山东文登 ZKCW01 干热岩钻孔地质特征及资源潜力

江海洋^{1,2)}, 王树星²⁾, 康凤新^{3,4)}, 史猛⁵⁾, 范振华²⁾, 张玲⁶⁾

1)吉林大学新能源与环境学院,长春,130061;2)山东省第一地质矿产勘查院,济南,250014;
3)山东省地质矿产勘查开发局,济南,250013;4)山东省地质勘查工程技术研究中心,济南,250013;

5)山东省第三地质矿产勘查院,烟台,264000;6)山东地矿新能源有限公司,济南,250014

内容提要:山东半岛属于中国干热岩潜力靶区之一。基于研究区地质、地球物理和地热地质等资料,经大地电磁和可控源勘探,确定了干热岩钻孔位置。通过钻探、测井、取芯及岩矿分析测试,全面得到深部文登花岗岩体规模、裂隙储层空间分布、深部地温及地温梯度、花岗岩热物性参数和岩石力学参数等,建立干热岩三维地质模型,通过数值模拟分析了其发电能力。研究区侵入岩、构造断裂发育,大地热流值为48~85mW/m²,地热异常区地温梯度为5.3~18.59℃/100m,表明研究区具有非常好的深部地热能赋存条件。数值模拟揭示,对研究区4000m储层进行人工激励后,以30kg/s的注入速率,17℃的注入水,运行20年后,产出水温度从168℃降低到149℃,降低了11.3%;流动阻抗在上升至0.076MPa/(kg/s);年发电量3.7~3.4MW,高于法国 Soultz的发电量。

关键词:山东半岛;干热岩;发电;数值模拟

山东省是地热资源大省,也是我国最早开发利 用地热资源的省份之一。山东半岛地区位于板块构 造交接地带附近,拉张构造使深部岩浆通过深大断 裂侵入地壳,广泛分布中生代花岗质侵入岩,地表出 露多处天然温泉,蕴藏着丰富的地热资源(Xu Junxiang et al., 1999, 2014)。过去的几十年间, 由 于技术问题,山东半岛地区的地热开发仅仅局限于 浅部水热型地热资源。2000年以来,美国、德国、澳 大利亚等国多个干热岩开发项目实现了并网发电, 高效经济地开发干热岩型地热资源的技术逐渐成熟 (Chabora et al., 2012; Rutqvist et al., 2015; Wybornet al., 2005; Lu et al., 2017)。自 2011 年 山东省国土厅部署利津干热岩调查项目以来,山东 省已经陆续开展了山东半岛蓝色经济区干热岩资源 潜力调查评价、山东省干热岩靶区研究等多个干热 岩勘查探索项目(Wang Hao et al., 2014; Tan Xianfeng et al. ,2016; Jiang Haiyang et al. ,2017; Tian Liqiang et al., 2016; Zhang Ling et al., 2017)。笔者等在参与山东半岛蓝色经济区干热岩 资源潜力调查评价项目的过程中,收集了山东半岛 地质、地球物理和地热等资料,通过地热遥感解译、 地热地质调查、地球物理勘探、地质钻探、综合测井 及岩矿分析测试等技术手段,获取了深部文登花岗 岩体规模、裂隙储层空间分布、深部地温及地温梯 度、花岗岩热物性参数和岩石力学参数等数据,建立 了干热岩三维地质模型,并通过数值模拟分析了其 发电能力。

1 研究区概况

1.1 自然地理

半岛地区位于山东省的最东部,行政区域由青岛、烟台、威海三市组成,西起胶莱河、胶州,东到威海、荣成,北自龙口、蓬莱,南至青岛范围内,地理坐标东经:119°28′~122°43′,北纬:35°33′~37°50′,面积 29830km²。工作区西部为胶莱盆地,其余地区属于典型的中低山丘陵区,地势起伏较大,大部分区域海拔高度在 100~300m 之间,地势总体上表现为内陆较高,近海较低。胶东地区河流属半岛边缘水系,

resource potential of dry-hot pore ZKCW01 in Wendeng, Shandong Province. Acta Geologica Sinica, 93(s1):217~225.

注:本文为山东省地勘基金项目(鲁勘字 2013-75、鲁勘字 2018-41)资助的成果。

收稿日期:2019-07-31;改回日期:2019-09-19;责任编辑:黄敏。

作者简介:江海洋,男,1988年生。博士生,主要从事地热地质勘查、增强型地热系统靶区选取研究。Email:hyjiang19@mails.jlu.edu.cn。 通讯作者:康风新,男,1968年生。博士,研究员。水文地质及地热地质专业,Email:kangfengxin@126.com。

引用本文:江海洋,王树星,康凤新,史猛,范振华,张玲. 2019. 山东文登 ZKCW01 干热岩钻孔地质特征及资源潜力. 地质学报, 93(s1): 217~225, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019231. Jiang Haiyang, Wang Shuxing, Kang Fengxin, Shi Meng, Fan Zhenhua, Zhang Ling. 2019. Geological characteristics and

源短流急,大部分独流入海,流量受季节影响大,丰 枯悬殊。区内主要河流有胶莱河、大沽河、五龙河、 城阳河、大沽夹河、乳山河、五沽河、母猪河、黄垒 河等。

2 研究区地质特征

从区域构造上看,胶东地区位于欧亚板块与菲 律宾板块俯冲带的北西侧,濒临西太平洋弧后盆地 区,中生代印支期由于地壳发生强烈的脆性引张变 形作用,形成了一系列近南北向张性断裂以及北东 向、北西向和近东西向扭性断裂,并导致下部地壳部 分岩石熔融,从而产生大规模的花岗质岩浆,沿断裂 入侵形成花岗岩体,有的沿北东向断裂入侵形成一 些浅成脉岩,由于上述地质演变,区域上具有良好的

地热形成条件。

山东半岛侵入岩十分发育,以新元古代花岗质 片麻岩和中生代花岗岩类为主(图1)。其中,文登 花岗岩主要由文登杂岩体和栾家河杂岩体两个规模 较大的复杂深成岩体组成,二者分别呈近南北向椭 圆状和近东西向不规则带状展布,主要岩性为各种 结构(细粒似斑状、中粒似斑状、粗粒似斑状及之间 的过度结构)的二长花岗岩,侵入体年龄约160 Ma (Wang Shijin et al.,2012)。文登花岗岩体附近出 露有宝泉汤、温泉汤、洪水岚汤、七里汤等多处温泉 且泉流量较大,目前大多用于理疗洗浴,据2017年 统计几处温泉日开采量约10000 m³。分析认为区 域断裂或侵入接触带沟通了深部干热岩的热量,浅 部凉水入渗并被迅速加温,深部干热岩体的存在与 该地区温泉形成具有紧密联系。所以把文登岩体作



图 1 山东半岛区域地质略图(据史猛,2017)

Fig. 1 Regional geological map of Shandong peninsula(after Shi Meng, 2017)

为山东山东半岛地区干热岩资源调查的重点。

山东半岛内出露着 15 处天然温泉,是我国地热 温泉最密集的分布区之一,地热资源丰富。花岗岩 的高热导率有利于深部热流的传导,有利于入渗的 大气降水携带岩石中更多的热量,为温泉的形成创 造了有利条件(Xu Junxiang et al., 2014; Kang Fengxin et al., 2017; Luan Guangzhong et al., 2002)。

从现有资料看,山东半岛地区热流值为48~85 mW/m²(Li Xuelun et al.,1997)。据陈墨香(1992) 在龙口黄城测定的大地热流结果表明,本区有一个 4.4℃/100m的地温梯度和62.587mW/m²的大地 热流值。与华北47.155mW/m²的平均大地热流值 相比,山东半岛地区具有一个较高的大地热流值。 综合岩浆岩、天然温泉、大地热流等资料分析,山东 半岛具有非常好的深部地热赋存条件。

3 干热岩热储层选择

3.1 干热岩钻孔

通过在文登地区进行大地电磁及可控源音频大 地电磁探测,发现工作区中生代以来构造活动强烈, 断裂构造较为发育,构造活动跟温泉的形成关系密 切,推断了主要断裂的发育规模及断裂发育特征,了 解了断裂深部展布情况。根据地热地质和物探结 果,将 ZKCW01 测温孔施工孔位布置在可控源 TPW1线1620点(图2),位于为威海市文登区经济 开发区止马岭村,洪水岚汤温泉西侧约200m。

3.2 岩芯特征

ZKCW01 孔于 2016 年 1 月 5 日正式开钻,9 月 11 日钻至孔深 2000.67m 终孔,钻遇岩石主要为文 登序列冶口单元二长花岗岩,每隔几百米有辉绿岩



图 2 山东半岛可控源 TPW1 线视电阻率剖面图 Fig. 2 CSAMT resistivity profile of TPW1 in Shandong Peninsula

脉侵入(图 3),辉绿岩脉厚度不均,从几十厘米到几 米不等,大多数层位比较完整,少数层段呈现破碎 状。部分节理裂隙面有黄铁矿化、部分有绿泥石化、 蛇纹石化现象(图 4)。

钻遇的主要破碎带有四处,一是 330~380m 段;二是 975~1010m 段;三是 1160~1242m 段;四 是 1800.44~1923.44m 段。其中 975~1010m 段, 岩石破碎(图 5),钻遇该段时,钻孔循环液全部漏 失,虽然采取了一些列堵漏措施,但漏失一直没有停



图 3 岩脉侵入接触 Fig. 3 Dyke intrusive contact



图 4 节理面黄铁矿化 Fig. 4 Joint surface pyritization



图 5 1001~1002m 溶蚀现象 Fig. 5 Corrosion phenomenon between 1001~1002 m (a)—整箱岩芯全貌;(b)—含溶穴岩芯;(c)、(d)—溶穴细部结构 (a)—whole box of cores; (b)—core with caves; (c)、(d)—detailed structure of caves

止,需不断补充。直到钻至 1285m,下套管封住后, 钻孔循环液才返至孔口,正常循环,漏失时间长达 2 个月左右。1001~1002m 处,钻孔揭露长度约 1m 的 蚀变蜂窝状二长花岗岩,岩石中的钾长石、钠长石,受 到强烈的高温溶蚀作用而流失,导致岩芯呈蜂窝状。 在其他深度的岩芯中,也零星见到了溶穴。反映了深 部的高温环境背景,以及水汽强烈活动的痕迹。

3.3 地温垂向变化特征

通过对 ZKCW01 测温孔进行准稳态井温测量 (井温稳定时间 80h),初步掌握了该孔所在位置地 温垂向变化特征,由于静井时间较短,并不能完全代 表地温场特征,温度梯度变化较大,具有明显的对流 型特征(图 6)。全孔自上而下地温梯度变化较大, 存在四个异常高值岩段。四个异常段平均地温梯度 5.3~18.59 ℃/100m(表 1)。由于不同深度地温梯 度有所不同,因此采取多个地温梯度对更深部地层 温度进行推断。G₁计算深度 0~1240m,洪水岚汤 温泉出水口水温 71.3 ℃,视为主干导热构造地表温 度,主干导热断裂 1240m 处最高温度 110.76 ℃。 G₂ 计算深度 325~1925m,四条导热断裂之间的平均 地温梯度,325m 处揭露第一条断裂温度 68.8 ℃, 1925m 处揭穿第四条断裂温度 111.82 ℃。G₃计算 深度 1575~1900m,1575m 之下,井温稳定上升,此

表 1 地温梯度异常岩段 Table 1 The rock segment with abnormal geothermal gradient

井段深度 (m)	温度变化 (℃)	地温梯度 (℃/100m)	平均地温梯度 (℃/100m)
20~230	31.57~70.61	4.2~38.6	18.59
$325\!\sim\!425$	78.80~76.79	1.6~13.6	8.79
$570 \sim 885$	77.10~102.33	3.4~12.2	8.08
$990\!\sim\!1075$	103.83~110.10	3.0~5.8	5.30



值为地温梯度均为正值段平均地温梯度(图7)。

4 干热岩发电数值模拟分析

4.1 目标热储层

花岗岩岩体致密,人工改造难度大。目前国际 开发利用干热岩热储层的特点是:温度高和天然裂 缝发育(Guo Liangliang et al.,2016)。由钻探取芯 结果可知,钻遇的主要破碎带有四处,一是 330~ 380m段;二是 975~1010m段;三是 1160~1242m 段;四是 1800.44~1923.44m段。考虑到本次钻探 深度只有 2000m,井底温度 114℃,而干热岩发电要 求温度最低 150℃,因此,假设在 4000m 处存在 100m(3900~4000 m)的破碎带,能够作为干热岩目 标储层,该假设需要以后深井钻探进行验证。另外, 本次钻探的第四段破碎带(1800.44~1923.44m)可 以作为供暖的目标储层。

4.2 开采井布置

采用"三垂直井"(中间注两边抽)的开采模式, 两口抽水井对称分布于注水井两侧。三口井的连线 应与当地最大水平主应力方向平行(Xu Tianfu et al.,2012)。井底的 3900~4000 m 为泄流部位。依 据国外成功的储层改造方案,本注入井采用低注入 流速的压裂方式长时间改造目标储层的注入率,配 合化学压裂及大排量水力压裂,直至使目标储层的 流动阻抗小于 0.1 MPa/(kg/s)(Xu Tianfu et al., 2012; Guo Liangliang et al.,2016)。参照美国



Desert Peak 和法国 Soultz 热储层改造结果,本次假 设改造后储层的长为 1000 m,宽为 500 m,高为 100 m,裂隙储层按等效多孔介质处理,渗透率参考 Desert Peak 为 1×10^{-13} m²。

4.3 建立水热耦合模型

4.3.1 网格划分

本次模拟采用多相流数值模拟软件 TOUGH2 (Pruess et al.,1999)。网格划分 1200 m×1000m ×300m,x,y,z方向的网格数分别为 48,22 和 10。 井附近加密,裂隙层加密。对应真实地层 3900~ 4000m,网格是 0~300m。储层温度根据图 7 预测 的平均地温梯度得到的 168 ℃。建立大尺寸模型可 以避免边界效应对储层换热的影响。图 8 是该三维 数值模型的网格划分图。

4.3.2 模型参数

该数值模型的参数见表 2。本次为了简化模 拟,储层温度统一设为 168℃。密度、孔隙度、热导 率和比热容来自于花岗岩芯的热物性测试结果。注 入流速按 Soultz 工程标准,设为 30kg/s。注入水采



图 8 三维数值模型网格划分 Fig. 8 Three-dimensional numerical model grid in,注水井;pro1,1号生产井;pro2,2号生产井

用浅层地下水,温度设为17℃。整个工程运行年限 设为20年,不间断运行。

参数		数值		
	密度	2450 kg/m^3		
	孔隙度	$1 \frac{9}{10}$		
花岗岩	渗透率 $(k_x = k_y = k_z)$	$1 \times 10^{-17} m^2$		
	热导率	3.0 W/(m • K)		
	比热容	1100 J/(kg • K)		
裂隙储层	渗透率	$1 \times 10^{-13} \mathrm{m}^2$		
	孔压	40~10000Z(MPa)		
和44 タル	温度	168 °C		
初如亲忤	注入流速	30 kg/s		
	注入水温	17°C		
产能条件	产能指数	$5 \times 10^{-12} \mathrm{m}^3$		
	抽水井流压	40 MPa		
	运行年限	20 a		

表 2 数值模拟参数 Table 2 Simulation parameters

4.3.3 抽水井水温变化

图 10 是该干热岩工程 20 年间抽水井温度变化 曲线。可以看出,产出水温度分为稳定阶段(0~5 年)和下降阶段(5~20 年)。第 20 年温度降低到 149℃,降低了 11.3%。美国干热岩未来报告指出, 干热岩热储层在生命周期内温度降低不能超过 10%(Tester et al.,2006),本次几乎满足该条件。 另外,干热岩发电对温度有下限要求,对于有机朗肯 发电系统,一般发电要求产出水温不低于 105.8℃。 本次模拟的整个过程均满足该条件,说明该系统在 其 20 年生命期内可以持续发电。

4.3.4 注入井压力和流动阻抗变化

图 10 是注入井 20 年间孔压变化曲线。注入点 孔压从开始 40MPa 上升到第 20 年的 42.27MPa,





上升了不到 3MPa,该值在允许范围内。另外,干热 岩储层流动阻抗=(注水井压力-抽水井压力)/注入 流速(Guo Liangliang et al.,2016),由于抽水井压 力设为恒定值 40MPa,因此计算得到流动阻抗在第 20 年上升到 0.076MPa/(kg/s),该值小于干热岩要 求的 0.1MPa/(kg/s)。可以看出,在该储层改造后 可以保证 20 年间水流循环畅通。







图 12 储层温度场 20 年间的演化情况(y=500m 平面处) Fig. 12 Reservoir temperature evolution during 20-year period (y=500 m plane)

4.3.5 发电量估算

按 20% 的热转换效率,发电量公式为 W_{e} = 0.2q($H_{pro} - H_{inj}$),其中 H_{pro} 和 H_{inj} 分别为抽出水和 注入水的比焓,注入水温度恒定为 10°C,因此比焓 恒定为 80.17kJ/kg。抽出水 20 年间的比焓变化情 况见图 11。因此,计算的发电量 20 年间变化为 3.7 ~3.4MW。该值略高于 Soultz 的发电量 3MW。

4.3.6 储层温度场演化情况

图 12 是储层温度场 20 年间的演化情况(y= 500m 平面处)。随着冷水的注入,温度冷锋逐渐从 注水井向抽水井移动,由于裂隙储层渗透率要远高 于围岩,因此其温度降低程度也比围岩要高。

图 13 是储层第 20 年的温度场分布情况。可以 看出,在 20 年持续不断的水流循环下,温度冷锋仍 未达到模型边界,保证了模型产能的准确性。另外, 冷锋主要在裂隙层水平方向扩散,其侧向围岩温度 影响范围约为 800m。

5 结论

(1)研究区侵入岩、构造断裂发育,大地热流值为48~85mW/m²,地热异常区地温梯度为5.3~ 18.59℃/100m,地热异常明显,表明研究区深部赋存有温度较高的干热岩资源。

(2)利津干热岩孔压裂试验表明,沿天然裂隙发 育带对深部花岗岩热储层进行压裂激励、建立具有 一定渗透能力的人工热储层是可行的。

(3)利用 tough2 数值模拟显示,对研究区 4000m 深热储层进行人工激励后,一个注入井两个



图 13 储层第 20 年的温度场分布 Fig. 13 Reservoir temperature field at the 20th year

开采井的生产方案中,以 30kg/s 的注入速率,10℃ 的注入水温,运行 20 年后,产出水温度从 168℃降 低到 149℃,降低了 11.3%;流动阻抗在第 20 年上 升到 0.076MPa/(kg/s);发电量 20 年间变化为 3.7 ~3.4MW,该值略高于 Soultz 的发电量,表明该区 具有非常大的干热岩发电潜力。

本次研究结果是在特定参数条件下获得的,还 有很多因素未加考虑,如应力场和化学场的影响、流 体流动过程中储层物理性质的改变、井筒流动对热 提取的影响等,因此,人工热储层建造和利用干热岩 发电尚需进一步试验研究。

References

Chabora E, Zemach E, Spielman P, Drakos P, Hickman S, Lutz S, Boyle K, Falconer A, Robertson T A, Davatzes N C, Rose P, Majer E, Jarpe S. 2012. Hydraulic stimulation of well 27~15, Desert Peak geothermal field, Nevada, USA. Proceedings, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University.

- Chen Moxiang. 1992. New compiled China's hot spring maps and its description. Scientia Geologica Sinica, (s1): 322~332 (in Chinese with English abstract).
- Guo Liangliang, Zhang Yanjun, Xu Tianfu, Jin Xianpeng. 2016. Evaluation of hot dry rock resource potential under different reservoir conditions in Xujiaweizi area, Daqing. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(2): 525 ~ 535 (in Chinese with English abstract).
- Li Xuelun, Liu Baohua, Sun Xiaogong, Wang Yonghong. 1997. Relationship between the silica heat flow and regional conditions in Shandong Peninsula. Periodical of Ocean University of China, (1): 75 ~ 83 (in Chinese with English abstract).
- Guo Liangliang, Zhang Yanjun, Yu Ziwang, Hu Zhongjun, Lan Chengyu, Xu Tianfu. 2016. Hot dry rock geothermal potential of the Xujiaweizi area in Songliao Basin, northeastern China. Environmental Earth sciences, 75(470):1~22.
- Luan Guangzhong, Liu Hongjun, Liu Dongyan, Wang Wenzheng. 2002. Geothermal attributes and characteristics of warm springs in Shandong Peninsula. Acta Geoscientica Sinica, 23 (1):79~84 (in Chinese with English abstract).
- Lu S M. 2017. A global review of enhanced geothermal system (EGS). Renewable & Sustainable Energy Reviews, 81(P2): 2902~2921.
- Pruess K, Oldenburg C, Moridis G. 1999. TOUGH2 user's guide, version 2. 0. Berkeley, CA, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Rutqvist J, Jeanne P, Dobson P F, Garcia J, Hartline C, Hutchings L, Singh A, Vasco D W, Walters M. 2015. The Northwest Geysers EGS Demonstration Project, California: Pre-Stimulation Modeling and Interpretation of the Stimulation. Mathematical Geosciences, 47(1): 3~29.
- Tan Xianfeng, Wang Hao, Kang Fengxin. 2016. Experimental study on fracturing of GRY1 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, Anderson B J, Batchelor A J, Blackwell D C, DiPippo R, Drake E M, Garnish J, Livesay B, Moore M C, Nichols K, Petty S, Toksoz N, Veatch R M. 2006. The future of geothermal energy impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. Washington, DC:DOE Geothermal Program Workshop.

- Tian Liqiang, Fan Shiyan. 2016. Analysis on occurrence conditions of geothermal resources in shallow hot dry rock in Wendeng area. Shandong Land and Resources, $32(08): 27 \sim 30$ (in Chinese with English abstract).
- Wang Shijin, Wan Yusheng, Guo Ruipeng, Song Zhiyong, Wang Lifa. 2012. SHRIMP zircon geochronology of Wendeng type granites in Wendeng City in Ludong area. Landand Resources in Shandong Province, 28(2):1~5 (in Chinese with English abstract).
- Wyborn D, Graaf L D, Hann S. 2005. Enhanced geothermal development in the cooper basin area, South Australia. GRC Transactions, (29): 151~156.
- Xu Junxiang, Kang Fengxin. 1999. The geothermal resource of Shandong Province. Geology in China, (9):30~31 (in Chinese with English abstract).
- Xu Junxiang, Kang Fengxin. 2014. The geothermal resource of Shandong province. Beijing: Geological Publishing House, 50 \sim 55 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tianfu, Zhang Yanjun, Zeng Zhaofa, Bao Xinhua. 2012. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock). Science & Technology Review, 30(32):42~45 (in Chinese with English abstract).

参考文献

- 陈墨香.1992.新编中国温泉图及其说明.地质科学,(s1):322~332.
- 郭亮亮,张延军,许天福,金显鹏. 2016. 大庆徐家围子不同储层水 力压裂的干热岩潜力评估. 吉林大学学报(地球科学版),46 (2):525~535.
- 李学伦,刘保华,孙效功,王永红.1997.山东半岛硅热流值与区域地 质条件的关系.中国海洋大学学报(自然科学版),(1):75~83.
- 栾光忠,刘红军,刘冬雁,王文正.2002.山东半岛温泉的地热属性及 其特征.地球学报,23(1):79~84.
- 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.
- 田立强,范士彦.2016.文登地区浅部干热岩地热资源的赋存条件分 析.山东国土资源,32(08):27~30.
- 王世进,万渝生,郭瑞鹏,宋志勇,王立法.2012. 鲁东文登地区文登 型(超单元)花岗岩体的 SHRIMP 锆石年代学.山东国土资源, 28(2):1~5.
- 徐军祥,康凤新.1999.山东省地热资源.中国地质,(9):30~31.
- 徐军祥,康凤新.2004.山东省地热资源.北京:地质出版社,50~55.
- 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.

JIANG Haiyang^{1,2)}, WANG Shuxing²⁾, KANG Fengxin^{*3,4)}, SHI Meng⁵⁾, FAN Zhenhua²⁾, ZHANG Ling⁶⁾

1) College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun, 130061;

2) The First Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province, Jinan, 250014;

3) Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan, 250014;

4) Shandong Provincial Research Center of Geological Survey Engineering Technology, Jinan, 250014;

5) The 3rd Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province, Yantai, Shandong, 264000;

6) Shandong New Energy Limited Company of Geology and Mienral Resources, Jinan, Shandong, 250014

* Corresponding author : kang fengxin@ 126. com

Abstract

Shandong Peninsula is one of the Hot Dry Rock (HDR) development target sites in China. Based on the geological, geophysical and geothermal data, a final drilling position was determined. Through analyzing the logging, coring and rock test data, this study obtianed the size, temperature and temperature gradient of the deep Wendeng granite, spatial distribution of fractures, physical and mechanics parameters of the grainte. Based on these data, a 3D HDR geothermal model was established and the electricity generation was evaluated through numerical simulation. Intrusive rocks and tectonic fractures are well developed within the study area. The high terrestrial heat flow of $48 \sim 85 \text{ mW/m}^2$ and anomaly geothermal gradient of $5.3 \sim 18.59 \text{ °C}/100 \text{ m}$ all suggest preferential occurrence conditions of deep geothermal resources. The simulation results show that with an injection water rate of 30 kg/s (10 °C) and running 20 years at the depth of 4000 m fractured reservoir, the production temperature decreased by 11.3% from 168 °C to 149 °C and flow impedance increased to the final 0.076 MPa/(kg/s). Annual power output of 3.7~3.4 MW is higher than that of Soultz project in France, indicating a huge HDR resource potential.

Key words: Shandong Peninsula; hot dry rock; electricity generation; numerical simulation