

增强型地热系统：国际研究进展与我国研究现状

许天福¹⁾，胡子旭¹⁾，李胜涛²⁾，姜振蛟¹⁾，侯兆云¹⁾，李凤昱¹⁾，梁旭¹⁾，冯波¹⁾

1) 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室，长春，130021；

2) 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心，河北保定，071051

内容提要：干热岩地热能源已经受到全世界广泛关注。基于干热岩能源的巨大潜力和我国日益增长的能源需求，近年来，政府、大学、科研院所和企业在干热岩资源勘查、增强型地热(EGS)等方面做了许多科学研究与技术开发。为了促进我国干热岩资源的开发和增强型地热系统(EGS)示范场地的建设，本文收集和整理了国内外大量文献和相关资料，分析了目前国际典型 EGS 示范场地最新研究动态，总结了 2013~2016 年国际上开发较最为活跃的 EGS 场地在开发过程中所取得的经验和教训。结合我国现有 EGS 场地的具体条件，详细阐述了我国干热岩远景区存在的问题，并对我国未来干热岩的开发和示范场地的建设提出建议。

关键词：干热岩；增强型地热系统；水力压裂；示范场地；储层刺激

现今，世界能源危机和环境问题日益严峻，发展储藏量大且环境友好的新型替代能源逐渐受到了各国政府和科学家的重视。其中，地热资源以其极高的清洁性，运行稳定性和空间分布的广泛性已成为世界各国重点研究和开发的新型清洁能源。根据地热能源产出方式，可以将地热资源划分为水热型地热资源和干热岩型地热资源(Wang Jiyang et al., 2012)。而可以有效开发的水热型地热资源仅占已探明地热资源中的 10%左右(Kang Ling et al., 2008)，更多的地热能储存于干热岩型地热资源中。干热岩(Hot Dry Rock, HDR)是指埋藏于地球深部，内部不存在或仅存在少量流体，温度高于 180℃的异常高温岩体。干热岩的岩性主要是致密变质岩或花岗岩。保守估计，地壳中可利用的干热岩资源量大约是地球上所有石油，天然气和煤炭资源量的 30 倍(Kang Ling et al., 2008)。据中国地质科学院水文地质环境地质研究所 2012 年的调查结果显示：我国大陆范围内，仅在深度为 3.5~7.5km 之间，温度在 150~250℃的范围内，可采出利用的地热能就相当于我国 2010 年一次能源消耗总量的 5300 倍(Lin Wenjing et al., 2012)。

增强型地热系统(Enhanced Geothermal System, EGS)是开发干热岩型地热资源的有效手段，其通过水力压裂等储层刺激手段将地下深部低孔、低渗岩体改造成具有较高渗透性的人工地热储层，并从中长期经济地采出相当数量的热能并加以利用(Zhang Senqi et al., 2017; Tester et al., 2006)。随着研究的不断深入，增强型地热系统的概念也不仅仅局限于干热岩内，一些传统的地热储层(如温度较高的富水岩层)也可以经过适当的改造而形成增强型地热系统加以利用。此外，除了地热发电，地热系统采出的热量也可为供暖、工厂或生态农业所用。近年来，雾霾天气在我国不少地区频繁出现。使用地热资源作为我国北方冬季供暖的能源可以极大程度上的减少化石燃料的使用，在很大程度上可以环节我国北方特别是华北地区空气污染和雾霾问题。

EGS 的开发和研究工作在国际上已经持续了 40 多年。早在 1973 年，美国能源部(U. S. DOE)在 Fenton Hill 建立了最早的 EGS 示范研究场地(Kelkar et al., 2016)，而后在英国、法国、日本、德国和澳大利亚等国家也相继开展了干热岩资源开发的研究，建立了一批研究试验基地并取得了很多成

注：本文为国家自然科学基金项目(编号 41572215)以及“中国地质调查局地质调查项目(编号 20179621)、吉林省省校共建计划专项“深部地热资源(含干热岩)勘查与开发利用”(编号 SXGJSF2017-5)、“吉林省教育厅项目(编号 JJKH20170807KJ)的资助成果。

收稿日期：2017-06-27；改回日期：2018-07-19；责任编辑：周健。

作者简介：许天福，男，1962 年生。博士生导师，国家“千人计划”特聘专家，主要从事多相流反应溶质运移和增强型地热系统方面的研究。通讯地址：130021，吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室；Email: tianfu_xu@jlu.edu.cn。通讯作者：冯波，男，1982 年生。博士，副教授。主要从事干热岩储层改造及资源评价方面的研究。Email: fengbo82@126.com。

果。但目前 EGS 的开发尚处于现场试验研发阶段,其商业性开发还面临着技术、资金、政策和民众接受程度等诸多方面的挑战。其中,干热岩地热地质勘查、深部钻探、储层建造、场地的模型建立与多场耦合数值模拟等,是整个 EGS 开发中的难点和关键问题,也是高效开发干热岩资源的关键所在。这些关键问题的突破,对降低开发成本、减少环境影响和增加开发安全性、进而推动 EGS 的发展和商业化开发具有重要意义。

我国干热岩地热开发研究虽然起步稍晚,但经过许多科研单位和高等院校通过多年的努力,近年来也取得了丰硕的成果。2012 年,许天福等讨论了增强型地热系统的基本理念以及国外的发展趋势和关键技术等,总结和指出了包括靶区评价、地下多场耦合作用等在内的干热岩开发相关的重大技术问题,为国内的干热岩开发和研究工作提供了重要的参考依据和指向作用(Xu Tianfu et al., 2012)。2016 年,许天福等详细分析了国际上重要 EGS 示范场地建设和研究过程中所取得的经验和积累的教训,并总结了我国在干热岩开发方面取得的进展和技术现状以及未来干热岩开发的研究动态。通过分析了美国自 1974 年以来的干热岩开发过程中具有重大意义和成果的几个经典工程实例,结合我国的干热岩资源的赋存条件、开发利用背景以及当前的技术装备条件,指出了未来研究的重点领域,并给出了重要意见(Xu Tianfu et al., 2016a, 2016b)。2017 年 1 月,由国家发改委、国土资源部及国家能源局共同编制的《地热能开发利用“十三五”规划》发布,《规划》中明确指出:在“十三五”期间,我国要在选择合适的靶区建设我国首个干热岩研发示范基地。该规划是我国颁布的第一个关于开发地热资源的规划,标志着我国对地热资源开发利用的重视程度逐渐增加。鉴于国际上近几年对干热岩地热资源开发的重视逐渐增加,得到的成果和发展更是日新月异。最近几年,国际上在干热岩示范场地上的建设和发展速度更是呈上升趋势发展,了解最新的国际发展动态对于我国干热岩资源的开发显得尤为重要。

为展示、总结和交流近年来国内外干热岩和 EGS 领域的研究成果,探索未来中国干热岩开发所面临的重大科学、技术和政策问题,2016 年 10 月吉林大学举办了“干热岩资源和增强型地热国际学术研讨会”。会议吸引了 100 多位国内外干热岩勘查和 EGS 工程研究领域的专家学者,针对有关干热岩开发的相关问题进行了深入交流讨论。会后,通过

对相关资料的收集、整理以及大量的文献检索和阅读,结合与会专家在会上讲述的国际上最新 EGS 研究进展和 EGS 场地的建设情况,回顾分析了目前国际典型 EGS 示范场地建设和最新研究动态,并详细阐述了国际上三个研究比较活跃的 EGS 示范场地近年来的研究进展和现状,总结了我国近些年在 EGS 热储改造方面取得的经验和教训,为进一步推动我国干热岩地热资源的开发和建设提供参考和借鉴。

1 国外典型 EGS 示范场地研究进展

1.1 美国 Newberry Volcano EGS 场地

1.1.1 场地概况

Newberry Volcano 位于美国 Oregon 州 Bend 市以南约 35 km 处, Cascade Range 山顶以东约 50km。自 20 世纪 70 年代该地区就已经开始了大量的勘探活动。为了推进在 Newberry 地区的 EGS 研究和提高地热资源开发的技术手段,2010 年在美国能源部的授权下, AltaRock 能源公司与 Davenport Newberry 合作开展了 Newberry EGS 示范工程(Bonneville et al., 2016; Cladouhos et al., 2016)。

1.1.2 EGS 场地开发

Newberry EGS 场地开发共分为两个阶段。第一阶段从 2010 年 5 月开始到 2011 年 12 月结束。该阶段的主要目的是查明 Newberry 区域的地质条件以及选择 EGS 的开发靶区,为后续开发提供设计基础和施工参数。在第一阶段中施工了探测井 NWG55-29,终孔深度 3067m,井底温度 331℃,是 Newberry 地区温度最高的地热探井;此外在 2012 年 5 月施工了四个 MSA 微震监测井以定位储层水力压裂过程中的微震事件。通过分析 NWG55-29 井和其附近 USGSN-2 井的测井资料,结合物探结果,研究人员建立了此区域的温度-水动力-力学-化学耦合(THMC)模型。并根据 THMC 模型的计算结果初步确定了在该区域进行储层水力压裂施工所需的一系列参数(Cladouhos et al., 2013, 2016)。

第二阶段从 2012 年开始到 2014 年结束,主要是利用 NWG55-29 井对目标储层进行储层刺激施工。第一次刺激过程中定位了约 175 个微震事件,其震级在 0.0~2.5 级之间(Cladouhos et al., 2013)。本次储层刺激主要使用了水力剪切刺激,其主要方式为使用中等压力进行水力压裂。剪切压裂将会导致现有的裂隙发生剪切滑移,加之裂隙表面

本身的粗糙结构,剪切后形成的裂隙可以保持自支撑,达到良好的压裂效果(Smith et al., 2015)。但随后对压裂过程中的微震数据分析显示本次压裂过程中的微震事件主要是由井内套管发生渗漏而引起,储层刺激所产生的裂隙不能满足工程开发的要求(Cladouhos et al., 2016);因此在 2014 年进行了第二次储层刺激,本次储层刺激施工的设计参考了在第一阶段中的 THMC 模型预测结果,在施工过程中达到了良好的效果,注入流量流速从 1.9 L/s 提高到 3.8 L/s,此后的一系列实验也显示第二次的储层刺激形成了良好的 EGS 储层;为了进一步增大渗透率,2014 年底项目团队进行了第三次储层刺激。在本次压裂过程中采用了 TZIM 处理技术以减少压裂液的漏失。该技术中使用的 TZIM 材料是一种热降解区域隔离材料(Thermally-degradable Zonal Isolation Material, TZIM),该材料不仅可以对此前产生或已有的裂隙进行了暂时的封堵,降低压裂液的漏失,维持井内压力,增强剪切压裂的效果;在压裂结束后,地层的高温会逐渐将封堵材料降解成较小的碎块随液体排出,维持原来地层中裂隙的连通性。此方法在本次刺激中起到了关键的作用,提高了储层刺激的效果(Cladouhos et al., 2015)。此后进行的注入试验结果也显示储层内有新的裂隙生成,储层的渗透性质显著改善。

在整个储层刺激过程中微震监测技术起到了关键的作用。监测到的微震事件与井位置关系如图 1 所示。从图中可以看出微震事件主要集中在 2000~3200m 的深度上。通过平面分布图可以得出微震事件的分布集中在井周围 150~200m 范围内,这显示出储层刺激产生的裂隙分布在井附近 150~200m。这为对井地热系统中设计布井位置提供了关键参考依据。

1.1.3 经验与教训

Newberry EGS 场地的试验及模拟研究提供了很多宝贵经验,现总结如下:

(1)在地热田开发之前应进行场地实际情况的详尽调查,通过实际数据建立完整的 THMC 模型。利用 THMC 模型可以确定一系列的施工参数指导场地的后续开发。

(2)EGS 的开发与传统石油工程的开发有一定区别。EGS 的开发中的储层刺激宜采用建造裂隙网络的方式。剪切压裂是一种有效的建造裂隙网络的方法。

(3)在 Newberry 工程的储层刺激过程中使用了最先进的 TZIM 压裂技术,该方法可有效地控制了压裂液的漏失,增加储层刺激的效果。

(4)在水力压裂过程中,较高精度的微震监测结果可以准确的判断储层内裂隙的分布情况,为下一

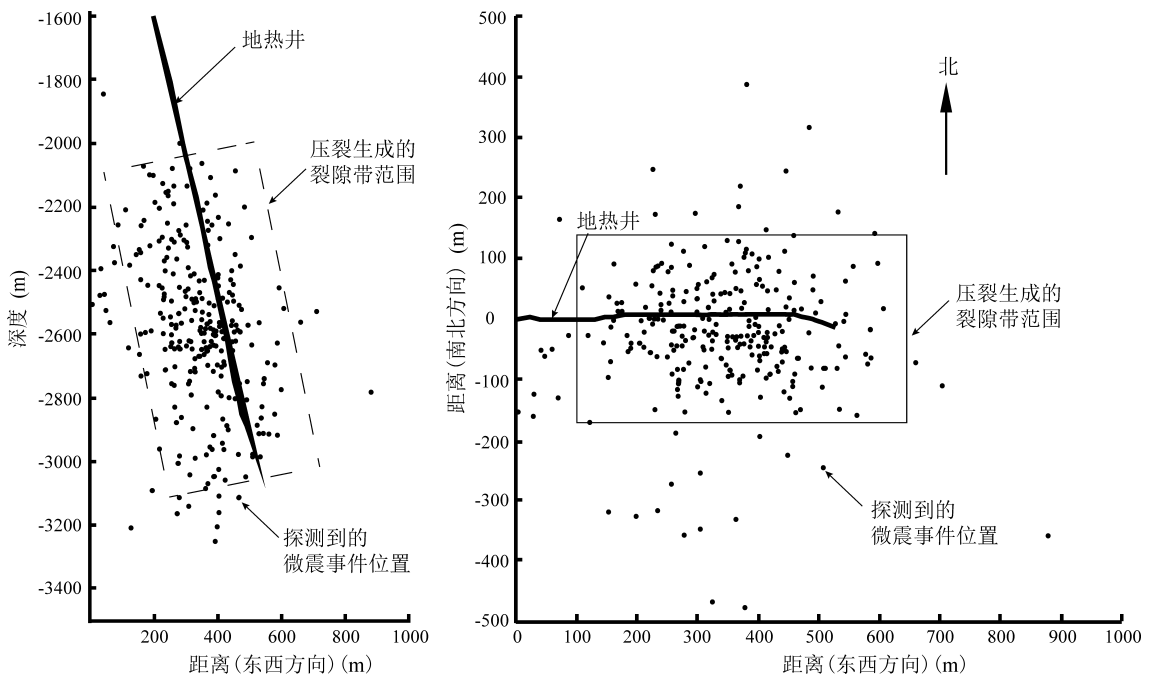


图 1 Newberry 场地 NWG55-29 井压裂过程中微震分布和井位置图(据 Cladouhos et al., 2016)

Fig. 1 Elevation view of NWG55-29 well and microseismic monitoring results in Newberry Volcano site (after Cladouhos et al., 2016)

步生产井的设计提供重要参考。

1.2 美国 Raft River EGS 场地

1.2.1 场地概况

Raft River 地热田位于美国西部爱达荷州 (Idaho) 与犹他州 (Utah) 交界地区, 在 Raft River 峡谷的南部边缘。该地区地热资源的发现源于 20 世纪 50 年代, 在 Bridge 和 Crank 两口农业灌溉用井中发现了沸腾的热水, 地热温度计指示热储资源温度约 149°C (Jones et al., 2011)。20 世纪 70 年代在该地区建立了世界上第一个双循环(异丁烷)地热发电站, 装机容量为 7MW (Ayling et al., 2013)。电站在 1982 年成功运行了近 8 个月, 净输出功率为 4MW, 由于无法满足商业生产的要求, 地热场地被迫关闭。随后的近 20 年里, Raft River 地热田没有开展进一步的勘探和开发工作。

2002 年美国地热公司 (U. S. Geothermal Inc.) 获得了 Raft River 地热田的开发使用权, 对已有的井进行了清理、加深及变道工作, 并重新安装了双循环(异戊烷)地热发电站, 装机容量 13MW (Neely et al., 2007; Bradford et al., 2013, 2014)。电站于 2007 年进行商业发电, 发电功率 $10.5\sim 11.5\text{MW}$ 。目前 Raft River 地热场地共有 9 口深井, 深度均大于 1500m, 生产流体温度约 140°C , 总生产流量近 300L/s 。地热水为 NaCl 型水, 矿化度约为 $1.465\sim 4.059\text{g/L}$ (Ayling et al., 2013; Bradford et al., 2014, 2015a, 2015b)。

1.2.2 EGS 场地开发

为了推进 EGS 开发相关关键技术突破, 实现 EGS 商业开发的进程, 同时增加 Raft River 地热田发电能力, 美国能源部资助犹他大学能源和地球科学所在该地区开展了储层改造工程。改造计划选择地热田南西方向约 1.61km 处的井 RRG-9 作为目标井, 通过储层改造建立井 RRG-9 与地热田之间的水力联系。储层改造工程采用了水力压裂和热刺激相结合的方法。改造工程从 2013 年 6 月持续到 2015 年 4 月, 后续的流体循环试验、示踪试验及微震监测工作一直持续到 2016 年 10 月。改造工程最终使得井 RRG-9 在相同的注入压力下, 其注入能力从 1.26L/s 增加到 63.1L/s , 表明井筒周围储层的渗透性能得到了明显改善 (Bradford et al., 2016)。

储层改造过程中的微震结果显示微震事件主要沿着 Narrows Zone 断层发展。这表明地层中先前存在的断裂结构会增加储层改造效果; 示踪试验

结果显示, 在井 RRG-9 注入示踪剂约 1 年后, 在此前地热田内的地热井 RRG-1、RRG-2 和 RRG-4 中监测到了示踪剂, 且出现时间随着距 RRG-9 的距离增加而增大, 这标志着储层改造产生的裂隙已经扩展到了 Raft River EGS 场地附近的地热田内, RRG-9 与地热田内其他生产井间建立了较好的水力联系, 地热田有效体积的增加将明显增大发电潜力。

由于第一阶段中 Raft River 场地取得了实质性的成果, 受到了美国能源部“地热能研究前沿瞭望台”(FORGE) 计划的第二阶段基金支持。该计划的主要目的是选择一个场地作为 EGS 尖端研究、钻井和技术测试的地下实验室, 最终可以通过该研究示范基地实现工业规模 EGS 开发。除了场地技术研发之外, FORGE 计划还致力于有关先进仪器开发、数据收集以及实时的数据分享等。2016 年 8 月, 美国能源部宣布将追加 2900 万美元的投资用于桑迪亚国家实验和犹他大学完善设备以及进行下一步的研究。目前可以确定美国内华达州 Raft River 地热田是 FORGE 计划建立示范场地的理想地点。根据美国能源部的估计, 目前美国的地热发电能力为 3.5GW , 建立示范基地后, 可以估计的地热发电能力将提高到 100GW , 发展前景十分广阔。

1.2.3 经验与教训

Raft River 地热场地 EGS 示范工程所取得的成功表明:

(1) 在现有水热田的附近开发 EGS, 可以以较短的周期内获得收益; 此外在水热田附近开发 EGS 的效果较好, 难度较低, 风险较小。

(2) 对地热田周边已存在的废弃井采用适当的储层改造工艺可以将这些井重新改造为地热井, 在降低成本的同时增加地热田的开采能力。

(3) 微震监测、场地示踪试验是识别人工诱导 EGS 储层空间扩展方向及范围的有效方法, 并可用于指导定向钻进生产井, 提高注入井和生产井之间水力连通的成功率。

(4) 地层中既有的断裂结构很大程度上控制了人工诱导裂隙扩展延伸的方向, 因此, 进行储层改造前一定要查清区内隐伏断裂结构的位置及产状, 合理利用这些地质因素提高储层改造效果。

1.3 法国 Rittershoffen EGS 场地

1.3.1 场地概况

Rittershoffen 场地位于法国阿尔萨斯地区, 其构造位置在 Upper Rhine Garbin (URG) 地区。该

地区的地热开发历史由来已久,著名的 Soultz EGS 地热场地距 Rittershoffen 场地仅数千米之遥。该地区地质调查资料显示,区内地温梯度最高可达 $110\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,热流值大于 $140\text{ mW}/\text{m}^2$ (Tester et al., 2006; Ziagos et al., 2013)。早在 20 世纪 90 年代,法国地质调查局(BRGM)在此发起了 Soultz-sous-Forêts 开发项目。在近 20 年的开发过程中建立了良好的 EGS 储层并成功运行发电 (Tester et al., 2006; Valley et al., 2007)。此外,在该地区还开发了 Bruchsal、Insheim、Landau 等几个地热场地,效果均较好,为本次的开发过程获得了大量的资料和丰富的经验。

为了更好地开发 URG 地区的地热资源,实现 EGS 系统流量大于 $70\text{ L}/\text{s}$ 、产流温度大于 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工业目标,法国 ECOGI 公司 2010 年在 Soultz 场地以东 6 km 处建立了 Rittershoffen 工程,采出的热水均用于为 Beinheim 的生物精炼厂提供 25 MW 的电力。选定的目标层位为三叠系砂岩和石炭系灰岩以及基底含裂隙的花岗岩,其原因在于目标层位不仅温度较高,而且原始地层一些位置裂隙和断层发育,更有利于建造 EGS 储层 (Baujard et al., 2015)。

1.3.2 EGS 开发过程

本次工程共施工两口地热井: GRT-1 井和 GRT-2 井,终孔深度分别为 2562 m 和 2707 m 。完井之后的注入试验结果显示: GRT-2 完井后的生产能力即可达到生产水平,不需要进行储层改造工程;而 GRT-1 井在初始状态下的注入系数不足 $0.5\text{ L}/\text{s}/\text{bar}$,远不及生产标准 (Baujard et al., 2015)。为了提高 GRT-1 井的生产能力,开发人员对 GRT-1 进行了储层改造。改造工程共使用了热刺激、化学刺激和水力压裂三种方式。

首先对 GRT-1 井进行了热刺激,从 2013 年 4 月开始持续了两个月。通过将冷水注入到储层中使岩石降温,利用岩体内热应力作用生成微裂隙。同时,热应力导致已有的孔隙开度增加,从而进一步增加渗透率。测试结果显示热刺激使储层的注入能力提高了 2 倍 (Dempsey et al., 2014);随后采用可生物降解的螯合剂 GLTA 作为化学刺激剂进行了化学刺激。GLTA 可以有效的保护储层并深入储层内部溶解裂隙表面的次生矿物,从而进一步增强储层渗透性能。经过化学刺激,储层的注入能力又提高了 1.7 倍;为了激发现有裂隙以使得储层刺激的效果最大化,在化学刺激的两天后进行了水力压裂,结果显示水力压裂使储层的注入能力又增加了

1.5 倍。经过热刺激、化学刺激以及水力压裂联合进行的储层改造工程,储层注入流体能力整体提高了 5 倍,渗透性被极大地改善 (Vidal et al., 2016)。储层刺激过程中检测到的微震事件主要分布在地下 $1000\sim 3000\text{ m}$ 的基岩范围内 (Maurer et al., 2015; Lengliné et al., 2017)。随后进行的示踪试验也证实了 GRT-1 井和 GRT-2 井之间已经建立了良好的水力联系,表明在 Rittershoffen 地区已经建立了地热储层 (Bernard et al., 2016)。

1.3.3 经验与教训

Rittershoffen 场地 EGS 工程的成功经验如下:

(1) 地热场地应尽量选择天然裂隙发育、地应力条件强烈并且主应力有明确走向的区域,这样可以更好的引导储层中裂隙的产生,更有利于建立 EGS 储层。

(2) 现阶段建立 EGS 储层不限于在高温的岩浆岩地区,对于高温的沉积岩地区同样具有建立 EGS 储层的良好条件。

(3) 联合使用热-化学-水力压裂 (THM) 的储层改造方式与单独使用单一的刺激方式相比,可以对地热储层产生更为明显的刺激效果。

(4) 本次改造工程中化学刺激的效果十分明显,但化学刺激剂带来的环境后果难以估计。因此开发环境友好,降解性能优异,零污染的化学刺激剂对地热田的有效开发具有重要意义。

2 国内干热岩及增强型地热工程研究进展

中国的板块构造位置比较特殊,西南部受印度洋板块挤压;东南部受菲律宾板块挤压,东部受太平洋板块的俯冲作用和挤压作用,地壳应力场复杂,构造极为发育,地震和岩浆活动强烈,这些条件都预示着我国地下的地热资源前景是相当可观的,对于我国陆区干热岩资源的勘查也确定出几个利于开发的靶区。开发深部干热岩资源无疑是当今中国地热资源开发的一项重要课题,也是未来远景规划需要着重考虑的一个方向。

2010 年,国土资源部启动了公益性的科研项目“中国干热岩勘查关键技术研究”,其主要开展了干热岩高温钻探技术方面的研究。2011 年,中国地质调查局开展了中国陆区干热岩资源潜力评估,结果显示我国陆区干热岩资源量巨大,赋存条件较好,具有广阔的发展前景。2012 年吉林大学、天津大学、清华大学和中国科学院广州先进能源研究所共同承

担了国家高技术研究发展计划(863项目)“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”,这标志着中国对干热岩资源的专项研究已经进入了实质研究阶段(Xu Tianfu et al., 2012)。吉林大学作为项目牵头单位承担了课题“干热岩靶区工程测试及人工压裂工艺技术研究”。这一课题是在中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院武汉岩土力学研究所和大庆油田井下分公司的协作下完成,在干热岩资源勘查、水力压裂室内试验、新型化学刺激剂以及地热储层内 THMC 多场耦合数值模拟等方面取得了一定的进展和创新;2013年,中国地质科学院水文地质环境地质研究所承担的地质调查项目“全国干热岩资源潜力评价与示范靶区研究”,国内干热岩资源调查评价与开发研究进入实质性阶段(Lin Wenjing et al., 2015);2014年国土资源系统分别在青海、西藏、四川、福建、广东、湖南、松辽盆地、海南等高温流区域进行了干热岩资源地质勘查,并在青海贵德和共和、山东利津、广东惠州、四川康定等地相继开展干热岩初步钻探,下面将对我国干热岩开发的潜力地区进行介绍。

2.1 青海贵德-共和盆地

2.1.1 区域概况

贵德-共和盆地位于青藏高原东北部,地处昆仑山脉与秦岭山脉之间,总体为一个在新生代形成的 NWW 向断陷盆地(Chang Hong et al., 2009)。盆缘活动断裂和岩浆岩发育,区内地热显示明显,类型多样,地热资源极为丰富。20世纪90年代中期,石油系统在共和-贵德地区进行了大量地球物理探测工作,结合在共和-贵德盆地的钻井资料可以得出:盆地隐伏热岩体是时代较新的印支-燕山期花岗岩,岩石生热率高,对大地热流贡献较大(Li Linguo, 2017)。通过地热勘探井,在共和、贵德、大柴旦、都兰、玉树巴塘盆地已发现多处温度 60~93℃的地下热水,热储埋深一般介于 200~1800m。共和-贵德盆地地温梯度为 5.71~7.1℃/100m,井深 3000m 处温度可达 150~200℃;2015年,青海省环境地质勘查局在贵德县曲乃亥地区发现有水温达 96.6℃的温泉(Xue Jianqiu, 2013),标志着贵德县地下具有大量的优质地热资源。

2.1.2 研究进展

(1)共和盆地:共和盆地作为我国重要的干热岩资源开发的远景区,近年来许多单位在此进行了深入的研究活动。2013年,由青海省水文地质工程地质调查院和中国地质大学(武汉)联合进行了钻探验

证工程,并于2014年4月在共和盆地中北部 2230m 的深度上钻得干热岩,温度为 153℃,探测到的平均地温梯度为 6.8℃/100m。此次探明的干热岩资源钻孔控制面积达到 150 km²(Wang Mindai et al., 2014),是我国首次探明的干热岩资源。根据共和恰卜恰地区已施工的 DR1、DR2、DR3、DR4 钻孔所收集到的资料,盆地内地温梯度较高,大地热流值异常明显,地热储层为传导型热储。地下 1000 m 处存在的 EGS 储层是一处完整的干热岩体,渗透性能较差,其中 DR4 井于 2014 年在深度为 3102m 处钻获干热岩体温度达 178℃。截止 2016 年 9 月 26 日,共和县恰卜恰地区干热岩勘查项目在上塔迈地区 GR1 钻孔已钻进至 3361m,井底温度 189℃;GR2 钻孔已钻进至 2950m,井底温度 186℃。据此分析,基底的花岗岩埋深呈由西向东逐步变浅的趋势(Yan Weide, 2015)。2015 年吉林大学对共和盆地露头花岗岩裂隙进行了调查,并利用裂隙调查结果对不同深部花岗岩渗透率进行了推测;2016 年对区内地表水、潜水及深部承压水进行了取样。通过对水化学组分全分析,绘制了共和盆地水文地球化学剖面,由补给区到排泄区、由浅部到深部分析了区域地下水水质演化过程,并利用传统地热温标和集成的多组分地温计对浅部及深部热储温度进行了估算。目前,在共和县恰卜恰地区干热岩勘查项目正在实施,初步取得了相关的地热地质参数,将为初步评价干热岩资源及查明资源分布情况提供了支持。

(2)贵德盆地:贵德地区在 1999~2012 年共施工有 7 口井,深度在 969~2700m,地温梯度在 5.61~6.79℃/100m。钻探结果显示出贵德盆地的地温场有温度高、地温梯度较大的特点。2012 年 10 月,由中国地质科学院水文地质环境地质研究所、青海省环境地质勘查局等实施的干热岩研究项目在青海省贵德县河西镇扎仓沟开始实施。2013~2014 年,青海省环境地质勘查局在贵德热水沟近沟口处实施了 ZR1 干热岩勘探孔,探获地层温度 151.34℃的对流型高温干热岩资源,证实了 NNW 向深大断裂导热通道的存在及其重大的控热作用;2015 年吉林大学对贵德扎仓沟地热区进行了水文地质勘查,并对贵德扎仓沟 ZR1 钻孔进行了岩性分析(XRD 和 XRF),建立了该地热区的三维地质模型,并对贵德地区地热水循环模式进行了氧、碳 14 及氦同位素示踪分析和高温高压水-岩作用实验,得到了比较合理的地热水循环模式和在径流过程中热储层岩石矿物的水岩相互作用规律,为后续地热资源开发

利用提供了基础。

2.1.3 未来发展方向

根据此前对贵德-共和盆地的勘查结果,贵德-共和地区干热岩资源储量大,地温梯度较高,是我国干热岩开发的有利远景区。针对贵德-共和地区地热储层低孔低渗、埋深较大的实际情况,如何具有针对性的地热井的钻井和完井以及后续的储层刺激工程是开发贵德-共和地区干热岩资源的核心问题,在此给出如下几点建议:

(1)针对共和盆地干热岩资源探明程度较高、资料较为完整的现状,下一阶段应将重点放在对高温地热井施工和储层改造的研究上。地热井施工方面,对高温钻井工艺和高温测井设备需要进一步研发;储层刺激方面,对于深部高温高应力条件下的岩石力学行为、储层刺激方案的优化和施工设计,都是共和盆地干热岩资源开发亟需解决的关键理论和关键技术。

(2)针对贵德盆地干热岩勘探程度较低、成因机理尚不完全清楚,因此下阶段应将重点放在盆地深部地地质条件调查以及地热成因机理的研究上,进一步完善贵德盆地的基础地地质资料,为后续的开发工作提供理论支持。

(3)结合贵德-共和地区干热岩赋存条件的实际情况,我国应参考国外地质条件较为类似的 EGS 场地开发实例(如 Newberry Volcano 场地等岩浆岩储层场地),借鉴国外成功的勘查开发经验,加大对干热岩勘查开发相关的投入和政策支持,尽快建立起国内花岗岩型 EGS 开发示范场地。

2.2 福建漳州地热田

2.2.1 区域概况

东南沿海地区是我国最主要的花岗岩分布区,花岗岩中由于富含 U、Th、K 等放射性元素,其放射性元素衰变形成了地下的重要热源,在壳源产热和幔源产热均理想的情况下花岗岩分布区的大地热流值可超过 $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$,因此,在覆盖层理想的地方,可以获取理想的干热岩资源。同时,东南沿海地区还是我国主要的近代火山活动分布区,本区位于板块边缘,构造活动发育,具有多期大规模的幕式岩浆活动。地下岩浆沿断裂带喷发出地表而形成火山,而未喷发部分残存于深部以局部岩浆囊的形式存在,在其周围则易形成干热岩(Lin Wenjing, 2016)。福建漳州地热田坐落于一条北西-南东向延伸的地热异常区内,其长约 2.5km,宽约 1km,位于闽东火山岩断裂带南端的漳州断陷盆地中央(Han Qingzhi

et al., 1988),位置如图 2 所示。深部地球物理勘探成果显示漳州热田及其附近 9 km 深处有一个厚 10 km、数百千米宽的岩浆房,体积约为 $1 \times 10^5 \text{m}^3$,热储量相当 4 万亿吨标准煤(Yang Lizhong, 2016a)。

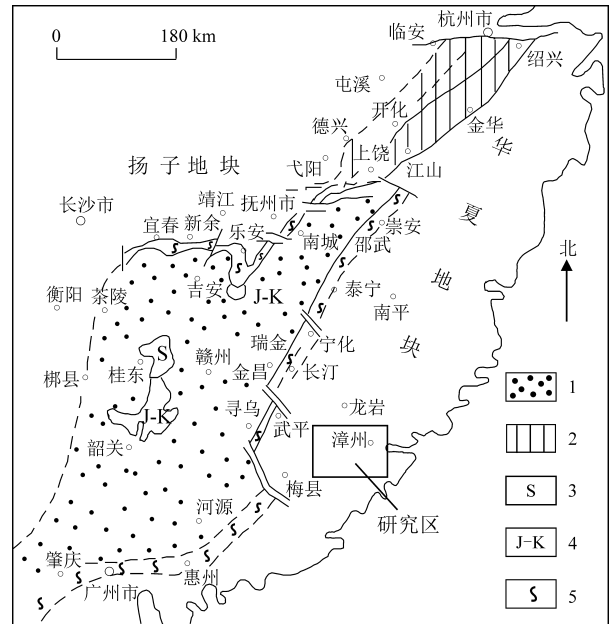


图 2 漳州地热田位置及其附近断裂构造分布
(据 Lin Wenjing et al., 2015)

Fig. 2 Location and fault structures in Zhangzhou geothermal field (after Lin Wenjing et al., 2015)

- 1—赣湘粤闽裂陷槽; 2—赣东北-浙西拗拉槽; 3—志留纪花岗岩;
4—二叠纪—白垩纪花岗岩; 5—变质混合岩带
1—Jiangxi-Hunan-Guangdong-Fujian rifting trough; 2—northeastern
Jiangxi-eastern Zhejiang Rifting trough; 3—Silurian granite;
4—Permian-Cretaceous granite; 5—metamorphic mixed rock belt

2.2.2 研究进展

2014 年,中国地质科学院水文地质环境地质研究所联合闽南地质大队开展了对漳州地区区域重力、重力剖面以及大地电磁测深等物探工作。结果显示漳州地区居里面隆起且岩浆岩体分布广泛,漳州地热田地表热流值在 $75 \sim 115 \text{mW}/\text{m}^2$,是我国干热岩的有利靶区。此外物探结果显示在研究区内 6 km 深度上可能存在较大范围的半熔融岩体,而且熔融体上部有约 1000m 的盖层,有利于地热资源的赋存。区域内钻探结果显示 1700 m 以深的地温梯度呈现逐步增大的趋势,3000m 处温度约 82°C ,地温梯度为 $2.81^\circ\text{C}/100\text{m}$,与此前预期的结果相接近(Lin Wenjing et al., 2015; Yang Lizhong et al., 2016a)。2015 年 5 月 21 日,由中国地质调查局组织实施了干热岩科学钻探深井,在福建省漳州市东泗乡清泉林场开钻,钻探深度将达 4000m。通

过本次钻探工程将进一步研究深部干热岩赋存特征和成因机制,评价干热岩资源潜力,为我国实现干热岩开发利用提供科学依据。

除普通的物探钻探勘查活动外,东华理工大学对岩体放射性生热进行了大量的研究。在漳州地区采取的岩石样品中,花岗岩密度高于该区域非花岗岩的平均密度而且在其中检测出了丰度较高的放射性元素,但元素含量分布在深度上变化不大。进一步的研究表明该区域的岩石生热率高于平均值,其中 Th 和 U 对放射性生热的贡献较高。该结果在勘查干热岩靶区中提供了重要的评价依据,对地热储层的评价具有重要意义(Yang Lizhong et al., 2016a, 2016b)。

2.2.3 未来发展方向

漳州地区火山岩的自身发热量大,且居里面较浅,深部地热资源丰富。此外,漳州地区地层裂隙发育且存在深大断裂,有利于深部热量的向上运移。这种地质条件均十分有利于干热岩资源的开发和利用。但漳州地区地处构造带边缘,初始地应力场较为复杂,故在选择 EGS 场地时应尽量选择地层中原始裂隙较为发育的地层作为可改造层。随着对漳州地区研究的逐渐深入,可以获得更多第一手研究数据和资料,为今后的研究提供帮助和借鉴。

2.3 松辽盆地

2.3.1 区域概况

松辽盆地位于我国东北部,是中新生代陆相沉积盆地,盆地内主要有 6 个一级构造单元,盆地地理位置及构造区域分布如图 3 所示。对松辽盆地地质调查结果显示,盆地内中央坳陷区和北部倾没区的地温梯度较高(4.66~4.78℃/100 m)(Lou Hong et al., 2014),盆地底部分布有大面积的火山岩基底,是松辽盆地干热岩开发的远景区。但花岗岩储层孔渗条件较差,直接进行干热岩的开发具有一定难度。

2.3.2 研究进展

目前在低孔低渗的火山岩地层中建造 EGS 储层的方式主要是先通过大规模储层压裂工程提高地层的渗透率,继而进行地热资源的开发和 EGS 的运行。石油工程领域对岩层中裂隙复杂、应力条件较差下的水力压裂进行了较多的研究(Zhang Yuguang, 2013)。对于如何将石油工程中储层改造的方法应用于干热岩的开发中也是现阶段干热岩开发的重点。

十二五期间吉林大学牵头承担并完成了国家

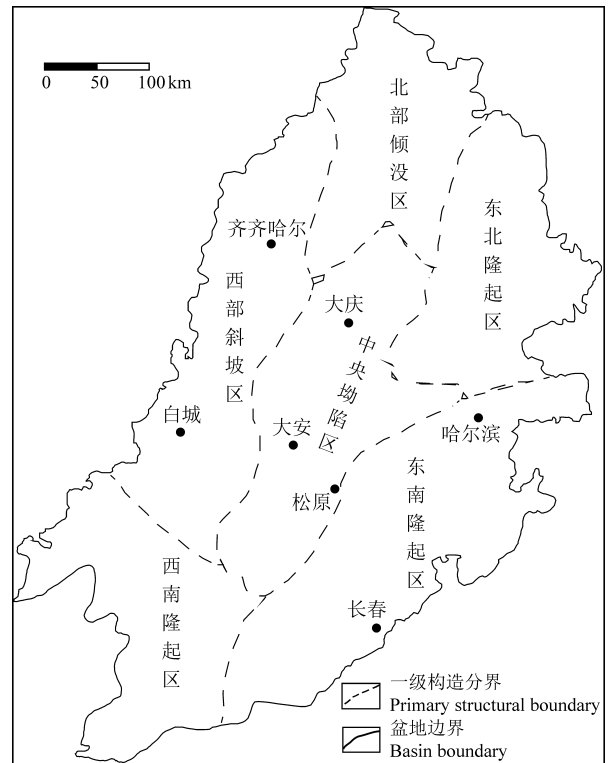


图 3 松辽盆地构造区域划分图

(据 Lei Hongwu et al., 2014)

Fig. 3 Structural division of Songliao basin in northeastern China (after Lei Hongwu et al., 2014)

863 计划项目“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”,以松辽盆地底部火山岩层为干热岩目标靶区,建立了靶区的定位体系并检验了地球物理工程探测技术,提出了中国首部干热岩靶区定位行业规程,该成果将对我国干热岩资源的探查和靶区选择提供指导;形成了一套地层降温压裂工艺,针对松辽盆地压裂条件,提出了不同排量、渗透率下的优化压裂方法。

2.3.3 未来研究方向

松辽盆地具有石油地质勘探开发程度高,基础地质资料较为丰富完善的条件,这无疑对地热资源的开发提供了良好的基础。下一步建议优选松辽盆地底部干热岩资源潜力靶区,建立干热岩勘探和 EGS 工程示范研究基地,为我国其他沉积盆地型干热岩资源开发提供借鉴。

2.4 其他地区

除上述介绍区域以外,近年来在国内的其他地区也进行了干热岩的勘探。但由于技术等因素的限制,这些地区的研究程度还不是很高。但对这些地区研究所取得的成果可为将来的 EGS 研究工作提供相关的资料和经验,同时这些地区也是我国未来

干热岩开发过程中的重要远景区。

2.4.1 四川康定县

四川甘孜康定县海拔高度 3100m, 地热资源丰富, 但开发利用十分有限。为了尽快探明并开发该地区地热资源, 2008~2009 年四川省地质工程勘察院在中谷地区实施了地热勘探工程。钻有地热探井 DZK02 井, 其设计井深 2000m, 完钻井深 1847m。在该地区的钻井施工难度较大, 该井是该地区第一口超过千米的深井。完井后的放喷试验显示混合流体稳定流量为 $51.66\text{m}^3/\text{h}$ (蒸汽流量为 $25.82\text{m}^3/\text{h}$, 液体流量为 $25.84\text{m}^3/\text{h}$), 温度为 116°C , 井口压力为 0.34MPa , 各项指标均取得了满意的钻井效果 (Long Xiaojun, 2014)。根据测算, 在四川康定地区的地热发电潜力在 150MW 以上 (Qiu Zhuoying et al., 2015)。

2.4.2 山东利津县

利津县位于山东省北部, 对干热岩的勘查开发方面在我国处于较为领先的位置。2012~2014 年山东省鲁北地质工程勘察院在利津县成功实施了干热岩调查项目, 并于 2014 年在利津县陈庄施工有干热岩勘探孔 GRY1, 钻孔资料显示在区域内的陈庄浅凸起区以下 4000m 的深度上有花岗岩的分布。仅在陈庄浅凸起区埋深 3000~5000m 深的范围内干热岩资源量为 $4.39 \times 10^{20}\text{J}$, 按温差 60°C 计算, 则可利用的干热岩资源为 $1.62 \times 10^{20}\text{J}$ (Wang Hao et al., 2015; Tan Xianfeng et al., 2016)。

3 政策措施建议

我国石油工程的历史比较悠久, 技术也相对成熟。石油工程领域的诸多成熟的经验和技術都可以应用在干热岩的开发中。建立全国性的 HDR/EGS 研究、开发和示范项目, 制定全国干热岩资源勘查和开发的标准和规范, 是十分必要的。除此之外, 国家应在 EGS 研究上加大投资和教育力度, 培养更多的干热岩开发相关的人才, 加强与干热岩开发相关的基础科学的研究, 如岩石物理, 渗流力学, 岩石地球化学等。此外, 有关高校和研究机构应深入开展干热岩资源开发技术的研究, 如水力压裂技术、高温完井技术等。这些技术的突破将会带来干热岩开发技术大幅度的进步。由于我国目前勘探出的干热岩远景区具有深度大, 温度低的特点。有些地区的地热资源在采出后无法达到发电要求, 因此需要转变观念, 拓宽思路加强梯级利用, 如向工厂供能、发展农业绿色温室、开发市区供暖等, 发展多样化的地热利

用形式。

国外 EGS 研究的诸多经验表明, EGS 投资周期长、风险大, 因此政府支持关键技术开发及集成示范研究, 是最终实现 EGS 可持续商业化开发的必经之路。建议国家有关部门抓住时机, 尽早设立“EGS 技术集成和工程化示范研究”专项, 验证和改善已有技术, 开发新技术。同时, 在吸取国外 EGS 示范场地建设经验的基础上, 结合我国实际场地和技术条件, 尽快建立我国 EGS 技术集成研究和工程示范基地。

4 结论

本文通过对 2013~2016 年来国外典型 EGS 场地最新研究动态的信息收集和整理, 详细阐述了国际上开发活动较活跃的 EGS 场地取得的经验和教训, 并分析了国内几个干热岩资源开发的远景地区, 总结了干热岩资源勘查和开发最新技术。虽然目前我国干热岩开发的进度较世界前沿还有一定的距离, 但就目前已经圈定的几个靶区来看, 我国陆区干热岩资源量巨大, 具有广阔的开发应用前景。但储层的深度大、储层低孔低渗且赋存条件复杂, 因此储层改造和高温深井的钻井完井技术依然是我国下一阶段干热岩开发的核心问题。

干热岩资源的开发不仅局限于发电利用, 近年来中低温地热资源的供暖以及非发电类利用的兴起, 不仅可以改变“以煤为主”的传统能源消费结构, 更有利于减缓华北、东北等地区雾霾等大气污染问题, 地热资源利用的多样化也即将变成未来能源研究的重点领域。充分吸取国外先进的地热开发经验和教训, 相信我国干热岩资源的开发将会很快进入一个新的时代。可以预见, 干热岩地热资源的研究与开发将对我国未来的节能减排和环境污染治理以及新一轮的能源结构调整做出重要的贡献。

References

- Ayling B, Moore J. 2013. Fluid geochemistry at the Raft River geothermal field, Idaho, USA: New data and hydrogeological implications. *Geothermics*, 47: 16~126.
- Baujard C, Genter A, Graff J J, Maurer V, Dalmis E. 2015. ECOG1, a new deep EGS project in Alsace, Rhine Graben, France. *Proceedings of World Geothermal Congress*, 19~25.
- Bernard S, Julia S, Frédéric G, Stéphane T, Albert G, Gueric V. 2016. Inter-well chemical tracer testing at the Rittershoffen geothermal site (Alsace, France). *European Geothermal Congress*, Strasbourg, France.
- Bonneville A, Cladouhos T T, Schultz A. 2016. Establishing the

- Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE) on the Newberry Volcano, Oregon. Proceedings of 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Bradford J, McLennan J, Moore J, Glasby D, Waters D, Kruwell R, King D. 2013. Recent developments at the Raft River geothermal field. Proceedings of 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Bradford J, Ohren M, Osborn W L, McLennan J, Moore J, Podgorney R. 2014. Thermal stimulation and injectivity testing at Raft River, ID EGS Site. Proceedings of 39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Bradford J, McLennan J, Moore J, Podgorney R, Tiwari S. 2015a. Hydraulic and thermal stimulation program at Raft River Idaho, a DOE EGS. GRC Transactions, 39: 261~268.
- Bradford J, Moore J, Ohren M, McLennan J, Osborn W L, Majer E, Rickard W. 2015b. Recent thermal and hydraulic stimulation results at Raft River, ID EGS Site. Proceedings of 40th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Bradford J, McLennan J, Tiwari S, Moore J, Podgorney R, Plummer M, Majer E. 2016. Application of hydraulic and thermal stimulation techniques at Raft River, Idaho; A DOE enhanced geothermal system demonstration project. In 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium 2016. American Rock Mechanics Association (ARMA).
- Chang Hong, Jin Zhangdong, An Zhisheng. 2009. Sedimentary evidences of the uplift of the Qinghai Nanshan (the Mountains South to Qinghai Lake) and its implication for structural evolution of the Lake Qinghai-Gonghe Basin. Geological Review, 55(01):49~57 (in Chinese with English abstract).
- Cladouhos T T, Petty S, Nordin Y, Moore M, Grasso K, Uddenberg M, Swyer M, Julian B, Foulger G. 2013. Microseismic monitoring of Newberry Volcano EGS demonstration. Proceedings of 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Cladouhos T T, Uddenberg M, Swyer M W, Petty S, Nordin Y. 2015. Production well targeting at Newberry Volcano EGS Demonstration. GRC Trans, 39.
- Cladouhos T T, Petty S, Swyer M W, Uddenberg M E, K Grasso, Y Nordin. 2016. Results from Newberry Volcano EGS demonstration, 2010 - 2014. Geothermics, 63: 44~61.
- Dempsey D, Kelkar S, Davatzes N C, Hickman S, Moos D, Zemach E. 2014. Evaluating the roles of thermoelastic and poroelastic stress changes in the desert peak EGS stimulation. Proceedings of Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. USA; Stanford University, California.
- Han Qingzhi, Zhuang Qingxiang. 1988. On the source and pathway of hot water in Zhangzhou Basin, Fujian. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 3: 271~277 (in Chinese with English abstract).
- Jones C, Moore J, Teplow W, Craig S. 2011. Geology and hydrothermal alteration of the Raft River geothermal system, Idaho. Proceedings of 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Kang Ling, Wang Shilong, Li Chuan. 2008. Reservoir technology in enhanced geothermal systems. Machinery Design & Manufacture, 9:141~143 (in Chinese with English abstract).
- Kelkar S, Woldegabriel G, Rehfeldt K. 2016. Lessons learned from the pioneering hot dry rock project at Fenton Hill. Geothermics, 63: 5~14.
- Lei Hongwu, Jin Guangrong, Li Jiaqi, Shi Yan, Feng Bo. 2014. Coupled thermal-hydrodynamic processes for geothermal energy exploitation in enhanced geothermal system at Songliao Basin, China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 44 (05): 1633~1646 (in Chinese with English abstract).
- Lengliné O, Boubacar M. Schmittbuhl J. 2017. Seismicity related to the hydraulic stimulation of GRT1, Rittershoffen, France. Geophysical Journal International, 208(3):ggw490.
- Li Linguo, Li Baixiang. 2017. A discussion on the heat source mechanism and geothermal system of Gonghe-Guide basin and mountain geothermal field in Qinghai Province. Geophysical and Geochemical Exploration, 41 (1): 29 ~ 34 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Wang Fengyuan, Gan Haonan, Ma Feng, Wang Guiling. 2015. Site selection and development prospect of a hot dry rock project in Zhangzhou geothermal field, Fujian province. Science & Technology Review, 33 (19): 28~34 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, Liu Chunlei, Wang Guiling. 2012. An estimation of HDR resources in China's mainland. Acta Geoscientica Sinica, 33 (05): 807~811 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Gan Haonan, Wang Guiling, Ma Feng. 2016. Occurrence prospect of HDR and target site selection study in southeastern of China. Acta Geoscientica Sinica, 90(08):2043~2058 (in Chinese with English abstract).
- Lou Hong, Min Lifei, Huang Lin, Wu Xiaoxiong, Yuan Xingyan. 2014. Study on potential of geothermal resources of hot dry rock in Songliao Basin. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 1:10~14 (in Chinese with English abstract).
- Long Xiaojun. 2014. Application of plateau geothermal well construction technology in Kangding County, Garze Prefecture, Sichuan Province. Coal Geology of China, 26(07):60~62+77 (in Chinese with English abstract).
- Maurer V, Cuenot N, Gaucher E, Grunberg M, Vergne J, Wodling H, Lehujeur M, Schmittbuhl J. 2015. Seismic monitoring of the Rittershoffen EGS project (Alsace, France). Proceedings of World Geothermal Congress, 19~25.
- Neely K W, Galinato G. 2007. Geothermal power generation in Idaho; an overview of current developments and future

- potential. Open File Report, Idaho Office of Energy Resources.
- Qiu Zhuoying, Wang Lingbao, Li Huashan, Bu Xianbiao. 2015. Energy and exergy analysis of geothermal generation from Ganzhi. *Advances in New and Renewable Energy*, 3(03): 207~213 (in Chinese with English abstract).
- Smith J T, Sonnenthal E L, Cladouhos T. 2015. Thermal-hydrological-mechanical modelling of shear stimulation at Newberry Volcano, Oregon. In 49th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association (ARMA).
- Tan Xianfeng, Wang Hao, Kang Fengxin. 2016. Experimental study on fracturing of GRYI hot dry rock hole in Chenzhuang Town, Lijin County. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 43(10): 230~233 (in Chinese with English abstract).
- Tester J W, Livesay B, Anderson B J, Moore M C, Bathchelor A S, Nichols K, Blackwell D D, Petty S, DiPippo R, Toksoz M N, Drake E M, Veatvh Jr R W, Granish J. 2006. The future of geothermal energy: impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century. Massachusetts Institute of Technology, 209.
- Valley B, Genter A. 2007. Multi-scale fracturing in the Soultz-sous-Forêts basement from borehole image analyses. *Proceedings of EHDRA Scientific Conference*, Vol. 28.
- Vidal J, Genter A, Schmittbuhl J. 2016. Pre- and post-stimulation characterization of geothermal well GRT-1, Rittershoffen, France: insights from acoustic image logs of hard fractured rock. *Geophysical Journal International*, 206(2): ggw181.
- Wang Hao, Lu Jianrong, Lan Shanzhi. 2015. Primary analysis on exploitation and utilization condition of hot dry rock in Lijin County. *Shandong Land and Resources*, 31(05): 20~23 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China. *Keji Daobao/ Science & Technology Review*, 30(32): 25~31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mindai, Guo Qinghai, Yan Weide, Liu Mingliang, Cao Yaowu, Li Jiexiang, Shi Weidong, Shang Xiaogang, Ma Yuehua. 2014. Medium-low-enthalpy geothermal power-electricity generation at Gonghe Basin, Qinghai Province. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 39(09): 1317~1322 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tianfu, Zhang Yanjun, Zeng Shaofa, Bao Xihua. 2012. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock). *Science & Technology Review*, 30(32): 42~45.
- Xu Tianfu, Yuan Yilong, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Feng Bo. 2016a. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: international experience and China prospect. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(04): 1139~1152 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tianfu, Zhang Wei. 2016b. Enhanced geothermal systems: international developments and China's prospects. *Petroleum Science Bulletin*, 1(01): 38~44 (in Chinese with English abstract).
- Xue Jianqiu, Gan Bin, Li Baixiang, Wang Zhilin. 2013. Geological-geophysical characteristics of enhanced geothermal systems (hot dry rocks) in Gonghe-Guide Basin. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(01): 35~41 (in Chinese with English abstract).
- Yan Weide. 2015. Characteristics of Gonghe Basin hot dry rock and its utilization prospects. *Science & Technology Review*, 33(19): 54~57 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lizhong. 2016a. The radioactive heat-producing characteristics and the hot dry rock resources potential of prototypes granite rocks in Zhangzhou region. *Esat China University of Technology*.
- Yang Lizhong, Liu Jinhui, Sun Zhanxue, Wang Andong, Wan Jianjun, Zhou Yi. 2016b. Study of the characteristics of radioactive heat production rate and hot dry rock resources potential in Zhangzhou City. *Modern Mining*, 32(03): 123~127+133.
- Zhang Senqi, Jia Xiaofeng, Zhang Yang, Li Shengtao, Li Zhiwei, Tian Puyuan, Ming Yuanyuan, Zhang Chao. 2015. Volcanic magma chamber survey and geothermal geological condition analysis for hot dry rock in the Wudalianchi region, Heilongjiang Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 91(7): 1506~1521 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuguang. 2013. Application of the generalized "G function" theoretical model to the minifrac analysis in volcanic beds: a case study from the Daqing Xushen gas field, Songliao Basin. *Natural Gas Industry*, 4: 61~65 (in Chinese with English abstract).
- Ziagos J, Phillips B R, Boyd L, Jelacic A, Stillman G, Hass E. 2013. A technology roadmap for strategic development of enhanced geothermal systems. *Proceedings of 38st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.

参 考 文 献

- 常宏, 金章东, 安芷生. 2009. 青海南山隆起的沉积证据及其对青海湖-共和盆地构造分异演化的指示. *地质论评*, 55(1): 49~57.
- 韩庆之, 庄庆祥. 1988. 漳州盆地地下热水的来源和运移途径的初步研究. *地球科学*, (3): 271~277.
- 康玲, 王时龙, 李川. 2008. 增强型地热系统 EGS 的人工热储技术. *机械设计与制造*, (09): 141~143.
- 雷宏武, 金光荣, 李佳琦, 石岩, 冯波. 2014. 松辽盆地增强型地热系统(EGS)地热能开发热-水动力耦合过程. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(05): 1633~1646.
- 李林果, 李百祥. 2017. 从青海共和-贵德盆地与山地区温场特征探讨热源机制和地热系统. *物探与化探*, 41(1): 29~34.
- 蔺文静, 刘志明, 马峰, 刘春雷, 王贵玲. 2012. 我国陆区干热岩资源

- 潜力估算. 地球学报, 33(05): 807~811.
- 蔺文静, 王凤元, 甘浩男, 马峰, 王贵玲. 2015. 福建漳州干热岩资源选址与开发前景分析. 科技导报, 33(19): 28~34.
- 蔺文静, 甘浩男, 王贵玲, 马峰. 2016. 我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究. 地质学报, 90(8): 2043~2058.
- 龙小军. 2014. 四川省甘孜州康定县高原地热井施工工艺. 中国煤炭地质, 26(07): 60~62+77.
- 娄洪, 闵丽霏, 黄林, 伍小雄, 袁兴雁. 2014. 松辽盆地干热岩地热资源潜力初探. 矿产保护与利用, 1: 10~14.
- 邱卓莹, 王令宝, 李华山, 卜宪标. 2015. 甘孜地热发电能量分析与?分析. 新能源进展, 3(03): 207~213.
- 谭现锋, 王浩, 康凤新. 2016. 利津陈庄干热岩 GRY1 孔压裂试验研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 43(10): 230~233.
- 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱传庆, 饶松, 唐晓音, 孔彦龙, 罗璐, 李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估. 科技导报, 30(32): 25~31.
- 王浩, 卢建荣, 兰善治. 2015. 利津县干热岩开发利用条件探析. 山东国土资源, 31(05): 20~23.
- 王敏黛, 郭清海, 严维德, 刘明亮, 曹耀武, 李洁祥, 石维栋, 尚小刚, 马月花. 2014. 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), 39(09): 1317~1322.
- 许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 侯兆云, 冯波. 2016a. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望. 吉林大学学报(地球科学版), 64(04): 1139~1152.
- 许天福, 张炜. 2016b. 增强型地热工程国际发展和我国前景展望. 石油科学通报, 1(01): 38~44.
- 许天福, 张延军, 曾昭发, 鲍新华. 2012. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展. 科技导报, 30(32): 42~45.
- 薛建球, 甘斌, 李百祥, 王志林. 2013. 青海共和—贵德盆地增强型地热系统(干热岩)地质-地球物理特征. 物探与化探, 37(01): 35~41.
- 严维德. 2015. 共和盆地干热岩特征及利用前景. 科技导报, 33(19): 54~57.
- 杨立中. 2016a. 漳州地区典型花岗岩体放射性生热特征及干热岩资源潜力研究. 东华理工大学硕士学位论文.
- 杨立中, 刘金辉, 孙占学, 王安东, 万建军, 周毅. 2016b. 漳州岩体放射性生热率特征及干热岩资源潜力. 现代矿业, 3: 123~127.
- 张森琦, 贾小丰, 张杨, 李胜涛, 李志伟, 田蒲源, 明圆圆, 张超. 2017. 黑龙江省五大连池尾山地区火山岩浆囊探测与干热岩地热地质条件分析. 地质学报, 91(7): 1506~1521.
- 张玉广. 2013. 扩展“G 函数”模型在火山岩测试压裂参数解释中的应用——以大庆油田徐深气田为例. 天然气工业, 33(04): 61~65.

Enhanced Geothermal System: International Progresses and Research Status of China

XU Tianfu¹⁾, HU Zixu¹⁾, LI Shengtao²⁾, JIANG Zhenjiao¹⁾, HOU Zhaoyun¹⁾,
LI Fengyu¹⁾, LIANG Xu¹⁾, FENG Bo¹⁾

1) Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education,
Jilin University, Changchun, 130021;

2) Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding, Hebei, 071051

Abstract

Dry hot rock geothermal energy has received worldwide attention. Because of the huge potential of dry hot rock energy and China's growing energy demand, in recent years, governments, universities, research institutes and enterprises have done many scientific research and technology in dry hot rock resource exploration and enhanced geothermal (EGS) development. In order to improve the exploitation of HDR resources and the construction of EGS demonstration ground in our country and ensure the current situation of geothermal resources' exploitation in China, this paper summarized the actuality of EGS exploitation in China by collecting and organizing many relative information and research articles, and analyzed the construction and up-to-date research trends of some international and domestic typical EGS demonstration field. In this paper, experience and lessons learned during the development of the most active EGS site in the world during 2013~2016 have been summarized. Combined with the specific conditions of the existing EGS sites in China, the problems existing in the HDR prospects in China are elaborated, and suggestions for the development of dry hot rocks and the construction of demonstration sites in China are proposed.

Key words: HDR; EGS; hydrofracture; demonstration field; reservoir stimulation