

## 不同加载角压剪耦合作用下岩石强度与渗透性演变特征

范钢伟, 范张磊, 张东升, 张世忠

(中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 华北型石炭-二叠纪煤系基底普遍发育奥陶系灰岩含水层, 煤炭开采受到底板承压含水层突水灾害和水资源流失的双重威胁, 压剪耦合作用下岩石水力特性是大倾角承压水上升开采底板岩层阻水性能评价的基础。综合采用理论分析及离散元数值计算等方法, 建立了不同压剪比例下莫尔圆旋转的岩石失稳判据, 揭示了压剪耦合作用下岩石强度衰减机制, 提出了综合裂隙角度、裂隙扩展速度、改进体积应变等指标的应力阈值确定方法, 明晰了不同加载角、渗透压差及围压条件下岩石微裂纹扩展及渗透性演化特征。主要结论如下: 压剪耦合作用下岩石承载能力降低表现在强度降低与弹性模量增大2个方面; 岩石弹性模量随加载角增大呈现先缓慢增大( $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ )后迅速增大( $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ )再减小( $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ )趋势, 但仍大于初始值; 岩石强度和加载角呈线性负相关关系, 降低幅度和围压成正比, 2 MPa围压下强度降低速度是无围压的1.9倍, 由等效内摩擦角控制; 随着加载角的增大岩石破坏程度降低、峰后应力由脆性跌落向塑性转变; 压剪耦合作用下拉伸裂隙诱导起裂及拉剪复合裂隙主导非稳定扩展解释了不同压剪比例条件起裂应力、损伤应力阈值非线性演化的内在机制; 渗透率回弹位置处于起裂与损伤应力阈值之间并接近后者, 随着加载角的增大, 拉剪复合裂隙(优势渗流路径)分布较为集中; 岩石强度随渗透压差增大而降低, 降低速率和加载角呈负相关关系; 岩石峰值渗透率随着加载角的增大而减小, 降低趋势随着渗透压差的增大由线性向非线性转变; 加载角较大时, 渗透压差与围压对岩石强度及渗透性控制作用减弱。

**关键词:** 渗透性; 保水开采; 加载角; 压剪耦合; 应力阈值; 破裂特征

**中图分类号:** TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)07-3090-12

## Rock strength and permeability under compression-shear coupling corresponding to different loading angles

FAN Gangwei, FAN Zhanglei, ZHANG Dongsheng, ZHANG Shizhong

(School of Mines, China University of Mining &amp; Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The Ordovician limestone aquifer is widely developed in the basement of the Carboniferous Permian coal bearing strata in North China. Coal mining is threatened by both water inrush disasters and water resource loss from the floor confined aquifer. The hydraulic characteristics of the rock under compression and shear coupling action are the basis for evaluating the water resistance performance of the mining floor strata on high inclined confined aquifer. Using theoretical analysis and discrete element numerical calculation methods, the rock instability criterion for the Mohr circle rotation un-

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2024-05-08 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1555

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774268); 江苏省卓越博士后资助项目(2023ZB517); 中央高校基本业务资助项目(2024QN11078)

作者简介: 范钢伟(1985—), 男, 河南汝州人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: fangw@cumt.edu.cn

通讯作者: 范张磊(1992—), 男, 河南永城人, 博士后, 博士。E-mail: fanzhanglei@cumt.edu.cn

引用格式: 范钢伟, 范张磊, 张东升, 等. 不同加载角压剪耦合作用下岩石强度与渗透性演变特征[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3090-3101.

FAN Gangwei, FAN Zhanglei, ZHANG Dongsheng, et al. Rock strength and permeability under compression-shear coupling corresponding to different loading angles[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3090-3101.



移动阅读

der different compression and shear ratios was established, the mechanism of rock strength attenuation under compression and shear coupling action was revealed, the stress threshold determination method for comprehensive indicators such as crack angle, crack propagation speed, and improved volume strain was proposed, and the characteristics of rock micro-crack propagation and permeability evolution under different loading angles, osmotic pressure differences, and confining pressure were clarified. The main conclusions are as follows. The reduction of rock bearing capacity under compression and shear coupling action is manifested in strength reduction and elastic modulus increase. The elastic modulus of rocks shows a trend of first slowly increasing ( $0^{\circ}$ – $15^{\circ}$ ), then rapidly increasing ( $15^{\circ}$ – $30^{\circ}$ ), and then decreasing ( $30^{\circ}$ – $45^{\circ}$ ) with the increase of loading angle, but is still greater than its initial value. There is a linear negative correlation between rock strength and loading angle, and the reduction amplitude is proportional to confining pressure. The rate of strength reduction under 2 MPa confining pressure is 1.9 times that without confining pressure, controlled by the equivalent internal friction angle. As the loading angle increases, the degree of rock failure decreases and the post peak stress drop transitions from brittle to plasticity. Under compression and shear coupling action, the induced initiation of tensile cracks and the dominant unstable propagation of tensile and shear composite cracks explain the inherent mechanism of nonlinear evolution of initiation stress and damage stress thresholds under different compression and shear ratios. The position of permeability rebound is between the threshold of initiation and damage stress, and as the loading angle increases, the distribution of tensile and shear composite cracks (dominant seepage paths) is more concentrated. The rock strength decreases with the increase of osmotic pressure difference, and the rate of decrease is negatively correlated with the loading angle. The peak permeability of rocks decreases with the increase of loading angle, and the decreasing trend changes from linear to nonlinear with the increase of osmotic pressure difference. When the loading angle is large, the control effect of osmotic pressure difference and confining pressure on rock strength and permeability weakens.

**Key words:** permeability; water conservation mining; loading angle; compression shear coupling; stress threshold; fracture characteristic

保水采煤是践行煤炭资源绿色开采、落实生态环境高水平保护及国家可持续发展的重要途径<sup>[1-2]</sup>。华北石炭二叠纪、华南晚二叠纪煤田底板灰岩承压含水层广布,加之部分区域为复杂难采的大倾角煤层( $35^{\circ}$ – $55^{\circ}$ ),采动底板应力环境呈典型的非对称特征<sup>[3-4]</sup>,主要表现为压剪耦合破坏。开采扰动下底板整体阻水性能降低或丧失是承压含水层水位下降的主要因素<sup>[5-6]</sup>。采动渗透率是底板水害风险评估与保水开采可行性评价的关键参数,明确压剪载荷耦合下底板岩石强度与渗透特性是突破大倾角承压含水层上原位保水采煤技术瓶颈的关键。

不同加载角压剪载荷耦合作用下的岩石力学特性研究起步较晚,目前学者主要采用:①试样形状的改变即试样端部呈倾斜状<sup>[7]</sup>、②试验机上直接增加对称倾斜垫片<sup>[8]</sup>、③试验机增加单块垫片+水平推力系统<sup>[9]</sup>、④加载板改进<sup>[10]</sup>等4类方法实现试样动态/静态力学性能的测试。XU等<sup>[11-12]</sup>认为动态压剪耦合下岩石强度随预载荷增加先增大后降低,破裂模式由劈裂向剪切模式转变,岩石强度具有显著的应力路径依赖性。不同加载角条件下岩石静态力学行为和单轴压缩条件下差异性较大,额外的剪应力直接从外部剪切载荷分量施加到岩石试样上,导致更早的微裂纹形

成<sup>[13-14]</sup>。岩石的峰值强度随加载角的增大呈降低趋势,破裂模式由拉剪复合破坏向剪切破坏转变<sup>[15]</sup>。CHEN等<sup>[16]</sup>分析了不同加载角条件下加载速率与含水率对岩石强度及裂隙类型的影响,结合声发射信息确定了压剪耦合作用下应力阈值演化特征。罗斌玉等<sup>[17]</sup>认为加载角将导致莫尔圆圆心向包络线偏移,导致岩石强度降低。不同学者从应力状态分析、最大主应力方向偏差、矿物颗粒摩擦阻力等角度对压剪耦合下的岩石强度演化进行了解释,但较少关注岩石破裂程度及破裂机制。

不同学者从断裂力学角度分析了常规压剪耦合下单一裂隙/多裂隙扩展特征,赵瑜等<sup>[18]</sup>建立了压剪作用下裂隙渗流模型,分析了裂隙扩展过程中渗透性演变特征;刘红岩等<sup>[19]</sup>认为水压可降低压剪闭合/非闭合裂隙起裂应力及强度;黄诗渊、高青鹏等<sup>[20-21]</sup>研究了裂隙产状及裂隙间距对压剪断裂性状及力学性质的影响;郑安兴<sup>[22]</sup>将摩擦效应融入闭合裂隙扩展的压剪判据,分析了不同断裂类型与摩擦效应的关系。魏星等<sup>[23]</sup>采用扭转剪切渗透试验系统分析了压剪耦合作用下黏土渗透性主控因素。以上研究均为压剪耦合下岩石起裂及渗透性演化提供了有益基础。数值计算可克服室内实验室测试技术约束,真实反映不同边

界下岩石破裂过程,但目前仍集中于不同加载角条件下试样/矿柱的强度、破裂形态等方面。孔隙压力对岩石破裂及渗透性方面已形成大量研究成果<sup>[24]</sup>,不同加载角压剪耦合下岩石渗透性及孔压效应有待进一步研究。

基于不同加载角压剪耦合下试样应力特征,建立了考虑加载角、水压、围压条件下莫尔圆旋转的岩石失稳判据,分析了加载角对围岩效应的影响;结合验证后的离散元数值模型分析了压剪耦合作用下岩石

强度、裂隙扩展及渗透性演化特征,以期为大倾角承压条件下采动底板阻水性能评估提供支撑。

## 1 压剪耦合下岩石强度劣化机制

### 1.1 压剪耦合下岩石应力状态分析

根据加载角条件压剪耦合下试样应力状态(图 1, 其中,  $F_c$ 、 $F_n$ 、 $F_s$  分别为试样侧向力、顶底端面轴向力、法向力, N;  $\tau$ 、 $\sigma$  分别为斜截面正应力和剪应力, MPa;  $s$  为斜截面长度, m), 采用平均应力分析:

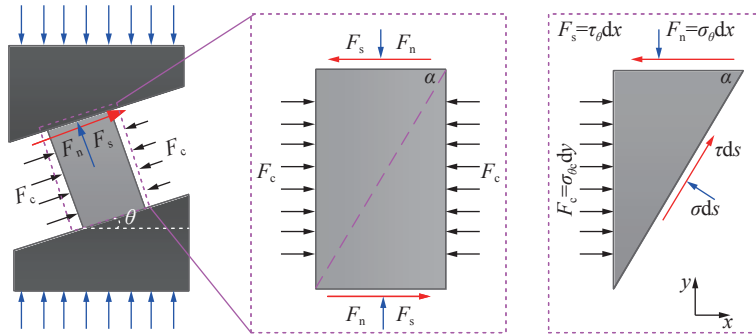


图 1 试样应力状态分析

Fig.1 Stress state analysis of sample

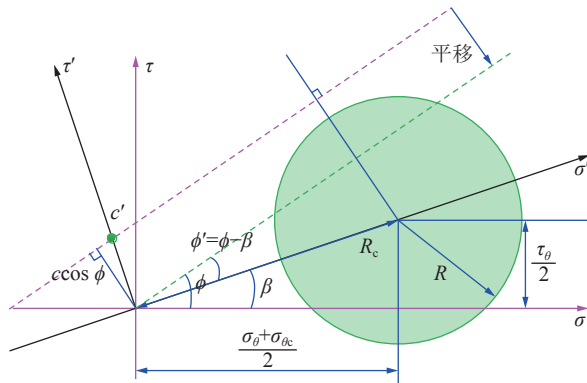
$$\begin{cases} \sigma_{\theta c} dy \sin \alpha + \sigma_{\theta} dx \cos \alpha = \sigma ds + \tau_{\theta} dx \sin \alpha \\ \sigma_{\theta c} dy \cos \alpha + \tau ds = \sigma_{\theta} dx \sin \alpha + \tau_{\theta} dx \cos \alpha \\ dx = ds \cos \theta = ds \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{\theta}$ 、 $\tau_{\theta}$  分别为试样上部压应力、剪应力, Pa;  $\sigma_{\theta c}$  为侧向应力, Pa;  $\alpha$  为斜面和试样底部水平线夹角, ( $^{\circ}$ );  $\theta$  为试样倾斜角度, ( $^{\circ}$ )。

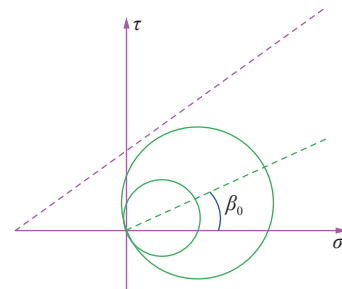
基于三角函数转换关系,可确定非常规(广义)莫尔圆的表达式<sup>[17]</sup>为

$$\left( \sigma - \frac{\sigma_{\theta} + \sigma_{\theta c}}{2} \right)^2 + \left( \tau - \frac{\tau_{\theta}}{2} \right)^2 = \left( \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_{\theta c}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{\theta}}{2} \right)^2 \quad (2)$$

圆心为  $(\sigma_{\theta}/2 + \sigma_{\theta c}/2, \tau_{\theta}/2)$ , 半径为  $\sqrt{(\sigma_{\theta} - \sigma_{\theta c})^2 + (\tau_{\theta})^2}/2$ , 当前应力状态下圆心和原点连线与  $x$  轴夹角  $\beta$ , 如



(a) 坐标转换



(b) 单轴状态莫尔圆

图 2 广义莫尔圆与坐标转换

Fig.2 Generalized mohr circle and coordinate transformation

图 2(a) 所示, 图 2 中,  $c$  为黏聚力, MPa;  $c'$  为新坐标系下 M-C 包络线和剪应力轴的交点对应的剪应力, MPa;  $\phi$ 、 $\phi'$  分别为内摩擦角和等效内摩擦角, ( $^{\circ}$ );  $\sigma'$ 、 $\tau'$  分别为新坐标系对应的正应力和剪应力, MPa;  $R$  为莫尔圆半径, MPa;  $R_c$  为莫尔圆圆心距坐标原点的距离, MPa。和传统的莫尔应力圆相比, 非常规莫尔应力圆圆心并不在主应力坐标轴上, 最小主应力可能是一种拉应力, 摩尔圆更靠近强度包络线, 岩石强度将进一步降低。

假定顶面法向应力等于围压为应力圆的初始状态。将原来主应力坐标轴逆时针旋转  $\beta$  角度可确定出新的主应力  $\sigma'_3$ 、 $\sigma'_1$  空间表达:

$$\begin{cases} \sigma'_3 = R_c - R = \\ \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta + \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_\theta}{2}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_\theta}{2}\right)^2} \\ \sigma'_1 = R_c + R = \\ \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta + \sigma_{\theta c}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_\theta}{2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_{\theta c}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_\theta}{2}\right)^2} \end{cases} \quad (3)$$

新的平面中, 莫尔-库伦包络线仍适用:

$$\begin{cases} \tau' = \sigma' \tan \phi' + c' \\ \phi' = \phi - \beta \\ c' = c \cos \phi / \cos (\phi - \beta) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\phi$ 、 $\phi'$  分别为内摩擦角和等效内摩擦角, ( $^\circ$ )。

由于加载角的存在, 顶面法向应力和切向应力是呈比例存在的。为了确定这一比例, 假定岩石为单轴压缩状态, 其莫尔圆只需将式 (3) 中  $\sigma_{\theta c} = 0$ , 易知莫尔圆必过原点, 圆心间连线和  $x$  轴夹角  $\beta_0$  为  $\tau_\theta / \sigma_\theta$ , 基于法向和切向应变关系可知 (图 2(b)):

$$\tan \beta_0 = \frac{\tau_\theta}{\sigma_\theta} = \frac{\tan \theta}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

式中,  $\nu$  为泊松比。

## 1.2 压剪耦合下岩石强度表达式

新坐标系下 M-C 准则对应的岩石强度表达式为

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{2c \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 有围压条件下岩石强度预测较为困难, 应力圆和莫尔包络线相切时岩石顶面正应力和围压的关系是未知的。假设围压作用导致的等效加载角变化不大 (围压较大时可能不适用), 式 (6) 可表达为

$$\sigma'_1 = \sigma_3 \left\{ \underbrace{\sqrt{1 + \left[ \frac{\tan \theta}{4(1+\nu)} \right]^2} - \frac{\tan \theta}{4(1+\nu)}}_{\text{围压效应}} \frac{1 + \sin (\phi - \beta_0)}{1 - \sin (\phi - \beta_0)} + \underbrace{\frac{2c \cos \phi}{1 - \sin (\phi - \beta_0)}}_{\text{单轴强度}} \right\} \quad (7)$$

三轴条件下岩石强度预测主要分为 2 个部分:

① 压剪围压效应, ② 压剪单轴强度。单轴条件下压剪耦合岩石强度则和前人结果较为一致<sup>[19]</sup>, 由式 (7) 可以看出内摩擦角越大, 不同加载角下岩石强度衰减速度越大。假定岩石黏聚力为 3.1 MPa, 内摩擦角为  $41^\circ$ , 不同泊松比、内摩擦角对应的围压效应如图 3 所示。随着内摩擦角的增大, 围压效应显著性增强, 加载角较大时, 围压效应差别不大, 泊松比对围压效应

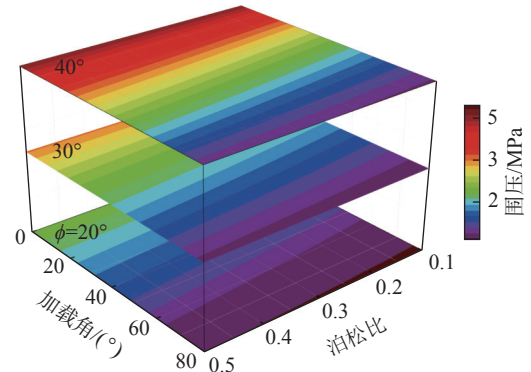


图 3 围压效应

Fig.3 Confining pressure effect

影响不显著。

根据有效应力原理, 将孔隙压力视为内力, 广义莫尔圆表达式为

$$\left( \sigma - \frac{\sigma_\theta + \sigma_{\theta c}}{2} + p \right)^2 + \left( \tau - \frac{\tau_{\theta c}}{2} \right)^2 = \left( \frac{\sigma_\theta - \sigma_{\theta c}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\tau_\theta}{2} \right)^2 \quad (8)$$

式中,  $p$  为孔隙压力, MPa。

按照上文初始状态假设及莫尔库伦准则, 可确定新的强度公式为

$$\sigma'_1 = \sigma_3 \left\{ \underbrace{\left[ \frac{1 - f(p)}{\text{水压效应}} + \left[ \frac{\tan \theta}{4(1+\nu)} \right]^2 - \frac{\tan \theta}{4(1+\nu)} \right]}_{\text{围压效应}} \frac{1 + \sin (\phi - \beta_0)}{1 - \sin (\phi - \beta_0)} + \underbrace{\frac{2c \cos \phi}{1 - \sin (\phi - \beta_0)}}_{\text{单轴强度}} \right\} \quad (9)$$

其中,  $f(p)$  为水压和围压的比例。孔隙压力的作用体现在保持莫尔圆大小不变的前提下, 导致圆心向左偏移更易接近莫尔包络线, 不考虑孔隙压力对岩石力学参数的弱化。

## 2 压剪耦合效应下岩石破裂特征

### 2.1 数值方案及模型验证

UDEC-GBM 离散元数值软件可用来分析岩石真实破裂过程, 对于试件尺度 (100 mm×50 mm), 3 mm 泰森多边形网格被认为是合理的。块体采用弹性本构模型, 对应参数为体积模量  $K$  和剪切模量  $G$ , 节理采用摩尔库伦本构模型, 主要参数为法向刚度  $k_n$ 、剪切刚度  $k_s$ 、黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\phi$ 、抗拉强度  $\sigma_t$ 。基于 UDEC 数值计算原理、接触刚度计算方法及宏观黏聚力、内摩擦角, 采用试错法对模型参数进行调整, 最终确定的模型参数见表 1。



表 1 数值计算参数

Table 1 Numerical calculation scheme

$K/\text{GPa}$	$G/\text{GPa}$	$k_n/\text{GPa}$	$k_s/\text{GPa}$	$c/\text{MPa}$	$\phi/(\circ)$	$\sigma_t/\text{MPa}$
1.73	1.04	600	400	4.8	29	1.2

加载板上下端头施加 0.05 mm/s 加载速度,即上下端头位移边界,两侧为辊支撑。通过监测节理应力获取加载板和试样接触面的正应力和切应力(直接法)。垂直方向力( $F_V$ )、水平方向力( $F_H$ )通过加载板的反作用力获取,轴向应变、侧向应变通过试件中心 1/3 区域监测数据换算后获取,数值模型及测点布置如图 4 所示。

基于实验室单试样加载形式及水平、垂直方向作用力平衡,可确定试样顶部轴向应力和切向应力理论表达式为(间接法)

$$\begin{cases} \sigma_\theta = (F_H \sin \theta + F_V \cos \theta) / A \\ \tau_\theta = (F_V \sin \theta - F_H \cos \theta) / A \end{cases} \quad (10)$$

岩石的压剪强度 $\sigma'_c$ 为

$$\sigma'_c = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \tau_\theta^2} \quad (11)$$

压剪耦合下数值计算与理论计算结果如图 5 所示(以 8°加载角为例)。从试样的水平位移可以明显

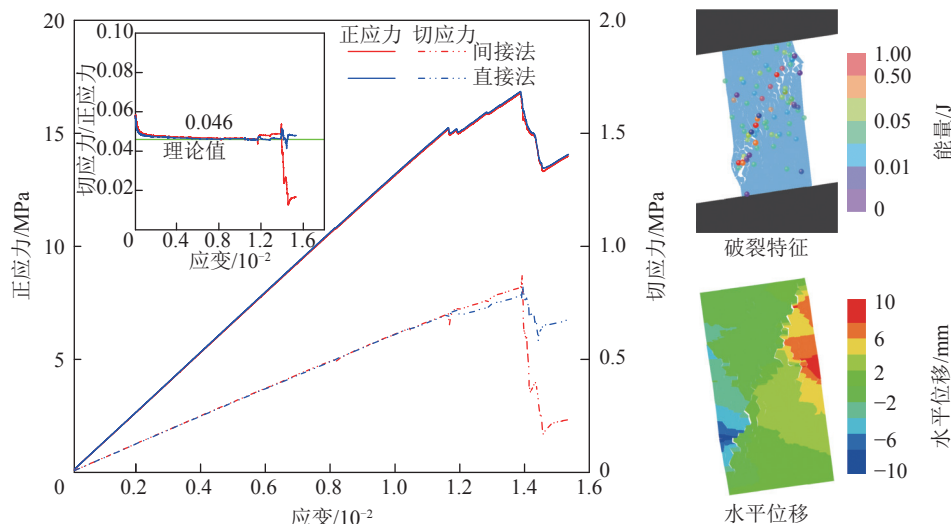


图 5 正应力/切应力演化

Fig.5 Evolution of normal stress/shear stress

在验证模型可靠性的基础上,考虑到实验室加载角通常小于 20°及孔隙压力小于围压的限制(上端头为进气口,设定目标孔压,下端头为出气口,孔压为 0),共设计了 35 组数值计算方案(表 2)。其中,无孔压条件下 15 组,分析不同加载角条件下岩石强度劣化机制及变形破坏特征;剩余 20 组为分析压剪耦合下岩

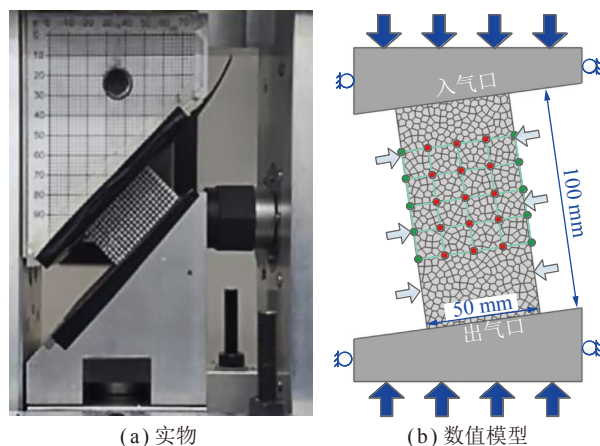


图 4 数值计算模型

Fig.4 Numerical calculation models

看出试样呈非对称破坏,剪应力较大位置(左下、右上)发生剥落,结合单一时步高能释放位置(彩色圆点)可确定试样破裂呈单一剪切破坏模式,和前人实验室测试结果较为一致<sup>[25]</sup>。理论计算与数值计算(直接法、间接法)确定的剪压比均在 0.046 附近,误差率仅为 5%,而岩石峰后阶段存在较大波动,这是由于采用的是离散元数值计算方法,试样破裂后加载板和试样真实接触状态和理论假设存在一定区别,这和实际实验室测试过程较为类似,表明采用不同加载角控制压剪比具有一定的适用性与局限性。

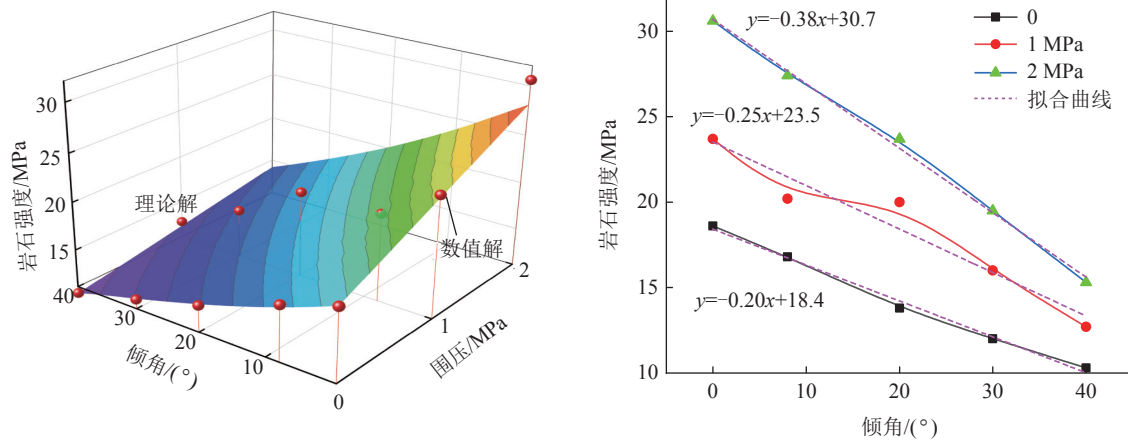
石渗流特征提供数据支撑。

## 2.2 围压对压剪效应的影响

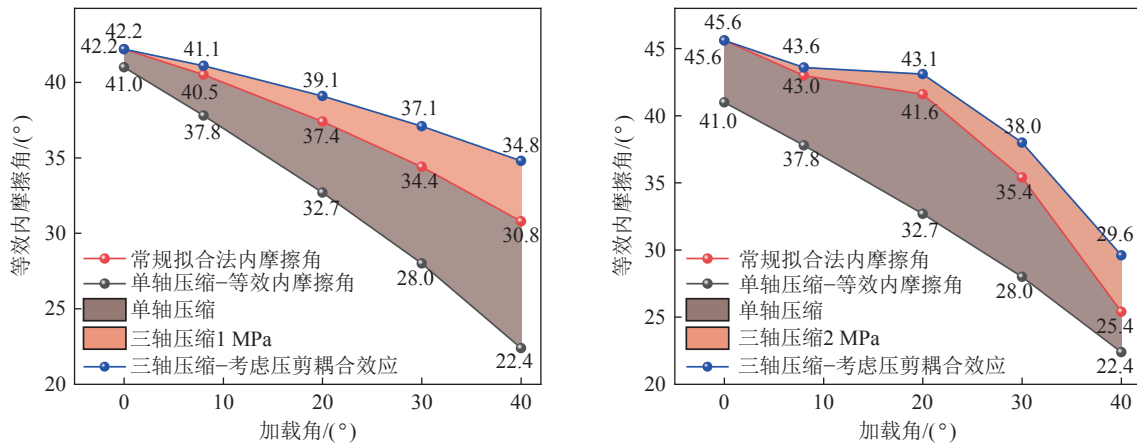
由于数值计算模型较多,只展示相应结果。数值计算和理论计算确定的岩石强度演化趋势较为一致,但数值计算结果大于理论计算结果,且随围压增大愈发明显(图 6),这是由于理论计算时的简化处理,即均

表 2 数值计算方案  
Table 2 Numerical calculation scheme

加载角/(°)	0			8			20			30			40		
围压/MPa	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
			0			0			0			0			0
压差/MPa		0	0.5		0	0.5		0	0.5		0	0.5		0	0.5
	0	0.5	1.0	0	0.5	1.0	0	0.5	1.0	0	0.5	1.0	0	0.5	1.0
			1.5			1.5			1.5			1.5			1.5



(a) 理论解与数值解



(b) 等效内摩擦角

图 6 理论解与数值解对比

Fig.6 Theoretical and numerical solution

采用单轴状态的下莫尔圆旋转角, 围压增大时高估了压剪效应的影响。随着围压的增大, 不同加载角条件下岩石强度衰减速度非线性增大, 围压为 0、1、2 MPa 对应的加载角-岩石强度斜率分别为-0.20、-0.25、-0.38。施加围压后颗粒间自锁结构较为稳定, 间接提升内摩擦角, 当剪切裂隙转化为拉剪复合裂隙后, 试样出现宏观裂纹。随着加载角的增大岩石强度逐渐降低, 围压效应逐渐减弱, 这也是围压越大, 强度下降速度越快的原因。

根据单轴压缩强度及三轴压缩强度结果对等效内摩擦角进行反演, 单轴压缩条件下, 等效内摩擦角

随加载角的增大近似呈线性降低趋势。随着围压的增大, 等效内摩擦角衰减幅度增大, 和强度衰减趋势一致。同时, 是否考虑压剪耦合效应, 对应的等效内摩擦角差值随着加载角的增大而增大。围压为 1 MPa 条件下, 加载角为 0°、8°、20°、30°、40°对应的等效内摩擦角分别为 42.2°、41.1°、39.1°、37.1°、34.8°。围压为 2 MPa 条件下, 随着加载角的增大围压效应 (等效内摩擦角) 先缓慢减小后快速减小, 转折点为 20°; 当加载角大于 30°时, 等效内摩擦角小于围压为 1 MPa 的对应值, 由式 (7) 可知, 围压为 2 MPa 的压剪单轴强度已经小于围压为 2 MPa 的对应值, 两者强度差靠围

压效应弥补,即加载角越大,围压的约束效应减弱。

### 2.3 加载角对岩石破裂模式的影响

为了明确加载角对岩石弹性模量、裂隙扩展的影响机制,以无围压条件为例展开分析(图7(a))。随着加载角的增大,试样塑性显著性增强(由应力应变峰后曲线确定)。岩石弹性模量曲线呈先缓慢增大后迅速增大再减小趋势,分别为1.26、1.33、1.54、2.07、1.84 GPa。和前人实验室测试结果单调递增/递减稍有差异<sup>[10,17]</sup>。表明压剪耦合下试样承受变形能力进一步降低,表现为强度降低和弹性模量增大,可能导致大倾角条件下底板抗干扰能力降低,采动底板岩层更易发生破坏,进而诱发结构性失稳。

不同加载角初始加载阶段试样总是以垂直于加载方向的拉伸裂隙萌生,剪切裂隙逐渐发育。随着倾角的增大,剪切裂隙与拉伸裂隙数量比值减小(图7(b))且该比值的抖动和应力曲线抖动较为一致。常规单轴压缩时,裂隙发育数量较多,随着倾角的增大,裂隙主要集中于对角线两侧,剪切裂隙从缓慢发育向快速发育转变,表明了压剪作用下,岩石剪切裂隙较易萌生、起裂。

图8为不同加载角条件下裂隙数量、长度及类型

演化特征。数值计算中不存在压密阶段,裂隙连续出现位置即为起裂阈值,裂隙扩展速度拐点为损伤阈值。同时,定义了裂隙数量损伤和裂隙长度损伤,即破坏裂隙数量、裂隙总长度和节理总数量、长度之比。数量损伤值总是大于长度损伤值,随着加载角的增大,损伤值呈减小趋势,纯剪切损伤占比随着加载角的增大逐渐增大,加载角为0°时损伤值约为加载角为30°对应值的1.6倍。

随着加载角的增大,I阶段(弹性阶段)对应的应变逐渐降低。非稳定扩展起点对应的应变与峰值应变之比随着加载角的增大逐渐减小,损伤阈值后拉剪复合裂隙起主导作用。

将II阶段(稳定扩展阶段CI)划分为II<sub>1</sub>阶段(纯拉伸阶段)、II<sub>2</sub>阶段(剪切裂隙萌生与扩展阶段),将III阶段(非稳定扩展阶段CD)划分为III<sub>1</sub>阶段(快速扩展阶段)、III<sub>2</sub>阶段(平静期阶段—每步裂隙破裂数量减少),此阶段为岩石破裂提供必要能量。随着倾角的增大,非稳定扩展阶段(III)逐渐增大,无法明确分辨平静期,和其本身能量值降低且能量无法大量集聚有关。

不同加载角下最大主应力分布如图9所示,试样对角线方向压应力较为集中,加载角较小时(8°以下),

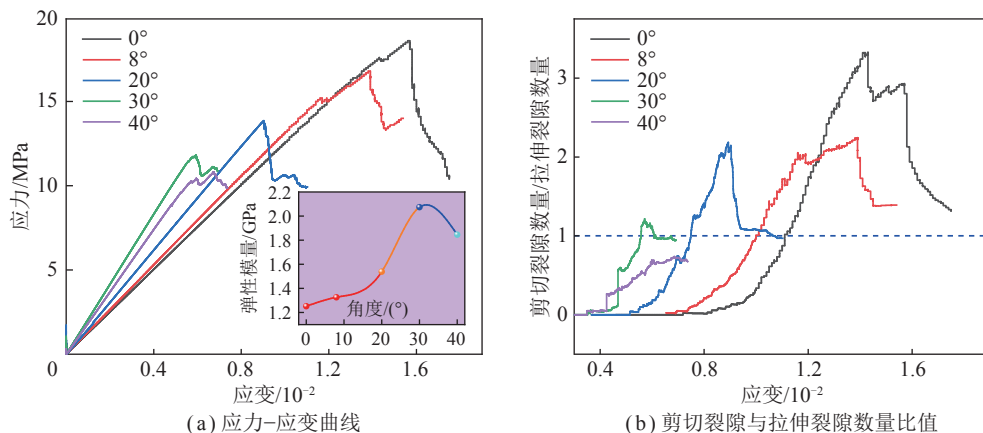


图7 不同加载角应力-应变曲线及裂隙演化

Fig.7 Stress-strain curves and crack evolution at different loading angles

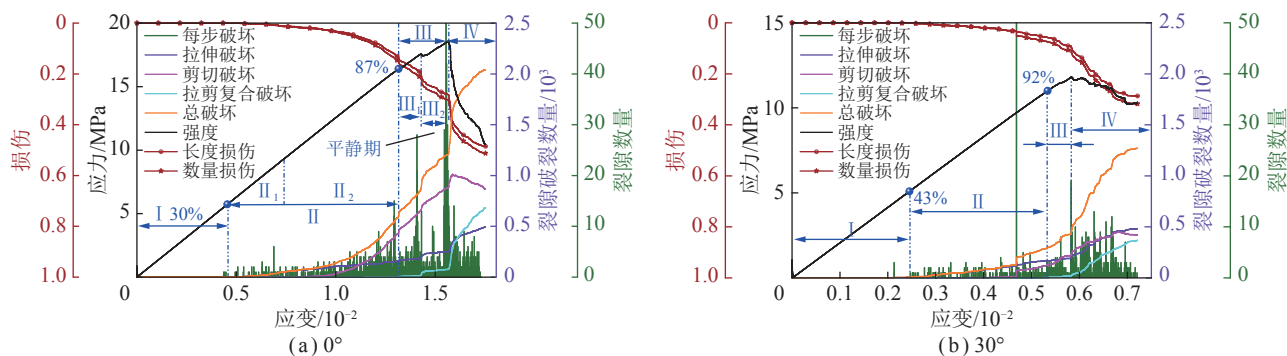


图8 不同加载角应力应变与裂隙发育特征(部分)

Fig.8 Characteristics of stress-strain and crack development (part)



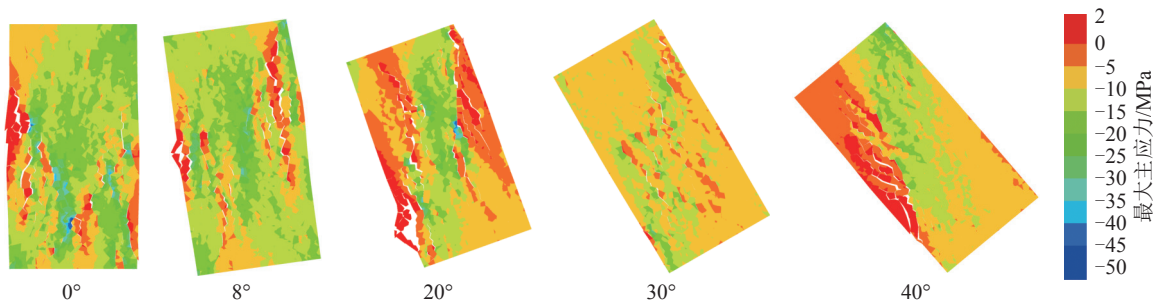


图9 不同加载角最大主应力分布

Fig.9 Distribution of maximum principal stress at different loading angles

试样压应力分布较广,且掺杂较多拉应力,岩石完整性较低,易发生剥落破坏,一旦达到损伤应力后迅速逼近应力峰值。随着加载角的增大,压应力区域及拉剪复合区域均较为集中,试样向剪切破坏转变。加载角改变了岩石的受力方式与抵抗外载能力,表明了岩石强度、应力阈值、破裂形式、弹塑性等指标并不是岩石的固有属性,而是由岩石的外载形式决定。

#### 2.4 岩石应力阈值的确定方法

损伤阈值可由小角度裂隙显著增加的位置确定,

通过 FISH 语言对岩石破裂过程中裂隙角度进行了监测。以加载角 20° 为例 (图 10(a)), 可明显区分岩石破裂各阶段。不同方法对应的起裂应力和损伤应力阈值如图 10(b) 所示。裂隙扩展速度和裂隙角度法判定结果基本一致, 体积应变法和实际偏差较大, 这是由于体积应变呈阶段性抖动趋势。以各抖动阶段内体积应变斜率变化点定义损伤应力, 预计结果和裂隙扩展速度及裂隙角度法两者平均值基本一致, 验证了此方法的可行性。

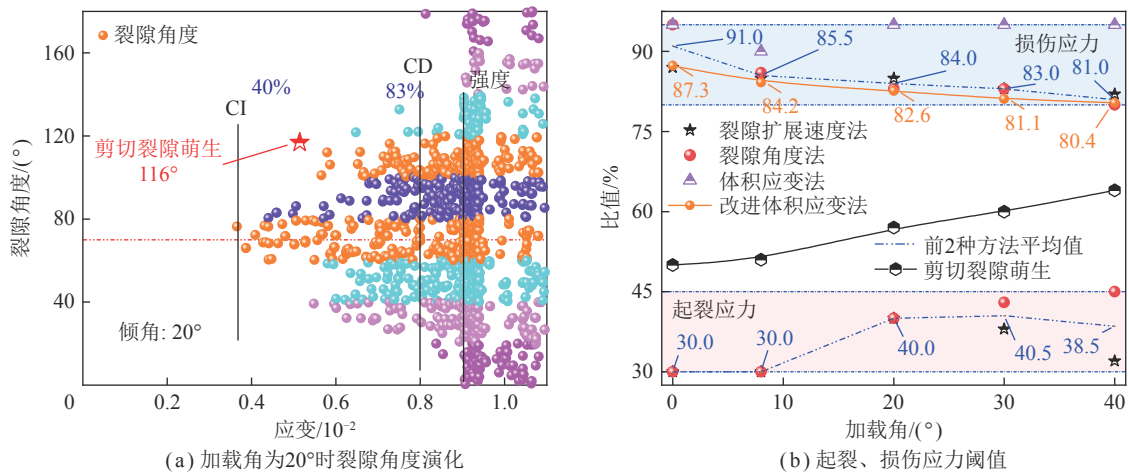


图10 裂隙角度与改进算法

Fig.10 Crack angle and improved algorithm

起裂应力和损伤应力随加载角增大趋势稍有差异,前者缓慢减小(0°~8°内基本不变),后者迅速减小。加载角为 0°、8°、20°、30°、40°对应的 CI 阈值分别为 30%、30%、40%、43%、45%, CD 阈值分别为 87%、86%、83%、83%、80%。岩石以拉裂隙起裂(起裂应力变化幅度不大),拉应力靠颗粒间剪切滑移产生,解释了直接拉伸测试强度小于间接拉伸强度现象。随着加载角的增大,剪切效应直接作用于颗粒,使其更易发生剪切破坏(拉剪复合裂隙更易萌生),解释了起裂应力阈值、损伤应力阈值非线性演化的内在机制。随着加载角的增大,岩石起裂、损伤应力阈值差值减小。

### 3 压剪耦合下岩石渗透性演变特征

#### 3.1 渗流计算方法

UDCE 数值软件渗流主要通过节理流动,且服从立方定律,通常改变初始开度和残余开度以匹配实验室测试结果<sup>[26]</sup>。对发生破坏的节理进行重新赋参(表 3),实现弹性状态、塑性状态节理渗流参数的差异,并通过 FISH 语言编写程序实现当前计算步破裂节理的搜寻,具体计算步骤及详细流程见文献<sup>[26-27]</sup>。

#### 3.2 三轴压缩全应力应变渗流特征

加载角为 0°、围压为 2 MPa 及进出口孔压分别为 1.5、0 MPa 条件下全应力应变渗透率计算结果如图 11 所



表 3 节理开度参数<sup>[26]</sup>

Table 3 Joint opening parameters<sup>[26]</sup>

弹性状态		塑性状态	
初始开度/m	残余开度/m	初始开度/m	残余开度/m
$4.8 \times 10^{-6}$	$6.6 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$

示。加载初始阶段(A点),基本无节理发生破坏,节理在压缩作用下闭合,渗透率随轴压增大快速减小。随着偏应力的增大,试样进一步被压缩,裂隙逐渐发育,但对渗透率基本无影响,失效裂隙大多是孤立的,对流体传导没有贡献。随着裂隙数量的增加,渗透率开始缓慢增加,随后增幅明显增大,渗透率变化曲线呈“S”型,并具有一定的滞后性,渗透回弹位置位于起裂应力和损伤应力之间并接近后者。A点孔压基本呈平行分布,孔压梯度较大,而E点孔压分布非常不规则,渗透率越高,孔压梯度越小,孔压的存在导致有效围压减小,试样内部有效应力重新分布,莫尔圆左移诱发破坏。

由 UDEC 数值软件计算法则可知,节理发生拉伸、拉剪破坏后,法向应力为 0,裂隙开度达到最大值(根据裂隙开度与法向应力、法向刚度关系)。但裂隙连通性是主控渗透率与渗流路径的因素,由第 2.3、2.4 节分析可知,拉剪复合裂隙是试样损伤扩展主要的破坏形式,主导了裂隙宏观破裂形态,即优势渗流路径(对比流量和裂隙分布),因此,拉剪复合裂隙可以一定程度表征渗透性演化规律。随着加载角的增大,压剪作用下岩石剪切裂隙较易萌生、破裂程度降低,拉剪复合裂隙分布较为集中,主要沿对角线分布(图 9),优势渗流路径较为单一,向局部化转变。采动条件下承压水渗流路径(渗透性主控)是确定保水开采控制靶区的重要依据。

3.3 加载角、渗透压对岩石强度及渗透性的影响

不同加载角条件对岩石强度影响如图 12 所示。围压-渗透压为 1.0~0.5 MPa 时,渗流应力导致岩石强度降低,强度随加载角变化趋势和无孔压条件基本一致。2 MPa 围压对应的相同加载角条件下,岩石强

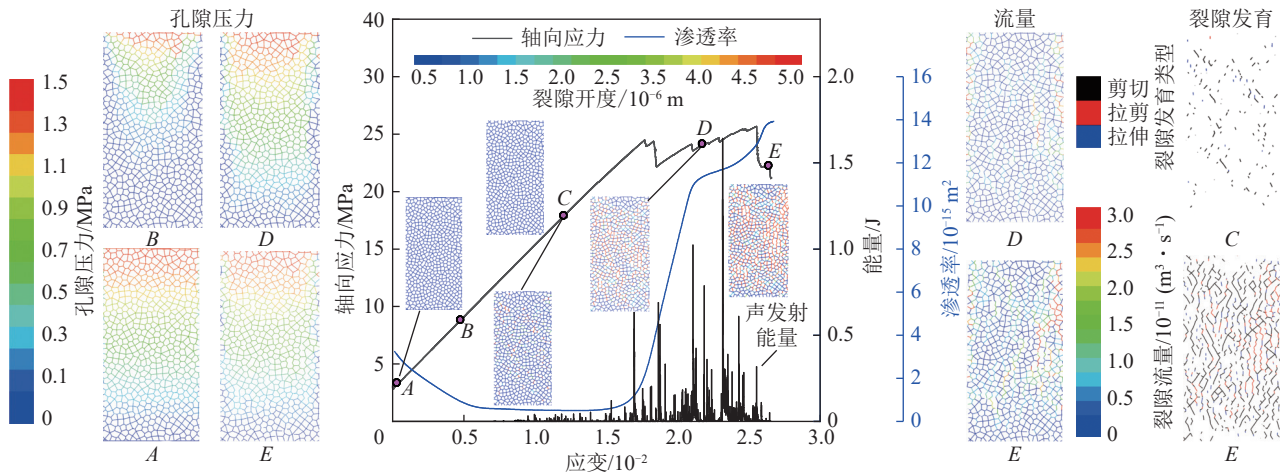


图 11 三轴压缩全应力应变渗流特征

Fig.11 Characteristics of full stress strain seepage in axial compression

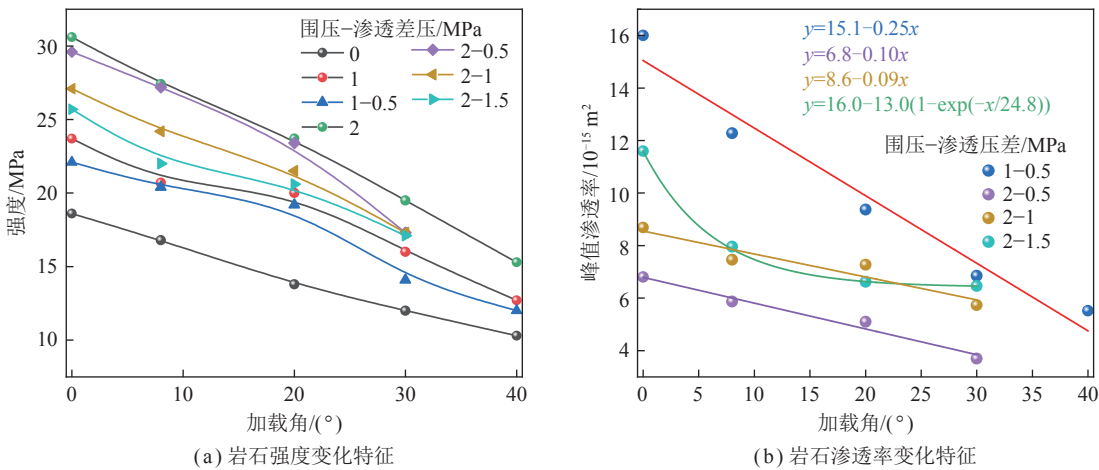


图 12 不同方案数值计算结果

Fig.12 Numerical calculation results of different schemes

度随渗透压差增大而减小,随着加载角的增大降低速率逐渐减小,且当渗透压在 0.5~1.0 MPa 衰减幅度较大;随着渗透压的增大,不同加载角对应的岩石强度降低趋势由线性向非线性转变,均以 20°为转折点,这和文献结论<sup>[10]</sup>加载角大于 15°时强度衰减程度较高一致;加载角为 30°时,渗透压对岩石强度的影响程度类似。综上,加载角较大时,渗透压差、围压对岩石强度控制作用减弱。

不同加载角条件下岩石峰值渗透率均随加载角的增大而减小(图 12(b)),相同渗透压差下,降低速率和围压呈反比,围压为 1、2 MPa 对应的加载角-渗透率斜率分别为-0.25、-0.10。2 MPa 围压条件下,随着渗透压差的增大,岩石渗透率降低趋势由线性向指数型形式转变。当渗透压差为 0.5、1.0 MPa 时,加载角-渗透率斜率分别为-0.10、-0.09,渗透压差为 1.5 MPa 时,渗透率先以加载角 8°为转折点先快速降低后缓慢减小,甚至低于渗透压为 1 MPa 对应值,表明渗透压差较大时,渗透率对有无压剪效应较为敏感。

压剪耦合效应下,岩石易发生剪切破坏,随着渗透压差的增大,岩石由单一裂隙类型向剪切、拉伸裂隙共同萌生过渡,受有效应力影响,拉剪复合裂隙更易发育,导致岩石强度降低及渗透率升高。拉剪裂隙控制岩石强度及渗透特性,随着加载角的增大,岩石破裂模式向单一剪切带形式转变,剪切作用下岩石渗透率增幅较小(裂隙正应力较大)。

## 4 讨 论

加载角本质上是影响施加至岩石顶底界面剪应力与压应力的比值,随着加载角的增大,压剪比呈非线性降低趋势。实验测试中的难点是对剪应力/压应力的稳定控制,基于不同加载角条件下岩石应力状态,可确定相应压剪比并提出基于不同准则的强度预测模型。但应注意的是,当岩石发生大规模破坏时,加载板和岩石试样接触面应力状态发生改变,理论假设可能是不成立的。图 5 也发现类似问题,理论值和数值解仅在岩石发生严重破坏时误差较大,表明采用数值计算方法分析不同加载角控制压剪比具有一定的适用性。

由于岩石性质的差异,目前实验室大多采用致密且完整性较强的砂岩进行不同加载角条件下压剪效应分析,此类岩石的脆性较强,损伤应力阈值更接近峰值,即压剪比较稳定,实验结论相对可靠。针对其他类型岩石,如弱胶结岩石具有孔隙度较大、富黏土矿物、水敏性较强等特点<sup>[28]</sup>,不同加载角压剪耦合下将更为复杂,包含颗粒压缩重塑、遇水泥化崩解等。

忽略水对岩石黏聚力、内摩擦角及岩石自身孔/裂隙的影响,加之,致密性岩石均质性较强,岩石微细观结构、颗粒组分等因素的影响较小。因此,研究结论主要适用于水敏性弱、致密且基本无原生裂隙的岩石。

伊盟隆起抬升作用下受岩溶水威胁区域大倾角煤层埋深较浅,对应上文数值最大围压为 2 MPa。针对华北地区大倾角高承压条件下底板岩层强度与渗透性演化规律将在后续研究中进一步丰富。以上不足将在以后研究中予以考虑。

加载角条件改变了岩石承载能力,可能导致倾斜煤层采动底板岩层更易发生破坏,或引起倾斜煤层区段煤柱失稳,但破裂程度是降低的(取决于应力水平和承载能力),可为大倾角煤层底板承压水灾害防治(完整底板条件下强度与渗透率均降低,结构失稳可能是主控因素)及大倾角煤层冲击地压防控(不同倾角煤层冲击倾向性与能量释放有待进一步归类)提供一定的借鉴。

## 5 结 论

(1) 以非常规(广义)莫尔应力圆为依据,建立了考虑主应力偏转效应的岩石失稳判据;岩石强度和加载角呈线性负相关关系,降低幅度和围压呈正比;理论假设简化下的强度计算结果高估了压剪效应的影响,并随围压增大愈发显著。

(2) 压剪耦合作用下岩石承载能力降低,体现在强度降低及弹性模量增大 2 个方面;随着加载角的增大,岩石破裂程度降低、加载角为 0°时损伤值约为加载角为 30°对应值的 1.6 倍;压应力区域较为集中,试样向剪切破坏转变,岩石峰后应力逐渐由脆性跌落向塑性转变。

(3) 提出了压剪耦合作用下综合裂隙角度、改进体积应变为指标的应力阈值确定方法;基于拉伸裂隙诱导起裂及拉剪复合裂隙主导损伤角度,揭示了不同加载角条件下起裂应力、损伤应力阈值非线性演化内在机制,随着加载角的增大,岩石起裂、损伤应力阈值间距减小。

(4) 岩石峰值渗透率随加载角的增大而减小,随着渗透压差的增大,渗透率对有无加载角作用下的压剪效应较为敏感;拉剪复合裂隙为主渗通道,随着加载角的增大,主渗通道向局部化转变;加载角较大时,渗透压差与围压对岩石强度及渗透性控制作用减弱。

## 参考文献(References):

- [1] 王双明,杜麟,宋世杰.黄河流域陕北煤矿区采动地裂缝对土壤侵蚀性的影响[J].煤炭学报,2021,46(9):3027-3038.

- WANG Shuangming, DU Lin, SONG Shijie. Influence of mining ground fissures on soil erodibility in Northern Shaanxi coal mining area of Yellow River Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 3027–3038.
- [2] 鞠金峰, 李全生, 许家林, 等. 采动含水层生态功能修复: 概念内涵、理论与技术框架[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(1): 21–30.
- JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, et al. Ecological function restoration of mining-damaged aquifers: Conceptual connotation, theory, and technical framework[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(1): 21–30.
- [3] 罗生虎, 王同, 伍永平, 等. 大倾角煤层群长壁开采承载拱与间隔岩层采动应力演化特征[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 551–562.
- LUO Shenghu, WANG Tong, WU Yongping, et al. Evolution characteristics of mining stress of bearing arch and interval strata in long-wall mining of steeply dipping coal seam groups[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 551–562.
- [4] 张浩, 伍永平, 解盘石. 大倾角大采高采场塑性区分布及主控因素分析[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(9): 55–64.
- ZHANG Hao, WU Yongping, XIE Panshi. Plastic zone distribution and main controlling factors analysis of large mining height face in steeply dipping coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(9): 55–64.
- [5] 张东升, 范钢伟, 张世忠, 等. 保水开采覆岩等效阻水厚度的内涵、算法与应用[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 128–136.
- ZHANG Dongsheng, FAN Gangwei, ZHANG Shizhong, et al. Equivalent water-resisting overburden thickness for water-conservation mining: Conception, method and application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 128–136.
- [6] 康红普, 李全生, 张玉军, 等. 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 1–24.
- KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 1–24.
- [7] ZHANG D H, LU G X, RUAN D, et al. Quasi-static combined compression-shear crushing of honeycombs: an experimental study[J]. *Materials & Design*, 2019, 167: 107632.
- [8] ZHANG J J, JIN T, WANG Z H, et al. Experimental investigation on yield behavior of PMMA under combined shear-compression loading[J]. *Results in Physics*, 2016, 6: 265–269.
- [9] LING C, IVENS J, CARDIFF P, et al. Deformation response of EPS foam under combined compression-shear loading. Part I: Experimental design and quasi-static tests[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 144: 480–489.
- [10] HE Q Y, LI Y C, XU J H, et al. Prediction of mechanical properties of igneous rocks under combined compression and shear loading through statistical analysis[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(2): 841–859.
- [11] XU Y, DAI F. Dynamic response and failure mechanism of brittle rocks under combined compression-shear loading experiments[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(3): 747–764.
- [12] XU Y, PELLEGRINO A, DAI F, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic failure envelope and cracking mechanism of precompressed rock under compression-shear loads[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(11): 04021208.
- [13] WU P, CHEN L, CHEN Y L, et al. Experimental study on mechanical properties and microcrack fracture of coal specimens under the coupling of loading rate and compression-shear loads[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(4): 04022028.
- [14] FANG Daining, LI Yulong, ZHAO Lihan et al. On the behavior characterization of metallic cellular materials under impact loading[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 26: 837–846.
- [15] NIE X, CHEN W W, SUN X, et al. Dynamic failure of borosilicate glass under compression/shear loading experiments[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(8): 2556–2562.
- [16] CHEN L, ZHANG D S, YAO N, et al. Coupling influence of inclination angle and moisture content on mechanical properties and microcrack fracture of coal specimens[J]. *Lithosphere*, 2022, 2021(7): 6226445.
- [17] 罗斌玉, 叶义成, 李玉飞, 等. Mohr-Coulomb 准则下倾斜矿柱稳定性的安全系数法[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(9): 2408–2415.
- LUO Binyu, YE Yicheng, LI Yufei, et al. Safety factor method for stability of inclined Pillars under Mohr-Coulomb criterion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(9): 2408–2415.
- [18] 赵瑜, 王超林, 万文. 压剪作用下裂隙扩展过程渗流与应力耦合模型研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(8): 2180–2186.
- ZHAO Yu, WANG Chaolin, WAN Wen. Seepage flow during crack propagation process and stress coupled model under compression-shear stress conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(8): 2180–2186.
- [19] 刘红岩, 周月智, 张光雄, 等. 水压作用下岩体裂隙压剪起裂准则[J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2023, 54(3): 920–929.
- LIU Hongyan, ZHOU Yuezhi, ZHANG Guangxiong, et al. Compression-shear initiation criterion for rockmass crack under water pressure[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(3): 920–929.
- [20] 黄诗渊, 王俊杰, 王爱国, 等. 压剪作用下压实黏土断裂破坏机理及断裂准则[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(3): 492–501.
- HUANG Shiyuan, WANG Junjie, WANG Aiguo, et al. Fracture failure mechanism and fracture criterion of compacted clay under compression and shear action[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(3): 492–501.
- [21] 高青鹏, 曹平, 王飞, 等. 压剪作用下多节理类岩试样力学性质及破坏判据[J]. *岩土力学*, 2019, 40(3): 1013–1022.
- GAO Qingpeng, CAO Ping, WANG Fei, et al. Mechanical properties and failure criteria of multi-joint rock-like specimens under compression-shear[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(3): 1013–1022.

- [22] 郑安兴, 罗先启. 压剪应力状态下岩石复合型断裂判据的研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1892–1898.  
ZHENG Anxing, LUO Xianqi. Research on combined fracture criterion of rock under compression-shear stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1892–1898.
- [23] 魏星, 邹婷, 王刚. 压-剪耦合条件下黏土渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3561–3568.  
WEI Xing, ZOU Ting, WANG Gang. Experimental study on permeability characteristics of clay under pressure-shear coupling condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3561–3568.
- [24] 赵延林, 刘强, 刘欢, 等. 水-力耦合作用下单裂隙灰岩三轴压缩与声发射试验及压剪断裂模型[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3855–3868.  
ZHAO Yanlin, LIU Qiang, LIU Huan, et al. Triaxial compression and acoustic emission tests on single cracked limestone and compression-shear fracture model under hydraulic-mechanical coupling action[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3855–3868.
- [25] 罗斌玉, 叶义成, 曹中, 等. 基于 Mohr-Coulomb 准则的缓倾斜层状矿床矿柱强度估算及倾角效应[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1940–1946, 1956.  
LUO Binyu, YE Yicheng, CAO Zhong, et al. Estimation of pillar strength and effect of inclination under gently inclined layered deposits based on Mohr-Coulomb criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1940–1946, 1956.
- [26] 张村, 屠世浩, 赵毅鑫, 等. 基于渗流实验的三轴流固耦合离散元数值模拟研究[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(1): 23–33.  
ZHANG Cun, TU Shihao, ZHAO Yixin, et al. Discrete element numerical simulation of triaxial fluid solid coupling based on seepage experiment[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(1): 23–33.
- [27] 范张磊. 大倾角高承水压采底板渗透率演化及地下水运移特征[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024: 47–54.  
FAN Zhanglei. Permeability evolution and groundwater migration characteristics of floor with large dip angle and high pressure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024: 47–54.
- [28] FAN G W, CHEN M W, ZHANG D S, et al. Experimental study on the permeability of weakly cemented rock under different stress states in triaxial compression tests[J]. Geofluids, 2018, 2018: 9035654.