

穿越层状多孔介质的非达西渗流特征研究

窦智, 刘万明, 陈舟, 徐朝晖, 赵天宇, 安亮

Experimental study on non-darcy flow through layered porous media

DOU Zhi, LIU Wanming, CHEN Zhou, XU Zhaohui, ZHAO Tianyu, and AN Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202310002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多孔介质界面对重非水相液体迁移过程影响的图像法研究

Investigation on the influence of porous media interface on DNAPL migration based on image methods

刘汉乐, 郝胜瑶, 马建初 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 169-174

井内嵌入同轴多孔与固体圆柱地下水渗流流型分析

Flow pattern analysis around a solid cylinder with both porous and water rings in porous media

朱琳, 雷海燕, 马非, 戴传山 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 25-31

非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式

A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media

张东, 刘晓丽, 王恩志 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 35-42

层状非均质结构包气带入渗过程单相流与两相流数值模拟对比研究

A comparative numerical simulation study of single-phase flow and water-gas two-phase flow infiltration process in the vadose zone with the layered heterogeneous structure

高靖勋, 冯洪川, 祝晓彬, 吴吉春, 吴剑锋, 卫云波, 王水 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 24-32

缓倾层状结构高陡采动斜坡变形特征研究

Deformation characteristics of a high and steep mining slope with gently-inclined layered structure

赵建军, 王子贤, 严浩元, 赖琪毅, 余建乐, 李清森, 朱要强, 董建辉 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 174-183

基于砂槽模型研究不同水流密度下盆地地下水系统

A study of the characteristics of groundwater flow system of a basin under variable density condition based on a physical sand box model

易磊, 漆继红, 许模, 吴明亮, 李潇, 岑鑫雨 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 40-40



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202310002

窦智, 刘万明, 陈舟, 等. 穿越层状多孔介质的非达西渗流特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 101-107.
DOU Zhi, LIU Wanming, CHEN Zhou, et al. Experimental study on non-darcy flow through layered porous media[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 101-107.

穿越层状多孔介质的非达西渗流特征研究

窦智¹, 刘万明^{1,2}, 陈舟¹, 徐朝晖¹, 赵天宇², 安亮²

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210098;

2. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃兰州 730030)

摘要: 穿越层状多孔介质的非达西渗流多见于人类活动影响下的土壤-地下水系统中。采用自行开发设计的室内渗流实验装置, 设置不同粒径的单层多孔介质和相应粒径组合的双层多孔介质, 从水力坡降与渗流流速关系、非达西渗流参数和临界雷诺数等方面, 探讨了平均粒径、粗细颗粒界面对穿越层状多孔介质非达西渗流特征的影响规律。结果表明: 当水流穿越层状多孔介质时, 粗细颗粒界面对非达西流渗流特征具有重要影响; 作为判断达西流态到非达西流态转换的临界雷诺数, 其在单层多孔介质中随多孔介质平均粒径的增大而减小, 而当水流穿越层状多孔介质时, 临界雷诺数不仅随平均粒径的增大而增大, 而且随粗/细颗粒粒径差的减小而增大; 受粗细颗粒界面的影响, 单层多孔介质中临界雷诺数均低于粗颗粒层与单层多孔介质相同相应粒径组合的双层多孔介质; 通过引入非线性分量指数发现, 粗细颗粒界面对水流惯性力分量的影响具有一定抑制作用, 其抑制性影响程度与粗细颗粒差别大小呈负相关。研究结果对研究穿越层状岩体的非达西渗流问题具有较好的指导意义。

关键词: 层状多孔介质; 非达西渗流; 流态转变; 临界雷诺数; 粗细颗粒界面

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0101-07

Experimental study on non-darcy flow through layered porous media

DOU Zhi¹, LIU Wanming^{1,2}, CHEN Zhou¹, XU Zhaohui¹, ZHAO Tianyu², AN Liang²

(1. Department of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co. Ltd.,

Lanzhou, Gansu 730030, China)

Abstract: Non-darcy seepage through layered porous media is common in soil-groundwater systems under the influence of human activities. The effect of average particle size and coarse-fine particle interface on the characteristics of non-Darcy porous flow through layered porous media was investigated from the relation between hydraulic gradient and flow velocity, non-Darcy seepage parameters, and critical Reynolds number. The results show that when water flows through layered porous media, the coarse-fine particle interface has an important effect on the characteristics of non-Darcy flow. The critical Reynolds number, which is used to judge the transition from Darcy flow to non-Darcy flow, decreases with the increase of the average particle size in monolayer porous media, but increases with the increase of the average particle size and the decrease of the coarse/fine particle size

收稿日期: 2023-10-01; 修订日期: 2023-12-19

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1804303); 国家自然科学基金项目(41877171)

第一作者: 窦智(1986—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事工程地下水, 地下水污染控制方面的教学与研究工作。E-mail: Douz@hhu.edu.cn

ratio when water flows through layered porous media. The critical Reynolds number of single-layer porous media is lower than that of the double-layer porous media with the same corresponding particle size due to the coarse-fine particle interface. By introducing the nonlinear component index E , it is found that the coarse/fine particle interface has a certain inhibitory effect on the hydrodynamic inertia force component, and the inhibitory effect degree is negatively correlated with the difference in size of the coarse and fine particles. The results in this study have a good guiding significance for studying non-Darcy seepage through layered rock and soil.

Keywords: layered porous media; non-Darcy flow; flow state transition; critical Reynolds number; Interface between coarse sand layer and fine sand layer

自然界中通常遇到穿越层状岩土体的非达西渗流问题,如穿越污染场地渗透性反应墙的地下水流、深埋隧道开挖时的涌水、水井抽/注水发生的越流等,研究其非线性渗流规律对于地下水污染修复与控制、工程地下水问题预测以及准确获取水文地质参数等方面均具有重要的现实意义。

尽管非达西渗流现象很早就被人们发现,但是其特征与规律十分复杂^[1]。非达西渗流最为直观的现象是随着流速的增大,水力坡降与渗流流速关系偏离线性,转变为非线性关系,此时经典的 Darcy 定律不再适用。通常,将水力坡降(J)与渗流流速(v)偏离线性关系的渗流称为非达西渗流^[2]。为了描述非达西渗流运动规律,应用最为广泛的 2 个非线性定律为 Izbash 定律和 Forchheimer 定律,其中 Izbash 方程表示为:

$$J = av^b \quad (1)$$

式中: a, b ——与流体及多孔介质性质相关的常数。

Forchheimer 方程表示为^[3]:

$$J = \alpha \frac{\mu (1-n)^2}{g n^3 d^2} v + \beta \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{gd} v^2 \quad (2)$$

式中: α ——孔隙结构相关的参数/($\text{cm}^4 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$);

β ——孔隙结构相关的参数;

n ——孔隙度;

g ——重力加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$);

μ ——动力黏度系数/($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$);

d ——多孔介质粒径/cm。

从 Forchheimer 定律表达式可以看到,孔隙结构、孔隙度、多孔介质粒径均影响非达西渗流的非线性特征,为此,国内外学者开展了大量的实验与理论研究。这些研究主要集中在达西向非达西流态转换机制^[4]、非达西流流动规律的介质依赖性^[5-6]以及井附近非达西流^[7-8]等方面。Li 等^[3]通过 5 种不同粒径的多孔介质渗流实验,发现粒径大小不同,水力坡降与渗流流速关系出现非线性的临界点不同,即多孔介质

粒径影响流态转变过程。Muljadi 等^[9]发现多孔介质孔隙结构也是影响流态转变的主要因素。近年来,随着人类活动对土壤-地下水流动系统的影响不断增强,水流穿越不同粒径多孔介质的强迫渗流时有发生。对于这种穿越层状多孔介质的渗流,相比于无明显分界面的单层岩土体,其非达西渗流规律是否一致,哪些因素影响这种非达西渗流是亟待回答的重要问题。

为此,本文采用自行开发设计的穿越层状岩土体非达西渗流实验装置,针对水流穿越单层与双层土层的非达西渗流问题,通过分析水力坡降与流速关系,引入临界雷诺数以及分析 Forchheimer 拟合方程参数等方面,探讨了多孔介质粒径、双层多孔介质粒径差别对非达西渗流的影响机制。

1 实验装置

本文设计了 1 套模拟穿越层状多孔介质的非达西渗流实验装置。该实验装置主要由 3 部分组成:供水装置、有机玻璃管和测量装置,见图 1。

供水装置由供水瓶、蠕动泵(型号: BT101L; 调节范围: 0~36 L/min; 产地: 保定)和进水流速调节阀组成。通过蠕动泵,将供水瓶中蒸馏水供至有机玻璃管。设置在蠕动泵与有机玻璃管之间的进水流速调节阀可控制供水流速。实验装置中有机玻璃管长 50 cm,截面内径为 5 cm,外径为 7 cm,壁厚为 1 cm。有机玻璃管内部充填玻璃砂。测量装置由出水管、压力表(型号: HD-100G; 量程: 0~60 kPa; 精度: 0.000 1 kPa; 产地: 西安)和量筒(量程: 0~20 mL)组成。在出水口处,可通过量筒测量单位时间内经砂柱流出的流体体积,以便获得流速。在有机玻璃管上端,设置 2 个压力表测量压力,以计算水力坡降。有机玻璃管两端设置的法兰,可有效地保证有机玻璃管的密封性。法兰内侧布置有粒径 0.1 mm 的铜丝网,以保证有机玻璃管内玻璃砂不能通过,而水流可以自由流动。

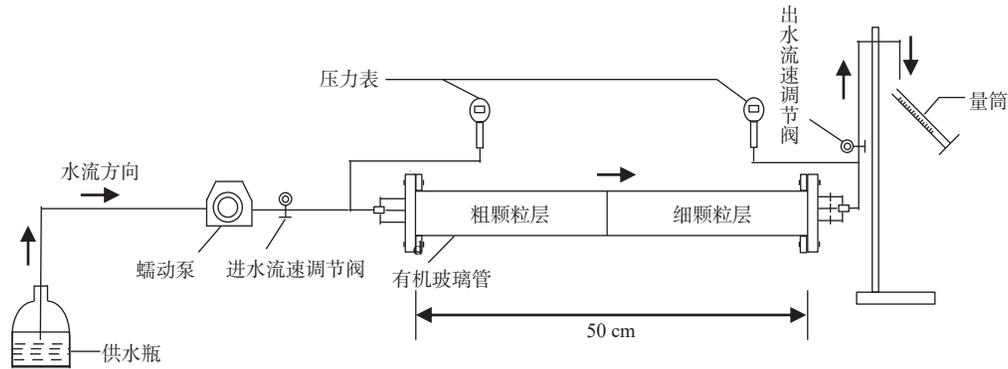


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Illustration of experimental device

2 实验材料与方法

本文实验旨在研究流体穿越单层多孔介质与双层多孔介质过程中, 平均粒径、粗细颗粒界面对穿越层状多孔介质非达西渗流特征的影响规律。在研究流体垂直穿越双层多孔介质的非达西渗流实验中, 通过设置不同粒径组合的双层多孔介质, 研究其粒径差别对非达西渗流规律的影响。其中, 为了忽略层厚对实验的影响, 将粗/细颗粒层的层厚设为相同; 为了减小孔隙度对实验的影响, 将粗/细颗粒层的质量比设为近乎 1:1; 为了忽略重力对实验的影响, 实验测量过程中, 将装填粗/细颗粒层的有机玻璃管水平放置。

实验多孔介质材料采用 4 种不同粒径的标准玻璃砂, 4 种玻璃砂的粒径分别为 0.70, 0.61, 0.43, 0.32 mm。

根据室内实验测得的玻璃砂比重 (G_s) 及装填干密度 (ρ_d), 计算装填玻璃砂对应的孔隙比 (e) 和孔隙度 (n):

$$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1 \quad (3)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (4)$$

式中: ρ_w ——流体密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。

对于单层多孔介质和双层多孔介质的渗流实验, 有机玻璃管内的玻璃砂装填组合见表 1。单层多孔介质渗流实验共设置 4 组不同粒径的多孔介质, 分别为 S1、S2、S3、S4; 双层多孔介质渗流实验共设置 5 组不同粒径组合的双层多孔介质, 分别为 S1-S2、S1-S3、S1-S4、S2-S3、S2-S4。玻璃砂装填干密度为 1.509 ~ 1.557 g/cm^3 , 相应的孔隙度为 0.367 ~ 0.396。

表 1 实验多孔介质装填组合形式及其相关参数

Table 1 Combination of filled porous media and corresponding parameters

介质类型	装填组合	d_1/mm	d_2/mm	\bar{d}/mm	$\rho_{d1}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_{d2}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	n_1	n_2
单层多孔介质	S1	0.70	—	0.70	1.54	—	0.38	—
	S2	0.61	—	0.61	1.52	—	0.37	—
	S3	0.43	—	0.43	1.51	—	0.39	—
	S4	0.32	—	0.32	1.54	—	0.40	—
双层多孔介质	S1-S2	0.70	0.61	0.66	1.56	1.55	0.37	0.36
	S1-S3	0.70	0.43	0.57	1.59	1.50	0.36	0.39
	S1-S4	0.70	0.32	0.51	1.57	1.53	0.38	0.39
	S2-S3	0.61	0.43	0.52	1.54	1.54	0.37	0.38
	S2-S4	0.61	0.32	0.47	1.55	1.55	0.36	0.39

注: d_1 为粗颗粒层粒径; d_2 为细颗粒层粒径; \bar{d} 为装填组合条件下的平均粒径; ρ_{d1} 为粗颗粒层干密度; ρ_{d2} 为细颗粒层干密度; n_1 为粗颗粒层孔隙度; n_2 为细颗粒层孔隙度。

在单层多孔介质渗流实验开始前, 首先关闭进水流速调节阀, 从底部逐层将提前浸泡 24 h 以上的饱和玻璃砂填入有机玻璃管并将空气排空, 装填玻璃砂时采用逐层装填分层夯实的方法, 以保证玻璃砂的均匀性。为保证压力测量的准确性, 需将压力表在标准大气压下校准调零, 并通过蠕动泵, 进一步排空进水管和压力表管中的空气。在实验过程中, 待压力表数值

稳定后, 分别记录不同流速下的压力表数值、测量单位时间内出水口的流量。为了降低测量误差, 压力表数值和出水口流量值均测定 3 次, 并取平均值作为本组实验数据。本文实验用水均采用无气蒸馏水。需要指出的是在双层多孔介质装填时, 以有机玻璃管中线为分界线, 左侧装填粗颗粒的玻璃砂, 右侧装填细颗粒的玻璃砂。在装填过程中, 将有机玻璃管垂直,

先装填下层粗颗粒,再装填上层细颗粒,实验数据记录 and 测量与单层多孔介质实验相同。

3 结果

水力坡降与水流流速的关系可以判断水流是否发生非达西流动^[10-11]。在单层和双层多孔介质中,水力坡降与水流流速之间的关系,见图 2。整体上,无论在单层还是双层多孔介质中,随着水流流速的增大,水力坡降与流速的关系偏离线性拟合曲线,表明本文考虑的不同粒径组合形式多孔介质,在一定流速范围内,水流均发生了非达西流动。

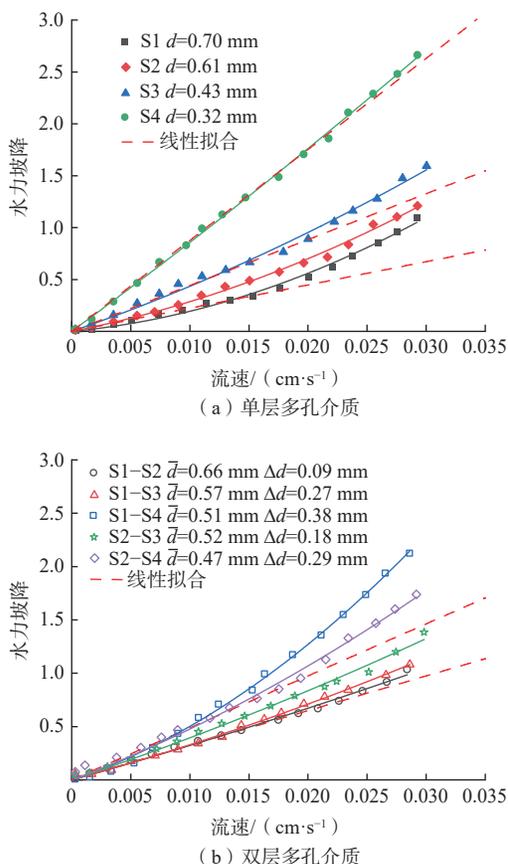


图 2 水力坡降与流速关系

Fig. 2 Relationship between hydraulic gradient and flow rate

注: Δd 表示双层多孔介质中粗颗粒层与细颗粒层的平均粒径差值。

当流速较小时,水力坡降与流速之间呈现线性关系,水流为达西流动状态;当流速较大时,水力坡降与流速之间呈现非线性关系,水流为非达西流动状态,此时达西定律不再适用。

由图 2(a)可知:对于单层多孔介质,颗粒越粗,相同流速条件下的水力坡降越小,随着流速的增大,水力坡降与流速之间越趋向于非线性关系。

由图 2(b)可知:对于双层多孔介质,2层颗粒粒径差别越大,相同流速条件下的水力坡降越大,同样,随着流速的增大,水力坡降与流速之间趋向于非线性关系,说明水流流动状态由达西流动逐渐转换为非达西流动。

与单层多孔介质相比,当水流穿越层状多孔介质时,不仅相同流速条件下的水力坡降发生变化,水力坡降与流速之间的非线性关系也发生变化,说明多孔介质粒径、双层多孔介质粒径差别均影响非达西流特征。

从水力坡降与水流流速关系看,其影响主要体现在:(1)水力坡降与水流流速关系非线性的程度不同;(2)达西流态到非达西流态转换的临界点不同。因此,将分别引入 Forchheimer 方程拟合参数和临界雷诺数并进行分析。

4 讨论

4.1 非达西渗流参数分析

因 Forchheimer 方程具有更广泛的普适性和更清晰的物理意义。本文欲研究多孔介质粒径、双层多孔介质粒径差别对非达西流的影响机制,而非孔隙结构对非达西流的影响机制,因此,采用 Forchheimer 方程对水力坡降与水流流速关系的实验结果进行拟合,并将式(2)中右边第一、二项改写,得到拟合方程^[8]:

$$J = Av + Bv^2 \quad (5)$$

式中: A ——与流体黏滞力相关的常数/($s \cdot cm^{-1}$);
 B ——与流体惯性力相关的常数/($s^2 \cdot cm^{-2}$);
 Av ——黏性项;
 Bv^2 ——惯性项。

黏性项表示流体-固体颗粒界面黏滞力(黏滞摩擦)造成的能量损失,其数值与多孔介质和流体的性质有关,可认为是由黏滞力消耗能量为主导的渗流流速线性分量。惯性项表示水流惯性力造成的能量损失^[12],其数值只与多孔介质性质有关,可认为是水力坡降中由惯性力消耗能量为主导的渗流流速非线性分量。

对图 2 中的实验结果拟合,参数见表 2,相关系数 $R^2 > 0.99$,表明采用 Forchheimer 方程可以较好地拟合实验结果。从表 2 可以发现,随着颗粒粒径的增大,单层与双层多孔介质对应的参数 A 变化趋势一致且变化幅度较小,参数 B 变化趋势相反且变化幅度较大,这表明非达西流动受多孔介质粒径和装填组合的影

响。对于 Forchheimer 方程,当 $B=0$ 时,其等同于达西定律,可描述线性变化的水力坡降与流速关系;而当 $B \neq 0$ 时,惯性项与流速的平方成正比^[13]。相比于黏性项(与流速呈线性关系),惯性项是主导水力坡降与流速非线性关系的重要非线性分量。因此,随着水流流速的增大,惯性力影响下的非线性分量的大小和变化趋势对水流流态具有重要的影响。

表 2 Forchheimer 方程拟合结果

Table 2 Fitting results for Forchheimer equation

介质类型	装填组合	$A/(s \cdot cm^{-1})$	$B/(s^2 \cdot cm^{-2})$	R^2	\bar{d}/mm
单层多孔介质	S1	10.69	864.30	0.996 8	0.70
	S2	22.22	638.63	0.998 1	0.61
	S3	39.25	419.73	0.997 5	0.43
	S4	83.39	235.01	0.999 6	0.32
双层多孔介质	S1-S2	31.02	129.40	0.998 3	0.66
	S1-S3	30.36	258.76	0.999 2	0.57
	S1-S4	36.90	1 331.71	0.999 2	0.51
	S2-S3	37.06	236.88	0.998 3	0.52
	S2-S4	41.90	576.49	0.997 6	0.47

注: A 、 B 为式(5)中的参数; R^2 为相关系数。

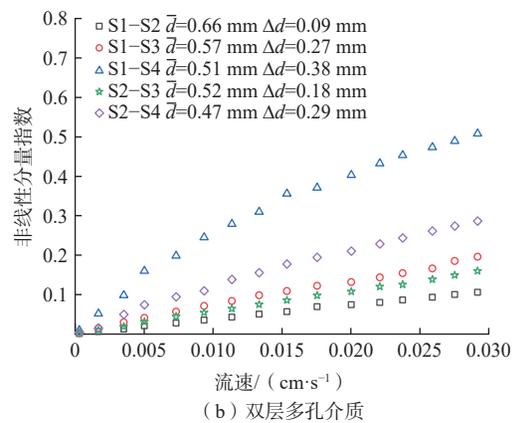
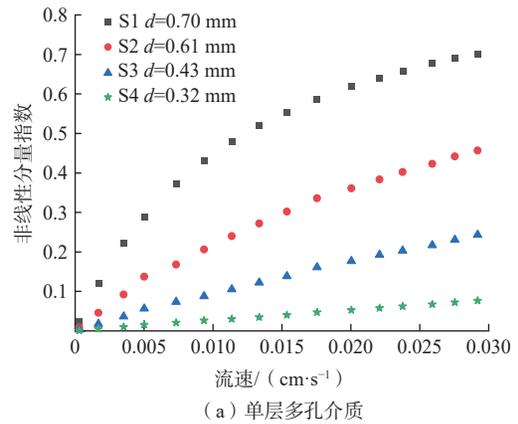
实际上,由于惯性力影响下的非线性分量和黏性力影响下的线性分量均与水流流速相关,随着水流流速增大,线性分量和非线性分量同时增大,惯性力影响下的非线性分量在水力坡降中的占比也增大。为此本文引入非线性分量指数(E),代表惯性力对于水流所处流态的相对贡献^[14]:

$$E = \frac{Bv^2}{J} = \frac{Bv^2}{Av + Bv^2} \quad (6)$$

如图 3 所示,对于不同多孔介质粒径和装填组合,随着水流流速的变化, E 也随之变化。从图 3 中可以看出, E 随着水流流速发生改变,说明惯性力影响下的非线性分量和黏性力影响下的线性分量占比发生改变。对于单层多孔介质,当流速相同时,其平均粒径越大, E 越大;对于双层多孔介质,当流速相同时,在粗颗粒层相同条件下,细颗粒层粒径越小,粒径差越大, E 越大。进一步对比发现,整体上,当流速相同时,双层多孔介质对应的 E 小于单层多孔介质对应的 E ,表明双层多孔介质惯性力对水流所处流态的贡献程度小于单层多孔介质惯性力对水流流态的贡献程度。特别地,当流速相同时,发现两层颗粒粒径差值越小, E 越小,说明粗细颗粒界面对惯性力在水流流态的贡献程度起到抑制作用,且其抑制性影响程度与 Δd 呈负相关。

4.2 临界雷诺数

雷诺数(Re)是表征渗流流态的无量纲数,其数值

图 3 非线性分量指数 E 与流速关系Fig. 3 Relationship between nonlinear component index E and flow rate

反映了水流惯性力作用与黏性力作用的占比,通常用于判断水流流动状态。对于多孔介质,相应公式为:

$$Re = \frac{\bar{d}v\rho_w}{\mu} \quad (7)$$

先前研究证实^[15-16],水流惯性力的影响是水力坡降与流速关系非线性的主要原因。随着流速不断增大,水流惯性力与黏性力占比发生改变。当流速较小时, Re 随流速增大而缓慢增大,此时,水流状态是达西流动,水力坡降与流速呈线性关系,达西定律适用;当流速超过某一临界值时, Re 随流速的增大速率发生改变,水流惯性力的影响增强,水力坡降与流速开始表现出非线性关系,此时水流为非达西流动,达西定律不再适用。

为了定量判断达西流向非达西流转换点处的临界雷诺数,本文采用定义的非线性分量指数的判断方法。非线性分量指数定义如式(6)所示。由式(6)推导可得渗流流速为:

$$v = \frac{AE}{B(1-E)} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)可得雷诺数为:

$$Re = \frac{\bar{d}\rho_w}{\mu} \times \frac{AE}{B(1-E)} \quad (9)$$

单/双层多孔介质非线性分量指数与式(9)推导所获取的雷诺数关系如图 4 所示。一般认为当非线性分量指数为 10% 时,其所对应的雷诺数为临界雷诺数^[17-19],故本文取非线性分量指数为 10% 所对应的雷诺数作为临界雷诺数(Re_f)。

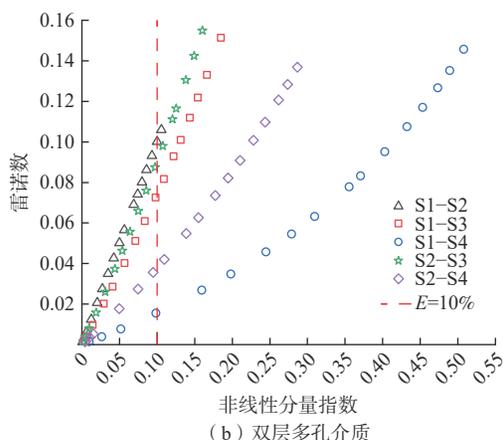
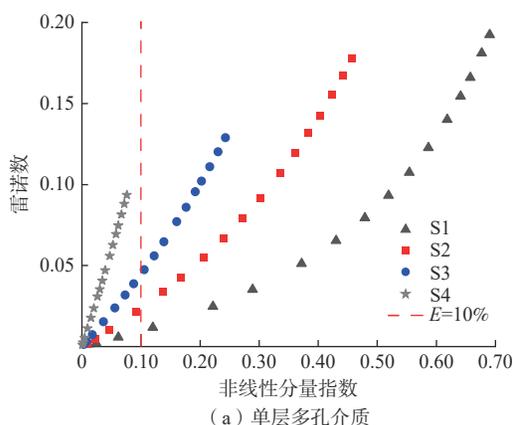


图 4 非线性分量指数与雷诺数关系

Fig. 4 Relationship between nonlinear component index E and Reynolds number Re

图 4 反映了单层与双层多孔介质非线性分量指数随雷诺数变化。可以看出,无论是单层多孔介质还是双层多孔介质,随着非线性分量指数的增加,雷诺数均增大。

从图 5 中可以看出, Re_f 随介质类型(单层或者双层)和介质颗粒粒径发生变化,说明介质类型和颗粒粒径均影响达西流向非达西流的流态转换过程。由于惯性力被认为是导致水力坡降与流速关系非线性的原因^[20],临界雷诺数作为定量判断达西流向非达西流流态转换的点,其值的大小反映了不同水流速度条件下,水流惯性力对非线性的影响程度。图 5 中, Re_f 较小,

表明即使在整体渗流流速较小时,惯性力的影响较为显著而不能忽略,致使水流从达西流向非达西流流态发生转换,进而水力坡降与流速关系表现出非线性。

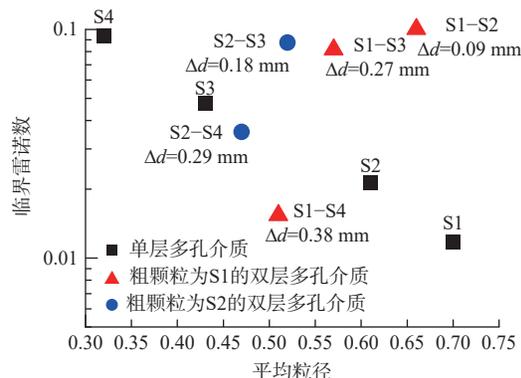


图 5 单层与双层多孔介质的临界雷诺数与平均粒径关系

Fig. 5 Relationship between critical Reynolds numbers and mean particle diameters in both single- and double-layer porous media

在图 5 中发现,对于单层多孔介质, Re_f 随介质颗粒平均粒径的增大而减小,并且单层多孔介质均小于双层多孔介质(粗颗粒层与单层多孔介质相同)对应的 Re_f 。一方面说明介质颗粒越小,对水流惯性力的影响越大,且即使当整体渗流流速较小时,相应的惯性力影响不能被忽略;另一方面,当水流穿越双层多孔介质界面时,粗细颗粒界面对水流惯性力的影响具有一定抑制作用,特别地,发现两层颗粒粒径差值越小, Re_f 越大,这也与粗细颗粒界面对水流惯性力的抑制性影响程度与 Δd 呈负相关的结论相一致。

5 结论

(1)无论是单层还是双层多孔介质,随着水流速度增大,水力坡降与流速的关系偏离线性,达西定律不再适用,Forchheimer 方程可以较好地描述非线性的水力坡降与流速关系。

(2)临界雷诺数不仅与颗粒平均粒径有关,而且粗细颗粒界面对临界雷诺数有影响。对于单层多孔介质,临界雷诺数随介质颗粒平均粒径的增大而减小。单层多孔介质均小于双层多孔介质(粗颗粒层与单层多孔介质相同)对应的临界雷诺数。

(3)粗细颗粒界面和颗粒粒径均影响达西流向非达西流流态的转换过程。当水流穿越双层多孔介质界面时,粗细颗粒界面对水流惯性力的影响具有一定抑制作用。这种粗细颗粒界面对水流惯性力的抑制性影响程度与粗细颗粒差呈负相关。

参考文献 (References) :

- [1] 蔡建超, 夏宇轩, 徐赛, 等. 含水合物沉积物多相渗流特性研究进展 [J]. 力学学报, 2020, 52(1): 208 – 223. [CAI Jianchao, XIA Yuxuan, XU Sai, et al. Advances in multiphase seepage characteristics of natural gas hydrate sediments[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(1): 208 – 223. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 周志芳, 窦智. 实验水文地质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2015. [ZHOU Zhifang, DOU Zhi. Experimental hydrogeology[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [3] LI Zhongxia, WAN Junwei, ZHAN Hongbin, et al. Particle size distribution on Forchheimer flow and transition of flow regimes in porous media[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 1 – 11.
- [4] LI Zhongxia, WAN Junwei, HUANG Kun, et al. Effects of particle diameter on flow characteristics in sand columns[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 104: 533 – 536.
- [5] 刘军文, 施安峰, 王晓宏, 等. 多孔介质结构对渗流惯性效应的影响规律研究 [J]. 力学季刊, 2019, 40(3): 447 – 457. [LIU Junwen, SHI Anfeng, WANG Xiaohong, et al. Study on influences of porous medium structure on inertial effect of seepage flow[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2019, 40(3): 447 – 457. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李一鸣, 文章. 非达西裂隙流对渗透性基岩中流场及溶质羽的影响 [J]. 地球科学, 2020, 45(2): 693 – 700. [LI Yiming, WEN Zhang. Impacts of non-darcian flow in the fracture on flow field and solute plumes in a fracture-aquifer system[J]. Earth Science, 2020, 45(2): 693 – 700. (in Chinese with English abstract)]
- [7] YIN Peijie, ZHAO Can, MA Jianjun, et al. Experimental study of non-linear fluid flow through rough fracture based on fractal theory and 3D printing technique[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 129: 104293.
- [8] QIAN Jiazhong, CHEN Zhou, ZHAN Hongbin, et al. Experimental study of the effect of roughness and Reynolds number on fluid flow in rough-walled single fractures: A check of local cubic law[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(4): 614 – 622.
- [9] MULJADI B P, BLUNT M J, RAEINI A Q, et al. The impact of porous media heterogeneity on non-Darcy flow behaviour from pore-scale simulation[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 95: 329 – 340.
- [10] QIAN Jiazhong, ZHAN Hongbin, ZHAO Weidong, et al. Experimental study of turbulent unconfined groundwater flow in a single fracture[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 311(1/2/3/4): 134 – 142.
- [11] DOU Zhi, SLEEP B, ZHAN Hongbin, et al. Multiscale roughness influence on conservative solute transport in self-affine fractures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 133: 606 – 618.
- [12] ZHANG Shuai, QIAO Weiguang, WU Yue, et al. Experimental study on seepage characteristics of microfracture with different aperture[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 5452.
- [13] TRYKOZKO A, PESZYNSKA M, DOHNALIK M. Modeling non-Darcy flows in realistic pore-scale proppant geometries[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 71: 352 – 360.
- [14] ZENG Zhengwen, GRIGG R. A criterion for non-Darcy flow in porous media[J]. *Transport in Porous Media*, 2006, 63(1): 57 – 69.
- [15] HUANG K, WAN J W, CHEN C X, et al. Experimental investigation on water flow in cubic arrays of spheres[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 492: 61 – 68.
- [16] 姚池, 邵玉龙, 杨建华, 等. 非线性渗流对裂隙岩体渗流传热过程的影响 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1050 – 1058. [YAO Chi, SHAO Yulong, YANG Jianhua, et al. Effect of nonlinear seepage on flow and heat transfer process of fractured rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1050 – 1058. (in Chinese with English abstract)]
- [17] ZHOU Jiaqing, HU Shaohua, FANG Shu, et al. Nonlinear flow behavior at low Reynolds numbers through rough-walled fractures subjected to normal compressive loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 202 – 218.
- [18] JAVADI M, SHARIFZADEH M, SHAHRIAR K, et al. Critical Reynolds number for nonlinear flow through rough-walled fractures: The role of shear processes[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(2): 1789 – 1804.
- [19] ZIMMERMAN R W, AL-YAARUBI A, PAIN C C, et al. Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41: 163 – 169.
- [20] PIETLICKI R, HARDEN I. Inertial model of flow through porous media[J]. *The European Physical Journal B*, 1996, 237: 433 – 468.