

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

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

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海

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

MA Zihan, XING Huilin, JIN Guodong, TAN Yuyang, YAN Weichao, and LI Sihai

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112010

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin 陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯波 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 191–199

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, 姜昕彤 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 171-180

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

巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究

Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China 周燕怡, 王旭升 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 44-54

非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式

A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media 张东, 刘晓丽, 王恩志 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 35-42

基于多源数据的弱透水层水文地质参数反演研究

Research on hydrogeological parameter inversion of an aquitard based on multi–source data: A case study of a silt layer in the Hohhot Basin

石鸿蕾, 郝奇琛, 邵景力, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 1-7



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112010

马子涵,邢会林,靳国栋,等.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 [J].水文地质工程地质,2022, 49(6):190-199.

MA Zihan, XING Huilin, JIN Guodong, *et al.* A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 190-199.

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

马子涵1.2.3, 邢会林1.2.3, 靳国栋1.2.3, 谭玉阳1.2.3, 闫伟超1.2.3, 李四海1.2.3

(1. 深海圈层与地球系统前沿科学中心,海底科学与探测技术教育部重点实验室,中国海洋大学海洋地球科学学院,山东青岛 266100;2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室,山东青岛 266237;3. 中国海洋大学海底科学与工程计算国际中心,山东青岛 266100)

摘要:发展清洁、稳定、可再生的干热岩型地热资源对于缓解能源危机、减轻环境污染、改善人类健康具有重要意义。增强型地热系统 (Enhanced Geothermal System, EGS) 是一项改造干热岩天然储层,高效开发地热能资源的先进技术。以澳大利 亚库珀盆地地热储层为研究对象,基于水力压裂实测微震数据,建立了三维分区均质渗透率模型和非均质渗透率模型,分别进行储层温度场、流场及采热性能变化的研究,并对比其差异。结果表明:在同样的注采流量下,由于非均质模型中微震 事件集中于井口附近,进而形成明显的优势流动通道,流体从注入井更快流向生产井,温度下降速度相对更快,分区均质模 型中优势流动通道没有非均质模型明显,温度下降速度较慢;地热模型运行期间分区均质模型的采热量变化相对稳定,降 幅为 3.74%,非均质模型采热量降幅较大,为 12.72%。分区均质模型的模拟结果相比于非均质模型,温度下降幅度小、采热 量高;但实际储层中的渗透率分布不均,分区均质模型的模拟采热量相比实际采热量偏高,因此在实际应用中,非均质模型 的模拟结果对实际工程更具参考意义。

关键词:增强型地热系统;微震数据;渗透率;热流耦合;数值模拟
中图分类号:TK521
文献标志码:A
文章编号:1000-3665(2022)06-0190-10

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

MA Zihan^{1,2,3}, XING Huilin^{1,2,3}, JIN Guodong^{1,2,3}, TAN Yuyang^{1,2,3}, YAN Weichao^{1,2,3}, LI Sihai^{1,2,3}

(1. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences

and Prospecting Techniques, MOE and College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao,

Shandong 266100, China; 2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao),

Qingdao, Shandong 266237, China; 3. International Center for Submarine Geosciences and Geoengineering Computing (iGeoComp), Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

收稿日期: 2021-12-04; 修订日期: 2022-01-15 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52074251);国家自然科学基金重大计划重点支持项目(92058211);国家自然科学基金委创新群体项目(42121005);中央高校基本科研业务经费(202012003);高等学校学科创新引智计划(B20048)

第一作者: 马子涵(1997-),女,硕士研究生,主要从事干热岩开采的数值模拟研究。E-mail: 1911778485@qq.com

通讯作者:邢会林(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事超级计算地球科学理论、软件研发及其应用等研究。E-mail:h.xing@ouc.edu.en

马子涵,等: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

Abstract: The development of clean, stable, and renewable hot dry rock geothermal energy is significant for alleviating the energy crisis, reducing environmental pollution, and improving human health. Enhanced geothermal system (EGS) is an advanced technology for developing geothermal energy efficiently by stimulating hot dry rock reservoir. This technology involves a complex hydro-thermal coupling process. A numerical approach is usually applied for analyzing heat extraction. In this paper, taking the geothermal reservoir of the Cooper basin in Australia as the research object, two models-a 3D zonal homogeneous permeability model and a heterogenious permeability model - are established based on the measured microseismic data of hydraulic fracturing. The latter one is inversed from microseismic data. The temperature field, seepage field and thermal performance of the reservoir are numerically studied, and their differences are compared and analyzed. The results show that with the same injection-production flow rate, fluid flows more quickly from the injection well to the production well while the temperature drops relatively more rapidly in the inhomogeneous model due to the dominant channel revealed by dense microseismic events near the wellbore. In the homogeneous model, the dominant flow channel is not as pronounced as in the previous model, and the temperature decreases more slowly. During the operation of the geothermal reservoir model, the change in heat recovery of the zonal homogeneous model is relatively stable, with a decline of 3.74%, and that of the inhomogeneous model is rather obvious, with a decline of 12.72%. Compared with the inhomogeneous model, a smaller temperature drop and a higher heat recovery exist in the homogeneous model. However, the permeability in the actual reservoir is uneven, and the simulated heat recovery of the zonal homogenization model is higher than the actual recovery. Therefore, the simulation results of the inhomogeneous model have more reference significance for practical engineering.

Keywords: EGS; microseismic data; permeability; hydro-thermal coupling; numerical simulation

地热能作为一种清洁、稳定、可再生的新型能源, 符合绿色环保可持续的发展要求,被誉为21世纪最 具潜力的能源之一^[1]。干热岩型地热资源是指储存在 地下低渗透性高温岩体中的热能^[2],约占地热资源总 量的30%,相当于全球石油、天然气和煤炭能量总和 的30倍^[3]。但是,干热岩储层具有埋藏深、岩石致 密、渗透率极低等特点,使用传统技术难以有效开发 其中的热能^[4]。利用增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems, EGS),即使用水力压裂技术将原有储 层改造为高渗透性的人工储层,而后通过水、二氧化 碳等工作流体的循环注采,可实现干热岩中热能的高 效开采^[5]。EGS技术作为实现深层干热岩型地热资源 综合开发利用的关键技术,已经成为各国新能源发展 的重点关注方向之一^[6]。

利用 EGS 技术提取热能是一个包含传热、渗流等 多物理场耦合的复杂过程^[7],因其影响参数众多^[8],物 理性质相差悬殊,时空演化不均衡等特点,通常利用 数值模拟技术分析 EGS 采热过程^[9-10]。近年来,国内 外学者提出了不同的数值模型,其中最常用的方法为 等效多孔介质模型。Jiang 等^[6]、Ayling 等^[11]建立了用 于研究 EGS 采热的热流耦合模型,将热储层等效为多 孔介质,进行模拟并与实际情况进行对比,验证了模

型的有效性。Llanos 等^[12] 为库珀盆地 Habanero EGS 开发 了一个三维热流模型,考虑了渗透率各向异性,结果 表明渗透率各向异性是控制储层流体流动的关键,同 时为干热岩储层的开发设计了不同的井布局,并得出 东西向交错的布局在该模型中为最优井布局。Hogarth 等13 在此模型基础上进行了单井注入和2口井联通、 闭环测试的模拟,将模型计算的生产井温度曲线与实 际记录温度进行对比,验证了模拟结果的准确性。 Samin 等^[14]提出孔隙度均一的三维多孔介质 THM 模 型,储层分为基岩和裂缝,裂缝区的渗透率具有各向 异性,以此模型优化裂缝区渗透率、流体注入压力、 注采井距等,实现热发电性能与成本控制的综合改 善。然而,均匀多孔介质模型没有考虑储层空间分布 上的非均质性,过于理想化,不能精确地表征压裂改 造后的储层渗流特征[15]。此外,另一种比较常用的方 法为规则裂缝或随机裂缝模型, Sun 等[]提出二维模 型中储层由岩石基质和规则裂缝组成,并以此模型对 地热储层中的流体流动、传热等特征进行了综合模 拟,通过敏感性分析研究了EGS采热的主控参数,结 果表明 THM 耦合效应对采热效率有重要影响。Xu 等^[2]提出由随机裂缝和岩石基质组成的模型,以此研 究 EGS 的热流耦合系统,将该模型应用于 Habanero 热

储层,对其采热过程进行模拟,应用结果表明该模型 是模拟工业规模地热储层传热的有效方法。Wang 等^[4]提出的 THM 模型由岩石基质块体和随机裂缝组 成,模拟包含三维随机裂缝的地热储层的长期地热生 产过程,并将其应用于澳大利亚的 Habanero EGS 项 目,评估了20a期间不同注入和生产压力下的采热 量,结果表明,通过适当控制注采压差,可以实现持续 稳定的供电。另外有学者利用单裂缝概念化模型研 究采热过程,即认为热储层是由基质岩体和水平单裂 缝组成或将裂缝简化为一维线段嵌入岩石基质网络 中, Yao 等^[16] 在三维热流单裂缝模型基础上, 研究区 域流动方向对采热的影响,结果表明,采热可持续性 随着区域流动方向和2井中心连线的夹角的增加而 增加。Li 等^[17]在THM 耦合单裂缝模型基础上进行开 发过程研究,发现高渗透率或大孔径会导致过早发生 热突破,因此要在流动和传热之间进行权衡。然而, 在这些模型中单一或者规则的裂缝分布过于理想,不 能体现储层中裂缝的真实情况;随机裂缝相对灵活, 但自由变量过多、模型数据量大、试验数据缺乏。

尽管已经开展了大量干热岩 EGS 多物理场耦合 的数值模拟工作,但由于改造后的渗透率通常极为复 杂,常规方法难以描述,因此准确地估计储层中的热 量提取过程仍然存在大量挑战。近年来, Xing 等^[8-9] 利用微震数据计算出地热储层的渗透率分布,为干 热岩开采设计了8井布局,模拟结果展示了地热储层 中流场和温度场随时间的演化。李庭樑等151结合地 质背景和压裂数据,计算出渗透率等水动力学参数的 分布,并对热储进行数值模拟,将其结果与分块均质 热储进行比较,结果表明热储的非均质性会导致 EGS 采热性能显著下降。Xu 等^[18]利用水力压裂过程 中记录的微震事件生成了裂缝模型,并将该方法应用 于 Habanero 储层, 证明了 Habanero 井之间的连通性。 Fang 等^[19] 分别利用基于立方定律的等效多孔介质方 法和离散裂缝网络方法估算压裂改造后的储层渗透 率,结果表明储层中渗透率最高的区域即微震最密集 的区域。以上研究表明水力压裂诱发微地震的分布 可以较为准确地表征储层改造后的渗透率,微地震分 布优势的方向也即储层中流体流动的优势路径。目 前利用微地震数据评估渗透率也存在不足,如网格分 布和震源精度的限制等。可通过优化网格划分、改善 定位方法等提高渗透率评估的准确性。

基于上述研究,本文以澳大利亚库珀盆地的 Habanero 热储为研究区,创新性地构建了微地震监测数 据与储层渗透率之间的等效关系并建立了不同的热 储模型,包括分区均质模型和非均质模型;利用自主 研发的多物理场耦合软件 PANDAS 对不同模型中渗 流场、温度场和生产井井底温度的变化等进行了数值 模拟、分析比较,探究采热性能的差异。

1 理论与方法

本文使用的模拟工具为自主研发的 PANDAS, 这是一种基于有限元和格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)的数值模拟程序;其中热-流 动耦合数值模拟模块^[20]将应用于 Habanero 地热储层 开发中的有限元模拟及评估研究。该模型基本假设为:

(1)干热岩储层中充满单相的饱和流体水,且流体在储层中的流动遵循达西定律;

(2)流体和岩石间的换热通过对流和传导实现;

(3)不考虑流体与矿物的物理化学反应。

 1.1 连续性方程 流体在多孔介质中的流动可以表示为:

$$\phi \beta_{\rm m} \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\beta_{\rm m} = \phi \beta_{\rm f} + \beta_{\rm r} (1 - \phi) \tag{2}$$

式中: *ϕ*——孔隙度;

 $\beta_{\rm m}$ ——综合压缩系数/Pa⁻¹;

 $\beta_{\rm f}$ 、 $\beta_{\rm r}$ —流体和基岩的压缩系数/Pa⁻¹;

P──流体压力/Pa;

$$\rho$$
——流体密度/(kg·m⁻³);

ν——流体流速/(m·s⁻¹)。

遵循达西定律的单相流体的流动控制方程为:

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu} (\nabla P - \rho \mathbf{g} \nabla D) \tag{3}$$

式中: k——多孔介质的渗透率/m²;

μ——流体的动力黏度/(Pa·s);

g—_重力加速度/(m·s⁻²);

D——深度/m。

 多孔介质中的对流-传导换热方程 多孔介质中基质和流体能量平衡方程分别为:

$$(1-\phi)(\rho C)_{\rm r}\frac{\partial T_{\rm r}}{\partial t} = (1-\phi)\nabla \cdot (\lambda_{\rm r}\nabla T_{\rm r}) \tag{4}$$

$$\phi(\rho C)_{\rm f} \frac{\partial T_{\rm f}}{\partial t} + (\rho C)_{\rm f} \mathbf{v} \cdot \nabla T_{\rm f} = \phi \nabla \cdot (\lambda_{\rm f} \nabla T_{\rm f}) \qquad (5)$$

式中:C-----比热/(J·kg⁻¹·K⁻¹); *λ*----导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹); *T*----温度/K; r---岩石基质;

f——流体。

从宏观角度出发, 假定 EGS 各阶段中局部处于热 平衡状态, 即 $T_r = T_f = T$ 。联立式(4)和式(5), 多孔介 质中的传导-对流换热控制方程为:

$$(\rho C)_{\rm m} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{\rm m} \nabla T) - (\rho C)_{\rm f} \nu \cdot \nabla T \tag{6}$$

$$(\rho C)_{\rm m} = (1 - \phi)(\rho C)_{\rm r} + \phi(\rho C)_{\rm f}$$
(7)

$$\lambda_{\rm m} = \phi \lambda_{\rm f} + (1 - \phi) \lambda_{\rm r} \tag{8}$$

式中:m——基质和流体的混合系统。

2 研究区概况

库珀盆地位于南澳大利亚东北部,如图1所示。 据资料显示,库珀盆地下方3500~4500m范围内埋 藏有大量的高温花岗岩,温度约为250°C^[21],是其他地 区相同深度花岗岩温度的2倍。花岗岩岩体上方覆 盖着约3500m厚的沉积盖层,其主要由低孔、低渗的 碎屑岩和煤系夹层组成^[12],是花岗岩基底天然的"绝 热屏障"。

Habanero 3 号井(H03)位于1 号井东北方向约 560 m 处,井深约 4 221 m。在 2008 年对 3 号井进行了水力压 裂^[22]。并对1 号井和3 号井进行了时长为 42 d 的闭环 流动测试。实测数据表明,1 号井井口压力为 44.5 MPa, 3 号井井口压力为 33.5 MPa,注采流量为 15.5 kg/s。

水力压裂诱发的微地震的空间分布表明存在呈 近水平结构的 Habanero 断层^[23]。测井资料表明,该断



层是构造成因,水力压裂重新激活并扩展了之前存在 的裂缝,扩大了储层高渗区域^[25]。本文将以库珀盆地 现场水力压裂及相关联通试验为基础,开展数值模拟 评估研究。

3 Habanero EGS 数值模型

3.1 三维数值模型

基于 Habanero 地热储层的地质构造特征及水力 压裂改造效果,建立了三维数值模型。该模型在 x, y 和 z 方向的模型尺寸分别为 1 200, 1 500, 500 m。模型 在水力压裂区划分较密,网格尺寸为 2.5 m,其他区域 的网格尺寸由压裂区向外逐渐变大,在 15~20 m之 间。模型计算深度为地下 4 000~4 500 m,如图 2(a) 所示。



图 2 分区均质模型和剖面图

Fig. 2 Homogeneous model (a) and homogeneous model profile view (b)

3.1.1 分区均质模型

根据库珀盆地现场资料及研究成果,将研究区简 化为从上至下分为3层的三维模型,如图2(b)所示。 上层的深度为4000~4245m,为未压裂的致密花岗岩; 中间层深度4245~4255m,厚度为10m,为孔隙度和 渗透率较高的改造区;下层的深度为4255~4500m, 为未压裂的致密花岗岩。

3.1.2 基于微地震数据的非均质模型

微震可以反映改造过程中岩石破裂发生的位置 及扩展范围,故本文利用已知地质信息、微震监测数 据构建 Habanero 非均质热储模型。本文的数据为 Geodynamics 公司在 Habanero 1号井水力压裂过程中 记录的诱发微震事件。研究表明,微震点的密集程度 可以用来表征储层内的渗透率分布,一般认为,微震 分布密集区域的渗透率要高于微震分布稀疏区域^[15]。 因此,本文基于 Habanero 热储区岩石破裂的机理,根 据微震点到模型中各个节点的距离建立了三维非均 质储层渗透率模型。

基于微地震数据的非均质模型使用的网格模型 与分区均质模型使用的网格相同。在本文的计算方 法中,渗透率是网格节点到微震点距离的指数函数, 各个节点处的渗透率由2部分组成:第1部分为初始 渗透率,第2部分通过计算各个微震事件到该节点的 距离进行评估。具体计算方法引自 Xing 等^[8]。在有 限元计算中对微震事件和渗透率计算节点的加权距 离评估:

$$K = K_0 + \sum_{i=1}^{n} A \cdot \exp(\beta_i)$$
(9)

$$\beta_i = -B_1 \cdot (d_{x_i})^2 - B_2 \cdot (d_{y_i})^2 - B_3 \cdot (d_{z_i})^2$$
(10)

式中: K——节点处的渗透率/m²;

*K*₀——初始渗透率/m²;

A 震级对渗透率的影响系数(此处 $A=1.0\times 10^{-15}$); d_x, d_y, d_z 考虑破裂面倾角影响的微震事

件与网格节点的距离;

B₁、B₂、B₃ 微震事件在 x、y、z 方向上影响范 围的参数。

3.2 模型参数

根据测井数据,库珀盆地在3500~5000m深度 范围内,初始温度和压力随深度而变化,温度梯度为 31°C/km,压力梯度为8.6 MPa/km。将模型上下表面 的压力和温度设置为恒定,上表面压力为71.8 MPa,温 度为240.1°C,下表面压力为76.1 MPa,温度为255.6°C。 根据 Llanos等^[12]和O'Sullivan等^[26]的研究,模型基于 所有侧面没有热量或质量的传递建立,因此模型四周 设置为封闭边界。

分区均质模型中除渗透率以外,其他的岩石物理 性质参考 Llanos 等^[12]的研究,如表 1 所示,在基于微 地震数据的非均质模型中,渗透率通过微震监测数据 进行计算,其他岩石物理性质参数与分区均质模型保 持一致。

在2个模型中,均使用水作为循环工作流体。在 模型初始状态时,假设储层中水的温度与其所处的围

表 1	分区均质模型中岩石物理性质参数	
表 1	分区均质模型中岩石物埋性质参数	

Table 1 Parameters of rock in the zonal homogenization model

区域	密度	比热	了附庄/07	导热系数	压缩系数
	$/(kg \cdot m^{-3})$	$/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	11际度/%	$/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$/(10^{-10} Pa^{-1})$
上层花岗岩	2 700	960	0.01	3.395	5.00
改造区	2 700	960	1.40	3.395	5.00
下层花岗岩	2 700	960	0.01	3.395	5.00

岩温度相同,注入工作流体温度为90℃。表2为循环 工作流体的物理性质参数。

表 2 循环工作流体的物理性质参数 Table 2 Parameters of the circulating fluid

			-		-
	密度	比热	导热系数	黏度	压缩系数
	$/(kg \cdot m^{-3})$	$/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	/(Pa·s)	$/(10^{-10} Pa^{-1})$
水	1 000	4 200	0.6	0.001	5.0

3.3 模型渗透率的确定

利用 2008 年 8 月进行的 Habanero 1 号井(H01,注 入井)与 Habanero 3 号井(H03,生产井)(图 3)的闭环 流动现场测试数据,对研究区渗透率进行校正。以现 场实测压力、流量数据为基础,确定模型中的井底压 力,调整模型中改造区的渗透率,并对比模拟流量与 实际流量。



H03 位于 H01 东北方向约 570 m 处。

3.3.1 分区均质模型渗透率

Habanero 地热储层是致密花岗岩体, 地层初始渗 透率低, 约为1.0×10⁻²⁰ m²。根据水力压裂产生的微震 点的空间分布, 结合 Llanos 等^[12]的研究, Habanero 地 热储层压裂后渗透率存在各向异性, y 方向和 x 方向 的渗透率之比为2:1, z 方向渗透率较低, 在此基础上 利用实测流量对渗透率进行调整。表 3 为在不同渗 透率下, 生产井中的模拟流量与实际流量的对比, 由 此可得, 压裂后改造区渗透率的最佳拟合值为 x 方 向 1.3×10⁻¹³ m², y 方向 2.6×10⁻¹³ m², z 方向 4.0×10⁻¹⁴ m², 10 m 厚的改造区以外渗透率均为 1.0×10⁻²⁰ m²。

Table 3 Simulated flow and actual flow of production wells in the homogeneous model with different permeabilities							
<u>>++-a</u> A		渗透率/m ²			掛削汰具/(3 1)	☆·珊·达县/(…31)	
试验	x	у	Ζ	中J HJ/ O	快扒流里((m ⁻ s ⁻)	头侧孤里/(m·s·)	
1	6.00×10 ⁻¹³	1.20×10^{-12}	4.00×10 ⁻¹⁴	42	0.074 9		
2	2.00×10^{-13}	4.00×10^{-13}	4.00×10^{-14}	42	0.023 8		
3	1.50×10^{-13}	3.00×10^{-13}	4.00×10^{-14}	42	0.017 6		
4	1.40×10^{-13}	2.80×10^{-13}	4.00×10^{-14}	42	0.016 4	0.015 5	
5	1.30×10^{-13}	2.60×10^{-13}	4.00×10^{-14}	42	0.015 2		
6	1.20×10^{-13}	2.40×10^{-13}	4.00×10^{-14}	42	0.014 0		
7	1.00×10^{-13}	2.00×10^{-13}	4.00×10^{-14}	42	0.011 6		

表 3 分区均质模型不同渗透率下生产井中的模拟流量与实际流量

3.3.2 非均质模型渗透率

在非均质模型中,通过调整相关参数,得到不同 渗透率下生产井中的模拟流量(表4),并与实际流量 进行对比。模型中渗透率的最佳拟合相关参数为 *B*₁=5.0×10⁻⁵、*B*₂=2.0×10⁻⁵、*B*₃=2.5(*B*₁、*B*₂、*B*₃是微震事 件在*x*、*y*、*z*方向上影响范围的权重参数,库珀盆地水 力压裂微震事件以水平分布为主,因此设置 Habanero 地热储层压裂效果对节点至微地震点 x、y 方向的距 离较为敏感)。该情况下,渗透率分布见图 4 和图 5, 图 4显示整体模型的渗透率的分布,图 5 为渗透率分 布的等值面图,主要显示水力压裂区的渗透率分布。

表 4 非均质模型不同渗透率相关参数下生产井中模拟流量与实际流量

Table 4 Simulated flow and actual flow of production wells in the heterogeneous model with different permeability related parameters

试验 一	渗透率计算相关系数			四十分司 / 1	措刊次具 ((31)	☆涮汰具((3 -=1)
	B_1	B_2	B_3	- hj hj/d	候拟流重/(m ⁻ s ⁻)	头侧流里/(m·s)
1	3.00×10 ⁻⁵	1.50×10 ⁻⁵	2.5	42	0.030 2	
2	4.00×10 ⁻⁵	1.50×10-5	2.5	42	0.029 3	
3	4.00×10 ⁻⁵	2.00×10-5	2.5	42	0.021 2	0.015 5
4	5.00×10 ⁻⁵	2.00×10-5	2.5	42	0.015 8	
5	5.00×10-5	2.50×10-5	2.5	42	0.008 6	





4 结果与讨论

4.1 流场

图 6(a)(d)是 2 种模型中深度为 4 250 m 截面的







流速分布,可以看出,2种渗透率模型中流速较大的 是2口井之间的连线及其附近的区域,说明储层内流 体流动的优势路径为两井之间的连通区域。对比 2种渗透率模型的平面流速,分区均质模型中该深度 截面流速较大区域的范围要比非均质模型更大。原 · 196 ·



Fig. 6 Velocity distribution of different models (the upper is the zonal homogeneous model and the bottom is the heterogeneous model)

因在于2种模型渗透率的不同,分区均质模型10m厚 改造区内是具有各向异性的均一分布渗透率,x方向1.30× 10⁻¹³ m²,y方向2.60×10⁻¹³ m²,z方向4.0×10⁻¹⁴ m²。非均 质模型中渗透率由微震事件及破裂面决定,如图7所 示,注入井附近渗透率最大,约为9.4×10⁻¹³ m²,从注入 井向生产井方向渗透率逐渐变小,在生产井附近渗透 率约为1.0×10⁻¹⁴ m²,这是因为微震事件发生的集中区 域为注入井附近,并由此向外延伸,在微震事件发生 较多的区域渗透率较高,储层中2井连线及其附近的 区域表现出流动优势,远离注入井的区域由于微震事 件较少,所以裂隙较少、渗透率较低,流速也小。非均 质模型中除注入井附近,其他位置渗透率要比分区均 质模型中低,因此分区均质模型井间流速大于非均质 模型。

由图 6(b)(e)可知,在垂直方向上,分区均质模型 的流动区域限于 10 m 厚的改造区内,而非均质模型在 深度方向上流体流动区域集中于该区域,但不限于 此,这是因为微震事件在垂向上有较大延伸。

4.2 温度场

温度分布等值面图,范围为90~230 ℃(图8),总 的来看,在初始运行阶段,冷流体自注入井进入压裂 改造区,由于与周围高温岩体进行了热交换,注入井 附近岩体温度接近注入温度90 ℃。随着注入流体的



Fig. 7 Permeability distribution at the section z=4 250 m in the heterogeneous model





增多,低温区(90~115℃)逐渐扩大,并沿优势流动通 道向生产井扩散。

对比来看,分区均质模型中的冷流体从注入井向 改造区中流动扩散,逐渐形成一个近似扁椭圆体的低 温区,近y方向上的低温区影响范围大于近x方向的 影响范围。在深度方向上,低温区范围基本限制在深度 4245~4255m的10m厚改造区内。

在非均质模型中,注入井两侧冷流体流动的影响 范围与均质模型相比,冷流体向着生产井流动的趋势 更加明显。近y方向上的低温区影响范围同样大于 近x方向的影响范围。但深度方向对比来看,低温区 影响范围不再局限于10m厚的范围。这是因为水力 压裂形成的微震事件在深度上的分布范围较广,微震 发生的区域内储层渗透率也随之变大。

4.3 采热性能

2种模型的生产井井底温度在 30 a 间的变化情况 见图 9(a)。分区均质模型 30 a 间温度变化趋势为前 期(0~7.9 a)保持不变,之后(7.9~30 a)缓慢下降,非 均质模型 30 a 间温度变化趋势为前期(0~8.5 a)保持 不变,之后(8.5~30 a)快速下降,且下降速度逐渐变慢。 系统运行到 30 a,分区均质模型温度下降到 220.9 °C, 下降了 26.9 °C,非均质模型温度下降到 170.0 °C,下降 了 77.8 °C。

对比来看,2种模型生产并初始温度保持不变的 时间十分接近;后期分区均质模型温度下降少,非均 质模型下降多。由此分析,分区均质模型略早下降 0.6 a,即热突破时间稍微早一些,这是分区均质模型 生产井附近渗透率比非均质模型大导致的。非均质 模型温度下降幅度比分区均质模型大,下降速度比非





均质模型快,这是由于非均质模型的高渗区集中于 2口井连通区域内,使得非均质模型中优势流动通道 显著,所以温度下降更快。

2种模型单位质量流体采热量的对比关系,即采 出热量与采出质量的比值^[27],见图 9(b)。分区均质模 型和非均质模型在储层模型运行初期单位质量流体 采热量比较接近,约为1.04 MJ/kg,分区均质模型初始 时间略高。之后随着生产井温度的快速下降,2种模 型的单位质量流体采热量也迅速降低,对比来看,两 种模型单位质量流体采热量下降发生的时间接近,分 区均质模型采热量下降速度很慢,在模型计算到30 a 时,单位质量流体采热量降低至1.003 MJ/kg,降低了 3.74%;非均质模型采热量下降速度较快,在模型计算 到 30 a 时,采热量降低至 0.906 MJ/kg,降低了 12.72%。 从采热量对比看,分区均质模型在热储层运行期间采 热量变化相对更稳定,非均质模型采热量降幅较大。

对比生产井温度曲线和采热量曲线,分区均质模型的模拟结果相比于非均质模型结果来说,温度下降幅度小、单位质量流体采热量高,但由微震分布可知实际储层中的渗透率分布并不均匀,2井之间优势流动通道效应显著,因此分区均质模型的模拟单位质量流体采热量高于实际单位质量流体采热量。

原始地热储层压裂后,激活并扩展了先存裂缝, 在水压足够高时产生新的裂缝,提高了储层中尤其是 近井区域的渗透率,形成优势流动通道,改善了储层 连通性。此外,水力压裂后储层渗透率具有显著的渗 透率各向异性,是影响干热岩开发动态的重要因素之 一^[28]。相比分区均质模型,非均质模型中的优势流动 通道、渗透率各向异性更加明显,更加符合压裂后的 储层实际情况,因此在实际应用中,非均质模型的模 拟结果对实际工程更具参考意义。

5 结论

(1)水力压裂诱发的微震事件集中于近井区域, 导致该区渗透率增高,因此非均质模型中优势流动通 道显著,冷流体从注入井更快流向生产井,温度下降 速度快;分区均质模型中优势流动通道效应较弱,温 度下降速度慢。

(2)深度方向上,分区均质模型仅限于10m厚的 压裂改造区内流动;非均质模型由于微震事件在深度 方向上有较大延伸,流体流动区域集中于该层但不限 于该范围。

(3)分区均质模型在热储层开采模拟期间采热量 变化相对稳定,降幅为3.74%;非均质模型单位质量流 体采热量降幅较大,为12.72%。

(4)对比2种模型的模拟结果,分区均质模型的生产并温度下降幅度小、单位质量流体采热量高。但由微震监测数据可知,实际储层中的渗透率分布不均,

优势流动通道效应显著,分区均质模型的模拟采热量 高于实际采热量,因此非均质模型的模拟结果在干热 岩资源实际开发过程中更具指导意义。

参考文献(References):

- [1] SUN Z X, ZHANG X, XU Y, et al. Numerical simulation of the heat extraction in EGS with thermal-hydraulicmechanical coupling method based on discrete fractures model[J]. Energy, 2017, 120: 20 – 33.
- XU C S, DOWD P A, TIAN Z F. A simplified coupled hydro-thermal model for enhanced geothermal systems [J].
 Applied Energy, 2015, 140: 135 - 145.
- [3] 许天福,张炜.增强型地热工程国际发展和我国前景展望[J].石油科学通报,2016,1(1):38-44.[XU Tianfu, ZHANG Wei. Enhanced geothermal systems: International developments and China's prospects[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1):38 44. (in Chinese with English abstract)]
- [4] WANG Y, LI T, CHEN Y, et al. A three-dimensional thermo-hydro-mechanical coupled model for enhanced geothermal systems (EGS) embedded with discrete fracture networks[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 356: 465 – 489.
- [5] 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.
- [6] JIANG F M, CHEN J L, HUANG W B, et al. A threedimensional transient model for EGS subsurface thermohydraulic process [J]. Energy, 2014, 72: 300 – 310.
- [7] ALIYU M D, ARCHER R A. Numerical simulation of multifracture HDR geothermal reservoirs[J]. Renewable Energy, 2021, 164: 541 - 555.
- [8] 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)]
- [9] XING H L, GAO J, ZHANG J, et al. Towards an integrated simulator for enhanced geothermal reservoirs
 [C]//35th Stanford Geotherma Workshop. Bali: Indonesia, 2010: 25 - 29.
- [10] XING H L, LIU Y, GAO J F, et al. Recent development in numerical simulation of enhanced geothermal reservoirs

[J]. Journal of Earth Science, 2015, 26(1): 28 – 36.

- [11] AYLING B F, HOGARTH R A, ROSE P E. Tracer testing at the Habanero EGS site, central Australia[J]. Geothermics, 2016, 63: 15 – 26.
- [12] LLANOS E M, ZARROUK S J, HOGARTH R A. Numerical model of the Habanero geothermal reservoir, Australia[J]. Geothermics, 2015, 53: 308 – 319.
- [13] HOGARTH, BOUR, DANIEL. Flow Performance of the Habanero EGS Closed Loop[R]. Melbourne: World Geothermal Congress, 2015.
- [14] SAMIN M Y, FARAMARZI A, JEFFERSON I, et al. A hybrid optimisation approach to improve long-term performance of enhanced geothermal system (EGS) reservoirs[J]. Renewable Energy, 2019, 134: 379 – 389.
- [15] 李庭樑,黄文博,曹文炅,等.EGS热储基于微震数据 反演模化及其采热性能分析[J].化工学报, 2018, 69(12): 5001 - 5010. [LI Tingliang, HUANG Wenbo, CAO Wenjiong, et al. Inverse modeling of EGS heat reservoir based on micro-seismic data and analysis of its heat recovery performance[J]. CIESC Journal, 2018, 69(12): 5001 - 5010. (in Chinese with English abstract)]
- [16] YAO C, SHAO Y L, YANG J H. Numerical investigation on the influence of areal flow on EGS thermal exploitation based on the 3-D T-H single fracture model[J]. Energies, 2018, 11(11): 1 – 19.
- [17] LI T Y, HAN D X, YANG F S, et al. Modeling study of the thermal-hydraulic-mechanical coupling process for EGS based on the framework of EDFM and XFEM[J]. Geothermics, 2021, 89: 101953.
- XU C, DOWD P, MOHAIS R. Connectivity analysis of the Habanero enhanced geothermal system[R]. Stanford: The 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2012.
- [19] FANG Y, ELSWORTH D, CLADOUHOS T T. Reservoir permeability mapping using microearthquake data[J].
 Geothermics, 2018, 72: 83 - 100.
- [20] XING H L. Finite element simulation of transient geothermal flow in extremely heterogeneous fractured

porous media[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 144: 168 - 178.

- [21] WYBORN D. Update of development of the geothermal field in the granite at innamincka, south Australia[R]. Bali: World Geothermal Congress, 2012.
- [22] XU C S, DOWD P, LI Q. Carbon sequestration potential of the Habanero reservoir when carbon dioxide is used as the heat exchange fluid[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(1): 50 – 59.
- [23] BAISCH S, WEIDLER R, VOROS R, et al. Induced seismicity during the stimulation of a geothermal HFR reservoir in the Cooper Basin, Australia[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(6): 2242 – 2256.
- [24] HILLIS R, HAND M, MILDREN S, et al. Hot dry rock geothermal exploration in Australia[J]. ASEG Extended Abstracts, 2004, 2004(1): 1 – 4.
- BAISCH S, VOROS R, WEIDLER R, et al. Investigation of fault mechanisms during geothermal reservoir stimulation experiments in the cooper basin, Australia[J].
 Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(1): 148 158.
- [26] O'SULLIVAN M J, O'SULLIVAN J P. Reservoir modeling and simulation for geothermal resource characterization and evaluation[C]//Geothermal Power Generation. Amsterdam: Elsevier, 2016: 165 – 199.
- [27] 白斌. THM耦合作用对储层孔渗参数影响及地热系 统优化研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2018.
 [BAI Bin. Research on hydrodynamic parameters in rock reservoir and optimization of geothermal system with THM coupling[D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [28] XU G X, WANG S Z. Numerical investigation of fluid flow and heat transfer in a two dimensional anisotropic EGS model[C]//International Conference on Industrial Engineering & Applications. Toronto: IEEE, 2017: 372 – 375.

编辑:张若琳