进展

干热岩地热储层钻井和水力压裂工程技术难题和攻关建议

周舟, 金衍*, 卢运虎, 周博成

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

*联系人, E-mail: jiny@cup.edu.cn

收稿日期: 2018-05-10; 接受日期: 2018-07-18; 网络出版日期: 2018-11-06

中国石油大学(北京)科研基金(编号: 2462016YJRC017)资助项目

摘要 干热岩地热资源是清洁能源的一种, 也是国家能源战略优化的关键措施之一. 对干热岩储层的开发是通过钻井和水力压裂建立人工热储构造, 利用地热水循环提取热量, 达到地热发电和供暖综合利用的目标. 其中干热岩储层钻井和水力压裂施工是开发成功的关键. 但是国内对于干热岩地热储层的开发才刚刚起步, 针对干热岩的钻井和水力压裂技术还处于探索阶段, 相关研究也还不成熟. 本文综合前期研究基础和国内外实地调研, 从干热岩地热储层地质条件、岩石物理和化学性质以及目前的施工手段等总结了钻井与水力压裂工程技术难题和前期的经验教训, 并提出了今后的理论研究方向和技术攻关建议. 以便尽快实现我国干热岩储层钻井和水力压裂配套工程技术, 促进干热岩资源的有效利用.

关键词 干热岩, 地热资源, 钻井, 水力压裂

PACS: 88.10.Eb, 88.10.fe, 88.10.G-

1 引言

干热岩(Hot Dry Rock, HDR), 指内部不存在流体或仅有少量流体, 温度高于200°C的高温岩体, 普遍埋藏深度4–8 km. 在我国, 干热岩地热资源储量十分丰富, 目前探测总量达到 2×10^{25} J, 相当于5万亿吨液化石油气. 因此, 国家地热能开发利用“十三五”规划专门明确指出要积极探索和开发干热岩的各项技术和示范基地的建设, 积累经验为后续推广做准备.

增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems,

EGS)是开发干热岩资源的具体工程手段, 通过钻完井建立注入井和生产井, 并通过水力压裂建成裂缝沟通, 最终形成“人造地热田”. 在注入井和生产井中循环地热水, 通过热交换提取裂缝中的地热能, 从而达到地热发电和综合供暖利用的目标. 国际上利用干热岩地热资源开发理论进行开发的储层主要分布在美国、欧洲、日本和韩国. 而我国在干热岩地热储层的开发上面才刚刚起步, 现阶段只开展了干热岩的钻井工作, 针对干热岩的水力压裂技术还处于经验摸索阶段. 因此本文总结国外干热岩储层开发过程中的工程技术难

引用格式: 周舟, 金衍, 卢运虎, 等. 干热岩地热储层钻井和水力压裂工程技术难题和攻关建议. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 124621
Zhou Z, Jin Y, Lu Y H, et al. Present challenge and prospects of drilling and hydraulic fracturing technology for hot dry rock geothermal reservoir (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 124621, doi: [10.1360/SSPMA2018-00184](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00184)

点问题, 抛砖引玉提出了今后相关的重点攻关方向.

2 国内外干热岩储层开发现状总结

干热岩开发始于20世纪70年代. 根据增强型地热系统开发构想, 相继在国外多个地热田开展了现场钻井和水力压裂试验: 美国Fenton Hill地热储层^[1,2]、美国Geysers地热储层^[3]、法国Soulzt-sous-Forêts地热储层^[1,4,5]、英国Rosemanowes地热储层^[1,6]、瑞士Basel Basin地热储层^[7]、德国Groß Schönebeck干热岩储层^[8,9]、日本Ogachi地热储层^[6]、日本Hijiori地热储层^[1]、韩国Pohang地热储层^[10]. 其中英国、瑞士和日本的干热岩项目已经结束试验. 法国上莱茵河的Soulzt-sous-Forêts工程已经成功实现了 1.5×10^4 kW的干热岩发电^[11]. 美国预期在2050年实现干热岩发电超过 10×10^4 MW.

中国的干热岩开发还处于试验探索阶段. 2013年, 青海省地质调查局在青海共和盆地开展了干热岩钻井实践^[12,13], 在盆地北部钻成了井深 3705 m, 温度达236°C的干热岩井. 2015年, 中国地质调查局在福建漳州居里面隆起启动了我国第一口4000 m花岗岩干热岩HDR-1井科学钻探工作, 但因为井底温度与预期温度相差太大而停止试验. 2017年, 中国地质调查局在广东惠州又开始了新一轮干热岩勘探开发工作.

截止到2017年, 全球主要干热岩地热储层开发现状见表1. 在这些干热岩储层开发的过程中, 不论是投产发电, 还是已经停止试验的, 在钻井和水力压裂等工程实践中都有一些共性的难题. 下面着重分析这些工程技术的难题.

3 钻井技术难点分析

干热岩地热储层的岩石岩性大部分为火成岩, 少量储层为火成岩和变质岩的混合物. 因此, 其岩石普遍较为坚硬, 导致储层的可钻性较差, 破岩效率低. 同时, 复杂地层情况和储层高温导致在钻井过程中井下事故频发, 且大部分钻井工具在高温下无法正常工作, 导致钻井施工的不可控因素增多. 综合分析下, 国内外干热岩钻井的主要难题有以下3个.

(1) 破岩效率低

国内外干热岩地热储层岩石以火成岩为主的储层

有: 美国的Desert Peak地热储层^[6]、英国的Rosemanowes干热岩储层^[1]、瑞士的Basel Basin干热岩地层^[7]、法国的Soulzt-sous-Forêts干热岩储层^[11]以及韩国的Pohang干热岩地层^[10]. 中国的福建漳州^[14]和青海共和盆地的干热岩储层^[12]的岩石也均为火成岩.

储层岩石为火成岩和变质岩混合体的储层有美国的Brady's Hot Springs地热储层, 其储层是上部为火成岩, 下部为变质岩^[6]. 美国的Fenton Hill地热储层, 其储层岩石主要由火成岩和变质岩的混合物基岩组成^[1].

美国Geysers地热储层主要岩石为硬砂岩, 上部盖层为低渗透混合岩性岩石, 下部为结晶岩石^[6,15].

研究表明, 干热岩地热储层的岩石比常规石油开采中的储层岩石更加坚硬, 储层的可钻性较差, 破岩效率低(表2列出了几个储层岩石杨氏模量的比较).

因此, 在实际钻井过程中, 破岩效率低的难题体现的很明显. 例如在美国Geysers地热储层的钻井时, 在钻进到储层的花岗岩储层段时, 钻井速度从6 m/h降到了3 m/h. 且钻头只钻进了30 m就完全损坏, 而在非储层段单个钻头的钻进深度可以达到100 m以上^[6].

福建漳州干热岩项目中, 在钻入储层后的钻进速度只有1.2 m/h. 而在塔里木油田, 相同深度的地层钻进速度可以达到10–20 m/h.

(2) 井下事故频发

干热岩地热储层多选在天然裂缝发育地区或断层附近, 例如法国的Soulzt-sous-Forêts储层^[1]、瑞士的Basel Basin干热岩储层^[7]和德国Groß Schönebeck干热岩储层^[9]都处于同一个断裂带的不同位置上, 储层内均含有多条裂谷和断层带, 福建漳州^[14]和青海共和干热岩储层^[13]也是含有多条断裂带. 虽然不能认为存在裂隙、断层和裂缝发育带就一定会造成钻井事故和复杂问题, 但是这些复杂的井下地质条件, 会导致钻井过程中特别容易出现各种井下状况.

干热岩储层最常见的问题是井底漏失. 美国Fenton Hill干热岩储层钻井时, 每口井钻遇储层都发生了井底漏失. 最严重的漏失量达到几十升每分钟, 60%的钻井液没有上返, 最后不得不绕过裂缝区域, 重新侧钻. 日本Ogachi干热岩储层钻井时发生的井底漏失高达90%^[6], 钻井施工一度陷入困境, 采取了多种措施处理井漏后才能继续钻进.

井壁坍塌也是干热岩储层钻井中常见的问题. 虽

表 1 主要地热资源项目开发现状(截止到2017年)**Table 1** Major geothermal development projects (By the end of 2017)

国家	地热储层	开发现状
中国	青海共和地热储层	正在开发
	福建漳州地热储层	项目停止: 储层温度偏低
	广东惠州地热储层	正在开发
美国	Fenton Hill地热储层	投产发电
	Geysers地热储层	
	Desert Peak地热储层	
	Brady's Hot Spring地热储层	
	Newberry Volcano地热储层	
	Raft River地热储层	
法国	Soultz-sous-Forêts地热储层	投产发电
英国	Rosemanowes地热储层	项目停止: 注水开采循环测试后发现地层的热量下降很多, 失去后续开发经济价值
瑞士	Basel Basin地热储层	项目停止: 水力压裂作业时频繁引发地震
德国	Groß Schönebeck地热储层	正在开发
日本	Ogachi地热储层	项目停止: 水力压裂裂缝预测错误, 压后渗透率依然偏低
	Hijiori地热储层	项目停止: 想通过水力压裂连通注入井和生产井的努力没有成功, 液体漏失超过70%
韩国	Pohang地热储层	正在开发

表 2 储层岩石的杨氏模量(单轴岩石力学测试)**Table 2** Young's modulus in various formations (uniaxial test)

储层岩石	杨氏模量 (GPa)	储层岩石	杨氏模量 (GPa)
龙马溪深层页岩	24–30	塔河碳酸盐岩	10–15
塔里木深层砂岩	32–46	干热岩	46–52

然普遍认为干热岩储层岩石坚硬容易保证井壁稳定, 但是在实际过程中因为储层中的裂缝和断层的影响, 井壁坍塌也很严重. 美国Fenton Hill^[6]和韩国Pohang干热岩地热储层^[10]都遇到井壁坍塌和井眼缩径的问题. 福建漳州干热岩项目的井壁坍塌掉块导致钻具遇卡, 最后只能侧钻.

综合起来看, 干热岩储层的井下钻井事故发生的主要原因是储层缺乏清晰的认识, 缺少高温井的测井数据和分析, 导致钻井方法和预防措施不能适应干热岩储层.

(3) 钻井工具抗高温能力不足

不论是钻头、钻井液, 还是各种井下工具, 在干热岩储层钻井时都要适应井下高于250°C的高温. 而据统计, 目前大多数钻井工具都只能在低于200°C左右的温度下运行, 高温下工具的效能大大降低, 工具的

损耗大大增加, 因此极大地限制了钻井作业的效率 and 增加了成本.

4 水力压裂技术难点分析

在干热岩开发过程中, 形成增强型地热田的重点是形成长期稳定的换热区域. 因此通过水力裂缝系统连通储层和注入井生产井是开发的关键内容. 但是在国内外有限的干热岩水力压裂作业过程中, 发现的主要难点问题有如下几点.

(1) 岩石破裂压力极高

与钻井过程中的破岩效率低的原因类似, 因为干热岩储层岩石基质非常坚硬, 导致破裂压力极高, 所以水力压裂时所需的泵入压力也不得不大幅提高.

韩国Pohang干热岩地热储层在井深为4100 m处开

展水力压裂施工, 初期预测破裂压裂不超过 60 MPa. 但是实际施工过程中泵入压力超过 100 MPa 后仍然没有压开, 最后不得不停止施工, 改变压裂位置重新压裂.

国内虽然还没有开展干热岩储层的水力压裂施工, 但是在前期中国石油大学(北京)岩石力学实验室进行的大尺寸真三轴水力压裂物理模拟实验中发现, 如果水力裂缝要在干热岩花岗岩岩石基质中起裂, 注入压力能达到 70 MPa, 甚至更高. 而常规致密砂岩或者深层碳酸盐岩储层的注入压力只在 20–50 MPa 之间. 但从实验中还发现, 若受到干热岩岩石中的天然裂缝影响, 起裂压力可以极大的减小, 注入压力变为 20–37 MPa 之间^[16].

从实验中得到的这个规律也解释了为什么大多数干热岩储层开发都要选在天然裂缝发育丰富和断裂带多的区域. 韩国 Pohang 干热岩储层在首次水力压裂没有压开岩石基质后, 选择在裂缝带进行重新压裂, 从而顺利实施了水力压裂作业. 而设计时就直接选在断层带进行水力压裂的日本 Hijiori 干热岩储层的井口最大压力只要 17 MPa (井深 1800 m); 法国 Soultz-sous-Forêts 干热岩地热储层第三期开发时的水力压裂施工的最大井口压力只需 14 MPa (井深 5000 m). 比较裂缝带和基质中的水力压裂的井口压力可以得出结论, 干热岩储层中的天然裂缝和断裂带可以有效降低压裂施工难度, 更容易形成水力裂缝.

(2) 压裂液漏失严重

虽然国外干热岩储层水力压裂施工的位置选在天然裂缝发育丰富的区域可以有效地减小泵入压力, 但同时又带来了严重的压裂液漏失的新问题.

日本 Hijiori 干热岩储层井口泵入压力虽然低, 水力裂缝成功起裂. 但是在裂缝延伸过程中发现 70% 以上的压裂液沿着天然裂缝和断层流走不知所踪, 导致水力裂缝不能按照预想的方向延伸. 最后, 注入井和生产井虽然只间隔 50 m 却依然无法通过水力裂缝连通, 造成施工失败, 项目被迫暂停^[6].

法国 Soultz-sous-Forêts 干热岩地热储层第三期水力压裂时, 90% 的注入水都流到断层中, 快速大量的压裂液漏失会导致压裂增长很快停止, 结果导致注入井和生产井没有有效的沟通^[1].

(3) 水力裂缝扩展预测困难

在干热岩储层中, 高温等复杂环境造成测量和监

测数据缺失, 导致对预测水力裂缝的形态和延伸方位较困难. 也是造成韩国 Pohang 干热岩地热储层首次压裂时破裂压裂预测偏低的主要原因之一.

除了对储层裂缝系统缺乏认识, 导致水力裂缝若沿天然裂缝扩展无法预测其形态以外, 另一个预测困难的重要原因是地应力数据不准确. 美国 Fenton Hill 干热岩储层水力压裂后发现水力裂缝的实际扩展方向与预测的方向正好相反, 且压裂实际影响区域也比预测的小^[6]. 究其原因是对储层地应力大小和方向缺乏准确的数据, 只对浅部地应力进行了测量, 以为可以代表储层的地应力状态, 却不知在干热岩储层中的地应力与浅部的相差过大, 所以导致水力裂缝扩展预测的错误.

英国 Rosemanowes 干热岩储层在水力压裂时本预计裂缝会向上延伸从而连通上部的生产井和下部注入井. 但实际情况是水力压裂后发现裂缝是往下延伸的, 注入井和生产井没有有效的沟通^[6]. 并且发现只有近井地带的裂缝是新创造的, 再往远处延伸都只是压开已有的天然裂缝, 裂缝延伸形态更加难以预测, 且导致大量的井底漏失.

5 干热岩储层工程技术攻关建议

以上讨论的干热岩储层钻井和水力压裂施工中的难题是总结了国外 40 多年干热岩储层开发后发现的共性问题, 我国在干热岩开发中也会遇到相似的问题. 因此为了保证我国的干热岩开发能顺利的施工, 我们需要针对干热岩储层的特殊情况, 结合已有的研究成果, 对相关的干热岩储层钻井和水力压裂技术难点进行系统性的技术攻关.

(1) 干热岩储层高温复杂环境下岩石力学行为和破坏机理研究. 系统开展高温高压下干热岩岩石的岩石力学实验, 明确其变形破坏特征及破坏规律, 建立非线性本构和破坏准则. 在此基础上探寻针对干热岩岩石有效的破岩手段.

(2) 干热岩储层井壁失稳预测模型研究. 基于干热岩地层特征, 考虑温度、化学、孔隙弹性及动力学效应, 建立基于孔隙弹性动力学井壁失稳预测模型, 分析温度、压力及工况对井壁稳定的影响.

(3) 干热岩储层耐高温工具的研究. 针对干热岩储层高温的特性, 因此需要研究适合于干热岩储层环境

的钻头、破岩工具、测井工具以及工作液体系。

(4) 干热岩储层裂缝形成机制的研究. 在已有的岩石破裂和裂缝扩展模型的基础上, 增加考虑温度-流体-应力-化学多场耦合效应对裂缝形态的影响, 分析温度、热膨胀系数、孔隙度、应力、天然裂缝等因素对裂缝起裂和扩展的影响规律和控制方法。

(5) 干热岩储层裂缝导流能力研究. 针对干热岩水力压裂时不采用支撑剂, 通过构建剪切缝来达到自支撑的目标, 研究自支撑裂缝的构建方法以及自支撑导流能力的可靠性和有效性与裂缝壁面的矿物成分、破坏强度、应力变化之间的关系, 最终建立干热岩缝网长效导流能力的控制理论。

(6) 干热岩储层水力压裂数值模拟研究. 干热岩储层水力压裂数值模拟需要建立考虑温度场、渗流场、应力场多场耦合的裂缝扩展数值模拟计算方法, 从而开发出多场耦合条件下多尺度干热岩岩体三维裂缝网

络仿真数值模型, 为后续的水力压裂设计和施工提供基础。

6 结束语

最终评价干热岩开发成功的重要标准是其发电的价格具有竞争力. 要达到这个标准, 就需要尽可能多地降低开发成本, 特别是要降低前期钻井和水力压裂等工程施工上的成本. 国外干热岩开发虽然已经取得了一些成果, 建立了示范基地, 形成了配套的钻井和水力压裂工程技术, 但是针对干热岩储层的钻井和水力压裂还存在很多的难题没有得到解决, 导致干热岩资源的可持续发展的经济性效益不足. 因此我国在开发干热岩资源的过程中需要对这些难点问题重点研究和持续攻关, 通过解决好这些工程技术难题, 从而更好地促进我国干热岩资源的勘探开发应用。

参考文献

- 1 Jung R. EGS-goodbye or back to the future. In: Proceedings of International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing 2013. Brisbane, 2013. 95–121
- 2 Duchane D, Brown D. Hot dry rock (HDR) geothermal energy research and development at Fenton Hill, New Mexico. *GHC Bull*, 2002, 23: 12–19
- 3 Chabora E, Zemach E, Spielman P, et al. Hydraulic stimulation of well 27-15, Desert Peak geothermal field, Nevada, USA. In: Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: International Geothermal Association, 2012. 519–520
- 4 Genter A, Goerke X, Graff J J, et al. Current status of the EGS Soultz-sous-Forêts geothermal project (France). In: Proceedings of World Geothermal Congress 2010. Bali: International Geothermal Association, 2010. 25–29
- 5 Tischner T, Schindler M, Jung R, et al. HDR project Soultz-sous-Forêts: Hydraulic and seismic observations during stimulation of the 3 deep wells by massive water injections. In: Proceedings of 32nd workshop on Geothermal Engineering. Stanford, 2007
- 6 Ziagos J, Phillips B R, Boyd L, et al. A technology roadmap for strategic development of Enhanced Geothermal Systems. In: Proceedings of 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, 2013
- 7 Häring M O, Schanz U, Ladner F, et al. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics*, 2008, 37: 469–495
- 8 Schellschmidt R, Sanner B, Pester S, et al. Geothermal energy use in Germany. In: Proceedings of World Geothermal Congress 2010. Bali: International Geothermal Association, 2010
- 9 Weber J, Ganz B, Schellschmidt R, et al. Geothermal energy use in Germany. In: Proceedings of World Geothermal Congress 2015. Melbourne: International Geothermal Association, 2015
- 10 Song Y, Lee T J, Jeon J, et al. Background and progress of the Korean EGS Pilot Project World. In: Proceedings of World Geothermal Congress 2015. Melbourne: International Geothermal Association, 2015
- 11 Sausse J, Genter A. Types of permeable fractures in granite. *Geol Soc London Spec Publ*, 2005, 240: 1–14
- 12 Wang M D, Guo Q H, Yan W D, et al. Medium-low-enthalpy geothermal power-electricity generation at Gonghe Basin, Qinghai Province (in Chinese). *Earth Sci-J China Univ Geosci*, 2014, 9: 1317–1322 [王敏黛, 郭清海, 严维德, 等. 青海共和盆地中低温地热流体发电. 地球科学-中国地质大学学报, 2014, 9: 1317–1322]
- 13 Zheng K Y, Chen Z H. Hot dry rock development in China: A long way to go (in Chinese). *Sino-Glob Energ*, 2017, 22: 21–25 [郑克模, 陈梓慧. 中国干热岩开发: 任重而道远. 中外能源, 2017, 22: 21–25]

- 14 Lin W J, Wang F Y, Gan H N, et al. Site selection and development prospect of a hot dry rock project in Zhangzhou geothermal field, Fujian Province resource (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2015, 33: 28–34 [蔺文静, 王凤元, 甘浩男, 等. 福建漳州干热岩资源选址与开发前景分析. *科技导报*, 2015, 33: 28–34]
- 15 Garcia J, Walters M, Beall J, et al. Overview of the northwest geysers EGS demonstration project. In: *Proceedings of Thirty-Seventh Workshop Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, 2012
- 16 Zhou Z, Jin Y, Zeng Y, et al. Experimental study of hydraulic fracturing in Enhanced Geothermal System. In: *52nd US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium*. Seattle: American Rock Mechanics Association, 2018

Present challenge and prospects of drilling and hydraulic fracturing technology for hot dry rock geothermal reservoir

ZHOU Zhou, JIN Yan^{*}, LU YunHu & ZHOU BoCheng

State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

The hot dry rock geothermal energy is one kind of the clean energies which are contained in the China National Energy Strategy. This strategy is to encourage the development of the green and clean energy instead of the fossil energy. In the development of hot dry rock (HDR), the artificial geothermal reservoir is built through drilling and hydraulic fracturing. Two wells are drilled and connected by hydraulic fractures. Then, the geothermal energy can be extracted by the water circulation. The cold water is injected into one of the two wells and flowed along with the hydraulic fractures. The water becomes gas when it contacts the formation rock because of the high temperature. The phase change since the temperature and pressure are reduced at the wellhead of the another well can provide power to generate electricity. Therefore, the key technology to build artificial geothermal reservoir is drilling and hydraulic fracturing. However, there is few experiences in drilling and hydraulic fracturing in the HDR in China. This paper summarized and analyzed the research and field cases around the world to investigate the challenges and key points during drilling and hydraulic fracturing in the HDR. The investigation was based on geology condition, rock physics and chemistry, and field operation during the HDR development. The summary provided the common problems and experience of the drilling and hydraulic fracturing. In addition, the further research directions of related technologies were expounded. Finally, this paper could be referenced for the drilling and hydraulic fracturing in the development of HDR in China for effective utilization.

hot dry rock, geothermal energy, drilling, hydraulic fracturing

PACS: 88.10.Eb, 88.10.fe, 88.10.G-

doi: [10.1360/SSPMA2018-00184](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00184)