

法向荷载作用下考虑裂隙空间相关特性的渗透率预测模型

宋明¹, 刘蓬源², 杨雅诗², 温垣滔², 修占国², 史林肯³, 尹乾⁴, 孟凡震²

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056;

2. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266000; 3. 山东黄金集团三山岛金矿, 山东 烟台 261442;

4. 中国矿业大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 岩石裂隙是地下岩体主要渗流通道, 快速准确预测裂隙渗透率对地下工程至关重要。现有修正立方定律多基于低法向或无法向荷载条件下的裂隙粗糙特征与接触面积, 未考虑高法向应力下裂隙开度分布的空间特征。本研究采用点云拼接技术重构岩石裂隙, 并利用高斯随机场方法生成具有不同初始空间相关特性的虚拟裂隙; 其次基于半空间接触理论的加速卷积方法模拟裂隙在法向荷载下的裂隙闭合过程, 并结合局部立方定律计算裂隙渗流; 最后根据数据集, 构建并验证了考虑空间相关长度的渗透率预测模型。结果表明: 提出的预测模型具有较高的预测精度, 整体预测性能优于未考虑空间相关性的水力开度预测公式; 空间相关性较强的裂隙其法向刚度较低, 在高法向荷载下裂隙闭合更为显著, 造成裂隙渗透率相对较低。

关键词: 裂隙渗流; 立方定律; 水力开度预测; 空间相关性; 修正系数

中图分类号: TK521

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0017-09

A Permeability Prediction Model for Rough Fractures Under Normal Stress Incorporating Spatial Correlation Length

SONG Ming¹, LIU Pengyuan², YANG Yashi², WEN Yuantao², XIU Zhanguo²,
SHI Linken³, YIN Qian⁴, MENG Fanzhen²

(1. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China;

2. College of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266000, China;

3. Shandong Gold Group Co., Ltd., SanShanDao Gold Mine, Yantai, Shandong 261442, China;

4. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Rock fractures are the main seepage pathways in underground rock masses, and rapid, accurate prediction of fracture permeability is critical for underground engineering. Existing modified cubic laws are mostly developed from fracture roughness and contact area under low or no normal load. In this study, fractured rock surfaces were first reconstructed using point cloud registration, and numerical virtual fractures with different initial spatial correlation characteristics were generated using Gaussian random fields. The fracture closure process under normal stress was then simulated using an accelerated convolution method based on half-space contact theory, and fracture flow was calculated with the local cubic law. Finally, a permeability prediction model incorporating spatial correlation length was developed and validated using the dataset. The results show that the proposed model achieves high prediction accuracy and outperforms formulas that neglect spatial correlation. Fractures with stronger spatial correlation exhibit lower normal stiffness and more pronounced closure under high normal loads, resulting in relatively lower permeability.

Keywords: fracture flow; cubic law; hydraulic aperture prediction; spatial correlation; correction factor

岩石裂隙是地下岩体中流体运移的主要通道,其渗透率的准确评估对于地下工程稳定性、干热岩开采、二氧化碳地质封存等地下工程的安全性至关重要^[1-3]。单裂隙内不可压缩流体的稳态流动服从纳维-斯托克斯方程。在忽略惯性项并假定流体沿光滑、平直平板流动的条件下,立方定律(cubic law)被广泛用于快速评估裂隙的渗透率,其基本假定为水力开度等于力学开度。然而,在复杂地应力与粗糙非均质裂隙形貌下,立方定律多数情况下高估裂隙的渗透能力。因此,建立兼具适用性与精度的裂隙渗透率预测模型,仍是岩石力学领域亟需解决的关键问题。

针对此问题立方定律的修正研究主要可分为两类:一类通过量化裂隙表面的几何特征参数预测渗透率,例如表面微凸体高度^[4]、节理粗糙度系数(joint roughness coefficient, JRC)^[5]及表面分形维数等。但该方法在真实法向荷载作用下存在局限,由于加载过程中,无论是数值模拟或是室内渗流试验,均难以实时、准确地获取裂隙表面几何信息,从而无法准确计算裂隙表面的 JRC、分形维数等参数。另一类研究则基于裂隙开度分布的统计特征(如算术平均值(e_m)、调和平均值、均方差(standard deviation, σ)、接触面积占比等)对立方定律进行修正。相较于裂隙表面的粗糙特征,开度分布更易在模拟裂隙闭合过程中提取。此类研究采用相对标准差(relative standard deviation, $RSD = \sigma/e_m$)来衡量裂隙的粗糙特征。Brown^[6]首次基于分形平面与局部立方定律,建立了水力开度与 RSD 之间的定量关系。Zimmerman 等^[7]在预测模型中进一步引入接触面积占比以提高渗透率预测精度;Kling 等^[8]分析了两种石英矿物形貌在裂隙闭合过程中的差异,通过引入不同的 RSD 系数对裂隙渗流特性进行预测。

仅采用方差、平均开度、接触面积等参数有时难以准确地表征裂隙开度的分布特征,其空间相关性亦显著影响局部开度分布。研究表明流体流动路径与空间相关长度密切相关^[9],但目前系统探讨空间相关性对渗透率预测影响的研究仍较为有限。Pyrak-Nolte 等^[10]及 Wang 等^[11]分别分析了不同围压下裂隙刚度、空间相关长度等参数对渗流结果的影响,但其提出的渗透率预测关系均未将裂隙接触面积占比纳入统一分析框架。此外,既有研究多基于单一虚拟裂隙生成方法^[12],导致裂隙几何参数分布范围受限,削弱模型在不同裂隙类型或新样本中的泛化与适用能力。

综上所述,为构建一种精度更高、适用范围更广且能反映裂隙空间分布特征的渗透率预测模型,本文以真实劈裂裂隙与高斯随机场方法生成的虚拟裂隙为研究对象,引入弹塑性接触模型模拟法向闭合过程,建立几何参数分布范围宽泛的裂隙数据集,分析初始空间相关长度对裂隙闭合行为、开度演化及渗流特性的影响,揭示了其在控制裂隙通道结构与渗透能力中的作用机制。

1 渗透率预测模型

1.1 立方定律

当假定裂隙为光滑的平直板,流体为粘性的不可压缩流体且处于稳态时,三维纳维-斯托克斯方程可简化为一维立方定律,即裂隙流量与裂隙开度的三次方成正比,如公式(1)所示,进而由公式(2)求得裂隙渗透率(Permeability):

$$Q = -\frac{we_h^3}{12\mu}\nabla P \quad (1)$$

$$k = \frac{e_h^2}{12} \quad (2)$$

式中: Q 为裂隙的流量, m^3/s ; w 为裂隙的宽度, m ; μ 为流体的动力粘度, $Pa \cdot S$; ∇P 为水压梯度, Pa/m ; k 为裂隙的渗透率, m^2 ; e_h 为裂隙的水力开度, m 。

1.2 修正的立方定律

真实岩石裂隙具有复杂的空间几何特征,立方定律难以准确预测其渗透特性。本文选取表1所列的模型一至模型八,作为用于对比验证的修正立方定律模型。将在原有考虑接触面积、粗糙特性的修正模型基础上,进一步纳入裂隙空间特性对渗透率的影响。

该空间特性采用沿渗流方向的半方差函数进行量化表征:

$$\gamma(l) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [e(x_i) - e(x_{i+l})]^2 \quad (3)$$

式中: $\gamma(l)$ 为滞后距离 l 的半方差函数; l 为滞后距离, mm ; N 为开度差的总数量; $e(x_i)$ 为位置 x_i 处的开度值, mm ; $e(x_{i+l})$ 为位置 x_{i+l} 处的开度值。

相关长度等参数用指数模型进行拟合:

$$\gamma(l) = (C - \gamma_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{3l}{a}\right) \right] + \gamma_0 \quad (4)$$

式中: C 为基台值,定义为半方差函数增长至收敛的值; a 代表着空间相关长度,即达到基台值的滞后距离,较低的空间相关长度代表着较弱的空间相关性。

表 1 用于对比验证及本文提出的水力开度预测公式

水力开度预测公式	考虑参数	参考文献	限制条件	编号
$e_h = e_m$	力学开度 e_m	立方定律	无限制条件	模型一
$e_h = e_m \left(\frac{1 - C_r}{1 + C_r} \right)^{\frac{1}{3}}$	接触面积比 C_r	Walsh 1981 ^[13]	无限制条件	模型二
$e_h = \frac{e_m}{\sqrt[3]{1 + 0.6 \left(\frac{\sigma}{e_m} \right)^{-1.2}}}$	粗糙度 $\frac{\sigma}{e_m}$	Amadei and illangasekare 1994 ^[14]	无限制条件	模型三
$e_h = \frac{e_m}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\sigma}{e_m} \right)^3 \right)}}$	粗糙度 $\frac{\sigma}{e_m}$	Kling et al. 2017 ^[8]	无限制条件	模型四
$e_h = e_m \left(1 - 1.5 \left(\frac{\sigma}{e_m} \right)^2 \right)^{\frac{1}{3}} (1 - 2C_r)^{\frac{1}{3}}$	接触面积 C_r , 粗糙度 $\frac{\sigma}{e_m}$	Zimmerman & Bodvarsson 1996 ^[7]	$\frac{\sigma}{e} < 0.816$ & $C_r < 0.5$	模型五
$e_h = \alpha e_m + \beta; e_h = \alpha e^{\beta e_m}$	微凸体的堵塞 α/β	Cao et al. 2019 ^[15]	无限制条件	模型六
$e_h = \frac{e_m}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{e_m} \right)^2}}$	粗糙度 $\frac{\sigma}{e_m}$	Renshaw 1995 ^[16]	无限制条件	模型七
$e_h = \frac{e_m}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{e_m} \right)^2}} (1 - 2NFF)^{\frac{1}{3}}$	粗糙度 $\frac{\sigma}{e_m}$; 无渗流面积占比 NFF	Javanmard et al. 2021 ^[17]	$NFF < 0.5$	模型八
$e_h = \alpha \frac{e_m}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{e_m} \right)^2}} (1 - C_r)^\beta$	粗糙度 $\frac{\sigma}{e_m}$; 接触面积 C_r	本文用作对比	无限制条件	模型九
$e_h = \alpha \frac{e_m}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{e_m} \right)^2}} (1 - C_r)^\beta \left(1 - \frac{L_c}{L_0} \right)^\gamma$	粗糙度 $\frac{\sigma}{e_m}$; 接触面积 C_r ; 相关长度 $\frac{L_c}{L_0}$	本文提出	无限制条件	模型十

基于此,我们提出结合空间相关长度的裂隙渗透率预测模型:

$$e_h = \alpha \frac{e_m}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{e_m} \right)^2}} (1 - C_r)^\beta \left(1 - \frac{L_c}{L_0} \right)^\gamma \quad (5)$$

式中: e_m 为裂隙的平均力学开度; α 、 β 、 γ 为拟合参数; L_c 为空间相关长度; L_0 为裂隙沿渗流方向的长度。

本文选取模型九作为对照模型,以系统评估空间相关特征在提升裂隙渗透率预测精度中的贡献。此外,所提出的预测模型(式(5))在数学形式上避免了单项表达中可能出现负值的情况,从而显著提高了模型的稳定性与适用范围。

2 裂隙生成、闭合、渗流模拟方法

2.1 裂隙生成方法

选取两类裂隙(劈裂拉伸裂隙与高斯随机场生成虚拟裂隙)作为渗透率预测的数据集。其中,劈裂拉伸裂隙的制备流程为:以 $\Phi 50 \times 100$ mm 的粗粒与细粒花岗岩圆柱式为试验对象,通过巴西劈裂试验形成拉伸裂隙,结合三维扫描与点云拼接技术,

完成裂隙的三维重构^[18],重构流程如图 1 所示,通过将两部分半圆形试样的点云配准至外侧参考点云坐标系,可将上下裂隙面之间的法向距离定义为无应力状态下的裂隙初始开度。

为获得更多裂隙模型开展渗流模拟,将上表面点云沿 X 方向平移指定距离(具体距离见表 2),以模拟剪切形成新的三维粗糙裂隙,同时选用左侧及右侧各 40 mm × 40 mm 的正方形区域作为研究对象。劈裂裂隙开度示意图如图 2 所示,通过图 2 的裂隙开度柱状分布图可知,右侧裂隙接触面积远大于左侧,以及左、右裂隙区域的相关长度分别为 7.4、4.8 mm。据此可判定,裂隙左、右两侧具有显著不同的几何特征,可分别进行渗流模拟。

虚拟裂隙采用 R 语言 gstat 程序包,基于高斯随机场理论生成。裂隙面尺寸设定为 100 mm × 100 mm,对应离散网格为 512 × 512,从而构建对数正态分布的裂隙开度场。通过分别控制初始力学开度、相对粗糙程度及空间相关长度,可获得具有不同空间结构特征的裂隙几何形貌(见表 2)。图 3 展示了初始力学开度为 0.5 mm 时,不同参数组合生成的裂隙表面形貌结果。通过引入两种具有代表性的裂

隙数据集,为后续数值模拟提供了覆盖更宽泛、更具代表性的几何特征范围,从而有效避免了因数据来

源单一或裂隙形态分布受限而导致的渗透率预测模型过拟合现象。

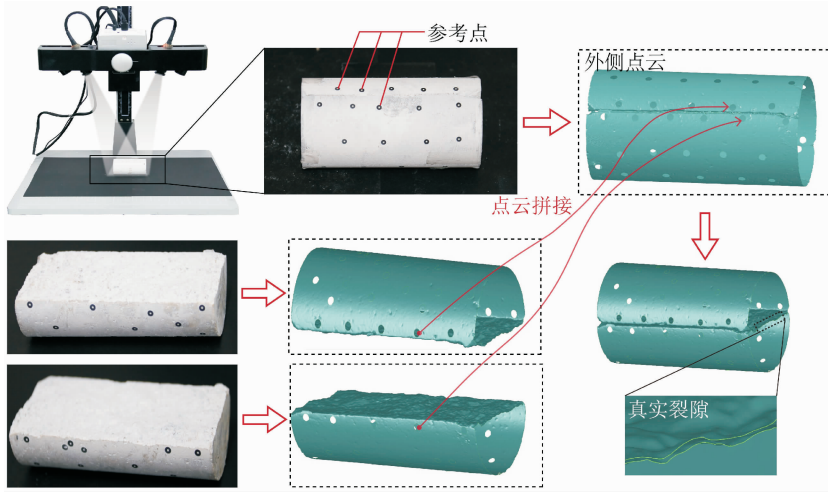


图 1 三维裂隙重构过程示意图

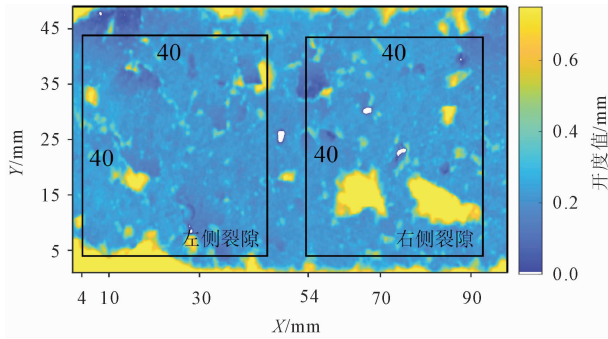


图 2 劈裂裂隙开度示意图

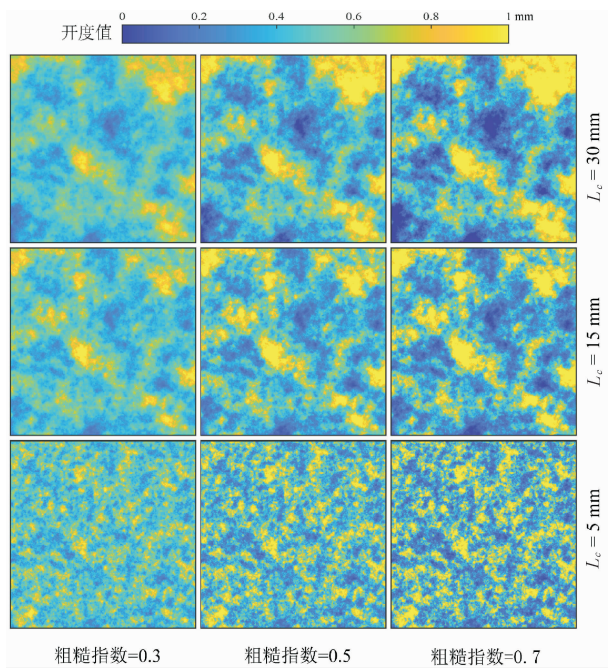


图 3 不同参数下高斯随机场生成裂隙面的开度分布图

2.2 裂隙法向闭合方法

采用开源的 Python 程序 ContactMechanics^[19] 模拟裂隙在法向荷载作用下的闭合过程。该程序基于半空间弹性接触理论,利用快速傅里叶变换 (FFT) 加速卷积计算,其假定接触体为无摩擦、线弹性且各向同性的材料。裂隙上下表面的接触行为等效为刚性复合平面向弹塑性的半空间接触。模拟所需参数,假定裂隙上下表面 $E_1 = E_2 = E, \nu_1 = \nu_2 = \nu$, E 为岩石试样的弹性模量, ν 为岩石试样的泊松比^[20]。在弹塑性模拟中,岩石硬度 (H) 采用文献中常用 H/E^* 的方法计算。对应的表面位移采用如下公式计算:

$$u(x, y) = \iint G(x - x', y - y') p(x', y') dx' dy' \quad (6)$$

式中: $u(x, y)$ 为观测点 (x, y) 处的位移; $p(x', y')$ 为源点 (x', y') 处的分布载荷; $G(x - x', y - y')$ 为 Boussinesq 解推导得到的表面格林函数,用于描述载荷在源点 (x', y') 对观测点 (x, y) 处响应的贡献 x' 和 y' 为积分变量, $dx' dy'$ 为面积微元。

该式表明,观测点处的响应由源区域各点源泉项通过 Green 函数加权叠加得到。

求解参数设置:复合面可穿透最大误差距离为 1×10^{-10} ,求解最大迭代次数为 1 500 次。不同法向荷载作用下,裂隙面每点的开度为:

$$e'_{mi}(x, y) = e_{mi}(x, y) - (d_0 - u(x, y)) \quad (7)$$

式中: $e'_{mi}(x, y)$ 为受到法向力后局部的裂隙开度; $e_{mi}(x, y)$ 为初始裂隙每一点对应的局部开度; d_0 为

刚体的垂直移动距离。

因此,裂隙的法向闭合定义为 $d_0 - u(x, y)$ 。在本文中规定,初始裂隙模型中开度小于 $20 \mu\text{m}$ 的区域判定为接触区域,后续模拟法向闭合过程中,将裂

隙承受法向支撑力的区域定义为接触区域。裂隙法向闭合过程的模拟法向荷载范围为 $0 \sim 70 \text{ MPa}$,模拟步长为 5 MPa ,生成裂隙的总个数如表2所示(初始法向荷载采用 0.5 MPa ,确保裂隙存在接触)。

表2 两类裂隙的详细参数

三维裂隙类型	参数			尺寸/mm	应力/MPa	裂隙总数/个
高斯随机场生成	初始开度/mm	相对粗糙度(-)	相关长度/mm	100×100	0:5:70 (15组)	1125
	0.2/0.3/0.4/0.5/0.6	0.3/0.5/0.7	5/10/15/20/30			
天然裂隙错位	岩石个数	错位距离/mm	位置	40×40	0:5:70 (15组)	600
	2	0/0.2/0.3/0.5/1/2/3/5/8/10	2			

2.3 渗流模拟方法

假定裂隙流体为稳态层流,采用局部立方定律(local cubic law)模拟裂隙渗流:

$$\nabla \cdot \left[\frac{e_{mi}^3(x, y)}{12\mu} \nabla p \right] = 0 \quad (8)$$

式中: $\nabla p, \mu$ 分别为裂隙局部开度、压力梯度以及动力粘度。

使用 COMSOL Multiphysics 求解上述控制方程。渗流模拟设置示意图如图4所示,为保持裂隙内流体处于层流状态,设定上下游水压差为 10 Pa ,边界条件如图4(a)所示,经过网格敏感性分析(图4(b)),采用边长为 0.05 mm 的正方形网格,以控制网格数量带来的计算误差。基于模拟结果,通过对边界积分获得裂隙流量,进而计算得到渗透率。

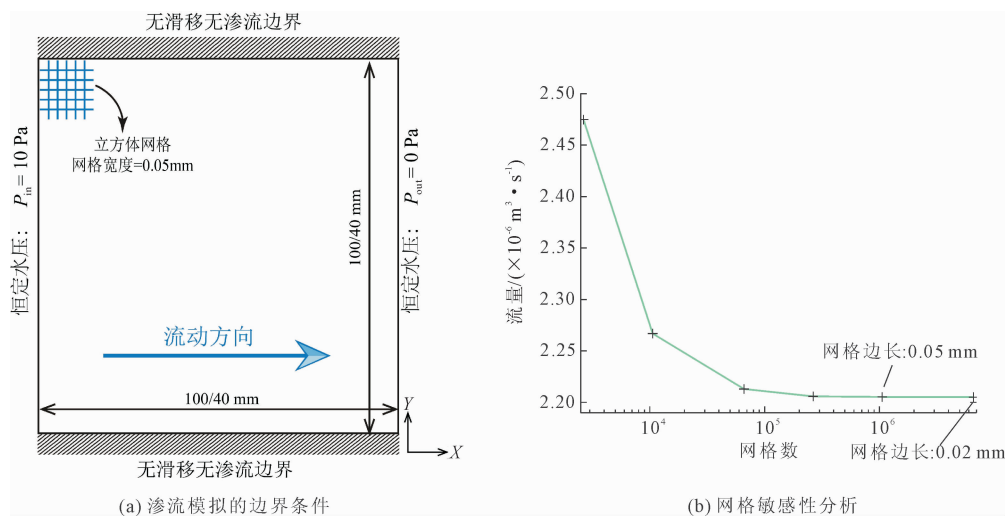


图4 渗流模拟设置示意图

2.4 拟合及验证方法

经过上述裂隙生成、施加法向荷载及渗流模拟流程,共获得 1 725 组裂隙渗透率数据。为了排除奇异数据影响,对原始数据集进行筛选。剔除了力学开度(e_m)大于 0.5 mm ,以及渗透率(k)小于 $9 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 的数据,得到有效数据为 1 424 组。本文提出的渗透率预测公式(式(5))含有三个拟合参数,而模型六、九同样含有两个拟合参数。为检验模型的泛化能力,将有效数据集随机划分为两部分,其中 70% 的数据用于参数拟合,其余 30% 数据用于验证拟合参数的有效性。同时,模型五与模型八受相对粗糙度或接触面积适用范围的限制,水力开度结果

为正的有数据仅为 163 组与 1 150 组(水力开度预测为负不纳入后续误差分析),其余模型带入所有数据进行验证。模型预测性能采用决定系数(R^2),均方根误差($RMSE$),以及相对误差指标(ξ)来进行对比评估:

$$\xi = \left| \frac{e_{h_pred} - e_{h_true}}{e_{h_true}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

3 渗透率预测模型验证结果

3.1 外荷载对裂隙几何形貌特征的影响

为分析空间相关长度对裂隙力学行为的影响,当初始力学开度为 0.5 mm 、粗糙度指数为 0.5 时,

五种不同初始相关长度裂隙随围压变化的几何特征演化规律如图 5 所示。

初始相关长度越小,裂隙法向刚度越大,力学开度降幅越缓。裂隙空间相关长度随围压增大整体呈下降趋势,且初始相关长度越大,其衰减幅度越显

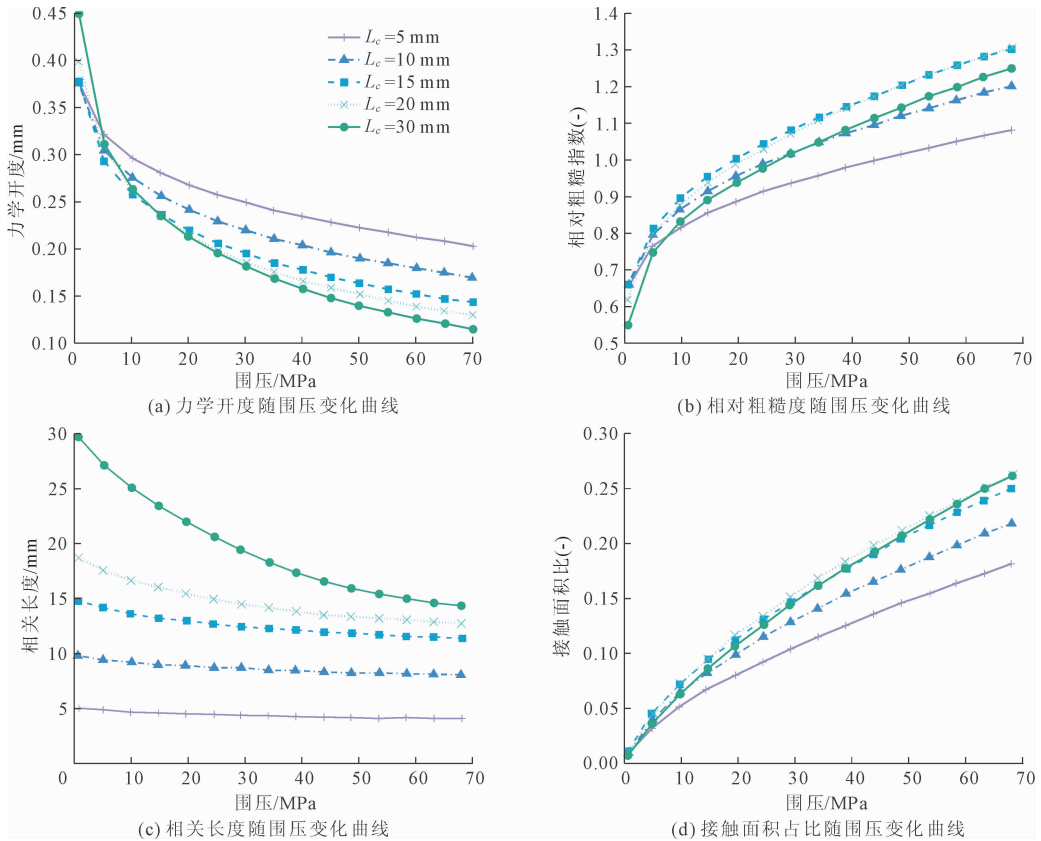


图 5 不同相关长度裂隙在外荷载下的几何参数演化规律

3.2 修正的立方定律模型预测结果

图 6 为两类裂隙在模拟中渗透率与力学开度的关系。结果表明,立方定律高估了裂隙的渗透特性,其预测渗透率可视为真实渗透率的上限。在裂隙开度相同时(以 0.1 mm 为例),渗透率可跨近两个数量级,并在一个数量级范围($6 \times 10^{-11} \sim 6 \times 10^{-10} \text{ m}^2$)内呈现显著离散性。由此可见,仅依赖裂隙力学开度这一单一参数难以准确表征和预测裂隙的渗透特性。同时,相较于真实重构的劈裂拉伸裂隙,高斯随机场生成的虚拟裂隙表现出更为显著的线性分布特征,而错位的劈裂拉伸裂隙并没有呈现出明显渗透率随开度降低而线性下降的明显趋势。由此表明,在裂隙渗透率预测过程中,引入来源多样的裂隙数据集有助于避免预测模型陷入对单一裂隙类型或几何特征分布的依赖,从而提高模型的适用性与泛化能力。

著,表明在外荷载作用下裂隙几何结构的空问相关性逐渐减弱。接触面积占比总体上与初始相关长度呈正相关关系,初始相关长度较大的裂隙更易形成较大的接触面积。

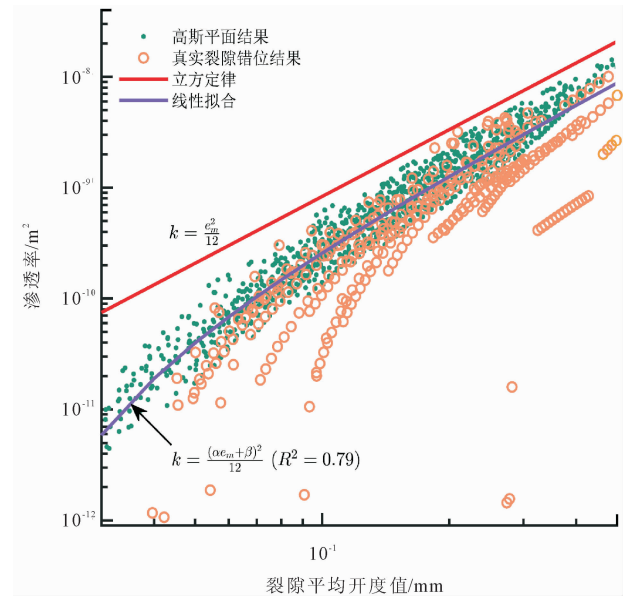


图 6 两类裂隙模型开度与渗透率分布对比图

图 7 总结了十种渗透率预测模型的 $RMSE$, R^2 , 以及相对误差分布结果图。结果表明,本文提出的结合空间相关长度的渗透率预测模型在三项指标上均表现出最优的综合预测性能。通过 70% 数据集对模型九与模型十拟合得到参数:模型九 $\alpha = 1.014, \beta = 1.44, R^2 = 0.85$;模型十 $\alpha = 1.066, \beta = 1.44, \gamma = 0.334, R^2 = 0.92$ 。结果表明,当预测模型中引入相关长度参数时,裂隙渗透率的预测精度可得到显著提升。相比之下,仅考虑接触面积或相

对粗糙度参数的模型预测性能普遍较弱,表明其适用范围的局限性。图 7(c) 所示的相对误差箱线图表明,多数水力开度预测模型的平均相对误差均大于其中位数,说明误差分布呈现明显的右偏特征,即少量误差较大的样本显著抬高了平均误差水平。相比之下,模型八和模型五的相对误差表现相对较优,这可能与其适用条件有关:部分粗糙度过高,接触面积过大的数据点无法被纳入模型验证范围,从而在统计意义上降低了整体误差水平。

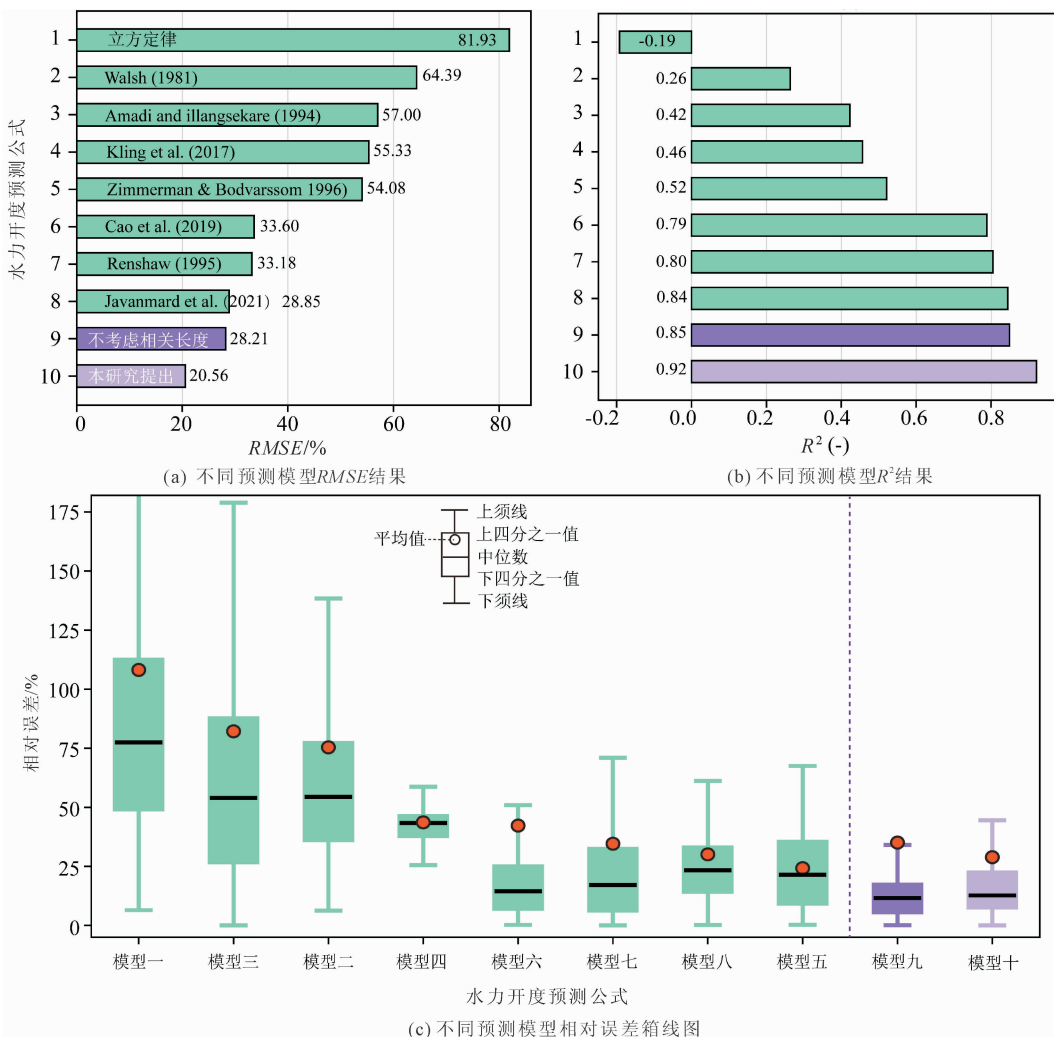


图 7 不同渗流预测模型误差分析结果

4 讨论

通过不同初始相关长度裂隙在不同围压下的局部流量分布,如图 8 所示,讨论空间相关长度对裂隙的渗透特征的影响。由图 8 可知,较离散的接触面积不会显著改变流体流线。初始相关长度较低的裂隙在数值模拟中表现出更为均匀的局部流量分布,即使在较高围压条件下(60 MPa),其优先流动路径

仍较为分散,通道化渗流特征不明显,因此在 30 MPa 和 60 MPa 围压下获得的总流量显著高于其他裂隙类型。与之相反,初始空间相关长度较高的裂隙在高围压作用下形成较大的接触面积占比,高接触面积显著增强流体流动的迂曲效应^[21],促使裂隙内渗流逐渐向通道化流动转变,从而降低整体渗透能力。此外,对比不同相关长度裂隙的流动路径可发现, $L_c = 15 \text{ mm}$ 与 $L_c = 5 \text{ mm}$ 裂隙之间的优先流动

路径差异大于 $L_c = 30 \text{ mm}$ 与 $L_c = 15 \text{ mm}$, 表明在相关长度相对较小的区间内, 裂隙渗流特征对空间相

关结构更加敏感。

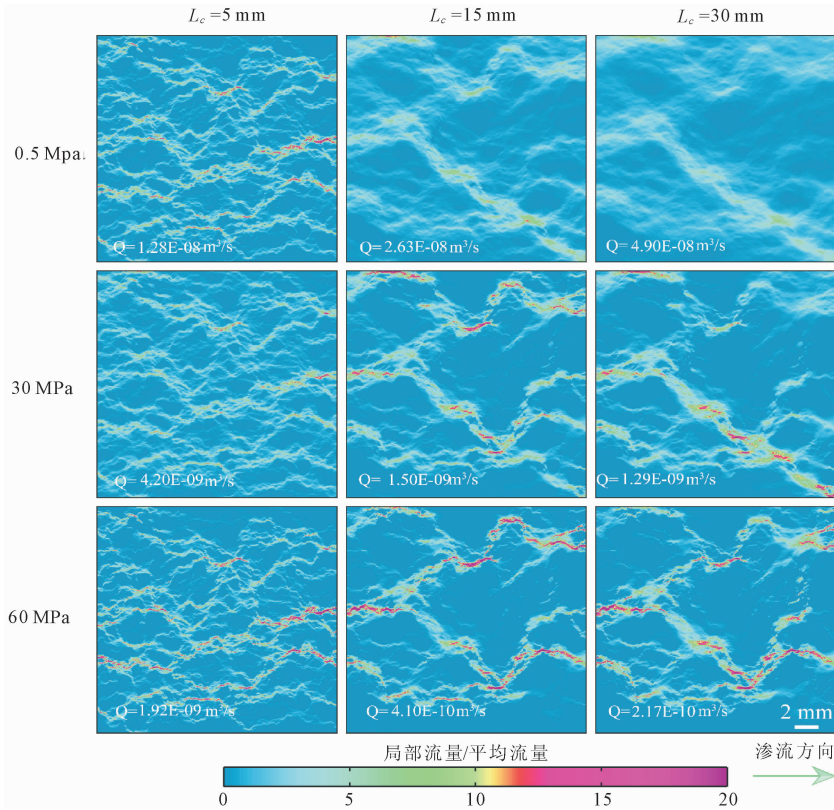


图 8 不同相关长度裂隙在外荷载下的局部流量分布图

5 结 论

基于真实岩石劈裂裂隙与虚拟生成裂隙, 开展了三维裂隙法向闭合与渗流耦合模拟研究。在此基础上, 结合裂隙渗流响应特征, 建立了考虑空间相关特性的裂隙渗透率预测模型, 并据此得出以下结论:

(1) 裂隙的初始空间相关长度显著影响其法向闭合刚度, 从而控制裂隙在法向荷载作用下的力学闭合行为。初始相关长度较大的裂隙整体法向刚度相对较低, 在相同法向应力条件下表现出更大的开度闭合量, 对应的接触面积占比亦更高。

(2) 提出了考虑空间相关性的裂隙渗透率预测公式, 并在错位劈裂裂隙与高斯随机场生成裂隙的数据集上进行了验证。考虑空间相关特性的渗透率预测公式表现出更好的预测精度, 其预测性能不仅优于文献中提到未考虑空间相关性的渗透率模型, 也优于本文中用于对比未引入空间相关特征的预测模型。

(3) 空间相关长度通过调控裂隙开度的空间分布结构, 影响裂隙内流体的流动形态。随着空间相

关性增强, 裂隙内更易形成明显的通道化流动特征, 流体流动路径的迂曲程度随之增大, 从而导致裂隙整体渗透率的降低。

参考文献:

- [1] 黄涵钰, 孟凡震, 李沐子, 等. 工质密度和储层渗透率演化对 EGS 系统传热效能的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(04): 71-79.
- [2] 易庆波, 杨进军, 牛志强, 等. 水电工程危岩体数据采集与稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(01): 160-164.
- [3] 胡明慧, 刘日成, 李树忱, 等. 废弃油气藏气体能源存储过程中不同浸润界面类型的断层活化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(01): 75-89.
- [4] 申林方, 曾叶, 王志良, 等. 考虑几何形貌特征的粗糙岩体裂隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 2704-2711.
- [5] 徐青, 喻亚奇. 岩石裂隙渗流立方定律的修正及应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(08): 1013-1021.
- [6] Brown S R. Fluid flow through rock joints; The effect of surface roughness[J]. Journal of Geophysical Research;

- Solid Earth, 1987,92(B2):1337-1347.
- [7] Zimmerman R W, Bodvarsson G S. Hydraulic conductivity of rock fractures[J]. *Transport in Porous Media*, 1996, 23:1-30.
- [8] Kling T, Schwarz J O, Wendler F, et al. Fracture flow due to hydrothermally induced quartz growth [J]. *Advances in Water Resources*, 2017,107:93-107.
- [9] 钟振,闫金秀,徐从强,等.粗糙单裂隙渗透性尺寸效应及其影响因素研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021,52(04):192-201.
- [10] Pyrak-Nolte L J, Nolte D D. Approaching a universal scaling relationship between fracture stiffness and fluid flow [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(01):10663.
- [11] Wang Lichun, Cardenas M B. Development of an empirical model relating permeability and specific stiffness for rough fractures from numerical deformation experiments [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016,121(07):4977-4989.
- [12] He Xinxin, Yu Pengliang, Eijsink A, et al. Co-evolution of specific stiffness and permeability of rock fractures offset in shear [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2025,130(05):e2024JB030633.
- [13] Walsh J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1981,18(05):429-435.
- [14] Amadei B, Illangasekare T. A mathematical model for flow and solute transport in non-homogeneous rock fractures [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1994,31(06):719-731.
- [15] Cao Cheng, Xu Zengguang, Chai Junrui, et al. Radial fluid flow regime in a single fracture under high hydraulic pressure during shear process [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,579:124142.
- [16] Renshaw C E. On the relationship between mechanical and hydraulic apertures in rough-walled fractures [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B12):24629-24636.
- [17] Javanmard H, Ebigho A, Walsh S D C, et al. No-flow fraction (NFF) permeability model for rough fractures under normal stress [J]. *Water Resources Research*, 2021,57(03):e2020WR029080.
- [18] 陈跃都.水力耦合作用下岩体粗糙裂隙渗流及滑移失稳机理研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [19] Deng Qinglin, Shangguan Jianming, Ji Yinlin, et al. Relating normal stiffness to permeability of a deformed self-affine rough fracture using its geometric properties [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024,17(05):2829-2842.
- [19] Röttger M C, Sanner A, Thimons L A, et al. Contact engineering-create, analyze and publish digital surface twins from topography measurements across many scales [J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2022,10(03):035032.
- [20] Liu Pengyuan, Meng Fanzhen, Yue Zhufeng, et al. A multi-device data fusion method for 3D rock fracture reconstruction: Development, comparison, and implications for hydro-mechanical simulations [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2026, 202:106507.
- [21] 熊峰.裂隙岩体非线性渗流特性及水热耦合模拟研究[D].武汉:武汉大学,2020.

(上接第16页)

- [28] 谢遵党,杨顺群,张雪才,等.一种基于大数据技术的水工金属结构设计方法 [P]. 河南省:CN113609555B, 2021-11-05.
- [29] 林秀山.黄河小浪底水利枢纽规划设计丛书——枢纽规划设计[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [30] 西北水电勘测设计研究院,西安理工大学.黄河小浪底工程偏心铰弧门压紧式止水试验总报告[R].郑州:黄河勘测规划设计研究院有限公司,1996.
- [31] 谭莹.偏心铰弧门面板抗磨防腐涂层研究与应
用[J]. *中小企业管理与科技(下旬刊)*, 2018,11(02):152-153.
- [32] 水电站机电设计手册编写组.水电站机电设计手册金属结构(一)[M].北京:水利电力出版社,1988.
- [33] 哈佳,张雪才,陈丽晔,等.平面闸门全过程三维参数化设计及应用[J]. *水电能源科学*, 2023,41(05):178-181,177.
- [34] 张雪才,陈丽晔,王正中.水工弧形闸门结构的 APDL 建模方法[J]. *图学学报*, 2021,42(02):271-278.