

基于钻孔数据的断层带结构数值模型构建及应用探索

赵金海^{1,2}, 朱伟龙¹, 孙文斌^{1,2}, 马海龙¹, 乔 洋³

(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 矿山灾害预防控制省部共建 国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 3. 枣庄矿业集团高庄煤业有限公司, 山东 枣庄 277605)

摘要: 断层带数值模型的准确构建和参数赋值一直是煤矿地质工作者面临的难题, 采动断层带涌水量预计存在结构复杂、渗透系数获取困难等问题。以采动影响下断层带涌水量计算为背景, 基于钻孔探测数据进行断层带数值模型的构建与涌水量研究。首先运用随机裂隙生成方法结合 Comsol Multiphysic 有限元数值模拟软件, 探究了单位面积内和单位体积内不同裂隙数量对孔隙水压力、渗流速度和渗透性的影响, 获得了裂隙岩体中单位面积和单位体积裂隙数量与渗透率之间的关系, 建立了二维与三维岩体中随机裂隙与渗透率之间的关系。然后基于钻孔探测数据, 建立了裂隙岩体质量指标 (Rock Quality Designation, RQD) 与岩体渗透率之间的函数关系。同时根据钻探数据建立了断层裂隙带三维数值分析模型, 研究了不同的岩体在煤层开采过程中, 断层带导水和采空区涌水量规律。研究表明: 裂隙数量与渗透率之间符合指数函数关系, 且相较于二维裂隙模型, 三维裂隙岩体中渗透率受裂隙数目增加所提升的幅度更为显著。通过钻孔控制区域范围内实体裂隙的线性延展和未探测区域 RQD 值参数赋值相结合的方法, 构建了含断层带结构的数值分析模型, 结合岩体多点钻孔分析, 建立了岩体质量指标 RQD 与渗透率之间的指数函数关系, 实现了应用矿井岩体质量指标进行涌水量预测分析。研究成果在矿井涌水预测、突水灾害防治及安全评价方面具有重要意义。

关键词: 钻孔数据; 断层带; 裂隙数量; 渗透率; 裂隙岩体质量指标; 涌水量

中图分类号: TD74 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)03-1458-15

Numerical model construction and application exploration of fault zone structure based on borehole data

ZHAO Jinhai^{1,2}, ZHU Weilong¹, SUN Wenbin^{1,2}, MA Hailong¹, QIAO Yang³

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Zaozhuang Mining Group Gaozhuang Coal Industry Co., Ltd., Zaozhuang 277605, China)

Abstract: The accurate construction and parameter assignment of fault zone numerical models have long been a challenge faced by coal mine geologists. The prediction of inflow from fault zones during mining activities is complicated by issues such as structural complexity and difficulty in obtaining permeability coefficients. This study focuses on the calculation of fault zone inflow under mining influence, and uses borehole survey data to construct numerical models of fault zones and study water inflow. First, a stochastic fracture generation method, in combination with the Comsol Multiphysic finite element numerical simulation software, was used to investigate the impact of the number of fractures per unit area and unit volume on pore water pressure, seepage velocity, and permeability. The relationship between the number of fractures per

收稿日期: 2024-10-16 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 官在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1253

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (52104203); 山东省自然科学基金青年基金资助项目 (ZR2020QE128)

作者简介: 赵金海 (1989—), 男, 山东潍坊人, 副教授, 博士。E-mail: Jinhai.zhao@sust.edu.cn

引用格式: 赵金海, 朱伟龙, 孙文斌, 等. 基于钻孔数据的断层带结构数值模型构建及应用探索[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1458-1472.

ZHAO Jinhai, ZHU Weilong, SUN Wenbin, et al. Numerical model construction and application exploration of fault zone structure based on borehole data[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1458-1472.



移动阅读

unit area and unit volume and permeability in fractured rock masses was determined, and the relationship between stochastic fractures and permeability in both 2D and 3D rock masses was established. Based on borehole survey data, a functional relationship between the fractured rock quality designation (RQD) and rock mass permeability was derived. Additionally, a 3D numerical analysis model of fault fracture zones was established based on drilling data to study the water-conducting and water inflow patterns of fault zones and goafs during coal seam mining with varying RQD values. The results indicate: The number of fractures and permeability follow an exponential function relationship. Compared to the 2D fracture model, the permeability in 3D fractured rock masses is more significantly enhanced with an increase in fracture number. A numerical analysis model incorporating fault zone structures was constructed using a method that combines linear extension of real fractures within borehole-controlled regions with RQD parameter assignment for undetected areas. This model, in conjunction with multipoint borehole analysis, enabled the establishment of an exponential function relationship between RQD and permeability, allowing for the prediction and analysis of water inflow using mining rock mass quality indicators. The findings of this study are of significant importance for water inflow prediction, prevention of sudden water inrush disasters, and safety evaluations in mines.

Key words: drilling data; fault zone; fracture number; permeability; rock quality designation (RQD); water inflow

0 引 言

矿井水害是威胁我国煤矿安全生产的主要灾害之一,据统计,60%左右的矿井灾害事故由地下水的作用引发^[1-2],矿山开采发生突水事故与断裂构造等的活化和裂隙扩展贯通密切相关^[3-7]。近年来矿井断层带及薄弱岩层面等突水事故频发,例如山东省某煤矿1107工作面发生断层带渗透涌水事故,最大涌水量 $3\ 827\ \text{m}^3/\text{h}$;山西省某矿发生断层破碎带松动垮塌透水事故,造成4人死亡,直接经济损失968.23万元。矿井涌水量的突变,对工人和矿井内设施造成危险和损坏。持续的涌水会导致岩体长期浸水,岩石裂隙中的水分侵蚀和软化岩体结构,导致岩体强度和稳定性的降低。随着时间推移,导致塌方、顶板冒落等次生地质灾害的风险增加。同时当涌水量突变增大时,矿井排水系统面临巨大的压力。一旦排水系统损坏,积水将迅速淹没生产区域,导致生产停止甚至威胁人员生命安全。随着煤炭开发战略向西部转移及中东部矿山向深部开发等形势的发展,水害威胁类型多样且耦合叠加危害严重,高承压水的威胁日趋严重^[8-9]。断层水害问题已成为我国煤炭资源实现安全高效开采战略迫切需要解决的难题。

突水常发生在2条主干断层的复合部位,以及主干断层旁小断层密集带尖灭端、交叉点等部位^[10-13]。断层带联合运动不同步,形成应力集中区,并诱发导水性突变是矿井涌水灾害主要类型之一^[14-18]。了解研究区域主要构造的结构特征,构建准确反映裂隙岩体特征的数值分析模型,对于断层分段、潜源区划分以及突水灾害的研究等方面都有着一定的参考价值^[19-22]。

在断层带渗透性研究方面, HAINES^[23]发现断层带岩体的孔隙、裂隙一般密度较大,发育程度较高,因而断层带渗透性一般较大,随着距断层带距离的增大,构造应力值逐渐衰弱,使得岩石受到的破坏程度也逐渐减弱,内部形成的孔隙、裂隙数量也逐渐减少。陈建业等^[24]研究发现断层泥的渗透率明显低于角砾岩及含裂隙围岩,随着有效压力升高,渗透率快速下降。随应力增加,破碎岩体的渗流孔对应力的敏感性降低,渗流孔隙率对全孔隙率的贡献减少,渗透率减小^[25]。研究表明断层带内部的渗透性呈现出规律的变化,断层带中心渗透性较低,两侧角砾渗透性较大,更远处两侧围岩带,渗透率与原岩相同,整体上呈现出随着与距断层面距离的增加,岩体渗透率先增后减的“M”形变化^[26]。

矿山水文地质模型渗透特征体现为各向异性和非均质性等特征,数值模拟方法成为涌水量预测精度较高的一种方法^[27-29],但大部分工程实践中是基于等效孔隙介质模型来进行渗流模拟,而忽略了实际的岩体裂隙离散特征。结构面(裂隙)的大小、数量、方向等要素反映了岩体的完整程度,对渗透系数有重要的控制作用。现场一般利用钻孔压水试验获取渗透系数,但试验费用昂贵。鉴于渗透系数的重要性和难获取性,如何准确求取岩体的渗透系数并指导现场生产,具有重要意义。岩体的渗透性与岩体的质量指标(Rock Quality Designation, RQD)之间具有相关性,在岩体力学性质与岩石质量指标相关性研究方面RQD均值随深度增大,渗透系数均值随深度减小,其相关性较好^[30-31]。刘艳章等^[32]基于分形理论,将计算所得的岩体结构面分布的分维数与按工程岩体分级标准对相应岩体分级所得的岩体质量等级进行对比,提出

了一个以岩体结构面分布的分形维作为分级指标的岩体质量评价方案。张亚衡等^[33]研究表明,分形维数 D 能够弥补岩石质量指标 RQD 在评价岩体质量中的不足,可以作为评价岩体质量的一个定量指标。宛东等^[34]编译了二维离散裂隙网络模型的生成程序,结合边界元法对其进行二次开发,计算了巷道单宽涌水量,为矿井涌水量预测提供一种快速的计算方法。如何依据探测数据构建断层带模型是数值模拟分析面临的基础问题。

目前关于断层带结构特征,尤其是断层裂隙带及采动影响下的渗透性变化特征研究相对较少,对于渗流参数如何方便、准确获取以及断层带数值模型精确构建方面缺少系统化研究。获取岩体渗透率主要有实验室测定和现场测试方法。实验室测定条件易控,但岩心样本难以代表岩体特征,受尺度效应和地应力解除等影响大。现场测试,如压水试验法等能较好反映岩体渗透率真实情况,但操作复杂、成本高、受环境影响大,且难以从岩体结构特征方面对采动影响下的发展情况进行分析。

笔者依据断层带的结构组成特征,基于断层带钻孔数据,运用 Comsol Multiphysics 有限元数值模拟软

件,探究了单位面积和单位体积内裂隙数量、岩体 RQD 统计值与渗透率之间的变化关系,获得了数值模型中孔隙水压力、渗流速度和渗透性的变化规律,建立了 RQD 指标与渗透率之间的指数函数关系,通过钻孔控制区域范围内实体裂隙的线性延展和未探测区域 RQD 值参数赋值相结合的方法,构建了含断层带结构的数值分析模型,实现了应用矿井岩体质量指标进行涌水量预测分析。研究成果对矿井涌水预测、突水灾害防治及安全评价具有重要意义。

1 断层分带结构与钻孔参数分析

1.1 断层分带结构模型

目前对于采场中断层带的研究多数将其简化为一个面(图 1a),而忽略了断层带的结构特征。国内外学者对断层带组成特征进行了大量的研究,对断层结构的划分,一般认为断层由断层核、破裂带和围岩 3 部分组成^[14-18],各分带之间的传力特性不同^[19-20],在采动和水压双重作用下运动不同步,形成多组传递力的结构(图 1b),造成分带结构联动演化的非协调性,诱发断层裂隙带导水特性发生变化,形成突水通道并引发突水灾害,是断层突水的基础因素^[20-22]。

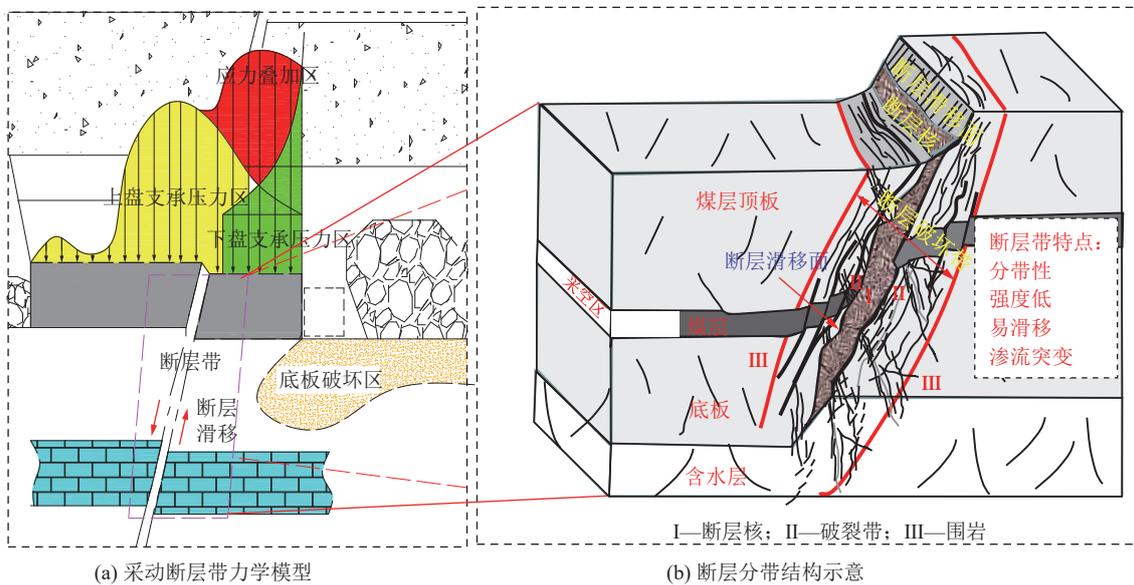


图 1 采场围岩断层分带结构模型示意

Fig.1 Schematic diagram of structural model of fault zoning of surrounding rock in stope

1.2 钻孔参数分析

通过现场取心方法和 3D 扫描方法,根据现场断层裂隙带钻孔探测数据,获得岩心裂隙的空间分布特征,对钻孔岩心数据进行反演建模分析,获得 RQD 值并推算出裂隙数量,建立 RQD 与结构面密度的关系^[35],对裂隙的开度值进行统计分析,探究裂隙数与渗透性之间的普遍性规律,并引入裂隙长度和裂隙网

络连通性相关系数对渗透性计算公式进行修正,提升数值模型与现场实测之间的关联性,如图 2 所示。

1.3 RQD 与裂隙频率的关系

一般来说很难对岩体裂隙数量进行直接测量。但可以通过钻探过程中获得的 RQD 值推算出裂隙的密度(频率)及其开度值^[36],岩体中裂隙频率可以根据 Priest 和 Hudson^[37-38]建立的 RQD 和裂隙频率的关

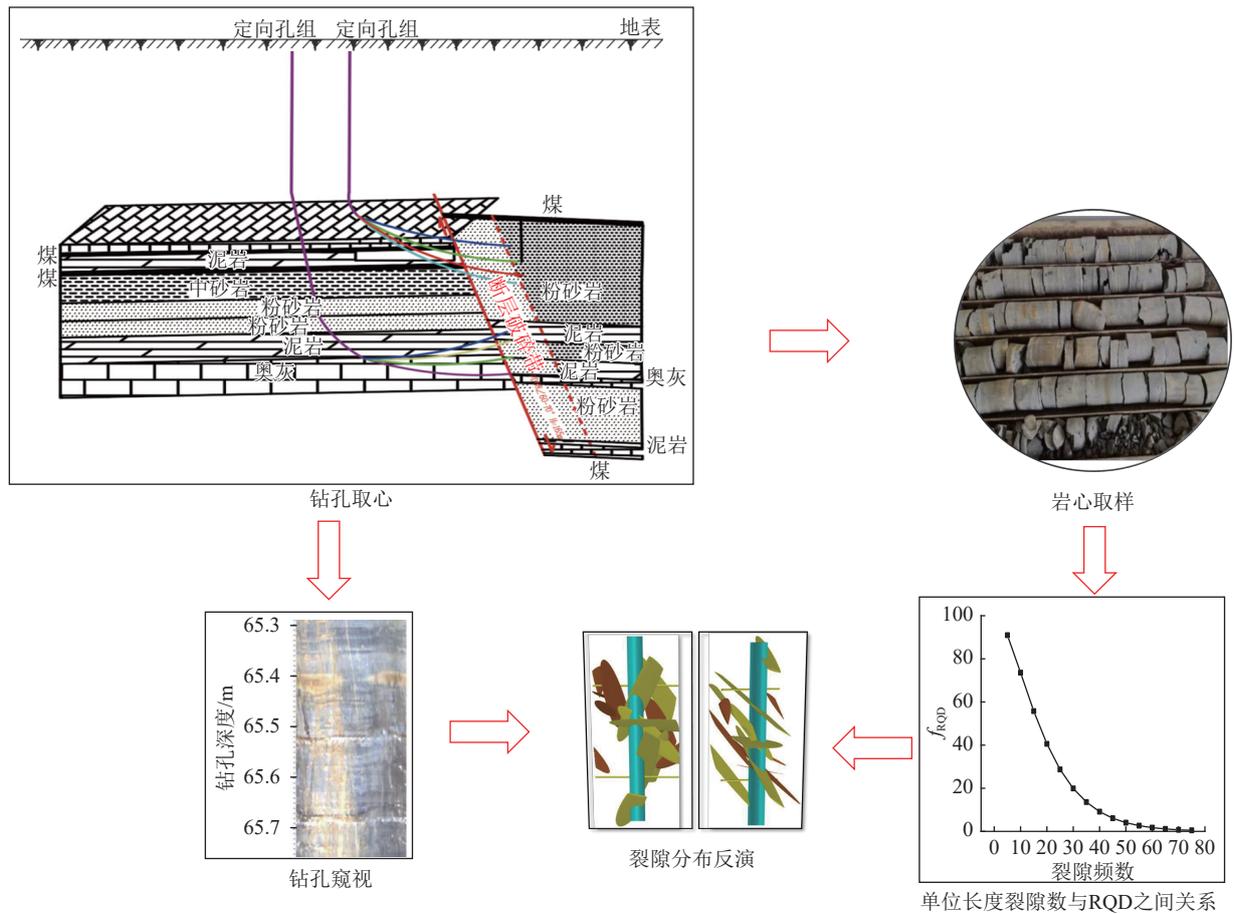


图 2 钻孔取心裂隙提取示意
Fig.2 Schematic diagram of drilling core fracture extraction

系来获取, 裂隙频率 λ 与 RQD 之间的关系如式 (1) 所示, 满足指数函数关系, 曲线如图 2 所示。

$$f_{RQD} = 100(1 + 0.1\lambda)e^{-0.1\lambda} \quad (1)$$

式中: λ 为裂隙频率; f_{RQD} 为 RQD 值。

现有测试技术表明, 地下裂隙张开度一般在几十微米级别。周创兵等^[39]根据含贯通节理的花岗岩岩样压缩变形特征, 确定了节理的平均力学张开度为 75 μm 。伯尔布斯基等曾证明, 在张开度为 0.25 μm 的裂隙中, 液体运动仍遵循达西定律, 因此可以用测量平均隙宽值计算渗透张量。对于张节理, 由于其随深度增加隙宽迅速减小, 而剪节理隙宽随深度衰减慢, 隙宽可以认为是常数, 在 400~600 m 时岩体垂直应力为最大主应力, 可以认为张节理和剪节理平均隙宽基本相同^[39]。上述研究对于应用裂隙数量相关的参数分析渗透性变化具有重要作用。

2 二维裂隙渗透性分析

2.1 二维裂隙渗透性计算原理

本文利用 Comsol Multiphysics 中的 Darcy's Law

模块来分析裂隙岩体中渗透性与裂隙数的关系。

达西定律物理场研究裂隙岩体在压力下的渗透性, 达西定律公式如下:

$$Q = k_1 A (h_2 - h_1) / L \quad (2)$$

式中: Q 为单位时间的渗流量, m^3/s ; k_1 为渗透系数, m/s ; A 为截面积, m^2 ; $h_2 - h_1$ 为水头差, m ; L 为渗流长度, m 。

单位时间渗流量与速度关系式为

$$Q = vA \quad (3)$$

因此达西速度为

$$v = k_1 i \quad (4)$$

式中: i 为水力梯度; $i = (h_2 - h_1) / L$ 。

当煤岩体的应力状态满足最大拉应力准则与 Mohr-Coulomb 准则时, 其分别发生拉伸损伤与剪切损伤^[40]。

最大拉应力准则:

$$F_1 = \sigma_1 - f_{t0} \quad (5)$$

莫尔库仑准则:

$$F_2 = -\sigma_3 - \sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} - f_{c0} \quad (6)$$

式中: f_{t0}, f_{c0} 分别为单元单轴抗拉强度与单元单轴抗压强度, Pa; ϕ 为内摩擦角, ($^\circ$)。

损伤变量 D 计算式:

$$D = \begin{cases} 0 & F_1 < 0 \text{ and } F_2 < 0 \\ 1 - \left(\frac{\varepsilon_{r0}}{-\varepsilon_1} \right)^n & F_1 = 0 \text{ and } dF_1 > 0 \\ 1 - \left(\frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_3} \right)^n & F_2 = 0 \text{ and } dF_2 > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: n 为单元损伤演化系数; $\varepsilon_{t0}, \varepsilon_{c0}$ 分别为最大拉伸主应变与最大压缩主应变, 分别与单元发生拉伸损伤和剪切损伤对应。

根据弹性损伤理论, 单元在发生损伤后, 弹性模量按照如下方程给出:

损伤对于弹性模量的影响:

$$E = (1 - D)E_0 \quad (8)$$

式中: E_0, E 分别为损伤前、后的弹性模量。假定在各向异性条件下发生损伤及其演化, 则此时 E, E_0 与 D 均为标量。

煤岩体自身渗透性演化规律较为复杂, 其损伤后, 可按照下述关系式表达损伤对煤岩体渗透率的影响:

$$k = k_0 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3 \exp(\alpha_D D) \quad (9)$$

式中: α_D 为损伤对渗透率的影响系数。

由文献[41-42]知, 根据孔隙率定义, 并考虑饱和和岩体水压力变化引起的煤岩体骨架变形, 可得考虑骨架变形的饱和煤岩体弹性阶段孔隙率计算式:

$$\varphi_m - \varphi_{m_0} = (\alpha - \varphi_m) \left(\Delta\varepsilon_v + \frac{\Delta p}{k_s} - \Delta\varepsilon_s \right) \quad (10)$$

式中: ε_v 为体积应变; Δp 为孔隙水压变化, Pa; k_s 为骨架体积模量, Pa; α 为 Biot 系数; φ_m 为孔隙率; φ_{m_0} 为初始孔隙率; $\Delta\varepsilon_s$ 为煤岩体骨架应变。

峰后岩石孔隙率变化根据文献[42]定义为

$$\varphi_p = (\varphi_{\max} - \varphi_c) \frac{\sigma_i - \sigma_s}{\sigma_c - \sigma_s} + \varphi_m \quad (11)$$

式中: φ_{\max} 为峰值应力 σ_c 时的孔隙率; σ_i 为应力强度; σ_s 为屈服应力; φ_m 为初始孔隙率。

根据渗流力学中 Kozeny-Carman 方程, 并结合 kotyakhov 的实验结果, 总结出弹性阶段孔隙介质中渗透率与孔隙率之间的关系:

$$k_m = \frac{d_c^2 \varphi_m^3}{72(1 - \varphi_m)} \quad (12)$$

忽略基质颗粒有效直径的变化, 对任意时刻的孔隙率与初始时刻孔隙率做比值, 可得任意时刻的渗透率比率:

$$\frac{k_m}{k_{m_0}} = \left(\frac{\varphi_m}{\varphi_{m_0}} \right)^3 \left(\frac{1 - \varphi_{m_0}}{1 - \varphi_m} \right)^2 \quad (13)$$

2.2 二维裂隙岩体数值模型构建

岩体中的裂隙分布具有随机性, 且渗流主要通过裂隙网络进行。二维裂隙岩体数值模型构建首先应用蒙特卡罗法结合线性同余法生成伪随机数模拟生成岩体中的随机裂隙, 建立随机裂隙岩体有限元数值模型。生成裂隙网络模型目前普遍认为相对精确的随机统计方法是 Monte-Carlo 法, 也称统计模拟方法[34,43]。

其一般递推公式为

$$\begin{cases} x_{n+1} = (ax_n + c) \pmod{M} \\ r_n = \frac{x_n}{m} \\ x_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: \pmod{M} 为对模数取余; a 为系数; c 为增量; x_0 为初始值; r_n 为 $[0,1]$ 区间随机数。

基于 Monte-Carlo 法的理论基础, 在 MATLAB 中设定每条裂隙服从的分布函数, 在网络中随机地生成每条裂隙的几何参数, 确定每条裂隙在研究区内的具体位置、大小和方向等。二维离散裂隙网络模型的计算机生成程序在 MATLAB 中编译的具体过程如下: ① 定义一个全局坐标系, 确定计算域尺寸; ② 确定网络模型中裂隙的条数 N , 通过随机函数确定裂隙位置及长度; ③ 在全局坐标系中, 首先应用 Monte-Carlo 法生成 N 条裂隙具体的几何参数, 包括中心点位置、产状、迹长; ④ 将所有组别的裂隙同时储存在一个矩阵中, 根据前述工作, 确定所有组别的每一条裂隙端点坐标后, 在 MATLAB 中执行画图命令即可生成二维随机离散裂隙网络模型。为减小随机生成裂隙导致的数值分析模型渗透系数离散性, 采用在上一组裂隙模型基础上再增加一定数量随机裂隙的叠加生成方法, 逐渐增加裂隙之间的连通性。然后将建立的随机裂隙模型导入到 Comsol Multiphysics 中, 构建二维随机裂隙, 建立的二维随机裂隙数值模型如图 3 所示。

二维裂隙平面数值分析模型的上下边界为无流动边界, 左侧为压力入口, 右侧为出口。裂隙流动模型为达西流, 为减少不必要的影响因素, 裂隙的隙宽统一取 0.001 m, 裂隙的孔隙率 0.7, 考虑裂隙的摩擦对于水流流动的影响, 采用立方定律, 粗糙度系数 1。裂隙的渗透率与裂隙的孔径和粗糙度系数符合

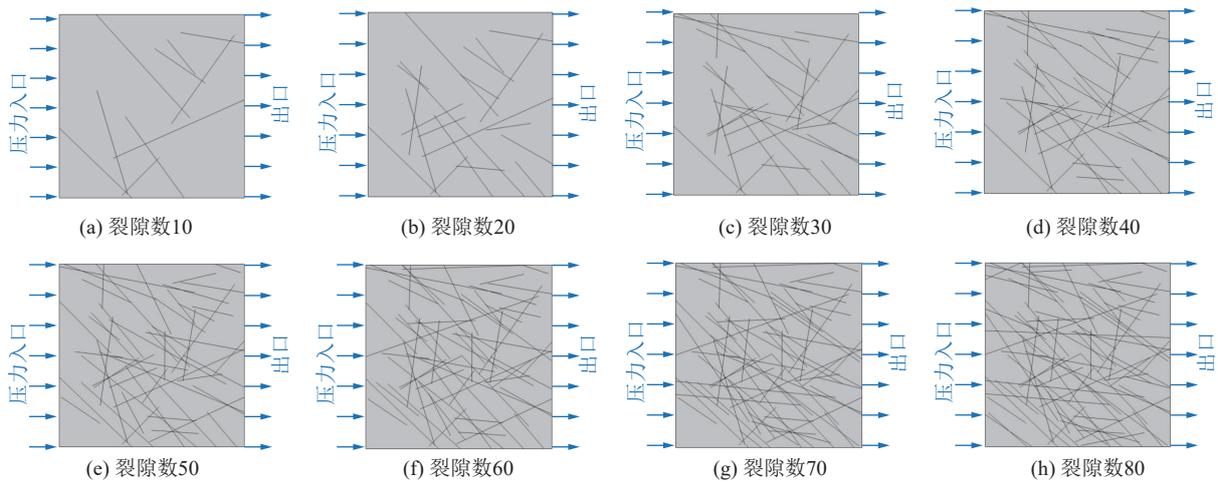


图 3 不同裂隙数的数值分析模型

Fig.3 Numerical analysis model of different fracture numbers

式 (15)。

$$k_f = \frac{d_f^2}{12f_f} \quad (15)$$

式中: k_f 为裂隙的渗透率, m^2 ; d_f 为裂隙的孔径, m ; f_f 为粗糙度系数。

2.3 二维随机裂隙数值模拟结果分析

二维不同随机裂隙数水压变化如图 4 所示, 在入口加载 3 MPa 恒压水压力, 岩体弹性模量 E 为 8.7 GPa, 抗拉强度为 3.2 MPa, 抗压强度为 45.1 MPa, 压力沿着裂隙的发育方向逐渐减小。当裂隙交集或在某些区域分布较为密集时, 水压变化较大。

随着裂隙数的增加, 高水压区域 (红色区域) 的面积变大, 而低水压区域 (蓝色区域) 的面积变小。比较图 4 中的几种工况可知, 裂隙数量为 10 时, 高水压区

域占比相对较小, 裂隙之间的连通性较差, 水压较难以扩散至裂隙网络中。当裂隙数增多时, 高压区域占比增大, 说明水压力得到了更好的扩散。对图中的水压大于 1 MPa 区域计算, 发现裂隙数为 10 时, 水压大于 1 MPa 面积为 11.40 m^2 , 而在裂隙数 80 时, 面积为 19.044 m^2 。随着裂隙数的增多, 水压分布趋于均匀, 并且水压的扩散效果变得更加明显。裂隙的密集程度和连通性会影响到局部压力的变化, 裂隙数量和连通性的增加促进了水压力的扩散, 促使整个裂隙岩体中的高水压区域占比迅速降低。

不同二维随机裂隙数的渗流速度变化如图 5 所示, 平均渗流速度随裂隙数的增加而增大, 当裂隙数为 80 时, 观察到最大渗流速度为 0.16 m/s; 而裂隙数为 10 时, 渗流最大速度为 0.005 m/s。这表明, 随着裂

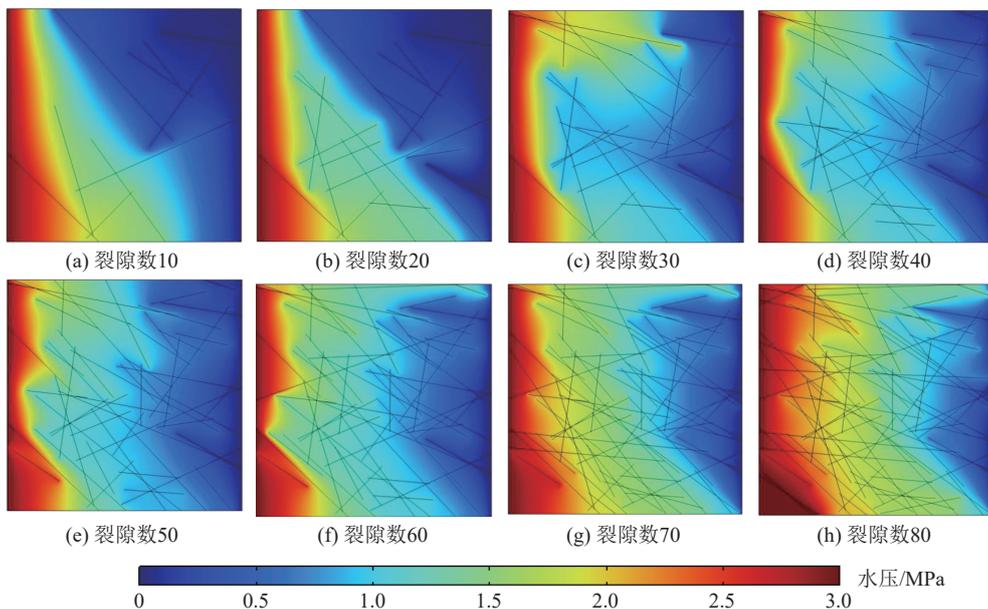


图 4 不同随机裂隙数水压

Fig.4 Water pressure diagram of different random fracture numbers

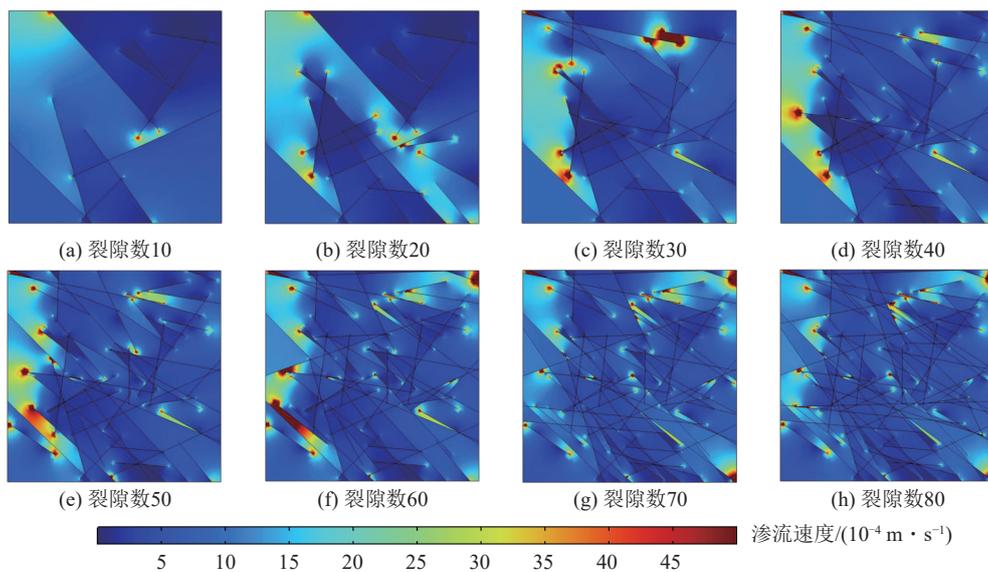


图 5 不同随机裂隙数渗流速度

Fig.5 Velocity diagram of different random fracture numbers

隙数量的增加,裂隙间的连通性增强,流体通过裂隙流动的能力提高,渗流速度增大。裂隙数与渗透率之间呈正相关,随着裂隙数的增加,渗透率快速增长。裂隙数的增长为流体提供了更多的通道,从而增加了岩体的渗透能力,使得流体更容易穿过岩体内部。渗流速度与渗透率呈现对应增长关系,随着渗透率的提高,流体的渗流速度也相应增加。

数值模拟获得的裂隙数、渗流速度和渗透率之间的对应关系如图 6 所示,初始分段岩体内裂隙数较少,裂隙连通性差,因而渗流速度较低,渗透率较小。随着裂隙数逐渐增加,岩石体的破碎程度提升,裂隙间的连通性增强,渗流速度随之增大。当岩体内部裂隙数量增加到一定阈值时(如图 6 中裂隙数量为 50 时),岩体的破碎程度突变增长,导致渗透率和渗流速度的急剧提高,此时岩石体内部结构显著变化,大量增长的裂隙相互贯通形成了导水通道,渗流速度急剧加快。

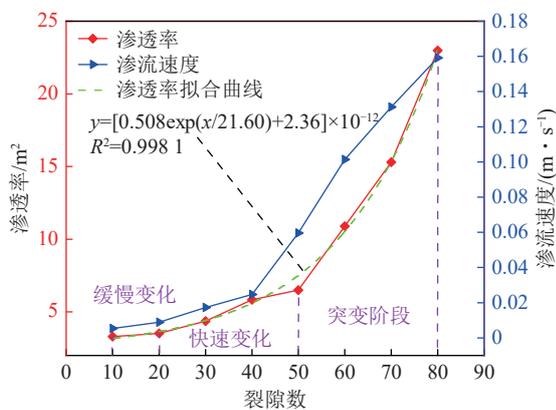


图 6 裂隙数与渗透速度和渗透率关系

Fig.6 Relationship between fracture number and seepage velocity and permeability

对图中的渗透率变化依据曲线斜率划分为 3 个分段。图 6 中的拟合曲线分析可知,渗透率与裂隙数量之间呈现明显的指数函数关系,拟合曲线相关性达到 0.998,表明拟合曲线具有较强的可信度。

3 三维随机裂隙岩体渗透性分析

3.1 三维随机裂隙岩体渗透性数值模型构建

应用 Comsol Multiphysics 数值模拟软件建立裂隙网络三维数值模型,裂隙位置遵循均匀随机分布函数,其大小遵循幂律分布函数,最小长度 1 m,最大长度 5 m,幂率指数取 2,方向遵循 Fisher 分布,弥散系数 0.1。在三维区域 5 m × 5 m × 5 m 的范围内,分别建立了裂隙数为 10、20、30、40、50、60 的 6 组三维裂隙岩体数值模型,建立的含不同裂隙数量数值分析模型如图 7 所示,通过数值模拟软件,对裂隙岩体中裂隙数量与水压力变化、渗流速度变化之间的关系进行量化探索。

将随机裂隙中的流动设置为裂隙流,裂隙的孔隙率为 0.7,多孔介质渗透率为 $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,裂隙孔径为 0.001 m。裂隙的渗透率模型采用立方定律,考虑裂隙摩擦对于流体的影响,粗糙度系数为 1。岩体弹性模量 E 为 8.7 GPa,抗拉强度为 3.2 MPa,抗压强度为 45.1 MPa。模型左侧设置为恒定压力边界,大小为 3 MPa,右侧为流出边界,其余部分皆为不透水边界。

3.2 三维随机裂隙岩体数值结果分析

含不同裂隙数三维岩体数值分析模型水压分布图如图 8 所示,图 9 为裂隙数分别为 10、20、30、40、50、60 的“井”型截面的水压分布。三维裂隙岩体中,随机裂隙的形态、方向和分布较二维裂隙更复杂,存

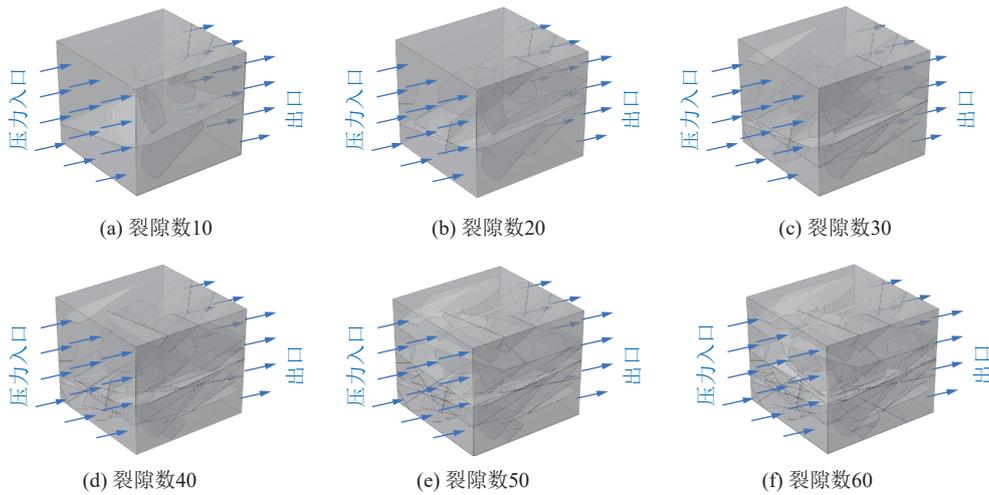


图 7 三维不同随机裂隙数岩体数值模型

Fig.7 Three-dimensional numerical model of rock mass with different random fracture numbers

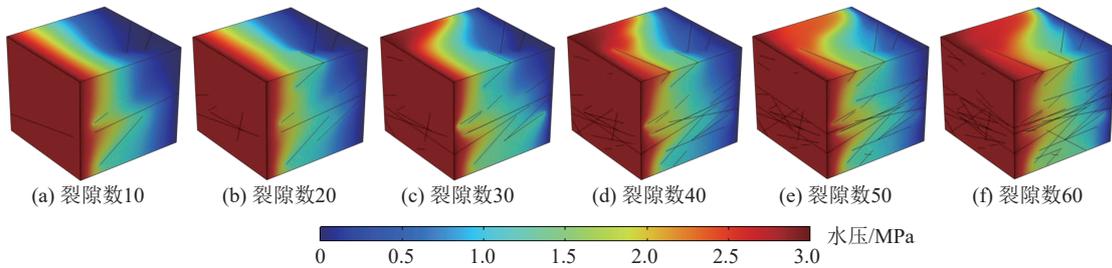


图 8 三维随机裂隙岩体水压

Fig.8 Three-dimensional water pressure diagram of random fractured rock mass

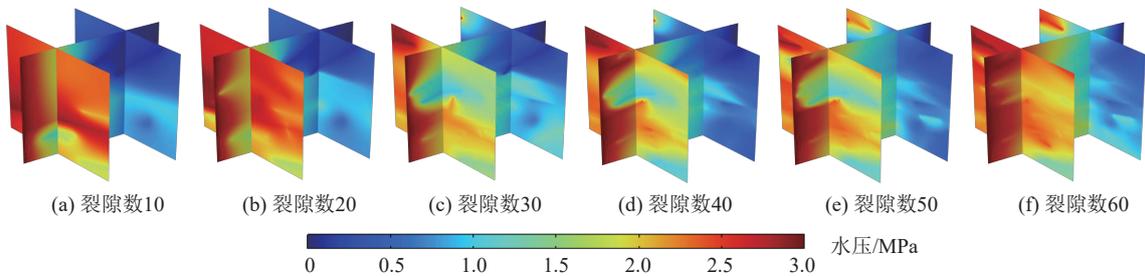


图 9 三维随机裂隙岩体“井”型截面水压

Fig.9 Water pressure diagram of three-dimensional random fractured rock mass well section

在更多的空间方向性和连通性选择。在三维随机裂隙岩体中,裂隙连通处出现压力突变,随着裂隙数量的增多,突变点增多,水压分布状态产生较大的影响。在恒定边界压力作用下(3 MPa),水压会沿着裂隙的发育方向传播。随着裂隙数目的增加,高水压区与低水压区之间的界线变得越来越模糊,推进了压力在整个裂隙岩体中的扩散。同时由于裂隙数的增加,导致在三维空间中高水压区域(红色区域)面积逐渐扩大。随着裂隙数目的增多,水压变化趋势更加显著,水压更易在裂隙岩体中扩散。在三维随机裂隙岩体中,随着裂隙数量的增加,水压扩散效果增强,在恒定水压边界作用下压力分布趋向均匀。

随着裂隙数量的增多,流体流动的通道选择性增多,从而导致整体的渗流速度和渗流量提高。对以上几种数值模拟工况对比分析可知,裂隙数为 60 时,裂隙贯通导渗,此时岩体内的渗流速度最快,如图 10 所示,裂隙的增加提供了更大的流动空间和水力连通性。单位体积内裂隙数目是描述岩石内部裂隙发育程度的一个重要参数,影响到岩体的渗透性能。随着单位体积内裂隙数量从 10 增加到 60,岩石的渗透性显著上升,渗透率逐渐增大,裂隙数的增加给流体提供了更多的流动通道。裂隙数较少时,流体流动受到较大程度的限制。随着裂隙数的增加,新增的裂隙(损伤区)与现存裂隙形成更好的连接,且连接的可选择性

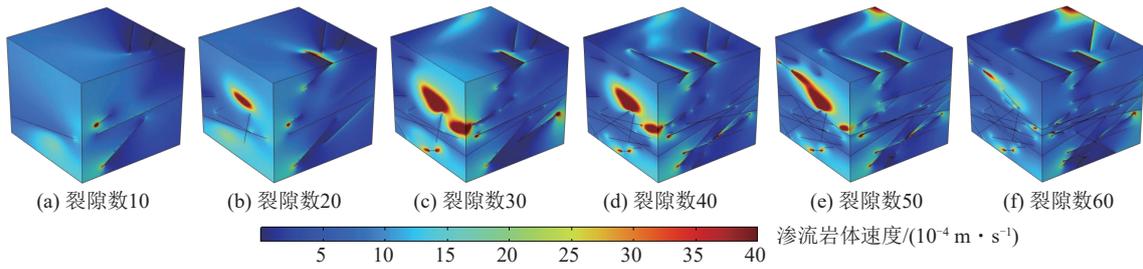


图 10 三维随机裂隙渗流岩体速度示意

Fig.10 Three-dimensional random fracture seepage velocity diagram of rock mass

增大,进一步增强了岩体的连通性,提高了岩体的渗透能力,为水流提供了更大的空间和通道,三维裂隙岩体内裂隙数与渗透率的关系如图 11 所示。

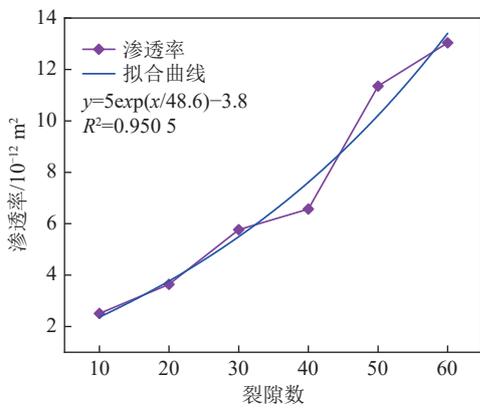


图 11 三维裂隙岩体裂隙数与渗透率之间关系

Fig.11 Relationship between fracture number and permeability of three-dimensional fractured rock mass

三维裂隙岩体中单位体积内随机裂隙数目的增加,渗透率提升幅度更为显著。相比之下,在二维裂隙岩体中,虽然单位面积内裂隙数量的增加也会对渗透率产生影响,但影响的幅度相对较小。二维空间中的裂隙增长主要影响的是局部流动路径的拓展,而整体通道的复杂性和连通性并未像在三维空间中那样显著增强。因此,二维裂隙岩体中渗透率的变化较为有限,难以达到三维裂隙岩体中的显著提升效果。表明裂隙的长度、维度、连通性等是三维裂隙非线性增长的主要指标。

3.3 裂隙岩体渗透率和 RQD 之间的关系

为更全面地反映出三维裂隙岩体中裂隙的分布及其对岩体完整性的影响,通过钻孔对三维裂隙岩体 RQD 值分析,分别从顶面和右侧面进行岩体钻孔取样,每面 5 个钻孔,打钻方式对应目前常用的垂直钻孔和水平钻孔钻进方式,钻孔位置如图 12 所示。分别计算每个钻孔的 RQD 值,然后取上述 10 组数据的 RQD 平均值作为岩体质量指标,对岩体的渗透率和 RQD 之间的关系进行研究,通过数据点拟合获得两者之间的变化曲线(图 13)。

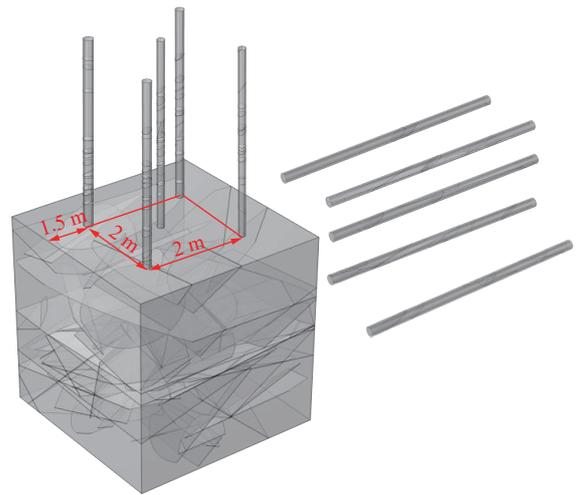


图 12 岩心钻孔取样位置

Fig.12 Core drilling sampling location map

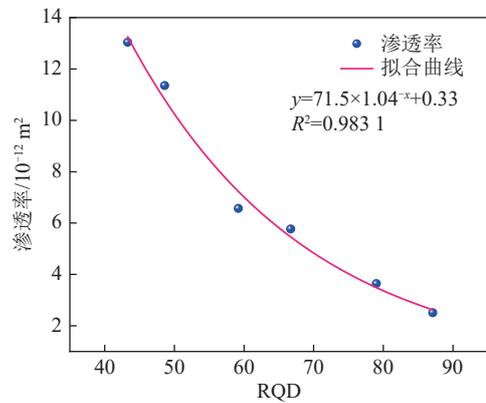


图 13 渗透率和 RQD 之间的关系

Fig.13 Relationship between permeability and RQD

结果表明 RQD 与渗透率之间符合非线性关系,随着 RQD 值的增大岩体越完整,渗透率越低,破碎岩体内裂隙贯通,提高了渗透性,为流体的流动提供了渗流路径。

为验证数值模型的准确性,选取山东枣庄矿业集团高庄煤矿矿井钻孔数据进行验证。现场钻探及取心如图 14 所示,钻孔 RQD 和渗透率统计结果如表 1 所示,通过数据拟合分析(图 15),统计结果与数值模拟结果符合相同的拟合函数类型,拟合度达到 0.86,



图 14 现场钻探及部分钻孔 RQD 统计

Fig.14 RQD statistics of field drilling and some boreholes

表 1 钻孔 RQD 和渗透率值

Table 1 Drilling RQD and permeability values

钻孔编号	钻孔岩性	试验类型	试验段孔径/m	降深次数	渗透率/m ²	钻孔RQD统计
1	新近系	抽水	110	3	2.58×10 ⁻¹³	60
2		抽水	110	3	5.97×10 ⁻¹³	45
3	灰岩	抽水	110	3	1.96×10 ⁻¹³	65
4		抽水	110	1	2.63×10 ⁻¹³	60
5		抽水	110	3	2.28×10 ⁻¹³	62
6		抽水	219	3	1.04×10 ⁻¹²	32
7		抽水	110	3	1.39×10 ⁻¹²	25
8	灰岩	抽水	110	3	6.59×10 ⁻¹³	40
9		抽水	110	3	3.25×10 ⁻¹³	30
10		抽水	127	1	1.74×10 ⁻¹²	20
11		抽水	110	3	1.02×10 ⁻¹²	35

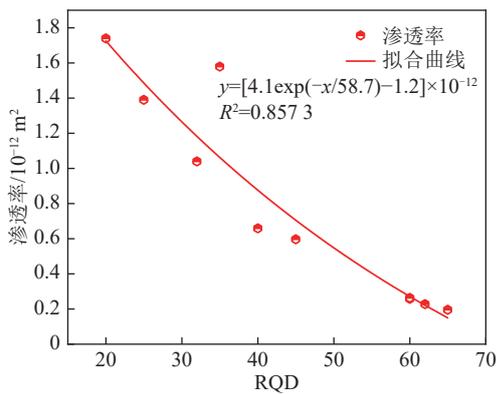


图 15 现场 RQD 和渗透率之间拟合曲线

Fig.15 Fitting curve between field RQD and permeability

表明拟合函数具有较高的可信度。初始岩性的渗透性和岩体内部的连通性是造成数值模拟和现场监测数据差异的主要原因,但数据的总体变化规律具有一致性,表明获得的拟合规律具有合理性,这就为进行矿井涌水量研究奠定了基础,可应用现场数据对数值

模型进行修正,提高预测的合理性和准确性。

4 应用 RQD 进行采空区涌水量计算

4.1 模型构建

为了研究断层裂隙带及围岩裂隙结构特征与采空区涌水量之间的关系,验证应用 RQD 值对矿井涌水量进行预测的可行性。以山东枣庄矿业集团高庄煤矿地质条件为背景,建立了尺寸为 800 m×200 m×400 m 的数值分析模型,其中断层带宽度 30 m,落差 10 m。断层带中裂隙采用与前述建模过程相同的随机分布函数,通过在 Matlab 中生成几何随机裂隙,然后与 Comsol Multiphysics with Matlab 接口连接,导入到几何模型中,数值模型构建过程中,考虑了数值模型与实际钻孔岩心裂隙结构的关联,模型构建方法是以钻孔岩心统计的获得裂隙方位、角度等分布数据,来构建钻探区域的裂隙分布(图 16),并进行了钻孔范围内(钻孔直径的 30~100 倍)裂隙的线性延展,裂隙

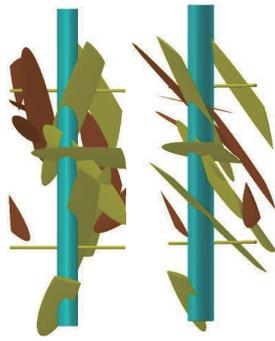


图 16 钻孔裂隙延展性三维线性推断

Fig.16 Three-dimensional linear inference of borehole fracture ductility

的开度值取 0.001 m 的相同数值,但控制模型的整体 RQD 值为设定值,通过这种方法实现基于钻孔数据的断层带数值模型构建,尽量增强数值模型与实际钻孔岩心裂隙结构的联系。

构建模型如图 17 所示,分别构建了裂隙岩体的 RQD 值分别为 6、11、16、21、28、34、41、49、57、66、76、86、98 的采场模型进行数值模拟分析,裂隙的孔隙率 0.7,裂隙孔径为 0.001 m。裂隙的渗透率模型采

用立方定律,考虑裂隙摩擦对于流体的影响,粗糙度系数为 1。各岩层物理力学参数见表 2,断层裂隙带的初始渗透率为 10^{-13} m^2 。其中一种三维模型如图 18 所示。模型下边界施加固定约束,前后左右 4 个侧面设置辊轴约束,限制模型的水平移动。在煤层底板中央位置不同深度 (1、6 m) 设置 2 条监测线 (图 17 绿线为监测线 1,红线为监测线 2),监测煤层开采过程中底板的水压,渗流速度等参数变化。采用固体力学和达西渗流场进行耦合模拟,研究不同 RQD 值下断层带及裂隙围岩采动过程中的导水性和渗透性变化。

工作面回采长度 260 m,每步回采 20 m,共计 13 步。开采后采空区边界压力值为标准大气压,底部为奥灰含水层,水压 5 MPa,顶部施加 10 MPa 均布荷载。通过对采空区开采边界上的渗流速度分别进行 6 个面积分,然后求和计算得到单位时间内采空区涌水量。

4.2 模拟结果分析

随着 RQD 值的降低,岩体的导水性增强,采空区底板水压降低,采空区涌水量增加。以煤层开挖长度 260 m 时为例,随着断层带裂隙损伤扩展,岩体质量指

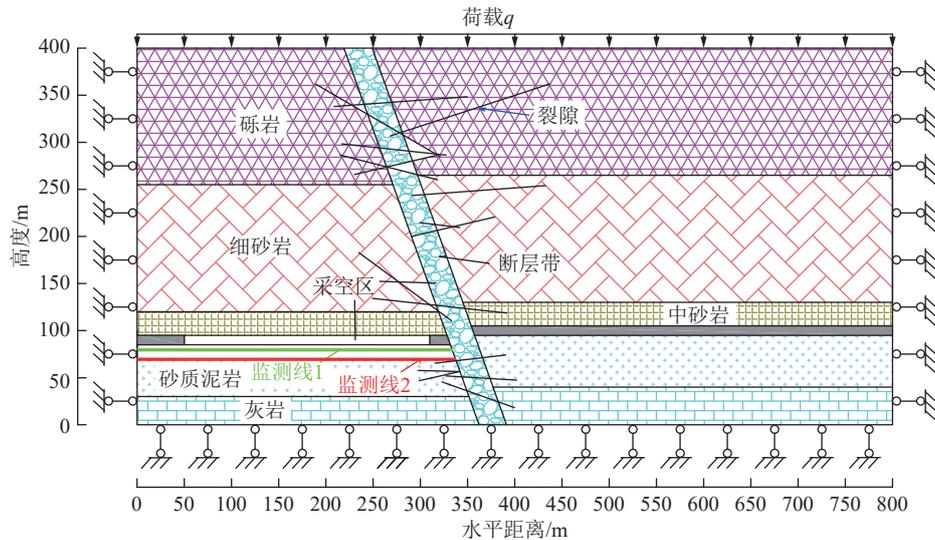


图 17 含断层带模型计算边界条件示意

Fig.17 Two-dimensional calculation diagram of geometric model

表 2 煤层顶底板及断层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of coal seam roof and floor and fault

岩性	弹性模量/GPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	渗透率/ m^2	孔隙率	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	厚度/m
砾岩	7.0	2 800	0.30	1×10^{-14}	0.05	4.0	45	145
细砂岩	14.0	2 600	0.30	1×10^{-14}	0.06	6.0	55.0	135
中砂岩	12.5	2 700	0.26	2×10^{-14}	0.06	5.0	65	25
煤层	1.5	1 330	0.36	4×10^{-14}	0.10	1.2	15.8	10
砂质泥岩	3.5	2 500	0.30	1×10^{-15}	0.10	3.0	40	55
灰岩	8.7	2 430	0.28	1×10^{-14}	0.15	3.2	45.1	30
初始断层带参数	1.0	1 500	0.37	1×10^{-12}	0.25	1.0	10.0	30

标 RQD 值降低, 导致底板隔水层阻水性降低, 裂隙带的存在使工作面 and 断层之间更容易形成有效的水流通道, 促进水流渗透汇入采空区。对比分析可知, 断层裂隙带破碎度越大, 所包含的裂隙数量越多, 岩体

RQD 值则越低, 承压水越容易从底部导升贯通形成渗流通道, 造成采空区涌水量的突变。

对比监测线 1 和监测线 2 处孔隙水压和渗流速度变化, 发现当煤层开挖长度为 260 m 时, 随着岩体质量 RQD 值降低, 初始分段水压变化平稳, 随着工作面不断推进, 孔隙水压力减小, 同时渗流速度缓慢, 如图 19、图 20 所示。随着工作面继续推进, 受到断层裂隙带扰动影响, 监测线 1 和 2 底板孔隙水压急剧增大, 同时渗流速度也急速上升, 但在断层裂隙带处监测线 2 的孔隙水压增大更加显著。

随着煤层开采距离增大, 断层带附近由于裂隙分布的不均匀性和裂隙的强导水性, 裂隙之间相连接致使渗流通道增加, 流体从裂隙发育处渗透, 此分段底板渗流速度急剧上升, 产生泄流, 含水层和断层裂隙带之间形成承压水优势导水路径。

对构建的数值分析模型进行涌水量预计分析, 为增强数值模型的对比性, 仅考虑了断层裂隙带不同岩体 RQD 值变化, 其余岩体不受 RQD 值变化影响。构建了 RQD 值为 6、11、16、21、28、34、41、49、57、66、

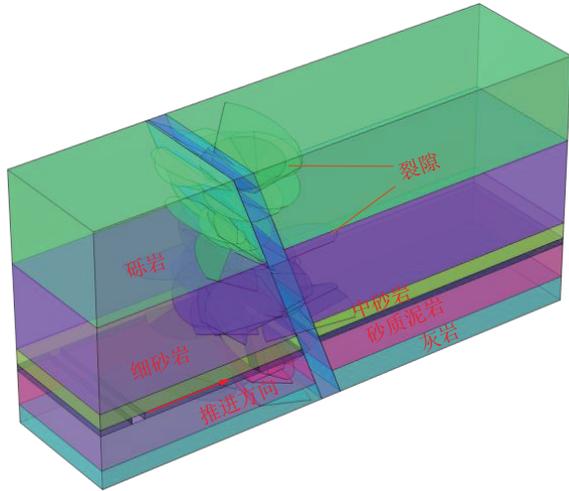


图 18 构建的含断层带三维模型

Fig.18 Three-dimensional graph of geometric model

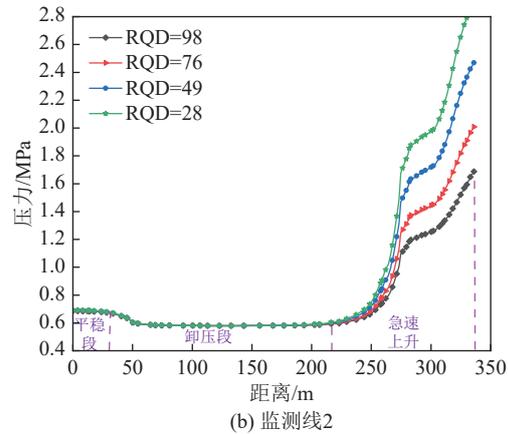
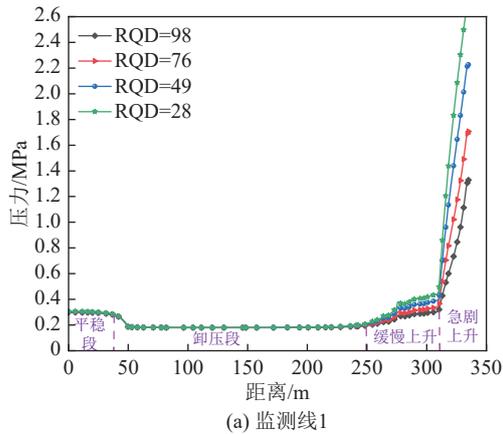


图 19 开挖长度为 260 m 时不同 RQD 值下监测线 1 和 2 的孔隙水压力变化

Fig.19 Pore water pressure variation of monitoring lines 1 and 2 under different RQD values when the excavation length is 260 m

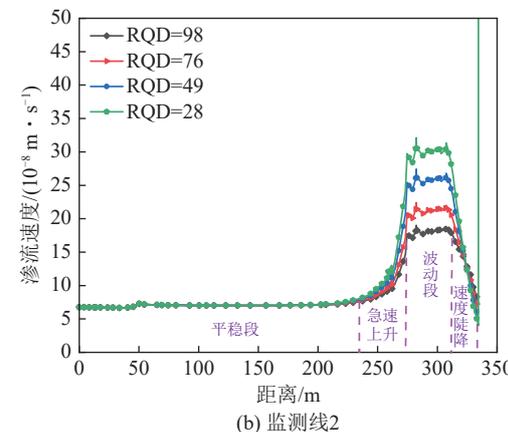
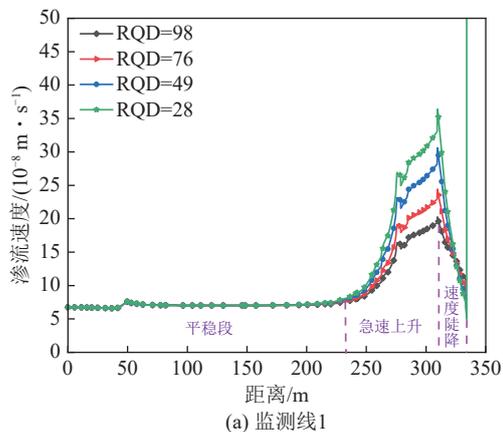


图 20 开挖长度为 260 m 时不同 RQD 值下监测线 1 和 2 渗流速度变化

Fig.20 Seepage velocity variation of monitoring line 1 and 2 under different RQD values when the excavation length is 260 m

76、86、98 的数值分析模型,通过对渗流速度进行体积分,计算单位时间内采空区涌水量,获得了 RQD 值 (6, 11, ..., 86, 98) 的涌水量变化,如图 21 所示。

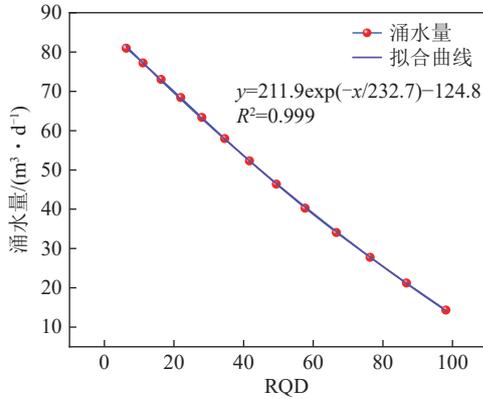


图 21 不同 RQD 值下的采空区涌水量

Fig.21 Goaf water inflow under different RQD values

采空区的涌水量计算结果表明,随着岩体 RQD 值减少,采空区涌水量增加且符合指数函数变化。当 RQD 值接近 6 时,涌水量约为 $82 \text{ m}^3/\text{d}$,当岩体 RQD 值接近 98 时,涌水量约为 $14 \text{ m}^3/\text{d}$ 。计算结果表明,运用岩体 RQD,可以在考虑岩体裂隙结构特征的情况下快速合理的获取矿井涌水量,研究成果对减少因涌水量突增造成的水害事故,促进矿井涌水预测、突水灾害防治及安全评价方面具有一定的意义。

5 结 论

1) 依据断层带的结构组成特征,基于断层带钻孔数据,运用 Comsol Multiphysics 有限元数值模拟软件,结合随机裂隙叠加生成程序,探究了单位面积和单位体积内裂隙数量、岩体 RQD 统计值与渗透率之间的变化关系,获得了数值模型中孔隙水压力、渗流速度和渗透性的变化规律,研究表明裂隙数量与渗透率之间符合指数函数关系,且相较于二维裂隙模型,三维裂隙岩体中渗透率受裂隙数目增加所提升的幅度更为显著。

2) 应用钻孔统计数据,通过钻孔控制区域范围内实体裂隙的线性延展和未探测区域 RQD 值参数赋值相结合的方法,整体 RQD 值是模型构建的设定值,构建了含断层带结构的数值分析模型,通过对岩体多点钻孔分析,建立了岩体质量指标 RQD 与渗透率之间的指数函数关系,实现了应用岩体质量指标进行矿井涌水量预测分析。

6 展 望

1) 采高、采动裂隙、含水层位置、厚度、富水性等

对于矿井涌水量具有重要影响,在下一步工作中进一步开展工程地质因素和岩体质量指标 (RQD) 共同作用下的涌水量分析,通过大量数据分析提高预测的合理性。

2) 本文考虑的是裂隙数量与渗透率之间的一般性规律,后续工作将进行裂隙数量与连通性概率之间的研究,限于论文篇幅,本文仅考虑了岩体中微裂隙导水情况对采空区涌水量变化的影响,断层直接导水等大型涌水通道的影响本文未做考虑。

参考文献(References):

- [1] 武强,赵苏启,孙文洁,等.中国煤矿水文地质类型划分与特征分析[J].煤炭学报,2013,38(6):901-905.
WU Qiang, ZHAO Suqi, SUN Wenjie, et al. Classification of the hydrogeological type of coal mine and analysis of its characteristics in China[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 901-905.
- [2] 董书宁,虎维岳.中国煤矿水害基本特征及其主要影响因素[J].煤田地质与勘探,2007,35(5):34-38.
DONG Shuning, HU Weiyue. Basic characteristics and main controlling factors of coal mine water hazard in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(5): 34-38.
- [3] 钱自卫,黄震,张蕊,等.基于高压注水试验的断层破碎带渗透特性研究[J].岩土工程学报,2021,43(10):1834-1841.
QIAN Ziwei, HUANG Zhen, ZHANG Rui, et al. Permeability characteristics of fracture zone by high-pressure water injection tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10): 1834-1841.
- [4] 曹思文,胡东祥,张民,等.基于压渗的下组煤巷道揭露某典型断层阻渗性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(1):120-127.
CAO Siwen, HU Dongxiang, ZHANG Min, et al. The impermeability of a typical fault exposed by lower coal group roadway based on water injection test by borehole[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(1): 120-127.
- [5] 赵春虎,王世东,靳德武,等.陕北与神东煤炭基地煤矿开采对地下水资源影响研究现状与评价方法[J].绿色矿山,2024,2(2):150-159.
ZHAO Chunhu, WANG Shidong, JIN Dewu, et al. Research status and evaluation methods on the impact of coal mining on groundwater resources in Shaanbei and Shendong coal bases[J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(2): 150-159.
- [6] 陈绍杰,张立波,李振华,等.采煤沉陷区土地建筑利用研究进展与展望[J].绿色矿山,2023,1(1):101-118.
CHEN Shaojie, ZHANG Libo, LI Zhenhua, et al. Research progress and prospect of building utilization in coal mining subsidence areas[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 101-118.
- [7] 冯国瑞,白锦文,马俊彪,等.残采区群柱遗煤资源绿色开采与地下空间开发技术挑战[J].绿色矿山,2023,1(1):91-100.
FENG Guorui, BAI Jinwen, MA Junbiao, et al. Technical challenge of coal pillars resource green mining and underground space developing in the residual mining area[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 91-100.

- [8] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041–1069.
LI Shucai, XU Zhenhao, HUANG Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041–1069.
- [9] 于昊辰, 张建, 韩晓彤, 等. 新疆煤炭资源-水资源-自然生态地理组合类型划分及生态修复策略[J]. 绿色矿山, 2024, 2(2): 191–205.
YU Haochen, ZHANG Jian, HAN Xiaotong, et al. Classification and corresponding ecological restoration strategies for coal mining areas in Xinjiang by integrating coal resources, water resources with physical geography & ecosystem[J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(2): 191–205.
- [10] LIN L, ZHONG Z, CAI Z X, et al. Automatic geologic fault identification from seismic data using 2.5D channel attention U-net[J]. *Geophysics*, 2022, 87(4): IM111–IM124.
- [11] 陈申. 基于分带的断层带注浆加固机理试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
CHEN Shen. Experimental study on grouting reinforcement mechanism of fault zone based on zoning[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [12] CECCATO A, VIOLA G, ANTONELLINI M, et al. Constraints upon fault zone properties by combined structural analysis of virtual outcrop models and discrete fracture network modelling[J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 152: 104444.
- [13] 焦振华, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 工作面过断层动态力学响应特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 54–63.
JIAO Zhenhua, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, et al. Study of dynamic mechanical response characteristics of working face passing through reverse fault[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 54–63.
- [14] CAMANNI G, VINCI F, TAVANI S, et al. Fracture density variations within a reservoir-scale normal fault zone: A case study from shallow-water carbonates of southern Italy[J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 151: 104432.
- [15] 桂辉. 物源组合对煤系断层破碎带渗透性的影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
GUI Hui. Study on the influence of provenance combination on the permeability of fault fracture zone in coal measures[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [16] MA D, WANG J J, LI Z H. Effect of particle erosion on mining-induced water inrush hazard of Karst collapse pillar[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(19): 19719–19728.
- [17] VOLATILI T, AGOSTA F, CARDOZO N, et al. Outcrop-scale fracture analysis and seismic modelling of a basin-bounding normal fault in platform carbonates, central Italy[J]. *Journal of Structural Geology*, 2022, 155: 104515.
- [18] 邢国军, 谢福志, 林牧. 丰满坝基大断层破碎带特征及工程处理措施分析[J]. 水利水电工程设计, 2020, 39(3): 18–21.
XING Guojun, XIE Fuzhi, LIN Mu. Analysis on characteristics and engineering treatment measures of large fault fracture zone in dam foundation of Fengman hydropower station[J]. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(3): 18–21.
- [19] SCHNEEBERGER R, EGLI D, LANYON G W, et al. Structural-permeability favorability in crystalline rocks and implications for groundwater flow paths: A case study from the Aar Massif (central Switzerland)[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(8): 2725–2738.
- [20] ZHAO J H, YIN L M, GUO W J. Stress-seepage coupling of cataclastic rock masses based on digital image technologies[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(8): 2355–2372.
- [21] 隋旺华, 王丹丹, 孙亚军, 等. 矿山水文地质结构及其采动响应[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 21–28.
SUI Wanghua, WANG Dandan, SUN Yajun, et al. Mine hydrogeological structure and its responses to mining[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 21–28.
- [22] Jinhai Zhao, Weilong Zhu, Wenbin Sun, et al. Mine water inrush characteristics based on RQD index of rock mass and multiple types of water channels[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2024, 38(3): 215–229.
- [23] HAINES T J, MICHIE E A H, NEILSON J E, et al. Permeability evolution across carbonate hosted normal fault zones[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 72: 62–82.
- [24] 陈建业, 杨晓松, 党嘉祥, 等. 汶川地震断层带结构及渗透率[J]. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1805–1816.
CHEN Jianye, YANG Xiaosong, DANG Jiexiang, et al. Internal structure and permeability of Wenchuan earthquake fault[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(7): 1805–1816.
- [25] 马丹, 李樯, 张吉雄, 等. 断层破碎带岩体孔隙结构表征与非线性渗流特性[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 666–677.
MA Dan, LI Qiang, ZHANG Jixiong, et al. Pore structure characterization and nonlinear seepage characteristics of rock mass in fault fracture zones[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 666–677.
- [26] 杨晓松, 陈建业, 段庆宝, 等. 地震断层带流体作用的岩石化学-物理响应: 来自矿物学、岩石化学、岩石物理学的启示[J]. 地震地质, 2014, 36(3): 862–881.
YANG Xiaosong, CHEN Jianye, DUAN Qingbao, et al. Geochemical and petrophysical responses to fluid processes within seismogenic fault zones: Implications from mineralogical, petro-chemical and petrophysical data[J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(3): 862–881.
- [27] 韦华鹏, 罗奇斌, 康卫东, 等. 基于不同开采方式的煤矿涌水量预测及其环境影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 21–31.
WEI Huapeng, LUO Qibin, KANG Weidong, et al. Prediction of coal mine water inflow by different mining methods and environment impact analyses[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(1): 21–31.
- [28] GAO J Y, PENG S Y, CHEN G Q, et al. Coupled hydro-mechanical analysis for water inrush of fractured rock masses using the discontinuous deformation analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 156: 105247.
- [29] 魏翔, 杨春和. 钻孔岩体裂隙几何参数确定方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1758–1766.
WEI Xiang, YANG Chunhe. A method of geometric parameter de-

- termination of drilling rock fractures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(9): 1758–1766.
- [30] DEERE D U. Technical description of rock cores for engineering purposes[J]. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1963, 1(1): 18–22.
- [31] 蒋小伟, 万力, 王旭升, 等. 利用 RQD 估算岩体不同深度的平均渗透系数和平均变形模量[J]. *岩土力学*, 2009, 30(10): 3163–3167. JIANG Xiaowei, WAN Li, WANG Xusheng, et al. Estimation of depth-dependent hydraulic conductivity and deformation modulus using RQD[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3163–3167.
- [32] 刘艳章, 盛建龙, 葛修润, 等. 基于岩体结构面分布分形维的岩体质量评价[J]. *岩土力学*, 2007, 28(5): 971–975. LIU Yanzhang, SHENG Jianlong, GE Xiurun, et al. Evaluation of rock mass quality based on fractal dimension of rock mass discontinuity distribution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 971–975.
- [33] 张亚衡, 周宏伟, 谢和平. 粗糙表面分形维数估算的改进立方覆盖法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3192–3196. ZHANG Yaheng, ZHOU Hongwei, XIE Heping. Improved cubic covering method for fractal dimensions of a fracture surface of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3192–3196.
- [34] 宛东, 胡成, 邢文乐. 离散裂隙网络模型在矿井涌水量预测中的应用[J]. *河北地质大学学报*, 2018, 41(1): 65–69. WAN Dong, HU Cheng, XING Wenle. Application of discrete fracture network model to mine water inflow prediction[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 2018, 41(1): 65–69.
- [35] MOTTAHEDI A, ATAIEI M. Fuzzy fault tree analysis for coal burst occurrence probability in underground coal mining[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83: 165–174.
- [36] 许献磊, 马正, 陈令洲. 煤矿地质灾害隐患透明化探测技术进展与思考[J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 56–69. XU Xianlei, MA Zheng, CHEN Lingzhou. Progress and thinking of transparent detection technology for hidden geological hazards in coal mines[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 56–69.
- [37] HUDSON JA, HARRISON J P. *Engineering rock mechanics* [M]. [S. l.]: Pergamon, 1997.
- [38] PRIEST S D, HUDSON J A. Discontinuity spacings in rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1976, 13(5): 135–148.
- [39] 周创兵, 叶自桐, 韩冰. 岩石节理非饱和渗透特性初步研究[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(6): 1–4. ZHOU Chuangbing, YE Zitong, HAN Bing. Preliminary study on unsaturated permeability of rock joints[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(6): 1–4.
- [40] 盖迪, 朱万成, 魏晨慧, 等. 基于损伤力学理论的脉冲压裂模型及模拟研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(5): 945–950. GAI Di, ZHU Wancheng, WEI Chenhui, et al. Pulse fracturing model based on damage mechanics and its numerical simulation[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(5): 945–950.
- [41] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰. 煤岩全应力应变过程渗透性特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(2): 381–385. YANG Yongjie, SONG Yang, CHEN Shaojie. Test study on permeability properties of coal specimen in complete stress-strain process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(2): 381–385.
- [42] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 含瓦斯煤岩固气耦合动态模型与数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(10): 1430–1436. YIN Guangzhi, WANG Dengke, ZHANG Dongming, et al. Solid-gas coupling dynamic model and numerical simulation of coal containing gas[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(10): 1430–1436.
- [43] 程香港, 乔伟, 李路, 等. 煤层覆岩采动裂隙应力-渗流耦合模型及涌水量预测[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(8): 2890–2900. CHENG Xianggang, QIAO Wei, LI Lu, et al. Model of mining-induced fracture stress-seepage coupling in coal seam over-burden and prediction of mine inflow[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(8): 2890–2900.