

增强型地热工程国际发展和我国前景展望

许天福^{1*}, 张炜²

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 中国地质图书馆(中国地质调查局地质文献中心), 北京 100083

* 通信作者, E-mail: Tianfu_Xu@jlu.edu.cn

收稿日期: 2016-03-26

摘要 增强型地热工程(EGS)是指通过水力压裂等工程手段在地层深处低渗透性干热岩(HDR)体中形成人工地热储层, 采出大量热能的人工地热系统。HDR是一种没有水或蒸汽的热岩体, 普遍埋藏于距地表3~10 km的地层深处, 其分布温度范围很广, 在150~650 °C之间, 所蕴含的能量相当于全球石油、天然气和煤炭总能量的30倍。EGS的研究与开发已有40年的历史, 美国、英国、法国、日本、澳大利亚等发达国家是早期的研究主体, 我国的研究才刚刚起步。目前HDR的开发面临诸多挑战, 如大体积人工裂隙热储的建造等, 因此EGS实现商业化还需要进行大量的研究和技术开发。本文分析了美国EGS重点示范场建设和EGS科学研究的经验和教训, 希望为我国EGS研究和工程化提供参考和借鉴。

关键词 干热岩; 增强型地热系统; 水力压裂; 热储建造; 示范场地

0 引言

地热资源由于其清洁和空间分布的广泛性, 已成为世界各国重点研究开发的清洁新能源, 主要分为水热型和干热岩型^[1-4]。世界上目前开采和利用的地热资源主要是水热型^[2-4]。干热岩(HDR)是一种没有水或蒸汽的热岩体, 主要是各种变质岩或结晶岩类, 普遍埋藏于距地表3~10 km深处, 其温度范围很广, 在150~650 °C之间。保守估计, 地壳中干热岩所蕴含的能量相当于全球所有石油、天然气和煤炭总能量的30倍^[2-3]。

增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems, EGS)是用人工形成地热储层的方法, 从低渗透性岩体中经济地采出深层地热能的人工地热系统^[2,5], 即从干热岩中开发地热的工程。美国能源部(DOE)2008年增强型地热系统技术评估报告指出, 需要对EGS技术中3个关键问题进行评估, 即地质条件、经济可行性和EGS技术领域的适用性, 最后通过耦合模型预测评价

能源开发的可行性^[1]。

2006年美国能源部资助由麻省理工学院(MIT)领导的独立专家评估委员会负责完成《地热能的未来——21世纪增强型地热系统对美国的影响》, 旨在确定地热能潜力能否满足美国未来的能源需求。报告指出, 美国通过使用EGS这一先进技术, 到2050年其地热能可提供10万MW以上的电力。美国认识到干热岩地热资源的巨大潜力, 将用于HDR开发的EGS技术作为最重要的新能源技术之一^[6]。

2009年《美国经济复苏与再投资法案》宣布将投资4亿美元用于EGS技术的研发。DOE地热技术处(GTO)与国家实验室、大学和相关行业机构合作, 致力于EGS技术研发和EGS示范项目的建设。GTO通过资助关键研发技术和重点示范项目, 改进EGS技术, 降低干热岩地热开发成本, 以便利用这个潜力巨大的新型地热资源进行发电。2013年GTO发布了其EGS研发投入战略的路线图, 该路线图描述了技术研究路径及相应的时间表, 要在2020年前建造一个发电量为

引用格式: 许天福, 张炜. 增强型地热工程国际发展和我国前景展望. 石油科学通报, 2016, 01: 38-44

XU Tianfu, ZHANG Wei. Enhanced Geothermal Systems: International developments and China's prospects. Petroleum Science Bulletin, 2016, 01: 38-44. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.003

5 MW的储层,在2030年前将单位地热发电成本降低至6美分/kW·h。

作为美国奥巴马政府“全方位能源政策”的一部分,DOE于2014年7月17日宣布为地热能研究的前沿观测计划(FORGE)的初始阶段投入3100万美元。该计划的目的是建立用于EGS前沿研究的现场实验室。此外,DOE还于同年8月6日宣布为可推动美国地热能开发的32个项目投入1800万美元。选择的项目集中在3个技术领域:(1)发展EGS的地下分析和工程技术;(2)应用一个被称为有利成藏组合分析(play fairway analysis)的成像方法来发现新的地热资源;(3)加快研发可从中低温地热资源中提取高附加值材料(如锂)的技术。总的来说,这些项目将降低地热开发的成本和风险,加速地热能的技术发展和经济部署。

鉴于美国在全球HDR和EGS的发展中的领先地位,本文分析美国自20世纪70年代以来HDR/EGS现场试验和示范项目的发展历程,希望为中国EGS技术研发和示范基地的建设提供借鉴和启示。

1 美国早期的干热岩试验项目

1974年美国Fenton Hill干热岩试验首次尝试从不存在高渗透性的岩石中采热。最初,该项目完全由美国政府资助,之后在国际能源署的协调下,美国与英国、法国、德国和日本开展了积极合作。该干热岩试验位于美国新墨西哥州Valles Caldera区中一个水热系统的边缘,距离美国洛斯阿拉莫斯国家实验室不远,该工程就是由这个国家实验室构想设计出来的^[7]。Fenton Hill地热田具有较高的地温梯度和大量的均质低渗透性结晶基底岩石。

Fenton Hill项目证实了干热岩概念的技术可行性,但所开展的试验未能产生商业规模所需的所有性能指标,没达到足够大的储层热提取量,而且生产成本较高。

通过Fenton Hill项目对EGS有如下发现。首先,可在坚硬的磨蚀性岩石中完成深部(近5 km)、高温(300℃)钻探。其次,产生或激活大规模裂隙网络并通过地震监测和定向钻孔对它们进行获取是可能的。最后,使流体在裂隙网络中循环也是可能的。该项目还建立了第一个流动和传热模型以预测EGS储层的行为。

尽管从商业开发角度来看,Fenton Hill项目未能给出一个商业规模所需的完整性能描述,但正是基于该项目的经验教训和数据,其他国家的项目如英国的

Rosemanowes、日本的Hijiori-Ogachi和法国的Soultz等才得以进一步发展在其他地质环境的结晶岩中建造热储的方法。

2 美国近年的EGS示范项目

2.1 Desert Peak项目

由Ormat科技公司负责的Desert Peak示范项目位于内华达州Reno城东北部。该地热田现有的水热生产(发电量为12.5 MW)来自埋深达760 m的流纹岩地层下部的破碎带,而其上部成为了该破碎带储层的盖层。

为了提高目标井周围区域的渗透率,建立该井与水热田生产部分间的连通性,Ormat公司设计了由4个独立阶段组成的储层改造方案。2010年8月在Desert Peak场地开始了改造作业,流体被注入深度在914~1005 m之间的流纹岩地层底部。经过8个月的多级改造(激发),井的注入能力增加了几个数量级,流量增加了几百加仑每分钟。这表明目标井附近区域的渗透性得到了显著的改善^[8-9]。

该激发作业为项目实施团队提供了重新评估某些技术或方法的经验和依据。例如,尽管化学激发暂时提高了井的注入能力,但随后会引发井筒失稳。此外,已有的经验明确表明剪切激发(shear stimulation)是用于增加井筒周围被激发岩体体积所必需的第一步,此后的大规模体积压裂会使渗透性明显增强,但其是否具有可持续性仍有待观察。最后,实时微震监测至关重要,因为它可以验证激发的效果。地下地震检波器以及检测算法的调整对获取与激发最相关的数据而言也是必需的,在Desert Peak项目中,这类数据包括小规模地震事件。为了进一步提高井的注入能力,Ormat公司最近开展了修井作业,使其可触及更深的地层,并开始了大规模的多层激发作业^[7]。

作为美国奥巴马政府全方位能源战略的一部分,DOE于2013年4月12日确认Desert Peak项目作为美国第一个商业化EGS工程,可向电网提供电力。此工程已使该处正在运营的地热田的输出功率增加了近38%,相当于可为电网提供额外的1.7 MW电力^[10]。

2.2 Bradys项目

除了Desert Peak项目,Ormat公司于2008承担了位于内华达州Bradys的EGS示范项目,该处邻近Desert Peak示范项目。Bradys的地层类似于Desert Peak。从Desert Peak采集到的地质、地球物理和测井

数据有助于对 Bradys 地质环境的总体认识以及 EGS 工程的建立。

研究表明 Bradys 和 Desert Peak 热源是彼此独立的热柱。Bradys 的水热生产总体上与其断层有关。为了穿透更深、更热的断层带,打井深度进一步增加。现有生产井的深度范围为 600~1 500 m,且位于断层带附近。Bradys 示范项目的目标井与流纹岩地层相交,该地层温度超过 204 °C 且发育有大量的裂隙。

Ormat 公司利用 EGS 技术针对目标井开展水力激发,致力于提高井的注入能力至商业水平,并确保井和生产区之间保持较高的水力连通性。

2.3 Geysers 项目

Calpine 电力公司承担的 Geysers 示范项目位于北加利福尼亚州盆岭区的西部,该地区是全球最大的蒸汽地热田,现发电装机容量 825 MW。Geysers 储层位于杂砂岩中,上覆由不同低渗透性岩石组成的盖层,下伏结晶岩体^[11-12]。

Geysers 项目的目的是钻及并激发位于水热储层之下的低渗透性高温区。估计该高温区的温度可达 280~400 °C 且含高浓度的酸性气体。2011 年 Calpine 公司开始了为期 1 年的激发作业,用经过处理的城市废水的逐步注入增加岩体的渗透性。该研究团队成功地在高温区中建造了一个储层,该试验结果由测井的地球化学和压力响应数据得到证实。流动测试和电力生产估算显示该新建造储层的蒸汽发电潜力为 5 MW^[7]。Calpine 公司正在设计建造一个新电厂,以便充分利用被激发区域的蒸汽流量。

通过该项目,作业人员接触到先进的钻进技术、温度硬化储层检测工具、耐高温的测井和井下采样设备以及高级数值模拟程序。同时也证实,激发已有地热田边缘处的热岩可以以较低的成本确保较高的产能。

2.4 Newberry 项目

由 2009 年《美国经济复苏与再投资法案》资助,AltaRock 能源公司负责 Newberry 示范项目的开发建设。该示范项目地处俄勒冈州中部 Newberry 火山的侧翼,火山位于 3 个地质省的连接处。

该项目在 DOE 的 EGS 示范项目资助额中所占比重最大,为降低地热开发成本做出了重要贡献;因为随着地热井发电能力的改善,钻进成本也逐步降低,进而显著减少工程建设成本。

Newberry 项目测试了不同的革新技术,通过向地下注入高压冷流体用近 40 d 建造了一个 EGS 储层。该

项目利用了由美国能源部部分资助 AltaRock 公司和 CSI 科技公司研发的化学和矿物分流器技术,以暂时封堵流体损失区,从而使新的裂隙重新打开和扩大,使更大的岩体发生破裂,可以从单井中采热。通过分析与激发有关的地震和注入井数据,可以发现使用化学分流器可帮助接近激发过程中在目标井筒产生的 3 个显著的流体漏失点。

2.5 Raft River 项目

犹他大学能源和地质研究所负责的 Raft River 示范项目位于爱达荷州。目前, Raft 地热田的电力生产来自 1974 年至 1982 年美国能源部早前建立的地热示范项目开发的常规水热资源。正如许多示范项目所发现的,区域断层对 Raft 地热田的地热潜力起到了重要的作用,地质流体通过相互交错的断层在地层深处进行循环^[13]。

该示范项目旨在建立一个预计温度在 130~200 °C 的 EGS 储层,以改善现有 Raft 地热田的性能。为了提高目标井的产量以及建立地热田的相互连通性,一般实施一次多级激发,先注入冷水以使热的岩体致裂,随后进行水力压裂。

3 国内 EGS 研究动态

根据板块构造理论,中国西南部受印度洋板块的挤压作用,东南部受菲律宾板块的挤压作用,东部受太平洋板块的挤压和俯冲作用,地质构造复杂,地震活动强烈,这都预示着我国地下深处蕴藏着丰富的地热资源,如西藏羊八井地区、云南腾冲地区、海南琼北地区、台湾及东南沿海地区、长白山地区等地,都具有极丰富的高温岩体地热资源和优越的形成条件^[2, 14]。我国以往的地热开采一般在 1 000 m 以内,以浅层地热开发为主。浅层地热的大量开采在一些地区造成了地下水位大幅度下降、地面沉降等后果,同时浅层地热资源的温度、水量等难以满足高附加值的相关领域,诸如发电、工业加工、农副业加工等的需要。中国科学院地质与地球物理研究所的研究表明,我国干热岩资源的有利靶区包括藏南地区、云南西部(腾冲)、东南沿海(浙闽粤)、东北(松辽盆地和长白山地区)、华北(渤海湾盆地)、鄂尔多斯盆地东南缘的汾渭地堑等地区。

盆地底部的干热岩虽没有火山型增温梯度高,但分布广泛,距离经济发达地区近,如松辽盆地。据中国科学院地质与地球物理研究所统计,中国大

陆地区大地热流值的变化范围相当大,但主要在25~105 mW/m³之间。松辽盆地热流值50~90 mW/m³,平均为70 mW/m³,其中杏4井的大地热流值高达84.15 mW/m³,是松辽盆地热流背景值高的直接证据。松辽盆地大地热流值高于东北地区平均热流值(63 mW/m³),在全国也属于高热流区。松辽盆地是一个以古生界和前古生界为基底的大型中、新生代含油气盆地。盆地基底中广泛分布华力西期及燕山期的花岗岩,从侏罗纪到白垩纪的多期构造活动使得盆地内形成了有利于地热资源赋存的生储盖组合,深层和浅层断裂构造发育,为地热资源的向上传导提供便利。第四纪以来的火山活动反映出松辽盆地现今深部地热仍较为活跃^[15]。地幔热流和部分地壳放射性元素蜕变产生的热使得松辽盆地北部现今地温场具有大地热流值高、地温梯度高的特点。

2012年国家高技术研究发展计划(“863”计划)启动了“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”项目。吉林大学作为项目的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的,旨在研究并解决干热岩开发的地下关键技术问题,项目刚刚执行完成。在以下EGS单向技术研究方面取得了进展与创新:

(1)提出了干热岩靶区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勘查和靶区选择提供指导。

(2)构建了大尺寸高温高压干热岩水力压裂实验室模拟系统,模拟研究和实时监控变温过程的岩石力学参数、水力压裂、裂隙导流换热的动态演化过程,可为将来我国EGS示范场地建设压裂方案设计提供理论和技术支撑。

(3)形成了一套地层降温压裂工艺,研发了高温(200℃)压裂液和新型化学压裂刺激剂,针对现场压裂条件,提出了不同排量、渗透率下的优化压裂方法。

(4)构建了热储改造效果验证评价技术体系。建立了基于示踪技术确定裂隙连通性和导热性的定量评价方法。通过微震、应力、温度监测,形成多地球物理场耦合的人工压裂—地表反馈表征方法。

(5)自主开发了一系列EGS地下传热传质过程的三维全区域动态模拟软件,提出了大规模EGS多井布局的优化设计方案,研究了运行参数(包括工质选择)对采热的影响。

(6)针对干热岩地下流动换热过程存在的热流固和化学反应多场耦合问题,建立了干热岩地下热—水—化—力(THCM)数值模拟软件系统,可为干热岩开发利用提供模拟研究手段。

与此同时,国内也开展了许多干热岩资源勘查工作。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、海南等高热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,大部分进尺在1 000 m左右,温度在100~120℃之间。

2014年4月,青海省水工环地质调查院经过2年试钻探,最终通过钻孔DR3在青海省海南藏族自治州共和盆地2 230 m深度处钻遇153℃干热岩。同年6月,在2 735 m深度处成功钻获168℃以上的干热岩,该岩体在共和盆地底部广泛分布,仅钻孔控制干热岩体面积已达150 km²。2014年10月6日青海省共和县ZKD23井,钻探深度2 886 m,井底温度达181℃,符合干热岩开发温度要求,潜力巨大。

2015年5月21日,由中国地质调查局组织实施的我国首个干热岩科学钻探深井,在福建省漳州龙海市东泗乡清泉林场开钻,钻探深度将达4 000 m。

此外,我国原有的传统水热型地热田边缘也在酝酿干热岩开发,如西藏羊易(近200℃)、云南腾冲、青海贵德县热泉水等地。

4 我国EGS展望

增强型地热(EGS)是应用前景良好的清洁新能源,有巨大的利用价值和发展潜力。自从美国Fenton Hill项目开展以来,EGS开发利用技术已经取得一定进展。过去40年的EGS研究经验表明,在地下深部高温干热岩体中建造人工裂隙热储且取得井间连通是切实可行的,人造热储的生长主要受到储层中存在的天然裂隙(或节理)发生剪切破坏所控制,这一过程主要受天然裂隙方向和原位应力状态的影响。储层刺激过程中,可以通过微震监测估计和判断储层激发区域的大小和扩展方向,并用于指导定向钻进生产井,以取得井和储层之间更好的水力连通。另外,美国能源部最新EGS示范工程成果表明,在现有水热田的边缘建立人造热储,并与天然热储取得连通可以提高其生产能力,这一技术路线可以在短期内以相对低的成本获得经济效益。

过去,我国由于资金和技术原因对地热资源的利

用多局限于水热型地热资源,随着我国经济增长和技术的创新,目前已具备干热岩勘查和开发研究的条件和能力。通过刚完成“863”项目“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”,我们在许多EGS单项技术,如干热岩靶区定位、高温水力压裂工艺和技术、储层改造和验证技术等研究方面均取得了一定的成果。加之,国土资源部门也开展了诸多干热岩资源勘查工作,这些都可为我国EGS示范基地建设提供支撑。

增强型地热的研究及工程应用应成为今后我国地热资源研究和开发的主要方向,今后开展干热岩资源勘查和EGS研发及示范工作,应重点关注以下领域。

(1)资源评价与选址。对不同类型资源:火山型,如吉林长白山、云南腾冲、黑龙江五大连池;花岗岩型,如福建、广东、江西^[16];盆地型,如东北、华北、苏中等的干热岩资源,结合地质、地球物理和地球化学等多种方法,对具备EGS开发潜力的远景区开展资源评价工作,如确定地质特征、岩性、构造、断裂和地震活动,计算地温梯度,预测某深度处温度,测量地应力场等,探测裂缝中流体,圈定有利区和靶区。

(2)地球物理勘查技术。地球物理方法在HDR勘探与开发各个环节中具有重要的作用,适宜于查明各种断裂的方向和性质,圈定地下深部热储的位置,确定与地下热水有关的地质构造,火成岩体的分布、规模和性质,监测地下水与热储的水文地质变化特征;判断地下热水的分布与埋藏状况等^[2]。主要包括:①地震法,具有高精度和高分辨率特点,在干热岩的勘探与开发中作用巨大。②电法和电磁法,HDR的目标体具有较明显的电性差异,为电法和电磁法的应用提供了基础。电法和电磁方法技术种类较多,根据频率分类包括直流电法、大地电磁测深、可控源音频电磁测深、瞬变电磁、探地雷达等。由于探测的深度和分辨能力不同,电法和电磁法广泛应用于HDR勘探和开发的各个阶段。其作用包括探测与地下热水有成因关系的断裂构造位置,圈定地下热水分布范围,确定覆盖层厚度、热源的位置以及隐伏基岩岩性,分析热储的裂隙分布规律分析水热耦合交换的规律等^[2,17-19]。③重磁法,是以介质的密度和磁化率差异为目标来探测干热岩位置和监测HDR的开发过程。在以下方面具有重要作用:研究岩浆岩侵入体空间分布,寻找深大构造断裂、基岩拗陷中的凸起构造,研究地热的成因特征等^[2,20]。④井中地球物理方法,通过井中地球物理方法技术测试,研究温度随深度变化的规律,精细研究岩石裂隙的分布规律,精细研究流体与岩石的分

布特点以及温度与流体间的变化关系。该测试方法为以上地球物理研究工作提供了重要的基础资料^[2]。

(3)高温、深部钻探。需要克服硬质岩层与耐磨性地层的钻进、套管柱的热膨胀、泥浆漏失和高温等问题。已有的现场经验表明,钻探在技术上已趋于成熟,但如何有效地降低成本仍是制约其发展的障碍之一,其他需要考虑的因素还有钻探效率、钻孔深度、直径和角度,以及工业设计和井位配置^[21]。

(4)压裂和储层改造。钻井完成后,需要通过激发来增强高温结晶岩体的渗透性,实现井孔之间的储层连通,而裂缝体系发育依赖于基岩性质和应力场。良好的热储层阻抗低,允许循环流体快速通过,并能有效加热^[21]。目前常用的是水力压裂、爆炸致裂和热开裂技术,其中水力压裂因快速、可控性良好而被广泛采用^[22],即通过高压流体的注入,破坏高温岩体原有的地应力场,从而激活已有裂隙或产生新的裂隙,增加岩体中的孔隙度和渗透率,进而改善注入井和生产井的连通性。近年来,化学激发技术也受到了广泛的关注,该技术主要包括以一定的破裂压力把酸或碱溶液注入地层,以利用化学溶蚀作用达到溶解裂隙表面可溶性矿物(如方解石等)或井筒附近沉积物的效果^[2]。研究表明,向井内注入强酸(一般为氢氟酸(HF)和盐酸(HCl)的混合液)会有效增加EGS热储的渗透率,进而加大载热流体的注入量。螯合剂(NTA)、超临界CO₂等对矿物的溶蚀速度较慢,可替代强酸作为EGS的化学压裂剂。国外学者研究表明高pH值螯合剂溶液对岩体中的硅酸盐矿物、方解石均具有溶蚀能力。

(5)微震、示踪等监测技术。目的是评价储层压裂效果,如裂隙的宽度、长度、方向、密度、分布和连通性、热交换面积等,以及追踪流体流动。微震方法对了解干热岩地热储层的形成及其开发过程中发生的岩石动力学过程,有着极其重要的作用。除了用地球物理方法研究压裂效果外,示踪剂方法是研究压裂产生的裂隙密度、连通性和热交换面积的有效方法,同时示踪剂方法也是评价热能产出能力的重要手段。除了常用的保守示踪剂和温度敏感示踪剂外,一种利用天然的化学组分和同位素,对刺激诱导开裂裂隙面发育情况进行示踪研究的新技术正在开发中。通过设计和分析示踪剂实验,同时测量吸附行为(分配系数),可获得断裂面面积和裂缝间距。设计和分析非等温注射回流示踪现场试验,是EGS的一项不可缺少的技术^[2]。

(6)流体流动和储层测试。通过对流体流动和储层性能进行测试,了解裂隙网络中的流体流动特征,重

点关注流量、温度、水损耗、储层发育和水岩作用。

(7) 储层性能评价。基于性能评价参数(如流量、温度、水损耗和井孔间的储层阻抗等)评估商业开发 EGS 储层的可行性和经济效益。

(8) 室内试验。确定水—岩—气—热作用机制; 研究水—岩—气—热的物理-化学反应机制; 构建高温高压条件下水—岩—气相互作用的热力学和动力学数据库; 构建干热岩室内试验模拟系统^[2]。

(9) 模拟。针对 EGS 储层的开发, 建立应力-水流-热-化学(THCM)多场耦合数值模拟程序, 并通过实验室和现场数据验证模型。

(10) 示范项目。通过试验性示范项目的建立, 验证和提高 EGS 技术的性能, 有助于降低未来 EGS 工程建设成本和运行成本, 以实现最终的商业部署。在确定的现场靶区上进行干热岩钻探, 同时开展测井工作, 进行岩心(样)分析测试, 结合测井和分析测试结果验证和完善干热岩关键技术模型, 为今后开展干热岩资源研究、开发利用和其他相关地球科学研究提供试验基地^[2]。

尽管我国已开始关注高温岩体中的潜在地热资源, 如 2012 年由吉林大学牵头实施的科技部“863”计划项目——“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”以及 2013 年开展的中国地质调查局工作项目“全国干热岩资源潜力评价与示范靶区研究”; 但在我国深部地热资源的开发和综合利用上, 仍面临众多技术瓶颈, 例如较灵敏的地球物理方法、高效的储层改造和大体积压裂技术、准确的微震监测技术和全面系统的示范项目。这就迫切需要制定国家层面的长期发展规划, 以指导我国对 HDR 资源的评价、选区、开发和利用等。此外, 针对 EGS 的研发工作和示范项目可借鉴油气行业的相关技术, 如页岩油气开发中已广泛应用的水平钻进技术和水力压裂技术等。由此可见, 通过统一规划(如法规、政策和路线图等)、多方(如国土资源部、中国地质调查局、科学技术部、国家能源局、企业、高校和科研机构等)联动, 建立全国性的 HDR/EGS 研究、开发和示范项目, 制订全国干热岩资源勘查和开发的标准和规范是十分必要的。

参考文献

- [1] 汪集旸, 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 J Y, HU S B, PANG Z H, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 25-31.]
- [2] 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 T F, ZHANG Y J, ZENG Z F, et al. Technology progress of enhanced geothermal system (hot dry rock)[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 42-45.]
- [3] BROWN D. The US hot dry rock program-20 years of experience in reservoir testing[C]. Proceedings of World Geothermal Congress, Italy, 1995: 2607-2611.
- [4] 陆川, 王贵玲. 干热岩研究现状与展望[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 13-21. [LU C, WANG G L. Current status and prospect of hot dry rock research[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 13-21.]
- [5] 翟海珍, 苏正, 吴能友. 苏尔士增强型地热系统的开发经验及对我国地热开发的启示[J]. 新能源进展, 2014, 2(4): 286-294. [ZHAI H Z, SU Z, WU N Y. Development experiences of the Soultz enhanced geothermal systems and inspirations for geothermal development in China[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(4): 286-294.]
- [6] MIT. The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century[R]. An assessment by an MIT-Led interdisciplinary panel. Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, USA. 2006, 372.
- [7] ZIAGOS J, PHILLIPS B R, BOYD L, et al. A technology roadmap for strategic development of enhanced geothermal system[C]. Thirty-eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford California: Stanford University. 2013, 1-24.
- [8] ZEMACH E, DRAKOS P, ROBERTSON-TAIT A. Feasibility evaluation of an “In-Field” EGS project at Desert Peak, Nevada[J]. GRC Transactions, 2009, 33: 285-295.
- [9] CHABORA E, ZENACH E, SPIELMAN P, et al. Hydraulic stimulation of well 27-15, Desert Peak geothermal field, Nevada, USA[C]. Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California: Stanford University, 2012, 1-12.
- [10] U.S. Department of Energy, Geothermal Technologies Office. First commercial success for enhanced geothermal systems spells exponential growth for the future of geothermal energy[EB/OL]. [2016-03-05]. http://apps1.eere.energy.gov/news/progress_alerts.cfm/news_id=192342013.
- [11] RUTQVIST J, DOBSON P F, GARCIA J, et al. The Northwest Geysers EGS demonstration project, California: Pre-stimulation modeling and interpretation of the stimulation[J]. Mathematical Geosciences, 2015, 47(1): 3-29.

- [12] RINALDI A P, RUTQVIST J, SONNENTHAL E L, et al. Coupled THM modeling of hydroshearing stimulation in tight fractured volcanic rock[J]. *Transport in Porous Media*, 2015, 108: 131-150.
- [13] PLUMMER M, HUANG H, PODGORNEY R, et al. Reservoir response to thermal and high-pressure well stimulation efforts at Raft River, Idaho[C]. *Fortieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California: Stanford University, 2015, 1-9.
- [14] 石岩, 姜云涛. 我国深层地热资源利用现状分析[J]. *吉林建筑工程学院学报*, 2011, 28(2): 37-39. [SHI Y, JIANG Y T. Analysis of utilization on deep geothermal resource[J]. *Journal of Jilin Institute of Architecture & Civil Engineering*, 2011, 28(2): 37-39.]
- [15] 王雅峰. 大庆市区地热资源评估及开发前景探讨[J]. *油气井测试*, 2003, 12(1): 9-72. [WANG Y F. A discussion on evaluation and current look of terrestrial heat resources in Daqing area[J]. *Well Testing*, 2003, 12(1): 9-72.]
- [16] 杨方, 李静, 任雪姣. 中国干热岩勘查开发现状[J]. *资源环境与工程*, 2012, 26(4): 339-341. [YANG F, LI J, REN X J. Prospecting and exploitative present situation of hot dry rock in China[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2012, 26(4): 339-341.]
- [17] VOLPI G, MANZELLA A, FIOREDELISI A. Investigation of geothermal structures by magnetotellurics (MT): An example from the Mt. Amiata area, Italy[J]. *Geothermics*, 2003, 32(2): 131-145.
- [18] OSKOOI B, MANZELLA A. 2D inversion of the magnetotelluric data from Travele Geothermal Field in Italy[J]. *Journal of the Earth & Space Physics*, 2011, 36(4): 1-18.
- [19] SCHWARZ G, HAAK V, RATH V. Electrical conductivity studies in the Travale Geothermal Field, Italy[J]. *Geothermics*, 1985, 14: 654-662.
- [20] KARASTATHIS V K, PAPOULIA J, FIORE B D, et al. Deep structure investigations of the geothermal field of the North Euboean Gulf, Greece, using 3-D local earthquake tomography and curie depth point analysis[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2011, 206(3/4): 106-120.
- [21] 苏正, 吴能友, 曾玉超, 等. 增强型地热系统研究开发: 以美国新墨西哥州芬登山为例[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(2): 771-779. [SU Z, WU N Y, ZENG Y C, et al. Research and development of enhanced geothermal system: A case of Fenton Hill in New Mexico (USA)[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(2): 771-779.]
- [22] 毛永宁, 汪小慈, 呼和涛力等. 增强型地热系统的研究进展[J]. *能源与环境*, 2013 (4): 6-8. [MAO Y N, WANG X H, HUHE T L, et al. Research progress on enhanced geothermal system[J]. *Energy and Environment*, 2013 (4): 6-8.]

Enhanced Geothermal Systems: International developments and China's prospects

XU Tianfu¹, ZHANG Wei²

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

2 National Geological Laboratory of China (Geoscience Documentation Center. CGS), Beijing 100083

Abstract An Enhanced Geothermal System (EGS) refers to artificial terrestrial heat engineering. In the system, the artificial geothermal reservoir is constructed by means of hydraulic fracturing in low permeability hot dry rock (HDR) and a large amount of terrestrial heat is collected. HDR is hot rock without water or steam. It is generally buried deep underground, 3~10 km under the Earth's surface at a temperature of 150~ 650 °C. The energy stored in HDR is 30 times the total amount in oil, nature gas and coal all over the world. EGS research has been carried out over the last 40 years in the United States, Britain, France, Japan, Australia, etc. China only began EGS study a few years ago. Currently HDR exploitation faces many challenges, such as the construction of massive artificially fractured geothermal reservoirs. So EGS commercialization needs further research and technological development. In this paper typical EGS demonstration projects and research work carried out in USA are shown. The prospects of EGS in China are discussed.

Keywords hot dry rock; enhanced geothermal system; hydraulic fracturing; thermal reservoir construction; egs demonstration

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.003

(编辑 马桂霞)