

地下水源热泵铁锰化学堵塞试验

潘俊,宋佳蓉,叶梦星

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 针对在铁锰含量较高地区的水源热泵工程回灌堵塞问题,模拟冬夏季间歇性回灌,分析铁锰化学堵塞影响原因. 方法 以沈阳理工大学地下水源热泵工程为主要研究对象,通过室内渗流砂柱模拟冬夏季间歇性回灌,在保证渗流砂柱温度为 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,用相同回灌水以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种温度进行回灌,分析水通量、相对渗透系数、渗透系数、孔隙度等变化规律. 结果 分析表明,冬季回灌水堵塞程度严重,夏季堵塞程度不明显,靠近进水口处的堵塞现象较为明显,说明季节性温度与在渗流途径上溶解氧含量对水源热泵化学堵塞影响较大. 结论 夏季回灌堵塞程度较冬季回灌发生堵塞程度小,发生时间较晚. 锰基本不参与水源热泵的化学堵塞, Fe^{2+} 为化学堵塞的主要因素.

关键词 地下水源热泵;铁锰化学堵塞;间歇回灌;渗透系数

中图分类号 TK529 文献标志码 A

Experimental Study on Influencing Factors of Chemical Plugging of Iron and Manganese in Groundwater Source Heat Pump

PAN Jun, SONG Jiarong, YE Mengxing

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The problem of recharge of water source heat pump in high iron and manganese content, this paper simulates the intermittent recharge in winter and summer, and analyzes the reason of chemical plugging. The groundwater source heat pump project of Shenyang Ligong University was used as the main research object. The intermittent recharge of winter and summer was simulated by indoor seepage sand column. When the temperature of the sand column was $11\text{ }^{\circ}\text{C}$, the same water was used at $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperature, the change of water flux, relative permeability coefficient, permeability coefficient, and porosity were analyzed. Analysis results show that the clogging degree is very obvious in the summer, and the clogging at the inlet is obvious. It shows that the seasonal temperature and the dissolved oxygen content on the seepage flow have a great influence on the chemical plugging of the water source heat pump. In this paper, the influencing factors of iron and manganese recharge in groundwater source heat pump are provided.

收稿日期:2017-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41072190)

作者简介:潘俊(1962—),男,教授,博士,主要从事水源热泵工程应用研究.

Key words: groundwater source heat pump; iron manganese chemical plug; intermittent recharge; permeability coefficient

地下水源热泵作为一项高效节能利用可再生能源的技术,在国内外广泛的应用,然而由于目前地下水回灌堵塞所引起的回灌效率下降造成了水资源浪费、增加维护成本等问题已成为制约地下水源热泵发展的关键因素^[1-2].堵塞所造成地下水回灌效率低的问题不仅是地下水源热泵工程关注的焦点,而且也是制约雨洪水、地面沉降等涉及地下水人工回灌技术回灌效率的关键因素^[3],因此对回灌堵塞机理的研究非常重要.

根据堵塞成因不同,地下水源热泵堵塞一般分为物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞.由于水动力或水化学作用下引起的化学堵塞具有影响因素众多、堵塞演化过程的时间尺度长短不一等特点,在回灌堵塞中的研究较少.潘俊等^[4]指出地下水中铁锰广泛分布,易生成沉淀,所以由铁锰引起的化学堵塞占主要地位.因此开展对铁锰化学堵塞的研究非常必要.有研究表明影响化学堵塞的因素与水化学的组成成分、含水层岩性矿物成分及物理条件有关^[5-6].国外学者 PAVELIC P^[7]指出氢氧化铁能被可降解有机物还原,亚铁离子氧化形成的铁氧化物会引起堵塞.李璐等^[8]研究指出在 pH 值发生变化的情况下,铁化合物在形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀的同时会凝聚成为胶体,影响多孔介质的渗透能力.

已有研究表明,多数造成水源热泵堵塞的原因为铁离子的氧化作用,而针对 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 以及冬夏季回灌过程、DO 浓度、渗流途径的远近等因素研究较少.基于此,笔者通过室内渗流砂柱模拟冬夏季间歇性回灌,对沈阳地区地下水中铁锰高含量区域展开试验,选取沈阳理工大学水源热泵工程为研究对象,得出铁锰化学堵塞与上述影响因素密切相关,研究成果可为防治地下水源热泵回灌堵塞提供科学依据.

1 铁锰堵塞室内回灌试验

1.1 试验装置及材料

试验装置如图 1 所示,其材质为有机玻璃.试验装置全长为 82 cm,内径为 10 cm,两侧有存水区,存水区与柱体间用 $150\ \mu\text{m}$ 纱网隔开,防止多孔介质流失,安装有标准 2 分阀.有机玻璃柱水平放置,用以消除试验中重力作用对粘粒释放、迁移产生的影响^[9].柱体上下两侧分别分布 5 个 2 分阀门,下侧阀门与柱体用 $150\ \mu\text{m}$ 纱网隔开,防止多孔介质流失.在下侧与两侧共 4 个阀门处连接测压管.测压孔分布 ①~② 间距为 44 cm,②~③ 间距为 10 cm,③~④ 间距为 38 cm.

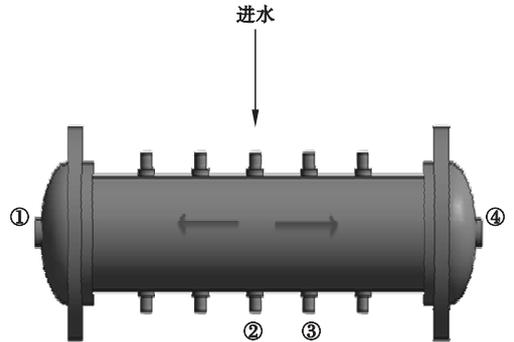


图 1 试验装置

Fig. 1 Test device

装置内装填的多孔介质取自沈阳理工大学处土壤层.样品进行试验前处理.用标准筛筛分为, $0.1\ \text{mm} < \text{粒径} < 2\ \text{mm}$ 的细中粗砂、 $2\ \text{mm} < \text{粒径} < 20\ \text{mm}$ 的砂砾、粒径 $> 20\ \text{mm}$ 的碎石与一部分黏土,混匀压实,做粒径分布检测,装填的多孔介质颗粒级配曲线如图 2 所示.从图中可以看出,粒径 $< 20\ \text{mm}$ 的颗粒约占 50%,粒径 $2 \sim 20\ \text{mm}$ 的颗粒约占 30%,粒径 $> 20\ \text{mm}$ 的颗粒约占 10%,黏土含量约占 10%.

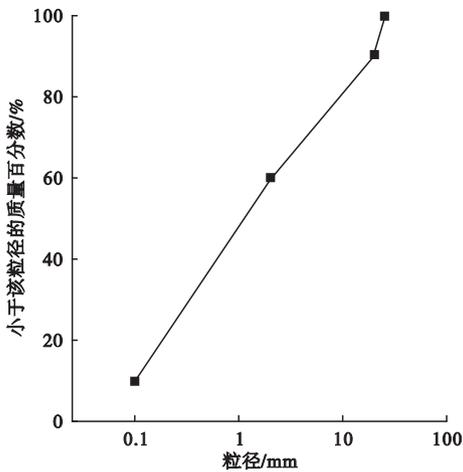


图2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle gradation curve

为确定高铁高锰地区冬夏季对回灌堵塞的影响,试验回灌水根据沈阳理工大学地下水水质报告中各离子浓度进行配置.沈阳理工大学地下水水质见表1.

表1 地下水水质

Table 1 Groundwater quality

项目名称	质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Ca^{2+}	64.13
Mg^{2+}	17.02
Cl^-	67.37
SO_4^{2-}	184.00
氨氮(以N计)	<0.02
Fe^{2+}	2.92
硫酸盐	101.00
溶解性总固体	328.00
溶解氧	8.99
锰	1.47
硝酸盐(以N计)	1.88
Fe^{3+}	0.05
pH	7.04

根据《地下水质量标准》(GB/T 14848—93)可以看出研究区铁锰离子质量浓度均高于VI类水限值,属于高锰高铁地区,硫酸盐、溶解性总固体、氯化物、pH值等指标均低于II类水限值.硝酸盐、氨氮等指标均低于I类水限值.

试验室所配得的回灌水水质见表2.回灌水由去离子水为背景原液,按比例投加 $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 NaSO_4 混合均匀后配成.

表2 试验室回灌水水质表

Table 2 Laboratory water quality table

回灌水质	质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Fe^{2+}	3
Mn^{2+}	1.5
SO_4^{2+}	180

1.2 试验方法

1.2.1 试验步骤

①在有机玻璃柱内壁一侧均匀地涂抹凡士林,消除由试验器材产生的边壁效应^[4],将筛好后得到的试样,即砂砾与黏土按一定比例充分混匀后装填进有机玻璃柱内.填装试样时,为防止多孔介质在有机玻璃柱内松散,易被水流冲散,影响后续渗透性试验,应注意一边装填一边进行压实,直至多孔介质在除两侧存水区外填满有机玻璃柱.为降低本次回灌试验里多孔介质中的微生物对堵塞的影响,在装填前将多孔介质在试验室中用烘箱 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干.

②在试验开始前,将渗流砂柱用蒸馏水饱和,待渗流砂柱出现水膜后,再将蒸馏水放空,并采用环刀切取部分试样称重.

③从有机玻璃柱中间用潜水泵将配好的回灌水充入,为减少水动力对多孔介质渗透性能的影响,在试验中,供液流量均以恒定功率充入^[9].

④试验分两组进行,两组有机玻璃柱温度均用加热带及温控开关控制在 $11\text{ }^\circ\text{C}$.冬季回灌试验中,回灌水温度控制在 $5\text{ }^\circ\text{C}$,夏季控制在 $24\text{ }^\circ\text{C}$.为模拟实际间歇性回灌,在回灌水充满有机玻璃柱后,静置 8 h 放水,间隔 10 h 进水,如此循环.

⑤试验中监测各段测压水头及时间、流量的变化.

1.2.2 计算方法

(1) 水通量公式

采用通过圆柱横截面的纯水通量来表征多孔介质堵塞的程度^[10]. 根据式(1)计算:

$$Q = V/t. \quad (1)$$

式中: Q 为通过圆柱横截面的流量即纯水通量, m^3/s ; V 为圆柱内充入全部水量总体积, m^3 ; t 为圆柱内充入全部水量所用时间, s .

(2) 渗透系数 K 与相对渗透系数 K/K_0

采用渗透系数表征多孔介质堵塞的程度. 渗透系数即单位水力梯度的达西定律(线性渗透定律)^[11], 根据式(2)计算:

$$Q_0 = K \frac{\Delta H}{L} \omega. \quad (2)$$

式中: Q_0 为出水流量, m^3/d ; ΔH 为在渗流途径 L 长度上的水头损失, m ; L 为渗流途径长度 m ; K 为渗透系数, m/d ; ω 为过水断面面积, m^2 .

采用相对渗透系数 K/K_0 表征多孔介质堵塞的程度^[12], 计算公式为

$$K = \frac{g}{v} k_0. \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度; v 为流体的运动黏滞系数, m^2/s , 与流体本身的性质、温度压强等有关, 一般须经试验量测得到. 水的运动黏滞系数随温度变化的经验公式:

$$v = 0.01775 / (1 + 0.0337t + 0.000221t^2). \quad (4)$$

式中: k_0 为多孔介质的渗透率, 其值取决于经验公式, 对于松散颗粒状多孔介质表述为 $k_0 = cd_{10}^2$, 其中 d_{10} 为有效粒径.

(3) 孔隙度

采用体积法近似测量孔隙比, 计算孔隙度表征多孔介质堵塞程度, 公式为

$$n = e / (1 + e), e = V_{\text{水}} / V_{\text{柱}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

式中: n 为孔隙度; e 为孔隙比, %.

2 试验结果与分析

2.1 水通量变化规律

图3为在冬季($5\text{ }^\circ\text{C}$)与夏季($24\text{ }^\circ\text{C}$)不

同回灌水温下, 相同回灌试样的水通量及其变化规律曲线. 结果表明, 冬季($5\text{ }^\circ\text{C}$)与夏季($24\text{ }^\circ\text{C}$)相同回灌试样的水通量的变化规律有较大差异, 说明冬季与夏季回灌水温对堵塞有显著的影响.

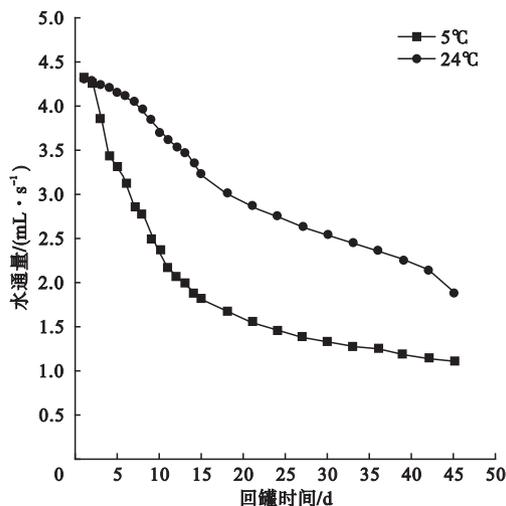


图3 水通量变化曲线

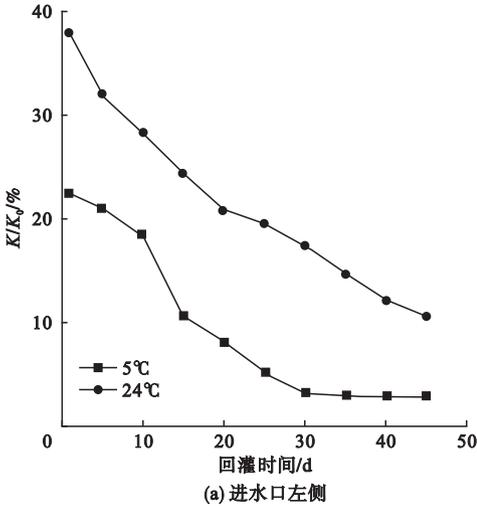
Fig. 3 Water flux change curves

由图3可以看出, 在 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 与 $24\text{ }^\circ\text{C}$ 不同回灌水温下, 相同回灌试样的水通量变化规律随着回灌时间的变化均呈下降趋势. $5\text{ }^\circ\text{C}$ 水温下, 回灌试样的水通量随回灌时间的变化下降速度较快, 可以看出, 该回灌水温下, 堵塞发生在第11天, 由初始的 4.34 mL/s 下降至 2.17 mL/s , 为初始时的50%, 并且该回灌水温下水通量变化规律曲线以回灌时间第15天为分界点, 15 d之前水通量的变化趋势随回灌时间的变化急剧下降, 由初始的 4.34 mL/s 下降至 1.82 mL/s , 是初始时的58%, 其后水通量的变化趋势逐渐平稳. 实验结束时, 水通量为 1.11 mL/s , 是初始时的74%. 与冬季相比, 在回灌水温为 $24\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 回灌试样的水通量变化趋势随回灌时间的变化较为平缓, 在该回灌水温下, 试样发生回灌堵塞时间较为靠后, 堵塞时间为第42天, 为初始时的50.35%, 实验结束后的水通量为 1.89 mL/s . 回灌水的水通量在 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时比 $24\text{ }^\circ\text{C}$ 时小, 产生这种现象的原因可能与回灌

水的运动黏度有关,流体的运动黏度规律由 $\nu = \mu/\rho$ 得出,水温越高,水密度越小,动力黏滞系数越小.液体分子间的距离很小,分子间的引力即黏聚力,是形成黏性的主要因素,温度升高,分子间的距离增大,黏聚力减小,黏度随之减小阻力越小,流体的流动性越好^[13-16].

2.2 K/K_0 变化规律

图4为冬季(5℃)与夏季(24℃)不同



回灌水温下,相同回灌试样的进水口两侧 K/K_0 变化规律图.其中,图4(a)为进水口左侧在不同温度时 K/K_0 的变化规律图,图4(b)为进水口右侧在不同温度时 K/K_0 的变化规律图.从图中可以看出,左右两侧 K/K_0 曲线的变化趋势基本一致,因此选取图4(a)为例进行详细的分析.

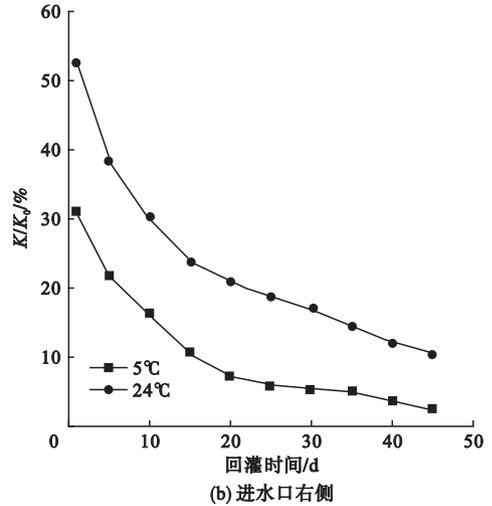


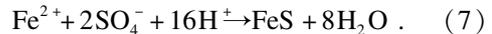
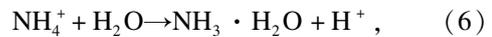
图4 进水口两侧 K/K_0 变化规律

Fig. 4 The change rules of K/K_0 on both sides of inlet

从图4(a)可以看出,在冬季(5℃)与夏季(24℃)不同回灌水温下,相同回灌试样的 K/K_0 变化趋势随着回灌时间的增加呈下降趋势.在5℃回灌水温下,回灌试样的 K/K_0 曲线的变化趋势以回灌第15天为转折点,回灌第15天前, K/K_0 下降趋势较为急剧,由开始的22.33%下降到10.53%.其后下降趋势逐渐平缓,在回灌第30天以后,回灌试样的 K/K_0 基本保持平衡.与冬季相比,在24℃回灌水温下,回灌试样的 K/K_0 曲线的下降趋势可视为“线性关系”,即 K/K_0 随着回灌时间的增加而减小.该回灌水温下, K/K_0 曲线没有出现明显的分界点.

分析实验中形成堵塞的原因可能为:一方面溶液中的 Fe^{2+} 与溶液中的氧气充分接触氧化成 Fe_2O_3 沉淀.另一方面溶液中的 Fe^{2+} 可能生成 FeS 沉淀,反应方程式如

下:



K/K_0 在5℃时较小,24℃时较大,可能与反应方程式(2)是放热反应有关.实验中,由于反应式(2)发生反应式会产生大量的热,5℃和24℃回灌水温下回灌水的运动黏度均会有所下降,但24℃回灌水温下,回灌水的运动黏度下降会更快一些,在一定长度及温度范围内,冬季回灌 K/K_0 较低,夏季 K/K_0 较大^[17-18].

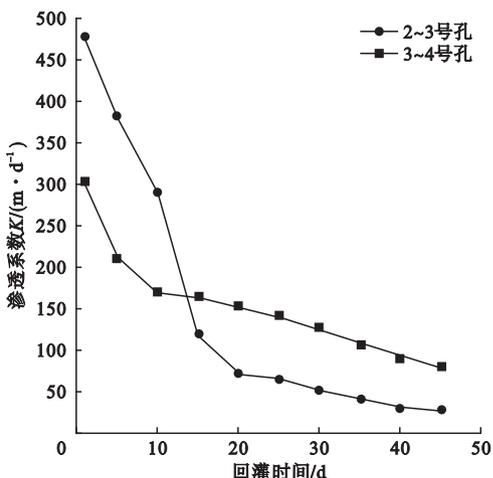
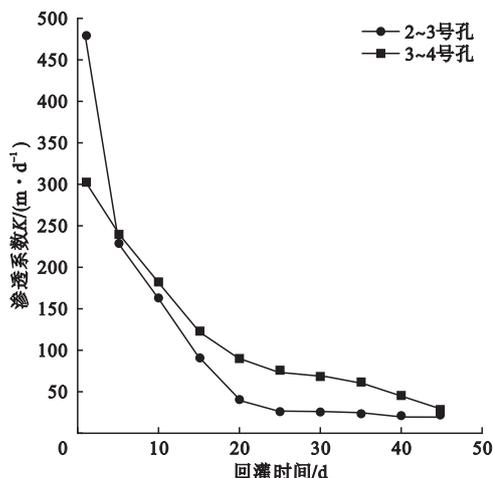
进水两侧 K/K_0 的变化规律与上述水通量的变化规律基本吻合,均表明实验前期堵塞发生的较为明显,其后随着回灌时间的增加堵塞趋于稳定.

2.3 不同渗流途径 K 变化规律

不同渗流途径 K 变化规律曲线见图5.

其中图 5(a) 为冬季回灌水温(5 °C) 时相同回灌水进水口右侧两段 K 的变化规律, 图 5

(b) 为夏季回灌水温(24 °C) 时相同回灌水进水口右侧两段 K 的变化规律.



(a) 5 °C 进水口右侧两端 K 变化规律

(b) 24 °C 进水口右侧两端 K 变化规律

图 5 进水口右侧两段 K 变化规律

Fig. 5 The change rules of the two sections of the right side of the inlet

从图 5 中可以看出, 在不同回灌水温下, 2~3 段和 3~4 段 K 的变化趋势大体一致. 在 5 °C 与 24 °C 水温下, 2~3 段 K 的变化趋势比 3~4 段的渗透系数变化趋势大. 以图 5(a) 为例, 2~3 段初始 K 为 477.68 m/d, 3~4 段初始 K 为 302.53 m/d, 相差较大, 并且 2~3 段 K 在前几天急剧下降, 第 5 天有较明显的变化, 下降了 52.04%; 在第 5 天到第 15 天下降速度放缓, 但仍由 60.25% 的下降率, 直至第 15 天后逐渐平稳. 与之相比, 3~4 段下降趋势比较平缓. 说明冬夏季渗透系数均在靠近进水口处下降趋势快, 产生这种现象的原因是含砂层对铁锰离子有一定的吸附作用, 因此靠近进水口处因间歇性回灌, 大量氧气随水进入, 使得近口处铁离子暂时性富集, 加快了铁离子沉淀物的生成^[19-20].

2.4 进水口处不同温度渗透系数变化规律

图 6 为冬季(5 °C) 与夏季(24 °C) 不同回灌水温下, 2~3 段的 K 变化规律曲线. 从图中可以看出, K 整体变化趋势为在 24 °C 时较大, 5 °C 时较小, 在前 15 d 内下降速率高, 15 d 后下降趋势放缓, 逐渐趋于平稳. 产生这种现象与溶液中的溶解氧有一定的关系.

通过公式 $DO_f = 468 / (31.6 + T)$ 可以看出, 随着水的温度升高, 饱和溶解氧的浓度降低, 因此氧化反应的速度会下降. 而在一段时间后渗透系数的衰减趋于平稳则为孔隙中的沉淀已经趋于饱和.

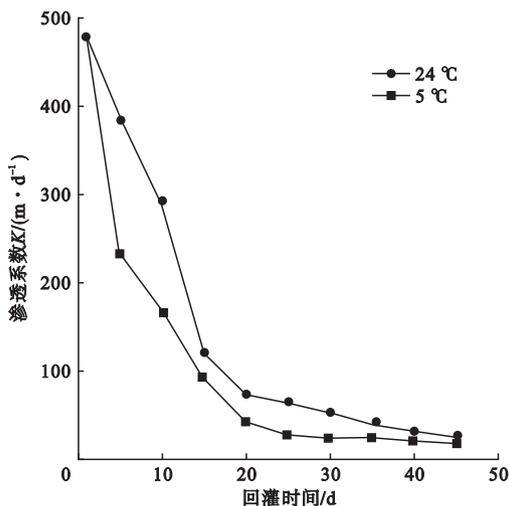


图 6 冬夏季 2~3 段 K 变化规律

Fig. 6 K change laws of 2~3 stages in winter and summer

2.5 孔隙度变化规律

冬夏季相同回灌水回灌过程孔隙度变化规律曲线见图 7. 其中图 7(a) 为冬季(5 °C)

回灌水温下,回灌过程的孔隙度变化规律图,图图7(b)为夏季(24℃)回灌水温下,回灌过程的孔隙度变化规律图。从图中可以看出孔隙度都随时间的增加而逐渐减小,回灌水温为24℃时,孔隙度由初始的25%下降至

20%,回灌水温为5℃时,孔隙度由初始的26%下降至15%,堵塞初期为前10d,由26%下降到18%,下降趋势较快,10d后孔隙度有所减小,但并不明显,已趋于饱和,因此证明有机玻璃柱内发生了堵塞。

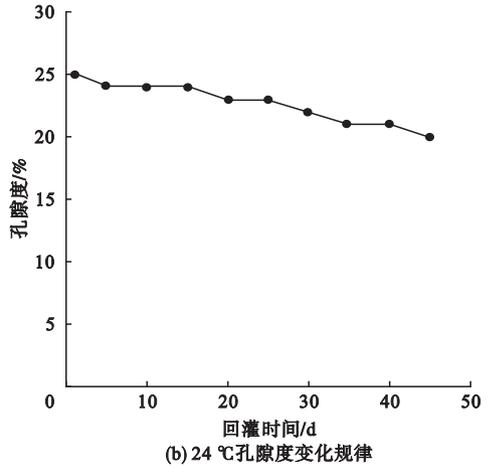
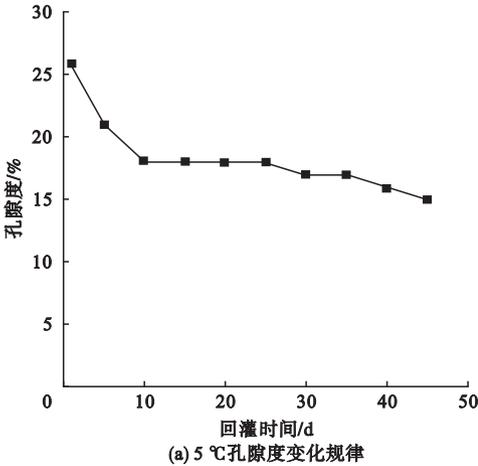


图7 冬夏季回灌过程孔隙度变化规律

Fig. 7 Change laws of porosity in winter and summer recharge process

3 结论

(1)在高铁高锰地区,回灌水温越低,发生堵塞的时间越早,越不利于回灌的进行。因此,夏季回灌堵塞程度较冬季回灌发生堵塞程度小,发生时间较晚。应与流体的黏度以及饱和溶解氧的浓度随温度的升高而减小的变化规律有关。

(2)在回灌过程中,当回灌水全部排出与进水时,大量氧气随水进入渗流砂柱内,因含砂层对铁离子的吸附作用,在进水处铁离子与大量氧气充分接触,使堵塞提前发生。而后溶解氧含量随着渗流途径的迁移而减小,远离进水处堵塞发生缓慢。因此,在回灌过程中,应尽量采用封闭式装置减少溶解氧的进入,避免氧气的过多参与。

(3) Fe^{2+} 在自然条件下易被氧化,化学反应生成沉淀可能在几分钟之内就开始,而锰难以在自然条件下氧化,因此,在高铁高锰地区中,锰基本不参与水源热泵的化学堵塞, Fe^{2+} 为化学堵塞的主要因素。

参考文献

- [1] SINGH J B, GUSTAV F J, HUNT A W. Representative operating problems of commercial ground-source and groundwater-source heat pumps [J]. ASHRAE transactions, 2000, 107 (2): 561 - 568.
- [2] TUFENKJI N. Modeling microbial transport in porous media: traditional approaches and recent developments [J]. Advances in water resources, 2007 (30): 1455 - 1469.
- [3] 杜新强, 冶雪艳, 路莹, 等. 地下水人工回灌堵塞问题研究进展 [J]. 地球科学进展, 2009, 24 (8): 973 - 979.
(DU Xinqiang, YE Xueyan, LU Ying, et al. Research progress in clogging of groundwater recharge by artificial recharge [J]. Advances in earth science, 2009, 24 (8): 973 - 979.)
- [4] 潘俊, 姜明岑, 冯许阳. 地下水中铁锰离子对地下水地源热泵回灌影响的试验研究 [J]. 暖通空调, 2014 (8): 80 - 84.
(PAN Jun, JIANG Mingcen, FENG Xuyang. Experimental study on the influence of iron and manganese ions in underground water on recharging of ground source heat pump system [J]. HV & AC, 2014 (8): 80 - 84.)
- [5] VIGNESWARAN S, RONILLO B S. A detailed investigation of physical and biological

- clogging during artificial recharge[J]. *Water, air and soil pollution*, 1987, 35: 119 - 140.
- [6] 贾国东, 钟佐燊. 铁的环境地球化学综述[J]. *环境科学进展*, 1999, 7(5): 74 - 84.
(JIA Guodong, ZHONG Zuoshen. Review of environmental geochemistry of iron [J]. *Advances in environmental science*, 1999, 7(5): 74 - 84.)
- [7] PAVELIC P, VANDERZALM J, DILLON P, et al. Assessment of the potential for well clogging associated with salt water interception and deep injection at chowila, SA[R]. Final report to department of water, Land; Biodiversity and Conservation, 2007.
- [8] 李璐, 卢文喜, 杜新强. 人工回灌过程中含水层堵塞试验研究[J]. *人民黄河*, 2010, 32(6): 77 - 78.
(LI Lu, LU Wenxi, DU Xinqiang. Experimental study on clogging of aquifer during artificial recharge[J]. *Yellow river*, 2010, 32(6): 77 - 78.)
- [9] 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 - 98.
(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 - 98.)
- [10] 康然然. 沈阳城区水源热泵回灌堵塞机理及防治研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
(KANG Ranran. Study on clogging mechanism and prevention of water source heat pump recirculation in Shenyang city [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.)
- [11] 杨维, 张戈, 张平. 水文学与水文地质学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
(YANG Wei, ZHANG Ge, ZHANG Ping. *Hydrology and hydrogeologic terminology* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010.)
- [12] 仵彦卿. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
(WU Yanqing. *Migration kinetics of porous media pollutants* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2007.)
- [13] 刘鹤年. 流体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
(LIU Henian. *Fluid mechanics* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2004.)
- [14] 何俊仕, 杨菲. 沈阳城区地下水地源热泵运行状况调查及分析[J]. *暖通空调*, 2008, 38(11): 41 - 44.
(HE Junshi, YANG Fei. Investigation and analysis on groundwater source heat pump operation in Shenyang urban area [J]. *HV&AC*, 2008, 38(11): 41 - 44.)
- [15] GANDY C J, SMITH J W N, JARVIS A P. Attenuation of mining-derived pollutants in the hyporheic zone; a review[J]. *Science of the total environment*, 2007, 373(2/3): 435 - 446.
- [16] 黄修东, 束龙仓, 刘佩贵, 等. 注水井回灌过程中堵塞问题的试验研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(4): 430 - 434.
(HUANG Xiudong, SU Longcang, LIU Peigui, et al. Experimental study on clogging of recharge well [J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2009, 40(4): 430 - 434.)
- [17] SUGIO T, TAHA T M, KANAO T, et al. Increase in Fe^{2+} -producing activity during growth of acidithiobacillus ferrooxidans ATCC23270 on sulfur[J]. *Bioscience, biotechnology and biochemistry*, 2007, 71(11): 2663 - 2669.
- [18] PAVELIC P, DILLON P J, BARRY K E, et al. Hydraulic evaluation of aquifer storage and recovery (ASR) with urban storm-water in a brackish limestone aquifer [J]. *Hydrogeology journal*, 2006, 14(8): 1544 - 1555.
- [19] MEDIHALA P G, LAWRENCE J R, SWERHONE G D W, et al. Effect of pumping on the spatio-temporal distribution of microbial communities in a water well field [J]. *Water research*, 2012(46): 1286 - 1300.
- [20] MEDIHALA P G, LAWRENCE J R, SWERHONE G D W, et al. Spatial variation in microbial community structure, richness, and diversity in an alluvial aquifer [J]. *Can. J. microbiol.*, 2012(58): 1135 - 1151.