

我国干热岩勘查的有关技术问题

冉恒谦, 冯起赠

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:干热岩作为一种可再生的新型能源, 具有热能大、分布广、开发利用对环境的影响小、不受季节等自然条件的限制等优势。而干热岩的勘查开发利用在我国还基本属于空白, 因此对于干热岩勘查关键技术开展研究有着非常现实的意义。在简述国内外对于干热岩勘查开发利用研究现状的基础上, 分析了干热岩开发利用的技术关键, 并提出了主要的研究内容和需要做的工作。

关键词:干热岩; 勘查; 地热能; 热交换; 热发电; 钻井

中图分类号:TD87; P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)10-0017-05

Some Technical Issues on Hot Dry Rock Exploration in China/RAN Heng-qian, FENG Qi-zeng (The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: As a renewable energy resource, hot dry rock (HDR) has advantages of strong heat energy, wide distribution, environmental protection and not being affected by natural conditions, such as seasons. Hot dry rock exploration development and utilization is basically a blank field in China, the study on this key technique has a very realistic significance. Based on the introduction on the current situation of hot dry rock exploration development and utilization both in China and abroad, the paper analyzed the key technology and put forward the main study target and work to be required.

Key words: hot dry rock; exploration; geothermal energy; heat exchange; thermal power; drilling

1 干热岩的概念

干热岩(HDR - Hot Dry Rock)是指埋深超过2000 m、温度超过150℃的地下高温岩体,其特点是岩体中很少有地下流体存在。当然,这是比较宽泛的干热岩概念。干热岩的热能赋存于各种变质岩或结晶岩类岩体中,较常见的干热岩有黑云母片麻岩、花岗岩、花岗闪长岩等。干热岩上一般覆盖有沉积岩或土等隔热层。干热岩主要被用来提取其内部的热量,因此其主要的工业指标是岩体内部的温度。

一个温度超过150℃的地下高温岩体的存在,一定会给周围的地温环境带来很大的异常,所以许多研究人员也把地温梯度是否超异常来研究地下是否存在干热岩体。

2 干热岩的开发利用价值

目前,人们对干热岩的开发利用,主要是发电。美国、法国、德国、日本、意大利和英国等科技发达国家已经掌握了干热岩发电的基本原理和基本技术。

干热岩发电的基本原理是:通过深井将高压水注入地下2000~6000 m的岩层,使其渗透进入岩层的缝隙并吸收地热能量;再通过另一个专用深井

(相距约200~600 m左右)将岩石裂隙中的高温水、汽提取到地面;取出的水、汽温度可达150~200℃,通过热交换及地面循环装置用于发电;冷却后的水再次通过高压泵注入地下热交换系统循环使用。整个过程都是在一个封闭的系统内进行。见图1。

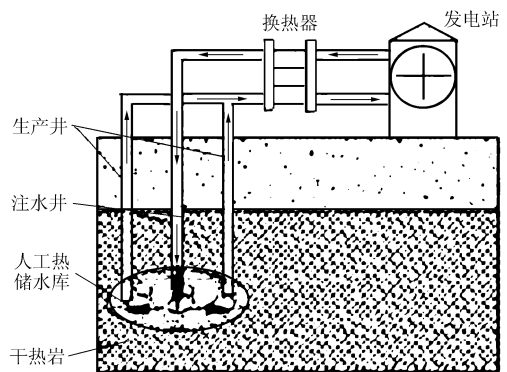


图1 干热岩地热发电系统

干热岩存在于地壳浅层的某些构造区,是一种清洁的新能源。全球干热岩蕴藏的热能十分丰富,比蒸汽型、热水型和地压型地热资源大得多,比煤炭、石油、天然气的热能总和还要大。

干热岩地热资源与核能(裂变和聚变)、太阳能

收稿日期:2010-09-10

作者简介:冉恒谦(1963-),男(汉族),重庆人,中国地质科学院勘探技术研究所地调科研处处长、教授级高级工程师,地质工程专业,博士,从事钻探装备研究工作,河北省廊坊市金光道77号,ranhq66@heinfo.net;冯起赠(1971-),男(汉族),吉林人,中国地质科学院勘探技术研究所高级工程师,钻探机械专业,从事全液车装水并钻机及大直径套管钻机的研发工作,fengqizeng@126.com。

或者其它可再生的能源相比,具有如下优势:

(1)干热岩地热能是巨大的,在许多国家存在并广泛分布。例如美国高等级地温梯度的地热资源约占全国面积的10%,中等地温梯度大约占30%,低级地温梯度约占60%^[1]。

(2)干热岩地热资源的使用,没有废气(CO₂、SO_x、NO_x等)排放,也没有其它流体或固体废弃物,干热岩地热资源系统可以维持对环境最低水平的影响。

(3)干热岩地热开发系统是安全的,没有爆炸危险,更不会引起灾难性事故或伤害性污染。它适合于基本负荷或高峰负荷的电力供应,是能源计划中最理想的组成部分。

(4)干热岩地热开发可以提供不间断的电力供应,不受季节、昼夜等自然条件的影响。

(5)美国、日本等国的高温岩体地热前期开发试验已充分说明,高地温梯度(80℃/km)的高温岩体地热发电电价,在今天已具有商业竞争能力;而对中等和低级地温梯度的高温岩体地热资源,通过进一步改进开发技术,也可以与以化石能源为基础的电价有商业竞争能力。

3 干热岩开发利用的技术关键

3.1 地下热交换系统的建立

水通过深井注入地下干热岩体,渗透进入岩层的缝隙并吸收地热能量,即在干热岩体内形成热交换。形成地下热交换系统有如下3种模式。

(1)人工高压裂隙模式,最早由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室提出,即通过人工高压注水到井底,干热的岩石受水冷缩作用形成很多裂隙,水在这些裂隙间穿过,即可完成进水井和出水井所组成的水循环系统热交换过程。

(2)天然裂隙模式,由英国卡门波矿产学校(Camborne School of Mines)提出的,即充分利用地下已有的裂隙网络。已有的裂隙虽然一方面阻止了人工高压注水裂隙的发育,但另一方面当人工注水时,原先的裂隙会变宽或错位更大,增强了裂隙间的透水性。在这种模式下,可进行热交换的水量更大,而且热量交换得更充分。

(3)天然裂隙-断层模式,由欧洲Soulz干热岩工程中的研究人员提出。这种模式除了利用地下天然的裂隙,还利用天然的断层系统,这两者的叠加使得热交换系统的渗透性更好。该模式的最大优势也是最大的挑战,即不需通过人工高压裂隙的方式连接进水井和出水井,而是通过已经存在的断层来连

接位于进水井和出水井之间的裂隙系统。

以上3种模式研究最多的是人工高压裂隙模式,即靠人工建造具有充分尺度和相当寿命的,可以获得各级温度梯度的热储层。通过人工热储的致裂、监测和连通实现与地表的水流连通,形成地下热交换系统。

3.2 地面发电供热系统

从生产井提取到高温水、蒸汽等中间介质后,即可采用常规地热发电的方式发电,包括直接蒸汽法、扩容法以及中间介质法等^[2]。由于直接蒸汽法要求从井下取出高温蒸汽,效率较低,因此应用较少。扩容法是将生产井中的热水先输送至扩容器,通过减压扩容产生的蒸汽推动汽轮机发电。我国西藏羊八井地热电站即属扩容法地热发电。目前研究较多的是应用中间介质法地热发电,例如有机朗肯循环,或用氨/水混合物作二次工质的卡里纳循环等^[3]。蒸发器是中间介质法干热岩发电的关键设备,地热水通过蒸发器把低沸点物质加热,使其产生高压蒸汽并通过汽轮机发电,做完功的排气在冷凝器中被还原成液态低沸点物质。

3.3 钻井技术

注水井和生产井数量根据不同的具体情况而异。井的配置方式有:一口注水井和一口生产井(两井模式),一口注水井和2口生产井(三井模式),一口注水井和4口生产井(五井模式)。根据各国试验站经验,一般采用三井模式,沿热储构造长轴方向布置注水井,在注水井的两侧各钻一口生产井,保证获取足够的热量。如果应用于大规模的发电站,采用五井式或更多。干热岩地热能源供应的价格主要由钻井和人工储留层建造的费用所决定。较低的单井钻井成本和较高的储层流动速率将大大降低供应的电价。降低低温度梯度资源钻井和储留层建造费用,将大幅度减少干热岩地热开发费用。所以,使用先进的钻井技术,减少在硬岩中和干热岩体中高额的钻井费用,将能够降低干热岩地热发电的价格,从而使干热岩地热资源在世界各地都具有竞争优势。

4 国外的试验研究以及开发利用状况

4.1 美国

利用地下干热岩体发电的设想,是美国人莫顿和史密斯于1970年提出的。迄今在干热岩发电技术方面迈出最大一步的试验是美国洛斯阿拉莫斯国家实验室和能源部在新墨西哥州芬顿山进行的试

验。该试验始于1973年,最深钻孔达4500 m,岩体温度为330℃,热交换系统深度为3600 m,发电量由最初的3 MW到最后的10 MW。试验地选在火山地区,干热岩体为花岗闪长岩,每平方米的地热流值是地球表面平均地热流值的3倍,达250 mW。

2001年,美国能源部终止了在芬顿山的干热岩试验项目,开始了名为“增强型地热系统”计划。

增强型地热系统(EGS - Enhanced Geothermal Systems)是指在干热岩技术基础上提出来的。美国能源部的定义是采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相当数量深层热能的人工地热系统。

增强型地热系统通过注入井注入水在地下实现循环,进入人工产生的、张开的连通裂隙带,水与岩体接触被加热,然后通过生产井返回地面,形成一个闭式回路(图1)。

建立增强型地热系统的第一步是进行勘探,以鉴别和确定最适宜的开发区块。然后施工足够深度的钻孔,达到可利用的岩体温度,进一步核实和量化特定的资源及相应的开发深度。如果钻遇低渗透性岩体,则对其进行水压致裂,以造成采热所需的大体积储水层,并与注入井-生产井系统实现适当的连通。如果钻遇的岩体在有限的几何界限内具有足够的自然渗透性,采热工艺就可能采用类似于石油开采所采用的注水或蒸汽驱油的成熟方法。其他的采热办法,包括井下换热器或热泵,或交替注入和采出(吞吐)的方法。

最近,美国地质调查局正在建立一个关于干热岩的政府-私人间的合作计划。该计划要求美国地质调查局勘探、优选并划分出全美国不同利用潜力的干热岩地区,还要为干热岩的利用做些开发活动并发布相关信息。

4.2 日本

从1985年开始,日本新能源与工业技术开发组织(NEDO)在Hijiori实验站开始了对干热岩发电的钻探、水压人工裂石、裂隙构图、人工热储水库等关键技术的研究。1991年,该实验站通过一个注水井(SK22)和3个生产井(HDR21、HDR22和HDR23),将地下1800 m温度为250℃的热水和蒸汽抽出。其中,渗漏的水大约占注入水的20%,其余的经生产井回收,热水和蒸汽输出热能约8 MW。

1992年,该实验站又在2200 m的深度人工致裂了一个温度为270℃的热储水库,1994年开始,重新修整原来的生产井并把1个生产井改为注水

井,与两个生产井进行短期循环测试和评估研究。2000年11月~2002年8月,Hijiori实验站进行约2年的循环测试,并在当地建立了干热岩发电厂。

4.3 德国和法国

德国和法国于1986年联合在苏尔士开展岩体热能利用项目。

第一阶段(1987~1997年):在3900 m处建立岩石裂隙网,温度超过165℃。经过一系列的水压测试,包括长达几个月的水流循环测试,得到水流持续循环的技术参数:注入流量为25 L/s,超过140℃,注水井和生产井两井相距450 m,没有流量损失,仅需水泵功率250 kW,输出热能达10 MWh。

第二阶段(1998~2001年):将生产井GPK2继续钻井到5000 m深,建立新的热储层,温度达200℃。在1500 m处又钻了微地震监测井。

第三阶段(2001~2004年):采用注水井和两口生产井的三井方式,新钻井GPK3(注水井)到5000 m深,距GPK2约600 m,两井下人工热储裂隙系统连通;新钻生产井GPK4同样到5000 m深,距GPK3约600 m,建立人工热储与已建立的热储连通,形成高渗透的裂隙系统。

第四阶段(2005~2008年):采用二井模式实现增强型地热系统,注水井流量100 kg/s,生产井均为50 kg/s,装机为6 MW。

另外值得一提的是,法国的环境和能源管理机构在地热能开发计划中明确提到,对于可再生能源,该计划主要关注4个方面,其中首当其冲的是干热岩的开发利用潜力研究。

4.4 澳大利亚

近年来,澳大利亚掀起了干热岩开发利用的高潮,许多开发商投入巨资进行干热岩这种新能源的勘探开发利用。幸运的是,“地球动力”公司在南澳大利亚Cooper盆地的沙漠中找到了一处理想的建站地点。该公司2003年开始在那里钻探出了2个深度达4500 m的深孔(分别命名为“Habanero-1”和“Habanero-2”),将深井钻到高温岩石上,并建立了岩石与注入水之间快速的热交换。到2008年,又完成了钻孔Habanero-3并进行钻孔流动试验,即在生产井中注入示踪剂,以监视岩石内的热储及热水的运移情况。2009年1月,该公司利用这两眼井建成一座1000 kW的示范电站,专为建站地点的小镇供电,准备3年后再钻9眼深井,建成一座5万kW的干热岩发电站,到2016年再扩大10倍的发电量。据估计,仅地球动力公司在澳大利亚南部

Cooper 盆地热能产区的热湿裂隙花岗岩就蕴含着巨大的能量潜力,在将来或可支持零排放标准下大于 10000 MW 的发电能力。

5 我国干热岩研究状况

(1)在 1993~1995 年期间,我国国家地震局地壳应力研究所和日本中央电力研究所开展合作,在北京西南房山区进行了干热岩发电的研究试验工作。

(2)在我国,近期中国能源研究会地热专业委员会、中国地质环境监测院与澳大利亚彼特里特姆公司就“中国干热岩资源潜力研究”项目进行合作洽谈,希望合作开发中国干热岩资源。

(3)2009 年 11 月底~12 月初,中国能源研究会地热专业委员会和中国地质环境监测院组团对澳大利亚“地球动力”公司在南澳大利亚 Cooper 盆地的干热岩开发利用现场进行了实地考察。

(4)国内的一些研究机构(如中国科学院、中国地质科学院水文地质环境地质研究所、中国地质环境监测院、中国地质调查局发展研究中心以及相关的大学等)从理论和情报信息上做了一些工作,并提出了一些建议。

可以说,干热岩的勘查开发利用基本上还是空白!

6 我们正在做的工作

6.1 国家的政策

(1)《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》中明确的重点领域及其优先主题中,第一个领域就是能源方面,其中之一就是可再生能源的低成本规模化开发利用。“干热岩的开发利用正好符合这一发展规划的精神。”

(2)2008 年 3 月发布的《全国地质勘查规划》中明确其他能源矿产勘查:开展地热资源评价和区划。开展全国地热资源远景调查评价,促进地热资源勘查。选择重要资源潜力区,开展浅层地热能勘查与开发示范。探索干热岩资源勘查开发利用技术。

(3)在国家制定的进一步优化电力结构规划中,小火电的关停范围将从此前的 10 万 kW 以下燃煤机组扩大到 20 万 kW 机组,这意味着我国还将有 8000 多万千瓦的小火电要被淘汰。这部分电力缺口除了由水电、核电来填补外,随着相关技术的日趋成熟,其他新能源发电包括干热岩发电也完全可以

承担起这一任务。

6.2 我国区域地质背景

根据我国区域地质背景,高热流区均处于板块构造带或构造活动带,在滇藏、东南沿海、京津冀、环渤海等地区分布有较高的大地热流和范围较大的侵入岩体,说明我国具备干热岩地热资源形成的区域构造条件。据初步估算我国主要高热流区的热储资源相当丰富,相当于标准煤 516 亿 t。

6.3 我们的建议

国家公益性地质工作的目的之一是要带动商业性的地质工作。我们强烈地感受到,我国干热岩的勘探开发利用至今仍停留在很肤浅的工作层面,是因为国家地质工作没有做好干热岩开发利用前期工作,如:没有对全国地热梯度开展进一步的普查、没有探明干热岩体的埋藏地和深度、没有圈定哪些地区或位置存在干热岩开发利用的可能、没有确定适合开展干热岩发电试验的选区等等。

为此,我们在 2009 年和 2010 年的国土资源部“公益性行业科研专项项目”立项中提出了开展“我国干热岩勘查关键技术研究”的项目立项申请。

6.3.1 项目的总体目标

通过开展干热岩资源潜力评价、干热岩综合地球物理勘查以及干热岩钻探关键技术研究,查明我国干热岩资源分布状况,建立干热岩勘查技术方法体系,圈定干热岩勘查靶区,并实施干热岩钻探示范工程,钻获高温岩体,为今后开展干热岩资源研究、开发利用和其他相关地学科学研究提供试验基地。

6.3.2 主要研究内容

6.3.2.1 干热岩资源分布及潜力评估

研究针对我国三个重点干热岩发育区——沉积盆地(东北、华北、苏中)、近代火山地区(吉林长白山、云南腾冲、黑龙江五大连池)、高热流花岗岩地区(福建、广东、江西),开展干热岩热能资源潜力评估。系统收集区域地质、物探、石油、地震、社会经济等相关基础研究资料,了解国外开发干热岩成功经验和教训,分析典型高温岩体地热资源富集区的地质、环境、地热能等特征,初步查明我国干热岩资源的分布,圈定若干干热岩优先开发地区。利用已有的钻孔,开展地温测量、热物理参数测定,结合地质构造分析,研究区内的地温场与大地热流场特征,通过资料分析,软件开发和模拟计算,进行干热岩资源现状及潜力评估。

6.3.2.2 综合地球物理勘查技术研究

开展综合地球物理勘查方法技术及多种地球物理数据处理、解释、反演技术研究,选择适合不同类型干热岩勘查的地球物理手段进行勘查,结合地质研究成果,建立地质-地球物理勘查模型,圈定干热岩有利部位,确定钻孔位置;研究适合不同类型干热岩的综合地球物理勘查方法技术;通过分析测试和测井结果完善或修正地质-地球物理勘查模型。

6.3.2.3 干热岩钻探关键技术研究

6.3.2.3.1 钻探工艺、器具及设备配套研究

(1)抗高温耐腐蚀液动冲击器研制;(2)高温取心工艺及器具研究;(3)高温环境钻孔测斜仪研究;(4)高温钻井液体系研究;(5)井口高温安全防护装备研究;(6)干热岩钻探设备配套研究。

6.3.2.3.2 孔底连通技术预研究

孔底热交换通道的建立有两种方式,一种是利用地层裂隙或断层自然形成热交换通道,另外一种方式是采用人工压裂方式建立通道。在开展压裂技术预研究的同时开展定向井结合压裂技术预研究,以增大换热面积,提高地热利用率。

6.3.2.4 干热岩勘查钻探示范工程

在地质、物探研究确定的钻孔位置上,利用本项目研究的干热岩勘查钻探工艺技术和器具,进行干热岩钻探示范工程,实施一口3000~3500 m的干热岩勘查孔,根据对钻孔中采取的岩心(岩样)分析测试和测井结果验证和完善模型,建立干热岩勘查技术方法体系。根据地层情况完成高温井筒的固井和井口建设,为今后开展干热岩资源研究、开发利用和其他相关地学科学研究提供试验基地。

6.3.3 技术难点

(1)地热资源评价模型条件的确定与实际情况吻合程度;(2)物探勘查模型条件的确定与实际情况吻合程度;(3)高温下测斜仪器的稳定性、灵敏性;(4)钻具系统(液动冲击器、钻头)的工作寿命;(5)高温下钻井液的稳定性;(6)大规模设备集成配套及钻探安全保证。

6.3.4 预期成果

(1)建立干热岩勘查技术方法体系,包括:建立适合我国具体地质条件的干热岩地热资源评价模型;可控源音频大地电磁法(CSAMT)、大地电磁法(MT)数据联合反演技术;高温、深井、硬岩钻探器具及工艺技术体系。(2)钻获高温岩体。(3)为今后开展干热岩资源研究、开发利用和其他相关地学科学研究提供试验基地。

7 结语

干热岩是一种尚未被普遍认识的深层地热能,可以说取之不尽,用之不竭。我国对干热岩的勘查开发利用基本属于空白。我们希望通过国家公益性地质工作对我国干热岩勘查关键技术研究及应用示范的投入,查明我国干热岩资源的分布,圈定若干干热岩优先开发地区,钻获干热岩。以此带动商业性地质工作的投入。我们深信,如果发现并钻获干热岩,将填补我国干热岩勘查的空白,将会在我国掀起干热岩体勘查、开发和利用的热潮,一定会吸引大量社会资本对干热岩体这种新能源勘查、开发和利用的投入,同时也会加快我国干热岩体勘查、开发和利用技术水平的提高。

为此,我们建议应将干热岩的勘查开发利用研究上升到国家层面,从资源的调查评价开始,尽快启动相关技术的研究,设立勘查开发利用研究专项,为干热岩资源勘查开发利用提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 殷秀兰.干热岩地热资源利用前景无限[N].中国矿业报,2008-10-14.
- [2] 万志军,赵阳升,康建荣.高温岩体地热开发的技术经济评价[J].能源工程,2004,(4).
- [3] 司士荣.澳大利亚的干热岩发电[J].地热能,2009,(3).
- [4] 张家强,王德杰.干热岩——未来清洁的新能源[J].地质工作战略研究参考,2004,(2).
- [5] 康玲,王时龙,李川.增强地热系统EGS的人工热储技术[J].机械设计与制造,2008,(9).
- [6] 杨吉龙,胡克.热岩(HDR)资源研究与开发技术综述[J].世界地质,2001,(1).
- [7] 澳将建首座使用“干热岩”技术的地热发电站[J].能源研究与信息,2005,21(4).
- [8] 杨丰田,庞忠和.澳大利亚利用增强型地热系统开发深层地热资源[N].科学时报,2008-08-10.
- [9] 郑秀华,Hwolff,郑伟龙.地下闭式循环热交换系统——一种新型地热发电系统[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(1):63-64.
- [10] 杨伍林.卡里纳循环地热发电装置[J].石油规划设计,2007,18(2):10211.
- [11] http://www.sp.com.cn/kpzl/xnyfd/200609/t20060915_36881.html[DB/OL].
- [12] <http://www.35kv.cn/Electricity/dianliyingxiao/20061019735.html>[DB/OL].
- [13] <http://www.china5e.net/www/dev/newsinfo/newsview/viewnews-200712070261.html>[DB/OL].
- [14] http://www.kaiguandianqi.com/news/news_detail.asp?news_id=6747[DB/OL].
- [15] 国土部公益性行业科研专项经费项目实施方案:我国干热岩勘查关键技术研究[Z].2010.