

# 深部能源开采中多场耦合模型研究现状

## ——以干热岩为例

李翰林<sup>1,2</sup>, 曹函<sup>1,2</sup>, 朱峻生<sup>1,2</sup>, 吕岩<sup>1,2</sup>, 朱凌<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

2. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 随着地球浅部能源资源的日益减少, 人类逐步向深部能源开发转型, 中国深部干热岩型地热资源具有巨大潜力, 但开发研究尚处起步阶段, 深部能源开采必然面临着高温、高应力、高渗透压力及水化学环境问题, 因此岩石 THMC(温度场+渗流场+力学场+化学场)多场耦合作用是当前研究的重点。本文介绍了多场耦合模型建立的方法及其发展过程, 概述了多场耦合模型在深部能源开采中的应用, 特别是增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)中的多场耦合问题和相关试验研究, 表明了EGS中的裂缝扩展、化学增产措施和力学参数研究是重点研究问题, 强调了深部能源开发的紧迫性和必要性, 为今后的研究和实践提供了重要的参考和指导。

**关键词:** 深部能源; 多场耦合模型; 增强型地热系统; 干热岩; 试验研究

中图分类号: P634; TE249 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2024)S1-0024-05

## Research status of multi-field coupling model in deep energy exploitation: A case study of hot dry rock

LI Hanlin<sup>1,2</sup>, CAO Han<sup>1,2</sup>, ZHU Junsheng<sup>1,2</sup>, LÜ Yan<sup>1,2</sup>, ZHU Ling<sup>1,2</sup>

(1. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** With the decreasing of shallow energy resources of the earth and the gradual transformation to deep energy development, China's hot dry rock geothermal resources have great potential, but the development and research is still in its infancy. Deep energy exploitation will inevitably face the problems of high temperature, high stress, high permeability pressure and hydrochemical environment. Therefore, the multi-field coupling effect of rock THMC (temperature field+seepage field+mechanical field+chemical field) is the focus of current research. In this paper, the method and development process of the multi-field coupling model are introduced, and the application in deep energy exploitation is summarized, especially the multi-field coupling problem in the Enhanced Geothermal System (EGS) and related experimental studies. The results show that the research on crack propagation, chemical stimulation measures and mechanical parameters in EGS is the key research problem. Moreover, the urgency and necessity of deep energy development are emphasized, which provides an important reference and guidance for future research and practice.

**Key words:** deep energy; multi-field coupling model; enhanced geothermal system; hot dry rock; experimental studies

## 0 引言

经过多年大规模开采, 地球浅部能源资源逐年

减少, 人类开采活动迈向地球深部地层。深部能源  
开采必然面临着高温、高应力、高渗透压力和复杂

收稿日期: 2024-07-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.004

第一作者: 李翰林, 男, 汉族, 2002年生, 硕士研究生, 资源与环境专业, 研究方向为深部岩体水力压裂, 湖南省长沙市麓山南路932号, 2672323863@qq.com。

引用格式: 李翰林, 曹函, 朱峻生, 等. 深部能源开采中多场耦合模型研究现状——以干热岩为例[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 24-28.

LI Hanlin, CAO Han, ZHU Junsheng, et al. Research status of multi-field coupling model in deep energy exploitation: A case study of hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 24-28.

的水化学环境问题,即岩体的温度-水流-应力-化学(THMC)多场耦合过程,这种耦合过程会改变岩石的物理力学性质,进而决定其宏观破裂模式及微观损伤过程,最终影响储层的开采效率。

增强型地热系统(EGS)是目前世界上唯一一种具有实际工程实践的干热岩(HDR, Hot Dry Rock)开发模式。岩石不仅是热能的载体,而且为增产后的热交换提供了人工通道,在EGS中,会在150~400℃的干热岩中创建扩展的裂缝网络,或扩大现有的裂缝网络,在深部地热能开发中起着重要的作用。但深部开采地热能面临复杂的原位应力场及其时空变化、应力状态量化、储层增产、多场耦合与渗透率演化以及诱发地震的岩石力学问题。

干热岩一般是指温度 $>180\text{℃}$ (甚至可达 $200\text{℃}$ 以上),埋深数千米,内部不存在流体或仅有少量地下流体(致密不透水)的高温岩体。干热岩作为一种新兴地热能源,其存量巨大,资源量全球陆区相当于4950万亿t标准煤,是全球所有石油、天然气和煤炭蕴藏能量的近30倍。中国大陆3~10 km深处的干热岩资源量约合856万亿t标准煤,占世界资源量的1/6左右,具有巨大的开发潜力。干热岩开采过程中涉及复杂的物理、化学及力学过程,特别是多场(温度场、应力场、渗流场、化学场)之间的相互作用与耦合,对开采效率、系统稳定性及环境影响具有显著影响。

## 1 多场耦合模型的建立

岩石的多场耦合并非所处多种物理场的简单叠加,而是各个物理场之间的相互影响和作用。Wang等<sup>[1]</sup>总结了多场耦合模型的3种方法:松散耦合、迭代耦合和全耦合。松散耦合是单向的,只传递流动解到地质力学计算,而地质力学解不反馈到流动计算。迭代耦合在每个时间步长中连续求解热流、流体和地质力学子系统的主要变量。先解流体方程,再将解传递至地质力学系统,反馈解回到流体系统,直至方程组收敛。全耦合法可以实现热流和流体流动以及地质力学的非线性偏微分方程组在每个时间步长同时求解。

岩石多场耦合的研究起源于对地下水资源开发和地下岩石工程行为的关注,早期的研究主要集中在渗流与地质力学之间的耦合作用,即HM耦合模型。近年来,随着地下工程的发展,学者们意识

到岩土体作为多孔介质,只考虑渗流场和应力场耦合,忽略温度-渗流-应力的相互作用,这将对高温环境下地下工程的安全高效的进行产生极大的影响。因此在HM模型中引入了热力场。

THM耦合模型描述了流体流动、热传导和变形之间的相互作用,其耦合过程可以表示为3个相互关联的偏微分方程:质量守恒、能量守恒和动力学守恒<sup>[2]</sup>。早期学者主要从岩石物理学参数随温度变化规律的角度研究了TM和HM耦合模型<sup>[3]</sup>。Abdallah等<sup>[4]</sup>根据具体的工程问题,简化了耦合过程,建立了THM不完全耦合模型;Zhang等<sup>[5]</sup>提出了完全耦合模型,充分反映了各种物理场之间的耦合关系。由于在地热储层中裂隙网络广泛存在,传统的多孔介质耦合模型受到限制,Nithiarasu等<sup>[6]</sup>基于双孔隙度模型,建立了各向异性储层和裂隙岩体的完整耦合THM模型;Chen等<sup>[7]</sup>构建了THM全耦合模型,将多孔介质中的单相流扩展为气液两相流。

在THM模型基础上引入化学场,建立THMC耦合模型(见图1)。化学场作用包括溶质运移和化学反应。溶质运移指浓度梯度下物质运动,化学反应涉及矿物溶解及对物理参数的影响和固体介质破坏。两者相互关联并影响彼此。Fan等<sup>[8]</sup>基于质量守恒定律和能量守恒定律建立了酸作用的THMC耦合模型;Xu等<sup>[9]</sup>提出了非均质裂隙碳酸盐岩地热储层酸性压裂过程中的全耦合THMC耦合模型。

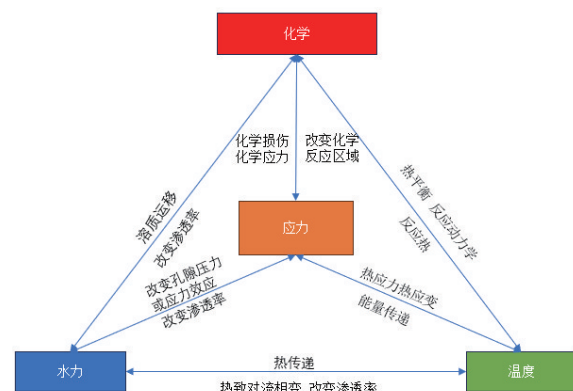


图1 THMC全耦合示意

## 2 多场耦合模型在EGS开采中的应用

### 2.1 多场耦合下EGS开采现场试验研究进展

针对深部能源开发,多场耦合研究岩石在温

度-渗流-应力-化学场的效应。EGS中,短期受温度-渗流-应力耦合影响。这些耦合可改变流体运移特性,增强裂缝网络渗透性,影响自然与诱发裂缝的网络几何形状,从而对渗透率和诱发地震活动产生重要影响。Park等<sup>[10]</sup>对韩国浦项地热项目地下4.3 km和1.4 km处PX-2井和PX-1井的第一和第二次水力压裂增产现场进行观测测试,观察和分析研究地层水力学和诱发地震特征;水力试验诱发局部地震发射(微震活动),由此可以得出大规模渗透率估计。Audigane等<sup>[11]</sup>将此法用于Soulz(法国)和Ogachi(日本)两个地热站点附近收集的6组数据,结果表明该方法能够较好地估计储层不同深度的大尺度渗透率张量,提供了与现场测量相匹配的压裂前介质渗透率。Delepine等<sup>[12]</sup>采用SBRC方法,利用法国索尔茨Soulz-2000水力压裂增产期间大约7200个地震事件来估计储层渗透率,估计了扩散系数值,结果与室内试验结果非常吻合。Rutledge等<sup>[13]</sup>通过手动在空间序列中重新选择传播时间,将微地震事件位置的精度提高了4倍,使其能够直观地关联相邻震源的波形,由此制作了德克萨斯州东部Carthage Cotton Valley气田水力压裂增产的高分辨率微地震图像,研究表明在注入增产过程中诱发地震活动性与低阻抗流体流动路径的相关性比通常假设的要强。Zoback等<sup>[14]</sup>在德国大陆深钻计划(KTB)的主孔中,于9.1 km深处(现场温度为260 °C)进行了一项流体注入诱发地震的实验,扩展脆性-韧性转变的深度和温度下储层的应力大小和脆性断裂的认识。

## 2.2 多场耦合下EGS室内试验研究进展

孔隙压力升高、温度变化、流体注入引起的体积变化和裂缝表面的化学变化是EGS储层渗透率变化的主要机制。同时在不同时间尺度下,THMC耦合过程对裂缝响应及储层渗透率具有显著影响,EGS裂缝网络保持长期可渗透的裂缝网络,确保注入流体与储层之间进行持续的热交换,是实现商业化的关键前提。然而,由于现场测试成本巨大,此类测试受到了限制,实验室规模试验就成了研究裂隙岩体的多场耦合作用的有效手段,不少学者对此进行了一系列室内试验。Ye等<sup>[15]</sup>考虑了渗流-应力-化学耦合作用,采用4个50 mm直径且含有一条张拉或锯切裂缝的圆柱形花岗岩试样,在三轴加载下进行新型水力压裂试验,通过逐步注入策略,捕

获与裂缝滑移相关的应力松弛,并允许在稳态流动状态下评估流体流动的测试方法,研究了EGS储层裂缝表面的流体力学响应,裂缝剪切过程中的渗透率演变、滑移特性和应力松弛特性。Bijay等<sup>[16]</sup>在Ye等<sup>[15]</sup>基础上考虑温度因素的影响,研究THMC耦合过程对裂缝响应的影响,在20、65和130 °C的温度下,对粗裂和锯切花岗岩试件进行了6次三轴渗流试验并对过程中裂缝的响应进行了研究,研究发现在20、65和130 °C温度下,水力压裂对粗裂缝S1、S2和S3的渗透率分别提高了1.4、1.5和8.5倍,表明升高的温度会促进粗晶降解和矿物溶解,并可能在水力压裂过程中诱导微裂纹在粗糙断口的扩展。Kamali-Asl等<sup>[17]</sup>通过在有效应力为5~36 MPa、岩石温度为25和130 °C、注入流体温度为25、75 °C的条件下的含人工裂隙花岗岩试件进行一系列渗流试验,研究了THMC耦合过程对裂隙孔径和渗透率的影响,并在较高的有效应力下观察到较高的裂缝闭合率,以及卸载阶段观察到裂缝渗透率和水力孔径的不完全恢复,突出了THMC耦合过程中力学参数的关键作用。

干热岩开采时,高温地热流体循环致岩石温度场巨变,热应力影响岩石应力状态,改变岩石力学性质,影响破坏模式和开采效率。同时,干热岩开采依赖于人工压裂形成的裂隙网络中的流体流动,流体在裂隙中的渗流会改变岩石的应力状态,反之,岩石应力的变化也会影响裂隙的开合度及渗透率,形成渗流场与应力场的双向耦合。Yu等<sup>[18]</sup>针对液氮、水及自然冷却3种冷却方式对花岗岩物理力学性能的影响进行实验研究。实验结果显示,液氮冷却对花岗岩破坏最显著,水冷却次之,自然冷却影响最小,得出结论流体温度越低,高温岩石温差越大,井筒围岩力学性能弱化越大。并且还发现,当岩石温度 $<400$  °C时,不同冷却方式对高温花岗岩的性能影响不显著,但当岩体温度 $>400$  °C时,不同冷却方式对高温花岗岩的性能影响显著,因此可以推断400 °C是该花岗岩性能的阈值点。基于实验结果和损伤力学,修正了岩石破坏准则,建立了热流固耦合井筒稳定性模型,同时还总结了井筒温度、应力和损伤随时间的变化规律。Wang等<sup>[19]</sup>以大理岩为例,通过数值模拟与室内实验相结合的方法进行相互验证,采用弹性模量法和峰值应力法对大理岩的损伤程度进行定量分析所得结论基本一

致,研究大理岩在30、60、90、120、150℃条件下的热-力学损伤及破坏机理。结果表明在干热岩储层温度条件下,与常温环境相比,大理岩的破坏模式呈现塑性特征。颗粒流动模拟分析模型得到的大理岩高温三轴应力-应变曲线与室内三轴实验结果基本一致,颗粒流程序可作为定量研究岩石热损伤的重要工具;针对在热流固耦合作用下,套管-水泥环胶结面的破裂机理。赵新波等<sup>[20]</sup>考虑套地层孔隙水压力、温差热载荷及热渗效应,建立了干热岩地热井套管-胶结面-水泥环-地层热流固耦合模型,分析胶结面热流固耦合参数对径向应力的影响,结果表明:与水泥环属性相近、地层温度低、胶结面孔隙率小的条件有利于保持组合体完整性。该结论对保护井筒完整性具指导意义。

在化学场与应力场的耦合中,地热流体中溶解的矿物质与岩石基质之间发生的化学反应(如水岩反应)会改变岩石的矿物组成和物理力学性质,进而影响岩石的应力响应。同时,岩石应力的变化也可能加速或抑制某些化学反应的进行。Zhang等<sup>[21]</sup>考虑低温诱导的热应力,通过花岗岩高温压裂实验对建立的三维THMD耦合模型进行验证,研究了超临界CO<sub>2</sub>(SCCO<sub>2</sub>)和水力压裂对干热岩的压裂机理。结果表明,低温诱导的热应力在水力压裂的协同作用下降低了开裂压力,并倾向于形成分支断裂;采用SCCO<sub>2</sub>在高阻压裂中可以在近井区产生更多的微裂缝,但水力压裂具有较好的冷却效果和较好的裂缝延伸能力。对于干热岩压裂,随着注入流量的增加,裂缝网络范围呈现先增大后减小的趋势且低粘度和高比热容的压裂液有利于裂缝网络的形成。Song等<sup>[22]</sup>通过THMC耦合作用对页岩进行软化处理,开展压裂液对岩石物力特征弱化效应的研究,模拟水力压裂过程中及压裂后深层储层高温高压岩石-流体相互作用,结果表明:经处理后,由于碳酸盐溶蚀、黄铁矿氧化和粘土矿物渗透溶胀导致的孔隙结构和裂纹扩展使岩石杨氏模量、硬度和断裂韧性显著降低,加强了页岩-压裂液的相互作用,以及在高温高压下深层储层中页岩软化的现象行为的认识。Zhuang等<sup>[23]</sup>针对化学和微波处理对不同岩性和温度岩石样品抗拉强度的影响这一问题开展一系列试验研究,进行实时高温巴西劈裂试验,量化抗拉强度,模拟了干热岩石的高温环境,首次对比分析了微波或化学处理对不同岩性和温度

下岩石样品结构损伤和抗拉强度的影响。实验结果表明:化学处理和微波处理均加重了热处理岩石的损伤,且对不同岩性的热处理岩石均有显著影响;可溶矿物比例高的试样经化学溶解,强微波吸收矿物比例高的试样经微波辐照后,其纵波速度较低,抗拉强度较低,开孔率较高,微观结构损伤较严重;岩石类型变化对试样微结构损伤和拉伸强度弱点的影响比对化学刺激物类型或微波功率的影响更为显著。因此,根据干热岩的岩性选择水力压裂辅助技术至关重要。

### 3 难点与挑战

目前研究重难点在于干热岩的物理、力学、热学及化学参数研究。

物理和热学参数是岩石与流体之间以及岩石内部热交换的基础。三个基本热参数(导热系数、热扩散系数、热容)及密度等干热岩参数决定热传导率。岩石物性和热参数也是评价温压相关性等数字模型的基础。加强不同压力和温度条件下这些基本参数的研究,有助于准确评价深层地热开发过程中的关键参数。渗透率是影响储层导流能力的关键参数,其演化集中在压裂和循环阶段。提高岩石渗透性面临挑战,如实验室与现场估计的渗透率结果存在差别,需考虑储层尺度的流体流动表征和实验室结果的规模效应。油藏裂缝孔径不均匀导致流量差异,多场耦合条件下裂缝演化不均匀,需进一步研究

干热岩的化学性质影响流体流动路径和机器与套管的腐蚀。在压裂和循环过程中,可以在裂缝性储层中加入化学溶液以减小注采井之间的阻抗。化学试剂的选择、溶液的浓度、工艺流程和时间控制是其变量。大型岩石裂缝的化学增产特征不清楚。

THMC耦合下岩石力学特性与变形、损伤等有关,与地质环境共同影响裂缝网络质量。深层地热工程中的流体短路等问题与岩石力学性质密切相关。地热压裂的目的是建立足够的裂缝网络,具有空间规模和数量、裂缝孔径、连接、密封性等特征,但目前的压裂裂缝网络与理想特性相距甚远。EGS项目在不同压力下进行多次增产和循环,导致流体压力对岩石产生循环应力。不均匀的原位应力和加载历史对岩石压裂的影响尚未得到很好的

理解。应加强对真实地质环境下裂缝形态和演化的研究,特别是对风化不均匀性的研究。

#### 4 结论

本文综述了深部能源开采中多场耦合模型的研究现状,特别是以干热岩为例,深入探讨了多场耦合模型在地热储层开发中的应用。文章涵盖了地热储层的地震活动、热产生、渗透性变化、水力压裂及其微地震效应等多个方面的研究,同时总结了多场耦合模型在物理实验及实际EGS和干热岩注采项目中的试验进展。

#### 参考文献:

- [1] Wang L, Wang S, Zhang R, et al. Review of multi-scale and multi-physical simulation technologies for shale and tight gas reservoirs [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 37: 560-78.
- [2] Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering [J]. 2003, 40(3): 283-353.
- [3] Seipold U. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks: A general law [J]. *Tectonophysics*, 1998.
- [4] Abdallah G, Thoraval A, Sfeir A, et al. Thermal convection of fluid in fractured media [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(5): 481-90.
- [5] Zhang N, Luo Z, Chen Z, et al. Thermal hydraulic mechanical chemical coupled processes and their numerical simulation: a comprehensive review [J]. *Acta Geotechnica*, 2023: 1-22.
- [6] Nithiarasu P, Sujatha K, Ravindran K, et al. Non-Darcy natural convection in a hydrodynamically and thermally anisotropic porous medium [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, 188(1-3): 413-30.
- [7] Chen Y, Zhou C, Jing L. Modeling coupled THM processes of geological porous media with multiphase flow: theory and validation against laboratory and field scale experiments [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(8): 1308-1329.
- [8] Fan C, Luo M, Li S, et al. A thermo-hydro-mechanical-chemical coupling model and its application in acid fracturing enhanced coalbed methane recovery simulation [J]. *Energies*, 2019, 12(4): 626.
- [9] Xu H, Cheng J, Zhao Z, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical modeling on acid fracturing in carbonatite geothermal reservoirs containing a heterogeneous fracture [J]. *Renewable Energy*, 2021, 172: 145-57.
- [10] Park S, Kim K-I, Xie L, et al. Observations and analyses of the first two hydraulic stimulations in the Pohang geothermal development site, South Korea [J]. *Geothermics*, 2020, 88: 101905.
- [11] Audigane P, Royer J-J, Kaieda H. Permeability characterization of the Soultz and Ogachi large-scale reservoir using induced microseismicity [J]. *Geophysics*, 2002, 67(1): 204-11.
- [12] Delepine N, Cuenot N, Rothert E, et al. Characterization of fluid transport properties of the hot dry rock reservoir Soultz-2000 using induced microseismicity [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2004, 1(1): 77-83.
- [13] Rutledge J T, Phillips W S. Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas [J]. *Geophysics*, 2003, 68(2): 441-52.
- [14] Zoback M D, Harjes H P. Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B8): 18477-91.
- [15] Ye Z, Ghassemi A. Injection-induced shear slip and permeability enhancement in granite fractures [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(10): 9009-9032.
- [16] Bijay K, Ghazanfari E. Geothermal reservoir stimulation through hydro-shearing: An experimental study under conditions close to enhanced geothermal systems [J]. *Geothermics*, 2021, 96: 102200.
- [17] Kamali-Asl A, Ghazanfari E, Perdril N. Experimental study of fracture response in granite specimens subjected to hydrothermal conditions relevant for enhanced geothermal systems [J]. *Geothermics*, 2018, 72: 205-224.
- [18] Yu Suo, DongMuyu, FuXiaofei, HeWenyuan, PanZhejun, Experimental and numerical simulation research on hot dry rock wellbore stability under different cooling methods [J]. *Geothermics*, 2024, 119: 102977.
- [19] Wang Z H, Feng C, Dong Z K, et al. Study on the influence of temperature on the damage evolution of hot dry rock in the development of geothermal resources [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 241: 213171.
- [20] 赵新波,秦翊玮,吕健,等. 热流固耦合作用下干热岩地热井套管-水泥环胶结面应力场分析 [J/OL]. *工程科学与技术*, 1-17 [2024-08-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240531.0900.003.html>.
- [21] Zhang W, Wang Ch G, Guo T K, et al. Study on the cracking mechanism of hydraulic and supercritical CO<sub>2</sub> fracturing in hot dry rock under thermal stress [J]. *Energy*, 2021, 221: 119886.
- [22] Song J, Xiang D, Zhao S, et al. Shale softening degree and rate induced by fracturing fluid under THMC coupling condition [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 96: 104294.
- [23] Zhuang D D, Yin T B, Zhang Z X, et al. Experimental study on the effects of chemical or microwave treatment on the tensile strength of hot dry rock [J]. *Energy Renewable*, 2024, 223: 120039.

(编辑 王文)