

# 含交叉裂隙的隧道围岩稳定性的试验和数值模拟研究

马继<sup>1</sup>, 杜强<sup>2</sup>, 熊良宵<sup>3</sup>

(1. 四川省华地建设工程有限责任公司, 成都 610081; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059;  
3. 华东交通大学土木与建筑学院, 南昌 330013)

**摘要:** 为了研究交叉裂隙隧道围岩的稳定性影响, 对含隧道和裂隙的模型试样进行单轴压缩试验和数值模拟, 研究主裂隙的倾角、裂隙端部距洞壁的距离、裂隙的长度、主次裂隙的夹角对模型的抗压强度的影响。研究表明当其它参数不变时, 随着主裂隙的倾角由 0° 增加到 180° 时, 模型的抗压强度呈先减小后增加的变化规律, 当主裂隙的倾角为 90° 时, 模型的抗压强度最小。裂隙端部距洞壁的距离对模型的抗压强度影响无规律。当其它参数相同时, 裂隙的长度越长, 模型的抗压强度越小。主次裂隙的夹角对模型的抗压强度有明显影响。

**关键词:** 交叉裂隙; 隧道; 围岩稳定; 数值模拟

**中图分类号:** TU457; TU458; U459 **文献标识码:** A

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ON THE STABILITY OF TUNNEL SURROUNDING ROCK WITH INTERSECTING CRACKS

MA Ji<sup>1</sup>, DU Qiang<sup>2</sup>, XIONG Liang-xiao<sup>3</sup>

(1. Sichuan Huadi Construction Engineering Co. Ltd. Sichuan, Chengdu 610081, China;  
2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;  
3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the stability of the surrounding rock of intersecting crack tunnels, uniaxial compression tests and numerical simulations were conducted on model specimens containing tunnel and cracks. The effects of the inclined angle of the main crack, the distance between the crack end and the tunnel wall, the length of the crack, and the angle between the primary and secondary cracks on the compressive strength of the model were studied. The research results indicate that when other parameters remain unchanged, the compressive strength of the model shows a pattern of first decreasing and then increasing as the inclined angle of the main crack increases from 0° to 180°. When the inclined angle of the main crack is 90°, the compressive strength of the model is the smallest. The distance between the crack end and the tunnel wall has an irregular effect on the compressive strength of the model. When other parameters are the same, the longer the crack length, the smaller the compressive strength of the model. The angle between primary and secondary cracks has a significant impact on the compressive strength of the model.

**Key words:** intersecting fissure; tunnel; stability of surrounding rock; numerical simulation

## 1 引言

隧道围岩中往往存在很多裂隙,比如交叉裂隙,交叉裂隙的长度和夹角会影响隧道围岩的稳定性,因此,很多研究者对含有交叉裂隙的岩石试样进行了单轴和三轴压缩试验,研究含交叉裂隙的岩石试样的力学特性。汪学清等<sup>[1]</sup>对含交叉裂隙类岩石试件开展不同加载速率的单轴压缩试验,结果表明试件的峰值应力强度与加载速率呈现正相关性。武旭等<sup>[2]</sup>对不同主次裂隙夹角的花岗岩试件进行了单轴压缩试验,研究结果表明交叉裂隙试件的力学性质和变形特征与主、次裂隙的夹角密切相关。张波等<sup>[3]</sup>制作含交叉多裂隙试件,对试件进行单轴压缩试验,研究结果表明含 2 条交叉裂隙试件强度高于含单一裂隙试件,当裂隙数量超过 2 条时,含主次多裂隙试件的峰值强度与含单一裂隙试件的峰值强度接近。张波等<sup>[4]</sup>对含交叉裂隙的相似材料试件进行单轴压缩试验,用 Abaqus 对含交叉裂隙节理岩体进行应力分析,结果表明交叉裂隙的主裂隙与加载方向呈  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  时,主裂隙是裂隙扩展及破坏的控制裂隙。汤双臣等<sup>[5]</sup>对完整岩石试样、含单裂隙和交叉裂隙的岩石试样进行单轴压缩试验,分析试样的力学参数及能量演化规律,结果表明与完整岩石试样的力学参数相比,含单裂隙的岩石试样的强度和弹性模量相对较小,含交叉裂隙的岩石试样的各项参数值最小。张梅丽等<sup>[6]</sup>采用 RFPA2D 对含交叉裂隙的岩体的破坏过程进行模拟研究,探讨主裂纹与加载方向的夹角的变化、主裂纹与次裂纹的夹角的变化对试件的破坏模式及破坏力学性质的影响,模拟结果表明主裂隙与加载方向垂直或者平行时,试件主要沿次裂隙发生剪切破坏,主裂隙与次裂隙的夹角较小时,试件主要沿主裂隙发生剪切破坏。张波等<sup>[7]</sup>以相似材料制作含交叉裂隙的岩体试件,对试件进行单轴压缩试验,研究结果表明主裂隙与加载方向呈  $0^\circ$  及  $90^\circ$  时,试件破坏主要为沿次裂隙扩展的剪切型破坏,当主裂隙与加载方向呈  $30^\circ$  及  $45^\circ$  时,试件破坏主要是沿主裂隙扩展所致的剪切型破坏。陈玉娟等<sup>[8]</sup>以砂岩为原型制作类岩石试件,并对单、双 X 型节理的试件进行单轴压缩试验,结果表明含单 X 型节理的岩体试件的裂隙扩展会以某一条节理为起裂节理,并沿起裂节理迅速扩展,释放能量达到新的平衡。周游等<sup>[9]</sup>制备含不同角度的主次交叉裂隙的花岗岩试件,对其进行单轴压缩试验,结果表明主裂隙平行于加载方向时,试件的峰值强度与起裂强度普遍较大,且均随裂隙的角度的增

加而呈降低的趋势。

也有少数研究者研究了裂隙对隧道模型的围岩稳定性的影响。杨治军等<sup>[10]</sup>对含单裂隙的类岩模型进行单轴压缩颗粒流数值模拟试验,结果表明模型中裂隙的长度与隧道拱顶围岩的内部水平拉应力基本呈反比关系,并在拱圈附近一定范围处存在水平拉应力的稳定区。有关裂隙对隧道的围岩稳定性的影响的试验研究成果还比较少。

本文以同时含隧道和交叉裂隙的水泥砂浆模型试样为研究对象,通过对试样进行单轴压缩试验,研究交叉裂隙对隧道围岩的稳定性的影响。

## 2 试验方案

### 2.1 试样准备

采用人工制作的含裂隙和隧道的立方体模型进行循环加卸载试验,模型采用水泥砂浆制作。立方体模型的尺寸为  $160\text{ mm}$  (长)  $\times$   $160\text{ mm}$  (宽)  $\times$   $50\text{ mm}$  (厚)。水泥为 32.5R 硅酸盐水泥,砂采用中级标准砂,水灰比为 0.65,水泥与砂的比为 1:2。立方体模型如图 1 所示。

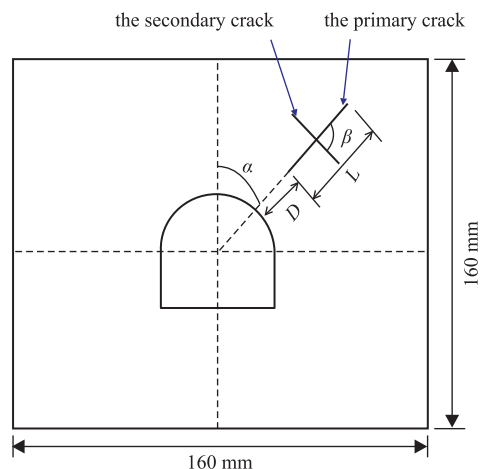


图 1 模型试样的示意图

图 1 以及后文中,定义主裂隙与竖向荷载方向间的夹角为  $\alpha$ ,定义主裂隙和次裂隙间的夹角为  $\beta$ ,定义主裂隙和次裂隙的长度均为  $L$ ,定义主裂隙至洞壁的距离为  $D$ 。

### 2.2 试验分组

根据主裂隙与竖向荷载方向间的夹角  $\alpha$ 、主裂隙和次裂隙间的夹角  $\beta$ 、主裂隙和次裂隙的长度  $L$ 、主裂隙至洞壁的距离  $D$ ,可将试验分为 5 组试验工况:(1)  $\alpha = 0^\circ$ 、 $\beta = 30^\circ$ 、 $L = 20\text{ mm}$  和  $D = 20\text{ mm}$ ;(2)  $\alpha = 45^\circ$ 、 $\beta = 60^\circ$ 、 $L = 20\text{ mm}$  和  $D = 0\text{ mm}$ ;(3)  $\alpha = 90^\circ$ 、 $\beta = 60^\circ$ 、 $L = 20\text{ mm}$  和  $D = 20$

mm;(4)  $\alpha = 135^\circ, \beta = 60^\circ, L = 20 \text{ mm}$  和  $D = 40 \text{ mm}$ ;(5)  $\alpha = 180^\circ, \beta = 90^\circ, L = 40 \text{ mm}$  和  $D = 20 \text{ mm}$ 。

### 3 数值模拟参数及模拟分组

#### 3.1 数值模拟参数

本次使用 PFC2D 程序提供的 FISH 语言建立

表 1 细观参数

密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	最小粒径 /mm	最大粒径 /mm	摩擦系数	平行粘结模量 /GPa	平行粘结刚度比	法向粘结强度均值/MPa	切向粘结强度均值/MPa
1 960	0.3	0.5	0.5	1.20	1	21.0±2	21.0±2

#### 3.3 模拟分组

在进行试验时,只进行 5 组试验工况。在试验结果的基础上,本文主要依靠数值模拟研究其它工况下交叉裂隙对隧道围岩的稳定性影响。因此,在进行数值模拟时,主裂隙倾角  $\alpha$  分别为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  和  $180^\circ$ ,主次裂隙的夹角  $\beta$  分别为  $30^\circ, 60^\circ$  和  $90^\circ$ ,距离  $D$  分别为  $0 \text{ mm}, 20 \text{ mm}$  和  $40 \text{ mm}$ ,裂隙的长度  $L$  分别为  $20 \text{ mm}$  和  $40 \text{ mm}$ ,裂隙宽度始终为  $1 \text{ mm}$ 。

(1) 主裂隙的倾角  $\alpha$  改变时

交叉裂隙的长度  $L$  均为  $20 \text{ mm}$ ,裂隙端部距洞壁边界的距离  $D$  为  $20 \text{ mm}$ ,夹角  $\beta$  为  $30^\circ$ ,主裂隙倾

与图 1 相同的数值模型,数值模型的尺寸为  $160 \text{ mm}$  (长)  $\times$   $160 \text{ mm}$  (宽),细观参数见表 1。

#### 3.2 加载方式

在对立方体模型进行室内试验和数值模拟,均是采用循环加卸载方式。侧向压力固定为  $1 \text{ MPa}$ ,轴向循环值为  $12 \text{ MPa}$ ,循环 5 次后直接继续施加轴向压力直至模型破坏。

角  $\alpha$  分别为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  和  $180^\circ$ ,具体见表 2 所示。

表 2  $D, L, \beta$  相同,但  $\alpha$  不同时的模拟分组

$D=20 \text{ mm},$ $L=20 \text{ mm},$ $\beta=30^\circ$	模拟工况编号				
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=90^\circ$	$\alpha=135^\circ$	$\alpha=180^\circ$
	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5

(2) 裂隙端部距洞壁边界的距离  $D$  改变时

交叉裂隙的长度  $L$  均为  $20 \text{ mm}$ ,夹角  $\beta$  为  $60^\circ$ ,主裂隙倾角  $\alpha$  分别为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  和  $180^\circ$ ,裂隙端部距离洞口边界的距离  $D$  为  $0 \text{ mm}, 20 \text{ mm}$  和  $40 \text{ mm}$  时,具体见表 3 所示。

表 3  $\alpha, L, \beta$  相同,但  $D$  不同时的模拟分组

$L=20 \text{ mm},$ $\beta=60^\circ$	$D$	模拟工况编号				
		$\alpha=0^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=90^\circ$	$\alpha=135^\circ$	$\alpha=180^\circ$
		工况6	工况7	工况8	工况9	工况10
	0 mm					
	20 mm					
	40 mm					

(3) 裂隙长度  $L$  改变时

裂隙端部距离洞壁边界的距离  $D$  均为  $20 \text{ mm}$ ,夹角  $\beta$  为  $90^\circ$ ,主裂隙倾角  $\alpha$  分别为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  和  $180^\circ$ ,裂隙长度  $L$  为  $20 \text{ mm}$  和  $40 \text{ mm}$  时,具体见表 4。

(4) 裂隙夹角  $\beta$  改变时

交叉裂隙的长度  $L$  均为  $20 \text{ mm}$ ,裂隙端部距离洞壁边界的距离  $D$  均为  $20 \text{ mm}$ ,主裂隙倾角  $\alpha$  分别

为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  和  $180^\circ$ ,夹角  $\beta$  为  $30^\circ, 60^\circ$  和  $90^\circ$ ,具体见表 5。

## 4 试验和数值模拟结果分析

### 4.1 室内试验和数值模拟结果的对比

工况 1、工况 7、工况 13、工况 19 和工况 30 的室内试验和数值模拟得到的应力-应变曲线对比结果见图 2,室内试验得到的破坏模式见图 3。

表 4  $D$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  相同,但  $L$  不同时的模拟分组

$L$	模拟工况编号				
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=90^\circ$	$\alpha=135^\circ$	$\alpha=180^\circ$
	20 mm	工况21 	工况22 	工况23 	工况24 
40 mm	工况26 	工况27 	工况28 	工况29 	工况30 

表 5  $D$ 、 $L$ 、 $\alpha$  相同,但  $\beta$  不同时的模拟分组

$\beta$	模拟工况编号				
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=90^\circ$	$\alpha=135^\circ$	$\alpha=180^\circ$
	30°	工况1 	工况2 	工况3 	工况4 
60°	工况11 	工况12 	工况13 	工况14 	工况15 
90°	工况21 	工况22 	工况23 	工况24 	工况25 

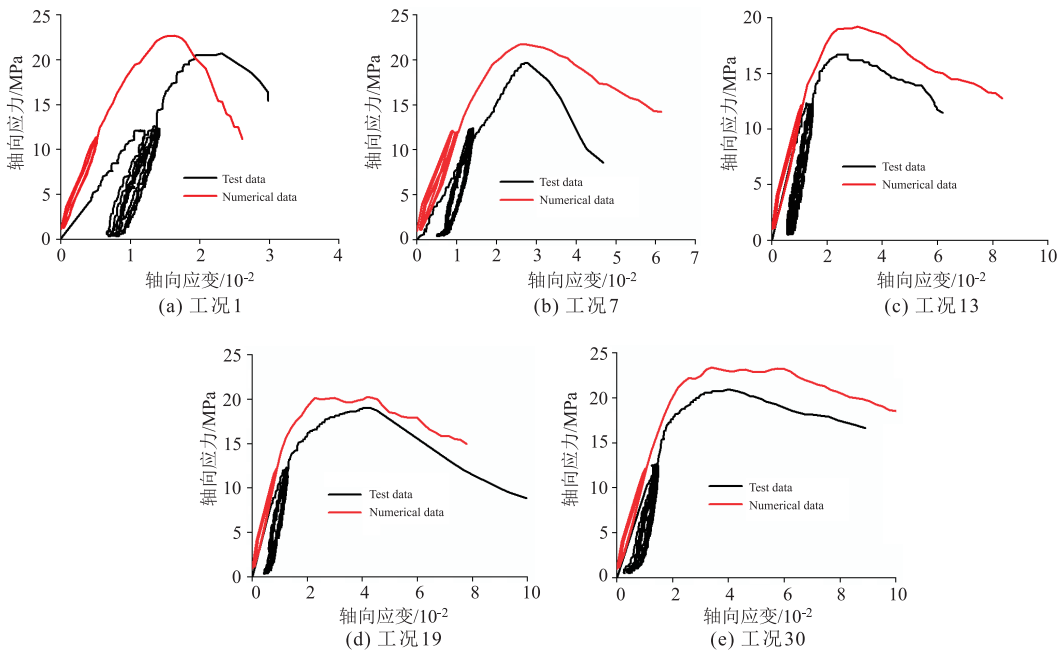


图 2 室内试验和数值模拟得到的应力应变曲线对比结果

由数值模拟和试验得到模型的应力-应变曲线比较吻合。隧道主要在两侧发生压剪破坏,且围岩易在边墙脚的位置产生裂纹。

通过实验观察得到,当模型的应力-应变曲线达到峰值强度时,隧道围岩的侧壁处的微裂隙已经贯通,微裂纹首先在隧道围岩的侧壁与底板的相交处

萌生,产生张拉裂纹,主要原因为交叉点处容易形成应力集中。随着加载的继续进行,起拱位置处生成翼型张拉裂纹,隧道周围围岩的翼型裂纹向模型的侧壁方向发展,最终裂纹贯通造成模型试样的破坏。

#### 4.2 模型的强度特征分析

主裂隙的倾角代表围岩的不同位置,主裂隙倾



图 3 室内试验得到的模型的破坏模式

角为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$  时代表裂隙在围岩的拱顶、拱腰、边墙的顶部、边墙的底部和底板。工况 1~工况 30 的抗压强度随主裂隙的倾角的变化规律见图 4 所示。

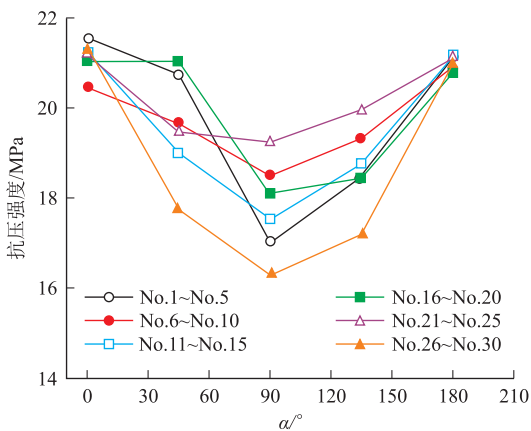


图 4 工况 1~工况 30 的抗压强度随主裂隙的倾角的变化规律

当主裂隙的倾角为  $90^\circ$  时模型的抗压强度全部低于主裂隙的倾角为其它时的抗压强度。裂隙位于拱顶时模型的抗压强度最大,裂隙位于边墙的顶部时模型的抗压强度最小。因此,边墙处存在裂隙时对隧道围岩的稳定性最不利。

通过对工况 6~工况 20 的抗压强度的分析,可

以得到裂隙端部距洞壁的距离  $D$  对模型的抗压强度的影响,结果如图 5 所示。

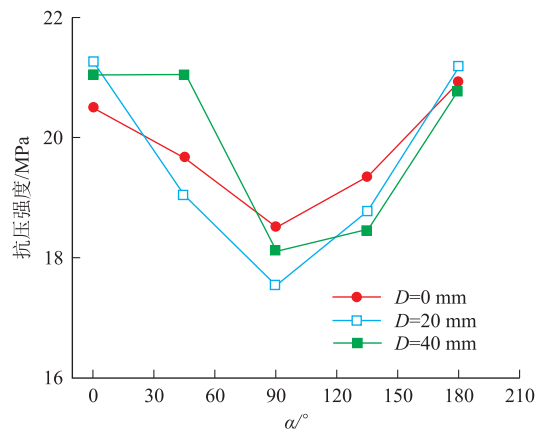


图 5 裂隙端部距洞壁的距离对模型的抗压强度的影响

裂隙端部距洞壁的距离对模型的抗压强度影响无规律。当裂隙端部距洞壁的距离  $D$  不变时,随着主裂隙的倾角由  $0^\circ$  增加到  $180^\circ$  时,模型的抗压强度呈先减小后增加的变化规律,当主裂隙的倾角为  $90^\circ$  时,模型的抗压强度最小。

通过对工况 21~工况 30 的抗压强度的分析,可以得到裂隙的长度  $L$  对模型的抗压强度的影响,如图 6 所示。

裂隙的长度  $L$  对模型的抗压强度有明显影响,

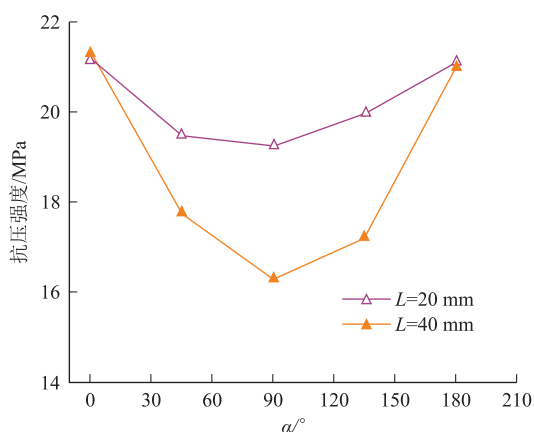


图6 裂隙的长度对模型的抗压强度的影响

当其他参数相同时,裂隙的长度越大,模型的抗压强度越小。当裂隙的长度  $L$  不变时,随着主裂隙的倾角由  $0^\circ$  增加到  $180^\circ$  时,模型的抗压强度呈先减小后增加的变化规律,当主裂隙的倾角为  $90^\circ$  时,模型的抗压强度最小。

通过对工况 1~工况 5、工况 11~工况 15、工况 21~工况 25 的抗压强度的分析,可以得到主次裂隙的夹角  $\beta$  对模型的抗压强度的影响,如图 7 所示。

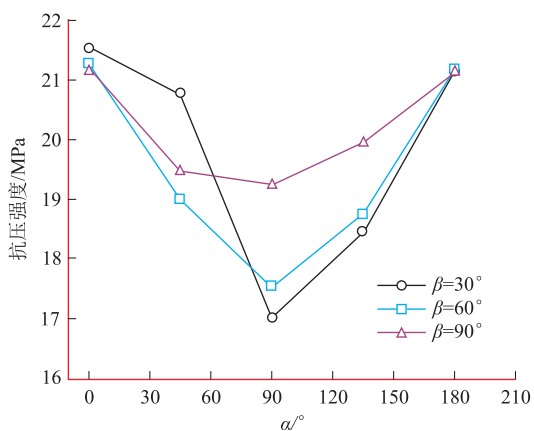


图7 主次裂隙的夹角  $\beta$  对模型的抗压强度的影响

主次裂隙的夹角  $\beta$  对模型的抗压强度有明显影响,但其影响没有一定规律。当主次裂隙的夹角  $\beta$

不变时,随着主裂隙的倾角由  $0^\circ$  增加到  $180^\circ$  时,模型的抗压强度呈先减小后增加的变化规律,当主裂隙的倾角为  $90^\circ$  时,模型的抗压强度最小。

## 5 结论

(1) 当其它参数不变时,随着主裂隙的倾角由  $0^\circ$  增加到  $180^\circ$  时,模型的抗压强度呈先减小后增加的变化规律,当主裂隙的倾角为  $90^\circ$  时,模型的抗压强度最小,即表明边墙处存在交叉裂隙时对隧洞围岩的稳定性最不利。

(2) 裂隙端部距洞壁的距离对模型的抗压强度影响无规律。当其他参数相同时,裂隙的长度越长,模型的抗压强度越小。主次裂隙的夹角对模型的抗压强度有明显影响。

## 参考文献

- [1] 汪学清,陈博,吴帅军,等.不同加载速率下含交叉裂隙类岩石力学特性研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):104-112.
- [2] 武旭,张丽媛,孙景来,等.单轴压缩下交叉裂隙花岗岩变形与能量演化分析[J].北京交通大学学报,2021,45(3):77-83.
- [3] 张波,李术才,杨学英,等.含交叉多裂隙类岩石材料单轴压缩力学性能研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):1777-1785.
- [4] 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.
- [5] 汤双臣,冯鹏,赵家琛.含交叉裂隙岩石试样单轴力学特性与破坏机理[J].地下空间与工程学报,2021,17(5):1376-1384.
- [6] 张梅丽,梁正召,高敏,等.含交叉裂隙岩体力学性质数值模拟研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(3):758-769.
- [7] 张波,李术才,杨学英,等.含交叉裂隙岩体相似材料试件力学性能单轴压缩试验[J].岩土力学,2012,33(12):3674-3679.
- [8] 陈云娟,刘洪钊,尹福强,等.交叉节理类岩石裂隙扩展规律研究[J].山东建筑大学学报,2019,34(2):22-26.
- [9] 周游,武旭,郭奇峰,等.预制交叉裂隙花岗岩强度特征试验[J].金属矿山,2020,(8):25-31.
- [10] 杨治军,刘涇堂,胡金鑫,等.单裂隙隧洞类岩模型力学特性的数值模拟[J].土木工程与管理学报,2022,39(6):98-105.

作者简介: 马继(1978—),男,四川成都人,大学本科,高级工程师,主要从事地基与基础工程施工、地质灾害、岩土工程勘查设计等研究工作。E-mail:188764236@qq.com