

# 集中式砂岩型热储地热资源开采井网优化与实践

李洪达<sup>1</sup>, 周宏<sup>2</sup>, 赵鹏飞<sup>3</sup>, 张吉昌<sup>2</sup>, 陈炫沂<sup>4</sup>, 郭光正<sup>5</sup>, 武少堃<sup>2</sup>

(1.冀东油田地热项目部,河北唐山063004; 2.辽河油田环境工程公司,辽宁盘锦124010;  
3.中煤西安设计工程有限责任公司,陕西西安710000; 4.吉林大学新能源与环境学院,吉林长春130012;  
5.唐山冀东地热能开发有限公司,河北唐山063004)

**摘要:**近年来人们对中深层砂岩型地热资源开发越来越重视,集中开采逐步成为常态。在集中式砂岩型地热井井群部署过程中,井距、井网不仅决定地热井多年后温度和水位变化,也影响着地热项目的寿命及经济性。文章以冀东曹妃甸新城 $2.3 \times 10^6 \text{ m}^2$ 地热供暖项目为例,研究了集中式砂岩型地热开采井网优化。在研究区地热勘查的基础上,利用采灌试验确定地热井开采量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 、回灌量为 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 。采用数值建模优化地热采灌井井距为450 m,地热采灌井井网按交错式排状部署。采用多井先导试验验证地热井开采量、回灌量的合理性,并制定地热井采灌运维制度,实现100%自然回灌。利用井群多年采灌生产数据建模,预测热储渗流场水位与温度变化。为规模化地热资源开发提供技术支持。

**关键词:**集中式地热井井群;中深层地热资源;砂岩型热储;井网优化;数值模拟

**中图分类号:**P634;TE249 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)04-0149-06

## Optimization and practice of well pattern for exploitation of geothermal resources in centralized sandstone thermal reservoir

LI Hongda<sup>1</sup>, ZHOU Hong<sup>2</sup>, ZHAO Pengfei<sup>3</sup>, ZHANG Jichang<sup>2</sup>,  
CHEN Xuanyi<sup>4</sup>, GUO Guangzheng<sup>5</sup>, WU Shaokun<sup>2</sup>

(1. Geothermal Project Department of Jidong Oilfield, Tangshan Hebei 063004, China;  
2. Environmental Engineering Company of Liaohe Oilfield, Panjin Liaoning 124010, China;  
3. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd, Xi'an Shaanxi 710054, China;  
4. College of New Energy and Environment, JiLin University, Changchun Jilin 130012, China;  
5. Tangshan Jidong Geothermal Energy Development Co., Ltd, Tangshan Hebei 063004, China)

**Abstract:** In recent years, people have paid more and more attention to the development of medium-deep sandstone geothermal resources, and centralized exploitation has gradually become the norm. In the deployment process of centralized sandstone geothermal wells, well spacing and well pattern not only determine the temperature and water level changes of geothermal wells after many years, but also affect the life and economy of geothermal projects. This paper takes the geothermal heating project with an area of  $2.3 \times 10^6 \text{ m}^2$  in Jidong Caofeidian Newtown as an example, the optimization of centralized sandstone geothermal exploitation well pattern is studied. On the basis of geothermal exploration in the study area, the exploitation volume of geothermal wells is  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  and the reinjection volume is  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ . Numerical modeling is used to optimize the well spacing of geothermal production and irrigation wells to 450m, and the well pattern of geothermal production and irrigation wells is arranged in staggered rows. Multi-well pilot test is used to verify the rationality of the production and reinjection volumn of the geothermal well, and the geothermal well production and irrigation operation and maintenance system is formulated to achieve 100% natural reinjection. The

收稿日期:2023-04-13; 修回日期:2023-06-23 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.020

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技攻关项目“地热资源开发利用关键技术研究”(编号:2021DJ5502)

第一作者:李洪达,男,汉族,1982年生,工程师,地质工程专业,主要从事地热开发工作,河北省唐山市路北区新华西道冀东油田第二科研办公区,jd\_lhd@petrochina.com.cn。

引用格式:李洪达,周宏,赵鹏飞,等.集中式砂岩型热储地热资源开采井网优化与实践[J].钻探工程,2023,50(4):149-154.

LI Hongda, ZHOU Hong, ZHAO Pengfei, et al. Optimization and practice of well pattern for exploitation of geothermal resources in centralized sandstone thermal reservoir[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):149-154.

water level and temperature changes for many years of the thermal reservoir seepage field are predicted by modeling the production data of the well group. It can provide technical support for large-scale geothermal resource development.

**Key words:** centralized geothermal wells; middle and deep geothermal resources; sandstone-type thermal reservoir; well pattern optimization; numerical simulation

## 0 引言

目前,地热资源开发利用已在世界范围内兴起,中国作为中低温地热资源丰富的国家<sup>[1]</sup>,地热直接利用处于世界前列。中深层砂岩型地热资源过去以零散开发为主,近年来由于其经济效益的优势,受到社会更为广泛的关注,特别是在双碳背景下,中深层砂岩地热资源利用发展迅速,开发方式逐步由零散向集中式过渡。在生产实践中地热开采井井距小易发生热突破,井距大不利于集中开发,经济效益低。

朱家玲等<sup>[2]</sup>以天津滨海新区塘沽地区(533 km<sup>2</sup>)馆陶组孔隙性地层为研究重点,利用数值模拟方法对地热井井距对孔隙型热储温度场及压力场的影响进行研究,基于井间距的模拟计算,并综合考虑对井回灌压力补偿作用和温度场的影响,建议孔隙型热储地热采灌井的间距不宜小于500 m。张红波<sup>[3]</sup>以东营凹陷中央隆起带地热田东营组和馆陶组下段热储为例,建立了地热资源可循环利用井网模式评价方法,通过井网模式评价,确定合理的采灌井距约为800 m。许多学者<sup>[4-8]</sup>以浅层地下水为例,利用数值模拟方法,研究了采灌井井距、井网部署、热突破、温度场等内容。

对井回灌试验的开采井与回灌井井距宜大于2倍的开采影响半径<sup>[9]</sup>。回灌井设计要求,井位布置应避免开采井和回灌井的井距过近,防止出现热突破<sup>[10]</sup>。地热供暖工程一般需要靠近居民聚集区,地面空间相对小,地热采灌井需要以丛式井方式布置,这样要求井底间距不能太大。所以,地热资源开采井网优化是一项非常重要的工作,关系到整个地热供暖工程的成败。

本文以冀东曹妃甸2.3×10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>地热供暖项目为实例(见图1),从资源勘查、采灌试验、井网优化、生产实践、模型预测等方面,详细阐述集中式中深层砂岩型地热开采井网优化与实践的过程,为未来规模化地热资源开采提供参考与借鉴。

## 1 模型理论与方法

建立水文地质概念模型、数学模型、三维水热耦



图1 研究区交通位置

Fig.1 Traffic location of the study area

合数值模型<sup>[11]</sup>。地下水流数学模型可表示如下:

水流运动控制方程采用连续性方程一般形式:

$$\mu_s \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: $\mu_s$ ——储水率, (m<sup>-1</sup>);  $h$ ——水头, m;  $t$ ——时间, d;  $x_i$ —— $i$ 方向距离;  $q_i$ —— $i$ 方向流速。

根据达西定律,  $q_i$ 可写作:

$$q_i = -k_{ij} f_\mu \left( \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} e^j \right) \quad (2)$$

式中: $k_{ij}$ ——渗透系数, m/d;  $f_\mu$ ——粘滞性方程;  $e^j$ ——方向向量;  $\rho$ ——流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_0$ ——参考温度条件下(15℃)流体密度, kg/m<sup>3</sup>。

密度与温度有关,其线性模型为:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = -\beta \frac{T - T_0}{T_0} \quad (3)$$

式中: $\beta$ ——热膨胀系数, 通常取10<sup>-4</sup> °C<sup>-1</sup>。

热量传输满足能量守恒,其控制方程可表示为:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) - C q_i \nabla T \quad (4)$$

式中: $C$ ——等效体积比热容, MJ·m<sup>-3</sup>·K<sup>-1</sup>;  $\lambda$ ——热传导系数, W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>。

等式左端代表热量随时间变化项,右端第一项为热传导控制下的热量传输、第二项为对流控制下的热量传输。

水流运动方程计算获得流速场,用于热量传递方程计算,进而获得三维温度空间分布及随时间演化过程。而温度场通过影响流体密度,引起密度流,

反馈于水流运动过程。

## 2 研究区热储层特征

冀东曹妃甸地处华北平原北部,构造位置位于渤海湾含油气盆地黄骅坳陷北部南堡凹陷的高尚堡构造带。新生界新近系馆陶组热储在全区广泛分布,为河流相沉积砂岩,单砂体厚度大,连通性好,见图2。岩性为灰白色不等粒细砂岩、中砂岩、砾岩,呈不等厚互层。砂岩成分以石英为主、长石次之,含少量暗色矿物,次圆状,分选好,泥质胶结,疏松,属于孔隙型热储。

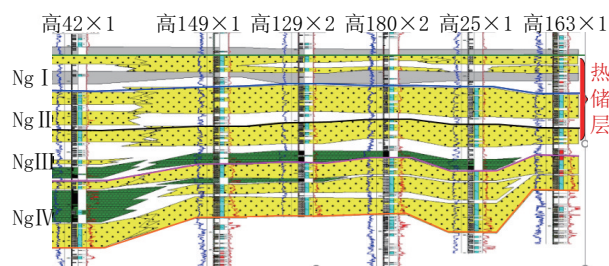


图2 研究区馆陶组地层对比

Fig.2 Stratigraphic correlation of Guantao Formation in the study area

通过测井解释及地震属性成果预测,热储顶板埋深1900~2100 m,底板埋深2100~2700 m,厚度120~300 m。储层平均孔隙度26%左右,平均渗透率630 md左右,属高孔高渗储层。本区恒温带深度为30 m,恒温层温度为13.5℃,地温梯度3.0~4.0℃/100 m,热储层温度70~110℃。地热水水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}$ 型,总矿化度为1.0~3.0 g/L。

通过对曹妃甸 $230\times 10^4\text{ m}^2$ 地热供暖项目采水区 $11.7\text{ km}^2$ 范围内馆陶组热储资源勘查、评价<sup>[12]</sup>,热能采出率按25%、热水可采率按20%计算<sup>[13]</sup>,采水区可用地热资源量为 $9.4\times 10^{16}\text{ J}$ ,可用地热水量为 $1.17\times 10^8\text{ m}^3$ 。项目年利用地热水量 $3.865\times 10^6\text{ m}^3$ ,地热资源可以满足该项目30年用热需求。

利用附近报废油井高129×2井、高149×1井改造为地热井。抽水试验测试最大稳定开采量为 $97\text{ m}^3/\text{h}$ ,井口出水温度75℃。使用Aquifertest软件求参<sup>[14]</sup>:热储层导水系数 $T=83.20\text{ m}^2/\text{d}$ ,渗透系数 $K=0.91\text{ m/d}$ ,弹性释水系数 $S=9.75\times 10^{-5}$ ,影响半径 $R=1274\text{ m}$ 。

## 3 集中式地热开采模式设计与优化

### 3.1 地热井井距优化

根据资源勘查结果,结合采灌试验资料,基于FEFLOW软件对地热采灌井距优化。设置1口开采井与1口回灌井,开采井开采量为 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 、回灌井回灌量为 $80\text{ m}^3/\text{h}$ ,井间距分别为300、400、500、600和700 m,一年中开井136 d,闭井229 d,进行周期30年的数值模拟,得到不同井间距下水头和温度变化趋势,见图3。

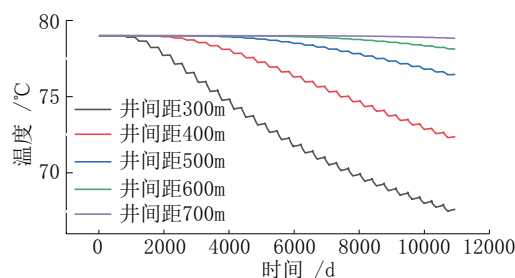


图3 运行30年开采井温度随井间距变化曲线

Fig.3 Variation curve of production well temperature with well spacing in 30 years of operation

进行为期30年的开采之后,当井间距为600~700 m时,储层温度下降幅度 $\geq 1^\circ\text{C}$ ;当井间距为500~600 m时,储层温度下降幅度 $\geq 2.5^\circ\text{C}$ ;当井间距为400~500 m时,储层温度下降幅度 $\geq 6.5^\circ\text{C}$ ;当井间距为300~400 m时,储层温度下降幅度 $\geq 11.5^\circ\text{C}$ 。当井距为450 m时,推测储层温度下降幅度 $\geq 4^\circ\text{C}$ 。

根据地热井抽水试验、采灌试验、井距优化对比,结合地热井钻井轨迹设计、地面钻井平台位置等因素,最后确定地热井井距为450 m。

### 3.2 井网结构设计

井群井网部署首先要确保井群地热流场压力平衡。根据热储层连通性、井组对应关系、单井采灌能力,使每一区块地下采灌量要达到平衡,整体井群地热流场压力平衡。其次,开采井和回灌井不互换,回灌井一旦确定下来,应长期坚持作为回灌井,不能轻易改变为开采井,因为经过试验该区域回灌后的地热尾水温度需要经过长时间热量交换后,温度才能逐渐恢复。

油井面积注水方式,根据采油井和注水井之间的相互位置及构成井网形状的不同,可分为四点法、五点法、七点法、九点法、歪七点法面积注水和正对式与交错式排状注水<sup>[15]</sup>。增强地热系统中,井网布

置方式有三点法、五点法、七点法和九点法等<sup>[16]</sup>。结合研究区地热地质、地温场、地热井等特征,借鉴油井开发面积注水方式,本次研究井群井网部署采用开采井与回灌井交错排状分布。

地热井开采量  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 、回灌量  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ ,地热开采井与回灌井数量比设计为 4:5,地热井井距 450 m,根据地热供暖项目用热总需求量设计地热开采井 16 口、回灌井 20 口、备用井 3 口,共计 39 口,开采与回灌层位均为馆陶组热储。井位见图 4。

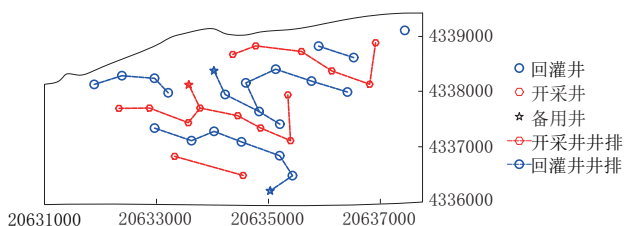


图 4 集中式砂岩地热井井群部署

Fig.4 Deployment of centralized sandstone geothermal well group

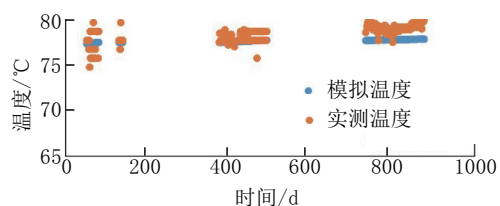
### 3.3 采灌生产实践与分析

在项目建设前期,首先建设了 6 口井的先导试验井。从钻井、完井、洗井、采灌试验、生产运行都投入大量研究工作,收到良好效果,为后期生产提供重要保证。如,钻井泥浆、固井方式、筛管类型、洗井方式等合理高效,确保地热井完井质量、防砂效果良好,开采量 ( $100 \text{ m}^3/\text{h}$ )、回灌量 ( $80 \text{ m}^3/\text{h}$ ) 都达到设计要求,并形成全链条可复制地热钻完井工艺技术。利用 6 口地热井开展生产性抽水试验、回灌试验,制定出合理的回扬周长、回扬量及运行维护制度,为整个地热工程长期稳定运行提供了保障,并形成合理的砂岩地热井采灌技术。

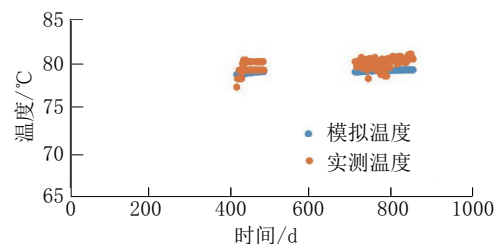
正式生产后,一直按照本文确定的井距、井网执行,并按照合理的采灌制度运行维护。到目前,地热开采井、回灌井 4 个供暖期运行平稳,开采量、回灌量、水温、水位等没有发生大的变化,连续 4 年实现 100% 同层自然回灌。

基于 2018~2021 年地热开采周期内水位和水温动态监测数据对数值模型进行校正。经过对模型各参数的调整,模拟得到的温度、水位数值和变化趋势与实际情况基本符合,拟合效果较好,见图 5、图 6。

经过对模型拟合调整,确定了模型的参数,进而得到了 2018~2021 采灌 3 年 (883 d) 后研究区温度、



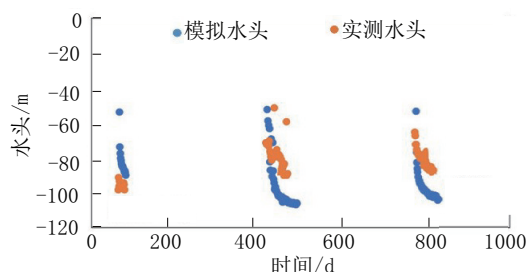
(a) 高热 5-2 温度拟合



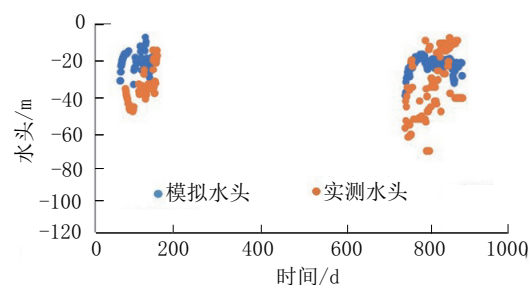
(b) 高热 5-4 温度拟合

图 5 部分井温度拟合

Fig.5 Temperature fitting for some wells



(a) 高热 6-5 温度拟合



(b) 高热 7-5 温度拟合

图 6 部分井水位拟合

Fig.6 Water level fitting for some wells

水位的变化特征,见图 7。

### 3.4 未来水热演化趋势分析

整理 2021 年以后每年度供暖采灌方案,得到了完整运行 1 年的各井采灌数据,将其重复扩展至 30 年,作为预测模型的采灌方案。将模拟获得的 2021 年水头分布和温度场分布作为预测模型的初始水头和初始温度条件。

在给定开采方案下,通过数值模拟得到了在开



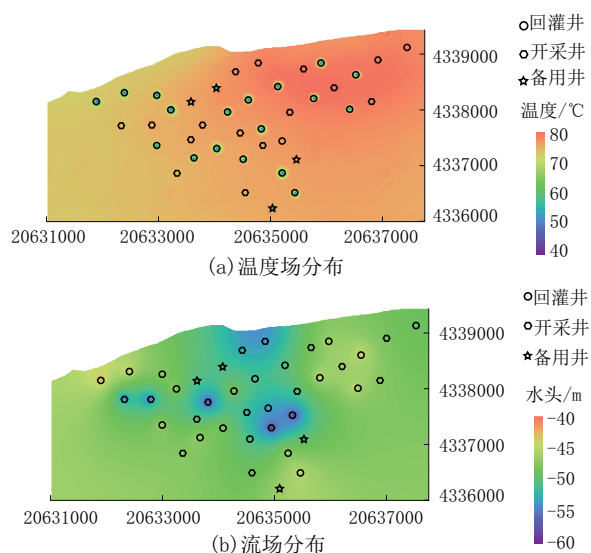


图7 模拟区温度场、流场分布

Fig.7 Distribution of temperature field and flow field in simulation area

采井和回灌井运行时以及所有井均关闭时的水头分布图,见图8。

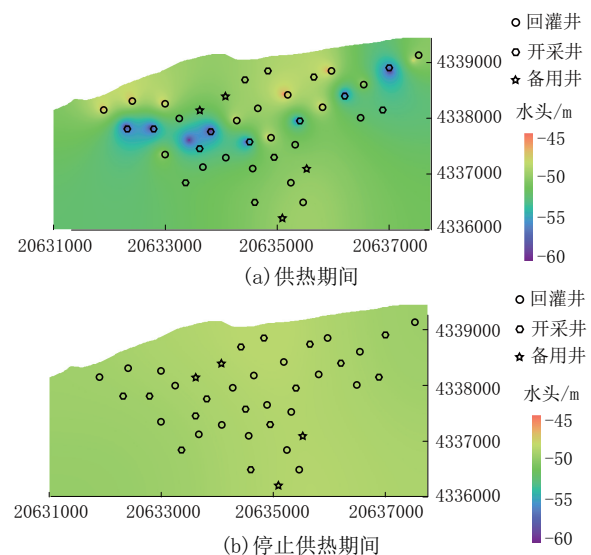


图8 运行20年时不同工况水头分布

Fig.8 Water head distribution under different working conditions during 20 years of operation

由图8(a)可以看出,在供热期间,回灌井区域水头较高,开采井区域水头较低,这是由于灌入低温水之后,回灌井区域的水位升高,开采井区域由于大量开采,四周的流体无法迅速得到补给,形成小规模降落漏斗(最大范围约300 m)。由图8(b)可以看出,在停止供热期间,受回灌井与开采井之间水头差

驱动,流体从水头高的区域流向水头低的区域,使得水位快速恢复至初始水位状态。

综上所述,地热工程运行多年以后,研究区热储地热流场始终保持动态平衡状态,供暖期形成小规模降落漏斗,而停止供暖又快速恢复至初始水位。

在上述开采条件下,模拟得到30年采灌条件下温度场随着时间的演化图。由图9(a)可以看出,在模型进行开采回灌第5年时,由于低温流体的回灌,回灌井区域热储层温度不断降低,随着注入流体不断向四周迁移,在热储层中形成同心圆型的低温区域,此时冷水影响范围半径约100 m。随着时间的增加,回灌井的回灌低温水影响范围不断增加,见图9(b)。在模型进行开采回灌第30年时,热储层的低温区域面积较第5年时有所增大,此时冷水影响范围约300 m。

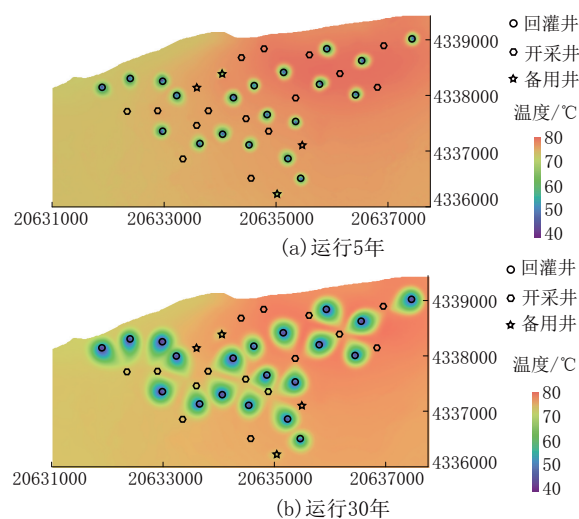


图9 地热井不同运行时间热储层温度场分布

Fig.9 Temperature field distribution of thermal reservoir at different operation time of geothermal well

模型运行30年时,热储层中回灌井区域温度最高下降幅度为40 °C,最低下降幅度为10 °C,其中大部分区域下降温度为15 °C左右。然而,开采井位置上的温度变化幅度<0.5 °C。由此可知,回灌低温水在向开采井运动过程中,受对流热传导作用影响加热,到达开采井时温度基本与储层温度维持一致。

综上所述,地热工程运行30年时,热储层的低温区域面积逐年增大,此时冷水影响范围约300 m,且开采井位置上的热储温度变化幅度<0.5 °C,没有发生热突破现象。

#### 4 结论及建议

(1)模拟优化地热井井距为450 m是可行的,解决了冀东曹妃甸集中式砂岩型地热井井群部署中,地热采灌井井距小易发生热突破、井距大无法满足丛式井钻井轨迹要求的问题。

(2)本次研究井群井网部署采用交错式排状分布,即开采井与回灌井成交错排状分布,是一种简单、实用的井位部署方式。

(3)冀东曹妃甸地热供暖工程,连续4年实现100%同层自然回灌;供暖期形成小规模降落漏斗(最大范围约300 m),停止供暖又快速恢复至初始水位;运行第30年时,开采井位置上的热储温度变化幅度 $<0.5^{\circ}\text{C}$ ,没有发生热突破现象。在勘查、设计、试验、井网优化、生产运维、模拟预测方面得到了客观的认识,是一次成功的集中式中深层砂岩型地热开采井网优化与实践。可为未来规模化地热开发利用提供参考。

(4)建议日后对该地热工程地热采灌井开展长期动态监测及定期评价工作。

#### 参考文献(References):

- [1] 汪集暘,邱楠生,胡圣标,等.中国油田地热研究的进展和发展趋势[J].地学前缘,2017,24(3):1-12.  
WANG Jiyang, QIU Nansheng, HU Shengbiao, et al. Advancement and developmental trend in the geothermics of oil fields in China[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3):1-12.
- [2] 朱家玲,朱晓明,雷海燕.地热回灌井间压差补偿对回灌效率影响的分析[J].太阳能学报,2012,33(1):56-62.  
ZHU Jialing, ZHU Xiaoming, LEI Haiyan. Analysis of impact of pressure compensation between geothermal wells on reinjection efficiency[J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2012, 33(1):56-62.
- [3] 张红波.地热资源可循环利用井网模式评价方法——以东营凹陷中央隆起带地热田为例[J].油气地质与采收率,2017,24(1):86-91.  
ZHANG Hongbo. A well pattern evaluation method for geothermal resource recycling—A case study of geothermal field in the central uplift belt of Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1):86-91.
- [4] 高青,周学志,江彦,等.地能利用过程抽灌井区热贯通及其定量分析[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(3):447-453.  
GAO Qing, ZHOU Xuezhi, JIANG Yan, Quantitative analysis of thermal breakthrough in pumping and injecting wellgroup area during earth energy utilization[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(3):447-454.
- [5] 张远东,魏加华,李宇,等.地下水源热泵采能的水·热耦合数值模拟[J].天津大学学报,2006,39(8):907-912.  
ZHANG Yuandong, WEI Jiahua, LI Yu, et al. Simulation of changes in geotemperature field due to energy abstraction from underground aquifers[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(8):907-912.
- [6] 倪龙,马最良.含水层参数对同井回灌地下水源热泵的影响[J].天津大学学报,2006,39(2):229-234.  
NI Long, MA Zuiliang. Effect of aquifer parameters on ground-water heat pump with pumping and recharging in the same well [J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(2):229-234.
- [7] 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,2003:1-120.  
ZHANG Yuandong. Thermal impact of energy abstraction on geotemperature field of shallow round water aquifers by single well, doublet and multiwell systems[D]. Beijing: Graduate School, Chinese Academy of Sciences, 2003:1-120.
- [9] GB/T 11615—2010.地热资源地质勘查规范[S].  
GB/T 11615—2010. Geologic exploration standard of geothermal resources[S].
- [10] NB/T 10099—2018.地热回灌技术(2018版)[S].  
NB/T 10099—2018. Technical requirements for geothermal re-injection (2018 Edition)[S].
- [11] 薛禹群,谢春红,张志辉,等.三维非稳定流含水层储能的数值模拟研[J].地质论评,1994,40(1):74-81.  
XUE Yuqun, XIE Chunhong, ZHANG Zhihui, et al. Study on numerical modeling of 3D aquifer thermal energy storage with transient flow[J]. Geological Review, 1994, 40(1):74-81.
- [12] 王社教,李峰,闫家泓,等.油田地热资源评价方法及应用[J].石油学报,2020,41(5):554-564.  
WANG Shejiao, LI Feng, YAN Jiahong, et al. Evaluation methods and application of geothermal resources in oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(5):553-564.
- [13] 董月霞,黄红祥,任路,等.渤海湾盆地北部新近系馆陶组地热田特征及开发实践——以河北省唐山市曹妃甸地热供暖项目为例[J].石油勘探与开发,2021,48(3):666-676.  
DONG Yuexia, HUANG Hongxiang, REN Lu, et al. Geology and development of geothermal field in Neogene Guantao Formation in northern Bohai Bay Basin: A case of the Caofeidian geothermal heating project in Tangshan, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3):666-676.
- [14] 何满潮,刘斌,姚磊华,等.地下水回灌过程中渗透系数研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2002,32(4):374-377.  
HE Manchao, LIU Bin, YAO Leihua, et al. Study on hydraulic conductivity during geothermal reinjection[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002, 32(4):374-377.
- [15] 杨艳林,靖晶,王福刚.CO<sub>2</sub>增强地热系统中的井网间距优化研究[J].太阳能学报,2014,35(7):1130-1137.  
YANG Yanlin, JING Jing, WANG Fugang, et al. Optimal design of well spacing on CO<sub>2</sub> enhanced geothermal[J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2014, 35(7):1130-1137.
- [16] 陈涛平,胡靖邦.石油工程[M].北京:石油工业出版社,2000,27-31.  
CHEN Taoping, HU Jingbang. Petroleum Engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000, 27-31.

(编辑 王文)