

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0024-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.006

## 三维含表面裂隙岩体裂纹扩展数值模拟研究

魏玉寒<sup>1,2</sup>, 朱珍德<sup>1,2</sup>, 曹加兴<sup>3</sup>, 田源<sup>1,2</sup>, 邰俊<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏南京 210098; 3. 中设设计集团股份有限公司, 江苏南京 210005)

**摘要:** 利用ABAQUS软件的扩展有限元法对不同倾角的半椭圆形表面裂纹岩体进行数值模拟研究, 结果表明: 随着裂隙倾角的增大裂纹峰值强度也逐渐增大, 并且发现裂隙的倾角对于表面裂纹影响比较大, I型应力强度因子在裂纹扩展中起到重要的作用。

**关键词:** 岩石力学; 三维表面裂纹; ABAQUS; 扩展有限单元法; 应力强度因子

**中图分类号:** TU452

**文献标志码:** A

## Three-dimensional numerical simulation of surface crack propagation of rock under uniaxial compression

WEI Yuhan<sup>1,2</sup>, ZHU Zhende<sup>1,2</sup>, CAO Jiaying<sup>3</sup>, TIAN Yuan<sup>1,2</sup>, TAI Jun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 3. China Design Group Limited Liability Company, Nanjing, 210005)

**Abstract:** In order to discuss and investigate the influence of the angle of inclination on the crack initiation, propagation and damage, the extended finite element method in the ABAQUS platform is used to simulate the semi-circular surface cracked rock mass with different angles. The results show that with the increase of fracture inclination, the peak strength of crack increases. The angles of cracks have magnificent impact on the surface cracks. Moreover, the I type stress intensify factor plays an important role in the process of crack propagation.

**Key words:** rock mechanics; three dimensional surface crack; ABAQUS; extended finite element method; stress intensify factor

由于长期的地质构造运动且处于特定的地应力场中, 岩石成为一种含有节理、孔洞、裂纹等初始缺陷的复杂工程介质, 这些缺陷在空间上来说形似三维表面裂纹, 他们的存在极大地影响着岩体本身的力学性质, 同时强烈地制约着岩体的力学行为。因此含裂隙岩体的扩展破坏过程及模式一直是岩体力学研究中非常重要的一个方面, 然而目前大多数的研究都集中在贯穿裂隙即二维裂隙, 对于三维表面裂隙以及内置裂隙涉及较少。但是裂纹的形成扩展乃至破坏的过程都是在三维空间中发生完成的, 所以很多三维问题是无法简化为二维问题的。A.V.Dyskin等<sup>[1-3]</sup>发现三维裂纹扩展机制与二维裂

纹扩展机制有着本质的不同, 将简化二维试验及模拟结果应用于三维实际问题中有着较大的偏差。同时黄凯珠等<sup>[4-6]</sup>研究了表面裂纹深度与试样厚度对三维表面裂纹的扩展规律影响。Sukumar等<sup>[7]</sup>最早采用扩展有限元法计算三维裂纹体的应力强度因子。T.X.Bai等<sup>[8]</sup>采用有限元软件FRANC对于裂隙岩体中裂纹扩展的几个影响因素包括弹性模量、预制裂纹深度等进行了数值研究。Areias等<sup>[9]</sup>采用扩展有限单元法模拟三维裂纹的起裂和扩展过程。由于岩石材料的特殊性, 很多学者没办法运用简单试验的方法观测到岩石内部裂纹扩展的过程, 同时岩石的受力情况复杂, 从断裂力学的角度上来说, 其实裂

收稿日期: 2017-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379065, 51579081); 国家“973”计划(2011CB013504)

作者简介: 魏玉寒(1992-), 女, 江西新余人, 硕士, 从事岩石力学与地下工程方向的数值研究。

纹常常是处于 I、II、III 三型断裂形式共存的状态。本文选用 ABAQUS 平台的扩展有限元方法, 来进行三维含表面裂隙的岩体在单轴受压的作用下在不同倾角的情况下裂纹扩展的规律数值研究。

## 1 扩展有限元法及数值模拟模型

### 1.1 扩展有限单元法以及 ABAQUS 软件平台

为了解决有限单元法处理裂纹孔洞等非连续界面问题时存在的弊端, 同时作为有限单元法的拓展与延伸, 1999 年首次由美国西北大学的 Belytschko<sup>[10]</sup> 课题组提出, 其核心思想是用扩充的带有不连续性质的形函数基来代表计算域内的间断, 因此在计算过程中, 不连续场的描述完全独立于网格边界, 这使得其在断裂问题上具有得天独厚的优势<sup>[11]</sup>。扩展有限元方法优于普通有限单元法在于他不仅继承了普通方法的优点同时解决了网格重划分的难题, 对于裂纹的扩展过程只需要在常规的网格中划分, 而不需要另外在裂纹尖端单独设置精密度高且繁复的网格, 就可以到达相同甚至更好的效果。

在 ABAQUS 软件平台上, 为研究者们提供了两种利用扩展有限元来模拟裂纹以及裂纹扩展路径的方法, 第一种是粘性片段方法即基于牵引-分离的粘性行为, 可以用于模拟材料中任意路径相关的裂纹初始化以及扩展过程, 并且当网格足够密的时候是不会依赖于网格划分的; 第二种则是基于线弹性断裂力学准则的方法, 此裂纹扩展不受限于单元的边界。这两种方法都运用虚拟节点来描述当满足断裂准则的前提下断裂单元的不连续性, 并且并不需要考虑裂纹尖端附近的渐进奇异, 而只是需要关注断裂单元的位移跳跃问题。用此平台进行三维裂纹的模拟, 需要定义裂纹初始位置以及裂纹扩展范围, 并采用最大主应力失效准则作为损伤起始判据, 损伤演化选取基于能量的、线性软化的、混合模式的指数损伤演化规律, 模型的相关参数见表 1。

### 1.2 数值模型的建立

含预制表面裂隙岩体的数值模拟力学模型见图 1。

该模型整体尺寸为  $W \times L \times T = 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 模型底端固定, 上表面施加均匀压缩应力, 且裂隙位于模型的中心并垂直于岩体表面。其中  $\sigma_0$  为压缩应力,  $c$  为裂隙长半轴长,  $a$  为裂隙短半轴长,  $\alpha$  为裂纹面与水平面的夹角, 其取值分别

表 1 模型所用类岩石材料岩体力学参数  
Tab.1 Rock mechanics parameters of rock-like materials used in the model

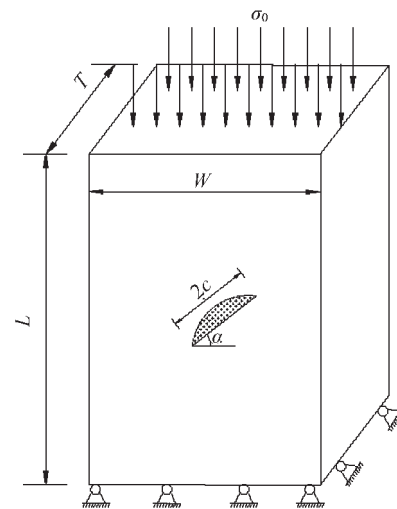
材料	密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弹性模量 /GPa	内摩擦角 /°	抗压强度 /MPa
类岩石材料	1.8	5.8	46.8	116.5

为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ ,  $\theta$  表示裂纹前缘的位置即从裂纹长轴的端点到裂纹前缘任意点处的转角大小(即定位角)。该软件在应用三维裂纹时, 应当在定义分析步中关闭几何非线性开关, 同时指定计算裂隙的类型为扩展有限元, 裂纹扩展区域为整个模型, 由于该方法不能计算动态状态下的应力强度因子, 所以应该将允许裂纹生长的选项关闭。

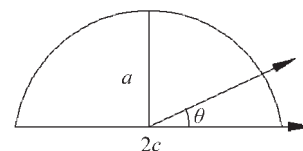
## 2 三维表面裂隙扩展数值模拟过程

### 2.1 表面裂纹扩展过程

表面裂纹扩展过程是一个纯三维的问题, 不同于贯穿裂纹, 它是在岩体的内部沿着特定的路径进行扩展破坏的。通过扩展有限单元法进行三维含表面裂隙岩体的受压条件下裂纹动态扩展过程(图 2), 并与课题组的类岩石材料表面裂隙受压试验进行对比, 结果吻合度较高(图 3)。裂隙岩体首先在



(a) 模拟力学模型包含裂纹位置



(b) 裂纹形状及尺寸

图 1 三维含表面裂隙岩体力学模型及裂纹尺寸  
Fig.1 Three dimensional mechanical model of surface crack in rock mass and size of the crack

裂纹表面出现微裂纹,随着压应力的持续进行,裂纹的下表面边缘首先出现裂纹扩展,而后裂纹的上表面的边缘进行扩展,同时观察可知在预制裂纹的上下表面边缘的裂纹扩展呈现对称的趋势。

## 2.2 表面裂隙倾角对岩体力学特性的影响

如图4数值模拟分析能够观察出不同倾角下表面裂纹的峰值强度变化规律,岩体的峰值强度随着表面裂纹的倾角增大而增大,同时表面裂纹的倾角越大,岩体起裂越困难,更难发生破坏。即岩体处于I型断裂状态,此时为水平裂隙也称为张开型裂纹,裂纹面垂直于压应力的方向,随着压应力的增长,裂纹前端产生翼裂纹,而翼裂纹的扩展方向就是沿着原裂纹面;而当,斜裂纹处于复杂应力状态,裂纹的扩展路径不同,扩展的过程也相对于复杂,即适用复合型裂纹扩展准则。

## 2.3 半椭圆形表面裂纹的应力强度因子 SIF 分析

利用ABAQUS软件中的扩展有限单元法计算半椭圆形表面裂纹前缘的应力强度因子SIF,应力强度因子是分析裂纹的初始扩展以及演化必须的力学指标,同时作为判断含裂隙岩体的断裂和估算裂

纹扩展速率以及裂隙剩余疲劳破坏的重要参数。XFEM计算得到的三维状态不同倾角下含表面裂隙岩体的应力强度因子 $K_I$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$ 随定位角 $\theta$ 的变化规律见图5,在该图中,为了便于分析比对,将所有的应力强度因子进行统一的无量纲化,即将所有应力强度因子值除以同一值 $K_R$ <sup>[12]</sup>,转化为形状系数 $Y_I$ 、 $Y_{II}$ 、 $Y_{III}$ <sup>[13]</sup>,该参数考虑了裂纹边界或者其他裂纹离该裂纹远近程度所带来的影响,裂纹扩展方向以及变形形状等其他因素的效应,其中各参数的表达式为 $Y_i=K_i/K_R$ , $K_R=\sigma_0\sqrt{\pi a/Q}$ , $Q=1+1.464(a/b)^{1.65}$ 。

由图5中形状系数 $Y_I$ 、 $Y_{II}$ 、 $Y_{III}$ 观察可得,表面裂隙倾角的不同使得形状系数有较大的差异,即裂隙倾角对于应力强度因子有着重要的影响。首先对于裂纹前缘的I型应力强度因子,其变化规律如图5(a)观察容易得到,在同一倾角下裂纹前缘应力强度因子关于裂纹中端 $\theta=90^\circ$ 呈轴对称分布,最小值基本出现在裂纹的两个端点。同时,随着裂纹倾角 $\alpha$ 的增大,I型应力强度因子整体呈减小的趋势,并在角度为 $75^\circ$ 时达到最小值。该现象可从力学角度进行分析,此时裂纹几近与轴向压应力平行,所以受到的压缩载荷分量为最小。其次对于裂纹前缘的II型应力强度因子,其变化规律如图5(b)可以

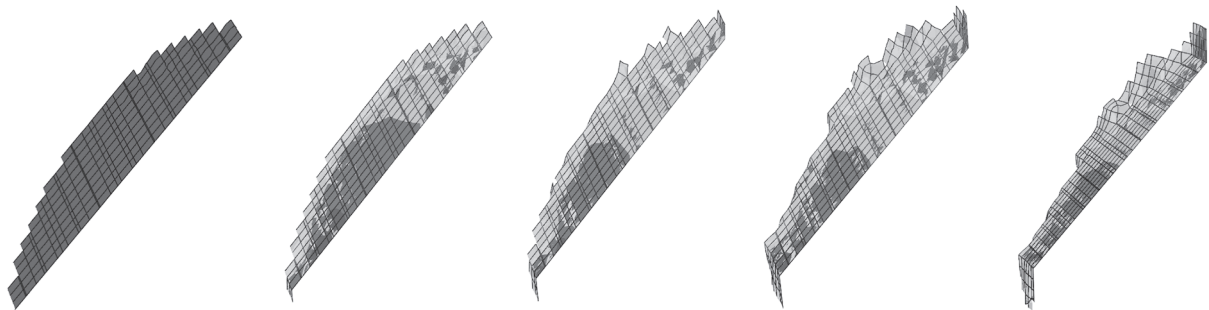
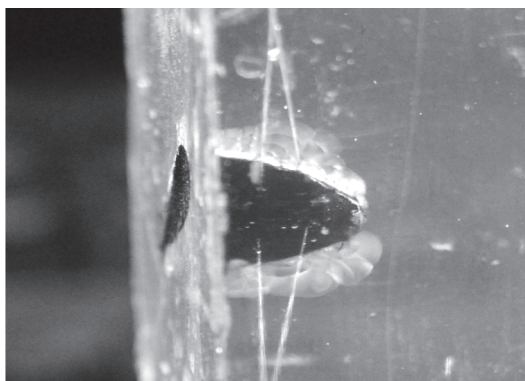
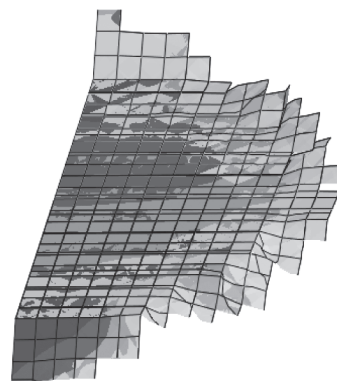


图2 三维含表面裂隙岩体在受压条件下裂纹动态扩展过程

Fig.2 The dynamic procession surface crack propagation of rock under uniaxial compression



(a) 试验图



(b) 模拟图

图3 试验与数值模拟对比图

Fig.3 Comparison chart between experiment and numerical simulation

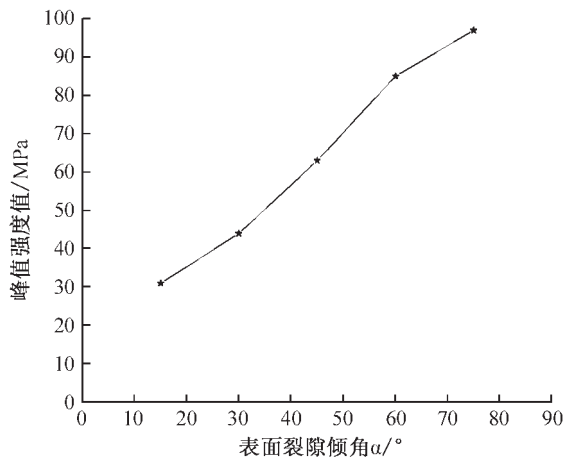


图 4 不同倾角下表面裂纹的峰值强度变化曲线

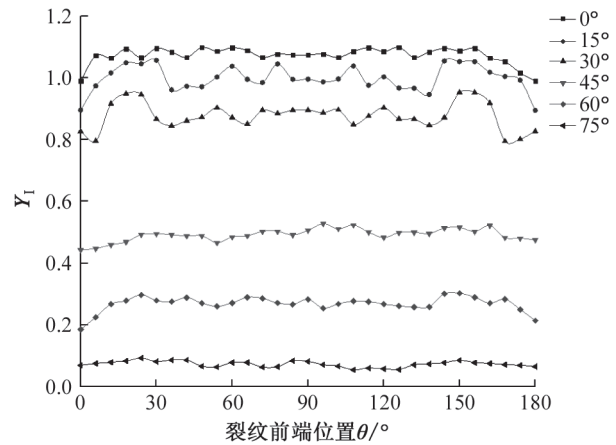
Fig.4 Curve of peak strength of surface crack in different inclination angles

看出在同一倾角下 II 型应力强度因子关于裂纹中端  $\theta=90^\circ$  呈中心对称分布, 最小值基本出现在裂纹的末端点, 最大值出现在裂纹的初始点, 以  $\theta=90^\circ$  为分界, 前端值为正, 后端值为负, 从力学角度考虑该受力条件下滑移裂纹前端是受到向外的剪切应力的作用, 而后端则相反, 与此同时  $45^\circ$  倾角下应力强度因子的变化程度最大且对应的应力强度因子的绝对值也最大, 而  $15^\circ$  和  $75^\circ$  倾角及  $30^\circ$  和  $60^\circ$  倾角下的表面裂纹的应力强度因子分布以及趋势基本相同。最后是裂纹前缘的 III 型应力强度因子, 其变化规律如图 5(c), 如同 I 型应力强度因子一样其关于裂纹中端  $\theta=90^\circ$  呈轴对称分布, 且最小值在两端点取得, 最大值在对称轴上, 同时  $45^\circ$  倾角下应力强度因子的值最大, 而  $15^\circ$  和  $75^\circ$  倾角及  $30^\circ$  和  $60^\circ$  倾角下的表面裂纹的应力强度因子分布以及趋势基本相同, 大小仅次于  $45^\circ$  倾角。并且由分析可知, 当  $\alpha=0^\circ$  时, 裂纹与受力方向垂直, 及为水平的表面裂隙, 这种情况为纯 I 型裂纹, 根据断裂准则, 不会产生分裂纹而是沿着原来的裂纹面进行扩展破坏, 而当  $\alpha=15 \sim 75^\circ$  时, 则是复合型的裂纹模式, 需采用复合断裂准则。

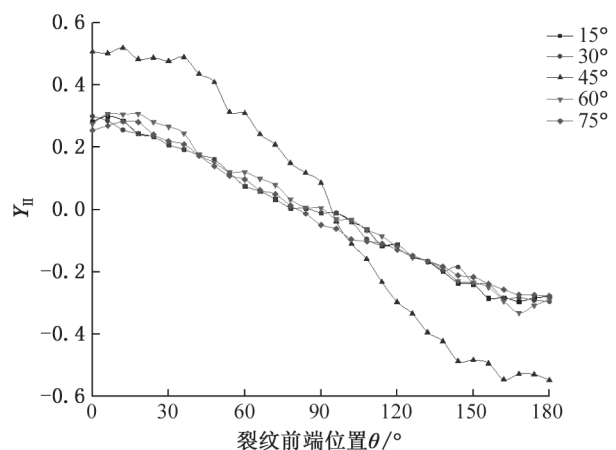
### 3 结论

1) 表面裂纹的倾角大小对于岩体的力学性能以及裂隙的扩展过程有着重要的影响, 同时随着裂纹倾角的增大, 岩体的峰值强度也逐渐增大, 并且斜裂纹是同时处于 I、II、III 型断裂应力状态。

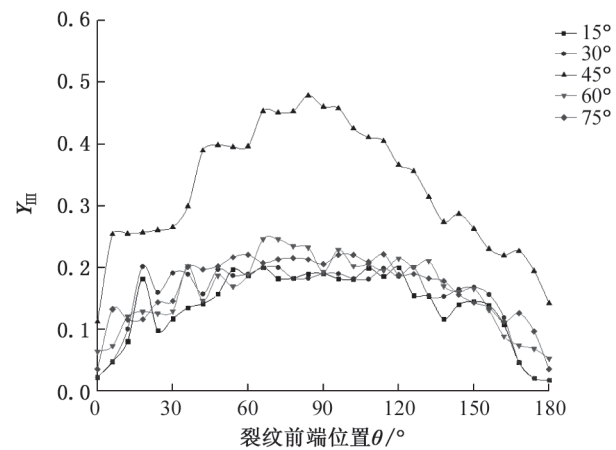
2) 半椭圆形表面裂纹的倾角大小对于其应力强度因子有着重要的影响, 通过对于形状系数的整理分析



(a) 形状系数在不同倾角下随的变化曲线



(b) 形状系数在不同倾角下随的变化曲线



(c) 形状系数在不同倾角下随的变化曲线

图 5 表面裂纹前缘形状系数  $Y_I$ 、 $Y_{II}$ 、 $Y_{III}$  在不同倾角  $\alpha$  下随  $\theta$  的变化曲线

Fig.5 Curve betweenand shape factor $Y_I$ 、 $Y_{II}$ 、 $Y_{III}$  of surface crack tip in different inclination angles

可知, I 型应力强度因子随着裂纹倾角的减小而增大, 同时关于方位角  $\theta=90^\circ$  呈轴对称分布, 而 II、III 型应力强度因子则是在倾角为  $45^\circ$  时达到最大, 同时都关于方位角  $\theta=90^\circ$  呈中心对称分布。(下转第 31 页)

度后, 植被对土壤抗侵蚀作用的影响开始下降。

2) 对于不同植被覆盖度的红壤坡面, 其临界坡度也发生了变化。试验证明了临界坡度是土壤内在性质、植被特性、降雨等因素综合作用的结果。

3) 植被对土壤抗侵蚀能力有极大的增强作用。

#### 参考文献:

- [1] 赵其国. 我国红壤的退化问题 [J]. 土壤, 1995(6): 281-285.  
 [2] 焦菊英, 王万忠. 人工草地在黄土高原水土保持中的减水减沙效益与有效盖度 [J]. 草地学报, 2001, 9(3): 176-182.  
 [3] 罗伟祥, 白立强. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量 [J]. 水土保持学报, 1990(1): 30-35.  
 [4] 张光辉, 梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述 [J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 104-110.  
 [5] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度 [J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 68-73.  
 [6] ZHANG Y, LIU B, ZHANG Q, et al. Effect of different vegetation types on soil erosion by water[J]. 植物学报: 英文版, 2003, 45(10): 1204-1209.

- [7] 孙佳美, 余新晓, 樊登星, 等. 模拟降雨下植被盖度对坡面流水动力学特性的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2574-2580.  
 [8] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究 [J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 401-407.  
 [9] RENNER F G. Conditions influencing erosion on the Boise River watershed[J]. Technical Bulletins, 1936.  
 [10] 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验 [J]. 中国水土保持, 1985(2): 2.  
 [11] HORTON R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Journal of the Japanese Forestry Society, 1945, 56(3): 275-370.  
 [12] 曹文洪. 土壤侵蚀的坡度界限研究 [J]. 水土保持通报, 1993(4): 1-5.  
 [13] 许炳心, 孙季. 无定河水土保持措施减沙效益的临界现象及其意义 [J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 610-615.  
 [14] 吴普特, 周佩华. 地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究 [J]. 水土保持通报, 1993(3): 1-5.

(责任编辑 王利君)

(上接第27页)

#### 参考文献:

- [1] DYSKIN A V, GERMANOVICH L N, USTINOV K B. A 3-D model of wing crack growth and interaction[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 63(1): 81-110.  
 [2] GERMANOVICH L N, SALGANIK R L, DYSKIN A V, et al. Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression[J]. Pure & Applied Geophysics, 1994, 143(1-3): 117-149.  
 [3] DYSKIN A V, SAHOURYEH E, JEWELL R J, et al. Influence of shape and locations of initial 3-D cracks on their growth in uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(15): 2115-2136.  
 [4] 黄明利, 黄凯珠. 三维表面裂纹相互作用扩展贯通机制试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007(9): 1794-1799.  
 [5] 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(Z1): 2145-2148.  
 [6] WONG R H C, LAW C M, CHAU K T, et al. Crack propagation from 3-D surface fractures in PMMA and marble specimens under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(3): 37-42.

- [7] SUKUMAR N, MOES N, MORAN B, et al. Extended finite element method for three dimensional crack modelling[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 48(11): 1549-1570.  
 [8] BAI T, POLLARD D D, GAO H. Spacing of edge fractures in layered materials[J]. International Journal of Fracture, 2000, 103(4): 373-395.  
 [9] AREIAS P M A, BELYTSCHKO T. Analysis of three-dimensional crack initiation and propagation using the extended finite element method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 63(5): 760-788.  
 [10] BELYTSCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45(5): 601-620.  
 [11] 庄茁. 扩展有限单元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.  
 [12] AYHAN A O. Mixed mode stress intensity factors for deflected and inclined surface cracks in finite-thickness plates[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(7-8): 1059-1079.  
 [13] 中国航空研究院. 应力强度因子手册 [M]. 增订版. 北京: 科学出版社, 1993.

(责任编辑 王利君)