

# 不同倾角穿层裂隙组合岩石力学性能及破坏特征研究

李杨杨<sup>1</sup>, 侯嘉琦<sup>1</sup>, 张士川<sup>1</sup>, 孙宁<sup>2</sup>, 李宗凯<sup>2</sup>, 冯海龙<sup>3</sup>, 苏鹭<sup>4</sup>

(1. 山东科技大学能源与矿业工程学院, 山东青岛 266590; 2. 山东东山王楼煤矿有限公司, 山东济宁 272000;

3. 陕西正通煤业有限责任公司, 陕西咸阳 712000; 4. 山东里能鲁西矿业有限公司, 山东济宁 272000)

**摘要:** 煤矿开采过程中, 覆岩中原生裂隙贯通是导致工作面发生水害的重要因素之一, 而原生裂隙不同赋存条件又影响裂隙间贯通形态, 研究不同形态原生裂隙间破坏贯通方式对揭示工作面突水机理尤为重要。采用 MTS816 岩石力学剪切试验机开展了不同倾角裂隙组合岩石单轴压缩试验, 研究了岩样破坏过程中应力-应变、峰值强度及能量耗散特征, 并使用颗粒流(PFC)数值模拟软件对岩样宏观破坏特征进行分析。研究结果表明, 岩样的单轴应力-应变曲线整体呈现缓升-陡升-急降趋势, 当裂隙倾角为 30°、60°时, 曲线出现大幅度二次波动。组合岩石抗压强度受强度较弱岩石影响更为显著, 岩样峰值强度与裂隙倾角呈正相关, 当裂隙倾角为 30°、90°时, 岩样峰值强度较无裂隙组合岩石降幅分别为 73.17%、21.07%; 峰值应力对应耗散能转化率随裂隙倾角增大而增大, 当裂隙倾角为 30°时, 耗散能转化率为 17.52%; 裂隙倾角为 90°时, 耗散能转化率为 47.51%。应力峰值点对应损伤变量  $D$  为 0.252, 岩样峰前损伤程度较小, 峰后阶段耗散能占比急剧增大, 岩样损伤程度大幅增加; 不同裂隙倾角组合岩石均发生以拉伸破坏为主的“倒Y”型拉-剪混合破坏, 且不同裂隙倾角岩样破坏过程可分为裂纹萌生、预制裂隙贯通、裂纹扩展及岩样破坏 4 个阶段。岩样不同倾角裂隙间的贯通与岩体断裂韧性及应力强度因子有关, 且随裂隙倾角增大, 岩样破坏时产生裂隙数量增多, 预制裂隙贯通方式分为裂隙相邻尖端贯通、裂隙对角尖端贯通、两裂隙近接触面与裂隙尖端贯通 3 种类型。

**关键词:** 组合岩石; 裂隙倾角; 力学行为; 能量耗散; 破坏特征

中图分类号: TD325

文献标志码: A

## Study on mechanical properties and failure characteristics of cross-layer fracture composite rock with different dip angles

LI Yangyang<sup>1</sup>, HOU Jiaqi<sup>1</sup>, ZHANG Shichuan<sup>1</sup>, SUN Ning<sup>2</sup>, LI Zongkai<sup>2</sup>, FENG Hailong<sup>3</sup>, SU Lu<sup>4</sup>

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shandong Dongshan Wanglou Coal Mine Co. Ltd, Jining 272000, China;

3. Shaanxi Zhengtong Coal Industry Co. Ltd, Xianyang 712000, China;

4. Shandong Lineng Luxi Mining Co. Ltd, Jining 272000, China)

**Abstract:** In the process of coal mining, the connectivity of primary fractures in overlying rock is one of the important factors leading to water damage in the working face. The different occurrence conditions of primary fractures affect the form of connectivity between fractures. Therefore, studying the failure and connectivity modes of different forms of primary fractures is particularly important for revealing the mechanism of water inrush in the

收稿日期: 2024-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974173, 52004147); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金项目(GJNY-20-113-19)

作者简介: 李杨杨(1987—), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士, 主要从事煤矿动力灾害、矿井水害防治等方面的教学和科研工作。

E-mail: lyy1987718@126.com

张士川(1989—), 男, 山东济宁人, 副教授, 博士, 主要从事矿井水害防治与岩体力学等方面的教学和科研工作, 本文通信作者。E-mail: zsc373260186@sdust.edu.cn

working face. This paper conducted uniaxial compression tests on fracture composite rocks with different dip angles by using the MTS816 rock mechanics shear tester. The stress-strain, peak strength, and energy dissipation characteristics of the rock samples during the failure process were studied, and the macroscopic and microscopic failure characteristics of the rock samples were analyzed using particle flow code (PFC) numerical simulation software. The research results indicate that the stress-strain curves of the rock samples show a trend of slow rise, steep rise, and sudden drop. When the fracture angle is  $30^\circ$  and  $60^\circ$ , the curve exhibits significant quadratic fluctuations. The compressive strength of composite rocks is more significantly affected by weaker rocks, and the peak strength of rock samples is positively correlated with the dip angle of fractures. When the dip angle of fractures is  $30^\circ$  and  $90^\circ$ , the peak strength of rock samples decreases by 73.17% and 21.07% respectively compared to non-fractured composite rocks. The conversion rate of dissipated energy corresponding to peak stress increases with the increase of fracture dip angles. It is 17.52% when the fracture dip angle is  $30^\circ$  and 47.5% when the fracture dip angle is  $90^\circ$ . The damage variable  $D$  corresponding to the peak stress point is 0.252. The damage degree of rock samples is relatively small in the pre-peak stage and the proportion of dissipated energy in the post-peak stage increases sharply, resulting in a significant increase in the damage degree of rock samples. All composite rocks with different fracture angles undergo a “inverted Y” type of tensile shear mixed failure, with tensile failure being the main mode. The failure process of rock samples with different fracture angles can be divided into four stages: Crack initiation, pre-existing fracture penetration, crack propagation, and rock sample failure. The connectivity between fractures with different dip angles in rock samples is related to the fracture toughness and stress intensity factor of the rock mass. As the dip angle of the fractures increases, the number of fractures generated during rock sample failure increases. The prefabricated fracture connectivity methods are divided into three types: Adjacent fracture tip connectivity, diagonal fracture tip connectivity, and two fracture near contact surface connectivity with fracture tip connectivity.

**Key words:** composite rock; fracture inclination angle; mechanical behavior; energy dissipation; failure characteristic

煤矿覆岩中存在大量形态复杂的原生裂隙,尤其是多跨度、大倾角穿层原生裂隙的存在使开采过程中覆岩裂隙贯通情况复杂多变,引发水害事故的隐蔽致灾因素增多。因此,研究含原生裂隙组合岩石裂隙贯通机制有着重要的工程价值。许多学者对裂隙岩体破坏特征及裂隙扩展贯通形态进行了大量研究。在室内试验方面,张波等<sup>[1]</sup>采用相似材料制备含交叉裂隙岩样,对过程中的应力变化进行分析,得到在单轴压缩条件下不同主、次裂隙倾角的破坏特征;赵扬锋等<sup>[2]</sup>通过对不同倾角预制裂纹的花岗岩进行单轴压缩试验,认为预制裂纹对岩样峰值强度有着显著影响;张科等<sup>[3]</sup>通过单轴压缩试验并结合数字图像技术量化,得到应变场灰度与纹理特征参数与裂隙岩体破裂演化间的对应关系;Wang等<sup>[4]</sup>对含预制裂隙砂岩进行单轴压缩试验,并结合数值模拟研究了裂隙倾角对微裂纹演化机制和砂岩破坏模式的影响。为了更加全面地获得裂隙岩体的破坏特征及裂隙贯通形态。Huang等<sup>[5]</sup>利用颗粒流数值模拟软件(particle flow code<sup>3D</sup>, PFC<sup>3D</sup>)对三轴压缩条件下含预制裂隙试样的裂纹萌生、扩展和贯通各阶段过程进行研究,得到试样开裂过程、应力应变曲线和微裂纹数量之间的关系;Zhao等<sup>[6]</sup>通过研究颗粒流模型中颗粒位移趋势,分析预制裂隙倾角对围岩颗粒位移趋势场和次生破坏的影响;李露露等<sup>[7-9]</sup>通过对含预制裂隙试样进行室内单轴压缩试验、计算机断层扫描(computed tomography, CT)、数值模拟分析等手段,得到含裂隙岩样强度特征、裂纹模式及裂纹扩展演化规律;杨超等<sup>[10]</sup>采用单轴试验与三维数值模拟结合的方法,对不同岩桥倾角双裂隙砂岩进行研究,得到不同岩桥倾角对裂纹扩展的影响;王云飞等<sup>[11]</sup>通过数值模拟的方法,对比分析了含不同倾角、不同间距裂隙白砂岩单轴压缩条件下的力学特征及裂纹扩展形态。

综上所述,目前对单一岩石及其裂隙扩展贯通规律的研究较为充分,但对于复合岩石裂隙贯通扩展形态的相关研究较少。实际煤矿覆岩中存在多形态、多跨度贯穿原生裂隙,裂隙间相互贯通是导致工作面发生水害的主要原因,并且原生裂隙在岩层中的赋存位置不同,岩体的力学特性及裂隙扩展贯通方式也截然不同。因此,通过试验及数值模拟结合的方法对不同倾角穿层裂隙组合岩石力学性能及破坏特征进行研究,对实际工程具有指导性意义。

### 1 试验准备

#### 1.1 岩样制备

以高家堡煤矿为例,煤层顶板覆岩内存在大量复杂倾角和穿层原生裂隙(如图 1 所示),原生裂隙的贯通间接导致工作面涌(淋)水事故的发生。由于现场取芯难度大、岩石易风化改性等原因,为减小试验离散性,试验岩样选取完整性好、质地均匀的砂岩。

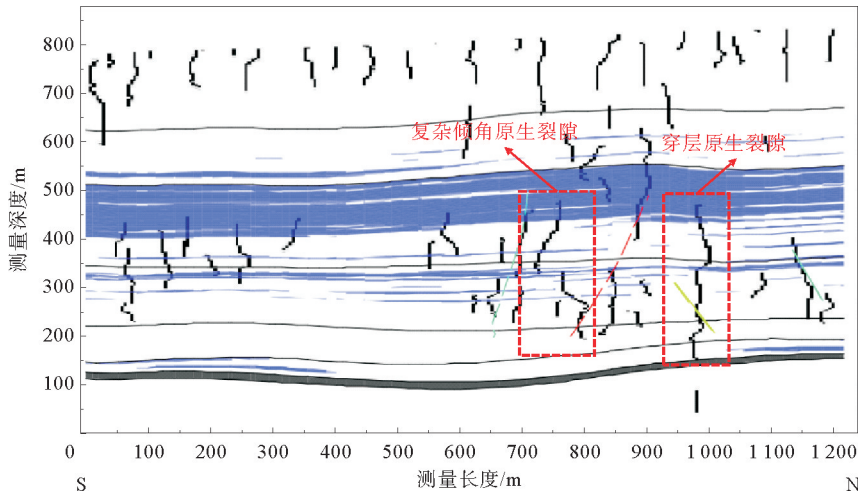


图 1 高家堡煤层上覆岩层裂缝三维地震探测图

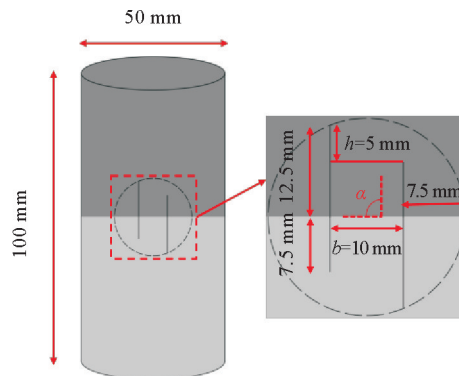
Fig. 1 3D seismic detection map of overlying cracks in Gaojiabu coal seam

试验选取完整均质粗砂、中砂岩块,将两类岩块切割制成 50 mm × 100 mm 的圆柱体岩样,相对面间不平行度小于 0.1 mm,并采用高强度云石胶对其进行粘合,同时保证其粘合剂厚度小于 1 mm。岩样粘合完全后,采用水刀切割技术对岩样进行预处理,以岩样几何中心点为圆心,直径为 25 mm 的圆内预制两条长度 20 mm、宽度 1.5 mm 的平行裂隙,预制裂隙与水平方向夹角  $\alpha$  依次设置为 30°、45°、60°、75°、90°,且保证两相近裂隙尖端距离  $h$  为 50 mm,裂隙垂距  $b$  为 10 mm。

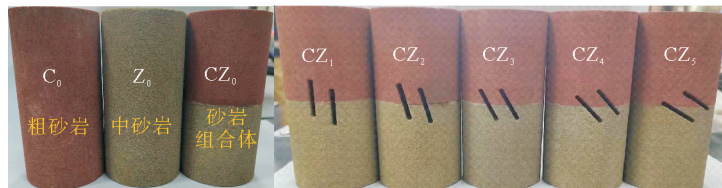
对已完成加工岩样根据外观、直径、高度及完整度进行首次筛选;通过密度及声波测试对岩样进行二次筛选,以减小岩样本身导致的试验偏差,试验制备岩样类型如图 2 所示。

#### 1.2 试验设备及加载方案

单轴压缩试验分为无裂隙岩样和预制倾角裂隙组合岩石两组,每组进行 3 次重复试验,共计 24 块试样。



(a) 预制裂隙岩样几何参数示意图



(b) 砂岩岩样图

图 2 试验预制岩样

Fig. 2 Test precast rock sample

试验在 MTS816 岩石力学试验机上进行,具体操作步骤如下。

1) 对已制备岩样分组并进行编号,具体试验分组及编号如表 1 所示;

2) 对第 1 组  $C_0$ 、 $Z_0$ 、 $CZ_0$  3 种试样以 1 MPa/min 的速率施加法向应力至岩样破坏;

3) 对第 2 组  $CZ_1$ 、 $CZ_2$ 、 $CZ_3$ 、 $CZ_4$ 、 $CZ_5$  (依次对应  $90^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $30^\circ$ ) 5 种试样以 0.05 mm/s 的速率加载至岩样破坏;

4) 对 2)、3) 步骤进行重复操作,时刻注意中控系统数据变化,数据出现大幅下降时,停止加载。

表 1 岩样分组及编号

Table 1 Grouping and numbering of rock samples

组号	编号	预制裂隙倾角 $\alpha/(\circ)$	类型
1	$C_0$	无裂隙	粗砂岩单体
	$Z_0$	无裂隙	中砂岩单体
	$CZ_0$	无裂隙	无裂隙组合岩石
2	$CZ_1$	90	组合岩石
	$CZ_2$	75	组合岩石
	$CZ_3$	60	组合岩石
	$CZ_4$	45	组合岩石
	$CZ_5$	30	组合岩石

## 2 试验结果分析

### 2.1 应力-应变曲线及峰值强度

单轴压缩下的应力-应变曲线如图 3 所示,可概括为以下几个阶段:①压密阶段。外力作用下,岩样内部原生裂隙空间被逐渐压密,曲线上升幅度较为平缓;②弹性变形阶段。随应力不断增大,内部裂隙逐渐被压密至闭合,岩样内部能量不断聚积,曲线近似呈线性上升;③塑性变形阶段。外力增大导致岩样起裂,内部裂隙发育扩展,曲线呈上升趋势,此阶段无裂隙组合岩石较其他两种岩样出现了较为平缓的小幅度增长;④峰后破坏阶段。应力达到峰值后,岩样内部裂隙快速扩展至贯通,导致岩样失去承载力而发生破坏,曲线急剧下降。当裂隙倾角为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  时,应力-应变曲线在达到峰值强度前存在明显二次波动,是由于组合岩石预制裂隙与岩样端部于峰前贯通,岩样发生部分塌落,导致岩样受力结构发生改变,曲线整体呈现缓升-陡升-急降趋势。

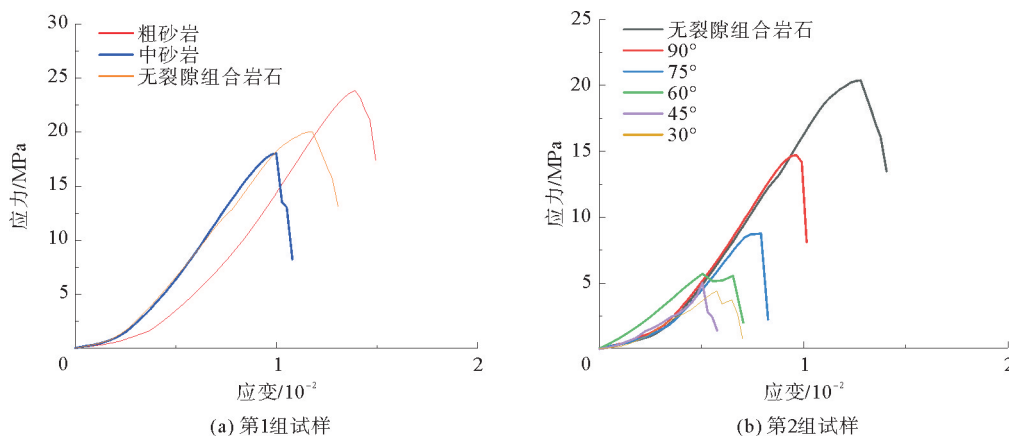


图 3 单轴压缩试样应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of specimens under uniaxial compression

试验得到粗砂岩、中砂岩及组合岩石峰值强度分别为 23.84、18.03、20.02 MPa,弹性模量分别为 2.21、2.31、2.33 GPa,组合岩石峰值强度略大于中砂岩单体,且较粗砂岩低 24.37%,较中砂岩高 9.94%,这说明组合岩石抗压强度受强度较弱岩石影响更为显著。当裂隙倾角分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$  时,所对应平均峰值强度分别为 4.38、4.98、5.71、8.74、14.71 MPa,随裂隙倾角增大,岩样峰值强度随之增大。当裂隙倾角为  $30^\circ$  时,平均单轴抗压强度较无裂隙组合岩石下降幅度为 73.17%;当裂隙倾角为  $90^\circ$  时,平均单轴抗压强度下降幅度为 21.07%。

### 2.2 岩石破坏形态分析

#### 2.2.1 岩石断裂理论

宏观缺陷裂纹扩展是导致岩石断裂破坏的原因。目前,对岩石裂纹扩展的研究存在两种不同观点,即能量与应力强度;格里菲斯基于能量分析的断裂理论认为固体的破坏是裂纹扩展的结果,裂纹扩展时所需的表面力等于系统释放的弹性能;奥罗文在格里菲斯理论的基础上提出,除裂纹扩展过程所释放的能量,还包括裂纹扩展前塑性变形所消耗能量。不同于两者,伊尔文主张用裂纹前缘区域应力场的强弱判断裂纹扩展及断裂并提出  $K$  准则<sup>[12]</sup>,即裂纹尖端应力应变场的强弱由应力强度因子  $K$  决定。

$$K = Y\sigma\sqrt{a} \tag{1}$$

式中: $Y$ —几何形状因子, $\sigma$ —外加应力, $a$ —裂纹半长。即随应力  $\sigma$  不断增大,裂纹前端应力强度因子  $K$  增大,当外部应力增大至裂纹扩展时临界应力  $\sigma_c$  时, $K$  则为材料的断裂韧性。

#### 2.2.2 岩样破坏特征

对试验所得各组岩样破坏效果进行筛选,得到不同倾角裂隙岩样破坏形态如图 4 所示,粗砂岩部分均表现为明显的拉伸破坏,中砂岩部分呈现拉-剪混合破坏模式,均产生 5~6 条宏观裂隙。不同裂隙倾角导致岩样破裂角发生变化,致使岩样破坏形态不同,两预制裂隙分别用 a、b 表示。

当裂隙倾角为 30°时,a、b 相邻尖端贯通(A 型),a 上尖端、b 下尖端分别产生沿裂隙贯通方向扩展的次生翼型拉-剪混合裂纹,粗砂部分产生沿主应力方向的贯通翼型张拉裂纹,岩样整体表现为以拉伸破坏为主的拉-剪混合破坏。当裂隙倾角为 45°时,a、b 沿主应力方向的对角裂隙贯通(B 型),岩样整体发生拉伸破坏。当裂隙倾角为 60°时,裂隙贯通形态为 B 型,a 上尖端、b 下尖端分别产生沿主应力方向的反翼剪切裂纹及沿预制裂隙走向扩展的翼型裂纹,粗砂部分沿 b 上尖端产生沿主应力方向的贯通翼型张拉裂纹。在应力作用下,岩样发生部分破坏而塌落,承载主体由岩样整体转移至左侧,a 上尖端产生斜向下的反翼裂纹致使部分发生失稳破坏。当裂隙倾角为 75°时,预制裂隙贯通形态同样为 B 型,整体破坏形态与 45°时相似,区别在于 a 裂隙发育位置不同,这与裂隙尖端应力强度因子有关。当裂隙倾角为 90°时,a 近岩体接触面与 b 下尖端贯通(C 型),a 下尖端、b 近岩体接触面处分别产生沿主应力方向的翼型张拉裂纹及翼型拉-剪混合裂纹。岩样整体发生以拉伸为主的拉-剪混合破坏,粗砂部分沿 a 上尖端产生非贯通翼型张拉裂纹。a、b 裂纹萌生区域说明裂隙于两岩样接触面处断裂韧性相较其他区域较低,且应力强度因子更大。

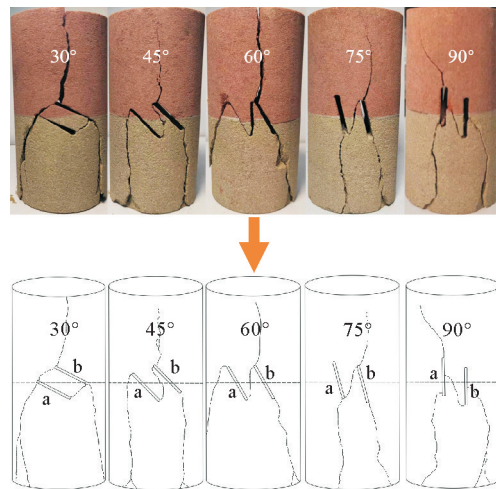


图 4 不同倾角裂隙岩样破坏形态

Fig. 4 Failure modes of fractured rock samples with different inclination angles

综上所述,岩样破坏形态与裂隙间贯通形式有关,随着裂隙倾角增大,裂隙间贯通方式由 30°时相邻裂隙尖端的贯通,到 45°~75°时对角裂隙尖端的贯通,再到 90°时岩体裂隙近接触面与裂隙尖端的贯通,表明两裂隙间的贯通方式与岩体的断裂韧性及应力强度因子有关。裂隙在强度较低的中砂岩中更易扩展,且岩样整体发生由两裂隙尖端产生的翼裂纹或反翼裂纹沿主应力方向扩展的、以拉伸破坏为主的“倒 Y”型拉-剪混合破坏。

#### 2.3 能量演化机制

基于热力学第一定律及能量计算原理<sup>[13]</sup>,得到单轴压缩下能量计算公式<sup>[14]</sup>,计算分析不同裂隙倾角岩样峰前能量转化情况如图 5 所示。随裂隙倾角及应力不断增大,总输入能  $U$  不断增大,整体呈非线性增长。

压密阶段总输入能  $U$  与弹性应变能  $U_e$  的曲线变化相似,保持平缓上升趋势,表明该阶段岩样内部损伤较小,外力所做功几乎全部转化为弹性应变能储存在岩样内部,随岩样内部应力集中程度增大,裂隙不断扩展贯通,弹性应变能转化为耗散应变能  $U_d$  的进程加快,耗散应变能  $U_d$  曲线逐渐呈非线性上升。

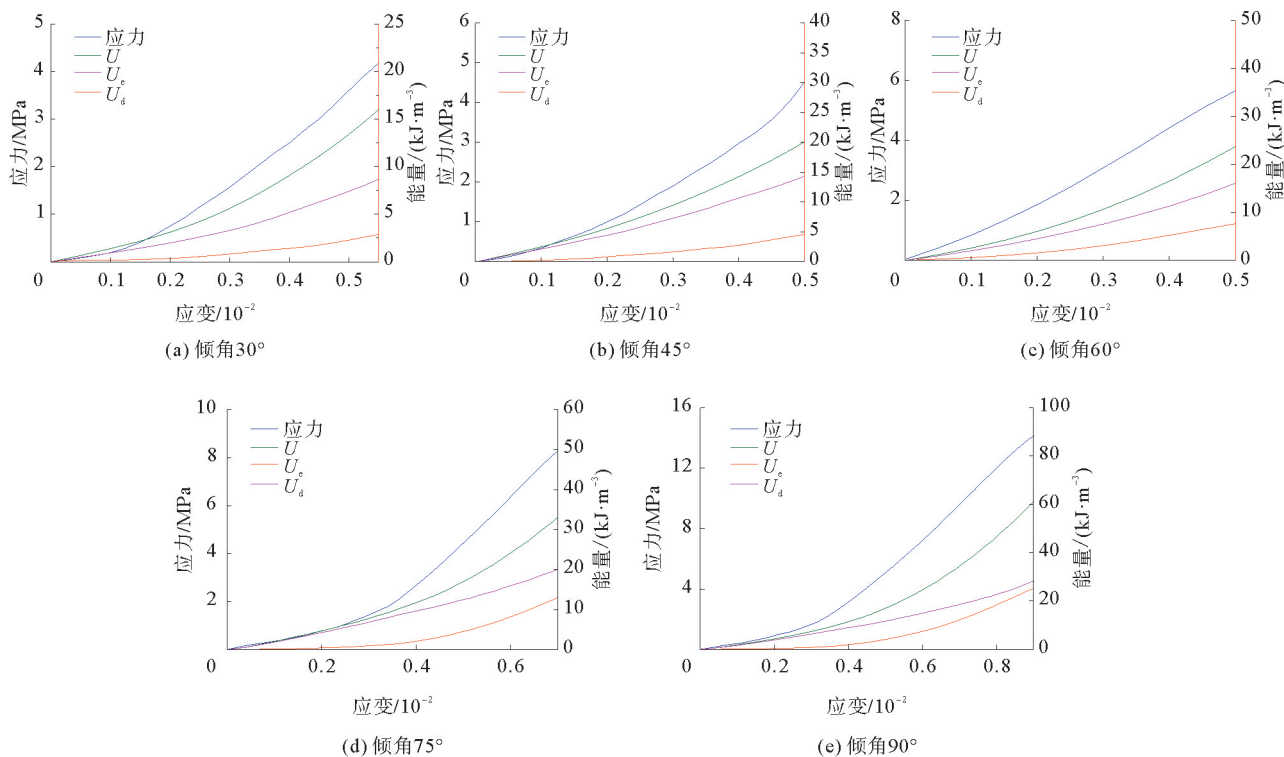


图 5 单轴压缩不同裂隙倾角岩样峰前能量转化

Fig. 5 Pre-peak energy transformation of rock samples with different fracture angles under uniaxial compression

将某时刻耗散能  $U_d$  与总输入能  $U$  的比值定义为耗散能转化率,计算可得峰值应力对应的耗散能转化率与裂隙倾角的关系,如图 6 所示。耗散能转化率随裂隙倾角的增大而增大,曲线整体呈现出平缓-陡峭-骤升的非线性增长趋势。裂隙倾角为  $30^\circ$  时,耗散能转化率为  $17.52\%$ ;裂隙倾角为  $90^\circ$  时,耗散能转化率为  $47.51\%$ 。说明岩样整体失稳破坏前,预制裂隙倾角越大,岩样内部积聚的弹性应变能越多,预制裂隙贯通时弹性能转化为耗散能的能量越多,耗散能转化率越高。

岩样破坏过程中,耗散能变化趋势与岩样损伤程度密切相关。因此,根据加载过程中耗散能对岩样损伤的影响特征,将  $t$  时刻累积耗散能与岩样破坏时累积耗散能比值定义为以耗散能为特征的损伤变量  $D^{[15-16]}$ ,即

$$D(t) = \frac{\sum U_d(t)}{\sum U_d} \quad (2)$$

式中: $U_d$ —岩石破裂过程释放耗散能,  $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $t$ —时间,  $\text{s}$ 。  $D$  值介于  $0 \sim 1$  之间,  $D$  值越大,耗散能占比越大,内部裂隙更为发育。以  $90^\circ$  为例,损伤变量与应力-应变的关系如图 7 所示:①压密阶段。随应力不断

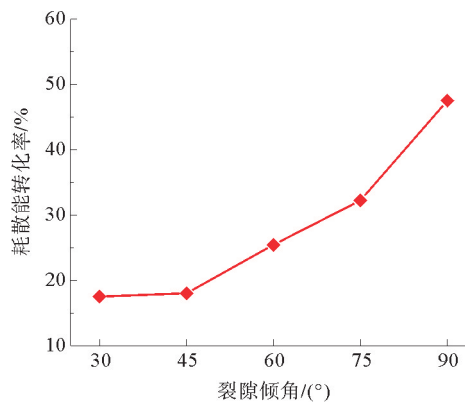


图 6 峰值应力处耗散能转化率与预制裂隙倾角的关系

Fig. 6 Relationship between pre-peak dissipation energy conversion and the inclination angle of precast fracture

增大,内部裂隙空间逐渐压密,几乎无耗散能产生,损伤变量几乎为零;②裂纹萌生阶段。外力作用使岩样内部萌生微裂纹,岩样出现初始损伤,损伤变量平缓上升;③裂纹稳定发展阶段。耗散能增加,微裂纹发育扩展,损伤变量呈坡度较缓的幂增长趋势;④破坏阶段。耗散能急剧上升,岩样损伤程度大幅增加直至岩样破坏。峰值点对应损伤变量  $D$  为 0.252,证明在达到峰值应力前,岩样内部损伤程度较低。宏观裂隙发育及岩样破坏主要发生在峰后阶段,耗散能占比增大,损伤变量骤增,内部裂隙大量扩展贯通,外力所做功及岩样储存弹性能均转化为耗散能释放。

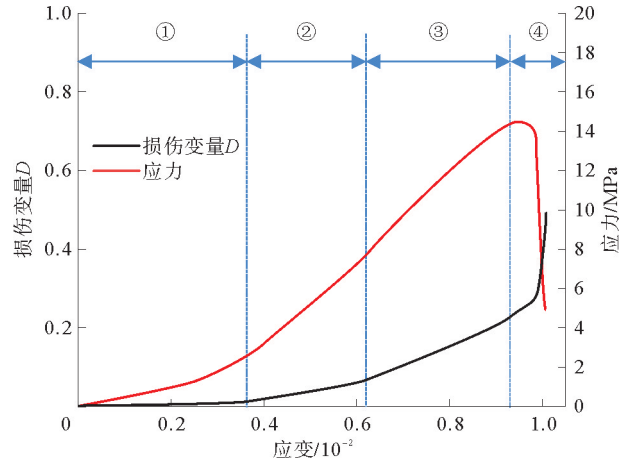


图 7 应力-应变与损伤变量关系图

Fig. 7 Relationship between stress-strain and damage variables

### 3 数值模拟

#### 3.1 颗粒流模型构建

为了更加系统地了解岩样破坏机理及裂纹扩展贯通机制,通过建立数值模型对不同倾角裂隙组合岩石破坏过程进行研究分析。采用平行黏结模型,在 PFC<sup>3D</sup> 中生成 50 mm×100 mm 的标准圆柱组合岩石模型,裂隙相关参数与室内试验一致。颗粒最大半径设置为 1.2 mm,最小半径为 1.0 mm,共计产生 23 058 个不同颗粒。基于室内试验所得数据,根据文献[17-18]方法进行参数选取。经过反复调试,得到室内试验与数值模拟分别对应的应力-应变曲线如图 8 所示。由于数值模拟无法模拟压密阶段,因此,将非压密阶段曲线

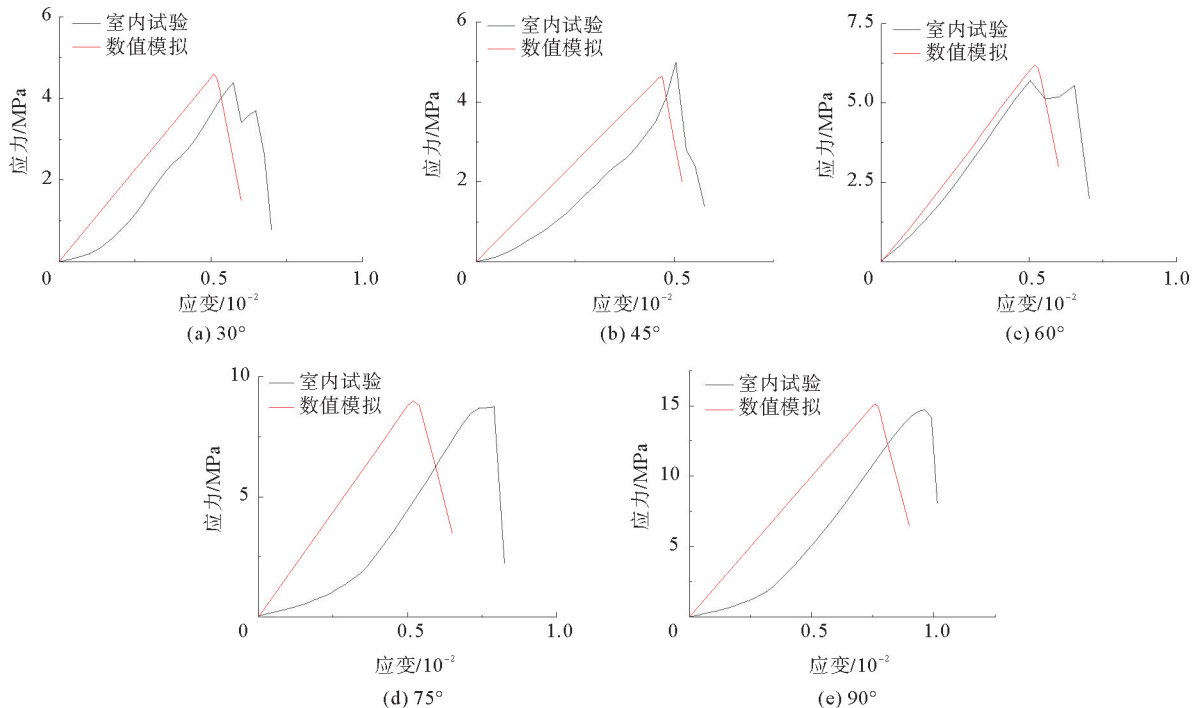


图 8 压缩过程中室内试验与数值模拟应力-应变曲线对比

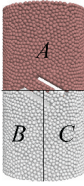

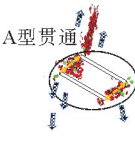
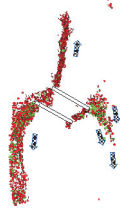
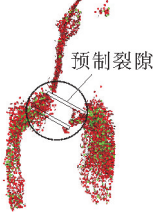
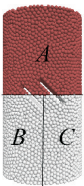

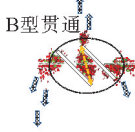
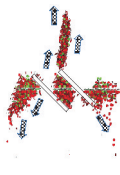
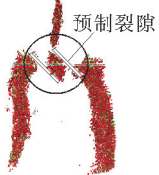
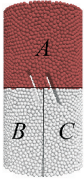

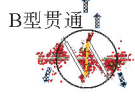
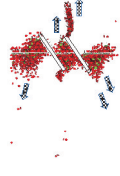

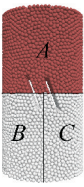

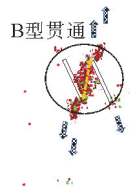
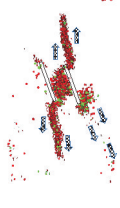
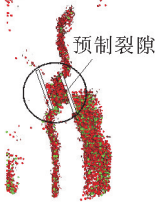
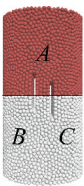

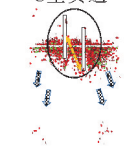
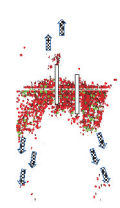

Fig. 8 Comparison of stress-strain curves of laboratory test and numerical simulation during compression

进行平移,对比各倾角裂隙岩样室内试验与数值模拟结果,弹性模量平均误差为 3.46%,峰值强度平均误差为 5.21%,均与室内试验吻合度较高,验证了所选取细观参数的合理性<sup>[19]</sup>。

### 3.2 岩样破坏及裂隙贯通

模拟得到不同倾角裂隙组合岩石破坏形态如表 2 所示,为便于分析,将数值模型分割为 A、B、C3 部分。

表 2 岩样破坏过程  
Table 2 Failure process of rock samples

裂隙倾角/(°)	数值模型	破坏过程				破坏产生 裂纹数
		裂纹萌生(I)	预制裂隙贯通(II)	裂纹扩展(III)	岩样破坏(IV)	
30			A型贯通 		预制裂隙 	张拉裂纹:6 045 剪切裂纹:3 979
45			B型贯通 		预制裂隙 	张拉裂纹:6 520 剪切裂纹:3 548
60			B型贯通 		预制裂隙 	张拉裂纹:6 793 剪切裂纹:4 131
75			B型贯通 		预制裂隙 	张拉裂纹:8 397 剪切裂纹:4 438
90			C型贯通 		预制裂隙 	张拉裂纹:10 033 剪切裂纹:5 264

注:数值模拟结果中红色颗粒代表张拉裂纹,绿色颗粒代表剪切裂纹;双向箭头代表裂隙贯通路径,单向箭头数量越多表示裂纹扩展速度越快。



当裂隙倾角为  $30^\circ$  时: I, a、b(如图4)上下尖端萌生张拉裂纹,近岩体接触面处裂隙发育更为密集; II, a、b 相邻尖端贯通, b 上尖端张拉裂纹沿主应力方向扩展; III, a 上尖端沿预制裂隙贯通路径迅速向下扩展, b 下尖端缓慢产生剪切裂纹; IV, B、A、C 依次发生拉-剪混合破坏。破坏时共产生张拉裂纹 6 045 个, 剪切裂纹 3 979 个。

当裂隙倾角为  $45^\circ$  时: I, a 上尖端与接触面、b 两尖端萌生张拉裂纹; II, a、b 沿主应力方向对角尖端贯通; III, a、b 上尖端裂纹以较快速度沿主应力方向扩展, b 下尖端裂纹扩展滞后; IV, C、B 依次发生拉伸破坏, A 未发生破坏。破坏时共产生张拉裂纹 6 520 个, 剪切裂纹 3 548 个。

当裂隙倾角为  $60^\circ$  时: I, 近岩体接触面、a 下尖端及 b 上尖端同时萌生初始张拉裂纹; II, a、b 沿主应力方向对角尖端贯通; III, a 上尖端与 b 两尖端裂隙沿主应力方向扩展, 且 a 上尖端裂纹发育数量较下尖端更为密集; IV, C、A 依次发生以拉伸为主的拉-剪混合破坏及拉伸破坏, 最终 B 发生斜向下的二次拉-剪混合破坏。破坏时共产生张拉裂纹 6 793 个, 剪切裂纹 4 131 个。

当裂隙倾角为  $75^\circ$  时: I, 近岩体接触面、a 下尖端及 b 上尖端萌生张拉裂纹; II, a、b 沿主应力方向对角尖端贯通; III, 裂纹由 a 下尖端及 b 上尖端沿主应力方向以张拉形式扩展, b 下尖端产生沿预制裂隙走向迅速扩展的拉-剪混合裂纹; IV, B、C 依次发生拉-剪混合破坏, C 破坏程度较大, A 未发生破坏。破坏时共产生张拉裂纹 8 397 个, 剪切裂纹 4 438 个。

当裂隙倾角为  $90^\circ$  时: I, a、b 近接触面内侧与 a 下尖端萌生张拉裂纹; II, a 近接触面与 b 下尖端贯通; III, a 尖端裂纹沿主应力方向扩展, b 近接触面产生斜向下扩展的拉-剪混合裂纹; IV, B、C 发生以张拉为主的拉-剪混合破坏, 且破坏程度较高, A 未发生破坏。破坏时共产生张拉裂纹 10 033 个, 剪切裂纹 5 264 个。

综上所述, 不同裂隙倾角岩样的破坏过程可概括为 4 个阶段: I, 裂纹在应力强度因子较高的裂隙尖端或岩体接触面萌生; II, 预制裂隙贯通; III, 贯通裂隙或次生裂隙沿主应力方向扩展; IV, 岩样发生以拉伸破坏为主的拉-剪混合破坏。随裂隙倾角增大, 岩样破坏时产生的裂隙数量增多, 当裂隙倾角为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$  时, 剪切裂纹数量占比分别为 39.70%、35.24%、37.8%、34.6%、34.4%, 这进一步说明岩样产生以拉伸破坏为主的拉-剪混合破坏。

## 4 结论

1) 应力-应变曲线包含压密、弹性变形、塑性变形以及峰后破坏 4 个阶段, 曲线整体呈现缓升-陡升-急降趋势, 当裂隙倾角为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  时, 曲线出现大幅度二次波动。组合岩石抗压强度受强度较弱岩石影响更为显著。裂隙倾角越大, 岩样峰值强度越大, 当裂隙倾角为  $30^\circ$ 、 $90^\circ$  时, 峰值强度较完整组合体降幅分别为 73.17%、21.07%。

2) 随裂隙倾角增大, 峰前总能量、弹性应变能及耗散应变能逐渐增大, 峰值应力对应耗散能转化率随裂隙倾角增大而增大, 当裂隙倾角为  $30^\circ$  时, 耗散能转化率为 17.52%, 裂隙倾角为  $90^\circ$  时, 耗散能转化率为 47.51%。应力峰值点对应损伤变量为 0.252, 岩样峰前损伤程度较小, 峰后阶段耗散能占比急剧增大, 损伤变量骤增。

3) 不同裂隙倾角组合岩石整体破坏形态相似, 均发生以拉伸破坏为主的“倒 Y”型拉-剪混合破坏, 且不同裂隙倾角岩样破坏过程可分为裂纹萌生、预制裂隙贯通、裂纹扩展及岩样破坏 4 个阶段。岩样不同倾角裂隙间贯通与岩体断裂韧性及应力强度因子有关, 且随裂隙倾角增大, 岩样破坏时产生的裂隙数量增多, 预制裂隙贯通方式分为裂隙相邻尖端贯通、裂隙对角尖端贯通、两裂隙近接触面与裂隙尖端贯通 3 类。

## 参考文献:

- [1] 张波, 李术才, 杨学英, 等. 含交叉裂隙节理岩体单轴压缩破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1863-1870.  
ZHANG Bo, LI Shucai, YANG Xueying, et al. Uniaxial compression failure mechanism of jointed rock mass with cross-cracks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1863-1870.
- [2] 赵扬锋, 张超, 刘力强, 等. 预制裂纹花岗岩单轴压缩全过程声发射特征试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 44-49.

- ZHAO Yangfeng, ZHANG Chao, LIU Liqiang, et al. Experimental study of acoustic emission during fracture process of pre-crack granite under uniaxial compression[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 44-49.
- [3] 张科, 张凯. 裂隙砂岩变形破裂过程中应变场灰度及纹理特征分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(4): 1253-1262.
- ZHANG Ke, ZHANG Kai. Gray and texture features of strain field for fractured sandstone during failure process[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4): 1253-1262.
- [4] WANG Y Q, PENG K, SHANG X Y, et al. Experimental and numerical simulation study of crack coalescence modes and microcrack propagation law of fissured sandstone under uniaxial compression[J/OL]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 115. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103060.
- [5] HUANG Y H, YANG S Q, TIAN W L. Crack coalescence behavior of sandstone specimen containing two pre-existing flaws under different confining pressures[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 99: 118-130.
- [6] ZHAO Y S, GAO Y T, WU S C, et al. Experimental and numerical study of failure characteristics of brittle rocks with single internal 3D open-type flaw[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(10): 3087-3113.
- [7] 李露露, 高永涛, 周喻, 等. 单轴压缩条件下含三叉裂隙类岩石试样力学特性的细观研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3668-3676.
- LI Lulu, GAO Yongtao, ZHOU Yu, et al. Meso-scale modelling mechanical properties of rock-like material containing tri-dent cracks under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3668-3676.
- [8] 陈佃浩, 李廷春, 吕学安, 等. 红砂岩不同张开度表面裂隙三维扩展模式研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 63-69.
- CHEN Dianhao, LI Tingchun, LÜ Xuean, et al. Three-dimensional extension mode of red sandstone with different opening surface crack[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(5): 63-69.
- [9] 黄冬梅, 朱盈盈, 乔书昱, 等. 含孔洞-双裂隙红砂岩宏观损伤特征数值试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 32-42.
- HUANG Dongmei, ZHU Yingying, QIAO Shuyu, et al. Numerical experiments on macro-and micro-damage characteristics of red sandstone with pore-double fractures[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 42(4): 32-42.
- [10] 杨超, 王娇, 董星辰, 等. 不同岩桥角度双裂隙砂岩单轴蠕变试验及三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(10): 2466-2477.
- YANG Chao, WANG Jiao, DONG Xingchen, et al. Uniaxial creep test and three-dimensional numerical simulation of double flawed sandstone with different rock bridge angles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2466-2477.
- [11] 王云飞, 董贺, 马勇超, 等. 含平行双裂隙白砂岩力学行为数值分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(3): 161-170.
- WANG Yunfei, DONG He, MA Yongchao, et al. Numerical analysis of mechanical behavior of white sandstone with parallel double fissures[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2024, 43(3): 161-170.
- [12] 谢和平, 彭瑞东, 周宏伟, 等. 基于断裂力学与损伤力学的岩石强度理论研究进展[J]. 自然科学进展, 2004(10): 7-13.
- XIE Heping, PENG Ruidong, ZHOU Hongwei, et al. Research progress of rock strength theory based on fracture mechanics and damage mechanics[J]. Progress in Natural Science, 2004(10): 7-13.
- [13] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3303-3010.
- XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3303-3010.
- [14] 刘小玲, 张泽天, 张茹, 等. 浸水煤体单轴压缩能量破坏机理及层理效应研究[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(1): 189-200.
- LIU Xiaoling, ZHANG Zetian, ZHANG Ru, et al. Study on energy failure mechanism and bedding effect of soaked coal under uniaxial compression[J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(1): 189-200.

- [20] BAI Y, SHEN Y F, WANG T X. Multi-objective optimization of heating operation of stratum ventilation under different clothing insulations using Taguchi method, RSM, and SPA-TOPSIS[J/OL]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 186. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2022.108124.
- [21] TANG Y, YU H, YE H, et al. Estimating local thermal insulation of clothing garments: Modelling and application[J/OL]. Building and Environment, 2023. DOI:10.1016/j.buildenv.2023.110558.
- [22] HU J L, QIAN Y, LIU T J, et al. Preparation of needled nonwoven enhanced silica aerogel for thermal insulation[J/OL]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 45. DOI:10.1016/j.csite.2023.103025.
- [23] 王春耀, 程卫民, 李伟清, 等. 工人热舒适性指标测定及其分析与评价[J]. 煤矿安全, 2007(6):66-68.  
WANG Chunyao, CHENG Weimin, LI Weiqing, et al. Measurement, analysis and evaluation of thermal comfort index of miners[J]. Safety in Coal Mine, 2007(6):66-68.
- [24] 苏昭桂, 董文庚, 程卫民. 高温矿井热舒适性及评价指标的研究[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(3):27-29.  
SU Zhaogui, DONG Wengeng, CHENG Weimin. Study on thermal comfort of high-temperature mine and its appraisal indexes[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35(3):27-29.
- [25] 向立平, 王汉青. 高温高湿矿井工人热舒适数值模拟研究[J]. 矿业工程研究, 2009, 24(3):66-69.  
XIANG Liping, WANG Hanqing. Numerical simulation study of thermal comfort on high temperature and humidity mine[J]. Mineral Engineering Research, 2009, 24(3):66-69.
- [26] MCCULLOUGH E A, JONES B W, T AMURA T. A data base for determining the evaporative resistance of clothing[J]. ASHRAE Transactions, 1989, 95(2):316-328.
- [27] 曹亚平. 矿井水平巷道通风降温影响因素数值模拟研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(2):72-73.  
CAO Yaping. The level of the mine roadway ventilation cooling factors affecting numerical simulation[J]. Journal of Inner Mongolia Coal Economy, 2021(2):72-73.
- [28] 王红艳. 采煤工作面降温除湿技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.  
WANG Hongyan. Research on cooling and dehumidification technology of coal face[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.

(责任编辑: 齐敏华)

### (上接第 27 页)

- [15] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 砂岩拉伸过程中的能量耗散与损伤演化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(12):2526-2531.  
PENG Ruidong, XIE Heping, JU Yang. Analysis of energy dissipation and damage evolution of sandstone during tensile process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(12):2526-2531.
- [16] 于辉, 刘少伟, 贾后省, 等. 不同围压下闭合单裂隙砂岩力学响应及能量耗散机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2):385-393.  
YU Hui, LIU Shaowei, JIA Housheng, et al. Mechanical response and energy dissipation mechanism of closed single fractured sandstone under different confining pressures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(2):385-393.
- [17] 李世海, 汪远年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21):3642-3651.  
LI Shihai, WANG Yuannian. Selection study of computational parameters for DEM in geomechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21):3642-3651.
- [18] 蒋明镜, 方威, 司马军, 等. 模拟岩石的平行粘结模型微观参数标定[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4):50-56.  
JIANG Mingjing, FANG Wei, SIMA Jun, et al. Calibration of micro-parameters of parallel bonded model for rocks[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2015, 45(4):50-56.
- [19] 李恒, 杨圣奇, 孙博文, 等. 双裂隙复合岩层单轴压缩力学性质及损伤机理离散元模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(10):4000-4014.  
LI Heng, YANG Shengqi, SUN Bowen, et al. Discrete element simulation of mechanical properties and damage mechanism of composite rock containing two fissures under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(10):4000-4014.

(责任编辑: 吕海亮)