

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.07.006

基质粒径变化对裂隙-基质系统中 水流运动的影响规律研究

查 蓉, 钱家忠, 马 雷, 严小三, 黄逸航

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:文章设计 1 组裂隙-基质模型, 选用 3 种不同粒径的石英砂填充裂隙-基质系统的基质区域, 研究不同粒径的石英砂对裂隙-基质模型中水流特征的影响。结果表明: Forchheimer 方程的决策系数均高于达西定律的决策系数, 与达西定律相比, Forchheimer 方程能更好拟合裂隙-基质系统内流体的非线性流动; Kozeny-Carman 模型模拟结果显示, 3 种基质粒径的裂隙-基质系统中基质渗透系数与特征粒径之间都呈线性关系; 裂隙-基质系统中水力开度越大, 裂隙渗透性越弱, 非达西渗流系数越大, 非达西渗流现象越明显。

关键词:基质粒径; 裂隙-基质系统; 渗透系数; 非达西系数; 水力开度

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2026)07-0905-05

Study on the law of influence of matrix particle size change on water flow in fracture-matrix system

ZHA Rong, QIAN Jiazhong, MA Lei, YAN Xiaosan, HUANG Yihang

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In this paper, a set of fracture-matrix models were designed, and three kinds of quartz sand with different particle sizes were selected to fill the matrix region of the fracture-matrix system, and the influence of quartz sand with different particle sizes on the water flow characteristics in the fracture-matrix model was studied. The results show that the decision coefficients of the Forchheimer equation are higher than those of Darcy's law, and the Forchheimer equation fits the nonlinear fluid flow in the fracture-matrix system better than Darcy's law. The simulation results of the Kozeny-Carman model show that there is a linear relationship between the matrix permeability coefficient and the characteristic particle size in the fracture-matrix system across all three matrix particle sizes. The larger the hydraulic opening in the fracture-matrix system, the weaker the fracture permeability, the greater the non-Darcy seepage coefficient, and the more obvious the non-Darcy seepage phenomenon.

Key words: matrix particle size; fracture-matrix system; permeability coefficient; non-Darcy coefficient; hydraulic opening

裂隙岩体由网状裂隙和裂隙周围的基质组成, 在岩体中, 流体的主要流动路径通常由裂隙主导, 但是同样会渗透至裂隙周围的基质中。若忽略基质渗透性的影响, 则会导致预测裂隙岩体中

水流流动的误差增大。由于裂隙的非均质性和基质的低渗透性, 研究人员难以对裂隙岩体中水流进行定量刻画, 因而对于裂隙-基质系统中水流特征尚不完全清楚。

收稿日期: 2024-05-15; **修回日期:** 2024-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42072276); 国家自然科学基金联合基金资助项目(U2267218)

作者简介: 查 蓉(1998—), 女, 安徽安庆人, 合肥工业大学硕士生;

钱家忠(1968—), 男, 安徽凤阳人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: qianjiazhong@hfut.edu.cn;

马 雷(1985—), 男, 安徽灵璧人, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师。

以往对于裂隙中水流的研究往往忽略基质渗透性的影响。文献[1]结合 Forchheimer 方程,提出裂隙岩石黏性和惯性渗透率的压力依赖性解析表达式,发现流体惯性损耗和裂隙扩张通过相互竞争对渗透率的演变产生影响;文献[2]通过耦合孔隙流体扩散和应力-应变分析来研究裂隙孔隙水压力分布变化,并对裂隙面渗透率和渗漏特性变化的敏感性进行分析;文献[3]应用 3D 黏结块模型对裂隙岩体的强度和渗透率进行数值量化,结果表明,渗透率与峰前加载阶段不渗透岩体的强度呈正相关。

事实上,构成裂隙的基质都有渗透性,已有研究表明基质的渗透性和裂隙与基质内的水量交换都会影响裂隙-基质系统中流体的流动。在裂隙-基质系统中,裂隙与基质之间存在着复杂的耦合作用。文献[4]通过有限元模拟建立由多孔基质和单个粗糙表面组成的双介质模型,发现当基质的渗透系数大于裂隙的渗透系数时,达到稳定状态所需的时间更少;文献[5]通过渗流实验探究裂隙开度和注入压力对裂隙-基质系统中流体流量交换的影响,结果表明,流量交换与开度和压力分别呈明显的正相关和负相关;文献[6]通过数值模拟分析裂隙与基质的渗透率之比对基质-裂隙流动传递项的影响,发现随着裂隙与基质的渗透率之比增加,基质-裂隙流动传递项增加;文献[7]对不同水力梯度下的裂隙-基质系统进行室内实验,分析了基质影响下裂隙-基质系统中的水流规律。

已有相关研究只是定性表征裂隙-基质系统中的水量交换,基质渗透性对裂隙岩体渗透特性的影响目前尚不明确。因此,本文分别对基质粒径变化下,裂隙-基质系统内基质和裂隙中流体的流态进行量化分析,揭示其中非达西流现象产生的主要因素。

1 实验设计与实验步骤

1.1 实验设计

实验装置由水流补给装置、裂隙-基质系统、排水装置 3 个部分组成,其中水流补给装置由 2 个进水箱构成,排水装置由 2 个出水箱构成。装置的核心是裂隙-基质系统模型,如图 1 所示。模型整体是一个长方体,长 60 cm、宽 12 cm、高 21 cm;基质区和裂隙区由红色虚线区分,水流分别从基质和裂隙进水口渗入,交换流量后分别从基质和裂隙出水口流出。虚线上部是基质区,长 60 cm、宽 12 cm、内部高 18 cm;基质区内的填充材料是石英砂,石英

砂粒径分别采用[3,4) mm、[2,3) mm、[1,2) mm,基质相应的孔隙度分别为 0.13、0.17、0.24。虚线下部是裂隙区,长 60 cm、宽 12 cm、内部高 2 mm,裂隙表面是光滑平面。裂隙区与基质区之间为有过滤网的有机玻璃隔板,玻璃隔板上钻小孔,方便裂隙和基质间的水量交换。

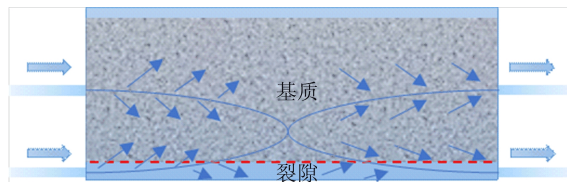


图 1 裂隙-基质系统模型示意图

1.2 实验步骤

将实验装置注满水,排出里面的空气,检查装置的气密性。首先在模型的基质区填充粒径为[3,4) mm 的石英砂,压实填平;然后调节进水箱和出水箱的高度,使侧压板水头达到预定水头后,测量水流的流量;保持裂隙出水位和基质出水位一致,调节基质进水位,在不同的水力梯度下进行水流实验;更换石英砂,重复上述实验步骤,完成 3 种石英砂粒径的水流实验。

2 实验结果分析

2.1 不同基质粒径下基质中流体流动

2.1.1 平均流速和水力梯度拟合方程

在基质水头大于裂隙水头情况下,对 3 种不同粒径的裂隙-基质系统进行水流实验,根据实验结果计算水力梯度和平均流速,分别用 Forchheimer 方程和达西定律分析基质中平均流速(v_m)和水力梯度(J)的关系,结果如图 2 所示,见表 1 所列。

从图 2 可以看出:3 种不同基质粒径下,裂隙-基质系统内基质中流速与水力梯度(v_m-J)关系曲线有很大差异;基质粒径越大, v_m-J 曲线越陡峭,即随着水力梯度增大,基质中流速增长曲线变化加快;与此相反地,基质粒径越小, v_m-J 曲线越平缓,即随着水力梯度增大,基质中流速增长曲线逐渐变缓。在同一水力梯度下,基质粒径越大,裂隙-基质系统内基质中流速越大;与此相反地,基质粒径越小,基质中的流速越小;由此可知基质粒径的大小会影响裂隙-基质系统内基质中流体的非线性流动。上述 v_m-J 曲线随基质粒径变化而出现不同趋势的现象,对应着表 1 中 Forchheimer 方程系数、达西定律系数的变化,可以发现,随着基质粒径增大,Forchheimer 方程的惯性项

系数 A 和黏性项系数 B 会增大,达西定律的渗透系数 K 也会增大。表 1 中拟合结果与文献[7]一致,表 1 中 Forchheimer 方程的决策系数 R_F^2 均大于达西定律的决策系数 R_D^2 ,表明与达西定律相比,Forchheimer 方程能更好拟合裂隙-基质系统内基质中流体的非线性流动;[3,4) mm 下 R_F^2 与 R_D^2 的差值较大,而[2,3) mm、[1,2) mm 下 R_F^2 与 R_D^2 的差值较小,说明基质粒径越大,基质中流体更容易出现非达西流动。

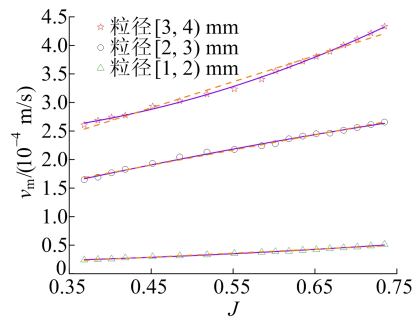


图 2 3 种粒径下裂隙-基质系统中基质水流速与水力梯度关系

表 1 3 种粒径下裂隙-基质系统中 v_m-J 关系数学拟合结果

粒径/mm	Forchheimer 方程		达西定律	
	方程	R_F^2	方程	R_D^2
[3,4)	$J=0.000\ 053v_m^2+0.000\ 058v_m$	0.998	$J=0.000\ 014v_m$	0.983
[2,3)	$J=0.000\ 049v_m^2+0.000\ 054v_m$	0.995	$J=0.0000\ 052v_m$	0.993
[1,2)	$J=0.000\ 013v_m^2+0.000\ 014v_m$	0.995	$J=0.000\ 002v_m$	0.986

2.1.2 渗透系数与基质特征粒径相关性

基质中流体的渗流特征常用渗透系数来表征,基质的渗透性与基质粒径有很大关系。Kozeny 采用介质的比表面积及孔隙率来间接反映孔隙结构影响,其理论推导结果表明,渗透系数与孔隙率的立方成正比^[8]。Carman 考虑到孔隙流体实际流动路径是曲线而非直线,引入孔隙流体流动路径的迂曲度改进 Kozeny 模型,其改进后的渗透系数模型即著名的 Kozeny-Carman (KC)模型^[8]。KC 模型考虑了基质特征粒径和孔隙度对渗透系数预测的影响,其表达式为:

$$K = \frac{n^3}{36C_1\tau^2(1-n)^2}d_{\text{eff}}^2 \frac{\rho g}{\mu} \quad (1)$$

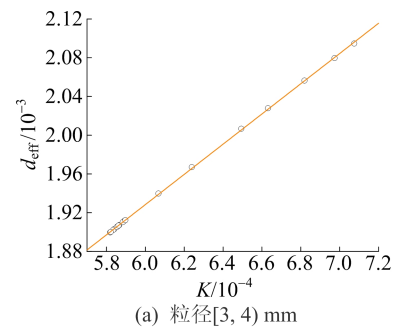
其中: K 为渗透系数; n 为基质孔隙度; d_{eff} 为特征粒径; ρ 为流体密度; g 为流体重力加速度; μ 为基质中流体的动力黏滞系数; C_1 为经验常数; τ 为流动的迂曲度,对于球形颗粒, τ 取值为 2 且 C_1 取值为 2.5。

本研究分别拟合 3 种不同基质粒径下基质渗透系数和特征粒径的实验数据,结果如图 3 所示。

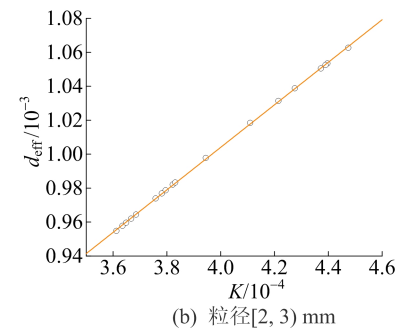
从图 3 可以看出,3 种不同基质粒径下,裂隙-基质系统中基质的渗透系数与特征粒径之间有明显的线性关系,验证了 KC 模型中渗透系数与基质特征粒径呈线性关系的合理性。

3 种不同基质粒径下,基质渗透系数都随着特征粒径增大而逐渐增大,并且拟合曲线的斜率存在一定差别,这表明除了基质粒径的影响外,基质孔隙度和颗粒形状都对渗透系数有较大影响。此结论与文献[8]一致,表明孔隙结构对渗透系数

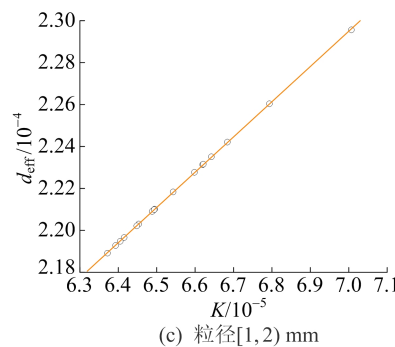
具有一定的影响。



(a) 粒径[3, 4) mm



(b) 粒径[2, 3) mm



(c) 粒径[1, 2) mm

图 3 裂隙-基质系统中基质的渗透系数与特征粒径的关系

2.2 不同基质粒径下裂隙中流体流动

2.2.1 平均流速与水力梯度拟合方程

根据基质水头大于裂隙水头情况下,3 种不同粒径的裂隙-基质系统水流实验结果,计算水力梯度和平均流速,分别用 Forchheimer 方程和达西定律分析裂隙中平均流速(v_f)和水力梯度(J)的关系,结果如图 4 所示。3 种粒径下裂隙-基质系统中 v_f - J 关系数学拟合结果见表 2 所列。

从图 4 可以看出:3 种不同基质粒径下,裂隙-基质系统内裂隙中流速与水力梯度(v_f - J)关系曲线也有很大差异;基质粒径越大, v_f - J 曲线越平缓,即随着水力梯度增大,裂隙中流速增长曲线逐渐变缓;与此相反地,基质粒径越小, v_f - J 曲

线越陡峭,即随着水力梯度增大,裂隙中流速增长曲线变化逐渐加快。

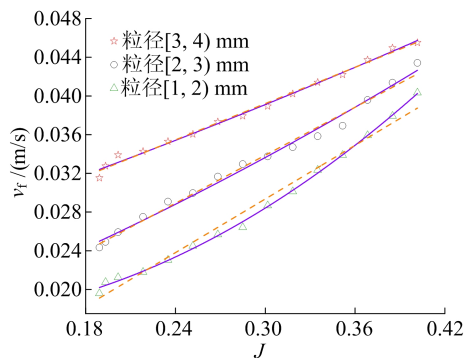


图 4 3 种粒径下裂隙-基质系统中裂隙水流速与水力梯度关系

表 2 3 种粒径下裂隙-基质系统中 v_f - J 关系数学拟合结果

粒径/mm	Forchheimer 方程		达西定律	
	方程	R_F^2	方程	R_D^2
[3,4)	$J=0.025\ 60v_f^2+0.014\ 95v_f$	0.992	$J=0.001\ 46v_f$	0.992
[2,3)	$J=0.040\ 89v_f^2+0.023\ 88v_f$	0.989	$J=0.002\ 41v_f$	0.988
[1,2)	$J=0.020\ 58v_f^2+0.012\ 02v_f$	0.998	$J=0.003\ 40v_f$	0.981

这是由于在裂隙-基质系统内基质与裂隙之间存在水量交换,在基质水头大于裂隙水头的情况下,基质向裂隙补给速度大于裂隙向基质的补给速度,基质粒径越大,基质向裂隙补给速度越快,裂隙中流速增长曲线逐渐变缓;与此相反地,基质粒径越小,基质向裂隙补给速度越慢,裂隙中流速增长曲线就会加快。在同一水力梯度下,基质粒径越大,裂隙-基质系统的裂隙中流速越大;与此相反地,基质粒径越小,裂隙中的流速越小;由此可知基质粒径的大小会影响裂隙-基质系统内裂隙中流体的非线性流动。上述 v_f - J 曲线随基质粒径变化而出现不同趋势的现象,对应着表 2 中达西定律系数的变化,可以发现,随着基质粒径增大,渗透系数 K 会减小。表 2 中拟合结果与文献[7]一致,表 2 中 Forchheimer 方程的决策系数 R_F^2 均大于达西定律的决策系数 R_D^2 ,表明与达西定律相比,Forchheimer 方程能更好拟合裂隙-基质系统内裂隙中流体的非线性流动。[3, 4) mm、[2, 3) mm 下 R_F^2 与 R_D^2 的差值较小,而 [1, 2) mm 下 R_F^2 与 R_D^2 的差值较大,说明基质粒径越小,裂隙中流体更容易出现非达西流动。

2.2.2 裂隙-基质系统内 e_h 与 k 、 β 的关系

裂隙中流体的渗流特征常用雷诺数表征,但是在裂隙-基质系统内裂隙的特征长度很难确定。

当裂隙中流体的流态呈现非线性流动时,可以用 Forchheimer 方程来描述流体的流动状态,即

$$J = Av_f^2 + Bv_f \quad (2)$$

其中: A 为惯性项系数; B 为黏性项系数。

$$A = \beta\rho/(\omega^2 e_h^2) \quad (3)$$

$$B = \mu/(k\omega e_h) \quad (4)$$

$$e_h = \left(\frac{48\mu Q}{\Delta h \rho v_f^2 \omega} \right)^{1/3} \quad (5)$$

其中: β 为裂隙中流体的非达西渗流系数; ρ 为裂隙中流体的密度; ω 为裂隙隙宽; e_h 为裂隙水力开度; μ 为裂隙中流体的黏滞系数; k 为裂隙中流体的渗透率; Q 为裂隙中流体在一定时间内的流量; Δh 为水头差。

本研究采用裂隙水力开度来表征裂隙中流体的非达西效应,根据式(3)、式(4)得出 3 种不同基质粒径下 e_h 与 k 、 β 的关系,如图 5 所示。

从图 5 可以看出:随着 e_h 增加,3 种不同基质粒径下 k 逐渐减小, β 逐渐增加; k - e_h 关系曲线呈负相关趋势, β - e_h 关系曲线呈正相关趋势。基质粒径越小,基质的渗透性越低,基质向裂隙补给速度减慢,裂隙中流体流量减小,从而影响裂隙-基质系统中 e_h 的改变; e_h 越大,裂隙渗透性越弱, β 越大,非达西渗流现象越明显;由此可知基质粒径大小会影响裂隙-基质系统内裂隙中流体的流动状态。文献

[9]实验结果也表明,非达西渗流系数与渗透率有关,非达西渗流系数越大,渗流越偏离达西流。

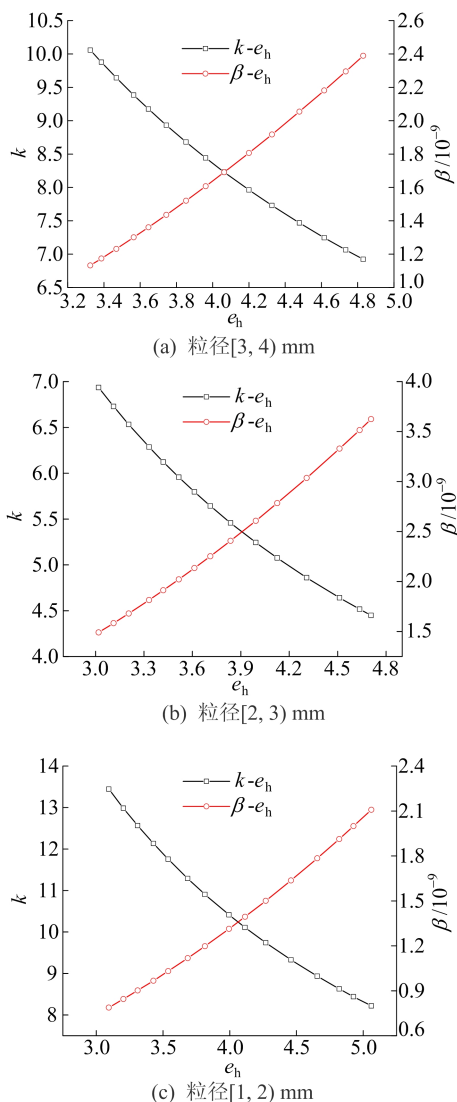


图5 裂隙-基质系统内 e_h 与 k 、 β 的关系

3 结 论

1) 在同一水力梯度下,基质粒径越大,裂隙-基质系统内流体的流速越快,表明基质渗透率的大小会影响裂隙-基质系统中流体的流动速度,使其由线性流向非线性流过渡。

2) 采用达西定律和 Forchheimer 方程拟合裂隙-基质系统中水流平均流速与水力梯度关系曲线,拟合结果显示,Forchheimer 方程的决策系数均高于达西定律的决策系数,表明与达西定律相比,Forchheimer 方程能更好拟合裂隙-基质系统内流体的非线性流动。基质粒径越大,基质渗透率越大,基质中流体出现非达西流动更明显。基质粒径越小,基质渗透率越小,裂隙中流体出现

非达西流动更明显。

3) 3 种不同基质粒径下,基质渗透系数都随着特征粒径增大而逐渐增大,KC 模型拟合结果显示,基质中流体的渗透系数与基质特征粒径成线性关系,表明除了基质粒径的影响外,基质孔隙度和颗粒形状都对渗透系数有较大影响。

4) 基质粒径越小,基质的渗透性越低,基质向裂隙补给速度减慢,裂隙中流体流量减小,从而影响裂隙-基质系统中裂隙水力开度改变。水力开度越大,裂隙渗透性越弱,非达西渗流系数越大,非达西渗流现象越明显。

【参 考 文 献】

- [1] Zhou J Q, Chen Y F, Tang H M, et al. Disentangling the simultaneous effects of inertial losses and fracture dilation on permeability of pressurized fractured rocks[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(15): 8862-8871.
- [2] Shaghghi T, Ghadrani M, Tolooian A. Effect of rock mass permeability and rock fracture leak-off coefficient on the pore water pressure distribution in a fractured slope [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2020, 105: 102167.
- [3] Zhang Y B, Liu X R, Guo P S, et al. Quantifying strength and permeability of fractured rock mass using 3D bonded block numerical model[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109592.
- [4] Jiang Z, Deng T C, Yin Q, et al. Numerical modeling of fluid flowing properties through porous media with single rough fractures[J]. Geofluids, 2021, 2021: 6611723.
- [5] Shu L C, Zou Z K, Li F L, et al. Laboratory and numerical simulations of spatio-temporal variability of water exchange between the fissures and conduits in a karstic aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125219.
- [6] Wang Z C, Guo J F, Pan Z J, et al. A generalized matrix-fracture flow transfer model for fractured porous media[J]. Journal of Porous Media, 2021, 24(3): 51-75.
- [7] Yan X S, Wang X Y, Ma L, et al. Experimental and numerical simulation study of flow and solute transport in pore-fractured media based on high-density resistivity method [J]. Lithosphere, 2021, 2021(Special 3): 7010329.
- [8] Han D Y, Wang Z M, Wang Q L, et al. Analysis of the Kozeny-Carman model based on pore networks[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2019, 16(6): 1191-1199.
- [9] Cheng J C, Zhao Y L, Li Y, et al. Transient pulse test for non-Darcy flow behaviors and hydromechanical coupling effect of fractured limestone[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8813396.

(责任编辑 张淑艳)