

单轴压缩条件下裂隙几何特征对岩石力学特性的影响研究*

周立¹, 李杨², 廖超龙¹, 夏文浩², 张理²

(1. 广西高峰矿业有限责任公司, 广西南丹县 547205;

2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:为探究裂隙几何特征对岩石单轴压缩力学特性的影响,采用 Rhino-Griddle 软件建立不同裂隙几何特征的标准岩样模型,并通过 FLAC3D 软件对单轴压缩条件下裂隙岩体的变形破坏规律进行了模拟研究,探讨了倾角、张开度、数目与岩石单轴力学特性的关联,分析了多裂隙岩样的裂纹扩展规律。数值计算结果表明:随着裂隙倾角的增加或裂隙张开度的降低,岩样的单轴抗压强度和峰值应变均会有所增加,且裂隙倾角相较于裂隙张开度对岩石的力学性能影响程度更大;裂隙数目对应力-应变曲线的影响在峰后阶段较为明显,随着裂隙数目的增加,岩样的残余强度不断降低,三裂隙岩样的残余强度几乎为 0;预制裂隙端部首先萌生裂纹,裂纹不仅向裂隙平行方向沿裂隙扩展,还沿着接近平行于轴向的加载方向向其他裂隙端部扩展,不同预制裂隙裂纹上下完全交汇贯通并与外部裂纹搭接,最终导致岩样完全失去承载能力。

关键词:裂隙几何特征;力学特性;裂纹扩展;数值模拟

0 引言

裂隙岩体是一类复杂的工程介质,其广泛存在于水利水电、采矿、石油开采、国防建设等工程中^[1]。裂隙岩体内部包含着断层、节理等各种软弱结构面,其几何特征对岩体的强度和变形特性有着重要的影响。因此,开展裂隙几何特征对岩体强度和变形破坏的影响研究,对保证裂隙岩体工程的安全稳定有着重要的意义。

目前,学者们大多通过理论分析、室内试验和数值模拟的方法对裂隙岩体力学性质、裂纹扩展及破坏机制等方面进行研究。全兴华等^[2]通过理论分析方法探讨了裂隙的平均间距、法向刚度和剪切刚度对裂隙岩体的峰后应力-应变曲线的影响。韩健^[3]通过室内力学试验系统地研究了裂隙几何特征对裂隙岩体力学参数的影响。蒲成志、肖桃李等^[4-5]通过开展单轴、三轴力学试验探究了预制 2 条贯通裂隙类岩石材料的破坏特性。张伟等^[6]对比分析了动静载荷下倾角对裂隙岩体力学特性影响的差异。唐红梅等^[7]采用 RFPA 软件模拟分析了单轴条件下裂隙

水平位置、倾角及长度变化对扩展角、强度、能量特征的影响。鲜振兴等^[8]开展了循环荷载下单裂隙岩体疲劳损伤演化规律及模型的研究,并提出了不同单裂隙角度岩体的疲劳累积损伤模型。武东阳等^[9]采用单轴压缩试验、声发射技术、数字照相技术和 PFC3D 数值模拟等手段探究了锚杆和裂隙倾角对裂隙岩体的锚固效应及其对裂纹扩展的影响。莫云龙等^[10]通过 CT 技术重构岩石三维特征,并基于统计学原理分析了岩体物理力学特性与其原生裂隙几何特征的联系。张艳博等^[11]基于 RFPA 探究了裂隙几何特征对岩石峰值强度的影响。牛江伟等^[12]通过室内试验和数值模拟分析了节理倾角对岩石峰值强度的影响。马平等^[13]采用超细单元划分法构建模型,基于 FLAC3D 软件深入探究了单轴压缩下含 X 型交叉裂隙的岩体力学特性和破裂机制。

学者们大多采用 PFC、RFPA、UDEC 和 FLAC3D 等数值模拟软件对裂隙岩体力学特性进行分析研究,其中 PFC、UDEC 等离散元软件和有限元软件 RFPA 具有可模拟岩石材料的断裂及裂纹发展过程的优点,但计算效率相对较低,参数校核麻烦,

* 收稿日期: 2023-03-08

作者简介: 周立(1983—),男,甘肃渭源人,高级工程师,主要从事矿山安全技术管理工作,E-mail:630668464@qq.com。

通信作者: 李杨(1986—),男,甘肃武威人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事矿山岩石力学相关研究工作,E-mail:yangli@ustb.edu.cn。

而 FLAC3D 软件基于连续网格,采用有限差分法进行计算,相较于 PFC、UDEC 和 RFPA,无法较好地反映材料的断裂及裂纹发展,只能通过塑性区反映岩石破坏情况,但是其参数很容易通过常规物理试验获得,且计算参数和实际岩石物理力学参数完全对应^[14],已在裂隙岩体的相关模拟中得到了较好的应用^[15-17]。

因此,本文通过 Rhino-Griddle 软件建立不同裂隙几何特征的标准岩样数值模型,并采用 FLAC3D 软件对单轴压缩条件下裂隙岩体的变形破坏规律进行了模拟研究,探讨了裂隙倾角、裂隙张开度、裂隙数目等几何特征与岩石力学特性的关联,并对多裂隙岩样的裂纹扩展规律进行了研究。

1 数值计算模型

1.1 模拟方案设计

本文主要研究裂隙角度 a 、裂隙张开度 b 、裂隙数目 e 对单轴压缩试验中岩体力学特性的影响,分别设计了 3 组试验组,同时选择无裂隙岩样作为空白对照,各方案中裂隙长度($c = 16 \text{ mm}$)和裂隙间距($d = 15 \text{ mm}$)均保持不变,试验方案见表 1 和图 1,裂隙几何分布如图 2 所示。

表 1 数值计算方案设计

试验组	固定参数	变量
1	$b = 1 \text{ mm}, e = 1$	$a = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$
2	$a = 45^\circ, e = 1$	$b = 1, 2, 3 \text{ mm}$
3	$a = 45^\circ, b = 1 \text{ mm}$	$e = 1, 2, 3$

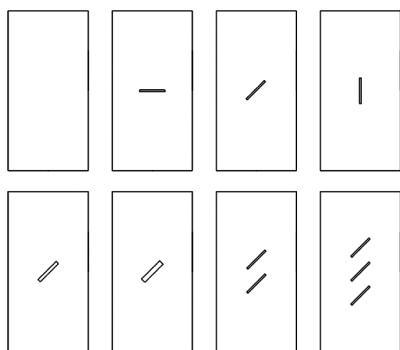


图 1 裂隙几何特征岩样

1.2 岩样模型构建

采用 Rhino 建立含有不同裂隙几何特征的标准圆柱体试样模型($\varphi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$),并通过 Griddle 插件将模型转换为能被 FLAC3D 读取的 f3grid 网格文件,最后导入到 FLAC3D 中进行数值计算。

模型共划分为约 1 141 000 个单元和 203 000 个节点,模型底部通过速度施加固定约束,模型顶部通过控制轴向位移的方法模拟加载过程,加载速率为 $1 \times 10^{-7} \text{ mm/step}$,岩样数值模型如图 3 所示。

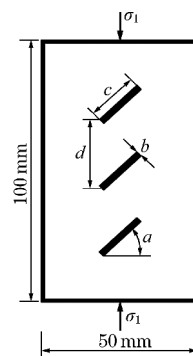


图 2 裂隙几何分布

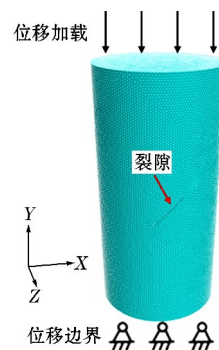


图 3 岩样数值模型

模型采用应变软化模型^[18],应变软化模型是 Mohr-Coulomb 理论体系下的经典模型之一,在弹性阶段应变软化模型和摩尔-库伦模型一致,塑性屈服后岩石的黏聚力、内摩擦角等力学参数会随着塑性应变的增加而逐渐衰减,两种模型的应力-应变曲线如图 4 所示。

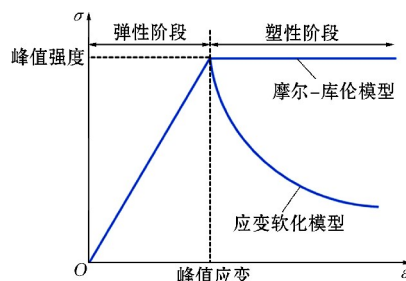


图 4 摩尔-库伦模型与应变软化模型应力-应变曲线对比

岩石峰前阶段取值如下:弹性模量 2.09 GPa,泊松比 0.26,黏聚力 3.61 MPa,内摩擦角 30.36° ,抗拉强度 0.4 MPa。峰后软化阶段的黏聚力和内摩擦角随塑性应变的衰减规律参数见表 2。

表 2 岩石峰后软化阶段参数^[19]

应变	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
0.01	2.61	30.72
0.02	1.60	24.64
0.50	0.32	23.14
1.00	0.32	23.14

2 模拟结果分析

2.1 裂隙倾角对单轴力学特性影响

图 5 为无裂隙岩样和 3 种不同裂隙倾角 ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) 岩样的应力-应变曲线。由图 5 可知,不同裂隙倾角的模型在弹性阶段表现出相似的线性变化规律,而峰后阶段应力跌落明显,呈现出一定的软化和残余特征。随着裂隙倾角的增加,岩样的抗压强度、弹性模量和峰值应变均相应地变大。

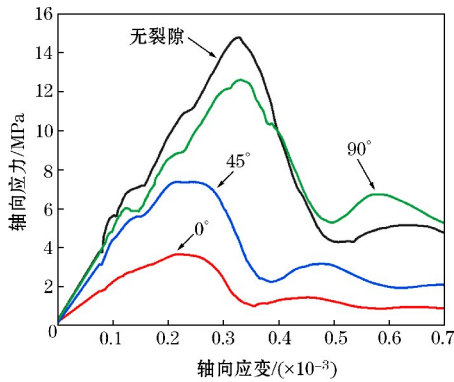


图 5 不同裂隙倾角岩样应力-应变曲线

图 6 为不同裂隙倾角的抗压强度、残余强度和峰值应变。由图 6 可知,无裂隙岩样的抗压强度和峰值应变最高,说明裂隙的存在降低了岩石的力学性质。在不同裂隙倾角对比中,裂隙倾角为 90° 的岩样与无裂隙岩样具有相近的力学性质,抗压强度达到了完整岩石的 85.1%。与之相比,裂隙倾角为 0° 的岩样抗压强度仅为完整岩石的 24.9%,说明裂隙倾角对岩石的力学性能影响程度较大,且抗压强度、残余强度和裂隙倾角呈近似线性关系,峰值应变与裂隙倾角的线性关系稍差,但仍是裂隙倾角越大,峰值应变越大。

由于各方案裂隙几何特征不同,进行单轴加载时岩样的塑性区分布也有所不同,故以各方案岩样达到峰值应力时为标准,对该时刻的塑性区分布情况进行分析。其中,蓝色表示剪切破坏,红色表示拉伸破坏,黄色表示复合破坏(颜色区分见电子版)。无裂隙岩样和 3 种不同裂隙倾角 ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) 岩

样的塑性区分布如图 7 所示。

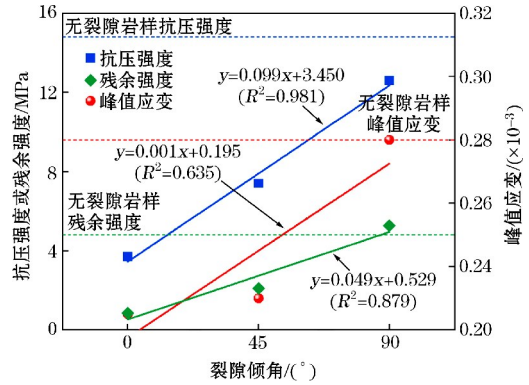


图 6 不同裂隙倾角岩样抗压强度、残余强度和峰值应变

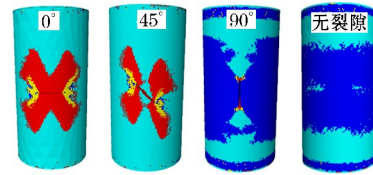


图 7 不同裂隙倾角岩样塑性区分布

由图 7 可以看出,当裂隙倾角为 0° 和 45° 时,主要为拉伸破坏,且塑性区呈 X 状;当裂隙倾角为 90° 或无裂隙时,主要为剪切破坏。由于这两种方案下岩样的抗压强度较大,加载时间较长,故塑性区不但分布在裂隙周围,在岩样端部和中部塑性区均较为发育。同时,在各种倾角下,裂隙的两端均存在复合破坏区,且随着倾角的增大,复合破坏区面积不断减小。

2.2 裂隙张开度对单轴力学特性影响

图 8 为无裂隙岩样和 3 种不同裂隙张开度 ($b = 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}, 3 \text{ mm}$) 岩样的应力-应变曲线。由图 8 可知,裂隙张开度的增加会一定程度地削弱岩样强度,但削弱作用较为有限。

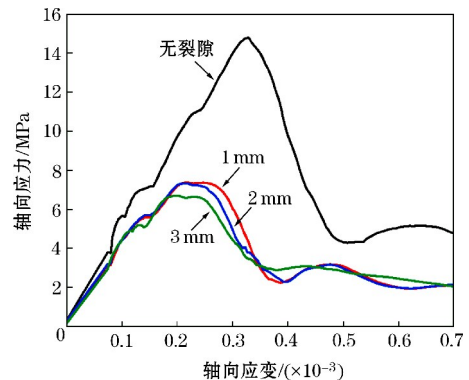


图 8 不同裂隙张开度岩样应力-应变曲线

图 9 为不同裂隙张开度的抗压强度、残余强度

和峰值应变。由图 9 可知,峰值应变和裂隙张开度呈近似线性关系,抗压强度与裂隙倾角的线性关系稍差,残余强度和裂隙张开度线性关系不明显。裂隙倾角为 1 mm、2 mm 和 3 mm 的岩样抗压强度分别为无裂隙岩石的 50.1%、49.7%、45.3%,说明裂隙倾角为 1 mm 和 2 mm 时,对岩样力学性质的劣化程度相近,当裂隙倾角为 3 mm 时,劣化程度有小幅增加。整体而言,3 种张开度下岩样的抗压强度、残余强度和峰值应变差距较小,说明裂隙张开度对岩石的力学性能影响程度较为有限。

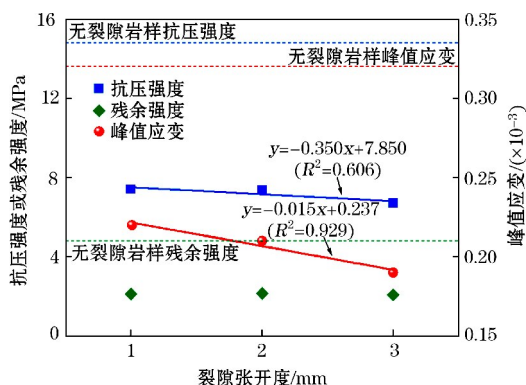


图 9 不同裂隙张开度岩样抗压强度、残余强度和峰值应变

无裂隙岩样和 3 种不同裂隙张开度 ($b = 1\text{ mm}$ 、 2 mm 、 3 mm) 岩样的塑性区分布如图 10 所示。由图 10 可以看出,岩样主要为拉伸破坏,塑性区呈 X 状,且随着张开度的增加,拉伸破坏塑性区体积减小,裂隙两端的复合破坏区体积也有所减小,塑性区更加集中在裂隙附近。

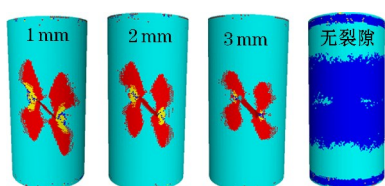


图 10 不同裂隙张开度岩样塑性区分布

2.3 裂隙数目对单轴力学特性影响

图 11 为无裂隙岩样和 3 种不同裂隙数目 ($e = 1, 2, 3$) 岩样的应力-应变曲线,图 12 为不同裂隙数目的抗压强度、残余强度和峰值应变。

由图 11 可知,单裂隙和三裂隙岩样力学性质的劣化程度相近,岩样抗压强度分别为无裂隙岩石的 50.1%、46.3%,与之相比,双裂隙岩样仅为 29.5%,可以看出裂隙数目并不是数目越多,劣化程度越高,抗压强度、峰值应变和裂隙数目无明显的线性关系,和文献[20]结论较为一致。由图 12 可以看

出,裂隙数目在应力-应变曲线峰后阶段的影响较为明显,单裂隙和双裂隙岩样的延性特征较为明显,但三裂隙岩样反而显示出脆性特征。同时裂隙数目越多,残余强度越低,三裂隙岩样的残余强度几乎为 0。

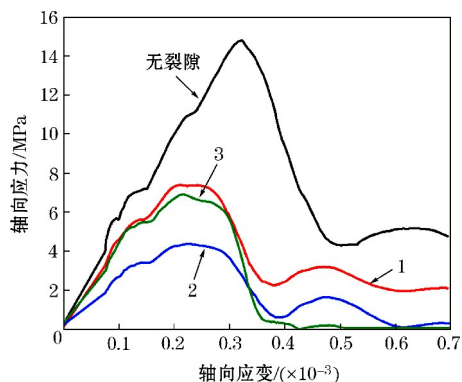


图 11 不同裂隙数目岩样应力-应变曲线

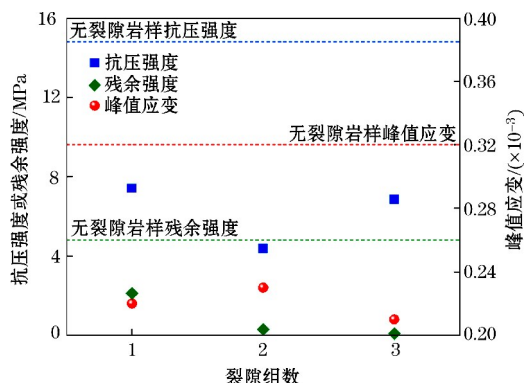


图 12 不同裂隙数目岩样抗压强度、残余强度和峰值应变

无裂隙岩样和 3 种不同裂隙数目 ($e = 1, 2, 3$) 岩样的塑性区分布如图 13 所示。由图 13 可以看出,岩样主要为拉伸破坏,裂隙数目对塑性区整体分布形态影响不大。同时塑性区从裂隙尖端发展并与邻近裂隙发生桥连,这些连接裂隙的塑性区可能会随着加载的进行继续发展贯通,使得岩样力学性质不断弱化。

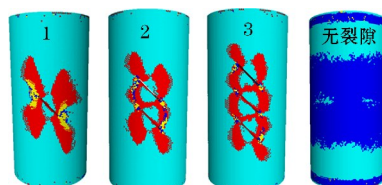


图 13 不同裂隙数目岩样塑性区分布

3 多裂隙岩样裂纹扩展规律研究

通过对多裂隙岩样的塑性区扩展过程进行分析,以探究预制裂隙之间裂纹的发育扩展规律。由

于双裂隙和三裂隙岩样的裂纹扩展规律相似,故仅以三裂隙岩样为研究对象,分别取第 300,600,900,1200,1500,1800,2100,2400,2700,3000,3300,3600 共 12 处时步下的岩样中部竖直剖面进行分析研究。其中 2100 时步的岩样达到峰值强度,2100 时步之前为弹性阶段,之后为塑性阶段,如图 14 所示。

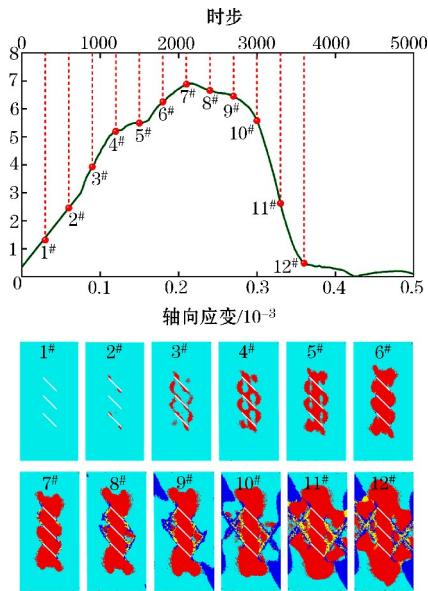


图 14 三裂隙岩样各时步裂纹扩展情况

由图 14 可以看出,300 时步(1[#])岩样裂隙附近未萌生裂纹;随着加载的进行,裂隙端部出现应力集中,600 时步(2[#])岩样两侧的预制裂隙端部开始产生翼形裂纹,但中部预制裂隙的裂纹萌生和扩展速率较慢,此时仍未萌生裂纹。裂隙两端萌生的裂纹不仅在裂隙平行方向扩展,还沿着接近平行于轴向加载方向向其他裂隙端部扩展,900 时步(3[#])岩样产生的次生裂纹不断扩展发育,直到不同预制裂隙端部裂纹上下贯通。1200 时步(4[#])岩样裂隙不断发育扩展,不同预制裂隙中部裂纹发生上下贯通;此后的 1500 时步(5[#])、1800 时步(6[#])和 2100 时步(7[#])岩样裂隙继续扩展发育直到岩样破坏,预制裂隙之间裂纹发生了完全的交汇贯通。在岩石的峰后阶段,即 2400 时步(8[#])之后的岩样裂隙端部开始出现剪切和复合裂纹,这些裂纹在预制裂隙端部发生桥连,并逐渐形成 X 形破坏区,预制裂隙附近的内部裂纹也开始与外部裂纹出现扩展搭接,最终导致岩样完全失去承载能力。

4 结论

本文采用 FLAC3D 对单轴压缩条件下裂隙岩

体的变形破坏规律进行了模拟研究,探讨了裂隙倾角、裂隙张开度、裂隙数目与岩石单轴力学特性的关联,并对多裂隙岩样的裂纹扩展规律进行了探究,研究结论如下。

(1) 随着裂隙倾角的增加或裂隙张开度的降低,岩样的单轴抗压强度和峰值应变均有所增加,且裂隙倾角相较于裂隙张开度对岩石的力学性能影响程度更大。

(2) 裂隙数目对应力-应变曲线的影响在峰后阶段较为明显,单裂隙和双裂隙岩样的延性特征较为明显,但三裂隙岩样反而显示出脆性特征。随着裂隙数目的增加,岩样的残余强度不断降低,三裂隙岩样的残余强度几乎为 0。

(3) 预制裂隙端部首先萌生裂纹,裂纹不仅向裂隙平行方向沿裂隙扩展,还沿着接近平行于轴向加载方向向其他裂隙端部扩展。次生裂纹不断扩展发育,最终导致不同预制裂隙裂纹上下完全交汇贯通,岩样达到峰值强度。峰后阶段岩样裂隙端部开始出现剪切和复合裂纹,并与外部裂纹搭接,最终导致岩样完全失去承载能力。

参考文献:

- [1] 陈卫忠,王鲁瑀,谭贤君,等.裂隙岩体地下工程稳定性研究发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10):1945-1961.
- [2] 全兴华,韩建新,李术才,等.基于裂隙岩样的多组贯穿裂隙岩体峰后应力-应变曲线研究[J].岩土力学,2013,34(7):1861-1866+1873.
- [3] 韩健.裂隙几何特征对岩体力学性质及裂纹扩展规律影响的试验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
- [4] 蒲成志,曹平,衣永亮.单轴压缩下预制 2 条贯通裂隙类岩材料断裂行为[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2708-2716.
- [5] 肖桃李,李新平,贾善坡.含 2 条断续贯通预制裂隙岩样破坏特性的三轴压缩试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(12):2455-2462.
- [6] 张伟,周国庆,张海波,等.倾角对裂隙岩体力学特性影响试验模拟研究[J].中国矿业大学学报,2009,38(1):30-33.
- [7] 唐红梅,王平,王林峰.变化裂隙岩体的压缩破坏 RFP 数值模拟[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(2):103-110.
- [8] 鲜振兴,许旭堂,杨枫,等.循环荷载对单裂隙岩体疲劳损伤的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(2):125-136.
- [9] 武东阳,蔚立元,苏海健,等.单轴压缩下加锚裂隙类岩石试块裂纹扩展试验及 PFC3D 模拟[J].岩土力学,2021,42(6):1681-1692.
- [10] 莫云龙,李宏艳,孙中学,等.原生裂隙结构对煤岩物理力学特

- 性影响分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 25-34.
- [11] 张艳博, 王科学, 姚旭龙, 等. 裂隙几何特征对岩石强度影响模拟实验研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(8): 141-148.
- [12] 牛江伟, 徐传贵. 节理倾角对岩石试件峰值强度和变形特征影响的研究[J]. 采矿技术, 2021, 21(3): 67-70.
- [13] 马平, 谢天铨, 刘红岩. 含 X 型交叉裂隙的岩体力学特性数值分析[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(2): 60-65.
- [14] 李元海, 刘金杉, 唐晓杰, 等. 考虑裂隙的含孔洞软岩体力学特性模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 594-603.
- [15] FU J W, CHEN K, ZHU W S, et al. Progressive failure of new modelling material with a single internal crack under bi-axial compression and the 3-D numerical simulation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 165: 140-152.
- [16] 张卫东, 陈士海. 考虑初始渗透压力的裂隙岩体本构模型二次开发及其验证[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 319-324.
- [17] 黄达, 刘富兴, 杨超, 等. 一种岩体裂隙时效扩展的数值模拟方法及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1623-1633.
- [18] 王卫华, 王永强, 张恒根, 等. 岩石峰后应变软化模型的构建与验证[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 2): 546-551 + 608.
- [19] 王猛, 宋子枫, 郑冬杰, 等. FLAC^{3D} 中岩石能量耗散模型的开发与应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2565-2573.
- [20] 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.