

# 岩体中孔与裂纹贯通破坏模式图形判别法

王述红<sup>1</sup>, 张雨浓<sup>1</sup>, 黄立夫<sup>1</sup>, 肖福坤<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 黑龙江科技大学 黑龙江省煤矿深部开采地压控制与瓦斯治理重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150027)

**摘 要:** 为研究工程岩体贯通破坏过程岩体裂纹起裂贯通机制, 预制了以岩桥倾角为变量的红砂岩试块用单轴压缩的加载方式进行实验, 并且通过数值模拟进行验证. 首先总结了含单裂纹与单孔红砂岩岩石试块破坏的4种断裂模式, 然后首次定义了塑性核心区半径、塑性延展区长度, 并用它们表征单孔半径(或裂纹长度、倾角)与塑性破坏区域的大小, 发现塑性破坏区的贯通与试块的贯通断裂具有很好的对应关系, 最后提出通过作图判断岩石裂纹贯通断裂的判别方法. 模拟结果验证了所提破坏模式判别方法的正确性, 与类似物理实验结果具有一致性.

**关 键 词:** 岩石力学; 单轴压缩; 贯通; 断裂模式; 判别方法

**中图分类号:** TU 45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)05-0705-05

## Graphic Discrimination Method of Coalescence and Failure Mode in Rock Mass with Hole and Crack

WANG Shu-hong<sup>1</sup>, ZHANG Yu-nong<sup>1</sup>, HUANG Li-fu<sup>1</sup>, XIAO Fu-kun<sup>2</sup>

(1. School of Resource & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Heilongjiang Ground Pressure and Gas Control in Deep Mining Key Laboratory, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150027, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, professor, E-mail: wangshuhong@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** In order to study the crack initiation and coalescence of the failure process of rock mass, the uniaxial compression of red sandstone samples with various rock bridge angles was numerically performed. Four failure patterns of red sandstone samples with single crack and hole is firstly summarized, then the radius of the plastic core and plastic extension area are defined, the single span radius (or the crack length, angle) and the size of the plastic damage area are characterized. It is found that the coalescence of plastic failure zone is well consistent with the coalescence and fracture of samples. Finally, a graphic discrimination method is proposed to discriminate the fracture mode of rock mass. The experimental results verify the correctness of the method of the failure mode, which is consistent with the results of similar physical tests.

**Key words:** rock mechanics; uniaxial compression; coalescence; fracture mode; discrimination method

针对含结构面岩体的破坏特性, 国内外学者进行了大量的理论研究, 得出了多种判别方法. 常用的有 Erdogan 等提出的最大周向应力准则<sup>[1]</sup>, Palaniswamy 等提出的最大能量释放率准则<sup>[2]</sup>和 Sih 提出最小应变能准则<sup>[3]</sup>. 除此之外, 还有赵均

海等提出的基于双剪统一强度理论裂纹断裂准则<sup>[4]</sup>, 许斌等提出的双参数复合应力准则<sup>[5]</sup>, 但是这些理论多是以裂纹张拉破坏为前提而建立的, 与工程岩体多数情况下处于多向受压的力学环境中的现况相违背. 因此, 许多学者研究了岩体

收稿日期: 2016-10-25

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51474050, U1602232); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N17010829); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540304, 20170520341); 硅酸盐建筑材料国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金资助项目(SYSJJ2017-08); 中建股份科技研发课题(CSCEC-2016-Z-20-8).

**作者简介:** 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授, 博士生导师.

在压缩荷载下的破坏特性,并建立了各种岩石压缩破坏准则<sup>[6-7]</sup>.而在物理实验研究方面,实验材料包括类岩石材料与真实岩石材料两种,加载方式包括单轴压缩、双轴压缩、三轴压缩 3 种,预制缺陷包括单裂纹、多裂纹、单孔、双孔、双孔与单裂纹等<sup>[7-8]</sup>.现有的判别方法中通过复杂公式及参数计算量大;通过软件建模、写语句,前后期处理麻烦,操作难度大,且对于裂纹、孔没有很好的统一适用性<sup>[9]</sup>.

针对以上问题,本文提出一种新的简单的判别方法,基于塑性破坏规律,采用作图判别的手段,适用性强,能够方便快速地判断破坏形态.

### 1 贯通断裂模式分析

本试验采用岩石材料——红砂岩岩块进行加工.试件的三维尺寸为:长( $L$ ) $\times$ 宽( $W$ ) $\times$ 高( $H$ ) $=80\text{ mm}\times30\text{ mm}\times160\text{ mm}$ ,采用高压水刀进行切割与预制裂纹、预制单孔.本试验中,预制裂纹长度 $l=15\text{ mm}$ ,预制单孔半径 $r=6\text{ mm}$ ;包含 3 个参数,分别为裂纹倾角 $\alpha$ 、岩桥倾角 $\beta$ 、岩桥长度 $d(d>r)$ .

图 1 为试验结果,可以总结归纳出以下 4 种断裂模式,如图 2 所示.

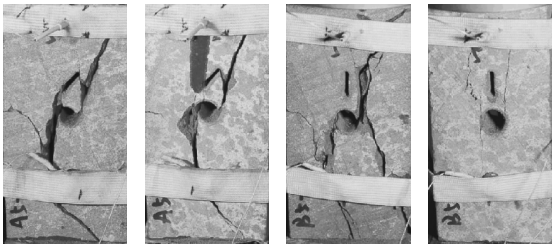


图 1 不同裂纹倾角下试块断裂模式  
Fig. 1 Failure modes of specimens under different crack angles

破坏模式包括:单向贯通破坏、同点双向贯通破坏、异点双向贯通破坏、独立破坏 4 种破坏模式.

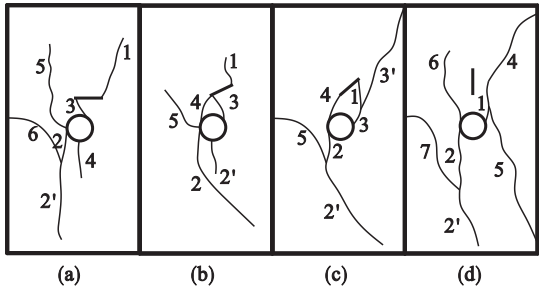


图 2 不同裂纹倾角下断裂模式  
Fig. 2 Failure modes under different crack angles

### 2 试块塑性破坏规律

#### 2.1 数值模型的建立

参数按照真实情况赋值,见表 1.

表 1 试验条件				
Table 1 Test conditions				
弹性模量 GPa	泊松比	黏聚力 MPa	内摩擦角 ( $^{\circ}$ )	抗拉强度 MPa
3.00	0.36	13.6	32	1.46

模型共划分 15 520 个单元,17 930 个节点.数值模拟的过程中,采用莫尔-库伦模型.模型的下边界施加法向位移约束,其他边界自由,试块顶面采用 0.002 mm/步的速度加载.

#### 2.2 含单孔试块塑性破坏规律

图 3a~图 3c 为以往预制单孔红砂岩进行单轴压缩试验得到的试块破坏结果.图 3d 为作者通过数值模拟得到的塑性区分布及破坏结果.可以看到,模拟结果单孔两端发生剪切破坏,与试验结果中的塌落破坏对应良好.模拟结果单孔周围存在“X”型的拉伸塑性区,裂纹为拉裂纹,产生在“X”型的塑性区的“/”笔部分.模拟试块的塑性区分布及破坏结果与试验所得实际破坏结果有很好的对应关系.

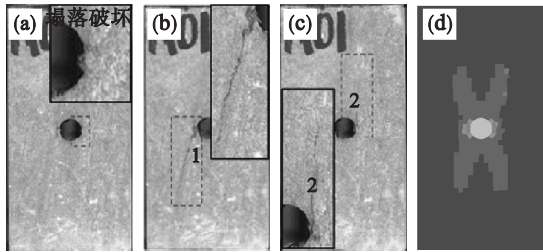


图 3 含单一圆孔试块断裂模式试验结果与模拟结果  
Fig. 3 Failure modes of specimens (single hole)

由图 4 可以看出,当孔径发生变化时,塑性区的形态仍保持“X”型,只是规模范围有所变化.

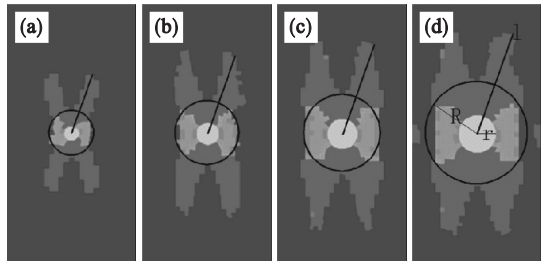


图 4 单孔直径 $2r$ 与塑性区规模关系模拟结果  
Fig. 4 Relationship between  $2r$  and the plastic zone  
(a)— $2r=10\text{ mm}$ ; (b)— $2r=15\text{ mm}$ ;  
(c)— $2r=20\text{ mm}$ ; (d)— $2r=25\text{ mm}$ .

2.3 含单裂纹试块塑性破坏规律

刘伟韬等<sup>[9]</sup>对预制 45°单裂纹砂岩进行单轴压缩试验,得出如图 5a 所示的试块破坏结果,指出单轴压缩下裂纹的破坏模式为翼裂纹拉破坏模式与反翼裂纹剪破坏模式。

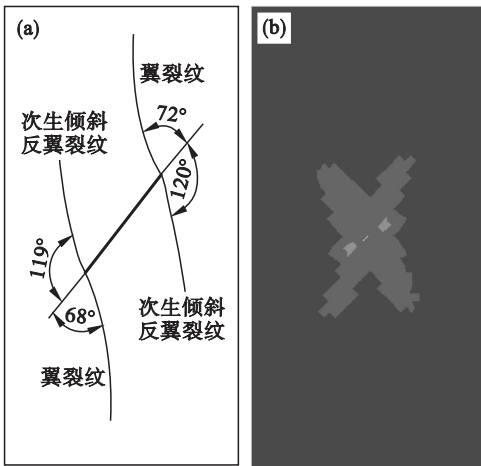


图 5 含 45°单裂纹试块断裂模式

Fig. 5 Failure modes of specimens (single crack,  $\beta=45^\circ$ )  
(a)—试验结果; (b)—模拟结果.

图 5b 为作者通过数值模拟得到的预制 45°单裂纹塑性区分布及破坏结果,可以看到,模拟结果裂纹周围同样存在“X”型的拉伸塑性区,“X”型的塑性区的“/”笔部分与“\”笔部分与试验产生的反翼裂纹位置及形态均有很好的对应关系。

如图 6 所示,为了方便分析,将单孔、单裂纹周围存在的“X”型塑性区划分为: $y_1$ (翼裂纹塑性区 1)、 $y_2$ (翼裂纹塑性区 2)、 $f_1$ (反翼裂纹塑性区 1)、 $f_2$ (反翼裂纹塑性区 2)。

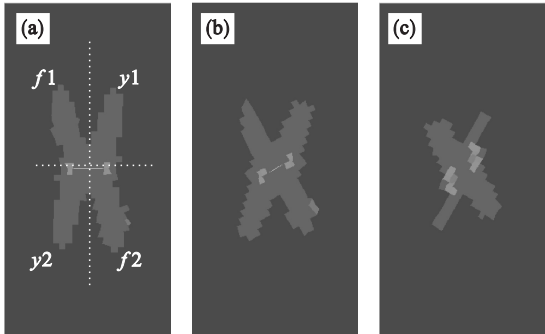


图 6 含不同倾角单裂纹试块断裂模式模拟结果

Fig. 6 Failure modes of specimens under different crack angles  
(a)— $\alpha=0^\circ$ ; (b)— $\alpha=30^\circ$ ; (c)— $\alpha=60^\circ$ .

当裂纹倾角发生变化时,塑性区的规模范围、优势区域有所变化:当裂纹倾角  $\alpha=0^\circ$  时, $y_1, y_2$  与  $f_1, f_2$  区域大小相当,区域优势相当;当  $0^\circ < \alpha$

$<45^\circ$  时, $y_1, y_2$  比  $f_1, f_2$  区域大小更占优势; $\alpha > 45^\circ$  时, $f_1, f_2$  比  $y_1, y_2$  区域大小更占优势;单孔  $y_1, y_2$  与  $f_1, f_2$  区域大小相当,优势相当。

2.4 含单裂纹与单孔试块塑性破坏规律

图 7 为物理试验结果与数值模拟结果的对比,可以发现:塑性破坏的贯通断裂模式与试块的贯通断裂模式有很好的 consistency。

如图 4 所示,预制单孔直径用  $2r$  表示, $y_1, y_2, f_1, f_2$  4 个区域对称分布,形态相似. 定义预制单孔圆心到  $y_1, f_1$  区域交界处的圆形区域为塑性核心区,塑性核心区半径用  $R$  表示;定义预制单孔圆心到塑性区边缘的远端距离为塑性延展长度,用  $l$  表示;定义塑性延展长度  $l$  与塑性核心区半径  $R$  的比值为塑性区延展系数,用  $k$  表示. 预制裂纹周围的参数定义与此一致。

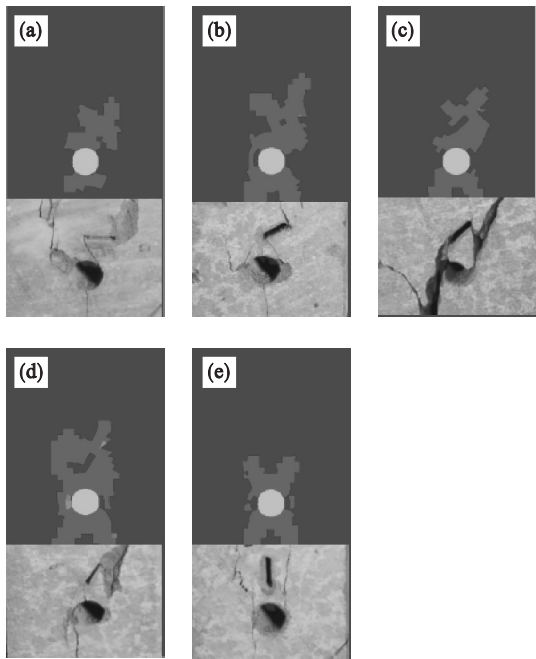


图 7 不同裂纹倾角下试块断裂模式

Fig. 7 Failure modes of specimens under different crack angles  
(a)— $\alpha=0^\circ$ ; (b)— $\alpha=30^\circ$ ; (c)— $\alpha=45^\circ$   
(d)— $\alpha=60^\circ$ ; (e)— $\alpha=90^\circ$ .

由图 8 可以看出,塑性核心区半径  $R$  与预制单孔直径  $2r$  存在良好的线性关系,且塑性核心区半径  $R$  随着预制单孔直径  $2r$  的递增而递增;塑性延展长度  $l$  与预制单孔直径  $2r$  存在良好的线性关系,且塑性延展长度  $l$  随着预制单孔直径  $2r$  的递增而递增。

对于预制单孔直径  $2r=25\text{ mm}$ ,塑性核心区半径  $R$  的长度已经接近试块宽度,由图 7 可以看出塑性区分布已经不是单纯的“X”型分布,试块的边缘也产生了塑性区,不满足“X”型塑性区

分布.

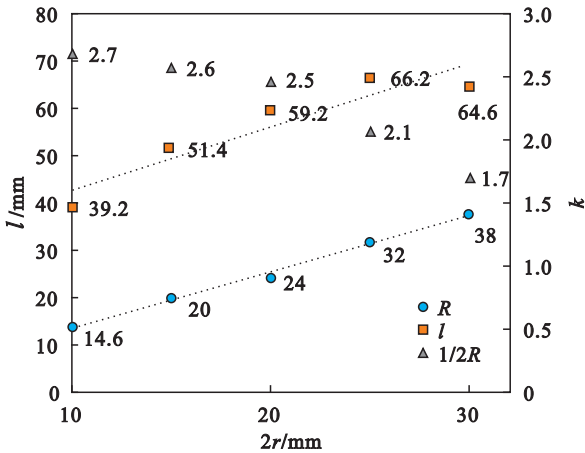


图 8 单孔直径  $2r$  与塑性核心区半径  $R$ 、塑性延展长度  $l$  间关系

Fig. 8 Relationship between  $2r$  and  $R, l$

对于满足分布的点进行拟合,得到:

$$l = 4r + 19.93 (R^2 = 0.984), \quad (1)$$

$$R = 1.88r + 5.43 (R^2 = 0.984). \quad (2)$$

同理,对不同裂纹倾角的试块进行模拟,得到的塑性延展系数如图 9 所示. 结合边缘塑性区效应判断,总结出:当预制圆孔直径  $2r$ 、预制裂纹长度的余弦值  $D\cos\beta$ , 在  $7.5 \sim 21.7$  ( $15\cos60^\circ \sim 25\cos30^\circ$ , 与试块宽比为  $9.38\% \sim 26.25\%$ ) 之间,  $k$  在  $2.5 \sim 2.9$  之间,此时满足“X”型塑性区分布规律.

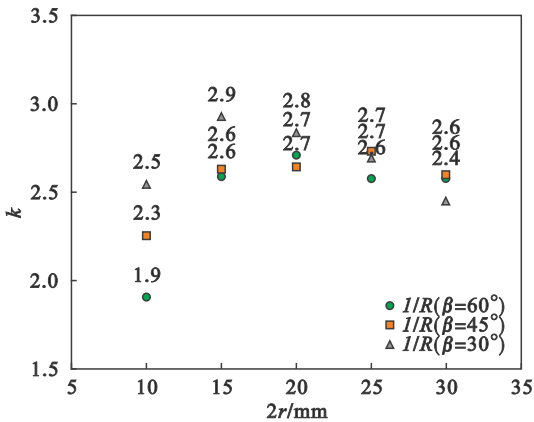


图 9 单孔直径  $2r$  与塑性延展系数  $k$  间关系

Fig. 9 Relationship between  $2r$  and  $k$

将不同裂纹倾角、裂纹长度下的数据进行拟合,见图 10. 其中圆点为数据点,折线为拟合曲线,得到式(3)中的函数关系式. 此关系式形式简单,并可表征塑性核心区半径  $R$  与裂纹倾角  $\beta$ 、预制裂纹长度  $D$  间关系:

$$R = 3.056\cos(3.566\beta + 1.312) + 0.804D + 2.732 (R^2 = 0.927). \quad (3)$$

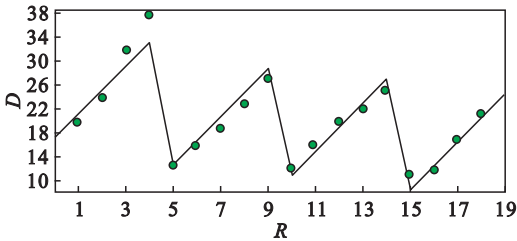


图 10 塑性核心区半径  $R$  与裂纹倾角  $\alpha$ 、预制裂纹长度  $D$  间关系拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves between  $R$  and  $\alpha, D$

### 3 岩石贯通断裂判别方法

#### 3.1 判别是否适用

对于单孔,由预制单孔圆心分别向物理边界短边  $L$ 、长边  $H$  作垂线  $h_1, h'_1, h_2, h'_2$  ( $h_1 \leq h'_1, h_2 \leq h'_2$ ),若满足  $h_1 \geq 2h_2, 9.38\% \leq 2r/2h_2 \leq 26.25\%$ ,则符适用于本判别方法;对于裂纹,预制裂纹中点分别向物理边界短边  $L$ 、长边  $H$  作垂线  $h_1, h'_1, h_2, h'_2$  ( $h_1 \leq h'_1, h_2 \leq h'_2$ ),若满足  $h_1 \geq 2h_2, 9.38\% \leq D\cos\beta/2h_2 \leq 26.25\%$ ,则适用于本判别方法.

#### 3.2 塑性区的画法

如图 11 所示,首先,根据塑性区核心半径  $R$  画出单孔(裂纹)周围的塑性核心区;然后,以单孔圆心(裂纹中点)作水平方向的基准线,根据塑性延展长度  $l$ 、塑性延展区域延展角度  $71^\circ$  (模拟结果多为  $70^\circ \sim 72^\circ$ ) 作 4 条线;最后,以单孔水平方向象限点(裂纹端点)作 4 条线将塑性延展区封闭.

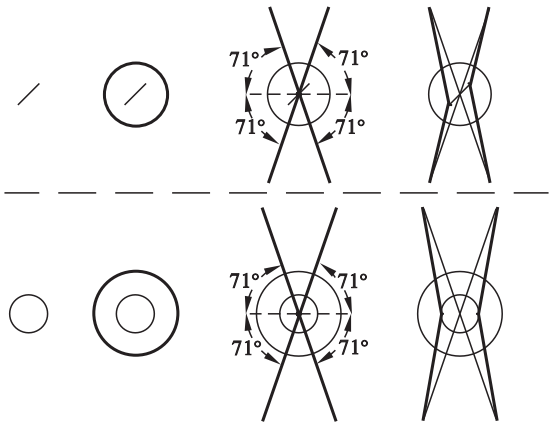


图 11 塑性区画法示意图

Fig. 11 Method of drawing plastic zones

#### 3.3 岩石贯通断裂判别方法

单孔(裂纹)周围存在一个塑性核心区,4 个塑性延展区 ( $y_1, y_2, f_1, f_2$ ),在前文基础上,结合图 12 得出以下几条判别准则:



判别准则一:单孔(裂纹)与单孔(裂纹)只有塑性区相交才会发生有联系的破坏,且占优势的区域相交比不占优势的区域相交更易发生破坏.

判别准则二:当塑性延展区的优势相当时,离对方塑性核心区中点近的塑性延展区占优势;当距离对方塑性核心区中点距离相当时,认为离塑性核心区中点远的塑性延展区占优势.

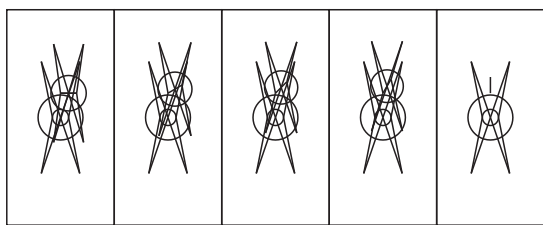


图12 不同裂纹倾角下塑性区分布

Fig. 12 Plastic zone distribution under different  $\alpha$

判别准则三:单孔(裂纹)与单孔(裂纹)彼此至少有一个塑性延展区宽度范围完全进入(或接近完全进入)对方的塑性核心区,才会发生贯通破坏.单孔(裂纹)与单孔(裂纹)的塑性延展区均不在对方塑性核心区中点两侧且塑性核心区相交(接近相交)时,发生单向贯通破坏;单孔(裂纹)与单孔(裂纹)的塑性延展区均在对方塑性核心区中点两侧且塑性核心区相交(接近相交)时,离塑性核心区中点近的塑性延展区占优势时,发生同点双向贯通破坏;单孔(裂纹)与单孔(裂纹)的塑性延展区均在对方塑性核心区中点两侧且塑性核心区相交(接近相交)时,离塑性核心区中点远的塑性延展区占优势时,发生异点双向贯通破坏.

判别准则四:单孔(裂纹)与单孔(裂纹)的塑性区处于接近相交等临界状态时,破坏形态处于两种破坏类型的过渡类型;单孔(裂纹)与单孔(裂纹)的塑性区不相交时,发生独立破坏.

判别准则五:裂纹倾角为 $90^\circ$ 时,裂纹周围不存在塑性区.

判别准则六:本判别准则适用于砂岩且未达峰值强度前的破坏特征分析.

文献[9]实验结果表明本文所提供的4种贯通破坏模式、贯通破坏判别方法具有一定的合理性与适用性.

## 4 结 论

### 1) 含单裂纹与单孔红砂岩岩石试块破坏具

有独立破坏模式、单向贯通破坏模式、同点双向贯通破坏模式及异点双向贯通模式.

2) 塑性破坏区的贯通与实际的贯通断裂有很好的对应关系,基于此提出的判别方法能快速、准确地判别岩石的贯通断裂模式.

3) 本文的判别方法,在各种岩石的适用性、尺寸效应方面有待进一步研究;未来研究考虑通过编程实现,并加入力学参数的修正.

## 参考文献:

- [1] Erdogan F, Sin G C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, 85: 519 - 527.
- [2] Palaniswamy K, Knauss E G. Propagation of a crack general in-plane tension [J]. *International Journal of Fracture Mechanics*, 1972, 8(1): 114 - 117.
- [3] Sih G C. Some basic problems in fracture mechanics and new concepts [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1973, 5(2): 365 - 377.
- [4] 赵均海, 魏雪英. 双剪统一强度理论下复合裂纹的研究 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(3): 58 - 61.  
(Zhao Jun-hai, Wei Xue-ying. Investigation of mixed mode crack based on twin shear unified strength theory [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2005, 25(3): 58 - 61.)
- [5] 许斌, 江见鲸. 混凝土 I-II 复合型断裂判据研究 [J]. 工程力学, 1995, 12(2): 13 - 21.  
(Xu Bin, Jiang Jian-jing. Study of I-II mixed-mode fracture criteria for concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 1995, 12(2): 13 - 21.)
- [6] Cheng C, Chen X, Zhang S F. Multi-peak deformation behavior of jointed rock mass under uniaxial compression: insight from particle flow modeling [J]. *Engineering Geology*, 2016, 213: 25 - 45.
- [7] Zhou Y, Wu S C, Gao Y T, et al. Macro and meso analysis of jointed rock mass triaxial compression test by using equivalent rock mass (ERM) technique [J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(3): 1125 - 1135.
- [8] Mohammad R Z, Ahmad F. Analytical solutions for the stresses and deformations of deep tunnels in an elastic-brittle-plastic rock mass considering the damaged zone [J]. *Tunneling and Underground Space Technology in Incorporating Trenchless Technology Research*, 2016, 58: 186 - 196.
- [9] 刘伟韬, 申建军. 含单裂纹真实岩石试块断裂模式的力学试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1182 - 1189.  
(Liu Tao-wei, Shen Jian-jun. Experimental study of propagation mode of crack in real rock specimens with a single crack [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(6): 1182 - 1189.)