

干热岩资源开发工程储层激发研究进展

王贵玲, 马峰, 蔺文静, 张薇

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061

摘要 干热岩作为清洁可再生能源, 在中国分布广泛。初步估算, 10 km可开发利用的干热岩资源占地热资源总量的90%, 经济地获取深部干热岩资源成为迫切任务。干热岩资源开发最关键的技术是储层建造, 为满足商业化开发的目的, 激发后储层必须达到一定体积的有效换热空间, 同时开采井应满足理想的开采流量及保证较长的开采年限。本文总结目前国际干热岩工程的储层激发情况及相关关键技术。

关键词 干热岩; 增强型地热系统; 储层激发; 裂隙表征

中图分类号 TE28

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.018

Reservoir stimulation in hot dry rock resource development

WANG Guiling, MA Feng, LIN Wenjing, ZHANG Wei

Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China

Abstract As a clean renewable resource, hot dry rock is widely distributed in China. Based on preliminary estimation, the available hot dry rock resources buried beneath the earth surface between 3 and 10 km account for 90% of the total geothermal resources. However, it is challenging to get these resources efficiently. The key technology for development of these resources is reservoir stimulation, which should guarantee a large reservoir volume for heat exchange, and the extraction well should keep sufficient flow rate and be sustainable for long-term heat extraction. This paper summarizes research progress of reservoir stimulation and related key technologies in world hot dry rock stimulation projects, aiming to promote the development of hot dry rock resources and research of related technologies in China.

Keywords hot dry rock; enhanced geothermal system; reservoir stimulation; fracture characterization

干热岩作为清洁的可再生能源是地热能中最具潜力的部分, 是地热能的未来^[1]。从分布上来讲, 干热岩资源和浅层地温能一样, 属于无处不在的资源, 然而, 干热岩与浅层地温能相比受气候等外界条件影响更小; 从资源品质来讲, 干热岩资源主要用于发电, 能解决国家能源根本需求, 资源基数更大。因此干热岩也被称作可能改变未来的新能源, 干热岩发电为中国地热能利用的长期目标^[2,3]。

中国干热岩资源潜力巨大, 中国地质调查局评价了中国陆区干热岩资源潜力^[4,5], 中国陆区 3.0~10.0 km 深处干热岩资源总量为 2.52×10^{25} J, 相当于 860 亿吨标准煤, 按 2% 的可

开采资源量计算, 相当于中国 2010 年能源消耗总量的 5300 倍。

干热岩开发的具体工程技术称为 EGS (enhanced geothermal system)。对于建造 EGS 而言, 最关键的技术就是储层的激发, 国际上普遍认为理想经济的 EGS 系统, 激发储层体积应达到 0.1 km^3 , 有效热交换面积应达到 100 万 m^2 。目前而言, 国际上很多 EGS 工程储层激发体积已能远远超过 0.1 km^3 的目标, 而热储有效换热面积距离商业化的要求还有一定的差距, 主要原因在于激发过程中对裂隙系统的控制还不够理想^[6,7]。

收稿日期: 2015-01-16; 修回日期: 2015-01-31

基金项目: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所项目 (SK201212); 中国地质调查局地质调查项目 (12120113077900)

作者简介: 王贵玲, 研究员, 研究方向为地热资源评价、深部地热开发等, 电子信箱: Guilingw@163.com; 马峰 (通信作者), 助理研究员, 研究方向为裂隙水流和深部地热, 电子信箱: mf-1203@163.com

引用格式: 王贵玲, 马峰, 蔺文静, 等. 干热岩资源开发工程储层激发研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 103-107.

1 干热岩储层激发

干热岩储层的激发是指通过向储层注入高压流体使热储原有裂隙扩展沿伸从而达到增大储层换热性能的目的。储层的激发并不是干热岩资源开发工程的最终目的,如何通过储层激发达到理想的热提取效果才是干热岩工程的关键。因此从这个角度而言,干热岩资源储层的开发包括储层的表征、储层的激发和储层的管理3个关键步骤。

1) 储层的表征是认识热储原有裂隙系统和渗流系统的过程,与传统水热系统的研究类似,很多钻探、物探、测井技术在这方面能够发挥重要作用,目前国际上使用较多的为钻孔成像和微震监测,前者可以获取一维准确的钻孔裂隙参数,后者通过微震解译可以获取激发过程中产生的三维裂隙空间信息。

2) 储层的激发则是干热岩工程所特有,关键技术包括创建新的裂隙通道和渗流途径、有效渗流通道的解释,储存封隔等。

3) 储层的管理需要对储层有足够的认识基础上,通过对压力、流量等参数的控制使热储能够达到长期热提取的目的。EGS系统属于人造热储系统,因此储层的管理是系统运行的关键。相关技术包括裂隙通道及渗流途径的控制、运行过程中渗流监测、开采井钻探以及实施模拟预测等。

目前,中国还未开展过具体的干热岩压裂工程,中国科学院广州能源所、吉林大学等在深部热储模拟上做了深入研究,提出了耦合THMC的裂隙换热模型。随着页岩气水力压裂的开展,中国陆续在个别深井开展了多级压裂、清水压裂、同步压裂、水力喷射压裂和重复压裂等压裂工艺。干热岩的压裂通常采用清水压裂,与页岩气开发中压裂最大的不同在于地层岩性,干热岩的压裂一般为坚硬的结晶岩体,干热岩压裂可以从页岩气水力压裂中得到启发。

2 干热岩开发工程(EGS)储层激发原理

EGS储层的激发与石油、天然气中的压裂有很多相似之处,其目的均是通过在岩体中高压注水提高储层渗透性,从

而达到最大限度采油或提热的目的。然而,两者在压裂原理上有着本质不同,EGS的激发是水力剪切破坏,有别于石油、页岩气开发中的拉伸破坏^[8]。

水力剪切是通过使岩体发生彼此间位移后,由于裂隙面表面粗糙度的作用在激发压力释放后仍然维持裂隙面的张开。水力压裂则不同,岩体不会形成彼此滑动,因此,在注水压力下,裂隙面会重新闭合,这也是在石油和天然气的压裂中需要通过支撑剂来维持裂隙面张开的原因^[8-10]。

对于干热岩热量提取而言,剪切破坏的优点在于使岩体形成的裂隙面足够大而隙宽维持较小,流体在裂隙面中穿过时流速不会过快,这样就可以使流体从注入井到生产井流动过程中充分地、与储层换热达到理想的开发温度,同时,也可以通过减少短路循环和过早形成热突破而延长储层寿命。

为了创建最佳裂隙面大小、隙宽、密度和方向的裂隙网络,在单井中的水力剪切通常需要进行多级压裂,多级激发的优点有:1) 创建更大的储层体积,大大增加储层有效的换热面积;2) 增加系统的渗透性和连通性,从而提高流体产能和降低注入压力,提高系统的综合经济性和发电性能;3) 单井流量达到可提供商业化发电的流量75 kg/s(大约1200 g/m);4) 使裂隙网络半径达到500 m以上,大大延长储层寿命。

3 世界干热岩开发储层激发工程

随着20世纪70年代美国第一个干热岩资源开发工程的建立,40多年来,很多国家的示范工程均在深部热储的建立上积累了丰富的经验,主要体现在储层激发原理完善、激发压力和控制、激发中裂隙空间结构的表征、多储层激发等,综合分析这些经验和教训对于建立中国干热岩示范工程不无裨益。表1总结了目前EGS工程的相关数据。

图1绘制了世界不同EGS工程激发过程中流量和压力的变化,可以看出所有的工程在初期激发试验时具有相似的注入率,但激发途径却各有不同,主要原因是储层压裂工艺和原生裂隙系统的不同。

表1 世界EGS工程激发参数对比

Table 1 Comparison of stimulation parameters of world EGS projects

井	激发时间/d	最大注入流量/ (L·s ⁻¹)	注入体积/m ³	最大井口压力/ MPa	激发前注入率/ (L·s ⁻¹ ·MPa ⁻¹)	激发后注入率/ (L·s ⁻¹ ·MPa ⁻¹)
法国GPK2	5.9	50	22680	15.5	0.18	4.48
法国GPK3	10.6	50	37299	16.0	2.01~3.47	5.30
法国GPK4+GPK3	3.5+3.9	45	9300+12300	17.0+14.0	0.09	3.29
德国Landan	分十级压力逐级激发, 每级持续几小时	187	4600~6600	13.0	0	0
澳大利亚 Habanero 1	9.0	48	20000	75.0	0.46	1.83
瑞士Basel-1	6.0	55	11570	29.6	0.09	2.83
德国 Grosse-Schoenebeck	4.4	150	13170	58.6		

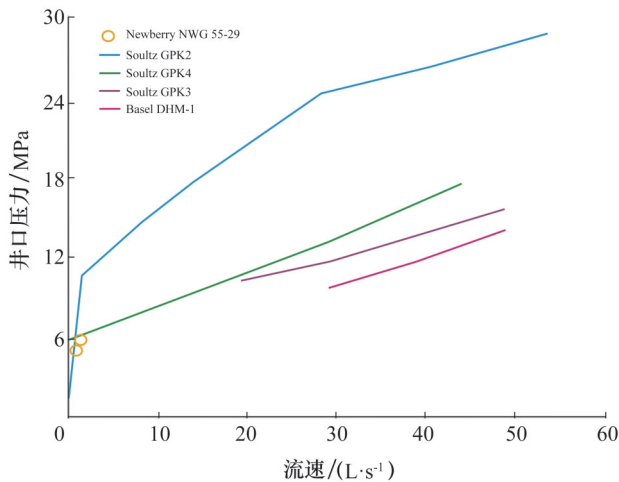


图1 世界EGS工程激发注入量比较

Fig. 1 Comparison of injection rate of several EGS projects in the world

3.1 新墨西哥芬顿山

第一个干热岩HDR示范工程在新墨西哥芬顿山于1974年开始,位于Valles火山口西翼,属于环状裂隙带的外侧,项目最初目的是试图利用水力激发来创造人造储层。在1983年的试验中,产生了850个0~3级的微震事件,这些微震事件主要通过井下微震检波器获取。该项目储层的建造采用传统石油工程中的压裂方法,因此产生了大量的张性裂隙,随着后期认识的不断加深,发现张性裂隙并不是EGS储层开发所期待的。

3.2 瑞士巴塞爾

2006年,在瑞士巴塞爾开展了深部地热开采计划(DHM),通过施工了一个深钻来创建人造热储层^[11,12]。整个激发过程起始注入流量为1.7 L/s,当井口压力达到11 MPa时开始诱发地震。在持续6 d的激发过程中,注入流量增加了5倍。初期随着流量的增加,压力反而降低,显示注入量的逐渐提高。在流量达到28 L/s后,压力和微震频率有表现出持续24 h的增加,反映出热储中压力的逐渐形成。随后流量增大到41 L/s,第一个大于2级的地震被诱发。在达到最大流量后(55 L/s),井口压力达到29.7 MPa,产生了4个大于2级的微震,随后注入停止并闭井。然而,由于储层压力的持续积累,微震事件并没有马上减弱,在井口压力消散前产生了3.4级的微震,整个激发过程用水11000 m³。

3.3 澳大利亚库珀盆地

澳大利亚库珀盆地具备大量放射性的元古代花岗岩,勘察结果显示,该地区热能储量高达500亿桶原油当量。由于库珀盆地处于极高的压应力机制,需要很高的井口注入压力激发裂隙,这使其有别于其他干热岩激发工程而成为世界EGS储层激发的重要组成部分。澳大利亚库珀盆地成功激发了Habanero1和Jolokia2两个地热井。Habanero1激发持续时间为9 d,注入水量超过20000 m³,最大注入流量为48 L/s,

最大井口压力为75 MPa。由于很高的注入压力,诱发了3.7级微震,是目前为止世界EGS工程所诱发的最大的地震事件。Jolokia2储层改造结果目前还未公布。

3.4 德国Gross-Schoenebeck

2007年,德国在东北部盆地区开展了对井EGS激发工程,该地区处于正断层以及走滑断层应力机制,与法国Soutlz工程极为相似^[13]。但与其他EGS工程不同的是,为减小激发过程中裂隙面所产生的阻力,在压裂液中添加了化学物质。主要添加物包括降低裂隙面摩擦的化合物、醋酸、低浓度砂粒等。

激发过程中的最大注入流量达到150 L/s,最大井口压力为58.6 MPa,大流量的好处是可以控制流体黏度过低对支撑剂运行距离的影响,从而达到理想的裂隙面填充效果。裂隙变形持续了4.4 d,整个过程注入量达到13000 m³。

该工程的激发由于添加了过多的化学物质,与目前国际上公认的EGS清水压裂相违背,因此,其压裂效果不能作为中国干热岩开发示范工程的有效参考。

3.5 德国兰道

位于德国兰道的EGS工程同样由一组对井组成,分别为GTLA1和GTLA2,目前正处于发电中。该井最初的钻探目标是寻找一个已知存在的断裂带,GTLA1水量很大,并不需要激发,而GTLA2相对较差,因此试图通过注入高速流体来扩大储层增加产能。

由于储层本身的渗透性很好,因此进行高流量的注入来激发更多裂隙是非常必要的。整个激发过程注入水量约为5000 m³,注入最高流量达187 L/s,井口压力为13 MPa。德国兰道在EGS储层激发上是成功的,实现了储层增产的目的。

3.6 法国苏尔茨

在20多年的研究中,法国苏尔茨是目前世界上公认的储层激发效果最好的EGS工程。整个系统目前包括:200℃的EGS热储层、一口注入井、两口生产井,井下泵以及1.5 MW的双工质发电机组。在激发GPK2井时,大约23000 m³的水在6 d多的时间注入井中,最大诱发微震等级为2.5,最大注入流量为50 L/s,伴随的最大井口压力为14.5 MPa。最终的注入率提高了25倍,从天然状态的0.18 L/(s·MPa)提高到激发后的4.48 L/(s·MPa),导致了中等规模裂隙网络的连通。

与此相反,对GPK3井的激发持续10.6 d,注入水量38000 m³,所诱发的最大地震2.9级。激发过程中最大的注入流量50 L/s,最大井口压力16 MPa,最终注入量增大了1.5~3倍,由开始的2.01~3.48 L/(s·MPa)增大到5.31 L/(s·MPa)。尽管井口流量和压力与GPK2井相类似,而渗透性的增长却不是十分明显,监测结果显示70%的水量进入了一个已有4705 m的裂隙带。

3.7 美国Newberry火山

Newberry火山EGS工程可以说是真正意义上的干热岩工程。示范工程区3000 m深地层温度可达到325℃,但下伏凝灰岩地层渗透性很小,激发储层几乎无水,历史资料表明

区域注入率为0.027~0.48 L/(s·MPa),比传统的地热井小1~2个数量级。由于最小剪切破坏应力没有准确获取,激发从阶步流量注水试验开始。最初注入流量为1.4 L/s,井口压力为7.9 MPa,并没有发生剪切破坏的迹象。2014年,Altarock公司运用了其专利技术TZIM(高温降解储层分隔材料)对55-29井进行了多储层激发,在32 d的激发过程中共享储层注水15000 m³,产生微震397次,激发效果显示在约2万m²的示范场地能产生60 MW的发电量,如果顺利预计2016年将实现场地发电^[14,15]。

综上所述,目前而言,干热岩储层的激发还远没有达到可以商业化开发的目标。激发范围比较理想的为法国和瑞士的EGS工程,激发所产生的微震云范围均分布在以注入井为中心的500 m半径范围内。水热型地热田开发经验以及热储模型均表明,要避免过快的热突破以及维持地热电站20年的运行时间,开采井与注入井之间的距离应至少为500 m。根据国际上EGS储层工程实例,激发压力的控制至关重要,在储层激发中平均注入压力应高于岩体零界剪切破坏压力,但低于拉升破坏包络线^[16,17]。因此,长时间的地应力储层激发效果要明显好于短时间高应力状态下的储层激发。法国苏尔茨就是通过控制注入压力高于岩体零界剪切破坏压力,保证理想的裂隙剪切破坏。在注入流体体积上一般认为,对于单个储层的激发,如果想达到理想的效果,需要注入水体积为19000~34000 m³。

4 干热岩储层激发的关键技术及挑战

4.1 人工压裂技术

针对不同的深部地应力场条件和裂隙发育特征,通过控制注入水流量使深部热储达到理想的剪切破坏是目前人工压裂技术重点解决的问题^[10]。干热岩开发本身的压裂设备和石油天然气开发中压裂设备基本相同,主要的区别在于干热岩的压裂设备需要解决耐高温问题。而高温岩体冷却收缩效应也使干热岩储层激发相对于传统油气储层更容易发生。

上述各国的储层激发试验均表明,在坚硬的花岗岩中创造新的裂隙几乎是不可能的,通过注入水压力的控制使储层已有的裂隙面错动和延伸从而形成有效的换热面积是目前国际公认的EGS储层建造方法。实际干热岩开发工程中,热储的创建主要包括以下关键步骤:1)安装微震监测器;2)形成已有注入井的剪切破坏;3)施工两口开采井,并对其储层进行水力剪切破坏;4)开展30~60 d的储层循环测试,评价热储连通性及表现。

储层压裂相关的技术主要包括:微震解译、井下电视成像、区域构造雷达反演、光纤式温度测井、岩体室内切片分析、电镜扫描、模拟预测等。

4.2 储层封隔技术

目前为止,世界干热岩资源开发工程大部分采用的是高温物理封隔器,通过对目标层位的封堵达到对特定储层激发的目的。其优点在于,封隔器深度可以自由调节,可对指定

深度进行储层激发。缺点在于受温度影响,很多封隔器采用弹性密封元件,温度上限为225℃,同时,高温封隔器技术操作过程中需要钻机配合,存在较高的施工卡钻危险,容易造成井孔报废,从而对整个工程造成较大的经济损失。目前为止,大多数的高温储层封隔器仅适用于套管段,而EGS储层激发的目标为裸孔段,因此,传统物理封隔技术的应用受到了很大的限制。

化学和生物封隔技术目前在部分发达国家已开展了广泛的研究。一种高温降解生物隔离技术(TZIM)目前在美国刚刚成功应用于Newberry干热岩工程。相对传统储层封隔器具有成本低、风险小、耐高温性能好等特点。具体如下:1)注入井后保持颗粒状;2)密度与水接近,操作时和注水一起进入最渗透的裂缝;3)TZIM会密封已有裂缝,通过激发可裂开更多层的岩石;4)操作无需井架,可采用分布式光纤温度传感器(DTS)监控井下隔离效果。

4.3 化学刺激技术

化学刺激最早应用于油气井的增产,通过将酸注入储层裂隙,目的是将裂隙面流体长期运移和沉淀过程中产生的矿物溶解,达到增大对近井区岩体渗透性的目标。对于EGS而言,结合化学刺激和水力激发可以降低注入压力、减小微震等级,优化储层管理。

近30年来,许多不同的化学酸化刺激法被应用于地热井^[18,19]。然而,同一种化学激发剂可能只适用于特定的地层,对于EGS储层激发而言,目前正在研究针对各种不同地层的综合化学刺激法。法国Soulz干热岩工程采用了化学刺激方法使注入率提高了1.12~2.5倍^[20]。激发结果显示注入酸与花岗岩体的裂隙之间的矿物发生了较为强烈的反应,增加了储层的渗透性。总体而言,化学刺激受到时间、体积和浓度等方面的制约,因此其发展还需要更多的室内实验及工程验证。

4.4 干热岩储层激发主要挑战

结合具体的干热岩开发工程,在干热岩储层激发方面主要存在以下挑战:1)提高注水压力可以破裂岩石并可产生更多的热能,但所注的水大多被导入最渗透的岩体;2)在整个储层的激发过程中,储层很多部位得不到有效激发,热储采热量受到了限制;3)过分增加井口压力提高注水量,会诱发较大的地震;4)单层裂缝不足以提供满足经济发电所需的热交换面积,系统循环水流量低。

如何在经济的条件下,创建足够大的储层有效换热空间,是目前EGS发展需要迫切解决的问题。发展高温储层封隔技术,通过多次激发来增大储层空间是实现EGS商业化的有效手段。

5 结论

EGS的开发具有很大的风险和不确定因素,但是,从工程建设到商业化的相关技术正逐步成熟。未来EGS的研究重点在储层激发前、激发过程中表征应力场、化学构成及导

热通道。EGS最终目标是达到满足商业化发电的足够流量并且没有过大的压力堆积或流体滞留。

2011年,美国地热技术协会、美国能源部在旧金山会议指出了未来5~20年EGS技术的发展机遇,通过发展EGS开发技术优化热储层性能,在2050年EGS储层发电达到100 GWe的目标。中国在“十二五”期间对干热岩开发中地质勘探、钻井工程、水力压裂、发电等EGS关键技术方面进行了初步探索,与世界发达国家相比,总体技术仍明显落后,一些勘查开发核心技术还不够完善,很多关键技术的研究仅停留在室内实验分析阶段等。因此,通过建立中国干热岩野外示范基地,开展干热岩勘查、开发中的相关关键技术研究是中国目前迫切需要开展的工作。

目前的部分示范工程已经显示,相关技术的提升正逐步降低工程经济性和风险性,预计在一个较短的时间内,干热岩储层开发的相关技术将会有较大的突破。同时,干热岩工程前期投资较大,因此政府部门应该在干热岩工程初期保持稳定的投入,促进相关技术的研发形成中国干热岩勘查开发和利用的技术体系,最终建立中国MW级EGS开发利用的示范工程。

参考文献 (References)

- [1] Tester J W, Anderson B J, Batchelor A S, et al. The future of geothermal energy—impact of enhanced geothermal system (EGS) on the United States in the 21 century[M]. Cambridge MA: MIT—Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [2] 国家能源局, 财政部, 国土资源部, 住房城乡建设部. 关于促进地热能开发利用的指导意见[J]. 太阳能, 2013(4): 15–18.
The National Energy Administration, The Ministry of Finance, Ministry of Land and Resources, Ministry of Housing Urban and Rural Development. Guidance on the promotion of geothermal energy development and utilization[J]. Solar Energy, 2013(4): 15–18.
- [3] 庞忠和, 胡圣标, 汪集昉. 中国地热能发展路线图[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 18–24.
Pang Zhonghe, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. A roadmap to geothermal energy development in China[J]. Science and Technology Review 2012, 30(32): 18–24.
- [4] 蒯文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 807–811.
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. Journal of Geological, 2012, 33(5): 807–819.
- [5] 汪集昉, 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.
Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science and Technology Review, 2012, 30(32): 25–31.
- [6] 曾玉超, 苏正, 吴能友, 等. 增强型地热系统储层试验与性能特征研究进展[J]. 矿业研究与开发, 2012, 3(32): 22–27.
Zeng Yuchao, Su Zheng, Wu Nengyou, et al. Advances in reservoir test and performance characteristics of enhanced geothermal system[J]. Mining Research and Development, 2012, 3(32): 22–27.
- [7] 康玲, 王时龙, 李川. 增强型地热系统EGS的人工热储技术[J]. 机械设计与制造, 2008(9): 141–143.
Kang Ling, Wang Shilong, Li Chuan. Artificial reservoir development technology in enhanced geothermal system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(9): 141–143.
- [8] Huenges E, Trautwein U, Legarth B, et al. Fluid pressure variation in a sedimentary geothermal reservoir in the North German Basin: Case study Groß Schönebeck[J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163(10): 2141–2152.
- [9] Stanford University. Proceedings of 35th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering[C]. California, 2010.
- [10] 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 42–45.
Xu Tianfu, Zhang Yanjun, Zeng Zhaofa, et al. Technology Progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock)[J]. Science and Technology Review, 2012, 30(32): 42–45.
- [11] Ustaszewski K, Schmid S M. Latest Pliocene to recent thick-skinned tectonics at the Upper Rhine Graben–Jura Mountains junction[J]. Swiss Journal of Geosciences, 2007, 100(8): 293–312.
- [12] Valley B, Evans K F. Stress orientation to 5 km depth in the basement below Basel (Switzerland) from borehole failure analysis[J]. Swiss Journal of Geosciences, 2009, 102(3): 467–480.
- [13] Legarth B, Tischner T, Huenge S E. Stimulation experiments in sedimentary, low-enthalpy reservoirs for geothermal power generation [J]. Geothermics, 2003, 32(4–6): 487–495.
- [14] Cladouhos T T, Clyne M, Nichols M, et al. Newberry volcano EGS demonstration stimulation modeling[J]. GRC Transactions, 2011, 35: 317–322.
- [15] Cladouhos T T, Osborn W L, Petty S, et al. Newberry volcano EGS demonstration—phase I results, Proceedings[C]. Thirty–Seven Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, January 30–February 1, 2012.
- [16] Legarth B, Huenges E, Zimmermann G. Hydraulic fracturing in sedimentary geothermal reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42: 7–8.
- [17] Legarth B, Tischner T, Huenges E, et al. Stimulation experiments in sedimentary, low-enthalpy reservoirs for geothermal power generation [J]. Geothermics, 2003, 32(4–6): 487–495.
- [18] Barelli A, Cappetti G, Manetti G, et al. Well stimulation in Latera Field[C/OL]. [2014–11–30]. <http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1001356.pdf>.
- [19] Barrios L A, Quijano J E, Romero R E, et al. Enhanced permeability by chemical stimulation at the Berlin Geothermal Field[C/OL]. [2014–11–30]. <http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1019575.pdf>.
- [20] Serpen U, Türeyen O I. Acidizing geothermal wells[C/OL]. [2014–11–30]. <http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1016872.pdf>.

(责任编辑 刘志远)