

### 三轴压缩下裂隙岩体破坏模式及能量演化研究

徐阳周宗红 杨渊 梁源贵 李绍斌

### Study on Failure Mode and Energy Evolution of Fractured Rock Body under Triaxial Compression

XU Yang, ZHOU Zonghong, YANG Yuan, LIANG Yuangui, LI Shaobin

### 引用本文:

徐阳,周宗红,杨渊,等. 三轴压缩下裂隙岩体破坏模式及能量演化研究[J]. 高压物理学报, 2024, 38(5):054203. DOI: 10.11858/gywlxb.20240722

XU Yang, ZHOU Zonghong, YANG Yuan, et al. Study on Failure Mode and Energy Evolution of Fractured Rock Body under Triaxial Compression[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(5):054203. DOI: 10.11858/gywlxb.20240722

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240722

### 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

### 三轴应力下花岗岩加载破坏的能量演化和损伤特征

Damage and Energy Evolution Characteristics of Granite under Triaxial Stress 高压物理学报. 2021, 35(2): 024102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200622

### 节理几何参数对岩体力学特征的影响

Influence of Joint Geometrical Parameters on Mechanical Properties of Rock Mass 高压物理学报. 2021, 35(6): 064202 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210753

### 不同应变率下两种岩石的压缩破碎特征试验研究

Experimental Study on Compression and Fracture Characteristics of Two Kinds of Rocks under Different Strain Rates 高压物理学报. 2021, 35(1): 014101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200605

### 高压下岩浆凝固对岩石圈力学状态的影响

Effect of Magma Solidification under High Pressure on Mechanical State of Lithosphere 高压物理学报. 2022, 36(1): 011203 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210905

### 非均质岩石动态断裂损伤细观特征模拟分析

Simulation Analysis of Mesoscale Characteristics in the Dynamic Fracture Damage of Heterogeneous Rock 高压物理学报. 2023, 37(4): 044204 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230638

### 非均质岩石动态断裂损伤细观特征模拟分析

Simulation Analysis of Mesoscale Characteristics in the Dynamic Fracture Damage of Heterogeneous Rock 高压物理学报. 2023, 37(4): 044204 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230638 DOI: 10.11858/gywlxb.20240722

# 三轴压缩下裂隙岩体破坏模式及能量演化研究

徐 阳<sup>1</sup>,周宗红<sup>2</sup>,杨 渊<sup>3</sup>,梁源贵<sup>3</sup>,李绍斌<sup>3</sup>
(1.昆明理工大学公共安全与应急管理学院,云南昆明 650093;
2.昆明理工大学国土资源与工程学院,云南昆明 650093;
3. 鹤庆北衙矿业有限公司,云南大理 671507)

摘要:为研究不同围压条件下含不同长度单裂隙岩体的裂纹扩展特征和能量演化规律,基于室内三轴压缩试验结果标定细观参数,开展了 PFC<sup>2D</sup>颗粒流数值模拟试验。结果表明:拉伸裂纹先于剪切裂纹产生,两者呈指数增长,裂隙长度减小和围压增大使拉伸裂纹和剪切裂纹快速增长时间滞后;最终破坏时,随裂隙长度增加,拉伸裂纹和剪切裂纹减少。应力集中于裂隙两端,裂纹周围存在应力集中现象。相同围压下,裂隙长度增加,岩样破坏时块体数减少。岩体破坏本质为能量储存、耗散与释放的过程,在加载过程中,岩体能量转化被分为4个阶段。裂隙长度增加削弱岩样储存应变能的能力,总能量减少,围压增强岩样储存应变能的能力。岩样破坏时,耗散能大于应变能,随裂隙增长,耗散能减少。

关键词:单裂隙岩体;三轴压缩;PFC<sup>2D</sup>模拟试验;裂纹扩展;能量演化

### 中图分类号:O346.1; O521.9; TU45 文献标志码:A

随着矿产资源开采不断向地下空间扩展,地应力不断增加,而岩体在复杂应力环境中易发生破坏, 从而威胁工作人员的安全。因此,研究不同围压下的岩体破坏模式和变形破坏过程中的能量演化规 律,对深部矿产资源开采安全性具有重要意义。李泓颖等<sup>[1]</sup>针对大理岩开展了不同围压下的三轴压缩 试验,研究了不同卸载条件下岩体的破坏特征与能量演化。刘鹏飞等<sup>[2]</sup>针对花岗岩开展了不同围压下 的三轴压缩试验,研究了破坏过程的力学特性、能量演化规律和损伤演化模型。Li等<sup>[3]</sup>在特定围压下 对盐岩进行了三轴压缩试验,研究了不同围压和应变速率下的力学特性和能量演化。Du等<sup>[4]</sup>探究了 煤样在三轴压缩下的力学特性和能量转化规律,结果表明,围压可以抑制裂纹扩展,增强煤样储能能 力。刘之喜等<sup>[5]</sup>对砂岩进行了真三轴压缩试验,研究了三向主应力加、卸载对岩体的影响,并计算得到 了其能量密度。Zhang等<sup>[6]</sup>对3种不同类型的岩石进行了真三轴压缩试验,分析了不同围压下的能量 演化规律和储能极限。

上述研究对象主要为完整岩样,但实际工程中,岩体内部多含有裂隙,裂隙的存在会导致岩体表现 出多种力学行为,成为影响岩体结构稳定性的关键因素,同时对人员生命安全和设备运行造成不利影 响。王星辰等<sup>[7]</sup>运用 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟软件研究了细观参数对宏观参数的影响和不同倾角的双裂隙岩体 在不同围压下的力学行为。方前程等<sup>[8]</sup>利用 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟软件,在类岩石材料试验的基础上建立含 断续节理的岩体模型,研究了不同围压和不同裂隙倾角下的力学特性和能量演化规律。黄明智等<sup>[9]</sup>、 Song 等<sup>[10]</sup> 对不同倾角、不同宽窄单裂隙花岗岩进行了三轴压缩试验,利用 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟软件研究了 其破坏特征和能量演化。

目前研究集中于不同围压、不同裂隙倾角和数量对岩体的力学特性、能量演化和失效特性的影

 <sup>\*</sup> 收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-03-21
 基金项目: 国家自然科学基金(52264019)
 作者简介: 徐 阳(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿山安全与岩石力学研究. E-mail: 351675412@qq.com
 通信作者: 周宗红(1967-), 男, 博士, 教授, 主要从事采矿工程与岩石力学研究. E-mail: zhou20051001@163.com

响。裂隙的倾角、数量、长度均为常见变量,当围压改变时,裂隙长度对岩体的破坏模式和能量演化等 的影响将产生差异。因此,研究不同围压下、不同裂隙长度岩体的破坏模式及能量演化规律,对于丰富 裂隙岩体在不同围压下的岩体稳定性具有重要意义。

基于此,本工作在室内三轴压缩试验的基础上,利用 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟软件建立岩样模型,研究三轴 压缩条件下不同裂隙长度岩体微裂纹的演化规律,通过接触力链分析破坏机理,运用块体图得到最终 破坏模式,分析不同岩样的能量演化规律、峰值弹性应变能(储能极限)以及峰值和峰值后的能量差异。

## 1 数值模型设计和参数校准

### 1.1 数值模型建立

基于 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟软件中的线性平行黏结(parallel bonding, PB)模型<sup>[11]</sup>,建立三轴压缩颗粒流模型,如图 1 所示。模型长 100 mm,宽 50 mm,在该区域内生成 11 019 个均匀分布的颗粒,有 25 308 个接触。保持侧墙围压恒定,由 Fish 伺服控制顶部和底部墙体运动,模拟常规三轴压缩试验。去除指定区域内的颗粒,设置预制裂隙,裂隙中心与岩样中心重合,裂隙倾角为固定值 45°,裂隙长度(*L*)分别为 0、5、10 和 15 mm<sup>[12]</sup>,所受围压分别为 2.5、5.0、10.0 和 15.0 MPa<sup>[13]</sup>。



Fig. 1 Model of fissure rock sample

### 1.2 细观参数的选择与校准

模型破坏模式和能量演化受细观参数影响,为确保模拟结果的准确性和合理性,开展模拟试验前 需进行岩样模型细观参数标定。基于室内三轴压缩试验获得的力学行为,采用试错法不断调整模型细 观参数<sup>[14]</sup>,直至数值模拟结果与室内试验结果基本一致,如表1所示。

室内三轴压缩试验和 PFC<sup>2D</sup>数值模拟试验得到的应力-应变曲线如图 2 所示,两者变化相似,该模型岩样能准确反映其破坏特征<sup>[15]</sup>。数值模型中颗粒间接触相对密实,而实际岩样中存在微裂隙,在数值模拟中很难模拟室内试验的压密过程,因此,峰值前室内试验与数值模拟之间存在差距。数值模拟所得偏应力和弹性模量(峰值应力与峰值应变之比)如表 2 所示。可见误差较小,数值模拟力学参数与室内试验力学参数基本一致。

| Minimum radius of particles/mm      | Ratio of maximum to minimum of radius  | Density of the particle/<br>(kg·m <sup>-3</sup> )   | Friction coefficient            | Bond friction<br>angle/(°)  |
|-------------------------------------|--|---|---------------------------------|-----------------------------|
| 0.3                                 | 1.5  | 2 950   | 0.17                            | 40                          |
| Parallel bonding<br>stiffness ratio | Particle stiffness ratio   | Effective modulus of bonding/GPa  | Tangential bond<br>strength/MPa | Normal bond<br>strength/MPa |
| 1.1                                 | 1.1  | 11  | 76.6                            | 69.6                        |
|                                     | $\begin{array}{c} 160 \\ 140 \\ \hline \\ 140 \\ \hline \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ $ | est results<br>al simulation test results<br>3 4 5 6 7 8<br>Axial strain/10 <sup>-3</sup> | 9 10                            |                             |
|                                     | 图 2 室内试验   | <sup>[16]</sup> 与 PFC <sup>2D</sup> 数值模拟结果  | 对比                              |                             |

表 1 岩石 PFC 模型细观参数 Table 1 Mesoscopic parameters of the rock PFC model

Fig. 2 Comparison between indoor test<sup>[16]</sup> and PFC<sup>2D</sup> numerical simulation

### 表 2 室内试验<sup>116]</sup> 与数值模拟对比

 Table 2
 Comparison between indoor test<sup>[16]</sup> and numerical simulation results

| Method                      | Deviatoric stress/MPa | Elastic modulus/MPa |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------|
| Indoor test <sup>[16]</sup> | 144.782               | 17.147              |
| Numerical simulation        | 144.670               | 17.109              |
| Error/%                     | 0.077                 | 0.222               |

## 2 数值模拟结果分析

## 2.1 不同长度裂隙岩体微裂纹发展分析

岩样宏观破坏主要由微裂纹不断发育、扩展所致。岩样加载过程中,随荷载不断提升,其内部将 产生拉伸裂纹(黑)和剪切裂纹(红),原理如图3所示。裂纹均沿接触颗粒的公切线产生,当颗粒之间 的拉力或剪力超过承受能力时,将产生相应破坏模式的微裂纹。



图 3 平行黏结破坏模式 Fig. 3 Parallel bonding damage pattern

054203-3

PFC<sup>2D</sup>能记录加载过程中所产生的微裂纹,分析不同条件下微裂纹的演化规律。如图 4、图 5 和图 6 所示,在初期加载阶段,岩样内无微裂纹产生,随荷载不断增加,其内部最先产生拉伸裂纹,一段时间后 产生剪切裂纹,剪切裂纹的产生滞后于拉伸裂纹,且剪切裂纹较少,因此,总裂纹数的变化趋势与拉伸 裂纹数的变化趋势相似。拉伸裂纹数和剪切裂纹数均呈指数增长,由斜率得到拉伸裂纹数的增长速率 高于剪切裂纹数。随裂隙长度增加,岩样更易破坏,总裂纹数、拉伸裂纹数和剪切裂纹数快速增长的时 间点提前,达到平稳阶段的时间点也将提前。随围压增大,总裂纹数、拉伸裂纹数和剪切裂纹数快速增 长时间滞后,达到平稳阶段的时间也滞后。当岩样所受围压为 5.0 和 15.0 MPa,裂隙长度为 10 和 15 mm,裂纹演化趋于平稳阶段时,裂纹数量还会出现一段时间的台阶式增长。



#### 图 4 不同围压和裂隙长度下岩样总裂纹的演化规律





054203-4



图 5 不同围压和裂隙长度下岩样拉伸裂纹的演化规律







由图 7 可知,在相同围压条件下,随着裂隙长度增加,岩体的峰值应力和弹性模量均降低,导致岩体更易被破坏,应力集中于裂隙尖端周围,导致岩样最终破坏时的总裂纹数、拉伸裂纹数和剪切裂纹数均随着裂隙长度的增加而减少。当岩样所受围压分别为 2.5、5.0、10.0 和 15.0 MPa 时,裂隙长度每增加 5 mm,总裂纹数平均下降 253、206、309、355,降幅分别为 42.55%、35.62%、54.03%、53.14%;拉伸裂纹占比平均值随围压的增加而逐渐降低,降幅分别为 89.49%、88.52%、87.51%、85.44%,围压增加导致岩样破坏时,剪切裂纹数占比升高。当裂隙长度不超过 5 mm 时,随着围压增加,总裂纹数和拉伸裂纹数均呈现先上升后下降趋势,随着围压增加,完整岩样的剪切裂纹数增加。



Fig. 7 Cracks number in rock specimens after failure under different confining pressures and fissure lengths

### 2.2 不同裂隙长度的岩体破坏模式分析

表3给出了不同裂隙长度的岩样在不同围压下的接触力链变化,其中,蓝色代表压应力,红色代表 拉应力,黑色为微裂纹。到达峰值应力前,接触力链分布模式基本一致,内部应力分布均匀,压应力集 中于裂隙两端,拉应力集中于裂隙中部。达到峰值应力时,随着裂隙增长和围压增加,接触力链数目逐 渐减少,岩样开始产生微裂纹,相对于峰值前有所增加;存在裂隙时,微裂纹集中于裂隙两端,随着裂隙 增长,压应力更集中于裂隙两端,随着围压增加,接触力链模式不变。峰值应力后,岩样接触力链进一 步减少,应力集中区域产生大量微裂纹,最终形成宏观裂隙,微裂纹分布模式仅随裂隙长度变化而不随 围压变化。随着岩样所受围压增加,接触力链数目逐渐减少,接触力链稀疏位置存在明显裂纹扩展,裂 纹周边存在应力集中现象,裂纹扩展与接触力链分布密切相关。

由图 8、图 9、图 10、图 11 和图 12 可得岩体最终破坏的块体数量和模式,图 9、图 10、图 11 和 图 12 中的颜色表示岩样破碎程度,也表示破坏位置,不同颜色之间没有区别,但颜色改变时即产生新 的破坏块体。当围压相同时,随着裂隙长度增加,裂纹数目减少,破坏程度降低,块体数也减少。在高 围压条件下(15.0 MPa),岩样几乎沿上下对角破坏为两部分,碎块基本集中于破坏的两部分岩样中间, 并且碎块的破碎程度较高。在相同围压条件下,岩样破坏基本沿裂隙尖端产生的翼裂纹方向,直至与 岩样对角贯通破坏并产生碎块,碎块主要集中在破坏路径上。当岩样所受围压分别为 10.0 和 15.0 MPa、 裂隙长度为 15 mm 时,岩样沿裂隙两端方向与岩样上下对角贯通破坏。除完整岩样在 2.5 MPa 围压下 破坏为一个大块体和若干小块体外,其余岩样的破坏模式以对角线斜剪切破坏为主,并伴有局部的小 破坏区。

## L/mm Confining pressure/MPa Pre-peak period Peak value Post-peak period Compression Tension Compression Tension Compression Tension 5.0 0 Compression Tension Compression Tension Compression Tension 10.0 Compression Tension Compression Tension Compression Tension 5.0 5 Compression Tension Compression Tension Compression Tension 10.0 Compression Compression Compression Tension Tension Tension 5.0 10 Compression Compression Compression Tension Tension Tension 10.0

### 表 3 不同裂隙长度的岩样在不同围压下的接触力链演化过程

### Table 3 Evolution of contact force chain of rock samples under different confining pressures and fissure lengths



图 8 不同围压下岩体最终破坏块体数

Fig. 8 Final number of failure blocks of rock mass under different confining pressures





Fig. 9 Crushing pattern of rock sample block with a fissure length of 2.5 mm under different confining pressures



 图 10
 不同围压下裂隙长度为 5 mm 的岩样块体的破碎形态

Fig. 10 Crushing pattern of rock sample block with a fissure length of 5 mm under different confining pressures



图 11 不同围压下裂隙长度为 10 mm 的岩样块体的破碎形态

Fig. 11 Crushing pattern of rock sample block with a fissure length of 10 mm under different confining pressures





Fig. 12 Crushing pattern of rock sample block with a fissure length of 15 mm under different confining pressures

## 3 不同裂隙长度岩体的能量演化规律

## 3.1 能量计算原理

基于能量演化机制,岩石破裂伴随各种不可 逆的能量变化,岩石变形和破坏过程中能量(应变 能、弹性能等)不可逆地转化为其他形式的能量 (耗散能等)。因此,阐明裂隙岩石中不同能量间 的转变是非常必要的。能量之间的转化关系<sup>[17-18]</sup> 可以表示为

$$W = U = U_{\rm e} + U_{\rm d} \tag{1}$$

式中: W为外部做功, U为岩石从外部吸收的能量, U<sub>a</sub>为岩石中储存的弹性应变能, U<sub>a</sub>为主导塑性变形和裂纹扩展的耗散能量。图 13 给出了岩样变形过程中弹性应变能与耗散能之间的关系曲线。



and dissipation energy of rock samples

在三轴压缩条件下,轴向应力( $\sigma_1$ )和围压( $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ )都作用于岩石,且 $\sigma_2 = \sigma_3$ 。

$$U = \int \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\varepsilon_3 \tag{2}$$

$$U_{\rm e} = \frac{1}{2E_i} \left[ \sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu \left( \sigma_3^2 + 2\sigma_1 \sigma_3 \right) \right]$$
(3)

$$U_{\rm e} \approx \frac{1}{2E_0} \left[ \sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu \left( \sigma_3^2 + 2\sigma_1 \sigma_3 \right) \right]$$
(4)

$$U_{\rm d} = U - U_{\rm e} \tag{5}$$

式中:  $E_i$ 为卸载弹性模量;  $E_0$  为初始弹性模量, 分析中,  $E_i$  可用 $E_0$ 代替;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 为3个主应变;  $\mu$ 为岩样的泊松比。

利用 PFC 颗粒流数值模拟软件可以跟踪能量存储和释放的变化情况,因此,可以从能量变化角度 更直接地分析整个岩样模拟试验的过程和结果<sup>[19-20]</sup>。

### 3.2 裂隙长度和围压对岩样各能量机制的影响

岩样破坏是由能量驱动的宏观失效演变过程,是耗散能与弹性能积累和转化的结果。能量耗散会 对岩石造成影响,导致其变形破坏产生微裂纹并最终失效。三轴压缩试验需满足准静态条件(加载速 度足够小),动能可忽略不计。以 10.0 MPa 围压下的完整岩样和裂隙长度为 5 mm 的裂隙岩样为例进行 分析,可以发现,不同裂隙长度的岩样在整个加载过程中表现出相似的能量变化规律,能量转化过程可 以分为 4 个阶段<sup>[21]</sup>,如图 14 所示。



Fig. 14 Energy conversion curves of different rock samples under 10.0 MPa confining pressure

初始时刻到A点为初始压缩阶段, 岩样从外部吸收机械能, 大部分能量以颗粒胶结能和颗粒应变能的形式储存, 这2部分能量的和为弹性应变能, 随着应变逐渐增大, 岩样内部颗粒逐渐压密, 弹性应变能增长速率增大, 颗粒胶结能转化率高于颗粒应变能, 摩擦能和阻尼能基本为零。

*AB* 段为裂纹逐步拓展阶段,随着应变增大,岩样所受载荷不断提高,岩样变形进一步加剧,弹性应 变能增长远大于耗散能,其中颗粒胶结能仍高于颗粒应变能,摩擦能高于阻尼能,岩样吸收的总能量大 多转化为弹性应变能。此时,裂隙尖端处应力集中开始产生微裂纹,并且剪切裂纹的增加明显少于拉 伸裂纹,裂纹之间的摩擦和滑动消耗能量,阻尼能和摩擦能开始增加。

BC 段为裂纹扩展进入不稳定阶段,裂纹大量出现,储存在岩样中的弹性应变能以岩样摩擦能、阻 尼能和动能等形式迅速释放。此时,耗散能迅速增加,岩样产生裂纹数也增加,剪切裂纹增加量低于拉 伸裂纹,耗散能与裂纹数几乎同时增长。阻尼能增速高于摩擦能,弹性应变能下降,颗粒胶结能下降速 度高于颗粒应变能。B 点处弹性应变能达到最大值,表明岩样累积能量已达极限。

C点以后为最终破坏阶段:峰值应力后,弹性应变能继续下降,弹性应变能比例减小,耗散能持续

升高,耗散能占比增大。直至岩样最终破坏丧失承载能力,应变能和耗散能不再改变,裂纹数量也不再 增加,保持平稳。

### 3.3 裂隙长度和围压对岩样各能量指标的影响

岩样峰值点储存的弹性应变能为储能极限<sup>[22]</sup>,继续加载时,岩体内部弹性应变能以耗散能的形式 释放。为此,分析裂隙长度和围压对峰值点各能量指标的影响,总能量和耗散能如表4所示。

|              |                        | Total energy/kJ | Dissingto day any any |              |
|--------------|------------------------|-----------------|-----------------------|--------------|
| <i>L</i> /mm | Confining pressure/MPa |                 | Dissipated energy     |              |
|              |                        |                 | Energy/kJ             | Proportion/% |
|              | 2.5                    | 288.67          | 9.54                  | 3.30         |
| 0            | 5.0                    | 324.79          | 10.41                 | 3.21         |
| 0            | 10.0                   | 415.48          | 14.47                 | 3.48         |
|              | 15.0                   | 474.29          | 21.31                 | 4.49         |
|              | 2.5                    | 248.58          | 8.24                  | 3.31         |
| E            | 5.0                    | 281.97          | 9.11                  | 3.23         |
| 5            | 10.0                   | 348.54          | 12.51                 | 3.59         |
|              | 15.0                   | 355.56          | 12.34                 | 3.47         |
|              | 2.5                    | 172.37          | 4.89                  | 2.84         |
| 10           | 5.0                    | 205.55          | 7.32                  | 3.56         |
|              | 10.0                   | 279.90          | 9.16                  | 3.27         |
|              | 15.0                   | 293.19          | 10.24                 | 3.49         |
|              | 2.5                    | 153.98          | 5.86                  | 3.8          |
| 15           | 5.0                    | 169.91          | 5.02                  | 2.95         |
| 15           | 10.0                   | 215.02          | 7.95                  | 3.70         |
|              | 15.0                   | 240.84          | 10.34                 | 4.29         |

表 4 不同裂隙长度岩样的峰值点能量指标 able 4 Indexes of peak point energy of rock samples with different fissure lengths

由表4可知,相同长度裂隙下,围压升高时,岩样吸收总能量增加,当裂隙长度为0、5、10、15 mm, 围压从2.5 MPa增加至15.0 MPa时,总能量分别增加185.62、183.19、120.82、86.86 kJ,增幅分别为 64.30%、73.69%、70.09%、56.41%。由此可以得出,裂隙长度增大时,随着围压增加,岩样吸收总能量的 增加量逐渐减小,增幅呈现先升高后降低的趋势,裂隙长度为5 mm时增幅最大。耗散能占总能量的比 重较低,平均占比分别约为3.62%、3.40%、3.29%、3.44%。相同围压下,随着裂隙长度增大,总能量均

呈现下降趋势,分别下降134.69、154.88、200.46、233.49 kJ,降幅分别为46.66%、47.69%、48.25%、49.22%;耗散能平均占比分别为3.31%、3.24%、3.51%、3.94%,裂隙长度为15 mm、围压为2.5 MPa时,吸收总能量最少,为153.98 kJ。

岩样峰值点的弹性应变能可以反映岩样抵抗 破坏的能力。由图 15 可知,相同围压下,储能极 限与裂隙长度具有线性关系

$$Y = B - AL \tag{6}$$

式中:Y为岩样的储能极限,B为完整岩样的储能极限,A为不同裂隙长度对岩样储能极限的影响程度。



Fig. 15 Energy storage limit of fissure rock samples

由式(6)可知,随着裂隙长度增大,岩样的储能极限逐渐下降,岩样更易被破坏。当围压升高时,由 斜率分析可得,岩样的储能极限随裂隙长度增大而下降的趋势不断增大,在2.5、5.0、10.0、15.0 MPa 围 压条件下,裂隙长度每增加1mm,岩样的储能极限分别下降9.23、10.32、12.72、14.13 kJ。裂隙长度相 同时,高围压条件下的岩样储能极限高于低围压,可能是由于围压提高了岩样的峰值强度,岩样破坏需 要吸收更多的能量,裂隙长度的弱化作用逐渐减弱。

随着加载继续进行, 岩样模型最终发生破坏, 峰值应力后各能量参数可以反映裂隙岩体继续承受 荷载的能力。图 16 给出了耗散能和应变能在峰值应力与峰值应力后的差异。由图 16 可以看出, 耗散 能与应变能的变化情况相反, 耗散能显著增加, 应变能显著降低。对比峰值点各能量指标可知, 峰后耗 散能均大于应变能, 输入岩样的总能量主要以耗散能的形式释放。随着裂隙不断增长, 峰后耗散能呈 下降趋势, 围压为 10.0 MPa 时完整岩样的峰后耗散能最大值为 203.12 kJ; 当裂隙长度为 5 mm、围压为 10.0 MPa 时, 峰后耗散能占比最高, 达 57.50%; 当裂隙长度为 15 mm、围压为 5.0 MPa 时, 峰后耗散能占 比最低, 为 44.74%。当围压为 15.0 MPa 时, 其峰后应变能与低围压相比显著增大, 峰后应变能基本呈 先上升后下降的趋势。





### 4 结 论

(1) 围压和裂隙长度会对微裂纹的演化规律和数量产生影响。随着裂隙长度增大,裂纹进入快速 增长的时间缩短;随着围压减小,裂纹进入快速增长的时间进一步缩短。相同围压下,岩样最终破坏时 的总裂纹数和拉伸裂纹数随裂隙长度增大而减少。

(2) 围压和裂隙长度会对岩样破坏模式产生影响。裂隙尖端压应力集中,裂隙中部拉应力集中;随 着加载的进行,应力集中于裂隙尖端周围,裂纹周围存在应力集中现象。相同围压下,随着裂隙长度增 大,岩样最终破坏时块体数减少,破碎程度降低。

(3) 围压和裂隙长度会对能量演化机制产生影响。相同裂隙长度下,岩样的峰值弹性应变能(储能极限)随围压升高而增大;相同围压下,储能极限与裂隙长度呈线性关系。峰后耗散能大于应变能,相同围压下,峰后耗散能随裂隙增长呈下降趋势。

### 参考文献:

[1] 李泓颖, 刘晓辉, 郑钰, 等. 深埋锦屏大理岩渐进破坏过程中的特征能量分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(Suppl 2): 3229–3239.

LI H Y, LIU X H, ZHENG Y, et al. Analysis of characteristic energy during the progressive failure of deep-buried marble in Jinping [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Suppl 2): 3229–3239.

- [2] 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): 024102. LIU P F, FAN J Q, GUO J Q, et al. Damage and energy evolution characteristics of granite under triaxial stress [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(2): 024102.
- [3] LI E B, GAO L, JIANG X Q, et al. Analysis of dynamic compression property and energy dissipation of salt rock under threedimensional pressure [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(14): 388.
- [4] DU X H, XUE J H, SHI Y, et al. Triaxial mechanical behaviour and energy conversion characteristics of deep coal bodies under confining pressure [J]. Energy, 2023, 266: 126443.
- [5] 刘之喜, 孟祥瑞, 赵光明, 等. 真三轴压缩下砂岩的能量和损伤分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 327–341. LIU Z X, MENG X R, ZHAO G M, et al. Energy and damage analysis of sandstone under true triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 327–341.
- [6] ZHANG Y, FENG X T, ZHANG X W, et al. Strain energy evolution characteristics and mechanisms of hard rocks under true triaxial compression [J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105222.
- [7] 王星辰, 王志亮, 黄佑鹏, 等. 预制裂隙岩样宏细观力学行为颗粒流数值模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 86–92.
   WANG X C, WANG Z L, HUANG Y P, et al. Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of the prefabricated fractured rock sample [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 86–92.
- [8] 方前程,周科平,刘学服.不同围压下断续节理岩体破坏机制的颗粒流分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2014, 45(10): 3536-3543.

FANG Q C, ZHOU K P, LIU X F. Failure mechanism of discontinuous joint rock mass under different confining pressures based on particle flow code [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(10): 3536–3543.

- [9] 黄明智, 李新平, 王刚, 等. 三轴压缩条件下单裂隙花岗岩破坏特性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(4): 1208–1218. HUANG M Z, LI X P, WANG G, et al. Study on the failure characteristics of single-fissured granite under triaxial compression condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(4): 1208–1218.
- [10] SONG L B, WANG G, WANG X K, et al. The influence of joint inclination and opening width on fracture characteristics of granite under triaxial compression [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(5): 04022031.
- [11] 陈鹏宇, 孔莹, 余宏明. 岩石单轴压缩 PFC<sup>2D</sup> 模型细观参数标定研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1240–1249.
   CHEN P Y, KONG Y, YU H M. Research on the calibration method of microparameters of a uniaxial compression PFC<sup>2D</sup> model for rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1240–1249.
- [12] 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. ZHANG L, WANG G L, LEI R D, et al. Energy damage evolution mechanism of single jointed rock mass with different lengths under uniaxial compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1): 24–34.
- [13] 周杰, 汪永雄, 周元辅. 基于颗粒流的砂岩三轴破裂演化宏-细观机理 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(Suppl 1): 76-82.
   ZHOU J, WANG Y X, ZHOU Y F. Macro-micro evolution mechanism on sandstone failure in triaxial compression test based on PFC<sup>2D</sup> [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(Suppl 1): 76-82.
- [14] 龙恩林,陈俊智.花岗岩颗粒流模型循环压缩作用下能量特征分析 [J].中国安全生产科学技术, 2019, 15(10): 95–100.
   LONG E L, CHEN J Z. Analysis on energy characteristics of granite particle flow model under cyclic compression [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(10): 95–100.
- [15] 李晓锋, 李海波, 夏祥, 等. 类节理岩石直剪试验力学特性的数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 583–591.
   LI X F, LI H B, XIA X, et al. Numerical simulation of mechanical characteristics of jointed rock in direct shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 583–591.
- [16] 刘剑. 闪长岩加卸荷失稳破裂前兆信息研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
   LIU J. Study on the precursor information of diorite plus unloading instability rupture [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [17] CHEN Z Q, HE C, MA G Y, et al. Energy damage evolution mechanism of rock and its application to brittleness evaluation [J].
   Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(4): 1265–1274.
- [18] WANG Q S, CHEN J X, GUO J Q, et al. Acoustic emission characteristics and energy mechanism in karst limestone failure under uniaxial and triaxial compression [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(3): 1427–1442.
- [19] YANG S Q, LIU X R, JING H W. Experimental investigation on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 63: 82–92.

- [20] ZHANG X P, JIANG Y J, WANG G, et al. Mechanism of shear deformation, failure and energy dissipation of artificial rock joint in terms of physical and numerical consideration [J]. Geosciences Journal, 2019, 23(3): 519–529.
- [21] FENG Q, JIN J C, ZHANG S, et al. Study on a damage model and uniaxial compression simulation method of frozen-thawed rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(1): 187–211.
- [22] 张志镇, 高峰. 受载岩石能量演化的围压效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 1–11.
   ZHANG Z Z, GAO F. Confining pressure effect on rock energy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 1–11.

## Study on Failure Mode and Energy Evolution of Fractured Rock Body under Triaxial Compression

XU Yang<sup>1</sup>, ZHOU Zonghong<sup>2</sup>, YANG Yuan<sup>3</sup>, LIANG Yuangui<sup>3</sup>, LI Shaobin<sup>3</sup>

(1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;
 Heqing Beiya Mining Co., Ltd., Dali 671507, Yunnan, China)

**Abstract:** To study the crack extension characteristics and energy evolution law of the rock body with different lengths of single fissure under different confining pressures, the mesoscopic parameters were calibrated by use of the indoor triaxial compression test, and the numerical simulation test of PFC<sup>2D</sup> particle flow was carried out. The results show that tensile cracks are generated before shear cracks, and both of them grow exponentially; the decrease of the fissure length and the increase of the confining pressure restrain the rapid growth of tensile and shear cracks; when the final failure occurs, the tensile and shear cracks decrease with the increase of the fissure length. The stress is concentrated at both ends of the crack, and there is stress concentration around the crack. Under the same confining pressure, the number of failure blocks of the rock sample decreases with the increment of fissure length. The nature of rock failure is the process of energy storage, dissipation and release, and the rock energy transformation is divided into four stages during the loading process. The increase in fissure length weakens the ability of the rock samples to store strain energy, the total energy decreases, and the confining pressure enhances the ability of the rock samples to store strain energy. The dissipated energy is greater than the strain energy when the rock sample fails, and the dissipated energy decreases with the fissure growth.

**Keywords:** single fissure rock mass; triaxial compression; PFC<sup>2D</sup> simulation test; crack extension; energy evolution