

利津陈庄干热岩 GRY1 孔压裂试验研究

谭现锋^{1,2}, 王浩², 康凤新³

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 山东省鲁北地质工程勘察院, 山东 德州 253015; 3. 山东省地质矿产勘查开发局, 山东 济南 250000)

摘要:地壳中干热岩所蕴含的地热能量巨大,已成为世界各国新能源开发研究的一个重要方向。在干热岩热储层建造(EGS 系统)与采热技术研究方面,主要有人工高压裂隙、天然裂隙及天然裂隙—断层 3 种模式。水力压裂是目前人工热储层建造普遍采用的一种方法,我国在这方面的研究还停留在实验室模拟的阶段。2014 年在山东省利津县陈庄镇完成了 1 眼干热岩勘探孔施工(GRY1 孔),并进行了 2 组水力压裂试验,取得了较好的效果。本文对该成果进行了简要分析,可为我国后续研究人工热储层建造技术提供一定的参考。

关键词:干热岩;压裂试验;增强型地热系统

中图分类号:R730.58 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)10-0230-04

Experimental Study on Fracturing of GRY1 Hot Dry Rock Hole in Chenzhuang Town, Lijin County/TAN Xian-feng^{1,2}, WANG Hao², KANG Feng-xin³ (1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Shandong Lubei Geological Engineering Investigation Institute, Dezhou Shandong 253015, China; 3. Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Jinan Shandong 250000, China)

Abstract The huge geothermal energy contained in hot dry rock of the earth's crust has become the research focuses for new energy development worldwide. At present, in the key technology of thermal recovery, or the formation of a heat exchange system in impermeable hot dry rock body, there are three modes, namely engineered artificial fracture system, natural fracture system and natural fracture-fault system. Hydraulic fracturing is a commonly used method for artificial thermal reservoir construction. Research in this area in our country is still in an experimental simulation stage. We completed one hot dry rock exploration hole (GRY1 hole) and 2 groups of hydraulic fracturing test and achieved good results in Chenzhuang town of Lijin County in 2014. This paper gives a brief introduction to the results of the project and aims to provide certain reference for future research on artificial heat reservoir construction technology.

Key words: hot dry rock; fracturing test; enhanced geothermal system(EGS)

0 引言

自从 20 世纪 70 年代初美国科学家提出干热岩概念以来,经过 40 余年的科学研究和生产实践,干热岩的概念得到了不断的修正和发展^[1-2]。目前,美国、法国、日本等发达国家先后开展了多个干热岩钻探试验,如美国于 1973 年开展的芬顿山干热岩开发 EGS 试验研究,在 1977 年获得了技术上的成功,钻探深度 4500 m,岩体温度达到 330 °C^[3-4]。而日本从 1980 年开始,通过资助旨在研究干热岩发电技术可行性的项目,在深度 2000 ~ 2200 m 时,钻获温度达到 250 °C 的高温岩体并在钻孔中进行了多次短期的水压测试,研究通过人工压裂增强型地热(EGS)系统的寿命长短^[5-6]。

国内在增强型地热系统建设方面还处于起步阶

段,大部分都是以室内模拟研究为主^[7-8]。2014 年 3 月,山东省鲁北地质工程勘察院在山东省利津县陈庄镇干热岩勘探孔进行了 2 组水力压裂试验,试验深度 2003 ~ 2500 m,试验取得了较好的效果,可对我国干热岩增强型地热系统的建造提供参考。

1 干热岩的赋存特征

干热岩,一般是指温度 > 150 °C,埋深数千米,内部不存在流体或仅有少量地下流体的高温岩体^[9]。增强型地热系统(EGS)或称工程型地热系统^[10],是干热岩资源开发利用的一种技术,是通过向高温岩体中高压注水,提取高温蒸汽,用于发电和综合利用^[11]。

1.1 地热地质背景

收稿日期:2016-06-12; 修回日期:2016-09-07

基金项目:泰山学者工程专项经费“胶东型金矿的构造岩浆背景和深部找矿关键技术”(编号:ts201511076)

作者简介:谭现锋,男,汉族,1977 年生,研究员,中国地质大学(武汉)地质工程专业博士研究生,主要从事地热、岩盐、页岩气、干热岩的勘探开发及相关研究工作,山东省德州市大学东路 1499 号,geotan1977@126.com。

利津县现阶段具有可研究开发利用的干热岩主要分布于济阳拗陷的陈庄潜凸起区。凸起区东西长 63 km, 南北宽 15 km, 面积约 558.3 km², 岩石顶板埋深为 950 ~ 1500 m, 在盐窝镇附近顶板埋深最浅, 并且呈中心辐射状埋深逐渐增加。在陈庄潜凸起区中部陈庄镇以北埋深达到 1400 m 以上, 其余大部分区域埋深在 1100 ~ 1300 m。上伏盖层绝大部分是新生界新近系地层, 部分隐伏在古生界地层之下。干热岩主要是新太古界泰山岩群变质岩、前寒武纪侵入岩。由此可以看出, 该凸起区上伏盖层具有保温作用, 其厚度较为适宜, 侵入岩体规模又相对较大, 因此相对来说该凸起区具有较好的干热岩赋存条件。

1.2 地温场特征

一般来说, 根据国内外相关研究, 热流值在 63 ~ 105 mW/m² 的区域就目前开发利用技术来说才有干热岩开发价值^[12]。

GRY1 孔所在陈庄潜凸起区大地热流值较高^[13], 为 82.1 ~ 98.2 mW/m², 据钻孔实测资料, GRY1 孔处大地热流为 98.2 mW/m²。另外根据 GRY1 孔测温资料, 该孔在埋深 1200 m 以浅的第四系及第三系松散层地温梯度达到 4.77 °C/100 m, 在埋深 1200 m 以深的花岗岩岩体中, 地温梯度为 2.903 °C/100 m。由此可见, 该区域干热岩赋存条件较好。

2 GRY1 孔地质条件与钻孔结构分析

2.1 GRY1 孔地质条件分析

GRY1 孔处上覆第四系、第三系松散层厚度达到 1243 m, 具有较好的热保护作用, 下部为新太古界泰山岩群(1243 ~ 2500 m 未揭穿), 岩性以花岗岩、二长花岗岩及弱绿泥石化二长花岗岩为主。其中在本次压裂实验段揭露地层岩性依次为: 花岗岩(2003 ~ 2050 m)、弱绿泥石化花岗岩(2036 ~ 2180 m)、碳酸盐化黑云母闪长岩(2180 ~ 2264 m)、黑云母辉长岩(2263 ~ 2315 m)、花岗岩(2315 ~ 2401 m)、二长花岗岩(2401 ~ 2500 m)。在压裂段(2003 ~ 2500 m)存在多次岩性突变, 尤其是埋深 2180 ~ 2264 m 段碳酸盐化黑云母闪长岩, 其岩心较破碎, 构造裂隙较发育, 为人工热储层的建造提供了良好的地质基础。

2.2 综合测井特征分析

根据 GRY1 孔(2000 m 以深孔径 152 mm, 裸眼成孔)综合测井资料进行综合解译分析, GRY1 孔埋深 2003 ~ 2500 m 范围内, 裂隙较发育段层厚累计达到 52.0 m, 孔隙率 3.1% ~ 12.3%, 平均达到 9.05%, 渗透率平均值为 $3.88 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在埋深 2200 m 左右存在一类裂缝层, 2400 m 左右存在二类裂缝层(见表 1), 因此水力压裂具有一定的可操作性。

2.3 钻孔结构分析

表 1 GRY1 孔 2000 m 以深裂隙解译成果

层号	孔段/m	层厚/m	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	声波时差/($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	泥质含量/%	解译结论
1	2180.9 ~ 2185.1	4.2	413.4	227.6	11.6	12.4	1.2	一类裂缝层
2	2200.0 ~ 2206.3	6.3	519.6	229.3	10.9	3.9	1.9	二类裂缝层
3	2213.0 ~ 2216.8	3.8	689.4	234.6	12.3	5.0	1.7	二类裂缝层
4	2252.4 ~ 2255.1	2.7	846.2	231.5	11.2	7.7	1.3	一类裂缝层
5	2256.5 ~ 2263.0	6.5	854.9	224.7	10.0	3.2	1.4	二类裂缝层
6	2270.5 ~ 2272.8	2.3	910.3	204.5	5.1	0.1	1.0	三类裂缝层
7	2313.9 ~ 2317.3	3.4	879.5	228.6	10.9	3.0	2.0	三类裂缝层
8	2355.6 ~ 2360.5	4.9	791.6	216.8	8.0	0.4	1.5	三类裂缝层
9	2401.8 ~ 2411.3	9.5	873.8	226.9	10.3	6.6	1.9	二类裂缝层
10	2439.8 ~ 2445.5	5.7	819.6	206.7	6.1	0.3	1.8	三类裂缝层
11	2469.4 ~ 2472.4	3.0	917.2	188.9	3.1	0.1	1.5	三类裂缝层

在 GRY1 孔实际施工中, 为方便后续压裂试验的需要, 埋深 2000 m 以浅全部下入石油套管成孔,

并进行了高质量的固井工作^[14], 钻孔结构及钻具组合见表 2。

表 2 钻孔结构及钻具组合

开次	孔段/m	孔径/mm	套管/mm	钻具组合
一开	0 ~ 1272	311.1	244.5	Ø311.1 mm 钻头 + Ø203 mm 钻铤 2 根 + Ø178 mm 钻铤 7 根 + Ø127 mm 钻杆
二开	1272 ~ 2003	215.9	177.8	取心阶段: Ø152 mm 取心钻头 + 川 6-4 取心筒 + Ø121 mm 钻铤 + Ø89 mm 钻杆 扩孔阶段: Ø215.9 mm 钻头 + Ø159 mm 钻铤 15 根 + Ø127 mm 钻杆
三开	2003 ~ 2500	152	裸眼	Ø152 mm 取心钻头 + 川 6-4 取心筒 + Ø121 mm 钻铤 + Ø89 mm 钻杆

2.4 注水试验分析

GRY1孔在压裂试验前,进行了维持7天的常压水头下的注水试验,根据注水试验结果,GRY1孔在孔深2003~2500m段常压下基本不透水,在静水压力20.03MPa时,根据注水试验结果计算,渗透系数为 9.91×10^{-8} m/d(见表3)。

表3 注水试验渗透系数计算表

试验依据	《水利水电工程注水试验规程》 (SL 345—2007)
计算公式	$K = [7.05Q/(LH)] \lg(2L/r)$
注入流量 $Q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	$Q = (\sum Qi)/i = 0.052$
试段长度 L/cm	$L = 49700$
试验水头 H/cm	$H = H_1 - H_0 = 200300$
试验段半径 r/mm	$r = R/2 = 76$
渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$K = [7.05Q/(LH)] \lg(2L/r)$ $= 1.1477 \times 10^{-10}$

3 GRY1孔压裂试验

常压注水试验完成后,在GRY1孔进行了2次压裂试验,试验段为埋深2003~2500m区段,第1次压裂试验开始持续27min时,孔口压力出现陡降(见图1),说明在孔口压力达到26.5MPa时,天然裂隙被水力压裂。渗透系数随着压力的增加呈逐渐增大的趋势(见表4)。

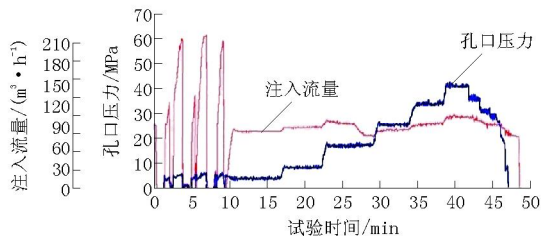


图1 第一次压裂压力与注入流量关系图

表4 第一次压裂试验压力、注入流量及渗透系数一览表

测试段	注入流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	试验时间/min	累计注入水量/ m^3	孔口压力 P/MPa	渗透系数 $K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
1	13.8	10	2.30	22.5	2.066×10^{-4}
2	30.6	11	7.91	24.3	4.394×10^{-4}
3	60	15	22.91	26.5	8.209×10^{-4}
4	90	8	34.91	23.1	1.328×10^{-3}
5	120	9	52.91	25.2	1.690×10^{-3}
6	149.4	7	70.34	28.5	1.959×10^{-3}

第1次压裂完成停泵1h后,在维持注入水量为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 的情况下,持续注入15h,孔口压力由18.07MPa平稳增加至27.23MPa(见图2),此阶段共计注入水量约 300 m^3 。

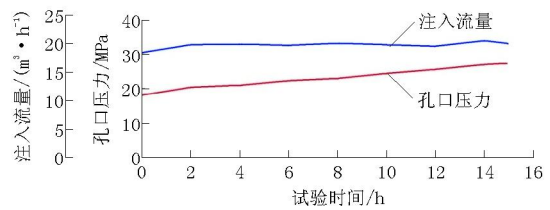


图2 注水试验压力与注入流量关系图

注水试验完成后经过2h的降压,进行了第2次压裂,压裂步骤及各压裂段所采用的注入流量、持续时间与第1次基本相同。本次压裂中,孔口压力随压裂时间及注入流量均呈正比关系(见图3),在试验水头不变的情况下(2003m),注入流量由 $18.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 阶梯状增加至 $150 \text{ m}^3/\text{h}$,孔口压力则由13.7MPa逐渐增大至33.7MPa,渗透系数由 $3.511 \times 10^{-4} \text{ m/d}$ 增加至 $1.781 \times 10^{-3} \text{ m/d}$ (见表5)。

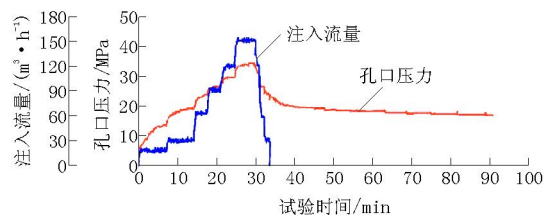


图3 第二次压裂压力与注入流量关系图

表5 第二次压裂试验压力、注入流量及渗透系数一览表

测试段	注入流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	试验时间/min	累计注入水量/ m^3	孔口压力 P/MPa	渗透系数 $K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
1	18.6	7	2.17	13.7	3.511×10^{-4}
2	30.6	7	5.74	19.1	4.978×10^{-4}
3	63.6	4	9.98	23.4	9.323×10^{-4}
4	90	4	15.98	26.5	1.231×10^{-3}
5	120	5	23.98	29.8	1.533×10^{-3}
6	150	5	36.48	33.6	1.781×10^{-3}

第2次压裂完成停泵2h后,在维持注入水量为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 的情况下,持续注入24h,孔口压力由16.31MPa平稳增加至24.33MPa,后提高至注入水量为 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 的情况下,持续注入24h,孔口压力由24.33MPa平稳增加至32.58MPa(图4),此阶段共计注入水量 1200 m^3 。

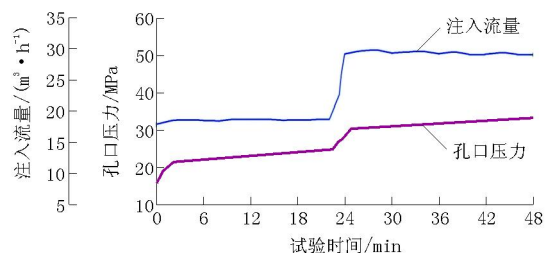


图4 注水试验压力与注入流量关系图

由上述测试分析可以看出,2次压裂及注水试验共注入高压水约 1606 m^3 ,按压裂后花岗岩裂隙率为3%计算,本次共建造人工热储层约 53533 m^3 ,在裂隙发育的2200及2400 m左右区段,影响范围可达数十米。另外在压裂试验后的注水试验中,孔口压力增长较平稳,说明天然裂隙在空间分布较均匀,且在一定的压力下有良好的连通性。

4 压裂后 GRY1 孔分析

4.1 压裂试验分析

根据注水试验及2次压裂试验结果综合分析,主要压裂段为天然裂隙较发育的2180~2263、2313~2411 m区段,因在试验过程中未进行微震监测,无法判断裂隙扩展的方向和空间分布。第一次压裂后降压2 h,因未使用颗粒支撑,压力下降后压裂裂隙又重新闭合,但第二次压裂时,在压裂压力前(26.5 MPa),相同的注水量下压力下降了约15%,在压裂压力后(26.5 MPa),相同的注水量下压力上升了约15%。由此说明,孔内未消散的压力对后续注水要求的压力较高,在干热岩 EGS 系统建设中使用支撑剂有利于后期注水工作^[15]。

4.2 压裂后 GRY1 孔情况

压裂试验完成后经过4 d时间,孔口压力全部消散,孔内水位缓慢下降,经过20 d孔内水位稳定在埋深55.3 m,因场地条件所限,未进行抽水试验,根据水位下降速度和天然裂隙发育情况分析,该孔2180~2263、2313~2411 m区段应该赋存地下水^[16]。据压裂试验完成封井7个月后再次测温资料,该孔在埋深2179 m处温度达到 $97.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5 结论

(1)干热岩作为一种地热资源,具有无污染及不受气候等外界条件影响等优势,我国干热岩地热地质条件优越,具有广阔的发展前景。利津县陈庄镇地区覆盖层下部主要由太古代泰山岩群混合花岗岩及古生代地层组成,具有良好的干热岩地质赋存条件。

(2)GRY1孔在孔深2003~2500 m段常压下基本不透气,渗透系数为 $9.91 \times 10^{-8}\text{ m/d}$,注水时压力持续增长的原因是只有注水孔没有抽水孔。

(3)GRY1孔处理深2003~2500 m花岗岩、二长花岗岩具有较好的可压裂性,虽然其天然裂隙率及渗透性很差,但经水力压裂后渗透系数有大幅提

高,压裂模式属于人工高压+天然裂隙复合压裂模式,在可控的孔口压力下能获得较大的注入水量,有利于干热岩资源的开发利用。

(4)通过本次试验可以看出,干热岩做压裂试验时应选取天然裂隙发育段作为压裂试验的目的层,非发育段压裂比较困难,对压裂设备要求高、能量消耗高、人工热储建造体积小,不经济,不利于开发。

(5)因GRY1孔现场压裂测试为国内首次干热岩工程现场压裂测试,受经费等影响,压裂方案存在不足之处,建议以后国内类似工程做压裂试验时在压裂前和压裂后做抽水试验并做对比分析,并在压裂过程中添加支撑剂,同时做好微震监测,以便综合分析裂隙的扩展方向和空间展布。

参考文献:

- [1] BROWN D. The US Hot Dry Rock Program - 20 years of experience in reservoir testing [R]. Proceedings of World Geothermal Congress, Italy. 1995:2607-2611.
- [2] BARRIA R, Baumgä J, Gerard A, et al. European HDR research programme at Soultz - sous - Forêts (France) 1987 - 1996 [J]. Geothermics, 1999, 28(4):655-669.
- [3] Massachusetts Institute of Technology. The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century [M]. Cambridge. 2006.
- [4] GÉRARD A, Genter A, Kohl T, et al. The deep EGS (Enhanced Geothermal System) [J]. project at Soultz - sous - Forêts (Alsace, France). Geothermics, 2006, 35(5-6):473-483.
- [5] Kremenetsky A A, Milanovsky S Y U, Ovchinnikov L N. 1989. A heat generation model for continental crust based on deep drilling in the Baltic Shield [J]. Tectonophysics, 159: 231-246.
- [6] 陆川, 王贵玲. 干热岩研究现状与展望 [J]. 科技导报, 2015, 33(19):13-16.
- [7] 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):141-143.
- [8] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估 [J]. 中国地质, 2013, 40(1):312-321.
- [9] 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.
- [10] 胡圣标, 何丽娟, 汪集明. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版) [J]. 地球物理学报, 2001, 44(5):611-626.
- [11] 龙西亭, 袁瑞强, 邓新平, 等. 汝城干热岩地热资源研究 [J]. 科技导报, 2015, 33(19):68-71.
- [12] 黄少鹏. 全球大地热流 - 岩石生热率关系综合分析 [J]. 地球物理学报, 1998, 41(S1):26-31.
- [13] 何丽娟. 流变边界层及其对华北克拉通热/地震岩石圈底界差异的意义 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(1):53-61.
- [14] 谭现锋, 王浩, 张震宇. 山东省陈庄潜凸区地温场特征与泰山岩群放射性元素生热率 [J]. 科技导报, 2015, 33(19):58-60.
- [15] 吴耀, 金振民, 欧新功, 等. 中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔地区岩石圈热结构 [J]. 岩石学报, 2002, 21(2):18-22.
- [16] 许天福, 张延军, 于子望, 等. 干热岩水力压裂实验室模拟研究 [J]. 科技导报, 2015, 33(19):35-39.
- [17] 刘彦广, 王潇媛, 陆川, 等. 多孔介质汽 - 水相对渗透率研究进展 [J]. 科技导报, 2015, 33(19):74-78.