

The Application Study of Fluid Dynamic Numerical Simulation Methods on Enhanced Geothermal System

Cheng Gao¹, Bingyu Ji¹, Rusheng Zhang¹, Jun Niu¹, Le Zhang²

¹Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing

²Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing

Email: gaocheng.syky@sinopec.com

Received: May 22nd, 2017; accepted: Jun. 5th, 2017; published: Jun. 8th, 2017

Abstract

Enhanced geothermal system (EGS) is a kind of important geothermal resources developing pattern which owns rich resources. EGS has been received great and popular attention from international community and research institutes since it is proposed. This paper conducts analytical research from pore scale simulation method (PSM), core scale simulation method (CSM) and filed scale simulation method (FSM) to illustrate current application status, technical advantage and existing problems. Finally, it is suggested that PSM should be used as the primary model for the EGS simulation. This work pointed out research direction for EGS simulation area.

Keywords

EGS, Fluid Dynamic Numerical Simulation, Pore Scale, Core Scale, Filed Scale

流体力学数值模拟方法在增强型地热系统的应用分析

高 诚¹, 计秉玉¹, 张汝生¹, 牛 骏¹, 张 乐²

¹中国石化石油勘探开发研究院, 北京

²清华大学热能工程系, 北京

Email: gaocheng.syky@sinopec.com

收稿日期: 2017年5月22日; 录用日期: 2017年6月5日; 发布日期: 2017年6月8日

文章引用: 高诚, 计秉玉, 张汝生, 牛骏, 张乐. 流体力学数值模拟方法在增强型地热系统的应用分析[J]. 流体动力学, 2017, 5(2): 47-55. <https://doi.org/10.12677/ijfd.2017.52006>

摘要

增强型地热系统(EGS)作为地热资源重要的开发形式,储量十分丰富,开发利用前景广阔,所以EGS的开发利用引起国际社会和研究领域的广泛关注。本文从孔隙尺度(PSM)、岩心尺度(CSM)到场地尺度(FSM)3种流体力学模拟方法展开分析,阐述了不同数值方法在增强型地热系统的应用现状、技术优势和存在的问题。认为可将PSM方法作为基础模型,3种不同尺度的数值模拟方法有机协同地联系在一起,为基于增强型地热系统的数值模拟方法研究指明了方向。

关键词

增强型地热系统,流体力学数值模拟,孔隙尺度,岩心尺度,场地尺度

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

近年来,日益增长的能源需求和备受重视的环境问题使得利用清洁可再生能源成为国家经济健康可持续发展的的重要途径。地热能作为一种基本的清洁可再生能源,是普遍存在于地球内部岩体和天然流体中的热量,是地球内部广泛存在的清洁能源,对于缓解我国能源压力、减少污染排放具有重要的作用。我国地热能资源储量丰富,可分为浅层地温能、水热型地热能 and 干热岩三种类型[1]。我国对于浅层地温能和水热型地热能的资源利用较早,而干热岩作为一种普遍埋藏于地表深3 km至10 km、温度150℃~650℃、几乎没有水或者蒸汽的热岩体,分布几乎遍布全球,资源储量十分丰富。就我国而言,大陆区域3 km至10 km深处的干热岩储量为 2.5×10^{25} 焦耳,即使只开发2%,也是我国2010年能源消费总量的5300倍[1],开发利用前景广阔。所以干热岩的开发利用吸引了越来越多的国际社会和研究领域的关注。

作为开发利用干热岩资源的重要技术,增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems,缩写为EGS)为了从低渗透性和低孔隙率的地热储层中提取具有一定经济效益的热能,通过一定的技术构建了工程储层[2]。EGS具体的开发原理和过程是通过一定的资源开发评价后进行开发区域定位后,在地表往地层深处打注入井,而后向井中注入高压水,对岩层进行水力压裂,使得没有天然裂隙或者天然裂隙很小岩层产生很多裂隙,裂隙不断发展并互相连通成为裂隙系统,即人工热储,作为后续采热阶段换热工质的流通通道。然后在距离注入井合理距离的位置上钻一口井或者几口井,并与人工热储连通,作为产出井收集换热工质从热储中带出的热量。在人工热储构造完成后进入地热采热阶段。通常水作为换热工质通过注入井注入到岩层中,温度较低的换热工质进入到高温裂隙岩层中流动并与周围岩层进行换热。通过热储被加热后的流体通过产出井到达地面进行发电或者用于综合利用。高温流体的热量被利用后温度降低再重新回注到注入井中进行循环利用。增强型地热系统的整个过程如图1所示。

1974年,美国Los Alamos国家实验室在新墨西哥州的芬顿山开始最早的干热岩研究,并建成世界上第一座高温岩体发电站。1993年中国国家地震局在北京房山区进行了干热岩发电的研究试验工作。水通常作为干热岩开采的流动换热工质,随着温度效应日益严重,2000年提出了用CO₂代替水作为增强型地

热系统中的流动换热工质，附加的 CO_2 封存的环境效益[4]。

詹麒[5]总结了国内外地热资源开发利用中存在的主要问题：一是人们对地热产业和地热资源缺乏科学的认识，导致地热资源开发利用水平低，存在浪费资源等问题；二是开发不当容易破坏和污染环境(如地面沉降、热污染、地温变化等问题)。地热系统数值模拟技术是解决以上两个问题的关键方法，也是实现地热系统的精细化、科学化、高效化开发的主要工具。因此，地热系统数值模拟技术已经成为国外知名地热公司致力发展的技术，现有增强型地热系统中的多物理过程的主要研究工具主要有 TOUGH2、STARS、FEHM、CMG 和 PetraSim 等软件，表 1 展示了近几年开展的项目。

增强型地热系统中涉及流动、传热、应力、化学等多种物理过程，而且各种物理过程之间相互作用。地层岩体的温度变化产生热应力，同时应力场中应力变化贮存的能量会影响到温度场，岩石应力达到一定程度会造成岩层渗透率的变化，进而影响到岩层中的渗流场。地层中的流体通过孔隙压力作用到岩石以引起岩石应力场的变化，同时流体渗流换热会带走岩石的热量，同时流体换热过程中温度的变化造成的流体粘度的变化影响到流体的流动状态。

总而言之，增强型地热系统中的多物理过程相互影响，采热工质在储层中的流动采热过程是一个复杂的热 - 流 - 力 - 化学耦合过程。如何实现数值模拟技术成为地热系统的重要开发工具，就要从孔隙尺度数值模拟到岩心尺度数值模拟，最后延伸到场地尺度数值模拟，形成全尺度封闭式的数值模拟技术。本文将从孔隙尺度数值模拟技术、岩心尺度数值模拟技术和场地尺度数值模拟技术展开讨论，最后归纳总结了增强型地热系统全尺度数值模拟研究路线框图，为下一步的数值模拟研究提供了思路 and 方向。

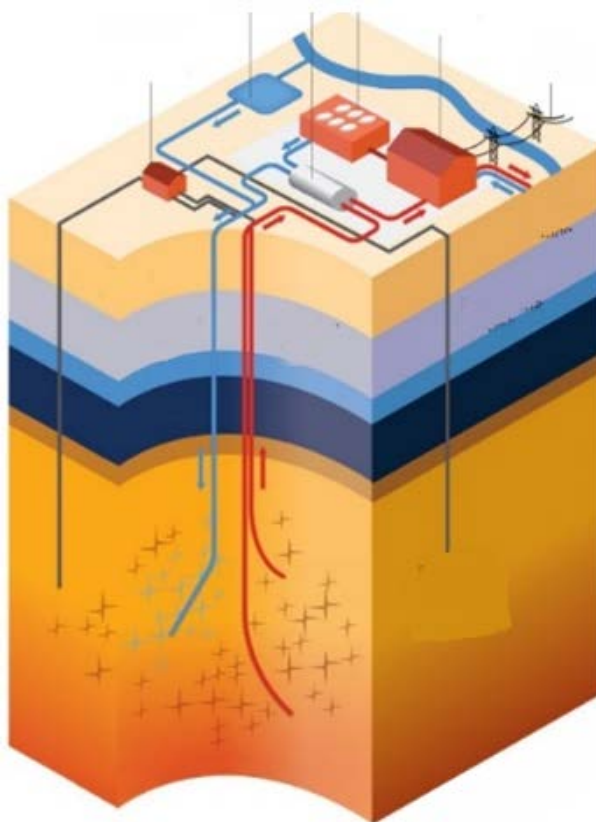


Figure 1. Schematic of Enhanced Geothermal System [3]

图 1. 增强型地热系统(EGS)示意图[3]

Table 1. Numerical simulation programs conducted by international geothermal companies
表 1. 国外地热公司开展的数值模拟技术

时间与公司	项目名称	主要结论
2010年6月 北加州电力公司	盖瑟尔色区块地热系统 一体化数值模拟	使用 TOUGH2、STARS、FEHM 储层模拟软件耦合 THERMOFLEX 井筒模拟软件进行计算
2015年 冰岛国家电力公司	基于 Hágöngur 地热区块的 数值模拟技术	使用 TOUGH2 和 PetraSim 软件耦合计算
2016年2月 印尼志高能源公司	印尼 Muara Laboh 地区的热储模拟	使用 TOUGH2, PetraSim 软件进行热储耦合井筒的 一体化模拟

2. 孔隙尺度数值模拟技术

孔隙尺度数值模拟技术(Pore Scale Method, PSM)常用的计算方法是格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method), LBM 方法是近年来发展最迅速的介观模拟方法,具有双重特性,即微观尺度的望远镜和宏观尺度的显微镜,进而成为了从宏观到微观的多尺度、跨尺度耦合计算的桥梁。该方法由流体粒子的离散速度集合、格子结构和演化方程 3 大要素组成。LBM 方法易于编程、并行效率高、可处理复杂集合边界的问题,易于模拟多孔介质中的流体流动换热等问题,特别是该方法还没有连续介质条件的限制,对于天然微尺度裂缝、孔隙内的渗流问题能够精确描述。LBM 方程如式(1)所示

$$(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \delta t, t + \delta t) - f_i(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)] + \delta t F_i(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

其中, $f_i(\mathbf{x}, t)$ 是表征流体粒子在 (\mathbf{x}, t) 位置 i 方向的分子数目的分布函数, δt 是时间步长, τ 是表征流体粘度的弛豫时间, $F_i(\mathbf{x}, t)$ 是离散速度空间的外力项, \mathbf{e}_i 是离散的速度矢量。

澳大利亚悉尼大学 Mora 等人[6]使用 LBM 方法研究了地热系统的天然裂隙内的渗流换热规律,结果表明 LBM 可以较好地模拟考虑渗流、温度、应力、化学反应三场耦合情况。印尼万隆大学 Anisofira 和 Latief [7]使用 LBM 开展了热储岩石渗透率的模拟计算,研究结果表明使用 LBM 方法计算得到的地热岩石心渗透率与常规的 Kozeny-Carman 公式预测的渗透率更为精确,能够更好体现热储的非均质性。

目前使用 LBM 方法对于增强型地热系统孔隙尺度的数值模拟还比较少,因为增强型地热系统的天然裂缝和孔喉尺寸都是纳米级别,这与微尺度流动的壁面效应比较复杂,物理图像不清晰有关。这也是我们下一步要进行研究的重点。

3. 岩心尺度数值模拟技术

换热工质在单个裂隙内的对流换热系数是裂隙网络模型和等效多孔介质模型的基本参数,使用岩心尺度数值模拟技术(Core Scale Method, CSM)研究单个岩石裂隙的流动换热规律是完善裂隙网络模型和多孔介质模型的基础和前提。若含有裂隙的基质岩石的渗透率很小,裂隙壁面可以看作不可渗透的边界,如图 2(a)。1951 年, Lomize [8]提出了描述裂隙内水渗流的平板模型,建立了著名的裂隙水力学定律,即

$$q = \frac{d^3}{12} \frac{\rho}{\mu} \frac{\Delta p}{L} \quad (2)$$

结合 Darcy 定律式和式(1)可以得到不可渗透裂隙的渗透率与裂隙开度的关系式。

$$K = \frac{d^2}{12} \quad (3)$$

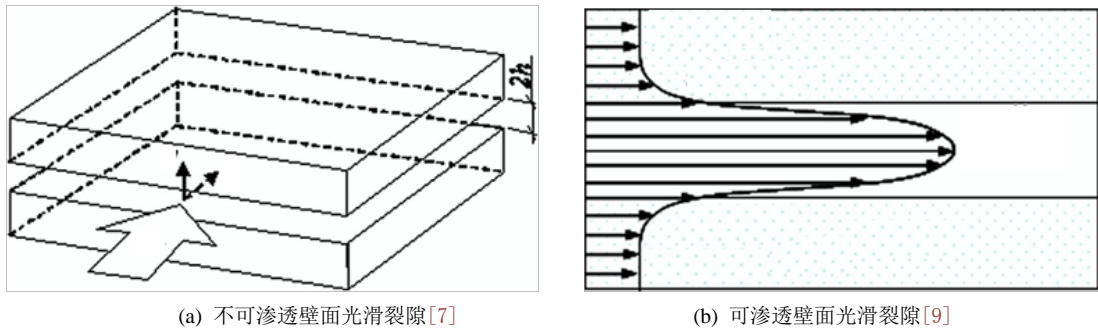


Figure 2. Schematic of features with permeable wall and impermeable wall
图 2. 具有不可渗透壁面和可渗透壁面的光滑裂隙

对于岩石基质渗透率较大的情况，裂隙和基质孔隙之间会存在质量和能量的交换。可渗透壁面的特性会对裂隙内的流动换热产生影响，如图 2(b)所示。使用 LBM 方法和常规求解 N-S 模型方法均可用于解决增强型地热系统岩心尺度的数值模拟。

4. 场地尺度数值模拟技术

为了更好地设计和预测增强型换热系统的运行特性，促进增强型地热系统的大规模商业应用，研究者通常针对包括注入井、储层和产出井的整个系统进行场地规模数值模拟(Files Scale Method, FSM)，采用已有计算程序可以对储层内的热-流-力-化学耦合作用进行数值模拟。增强型地热系统中经过压裂后的人工热储裂隙交错贯通，流通通道复杂。针对采热工质水的问题，已有的研究将复杂的储层裂隙结构简化为单一裂隙[10]、平行裂隙群[11]、裂隙网络[12]、等效多孔介质[13]四种物理模型，如图 3 所示。

目前 FSM 常用的是 Darcy-Brinkman-Forchheimer 模型，该模型在 Darcy 定律的基础上考虑了流动惯性、粘性耗散和空间孔隙率变化的作用，如式(4)所示

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\nabla(\rho_f \mathbf{u} \cdot \mathbf{u})}{\varepsilon} = -\nabla(\varepsilon p) - \frac{\varepsilon \mu_f}{K} \mathbf{u} - \frac{\varepsilon c_F \rho_f}{\sqrt{K}} |\mathbf{u}| \mathbf{u} + \nabla(\mu_e \nabla \mathbf{u}) \quad (4)$$

Cheng 和 Ghassemi 等[10] [14]在垂直于流动方向的裂隙内流体温度相同，并且和裂隙-岩石壁面温度相同假设的基础上，得到常物性工质在干热岩储层内的二维单一裂隙、三维平面裂隙内换热的积分方程解。Gringarten 等[11]得到储层内冷水从下部流过平行竖直裂隙被加热后的出口热水温度的理论解，分析了裂隙间距、裂隙个数对水出口温度和发电量的影响。Mohais 等[15]将增强型地热系统等效为注入井、具有可渗透壁面的单一水平裂隙和产出井三部分，采用相似解和摄动展开的方法得到具有可渗透壁面裂隙内的速度分布和温度分布，分析了低雷诺数($Re < 7$)下 Beavers-Joseph 滑移边界条件及其重要参数对裂隙内速度分布和温度分布的影响。Fox 等[16]采用格林函数法得到在交替进行采热和恢复的过程中，含有单个裂隙的理想储层内的传热效应的理论解，并与 TOUGH2 软件计算的单个裂隙和多个裂隙结果进行对比分析，多裂隙 EGS 储层更有能力保证较高的出口流体温度。上述的耦合岩石壁面的单一裂隙内的流动换热问题大多基于沿流动方向流体温度和裂隙-岩石交界面温度相同的基本假设，也即局部热平衡的假设。Lu 和 Xiang [17]在已有研究的基础上采用裂隙内流体和岩石壁面对流换热系数描述一维假设下的流体温度和岩石壁面的热量交换，分析了单一裂隙内局部非热平衡效应对裂隙出口流体温度的影响，当对流换热系数越小，储层岩石热容和导热系数越大，裂隙内流体和岩石壁面的局部非热平衡效应越明显。Zeng 等[18]针对 Desert Peak 地热场地的 EGS 项目，构建单一竖直裂隙联通注入井和产出井的数值计算模型，采用 TOUGH2-EOS1 程序计算并分析了裂隙孔隙率、裂隙渗透率、岩层导热系数、工质水的流量和

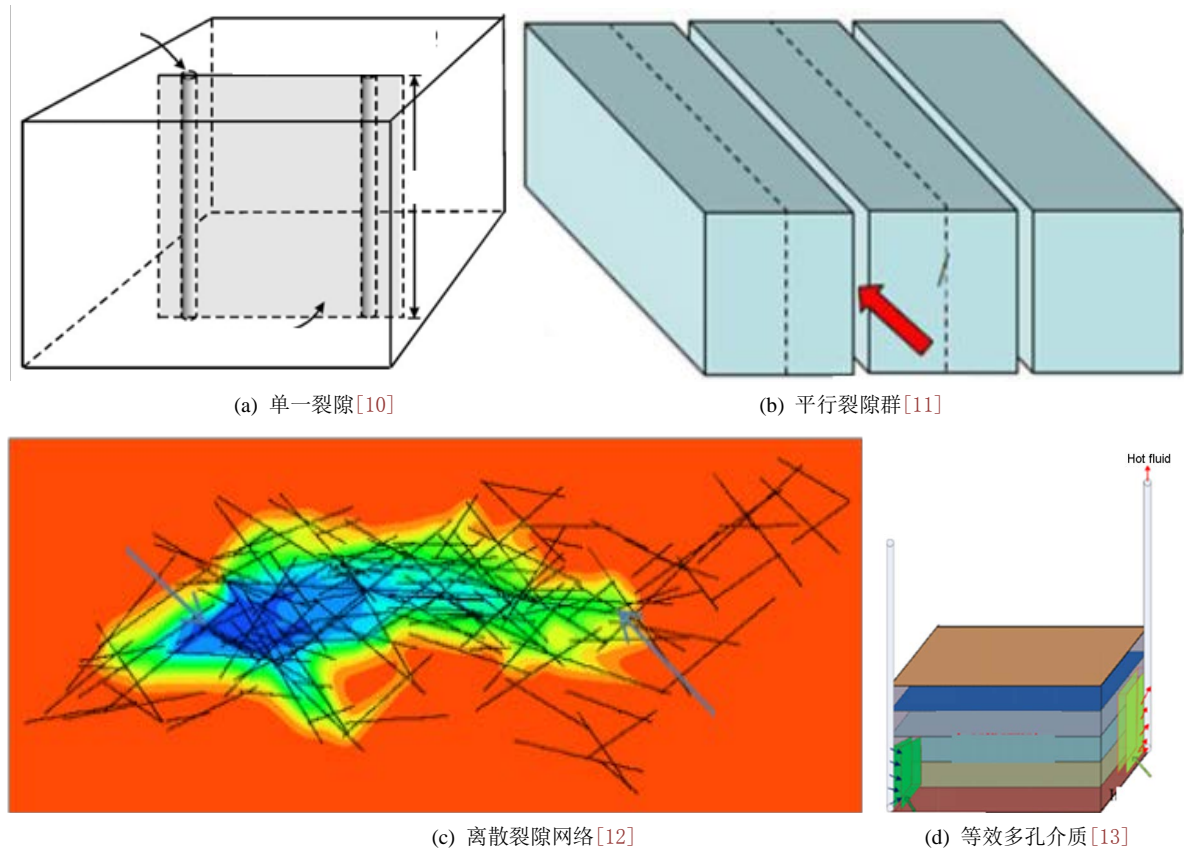


Figure 3. Research methods on geothermal reservoir
图 3. 热储的研究方法

注入温度等参数对电能产量的影响。

将增强型地热系统的储层简化为单一裂隙或者平行裂隙的研究更侧重于获得储层裂隙内流动换热的理论解，分析裂隙宽度、裂隙间距等基础参数对于系统产出温度的影响。为了建立更为符合实际 EGS 场地数据的数学物理模型，更好地指导和预测运行 EGS 运行特性，离散裂隙网络模型能够根据实地测量得到的裂隙观测数据，通过计算机处理建立三维裂隙网络的几何模型，是模拟采热工质在裂隙网络中渗流和换热过程的基础。离散裂隙网络模型能够详细地描述压裂后储层内裂隙联通构成的真实通道，但是计算量大也是其不可避免的缺点[19]。Witherspoon 等[20]指出裂隙网络模型中裂隙内的流动特性可以采用平行平板模型的立方定律近似。对于裂隙网络模型中的传热模型，陈等人[21]采用裂隙水温度和裂隙表面岩石温度相同的假设，在建立的二维离散裂隙网络模型中加入裂隙内渗流和裂隙-岩石传热模型，实现了低温水通过高温岩石内裂隙网络被加热的过程的数值模拟。Kolditz 和 Clauser [22]根据裂隙几何尺寸、渗透率、热源项等参数构建三维裂隙网络和多孔基质的耦合模型，采用 Darcy 定律和无源项能量方程分别对多孔基质和裂隙内的层流流动和传热进行描述。建立的裂隙网络模型对位于 Rosemanowes 的干热岩场地的 900 天测试进行了数值模拟，计算结果和实验数据较好吻合。Shaik 等[23]根据裂隙开度、裂隙密度和方位建立裂隙网络模型，裂隙内流体和岩石基体之间的换热采用对流换热系数描述，计算结果表明裂隙内流体和岩石之间的对流换热系数对于储层出口流体温度和岩石温度降低具有重要影响。

实际增强型地热系统储层中裂隙网络复杂，根据储层观测数据建立的相应储层的裂隙网络模型，虽然能够较好地反映储层裂隙网络内的流动，但是对于压裂较为充分，裂隙交错复杂的储层，模型建立困难而且计算量大。将储层内复杂的裂隙网络采用体积平均的方法等效为具有相同渗透性能和传热性能的

多孔介质, 采用多孔介质流动换热的控制方程来描述压裂后储层内流动换热的过程, 此研究方法也被许多研究者应用到水-EGS [24] [25] [26] [27] [28]的场地数值研究中。Bataille 等[24]研究了水的自然对流在增强型地热系统储层中竖直裂隙区域内流动传热的影响, 结果表明不考虑大渗透率裂隙区域中的自然对流, 流体产出温度将大大降低。Blocher 等[25]以德国 Groß Schonebeck EGS 真实岩层参数构建三维储层流动换热模型, 该模型考虑了采热工质水的物理性质随矿物饱和度、温度和压力的变化。国内研究机构清华大学、广州能源所、天津大学和吉林大学等采用等效多孔介质的研究方法分别对德国 Groß Schonebeck 地热项目、美国 Desert Peak 地热项目、我国松辽盆地和大庆徐家围子地热项目进行了场地规模的数值模拟以及采热量和发电量的预测。

已有的增强型地热系统场地规模数值模拟的研究大多假设岩层内岩石和裂隙孔隙内的流体的局部温度相同, 即采用局部热平衡模型。但是增强型地热系统中岩层内部固体骨架和流体之间的温差是否可以忽略, 采用局部热平衡模型是否合理, 是我们值得关注的重点和下一步研究的重点。

5. 结论与展望

在增强型地热系统中, 涉及尺寸从孔隙尺度(微纳米级别的天然裂缝), 到岩心尺度(微米到毫米级别), 再到场地尺度(毫米到米/千米级别), 跨越了 6~9 个数量级。流动换热规律从非达西流到达西流, 从微尺度换热到常规尺度的换热。如何将纳米尺度得到的机理性的认识和结果反映到宏观尺度人们更为关心的问题呢? 通常人们更为熟悉的是岩心尺度以上的问题。

本文提出, 借助岩心的微观结构, 使用孔隙尺度数值模拟方法计算岩心尺度上的渗透率、换热系数与孔隙度之间的关系, 并根据相容性条件借助裂缝密度等关键参数推导到场地尺度上渗流和换热的控制方程, 可以得到尺度升级后的表观渗透率和换热系数。同时, 对于非均质的增强型地热系统, 表观渗透率和换热系数的表达形式会在尺度升级过程中发生变化。

目前还没有关于增强型地热系统的尺度升级方面的数值模拟的文献。概括起来, PSM 方法、CSM 方法和 FSM 方法在处理增强型地热系统数值模拟方面各有千秋。其中, CSM 可作为 PSM 结果尺度升级到 FSM 的有效载体, 又能很方便的将 PSM 计算得到的结果以及孔渗数据溶入其中, 从而使得 FSM 方法的计算效率更高。因此, 使用尺度升级的计算方法, 有助于深刻认识增强型地热系统的富集和成藏机制, 从而更加合理、准确地评价增强型地热系统的资源潜力。

参考文献 (References)

- [1] Wang, G.L., Li, K.W., Wen, D.G., *et al.* (2013) Assessment of Geothermal Resources in China. *Proceedings of Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford.
- [2] Tester, J.W., Anderson, B.J., Batchelor, A.S., Blackwell, D.D., Di Pippo, R., Drake, E.M., Garnish, J., Livesay, B., Moore, M.C., Nichols, K., Petty, S., Toksoz, M.N. and Veatch, R.W. (2006) The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century, Massachusetts Institute of Technology, DOE Contract DE-AC07-05ID14517 Final Report.
- [3] Huang, S.P. (2012) Geothermal Energy in China. *Nature Climate Change*, **2**, 557-560. <https://doi.org/10.1038/nclimate1598>
- [4] Brown, D.W. (2000) A Hot Dry Rock Geothermal Energy Concept Utilizing Supercritical CO₂ Instead of Water. *Proceedings of Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford.
- [5] 詹麒. 国内外地热开发利用现状浅析[J]. 理论月刊, 2009(7): 71-75.
- [6] Mora, P., Wang, Y.C. and Alonso-Marroquin, F. (2015) Lattice Solid/Boltzmann Microscopic Model to Simulate Solid/Fluid Systems—A Tool to Study Creation of Fluid Flow Networks for Viable Deep Geothermal Energy. *Journal of Earth Science*, **26**, 11-19. <https://doi.org/10.1007/s12583-015-0516-0>
- [7] Anissofira, A. and Latief, F.D.E. (2015) Permeability Estimation of Crack Type and Granular Type of Pore Space in a Geothermal Reservoir Using Lattice Boltzmann Method and Kozeny-Carman Relation. *Proceedings World Geo-*

thermal Congress.

- [8] Lomize, G.M. (1951) Flow in Fractured Rocks. Gesemergoizdat, Moscow.
- [9] Berman, A.S. (1953) Laminar Flow in Channels with Porous Walls. *Journal of Applied Physics*, **24**, 1232-1235. <https://doi.org/10.1063/1.1721476>
- [10] Cheng, A.H.D., Ghassemi, A. and Detournay, E. (2001) Integral Equation Solution of Heat Extraction from a Fracture in Hot Dry Rock. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **25**, 1327-1338. <https://doi.org/10.1002/nag.182>
- [11] Gringarten, A.C., Witherspoon, P.A. and Ohnishi, Y. (1975) Theory of Heat Extraction from Hot Dry Rock. *Journal of Geophysical Research*, **80**, 1120-1124. <https://doi.org/10.1029/JB080i008p01120>
- [12] Doe, T., McLaren, R. and Dershowitz, W. (2014) Discrete Fracture Network Simulations of Enhanced Geothermal Systems. *Proceedings of Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*, 24-26 February 2014, Stanford, California.
- [13] Luo, F., Xu, R.N. and Jiang, P.X. (2014) Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Doublet Enhanced Geothermal System with CO₂ as the Working Fluid (CO₂-EGS). *Energy*, **64**, 307-322. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.048>
- [14] Ghassemi, A., Tarasovs, S. and Cheng, A.H.-D. (2003) An Integral Equation Solution for Three-Dimensional Heat Extraction from Planar Fracture in Hot Dry Rock. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **27**, 989-1004. <https://doi.org/10.1002/nag.308>
- [15] Mohais, R., Xu, C.S. and Dowd, P. (2011) Fluid Flow and Heat Transfer within a Single Horizontal Fracture in an Enhanced Geothermal System. *Journal of Heat Transfer*, **133**, 40-45. <https://doi.org/10.1115/1.4004369>
- [16] Fox, D.B., Sutter, D., Beckers, K.F., Lukawski, M.Z., Koch, D.L., Anderson, B.J., *et al.* (2013) Sustainable Heat Farming: Modeling Extraction and Recovery in Discretely Fractured Geothermal Reservoirs. *Geothermics*, **46**, 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.09.001>
- [17] Lu, W. and Xiang, Y.Y. (2012) Analysis of the Instantaneous Local Thermal Equilibrium Assumption for Heat Exchange between Rock Matrix and Fracture Water. *Advanced Materials Research*, **594-597**, 2430-2437. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.2430>
- [18] Zeng, Y.C., Wu, N.Y., Su, Z., *et al.* (2013) Numerical Simulation of Heat Production Potential from Hot Dry Rock by Water Circulating through a Novel Single Vertical Fracture at Desert Peak Geothermal Field. *Energy*, **63**, 268-282. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.036>
- [19] Kolditz, O. (1995) Modelling Flow and Heat Transfer in Fractured Rocks: Conceptual Model of a 3-d Deterministic Fracture Network. *Geothermics*, **24**, 451-470. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(95\)00020-Q](https://doi.org/10.1016/0375-6505(95)00020-Q)
- [20] Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K., *et al.* (1980) Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture. *Water Resources Research*, **16**, 1016-1024. <https://doi.org/10.1029/WR016i006p01016>
- [21] 陈必光, 宋二祥, 程晓辉. 二维裂隙岩体渗流传热的离散裂隙网络模型数值计算方法[J]. 岩石力学与工程学报. 2014, 33(1): 43-51.
- [22] Kolditz, O. and Clauser, C. (1998) Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer in Fractured Crystalline Rocks: Application to the Hot Dry Rock Site in Rosemanowes (U.K.). *Geothermics*, **27**, 1-23. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(97\)00021-7](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(97)00021-7)
- [23] Shaik, A.R., Rahman, S.S., Tran, N.H. and Tran, T. (2011) Numerical Simulation of Fluid-Rock Coupling Heat Transfer in Naturally Fractured Geothermal System. *Applied Thermal Engineering*, **31**, 1600-1606. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.038>
- [24] Bataille, A., Genthon, P., Rabinowicz, M., *et al.* (2006) Modeling the Coupling between Free and Forced Convection in a Vertical Permeable Slot: Implications for the Heat Production of an Enhanced Geothermal System. *Geothermics*, **35**, 654-682. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2006.11.008>
- [25] Blocher, M.G., Zimmermann, G., Moeck, I., *et al.* (2010) 3D Numerical Modeling of Hydrothermal Processes during the Lifetime of a Deep Geothermal Reservoir. *Geofluids*, **10**, 406-421. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2010.00284.x>
- [26] Zeng, Y.C., Su, Z. and Wu, N.Y. (2013) Numerical Simulation of Heat Production Potential from Hot Dry Rock by Water Circulating through Two Horizontal Wells at Desert Peak Geothermal Field. *Energy*, **56**, 92-107. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.055>
- [27] Huang, X.X., Zhu, J.L., Niu, C.K., *et al.* (2014) Heat Extraction and Power Production Forecast of a Prospective Enhanced Geothermal System site in Songliao Basin, China. *Energy*, **75**, 360-370. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.085>
- [28] Zhang, Y.J., Li, Z.W., Guo, L.L., Gao, P., Jin, X.P. and Xu, T.F. (2014) Electricity Generation from Enhanced Geo-

thermal 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. *Energy*, **78**, 788-805.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.073>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ijfd@hanspub.org