

刘伟韬,周在兴,苏苗苗,等.含边缘裂隙红砂岩力学特性与裂纹扩展规律试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):736-745.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250250

LIU Weitao,ZHOU Zaixing,SU Miaomiao,et al.Experimental study on mechanical properties and crack propagation law of red sandstone with edge cracks[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(6):736-745.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250250

含边缘裂隙红砂岩力学特性与裂纹扩展规律 试验研究

刘伟韬^{1,2},周在兴¹,苏苗苗³,刘玉本¹,杜衍辉²,陈东祺¹

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院,山东 青岛 266590;2. 山东科技大学 安全与环境工程学院,山东 青岛 266590;3. 山东东山王楼煤矿有限公司,山东 济宁 272065)

摘 要:为探究不同长度的边缘裂隙对岩体力学性质与裂纹扩展规律的影响,采用室内试验、PFC^{2D}数值模拟方法,研究以50 mm×50 mm×100 mm含预制边缘裂隙(0 mm、5 mm、15 mm、20 mm、25 mm)的红砂岩试样在单轴压缩条件下的力学性质、裂隙扩展规律、破坏模式,使用声发射同步监测。试验结果表明:随着边缘裂隙长度增加,试样承载能力显著降低,峰值强度与弹性模量均呈现出阶梯状下降趋势,当裂隙长度达到25 mm时,试样强度降幅达到80.39%;破坏模式由拉剪混合破坏逐渐向剪切主导破坏转变,脆性特征显著增强;声发射累计振铃计数曲线斜率逐渐增大,弹塑性阶段分界点后移,脆性转变加快;PFC^{2D}数值模拟与室内试验结果基本一致,揭示了裂隙尖端起裂和破坏模式转变机制。研究结论为地下工程中临空侧含边缘裂隙围岩的稳定性评价与灾害防控提供理论支撑。

关键词:边缘裂隙;红砂岩;裂纹扩展;破坏模式;PFC^{2D};声发射

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)06-0736-10

Experimental study on mechanical properties and crack propagation law of red sandstone with edge cracks

LIU Weitao^{1,2}, ZHOU Zaixing¹, SU Miaomiao³, LIU Yuben¹, DU Yanhui², CHEN Dongqi¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Shandong Dongshan Wanglou Coal Mining Corporation Limited, Jining 272065, China)

Abstract:In order to explore the influence of edge cracks with different lengths on the mechanical properties and crack propagation law of rock mass, The mechanical properties, crack propagation law and failure mode of red sandstone samples with prefabricated edge cracks (0 mm, 5 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm) of 50 mm×50 mm×100 mm under uniaxial compression were studied by laboratory test and PFC^{2D} numerical simulation method, and acoustic emission was used for synchronous monitoring. The test results show that with the increase of the edge crack length, the bearing capacity of the sample decreases significantly, and the peak strength and elastic modulus show a stepwise downward trend. When the crack length reaches 25 mm, the strength of the sample decreases by 80.39%. The failure mode gradually changes from tensile-shear mixed failure to shear-dominated failure, and the brittleness characteristics are significantly enhanced. The slope of the cumulative ring count curve of acoustic emission gradually increases, the boundary point of the elastic-plastic stage moves backward, and the brittle transition is accelerated. The PFC^{2D} numerical simulation results are basically consistent with the laboratory test, and the mechanism of crack initiation and failure mode transformation at the crack tip is revealed. The research

收稿日期:2025-06-07 修回日期:2025-08-07 接受日期:2025-08-16 责任编辑:张雯

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2023ME002)

作者简介:刘伟韬(1970-),男,山东菏泽人,博士,教授,主要从事矿井水害防治方面的研究。E-mail:skdlwt@126.com

通信作者:周在兴(2000-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事矿山岩体力学与水害防治方面的研究。E-mail:zhouzaixing@126.com

conclusions provide theoretical support for the stability evaluation and disaster prevention and control of surrounding rock with edge cracks on the free side in underground engineering.

Keywords: edge fissures; red sandstone; crack propagation; failure mode; PFC^{2D}; acoustic emission

0 引言

裂隙岩体的力学行为及破坏机制研究是采矿工程领域的关键问题之一,尤其在裂隙发育的矿井巷道围岩和边坡表层风化岩体等复杂地质条件下,裂隙网络的扩展演化直接关系着工程结构体的稳定性与灾害风险^[1-2]。在地下工程尤其是采矿工程中,受掘进开挖影响,巷道围岩临空面边缘裂隙的形成与扩展易在较高地应力条件下引发片帮、岩爆等动力灾害^[3]。对于此类含表面缺陷岩体,裂隙扩展往往从岩体表面边缘裂隙开始,逐步向内部发展,形成复杂的裂隙网络,对岩体的整体力学性质和工程安全构成潜在威胁^[4-5]。

近年来,国内外学者针对岩石裂隙扩展演化规律开展了大量的室内试验与数值模拟研究。HU等^[6]通过对双平行裂隙层状岩石进行单轴压缩试验,研究了不同裂隙倾角的层状岩石的力学性质,建立8种细观位移场模型,从细观角度阐述了裂隙岩石破坏机理。LI等^[7]通过室内试验探究水平单裂隙与试件末端间距和水平双裂隙间距对单轴压缩下砂岩性质的影响,发现砂岩的力学性能随裂隙间距的增加而显著降低,并且裂隙的位置对裂纹的扩展具有显著影响。刘强等^[8]通过建立视电阻率加载系统测试裂隙试样在分级加载破坏过程的视电阻率变化,揭示了裂隙变化与电阻率之间的内在联系。王兆会等^[9]通过单轴抗压试验结合DIC技术实现了预制裂隙动态扩展过程的量化表征,并结合数值模拟揭示预制裂隙对岩石表面变形场演化及破坏模式的作用机理。于利强等^[10]通过不同加载速率的单轴压缩试验并结合声发射和DIC技术,对预制0°~90°贯通裂隙的砂岩试样的破裂过程进行分析。YANG等^[11]制备了含圆孔的非贯通裂隙岩体,通过单轴压缩试验结合声发射技术与数值模拟,分析了含圆孔非贯通裂隙试样的破坏模式及裂纹演化机制。李兆霖等^[12]通过构建真三轴多级应力路径下完整岩样与预制裂隙岩样的实时CT扫描对比试验,揭示了中间主应力对岩体内部新生裂隙扩展路径主导作用。YUAN等^[13]通过PFC^{2D}软件建立含预制裂隙的岩石单轴压缩模型,研究了不同裂隙长度和倾角对类岩石结构破坏模式和裂纹扩展的影响,从微观层面揭示了含单个裂隙的岩石在裂纹萌生、扩展和破坏过程中的宏观力学行

为机制。

已有研究揭示了裂隙对岩体强度的弱化规律,但多聚焦于岩石内部裂隙,对于边缘裂隙的研究较少;针对不同长度边缘裂隙的扩展路径及其对破坏模式的影响与能量释放特征,尤其是红砂岩这类典型脆性岩体的响应特性,仍须结合多尺度裂隙室内试验与数值模拟方法深入探讨。本文以含预制边缘裂隙的红砂岩试样为研究对象,通过单轴压缩试验与声发射监测,系统分析边缘裂隙长度对试样力学性能、裂纹扩展模式及声发射特征的影响规律;结合PFC^{2D}数值模拟揭示裂隙尖端起裂的细观力学机制,为应力扰动下巷道围岩与裂隙边坡等工程岩体的稳定性控制和灾害防控提供理论支撑。

1 岩石单轴压缩试验

根据试验要求,对同一块岩芯经钻孔、切割后,制成尺寸为50 mm×50 mm×100 mm的标准方体试样。对红砂岩试样两端面进行磨光处理,确保两端面平整度符合国际岩石力学与岩石工程学会的试验标准。预制边缘裂隙红砂岩试样见图1。

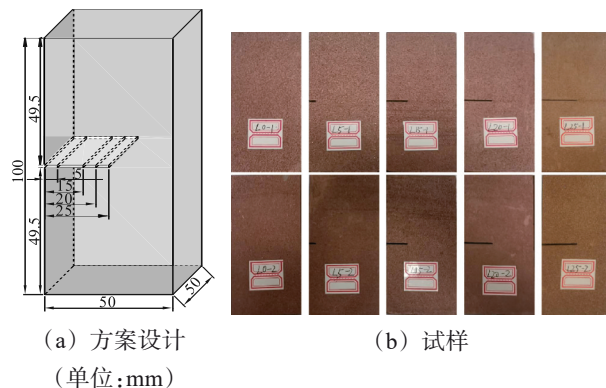


图1 预制边缘裂隙红砂岩试样

Fig.1 prefabricated edge crack red sandstone specimen

为探究不同长度边缘裂隙对单轴压缩条件下红砂岩试样的力学性质和破坏规律的影响,采用高压水射流切割机在红砂岩试样轴向中心的左侧边缘位置,切割出前后贯通的厚度为1 mm,长度分别为5 mm、15 mm、20 mm、25 mm的水平裂隙。为减小离散性,对加工后的红砂岩试样进行纵波波速测量,剔除差异性较大的试样,并在恒温恒湿养护箱内遮光养护14 d,确保试验试样接近

原岩状态。将完整红砂岩试样与加工后的含裂隙试样按照裂隙长度不同分为 5 组, 每组试样数为 2 个并进行编号。

单轴压缩实验系统主要包括伺服加载系统、声发射监测系统和图像采集系统, 见图 2。

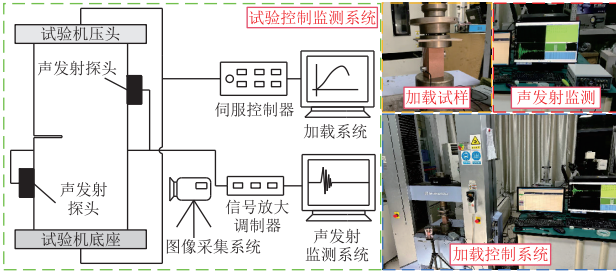


图2 试验控制与监测系统

Fig.2 test control and monitoring system

加载系统由岛津 AG-X250 电子万能试验机完成, 采用位移加载控制进行轴向加载, 直至试样破坏失去承载能力, 加载速率设定为 0.002 mm/s; 采用声发射系统监测试样在加载破坏过程中的声发射特征参数, 将 2 个声发射监测传感器分别布置在试样左、右侧面的上、下 1/4 高度处, 并在传感器与试样的接触面之间涂抹适量凡士林, 保证紧密贴合以提高监测质量; 图像采集系统使用像素较高的摄像机拍摄试样受压破坏过程中的破坏形态。试验开始时加载系统、声发射监测系统与图像采集系统同步开启, 保证相同的时间参数, 以便后期的数据处理和分析。

2 数值模拟及模型细观参数

采用 PFC^{2D} 软件模拟时, 每个颗粒的运动均由外力和接触力共同决定。颗粒之间的接触模型包括接触黏结模型和平行黏结模型^[14], 本文选择能够传递颗粒之间力和力矩作用的平行黏结模型, 见图 3。图中, g_s 为平行结合面间隙, $\bar{\sigma}_c$ 为平行黏结抗拉强度, 其他变量说明见表 1。

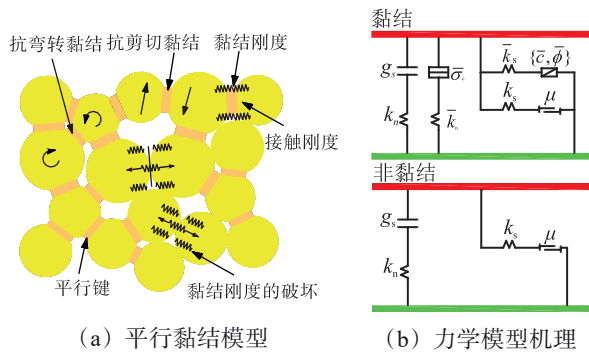


图3 PFC^{2D}平行黏结模型

Fig.3 PFC^{2D} parallel bonding model

表 1 砂岩试样模型参数
Tab.1 parameters of sandstone sample model

参数	取值
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 300
弹性模量 E/GPa	3.23
颗粒法向与剪切刚度比 k_n/k_s	1.5
颗粒摩擦系数 μ	0.7
抗拉强度 T_s/MPa	3.85
内聚力 c/MPa	19.38
内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	35
平行黏结模量 $\bar{E}_c/\text{GPa}$	2.95
平行黏结刚度比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$	1.5

使用 PFC^{2D} 软件模拟岩石单轴压缩试验时, 首先生成一定数量可相互作用的圆形颗粒模拟刚性岩石试样, 之后在模型的上下边界分别设置刚性墙体模拟加载压板, 通过控制上下墙体以 0.002 mm/s 的恒定速率相向位移, 模拟单轴压缩过程。加载过程中实时监测并记录轴向应力、位移等数据信息, 以定量分析力学性能变化与裂隙扩展规律。

为了与室内试验结果对比, 构建尺寸为 50 mm×100 mm 的二维颗粒模型 (图 4), 模型大小与试样宏观尺寸一致, 完整模型包含 26 033 个不同尺度圆形颗粒, 共 56 022 个接触, 颗粒最小半径为 0.18 mm, 最大半径为 0.28 mm。通过删除颗粒的方式, 以模型左侧边缘中间为起点, 设置宽度为 1 mm, 长度分别为 5 mm、15 mm、20 mm、25 mm 的水平预制裂隙, 模拟研究单轴压缩条件下不同长度的边缘裂隙对红砂岩试样裂纹扩展规律的影响。

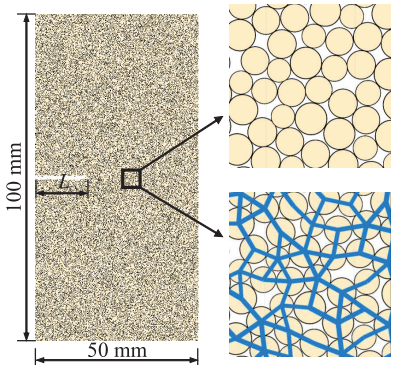


图4 预制边缘裂隙 PFC 数值模型

Fig.4 prefabricated edge crack PFC numerical model

PFC^{2D} 通过运算颗粒参数和接触模型参数实现模拟表征, 通过相关文献^[14-15]和完整试样的室内试验数据, 采用试错法, 以室内试验所得应力-应变曲线形态、峰值强度、弹性模量等核心力学参数为锚点, 逐步调整数值模型细观接触参数, 使数值模型通过多次试错迭代, 在较小误差范围内呈

现与真实岩石近似的破裂过程与力学特征,为后续边缘裂隙模型的模拟奠定基础。

为评价参数取值的准确性,将完整红砂岩试样室内试验和数值模拟所得应力-应变进行对比,见图5。室内试验与数值模拟得到的单轴抗压强度分别为37.94 MPa与38.22 MPa,弹性模量分别为3.23 GPa与3.25 GPa,相对误差分别为0.7%和0.6%,结果较为吻合。峰值应变分别为0.016与0.012,相对误差达到25.0%。产生误差的原因是真实岩石中的复杂原生微裂隙在单轴压缩初期不断压实、滑移,此时应变率显著高于应力增长率,应力-应变曲线呈现上凹型非线性特征;在线弹性变形阶段,岩石中微裂隙进一步闭合及压密,曲线近似呈直线形;最终,试样达到承载能力极限后发生失稳破坏,曲线跌落。数值模拟可以较为真实地模拟出线弹性变形阶段和应力跌落阶段,但是PFC^{2D}模型中颗粒接触紧密,内部不存在原生微裂隙,使得微裂隙压密阶段缺失,导致模拟与试验所得峰值应变存在一定差异。

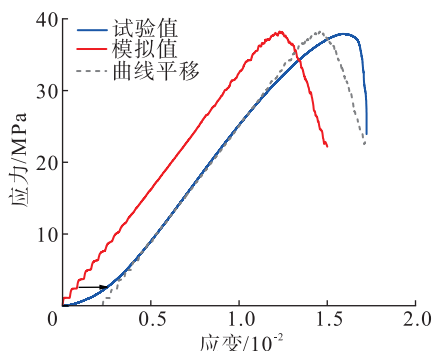


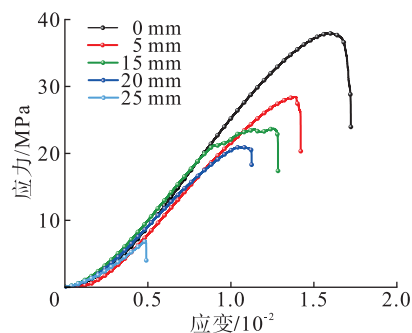
图5 完整试样应力-应变曲线对比

Fig.5 comparison of stress-strain curves of complete specimens

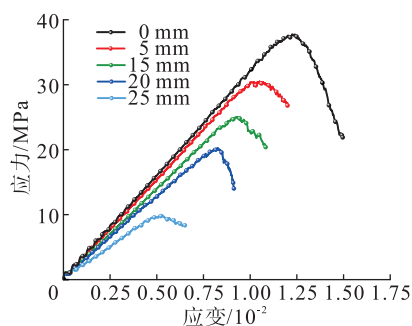
3 试验结果分析

3.1 力学响应特征

室内试验与数值模拟得到不同边缘裂隙长度红砂岩试样的轴向应力-应变,见图6。在不同边缘裂隙长度条件下,室内试验试样与数值模拟试样的应力与应变关系基本一致。室内试验所得各组红砂岩试样应力-应变变化趋势基本相似,均经历了压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段和峰后破坏阶段,数值模拟试样由于内部不存在原生微裂隙并预压消除了不平衡力,故不存在压密阶段。



(a) 室内试验



(b) PFC数值模拟

图6 不同边缘裂隙长度下室内试验和PFC数值模拟红砂岩应力-应变曲线

Fig.6 stress-strain curves of red sandstone under different edge crack lengths by laboratory test and PFC numerical simulation

比较图6(a)与图6(b)可以发现,当室内试验试样进入塑性变形阶段后曲线斜率逐渐降低,达到临界强度后,试样失去承载能力,曲线迅速跌落,表明试样存在较明显的脆性破坏倾向。而PFC模拟结果则表现出峰后渐进式应力耗散特征,脆性特征显著降低。这是因为PFC模型颗粒之间为平行黏结接触,当接触间的作用力超过其强度阈值时,接触黏结发生渐进式断裂,裂纹逐步扩展导致应力缓慢释放,而实际岩石发生破坏时,内部的微裂纹迅速扩展贯通形成宏观破坏面,因此曲线表现出较大的峰后差异。

相较于完整试样,含不同长度边缘裂隙的试样的峰值强度和弹性模量均呈现出不同程度的降低趋势,说明边缘裂隙对红砂岩试样的力学性能具有显著的劣化作用。室内试验与数值模拟所得试样力学参数受裂隙长度变化影响情况见图7。随着边缘裂隙长度的增加,试样的峰值强度呈现出骤降-平缓降低-骤降的阶梯状降低趋势。相较于完整试样,含边缘裂隙试样有效承载面积降低,且在裂隙尖端处出现应力集中区域,为裂隙扩展提供了优先通道,导致峰值强度显著降低;当边缘

裂隙长度由 5 mm 增至 20 mm 时, 试样峰值强度平稳下降, 室内试验试样降低幅度由 25.14% 增至 44.86%, 数值模拟试样降低幅度由 24.78% 增至 47.10%; 当试样边缘裂隙长度达到 25 mm, 试样承载能力显著降低, 峰值强度发生骤降, 室内试验与数值模拟试样最终降幅分别为 80.39% 和 74.15%。

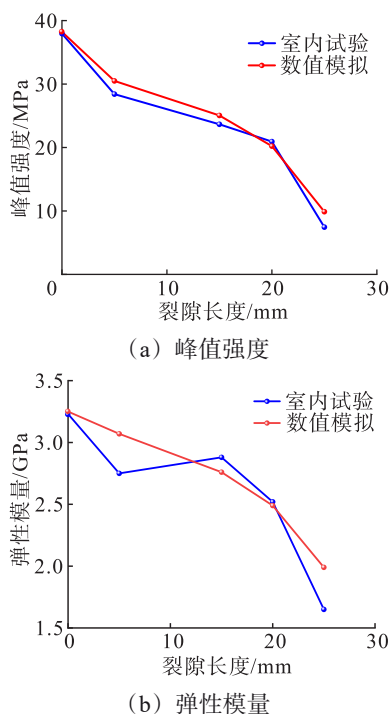


图 7 边缘裂隙长度对力学参数的影响

Fig.7 effect of edge crack length on mechanical parameters

弹性模量随边缘裂隙长度的变化规律与峰值强度相似, 但对于边缘裂隙长度为 5 mm 的试样, 试验所得弹性模量较完整试样大幅度降低, 且与数值模拟结果差距较大, 原因在于使用高压水射流切割短裂隙 (5 mm) 时, 单位长度的能量密度更高, 在裂隙尖端引起更为显著的局部损伤, 降低其局部承载能力, 弹性模量异常下降。随着边缘裂隙长度的增加, 试样弹性模量整体呈下降趋势, 最终下降幅度分别为 48.99% 和 38.77%。

数值模拟与室内试验均呈现出相似的变化规律, 红砂岩试样的峰值强度和弹性模量均与边缘裂隙的长度负相关, 表明边缘裂隙的存在会对试样的力学性质产生较大弱化影响。

3.2 破坏模式与裂纹扩展规律

(1) 裂纹扩展规律

为进一步分析不同长度边缘裂隙试样的裂纹扩展规律与破坏模式, 使用高清摄像机同步拍摄试样单轴压缩试验过程。预制边缘裂隙长度的变化对试样的破坏特征有较大影响, 选取室内试验

每组中具有代表性的试样进行裂纹扩展规律分析, 见图 8~图 11。

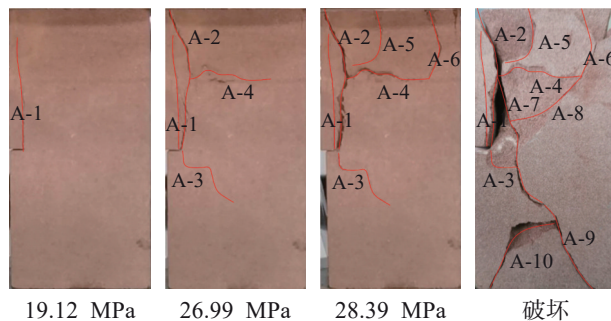


图 8 试样 L5-2 裂纹扩展过程

Fig.8 crack propagation process of specimen L5-2

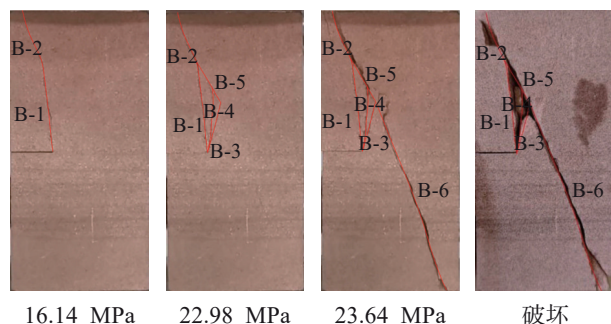


图 9 试样 L15-1 裂纹扩展过程

Fig.9 crack propagation process of specimen L15-1

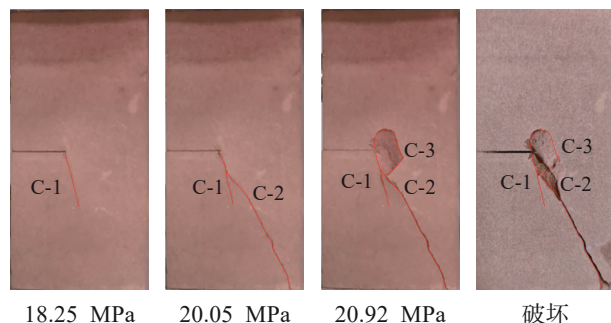


图 10 试样 L20-2 裂纹扩展过程

Fig.10 crack propagation process of specimen L20-2

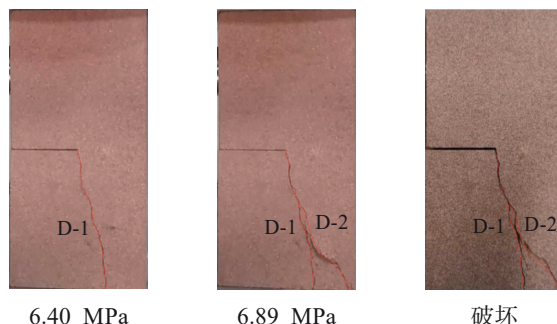


图 11 试样 L25-2 裂纹扩展过程

Fig.11 crack propagation process of specimen L25-2

由图 8 可知, 当边缘裂隙长度为 5 mm (L5-2) 时, 起裂应力为 19.12 MPa, 约为峰值应力的 67.35%; 此时裂隙尖端率先起裂裂纹, 之后迅速与

预制裂隙呈近似 90° 夹角向试样顶部扩展,形成翼状拉伸裂纹(A-1)。当加载至26.99 MPa时,裂隙尖端产生多条拉伸裂纹(A-2、A-3),分别向试样顶部和底部方向发展,同时产生次生倾斜裂纹A-4并逐渐与拉伸裂纹连接。当加载至峰值应力28.39 MPa时,试样顶、底部萌生多条倾斜剪切裂纹,在扩展过程中逐步贯通次生裂纹并与预制裂隙形成有效连接。最终破坏主要表现为拉伸裂纹A-2、A-3与剪切裂纹A-6、A-7、A-8、A-9贯通形成典型的拉剪混合破坏模式。在加载过程中,试样表面非贯通裂纹的持续扩展还引发了局部片状剥落现象。

由图9可知,当边缘裂隙长度为15 mm(L15-1)时,起裂应力为16.14 MPa,约为峰值应力的68.27%,此时由裂隙尖端向试样顶面沿约 82° 方向起裂,形成翼状拉伸裂纹B-1,之后向试样左上方向扩展,产生次生剪切裂纹B-2。当加载至22.98 MPa时,由裂隙尖端向试样顶部沿 96° 、 107° 方向产生2条翼状拉伸裂纹(B-3、B-4),并于试样约 $3/4$ 高度处经次生剪切裂纹B-5连接。当加载至峰值应力23.64 MPa时,试样产生由左上至右下的剪切贯通裂隙,最终破坏表现为剪切裂纹B-2、B-5、B-6经拉伸裂纹B-1、B-4连接预制裂隙,造成试样拉剪混合破坏,使试样失去承载能力。

由图10可知,当边缘裂隙长度为20 mm(L20-2)时,起裂应力为18.25 MPa,约为峰值应力的87.24%,此时由裂隙尖端处向试样底部端面发展翼状拉伸裂纹(C-1),扩展方向与预制裂隙呈约 105° 夹角。当加载至20.05 MPa时,由翼状裂纹中部产生次生剪切裂纹C-2,并迅速沿 120° 方向扩展至试样底部端面。当加载至20.92 MPa时,次生剪切裂纹贯通,预制裂隙受压闭合,表现为由拉伸裂纹C-1诱导产生剪切裂纹C-2,最终造成剪切破坏;同时在裂隙尖端处产生表面非贯通裂纹C-3,引发局部片状剥落现象。

由图11可知,当边缘裂隙长度为25 mm(L25-2)时,起裂应力为6.40 MPa,约为峰值应力的92.89%,此时由裂隙尖端处向试样底部产生翼状裂纹D-1并迅速延伸到底部端面。起裂后,随着加载的进行,试样在较短时间内便达到峰值应力并发生脆性破坏,当加载至峰值应力6.89 MPa时,由翼状裂纹处产生次生剪切裂纹D-2,并迅速贯通造成剪切破坏,使试样失去承载能力。

(2) 破坏模式

室内试验与数值模拟所得不同长度边缘裂隙试样的破坏形态见图12。对比试验和模拟结果可知,随着边缘裂隙长度的增加,试样的破坏模式逐渐由拉剪混合破坏向剪破坏转变,室内试验和PFC数值模拟结果基本一致。含边缘裂隙试样受到轴向压力后,一般先从裂隙尖端向上或向下沿近

似 90° 方向发展出宏观翼状拉伸裂纹;起裂裂纹产生后,随着轴向压力的持续加载,裂纹开度增大并迅速扩展至试样顶底端面;同时发展出次生拉伸或剪切裂纹,最终起裂裂纹与次生裂纹沟通扩展并贯通预制裂隙,造成试样宏观破坏。

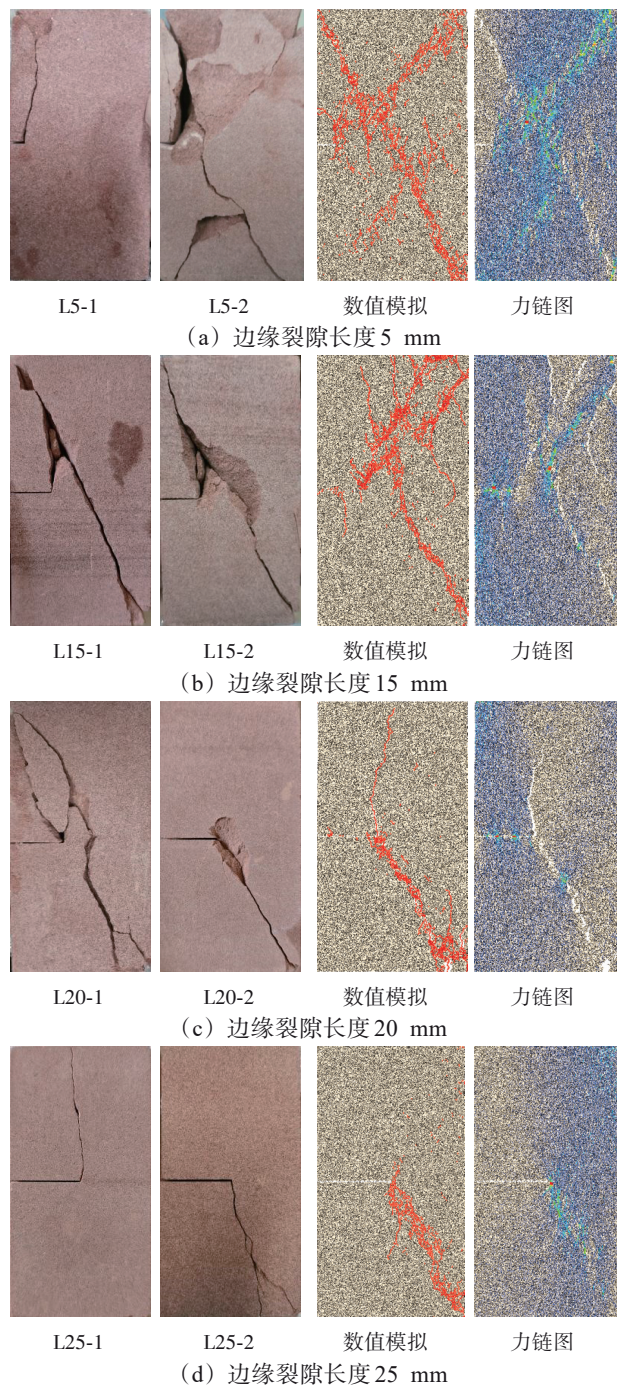


图12 边缘裂隙试样室内试验与PFC数值模拟破坏形态

Fig.12 laboratory test of edge fracture sample and PFC numerical simulation of failure mode

当次生裂纹扩展并逐渐与起裂裂纹沟通时,在预制裂隙尖端附近常发生试样表面“剥落”现象。这是由于试样在受压缩过程中,次生裂纹与

自由界面或其他裂纹贯通时,作为高应力集中区的裂隙尖端附近应力场重新分配,试样表面裂隙尖端附近区域拉应力超过材料抗拉强度;同时,试样内部积聚的弹性能在裂隙贯通时瞬间释放,从而引发试样表面裂隙尖端附近局部材料的剥离^[16-17]。

在 PFC^{2D} 中,力链图作为一种重要的可视化工具,可用于展示模型颗粒内部接触力的分布与传递路径。当数值模拟试样加载至失去承载能力后,最终破坏时的力链图见图 12,红色代表高接触力,蓝色代表低接触力,线条代表力的传递方向。裂隙尖端的应力集中是裂纹萌生的直接原因。在轴向压缩载荷作用下,预制裂隙尖端附近形成拉伸与剪切复合应力区,裂隙两侧颗粒产生相对挤压与错动趋势,尖端局部接触力快速累积,当局部应力超过颗粒间黏结强度极限时,微裂纹首先在力链交汇或转向处产生,沿最大主应力方向或颗粒间薄弱面扩展。

从破坏模式转变机制来看,室内试验与数值模拟均表现出相似的破坏特征。随着单轴压缩试验的进行,预制裂隙逐渐闭合,此过程中的力链网络重构对裂纹扩展路径产生显著影响。对于裂隙长度小于 25 mm 的试样,裂隙上下界面在试样发生整体破坏前闭合,在界面处形成的新的力链路径分散了尖端集中力,原位于裂隙尖端的高集中力向闭合界面扩散,微裂纹扩展进而受到多方向力链的约束呈现出剪切-拉伸的复合特征,避免了裂纹的快速贯通,使试样在整体破坏前产生较大塑性变形,表现出一定的延性特征。当裂隙长度达到 25 mm,力链分布更为集中,链径数量更少,裂隙尖端承受了更大的集中应力,裂纹起裂后,力链网络尚未通过裂隙界面接触实现载荷的重分配,在持续的高集中应力下发生贯通破坏,最终表现出明显的脆性破坏特征。

(3) 边缘裂隙试样破坏机制

断裂力学中根据裂纹扩展模式不同将裂纹分为张开型(I型)、滑开型(II型)和撕开型(III型)。由于在试验过程中裂隙周围的应力难以直接测量,诸多学者从理论分析角度探讨裂隙的扩展方向。在断裂力学中,应力强度因子 K_I (I型) 和 K_{II} (II型) 分别表征裂隙尖端在张开和滑移模式下的应力奇异性,二者的相对大小和相互作用直接影响裂纹扩展的方向、路径及临界破坏条件。

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

$$K_{II} = Y\tau\sqrt{\pi a}, \quad (2)$$

式(1)、式(2)中: Y 为几何修正因子; a 为裂隙半长, m; σ 为正应力, MPa; τ 为剪应力, MPa。

在施加轴向压缩载荷前期,预制边缘裂隙尚未闭合,此时远场应力为压应力,裂隙的存在显著扰动应力分布,在裂隙尖端形成局部拉应力区,裂隙尖端表现为张开与滑移共同作用下的 I-II 型复合破坏,主要表现为在加载初期,由裂隙尖端逐渐发展出翼状拉伸与剪切裂纹,见图 8~图 11。

随着轴向压缩载荷的施加,预制裂隙逐渐闭合,裂隙界面摩擦力抵抗滑移,此时 K_I 趋近于 0,裂纹扩展模式由复合型转为 II 型裂纹主导的剪切破坏。由图 12 中力链图可看出,5 mm、15 mm、20 mm 试样预制裂隙均在破坏前闭合,闭合后随着加载进行主要发展剪切裂纹。当 $K_{II} \geq K_{IIc}$ (K_{IIc} 为 II 型裂纹的应力强度因子临界值) 时发生剪切失稳,形成宏观剪切裂隙。

随着边缘裂隙长度的增加,试样有效承载面积减小,裂隙闭合进程加快, I-II 型复合破坏阶段缩短,因此整体上表现出拉伸破坏减弱、剪切破坏增强,由拉剪混合破坏向剪切破坏转变的变化规律。

(4) 边缘裂隙理论模型分析

含边缘裂隙有限板模型见图 13。对于边缘裂隙板,综合采用能量释放率方法和卡氏定理,可得二维边缘裂隙长度与模型宽度关系^[18-19]为

$$F(l/L) = 2\sqrt{2} \left\{ 8.3465 - [0.09(1-l/L)^6 - 0.256(1-l/L)^{\frac{9}{2}} + 0.266(1-l/L)^{\frac{7}{2}} - 0.376(1-l/L)^{\frac{3}{2}} + 9.5594(1-l/L)^{\frac{1}{2}} + 2.3056\ln(1-l/L) + 5.8135(1-l/L)^{-1} - 1.9747(1-l/L)^{-2}] \right\} / (l/L), \quad (3)$$

式中: F 为位移张开率,表征位移张开难易程度; l 为边缘裂隙长度, m; L 为模型宽度, m;

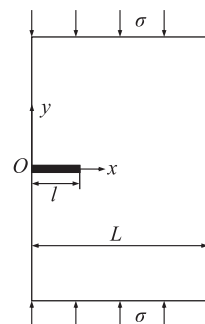


图 13 含边缘裂隙有限板模型

Fig.13 finite plate model with edge cracks

基于式(3)绘制位移张开率与裂隙相对长度关系曲线,见图14。

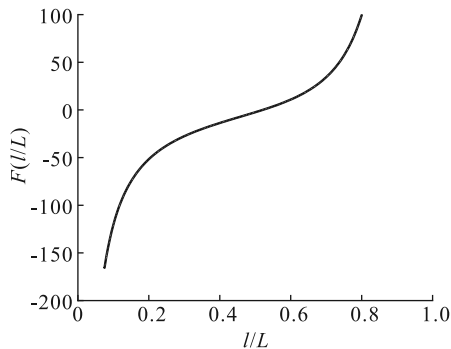


图14 位移张开率与裂隙相对长度关系

Fig.14 relationship between displacement opening rate and relative length of fracture

由图14可以看出,随着边缘裂隙相对长度 I/L 的增加,裂隙位移张开率也逐渐增加,表明裂纹尖端区域呈现显著增强的位移倾向性,从而在宏

观上表现为模型起裂应力的逐渐降低和峰值强度的显著下降。同时曲线斜率呈现出了明显的骤升-平缓上升-骤升的阶梯状变化趋势,表明随着边缘裂隙相对长度的增加,模型强度将呈现出骤降-平缓下降-骤降的阶梯状降低规律,与前文室内试验和数值模拟所得力学参数变化趋势相吻合,验证了试验结果的可靠性。

3.3 声发射特征与损伤演化

声发射技术是通过监测岩石受力时内部裂纹扩展释放的弹性波信号,实现损伤动态分析的无损检测方法。外力作用下,岩石内部微裂隙向宏观裂隙扩展演化,伴随能量以弹性波形式释放,其信号特征可表征破裂过程。核心参数振铃计数(超阈值振荡次数)及其累计值直接反映破裂形态与损伤规律,是评估岩石破坏状态的关键指标。不同长度预制边缘裂隙红砂岩试样轴向应力、振铃计数、累计振铃计数变化见图15。

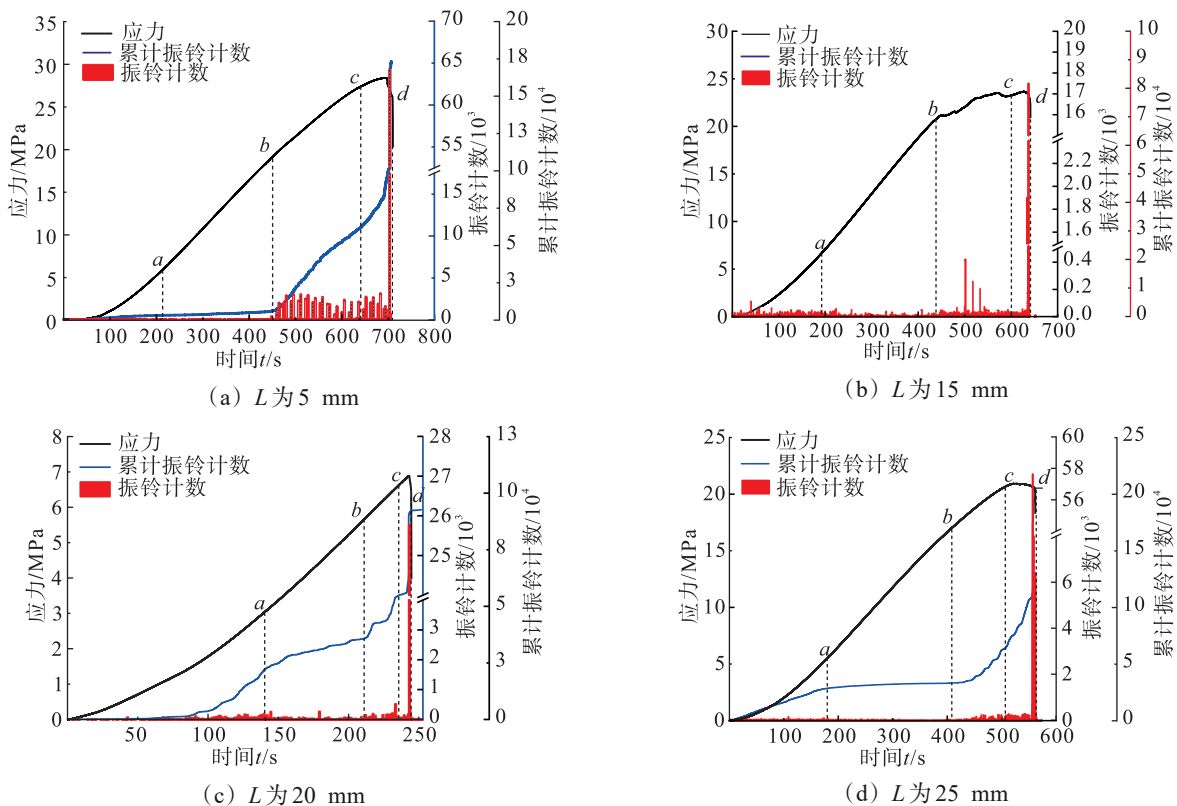


图15 不同长度 L 边缘裂隙试样轴向应力、振铃计数、累计振铃计数变化

Fig.15 changes of axial stress, ringing count and cumulative ringing count of edge crack samples with different lengths L

各组试样声发射特征曲线基本相似,声发射过程可分为以下5个阶段。

(1) 初始微裂隙压密阶段(点 a 前):在加载初期,岩石中的微裂隙在压力作用下逐渐压密闭合,产生较少声发射信号。但在图15(b)~图15(d)中,此阶段声发射产生了相对较大的反应,

并随着边缘裂隙长度的增加呈上升态势。这是由于随着预制边缘裂隙长度的增加,裂隙尖端受到的应力集中逐渐增大,在压密过程中裂隙尖端开始形成更多微破裂,产生了较多声发射信号。

(2) 弹性变形阶段(ab 段):在轴向压力作用下,岩石中的微裂隙进一步压密闭合,但未形成

新的宏观裂纹。故声发射事件不明显,偶见较高反应,累计振铃计数维持缓慢上升状态,表明此阶段试样内部没有产生较大破坏,无明显的能量释放。

(3) 稳定破裂阶段(*bc*段):此阶段包括弹性变形阶段后期和塑性变形阶段前期,此时应力增长变缓,应变增加明显。岩石内部产生大量微裂纹,且不断发展,声发射振铃信号明显增加且分布集中,累计振铃计数呈稳定上升趋势。

(4) 非稳定破裂阶段(*cd*段):随着轴向应力的不断增加,岩石内部裂隙进一步扩展演化,逐步发展为明显的宏观裂隙,引起声发射振铃信号显著增多;当轴向载荷达到其屈服应力时,试样发生贯通破坏,导致应力跌落并释放出大量能量,声发射信号急剧增强,累计振铃计数曲线近乎垂直上升。声发射振铃信号在试样发生破坏时达到最大值,表明边缘裂隙试样具有较明显的脆性特征。

(5) 峰后阶段(点*d*后):试样破坏后,声发射振铃信号显著降低或不再产生,累计振铃计数不再增加,此时试样发生脆性破坏,失去承载能力。

由图15可知,随着边缘裂隙长度的增加,点*b*逐渐后移。在点*b*前,由于边缘裂隙长度增加,试样中部断面支撑面积减小,裂隙尖端产生更大的应力集中,试样更易在裂隙尖端处产生微破裂,引起更多声发射信号。在点*b*后,试样由塑形变形到破坏失去承载能力的过程逐渐加快,累计振铃计数曲线斜率逐渐增加,说明裂隙长度增加不仅降低了材料的承载能力,还通过应力集中和能量释放机制加速了裂纹扩展,并促使破坏过程向脆性失稳转变。

4 结论

(1) 室内试验与PFC^{2D}数值模拟结果一致。含预制边缘裂隙的红砂岩试样随裂隙长度增加,承载能力显著下降,峰值强度与弹性模量呈阶梯状递减趋势(骤降-平缓下降-骤降)。当裂隙长度增至25 mm(试样宽度的50%)时,室内试验与数值模拟试样的峰值强度分别降低80.39%和74.15%,弹性模量分别下降48.99%和38.77%,表明边缘裂隙的存在对试样力学性能具有显著的弱化作用。

(2) 试样破坏模式受边缘裂隙长度调控。短裂隙试样以拉剪混合破坏为主,并随裂隙长度的增加逐步向剪切主导破坏转变,脆性特征加剧。

当裂隙长度达到25 mm时,应力集中引发裂纹快速贯通,试样在裂隙闭合前即发生脆性失稳破坏。同时由局部拉应力超限与弹性能瞬时释放协同作用导致的表面“剥落”现象频发。数值模拟力链图显示,裂隙尖端为高应力集中区,试样破坏时力链网络断裂和颗粒黏结失效形态与室内试验裂纹扩展路径高度吻合。

(3) 声发射信号特征揭示了损伤演化规律,裂隙长度增加导致弹性变形阶段延后(点*b*后移),同时加速塑性至脆性破坏的转变。累计振铃计数曲线斜率增大,表明裂隙长度通过应力集中与能量释放机制主导脆性失稳过程,进一步验证裂隙扩展与能量演化的动态关联性。

参考文献(References):

- [1] 齐消寒,王品,侯双荣,等.煤岩三轴破坏行为与能量演化规律的图像测量[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(3): 274-282.
QI Xiaohan, WANG Pin, HOU Shuangrong, et al. Image measurement on triaxial failure behavior and energy evolution law of coal rock[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(3): 274-282.
- [2] 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, LYU Xue'an, 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.
- [3] 谭云亮,郭伟耀,赵同彬,等.深部煤巷帮部失稳诱冲机理及“卸-固”协同控制研究[J].煤炭学报,2020,45(1): 66-81.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Coal rib burst mechanism in deep roadway and “stress relief-support reinforcement” synergetic control and prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 66-81.
- [4] 赵鹏翔,刘云川,韩霜莹,等.构造煤组合体单轴加载下裂隙演化及分形规律[J].西安科技大学学报,2023,43(6): 1035-1044.
ZHAO Pengxiang, LIU Yunchuan, HAN Shuangying, et al. Fracture evolution and fractal law of tectonic coal combinations under uniaxial loading[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(6): 1035-1044.
- [5] 吴顺川,张锐,韩龙强,等.含不同倾角预制结构面的深埋隧洞岩爆发生机制研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(1): 10-21.
WU Shunchuan, ZHANG Zhenrui, HAN Longqiang, et al. Mechanism of rockburst in deep-buried tunnels with prefabricated structural planes of different inclinations[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(1): 10-21.
- [6] HU J, WANG H K, XIA Z G, et al. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of two dissimilar layers of rock-

- like specimens with prefabricated parallel fissures[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2024, 10(1): 19.
- [7] LI K S, CHEN L X, ZHAO Z, et al. Experimental investigation on mechanical, acoustic, and fracture behaviors and the energy evolution of sandstone containing non-penetrating horizontal fissures[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 123: 103703.
- [8] 刘强, 邱黎明, 祖自银, 等. 含裂隙煤样受载破坏过程视电阻分布特征[J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(4): 731-738.
LIU Qiang, QIU Liming, ZU Ziyin, et al. Variation characteristics of apparent resistivity of fractured coal sample in loading process [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41 (4): 731-738.
- [9] 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.
- [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] YANG S Q, YIN P F, ZHANG Y C, et al. Failure behavior and crack evolution mechanism of a non-persistent jointed rock mass containing a circular hole[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 114: 101-121.
- [12] 李兆霖, 王连国, 姜崇扬, 等. 基于实时CT扫描的岩石真三轴条件下三维破裂演化规律[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 937-949.
LI Zhaolin, WANG Lianguo, JIANG Chongyang, et al. Three-dimensional fracture evolution patterns of rocks under true triaxial conditions based on real-time CT scanning[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 937-949.
- [13] YUAN H, XIAO T L, SHE H C, et al. Crack propagation law of rock with single fissure based on PFC^{2D}[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 977054.
- [14] 黄彦华, 杨圣奇. 孔槽式圆盘破坏特性与裂纹扩展机制颗粒流分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(8): 2269-2277, 2285.
HUANG Yanhua, YANG Shengqi. Particle flow simulation of fracture characteristics and crack propagation mechanism of holed-cracked Brazilian disc specimen[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(8): 2269-2277, 2285.
- [15] 范星宇, 刘海明, 王希辉, 等. 基于PFC的单节理岩石裂缝演化数值模拟[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(7): 1238-1251.
FAN Xingyu, LIU Haiming, WANG Xihui, et al. Numerical simulation of single-joint rock fracture evolution based on PFC[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(7): 1238-1251.
- [16] 周军霞, 张学奇, 牛佳斌, 等. 改性超细水泥基注浆材料裂隙注浆扩散规律研究[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(6): 671-681.
ZHOU Junxia, ZHANG Xueqi, NIU Jiabin, et al. Study on crack grouting diffusion law of modified ultrafine cement-based grouting material[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2024, 43(6): 671-681.
- [17] 朱栋, 靖洪文, 尹乾, 等. 含弧形预制裂隙砂岩力学特征试验研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(9): 2721-2732.
ZHU Dong, JING Hongwen, YIN Qian, et al. Mechanical characteristics of sandstone containing arc prefabricated fissures [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2721-2732.
- [18] 张春阳, 胡凯兵, 赵尔丞, 等. 基于XT-DIC的冻融裂隙砂岩裂纹扩展规律及损伤演化特征[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2025, 44(3): 293-302.
ZHANG Chunyang, HU Kaibing, ZHAO Ercheng, et al. Crack propagation law and damage evolution characteristics of freeze-thaw fractured sandstone based on XT-DIC[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2025, 44(3): 293-302.
- [19] 张保良. 脆性类岩石材料边缘裂纹扩展规律及破裂机制试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017: 22-23.