

引文: 姬佳炎, 宋先知, 李根生. 孔隙—裂缝型岩溶热储热—流—化多场耦合作用机理[J]. 天然气工业, 2024, 44(3): 214-224.

Ji Jiayan, SONG Xianzhi, LI Gensheng. Thermal-hydraulic-chemical coupling mechanism of porous-fractured karst geothermal reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(3): 214-224.

孔隙—裂缝型岩溶热储热—流—化多场耦合作用机理

姬佳炎¹ 宋先知^{1,2} 李根生¹

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院 2. 油气资源与工程全国重点实验室·中国石油大学(北京)

摘要: 岩溶型热储开采过程中, 储层孔隙内水岩反应会导致流动通道变形, 忽略这一反应过程将导致热储产能预测偏差较大。为了揭示水岩作用下岩溶型热储孔隙和裂缝形态的演化特征, 综合考虑了孔隙和裂缝内的水岩反应过程, 搭建了孔隙—裂缝双重介质热—流—化多场耦合模型并验证了其准确性, 进而分析了热—流—化多物理场与孔隙—裂缝形态的分布特征, 探究了孔隙—裂缝内水岩反应对孔、缝变形和系统取热性能的影响。研究结果表明: ①欠饱和注入条件下, 注入井处发生溶解反应, 生产 30 年时, 裂缝开度增大了 0.32%, 孔隙度增大了 75.76%; ②生产 30 年时, 考虑孔隙—裂缝内水岩反应案例的裂缝平均开度降低了 0.05%, 考虑裂缝而不考虑孔隙内水岩反应案例的裂缝平均开度增大了 17.12%, 二者呈现相反的变化趋势; ③考虑孔隙—裂缝内水岩反应案例相比于仅考虑裂缝而不考虑孔隙内水岩反应的案例, 生产 30 年时, 生产温度相差不大, 系统注采压差增大了 1.57 倍。结论认为: ①岩溶型热储孔隙内水岩反应对孔、缝变形和取热性能影响显著, 其改变了水岩反应对裂缝开度的作用机理, 影响系统注采压差; ②孔隙内的水岩反应不容忽视, 在进行岩溶型热储产能的精确预测和经济评价时必须予以充分考虑; ③该认识可为岩溶型热储开发方案设计和产能预测方面提供理论和技术参考。

关键词: 岩溶型热储; 孔隙结构; 裂缝开度; 水岩作用; 取热性能; 孔—缝双重介质; 热—流—化多场耦合; 裂缝变形

中图分类号: P314

文献标识码: A

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.03.018

Thermal-hydraulic-chemical coupling mechanism of porous-fractured karst geothermal reservoirs

Ji Jiayan¹, SONG Xianzhi^{1,2}, LI Gensheng¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum - Beijing, Beijing 102249, China; 2. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum - Beijing, Beijing 102249, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.3, p.214-224, 3/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Water-rock reactions in karst thermal reservoirs during exploitation may lead to deformation of flow pathways. Neglecting this reaction will yield a large deviation in predicted productivity of geothermal reservoirs. A (pore-fracture) two-medium thermal-hydraulic-chemical coupling model was developed to reveal the evolution of the pore-fracture morphology in karst geothermal reservoirs under water-rock reaction, and it was verified. With this model, the distribution characteristics of multi-physics (thermal-hydraulic-chemical) field and pore-fracture morphology are analyzed, and the influences of water-rock reaction on the pore/fracture deformation and system thermal performance are identified. The following results are obtained. First, dissolution reaction occurs at the injection well under the condition of under-saturated injection. The fracture aperture increases by 0.32% and the porosity increases by 75.76% after 30 years. Second, after 30 years of production, the average fracture aperture in the case of considering water-rock reactions in both pores and fractures decreases by 0.05%, and that in the case of only considering water-rock reactions in fractures increases by 17.12%, showing the opposite trend. Third, after 30 years of production, the production temperature in the case of considering water-rock reactions in both pores and fractures is similar to that in the case of only considering water-rock reactions in fractures, but the injection-production pressure difference increases by 1.57 times. In conclusion, for karst geothermal reservoirs, the water-rock reaction in pores has great influences on pore/fracture deformation and system thermal performance, and it changes the mechanism at which the water-rock reaction acts on the fracture aperture and affects the system's injection-production pressure difference. Thus, the water-rock reaction in pores should not be ignored, but should be fully considered in accurate productivity prediction and economical evaluation of karst geothermal reservoirs. This understanding provides a theoretical and technical support for the development planning and productivity prediction of karst geothermal reservoirs.

Keywords: Karst geothermal reservoir; Pore structure; Fracture aperture; Water-rock reaction; Thermal performance; Pore-fracture two-medium; Thermal-hydraulic-chemical coupling; Fracture deformation

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“高温岩石动态损伤机理与高效破碎方法”(编号: 52192624)、国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目“油气井流体力学与工程”(编号: 52125401)。

作者简介: 姬佳炎, 1996 年生, 博士研究生; 主要从事地热开采过程储层内热—流—化多场耦合机制等方面的研究工作。地址: (102249) 北京市昌平区府学路 18 号。ORCID: 0009-0008-9194-9057。E-mail: 1213742906@qq.com

通信作者: 宋先知, 1982 年生, 教授; 主要从事油气井流体力学与工程、人工智能、水射流理论与技术和地热钻井理论与技术等方面的研究工作。地址: (102249) 北京市昌平区府学路 18 号。ORCID: 0000-0002-6963-9262。E-mail: songxz@cup.edu.cn

0 引言

地热能是一种节能环保的可再生能源, 具有优化能源结构、节能减排和改善环境的重要作用^[1-4]。我国地热资源储量丰富, 其中高温地热资源主要分布于滇藏地热带的藏南、川西、滇西地区^[5]。中低温地热资源分布广泛, 其中华北盆地的中低温地热资源尤为丰富^[6]。在“十二五”和“十三五”期间, 我国对华北盆地冀中拗陷雄安新区地热资源进行了大量的研究, 为该区地热资源的开发和利用提供了有力的支撑^[7]。

雄安新区地热储层多为碳酸盐岩岩溶型储层, 其中大型断裂和溶洞是储层的主要流动通道^[8-9]。其开采过程主要为从注入井注入冷水, 水与储层进行对流换热后从生产井产出。由于低温流体的注入会扰乱储层内部的力学、热和化学平衡, 诱发应力变化和水岩反应。因此, 流体在储层中的对流换热过程是一个热—流—固—化 (THMC) 多场耦合的过程。探究多物理场作用下流动通道变化对储层内部流动换热的影响具有重要意义。前人建立了大量的热—流—固 (THM) 多场耦合模型^[10-12], 分析了热应力、孔弹效应和热弹效应对储层孔、缝结构的影响。然而关于储层中化学作用对孔隙—裂缝结构影响的研究较少。Ontoy 等^[13]采用 TOUGHREACT 软件探究了注入参数 (注入温度、二氧化硅浓度、pH 值等) 对储层近井区域无定性二氧化硅沉淀的影响。Xu 等^[14]基于反应输运模型探究了菲律宾 Tiwi 油田 Nag-67 井附近的矿物沉积, 研究发现, 距井 10 m 半径范围内发生了无定性二氧化硅沉淀, 降低了该区域的孔隙度和渗透率。Rawal 和 Ghassemi^[15]基于有限元法 (FEM) 和边界元法 (BEM) 模拟了地热注采过程中的 THMC 多场耦合过程, 研究发现, 低温欠饱和水注入后, 储层二氧化硅发生溶解, 导致裂缝开度增大。Pandey 等^[16]建立了含单水平裂缝的双井地热系统热—流—化 (THC) 耦合模型, 其研究表明, 无定形二氧化硅溶解度最高的地方离注入井有一定距离; 欠饱和注入有利于干热岩型地热资源的开发。Chen 等^[17]基于统一管网法, 考虑岩体中嵌套的多个裂隙, 搭建了 THC 耦合模型, 探究了注入温度、溶液饱和度和注采压差对系统取热性能的影响。结果表明, 注入温度越高, 反应越强。Song 等^[18]建立了干热岩 THC 多场耦合模型, 揭示了储层化学作用对裂缝开度演化和系统取热性能的影响。研究发现, 反应速率和裂缝孔径呈带状分布, 这是由于反应速率

是受饱和指数和温度共同决定的。从前人研究可知, 储层中的水岩反应过程会影响储层孔渗结构, 从而影响系统取热性能。

在大多数储层条件下, 裂缝是储层的优先流动通道。因此, 前人针对储层中的水岩反应研究, 大多集中于探究水岩反应对储层裂缝开度和裂缝结构的影响, 主要考虑裂缝内的水岩反应过程, 而忽略了储层孔隙内部的水岩反应。然而, 碳酸盐岩岩溶型储层具有发育的孔隙结构, 孔隙内部的水岩反应会改变储层内部浓度场的分布, 影响孔隙和裂缝处的水岩反应, 从而影响储层整体的孔渗特性。因此, 忽略孔隙内部的水岩反应过程会导致储层浓度场计算不准确, 从而影响储层孔、缝形态演化, 导致热储产能预测偏差大。

为探究岩溶型地热储层开采过程中水岩作用对储层孔隙—裂缝形态的影响, 本文基于雄安新区容城地热田, 搭建了孔隙—裂缝双重介质碳酸盐岩 THC 多场耦合模型。分析了 THC 多物理场与孔隙—裂缝形态的分布特征, 探究了孔隙内水岩反应对孔、缝变形和系统取热性能的影响。

1 模型建立

由于低温流体的注入会扰乱储层内部的热力学和化学平衡, 导致储层内部发生水岩反应, 改变储层孔隙—裂缝结构, 从而影响系统的取热性能。因此, 探究水岩反应作用下储层孔隙—裂缝结构的变化具有重要意义。

本文采用达西定律描述储层内的渗流过程, 具体控制方程如下^[19]:

$$\frac{\partial(\phi\rho_f)}{\partial t} - \nabla \cdot \rho_f \left[\frac{K}{\mu_f} (\nabla p + \rho_f g) \right] = 0 \quad (1)$$

其中 ϕ 表示储层孔隙度; ρ_f 表示流体密度, kg/m^3 ; K 表示储层渗透率, m^2 ; μ_f 表示流体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; g 表示重力加速度, m/s^2 ; p 表示着流体压力, Pa 。

储层中传热过程采用局部热平衡理论进行计算, 具体的控制方程如下:

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) = 0 \quad (2)$$

其中 $(\rho C_p)_{\text{eff}} = (1 - \phi) \rho_s C_{p,s} + \phi \rho_f C_{p,f}$
 $\lambda_{\text{eff}} = (1 - \phi) \lambda_s + \phi \lambda_f$

式中 u 表示流速, m/s ; $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 、 λ_{eff} 分别表示有效体积热容和有效热传导率; ρ_s 表示储层固体组分密度, kg/m^3 ; $C_{p,s}$ 表示储层固体组分的热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

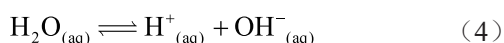
$C_{p,f}$ 表示流体的热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; λ_s 表示储层固体组分的热传导系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; λ_f 表示流体的热传导系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$;

储层中的传质过程包括对流和扩散过程, 物质运输方程如下:

$$\frac{\partial(\phi \rho_f c_i)}{\partial t} - D_i \nabla(\rho_f c_i) + u \cdot \nabla(\rho_f c_i) = \phi R_i A_s \quad (3)$$

式中 c_i 表示溶液中 i 物质的浓度, mol/m^3 ; D_i 表示溶液中 i 物质的有效扩散系数, m^2/s ; R_i 表示 i 物质的反应速率, $mol/(m^2 \cdot s)$; A_s 表示储层的反应比表面积, $1/m$ 。

本文主要针对雄安新区碳酸盐岩地热储层, 仅考虑碳酸盐岩与水的水岩反应。其化学表达式如下:



物质的化学反应过程受动力学控制, 对于碳酸盐岩的反应, 其反应速率 R_{CaCO_3} 表示为^[20]:

$$R_{CaCO_3} = k^+_{CaCO_3} \left(1 - \frac{Q_{CaCO_3}}{K_{eqCaCO_3}} \right) \quad (6)$$

$$k^+_{CaCO_3} = k^+_{CaCO_3, 25^\circ C} \times \exp \left[\frac{-E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] \quad (7)$$

式中 $k^+_{CaCO_3, 25^\circ C}$ 表示 $25^\circ C$ 时碳酸盐岩的反应速率常数, $mol/(m^2 \cdot s)$; E_a 表示反应活化能, kJ/mol ; R 表示摩尔气体常数, $J/(mol \cdot K)$; Q_{CaCO_3} 表示离子浓度积; K_{eqCaCO_3} 表示碳酸盐岩的平衡常数; $SI = Q_{CaCO_3}/K_{eqCaCO_3}$, 为饱和度 ($SI > 1$, 发生沉淀; $SI < 1$, 发生溶解)。

储层的孔隙度和裂缝开度随水岩反应作用而变形, 其与反应速率之间的变形关系如下^[18]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{R_{CaCO_3} M_{CaCO_3} A_p}{\rho_{CaCO_3}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial d_f}{\partial t} = \frac{R_{CaCO_3} M_{CaCO_3} A_f}{\rho_{CaCO_3}} \quad (9)$$

式中 R_{CaCO_3} 表示碳酸盐岩的反应速率, $mol/(m^2 \cdot s)$; M_{CaCO_3} 表示碳酸盐岩的摩尔质量, kg/mol ; ρ_{CaCO_3} 表示碳酸盐岩的密度, kg/m^3 ; d_f 表示裂缝开度, mm ; A_p 和 A_f 分别表示孔隙和裂缝的反应比表面积, $1/m$ 。

孔隙度和裂缝开度的改变会影响储层的渗透率和反应比表面积, 储层孔隙度、渗透率和比表面积之间的关系表达式为^[16]:

$$K_p = K_0 \left(\frac{\phi_p}{\phi_0} \right)^3 \left(\frac{1 - \phi_0}{1 - \phi_p} \right)^2 \quad (10)$$

$$K_f = \frac{d_h^2}{12} \quad (11)$$

$$d_h = d_{h0} + f_f (d_f - d_{f0}) \quad (12)$$

$$A_p = A_0 \frac{\phi_p \log(\phi_p)}{\phi_0 \log(\phi_0)} \quad (13)$$

$$A_f = \frac{2}{d_f} \quad (14)$$

式中 K_p 、 K_f 分别表示孔隙和裂缝的渗透率, mD ; K_0 表示孔隙初始渗透率, mD ; ϕ_0 表示储层初始孔隙度; A_0 表示储层初始比表面积, $1/m$; d_h 、 d_{h0} 分别表示裂缝等效水力开度和初始等效水力开度, mm ; d_{f0} 表示初始裂缝开度, mm ; f_f 表示等效水力开度和裂缝开度的转换系数, 取值范围 $0.5 \sim 1.0$ 。

2 模型求解

本文采用 COMSOL 有限元软件对模型进行求解, 采用达西定律、多孔介质传热、多孔介质稀物质传递等模块描述流动、传热和传质过程。储层内部的化学反应和孔隙—裂缝结构变化由微分代数方程模块控制。

2.1 几何模型

本文研究针对雄安新区容城地热田, 该地热田主要分布于雄安新区中北部, 储层埋深 $1\,200 \sim 1\,500\,m$, 为碳酸盐岩热储, 区域内孔隙发育, 孔隙度 $4\% \sim 12\%$, 存在 1 条容城断裂带, 探测储层温度为 $50 \sim 98^\circ C$ ^[21]。图 1 为几何模型, 包括围岩区域和孔隙—裂缝区域。岩溶型地热储层位于地下 $1\,000 \sim 2\,000\,m$ 处, 为边长 $1\,000\,m$ 的正方体, 确保边界效应不会波及至注采

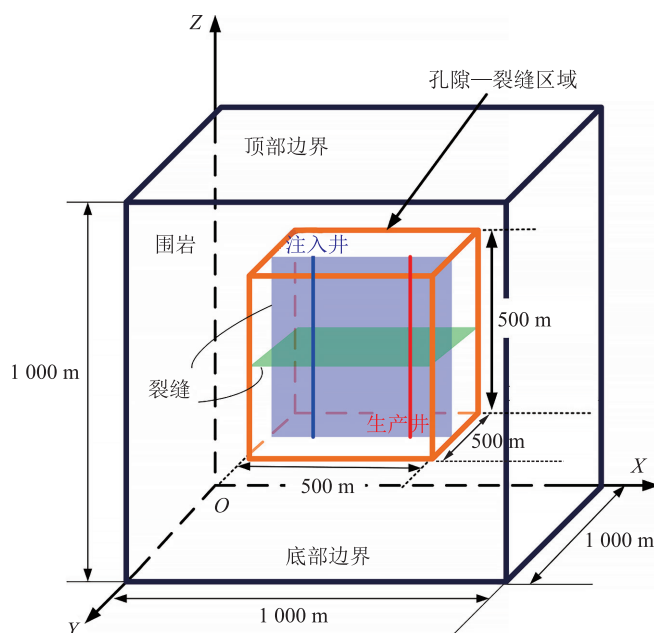


图 1 储层热—流—化多场耦合模型示意图

井。孔隙—裂缝区域位于储层中心，为边长 500 m 的正方体。孔隙—裂缝区域代表储层内的高渗区域（洞穴和裂缝），是取热的主要区域。由于热储尺度三重介质模型（基岩—溶洞—裂缝）的数值模拟十分困难^[22]，因此，笔者将孔隙—裂缝区域的溶洞和基质等效为多孔介质，将连通的裂缝网络等效为 1 条垂直裂缝和 1 条水平裂缝。裂缝位于孔隙—裂缝区域的中心^[16,23]，其长度、高度均为 500 m。孔隙—裂缝区域有 1 口注水井和 1 口生产井，裸眼长度为 500 m，注采井距为 400 m，井眼直径为 0.1 m。表 1 列出了围岩、孔隙裂缝区域、裂缝和注采井的参数设置。

表 1 模型物理参数设置表

参数	取值
围岩密度/(kg·m ⁻³)	2 800
围岩热导/[W·(m·K) ⁻¹]	3
围岩热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	1 000
围岩渗透率/mD	0.001
围岩孔隙度	1%
孔隙—裂缝区域密度/(kg·m ⁻³)	2 700
孔隙—裂缝区域热导/[W·(m·K) ⁻¹]	2.8
孔隙—裂缝区域热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	920
孔隙—裂缝区域渗透率/mD	30
孔隙—裂缝区域孔隙度	10%
裂缝密度/(kg·m ⁻³)	2 000
裂缝热导/[W·(m·K) ⁻¹]	2.8
裂缝热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	850
裂缝孔隙度	100%
初始裂缝开度/mm	0.1
裂缝等效水力开度/m	4×10 ⁻⁵
裂缝面不平整度	0.6
地温梯度/(K·m ⁻¹)	0.012
井眼直径/m	0.1
扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)	1×10 ⁻⁹
孔隙初始反应比表面积/m ⁻¹	20 000
碳酸钙摩尔质量/(g·mol ⁻¹)	100

注：参数设置参考本文文献 [21,24-25]。

2.2 初始和边界条件

对于围岩区域，温度和压力从上边界到下边界呈线性增加。温度梯度和压力梯度分别为 0.012 °C /m

和 0.01 MPa/m。储层顶部温度为 60 °C，压力为 14 MPa。顶部、底部和侧面边界被认为是无流动和恒温条件。初始时刻，储层内的流体处于化学平衡状态。钙离子的初始浓度为 0.084 mol/m³（平衡），pH 值为 6.54。钙离子的注入浓度为 0.01 mol/m³（欠饱和），注入溶液 pH 值为 7.52。对于孔隙—裂缝区域，初始温度和压力设置与围岩相同，顶部、底部和侧面边界均设置为通量边界，化学反应和变形主要发生在该区域。注入井注入流量为 50 kg/s，生产压力为 20 MPa，模拟时间为 30 年。表 2 为基础案例初始和边界条件的参数设置。

表 2 初始条件和边界条件设置表

参数	取值
注入排量/(kg·s ⁻¹)	50
生产压力/MPa	20
注入流体温度/°C	20
储层顶部温度/°C	60
储层顶部压力/MPa	14
初始钙离子浓度/(mol·m ⁻³)	0.084
初始 pH 值	6.54 (66 °C)
注入钙离子浓度/(mol·m ⁻³)	0.01
反应活化能/(kJ·mol ⁻¹)	17.8
气体平衡常数	8.314
注入溶液 pH 值	7.52

注：参数设置参考本文文献 [7,21,24-25]。

2.3 模型验证

由于目前还没有实验或现场数据可以验证该模型，故笔者采用高精度解析解来验证 THC 耦合模型。由于 THC 耦合机制复杂，全耦合条件下验证困难。因此，将 THC 耦合模型分为热一流（TH）、热—化（TC）和流—化（HC）耦合模型进行分别验证。TH 耦合模型采用二维单裂缝对流换热问题的解析解进行验证^[26]。TC 耦合模型基于前人室内实验数据搭建^[18,20]。因此，本文重点验证 HC 之间的耦合关系从而验证本文 THC 耦合模型的可靠性。采用地下水溶质运移案例的解析解^[27]来验证 HC 耦合模型，其表达式为：

$$c_{\text{ana}} = \frac{M \times e^{\frac{\{-x_{\text{uf}}^2 \times (2tD_{\text{yy}} + d^2) - y_{\text{vf}}^2 \times (2tD_{\text{xx}} + d^2) + 4tx_{\text{uf}}y_{\text{vf}}D_{\text{xy}}\}}{2\omega^2}}}{2\pi ne\omega}$$
$$x_{\text{uf}} = (x - x_0) - ut \qquad y_{\text{vf}} = (y - y_0) - vt$$
$$\omega = \sqrt{4t^2(D_{\text{xx}}D_{\text{yy}} - D_{\text{xy}}^2) + d^4 + 2d^2t(D_{\text{xx}} + D_{\text{yy}})}$$

(15)

式中 M 表示溶质源，mol/m³； ne 表示有效孔隙度；

x_0 、 y_0 分别表示地下水溶质的横纵坐标； d 表示注入区域的宽度，m； u 、 v 分别表示水平和垂直方向流速，m/s； D_{xx} 、 D_{yy} 和 D_{xy} 分别表示在“xx”“yy”和“xy”方向上的弥散张量， m^2/s 。

图 2 为初始浓度场和流场的分布情况。该解析解模型的几何模型为边长 4 000 m 的正方形。表 3 列出了验证模型的参数设置。在 COMSOL 中设置

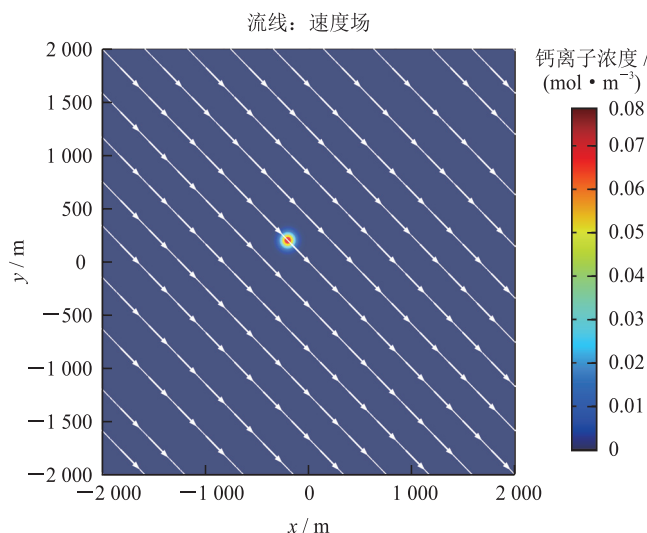
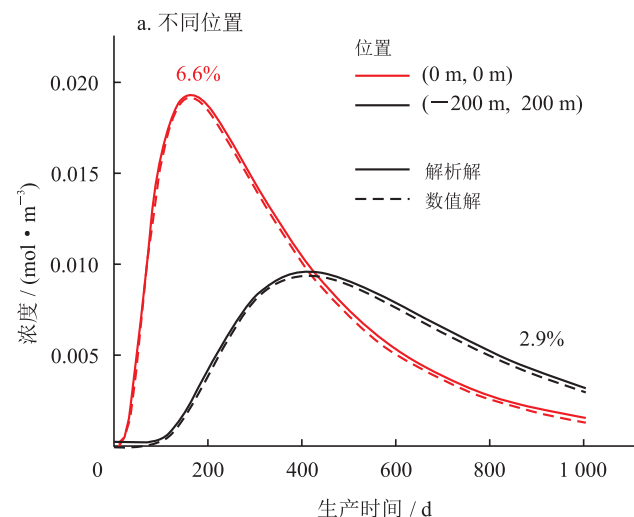


图 2 模型初始时刻浓度和流动场云图



相同的参数，模拟时间为 1 000 d，对比仿真结果与解析解。

表 3 验证模型的参数设置表

类型	参数
注入点坐标	(-200 m, 200 m)
注入浓度 / ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 000
地下水流速 / ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.1
孔隙度	30%
扩散系数 / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	10^{-9}
纵向弥散长度 / m	100
横向弥散长度 / m	10

从图 3 中可以看出，数值解和解析解的结果相近。对比不同位置处的浓度（图 3-a）可知，解析解和数值解的最大相对误差仅为 6.6% 和 2.9%。对比不同时刻斜对角线上浓度（图 3-b）可知，最大相对误差为 3.47%。因此，认为 HC 耦合模型是合理的。TH、TC 和 HC 耦合模型都已验证其可靠性，所以本文的 THC 耦合模型是合理的。

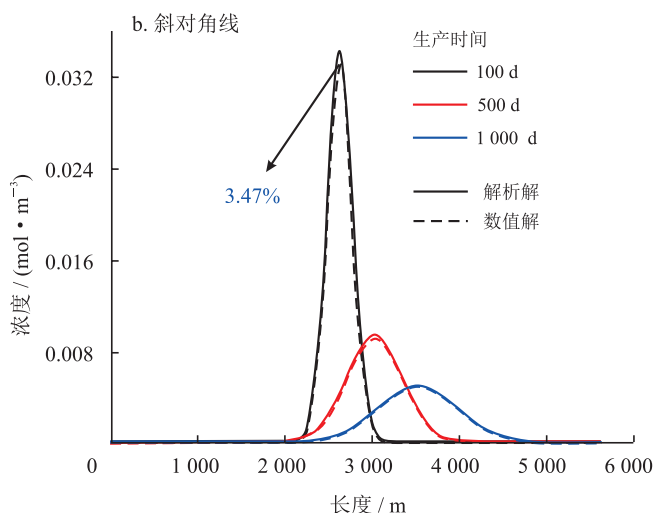


图 3 数值解与解析解的结果对比图

3 模拟结果与分析

3.1 多物理场分析

图 4 为水平裂缝面（ $z = 500$ m）各物理参数的云图分布情况。从压力云图可以看出，随着流体的注入，注入井附近压力逐渐升高。从温度云图可以看出，随着低温流体的注入，储层中的低温区域由注入井

向生产井延伸。并且由于垂直裂缝的存在，导致温度突破前沿处产生尖端。说明相比于储层孔隙，裂缝区域具有更高的渗流能力。从钙离子的浓度分布云图可以发现，钙离子浓度的变化区域和温度云图相同。说明储层中的化学反应是低温流体注入扰乱储层内部热平衡和化学平衡所导致的。因此，随着低温流体波及区域的增大，发生化学反应的区域也随之增

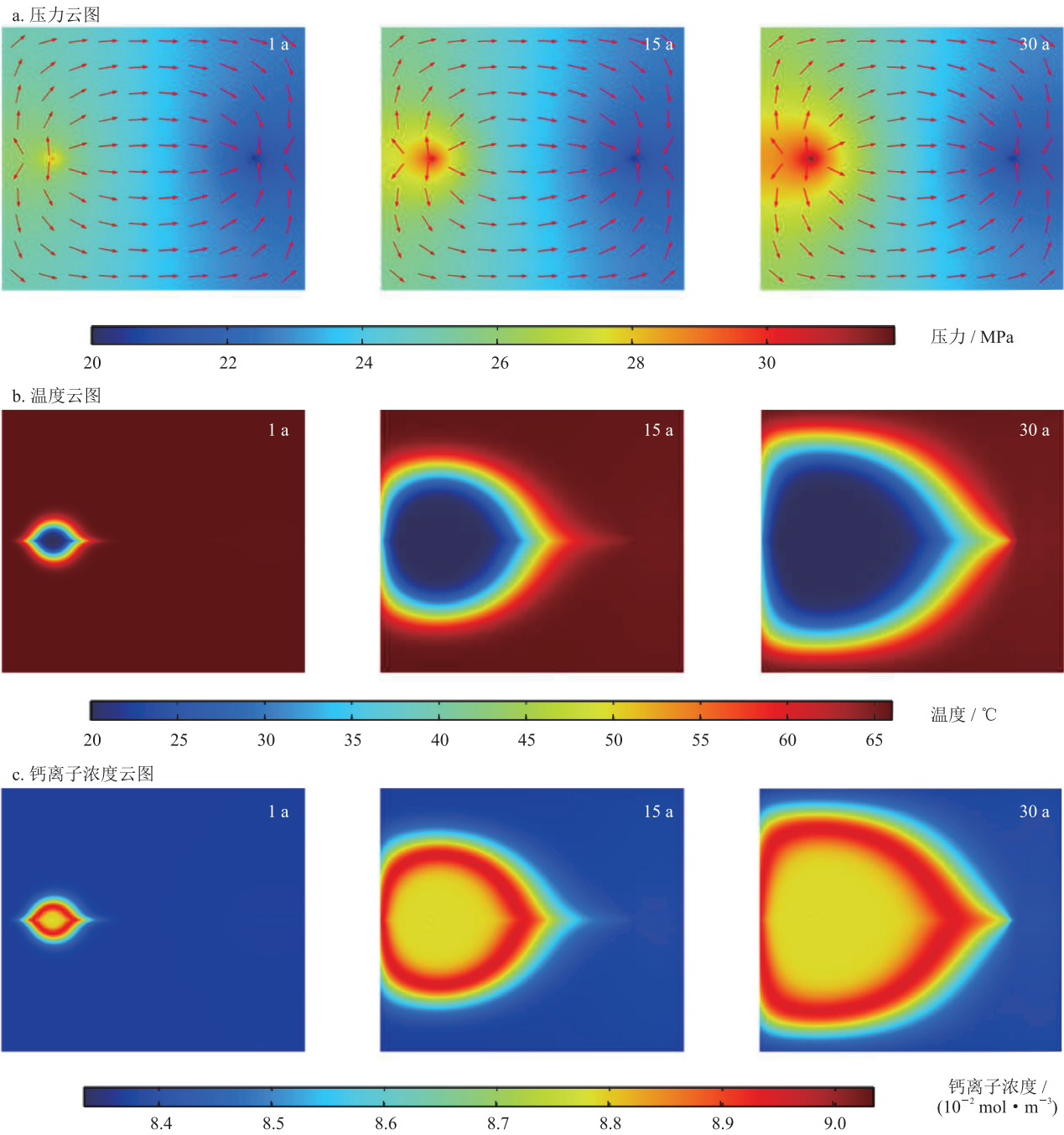
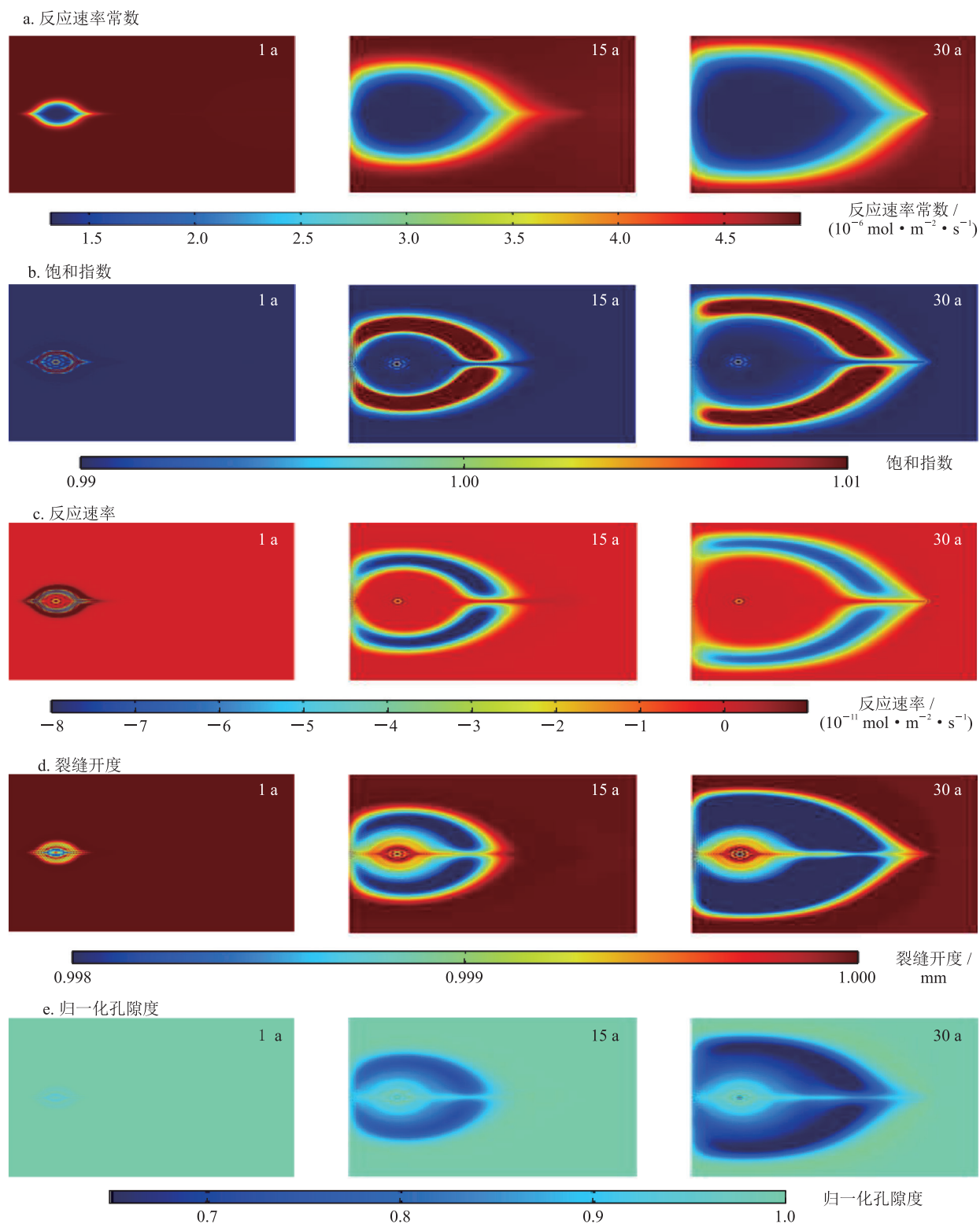


图 4 基础案例水平裂缝面 ($z = 500\text{ m}$) 各物理参数云图

大。且波及区域钙离子浓度大于初始值 0.084 mol/m^3 ，说明欠饱和和注入导致注入井附近发生溶解反应，使得溶液中钙离子浓度增大。但是钙离子的浓度分布并非随温度呈线性变化趋势，而是呈环状分布。这说明温度对反应的影响并非简单的线性关系，其中涉及复杂的影响机理。

为了进一步探究温度对反应的影响，根据前面公式可知，化学反应速率受反应速率常数和饱和指数影响。图 5 展示了水平裂缝面 ($z = 500\text{ m}$) 反应速率常数、饱和指数、反应速率、裂缝开度和归一化

孔隙度的云图变化情况。对比图 4-b 和图 5-a，可以看出反应速率常数的云图分布和温度云图完全一致。说明反应速率常数仅受温度的影响，这一结论也和式 7 相对应。并且，反应速率常数仅影响反应速率的快慢，并不影响反应发生的方向。因此，反应速率常数并非导致反应速率呈现环状分布的主要原因。进一步对比饱和指数与反应速率云图，发现低温波及区域环状内部饱和指数小于 1，反应速率大于 0，发生溶解反应；环状区域饱和指数大于 1，反应速率小于 0，发生沉淀反应。说明饱和指数是控制反应发

图 5 基础案例水平裂缝面 ($z = 500 \text{ m}$) 各物理参数云图

生方向（溶解或沉淀）的主要原因。且由式（6）可知，饱和度并非随温度和浓度呈现简单的线性变化，其存在复杂的作用关系。前人对其随温度和浓度之间的变化关系进行了详细的分析，认为饱和度随温度和浓度的变化是反应速率呈环状分布的主

要原因^[18]。

储层孔隙和裂缝结构的变化是受化学反应控制的。当发生溶解反应时，裂缝开度和孔隙度增大；而发生沉淀反应时，裂缝开度和孔隙度减小。从裂缝开度和归一化孔隙度的云图可以看出，注入井附近裂

缝开度和归一化孔隙度增大，外部环状区域裂缝开度和归一化孔隙度均减小，这一现象也和反应速率呈环状分布相对应。进一步定量分析注入井处裂缝开度和孔隙度的变化情况，发现注入井处裂缝开度由初始的 1 mm，增大至 1.003 2 mm（30 年），增大了 0.32%；注入井处孔隙度由初始的 1.0 增大至 1.76（30 年），增大了 75.76%。这说明储层内水岩反应对孔隙结构的影响大于对裂缝开度的影响。前人的研究认为裂缝相对于孔隙是更优的流动通道，流体应优先从裂缝中流通（本文也获得了相同结论）。因此，前人大多忽略了孔隙中的水岩反应。然而，本文研究发现储层内水岩反应对孔隙结构的影响大于对裂缝开度的影响，与前人假设相悖。需更进一步探讨孔隙内水岩反应对孔隙—裂缝结构变形和取热性能的影响。

3.2 孔隙内水岩反应对孔隙—裂缝结构变形和取热性能的影响

图 6 为开采第 15 年时基础案例和不考虑孔隙内水岩反应案例的云图对比，两者具有不同的云图分布特征。基础案例在开采第 15 年时的注采压差为 10.7 MPa，而不考虑孔隙内水岩反应案例的注采压差为 5.3 MPa。两者温度云图分布相似，基础案例的低温波及区域面积略大于不考虑孔隙内水岩反应案例。两者间浓度分布存在明显差异，基础案例注入井附近钙离子浓度为 0.087 mol/m^3 ，远大于注入浓度；而不考虑孔隙内水岩反应案例注入井附近钙离子浓度为 0.01 mol/m^3 ，等于注入浓度。这说明，注入井附近孔隙内的水岩反应会使得储层浓度迅速趋于平衡浓度，且反应速率快于裂缝内的水岩反应。两者裂缝开度云图分布特征与浓度云图相似，基础案例

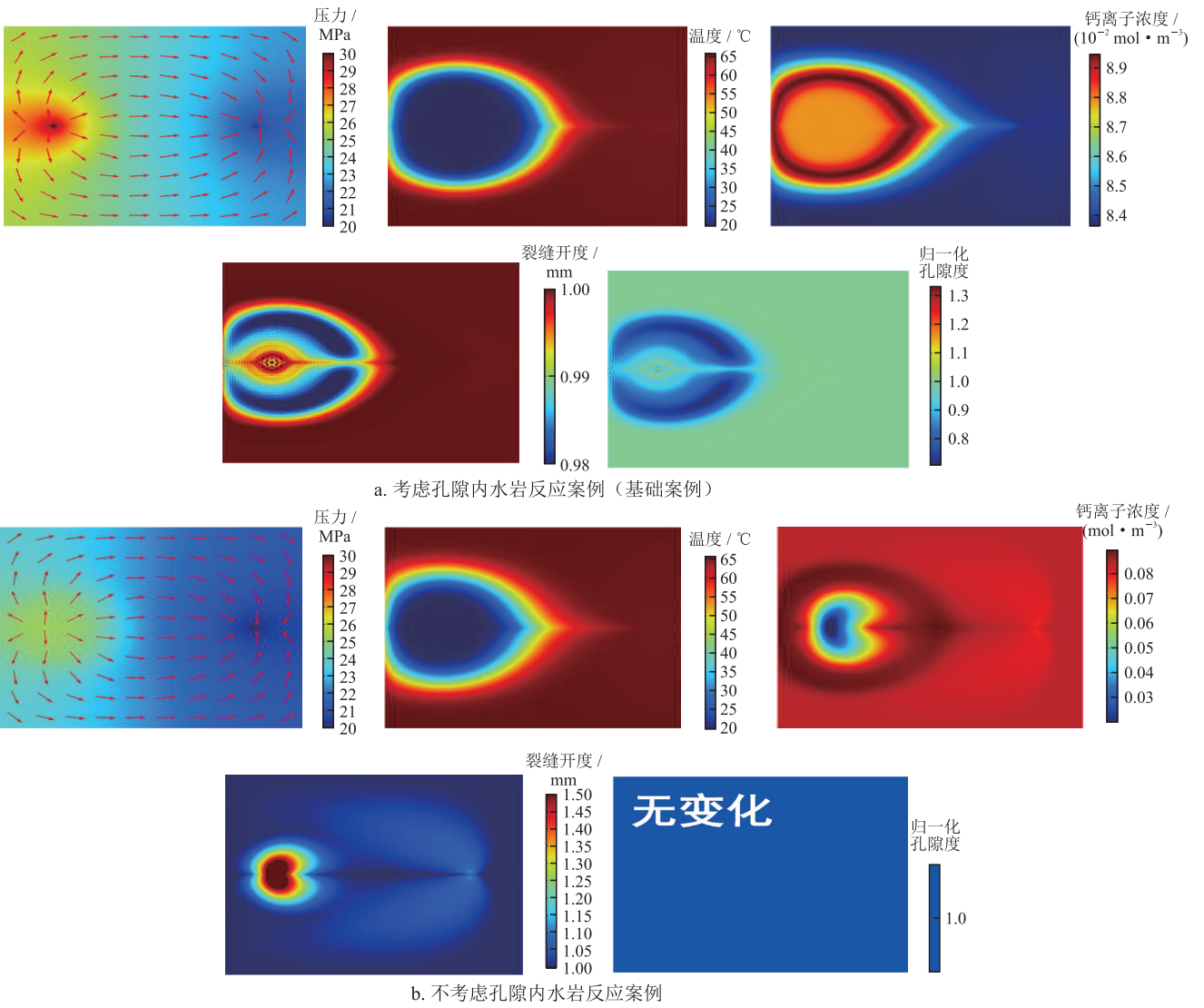


图 6 开采第 15 年时不同案例云图对比图

注入井处裂缝开度在第 15 年时增大了 0.15%，而不考虑孔隙内水岩反应案例注入井处裂缝开度增大了 71.48%。这说明孔隙内的水岩反应不仅影响孔隙结构的变化，还会改变储层中的浓度分布（使近井区域浓度从注入浓度逐渐变为平衡浓度），从而影响裂缝内的水岩反应和形态演化。

为了进一步定量分析孔隙内水岩反应对裂缝开度变化的影响，图 7 展示了不同案例注入井处、生产井处和裂缝面平均裂缝开度随开采时间的变化情况。对比图 7-a、b 可知，基础案例生产 30 年时，注入井处裂缝开度从 1 mm 增大至 1.003 2 mm；生产井处裂缝开度从 1 mm 减少至 0.999 8 mm。说明注入井处发生了溶解反应，生产井处发生了沉淀反应。而不考虑孔隙内水岩反应案例生产 30 年时，注入井处裂缝开度从 1 mm 增大至 2.423 3 mm；生产井处裂缝开度从 1 mm 增大至 1.148 3 mm。对比基础案例和考虑孔隙内水岩反应案例裂缝面平均开度可知（图 7-c），

基础案例的平均裂缝开度从 1 mm（初始时刻）降低至 0.999 5 mm（30 年），说明基础案例中裂缝面发生沉淀的区域大于溶解的区域；不考虑孔隙内水岩反应案例的平均裂缝开度从 1 mm（初始时刻）增加至 1.171 2 mm（30 年），说明不考虑孔隙内水岩反应案例中裂缝面发生溶解的区域大于沉淀的区域。对比两个案例可知，30 年时，不考虑孔隙内水岩反应案例裂缝平均开度增大了 17.12%；考虑孔隙内水岩反应案例裂缝平均开度降低了 0.05%。两者相差明显，且出现了相反的变化趋势。这说明，孔隙内的水岩反应过程对储层孔隙—裂缝结构变化的影响至关重要，需要综合考虑孔隙和裂缝双重介质中的水岩反应过程。

孔隙内的水岩反应对孔、缝变形影响剧烈，而孔、缝变形影响系统产能。因此有必要探究孔隙内水岩反应对系统取热性能的影响。图 8 为不同案例系统注采压差和生产温度的变化情况。基础案例中，系统的注

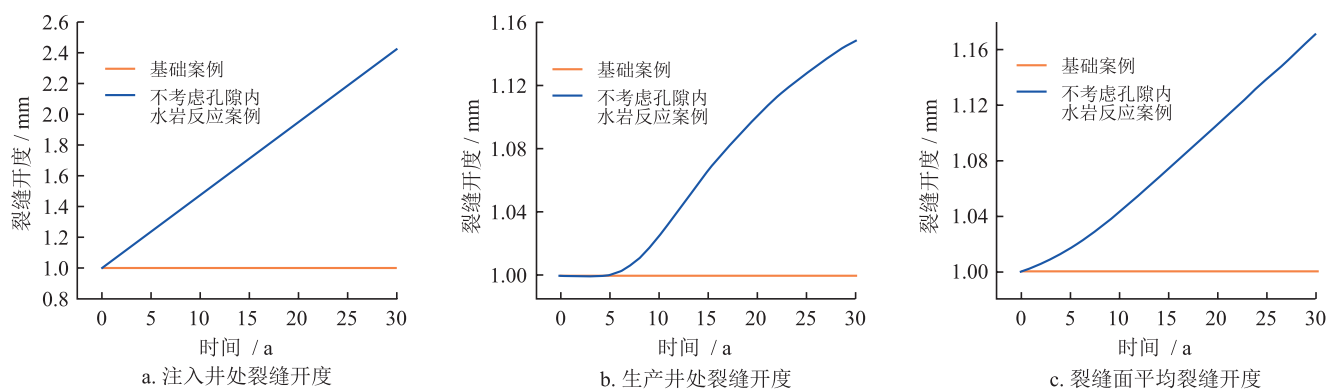


图 7 不同案例条件下注入井处裂缝参数随生产时间的变化曲线图

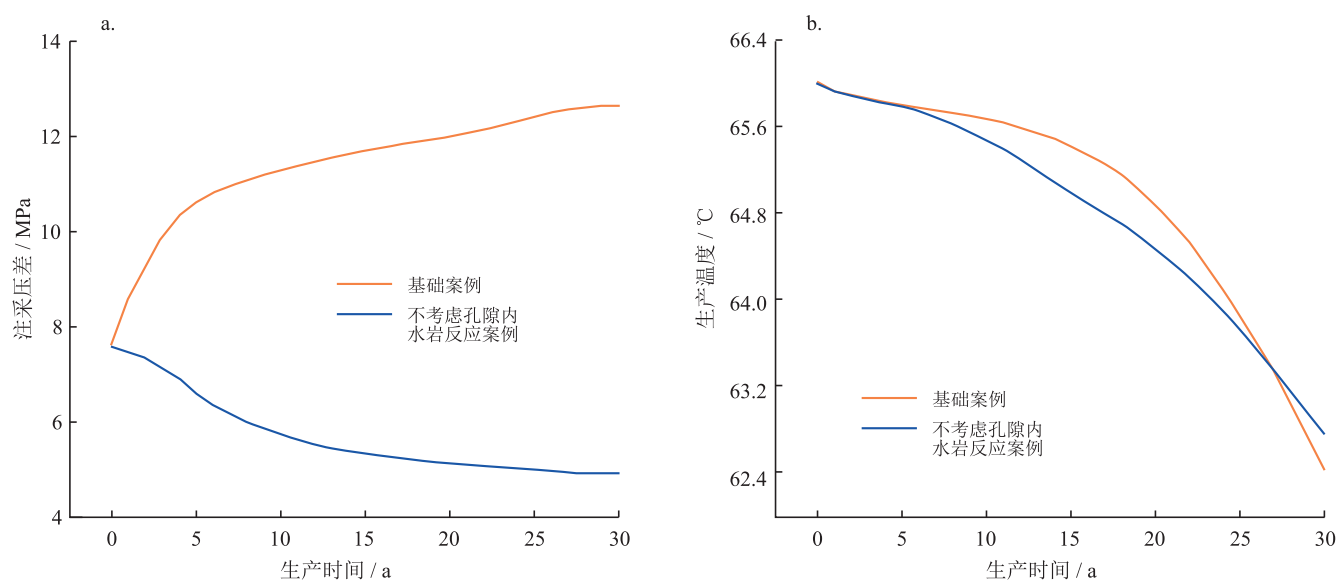


图 8 不同案例条件下系统的注采压差和生产温度随生产时间的变化曲线图

采压差随生产进行逐渐增大,从 9.81 MPa (第 1 年) 逐渐增加至 12.663 MPa (第 30 年); 不考虑孔隙内水岩反应案例的注采压差随着生产的进行逐渐减小, 最终降低至 4.928 MPa。对比两个案例条件下系统的生产温度发现, 是否考虑孔隙内水岩反应对系统生产温度的影响不大。这是由于碳酸盐岩储层孔隙—裂缝发育, 系统热波及区域广泛, 具有稳定良好的换热性能, 这一结果也和法国 Soultz 地热田的现场效果相一致^[28-29]。综上所述, 岩溶型热储孔隙内的水岩反应不容忽视, 其对储层孔、缝变形和取热性能影响显著。为实现岩溶型热储产能的精确预测和经济评价需综合考虑孔隙和裂缝中的水岩反应过程。

4 结论

1) 欠饱和注入条件下, 储层浓度、归一化孔隙度和裂缝开度均呈现环状分布, 这是由于饱和指数与温度和浓度变化关系相互制约所导致的。

2) 注入井附近发生溶解反应, 生产 30 年时, 注入井处裂缝开度增大了 0.32%, 孔隙度增大了 75.76%, 水岩反应对孔隙变形的影响大于对裂缝开度的影响。

3) 生产 30 年时, 考虑孔隙内水岩反应案例裂缝平均开度降低了 0.05%; 不考虑孔隙内水岩反应案例裂缝平均开度增大了 17.12%; 出现了相反的变化趋势。

4) 考虑孔隙内水岩反应案例相比于不考虑案例, 生产 30 年时, 生产温度相差不大, 但系统注采压差增大了 1.57 倍。

5) 岩溶型热储孔隙内水岩反应对孔、缝变形和取热性能影响显著, 在进行岩溶型热储产能的精确预测和经济评价时必须予以充分考虑。

参 考 文 献

- [1] 宋国锋, 李根生, 宋先知, 等. 基于多目标的干热岩注采取热性能均衡优化方法[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 73-84.
SONG Guofeng, LI Gensheng, SONG Xianzhi, et al. Multi-objective based balanced optimization method of heat extraction performance of hot dry rock[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 73-84.
- [2] 何东博, 任路, 郝杰, 等. 基于层次分析法的地热资源评价体系研究——以河北省曹妃甸地区中深层水热型砂岩储层为例[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(6): 713-725.
HE Dongbo, REN Lu, HAO Jie, et al. Quantitative evaluation system of geothermal resources based on analytic hierarchy process: A case study of middle-deep hydrothermal sandstone reservoir in Caoheidian of Hebei Province[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 713-725.
- [3] 王迎春, 周金林, 李亮, 等. 羊八井地热田地质地质条件及其对超临界地热资源勘探的启示[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 35-45.
WANG Yingchun, ZHOU Jinlin, LI Liang, et al. Geothermal geological conditions in the Yangbajing geothermal field and its enlightenment to the exploration of supercritical geothermal resources[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 35-45.
- [4] 唐宜家, 马天寿, 陈力力, 等. 基于二维裂缝网络数值模拟的干热岩储层热采收率评价[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 94-106.
TANG Yijia, MA Tianshou, CHEN Lili, et al. Evaluation on the heat extraction efficiency of hot dry rock reservoirs based on two-dimensional fracture network numerical simulation[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 94-106.
- [5] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 312-321.
- [6] 陈墨香, 汪集旸, 汪缉安, 等. 华北断陷盆地热场特征及其形成机制[J]. 地质学报, 1990, 64(1): 80-91.
CHEN Moxiang, WANG Jiyang, WANG Ji'an, et al. The characteristics of the geothermal field and its formation mechanism in the North China down-faulted basin[J]. Acta Geologica Sinica, 1990, 64(1): 80-91.
- [7] 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1224-1230.
PANG Zhonghe, KONG Yanlong, PANG Jumei, et al. Geothermal resources and development in Xiong'an New Area[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(11): 1224-1230.
- [8] WANG Yang, LI Tuo, CHEN Yun, et al. A three-dimensional thermo-hydro-mechanical coupled model for enhanced geothermal systems (EGS) embedded with discrete fracture networks[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 356: 465-489.
- [9] MAEDO M A, SÁNCHEZ M, FABBRI H, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical numerical modeling of evolving fractures in rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(7): 3569-3591.
- [10] LI Peidong, LI Dingyu, WANG Qingyuan, et al. Phase-field modeling of hydro-thermally induced fracture in thermo-poroelastic media[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 254: 107887.
- [11] SONG Guofeng, SONG Xianzhi, XU Fuqiang, et al. Contributions of thermo-poroelastic and chemical effects to the production of enhanced geothermal system based on thermo-hydro-mechanical-chemical modeling[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377: 134471.

- [12] 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.
- [13] ONTOY Y, MOLLING P, XU Tianfu, et al. Scaling of hot brine injection wells: Supplementing field studies with reactive transport modeling[C]//*Proceedings, Tough Symposium 2003*. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003: 1-9.
- [14] XU Tianfu, ONTOY Y, MOLLING P, et al. Reactive transport modeling of injection well scaling and acidizing at Tiwi field, Philippines[J]. *Geothermics*, 2004, 33(4): 477-491.
- [15] RAWAL C, GHASSEMI A. A reactive thermo-poroelastic analysis of water injection into an enhanced geothermal reservoir[J]. *Geothermics*, 2014, 50: 10-23.
- [16] PANDEY S N, CHAUDHURI A, RAJARAM H, et al. Fracture transmissivity evolution due to silica dissolution/precipitation during geothermal heat extraction[J]. *Geothermics*, 2015, 57: 111-126.
- [17] CHEN Yun, MA Guowei, WANG Huidong. The simulation of thermo-hydro-chemical coupled heat extraction process in fractured geothermal reservoir[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143: 859-870.
- [18] SONG Guofeng, SONG Xianzhi, JI Jiayan, et al. Evolution of fracture aperture and thermal productivity influenced by chemical reaction in enhanced geothermal system[J]. *Renewable Energy*, 2022, 186: 126-142.
- [19] PRUESS K. Enhanced geothermal systems (EGS) using CO₂ as working fluid: A novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon[J]. *Geothermics*, 2006, 35(4): 351-367.
- [20] LINSTROM P J, MALLARD W G. The NIST chemistry WebBook: A chemical data resource on the internet[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2001, 46(5): 1059-1063.
- [21] 马峰, 王贵玲, 张薇, 等. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力[J]. *地质学报*, 2020, 94(7): 1981-1990.
- MA Feng, WANG Guiling, ZHANG Wei, et al. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 1981-1990.
- [22] HUANG Zhaoqin, YAO Jun, WANG Yueying. An efficient numerical model for immiscible two-phase flow in fractured karst reservoirs[J]. *Communications in Computational Physics*, 2013, 13(2): 540-558.
- [23] PANDEY S N, CHAUDHURI A, KELKAR S, et al. Investigation of permeability alteration of fractured limestone reservoir due to geothermal heat extraction using three-dimensional thermo-hydro-chemical (THC) model[J]. *Geothermics*, 2014, 51: 46-62.
- [24] 刘明亮, 何瞳, 吴启帆, 等. 雄安新区地热水化学特征及其指示意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(6): 2221-2231.
- LIU Mingliang, HE Tong, WU Qifan, et al. Hydrogeochemistry of geothermal waters from Xiong'an New Area and its indicating significance[J]. *Earth Science*, 2020, 45(6): 2221-2231.
- [25] JI Jiayan, SONG Xianzhi, SONG Guofeng, et al. Study on fracture evolution model of the enhanced geothermal system under thermal-hydraulic-chemical-deformation coupling[J]. *Energy*, 2023, 269: 126604.
- [26] JI Jiayan, SONG Xianzhi, XU Fuqiang, et al. Effects of variable thermophysical properties of water on the heat extraction of an enhanced geothermal system: A numerical case study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 217: 119050.
- [27] WILSON J L, MILLER P J. Two-dimensional plume in uniform ground-water flow[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1978, 104(4): 503-514.
- [28] ANDRÉ L, RABEMANANA V, VUATAZ F D. Influence of water-rock interactions on fracture permeability of the deep reservoir at Soultz-sous-Forêts, France[J]. *Geothermics*, 2006, 35(5/6): 507-531.
- [29] MAHMOODPOUR S, SINGH M, TURAN A, et al. Hydro-thermal modeling for geothermal energy extraction from Soultz-sous-Forêts, France[J]. *Geosciences*, 2021, 11(11): 464.

(修改回稿日期 2024-01-17 编辑 罗冬梅)



全文互动