

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220195

# 含预制断续裂隙类岩石材料力学特性 试验及数值模拟研究

刘树新, 郑旭, 丁凯, 张东杰

(内蒙古科技大学矿业与煤炭学院, 内蒙古包头 014010)

**摘要:** 为了研究含预制裂隙岩石的力学特性, 制备不同角度的断续裂隙类岩石试件, 对含裂隙岩石试件进行单轴试验, 发现倾角  $40^\circ$  断续裂隙的单轴抗压强度最大,  $60^\circ$  次之,  $20^\circ$  最小。使用 PFC2D 对试验过程进行模拟, 并分析试验过程中微裂纹与应力的变化规律, 发现岩桥强度对试件单轴抗压强度具有重要影响, 通过对比发现数值模拟的应力-应变曲线的变化规律与物理试验结果基本一致。

**关键词:** 预制裂隙; 单轴压缩; PFC2D; 数值计算

**中图分类号:** TV223.1; TU452

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0181-05

## 1 引言

在岩体工程中, 由于岩石的不连续性, 岩石内部往往存在节理、裂隙, 影响岩体强度及渗流特性, 对岩体工程安全产生重要影响。目前, 对裂隙岩体已有很多研究。如易婷等<sup>[1]</sup>研究了不同数目、不同倾角对岩体强度及变形特征的影响; YANG SHENG-QI 等<sup>[2]</sup>对非共面断续裂隙砂岩进行单轴压缩试验, 并研究了微裂纹的演化过程; 梁露等<sup>[3]</sup>定量分析了断续节理岩体破坏模式与强度的关系; 邓华锋等<sup>[4]</sup>研究了三轴压缩作用下柱形断续节理砂岩试样的力学特性。已有研究大多以高强度的岩体为研究对象, 且节理裂隙的尺寸较小<sup>[5,6]</sup>。在实际工程中, 低强度断续裂隙岩体中裂隙的发育速度往往较快, 裂隙数多, 且发育复杂。为了研究低强度断续裂隙岩体的力学特性及断续裂隙倾角对岩体破坏模式及破坏过程的影响, 本文对不同角度共面低强度断续节理类岩石进行单轴压缩试验, 并结合数值模拟软件分析了试验过程, 旨在探究裂隙倾角对岩体的影响。

## 2 研究方法

### 2.1 试件制备

通过现场取样方法获取原岩, 但在岩石形成过程中由于地质作用, 岩石中的裂隙往往是不均匀、不连续的, 要获取规律的断续节理, 会大幅增加试验成本, 并且试验结果具有不确定性。大量研究表明<sup>[7-9]</sup>, 岩石材料与类岩石材料在力学参数上具有相似性。因此, 本文采用类岩石材料作为研究对象。为模拟砂岩的力学参数, 选择水泥、河沙和水来制作类岩石, 比例为  $3:6:1$ , 并添加少量减水剂来增大初凝时间, 方便预制裂隙的生成。河沙的粒径为  $0.4\sim 0.8$  mm。

将配制好的水泥砂浆分层浇注至内部尺寸为  $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的模具中, 并将准备好的薄片(其外形尺寸高 $\times$ 宽 $\times$ 厚= $150\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ )涂抹润滑油后插入其中。在分层浇注的过程中, 在水泥砂浆表面放置一块根据断续节理尺寸定制的铁板, 来确保铜片的位置不会偏移, 然后不断振捣, 最后抹平试件平面。静置  $6\sim 8$  h 后, 拔出预置铜片, 24 h 后进行脱模, 在通风干燥处养护 15 d。分别使预制断续裂隙与轴向之间的角度为  $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ , 固定裂隙长度为 20 mm, 并保证断续裂隙贯穿整个类岩石试件且在同一平面内, 试件的具体几何尺寸见图 1。

### 2.2 试验方案

根据试验目的, 先对完整的类岩石试件进行单轴抗压试验。然后对含预制断续裂隙的试件进

收稿日期: 2022-02-03, 修回日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51264028); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021LHMS05017); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY11147)

作者简介: 刘树新(1971-), 男, 博士、教授, 研究方向为岩石力学、采矿工艺等, E-mail: sxbt@163.com

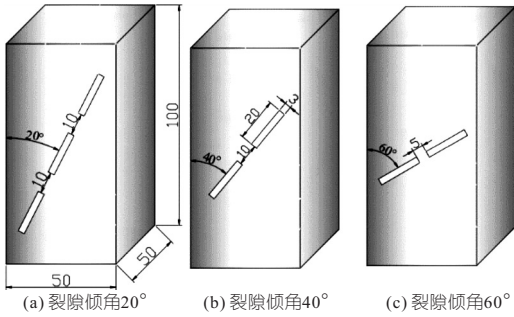


图 1 试件尺寸示意图(单位:mm)

Fig. 1 Planar polarization system

行单轴试验,为减小试验结果的离散性,每个角度的断续裂隙分别制作 3 个相同的试样。

### 2.3 试验系统与加载

单轴压缩试验设备为型号为 SAW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴压力试验机,采用轴向等位移控制方式对试样匀速加载,加载速率为 0.1 mm/min;试样在试验过程中的变形用单轴压缩试验机配置的  $\phi 50$  mm 规格引伸计采集。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 裂隙倾角对峰值强度的影响

图 2 给出了完整试样和不同共面断续裂隙的单轴应力—应变曲线。由图 2 可看出,完整试件的峰值强度最大值为 12.3 MPa,倾角  $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$  断续裂隙峰值强度分别为 3.91、5.92、4.42 MPa。由此可知,预制断续裂隙的存在会大幅缩

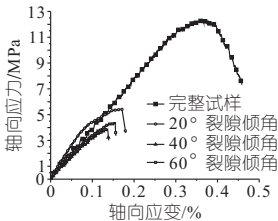


图 2 单轴压缩应力—应变曲线

Fig. 2 Uniaxial compressive stress-strain curve

减岩石试件的峰值强度,削减程度可达  $51.8\% \sim 68.0\%$ 。这说明裂隙对岩石试件会有初始损伤,本文引入损伤系数  $\eta$  来定义损伤程度<sup>[6]</sup>,即:

$$\eta = (\delta_1 - \delta_2) / \delta_1 \quad (1)$$

式中,  $\delta_1$  为完整试件的单轴抗压强度;  $\delta_2$  为含预制裂隙的单轴抗压强度。

图 3 为不同倾角断续裂隙峰值强度及损伤系数曲线。由图 3 可看出,损伤系数随着裂隙倾角变化呈“V”型变化,峰值强度随裂隙倾角呈倒“V”型变化。当断续裂隙的倾角为  $20^\circ$  时,损伤系数最大,  $40^\circ$  的损伤系数最小,  $60^\circ$  损伤系数与  $20^\circ$  最接近。

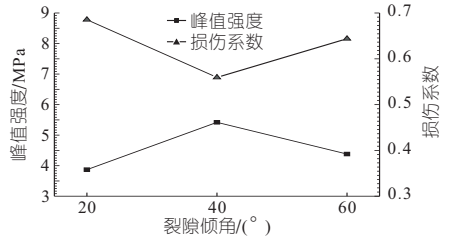


图 3 不同倾角断续裂隙峰值强度及损伤系数曲线

Fig. 3 Peak strength and damage coefficient curves of intermittent fractures with different dip angles

### 3.2 裂隙倾角对试件变形特征的影响

不同倾角断续裂隙的轴向峰值应变见图 4。由图 4 可知,当裂隙倾角为  $40^\circ$  时轴向应变最大为 0.001 8,  $20^\circ$  轴向应变最小为 0.001 39,  $60^\circ$  轴向应变为 0.001 5。

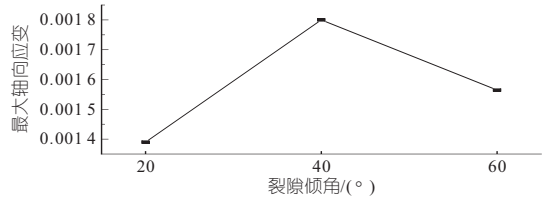


图 4 不同倾角断续裂隙的最大轴向应变

Fig. 4 Maximum axial strain of intermittent fractures with different dip angles

### 3.3 裂隙倾角对试件破坏模式的影响

对单轴压缩下含裂隙岩石的微裂纹进行划分,裂纹包括翼裂纹与次生裂纹。次生裂纹又包括次生共面裂纹与次生倾斜裂纹。翼裂纹属于初始萌生裂纹,是张拉裂纹,翼裂纹位于预制裂隙尖端,起裂后向最大主应力方向发展。次生裂纹同样产生于预制裂隙的尖端附近,次生共面裂纹与预制裂隙平行,次生倾斜裂纹与预制裂隙垂直且与翼裂纹发展方向相反。裂纹的贯通模式包括拉贯通、剪贯通、压贯通和混合贯通<sup>[10]</sup>。

图 5 给出了  $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$  不同倾角的断续裂隙在单轴压缩下的最终破坏模式。试件裂隙倾角为  $20^\circ$  时,试件中仅存在翼裂纹和少量次生倾斜裂纹,岩桥间产生了贯通裂纹,贯通模式为剪贯通。试件裂隙倾角为  $40^\circ$  时,产生两条翼裂纹和两条次生倾斜裂纹,岩桥周围产生许多微裂纹,并在次生倾斜裂纹附近表面有岩块脱落的现象,岩

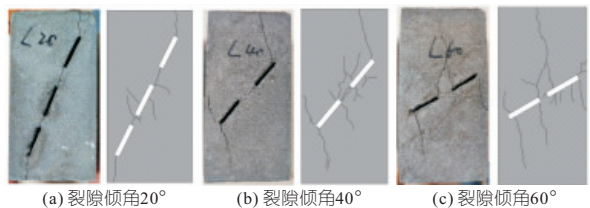


图 5 断续裂隙试件的最终破坏模式

Fig. 5 The ultimate failure mode of intermittent fissures specimens

桥间产生了贯通,贯通模式为剪贯通。裂隙倾角为 60°时,初期预制裂隙上部产生两条翼裂纹,两条裂纹向主应力方向萌生,后期交汇,合并为一条翼裂纹,并继续向最大主应力方向发展;预制裂隙下部产生一条翼裂纹和次生倾斜裂纹;且岩桥间未发生贯通。

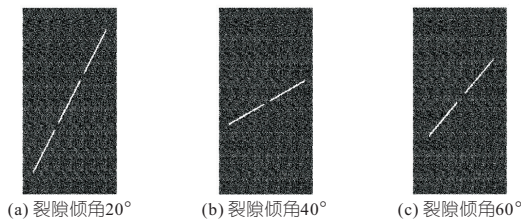


图 6 数值模型

Fig. 6 Numerical simulation model

## 4 PFC 数值模拟

### 4.1 数值模拟

使用 PFC2D 对含预制裂隙的岩石试件的单轴压缩过程进行数值模拟,以验证物理试验的准确性。计算步骤如下。

**步骤 1 建立模型。**根据河沙粒径为 0.4~0.8 mm,设置 PFC 中颗粒大小与之对应。使用纽迈核磁共振设备确定完整岩石试件的孔隙率为 5%,将孔隙率数值代入 PFC 中。随机种子数设置为 10 004 个,生成的颗粒数目为 26 112 个,赋值参数包括密度、弹性模量和泊松比,具体见表 1。

表 1 岩石力学参数

Tab. 1 Rock mechanics parameters

密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模 量/GPa	泊松 比	抗拉强 度/MPa	粘聚力 /MPa	内摩擦 角/(°)
2 490	2.0	0.3	1.45	11.2	42

**步骤 2 施加预应力。**在岩石试件制备过程中,由于周边铁板对试样的限制作用,在对试样振捣的过程中会产生预应力,这里通过控制墙体的位移来实现预应力的生成,预应力设置为 5 000 Pa。

**步骤 3 赋予本构模型。**平行粘结模型广泛应用于岩石及水泥胶结材料的破裂过程<sup>[11]</sup>,根据砂岩的力学性质及粒径大小建立对应的数值模型,模拟裂隙岩石。其中赋值参数包括抗拉强度、粘聚力和内摩擦角。由于岩石的细观参数直接影响应力—应变曲线,本文通过“试错法”向试验所得应力—应变曲线拟合,具体赋值见表 1。

**步骤 4 生成裂隙。**根据所设计裂隙大小及位置,在数值模型中生成共面预制裂隙(图 6)。

**步骤 5 单轴加载。**删除左右两侧的墙体,对上下墙体施加速度,加载速度为 0.1 mm/min,加载过程中,记录轴向应力、轴向应变和微裂纹数量,这里的微裂纹是指在加载过程中破坏产生的裂纹。

### 4.2 数值模拟结果及分析

#### 4.2.1 应力—应变曲线分析

使用 PFC 计算的结果见图 7。由图 7 可看出,含预制断续裂隙的岩石的应力—应变曲线存在四个阶段,即:①裂隙压密阶段(第 1 阶段);②弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段(第 2 阶段);③裂纹非稳定破裂阶段(第 3 阶段);④破裂后阶段(第 4 阶段)。裂隙压密阶段轴向应变增大而应力基本保持不变,这是由于试件内部存在的初始孔隙所致。由图 7 可看出,倾角 20°、40°、60°断续裂隙压密阶段的轴向应变基本相同,这说明在数值模型中三者的孔隙率一致。

倾角 20°、40°、60°断续裂隙的弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段的起始轴向应变相近,大致为 0.01%。倾角 20°、40°、60°断续裂隙的第 2 阶段约在轴向应变 0.043 4%、0.107 4%、0.094 9%结束。可以看出,倾角 40°、60°断续裂隙的弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段基本接近并明显长于 20°断续裂隙。

当断续裂隙试件处于裂纹非稳定破裂阶段时,裂纹数量、弹性模量变化不稳定。由图 7 可知,倾角 20°断续裂隙第 3 阶段持续时间最长,倾角 40°断续裂隙第 3 阶段略大于倾角 60°。

在破裂后阶段,断续裂隙试件中的微裂纹数量呈指数增长,这是由于裂隙试件达到其峰值强

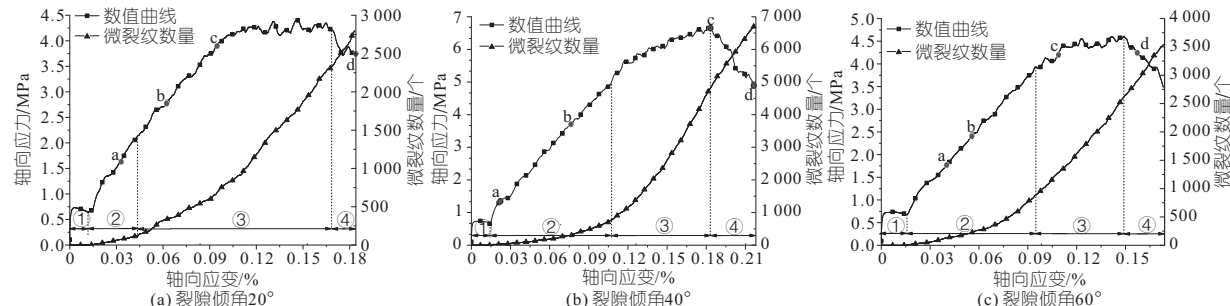


图 7 倾角 20°、40°、60°断续裂隙数值计算结果

Fig. 7 Numerical calculation results of 20°, 40° and 60° intermittent fissures

度。倾角 20°、40°、60° 断续裂隙最终的微裂纹数量分别为 2 810、6 765、3 538 个，主要以拉伸裂纹为主，仅在岩桥附近有少量剪切裂纹出现。

### 4.2.2 裂纹演化过程分析

数值模拟计算过程中，为了分析试件中的力学特性及微裂纹发展规律，在数值模型加载过程中，当应力达到图 7 中的 a、b、c、d 时，暂停加载，并记录这些点的力链图及微裂纹分布图(图 8)，其中细线代表力链，粗实线代表试验过程中产生的裂纹。

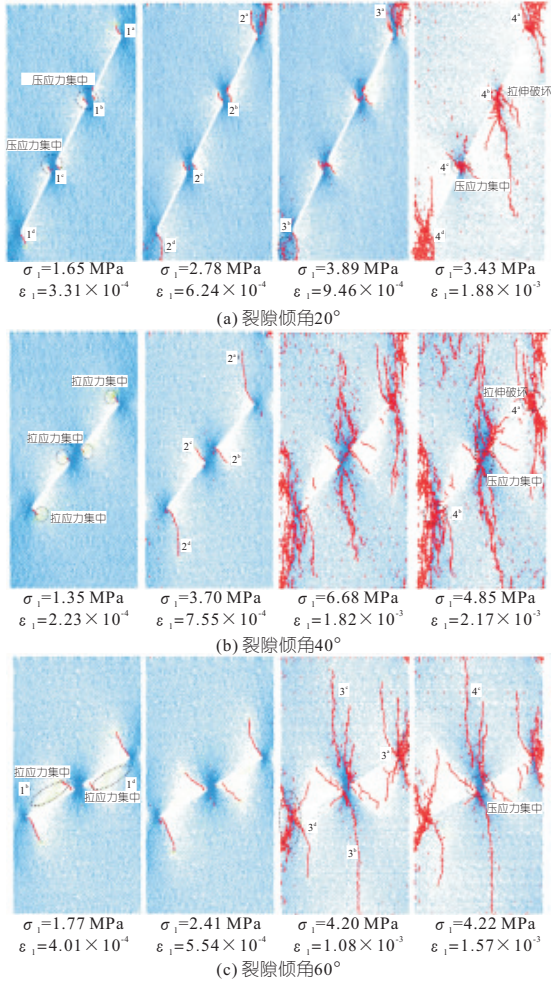


图 8 倾角 20°、40°、60° 断续裂隙数值计算过程力链图  
Fig. 8 Force chain diagram of numerical calculation process of 20°, 40° and 60° intermittent fissures

如图 8(a) 所示，在 1<sup>a</sup>、1<sup>b</sup>、1<sup>c</sup>、1<sup>d</sup> 处有翼状拉伸微裂纹产生，1<sup>b</sup>、1<sup>c</sup> 处有压应力集中现象。在 2<sup>a</sup>、2<sup>d</sup> 处翼裂纹、反翼裂纹发育至岩石试件的边界，2<sup>b</sup>、2<sup>c</sup> 处反翼裂纹、翼裂纹基本无变化，并在岩桥处开始产生拉伸裂纹。在 3<sup>a</sup>、3<sup>b</sup> 处的次生共面裂纹延伸至边界，岩桥处拉伸裂纹逐渐增多。在 4<sup>a</sup>、4<sup>d</sup> 处拉伸裂纹不断增多，同时在每条裂隙的端部均产生了少量的剪切裂纹。此时 4<sup>b</sup> 处岩桥已发生拉伸破坏，萌生的翼裂纹向着最大主应力方向发

展，而 4<sup>c</sup> 处岩桥还未破坏，压应力显著增大。

如图 8(b) 所示，在每条裂隙的端部均产生了微小翼裂纹、反翼裂纹，且存在拉应力集中，岩桥中存在压应力集中。在 2<sup>a</sup>、2<sup>d</sup> 处翼裂纹、反翼裂纹发育显著，2<sup>b</sup>、2<sup>c</sup> 处裂纹发育缓慢，岩桥中开始产生拉伸裂纹。岩石试件达到峰值强度，在裂隙端部有大量拉伸裂纹，岩桥被拉伸裂纹贯通且伴随少量剪切裂纹，并向最大主应力方向发育。在岩桥上下部的拉伸裂纹贯通至岩石试件的边界 4<sup>a</sup> 处发生拉伸破坏，岩桥部位压应力集中，但 4<sup>b</sup> 处的压应力集中不太明显。

如图 8(c) 所示，每条裂隙均产生了翼裂纹、反翼裂纹，在 1<sup>a</sup>、1<sup>b</sup> 处拉应力集中，岩桥处压应力集中。翼裂纹、反翼裂纹继续发育，在 3<sup>a</sup>、3<sup>d</sup> 处产生大量次生裂纹，3<sup>a</sup> 处发生拉伸破坏，岩桥中出现剪切裂纹，3<sup>b</sup> 处反翼裂纹贯穿至试件边界，3<sup>c</sup> 处翼裂纹仍在发育。在 4<sup>c</sup> 处翼裂纹贯穿至试件边界，轴向应力开始减小，岩桥还未完全破坏，岩桥部位压应力集中。

### 4.2.3 试验与数值结果对比分析

试验所得应力—应变曲线与数值计算结果见图 9。对比发现裂隙倾角 20°、40°、60° 试验与数值模拟的应力—应变曲线的变化规律基本相同，在峰值强度有 4%~11% 的差距。

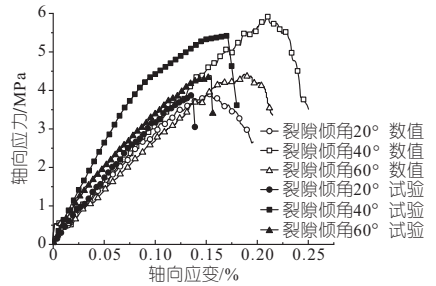


图 9 试验结果与数值模拟对比  
Fig. 9 Comparison between experimental results and numerical simulation

## 5 结论

a. 断续裂隙岩体的单轴抗压强度小于完整岩体，且不同角度断续裂隙的单轴抗压强度不同，倾角 40° 断续裂隙岩体的单轴抗压强度最大，60° 的次之，20° 的最小。倾角 40° 断续裂隙在单轴加载过程中产生的微裂纹数量最多，20° 与 60° 微裂纹数量相差不大。

b. 断续裂隙岩体在加载初期，微裂纹最先在裂隙两端产生，这些微裂纹称为翼裂纹与反翼裂纹。断续裂隙间的岩桥从加载开始就存在压应力

集中现象,并且岩桥的强度对含裂隙试件的单轴抗压强度有直接影响。在断续裂隙试件达到峰值强度后,由岩桥承担着上下部的加载力,一旦岩桥破坏,应力会迅速下降。

c. 断续裂隙岩体最终破坏模式以拉伸破坏为主,仅在岩桥部位有少许剪切破坏。

#### 参考文献:

- [1] 易婷,唐建新,王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1):98-106,134.
- [2] YANG SHENG-QI, TIAN WEN-LING, HUANG YAN-HUA, et al. An experimental and numerical study on cracking behavior of brittle sandstone containing two non-coplanar fissures under uniaxial compression[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2016, 49(4):1497-1515.
- [3] 梁露,刘怀忠,肖明砾,等. 断续节理岩体破坏模式对强度特性的影响[J]. 水电能源科学, 2020, 38(5): 113-117.
- [4] 邓华锋,潘登,许晓亮,等. 三轴压缩作用下断续节理砂岩力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11):2133-2141.
- [5] HU JIANHUA, WEN GUANPING, LIN QIBIN, et al. Mechanical properties and crack evolution of

double-layer composite rock-like specimens with two parallel fissures under uniaxial compression[J]. Theoretical and applied fracture mechanics, 2020, 108:102610.

- [6] 周维垣,杨延毅. 节理岩体的损伤断裂力学模型及其在坝基稳定分析中的应用[J]. 水利学报, 1990(11):48-54.
- [7] 朱维申,李术才,陈卫忠. 节理岩体破坏机制和锚固效应及工程应用[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [8] WONG R H C, CHAU K T. Crack coalescence in a rocklike material containing two cracks[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 1998, 35(2):147-164.
- [9] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rocktype materials under uniaxial and biaxial compression[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 1998, 35(7):863-888.
- [10] 黄凯珠,林鹏,唐春安,等. 双轴加载下断续预置裂纹贯通机制的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6):808-816.
- [11] HOLT R M, KJØLAAS J, LARSEN I, et al. Comparison between controlled laboratory experiments and discrete particle simulations of the mechanical behaviour of rock[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2005, 42(7-8):985-995.

## Experimental and Numerical Simulation Study on Mechanical Properties of Sandstone with Prefabricated Intermittent Fissures

LIU Shu-xin, ZHENG Xu, DING Kai, ZHANG Dong-jie

(Institute of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of rocks with prefabricated fissures, rock specimens with intermittent fissures at different angles were prepared. Uniaxial compression test was carried out on the specimens with fissures using uniaxial compression test equipment. It is found that the uniaxial compressive strength of 40° intermittent fissures is the largest, followed by that of 60° and 20°. The PFC2D was used to simulate the test process. The change law of microcrack and stress in the test process was analyzed. It is found that the strength of rock bridge has an important impact on the uniaxial compressive strength of the specimen. Through comparison, the change law of stress-strain curve of numerical simulation is basically consistent with that of physical test.

**Key words:** prefabricated fissures; uniaxial compression; PFC2D; numerical calculation

\*\*\*\*\*  
(上接第 206 页)

## Influence of Wear Clearance and Unit Speed on Oil Tank Seal Leakage of Thrust Bearing

PENG Xu-yi<sup>1</sup>, QIN Cheng<sup>1</sup>, WU Zhong-hua<sup>1</sup>, ZHANG Song-xiao<sup>1</sup>,  
NIE Sai<sup>1</sup>, SUN Jie<sup>2</sup>, ZHENG Yuan<sup>3</sup>, ZHANG Yu-quan<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Hongping Pumped Storage Co., LTD., Yichun 330603, China; 2a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering; 2b. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** As the time goes by, the seal of the bearing oil tank cover of the hydropower station is gradually worn, the gap between dynamic and static increases, and the oil mist escapes seriously. In order to explore the influence of wear clearance and unit speed on oil mist leakage in oil tank seal, a geometric model of thrust bearing oil tank seal of generator was established. Using SST  $\kappa\omega$  turbulence model, steady state numerical simulation was carried out for oil mist leakage at different clearances (0.2 mm-2 mm) and rotating speeds (100 r/min-500 r/min). It is found that the influence of clearance value on oil mist leakage is much higher than that of rotational speed. With the increase of clearance, the throttling effect of sealing teeth is weakened, the sealing inlet pressure is reduced, and the oil mist leakage at the top of the tank cover is aggravated. The inlet and outlet velocity increases with the increase of wear clearance value. When the clearance value increases from 0.2 mm to 2 mm, the inlet velocity increases from 20 m/s to 113 m/s, the outlet speed increases from 76 m/s to 144 m/s, the leakage volume increases from 0.034 4 kg/s to 0.053 8 kg/s. The research can provide a theoretical basis for the optimization of sealing structure, the formulation of power station operation strategy, and the judgment of sealing performance.

**Key words:** hydropower station; thrust bearing oil tank; seal clearance wear; oil mist leakage; SST  $\kappa\omega$  turbulence model