

基于热流固耦合的增强型地热有机朗肯循环 发电系统性能分析

王令宝¹⁾, 郭志鹏^{1, 2)}, 卜宪标¹⁾, 李华山¹⁾, 龚宇烈^{1)*}

1)中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510640; 2)中国科学技术大学工程科学学院, 安徽合肥 230026

摘要: 本文建立了耦合井筒、热储、有机朗肯循环发电系统的详细数学模型, 包括三维非稳态热流固耦合模型和有机朗肯循环发电系统热力学模型, 参考青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征, 包括压裂储层、围岩、裂隙、井筒等特征参数, 研究了注入流量、注入温度和井间距对系统净输出功、年均净输出功和热效率的影响规律。结果表明: 在一定的注入流量、注入温度和净间距下, 随着时间的推移, 岩石孔隙压力和热应力作用使得裂隙渗透率增大, 注入泵功耗是降低的, 净输出功和热效率也是降低的。注入流量的增大提高了膨胀机轴功、注入泵功耗和生产温度衰减速率, 进而导致热效率降低, 存在最优的注入流量 50 kg/s, 使得年均净输出功达到最大值 1 470.1 kW。注入温度的增大可以提高系统热效率, 降低净输出功的年均衰减速率, 当注入温度为 60 °C 时, 年均净输出功最大。井间距的增大减缓了生产温度的衰减速率, 有利于热效率的提高, 但是也同时也增大了膨胀机轴功和注入泵功耗。当分支井间距为 450 m 时, 年均净输出功达到最大值 1 497.3 kW。此研究可为增强地热发电系统的开发利用提供指导。

关键词: 增强地热系统; 有机朗肯循环; 热流固耦合; 净输出功; 热效率

中图分类号: TM616 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.100801

Numerical Simulation of Organic Rankine Cycle for Enhanced Geothermal Systems Based on a Thermal-hydraulic-mechanical Coupling Model

WANG Ling-bao¹⁾, GUO Zhi-peng^{1, 2)}, BU Xian-biao¹⁾, LI Hua-shan¹⁾, GONG Yu-lie^{1)*}

1) Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640;
2) School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026

Abstract: In this study, a detailed thermodynamic model coupled with wellbore, heat storage, and organic Rankine cycle power generation system was established, including a 3D unsteady thermal–hydraulic–mechanical (THM) coupled model and organic Rankine cycle power generation system thermodynamic model. Based on the geothermal geological characteristics of the Qiabuqia geothermal field in Gonghe Basin, Qinghai Province and the characteristic parameters of fractured reservoir, surrounding rock, fracture and wellbore, the effects of injection flow rate, injection temperature, and well spacing on net power output, annual net power output, and thermal efficiency were investigated. Under a certain injection flow rate, injection temperature, and net spacing, the pore pressure and thermal stress of rock increased the fracture permeability, and afterward, the power consumption of the injection pump and the net output work of the expander, power consumption of the injection pump, and drop rate of the production temperature, resulting in a decrease in thermal efficiency. The optimal injection flow rate at which the annual net power output reached a maximum value (1 470.1 kW) was 50 kg/s. The increase in injection temperature can improve thermal efficiency and reduce the annual drop rate of net power output. When the injection temperature was 60 °C, the annual net output power was the maximum. The increase in well spacing

本文由国家自然科学基金项目(编号: 42102336)和广东省自然科学基金项目(编号: 2021A1515011763)联合资助。

收稿日期: 2022-06-09; 改回日期: 2022-09-25; 网络首发日期: 2022-10-09。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 王令宝, 男, 1986 年生。博士, 副研究员。研究方向为地热能利用。E-mail: wanglb@ms.giec.ac.cn。

*通讯作者: 龚宇烈, 男, 1978 年生。博士, 研究员。研究方向地热能发电及综合利用。E-mail: gongyl@ms.giec.ac.cn。

slowed down the drop rate of production temperature, and this is conducive to the improvement of thermal efficiency; however, it also increased the power of the expander shaft and consumption power of the injection pump. The optimal well spacing at which the annual net power output reached the maximum value (1 497.3 kW) was 450 m. This study can provide guidance for the development and utilization of enhanced geothermal power generation system.

Key words: enhanced geothermal system; ORC; THM; net power output; thermal efficiency

2020 年, 我国提出了二氧化碳的碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取到 2060 年前实现“碳中和”。2021 年, 我国提出了构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统, 推动清洁电力资源大范围优化配置(张智刚和康重庆, 2022)。地热能是一种清洁的可再生能源, 具有储量丰富、稳定性强、连续性好、利用系数高等优点(Falcone et al., 2018)。地热能包括水热型和干热岩型, 干热岩一般指赋存于地下 3~10 km 具有经济开发价值的高温岩体, 我国干热岩资源十分丰富, 调查表明, 我国大陆 3~10 km 深度段干热岩资源总量相当于 856 亿万吨标煤, 其中埋深 5.5 km 以内的资源折合 106 亿万吨标煤(王贵玲等, 2020), 干热岩的开发利用对于“双碳”目标达成和新型电力系统构建具有重要意义(张超等, 2022)。

天然状态下的干热岩孔(裂)隙不发育, 裂隙之间连通性较差。增强型地热系统(enhanced or engineered geothermal system, EGS)是目前开发干热岩资源的有效技术手段, 通过水力压裂等工程手段在地下深处的干热岩体中形成载热工质的流动通道, 是一种具有广阔发展前景的地热能利用形式。EGS 方面的研究主要集中在循环工质优选(Guo et al., 2019; 冯雨晴等, 2021; Liu et al., 2022)、干热岩储层激发(周舟等, 2019; 冯波等, 2019)和采热过程的多物理场耦合数值模拟(孙致学等, 2020; Li et al., 2021; 贺甲元等, 2022)等。研究表明, 循环流体注入条件、循环流体、储层激发效果(裂隙形态、尺寸、分布与连通性)、储层所处的温度场、应力场以及化学作用等多重因素均会影响 EGS 系统取热性能。

李骥飞(2021)基于不同干热岩开采温度, 进行了发电方式和循环工质的优化及性能分析。Li and Liro(2014)对 200~800 °C 的干热岩地热流体的发电方式进行了分析、考察和对比。Duniam and Guigenci(2016)研究了环境温度对风冷式干热岩有机朗肯循环发电系统的影响规律。Zhang and Jiang(2012)针对 200 °C 以下 4 种典型地质流体温度, 分析了亚临界、过热和跨临界发电循环的系统性能, 比较了 R134a、异丁烷、R245fa 和异戊烷的系统性能。Meng et al.(2021)针对典型的干热岩资源参数, 进行了干热岩驱动的新型超临界 CO₂ 循环发电结构

改进与热力学优化。这些研究是基于设定的干热岩资源开采温度, 并没有考虑热储参数和布井参数对干热岩发电系统的影响。

Xu et al.(2018)基于两口水平井水循环, 研究了共和盆地恰卜恰地热田裂缝性储层的发电潜力。Zhang et al.(2014)以大庆油田徐家围子地区为例, 分析了水平井分段压裂增产油藏采出水循环增强型地热发电系统的性能。Lei et al.(2019, 2020)基于青海共和盆地恰卜恰干热岩资源参数构建了三竖井干热岩发电系统, 研究了注入速率、井距和注入温度对系统性能的影响, 提出了三种干热岩有机朗肯循环发电系统优化方案, 并对其经济和环境效益进行了评估。Zhong et al.(2022)基于青海共和盆地恰卜恰干热岩资源参数, 进行了布井参数和干热岩资源开采参数优化。这些研究针对干热岩热储资源参数建立了热储的流动传热数学模型, 但是并未建立地面发电系统的详细热动力学模型。

通过上述研究可以发现, 有机朗肯循环(ORC)是利用干热岩进行发电的主要技术方式, 耦合井筒、热储和地面发电系统的详细热动力学模型进行数值模拟研究的工作鲜有报道。我国干热岩地热资源勘探和开发起步较晚, 2017 年, 中国地质调查局和青海省自然资源厅在青海共和盆地钻获 236 °C 高温岩心, 取得了我国干热岩勘查的重大突破(何森等, 2021)。基于青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质参数(Lei et al., 2020; 唐显春等, 2020, 2023), 本文建立了耦合井筒、热储和地面发电系统的全局数学模型, 研究了地热资源开采参数、布井参数对 ORC 发电系统性能的影响规律。

1 系统描述及数学模型

1.1 系统描述

增强型地热 ORC 系统的流程图和 T-s 图如图 1 所示。为减小地热水对机组的腐蚀结垢风险, 将地热水的热量传递给清水, 然后清水进入 ORC 系统的蒸发器, 将低沸点的有机工质加热成过热的有机工质蒸汽, 有机工质蒸汽进入膨胀机, 驱动膨胀机做功, 膨胀机排出的低温低压有机工质乏汽进入冷凝器, 在其中被外部冷却介质冷凝成饱和或者具有一定过冷度的液态工质, 冷凝器出口的液态有机工

质经过工质泵的升压后进入蒸发器，如此循环往复，实现 ORC 系统的连续运转。Landau and Insheim 干热岩电站采用 ORMAT 公司的有机朗肯循环发电机组，循环工质均为 R601a(Eyerer et al., 2020)。本文的 ORC 系统也采用 R601a 作为循环工质，热物性参数调用 NIST 的 REFPROP 9.1 软件(Lemmon et al., 2020)。

1.2 模型假设

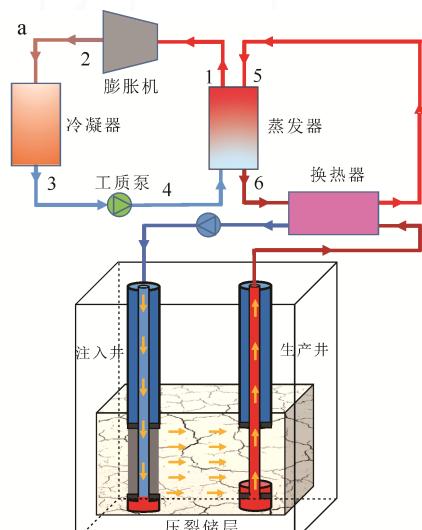
假设压裂储层为均质、各向同性；地热水流动服从达西定律；岩石和地热水的换热满足局部热平衡，忽略固液两相温差；岩石在外力作用下发生线弹性变形。岩石基质渗透率与裂缝渗透率相比量级很小，仅考虑裂隙渗透率与岩石有效应力的关系，忽略岩石基质块渗透率的变化；ORC 系统处于稳定流动状态；忽略 ORC 系统和环境间的散热损失；忽略蒸发器、冷凝器和连接管路的压力损失。

1.3 数学模型

1.3.1 热储模型

储层中岩石和裂隙热交换的能量守恒方程为：

$$(\rho C)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_f \mathbf{u}_f \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) = -Q_f \quad (1)$$



a—流程图; b— T - s 图。
a—flow diagram; b— T - s diagram.

图 1 增强型地热 ORC 系统

Fig. 1 Enhanced geothermal system ORC

$$d_f (\rho C)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + d_f \rho_f C_f \mathbf{u}_f \cdot \nabla T - \nabla \cdot (d_f \lambda_{\text{eff}} \nabla T) = d_f Q_r \quad (2)$$

式中, T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; \mathbf{u}_f 为水的流速, m/s ; ρ_f 为水的密度, kg/m^3 ; C_f 为水的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; Q_r 表示储层中岩石基质和裂缝之间的热量传递, W/m^3 ; d_f 为裂隙孔径, m ; $(\rho C)_{\text{eff}}$ 和 λ_{eff} 为有效比热容和有效导热系数, 表示为:

$$(\rho C)_{\text{eff}} = (1 - \varphi) \rho_m C_m + \varphi \rho_f C_f \quad (3)$$

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

式中, ρ_m 为岩石的密度, kg/m^3 ; C_m 为岩石比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; λ_f 和 λ_m 分别为水和岩石导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; φ 为孔隙度。

储层中地热水的流动由达西定律和质量守恒方程表示:

$$\rho_f S \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \rho_f \left[\frac{\kappa_m}{\eta_f} (\nabla p + \rho_f g \nabla z) \right] = -\rho_f \alpha_B \frac{\partial e}{\partial t} - Q_f \quad (5)$$

$$d_f \rho_f S \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot d_f \rho_f \left[\frac{\kappa_f}{\eta_f} (\nabla_T p + \rho_f g \nabla_T z) \right] = -d_f \rho_f \alpha_B \frac{\partial e}{\partial t} + d_f Q_f \quad (6)$$

式中, p 为孔隙压力, Pa ; η_f 为水的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\rho_f g \nabla z$ 表示重力的影响; κ_m 和 κ_f 为岩石基质渗透率和裂隙渗透率, m^2 ; e 表示由于岩石变形引起的体积应变; Q_f 为岩石基质和裂缝之间的质量传递, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; α_B 为 Biot 系数; S 为考虑地热水和岩石压缩性的存储系数, Pa^{-1} 。

储层岩石变形的力学平衡方程为:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} - \alpha_B p_{ii} - 3K_d \alpha_T \Delta T + F_i = 0 \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{Ev}{[(1+\nu)(1-2\nu)]}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

$$K_d = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (9)$$

式中, u 为位移, m ; λ 和 μ 是 Lamé 参数, Pa ; E 为弹性模量; ν 为泊松比; T_i 为地层的初始温度, K ; α_T 为热膨胀系数; F_i 为单位体积力, N/m^3 ; K_d 为相同材料多孔基质的排水体积模量, Pa 。

岩石变形会改变裂缝的孔径, 从而导致裂隙渗透率发生变化。应力和裂隙渗透率之间的关系可表示为:

$$\kappa_f = \kappa_{f0} e^{-(\sigma_n / \sigma^*)} \quad (10)$$

式中, κ_f 为裂隙渗透率, m^2 ; κ_{f0} 为初始渗透率, m^2 ; σ^* 为标准化常数, 可取值 -10 MPa 。

1.3.2 井筒模型

井筒换热的能量守恒方程为:

$$\rho_f C_f A_c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_f \mathbf{u}_f A_c \cdot \nabla T - \nabla \cdot (A_c \lambda_f \nabla T) = Q_{\text{wall}} \quad (11)$$

$$Q_{\text{wall}} = \frac{T_m - T}{R} \quad (12)$$

$$R = \frac{1}{2\pi r_1 h} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\lambda} \quad (13)$$

式中, A_c 为流道的横截面积, m^2 ; Q_{wall} 为通过管壁与外部热交换, W/m ; T_m 为外部岩石温度, $^\circ\text{C}$; R 为热阻, $^\circ\text{C}/\text{W}$; r_1 、 r_2 分别为井筒的内、外半径, m ; λ 为管壁导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot{}^\circ\text{C})$ 。

流体和管壁的对流换热系数由下式表示:

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{D} \quad (14)$$

$$Nu = \frac{(f/8) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \sqrt{f/8} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (15)$$

$$f = \frac{1}{(1.82 \lg Re - 1.64)^2} \quad (16)$$

式中, Nu 为努塞尓数; D 为水力直径; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; f 为达西摩擦系数。

1.3.3 发电系统模型

开采出的地热流体在换热器中将热量传递给清水, 换热器中的能量守恒为:

$$m_{\text{geo}}(h_{\text{pro}} - h_{\text{inj}}) = m_{\text{water}} c_{\text{p,water}} (T_5 - T_6) \quad (17)$$

式中, m_{geo} 和 m_{water} 分别为地热流体和清水的质量流量, kg/s ; h 表示焓值, kJ/kg ; $c_{\text{p,water}}$ 为定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot{}^\circ\text{K})$; T 表示温度, $^\circ\text{C}$; 下标 “pro” 和 “inj” 分别表示生产和注入; 下标 “5” 和 “6” 对应图 1a 中的状态点, 下述模型中数字下标均对应图 1a 中的状态点。

清水与有机工质在蒸发器中以逆流形式进行热交换, 清水放热, 温度不断降低, 有机工质吸热逐步从过冷状态变为过热状态, 蒸发器中清水提供的热量与有机工质吸收的热量相等, 蒸发器中的能量守恒为:

$$Q_{\text{eva}} = m_{\text{water}} c_{\text{p,water}} (T_5 - T_6) = m_{\text{wf}} (h_1 - h_4) \quad (18)$$

式中, Q 为热负荷, 单位 kW ; m_{wf} 为质量流量, 单位 kg/s ; 下标 “eva” 表示蒸发器。

据共和气象站资料(1980—2012 年), 多年平均气温 $3.7\text{ }^\circ\text{C}$, 采用空冷方式, 空气与有机工质在冷凝器中亦是以逆流形式进行热交换, 冷却介质吸热, 温度不断升高, 有机工质放热逐步从过热蒸汽变为过冷液体, 冷凝器中冷却介质吸收的热量与循环工质释放的热量相等, 冷凝器中的能量守恒为:

$$Q_{\text{con}} = m_{\text{air}} (h_{\text{air,out}} - h_{\text{air,in}}) = m_{\text{wf}} (h_2 - h_4) \quad (19)$$

式中, 下标 “con”、“in” 和 “out” 分别表示冷凝器、进口和出口。

工质泵对有机工质的增压过程中实际上是熵增过程, 工质泵耗功为:

$$W_{\text{wp}} = m_{\text{wf}} (h_4 - h_3) = m_{\text{wf}} (h_{4,s} - h_3) / \varepsilon_{\text{wp}} \quad (20)$$

式中, ε 表示工质泵的等熵效率; 下标 “wp” 和 “s” 分别表示工质泵和等熵过程。

有机工质在膨胀机中膨胀作功也是熵增过程, 膨胀机的输出功为:

$$W_{\text{exp}} = m_{\text{wf}} (h_1 - h_4) = m_{\text{wf}} (h_1 - h_{4,s}) \varepsilon_{\text{exp}} \quad (21)$$

式中, 下标 “exp” 表示膨胀机。

地热流体注入泵功耗为:

$$W_{\text{injwp}} = \frac{m_{\text{geo}} (P_{\text{inj}} - P_{\text{pro}})}{\rho_{\text{geo}} \varepsilon_{\text{injwp}}} \quad (22)$$

式中, ρ_{geo} 为地热流体的密度, kg/m^3 ; P_{inj} 和 P_{pro} 分别为地热流体的注入压力和生产压力, kPa ; ε 表示工质泵的等熵效率; 下标 “injwp” 表示注入泵。

增强型地热 ORC 系统的净输出功为:

$$W_{\text{net}} = W_{\text{exp}} - W_{\text{wp}} - W_{\text{injwp}} \quad (23)$$

增强型地热 ORC 系统的热效率为:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{eva}}} \quad (24)$$

1.4 模型验证

对于裂隙中流体的流动换热, 可通过图 2 所示的单裂隙流动换热模型的解析解进行验证(Huang et al., 2020)。该模型假设岩石基质在 x 和 z 方向无限延伸, 中间有一条宽度为 1 mm 的裂隙。初始温度为 353.15 K , 注入水流速和温度分别为 0.01 m/s 和 303.15 K 。裂隙与岩石的温度通过解析解(Barends, 2010)获得。

裂隙中的温度分布表示为:

$$T_f(x, t) = T_0 + (T_i - T_0) \operatorname{erfc} \left(\frac{\lambda_m x}{\rho_f c_f u_f d_f} \sqrt{\frac{\rho_m c_m u_i}{\lambda_m (u_i t + x)}} \right) \quad (25)$$

岩石基质中的温度分布表示为:

$$T_m(x, z, t) = T_0 + (T_i - T_0) \operatorname{erfc} \left(\frac{2\lambda_m x + |z| \rho_f c_f u_i d_f}{2\rho_f c_f u_i d_f} \sqrt{\frac{\rho_m c_m u_i}{\lambda_m (u_i t + x)}} \right) \quad (26)$$

式中, T 为温度, K ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot{}^\circ\text{K})$, c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot{}^\circ\text{K})$; d_f 为裂隙孔径, m ; t 为时间, s ; 下标 “f” 和 “m” 分别表示水和岩石, x 和 z 为位置坐标, erfc 表示互补误差函数。

在数值求解中, 岩石基质由 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的矩形区域表示。裂隙流动换热模型验证的输入参数见表 1。图 3a 表示不同时间沿裂隙的流体温度分布;

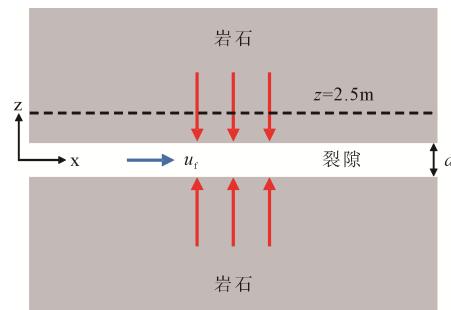
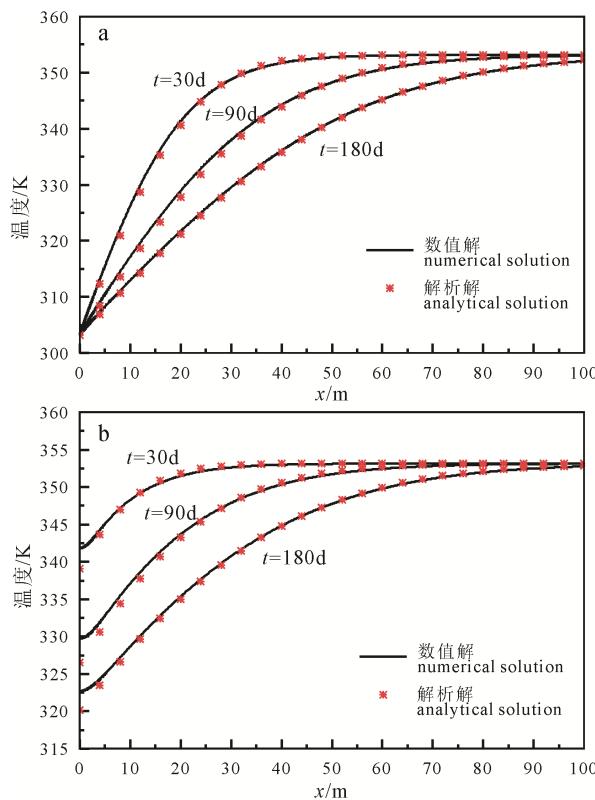


图 2 裂隙流动换热物理模型示意图
Fig. 2 Schematic diagram of two-dimensional single fracture flow and heat transfer mode

图3b表示不同时间岩石基质中 $z=2.5\text{ m}$ 处的温度分布。可以看出数值解与解析解吻合较好,最大相对误差仅为0.8%。

对于应力作用引起的岩石形变,可通过Bai et al.(2005)针对典型热固结问题提出的精确解析解进行验证。土柱热固结问题几何模型如图4所示,土柱高度为1 m,初始温度283.15 K,初始孔隙压力0.1 MPa。顶面施加0.1 MPa的垂直压力荷载,顶面温度和压力分别为333.15 K和0 MPa,侧边界和底部边界被视为不透水和绝热,且位移受到法向约束。验证模型所需的计算参数列于表2中。图5表示数值计算得到的温度、孔隙压力和位移分布,



a—不同时间沿裂隙的温度分布;

b—不同时间沿 $z=2.5\text{ m}$ 的温度分布。

a—temperature distribution along fractures at different times;
b—temperature distribution along $z=2.5\text{ m}$ at different times.

图3 裂隙流动换热问题解析解与数值解比较
Fig. 3 Comparison between analytical solution and numerical solution

表1 裂隙流动换热模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of fracture flow heat transfer model

参数	数值
岩石密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2700
岩石比热/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1000
岩石导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	2.8
裂隙孔径/m	0.001
注射速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.01
初始温度/K	353.15
注入温度/K	303.15

可以看出,数值解与解析解计算结果吻合很好,验证了热流固耦合计算的准确性。

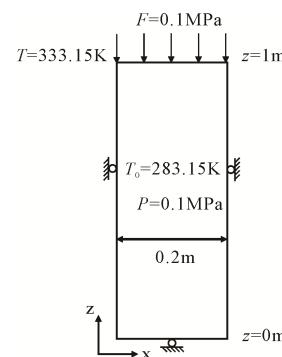
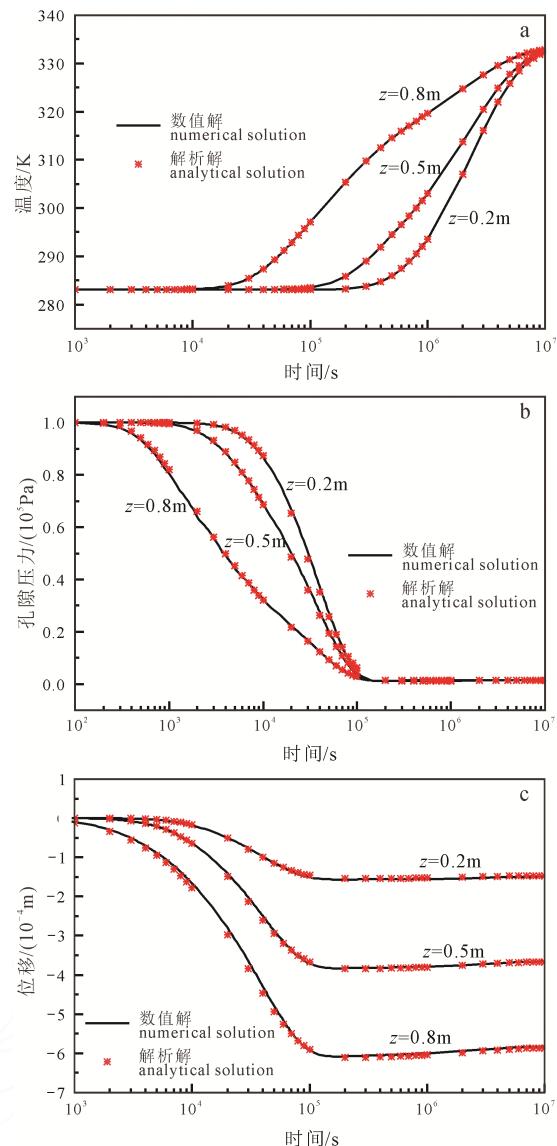


图4 土柱热流固问题模型示意图
Fig. 4 Schematic diagram of soil column model



a—土柱不同位置的温度; b—土柱不同位置的孔隙压力;

c—土柱不同位置沿 z 方向位移。

a—temperature at different positions of soil column;
b—pore pressure at different positions of soil column;
c—displacement of soil column at different positions along z direction.

图5 热流固问题解析解与数值解比较
Fig. 5 Comparison of analytical and numerical solutions

表 2 热流固问题计算参数
Table 2 Calculation parameters of THM problems

参数	数值
土柱密度/(kg·m ⁻³)	2600
土柱比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1000
土柱导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.5
弹性模量/MPa	60
孔隙率	0.4
水力传导率/(m·s ⁻¹)	1×10^{-9}
热膨胀系数	3×10^{-7}
泊松比	0.4
Biot系数	1.0

2 物理模型

热储模型示意图见图 6, 计算区域为 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$ 的立方体, 位于地下 $2200\sim3200\text{ m}$, 模型由外部围岩、压裂储层、人工裂隙、注入井和生产井组成。压裂储层位于模型中间, 尺寸为 $600\text{ m} \times 600\text{ m} \times 500\text{ m}$, 具有与外部围岩不同的参数。注采井长度均为 500 m , 间距为 400 m 。注采井之间分布有 1 条垂向裂隙和 4 条水平裂隙, 水平裂隙间距为 100 m , 初始隙宽为 2 mm , 其余计算参数见表 3(Lei, 2020)。储层顶部的初始温度设为 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度梯度为 $0.057\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 初始压力梯度为 $10\,000\text{ Pa/m}$ 。计算过程中, 采出井井底压力设为 26 MPa , 绝热和无流动边界条件应用于所有外部边界。

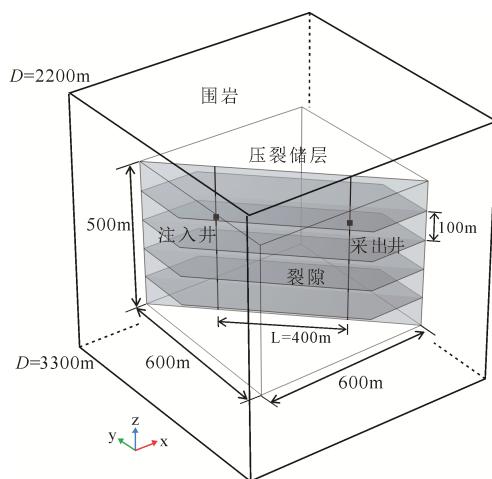


图 6 储层模型示意图
Fig. 6 Reservoir model diagram

表 3 储层参数(据 Lei, 2020)
Table 3 Reservoir parameters (from Lei, 2020)

参数	压裂储层	围岩	裂隙
密度/(kg·m ⁻³)	2590	2623	2000
比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	890	1000	800
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.8	3	2.8
渗透率/m ²	2.69×10^{-15}	2.6×10^{-16}	3.5×10^{-11}
孔隙度	0.045 9	0.024 9	1

3 结果与讨论

3.1 注入流量的影响

参考青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征, 如物理模型部分参数设定, 增强型地热 ORC 系统性能分析的其他输入参数如表 4 所示。进行了干热岩资源开采参数及布井参数对干热岩发电系统性能的影响规律分析。注入流量对净输出功、年均净输出功和热效率的影响如图 7~9 所示。由图 7 可以发现, 5 种注入流量下, 净输出功均随着时间的推移而减小。这是因为干热岩的即时热量有限, 随着地热流体提取热量的累积, 热源传递到热储层的热量无法得到及时的补充。净输出功等于膨胀机轴功减去泵功, 在同一注入流量下, 随着时间的推移, 生产温度是衰减的, 导致发电系统膨胀机轴功减小; 地热流体在热储中的流动造成有效应力变化, 地热流体与岩体的传热引起热应力变化, 二者均改变了储层应力分布, 造成岩体基质与裂隙变形, 导致裂隙渗透率增大, 注采压差是减小的, 导致注入泵功耗减小, 两者的综合作用造成了净输出功的变化趋势。20 年运行周期内, 注入流量分别为 30 kg/s 、 40 kg/s 、 50 kg/s 、 60 kg/s 和 70 kg/s 下, 净输出功年均下降率分别为 0.57% 、 1.15% 、 1.80% 、 2.62% 和 3.73% , 下降速率随着注入流量的增大而增大。由图 8 可以发现, 年均净输出功随着注入流量的增大, 先增大后减小, 当注入流量为 50 kg/s 时, 年均净输出功达到最大值 $1\,470.1\text{ kW}$, 这主要是由衰减的生产温度和增大的注入流量综合造成的, 当注入流量小于 50 kg/s 时, 注入流量的增大对净输出功的影响较大, 当注入流量大于 50 kg/s 时, 生产温度的衰减对净输出功的影响较大。由图 9 可以发现, 5 种注入流量下, 热效率均随着时间的推移而减小, 减小幅度是增大的。注入流量越小, 发电系统的

表 4 增强地热 ORC 系统输入参数
Table 4 Enhance input parameters of geothermal ORC system

参数	典型值	范围
膨胀机等熵效率/%	70	/
工质泵等熵效率/%	70	/
水泵效率/%	80	/
冷凝温度/°C	20	/
运行寿命/年	10	/
过热度/°C	15	/
过冷度/°C	5	/
注入流量/(kg/s)	50	20~70
注入温度/°C	60	50~90
井间距/m	400	200~600

热效率越大。20 年运行周期内, 注入流量分别为 30 kg/s、40 kg/s、50 kg/s、60 kg/s 和 70 kg/s 下, 热效率年均降低幅度分别为 0.26%、0.62%、1.15%、2.62% 和 3.73%, 注入流量越大, 热效率的年均降低幅度越大。注入流量对净输出功和热效率具有不同的影响, 实际干热岩发电系统中要综合考量各种因素, 进行全生命周期的性能评价。

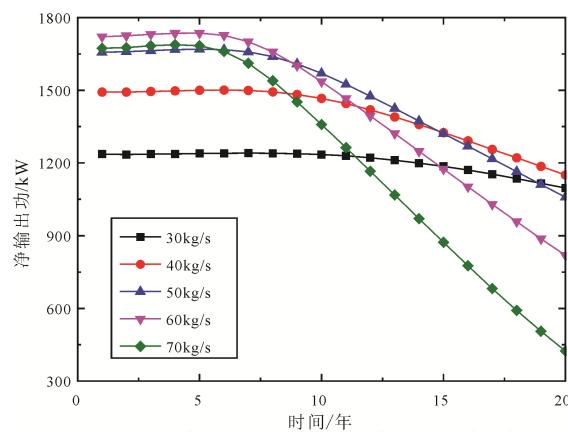


Fig. 7 Effect of injection flow on net output work

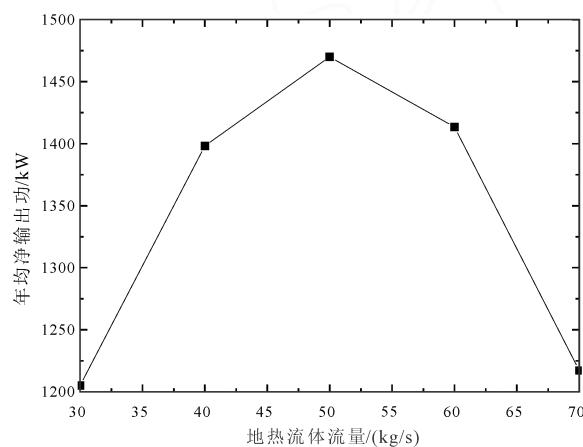


Fig. 8 Effect of injection flow on annual average net output work

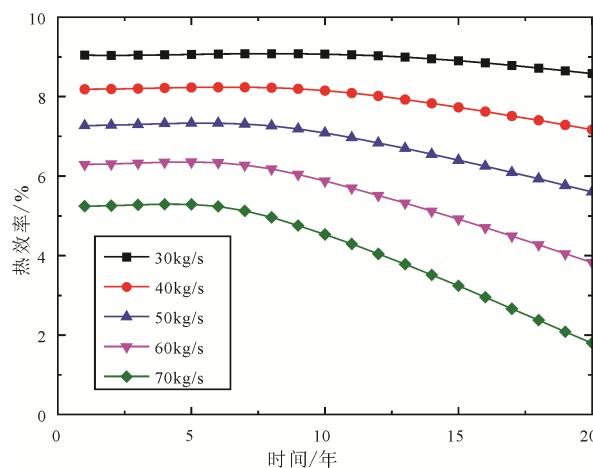


Fig. 9 Effect of injection flow rate on thermal efficiency

3.2 注入温度的影响

注入温度对净输出功、年均净输出功和热效率的影响如图 10~12 所示。由图 10 可以发现, 5 种注入温度下, 净输出功均随着时间的推移而降低, 降低速率是增大的, 这是因为早期储层的低温区并未推进至生产井, 低温流体能在运行过程中吸收足够的热量, 造成地热流体温度随着开采年限推移不同的衰减幅度, 进而影响净输出功的时间演变趋势。20 年运行周期内, 注入温度分别为 50 °C、60 °C、70 °C、80 °C 和 90 °C 下, 净输出功年均下降率分别为 2.00%、1.80%、1.70%、1.66% 和 1.65%。随着注入温度的增大, 生产温度的衰减速率减小, 造成发电系统膨胀机轴功衰减速率减小; 注入温度的提高使得地热流体黏度减小, 地热流体流动阻抗减小, 造成注入泵功耗减小, 进而造成了不同注入温度下净输出功的时间演变趋势。由图 11 所示, 年均净输出功随着注入温度的增大, 先增大后减小, 当注入温度为 60 °C 时, 年均净输出功达到最大值 1470.1 kW。在相同的注入流量下, 较小的注入温度可以从热储获得更多的热量, 但也会造成生产温度减小, 使得发电系统效率降低, 加之注入温度对

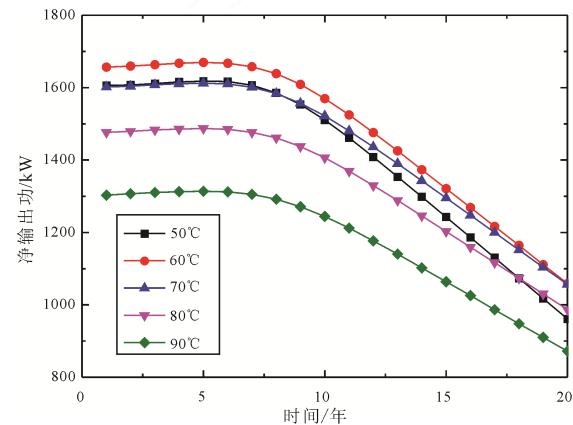


Fig. 10 Effect of injection temperature on net output work

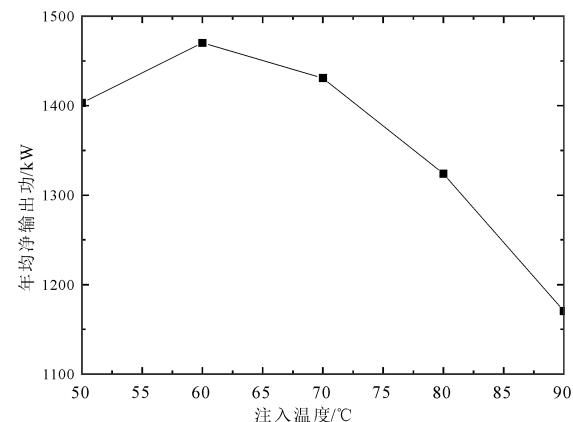


Fig. 11 Effect of injection temperature on annual net output work

注入泵功耗的影响，多种因素的综合作用使得年均净输出功存在极值。由图 12 可以发现，5 种注入温度下，热效率均随着时间的推移而减小，减小幅度是减小的。注入温度越高，热效率越大。这是因为注入温度越高，相同运行年份的生产温度越高，在相同的冷凝温度下的热效率越大。20 年运行周期内，注入温度分别为 50 °C、60 °C、70 °C、80 °C 和 90 °C 下，热效率年均下降率分别为 1.40%、1.15%、1.01%、0.96% 和 0.95%，注入温度越高，热效率年均降低速率越小。注入温度对热效率和净输出功具有不同的影响，从净输出功角度考量，基于本文的假定，最优的注入温度为 60 °C。实际工程中，应兼顾干热岩的开采效率与开采寿命。

3.3 井间距的影响

井间距对净输出功、年均净输出功和热效率的影响如图 13–15 所示。由图 13 可以发现，7 种井间距下，净输出功均随着时间的推移而降低，降低幅度是增大的，这是由衰减的生产温度和降低的注采压差造成的。井间距分别为 250 m、300 m、350 m、400 m、450 m、500 m 和 550 m 下，净输出功的年均下降率分别为 3.59%、3.06%、2.43%、1.80%、1.25%、0.76% 和 0.39%，这是由于井间距的增加导致储层冷锋面和低温区面积的降低，井间距越大，地热流体在注采井间的有效换热区域越大，等量的流体可采取的热量总量越大，致使冷锋面与低温区的推进速度减慢，造成地热流体生产温度衰减速率减小。由图 14 可以发现，年均净输出功随着井间距的增大先增大后减小，当井间距为 450 m 时，年均净输出功达到最大值 1 497.3 kW。井间距的增大使得相同运行年份的生产温度增大，发电系统膨胀机轴功越大；井间距的增大也使得地热流体循环在压裂储层的循环路径增大，注入泵功耗增大，两者的综合作用造成了年均净输出功的变化趋势。

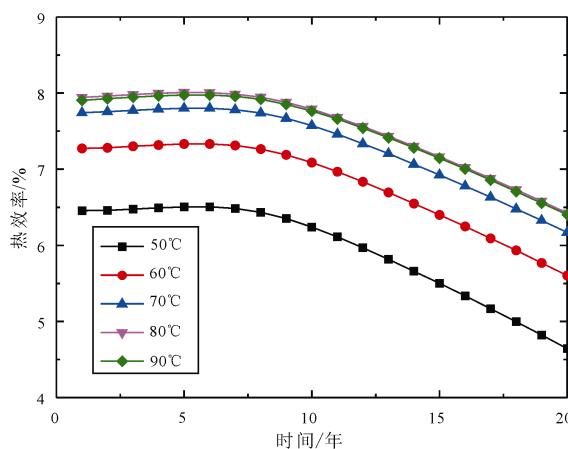


图 12 注入温度对热效率的影响

Fig. 12 Effect of injection temperature on thermal efficiency

由图 15 可以发现，不同井间距下，20 年运行周期内，热效率均随着时间的推移而降低，井间距分别为 250 m、300 m、350 m、400 m、450 m、500 m 和 550 m 下，热效率的年均下降率分别为 2.57%、2.10%、1.61%、1.15%、0.77%、0.44% 和 0.19%。从净输出功角度考量，基于本文的假定，最优的井间距为 450 m。

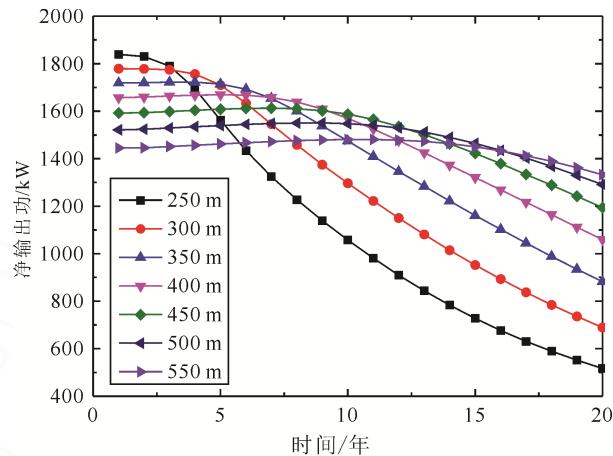


图 13 井间距对净输出功的影响

Fig. 13 Effect of well spacing on net output work

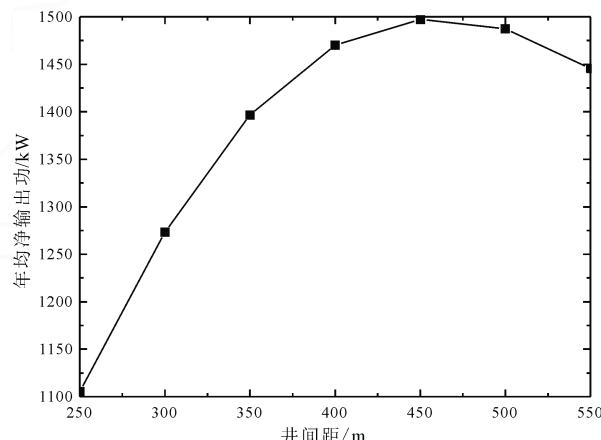


图 14 井间距对年均净输出功的影响

Fig. 14 Effect of well spacing on annual net output work

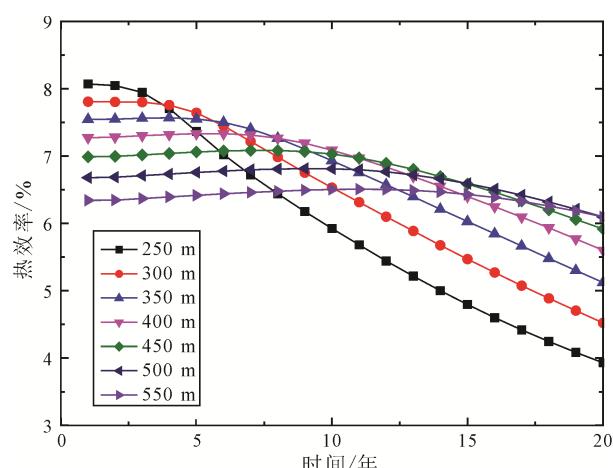


图 15 井间距对热效率的影响

Fig. 15 Effect of well spacing on thermal efficiency

4 结论

本文建立了耦合井筒、热储和地面发电系统的全局数学模型，包括 THM 耦合的三维非稳态数值模型和有机朗肯循环系统工作模型，参考青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征，研究了地热资源开采参数、布井参数对发电系统性能的影响规律，地热流体开采参数和布井参数对增强型 ORC 系统的开发效率和稳定性具有重要影响，主要结论如下：

(1) 在相同的注入流量、注入温度和井间距下，岩石孔隙压力和热应力作用造成裂隙渗透率增大，生产温度和注入泵功耗随着时间推移是减小的，净输出功和热效率均随着时间的推移而减小。

(2) 注入流量的提高使得发电系统膨胀机轴功增大，但也会造成注入泵功耗增大，存在最优的注入流量 50 kg/s，年均净输出功达到最大值 1 470.1 kW，注入流量的增大造成系统热效率减小。

(3) 20 年运行周期内，注入温度越高，热效率越大，净输出功的年均降低幅度越小，可以延缓系统的热突破时间，有效延长系统的运行寿命。注入温度对热效率和净输出功具有不同的影响。当注入温度为 60 °C 时，ORC 系统年均净输出功达到最大值 1 470.1 kW。

(4) 井间距对储层热稳定性及运行寿命非常重要，在合理的范围内增大井间距可以有效提升增强型 ORC 系统的效率与稳定性。但超过一定范围，井间距对发电系统性能的改善会有所降低。井间距越小，净输出功和热效率的年均降低速率越大，当井间距为 450 m 时，年均净输出功达到最大值 1 497.3 kW。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42102336), and Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2021A1515011763).

参考文献:

- 冯波, 许佳男, 许天福, 李胜涛, 宋丹, 陈明涛. 2019. 化学刺激技术在干热岩储层改造中的应用与最新进展[J]. 地球科学与环境学报, 41(5): 577-591.
- 冯雨晴, 汪道兵, 秦浩, 张凯鑫, 边雨辰. 2021. 干热岩人工裂隙三维流动传热的数值模拟研究[J]. 北京石油化工学院学报, 29(4): 37-43.
- 何森, 龚武镇, 许明标, 宋建建. 2021. 干热岩开发技术研究现状与展望分析[J]. 可再生能源, 39(11): 1447-1454.
- 贺甲元, 张伟, 张乐, 郭天魁, 王春光, 曲占庆. 2022. 基于 THMD 耦合的干热岩径向井压裂裂缝扩展[J/OL]. 地球物理学进展: 1-12. [2022-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20220322.2034.009.html>.

李骥飞. 2021. 干热岩发电技术模拟研究与性能分析[J]. 山东化工, 50(9): 114-119.

孙致学, 姜传胤, 张凯, 庄丽, 任小庆, 王强. 2020. 基于离散裂缝模型的 CO₂ 增强型地热系统 THM 耦合数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 44(6): 79-87.

唐显春, 王贵玲, 马岩, 张代磊, 刘忠, 赵旭, 程天君. 2020. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J]. 地质学报, 94(7): 2052-2065.

唐显春, 王贵玲, 张代磊, 马岩. 2023. 青藏高原东北缘活动构造与共和盆地高温热异常形成机制[J]. 地球学报, 44(1): 7-20.

王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 张薇. 2020. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 27(1): 1-9.

张超, 胡圣标, 黄荣华, 王朱亭, 秦松, 左银辉, 宋荣彩. 2022. 干热岩地热资源热源机制研究现状及其对成因机制研究的启示[J]. 地球物理学进展, 37(5): 1907-1919.

张智刚, 康重庆. 2022. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 42(8): 2806-2819.

周舟, 金衍, 曾义金, 张旭东, 周健, 汪文智, 孟翰. 2019. 青海共和盆地干热岩地热储层水力压裂物理模拟和裂缝起裂与扩展形态研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(5): 1425-1430.

References:

- BAI Bing. 2005. One-dimensional thermal consolidation characteristics of geotechnical media under non-isothermal condition[J]. Engineering Mechanics, 22(5): 186-191.
- BAREND F B. 2010. Complete solution for transient heat transport in porous media, following Lauwerier's concept[C]//SPE annual technical conference and exhibition. Florence: Society of Petroleum Engineers.
- DUNIAM S, GURGENCI H. 2016. Annual performance variation of an EGS power plant using an ORC with NDDCT cooling[J]. Applied Thermal Engineering: Processes, Equipment, Economics, 105: 1021-1029.
- EYERER S, SCHIFFLECHNER C, HOFBAUER S, BAUER W, WIELAND C, SPLIETHOFF H. 2020. Combined heat and power from hydrothermal geothermal resources in Germany: An assessment of the potential[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 120: 109661.
- FALCONE G, LIU Xiao-lei, OKECH R R, SEYDOV F, TEODORIU C. 2018. Assessment of deep geothermal energy exploitation methods: The need for novel single-well solutions[J]. Energy, 160: 54-63.
- FENG Bo, XU Jia-nan, XU Tian-fu, LI Sheng-tao, SONG Dan, CHEN Ming-tao. 2019. Application and recent progresses of chemical stimulation on hot dry rock reservoir modification[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 41(5): 577-591(in Chinese with English abstract).
- FENG Yu-qing, WANG Dao-bing, QIN Hao, ZHANG Kai-xin, BIAN Yu-chen. 2021. Numerical simulation study of three-dimensional fluid and heat transfer in artificial fractures of hot dry rocks[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 29(4): 37-43(in Chinese with English abstract).
- GUO Tian-kui, GONG Fa-cheng, WANG Xiao-zhi, LIN Qiang, QU Zhan-qing, ZHANG Wei. 2019. Performance of enhanced geothermal system (EGS) in fractured geothermal reservoirs

- with CO₂ as working fluid[J]. Applied Thermal Engineering, 152: 215-230.
- HE Jia-yuan, ZHANG Wei, ZHANG Le, GUO Tian-kui, WANG Chun-guang, QU Zhan-qing. 2022. Fracture propagation research of radial well fracturing in hot dry rock based on THMD coupling[J]. Progress in Geophysics, 1-12. [2022-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20220322.2034.009.html>(in Chinese with English abstract).
- HE Miao, GONG Wu-zhen, XU Ming-biao, SONG Jian-jian. 2021. Research status and prospect analysis of hot dry rock development technology[J]. Renewable Energy Resources, 39(11): 1447-1454(in Chinese with English abstract).
- HUANG Man, JIAO Yu-yong, LUO Jin, YAN Cheng-zeng, WU Liang-hong, GUAN Peng. 2020. Numerical investigation on heat extraction performance of an enhanced geothermal system with supercritical N₂O as working fluid[J]. Applied Thermal Engineering, 176: 115436.
- LEI Zhi-hong, ZHANG Yan-jun, YU Zi-wang, HU Zhong-jun, LI Liang-zhen, ZHANG Sen-qi, FU Lei, ZHOU Ling, XIE Yang-yang. 2019. Exploratory research into the enhanced geothermal system power generation project: The Qiabuqia geothermal field, Northwest China[J]. Renewable Energy, 139: 52-70.
- LEI Zhi-hong, ZHANG Yan-jun, ZHANG Sen-qi, FU Lei, HU Zhong-jun, YU Zi-wang, LI Liang-zhen, ZHOU Jian. 2020. Electricity generation from a three-horizontal-well enhanced geothermal system in the Qiabuqia geothermal field, China: Slickwater fracturing treatments for different reservoir scenarios[J]. Renewable Energy, 145: 65-83.
- LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDEN M O. 2013. NIST standard reference database 23: Reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, version 9.1[M]. National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg (2013) version 9.1.
- LI Ji-fei. 2021. Simulation research and performance analysis of dry hot rock power generation technology[J]. Shandong Chemical Industry, 50(9): 114-119(in Chinese).
- LI Meng-Ying, LIOR N. 2014. Comparative analysis of power plant options for enhanced geothermal systems (EGS)[J]. Energies, 7(12): 8427-8445.
- LI Ting-yu, HAN Dong-xu, YANG Fu-sheng, LI Jing-fa, WANG Dao-bing, YU Bo, WEI Jin-jia. 2021. Modeling study of the thermal-hydraulic-mechanical coupling process for EGS based on the framework of EDFM and XFEM[J]. Geothermics, 89: 101953.
- LIU Feng, KANG Yong, HU Yi, CHEN Hao, WANG Xiao-chuan, PAN Hai-zeng, XIE Jia-qiao. 2022. Comparative investigation on the heat extraction performance of an enhanced geothermal system with N₂O, CO₂ and H₂O as working fluids[J]. Applied Thermal Engineering, 200: 117594.
- MENG Nan, LI Tai-lu, WANG Jian-qiang, KONG Xiang-fei, JIA Ya-nan, LIU Qing-hua, QIN Hao-sen. 2021. Structural improvement and thermodynamic optimization of a novel supercritical CO₂ cycle driven by hot dry rock for power generation[J]. Energy Conversion and Management, 235: 114014.
- SUN Zhi-xue, JIANG Chuan-yin, ZHANG Kai, ZHUANG Li, REN Xiao-qing, WANG Qiang. 2020. Numerical simulation for heat extraction of CO₂-EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fracture models[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 44(6): 79-87(in Chinese with English abstract).
- TANG Xian-chun, WANG Gui-ling, MA Yan, ZHANG Dai-lei, LIU Zhong, ZHAO Xu, CHENG Tian-jun. 2020. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2052-2065(in Chinese with English abstract).
- TANG Xian-chun, WANG Gui-ling, ZHANG Dai-lei, MA Yan. 2023. Coupling Mechanism of Geothermal Accumulation and the Cenozoic Active Tectonics Evolution in Gonghe Basin, Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientifica Sinica, 44(1): 7-20(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ling, LIU Yan-guang, ZHU Xi, ZHANG Wei. 2020. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 27(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- XU Tian-fu, YUAN Yi-long, JIA Xiao-feng, LEI Yu-de, LI Sheng-tao, FENG Bo, HOU Zhao-yun, JIANG Zhen-jiao. 2018. Prospects of power generation from an enhanced geothermal system by water circulation through two horizontal wells: A case study in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. Energy, 148: 196-207.
- ZHANG Chao, HU Sheng-biao, HUANG Rong-hua, WANG Zhu-ting, QIN Song, ZUO Yin-hui, SONG Rong-cai. 2022. Research status of heat source mechanism of the hot dry rock geothermal resources and its implications to the studies of genetic mechanism[J]. Progress in Geophysics, 37(5): 1907-1919(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Fu-zhen, JIANG Pei-xue. 2012. Thermodynamic analysis of a binary power cycle for different EGS geofluid temperatures[J]. Applied Thermal Engineering, 48: 476-485.
- ZHANG Yan-jun, LI Zheng-wei, GUO Liang-liang, GAO Ping, JIN Xian-peng, XU Tian-fu. 2014. Electricity generation from enhanced geothermal systems by oilfield produced water circulating through reservoir stimulated by staged fracturing technology for horizontal wells: A case study in Xujiaweizi area in Daqing Oilfield, China[J]. Energy, 78(C): 788-805.
- ZHANG Zhi-gang, KANG Chong-qing. 2022. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 42(8): 2806-2819(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Chen-hao, XU Tian-fu, YUAN Yi-long, FENG Bo, YU Han. 2022. The feasibility of clean power generation from a novel dual-vertical-well enhanced geothermal system (EGS): A case study in the Gonghe Basin, China[J]. Journal of Cleaner Production, 344: 131109.
- ZHOU Zhou, JIN Yan, ZENG Yi-jin, ZHANG Xu-dong, ZHOU Jian, WANG Wen-zhi, MENG Han. 2019. Experimental study on hydraulic fracturing physics simulation, crack initiation and propagation in hot dry rock geothermal reservoir in Gonghe Basin, Qinghai[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 49(5): 1425-1430(in Chinese with English abstract).