

增强型地热系统开发过程中的多场耦合问题

王晓星^{1,2}, 吴能友^{1,2}, 张可霓³, 苏正^{1,2}, 曾玉超^{1,2}

(1. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室/广州能源研究所, 广州 510640;

2. 中国科学院广州天然气水合物研究中心, 广州 510640;

3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 增强型(或工程型)地热系统(简称 EGS)是指从地下 3~10km 低渗透岩体中经济开采深层地热的人工热能系统, 作为目前地热领域的重要发展方向, 其研究受到发达国家的高度重视, 但我国还基本处于空白。在 EGS 运行过程中, 高温岩体及裂隙受到温度场(T)、渗流场(H)、应力场(M)、化学场(C)的耦合作用, 其结果直接影响整个系统的设计和运行。本文根据对 EGS 最基本的物理-化学过程进行分析, 讨论了任意两场之间的相互作用, 指出了三场耦合应考虑的重点及四场耦合现阶段研究的不完善性, 最后综述了目前国际上用于解决 EGS 多场耦合问题的模拟软件研究进展。

关键词: 增强型地热系统; T-H-M-C 耦合; 数值模拟; TOUGH2

中图分类号: P312.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)02-0126-05

在能源日益紧张的大背景下, 作为可再生的绿色能源——地热能开发呼声日益高涨^[1~3]。其中, 地下 3~10km 深度范围内赋存于高温岩体内的地热能主要用于发电。其基本原理是首先钻进能够到达该深度范围内地下结晶质岩层中的深井(温度可达 150~350℃), 采用水力压裂等井下作业措施在高温岩体中造成具有高渗透性的裂隙体系, 然后在地面上从一口(或几口)井中将冷水注入, 经孔隙-裂隙换热构造加热再从另一口井中产出高温热水或蒸汽进行发电。目前, 地热界称其为“增强型”或“工程型”地热系统(Enhanced / Engineered Geothermal Systems), 简称 EGS^[4~6]。典型的水力压裂 EGS 开发过程见图 1^[7]。

在 EGS 运行过程中, 高温岩体的赋存环境和工程作用组成了一个有机系统。受地层深部复杂地质环境和流体长期循环影响, 岩体及裂隙在同时存在的温度场(Thermal)、渗流场(Hydraulic)、应力场(Mechanical)及化学反应(Chemical)的共同作用下, 渗透率、孔隙度、连通性等指标随空间和时间发生动态变化, 进而影响整个 EGS 设计和运行中的关键技术参

数; 出力(单位时间内允许提取的地热资源量)与寿命^[6,8]。同时上述物理-化学过程之间还存在相互影响和相互作用, 即耦合, 因此对 T-H-M-C 耦合问题的理解是解决 EGS 数值模拟问题的重要基础和前提条件。

为了更好地理解 EGS 系统运行, 开展 EGS 数值模拟研究, 本文在简述 EGS 系统的热量传递、流体流动、力学、化学过程的基础上, 从 EGS 最基本的两场耦合问题入手, 进而分析三场耦合和四场耦合, 介绍目前国际上数值模拟软件的研究现状, 以便为国内 EGS 研究提出一些可借鉴的经验。

1 主要物理-化学过程

1.1 热量传递过程(T)

EGS 开发的目的是提取储藏在深部结晶岩石中的热能。因此, 在研究中首先关心含有流体的高温岩体中大规模的传热过程。在地下深层高温岩体区中, 热传导是主要的地热传递机制, 裂隙中的水则以传导和对流的双重机制进行热量交换和输运^[6~7]。

1.2 流体流动过程(H)

裂隙介质的储层通常分为两类: 一类是单纯的天然裂缝介质; 另一类是孔隙-裂缝双重介质^[9~10]。虽然地下深部岩体的温度极高, 但随着深度的增加, 岩体的渗透性和孔隙度通常极不发育, 内部不存在流体或仅有少量地下流体, 几乎不具备储存和传导流体的能力。因此, 裂隙中可能仅存在单相水, 但根据温度、压力以及高温岩体天然状态的不同以及开发过程的不断

收稿日期: 2011-03-17; 修订日期: 2011-11-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KGCX2-YW-805); 广州能源研究所博士后基金和所长基金项目联合资助

作者简介: 王晓星(1982-), 女, 博士后, 主要从事增强型地热系统数值模拟研究。

E-mail: wangxx@ms.giec.ac.cn

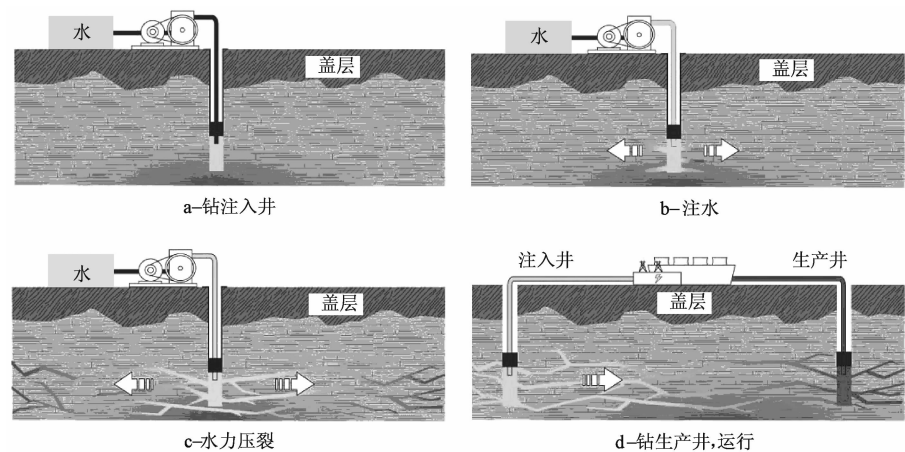


图 1 典型水力压裂 EGS 开发过程(据文献[5])

Fig. 1 Typical development process of hydraulic fracturing in EGS

深入,特别是在高温的水热型地热田附近的 EGS 开发项目,都可能出现气液两相流^[3,6]。

1.3 力学过程(M)

力学过程即介质应力-应变过程。岩体变形由基岩块变形和裂隙变形组成^[11]。在 EGS 开发过程中,引起岩体产生应力的原因主要有上覆岩体的重力应力,构造运动产生的构造应力以及高温岩体中温度变化引发的热应力。一般注入人工储层的低温水与母岩的温度相差较大,在热应力和地热提取过程中水压力复合作用下,岩体裂隙会进一步扩展或在岩体内产生新的裂隙,使得人工储层及其围岩产生二次甚至三次破裂,形成裂缝网络系统^[3,6]。

1.4 化学过程(C)

EGS 长期运行的巨大风险之一是随着时间的推移,储层渗透性和连通性发生改变,产生循环短路、井壁腐蚀或沉积水垢,这些现象均与化学作用有关。注入人工储层的流体是地表水或浅层地下水,其矿物成分远没有达到与基岩的地球化学平衡和热平衡。在与地热储层里自然存在的流体长期的混合过程中,受温度、压力的影响,水与裂隙面壁和裂隙尖端处矿物质发生溶解和沉淀,造成裂隙开度变化,进而影响岩体的渗透性。此外,地热流体中常见酸性气体(如 H₂S)等还会腐蚀钢铁质输水管道, Ca²⁺、Mg²⁺ 等离子在较高水温下容易在管网表面结垢,严重影响地热水输送管道的使用寿命^[3,12~13]。

2 THMC 耦合关系

在多场存在的系统中,各物理-化学场的耦合作用是一种客观存在。无论是石油天然气开采,还是引

水隧洞深埋,或是高放射性废料地质处置,几乎所有与地质工程有关的问题都会涉及到 T-H-M-C 耦合现象。但复杂的整体系统总是由相对简单的子系统组合或耦合而成的,多场耦合也可以分解成任意两个场之间的相互作用(表 1)^[14~17]。

表 1 T-H-M-C 两两耦合关系

Table 1 Interaction between two fields	
耦合场	相互作用
热-力耦合(T-M)	温度变化诱发热应力变化,岩石骨架膨胀,裂缝闭合、张开或破坏
热-水耦合(T-H)	温度影响流体密度、浮力粘度、流体相态变化(蒸发和冷凝)、流体分子的热扩散
热-化耦合(T-C)	温度影响反应速率和矿物、化学元素以及反应过程的稳定性
水-热耦合(H-T)	流体流动影响热对流以及对邻近岩石的热传导
水-力耦合(H-M)	流体压力影响岩石骨架的有效应力、毛管压力、裂隙开度等
水-化耦合(H-C)	流动压力、速度、饱和度影响固/气溶解、矿物沉淀及污染物传输等
力-热耦合(M-T)	力学做功引起热能增加
力-水耦合(M-H)	应力-应变影响岩石孔隙度和渗透率、裂隙的导水率和网络的连通性
力-化耦合(M-C)	应力-应变改变物质传输路径和流体溶解、扩散速度等性质
化-热耦合(C-T)	化学反应过程释放或吸收热量
化-水耦合(C-H)	化学反应(气体溶解和出溶,固体溶解和沉淀)影响骨架和裂隙流体性质
化-力耦合(C-M)	化学作用影响岩土应力、变形

当然,在 EGS 开发过程中,并不是上述所有两场之间的相互作用都要考虑,如 M-T 耦合、C-T 耦合都可忽略不计。EGS 商业可行性的主要目标是在储层内

流体与岩体的充分接触的条件下,使生产井保持较高流量同时确保足够长的储层寿命。因此,对其来说,最基本的两两耦合过程应为 T-H 和 H-T 耦合,即一个在温度场作用下裂隙介质的渗流问题。在此基础上才能逐步深入对岩体多场耦合过程与耦合机制的研究。

由于 EGS 开发以裂隙为核心,无论是前期流体与岩石之间几小时或者几天之内短时间快速作用的激发阶段,还是后期深部复杂地质环境和流体循环长达十几年甚至几十年的运行过程,与力学作用有关的变化,如有效应力、剪切形变、热应力等往往都是影响裂隙产生和生长的主要原因,进而影响到水流短路以及热储换热性能。因此,T-H-M 全物理场耦合在 EGS 开发过程中需要予以重点考虑^[3,6,18~19]。

对一个地下物理-化学过程进行全面分析,应该注意各种热水文和地球化学条件。化学场的加入也将以往的工程问题放在一个更加微观的角度去认识,使研究更加贴近实际。尽管目前国际上对各种基本地球化学作用研究非常深入,但 EGS 实际应用中,主要兴趣不在于考查各种化学物质的改变,而是分析这些变化如何影响力学性质以及其反馈又如何影响化学行为。特别是相比于其他物理场,EGS 中化学反应对裂隙的影响通常需要经过长期的运行时间才可以显现,并且需要更长的时间达到动态平衡。目前,化学反应如何与其它物理场进行耦合的研究并不完善^[18~21]。

3 数值模拟研究进展

目前国际上已经用于或可以用于 EGS 数值模拟的软件主要有两类,分别是进行干热岩(Hot Dry Rock)和水热型地热系统数值模拟的求解器^[18~19]。

最初用于干热岩数值模拟的典型软件包括:FRACture、GEOH3D、FRACSIM-3D、GEOCRACK 和 GeoSys/RockFlow。其中,FRACture 可以实现 EGS 激发过程中 T-H-M 全物理场耦合,且计算速度快;GEOH3D 的特点是地下渗透系数的定量分布空间需利用水压致裂的声发射(AE)实测数据并结合注水试验结果推算出来,再应用到孔隙介质模型中;FRACSIM-3D 采用裂隙网络模型,能够模拟裂隙的剪切和膨胀、热-弹效应以及简单的化学溶解和沉淀,既可用于分析激发又可以分析地热田的测试运行;GEOCRACK 采用与 FRACture 相似的离散裂隙方法,能够针对裂隙中的流体进行 T-H-M 耦合计算;GeoSys/RockFlow 是一个地质力学模型,它将几何学中的分形理论运用到裂隙开度分布计算,考虑了裂隙表

面之间接触面积的变化和粗糙度分布,可以描述温度场、渗流场和应力场作用下裂隙系统中流动和传输参数的变化^[18~19,22~24]。

利用水热型地热资源进行热能生产和发电已有百年历史,典型软件包括:FEHM、STAR、TEDRAD 和 TOUGH2。其中,FEHM 是用来模拟非等温、多相、多组分流体在多孔介质中流动的程序,能描述水和蒸汽相的运移、传导和对流传热;STAR 在进行地下计算的基础上还配备有一些地面“发电站”的选项,除地热外还可用于天然气、稠油热采等项目;TEDRAD 最初用于石油天然气领域,改进后用于地热模拟,具备水热型地热系统研究需要的特点,被认为是工业上最友好的模拟器之一;TOUGH2 是目前国际上多孔及裂隙介质中多维、多相、多组分混合流体及热量运移的最通用数值模拟程序之一,在 EGS 或 HDR 中,岩石和循环流体之间存在较高的温度梯度,其处理裂隙介质所采用的 MINC 方法能够连续地剖分岩石骨架,很好地模拟压力和温度在岩石和注入流体之间的传递。TOUGH2 与主要用于岩土力学模拟的商业软件(如 FLAC^{3D})等结合,可以通过迭代和循环过程中不断更新力学数据,弥补水热型地热系统在表示裂隙动态变化方面的不足,完成 T-H-M 耦合模拟。为了考察化学过程对整体系统的影响,TOUGH2 还将化学反应引入现有非等温多相流体和热流动程序框架,开发出了 TOUGHREACT^[18~19,25~26]。

由于温度、有效应力、化学势和裂隙之间的关系非常复杂,尽管 T-H-M 耦合和 T-H-C 耦合的数值模拟已经分别实现,但到目前为止还没有完全单独的模拟器能够检验完整的 T-H-M-C 耦合过程。沿用 TOUGH2 解决 T-H-M 耦合问题的思路,将 TOUGHREACT 和 FLAC^{3D} 结合可以作为一种方案^[26]。

4 结语

鉴于深层地热资源的独特优势,美国、法国、日本等经济发达的能源消耗大国竞相开展 EGS 研发工作,甚至纳入到国家发展计划。但作为一项复杂的综合性工程,EGS 代价巨大。受限于资金、技术等条件,目前还没有形成商业规模,只有少数国家进行过工业试验,建有试验性、小规模的热电厂。

在 EGS 开发过程中,温度场、渗流场、应力场和化学场的耦合作用客观存在,从长期的地热储层开采周期来看,各物理-化学场占优势的阶段会随着运行的推进而发生变化,水力激发、热应力和化学作用分别在

EGS 开发的前期、中期和后期通过对裂隙的作用影响渗透率^[8]。

目前,各种物理场(T-H-M)之间的数学模型相对成熟,各种化学反应在地球化学模型中十分完善,但在计算中如何与物理场耦合相对薄弱。在实际研究中,应重视对研究区域具体的水文地质条件的认识和基本方程的理解,在满足基本的温度场和渗流场耦合的前提下,有针对性地选择强耦合场进行数值计算,且盲目追求软件版本。当然,由于岩体裂隙面的几何复杂性和难预测性,含裂隙岩体的 T-H-M-C 耦合作用特征还远未认识清楚。由于石油、地下核废料地质处置等都会不同程度地涉及 T-H-M-C 过程,因此,多领域之间应当相互借鉴。

参考文献:

- [1] 尹立河. 地热利用迎来又一个高峰—2010 年世界地热大会见闻[J]. 国土资源, 2010(6): 33. [YIN L H. Utilization of geothermal for another peak-2010 knowledge of the World Geothermal Conference [J]. Land & Resources, 2010(6): 33. (in Chinese)]
- [2] 汪集旸, 刘时彬, 朱化周. 21 世纪中国地热能发展战略[J]. 中国电力, 2000, 33(9): 85 - 94. [WANG J Y, LIU S B, ZHU H Z. Development strategy of China's geothermal energy in 21st Century [J]. Electric Power, 2000, 33(9): 85 - 94. (in Chinese)]
- [3] U. S. Massachusetts Institute of Technology. The Future of Geothermal Energy[R/OL]. (2007) [2011 - 03 - 10]. <http://geothermal.inel.gov>. 杨伍林, 译.
- [4] U. S. Department of Energy. An evaluation of Enhances Geothermal Systems technology [R/OL]. (2008) [2011 - 03 - 10]. <http://www.eere.energy.gov>.
- [5] How an Enhanced Geothermal System Works [OL]. [2011 - 03 - 11]. http://www.eere.energy.gov/geothermal/egs_animation/html.
- [6] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004. [ZHAO Y S, WAN Z J, KANG J R. Introduction to HDR Geothermal Development [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)]
- [7] Incropera F P, DeWitt D P, Bergman T L, et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. 葛新石, 叶宏, 译.
- [8] Taron J, Elsworth D. Thermal-hydrologic - mechanical l-chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 855-864.
- [9] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007. [XUE Y Q, XIE C H. Numerical Simulation for Groundwater [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)]
- [10] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. [KONG X Y. Advanced fluid mechanics[M]. 2nd ed. Hefei: University Press of Science and Technology, 2010. (in Chinese)]
- [11] 楼一珊, 金业权. 岩石力学与石油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006. [LOU Y S, JIN Y Q. Rock Mechanics and Petroleum Engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006. (in Chinese)]
- [12] 周大吉. 地热发电简述[J]. 电力勘测设计, 2003(3): 1 - 6. [ZHOU D J. The overview of geothermal power generation [J]. Electric Power Survey & Design, 2003(3): 1 - 6. (in Chinese)]
- [13] Min K B, Rutqvist Elsworth. Chemically and mechanically mediated influences on the transport and mechanical characteristics of rock fractures [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009(46): 80 - 89.
- [14] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉, 等. 论多场广义耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1329 - 1340. [ZHOU C B, CHEN Y F, JIANG Q H. On generalized multi-field coupling for fractured rock masses and its applications to rock engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1329 - 1340. (in Chinese)]
- [15] 章根德, 王羽, 石占中. 地质材料中的流-固耦合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 856 - 859. [ZHANG G D, WANG Y, SHI Z Z. Study for fluid-solid-interaction in geological media [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(S): 856 - 859. (in Chinese)]
- [16] Jing L R, Feng X T. Numerical modeling for coupled thermo-hydro-mechanical and chemical processes (THMC) of geological media—international and Chinese experiences [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1704 - 1715.
- [17] 井兰如, 冯夏庭. 放射性废物地质处置中主要岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 833 - 841. [JING L R, FENG X T. Main rock

- mechanics issues in geological disposal of radioactive wastes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (4): 833 - 841. (in Chinese)]
- [18] Sanyal K S, Butler S J, Swenson D, *et al.* Review of the state-of-the art of numerical simulation of enhanced geothermal system[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku: [s. n.], 2000.
- [19] Assessment of the state-of-the-art of numerical simulation of Enhanced Geothermal Systems [R]. 1999.
- [20] 汤连生. 水-岩土反应的力学与环境效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 681 - 682. [TANG L S. Mechanical and environmental effects of interaction between water and rock or soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19 (5): 681 - 682. (in Chinese)]
- [21] 汤连生, 王思敬. 水-岩化学作用对岩体变形破坏力学效应研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14 (5): 432 - 439. [TANG L S, WANG S J. Process in the study on mechanical effect of the chemical action of water-rock on deformation and failure of rocks [J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14 (5): 432 - 439. (in Chinese)]
- [22] 李宏, 海江田秀志, 大西浩史. 雄胜高温岩体地热开发的数值计算进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 965 - 968. [LI H, Kaieda Hideshi, Ohnishi Hiroshi. Progress on numerical modeling of geothermal extraction development for Ogachi hot dry rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (6): 965 - 968. (in Chinese)]
- [23] Kohl T, Hopkirk R J. FRACTure - a simulation code for forced fluid-flow and transport in fracture, porous rock [J]. Geothermics, 1995, 24(3): 333 - 343.
- [24] Hayashi K, Willis-Richards J, Hopkirk R J, *et al.* Numerical models of HDR geothermal reservoirs - a review of current thinking and progress [J]. Geothermics, 1999(28): 507 - 518.
- [25] Xu T F, Sonnenthal E, Spycher N, *et al.* TOUGHREACT User's Guide: A Simulation Program for Non-isothermal Multiphase Reactive Geochemical Transport in Variably Saturated Geologic Media[R]. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory University of California. Berkeley: [s. n.], 2004.
- [26] Rutqvist J. Status of The TOUGH-FLAC Simulator and Recent Applications Related to Coupled Fluid Flow and Crustal Deformations[R]. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley: [s. n.], 2005.

Multi-field coupling for enhanced geothermal system development

WANG Xiao-xing^{1,2}, WU Neng-you^{1,2}, ZHANG Ke-ni³, SU Zheng^{1,2}, ZENG Yu-chao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academic of Science, Guangzhou 510640, China; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The enhanced geothermal system is defined as engineering reservoirs that have been created to economically extract heat for electric power production at depth ranging from 3 to 10km. As an important field of current geothermal development, the research is of interest to many developed countries, but China is still in its infancy. During the EGS operation, the design and operation of the fractured system are influenced by thermal - hydrologic - mechanical - chemical processes. This paper presents a brief analysis on the above four fields in EGS. Then the basic two-field coupling (T-H) is examined and the importance of T-H-M and the insignificance of T-H-M-C coupling are discussed. Related research progresses in numerical simulation are also introduced.

Key words: EGS; T-H-M-C coupling; numerical simulation; TOUGH2

责任编辑:汪美华