

# 含孔洞-双裂隙红砂岩宏细观损伤特征数值试验研究

黄冬梅,朱盈盈,乔书昱,邢大千,王新照

(山东科技大学 安全与环境工程学院,山东 青岛 266590)

**摘要:**为研究含孔洞-裂隙缺陷岩石损伤的宏细观特征,利用颗粒流程序 PFC<sup>2D</sup>,对不同裂隙倾角、裂隙开度的红砂岩试样进行了单轴压缩数值试验,分析了不同类型缺陷试样的峰值强度、弹性模量、声发射特征、裂纹扩展特征随裂隙倾角及裂隙开度的变化情况。试验结果表明:砂岩的峰值强度和弹性模量与裂隙倾角间具有正相关关系,而裂隙开度的增加对试样峰值强度和弹性模量影响较小;随着裂隙倾角的增大,声发射累计振铃计数呈现前期缓慢减少、后期迅速增大的变化趋势;随着裂隙开度的增大,声发射累计振铃计数呈现先减小后增加再减小的变化趋势;随着裂隙倾角的增加剪切裂纹数量逐渐增加至与拉伸裂纹相近,破裂模式也由拉伸破坏变为拉剪混合破坏;不同开度砂岩破裂模式均为拉伸破坏;当裂隙倾角水平或垂直时,仅有一条裂隙参与主裂纹的形成;当裂隙倾角非水平或非垂直时,两裂隙之间产生崩落区,且均参与主裂纹的形成;随着裂隙开度的增大砂岩试样的破碎程度逐渐增大,除裂隙开度为 1 mm 时因开度太小导致裂隙闭合未形成崩落区外,其余试样均产生崩落区,且崩落区范围逐渐增大,4 种开度砂岩裂隙均参与主裂纹的形成。

**关键词:**颗粒流模拟;红砂岩;孔洞裂隙;裂纹扩展;损伤特征

中图分类号:TD31

文献标志码:A

## Numerical experiments on macro- and micro-damage characteristics of red sandstone with pore-double fractures

HUANG Dongmei, ZHU Yingying, QIAO Shuyu, XING Daqian, WANG Xinzhaoh

(College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** To study the macro- and micro-structure characteristics of rock damage with pore-double fractures, a uniaxial compression numerical test was conducted on sandstone with different fracture inclination angles and crack openings by using PFC<sup>2D</sup>. The changes of peak strength, elastic modulus, acoustic emission characteristics, and crack propagation characteristics of rock samples with different types of defects, as the inclination angle and crack opening vary, were analyzed and the results were as follows: There is a positive correlation between the sandstone's peak strength, elastic modulus and inclination angles while the increase of fracture openings has little effect on the peak strength and elastic modulus of sandstone samples. With the increase of fracture inclination angles, the cumulative ringing count of acoustic emission show a trend of slow decrease in the early stage and rapid increase in the later stage. The cumulative ringing count of acoustic emission show a trend of decreasing first, then increasing, and finally decreasing with the increase of fracture opening. With the increase of the fracture inclination angles, the number of shear cracks gradually increases to be similar to that of tensile cracks, and the failure mode changes from

收稿日期:2022-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51704179)

作者简介:黄冬梅(1982—),女,山东济宁人,副教授,博士,主要从事岩体损伤、矿山评价、安全技术及工程等方面的研究。

E-mail:kmcandy@126.com

朱盈盈(1996—),女,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事岩体损伤、矿山评价等方面的研究,本文通信作者。

E-mail:zydyx12@163.com

tensile failure to mixed failure. The fracture mode of sandstone with different opening are tensile failure. When the fracture inclination angles are horizontal or vertical, only one fracture is involved in the formation of the main crack. When the fracture inclination angles are not horizontal or vertical, there is a caving zone between the two fractures and both of them are involved in the formation of the main crack. With the increase of the fracture openings, the fracture degree of sandstone samples increases gradually. Except for samples with the fracture opening degree of 1mm, which failed to form caving zones as a result of the crack closure due to the small fracture opening, all the other samples have caving zones, whose range increases gradually. All the four kinds of sandstone cracks are involved in the formation of the main crack.

**Key words:** particle flow simulation; red sandstone; pore and fractures; crack propagation; damage characteristics

岩石内部存在各种孔裂隙等宏细观缺陷结构,地下岩体工程中应力会发生重分布,岩石中的孔隙与裂隙之间将进一步发生扩展、贯通破坏,对岩石的力学性质产生较大影响<sup>[1]</sup>,会导致岩体滑坡等失稳破坏,科学地评价含缺陷岩石的破裂模式、力学特性等,对于岩体稳定性研究具有重要的实用价值<sup>[2]</sup>。因此,研究含孔洞裂隙岩体的破裂演化规律,可以更全面地掌握岩体的破坏模式和破坏机理。

含裂隙、孔隙等缺陷岩石的破坏模式是岩石力学领域研究的重要内容,对于石油以及煤矿的开采、岩体滑坡等均有工程意义。近年来,人们对含孔洞裂隙岩石的破裂演化过程进行了试验与模拟研究<sup>[3-4]</sup>。邱加冬等<sup>[5-6]</sup>将试验和模拟结合,研究孔洞缺陷对岩石强度的影响;刘红岩等<sup>[7-8]</sup>结合室内试验研究了不同含孔洞裂隙试样的破裂演化过程;张恒等<sup>[9]</sup>运用离散元分析系统,结合室内试验研究了含双裂隙试样在不同岩桥倾角条件下的破裂演化过程;王浩然等<sup>[10-11]</sup>通过数值模拟,对含孔洞裂隙砂岩的力学性质进行研究,并对其破裂模式进行研究;李杨杨等<sup>[12]</sup>采用物理模拟试验的方法,制作复合缺陷类岩石试件,分析不同倾角对岩石裂纹扩展等的影响;王锐等<sup>[13]</sup>基于离散元理论,利用 PFC<sup>3D</sup> 数值模拟软件对煤样进行单轴压缩和巴西劈裂模拟实验,分析了煤样宏细观力学参数之间的关系;李守巨等<sup>[14]</sup>通过力学试验确定细观参数取值,并据此建立含缺陷巴西劈裂试件的 PFC<sup>2D</sup> 模型,提出了细观参数的估计方法。

岩石内部具有各种不同形态的缺陷,前人对含单一孔洞、裂隙及孔洞裂隙简单组合等几何形态的岩石进行了研究与探讨,而对于含单孔洞-双裂隙红砂岩在不同裂隙开度及倾角条件下的力学特性及损伤演化规律研究较少。为了进一步研究孔洞、裂隙组合形态的影响,本研究以新汶矿区红砂岩为研究对象,建立含孔洞-双裂隙几何形态模型,通过室内试验与 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟结合的方法,对含孔洞-双裂隙红砂岩宏细观损伤特征进行分析,研究在不同裂隙倾角及裂隙开度条件下,含孔双裂隙红砂岩力学参数、声发射特征、破坏模式的变化规律,为岩体内部损伤破坏机理研究提供科学参考,对于地下工程岩体稳定控制具有理论借鉴意义。

## 1 单轴压缩试验

砂岩是一种沉积岩,主构稳定。从新汶煤田鄂庄煤矿选取了典型砂岩红砂岩,颜色主要为红色。将试样加工为 50 mm×100 mm 的圆柱体,单轴压缩试验使用岛津 AGX-250 电子万能试验机,如图 1 所示。试验得到其单轴抗压强度、弹性模量分别为 123.69 MPa、7.26 GPa。

## 2 颗粒离散元模型构建

颗粒流程序(particle flow code, PFC)是采用离散元理论开发的数值软件<sup>[15]</sup>,在岩土领域用于模拟岩土材料力学性能<sup>[16]</sup>。

### 2.1 细观参数标定与试验验证

本研究在 PFC 中建立与上述试样等比例模型,如图 2 所示。研究结果<sup>[17]</sup>表明,平行黏结能够很好地反应岩石的力学行为,故采用 PFC<sup>2D</sup> 软件中的平行黏结模型进行模拟分析。

本次模拟采用位移加载法,调参采用“试错法”<sup>[18]</sup>,表 1 为最终得到的细观参数。由图 3 可知,试验结果与模拟值有较高吻合度,能够再现红砂岩的力学行为,因此采用 PFC 数值模拟研究不同裂隙倾角和开度对含孔双裂隙砂岩力学参数、破裂模式等的影响。

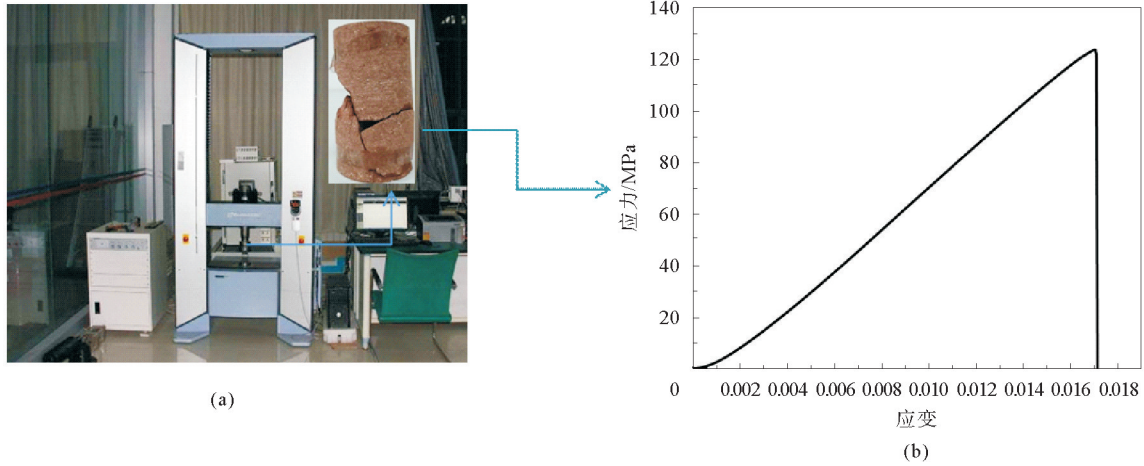


图 1 单轴压缩试验

Fig. 1 Uniaxial compression test

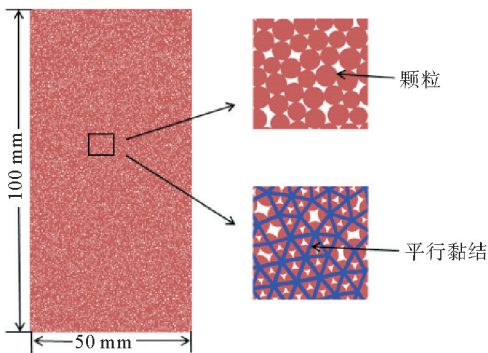


图 2 试样模型图

Fig. 2 Sample model diagram

表 1 红砂岩颗粒流模拟微观参数  
Table 1 Micro parameters of red sandstone particle flow simulation

微观参数	数值	微观参数	数值
最小粒径/mm	0.3	平行黏结模量/GPa	3.984
粒径比	1.33	平行黏结刚度比	3.0
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	2 500	平行黏结法向强度/MPa	37
颗粒接触模量/GPa	3.984	平行黏结切向强度/MPa	74
颗粒接触刚度比	3.0	摩擦系数	0.577

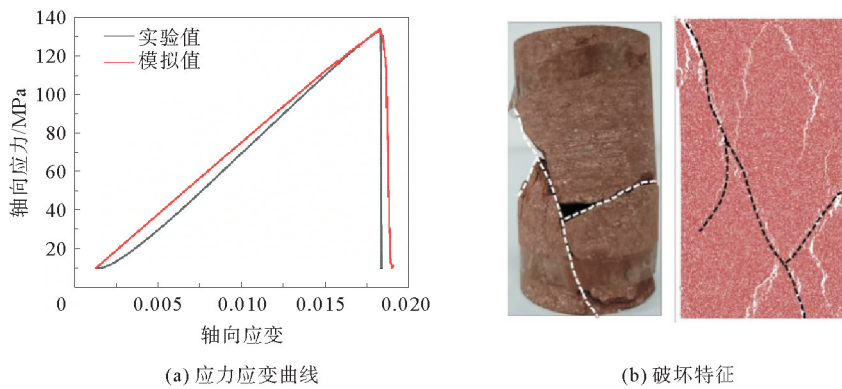


图 3 试验与模拟结果对比图

Fig. 3 Comparison of test and simulation results

### 2.2 模型建立

通过删除模型中设定的裂隙区域中的颗粒,在完整砂岩模型中制作含孔双裂隙的试样。采用 PFC<sup>2D</sup> 建立 16 个含孔洞双裂隙岩体模型,模型裂隙长度  $a = 16 \text{ mm}$ ,两裂隙间距为  $24 \text{ mm}$ ,孔洞半径为  $2.5 \text{ mm}$ ,并设

置 4 不同的裂隙开度  $b$ , 分别为 1、2、3、4 mm, 以及 4 种不同裂隙倾角  $\alpha$ , 分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ , 如图 4 所示, 具体工况如表 2 所示。

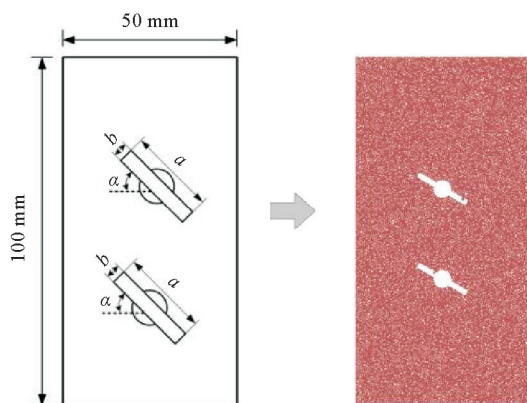


图 4 模型几何尺寸示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the model's geometric dimensions

表 2 模拟试验条件

Table 2 Simulation test conditions

工况	$\alpha/(\circ)$	$b/\text{mm}$	工况	$\alpha/(\circ)$	$b/\text{mm}$
1	0	1	9	60	1
2	0	2	10	60	2
3	0	3	11	60	3
4	0	4	12	60	4
5	30	1	13	90	1
6	30	2	14	90	2
7	30	3	15	90	3
8	30	4	16	90	4

### 3 结果与分析

#### 3.1 宏观力学特征及声发射特征演化分析

通过数值模拟实验, 分析红砂岩加载过程中的力学参数和声发射演化特征, 根据力学参数的变化情况得出裂纹的萌生、扩展、演化发展规律。

##### 3.1.1 宏观力学特征分析

相较于不含缺陷的红砂岩, 含缺陷红砂岩峰值强度和弹性模量均大幅度降低。以裂隙倾角为  $0^\circ$ 、裂隙开度 1 mm 为例, 峰值强度降幅为 31.7%, 弹性模量降幅为 16.5%, 因此缺陷对砂岩的峰值强度和弹性模量具有明显的劣化作用。图 5 为峰值强度、弹性模量随裂隙倾角、裂隙开度变化情况。

如图 5(a) 所示, 随着裂隙倾角的增加, 峰值强度整体呈现逐渐增大的趋势, 整体增幅为 55.9%; 在裂隙开度大于 1 mm 时, 随着裂隙倾角的增加, 其增高趋势由平缓(增幅 6.5%)到激增(增幅 27.2%)再到平缓(增幅 8.0%), 说明在此开度下裂隙倾角由  $30^\circ$  增加到  $60^\circ$  时对峰值强度的影响较大。仅在裂隙开度为 1 mm 时, 在开度的影响下, 峰值强度随裂隙倾角的增加其增高趋势由平缓(增幅 3.5%)到激增(增幅 35.2%), 但整体趋势不变。由图 5(b) 可以看出, 峰值强度随裂隙开度的变化幅度不超过 18.5%, 相较于裂隙倾角, 在不同裂隙开度情况下峰值强度变化幅度较小。同样的, 弹性模量随裂隙倾角、裂隙开度变化趋势相似, 弹性模量随裂隙倾角的增加整体呈现逐渐增大的趋势, 且增幅达 20.1%, 弹性模量随裂隙开度的增加变化幅度较小, 仅为 1.7%。因此砂岩的峰值强度和弹性模量与裂隙倾角间具有正相关关系, 而裂隙开度的增加对试样峰值强度和弹性模量影响较小。

##### 3.1.2 声发射振铃计数演化分析

图 6 为应力应变及声发射关系曲线, 根据声发射数量, 可以将声发射过程分为 3 个阶段。初始阶段(I)声发射事件几乎为 0, 无裂纹产生, 试样内部颗粒开始挤压, 但未产生黏结破坏, 此时应力应变曲线处于弹性阶段; 萌发阶段(II)声发射事件依然很少, 但是有逐渐增加的趋势, 开始有少量裂纹生成, 黏结出现少量破坏, 此时应力应变曲线处于微裂纹稳定发展阶段; 扩展阶段(III)发生大量黏结破坏及裂纹生成, 伴随着声发射事件急速上升, 试样产生了无法恢复的变形破坏, 此时应力应变曲线处于破裂阶段。含孔洞裂隙砂岩声发射事件可能存在一个或多个声发射波动现象, 这是因为在缺陷的影响下试样未完全贯通而存在残余应力, 继续加载, 又会产生新的峰值。

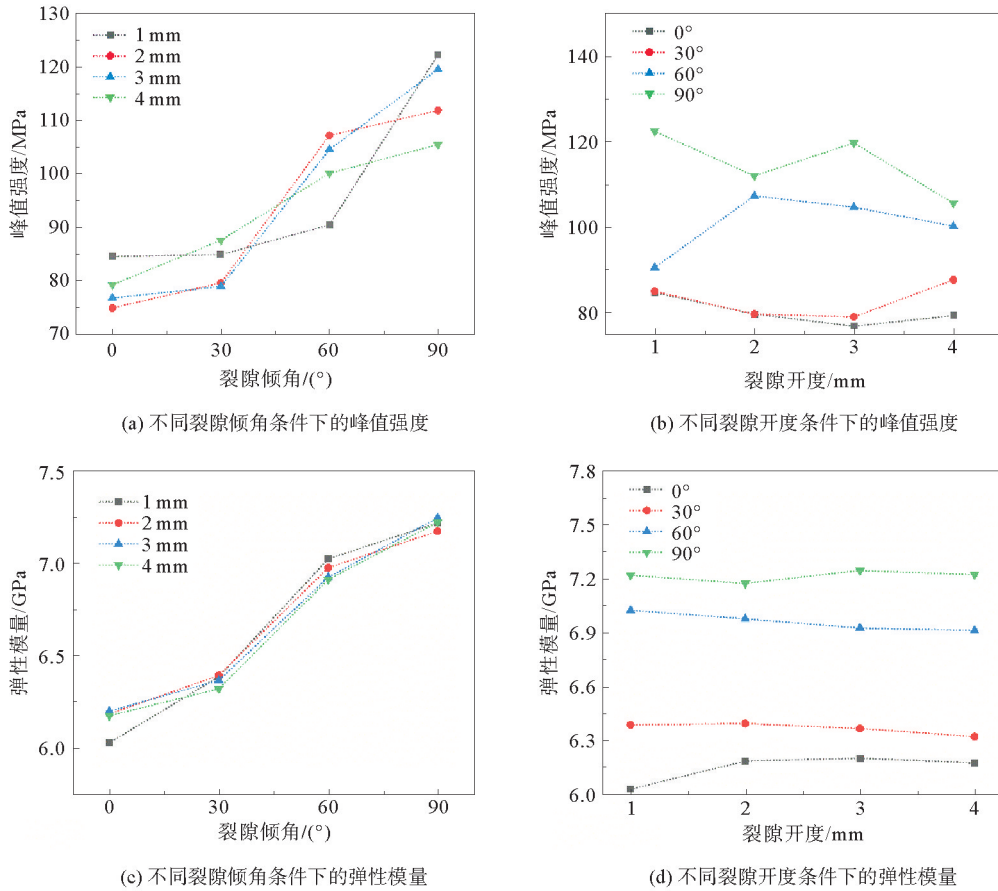


图 5 峰值强度、弹性模量随裂隙倾角及裂隙开度的变化

Fig. 5 Change of peak strength and elastic modulus with fracture inclination angle and fracture opening

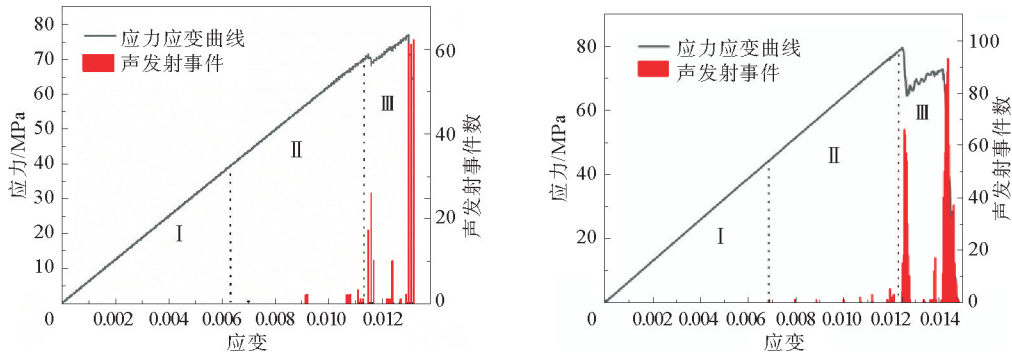


图 6 应力-应变-声发射关系曲线

Fig. 6 Schematic diagram of stress-strain-AE relation curve

对各试样声发射计数情况进行统计,如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,声发射累计振铃计数随裂隙倾角的增大呈现先缓慢减少、后迅速增大的变化趋势,在裂隙倾角为 90°时累计振铃计数增至 1 761;图 7(b)显示了累计振铃计数随裂隙开度的变化情况,随着裂隙开度的增大,声发射累计振铃计数呈现先减小后增加再减小的变化趋势。因此裂隙倾角及开度的增加对含孔洞双裂隙红砂岩声发射的影响主要表现在声发射频率以及声发射累计振铃计数方面。

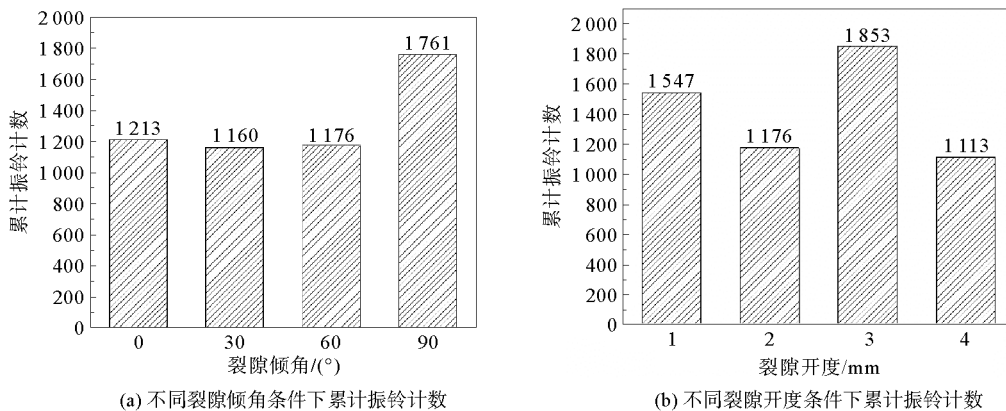


图 7 累计振铃计数与裂隙倾角及裂隙开度关系图

Fig. 7 Relationship between cumulative ring count and fracture inclination angle, fracture opening

### 3.2 裂纹扩展细观特征分析

#### 3.2.1 裂纹数量演化规律分析

以裂隙开度 2 mm 为例,不同裂隙倾角红砂岩裂纹数量变化曲线如图 8 所示。随着加载的进行,当裂隙倾角为 0°时,裂纹萌发时先出现拉伸裂纹,试样破坏过程中张拉裂纹明显多于剪切裂纹,表明模型以拉伸破坏为主;当倾角为 30°时,裂纹萌发阶段剪切裂纹多于拉伸裂纹,两者均呈阶梯状增加,在裂纹扩展阶段,拉伸裂纹数量迅速超越剪切裂纹,拉、剪裂纹数量比大致为 2 : 1,表明模型主要以拉伸破坏为主;当倾角为 60°

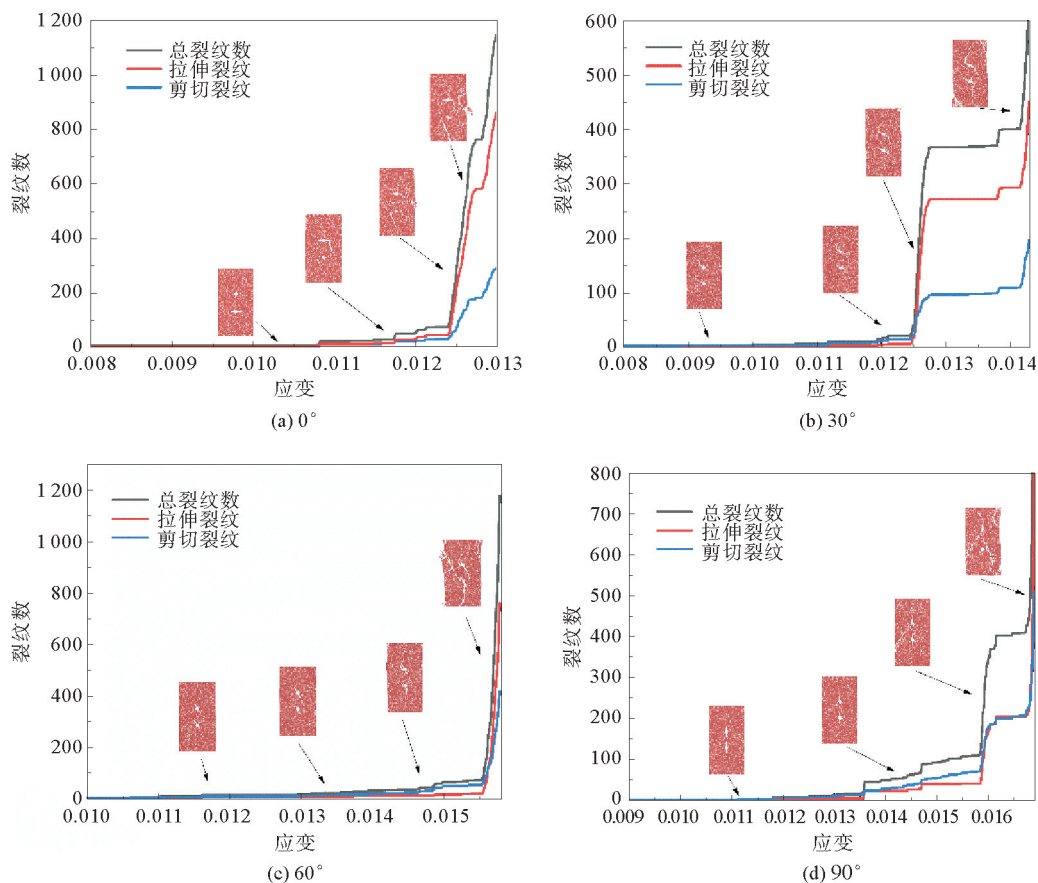


图 8 裂隙开度 2 mm 下不同裂隙倾角红砂岩裂纹数量变化曲线

Fig. 8 Curve of crack number of red sandstone with different inclination angles based on the fracture opening of 2 mm

时,裂纹萌发阶段剪切裂纹多于拉伸裂纹,随着加载的进行,拉伸裂纹数量逐渐超越剪切裂纹,表明模型主要以拉伸破坏为主;当倾角为 90°时,剪切裂纹与拉伸裂纹数量相近,且同时发育扩展,模型以拉剪混合破坏为主。试验表明,随着裂隙倾角的增加,剪切裂纹数量逐渐增加至与拉伸裂纹相近,破裂模式也由拉伸破坏变为拉剪混合破坏。

以裂隙倾角 60°为例,不同裂隙开度红砂岩裂纹数量变化曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出,不同裂隙开度试样的初始裂纹均主要为剪切裂纹。随着加载的进行,拉伸裂纹数量开始增多,逐渐超越剪切裂纹数量并占主导地位,表明 4 种开度的砂岩破裂模式均为拉伸破坏。

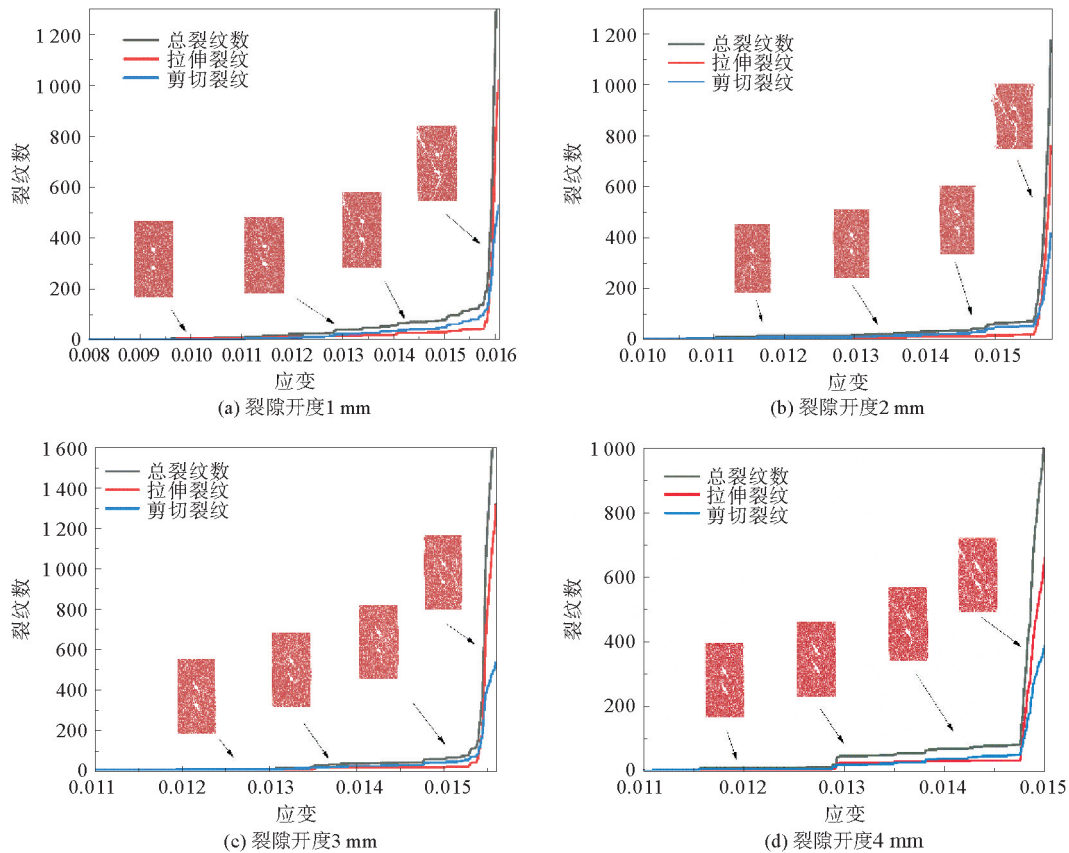


图 9 裂隙倾角 60°下不同裂隙开度红砂岩裂纹数量曲线

Fig. 9 Curve of crack number of red sandstone with different fracture openings based on the fracture angle of 60°

以裂隙开度 2 mm、倾角 0°试样为例,以试样内部颗粒位移所指方向确定试样的裂纹类型,如图 10(a)所示,可以看出裂纹为同一方向向两边发散扩展,表明试样主要为拉伸破坏。以裂隙开度 2 mm、倾角 90°试样为例,如图 10(b)所示,可以看出裂纹既有同一方向向两边发散扩展的,也有反方向扩展的,表明试样主要为拉剪混合破坏,分析结果与上述一致。

### 3.2.2 不同裂隙倾角裂纹扩展细观特征分析

将相同裂隙开度和不同裂隙倾角的试样进行比较,可以清楚地看出不同裂隙倾角对红砂岩破坏模式的影响。对比裂隙开度为 2 mm 的不同试样,如图 11 所示,图中数字表示主裂纹、非主裂纹的萌生顺序,不同的颜色代表不同的块体。

由图 11 可知,在相同裂隙开度下,当倾角为 0°时,在下方裂隙尖端萌生出反翼型裂纹 1 和翼型裂纹 2;继续加载,裂纹 2 扩展形成崩落区,最终与裂纹 1 汇合形成拉伸破裂,上方裂隙并未参与主裂纹的形成。当裂隙倾角为 30°时,试样上部裂隙尖端同时萌生翼型裂纹 1,并沿着应力加载方向继续扩展;随着加载进行,

斜次生裂纹 2 继续向下扩展,与裂纹 1 汇合,且两裂隙间形成近似正方形的破裂体,最终形成拉伸破坏,两裂隙均参与了主裂纹的形成。当裂隙倾角为 60°时,由于初始裂纹 2 和反翼型裂纹 3 在下部裂隙两尖端萌发后继续向上下端扩展,分别与裂纹 2<sup>#</sup>、1<sup>#</sup> 汇合,形成椭圆形崩落区,最终导致拉伸破坏,两裂隙均参与了主裂纹的形成。当裂隙倾角为 90°时,试样上部分孔洞裂隙发生崩落挤压变形,左边缘萌发斜次生裂纹 2 和翼型裂纹 1;继续加载随即产生次生裂纹 1<sup>#</sup> 和远场裂纹 4<sup>#</sup> 并扩展汇合,最终裂纹 2、裂纹 1<sup>#</sup> 与裂纹 1 汇合形成拉剪混合破裂,但下方裂隙未参与主裂纹的形成。

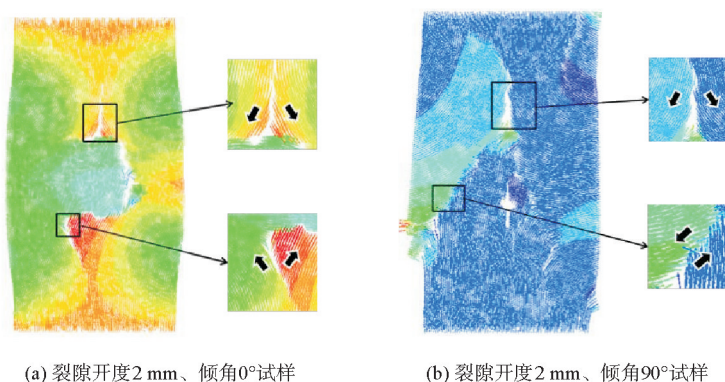


图 10 不同工况模型位移场分布

Fig. 10 Displacement field distribution of models under different working conditions

由图 11 中还可看出,当红砂岩倾角为 0°时,破碎程度较大,且仅一条裂隙参与主裂纹的形成;当倾角为 0~90°时,试样两裂隙间会产生崩落区,且两裂隙均参与主裂纹的形成;当砂岩倾角为 90°时,仅一条裂隙参与主裂纹的形成。因此,当裂隙水平或垂直时,仅有一条裂隙参与主裂纹的形成;当裂隙非水平或垂直时,两裂隙之间产生崩落区,且均参与主裂纹的形成。

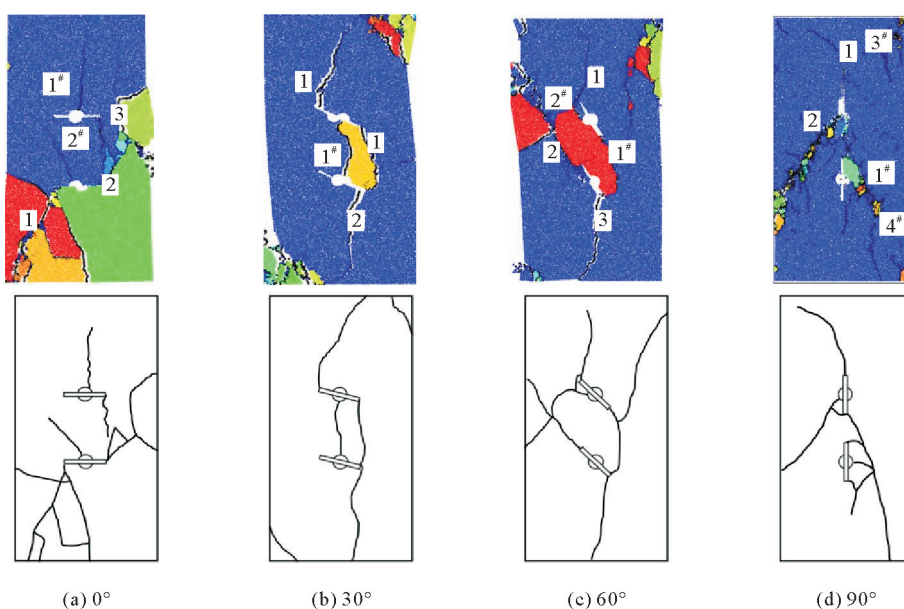


图 11 裂隙开度 2 mm 时不同裂隙倾角的红砂岩破裂模式

Fig. 11 Fracture models of red sandstone with different inclination angles based on the fracture opening of 2 mm



### 3.2.3 不同裂隙开度裂纹扩展细观特征分析

将相同裂隙倾角和不同裂隙开度的试样进行比较,可以清楚地看出裂隙开度对红砂岩破坏模式的影响。以裂隙倾角为  $60^\circ$  试样为例进行比较,图 12 所示。由图 12 可知,在相同裂隙倾角下,裂隙开度为 1 mm 时试样由于裂隙开度很小,因此在力作用下裂隙上下面产生闭合现象,上下面之间产生摩擦力,导致上方翼型裂纹  $1^\#$  未继续扩展,而下方裂隙在加载的压力下产生翼型裂纹 1 和共面次生裂纹 2,并向上下端继续扩展,导致拉伸破坏,两裂隙间产生崩落区,破碎程度较小,两裂隙均参与了主裂纹的形成。当裂隙开度为 2 mm 时,由于初始裂纹 2 和反翼型裂纹 3 在下部裂隙两尖端萌发后继续向上下端扩展,分别与裂纹  $2^\#$ 、 $1^\#$  汇合,形成椭圆形崩落区,最终导致拉伸破坏,两裂隙均参与了主裂纹的形成。当裂隙开度为 3 mm 时,上方裂隙的翼型裂纹和反翼型裂纹扩展,并与下方翼型裂纹汇合导致试样拉伸破坏。当裂隙开度为 4 mm 时,上下两裂隙的翼型和反翼型裂纹扩展汇合,并向上下两面继续扩展,导致拉伸破坏,两裂隙均参与了主裂纹的形成,破碎程度较大。

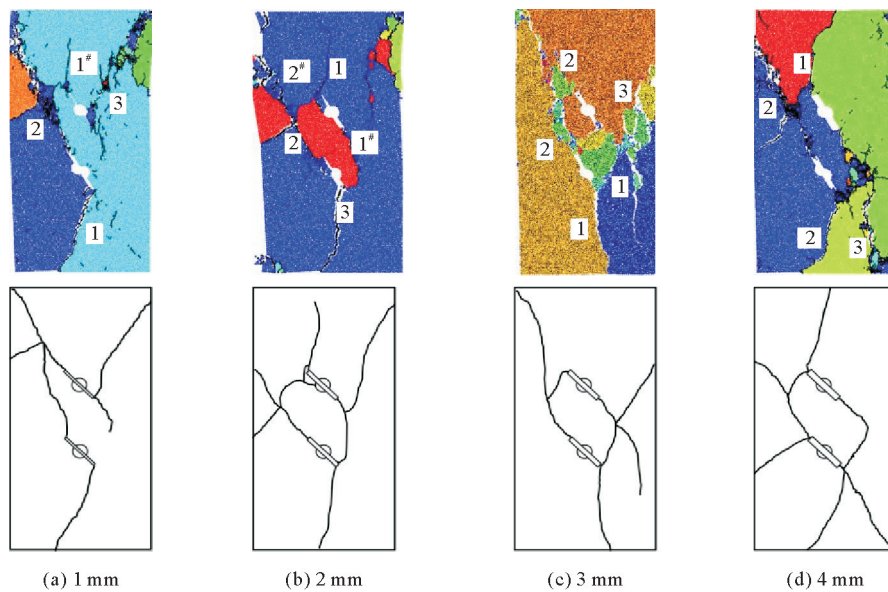


图 12 裂隙倾角  $60^\circ$  时不同裂隙开度的红砂岩破裂模式

Fig. 12 Fracture models of red sandstone with different fracture openings based on the fracture angle of  $60^\circ$

因此,随着裂隙开度的增大,砂岩试样的破碎程度逐渐增大,除裂隙开度为 1 mm 时因开度太小导致裂隙闭合未形成崩落区外,其余试样均产生崩落区,且崩落区范围逐渐增大,4 种开度砂岩裂隙均参与主裂纹的形成,其破裂模式较为相似。

## 4 结论

1) 红砂岩的力学参数与裂隙倾角、开度密切相关。缺陷的存在对红砂岩的峰值强度和弹性模量均有明显劣化作用,砂岩的峰值强度、弹性模量与裂隙倾角具有正相关关系,裂隙开度的增加对砂岩峰值强度和弹性模量变化幅度影响较小。红砂岩破坏过程中,随着裂隙倾角的增大,声发射累计振铃计数呈现前期缓慢减少、后期迅速增大的变化趋势;随着裂隙开度的增大,声发射累计振铃计数呈现先减小后增加再减小的变化趋势。

2) 随着裂隙倾角的增加,剪切裂纹数量逐渐增加至与拉伸裂纹相近,破裂模式也由拉伸破坏变为拉剪混合破坏;4 种不同开度的红砂岩初始裂纹均主要为剪切裂纹,随着加载的进行,拉伸裂纹超越剪切裂纹数

量并占主导地位,破裂模式均为拉伸破坏。

3) 裂隙的存在会改变原有红砂岩的破坏模式,当裂隙倾角水平或垂直时,仅有一条裂隙参与主裂纹的形成,当裂隙倾角非水平或非垂直时,两裂隙之间产生崩落区,且均参与主裂纹的形成;随着裂隙开度的增大,砂岩试样的破碎程度逐渐增大,除裂隙开度为 1 mm 时因开度太小导致裂隙闭合未形成崩落区外,其余试样均产生崩落区,且崩落区范围逐渐增大,4 种开度砂岩裂隙均参与主裂纹的形成,其破裂模式较为相似。

## 参考文献

- [1] 曾昭飞. 双圆形孔洞-裂隙类岩石试样力学特性试验研究[D]. 衡阳:南华大学,2021:1-2.  
ZENG Zhaofei. Experimental study on mechanical properties of double-circular cavity-fissure rock specimens[D]. Hengyang: University of South China, 2021:1-2.
- [2] 张栩. 预制椭圆形缺陷类岩石材料单轴压缩试验与数值模拟研究[D]. 衡阳:南华大学,2020:1-3.  
ZHANG Xuxu. Uniaxial compression test and numerical simulation of like-rock materials with precrack[D]. Hengyang: University of South China, 2020:1-3.
- [3] 赵国彦,王恩杰,吴浩,等. 单轴压缩下孔洞砂岩微观破裂演化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(8):1891-1900.  
ZHAO Guoyan, WANG Enjie, WU Hao, et al. Micro-fracture evolution rule of sandstone specimens with a single hole under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(8):1891-1900.
- [4] 汤双臣,冯鹏,赵家琛. 含交叉裂隙岩石试样单轴力学特性与破坏机理 [J]. 地下空间与工程学报,2021,17(5):1376-1383.  
TANG Shuangchen, FENG Peng, ZHAO Jiachen. Uniaxial mechanical properties and failure mechanism of rock specimens containing cross fractures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(5):1376-1383.
- [5] 邱加冬,李地元,李夕兵,等. 预制缺陷对花岗岩层裂破坏的影响[J]. 爆炸与冲击,2018,38(3):665-670.  
QIU Jiadong, LI Diyuan, LI Xibing, et al. Effect of pre-existing flaws on spalling fracture of granite[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(3):665-670.
- [6] 程龙,杨圣奇,刘相如. 含缺陷砂岩裂纹扩展特征试验与模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(5):719-724.  
CHENG Long, YANG Shengqi, LIU Xiangru. Experimental and numerical simulation investigation on crack expansion of sandstone containing flaws[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5):719-724.
- [7] 刘红岩. 宏观缺陷对岩体力学特性及边坡稳定影响研究[J]. 岩土力学,2019,40(增1):431-439.  
LIU Hongyan. Influence of macroscopic and mesoscopic flaws on mechanical behavior of rock mass and slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1):431-439.
- [8] 郝燕奎,聂鑫. 孔洞-裂隙缺陷岩石力学及声发射特征分析[J]. 中国地质调查,2019,6(3):63-67.  
HAO Yankui, NIE Xin. Analysis of mechanical and acoustic emission characteristics of hole-fracture defective rocks[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(3):63-67.
- [9] 张恒,唐世斌,王龙,等. 压缩作用下岩石预置裂隙贯通机制的研究[J]. 应用力学学报,2015,32(5):762-767.  
ZHANG Heng, TANG Shibin, WANG Long, et al. Analysis of mechanisms of crack coalescence based on pre-cracked rock under compression[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(5):762-767.
- [10] 王浩然,王志亮,王星辰. 含缺陷岩样三轴压缩变形破坏过程颗粒流模拟[J]. 水利水运工程学报,2021(4):46-53.  
WANG Haoran, WANG Zhiliang, WANG Xingchen. Particle flow simulation of deformation and failure process of defective rock samples under triaxial compression[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(4):46-53.
- [11] CHEN M L, JING H W, MA X J, et al. Fracture evolution characteristics of sandstone containing double[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(3):499-505.
- [12] 李杨杨,颜浩东,张士川,等. 复合缺陷类岩石裂纹扩展规律及力学特性试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(2):42-50.  
LI Yangyang, YAN Haodong, ZHANG Shichuan, et al. Experimental study on the expansion law and mechanical characteristics of crack propagation in rock with composite defect[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology

(Natural Science), 2022, 41(2): 42-50.

- [13] 王锐, 修毓, 王刚, 等. 基于颗粒流理论的煤与瓦斯突出数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 52-61.

WANG Rui, XIU Yu, WANG Gang, et al. Numerical simulation of coal and gas outburst based on particle flow theory[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2016, 35(4): 52-61.

- [14] 李守巨, 王颂, 王志云. 基于巴西劈裂试验的混凝土细观本构模型参数估计方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 49-57.

LI Shouju, WANG Song, WANG Zhiyun. Microparameter estimation method of concrete micro-constitutive model based on Brazilian test[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(4): 49-57.

- [15] 胡国志. 脆性材料中裂纹扩展特性的离散模拟研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2020: 18-24.

HU Guozhi. Discrete modeling of the propagation characteristics of cracks in brittle materials[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2020: 18-24.

- [16] 杨圣奇, 孙博文, 田文岭. 不同层理页岩常规三轴压缩力学特性离散元模拟[J]. 工程科学学报, 2022, 44(3): 430-439.

YANG Shengqi, SUN Bowen, TIAN Wenling. Discrete element simulation of the mechanical properties of shale with different bedding inclinations under conventional triaxial compression[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(3): 430-439.

- [17] 邓树新, 郑永来, 冯利坡, 等. 试验设计法在硬岩 PFC<sup>3D</sup> 模型细观参数标定中的应用[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 655-664.

DENG Shuxin, ZHENG Yonglai, FENG Lipo, et al. Application of design of experiments in microscopic parameter calibration for hard rocks of PFC<sup>3D</sup> model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 655-664.

- [18] 黄彦华, 杨圣奇. 断续三裂隙砂岩单轴压缩裂纹扩展特征颗粒流分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(6): 1232-1247.

HUANG Yanhua, YANG Shengqi. Particle flow analysis on crack coalescence behavior of sandstone specimen containing three pre-existing fractures under uniaxial compression[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(6): 1232-1247.

(责任编辑: 齐敏华)