



## 预制裂隙类岩石试件表面变形场演化与裂隙扩展机理研究

王兆会 孙文超 王雪冰 乔博锴

### 引用本文:

王兆会, 孙文超, 王雪冰, 等. 预制裂隙类岩石试件表面变形场演化与裂隙扩展机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 72–82.

WANG Zhaohui, SUN Wenchao, WANG Xuebing. Surface deformation field and fracture propagation mechanism of rock-like specimen with pre-existing fracture[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 72–82.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1447>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 岩石破坏全场变形演化规律的试验研究

Experimental study on evolution of rock deformation in whole field

煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/60017728-52b2-4b35-8d16-121c7de7e59e>

##### 蠕变作用后裂隙类岩石单轴强度和裂纹扩展规律研究

Study on uniaxial strength and crack propagation law of cracked similar rock after creep

煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a2a62f78-94b3-4ad4-a8e3-ac9b7b42ac26>

##### 循环荷载下含瓦斯煤力学特性及应变场演化规律研究

Study on the mechanical properties and strain field evolution of gas-bearing coal under cyclic loading

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 90–101 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0328>

##### 预制裂隙砂岩相似材料损伤破坏特性试验研究

Experimental study on damage and failure characteristics of similar materials with prefabricated fracture sandstone

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 171–178 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ce05b7ed-a447-4680-96ba-09aee4e5b895>

##### 裂隙网络对岩体试件单轴压缩力学特性影响研究

Study on effect of fracture network on mechanical properties of rock specimens in uniaxial compression

煤炭科学技术. 2021, 49(7): 31–37 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a506bc4a-7244-4775-b2ee-1db85aad40b6>

##### 微震定位精度影响下采场裂隙表征与冲击地压预警

Fractures characterization in mining field considering seismic location accuracy and its application on pre-warning coal burst hazards

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 1–9 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1968>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王兆会,孙文超,王雪冰,等.预制裂隙类岩石试件表面变形场演化与裂隙扩展机理研究[J].煤炭科学技术,2023,51(10):72-82.  
WANG Zhaohui, SUN Wenchao, WANG Xuebing, et al. Surface deformation field and fracture propagation mechanism of rock-like specimen with pre-existing fracture[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 72-82.

## 预制裂隙类岩石试件表面变形场演化与裂隙扩展机理研究

王兆会<sup>1,2</sup>,孙文超<sup>1</sup>,王雪冰<sup>1</sup>,乔博锴<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083;2.放顶煤开采煤炭行业工程研究中心,北京 100083)

**摘要:**我国东部矿区相继进入深部开采阶段,裂隙发育程度升高,开采扰动效应增强,围岩控制难度增大。为研究含裂隙岩石破坏机理,提高深部围岩控制效果,采用单轴抗压试验结合DIC技术研究了裂隙倾角对类岩石试件力学特性、表面变形场、裂隙扩展路径的影响。结果表明:预制裂隙与翼裂纹产生剪切互锁效应,含裂隙岩石应力-应变曲线呈双峰形态;裂隙倾角增大,岩石弹性模量和损伤程度升高,单轴抗压强度先降低后升高;确定了单轴抗压强度与裂隙倾角的定量关系,定义了含裂隙岩石破坏优势倾角,张开型裂隙优势倾角为45°;含裂隙岩石变形局部化现象始见于裂隙尖端,拉应力主导型启动应力为初始屈服强度的80%,剪应力主导型降至60%;变形集中带扩展路径与表面裂隙一致,应变值达到5.0%时,岩石变形由局部集中向裂隙发育阶段过渡;预制裂隙倾角为60°和75°时,岩石发生拉剪混合破坏,其他角度发生拉伸破坏;拉伸裂隙孕育时间长,两侧特征点水平位移曲线相互分离,剪切裂隙孕育时间短,两侧特征点纵向位移曲线相互分离;构建了预制裂隙类岩石试件GBM模型,岩石内部微裂纹以拉伸型为主,剪切型微裂纹随预制裂隙倾角增大呈先增多后减少趋势;DIC技术可预判岩石起裂位置、时间和裂隙扩展路径,为深部岩石破坏防控提供前兆信息。

**关键词:**预制裂隙;DIC技术;表面应变场;应变局部化;裂隙扩展

中图分类号:TD313 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)10-0072-11

### Surface deformation field and fracture propagation mechanism of rock-like specimen with pre-existing fracture

WANG Zhaohui<sup>1,2</sup>, SUN Wenchao<sup>1</sup>, WANG Xuebing<sup>1</sup>, QIAO Bokai<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Top-coal Caving Mining Research of Coal Mining Industry, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Eastern coalfield goes into deep mining gradually in China. Fracture development rises greatly in surrounding rocks, increasing the difficulty in ground control under increased mining disturbance. In order to reveal failure mechanism of fractured rocks and improve ground control of deep coal mine, the influence of fracture angle on mechanical behavior, surface strain field and fracture propagation is analyzed by using uniaxial compression test combined with DIC technique. The results show that stress-strain curve of rock specimen with pre-existing fracture presents double-peak shape, induced by shear inter-locking effect between pre-existing and newly-developed fractures. With the growth in fracture angle, elastic modulus and damage degree rise in rock specimen while uniaxial compressive strength (UCS) experiences decreasing and subsequent increasing stages, respectively. Quantitative relationship between the UCS and fracture angle is deduced. Preponderant dip angle is defined for failure of rock with pre-existing fractures and the value is 45° when the fracture belongs to open-type. Deformation localization rock with pre-existing fractures occurs at the fracture tip. The initiation stress reaches 80% of initial yield stress when localization area is dominated by tensile stress, and the percentage decreases to 60% when dominated by shear stress. Propagation path of deformation localization area is consistent with that of surface fracture. Rock deformation stage transits from

收稿日期:2022-10-20 责任编辑:朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1447

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51934008, 51904304);中央高校基本科研业务费资助项目(2023ZKPYNY01)

作者简介:王兆会(1987—),男,山东泰安人,副教授,博士。E-mail: zhwang1024@163.com

通讯作者:孙文超(1998—),男,山东潍坊人,硕士研究生。E-mail: sunw\_c@163.com

strain localization to fracture development when strain magnitude reaches 5.0%. Rock specimen fails in tension and shear mixed mode when fracture angle is 60° or 75°. Otherwise, only tension failure is observed in the loading process. It takes longer to form a tensile fracture and horizontal displacement curves of feature points on two sides deviate from each other. It takes shorter to form a shear fracture and vertical displacement curves show deviation trend. Grain based model (GBM) is developed for fractured specimen, which indicates small crack development is dominated by tensile type. Shear crack experiences both rising and subsequent declining stages with the growth in fracture angle. With the DIC technique, failure position, failure time and fracture propagation path can be predicted, which provides valuable precursor for instability prevention of surrounding rock at depth.

**Key words:** pre-existing fracture; DIC technique; surface strain field; strain localization; fracture propagation

## 0 引言

我国煤炭开采深度以速度 10~25 m/a 向深部延伸, 特别是东部矿区, 多座矿井开采深度已达千米<sup>[1]</sup>。深部地层经历的大型构造运动次数增多, 构造应力导致地层节理裂隙发育, 具有非均质、不连续和各向异性等特征, 造成深部裂隙发育围岩承载能力和破坏模式受采动应力大小和方向的双重影响<sup>[2]</sup>。深部煤层开采后, 采动应力水平升高, 旋转幅度增大, 对围岩内部裂隙扩展的驱动效应增强, 因此, 深部围岩大变形失稳和异常灾变现象频发<sup>[3-5]</sup>。大量开采实践表明原生裂隙在深部围岩破坏进程中的主导作用增强, 破坏模式由应力驱动型向裂隙诱导型转变。为改善深部裂隙发育围岩控制效果, 需掌握裂隙对岩石变形特征和破坏模式的影响机制, 因此, 国内外学者对含裂隙岩石力学行为和裂隙扩展规律进行了大量研究。

岩石力学特性方面, 杨圣奇等<sup>[6-7]</sup>分析了预制裂隙倾角、数量、长度等参数对类岩石试件抗压强度的影响, 提出了预制裂隙类岩石试件宏-细观力学参数确定方法。KAKOURIS 等<sup>[8]</sup>研究了受拉应力环境中裂隙倾角对各向异性岩石裂隙扩展和破坏模式的影响。REIS 等<sup>[9]</sup>对含预制裂隙岩石试件进行单轴抗压试验, 将峰后破坏裂隙分为 9 类, 分析了预制裂隙参数对岩石破坏模式的影响。于利强等<sup>[10]</sup>研究了加载速率对裂隙砂岩破坏特征的影响, 发现加载速率增大, 裂隙扩展模式趋于张拉破坏, 裂隙张开度升高。表面变形场方面, 数字图像相关技术 (DIC) 得到广泛应用。李建旺<sup>[11]</sup>通过 DIC 技术研究了岩石破坏过程中全场应变和位移演化特征, 分析了含平行裂隙岩石试件在单轴抗压条件下的破坏规律。彭守建和宋义敏等<sup>[12-13]</sup>基于 DIC 技术研究了砂岩变形局部化现象对加载速率的敏感性, 发现启动应力与加载速率呈正相关。DAUTRIAT 和 YANG 等<sup>[14-15]</sup>采用 DIC 技术得到孔隙岩石表面拉伸应变演化特征, 分析了孔隙非均布特征对岩石非均匀变形程度的影响

机制。ALIABADIAN 和 SHARAFIFISAFA 等进行了砂岩试件的巴西劈裂试验和 3D 打印岩石试件的单轴抗压试验, 基于 DIC 技术对比分析了岩石在拉伸和压缩应力环境中破坏裂隙萌生和扩展规律差异<sup>[16-17]</sup>。

数值计算方面, 不需要复杂本构关系的离散元颗粒流程序 (Particle Flow Code, PFC) 在表征岩石微观结构中具有显著优越性, 可模拟岩石宏-细观裂隙扩展规律<sup>[18-19]</sup>。HUANG 等<sup>[20]</sup>采用 PFC 进行了含预制裂隙岩石试件单轴抗压模拟试验, 研究了预制裂隙倾角、长度等参数对岩石破坏模式的影响, 根据微裂纹类型和成核特点划分了 4 种岩石破坏模式。SARFARAHI 等<sup>[21]</sup>采用 PFC 开展了含裂隙岩石直接剪切模拟试验, 揭示了剪切面微观裂纹产生机理, 确定了抗剪强度同微裂纹分布的内在关系。HOFMANN 和 BAHRANI 建立了非规则颗粒模型 (Grain-based model, GBM), 分析了裂隙分布、矿物成分、尺寸效应等因素对微裂纹发育特征的影响, 证明了 GBM 模型表征岩石微观结构的有效性<sup>[22-23]</sup>。李博等<sup>[24]</sup>建立了含预制裂隙岩石 GBM 数值模型, 分析了岩石宏观破坏裂隙对颗粒结构、预制裂隙分布和围压等因素的敏感性。

以往研究重点关注裂隙参数对岩石破坏模式的影响, 对裂隙扩展机制分析尚不充分。笔者对含预制裂隙类岩石试件进行单轴抗压试验, 借助 DIC 技术得到岩石表面变形场全程动态演化特征, 对预制裂隙扩展过程进行定量分析; 最后采用 PFC<sup>2D</sup> 建立含预制裂隙岩石 GBM 模型, 研究预制裂隙倾角对岩石内部微裂纹发育特征的影响, 从宏-细观角度揭示预制裂隙对岩石表面变形、破坏模式的影响机制, 为深部裂隙发育围岩稳定性控制奠定基础。

## 1 类岩石裂隙扩展试验方案

### 1.1 试件材料与试件制备

试验采用的类岩石试件与口孜东矿直接顶泥岩性质相当(单轴抗压强度 30~40 MPa, 弹性模量 4~5

GPa)。标准砂、水泥和水3种材料以质量比3.0:1.0:0.5的配比混合,搅拌均匀后灌入圆柱形模具,如图1a所示。模具中心预留长度30 mm、张开度0.8 mm裂缝,倾角 $\beta$ 分别为0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°。灌注试件时裂缝位置处插入铁片,5 h后将铁片抽出,形成预制裂隙,粗糙度为7,试件在室温环境下继续养护28 d。根据预制裂隙倾角 $\beta$ 的不同将试件分为7组,如图1b所示,同时制备不含预制裂隙的完整试件,作为对照组。岩石试件脱模后,在试件侧面喷涂随机散斑点,用于DIC监测,如图1c所示。



图1 预制裂隙类岩石试件制备

Fig.1 Preparation of rock sample with pre-existing fracture

## 1.2 试验方案和设备

借助YZJ-200型压力机开展单轴抗压试验,加载速率0.1 mm/min。设备配有压力和位移传感器,得到类岩石试件应力-应变曲线。采用DIC技术监测试件表面变形场演化特征,分析岩石变形由全场均匀到局部集中,最终因裂隙发育进入非连续进程的内在机制。为便于直接观测岩石表面变形场,只开展单轴抗压试验。采用声发射定位系统监测岩石内部细观破坏特征,采用U5200非金属超声波采集仪测量超声波在类岩石试件中的传播速度。单轴抗压试验所用加载与监测设备如图2所示。



图2 试验和监测设备

Fig.2 Testing and monitoring equipment

## 2 试验结果分析

### 2.1 预制裂隙类岩石应力-应变曲线特征

完整试件应力-应变曲线如图3a所示,加载初期,内部裂隙闭合,岩石处于压密阶段,A点压密极限载荷( $\sigma_a$ )为10.4 MPa,将轴向载荷为 $\sigma_a/2$ 处的曲线斜率定义为初始模量( $E_i=2.8$  GPa)。A点之后变形曲线进入线性增长阶段,弹性模量 $E=5.0$  GPa,B点初始屈服强度( $\sigma_b$ )为28.8 MPa。之后变形曲线偏离线性阶段,进入应变硬化进程,微裂隙开始萌生,但裂隙处于稳定扩展阶段。变形曲线在C点达到峰值,单轴抗压强度( $\sigma_c$ )为36.2 MPa。峰后岩石弹性应变能快速释放,破坏裂隙扩展所需能量由释放应变能补给,裂隙进入非稳定扩展阶段。

含裂隙试件的应力-应变曲线如图3b—图3h所示。同完整试件相比,裂隙压密阶段(OA)应变量增加,弹性阶段(AB)应变量减小,应变硬化阶段基本消失,破坏模式以预制裂隙非稳定扩展为主。轴向载荷达到B点翼裂纹开始扩展,扩展方向与加载方向平行。裂隙扩展引起应力重新分布,预制裂隙完全闭合,试件承载能力在C点发生局部跌落,跌落程度与翼裂纹扩展长度成正比,该点为预制裂隙类岩石试件初始屈服点。闭合裂隙面上出现剪应力,同未充分扩展的翼裂纹形成剪切互锁效应,承载能力再次呈现上升趋势,但二次增长阶段变形曲线斜率降低。载荷达到峰值点D时,翼裂纹扩展至试件两端,同预制裂隙贯通,变形曲线发生二次跌落现象。

预制裂隙类岩石试件应力-应变曲线包含初始压密、弹性变形、首次应力跌落、裂隙互锁和二次应力跌落5个阶段,裂隙互锁效应导致应力-应变曲线呈双峰形态。声发射监测结果表明完整岩石内部微破裂事件多,含裂隙岩石内部微破裂事件少。这是由于后者破坏模式由预制裂隙主导,新生破坏裂隙数量少。含裂隙岩石内部高能级微破裂事件主要发生在应力跌落过程中,微破裂释放能量高于完整岩石试件,因此,预制裂隙导致岩石峰后行为向脆性破坏转变。

### 2.2 预制裂隙对变形和强度参数的影响

初始模量、弹性模量同裂隙倾角之间的关系如图4所示。初始模量小于弹性模量,两者随裂隙倾角的增加而升高。裂隙倾角小,其外法线同加载方向接近平行,裂隙张开度对轴向载荷的敏感度高,导致初始弹性模量小。裂隙倾角小于45°,弹性模量基本保持不变,之后随裂隙倾角升高而增大。该现象由裂隙面粗糙度引起,裂隙倾角小,弹性变形主要由裂

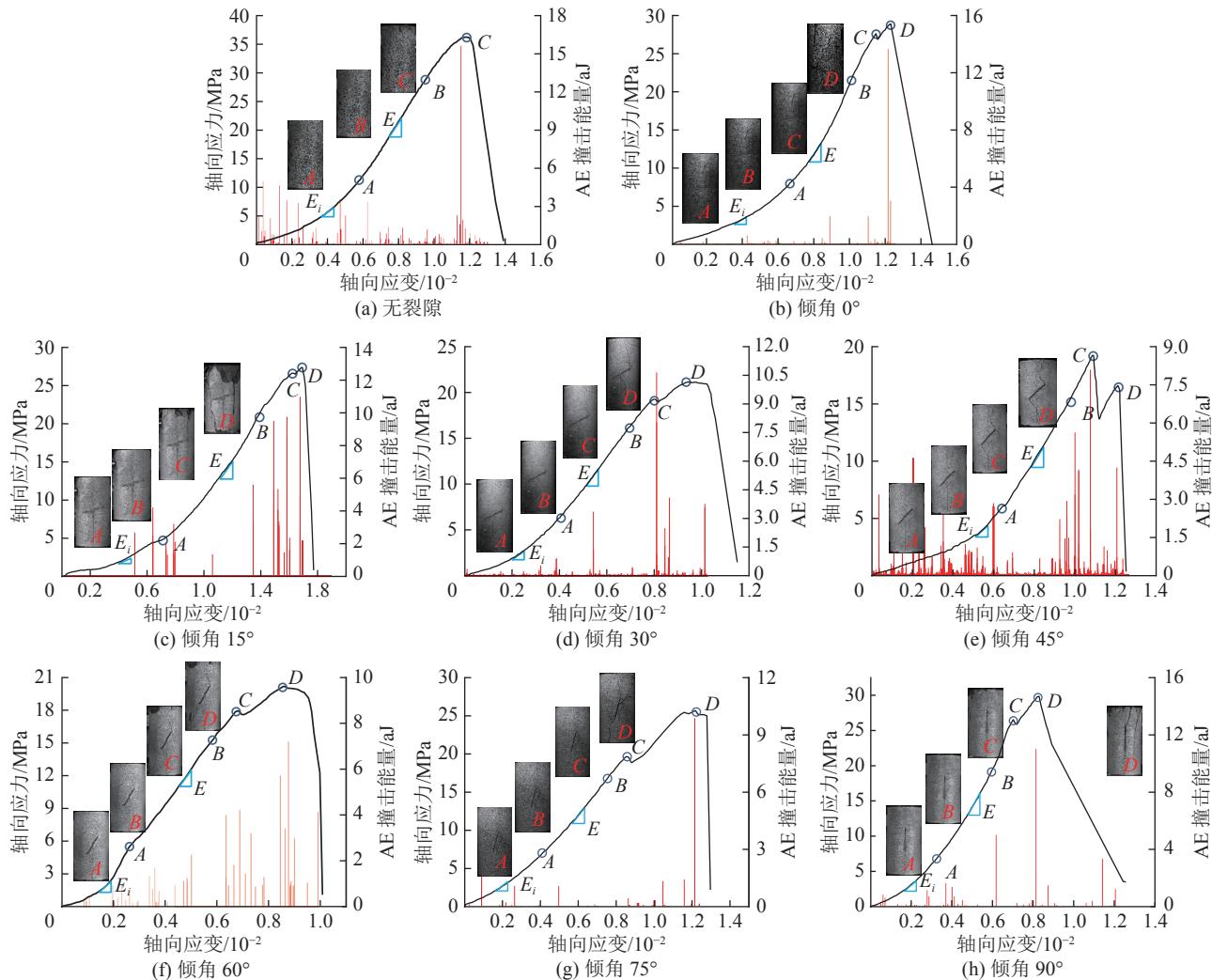


图3 预制裂隙类岩石试件应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of rock sample with pre-existing fracture

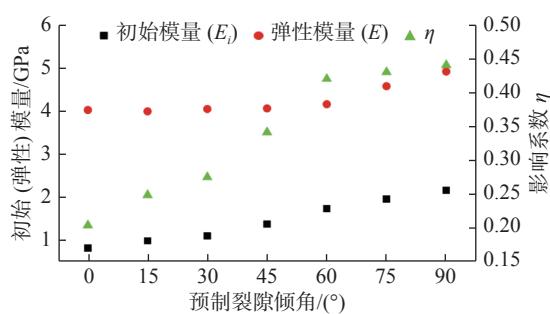


图4 岩石变形参数与预制裂隙倾角关系

Fig.4 Evolution of rock modulus with fracture angle

隙非整合接触面变形贡献, 弹性模量小; 倾角增大, 岩石骨架变形对压缩变形量的贡献度升高, 弹性模量增大。将初始模量与弹性模量的比值定义为预制裂隙对岩石变形特征的影响系数  $\eta$ 。裂隙倾角增大, 系数  $\eta$  升高, 预制裂隙对岩石变形能力的影响程度增大。

单轴抗压强度随预制裂隙倾角的变化特征如图5所示。同完整试件相比, 含裂隙试件单轴抗压

强度降低, 降低程度同裂隙倾角密切相关。倾角为0°和90°时, 预制裂隙对岩石强度的影响程度最低, 单轴抗压强度降至30 MPa, 为完整岩石的83%。预制裂隙倾角由[0, 90]区间两侧向中部移动, 单轴抗压强度呈现降低趋势。倾角为45°时, 单轴抗压强度降至最小值18 MPa, 为完整岩石强度的50%。裂隙方向对岩石强度的影响不可忽视, 裂隙倾角由

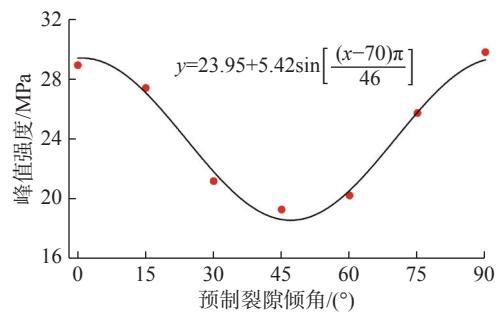


图5 预制裂隙类岩石试件单轴抗压强度变化曲线

Fig.5 Evolution of rock UCS with fracture angle

$0^\circ \rightarrow 45^\circ$ 或 $90^\circ \rightarrow 45^\circ$ 变化过程中,岩石单轴抗压强度降低程度由17%增至33%。将最低强度值对应的倾角定义为岩石破坏优势裂隙角 $\beta_m$ ,张开型裂隙条件下 $\beta_m$ 为 $45^\circ$ ,与断裂力学结论一致<sup>[25]</sup>。

### 2.3 预制裂隙类岩石试件破坏模式

类岩石试件表面破坏裂隙如图6所示。完整试件中部出现一条纵向劈裂裂隙,裂隙倾角约 $85^\circ$ 。裂隙倾角为 $0^\circ$ 时,裂隙尖端出现翼裂纹扩展现象,扩展方向与加载方向平行,试件中部出现劈裂裂隙,扩展至试件端部。左侧翼裂纹与中部裂隙贯通,右侧翼裂纹扩展不充分。倾角为 $15^\circ$ 时,岩石试件破坏模式同 $0^\circ$ 相似,但试件中部无裂隙发育,两端翼裂纹均得到充分扩展。裂隙倾角为 $30^\circ$ 和 $45^\circ$ 时,翼裂纹扩展方向与加载方向平行,类属拉伸破坏;倾角为 $60^\circ$ 时,裂隙上尖端翼裂纹扩展方向与加载方向一致,下尖

端则发生沿预制裂隙面的自相似扩展,类属拉剪混合破坏。倾角为 $75^\circ$ 时,翼裂纹初始扩展方向与裂隙面平行,继而转向加载方向,预制裂隙闭合后,接触面剪应力非均匀分布引起局部拉应力,预制裂隙上尖端下方5 mm处出现拉伸裂纹发育现象,试件发生拉剪混合破坏。裂隙倾角达到 $90^\circ$ 时,翼裂纹扩展方向与加载方向一致,试件右侧发育一条破坏裂隙,方向与主裂隙平行,破坏模式同完整岩石类似。

超声波传播速度测试结果如图7所示,试验前超声波在试件中的传播速度介于 $3.7 \sim 3.8 \text{ km/s}$ 。试验后超声波在破坏试件中的传播速度大幅降低。超声波速降低程度随着裂隙倾角的增大呈现升高趋势,将超声波速降低量与初始波速的比值定义为预制裂隙类岩石损伤度,裂隙倾角由 $0^\circ$ 增加至 $90^\circ$ ,类岩石试件损伤程度由0.1升高至0.2。

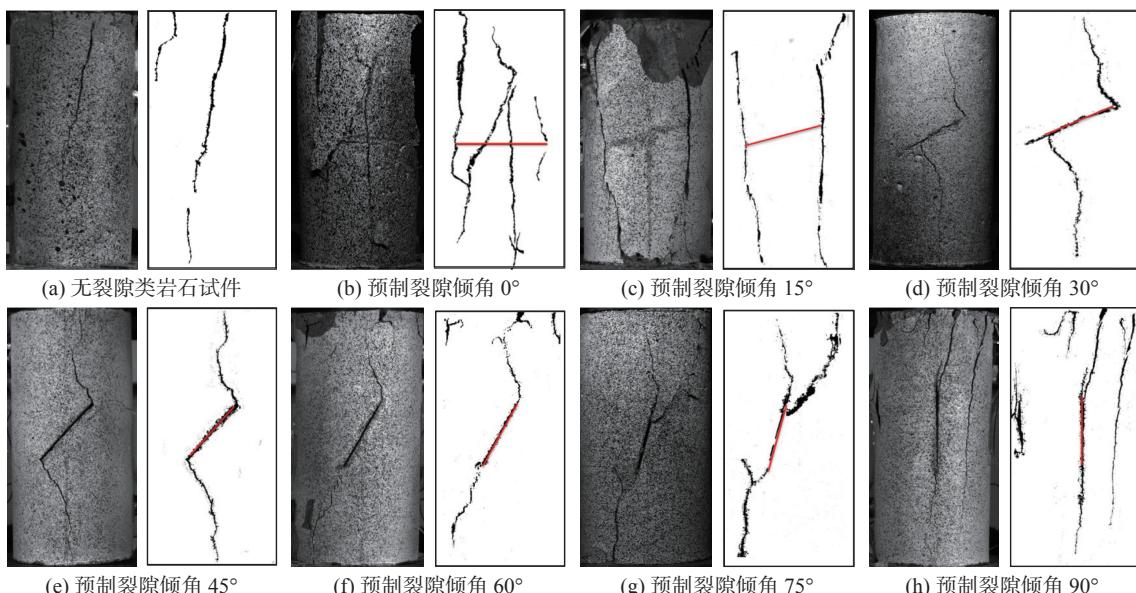


图6 预制裂隙类岩石试件破坏模式  
Fig.6 Surface fracture distribution of rock sample

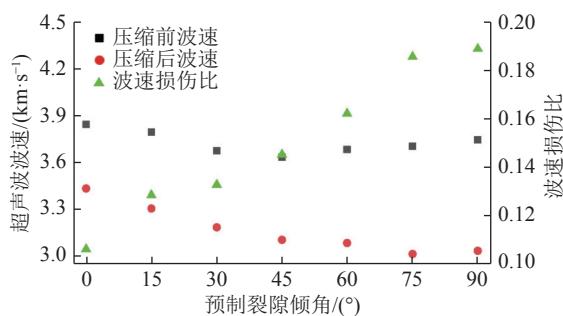


图7 预制裂隙类岩石试件中超声波传播速度  
Fig.7 Ultrasonic wave velocity in rock sample

### 2.4 预制裂隙扩展过程与机理分析

采用DIC技术监测试件表面最大主应变演化特

征如图8所示。初始阶段表面应变场均匀分布;轴向应力达到初始屈服强度的80%时,岩石表面出现应变集中,即变形局部化现象,如图8a—图8h中(1)图所示。完整岩石试件应变集中区位于试件上、下两端,含裂隙试件应变集中区位于裂隙尖端。应变集中表明岩石内部出现损伤,岩石变形主要位于损伤集中区。随着载荷的增加,变形集中带的应变值升高,当应变值增加至5.0%时,岩石变形发生不连续现象,由局部集中向裂隙发育阶段过渡。应力达到初始屈服强度时,应变集中区发生扩展,如图8a—图8h中(2)图所示。完整试件应变集中区由上、下两端向试件中部扩展,含裂隙试件由裂隙尖端向上、

下两端扩展, 扩展长度达20 mm, 应变值大于5.0%的区域已进入非连续变形阶段, 变形集中带扩展路径实质为破坏裂隙扩展路径。轴向应力达到岩石峰

值强度时, 应变集中区扩展至试件上、下两端或侧面边界, 应变值达到10%~20%, 形成贯通裂隙, 岩石发生破坏, 如图8a—图8h中(3)图所示。

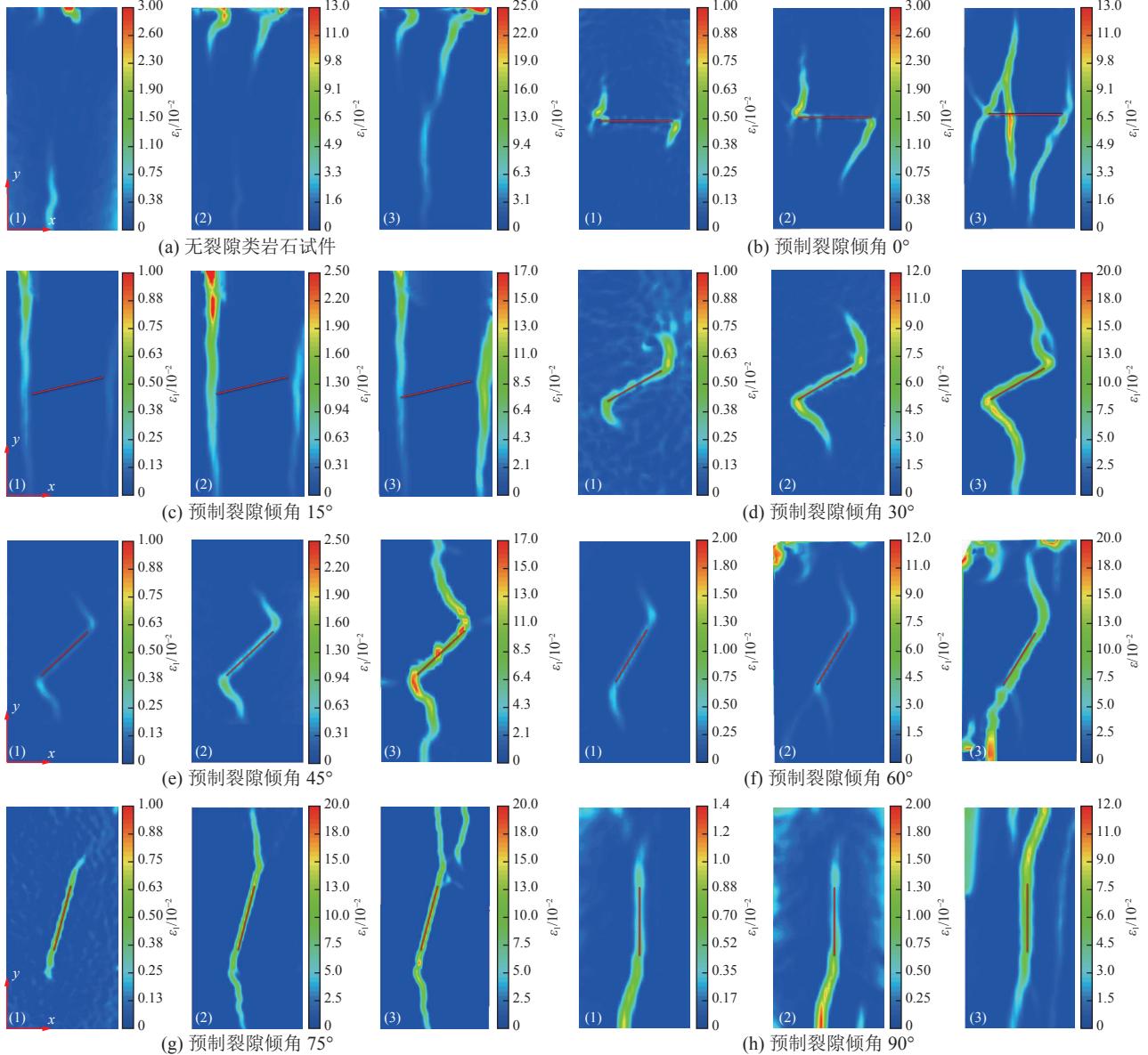


图8 预制裂隙类岩石试件最大主应变场分布

Fig.8 Major principal strain distribution on monitoring surface

裂隙面两侧特征点的相对位移演化特征可定量确定裂隙类型: 若相对位移呈分离张开趋势, 为拉伸裂隙; 若呈剪切错动趋势, 为剪切裂隙。预制裂隙倾角0°时, 特征点位置和相对位移曲线如图9a所示。*a-b*和*c-d*两个位置处, 特征点沿*x*轴的水平位移在裂隙面一侧为正、一侧为负, 表明裂隙呈张开趋势, 张开度随着加载时间的增加逐渐增大。特征点*e-f*位置处, 裂隙两侧水平位移均呈升高趋势, 这是由于预制裂隙左侧和中部裂纹扩展充分, 张开度大, 导致

试件右侧整体右移。靠近试件右侧边界的*f*点水平位移增长速度大于*e*点, 因此, 该裂隙仍然呈张开趋势。3个特征点位置处, 裂隙两侧纵向位移演化曲线保持一致, 即在压应力作用下呈现协同下降的趋势, 剪切错动量很小。相对位移曲线演化特征表明倾角0°时, 预制裂隙扩展由拉应力主导, 岩石发生拉伸破坏。

预制裂隙倾角60°时, 特征点位置和相对位移曲线如图9b所示。特征点*a-b*处, 裂隙两侧水平位移

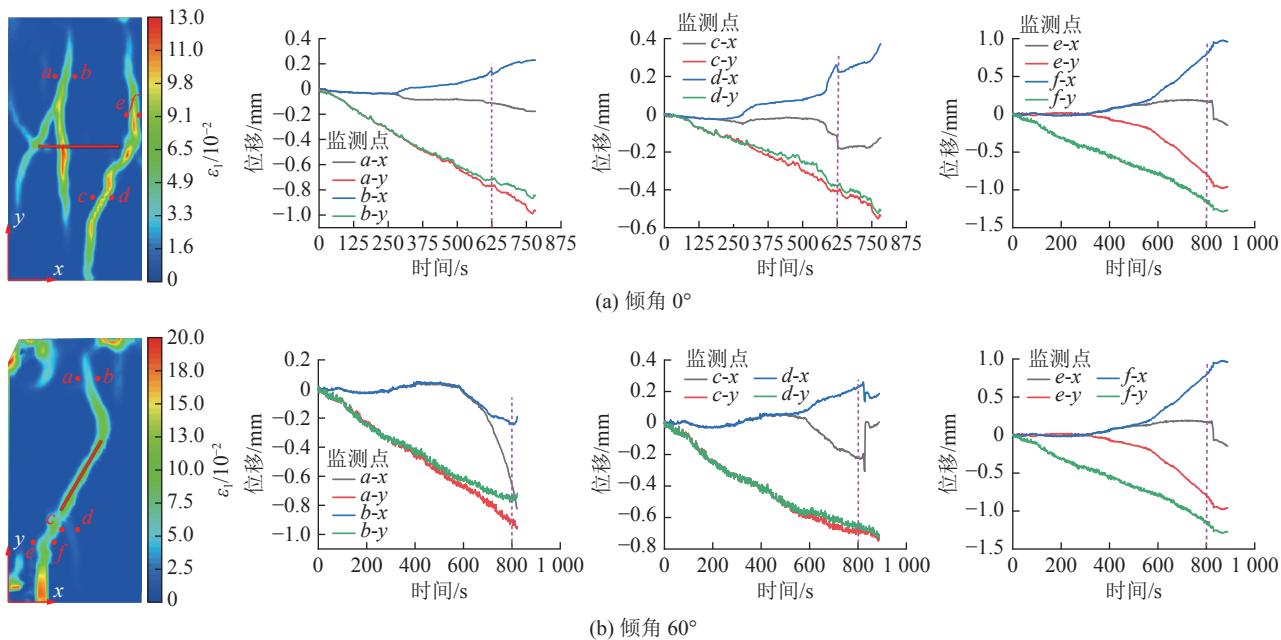


图9 裂隙面两侧特征点相对位移演化曲线

Fig.9 Displacement curves of points on two sides of the fracture

呈降低趋势。这是由于边界效应下,预制裂隙上尖端右侧首先发育一条拉伸裂隙,其左侧岩石整体左移。但是a点左移速度高于b点,因此,裂隙呈张开趋势。特征点c-d处,裂隙两侧水平位移一侧为正、一侧为负,也呈张开趋势。加载时间达到820 s时,裂隙张开度突然减小,表明该裂隙进入压实闭合进程。特征点e-f处,裂隙两侧位移均呈增大趋势,这是由于裂隙压实闭合效应的结果。特征点f位移速度高于e点,因此,裂隙同样呈张开趋势,但张开速度缓慢。特征点a-b和c-d处,裂隙两侧纵向位移保持一致,表明裂隙两侧岩石没有剪切错动趋势。但在特征点e-f处,裂隙两侧纵向位移差异明显,即发生剪切位错现象,剪切面粗糙导致裂隙面在法线方向呈现慢速张开的趋势。综上可知预制裂隙倾角为60°时,特征点a-b、c-d所在裂隙为拉应力主导型,特征点e-f处裂隙为剪应力主导型,岩石发生拉剪混合破坏。

特征点应变演化曲线可定量确定岩石起裂时间和顺序。预制裂隙倾角为60°和75°时,岩石主破坏裂隙和次生裂隙扩展路径特征点的应变演化曲线如图10所示。特征点a、b位于预制裂隙尖端,c、d位于裂隙扩展路径上。

倾角60°时,a、b两点应变保持一致,加载时间达到200 s时,裂隙尖端应变值进入缓慢增长阶段,加载时间接近600 s时,轴向应力达到初始屈服强度的80%,应变增长速度升高,裂隙尖端出现变形局部化现象。c点应变增长时间滞后a、b两点200 s,但

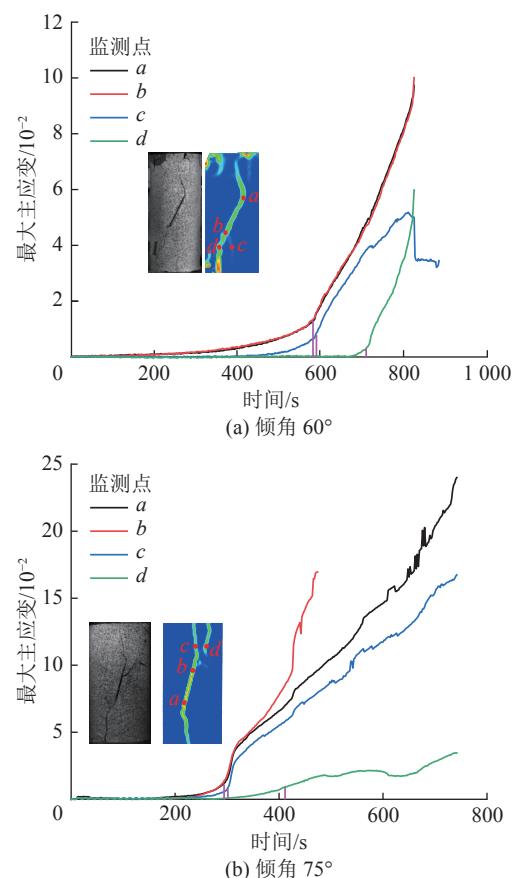


图10 裂隙扩展路径特征点应变值演化曲线

Fig.10 Strain curve on fracture propagation path

其拐点出现时间仅滞后a、b两点约10 s,表明应变集中带扩展速度极快。加载时间达到700 s时,c点应变增长速度开始降低,并在800 s时呈现回落趋势,

表明贯穿  $b$ 、 $c$  两点的拉伸裂纹扩展不充分, 应力重新分布过程中压实闭合, 因此, 图 6f 未捕捉到该裂隙。 $c$  点应变增长速度降低后,  $d$  点应变呈现升高的趋势, 且应变演化曲线增长趋势同  $a$ 、 $b$  两点类似, 即贯穿  $b$ 、 $d$  两点的剪切裂纹得到充分扩展。

倾角 75° 时, 裂隙首先发生自相似扩展,  $a$ 、 $b$  两点应变曲线缓慢增长阶段短。加载时间达到 300 s, 曲线拐点出现, 裂隙尖端发生变形局部化现象。此时轴向载荷达到 12 MPa, 为初始屈服强度的 60%, 剪应力主导的应变集中带对轴向载荷更为敏感。 $c$  点应变增长时间滞后于  $a$ 、 $b$  两点约 50 s, 拐点出现时间约滞后 10 s。加载时间达到 300 s 时,  $d$  点应变呈现升高趋势, 由于贯穿  $b$ 、 $d$  两点的次生裂隙扩展发生在首次应力跌落后, 其增长速度低于  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三点。 $a$ 、 $b$  两点应变在次生裂隙出现前保持一致, 次生裂隙出现后,  $b$  点应变同时受到 2 条张开型裂隙的影响, 增长速度高于  $a$  点。图 10 表明拉应力主导型

应变演化曲线缓慢增长阶段长, 变形局部化容易预测, 剪应力主导型缓慢增长阶段短, 变形局部化预测难度大。

### 3 预制裂隙类岩石破坏模拟分析

#### 3.1 数值模型构建

采用 PFC<sup>2D</sup> 建立含裂隙岩石 GBM 模型, 首先生成与试件尺寸相同的 Voronoi 多面体模型, 如图 11a 所示; 然后建立相同尺寸的小球模型, 如图 11b 所示; 第 3 步将构建的 Voronoi 多面体模型导入 PFC<sup>2D</sup>, 实现多面体模型与小球模型的覆盖叠加, 如图 11c 所示; 第 4 步将落入同一多面体的小球识别为岩石晶体颗粒, 得到非规则颗粒模型几何结构, 如图 11d 所示。非规则颗粒内部装载平行黏结接触 (绿色), 颗粒边界装载光滑节理接触 (蓝色), 并在试件中心位置处建立贯穿多个非规则颗粒的预制裂隙, 形成预制裂隙类岩石试件数值模型, 如图 11e 所示。

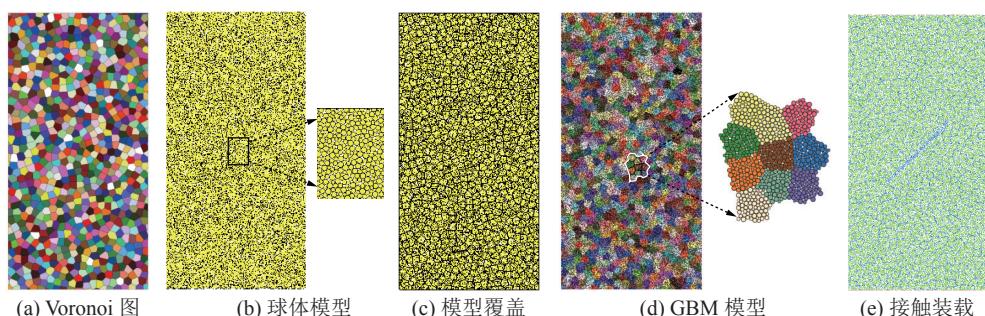


图 11 GBM 数值模型的建立  
Fig.11 Establishment method of GBM model

采用文献 [18] 所提方法, 根据预制裂隙类岩石变形参数和强度参数对 GBM 模型中的细观参数进行校正。开展预制裂隙类岩石试件单轴抗压模拟试验, 最终得到基础球体颗粒组、非规则内部颗粒组、非规则颗粒边界组和预制裂隙组的细观参数取值见表 1。数值模拟与试验所得弹性模量与峰值强度对比见表 2, 模拟误差均小于 5%, 验证了 GBM 方法模拟预制裂隙类岩石变形破坏行为的有效性。

#### 3.2 微裂纹发育规律及试件破坏机制

应力-应变、声发射和微裂纹演化曲线的模拟结果如图 12 所示。GBM 模型模拟岩石峰前行为有效, 难以体现峰后互锁现象, 因此, 倾角 0°、45° 和 90° 模型应力-应变曲线未出现双峰形态。声发射事件主要发生在峰值附近, 裂隙倾角增大, 峰前声发射事件增多, 与试验结果一致。模型破坏形态表明倾角 60° 和 75° 时, 裂隙发生自相似扩展, 类属拉剪混合破坏;

其他倾角裂隙扩展路径均沿加载方向, 岩石发生拉伸破坏, 破坏模式与试验结果一致。

微裂纹在峰值应力之前缓慢增长, 主要在预制裂隙尖端发育。轴向应力达到单轴抗压强度时, 微裂纹演化曲线出现拐点, 增长速度突然增大, 微裂纹由裂隙尖端向试件上、下端面扩展。峰值应力之后, 微裂纹保持快速增长状态, 最终导致岩石破坏。微裂纹演化曲线表明岩石中拉伸微裂纹数量明显多于剪切裂纹数量, 剪切型微裂纹数量随预制裂隙倾角增大呈先增多后减少趋势。GBM 模拟所得微裂纹发育集中区与 DIC 监测所得局部变形集中区实质相同, 两者演化特征基本一致。

微裂纹产状分布如图 13 所示。拉伸微裂纹发育方向不受预制裂隙的影响, 主要集中在加载方向, 倾角等于 90°。预制裂隙倾角增大, 拉伸微裂纹数量呈先减少后增多趋势。剪切微裂纹发育方向受预制

表1 GBM数值模型细观力学参数

Table 1 Meso-mechanical properties for the GBM model

属性组别	细观参数	取值
基础球体颗粒组	球体半径/mm	0.1~0.2
	球体刚度/GPa	1.0
	线性黏结刚度比/(kg·m <sup>-3</sup> )	2.0
非规则内部颗粒组	线性黏结摩擦因数	0.7
	平行黏结有效模量/GPa	4.0
	平行黏结刚度比	2.0
非规则颗粒边界组	平行黏结黏聚力/MPa	25.0
	平行黏结摩擦角度/(°)	30
	平行黏结抗拉强度/MPa	10.0
光滑节理组	光滑节理刚度/GPa	200
	光滑节理刚度比	2.0
	光滑节理摩擦角度/(°)	30
光滑节理组	光滑节理黏聚力/MPa	20
	光滑节理抗拉强度/MPa	8.0
	光滑节理黏聚力/MPa	10
预制裂隙组	光滑节理抗拉强度/MPa	4.0

表2 试验与数值模拟结果对比

Table 2 Comparison of testing and numerical results

裂隙倾角/(°)	峰值强度/MPa			弹性模量/GPa		
	试验	模拟	误差	试验	模拟	误差
0	28.89	28.61	-0.28	4.01	3.64	-0.37
15	27.36	27.79	+0.43	3.98	3.85	-0.13
30	21.14	21.23	+0.09	4.03	3.91	-0.12
45	18.23	18.34	+0.11	4.05	3.76	-0.29
60	20.19	20.28	+0.09	4.14	3.99	-0.15
75	25.68	25.89	+0.21	4.56	4.37	-0.19
90	29.76	29.71	-0.05	4.90	4.53	-0.37

裂隙影响明显,主要集中在平行于预制裂隙面的方向,表明预制裂隙面两侧岩石易于发生剪切错动。对比拉伸和剪切微裂纹的玫瑰花图可知:含裂隙岩石试件微细观破坏机制以拉伸为主,剪切为辅。

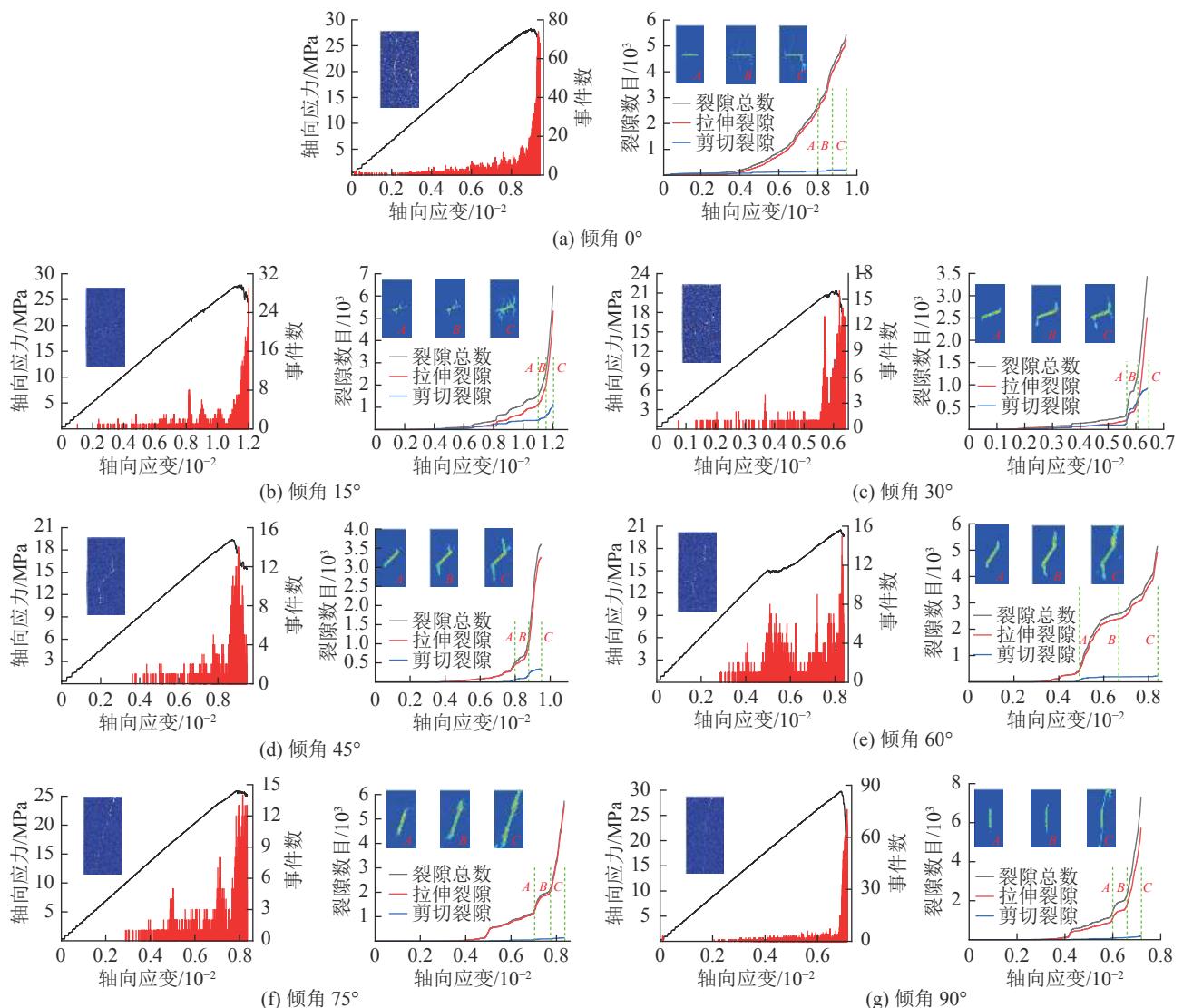


图12 预制裂隙类岩石破坏行为数值模拟结果  
Fig.12 Modeling results of failure behavior in rock sample

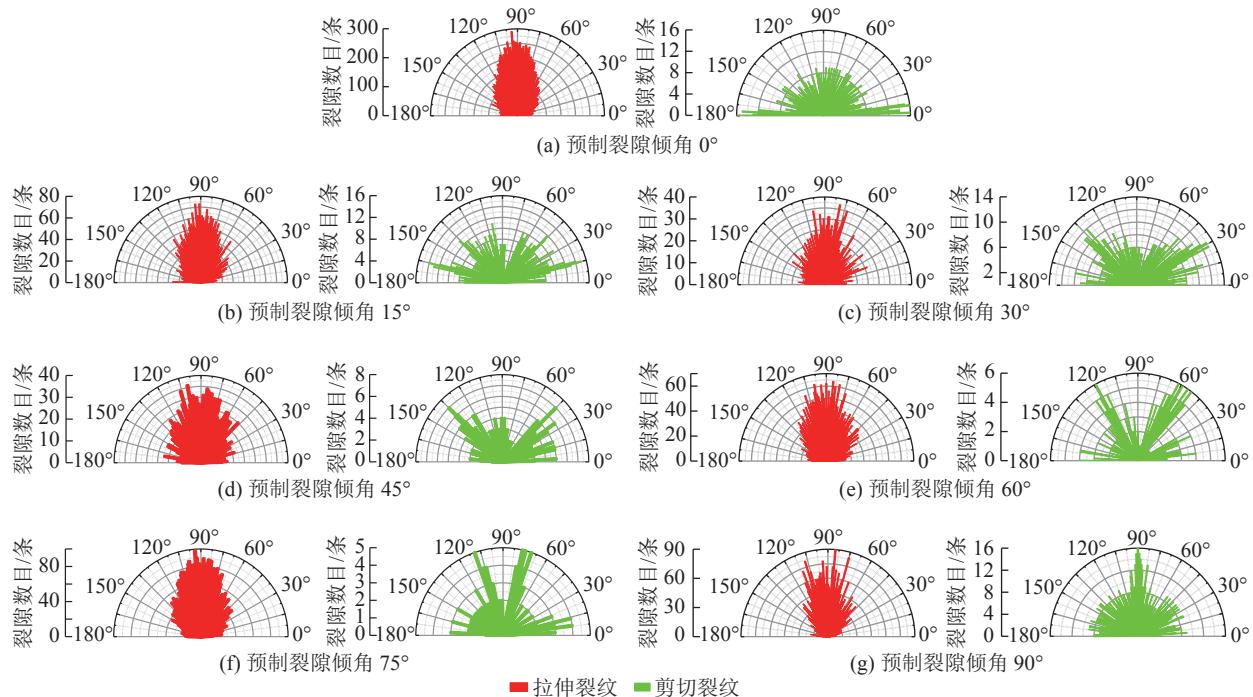


图 13 预制裂隙类岩石微裂纹产状分布  
Fig.13 Micro-crack distribution in rock sample

## 4 结 论

1) 预制裂隙闭合后与翼裂纹形成剪切互锁效应, 导致岩石应力-应变曲线呈现双峰形态; 预制裂隙倾角增大, 岩石弹性模量和峰后损伤程度升高, 单轴抗压强度先降低后升高; 将最小强度值对应的预制裂隙倾角定义为优势裂隙角, 张开型裂隙条件下其值为 45°。

2) 岩石试件局部变形集中带发育模式与表面裂隙扩展模式一致, 应变大于 5% 的区域发生变形不连续现象, 岩石变形由局部集中向裂隙发育阶段过渡; 拉伸裂隙萌生前, 应变集中带孕育时间长, 剪切裂隙萌生前, 应变集中带孕育时间短。

3) 岩石连续变形阶段, 裂隙两侧特征点相对位移演化曲线保持一致, 非连续变形阶段, 特征点相对位移演化曲线相互偏离; 水平位移曲线偏离, 裂隙扩展由拉应力主导, 纵向位移曲线偏离, 裂隙扩展由剪应力主导; 预制裂隙倾角为 60° 和 75° 时, 试件发生拉剪破坏, 其他角度时发生拉伸破坏。

4) 基于 Voronoi 多面体构建了预制裂隙类岩石试件 GBM 模型, 模拟所得应力-应变曲线和微裂隙发育特征与试验数据吻合, 岩石内部微裂纹发育以拉伸裂纹为主, 剪切裂纹数量随裂隙角度增加呈现先增多后减少的趋势, 拉伸微裂纹平行于加载方向, 剪切微裂纹平行于预制裂隙方向。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平, 高 峰, 鞠 杨. 深部岩体力学研究与探索 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161–2178.  
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2161–2178.
- [2] 王家臣, 杨胜利, 杨宝贵, 等. 深井超长工作面基本顶分区破断模型与支架阻力分布特征 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 54–63.  
WANG Jiachen, YANG Shengli, YANG Baogui, et al. Roof sub-regional fracturing and support resistance distribution in deep long-wall face with ultra-large length [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 54–63.
- [3] 王家臣, 王兆会, 杨 杰, 等. 千米深井超长工作面采动应力旋转特征及应用 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 876–888.  
WANG Jiachen, WANG Zhaohui, YANG Jie, et al. Mining-induced stress rotation and its application in longwall face with large length in kilometer deep coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 876–888.
- [4] 张俊文, 宋治祥, 刘金亮, 等. 煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 27–36.  
ZHANG Junwen, SONG Zhixiang, LIU Jinliang, et al. Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 27–36.
- [5] 王兆会, 孙文超, 水艳婷, 等. 千米深井超长工作面采动应力旋转轨迹及其推进方向效应研究 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 634–650.  
WANG Zhaohui, SUN Wenchao, SHUI Yanting, et al. Mining-induced stress rotation trace and its sensitivity to face advance direc-

- tion in kilometer deep longwall panel with large face length[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 634–650.
- [6] YANG S Q, YIN P F, ZHANG Y C, et al. Failure behavior and crack evolution mechanism of a nonpersistent jointed rock mass containing a circular hole[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 114: 101–121.
- [7] 黄彦华, 杨圣奇, 刘相如. 焦炭材料力学特性的试验及数值模拟研究[J]. *实验力学*, 2014, 29(2): 239–249. HUANG Yanhua, YANG Shengqi, LIU Xiangru. Experimental and Numerical study on the mechanical characteristics of rock-like materials[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(2): 239–249.
- [8] KAKOURIS E, TRIANTAFYLLOU S. Material point method for crack propagation in anisotropic media: a phase field approach[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2018, 88(1): 287–316.
- [9] REIS J M L, NUNES L C S, MATTOS H S D C. Crack propagation analysis of polymer mortars Brazilian disc specimens containing cracks under compressive line loading[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1129: 429–437.
- [10] 于利强, 姚强岭, 徐强, 等. 加载速率影响下裂隙细砂岩裂纹扩展试验及数值模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3488–3501. YU Liqiang, YAO Qiangling, XU Qiang, et al. Experimental and numerical simulation study on crack propagation of fractured fine sandstone under the influence of loading rate[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3488–3501.
- [11] 李建旺. 基于数字图像技术的含双预制裂隙类岩石试样力学特性细观研究[J]. *中国矿业*, 2020, 29(9): 168–174. LI Jianwang. Meso research on the mechanical properties of rock specimens with double pre-existing fissures based on digital image correlation[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(9): 168–174.
- [12] 彭守建, 冉晓梦, 许江, 等. 基于3D-DIC技术的砂岩变形局部化荷载速率效应试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3591–3603. PENG Shoujian, RAN Xiaomeng, XU Jiang, et al. Experimental study on loading rate effects of sandstone deformation localization based on 3D-DIC technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3591–3603.
- [13] 宋义敏, 邢同振, 邓琳琳, 等. 不同加载速率下岩石变形场演化试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(10): 2773–2779. SONG Yimin, XING Tongzhen, DENG Linlin, et al. Experimental study of evolution characteristics of rock deformation field at different loading rates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(10): 2773–2779.
- [14] DAUTRIAT J, BORNERT M, GLAND N, et al. Localized deformation induced by heterogeneities in porous carbonate analyzed by multi-scale digital image correlation[J]. *Tectonophysics*, 2011, 503(1-2): 100–116.
- [15] YANG G, CAI Z X, ZHANG X C, et al. An experimental investigation on the damage of granite under uniaxial tension by using a digital image correlation method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 73(10): 46–52.
- [16] ALIABADIAN Z, ZHAO G F, RUSSELL A R. Crack development in transversely isotropic sandstone discs subjected to Brazilian tests observed using digital image correlation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 119(7): 211–221.
- [17] SHARAFIFISAFA M, SHEN L M, XU Q F. Characterization of mechanical behaviour of 3D printed rock-like material with digital image correlation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112(12): 122–138.
- [18] WANG ZH, YANG SL, LI LH. A 3D Voronoi clump based model for simulating failure behavior of brittle rock[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 248: 107720.
- [19] LI H, MA H L, SHI X L, et al. A 3D grain-based model for simulating the micromechanical behavior of salt rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53: 2819–2837.
- [20] HUANG S B, YAO N, YE Y C, et al. Strength and failure characteristics of rocklike material containing a large-opening crack under uniaxial compression: experimental and numerical studies[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(8): 04019098.
- [21] SARFARAZI V, GHAZVINIAN A, SCHUBERT W, et al. Numerical simulation of the process of fracture of echelon rock joints[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4): 1355–1371.
- [22] HOFMANN H, BABADAGLI T, YOON J S, et al. A grain based modeling study of mineralogical factors affecting strength, elastic behavior and micro fracture development during compression tests in granites[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 147: 261–275.
- [23] BAHRANI N, KAISER P K, VALLEY B. Distinct element method simulation of an analogue for a highly interlocked, non-persistently jointed rockmass[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 71: 117–130.
- [24] 李博, 朱强, 张丰收, 等. 基于矿物晶体模型的非均质性岩石双裂纹扩展规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(6): 1119–1131. LI Bo, ZHU Qiang, ZHANG Fengshou, et al. Study on crack propagation of heterogeneous rocks with double flaws based on grain based model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(6): 1119–1131.
- [25] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. *Fundamentals of rock mechanics*. forth ed[M]. Oxford: Wiley-Blackwell Publishing, 2007.