

含水层参数对同井回灌地下水源热泵的影响

倪 龙, 马最良

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 模拟分析了含水层厚度、渗透系数比和不同含水层对同井回灌地下水源热泵地下水渗流和换热的影响. 对于合理的水井设计, 含水层厚度增大可以减小抽水、回灌压力, 显著地提高抽水平均温度. 抽、回水口的平均降深与渗透系数比的对数基本成线性关系. 从热贯通的角度来说, 渗透系数比是同井回灌地下水源热泵系统工程成败的关键. 过小的渗透系数比显著加快系统的热贯通. 渗透系数大小是抽水 and 回灌难易程度的决定因素. 对于渗透性能不好的含水层, 更应该关注抽水和回灌不能对含水层渗透系数产生影响.

关键词: 含水层; 同井回灌; 地下水源热泵; 渗透系数

中图分类号: TK529

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2006)02-0229-06

Effect of Aquifer Parameters on Groundwater Heat Pump with Pumping and Recharging in the Same Well

NI Long, MA Zui-liang

(School of Municipal and Environment Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Effect of aquifer thickness, ratio of permeability coefficient and different aquifers on groundwater seepage and heat transfer caused by groundwater heat pump with pumping and recharging in the same well (GWHPRSW) is analyzed through numerical simulation. For a rationally designed well, the increase of aquifer thickness can reduce the pressure of pumping and injection, and remarkably enhance the temperature of pumping. The value of mean pumping and recharging drawdown is linear to the logarithm of permeability coefficient ratio (horizontal/vertical). In respect of thermal transfixion, the permeability coefficient ratio determines the success or failure of GWHPRSW. The heat transfixion will be increased remarkably if the permeability coefficient ratio is too small. The permeability coefficient is the key factor to pumping and injection. With poor permeability, it should be paid more attention that pumping and injection should have no effect on the permeability coefficient.

Keywords: aquifer; pumping and recharging in the same well; groundwater heat pump; permeability coefficient

近年来,国内学者们提出了一种具有自主知识产权的新型地下水源热泵,该热泵生产井与回灌井集成在同一口井中.相对于传统的异井回灌地下水源热泵,该热泵被称为同井回灌地下水源热泵.该技术自2001年在北京某工程投入运行以来,其推广与应用速度很快,到2003年底已完成160多个项目,总建筑面积超过200万米²[1].图1为该新型地下水源热泵的示意图.如图1所示,取热井内含有一套管,从换热器来的

水进入套管外管,通过回水并网回灌到含水层中,与含水层换热;同时,含水层中的地下水经过抽水井网由潜水泵加压后由套管内管进入换热器.抽水井网与回灌井网之间有一隔断,避免回水直接进入抽水部分,产生较大的热贯通.在同一取热井中,同时进行抽水和回灌,因此上述技术亦称单井抽灌技术.同井回灌地下水源热泵抽水和回灌在含水层同一径向位置不同深度处同时发生,节省了场地,其初投资仅为传统地热系统的

收稿日期:2004-10-15; 修回日期:2005-05-10.

作者简介:倪 龙(1979—),男,博士研究生, nilonggn@hit.edu.cn.

$1/3 \sim 1/4$ ^[2],但也使其比异井回灌地下水热泵更易发生热贯通.笔者分析了含水层厚度、渗透系数比和不同含水层对同井回灌地下水热泵抽水、回灌和出水温度等的影响.

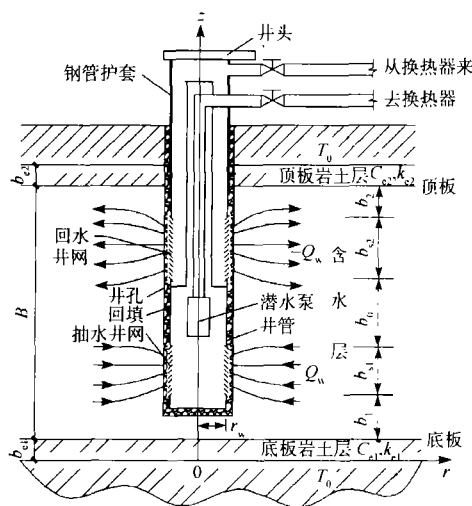


图 1 同井回灌示意

Fig.1 Sketch of pumping and recharging in the same well

1 含水层参数模型及典型值

与同井回灌地下水热泵运行引起地下水渗流和换热有关的含水层和弱透水层参数包括:含水层厚度 B ,水平渗透系数 K_r ,渗透系数比(水平/竖直) $r_k = K_r/K_z$,单位储水系数 S_0 ,含水层容积比热容 C_a ,含水层有效导热系数 k_A ,含水层滞止导热系数 k_a ,顶、底板岩土

层容积比热容 C_e ,顶、底板岩土层导热系数 k_e ,地下水容积比热容 C_w ,地下水导热系数 k_w 等.不同介质含水层的参数值各不一样;同一介质含水层不同地方的参数值也有很大差别;还有些参数与热泵运行工况有关.因此,为分析简便,需要给出这些参数的合理数学模型或典型值.

1.1 含水层参数模型

含水层容积比热容的计算式^[3]为

$$C_a = nC_w + (1 - n)C_s \quad (1)$$

式中: C_s 为固体骨架的容积比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; n 为含水层的孔隙率, %.

含水层有效导热系数由两部分组成^[4-6],即

$$k_A = k_a + \alpha C_w |q| \quad (2)$$

式中: k_a 为含水层的滞止导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; α 为热弥散长度, m ; q 为地下水 Darcy 速度矢量, m/s .

含水层的滞止导热系数是指地下水不流动时的含水层导热系数,其计算式^[7]为

$$k_a = C_a [nk_w/C_w + (1 - n)k_s/C_s] \quad (3)$$

式中: k_w 为水的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; k_s 为固体骨架的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$.

1.2 含水层参数典型值

为了说明问题,仅取几种典型的含水层和弱透水层作为算例.文献[3,8]中给出的多为参数的范围,在使用时取它们的平均值作为典型值.由于同一类含水层的参数变化范围很大,平均值计算的算例并不能代表该含水层,而只能代表该组合参数,但为了叙述方便,仍用含水层的类型代替该组合参数.含水层参数的典型值见表 1^[3,8].

表 1 含水层参数典型值

Tab.1 Typical values of hydraulic and thermal properties of aquifers and aquitards

类别	孔隙率/%	水平渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	固体骨架容积比热容/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	含水层容积比热容/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	固体骨架导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	含水层导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
细沙	40	7.3×10^{-4}	1 400	2 510	1.88	2.025
粗沙	38	1.9×10^{-3}	1 400	2 441	1.88	2.051
细砾石	33	7.3×10^{-3}	1 560	2 410	1.82	1.898
粗砾石	30	2.6×10^{-3}	1 560	2 345	1.82	1.915
沙砾	28	1.2×10^{-3}	1 588	2 300	1.85	1.945
沙丘沙	40	9.4×10^{-5}	1 400	2 510	1.88	2.025
沙岩	38	1.2×10^{-5}	2 057	2 852	1.05	0.907
石灰岩	30	4.7×10^{-3}	2 083	2 711	2.72	2.476
黄土	48	-	1 187	2 607	1.00	1.155
黏土	45	-	1 563	2 739	1.05	1.010

各向异性含水层的渗透系数比 r_K 的范围通常为 $2 \sim 100$ ^[3];承压含水层储水系数 $S = S_0 B$ 的常见值为 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 数量级^[9],文献[3]指出 $S = 10^{-6} \times B$,因此,取含水层单位储水系数 $S_0 = 10^{-6} \text{ m}^{-1}$;热弥散长度 $\alpha = 1 \text{ m}^{[10]}$;含水层顶、底板岩土层分别为黄土、黏土,等温层距底、顶板的距离 $b_{e1} = b_{e2} = 15 \text{ m}$;地下水的热物性参数采用纯水热物性参数,地下水的导热系数 $k_w = 0.60 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;容积比热容 $C_w = 4176 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ^[3].

在以下讨论中除特殊说明外,计算参数为:细沙含水层,含水层厚度 $B = 30 \text{ m}$,渗透系数比 $r_K = 10$,无越流;抽水滤网距含水层底板的距离 $b_1 = 1.5 \text{ m}$,抽水滤网长度 $b_{s1} = 9.0 \text{ m}$;抽回水滤网间隔 $b_0 = 7.5 \text{ m}$,回水

滤网长度 $b_{s2} = 10.5 \text{ m}$;井半径 $r_w = 0.1 \text{ m}$,抽水流量 $Q_w = 50 \text{ m}^3/\text{h}$;制热工况,抽回水温差 $\Delta t_h = 5 ^\circ\text{C}$,热泵连续运行 120 d.

2 含水层厚度的影响

当含水层厚度发生变化时,井结构参数的变化分两种情况:井的相对参数 θ_i ($\theta_1 = b_1/B, \theta_{s1} = b_{s1}/B, \theta_0 = b_0/B, \theta_{s2} = b_{s2}/B, \theta_2 = b_2/B$) 保持不变; b_{s1}, b_0, b_{s2} 和 b_2 保持不变. 表 2 给出了 3 个模拟井的计算条件. 模拟井 2 与模拟井 1 具有相同的 θ_i ;模拟井 3 与模拟井 1 具有相同的 b_{s1}, b_0, b_{s2} 和 b_2 ,这样能减少钻井成本.

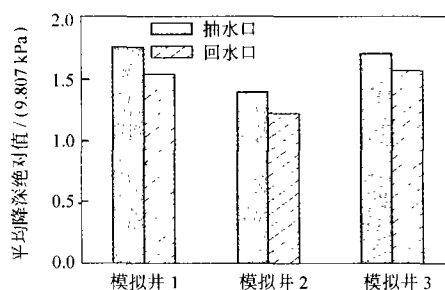
表 2 3 个模拟井的计算条件

Tab. 2 Calculation conditions of three simulation wells

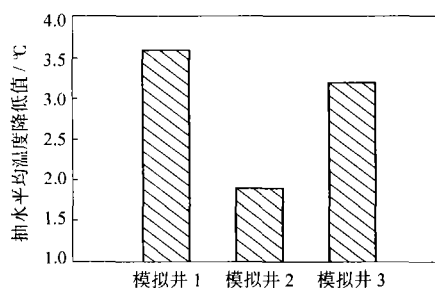
模拟井	B/m	b_1/m	θ_1	b_{s1}/m	θ_{s1}	b_0/m	θ_0	b_{s2}/m	θ_{s2}	b_2/m	θ_2
1	30	1.5	0.05	9.0	0.30	7.5	0.25	10.5	0.35	1.5	0.05
2	40	2.0	0.05	12.0	0.30	10.0	0.25	14.0	0.35	2.0	0.05
3	40	11.5	—	9.0	—	7.5	—	10.5	—	1.5	—

图 2(a) 为模拟井 1~3 抽、回水口平均降深(相对于含水层初始水位的水位降低值,降低为正,升高为负)绝对值的大小关系. 由图 2(a) 可以看出,模拟井 2 抽、回水口平均降深绝对值均较模拟井 1 小,而且减小的百分比均为 21%,这说明在相同的管路阻力和井损条件下,模拟井 2 井水循环泵用于抽水和回灌的扬程会较模拟井 1 低 1/5 左右. 模拟井 3 抽、回水口平均降深与模拟井 1 相差不多,模拟井 3 抽水口平均降深较模拟井 1 小 3%,而回水口平均降深绝对值较模拟井 1 大 2%. 因此,对于不同的含水层厚度,合理的设计水井参数,可以明显地改善抽水和回灌的压力. 不同的水井设计,改善的效果不同,甚至会出现相反的结果.

图 2(b) 给出了模拟井 1~3 热泵运行 120 d 后抽水平均温度降低值. 由图 2(b) 可以看出,在相同取热量条件下,含水层越厚,抽水平均温度的降低值越小. 热泵运行 120 d 时,模拟井 2 的抽水平均温度变化较模拟井 1 的抽水平均温度变化小 47%,模拟井 3 的抽水平均温度变化较模拟井 1 的抽水平均温度变化小 11%. 模拟井 3 热泵运行 120 d 时抽水平均温度较模拟井 2 低 1.3 $^\circ\text{C}$,即抽水平均温度降增大 68%. 因此,井结构参数会对抽水平均温度产生较大影响.



(a) 抽、回水口平均降深绝对值



(b) 抽水平均温度降低值

图 2 含水层厚度对抽、回水降深和抽水温度降的影响
Fig. 2 Effect of aquifer thickness on the pumping and recharging drawdown and the decrease of pumping temperature

含水层厚度的增大可能减小抽水、回灌压力,提高抽水平均温度.但必须合理地设计水井结构参数,才能把这种改善效果发挥出来,否则会适得其反.

3 含水层渗透系数比的影响

含水层渗透系数是一个极其重要的水文地质参数,它表征岩层的透水性能,又称水力传导系数.含水层渗透系数呈现各向异性是较常见的.含水层渗透系数比为含水层水平渗透系数与含水层竖直渗透系数之比,反映了含水层渗透系数各向异性的程度.图 3 为抽、回水口平均降深随渗透系数比的变化曲线.由图 3 可以看出:抽、回水口平均降深与渗透系数比的对数基本成线性关系;随着渗透系数比的增加,抽、回水口平均降深的绝对值均增加,但增加缓慢,渗透系数比从 10 增加到 50,抽、回水口平均降深绝对值仅增加了 15%.

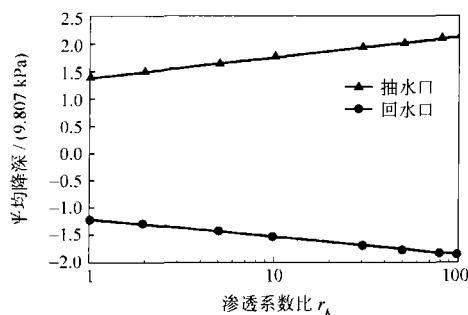


图 3 抽、回水口平均降深随渗透系数比的变化

Fig. 3 Mean drawdown of pumping and recharging vs ratio of permeability coefficient

图 4 为同井回灌地下水源热泵抽水平均温度变化(相对于含水层初始温度,降低为负值)与渗透系数比的关系曲线.由图 4 可知,取热量相同时,随着渗透系数比的减小,井的抽水平均温度降低值加大,而且随着渗透系数比的减小,其温度降低速率加快.如渗透系数比为 1 时,热泵运行 120 d 抽水平均温度下降了 14.6 °C;在渗透系数比为 2 时,热泵运行 120 d 抽水平均温度下降了 9.6 °C,对于一般的含水层来说,这是不允许的,很容易出现热贯通,甚至会导致地下水的冻结,而使工程失败.例如,地下水初始温度在 15 °C 左右的地区,当 $r_k = 1$,热泵运行 30 d 左右时,抽水平均温度降低 6 °C,如果仍保持 5 °C 的换热温差,回水温度就只有 4 °C,这样地下水就有被冻结的危险;此外,抽水温度降低过大还会对热泵的效率产生很大影响.而当渗透系数比较大时,经过一个采暖季的运行,抽水平均温度降低很小,如 $r_k = 30$,热泵运行 120 d 抽水温度降低了

1.8 °C,而 $r_k = 50$ 时,抽水温度仅降低了 1.3 °C,这对地下水源热泵效率的影响不大.从换热的角度来看,这样的含水层很适合同井回灌地下水源热泵.从模拟结果看, $r_k = 5$ 时,热泵运行 120 d 后抽水平均温度下降了 5.5 °C,对于地下水温度较高的地区,这样的热贯通程度是允许的; $r_k = 10$ 时,热泵运行 120 d 后抽水平均温度下降了 3.6 °C,这说明含水层初始温度在 12 °C 以上的地区,均可采用同井回灌热泵技术.

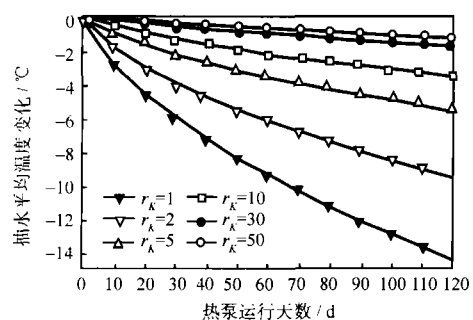


图 4 抽水平均温度变化与渗透系数比的关系

Fig. 4 Mean pumping temperature change vs ratio of permeability coefficient

图 5 为不同渗透系数比时热泵运行 120 d 的热影响范围(定义为含水层和其顶、底板温度变化为 -0.001 °C 的最远径向距离).由图 5 可知,随着渗透系数比的增加,含水层中热影响范围和受到影响的含水层土壤体积均加大, $r_k = 50$ 时,热影响范围为 90 m,而 $r_k = 1$ 时,热影响范围仅为 47 m.正是由于含水层中热影响范围的加大,使得在相同的取热量情况下,靠近井轴处的含水层温度不致降得过低.含水层顶板岩土轴向方向热影响范围差不多,而含水层底板岩土层由于渗透系数小时抽水平均温度较低,换热温差相应增大,使底板岩土层的轴向热影响范围加大.这使得在不同渗透系数比时热影响范围曲线在含水层底板岩土层处互相交叉,由图 5 可知,这些交点很接近,坐标基本集中在 24 ~ 28 m 和 9 ~ 10 m 范围内.

从热贯通的角度来说,渗透系数比是决定同井回灌地下水源热泵系统工程成败的关键.渗透系数比过小会显著加快系统的热贯通,大渗透系数比的含水层对同井回灌地下水源热泵的换热是合适的.从初步模拟的结果看,渗透系数比小于 2 时,一般不可采用同井回灌地下水源热泵;渗透系数比大于 30 时,我国任何地区均可采用同井回灌地下水源热泵;渗透系数比在 5 和 10 之间时,在地下水温度较高的地区可采用同井回灌地下水源热泵.

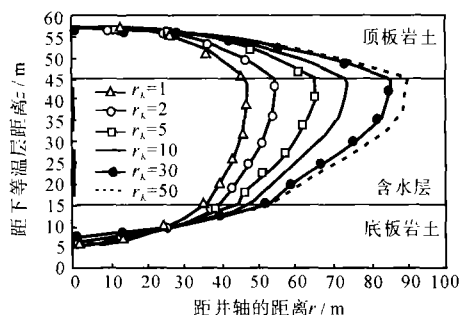


图 5 不同渗透系数比热泵运行 120 d 的热影响范围

Fig. 5 Thermal effective radius of 120 days' operation vs ratio of permeability coefficient

4 不同含水层的影响

不同含水层的渗透系数、滞止导热系数和容积比热容不同,在一定程度上影响抽水、回灌的压力和井的出水温度. 在这里认为含水层渗透系数比相同,而水平、竖直渗透系数不同.

图 6 为几种含水层中同井回灌地下水源热泵抽、回水口平均降深随水平渗透系数的变化曲线. 由图 6 可看出:降深绝对值随着水平渗透系数的增加而减小,且变化剧烈;抽、回水口平均降深绝对值基本与水平渗透系数成双对数线性分布,即 $s \propto (1/K_r)^a$; 水平渗透系数较小时,降深对水平渗透系数的变化更为敏感. 对沙岩含水层,抽、回水口平均降深的绝对值分别为 1 068.96 kPa 和 931.67 kPa,对抽水和回灌很困难. 渗透系数大小是抽水和回灌难易程度的决定因素. 对渗透性能不好的含水层中的回水井,更应注意回水对含水层渗透性能的削弱,避免井的堵塞. 堵塞将显著增加系统的抽水、回灌难度,加大井水循环泵的功耗,甚至使水井失效.

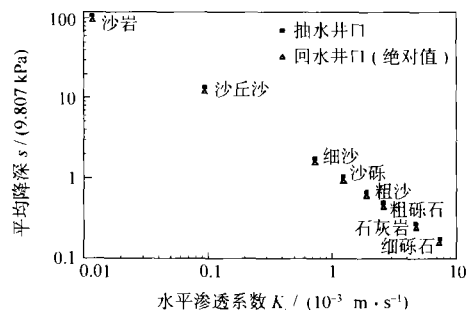


图 6 抽、回水口平均降深随水平渗透系数的变化曲线

Fig. 6 Mean drawdown of pumping and recharging vs radial coefficient of permeability

图 7 为不同含水层中同井回灌地下水源热泵运行

120 d 时井的平均出水温度变化. 由图可知,不同含水层中的同井回灌地下水源热泵运行 120 d 时井的出水温度变化不大,出水温度降集中在 3.2 ~ 3.8 °C 范围内;且同井回灌地下水源热泵在细沙和沙丘沙含水层中运行时井的出水温度相同. 这是因为,虽然细沙和沙丘沙含水层的渗透系数不同,但含水层容积比热容和滞止导热系数相同;对于无越流的含水层,抽灌同井运行引起的地下水速度场与渗透系数比有关,与渗透系数的绝对大小无关,因此,无越流时相同厚度的含水层只要渗透系数比相同,则地下水渗流场相同,如果含水层容积比热容和滞止导热系数相同,则含水层温度场相同,抽水平均温度相同. 水平渗透系数的大小只影响抽水和回灌的难易,对井的出水温度影响较小. 由图 7 还可看出,抽水平均温度降随滞止导热系数变化的规律性不强,而随着含水层的容积比热容增加,出水温度降减小(图中含水层即按含水层容积比热容由小到大的顺序排列).

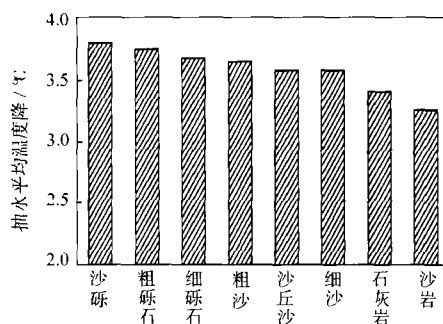


图 7 不同含水层热泵运行 120 d 时井的出水温度降

Fig. 7 Well pumping temperature decrease within 120 days' operation in different aquifers

5 结 论

(1) 对于合理的水井设计,含水层厚度的增大可以减小抽水、回灌压力,显著提高抽水平均温度. 但水井设计不同,改善的效果也不同,甚至会出现相反的结果. 因此,从某种意义上讲,水井的设计比含水层的厚度变化更重要.

(2) 抽、回水口的平均降深与渗透系数比的对数基本成线性关系;随着渗透系数比的增加,抽、回水口平均降深的绝对值亦增加,但增加缓慢. 从热贯通的角度讲,渗透系数比是决定同井回灌地下水源热泵系统工程成败的关键,过小的渗透系数比会显著加快系统的热贯通,从而使系统失效,因此,渗透系数比较小的含水层应避免单口水井承担过大的负荷.

(3) 渗透系数的大小决定抽水和回灌的难易程

度,因此,对于渗透性能不好的含水层中的抽、回水井,更应注意回水对含水层渗透性能的削弱,避免井的堵塞。但渗透系数的绝对值大小对于地下水换热影响较小。

(4)抽水平均温度降随着含水层的容积比热容增加而有所减小,而随含水层滞止导热系数变化的规律性不强。

参考文献:

- [1] 李志浩. 全国暖通空调制冷 2004 年学术年会综述[J]. 暖通空调, 2004, 34(10): 5—12.
Li Zhihao. Review of the biennial meeting of China's HVAC and R 2004 [J]. *Heating Ventilating and Air Conditioning*, 2004, 34(10): 5—12 (in Chinese).
- [2] Xu Shengheng, Ladislaus Rybach. Utilization of shallow resources performance of direct use system in Beijing [J]. *Geothermal Resource Council Transactions*, 2003, 27: 115—118.
- [3] Walton W C. *Practical Aspects of Groundwater Modeling—Flow, Mass and Heat Transport and Subsidence and Computer Models* [M]. 2nd ed. New Jersey, USA: McGraw-Hill Book Company, 1985.
- [4] Xue Yuqun, Xie Chunhong, Li Qingfen. Aquifer thermal energy storage: A numerical simulation of field experiments in China [J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(10): 2365—2375.
- [5] Sauty J P, Gringarten A C, Menjoz A, et al. Sensible energy storage in aquifers (1): Theoretical study [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(2): 245—252.
- [6] Chevalier S, Banton O. Modeling of heat transfer with the random walk method (Part 1): Application to thermal energy storage in porous aquifers [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 222: 129—139.
- [7] Chevalier S, Banton O. Modeling of heat transfer with the random walk method (Part 2): Application to thermal energy storage in fractured aquifers [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 222: 140—151.
- [8] Chiasson A D, Rees S J, Spiter J D. A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground-source heat pump systems [J]. *ASHRAE Transactions*, 2000, 106(1): 380—393.
- [9] 雅·贝尔. 地下水水力学[M]. 许涓铭, 车用太, 李俊亭, 等译. 北京: 地质出版社, 1985.
Bear J. *The Hydraulics of Groundwater* [M]. Xu Juanming, Che Yongtai, Li Junting, et al Trans. Beijing: Geological Publishing House, 1985 (in Chinese).
- [10] Sauty J P, Gringarten A C, Fabri H, et al. Sensible energy storage in aquifers (2): Field experiments and comparison with theoretical results [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(2): 253—265.