

同期采灌储能模式浅层咸水介质 渗透性演化过程研究

马玖辰^{1,2}, 武春彬¹, 刘雪玲², 张志刚¹

(1. 天津城建大学 能源与安全学院, 天津 300384; 2. 天津大学 中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津 30072)

摘 要: 针对地下浅层储能咸水介质复杂的水文地质条件与矿物构成的特殊性, 开展可控三维物理模拟试验, 基于表面化学与胶体稳定性理论, 从介观尺度分析回灌溶液宏观参数变化与含水介质中微纳米颗粒重新分布过程的内在关联; 探索复杂时空条件下咸水层孔隙结构变化规律; 确定不同储能模式下低渗透帷幕带的形成区域。研究表明, 回灌溶液温度、盐度变化是打破颗粒间受力平衡, 造成含水介质渗透性能下降的诱导机制。在抽-注井固定与调换模式下, 经历完整储能周期, 含水层整体相对渗透率 k/k_0 分别下降至 63%、57%, 表明由微纳米颗粒物质重组, 导致含水介质空间结构变化具有不可逆性。两组储能试验中, 由于形成机制不同, 低渗透帷幕带分别形成于 700~900 mm 与 500~700 mm 的渗流单元。

关 键 词: 咸水层储能; 微纳米颗粒; 孔隙结构; 渗透性能; 模拟试验

中图分类号: TK 529

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 07-1883-09

Variation of the permeability of shallow brackish aquifers during synchronously pumping and injecting energy storage

MA Jiu-chen^{1,2}, WU Chun-bin¹, LIU Xue-ling², ZHANG Zhi-gang¹

(1. School of Energy Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Key Laboratory for Efficient Use of Low and Medium Grade Energy of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 30072, China)

Abstract: Considering the complex hydrogeology condition and the particularity of mineral composition of shallow brackish aquifers for energy storage, a controllable three-dimension infiltration experiment is conducted. Based on the theories of surface chemistry and colloid stability, the intrinsic connection between the variation of macro parameters of recharged solutions and the redistribution of micro-nano particles are analyzed from the mesoscopic standpoint. The spatial and temporal variations of the pore structure of brackish aquifer are analyzed; and the regions of low permeability curtain formed in different modes are determined. The results show that it is the variation of temperature and salinity of recharge solution that breaks equilibrium condition of forces between particles and induces the decrease of aquifer medium permeability. By fixing and switching the locations of pumping and injection well, the relative permeability of the whole aquifer medium k/k_0 decrease to 63% and 57%, respectively, after one complete energy storage period, showing that the aquifer medium space structure variations are irreversible as result of micro-nano particles redistribution. Under the two working modes, low permeability curtain occurs in the 700-900 mm and the 500-700 mm seepage elements, respectively, due to their different formation mechanism.

Keywords: brackish aquifer energy storage and recovery; micro-nano particles; pore structure; permeability; simulation experiment

1 引 言

我国环渤海低平原区地下浅层具有丰富的咸水资源, 据估算咸水资源总储量在 $2\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1], 仅天津市所在滨海平原区, 浅层地下咸水分布面积达到 $6\,922 \text{ km}^2$, 占全市总面积 $2/3$ 以上^[2]。浅层咸

水所在地层主要为第四系上更新统 (Q_3) 以及全新统 (Q_4), 以冲积三角洲相沉积及海相沉积为主, 具有储量大、分布广、埋藏浅、易开采、补给快、抽灌便捷、封闭条件好的特点, 有利于地下储能利用。然而基于咸水层特殊的含水介质矿物构成与水质特性, 一旦随意开采、盲目利用, 则会造成储能

区域水文地质环境改变, 导致地下水资源的空间分布与更新演化规律都发生巨大变化^[3]。

根据 Dillon 对于 26 个发生回灌堵塞储能系统的调研, 发现由悬浮物在含水介质中絮凝、沉积引起孔隙结构发生变化而导致的表层和内部堵塞占到 50%^[4]。Zamani 等^[5]通过对前人的研究成果进行总结认为, 悬浮颗粒运移、沉积作用会改变多孔介质的孔隙结构、孔隙度以及压力梯度等参数, 从而降低含水层渗透性以及抽注水井的工作效率。Ahfir 等^[6]针对不同的多孔介质内部结构对悬浮颗粒迁移和沉积的影响展开研究, 发现含水层内部结构的变化影响悬浮颗粒与介质骨架之间的碰撞。Bauer 等^[7]采用随机模型研究了颗粒的宏观迁移特性, 得出渗流张量变化取决于悬浮颗粒大小以及注入点的位置。国内学者多采用石英砂、玻璃珠等理想多孔介质与人工造悬浮颗粒为试验材料进行物理模拟试验, 根据不同层位渗透系数的变化特征, 确定含水介质渗透系数变化的急剧下降区、缓慢下降区和稳定不变区^[8]; 对悬浮颗粒在不同多孔介质中的沉积机制进行分析, 拟合渗透系数衰减模型^[9]; 针对不同浓度的悬浮颗粒在不同的渗流速度下, 分析悬浮颗粒的浓度对迁移与沉积过程的影响, 确定颗粒浓度的临界值^[10]。张我华等^[11]基于孔隙率和损伤变量之间的定量关系, 从连续损伤力学的角度对多孔介质岩土材料的渗流力学特性进行了研究, 提出了孔隙介质完备有效的达西定律模型。孔令伟等^[12]通过引入粒间状态参量概念, 探讨砂土渗透系数的细粒效应及其与表征砂土各种状态参数的相互关联性。

对于含水层内部产生固体颗粒造成空间结构改变的研究则集中于在水动力与水化学作用下含水介质中胶体的释放、运移领域^[13]。Santos 等^[14]针对含水介质物理化学条件变化引起胶体的沉积展开研究, 认为沉积往往发生在离子浓度较高的部分。Subba 等^[15]通过现场试验得到不同渗流溶液盐度变化率引起的含水介质中黏粒释放总量与释放速率均不相同。国内学者通过批试验与一维砂(土)柱试验对于含水层内部水动力^[16]与水化学条件(离子强度^[17]、pH 值^[18]、钠吸附比^[19]等)变化引起含水介质中胶体颗粒的释放、迁移过程展开研究, 识别不同胶体释放的差异性, 分析释放过程中含水介质渗透性变异特征。

综上所述, 国内外学者对于回灌溶液携带颗粒物质以及渗流溶液化学条件改变造成含水层渗透性能变化进行了深入研究, 然而针对地下含水层热环境的变化导致含水介质孔隙结构改变的研究鲜见报

道。本文通过构建三维可控渗流系统, 以天津市滨海地区代表性水样、砂样为试验材料, 从介观尺度($\leq 10^{-5}$ m)研究回灌溶液温度、盐度等宏观参数变化与咸水层中微纳米颗粒分散、迁移、絮凝过程的内在关联; 探索颗粒物质重组所引起的含水介质孔隙结构演化规律; 确定在不同储能模式下垂直于地下水流方向的低渗透帷幕的形成机制与区域。

2 试验系统与材料

2.1 试验系统

为确保利用有限空间有效再现不同储能模式的含水介质孔隙结构动态演化过程, 以咸水层储能野外试验系统为原型, 基于试验模型与原型中渗流、传热与传质过程具有相似数学模型, 按照相似准则, 依据方程分析法原理设计、建立三维可控定水头供液渗流系统^[20], 试验系统如图 1 所示。

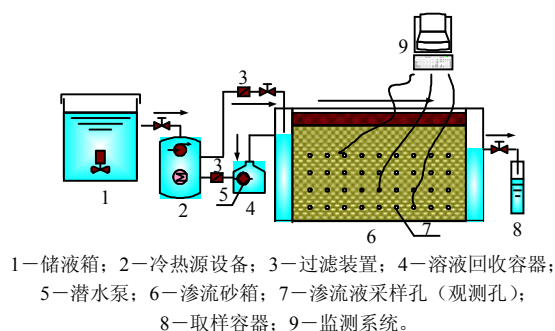


图 1 储能试验系统示意图

Fig.1 Schematic of energy storage experiment

砂箱主体为采用 8 mm 厚的有机玻璃板粘结而成的 1 200 mm×300 mm×650 mm 的长方体, 选用角钢作为加强筋, 确保填充过程中不会由于承重受压而发生变形或开裂。在砂箱填充区两端对称设置 100 mm 长的进(出)液区, 其构造完全相同以便根据试验要求灵活调换供、回水位置, 改变渗流方向。在进(出)液区与含水介质填充区之间分别安装粘贴有 300 目滤布的壁厚 8 mm、钻满孔眼($\phi 5$ mm)的有机玻璃板, 确保含水层中渗流溶液水平均匀面状流动, 同时避免填充介质随渗流液流失对含水介质内部孔隙结构产生破坏。在砂箱填充区一侧分别距隔板 100~900 mm 之间有机玻璃板上并列钻间隔 100 mm 的采样孔($\phi 8$ mm)4 排, 每排间距 100 mm, 试验过程中用以监测渗流液中颗粒质量浓度变化过程。另一侧有机玻璃板上距砂箱底部 150 mm 与 350 mm 处并列打两排间距 200 mm 的测试孔($\phi 8$ mm), 将砂箱填充区分为 6 个渗流单元, 测试孔分别与精度为 ± 1 mm 的测压管

连接，测量砂箱中不同垂直高度的各渗流单元水头变化。

为确保回灌溶液温度满足储能试验要求，选用 GDH-2010 系列高精度恒温水浴作为冷热源设备。该恒温水浴容积为 10 L，自带循环泵流量为 6 L/min，控制温度范围为 $-20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于水浴循环泵提供的流量超出试验中砂箱所需的供液量，系统设置溶液回收器通过溢流管回收高出供水水头的溶液，再经过潜水泵输送回恒温水浴。砂箱装置、溶液回收器以及连接管道外部贴有 5 mm 的橡塑发泡保温材料。

2.2 试验材料

基于储能试验中采用原水回灌、原砂填充的原则，砂样与地下咸水均采集于天津滨海新区于家堡地下埋深 40 m 处的咸水层。地下咸水提取后，为确保水样中化学成分不发生变化，在储水容器中加入适量稳定剂就地密封保存。咸水样品水质分析结

果见表 1，咸水样品的 pH 值为 7.13，矿化度为 17 569 mg/L，固形物为 171 99.8 mg/L。咸水层砂样采集后就地蜡封，采用吸管法分析砂样的颗粒组成，颗粒级配上属于细砂与粉细砂，重度为 1.787 kN/m^3 ；采用 Dmax 12kW 粉末衍射仪对砂样矿物种类的相对含量进行 X 射线衍射分析，砂样颗粒组成及矿物种类分析见表 2。

表 1 咸水水质成分表

Table 1 Water constituents in the brackish aquifer		
成分	摩尔浓度/(mmol/L)	摩尔浓度比值/%
K^+	1.67	0.6
Na^+	211.83	71.4
Ca^{2+}	18.83	6.3
Mg^{2+}	64.41	21.7
Cl^-	300.00	95.5
SO_4^{2-}	2.08	0.7
CO_3^{2-}	0.00	0.0
HCO_3^-	12.10	3.8

表 2 咸水层砂样机械组成与矿物种类

Table 2 Particle size distribution and mineral composition of sand samples from brackish aquifer								
含水介质	颗粒组成/%			矿物种类/%				
	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	<0.075 mm	石英	斜长石	微斜长石	闪石	黏土总量
咸水层砂样	2.18	69.09	29.73	27	37.5	32.5	1.5	1.5

3 试验方案与测试方法

首先取出蜡封的天然咸水层砂样，干燥后过 30 目砂石筛去除杂质。采用湿装法等重度填充砂箱，含水层填充高度为 450 mm，每填充 30 mm 砂样，均匀喷淋地下咸水溶液并压实，确保每层含水介质重度($1.78\pm 0.1\text{ kg/L}$)相同，在含水层上部装填 50 mm 的黏土层与 100 mm 砾石作为隔水层将含水介质与外界隔离，同时具有一定承压能力。采用在砂箱内壁贴砂和加肋方法解决由于填充不均匀，边界上的渗流速度大于含水介质内部流速，形成流动短路问题。图 2 为未装保温材料的砂箱实体照片。砂箱装填结束，以 140 mm 水头差向砂箱通入 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 地下咸水进行饱水，同时采用水环式真空泵通过采样孔排气。当流出溶液的体积和温度值基本保持稳定，采样孔及测压管内无气泡与固体颗粒出现，则认为渗流砂箱饱水完成。

针对抽-注井固定与调换运行模式开展的两组储能试验均包括储热、间歇与储冷 3 个过程，其中储热试验与储冷试验各历时 8 h，间隙期 4 h，3 部分试验连续进行。砂箱饱水后，首先通入温度为

$60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、20%地下原水和 80%去离子水混合溶液开展储热试验，固定模式中经过 4 h 间歇期，由原注水端回灌 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、1:4 混合溶液；在调换模式中，由原出水口通入低温混合溶液，将原入水端变为出水端。试验中进出溶液的水头差值始终保持 140 mm 不变，每 10 min 采用秒表-量筒法测试砂箱流出液的流量，同时读取各渗流单元测压管水头值，根据达西定律计算出不同时段各空间含水介质渗透系数 K ，同时分别测试各渗流单元中渗流溶液的密度与黏滞系数，确定渗透率 k 。为消除两组试验中砂箱填充、测试阶段，由系统、偶然与过失误差对试验结果所产生的影响，选择与试验前饱水稳定状态的初始渗透率 k_0 的比值相对渗透率 k/k_0 作为评价含水介质空间结构变化的标准。

在砂样填充过程中预先将 K 型热电偶温度传感器固定，所有热电偶在安装前均进行标定，水平断面测点布置如图 3 所示。试验中采用 HACN1900C 浊度计测量流出液以及各渗流段内部溶液的浊度值，通过拟合的颗粒质量浓度与浊度标准曲线确定颗粒含量，作为判定含水介质颗粒重组与渗透性变化的依据^[21]。

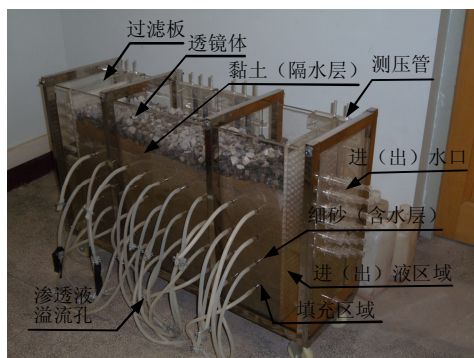


图2 渗流砂箱装置实体照片

Fig.2 Photograph of the infiltration sand box

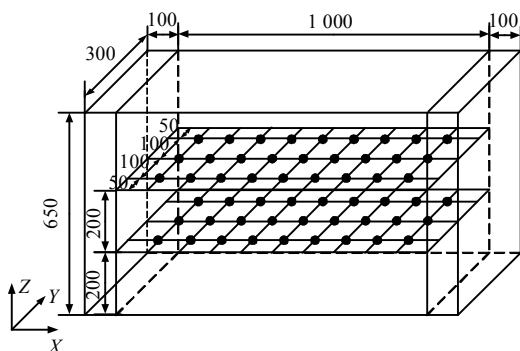


图3 砂箱水平断面温度测点分布图 (单位: mm)

Fig.3 Layout of temperature monitoring points in different horizontal sections of sand box (unit: mm)

4 试验结果与分析

4.1 孔隙结构演化过程

在两组同期采灌咸水层储能试验中, 储热阶段含水介质的空间结构与流出液微纳米颗粒的质量浓度变化趋势相同, 变化幅度基本一致; 然而储冷阶段含水层渗透性能的变化规律在进出液固定模式与调换模式下呈现显著差异, 试验结果如图4所示。在进出液固定模式中, 由于高温、低盐度混合溶液的注入, 含水介质中微纳米颗粒从孔隙壁表面分离、脱落, 随着溶液渗流方向运移。迁移过程中颗粒之间不断碰撞, 絮凝形成体积较大的黏团发生沉积, 堵塞有效过水断面, 造成砂箱整体渗透率在试验进行 190 min 后降低, 至储热过程结束下降至初始状态的 73%。伴随含水介质渗透性能下降, 270 min 时流出液中出现颗粒物质, 其质量浓度达到峰值 5.2 g/L 后迅速下降, 储热试验结束降至 1.2 g/L。

间歇期内含水介质中颗粒物质重新分布与孔隙结构变化并没有因为回灌过程的结束而终结, 储冷试验开始后 k/k_0 下降至 70%。正向通入 5 °C 低盐度混合溶液后, 在水动力作用下末端渗流单元中的部分颗粒物质迁移出砂箱, 致使储冷试验进行 100 min

后, 流出液中再次出现颗粒物质, 当浓度最大值达到 1.2 g/L 后迅速下降, 120 min 后降至 0 g/L。同时 k/k_0 在出现小幅回升后再次出现下降, 至试验结束后稳定在 63%。

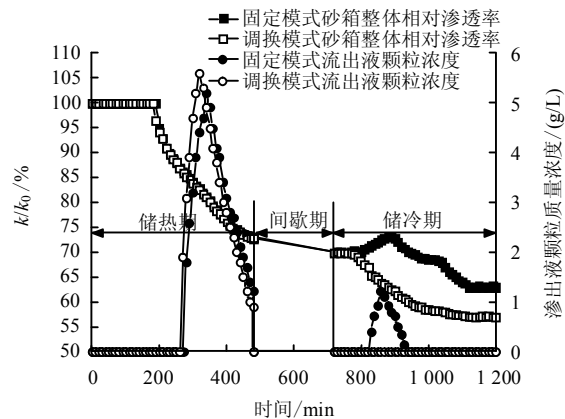


图4 储能试验中砂箱整体相对渗透率与流出液黏粒浓度变化曲线

Fig.4 Relations between relative permeability and released clay particle concentration in the energy storage experiment

抽-注井调换运行模式中, 在储热阶段砂箱 k/k_0 降至 72.8%。由于填充介质个体差异以及试验过程中存在的系统误差, 释放的颗粒质量浓度峰值为 5.6 g/L。由原出水口通入 5 °C 低盐度混合溶液 50 min 后, 含水介质整体渗透性能开始缓慢下降, 试验结束时 k/k_0 由 70% 下降至 57%; 在储冷过程中, 砂箱流出液中并没有颗粒物质出现。通过两类模式储能试验, 含水介质渗透性能均无法通过储热、储冷过程的交替运行恢复到初始状态, 表明地下含水层微纳米颗粒分布与孔隙结构演化过程具有不可逆性。

4.2 微纳米颗粒稳定性影响因素

采用粉末衍射仪分别对含水介质内部渗流溶液以及流出液中微纳米颗粒进行 X 射线扫描, 测试结果表明, 颗粒中次生黏土矿物分别占总质量的 86%、74%, 各类黏土矿物相对含量如表 3 所示。利用场发射扫描电子显微镜观察微纳米颗粒形貌特征, 直径为 0.5~3 μm 的黏土矿物以及絮凝形成的黏团附着在石英、斜长石等原生矿物表面。放大扫描倍数, 流出液中颗粒外貌形态基本呈椭圆片状和类球状 (见图 5), 颗粒体积较大, 总比表面积较低。然而, 含水层内渗流液中颗粒形貌则为薄片状、环状与鳞片状 (见图 6), 不仅外比表面积很大, 同时还具有很大的内比表面, 使其具有很强的胀塑性与粘结性, 正是由于这种结构特征使其更加容易絮聚、沉积, 并在迁移过程中被含水介质孔喉所捕获。

表 3 黏土矿物成分表

Table 3 Clay mineral species of particles

取样类型	黏土矿物相对质量含量/%				
	蒙脱石	伊蒙混层	伊利石	高岭土	绿泥石
流出溶液	6	24	58	6	6
渗流溶液	21	58	12	5	4

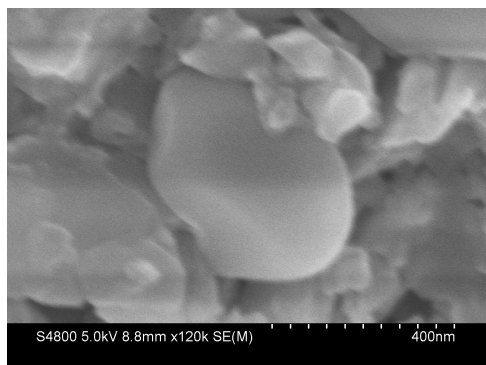


图 5 储能试验释放颗粒 120 000 倍电镜图

Fig.5 Photograph of released particles magnified by scanning electron microscope by 120 000 times in the energy storage experiment

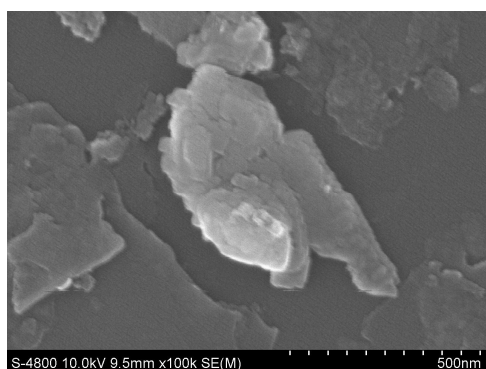


图 6 储能试验渗流液颗粒 100 000 倍电镜图

Fig.6 Photograph of released particles magnified by scanning electron microscope by 100 000 times in the infiltration flow in the energy storage experiment

颗粒物质不仅具有比表面积大、吸附能力强等胶体特性，同时黏土矿物主要构成为次生铝硅酸盐^[22]，带电特性源于晶格取代方式，其带电固体表面与相邻电解质溶液形成双电层结构。根据胶体稳定性原理，在水动力坡度恒定情况下忽略渗流剪切应力，因此，微纳米颗粒之间的长程范德华引力与扩散双电层排斥力成为粒子重新分布的力学诱导机制。以表面化学双电层理论 Gouy-Champman 模型与胶体稳定性理论 (DLVO) 为基础^[23-24]，针对电镜扫描所得颗粒形貌特征，建立片状与球状粒子之间总位能关系式见式 (1)、(2)。

$$V = V_A + V_R = -\frac{A}{12\pi} D^{-2} + \frac{64kTn_0v_0^2}{\kappa} \exp(-\kappa D) \quad (1)$$

$$V = V_A + V_R = -\frac{A}{12} \frac{a}{H_0} + \frac{64kT\pi a n_0 v_0^2}{\kappa^2} \exp(-\kappa H_0) \quad (2)$$

式中：\$V_A\$ 为长程范德华吸引力位能 (J)；\$V_R\$ 为双电层排斥力位能 (J)；\$A\$ 为 Hamaker 常数 (J)；\$D\$ 为平面状粒子间距离 (nm)；\$H_0\$ 为球状黏粒间最短距离 (nm)；\$a\$ 为黏粒粒径 (nm)；\$n_0\$ 为渗流溶液电解质浓度 (mol/m³)；\$k\$ 为 Boltzmann 常数 (K/J)；\$T\$ 为含水介质温度 (K)；\$\kappa^{-1}\$ 为 Debye 长度，表征扩散双电层的厚度 (m)；\$v_0\$ 为粒子表面初始电位 \$\psi_0\$ 函数。

$$\kappa^{-1} = \left[\frac{e^2 N_A \sum_i c_i z_i^2}{\varepsilon k T} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

$$v_0 = \frac{\exp\left(\frac{ze\psi_0}{2kT}\right) - 1}{\exp\left(\frac{ze\psi_0}{2kT}\right) + 1} \quad (4)$$

式中：\$\psi_0\$ 为粒子表面初始电位 (mV)；\$z_i\$ 为渗流溶液 \$i\$ 离子价位；\$c_i\$ 为渗流溶液质量摩尔浓度 (mol/kg)；\$\varepsilon\$ 为介电常数 (F/m)；\$N_A\$ 为阿佛加德罗常数；\$e\$ 为电子的电量 (C)。

Hamaker 常数 \$A\$ 是决定长程范德华吸引力位能大小的关键因素。多孔介质中颗粒的 \$A\$ 值称之为有效常数 \$A_{121}\$ (见式 5) 是由分散项 \$A_{11}\$、分散介质 \$A_{22}\$ 的化学性质以及粒子本身的物理性质所共同决定的^[25]。由于储能过程中含水介质矿物构成及渗流溶液化学组分、离子价位均不变，对应的 \$A\$ 也保持稳定，则颗粒之间、颗粒与含水层孔隙壁面间的长程范德华吸引力不发生变化。

$$A_{121} = (A_{11}^{1/2} - A_{22}^{1/2})^2 \quad (5)$$

在渗流溶液其他物理性质参数不发生变化的工况下，将 Debye 长度 \$\kappa^{-1}\$ 与扩散双电层排斥力位能 \$V_R\$ 分别转化为温度 \$T\$ 与溶液电解质浓度 \$n_0\$ 的关系式。

$$\kappa^{-1} \propto K_1 T^{1/2} \quad (6)$$

$$V_R \propto K_2 T^{3/2} \exp(-K_3 T^{-1/2}) \quad (7)$$

$$\kappa^{-1} \propto K_4 n_0^{-1/2} \quad (8)$$

式中：\$K_1\$、\$K_2\$、\$K_3\$、\$K_4\$ 为正常数。

储热阶段随着高温、低盐度溶液的注入，含水

层温度升高,颗粒间扩散双电层厚度增大,扩散双电层排斥力上升。由于渗流溶液盐度的下降,溶液中补偿离子的浓度降低,颗粒表面的阳离子逐渐由固定层进入扩散层,加剧扩散双电层厚度增加,导致受力平衡被打破,颗粒物质从多孔介质骨架上脱离,原本絮凝的黏团分散,最终造成含水层孔隙结构改变。储冷阶段中,由于渗流溶液温度降低,粒子间扩散双电层厚度变薄,引起排斥力下降,分散、脱离的颗粒发生絮凝,致使孔隙有效过水断面变小,渗透性能下降。

4.3 低渗透帷幕形成区域

试验结果表明,流出溶液中颗粒变化过程以及质量浓度可以作为判定含水介质渗透性变化的依据,但孔隙结构的变化程度则取决于含水介质内渗流溶液中的颗粒含量及矿物构成。由于含水介质渗透性能的变化规律具有很强的空间非均质性特征^[26],试验中分别测试各渗流单元沿垂直方向距底板 400 mm 与 200 mm 上、下两层水平断面相对渗透率与温度变化过程。

试验结果如图 7 所示,两组储能模式下,在储热阶段各渗流段相对渗透率以及温度变化规律一致。以抽-注井调换模式为例,由于高温、低盐度溶液的密度小于咸水的密度,混合溶液回灌初期位于咸水上部,造成上层含水介质温度与盐度首先变化,从而导致含水层渗透性能变化不同步。100~300 mm 段由于靠近注水端,上部含水层 k/k_0 在试验进行 70 min 首先下降,至 230 min 降至 80.5%。当释放出的微纳米颗粒随渗流溶液迁移出该区域,含水介质孔隙结构再次出现变化,渗透性能开始回升,试验结束时达到 110%。尽管下部含水层空间结构变化滞后,释放的颗粒与絮凝黏团在重力作用下聚沉,使下层颗粒含量上升,在相同水动力梯度下,迁移能力减弱,渗透率降低幅度增加,储热试验结束时稳定在 104%。砂箱前端释放的颗粒在迁移过程中不断絮凝形成迁移能力差、体积较大的黏团,堵塞过水断面,因此,随着与注水端距离的增加,渗透性能降幅增大。至试验结束,700~900 mm 段上、下层含水介质 k/k_0 分别下降至 41%、38%,并且均有继续下降的趋势。

渗流砂箱 100~300 mm、700~900 mm 渗流单元由于距离注(出)水口比较近,间歇期间受到环境的影响,温度均小幅下降。在抽-注井固定模式下,储冷试验中回灌溶液盐度不变,因此,渗流溶液密度效应影响消失,100~300 mm 段上、下层温度变化基本同步并且幅度一致。以上层含水介质为例,

由于靠近注水口,渗流速度较高,在水动力作用下将孔隙间残存的颗粒物质迁移出去,导致渗透性能出现再次上升,试验进行 110 min 时 k/k_0 由 109% 上升至 115.2%。随着低温溶液注入,颗粒间扩散双电层排斥力减弱,絮凝形成体积较大的黏团,孔隙间有效横截面积减少,渗透性能降低,截至试验结束时稳定在 92%。

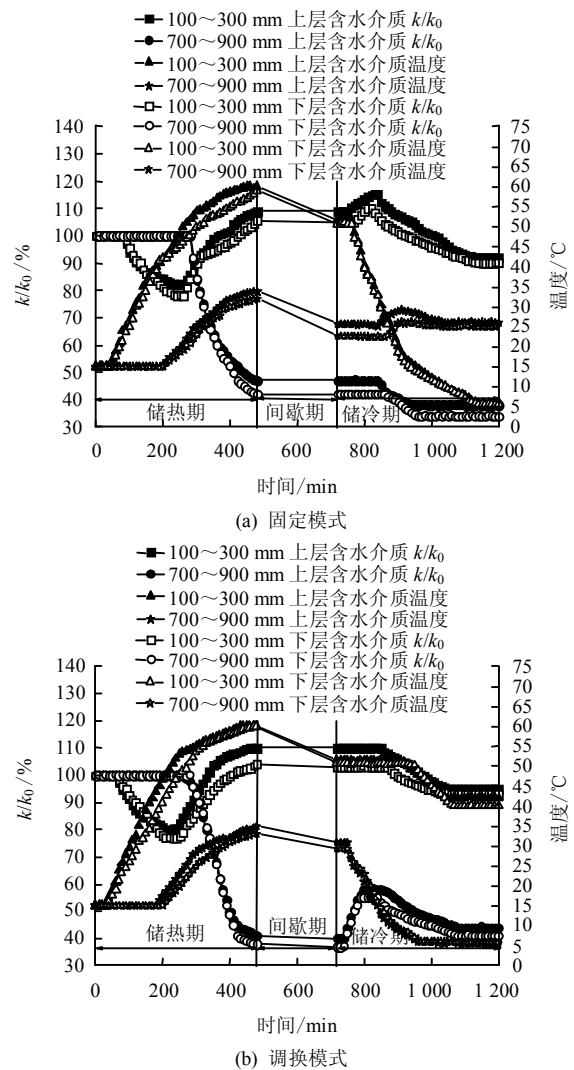


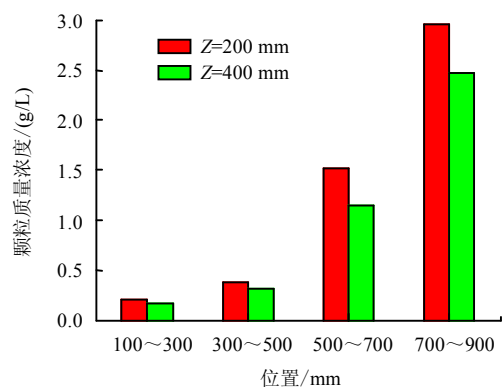
图 7 储能试验不同渗流单元含水介质相对渗透率与温度变化曲线

Fig.7 Relations between relative permeability and temperature in different infiltration regions in the energy storage experiment

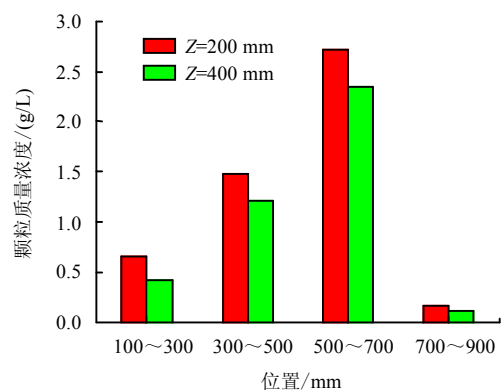
700~900 mm 单元含水介质中由储热期所通入的高温水被低温回灌水和砂箱末端的低温水环绕包围,因此,在储冷试验开始后,该渗流段含水层温度发生小幅上升后开始缓慢下降。对比储冷试验结束时各渗流单元渗透性能变化,700~900 mm 段上、下层含水介质 k/k_0 分别降至 38%、34%,同时含水介质中微纳米颗粒浓度最高,上层为 2.47 g/L,下

层则达到 2.96 g/L (见图 8(a))。根据试验结果可得每经历一次储能过程, 距抽水井较近的含水层中微纳米颗粒含量就会相应增大, 从而导致该区域的渗透性能进一步降低, 在抽水井附近区域形成低渗透帷幕, 并且具有向抽水井缓慢迁移的趋势。

在抽-注井调换模式中, 储冷试验进行 20 min 后, 700~900 mm 渗流单元上、下层 k/k_0 经过 60 min 分别由 40%、37% 上升至 58%、55%。随着该段含水介质温度迅速下降而逐渐降低, 截止试验结束时分别降至 44%、41%。100~300 mm 渗流单元含水介质渗透性能随着储冷试验的进行缓慢下降, 下层含水介质至试验结束时由 103% 降低至 93%, 温度则稳定在 40 °C 上下。试验结果表明, 500~700 mm 渗流段在储冷试验结束时上、下层含水层 k/k_0 降幅最大, 分别降至 42%、39%; 与之对应, 含水介质中微纳米颗粒含量最高 (见图 8(b))。由于低渗透帷幕带形成于该区域, 不仅减缓咸水层渗流溶液流动速度, 同时有效减小了热 (冷) 量扩散范围。在帷幕带两边以高 (低) 温注水井为中心形成了高渗透性的热 (冷) 溶液库, 利用地下咸水层空间结构变化的特性, 增加储能利用效率。



(a) 固定模式



(b) 调换模式

图 8 储能试验结束时砂箱各渗流单元颗粒含量
Fig.8 Particle concentration in different infiltration regions at the end of the energy storage experiment

5 结 论

(1) 不同咸水层储能模式下, 回灌溶液温度、盐度物性参数变化是引起介观尺度上黏土矿物表面扩散双电层排斥力变化, 导致含水介质微纳米颗粒重新分布的诱导机制。

(2) 在抽-注井固定与调换模式中, 经过完整的储能周期, 砂箱整体 k/k_0 分别降至 63%、57%。尽管含水介质物性参数变化所引起的颗粒之间分散、聚沉现象本质是可逆过程, 但颗粒物质重组所造成的含水层孔隙结构变化具有不可逆性, 含水介质渗透性能无法通过储热与储冷过程交替运行恢复到初始状态。

(3) 在抽-注井固定与调换模式中, 含水介质渗透率变化在水平与垂直方向具有空间非均质性特征, 低渗透帷幕带分别形成于 700~900 mm 与 500~700 mm 渗流单元。该区域含水介质渗透性能最差, 微纳米颗粒质量浓度最高, 空间结构变化显著。

参 考 文 献

- [1] 周在明. 环渤海低平原土壤盐分空间变异性及影响机制研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
- [2] 刘九龙, 林黎, 程万庆. 天津市地下水源热泵系统适宜性分区[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊 1): 380—385.
LIU Jiu-long, LIN Li, CHENG Wan-qing. Suitability zoning for groundwater source heat pump systems in Tianjin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(Supp.1): 380—385.
- [3] PIAO S, CIASIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43—51.
- [4] SIRIWARDENE N, DELETIC A, FELTCHER T D. Clogging of storm water gravel infiltration systems and filters: insights from a laboratory study[J]. *Water Research*, 2007, 41(7): 1433—1440.
- [5] ZAMANI A, MAINI B. Flow of dispersed particles through porous media-deep bed filtration[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, 69(1—2): 71—88.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 路莹, 杜新强, 迟宝明, 等. 地下水人工回灌过程中多孔介质悬浮物堵塞实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(2): 448—454.
LU Ying, DU Xing-qiang, CHI Bao-ming, et al. The porous media clogging due to suspended solid during the artificial recharge of groundwater[J]. **Journal of Jilin University (Earth Science Edition)**, 2011, 41(2): 448—454.
- [9] 赵军, 刘泉声, 张程远. 水源热泵回灌困难颗粒阻塞试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 604—609.
ZHAO Jun, LIU Quan-sheng, ZHANG Cheng-yuan. Experimental study of particles clogging in ground source heat pump[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(3): 604—609.
- [10] 陈星欣, 白冰, 闫瑜龙, 等. 悬浮颗粒的浓度对其在饱和多孔介质中迁移和沉积特性的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2343—2348.
CHEN Xing-xin, BAI Bing, YAN Yu-long, et al. Influence of concentration of suspended particles on transport and deposition characteristics in saturated porous media[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2343—2348.
- [11] 张我华, 薛新华. 孔隙介质的渗透特性初探[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1357—1361.
ZHANG Wo-hua, XUE Xin-hua. Primary study of permeability of porous media[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1357—1361.
- [12] 孔令伟, 李新明, 田湖南. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 21—26.
KONG Ling-wei, LI Xin-ming, TIAN Hu-nan. Effect of fines content on permeability coefficient of sand and its correlation with state parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 21—26.
- [13] BOATTA F, D'ALESSANDRO W, PARELLO F. Geochemical survey of Levante Bay, Vulcano Island (Italy), a natural laboratory for the study of ocean acidification[J]. **Marine Pollution Bulletin**, 2013, 69(1): 230—240.
- [14] SANTOS A, BEDRIKOVETSKY P. A stochastic model for particulate suspension flow in porous media[J]. **Transport in Porous Media**, 2006, 62(1): 23—53.
- [15] SUBBA RAO N, SURYA RAO P, VENKTRAM REDDY G. Chemical characteristics of groundwater and assessment of groundwater quality in Varaha River Basin, Visakhapatnam District, Andhra Pradesh, India[J]. **Environmental Monitoring and Assessment**, 2012, 184(8): 5189—5214.
- [16] 李海明, 翟菁, 顾晓明. 地下咸水储能回灌含水层胶体释放动力学与渗透性变异[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 170—174.
LI Hai-ming, ZHAI Jing, GU Xiao-ming. Dynamics of colloid release and variation of permeability of saline aquifer during aquifer thermal energy storage with recharging[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.2): 170—174.
- [17] 孙慧敏, 殷宪强, 曹秀蓉. 离子强度对蒙脱石胶体在饱和多孔介质中运移与释放的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1120—1125.
SUN Hui-min, YIN Xian-qiang, CAO Xiu-rong. The effect of solution ionic strength on the transport and release of montmorillonite colloid in saturated porous media[J]. **Acta Scientiae Circumstantiae**, 2012, 32(5): 1120—1125.
- [18] 孙慧敏, 殷宪强, 王益权. pH 对黏土矿物胶体在饱和多孔介质中运移的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 419—424.
SUN Hui-min, YIN Xian-qiang, WANG Yi-quan. The effect of pH on the transport of clay mineral colloid in saturated porous media[J]. **Acta Scientiae Circumstantiae**, 2012, 32(2): 419—424.
- [19] 李海明, 李子琛, 赵雪, 等. 不同 SRA 条件下滨海含水层胶体释放与渗透性变异[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37(2): 263—268.
LI Hai-ming, LI Zi-chen, ZHAO Xue, et al. Colloid release process and permeability losses of coastal aquifer in different SAR conditions[J]. **Earth Science—Journal of China University of Geosciences**, 2012, 37(2): 263—268.
- [20] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 185—190.
- [21] 马玖辰, 赵军, 安青松. 咸水层储能回灌溶液温度变化对含水介质空间结构的影响[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(6): 241—245.
MA Jiu-chen, ZHAO Jun, AN Qing-song. Influence of recharge solution temperatures on aquifer medium space structure in brackish aquifers energy storage and recovery[J]. **Journal of Safety and Environment**, 2012, 12(6): 241—245.
- [22] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 1—50.
- [23] 林国庆. 咸淡水过渡带渗透性突变的机理与效应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [24] 陈宗淇, 王光信, 徐桂英. 胶体与界面化学[M]. 北京: 高教出版社, 2004: 142—156.
- [25] 章莉娟. 胶体与表面化学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 63—156.
- [26] 马玖辰, 郭春梅, 张志刚. 咸水层储能与含水介质渗透性变化的实验研究[J]. 热科学与技术, 2013, 12(2): 107

—113.

MA Jiu-chen, ZHANG Zhi-gang, GUO Chun-mei. The experiment researches of energy storage and recharge

aquifer medium permeability in brackish aquifers[J]. **Journal of Thermal Science and Technology**, 2013, 12(2): 107—113.

(接第 1882 页)

《岩土力学》2014 年增刊 2 被 EI 收录论文 (98 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
49	填筑速率对软基上堤防沉降影响的现场试验与数值模拟	孔纲强, 张 弛	343—349
50	卸压开采研究进展	李俊平, 王红星, 王晓光, 等	350—358
51	扩底抗拔桩在天津于家堡南北地下车库中的应用	赵 彤, 杨海松, 王向军	359—363
52	深厚淤泥爆破挤淤堤坝沉降计算与分析	徐学勇, 陈国海, 汪 稔, 等	364—369
53	某地铁车站出入口结构病害原因分析	刘庭金, 周书扬, 蔡仁贤	370—378
54	盐岩地下储气库套管运行安全的可靠性分析研究	向 文, 张强勇, 蔡 兵	379—385
55	克里金算法与多重分形理论在岩土参数随机场分析中的应用	王长虹, 朱合华, 钱七虎	386—392
56	土钉墙地基承载力问题探讨	秦会来, 周同和, 郭院成, 等	393—397
57	基坑工程平面竖向弹性地基梁法中土的水平抗力比例系数反分析研究	徐中华, 李 靖, 王卫东	398—404
58	改进遗传算法和支持向量机的岩体结构面聚类分析	李 宁, 王李管, 贾明涛, 等	405—411
59	不同地连墙插入深度下承压含水层减压降水对既有隧道的影响	郑 刚, 王 琦, 邓 旭, 等	412—421
60	基于突变理论的滑坡危险性评价	宋盛渊, 王 清, 潘玉珍, 等	422—428
61	深部急倾斜煤层偏压巷道支护参数优化研究	郑朋强, 陈卫忠, 孟祥军, 等	429—436
62	基于 Mamdani FIS 模型的滑坡易发性评价研究	张纫兰, 王少军, 李江凤	437—444
63	上下交叉隧道爆破振动控制技术研究	于建新, 陈卫忠, 杨建平, 等	445—452
64	盾构隧道实测土压力分布规律及影响因素研究	李 雪, 周顺华, 王培鑫, 等	453—459
65	大采高综放面区段煤柱合理留设研究	孔德中, 王兆会, 李小萌, 等	460—466
66	走滑断层位错作用下城市地铁隧道损伤分析	赵 颖, 郭恩栋, 刘 智, 等	467—473
67	基于流固耦合的围岩后注浆对大型水封石油洞库水封性影响分析	张龙云, 张强勇, 李术才, 等	474—480
68	地下工程开挖面空间效应特征研究及应用	乔丽苹, 刘 杰, 李术才, 等	481—487
69	某核电取水隧洞洞口段及洞口高边坡抗震稳定分析	白广斌, 赵 杰, 易 剑	488—494
70	上海中山医院基坑逆作法施工时间效应分析	王国粹, 梁志荣, 魏 洋	495—500
71	蒙山断裂地应力特征及其稳定性分析	李 兵, 郭启良, 王建新, 等	501—507
72	白山抽水蓄能泵站地下厂房的岩体力学参数反演	田泽润, 李守巨, 于 申	508—513
73	锚杆对双排桩结构变形和受力影响分析	胡贺祥, 宋福渊, 油新华, 等	514—519
74	爆破冲击荷载作用下中隔墩岩体的动力响应与局部破坏机制	张 乐, 卢文波, 周俊汝, 等	520—527
75	基于两阶段法的堆载对公路桥梁桩基础影响分析	冯昌明, 木林隆, 孙志伟, 等	528—534
76	天津软土地区盾构掘进对上方建筑物影响分析	姜晓婷, 路 平, 郑 刚, 等	535—542
77	加筋土边坡地震稳定性动点安全系数分析方法	董士杰, 魏红卫	543—547
78	开挖黄土高边坡的应力路径及变形破坏机制分析	侯晓坤, 李同录, 李 萍	548—555
79	塑性扩容梯度对孔隙介质岩体中 T-H-M 耦合作用的二维有限元分析	张玉军, 张维庆	556—564
80	粉质砂土土钉墙水平位移与土钉轴力的 FLAC3D 研究	单仁亮, 董洪国, 魏龙飞, 等	565—571
81	注浆成型螺旋桩抗拔承载特性的数值分析	王 斌, 钱建固, 陈宏伟, 等	572—578
82	基于 LSSVM-ARMA 模型的基坑变形时间序列预测	曹 净, 丁文云, 赵党书, 等	579—586
83	崩积混合体直剪试验与 PFC2D 数值模拟分析	薛亚东, 刘忠强, 吴 坚	587—592
84	夯扩挤密碎石桩加固液化砂土地基的动力数值分析	杨继红, 董金玉, 黄志全, 等	593—599
85	软基真空预压加固的注气增效机制与数值分析	屠红珍, 徐衍徽, 谢立全	600—606
86	真空井点降水试验分析与数值模拟	贾向新, 聂庆科, 王英辉, 等	607—612
87	含应变软化本构关系的岩-土接触元直剪试验数值模拟	郑立宁, 康景文, 谢 强, 等	613—618
88	复杂地铁车站施工对邻近建筑物变形影响数值分析的位移叠加法	徐帮树, 丁万涛, 刘林军, 等	619—625
89	岩石弹塑性应力-渗流-损伤耦合模型研究(I): 模型建立及其数值求解程序	王军祥, 姜谔男, 宋战平	626—637
90	基于复杂地质体的地应力场智能识别方法研究	李茂辉, 杨志强, 高 谦, 等	638—644
91	非贯通随机节理岩体的结构效应对地下洞室地震响应的影响	崔 臻, 冷先伦, 朱泽奇, 等	645—652
92	基于非均质边坡强度折减法的三维桥基边坡稳定性分析	胡松山, 童申家, 刘斌清, 等	653—661
93	六面体覆盖的高阶数值流形方法的探讨	刘登学, 张友良, 谭 飞, 等	662—666
94	重庆小南海滑坡形成机制离散元模拟分析	申 通, 王运生, 吴龙科	667—675
95	考虑固结的透水管桩沉桩全过程有限元模拟	周小鹏, 梅国雄	676—682
96	珊瑚岛礁工程地球物理方法初探	崔永圣, 马 林, 刘宏岳, 等	683—689
97	地铁拱顶衬砌上方土体中的隐患的探查	钟世航, 刘传新, 范鹏举, 等	690—694
98	FBG-BOTDA 联合感测管桩击入土层模型试验研究	朱友群, 朱鸿鹄, 孙义杰, 等	695—702