

文章编号: 1007-2993(2024)05-0539-09

不同倾角单裂隙对非均质岩石失稳演化研究

王婷静

(浙江建设职业技术学院, 浙江杭州 311231)

【摘要】 岩体中的裂隙对岩石的力学行为、能量演化和失稳破坏有显著影响。为阐明不同倾角单裂隙对岩石能量演化和失稳破坏机理, 基于颗粒流 PFC2D 方法, 建立了不同倾角单裂隙砂质泥岩数值模型, 模拟了不同倾角单裂隙下砂质泥岩的单轴压缩试验。研究表明, 随着单裂隙倾角变大, 砂质泥岩的强度与弹性模量先降低后增大, 预制裂纹会影响断裂面的裂纹起始位置, 并加速断裂面的形成; 声发射事件在岩样破坏前存在小范围沉寂期, 该特征可作为岩石破坏的前兆判据; 随着裂隙倾角的增大, 总能量持续增大, 弹性能和耗散能呈现先增加后减小的趋势, 倾角 30° 时, 岩石试样冲击倾向性最弱, 有利于降低冲击地压危险, 倾角为 90° 时, 岩石试样冲击倾向性相对最强, 不利于冲击地压的防治。

【关键词】 PFC2D; 岩石; 单裂隙倾角; AE; 能量演化; 弹性能存储率; 弹性能释放率

【中图分类号】 TU452

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.006

Instability Evolution of Single Fracture with Different Dip Angles on Heterogeneous Rock

Wang Tingjing

(Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, Zhejiang, China)

【Abstract】 Fractures in rock mass have a significant influence on the mechanical behavior, energy evolution and instability failure of rock. To clarify the rock energy evolution and instability failure mechanism of single fracture with different dip angles, based on the particle flow PFC2D method, a numerical model of sandy mudstone with single fracture with different dip angles was established, and the uniaxial compression test of sandy mudstone with single fracture with different dip angles was simulated. The results show that with the increase of single fracture dip angle, the strength and elastic modulus of sandy mudstone decrease first and then increase, and the prefabricated crack will affect the crack initiation position of the fracture surface and accelerate the formation of the fracture surface. The acoustic emission event has a small range of quiet period before the rock sample is destroyed, which can be used as a precursory criterion for rock failure. With the increase of fracture dip angle, the total energy continues to increase, and the elastic energy and dissipation energy show a trend of increasing first and then decreasing. When the dip angle is 30°, the rock sample has the weakest impact tendency, which is beneficial to reduce the risk of rock burst. When the dip angle is 90°, the rock sample has the strongest impact tendency, which is not conducive to the prevention and control of rock burst.

【Key words】 PFC2D; rock; single fracture dip angle; AE; energy evolution; elastic energy storage rate; elastic energy releasing rate

0 引言

岩体是非均质且复杂的天然材料, 其内部演化出不同缺陷, 如裂隙、孔洞、节理和断层等, 致使岩体在物理特征和力学行为上表现出非连续性和各向异性。在外部荷载的影响作用下, 岩体内部的裂隙会起裂、扩展和贯通, 局部裂纹影响整体裂纹演化。尤其是裂纹倾角严重影响岩体的力学行为, 降低岩体安全

性和可靠性, 导致岩体失稳破坏^[1]。因此, 深入开展不同倾角裂隙对岩体能量演化和失稳破坏规律研究, 可揭示岩体损失演化机制, 并为工程灾害防治提供科学基础。

近年来, 国内外众多学者对裂隙、节理岩体做了试验及研究, 在裂纹扩展及岩体的力学行为方面取得了一定科研成果。钟 振等^[2]探究了不同围压和不

基金项目: 舟山市科技计划项目(2020C21013); 中交集团科技项目(ZJLJGLTJ5A3JSFW2019011)

作者简介: 王婷静, 女, 1981 年生, 汉族, 山西太原人, 博士, 讲师, 主要从事道路与桥梁工程研究。E-mail: jianchidada@sina.com

同裂隙粗糙度条件下岩体裂纹发育和渗流演化规律,而未考虑裂隙位置对岩体力学特性的影响。人们已经认识到裂隙位置、形状等对实际工程的影响,宋洋等^[3]基于单轴压缩试验,研究了裂隙位置对类岩体短柱破坏影响,为巷道稳定性加固和防治提供参考。宋勇军等^[4]利用CT技术,探究了不同冻融循环下裂隙岩体孔隙演化特征。陈家嵘等^[5]对单裂隙砂岩开展压剪试验,提出了裂纹起裂位置判据。王磊等^[6-7]开展不同围压下三轴压缩试验,研究了裂隙煤体裂纹演化规律,并提出了应力强度因子公式。Li等^[8]基于裂缝角度和耗散能,建立了考虑破碎砂岩初始损伤的损伤模型。Chen等^[9]基于数字图像相关技术(DIC)和扫描电镜技术,对压剪荷载作用下含双缺陷试样的宏观和微观破坏特征进行了综合研究。章德超等^[10]和周春煦等^[11]揭示了双裂隙岩体裂隙发育机理。Zhang等^[12]为了揭示T型裂隙岩样的变形演化规律,探究了裂隙岩石与完整岩石能量演化差异特征性。Chen等^[13]开展了不同倾角平行裂隙类岩石试样的微观破裂模式和宏观强度预测试验。然而,室内试验不能准确反映出岩体裂纹细观变化,并且岩体具有各向异性,导致力学行为也具有差异性,即有众多学者采用数值模拟方法对不同裂纹形状岩体进行研究。Ren等^[14]对不同裂纹形状试件进行单轴压缩试验和模拟裂纹扩展,得到了裂纹扩展特性。随着离散元方法的兴起,学者采用细观研究方法对裂隙岩体进行分析,张岩等^[15]利用PFC2D开展了不同裂隙倾角和长度的岩体单轴压缩数值试验。王子航等^[16]基于PFC2D,对裂隙岩体进行直剪试验,细观分析了试件内部位移规律。Wu等^[17]研究了不同原有缺陷条件下的断裂行为对于保持煤矿作业的安全性。李志强等^[18]利用CT扫描和图像转化技术,提出了裂隙岩体细观参数标定法,提高了PFC中参数标定的可靠性。

可见,目前对裂隙岩体的研究主要集中在裂纹扩展、力学行为等,然而对不同倾角单裂隙岩体能量演化规律和失稳判定却鲜有研究。因此,本文基于试验数据,建立颗粒流数值模型,开展不同倾角单裂隙非均质岩石单轴压缩试验,分析不同倾角单裂隙岩体能量演化规律,提出失稳判据,为实际工程分析、设计以及防治提供参考。

1 数值模型

PFC为离散元数值模拟软件,主要模拟数值模型中颗粒的运动形式。在颗粒流模拟期间,材料动态行为是通过数值方法不断迭代来显示和更新模型颗

粒的位置和速度。PFC2D颗粒流软件适合用于模拟岩石试验,此方法可以通过编制Fish语言模拟岩石破坏过程中裂纹的发育与贯通,故选用PFC2D模拟软件来建立数值模型^[19]。

1.1 颗粒流模型建立

PFC2D中构建的颗粒流数值模型尺寸如下:直径 D 为50 mm,高度 H 为100 mm。设置颗粒密度 $\rho=2620 \text{ kg/m}^3$,孔隙比 $=0.1$,颗粒最小半径 $R_{\min}=0.4 \text{ mm}$,颗粒最大半径 $R_{\max}=0.6 \text{ mm}$,由5657个颗粒组成。模型初始物理属性见表1。

表1 模型初始物理属性

颗粒粒径/mm	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比	颗粒数 n	R_{\max}/mm
0.4~0.6	2620	0.1	5657	0.6

在岩石力学和岩石工程中,平行黏结模型的接触是有限尺寸面积的黏结材料,平行黏结是弹簧均匀分布组成的,有一定的法向和切向刚度,同样有一定的切向和法向强度。平行黏结模型可以传递力也能传递力矩。

在平行黏结接触模型中,颗粒与颗粒间产生类似于圆盘状接触,当在荷载作用下颗粒与颗粒间的接触力链断裂,该黏结处可产生裂纹,与真实岩体中的结构面相似,颗粒与颗粒间的法向拉力或者切向力大于其相应的黏结强度时,颗粒与颗粒间就发生位移产生断裂破坏。因此选用平行黏结接触模型用于数值模拟试验(见图1)。

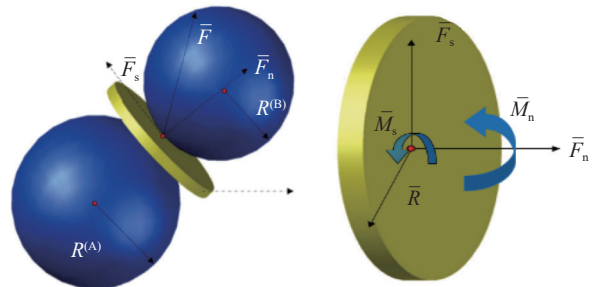


图1 平行黏结模型示意图

1.2 细观参数验证

本文利用PFC2D模拟砂质泥岩的单轴压缩试验,采用位移控制,赋予顶部墙体和底部墙体合适的速度,速度设置为 0.005 mm/s ,直至试件破坏,停止条件以峰值应力的40%为基础^[20],通过PFC2D内代码进行调试,得出模拟试件宏-细观参数规律,进而得知各细观敏感性参数对模型宏观影响以及数值模拟结果与室内试验结果最相近时相关参数(见表2)。

确定敏感性参数数值后,将单轴室内压缩试验

结果与数值模拟结果进行对比,室内单轴压缩试验和数值模拟相关数据库见表3。

表2 数值模型细观参数

模型参数	符号	取值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ρ	2620
孔隙度	φ	0.1
颗粒最大粒径/mm	R_{\max}	0.6
颗粒粒径比	R_{\max}/R_{\min}	1.5
弹性模量/GPa	E^*	0.535
刚度比	k^*	1.5
摩擦系数	μ	0.32
平行黏结有效模量/GPa	\bar{E}^*	11.5
平行黏结刚度比	\bar{k}^*	1.5
法向黏结强度/MPa	$\bar{\sigma}_c$	2.0
切向黏结强度/MPa	\bar{c}	2.71
摩擦角/($^\circ$)	$\bar{\phi}$	40

表3 数值模型细观参数

	峰值应力/MPa	峰值应变($\times 10^{-3}$)	弹性模量/GPa
文献试验[19]	7.48	6.40	1.163
数值模拟值	7.65	6.63	1.154
误差	2%	3%	0.7%

将表3中试验数据库与模拟数据库进行对比,试验与模拟应力-应变曲线的对比见图2。

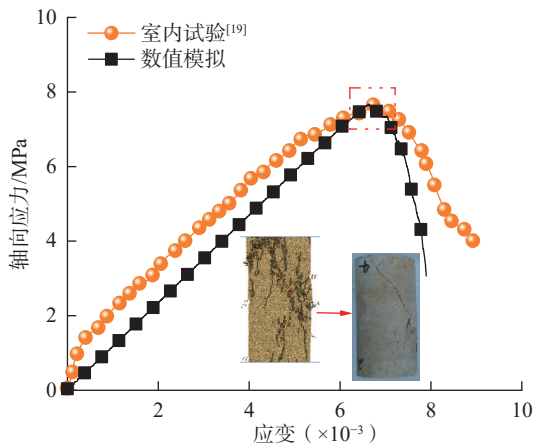


图2 单轴室内试验与数值模拟对比

由图2可知,室内试验与数值模拟应力-应变曲线在各关键点和总体趋势上十分接近,室内试验破坏模式与数值模拟破坏模式相似。由于PFC软件的局限性,初始模型中颗粒是均质分布的,所以无法准确模拟试件前期压密段。

根据表3和图2结果,计算出单轴压缩条件下

相对误差,依次为2%、3%和0.7%,并可观察出室内试验的峰值应力、峰值应变和弹性模量与数值模拟结果误差较小,可靠度和精确度高,室内试验峰值应力后阶段与数值模拟峰值应力后阶段下降趋势一致,表明该模型能较好地模拟不同开采条件下砂岩力学特性研究,为分析砂质泥岩的强度特征、裂纹变化和能量演化奠定基础。

2 不同倾角单裂隙岩石宏-细观演化特征

2.1 力学参数分析

数值模型中的预制裂隙位于试件中心,长度为20 mm、宽度为1.5 mm的裂隙在 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 条件下的砂质泥岩单轴压缩应力-应变曲线如图3所示。由图3可知,前期单裂隙砂质泥岩应力-应变曲线呈线性正相关,是因为外荷载未达到砂质泥岩的屈服强度,且PFC不能表现出压密阶段,此时裂隙尖端未发生起裂现象,为线弹性阶段;随着荷载的增加,试件开始产生裂纹,应力-应变曲线开始呈现非线性增长,为裂纹扩展阶段,在线弹性阶段结束时,称下阶段为屈服阶段,对应的应力为屈服强度;砂质泥岩在屈服阶段,随着荷载的增加,裂纹数量显著变多,裂纹开始发育贯通,试件发生破坏,承载能力显著下降,变形快速增加,应力-应变曲线出现下降,此阶段为破坏阶段。由于裂隙的存在导致岩体的峰值应力也呈现出降幅,相应砂质泥岩的强度也不同。

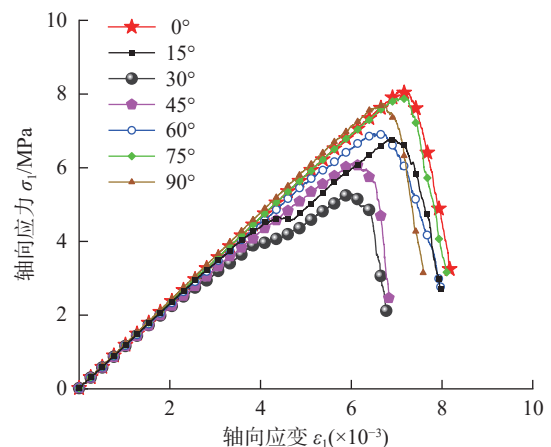


图3 不同倾角下应力-应变曲线

为直观比较不同倾角下单裂隙砂质泥岩的力学特性,绘制了裂隙倾角与峰值应力、峰值应变和弹性模量的关系(见图4、图5)。单裂隙倾角对砂质泥岩的峰值应力影响较大,其中裂隙倾角为 30° 时,砂质泥岩的劣化程度处于较弱状态。随着倾角的变大,其强度是先变弱后逐渐变强,最后缓慢变弱,表明砂质泥岩对裂隙倾角敏感度高。

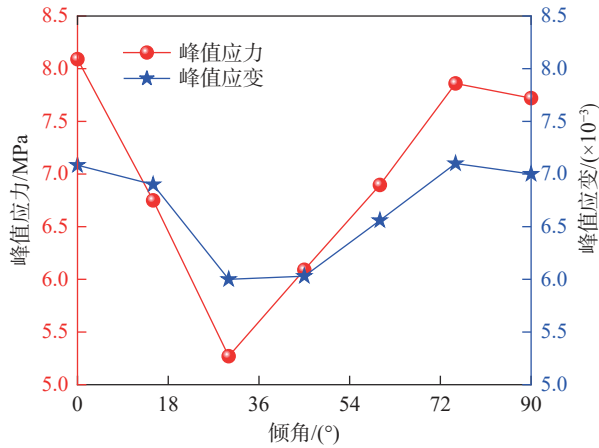


图4 裂隙倾角与峰值应力、峰值应变的关系

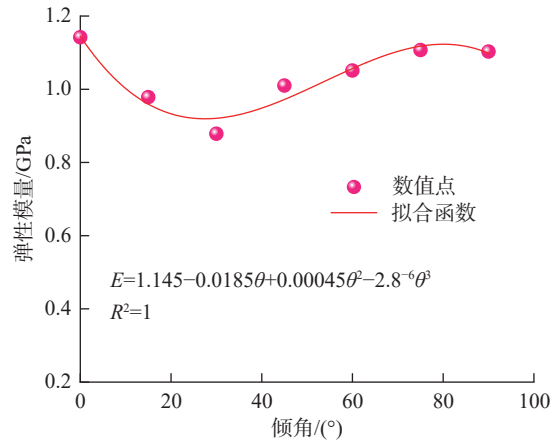


图5 裂隙倾角与弹性模量的关系

单裂隙倾角与砂质泥岩弹性模量的关系如图5所示。当单裂隙倾角增大,砂质泥岩的弹性模量先是降低,后缓慢增加并趋于平缓。表明裂隙为30°时,砂质泥岩。利用1stOpt,对弹性模量进行拟合,裂隙倾角与弹性模量的关系为

$$E = 1.145 - 0.0185\theta + 0.00045\theta^2 - 2.8 \times 10^{-6}\theta^3 \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量; θ 为裂隙倾角。

2.2 AE 演化规律

声发射(AE)有助于研究动态缺陷,在颗粒流软件模拟砂质泥岩在外荷载作用下,基于矩张量理论编

写Fish语言建立声发射模拟方法。根据数值模型受荷过程中颗粒受到的位移和力,从而计算出颗粒动能,最终合成矩张量[21-22]。结合不同倾角单裂隙砂质泥岩的应力-应变曲线(见图6),二者变化状态相一致,不同倾角单裂隙砂质泥岩的应力-应变曲线将声发射演化过程划分为以下四个特征段。

(1)无损期:在加载前期,砂质泥岩内部孔隙被压实,暂时无声发射事件产生。

(2)增长期:随着荷载的增加,颗粒与颗粒间的摩擦效应开始作用,发生滑移,在颗粒边缘出现微裂纹,试件内部的损伤开始显露,其内部微裂纹数很少,所

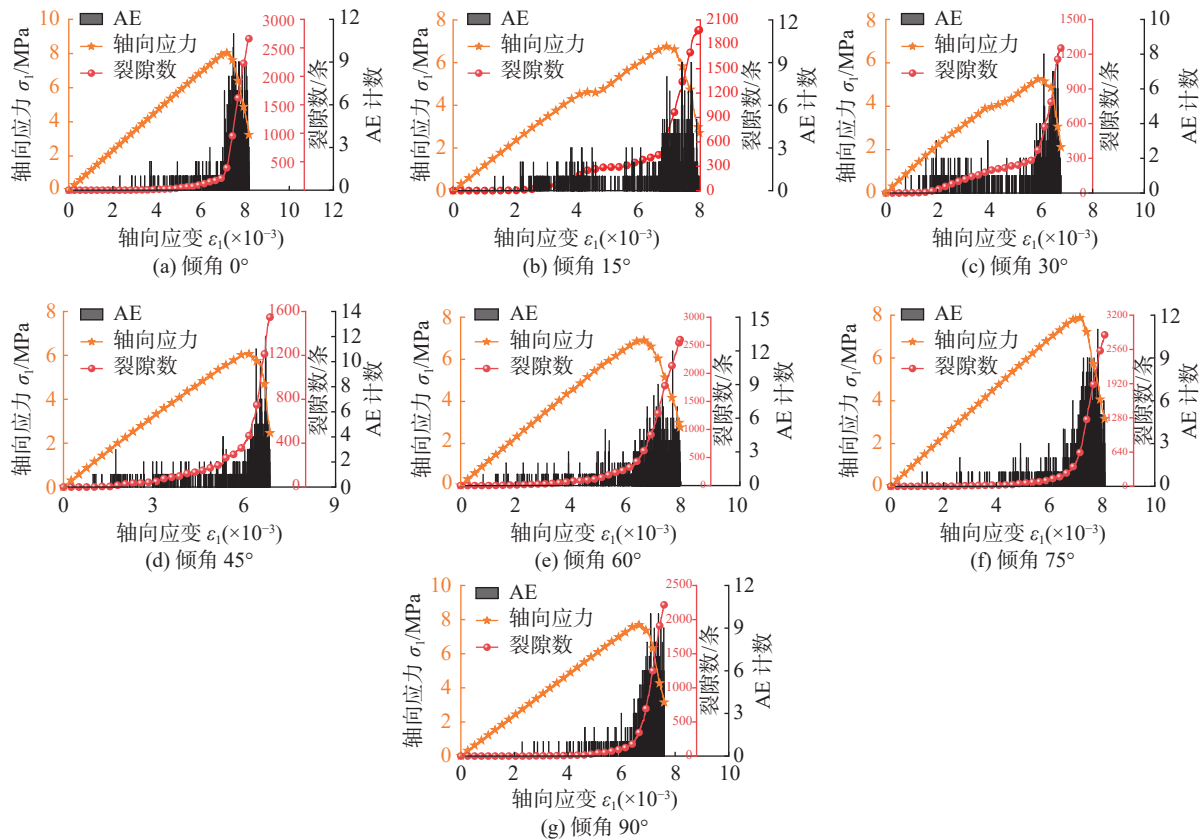


图6 不同倾角单裂隙砂质泥岩的声发射事件演化

以声发射信号微弱,为“爆发期”的产生蓄力。

(3)爆发期:由“增长期”的蓄势,此阶段声发射事件显著增加,颗粒与颗粒间的黏结变弱,砂质泥岩内部萌生的微裂纹扩展贯通形成宏观裂隙,试件内部损伤程度加剧,强度达到顶峰。

(4)回落期:试件整体失稳破坏,但仍具有一定残余强度。声发射事件继续产生,内部微裂纹多且密,所以裂纹扩展贯通仍在快速发展,形成宏观破坏同时,声发射事件在岩样破坏前存在小范围沉寂期,该特征可作为岩石破坏的前兆判据。

2.3 裂纹细观特征

在图7不同倾角单裂隙砂质泥岩裂纹数变化曲线中,蓝色裂纹代表剪压裂纹,红色裂纹代表剪拉裂纹,黑色裂纹代表拉伸裂纹。砂质泥岩中的预制裂隙,会产生裂隙端部出现应力集中的现象,当应力值大于临界值时,试件会从裂隙两端开始起裂,微裂纹开始

扩展贯通,直至失稳破坏。当 $\theta < 45^\circ$ 时,裂纹的萌生、扩展与贯通并非从预制裂隙端部开始,而是位于预制裂隙四周,发育的微裂纹有显著扩展的趋势;当 $\theta \geq 45^\circ$ 时,裂纹的萌生、扩展是从预制裂隙的端部开始,扩展与贯通不明显,但微裂纹萌生的数量显著增加。

不同倾角单裂隙砂质泥岩的裂纹扩展情况见图7所示。当裂隙倾角为 0° 时,裂纹扩展方向近似沿着试件的最大主应力方向发育,有一条贯通性裂缝和多条二次裂缝,为单斜面剪切破坏;当裂隙倾角为 30° 时,裂纹的扩展方向在试件中下部,称为二次倾斜裂纹;当裂隙倾角为 45° 时,裂纹的扩展方向开始于预制裂隙端部,预制裂隙与贯通面共线,称为二次共面裂纹;当裂隙倾角为 60° 和 75° 时,预制裂隙与贯通面形成一定夹角,未沿着预制裂隙方向;当裂隙倾角为 90° 时,试件的破坏面与预制裂隙共线,裂纹的发育在预制裂隙两侧也发育,为拉伸破坏模式。表明预

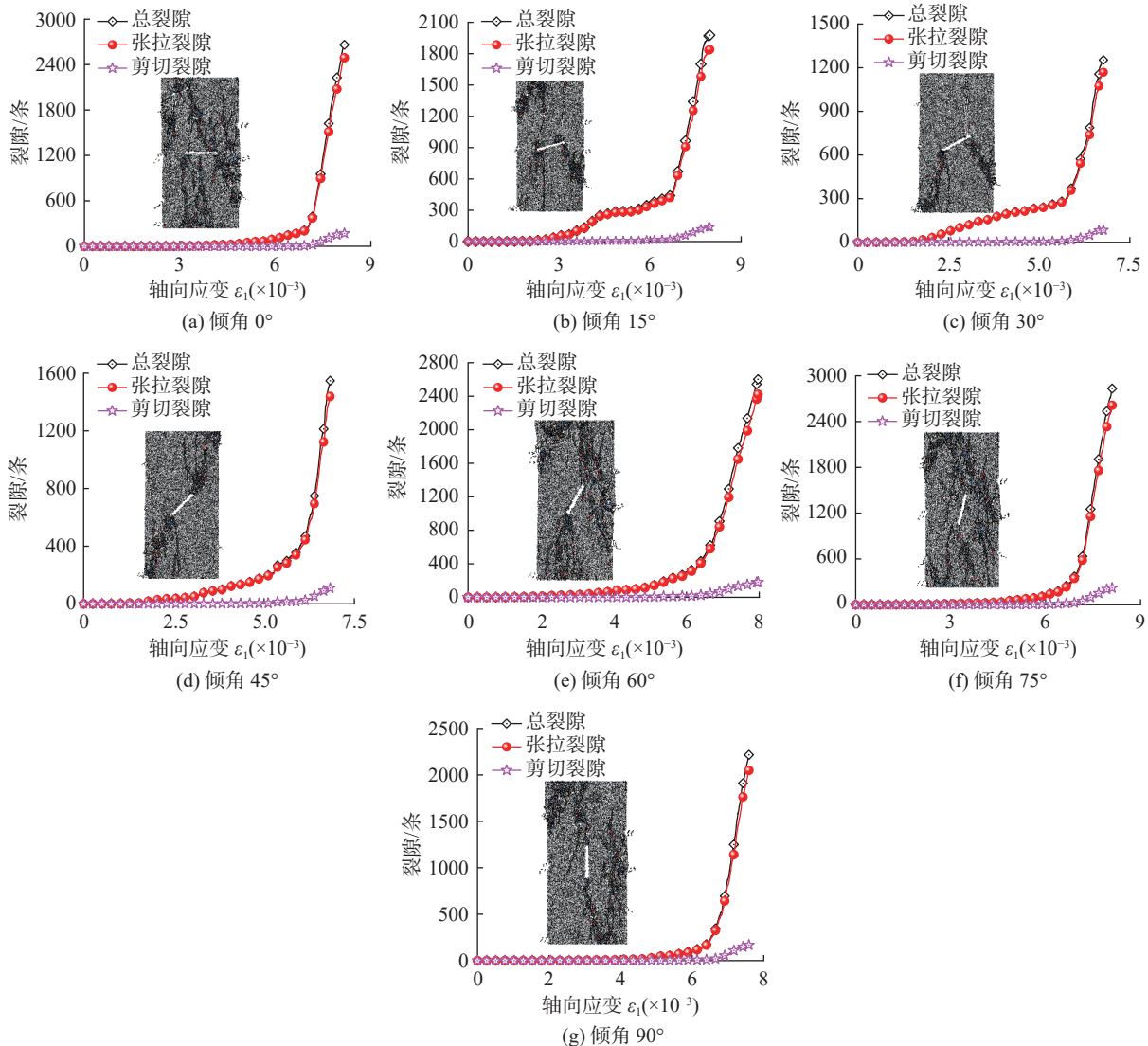


图7 不同倾角单裂隙砂质泥岩裂纹数变化曲线

制裂隙对裂纹的起裂位置影响更大,裂隙角度对破坏模式影响较小。

不同倾角单裂隙砂质泥岩裂纹数目变化情况见图7。随着荷载的增加,裂纹首先萌生出张拉裂隙,剪压裂隙和剪拉裂隙在非弹性阶段开始发育,裂隙发育以张拉裂隙为主,剪切裂隙为辅,试件主要破坏模式是拉伸破坏。

3 不同倾角单裂隙岩石能量演化规律

以力学机制原理为出发点,岩石在受到外部荷载作用后内部开始出现裂纹的变化,其变化特征依次为:萌生—扩展—贯穿,最终导致岩石产生极大的损伤直至发生破坏,这由外部荷载的变化决定,同时说明考虑损伤对岩石的影响无比重要。从能量原理作为入手点,岩石的损伤变化本质上是热力学能量转化的一个过程,能量的吸收和释放演变过程是岩石发生损伤的本质。

3.1 能量计算原理

岩石在荷载的作用下的破坏过程本质上是能量的输入、累积、发散以及释放的一个过程。假设岩石试样在外荷载作用下处于不进行热交换的理想状态,此时外荷载对岩石试样所做的功仅有弹性能和耗散能两种形式。弹性能先存储在岩石试样中,当达到极限值时,试样发生变形和破坏,存储的弹性能一部分以试样的破坏损伤显现出来,其余的能量以热能、动能以及各种辐射能等形式表现出来。

假设岩石试样在外荷载作用下处于不进行热交换的理想状态,热力学第一定律的关系如下^[23-26]:

$$U = U^e + U^d \quad (2)$$

式中: U 为岩石试样总能量, J/cm^3 ; U^d 为岩石试样耗散能, J/cm^3 , 主要用于塑性变形和内部损伤变形; U^e 为岩石试样弹性能, J/cm^3 。

将总能量、弹性能、耗散能之间的关系图见图8,其中总能量 U 为应力-应变曲线的面积积分。

岩石试样中单元能量^[26-28]为:

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (3)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3^e \quad (4)$$

由胡克定律,将式(4)改写为:

$$U^e = \frac{1}{2E_0} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (5)$$

式中: E 为弹性模量^[25-28]; ν 为泊松比。在单轴压缩中, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 此时弹性能计算公式为:

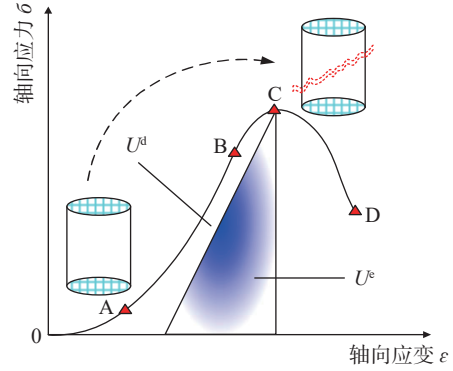


图8 岩石试样内部能量演化关系^[23,27]

$$U^e = \frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (6)$$

总能量 U 为对应力-应变曲线所围成的面积,根据定积分计算面积概念,总能量 U 计算公式为:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_1^i + \sigma_1^{i+1})(\varepsilon_1^{i+1} - \varepsilon_1^i)}{2} \quad (7)$$

式中: σ_1^i 为岩石试样中轴向应力-应变曲线任一点应力, MPa ; ε_1^i 为应力-应变曲线中任一点应变。

故试样的耗散能为^[23,26]:

$$U^d = U - U^e \quad (8)$$

3.2 不同倾角单裂隙对岩石能量演化规律分析

根据上述能量计算原理及公式,可求出不同倾角单裂隙对岩石试样能量演化过程中各部分的总能量、弹性能和耗散能具体数值,演化曲线见图9。

图9共由6幅小图组成,从(a)~(f)依次对应于裂隙倾角 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$, 每幅小图内部由五部分组成:轴向应力(绿色)、总能量(黑色)、弹性能(红色)、耗散能(蓝色)以及在数值模拟软件 PFC 中试样的倾角与裂隙的关系图。观察不同倾角下的能量演化过程,可总能量均是随着应变的增加而增加,且增加的幅度越来越陡峭,裂隙倾角为 0° 和 75° 情况下,总能量均接近 $0.035 \text{ J}/\text{cm}^3$; 弹性能均是随着应变的增加呈现出先增大后减小的趋势,且在第一个荷载阶段(OA),其与总能量近乎贴合,在达到峰值前,弹性能增加的幅度也越来越大,直至达到峰值点,达到峰值点后,弹性能出现骤降,与末点弹性能之比最大可达到 6.5 倍; 反观耗散能的变化趋势,其与总能量和弹性能有显著差异。在峰值应变前,耗散能近乎平稳,且数值极小,到达峰值应变后,耗散能呈现出近乎直线上升的趋势,增幅倾角接近于 90° 。

3.3 岩石冲击性能指标

目前,岩石冲击性能指标主要包括强度指标、刚

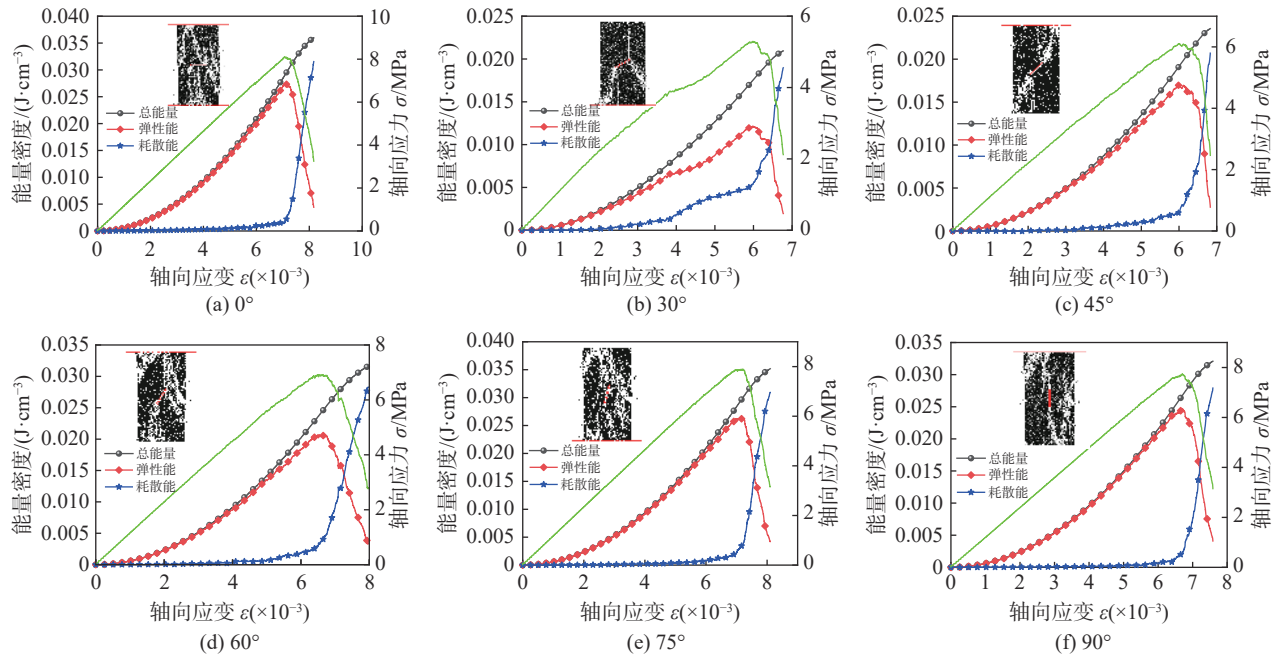


图9 不同倾角单裂隙下岩石试样内部能量演化

度指标、变形指标和时间指标等, 这些指标均可在一定程度上反映岩石试件峰值前弹性应变能积累或破坏后能量消耗或二者的相对关系。岩石的抗冲击性与能量的储存、释放存在密切相关的关系, 因此, 可以从岩石试样峰值前弹性应变能积累能力和破坏后能量消耗能力两个角度分析岩石抗冲击性能^[29]。

岩石试样峰值前弹性能应变积累的能力可用弹性能存储率 E_m 来衡量, 岩石试样破坏后能量消耗的能力可用弹性能释放率 E_k 来衡量。

弹性能存储率 E_m 可表示为

$$E_m = U^c / \varepsilon_c \quad (9)$$

弹性能释放率 E_k 可表示为

$$E_k = (U^c - U^u) / \varepsilon_u \quad (10)$$

式中: U^c 为应力峰值处所储存的弹性应变能; U^u 为终值应力(即试件完全破坏)处所储存的弹性能; ε_c 为应力峰值处的应变; ε_u 为终值应力处所对应的应变。

3.4 不同倾角单裂隙岩石冲击性能指标的规律分析

根据 3.3 中论述的冲击倾向性指标的评判方法以及弹性能存储率 E_m 和弹性能释放率 E_k 的计算公式, 将不同裂隙倾角下岩石试样的 E_m 和 E_k 计算出来, 并分别绘制出来, 如图 10 所示。

图 10(a) 为不同倾角单裂隙下岩石试样的弹性能存储率 E_m 的变化情况, 图 10(b) 为不同倾角单裂隙下岩石试样的弹性能释放率 E_k 的变化情况。由 10(a) 可知, 随着单裂隙倾角的增大, 弹性能存储率 E_m 呈现出减—增—减的趋势, 在裂隙倾角为 30° 时

E_m 达到最小值, 在裂隙倾角为 75° 和 90° 时 E_m 达到较大值。由 10(b) 可知, 随着单裂隙倾角的增大, 弹性能存储率 E_k 呈现出减—增—减—增的趋势, 也在

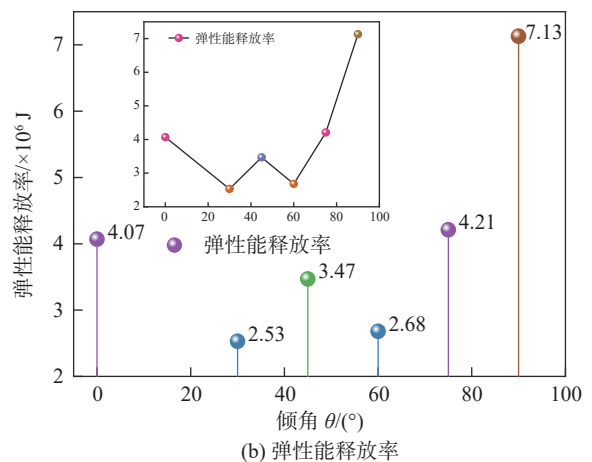
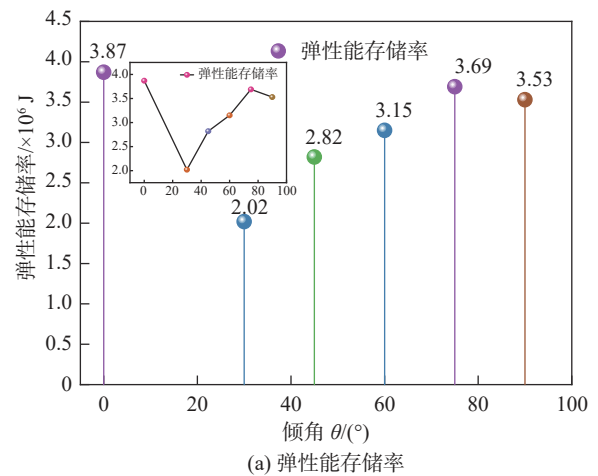


图 10 不同倾角单裂隙下岩石试样的冲击倾向性分析

单裂隙倾角为 30° 时 E_k 达到最小值, 在裂隙倾角为 90° 时 E_k 达到较大值。说明在单裂隙倾角为 30° 时, 岩石试样冲击倾向性最弱, 在单裂隙倾角为 90° 时, 岩石试样冲击倾向性最强。

为便于对比观察, 将不同倾角单裂隙下岩石试样的弹性能存储率 E_m 与弹性能释放率 E_k 绘制在同一幅三维图中如图 11 所示。

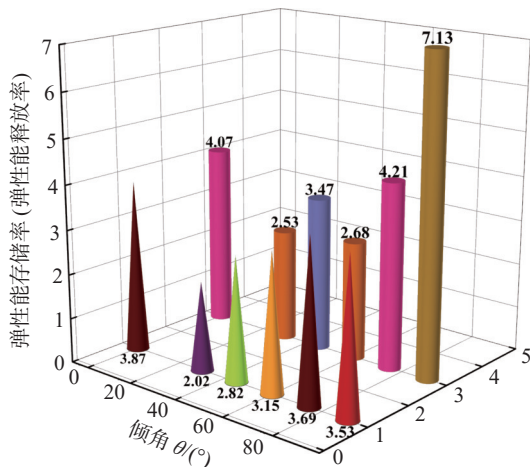


图 11 3D 中不同倾角单裂隙岩石试样的冲击倾向性分析

由图 11 可知, 三维图下不同倾角单裂隙岩石试样的冲击倾向性对比更加明显, 虽然随着单裂隙倾角的增大, 弹性能存储率 E_m 和弹性能释放率 E_k 的变化趋势存在细小差别, 但均在单裂隙倾角为 30° 时达到最小值。即在单裂隙倾角为 30° 时, 裂隙沿加载方向最容易扩展, 岩石试件积累能量程度最低, 岩石试样冲击倾向性最弱, 有利于降低冲击地压危险。单裂隙倾角为 90° 时, 岩石试样冲击倾向性相对最强, 不利于冲击地压的防治。

4 结论

本文基于颗粒流 PFC2D, 建立了砂质泥岩模型, 研究了不同倾角单裂隙对砂质泥岩失稳演化, 主要结论如下:

(1) 随着单裂隙倾角变大, 砂质泥岩的强度与弹性模量先降低后增大。预制裂纹会影响断裂面的裂纹起始位置, 并加速断裂面的形成。裂隙发育以张拉裂隙为主, 剪切裂隙为辅, 其破坏形式主要是拉伸破坏。

(2) 砂质泥岩声发射活动可分为无损期、增长期、爆发期和回落期四个阶段, 声发射事件在岩样破坏前存在小范围沉寂期, 该特征可作为岩石破坏的前兆判据。

(3) 随着裂隙倾角的增大, 总能量持续增大, 弹性能 and 耗散能呈现先增加后减小的趋势, 但增幅存在较

大差别。

(4) 在单裂隙倾角为 30° 时, 裂隙沿加载方向最容易扩展, 岩石试件积累能量程度最低, 岩石试样冲击倾向性最弱, 有利于降低冲击地压危险。单裂隙倾角为 90° 时, 岩石试样冲击倾向性相对最强, 不利于冲击地压的防治。

参考文献

- [1] 王春萍, 王璐, 刘建锋, 等. 单轴压缩条件下单裂隙花岗岩力学特性及破坏特征 [J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(2): 369-376, 446.
- [2] 钟振, 孟醒, 胡云进, 等. 考虑基质渗透性的岩体单裂隙渗流及影响因素的室内和数值试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2148-2163.
- [3] 宋洋, 罗志恒, 张波, 等. 裂隙位置对类岩体短柱单轴压缩破坏形态影响 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2023, 53(5): 121-131.
- [4] 宋勇军, 李晨婧, 毕冉, 等. 冻融作用下岩石孔隙扩展演化特征研究 [J]. 冰川冻土, 2023, 45(3): 1116-1127.
- [5] 陈家嵘, 周昌台, 周韬, 等. 压剪荷载下含单一裂隙砂岩的应变演化与破坏特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1743-1758.
- [6] 王磊, 刘化强, 李少波, 等. 不同围压下含预制裂隙煤体裂隙演化特征研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4): 786-797.
- [7] 王磊, 刘化强, 李少波, 等. 煤体张开裂隙演化规律及失稳前兆试验 [J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(2): 250-263.
- [8] LI X, YAO Z, LIU X, HUANG X. Energy evolution and damage mechanism of fractured sandstone with different angles. Energies. 2022, 15(4): 1518.
- [9] CHEN J, YIN X, ZHOU C, et al. Interaction between flaws and failure characteristics of red sandstone containing double flaws under compressive-shear loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 292, 109664.
- [10] 章德超, 肖桃李, 折海成, 等. 基于 DIC 的裂隙分布对层状复合岩力学特性及变形破坏影响研究 [J/OL]. 中国测试, 2023, 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20230928.1719.002.html>.
- [11] 周春煦, 冯红春, 周文正. 充填双裂隙砂岩力学特性及裂隙演化规律研究 [J/OL]. 有色金属科学与工程, 2024, 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.TF.20231013.1607.004.html>.
- [12] ZHANG Y, ZHONG L, PANG F, et al. Characteristics of energy dissipation in T-shaped fractured rocks under different loading rates [J]. Sustainability, 2023, 15(18): 13695.

- [13] CHEN Y, TANG Y, CAO R, et al. Failure mode of parallel-fractured rock-like sample with different inclinations[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 127: 104053.
- [14] REN X, ZHANG H, ZHANG J, et al. Numerical simulation analysis of fracture propagation in rock based on smooth particle hydrodynamics[J]. *Materials*, 2023, 16(19): 6560.
- [15] 张岩, 经纬, 经来旺, 等. 裂隙倾角及长度对岩石强度和破坏特征影响数值模拟 [J]. *煤炭技术*, 2023, 42(10): 106-109.
- [16] 王子航, 陈俊智, 冯豪天. 直剪条件下含裂隙岩石变形特征研究 [J]. *有色金属(矿山部分)*, 2023, 75(5): 127-133.
- [17] WU Y, MA D, HU X, et al. Numerical simulation on the mechanical and fracture behavior of bedding argillaceous sandstone containing two pre-existing flaws[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 127: 104047.
- [18] 李志强, 刘国锋, 晏长根, 等. 含原生隐微裂隙岩石颗粒流模型构建及细观参数标定方法研究 [J]. *工程地质学报*, 2023, 31(6): 1842-1853.
- [19] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流 (PFC5.0) 数值模拟技术及应用 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(S2): 36.
- [20] 原先凡. 砂质泥岩卸荷流变力学特性研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2014.
- [21] ZHANG S, CHEN L, LU P, et al. Analysis of the energy and damage evolution rule for sandstone based on the particle flow method[J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2022, 26(3): 531-546.
- [22] YANG Y S, CHENG W, ZHANG Z R, et al. Energy evolution law of marble failure process under different confining pressures based on particle discrete element method[J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8: 665955.
- [23] 王桂林, 张亮, 许明, 等. 单轴压缩下非贯通节理岩体损伤破坏能量演化机制研究 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 639-647.
- [24] 刘鹏飞, 范俊奇, 郭佳奇, 等. 三轴应力下花岗岩加载破坏的能量演化和损伤特征 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(2): 44-53.
- [25] 尹升华, 侯永强, 杨世兴, 等. 单轴压缩下混合集料胶结充填体变形破坏及能耗特征分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(3): 936-947.
- [26] LI P, CAI M. Energy evolution mechanism and failure criteria of jointed surrounding rock under uniaxial compression[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(6): 1857-1874.
- [27] 张如九, 张延杰, 高全, 等. 基于最大能量耗散率的岩爆倾向性指标研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(12): 2993-3009.
- [28] 张亮, 王桂林, 雷瑞德, 等. 单轴压缩下不同长度单裂隙岩体能量损伤演化机制 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 24-34.
- [29] 朱志洁, 李瑞琪, 汤国水, 等. 含裂隙煤体能量耗散特征与冲击倾向性研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(5): 32-44.

收稿日期: 2023-10-28