

文章编号:1673-9469(2024)05-0085-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.05.012

## 含水层储层多能互补系统的采热效果数值模拟分析

杨金鹏<sup>1,2,3</sup>, 郑永香<sup>1,2,3\*</sup>, 王伟<sup>1,2,3</sup>, 牛庆合<sup>1,2,3</sup>, 袁维<sup>1,2,3</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学  
道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;  
3. 石家庄铁道大学 河北省金属矿山安全高效开采技术创新中心, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 构建了一种基于含水层储层的多能互补系统, 分析了含水层多能互补系统的地层温度响应特征和产水井温度变化规律, 探讨了回灌温度、井底压差和井间距对产水井温度的影响规律, 最后通过响应面法分析了各因素的显著性。结果表明, 该系统可有效延长地热井使用年限, 并实现将波动性能量通过地层内的热量交换和平衡最终输出稳定能量的功能。提高回灌温度可减缓产水井温度的下降幅度, 增大井底压差会缩短平衡产热时间并加速产水井温度下降, 增大井间距导致产水井稳定时间延长并减缓产水井温度下降幅度。采用响应面分析方法, 分析出4个因素对产水井水温影响的主次顺序为井间距>井底压差>回灌温度>使用年限, 交互作用中影响最大的为回灌温度与井间距。

**关键词:** 含水层储层; 岩土储能; 多能互补系统; 温度-渗流耦合; 采热效果

**中图分类号:** TU83

**文献标识码:** A

## Numerical Simulation Analysis of Thermal Recovery Effect of Multi Energy Complementary System in Aquifer Reservoirs

YANG Jinpeng<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Yongxiang<sup>1,2,3\*</sup>, WANG Wei<sup>1,2,3</sup>, NIU Qinghe<sup>1,2,3</sup>, YUAN Wei<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;  
2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety and Control of Ministry of Education,  
Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. Hebei Metal Mine Safety and  
Efficient Mining Technology Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** A multi energy complementary system based on aquifer reservoirs was constructed, and the temperature response characteristics of the aquifer multi energy complementary system and the temperature variation law of the production well were analyzed. The influences of the reinjection temperature, bottomhole pressure difference, and well spacing on the temperature of the production well were explored. Finally, the significance of each factor was analyzed through the response surface methodology. The results indicate that the system can effectively extend the service life of geothermal wells and achieve the function of outputting stable energy by exchanging and balancing fluctuating energy through heat exchange within the formation. Increasing the reinjection temperature can slow down the decrease in temperature of the production well. Increasing the bottomhole pressure difference can shorten the equilibrium heat production time and accelerate the temperature drop of the production well. Increasing the well spacing can prolong the stability time of the production well and slow down the temperature drop of the production well. With the response surface analysis method, the primary and secondary order of the four factors affecting the water temperature of production wells was analyzed as: well spacing>bottomhole pressure difference>reinjection temperature>service life. The interaction between reinjection

收稿日期: 2023-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979170, U1967208); 河北省自然科学基金资助项目(E2021210128, E2021210036)

作者简介: 杨金鹏(1996-), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩土体多场耦合。

\* 通信作者: 郑永香(1991-), 男, 河北邢台人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 岩土体多场耦合, 储层改造。

temperature and well spacing had the greatest impact.

**Key words:** aquifer reservoirs; rock and soil energy storage; multi energy complementary system; temperature seepage coupling; thermal recovery effect

我国中低温地热能源占比地热总资源比重较大,其具有良好的保温性和聚热性<sup>[1-2]</sup>。同时,我国太阳能资源丰富<sup>[3]</sup>,但太阳能具有间歇性的特点,而电网需要稳定。因此,需要将波动性的能量进行平衡调峰。含水层储层系统是指将多余的能量(如风能/光能/工业余热)转化为地下水的形式存在于地下含水层中的技术<sup>[4]</sup>。基于此思路,考虑利用含水层储层的热交换来平衡能量的波动性。将太阳能储存在地热储层中能够有效改善中低温地热能源品质问题。

多能互补系统的本质是注入采出流体与地层之间的热量交换问题。对于地热储能的研究, Kim等<sup>[5]</sup>确定了热损失与含水层和注入流体的联系。Schout等<sup>[6]</sup>研究发现含水层渗透率、含水层厚度以及储热流量等是影响地热储热效率的重要因素。Birdsell等<sup>[7]</sup>针对深部含水层储能的研究表明,较高渗透率会降低储热效果。Bonyadi等<sup>[8]</sup>设计了一种新型太阳能地热多能互补发电系统,针对不同工况的热力系统开展了模拟计算。Lee<sup>[9]</sup>研究发现密度差异流造成的自由对流是造成热损失的主要原因。Collignon等<sup>[10]</sup>分析了含水层渗透率影响储热效率的机制:中低渗含水层在储热所允许的注入与开采的水量较小,影响了储热效率。王侃宏等<sup>[11]</sup>探讨了太阳能与地源热泵联合应用的可能性。刘肖等<sup>[12]</sup>研究和开展了地热田现场阻垢试验及其效果评价。刘帅等<sup>[13]</sup>的研究表明随着回灌年数的增加冷水范围越来越大,热对流对温度场恢复的作用逐渐减弱。黄永辉等<sup>[4]</sup>探究了深部含水层储能技术,它可以延长地热井寿命,实现可持续开采。马捷等<sup>[14]</sup>研究了含水层储能循环采灌过程中抽出储能水的温度变化的一般特点。邹鹏飞等<sup>[15]</sup>研究了采灌井开发利用方案的模拟优选。单丹丹等<sup>[16]</sup>研究发现裂隙宽度、裂隙流流速和渗透系数与单裂隙地热系统开采效率都成正比关系。综上,国内外对光热地热耦合效果进行了探索,发现光热地热耦合可以增加发电效率,具有良好的热力性能和经济性能<sup>[17]</sup>。但是,目前关于太阳能与地热能耦合储能的技术主要是发生在地表,即通过光热对采出的地热水进行加热的方式,该工艺需要占用大量的土地资

源。本文提出了基于含水层储层的多能互补系统,基于地热储层,实现多种能源综合利用的多能互补系统。

本文将介绍基于含水层储层的多能互补系统的概念和具体工艺流程,分析系统的采热效果,探究各因素的影响规律,最终确定各因素的影响显著性。本研究对实现多能互补和高效利用提供了可能性,可有力助力我国“双碳”目标的实现。

## 1 基于深部含水层储热系统的“地热+”多能互补系统

由于风能和光能具有波动性,因此将其直接发电入网对电网具有冲击性。通过储能系统可以将波动性的能量平衡,最终实现能量的稳定输出。但常规储能系统会占用大面积土地,而深部储层(如地热储层)具有良好的自封闭系统,因此通过深部含水层进行储热为实现波动能量向稳定能量转化提供了可能性。因此本文构建了一种基于深部含水层储热系统的“地热+”多能互补系统(图1)。系统的概念图如图1(a)所示。该系统主要包括了三个模块,分别是能量收集模块、含水层储热模块和能量利用模块。该系统的具体工艺流程如图1(b)所示。在能量收集模块中,通过太阳能集热器收集光热,同时工业余热模块辅助收集工业余热,最终通过蒸发器实现与回灌水的热量交换。含水层储热模块有两个作用:第一,利用地热系统自有的聚热机制和储热机制,保证注入地下的热能量不损失或极少损失;第二,通过储热系统将能量收集系统采集的波动性能量削峰后平衡为稳定输出能量。能量利用系统则是将经过储热系统平衡后的能量进行利用,实现稳定发电。

目前能量收集模块和能量利用模块已经具有较好的发展基础,可通过工业化生产完成其功能。但是含水层储层模块中能量的转换机理以及能量注入后对开采井温度的影响规律尚不明确。因此需要针对含水层储能模块开展温度-渗流耦合分析,探究含水层地层的采热效果。

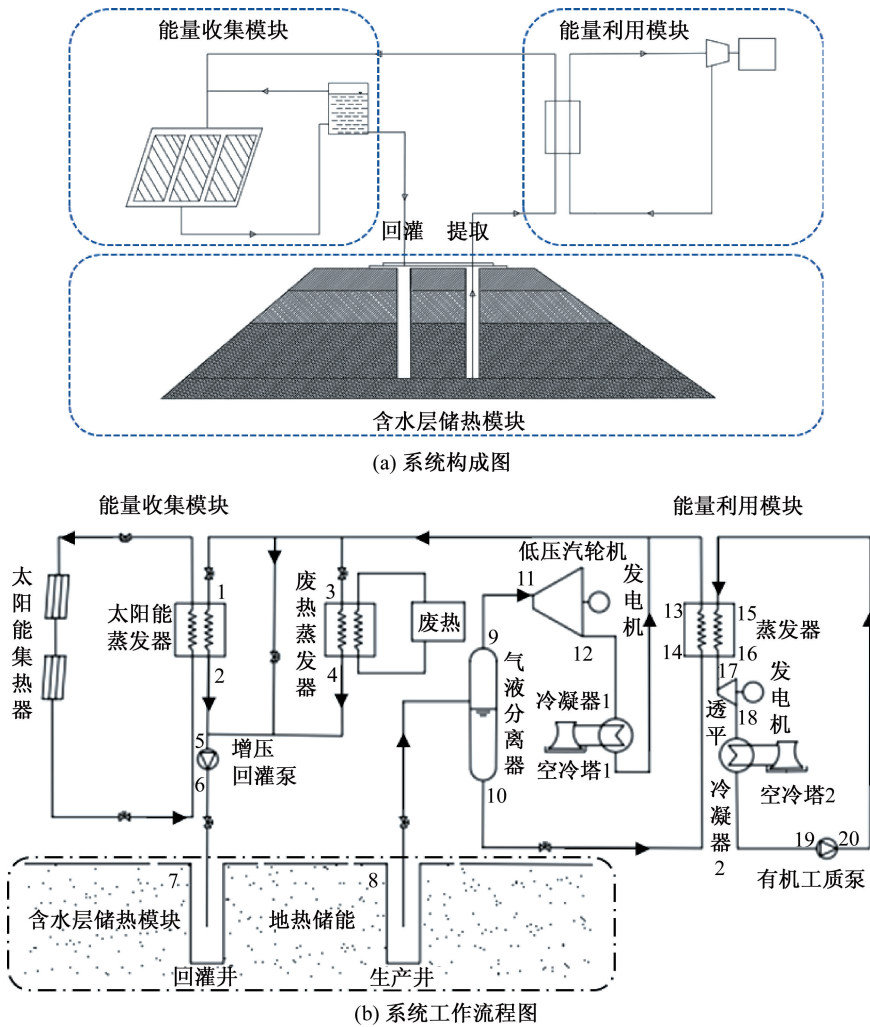


图 1 基于深部含水层储热系统的“地热+”多能互补系统

Fig. 1 “Geothermal+” multi-energy complementary system based on deep aquifer thermal storage system

## 2 模型建立

### 2.1 渗流-温度耦合数学模型

对渗流-温度耦合数学模型作出以下假设:

(1) 地层岩体的物理力学性质为各向同性, 各个参数取其等效数值;

(2) 地下水渗流满足达西定律, 流动过程中不可压缩、无相变;

(3) 由于含水层系统具有良好的聚热和储热机制, 所以本模拟中假设地热水在采灌过程中无能量损失、无化学反应, 地下换热只存在热传导和热对流。

基于上述假设, 建立本模拟的数学模型。地层内流体的流体渗流方程满足连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho_w \varepsilon_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w v_w) = Q \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_s$  表示孔隙率;  $v_w$  表示储层中达西流速,

m/s;  $Q$  表示源汇项。根据达西定律,  $v_w$  可由式(2)描述:

$$v_w = -\frac{K}{\mu} (\nabla p - \rho_w g) \quad (2)$$

式中:  $K$  是岩石的渗透率, md;  $\mu$  是流体粘滞系数, Pa · s;  $p$  是压强, MPa;  $g$  是重力加速度, N/kg。

地层内的温度满足能量守恒方程:

$$\frac{\partial(H_t)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_w h_w \mu_s) + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_{\text{heat}} \quad (3)$$

式中:  $h_w$  是液相的焓, J/m<sup>3</sup>;  $\lambda$  是热传导系数, W/m · K;  $Q_{\text{heat}}$  是热量的源汇项,  $H_t$  是系统中总的焓, J/m<sup>3</sup>; 包括岩石和流体两部分, 可由式(4)描述:

$$H_t = \varepsilon_s \rho_w h_w + (1 - \varepsilon_s) \rho_R C_{PR} T \quad (4)$$

式中:  $\rho_R$  是岩石的密度, kg/m<sup>3</sup>,  $C_{PR}$  是岩石的比热容, J/(kg · °C)。

## 2.2 数值模型

针对含水层储能系统建立渗流-温度耦合地热模型。通过 CMG 软件建立如图 2 所示的地层模型,CMG 软件是一款成熟的油气藏模拟软件,该软件的 STARS 模型可高效模拟地层中的温度和渗流特征。地层模型尺寸为 120 m×120 m×300 m。模型包含 2 口井,其中 1 口为回灌(注入)井,1 口为产水(采热)井。井底埋深为 1 596 m,井间距为 50 m。

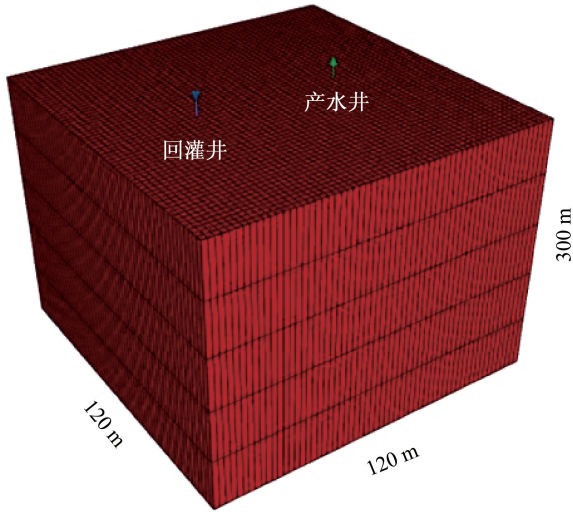


图 2 三维地层模型

Fig. 2 3D model of formation

模型四周设置为无流动边界。模型的井模型采用压力边界,注入压力最大值为 31.92 MPa,产水井井底压力为 15.66 MPa。设置模型初始值及上、下温度边界,四周设置为绝热边界,工作介质为水,储层温度 92 ℃。地热地质模型参数数值采用的是黄旭等<sup>[18]</sup>文献中的地质数据。模型计算参数的选取如表 1 所示,其中岩石主要以白云岩为研究对象。

回灌水温度的补充热量来源于光热和工业废热。由于光热等能量具有波动性,则回灌水温度具有波动性。经过地层的平衡后,能量最终平衡。因此,波动能量可以折算为稳定能量。模拟中设置回灌水的温度条件,而每天的温度波动在整个模拟尺度上是很小的,因此可以根据总热量将波动温度折算为一个稳定的注水温度。白天的能量

来源包括光热和工业废热,而夜晚的热量来源主要是工业余热,热量可通过式(5)进行折算。假定白天时间为 8 h,白天时间段内回灌水温度为 90 ℃;夜间时间为 16 h,夜间时间段内回灌水温度为 60 ℃,可以将温度折算为 70 ℃。经过该折算,在模拟中采用稳定的注入温度代替波动温度。

$$T_a = \frac{\sum T_i t_i}{\sum t_i} \quad (5)$$

式中, $T_a$  为折算后的平衡温度,即模拟中采用的回灌温度,℃; $T_i$  为第  $i$  时间段内的实际回灌温度,℃; $t_i$  为第  $i$  时间段的持续时间,h。

## 3 含水层储热系统的温度演化规律

### 3.1 地层温度分布与演化规律

经过含水层储热系统的平衡,波动性的能量最终可输出为稳定能量。而能量的稳定与地层温度密切相关。为了探究本工艺的适用性,分别开展多能互补回灌(70 ℃)和常规地热回灌(30 ℃)工况下的数值模拟,结果如图 3 所示。其中 30 ℃ 工况是以常规回灌模拟传统地热田开发为背景。由图可知,在常规回灌中,地层温度云图最初表现为围绕井周的“圆形”温度降低,但由于回灌井与产水井之间存在流体流动,因此温度云图中出现了“气球形”区域(蓝色区域)。最终,底层的温度逐渐靠近注液温度。此结论与万志军等<sup>[19]</sup>开展的数值计算结果类似,这表明本文的计算结果具有可靠性。

由图 3 可知,30 ℃ 低温常规回灌条件下,1 年后,回灌水产生的冷锋面未到达产水井位置,热储层出现“圆形”温降区。15 年后,回灌水冷锋面已经到达产水井位置,热储层开始出现“气球形”温降区。30 年后,回灌水冷锋面降低了产水井周围温度,热储层的温降区变大。70 ℃ 高温回灌条件下,1 年后,热储层也出现“圆形”温降区,但温降区的面积较小。15 年后,热储层出现的“气球形”温降区面积比低温回灌方式下温降区面积较小。30 年后,回灌水冷锋面影响了产水井周围的温度,热储层的“气球形”温降区变大,但此方式下的“气球

表 1 数值模型的地层研究参数

Tab. 1 Formation research parameters of numerical models

岩石密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	岩石热导率/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	岩石比热容/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$ )	孔隙率
2 870	4.9	1 900	0.033
渗透率/md	水密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水比热容/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$ )	
22	1 000	4 200	

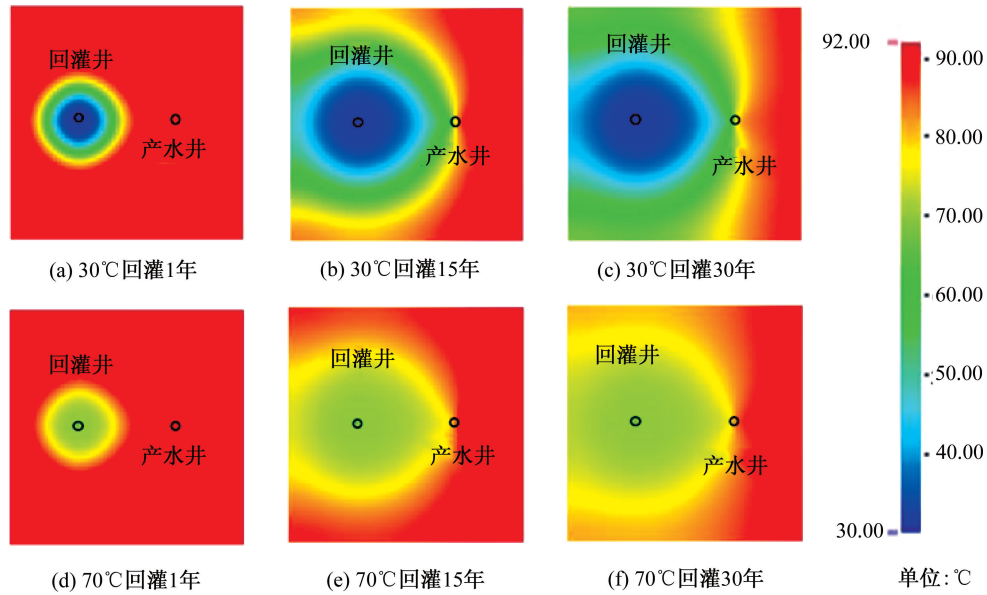


图 3 热储温度场变化云图

Fig. 3 Cloud chart of geothermal reservoir temperature field variation

形”温降区面积小于低温回灌方式下的温降区面积。高温回灌条件下,地层温度能够保持。地层温度保持高温有两方面的意义:第一是高温地层中,波动性的热量注入地层后可以快速平衡;第二是地热系统温度保持在高位,则其使用年限可以延长。此外还应注意,高温回灌条件相较于常规回灌条件,热储层的温度梯度更小,有利于热储层促使波动能量平衡。

### 3.2 产水井温度变化规律

产水井温度是地热利用和开发效果的最直接表征因素。高温回灌方式下,产水井生产周期的井底温度演化如图 4 所示。由图可知,产水井的温度曲线可分为三个阶段:平稳阶段、快速下降阶段和趋于平缓阶段。结合图 3 可知,在开发初期,回灌井的流体尚未到达产水井,此时生产井中的水主要来自于原始地层,产水井温度与原始地层温度保持一致,该阶段温度曲线保持平衡,即平稳阶段。随着回灌水在地层中的流动,由于其温度低于原始地层,因此回灌水在地层的流动会导致地层温度降低。当回灌水到达生产井时,地层温度快速降低,即快速下降阶段。随着回灌时间增长,回灌水已经将渗流路径上的地层温度逐步降低到稳定值,此时地层向回灌水传递的热量和回灌水带走的热量趋于平衡,此时产水井的温度则逐渐趋于稳定,即趋于平缓阶段。最终地层可对波动能量实现均衡削峰,实现基于含水层地热系统的多能互补利用模式。

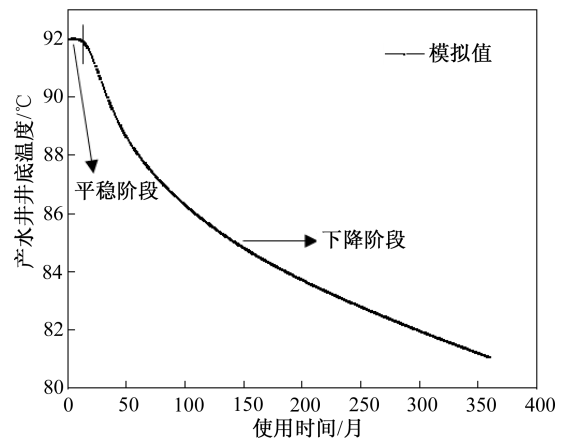


图 4 产水井井底温度变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curve on the bottom of production wells

## 4 产水井温度的影响因素分析

基于含水层储层的多能互补系统中的温度时空演化在模拟中可视为高温回灌下地层温度的演化规律。由上述可知,产水井的温度是表征地层稳定性的关键因素。而高温回灌的储热效果受多种因素共同作用,其中生产参数是人为可控因素,探究各生产参数对产水井温度的影响可以为多能互补系统的运营提供理论指导。因此本节将分析设计和生产参数对产水温度的影响,在进行光热-地热耦合储热采灌设计时,考虑回灌温度、井底压差、井间距等因素对储热效果的影响。

### 4.1 回灌温度对生产井水温的影响

为了探究回灌温度对生产井水温的影响规律,

设计了5种不同回灌温度的方案:30℃、40℃、50℃、60℃和70℃。其他参数与表1保持一致。计算得到随时间变化的产水井温度曲线,如图5所示。由图可知,回灌温度对平稳阶段的持续时间差异影响不大。在回灌水到达产水井前,产水井温度处于平稳阶段。当回灌水到达产水井时,产水井温度开始下降,平稳阶段结束。本研究中只涉及到温度的变化,当井底压差与井间距不变时,不同温度回灌水的渗流速度相同(不考虑温度导致的流体粘度变化),各方案中回灌水到达产水井所需的时间大致相同。因此,回灌温度对平稳阶段持续时间基本没有影响。

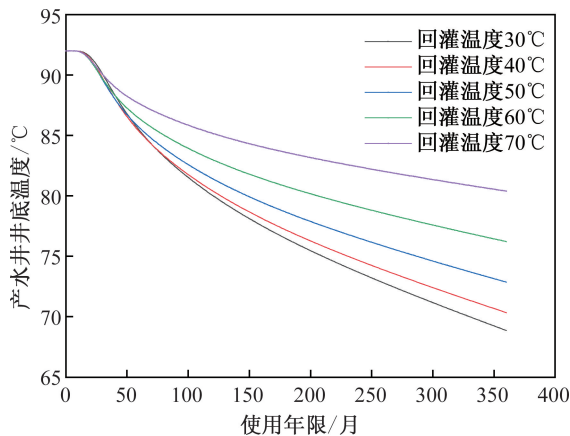


图5 回灌温度对产水井井底温度的影响

Fig. 5 Influence of reinjection temperature on the bottom hole temperature of production wells

回灌水到达产水井后,产水井温度开始下降。30℃回灌条件下,产水井温度下降速率最快,生产30年后,井底温度为68.86℃。随着回灌温度的增加,产水井温度下降速率逐渐变缓。当回灌温度为70℃时,温度曲线下下降最慢,生产30年后,井底温度为80.39℃。回灌水在渗流过程中,回灌温度越高,其与储层温度的温差越小,回灌水与储层的热交换越低,储层温度对回灌水的热补充减少。因此,随着回灌温度的提高,产水井井底水温降低幅度在变小。

为了分析30年后回灌温度对产水井水温的影响规律,将产水井井底温度随回灌温度变化的曲线总结于图6。结果显示,随着回灌温度的提高,30年后产水井温度呈非线性增长,产水井温度分别为68.86℃、70.34℃、72.86℃、76.22℃、80.39℃。温度差值为不同回灌温度下30年后产水井温度间的差值,其分别为1.48℃、2.52℃、3.36℃、4.17℃。在70℃高温回灌方式作用30年后,生产井水温(80.39℃)依旧大于有机朗肯循环法

(ORC)法发电的最低温度(80℃)。以上的数据显示,高温回灌相对于低温回灌,有助于减缓储层温度降低,延长了地热井的使用年限。总之,高温回灌有利于延缓产水井的温度下降速率。回灌温度决定了注入地层的的热量,影响地层的温度场变化,继而影响生产井产水温度。

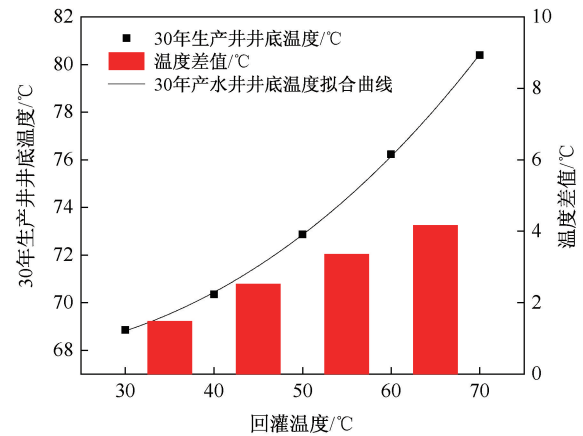


图6 回灌温度对30年后产水井井底温度的影响效果

Fig. 6 Effect of reinjection temperature on the bottom temperature of production wells 30 years later

#### 4.2 井底压差对生产井水温的影响

井底压差是回灌井井底压力与产水井井底压力的差值。井底压差是两口井之间流体流动的驱动力,决定了流体的渗流速度。流体渗流速度会影响流体与地层的热交换时长,因此会对温度造成较大影响。为了研究井底压差对产水井温度的影响,设置了5种井底压差方案(3、6、9、12、15 MPa)。通过计算得到不同井底压差条件下产水井水温随时间的变化情况,如图7所示。

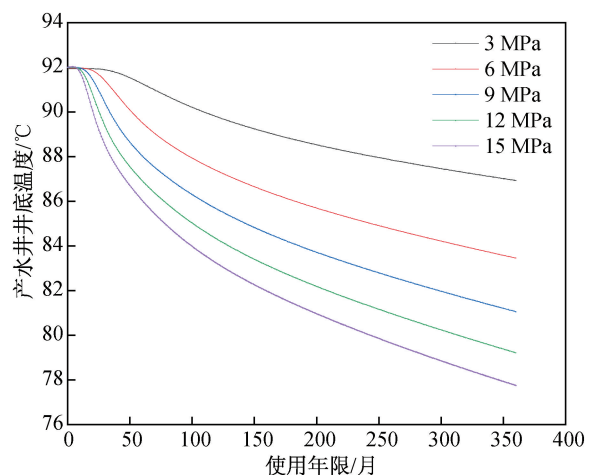


图7 井底压差对产水井井底温度的影响

Fig. 7 Influence of bottom hole pressure difference on the bottom temperature of production wells

由图 7 可知,井底压差越大,平稳阶段的持续时间越短。上文提到,曲线的平稳阶段是回灌水未到达产水井前的时间段。根据达西定律可知,随着井底压差的增加,渗流速度随之增大,回灌水到达产水井的时间缩短。因此,井底压差增加导致的渗流速度加快是引起平衡阶段持续时间缩短的根本所在。

回灌水到达产水井后,产水井温度开始下降。3 MPa 回灌条件下,产水井温度下降速率最慢,生产 30 年后,井底温度为 86.93 °C。随着井底压差的增加,产水井温度下降速率逐渐变大。当回灌温度为 70 °C 时,温度曲线下降最快,生产 30 年后,井底温度为 77.75 °C。总之,井底压差越大,产水井温度下降越快,产水井温度越低。随着井底压差增加,渗流速度加快,这会从两方面影响产水井的温度:第一,渗流速度加快导致回灌水在地层中停留时间缩短,这意味着水和地层的换热时间缩短,进而导致产水井温度降低;第二,渗流速度加快导致相同时间内更多的流体流经地层,这意味着流体可从地层中带走更多热量,继而导致整个地层温度降低。地层温度降低后其对回灌水的热交换能力降低,最终导致生产井的水温降低。

图 8 分析了 30 年产水井井底温度随回灌温度变化的规律。结果显示,随着井底压差的增大,30 年后产水井温度分别为 86.93 °C、83.46 °C、81.05 °C、79.22 °C、77.75 °C。温度差值为不同井底压差下 30 年后产水井温度间的差值,其分别为 3.47 °C、2.41 °C、1.83 °C、1.47 °C。30 年后产水井温度呈非线性降低,产水井温度差值逐渐减小。井底压差越大,产水井水量越多,热储层温度的降低速度越快。因此,选择合适的井底压差方案对于含水层储层多能互补系统的生产需求是十分重要的。

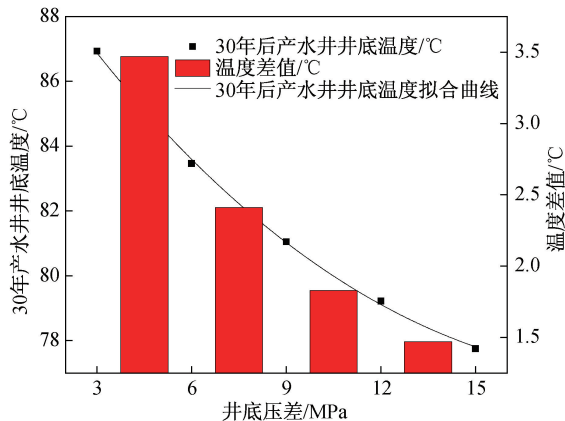


图 8 井底压差对 30 年后产水井井底温度的影响  
Fig. 8 Effect of bottom well pressure difference on the water temperature of production wells 30 years later

### 4.3 井间距对生产井水温的影响

合理的井间距,既有利于保证地热井的使用年限,又能保证尽快地利用光热加热的高温水。为了探究井间距对生产井水温的影响,本文设置了不同的井间距参数,设计了 5 种试验方案(30、40、50、60、70 m)。通过开展数值模拟计算,得到不同井间距对产水井水温随时间变化规律分析结果,如图 9 所示。

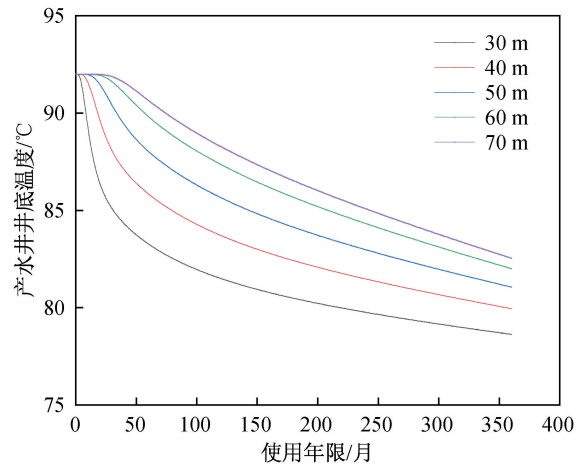


图 9 井间距对产水井井底温度的影响曲线  
Fig. 9 Influence of well spacing on the bottom temperature of production wells

由图 9 可知,随着井间距增大,平稳阶段的持续时间延长。当回灌温度与井底压差不变时,回灌水的渗流速度不变,井间距越大,回灌水到达产水井所需的时间越长。因此,井间距越大,产水井温度平稳阶段持续时间越长。回灌水到达产水井后,产水井温度开始下降。30 m 井间距条件下,产水井温度下降速率最快,生产 30 年后,井底温度为 78.63 °C。随着井间距的增大,产水井温度下降速率逐渐变慢。当井间距为 70 m 时,温度曲线下降最慢,生产 30 年后,井底温度为 82.01 °C。综上,随着井间距增加,产水井温度下降幅度变慢,30 年后的井底温度更高。在地层中,流体的主要流动区域为回灌井与产水井之间的地层。井间距增加则流体波及面积增加,这意味着流体和地层之间的换热范围增加。换热范围增加一方面可以延长流体流动路径,从地层中吸收更多热量,另一方面也意味着地层可提供的有效热源在增加。因此,适当增加井间距可有效延缓产水井温度的下降。

为了分析井间距与产水井水温降低的关系,将 30 年后产水井井底温度随回灌温度变化的曲线总结于图 10。随着井间距的增大,30 年后产水井温度分别为 78.63 °C、79.95 °C、81.06 °C、82.01 °C、

82.54℃,温度差值为不同井间距下30年后产水井温度间的差值,其分别为1.32℃、1.10℃、0.95℃、0.53℃。随着井间距增大,30年后产水井井底温度呈非线性增长,产水井温度差值逐渐降低。应该注意的是,本文提出的多能互补系统是在某一区域内广泛布局的,因此在某一区域内将采用井群布置。虽然增大井间距有利于延缓井底温度的降低,但井间距过大,则会降低该区域的布井密度。应综合考量井数减少导致的总体能量产出降低和温度降幅之间的关系。

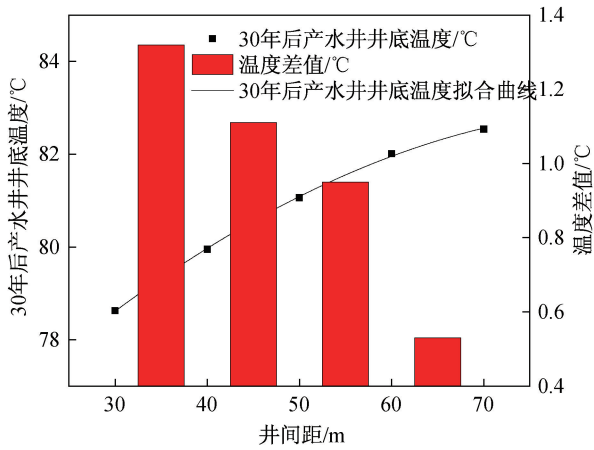


图10 井间距对30年后产水井井底温度的影响效果  
Fig. 10 Effect of well spacing on the bottom temperature of producing wells 30 years later

### 5 产水井温度影响因素的响应面法分析

由于回灌温度、井间距、井底压差和使用年限等因素对地热储层储热效果有显著影响,因此考虑四因素变量来进行响应变量分析。采用 Design-Expert 软件数据进行设计分析。设置回灌温度、井间距、井底压差和使用年限作为自变量,30年后产水井井底温度为响应值,进行四因素三水平响应面试验。试验因素及水平如表2所示,响应面试验设计组合及结果见表3。

表2 试验因素及水平

Tab. 2 Test factors and levels

水平	回灌温度 A/℃	井间距 B/m	井底压差 C/MPa	使用年限 D/a
-1	30	30	5	10
0	50	50	10	20
1	70	70	15	30

利用 Design-Expert 软件进行二次多元回归拟合,得到描述产水井井底温度(Y)与自变量回灌温

度(A)、井间距(B)、井底压差(C)和使用年限(D)的二次多项回归拟合方程:

$$Y = 70.24 - 0.20A + 0.96B - 2.00C - 0.61D - 0.01AB + 0.02AC + 0.01AD - 0.01BC - 0.01BD + 0.01CD + 0.01A^2 - 0.01B^2 + 0.01C^2 + 0.02D^2$$

表3 响应面试验设计及结果

Tab. 3 Response surface test design and results

序号	因素				产水井温度/℃
	回灌温度 A/℃	井间距 B/m	井底压差 C/MPa	使用年限 D/℃	
1	50	50	10	20	76.52
2	50	50	10	20	76.52
3	30	50	10	10	80.10
4	50	30	15	20	67.33
5	50	50	10	20	76.52
6	50	50	5	10	86.20
7	30	70	10	20	80.73
8	50	70	5	20	87.37
9	70	50	10	10	85.20
10	70	50	15	20	80.09
11	50	30	10	30	68.06
12	70	30	10	20	79.36
13	50	70	10	10	87.08
14	50	50	10	20	76.52
15	50	70	15	20	76.26
16	30	30	10	20	64.11
17	50	50	10	20	76.52
18	70	70	10	20	84.88
19	70	50	5	20	85.94
20	50	50	5	30	79.97
21	50	50	15	30	67.94
22	50	30	10	10	73.69
23	30	50	10	30	68.90
24	30	50	5	20	81.07
25	30	50	15	20	68.27
26	50	70	10	30	76.51
27	70	50	10	30	80.41
28	50	30	5	20	75.25
29	50	50	15	10	78.15

对上述回归方程进行方差分析,结果见表4。对响应面模型进行方差分析,响应曲面模型的  $P < 0.0001$ ,说明拟合的模型是极显著的,  $R^2 = 0.9891$ ,取值越接近1,说明上述回归拟合方程越合理。由方差分析表中F值的大小可知,在单因素影响下,4个因素对产水井水温影响程度大小关系为:井间距>井底压差>回灌温度>使用年限。在多因素耦合作用下,交互作用中影响最大的为回灌温度与井间距。在实际的生产过程中,要首先考虑布置

表4 响应面法方差分析表

Tab. 4 Response surface methodology analysis of variance

方差源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1 161. 44	14	82. 96	68. 51	<0. 000 1	**
A	231. 44	1	231. 44	191. 13	<0. 000 1	**
B	352. 08	1	352. 08	290. 75	<0. 000 1	**
C	337. 08	1	337. 08	278. 36	<0. 000 1	**
D	152. 80	1	152. 80	123. 18	<0. 000 1	**
AB	30. 80	1	30. 80	25. 44	0. 000 2	—
AC	12. 08	1	12. 08	9. 97	0. 007 0	—
AD	10. 27	1	10. 27	8. 48	0. 011 4	—
BC	2. 59	1	2. 59	2. 14	0. 165 5	—
BD	6. 10	1	6. 10	5. 04	0. 041 5	—
CD	0. 84	1	0. 84	0. 69	0. 419 7	—
A <sup>2</sup>	19. 78	1	19. 78	16. 33	0. 001 2	—
B <sup>2</sup>	2. 04	1	2. 04	1. 69	0. 214 9	—
C <sup>2</sup>	0. 86	1	0. 86	0. 71	0. 414 0	—
D <sup>2</sup>	0. 17	1	0. 17	0. 14	0. 710 4	—
残差	16. 95	14	1. 21	—	—	—
失拟项	16. 95	10	1. 70	—	—	—
误差项	0. 000	4	0. 000	—	—	—
总和	1 178. 39	28	—	—	—	—

合理的井间距,其次考虑设置合适的井底压差,以及采用更高温度的热水回灌,以实现高温回灌下地热储层的良好利用效果。

## 6 结论

1)采用含水层储层的多能互补系统,可以延缓地层的温度降低速率,延长地热的开采年限,提升含水层储层对波动性能量的平衡效果。

2)回灌温度对产水井温度平稳阶段的影响可以忽略,但对产水井温度降低阶段具有显著影响。随着回灌温度的提高,产水井井底水温降低幅度变小。

3)井底压差影响产水井水温的平稳阶段和下降过程。井底压差越大,产水井水温平稳阶段的时间越短,产水井温度下降越快,产生井温度越低。在设计中应综合考虑井底压差对温度降幅和整体产水量的影响。

4)井间距影响产水井水温的平稳阶段和下降过程。随着井间距增大,平稳阶段的持续时间延长,产水井温度下降幅度变慢,30年后的井底温度更高。在设计中应综合考量井数减少导致的总体能量产出降低和温度降幅之间的关系。

5)采用响应面分析方法,探究出单因素及多因素耦合作用对产水井水温的影响。单因素影响

下,4个因素对产水井水温影响程度大小关系为:井间距>井底压差>回灌温度>使用年限。在多因素耦合作用下,交互作用中影响最大的为回灌温度与井间距。

## 参考文献:

- [1] 闫强,于汶加,王安建,等. 全球地热资源述评[J]. 可再生能源, 2009, 27(6): 69-73.
- [2] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
- [3] 赵媛,赵慧. 我国太阳能资源及其开发利用[J]. 经济地理, 1998(1): 56-61.
- [4] 黄永辉,杨俊生,朱传庆,等. 深部含水层储热系统的数值模拟研究[J]. 地球学报, 2023, 44(1): 239-247.
- [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] SCHOUT G, DRIJIVER B, GUTIERREZ-NERI M, et al. Analysis of recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage: A rayleigh-based method[J]. Hydrogeology Journal, 2014, 22(1): 281-291.
- [7] BIRDSELL D T, ADAMS B M, SAAR M O. Minimum transmissivity and optimal well spacing and flow rate for high-temperature aquifer thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2021, 289: 116658.
- [8] BONYADI N, JOHNSON E, BAKER D. Technoecono-

- mic and exergy analysis of a solar geothermal hybrid electric power plant using a novel combined cycle[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 156: 542-554.
- [9] LEE K S. A review on concepts, applications, and models of aquifer thermal energy storage systems[J]. *Energies*, 2010, 3(6): 1320-1334.
- [10] COLLIGNON M, KLEMETS DAL Q S, MQYNER O, et al. Evaluating thermal losses and storage capacity in high-temperature aquifer thermal energy storage (ATES) systems with well operating limits: Insights from a study-case in the Greater Geneva Basin, Switzerland[J]. *Geothermics*, 2020, 85: 101773.
- [11] 王侃宏, 谷铁柱, 桂林平, 等. 蓄热技术在太阳能-地源热泵中的应用及模拟[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2008, 25(1): 63-67.
- [12] 刘肖, 谭现锋, 张丰, 等. 河北博野某地热系统现场阻垢试验及阻垢效果评价[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 39(3): 83-92.
- [13] 刘帅, 刘志涛, 冯守涛, 等. 采暖尾水回灌对砂岩热储地温场的影响——以鲁北地区为例[J]. *地质评论*, 2021, 67(5): 1507-1520.
- [14] 马捷, 王明育, 戴斌. 地下含水层的储能和过程特性的分析[J]. *华北电力大学学报*, 2004, 36(6): 58-60.
- [15] 邹鹏飞, 王彩会, 杜建国, 等. 地热水系统采灌方案模拟优化研究——以苏北农村清洁能源供暖示范区为例[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(4): 59-72.
- [16] 单丹丹, 闫铁, 李玮, 等. 单裂隙热储热流耦合数值模拟分析[J]. *当代化工*, 2020, 49(4): 716-719+723.
- [17] 徐琼辉, 龚宇烈, 骆超, 等. 太阳能-地热能联合发电系统研究进展[J]. *新能源进展*, 2016, 4(5): 404-410.
- [18] 黄旭, 沈传波, 杜利, 等. 沧县隆起中段献县凸起和阜城凹陷岩溶型地热资源特征[J]. *现代地质*, 2021, 35(4): 997-1008.
- [19] 万志军, 张源, 师鹏, 等. 煤-热共采模式下地热水非常规开采数值模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(3): 1115-1125.

(责任编辑 唐彦彦)

(上接第 84 页)

3) 对于中深层 U 型地埋管换热系统的设计, 选取地质条件较好的地区可以有效减少竖直管段与水平管段的总长, 提高系统的经济性。

4) 回归模型表明土壤导热系数、竖直管长、地温梯度、水平管长与恒温层温度 5 个因素即可确定中深层 U 型地埋管换热量, 5 个因素对于最大稳定换热量有正向影响, 模型对最大稳定换热量的预测值与模拟值最大相对误差为 -9.88%, 平均误差为 6.76%。

#### 参考文献:

- [1] LUO Y, XU G, CHENG N. Proposing stratified segmented finite line source (SS-FLS) method for dynamic simulation of medium-deep coaxial borehole heat exchanger in multiple ground layers[J]. *Renewable Energy*, 2021, 179: 604-624.
- [2] 孔彦龙, 陈超凡, 邵亥冰, 等. 深井换热技术原理及其换热量评估[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(12): 4741-4752.
- [3] 刘洪涛, 刘俊, 王洋浩, 等. 设计参数对中深层地埋管换热器长期换热性能的影响研究[J]. *可再生能源*, 2021, 39(12): 1594-1601.
- [4] 王伟. 深层 U 型地热井仿真模拟及取热性能研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(7): 477-484.
- [5] WANG N, YU M, ZHANG X, et al. Structural optimization of deflector within air-water direct contact tank based on uniform design[J]. *Energy and Built Environment*, 2022, 3(2): 190-200.
- [6] 李霏霞, 曾声奎, 庞怡, 等. 均匀试验设计在无人机关键参数设计中的应用[J]. *火力与指挥控制*, 2010, 35(1): 122-125.
- [7] 王熔, 汤涛, 周辉, 等. GH4738 高温合金薄壁弧形零件切削参数优化[J]. *工具技术*, 2022, 56(12): 81-86.
- [8] 廖惊响. 地下水渗流作用下的地热换热器集群的温度场和设计研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2019.
- [9] 王雪. 中深层 U 型井下换热器热渗耦合传热性能研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- [10] 张育平, 刘俊, 王洋浩, 等. 中深层 U 型对接井取热能力影响因素显著性分析[J]. *可再生能源*, 2022, 40(11): 1473-1480.
- [11] 鲍玲玲, 王雪, 刘俊青, 等. 基于岩土纵向分层的中深层 U 型地埋管换热器取热性能研究[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(4): 1371-1378.
- [12] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 2017, 38(4): 449-450+134+451-459.
- [13] 刘晓燕, 赵军, 石成, 等. 土壤恒温层温度及深度研究[J]. *太阳能学报*, 2007(5): 494-498.
- [14] 方开泰. 均匀设计[J]. *战术导弹技术*, 1994(1): 55-65.
- [15] MILHOMME S, LARTIGAU J, BRUGGER C, et al. Bead geometry prediction using multiple linear regression analysis[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(1-2): 607-620.

(责任编辑 唐彦彦)