

地下水源热泵砂层阻塞试验研究(II)

赵军^{1,2}, 张程远³, 刘泉声³

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 江西渝州科技职业学院 土木工程学院, 江西 新余 338029;
3. 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)

摘要:介绍针对地下水源热泵系统阻塞机制开发的砂层阻塞模拟试验系统。该观测系统采取透射式观测,可实时、直接地观测阻塞物的空间变化。系统采用双向水流驱动,可模拟地下水源热泵系统回灌和回扬的渗流条件。分别利用玻璃珠和砾石颗粒作为多孔介质,以碱性氧化铝颗粒作为悬浮颗粒,通过数值模拟说明孔隙的不同引起孔隙内的流体的流速是不同的。模拟发现,在最小孔隙处流体的速度往往是最大的,而在最小孔隙处颗粒也最易发生堵塞。可为解决环境安全评估等提供试验基础。

关键词:土力学;地下水源热泵;砂层阻塞;试验系统

中图分类号: TU 46

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)增2-3363-07

EXPERIMENTAL STUDY OF PARTICLES CLOGGING IN SAND LAYER OF GROUND-SOURCE HEAT PUMP (II)

ZHAO Jun^{1,2}, ZHANG Chengyuan³, LIU Quansheng³

(1. Anhui University of Science and Technology, School of Civil and Architecture Engineering, Huainan, Anhui 232001, China;
2. Jiangxi Yuzhou Vocational College of Science and Technology, College of Civil Engineering, Xinyu, Jiangxi 338029, China;
3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: A new experimentation equipment, which can provide directly observation on mechanisms of physical and biological clogging of ground-source heat pump(GSHP) in porous media, is developed. The system can observe real-timely and directly space change of obstruction with the tem observation. Two-way flow drive is adopted to simulate the recharge of underground water source heat pump system and back to the young's seepage conditions. The glass beads and gravel particles are used as porous mediums, and alkaline alumina particles are used as the suspended particles. The velocity of the fluid inside the pore is different caused by different pores through numerical simulation. From the simulation we find that in the least pore the fluid velocity is often the biggest, and in the smallest pore can clog particles most easily. The results can provide test base for solving environmental safety evaluation.

Key words: soil mechanics; ground-source heat pump(GSHP); clogging of sand layer; experimental system

1 引言

地下水源热泵是利用地下水进行供暖或制冷的

低位热源技术,夏天利用地下低温达到制冷的效果,冬天利用其高水温达到供暖的需求。但是如果长期开采地下水而不及回灌会引起地表沉降,从而对建筑物的安全产生影响。因此对利用后的地下水进

收稿日期: 2012-12-25; **修回日期:** 2013-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772161); 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前言探索性项目(SKLQ009)

作者简介: 赵军(1982-),男,2011年于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业获博士学位,现任讲师,主要从事隧道支护及地下水源热泵回灌堵塞机制方面的教学与研究工作。E-mail: jzhao_rsm@163.com

行回灌很有必要。但是回灌的过程并不像抽取地下水那么容易。鉴于此,首先对地下水回灌过程进行分析,从地下水的运移过程分析来看,回灌(即向井中注入)是抽水的逆过程,回灌和抽水的不同之处在于:前者是发散的径向流,后者是收敛的径向流;除此之外,还要强调两者的物理条件的区别。当水井抽水时,因为井周围的过水断面小,流速相当大,因而岩层中的细颗粒将随水进入井内,这时抽出的井水是混浊的。持续一定时间后,井水变清,此时在水井过滤器周围形成一个渗透性增高的地带。而回灌注水情况正好相反,注入的水中带有细颗粒、有机物和空气,水由井内向井外流动,速度减小,所携带的细颗粒在一定的距离内沉淀在岩层中。水中所带有的某些溶解物质可能和岩石骨架或含水层中原有的水发生作用,从而产生堵塞;回灌水所带有的气泡停留在微小空隙中,同时某些细菌可能在示波器上生长,这些都导致含水层的堵塞和渗透性的降低,从而在井周围产生了一个渗透性降低的地带。该地带成圆柱状包在井管外面,渗透系数比原来的渗透系数小,而且不是常数,随着距井轴的距离而变化。距井轴越近,堵塞程度越大,渗透系数值降低越快。

回灌困难主要由以下3个因素所引起:一为物理堵塞因素,二为生物堵塞因素,三为化学堵塞因素。在国外,关于细颗粒在孔隙中的迁移已经做了大量的试验研究,发现可以通过众多参数去定性描述颗粒迁移过程。这些参数主要有渗透率、过滤系数、临界速度等。S. E. Silliman等^[1-2]通过可视化装置去追踪孔隙内悬浮颗粒的运移和沉积过程,得到悬浮颗粒在局部的沉积与颗粒的物理特征,其尺寸大小,流体成分和流体速度有关;A. Millard等^[3-8]从物理-化学作用对胶体颗粒的沉积方面做出了研究,得出沉积往往发生在离子浓度较高的部分。在国内,何满潮等^[9-11]对天津地热进行了研究;赵军等^[12]在室内试验的基础上提出了渗透系数衰减模型。但是关于水源热泵回灌中因悬浮颗粒所引起的物理堵塞问题的研究很少,本文重点研究物理堵塞所引起的回灌困难。

2 试验装置

2.1 试验系统拟解决问题

本砂层堵塞试验系统主要满足以下试验观测需要:

(1) 物理性堵塞的模拟和观测,包括固体颗粒和气泡。

(2) 微生物堵塞及其耦合作用的模拟和观测,包括微生物和产气耦合堵塞过程。

具体的重点需求包括:

(1) 可以实时地、直接地观测砂层渗流的变化和堵塞物的空间、时间变化。

(2) 可以自由控制堵塞物的供给。

(3) 可以模拟地下水源热泵砂层堵塞的回灌和回扬渗流条件。

另外,试验系统还应可以同时提供颗粒、气泡和微生物堵塞的耦合研究,也可以单独进行每一项试验观察。

2.2 试验系统硬件方案

为达到上述试验观测要求,本文采取了下述的硬件方案,要点简述如下:

(1) 采用有机玻璃制作薄型的可透射观测试验箱体,使用透射光学图像记录设备,配合较薄砂层或较透明的砂层颗粒,采用适当的示踪剂,即可直接观测渗流场的变化、堵塞物占据孔隙空间的分布状况、堵塞模式等关键信息。

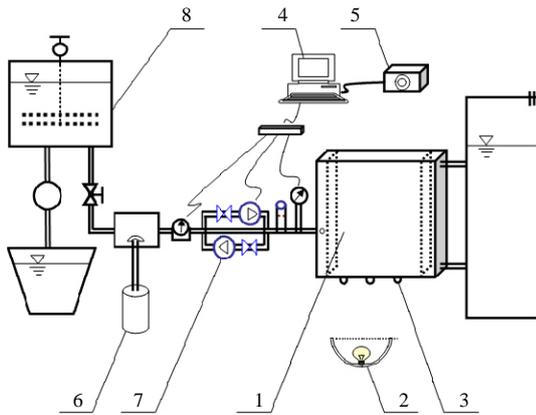
(2) 试验观测箱体采用有机玻璃(聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA)制作,利用该材料的2个特性:一是极好的透光性能,可透过92%以上的太阳光,紫外线透过率可达73.5%;二是机械强度较高,抗拉强度55~77 MPa,抗压强度130 MPa,有一定的耐热、耐寒性,耐腐蚀,绝缘性能良好,这样的箱体性能可以模拟数十米深浅层地下水砂层,保持长期稳定的试验环境。

(3) 采用高亮度白光LED作为观测光源,大功率白光LED是实用化的优良光源,可以提供低温、高照度的理想试验环境。一方面功耗低、产热少,可以很好地控制试验箱体渗流区域的温度,这对模拟温度敏感的微生物和现实的地下水沙层温度环境尤为重要;另一方面白光光谱广、色温合适,可以提供10 000 Lux以上的高照度,对光学透射成像和分析非常有利。

(4) 双向恒压水泵系统模拟地下水源热泵砂层堵塞的回灌和回扬。配合0.1级以上的高精度质量流量

计和压力变送器，可以提供实时精确的渗流参数。

试验装置如图 1 和 2 所示，该试验系统为自行研发砂层阻塞试验系统装置。



1—为试验箱体；2—为观测光源；3—压力传感和采样装置；4 和 5—光学数字相机；6—曝气室；7—双向的恒压水泵；8—混砂箱体

图 1 试验系统组成示意图

Fig.1 Sketch of experimental system



图 2 试验系统实体图

Fig.2 Entity diagram of test system

试验箱体的长度为 100 cm (在箱体底部安装 2 个压力传感器，分别位于截面 1(距离箱体入口处 30 cm 处)和截面 2(距离截面 1 距离为 40 cm 处)。

2.3 试验材料及试验过程

试验中采用玻璃珠和砾石 2 种材料作为多孔介质，选取细砾石颗粒的主要原因是考虑到其不均匀性，更接近实际情况，当然，在试验中也可以选取细砂层作为孔隙介质，玻璃珠颗粒的选取主要是满足对比性试验要求。其物理特性如表 1 所示。图 3 给出了 2 种多孔介质材料。

表 1 材料物理特性

Table 1 Physical property of materials

材料	密度/(g · cm ⁻³)	孔隙率	直径分布范围/mm
玻璃珠	2.45	0.367	4.5 ~ 5.0
细砾石	2.70	0.676	4.5 ~ 5.0



(a) 砾石颗粒



(b) 玻璃珠颗粒

图 3 2 种试验材料

Fig.3 Two test materials

砾石经过筛分后得到的曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出，大约有 80% 的砾石粒径分布在 2 ~ 5 mm，满足试验要求，不均匀系数也较好。

用碱性氧化铝作为悬浮颗粒在多孔介质中运移和沉积，把事先准备好的碱性氧化铝颗粒同水充分混合后，用注射器(60 mL)间隔性的注入试验箱中，流速可通过变频控制系统来调控(见图 5)，同时利用可视化的电子流速计测出流速，本次试验中流速控制在 20 ~ 200 cm/min。

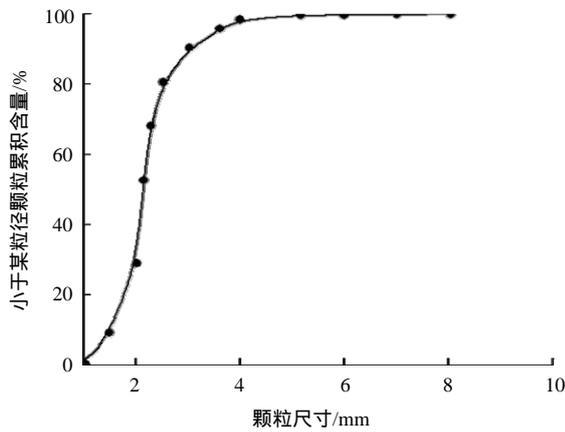


图 4 细砾石颗粒级配曲线

Fig.4 Grading curve of fine gravel particle



图 5 可调控变频仪

Fig. 5 The device of regulation frequency conversion

首先将上游水箱加满水，然后打开水箱水阀，此时关闭双向恒压水泵中出水阀，目的是防止水流的逆向流动。打开变频控制器，在低速的情况下让流体充满试验箱体，使多孔介质完全浸润，同时打开流量计，关闭下游水箱入口处的水阀，经过一段时间(大约 10 min)后开启压力计和 LED 光源系统，在试验箱体的入口处注入悬浮颗粒，然后根据试验情况进行相应试验。

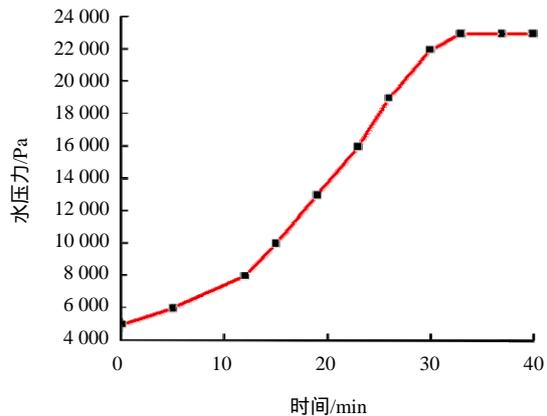
需要指出的是：当试验箱体内用砾石作为多孔介质时，砾石放置顺序不同于玻璃珠颗粒的，首先在试验箱体的底部加入一定量的水(大约为 3 cm 高

度)，然后加入砾石颗粒，轻轻晃动后再加入水体，再加入砾石颗粒，如此反复，直至砾石充满整个砂箱体。试验是在常温下进行的，不用考虑温度的变化对试验的影响。

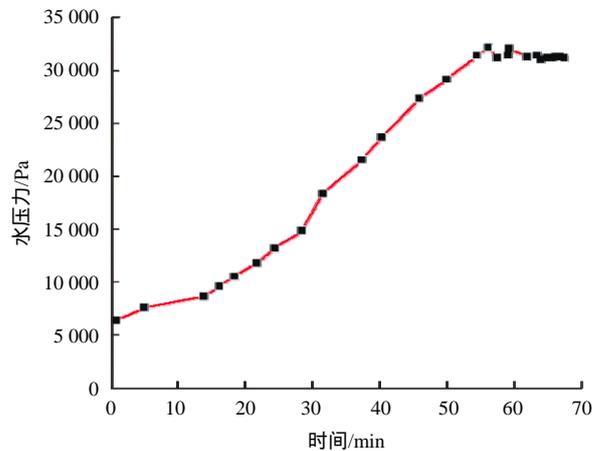
3 试验结果分析

3.1 水压力与时间的关系

分别研究玻璃珠颗粒和砂砾颗粒水压力与时间的关系。选取粒径为 4~5 mm 的玻璃珠颗粒，注入 80 g 的碱性氧化铝悬浮颗粒，经过监测后得到如图 6(a)所示的关系曲线。同时观察砾石颗粒的沉积情况。试验过程的具体操作方法同玻璃珠颗粒，注入的悬浮颗粒的质量也是 80 g，得到的关系曲线如图 6(b)所示



(a) 玻璃珠颗粒



(b) 砾石颗粒

图 6 水压力与时间关系曲线(界面 2 处)

Fig.6 Relationship curves between pressure and time(section 2)

3.2 起始悬浮颗粒浓度对水压力的影响

随着注入箱体里的悬浮颗粒浓度的不断增加，

将部分悬浮颗粒沉积在多孔介质孔隙孔道内而不参与运移，但是这部分沉积的悬浮颗粒对水压力和渗透系数改变将起到作用。当水体流速达到悬浮颗粒的“临界”启动速度时，颗粒在水体的流速下发生运移，再次引起“新”孔隙的堵塞，从而降低了多孔介质的渗透性，本节将对该猜测进行试验研究。

首先以砾石为研究对象，往试验箱体内加满砾石颗粒，然后注入 140 g 的碱性氧化铝颗粒，再驱动变频调控仪，水体在水泵的驱使下流经多孔介质，碱性氧化铝颗粒在水体的流动作用下沿着箱体横向流动，随着时间的推移，砾石颗粒的孔隙发生堵塞，然后加大变频仪的频率，使流体的流动速度加快，目的是使沉积在玻璃珠内的悬浮颗粒“漂浮”起来。

从图 7(a)可以看出，截面 2 处的水压力随着时间呈现波动关系，开始水压力的增加趋势是缓慢的，这个过程说明悬浮颗粒随着流体的流动而流动。悬

浮颗粒并没有全堵塞住孔隙，大约在 50 min 时，水压力迅速增长，这说明起始沉积的悬浮颗粒达到了其启动速度，颗粒在孔隙内发生移动，并伴有新的堵塞发生。这些堵塞可能由桥堵、捕获或沉降在孔隙壁所引起的，本文不探究到底是由哪种情况使孔隙堵塞，而只关心堵塞的发生即可。因此单位截面面积的入水量减小，当时间达到 70 min 左右时，出现了水压力升高和降低的周期性现象。该过程是保持流速不变的情况下进行，当水压力升高的某一临界值时，堵塞在孔隙壁处的悬浮颗粒发生“突破”，悬浮颗粒随着流体一起运动。此时水压力值减小，流动的悬浮颗粒继续堵塞在“新”的孔隙壁处，从而又出现了水压力值的升高。如此反复，从而出现了图 7 所示的水压力随时间的周期性变化关系。

便于比较，在试验的第二部分以玻璃珠作为研究对象，还以碱性三氧化二铝作为悬浮颗粒。将悬浮颗粒注入到试验箱体后经过一段时间后，一部分悬浮颗粒沉积在玻璃珠的孔隙孔道内，然后加大流速，使停留在孔道内的悬浮颗粒“漂浮”起来。

从图 7(b)可以看出，起始阶段水压力的增长速度比较缓慢，这个过程大约持续了 40 min。随后水压力的增长速度非常快，这一现象说明悬浮颗粒堵塞在玻璃珠孔隙孔道内，颗粒并没有达到其“启动”速度。当时间达到 70 min 时，水压力瞬间减小。说明沉积在孔道内的悬浮颗粒已经“漂浮”起来，水压力才会减小。“漂浮”的悬浮颗粒将随着流体一起流动，直至流出试验箱体，与砾石颗粒的现象有所不同的是玻璃珠颗粒并没有出现周期性的波动情况。这个现象可以解释为：玻璃珠颗粒内部孔隙分布较砾石均匀，而砾石颗粒内部有大量分布不均匀的孔隙孔道，如果悬浮颗粒沉积在极小的孔隙孔道内很难“漂浮”起来，将继续沉积在孔隙孔道内，所以砾石介质内的水压力继续增大。但是当大的孔隙孔道内的悬浮颗粒“漂浮”起来时，水压力才会减小，而被“漂浮”的悬浮颗粒遇到极小的孔隙孔道时沉积在孔隙内，因此水压力又会出现增大现象。如此反复才会出现砾石颗粒水压力的周期性变化，而这种现象在玻璃珠颗粒中是无法得出的。

3.3 悬浮颗粒恢复率

悬浮颗粒在流体作用下沉积在多孔介质的孔隙孔道内，随着流体速度的增加，部分沉积过的悬浮颗粒被“漂浮”起来，随着流体而流出。如果流速减小，会增加了沉积的概率。虽然可以通过数值方

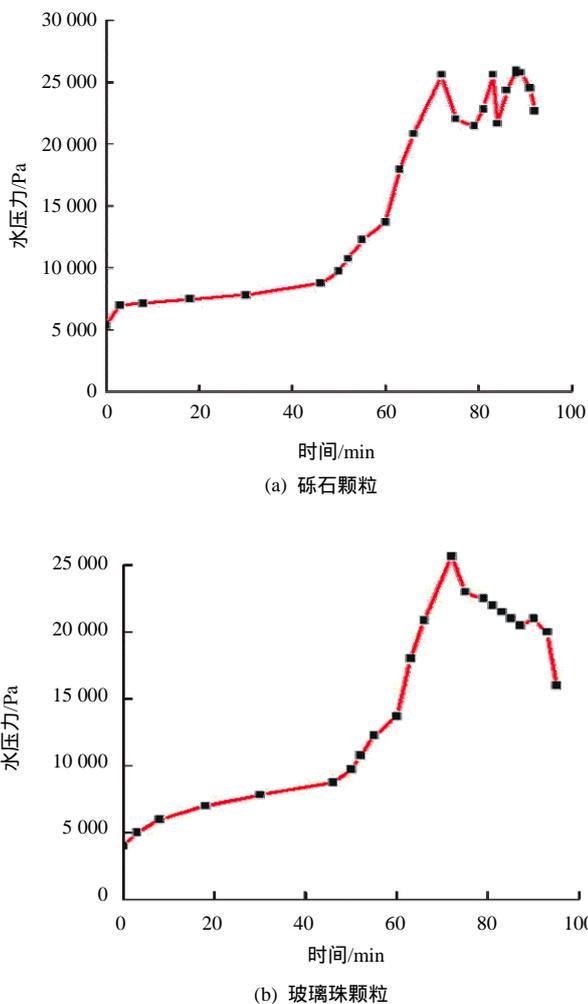


图 7 起始浓度对水压力影响关系(截面 2 处)

Fig.7 Effect of initial concentration on pressure(section 2)

法得出恢复率的具体值，但如果能直接从试验中将参数提出，将方便处理试验结果。试验过程可以利用浊度仪对出口处的液样进行检测，得到不同流速下液样的浊度，记为 NTU ，取值范围为 $0 \sim 100$ ，可得恢复率与流速的关系如图 8 所示。

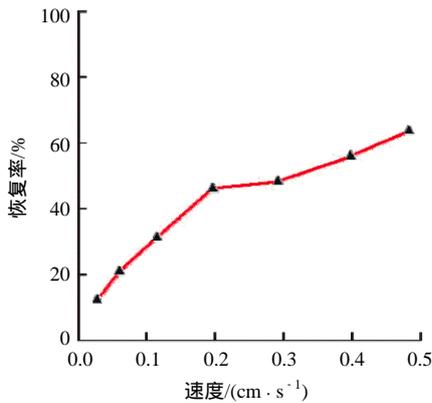


图 8 恢复率与流速的关系(玻璃珠)

Fig.8 Relationship of recovery rate and velocity(glass)

从图 8 中可以看出，随着流体速度的增加，悬浮颗粒在玻璃珠颗粒孔道内的恢复程度越高，最大恢复率达到了 60%。换言之，有 40% 左右的悬浮颗粒沉积在孔隙壁处。由于玻璃珠颗粒孔隙分布较均匀，且颗粒与颗粒之间没有咬合力，有利于悬浮颗粒的“漂浮”，从而出现了较高的恢复率。悬浮颗粒的沉积率可以用悬浮颗粒入口处的浓度与出口处的浓度的差来表示。在刚注入悬浮颗粒后，经过几分钟后，可以认为悬浮颗粒的沉积率为 100%，然后加大流体速度，在出口处测量悬浮颗粒的浊度，就可以得到在不同的流体速度下沉积率与流速的关系，如图 9 所示。

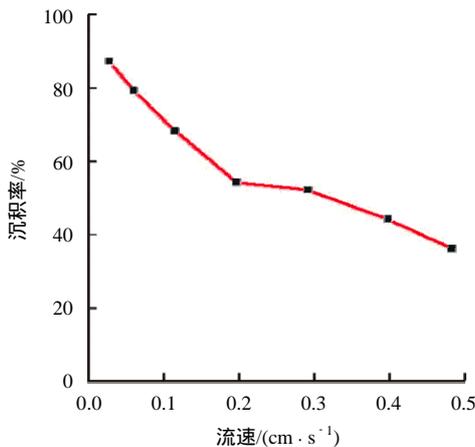


图 9 沉积率与流速关系

Fig.9 Relationship between deposition rate and velocity

4 数值模拟

为了便于说明问题，定义孔隙介质为二维的，尺寸为 $0.6 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 。水流从右向左流动，进口处和出口处的流体压力已知，同时假定上、下边界对称条。利用 COMSOL 数值软件对模型进行模拟，边界条件设定为：设置模型尺寸左边界为进水口，起始水压力值大小为 0.3 MPa ，上边界为自由面，右边界为固定边界。

颗粒的沉积可通过下式表达：

$$K_{\text{dep}} = \frac{\ln R}{t_c} \left(1 - \frac{\ln R}{P_e} \right) \quad (1)$$

式中： K_{dep} 为颗粒沉积率， R 为颗粒的恢复率， t_c 为颗粒在介质中对流时间(s)， P_e 为普朗特数。

沉积学中对水流的启动(搬运临界)速度、沉积速度都有研究，涉及到水力梯度、颗粒级配、水流速度、孔隙联通性等。本文模拟过程中，只对这些参数进行应用，关于这方面的研究将在后续工作中将作为重点。

流体在孔隙内的流动速度和颗粒的动态追踪如图 10 所示。

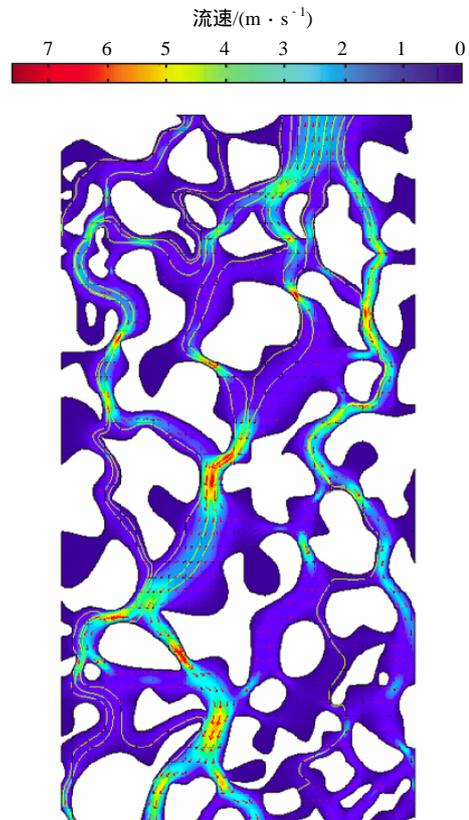


图 10 孔隙中流体的速度、颗粒追踪示意图

Fig. 10 Flow velocity and particles tracing

从图 10 中可以看出,在孔隙直径最小处,流体的流速往往是最大的,比入口处的流速还大。在最小孔隙处颗粒最易于发生堵塞,这同现实情况是相吻合的。随着时间的推移,越来越多的颗粒将沉积在较细的孔隙孔道内。

5 结 论

(1) 砾石颗粒间的不均匀性为颗粒的沉积提供了“温床”,玻璃珠颗粒粒径较单一、均匀,同时颗粒之间咬合力较小,不利于悬浮颗粒的沉积。

(2) 同等水压力条件下,起始浓度的大小对砾石颗粒的影响比玻璃珠颗粒影响要大。

(3) 由于玻璃珠颗粒孔隙分布较单一、均匀,有利于悬浮颗粒的“漂浮”,悬浮颗粒出现了较高的恢复率。

(4) 从数值模拟结果可得出,在最小直径的孔隙处流体的速度最大。当流体速度增加时,颗粒易堵塞在细小孔隙处。

参考文献(References) :

- [1] SILLIMAN S E. Particle transport through two-dimensional, saturated porous media : influence of physical structure of the medium[J]. Journal of Hydrology , 1995 , 167(1/2/3/4) : 79 – 98.
- [2] SILLIMAN S E. The importance of the third dimension on transport through saturated porous media : case study based on transport of particles[J]. Journal of Hydrology , 1996 , 179(5) : 181 – 195
- [3] MILLARD A ,REJIB A ,CHIJIMATSU M ,et al. Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository—BMT1 of the DECOVALEX III project. part 2 : effects of THM coupling in continuous and homogeneous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences ,2005 , 42(4) : 731 – 744.
- [4] 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(7) : 21 – 39.
- [5] WANG H Q , LACROIX M , MASSEI N , et al. Particle transport in porous medium : determination of hydrodispersive characteristics and deposition rates[J]. Comptes Rendus de A Academie des Sciences Series II A Earth and Planetary Science , 2000 , 331(11) : 97 – 104
- [6] WANG H Q , CRAMPON N , HUBERSON S , et al. Linear graphical method for determining hydrodispersive characteristics in tracer experiments with instantaneous injection[J]. Journal of Hydrology , 1987 , 95(11) : 143 – 154.
- [7] WERONSKI P , WALZ J Y , ELIMELECH M. Effect of depletion interactions on transport of colloidal particles in porous media[J]. Journal of Colloid and Interface Science , 2003 , 262(6) : 372 – 383.
- [8] SANTOS A , BEDRIKOVETSKY P A. Stochastic model for particulate suspension flow in porous media[J]. Transp. Porous Media , 2006 , 62(1) : 23 – 53.
- [9] 何满潮, 李启民. 地热资源在移民小区可持续发展应用研究[J]. 太阳能学报, 2005 , 25(2) : 223 – 226.(HE Manchao , LI Qiming , Research of sustainable development of geothermal resources in immigrant communities[J]. Acta Energiae Solaris Sinica , 2005 , 25(2) : 223 – 226.(in Chinese))
- [10] 何满潮, 刘 斌, 姚磊华, 等. 地热水对井回灌渗流场理论研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004 , 33(3) : 245 – 248.(HE Manchao , LIU Bin , YAO Leihua , et al. Study on theory of seepage field a round geothermal production-reinjection doublets wells[J] , Journal of China University of Mining and Technology , 2004 , 33(3) : 245 – 248.(in Chinese))
- [11] 何满潮, 刘 斌, 姚磊华, 等. 地下热水回灌过程中渗透系数研究[J]. 吉林大学学报 : 自然科学版 , 2002 , 32(4) : 374 – 377.(HE Manchao , LIU Bin , YAO Leihua , et al. Study on hydraulic conductivity during geothermal reinjection[J]. Journal of Jilin University : Earth Science , 2002 , 32(4) : 374 – 377.(in Chinese))
- [12] 赵 军, 刘泉声, 张程远, 地源热泵井回灌堵塞实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012 , 31(3) : 604 – 609.(ZHAO Jun , LIU Quansheng , ZHANG Chengyuan. The experimental study of the particles clogging in GSHP[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2012 , 31(3) : 604 – 609.(in Chinese))