

基于局部热非平衡的含裂缝网络干热岩采热性能模拟

曲占庆, 张伟, 郭天魁, 孙江, 巩法成, 田雨, 李小龙

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:采用压裂技术在干热岩中构造裂缝网络,工作流体在裂缝内的循环携热使干热岩中高温资源得到有效提取。为真实模拟岩体与流体间能量传递,基于局部热非平衡理论,将储层视为由基质岩体与离散裂缝组成的双重介质模型,建立温度-渗流-应力全耦合模拟采热过程中流体流动、热量传递、岩体变形的相互作用,进而对不同注采井网和模型参数下采热性能进行研究。结果表明:干热岩资源开采过程的模拟有必要采用温度-渗流-应力耦合,裂缝分布的非均匀性对采热性能有影响;注采井网的合理布局有利于地热能大规模动用与高效开发;基岩热膨胀系数影响温差引起的热应力作用从而影响采热性能;合理选择注采压差有利于开发,压差过大将缩短开发寿命,注入温度越高采热速率越高。

关键词:干热岩;离散裂缝网络;温度-渗流-应力耦合;局部热非平衡;注采井网

中图分类号:P 314

文献标志码:A

引用格式:曲占庆,张伟,郭天魁,等.基于局部热非平衡的含裂缝网络干热岩采热性能模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(1):90-98.

QU Zhanqing, ZHANG Wei, GUO Tiankui, et al. Numerical simulation of heat mining performance of hot dry rocks with fracture network based on a local thermal non-equilibrium model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(1): 90-98.

Numerical simulation of heat mining performance of hot dry rocks with fracture network based on a local thermal non-equilibrium model

QU Zhanqing, ZHANG Wei, GUO Tiankui, SUN Jiang, GONG Facheng, TIAN Yu, LI Xiaolong

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

Abstract: Heat carrying fluids can be injected and circulated in fractured networks formed in hot dry rocks for effective heat mining. In order to simulate the heat transfer process between the rock mass and the working fluid realistically, a local thermal non-equilibrium model was adopted, considering the reservoir as a dual-medium model composed of matrix rock and discrete fractures. The interactions of the fluid flow, heat transfer and rock mechanics during the heat mining process was simulated via a full thermo-hydro-mechanical (THM) coupling model, and the heat mining performance with different inject-product well patterns and operation parameters was investigated. The simulation results show that the adoption of the THM coupling model is necessary and adequate for the simulation of the heat resource mining process, and the heterogeneous distribution of the fractures has a significant influence on the performance of heat mining. Reasonable layout of the injection-production well patterns is conducive to the large-scale utilization and efficient exploitation of the geothermal energy. The thermal expansion coefficient of the rock matrix can affect the thermal stress induced by temperature difference, thus affecting the heat mining performance. Rational selection of injection-production pressure difference is beneficial heat extraction, but an excessive pressure difference can shorten the duration of the process.

收稿日期:2018-02-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51874338);中央高校基本科研业务费专项资金项目(17CX06008, 17CX02077);青岛市应用基础研究计划项目(17-1-1-20-jch)

作者简介:曲占庆(1963-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为采油工程理论与技术、地热资源开发。E-mail:quzqh@upc.edu.cn。

通信作者:张伟(1990-),男,博士研究生,研究方向为增强型地热系统、水力压裂。E-mail:18562029717@163.com。

Keywords: hot dry rocks; discrete fracture network; thermo-hydro-mechanical coupling; local thermal non-equilibrium; injection-production well pattern

干热岩中地热资源丰富,但低孔低渗、埋深大等特点使开发难度增大。利用压裂技术形成增强型地热系统为从干热岩中高效提取热能提供了可能。现场施工试验^[1-2]、数值模拟研究^[3]、物理模拟试验^[4]均表明低温压裂液注入高温干热岩储层时的冷冲击作用促进了多裂缝的形成与裂缝网络的构建。针对干热岩储层改造后形成增强型地热系统的采热性能,国内外学者开展了温度-渗流耦合^[5-6]与温度-渗流-应力(thermo-hydro-mechanical, THM)耦合^[7-9]采热性能的相关研究。然而大部分数值模拟研究基于热平衡理论,忽略了热储层中岩体与流体间的热交换, Sun 等^[10]在前期研究的基础上基于局部热非平衡理论开展了相关研究,但其中采热性能仅对产出流体温度进行描述评价指标较单一。笔者以产出液质量流量、产出液温度、采热速率为评价指标,基于局部热非平衡理论,将储层视为由基质岩体与离散裂缝组成的双重介质模型,建立 THM 耦合模拟采热过程中流体流动、热量传递、岩体变形的相互作用,借助有限元软件 COMSOL Multiphysics 实现所建立模型的全耦合求解,进而对不同注采井网和模型参数下采热性能进行探讨。

1 耦合模型的建立与求解

1.1 模型假设条件

假设:含裂缝网络干热岩储层为由基质岩块与离散裂缝构成的双重介质模型,改造后形成的裂缝网络与基质相比渗透率较高,因此构成了携热流体的主要流动通道,基质和裂缝中的渗流规律符合达西定律;流体和岩石间不发生化学反应;导热符合傅里叶定律,不考虑热辐射的影响;储层压力高,不存在相变为单相液体流动;基于小变形理论认为基岩为热弹性。

1.2 控制方程

根据以上假设,基于局部热非平衡理论,含裂缝网络干热岩开发过程中 THM 耦合数学模型控制方程有质量守恒方程、能量守恒方程和应力平衡方程。

1.2.1 质量守恒方程

岩体内质量守恒方程为

$$\rho S \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho v) = Q_m. \quad (1)$$

其中

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p.$$

式中, ρ 为岩体密度, kg/m^3 ; S 为岩体的储水系数; t 为时间, s ; Q_m 为渗流源汇项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; v 为岩块中水流速, m/s ; k 为岩体渗透率, m^2 ; μ 为流体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为压力, Pa 。

裂缝内质量守恒方程为

$$d_f \rho_f S_f \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \tau (d_f \rho_f v_f) = Q_f. \quad (2)$$

其中

$$v_f = -\frac{k_f}{\mu} \nabla \tau p.$$

式中, d_f 为裂缝宽度, m ; ρ_f 为裂缝密度, kg/m^3 ; S_f 为裂缝储水系数, Pa^{-1} ; Q_f 为岩块与裂隙面的流量交换; k_f 为裂缝渗透率, m^2 ; $\nabla \tau$ 沿裂缝切向梯度。

1.2.2 能量守恒方程

对于增强型地热系统中流体的换热,工作流体与固体骨架间的温差不容忽视,因此局部热平衡模型将导致较大的计算误差。采用两个不同的能量方程分别对流体和固体骨架中的热量传递进行描述实现非平衡传热,从而更加真实准确地模拟基质岩体与裂缝内流体的能量传递过程。

流体能量守恒方程^[11]为

$$\varepsilon \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f v \cdot \nabla T_f = \varepsilon \lambda_f \nabla^2 T_f + h_{sf} \alpha_{sf} (T_s - T_f). \quad (3)$$

固体骨架能量守恒方程为

$$(1-\varepsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\varepsilon) \lambda_s \nabla^2 T_s - h_{sf} \alpha_{sf} (T_s - T_f). \quad (4)$$

式中, C 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ρ 为密度, kg/m^3 ; h_{sf} 为固体骨架与液体间换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; α_{sf} 为两相界面的比表面积, m^2/g ; T_s 为岩石骨架温度, K ; T_f 为流体温度, K ; 下标 s, f 分别对应岩石和流体; ε 为岩石孔隙率。

裂缝内热传导与热对流能量平衡方程^[10]为

$$d_{fr}(\rho C)_{\text{eff}} \frac{\partial T_f}{\partial t} + d_{fr} \rho_f C_f v \cdot \nabla \tau T_f = Q_{fr} + \nabla \tau (d_{fr} \lambda_{\text{eff}} \nabla \tau T_f). \quad (5)$$

其中

$$(\rho C)_{\text{eff}} = \rho_f C_f (1-\varphi) + \rho_{fr} C_{fr} \varphi, \quad k_{\text{eff}} = \lambda_f (1-\varphi) + \lambda_{fr} \varphi.$$

式中, d_{fr} 为裂隙宽度, m ; $(\rho C)_{\text{eff}}$ 为有效比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; K_{eff} 为有效热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; v 为

岩块中水流速, m/s, 流体遵从达西定律。

1.2.3 应力平衡方程

$$Gu_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu}u_{j,ji} - \alpha_B p_i - K' \alpha_T T_i + F_i = 0. \quad (6)$$

其中

$$G = E/2(1+\nu).$$

式中, u_i 为位移分量, m; G 为剪切模量, Pa; ν 为泊松比; E 为弹性模量, Pa; F_i 为 i (二维坐标下 i 指下 x 、 y) 方向每单位体积体力, Pa; $-\alpha_B p_i$ 为水压力作用项 (孔隙压力作用下的渗透力); α_B 为 Biot 系数; $-K' \alpha_T T_i$ 为热应力项; α_T 为岩体热膨胀系数, K^{-1} ; K' 为多孔介质体积弹性模量, $K' = E/3(1-2\nu)$ 。

裂隙近似由一对法向和切向位移表面构成, 岩体裂隙变形方程为

$$u_n = \sigma'_n / K_n, u_s = \sigma'_s / K_s. \quad (7)$$

$$\sigma'_n = \sigma_n - \alpha_B p, \sigma'_s = \sigma_s. \quad (8)$$

式中, u 为位移, m; σ 为总应力, Pa; σ' 为有效应力, Pa; K 为刚度, Pa/m; 下标 n 、 s 分别指示裂隙面法向和切向。通过对裂隙内部边界进行弱形式描述代表裂隙的刚度^[5,10]。

1.3 THM 耦合相互作用关系

(1) 渗流场对温度场的影响: 裂隙内冷流体与高温岩体进行热交换, 岩体中原有平衡状态的温度场发生改变。

(2) 温度场对渗流场的影响: 高温高压岩体内, 裂隙内水渗流物理特性 (如密度、黏度等) 不再是常数, 随温度变化发生变化, 从而影响岩体内流体流动。

(3) 温度场对应力场的影响: 岩体温度的改变影响岩体固有的物理力学性质, 同时温度效应产生的热应力会导致原有应力场分布改变。Zhu 等^[12]通过实验获得了不同温度下弹性模量。

(4) 应力场对温度场的影响: 应力场变化引起岩体结构改变时的变形生热, 同时岩体的结构变形会影响孔隙内部的导热性能。

(5) 渗流场对应力场的影响: 孔隙压力的存在影响岩石有效应力。

(6) 应力场对渗流场的影响: 应力场变化导致了孔隙和裂隙变化, 进而改变了岩体与裂隙的渗透性能。

与裂隙的渗透率相比岩石基质的渗透率极低, 因此忽略基质渗透率的变化。裂隙渗透率的变化进行描述为

$$k_f = k_0 \exp(-\alpha \sigma'_n). \quad (9)$$

式中, k_f 为裂隙渗透率, m^2 ; k_0 为裂隙渗透率初始值 (不承受有效应力时), m^2 ; σ'_n 为裂隙断裂面所受的有效应力, Pa; α 为与裂隙受力变形相关的归一化常数。

1.4 模型的求解

应用有限元软件 COMSOL Multiphysics 可将各物理场联立求解, 实现耦合分析中各物理场的全面耦合, 从而反映真实的模拟过程。采用有限元方法对裂隙网络的模拟通常使用具有一定厚度的单元层刻画裂隙, 但当裂隙网络规模较大时, 往往受限于计算能力而无法求解。借鉴文献[10]和[13], 将二维离散裂隙网络设置为线单元, 并借助软件中内置的裂隙模块进行求解。所建立耦合模型与借助 COMSOL 实现的数值求解方法的可行性与准确性通过对比白冰^[14]针对一维条件下饱和土热弹性固结问题获得的解析解得到验证。

2 计算模型

2.1 模型描述

假定压裂改造后含裂隙网络干热岩计算模型为 700 m×700 m 的二维模型。改造后干热岩中裂隙网络认为是在注入水压力、热应力与储层中原有裂隙的共同作用下所形成的^[14,10], 模型中采用随机裂隙进行描述。随机生成的裂隙网络由两组裂隙构成, 裂隙数量为 245 条, 倾角分别为 0°和 90°, 裂隙长度均值为 70 m, 方差为 30 m, 由于增强型地热系统中的主要导水通道为联通裂隙, 在构建裂隙网络模型时去掉不联通的裂隙^[13]。模型采用两注一采的注采方式, 计算模型如图 1 所示, 蓝色圆点代表注入井, 红色圆点代表采出井, 注入井与采出井距离均为 350 m。

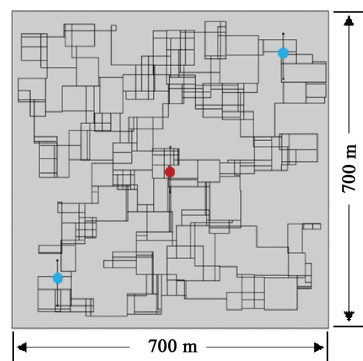


图 1 含裂隙网络干热岩模型

Fig. 1 Hot dry rock model with fracture network

2.2 计算条件

利用上述模型模拟含裂隙网络干热岩采热全过程, 耦合分析从注入水的时刻开始, 时间步长为 1 d,

总时间段为 40 a。边界条件和初始条件如下:

(1)渗流场。为确保系统中的水循环给定压力边界条件。假设注入井给定压力为 44 MPa,生产井给定压力为 40 MPa,注采井直径设置为 0.2 m。其他外部条件为不可渗透边界。在携热流体注入前,储层中的初始水压为 40 MPa。

(2)温度场。注入井的水温为 20 ℃。为真实模拟 EGS 周边基岩对 EGS 区域的传热将边界设为开边界。对于干热岩基质岩体初始温度为 200 ℃。

(3)应力场。模型四周边界设置为位移约束边界。为便于明确低温流体注入过程对储层应力场的扰动,不考虑地应力场的影响。

应用 COMSOL Multiphysics 实现了固体形变、流体渗流与热量传递的全耦合,并对所建立的二维模型进行求解。采用三角形网格进行网格剖分,形成三角形单元 49 725 个与边界单元 5 932 个。

模型中采用的主要材料参数如下:基岩密度为 2 700 kg/m³,渗透率为 1×10⁻¹⁷ m²,孔隙度为 1%,导热系数为 3.1 W/(m·K),弹性模量为 40 GPa,泊松比为 0.25,比热容为 950 J/(kg·K),储水率为 1×10⁻⁸ Pa⁻¹,热膨胀系数为 6×10⁻⁶ K⁻¹;裂缝密度为 1 200 kg/m³,宽度为 0.002 m,渗透率为 3×10⁻¹¹ m²,孔隙度为 30%,储水率为 1×10⁻⁹ Pa⁻¹,比热容为 850 J/(kg·K),法向刚度为 100 GPa/m,切向刚度为 30 GPa/m;Biot 系数为 1。

3 模拟结果分析

3.1 渗流场、温度场、应力场演化

向含裂缝网络干热岩储层中注入低温携热流体循环采热过程伴随着渗流场、温度场、应力场的互相影响与制约。由于基岩渗透率极低,少量携热流体滤失到基岩中,如图 2 所示。流体主要沿

裂缝渗流,联通的裂缝网络成为 EGS 中主要的导水通道。同时携热流体在流动过程中与裂缝周围基岩发生热量交换,如图 3 所示。低温流体被不断加热,裂缝周围基岩中热量被不断提取,携热流体流动一段距离后被加热至储层温度,此时的流体与基岩达到热平衡不再发生热交换。不论是流体渗流产生的水压作用还是注入流体与储层温差导致的热应力作用都将对应力场分布形成扰动,应力场的变化将直接影响储层中裂缝的渗流能力。在裂缝网络中设置裂缝渗透率探针,如图 4 所示。低温流体的注入使高温基岩遇冷收缩,同时流体压力也导致裂缝和基岩受力发生形变,在两者的共同作用下裂缝渗透率提高。由于 a、d 两点处离注入井距离近,开发初期即受到水压力与热应力的影响,裂缝渗透率升高较早,而 b、c 处距离注入井远,水压力与冷锋面扩散至 b、c 处需一段时间,因此系统开发约 4 a 后渗透率才有所提升,且此处流体已被加热,热应力的作用不及 a、d 处剧烈,导致提升幅度不大。

裂缝分布存在非均匀性,裂缝密集区域的热对流更明显,冷锋面范围更大,如图 3 所示。裂缝稀疏区域,周围基岩中未提取热量多,基岩对携热流体加热能力更强,冷锋面范围较小。裂缝分布的非均匀性也同样导致了储层有效应力场的非均匀性,如图 5 所示。

随着开发的进行,冷锋面逐渐向采出井推进,直至该 EGS 系统出现热突破,如图 3(c) 所示。裂缝周围基岩温度的降低也使裂缝内流体黏度增加流速下降(图 2)。冷锋向采出井的不断推进也导致了有效应力场的不断变化。因此在 EGS 开发中流体渗流、热量传递、固体形变的相互作用伴随着整个开发过程。

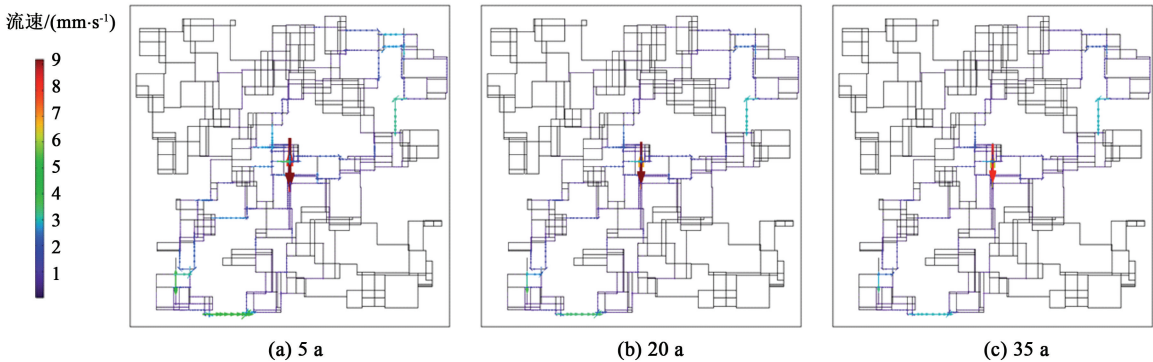


图 2 不同时刻裂缝网络内速度场分布

Fig. 2 Distribution of velocity field in fracture network at different time

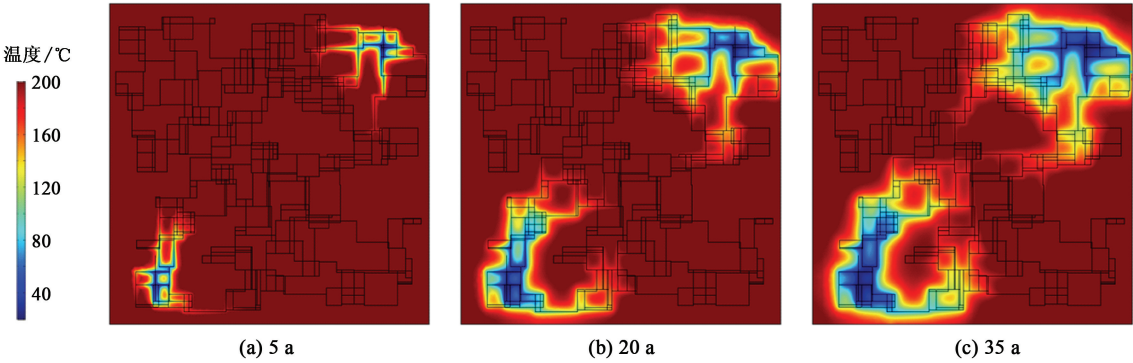


图 3 不同时刻干热岩储层温度场分布

Fig. 3 Distribution of temperature field in hot reservoir at different time

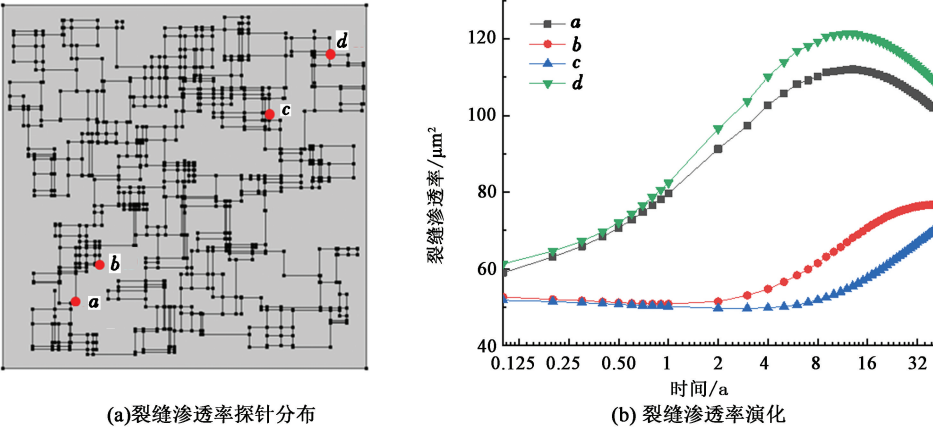


图 4 裂缝渗透率探针分布与不同时刻渗透率演化

Fig. 4 Location of fracture permeability probes and permeability evolution

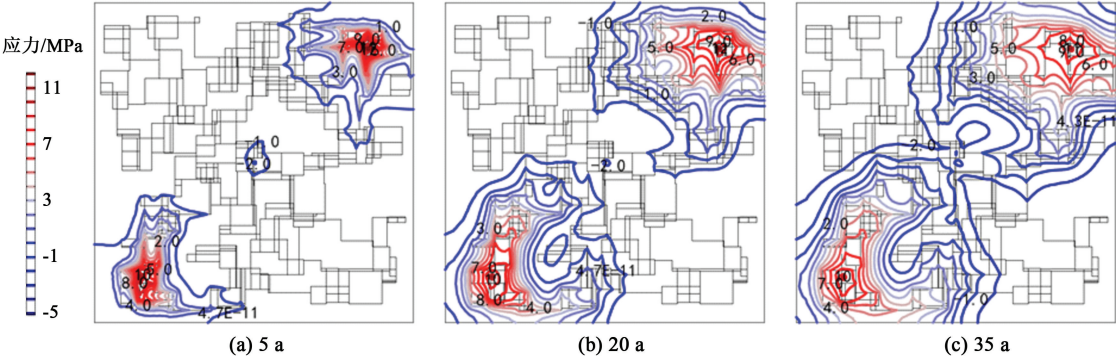


图 5 不同时刻干热岩储层有效应力场等值线图

Fig. 5 Contour map of effective stress field in hot reservoir at different time

3.2 注采井网对采热性能的影响

注采井网的变化必然对渗流场、温度场、应力场产生影响,最终改变干热岩储层的采热性能。采用图 1 中裂缝网络模型,分别设置一注一采、两注一采、四注一采 3 种不同的注采井网,注采井井距均设置为 350 m。以采出井的产出液温度、产出液质量流量、采热速率^[15-17]作为采热性能评价指标,产热速率为

$$W_h = q(h_{pro} - h_{inj}). \quad (10)$$

式中, W_h 为产热速率, MW; q 为产出液质量流量, kg/

s; h_{pro} 为产出液比焓, kJ/kg; h_{inj} 为注入液比焓, kJ/kg。

井网中注入井数量的增加可为 EGS 注入更多的携热流体,在裂缝网络中进行热交换后,更多热流体在采出井被采出。如图 6(a) 所示,一注一采开发 5 a 时产出液质量流量为 32 kg/s, 井网改为两注一采后开发 5 a 时产出液质量流量为 55 kg/s, 四注一采开发 5 a 时达到了 75 kg/s。不同注采井网干热岩储层温度场分布如图 7 所示。注入井的加入,使干热岩中更多区域的地热资源得到动用,同时合理的

注采井布局并未造成冷锋面扩大导致的热突破加快。如图 8(b)所示,注入井的加入反而缓解了产出

采热速率提高有效。

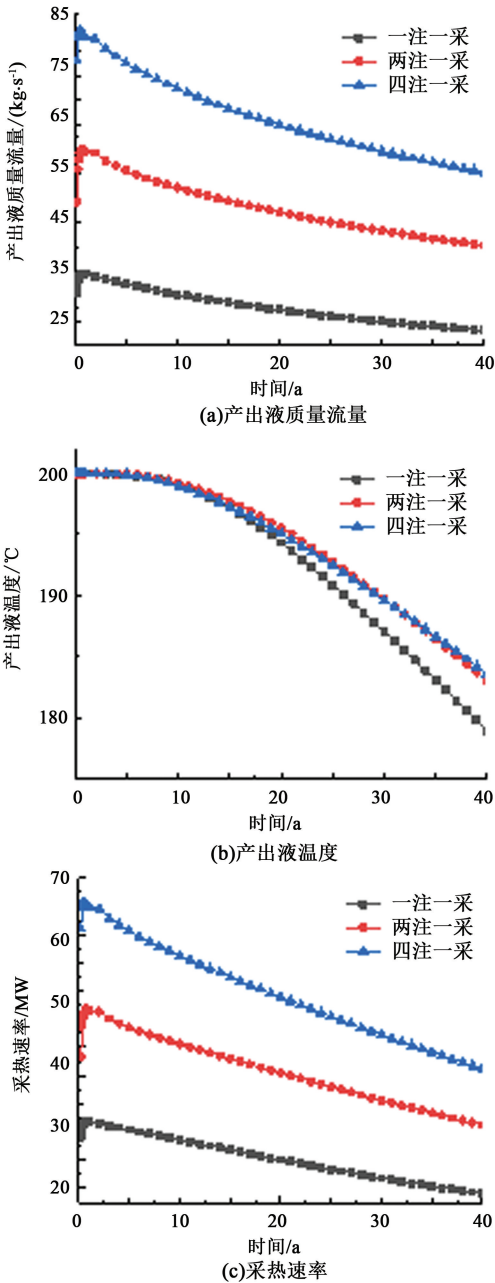


图 6 不同注采井网下采热性能
Fig. 6 Heat mining performance with different inject-product well patterns

液温度的降低。分析图 8 可见,裂缝网络中同一位置处,采用一注一采时裂缝内流速最快,增加注入井数量后,在产出井附近产生流体累加,裂缝内流速减缓,增加了其在干热岩中的换热从而缓解了产出液温度的降低。注入井数量的增加使产出液质量流量大幅提高,同时产出液温度未出现下降,因此 EGS 采热速率提升明显,四注一采开发 5 a 时采热速率达到 60 MW。可见在井网中加入注入井对于系统

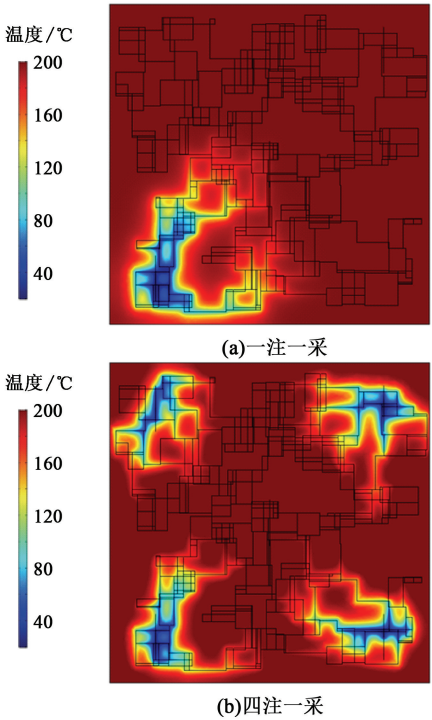


图 7 开发 20 a 时不同注采井网干热岩储层温度场分布
Fig. 7 Distribution of temperature field in hot reservoir with different inject-product well pattern after 20-year development

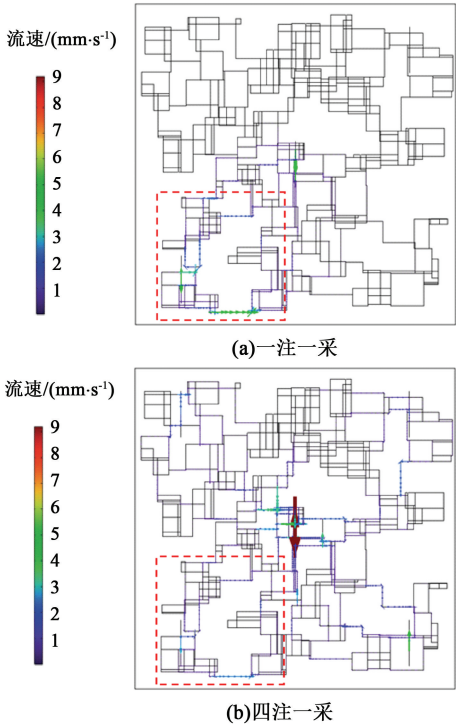


图 8 开发 20 a 时不同注采井网干热岩储层速度场分布
Fig. 8 Distribution of velocity field in fracture network with different inject-product well pattern after 20-year development

3.3 模型参数对采热性能的影响

采热速率结合了产出液质量流量与产出液温度,是评价系统采热性能的综合评价指标。鉴于对注采井网研究的认识,采用四注一采的开发方式,针对模型关键参数开展敏感性分析。

基质渗透率的增加首先引起渗流场的改变,更多低温携热流体由裂缝流向基质,高温基岩遇冷收缩加剧。因此裂缝开度增加,应力场受到影响,同时裂缝渗透率提高,产出液质量流量增加采热速率提高,如图9(a)所示,基质渗透率为 $1\times 10^{-17}\text{ m}^2$ 与 $1\times 10^{-18}\text{ m}^2$ 时相比采热速率增幅较大,但与 $1\times 10^{-16}\text{ m}^2$

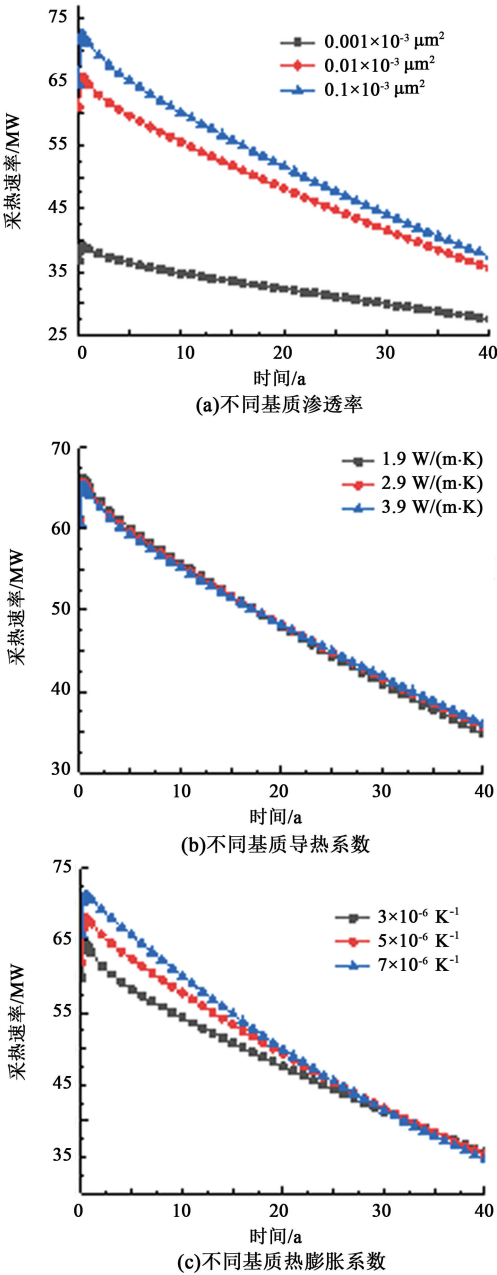


图9 储层物性对采热速率的影响

Fig.9 Effect of reservoir properties on heat mining rate

时相比增幅较小,这是由于基岩渗透率增大到一定程度后,大量工作流体滤失所致。

基质导热系数通过改变温度场从而影响渗流场与应力场。基质导热系数对储层温度场影响较小,如图9(b)所示。其对采热速率的影响也较微弱,该模拟结果与Sun等^[10]的研究结果一致。

基质热膨胀系数的不同首先影响应力场,热膨胀系数越大,高温基岩遇冷产生的热应力越强,基岩收缩位移越大,裂缝渗透率提升越大,如图9(c)所示。热膨胀系数增加开发0~30a间采热速率增加,但30a后采热速率降低。这是由于低温流体注入产生的热应力作用在使裂缝渗透率提高的同时也导致了热窜流^[7],使热突破更快,产出液温度降低速度增加。

注采压差增加储层中流体流速增加,采热速率提高,同时流速的增加将导致携热流体换热不充分,如图10所示,随着开发时间的延长由注采压差增加

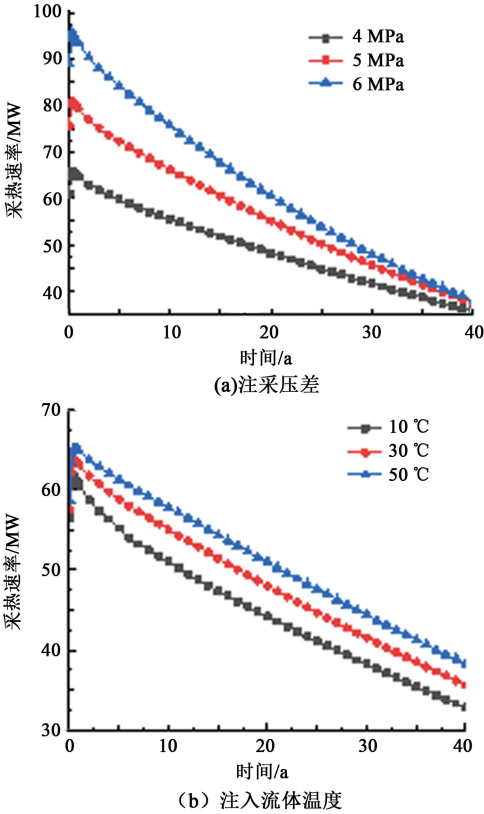


图10 注采参数对采热速率的影响

Fig.10 Effect of inject-product parameters on heat mining rate

引起的采热速率提升幅度减小。若压差过大将导致EGS开发寿命缩短,采热速率快速下降。不同注入温度对应力场与渗流场均有影响。注入温度越高低温流体导致的热应力作用越小,高温流体温度也更有利于

流体流动,因此注入流体温度越高采热速率越高。

4 结 论

(1)向含裂缝网络干热岩中注入携热流体采热过程中涉及 THM 耦合,其中应力场受水压力与温差所致热应力的共同作用,裂缝网络分布的非均匀性对流体渗流、冷锋面扩散及应力场分布均有影响。

(2)采用局部热非平衡理论对干热岩采热过程进行模拟,考虑换热过程中工作流体与固体骨架间的温度差异可更真实地描述岩石与流体间热交换。

(3)井网中注入井的加入,使干热岩中更多区域的地热资源得到动用,产出液质量流量大幅提升,合理的布局可避免热突破加快,从而有效提高系统采热速率,四注一采开发 5 a 时采热速率可达 60 MW。

(4)储层基质渗透率对采热速率的影响大于基质导热系数。基质热膨胀系数通过控制温差引起的热应力影响采热性能,其数值越大携热流体越容易发生热窜流。注入温度越高对干热岩开发越有利,注采压差应调节适当,过大的压差虽然产出液质量流量高,但会影响开发寿命。

参考文献:

- [1] JULIO G, CRAIG H, MARK W, et al. The northwest geysers EGS demonstration project, California-part 1: characterization and reservoir response to injection[J]. *Geothermics*, 2016,63:97-119.
- [2] JONNY R, PIERRE J, DOBSON P F, et al. The northwest geysers EGS demonstration project, California-part 2: modeling and interpretation[J]. *Geothermic*, 2016, 63:120-138.
- [3] TOMAC I, GUTIERREZ M. Micro-mechanics of hydro-thermo-mechanical fracture propagation in granite[R]. ARMA 14-7148, 2014.
- [4] 郭亮亮. 增强型地热系统水力压裂和储层损伤演化的试验及模型研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
- GUO Liangliang. Test and model research of hydraulic fracturing and reservoir damage evolution in enhanced geothermal system[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [5] ZHAO Yangsheng, FENG Zijun, FENG Zengchao, et al. THM (thermo-hydro-mechanical) coupled mathematical model of fractured media and numerical simulation of a 3D enhanced geothermal system at 573 K and buried depth 6000-7000 m[J]. *Energy*, 2015,82:193-205.
- [6] HANNES H, SIMON W, TAYFUN B, et al. Potential for enhanced geothermal systems in Alberta, Canada[J].

Energy, 2014,69:578-591.

- [7] GUO Bin, FU Pengcheng, HAO Yue, et al. Thermal drawdown-induced flow channeling in a single fracture in EGS[J]. *Geothermics*, 2016,61:46-62.
- [8] PANDEY S N, CHAUDHURI A, KELKAR S. A coupled thermo-hydro-mechanical modeling of fracture aperture alteration and reservoir deformation during heat extraction from a geothermal reservoir[J]. *Geothermics*, 2017,65: 17-31.
- [9] 孙致学,徐铁,吕抒桓,等. 增强型地热系统热流固耦合及数值模拟[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.
- [10] 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.
- [11] 骆雄飞. 局部非热平衡条件下多孔介质通道中对流换热研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
- LUO Xiongfei. Research of forced convection in a channel filled with porous media using local thermal non-equilibrium model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [12] ZHU W C, WEI J, ZHAO J, et al. 2D numerical simulation on excavation damaged zone induced by dynamic stress redistribution[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014,43:315-326.
- [13] 陈必光,宋二祥,程晓辉. 二维裂隙岩体渗流传热的离散裂隙网络模型数值计算方法[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(1):43-51.
- CHEN Biguang, SONG Erxiang, CHENG Xiaohui. A numerical method for discrete fracture network model for flow and heat transfer in two-dimensional fractured rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014,33(1):43-51.
- [14] 白冰. 岩土颗粒介质非等温一维热固结特性研究[J]. 工程力学,2005,22(5):186-191.
- BAI Bing. One-dimensional thermal consolidation characteristics of geotechnical media under non-isothermal condition[J]. *Engineering Mechanics*, 2005,22(5): 186-191.
- [15] QU Zhanqing, ZHANG Wei, GUO Tiankui. Influence of different fracture morphology on heat mining performance of enhanced geothermal systems based on COMSOL

[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42:18263-18278.

[16] ZENG Yuchao, SU Zheng, WU Nengyou. 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, 56:92-107.

[17] 任韶然,崔国栋,李德祥,等. 注超临界 CO₂ 开采高温废弃气藏地热机制与采热能力分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2):91-98.

REN Shaoran, CUI Guodong, LI Dexiang, et al. Development of geothermal energy from depleted high temperature gas reservoir via supercritical CO₂ injection[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2016,40(2):91-98.

(编辑 李志芬)