

考虑热流固耦合干热岩储层热提取解析模型

樊冬艳, 孙海, 姚军, 严侠, 张凯, 张建光, 张林

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:干热岩储层热开采是一个典型的多物理场耦合问题,基于离散裂缝网络模型建立考虑热流固耦合干热岩储层解析模型,其中离散裂缝网络中只考虑裂缝中水的流动,水通过热对流方式进行热交换,基岩通过热传导对裂缝中的水进行加热;其次考虑水的黏度、裂缝的开度随温度及压力发生改变,利用 Laplace 变换求解得到离散裂缝网络模型下干热岩储层解析解;在此基础上总结复杂裂缝网络系统各裂缝的压力温度求解过程,并与 TOUGH2 数值结果对比,验证方法的正确性,分析不同影响因素对干热岩热提取过程的影响。结果表明:随着冷水注入,各裂缝水的黏度逐渐增加,出口端流量减小并趋于黏度不变时流量;而裂缝开度逐渐增加,出口端流量增加迅速;随着注入速度线性增加,生产井出口端温度逐渐减小,且减大幅度变缓,因此在干热岩热提取过程中,须综合考虑生产井出口端流量及温度的影响。

关键词:干热岩;离散裂缝网络模型;热流固耦合;解析模型

中图分类号:TK 521

文献标志码:A

引用格式:樊冬艳,孙海,姚军,等.考虑热流固耦合干热岩储层热提取解析模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):106-113.

FAN Dongyan, SUN Hai, YAO Jun, et al. An analytical thermo-hydraulic-mechanical coupled model for heat extraction from hot-dry rock reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(6): 106-113.

An analytical thermo-hydraulic-mechanical coupled model for heat extraction from hot-dry rock reservoirs

FAN Dongyan, SUN Hai, YAO Jun, YAN Xia, ZHANG Kai, ZHANG Jianguang, ZHANG Lin

(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: An analytical thermo-hydraulic-mechanical coupled model was built in this study to investigate the heat extraction process from dry-hot rock reservoirs. It is assumed that the rock matrix is impermeable with heat conduction only, while water flow is confined within a discrete fracture network (DFN), in which both heat conduction and convection need to be considered. The coupled model was solved via a Laplace transform method, and the viscosity of water and the aperture of the fractures were considered as a function of temperature and pressure. The distribution of pressure and temperature in the complex fracture network system was calculated, and the results were verified in comparison with the TOUGH2 numerical solution. The influences of different factors were analyzed during the heat extraction. The calculation results show that the viscosity of water in the fractures increases gradually during cold water injection, and its flow rate at the outlet decreases initially, and then tends to be stable as in the case with a constant water viscosity. The fracture aperture also increases gradually during cold water injection, and the flow rate of water increases rapidly. When the injection rate increases linearly, the temperature of the produced water decreases gradually. Therefore it is necessary to consider the influence of water flow rate on its outlet temperature in order to increase the heat extraction rate and efficiency from dry hot rock reservoirs.

Keywords: hot-dry rock; discrete fracture network model; thermo-hydraulic-mechanical coupled model; analytic model

收稿日期:2018-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51504277, 51504276, 61573018, 41502131);中央高校基本科研业务费专项(16CX05018A, 17CX02008A)

作者简介:樊冬艳(1985-),女,博士研究生,研究方向为裂缝性储层数值模拟、产能及试井分析。E-mail:fandongyan2010@126.com。

通信作者:孙海(1984-),男,博士研究生,研究方向为页岩气藏数值模拟、微观流动模拟。E-mail:sunhai@upc.edu.cn。

能源和环境是可持续发展战略的核心与关键,常规的化石能源已十分有限且不可再生,同时随着全球气候变暖,节能减排的呼声日益高涨,开发利用清洁的、可再生的新能源已成为各国 21 世纪的重要战略选择。地热能作为一种经济、可再生、环保的新型能源,在国际能源结构中所占比重越来越大^[1]。中国地质科学院和中国科学院分别进行了中国干热岩资源量的估算,分别为 $2.5 \times 10^{25} \text{ J}^{[2]}$ 和 $2.1 \times 10^{25} \text{ J}^{[3]}$,按照 2% 的回收率计算,为 2010 年能源消耗的 4400 倍,因此中国对于干热岩地热开采和利用给予了极大重视^[4-6]。干热岩储层的开采一般将低温水通过注入井注入热储层(人工裂缝和天然裂缝),经加热变成热水,再从生产井排出,实现地热的利用^[7]。目前,研究干热岩裂缝内流动模型主要包括单裂缝模型^[8]、连续介质模型^[9-10]以及离散裂缝网络模型^[11-13]等。其中单裂缝模型^[8]假设水通过一个裂缝在注水井和生产井之间流动,实际储层存在大量裂缝因此与实际不太相符。连续介质模型^[9-10]假设水通过均匀多孔介质在注水井和生产井之间流动,无法准确描述裂缝性质,因此存在一定的局限性。离散裂缝网络模型^[11-13]假定储层由大量裂缝网络相互构成,更加符合实际情况。离散裂缝网络渗流模型的研究始于 20 世纪 60 年代对岩石水力学研究,因此关于流动及流固耦合方面的研究已经非常完善^[14-15]。目前地热多场耦合模型主要基于数值模拟方法,采用商业软件如 TOUGH2 进行数值模拟^[16-18],而解析方法较少^[19-20],主要以单条裂缝模型为主。笔者在考虑流体黏度及裂缝开度变化的情况下,建立基于离散裂缝网络模型干热岩热流固耦合开采数学模型,采用 Laplace 变换得到模型的解析解,以期于干热岩储层的开采提供技术指导及理论支持。

1 干热岩储层的离散裂缝网络模型

1.1 物理模型

由于干热岩储层地热资源的开采系统一般由热储层、注水井、生产井和压裂裂缝以及天然裂缝组成。冷水通过注水井注入热储层,基于热传导和对流等机制加热变成热水,再从生产井排出,实现地热资源的开发利用。为了准确模拟地热储层的热、流、固等复杂机制,针对干热岩储层采用离散裂缝网络模型(图 1),其中采用一维的线单元代表二维的矩形裂缝,流体通过裂缝网络流动,基岩中无流体流动只进行热传导过程;离散裂缝内的流动为稳定渗流,应力通过改变裂缝的开度对流动产生影响,裂缝内

主要以热对流为主;其次离散裂缝网络模型主要由注水井、生产井、边、结点构成,考虑了单井注入单井开采情况,只有相互沟通的裂缝参与流体流动,只与一个结点相连的裂缝无流体流动。

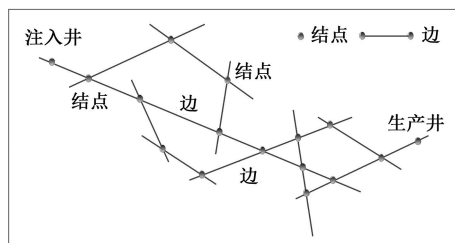


图 1 干热岩储层离散裂缝网络模型

Fig. 1 Discrete fracture network model of dry-hot rock reservoir

1.2 离散裂缝模型的流动模型

为了研究裂缝中水的流动,基于质量守恒方程以任意一个结点 n 作为研究对象(图 2),则流入与流出的质量应相等,当该结点为注水井时,定注入量生产,因此水的质量变化,即注水井的注入量 m_{inj} 已知,当结点为生产井时,定生产压力 p_w ,该结点的压力已知。因此对于结点 n 可建立质量守恒方程为

$$\begin{cases} \sum_{i \in B_n} m_i = f_n, \\ f_n = 0, \quad n \neq n_p, n_{inj}, \\ f_n = m_{inj}, \quad n = n_{inj}, \\ p = p_w, \quad n = n_p. \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$m_i = \rho_w v_i A_i, A_i = \bar{w}_i H.$$

式中, B_n 为与结点 n 相连的所有边的集合; f_n 为第 n 个结点的流入流出质量差, kg/s ; n_p 为生产井; n_{inj} 为注水井; m_{inj} 为注水井的注入量, kg/s ; p_w 为生产井压力值, MPa ; m_i 为第 i 条裂缝的质量流量, kg/s ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; v_i 为裂缝边的流速, m/s ; A_i 为裂缝面的截面积, m^2 ; $\bar{w}_i$ 为该裂缝的平均开度, m ; H 为裂缝的高度, m 。

裂缝中的流动服从 Poiseuille 流动规律,因此

$$v_i = -\frac{\bar{w}_i^2}{12\mu(T_i)L_i} \frac{\Delta p}{L_i}. \quad (2)$$

式中, Δp 为裂缝两端压差,记为 $\Delta p = p_n - p_{[n]}$, p_n 为结点 n 处的压力值, $p_{[n]}$ 为另一端点的压力值, MPa ; $\mu(T_i, p_i)$ 为该裂缝的平均黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; 水的黏度为温度的函数,随着温度的增加急剧降低,而随压力的变化较小可忽略^[21],采用 McCain 公式^[21]计算水的黏度与温度的关系为

$$\mu_w(T) = AT^B. \quad (3)$$

其中

$$A=109.574-8.40564S+0.31334S^2+8.72213\times 10^{-3}S^3,$$

$$B=-1.12166+2.63951\times 10^{-2}S-6.79461\times 10^{-4}S^2-5.47119\times 10^{-5}S^3+1.55586\times 10^{-6}S^4.$$

式中, S 为水中矿物质质量分数, %; T 为温度, $1^\circ\text{F}=[(T-32)\times 5/9]^\circ\text{C}$ 。

1.3 离散裂缝模型的开度模型

大量的实验和矿场实践表明裂缝开度在开采过程中具有动态性质^[23-25], 例如裂缝的开度受孔隙弹性和热弹性的影响, 目前大部分模拟都没有考虑这些动态变化, 笔者基于 Ahmad Ghassemi 模型^[26]在不考虑滤失的情况下给出裂缝开度在不同时间和位置随岩石特性和温度的变化关系为

$$w(z,t)=\xi_1\exp(-\xi_2z^2)-\xi_3z\cdot\text{erfc}(z\sqrt{\xi_2})+w_0. \quad (4)$$

其中

$$\xi_1=\frac{4\chi T_\Delta\sqrt{K_r t}}{\sqrt{\pi\rho_r c_r}}, \quad \xi_2=\frac{K_r\rho_r c_r}{(q_0c_w\rho_w)^2t}, \quad \xi_3=\frac{4\chi T_\Delta K_r}{q_0c_w\rho_w},$$

$$\text{erfc}(x)=1-\text{erf}(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^\infty e^{-\eta^2}d\eta,$$

$$\chi=\alpha_T(1+v)/(1-v), \quad T_\Delta=T(x,z,0)-T(0,0,t).$$

式中, w 为裂缝开度, m; w_0 为初始裂缝开度; z 为沿裂缝方向的长度坐标, m; t 为时间, s; $\text{erfc}(x)$ 为互补误差函数; χ 为热弹性应力系数; α_T 为基岩的线性热膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$; v 为排水泊松比; T_Δ 为初始时刻温度与端点的温度差, $^\circ\text{C}$; K_r 为岩石导热系数, W/(m· $^\circ\text{C}$); ρ_r 和 ρ_w 分别为基岩和流体水的密度, kg/(m³); C_r 和 C_w 分别为基岩和流体水的比热容, J/(kg· $^\circ\text{C}$); q_0 为注入流体速度, m²/s。

1.4 离散裂缝模型的温度模型

为了求解离散裂缝网络模型的流动, 取任意一条裂缝 i 作为研究对象, 由于假设流体只在裂缝中流动, 沿着裂缝建立相应的坐标, 如图 2 所示。

建立基岩中一维热传导数学模型为

$$\begin{cases} a_r \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial x^2} = \frac{\partial \Psi_i}{\partial t}, \\ \Psi_i(\infty, z, t) = 1, \\ \Psi_i(0, 0, t) = \Psi_{0,i}, \\ \Psi_i(x, z, 0) = 1. \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\Psi=(T-T_w)/(T_r-T_w),$$

式中, T_r 为初始储层温度, $^\circ\text{C}$; T_w 为注入水的温度, $^\circ\text{C}$; a_r 为基岩的热扩散系数, $a_r=K_r/(\rho_r C_r)$, 故无

因次温度的范围为 $[0, 1]$ 。

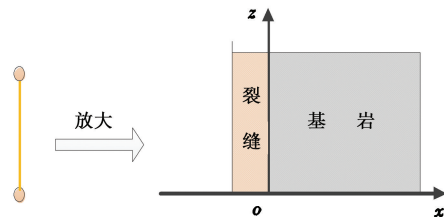


图 2 单条裂缝坐标示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single fracture

其次, 裂缝中对流的流体在边界处, 通过热传导的方式获取基岩中热量, 忽略岩石与水界面阻力, 假定水的温度与裂缝表面温度相等, 即

$$\left(\rho_w C_w w_i v_i \frac{\partial \Psi_i}{\partial z} = 2K_r \frac{\partial \Psi_i}{\partial x}\right)_{x=0}. \quad (6)$$

式中, w_i 为第 i 条裂缝的开度, m; v_i 为第 i 条裂缝的流速, m/s。

2 地热储层离散裂缝网络模型的求解

2.1 离散裂缝网络模型温度场求解

将一维热传导方程(5)、(6)变换到 Laplace 空间, 则方程化为

$$\begin{cases} s \bar{\Psi}_i(x, z, s) - 1 - a_r \frac{\partial^2 \bar{\Psi}_i}{\partial x^2} = 0, \\ \bar{\Psi}_i(\infty, z, s) = \frac{1}{s}, \\ \bar{\Psi}_i(0, 0, s) = \bar{\Psi}_{0,i}, \\ \left(\rho_w C_w w_i v_i \frac{\partial \bar{\Psi}_i}{\partial z} = 2K_r \frac{\partial \bar{\Psi}_i}{\partial x}\right)_{x=0}. \end{cases} \quad (7)$$

常微分方程的通解为

$$\bar{\Psi}_i(x, z, s) = \frac{1}{s} + C_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{\alpha_r}}x\right) + C_2 \exp\left(\sqrt{\frac{s}{\alpha_r}}x\right). \quad (8)$$

代入初始和边界条件方程(7)可得单条裂缝的温度分布为

$$\bar{\Psi}_i(0, z, s) = \frac{1}{s} + \left(\bar{\Psi}_{0,i} - \frac{1}{s}\right) \exp\left(-\beta_i z \sqrt{\frac{s}{\alpha_r}}\right). \quad (9)$$

其中

$$\beta_i = \frac{2K_r H}{m_i C_w}.$$

当裂缝为离散裂缝网络时, 第 i 条裂缝的初始温度由上一级裂缝 j 的温度决定, 故

$$\bar{\Psi}_{0,i} = \sum_{j \in J_i} \chi_j \bar{\Psi}_{0,j}; \quad \chi_j = m_j / \sum_{l \in J_i} m_l.$$

代入到方程(9)得:

$$\bar{\Psi}_i(0, z, s) = \frac{1}{s} +$$

$$\left(\sum_{j \in J_i} \chi_j \left(\bar{\Psi}_{0,j} - \frac{1}{s} \right) \exp(-\bar{\xi}_j) \right) \exp\left(-\beta_i z \sqrt{\frac{s}{\alpha_r}}\right). \quad (10)$$

其中 $\bar{\xi}_j = \frac{\beta_j L_j}{\sqrt{s/\alpha_r}}$; 以此类推, 多级离散裂缝网络如图 3 所示, 从注水井结点开始到裂缝 i , 计算得到裂缝 i 的温度分布为

$$\bar{\Psi}_i(z, s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s} \sum_k^{n_p} \left(\prod_{j \in s_k} \chi_j \exp(-\bar{\xi}_j) \right) \exp\left(-\beta_i z \sqrt{\frac{s}{\alpha_r}}\right). \quad (11)$$

其中 s_k 表示到达裂缝 i 的所有路径。

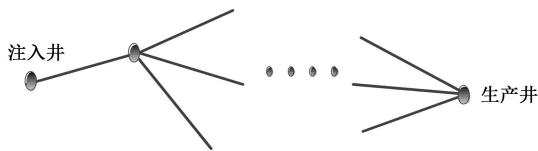


图 3 注入井与生产井的多级裂缝网络示意图

Fig. 3 Schematic diagram for a multi-stage fracture network between injection wells and production wells

最后, 将 Laplace 空间温度分布进行 Laplace 反演, 得到实空间下裂缝网络中, 任意一条裂缝的温度分布为

$$\Psi_i(z, t) = \sum_k^{n_p} \left(\prod_{j \in s_k} \chi_j \right) \operatorname{erf} \left[\sum_{j \in s_k} \xi_j + \frac{\beta_i z}{2\sqrt{\alpha_r t}} \right]. \quad (12)$$

其中

$$\xi_j = \frac{\beta_j L_j}{2\sqrt{\alpha_r t}}.$$

2.2 离散裂缝网络模型耦合求解过程

为了说明离散裂缝网络模型的耦合求解过程, 结合简单缝网进行说明, 如图 4 所示。地热储层有一口注水井和一口生产井, 注水井定注入量, 生产井定生产压力, 注入井与生产井通过 6 条裂缝、5 个结点相连, 其中裂缝 1、2、5、6 为水平缝, 裂缝 3、4 为垂直缝, 所有裂缝与地热储层垂直, 简化为二维处理, 把离散裂缝网络模型耦合求解过程分为以下 3 步。

(1) 求解各边的流量分布。基于离散裂缝网络的流动模型, 对质量守恒方程进行求解, 其中黏度采用地层温度下流体黏度, 开度取初始裂缝开度; 计算得到各结点的压力值, 通过压差计算各裂缝段的流量分布。如图 4 所示, 包括注水井和生产井共有 6 个结点, 通过方程(1)建立方程组 $DP = F$, D 为 6×6 的系数矩阵, P 为各结点的压力值, F

为流入流出量。

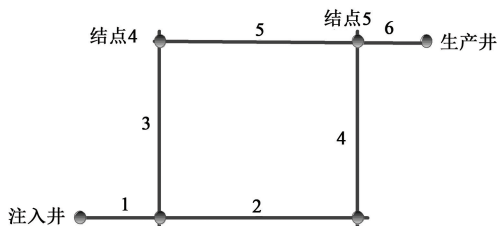


图 4 离散裂缝网络实例 1

Fig. 4 Discrete fracture network example 1

(2) 求解各条边的温度分布。如果某条裂缝只和单个结点相连, 则认为该裂缝中流体不流动, 裂缝两个端点无压差; 分析流入某裂缝的网络路径, 如图 4 从注水井到生产井可能流动的路径为 $s_1 = \{1, 3, 5\}$, $s_2 = \{1, 2, 4\}$, 存在两条路径, 代入式(12), 则裂缝 6 的温度分布可表示为

$$\Psi_6(z, t) = \chi_1 \chi_3 \chi_5 \cdot \operatorname{erf} \left[\xi_1 + \xi_3 + \xi_5 + \frac{\beta_6 z}{2\sqrt{\alpha_r t}} \right] + \chi_1 \chi_2 \chi_4 \cdot \operatorname{erf} \left[\xi_1 + \xi_2 + \xi_4 + \frac{\beta_6 z}{2\sqrt{\alpha_r t}} \right]. \quad (13)$$

(3) 黏度及开度的耦合迭代求解。在上一步中得到各裂缝段的温度分布, 通过式(3)得到相应水的黏度分布, 代入式(4)计算开度变化, 利用平均黏度和开度循环进行步骤(1)、(2)计算温度分布, 直至平均黏度与开度的值稳定。

3 模型正确性验证及参数敏感性分析

为了验证本模型解析方法的正确性, 在不考虑黏度及开度变化时, 与 TOUGH2 数值计算结果进行对比, TOUGH2 软件是由 Berkeley 国家实验室研发的一款通用数值模拟器, 针对裂缝及多孔介质中的多维、多相、多组分非等温流动过程, 对离散区域采用有限差分, 时间采用一阶向下全隐式方法^[27], 分析黏度及开度的变化对产水量的影响, 以及热提取过程注入量和注入温度的影响。根据上述求解过程, 对实例 1 (图 4) 进行求解, 基本参数: 裂缝 1、6 长度为 100 m, 裂缝 2、3、4、5 长度为 500 m, 裂缝初始开度为 0.003 m, 裂缝高度为 1 m; 水密度为 980 kg/m³, 水的比热容为 4 300 J/(kg · °C); 岩石矿化度为 2 000 mg/L, 岩石比热容为 1 050 J/(kg · °C), 岩石密度为 2 700 kg/m³, 岩石导热系数为 2.7 W/(m · °C), 泊松比为 0.185; 基岩的线性热膨胀系数为 $8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。边界条件: 注入量为 0.1 kg/s; 生产井定压力为 10 MPa; 注入水温度为 10 °C; 储层初始温度为 70 °C。

3.1 模型的正确性验证

基于离散裂缝网络模型,在不考虑水的黏度及裂缝开度变化的情况下,计算实例 1,将裂缝网络中各裂缝的温度分布与 TOUGH2 数值计算结果进行对比,如图 5 所示。本模型解析解结果与数值解 TOUGH2 计算结果吻合,生产井出口端早期误差约为 3%,但随着时间增加误差减小,结果几乎一致,说明本解析模型的可行性及正确性,当然随着裂缝复杂程度的增加,误差稍有变化;其次各裂缝出口端的温度变化,随着时间的增加,出口端的温度逐渐降低,其中注水井裂缝 1 由于冷水的不断注入,温度下降最快,其次为裂缝 2、3 出口端,裂缝 4、5 出口端,裂缝 6 出口端即生产井处。

图 6 为实例 1 离散裂缝网络各点处的温度分布,包括生产 1 a 和生产 10 a 的两种情况。由图 6 可见,生产 1 a 时,生产井的温度还没有突破,产出

井水的温度为 70 ℃,而到了生产 10 a 整个裂缝网络系统的温度下降,由图 6 可见生产井热突破时间大约为 3 a。

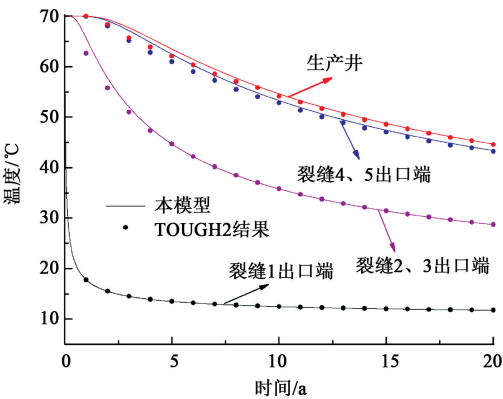


图 5 解析模型与 TOUGH2 结果对比
Fig. 5 Comparison between analytic model and TOUGH2 results

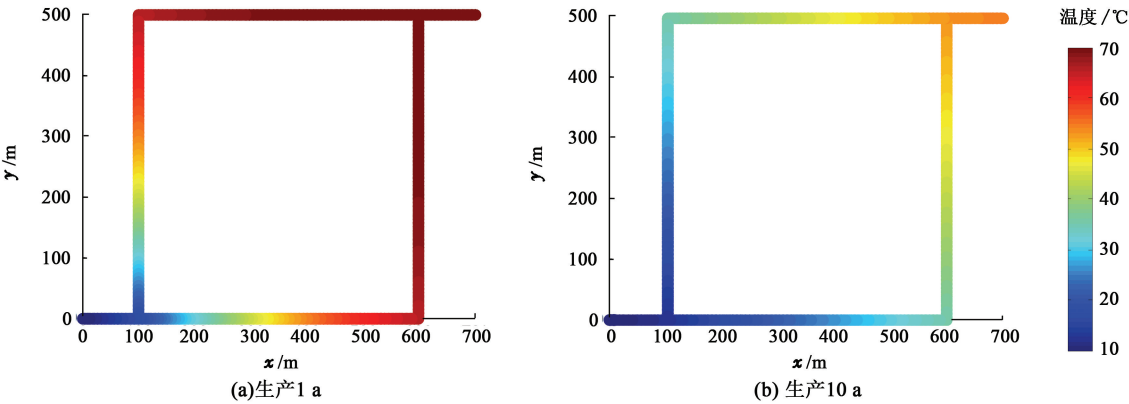


图 6 离散裂缝网络温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of discrete fracture network

3.2 离散裂缝网络黏度及开度的影响

3.2.1 离散裂缝网络黏度

在地热储层随着冷水的注入,水的黏度随温度和压力的变化发生改变,特别是温度对黏度的影响较大,本文中假定水的黏度满足 McCain 公式,主要受矿化度及温度的影响。当不考虑水的黏度变化时,水的黏度通过注入水初始温度由式(3)计算得到,在实例 1 的基础上不考虑开度变化,计算各条裂缝的平均黏度,如图 7 所示。

由图 7 可见,随着时间的增加,各条裂缝内水的黏度增加,渗流速度减小,故出口端流量减小,趋于不考虑黏度变化时流量值;当不考虑黏度变化时,黏度由注入水初始温度(10 ℃)计算得到,黏度较大为 1.368 mPa · s,随着冷水的注入,沿着离散裂缝分布,裂缝 1 最靠近注入端,因此裂缝 1 黏度与不考虑

黏度变化时几乎重合,裂缝 2、3 与裂缝 4、5 位置对称,因此计算黏度相同,同时说明算法的正确性,沿着冷水由注入端至出口端,裂缝中水的温度逐渐上升,因此沿着水的流动方向黏度逐渐减小,但随着时间的增加,裂缝中水的温度逐渐降低,黏度逐渐增大,增加幅度越来越小,特别是早期黏度增加比较明显,晚期几乎不变,对于出口端流量在开采 8 a 后几乎没有太大的影响。

3.2.2 离散裂缝网络开度

地热储层基于离散裂缝模型,考虑孔隙压力及热弹性的影响,建立开度随温度压力的变化过程。在不考虑黏度变化的基础上,计算实例 1 得到各裂缝的开度变化,图 8(a)为各裂缝在模拟 20 a 的过程中的平均开度随时间变化,图 8(b)为考虑与不考虑裂缝开度的产量变化。

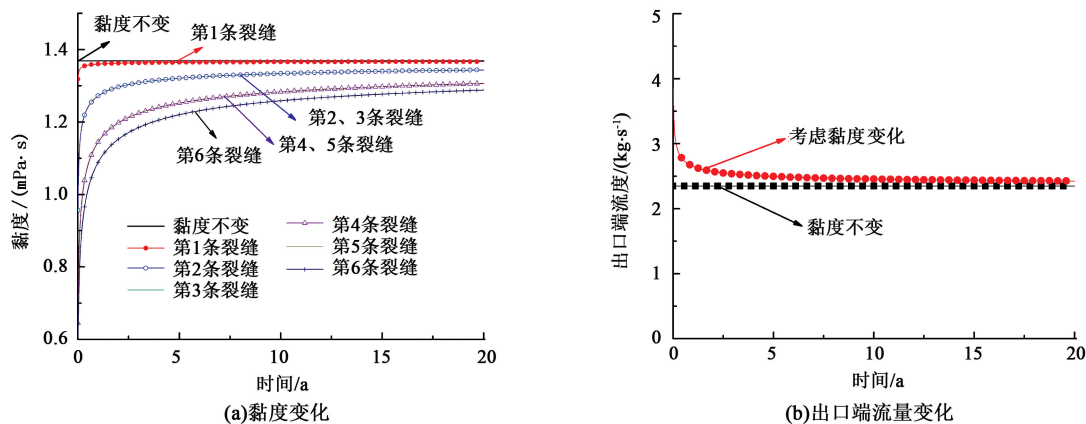


图 7 考虑与不考虑黏度变化时曲线对比
Fig. 7 Comparison curves of considered viscosity change or not

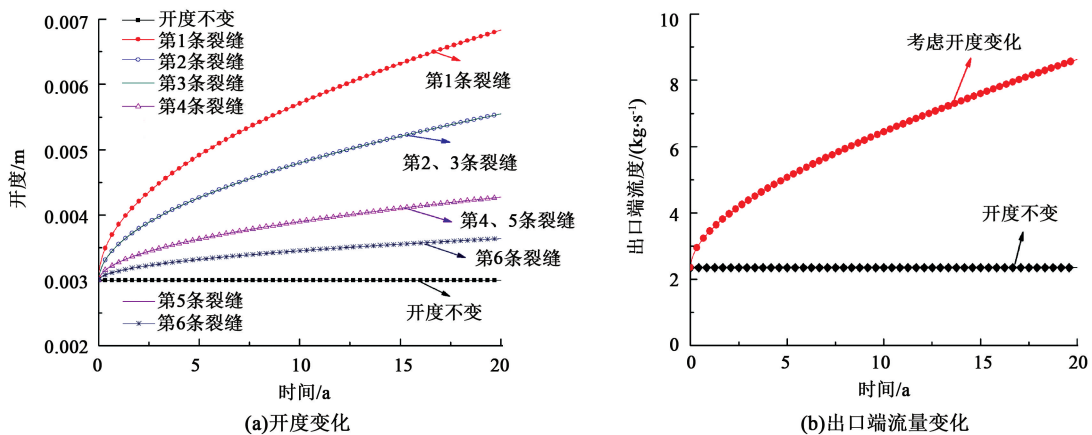


图 8 考虑与不考虑开度变化时曲线对比
Fig. 8 Comparison curves of considered fracture aperture change or not

由图 8 可见,随着时间的增加,各条裂缝的开度逐渐增大,同时出口端流量增加迅速,主要是由于裂缝的开度对流量的影响最大,裂缝开度的 3 次方为渗透率的函数,而流量直接取决于渗透率;不考虑开度变化时,设置开度为 0.003 m,出口端流量较小;由于冷水的注入,受应力和热弹性的影响导致裂缝开度的增加,且沿着水流动的方向裂缝开度的增加幅度越来越小,即在注入端裂缝开度的增加最大,生产端裂缝开度变化最小。

3.2.3 同时考虑黏度及开度变化

通过以上分析可见,考虑黏度后出口端的流量变化不大,而考虑开度变化后出口端的流量增加明显,在此同时考虑黏度和开度变化时,出口端流量的变化规律。在实例 1 的基础上同时考虑黏度随温度的变化,开度随温度和地层性质的影响得到图 9。

由图 9 可见,在不考虑黏度和开度变化时,出口端的流量为定值;考虑黏度变化后,早期流量变化明显,逐渐减小并趋于不考虑黏度变化时流量;考虑开度变化时流量迅速增加,主要因为裂缝的开度与流量

成 3 次方关系,当同时考虑裂缝的开度变化和水的黏度变化时,产量依旧呈上升趋势,由图 9 可见相对而言裂缝开度对出口端流量的影响更加明显,因此在模拟过程中有必要考虑裂缝开度对地热储层的影响。

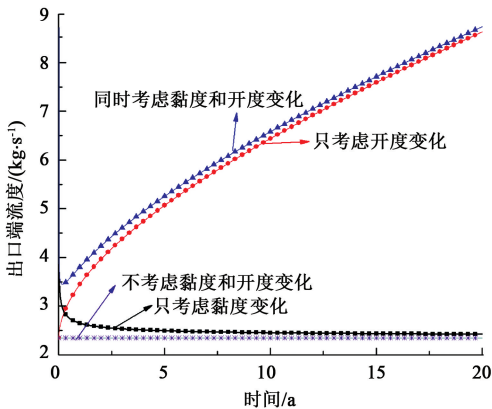


图 9 对比不同因素出口端流量
Fig. 9 Export flow rates with different factors

3.3 注入量的影响

为了分析注入量对离散裂缝网络温度的影响,在其他参数不变的情况下,分别设置注入量为 0.1、

0.2 和 0.3 kg/s 时,得到裂缝 1 出口端和生产井出口端处的温度变化,如图 10 所示。由图 10 可见,随着注入量的增加,裂缝 1 出口端和生产井出口端中水的温度逐渐减小,且随着注入量的线性增加,温度降低幅度越来越小,主要由于注入量增加,流体从地层带走的热量越多,裂缝中热量通过基岩块热传导越难及时补充。裂缝 1 出口端早期温度变化迅速,后期变缓;同时随着注入量的增加,生产井出口端热突破时间越来越早,因此在考虑热提取的过程中,不仅要考虑生产井流出水量,还需要综合考虑热水的温度及其他参数的影响,在各参数优化的情况下,选择合适的注入量,使产出热值实现最大化。

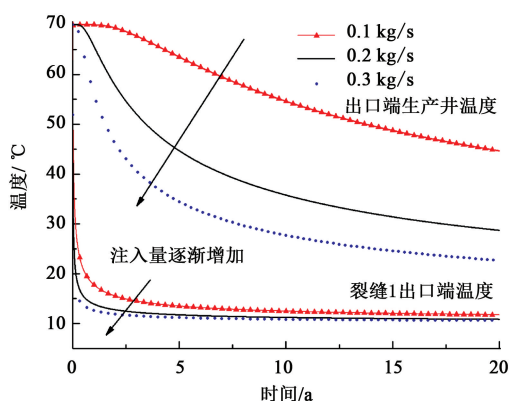


图 10 不同注入量下生产井出口端温度变化

Fig. 10 Variation of temperature with injection volume at production well outlet

3.4 注入温度的影响

为了分析注入水的温度对离散裂缝网络温度的影响,在其他参数不变的情况下,得到裂缝 1 出口端和生产井出口端处的温度变化,如图 11 所示。

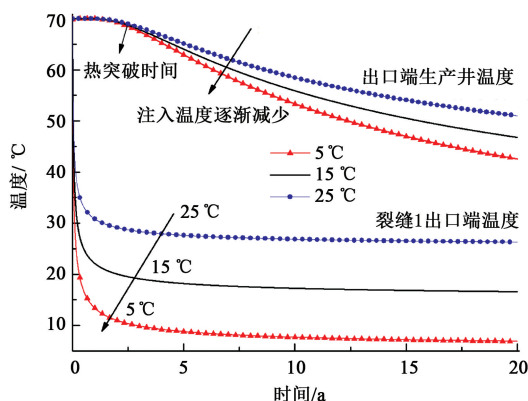


图 11 不同注入温度下生产井出口端温度变化

Fig. 11 Variation of temperature with injection temperature at production well outlet

由图 11 可见,随着注入水温度的增加,生产井出口端处温度早期相同,到后期注入温度越低,出口端生产井温度下降越快,温度越低。在注入水量和

裂缝网络结构相同的情况下,热损失近似,且由图 11 可见在不同注入温度下热突破时间几乎相同,受注入水温的影响不大,而主要受地层及裂缝网络的影响;其次随着注入水温度的线性增加,裂缝 1 出口端的温度早期迅速降低,并趋于相应的注入温度。

4 结 论

(1)随着时间的增加,各裂缝内水的黏度增加,同时出口端流量减小;当冷水由注入端流经采出端采出,裂缝中水的温度逐渐上升,沿着水的流动方向黏度逐渐减小,但随着时间的增加,裂缝中水的温度逐渐降低,黏度逐渐增大,增加幅度减小;黏度对流量的影响主要在早期,晚期影响较小。

(2)随着时间的增加,各条裂缝的开度逐渐增大,同时出口端流量增加迅速,主要是由于裂缝的开度对流量的影响较大;在同时考虑裂缝的开度变化和水的黏度变化时,产量依旧呈明显的上升趋势,故在干热岩模拟过程中不应忽略开度的变化。

(3)随着时间的增加,出口端的温度逐渐降低;随着注入量的增加,出口端中水的温度逐渐减小,且随着注入量的线性增加,生产井出口端中温度降低幅度越来越小;随着注入水温度的增加,出口端生产井处的温度早期相同,到后期注入温度越低,出口端生产井温度下降越快,温度越低,且在不同注入温度下热突破时间几乎相同,受注入水温度的影响不大。

参考文献:

- [1] MIT. The future of geothermal energy: impact geothermal system (EGS) on the United States in the 21st century: an assessment by an MIT-Led InterDisciplinary Panel [R]. Boston, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2006:372.
- [2] 汪集旻,胡圣标,庞忠和,等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报,2012,30(32):25-31.
WANG Jiyang, HU Shengbiao, PANG Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science & Technology Review, 2012,30(32):25-31.
- [3] 蔺文静,刘志明,马峰,等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报,2012,33(5):807-811.
LIN Wenjing, LIU Zhiming, MA Feng, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2012,33(5):807-811.
- [4] 赵阳升,万志军,康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [5] 许天福,张延军,曾昭发,等. 增强型地热系统(干热

- 岩)开发技术发展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 42-45.
- XU Tianfu, ZHANG Yanjun, ZENG Zhaofa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock) [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 42-45.
- [6] 李虞庚, 蒋其垠, 杨伍林. 关于高温岩体地热能及其开发利用问题[J]. 石油科技论坛, 2007, 1: 28-40.
- LI Yugeng, JIANG Qikai, YANG Wulin. On the geothermal energy of high temperature rock mass and its development and utilization[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2007, 1: 28-40.
- [7] 王晓星, 吴能友, 苏正, 等. 增强型地热系统开发技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 15-22.
- WANG Xiaoxing, WU Nengyou, SU Zheng, et al. Progress of the enhanced geothermal systems (EGS) development technology[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 15-22.
- [8] NAKATSUKA K. Field characterization for HDR/HWR: a review[J]. Geothermics, 1999, 28(4): 519-531.
- [9] ZENG Yuchao, ZHAN Jiemin, WU Nengyou, et al. Numerical simulation of electricity generation potential from fractured granite reservoir through vertical well at Yangba-jing geothermal field[J]. Energy, 2016, 103: 290-304.
- [10] GELET R, LORET B, KHALILI N. A thermos-hydro-mechanical coupled model in local thermal non-equilibrium for fractured HDR reservoir with double porosity[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: 1-23.
- [11] QUAN Gan, DEREK Elsworth. Production optimization in fractured geothermal reservoirs b coupled discrete fracture network modeling[J]. Geothermics, 2016, 62: 131-142.
- [12] MAFFUCCI R, BIGI S, CORRADO S, et al. Quality assessment of reservoirs by means of outcrop data and "discrete fracture network" models: the case history of Rosario de La Frontera (NW Argentina) geothermal system[J]. Tectonophysics, 2015, 647: 112-131.
- [13] 孙致学, 徐轶, 吕抒恒, 等. 增强型地热系统热流固耦合模型及数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 109-117.
- SUN Zhixue, XU Yi, LÜ Shuhuan, et al. A thermo-hydro-mechanical coupling model for numerical simulation of enhanced geothermal systems[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(6): 109-117.
- [14] YAN Xia, HUANG Zhaoqin, YAO Jun, et al. An efficient embedded discrete fracture model based on mimetic finite difference method[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 145: 11-21.
- [15] YAN Xia, HUANG Zhaoqin, YAO Jun, et al. An efficient hybrid model for fractured reservoirs[J]. Science China, 2016, 59: 1609-1616.
- [16] CAO Wenjong, HUANG Wenbo, JIANG Fangming. A novel thermal-hydraulic-mechanical model for the enhanced geothermal system heat extraction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 100: 661-671.
- [17] SUN Zhixue, ZHANG Xu, XU Yi, et al. Numerical simulation of the heat extraction in EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model[J]. Energy, 2017, 120: 20-33.
- [18] ZENG Yuchao, WU Nengyou, SU Zheng, et al. Numerical simulation of heat production potential from hot dry rock by water circulating through a novel single vertical fracture at desert peak geothermal field[J]. Energy, 2013, 63: 268-282.
- [19] FOX D B, SUTTERD D, BECKERS K F, et al. Sustainable heat farming: modeling extraction and recovery in discretely fractured geothermal reservoirs[J]. Geothermics, 2013, 46: 42-54.
- [20] FOX D B, KOCH D L, TESTER J W. An analytical thermohydraulic model for discretely fractured geothermal reservoirs[J]. Water Resources Research, 2016, 52(9): 6792-6817.
- [21] Jr MCCAIN W D. Reservoir water property correlations state of the art[J]. SPE Reservoir Engineering, 1991, 6(2): 266-272.
- [22] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006.
- [23] MOSSOP A P. Seismicity, subsidence and strain at the geysers geothermal field[D]. USA: Stanford University, 2001.
- [24] GHASSEMI A, TARASOV S, CHENG A H. Integral equation solution of heat extraction induced thermal stress in enhanced geothermal reservoirs[J]. Int J Numer Anal Meth Geomech, 2005, 29: 829-844.
- [25] GHASSEMI A, ZHANG Q. Poro-thermoelastic response of a stationary crack using the displacement discontinuity method[J]. ASCE J Eng Mech, 2006, 132: 26-33.
- [26] AHMAD G, ANDREW N, ALEXANDER C. Effects of heat extraction on fracture aperture: a poro-thermoelastic analysis[J]. Geothermics, 2008, 37: 525-539.
- [27] PRUESS K, OLDENBURG C, MORIDIS G. TOUGH2 user's guide, version 2.1[R]. LBNL-43134, 2012.