

# 管道水流速对深层 U 型地热井采热影响的数值模拟研究

冯绍航<sup>1</sup>, 陈静平<sup>1</sup>, 陈延信<sup>1</sup>, 范金禾<sup>1</sup>, 符国力<sup>1</sup>, 郭晓明<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学材料与矿资学院, 陕西 西安 710055;

2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司工程技术研究院, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 深层采热井是一种新型地热利用方式, 其主要特点是“采热不采水”, 为模拟研究深层采热井的运行状态, 以 4 000 m 深 U 型地热采热井为研究对象, 在合理假设的基础上建立了采热井管道内外传热的数学物理模型, 模型中考虑了地下深层岩土的温度梯度、岩性变化与地下水的渗流作用等对传热的影响, 并编制程序进行了模拟计算. 利用实际地热井数据对模型进行验证, 结果表明: 理论计算温度与实际温度的误差为 7.77%, 模型合理可靠. 模拟计算分析了管道内流速对采热功率、传热半径的影响关系, 结果表明: 最大采热功率为 0.841 MW, 对应流速为 0.75 m/s, 120 d 时传热的最大影响半径为 15.68 m.

**关键词:** 深层地热井; 传热模型; 数值模拟; 采热功率

**中图分类号:** TK529

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2012)04-0586-07

地热能是地球内部包含的热能, 有两种不同的来源, 一种来自地球外部, 一种来自地球内部, 其中来自地球内部的地热是我们利用的主要热源. 西安地热田目前勘探深度 2 500 m 内的 4 个热储层段中, 储存的地热资源总量为  $2.107 \times 10^{19}$  J, 相当于  $7.185 \times 10^9$  t 标准煤发热量. 各热储层中储存的地热水资源总量约  $5.476 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>, 其蕴藏热量约相当于  $3.358 \times 10^9$  t 标准煤发热量.

对地热资源的利用中以直接抽取地下热水和地源热泵技术为主, 地源热泵采热的理论研究中, 地埋管换热器的换热模型以 U 型竖直埋管传热模型为主. 长期以来, 国内外研究者大多都采用线热源模型<sup>[1]</sup>或柱热源模型<sup>[2]</sup>, 前者把 U 型管看作无限大均匀固体中的一根无限长线热源, 后者把 U 型管看作柱热源, 由于计算简单, 在工程中被广泛采用. 近年来也出现了运用数值模拟技术进行计算的 k-ε 热流耦合模型<sup>[3-5]</sup>; 它用 k-ε 湍流模型模拟管内流场, 再计算它对周边岩土的温度影响, 该模型充分考虑了地埋管的具体形状以及管道中流速、压力等变量对换热的影响, 适用于长度较短的, 弯管对流场有较大影响的换热管道. 由于地源热泵地埋管换热器大都埋于地下数 m 至数十 m 的地层中<sup>[6]</sup>, 岩土结构单一, 地下水含量很低, 以上模型均可以适用.

本文的研究对象是井深深达 4 000 m、两管间间距长达 1 000 m 的 U 型采热井, 结构如图 1 所示. 这一深度远超恒温层的厚度, 随着深度增加, 岩土温度逐渐上升, 岩层岩性发生显著变化, 地下水含量丰富. 在数值计算中, 大量的非线性因素无疑会增加网格数量与计算量, 但是现有的数值模型均没有综合考虑以上因素. 本文在充分考虑影响传热的各种因素下建立物理数学模型, 研究管道内水的流速对 U 型采热井采热和地温层温度变化的影响关系.

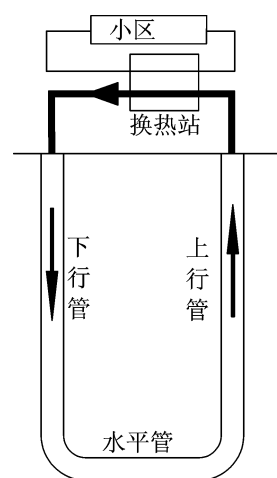


图1 4 000 m 深层地热井采热模式

Fig.1 Heat exchange model of the deep geothermal well with 4 000 meters length

收稿日期: 2012-02-04 修改稿日期: 2012-07-17

基金项目: 陕西省西部建筑科技重点实验室资助项目(2011SZS001)

作者简介: 冯绍航(1978.06~), 男, 四川南充人, 讲师, 硕士, 主要从事热工工程、粉体工程等领域研究.

## 1 数学模型

### 1.1 假设条件

①忽略不同地层岩性对地温梯度的影响,取平均地温梯度  $3^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ;②管外岩土为饱和多孔介质,其中固体颗粒不运动;③忽略地下水中溶质的影响;④由于上层岩土温度较低,采热管散热较严重,在井深  $1\,166\text{m}$ (岩土温度小于  $50^{\circ}\text{C}$ )以上管壁添加了玻化微珠保温砂浆(导热系数为  $0.068\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ );⑤从恒温层开始进行模拟计算,忽略地表温度变化对传热的影响。

### 1.2 控制方程

#### 1.2.1 岩土多孔介质渗流场控制方程

在岩土中存在着固体骨架和孔隙空间,孔隙空间中存在着流体,用多孔介质来定义岩土材料更加符合实际.达西定律适合在低雷诺数( $\text{Re}=1\sim 10$ )条件下流体通过多孔介质的层流运动<sup>[7,8]</sup>,因此采用达西定律作为地下水流动的控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon_p) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla D) \quad (2)$$

式中  $\mathbf{u}$  为岩土中水分渗流的速度向量;  $\epsilon_p$  为岩土多孔介质孔隙率;  $\rho$  为岩土中水的流体密度;  $\rho \epsilon_p$  为单位体积流体质量;  $k$  为岩土渗透率;  $\mu$  为岩土中水的动力粘度;  $g$  为重力加速度;  $\nabla D$  为高度差,在速度向量中加入重力项,可以计算出由于密度变化导致的浮力流。

#### 1.2.2 传热控制方程

管内水流传热方程<sup>[5]</sup>:

$$(\rho_{\text{管}} C_{p,\text{管}}) \frac{\partial T_{\text{管}}}{\partial t} + \rho_{\text{管}} C_{p,\text{管}} \mathbf{u}_{\text{管}} \cdot \nabla T_{\text{管}} = \nabla \cdot (k_{\text{管}} \nabla T_{\text{管}}) \quad (3)$$

式中,  $\rho_{\text{管}}$  为管内水的密度;  $C_{p,\text{管}}$  为管内水定压比热容;  $k_{\text{管}}$  为管内水的热传导系数;  $\mathbf{u}_{\text{管}}$  为管内水的流速;  $T_{\text{管}}$  为管内水温。

岩土多孔介质传热方程<sup>[5]</sup>:

$$(\rho C_p)_{\text{eq}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{\text{eq}} \nabla T) \quad (4)$$

$$k_{\text{eq}} = (1 - \epsilon_p) k_p + \epsilon_p \rho C_p \quad (5)$$

$$(\rho C_p)_{\text{eq}} = (1 - \epsilon_p) \rho_p C_{p,p} + \epsilon_p \rho C_p \quad (6)$$

式中,  $k_{\text{eq}}$  是饱和多孔介质等效热传导系数;  $(\rho C_p)_{\text{eq}}$  是饱和多孔介质等效热容量;  $\rho$  为岩土中水的密度;  $\rho_p$  为岩土固体密度;  $C_p$  为岩土中水的比定压热容;  $C_{p,p}$  为岩土固体比定压热容;  $1 - \epsilon_p$  为多孔介质中固体所占体积百分数。

### 1.3 多孔介质渗流场与传热场之间的耦合关系

(1) 多孔介质中水的物性(密度、粘度、常压热容、导热系数)受温度控制,表达式为:

$$\textcircled{1} \rho = 838.5 + 1.4T - 0.003T^2 + 3.72 \times 10^{-7}T^3, 273.15\text{K} < T < 553.7\text{K}$$

$$\textcircled{2} \mu = 1.38 - 0.02T + 1.36 \times 10^{-4}T^2 - 4.65 \times 10^{-7}T^3 + 8.90 \times 10^{-10}T^4 - 9.08 \times 10^{-13}T^5 + 3.85 \times 10^{-16}T^6, 273.15\text{K} < T < 413.15\text{K}$$

$$\textcircled{3} Cp = 12\,010.15 - 80.41T + 0.31T^2 - 5.38 \times 10^{-4}T^3 + 3.63 \times 10^{-7}T^4, 273.15\text{K} < T < 553.75\text{K}$$

$$\textcircled{4} k = -0.87 + 0.008\,95T - 1.58 \times 10^{-5}T^2 + 7.98 \times 10^{-9}T^3, 273.15\text{K} < T < 553.75\text{K}$$

(2) 多孔介质传热方程中的对流项  $\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T$  中的  $\mathbf{u}$  值取自于多孔介质渗流场。

### 1.4 边界条件、初始条件及物性参数

#### 1.4.1 传热场的边界条件、初始条件

初始条件:管内水温与管外岩土温度相同,管内水流静止( $\mathbf{u}_{\text{管}} = 0\text{ m/s}$ )。

边界条件:模型外围温度始终保持不变,由上到下温度逐渐升高,温度梯度  $3^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。

### 1.4.2 多孔介质渗流场的边界条件、初始条件

初始条件:压力头为岩土深度的函数,  $H_p = -y$ .

边界条件:岩土顶端压力为一个标准大气压,管壁与岩土外围设为不流动边界.

### 1.4.3 岩层物性参数

本模型物性参数取自西安地热田地质资料<sup>[9]</sup>,见表 1.

表 1 西安地热田地层物性表

Tab. 1 Properties of Xi'an geothermal field

Chronostratigraphic	Average thickness /m	Main rock	$k$ /W · (m · K) <sup>-1</sup>	$r$ /(g · cm <sup>-3</sup> )	$C$ /J · (g · K) <sup>-1</sup>	Sandstone thickness /m	Sand stone Permeability /×10 <sup>9</sup> m <sup>2</sup>	Average porosity /%
秦川群 Q <sub>2-4</sub> qc	500	粘土	1.55	1.76	0.933			50.0
三门组 Q <sub>1</sub> s	220	砂砾石	1.59	1.86	0.824	96.3	10.916	30.0
张家坡组 N <sub>2</sub> z	730	泥岩、砂岩	1.64	1.97	0.878	115.8	9.870	28.2
蓝田灞河组 N <sub>2</sub> 1+b	850	泥岩、砂岩	1.73	2.07	0.878	168.3	1.974	26.2
高陵群 N <sub>1</sub> g	1 500	泥岩、砂岩	1.90	2.26	0.878	233.0	9.870	23.1
白鹿塬组 E <sub>3</sub> b	306	泥岩、砂岩	1.90	2.26	0.878	98.0	9.870	23.1

## 1.5 计算方法

分析本研究对象的几何物理特征可知,深层 U 型地热井在竖直管道上的传热属于轴对称换热,在水平管道上,管道上下的温差较小(100m 内的温差为 3℃,传热影响区域更小则温差更小),可以将水平管道也近似为轴对称换热,整个 U 型地热井按轴对称换热处理,轴对称下网格划分如图 2 所示.

方程(1)–(4)为系统的控制方程,4 个方程,包含 4 个未知数( $u, T_{\text{管}}, T, t$ ),边界条件完备,方程非线性,封闭可解,对方程(1)–(4)进行差分离散后编程进行递归求解.

## 2 模型验证

研究中取用西安某房地产公司直接抽取地热水井的相关数据对本文模型进行验证,热水井参数见下表 2 和图 3. 该井与本文所建模型的换热均为沿管长存在温度梯度、边界封闭的柱状换热情况,二者的井筒几何结构、井筒材料和边界条件相同. 因此应用控制方程(1)–(4)及相关边界条件,选取出口水温为目标参数进行验证. 按西安地区平均地温梯度 3℃/hm 进行计算竖井入口水温为 137.5℃,进行模拟计算,计算结果如图 4 所示. 采热进行 1h 后,出口水温基本稳定,16h 后出口水温达到稳定,将 24h 后出口水温为 128℃,与工程实测稳定值 119℃进行比较,误差为 7.77%,表明所建模型基本假设合理,选取的相关参数准确,可以用来进行 U 型管地热井采热计算.

表 2 实际工程中的直接抽取热水井运行参数

Tab. 2 The operating parameters from a practical engineering seothermal well

Geothermal Well	Well depth /m	Quantity/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	Temperature/℃	Diameter/m	Velocity /(m · s <sup>-1</sup> )
西安某地产有限公司地热井	4 082	100	119	0.157 1	1.433

## 3 计算结果与分析

设计采热井管径为 0.153 8 m,水平管道长度 1 000 m,入口水温 50℃. 计算了流速为 0.5、0.75、1.0、1.25、1.5、1.75、2.0 m/s 工况下采热井在整个供暖季(120 d)的出口水温与采热功率. 结果如下:

由图 5 和图 6 可知:采热井出口水温呈现先急速上升,后快速下降,最后缓慢趋于稳定的趋势;在不同流速下,出口水温均在 1 h 后迅速达到最大值,随流速的降低,水温峰值的出现时间向后推迟到 2 h,然后开始快速降低,在第 10 d 时基本趋于稳定,在以后的 110 d 采暖中,出口水温最高降低 5.95℃,最低降低 1.82℃,且随流速的增大,温度降低的值在减小,出口水温也在降低. 因为随管内水的流速增大,与管外岩层的换热时间缩短,采热功率( $Q = u_{\text{管}} A_{\text{管}} C_{p, \text{管}} \Delta T_{\text{管}}$ )减小,导致出口水温降低.

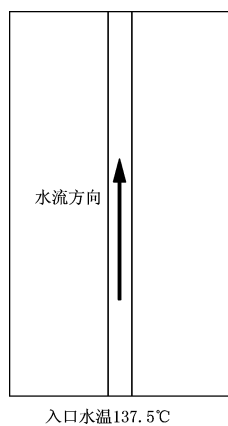


图 3 直接抽水地热井结构

Fig. 3 Structure of hot water well

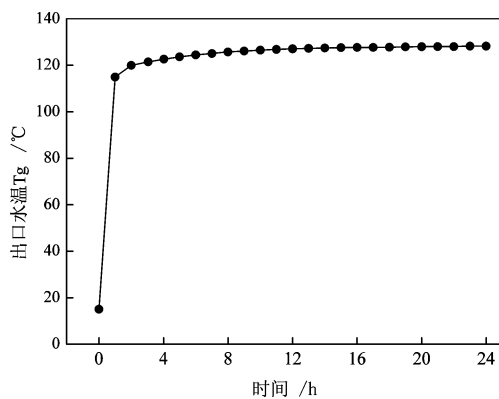


图 4 出口水温随时间变化关系图

Fig. 4 The relationship between outlet temperature and time

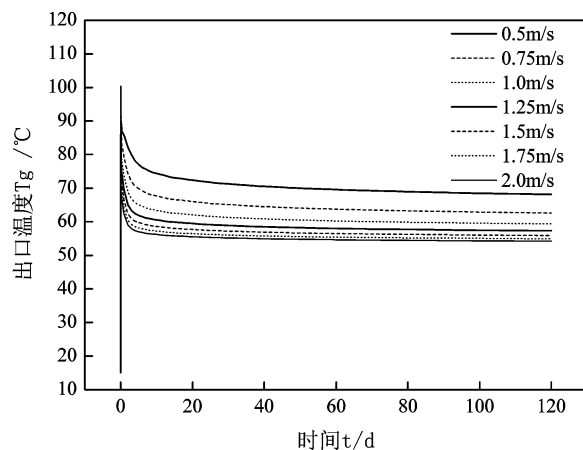


图 5 不同流速下采热井出口水温

Fig. 5 Outlet temperature under different water velocity

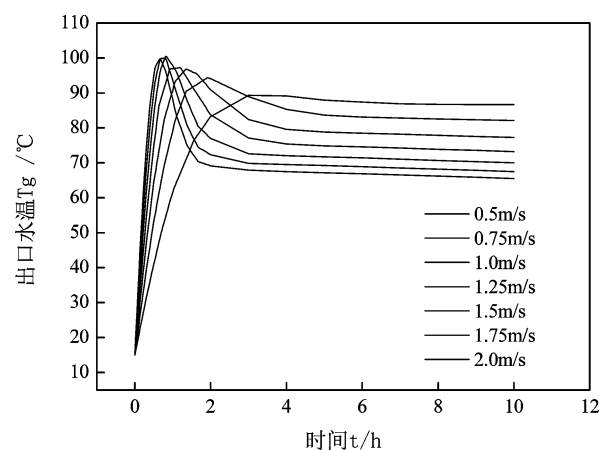


图 6 前 10 小时采热井出口水温

Fig. 6 Outlet temperature under different water velocity from 0 to 10 hours

由图 7 可知:采热功率的峰值出现在流速  $0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,此时的采热量为  $0.741 \text{ MW}$ ,当管内流速大于  $0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,采热功率基本上随流速增加而线性降低,说明流速是影响采热功率的主要因素.由表 3 和图 8 可知:在最大采热功率下,随着井深增加,管内外温差的变化,在井深为  $3500 \text{ m}$  处,采热对

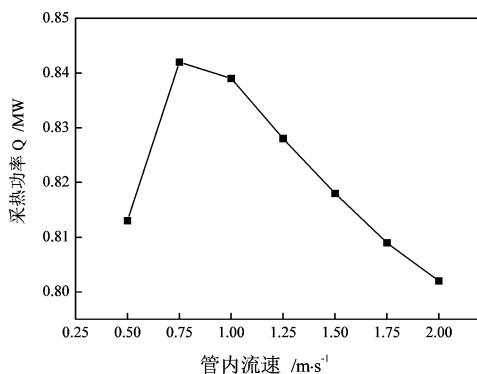
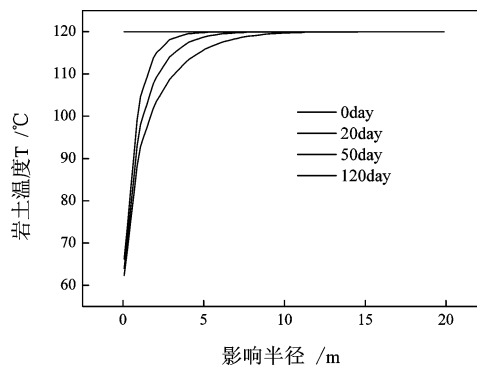
图 7 第 120 d 采热功率  $Q$  与流速  $v$  的关系

Fig. 7 The relationship between thermal power exploited and water velocity at the 120th day

图 8 流速  $0.75 \text{ m/s}$  时井深  $3500 \text{ m}$  岩土温度影响范围Fig. 8 The radius influenced by heat transfer at  $3500 \text{ m}$  underground with water velocity of  $0.75 \text{ m/s}$

管外岩层的影响半径达到最大;在最大影响半径处,随着时间的增加,影响的距离在显著增大,最远影响半径为 15.68m,在管道半径 2.5m 以内的区域中,换热对岩层的影响巨大,该区域内温度梯度为 18.24  $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,管道半径 2.5~5.0m 间,换热对岩层产生明显影响,该区域内温度梯度为 4.06  $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,管道半径 5.0~16.0m 间,换热对岩层产生较弱影响,该区域内温度梯度为 1.73  $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ .

表 3 流速 0.75 m/s 采暖结束时岩土温度影响范围

Tab 3. The radius influenced by heat transfer at the end of heating season with water velocity at 0.75 m/s

Well depth/m	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	3 900
Influenced radius/m	13.88	14.88	15.28	15.48	15.68	15.48

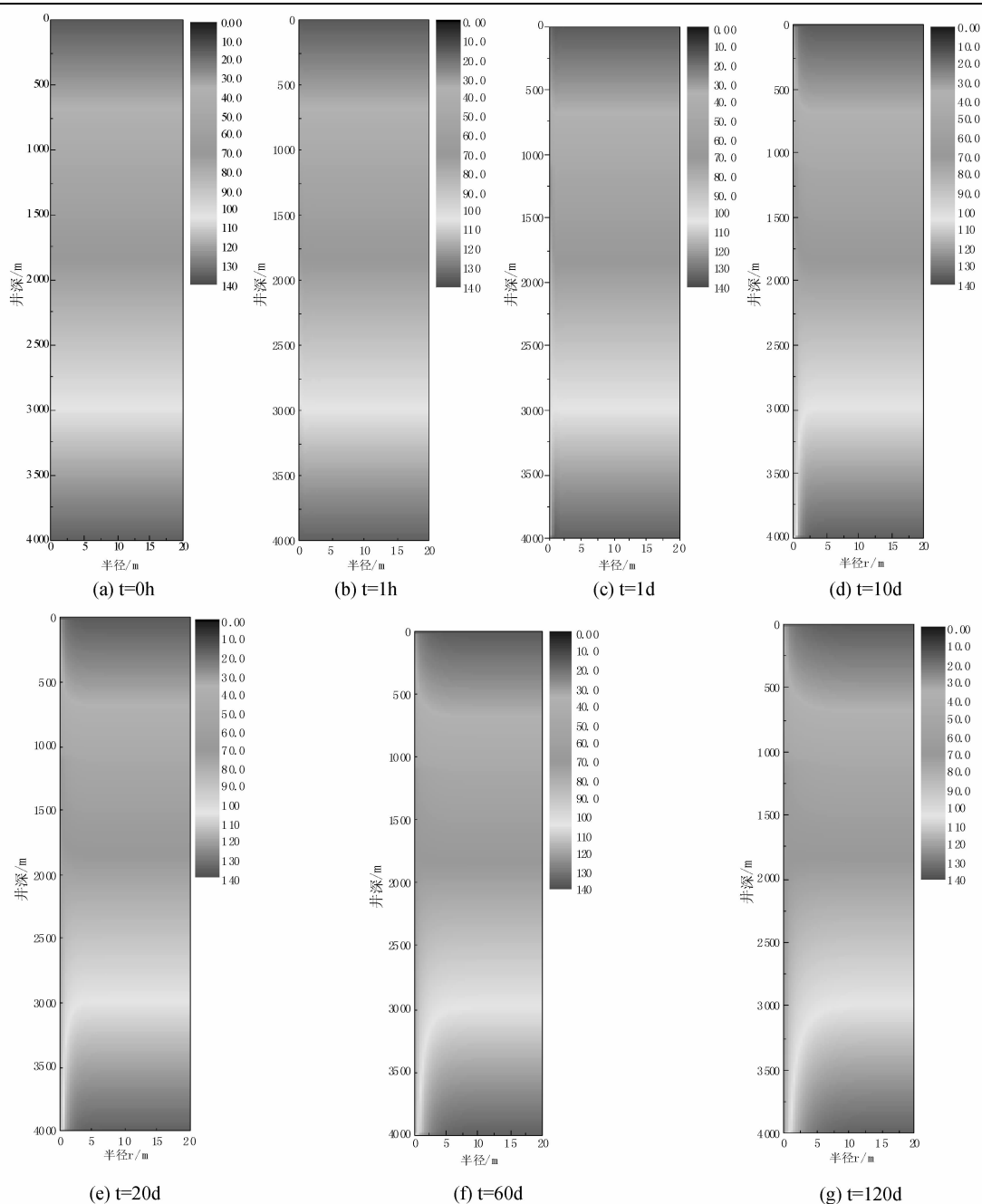


图 9 流速 0.75 m/s 时不同时期上行管道外岩土层温度分布云图

Fig. 9 Temperature distribution in rock outside upstream pipe at various times with water velocity at 0.75 m/s

由图 9 可知:在热交换 1d 时,管道出口水温很快达到峰值,但是管道外岩土层的温度变化很小,初期的换热还未影响到岩层的温度分布;热交换 10d 时,在 2 500~4 000m 区域中,温度出现明显的下降,

但是影响区域很小,在管道的出口段,在0~1 000m区域中,由于水温的升高,管道内水的温度高于管外岩土层的温度,热量从管道传递到岩土层,岩土层出现明显的受热区域;热交换进行到20d、60d和120d时,这种趋势更加明显,2 500~4 000m区域内的岩土层降温,0~1 000m岩土层升温,温度变化的区域都进一步扩大,温度变化最大的区域出现在3 000m附近;1 000~2 500m区域中,不同时期下的温度分布都没有明显的变化,在该区域内,热交换很小。

## 4 结 论

通过对U型地热井进行分析建模和模拟研究得到如下结论:

- (1)通过对现有采热井的模拟计算对比,理论计算误差为7.77%,所建立模型合理可靠;
- (2)通过对整个供暖季采热模拟计算,发现管道内水的流速对采热功率影响巨大,当管内流速为0.75m/s时,采热功率最大,达到0.841MW;采热对地层温度影响可以分为三个区域,在2.5m以内,采热对地层温度影响巨大,在2.5~5.0m之间时,采热对地层温度影响明显,在5.0~16.0m之间时,采热对地层温度影响较小;最大影响半径出现在井深3 500m处,最大影响半径为15.68m。
- (3)不同时期上行管道外的岩土层温度分布可以分为三个不同区域,0~1 000m,管道内流体向岩土层传热,岩土层温度升高,随时间延长,影响区域扩大;1 000~2 500m,岩土层温度变化不大,热交换量很小;2 500~4 000m,岩土层向管道内流体传热,岩土层温度降低,随时间延长,影响区域扩大,3 000m附近温度变化最大。

## 参考文献 References

- [1] INGERSOLL L R, PLASS H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. Heating Piping & Air Conduction, 1948: 119-122.
- [2] YAVUZTURK C, REES S J, SPITLER J D. A transient two-dimensional finite volume model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers [J]. ASHRAE Transactions, 1999, 105(2):465-474.
- [3] 熊莉芳, 林 源, 李世武. k- $\epsilon$  湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 工业加热, 2007, 36(4): 13-15.  
XIONG Li-fang, LIN Yuan, LI Shi-wu. k- $\epsilon$  turbulent model and its application to the FLUENT[J]. Industrial Heating, 2007, 36(4): 13-15.
- [4] 王金香, 李素芬, 尚 妍, 等. 地下含湿岩土热渗耦合模型及换热埋管周围土壤温度场数值模拟[J]. 太阳能学报, 2008, 29(7): 837-841.  
WANG Jin-xiang, LI Su-fen, SHANG Yan, et al. Underground humid soil model considering thermal conduction and groundwater advection and numerical simulation on soil temperature field around underground heat exchanger [J], Acta Energiæ Solaris Sinica. 2008, 29(7): 837-841.
- [5] SHANG Y, Fen L S, Jun L H. Analysis of geo-temperature recovery under intermittent operation of ground-source heat pump[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(4): 935-943.
- [6] 赵 军, 戴传山. 地源热泵技术与建筑节能应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.  
ZHAO Jun, DAI Chuan-san. Design and application of ground source heat pump system [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [7] 作彦卿. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.  
WU Yan-qing. Dynamics of fluid flow and contaminant transport in porous media[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.
- [8] BEAR J. 多孔介质流体动力学[M]. 李竞生, 陈崇希, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.  
BEAR J. Dynamics of fluids in porous media [M]. LI Jing-sheng, CHEN Chong-xi, Translated. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983.
- [9] 陕西省地矿局第一水文队. 西安地热普查报告[R]. 西安: 陕西省地矿局, 1996.  
Hydrogeology and Engineering Geology Team No. 1, The Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province, Xi'an Geothermal Survey Report[R]. Xi'an: The Bureau of Geology and Miueval Resources of Shaanxi Province. 1996.

## Numerical simulation study of the relation between water velocity and heat transfer in the deep geothermal well

FENG Shao-hang<sup>1</sup>, CHEN Jing-ping<sup>1</sup>, CHEN Yan-xin<sup>1</sup>, FAN Jing-he<sup>1</sup>, FU Guo-li<sup>1</sup>, GUO Xiao-ming<sup>2</sup>

(1. College of Materials and Mineral Resources, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Institute of Engineering Techniques; Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd.; Xi'an 710018; China)

**Abstract:** The deep geothermal well is a new way to utilize geothermal energy, the distinctive characteristic of which is heat quantity exploited under earth without water pumped. In order to study the working state of the deep geothermal well, a model on the deep geothermal well with 4 000 meters depth was established. Based on the reasonable assumption, the heat transfer mathematical-physical model between geothermal well and stratum was established. The temperature gradient, lithology and transfusion of underground water were taken into account. A program was written and an analog computation was carried out. The model was tested and verified with an actual geothermal well, and the result shows: with the relative error between calculation temperature and actual temperature at 7.77%, the model is reliable. Moreover, the relationship between the velocity in the well and thermal power exploited, heat transfer radius were calculated and analyzed. The results showed that the largest thermal power exploited was 0.841MW, and the corresponding velocity in the well was 0.75m/s, the longest heat transfer radius at the 120th day 15.68m.

**Key words:** *deep geothermal well; heat transfer model; numerical simulation; thermal power exploited*

**Biography:** FENG Shao-hang, Lecturer, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-82205280, E-mail: fengshaohang@126.com

(上接第 567 页)

[9] 仇保兴. 发展小企业集群要避免的陷阱——过度竞争所致的“柠檬市场”[J]. 北京大学学报:哲学社会科学版, 1999,36(1):25-29.

QIU Bao-xing. The development of small business clusters to avoid the trap—due to excessive competition “The market for lemons”[J]. Journal of Peking University: Humanities and Social Sciences, 1999,36(1):25-29.

[10] 王 雷. 我国产业集群的风险防范与控制研究[J]. 中央财经大学学报, 2004(7):45-49.

WANG Lei. The Research of the control and avoidance of the crisis of industrial clusters in China[J]. Journal of Central University of Finance & Economics, 2004(7):45-49.

## Risk assessment index system and model study of industrial clusters

FANG Yong-heng, ZHOU Yue

(School of Management, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** This article, on the basis of reviewing the risk theories of industrial clusters at home and abroad, discusses the research on the risk assessment of industrial clusters, establishes a risk assessment index system and puts forward a kind of assessment model based on principal component analysis. It also verifies the indicators and models proposed by the author by assessing the risk of industrial clusters in Baoji Machine Tool & Tools.

**Key words:** *industrial cluster; risk; assessment*

**Biography:** FANG Yong-heng, Ph. D. Associate professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-015029075065, E-mail: yhfang@xauat.edu.cn