

包头地热资源钻井技术与评价

秦俊生^{1,2}, 杨甘生¹, 曹京瑞², 王立超¹

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 北京市地质矿产勘查开发总公司, 北京 100050)

摘要: 地热资源是一种清洁可再生的矿产资源,也是绿色环保能源和资源。地热含水层的综合性质、施工地层的特点和施工区域的复杂状况对地热成井工艺提出了不同的要求。针对内蒙古包头市地热空白区泥岩、砂岩热储地层,从设备选型、钻井结构、成井工艺等方面进行了分析研究,并就单井地热资源进行了评价,为该区域和其它类似区域进一步勘查开发地热资源提供指导和借鉴。

关键词: 地热; 钻井; 评价; 包头

中图分类号: TE249 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2012)12-0015-05

Drilling Technology of Geothermal Well in Baotou and the Evaluation/QIN Jun-sheng^{1,2}, YANG Gan-sheng¹, CAO Jing-rui², WANG Li-chao¹ (1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Corporation of Geo-exploration and Mineral Development, Beijing 100050, China)

Abstract: Geothermal energy is a clean and renewable mineral resource, green environmental protection energy and tourism resources. The comprehensive nature of geothermal aquifer, the characteristics of construction formation and the complex conditions of construction area have different requirements for geothermal well completion technology. Based on the geothermal blank area and sandstone thermal reservoir formation of Baotou in Inner Mongolia, analysis and study were made on equipment selection, well structure and well completion technology; and the evaluation was made on single well geothermal resources to provide guidance and reference to the further geothermal resources exploration and development in the local and other similar areas.

Key words: geothermal energy; well drilling; evaluation; Baotou

1 概述

地热资源是一种清洁可再生的矿产资源,也是绿色环保能源和资源,主要用于供暖、医疗保健、种植养殖、洗浴和旅游。

内蒙古自治区包头市是地热空白区,该区实施了几眼地热普查井,因钻井工艺技术等因素,效果不甚理想。我公司与内蒙古地勘单位合作在滨河新区实施地热勘查,通过勘查井的施工,确定本区热储、盖层、导水和导热构造,了解单井涌水量、水温、地热水化学成分,并进行水质综合评价。普查地热井位于包头市西南约8 km,设计深度2600 m。该区地层以第四系覆盖层和第三系泥岩、砂岩为主,热储层为砂岩地层,钻井、成井工艺要求高。经过总结该区域以前地热井施工失败的教训,优化钻井与成井工艺,45天快速成井,并取得了自流水头高出地表44 m,自流量2016.48 m³/d,水温64℃的优质成果,为包头市及周边地区地热开发取得了示范效果。

2 地热地质条件

2.1 区域地质条件

滨河新区大地构造位置处于华北地台(I级构造单元)鄂尔多斯台坳(II级构造单元)河套断坳(III级构造单元)的中部。河套盆地主要出露第四系,下部为第三系、白垩系、侏罗系及太古界。断裂构造较发育,主要为北东东向,岩浆活动不强烈,仅在北部山区有小的岩脉分布。

2.2 区域构造概况

区域构造以断裂为主,工区附近主要为乌拉山山前断裂和大青山山前断裂。

(1) 乌拉山山前断裂: 该断裂西起乌拉特前旗西山咀,向东经公庙子、哈拉汗、白彦花、哈业胡同、哈业脑包至包头市昆都伦召一带,总体走向近东西向,倾向南,倾角较陡,发育断层崖、断层陡坎及三级台地等构造地貌。全新世以来共揭示大地震6次,反映该断裂至今仍在活动。

(2) 大青山山前断裂: 该断裂西起昭君坟,向东经包头市东河区、土默特左旗至呼和浩特以东。总

收稿日期: 2012-08-16

作者简介: 秦俊生(1970-),男(汉族),安徽人,中国地质大学(北京)博士研究生,北京市地质矿产勘查开发总公司副总经理、高级工程师,地质工程专业,从事专业技术与管理工作,北京市西城区南纬路4号北京市地质矿产勘查开发总公司,flowboy@163.com。

体走向北东东向,倾向南,发育断层陡坎及三级台地等构造地貌,全新世以来共揭示大地震14次,为南盘下降至今仍在活动的正断层。

2.3 区域地层概况

2.3.1 太古界桑干群(Arsn)

岩性主要为灰黑色黑云角闪斜长片麻岩和肉红色花岗岩片麻岩,在区内主要隐伏于地下深部。

2.3.2 中生界(Mz)

(1)侏罗系上统大青山群(J_3d):岩性为灰色厚层砂岩和黄色砾岩互层,夹炭质页岩。工区内没有分布。

(2)白垩系下统(K_1):上部为灰白色砾岩夹砂岩和泥岩,下部为紫红色中细砂岩和砂质泥岩,厚度>1500 m。

2.3.3 新生界(Kz),为主要钻进地层

(1)上第三系(N):岩性主要为棕红色泥岩、砂质泥岩夹泥质砂岩、粉砂岩,在临河石油钻孔中揭示厚度5644 m,向东南变薄。上新统(N_2):950~1993 m,上部为灰绿色、灰色粉砂岩与灰色泥岩互层;中上部为灰色泥岩夹粉砂岩;中下部为灰色、土黄色粉砂岩夹灰色泥岩;下部为土黄色、深灰色、灰色泥岩夹灰色粉砂岩、砂岩;底部为浅灰绿色、浅灰色粗砂岩、含砾粗砂岩和细砂岩。中新统(N_1):1993~2604.33 m,上部为灰色、土黄色泥岩夹紫红色粉砂岩,中部为浅黄色中粒砂岩、细粒砂岩夹砾岩;下部为浅黄色中粒砂岩、含砾中砂岩夹砂砾岩。

(2)第四系(Q):全新统~下更新统,岩性为黄土、亚砂土、亚粘土、粉砂、细砂夹砂砾石,厚度950 m。

本区地热覆盖层为上第三系上新统中的泥岩、砂质泥岩及第四系中的亚砂土和亚粘土,热水储层为上第三系中新统中的砾岩、砂砾岩和砂岩。

3 井身结构及成井技术要求

3.1 井身结构

设计为二开结构,一开井径444.5 mm,深度500 m,下入 $\varnothing 339.7$ mm表层套管到井口;二开井径为216 mm,深度为2600 m,下入 $\varnothing 177.8$ mm技术套管,深度为470~2600 m,上部为井壁管,下部按测井曲线确定含水层位置对应下入过滤管。

3.2 成井技术要求

(1)井斜要求500 m不大于 1° ,1000 m不大于 3° ,2000 m及以深不大于 7° ;井深误差 $\geq 2\%$ 。

(2)钻进过程中应做好简易水文地质观测工

作,记录循环液漏失量和孔深位置,每2 h测量一次泥浆温度。

(3)间断性采取岩心,总次数不得少于5次,每次取心长度>2 m,采取率 $\leq 70\%$ 。

(4)岩屑录井:井深0~500 m岩屑样品间距为10 m,500~2000 m岩屑样品间距为5 m,2000~2600 m岩屑样品间距为2 m。

(5)物探测井根据施工阶段分2次完成,测井项目为:视电阻率、自然电位、自然伽玛、声波、井温和井斜。

(6)要进行3个落程稳定流抽水试验,同步观测水温、水量和水位。

(7)抽水试验结束前取热水全分析样。

4 钻井施工

4.1 钻井设备

施工选用ZJ30/1700B型柴油动力钻机,43 mK形钻塔,3NB-1300C型泥浆泵。

4.2 钻井方法

根据地热井的井深、钻遇地层及施工现场动力电源的能力,采用三牙轮钻头正循环全面钻进方法。

一开钻具组合: $\varnothing 444.5$ mm3A + $\varnothing 203$ mmDC(6根) + $\varnothing 178$ mmDC(16根) + $\varnothing 127$ mmDP(串根);

二开钻具组合: $\varnothing 222.3$ mm3A + $\varnothing 178$ mmDC(18根) + $\varnothing 127$ mmDP(串根)。

4.3 取心技术

采用 $\varnothing 190$ mm取心筒取心,取心后扩孔钻进,平均采取率72.3%,取心情况见表1。

表1 取心结果

序号	深度/m	进尺数/m	岩心长度/m	采取率/%
1	499.03 ~ 504.28	5.25	3.30	62.9
2	996.09 ~ 1001.44	5.35	3.85	72.0
3	1493.81 ~ 1499.16	5.35	3.95	73.8
4	1975.66 ~ 1981.01	5.35	3.79	70.8
5	2305.03 ~ 2310.38	5.35	4.26	79.6
6	2599.99 ~ 2604.33	4.34	3.25	74.7

4.4 泥浆配置

施工使用水基钻井液,为更好的携带和悬浮岩屑、稳定井壁及平衡地层压力,各施工阶段依据井深和地层岩性,使用不同性能的泥浆(见表2)。

5 成井工艺

5.1 下管作业

表层套管:钢级J55,外径339.7 mm,壁厚9.65

表2 各不同施工阶段使用泥浆参数

井段/m	泥浆类型	密度 /(g cm ⁻³)	粘 度 /s	含砂 量 /%	塑粘 /(mPa·s)	动 切力 /Pa	酸 碱 值	基本 配方
0~100	聚合物	1.03	26	0.1	6~12	4~9	7	胶液
100~500	聚合物	1.03	28	0.2	6~12	4~9	7	胶液
		1.05	45	0.1	6~12	4~9	8	胶液
500~700	聚合物	1.05	40	0.1	6~12	4~9	8	胶液
		1.06	32	0.2	6~12	4~9	8	胶液
700~1000	防塌剂	1.08	33	0.2	6~12	4~9	8	胶液
1000~1100	防塌剂	1.10	32	0.2	6~12	4~9	8	胶液
1100~1800	防塌剂	1.12	35	0.3	6~12	4~9	8	胶液
1800~2000	防塌剂	1.14	40	0.3	6~12	4~9	8	胶液
2000~2604	防塌剂	1.18	42	0.3	6~12	4~9	8	胶液

mm,扣型为短圆螺纹,高出地面0.73 m。技术套管:包括实管和缠丝滤水管,钢级N80,外径177.8 mm,壁厚9.19 mm,扣型为长圆螺纹,其中滤水管36根,长度385.49 m。根据测井曲线解释井深1577.69 m以下的含水层位置,对应下入过滤管。

针对泥岩、砂岩的特殊情况,设计了膨胀橡胶止水装置(见图1)。

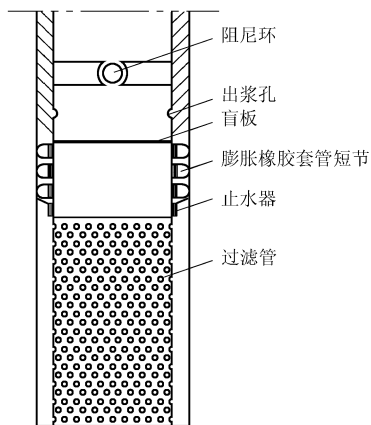


图1 膨胀橡胶止水装置

5.2 固井作业

固井使用G级高抗油井水泥,水泥浆密度1.65~1.85 g/cm³。

表层套管水泥浆返至地表,候凝时间达100 h。二开井段下管时,深度1533.73~1577.69 m下入盲板、封隔器和膨胀橡胶,采用“穿鞋戴帽”式固井,深度为500~1530 m。先固下部,返高500 m,再从Ø177.8 mm管口压水泥浆。水泥浆密度1.85 g/cm³,压进环形空间约200 m,顶部留水泥塞。

固井后憋压,压力为70个大气压(7.0 MPa),1 h不泄压,固井合格。

5.3 洗井作业

洗井仅用清水替浆,替浆后出现自流,因涌水量

较大,很快就水清砂净。

5.4 地球物理测井

经2次测井,一开结束后第一次测井,测量井段为0~500 m,测井项目为视电阻率、自然电位、自然伽玛、井斜,比例尺为1:200,最大井斜0.41°(在深度400 m处),其它测点井斜<0.21°;二开结束后进行第二次测井,测量井段500~2604 m,使用SK2000数控测井仪,测井项目为:视电阻率、自然电位、自然伽玛、声波时差、井温、井斜和地层渗透率、地层孔隙度。

综合测井综合曲线成果图、岩屑录井资料,确定了地层、岩性、厚度及富水段。为保证较高出水温度,依据测井曲线在1577.69 m以深确定的较厚砂(砾)岩段对应下入了过滤管。

随着深度的增加,井内温度增加。第四系底界950 m,井温37.1℃,500~950 m井温增加5.3℃,地热增温率为1.18℃/100 m;上第三系上新统底界1993 m,该处井温56.1℃,上新统顶板到底板增温19.0℃,地热增温率为1.82℃/100 m;中新统深度为1993~井底,井温增加14.65℃,地热增温为2.39℃/100 m,从地热增温率统计看(见表3),随着深度增加,地热增温率也增加,显示水热对流比较明显。

表3 ZK1井测温统计

序号	深度 /m	温度 /℃	序号	深度 /m	温度 /℃	序号	深度 /m	温度 /℃
1	500	31.8	5	1200	41.6	9	2000	56.2
2	600	33.0	6	1400	45.4	10	2200	59.8
3	800	34.8	7	1600	49.3	11	2400	63.3
4	1000	38.0	8	1800	53.0	12	2600	70.8

6 地热单井资源评价

6.1 抽水试验

该井替浆后便自流,水头高出地表44 m,自流量2016.48 m³/d,水温64℃。自流10天后做了3个降深的抽水试验。第一、二次用潜水泵抽水,第三次为井口自然流量进行观测。观测项目为:动水位、水量、水温和气温,采用同步观测。

根据3次降深的抽水试验结果(表4),找出水量(Q)与水位(S)之间的关系,确定水流方程公式,以预测水位或水量。首先确定曲度值,然后找出曲线类型,经公式计算预测水量。

抽水试验第一次降深和第二次降深稳定时间较长,以此结果为依据进行计算。

表4 抽水试验结果

序 号	静水位 /m	降深 /m	涌水量 /(L· s ⁻¹)	涌水量 /(m ³ · d ⁻¹)	单位涌水 量/(L· m ⁻¹)	单位涌水 量/(m ³ · d ⁻¹ ·m ⁻¹)	出水 温度 /°C	稳定 时间 /h
1	+45.08	75.32	33.139	2863.2	0.440	38.01	64	112
2	+45.08	61.62	27.889	2409.6	0.453	39.10	64	36
3	+45.08	45.08	23.340	2016.5	0.518	44.73	64	14

$$N = \frac{\lg S_2 - \lg S_1}{\lg Q_2 - \lg Q_1}$$

式中: N ——曲度值; S_1 ——第一次抽水试验降深, m ; S_2 ——第二次抽水试验降深, m ; Q_1 ——第一次抽水试验水量, L ; Q_2 ——第二次抽水试验水量, L 。

将表4抽水试验数据代入上式中:

$$N = \frac{\lg 61.62 - \lg 75.32}{\lg 27.889 - \lg 33.139} = 1.16$$

曲度值为1.16,即 $1 < N < 2$, $Q = f(s)$ 曲线属幂函数型,反映该井地下水呈混合运动,含水层渗透性较好,厚度相对较大,但补给来源相对差。

幂函数曲线型公式:

$$Q = ns^{1/m}$$

式中: Q ——流量; m^3 ; n ——待定系数; s ——水位降深。

$$n = \frac{N \sum (\lg S)^2 - (\sum \lg S)^2}{N \sum (\lg S \lg Q) - \sum \lg S \sum \lg Q}$$

$$\lg n = \sum \lg \frac{Q}{N} - \frac{1}{m} \sum \lg \frac{S}{N}$$

根据上面水量与水位函数关系,可推测出水量和相应水位。

6.2 地热井开采量计算与评价

(1)该井地下水自流,井口处自流量 $2016.48 \text{ m}^3/\text{d}$,假设开采量即为此数,出水温度 $64 \text{ }^\circ\text{C}$,按此出水量和温度开采100年所排放的总热量为:

$$Q_w = 36500 Q C_w (t_w - t_0)$$

式中: Q_w ——热水井开采100年所排放的总热量, Kcal ; Q ——热水井日开采量, m^3 ; C_w ——热水平均热容量, $\text{Kcal}/(\text{m}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; t_w ——地热水平均温度, $^\circ\text{C}$; t_0 ——地层常温带温度, $^\circ\text{C}$ 。

据抽水试验和调查, Q 为 2016.48 m^3 , C_w 为 $980.95 \text{ Kcal}/(\text{m}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$,地热水平均温度 $64 \text{ }^\circ\text{C}$,地层常温带温度 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。以上数据代入上式为:

$$Q_w = 36500 \times 2016.48 \times 980.95 \times (64 - 4) \\ = 4.33 \times 10^{12} \text{ Kcal}$$

以每公斤标准煤发热量 7000 Kcal 计,单井100年排放总热量相当于燃烧 618852.1 t 标准煤,平均每年燃烧 6188.5 t 标准煤。

(2)本井热储岩性主要为砂岩、砾岩,参考下入滤水管长度与砂(砾)岩对应情况,取水段厚度约 243 m ,该井开采利用热储层单位面积可开采的热储量:

$$Q_r = KHC_r(t_r - t_0)$$

式中: Q_r ——地热井开采影响区内可采热储量, Kcal/m^2 ; K ——热储层地热回放率,砂岩一般取 $0.15 \sim 0.20$; H ——热水井所利用的热储层厚度, m ; C_r ——热储层平均热容量, $\text{Kcal}/(\text{m}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; t_r ——热储层地热平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

据岩屑录井、测井下和井内滤水管资料, K 取为 0.20 , H 为 243 m , C_r 为 $546 \text{ Kcal}/(\text{m}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$, t_r 为 $58.57 \text{ }^\circ\text{C}$,计算为:

$$Q_r = 0.20 \times 243 \times 546 \times (58.57 - 4) \\ = 1.448 \times 10^6 \text{ Kcal}/\text{m}^2$$

开采利用热储层每平方米可开采的热储量为 $1.448 \times 10^6 \text{ Kcal}$ 。

(3)按照均衡原理,采用下面公式计算热储可采热储量与地热井开采100年排放总热量保持均衡所需的热田面积(F)为:

$$F = Q_w / Q_r \\ = 4.33 \times 10^{12} / (1.448 \times 10^6) \\ = 2.99 \times 10^6 \text{ m}^2$$

该井所需热田面积为 $2.99 \times 10^6 \text{ m}^2$,以此估算热水井的影响半径(R):

$$R = (F/\pi)^{1/2} \\ = (2.99 \times 10^6 \div 3.1416)^{1/2} \\ = 975.8 \text{ m}$$

影响半径为 975.8 m ,保护距离应大于 1951 m 。

6.3 水质评价

依照《饮用天然矿泉水检验方法》(GB/T 8538-1995),对水中52个项目进行分析,地下水pH值为 8.06 ,属中性水;矿化度为 $2663 \text{ mg}/\text{L}$,属微咸水;总硬度为 $127 \text{ mg}/\text{L}$,属软水;总 β 放射性含量 $0.562 \text{ Bq}/\text{L}$,属弱放射性水;水温 $64 \text{ }^\circ\text{C}$,从利用能源考虑可用于生活、取暖和锅炉用水;主要阴离子 Cl^- ,含量 $980 \text{ mg}/\text{L}$,毫克当量百分数为 68.5% ;主要阳离子 Na^+ ,含量 $893 \text{ mg}/\text{L}$,毫克当量百分数为 93.4% ,热水化学类型为氯钠($\text{Cl}^- - \text{Na}^+$)型水。

6.4 热矿水类型及评价

热矿水中含有多种对人体有益元素,依照《天然矿泉水地质勘探规范》(GB/T 13727-92)中医疗热矿水水质标准,对热矿水进行评价。

热水中氟、偏硅酸、偏硼酸和温度达到命名矿水

浓度,可命名为氟化物、偏硅酸、偏硼酸型温泉水,碘化物达到有医疗价值和矿水浓度。另外还含有溴化物、偏硼酸、锶、钡和硫化氢等对人体有益的化学成分,这些元素呈离子状态,容易被皮肤吸收进入肌体发挥作用,因此可以说该井地热水是不可多得的珍贵复合型医疗矿泉。水中有害元素如氰化物、汞、铅等含量极微,均在允许范围之内,对人体不会产生影响。

表5为地热水质检测结果及评价。

表5 地热水质检测结果及评价

序号	项目	水质检验报告 /(mg·L ⁻¹)	有医疗 价值	矿水 浓度	命名矿 水浓度	矿水 命名
1	氟	4.50	1	2	2	氟水
2	偏硅酸	58.0	25	25	50	硅水
3	偏硼酸	62.0	1.2	5	50	硼水
4	碘化物	2.20	1	1	5	
5	温度/℃	64	≥34	≥34		温泉

7 结语

(1)滨河新区 ZK1 地热井深度 2604.33 m,井水自流,出水量 2016.48 m³/d,出水温度 64℃,为该地区开发地热资源起到了示范作用。

(上接第 10 页)

现在液压控制系统和钻机自动化程度上。从非开挖钻机在国内的发展阶段来看,国产钻机的低成本、实用性更能适应市场需要。但是随着国家经济的发展,政策的调整,劳动力成本的提高以及非开挖工程市场的竞争加剧,要求钻机的工作效率更高,可靠性更高,同时提高自动化水平,尽量减少施工人员数量。这一点应该是设计开发人员下一步的重点工作方向。

设计科学的液压控制系统,选择质量可靠的液压件,可以相应提高钻机的工作效率。PLC 总线控制模式可以有效地提高钻机的技术水平,操作简单,可靠。自动钻杆系统可以减少施工人员数量,提高施工效率。另外,操作系统的人性化设计也是非常必要的方面。

4 结语

随着非开挖技术的应用范围越来越广,管道穿

(2)针对该区域地层特点选用的设备装置、设计的成井结构和选择的施工工艺有利于减少孔内事故风险。

(3)独特的后成井管外环隙封隔和固井技术对储层控制和产能提高有一定保障。

(4)通过地温梯度计算和产能测试与水质评价,对该区域地热能的进一步勘查、规划与开发具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 姬道新,等.内蒙古自治区包头市滨河新区地热资源普查综合物探勘查报告[R].2009.
- [2] 李安宁,孙友宏,彭新明.北京地区地热井钻探技术[J].探矿工程(岩土工程钻掘),2001,(5).
- [3] 黄尚瑶,等.中国城市地热开发30年[A].刘久荣,等.北京地热国际研讨会论文集[C].北京:地质出版社,2002.
- [4] 高仰才,葛玉玮.内蒙古地热资源成因类型及开发前景初探[J].西部资源,2004,(3).
- [5] CJJ 13-87,供水水文地质钻探与凿井操作规程[S].
- [6] 冯亿年.多种方法联合洗井增大供水井出水量的实例[J].探矿工程(岩土工程钻掘),2007,34(8).
- [7] GB/T 11615-2010,地热资源地质勘查规范[S].

越工程越来越复杂,新的工艺工法的研究成功,要求非开挖钻机的研究开发人员要有开放的思维,不断学习研究,设计出满足于国内国外市场需求,达到国际先进水平的钻机。本文就钻机设计的几个方面提出了一些见解供讨论,其它诸如动力系统、外观设计等也是需要注意的方面。

参考文献:

- [1] 王朝建,花蓉.GBS-40型非开挖铺管钻机的研制[J].探矿工程(岩土工程钻掘),2009,(S1):334-337,341.
- [2] 花蓉.非开挖导向钻机中几种主要结构的设计[J].探矿工程(岩土工程钻掘),2009,36(8):11-14.
- [3] 乌效名,胡郁乐,李粮纲.导向钻进与非开挖铺管技术[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2004.
- [4] 谭禾丰,赵玉玺,应忠卿.工程钻机用履带行走装置的研制[J].地质装备,2009,(1):11-15,23.
- [5] 马保松.非开挖工程学[M].北京:人民交通出版社,2008.