

回灌盐度和水头对咸水储层渗透性能的影响

刘雪玲^{1,2}, 刘金松^{1,2}, 李婉艺^{1,2}, 姜 鑫^{1,2}

(1. 中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津大学机械学院, 天津 300350; 2. 天津大学地热研究与培训中心, 天津 300350)

摘 要: 针对咸水储层由于水质类型复杂及粘土矿物成分的存在,在回灌溶液盐度改变的情况下,含水层多孔介质内发生胶体粘粒释放,引起储层渗透性能和传热特性改变的问题,搭建一维渗流砂柱实验系统,研究粘土矿物成分、回灌盐度和回灌水头对砂样渗透性能的影响,得到含有蒙脱石砂样的渗透系数随回灌盐度的实验关联式。结果表明:咸水储层渗透性能变化的主要影响因素是粘土矿物的类型和含量以及回灌溶液盐度的变化,回灌水头对咸水储层渗透性能的影响较小。在粘土矿物成分中蒙脱石导致储层渗透性能降低幅度最大,其次是伊利石和高岭石;蒙脱石的含量越多,储层渗透性能降低越显著。

关键词: 咸水储层; 粘土矿物; 渗透性能; 回灌浓度; 回灌水头

中图分类号: TK529

文献标识码: A

0 引 言

季节性含水层储能是将含水层储能系统与热泵技术相结合,以管井回灌的方式将热流体和冷流体储存在地下,显著提高了建筑冬季供暖和夏季制冷的效率^[1-3]。含水层储能过程中,地下水流动与热量运移几乎同时发生,是地下水动力场和温度场相互耦合的过程。研究表明:大量的抽回灌增大储能井间的水头差和渗流速度,缩短回灌流体的运移时间,加快流贯通和热贯通的发生,导致储能效率的降低^[4,5]。此外,含水层渗透系数越大,透水性就越好,回灌引起的热量流失越多,储能效果越差^[6]。当前,国内外对含水层储能的研究多集中在储能井的布置方式、间距以及运行模式优化上,忽略了含水层渗透性变化规律对提高储能系统性能的重要性。

由于含水层的非均质性,渗透性能的变化不仅取决于砂层的成分、粒度、孔隙结构^[7],还体现在不同粘土矿物的水敏性上,即回灌溶液盐浓度变化引起的胶体粘粒及其附属物的运移,导致含水层渗透性降低。Sen 和 Khilar 发现,水动力和水化学条件的变化是引起粘粒释放、迁移的主要原因^[8]。Compere 等^[9-11]将蒙脱石悬浊液注入石英砂柱中,通过实验发现当孔隙流速降低时,粘性胶体微粒出现

絮凝、沉积现象造成孔隙堵塞,导致渗透性降低。Rosenbrand 等^[12]在含高岭石的 Berea sandstone 中进行流动实验,发现渗透性的降低主要是由于溶液盐度的降低引起高岭石粘粒的释放和运移,且渗透性不可恢复。Khilar 和 Fogler 通过 Berea sandstone 的水敏性实验发现,粘土颗粒的释放存在临界盐浓度(CSC)。当回灌溶液的盐度低于 CSC 时,砂岩的渗透性能显著降低。这是由于浓度的改变使束缚在孔隙表面的粘粒发生释放、絮凝、迁移和沉积,堵塞多孔介质的孔隙喉部,导致渗透性大幅下降。当堵塞现象达到最大时,渗透性逐渐趋于稳定^[13,14]。

中国海洋大学的郑西来教授在对原砂注入海水—河水—海水—河水的突变过程,以及连续注入海水—不同比例海水和河水混合溶液—河水—海水的渐变过程,对咸淡水界面的水敏性和含水层的渗透性能进行测试,结果显示含有非膨胀性粘土的含水层中,伊利石和高岭石等成分的释放和迁移是含水层渗透性降低的主要原因^[15-17]。韩志勇等采用去离子水和 NaCl 溶液代替海水,在连续回灌的情况下,对回灌液的流速、浓度和 pH 值对颗粒的释放速度和释放量的影响进行测试,结果显示当回灌溶液浓度和流速达到临界值时,会产生颗粒释放现象,砂柱渗透率下降;回灌液 pH 值越高,颗粒释放

的速度越快^[18]。当回灌水头为 30 cm 时,含水层添加不同比例的高岭石、伊利石和蒙脱石,在海水和地下淡水交替回灌的条件下,实验显示蒙脱石引起的渗透性降低程度最大,其次是伊利石和高岭石;蒙脱石含量达 3%~4%时,渗透系数已经下降至极低,可看作不透水层^[19]。天津科技大学的李海明教授通过砂柱实验研究在不同水力梯度和钠吸附比条件下胶体颗粒的释放特性,以及用 10 g/L 的 NaCl 溶液回灌时,粘土胶体、高岭土胶体和蒙脱石胶体 3 种类型的胶体颗粒的沉积、释放和运移特征^[20~22]。天津大学的赵军、马玖辰等通过定流量的一维砂柱渗流系统,在对原砂回灌 100% 去离子水、地下原水和去离子水 1:1 混合液、地下原水回灌时,对含水层的渗透特性进行测试,定性分析盐度变化及其变化梯度对咸水层渗透性能的影响。结果表明回灌盐度越低、盐度递减梯度越大,咸水层渗透性能的降低幅度也就越大^[23,24]。

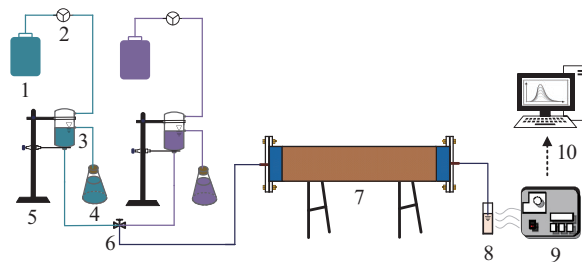
国内外学者对不同类型砂岩的水敏性进行大量的实验,研究胶体颗粒的释放、迁移和沉积特性,定性分析咸水含水层的渗透特性。但不同地区含水层的砂岩特性、粘土矿物成分以及地下水的化学成分和盐度均存在较大差异。本文主要针对天津滨海地区浅层咸水储层的水文地质条件及含有的粘土矿物成分,在含水层储能过程中回灌流体的浓度范围内,对回灌水头、盐度和粘土成分含量对渗透性能的影响进行实验测试,并进行定量分析,拟合含水层渗透系数随回灌浓度变化的实验关联式。为咸水层储能过程中含水层渗流特性和储能效果的计算提供基础数据。

在实验测试方法上,文献中回灌流体浓度的变化大都是在连续回灌的条件下进行的,前面的回灌浓度会对后面回灌浓度下的渗透性产生影响,而回灌时间也会引起含水层渗透性能的降低^[25]。为了减小各回灌浓度下的相互影响,及回灌时间的影响,更准确地反应测试参数引起的渗透性变化规律,本文每一个测试工况都需要重新填砂,单独测试。重点研究初始条件和其他参数不变的情况下,各水头、浓度和粘土矿物成分含量对含水层渗透性能的影响。为合理地开发和设计咸水层储能系统,提高系统的储能效率提供指导。

1 实验装置与实验材料

1.1 实验装置

该实验系统主要由供水系统、渗流砂柱、测试系统 3 部分组成,如图 1 所示。供水系统包括储液箱、蠕动泵、定水位瓶、溢流瓶和起吊架。本实验采用流速范围在 0.0015~380 mL/min 的数字转速型蠕动泵,型号为 BT100M+YZ1515x。将地下咸水和配制盐溶液从储液箱输送到定水位瓶中,以保证瓶内水位恒定。另外,瓶体一侧开有溢流孔,多余的溶液可流入溢流瓶中。起吊架用来支撑定水位瓶和调整水头差。三通阀用于转换不同水头和不同浓度的溶液。



1. 储液箱 2. 蠕动泵 3. 定水位瓶 4. 溢流瓶 5. 起吊架
6. 三通阀 7. 渗流砂柱 8. 称量容器 9. 浊度仪 10. PC

图1 实验系统图

Fig. 1 Schematic of experiment system

砂柱是实验系统的测试段,由长 400 mm、内径 50 mm、厚度为 5 mm 的亚克力玻璃管加工制成,具有高透明度、低导热系数和良好的抗水汽渗透能力。砂柱两端采用法兰密封,进出口处分别装有内径为 5 mm 的金属铜管。为了消除重力作用对微粒迁移的影响,砂柱水平放置,并由支架固定。砂柱整体分为溶液散流区和砂样填充区,两端散流区各 40 mm,砂样填充区长 320 mm。砂柱示意图如图 2 所示。

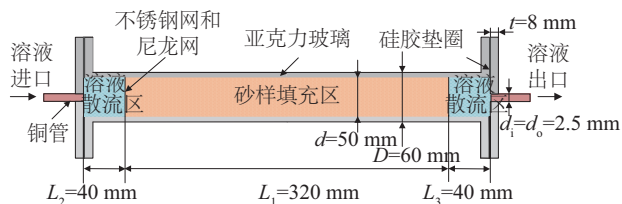


图2 砂柱示意图

Fig. 2 Sectional diagram of sand column

测试系统包括流出液的流量和浊度测量。流量采用秒表量筒法测量,记录流出液在一段时间内的体积和时间,计算得到。浊度采用美国哈希公司的 HACH2100AN 型浊度仪测量。各设备之间用硅胶管连接。

1.2 实验材料

实验所用砂样取自天津市滨海新区地下 40 m 处的咸水层,主要以细砂和粉细砂为主。经测定,砂样的密度为 2.562 kg/L,容重为 1.638 kg/L。经 D/max-rA X 射线衍射仪分析,砂样的主要成分有石英、斜长石、微斜长石和闪石以及少量粘土矿物。其中粘土矿物主要由伊利石、蒙脱石、高岭石和绿泥石组成,约占砂样总量的 0.5%。

实验用水采用地下咸水和配制的盐溶液。砂样的填充和饱水过程采用地下咸水,地下咸水取于砂样采集区域。回灌盐溶液由去离子水和海盐晶配制而成。采集的地下咸水通过水质测试分析,pH 值为 7.16,矿化度为 20941.7 mg/L。其主要成分是 Na^+ 和 K^+ 为 6347.5 mg/L, Ca^{2+} 为 435.8 mg/L, Mg^{2+} 为 773.3 mg/L, Cl^- 为 11521.2 mg/L, SO_4^{2-} 为 1330 mg/L, HCO_3^- 为 533.9 mg/L。海晶盐的主要成分如表 1 所示。

表 1 海盐晶的成分

Table 1 Compositions of salt crystal

成分	NaCl	KCl	CaCl ₂	MgSO ₄
质量分数/%	62.26	1.74	3.27	14.39
成分	MgCl ₂	NaHCO ₃	其他	
质量分数/%	12.76	0.49	5.09	

2 实验方法与数据处理

2.1 实验方法

为了保证进出实验测试段的渗流溶液呈面状均匀流动,散流区采用直径为 2 mm 玻璃珠填充。填充前需在 2% 稀盐酸溶液中浸泡 24 h,并用去离子水清洗除去表面杂质,烘干后封存备用。砂样在填充前依次进行自然风干、除杂、研碎、水洗、烘干,通过 30 目标标准筛后取样。为了等容重填充砂柱,根据砂样容重和填充区体积,计算所需填充砂样的质量为 1043.5 g。为了充分排除空气对渗流实验的

影响,采用湿填法填充。每填充 20 mm 后,轻敲管壁并用玻璃棒压实,确保所填砂样密实均匀,容重为 1.638 kg/L。在砂样填充区与溶液散流区的分界处,使用 60 目圆形不锈钢丝网和 100 目尼龙滤网将两区隔开。法兰中间有硅胶垫圈并用螺栓密封。装填完毕,将渗流砂柱水平固定,静置 6 h。然后通入地下咸水使砂柱测试段充分饱和,待其充分饱水且水流稳定后,改变回灌溶液参数,测试并记录流出液的流量和浊度。实验分别对水头差为 0.2、0.3、0.48 m,盐度为 5、4、3、2、1、0 g/L 的工况进行测试。每组实验过程中,每间隔 2 分钟记录一次数据。

每一参数下的测试均采用等比例的配制粘土矿物和砂样,混合均匀后等容重重新填充,以确保实验数据的可靠。

2.2 数据处理

在不同的实验工况下,根据计算的渗流量,通过达西定律得到砂样的渗透系数 K 。

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta H} \quad (1)$$

式中, K ——渗透系数, m/s; Q ——渗透流量, m^3/s ; L ——渗流的有效长度, m; A ——过水断面, m^2 ; ΔH ——水头差, m。

在不同工况下,为了准确比较溶液回灌后砂样渗透性能的变化规律,选取相对渗透系数 K^* 作为评价渗透性能的标准。相对渗透系数 K^* 是指在不同的实验工况下不同盐浓度回灌溶液中达到稳定状态渗透系数 K 与地下咸水原溶液饱水过程中达到稳定状态初始渗透系数 K_0 的比值。

$$K^* = \frac{K}{K_0} \quad (2)$$

式中, K^* ——相对渗透系数, %; K ——最终稳定渗透系数, m/s; K_0 ——初始稳定渗透系数, m/s。

3 实验结果与分析

3.1 粘土矿物成分和回灌水头对储层渗透性能的影响

伊利石、高岭石和蒙脱石是浅层含水层主要的粘土矿物,粘土矿物的类型不同,对咸水储层渗透性能的影响也不相同。当原砂中分别含有砂样总质量的 0.5% 的高岭石、伊利石和蒙脱石时,通过回灌地下咸水原溶液,在不同的回灌水头下,对砂样

的渗透系数进行测试,结果如图3所示。从图3中可以看出,当回灌水头一定时,由于粘土矿物的影响,砂样的渗透系数明显降低。当回灌水头为0.1 m时,含有0.5%高岭石、伊利石和蒙脱石的砂样渗透系数分别下降到原砂的82%、79.3%和44.7%。当砂样中含有0.5%的蒙脱石时,砂样渗透系数的降低幅度最大,其次是伊利石,高岭石的影响最小。这是由于粘土矿物的晶体结构及性质不同引起的。高岭石的比表面积较小,易随溶液流动发生迁移,多形成卷状或积聚起来附着在孔隙壁面上,作为骨架颗粒之间的孔隙填充物,减小了实际过水断面的面积,引起砂样渗透系数的下降。而伊利石矿物主要呈片状,颗粒较大,能够紧紧粘附在颗粒壁面上,成为颗粒的连接体,并且粘土颗粒的周围会吸附并形成一层水膜,使砂样的渗透系数降低。由于晶体结构的不同,蒙脱石形成水膜的厚度高于伊利石^[19],并且蒙脱石属于高膨胀性粘土矿物,吸水后体积膨胀,大大减小含水层的孔隙度,导致砂样渗透系数大幅度降低。因此,当砂样中含有蒙脱石时,砂层的渗透系数降低幅度较大。

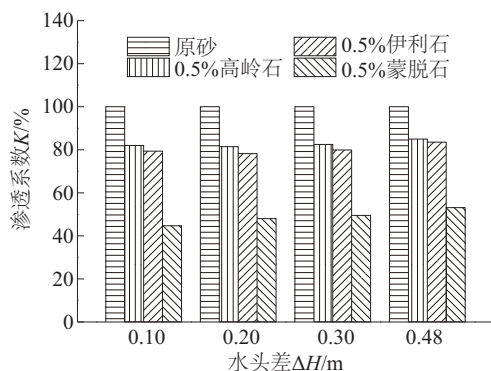


图3 不同类型粘土矿物的砂样渗透系数

Fig. 3 Permeability coefficient of the sand samples with different types of clay minerals

当砂样中含有的粘土矿物成分一定,回灌水头发生变化时,含水层的渗透特性如图4所示。从图4中可看出回灌水头从0.10 m升高到0.48 m的过程中,砂样的渗透系数逐渐降低,其中原砂的渗透系数降幅最大,含蒙脱石的砂样的渗透系数受水头的影响较小。原砂的渗透系数从 4.0764×10^{-4} m/s降低到 3.1989×10^{-4} m/s,下降了 0.8775×10^{-4} m/s;而含蒙脱石的砂样渗透系数降低了 0.1223×10^{-4} m/s。含有高岭石和伊利石的砂样的渗透系数分别降低

了 0.6251×10^{-4} 、 0.5617×10^{-4} m/s。根据DLVO理论,当回灌地下咸水原溶液时,由于溶液盐度较高且大于临界盐浓度(CSC),双电层被压缩,粘粒与孔隙壁面之间的范德华引力远大于双电层斥力和流动剪切力,使粘粒束缚在孔隙表面。随着回灌水头和渗流速度的升高,流动剪切力逐渐增大,带动了一部分微小颗粒的迁移,导致孔隙空间结构的堵塞,引起砂样渗透系数的降低。然而,这些微小颗粒的迁移和孔隙表面胶体粘粒的释放、迁移有所不同^[26]。由于回灌盐度未发生改变,双电层斥力不变,流动剪切力仍小于范德华引力,不足以引起束缚在孔隙壁面的粘土矿物发生大量释放,由图5流出液的浊度变化也显示,流出液的浊度无显著变化,说明在回灌过程中无胶体颗粒的释放。因此,回灌水头引起的含水层渗透性能的降低主要是由于微小颗粒迁移的影响。

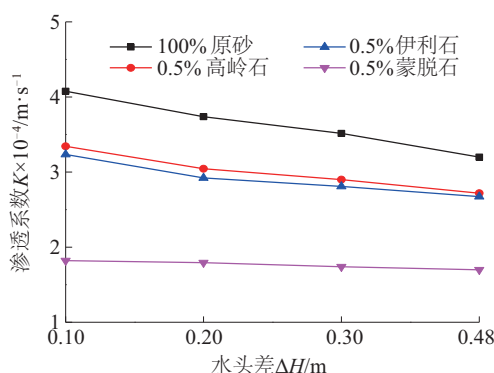


图4 不同类型粘土矿物的砂样渗透系数与回灌水头关系
Fig. 4 Permeability coefficient of sand samples of different types of clay minerals with injection water head

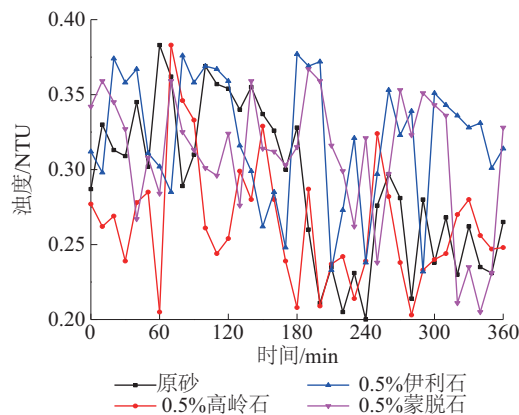


图5 不同类型粘土矿物的流出液浊度变化

Fig. 5 Effluent turbidity change of sand samples with different types of clay minerals

3.2 回灌溶液盐度对储层渗透性能的影响

含水层中粘土颗粒的释放和运移不仅与水动力作用有关,还受到水化学的影响。当回灌溶液的盐度低于临界盐浓度时,束缚在含水层多孔介质孔隙表面的粘粒发生释放、迁移,堵塞孔隙通道的喉部,导致含水层渗透性能显著降低。研究表明:蒙脱石最易释放,其次是伊利石,高岭石的临界盐浓度最低,最难释放^[27]。因此针对砂样中含有蒙脱石时,在回灌盐度变化后,对其渗透性能的变化规律进行了测试。图6给出了原水回灌以及回灌盐度为0 g/L和2 g/L时,砂样的渗透系数的变化。从图6中可看出原水回灌时,砂样的渗透系数变化不大;回灌盐度降低,砂样的渗透系数变化加快,达到稳态时,渗透系数的降幅增大。实验结果与文献[23]的渗透系数的变化趋势一致。随着回灌盐度的降低,砂样渗透性能的降低是由于含水层中胶体颗粒的释放的影响。图7流出液的浊度图也显示,当回灌盐度为0 g/L时,流出液的浊度最高达到2546 NTU,原水回灌的流出液的浊度基本无变化。这说明随着回灌盐度的降低,砂样中出现胶体颗粒的释放,引起含水层空间结构的改变,造成渗透系数的降低。

在回灌水头保持恒定的情况下,当砂样中含有0.5%的蒙脱石时,分别回灌0、1、2、3、4和5 g/L的盐溶液,得到砂层渗透系数与回灌溶液盐度的关系曲线,如图8所示。从图8中可看出,随着回灌盐度的降低,砂样的渗透系数逐渐降低,回灌溶液盐度越低,渗透系数下降越快。当水头差为0.1 m时,回灌溶液的盐度从5 g/L降低到0 g/L,砂层的渗透系

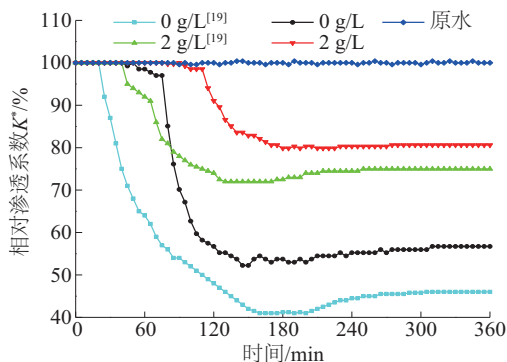


图6 不同回灌盐度的相对渗透系数(回灌水头0.1 m)

Fig. 6 Relative permeability coefficient change with different injection salinity (Injection water head is 0.1 m)

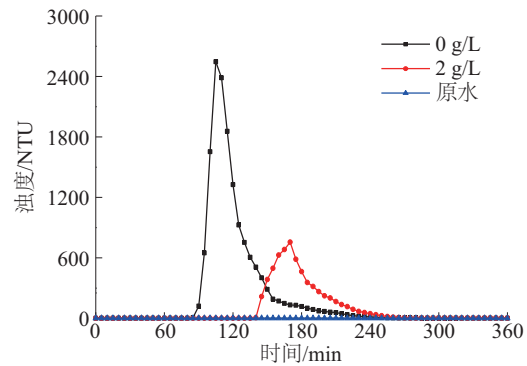


图7 不同回灌盐度的流出液浊度变化(回灌水头为0.1 m)

Fig. 7 Effluent turbidity change with different injection salinity (Injection water head is 0.1 m)

数由 1.5762×10^{-4} m/s 变化到 1.0327×10^{-4} m/s,降低了 0.5435×10^{-4} m/s。当水头差为0.2 m和0.48 m时,随着回灌盐度的降低,砂层的渗透系数分别下降 0.5707×10^{-4} 和 0.6398×10^{-4} m/s。根据 DLVO 理论,当溶液的盐度较高,远大于粘粒发生释放的临界盐浓度(CSC),双电层被压缩,此时粘粒与孔隙表面之间的范德华引力大于双电层斥力,粘粒被束缚在孔隙表面。当回灌溶液的盐度低于 CSC,双电层膨胀,双电层的重叠使双电层斥力逐渐增大。当双电层斥力超过范德华引力时,就会引起粘土颗粒的释放和迁移。随着回灌溶液盐度的降低,粘粒的释放量和释放速率逐渐升高,含水层渗透系数下降程度显著增大。并且回灌盐度越低,粘土颗粒发生释放、迁移和沉积现象就越剧烈,孔隙通道喉部的堵塞就越严重,含水层渗透性能就越低。此外,回灌溶液中含有的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等二价阳离子能够使颗粒表面电势显著降低,抑制粘粒的释放^[28]。随着回灌溶

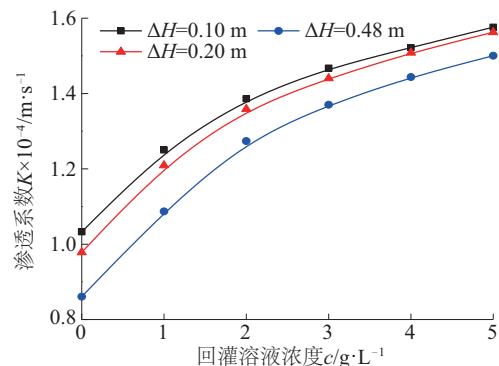


图8 砂样渗透系数与回灌盐度的关系(含0.5%蒙脱石)

Fig. 8 Permeability coefficient of sand samples with injection salinity (Contain 0.5% montmorillonite)

液盐度的降低,相应的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等二价阳离子也相应减少,对粘粒释放的抑制作用减弱,砂层渗透系数的变化幅度逐渐增大。当回灌溶液盐度从 5 g/L 降低到 0 g/L 时,随着水头差和渗流速度的增大,粘粒的释放速度相应加快,粘粒的释放量也随之增多,导致砂样渗透系数的降低更加显著^[29]。

根据砂样的渗透系数随回灌盐度的变化曲线,通过拟合得到在实验的回灌盐度范围内,含水层渗透系数随回灌盐度变化的实验关联式。

当回灌水头 $\Delta H=0.1$ m 时, $R^2=0.99781$

$$K = 1.0388 + 0.3041 \ln(c + 1) \quad (3)$$

当回灌水头 $\Delta H=0.2$ m 时, $R^2=0.99596$

$$K = 0.8558 + 0.3648 \ln(c + 1) \quad (4)$$

当回灌水头 $\Delta H=0.48$ m 时, $R^2=0.99820$

$$K = 0.9836 + 0.3277 \ln(c + 1) \quad (5)$$

式中, K —— 砂样的渗透系数, $\times 10^{-4}$ m/s; c —— 回灌溶液的盐度, g/L; R^2 —— 相关系数。

3.3 粘土矿物含量对储层渗透性能的影响

由于蒙脱石引起了砂样渗透系数的大幅降低,本文在地下咸水原溶液回灌时,对蒙脱石的含量变化对砂样渗透系数的影响进行测试,结果如图 9 所示。图 9 中给出了在不同回灌水头下,蒙脱石含量分别为 0.1%、0.5%、1.0% 的砂样的渗透系数变化,图 9 中显示,随着蒙脱石含量的增大,砂样的渗透系数显著降低。当回灌水头为 0.1 m 时,蒙脱石含量分别为 0.1%、0.5%、1.0% 的砂样的渗透系数分别下降到原砂的 74.7%、44.7% 和 16%。在不同的回灌水头下,随着蒙脱石含量的增加,砂样渗透系数均呈现出显著降低的趋势。当砂样中蒙脱石含量继续增加时,砂样渗透系数的下降幅度更加明显,甚至可产生一个低渗透帷幕带或不透水带^[19]。这主要是由于蒙脱石的高膨胀性引起的。

图 10 给出了含蒙脱石砂样的渗透系数随回灌水头的变化曲线,当蒙脱石的含量一定时,回灌水头从 0.10 m 升高到 0.48 m,砂样的渗透系数逐渐降低,但变化幅度不大。这说明随着回灌水头的升高,未使束缚在孔隙壁面的粘土矿物发生大量释放、迁移,只带动了一些微小颗粒的运移,减小含水层孔隙度,使渗透性能逐渐降低。从图 11 也可看出,流出液浊度变化不大,说明含有蒙脱石的砂样的渗透系数的降低主要是由于蒙脱石的高

膨胀性和微小颗粒的迁移引起的。在回灌盐度未发生变化时,胶体颗粒的释放量很小,其对渗透性变化的影响较小。当蒙脱石含量为 0.1%、0.5% 和 1.0% 时,随着回灌水头的增大,渗透系数的降低幅

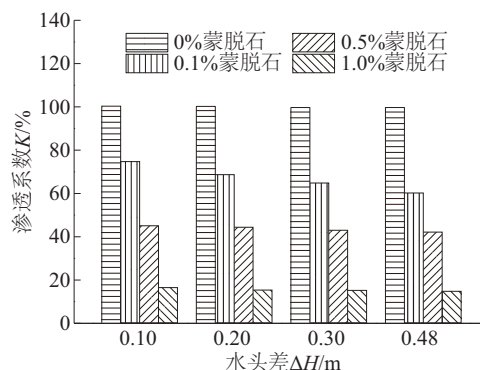


图 9 不同蒙脱石含量的砂样渗透系数

Fig. 9 Permeability coefficient of sand samples with content of montmorillonite

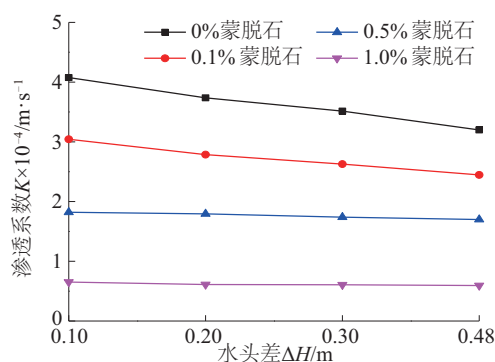


图 10 不同蒙脱石含量的砂样渗透系数与回灌水头关系

Fig. 10 Permeability coefficient of sand samples of different contents of montmorillonite with injection water head

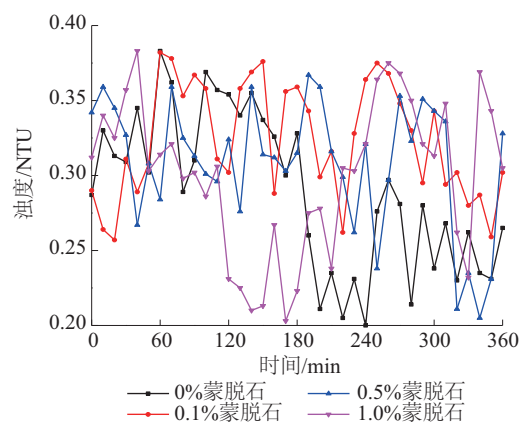


图 11 不同蒙脱石含量的流出液浊度变化

Fig. 11 Effluent turbidity change of sand samples with different contents of montmorillonite

度分别为 0.5978×10^{-4} 、 0.1223×10^{-4} 和 0.0577×10^{-4} m/s。由于蒙脱石粘粒的膨胀,随着其含量的增多,加剧孔隙空间结构的堵塞,进一步削弱回灌水头变化对砂样渗透性能的影响。因此,当蒙脱石含量增大,回灌水头引起的砂样渗透系数的变化甚微。

4 结 论

通过室内砂柱实验,在原砂中添加不同类型的粘土矿物,对粘土矿物成分、回灌水头、回灌盐度以及粘土矿物含量对含水层渗透性能的影响进行测试。通过对实验结果的分析,得到以下结论:

1)回灌水头引起的咸水储层渗透性能的改变主要是由于微小颗粒迁移的影响。当砂样中含有蒙脱石时,其渗透性受回灌水头的影响比含有伊利石和高岭石时差;随着蒙脱石含量的增加,回灌水头对砂样渗透性的影响越来越小。

2)回灌盐度越低,束缚在孔隙表面的粘粒的释放、迁移和沉积现象越剧烈,储层的渗透性能也就越低。通过对不同回灌盐度下渗透系数的测试,得到含有蒙脱石砂样的渗透系数随回灌盐度的实验关联式。

3)咸水储层渗透性能的变化主要受粘土矿物的类型、含量以及回灌溶液盐度的影响,回灌水头对储层渗透性能的影响较小。

[参考文献]

- [1] Dudfield P, Woods A W. On the periodic injection of fluid into, and its extraction from, a porous medium for seasonal heat storage[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 27(5): 467—481.
- [2] Bakr M, Oostrom N V, Sommer W. Efficiency of and interference among multiple aquifer thermal energy storage systems: A dutch case study[J]. *Renewable Energy*, 2013, 60(4): 53—62.
- [3] Sommer W, Valstar J, Leusbrock I, et al. Optimization and spatial pattern of large-scale aquifer thermal energy storage[J]. *Applied Energy*, 2015, 137: 322—337.
- [4] 牡丹艳, 胡继华, 张延军. 水源热泵系统含水层中渗流场模拟及其对温度场的影响分析[J]. *建筑节能*, 2008, 36(8): 8—12.
- [4] Du Danyan, Hu Jihua, Zhang Yanjun. Numerical simulation of seepage flow field of the groundwater source heat pump system[J]. *Building Energy*, 2008, 36(8): 8—12.
- [5] Kim J, Lee Y, Yoon W S, et. al. Numerical modeling of aquifer thermal energy storage system[J]. *Energy*, 2010, 35(12): 4955—4965.
- [6] 朱家玲, 刘雪玲, 刘立伟, 等. 含水层储能影响因素分析[J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(12): 2003—2006.
- [6] Zhu Jialing, Liu Xueling, Liu Liwei, et al. Analysis of effects of aquifer energy storage[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(12): 2003—2006.
- [7] 吴吉春, 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [7] Wu JiChun, Xue Yuqun. *Groundwater dynamics* [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2009.
- [8] Sen T K, Khilar K C. Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media[J]. *Advances in Colloid & Interface Science*, 2006, 119(2-3): 71—96.
- [9] Compere F, Porel G, Delay F. Transport and retention of clay particles in saturated porous media. Influence of ionic strength and pore velocity[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, 49(1-2): 1—21.
- [10] 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.
- [11] Bedrikovetsky P, Zeinijahromi A, Siqueira F D, et al. Particle detachment under velocity alternation during suspension transport in porous media[J]. *Transport in Porous Media*, 2012, 91(1): 173—197.
- [12] Rosenbrand E, Kjoller C, Riis J F, et al. Different effects of temperature and salinity on permeability reduction by fines migration in Berea sandstone[J]. *Geothermics*, 2015, 53: 225—235.
- [13] Khilar K C, Fogler H S. The existence of a critical salt concentration for particle release[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1984, 101(1): 214—224.
- [14] McKay W I, Brigham W E. Effects of temperature on the absolute permeability of consolidated sandstone[R]. Stanford University, CA (USA), Petroleum Research Inst, 1984: 43.
- [15] 郑西来, 王东升, 胡志峰, 等. 滨海地区咸淡水界面上含水介质水敏感性的实验[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(5): 133—137.
- [15] Zheng Xilai, Wang Dongsheng, Hu Zhifeng, et al. Water sensitivity of porous media at seawater-freshwater

- interface[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2007, 27(5): 133—137.
- [16] 张晓辉, 周 骏, 郑西来, 等. 咸淡水界面上含水介质的水敏感性研究[J]. *海洋环境科学*, 2007, 26(4): 301—304.
- [16] Zhang Xiaohui, Zhou Jun, Zheng Xilai, et al. Study on water sensitivity of the porous media at saline-freshwater interface[J]. *Marine Environmental Science*, 2007, 26(4): 301—304.
- [17] 黄 翠, 郑西来, 栾熙明, 等. 咸淡水驱替过程中含水介质渗透性变化的试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(6): 21—25.
- [17] Huang Cui, Zheng Xilai, Luan Ximing, et al. Experimental study of changes in hydraulic conductivity of aquifer medium in salt- freshwater displacement process [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2009, 36(6): 21—25.
- [18] 韩志勇, 郑西来, 陈继红, 等. 影响咸淡水界面水敏感性的几个因素[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(6): 24—27.
- [18] Han Zhiyong, Zheng Xilai, Chen Jihong, et al. Factors affecting the water sensitivity of saltwater- freshwater interface [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2007, 34(6): 24—27.
- [19] 韩志勇, 郑西来, 陈继红. 不同粘土矿物水敏性特征[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(1): 80—82.
- [19] Han Zhiyong, Zheng Xilai, Chen Jihong. Water sensitivity characters of different clay minerals[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2008, 35(1): 80—82.
- [20] 吴锦兰, 李海明, 王 博, 等. 滨海含水介质胶体释放的粒度和动电性质表征[J]. *水资源保护*, 2009, 25(3): 18—21.
- [20] Wu Jinlan, Li Haiming, Wang Bo, et al. Characteristics of particle size and electrokinetic properties of colloid release in coastal water-bearing media[J]. *Water Resources Protection*, 2009, 25(3): 18—21.
- [21] 李海明, 李子琛, 赵 雪, 等. 不同 SAR 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.
- [21] Li Haiming, Li Zichen, Zhao Xue, et al. Colloid release and permeability losses of coastal aquifer in different SAR conditions[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(2): 263—268.
- [22] 李海明, 张 楠, 佟 琪, 等. 不同种类胶体在含水介质中沉积和释放特征[J]. *工程勘察*, 2011, 39(9): 42—45.
- [22] Li Haiming, Zhang Nan, Tong Qi, et al. Deposition and release of different types of colloids in water-bearing media [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2011, 39(9): 42—45.
- [23] 马玖辰, 郭春梅, 张志刚. 咸水层储能回灌溶液盐度变化对含水介质渗透性能的影响[J]. *可再生能源*, 2013, 31(4): 94—99.
- [23] Ma Jiuchen, Guo Chunmei, Zhang Zhigang. The effect of salinity variation of saline aquifer energy storage reinjection solution on water-bearing medium permeability [J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(4): 94—99.
- [24] 马玖辰. 地下咸水层储能与含水介质空间结构变化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [24] Ma Jiuchen. The researches of energy storage and recharge aquifer medium space structure in brackish aquifers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [25] 郑西来, 单蓓蓓, 崔 恒, 等. 含水层人工回灌物理堵塞的实验与数值模拟[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2013, 38(6): 1321—1326.
- [25] Zheng Xilai, Shan Beibei, Cui Heng, et al. Test and numerical simulation on physical clogging during aquifer artificial recharge [J]. *Earth Science- Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(6): 1321—1326.
- [26] 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(1-2): 21—39.
- [27] Neaman A, Singer A, Stahr K. Clay mineralogy as affecting disaggregation in some palygorskite containing soils of the Jordan and Bet-She'an Valleys[J]. *Journal of Soil Re-search*, 1999, 37(5): 913—928.
- [28] Mohan K K, Vaidya R N, Reed M G, et al. Water sensitivity of sandstones containing swelling and non-swelling clays [J]. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 1993, 73(2): 237—254.
- [29] Zheng Xilai, Zhou Jun, Lin Guoqing. Particles release on a sea-freshwater interface by flow velocity and rate of salinity decrease effects[A]. 2009 3rd. International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering[C], Beijing, 2009: 1—5.

EFFECT OF INJECTION SALINITY AND WATER HEAD ON BRINE AQUIFER PERMEABILITY

Liu Xueling^{1,2}, Liu Jinsong^{1,2}, Li Wanyi^{1,2}, Jiang Xin^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy(MOE), Tianjin University, Tianjin 300350, China;*

2. *Tianjin Geothermal Research & Training Center, Tianjin University, Tianjin 300350, China*)

Abstract: Due to the complexity of the water quality and the composition of clay minerals in brine aquifer, when the injection water salinity is different from the underground brine water, there will be the release of colloidal particles, which could result in the reduction of the permeability and affect the heat transfer characteristics of the brine aquifer. In this paper, an experimental study was carried out using sand column to study the influence of the clay minerals, injection salinity and water head on the permeability of the sand samples, imperial relations of the permeability coefficient were got. Results indicate that the main factor that affects the permeability of the brine aquifer are the clay mineral type and its proportion, as well as the injection salinity, while the injection water head has less effect on the permeability. Among the composition of clay minerals, montmorillonite leads to the largest permeability reduction, followed by illite and kaolinite. The more proportion of montmorillonite is, the more obviously reduction of the permeability is.

Keywords: brine aquifer; clay mineral; permeability; injection salinity; injection water head