

基于单井注抽试验的增强型地热系统储层近井渗透率原位测试方法研究

徐含英, 姜振蛟, 许天福, 陈炫沂

Single well injection withdraw (SWIW) - based tracer test approach for in-situ permeability estimation in an enhanced geothermal system

XU Hanying, JIANG Zhenjiao, XU Tianfu, and CHEN Xuanyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199

吉木萨尔超排液氢氧同位素特征及地下水含量计算

Investigation of the characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of the excess fracturing flowback fluid and calculation of groundwater content in the Jimsar Sag

贾俊, 王亮, 孟云涛 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 10-18

基于四参数随机生长法重构土体的格子玻尔兹曼细观渗流研究

Lattice Boltzmann meso-seepage research of reconstructed soil based on the quartet structure generation set

蔡沛辰, 阙云, 蒋振梁, 杨鹏飞 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 33-42

鄂尔多斯高原湖泊蒸发原位试验研究

Research on in-situ test of lake evaporation in the Ordos Plateau

许文豪, 王晓勇, 张俊, 尹立河, 贾伍慧, 朱立峰, 董佳秋, 孙芳强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 16-23

基于示踪试验及动态数据的北京小汤山地区地热资源量评价

Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing

杨亚军, 丁桂伶, 徐巍, 李海京, 鲁鹤, 王雨石, 张俊华, 王翊虹 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 196-200

渗透率对干热岩开采过程储层变化规律的影响

#{suggestArticle.titleEn}

崔翰博, 唐巨鹏, 姜彤彤 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 171-180



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209010

徐含英, 姜振蛟, 许天福, 等. 基于单井注抽试验的增强型地热系统储层近井渗透率原位测试方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 50-58.

XU Hanying, JIANG Zhenjiao, XU Tianfu, *et al.* Single well injection withdraw (SWIW) - based tracer test approach for in-situ permeability estimation in an enhanced geothermal system[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 50-58.

基于单井注抽试验的增强型地热系统储层近井 渗透率原位测试方法研究

徐含英, 姜振蛟, 许天福, 陈炫沂

(吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 储层压裂阶段, 对近井渗透率的高效评估是分析压裂效果、更新压裂方案的重要环节。但受技术或成本制约, 目前仍然缺少深部储层近井渗透率原位测算方法。借助于压裂施工过程的间歇性注入和返排泄压环节, 提出一种依托压裂施工过程的单井注抽示踪试验工艺, 以及基于数值求解和解析解的 2 种渗透率估算方法, 实现了低成本条件下深部储层渗透率原位测试。将该套方法体系应用于实际增强型地热系统场地, 结果显示: 在单井注抽试验示踪剂突破曲线不完备条件下, 通过数值方法仍然能够合理地估算近井渗透率(0.8 D), 但方法计算效率较低; 而在示踪剂突破曲线相对完备条件下(即监测得到示踪剂浓度峰值), 可采用解析法快速估算渗透率(0.25 D); 但由于解析法中未能精确考虑井筒内部长距离示踪剂迁移过程和储层内部弥散作用对示踪剂突破曲线的影响, 计算精度相对较低。然而, 通过数值方法和解析方法估算近井渗透率处于同一数量级, 表明解析法仍可以作为渗透率原位快速估算的一种有效手段。文章提出的单井注抽试验工艺和数据解释方法体系为深部储层渗透率原位测试提供了一种新的途径。

关键词: 渗透率; 原位测试; 单井注抽试验; 水力压裂; 地热

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0050-09

Single well injection withdraw (SWIW) - based tracer test approach for in-situ permeability estimation in an enhanced geothermal system

XU Hanying, JIANG Zhenjiao, XU Tianfu, CHEN Xuanyi

(Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment of Ministry of Education, Jilin University,
Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: Efficient estimation of near-wellbore permeability is critical for evaluating fracturing effect and updating fracturing plan. However, due to technical or cost constraints, there is still a lack of methods for in-situ testing and estimating near-wellbore permeability in deep geothermal reservoirs. Considering that the hydraulic fracturing is often associated with injection breaking and back drainage to control the reservoir pressure, this study proposes a single-well-injection-withdraw-based tracer test approach and two permeability interpretation methods

收稿日期: 2022-09-05; 修订日期: 2022-10-15

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501803)

第一作者: 徐含英(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事热储层参数示踪反演方法的研究工作。E-mail: 1215273766@qq.com

通讯作者: 姜振蛟(1986-), 男, 博士, 教授, 主要从事储层表征与多场耦合模拟技术的研究工作。E-mail: zjjiang@jlu.edu.cn

based on numerical and analytical solutions, which allow in-situ permeability estimation at low cost. Implementation of the proposed method at a realistic enhanced geothermal system indicates that the numerical interpretation method can still reasonably estimate near-wellbore permeability under the condition of incomplete tracer breakthrough curve in the single well injection and withdraw test, but the computational efficiency is low. Once the tracer breakout curve is relatively complete (i.e. the peak tracer concentration is monitored), the analytical method can be used to quickly estimate the permeability. However, the analytical method cannot accurately consider the long-distance tracer migration process inside wellbore and the influence of dispersion on the tracer breakthrough curve, hence the accuracy is relatively low. The numerical and analytical permeability estimations are at the same order of magnitude. The results suggest that in addition to the numerical method, the analytical method can still be used as an effective method for in-situ rapid permeability estimation. The proposed methodology may provide a new tool for in-situ permeability estimation in deep geothermal reservoirs.

Keywords: permeability; in-situ tracer test; single well injection and withdraw test; hydraulic fracturing; geothermal energy

随着浅部地质资源日趋减少,勘探和开发深部地质资源成为地质领域的研究焦点。深部地热资源作为非碳基能源,具有分布广泛、清洁稳定的优点^[1],若能成功实现商业化开采,可以广泛用于发电、供暖等多个领域^[2]。然而,深部地热储层渗透率普遍偏低,需通过水力压裂等储层改造方式提升深部储层渗透能力,拓展深部储层热量获取路径^[3]。储层改造后的渗透率是热储层产热效率的控制性因素^[4-5]。因此,准确刻画压裂前后的渗透率是评价压裂效果、提高深部地热资源开采效率的关键^[6]。

目前渗透率原位测试方式较多。对于浅部含水层,若存在多口勘探井,可基于群井、多段响应示踪试验,通过渗流-溶质运移数值模拟配合地球物理反演,较高精度地确定示踪试验过程中流体渗流通道和渗透率空间分布,该类方法也被称为水力层析成像或水文地球物理联合反演^[7-9]。但在深部热储层,压裂阶段通常仅只有一口勘探井可用于测试储层渗透率,多数浅部储层渗透率刻画方法无法直接推广应用于深部热储层。热储层渗透率的原位估算方法十分有限。借鉴石油领域储层渗透率估算经验,可以采用测井的方法间接推测近井渗透率。例如:电阻率测井方法考虑岩体孔渗条件变化引起电导率变化,基于阿尔奇等电性与储层性质关联方程,将测试获得的电阻率换算为渗透率、孔隙度和饱和度等参数^[10-12];斯通利波测井方法基于斯通利波速度、衰减和幅值与岩芯渗透率值之间相关性,推测渗透率数值^[13];瞬态压力脉冲通过测量不同气体流量下稳定气体压力值和泄压试验获得的原位压降,基于达西定律估算渗透率^[14]。然而,测井信号受渗透率影响的同时,还受矿物组分、

孔隙度、含水率、温度等一系列因素干扰,通过地球物理测井数据间接推测获得的渗透率误差较大;而基于压力波数据计算渗透率时,由于长井筒内部流体的可压缩性,也会对渗透率测试结果造成一定影响,并且上述方法单独运行成本均较高。

单井注抽试验通过向目标储层注入示踪流体,随着示踪流体在储层中迁移一定距离后,通过井筒将示踪流体反排至地表,并定时取样,检测反排流体中示踪剂浓度,获得示踪剂浓度突破曲线,据此分析储层水力特性及溶质运移属性^[15-16]。该类试验具有示踪剂突破曲线易于获取、曲线稳定性强的优势^[17]。在水文地质领域,该技术主要用于分析含水层中溶质弥散系数及吸附特征^[18];在油气领域,该技术用于分析油气产出流阻系数^[19]。在地热领域,由于储层埋藏深度较大,单独开展单井注抽试验成本较高,目前尚未见有利用该试验技术进行深部热储层渗透率原位测试的报道。

此次研究提出一种依托于压裂施工过程的单井注抽试验方法,可以在低成本条件下完成该试验。在此基础上,以近井渗透率计算为核心目标,一方面陈述单井注抽试验突破曲线数值反演方法,另一方面提出根据示踪剂突破曲线快速估计近井渗透率的解析方程。结合实际增强型地热系统试验数据,评述该方法体系在渗透率原位测试方面的有效性。

1 试验流程及分析方法

1.1 试验流程

深部热储层压裂改造过程中通常伴有停注、放喷,以防止储层压力过度堆积诱发破坏性地震。此

外,通过放喷试验,可以间接了解储层产热能力。若能依托于压裂施工过程,将示踪剂注入储层,在放喷阶段,采集返排液样品,检测示踪剂浓度,则可在少量额外经济成本条件下,完成单井注抽示踪试验,为储层水热参数原位测试提供现实可行途径。具体流程设计如下(图 1):

(1) 准备期:根据压裂施工数据(用于估计示踪剂溶液注入流量)及压裂液中示踪剂本底浓度(用于预估峰值浓度),估算示踪剂用量;

(2) 脉冲式注入期:在压裂后期,压裂液剩余 100 ~ 500 m³ 时,将示踪剂快速加入混砂车,并随压裂液一同经过压裂井注入热储层;记录泵量和示踪剂全部注入所用时间,换算示踪剂溶液体积和注入浓度;

(3) 驱替期:继续注入剩余 100 ~ 500 m³ 压裂液,驱替注入示踪剂,使其以井位中心,呈近似同心环形进入热储层;

(4) 静置期:压裂液全部注入后,可静置 1 ~ 2 d。对于反应性示踪剂,该过程能够使示踪剂与储层充分反应,进而更好地反映储层温度条件和近井换热比表面积等参数;对于保守示踪剂,该过程可以忽略。

(5) 返排期:在返排泄压阶段,实时取样,进行示踪剂浓度检测,并记录井口压力、流量和温度数据,进而获得示踪剂回收曲线和施工参数。

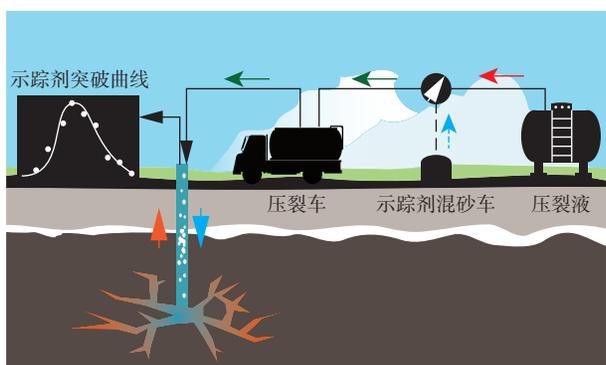


图 1 依托于压裂施工过程的单井注抽试验流程示意图

Fig. 1 Single well injection and withdraw test related to the processes of hydraulic fracturing

1.2 数据分析方法

1.2.1 数值模拟与反演估值

本文假设水力压裂过程中,注入井附近形成密集裂隙网络,将近井附近储层等效为孔隙介质模型而忽略裂隙网络空间结构及各裂隙内部的渗流-传热过程,以计算近井等效渗透率。在此前提下,单井注抽试验过程中传热和渗流控制方程分别为^[20-22]:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla(\lambda \nabla T) + Cu \nabla T + q_h \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} = \nabla \rho u + q_m \quad (2)$$

式中: C ——体积比热容/(J·m⁻³·°C⁻¹);

T ——温度/°C;

t ——时间/s;

λ ——导热系数/(W·m⁻¹·°C⁻¹);

ρ ——水密度/(kg·m⁻³);

φ ——孔隙度;

q_m ——抽注井流量/(m³·s⁻¹);

q_h ——流体注入时输入储层的能量/(W·m⁻²);

u ——储层内部水流速度,根据达西定律可表示为:

$$u = -\frac{k}{\mu} (\nabla P + \rho g \vec{e}) \quad (3)$$

式中: μ ——水黏度/(Pa·s);

k ——地层渗透率/m²;

p ——孔隙压力/Pa;

g ——重力加速度/(m·s⁻²);

\vec{e} ——方向因子,垂向上为 1.0,其他方向为 0。

示踪剂迁移过程采用对流-弥散方程表达:

$$\frac{\partial(\varphi A)}{\partial t} = \nabla(D \nabla A) - u \nabla A \quad (4)$$

式中: A ——示踪剂质量浓度/(mg·L⁻¹);

D ——扩散系数/(m²·s⁻¹);

u ——达西速度/(m·s⁻¹)。

上述方程可通过 FEFLOW、TOUGH2 等多场耦合数值模拟程序求解。本文依托 TOUGH2 模拟器,基于积分有限差分法对水热运动方程及示踪剂迁移控制方程进行数值离散并构建矩阵方程组。其中,水热耦合运动方程数值矩阵方程组,采用 Newton-Raphson 迭代法求解;获得流速后,用于示踪剂迁移控制方程,求解获得示踪剂浓度。非稳定水热示踪剂耦合方程求解过程中,采用自适应时间步长,根据状态变量稳定程度自动调整时间步长。迭代收敛容许度设置为 10⁻³。

通过敏感性分析,确定渗透率对示踪剂迁移转化过程和示踪剂突破曲线形态影响规律后,通过多次多场耦合迭代试算(反演),直到示踪剂突破曲线计算结果和实测值拟合为止,方可确定渗透率数值。

1.2.2 解析法

由于数值反演确定渗透率的方法专业性较强、计算历时较长,不利于单井注抽试验结果的现场快速解

释。为此,本文在数值反演解释方法的基础上,进一步阐述一种可用于渗透率快速估算的解析方法。但需要说明的是,单井抽注试验施工参数较为复杂,涉及变流量注入和抽出;热储层内部示踪剂迁移转化过程中受温度梯度影响,渗流过程呈现非线性特征,单井注抽试验过程中渗透率并不存在严格意义上的解析方程。此次仅参考对井示踪试验参数估算方法^[23],建立基于单井注抽试验解释渗透率的半解析方程,具体过程如下。

(1) 保守示踪剂储层内部扫描体积估算

示踪剂平均滞留时间(τ)用以表征示踪剂在储层内部运移过程的平均耗时,按照粒子计数法的估算,其方程可表达为:

$$\tau = \frac{\int_{t_0}^{\infty} C(t) dt}{\int_{t_0}^{\infty} C(t) dt} \quad (5)$$

式中: $C(t)$ ——返排阶段 t 时刻示踪剂质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);
 t_0 ——返排阶段井筒内部存水排空所需时间/s,
其计算公式为:

$$t_0 = \frac{V_w}{Q} \quad (6)$$

式中: V_w ——井筒体积/ m^3 ;
 Q ——渗流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)。

若按照储层渗流空间体积法估算, τ 与流量和空间体积的关系为:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (7)$$

式中: V ——渗流空间体积/ m^3 。

联合式(5)(7)可得:

$$V = \frac{Q \int_{t_0}^{\infty} tC(t) dt}{\int_{t_0}^{\infty} C(t) dt} \quad (8)$$

据此估算 V 。

(2) 示踪剂迁移距离估算

单井注抽试验过程中将示踪剂波及空间体积(即渗流空间体积)视为以井为中心的圆柱形空间,体积为:

$$V = 2\pi rh \quad (9)$$

式中: r ——示踪剂径向迁移距离/m;

h ——井口进水段高度/m。

基于式(9),示踪剂迁移距离可表示为:

$$r = \frac{V}{2\pi h} \quad (10)$$

(3) 平均渗流速度估算

平均渗流速度可量化为示踪剂迁移距离和迁移时间的函数:

$$u = \frac{r}{t_{\max} - t_0} \quad (11)$$

式中: t_{\max} ——由开始返排时刻至示踪剂峰值浓度出现的时间/s;

t_0 ——井筒内流体排空所需时间/s。

(4) 渗透率估算

根据达西定律,忽略渗流空间内部受热量驱动所导致的垂向自由对流过程,将示踪剂迁移视为径向一维运动,则渗流速度与渗透率关系可表示为:

$$u = \frac{\rho g P_r - P_b}{\mu r} k \quad (12)$$

式中: P_r ——远井储层内部压力值/Pa(按压裂结束时井口压力);

P_b ——返排阶段井底压力值/Pa(按返排阶段井口平均值);

ρ ——流体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

g ——重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)。

由此计算渗透率。

2 场地试验及数值模型构建

2.1 单井注抽试验场地条件及施工参数

本次单井注抽示踪试验场地位于青海省东中部的共和盆地,隶属于青海省海南藏族自治州(图2),南北宽90 km,东西长210 km,总面积21 186 km^2 。盆地中心地形较为平坦,海拔2 850 m左右。黄河纵贯盆地东部,年平均流量663 m^3/s 。盆地中分布有以传导热为主的层状热储,且分布范围遍布整个盆地^[24]。四周断裂、褶皱及岩浆岩发育,内部沉积有第四系和新近

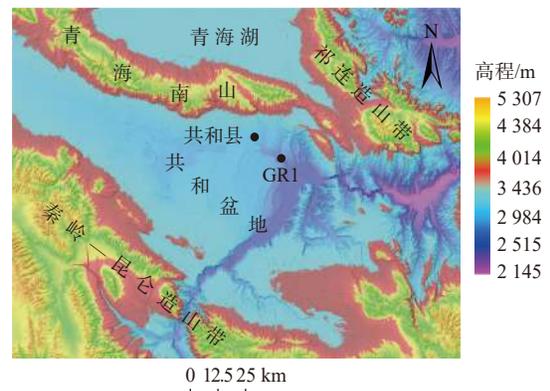


图2 共和盆地地形图

Fig. 2 Topographic map of the Gonghe Basin

系地层, 基底普遍为印支—燕山期花岗岩。按照储层温度条件, 该盆地主要包括第四系中低温热储层、新近系中高温热储层以及花岗岩型高温干热岩。已有钻探结果显示, 该地区干热岩热储层在 3 000 m 深度, 温度可超过 200 °C^[25-26](图 3)。鉴于该地区良好的干热岩型地热资源条件, 目前已相继开展了多期储层改造和增强型地热系统示范工程建设。

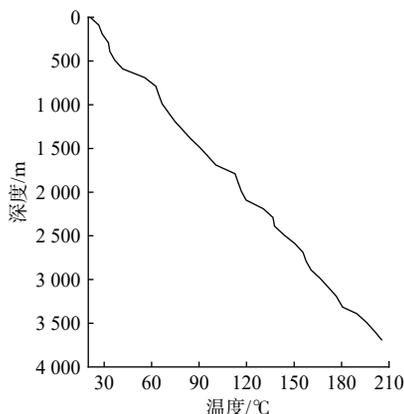


图 3 共和 GR1 井测温曲线

Fig. 3 Downhole temperature logs in well Gonghe GR1

在某增强型地热系统示范场地储层改造初期, 使用氯化锂作为示踪剂, 融入压裂液后注入储层。随后, 在返排阶段采集水样并检测其中氯离子浓度, 比拟保守示踪剂单井注抽试验过程。具体试验参数如表 1 所示。

表 1 井储条件和示踪试验施工参数汇总表

Table 1 Well-reservoir conditions and parameters controlling the tracer test

类型	参数	数值	类型	参数	数值
井结构	进水段长度/m	500	示踪试验	示踪剂用量/kg	200
	进水段顶部埋深/m	3 200		注入排量/(m ³ ·h ⁻¹)	102
	进水段井径/m	0.1~0.2		注入浓度	见图4
储层条件	温度/°C	200	注入时长/h	10.5	
	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.51	返排时长/h	6	
	比热容/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	920	返排流量/(m ³ ·h ⁻¹)	51.5	
	岩性	花岗岩	返排时井口压力/MPa	40	

在示踪剂注入阶段, 每隔 0.5~1.0 h 在井口附近采集一次压裂液样品, 测试其中示踪剂含量, 代表示踪剂注入浓度。如图 4 所示, 受试验条件限制, 此次示踪剂直接倒入压裂液储集罐中, 缺少混合搅拌过程, 注入液中示踪剂浓度波动明显; 随着压裂液的持续注入, 示踪剂含量呈现递减的趋势。

待含有示踪剂的压裂液(1 000 m³)全部注入储层后, 关闭注入井, 静置 1.0 h 后, 开井返排且每隔 0.5 h

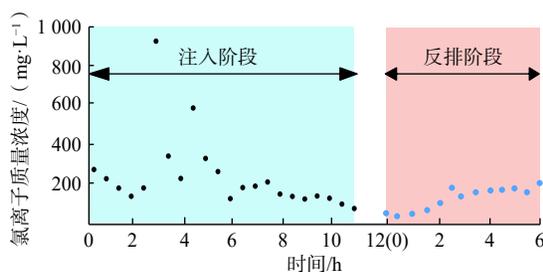


图 4 示踪剂注入和反排质量浓度随时间变化曲线

Fig. 4 Variation of tracer concentrations in the injection fluid and extracted fluid

采集一次样品, 检测示踪剂浓度。返排 6 h 后, 由于现场压裂工程需求, 停止返排。

本文基于已掌握的不完备示踪剂浓度观测数据, 利用数值反演方法计算近井渗透率。获得近井渗透率后, 继续通过数值模拟增补获得完整示踪剂突破曲线。根据增补后的完整示踪剂浓度突破曲线, 采用本文所提出的解析分析方法计算渗透率。本文假设数值反演方法确定的渗透率相对准确, 通过解析法计算的渗透率与数值反演方法结果对比, 以验证解析法对渗透率估算的可靠性。

2.2 数值模型构建

根据单井注抽试验条件, 构建水-热-示踪剂耦合概念模型如下(图 5): 模型中考虑 3 200 m 井筒内部物质和能量运移过程, 并在 3 200~3 700 m 深度, 遵循质量和能量守恒定律, 实现井筒与储层渗流-传热-溶质运移过程耦合。为了削弱模型侧向边界对单井注抽试验过程中近井多场耦合过程的数值模拟结果的影响, 将模型中的储层侧向拓展至 10 km, 模型侧向及顶底板边界均设置为定温(200 °C)、零流量边界。注入

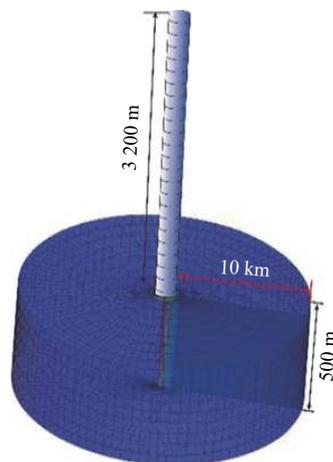


图 5 井筒与储层水-热-示踪剂耦合传输过程概念模型

Fig. 5 Conceptual model of hydrothermal and tracer transport in the wellbore and reservoir

井口位置设置为定流量边界, 流量为 $102 \text{ m}^3/\text{h}$, 并依据图 4 设置变浓度边界。返排阶段, 按照场地相关数据, 将井口设置为定流量边界, 流量固定为 $51.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

模型中井筒剖分为 75 个网格、储层剖分为 1 000 个网格, 网格尺寸为 50 m。模拟结果显示, 继续加密剖分, 不能使模拟结果精度产生明显提升。

3 结果

3.1 单井注抽试验储层内部示踪剂迁移转化过程

如图 6 所示, 在示踪剂注入后约 0.5 h, 示踪剂开始进入储层。在持续注入 10.5 h 以后, 示踪剂在储层

内部最大迁移距离为 1.75 m, 最高质量浓度为 210 mg/L , 最高浓度线迁移距离为 0.75 m。尽管将模型侧向边界拓展至侧向 10 km 位置且数值模型中假设储层处于均质状态(采用同一渗透率), 但模拟结果显示短期试验周期内, 示踪剂仅在近井附近迁移, 远井渗透率数值和边界属性并不对近井附近示踪剂迁移过程产生影响。

随着返排持续进行, 进入抽水井的示踪剂浓度逐渐增大, 对应示踪剂浓度突破曲线持续上升。但在返排 6 h 后, 储层内部示踪剂最高浓度线并未到达开采井, 即监测获得的示踪剂突破曲线并未观测到峰值出现(图 3)。

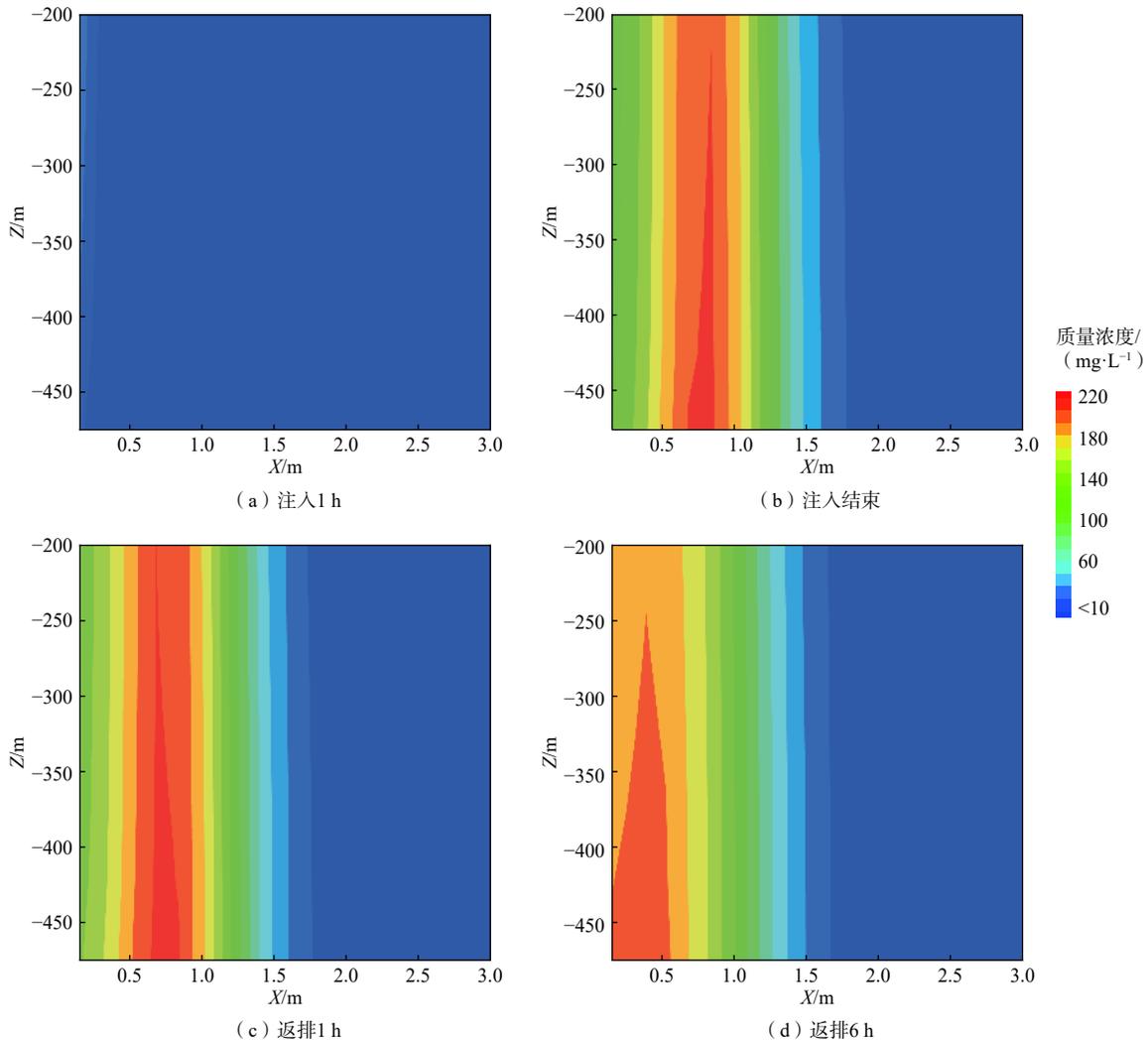


图 6 示踪剂注入期和返排期储层内部示踪剂迁移过程示意图

Fig. 6 Spatial distribution of tracer concentration in the reservoir during injection and backflow period.

3.2 敏感性分析与渗透率估计

为了明确渗透率对示踪剂突破曲线形态的影响, 进而更好地根据示踪剂突破曲线估计渗透率数值, 开

展了示踪剂突破曲线对渗透率的敏感性分析。设置储层内部渗透率数值为 5 mD 、 0.05 D 、 0.5 D 、 5 D , 通过不同渗透率对应的突破曲线形态可以看出(图 7):

随着渗透率的升高,示踪剂的峰现时间逐渐变短,5 mD 时示踪剂浓度约在 10 h 时达到峰值,0.5 D 时约在 9 h 时达到峰值,5 D 时约在 7 h 时达到峰值。随着渗透率增加,示踪剂在同样注入时间内迁移距离更大(即波及体积更广),导致在返排阶段示踪剂峰值浓度降低。当渗透率为 5 mD 时峰值浓度最高,约为 210 mg/L;渗透率为 5 D 时峰值浓度最低,约为 140 mg/L。根据上述敏感性分析结果,将渗透率调整为 0.8 D 时,计算获得的示踪剂突破曲线与实测值拟合效果最佳,均方根误差为 11.7 mg/L。此外,在渗透率为 0.8 D 条件下,平均迁移距离(最高浓度对应距离)为 0.75 m,平均渗透流速为 2.18 m/d。

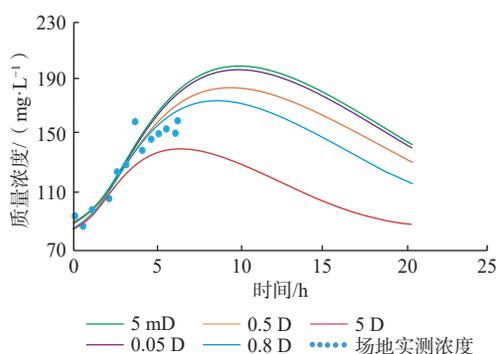


图 7 不同储层渗透率控制下示踪剂突破曲线形态

Fig. 7 Tracer breakout curve morphology under different reservoir permeability controls (scatter points are measured data)

3.3 基于解析法的渗透率估计

通过数值模拟,获得渗透率为 0.8 D 时相对完整的示踪剂突破曲线,在此基础上采用解析法估算渗透率,以检验所提出的单井注抽试验突破曲线解析法的有效性。首先,计算获得井筒内部示踪剂运移时间约为 2.25 h(式 6);利用数值模拟增补后的突破曲线,计算示踪剂的平均滞留时间为 8.23 h(式 5),渗流空间体积为 540.1 m³(式 9)、示踪剂平均迁移距离为 0.43 m(式 10),平均渗透流速为 1.25 m/d(式 11)。注入结束和返排阶段井口底压力差为 0.7 MPa, 100 °C 时流体黏度取 0.284×10^{-3} Pa·s,代入式(12),计算渗透率为 0.25 D。

4 讨论

上述计算结果表明解析法估算渗透率与数值反演结果处于同一数量级,而计算效率提升数十倍,可以满足压裂过程中渗透率现场快速解释的需求。对于深部热储层,利用解析法估算渗透率误差在实际工

程条件下处于合理范围。

对比解析法与数值法结果发现:通过解析法估算得到的示踪剂平均迁移距离、渗流速度和渗透率低于数值解计算结果。原因主要体现在以下两个方面:

(1)在解析法中,井筒内部水流运动时间是根据井筒内水的体积与流量之比获得,尽管考虑了长距离井筒内部流体迁移引起的示踪剂迁移的滞后效益,但未能精细刻画井筒内部流体通过压力波形式的快速传质过程。在数值解(更接近真实情况)中,井筒内部示踪剂到达储层的时间约为 0.5 h;而解析法中,时间为 2.5 h,解析法过高估计了井筒示踪剂迁移的滞后效应。

(2)在解析法中未能完全考虑弥散作用对示踪剂迁移过程的影响,而数值法中示踪剂迁移同时受对流和弥散作用影响,示踪剂平均迁移距离高于解析法中的迁移距离,是造成解析法对渗流速度和渗透率估值偏低的原因。

5 结论及展望

(1)基于相对不完备的单井试验示踪剂突破曲线,利用数值反演仍可以从机理层面准确分析和解释渗透率数值,渗透率数值估值结果为 0.8 D。

(2)通过数值模拟增补获得相当完整示踪剂突破曲线后(至少保障峰值浓度出现),采用解析法快速估算渗透率数值,估值结果为 0.25 D。

(3)由于解析法中未能精细考虑井筒内部流体及示踪剂传输过程和储层内部弥散作用所引起的示踪剂迁移过程,使得渗透率估值结果低于数值法中的结果。但二者处于同一数量级,在实际场地中,解析法可以作为数值法的一种替代方法快速计算近井渗透率值。

本文评价了共和盆地储层建造前期,压裂阶段在井周产生的裂隙网络等效渗透率。单井注抽示踪剂试验工程周期短、注入储层示踪流体迁移范围有限,再经过静置期后,注入示踪流体通过井筒反排后示踪剂回收率高,因此试验成功率较高。目前青藏高原地区(如贵德盆地等)深部热储建造、热能开发工作正逐步推进,本文提出的高效、低成本的渗透率估算技术方法能够为场地前期压裂效果评估提供新的支撑。

综上,在压裂施工阶段,通过向压裂液中注入示踪剂,借助压裂过程固有的流体注入和返排过程,获得单井注抽示踪剂突破曲线,据此快速估算近井渗透率数值,为压裂效果原位评价提供了一种低成本途径。

参考文献 (References) :

- [1] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].*地球学报*,2017,38(4):449-459. [WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(4): 449 - 459. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 蔺文静,刘志明,王婉丽,等.中国地热资源及其潜力评估[J].*中国地质*,2013,40(1):312-321. [LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 312 - 321. (in Chinese with English abstract)]
- [3] OLASOLO P, JUÁREZ M C, MORALES M P, et al. Enhanced geothermal systems (EGS): A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 56: 133 - 144.
- [4] 段云星,杨浩.增强型地热系统采热性能影响因素分析[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2020,50(4):1161-1172. [DUAN Yunxing, YANG Hao. Analysis of influencing factors on heat extraction performance of enhanced geothermal system[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(4): 1161 - 1172. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 崔翰博,唐巨鹏,姜昕彤.渗透率对干热岩开采过程储层变化规律的影响[J].*水文地质工程地质*,2020,47(1):171-180. [CUI Hanbo, TANG Jupeng, JIANG Xintong. Influence of permeability on reservoir change during dry hot rock mining[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 171 - 180. (in Chinese with English abstract)]
- [6] O'MALLEY D, KARRA S, CURRIER R P, et al. Where does water go during hydraulic fracturing?[J]. *Groundwater*, 2016, 54(4): 488 - 497.
- [7] LIU X, KITANIDIS P K. Large-scale inverse modeling with an application in hydraulic tomography[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(2): W02501.
- [8] OWARE E K, IRVING J, HERMANS T. Basis-constrained Bayesian Markov-chain Monte Carlo difference inversion for geoelectrical monitoring of hydrogeologic processes[J]. *Geophysics*, 2019, 84(4): A37 - A42.
- [9] YEH T C J, LIU Shuyun. Hydraulic tomography: Development of a new aquifer test method[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(8): 2095 - 2105.
- [10] 刘莹.基于电阻率与自然电位曲线的孔隙度与渗透率解释方法研究[J].*长江大学学报(自科版)*,2013,10(32):80-82. [LIU Ying. Study on porosity and permeability interpretation method based on resistivity and spontaneous potential curve[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2013, 10(32): 80 - 82. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 马建斌,唐新功,向葵.利用电阻率求取岩石渗透率的方法研究[J].*长江大学学报(自科版)*,2013,10(10):105-106. [MA Jianbin, TANG Xingong, XIANG Kui. Study on the method of calculating rock permeability by using resistivity[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2013, 10(10): 105 - 106. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张志强,王猛,翁新伙.基于时移电阻率资料的渗透率评价方法[J].*中国石油和化工标准与质量*,2021,41(12):7-8. [ZHANG Zhiqiang, WANG Meng, WENG Xinhua. Permeability evaluation method based on time-lapse resistivity data[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2021, 41(12): 7 - 8. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 崔志文,吕伟国,谢树理,等.利用斯通利波衰减反演渗透率的方法改进[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2010,40(增刊1):35-38. [CUI Zhiwen, LYU Weiguang, XIE Shuli, et al. Improvement in inversion of permeability from attenuation of stoneley waves[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(Sup 1): 35 - 38. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 曹渊,牛冠毅,王铁良,等.基于原位渗透率试验反演岩石孔隙度的新方法[J].*岩土力学*,2017,38(1):272-276. [CAO Yuan, NIU Guanyi, WANG Tieliang, et al. A new method for rock porosity inversion based on in situ permeability test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1): 272 - 276. (in Chinese with English abstract)]
- [15] ALTMAN S J, MEIGS L C, JONES T L, et al. Controls of mass recovery rates in single-well injection-withdrawal tracer tests with a single-porosity, heterogeneous conceptualization[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(7): 30-1 - 30-15.
- [16] 顾昊琛,王全荣,詹红兵.非完整井下单井注抽试验数值模拟方法改进[J].*地球科学*,2020,45(2):685-692. [GU Haochen, WANG Quanrong, ZHAN Hongbing. An improved approach in modeling injection-withdraw test of the partially penetrating well[J]. *Earth Science*, 2020, 45(2): 685 - 692. (in Chinese with English abstract)]
- [17] TSANG C F, DOUGHTY C. Insight from simulations of

- single-well injection-withdrawal tracer tests on simple and complex fractures[R]. Berkeley, CA : Lawrence Berkeley National Lab(LBNL), 2009.
- [18] CVETKOVIC V, CHENG H. Evaluation of single-well injection-withdrawal tests in Swedish crystalline rock using the Lagrangian travel time approach[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(2): W02527.
- [19] NORDQVIST R, GUSTAFSSON E. Single-well injection-withdrawal tests (SWIW)—Literature review and scoping calculations for homogeneous crystalline bedrock conditions[R]. Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2002.
- [20] HYMAN J D, RAJARAM H, SRINIVASAN S, et al. Matrix diffusion in fractured media: New insights into power law scaling of breakthrough curves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(23): 13785 – 13795.
- [21] MACQUARRIE K T B, MAYER K U. Reactive transport modeling in fractured rock: A state-of-the-science review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 72(3/4): 189 – 227.
- [22] 侯兆云. 基于流体渗流-化学(同位素)耦合模拟的共和—贵德地热储层特征分析[D]. 长春: 吉林大学, 2019. [HOU Zhaoyun. Characterizing the geothermal system in the Gonghe—Guide Basin by coupled fluid-heat-chemical (isotope) transport modeling[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李佳琦. 基于示踪技术的增强型地热系统裂隙储层连通性及导热性评价[D]. 长春: 吉林大学, 2015. [LI Jiaqi. Evaluation of the fluid connectivity and heat exchange in a fractured reservoir of enhanced geothermal system based on the tracer technique[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张盛生, 张磊, 田成成, 等. 青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(4): 501 – 508. [ZHANG Shengsheng, ZHANG Lei, TIAN Chengcheng, et al. Occurrence geological characteristics and development potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(4): 501 – 508. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 等. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. *中国地质*, 2018, 45(6): 1087 – 1102. [ZHANG Senqi, YAN Weide, LI Dunpeng, et al. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuchia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 2018, 45(6): 1087 – 1102. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 孙知新, 李百祥, 王志林. 青海共和盆地存在干热岩可能性探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(2): 119 – 124. [SUN Zhixin, LI Baixiang, WANG Zhilin. Exploration of the possibility of hot dry rock occurring in the Qinghai Gonghe Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(2): 119 – 124. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
刘真真