

DOI: 10.13745/j.esf.2020.1.18

地热能可持续开发利用的数值模拟软件 OpenGeoSys: 原理与应用

孔彦龙^{1,2,3}, 黄永辉^{1,2}, 郑天元⁴, 陆仁超⁵, 潘 晟^{1,2,3}, 邵亥冰⁵, 庞忠和^{1,2,3}

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所; 中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院 地球科学研究院, 北京 100029

3. 中国科学院大学, 北京 100049

4. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100

5. 德国亥姆霍兹环境研究中心, 萨克森州 莱比锡 04318

KONG Yanlong^{1,2,3}, HUANG Yonghui^{1,2}, ZHENG Tianyuan⁴, LU Renchao⁵, PAN Sheng^{1,2,3},
SHAO Haibing⁵, PANG Zhonghe^{1,2,3}

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China

2. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Ocean University of China, Qingdao 266100, China

5. Helmholtz Centre for Environmental Research-UFZ, Leipzig 04318, Germany

KONG Yanlong, HUANG Yonghui, ZHENG Tianyuan, et al. Principle and application of OpenGeoSys for geothermal energy sustainable utilization. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 170-177

Abstract: Numerical simulation is very useful in utilizing large scale geothermal energy, predicting reservoir response and optimizing exploitation procedure. Here we describe the OpenGeoSys (OGS) software used to simulate the complex processes in geoscience and hydrological applications, focusing on its application in geothermal energy utilization. OGS is based on an object-oriented finite element method concept and can deal with numerical simulation of thermo-hydro-mechanical-chemical processes in porous media. Case studies related to shallow geothermal energy (temperature and pressure prediction), hydrothermal energy (optimization on the distance between production well and reinjection well, scaling) and hot dry rock (hydraulic fracturing, permeability evolution) are shown with the purpose to help managing geothermal energy utilization.

Keywords: OGS; multi-fields coupling; geothermal energy; numerical simulation

摘 要: 地热能规模化利用的可持续开发, 通常需要建立数学模型, 以实现定量管理和预测。文章评述 OpenGeoSys(OGS)数值模拟软件及其在地热资源开发利用过程中的应用算例。OGS是一款基于有限元的免费开源软件, 它可处理与地热能开发相关的水流场-温度场-力学场-化学场等多场耦合过程。OGS已应用在国内外多个地热场地, 文中着重介绍它在浅层地热能的流体温度变化预测、水热型地热能开发过程中的采灌井距优化、结垢机理和干热岩开发过程中的渗透性演化等方面的应用算例, 为地热能开发提供计算手段和参考。

关键词: OpenGeoSys; 多场耦合; 地热能; 数值模拟

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2020)01-0170-08

收稿日期: 2019-03-31; 修回日期: 2019-12-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501801)

作者简介: 孔彦龙(1987—), 男, 副研究员, 主要从事示踪水文地质与热储工程研究。E-mail: ylkong@mail.iggcas.ac.cn

地热能是一种极具竞争力的可再生能源,以资源量大、利用效率高、成本低廉和 CO₂ 零排放为特征^[1]。基于地热地质概念模型,建立数学模型,是可持续开发地热能的必要环节,可为地热能的开发利用提供不同情境下的效益分析和环境影响,为决策者提供最优的开采方案^[2]。

地热能开发过程中的数学模型通常涉及水流场和温度场的耦合,在处理高温高压下的岩石变形时,还需与应力场进行耦合;在考虑溶解-沉淀等化学反应过程时,则需要耦合化学场。水热耦合过程的模拟始于 20 世纪 70 年代,应用于地热及油田开发等多项地质工程。近 20 年来,由于核废物处置及干热岩开发等地质工程的兴起,数值模拟技术已经发展成为对水-热-力-化学多场乃至多相(水、气及超临界态等)过程的模拟技术^[3-4]。OpenGeoSys (OGS)即为在此背景之下由德国亥姆霍兹环境研究中心(UFZ)作为研发主体,开发的一款开源软件。该软件采用 C++ 语言编写,基于有限元分析,面向对象开发^[4]。OGS 至今已有 30 年的开发历史,并被分别应用于核废物处置、水污染分析、CO₂ 封存

和地热能开发利用等多个项目中。

本文受篇幅和主题限制,在介绍 OGS 的原理及使用方法的基础之上,仅给出 OGS 在地热开发领域的应用实例,其他方面的应用(如在水体污染控制、高放核废物处置等方面)可以参见 OGS 开发团队编写的系列教材^[5-6]。鉴于地热能通常按照开采深度划分为浅层(<200 m)、中深层(200~3 000 m)和深层(>3 000 m)地热能,本文也以此分类,分别给出 OGS 在相应类型地热能开发利用中的应用实例。

1 OGS 的原理及使用方法

OGS 内核基于质量守恒和能量守恒定律,建立一系列状态方程(EOS)进行运算。OGS 采用适当的数值方法对不同场进行耦合(图 1、表 1),主要包括:(1)水流场,即非等热的多相流运动场;(2)温度场,即多相流系统内的热传递场;(3)力学场,即非等热的弹性和非弹性形变场;(4)化学场,即多组分溶质运移及地球化学反应场。

OGS 采用面向对象的编译方法,通过对这些对

表 1 OGS 多场耦合公式中的符号变量注释表

Table 1 Parameters in the coupling equations of OGS

量符号	量名称及单位	量符号	量名称及单位
$\vec{n}$	外边界的外法线方向单位矢量	Γ_n	Neumann 边界条件
c	流体比热/(J · m ⁻³ · K ⁻¹)	q^k	源汇项
ρ	流体密度/(kg · m ⁻³)	Φ	孔隙度
T	流体温度/℃	ρ_β	β 相的密度/(kg · m ⁻³)
K	岩石导热系数/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	S_β	β 相的饱和度
q	热源/(W · m ⁻²)	X_β^k	组分 k 在 β 相中的质量分数
h_β	β 相的热焓	$\vec{\kappa}$	绝对渗透率张量
$\vec{\sigma}$	应力张量	$\kappa_{r\beta}$	β 相的相对渗透率
$\vec{g}$	重力加速度/(m · s ⁻²)	μ_β	β 相的黏度/(Pa · s)
σ	主应力/Pa	P_β	β 相的压力/Pa
S^l	液相饱和度	$\vec{D}_\beta^k$	组分 k 在 β 相中扩散系数
S^g	气相饱和度	$G_{p,T}^\circ$	定温压下系统吉布斯函数变化
p^l	液相压强/Pa	R	理想气体常数
p^g	气相压强/Pa	$K_{p,T}$	定温压下的化学平衡常数
I	单位矩阵	a_w, a_m	活度
β_T	热膨胀系数	γ_i, γ_j	逸度系数
V_n	体积/m ³	C_i, C_j	热容
M^k	质量矩阵	$\nu_{wj}, \nu_{ij}, \nu_{mj}, \nu_{gj}$	反应方程式中的化学计量数
$\vec{F}_\beta, \vec{F}^k, \vec{F}_\beta^k$	达西流量	f_g	逸度

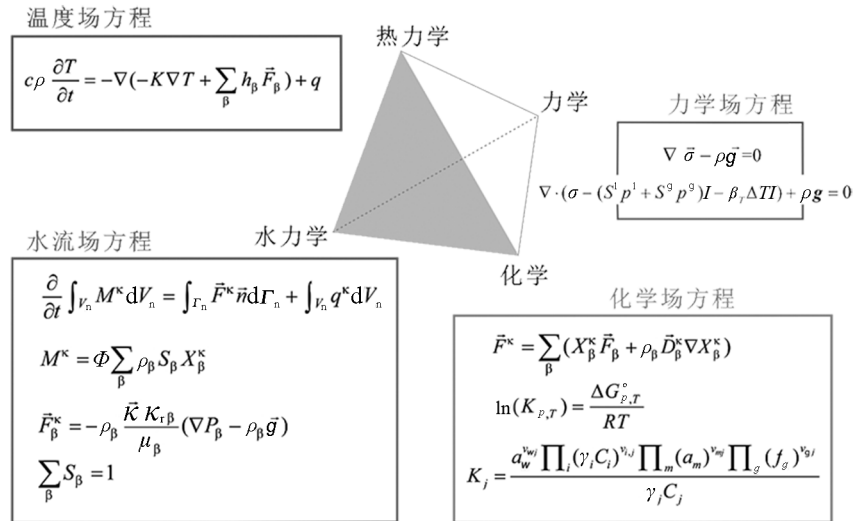


图1 OGS中水流场-温度场-力学场-化学场等的耦合原理

(据文献[4]修改)

Fig. 1 The coupling of thermo-hydro-mechanical-chemical processes by OGS. Modified after [4].

象的整合,来求解 EOS。所有对象均基于研究体的几何形态予以赋值,这些对象包括网格剖分(MSH,包括剖分的节点、剖分类型和体积)、初始条件(IC)、边界条件(BC)、源汇项(ST)、流体特征(MFP)、介质特征(MSP/MMP)、化学特征(MCP)和数值方法(NUM)。

图2展示了OGS的数据输入和输出格式,以及进行模拟计算的整个流程。应用OGS开展多场耦合模拟,需建立在大量的数据基础之上。为将这些数据输入模型,需要对其格式进行标准化处理。为此OGS开发了自己的数据前处理可视化界面(OGS-Data Explorer),它有与常见地质软件(如ArcGis、GMS、Petrel、GoCAD等)的接口,能够处理ASCII、Shape等格式文件,并将其直接转化为OGS所需要的BC、ST、

MSH等的文件格式。OGS输出的数据格式为VTK、VRML及OpenSG等格式,可以在Paraview等可视化软件中便捷地进行三维显示。

2 OpenGeoSys 的应用实例

2.1 浅层地热能开发

以用于浅层地热能开发的地源热泵供暖系统为例,其原理为在深度一般不超过200 m处安置地埋管,用低温循环液体抽取地下热量,再通过热泵将水温提升到合适的温度来进行室内供暖。地源热泵系统主体分为地上的热泵系统和地下的钻孔换热器两部分。地下的钻孔换热器一般是以固井泥浆作为保护层包裹着液体运输管道与外界土壤相连接(概念

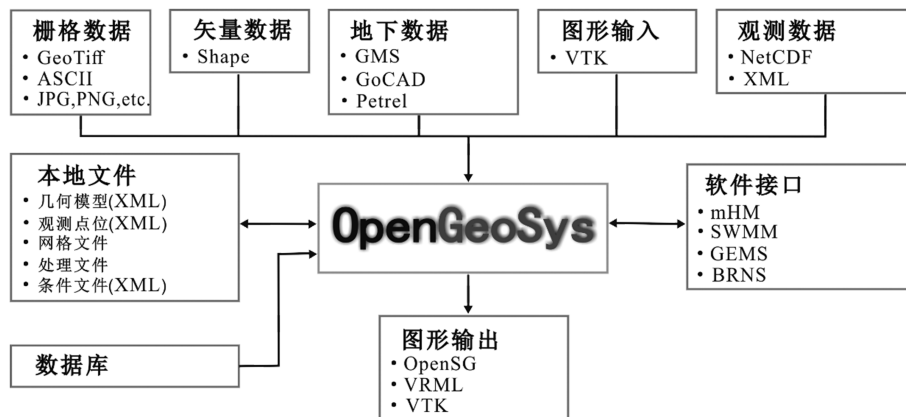


图2 OGS的使用流程和处理的文件格式

(据文献[4]修改)

Fig. 2 Flowchart of OGS application and data input requirements. Modified after [4].

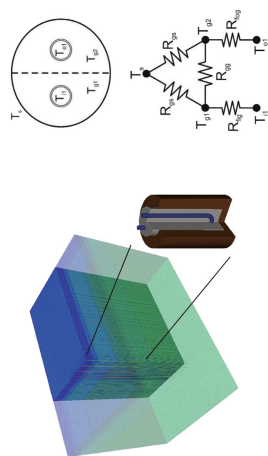


图3 OGS地源热泵模块的概念模型

Fig. 3 The conceptual model of ground source heat pumps in OGS

模型见图3)。地源热泵模型和其对周围环境的响应均作为独立的过程包含在OGS中。下面用一个算例加以验证。

2.1.1 钻孔换热器模型的室内实验验证

Beier等^[7]通过砂箱实验,模拟了地源热泵系统工作过程中地温随时间的变化。如图4所示,本文采用OGS,使用和砂箱实验一样的参数,进行数值计算。

在Beier的实验中,钻孔换热器被一层铝管包围,使得实验中保护层的热阻低于数值解的参数。这也导致了在换热初期(1 h内)实验结果和数值解大概有0.2℃的差别。在数值解中,以进水管的水温作为边界条件,输出出水温度和实验做对比识别。我们可以看到在1 h之后,两者匹配得非常好。因此,OGS中的地源热泵模块可以用来预测地源热泵长期工作时,管道内部流体的温度变化,并能够给出保护层及相邻土壤的温度变化,进而基于非线性迭代中内置的热泵模型,可以计算出地源热泵的性能系数(COP)和耗电量^[8]。

2.1.2 热流固耦合模型

浅层地热能的长期单向开发可能会导致地下温度的显著变化,甚至引起土壤和岩石的结构变化^[9-10]。模拟该过程,则需要全耦合的热流固模型,因为它可以很好地反映温度变化导致的流体压力增减和固体的位移及应力变化。下面就以一个无限空间点注射热源的实例与解析解对比来验证一下OGS中的热流固耦合的模块^[11]。

模型网格和结构如图5(a)所示,整个扇形区域在计算中绕y轴旋转360°形成一个半径为10 m的

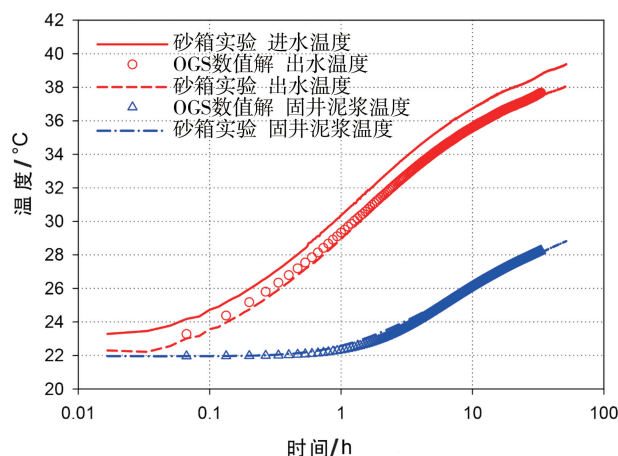
图4 OGS平台中地源热泵模块的验证
(据文献[8])

Fig. 4 Verification of the ground source heat pump module in OGS. Adapted from [8].

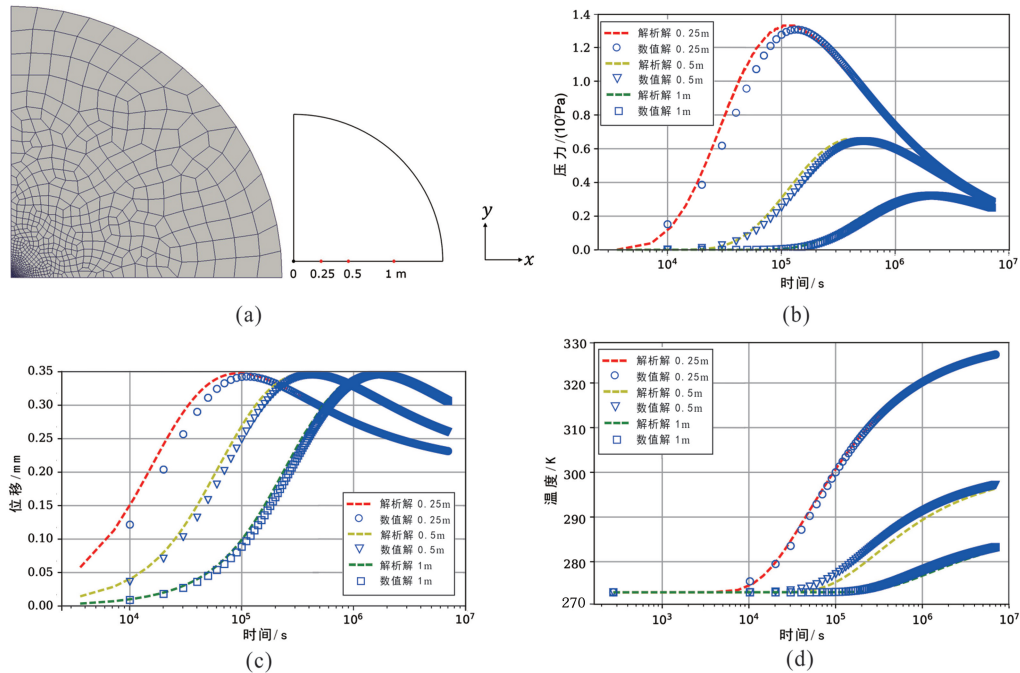
半球形。特定流量的热流会注射到半球的中心处。在离中心点0.25 m、0.5 m和1 m处分别用数值解和解析解计算温度、水压力和位移变化,对比结果如图5(b)、图5(c)及图5(d)所示。总的来说数值解和解析解的结果匹配得非常好,一些小的差异可能来源于数值解在处理点源问题时的奇异性。以上结果证明,OGS可以很有效地模拟热流固耦合情况下的温度变化、水压力变化和固体变形,从而可以被广泛地应用到预测地热开发导致的温度变化对环境的影响之中。

2.2 中深层地热能开发

中深层地热能的开发,以水热型地热能开发为主。实现水热型地热能的可持续开发,回灌是必由之路。它一方面可以维持热储压力的稳定,另一方面能够防止热水对地表及浅层地下水产生污染。但是,如果回灌井布局不当,则会造成热突破,即热储内水温下降,降低热田寿命,因此需要采用数值模拟技术,模拟不同采灌情景下热储的温度与压力响应^[2]。水热型地热能(尤其是温度大于150℃的高温地热能)开发利用过程往往会产生结垢的问题,降低热田的生产能力,通过数值方法,可以模拟矿物沉淀过程,分析结垢形成机理。此外,针对近年来国内很多企业关注的深井换热技术,OGS也可以模拟计算深井换热的换热量和预测长期地温变化。下面以3个相关算例分别予以介绍。

2.2.1 采灌井距优化

以采用水热型地热能进行供暖为例,Kong等^[12]建立了一套合理设置采灌井距的方法。该方



(a)—模型设置; (b)—压力的验证; (c)—位移的验证; (d)—温度的验证。

图5 OGS平台中热流固耦合模型的验证

(据文献[11])

Fig. 5 Verification of the thermo-hydro-mechanical process through point injection test. Adapted from [11].

法结合数值模拟与经济学分析方法,以回灌带来的热储下降与水温下降所产生的经济损失最小为目标函数,寻找最优采灌井距。其中,数值模拟部分,采用OGS,给定不同井距下温度与水位的响应。设定对某地热田进行为期50年的开采与回灌(回灌率为100%),将回灌井布置在开采井下游,且井距从100 m至1 000 m变化时,储层内的温度与水头响应如图6所示。从图6中可以看出,当井距为400 m时,开采井水温50年内变化极其微弱。依据Kong等^[12]建立的经济模型,便可进行成本核算,确定最优井距。

2.2.2 高温热田生产井和回灌井中的结垢模拟

地质流体流经热储层进行热交换的同时,伴随着矿物溶解-沉淀反应的发生。高温条件下矿物溶解度很高,使得地质流体富含大量的溶质。地质流体进入生产井后,随着井壁内压力的下降出现液体汽化,并以水汽两相的方式在井内流动,持续的压降使得液体质量分数逐渐减小。当井壁内压力达到闪蒸压力时,过饱和的溶解态二氧化碳从液相中析出,造成pH值增大趋向中性、溶质因饱和浓度下降而析出并形成富含钙镁的结垢物^[13]。结垢物黏附积聚在闪蒸位置上方的管道内壁上,导致生产井井径减小。对结垢矿物的分析发现,碳酸钙是构成结垢物最为主要的矿物组

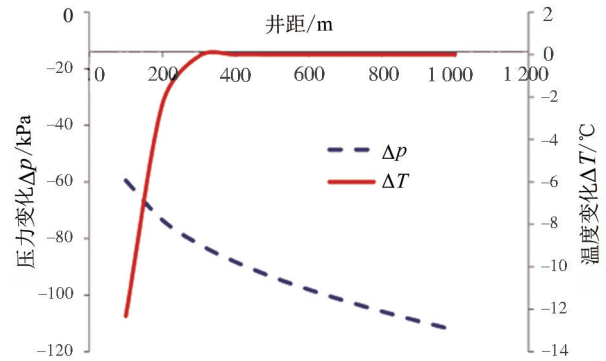


图6 50年后不同采灌井距下的温度与压力变化

(据文献[12])

Fig. 6 Pressure and temperature change with distance between the production and re-injection wells after 50 years. Adapted from [12].

分。当前主要是通过安装井下增压泵和添加阻垢剂的技术手段来减少结垢物的生成。此外,回灌井中也存在类似的结垢问题。水汽混合物通过热交换器之后,温度的下降使得地质流体中的硅离子处于过饱和状态。当硅饱和度大于2时,回灌井中极易出现二氧化硅硬质结晶。本算例以四川甘孜某地热井为工程背景,计算得到了井壁管内压力分布(图7)和不同初始值的情况下溶解态二氧化碳物质的量随深度变化曲线(图8)。如图8所示,地质流体在进入生产井时所含溶解态二氧化碳量对闪蒸发生的位置有明显影

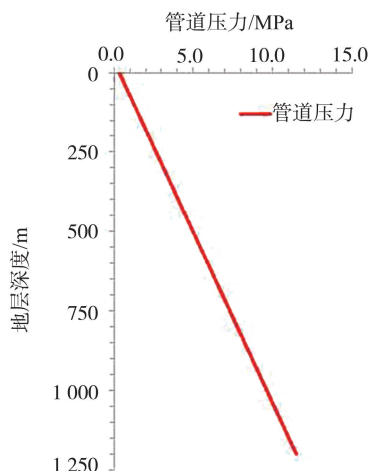


图7 生产井内管道压力随深度变化曲线
Fig. 7 Pressure profile along the production well

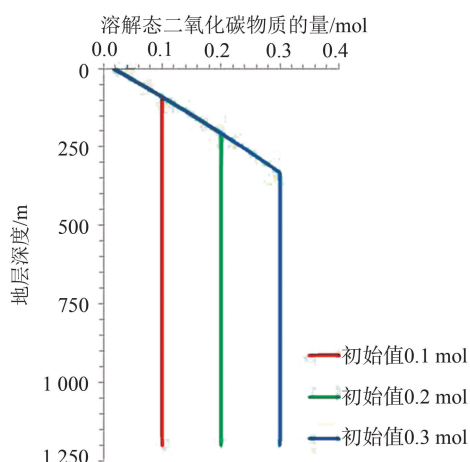


图8 溶解态二氧化碳物质的量随深度变化曲线

Fig. 8 Change of dissolved carbon dioxide along the production well
响,初始物质的量越小,闪蒸位置越接近地表。因此,有必要在生产井底部进行原位保压水样采集,并根据测得的溶解态二氧化碳浓度预测闪蒸发生的位置,进而在闪蒸位置下方添加阻垢剂以减少结垢物的生成。

2.2.3 深井换热模拟

深井换热技术是指在深井中通过同轴套管进行单井内部流体循环,以“取热不取水”形式开发地热能的技术^[14]。其原理为在一口钻井内,安装一同轴套管,然后在外套管中注入冷水,冷水被周围岩石加热升温,再由内管向上运移,热水到达地面后,通过热泵提升水温进行供暖。孔彦龙等^[14]针对我国北方典型的地热地质条件,采用 OGS 模拟了不同采热功率下地温随时间的变化,分析了地温梯度和热导率对采热功率的敏感性,并得出结论:在高功率连续采热情景下,地温衰减较快;在其给定的地质条件下,稳定采热 30 年的延米换热功率不超过 150 W/m(图 9)^[14]。

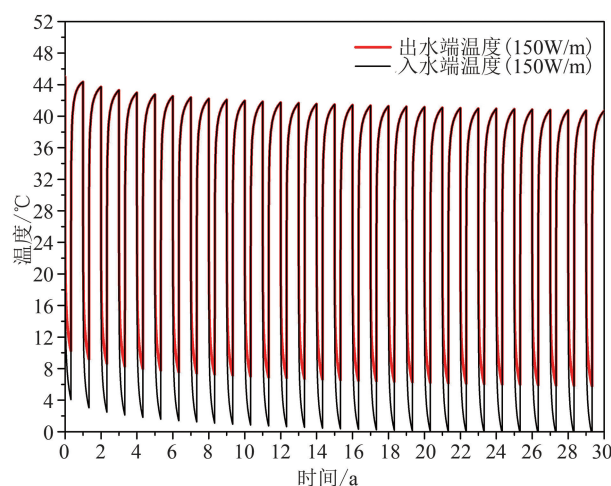


图9 OGS 模拟深井换热系统长时间运行后的温度变化
(据文献[14])

Fig. 9 Change of inlet and outlet water temperatures in the deep borehole heat exchanger system after long time operation.
Adapted from [14].

2.3 深层干热岩型地热能开发

深层地热能的开发,尤其是通过压裂的方式实现人工造储,从而对干热岩进行开发利用是当前国际上地热研究的热点之一。干热岩开发的经济性对于压裂后的单井出水量和水温都有一定的要求,如美国 MIT 的报告认为流量需高于 80 L/s,水温需高于 200 °C才具有开发的经济价值^[15],可以通过模拟不同情境下人造热储内的单井出水温度和流量,进行对比分析以获得最优开采方案。以下将介绍两个采用 OGS 模拟干热岩开发的具体算例。

2.3.1 界面单元法模拟干热岩开发的水力压裂过程

水力压裂用于在基岩渗透性低的干热岩中进行人工造储。通过向原生微裂隙中不断注水增压,裂隙尖端在水压作用下沿着干热岩薄弱面拓展进而形成贯穿性拉张裂隙。为了确保制裂的裂隙具有高渗透性,并防止裂隙闭合,通常还会在水中添加压裂支撑剂。水力压裂的一大技术难点在于如何在控制注水流量的前提下确定复杂地层中主裂隙的走向及开裂长度,从而为井位布置提供设计依据。在接下来的算例中(图 10),我们假设已知原生微裂隙开裂走向,采用界面单元法研究在控制注水流量情况下的水压变化及裂隙生长^[16-17]。几何模型上,采用二阶线单元表征原生裂隙和开裂路径上的薄弱界面和二阶四边形单元表征围岩;材料模型上,采用内聚力模型模拟裂缝的形成;数值计算上,在非线性迭代计算过程中将裂隙开度与注水量之间的恒等关系作为强限制条件。图 11 给出了流体压力和开裂长度随注

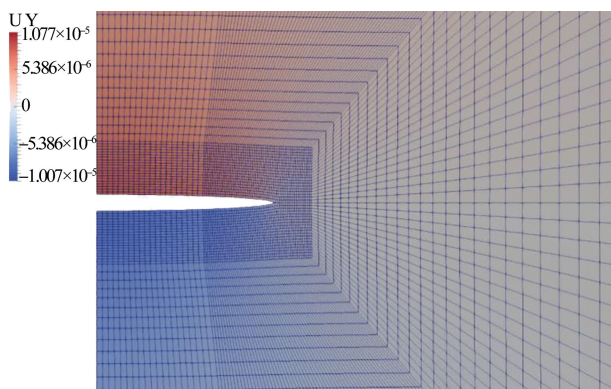


图 10 定流量的情况下水力压裂过程中地层垂直方向上位移云图

Fig. 10 Vertical displacement in hydraulic fracturing under prescribed injected fluid volume

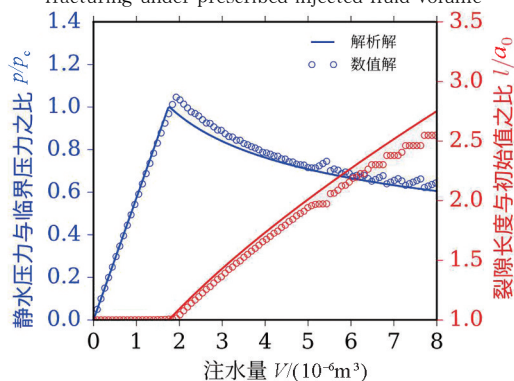


图 11 流体压力和开裂长度随注水流量变化曲线 (据文献[17])

Fig. 11 Comparison between analytical and numerical solutions in terms of hydraulic pressure and crack length vs. injection fluid volume. Adapted from [17].

水流量的变化曲线,并与解析解进行了比较。在开裂之前,随着注水流量的增大静水压力呈线性增长。开裂之后,随着裂隙长度的增长,静水压力逐渐减小。

2.3.2 水岩相互作用下深部人造储层渗透性的长期演化规律模拟

水力压裂形成的裂隙渗透性能短期内主要取决于地层应力下由力学徐变引起的形变^[18-19]。但长期行为还是由矿物溶解-沉淀化学机制所决定(图 12)。矿物溶解反应不仅发生在裂隙的自由面上,还发生在裂隙的接触面上。矿物溶解机制上,由于裂隙的接触面上有非静水压力的作用,反应活度更高,但随着非静水压力在不断扩大的接触面上进行应力迁移,反应活度逐渐衰减。在浓度梯度的驱动力下,接触面内形成的大量溶质逐渐向接触面外的渗流通道迁移。在接触面周围由于溶质局部过饱和可能会出现胶结物沉积。同时,接触面和自由面上发生的矿物溶解将造成裂隙不同的几何变形,接触面上发

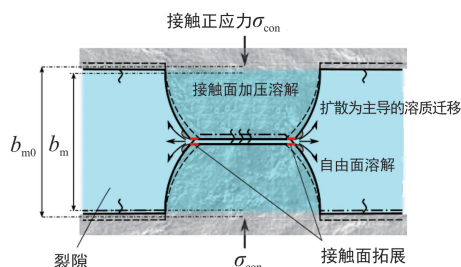


图 12 接触面上加压溶解反应示意图 (据文献[19])

Fig. 12 Schematic diagram of pressure solution at contact surface. Adapted from [19].

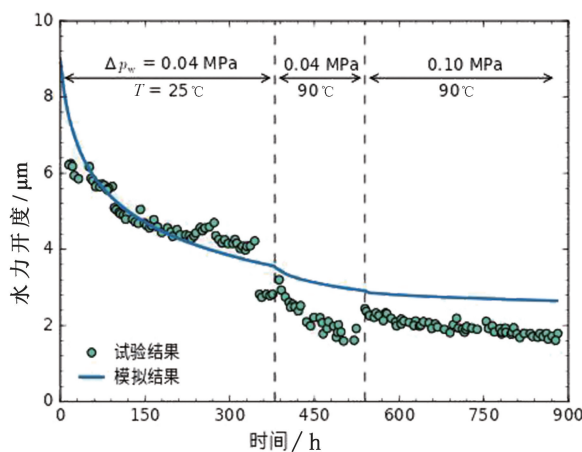


图 13 裂隙渗透率随时间变化曲线 (据文献[19-20])

Fig. 13 Comparison between experimental and simulated results in terms of evolution of hydraulic aperture under varying hydrothermal conditions. Adapted from [19-20].

生的矿物溶解使得裂隙逐渐闭合,而自由面上发生的矿物溶解则使得裂隙开度不断增大。在本算例中,我们模拟了地层应力在 5 MPa,上下游静水压力差为 0.04 MPa 和 0.1 MPa,环境温度在 25 °C 和 90 °C 的地层条件下裂隙渗透性的长期演化规律^[18-19]。如图 13 所示,裂隙渗透性能主要受制于接触面上的矿物溶解^[19-20]。早期压溶效应明显,裂隙渗透率快速下降。随着接触面的扩大,压溶效应不断衰减,裂隙渗透率逐渐趋于稳定。高温加速了压溶效应的进程,但不能延长压溶效应的持续时间。

3 结论与展望

本文介绍了开源数值模拟软件 OGS,并对其在浅层地热能、中深层水热型地热能 and 深部干热岩型地热能开采中应用的算例进行了展示。本文限于篇幅仅介绍了地热开发利用过程中的部分实例,其他的应

用案例包括地下储热系统、岩浆型地热能开采等, 请参见文献[21-25]。OGS 因具有免费、开源和强大的计算能力而获得认可, 但它的发展还依赖于学术共同体的共同努力, 尤其是处理地热能开发过程中的一些新问题, 比如深部储层的非均质刻画、浅层地能与中深层地热能联用的有机耦合等, 为此 OGS 专门建立了共享网站(www.opengeosys.org), 可以将全球不同学者完成的程序及时更新完成。

参考文献

- [1] 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
- [2] KONG Y L, PANG Z H, SHAO H B, et al. Recent studies on hydrothermal systems in China: a review[J]. Geothermal Energy, 2014, 2:19.
- [3] 庞忠和. 地下水运动对地温场的影响; 研究进展综述[J]. 水文地质工程地质, 1987, 14(3): 30-34.
- [4] KOLDITZ O, BAUER S, BILKE L, et al. OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67 (2): 589-599.
- [5] KOLDITZ O, GÖRKE U J, SHAO H, et al. Thermo-hydro-mechanical/chemical processes in porous media: lecture notes in computational science and engineering[M]. Heidelberg: Springer, 2012: 344.
- [6] KOLDITZ O, SHAO H, WANG W Q, et al. Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in fractured porous media: modelling and benchmarking [M]. Heidelberg: Springer, 2016: 217.
- [7] BEIER R A, SMITH M D, SPITLER J D. Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis[J]. Geothermics, 2011, 40 (1): 79-85.
- [8] ZHENG T Y, SHAO H B, S. SCHELENZ S, et al. Efficiency and economic analysis of utilizing latent heat from groundwater freezing in the context of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105: 314-326.
- [9] EROL S, FRANCOIS B. Freeze damage of grouting materials for borehole heat exchanger: experimental and analytical evaluations[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2016, 5: 29-41.
- [10] ESEN H, INALLI M, ESEN Y. Temperature distributions in boreholes of a vertical ground-coupled heat pump system [J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2672-2679.
- [11] ZHENG T Y, MIAO X Y, NAUMOV G, et al. A thermo-hydro-mechanical finite element model with freezing and thawing processes in saturated soils for geotechnical engineering[J]. Environmental Geotechnics, 2019, 6: 1-13.
- [12] KONG Y L, PANG Z H, SHAO H B, et al. Optimization of well-doublet placement in geothermal reservoirs using numerical simulation and economic analysis[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(3): 118.
- [13] AKIN T, GUNAY A, KARGI H. Modeling of calcite scaling and estimation of gas breakout depth in a geothermal well by using PHREEQC [C]//Proceedings of the 40th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California, 2015.
- [14] 孔彦龙, 陈超凡, 邵亥冰, 等. 深井换热技术原理及其换热能力评估[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4741-4752.
- [15] TESTER J W, ANDERSON B J, BATCHELOR A S, et al. The future of geothermal energy: impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 2006: 358.
- [16] WATANABE N, WANG W, TARON J, et al. Lower-dimensional interface elements with local enrichment: application to coupled hydro-mechanical problems in discretely fractured porous media[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2012, 90(8):1010-1034.
- [17] YOSHIOKA K, PARISIO F, NAUMOV D, et al. Comparative verification of discrete and smeared numerical approaches for the simulation of hydraulic fracturing[J]. International Journal on Geomathematics, 2019, 10(1):13.
- [18] BOND A, BRUSKY I, CHITTENDEN N, et al. Development of approaches for modelling coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical processes in single granite fracture experiments[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(19): 1313.
- [19] LU R C, NAGEL T, SHAO H, et al. Modeling of dissolution-induced permeability evolution of a granite fracture under crustal conditions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(7): 5609-5627.
- [20] YASUHARA H, KINOSHITA N, OHFUJI H, et al. Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal conditions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model[J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(12):2074-2088.
- [21] HUANG Y H, KOLDITZ O, SHAO H B. Extending the persistent primary variable algorithm to simulate non-isothermal two-phase two-component flow with phase change phenomena [J]. Geothermal Energy, 2015, 3(1): 13.
- [22] HUANG Y H, SHAO H B, WIELAND E, et al. A new approach to coupled two-phase reactive transport simulation for long-term degradation of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 805-829.
- [23] NAGEL T, SHAO H, SINGH A K, et al. Non-equilibrium thermochemical heat storage in porous media: Part 1-Conceptual model[J]. Energy, 2013, 60: 254-270.
- [24] MIAO X Y, KOLDITZ O, NAGEL T. Modelling thermal performance degradation of high and low-temperature solid thermal energy storage due to cracking processes using a phase-field approach[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 977-989.
- [25] YAPPAROVA A, MIRON G D, KULIK D A, et al. An advanced reactive transport simulation scheme for hydrothermal systems modelling[J]. Geothermics, 2019, 78: 138-153.