

文章编号:1673-5005(2006)02-0074-04

地热热储模型及井内换热器优化设计

梁金国, 房爱兵, 张 焱

(中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:建立了地热热储二维分布模型,对地热生产过程中地热热储的压力响应和冷却效应进行了数值模拟,提出了利用地热尾水回灌和井内换热相结合的新型对井系统。该系统采用采水井内换热器和地面套管式换热器,既可节省保温费用,又可减少散热损失。根据井筒传热模型,建立了井内换热器优化设计方法,得出了井内换热器的最佳长度为360 m。

关键词: 地热能; 新型对井系统; 换热器; 传热模型; 优化设计

中图分类号: TE 974 **文献标识码:** A

Geothermal energy reservoir model and optimal design of heat-exchanger in well bore

LIANG Jin-guo, FANG Ai-bing, ZHANG Xin

(College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: A two-dimensional distributed parameter model of geothermal reservoir was established. The pressure maintenance and temperature cooling effect of geothermal reservoir were predicted by numerical simulation. A new-type couple-well heating system was put forward to adopt the techniques of the re-injection of geothermal exhaust water and the heat-exchanger in well bore. The system can save insulating cost and reduce heat loss using heat-exchanger in well bore and casing heat-exchanger on surface. Based on well bore heat transfer model, an optimal design method of heat-exchanger in well bore was given, and the optimal length of the heat-exchanger in well bore was 360 metres.

Key words: geothermal energy; new-type couple-well system; heat-exchanger; heat transfer model; optimal design

地壳内的热能绝大部分都储存在一些大型岩体中,必须有水或水蒸气将分散的热能聚集、运移,并在适宜的地质条件下以形成地热储的方式富集起来,才可能在现有技术条件下以开采地热水的方式经济地利用这些热能。笔者通过对地热热储的数值模拟和地热开发技术的研究,达到避免浪费地热水资源和可持续发展地热供热的目的。

1 热储模型

根据地热热储的热源、水源、热水运移方式和传热机制^[1]等,使用二维分布模型描述地热热储。采用此模型在地热储开发时可以动态预测对井供热系统的井底水位和温度随时间的变化,预测地热储的

压力响应和冷却效应。

1.1 地热水流动模型

假设条件:①热储中流体为单相受压流体;②热储中流体流动服从达西定律,不考虑垂向流动;③基岩和盖层均为弱透水层,可以有越流;④将热储视为弹性体,水头变化时弹性储量瞬时完成。

在地热储的水平方向建立直角坐标系,根据达西定律和质量守恒定律建立的地热水流动模型为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \rho W_1 (H_0 - H) + \rho^{\text{in}} \dot{Q}_w^{\text{in}} + \rho \dot{Q}_w^{\text{ex}} = \rho S \frac{\partial H}{\partial t},$$
$$u = -\frac{T_x \partial H}{M \partial x}, \quad v = -\frac{T_y \partial H}{M \partial y}.$$

收稿日期:2005-08-06

作者简介:梁金国(1963-),男(汉族),山东昌乐人,教授,硕士,从事热力过程优化与系统节能、清洁能源开发与利用等研究。

式中, H 为地热热储水头, m ; T_x 和 T_y 为主轴方向导水系数, m^2/s ; ρ 为地热水密度, kg/m^3 ; W_1 为越流渗漏系数, s^{-1} ; H_0 为越流补给水层水头, m ; Q_w^{in} , Q_w^{ex} 分别为回灌井和生产井流率, $m^3/(s \cdot m^2)$; S 为贮水系数; u 和 v 分别为 x, y 方向地热水流速, m/s ; ρ^{in} 为回灌水密度, kg/m^3 ; M 为热储层厚度, m 。

流动模型的边界条件为:①Dirichlet 条件,即给出边界上的水头或其函数;②Neumann 条件,即给出边界上的流率或其分布函数;③Robbins 条件,即边界流率与正常源项、水头相关。

1.2 热储传热模型

假设条件:①流体和岩石骨架处于局部热平衡状态;②热储处于正常大地热流值区域,越流补给水温度和热储温度相等;③热储中地热水的内能为温度的函数,岩石骨架的热容量和密度均为定值;④忽略地热水的粘性耗散、压缩功和热储内的物理和化学反应。

根据傅里叶定律和能量守恒定律建立的热储传热模型为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x M \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y M \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\rho c T u M) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho c T v M) + \rho c T W + q_s + \rho c T Q_w^{\text{ex}} + \rho^{\text{in}} c T^{\text{in}} Q_w^{\text{in}} = [\varphi \rho c + (1 - \varphi)(\rho c)_r] M \frac{\partial T}{\partial t}$$

式中, T 为地热热储温度, $^{\circ}C$; λ_x 和 λ_y 为主轴方向导热系数, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$; W 为越流流率, $m^3/(s \cdot m^2)$; T^{in} 为回灌水温度, $^{\circ}C$; c 为地热水的比热, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$; φ 为热储的有效孔隙度; $(\rho c)_r$ 为岩石骨架密度与比热的乘积, $J/(m^3 \cdot ^{\circ}C)$ 。

传热模型的边界条件为:①Dirichlet 条件,即给出边界上的温度或其函数;②Neumann 条件,即给出边界上的热流或其分布函数;③Robbins 条件,即边界热流与正常源项、热储温度相关。

2 对井供热系统

地热水对井供热系统是指利用采水井和回灌井联合进行地热能生产,采出的地热水经过换热器释放热能后再由回灌井注入到热储。此系统特别适用于地热水开采规模较大或地热水质较差不宜直接利用的场合。

地热能作为新能源与常规能源相比是相对清洁的,但是若利用传统的地热开发方案也存在环境问题^[2,3],包括几方面:①空气、水体和土地污染。在

以往的开发过程中一些有害气体和放射性物质随地热水进入地表空间造成空气、水体或土地污染。②热污染。目前我国地热能利用大多是单一供热方式,直接排放的地热水尾水温度仍然很高,促使环境中局部空气或水体的温度升高,改变生态平衡,影响生物生长。③地面沉降。若不采取地热尾水回灌方案,长期从热储中抽出流体可能导致地面沉降,破坏地表自然景观。

地热水作为承压水,若超量开采可能造成地层能量亏空和地热井报废。另外,地热储中的热量在岩石骨架中占 80% 以上,而孔隙流体中不足 20%,岩石骨架中的热量只有通过回灌才能开采出来。

为了解决传统地热开发中的环境问题,保持热储地层压力,提高热能采收率和稳定生产,地热尾水回灌是经济有效的方法。

2.1 换热器设置方式

换热器设置方式在对井供热系统中是关系到地热开发可否顺利进行的关键。普通的地上表面式换热器不宜用于地热生产。无论是管壳式换热器,还是板式换热器,都会因腐蚀与结垢造成换热效率不断下降,而除垢与频繁维修又造成换热器使用寿命缩短,使地热生产经济性变差。为了解决对井供热系统中换热器的“瓶颈”问题,提出使用井内换热器^[4],它是装设在地热井上部的套管式换热器,长度从几十米到几百米。

2.2 新型对井换热系统

新型对井换热系统如图 1 所示,地热水在系统的回路中循环。换热器为地面套管式换热器,它的结构是在地热水输送管线外部加上套管和保温层,使载热水在两管环隙中流动,流程与地热水相反。在这个系统中地热水只在地热井井管和地面管线中流过,因此不存在地热水腐蚀换热器或结垢问题。井内换热器的中间管可用薄壁无缝钢管或塑料管制作。

新型对井换热系统采用井内换热器和地面套管式换热器,没有采用文献[4]中提出的回灌井井内换热器,主要是从设备投资的经济性方面考虑的。

若安装回灌井井内换热器,采水井与回灌井之间的所有地面管线都必须加设保温层,不但增加了大量的保温投资,而且仍不能避免热量散失。而地面套管式换热器结构非常简单,只需在靠近采水井一端的地热水输送管线外加上一段套管并覆上保温层。这种换热器不仅节省了大量的保温投资,而且避免了部分热量的散失。

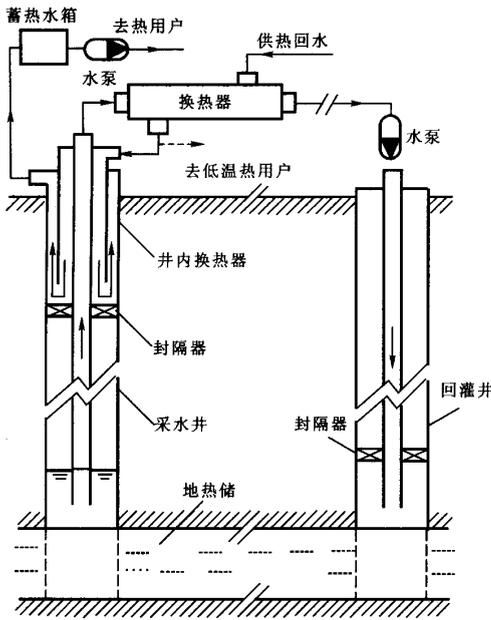


图1 井内换热器和地热水回灌系统示意图

3 换热器设计

3.1 井内换热器传热计算

通过热储数值模拟,可得到采水井井底压力、温度等参数。为了得到井口的热力参数,需要分析井筒传热过程^[5,6]。

井筒到地层的传热为非稳态,将时间对传热的影响归结到传热系数中,按稳态传热方式分析沿井筒的温度分布。

假设条件:①将井筒沿井深方向分为3部分,即图2中I、II和III部分;②地层物性参数为常数;③采用 Ramey 和 Scatter 方法,将井筒径向传热看作是由井管中心到水泥环外缘的一维稳态传热和水泥环外缘到地层的一维非稳态传热,不考虑沿井深方向的导热;④沿井深方向线性变化,即地温梯度 m 为常数。

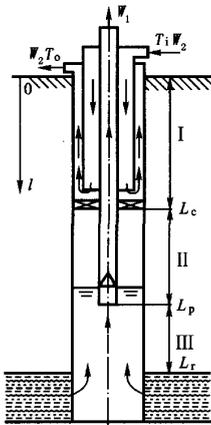


图2 采水井井筒井筒未影响到的地层温度 T_e 结构示意图

在井深 l 处取微元段 dl ,对其应用能量平衡方程,得到如下方程:

(I)井内换热器部分

$$W_1 d\theta = K_1^I (\theta - \theta_i) dl,$$

$$-W_2 d\theta_i = K_1^I (\theta_i - \theta) dl + K_2^I (\theta_i - \theta_o) dl,$$

$$W_2 d\theta_o = K_2^I (\theta_o - \theta_i) dl + K_3^I [\theta_o - T_e(l)] dl.$$

边界条件为

$$\theta(L_c) = \theta_c,$$

$$\theta_i(L_c) = \theta_o(L_c),$$

$$\theta_i(0) = T_i.$$

式中, W_1 和 W_2 分别为地热水和载热水热容量, $W/^\circ\text{C}$; θ, θ_i 和 θ_o 分别为地热水和内、外环隙载热水温度, $^\circ\text{C}$; K_1^I, K_2^I 和 K_3^I 均为传热系数, $W/(m \cdot ^\circ\text{C})$; L_c 为换热器深度, m ; T_i 为载热水入口温度, $^\circ\text{C}$; θ_c 为地热水 L_c 处温度, $^\circ\text{C}$ 。

(II)换热器至井管末端

$$W_1 d\theta = K^{II} [\theta - T_e(l)] dl.$$

边界条件为

$$\theta(L_p) = \theta_p.$$

式中, K^{II} 为传热系数, $W/(m \cdot ^\circ\text{C})$; L_p 为井管深度, m ; θ_p 为地热水 L_p 处温度, $^\circ\text{C}$ 。

(III)井管末端到井底

$$W_1 d\theta = K^{III} [\theta - T_e(l)] dl. \quad (6)$$

边界条件

$$\theta(L_r) = T_r.$$

式中, K^{III} 为传热系数, $W/(m \cdot ^\circ\text{C})$; L_r 为井底深度, m ; T_r 为井底热储温度, $^\circ\text{C}$ 。

3.2 井内换热器优化设计

求解上述能量平衡方程,可得到换热器载热水出口温度 T_o ,进而算出换热器的综合收益。以井内换热器的年收益和成本年金之差作为换热器优化设计的目标函数,它受井管尺寸、载热水参数及换热器中间管长度等的影响,以换热器长度为设计变量。

$$\max(m - z) = \max[3600 c_h \tau W_2 \Delta T - (r_a U L_c + \frac{W_2 \Delta p c_e \tau}{\rho c 1000 \eta_T} + C)], \quad (7)$$

其中

$$\Delta T = T_o - T_i.$$

式中, m 为年收益; z 为成本年金; c_h 为热能价格,元/ J ; τ 为换热器年运行时间, h ; ΔT 为载热水通过换热器后的升温, $^\circ\text{C}$; r_a 为投资年摊还率; U 为中间管价格,元/ m ; ρc 为载热水容积比热, $J/(m^3 \cdot ^\circ\text{C})$; Δp 为换热器的总压降, Pa ; c_e 为消耗动力的费用,元/ $(kW \cdot h)$; η_T 为设备总机械效率; C 为基础投资。

4 算例分析

热储计算网格总面积为 1 km^2 ,有 2809 个结点。采水井和回灌井相距 294 m,热储没有明显的

补给边界,生产前热储中的水头和温度假定为常数,即不存在初始水力梯度和初始温度梯度。

热储模型计算参数:贮水系数 0.02,孔隙度 0.20,渗透率 $125 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗漏系数 $1.0 \times 10^{-9} \text{s}^{-1}$,热储含水层厚度 20 m,初始水头 1000 m,初始温度 80 °C,采水井产水量 300 m³/d,回灌井注水量 300 m³/d,回灌井水温 20 °C。

模拟计算时在热储中选取回灌井与采水井之间的一些关键点(点后面括号中的数字是到回灌井的距离),观察其压力和温度随时间变化情况(见图 3, 4)。压力场选 4 个点,即 1 点(39 m)、2 点(98 m)、3 点(196 m)和 4 点(255 m)。温度场选 3 个点,即 1 点(59 m)、2 点(78.5 m)和 3 点(98 m)。图 3 表明,在连续生产大约 50 d 后热储压力场基本趋于稳定,完全避免了单井生产时由于地层压力减小导致地热井报废的风险。图 4 表明,在生产过程中回灌水的冷峰不断向采水井推进,但推进速度逐渐减慢,在连续生产 360 d 后回灌水冷峰到达 2 点和 3 点之间,按最大估计冷峰只扫过了两井间 30% 的距离。

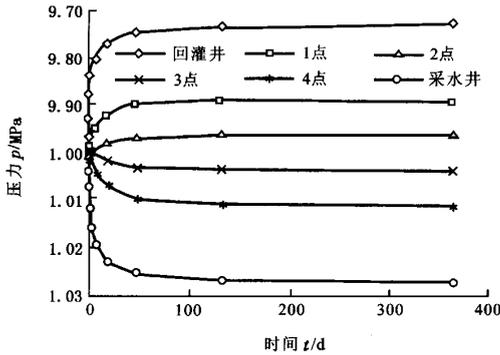


图 3 回灌时热储压力响应

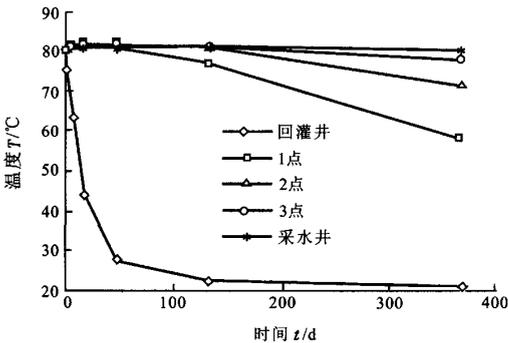


图 4 回灌冷峰推进图

换热器优化设计计算参数为:年运行时间 360 d,热能价格 1.07×10^{-8} 元/J,电能价格 0.42 元/

(kW·h)。

为观察换热器长度对运行效果的影响,取载热水的流量为 300 m³/d 进行计算,结果见图 5。由图 5 可见,随着换热器长度增加,载热水出口温度升高的趋势减缓。当换热器长度为 360 m 时,经济指标达到最大值 7.15 万元,即年经济效益最好。为观察载热水流量不同时换热器的运行情况,取换热器的长度为 360 m 进行计算,结果见图 6。由图 6 可见,流量越小载热水出口温度越高,但地热水出口温度也相应越高,使地热水的热能不能完全被利用而造成浪费,经济效益变差;流量越大出口温度越低,经济效益越好,但温度过低有可能无法满足生产或生活需要。因此,在保证载热水出口温度不低于限定值的情况下,应设法提高载热水的循环流量。对于中低温地热资源,载热水的流量一般应在地热水开采流量的附近取值。

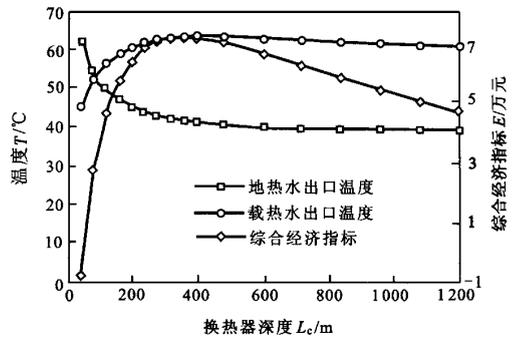


图 5 换热器长度的影响

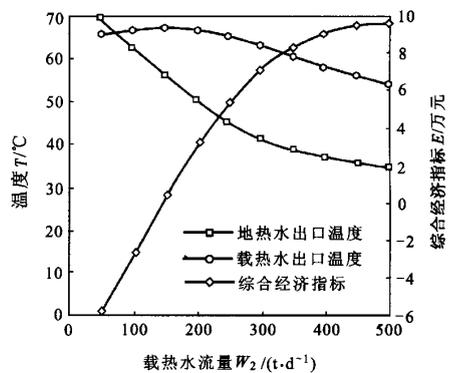


图 6 载热水流量的影响

此外,图 5 和 6 中经济指标值有小于零的点,这些点说明使用井内换热器没有经济效益,而且还可能亏损,因此这些工况必须避免。

(下转第 84 页)

4 结 论

(1) 流动水条件下焊接 20# 管线钢, HAZ 出现较多的贝氏体、马氏体和 M-A 组元等不平衡组织, 使得 HAZ 的硬度最大, 性能最差。在满足管道正常运行的情况下, 适当降低管内介质的流速, 减少 HAZ 不平衡组织的形成, 对避免氢致开裂有益。

(2) 在流动水冷却下, 采用的线能量越小, 形成的马氏体和 M-A 组元越多, 对接头越不利。线能量越大, 形成的上贝氏体组织和粒状贝氏体越多, 对接头越有利。

(3) 随着管内介质冷却能力的增大, $t_{8/5}$ 明显减小。降低管内介质的冷却能力对防止氢致开裂有利。

参考文献:

[1] 赵新伟, 白真权. 在役输气管道焊接接头开裂原因分析 [J]. 机械工程材料, 1998, 22(6): 46-57.
ZHAO Xin-wei, BAI Zhen-quan. The crack reason analy-

(上接第 77 页)

参考文献:

[1] CRAIG M, BETHKE. A numerical model of compaction-driven groundwater flow and heat transfer and its application to the paleohydrology of intracratonic sedimentary basins [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90 (B8): 6817-6828.
[2] 申建梅, 陈宗宇, 张古彬. 地热开发利用过程中的环境效应及环境保护 [J]. 地球学报, 1998, 19(4): 402-408.
SHEN JIAN-mei, CHEN Zong-yu, ZHANG Gu-bin. Environmental protection and environmental impact of geothermal development and utilization [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1998, 19(4): 402-408.
[3] 郭静, 阮宜纶, 林荣忱, 等. 地热水开发利用的环境效应与可持续发展 [J]. 农业环境保护, 1997, 16(4): 158-

(上接第 80 页)

[10] BRANDES E A, BROOK G B Smiths. Metals reference book [M]. 7th. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd, 1992.
[11] 潘金生, 全健民. 材料科学基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
[12] 韩彬, 李世春, 邹增大. 热压法获得 Zn-Al 共析组织的

研究 [J]. Mechanical Engineer Material, 1998, 22(6): 46-57.

[2] 陈怀宁, 林洪泉, 钱百年. 运行管道在线焊接工艺研究 (一) 流动介质和结构等因素对 $t_{8/5}$ 影响 [C] // 第八次全国焊接会议论文集, 1997. 北京: 机械工业出版社, c1997: 135-136.
[3] WILLLIAM A, BRUCE. Repair of in-service pipelines by welding [J]. Pipes & Pipelines International, 2001, 9 (10): 5-11.
[4] FISCHER R D, KIEFNER J F, WHITACRE G R. User's manual for model 1 and 2 computer programs for predicting critical cooling rates and temperature during repair and hot-tap welding on pressured pipelines [J]. Oil & Gas, 1981(10): 197-215.
[5] FISCHER R D, KIEFNER J F. Models aid pipelines repair-welding procedure [J]. Oil & Gas, 1988, 86(10): 41-46.
[6] BRUCE W A, THREADGILL P L. Welding onto in-service pipelines [J]. Welding Design Fabrication, 1991, 64 (2): 19-22.

(编辑 沈玉英)

161.
GUO Jing, RUAN Yi-lun, LIN Rong-chen, et al. Environmental impacts of the exploitation and utilization of geothermal water and sustainable development [J]. Agro-environmental Protection, 1997, 16(4): 158-161.

[4] 庄斌舵, 陈兴华, 刘光远. 地热水回灌井内换热新技术 [J]. 能源研究与利用, 2000(6): 36-39.
ZHUANG Bin-duo, CHEN Xing-hua, LIU Guang-yuan. New heat exchanging techniques in wells for geothermal exhaust water re-injection [J]. Energy Research and Application, 2000(6): 36-39.
[5] 任瑛, 梁金国. 井筒加热在稠油与高凝油开采中的应用 [C] // 石油高等教育四十年科学研究论文集. 东营: 石油大学出版社, 1993: 58-67.
[6] 任瑛, 梁金国. 稠油与高凝油热力开采问题的理论与实践 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.

(编辑 沈玉英)

研究 [J]. 机械工程材料, 2002, 26(9): 7-9.
HAN Bin, LI Shi-chun, ZOU Zeng-da. Zn-Al eutectoid structure formed by hot compression [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002, 26(9): 7-9.

(编辑 沈玉英)