

基于晶体模型的岩石孔隙结构与矿物组成对 裂纹扩展影响机制研究

王 帅^{1,2}, 王豫徽³, 王 玲¹, 李佳祺⁴, 赵梓皓¹, 庞凯旋¹

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 华北理工大学 河北省矿山绿色智能开采技术创新中心, 河北 唐山 063210;
3. 开滦能源化工股份有限公司范各庄矿业分公司, 河北 唐山 063109; 4. 华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

摘 要: 岩石内孔隙结构和矿物组成是诱导岩体破裂失稳的重要因素。为了研究孔隙结构和矿物组成对裂纹扩展的影响, 利用颗粒流程序 (particle flow code, 简称 PFC), 构建含不同孔隙结构和矿物组成的岩石晶体模型 (grain based model, 简称 GBM), 研究孔隙大小对裂纹扩展的影响以及不同矿物内裂纹的扩展规律。研究表明: 随着孔隙短长轴比的增大, 岩石的单轴抗压强度和弹性模量均先减小后增大, 岩石的破坏程度先增大后减小, 在短长轴比为 0.8 时, 岩石破坏程度最严重。随着孔隙短长轴比的增大, 岩石内形成的裂纹数量先减小后增加再减小, 张拉裂纹数量先减小后增加再减小, 而剪切裂纹数量基本无变化。岩石在破坏过程中以晶内张拉破坏为主, 其次为晶间张拉破坏, 晶内破坏和晶间破坏中剪切破坏均较少。孔隙短长轴比为 0.6 时对砂岩基质、黏土、云母内裂纹扩展演化行为影响程度最大, 孔隙短长轴比为 0.2 时对石英和长石内裂纹扩展演化行为影响程度最大。该研究成果可以为解决含孔隙缺陷岩体的失稳破坏问题提供参考和研究基础。

关 键 词: 失稳破坏; 裂纹扩展; 矿物组成; 孔隙结构; 数值模拟

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 10-3289-13

Influence mechanism of rock pore structure and mineral composition on crack propagation based on grain based model

WANG Shuai^{1,2}, WANG Yu-hui³, WANG Ling¹, LI Jia-qi⁴, ZHAO Zi-hao¹, PANG Kai-xuan¹

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;

2. Hebei Mining Green Intelligent Mining Technology Innovation Center, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;

3. Fangezhuang Mining Company, Kailuan Energy and Chemical Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063109, China;

4. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: The internal pore structure and mineral composition of rocks are crucial factors contributing to the instability and failure of rock masses. To investigate the influence of pore structure and mineral composition on crack propagation, a grain based model (GBM) of rock with varying pore structures and mineral compositions was established using the particle flow code (PFC). This study examines the effect of pore size on crack evolution and the propagation behavior of cracks within different minerals. The results indicate that as the short-long axis ratio of pores increases, both the uniaxial compressive strength and elastic modulus of the rock first decrease and then increase, while the degree of rock damage initially increases and subsequently decreases. The most severe failure occurs at the short-long axis ratio of 0.8. With the increase of the short-long axis ratio of pores, the number of internal cracks first decreases, then increases, and finally decreases again. The number of tensile cracks follows a similar trend, whereas the number of shear cracks remains largely unchanged. During the failure process of the rock, intragranular tensile failure is dominant, followed by intergranular tensile failure, while shear failure is relatively rare in both intragranular failure and intergranular failure. Crack propagation behavior in sandstone matrix, clay, and mica is most significantly influenced at the short-long axis ratio of 0.6, whereas the effect on quartz and feldspar is most pronounced at the short-long axis ratio of 0.2. The research results can provide reference and research basis for solving the instability failure problem of rock mass with porosity structures.

收稿日期: 2024-11-25

录用日期: 2025-05-19

基金项目: 河北省自然科学基金 (No.E2023209087); 河北省高校基本科研业务项目 (No.JJC2024066); 中央引导地方科技发展资金项目 (No.236Z3804G)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (E2023209087), the Basic Scientific Research Business Project of Universities in Hebei Province (JJC2024066) and the Central Guide Local Science and Technology Development Fund Project (236Z3804G).

第一作者简介: 王帅, 男, 1991 年生, 博士, 讲师, 主要从事矿山岩石力学方面的研究。E-mail: wangshuai@ncst.edu.cn

Keywords: instability failure; crack propagation; mineral composition; pore structure; numerical simulation

1 引 言

岩石是一种复杂的天然材料,其内部含有不同的矿物组成和孔隙结构,在外部荷载作用下,受矿物组成和孔隙结构的影响,岩石内的裂纹扩展演化导致岩体失稳破坏^[1]。在矿山工程方面,受矿物组成和孔隙结构的影响,岩体内裂纹的起裂及其扩展控制着巷道围岩的稳定性,引起巷道崩塌、破坏等灾害^[2-3]。在矿产资源开发方面,孔隙结构和矿物组成影响巷道围岩内裂纹的扩展,制约着资源开采与利用的进一步发展。因此,开展孔隙结构和矿物组成对岩石内裂纹扩展的影响机制分析不仅对资源的高效开采有重要意义,而且能为地下工程围岩稳定性研究提供理论基础。

含椭圆形孔隙结构是岩石中常见的缺陷,其几何特征(如长短轴比、倾角)通过影响局部应力及裂纹扩展,改变岩石的变形能力和破坏模式。王海洋等^[4]研究了椭圆形孔隙砂岩在拉剪作用下的力学特性和变形破坏规律,发现椭圆孔隙砂岩的力学性质受倾角和长短轴之比的双重影响。朱泉企等^[5]研究了椭圆形孔隙大理岩的变形破坏特性,椭圆孔隙试样的峰值强度和弹性模量随孔隙倾角的增大而增大,峰值强度对孔隙倾角变化的敏感程度随长短轴比的增大而增大。杜明瑞等^[6]研究了椭圆形孔隙长轴与轴向荷载间夹角对砂岩强度及变形特征的影响,砂岩的峰值强度随夹角的增大呈现先减小后增大再减小的变化规律。Liu 等^[7]研究了椭圆形孔隙倾角和长短轴比对岩石力学性能的影响,孔隙的长短轴比保持不变时,单轴和双轴抗压强度随孔隙倾角的增大而增大,孔隙的倾角保持不变时,单轴和双轴抗压强度随椭圆孔长短轴比的增大而减小。Zhang 等^[8]研究了椭圆形孔隙的几何参数对岩石破坏过程的影响,孔隙的几何参数影响主要体现在加载初期,而在加载后期对岩石试样的劣化效应和破坏模式影响较小。

受孔隙结构影响,岩石内裂纹扩展演化行为更加复杂。许多学者在均质的岩石中加工孔隙或者制备含孔隙的类岩石试样,通过理论分析和室内试验,探究含孔隙岩石的裂纹扩展规律及其内在机制。唐利明^[9]研究了侧向压力对含孔隙岩石内孔隙周围裂纹扩展规律的影响。李地元等^[10]对含不同形状孔隙的大理岩进行单轴压缩试验,分析了孔隙形状对大理岩裂纹扩展特性的影响规律。龚爽等^[11]对含双孔

隙石灰岩进行冲击试验,结合图像处理方法分析了冲击荷载下含双孔隙石灰岩的裂纹扩展行为。林群超^[12]利用 3D-DIC 技术和红外热成像技术研究了预制孔隙大理岩在单轴压缩下的裂纹扩展过程,从应变云图和红外辐射能量变化的角度研究了裂纹扩展演化特征。Manouchehrian 等^[13]对圆孔岩石试样的破坏过程进行分析,研究了孔隙周围的强度变化和裂纹扩展演化过程。Yu 等^[14]分析了含预制孔隙岩石在应力作用下的破坏过程,探究了裂纹的萌生、扩展和贯通规律。Peng 等^[15]对不同直径圆形孔隙试样进行单轴压缩试验,研究了岩石的裂纹扩展规律。朱飘扬^[16]将室内试验和理论分析相结合研究了孔隙周围裂纹的扩展演化行为,结果表明孔隙周围的裂纹扩展演化规律受邻近孔隙的影响。周子龙等^[17]对含有单一孔隙、水平双孔隙、垂直双孔隙、水平三孔隙和垂直三孔隙的 5 种花岗岩试样进行落锤冲击试验,研究了含不同孔隙数量和排列方式的孔隙岩石在冲击载荷下裂纹的扩展规律。

有别于传统的试验方法,数值模拟能够获得裂纹的扩展演化过程,有利于研究岩石的细观破裂机制及其渐进破坏过程。众多学者已运用颗粒流程序 (particle flow code, 简称 PFC) 从细观角度研究了含孔隙岩石的裂纹扩展演化行为。Liu 等^[18]采用 PFC 建立了含孔隙岩石的数值模型,研究了含孔隙试样的应力-应变和裂纹演化特征。韦波^[19]利用 PFC 对含孔隙试样的细观损伤演化进行分析,研究了孔隙对岩石宏观力学参数的影响及裂纹扩展演化规律。崔嘉慧^[20]通过 PFC 细观参数敏感性分析法研究了双孔隙类岩石的力学特性和裂纹扩展演化规律。Wu 等^[21]采用 PFC 数值模拟方法研究了交叉开挖下孔隙试样的破坏模式和裂纹演化规律。曾昭飞等^[22]采用 PFC 建立了双孔隙岩石模型,研究了单轴压缩下含有双孔隙岩石的力学特性以及裂纹扩展演化规律。Zhao 等^[23]采用 PFC 对含双孔隙试样的力学特性和破坏行为进行研究,分析了含双孔隙岩石的力学响应以及裂纹演化特征。Chen 等^[24]采用 PFC 对含有 10 种不同类型孔隙缺陷的岩石进行单轴压缩试验,分析其破坏行为和力学性能,确定了 4 种失效模式,研究了孔隙岩石的裂纹扩展演化规律。

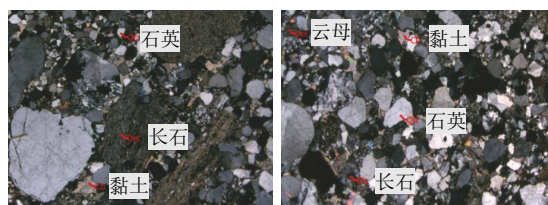
上述研究从室内试验和数值模拟两个角度侧重分析了孔隙的分布、数量、形状、大小等特征对岩石力学性质和裂纹扩展演化的影响,但岩石是由矿物集合体构成的复杂材料,其内部的裂纹扩展演

化和力学特性必然受到矿物组成和孔隙结构的共同影响, 综合考虑孔隙结构和矿物组成, 仍需进一步深入研究岩石的力学性能和裂纹扩展演化行为。因此, 本文以露天矿选取的砂岩为研究对象, 通过数值模拟方法, 构建含不同矿物组成和不同孔隙结构的岩石晶体模型, 获取砂岩内裂纹的扩展演化过程, 分析裂纹扩展与应力-应变关系, 以及岩石破裂形貌特征和裂纹数量变化规律, 分别研究孔隙大小与矿物组成对裂纹扩展演化的影响, 揭示在孔隙结构和矿物组成共同作用下岩石内裂纹的扩展演化规律。

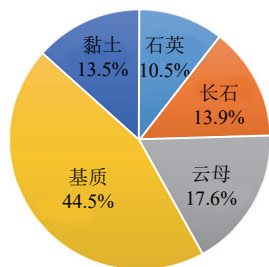
2 晶体模型建立及细观参数校正

2.1 岩石晶体模型的建立

从某露天矿边坡中选取砂岩进行偏光显微观察试验, 经偏光显微图像分析, 试样中所含矿物主要成分为石英、长石、云母、黏土以及砂岩基质。矿物颗粒的尺寸主要集中在 0.5~0.75 mm 范围内, 属于中砂级别, 部分颗粒尺寸为 0.75~2 mm, 属于粗砂级别。矿物颗粒多数呈现次棱角状, 个别呈现次圆状。图 1 为砂岩的偏光显微图及其对应的矿物含量占比。根据偏光显微分析结果确定了砂岩的矿物组成及其含量分别为: 石英 10.5%, 长石 13.9%, 云母 17.6%, 砂岩基质 44.5%, 黏土 13.5%。



(a) 试样的偏光显微图 (目镜 10 倍×物镜 1.25 倍)



(b) 矿物含量占比图

图 1 砂岩偏光显微图及其矿物含量占比

Fig.1 Polarizing micrograph of sandstone and its mineral content proportion

本文根据砂岩内矿物的组成和含量, 运用 PFC 数值方法建立岩石晶体模型 (grain based model, 简称 GBM), 如图 2 所示, 构建模型的步骤如下:

(1) 生成初始颗粒集合

首先, 构建尺寸为 50 mm×100 mm 的四面边界墙, 基于砂岩的矿物类型、含量和粒径分布在边界墙中生成等效粒径的初始颗粒, 初始模型如图 2(a)所示。

(2) 生成矿物晶体结构

连接各相邻颗粒围成的多边形中心以获得矿物的晶体结构, 并删除模型中的初始圆颗粒, 形成结果如图 2(b)所示。

(3) 矿物晶体结构分组

根据矿物类型对矿物晶体结构进行分组, 不同种类的矿物被赋予不同的颜色, 以区别基质、黏土、石英、长石、云母, 形成结果如图 2(c)所示, 不同颜色代表的矿物分组的结果如图 2(e)所示。

(4) 生成 GBM

矿物内部和边界被分别赋予接触模型后, 生成 GBM, 生成结果如图 2(d)所示。矿物内的颗粒接触模型为平行黏结模型 (parallel bonded model, 简称 PBM), 不同矿物间的接触模型为光滑节理模型 (smooth joint model, 简称 SJM), 节理模型如图 2(f)所示。

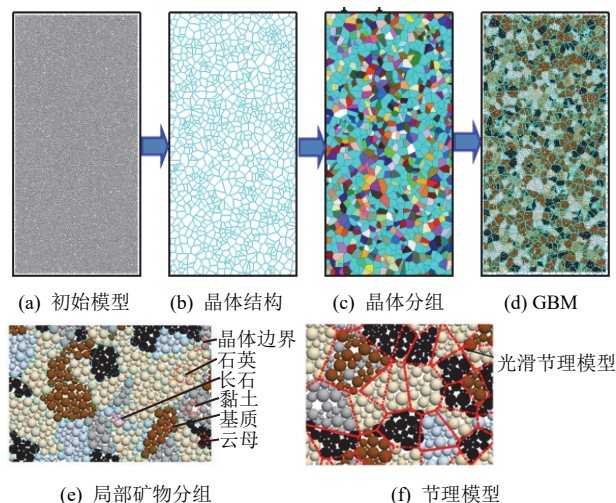


图 2 岩石 GBM 构建

Fig.2 Construction of GBM for rocks

2.2 预制孔隙的生成

岩石内预制孔隙是通过删除区域颗粒的方式生成, 孔隙模型由 CAD 导入。图 3(a)为预制孔隙大小示意图, 其中椭圆孔隙长轴 a 为固定值 10 mm, 短轴为 b , 椭圆孔隙长轴的倾角固定为 45° 。

通过改变椭圆的短长轴比 x 来改变孔隙的大小, 数值模拟方案中, 保持椭圆孔隙长轴倾角不变, 孔隙短长轴比值 x 分别设置为 0.2、0.4、0.6、0.8

和 1.0, 通过逐渐增大椭圆孔隙的短轴长度, 使预制椭圆孔逐渐变为圆形孔隙。图 3(b)为预制椭圆孔隙短长轴比 $x=0.4$ 时生成的数值模型。

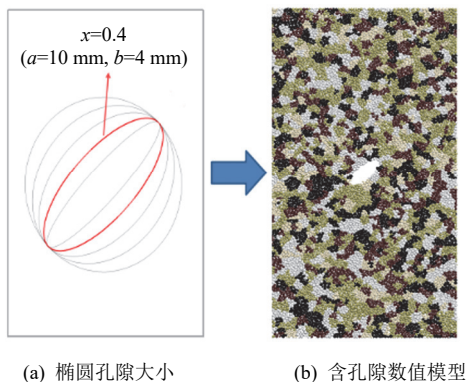


图 3 预制椭圆孔隙尺寸及其数值模型

Fig.3 Prefabricated ellipse pore size and its numerical model

2.3 模型的细观参数标定

通过常规的室内试验, 难以直接获取所需砂岩的细观结构参数。在 PFC 中, 细观参数与岩石宏观参数无法一一对应。因此, 通常将数值模拟得到的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比等宏观力学参数与室内试验所获取的参数进行对比, 不断调整细观参数, 直至两者的宏观力学性能在一定误差范围内保持一致, 裂纹形态相似, 才能确定模型的细观参数^[25-27]。具体标定的思路为: 首先分析细观参数对岩石宏观参数的影响, 归纳出规律; 其次, 参考前人研究中所使用的细观参数数值范围, 赋予 PBM 和 SJM 初始参数, 通过开展室内试验及数值模拟, 比较二者所得到的宏观参数; 最后, 根据细观参数的影响规律, 对于偏离试验值较大的宏观参数, 可以通过不断调节细观参数逼近实际值。

结合前人的研究基础, 选取了接触模型中的有效模量、摩擦系数、刚度比、摩擦角、黏结强度和抗拉强度 6 个参数作为变量, 研究这些变量对模型宏观力学性质的影响。研究过程中采用参数变量法, 保证试验中只有一个参数变动, 其他参数保持不变。根据模拟分析中得到的宏观参数和细观参数, 参考表 1 前人对砂岩内矿物物理力学参数的取值^[28-29], 赋予数值模型的初始值, 进行室内试验和模拟试验的对比校正。为了使数值模型更接近于真实模型, 岩石 GBM 中矿物颗粒的接触细观力学特性设置满足以下关系: 石英 > 长石 > 云母 > 基质 > 黏土。经过大量调试工作, 最终标定的细观力学参数如表 2、3 所示。

表 1 砂岩矿物组成的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of sandstone mineral components

矿物组成	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含量/%
基质	47	6	0.30	2 800	44.5
长石	375	64	0.35	2 650	13.9
黏土	32	7	0.52	1 500	13.5
石英	697	89	0.10	2 750	10.5
云母	220	35	0.40	3 200	17.6

表 2 岩石平行黏结模型中的细观参数

Table 2 Mesoscopic parameters in PBM of rock

矿物组成	有效模量 /GPa	黏结模量 /GPa	刚度比	黏结抗压强度 /MPa	黏结黏聚力 /MPa	黏结摩擦角 /($^{\circ}$)
基质	5.93	5.96	1.71	74.31	78.60	25
石英	60.21	58.36	1.10	106.6	97.71	24
长石	42.51	57.89	2.36	98.6	99.72	36
云母	9.63	42.95	3.47	72.42	74.68	36
黏土	3.82	9.00	3.05	69.86	78.69	24

表 3 岩石光滑节理模型中的细观参数

Table 3 Mesoscopic parameters in SJM of rock

节理法向刚度 /GPa	节理切向刚度 /GPa	节理抗拉强度 /MPa	节理黏聚力 /MPa	节理摩擦角 /($^{\circ}$)
1 100	367	110	80	9

2.4 数值模型有效性验证

图 4 为砂岩单轴压缩数值模拟与室内试验的应力-应变曲线及其最终破坏形貌图。

从图 4(a)中可知, 数值模拟的峰值应力为 45 MPa, 室内试验的峰值应力为 46 MPa, 砂岩数值模型与室内岩样的应力-应变曲线吻合度较高, 数值模拟峰值应力略低于室内试验结果。从整体上看, 数值模拟的应力-应变曲线形态与室内试验相近, 峰前阶段的斜率和峰值应力相差不大。但是, 在初始压密阶段, 数值模拟结果和室内试验结果存在较大的差异, 主要是由于岩石内部的微裂隙和孔隙在初始压密阶段发生闭合, 导致应力-应变曲线在初始阶段呈现非线性变化, 而数值模型未充分考虑岩石内部微观结构的演化过程, 如裂隙的扩展和闭合, 无法准确反映初始压密阶段的变形特征。

从图 4(b)最终破坏相貌图可知, 数值模拟与室内试验的试样破坏形貌保持一致, 裂纹从孔隙的端部起裂, 破坏以张拉-剪切混合模式为主, 在孔隙左端萌生的裂纹逐步扩展至试样左上端, 在孔隙右端萌生的裂纹向试样上下端面扩展演化并形成贯通, 导致试样发生破坏, 由此表明构建的岩石 GBM 和标定的参数能够很好地描述砂岩的力学特性。

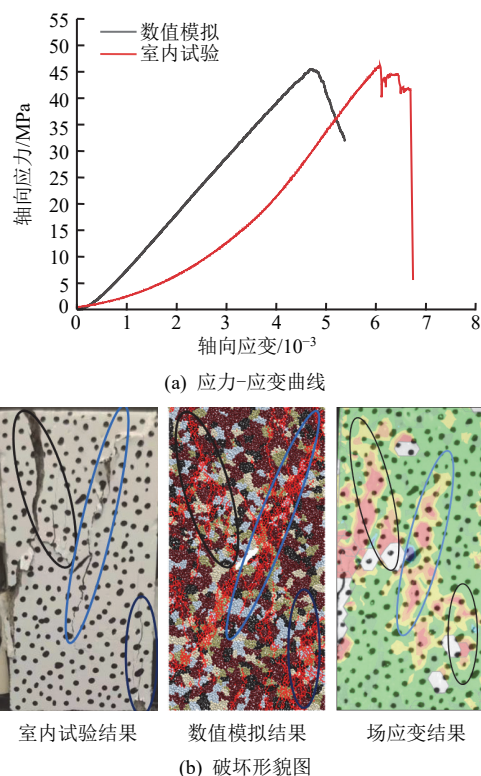


图 4 数值模拟与室内试验的应力-应变曲线及其破坏形貌
Fig.4 Stress-strain curves and fracture morphology of numerical simulation and indoor experiment

3 砂岩力学特征及裂纹扩展规律

3.1 孔隙大小对抗压强度和弹性模量的影响

图 5 为在单轴压缩条件下, 试样的单轴抗压强度和弹性模量随孔隙短长轴比的变化曲线。从图中可以看出, 随着孔隙的短长轴比增大 (除了完整试样), 砂岩单轴抗压强度和弹性模量均出现先减小后增大的变化趋势。当孔隙短长轴比为 0.2 时, 试样的单轴抗压强度达到最大值, 为 41.07 MPa; 弹性模量达到最大值, 为 10.27 GPa。当孔隙短长轴比为 0.8 时, 试样的单轴抗压强度最小, 为 37.44 MPa; 弹性模量最小, 为 9.68 GPa。表明在含有孔隙的试样中, 当短长轴比较小 ($x=0.2$) 时, 试样承受压缩的能力与抵抗变形的能力最强。

完整试样在加入短长轴比为 0.2 的孔隙后, 试样的单轴抗压强度和弹性模量减小幅度较大, 原因是当完整试样加入预制孔隙后, 试样内部孔隙端部的应力集中现象加剧, 导致试样抵抗外力和变形的能力显著下降。

孔隙短长轴比从 0.2 增加到 0.8, 试样的单轴抗压强度和弹性模量减小, 在孔隙短长轴比增大的过程, 应力集中现象减弱, 但是孔隙所占试样的面积相应的增大, 导致试样的初始损伤程度增加, 试样

的连续性和完整性破坏加重, 内部的应力传递路径破坏, 导致试样更容易破坏和发生变形。

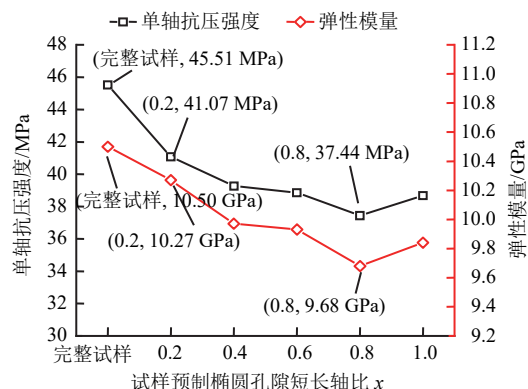


图 5 弹性模量和单轴抗压强度与孔隙短长轴比的关系
Fig.5 Relationship between elastic modulus, uniaxial compressive strength and short-long axis ratio of pore

孔隙短长轴比从 0.8 增加到 1.0, 孔隙从椭圆转变为圆形, 圆形孔隙的存在使得孔隙周围的应力分布由集中状态逐渐向均匀状态转变, 弱化了孔隙端部的应力集中现象, 增加了岩石的承载能力, 导致岩石的单轴抗压强度和弹性模量呈现增大的现象。

上述分析表明, 含椭圆孔隙对试样抗压强度和变形特性有明显的劣化作用, 并且这种劣化作用随着预制孔隙短长轴比的增大呈现先增大后减小的趋势。

3.2 裂纹扩展与应力-应变的关系

为探究含孔隙试样中裂纹扩展与岩石应力-应变之间的关系, 本文选取椭圆孔隙短长轴比 $x=0.2$ 的试样为例, 对岩石的应力-应变特征和裂纹数目的变化规律进行分析。图 6 为短长轴比 $x=0.2$ 时试样的应变与应力和裂纹数目之间的关系曲线。图 7 为数值模拟和室内试验在不同变形阶段对应的裂纹扩展演化图, 其中, 第 1 行为数值模拟结果, 第 2 行为室内试验结果。

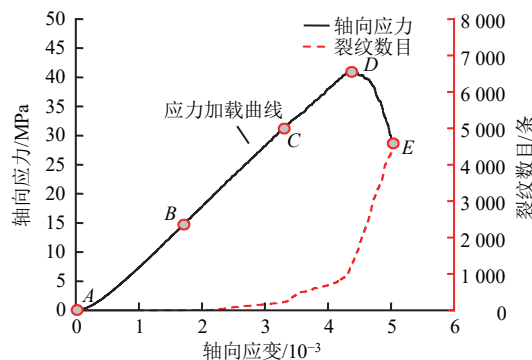


图 6 $x=0.2$ 时岩石的应变与应力和裂纹数目的关系
Fig.6 Relationship between strain, stress of rock and number of cracks at $x=0.2$

从图 6 中可以看出, 在单轴压缩作用下, 含孔隙岩石表现出塑性-弹性-塑性的性质。在应力较低时, 应力-应变曲线呈现向下凸的现象, 形成裂纹较少, 裂纹数目几乎为 0。当应力增加到一定值时, 变形曲线变为直线, 形成裂纹增加, 但是裂纹数量较少。当应力继续增加, 曲线呈现向上凸的现象, 裂纹数量增加。当应力大于峰值应力, 裂纹数量急剧增加, 岩石发生破坏。

根据应力-应变曲线的特征, 结合试样内裂纹数量的演化规律, 含孔隙岩石试样压缩破坏过程经历 4 个阶段: 压密阶段、弹性变形阶段、非稳定破坏发展阶段、峰后破坏阶段, 每个阶段裂纹的扩展与应力-应变的对应关系如图 7 所示。从图中可以看出:

第 1 阶段 (从 A 点到 B 点), 裂隙压密阶段。在加载初期, 试样原有的微裂隙逐渐压密, 导致应力-应变曲线呈现凹形, 形成早期的非线性变形。在这个阶段, 裂纹的数量变化曲线为 0。从图 7(c) 可知, 数值模拟结果和 DIC 全场应变监测数据表明, 试样内部孔隙上下端有少量微裂纹, 试样内部有少量微裂纹萌生。

第 2 阶段 (从 B 点到 C 点), 弹性变形阶段。随着轴向应力的增加, 试样整体表现出弹性变形,

应力-应变曲线近似为直线, 符合胡克定律。在这个阶段, 试样内部微裂纹数量进一步增多, 并且裂纹数量增加的趋势较为平缓。从图 7(d) 可知, 数值模拟结果和 DIC 全场应变监测数据表明, 试样内部微裂纹部分相互贯通, 形成裂纹集中带, 这些裂纹从椭圆孔隙的两端扩展, 呈现向试样端部扩展的趋势。

第 3 阶段 (从 C 点到 D 点), 非稳定破坏发展阶段。在应力-应变曲线的 C 点之后, 试样进入塑性变形阶段, 曲线呈现出凸形。在这个阶段, 内部微裂纹进一步扩展演化, 形成更大的裂纹集中带, 裂纹的数量变化曲线增加。从图 7(e) 可知, 数值模拟结果和 DIC 全场应变监测数据表明, 裂纹继续扩展演化, 形成的裂纹集中带主要在椭圆孔隙长轴两端, 并且逐渐向试样的端部扩展演化。

第 4 阶段 (从 D 点到 E 点), 峰后破坏阶段。当试样的承载力达到峰值强度后, 裂纹开始快速扩展。在这个阶段, 轴向应力急剧下跌, 裂纹数量急剧增加。从图 7(f) 可知, 数值模拟结果和 DIC 全场应变监测数据表明, 沿着孔隙长轴方向以及垂直孔隙长轴的方向都产生了裂纹, 试样最终呈现 X 型破坏, 特别是沿着孔隙长轴方向和垂直长轴方向裂纹扩展演化显著。

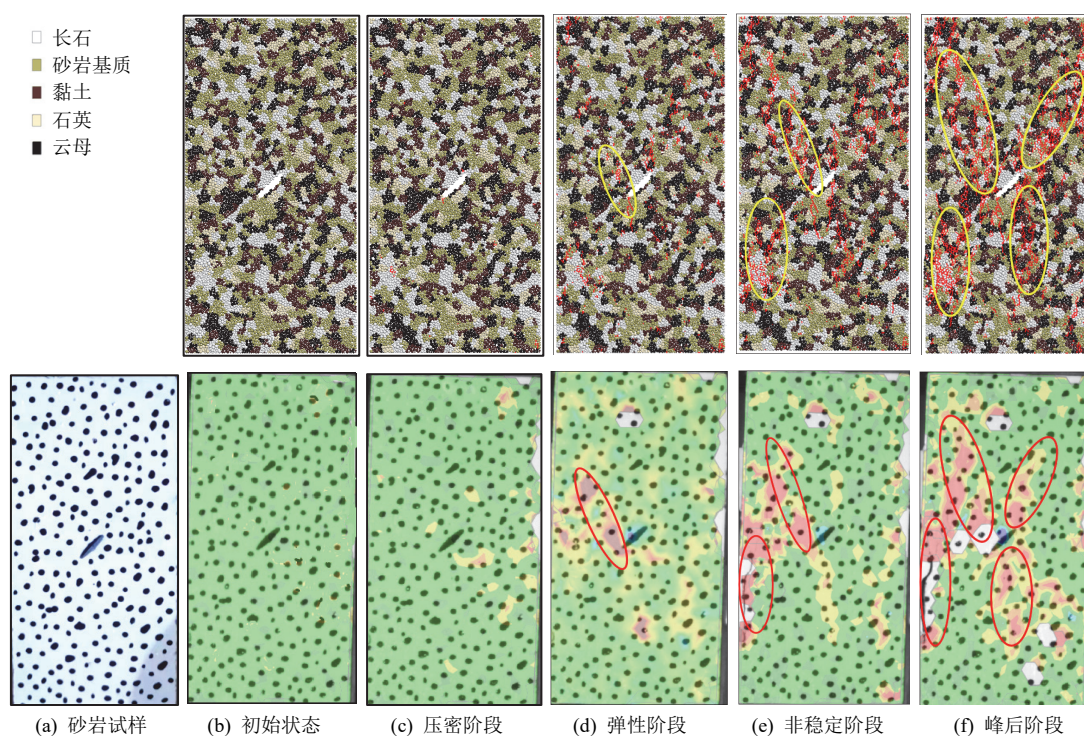


图 7 $x=0.2$ 时不同变形阶段对应的裂纹扩展演化图

Fig.7 Crack growth evolution corresponding to different deformation stages at $x=0.2$

3.3 孔隙大小对破坏模式的影响

为研究椭圆孔隙大小对岩石破坏模式的影响,

对含不同椭圆孔隙短长轴比的岩石进行单轴压缩试验。图 8 为含不同短长轴比的椭圆孔隙试样在破

坏后形成的裂纹网络图，图中红色表示形成的宏观裂纹，T 代表孔隙端部的破坏模式为张拉破坏，S 代表孔隙端部的破坏模式为剪切破坏。

从图 8 可以看出，试样破坏后产生的裂纹主要集中在孔隙端部。与短轴相比，长轴端部形成的裂纹集中程度更大，表明在孔隙的长轴方向更容易引起应力集中。

孔隙短长轴比的大小对试样孔隙周围的破坏模式具有显著影响。当孔隙短长轴比较小时，孔隙

周围的破坏主要呈现为剪切破坏，如图 8(a)、8(b) 所示。随着椭圆孔隙短长轴比的增大，试样孔隙周围的破坏形式转变为张拉剪切混合破坏，如图 8(c)、8(d) 所示。当椭圆孔隙短长轴比达到最大值时，预制椭圆孔隙变为标准圆形孔隙，试样孔隙周围的破坏形式以张拉破坏为主，如图 8(e) 所示。从上述分析可知，随着椭圆孔隙短长轴比的增大，孔隙周围的破坏模式由剪切破坏为主转变为张拉破坏为主。

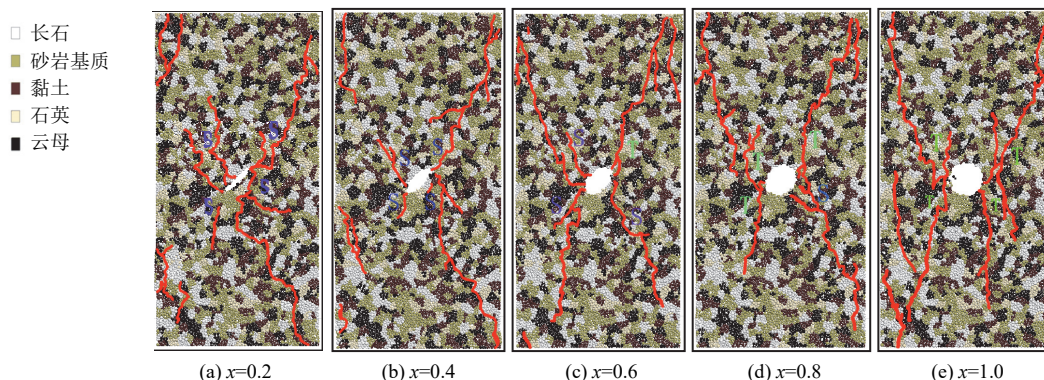


图 8 单轴压缩条件下试样破坏后形成的裂纹网络图

Fig.8 Diagram of crack network formed after specimen failure under uniaxial compression condition

为了验证孔隙短长轴比对孔隙周围破坏模式的影响，选取了孔隙短长轴比分别为 0.2、0.6 和 1.0 的岩石试样分析，图 9 为岩石试样破坏后的形貌图。从图中可以看出，孔隙短长轴比为 0.2 时，孔隙周围分布的主要是剪切裂纹，孔隙短长轴比为 1.0 时，孔隙周围分布的主要是张拉裂纹，数值模拟与室内试验结果一致，表明了数值模拟结果的准确性和可靠性。

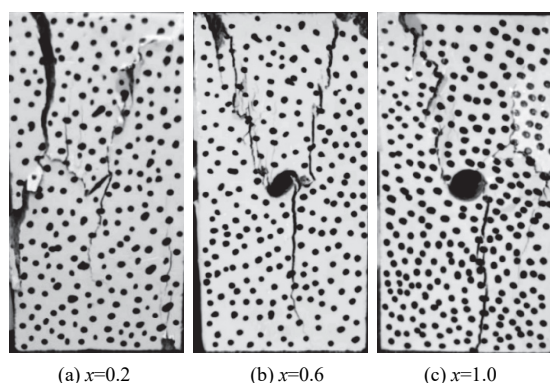


图 9 砂岩试样破坏后的形貌图

Fig.9 Morphology of sandstone samples after failure

为了研究孔隙短长轴比的变化对试样破坏程度的影响，利用 CAD 对试样最终破坏形成的宏观裂纹轮廓进行刻画，计算试样在最终破坏时形成的宏观裂纹面积，统计结果如图 10 所示。

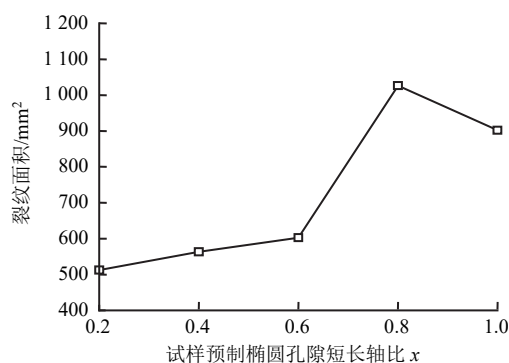


图 10 试样破坏后形成的宏观裂纹面积统计图

Fig.10 Statistical diagram of macroscopic crack area formed after specimen failure

从图 10 中可以看出，裂纹的面积随着孔隙短长轴比的增加呈现先增大后减小的趋势。当孔隙的短长轴比 $x=0.2$ 时，试样的宏观裂纹面积最小；当 $x=0.8$ 时，试样形成的宏观裂纹面积达到最大，试样遭受破坏最为严重。当 $x=1.0$ 时，孔隙为圆形孔隙，相较于 $x=0.8$ ，试样形成的宏观裂纹面积呈现减小趋势。由上述分析可知，孔隙短长轴比较小时， $x=0.2$ ，含孔隙试样的破坏程度较低，孔隙短长轴比 $x=0.8$ 时，含孔隙试样破坏程度最为严重。

3.4 孔隙大小对张拉和剪切裂纹的影响

假设远场应力（加载应力）为 σ ，椭圆孔在单轴拉伸应力下，其长轴端点处应力最大。根据英格

里斯 (Inglis) 公式, 椭圆孔在单向拉伸下的应力集中因子与孔隙轴比的关系为

$$k_t = \sigma(1 + 2a/b) \quad (1)$$

式中: k_t 为应力集中因子。

假设椭圆孔隙长轴 a 固定, 椭圆孔隙的面积为 $A = \pi ab$, 试样的初始损伤与孔隙的面积关系为

$$D_0 = A/S \quad (2)$$

式中: D_0 为初始损伤; S 为试样的面积; A 为孔隙面积。

根据式 (1)、(2) 分别计算了不同短长轴比孔隙周围的应力集中因子和试样的初始损伤, 计算结果如表 4 所示。

表 4 应力集中因子和初始损伤的变化

Table 4 Changes in stress concentration factors and initial damage

短长轴比	应力集中因子	初始损伤
0.2	11.0	0.013
0.4	6.0	0.025
0.6	4.4	0.038
0.8	3.5	0.050
1.0	3.0	0.063

根据试样破坏后结果, 分别统计不同孔隙短长轴比的试样中裂纹总数量、张拉裂纹数量和剪切裂纹数量, 分析孔隙大小对裂纹数量的影响。图 11 为试样破坏后裂纹总数量、张拉裂纹数量和剪切裂纹数量的变化曲线。

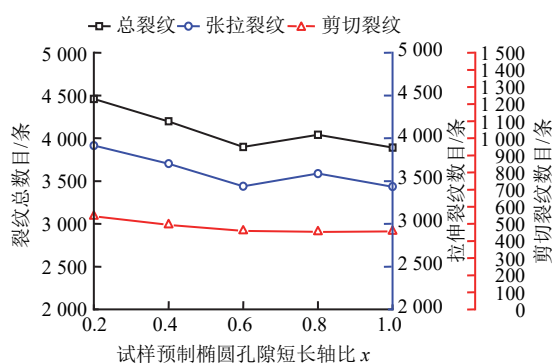


图 11 总裂纹与张拉、剪切裂纹数量变化曲线

Fig.11 Variations of total cracks, tensile cracks and shear cracks

从图 11 中可以看出, 随着孔隙短长轴的增大, 试样产生的裂纹总数和张拉裂纹数量呈现先减小后增加再减小的趋势, 试样产生的剪切裂纹总数量呈现减小趋势, 并且减小的幅度较小, 表明孔隙短长轴比的增大对张拉裂纹数量的变化影响较大, 而

对剪切裂纹数量的变化影响较小。

当孔隙短长轴比从 0.2 增至 0.6 时, 试样产生的裂纹总数量和张拉裂纹数量减少, 主要是由于随着短长轴比的增加, 孔隙的形状发生变化, 导致应力集中现象减弱, 应力集中因子从 11 降到 4.4, 降低了 60%, 初始损伤从 1.3% 增加到 3.8%, 约增加到 3 倍。

当孔隙短长轴比从 0.6 增至 0.8 时, 试样产生的总裂纹数量和张拉裂纹数量增加, 椭圆孔隙向标准圆转变, 应力集中因子从 4.4 降到 3.5, 降低了 20%, 初始损伤从 3.8% 增加到 5%, 增加到 1.3 倍。试样应力集中因子降低幅度和初始损伤增加幅度均降低。

当孔隙短长轴比从 0.8 增加至 1.0 时, 试样内的椭圆孔隙变为标准圆形, 圆形孔隙的边缘相对平滑, 应力集中因子从 3.5 降到 3.0, 圆形孔隙能承受较大的应力, 抵抗变形的能力增加, 使得试样产生的裂纹总数和张拉裂纹数量减少。

图 12 为应力集中因子和初始损伤程度随孔隙短长轴比的变化曲线。从图中可知, 应力集中因子以幂函数趋势减小, 初始损伤程度以正比例趋势增加。在孔隙短长轴比为 0.5 左右时, 二者曲线相交; 孔隙短长轴比大于 0.5 后, 应力集中因子减小幅度减缓。相关研究也表明^[30]: 椭圆短长轴比大于 0.5 后, 最大拉应力增幅减缓, 超过 0.75 后, 最大拉应力变化不明显。

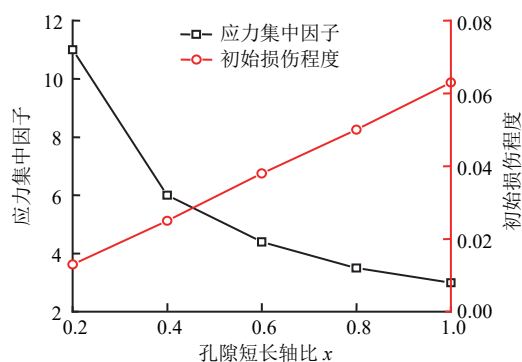


图 12 应力集中因子和初始损伤随孔隙短长轴比的变化

Fig.12 Changes in stress concentration factor and initial damage with short-long axis ratio of pore

孔隙短长轴比从 0.2 增加到 0.6, 对比图 10 裂纹面积与图 11 裂纹数量的变化发现二者的变化规律相反, 其内在原因主要是孔隙短长轴比在 0.2~0.6 范围, 应力集中明显, 应力主导裂纹扩展, 应力集中区域的裂纹优先扩展形成主裂纹, 主裂纹扩展过程中会贯通周围的分支裂纹, 导致裂纹数量和张拉裂纹数量减少, 裂纹的面积反而增加。此现象

与经典断裂力学中“裂纹合并减少数量但增大面积”的结论一致。从能量角度分析为：假设总能量释放率 $G_{\text{total}} = \sum G_i$ ，其中 G_i 为第 i 个裂纹在扩展时，单位面积所释放的能量，单个裂纹面积 A_i 与 $\sqrt{G_i}$ 成正比关系（假设为线性弹性）。在 G_{total} 不变的情况下，当裂纹数量减少时， G_i 增大，驱动单个裂纹面积 A_i 增大，导致总裂纹面积增加，呈现裂纹数量减小而总面积增加的趋势。

图 13 为含不同孔隙试样中张拉裂纹和剪切裂纹分别占总裂纹的百分比。从图中可以看出，含孔隙试样中张拉裂纹与剪切裂纹所占总裂纹的百分比大致相等，统计得出张拉裂纹占比的平均值为 88.31%，剪切裂纹占比的平均值为 11.69%，表明在单轴压缩条件下含孔隙岩石的细观破坏力学机制以张拉破坏为主，剪切破坏较少。这一结果与 Kranz^[31]发现的脆性材料剪切强度大于张拉强度的观点相符合。

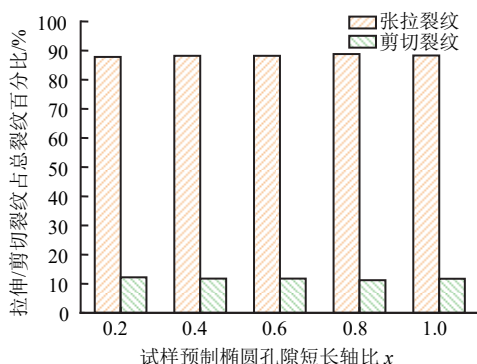


图 13 不同试样的拉剪裂纹占比

Fig.13 Proportion of tensile shear cracks in different samples

3.5 孔隙大小对晶内和晶界裂纹的影响

岩石破坏时常伴随两种主要的微细观裂纹形式：一是在矿物边界处形成的晶间破坏裂纹，二是贯穿矿物内部的晶内破坏裂纹。本文根据岩石破裂后裂纹的形成位置（矿物内部或边界）及其破裂微观机制（剪切或张拉破坏），将微裂纹划分为 4 种类型：晶内张拉裂纹、晶内剪切裂纹、晶间张拉裂纹以及晶间剪切裂纹，划分示意图如图 14 所示。

通过编制的 FISH 函数，统计了含孔隙试样中 4 种不同类型裂纹分别占总裂纹的百分比，统计结果如图 15 所示。从图中可知，在 5 组含孔隙试样中，晶内张拉裂纹占比的平均值为 66.51%，晶间张拉裂纹占比的平均值为 21.8%，晶间剪切裂纹占比平均值为 6.81%，晶内剪切裂纹占比的平均值为 3.58%，表明含孔隙试样在破坏过程中以晶内张拉破坏为主，其次为晶间张拉破坏，晶间剪切和晶内剪切均

较少，这与脆性材料的力学特性一致，即剪切强度较高，不易发生剪切破坏。因此，在单轴压缩条件下，含孔隙岩石的细观破坏模式以张拉破坏为主，岩石内部裂纹起裂主要以晶内张拉裂纹为主导，其次是晶间张拉裂纹，剪切裂纹最少。

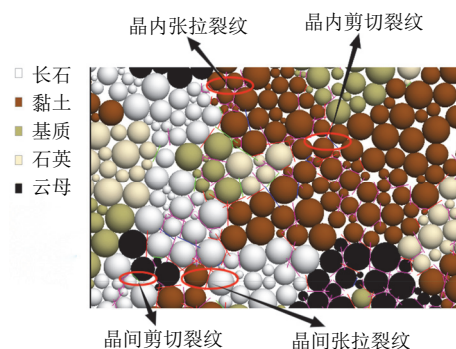


图 14 4 种不同类型破坏裂纹划分示意图

Fig.14 Schematic diagram of the four different types of disruption cracks

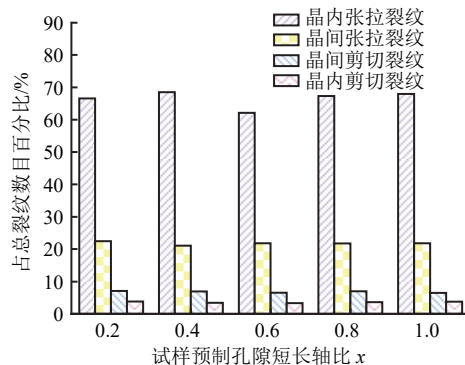


图 15 4 种不同类型破坏裂纹分别占总裂纹的百分比

Fig.15 Four different types of failure cracks as a percentage of total cracks

4 不同矿物内裂纹扩展演化规律

岩石由不同类型的矿物构成，矿物分布的不均影响着裂纹的扩展演化。裂纹在矿物中扩展演化的特性取决于矿物颗粒的自身属性，根据裂纹形成时所在区域矿物种类的不同，将矿物内裂纹分为 5 种类型：石英内裂纹、长石内裂纹、云母内裂纹、砂岩基质内裂纹和黏土内裂纹。图 16 为 5 种类型裂纹在岩石中的分布示意图。

为了进一步探究在孔隙大小影响下矿物内裂纹的扩展演化行为，分别统计了不同孔隙大小模型中石英、长石、云母、基质和黏土 5 种矿物内裂纹数量及其占总裂纹数量的百分比，研究在孔隙大小的影响下矿物组成对裂纹扩展演化的影响。

图 17 和图 18 为砂岩基质和黏土内裂纹数量及其占总裂纹数量百分比的变化。从图中可以看出，

黏土和砂岩基质内裂纹数量及其占总裂纹数量的百分比随着孔隙短长轴比的增大呈现先增加后减小的趋势。在孔隙短长轴比 $x=0.2$ 时, 黏土和砂岩基质矿物内裂纹数量及其占总裂纹数量的百分比最少, 表明黏土和砂岩基质形成的裂纹较少。在孔隙短长轴比 $x=0.6$ 时, 黏土和砂岩基质内裂纹的数量及其占总裂纹数量的百分比最大, 表明黏土和砂岩基质形成的裂纹较多。孔隙短长轴比 $x=0.6$ 对砂岩基质和黏土内裂纹的扩展演化行为影响大, 导致砂岩基质和黏土内容易形成裂纹。

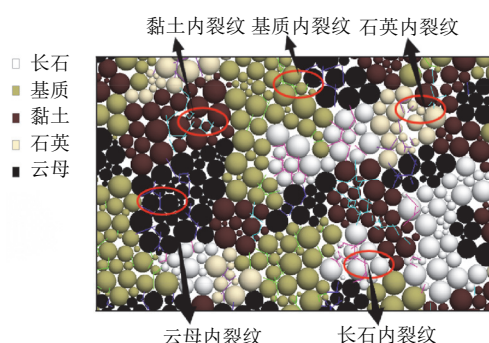


图 16 不同矿物内裂纹划分示意图

Fig.16 Schematic of crack division in different minerals

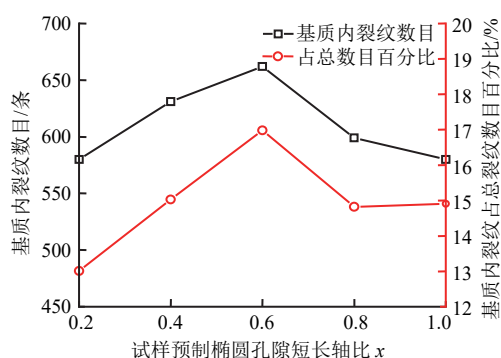


图 17 砂岩基质内裂纹变化统计图

Fig.17 Statistics of crack change in sandstone matrix

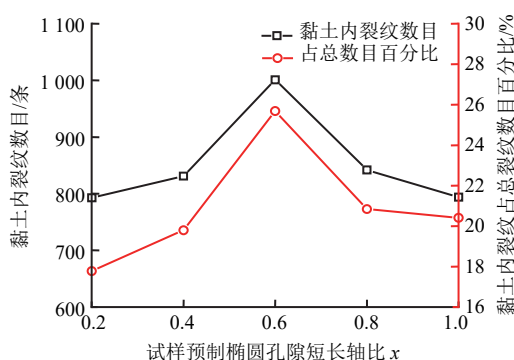


图 18 黏土内裂纹变化统计图

Fig.18 Statistics of crack change in clay

图 19 为云母内裂纹数量及其占总裂纹数量百

分比的变化。从图中可以看出, 云母内裂纹数量及其占总裂纹数量的百分比随着孔隙短长轴比的增大呈现先减小后增加再减小的趋势, 在孔隙短长轴比 $x=0.4$ 时, 云母内裂纹数量及其占总裂纹数量的百分比最小, 表明云母内部形成的裂纹较少。在孔隙短长轴比 $x=0.6$ 时, 云母内裂纹数量及其占总裂纹数量的百分比最大, 表明云母内部形成的裂纹较多。孔隙短长轴比 $x=0.6$ 对云母内裂纹的扩展演化行为影响大, 导致云母矿物内容易形成裂纹。

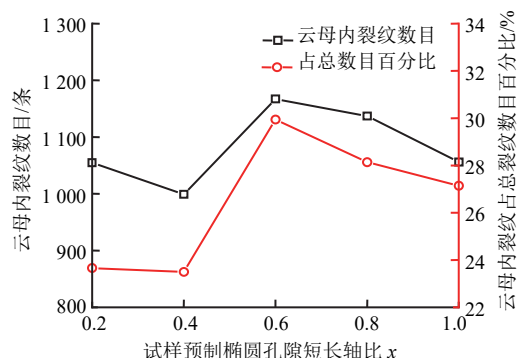


图 19 云母内裂纹变化统计

Fig.19 Statistics of crack changes in mica

图 20 和图 21 分别为长石和石英两种矿物内裂纹数量及其占总裂纹数量百分比的变化。从图中可知, 随着孔隙短长轴比的增加, 长石和石英内裂纹数量及其占总裂纹数量百分比的变化趋势呈现先减小后增加再减小的趋势。在孔隙短长轴比从 $x=0.8$ 增加到 $x=1.0$ 过程中, 长石内裂纹总数目及其占总裂纹数量百分比降低趋势没有石英明显。

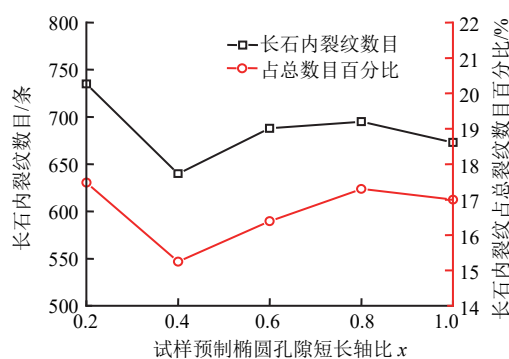


图 20 长石内裂纹变化统计

Fig.20 Statistics of crack change in feldspar

在孔隙短长轴比 $x=0.4$ 时, 长石和石英内裂纹数量及其占总裂纹数量的百分比最小, 表明长石和石英内形成的裂纹较少。在孔隙短长轴比 $x=0.2$ 时, 长石和石英内裂纹数量及其占总裂纹数量的百分比最大, 表明长石和石英内形成的裂纹较多。孔隙

短长轴比为 $x=0.2$ 时对长石和石英内裂纹的扩展演化行为影响大，导致长石和石英内容易形成裂纹。

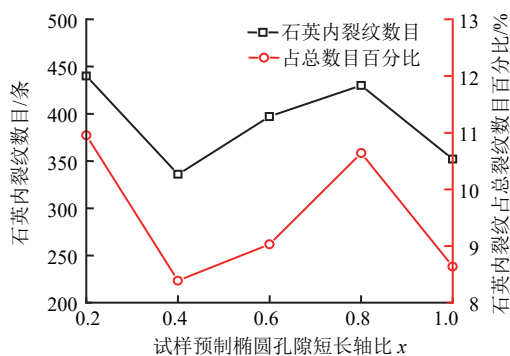


图 21 石英内裂纹变化统计

Fig.21 Statistics of crack change in quartz

综合裂纹数目占总裂纹数的百分比和不同矿物内裂纹数目统计结果分析发现，不同孔隙结构对不同矿物内裂纹的扩展演化影响不同。孔隙短长轴比 $x=0.6$ 对砂岩基质、黏土、云母内裂纹扩展演化行为影响程度最大，孔隙短长轴比 $x=0.2$ 对石英和长石内裂纹扩展演化行为影响程度最大。

孔隙短长轴比 $x=0.6$ 时，砂岩基质、黏土、云母内形成的裂纹数量最多。孔隙短长轴比 $x=0.2$ 时，石英和长石内形成的裂纹数量最多。石英和长石等脆性矿物的裂纹萌生需要较高的局部应力，当孔隙短长轴比 $x=0.2$ 时，孔隙扁平，局部应力较大。石英和长石作为脆性矿物，高应力集中区域的石英和长石容易达到裂纹起裂的临界值，直接导致石英和长石矿物发生脆性断裂。孔隙短长轴比 $x=0.6$ 时，孔隙形状接近圆形，应力集中较低，孔隙周围的局部应力不足以超过石英或长石内裂纹起裂的临界值，裂纹难以在脆性矿物内部优先萌生，会在砂岩基质、黏土、云母的薄弱区萌生及扩展。

在孔隙结构和矿物组成的共同作用下，岩石内裂纹的扩展演化存在差异，这种差异不仅可以揭示矿物力学性质、孔隙几何形态和裂纹扩展行为之间的内在联系，而且能够为理解岩石的微观力学行为和宏观力学性质提供重要的参考依据。

5 结 论

本文利用 PFC 数值方法构建了含不同矿物组成和不同孔隙大小的岩石 GBM，研究了在不同孔隙和不同矿物组成的共同影响下岩石内裂纹的扩展演化，得出主要结论如下：

(1) 当完整试样加入预制孔隙后，随着孔隙短长轴比的增大，单轴抗压强度和弹性模量均呈现先

减小后增大的变化趋势。当 $x=0.8$ 时试样的单轴抗压强度和弹性模量均为最小值，试样抵抗变形的能力最弱。

(2) 随着孔隙短长轴比的增大，试样孔隙周围的破坏模式由剪切破坏为主转变为张拉破坏为主。孔隙短长轴比的增大对张拉裂纹数量的变化影响较大，而对剪切裂纹数量的变化影响较小。

(3) 在单轴压缩条件下含孔隙岩石的细观破坏力学机制以晶内张拉破坏为主，其次为晶间张拉破坏，晶内剪切破坏和晶间剪切破坏均较少。

(4) 受孔隙结构的影响，不同矿物内裂纹的扩展演化特征不同，孔隙短长轴比为 0.6 时对砂岩基质、黏土、云母内裂纹扩展演化影响程度最大，孔隙短长轴比为 0.2 时对石英和长石内裂纹扩展演化影响程度最大。

参 考 文 献

- [1] WANG S Y, SLOAN S W, SHENG D C, et al. Numerical study of failure behaviour of pre-cracked rock specimens under conventional triaxial compression[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2014, 51(5): 1132-1148.
- [2] 韩勇, 李树忱, 袁超, 等. 单轴压缩下薄喷裂隙红砂岩力学性质与裂纹扩展特征分析[J]. **岩土力学**, 2024, 45(9): 2583-2594.
HAN Yong, LI Shu-chen, YUAN Chao, et al. Mechanical properties and crack propagation behavior of flawed red sandstone coated with a thin spray-on liner under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(9): 2583-2594.
- [3] WANG S, XU Y, ZHANG Y, et al. Effects of sandstone mineral composition heterogeneity on crack initiation and propagation through a microscopic analysis technique[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2023, 162: 105307.
- [4] 王海洋, 李金滨, 郑仕跃, 等. 拉剪作用下椭圆孔洞砂岩力学及破坏特征模拟研究[J]. **煤炭科学技术**, 2023, 51(8): 86-96.
WANG Hai-yang, LI Jin-bang, ZHENG Shi-yue, et al. Simulation on mechanical and failure characteristics of sandstone with elliptical hole under tension shear effect[J]. **Coal Science and Technology**, 2023, 51(8): 86-96.
- [5] 朱泉企, 李地元, 李夕兵. 含预制椭圆形孔洞大理岩变形破坏力学特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2019, 38(增刊 1): 2724-2733.

- ZHU Quan-qi, LI Di-yuan, LI Xi-bing. Experimental study on failure and mechanical characteristics of marble containing a prefabricated elliptical hole[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl. 1): 2724-2733.
- [6] 杜明瑞, 靖洪文, 苏海健. 椭圆形孔洞对砂岩试样强度及变形特征影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1): 141-147.
- DU Ming-rui, JING Hong-wen, SU Hai-jian. Study on the influence of elliptical hole on strength and deformation characteristics of sandstone sample[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2017, 34(1): 141-147.
- [7] LIU P, XIE X Q, LIU Q S, et al. Influence of the oval hole on rock mechanical mechanism under uniaxial and biaxial compression: insights from the combined finite-discrete element method[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2023, 27(11): 3324-3342.
- [8] ZHANG S, CAO H, HU Q C, et al. Failure mechanism of rock specimens with an elliptical pre-hole under different stress conditions[J]. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2023, 128: 104133.
- [9] 唐利明. 双轴压缩下含孔洞和孔周预制裂隙类岩石材料加固前后破裂特性研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2020.
- TANG Li-ming. Study on the rupture characteristics of precast fissure rock materials containing holes and surrounding holes under biaxial compression[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2020.
- [10] 李地元, 朱泉企, 李夕兵. 孔洞形状对大理岩渐进破坏力学特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 58-66.
- LI Di-yuan, ZHU Quan-qi, LI Xi-bing. Study on the influence of hole shape on mechanical properties of progressive failure[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2018, 14(1): 58-66.
- [11] 龚爽, 赵毅鑫, 周磊, 等. 冲击荷载作用下含双孔洞裂纹石灰岩动态断裂行为[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3030-3047.
- GONG Shuang, ZHAO Yi-xin, ZHOU Lei, et al. Study on the dynamic fracture behavior of cracked limestone with double holes under impact load[J]. **Journal of China Coal Society**, 2023, 48(8): 3030-3047.
- [12] 林群超. 基于 3D-DIC 和红外技术的预制孔洞大理岩破坏过程研究[D]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2021.
- LIN Qun-chao. Study on the prefabricated hole marble failure process based on 3D-DIC and infrared technology[D]. Shaoxing: Shaoxing University, 2021.
- [13] MANOUCHEHRIAN A, KULATILAKE P H S W, WU R. Failure mechanism of rock specimens with a notched hole under compression-a numerical study[J]. **Applied Sciences**, 2021, 11(17): 7797-7797.
- [14] YU Q, YU F, YAO D L, et al. Numerical simulation of stress wave propagation in joint rock specimens with cavity defects[J]. **Frontiers in Earth Science**, 2022, 10: 971172.
- [15] PENG Y Y, XING M H, LIN Q C, et al. Experimental study on uniaxial compression fracture process of marble specimens with circular holes with different diameters[J]. **Geofluids**, 2022, 2022(16): 1-10.
- [16] 朱飘扬. 马蹄形孔洞与邻近裂隙受压破坏模式研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- ZHU Piao-yang. Study on the compression destruction pattern of horseshoe holes and adjacent fissure[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [17] 周子龙, 孙景楠, 王海泉, 等. 冲击载荷作用下孔洞花岗岩的应变演化及破坏特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 681-692.
- ZHOU Zi-long, SUN Jing-nan, WANG Hai-quan, et al. Strain evolution and damage characteristics of porous granite under impact load[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2021, 52(3): 681-692.
- [18] LIU S, LIU H D, LIU H N, et al. Numerical simulation of mesomechanical properties of limestone containing dissolved hole and persistent joint[J]. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2022, 122: 103572.
- [19] 韦波. 含孔洞类岩石力学特性及损伤演化研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- WEI Bo. Study on mechanical properties and damage evolution of rock-like with holes[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [20] 崔嘉慧. 含孔洞类岩石材料力学特性试验与数值模拟研究[D]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2019.
- CUI Jia-hui. Study on the mechanical characteristic test and numerical simulation of porous rock materials[D]. Shaoxing: Shaoxing University, 2019.
- [21] WU H, ZHAO G Y, KULATILAKE P H S W, et al.

- Fracturing behaviour of sandstone specimens with a cavity formed by intersecting excavations under compression: experimental study and numerical modelling[J]. **Strain**, 2019, 55(4): e12316.
- [22] 曾昭飞, 贺桂成, 戴兵, 等. 双孔洞式双裂隙类岩石力学特性及裂纹扩展分析[J]. 有色金属工程, 2021, 11(5): 87-95.
- ZENG Zhao-fei, HE Gui-cheng, DAI Bing, et al. Analysis of mechanical characteristics and crack extension of double-hole type double-crack rock[J]. **Nonferrous Metals**, 2021, 11(5): 87-95.
- [23] ZHAO T D, LI Q, YU B B, et al. Mechanical behavior and failure characteristics of rock with double holes[J]. **Structures**, 2023, 54: 38-47.
- [24] CHEN S J, XIA Z G, FENG F, et al. Numerical study on strength and failure characteristics of rock samples with different hole defects[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021, 80: 1523-1540.
- [25] 张恩源. 岩石细观结构参数对裂隙演化影响实验研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2021.
- ZHANG En-yuan. Experimental study on the influence of rock microstructure parameters on fissure evolution[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2021.
- [26] LI X F, ZHANG Q B, LI H B, et al. Grain-based discrete element method (GB-DEM) modelling of multiscale fracturing in rocks under dynamic loading[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(12): 3785-3817.
- [27] 杨振琦, 王述红, 孟嫣然, 等. 基于 CT 扫描的花岗岩数值试样重构模型及应用[J]. 固体力学学报, 2017, 38(6): 591-598.
- YANG Zhen-qi, WANG Shu-hong, MENG Yan-ran, et al. Reconstruction model and application of granite numerical samples based on CT scan[J]. **Chinese Journal of Solid Mechanics**, 2017, 38(6): 591-598.
- [28] 彭涛, 何满潮, 马伟明. 煤矿软岩的黏土矿物成分及特征[J]. 水文地质工程地质, 1995(2): 40-43, 48.
- PENG Tao, HE Man-chao, MA Wei-ming. Clay mineral composition and characteristics of soft rocks in coal mine[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1995(2): 40-43, 48.
- [29] 刘帅奇, 马凤山, 郭捷, 等. 基于 Multi Pb-GBM 方法的花岗岩细观力学行为数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2283-2295.
- LIU Shuai-qi, MA Feng-shan, GUO Jie, et al. Numerical study of fine mechanical behavior of granite based on Multi Pb-GBM method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(11): 2283-2295.
- [30] 毛灵涛, 毕玉洁, 左建民, 等. 基于 CT 图像分析建立岩土材料数值模型的方法研究[J]. CT 理论与应用研究, 2010, 19(4): 27-34.
- MAO Ling-tao, BI Yu-jie, ZUO Jian-min, et al. Study on building geomaterial numerical model method based on CT image[J]. **Computerized Tomography Theory and Applications**, 2010, 19(4): 27-34.
- [31] KRANZ R L. Crack-crack and crack-pore interactions in stressed granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1979, 16(1): 37-47.