

DOI: 10.11779/CJGE201504022

# 多孔介质中沉积颗粒脱离特性试验研究

刘泉声, 崔先泽, 张程远, 黄诗冰

(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:** 开展沉积颗粒在多孔介质中脱离过程试验对研究地下水热泵回灌堵塞过程有重要意义。利用自主研发的砂层沉积-脱离模拟试验系统, 研究增加渗流速度和改变渗流方向对多孔介质中已沉积颗粒脱离特性的影响。结果表明: 在改变渗流速度大小条件下, 渗流速度越大, 已沉积的颗粒越容易发生脱离, 到达悬浮颗粒相对浓度第二次峰值所需的时间越短, 而达到二次峰值时所注入的水量接近; 与改变渗流速度大小相比, 用改变渗流方向的方式进行沉积颗粒脱离效果更为明显, 到达二次峰值所需时间更短、水量更少, 但随着时间增加, 多孔介质中又会出现类似渗流方向改变前的堵塞现象; 渗流条件变化后的初始阶段是已沉积颗粒脱离的主要时期。研究结果为水源热泵回灌过程中悬浮颗粒在地层中的沉积-脱离特性进一步研究奠定了基础。

**关键词:** 水源热泵; 悬浮颗粒; 多孔介质; 沉积; 脱离

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)04-0747-08

**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。

## Experimental research on release characteristics of deposited particles in porous media

LIU Quan-sheng, CUI Xian-ze, ZHANG Cheng-yuan, HUANG Shi-bing

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The experimental research on the release characteristics of deposited particles in porous media plays an important role in the blocking process of the WSHP recharge. The release characteristics of deposited particles in porous media are studied by using the self-development sand deposition and release equipment. Two factors are taken into consideration, one is increasing the flow velocity, the other is changing the flow direction. The study shows that as the flow velocity increases, deposited particles are easier to release from the surface of porous media and it takes less time to reach the second peak of relative concentration, meanwhile, the water injected is almost of the same amount. Compared with the way of increasing the flow velocity, the way of changing the flow direction is more effective in the releasing process of deposited particles, and it takes less time and water to reach the second peak of relative concentration. With the increase of time, blocking will appear in porous media and change as it is before the flow direction. The initial phase after the flow condition changes plays an important role in the release of deposited particles. The research lays foundation for further studies on the deposition and release characteristics that suspended particles transport in layer, especially in the recharge process of WSHP.

**Key words:** WSHP; suspended particle; porous medium; deposition; release

## 0 引言

地下水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<sup>[1-2]</sup>。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<sup>[3-4]</sup>, 而阻塞物在回扬及回灌条件变化等条件下会发生脱离<sup>[5-6]</sup>, 从而造成水源热泵含水层性状发生变

化, 并有可能影响其正常使用。因此有必要进行已沉积颗粒在多孔介质中的脱离特性研究。

国内外关于细小颗粒在多孔介质中的沉积及脱离已经有较多的研究, 但主要集中在污水处理和石油工程中<sup>[7-8]</sup>, 而且对多孔介质中悬浮颗粒沉积后再脱离

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272272, 51478368); 湖北省自然科学基金项目(132002)

收稿日期: 2014-09-04

的过程及影响机制并不十分明确。Derjaguin 等<sup>[9-10]</sup>提出的DLVO理论是最早描述胶体颗粒与多孔介质表面接触的理论,该理论认为偶极子层作用和范德华力是决定悬浮颗粒沉积与脱离最主要的因素。多孔介质中颗粒沉积的最主要沉积原因有滤除作用和吸附作用,Herzig 等<sup>[11]</sup>认为滤除效果可以通过悬浮颗粒有效粒径和土颗粒级配等参数来预测。Xu 等<sup>[12]</sup>通过试验发现悬浮颗粒与多孔介质粒径比存在一个临界值0.008,小于此值可忽略滤除作用,大于此值滤除系数与粒径比呈线性相关。陈星欣等<sup>[13]</sup>利用室内土柱试验研究重力对饱和多孔介质中颗粒输运特性的影响,发现渗流速度越小,重力的作用越明显。多孔介质中沉积颗粒的脱离是由颗粒与多孔介质的接触力及水动力共同决定<sup>[5]</sup>。Goldman 等<sup>[14]</sup>给出了剪切流影响下平面上球形颗粒所受拖拽力计算方法。Bergendahl 等<sup>[15]</sup>建立了考虑热力学和水动力作用的描述胶体颗粒脱离数学模型。Bedrikovetsky 等<sup>[16]</sup>建立了考虑拖拽力、静电力、升力及重力的岩石孔隙表面颗粒脱离模型,该模型可以计算岩石孔隙中颗粒的滞留浓度和过滤系数。Grolimund 等<sup>[17]</sup>通过土体和地下含水层试验,认为多孔介质中颗粒脱离过程可以由一阶方程进行描述,并由此建立了多孔介质中颗粒脱离数学模型。Ahmadi 等<sup>[18]</sup>考虑了毛细作用对紊流中颗粒黏附和脱离过程的影响,估算了不同条件下颗粒发生脱离的临界剪切速率。

由此可见,目前对于多孔介质中沉积颗粒脱离特性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<sup>[16-17]</sup>,而由于水源热泵回灌堵塞过程中存在综合物理、化学、生物作用而形成的10 μm以上粒径悬浮物<sup>[2, 19-20]</sup>,对该尺寸悬浮颗粒的沉积后再脱离特性研究很少。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<sup>[21-22]</sup>,颗粒脱离特性可能发生变化,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沉积—脱离特性。

通过自主研发的砂层沉积—脱离模拟试验系统,对试验箱体中已沉积颗粒采用增加渗流速度和改变渗流方向两种方式进行脱离试验,研究两种条件下多孔介质中已沉积颗粒脱离特性,分析两种模式对已沉积颗粒脱离过程的影响。试验为多孔介质特别是水源热泵回灌条件下悬浮颗粒的沉积—脱离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。

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,综合考虑观察的方便、试验水压力、流量计精度等方面要求,自主研究开发了一套砂层沉积—脱离模拟试验系统。试验装置结构如图2所示。

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。箱体可以模拟数十米深含水砂层,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,从而通过浊度计量测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。

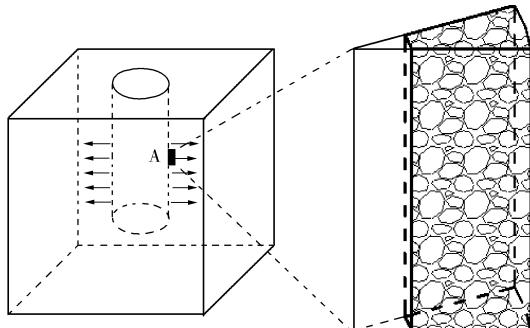
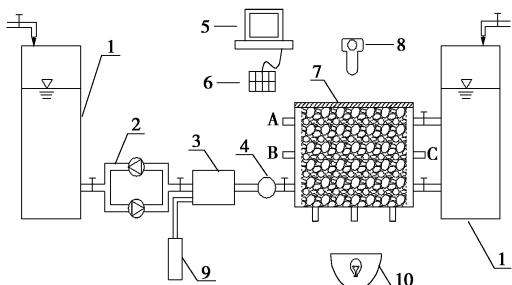


图1 地下水源热泵回灌井运行模式图

Fig. 1 Operation mode for WHSP recharge well



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

## 1.2 试验材料

本试验的多孔介质采用天然石英砂, 其中  $\text{SiO}_2$  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, 相对密度为  $2.65 \text{ g/cm}^3$ 。武汉地区地下水热泵回灌水地层以中粗砂为主, 故由此选择试验所用石英砂, 具体参数见表 1。

表 1 试验用石英砂物理参数

Table 1 Physical parameters of quartz sand in experiments

材料	粒径大小 /mm	中值粒径 /mm	孔隙率 /%	不均匀 系数	曲率系数
石英砂	0.84~1.70	1.25	34	1.4	1.2

水源热泵回灌堵塞物成分十分复杂, 往往是在物理颗粒的基础上伴随化学沉积、微生物生长、生物膜附着等作用共同形成的混合体。为把握研究核心问题, 简化试验, 悬浮颗粒采用红色石英粉, 其与实际工程中物理悬浮颗粒的主要成分相同<sup>[20]</sup>, 物理化学性质稳定, 便于观测。试验中根据实际工程中发生堵塞的悬浮颗粒的尺寸, 所选取的石英粉具体参数如表 2 所示。

表 2 试验用石英粉物理参数

Table 2 Physical parameters of quartz powder in experiments

材料	粒径大小 / $\mu\text{m}$	中值粒径 / $\mu\text{m}$	密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
石英粉	37~44	41	2.65

## 1.3 试验方案

试验根据武汉百步亭新港苑小区水源热泵工程地质资料, 选取典型粒径的多孔介质及悬浮颗粒进行二维沙箱试验。由于在水源热泵回灌困难时通常采用增加渗流速度和回扬洗井两种方式, 因此进行增加渗流速度影响脱离试验和改变渗流方向影响脱离试验。

两种试验均分为悬浮颗粒沉积和脱离两个过程, 两种试验的沉积过程一致, 而对于沉积后再脱离的过程, 两套试验分别采取了增加渗流速度和逆转渗流方向两种方法。

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  $105^\circ\text{C}$  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, 直至石英砂填充满整个试验箱体, 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。

试验中采取连续式注入悬浮颗粒, 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。

在试验系统运行足够长的时间(多孔介质发生堵塞)后, 即悬浮颗粒沉积过程稳定后, 进行已沉积颗粒脱离试验。

增加渗流速度影响脱离试验通过增大渗流速度观察渗流速度增加对已沉积悬浮颗粒脱离过程的影响。沉积过程发生后, 采用 4 种渗流速度的回灌水, 观察沉积颗粒的脱离过程。

改变渗流方向影响脱离试验通过改变渗流方向观测其对已沉积悬浮颗粒脱离过程的影响。沉积发生后, 关闭水泵进水阀门, 打开回水阀门, 调节变频控制器调节管路中水流速, 使水流速度与沉积过程相同。观测沉积颗粒的在逆向水流条件下的脱离过程。

试验中每隔 20 s 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沉积-脱离状况。

## 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<sup>[23]</sup>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<sup>[24-25]</sup>,  $P_V$  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,  $V_p$  表示砂箱中多孔介质孔隙体积,  $V_{\text{inj}}$  表示注入砂箱的液体体积,  $V_0$  表示单位时间注入砂箱的液体体积。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<sup>[23]</sup>, 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 增加渗流速度影响脱离试验

为了研究增加渗流速度对已沉积颗粒的脱离特性, 将试验分为 4 组, 首先将浓度为 200 mg/L 的悬浮颗粒在 0.3 cm/s 的渗流速度下通过试验箱体, 沉积发生后, 再对 4 组试验分别以 4 种不同的渗流速度进行脱离试验。

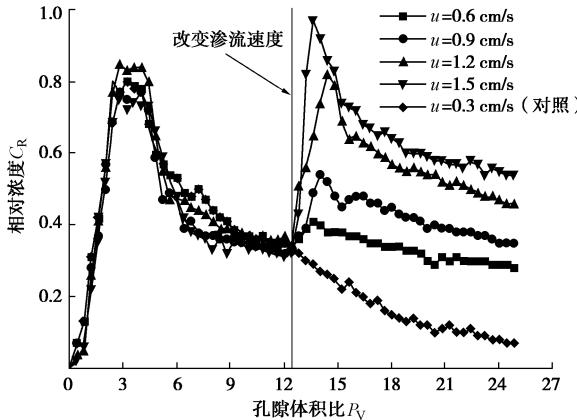


图 3 不同渗流速度影响下沉积-脱离  $P_v - C_R$  关系曲线

Fig. 3 Curves of  $P_v - C_R$  under different flow velocities

图 3 表示的是同种试验条件下发生沉积后又以不同渗流速度进行脱离试验的 4 组试验结果。根据武汉百步亭新港苑小区水源热泵工程资料, 在本试验中分别选取 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 cm/s 四种渗流速度进行脱离试验。对照试验在发生沉积后不做任何改变, 并继续进行数据采集。

试验箱体中多孔介质原为无悬浮颗粒的饱和状态, 随着这部分孔隙水的排除, 多孔介质逐渐处于石英粉悬浮液中, 造成悬浮颗粒相对浓度值逐渐增大, 并在某一时刻到达峰值, 随着悬浮液的注入, 峰值将维持一段时间。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。在  $P_v$  到达 12.4 时, 分别以更高的 4 种渗流速度通过试验箱体。部分已发生沉积的颗粒在较大的水动力作用下发生脱离, 并随着水流进行迁移, 造成相对浓度值重新增大, 并在某处第二次到达峰值。随着注入悬浮液体积的增加, 试验箱体中悬浮颗粒的沉积与脱离重新达到动态平衡,  $C/C_0$  保持稳定,  $C_R$  下降。

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<sup>[26]</sup>。

由图 3 可以看到, 在  $P_v$  从 0 增加到 12.4 的第一

次沉积过程中, 5 组试验结果十分接近, 说明本试验的可重复性强, 试验结果可比性强。图 4 表示的是 4 种渗流速度下两次相对浓度峰值时相对浓度对比图。由图 3, 4 可以发现, 渗流速度越高, 二次峰值时相对浓度越高, 并且在渗流速度达到一定值后会超过初次峰值时相对浓度。这是由于渗流速度越大, 沉积在孔隙中的颗粒越容易在较大水动力作用下发生脱离, 并随着水流迁移, 造成流出液中悬浮颗粒浓度越大, 从而使相对浓度越高。由于在较大的水动力作用下更多已发生沉积的悬浮颗粒会发生脱离并随水流迁移, 因此二次峰值在较大渗流速度下会超过一次峰值。

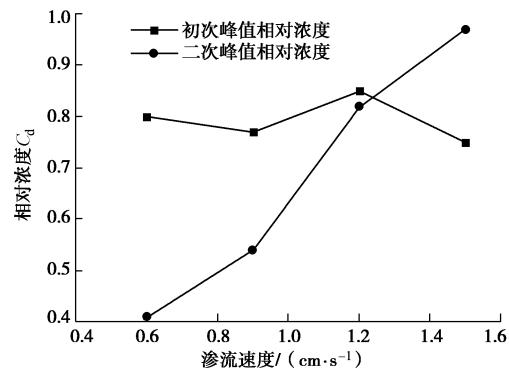


图 4 不同渗流速度两次峰值相对浓度对比图

Fig. 4 Curves of  $C_d$  during two peaks under different flow velocities

同时由图 3 可以看到, 渗流速度越高, 沉积脱离重新达到动态平衡后的相对浓度值越高。分析认为, 对于固定粒径的多孔介质和悬浮颗粒, 渗流速度越高, 悬浮颗粒越不容易在多孔介质中发生沉积, 更容易随着水流进行迁移而流出试验箱体, 从而较少地沉积在多孔介质中, 最终使得沉积—脱离达到动态平衡后流出液的悬浮颗粒相对浓度值越高。

另外, 与到达第一次峰值相比, 第二次到达峰值所需  $P_v$  相对较小。这一方面由于第一次到达峰值前多孔介质中有一个悬浮颗粒充填孔隙的过程, 另一方面, 在第一次峰值后, 有部分颗粒沉积在多孔介质孔隙通道内, 在较大的水动力作用下, 部分已沉积颗粒发生脱离并随水流迁移, 从而使得第二次峰值更早到达。

图 5 表示的是不同渗流速度对应的从改变渗流速度到达第二次峰值所用的时间和所注入的水量。可以看到, 渗流速度越大, 到达第二次峰值所需的时间越短, 而达到第二次峰值时所注入的水量是十分接近的。这说明影响悬浮颗粒脱离—迁移的水量是相近的, 而由于渗流速度不同导致达到第二次峰值所需时间有较大差别, 造成渗流速度越大, 达到峰值时间越短的结果。

## 2.2 改变渗流方向影响脱离试验

为了研究改变渗流方向对已沉积悬浮颗粒的脱离特性, 首先将浓度为 200 mg/L 的悬浮颗粒在 0.3 cm/s 的渗流速度下通过试验箱体, 沉积发生后, 再改变渗流方向, 使水流逆向通过试验箱体, 进行脱离试验。

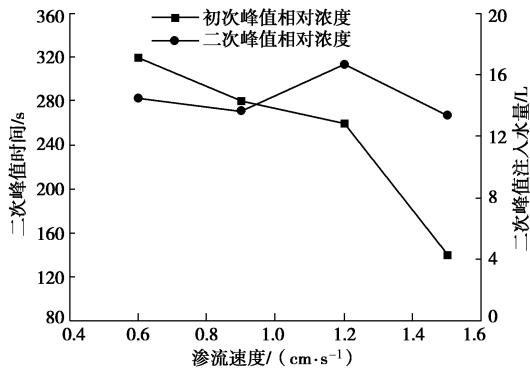


图 5 不同渗流速度影响二次峰值时间及注入水量曲线

Fig. 5 Curves of water volume injected in and time needed to reach second peck under different flow velocities

图 6 表示的是在试验箱体中发生沉积后改变渗流方向进行脱离试验的试验结果。试验结果与对照组试验进行对比。

由图 6 可以看到, 已沉积颗粒在改变渗流方向影响下与在更高渗流速度影响下相对浓度变化规律基本相同, 即改变渗流方向后, 流出液中悬浮颗粒相对浓度迅速到达峰值, 然后随着注入水量的增加相对浓度缓慢降低。

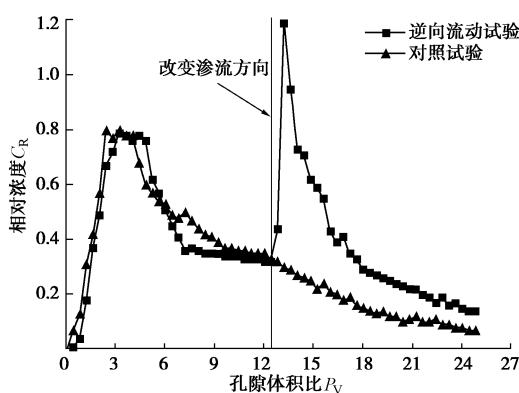


图 6 改变渗流方向影响下沉积 PV - CR 关系曲线

Fig. 6 Curves of PV - CR under change of flow direction

分析认为, 当渗流方向变为与原方向相反, 沉积在多孔介质表面的颗粒并不会发生显著的脱离, 而沉积在孔隙“孔喉”部位的颗粒则会有较为明显的脱离现象发生。这是因为沉积在多孔介质表面的颗粒是由于水动力作用与重力、双电层力等作用平衡的结果, 而沉积在“孔喉”部位的颗粒则主要是基于滤除作用发生的沉积。

下面将增加渗流速度与改变渗流方向对沉积颗粒脱离效果的关键指标进行对比, 分析两种因素对脱离效果的影响。为得到更显著的对比效果, 选取改变后渗流速度为 1.5 cm/s 试验结果与逆向渗流结果进行比较。结果如表 3 所示。

表 3 两种因素影响下脱离试验效果对比

Table 3 Comparison of release results under two factors

类型	二次峰 值 PV 值	二次峰值 时间/s	二次峰值注 入水量/L	相对浓度 终值	终值
增加渗 流速度	1.2	140	13.36	0.97	0.54
改变渗 流方向	0.8	80	3.72	1.19	0.14

从表 3 可以看出, 悬浮颗粒在多孔介质中发生沉积后, 使用改变渗流方向的方式进行沉积颗粒脱离效果更为明显, 具体体现为: 到达二次峰值  $P_V$  值较小、到达二次峰值时间较短、到达二次峰值所需注入水量更小、到达二次峰值时相对浓度较高。同时, 在改变渗流方向的影响下, 随着达到沉积-脱离过程的动态平衡, 悬浮颗粒相对浓度逐渐下降。而由于改变渗流方向的方式并未改变渗流速度大小, 最终也会发生类似渗流方向改变前的阻塞, 从而使得相对浓度终值较低, 为 0.14, 远小于增加渗流速度影响下相对浓度终值的 0.54, 而与对照试验中初次峰值后同样增加 11.6 的  $P_V$  后的相对浓度值 0.21 较为接近。这说明, 在实际工程中, 若回扬洗井为原含有悬浮颗粒的水, 且洗井时间较短, 则改变渗流方向比增加渗流速度的洗井效果更为显著, 若缩短洗井时间较长, 地层中可能发生新的阻塞, 洗井效果可能反而更差。

## 3 脱离过程分析

沉积在多孔介质中的悬浮颗粒的脱离过程受多种因素影响, 例如颗粒物理特性、水流物理化学性质和多孔介质孔隙特征等。颗粒从多孔介质骨架表面脱离有滑动脱离和滚动脱离两种方式<sup>[27]</sup>。对于滑动脱离, 颗粒脱离条件为

$$T \geq f(F_w + F_a - F_l) \quad (3)$$

式中,  $T$  为颗粒所受拖拽力,  $f$  为摩擦系数,  $F_w$  为颗粒有效重量,  $F_a$  为黏附力,  $F_l$  为升力。

对于滚动脱离可分为光滑接触面和粗糙接触面两种情况, 对于光滑接触面, 颗粒滚动条件为

$$TH \geq (F_w + F_a - F_l)a \quad (4)$$

式中,  $H$  为拖拽力力臂,  $a$  为滚动原点距颗粒中轴线距离。

对于粗糙接触面, 颗粒滚动条件为

$$Th \geq (F_w + F_A - F_L)L \quad , \quad (5)$$

式中,  $h$  为拖拽力力臂,  $L$  为滚动原点距颗粒中轴线距离。

显然, 对于这几种情况, 增加渗流速度都可以有效地提高颗粒的脱离率, 而改变渗流方向仅能提高粗糙接触面上颗粒滚动脱离的概率。

由于多孔介质中的沉积淤堵主要位于“孔喉”而非平坦接触面上, 如图 7(a)、7(b) 所示。在这种沉积条件下, 改变渗流速度和改变渗流方向对颗粒脱离率的影响有较大区别。

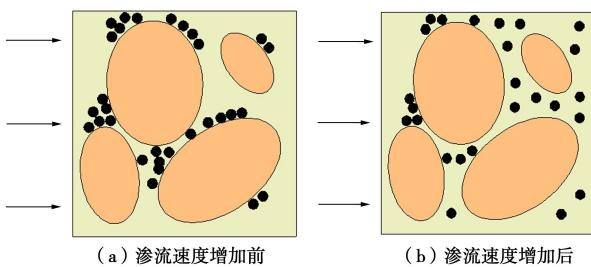


图 7 增加渗流速度影响下颗粒脱离示意图

Fig. 7 Sketch of particle release under increasing flow velocity

图 7 表示的是在增加渗流速度的影响下发生沉积的悬浮颗粒的脱离示意图。沉积在多孔介质表面的颗粒在更大的水动力作用下发生脱离, 而部分沉积在“孔喉”部位的颗粒则难以脱离, 依然继续影响多孔介质的通透性。

图 8 表示的在改变渗流方向影响下已发生沉积的颗粒脱离过程示意图。沉积在多孔介质表面的颗粒在更大的水动力作用下发生脱离, 沉积在“孔喉”部位的颗粒也会脱离, 从而使得多孔介质的通透性有较大的提高, 试验箱体流出液中悬浮颗粒也可以达到较高的浓度。

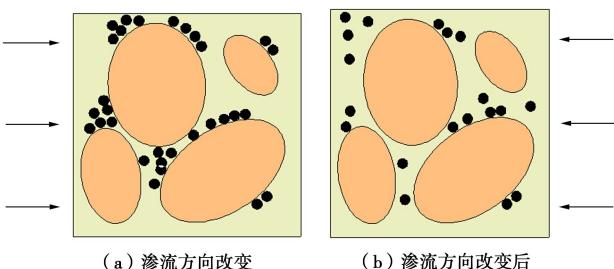


图 8 改变渗流方向影响下颗粒脱离示意图

Fig. 8 Sketch of particle release under changing flow direction

对于改变渗流条件下颗粒相对浓度达到峰值后过程参照 Escher 指数模型<sup>[28]</sup>进行分析。

定义相对浓度指标  $C_d = C_R / C_{RP}$ ,  $C_{RP}$  为二次峰值颗粒相对浓度, 则

$$C_d = A e^{-k_1 P_V} + (1 - A) e^{-k_2 P_V} \quad , \quad (6)$$

其中  $0 \leq A \leq 1$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  分别表示快速脱离系数和慢速

脱离系数。当  $k_1$ ,  $k_2$  保持不变, 权重  $A$  增加时, 颗粒脱离过程增快; 当权重  $A$  保持不变,  $k_1/k_2$  越大, 颗粒脱离过程越快。

图 9 为根据双比率指数模型做出的 4 种渗流速度下  $P_V - C_d$  拟合曲线图。

对于  $u=0.6 \text{ cm/s}$ , 有

$$C_d = 0.069 e^{-0.577 P_V} + 0.931 e^{-0.026 P_V} \quad (R^2 = 0.940) \quad . \quad (7)$$

对于  $u=0.9 \text{ cm/s}$ , 有

$$C_d = 0.073 e^{-3.024 P_V} + 0.927 e^{-0.035 P_V} \quad (R^2 = 0.961) \quad . \quad (8)$$

对于  $u=1.2 \text{ cm/s}$ , 有

$$C_d = 0.214 e^{-1.057 P_V} + 0.786 e^{-0.032 P_V} \quad (R^2 = 0.983) \quad . \quad (9)$$

对于  $u=1.5 \text{ cm/s}$ , 有

$$C_d = 0.355 e^{-0.489 P_V} + 0.645 e^{-0.013 P_V} \quad (R^2 = 0.961) \quad . \quad (10)$$

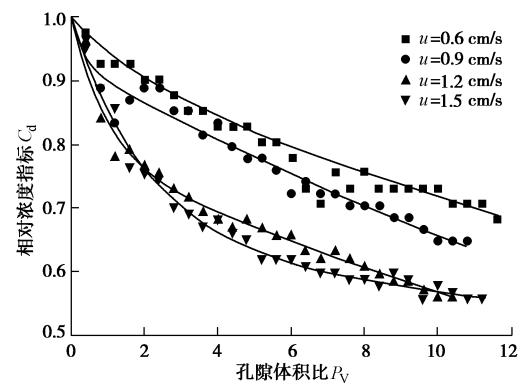


图 9 4 种渗流速度下  $P_V - C_d$  拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of  $P_V - C_d$  under four flow velocities

图 10 为根据双比率指数模型做出的改变渗流方向条件下  $P_V - C_d$  拟合曲线图, 其中:

$$C_d = 0.578 e^{-0.813 P_V} + 0.422 e^{-0.1 P_V} \quad (R^2 = 0.986) \quad . \quad (11)$$

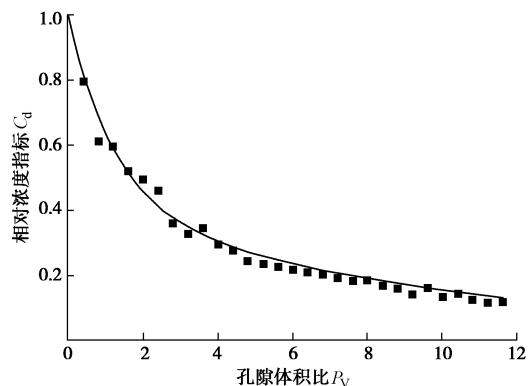


图 10 改变渗流方向条件下  $P_V - C_d$  拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of  $P_V - C_d$  under changing of flow direction

图 9, 10 表明, 在增加渗流速度和改变渗流方向两种条件下表征孔隙空间中悬浮颗粒数量的相对浓度指标  $C_d$  与表征通过多孔介质流量的孔隙体积比  $P_V$  呈双比率指数关系。可以发现, 随着渗流速度的增加, 相对浓度指标下降呈加快的趋势, 而相较于增加渗流

速度, 改变渗流方向条件下相对浓度指标下降更为迅速。这在拟合函数上也有体现, 即渗流速度从 0.6 cm/s 增加到 1.5 cm/s 时, 权重  $A$  从 0.069 增加到 0.355。这说明随着渗流速度的增加或改变渗流方向时, 沉积在多孔介质中的颗粒将首先经历一个颗粒快速脱离的过程, 随后随着时间的增加, 其余沉积颗粒脱离率保持在一个相对较低的水平。这说明在堵塞层清洗等工程中, 当渗流速度达到一定值或采用回扬清洗方式时, 清洗前期发挥着主要的作用。

## 4 结 论

根据自主研发的砂层沉积-脱离模拟试验系统研究了增加渗流速度与改变渗流方向对已沉积悬浮颗粒脱离特性的影响, 主要结论如下:

(1) 在改变渗流速度条件下, 渗流速度越大, 已沉积的悬浮颗粒越容易在较大的水动力条件下发生脱离, 到达第二次峰值所需的时间越短, 而达到二次峰值时所注入的水量十分接近。

(2) 与改变渗流速度相比, 用改变渗流方向的方式进行沉积颗粒脱离效果更为明显, 到达二次峰值所需时间更短、水量更少。但随着时间增加, 多孔介质中又会出现类似渗流方向改变前的堵塞现象。

(3) 实际工程中, 回扬洗井比增加回灌水流速更能显著改善地层中淤堵状况, 须着重控制洗井前期过程, 并控制洗井时间。

## 参考文献:

- [1] RYBACH L, SANNER B. Ground source heat pump systems, the European experience[J]. *GHC Bull*, 2000, **21**: 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] TUFENKJI N. Modeling microbial transport in porous media: Traditional approaches and recent developments[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, **30**(6): 1455 – 1469.
- [6] REEKS M W, HALL D. Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows: theory and measurement[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, **32**(1): 1 – 31.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] DERJAGUIN B V. Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and the adhesion of strongly charged particles in solutions of electrolytes[J]. *Acta Physicochim, USSR*, 1941, **14**: 633 – 662.
- [10] VERWEY E J W, OVERBEEK J T G, VAN NES K. Theory of the stability of lyophobic colloids: the interaction of sol particles having an electric double layer[M]. New York: Elsevier, 1948.
- [11] HERZIG J P, LECLERC D M, GOFF P L. Flow of suspensions through porous media—application to deep filtration[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1970, **62**(5): 8 – 35.
- [12] XU S, GAO B, SAIERS J E. Straining of colloidal particles in saturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 2006, **42**(12).
- [13] 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))
- [14] GOLDMAN A J, COX R G, BRENNER H. Slow viscous motion of a sphere parallel to a plane wall: II Couette flow[J]. *Chemical Engineering Science*, 1967, **22**(4): 653 – 660.
- [15] BERGENDAHL J A, GRASSO D. Mechanistic basis for particle detachment from granular media[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(10): 2317 – 2322.
- [16] BEDRIKOVETSKY P, SIQUEIRA F D, FURTADO C A, et al. Modified particle detachment model for colloidal transport in porous media[J]. *Transport in Porous Media*, 2011, **86**(2): 353 – 383.
- [17] GROLIMUND D, BORKOVEC M. Release of colloidal particles in natural porous media by monovalent and divalent cations[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, **87**(3): 155 – 175.

- [18] AHMADI G, GUO S, ZHANG X. Particle adhesion and detachment in turbulent flows including capillary forces[J]. *Particulate Science and Technology*, 2007, **25**(1): 59 – 76.
- [19] 毕海洋. 污水源热泵系统取水换热过程流化除垢与强化换热方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (BI Hai-yang. Fouling fluidized-removing and heat transfer enhancement technique on intake water and heat transfer of sewage-source heat pump system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [20] Mustafa Omer A. Ground-source heat pumps systems and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, **12**(2): 344 – 371.
- [21] McDOWELL - BOYER L M, HUNT J R, SITAR N. Particle transport through porous media[J]. *Water Resources Research*, 1986, **22**(13): 1901 – 1921.
- [22] 周 健, 姚志雄, 张 刚. 砂土渗流过程的细观数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(7): 977 – 981. (ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, ZHANG Gang. Mesomechanical simulation of seepage flow in sandy soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(7): 977 – 981. (in Chinese))
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] HUBBE M A. Theory of detachment of colloidal particles from flat surfaces exposed to flow[J]. *Colloids and Surfaces*, 1984, **12**: 151 – 178.
- [28] ESCHER A R. Bacterial colonization of a smooth surface, An analysis with image analyzer[D]. Bozeman: Montana State University, 1986.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)