

# 岩溶型地热资源开采过程水岩反应对储层孔渗演变影响研究

姬佳炎<sup>1</sup>, 宋先知<sup>1,2\*</sup>, 易俊琳<sup>1</sup>, 李根生<sup>1</sup>, 王高升<sup>1</sup>

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

\* 通信作者, songxz@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-11-02; 修回日期: 2024-02-27

国家自然科学基金重大项目课题“高温岩石动态损伤机理与高效破碎方法”(52192624)资助

**摘要** 岩溶型地热开采过程中, 储层内的水岩反应会改变储层孔渗, 影响系统产能。为探究岩溶型热储开采过程中水岩反应对孔渗演变的作用机制, 搭建了考虑孔隙变形的碳酸盐岩热流化多场耦合模型。揭示了热流化耦合作用下水岩反应对储层孔渗演变的作用机制, 研究了孔渗参数的演变特征及其演变对系统取热性能的影响。结果表明: 欠饱和注入下, 注入井和波及前沿区域发生溶解反应, 中间区域发生沉淀反应, 致使储层浓度和孔隙度呈环状分布。开采30年时, 注入井处孔隙度和渗透率分别增大了19.3%和73.6%, 生产井处分别降低了0.11%和0.32%; 考虑孔隙变形案例的注采压差比不考虑孔隙变形案例低21.7%。本研究可为碳酸盐岩岩溶型热储产能的精确预测和开发方案优化提供参考依据。

**关键词** 岩溶型热储; 演变特征; 水岩作用; 孔渗参数; 取热性能

中图分类号: P618.13; TE37

## Study of the effect of water-rock reaction on reservoir pore-permeability evolution during exploitation of karst geothermal resources

Ji Jiayan<sup>1</sup>, Song Xianzhi<sup>1,2</sup>, Yi Junlin<sup>1</sup>, Li Gensheng<sup>1</sup>, Wang Gaosheng<sup>1</sup>

1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Received: 2023-11-02; Revised: 2024-02-27

**Abstract** Water-rock reactions within the reservoir during karst-based geothermal exploitation can lead to variation of porosity and permeability, affecting the system's thermal performance. A multi-field coupled thermal-hydraulic-chemical model considering the pore changes was developed to investigate the mechanism of water-rock reaction on the evolution of pores and permeability during the production process of karst-based geothermal reservoirs. The mechanism of water-rock reaction on reservoir pore-permeability evolution under thermal-hydraulic-chemical coupling is revealed, and the evolutionary characteristics

引用格式: 姬佳炎, 宋先知, 易俊琳, 李根生, 王高升. 岩溶型地热资源开采过程水岩反应对储层孔渗演变影响研究. 石油科学通报, 2024, 09(05): 737-749

Ji Jiayan, Song Xianzhi, Yi Junlin, Li Gensheng, Wang Gaosheng. Study of the effect of water-rock reaction on reservoir pore-permeability evolution during exploitation of karst geothermal resources. Petroleum Science Bulletin, 2024, 09(05): 737-749. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.056

of pore-permeability parameters and their evolutionary impact on the system heat extraction performance are investigated. The results show that under undersaturated injection conditions, the concentration and porosity distribution present a ring shape, which is caused by dissolution reactions occurring in the injection wells and swept front regions, and precipitation reactions occurring in the intermediate regions. After 30 years of production, the porosity and permeability at the injection wells increased by 19.3% and 73.6%, respectively, and the porosity and permeability at the production wells decreased by 0.11% and 0.32%, respectively. The injection-production differential pressure of the case considering pore deformation was 21.7% lower than that of the case without considering pore deformation. This study is instructive for the accurate prediction of carbonate karst-based reservoir production and development program optimization.

**Keywords** karst-based thermal reserve; evolutionary characteristics; water-rock reaction; pore-permeability parameters; heat extraction performance

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.056

## 0 引言

近年来,随着“双碳”目标的提出,地热能作为一种清洁能源,引起了广泛关注。我国地热资源储量巨大,其中华北盆地的地热资源尤为丰富<sup>[1-2]</sup>。在“十二五”和“十三五”期间,我国曾多次对华北地区的地热资源进行系统评估,并对雄安地区地热资源的赋存状态和储层特征进行了大量研究,为雄安地区地热资源的开发利用提供重要支撑<sup>[3-4]</sup>。

雄安地区地热储层多为碳酸盐岩岩溶型热储,具有发育的溶洞和裂缝<sup>[5-6]</sup>。其注采取热过程是一个复杂的热一流一固一化多场耦合过程。取热流体从注入井注入储层,与储层对流换热后从生产井流出。取热流体注入储层时会破坏储层内部应力、热和化学平衡,诱导应力变化和水岩反应,改变储层孔隙和裂缝形态,从而影响储层内部的对流和换热过程。因此,探究应力变化和水岩反应对储层孔隙结构和裂缝形态演变的影响具有重要意义。针对应力变化对孔隙结构和裂缝形态演变的影响,前人建立了大量的热一流一固多场耦合模型<sup>[7-11]</sup>,探究了孔弹、热弹以及热应力对储层孔隙和裂缝演变的影响。然而针对储层中水岩反应对孔隙结构和裂缝形态演变影响的研究较少。李佳琦等人<sup>[12]</sup>针对干热岩热储开展了静态水岩反应实验,并结合数模分析了水岩反应对储层孔渗参数的影响,发现水岩反应会增大储层孔隙度和渗透率,提高系统取热效率。徐伟等人<sup>[13]</sup>以灰岩为研究对象,测定了灰岩在不同温度、流速和浓度条件下的溶解度,研究发现温度和流速严重影响灰岩的溶解效率。Laurent等<sup>[14]</sup>探究了水岩反应对soulz裂缝渗透能力的影响,建立了单裂缝模型和裂缝一多孔介质双重介质模型。研究结果发现,碳酸盐的溶解和沉淀控制着储层孔渗参数的变化;注入井附近发生了溶解反应,孔渗参数增大;生成井附近发生沉淀反应,孔渗参数减小。且是否考虑

孔隙内的反应对系统整体孔渗参数演变影响较大,说明孔隙中的水岩反应过程不容忽视。吴永东等<sup>[15]</sup>基于多重介质连续模型探究了水岩作用对花岗岩储层孔渗特征的影响,研究发现孔隙度和渗透率增大的区域出现在距离注入井一定距离的位置处,并且物质浓度和孔渗参数呈现环状分布特征。宋国锋、陈昀和Pandey等<sup>[16-18]</sup>针对水岩作用下干热岩裂缝的形态演变过程,搭建了热一流一化多场耦合模型,发现热流化耦合作用下裂缝开度的变化并非呈线性分布,而是随其反应特征呈环状分布。从前人的研究可知,储层内部的水岩反应过程受流动和传热影响,是一个复杂的热一流一化多场耦合过程,其会改变储层的孔渗参数,影响系统取热性能。

然而前人的研究多针对于干热岩储层,侧重于探究水岩作用对裂缝形态演变的影响,这是因为在大多数储层中,裂缝是绝对的最优通道。然而,碳酸盐岩岩溶型热储孔隙结构发育,孔隙作为储层内部主要的储水和渗流通道,其内部水岩反应的发生会改变储层孔渗参数,影响系统取热性能。因此,忽略孔隙内部的水岩反应会造成储层孔渗演变刻画不准确,导致系统产能预测误差大。并且,前人关于水岩反应对储层孔隙和裂缝演变影响的研究主要侧重于储层宏观孔渗参数的变化及其变化对系统取热的影响,并未揭示热流化耦合作用对储层孔渗演变的作用机制(如呈现环状分布的原因等)。因此,亟需探究热流化耦合作用下,水岩反应对储层孔渗演变的作用机制。

为探究岩溶型热储开采过程中水岩反应对孔渗演变的作用机制,本文搭建了考虑孔隙变形的碳酸盐岩热一流一化多场耦合模型。探究了热一流一化耦合作用下水岩反应对储层孔渗演变的作用机制,揭示了热一流一化作用下储层内部孔渗参数的演变特征以及孔渗参数变化对系统取热性能的影响。本研究对碳酸盐岩岩溶型热储产能的精确预测具有指导意义。

# 1 模型描述

## 1.1 控制方程

流体从注入井注入储层，从储层提取热量并从生产井流出，其中储层里流体的对流换热过程本文采用达西定律和传热方程来描述。温度的改变会打破储层内部的热力学和化学平衡，导致储层内部矿物发生溶解和沉淀，从而改变储层孔渗特性。采用物质输运方程和反应动力学方程描述储层内部的传质和反应过程。具体各部分的控制方程如下所示：

本文采用达西定律来描述储层孔隙内部的渗流过程，具体控制方程如下<sup>[19]</sup>：

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

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

储层中的传热过程表示为：

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

式中， $(\rho c_p)_{\text{eff}}$ 和 $\lambda_{\text{eff}}$ 分别代表着有效体积热容和有效热导率，由下式计算：

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} = (1 - \phi) \rho_s c_{p,s} + \phi \rho_f c_{p,f} \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = (1 - \phi) \lambda_s + \phi \lambda_f \quad (4)$$

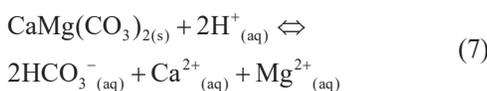
式中， $\rho_s$ 、 $c_{p,s}$ 和 $\lambda_s$ 分别为储层岩石密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 、岩石热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 和岩石热导率， $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。

储层中溶质的输运过程包括对流和扩散过程，储层中溶质输运方程如下所示：

$$\frac{\partial(\phi\rho_f c_i)}{\partial t} - D_i \nabla^2(\rho_f c_i) + u \cdot \nabla(\rho_f c_i) = \phi R_i A_s \quad (5)$$

式中， $c_i$ 和 $D_i$ 分别代表着溶液中物质“ $i$ ”的浓度， $\text{mol}/\text{m}^3$ 和有效扩散系数， $\text{m}^2/\text{s}$ ； $R_i$ 表示物质“ $i$ ”的反应速率， $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，它来自于储层中溶液与储层矿物发生的水岩反应； $A_s$ 为反应的比表面积， $\text{m}^2/\text{m}^3$ 。

本文针对雄安碳酸盐岩蓟县系地热储层，地层岩性组成主要为白云岩<sup>[20]</sup>，因此本文主要考虑白云石与水的水岩反应。其化学表达式如下所示：



物质的化学反应受动力学控制，对于白云石的水岩反应，其反应速率 $R_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}$ 表示为<sup>[21]</sup>：

$$R_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)} = k^+_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)} \left( 1 - \frac{Q_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}}{K_{\text{eq}(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}} \right) \quad (8)$$

$$k^+_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)} = k^+_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2, 25^\circ\text{C})} \times \exp \left[ \frac{-Ea}{R} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] \quad (9)$$

$$Q_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)} = \frac{a(\text{Ca}^{2+}) \times a(\text{Mg}^{2+}) \times a^2(\text{HCO}_3^-)}{a^2(\text{H}^+)}$$

$$SI = \frac{Q_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}}{K_{\text{eq}(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}} \quad (10)$$

$$\log(K_{\text{eq}(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}) = -1792.36 - 0.2896T + \frac{99594.04}{T} + 651.14 \times \log(T) - \frac{5600813.63}{T^2} \quad (11)$$

式中 $k^+_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}$ 代表白云石的反应速率常数， $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ； $Ea$ 代表反应活化能， $\text{kJ}/\text{mol}$ ； $R$ 代表摩尔气体常数， $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ； $Q_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}$ 表示为离子浓度积； $SI$ 为饱和度指数，当 $SI$ 大于1时，溶液处于过饱和状态，发生沉淀。当 $SI$ 小于1时，溶液处于欠饱和状态，发生溶解； $a(\text{Ca}^{2+})$ 、 $a(\text{Mg}^{2+})$ 、 $a(\text{HCO}_3^-)$ 和 $a(\text{H}^+)$ 分别表示为钙离子、镁离子、碳酸氢根离子和氢离子的活度， $\text{mol}/\text{m}^3$ ； $K_{\text{eq}(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}$ 为白云石的平衡常数；从上式中可以看出，反应速率 $R_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}$ 受反应速率常数 $k^+$ 和平衡常数 $K_{\text{eq}}$ 控制，而这两个参数又随温度变化，因此温度会影响白云石的反应过程。且当反应速率 $R_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}$ 为正值时，发生溶解反应，为负值时，发生沉淀反应。

储层孔隙度随水岩反应作用而变化，其随反应速率之间的变形关系如下所示<sup>[16]</sup>：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{R_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)} M_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)} A_s}{\rho_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}} \quad (12)$$

式中， $\phi$ 为储层孔隙度，%； $R_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}$ 表示白云石的反应速率， $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ； $M_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}$ 表示摩尔质量， $\text{kg}/\text{mol}$ ； $\rho_{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)}$ 表示密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $A_s$ 为反应的比表面积， $\text{m}^2/\text{m}^3$ 。

其中孔隙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为<sup>[16]</sup>：

$$k = k_0 \left( \frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \left( \frac{1 - \phi_0}{1 - \phi} \right)^2 \quad (13)$$

$$A_s = A_0 \frac{\phi \log(\phi)}{\phi_0 \log(\phi_0)} \quad (14)$$

其中， $k_0$ 、 $\phi_0$ 和 $A_0$ 分别为初始渗透率、初始孔隙度和初始比表面积。

## 1.2 热流化多场耦合过程

图1所示为碳酸盐热储开采过程中,储层中各物理场之间的耦合关系。各个物理过程由于温度、流速、浓度、形态和化学常数等参数之间的反馈作用机制而相互耦合<sup>[22]</sup>。孔隙作为岩溶型热储的重要流动通道,其形态和结构的变化对系统取热性能影响重大。例如,孔隙结构的改变会改变储层的孔渗特性,影响储层内部的流动换热过程,从而影响系统取热性能。并且,储层内部的各个物理过程也都直接或间接的影响孔隙结构,如矿物的溶解和沉淀会直接影响其孔隙结构,而其他物理场通过影响化学场而间接的影响孔隙结构的变化。例如,储层流体的流动会影响溶质运移和换热过程,从而影响储层内部的温度和浓度分布,影响化学反应;而储层内部的换热会影响储层的温度分布,改变储层内部的化学平衡,促使化学反应的发生。因此,储层内部的各个耦合过程是相互关联的,探究热一流一化耦合作用下水岩反应对储层孔渗演变的作用机制具有重要意义。

## 2 模型求解

### 2.1 几何模型

本文针对雄安新区蓟县系地热储层,该热储主要分布于雄安新区中北部,储层埋深为1200~1500 m之间,为碳酸盐岩热储,区域内孔隙发育,孔隙度4%~12%,地温梯度为1 °C/100 m左右<sup>[20]</sup>,储层探测温度为50~98 °C。本文采用COMSOL有限元软件进行

模型的求解,采用COMSOL软件中的达西定律、多孔介质传热、多孔介质的稀物质传递等模块来描述THC多场耦合过程。化学场和孔隙结构变形采用微分代数方程模块控制。图2为几何模型,由围岩、储层区域和注采井3部分组成。流体从注入井注入,从采出井采出。围岩底部埋深2000 m,为边长1000 m的立方体,确保边界效应不会波及到注采井。储层位于围岩中心位置<sup>[23]</sup>,为边长500 m的立方体。注、采井分别位于储层内部两侧。围岩和储层具有不同的孔隙度和渗透率。表1为储层、围岩和注采井的参数设置。

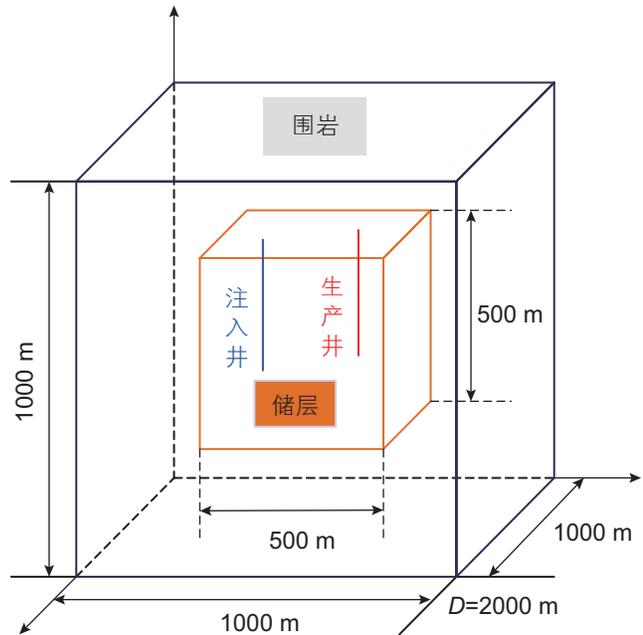


图2 储层热一流一化多场耦合模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reservoir T-H-C coupling model

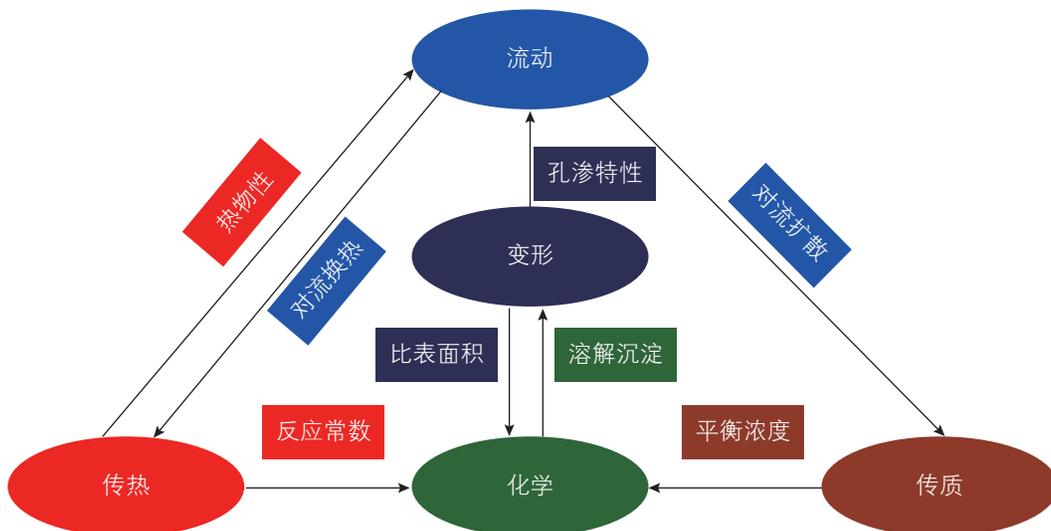


图1 热一流一化多物理场耦合关系

Fig. 1 The interaction among the T-H-C multi-physical field coupling

### 2.2 初始和边界条件

围岩温度和压力从顶部到底部呈线性增加，温度和压力梯度分别为 0.012 °C/m 和 0.01 MPa/m。围岩顶部压力为 14 MPa，顶部温度为 60 °C，围岩外部边界设置为定温和不流动边界。储层区域初始温度和压力的设置与围岩相同，外部边界设置为通量边界。初始时刻，储层内部流体处于平衡状态，pH 值为 7.8。注入流体为纯水，注入流量为 70 kg/s，生产压力为

表 1 模型物理参数设置 [22,24]

Table 1 Model physical parameter Settings

类型	参数
围岩密度	2800 kg/m <sup>3</sup>
围岩热导	3 W/(m·K)
围岩热容	1000 J/(kg·K)
围岩渗透率	1E-18 m <sup>2</sup>
围岩孔隙度	1%
储层密度	2700 kg/m <sup>3</sup>
储层热导	2.8 W/(m·K)
储层热容	920 J/(kg·K)
储层渗透率	5E-15 m <sup>2</sup>
储层孔隙度	5%
地层温度	0.012 K/m
井眼直径	0.16 m
岩石热膨胀系数	5E-6 1/K
储层初始比表面积	1000 1/m

20 MPa。反应和孔隙变形仅发生在储层区域。表 2 为初始条件和边界条件设置情况。

### 2.3 网格划分与网格无关性分析

图 3 所示为网格划分方案。由于储层是流动、换热和化学反应发生的主要场所，为了详细描述各物理场特征的变化规律，需对储层区域进行网格加密。该区域顶端采用自由三角形网格划分为 11 624 个部分，然后采用扫掠方法，从上至下将该区域划分为 116 240 个网格。围岩部分采用自由四面体网格进行填充。图 4 展示了生产 30 年时，不同网格数条件下注入井处压力和归一化孔隙度的变化情况。从图中可以看出，当网格数超过 343 483 时，网格数基本对结果无影响。

表 2 初始条件和边界条件设置 [6,22,24]

Table 2 Parameters set of the initial and boundary conditions for the base case

类型	参数
注入排量	70 kg/s
生产压力	20 MPa
储层初始平均温度	66 °C
注入流体温度	20 °C
初始钙离子浓度	8.2 mol/m <sup>3</sup>
初始 pH 值	7.8
注入钙离子浓度	5 mol/m <sup>3</sup>
反应活化能, <i>E<sub>a</sub></i>	17.8 KJ/mol
气体平衡常数, <i>R</i>	8.314
注入溶液 pH 值	8.4

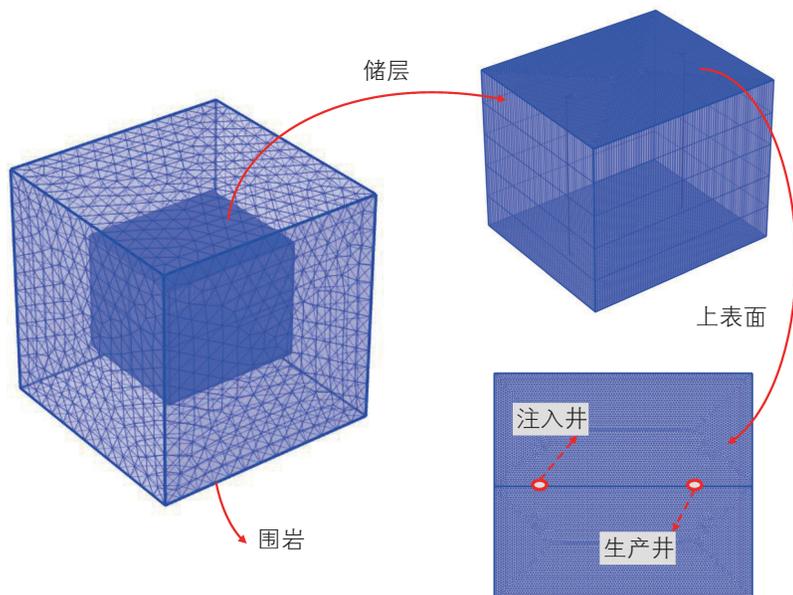


图 3 网格划分方案

Fig. 3 Numerical meshing schemes.

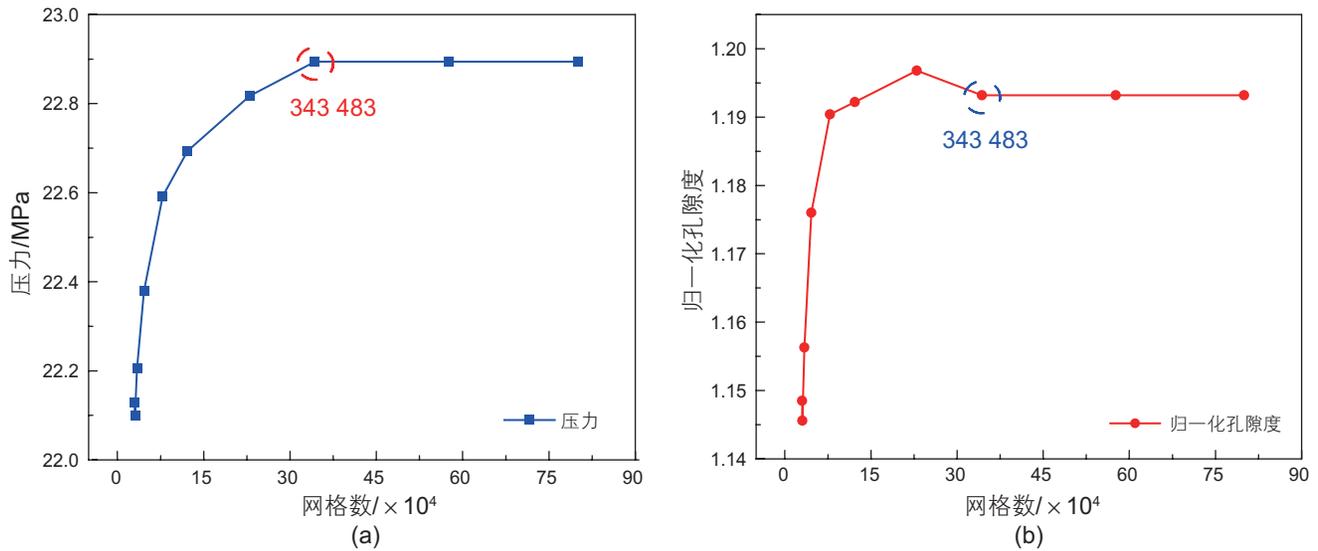


图 4 生产 30 年时, 注入井处压力和归一化孔隙度随网格数的变化关系

Fig. 4 The pressure and normalized porosity ( $\phi/\phi_0$ ) at injection well over 30 years of production with various finite mesh numbers

因此, 最终网格数确定为 343 483, 后续模型也均采用该网格数进行求解。

### 3 模拟结果与分析

#### 3.1 多物理场分析

图 5 为储层水平剖面 ( $z=500$  m), 各物理参数的云图分布情况。从压力云图(第 1 行)可以看出, 随着流体的注入, 系统注采压差逐渐增大, 从第一年的 2.145 MPa 增大到 2.883 MPa, 其是否由水岩反应导致将在后续研究中进行分析。从温度云图(第 2 行)可以看出, 随着低温流体的注入, 储层中的低温区域从注入井向生产井延伸。第 3 行为钙离子的浓度云图。除注入井附近, 钙离子浓度的变化区域与温度相似, 这说明储层中的化学反应是低温流体注入扰乱了储层内部的热平衡和化学平衡所导致的。随着低温流体波及区域的增大, 水岩反应作用区域随之增大。但浓度并非随温度单调变化, 而是呈现环状分布, 说明温度对反应的影响涉及复杂的影响机理, 其原因会在后面的内容中进行详细分析。第 4 行为储层归一化孔隙度 ( $\phi/\phi_0$ ) 的分布云图。由于本研究案例设置为欠饱和注入(纯水注入), 因此注入井附近的归一化孔隙度大于“1”(孔隙度高于初始孔隙度), 且随低温流体的注入, 注入井处归一化孔隙度从第 1 年的 1.006 增大到 1.193(30 年), 增大了 18.59%。这是由于欠饱和注入诱导注入井附近岩石被不断溶解导致的; 注入井附近外围区域, 储层归一化孔隙度小于“1”(孔隙度低于

初始孔隙度), 以环带状的形式包围注入井, 且环带状区域的覆盖面积随着低温波及区域的增大而增大; 而在低温波及区域的最前沿, 归一化孔隙度又大于“1”。这说明储层中的水岩反应并非单一的溶解反应, 其反应类型(溶解/沉淀)受流体流动、温度变化和浓度分布等多因素影响。关于该现象的具体原因, 将会在后面进行详细的分析。

#### 3.2 水岩反应对孔渗演变的作用机制

根据多物理场分析可知, 储层中的浓度云图和归一化孔隙度云图呈现环状分布。由于储层中的浓度变化和孔隙变形是低温不饱和流体注入诱发水岩反应导致的, 因此探究水岩反应速率的变化情况对揭示浓度和归一化孔隙度呈现环状分布的机制具有重要作用。根据式 9 至式 12 可知, 化学反应速率受饱和指数和反应速率常数的影响。图 6 展示了储层水平剖面 ( $z=500$  m), 反应速率常数(第 1 行)、饱和指数(第 2 行)和反应速率(第 3 行)的云图分布情况。对比图 5 和图 6 可知, 反应速率常数云图(图 6 第 1 行)和温度云图(图 5 第 2 行)高度相似, 呈单调变化; 反应速率云图(图 6 第 3 行)与饱和指数云图(图 6 第 2 行)形状高度相似, 呈环状分布。这说明, 反应速率常数仅受温度的影响, 只影响反应的快慢; 反应发生的方向(溶解/沉淀)受溶液饱和程度驱使, 饱和指数影响反应发生的方向。因此, 揭示饱和指数呈环状分布的原因就可揭示反应速率、浓度呈环状分布的机制。由于饱和指数是温度和浓度的函数, 所以其随温度和浓度

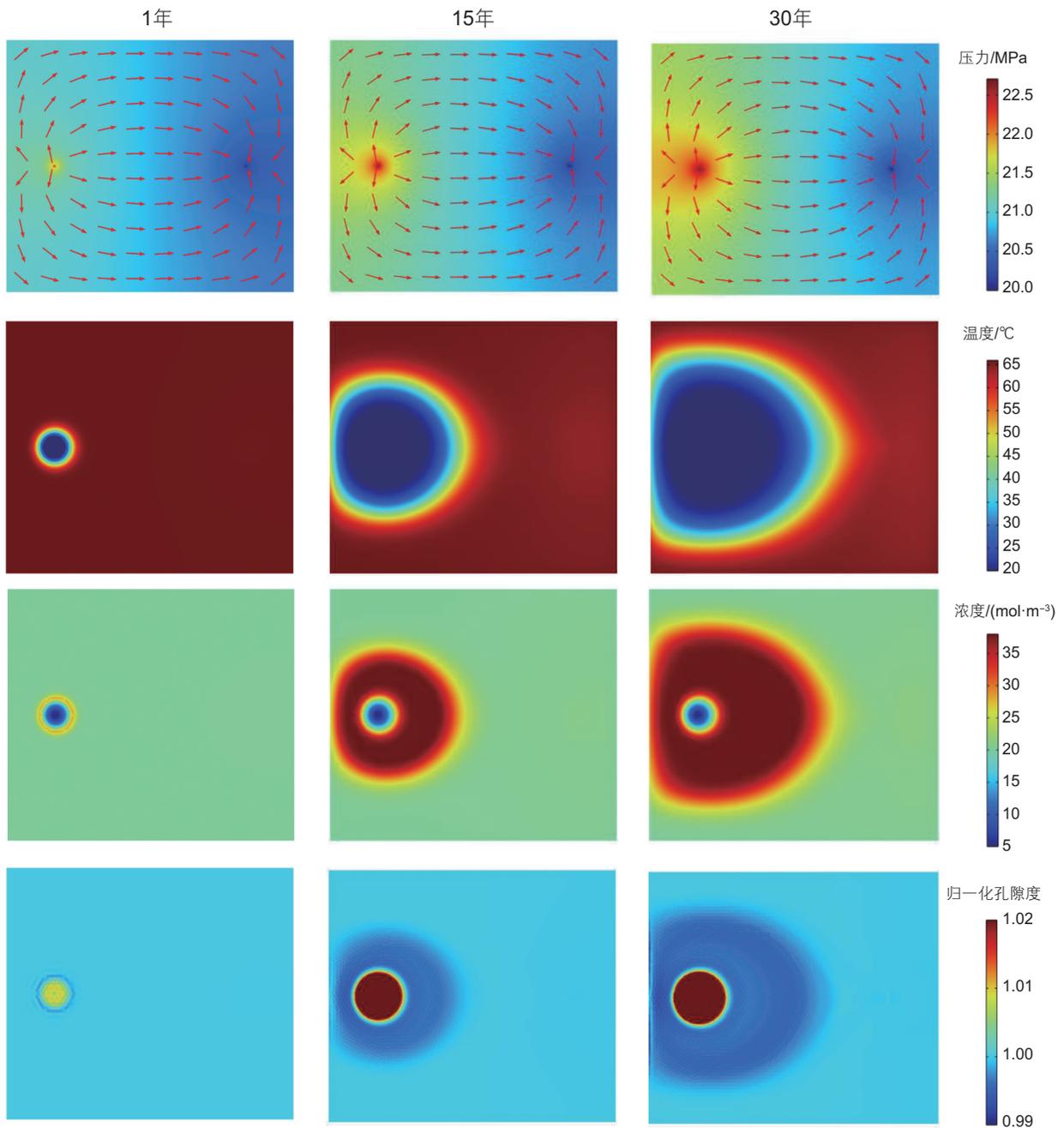


图5 基础案例下储层水平剖面( $z=500\text{ m}$ )处压力云图(第1行)、温度云图(第2行)、浓度云图(第3行)、归一化孔隙度( $\phi/\phi_0$ )云图(第4行)

Fig. 5 The pressure contours (first row), temperature contours (second row), concentration contours (third row), normalized porosity ( $\phi/\phi_0$ ) contours (forth row)

的变化为其呈环状分布的主要原因。

图7为开采第15年,水平剖面( $z=500\text{ m}$ )注采井间连线处温度、浓度和饱和指数的变化情况。从图中可以看出,饱和指数仅在注入井附近和环状区域不等于“1”,说明储层中的水岩反应发生在温度波及区域和注入井附近,其他区域都处于稳定状态,这也解释了储层中浓度呈现环状分布的原因。进一步探究注入井附近和温度波及区域的反应机理。对比图7可知,

注入井处于温度稳定区域。因此诱导该区域发生水岩反应的主要原因为欠饱和溶液注入打破了该区域平衡状态。而在温度波及区域,首先可以看到波及区域前侧和后侧浓度均处于平衡状态。说明近井区域的水岩反应会吸收欠饱和注入的影响,使得注入井附近浓度趋于平衡状态。在温度波及前沿区域,低温波及前沿的推进会打破该区域平衡状态,导致浓度和饱和指数发生变化,从而诱导反应发生。在环状区域的内侧,

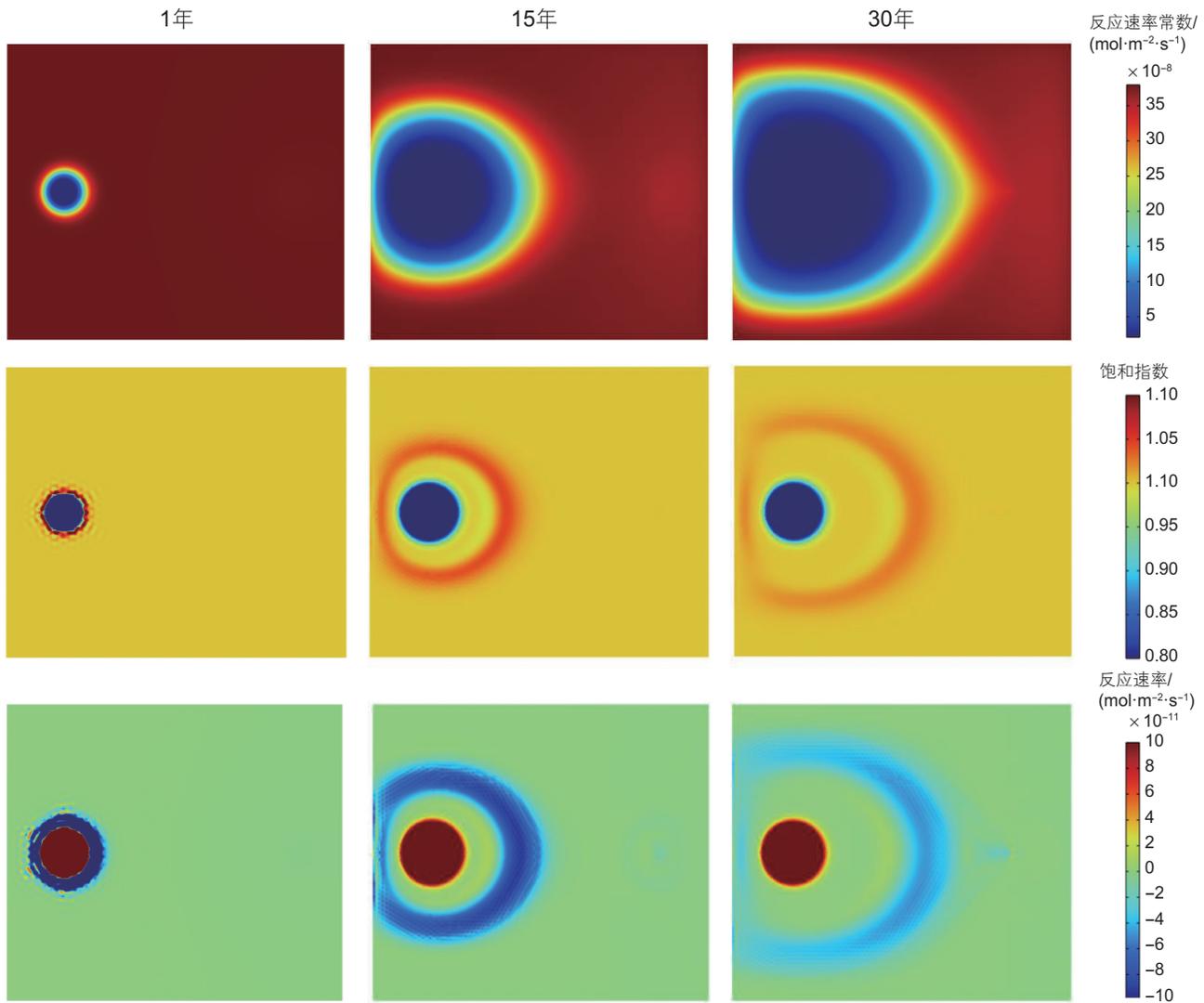


图 6 基础案例下储层水平剖面( $z=500$  m)处反应速率常数云图(第 1 行)、饱和度指数(SI)云图(第 2 行)、反应速率云图(第 3 行)  
Fig. 6 The rate constant contours (first row), saturation index contours (second row), reaction rate contours (third row)

饱和度指数略大于“1”，这说明在波及区域内部，由于温度梯度的存在，导致该处平衡浓度发生变化，从而诱导反应的发生。因此，我们可以推断出诱导低温波及区域发生水岩反应的原因为低温波及扰乱平衡所导致的。

根据前文分析可知，不饱和流体的注入诱发水岩反应，在注入井附近发生溶解反应，其孔隙度增大。在温度波及前沿处，温度降低破坏平衡状态，诱发水岩反应。根据式(12)计算白云石溶解的平衡浓度，结果如图 6 所示。白云石的平衡浓度随着温度的升高而降低。环状区域内侧，温度高于注入井附近稳定温度，该处饱和浓度降低，诱导沉淀反应的发生，孔隙度减小；环状区域处，饱和浓度随着温度不断降低，该区域发生沉淀反应，导致储层内部浓度降低，这也揭示了归一化孔隙度在该区域小于“1”的原因；环状区域

外侧(波及前沿区域)，饱和浓度随着低温的波及而增大，该处浓度低于饱和浓度，发生溶解反应，孔隙度增大。

根据以上分析可知，储层中浓度呈现环状分布是由于随着开采的进行，溶解反应发生在注入井附近和温度波及区域，沉淀反应发生在两者之间导致的。开采初期，注入井附近的水岩反应为温度和浓度双重变化导致的；开采中后期，注入井附近的水岩反应是由低饱和和注入引起的，储层中的水岩反应是由于低温波及引起的。白云石溶解饱和浓度随温度的单调递减是导致注入井和波及前沿中间区域孔隙度降低的原因。

### 3.3 孔渗参数演变及其对系统取热性能的影响

从以上的分析可知，储层内部的水岩反应过程会导致储层的孔渗特性发生变化，孔渗特性的变化会反

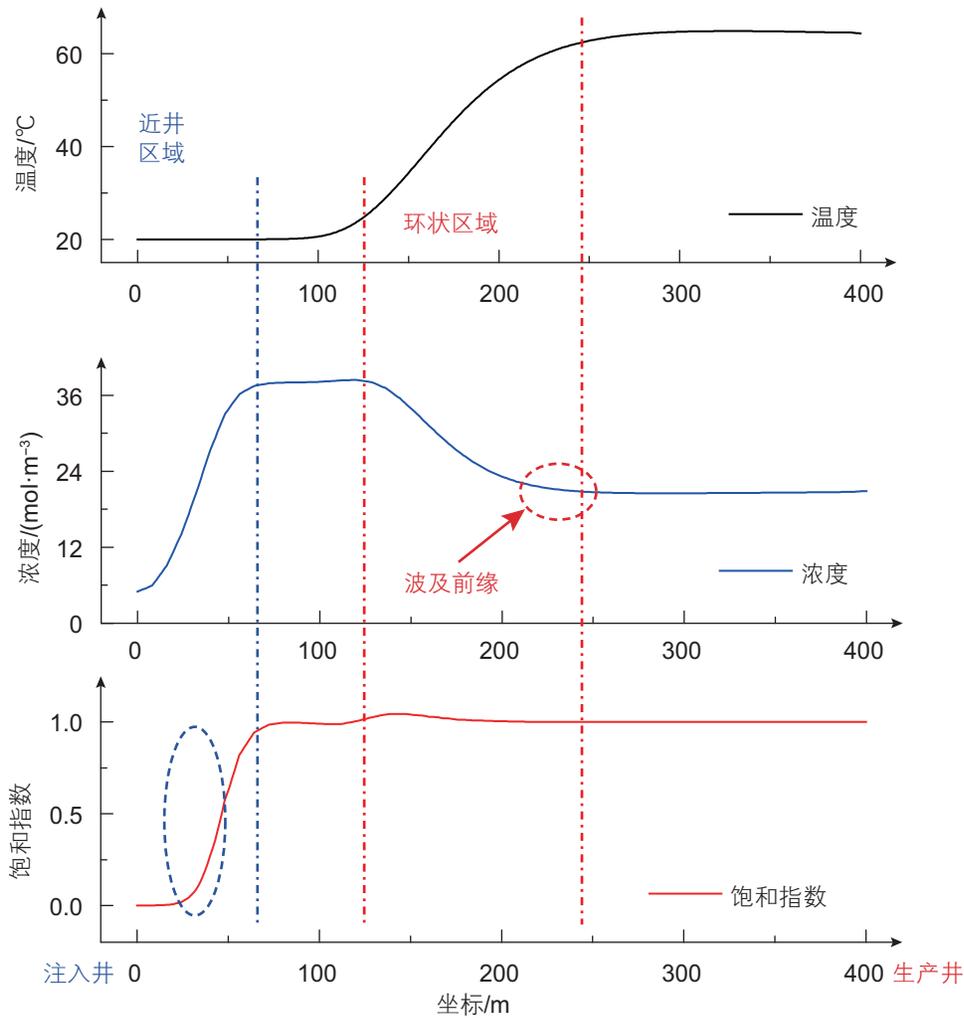


图 7 储层水平剖面( $z=500\text{ m}$ )井间连线处温度、浓度和饱和指数的变化情况(15年)

Fig. 7 The temperature, concentration, and saturation index at the line between injection-production wells in the horizontal profile ( $z=500\text{ m}$ )

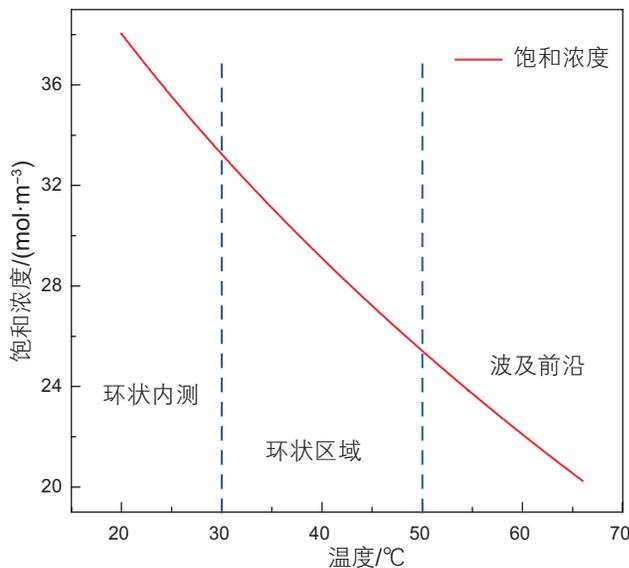


图 8 饱和浓度随温度的变化情况

Fig. 8 The variation of concentration with temperature

馈于流动、传热、传质以及化学反应等过程，从而影响系统产能，因此探究储层孔隙度和渗透率的变化及其变化对系统取热性能的影响至关重要。图 9 所示为储层水平剖面( $z=500\text{ m}$ )，归一化孔隙度和归一化渗透率的分布情况。从图中可知，渗透率的变化趋势与孔隙度相同，说明渗透率的改变是由于孔隙度改变导致的。从图 9 中还可以看出，注入井附近和波及前缘处归一化孔隙度和渗透率大于 1，波及区域内部，归一化孔隙度和渗透率小于 1。呈现该分布的原因也在上面的研究中进行了详细的分析，为了进一步定量分析储层各位置处归一化孔隙度和归一化渗透率的变化情况。将储层分为注入井、生产井和井间连线 3 个区域，并分别求取了其归一化孔渗参数的变化情况，结果如图 10 所示。

从图 10a 中可知，注入井归一化孔渗参数大于 1，且随着开采的进行而逐渐增大，生产到第 30 年时，注

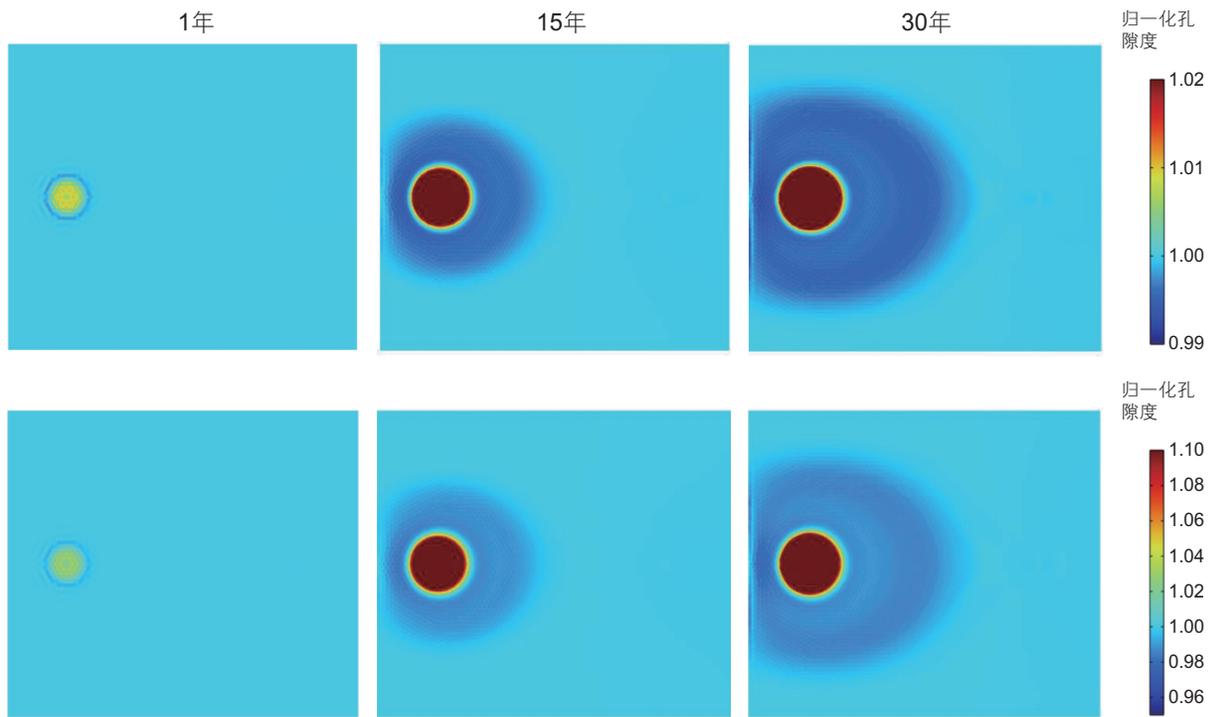


图 9 储层水平剖面 ( $z=500\text{ m}$ ) 归一化孔隙度云图 (第 1 行)、归一化渗透率云图 (第 2 行)  
 Fig. 9 The normalized porosity contours (first row), normalized permeability (second row)

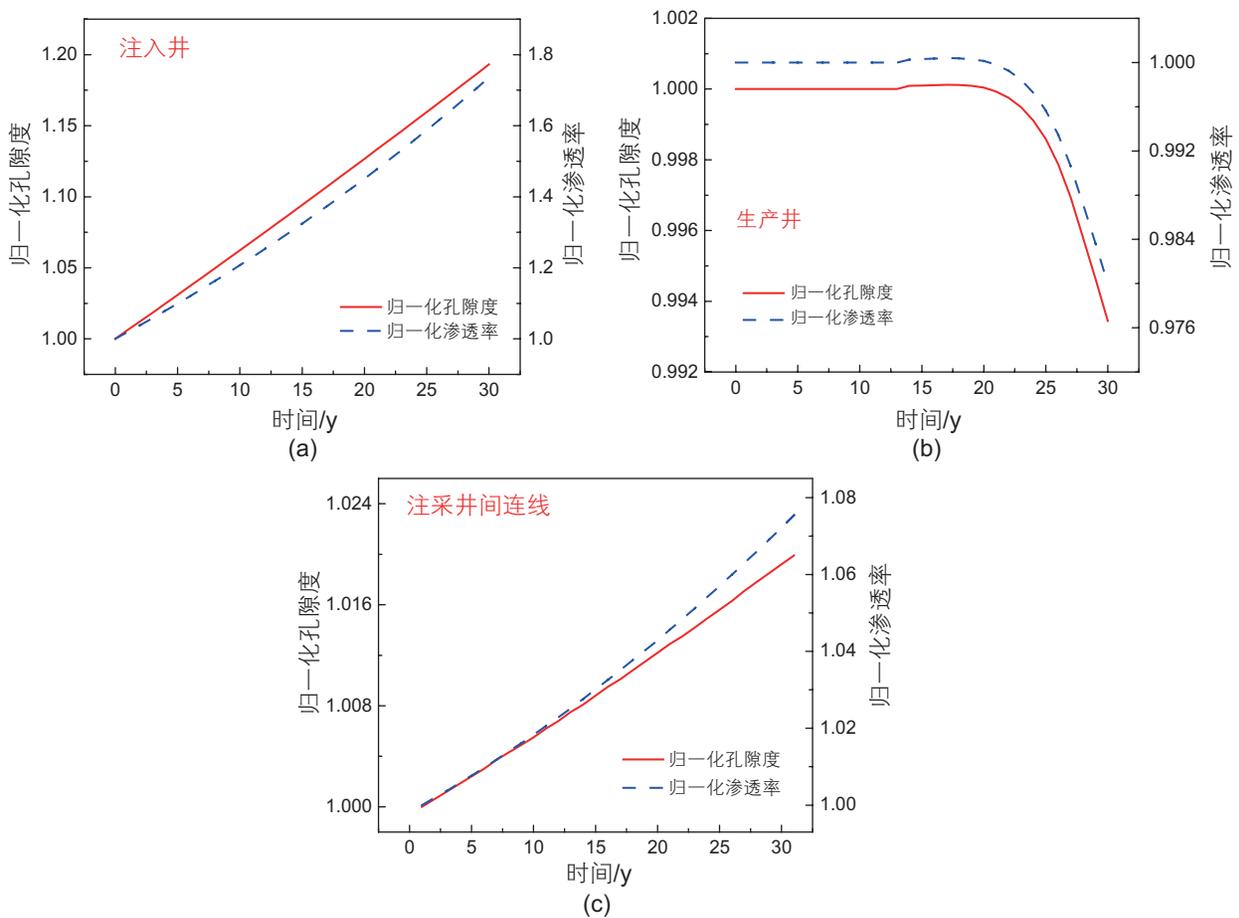


图 10 储层不同区域归一化孔隙度和归一化渗透率的变化情况  
 Fig. 10 The variation of normalized porosity and normalized permeability in different reservoir regions

入井处孔隙度增大了 19.31%，渗透率增大了 73.57%。从图 10b 可知，生产前期，生产井归一化孔渗参数保持为 1，这说明生产前期低温区域并未波及到生产井，生产井处于化学平衡状态。随后生产井归一化孔渗参数出现短暂提升，这是由于波及前缘到达生产井，诱导生产井处发生了溶解反应导致的。波及区域过后生产井处归一化孔隙度和渗透率降低，生产 30 年时，生产井处孔隙度降低了 0.11%，渗透率降低了 0.316%。图 10c 为井间连线归一化孔渗参数的变化情况，发现随着开采的进行，其归一化孔渗参数不断增大，且始终大于 1。当开采到 30 年时，井间连线处平均孔隙度和渗透率分别增大了 2% 和 7.54%。这说明在储层井间连线上，溶解反应的影响大于沉淀反应，其中溶解区域主要在注入井附近。

由以上分析可知，水岩反应会导致储层内部孔渗特性发生变化。而储层的孔渗特性又影响储层内的流动、传热、传质、以及化学反应等过程，从而影响系统取热性能。因此，本节将探究孔渗参数变化对系统取热性能的影响。本文将设置一个对照案例，基础案例考虑多场耦合作用下孔渗参数的变化，而对照案例

不考虑多场耦合作用与孔渗参数变化之间的相互作用关系。图 11 为两种案例条件下，系统注采压差(a)和采出温度(b)的变化情况。从图 11a 中可知，考虑孔隙变化案例的注采压差比不考虑案例低 0.625 MPa，降低了 21.68%。这是因为在考虑孔隙变化的案例中，低温欠饱和流体的注入会导致注入井附近发生溶解反应，增大注入井附近储层的孔隙度，从而降低了注采压差。这一结论也和前人的研究结果相似，S.N. Pandey 研究也发现考虑水岩反应案例会导致注入井附近发生溶解反应，降低系统注采压差<sup>[25]</sup>。从图 11b 中可知，考虑孔隙变化案例的生产温度略高于不考虑孔隙变化的案例。同时规定温度下降超过 10%，即为发生了热突破。可以看出，考虑孔隙变化的案例在第 25 年发生热突破，而不考虑孔隙变形的案例第 23 年就发生了热突破。这是因为，在考虑孔隙变形的案例中，低温区域的波及会导致储层整体的孔隙度降低，从而延缓了系统热突破的发生。从以上的分析可知，孔渗参数演变对储层内部流动换热过程的影响不容忽视，其对注采压差、生产温度和系统寿命等取热性能参数均具有重要影响。

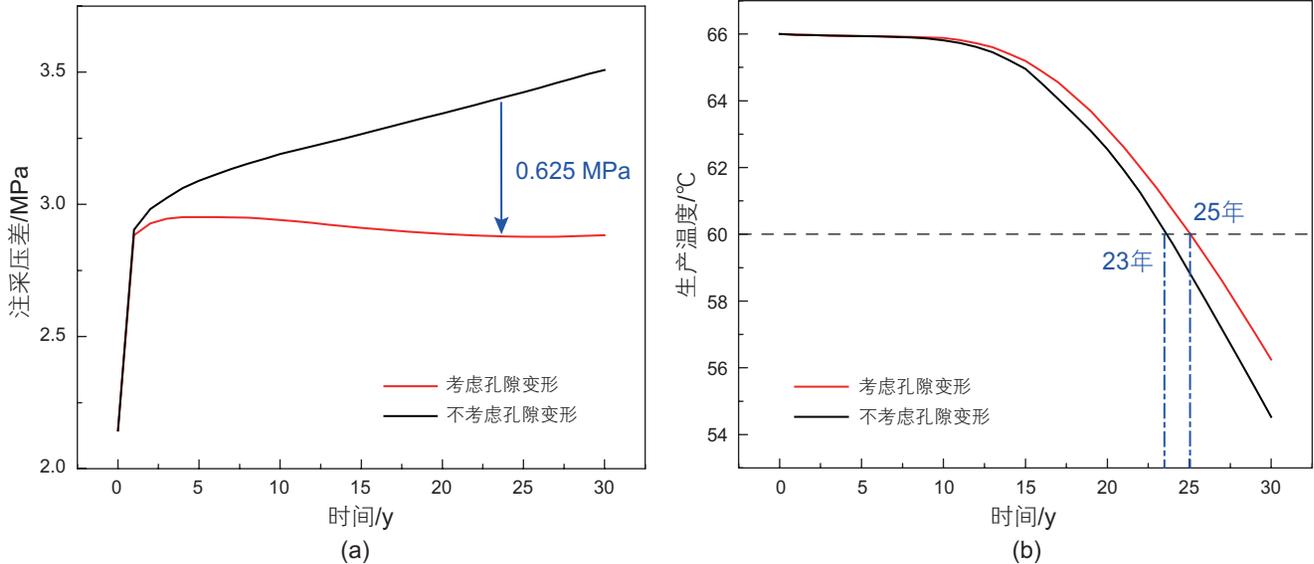


图 11 不同案例条件下系统的注采压差和生产温度

Fig. 11 The difference between injection and production well and the production temperature of the system under different case

## 4 结论

本文针对雄安碳酸盐岩岩溶型储层，搭建了考虑孔隙变形的碳酸盐岩热一流一化多场耦合模型。探究了热一流一化耦合作用下水岩反应对储层孔渗演变的作用机制，揭示了热一流一化作用下储层内部孔渗参

数的演变特征以及孔渗参数变化对系统取热性能的影响。本研究可为碳酸盐岩岩溶型热储产能的精确预测和开发方案优化提供参考依据，得到的主要结论如下：

(1) 本文注采条件下，储层浓度和孔隙度呈现环状分布，这是由于注入井和波及前沿区域发生溶解反应，注入井和波及前沿区域之间发生沉淀反应导致的。

(2) 注入井附近的溶解反应是由于低饱和溶液注入

导致的,波及前沿处的溶解反应是由于低温破坏平衡导致的。中间区域的沉淀反应是由于白云石溶解饱和浓度随温度单调递减导致的。

(3)开采30年时,注入井附近发生溶解反应,孔隙度和渗透率分别增大了19.31%和73.57%;井间连线,溶解反应作用效果大于沉淀反应,储层孔隙度和

渗透率分别提高了2%和7.54%;生产井附近发生沉淀反应,孔隙度和渗透率分别降低了0.11%和0.316%。

(4)本文注采条件下,考虑孔隙变化案例的注采压差比不考虑案例低0.625 MPa,降低了21.68%。且孔隙变形可以延长系统寿命(从23年增加到25年),减缓热突破的发生。

## 参考文献

- [1] 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 W J, LIU Z M, WANG W L, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 312-321.]
- [2] 陈墨香,汪集旻,汪缉安,等.华北断陷盆地地热场特征及其形成机制[J].地质学报,1990,64(1):80-91.[CHEN M X, WANG J Y, WANG J, 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.]
- [3] 李卫卫,饶松,唐晓音,等.河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征[J].地质科学,2014,49(3):850-863.[LI W W, RAO S, TANG X Y, et al. Borehole temperature logging and temperature field in the XiongXian geothermal field, Hebei province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2014, 49(3): 850-863.]
- [4] 庞中和,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):56-62.[PANG Z H, KONG Y L, PANG J M, et al. Geothermal resources and development in XiongAn new area[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(11): 56-62.]
- [5] 吴爱民,马峰,王贵玲,等.雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J].地球学报,2018,39(5):523-532.[WU A M, MA F, WANG G L, et al. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in XiongAn new area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(5): 523-532.]
- [6] 马峰,王贵玲,刘桂宏,等.雄安新区容城地热田碳酸盐岩热储采灌数值模拟[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52:1-18.[MA F, WANG G L, LIU G H et al. Numerical simulation of exploitation and reinjection of carbonate geothermal reservoir in Rongcheng geothermal field, XiongAn new area[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2022, 52: 1-18.]
- [7] WANG Y, LI T, CHEN Y, 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.
- [8] 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.
- [9] LI P, LI D, WANG Q, et al. Phase-field modeling of hydro-thermally induced fracture in thermo-poroelastic media[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 254: 107887.
- [10] WANG C, SHI X, ZHANG W, et al. Dynamic analysis of heat extraction rate by supercritical carbon dioxide in fractured rock mass based on a thermal-hydraulic-mechanics coupled model[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(2): 225-236.
- [11] 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.
- [12] 李佳琦,魏铭聪,冯波,等. EGS 地热能开发过程中水岩作用对热储层特征的影响[J]. 可再生能源, 2014, 32(7): 1004-1010. [LI J Q, WEI M C, FENG B, et al. Impacts of water-rock interactions on thermal reservoir characteristics in EGS geothermal development[J]. *Renewable Energy Resources*, 2014, 32(7): 1004-1010.]
- [13] 徐伟. 高温高压流动条件下灰岩溶解实验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007. [XU W. An experimental study of limestone dissolution at high temperature and high pressure in liquid-flow reaction set[D]. Beijing: China University of Geosciences-Beijing, 2007.]
- [14] ANDRÉ L, RABEMANANA V, VUATAZ F. Influence of water-rock interactions on fracture permeability of the deep reservoir at Soultz-sous-Forêts, France[J]. *Geothermics*, 2006, 34(5-6): 507-531.
- [15] 吴永东. 水岩作用对 EGS 地热储层孔渗特征的影响研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2016. [WU Y D. Research on the impact of water-rock interactions on EGS geothermal reservoir porosity and permeability[D]. Jilin: Jilin University, 2016.]
- [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 Y, MA G, WANG H, et al. The simulation of thermo-hydro-chemical coupled heat extraction process in fractured geothermal

- reservoir[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143: 859–870.
- [18] SONG G, SONG X, JI J, 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 CO<sub>2</sub> as working fluid—A novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon[J]. *Geothermics*, 2006, 35: 351–367.
- [20] 高俊, 李燕燕, 王贵玲, 等. 雄安新区高阳地热田蓟县系热储特征及资源量评估[J]. *地球学报*, 2023, 44(1): 133–144. [GAO J, LI Y Y, WANG G L, et al. Geothermal reservoirs characteristics and resource assessment of Jixian system in Gaoyang geothermal field, XiongAn new area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(1): 133–144.]
- [21] LINSTROM P, MALLARD G. The NIST Chemistry WebBook: A chemical data resource on the internet[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2001, 46.
- [22] JI J Y, SONG X Z, SONG G F, et al. Study on fracture evolution model of the enhanced geothermal system under thermal-hydraulic-chemical-deformation coupling[J]. *Energy*, 2023, 269: 126604.
- [23] 宋先知, 张逸群, 李根生, 等. 雄安新区地热井同轴套管闭式循环取热技术研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2021, 54(9): 971–981. [SONG X Z, ZHANG Y Q, LI G S, et al. Performance study of the downhole coaxial closed-loop heat exchange technology in Xiong'An new area[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2021, 54(9): 971–981.]
- [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 M L, HE T, WU Q F, et al. Hydrogeochemistry of geothermal waters from Xiongan new area and it indicating significance[J]. *Earth Science*, 2020, 45(6): 2221–2231.]
- [25] 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.

(编辑 杨雅露)