

# EGS 载热流体水岩作用对人工地热储层裂隙物性特征的影响

鲍新华<sup>1</sup>, 吴永东<sup>1</sup>, 魏铭聪<sup>1</sup>, 金显鹏<sup>2</sup>, 王淑媛<sup>1</sup>

1. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130021

2. 中国石油大庆油田有限责任公司, 大庆 163000

**摘要** 增强型地热系统(EGS)是一种从低渗透率低孔隙度岩层中提取热量的工程。载热流体注入深部地热储层后在储层裂隙发生水岩作用,引起地热储层矿物的溶解和沉淀,改变储层裂隙通道的物性特征,对EGS的长期运行产生重要影响。以苏尔茨地区的一种典型花岗岩为人工地热储层,建立了一维多重相互作用连续统一体地质模型,将相同温度的CO<sub>2</sub>和水以相同压力注入人工地热储层裂隙通道中,探讨两种载热流体的水岩作用对储层裂隙物性特征的影响。结果表明,在同样的储层状态、相同的运行模式下,CO<sub>2</sub>-EGS水岩作用对裂隙通道物性特征的影响明显小于H<sub>2</sub>O-EGS。

**关键词** 增强型地热系统;地热储层;水岩作用;载热流体;物性特征

**中图分类号** P641

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.14.006

## Impact of Water/CO<sub>2</sub>-Rock Interactions on Formation Physical Properties in EGS

BAO Xinhua<sup>1</sup>, WU Yongdong<sup>1</sup>, WEI Mingcong<sup>1</sup>, JIN Xianpeng<sup>2</sup>, WANG Shuyuan<sup>1</sup>

1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China

2. Daqing Oil-field Limited Liability Company, PetroChina, Daqing 163000, China

**Abstract** The enhanced geothermal system (EGS) is an engineering technique that has been created to extract economical amounts of heat from geothermal resources of low permeability and porosity. After the heat-exchange fluid is injected into the deep geothermal reservoir, there will be a water-rock interaction in the fracture channel, causing the dissolution and precipitation of reservoir minerals and changing the physical properties of the fracture channel, influencing long-time running of EGS significantly. This paper concerns a typical granite in Soultz as a geothermal reservoir and builds up a one-dimensional MINC model. Then CO<sub>2</sub> and water with identical temperatures and pressures are injected to contrast the effects of injected fluid water/CO<sub>2</sub>-rock interactions on the fractures in EGS. Results show that the effect of water-rock interaction of CO<sub>2</sub>-EGS on fracture channel properties is less obvious than that of H<sub>2</sub>O-EGS on the same operation mode.

**Keywords** enhanced geothermal systems; geothermal resources; water - rock interaction; heat-exchange fluid; physical properties characteristic

在当前全球气候变化日益加剧,节能减排迫在眉睫,发展可再生能源势在必行的大背景下,增强型地热系统(enhanced geothermal systems, EGS)日益受到重视。EGS资源具有蕴藏量巨大、利用效率高、系统稳定等特点,大规模推广具有重要意义<sup>[1]</sup>。

增强型地热系统是一种不需要自然对流热流体的新型地热能系统,美国能源部将其定义为采用人工形成地热储层的方法,从地下3~10 km低渗透性岩体中经济地开采相当数量深层热能的人工地热系统<sup>[2]</sup>。传统的EGS都是利用水作为热传递载体(H<sub>2</sub>O-EGS),然而水是一种宝贵的资源,在热

收稿日期:2013-09-22;修回日期:2014-03-24

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA052801)

作者简介:鲍新华,副教授,研究方向为地热及水文地质,电子信箱:bxinhua@163.com

引用格式:鲍新华,吴永东,魏铭聪,等. EGS载热流体水岩作用对人工地热储层裂隙物性特征的影响[J]. 科技导报, 2014, 32(14): 42-47.

循环中会造成不可避免的水量流失。同时,水是溶解岩石矿物质的强溶剂,注入到热的岩石裂隙中会产生强烈的溶解和沉淀作用,改变裂隙的渗透率,使在稳定方式下操作 EGS 变得困难。鉴于 H<sub>2</sub>O-EGS 运行中的问题,国外学者进行了用超临界 CO<sub>2</sub> 作循环液的强化地热系统(CO<sub>2</sub>-EGS)研究。以往研究表明,超临界 CO<sub>2</sub> 在人工地热储层中的流动性和热提取能力优于水,更适合作为 EGS 的载热流体<sup>[3,4]</sup>。

载热流体注入人工地热储层后,和岩体、地下水发生了相互化学反应,引起储层中矿物的沉淀和溶解,对储层裂隙通道的物性特征(如孔隙度、渗透率等)产生重要影响,进而影响 EGS 的热量提取效率<sup>[5]</sup>。所以注入流体的水岩作用对储层裂隙物性特征的影响是衡量载热流体优劣性的重要因素,然而目前并没有文献对比 CO<sub>2</sub> 和水作为载热流体的水岩作用对储层物性特征的影响。本研究以德法两国边境苏尔茨地区埋深为 5000 m 处的花岗岩为人工地热储层,通过 TOUGHREACT 软件建立一维多重相互作用连续统一体地质模型,分别将等温度的水和 CO<sub>2</sub> 以相同压力注入人工地热储层的裂隙通道,模拟 EGS 运行过程中温度场(T)、渗流场(H)、应力场(M)、化学场(C)的耦合作用,研究岩石矿物发生的溶解和沉淀现象,探讨和对比两种载热流体注入后水岩作用对储层裂隙物性特征的影响。

## 1 模型建立

### 1.1 模拟工具

利用由 Xu 等<sup>[6]</sup>研发的非等温多相流体反应性溶质运移模拟程序 TOUGHREACT 进行模拟。该软件耦合了地下水流动、热、溶质运移和地下矿物质化学反应过程,已成功应用于矿床的形成、CO<sub>2</sub> 和核废料的地质处置、污染物运移、地热能开发等领域。

### 1.2 模型特征及载热流体流动状态

以苏尔茨(Soultz)地区埋深 5000 m 处高温花岗岩为人工地热储层,地层的孔压为 50 MPa,温度为 210℃。为保证水流在裂隙通道中的正常流动,H<sub>2</sub>O-EGS 运行期间,以高于地层 2 MPa 的压力将 30℃ 的水注入人工地热储层裂隙中,水的化学成分同人工地热储层中初始水一致。根据地层实际情况将生产井井底压力控制为 50 MPa,等于地层初始压力。CO<sub>2</sub>-EGS 的运行模式与 H<sub>2</sub>O-EGS 的一致。人工地热储层裂隙体积分数 10%,裂隙渗透率 2 μm<sup>2</sup>,裂隙孔隙度 20%,岩石密度 2650 kg/m<sup>3</sup>,岩石比热 1000 J/(kg·℃),岩石导热系数 2.1 W/(m·℃);注入井和生产井间距 600 m,注入井井底压力 52 MPa,注入水温度 30℃,生产井井底压力 50 MPa。

埋深为 5000 m 的人工地热储层中地下水流速较慢,可视作滞流,因此本研究忽略人工地热储层的初始水动力条件,假定储层中的初始水只会载热流体的驱动下由注入井向生产井运动。人工地热储层周围为低渗透性岩层,和人工地热储层不存在质量交换但是存在能量交换,所以模型的边界被设定为隔水传热边界,热量交换解析公式为

$$T(x,t) - T_i = (T_i - T_i + px + qx^2) \exp\left(-\frac{x}{d}\right) \quad (1)$$

$$d = \frac{\sqrt{\Theta t}}{2}$$

$$\Theta = \frac{\lambda}{\rho c}$$

式中, $T$  为绝对温度, $t$  为时间, $x$  为距边界的距离, $T_i$  为盖层初始温度, $T_i$  为边界随时间的温度, $p$  和  $q$  为时间耦合参数, $d$  为热传导的穿透深度, $\Theta$  为热扩散系数, $\lambda$  为岩石导热系数, $\rho$  为岩石密度, $c$  为岩石比热容。

本研究参考文献[6]通过 TOUGHREACT 建立一维多重相互作用连续统一体地质模型模拟 EGS 的热量运移和流体动态(图 1)。多重相互作用连续统一体法中的流体在裂隙网络中可看作连续统一体,该方法可用于流体、热或化学核素在裂隙和非裂隙岩石间的流动模拟<sup>[7]</sup>。由于地热储层的对称性决定了水流及水岩反应在各方向上相似,可以将三维地热储层概化为一维模型,用来反映 EGS 的共性特征。注入井和生产井间发育的裂隙带被概化成两组正交裂隙,是载热流体的主要流动通道。中外学者研究深部地热能系统相关问题时,大多把注入井和生产井的距离设定为 400~1000 m<sup>[8]</sup>。参考相关研究成果,本模拟注入井和生产井间距设定为 600 m,井间被剖分成 72 个网格,从注入井至生产井网格的径向距离逐渐增大,由注入井处的 0.1 m 增至生产井处的 20 m。

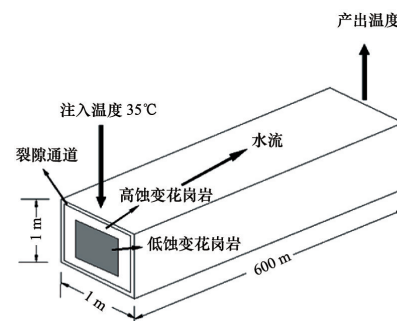


图 1 一维多重相互作用连续统一体地质模型  
Fig. 1 Schematic diagram of one-dimensional multiple geological model

### 1.3 矿物成分、反应动力学参数和水化学参数

一维多重相互作用连续统一体地质模型模拟的矿物成分主要为两个部分。人工地热储层的裂隙主要为易破碎的蚀变强烈花岗岩,矿物成分以石英为主;基质主要为蚀变程度较低的花岗岩,矿物成分以黏土矿物为主,剩下部分为杂质(表 1)。CO<sub>2</sub>-EGS 运行期间,注入的 CO<sub>2</sub> 与围岩矿物质发生化学反应时可能产生次生矿物的沉淀,所以 CO<sub>2</sub> 为载热流体的 EGS 模型不仅需要表 1 中的矿物,还要考虑 CO<sub>2</sub>-水-矿物反应生成的所有碳酸盐矿物<sup>[9]</sup>。动力学溶解/沉淀平衡反应速率方程为

$$r_n = f(C_1, C_2, \dots, C_n) = \pm K_n A_n [1 - \Omega_n^q] \quad (2)$$

其中, $n$  为发生动力学溶解/沉淀平衡反应的矿物代号, $r$  为溶解/沉淀反应速率, $C$  为物质的量浓度, $K$  为反应速率常数, $A$

为在1 kg水中矿物的反应性比表面积,  $\Omega$ 为饱和指数,  $\theta$ 和 $\eta$ 为两个一般由实验确定的参数, 通常设为1。软件中所采用的反应速率常数计算公式<sup>[10]</sup>为

$$K = K_{25}^{\text{nu}} \exp\left[\frac{-E_a^{\text{nu}}}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right] + K_{25}^{\text{H}} \exp\left[\frac{-E_a^{\text{H}}}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right]$$

$$a_{\text{H}}^{n_{\text{H}}} + K_{25}^{\text{OH}} \exp\left[\frac{-E_a^{\text{OH}}}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right] a_{\text{OH}}^{n_{\text{OH}}}$$

(3)

其中,  $K_{25}$ 为25℃下的反应速率常数,  $E_a$ 为活化能,  $R$ 为气体常数,  $a$ 为活度。nu表示中性机制, H表示酸性机制, OH表示碱性机制, 化学反应动力学参数见表2。

人工地热储层初始水的化学成分是通过苏尔茨地区钻孔GPK1埋深为3500 m的水样在储层210℃条件下分别和蚀变强烈花岗岩矿物、蚀变程度较低的花岗岩矿物化学平衡得到。人工地热储层裂隙通道中水、基质中水化学成分初始浓度见文献[11]。

表1 人工地热储层的矿物成分

Table 1 Mineral composition of artificial geothermal reservoir

矿物	体积分数/%	
	裂隙通道	基质
石英	43.900	4.090
钾长石	—	13.900
绿泥石	—	4.800
方解石	4.300	3.300
白云石	0.700	0.800
伊利石	40.200	24.600
钠蒙脱石	7.392	7.469
钙蒙脱石	2.208	2.231
硫化铅	1.000	0.700
黄铁矿	0.300	1.300

注:—表示不含有该矿物。下表同。

表2 各种矿物的反应动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of minerals

矿物	比表面积/ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	反应动力学参数值								
		中性机制		酸性机制			碱性机制			
		$K_{25}/$ ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$E_a/$ ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$K_{25}/$ ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$E_a/$ ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$n_{\text{H}}$	$K_{25}/$ ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$E_a/$ ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$n_{\text{OH}}$	
石英	9.8	$1.023 \times 10^{-14}$	87.70	—	—	—	—	—	—	
方解石	9.8	$1.457 \times 10^{-7}$	62.76	$6.918 \times 10^{-2}$	19.0	1.00	—	—	—	
钾长石	9.8	$3.890 \times 10^{-13}$	38.00	$8.710 \times 10^{-11}$	51.7	0.50	$6.31 \times 10^{-12}$	94.1	-0.82	
初 绿泥石	108.7	$3.020 \times 10^{-13}$	88.00	$7.762 \times 10^{-12}$	88.0	0.50	—	—	—	
始 白云石	9.8	$2.951 \times 10^{-8}$	52.20	$6.457 \times 10^{-4}$	36.1	0.50	—	—	—	
矿 钠蒙脱石	108.7	$1.660 \times 10^{-13}$	35.00	$1.047 \times 10^{-11}$	23.6	0.34	$3.02 \times 10^{-17}$	58.9	-0.40	
物 钙蒙脱石	108.7	$1.660 \times 10^{-13}$	35.00	$1.047 \times 10^{-11}$	23.6	0.34	$3.02 \times 10^{-17}$	58.9	-0.40	
黄铁矿	12.9	$4.000 \times 10^{-11}$	62.76	—	—	—	—	—	—	
伊利石	108.7	$1.660 \times 10^{-13}$	35.00	$1.047 \times 10^{-11}$	23.6	0.34	$3.02 \times 10^{-17}$	58.9	-0.40	
硫化铅	12.9	$4.000 \times 10^{-11}$	62.76	—	—	—	—	—	—	
次 菱铁矿	9.8	$1.260 \times 10^{-9}$	62.76	$6.457 \times 10^{-4}$	36.1	0.50	—	—	—	
生 铁白云石	9.8	$1.260 \times 10^{-9}$	62.76	$6.457 \times 10^{-4}$	36.1	0.50	—	—	—	
物 片钠铝石	9.8	$1.260 \times 10^{-9}$	62.76	$6.457 \times 10^{-4}$	36.1	0.50	—	—	—	

注:  $n_{\text{H}}$ 表示酸性环境下的机制常数,  $n_{\text{OH}}$ 表示碱性环境下的机制常数。

## 2 孔隙度-渗透率相互关联

由于初始矿物的溶解和次生矿物的沉淀导致含水层孔隙度和渗透率的不断变化。孔隙度的变化直接由矿物体积分数的改变计算, 而因孔隙度改变导致的渗透率变化可以通过Kozeny-Caeman球体颗粒模型计算, 具体表达式为

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

(4)

式中,  $k_0$ 为初始渗透率,  $k$ 为渗透率,  $\phi_0$ 为初始孔隙度,  $\phi$ 为孔隙度。

模拟过程中选择的孔隙度-渗透率相互关联的模型较为

简单, 没有考虑孔隙的大小、形状及连通性等多方面因素的影响, 模型中孔隙度与渗透率的关联性良好。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 H<sub>2</sub>O-EGS水岩作用

作为载热流体的低温水注入人工储层的裂隙后被加热(图2, 低温水注入1.5、10 a时的温度分布, 横坐标为与注入井的距离), 促进了水分子的电离, 导致水中H<sup>+</sup>浓度上升, 因此注入井附近pH值明显下降(图3)。随着低温水的不断注入, pH值降低范围逐渐增大, 引发注入井附近裂隙通道中方解石的溶解。

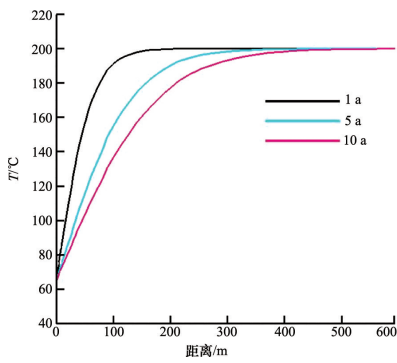


图2 温度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution for temperature

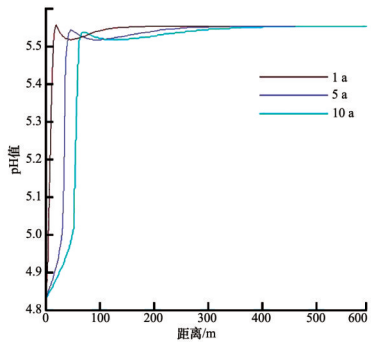


图3 H<sub>2</sub>O-EGS 中 pH 值空间分布

Fig. 3 Spatial distribution for pH value in H<sub>2</sub>O-EGS

由于方解石的溶解度随着温度降低而增加,注入的低温水会加剧地层水方解石的溶解。以水为载体流体的EGS运行1a后,注入井附近方解石溶解现象明显。随着低温注入水和高温地层水不断混合,注入水温度提高,其方解石的溶解度降低,由非饱和状态逐渐变为饱和状态,在距离注入井20 m处发生沉淀,于距注入井25 m处方解石的沉淀达到峰值(图4,图中负值表示溶解,正值表示沉淀)。随着H<sub>2</sub>O-EGS的运行,注入水的影响范围逐渐增大,方解石溶解的区域不断扩大,方解石发生沉淀处距注入井的距离不断增大,沉淀的峰值不断增加。水中石英的溶解度随着温度的降低而降低。低温注入水的石英为过饱和状态,在注入井附近发生沉淀。石英沉淀的反应速率随温度的升高而升高,1年后在距注入井30 m处石英沉淀量达到峰值。沿着裂隙通道,注入水和地层水混合,温度不断升高,石英的溶解度不断增加,由饱和状态变为非饱和状态,石英由沉淀变为溶解。H<sub>2</sub>O-EGS运行,石英沉淀区域的范围逐渐增大,沉淀量的峰值逐渐增大,溶解区域的范围逐渐增大,溶解量的峰值逐渐增大(图5)。由于石英的反应速率小于方解石,石英体积分数的改变量远小于方解石。

人工地热储层裂隙通道的白云石先溶解后沉淀,沉淀量比方解石小1个数量级。伊利石在模型运行过程中的体积分数基本不变,对裂隙物性特征影响很小。黄铁矿、硫化铅、蒙脱石在注入井附近发生极少量沉淀,由于这些矿物初始体积

分数较小,水岩作用对其体积分数的改变量较小,所以对裂隙物性特征基本没有影响,本文不予讨论。

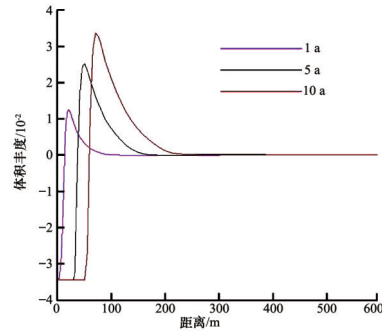


图4 H<sub>2</sub>O-EGS 中方解石体积丰度空间分布

Fig. 4 Distribution for volumetrical abundance of calcite in H<sub>2</sub>O-EGS

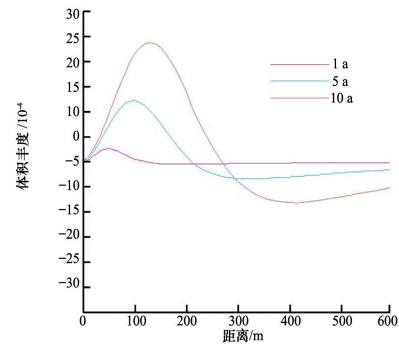


图5 H<sub>2</sub>O-EGS 中石英体积丰度空间分布

Fig. 5 Distribution for volumetrical abundance of quartz in H<sub>2</sub>O-EGS

矿物的溶解和沉淀会导致人工地热储层孔隙度和渗透率的改变。沿着载热流体流动通道,储层的孔隙度和渗透率先增大后减少。随着低温水的注入,储层孔隙度和渗透率的变化逐渐明显,变化区域的范围逐渐增大(图6、图7)。储层孔隙度和渗透率的变化与方解石体积分数的变化有较好的相关性,这是因为方解石和水中H<sup>+</sup>发生中和反应,并且其发生溶解或沉淀的反应速率明显高于其他矿物,所以方解石体积分数变化对储层的物性特征具有绝对性影响。

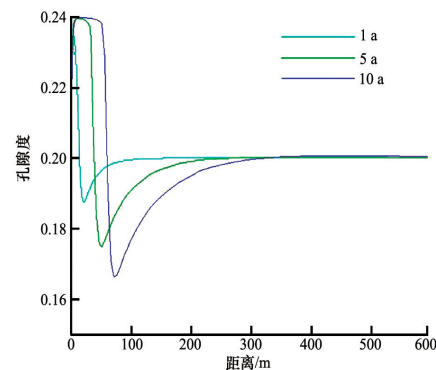


图6 H<sub>2</sub>O-EGS 中孔隙度空间分布

Fig. 6 Distribution for porosity in H<sub>2</sub>O-EGS

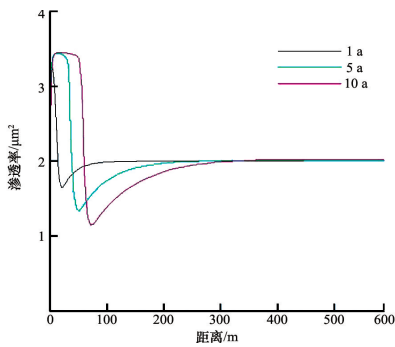


图7 H<sub>2</sub>O-EGS中渗透率空间分布  
Fig. 7 Distribution for permeability in H<sub>2</sub>O-EGS

由此可见, H<sub>2</sub>O-EGS运行期间, 注入的低温水打破了储层初始水化学场和温度场的平衡。注入水和初始水混合后, 初始地层水 pH 值和溶解度的变化会导致储层岩体矿物发生溶解和沉淀, 改变了人工地热储层的物性特征。随着低温水不断注入, 水岩作用对储层裂隙通道物性特征的影响愈发明显。

### 3.2 CO<sub>2</sub>-EGS水岩作用

CO<sub>2</sub>-EGS运行的开始阶段, 是注入的CO<sub>2</sub>对人工地热储层的滞留水进行驱替的过程。运行的开始阶段流入生产井中流体为单相水, 随着CO<sub>2</sub>的注入, 单相水的流量逐渐增加。系统运行 23.7 s 后气相CO<sub>2</sub>到达生产井, 生产流体变为水-CO<sub>2</sub>混合双相流(图8)。随后单相水的流量持续降低, 生产流体中气相流体(由气相CO<sub>2</sub>和少量水蒸气构成)的比例逐渐增加, 运行0.2 a后生产流体的相态只有气相, CO<sub>2</sub>-水驱替过程结束, 裂隙通道被以CO<sub>2</sub>为主的气相流体占据。

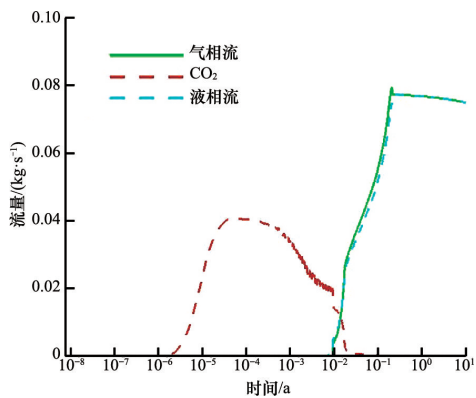
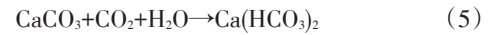


图8 CO<sub>2</sub>-EGS生产流体不同相态动态  
Fig. 8 Phase changing over time in CO<sub>2</sub>-EGS

EGS运行0.1 a时, 随着CO<sub>2</sub>的注入, 溶解的CO<sub>2</sub>增加水中液相CO<sub>2</sub>的浓度(图9), 降低地层水的pH值(图10), 会引发人工地热储层裂隙通道矿物发生溶解或沉淀。0.2 a后水-CO<sub>2</sub>驱替完成, 裂隙通道中矿物体积分数发生改变, 其中方解石发生微量溶解(图11), 石英发生微量沉淀(图12)。EGS运行10 a时, 石英和方解石体积丰度空间分布和0.2 a时相比基本不变, 这是由于水是CO<sub>2</sub>-矿物化学反应的溶解剂和重要的

化学载体, 0.2 a后裂隙通道的液相水消失, EGS载热流体的水岩作用停止, 裂隙通道的各矿物体积丰度停止变化。方解石的溶蚀反应为



其他矿物中, 伊利石体积分数基本保持不变。白云石、黄铁矿、硫化铅发生极少量溶解, 钙蒙脱石和钠蒙脱石发生极少量沉淀, 由于这些矿物初始体积分数较小, 水岩作用对其体积分数的改变量较小, 所以对裂隙物性特征基本没有影响, 本文不予讨论。

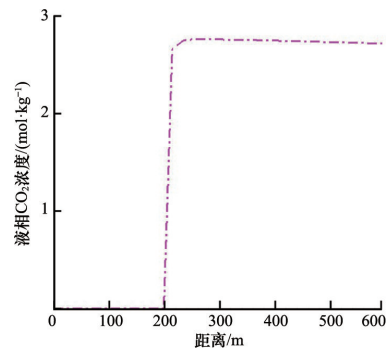


图9 EGS运行0.1 a时液相CO<sub>2</sub>浓度  
Fig. 9 Concentration of liquid phase CO<sub>2</sub> as EGS running 0.1 a

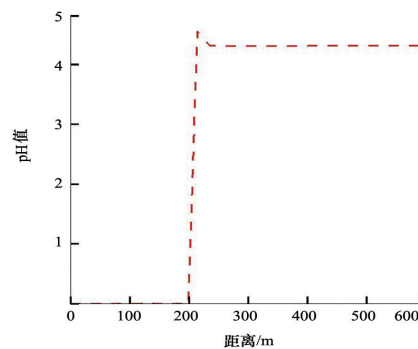


图10 CO<sub>2</sub>-EGS中pH值空间分布  
Fig. 10 Spatial distribution for pH value in CO<sub>2</sub>-EGS

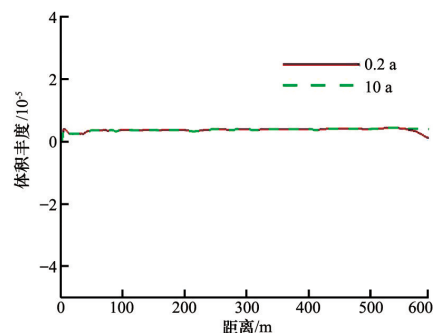
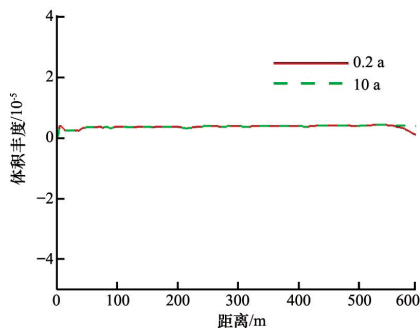
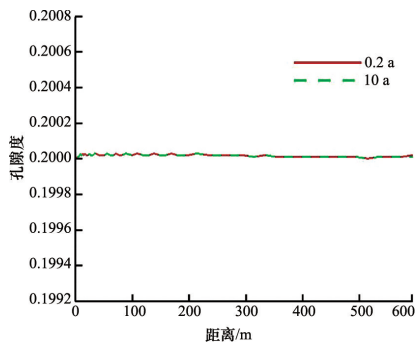
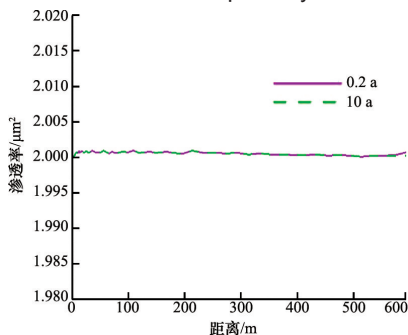


图11 CO<sub>2</sub>-EGS中方解石体积丰度空间分布  
Fig. 11 Distribution for volumetrical abundance of calcite in CO<sub>2</sub>-EGS

图 12 CO<sub>2</sub>-EGS 中石英体积丰度空间分布Fig. 12 Distribution for volumetrical abundance of quartz in CO<sub>2</sub>-EGS

本次模拟并无铁白云石、菱铁矿、片钠铝石等次生固碳矿物的生成。虽然方解石、白云石、硫铁矿的溶解为次生固碳矿物形成提供了 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> 等金属离子,但从注入井到生产井地层水一直保持较低的 pH 值,对次生固碳矿物的形成产生了抑制作用,同时这些矿物的沉淀反应速率小,在 0.2 a 时未明显生成。0.2 a 后由于裂隙通道中的液相水消失,水岩作用停止,也不会生成次生固碳矿物。

裂隙通道矿物的化学反应被化学反应动力学控制,CO<sub>2</sub> 驱替越快,水(地层水)-气(超临界 CO<sub>2</sub>)-固(岩体矿物)三相共存时间越短,载热流体的水岩作用时间越短,对裂隙通道物性特征影响越小。当 CO<sub>2</sub> 驱替完成后,裂隙通道的各矿物体积丰度停止变化,裂隙通道的渗透率和孔隙度停止变化(图 13 和图 14)。与 H<sub>2</sub>O-EGS 相比,CO<sub>2</sub>-EGS 水岩作用对裂隙通道孔隙度和渗透率的改变较小,基本可以忽略不计。

图 13 CO<sub>2</sub>-EGS 中孔隙度空间分布Fig. 13 Distribution for porosity in CO<sub>2</sub>-EGS图 14 CO<sub>2</sub>-EGS 中渗透率空间分布Fig. 14 Distribution for permeability in CO<sub>2</sub>-EGS

## 4 结论

1) 水为载热流体的 EGS 运行期间,注入水和初始水混合导致注入井附近地层水 pH 值升高、温度降低、裂隙通道岩体矿物溶解度改变,从而引起裂隙通道中岩体矿物,如方解石和石英的溶解和沉淀,导致裂隙通道的孔隙度和渗透率增大或变小,改变裂隙通道的物性特征。同时,随着低温水的不断注入,水岩作用对储层裂隙通道物性特征的影响将愈发明显。

2) CO<sub>2</sub> 为载热流体的 EGS 运行期间,CO<sub>2</sub> 的溶解降低了地层水的 pH 值,导致裂隙通道中方解石发生微量溶解,石英发生微量沉淀,无次生固碳矿物生成,水岩作用对裂隙通道孔隙度和渗透率的影响小,裂隙通道物性特征变化小。并且当 CO<sub>2</sub>-水驱替完成后,水岩反应停止,裂隙通道的物性特征将基本不再发生变化。

3) 在同样的储层状态、注入-生产井设计条件下,以 CO<sub>2</sub> 为载热流体的 EGS 水岩作用对裂隙通道物性特征的影响小于水为载热流体的 EGS 水岩作用。

## 参考文献 (References)

- [1] 康玲,王时龙,李川. 增强地热系统 EGS 的人工热储技术[J]. 机械设计与制造, 2008(9): 141-143.  
Kang Ling, Wang Shilong, Li Chuan. Reservoir technology in enhanced geothermal systems[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(9): 141-143.
- [2] 张建英. 增强型地热系统 (EGS) 资源开发利用研究[J]. 中国能源, 2011, 33(1): 29-32.  
Zhang Jianying. Study on exploitation and utilization in an enhanced geothermal system (EGS)[J]. Energy of China, 2011, 33(1): 29-32.
- [3] Durst A C, Lee P A. Microwave conductivity due to scattering from extended linear defects in d-wave superconductors[J]. Physical Review B, 2002, 65(9): 094501.
- [4] Rabemanana V, Violette S, De Marsily G, et al. Origin of the high variability of water mineral content in the bedrock aquifers of Southern Madagascar[J]. Journal of Hydrology, 2005, 310(1): 143-156.
- [5] 王洋,张可霓. 增强型地热系统 (EGS) 的裂隙模拟方法[J]. 上海国土资源, 2011, 32(3): 77-80.  
Wang Yang, Zhang Keni. Modeling approaches for fractures in an enhanced geothermal system (EGS)[J]. Shanghai Land and Resources, 2011, 32(3): 77-80.
- [6] Xu T, Sonnenthal E, Spycher N, et al. TOUGHREACT: A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media: applications to geothermal injectivity and CO<sub>2</sub> geological sequestration[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(2): 145-165.
- [7] Vinsome P K W, Westerveld J. A simple method for predicting cap and base rock heat losses in thermal reservoir simulators[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1980, 19(3): 87-90.
- [8] 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(4): 351-367.
- [9] Pruess K. On production behavior of enhanced geothermal systems with CO<sub>2</sub> as working fluid[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(6): 1446-1454.
- [10] Xu T, Rose P, Fayer S, et al. On modeling of chemical stimulation of an enhanced geothermal system using a high pH solution with chelating agent[J]. Geofluids, 2009, 9(2): 167-177.
- [11] Xu T, Pruess K, Apps J. Numerical studies of fluid-rock interactions in enhanced geothermal systems (EGS) with CO<sub>2</sub> as working fluid[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.

(责任编辑 王媛媛)