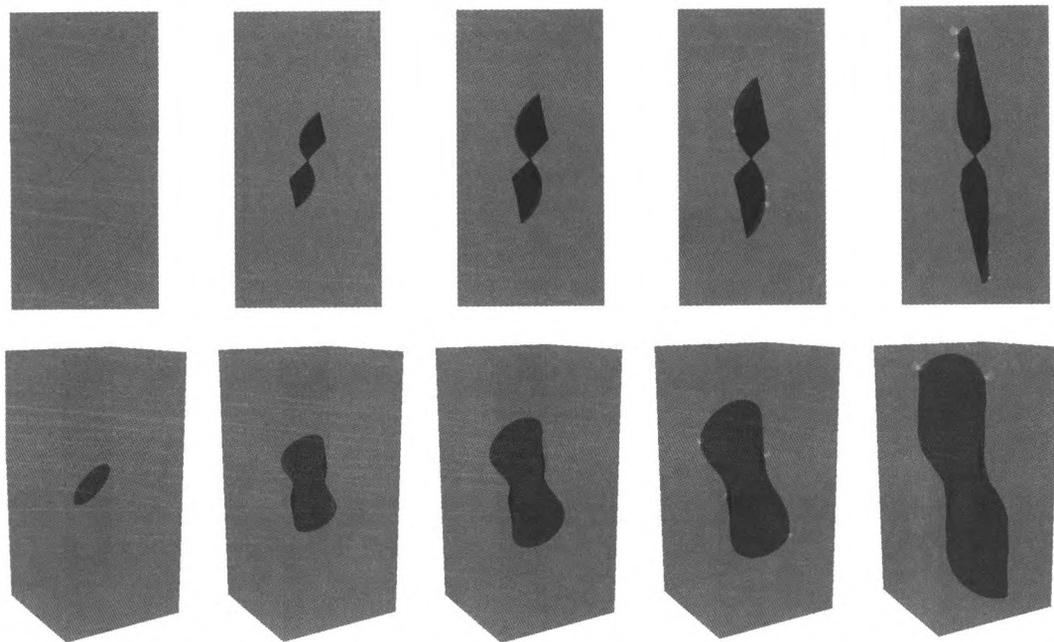


图2 裂纹扩展过程

Fig. 2 Crack propagation process

由图2可见,水-力耦合下裂纹从预制裂纹尖端萌生,接着呈现翼型裂纹扩展,翼裂纹最初沿着最大主应力方向扩展,即试件的上下表面,

等扩展到一定程度,裂纹贯穿试件的前后表面形成贯穿型裂纹,最终翼裂纹沿着与上下垂直方向呈一定角度方向扩展,裂纹贯穿试件顶部形成贯

穿,试件发生破坏,计算停止。

为验证数值模拟的合理性,对比文献<sup>[9]</sup>中的

实验结果,可见数值模拟与实验有着较好的一致性。对比图见图3。

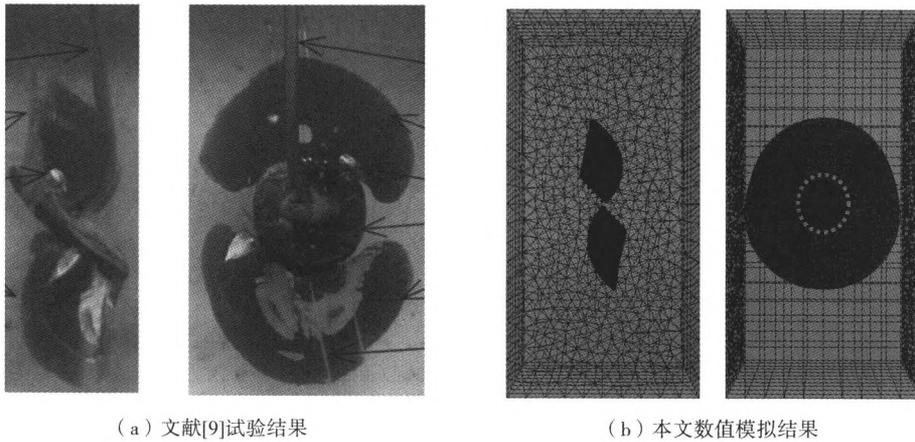


图3 数值模拟与试验结果对比

Fig. 3 Comparison between numerical simulation and experimental results

### 3.2 应力强度因子分析

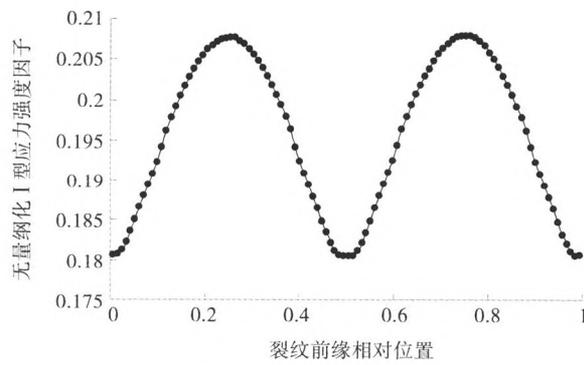
对该工况下的裂纹尖端应力强度因子进行分析,以裂纹长轴尖端处定义为起点,沿着裂纹一周的距离定义为单位1,则可以把裂纹尖端不同位置的应力强度因子表示成为距离的函数,见图4。其中定义无量纲化应力强度因子的表达式为:

$$K_R = \sigma_0 \sqrt{\pi a/Q} \tag{14}$$

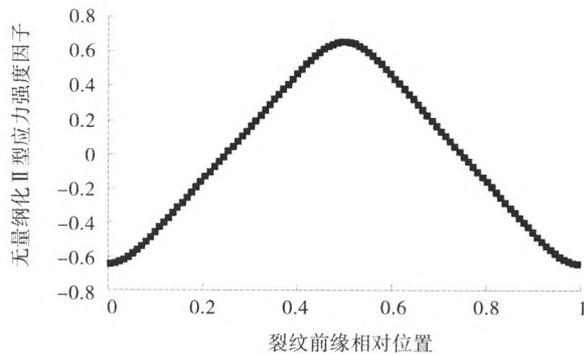
其中:

$$Q = 1 + 1.464(a/b)^{1.65} \tag{15}$$

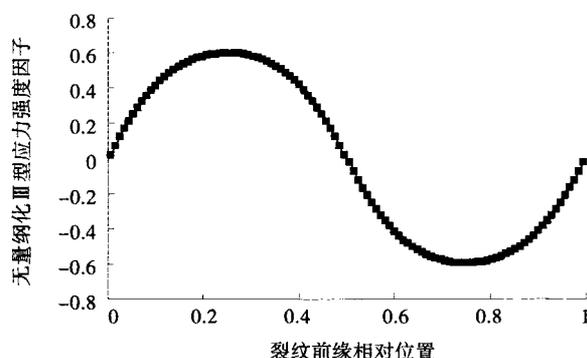
式中: $\sigma_0$  为模型边界上的拉伸应力; $a$  为裂纹的长半轴长度; $b$  为裂纹的短半轴长度。



(a) 无量纲化 I 型应力强度因子



(b) 无量纲化 II 型应力强度因子



(c) 无量纲化 III 型应力强度因子

图 4 无量纲化应力强度因子

Fig. 4 Dimensionless stress intensity factor

对于 I 型应力强度因子来说,在裂纹长轴处的 I 型应力强度因子达到最小,而在裂纹短轴处的应力强度因子达到最大;对于 II 型应力强度因子来说,预制裂纹在裂纹长轴处的应力强度因子的绝对值达到最大,正负代表错动的方向不同,对于短轴处的 II 型应力强度因子为 0;对于 III 型应力强度因子来说,预制裂纹长轴处的 III 型应力强度因子为 0,而短轴处的 III 型应力强度因子达到最大。由计算结果可见,三维内裂纹的裂纹扩展为 I - II - III 型复合。

#### 4 结 论

1) 利用三维断裂有限元计算软件 Franc3d 对水 - 力耦合下的裂纹扩展过程进行了数值模拟,可见 Franc3d 软件在模拟水 - 力耦合下的裂纹扩展问题上具有很大的优越性。

2) 裂纹扩展沿着预制裂纹尖端进行萌生,沿着最大主应力方向进行扩展,最终裂纹与最大主应力方向呈现一定的夹角。

3) 对裂纹尖端的应力强度因子进行了计算,可以发现水 - 力耦合下的内裂纹扩展为 I - II - III 型复合。

#### [参考文献]

[1] 冯彦军,康红普. 受压脆性岩石 I - II 型复合裂纹

水力压裂研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2):226 - 232.

[2] Griffith A A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1921, 221(2):163 - 198.

[3] Obert L. BRITTLE FRACTURE OF ROCK[C]// Fracture of Nonmetals and Composites, 1972.

[4] Hoek E, Bieniawski Z T. Brittle Fracture Propagation in Rock under Compression[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1984, 26(4):276 - 294.

[5] 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.

[6] 冯彦军,康红普. 水力压裂起裂与扩展分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(s2):3169 - 3179.

[7] Kayupov M A. Hydraulic Pressure Induced Crack Orientations in Strained Rock Specimens[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1998, 35(4):434 - 435.

[8] 徐世烺,王建敏. 水压作用下大坝混凝土裂缝扩展与双 K 断裂参数[J]. 土木工程学报, 2009(2):119 - 125.

[9] 付金伟,朱维申,张新中,等. 内水压下含中空裂隙新型材料的压裂试验及数值模拟研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(4):78 - 85.