

干热岩开发循环试验的研究进展和发展建议

王 丹, 文冬光, 杨用彪, 杨伟峰, 金显鹏, 吴 斌

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心)

摘 要:干热岩是一种开发前景广阔的地热资源。增强型地热系统是当前干热岩开发的主要方式,需要通过多个工程环节衔接实施,循环试验是其中的重要步骤。循环试验实施过程具有长期性和复杂性的特点,亟需技术突破降本增效。

本文简要总结了国内外较为典型的干热岩开发 EGS 工程的循环试验经验和探索方向,阐述了多种因素对于循环试验的影响,并结合青海共和场地的实际情况提出了发展建议。可以看出,以往提高循环试验效果主要是通过开发层位及井组调整、长期循环、储层改造以及化学刺激等方法实现的,而当前技术人员主要通过解决准确获取工程参数,以及改进注采井组设计和储层改造工艺进行探索。循环试验的方案制定需要充分考虑地质因素,且数值模拟、储层刺激、流程设计、工程实施等方面都值得进行深入研究。随着开发技术的日趋成熟,干热岩地热资源将会成为我国能源结构中的重要一环,为经济发展和环境保护发挥重要的作用。

干热岩资源是一种储量丰富的清洁无污染能源,我国大陆地区 3.0 ~ 10.0km 深处的干热岩资源量相当于 860 万亿吨标准煤,开发潜力巨大,因此干热岩开发是地热资源综合利用方面的一个重要的研究问题。突破干热岩开发技术,可以有效补充地热清洁能源在能源消费结构中的占比,对减少化石能源消费,缓解环境污染,保障能源安全都有重要的意义。目前,干热岩开发主要采用增强型地热系统,即 EGS 系统的方式实现,且相比于水热型和沉积含水层型地热能的 EGS 系统,其技术难度更高,流程更复杂。目前国际上已开展的 EGS 项目约有 41 个,自 1973 年美国 Fenton Hill EGS 工程启动后,通过多个干热岩场地的试验,已经证明通过 EGS 工程实现发电是可行的,其中法国 Soultz 工程的发电功率达到了 $1.5 \times 10^3 \text{ kW}$ 。但

是,由于存在着钻井施工、热储建造、循环试验和电厂运行等方面的诸多问题,有 48 个项目面临挑战或被迫终止,因此 EGS 工程的技术探索仍然任重道远,总结循环试验的施工经验,明确问题解决方向,对技术进步具有重要的意义。

EGS 工程的实施主要包括工程选址、地热钻井、热储建造、循环试验和调试发电等几个环节。循环试验是承接热储建造和发电工程的重要步骤,其施工以人工热储的建造与评价为基础,过程具有长期性和复杂性的特点,常常和钻井及压裂施工交错进行,国际上的 EGS 工程循环试验施工常伴随较大的方案调整,最终形成较为稳定的开发层位和注采模式。循环试验的探索过程中,发生过循环减阻效果慢、连通不足、微震过强、液体漏失、循环液结垢、设备可靠性不足等问题,造成此阶段需要付出大量的时间和经济成本。本文总结了国际上典型干热岩 EGS 工程稳定层位的循环试验经验和当前探索方向,并结合青海共和场地的实际情况,提出了循环试验的发展建议,希望为从事相关领域工作的技术人员提供参考。

1 典型 EGS 工程循环试验经验

1.1 美国 Fenton Hill EGS 工程 (Phase II)

1.1.1 工程概况

美国 Fenton Hill EGS 工程是最早的典型干热岩试开发工程,场地位于中元古代增生型造山带圣胡安盆地,属于前寒武纪结晶岩储层,热储开发深度达 4400m,最高温度 327℃。其 EGS 工程建设开始于 1974 年,深部热储始建于 1979 年

(Phase II), 到 1995 年发生严重的井下环路突破导致了工程的终止。热储开发过程经历了以深浅两个热储为目标的阶段, 并均进行了循环试验, 由于上部热储温度低、井距短、循环流体温度下降快, 造成其循环水出口及热产出量低于预期, 因此在热储深部又进行了新的商业化开发尝试。

1.1.2 循环试验简介

美国 Fenton Hill EGS Phase II 循环试验从 1986 年 5 月 19 日开始, 到 1995 年 7 月 6 日因为注入井 EE-3A 井下发生严重的环路突破导致循环试验终止, 并于一周之后彻底停止项目运行。在此期间, 循环试验的环节主要包括初始闭环测试、扩展静态储层压力试验、长期循环试验三个阶段, 其中长期循环试验又细分为初步循环测试、第一次稳定状态试验、临时流动试验、第二次稳定状态试验及短期试验、第三次稳定状态试验(热储验证流动试验)等五个环节。初始闭环测试的主要目的是为长期循环试验获取准稳态情况下的储层参数, 如流速、阻抗、水损失、微震情况、流体分布、过流体积等。扩展静态储层压力试验是为了测试 EE-2 井加深之后, 评估不同压力情况下的外围水损失, 以及计算热储进液体积。长期循环试验的主要目的是评估储层的经济潜力、产能可靠性和储层寿命三个主要特性, 同时在过程中加入了部分附加测试, 研究了常规生产流量下降和峰值流量获取的问题。

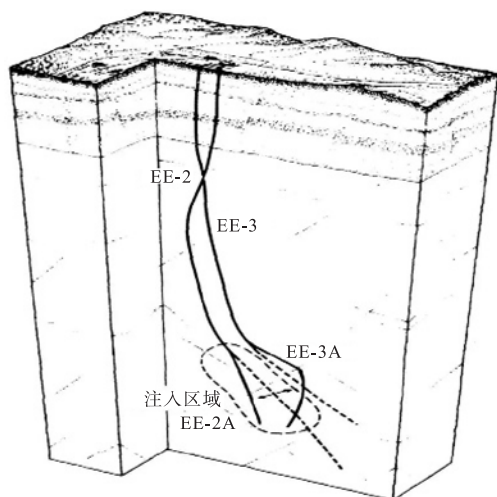


图 1 Fenton Hill EGS 工程循环注采井示意图(据文献[23]修编)

与之后进行的干热岩开发工程循环试验相

比, 美国 Fenton Hill EGS 工程所采用的总注采流量偏小, 比较显著的原因主要有两个: 试验过程为了避免更高注入压力诱发高能级地震做出妥协和注采井数量的限制。

1.2 法国 Soultz EGS 工程(Level III)

1.2.1 工程概况

Soultz EGS 工程场地位于阿尔卑斯褶皱带上莱茵地堑, 属于石炭纪花岗岩储层, 热储开发深度达 5000m, 目标层最高温度约为 202℃。其 EGS 工程建设始于 1987 年, 1995 年首次开始循环试验。为了获得更好的开发效果, 场地原有的 GPK2、GPK3 井被相继加深, 并增加钻进一口 GPK4 井, 形成了深度分别在 1400 ~ 2200m、3000 ~ 3900m、4000 ~ 5400m 的三个开发层位, 其中最深层为稳定开发层位(Level III)。

2005 年, 稳定开发层位以 GPK2 井、GPK3 井和 GPK4 井构成的井组进行了 5 个月的循环试验, 此后, 于 2007 年开始建设发电场地, 并于 2008 年 6 月中旬实现首次试验性发电。2008 年 7 月开始采用电泵进行循环试验, 截至 2013 年 7 月共进行 8 组。

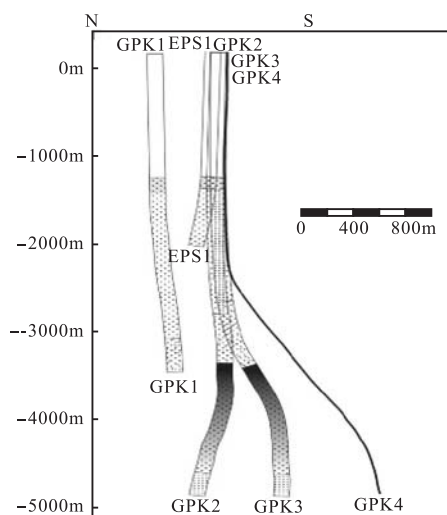


图 2 Soultz EGS 工程场地循环注采井分布示意图(据文献[35]修编)

1.2.2 循环试验简介

法国 Soultz 项目深部储层自 2008 年 7 月开始, 至 2013 年 7 月结束, 共进行了 8 次循环试验。参与循环的井有 GPK1、GPK2、GPK3、GPK4 四口井。其循环试验的特点在于地质条件较好、循环时间长、循环液量大、微震监测数据丰富, 对诱

发微震影响因素研究深入、循环用泵试验多、循环液体伴随地层水。

表 1 典型干热岩 EGS 工程稳定层位循环试验参数汇总表

名称		循环方 量/m ³	回收率	持续时 间/天	循环 井组	井距/m	最大注入 流量/ (L·s ⁻¹)	最大生产 流量/ (L·s ⁻¹)	井口压力 (注)/MPa	井口压力 (采)/MPa	液体井口 温度/℃	结垢 控制
Fenton Hill Phase II	1986.5.19-6.18	37000	62.8%	30	1 注 1 采	约 400	18.3	13.5	31.5	3.4	190	生产井 压力保 持在 10MPa 左右
	1991.12-1992.3	估算 270000 左右	水损失 率稳定 在 7% 左右	18	1 注 1 采		7.2	6.4	25.9	10.3	180	
	1992.4.8-7.31			112	1 注 1 采		6.76	5.66	27.29	9.66	183	
	1992.8-1993.2			205	1 注 1 采		7.14	5.71	27.32	12.40	182.8	
	1993.2.22-4.15			55	1 注 1 采		6.50	5.71	27.34	9.65	184	
	1995.5.10-7.14			66	1 注 1 采		7.6	5.9	27.3	15.2	181	
Soultz Level III	2008.7-8	62000	循环水中 有地层齿 水成分, 难以判别	40	1 注 2 采	约 600	31	31	7.3	1.8		将生产 井压力 保持在 2MPa 左右
	2008.11-12	63000		40	1 注 2 采		27	17	8.6	1.8		
	2009.3-2009.10	285000		230	2 注 2 采		20	22	6.8	2		
	2009.11-2010.10	500000		323	2 注 1 采		15	18	5	1.8		
	2011.1-4	165000		90	2 注 1 采		11	22	1.8	1.9		
	2011.8-10	135000		70	2 注 1 采		12	23	1.6	2		
	2012.3-4	30000		31	3 注 1 采		12	21	1.5	2		
Cooper Basin	2008.12-2009.2	61000	91%	71	1 注 1 采	570		15.4			21.2	
	2013.4-2013.10	182000		161	1 注 1 采	690		18.9			215	
Hijiori	2000.11.27- 2001.11.15	484203	43%	354	1 注 2 采	130	20.0		10-7		130	结垢严 重, 扩 孔消除 水垢
	2001.11.23- 2002.4.28	310733	54%	157	2 注 2 采	130	16.7		2-4			
	2002.6.1- 2002.8.31			92	2 注 2 采	130	16.7		1			

通过长时间的循环测试, 达到了获取不同井间的水力联系状况、试验不同注采井组的工作性能、逐步加快注采流量以达到发电需求、测试所需泵及能量转换装置的性能等目的, 其中该工程在循环方案设计和微震能级控制方面较为成功, 有效增强了循环回路功能并降低了环境影响。同时, 在每一次的循环中, 对于注采流量、井头流量、诱发微震等关键参数进行了详细记录和细致分析。另外, 循环试验过程中也出现了一些问题, 例如循环泵以及系统故障造成的施工停滞, 需要进行总结 and 预防。

循环试验过程中, 循环井组不断调整变化, 从最初的一注一采逐渐稳定为两注一采和三注一采。初期的循环时间较短, 主要是由于循环工具和系统问题导致的施工故障。中期的循环试验时间加长, 最长达到 323 天, 正是通过此长期循环形成了明显的水力学变化, 使得随后循环试验产生的微震事件也显著减少。后期循环的主要目的是逐步增大流速形成生产流量。

1.3 澳大利亚 Habanero EGS 工程

1.3.1 工程概况

澳大利亚 Habanero EGS 工程场地位于 Cooper 盆地, 属于花岗岩储层, 热储开发深度约 4400m, 目标层温度最高 243℃。2008 年通过水力压裂形成连通, 并于同年 12 月至 2009 年 2 月开展了 2 次循环试验。2013 年该场地建成了一座 1MW 的电厂。

1.3.2 循环试验简介

从 2008 年 12 月至 2013 年 10 月, Habanero EGS 工程一共进行了 2 次闭合环路循环试验, 参与循环的注采井为 H01 井、H03 井和 H04 井。试验过程较为稳定, 循环总量约 240000 方。闭合环路测试将注采井以环路形式连通, 以使 91%自生产井采出的流体被重新回注到注入井。Habanero EGS 工程循环试验的特点是循环试验用水采收率高, 地下超压, 循环水为单相态, 没有沸腾或失去任何溶解气体。循环试验的闭合环路没有发生漏失, 即生产流速等于注入流速。在地表使用水回注

泵重新对水进行加压,以将其重新注入储层。循环试验中保证回路在较宽的流速范围内进行,通过同一回路在不同时期的流量-压差关系反映储层产生的阻抗变化及热虹吸效应的变化。同时,通过以“Vee”图的方式进行系统性能评价和生产能力预测,可以反映注采回路的整体情况,改进了通过阻抗指标反映单一热储性能的评价方法,具有一定的借鉴意义。

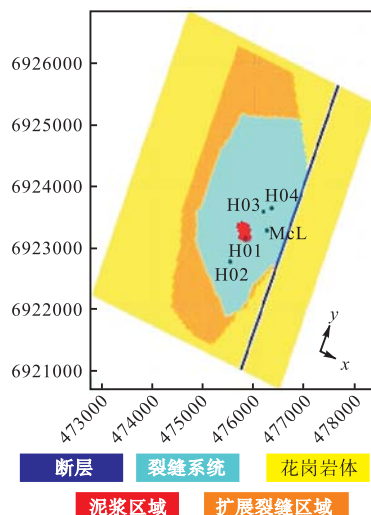


图3 Habanero EGS 工程场地循环注采井分布(据文献[43]修编)

1.4 日本 Hijiori EGS 工程

1.4.1 工程概况

日本 Hijiori EGS 工程位于环太平洋火山带,属于花岗岩储层,热储开发深度 1788-2300m,深部热储目标层温度 270℃。该场地开发始于 1985 年,其进程以深浅两个储层的施工分为不同阶段。后因循环试验过程中水损失过于严重,且出现明显的热突破现象而被迫终止。日本同期进行的 Ogachi EGS 工程情况与之类似,但水损失情况更为严重,未达到良好的试验效果。

1.4.2 循环试验简介

日本 Hijiori 项目的特点是热储的埋藏深度浅,温度高,井距短,回收率低,开发过程中深浅两个热储均开展了循环试验。循环试验目的明确,短期循环是为了获取参数和提高井组连通性,长期循环试验的目的是评价长期生产特征和估计热储寿命。日本 Hijiori 项目两层人工热储采用的循环井距均较短。浅层热储深度约为 1800m,温度

250℃,循环井距在 60m 以内;深层热储深度约为 2200m,温度 270℃,循环井距 180m 以内。在深层热储循环测试期间,两口生产井进行了 PTS 测井,记录了温度、压力以及流量数据。可以分辨出共有 19 个热水流入点。

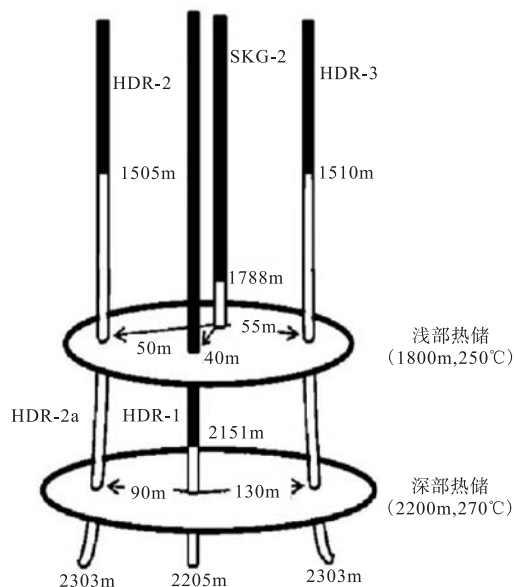


图4 Hijiori EGS 工程场地循环注采井分布(据文献[48]修编)

日本 Hijiori 项目的循环试验过程中出现了热突破和循环流体漏失的典型问题,这为如何进行井距设置和储层评价提供了宝贵经验。首先,EGS 循环发电必须保证合适的井间距。由于该场地的井间距过小,即使在深层热储循环的较大井间距条件下,循环流体出口的温度下降也非常明显,热储寿命难以保证。其次是要充分评价热储储层的开放性和谨慎设置生产流速。根据日方相关学者研究,可以将干热岩热储分为封闭储层、开放储层和中间储层三种,封闭储层的特点是高注入压力伴随高回收率,开放储层是低注入压力伴随低回收率,而中间储层需要在循环试验设计上更加谨慎,因为对于此类储层过高的注入压力会导致超出地层的承受能力造成回收率过低;相反,过低的注入压力会造成可利用的热储规模过小,无法形成有效换热。

1.5 小结

由于高温硬岩的地质条件,典型干热岩储层通过改造形成复杂人工缝网较为困难。从以往的

施工经验可以看出,为了在储层改造基础上实现换热发电,循环试验需要完成一系列工程目标,具有长期性和复杂性的特点。循环试验初期,现场施工对场地电力供应和设备调试的依赖性很强;试验过程中易出现人工热储改造不足预期、井组及流速设置不合理、阻抗等循环关键参数优化稳定慢、液量快速累积造成诱发地震等问题。因此需要提高储层改造和评价技术,同时优化改进循环试验施工流程,从而高效达到工程目标。

2 当前干热岩 EGS 工程循环试验探索方向

2.1 美国 FORGE EGS 工程

2.1.1 工程概况

美国 FORGE 计划[53]是一个旨在验证干热岩开发技术可行性的项目,截至目前的储层改造工作均以小型的测试为主,研究非常深入,但并未大规模进行水力压裂和循环试验。该场地位于犹他州盐湖城以南 350km 的 Milford,占地 5km²,目标层岩体主要由花岗岩和闪长岩构成,钻遇温度超过 220℃(垂深 2609m)。2017 年和 2019 年,研究团队在场地的 58-32 井开展了多次注入测试,其中部分包含了返排的过程,用来确定以闭合应力为代表的一系列储层特性参数,改进了由关井测试方法计算持续时间过长的缺点。

2.1.2 循环试验裂缝精确评价技术探索

FORGE 项目场地 58-32 井的注入测试是分布在三个区域开展的,其中区域 1 是钻孔的裸眼部分,从测深 2248 米处的套管鞋延伸至测深 2294 米处;区域 2 是测深 2123~2126 米区间内的 3 米射孔区;区域 3 是测深 2001~2004 米区间内的 3 米射孔区。区域 1 和区域 2 的注入测试中包含了数次返排过程,形成了事实上的单井注采循环。但以上的返排测试主要是为了探索替代持续时间很久的关井测试方法,用以证明通过此种方法实现闭合应力等参数计算的可行性,是快速准确评价裂缝系统和储层特性参数的一种尝试。因此,FORGE 场地的注采循环测试并不能反映注采井之间,储层中循环回路的性能,与以往的场地大规模注采循环测试具有很大区别。

美国 FORGE 计划的探索意义在于,在以往干热岩 EGS 工程未形成可复制推广的成熟技术的

情况下,通过纯粹的 EGS 示范工程建设实践,形成新一代 EGS 试验平台,实现干热岩开发新飞跃,从场地勘查阶段到注入测试分析阶段,各个环节对于裂隙系统、应力场、压裂参数等重要信息的评价工作细致而有效,这对于开展循环试验所需进行的事前评估、井组设置、参数选择等环节均有重要意义,是技术进步的重要方向之一。

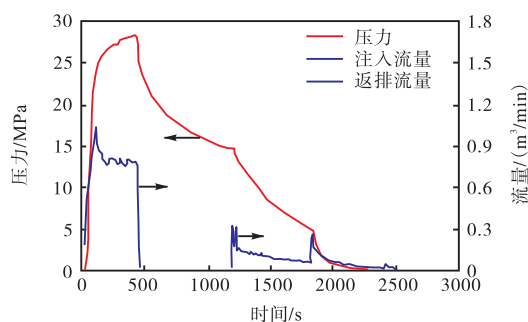


图5 2019年区域2注入测试期间单次(循环5)的压力-排量曲线(据文献[54]修编)

2.2 美国 Fervo EGS 工程

2.2.1 工程概况

美国 Fervo EGS 工程场地位于内华达州北部的 Blue Mountain 发电厂附近,目标储层是由千枚岩、石英岩、闪长岩和花岗闪长岩组成的混合玄武岩和火成岩地层。该项目设计并建造了一个三井井组,其中两口水平井形成一注一采双井系统,一口深垂直井用于实施监测。注采井的深度约为 2350m,水平段长度约为 990m,最高的测温为 191℃。实验场地的钻井和压裂施工于 2022 年 1 月至 2023 年 3 月完成,压裂造储采用桥塞射孔分段压裂工艺。2023 年 4 月至 5 月,进行了为期 37 天的循环试验。

2.2.2 循环试验新型井组探索

双井注采生产测试 2023 年 4 月 9 日开始,持续了 37 天,直到 2023 年 5 月 16 日结束,共分为恒速注入、建立测试条件、示踪试验、稳态性能测试、负载跟随可调度性测试、井筒可采曲线和稳态性能测试、电测井和最终关闭七个阶段。测试过程中,生产井压力维持在 0.7~1.4MPa 之间,以确保循环流体为单相态,循环注入流量约为 41~54L/s,注入压力约为 7~14MPa,采出流量约为 35~48L/s,注入温度约为 24~52℃,采出最高温度为 169℃。开发过程中产生的最大诱发地震发

生在循环测试期间,震级为 $M = 1.8$ 。

以往受限于钻井施工技术和压裂分段设备,采用双水平井分段压裂,并在此基础上开展循环试验的干热岩 EGS 工程几乎没有。此次 Fervo EGS 工程的顺利实施,证实了这种新型井组钻探和压裂的可行性,并展示出水平井组循环试验阶段在井间连通和换热方面的优势,是大幅提高循环试验注采规模和成功率的一种可能得发展方向。

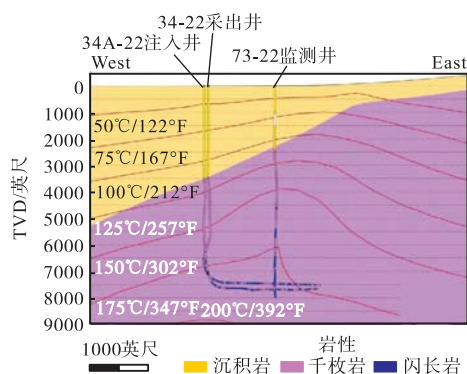


图6 Fervo EGS 工程场地循环注采井分布示意图(据文献[55]修编)

2.3 青海共和场地循环试验

2.3.1 工程概况

青海共和盆地干热岩资源丰富,具有广阔的开发前景和巨大的研究价值[60],2017 年地质调查取得重大进展后,中国地质调查局联合青海省政府启动了干热岩勘查与试验性开发科技攻坚

战。

共和场地的 GH-01 井经历了小型测试压裂、小规模中试压裂、规模化压裂三个储层改造阶段,最终形成了 $1.2 \times 10^7 \text{m}^3$ 的改造体积,换热面积明显增加。根据前期国际上的工程经验,在将 GH-02 井和 GH-03 井两口井钻入储层改造形成的地震云后,场地上开始了井间连通和循环试验的施工。

2.3.2 循环试验简介

在循环初期,为了降低对场地供电能力和循环设备可靠性的依赖,为现场设施的建设配套争取时间,同时保障一定的储层改造能力,采用了泵车作为主要的施工设备;在注采方式上,初期通过一注多采的方式开始循环并获取井组性能参数,中期通过多注一采的方式进行稳定循环,用以兼顾施工效率和热储利用率;共和场地在循环试验初期遇到了诸如储层原位应力高、裂缝系统评价难、进液通道复杂、循环阻抗大、井下污染等多种问题,通过采取交替注采、酸化刺激、精准射孔等储层刺激措施,上述问题得到了一定程度的缓解。共和场地于 2021 年阶段性地完成了循环试验和试验性发电,此阶段的采出流量为 $15.4 \sim 22.5 \text{m}^3/\text{h}$,采出温度为 $110.4 \sim 125.7^\circ\text{C}$,注入压力为 $54.6 \sim 65.3 \text{MPa}$ 。随着循环测试的进行,注入压力有较为明显的下降,采收率有一定程度的提高,微震监测显示的改造体积相比储层改造阶段也大幅上升。

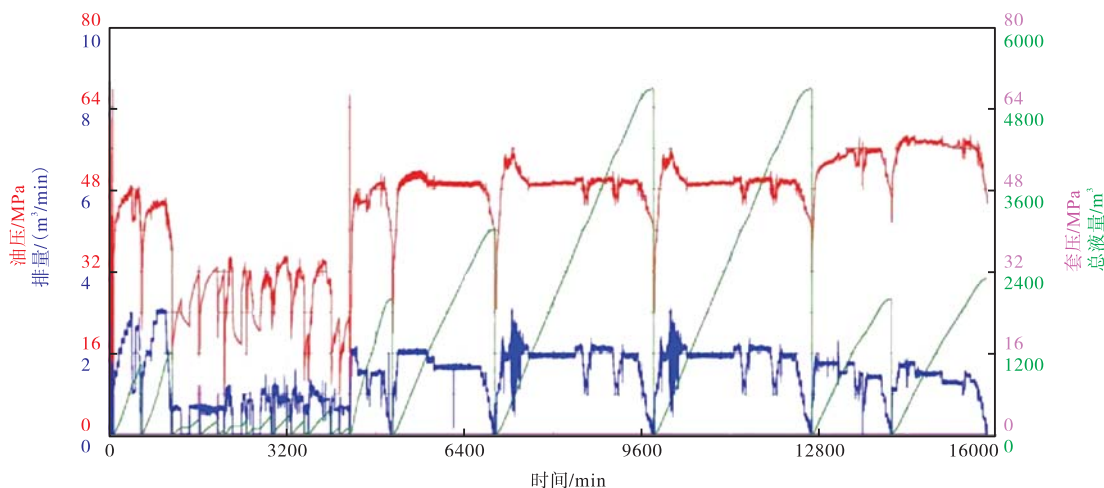


图7 共和场地压裂注采期间注入井施工排量与压力变化趋势图(据文献[60]修编)

共和 EGS 工程的主要生产指标、参数评价精度以及井组设计先进性,与 Soultz EGS 工程、

FORGE 计划和 Fervo EGS 工程等相对先进的案例存在着一定的差距。但是在特殊地质环境和开

发工艺缺乏参考的困难下,技术人员针对裂缝系统的精确评价和以此为基础的射孔增效施工,以及多级酸化的化学刺激工艺探索均取得了积极成果,有效增强了井间连通,降低了循环阻抗,实现了注采规模的扩大和换热能力增强。

3 干热岩 EGS 工程循环试验发展建议

3.1 储层改造的评价和建模

干热岩循环试验是以储层改造为基础的,因此成功的水力压裂与井间连通施工是循环试验的先决条件。压前的地质条件勘查应针对场地的地质结构、地应力和储层特性参数等重要信息开展充分的工作,压后则通过工程方法和监测方法,对于储层改造的效果进行精准的评价,为循环试验方案制定提供参考。在循环试验前,为了设置合理的井距,保证井间有效连通的情况下避免热突破,需要数值模拟结合地热发电厂的长期运行要求进行计算。因此通过准确评价人工裂缝系统的改造效果,来提高井间连通概率和导流能力预测精度至关重要。如果可以充分利用储层改造中产生的大量有价值数据,如测井测温数据、微震监测数据、电磁监测数据、压裂及放喷数据等进行联合解释,则可以对热储缝网的方位、长度、宽度、密度、渗透性等关键因素进行更精确的评价,构建包含复杂裂缝介质的储层模型,从而相对准确地评估储层的换热能力,并对循环流量进行科学评估,并随着循环试验的推进,不断积累数据和完善模型,进一步评价人工热储的经济性和寿命。

3.2 循环过程中的储层刺激手段

循环过程中的储层刺激手段主要包括水力压裂和化学刺激等,其目的主要是构建和加强井间连通,提高热储换热能力和采出能力,并进一步减小循环回路阻抗,缩短施工周期。目前国际上的 EGS 工程中,水力压裂多采用直井或大斜度井的笼统压裂施工方法,造成了纵向上改造不均匀、液体效率低等问题。因此,为了加强连通,可以考虑增强水力压裂的针对性,对井周裂缝分布进行精确解译,同时以井下工具分段、射孔、填砂、缝间暂堵等方式增强改造层段分段压裂的能力,提高压裂精度和液体效率。对于花岗岩型干热岩,同时保证化学刺激的有效性、作用距离和作用方向具

有相当的挑战性,发展酸、碱、螯合剂等不同成分的化学刺激剂,以及优化暂堵转向和多级酸化等工艺方法,同时做好化学刺激环境影响评价和预防,可能对问题解决有一定的帮助。此外,超临界二氧化碳和液氮压裂技术在干热岩改造中具有在热破裂、破岩和增能等方面的优势[65],燃爆压裂技术对提高近井裂缝复杂程度,增强井组注入能力有一定作用,是可能的循环试验储层刺激技术发展方向。

3.3 循环试验的现场施工

循环试验具有长期性、复杂性的特点,需要做到热储评价、储层刺激、井组调整和参数调整的有效结合。热储评价方面,基于实时工程数据和多种监测手段,在评价注采参数、循环回路性能和热储开发潜力的过程中,建议着重深入研究裂缝系统的特点,对其本身性质和过流情况作出精确判断,为循环参数设定,和进一步可能需要的钻井和储层刺激提供依据。此外,与储层改造阶段类似,诱发地震是循环试验施工的重要限制因素,只有经过长期循环形成稳定热储裂缝换热通道后,其产生和影响才会逐步减弱。为了防控诱发地震风险,需要采取开展地震风险评价、建设高精度监测网络、建立施工管控红绿灯系统、控制注入液量和注入流速等措施。

3.4 多井井组循环试验流程设计改进建议

在以多井井组进行循环试验时,之所以难以快速形成高效井组并实现稳定注采,是因为存在现场施工对电力和设备依赖性强、热储参数评价困难、阻抗等循环关键参数优化稳定慢、注采井组井距和循环参数难以确定、不同分支注采井组阻抗差异造成热储体积无法充分利用等难题。上述问题的解决有赖于技术的进步,但同时对于施工流程的改进也是必不可少的。综合循环试验案例施工经验,笔者认为可以按以下步骤执行:根据现场的实际情况,以孔隙-裂缝双介质换热模型进行模拟,选择合适的注入井和测试循环流量,提高初始设置参数的准确性和适用性;采取一注多采的工作方式开始测试循环阶段,并逐渐循环至准稳态,记录关键参数,从而节省获取参数的总体时间;进行参数分析,转入过渡循环阶段,视情况进行注采井转换、储层二次改造、单侧井组循环,为

过渡至多注一采稳定循环井组做好准备;以多注一采井组开展稳定循环阶段试验,通过调节注入压力维持各通路稳定流量,测试热储与环路性能,并克服不同分支井组阻抗不均衡的问题,避免流量分配不均导致热储利用率低甚至热突破风险,最终高效实现试验性发电。

4 结论与展望

国际上干热岩场地开发 EGS 工程循环试验已发展多年,可以看出循环试验具有长期性和复杂性的特点,只有兼顾安全和效率,才能降低其占用的时间和资金成本,做到干热岩资源的经济性开发。在案例分析基础上,可以得到如下结论。

(1)循环试验的实施效果与地质和工程因素均紧密相关,对于已有案例的借鉴,以及开发方案的制定,应充分考虑场地地质条件,做到因地制宜。

宜。

(2)从以往的案例来看,提高循环试验的效果,主要是通过开发层位及井组调整、长期循环、储层改造以及化学刺激等方法实现的。为了深化以上方面的研究,当前技术人员主要通过解决如何准确获取工程参数,实现储层的准确评价和工程环节的精准把控;以及如何改进注采井组设计和储层改造工艺,实现循环回路性能的大幅增强,这两个方向进行技术探索。

(3)以试验发电为目标,聚焦多井井组循环试验中的关键问题,改进循环试验施工流程,也是提高效率节省成本的有效手段。

(4)随着开发技术的日趋成熟,干热岩地热资源将会成为我国能源结构中的重要一环,为经济发展和环境保护发挥重要的作用。

参考文献

转自《地质科技通报》

《地热资源监测规范》 国家标准编制启动会召开

中国地调局水环中心 报

近日,由自然资源部中国地质调查局水文地质环境地质调查中心(以下简称“水环中心”)牵头的《地热资源监测规范》国家标准编制启动会召开。中国石油化工集团有限公司、中国科学院地质与地球物理研究所、北京市地质矿产勘查院、天津市地质矿产勘查开发局、山东省地质矿产勘查开发局、中国地质科学院水文地质环境地质研究所等单位有关领导、专家及编写组相关技术人员参加本次会议。

水环中心主任文冬光同志出席会议并对与会专家及参编单位表示感谢。他强调,北京、天津、山东、河北等地区地热资源勘查开发时间早、利用规模大,地热资源监测工作实践经验丰富。本次标准的编制就是要充分利用已有基础,集思广益,既

要从我国国情出发,又要体现当前地热监测科学技术水平,为地热资源有规模、有效益开发利用提供技术支撑。

全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会(TC93)和地质灾害防治分技术委员会(TC93/SC2)相关领导出席本次会议并对标准编制提出要求。中国自然资源经济研究院专家就标准编制技术要点、审查流程和注意事项等关键问题进行培训。参编单位针对各自地区地热资源监测经验和标准编制情况展开深入交流。会议还明确了《地热资源监测规范》编制的任务分工和时间节点。

会议的顺利召开标志着标准编制工作的正式启动,对服务地热资源规模化开发利用,支撑我国生态文明建设有重要意义。