

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-662-05

# 含水层厚度对 地下水源热泵抽灌井设计间距的影响

杨伟涛

(筑博设计股份有限公司 深圳 518042)

**【摘要】** 通过建立地下含水层水-热耦合数学模型,模拟分析不同含水层厚度下抽水井的温度变化,结合温度变化曲线,讨论了地下水源热泵抽灌井设计间距问题。结果表明,保持抽灌井间距不变,含水层厚度的增加可以减弱热贯通的影响;同一含水层厚度,可能在某一范围内改变抽灌井间距,热贯通程度变化不大;随着含水层厚度的增加,抽灌井设计间距总体呈现递减的趋势。

**【关键词】** 地下水源热泵; 含水层; 井间距; 热贯通

中图分类号 TU831.3 文献标志码 A

## The Effect of Aquifer Thickness on the Design Spacing of Groundwater Heat Pump Pumping-injection Wells

Yang Weitao

(Zhubo Design Co., Ltd, Shenzhen, 518042)

**【Abstract】** Through the establishment of a mathematical model of underground aquifer which couples water flow with heat transfer, the temperature of pumping well was simulated and analyzed with different aquifer thickness, with temperature variation curve, the design spacing of groundwater heat pump pumping-injection wells was discussed. The simulation results show that, the effect of heat transfixion can be weakened with the increase of aquifer thickness by keeping the spacing of pumping-injection wells; With the same aquifer thickness, the spacing of pumping-injection wells may change within a certain range, but the heat transfixion degree does not change much. With the increase of aquifer thickness, the design spacing of pumping wells decreases.

**【Keywords】** Groundwater source heat pump; Aquifer; Well spacing; Heat transfixion

## 0 引言

地下水源热泵 (Groundwater Source Heat Pump) 技术作为一种地热能可持续开发利用方式,因其多方面的优势,得到了广泛的推广应用<sup>[1]</sup>。抽水井水温的恒定是保证其稳定运行的关键因素。但是,回灌行为不可避免地会抬高或降低回灌井周围的地下水温度,这种温度的变化将随着时间的推移扩展到抽水井周围,可能在热泵运行期间导致热短路<sup>[2-3]</sup>,即热贯通。合适的抽灌井间距对减弱或避免热贯通的影响至关重要,寻求合适的井间距需要

考虑多方面的因素,如含水层参数、地质条件、抽灌量等。本文主要针对一抽两灌模式,利用 FlowHeat 软件,通过控制容积的能量平衡运用离散的方法进行数值模拟,分析不同含水层厚度下的抽灌井间距问题,进而为实际工程提供参考。

## 1 模拟概况

研究区域内为一抽两灌布井模式,且抽水井距两口回灌井的距离相等。模拟期包括四个阶段,依次为供暖期 (150d)、停运期 (60d)、制冷期 (90d)

和停运期（60d）。供暖期间取水量为1900m<sup>3</sup>/d，回灌水温7℃；制冷期间取水量为1400m<sup>3</sup>/d，回灌水温25℃。为简化问题，假设区域内含水层厚度一致，系统运行期间均为24小时全天运行。

## 2 研究区域及概念模型

### 2.1 研究区域的确定

估算出地下水抽灌引起的水动力场影响范围，即可判断分析地下温度场的影响范围<sup>[4]</sup>。假定布井区域内抽水井个数为 $n$ ，回灌井数为 $m$ ，则根据泰斯公式和叠加原理，抽灌场地任一点的稳定水位降深：

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\sqrt[n]{R_1 R_2 \cdots R_m}}{\sqrt[m]{r_1 r_2 \cdots r_n}} \quad (1)$$

式中： $s$ 为水位降深，m； $Q$ 为抽灌水量，m<sup>3</sup>/d； $T$ 为含水层导水系数，m<sup>2</sup>/d； $R_i$ 为场地内某点与第 $i$ 口回灌井之间的距离，m； $r_i$ 为场地内某点与第 $i$ 口取水井之间的距离，m。

根据公式（1），以抽灌井间距140m，回灌井间距60m为例，经计算其水位降深等值线如图1所示，图示中下部区域为取水区域，上部区域为回灌区域。

图1显示，抽灌区域上部边界水位约被抬高0.03m，下部边界水位降深约0.03m，两侧边界水位

变化更小。一般认为抽灌场地的地下水动力场影响范围以±5cm为界线较为适宜<sup>[5,6]</sup>，因此该区域边界上的水位变化可忽略不计。从而可确定研究的平面区域：X、Y方向均为-800~800m。经验证，对于本文涉及的其他布井间距，所选区域均符合要求。

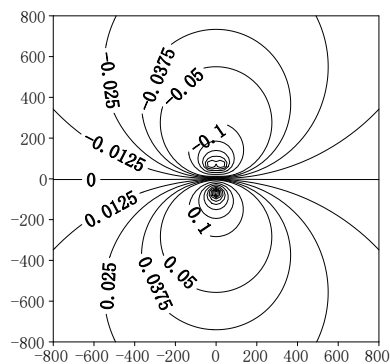


图1 地下水水位降深等值线图（m）

Fig.1 Contour map of groundwater level drawdown (m)

### 2.2 定解条件和含水层参数

地下含水层初始水温为13℃，研究区域垂向上划分为四个节点层，承压含水层上表面初始压力标定为0，含水层底部初始压力根据含水层厚度而定，如含水层厚30m时，底部初始压力标定为30。四个侧面概化为定水头边界，顶面和底面视为隔水隔热边界。

根据研究区域内水文地质条件及相关文献<sup>[7,8]</sup>，含水层参数如表1所示。

表1 水文地质及热力参数

Table 1 Hydrogeological and thermal parameters

类别	渗透率 1e <sup>-10</sup> m <sup>2</sup>	孔隙度	纵向弥散度 m	横向弥散度 m	比热容 MJ/m <sup>3</sup>	导热系数 w/(m·℃)
参数值	0.719	0.38	2.4	0.6	2.2	2.0

## 3 地下水数学模型

### 3.1 地下水水流数学模型<sup>[9-11]</sup>

根据上述水文地质条件，研究区域地下水水流数学模型可由式（2）描述：

$$\begin{cases} n\rho_0\beta_p \frac{\partial P}{\partial \tau} + n\rho_0\beta_T \frac{\partial t}{\partial \tau} + \rho\alpha_b \frac{\partial P}{\partial \tau} = \nabla \cdot \rho \frac{K_p}{\mu} (\nabla P + \rho g) \\ P(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = P_0(x, y, z), (x, y, z) \in D \\ P(x, y, z, \tau)|_{\Gamma_1} = P(x, y, z), (x, y, z) \in \Gamma_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $n$ 为孔隙度； $\rho_0$ 为液体的参考密度，kg/m<sup>3</sup>； $\beta_p$ 为水的压缩系，Pa<sup>-1</sup>； $P$ 为地下水压力，Pa； $\tau$ 为时间，s； $\beta_T$ 为水的热力膨胀系数，℃<sup>-1</sup>； $t$ 为水和孔隙介质的温度，K； $\rho$ 为地下水密度，kg/m<sup>3</sup>； $\alpha_b$ 为孔隙介质的压缩系数，Pa<sup>-1</sup>； $\nabla$ 为梯度算子； $K_p$ 为渗透能力张量，m<sup>2</sup>； $\mu$ 为水的黏度系数，Pa·s； $D$ 为研究区域； $\Gamma_1$ 为第一类边界条件。

### 3.2 地下水热量运移模型<sup>[9-11]</sup>

依据水文地质和热力条件，建立地下水水流和热传递耦合的数学模型，其方程式如下：

$$\begin{cases} n\rho_0\beta_p c_f \frac{\partial P}{\partial \tau} + n\rho_0\beta_r c_f t \frac{\partial t}{\partial \tau} + \beta\alpha_b c_f t \frac{\partial P}{\partial \tau} + n\rho c_f t \frac{\partial t}{\partial \tau} - \rho_s c_s t \alpha_b \frac{\partial P}{\partial \tau} + (1-n)\rho_s c_s \frac{\partial t}{\partial \tau} \\ = \nabla \cdot [nK_f + (1-n)K_s] I \nabla t + \nabla \cdot nD \nabla t - \nabla \cdot n\rho c_s v t \\ t(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x, y, z), (x, y, z) \in D \\ t(x, y, z, \tau)|_{\Gamma_1} = t(x, y, z), (x, y, z) \in \Gamma_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $c_f$ 为水的比热容， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ； $\rho_s$ 为孔隙介质密度， $kg/m^3$ ； $c_s$ 为孔隙介质比热容， $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$ ； $K_f$ 为水的导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； $K_s$ 为孔隙介质的导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； $I$ 为单位矩阵； $D$ 为热机械弥散张量， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； $v$ 为地下水的流速， $m/s$ 。其余符号意义与式(2)相同。

### 4 模拟结果与分析

为了研究问题的方便，作以下设定：各水井结构相同；回灌井之间的距离60m；过滤管长20m，且过滤管设在含水层顶部。根据以上假定条件，分别设含水层厚度为30m、40m、50m、60m、80m及100m六种工况进行模拟分析。

#### 4.1 温度分析

假设把抽水平均温度降低 $0.5^\circ C$ 看作发生热贯通的临界状态；抽水平均温度降低 $0.5^\circ C$ ，则认为抽灌系统已经发生轻度热贯通；抽水平均温度降低 $1^\circ C$ ，则认为抽灌系统已经发生中度热贯通；抽水平均温度降低超过 $2^\circ C$ ，则认为抽灌系统已经发生重度热贯通<sup>[12,13]</sup>。本文根据以上设定，将抽水井水温变化 $0.5^\circ C$ 定为轻度热贯通，变化 $1^\circ C$ 为中度热贯通，变化超过 $2^\circ C$ 为重度热贯通。图2给出了抽灌井间距50m时，不同含水层厚度的温度模拟结果，图3~4为六种含水层厚度下不同抽灌井距温度模拟结果。

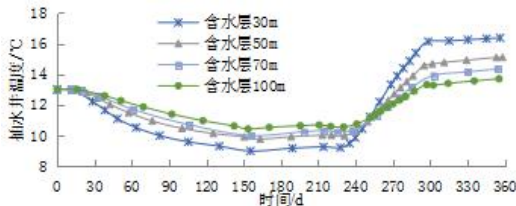
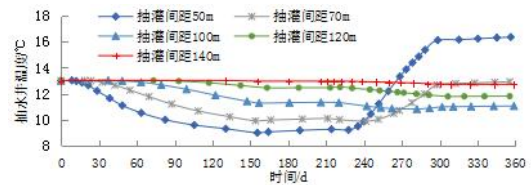


图2 抽灌井间距50m不同含水层厚度的温度模拟结果

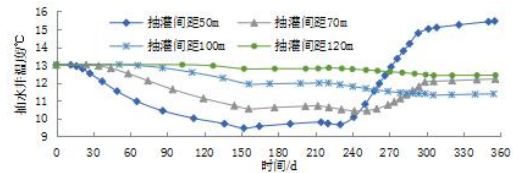
Fig.2 Temperature simulation results of different aquifer thickness with 50m interval between pumping-irrigation wells

从图2看出，50m的抽灌井间距普遍较小。以含水层厚30m为例，供暖期末抽水井温度已降为

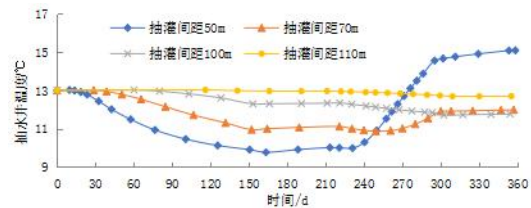
$9^\circ C$ ，比含水层初始温度低 $4^\circ C$ ，制冷期末，抽水井水温约为 $16.1^\circ C$ ，高出初始温度 $3.1^\circ C$ ，均发生了重度热贯通。含水层厚100m时，热贯通程度相对较弱，供暖末期和制冷末期，温度分别约为 $10.5^\circ C$ 、 $13.3^\circ C$ ，分别比初始温度高 $2.5^\circ C$ 和 $0.3^\circ C$ ，尽管制冷末期发生了轻度热贯通，但是供暖末期的热贯通却不可忽略。另外，图2表明，抽灌井间距一定时，随着含水层厚度的增加，系统运行过程中热贯通程度逐渐减弱。



(a) 含水层厚30m



(b) 含水层厚40m



(c) 含水层厚50m

图3 含水层厚30m、40m、50m时不同抽灌井间距的温度模拟结果

Fig.3 Temperature simulation results of different spacing between pumping-irrigation wells in 30, 40, 50 meter thick aquifer

图3~4可以得出，同一含水层厚度下，随着抽灌井间距的增加，热贯通发生的时间向后延迟，系统运行过程中抽水井温度相对于含水层初始温度的变化量逐渐减小，即回灌行为对抽水井水温的影响不断减弱。这主要是由于抽、灌井周围主要以对流传热为主，在抽灌量不变的条件下，抽灌井间距

越大，抽水井和回灌井之间形成的水力坡度越小，区域内地下水流速越小，对流传热强度就越弱。

根据图3~4，尽管在同一含水层厚度下，随着抽灌井间距的增加，热贯通程度逐渐减弱，但根据所设定的几个距离，并不能说明热贯通呈现严格的递减规律，如图5所示。

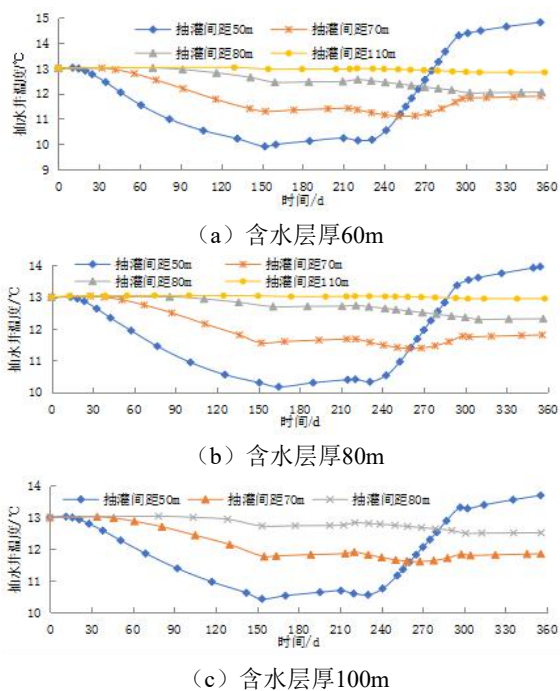


图4 含水层厚60m、80m、100m时不同抽灌井间距的温度模拟结果

Fig.4 Temperature simulation results of different spacing between pumping-irrigation wells in 60, 80, 100 meter thick aquifer

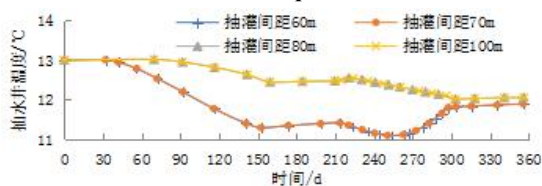


图5 含水层厚60m时两组特殊曲线

Fig.5 Two sets of special curves when the aquifer is 60m thick

从图5可以看出，含水层厚60m时，抽灌井间距60m和70m的曲线重合，80m和100m的曲线重合。经其他工况的模拟，在同一含水层厚度下，均出现某范围内的模拟温度曲线重合现象。由此可见，随着抽灌井距离的增加，热贯通程度并非一直递减。在一定的范围内，增加抽灌井间距，并不能明显减弱热贯通现象。

根据发生热贯通的程度，由图3~4可以得到本文所涉及含水层的抽灌井设计间距。含水层厚度30m，抽灌井间距120m时，供暖末期抽水井温度约12.5℃，低于初始温度0.5℃，制冷末期11.8℃，比初始温度低1.2℃，若以发生轻度热贯通为条件，还需增加抽灌井间距。当抽灌井间距为140m，显然系统运行期间仅发生轻度热贯通。因此，在保证系统运行期间仅发生轻度热贯通的条件下，含水层厚30m时，抽灌井间距应设定为140m。同样，由图可以确定含水层厚度为40m、50m、60m、80m及100m时，抽灌井设计间距分别为120m、110m、110m、110m及80m。由以上含水层厚度对应的设计间距发现，随着含水层厚度增加，所需抽灌井间距并没有呈现严格的增减规律，这可能是由于本文在模拟过程设置的抽灌量较小或者未考虑天然水力坡度的影响，致使含水层在某一范围内变化时，合适的抽灌井间距差别不大。需要说明的是，虽然含水层厚度为50m、60m、80m时，最小抽灌井间距均为110m，但系统运行过程中温度的变化还是有一定区别的，如图6所示。

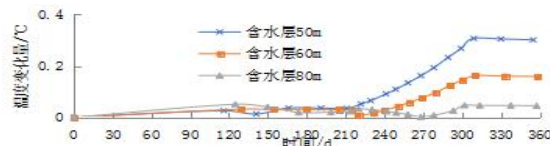


图6 含水层厚50、60、80m对应的温度变化绝对值

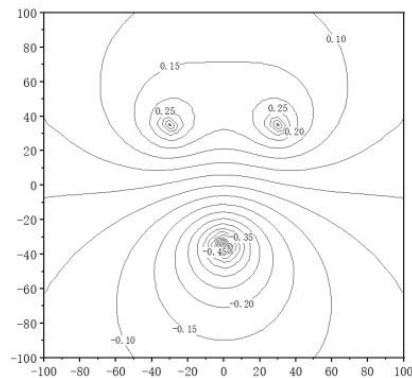
Fig.6 Absolute value of temperature variation corresponding to 50, 60, 80m thickness of aquifer

图6可以看出，系统供暖运行期间，三种含水层厚度对应的温度变化绝对值较小，在0.05℃范围内，在此阶段差别不大。制冷末期，含水层50m厚对应的温度变化绝对值约0.3℃，含水层60m厚对应的温变绝对值约0.15℃，而含水层厚100m时，温变绝对值仅约为0.04℃。可见这三种含水层厚度所需的间距尽管一样，但在制冷末期抽水井基于初始温度的变化并不一致。

#### 4.2 抽灌引起的水力坡度分析

根据文献[14]的承压完成井及承压非完整井单井出水量计算公式可知：其他条件一定时，含水层厚度越大，则在井内以及井周围水位降深越小。因此，含水层越厚，抽灌行为引起的抽灌井之间的水力坡度就越小，越不容易导致热贯通的发生。图7给出了抽灌井间距80m时，含水层厚度为30m（左

侧)及50m(右侧)两种情况下在供暖末期的相对



水头分布情况。

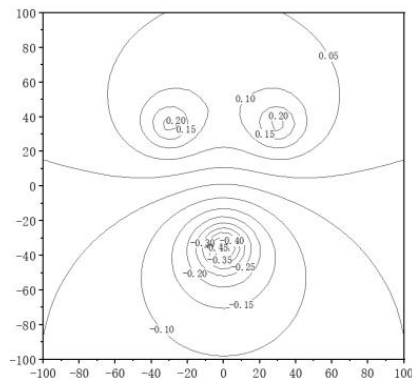


图7 含水层厚30、50m对应的水头分布

Fig.7 Distribution of water head corresponding of 30m and 50m thickness of aquifer

由图7可以看出,含水层30m厚时整个场地的水头变化幅度明显大于含水层50m厚的情况。对于水头变换幅度为0的分界线,30m厚的含水层大致在-8~0m范围,而50m厚的含水层大致在10~15m范围。可见,含水层越厚回灌井的水头变化对抽水井的影响越弱。因此,也从另一方面说明了含水层越厚,越不容易形成热贯通。

## 5 结论

通过数值模拟的方法,计算和分析了含水层厚度对抽灌井设计间距的影响,可以得出以下结论:

(1) 抽灌井间距一定,随着含水层厚度的增加,系统运行过程中回灌井对抽水井的影响逐渐减弱,即热贯通程度逐渐减弱。

(2) 同一含水层厚度,抽灌井间距增加,热贯通程度总体呈现减弱趋势,但是可能在某一范围内增加抽灌井间距,热贯通减弱程度不明显。如,含水层厚60m时,抽灌井间距80m与100m之间热贯通程度基本没有变化,因此在这样的范围内,应该取最小的间距。

(3) 随着含水层厚度的增加,抽灌井设计间距总体呈现递减的趋势,同时存在含水层厚度在某一范围增加时,对应的抽灌井设计间距一致的情况,但这种现象与含水层越厚抽水井受回灌井影响越弱的结论并不矛盾。

## 参考文献:

[1] 马最良,吕悦.地源热泵系统设计与应用[M].北京:机械工业出版社,2014.  
[2] 张德祯,闫银花,王宏,等.水源热泵热源井群布局及供

水-回灌系统可行性分析[C].地温资源与地源热泵技术应用论文集,2008:206-213.

- [3] 朱文举,平建华,侯俊山,等.安阳市地下水源热泵系统建设水资源管理区划研究[J].水文地质工程地质,2022,49(1):200-208.  
[4] 廖荣,丁跃元,刘立才,等.水源热泵系统应用对地下水环境的影响[J].水资源保护,2010,26(2):92-96.  
[5] 刘立才,刘乔木,廖荣,等.水源热泵应用的细节技术探讨—以北京地区为例[J].水文地质工程地质,2009,(3):134-138.  
[6] 文韬,崔先泽,范勇.地下水源热泵抽灌井群优化布置[J].长江科学院院报,2022,39(1):23-31.  
[7] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,2018.  
[8] 中国地质调查局.水文地质手册[M].北京:地质出版社,2012.  
[9] 王旭升.FlowHeat Modeling for Windows 1.0 FlowHeat 1.0软件用户手册[Z].中国地质大学(北京)水资源与环境学院,2006:1-28.  
[10] 刘立伟.热泵耦合反季节储能技术研究[D].天津:天津大学,2008.  
[11] 胡继华.地下水源热泵水力学机理及其对地下温度场影响研究[D].吉林:吉林大学,2009.  
[12] 张远东.单(多)井抽、灌对潜部地温场的影响研究[D].北京:中国科学院研究生院,2003.  
[13] 肖锐,黄坚,王小清.热屏障井对地下水源热泵换热影响模拟[J].水文地质工程地质,2021,48(2):190-198.  
[14] 束龙仓,刘波,陶月赞.地下水水文学(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,2022.