

天津市深层基岩地下热水系统 数值模拟中若干问题的处理

周训, 陈明佑, 吴胜军, 崔红梅, 付丽, 赵越

(中国地质大学水资源与环境工程系, 北京 100083)

摘要: 天津市基岩地下热水具有密度随温度变化显著、存在水岩之间热交换的特点, 采用适合于描述深层地下热水水流和热量运移的压力场和温度场控制方程, 通过对渗流场、边界条件的合理概化和对初始条件、热储层缺失区域及倾斜断层等的合理处理, 使所建立的三维数值模型变得更为有效和实用。

关键词: 地下热水; 三维模型; 数值模拟; 密度; 压力; 温度。

中图分类号: P314.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2002)02-0163-05

作者简介: 周训(1963—), 男, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源、水文地质和环境地质专业的教学和科研工作。E-mail: zhouxun@cugb.edu.cn

天津市基岩地下热水系统由于:(1)热储层埋藏深, 钻井井底压力随深度变化大;(2)水温较高且变化大(60~96℃), 水的密度随温度变化而改变, 井中水位高度不能代表井底压力的大小;(3)地下水在运移过程中不断与围岩发生热交换, 并受到来自深部热源的加热;(4)通过回灌冷水到热储层中, 又能获得新的地热资源, 从而使得热水系统的压力场和温度场变化复杂。前人研究天津市地下热水运移时, 曾建立区域的准三维模型^[1,2]和局部地段的平面二维结合裂隙带准三维开采预测模型^[3], 均未涉及到热水系统的温度场。根据热水系统的这些特点, 我们尝试用三维非稳定流数学模型来同时描述压力场和温度场的变化。另一方面, 由于深层地下热水系统的勘查难度大, 不易获取满足模型要求的各种资料, 因而在实际计算中对三维数值模拟涉及到的一些问题进行合理处理, 将有助于提高模拟和预测计算结果的精度。

1 基岩热水系统简述

天津地区基岩以宝坻—宁河断裂为界, 北区属

燕山褶皱带的次一级构造单元冀北拗陷区, 南区华北平原属华北拗陷区。南区自西向东依次为冀中拗陷、沧县隆起和黄骅拗陷, 在拗陷或隆起上又分布有一系列凸起和凹陷(图1)。南区主要断裂的走向均为北北东向, 次要断裂为近东西向。地层展布通常为东翼陡西翼缓的背斜, 或是向西倾斜的单斜。钻井揭露的基岩由老至新为中新元古界碳酸盐岩、寒武系和奥陶系碳酸盐岩、石炭—二叠系砂页岩、中生界(侏罗—白垩系)砂岩、页岩, 基岩之上被厚层的新生界上第三系、第四系沉积物所覆盖。

钻井揭露南区基岩中分布有以白云岩为主的中新元古界热储层和以灰岩为主的奥陶系热储层, 二者之间分布有寒武系弱透水系。中新元古界热储层顶界埋深1030~4000m, 厚度2000~3000m, 裂隙和孔洞发育, 钻井涌水量1200~4200m³/d, 水温90~96℃, 是天津市基岩地下热水的主要开采层。奥陶系热储层顶界埋深1000~4000m, 厚度1000~1500m, 裂隙和孔洞比较发育, 钻井涌水量960~3600m³/d, 水温60℃左右。寒武系钙质泥岩夹灰岩富水性差, 水温75~95.7℃。热水水化学和同位素资料^{①②}表明, 天津市基岩地下热水来源于大气降

①卢润, 杜宝金, 蔡冠英, 等. 天津市区及王兰庄地热田勘探报告, 1987.

②陈振霞, 蔡冠英, 陈双海, 等. 天津市山岭子地热田详查报告, 1991.

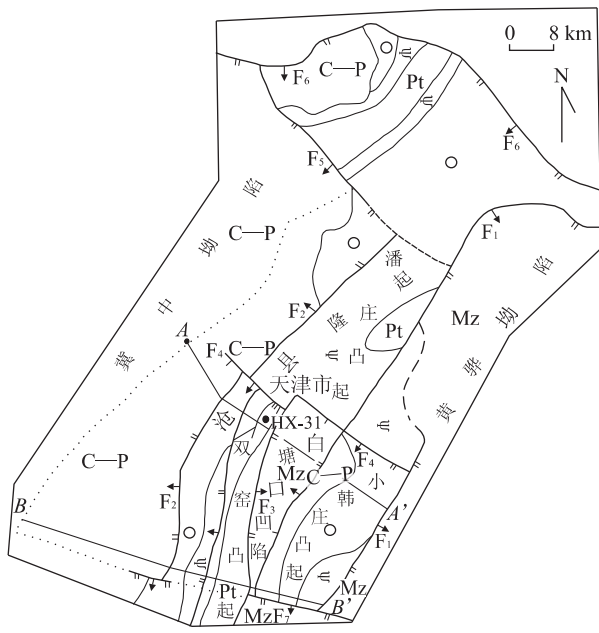


图 1 研究区基岩地质分布

Fig. 1 Geological map of basement rocks in the study area

F₁. 沧东断裂; F₂. 天津断裂; F₃. 白塘口西断裂; F₄. 海河断裂; F₅. 潘庄断裂; F₆. 宝坻—宁河断裂; F₇. 胡连庄断裂; Mz. 中生界; Q—N. 第四—第三系; C—P. 石炭—二叠系; O. 奥陶系; ⌋. 寒武系; Pt. 中新元古界. 点线为模型边界

水. 地下水在北部山区获得大气降水的入渗补给后, 自北、北东向南、南西方向缓慢流动, 在漫长的深循环过程中, 不断与围岩进行热交换, 并接受深部热源的热加温, 从而形成现今的地下热水.

基岩地下热水自 1980 年起被开采利用, 开采井数和总开采量逐渐增加, 尤其是在近几年由于房地产业的兴起而增加较快, 最近开采井数已近 50 眼, 大多数分布在中区, 年开采量达 800 余万 m³. 热水开采井一般在冬季采暖期(11 月至次年 3 月)集中开采, 而在非采暖期开采量很小甚至停采.

2 热水密度变化和热交换

由于钻井中热水的密度随水温的升高而降低, 因此在井口观测到的水位高度不能代表井底压力的大小, 在计算中宜用井底压力^[4,5]. 实际上, 热水密度不仅取决于水温, 还与水的压力和矿化度有关, 可以近似地表示为它们的线性函数, 即

$$\rho \approx \rho_0 [1 + \alpha_T (T - T_0) + \alpha_P (p - p_0) + \alpha_S (S - S_0)] \quad (1)$$

式中: ρ 为水的密度; T 为水温; p 为压力; S 为矿化

度, 并假定不随时间变化; $\rho_0 = (T_0, p_0, S_0)$ 是在参考水温 T_0 、压力 p_0 和矿化度 S_0 下水的密度; α_T, α_P 和 α_S 是 T, p 和 S 相应的系数. 从水量守恒方程^[6]出发, 可以推导出具有以下形式的压力场控制方程

$$\frac{S_S \partial p}{\rho_0 g \partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} \left(\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial z}{\partial x_j} \right) \right] + Q \frac{\rho_Q}{\rho} - \frac{\phi}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad i=1, 2, 3; \quad j=1, 2, 3. \quad (2)$$

式中: S_S 为比弹性给水度; g 为重力加速度; K_{ij} 为渗透系数张量; ϕ 为孔隙度; Q 为源(正)或汇(负); ρ_Q 为源或汇的密度; z 为垂向坐标. 另外, 可以认为水的温度一部分是由于热储层岩石的加热而获得, 另一部分来自深部热源的热传导. 从能量守恒方程^[7]出发, 可以推导出具有以下形式的温度场控制方程

$$\phi \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c V \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} = \text{div}(D \text{grad} T) + Q \rho_Q c \cdot (T_Q - T) + k_S (T_S - T), \quad i=1, 2, 3; \quad j=1, 2, 3. \quad (3)$$

式中: V 为渗透速度; D 为热扩散系数; c 为水的比热容; T_Q 为源或汇的温度; T_S 为岩石的温度, 并可以认为任意点的岩石温度不随时间变化; k_S 为水、岩之间的热交换系数. 式(3)右边第三项用来表示水、岩之间的热交换, 当 $T_S > T$ 时, 水被加热; 当 $T_S < T$ 时, 水的温度降低. 此外, 当抽水($Q < 0$)时, 此时 $T_Q = T$, 式(3)右边第二项为零; 当注水或回灌($Q > 0$)时, 式(3)右边第二项才有意义. 至于来自深部热源的热传导, 则可用边界条件表示.

3 边界条件与热储层参数分区

目前, 天津地区深层基岩热水的开采主要集中在市区, 开采井大部分分布在中新元古界和奥陶系热储层内. 为了更好地模拟深层地下热水的运移和预测开采动态, 计算区域应尽可能远离市区扩展到自然边界, 即北部到达宝坻—宁河断裂; 西部跨过天津断裂, 大体上以奥陶系顶面埋深 3 500 m 等深线为界; 南侧到达胡连庄断裂; 东部以沧东断裂为界, 其中南段受白塘口东、西断裂之间的白塘口凹陷分隔. 计算区域的平面面积约 4 152 km² (图 2), 其顶界为基岩热储层的顶面, 底界以基岩热储层埋深 4 000 m 处为界. 根据前人的认识^{①②③}和我们对天津市地下热水的分布和形成条件的综合分析, 可将计算区周围边界作如下概化: 北部宝坻—宁河断裂和

③李明朗, 赵维明, 久建新, 等. 天津市深部基岩地热资源开发潜力研究, 1999.

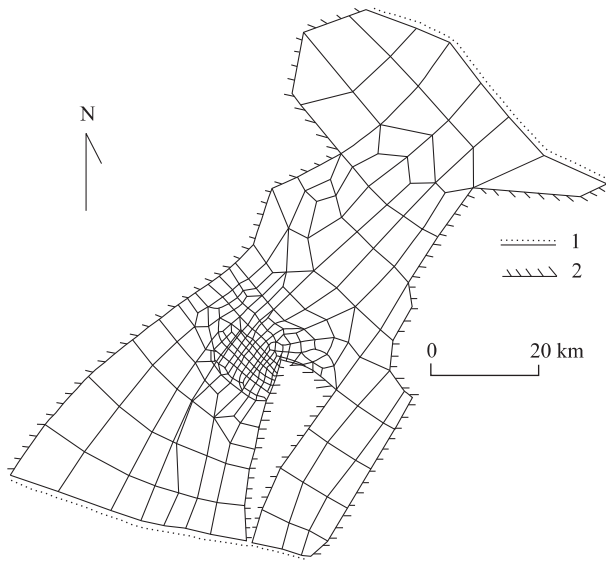


图2 计算区边界条件和平面剖分

Fig. 2 Boundary conditions and discretization in a horizontal plane of modeled domain

1. 给定压力和温度边界; 2. 隔水、隔热边界

南部胡连庄断裂为给定压力、温度边界,东、西边界为隔水、隔热边界,白塘口凹陷的东、北、西界也是隔水、隔热边界(图2)。

将基岩地下热水系统概化为三层结构,自上而下对应于奥陶系热储层、寒武系弱透水层和中新元古界热储层。对渗流区域进行剖分时,先在平面上按不规则四边形单元剖分,共有264个平面单元、301个结点(图2);剖面上按奥陶系、寒武系和中新元古界顶、底界面分为3层。这样可将渗流区域剖分为264个柱体、792个六面体单元,有301根棱、1204个结点。

计算区的顶界和底界对地下水流来说为隔水边界,但对热量运移来说是定热流值边界。大地热流从底界进入计算区,使地下热水获得一部分热量,又从顶界向上覆地层传递一定热量。由于基岩热储层上覆不同地层的导热性能不同,可将顶界分为东、西两区;西区上覆石炭—二叠系,结构较致密,热导率较大;东区第三系,结构较松散,热导率小。它们的数值可根据前人的计算结果^①给出,即底界热流值为 0.0935 W/m^2 ,顶界西区为 0.078 W/m^2 ,东区为 0.0628 W/m^2 。此外,地下热水的矿化度实测值,奥陶系热水为 4.0 g/L ,寒武系热水为 1.8 g/L ,中新元古界热水为 1.9 g/L 。

根据断层切割、断裂带位置和热储层富水性的差异,可将奥陶系热储层划分为5个参数分区(编号

为1至5区),寒武系弱透水层不细分,即只有1个区(6区),将中上元古界热储层划分为5个参数分区(编号为7至11区),这样渗流区域共有11个参数分区,其中5区和11区分别为奥陶系和中新元古界热储层断层带。

4 初始温度、初始压力和岩温的计算

用以下方法计算各结点的初始温度和压力数值。(1)位于观测井井底处的结点的温度值为该井在开采条件下井口的水温加上 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ (对于奥陶系热储层)或 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ (对于中新元古界热储层),这是因为在这种条件下井口水温与井底水温极为接近^①。其他结点处的温度值先用下式计算:

$$T = (H - H_r) \cdot T_i + T_j, \quad (4)$$

式中: H 为结点的埋深; H_r 为恒温层深度,在天津地区取值为 30 m ; T_i 为地温梯度; T_j 为当地基准温度,取值为 $13.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。其中地温梯度对于不同深度和岩性有所不同。然后再参照已知观测井结点处的温度值作进一步修正。(2)位于观测井井底处的结点的压力用下式计算:

$$p = 1/2 \cdot (\rho_k + \rho_d) \cdot (H - h_r) \cdot g, \quad (5)$$

式中: ρ_k, ρ_d 分别为井底水温和井口水温对应的水的密度; h_r 为井中水位埋深。其他结点处的压力值先用下式计算:

$$p = \rho \cdot g \cdot H, \quad (6)$$

其中 ρ 取该结点水温对应的密度值,然后参照已知观测井点压力值作进一步修正。

此外,计算区域内各剖分单元的岩温需要预先确定。可根据式(4)先计算出某一柱体顶面4个结点的岩温,然后取其平均值作为该柱体顶面的岩温。从该顶面起,按不同地温梯度计算出下面3个单元的岩温,其中奥陶系的地温梯度为 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,寒武系为 $1.2 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,中新元古界为 $1.0 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。

5 热储层缺失区域和倾斜断层的处理

由于断层的切割,在计算区东部较大范围内缺失奥陶系热储层,而在西侧天津断裂以西,在埋深 4000 m 之上的较小范围内缺失寒武系和中上元古界热储层。为了保持计算单元的连续性,在有缺失热储层的范围内,每个柱体仍然按3层剖分成3个六

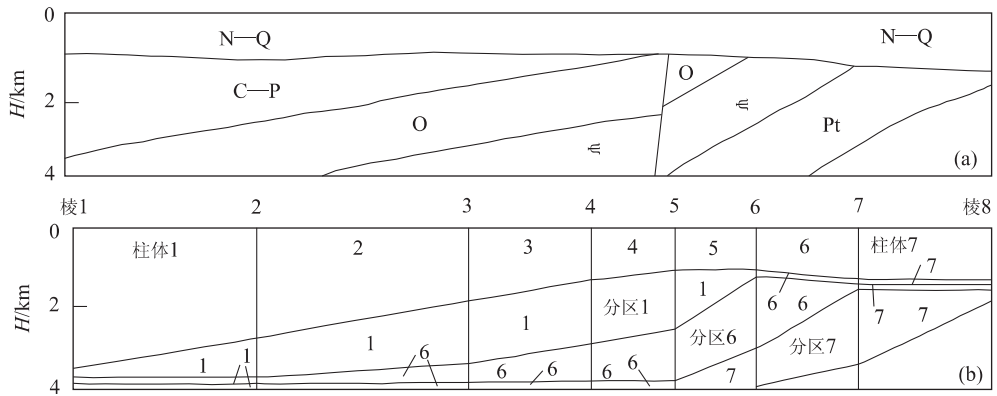


图 3 实际地层剖面(a)与剖分剖面(b)对比

Fig. 3 Comparison of an actual stratigraphic profile (a) with a discretized profile (b)

参数分区: 1. 奥陶系热储层; 6. 寒武系弱透水层; 7. 中新元古界热储层

面体单元,但在参数分区时,可将缺失的热储层所在单元的参数分区处理为实际存在的热储层所在单元相同的参数分区,从而达到与原来热储层分布状况相同的效果。以南侧西部 7 个柱体为例,其实际地层剖面与剖分剖面及参数分区见图 3。

计算区内的断层有一定的倾角,其中沧东断裂、天津断裂以及白塘口西断裂尤为突出,致使断层面与计算区顶、底面的相交线在水平面上的投影不重合。可用断层面与顶面的相交线作为剖分时相应的界线,以在该线上的结点的坐标作为基准,按照断层的实际倾向和倾角,换算出下面第 2、3、4 层对应结点的实际坐标。

6 回灌井的处理

回灌是延长热水系统使用寿命的重要措施。在天津市未来的深层热水开采方案中规划增加 9 个开采井和 6 个回灌井。其中中新元古界热储层中有 5 个回灌井,有 4 个回灌井位于原有或新开采井邻近,但井底相距大于 500 m,用开采井开采的热水经使用后再回灌到相同的热储层中,成为同层“一采一灌”的对井;奥陶系热储层中有 1 个回灌井,将原开采井采自中新元古界热储层的热水经使用后再通过邻近的回灌井回灌到奥陶系热储层中,成为异层“一采一灌”的对井。在预测计算中,回灌井的回灌水量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,其中奥陶系热储层回灌井的回灌水温为 30°C ,中新元古界热储层回灌井的回灌水温为 40°C 。回灌井的回灌水量 100% 在采暖期回灌到热储层中。回灌井的位置若位于“棱”上,可处理为“点

井”,将回灌水量分配到该井井底所在的结点上;若回灌井的位置位于“柱体”中,则可处理为“体积井”,将回灌水量平均分配到该井井底邻近的结点上。

7 结语

在模型识别中对 15 个观测井为期一年的压力和采暖期的水温进行拟合计算,结果表明观测井的计算压力拟合实测压力的平均绝对误差不超过 0.5 个大气压,计算温度拟合实测温度的平均绝对误差不超过 3°C 。对未来的开采方案开采 5 年的预测结果表明,观测井的井底压力只有轻微下降,5 年内下降值一般不超过 2 个大气压,而观测井的井底温度总体上呈下降趋势,下降幅度稍大,一些钻井达到 $3 \sim 13^\circ\text{C}$ 。

在建立天津市基岩地下热水系统的数学模型和数值模拟过程中,在描述地下热水水流的压力场控制方程中考虑了水的密度变化,把热水密度表示为压力、温度和矿化度的线性函数;在描述热量运移的温度场控制方程中加上了反映水、岩之间的热交换项,而来自深部的热流可用边界条件表示。将热水系统进行合理概化,包括对边界条件、参数分区、热储层缺失区域和倾斜断层等的处理,使模型更为有效和实用。通过对天津市基岩热水系统的实际应用,说明对这些问题的处理是合理的,所建立的模型是可行的。随着人们对地热资源开发利用的日益重视,热水系统的勘查程度和野外观测数据的精度会不断提高,将会更有助于提高深层地下热水数值模拟计算的精度。

参考文献:

- [1] Pizzi G, del Giudice C, Sartori L, et al. Mathematical model of Tianjin hydrothermal field [M]. Italy: Aquater, 1984. 146.
- [2] Brandi G P, Ceccarelli A, Dipaola G M, et al. Model approach to the management of the Tianjin hydrothermal field, China [J]. Geothermics, 1986, 15(5/6): 639—655.
- [3] 许广森,高秀生. 基岩地下热水资源系统管理[J]. 水文地质工程地质, 1995, (3): 20—23.
XU G S, GAO X S. Systematic management of geothermal water resources in basement rocks [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1995, (3): 20—23.
- [4] 周训,陈明佑,赵维明. 深层地下热水钻井内动水位升高值的计算[J]. 勘察科学技术, 2000, (5): 33—35.
ZHOU X, CHEN M Y, ZHAO W M. Calculation of the dynamic water level rise of geothermal water in deep wells [J]. Site Investigation Sciences and Technology, 2000, (5): 33—35.
- [5] Zhou X, Chen M Y, Li M L, et al. Occurrence and modeling of geothermal water in the basement aquifer system near Tianjin, China [A]. In: Wang Y X, Liang X, eds. Proceedings of the International Symposium on Hydrogeology and the Environment [C]. Beijing: China Environmental Science Press, 2000. 282—287.
- [6] Bear J. Hydraulics of groundwater [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1979. 569.
- [7] Huyakorn P S, Pinder G F. Computational methods in subsurface flow [M]. New York: Academic Press, 1983. 473.

Treatment of Some Problems in Numerical Modeling of Geothermal Water System in Deep-Seated Basement Rocks near Tianjin

ZHOU Xun, CHEN Ming-you, WU Sheng-jun, CUI Hong-mei, FU Li, ZHAO Yue

(Department of Water Resources and Environmental Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Geothermal water in the basement aquifers near Tianjin is characterized by a significant change in density of the water with its temperature and an exchange of heat between the water and its surrounding rocks. This paper puts forward the governing equations of pressure and temperature for describing water flow and heat transport of the deep-seated geothermal system. The 3-dimensional numerical model established are proved more effective and practical by the reasonable generalization and treatment of the flow domain, boundary and initial conditions, missing areas of the aquifers, and tilted faults.

Key words: geothermal water; 3-dimensional model; numerical modeling; density; pressure; temperature.