

DOI: 10.11779/CJGE201410003

粒径对多孔介质中悬浮颗粒迁移—沉积特性的影响

刘泉声^{1,2}, 崔先泽¹, 张程远¹, 占婷²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 粒径变化对悬浮颗粒在多孔介质中迁移—沉积过程影响的研究有重要意义。利用自主研发的砂层迁移—沉积模拟试验系统, 研究不同粒径的悬浮颗粒在不同尺寸多孔介质中的迁移—沉积特性。结果表明, 对于相同尺寸的多孔介质, 随着悬浮颗粒粒径的增加, 到达相对浓度峰值时间增加, 而对应的相对浓度峰值降低; 同时, 对于相同粒径的悬浮颗粒, 随着多孔介质尺寸增大, 相对浓度峰值增加; 另外, 相对于多孔介质, 悬浮颗粒粒径的变化对其迁移—沉积过程影响更为显著; 随着多孔介质与悬浮颗粒粒径比增大, 相对浓度的峰值和终值增大; 根据粒径比不同将悬浮颗粒在多孔介质中的迁移—沉积类型划分为“滤饼过滤型”、“迁移—沉积型”、“自由迁移型”3种。研究结果为水源热泵回灌过程中悬浮颗粒在地层中的迁移—沉积特性进一步研究奠定了基础。

关键词: 水源热泵; 粒径; 悬浮颗粒; 多孔介质; 迁移—沉积

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)10-1777-07

作者简介: 刘泉声(1962-), 男, 研究员、博士生导师, 主要从事岩土力学与地下工程方面的研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn。

Effects of particle size on characteristics of transportation and deposition of suspended particles in porous media

LIU Quan-sheng^{1,2}, CUI Xian-ze¹, ZHANG Cheng-yuan¹, ZHAN Ting²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Particle size plays an important role in transportation and deposition of particles in porous media, especially in the WSHP engineering. The transportation-deposition characteristics of particles with different sizes in porous media with different sizes are studied by the self-developed sand transportation-deposition equipment. The studies show that when the size of porous media is fixed and the size of suspended particles increases, it needs more time to reach the peak of relative concentration, and at the same time, the corresponding peak value declines. Meanwhile, when the size of suspended particles is fixed and the size of porous media increases, the peak value of relative concentration also increases. Relative to the porous media, change in the size of suspended particles has more significant effects in the transportation-deposition process. In addition, the peak and final values of relative concentration increase when the diameter ratio of the porous media and suspended particles increases. Finally, according to the difference of diameter ratio, the model of transportation-deposition is divided into three types, i.e., filter cake mode, transportation-deposition mode and free transportation mode. The research lays a foundation for further studies on the transportation-deposition characteristics that suspended particles transport in layer, especially in the recharge process of WSHP.

Key words: WSHP; particle size; suspended particle; porous medium; transportation-deposition

0 引言

地下水源热泵是一种利用浅层地下水进行供暖或制冷的热源技术, 其运行稳定可靠、投资较低且节能环保, 因此近年来发展十分迅速。但是长期抽取地下水而不进行有效的回灌势必会引起地表沉降^[1-2], 因此地下水源热泵一般有若干回灌井。在回灌的过程中由

于回灌水中常携带有固体颗粒且在水动力或水化学作用下含水层内部会产生固体颗粒, 因此经常会发生堵塞, 从而影响地下水源热泵的长期运行^[3-4]。因此研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272272); 湖北省自然科学基金项目(132002); 国家重点实验室基金项目(SKLQ009)

收稿日期: 2013-12-05

悬浮颗粒在多孔介质中的迁移—沉积过程具有重要的学术价值和现实意义。

国内外关于细小颗粒在多孔介质中的迁移及沉积已经有较多的研究,但主要集中在污水处理和石油工程中^[5-6],而且对多孔介质中悬浮颗粒迁移—沉积的影响机制并不十分明确。其中,悬浮颗粒及多孔介质粒径变化是颗粒迁移—沉积的重要影响因素。国内外针对悬浮颗粒迁移及沉积问题进行了一些理论与试验研究。Iwasaki等^[7]最早建立了深层过滤系统中悬浮颗粒迁移的数学模型;楚锡华^[8]基于连续介质概念从颗粒层次建立了颗粒材料孔隙度与宏观平均体积应变之间的联系,并进一步推导了饱和颗粒材料孔隙水压力状态方程;Sakthivadivel^[9]通过试验说明了多孔介质中发生沉积的过程与悬浮颗粒和孔隙介质的粒径相关;刘杰等^[10]通过多级配土的反滤试验,提出了反滤层多级配土的控制粒径确定方法,以保护2 mm以下颗粒不在渗流时发生流失;Bradford等^[11]通过胶体在土柱中运移的一维模拟试验,得出悬浮颗粒的沉积与悬浮颗粒及孔隙通道的尺寸相关,当悬浮颗粒尺寸远小于孔隙通道时,沉积作用微弱;Bauer等^[12]通过使用随机步长模型描述悬浮颗粒在多孔介质中的迁移过程,认为多孔介质渗透率取决于颗粒大小,同时由于筛滤等作用,大颗粒不能在多孔介质中均匀分布。Kampel等^[13]通过使用考虑孔隙弯曲度和惯性作用的数学模型,得出孔隙大小及曲折度的不同会影响流体的速度,并影响颗粒与孔隙壁的碰撞过程。

由此可见,目前对于粒径对多孔介质中悬浮颗粒迁移—沉积特性影响的研究主要停留在理论阶段,少量试验研究也主要针对10 μm以下粒径的胶体状悬浮颗粒^[11, 14],而对水源热泵回灌过程中起主导因素的10 μm以上悬浮颗粒的迁移—沉积特性研究很少^[2],由于随着悬浮颗粒粒径增大,主导其运移的因素由静电作用、布朗运动等变为重力作用、水动力作用等^[15],因此有必要对此过程进行更深入的试验及理论研究,探究水源热泵回灌条件下悬浮颗粒在多孔介质中的迁移—沉积特性。

通过自主研发的砂层迁移—沉积模拟试验系统,对不同粒径的悬浮颗粒和不同尺寸的多孔介质进行试验,研究粒径变化对悬浮颗粒迁移—沉积特性的影响,提出了悬浮颗粒及多孔介质粒径变化下不同的沉积模式。试验为多孔介质特别是水源热泵回灌条件下悬浮颗粒的迁移—沉积特性进一步研究奠定了基础。

1 试验方法

1.1 试验仪器

水源热泵回灌井运行模式如图1所示。图中箭头表示水流方向,A表示井周岩土体,放大后结构如图1右所示。

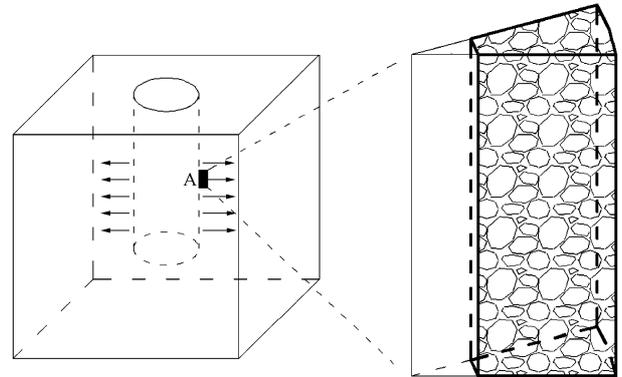
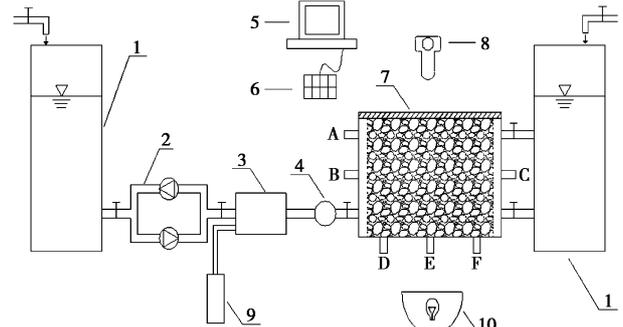


图1 地下水源热泵回灌井运行模式图

Fig. 1 Operation mode for WHSP recharge well

为了把握核心问题,简化试验,选取井周径向岩土体作为试验模拟原型,自主研究开发了一套砂层迁移—沉积模拟试验系统,试验装置结构如图2所示。



1-水箱, 2-双向变频恒压水泵, 3-曝气室, 4-电磁流量计, 5-计算机, 6-数据采集器, 7-试验观测箱体, 8-光度计, 9-压缩空气罐, 10-矩阵式LED光源, A~F-压力传感器

图2 试验系统结构图

Fig. 2 Structure of test system

该套试验系统的要点如下:

(1) 试验观测箱体采用有机玻璃制作,箱体周边设有3个带阀门的水管和6个可安装压力传感器或其他采样装置的接口。箱体内部两端设有过滤网,内部有效尺寸为600 mm×500 mm×12 mm。箱体盖板下放置止水橡胶垫,盖板与箱体通过螺栓连接。箱体可以模拟数10 m深含水砂层,并能够保持长期稳定的实验环境。

(2) 箱体透光性好,可以直观地观测箱体中悬浮颗粒的沉积情况。箱体进出口位置水样均可采集,从而通过浊度计测量通过箱体前后悬浮颗粒浓度变化。

(3) 双向变频恒压水泵用以模拟地下水源热泵的回灌和回扬,该水泵可以提供60 m的扬程。

(4) 试验系统设置有压力监测装置、气泡发生装置和箱体细部透光性观测装置,可以进行多孔介质中

悬浮颗粒迁移—沉积过程相关试验研究。

1.2 试验材料

本试验的多孔介质采用天然石英砂, 其中 SiO_2 的含量不低于 99.6%, 其为无色半透明状颗粒, 莫氏硬度为 7, 性脆无解理, 贝壳状断口, 油脂光泽, 密度为 2.65 g/cm^3 。由于武汉地区地下水源热泵回灌水地层以细砂、中粗砂及中粗砂夹砾卵石为主, 故试验中选取 3 种粒径分布, 具体参数见表 1。

表 1 试验用石英砂物理参数

类别	粒径大小 /mm	中值粒径/mm	孔隙率/%	不均匀系数	曲率系数
粒径 1	0.25~0.50	0.36	32	1.3	1.1
粒径 2	0.84~1.70	1.25	34	1.4	1.2
粒径 3	2.00~3.35	2.82	35	1.3	1.2

试验用悬浮颗粒采用红色石英粉, 其与实际工程中悬浮颗粒的主要成分相同, 物理化学性质稳定, 便于观测。试验中选取了 3 种粒径分布的石英粉, 密度均为 2.65 g/cm^3 。具体参数如表 2 所示。

表 2 试验用石英粉物理参数

类别	粒径 4	粒径 5	粒径 6
粒径大小 / μm	15~20	37~44	75~90
中值粒径 / μm	18	41	82

1.3 试验方案

选取 3 种粒径分布的多孔介质进行二维沙箱试验, 每组试验中分别进行 3 种粒径悬浮颗粒的迁移—沉积试验。

每次装填石英砂之前均采用纯净水反复冲洗直至无悬浮杂质, 然后将其放在烘干箱中, 在 105°C 条件下烘干 24 h。作为多孔介质的石英砂装填按照下面的步骤进行: 首先关闭箱体两端阀门, 在箱体中灌入 5 cm 深的纯净水, 通过长颈漏斗缓缓向箱中加入石英砂, 待砂层上表面距水面 1 cm 左右停止加砂, 注入 5 cm 深纯净水, 再加入石英砂, 如此反复, 直至石英砂填充整个试验箱体, 在试验箱体上放上止水垫并装上盖板进行密封。

将上游水箱灌满纯净水, 关闭水泵回水阀门, 打开进水阀门。打开水泵变频控制器, 通过调节变频控制器调节管路中水流速, 使水流以缓慢的速度通过试验箱体中的多孔介质, 使多孔介质完全浸没在水中。调节变频控制器, 观察流量计读数, 使流速稳定在需要的数值。

以往的研究中悬浮颗粒往往是采用脉冲式^[14]或阶跃式注入^[16], 然而在水源热泵工程中, 回灌水水中的悬浮颗粒含量往往是稳定存在的, 为了更加真实地模

拟, 试验中采取连续式注入, 即向水箱中投入需要数量的石英粉, 打开水箱中的搅拌器, 使石英粉均匀悬浮在水中, 作为含悬浮颗粒的回灌水。每隔 3 min 进行一次取样, 对进入试验箱体前后的水样进行浊度测定, 实时监控水箱中各处水头压力变化, 观测悬浮颗粒在多孔介质中的迁移—沉积状况。

2 试验结果分析

水中悬浮颗粒的含量一般通过过滤称重法测定, 但这种方法繁复且不利于连续性观测。根据 Ahfir 等^[16]的研究, 悬浮颗粒浊度与浓度之间呈高度线性相关, 故在试验中采用浊度计测量水中悬浮颗粒数量的变化。

横坐标采用孔隙体积比 P_V 来表示^[17-18], P_V 指的是流过多孔介质的水流体积与多孔介质中总孔隙体积之比, 即

$$P_V = \frac{V_{\text{inj}}}{V_p} = \frac{V_0 t}{V_p} \quad (1)$$

式中, V_p 表示多孔介质孔隙体积, V_{inj} 表示注入的液体体积, V_0 表示单位时间注入液体体积。用 P_V 而不用时间 t 作为横坐标可以减小不同多孔介质孔隙体积及流速差异对试验结果可比性的影响。纵坐标采用悬浮颗粒相对浓度 C_R 表示^[16], 相对浓度 C_R 在此定义为

$$C_R = \frac{CV_p}{m} = \frac{CV_p}{C_0 V_{\text{inj}}} = \frac{CV_p}{C_0 V_0 t} \quad (2)$$

式中, C 表示流出液体中颗粒的浓度, C_0 表示液体中初始颗粒浓度, m 表示注入多孔介质内的悬浮颗粒总量。采用该变量可达到与使用 P_V 相同的目的。

2.1 相同多孔介质中不同尺寸悬浮颗粒迁移—沉积特性

为了研究悬浮颗粒粒径变化对其在多孔介质中的迁移—沉积特性影响, 选取 3 种不同尺寸多孔介质, 每种多孔介质选取 3 种不同粒径悬浮颗粒进行试验。根据武汉百步亭新港苑小区地质资料, 此处选取的渗流速度为 0.3 cm/s , 悬浮颗粒浓度为 200 mg/L 。水箱中加入石英粉后, 在搅拌器的作用下水箱水成为浓度 200 mg/L 的石英粉悬浮液, 在水泵的作用下以 0.3 cm/s 的速率在试验箱体中通过。

图 3 表示的是在 3 种不同尺寸多孔介质中, 3 种不同粒径分布的悬浮颗粒迁移—沉积特性试验结果。

试验箱体中多孔介质原为无悬浮颗粒的饱和状态, 随着这部分水的排除, 多孔介质逐渐处于石英粉悬浮液中, 造成相对浓度值逐渐增大, 并在某一时刻到达峰值。随后由于部分悬浮颗粒沉积在多孔介质表面, 多孔介质孔隙率逐渐降低, 通透性下降, 且由于

注入悬浮液的体积持续增加,相对浓度呈下降的趋势。到达足够长时间后,试验箱体中颗粒的沉积达到了动态的平衡, C/C_0 保持稳定, C_R 下降。

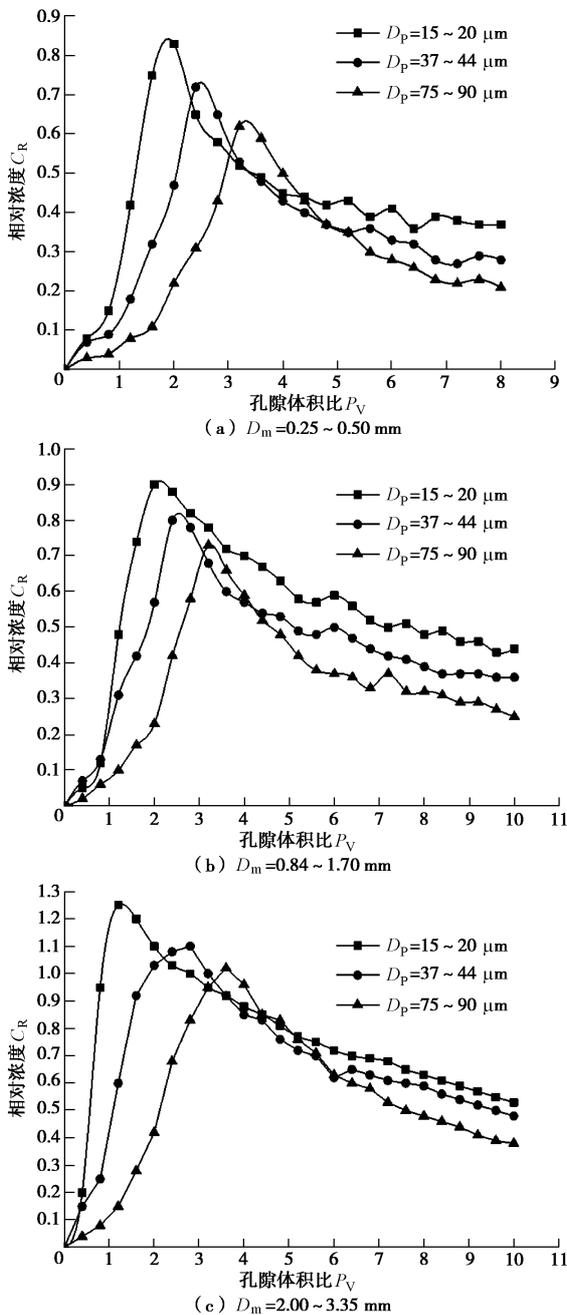


图3 3种不同尺寸多孔介质中悬浮颗粒 $P_V - C_R$ 关系曲线

Fig. 3 $P_V - C_R$ relation curves of suspended particles in porous media with three different diameters

试验中,试验箱体前后壁面在水压作用下发生鼓起,从而导致箱体空间增大,同时多孔介质孔隙体积会随着悬浮颗粒的沉积而逐渐减小,但是试验中这两方面的影响都相对较小,因此多孔介质孔隙体积 V_p 可视为定值。同时试验保持单位时间液体注入速率 V_0 与液体初始颗粒浓度 C_0 保持不变,由式(2)可知相对浓度 C_R 仅与流出液体中颗粒浓度 C 和试验时间 t

相关。由图3(a)~(c)可以看出,对于固定尺寸的多孔介质,随着悬浮颗粒粒径的增加,到达相对浓度峰值时间逐渐增加,这是由悬浮颗粒粒径及相对浓度 C_R 的定义决定的。由于试验中选取的悬浮颗粒粒径不小于 $15 \mu\text{m}$,在该粒径尺度上可以忽略颗粒与多孔介质及颗粒与颗粒之间的电荷作用,并忽略悬浮颗粒的布朗运动,仅考虑其在重力及水力作用下的运动^[19-20]。对于固定孔隙率的多孔介质,粒径较小的悬浮颗粒更容易通过多孔介质与多孔介质之间的孔隙通道,与多孔介质碰撞的概率相对较小,能量损失较少,且更容易随着水流进行迁移,因此悬浮颗粒粒径越小越容易较早达到相对浓度峰值。

同时由图3(a)~(c)可以看到,在固定尺寸的多孔介质中,悬浮颗粒粒径越大,相对浓度峰值越低。这一方面由于大颗粒在孔隙中更容易由于筛滤及重力作用发生沉积^[21],从而造成多孔介质孔隙率降低,孔隙通道变窄,通透性降低。这反过来又会增加悬浮颗粒通过孔隙通道的难度,最终使通过多孔介质的水流中悬浮颗粒浓度降低,即 C 值下降。另一方面,悬浮颗粒粒径增加会导致到达相对浓度峰值时间增加,即 t 增大。两方面的因素最终导致试验中悬浮颗粒粒径越大,相对浓度峰值越低。

2.2 相同粒径悬浮颗粒在不同尺寸多孔介质中迁移—沉积特性

为了研究多孔介质尺寸变化对其中悬浮颗粒的迁移—沉积特性影响,选取3种不同粒径悬浮颗粒,每种悬浮颗粒在3种不同尺寸多孔介质中进行试验。水箱中石英粉悬浮液浓度为 200 mg/L ,在水泵的作用下以 0.3 cm/s 的速率在试验箱体中通过。

图4表示的是3种不同粒径悬浮颗粒下,3种不同尺寸多孔介质中颗粒迁移—沉积特性试验结果。由图4(a)~(c)可以看出,对于同种粒径的悬浮颗粒在不同尺寸多孔介质中的迁移过程,多孔介质尺寸越大,相对浓度峰值越高。根据2.1部分的分析可知,当悬浮颗粒粒径与多孔介质尺寸比相对较小时,悬浮颗粒与多孔介质碰撞概率相对较小,更容易通过孔隙通道而迁移,能够通过多孔介质的悬浮颗粒量较大且相对通过时间短,因此相对浓度值较高。

同时,由图4(b)~(c)及4(a)中 $D_m=0.84 \sim 1.70 \text{ mm}$ 、 $D_m=2.00 \sim 3.35 \text{ mm}$ 两组数据可以看到,同种粒径的悬浮颗粒在不同尺寸的多孔介质中迁移时到达相对浓度峰值的孔隙体积比几乎相同,而不同粒径分布的悬浮颗粒到达相对浓度峰值的时间有较大差别。 $D_p=15 \sim 20 \mu\text{m}$ 时, C_R 在 $P_V=2.0$ 时到达峰值, $D_p=37 \sim 44 \mu\text{m}$ 时, C_R 在 $P_V=2.4$ 时到达峰值, $D_p=75 \sim$

90 μm 时, C_R 在 $P_V=3.2$ 左右时到达峰值。这说明在重力和水力作用主导下, 悬浮颗粒粒径的变化比多孔介质尺寸的变化更能影响悬浮颗粒的迁移—沉积过程。

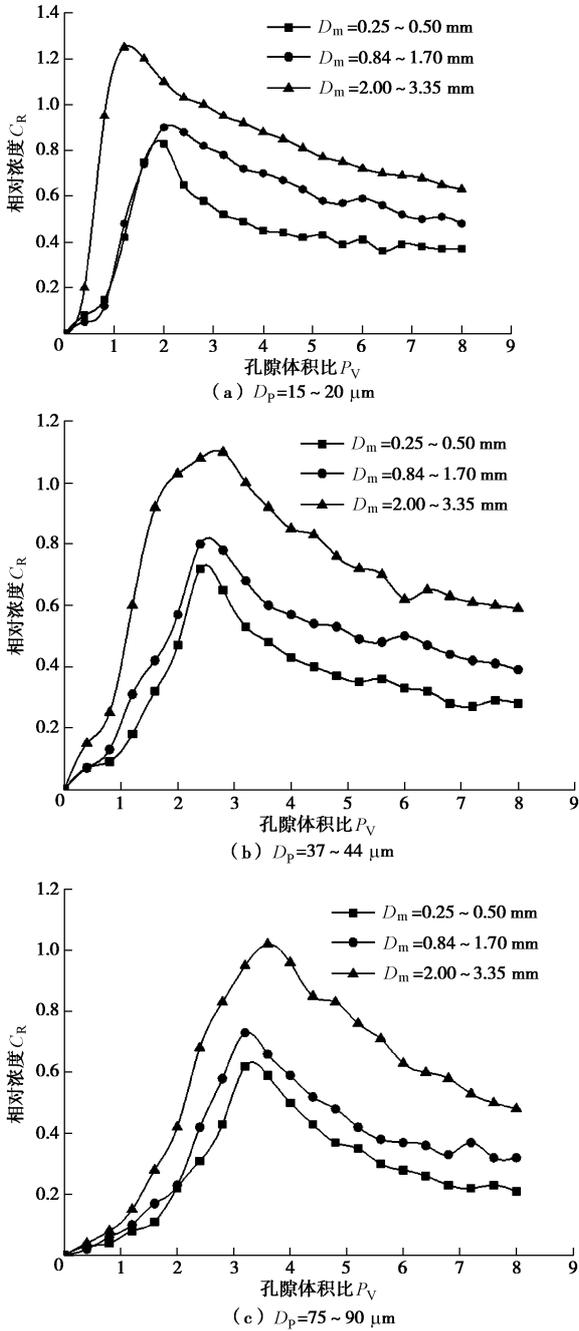


图 4 3 种不同粒径悬浮颗粒在多孔介质中 $P_V - C_R$ 关系曲线
Fig. 4 $P_V - C_R$ relation curves of suspended particles with three different diameters in porous media

另外, 在相对浓度到达峰值后, 对于同种粒径分布的悬浮颗粒, 多孔介质尺寸越小, 相对浓度将保持在越低的水平上, 这在 4 (a) ~ (c) 中都有很明显的体现。分析可知, 在试验系统运行足够长时间后, 多孔介质中的悬浮颗粒在孔隙通道壁面的沉积与脱离

已经达到一个动态的平衡过程。对于较小尺寸的多孔介质, 由于悬浮颗粒有更大的概率与孔隙壁面发生碰撞并最终在重力和水力作用下发生沉积, 从而更显著地改变多孔介质的孔隙率, 使后续悬浮颗粒更加难以通过孔隙通道, 最终使流出液中悬浮颗粒浓度值较低, 造成相对浓度保持在较低的水平上。

2.3 多孔介质与悬浮颗粒粒径比对迁移—沉积影响分析

根据试验可以发现, 多孔介质与悬浮颗粒的粒径变化会显著影响悬浮颗粒的迁移—沉积过程, 下面采用多孔介质与悬浮颗粒粒径比 K 来描述粒径变化对该过程的影响, 其中 $K = D_{m50} / D_{P50}$, D_{m50} 和 D_{P50} 分别表示多孔介质和悬浮颗粒的中值粒径。使用相对浓度峰值 C_{RT} 和相对浓度终值 C_{RL} (取 $P_V=8$ 时的 C_R 值) 两个量来衡量悬浮颗粒在多孔介质中的迁移—沉积效果。

图 5 表示不同粒径比条件下相对浓度所能到达的峰值, 可以发现, C_{RT} 与 K 近似成指数相关, 拟合函数用下式表示:

$$C_{RT} = -0.678e^{-0.014K} + 1.300 \quad (R^2 = 0.8568) \quad (3)$$

图 6 表示不同粒径比的条件下相对浓度所到达的终值, 可以发现, C_{RL} 与 K 也近似成指数相关, 拟合函数用下式表示:

$$C_{RL} = -0.448e^{-0.026K} + 0.626 \quad (R^2 = 0.9174) \quad (4)$$

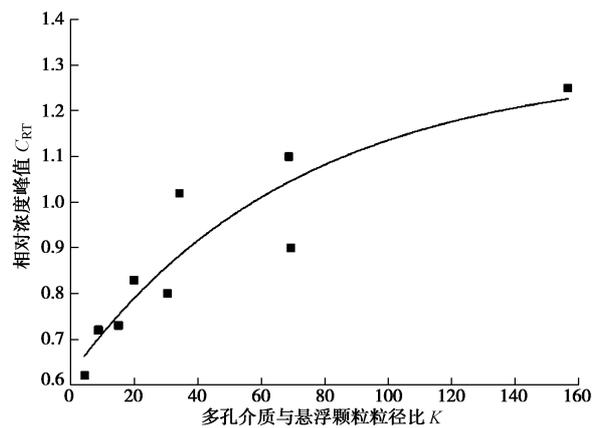


图 5 不同粒径比下悬浮颗粒相对浓度峰值曲线拟合图
Fig. 5 Fitting curve of relative concentration peak value of suspended particles under different particle diameter ratios

可以发现, 相对浓度峰值和终值与粒径比之间呈指数关系。随着粒径比的增大, 相对浓度峰值及终值均成指数关系增大。由图 5 和图 6 可知, 随着多孔介质与悬浮颗粒粒径比 K 的增大, 相对浓度的峰值和终值都将呈增大的趋势。而且根据试验观测发现, 当 K

值较小时, 悬浮颗粒在多孔介质中的堵塞是呈“滤饼”形式, 即悬浮颗粒在刚进入多孔介质时就会由于筛滤作用在多孔介质表面及孔隙通道中发生沉积并可能造成堵塞。在此“滤饼”区域, 悬浮颗粒在孔隙通道中大量沉积, 多孔介质孔隙率大幅下降, 此区域往后发生沉积的悬浮颗粒大为减少, 与“滤饼”区形成鲜明的对比。“滤饼过滤型”沉积效果如图 7 所示。当 K 值相对较大时, “滤饼”区域逐渐弱化消失, 悬浮颗粒能够较为均匀地在多孔介质中发生沉积, 发生沉积的区域也大为增加, 此种类型在此称为“迁移—沉积型”, 如图 8 所示。当 K 值大到某一水平后, 悬浮颗粒在多孔介质中沉积很少, 悬浮颗粒能够自由地通过多孔介质中的孔隙通道, 沉积对孔隙率的影响可以忽略不计, 此种类型在此称为“自由迁移型”, 如图 9 所示。

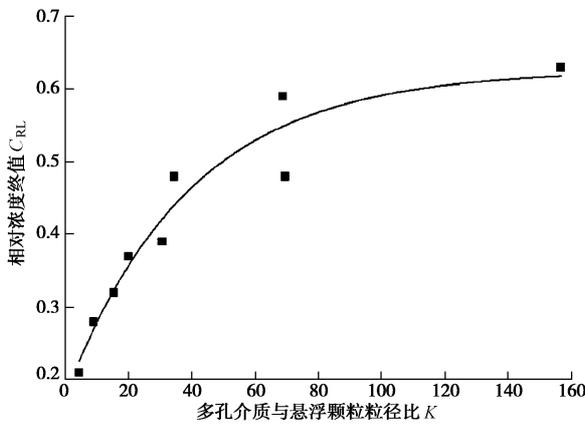


图 6 不同粒径比下悬浮颗粒相对浓度终值曲线拟合图
Fig. 6 Fitting curve of relative concentration final value of suspended particles under different particle diameter ratios

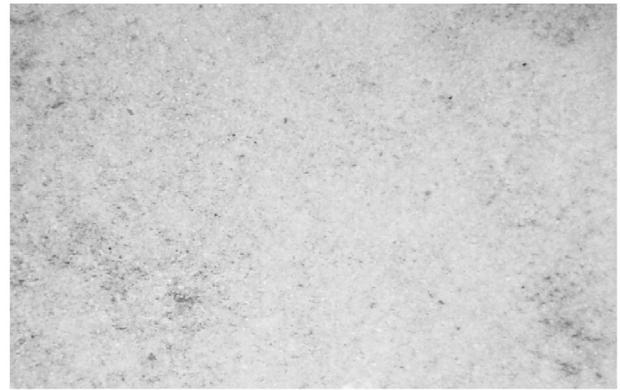


(图中 $D_{m50}=0.36\text{ mm}$, $D_{p50}=82\text{ }\mu\text{m}$, $K=4.4$)

图 7 “滤饼过滤型”试验结果

Fig. 7 Experimental results of filter cake mode

图 10 表示的是不同粒径比下悬浮颗粒在多孔介质中的迁移—沉积类型划分, 当粒径比 $K < K_1$ 时为“滤饼过滤型”, $K_1 < K < K_2$ 时为“迁移—沉积型”, $K > K_2$ 时为“自由迁移型”。在本试验中, K_1 大致为 8~15, K_2 大致为 30~35。



(图中 $D_{m50}=0.36\text{ mm}$, $D_{p50}=18\text{ }\mu\text{m}$, $K=20$)

图 8 “迁移—沉积型”试验结果

Fig. 8 Experimental results of transportation-deposition mode



(图中 $D_{m50}=1.25\text{ mm}$, $D_{p50}=18\text{ }\mu\text{m}$, $K=69.4$)

图 9 “自由迁移型”试验结果

Fig. 9 Experimental results of free transportation mode

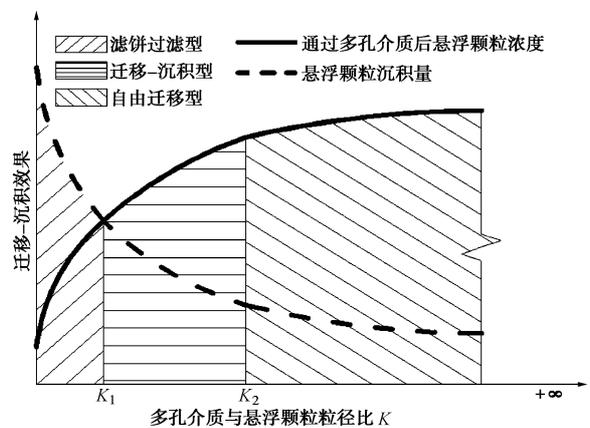


图 10 不同粒径比下悬浮颗粒迁移—沉积类型划分图

Fig. 10 Classification of transport—deposition of suspended particles under different particle diameter ratios

3 结 论

根据自主研发的砂层迁移—沉积模拟试验系统研究了悬浮颗粒和孔隙介质粒径变化对迁移—沉积的影响, 主要试验结论如下:

(1) 对于相同尺寸的多孔介质, 随着悬浮颗粒粒径的增加, 到达相对浓度峰值时间逐渐增加。粒径较小的悬浮颗粒更容易通过多孔介质中的孔隙通道, 也更容易随着水流进行迁移。悬浮颗粒粒径越大, 越容

易由于筛滤及重力等作用发生沉积, 从而相对浓度峰值越低。

(2) 相同粒径的悬浮颗粒在不同尺寸多孔介质中的迁移过程中, 多孔介质尺寸越大, 相对浓度峰值越高。同时, 悬浮颗粒粒径的变化比多孔介质尺寸的变化更能影响悬浮颗粒的迁移—沉积过程。

(3) 随着多孔介质与悬浮颗粒粒径比 K 的增大, 相对浓度的峰值和终值都呈增大的趋势。悬浮颗粒在多孔介质中的迁移—沉积类型可根据粒径比 K 的不同划分为“滤饼过滤型”、“迁移—沉积型”、“自由迁移型”3 种。

参考文献:

- [1] RYBACH L, SANNER B. Ground source heat pump systems, the European experience[J]. *GHC Bull*, 2000, **21**(1): 16 - 26.
- [2] ABESSER C. Open-loop ground source heat pumps and groundwater systems: a literature review of current applications, regulations and problems[R]. Nottingham: British Geological Survey, 2010.
- [3] SANNER B, KARYTSAS C, MENDRINOS D, et al. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe[J]. *Geothermics*, 2003, **32**(4): 579 - 588.
- [4] LUND J, SANNER B, RYBACH L, et al. Geothermal (ground-source) heat pumps—a world overview[J]. *GHC Bulletin*, 2004, **25**(3): 1 - 10.
- [5] AHFIR N D, WANG H Q, BENAMAR A, et al. Transport and deposition of suspended particles in saturated porous media: hydrodynamic effect[J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, **15**(4): 659 - 668.
- [6] ZHUANG J, TYNER J S, PERFECT E. Colloid transport and remobilization in porous media during infiltration and drainage[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **377**(1): 112 - 119.
- [7] IWASAKI T, SLADE J J, STANLEY W E. Some notes on sand filtration [with discussion][J]. *Journal American Water Works Association*, 1937, **29**(10): 1591 - 1602.
- [8] 楚锡华. 基于连续介质模型的颗粒材料孔隙度及孔隙水压力计算公式[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(8): 1255 - 1257. (CHU Xi-hua. Evolution of porosity and pore water pressure of granular materials based on continuum model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(8): 1255 - 1257. (in Chinese))
- [9] SAKTHIVADIVEL R. Clogging of a granular porous medium by sediment[M]. California: Hydraulic Engineering Laboratory, College of Engineering, University of California, 1969.
- [10] 刘 杰, 张 雄. 多级配砾石土反滤设计方法试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1996, **18**(6): 1 - 9. (LIU Jie, ZHANG Xiong. Study on filter design of broadly-graded soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, **18**(6): 1 - 9. (in Chinese))
- [11] BRADFORD S A, YATES S R, BETTAHAR M, et al. Physical factors affecting the transport and fate of colloids in saturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 2002, **38**(12): 1 - 12.
- [12] BAUER D, GOYEAU B, GOBIN D. Large particle transport in porous media: Effect of pore plugging on the macroscopic transport properties[J]. *Journal of Porous Media*, 2008, **11**(4): 343 - 360.
- [13] KAMPEL G, GOLDSZTEIN G H. Transport of non-Brownian particles in porous media[J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2011, **71**(3): 773 - 790.
- [14] 陈星欣, 白 冰. 重力对饱和多孔介质中颗粒输运特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(9): 1661 - 1667. (CHEN Xing-xin, BAI Bing. Effect of gravity on transport of particles in saturated porous media[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(9): 1661 - 1667. (in Chinese))
- [15] MCDOWELL - BOYER L M, HUNT J R, SITAR N. Particle transport through porous media[J]. *Water Resources Research*, 1986, **22**(13): 1901 - 1921.
- [16] AHFIR N D, BENAMAR A, ALEM A, et al. Influence of internal structure and medium length on transport and deposition of suspended particles: a laboratory study[J]. *Transport in Porous Media*, 2009, **76**(2): 289 - 307.
- [17] MASSEI N, LACROIX M, WANG H Q, et al. Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium: comparison of the transfer parameters[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2002, **57**(1): 21 - 39.
- [18] KANTI SEN T, KHILAR K C. Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, **119**(2): 71 - 96.
- [19] FREY J M, SCHMITZ P, DUFRECHE J, et al. Particle deposition in porous media: analysis of hydrodynamic and weak inertial effects[J]. *Transport in Porous Media*, 1999, **37**(1): 25 - 54.
- [20] ZAMANI A, MAINI B. Flow of dispersed particles through porous media—deep bed filtration[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, **69**(1): 71 - 88.
- [21] SOLTANI M, AHMADI G. On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1994, **8**(7): 763 - 785.