

渗透率各向异性对地热电池高效储能发电系统的影响

甘泉^{1,2}, 刘艳婷^{1,2}, 马跃强^{1,2}, 汪涛^{1,2*}, 胡大伟³, 鄧胜⁴

1 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044

2 重庆大学资源与安全学院, 重庆 400044

3 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071

4 中国华融国际控股有限公司, 香港 999077

* 通信作者, wangtao.oil@cqu.edu.cn

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-06-07

科技部重点研发计划(2021YFC3000603)、国家自然科学基金委面上项目(5217041034)、四川省重点项目(2022YFSY0008)、中国石油科技创新基金(2023DQ02-0206)和中国博士后科学基金第72批面上资助(2022M720555)联合资助

摘要 在当前能源转型的大背景下, 清洁能源利用的新技术市场日益扩大。地热电池储能发电技术有望解决太阳能、风能等可再生能源间歇性问题, 受到清洁能源领域的关注。地热电池储能系统利用沉积地层中形成的低渗透率、低孔隙度的盖层和基层以及高渗透率、高孔隙度的中间储层实现热水的储存。这些热水创造了一个高温地热储层, 已有研究表明这些储热可以高效回收, 甚至可能实现长期甚至季节性的存储。在沉积结构中, 其物理特征等方面存在十分明显各向异性, 其中渗透率各向异性在流体的流动过程中发挥着重要作用。因此, 研究渗透率各向异性对储能产能的影响至关重要。本研究利用 TOUGHREACT-FLAC3D 耦合软件建立了地热储能温度场—渗流场—应力场 (THM) 多场耦合模型, 模拟了 4 种渗透率各向异性的情况, 并分析了 4 种条件下热水注入和生产中热水流动路径、温度和压力的分布以及发电效率。结果表明: (1) 渗透率各向异性对注采过程中压力的演变有强烈的影响, 压力锋面在渗透率大的方向快速移动, 而且各向异性越小, 储层等效渗透率越大, 注入热水需要的压力越小。(2) 热水流动优先在渗透率大的方向流动, 温度和压力的传播与热水流动方向一致, 但是温度分布主要由流体流动的方向决定, 在流动过程中热水用于加热初始环境中较冷的岩石和水造成热量损失, 所以渗透率各向异性对储层温度的分布情况影响较小。(3) 储层的岩石在高温热水的作用下发生膨胀, 其孔隙压力恢复值随温度的升高逐渐高于储层初始的孔隙压力 (12 MPa)。(4) 在进行的 30 个注采循环结束后渗透率各向异性为 1000 时产生的电量最高可以达到 5.2 MW。因此, 在地热电池储能系统进行选取时, 选择水平方向与垂直方向渗透率各向异性大的储层产能效率更高。

关键词 地热电池; 渗透率各向异性; 地热储能; 可再生能源; 数值模拟

中图分类号: P314; TM616

Influence of permeability anisotropy on high-efficiency energy storage power generation system of geothermal battery

GAN Quan^{1,2}, LIU Yanting^{1,2}, MA Yueqiang^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, HU Dawei³, ZHI Sheng⁴

引用格式: 甘泉, 刘艳婷, 马跃强, 汪涛, 胡大伟, 鄧胜. 渗透率各向异性对地热电池高效储能发电系统的影响. 石油科学通报, 2024, 03: 476-486
GAN Quan, LIU Yanting, MA Yueqiang, WANG Tao, HU Dawei, ZHI Sheng. Influence of permeability anisotropy on high-efficiency energy storage power generation system of geothermal battery. Petroleum Science Bulletin, 2024, 03: 476-486. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.03.035

1 State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2 School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

3 Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

4 Huarong International Financial Holdings Limited, Hong Kong 999077, China

Received: 2023-02-15; Revised: 2023-06-07

Abstract In the context of the current energy transition, the market for innovative technologies for clean energy utilization is growing. Geothermal battery storage power generation technology is expected to solve the problem of intermittency of renewable energy sources such as solar and wind power, and is attracting attention in the clean energy field. Geothermal battery energy storage system uses the low permeability, low porosity cap and base layers and the high permeability, high porosity intermediate reservoirs formed in the sedimentary strata to realize the storage of hot water. This hot water creates a high-temperature geothermal reservoir, and it has been shown that this stored heat can be efficiently recovered and may even enable long-term or even seasonal storage. In sedimentary structures, there are very obvious anisotropy in their physical characteristics and other aspects, among which permeability anisotropy plays an important role in the flow process of fluids. Therefore, it is crucial to study the effect of permeability anisotropy on energy storage capacity. In this study, a multi-field coupled model of temperature-percolation-stress field (THM) for geothermal energy storage was developed using TOUGHREACT-FLAC3D coupling software to simulate four permeability anisotropies and analyze the hot water flow paths, temperature and pressure distributions, and power generation efficiency. The results showed that: (1) permeability anisotropy has a strong influence on the evolution of pressure during injection and production, pressure fronts move rapidly in the direction of high permeability and the lower the anisotropy the larger equivalent permeability the lower the pressure required to inject hot water. (2) Hot water flows preferentially in the direction of large permeability, and the propagation of temperature and pressure is consistent with the direction of hot water flow, but the temperature distribution is mainly determined by the direction of fluid flow, and hot water is used to heat up the colder rocks and water in the initial environment during the flow process resulting in heat loss, so the permeability anisotropy has less effect on the distribution of temperature in the reservoir. (3) The rock of the reservoir expands under the action of high-temperature hot water, and its pore pressure recovery value is gradually higher than the initial pore pressure of the reservoir (12 MPa) with the increase of temperature. (4) At the end of the 30 injection cycles, the maximum power generated at an anisotropy of 1000 permeability can reach 5.2 MW. Therefore, when selecting the geothermal cell storage system, the reservoir with a large permeability in the horizontal direction is more efficient.

Keywords geothermal battery; permeability anisotropy; geothermal energy storage; renewable energy storage; numerical simulation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.03.035

煤炭和石油等化石燃料的日渐枯竭, 温室气体的排放导致的全球气候变化, 是 21 世纪人类需要面对的重要难题和挑战。推动清洁能源的充分利用和技术创新是目前非常重要的课题^[1-2]。我国太阳能和风能分布广泛且资源丰富, 风力发电、太阳能发电技术近 10 年来都取得了飞速发展^[3]。但因储能技术的限制, 导致太阳能和风能无法实现大规模持续供能。我国西北、华北等地区弃风、弃光现象十分严重。据报道, 2017 年弃光、弃风的能量约为三峡水库全年的发电量^[4]。现存的储能技术^[5-6]在实现电网规模储能方面仍存在成本高、寿命短、环境污染等问题; 目前, 国际上提出了一种新概念—地热电池^[7], 汪集旸院士将其称之为“地热充电/热宝”^[4]。其可以将光能、风能等形式的能量转化成热能储存在沉积地层中, 根据生产生活需要取出并加以利用。地热电池储能系统可以解决地热资源^[8-11]分布不均, 热量强度不足难以实现远距离供暖、发电以及太阳能、风能供能间歇性问题。

由于地下岩体经历了漫长的沉积作用, 地下空间的结构非常复杂, 渗透率是控制热能储存和利用过程中流体的流动^[12]以及最终的产能效率最关键的地质参数之一。为实现对地下储层高效利用, 许多学者研究了地热能利用中裂缝孔径异质性^[13], 高渗透率裂缝^[14-16]对流体流动和热量提取的影响。利用地下含水层进行储能的研究^[17-19]中也考虑了渗透率非均质性等储层对储能过程中温度、压力的分布以及储能效率的影响。大多数储层都存在不同程度的渗透率各向异性, 准确了解水平和垂直渗透率的比值对采收率的影响至关重要。许多研究在储层建模中考虑了渗透率各向异性的情况^[20-22]。Ijeje 等人^[23]模拟了增强型地热系统中渗透率各向异性对生产井热突破时间、渗透率演化以及产热功率的影响, 结果表明各向异性为 0.01 时输出功率最大。Mao 等人^[24]通过数值模拟研究天然气水合物储层渗透率各向异性对压力、温度以及气、水采收率的演化规律, 结果表明水平渗透率越高越有利

于产气。地热电池储能的过程中存在很多未知, 研究热流体在储层中的流动、温度变化以及与岩石的反应是非常重要的。Panja 等人^[25]研究了单井注采模型下储层渗透率非均质性储层温度和压力的分布以及对热采收率的影响, 研究结果表明非均质性对热量回收的影响较小。此外, 研究了二维平面内水平方向渗透率各向异性对温度和压力分布的影响^[26]。但在实际沉积地质储层中渗透率表现为垂直和水平方向的空间各向异性^[27-28], 且其存在导致渗流机理非常复杂, 甚至可能对地热电池储能系统发电效率产生影响。

本文利用 TOUGH-FLAC 耦合软件建立了地热储能温度场-渗流场-机械场 (THM) 多场耦合双井注采模型, 用于研究三维空间内渗透率各向异性对储层温度以及压力分布的影响, 并确定储层渗透率各向异性对储能发电系统发电效率的影响, 对后期地热电池系统发电站的选址和商业化应用十分重要。

1 数值模型

1.1 地热电池储能发电系统

地热电池储能发电系统是指以地球为载体, 利用地质结构将风能、太阳能等各种形式的能量转化成储存起来, 在低能源需求期间储存多余的热能, 并在高能源需求期间提取储存的热量用于发电, 实现能源的灵活利用, 甚至实现跨季节性储能发电。以太阳光为例, 利用太阳能集热器^[29]接收太阳光照, 将太阳能集热器中的循环传热流体加热至高温, 然后热交换器将热量传递给地表水。被加热的地表水通过热水井注入地下的储层中, 储层温度提高, 使不经济的地热储层得到利用, 并实现根据电力需求抽采储层中的热水用

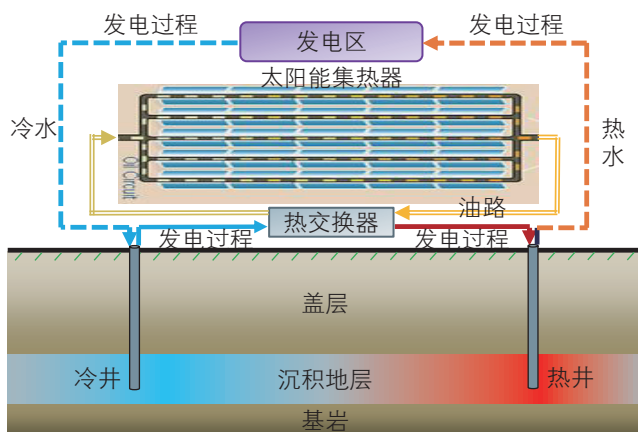


图1 利用太阳能进行储存发电的地热电池系统结构^[30]

Fig. 1 The structure of geothermal cell system using solar energy for storage and power generation^[30]

于发电。放电周期结束冷水注入冷水井维持地层的压力恒定, 并代替地上蓄水池的建造, 降低投入成本。利用太阳能进行储存发电的地热电池系统结构如图1所示。

1.2 数值模型建立

1.2.1 TOUGHREACT-FLAC3D 模拟软件

FLAC3D^[32]主要用于求解地质岩土中应力应变问题, 而TOUGHREACT^[33-35]则是用于研究多孔和裂缝介质中多相、多组分混合流体以及热传输的问题。TOUGHREACT-FLAC3D耦合架构原理如图2所示。其是将TOUGHREACT中的热(T), 渗流(H)及化学(C)沉淀/溶解与FLAC3D的应力(M)耦合, 可以模拟多孔介质中的THMC过程。“插值模块”即外部耦合模块, 将一个模拟软件的数据输出作为另一个模拟软件的输入数据, 使得TOUGHREACT的模型网格中心节点数据被插值到角节点中并作为FLAC3D的信息输入。该插值模块还可以计算储层流体的温度, 压力, 应力和化学作用下裂缝孔径的演变等。经过不断修正^[36-39], 该模拟软件不断被完善, 可以借助高效的计算机进行全面的非等温多组分反应流体物理和化学过程问题研究。

温度和压力范围由化学热力学数据以及所采用的状态方程(EOS)模块控制。目前, TOUGHREACT-FLAC3D共有9个状态方程(EOS)控制模块, 用于解决不同的流体以及多相流体混合在多孔介质中的

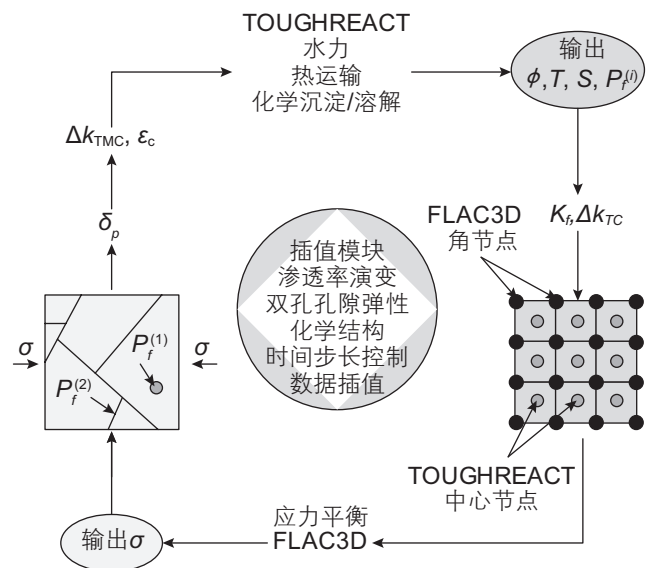


图2 TOUGHREACT-FLAC3D耦合架构原理图^[31]

Fig. 2 The flowchart and coupling interaction between TOUGHREACT-FLAC3D^[31]

流动, 热量传输, 化学反应等。本文地热电池系统模型使用EOS1 解决涉及的水热问题。

1.2.2 控制方程

在模拟过程中, 模型流体流动, 热传递和应力应变分别由TOUGH和FLAC3D进行计算处理。其中, 控制流体在可渗透模型中流动的质量守恒方程式^[40]如下:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M dV_n = \int_{\Gamma_n} F \cdot n d\Gamma_n + \int_{V_n} q dV_n \quad (1)$$

式中, M 表示特定流体的单位体积质量; V_n 指研究的流动系统的任意子域, 该域受封闭表面 V_n 的限制; F 表示质量通量; q 表示汇和源; n 是指向 V_n 的表面元素 $d\Gamma_n$ 上的法向量。该方程式表示特定体积 V_n 的质量变化率等于整个体积 V_n 表面的净流入量与来自汇和源的质量流入量。

应力、孔隙压力的变化导致储层发生机械变形, 岩体的孔隙度也随之发生变化。在模拟过程中孔隙度变化的控制方程如下^[41-42]:

$$\varphi = \varphi_r + (\varphi_0 - \varphi_r) e^{-\alpha \tau} \quad (2)$$

式中, φ_0 是有效应力为零时的孔隙度; φ_r 是高有效应力条件下的孔隙度; τ 指有效平均应力; α 为岩石的压缩性(恒定的参数)。

岩石之间温度的传递主要以传导的方式进行, 其热传导方程为:

$$\frac{\partial^2 T_r(x, z, t)}{\partial z^2} = \frac{\rho_r c_r}{K_r} \frac{\partial T_r(x, z, t)}{\partial t} \quad (3)$$

式中, ρ_r 为岩石的密度(kg/m^3); c_r 为岩石的热容($\text{J}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$)。

将渗透率各向异性的参数定义为:

$$\eta = \frac{k_h}{k_v} \quad (4)$$

式中, k_h 是在储层 x - y 平面(水平方向)的渗透率(m^2); k_v 是在储层 z 方向的渗透率(垂直方向)(m^2)。

1.3 模型建立

使用TOUGHREACT-FLAC3D软件并基于五点井网配置建立的本研究模型如图3所示, 模拟热水注采循环以及热损失、回收热效率的情况。储层尺寸为 $200\text{ m} \times 200\text{ m} \times 240\text{ m}$, 其中盖层和基层的厚度为 70 m , 中间储层的厚度为 100 m 。假定储层位于地下 1200 m 处, 储层的初始孔隙压力为 12 MPa , 平均地热梯度为 $25\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$, 地表温度假定为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 储层中部的初始温度设为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 。沿 x 、 y 和 z 轴的初始边界应力条件分别设置为 34.4 MPa 、 35.4 MPa 和 40 MPa , 并且

在施加恒定应力的情况下将模型边界设置为无流动的边界。模型各基本参数值已在表1中列出, 储层为高孔高渗的砂岩储层, 并在数值模型中将储层等效为均质的多孔介质, 覆盖层和基地岩层设置为低孔隙度和低渗透率, 实现储层的密封性。图3中标注位置为热水注入点, 对角同一水平位置为冷水注入点, 类似于我们模型中的热水井和冷水井。

储层初始温度设为 $50\text{ }^\circ\text{C}$, 注入热水的温度取 $250\text{ }^\circ\text{C}$ ^[12], 该温度保证客观发电效率的同时又最大程度地减少了温度过高带来的潜在危险。我们采用的注采方案为每日将太阳能加热的水通过热井注入, 以 10 kg/s 的速率注入 8 h 进行“充电”, 之后再以 10 kg/s 的速率从热井中采出白天注入的热水。在热井注入热水的同时冷井以 10 kg/s 的速率产出水, 持续 8 小时; 热井进行抽采工作时冷井以相同速率注入, 以保持储层压力平衡, 避免注采过程中压力变化过大导致储层塌陷或盖层破裂。注采循环结束后, 所有井都关闭, 闲置 8 h 后开始下一个注采循环。图4表示了一个注采循环周期冷井和热井的工作模式, 共进行了 30 天的

表1 模型各基本参数值^[25,30,43]

Table 1 The parameters of the studied model^[25,30,43]

| 参数 | 储层 | 盖层/基层 |
|----------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 渗透率(各向同性)/ m^2 | 1×10^{-13} | 1×10^{-17} |
| 初始孔隙度/% | 30 | 2.5 |
| 初始孔隙压力/MPa | 12 | 12 |
| 初始温度/ $^\circ\text{C}$ | 50 | 50 |
| 厚度/m | 100 | 70 |
| 岩石密度/ (kg/m^3) | 2500 | 2000 |
| 岩石热导率/ $(\text{W}/\text{m}^2\text{K})$ | 2.51 | 1.05 |
| 岩石比热容/ (kJ/km^3) | 0.92 | 0.8 |
| 水的比热容/ $(\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C})$ | 4.18 | |

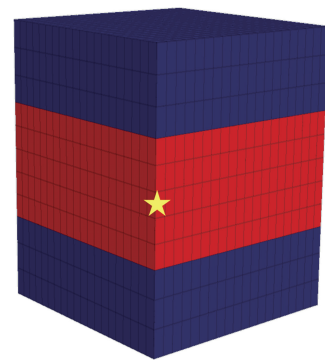


图3 地热电池储能数值模型

Fig. 3 The numerical model of geothermal battery energy storage working mode

注采循环。表2给出了我们设置的渗透率各向异性方案，保证水平渗透率不变的情况下，改变垂直方向的

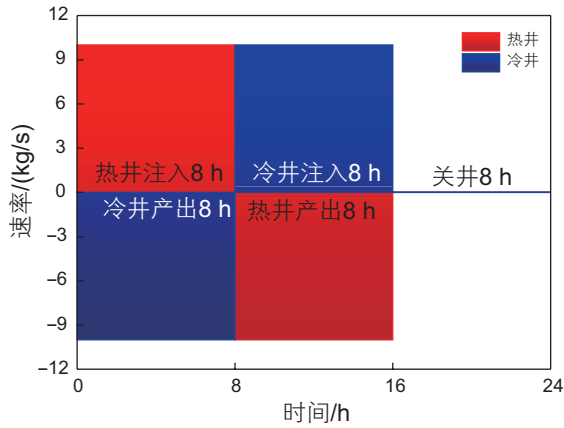


图4 一个注采循环周期冷热井工作模式
Fig. 4 The mode of hot and cold well in a injection and extraction cycle

渗透率。

2 模拟结果及讨论

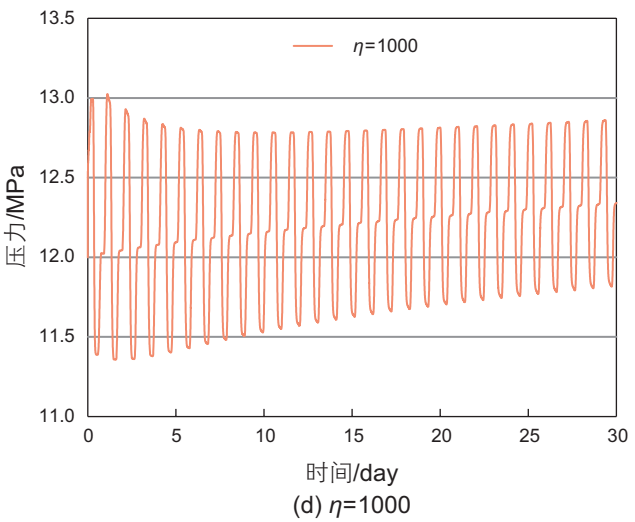
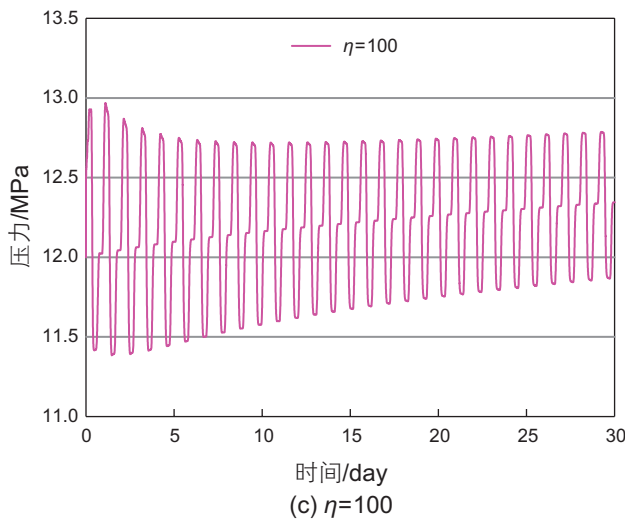
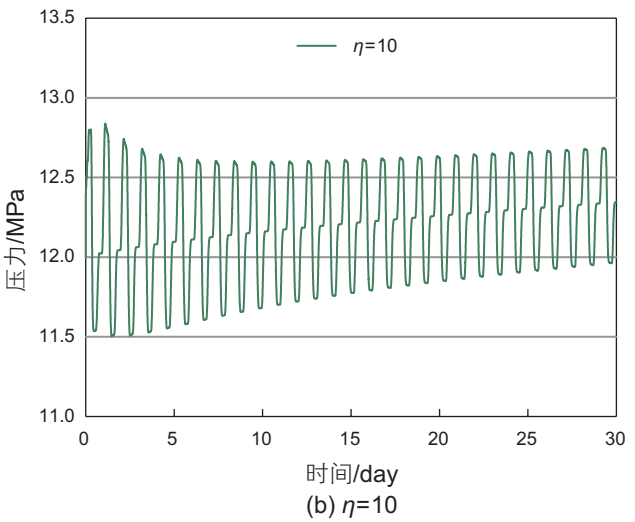
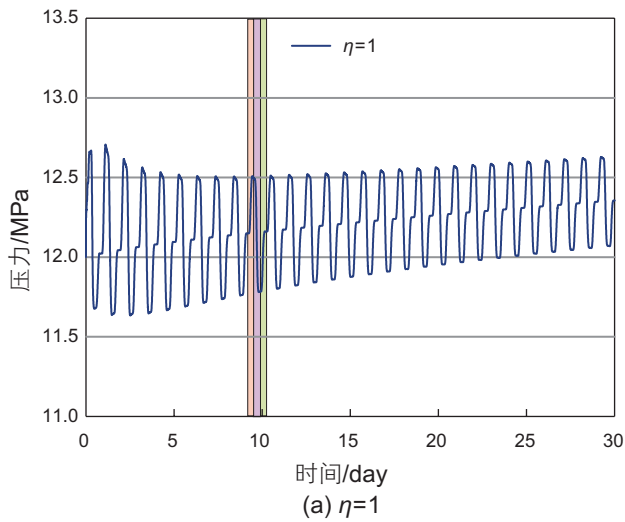
2.1 压力分布

4种渗透率各向异性条件下30个注采周期注入点压力变化如图5所示。注入热水压力升高，抽采阶段压力降低，关井阶段储层的压力恢复。在注采循环初

表2 渗透率各向异性方案

Table 2 Permeability anisotropy scheme

| 序号 | K_h/m^2 | K_v/m^2 | η |
|----|---------------------|---------------------|--------|
| 1 | 1×10^{-12} | 1×10^{-12} | 1 |
| 2 | 1×10^{-12} | 1×10^{-13} | 10 |
| 3 | 1×10^{-12} | 1×10^{-14} | 100 |
| 4 | 1×10^{-12} | 1×10^{-15} | 1000 |



注入阶段 抽采阶段 关井阶段

图5 4种方案下30次注采循环压力变化
Fig. 5 The pressure variation of 30 injection and extraction cycles under 4 scenarios

期需要的压力略高,随着循环次数的增加,注入和抽采阶段压力差减小并趋于稳定。在 $\eta=1$ 的储层中大约需要 12.5 MPa 的压力进行热水注入, $\eta=10$ 、 $\eta=100$ 和 $\eta=1000$ 条件下需要的注入压力越来越大。因为渗透率各向异性的比值越大,水平渗透率保持不变的条件下储层的等效渗透率(通常取 $k \sim \sqrt{k_h k_v}$)减小,注入热水需要的压力比渗透率各向同性条件下需要的压力大。同时,在渗透率各向异性越大的储层需要更高的压力差从储层中采出等量的水,则抽采阶段储层孔隙压力越低。渗透率各向异性越高的储层在注采过程中压力变化越大,孔隙压差变化在热水抽采过程中可能对储层造成损害,降低其使用寿命。因此,在系统实际选址中渗透率各向异性的影响至关重要。

图 6 给出了第 30 次注采周期结束时,4 种渗透率各向异性条件下储层压力变化云图(y-z 平面)。渗透率的大小决定了流体流动的情况,流体会优先向渗透

率较大的方向流动。温度和压力的锋面移动方向也和流体流动方向一致,优先在渗透率大的方向流动。4 种条件下由于储层等效渗透率随各向异性的增大而减小,等质量热水注入各向异性大的储层中受到的阻力更大。从图 6 可以看出,压力锋面的移动在储层(z 方向 70~170 m)内沿着渗透率较大的方向移动。4 种渗透率各向异性情况下,压力锋面随各向异性的增大由圆形转变为椭圆形, $\eta=10$ 、 $\eta=100$ 和 $\eta=1000$ 与各向同性相比,压力锋面在水平方向呈现椭圆形,且各向异性越大,椭圆的长轴在水平方向越长。 $\eta=1000$ 时的压力锋面形成的椭圆比 $\eta=100$ 和 $\eta=10$ 时更扁,垂直渗透率减小,压力在水平方向移动的更快。由此可知,渗透率越大,压力传播越快,为保证该储能系统进行注采工作时的安全性,系统的盖层和基层要具备足够低的渗透率。

在关井阶段储层的孔隙压力恢复时,恢复压力随

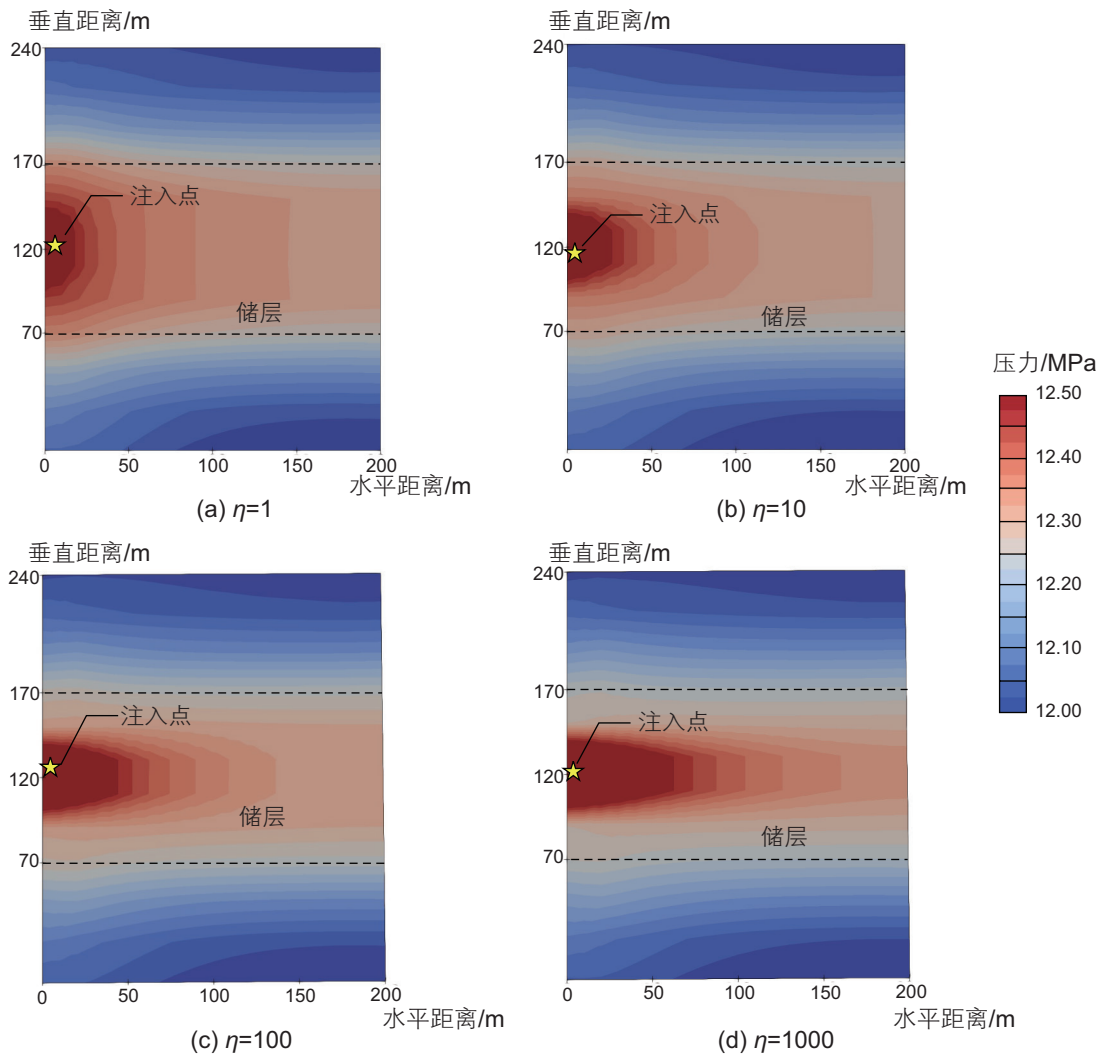


图 6 4 种方案下第 30 次注入结束压力分布图

Fig. 6 The Pressure distribution at the end of the 30th injection under 4 scenarios

着循环次数的增加呈现上升的趋势，其上升趋势与30次注采周期温度升高趋势大致相似，考虑是因为温度的升高导致岩石的膨胀而引起储层关井后的孔隙压力逐渐增大。我们将注入水温度调整为与储层初始温度相同(50℃)，其压力波动情况如图7所示，在关井阶段其压力恢复至储层的初始压力12MPa，验证了上述假设。

2.2 温度

图8显示了4种渗透率各向异性方案下第30次注入结束时储层温度场变化云图。总体而言，4种渗透率各向异性情况下，储层温度变化和压力的变化类似，会优先沿着渗透率大的方向移动。从图8的温度分布图可以看出，水平渗透率为 $1 \times 10^{-12} \text{m}^2$ 保持不变，在 $\eta=1$ 、 $\eta=10$ 、 $\eta=100$ 和 $\eta=1000$ 这4种渗透率条件下，储层温度锋面向渗透率大的方向移动，但这种变化不如上述压力分布的变化明显，在第30次注入结束时储层温度升高范围始终小于50m。因为温度的分布主

要由热水流动决定，在储层中热水优先在渗透率较大的方向流动，但流动过程中会以热传导、热对流等方式加热储层原始地层中相对较冷的岩石和水，导致热

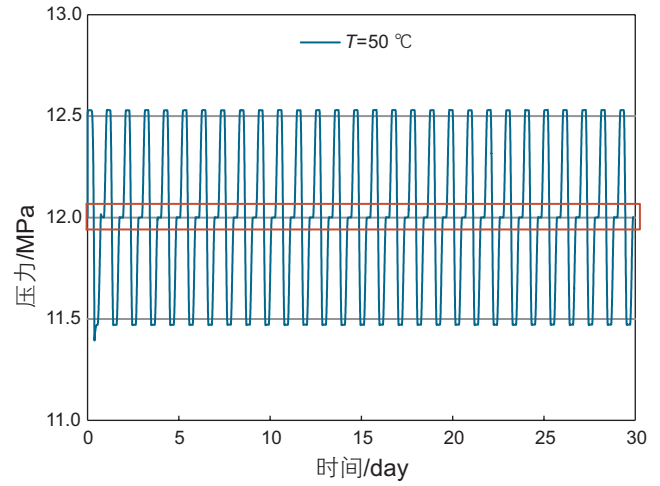


图7 注入热水温度为50℃时注采循环压力变化
Fig. 7 The variety of the injection mining cycle pressure with 50℃ injected hot water

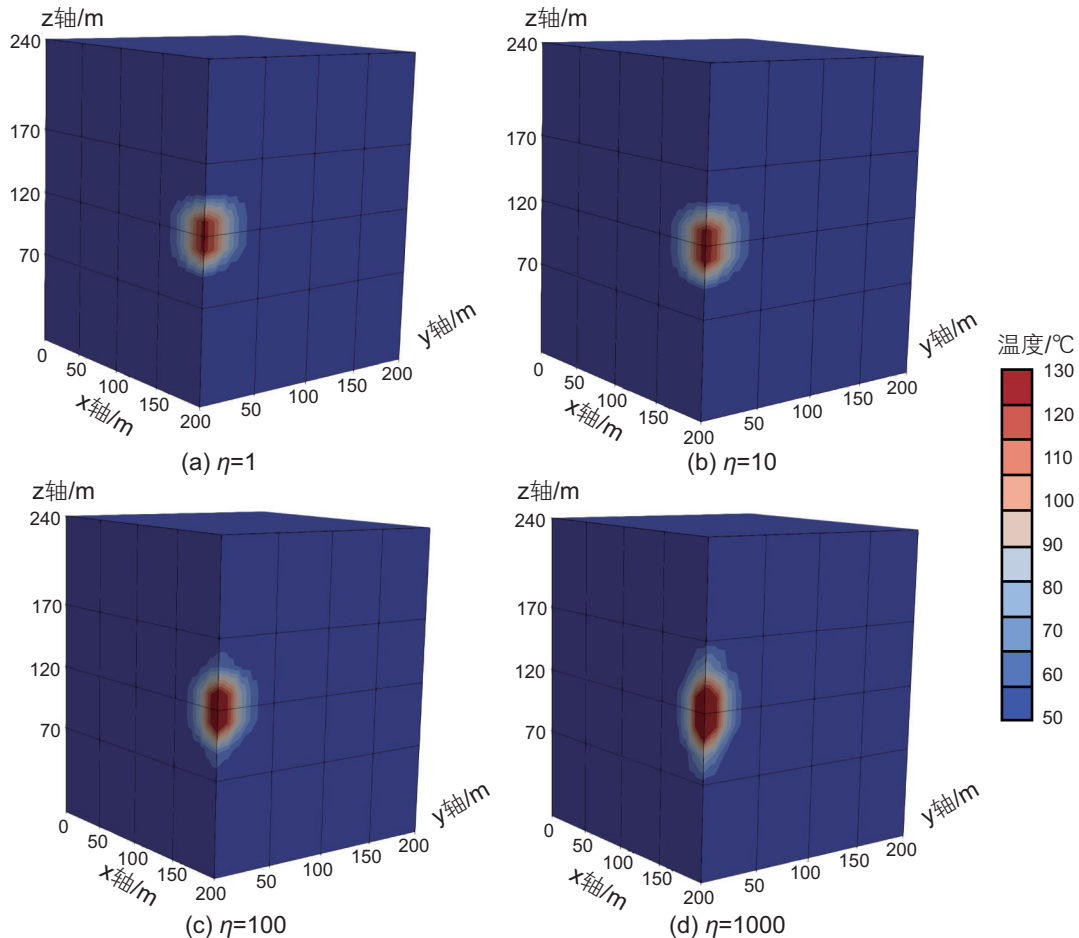


图8 第30次注入结束温度分布图
Fig. 8 The temperature distribution at the end of the 30th injection

水热量损失。因此，热水优先在渗透率大的方向流动，储层温度的空间分布也随渗透率各向异性的变化而变化。

图 9 为 30 次注采循环时注入点温度波动变化曲线图，其更清晰地显示了注入的热水因为加热较冷的储层岩石和原始地下水导致初始注采循环的热量损失较大。随着循环周期次数的增加，储层的环境逐渐被加热，注入阶段储层的最高温度不断升高。抽采过程中井筒附近压力降低，周围的冷水快速流向井筒，与热水混合，井筒附近水温降低。在 30 个周期结束时，垂直渗透率越小，热水优先在其水平方向流动，储层能达到的最高温度随 η 值的增大依次升高。在 30 次注采周期结束时，储层最高温度接近 200 °C，想要储层的温度达到注入热水的温度将需要更长的时间，储层初始温度越低需要的时间越久。此外，如果进行跨季节的储能，在能量被抽采之前有充足的时间进行热水注

入，那么储层的初始温度不会对抽采阶段热量提取造成影响，同时会降低系统运行过程中温度的波动幅度。

2.3 热能发电量

热能发电量的计算公式如下^[23]：

$$W_e = Q(h_{pro} - h_{min}) \quad (5)$$

式中， W_e 指热能发电量(MW)， Q 为抽采阶段的产出速率(kg/s)， h_{pro} 为产出热水的焓值， h_{min} 指能用于发电的热水最低焓值。假设采用Climeon HP 150 热发电系统进行发电^[44]，其允许的最小流速为 10 L/S，用于发电的最低温度为 80 °C，即 h_{min} 取 3.44×10^5 J/kg。

根据公式(5)对 30 个周期内抽采阶段的产热发电量进行计算，计算结果如图 10 所示。从图中可以看出，该储能发电系统每次抽采的热水焓值均大于 3.44×10^5 J/kg，都可以进行发电。发电量在每个周期的

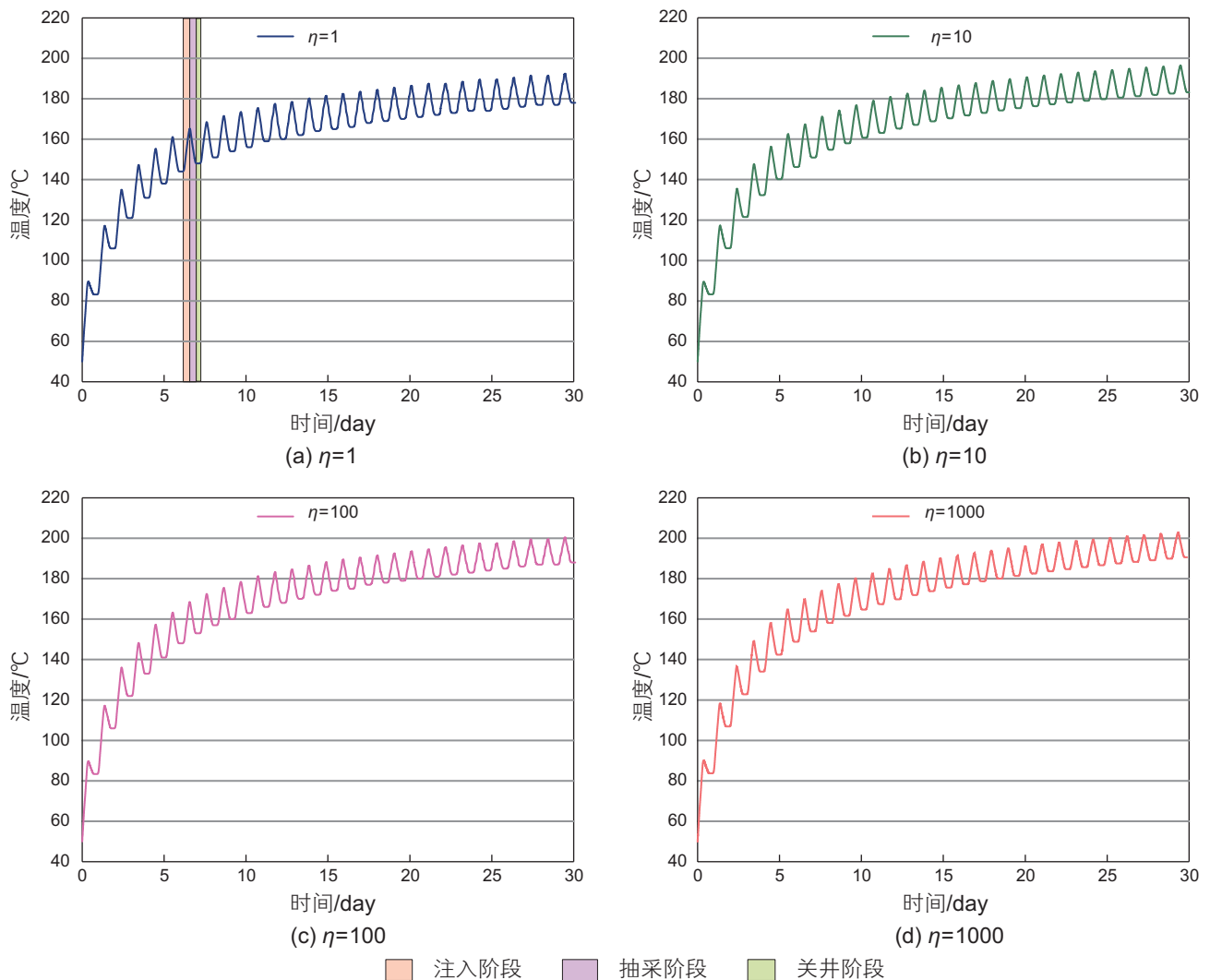


图 9 4 种方案下 30 次注采循环注入点储层温度变化

Fig. 9 Change in reservoir temperature at the injection point for 30 injection and extraction cycles under 4 scenarios

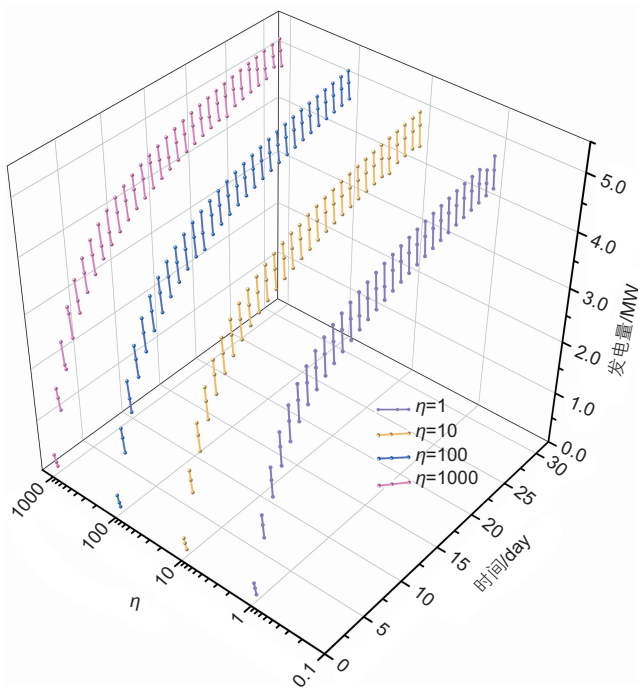


图 10 4 种方案下 30 次抽采产生的发电量

Fig. 10 The power generation of 30 pumping sessions under 4 scenarios

的抽采阶段呈线性减少,因为在抽采过程中热井附近的压力急剧下降,周围环境中的冷水向热井流动,热井附近的高温水与冷水混合导致温度降低,采出热水的发电量也随之降低。随着循环次数的增加,储层中储存的热水温度升高,每个周期的最大发电量逐渐升高。如果进行更多次的抽采循环使储层的温度达到注入的热水温度($250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{pro}}=1.09\times 10^6\text{ J/kg}$),那么发电量能达到 7.46 MW 。

如图 10 所示 4 种渗透率各向异性的情况发电量都超过 4.5 MW ,这是非常可观的。图 10 将 $\eta=10$ 、 $\eta=100$ 和 $\eta=1000$ 与各向同性条件下的发电量进行对比。结果显示水平渗透率不变的情况下,垂直渗透率越小系统的发电量越高, $\eta=1000$ 时第 30 个抽采阶段采出

热水焓值最大值为 $h_{\text{pro}}=8.67\times 10^5\text{ J/kg}$,由公式(5)计算的最大发电量达到 5.2 MW 。这表明渗透率各向异性会影响最终的发电量,而且水平方向和垂直方向各向异性越大发电量越高,这对地热电池储能系统储层的选取具有重要意义。

3 结论

研究渗透率各向异性对储层中压力分布、温度分布以及最终发电效率的影响非常重要。通过在不同渗透率各向异性条件下,对热水注采过程中的压力分布和温度分布进行研究,明确了渗透率各向异性对储能系统储能和发电的影响:

(1)渗透率各向异性对储层压力分布有强烈影响,注入阶段压力优先在渗透率大的方向传递。低渗透率、低孔隙度的盖层和基底岩层为储能提供安全、密封的环境。渗透率各向异性越小,储层等效渗透率越大,注入和抽采热水需要的压力更小,更容易进行热水的注采工作。

(2)在关井阶段,储层的孔隙压力恢复,但因为高温热水的作用导致岩石发生膨胀,其孔隙压力恢复值随温度的升高逐渐高于储层初始的孔隙压力(12 MPa)。

(3)温度的分布也会优先沿着渗透率大的方向移动。但是温度分布主要由流体流动的方向决定,在流动过程中热水中的热量以热传导、热对流等方式加热初始环境中较冷的岩石和水造成热量损失,所以渗透率各向异性对储层温度的分布情况影响较小。

(4)地热电池储能系统的发电量非常可观,在第 30 次抽采阶段 4 种各向异性情况下发电量均能达到 4.5 MW 。渗透率各向异性越大,系统的发电量也越大, $\eta=1000$ 时发电量可以达到 5.2 MW 。如果进行更长时间的注采循环,储层温度达到热水温度,注入的热量几乎没有损失,其发电量可以达到 7.46 MW 。

参考文献

- [1] APERGIS N, TSOUMAS C. Integration properties of disaggregated solar, geothermal and biomass energy consumption in the US[J]. Energy Policy, 2011, 39(9): 5474–5479.
- [2] WANG Y, LIU Y, DOU J, et al. Geothermal energy in China: Status, challenges, and policy recommendations[J]. Utilities Policy, 2020, 64: 101020.
- [3] 李耀华, 孔力. 发展太阳能和风能发电技术 加速推进我国能源转型[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(04): 426–433. [LI Y H, KONG L. Development of solar and wind power generation technology to accelerate China's energy transition[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(04): 426–433.]
- [4] 陆晓如. 为地球充电 让地热发光—专访中国科学院院士汪集暘[J]. 中国石油石化, 2022(10): 14–17. [LU X R. Recharge the earth let geothermal heat shine—interview with Academician Wang Ji Yong of the Chinese Academy of Sciences[J]. China Petroleum &

- Petrochemical, 2022(10): 14–17.]
- [5] MIKKELSO D M, FRICK K L, BRAGG-SITTON S M, et al. Initial performance evaluation and ranking of thermal energy storage options for light water reactor integration to support modeling and simulation[R]. Idaho National Lab.(INL), Idaho Falls, ID(United States), 2019.
- [6] MIKKELSO D M, FRICK K L, BRAGG-SITTON S M, et al. Phenomenon identification and ranking table development for future application figure-of-merit studies on thermal energy storage integrations with light water reactors[J]. Nuclear Technology, 2022, 208(3): 437–454.
- [7] GREEN S, MCLENNAN J, PANJA P, et al. Geothermal battery energy storage[J]. Renewable Energy, 2021, 164: 777–790.
- [8] 马冰, 贾凌霄, 于洋等. 世界地热能开发利用现状与展望[J]. 中国地质, 2021, 48(6): 1734–1747. [MA B, JIA L G, YU Yang, et al. Current situation and prospects of geothermal energy development and utilization in the World[J]. Geology of China, 2021, 48(6): 1734–1747.]
- [9] GUO, B, FU P C, HAO Y, et al. Thermal drawdown-induced flow channeling in a single fracture in EGS[J]. Geothermics: international journal of geothermal research and its applications, 2016, 61: 46–62.
- [10] 朱传庆, 陈驰, 杨亚波, 等. 岩石热导率影响因素实验研究及其对地热资源评估的启示[J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 321–333. [ZHU C Q, CHEN C, YANG Y B, et al. Experimental study on the factors influencing rock thermal conductivity and its implications for geothermal resource assessment[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 321–333.]
- [11] 李根生, 武晓光, 宋先知, 等. 干热岩地热资源开采技术现状与挑战[J]. 石油科学通报, 2022, 03: 343–364. [LI G S, WU X G, SONG X Z, et al. Current status and challenges of dry heat rock geothermal resource extraction technology[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 343–364.]
- [12] 王川, 姜汉桥, 马梦琪, 等. 基于微流控模型的孔隙尺度剩余油流动状态变化规律研究[J]. 石油科学通报, 2020, 5(3): 376–391. [WANG C, JIANG H Q, MA M Q, et al. Study of the variation of pore-scale residual oil flow based on a microfluidic model[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 03: 376–391.]
- [13] PANDEY S. N, CHAUDHURI A, KELLAR S. Coupled thermo-hydro-mechanical modeling of fracture aperture alteration and reservoir deformation during heat extraction from a geothermal reservoir[J]. Geothermics: international journal of geothermal research and its applications, 2017, 65: 17–31.
- [14] SUN Z X, ZHANG X, XU Y, 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.
- [15] 王玲玲, 魏建新, 黄平, 等. 裂缝储层地震物理模拟研究[J]. 石油科学通报, 2017, 2(2): 210–227. [WANG L L, WEI J X, HUANG P, et al. A seismic physical simulation study of fractured reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(2): 210–227.]
- [16] IZADI G, ELSWORTH D. The influence of thermal-hydraulic-mechanical– and chemical effects on the evolution of permeability, seismicity and heat production in geothermal reservoirs[J]. Geothermics: international journal of geothermal research and its applications, 2015, 53: 385–395.
- [17] HUANG Y H, PANG Z H, Kong Y L, et al. Assessment of the high-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) potential in naturally fractured geothermal reservoirs with a stochastic discrete fracture network model[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127188.
- [18] JULIAN M, THOMAS D. HEATSTORE: Preliminary design of a high temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) system in Geneva based on TH simulations[C], Iceland: Institute of Geochemistry and Petrology, 2020.
- [19] MARINE C, OYSTEIN STRENGEHAGEN K, OLAV M. Evaluating thermal losses and storage capacity in high-temperature aquifer thermal energy storage(HT-ATES)systems with well operating limits: Insights from a study-case in the Greater Geneva Basin, Switzerland[J]. Geothermics, 2020, 85: 101773.
- [20] PERKINS T K, GONZALEZ J A. Changes in earth stresses around a wellbore caused by radially symmetrical pressure and temperature gradients[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1984, 24(02): 129–140.
- [21] MYINT P C, BESTEHORN M, FIROOZABADI A. Effect of permeability anisotropy on buoyancy - driven flow for CO₂ sequestration in saline aquifers[J]. Water Resources Research, 2012, 48(9).
- [22] SHEDID S A. Prediction of vertical permeability and reservoir anisotropy using coring data[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2019, 9: 2139–2143.
- [23] IJEJE J J, GAN Q, CAI J. Influence of permeability anisotropy on heat transfer and permeability evolution in geothermal reservoir[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2019, 3(1): 43–51.
- [24] Mao P, Sun J, Ning F, et al. Effect of permeability anisotropy on depressurization - induced gas production from hydrate reservoirs in the South China Sea[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(8): 2690–2707.
- [25] PANJA P, MCLENNAN J, GREEN S. Impact of permeability heterogeneity on geothermal battery energy storage[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2021, 5(2): 127.
- [26] PANJA P, MCLENNAN J, GREEN S. Influence of permeability anisotropy and layering on geothermal battery energy storage[J].

- Geothermics, 2021, 90.
- [27] 王登科, 吕瑞环, 彭明, 等. 含瓦斯煤渗透率各向异性研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1008–1015. [WANG D K, LV R H, PENG M, et al. Study on the anisotropy of permeability of gas-bearing coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018,43(4):1008–1015.]
- [28] SUN H, VEGA S, TAO G. Analysis of heterogeneity and permeability anisotropy in carbonate rock samples using digital rock physics[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2017, 156: 419–429.
- [29] HACK M, ZHU G, WENDELIN T. Evaluation and comparison of an adaptive method technique for improved performance of linear Fresnel secondary designs[J]. Applied Energy, 2017, 208: 1441–1451.
- [30] WENDT D S, HUANG H, ZHU G, et al. Flexible geothermal power generation utilizing geologic thermal energy storage: Final seedling project report[R]. Idaho National Lab.(INL), Idaho Falls, ID (United States), 2019.
- [31] TARON J, ELSWORTH D. Thermal–hydrologic–mechanical–chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5): 855–864.
- [32] PRUESS K, OLDENBURG C, MORIDIS G. TOUGH2 user’s guide, Version 2.0. Report LBNL4 43134, Lawrence Berkeley National Laboratory[J]. Earth Sciences Division, Berkeley, California, 1999.
- [33] ITASCA F. Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, Version 4.0[J]. Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group, 2009, 438.
- [34] XU T, SONNENTHAL E, SPYCHER N, et al. TOUGHREACT user’s guide: A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variable saturated geologic media[R]. Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States), 2004.
- [35] XU T, SONNENTHAL E, SPYCHER N, et al. TOUGHREACT user’s guide: A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media, V1.2.1[R]. Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA(United States), 2008.
- [36] GAN Q, CANDELA T, WASSING B, et al. The use of supercritical CO₂ in deep geothermal reservoirs as a working fluid: Insights from coupled THMC modeling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 147: 104872.
- [37] GAN Q, ELSWORTH D. Production optimization in fractured geothermal reservoirs by coupled discrete fracture network modeling[J]. Geothermics, 2016, 62: 131–142.
- [38] AKANDE W G, GAN Q, CORNWELL D G, et al. Thermo-Hydro-Mechanical model and caprock deformation explain the onset of an ongoing seismo-volcanic unrest[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(3): e2020JB020449.
- [39] HU Y, GAN Q, HURST A, et al. Evolution of permeability in sand injectite systems[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 106: 176–189.
- [40] PRUESS K. The TOUGH codes—A family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media[J]. Vadose zone journal, 2004, 3(3): 738–746.
- [41] DAVIES J P, DAVIES D K. Stress-dependent permeability: characterization and modeling[J]. Spe Journal, 2001, 6(02): 224–235.
- [42] RUTQVIST J, WU Y S, TSANG C F, et al. A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4): 429–442.
- [43] PEPIN J D, BURNS E R, DICKINSON J E, et al. National-scale reservoir thermal energy storage pre-assessment for the United States[C]//Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 46th, Stanford, Calif., February. 2021: 16–18.
- [44] ABUDUREYIMU S. Geothermal Energy from Repurposed Oil and Gas Wells in Western North Dakota[D]. The University of North Dakota, 2020.

(编辑 马桂霞)