

doi: 10.12029/gc20231121002

朱贵麟, 刘东林, 周殷竹, 边超, 曹月婷, 冯庆达, 张林友, 许文豪, 牛兆轩, 邓志辉. 2025. 青海共和盆地干热岩人工储层示踪试验研究[J]. 中国地质, 52(2): 416–424.

Zhu Guilin, Liu Donglin, Zhou Yinzhu, Bian Chao, Cao Yueting, Feng Qingda, Zhang Linyou, Xu Wenhao, Niu Zhaoxuan, Deng Zhihui. 2025. Tracer test study on artificial reservoirs in hot dry rock geothermal systems in the Gonghe Basin, Qinghai[J]. Geology in China, 52(2): 416–424(in Chinese with English abstract).

青海共和盆地干热岩人工储层示踪试验研究

朱贵麟, 刘东林, 周殷竹, 边超, 曹月婷, 冯庆达, 张林友, 许文豪,
牛兆轩, 邓志辉

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300000)

摘要:【研究目的】干热岩是一种清洁、储量巨大的地热资源, 从 2019 年开始, 中国地质调查局在青海共和持续实施中国首例干热岩发电并网工程。干热岩储层致密, 需压裂形成一定渗透性的连通缝网, 形成容纳一定规模换热、导水储层, 但高温硬岩人工储层研究还相对较少。【研究方法】人工储层的成功建造和井间有效连通是干热岩成功开发的核心, 示踪试验是研究上述问题、刻画储层水文地质条件的有效手段, 本文以青海共和盆地干热岩试采场地为研究对象, 选取荧光素钠、溴化钠作为示踪剂, 分别在规模压裂改造前后开展示踪试验。【研究结果】规模压裂改造前示踪剂回收率、换热体积等均较低, 改造后储层裂缝更复杂, 储层连通性更好, 示踪剂回收率达到 14.14%, 裂缝换热体积增大至 27 倍, 裂隙相对均质, 有效减少了热突破风险。【结论】示踪实验可以定量化评价干热岩人工储层压裂改造效果, 研究成果对于干热岩示踪试验的开展和高温硬岩热储的科学开发具有指导意义。

关 键 词:干热岩; 示踪试验; 压裂改造; 地热地质调查工程; 共和盆地; 青海

创 新 点:采用示踪试验评价中国首例发电并网干热岩场地人工储层水文地质参数。

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0416-09

Tracer test study on artificial reservoirs in hot dry rock geothermal systems in the Gonghe Basin, Qinghai

ZHU Guilin, LIU Donglin, ZHOU Yinzhu, BIAN Chao, CAO Yueting, FENG Qingda,
ZHANG Linyou, XU Wenhao, NIU Zhaoxuan, DENG Zhihui

(Center for Hydrogeological and Environmental Geological Survey, China Geological Survey, Tianjin 300000, China)

Abstract: This paper is the result of geothermal geological survey engineering.

[Objective] Hot dry rock is a clean and vast geothermal resource. China Geological Survey has been continuously implementing China's first hot dry rock geothermal power generation and grid connection project in Gonghe, Qinghai since 2019. Hot dry rock reservoirs are dense and require fracturing to form a permeable interconnected fracture network, creating a reservoir capable of

收稿日期: 2023-11-21; 改回日期: 2024-01-24

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230018)和河北省水资源可持续利用与产业结构优化协同创新中心开放基金(SXTCX202402)联合资助。

作者简介: 朱贵麟, 男, 1993 年生, 工程师, 主要从事地热地质工作; E-mail: zguilin@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 刘东林, 男, 1985 年生, 高级工程师, 主要从事地热地质工作; E-mail: ldonglin@mail.cgs.gov.cn。

accommodating a certain scale of heat exchange and water conduction. However, research on artificial reservoirs in high-temperature hard rock is relatively limited. [Methods] The successful construction of artificial reservoirs and effective inter-well communication are the core of successful hot dry rock development. Tracer tests are an effective means to study the above issues and characterize reservoir hydrogeological conditions. This study focuses on the hot dry rock test site in the Gonghe Basin of Qinghai, selecting sodium fluorescein and sodium bromide as tracers, and conducting tracer tests before and after large-scale fracturing. [Results] Before large-scale fracturing, tracer recovery rate and heat exchange volume were relatively low. After the transformation, reservoir fractures became more complex, reservoir connectivity improved, and the tracer recovery rate reached 14.14%. The heat exchange volume of fractures increased to 27 times, and the fractures became relatively homogeneous, effectively reducing the risk of heat breakthrough. [Conclusions] Tracer experiments can quantitatively evaluate the effectiveness of hot dry rock artificial reservoir fracturing. The research results have guiding significance for the conduct of hot dry rock tracer tests and the scientific development of high-temperature hard rock thermal storage.

Key words: hot dry rock; tracer test; fracturing remodeling; geothermal geological survey engineering; Gonghe Basin; Qinghai

Highlights: Tracer test was used to assess hydrogeological parameters of the artificial reservoir at the first grid-connected geothermal site for electricity generation in China.

About the first author: ZHU Guilin, male, born in 1993, engineer, engaged in geothermal reservoir engineering; E-mail: zguilin@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: LIU Donglin, male, born in 1985, senior engineer, engaged in geothermal reservoir engineering; E-mail: ldonglin@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20230018) and the Open Fund for Hebei Province Collaborative Innovation Center for Sustainable Utilization of Water Resources and Optimization of Industrial Structure (No.SXTCX202402).

1 引言

能源问题已逐渐成为制约中国经济和社会发展的重要因素。能源生产和消费革命的根本出路在于可再生清洁能源(黄宽等, 2024)。与煤、石油、天然气、页岩气和核能相比, 地热能是取之不尽的可再生清洁能源(李德威和王焰新, 2015)。干热岩(Hot dry rock)属于地热能的一种, 是指埋藏于地下3~10 km、温度150~650°C, 不含或微含不流动流体的高温岩石(汪集旸等, 2012)。中国大陆3~10 km深处于干热岩资源总计为 2.5×10^{25} J, 相当于860万亿t标准煤; 按2%的可采资源量计算, 相当于中国目前能源消耗总量的5200倍(蔺文静等, 2012)。可见干热岩储量巨大, 有望成为新型战略接替能源。

地热开发利用过程中, 为保障地层稳定、维持热储压力, 需要地热回灌。大量开采高温地下热水、回注冷水, 超出储层承受能力, 往往导致储层温度急剧降低, 影响地热工程使用寿命和利用途径。目前, 干热岩长时间稳定运行案例较少, 但热突破相关报道在水热型地热系统屡见不鲜(Moreno and

Tsang, 1994; Stefansson, 1997; Crooijmans et al., 2016)。萨尔瓦多Ahuachapan地热田AH-5井在回灌一段时间后, 开采温度降低了30°C; 冰岛Svartsengi地热田SG-6井在回灌4年后, 开采温度降低了6°C; 菲律宾Palinpinion地热田PN-26井在回灌4年后开采温度甚至降低了50°C, 这些都已经严重影响到了地热系统的正常运行(Wang et al., 2019; Liu et al., 2019)。热突破现象产生的主要原因是地热开采速率远大于深部热交换速率, 井间连通的流体只沿着高渗透通道渗流, 未能在储层内部充分换热, 导致局部地区温度迅速降低, 储层内部尚有大量热量未能有效开采, 造成资源大量浪费。因此探明采灌井间的水力连通情况和热储的渗流特性对准确分析、预测热突破具有重要意义。

示踪试验在水文调查(Cartwright et al., 2017; 陈亚洲和董维红, 2022; Martín-Rodríguez et al., 2023; Lorenzi et al., 2024)、追踪污染物迁移(Liao et al., 2018; Ren et al., 2023a; 顾瑞婷等, 2023)、核素迁移(Zhao et al., 2024; 王伟豪等, 2024)、油气行业(梁娟等, 2008; Yang et al., 2022; 李华洋等, 2023)广泛

应用,是评价储层地质参数的重要手段。关于示踪试验在地热方面的研究主要集中于水热型地热系统,通过群井示踪试验,查明天津东丽湖地区优势渗流通道方向为北东向,井间回收率极低,最高值仅达到 0.0032% (殷肖肖等, 2021)。在鄂尔多斯盆地东南缘韩城地区对井回灌示踪试验研究发现采灌井水力主通道上可能有溶潭发育,开采井温度 100 年内温度仅下降 8.31°C (薛宇泽等, 2023)。受人工流场过弱影响,西安三桥地区示踪剂 89 天才出现峰值,运移速度较慢(许勇, 2018)。将 3 t 硫氰酸铵投放至咸阳回灌二号井中,108 天内示踪剂未检出,推测示踪试验失败主要原因是采灌井距过大(超 500 m)、深层孔隙型热储渗透率极小等多重原因造成的(云智汉, 2014)。沧州献县示踪试验显示,在开发井和回注井之间发现了一条优势裂缝通道,裂缝长度约为 513.7 m (Liu et al., 2022)。通过格林函数法求解三维多孔介质中溶质输运的对流-弥散-扩散方程的移动线源解,并通过蒙特卡罗模拟拟合示踪剂试验数据中获取流速、弥散度等参数,研究发现该类参数有效解决了数值模拟参数不确定性问题(Erol et al., 2022)。

相对而言,由于干热岩工程化开发案例有限,干热岩示踪试验研究相对较少(Ren et al., 2023b)。1976—1992 年间,世界首例干热岩开发项目——芬顿山开展了一系列示踪试验,揭示压裂增加了储层体积和有效换热面积(Robinson et al., 1988)。澳大利亚库珀盆地开展了荧光素钠和 1,3,5-萘三磺酸盐示踪试验,计算出有效连通区域体积约为 18500 m³ (Yanagisawa, 2009)。美国沙漠峰干热岩试验场应用示踪技术分析井间连通性(Robertsonait et al., 2009),澳大利亚 Habanero EGS 项目通过 2,6-萘二磺酸盐示踪试验查明井间示踪剂回收率约为 60% (Ayling et al., 2016)。Sanjuan et al. (2010)通过示踪试验结合水化学演化分析,量化出苏尔茨深层卤水存在 1~1.2 m³/h 的自然对流通量,Liang et al. (2023)创新性地将示踪数据与微震监测结合进行储层反演,使注入压力和示踪剂浓度的预测精度分别提升 61.16% 和 67.35%。综上,示踪试验在干热岩储层中存在两方面的研究方向,一方面是评估井间连通性,另一方面是与其他手段融合揭示储层特征。

现有示踪试验论文主要是以有限 EGS 开发场

地为研究对象,得出结论往往不具有普适性。因此,本文以青海共和盆地干热岩规模化压裂前后开展两次示踪为例,选取不同示踪剂,定量分析井间热储的水文地质、地热地质条件,研究长期采灌情况下储层温度降低情况,以期为花岗岩裂隙型热储示踪试验分析、干热岩压裂工程实施提供科学依据。

2 研究区概况

恰卜恰干热岩体所在的共和盆地(图 1),位于青藏高原东北缘,西秦岭造山带西北端,为呈北西走向展布的菱形叠合盆地,构造演化复杂。场地钻井揭露地层显示,地表至 1360 m 深度为河湖相沉积盖层,1360~4000 m 为中晚三叠世花岗岩体。干热岩储层岩体主体岩性为灰色、灰白色似斑状中粗粒花岗闪长岩,青灰色似斑状中粗粒蚀变花岗闪长岩,主要由斜长石、石英、钾长石、角闪石、黑云母组成,整体脆性矿物含量在 80% 以上。

三维微纳扫描结果显示恰卜恰干热岩开发场地储层内部发育有宽度 8 nm~14.197 μm 的裂隙和直径 8.824 nm~16.465 μm 的孔隙,天然渗透率约为 $2.494 \times 10^{-9} \mu\text{m}^2$, 属于超低渗材料(Zhang et al., 2022)。仅依靠天然孔隙难以支持循环液的充分换热和多井连通,需要人为压裂形成复杂井间缝网,保障循环液在储层内有相当体积换热。试采场地前期开展了几次压裂工作,初步形成一定规模的缝网,随后开展了规模化压裂工作,实现复杂化缝网的建造,并在压裂前后分别开展示踪试验,以查明压裂对储层的改造效果。

3 示踪试验概况

3.1 示踪试验基本情况

干热岩工程已完成三眼注采井施工工作,形成三井井组模式(图 2),钻井编号依次为 01、02、03。01 井型为垂直井,02、03 为定向井。02 和 03 井口以 01 为中心,地面呈三点一线布设。规模压裂前示踪实验由 01 投入示踪剂,02 监测;规模压裂后示踪试验由 02 投入示踪剂,01 监测,投放入示踪剂期间 03 关闭,着重探究 01、02 间连通性的变化情况。示踪剂投放监测层位为压裂储层段,埋深为 3500~4000 m。

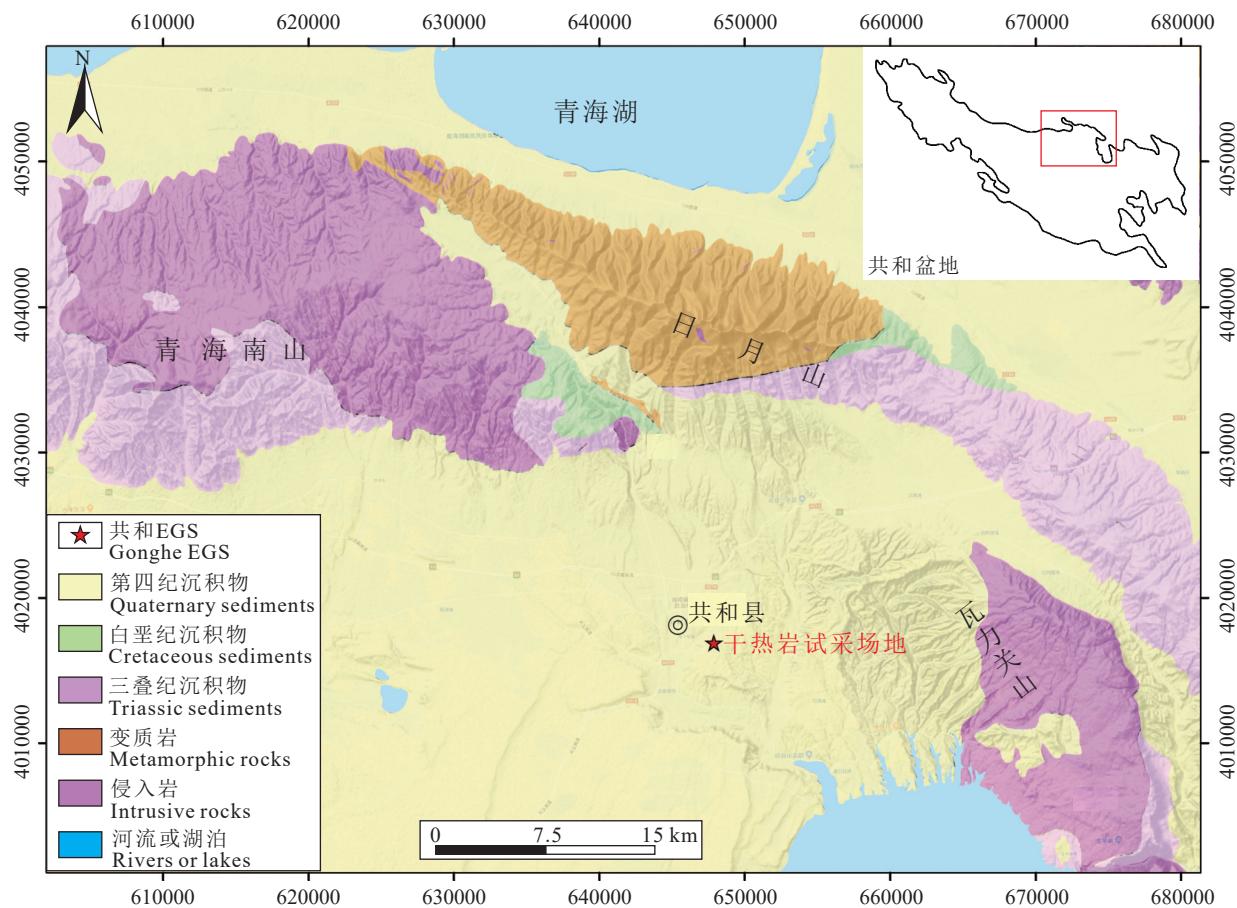


图 1 干热岩工程场地分布位置图
Fig.1 Location map of hot dry rock engineering site

3.2 示踪剂选择

干热岩开发利用过程中由于岩体具有温度高、硬度强、埋藏深等特征,在钻井阶段、固井阶段、压裂阶段组合使用了多种钻井液、高温固井水泥、滑溜水、胶连液、酸液等材料,这些材料长期在高温高压条件下与储层或相互之间发生化学反应,可能产生某种可以与示踪剂反应的物质,造成人工储层堵塞、示踪剂失效等现象,因此在投放示踪剂前开展室内实验。本次示踪试验前开展了吸附实验、配伍性实验和热稳定性室内实验。使用氯化锂、荧光素钠、罗丹明 B、溴化钠等示踪剂配置 100 mg/L 溶液,选取 1 kg 岩屑与配置的上述溶液在高温高压反应釜内反应 3 h、6 h、12 h、24 h、48 h,调整温度为热储平均温度 180℃,分别测试反应前后示踪剂浓度,经测试,荧光素钠、溴化钠热稳定性良好,不易被岩石吸附,反应 48 h 后示踪剂含量与实验前浓度差距小于 1%,满足工程需要,故选用这两种材料作

为示踪剂。

3.3 示踪剂投放量

根据 NB/T 10703—2021 热储示踪试验技术规程,示踪剂投放量可按照式(1)计算。

$$G = \pi R^2 H \alpha \beta C_p \quad (1)$$

式(1)中: R 为井间距, m; H 为热储层厚度, m; α 为分散常数因子,一般取 0.0153; β 为优势流浓度场修正系数,一般取 0.1; C_p 为示踪剂峰值浓度, kg/m³; G 为示踪剂投放量, kg。

01、02 压裂段井间距离约为 250 m,热储层厚度 500 m,第一次示踪试验开展前未检测出循环液荧光素钠含量,为使得示踪曲线变化明显,设置示踪剂峰值浓度为 1 mg/L,计算出荧光素钠的投放量为 150 kg;第二次示踪试验开展前检测出循环液溴化钠浓度为 7 mg/L 左右,参照第一次荧光素钠示踪试验结果,投放溴化钠 75 kg。

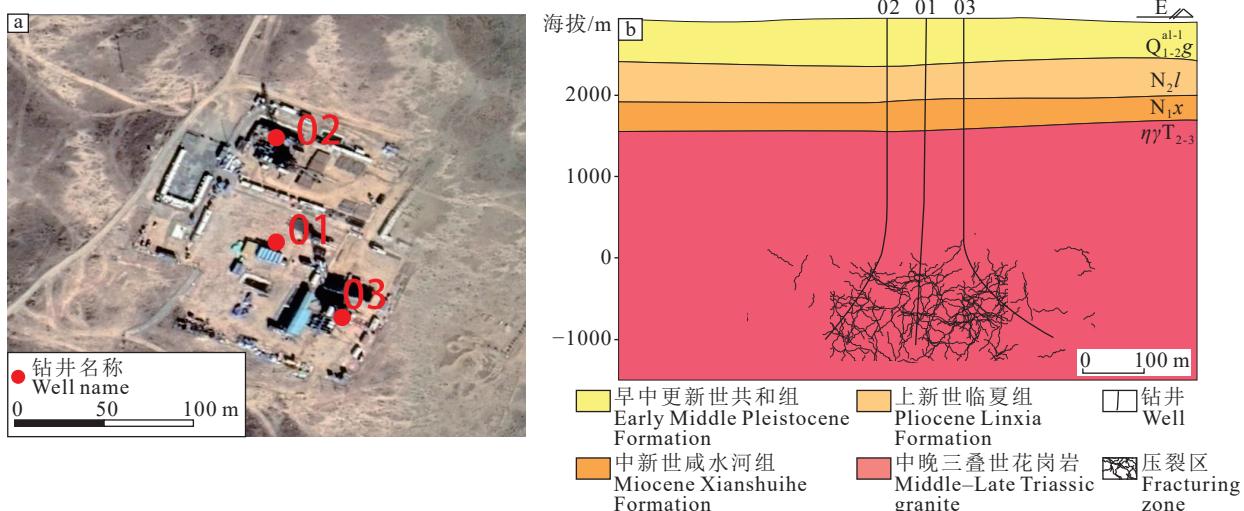


图 2 干热岩试采场地平面图及剖面图
Fig.2 Horizontal and sectional view of hot dry rock site

3.4 示踪剂投放、监测与测试

示踪试验开始前先配置高浓度示踪剂溶液：将示踪剂倒入 3 m^3 的铁罐内，装满水，快速搅拌溶液，使得示踪剂完全溶解在铁罐内，取样测试此时示踪剂浓度。将充分搅拌后的溶液采用连续注入方式迅速压入注入井，随后用常规循环液持续注入液体，两次示踪试验注入井压力几乎一致，约 50 MPa 。分析测试开采井的示踪剂浓度、温度和流量变化，在示踪试验刚开始进行时，每半个小时取一次样品，在监测到浓度出现波动后，迅速将监测频率提升至 10 min ，使用 FL30 野外荧光光度计现场检测示踪剂浓度。

4 试验结果及讨论

4.1 试验数据解释方法

干热岩压裂形成裂隙通道，溶质运移符合裂隙流模型（Axelsson et al., 2001）。假设对井开采模式下，井间存在数个裂隙通道，则每条通道皆为一维流。在考虑溶质对流和弥散的作用下，根据质量守恒定律，开采井示踪剂浓度为：

$$C(t) = \frac{\rho M \mu}{2Q \sqrt{\pi D t}} e^{-(x - \mu t)^2 / 4Dt} \quad (2)$$

式(2)中： $C(t)$ 为裂隙出口示踪剂浓度， kg/m^3 ； ρ 为循环液密度， kg/m^3 ； M 为裂隙通道的示踪剂量， kg ； μ 为裂隙水的瞬时运移速度， m/s ； Q 为开采量， kg/s ； D 为弥散系数， m^2/s ； t 为时间， s ； x 为裂隙通道

长度， m 。

如果注采井间存在 n 条通道，则开采井的示踪剂浓度为连接两井所有裂隙通道出口示踪剂浓度之和：

$$c(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) \quad (3)$$

$$c_i(t) = \frac{\rho M_i \mu_i}{2Q \sqrt{\pi D_i t}} e^{-(x_i - \mu_i t)^2 / 4D_i t} \quad (4)$$

$$u_i = \frac{q_i}{\rho A_i \varphi_i} \quad (5)$$

$$D_i = a_L \mu_i \quad (6)$$

$$q_i = \frac{M_i}{M} q_m \quad (7)$$

式中： $c(t)$ 为开采井示踪剂浓度， kg/m^3 ； $c_i(t)$ 为 i 通道示踪剂浓度， kg/m^3 ； ρ 为循环液密度， kg/m^3 ； M_i 为 i 裂隙通道的示踪剂量， kg ； μ_i 为 i 裂隙通道内水的瞬时运移速度， m/s ； Q 为开采量， kg/s ； D_i 为弥散系数， m^2/s ； t 为时间， s ； x 为 i 裂隙通道长度， m ； u_i 为 i 裂隙通道内水的平均运移速度， m/s ； a_L 为示踪剂纵向弥散度， m ； A_i 为裂隙通道的横截面积， m^2 ； φ_i 为裂隙通道 i 的孔隙度，无量纲。

利用式(8)预测热突破的时间。

$$T(t) = T_0 - \frac{q}{Q} (T_0 - T_1) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{kxh}{c_w q \sqrt{K(t-x/\beta)}} \right] \right\} \quad (8)$$

$$\beta = \rho_w c_w \varphi + \rho_r c_r (1 - \varphi) \quad (9)$$

式(8)、(9)中: $T(t)$ 为开采井的出水温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为初始热储温度, $^{\circ}\text{C}$; T_i 为注入水温度, $^{\circ}\text{C}$; q 为回灌量, kg/s ; Q 为开采量, kg/s ; erf 为误差函数; k 为岩石导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; K 为热扩散率; x 为注采井距离, m ; β 为热储平均比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ_w 为循环液密度, kg/m^3 ; ρ_r 为储层岩石密度, kg/m^3 ; φ 为孔隙度, 无量纲。

$$c(t) \approx M / (V \varphi \rho_w) e^{-(Qt/V\varphi\rho_w)} \quad (10)$$

式(10)中: $c(t)$ 为采井示踪剂浓度, kg/m^3 ; M 为示踪剂量, kg ; V 为示踪剂影响体积, m^3 ; φ 为孔隙度, 无量纲; ρ_w 为循环液密度, kg/m^3 ; Q 为开采量, kg/s ; t 为时间, s 。

基于以上理论分析人工储层的水文地质参数, 评价连通改造效果, 预测热突破时间。

4.2 示踪曲线形态分析

示踪剂检出曲线如图 3 所示, 01 和 02 井间荧光素钠背景值接近于 0, 由于早期开展了单井示踪试验投放过溴化钠, 溴化钠背景值为 7×10^{-6} , 两次示踪剂检出时间约为 23 h, 到达峰值时间为 40~50 h。受限于采灌时间, 在监测到溴化钠浓度达到峰值 15 h 后停止示踪试验。

从示踪剂检出时间来看, 两次示踪试验的检出时间都在 23 h 左右, 说明 01 井和 02 井最短裂隙距离没有发生改变, 示踪剂最快速率相同; 从出峰时间上来看, 溴化钠示踪试验出峰时间约为 43 h, 略

早于荧光素钠示踪试验的 45 h, 在两次试验过程中保持注入、采出井的套压、流量几乎一致, 相同的距离、压力情况下规模化压裂后示踪剂出峰时间减少, 说明储层连通性更好; 从峰值持续时间和出峰数目来看, 溴化钠峰值持续时间约为 20 h, 而荧光素钠试验峰值持续时间约为 15 h, 说明规模化压裂后的储层缝网更复杂, 示踪剂进入地下储层中通过更多的裂隙、经过更多的路径到达出水口, 换热面积更大; 从峰值浓度上来看, 尽管荧光素钠示踪剂投放量比溴化钠示踪剂多 1 倍, 但溴化钠示踪试验峰值超 30 mg/L, 扣除背景值浓度约为 24 mg/L, 与荧光素钠示踪试验峰值浓度 23 mg/L 接近, 比较两次试验投放量, 说明更多的示踪剂通过裂缝到达开采井, 而非困在深部裂缝的死端孔隙, 证明两井间连通性进一步增强。综合来看, 规模化压裂改造效果较为成功。

4.3 水文地质参数反演

使用 ICEBOX 程序对储层水文地质参数反演。ICEBOX 是冰岛地质调查局开发的一款地热资源分析、管理、计算、评价的软件, 拥有许多强大的解析算法, 如厘定地热井沸点深度、使用最小二乘法拟合方程、分析静态水柱压力变化情况等, 其以清新的界面和强大的功能广泛应用于地热工程。计算获得参数如表 1 所示。可见, 经过压裂改造后, 示踪剂回收率、裂缝开度等都进一步提高, 其中回收率由 2.8% 增加到 14.14%, 增加近 5 倍, 更多的循环液经缝网由注入井返回至开采井; 渗流速度由 76.33 m/d 增加到 91.29 m/d, 说明渗流主要裂缝开度略有增加, 但增加幅度不大; 缝网间换热体积由 6.4 m³ 增加到 174 m³, 增长了 27 倍。

裂缝换热体积直接影响水热相互接触的换热面积, 而换热面积的增加说明在人工储层形成更多有效连通的人工裂缝。由于本研究忽略分子扩散, 反演的弥散度与机械弥散密切相关。规模化压裂

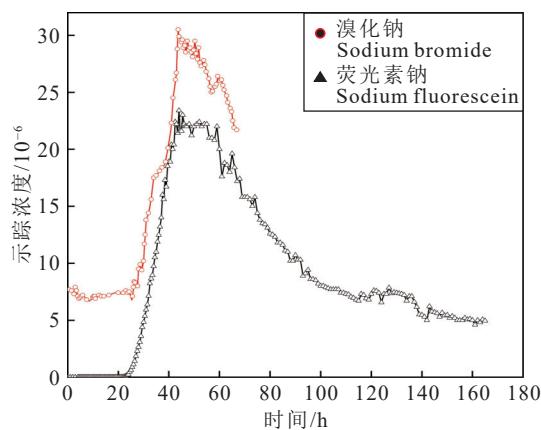


图 3 溴化钠和荧光素钠突破曲线

Fig.3 Breakthrough curves of sodium bromide and sodium fluorescein

表 1 人工储层示踪试验解释成果

Table 1 Interpretation results of artificial reservoir tracing test

参数	荧光素钠示踪试验	溴化钠示踪试验
回收率/%	2.8	14.14
渗流速度/(m/d)	76.33	91.29
裂缝换热体积/m ³	6.4	174
弥散度/m	22.58	8.59

前弥散度较大,指示机械弥散速率也较大,储层复杂度差异较大。规模化压裂后储层弥散度相对较少,指示裂隙机械弥散速率差异相对较小,裂隙相对均质,热突破风险也相应减少。

4.4 热突破预测

示踪试验目的一方面是分析井间连通性,另一方面则是探究是否会产生热突破。理想状态下是将区域内地热能全部开采,但由于井间距、地质条件、压裂效果等多项条件制约,开采一定时间后地热井的温度可能会下降,因此分析地热井最适宜开采流量和预测热突破风险具有相当的意义。

地热水的升温取决于流体通道的比表面积,但由于深部地质结构复杂,裂隙、孔隙难以完全区分,因此本研究在评价时选择使用体积最大、比表面积最小的形状——球形进行概化,并以局部热平衡理论为基础,以求得最保守的热突破时间。为使发电能力达到兆瓦级,根据青海共和干热岩开发的工程条件和场地条件,热水流量须达到 $120 \text{ m}^3/\text{h}$,设置回灌水温度为 20°C ,根据式(8)预测当前压裂效果下不同开采流量条件储层温度的下降趋势如图 4 所示,可见开采流量越大,温度下降越快,但是 2 年之后储层温度基本保持稳定,不同开采流量之间差距不大。此时岩体之间传热和水岩换热基本达到动态平衡,温度稳定在 155°C 左右。可见,在水-岩换热可以达到热平衡条件下,恰卜恰干热岩试采场地可以满足稳定 1.6 MW 发电需求。但由于本研究基

于局部热平衡理论进行计算,实际情况往往是局部热非平衡状态,并且干热岩长期稳定发电与井距、注采组合、采出速度等密切相关,建议实际开发利用应仔细论证热突破风险。

5 结 论

本文通过裂隙一维流的分析方法研究了青海共和盆地干热岩试采场地在规模化压裂前和压裂后的储层改造效果。经分析,在压裂前注采井连通性较差,井间示踪剂回收率仅为 2.8%,最大渗流速度为 76.33 m/d ,裂隙换热体积为 6.4 m^3 ;而压裂后井间示踪剂回收率达到 14.14%,最大渗流速度为 91.29 m/d ,裂隙换热体积为 174 m^3 ,形成较为复杂、满足大量循环液流动的缝网,在水-岩充分换热基础上以 $360 \text{ m}^3/\text{h}$ 开采流量开发,恰卜恰干热岩体可安全平稳运行 30 年。

References

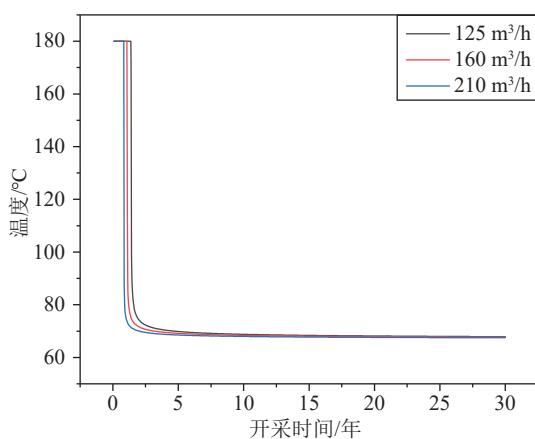


图 4 不同开采流量下青海共和人工储层 30 年温度变化图
Fig.4 Temperature change chart of Qinghai Gonghe artificial reservoir in 30 years under different exploitation flow

- Axelsson G, Florenz O G, Hauksdottir S, Hjartarson A, Liu J. 2001. Analysis of tracer test data, and injection-induced cooling, in the Laugaland geothermal field, N-Iceland[J]. *Geothermics*, 30: 697–725.
- Aylng B F, Hogarth R A, Rose P E. 2016. Tracer testing at the Habanero EGS site, central Australia[J]. *Geothermics*, 63: 15–26.
- Cartwright I, Cendon D, Currell M, Meredith K. 2017. A review of radioactive isotopes and other residence time tracers in understanding groundwater recharge: Possibilities, challenges, and limitations[J]. *Journal of Hydrology*, 555: 797–811.
- Chen Yazhou, Dong Weihong. 2022. Analysis of karst pipeline structure characteristics using tracer test time-concentration curves[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 49(1): 41–47 (in Chinese with English abstract).
- Crooijmans R A, Willems C J L, Nick H M, Bruhn D. 2016. The influence of facies heterogeneity on the doublet performance in low-enthalpy geothermal sedimentary reservoirs[J]. *Geothermics*, 64: 209–219.
- Erol S, Bayer P, Akin T, Karydakis D. 2022. Advanced workflow for multi-well tracer test analysis in a geothermal reservoir[J]. *Geothermics*, 101: 102375.
- Gu Ruiting, Shi Xiaoqing, Guo Qiongze, Song Meiyu, Xu Hongxia, Wu Jichun. 2023. Numerical analysis of DNAPL residuals in aquifers based on single-well injection-extraction tracer tests[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 50(4): 204–212 (in Chinese with English abstract).
- Huang Kuan, Zhang Wanyi, Wang Fengxiang, Luan Zhuoran, Hu Yalu, Chen Ji, Fang Yuan, Song Zefeng, Wang Jian. 2024. Development

- status of underground space energy storage at home and abroad and geological survey suggestions[J]. *Geology in China*, 51(1): 105–117 (in Chinese with English abstract).
- Li Dwei, Wang Yanxin. 2015. Major issues in the research and development of hot dry rock geothermal energy[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 40(11): 1858–1869 (in Chinese with English abstract).
- Li Huayang, Deng Jingen, Feng Yongcun, Dong Baohong, Ding Jianqi, Cao Zhipeng. 2023. Research status and development trends of tracer technology in oilfields[J]. *Applied Chemistry*, 52(11): 3163–3168, 3168, 3174 (in Chinese with English abstract).
- Liang Juan, Pang Jufeng, Li Qiang, Wang Lei, Li Zhen. 2008. Tracer test technology and its applications between wells[J]. *Petroleum Instruments*, 22(6): 41–43, 101 (in Chinese).
- Liang X, Xu T, Chen J, Jiang Z. 2023. A deep-learning based model for fracture network characterization constrained by induced microseismicity and tracer test data in enhanced geothermal system[J]. *Renewable Energy*, 216: 119046.
- Liao R K, Yang P L, Wu W Y, Luo D, Yang D Y. 2018. A DNA tracer system for hydrological environment investigations[J]. *Environmental Science & Technology*, 52: 1695–1703.
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, Liu Chunlei, Wang Guiling. 2012. Estimation of hot dry rock resource potential in China's continental area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 33(5): 807–811 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y G, Liu G H, Zhao Z H, Zhang H L. 2019. Theoretical model of geothermal tail water reinjection based on an equivalent flow channel model: A case study in Xianxian, North China Plain[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 37: 849–864.
- Liu Y G, Long X T, Liu F. 2022. Tracer test and design optimization of doublet system of carbonate geothermal reservoirs[J]. *Geothermics*, 105: 102533.
- Lorenzi V, Banzato F, Barberio M D, Milani P, Fantoni R. 2024. Tracking flowpaths in a complex karst system through tracer test and hydrogeochemical monitoring: Implications for groundwater protection (Gran Sasso, Italy)[J]. *Heliyon*, 10: e24663.
- Martín-Rodríguez J F, Mudarra M, De La Torre B, González A, Delgado J. 2023. Towards a better understanding of time-lags in karst aquifers by combining hydrological analysis tools and dye tracer tests. Application to a binary karst aquifer in southern Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 621: 129643.
- Moreno L, Tsang C F. 1994. Flow channeling in strongly heterogeneous porous media: A numerical study[J]. *Water Resources Research*, 30: 1439–1450.
- Ren K, Pan X D, Peng C, Chen J Y, Li J, Zeng J. 2023a. Tracking contaminants in groundwater flowing across a river bottom within a complex karst system: Clues from hydrochemistry, stable isotopes, and tracer tests[J]. *Journal of Environmental Management*, 342: 118099.
- Ren Y Q, Kong Y L, Pang Z H, Wang J Y. 2023b. A comprehensive review of tracer tests in enhanced geothermal systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182: 113393.
- Robertsontait D, Drakos D, Leecaster M, Holdaway L, Hall R. 2009. Tracer testing at the desert peak EGS project[J]. *Transactions-Geothermal Resources Council*, 33: 217–220.
- Robinson B A, Tester J W, Brown L F. 1988. Reservoir sizing using inert and chemically reacting tracers[J]. *SPE Formation Evaluation*, 3: 227–234.
- Sanjuan B, Millot R, Dezayes R, Dumas P, Soulard J. 2010. Main characteristics of the deep geothermal brine (5 km) at Soultz-sous-Forêts (France) determined using geochemical and tracer test data[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 342: 546–559.
- Stefansson V. 1997. Geothermal reinjection experience[J]. *Geothermics*, 26: 99–139.
- Wang G L, Liu G H, Zhao Z H, Liu Y G, Pu H. 2019. A robust numerical method for modeling multiple wells in city-scale geothermal field based on simplified one-dimensional well model[J]. *Renewable Energy*, 139: 873–894.
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Assessment of geothermal resource potential of hot dry rock in mainland China[J]. *Science and Technology Review*, 30(32): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Weihao, Liu Jinhui, Yang Yihan, Wang Ruyi, Liang Daye, Yan Xuerui, He Ting. 2024. Tracer tests on the permeability evolution of ore-bearing layers during uranium leaching in-situ[J]. *Nonferrous Metals (Smelting Part)*, (2): 72–82 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yong. 2018. Simulation and Prospects of Geothermal Tailwater Reinjection in the Pore-type Geothermal Reservoir in the Sanqiao Area of Xi'an[D]. Xi'an: Chang'an University, 1–116 (in Chinese with English abstract).
- Xue Yuze, Zhang Yugui, Ma Yinjuan, Xue Chao. 2023. Tracer test on well reinjection in karst thermal reservoirs on the southeastern edge of the Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Reservoir Evaluation and Development*, 13(6): 757–764, 780 (in Chinese with English abstract).
- Yanagisawa N. 2009. First tracer test at Cooper-basin, Australia HDR reservoir[J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 33: 281–284.
- Yang H R, Guo K L, Zhu G W, Gao X C. 2022. Application of trace substance tracer test method in low permeability reservoir-CQ oilfield[J]. *Energy Reports*, 8: 11309–11319.
- Yin Xiaoxiao, Shen Jian, Zhao Yanting, Liu Donglin, Zhao Sumin, Zong Zhenhai. 2021. Tracer tests on group wells in carbonate thermal reservoirs under centralized production and reinjection conditions[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(6): 1984–1994 (in Chinese with English abstract).
- Yun Zhihan. 2014. Study on the Mechanism of Geothermal Tailwater Reinjection Plugging and Tracer Technology in Deep Pore-type

- Thermal Reservoirs[D]. Xi'an: Chang'an University, 1–85 (in Chinese with English abstract).
- Zhang E Y, Wen D G, Wang G L, Yan W D, Wang W S, Ye C M, Li X F, Wang H, Tang X C, Weng W, Li K, Zhang C Y, Liang M X, Luo H B, Hu H Y, Zhang W, Zhang S Q, Jin X P, Wu H D, Zhang L Y, Yang L. 2022. The first power generation test of hot dry rock resources exploration and production demonstration project in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. *China Geology*, 5(3): 372–382.
- Zhao Z H, Chen S C, Zhang J T, Chen J Y, Wu Y. 2024. In-situ tracer test in fractured rocks for nuclear waste repository[J]. *Earth-Science Reviews*, 250: 104683.

附中文参考文献

- 陈亚洲, 董维红. 2022. 利用示踪试验时间–浓度曲线分析岩溶管道结构特征[J]. 水文地质工程地质, 49(1): 41–47.
- 顾瑞婷, 施小清, 郭琼泽, 宋美钰, 徐红霞, 吴吉春. 2023. 单井注抽示踪试验推估含水层中 DNAPL 残留量的数值分析[J]. 水文地质工程地质, 50(4): 204–212.
- 黄宽, 张万益, 王丰翔, 栾卓然, 胡雅璐, 陈骥, 方圆, 宋泽峰, 王健. 2024. 地下空间储能国内外发展现状及调查建议[J]. 中国地质, 51(1): 105–117.
- 李德威, 王焰新. 2015. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 40(11): 1858–1869.
- 李华洋, 邓金根, 冯永存, 董保宏, 丁建琦, 曹志鹏. 2023. 油田示踪剂技术的研究现状及发展趋势 [J]. *应用化工*, 52(11): 3163–3168, 3174.
- 梁娟, 庞巨丰, 李强, 王磊, 李震. 2008. 井间示踪测试技术及其应用 [J]. 石油仪器, 22(6): 41–43, 101.
- 蔺文静, 刘志明, 马峰, 刘春雷, 王贵玲. 2012. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. *地球学报*, 33(5): 807–811.
- 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱传庆, 李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估 [J]. 科技导报, 30(32): 25–31.
- 王伟豪, 刘金辉, 阳奕汉, 王如意, 梁大业, 闫学锐, 何挺. 2024. 地浸采铀过程中含矿层渗透性演化的示踪试验[J]. 有色金属 (冶炼部分), (2): 72–82.
- 许勇. 2018. 西安三桥地区孔隙型地热尾水回灌模拟及前景展望——以惠森公司地热回灌井为例[D]. 西安: 长安大学, 1–116.
- 薛宇泽, 张玉贵, 麻银娟, 薛超. 2023. 鄂尔多斯盆地东南缘岩溶热储对井回灌示踪试验[J]. 油气藏评价与开发, 13(6): 757–764, 780.
- 殷肖肖, 沈健, 赵艳婷, 刘东林, 赵苏民, 宗振海. 2021. 集中采灌条件下碳酸盐岩热储群井示踪试验[J]. *地质学报*, 95(6): 1984–1994.
- 云智汉. 2014. 深层孔隙型热储地热尾水回灌堵塞机理及示踪技术研究——以咸阳回灌二号井为例[D]. 西安: 长安大学, 1–85.