

引用本文:周念清,孔令熙,王小清,等. 地下水源热泵运行模式对地温场效能影响研究[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(5):284-292.
ZHOU Nian-qing, KONG Ling-xi, WANG Xiao-qing, et al. Research on Influence of Operation Mode on Geothermal Field Efficiency of
Groundwater Heat Pump[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 284-292.

DOI:10.19815/j.jace.2021.09126

地下水源热泵运行模式对地温场效能影响研究

周念清¹, 孔令熙¹, 王小清², 王 洋²

(1. 同济大学 水利工程系, 上海 200092; 2. 上海浅层地热能工程技术研究中心, 上海 200072)

摘要:基于上海市某地下水源热泵工程项目,采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析工具建立二维简化的热渗耦合数值模型,模拟采能区含水层多孔介质热量运移过程,并利用热泵运行 3 年的现场监测数据进行模型的识别与验证。探讨热泵系统冷、热负荷设计和抽、灌模式两个方面对采能区地温场效能的影响,分析和预测不同工况下热泵运行期间地温场的演变特征,最后对系统的运行效果进行评价。结果表明:该热泵系统按原设计方案运行时,抽灌井短期运行效果良好,但在第 7 个供暖期末将出现热贯通现象,长期运行将不利于热井的取热;如果减小 20% 热负荷、增加 20% 冷负荷,会使冷影响区扩散速度降低 46.3%,系统运行效果得到显著改善,在模拟的 9 个运行周期内并未出现热贯通现象,说明合理调节冷、热负荷有利于热泵系统的长期稳定运行;当冷、热负荷恒定时,分别减小 10% 和 20% 的循环水量将会使冷影响区扩散速度分别降低 9.3% 和 15.7%,有效地缓解了热贯通的发生,且仍能满足项目对于制冷供暖的需求,进一步阐明了地下水源热泵系统宜采用“大温差、小流量”的抽灌模式。

关键词:地下水源热泵;热渗耦合;地温场;热贯通;运行模式

中图分类号:TK521

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)05-0284-09

Research on Influence of Operation Mode on Geothermal Field Efficiency of Groundwater Heat Pump

ZHOU Nian-qing¹, KONG Ling-xi¹, WANG Xiao-qing², WANG Yang²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Engineering and Technology Research Center of Shallow Geothermal Energy, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on a groundwater heat pump project in Shanghai, a 2D simplified coupled thermal conduction and groundwater seepage numerical model was established to simulate the heat transport process of porous media in the production aquifer by means of finite element analysis tool COMSOL Multiphysics, and the field monitoring data of heat pump operation for 3 years were used to identify and verify the model. The efficiency influenced by cooling/heating load design and pumping/injection mode of heat pump system were discussed on geothermal field under different working conditions in production area, the evolution characteristics of geothermal field during operation of heat pump were predicted and analyzed, and finally the operating effect of the system was evaluated. The results show that when the heat pump system is running

收稿日期:2021-09-25

基金项目:国家自然科学基金项目(42077176)

作者简介:周念清(1964-),男,湖南石门人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:nq.zhou@tongji.edu.cn。

according to the original design scheme, the pumping and injection wells have a good short-term operation effect, but the heat transfixion phenomenon will occur at the end of the 7th heating period, which means that long-term operation will not be conducive to the heat production of hot wells. If 20% heating load is reduced and 20% cooling load is increased, the diffusion velocity of cold affected zone is reduced 46.3%, the operation effect of the system is significantly improved, and heat transfixion phenomenon will not occur within nine simulated operating cycles, which indicates that reasonable adjustment of the cooling and heating load is beneficial to long-term stable operation of heat pump system. When the cooling load and heating load is constant, the diffusion velocity of cold affected zone decreases by 9.3% and 15.7% respectively when the circulating water flow decreases by 10% and 20% respectively, the heat transfixion phenomenon is effectively alleviated, and it can still meet the needs of the project for refrigeration and heating. It is further clarified that the pumping and irrigation mode of large temperature difference and small flow should be adopted in the groundwater source heat pump system.

Key words: groundwater heat pump; coupled thermal conduction and groundwater seepage; geo-thermal field; heat transfixion; operation mode

0 引言

地下水源热泵从含水层中抽取地下水,通过热交换器实现向使用对象供暖或制冷,然后再将抽取的地下水重新注入到含水层中,从而保持地下水量的平衡^[1-2]。在系统运行期间,沿地下水流方向引起的热对流要比热传导传递的热能更多^[3],因此在水文地质条件良好的含水层中,系统运行具有出色的供暖/制冷性能和效率^[4]。经过热交换后的地下水在含水层中产生热羽流,当其沿着抽灌行为引起的局部地下水流到达抽水井时,就会出现热贯通现象^[5]。抽水井温度的变化会降低系统性能和运行效率,甚至可能导致系统故障^[6-7]。国内外学者关于地下水源热泵对地温场的影响做了大量的研究,但多数以室内试验^[8-9]和数值模拟^[10-11]为主,只有结合实际工程监测数据进行研究才真正具有应用价值^[12-13]。COMSOL 作为一款多物理场耦合分析软件,具有精度高、误差小的特点,近年来在地热能开发利用的研究当中得到了越来越广泛的应用^[14-15]。

井群布局和运行模式是地下水源热泵设计重点考虑的问题,关系到系统的可持续运行^[16-17]。在方案设计阶段,通过比较不同井群布局下热泵运行的地温场变化,可以优化抽灌井的布置方式^[18-19]。对已投入运行的工程项目,一般在原有设计的基础上评价热泵系统的运行效果并提出改进策略。骆祖江等^[20]对地下水源热泵工程热平衡发展趋势进行了分析和预测,通过增大温差的方式来进行调节,可有效缓解工程中出现的热贯通现象。对于实际工程而

言,情形比较复杂,多数研究是基于假设简化模型进行探讨^[21-22]。曾锦雯^[23]建立了一个“三抽三灌”的对井模型,模拟一个供暖制冷周期不同情形下含水层温度场的分布情况,以此来探讨地下水源热泵系统运行模式的优化问题。此类研究虽具有普适性但缺少实例验证,且研究时间尺度较短。业界普遍认为“大温差、小流量”的运行模式能减小对地温场的影响,但结合实际工程运行策略优化方案时缺少相应的量化指标。

本研究以上海某地下水源热泵工程为例,采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析工具建立地下采能区含水层热渗耦合数值模型,模拟系统长期运行时地温场的演变过程,从冷、热负荷设计和抽灌模式两个方面进行探讨,获取相关的技术参数,为地下水源热泵系统的长期稳定运行提供技术支撑。

1 场地工程概况

研究场地地下水源热泵工程位于上海市郊区花卉产业化示范基地,地处长江三角洲冲积平原区。场地上覆盖层为全新统(Q_4)粉质黏土、淤泥质黏土和黏土,下伏上更新统(Q_3)粉砂、粉细砂和中砂,土层结构见表1。根据区域水文地质资料,崇明岛分布有潜水含水层和第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ承压含水层,区域内第Ⅰ承压含水层缺失。场地地下水位埋深在1 m左右,地下水径流方向由西向东,径流速度较为缓慢。其中第Ⅱ承压含水层为晚更新世早期(Q_3^1)河口~滨海相沉积,层顶埋深约70 m,层厚约30 m,岩性为粉细砂、中砂互层。该含水层补给条件和富

表 1 场地地层结构

Table 1 Site Stratigraphic Texture

地质年代	土层序号	土层名称	顶底面埋深/m
Q ₃ ¹	② ₁	棕黄色粉质黏土	0.0~3.3
Q ₃ ¹	② ₃	灰黄色粘质粉土	3.3~7.2
Q ₃ ¹	④	灰色淤泥质黏土	7.2~14.0
	⑤ ₂	灰色粉质黏土	14.0~33.6
	⑤ ₃	灰色黏土夹砂土	33.6~36.8
Q ₃ ²	⑦ ₁	灰色粉砂	36.8~48.5
	⑦ ₂	灰色粉细砂	48.5~55.7
	⑧ ₂	灰色粉砂夹粉质黏土	55.7~74.0
Q ₃ ³	⑨ ₂₋₁	灰色中细砂	74.0~87.5
	⑨ ₂₋₂	灰色粉砂	87.5~91.5
	⑨ ₂₋₃	灰色中细砂	91.5~94.3
	⑨ ₂₋₄	灰色粉砂	94.3~97.8
	⑨ ₂₋₅	灰色中细砂	97.8~102.5
	⑨ ₂₋₆	灰色粉砂	102.5~104.2
Q ₃ ²	⑩	灰色黏土	104.2~未钻穿

水性均较好,单井涌水量为 1 000~3 000 m³·d⁻¹,地下水温度为 19~20 ℃,是地下水开采的主要含水层。因此,工程选择该含水层作为目标水源含水层。

地下水源热泵系统主要用于农业种植温室的温度调节,温室面积约 21 000 m²。该工程建设项目在 2010 年 3 月进行了水资源论证,地下水源热泵系统于 2014 年 11 月建成后开始试运行,于 2015 年 11 月正式投入使用,至今仍在稳定运行中。系统供暖季为 12 月~次年 5 月,制冷季为 6~10 月,全天 24 h 运行。供暖季日均热负荷为 350 kW,制冷季日均冷负荷为 262.5 kW。

工程采用“两抽两灌”的 L 型布井方案,井 1、井 2 为冬灌夏抽井(冷井),井 3、井 4 为夏灌冬抽井(热井),抽、灌井之间距离为 124 m。水源井井深 104.5 m,滤水管位于井深 77.6~102.6 m 处,总长度 16.7 m,为承压非完整井。系统设计单井最大地下水抽灌量为 30 m³·h⁻¹。井管、滤水管均采用 φ250 PVC 管材。抽取的地下水 100%回灌入相同目标含水层。另外,场地井 2 和井 3 之间设置了 3 口地温监测井,工程平面布置见图 1。

2 地下水渗流与热量运移耦合模型

2.1 基本假设

地下含水层热量运移是一个极其复杂的传热传导过程,为便于分析和计算,对抽灌井计算模型做了如下假设:①计算区岩土体为饱和和多孔介质,同一地层岩土体均质、各向同性,产状水平,厚度不变;②地

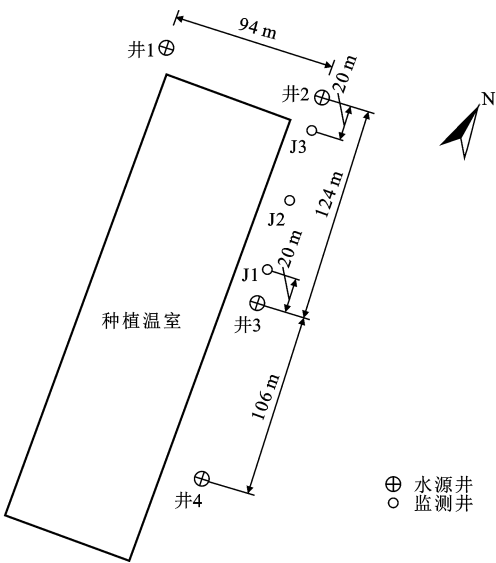


图 1 工程平面布置

Fig. 1 Project Plane Layout

下水流为水平径向流,忽略竖直方向上的渗流,地下水流运动服从达西定律;③不考虑上部弱透水层的贮水性和弹性释水量;④流体与介质的比热容、导热系数、密度、渗透率等物性参数不随温度和压力变化而变化;⑤忽略自然对流和辐射换热的影响;⑥忽略井身传热带来的热损失,不考虑地面环境和大地热流对采能区的温度影响。

2.2 地下水渗流与热量运移数学模型

本研究的含水层类型为承压含水层,根据假设条件,含水层饱和和多孔介质地下水流运动遵循达西定律,并且满足质量守恒定律。地下水渗流过程和定解条件可用方程(1)描述。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_p \rho_w) + \nabla(\rho_w u) &= Q_m \\ p(x, y, z, t)|_{t=0} &= p_0(x, y, z) \quad x, y, z \in \Omega \\ p(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} &= p'_0(x, y, z, t) \quad x, y, z \in \Gamma_1 \\ K \frac{\partial H}{\partial n}|_{\Gamma_2} &= u(x, y, z) \quad x, y, z \in \Gamma_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$u = -\frac{K}{\rho g} \nabla p \quad (2)$$

式中:ε_p 为孔隙率;ρ_w 为水的密度;u 为达西速度;Q_m 为质量源(汇);K 为含水层渗透系数;H 为水头;p 为水头压力;p₀ 为求解域 Ω 上的初始压力;p'₀ 为第一类边界 Γ₁ 上的压力;u(x, y, z) 为第二类边界 Γ₂ 上的渗流速度;t 为时间;g 为重力加速度。

热量运移与传输的机制主要通过对流和传导实现,忽略辐射换热的影响。地下水源热泵抽灌井热量运移主要发生在含水层水与水之间、水与介质之

间,在此过程中地下多孔介质基体和流体成为了热传递的载体,二者构成了渗流场和温度场的耦合关系。通过达西渗流速度可将渗流方程与热传导方程进行耦合。含水层多孔介质热量运移过程和定解条件可以用方程(3)描述。

$$\left. \begin{aligned} &(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_w u \nabla T + \nabla q = Q \\ &T(x, y, z, t) |_{t=0} = T_0(x, y, z) \quad x, y, z \in \Omega \\ &T(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = T'_0(x, y, z, t) \quad x, y, z \in \Gamma_1 \\ &k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, z) \quad x, y, z \in \Gamma_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$q = -k_{\text{eff}} \nabla T \quad (4)$$

式中: $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 为常压下的有效体积热容, $(\rho C_p)_{\text{eff}} = \epsilon_p \rho_w C_w + (1 - \epsilon_p) \rho_s C_{p,s}$, C_w 和 $C_{p,s}$ 分别为水和多孔基体的比热容, ρ_s 为多孔基体密度; T 为温度; q 为热通量; Q 为热源(汇); k_{eff} 为有效导热系数, $k_{\text{eff}} = \epsilon_p k_w + (1 - \epsilon_p) k_s$, k_w 和 k_s 分别为水和多孔基体的导热系数; T_0 为求解域 Ω 上的初始温度; T'_0 为第一类边界 Γ_1 上的温度; $q(x, y, z)$ 为第二类边界 Γ_2 上的热通量函数。

2.3 数值模型与网格剖分

地下水源热泵的运行过程是复杂的三维多场耦合问题,许多研究常将其简化为二维模型来计算。陈必光^[24]讨论了对井系统的二维简化问题,结果表明,横向剖切模型对于模拟热储层中间深度区域的温度场效果良好。项目选定的热储层即采能区埋深为 74.0~104.2 m,含水层岩性为粉细砂、中砂互层,选择渗透性较好的中砂层(91.5~94.3 m)进行模拟,取中间深度 93 m 地层进行横切获得二维简化模型。

采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件进行模拟,研究热渗耦合作用下的地温变化特征,分别选用达西定律模块和多孔介质传热模块模拟抽灌系统的渗流和传热过程。为了确定模型的几何尺寸以消除边界的影响,先进行了多种尺寸的试算,判定依据是研究区边界上的水头和温度条件不受抽灌井引起的地下渗流场和温度场改变带来的影响,试算结果得到抽灌井的影响半径约为 300 m。为了网格剖分和计算的便捷,几何形状通常采用正方形,故研究区尺寸最终确定为 800 m×800 m。模型网格采用细化尺寸的自由三角形网格,最小网格单元边长为 0.1 m,共包含 6 496 个域单元和 132 个边界单元,计算区域单元剖分参见图 2。

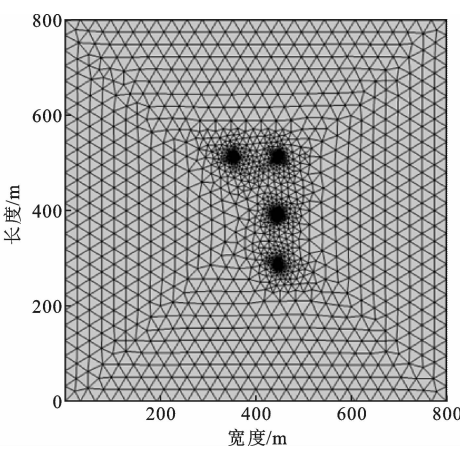


图 2 抽灌井模型网格(单位:m)

Fig. 2 Pumping and Recharge Well Model Grid (Unit:m)

2.4 初始条件和边界条件

为了评价含水层的出水能力,并计算含水层的渗透系数,在方案阶段进行了现场抽水试验。此次采用承压水非完整井稳定流单孔抽水试验,根据经验公式(5)可计算含水层的渗透系数。

$$K = \frac{0.366Q' \lg(2l/r_w)}{ls_w} \quad (5)$$

式中: Q' 为抽水井流量; l 为滤水管长度; r_w 为抽水井半径; s_w 为抽水井水位降深。

利用 J2 监测井进行单孔抽水试验,根据抽水试验期间观测数据,取平均值进行计算,最终得到目标含水层渗透系数 K 为 26.8 m·d⁻¹。结合室内试验结果,得到含水层主要物理和热物性参数,见表 2。

表 2 含水层主要参数

Table 2 Main Parameters of Aquife

参数	数值
孔隙率 ϵ_p	0.315
水的密度 $\rho_w / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 000
多孔基体密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 090
渗透系数 $K / (\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	26.8
多孔基体导热系数 $k_s / [\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	2.40
水的导热系数 $k_w / [\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	0.56
水的比热容 $C_w / [\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	4 210
多孔基体比热容 $C_{p,s} / [\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	761
初始地温 T_0 / K	292.82

根据水文地质资料,计算区的初始水头为 -1.63~-0.27 m,地下水径流方向由西向东,平均水力坡度为 1.26×10^{-3} ,地下水平均渗流速度为 $3.89 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。含水层初始温度为 19.67℃,假定同一深度初始地温分布一致。初始水头和渗流场如图 3 所示。

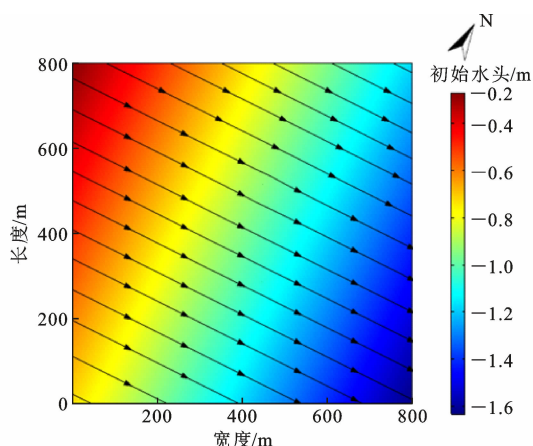


图3 初始水头和渗流场

Fig. 3 Initial Water Head and Seepage Field

在渗流场中,含水层四周设定为第一类(水头)边界;抽灌井设定为第二类(流量)边界。为方便计算,抽灌井流量取供暖(制冷)期的平均流量,且抽灌量相等。在温度场中,含水层四周设为开放边界,即认为四周为恒温边界,上游温度设为初始地温;抽灌井设为第二类(热通量)边界,回灌水温度恒定。

2.5 模型的识别与验证

模型初步建立后,需要对模型参数进行识别,并验证模型的准确性,取 J1、J2、J3 监测井处一个供暖制冷周期地温变化的实测值和模拟值进行对比。根据系统运行 3 年的监测数据,供暖期和制冷期抽灌水量变化呈正态分布,最大值分别约为 $500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,平均值约为 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;冷井供暖期回灌水温度分别在 8°C 上下变化,制冷期抽水温度则由 8°C 逐渐升高至 14°C ;热井供暖期抽水温度基本稳定在 20°C 左右,制冷期回灌水温度受热负荷变化的影响在 $17\sim 30^\circ\text{C}$ 动态变化,平均在 21°C 左右。因此,模型的单井抽灌流量设为 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,供暖期和制冷期回灌水温度分别设为 8°C 和 21°C 。结果显示,J1、J2、J3 处地温实测值与模拟值的变化曲线较为吻合,见图 4。计算可得 J1、J2、J3 处地温实测值和模拟值的平均误差分别为 5.22%、2.60% 和 7.28%,说明该数值模型能较好地拟合实际情况,满足参数反演要求,可进行下一步计算分析工作。

3 计算结果与分析

3.1 地温场特征

为了分析热泵系统运行期间地温变化规律和换热性能,共模拟了系统运行 5 个供暖和制冷周期含水层的地温场变化,选取 3 个供暖和制冷周期进行

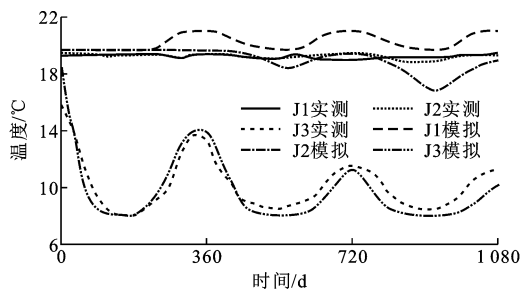


图4 J1、J2、J3 处实际地温与模拟地温对比

Fig. 4 Comparison of Actual and Simulated Ground Temperature at J1, J2 and J3

分析,见图 5。由图 5 可知,冷、热井交替抽灌地下水的运行模式使得冷、热影响区呈现交替扩散收缩的趋势,且热羽形状受地下水渗流和抽灌作用影响呈现水滴状。“冬灌夏抽”和“夏灌冬抽”的地下水抽灌模式使得供暖期和制冷期灌入含水层的冷量和热量被储存起来,作为下一运行周期的冷源和热源,实现废热再利用,从而避免了热冗余导致热堆积区的产生。由于供暖期换热量大于制冷期,且供暖期回灌水与初始地温的温差较大,故冷井附近的冷影响区相对于热影响区其扩散速度更快、范围更大,这就导致每一运行周期冷影响区相比上一周期都在不断地扩大,因此需要考察冷影响区对于系统运行的影响。

在系统冷、热负荷满足温室实际需求的情况下,本研究考虑是否会发生热贯通来评价系统换热性能的优劣。取井 2 和井 3 之间的截线,设定低于初始地温 0.5°C 的 19.17°C 等温线作为冷影响区边界,当冷影响区扩散至热井,即影响距离大于井 2 和井 3 间距 124 m 时,认为出现热贯通现象。由模拟结果可以得出,第 1、第 3 和第 5 个制冷期末的影响距离分别为 55.5、80.2、100 m,平均扩散速度为 $11.1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由此可见,该热泵系统的短期运行效果良好,但预计到第 7 个供暖期末冷影响区将扩散到热井,发生热贯通,导致热泵换热性能降低。

3.2 冷、热负荷设计的影响

在热泵系统实际运行时,日均冷、热负荷会根据用户需求进行调整。通过模拟冷、热负荷变化时含水层热量运移过程,评价其对热泵系统换热性能的影响。为了简便计算,在满足分析要素的基础上设置了“同时增加”“一增一减”“同时减小”等不同工况。根据系统实际运行时冷、热负荷变化情况,确定各工况设定的负荷增减幅度为 20%。因为冷、热负荷与系统循环水量及抽灌水温差有关,所以通过同时改变日均抽灌水流量和温差,分别比较冷、热负荷增加和减小 20% 时的运行工况模拟得到的结果,各

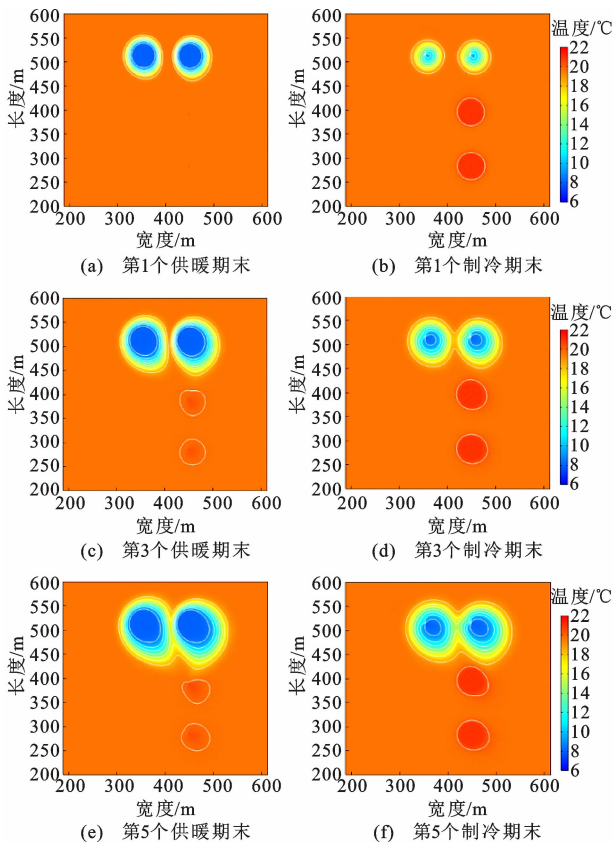


图 5 供暖和制冷周期含水层地温场变化特征
Fig. 5 Geothermal Field Change Characteristics of Aquifer During Heating and Cooling Period

工况设定见表 3。

表 3 不同冷、热负荷的工况设定

Table 3 Working Condition Setting of Different Cooling and Heating Loads						
工况 编号	热负荷	冷负荷	单井流量/(m ³ ·d ⁻¹)		抽灌水温差/℃	
			供暖	制冷	供暖	制冷
1	基础工况	基础工况	300.0	300.0	12.0	9.0
2	增加 20%	增加 20%	328.5	328.5	13.1	9.9
3		减小 20%	328.5	268.2	13.1	8.0
4	减小 20%	增加 20%	268.2	328.5	10.7	9.9
5		减小 20%	268.2	268.2	10.7	8.0

从模拟结果可以得出,在供暖期冷影响区在不同工况下仍在不断向热井扩散,如图 6 所示。工况 1~5 冷影响区平均扩散速度分别为 10.8、11.9、16.9、5.8、9.9 m·a⁻¹,预计出现热贯通现象的时间分别为 2 355、2 004、1 594、4 527、2 704 d。增加热负荷会加剧热贯通现象的发生。与基础工况相比,工况 3 的冷影响区扩散速度提高了 56.5%,预计提前 2 个周期发生热贯通;增加冷负荷可以明显延缓这种趋势,工况 2 比工况 3 推后 1 个周期达到热贯通。工况 2、工况 5 与工况 3 相比,冷影响区扩散速

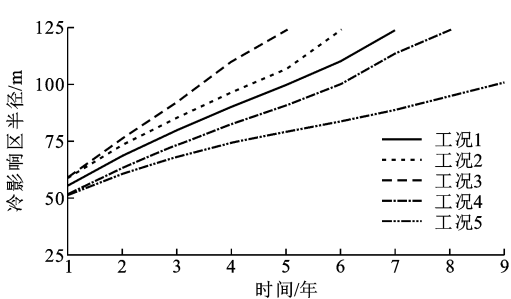


图 6 不同冷、热负荷时的冷影响区半径
Fig. 6 Radius of Cold Affected Zone Under Different Cooling and Heating Loads

度分别降低了 29.6%和 41.4%,因此冷、热负荷设计对冷影响区扩散速度是敏感的。与增加冷负荷相比,减小热负荷更能有效延缓冷影响区的扩散,工况 5 预计比基础工况推后 1 个周期发生热贯通。如果减小热负荷同时增加冷负荷,那么这种缓解作用将得到显著提升,工况 4 的扩散速度相比基础工况降低了 46.3%,在模拟的 9 个运行周期内未出现热贯通现象。另外,在第 9 个供暖期末,工况 1~5 冷影响区域场外扩散距离分别为 135、140、150、118、133 m,因此,减小热负荷、增加冷负荷均能减小冷扩散羽对场地周边的影响,且有利于系统的可持续运行。

此外,为了评价冷、热负荷变化对热扩散羽的影响,设定 20.17℃等温线作为热影响区边界,考察井 2、井 3 截线上的热影响区在制冷期运行时的变化趋势。在不同工况下,制冷期末的热影响区随着热泵运行周期总体呈现缓慢收缩的趋势见图 7。由于冷负荷增加使得热影响区扩散距离增加,工况 2 和工况 4 分别比基础工况平均增加了 4.4%和 26.6%。由模拟结果可知,热影响区距离在 20~42 m 之间,不会对下一周期冷井的运行产生影响。

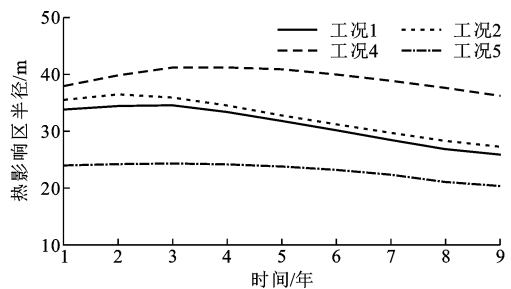


图 7 不同冷、热负荷时的热影响区半径
Fig. 7 Radius of Heat Affected Zone Under Different Cooling and Heating Loads

需要说明的是,如根据用户负荷需求本身对系统冷、热负荷工况进行调整,则这种调控措施完全能

够满足实际工程运行的需求;如为了缓解热贯通现象进行调整,则需要其他能源的运用或项目本身运营策略的调整作为补充,以满足用户对供暖制冷的需求。

3.3 抽灌模式的影响

当热泵系统冷、热负荷设计恒定时,可以通过改变系统循环水量和抽灌水温差,分析热泵抽灌模式调整对换热性能的影响。下面分别对增大循环水量、减小抽灌水温差以及减小循环水量、增大抽灌水温差的运行工况进行模拟,并比较其结果。根据监测数据可知,热泵运行时实际的单井涌水量最高可达 $500\sim1\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,全年平均为 $300\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,说明该含水层开采能力和水泵功率有较大的可调整余量,但由于冷、热负荷恒定,循环水流量与抽灌水温差呈反比关系,温差的限制使得流量不能过大或过小。如果实际运行中井 1、井 2 供暖期回灌水在 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上下变化,抽水温度基本稳定在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,抽灌水温差在 $10\sim15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。因此,循环水流量的调整范围不宜超过 $\pm 20\%$,各工况设定见表 4。

表 4 不同抽灌模式工况

Table 4 Working Condition of Different Pumping and Injection Modes				
工况 编号	抽灌模式	单井流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	抽灌水温差/ $^{\circ}\text{C}$	
			供暖	制冷
1	基础工况	300	12.0	9.0
6	流量增加 10%	330	10.9	8.2
7	流量增加 20%	360	10.0	7.5
8	流量减小 10%	270	13.3	10.0
9	流量减小 20%	240	15.0	11.3

从模拟结果可知,冷、热负荷设计恒定时各工况冷影响区范围仍会到达热井处,但在程度上存在差异,如图 8 所示。工况 6~9 冷影响区扩散速度分别为 $12.0、13.2、9.8、9.1\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,预计发生热贯通的时间分别为 2 000、1 977、2 717、3 083 d。工况 6、7 冷影响区扩散速度分别比基础工况提高了 11.1% 和 22.2%,而工况 8、9 则分别降低了 9.3% 和 15.7%。可以得到循环水量对冷影响区扩散速度的灵敏度为:每增加 1% 循环水量,冷影响区扩散速度提高 1.11%;每减小 1% 循环水量,冷影响区扩散速度提高 0.86%。由此可见,抽灌水流量增大、温差减小时,热贯通现象加剧;抽灌水流量减小、温差增大时,有利于缓解热贯通趋势。另外,减小抽灌流量还可以减小冷羽场地外方向的扩散距离,第 9 个供暖期末工况 9 的冷羽半径比基础工况减小了 3.6%。

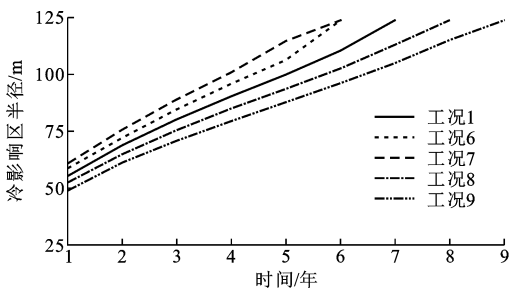


图 8 不同抽灌模式时的冷影响区半径

Fig. 8 Radius of Cold Affected Zone Under Different Pumping and Injection Modes

因此,采用“大温差、小流量”抽灌模式能减小系统运行对地温场的影响。

随着热泵运行,各工况制冷期末的热影响区距离均在 $20\sim40\text{ m}$ 之间,呈现先扩散后收缩的趋势(图 9),平均收缩速率为 $1.2\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。热影响区的发展与抽灌模式的选择无明显关系,对系统运行的影响也较小。值得注意的是,在冷、热负荷恒定时,无论循环水量和抽灌水温差如何调整,经换热器换热后提供给温室的热(冷)量同样是恒定的,所以调整水量和温差后仍能符合温室对温度的要求。

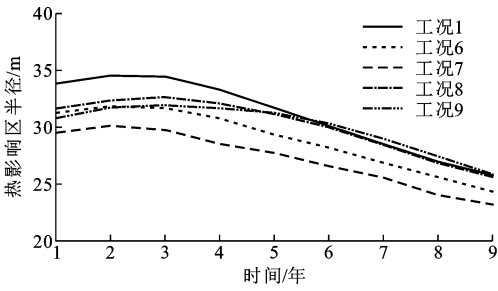


图 9 不同抽灌模式时的热影响区半径

Fig. 9 Radius of Heat Affected Zone Under Different Pumping and Injection Modes

4 结 语

(1)采用 COMSOL Multiphysics 建立的热渗耦合数值模型能较为准确地模拟地下水源热泵运行地温场的演变特征。现行工况的模拟结果显示,热泵系统的短期运行效果良好,但由于全年热负荷大于冷负荷,随着热泵运行,冷影响区扩散范围将逐渐增大,冷、热源井之间会在第 7 个供暖期末出现热贯通现象,长期运行将不利于热井的取热。

(2)减小热负荷、增加冷负荷可以显著延缓热贯通发生的趋势。若减小 20% 热负荷的同时增加 20% 冷负荷,冷影响区的扩散速度比原来降低 46.3%,在模拟周期内并未发生热贯通。虽然冷负

荷增加使得热影响区扩散距离增加,但不会对冷井的运行造成影响。因此,合理调节冷、热负荷有利于热泵系统的长期稳定运行。

(3)当冷、热负荷设计恒定时,分别增大10%和20%循环水量,冷影响区扩散速度将分别比原工况提高11.1%和22.2%;如果分别减小10%和20%循环水量,则分别降低了9.3%和15.7%。说明减小抽灌水流量、增大温差的抽灌模式能有效缓解热贯通现象的发生。

参考文献:

References:

- [1] LO RUSSO S, TADDIA G, DABOVE P, et al. Effectiveness of Time-series Analysis for Thermal Plume Propagation Assessment in an Open-loop Groundwater Heat Pump Plant[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(18): 1-11.
- [2] 高秀芝,王泮浩,戟坤池,等. 热泵供暖技术发展现状及展望[J]. *制冷与空调*, 2019, 19(5): 71-78, 83.
GAO Xiu-zhi, WANG Feng-hao, JI Kun-chi, et al. Development Status and Prospects of Heat Pump Heating Technology[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2019, 19(5): 71-78, 83.
- [3] CASASSO A, SETHI R. Modelling Thermal Recycling Occurring in Groundwater Heat Pumps (GWHPs)[J]. *Renewable Energy*, 2015, 77: 86-93.
- [4] POPHILLAT W, ATTARD G, BAYER P, et al. Analytical Solutions for Predicting Thermal Plumes of Groundwater Heat Pump Systems[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 2696-2707.
- [5] MILNES E, PERROCHET P. Assessing the Impact of Thermal Feedback and Recycling in Open-loop Groundwater Heat Pump (GWHP) Systems: A Complementary Design Tool[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(2): 505-514.
- [6] LO RUSSO S, TADDIA G, GNAVI L, et al. Neural Network Approach to Prediction of Temperatures Around Groundwater Heat Pump Systems [J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(1): 205-216.
- [7] GANGULY S, MOHAN KUMAR M S, DATE A, et al. Numerical Investigation of Temperature Distribution and Thermal Performance While Charging-discharging Thermal Energy in Aquifer [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 756-773.
- [8] 王鹏杰. 多孔介质热渗耦合实验及模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
WANG Peng-jie. Experiment and Simulation Research

on Porous Medium Under Coupled Thermal Conduction and Groundwater Seepage Conditions [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.

- [9] 马致远,翟美静,许勇,等. 砂槽模拟浅源热泵的合理井间距及布局优化: 以枫林九溪为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(4): 143-149.
MA Zhi-yuan, ZHAI Mei-jing, XU Yong, et al. Reasonable Well Spacing and Layout Optimization of Shallow Source Heat Pump Using Sand Trough Simulation: A Case Study in Fenglinjiuxi [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(4): 143-149.
- [10] LO RUSSO S, GNAVI L, ROCCIA E, et al. Groundwater Heat Pump (GWHP) System Modeling and Thermal Affected Zone (TAZ) Prediction Reliability: Influence of Temporal Variations in Flow Discharge and Injection Temperature[J]. *Geothermics*, 2014, 51: 103-112.
- [11] ATTARD G, BAYER P, ROSSIER Y, et al. A Novel Concept for Managing Thermal Interference Between Geothermal Systems in Cities[J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 914-924.
- [12] 王洋,王小清,吕亮. 基于监测数据的地下水源热泵系统运行策略优化[J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(5): 153-158.
WANG Yang, WANG Xiao-qing, LV Liang. Operation Strategy Optimization of Groundwater Source Heat Pump Based on Monitoring Data[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2019, 17(5): 153-158.
- [13] GARCIA-GIL A, MUELA MAYA S, GARRIDO SCHNEIDER E, et al. Sustainability Indicator for the Prevention of Potential Thermal Interferences Between Groundwater Heat Pump Systems in Urban Aquifers[J]. *Renewable Energy*, 2019, 134: 14-24.
- [14] 郝豆. 地下水源热泵 THM 耦合模拟及工程应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
HAO Dou. Groundwater Source Heat Pump THM Coupling Simulation and Engineering Application [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [15] 周彦章,周志芳,傅志敏. 地源热泵系统可持续运行地下水热量运移模拟[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(增2): 297-303.
ZHOU Yan-zhang, ZHOU Zhi-fang, FU Zhi-min. Simulation of Thermal Transport in Aquifer for the Sustainable Running of GWHP System[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*,

2009,39(S2):297-303.

[16] BLAZQUEZ C S, VERDA V, NIETO I M, et al. Analysis and Optimization of the Design Parameters of a District Groundwater Heat Pump System in Turin, Italy[J]. *Renewable Energy*, 2020, 149:374-383.

[17] FREEDMAN V L, WAICHLER S R, MACKLEY R D, et al. Assessing the Thermal Environmental Impacts of an Groundwater Heat Pump in Southeastern Washington State[J]. *Geothermics*, 2012, 42:65-77.

[18] 李海岭,周雨泽,曹亚新,等. 基于地下水压采目标的地下水源热泵系统井群调控方案[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(5):165-173.

LI Hai-ling, ZHOU Yu-ze, CAO Ya-xin, et al. Controlling Plan of Well Group Operation of Groundwater Source Heat Pump System with the Target of Groundwater Pressure Recovery[J]. *South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(5):165-173.

[19] GAO Q, ZHOU X Z, JIANG Y, et al. Numerical Simulation of the Thermal Interaction Between Pumping and Injecting Well Groups[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51(1/2):10-19.

[20] 骆祖江,李 伟,王 琰,等. 地下水源热泵系统热平衡模拟三维数值模型[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(2):198-204.

LUO Zu-jiang, LI Wei, WANG Yan, et al. Three-dimensional Numerical Model for Heat Balance Simulation of Ground-water Heat Pump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(2):198-204.

[21] 周丹坤,李晓昭,常晓军. COMSOL 平台在城市地下多种资源相互影响分析中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(2):526-532.

ZHOU Dan-kun, LI Xiao-zhao, CHANG Xiao-jun. Application of COMSOL Platform in Analysis of Interaction of Urban Underground Multiple Resources [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(2):526-532.

[22] PARK D K, KAOWN D, LEE K K. Development of a Simulation-optimization Model for Sustainable Operation of Groundwater Heat Pump System[J]. *Renewable Energy*, 2020, 145:585-595.

[23] 曾锦雯. 地下水源热泵系统土壤换热特性研究及运行优化[D]. 北京:北京建筑大学, 2020.

ZENG Jin-wen. Investigation of Heat Seepage Transfer of Aquifer with Pumping and Recharge in Ground Water Heat Pump System[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.

[24] 陈必光. 地热对井裂隙岩体中渗流传热过程数值模拟方法研究[D]. 北京:清华大学, 2014.

CHEN Bi-guang. Study on Numerical Methods for Coupled Fluid Flow and Heat Transfer in Fractured Rocks of Doublet System[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.