

河北阳原县三马坊地区温泉井成井工艺探讨

景 龙¹, 王彦静¹, 赵丽梅², 常林祯¹

(1. 河北省地矿局第四水文工程地质大队, 沧州 061000;

2. 河北柳江盆地地质遗迹国家级自然保护区管理处, 秦皇岛 066000)

[摘 要] 河北省阳原县三马坊地区地热资源条件优越, 该地区多年来施工温泉井较多, 但成功者无几, 即使成井亦无法实现井口关闭, 造成资源浪费。工程实践中通过分析以往成井存在的问题, 采用了三开成井的施工工艺。通过准确把握一开深度, 将 $\phi 273\text{mm}$ 表层套管下入至高压热储层上部的稳定隔水段后水泥封固, 经试压检验确保管外封闭牢固; 二开通过加大泥浆比重力求平衡钻进, 钻进后期以涌水限量为依据准确把握时机抢下 $\phi 219\text{mm}$ 技术套管; 三开以安全钻进为前提, 以涌出颗粒大小为依据, 采用清水钻进适时完井, 从而实现增产。最终本井顺利完工, 井口安全关闭。

[关键词] 三马坊 地热资源 温泉井 成井工艺

[中图分类号] P642 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2010)04-0716-06

Jing Long, Wang Yan-jing, Zhao Li-mei, Chang Lin-zhen. Research on well completion technology of hot-spring wells in the Sanmafang area of Yangyuan County, Hebei Province [J]. *Geology and Exploration*, 2010, 46 (4) : 0716-0721.

1 前言

河北省阳原县三马坊地区地热资源条件优越, 钻深 200m 左右时水温即可达 40°C 左右。该泉水中含有人体所需的微量元素, 对健身祛病有特殊疗效。阳原泥河湾被誉为“人类的东方故乡”, 在泥河湾文化旅游大产业背景下, 开发本区地热资源, 发展洗浴、种植、养殖产业具有广阔的前景, 这将更加有利于带动地区经济发展。

由于成井工艺缺陷, 该区以往成井自流不可关闭, 资源浪费极大。90 年代闭井压力为 +60m (高于地面) 左右 (阳原 J007 井^①, 1991), 到目前压力降至 +30m 左右 (阳原 ZK1 井^①, 2009), 下降速率达 1.5m/a 。为此地方政府委托河北省地调院对该区进行全面的资源调查及规划, 并在此基础上由我队施工完成 ZK1 探采井, 要求创新成井工艺, 实现井口可开可闭, 为后期资源合理开发提供技术支持。

2 地质概况

2.1 地质构造

阳原县三马坊地热田位于马市口-松枝口大断裂和桑干河断裂交汇处的西北侧, 属四级构造单元天镇台穹内。根据地质分析, 马市口-松枝口大断裂具有继承性活动, 断层北端为实测, 断层面向北东倾, 属正断层, 其它部位被第四系沉积物覆盖 (图 1), 根据多波段卫星像片资料判释和推测 (河北省地矿局, 1989), 桑干河断裂走向北东, 属祁吕系桑干河压性断裂带, 控制着阳原盆地的生成与发展, 具有南侧上升北侧下降的活动特征, 挽近显张性, 上覆第四系厚度一般在 $100 \sim 300\text{m}$ 。

2.2 地层特征及水文地质条件

根据 ZK1 取心结果, 施工地第四纪地层为:

0 ~ 6m 为粉质粘土;

6 ~ 48m 为砂卵砾石, 局部夹泥砾石, 为河流相沉积;

[收稿日期] 2009-11-22; [修订日期] 2010-06-21; [责任编辑] 郑 杰。

[第一作者简介] 景 龙 (1978 年-), 男, 助理工程师, 毕业于中国地质大学 (武汉) 网络教育中心, 探矿工程、水文地质工程地质专业, 主要从事岩心钻探、地热钻井工程、水文地质工程技术及施工管理工作, Email: jing_longd@163.com。

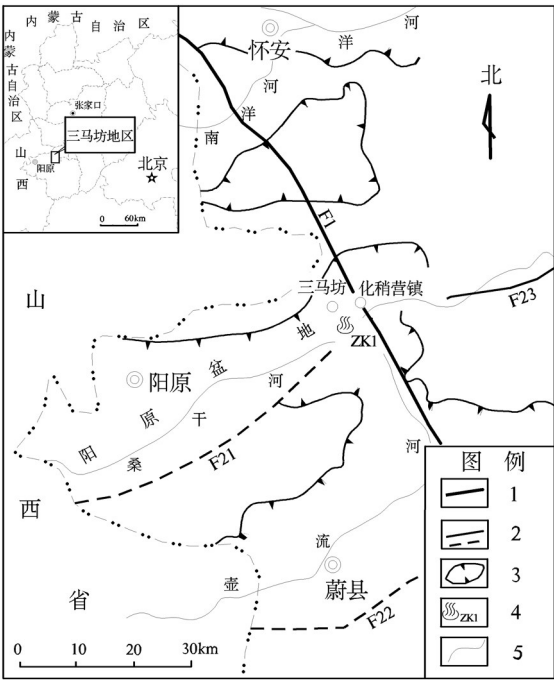


图 1 三马坊地区构造略图

Fig. 1 Simplified structure map of Sanmafang area

1-大断裂;2-一般断裂及推测断裂;3-断陷盆地;4-温泉井及编号;5-河流;F1-马市口-松枝口大断裂;F21-桑干河断裂;F22-蔚县-延庆断裂;F23-下花园断裂

1-major fault;2-general fault, observed and inferred;3-faulted-depression basin;4-hot-spring well and number;5-river; F1-Mashikou-Songzhikou fault; F21-Sangganhe fault; F22-Yu county-Yanqing fault; F23-Xiahuayuan fault

48 ~ 149m 为浅灰绿色为主,局部浅棕色粉质粘土与淤泥质粘土互层,为典型的“泥河湾组”。149m 以下为泥砾石、角砾石层,其成分主要为燧石块、燧石条带白云岩类以及经变质重结晶的燧石角砾岩类,一般碎块大小 25 ~ 60mm 左右,大者达 100×90×50mm(图 2),孔隙较大,可视为裂隙状。角砾岩底界未揭穿,根据地震勘探,井位处底界埋深大于 200m,基底为太古界片麻岩。该层为高压承压水,水温 40℃ 左右,是本区利用热储,该区所成温泉井均是在揭露本层自流后终孔,单井自流量均在 100m³/h 以上。

在桑干河断裂的控制下,于北西向的马市口-松枝口大断裂交汇处的长城系燧石条带白云岩内裂隙发育、岩石破碎,形成热水上涌通道(魏洪章, 2006)。西北部山区接受的大气降水沿断裂破碎带缓慢深循环加热,溢出基岩后赋存于第四系泥河湾期砂砾石层及断裂接触带的角砾岩堆积物中。由于

上部隔水覆盖层厚度大,封闭了基岩热水的上移,形成了高承压水,承压水头可达数十米。上部隔水层底板一旦揭穿,井水自流不可控,可将井底直径 100mm 的角砾冲出井外。

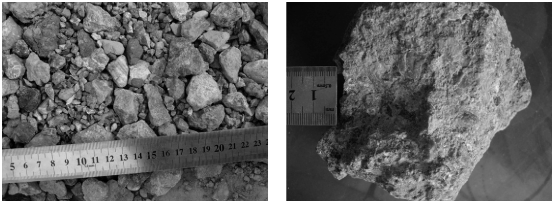


图 2 角砾碎块及岩屑(阳原 ZK1 井^①, 2009)

Fig. 2 Breccia block and debris

3 以往成井工艺分析

3.1 以往成井情况

该区现有 4 眼温泉自流井,总涌水量在 500m³/h 左右。由于成井工艺不完善,井口无法关闭。

施工区有废弃井 3 眼(J007 井、J008 井、J010 井),虽不能合理使用,但仍具有一定的自流量。当时,J008 井钻进出现大量涌水时方下管,下管不到百米,水流冲蚀井口坍塌使钻机沉陷形成直径 43m 的水坑。J007 井成井自流几年后关闭井口时,水从管外急速流出,将管周围泥砂冲出,瞬时井口成坑而被废弃。目前成坑的废弃井成为当地的安全隐患。

3.2 以往成井工艺分析

根据笔者调查,以往井施工的基本程序为:当钻进至含水角砾石层自流时,再将井壁管下入(多数采用铸铁管),管外投入大径骨料固定,上部采用粘土球封填至井口。这种施工方法主要存在以下问题:

- (1) 外部大径骨料封填,形成下部承压水在管外环隙中流动的过水通道。一旦闭井,底部承压水便会顺管外流出,涌水冲蚀围填粘土及上部 25m 处砂卵砾石层,造成井周围垮塌(J007 井因此损坏)。
- (2) 施工风险较大。钻进至底部角砾石层必然发生井涌,且涌水量会逐渐增大而不可控。在涌水状态下特别是瞬时涌水增大时水流冲出大量地层角砾(图 1),极易造成施工事故;同时涌水冲蚀上部地层,容易冲蚀井壁坍塌。
- (3) 以往施工只下一级套管,只能形成井底进水通道,单井涌水量受限,且流量有降低之势。
- (4) 采用该种井结构,水井一旦毁坏,井口不能

封闭,井周围必然被冲蚀塌方形成水坑。

4 改进后的成井施工实践

4.1 施工设计

4.1.1 成井结构设计

总结以往该区成井经验和失败教训,亦参考类同地质特征条件下一些兄弟单位施工经验,采用三级孔径成井(常璐,1987;张晓延等,2004;王伟,2008)、表套水泥封固(高振东,2003)、井口三通控制(林化岭,1984)的井身结构(图3)。

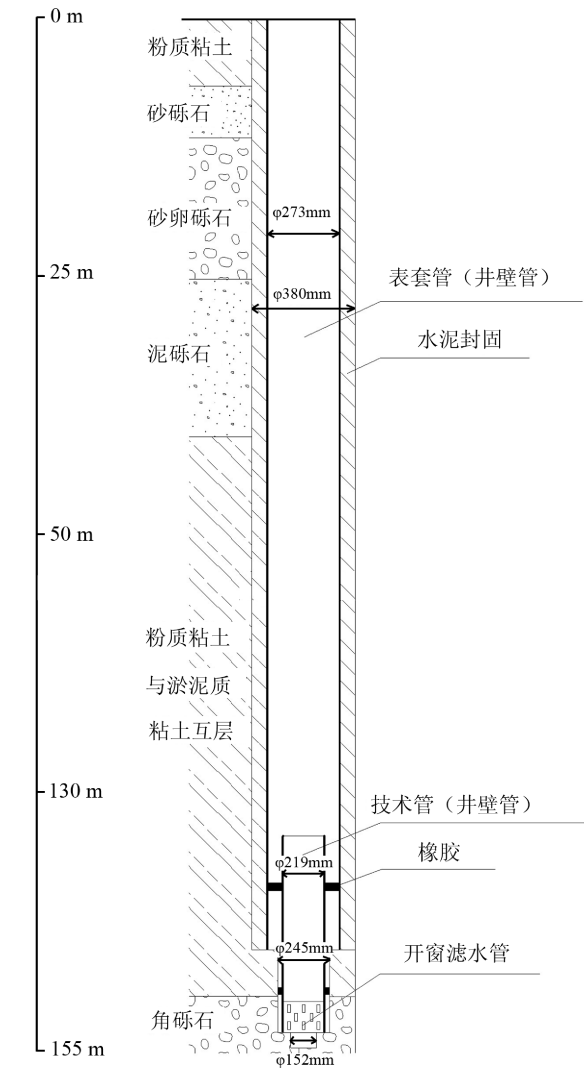


图3 ZK1井成井结构示意图

Fig.3 Sketch showing structure of the completed well ZK1

该井结构的可行性在于:采用水泥将上部表套管与地层固结,保证安全关闭井口且管外密封不涌水;上部井管护壁,在底部承压层钻进更安全;井一旦报废井口稳定不塌陷成坑。

4.1.2 施工工序设计

施工工艺流程:小径取心至角砾层→测井→φ380mm扩孔(确定表套管下入位置)→下入φ273mm表套管固井→候凝、井口处理→试压→调整泥浆→二开φ245mm全面钻进→抢下入φ219mm技术管(底部开窗)→采用φ152mm钻头清水三开完井。

施工关键技术:一开套管下入位置是关键,保证在揭穿热储前将表层套管下入并固井,同时要试压检验;二开必须调整泥浆性能(常永生,2000;秦沛等,2005;魏文忠等,2006),在施工现有条件下力求平衡钻进,同时适时观察井口涌水变化掌握适当时机抢下技术套管;根据涌水大小合理控制三开进尺,保证安全完井。

4.2 施工实践及主要技术措施

4.2.1 表套管的下入及封固

表层套管的安全下入及有效封固是成井的关键,该工序的主要目的是封固上部地层,为后续施工做准备。

我们在下入表套管之前进行了钻探取心,小径揭露出含水角砾层顶界(149m)后停钻,通过岩性对比,在含水层上部选择座管地层在145m~149m段,该段为稳定完整的粘土层,致密结构。然后采用φ380mm钻头扩孔至145m下管。

井管安全到位后进行了全井段水泥固井,候凝期间完成井口法兰焊接工作。3天后钻穿水泥塞试压达到2MPa不降,可以确定固井合格,从而可保证成井后期安全封闭井口。

4.2.2 二开钻进及下管

在地层与井眼之间的压力系统中,有地层压力 P_p ,同时井内钻井液柱对地层有井底压力 P_b (谢南屏,1997)。二开钻进如果 P_p 增大时,就会出现涌水破坏泥浆体系,当 $P_p \gg P_b$ 时,甚至出现井壁坍塌以致无法下管成井。因此须在钻进中控制泥浆比重,力求实现平衡钻进,保证安全施工。

(1) 井壁平衡计算

相关井壁平衡的计算如下:

$$P_p = P_d + 9.81\rho_m H \tag{1}$$

$$\rho_{ml} = P_p / (9.81H) \tag{2}$$

式中:

P_p —地层压力;

P_d —闭井井口压力;
 ρ_{ml} —井筒中液体密度;
 H —井深(m),按 150m 计;
 ρ_{ml} —平衡地层所需钻井液密度,经计算泥浆比重至少达到 1.25 方可达到平衡钻进。

现场采用了重晶石粉及纤维素加重泥浆比重(黄伯皋,1994;鄢捷年,2001)实现平衡钻进。

(2) 下管时机确定
依据现场条件,井内涌水状态下确保泥浆比重达到 1.25 以上是很困难的。普通水井装备没有井控设备。施工现场只能利用现有条件增大泥浆比重,减少涌水量,在安全涌水量内将井管下入到位。因此掌握下管时机是二开施工的关键。

下管时机的确定:可以使地层在二开钻进时具有一定的涌水量,只要涌水携带出的角砾、岩屑不致引起坍塌,保证开窗滤水管进入主要涌水段即可。显然决定上述施工隐患的即为井内自涌量大小。涌水层内岩性为断层角砾岩碎块,钻进中形成的井壁是由大小级配的角砾石“堆砌”而成,其中要保证井壁稳定实际是保证“堆砌体”的骨架颗粒不发生位移。骨架颗粒在井底的受力是十分复杂的,可以进行简易判定:以井内涌水量不足以携带出骨架颗粒的流速为涌水控制限量。涌水量增大时,水流携带的颗粒增大增多,井壁容易失稳。由此可见,涌水限量的确定是二开下管的关键。根据式(3)静止液体中岩屑颗粒下沉速度及式(4)计算如下(王世光等,1987):

$$v = K \cdot [d_1(\rho_1 - \rho) / \rho]^{0.5}$$

(3)

式中:
 v —岩屑颗粒在液体中的下沉速度(m/s);
 K —颗粒的形状系数,球形取 5.11,不规则形取 2.5~4,由于多数颗粒呈不规则状,按 3.5~4 计取;
 d_1 —岩屑颗粒直径(骨架颗粒粒径),根据地层结构,以大于 0.01m 的颗粒为骨架颗粒;

式中:

$$\rho_1\text{—岩屑密度(为 }2650\text{kg/m}^3\text{);}$$
$$\rho\text{—液体密度(比重以 }1.05\text{ 计)。$$

$$Q = v \cdot S$$

(4)

式中:
 Q —井内涌水限量;
 S —过水截面积。

经计算 0.01m 的最小骨架颗粒在静水中的下沉速度为 0.43m/s,即当涌水流速大于此限量时骨架颗粒即开始被水携带上涌。由(4)式计算,当井内稳定涌水量达到 73m³/h 时必须停钻下管。

(3) 井管设置
二开技术管是在钻进涌水达到下管限量时及时抢下,因此井管须达到安全护壁、下入快捷可靠的要求。目的层的断层角砾碎块个体粒径较大,因此现场采用条缝式滤水管,条缝孔隙率控制在 16% 左右,缝口宽度控制以可阻挡地层骨架颗粒为宜,选择缝宽为 10±2mm。同时保证表套管(φ273mm)与技术套管(φ219mm)重叠不小于 10m,重叠段橡胶止水封闭(见图 2)。

二开技术管由井壁管和条缝滤水管组成,整体长度 18m 焊接下入。由于技术管重量较轻,采用反丝接头连接不易脱扣,借鉴兄弟单位的施工经验(刘文新等,2008)应用挂管结构完成二开套管的下入。

(4) 施工过程
二开配置泥浆(比重 1.10,粘度 38s)扫水泥塞钻进至 150m 时便有涌水现象,提钻测闭井压力为 0.1MPa,自流涌水 3m³/h 左右。增大泥浆比重重新调整泥浆性能(比重为 1.30、粘度 42s)进行循环。由于现场条件,泥浆循环后比重只能达到 1.15,基本可以平衡钻进。当钻进至 153.25m 时自流量增大,现场通过简易方法(杨德寿等,2007)测定涌水量可达到 84m³/h,已超出流速限量。此时已无法再平衡钻进,现场立即提钻抢下井管,在 2h 内井管顺利到位。

4.2.3 三开增产钻进

二开顺利下入技术管后流量不足 100m³/h,为满足地方使用要求,施工中采用 φ152mm 牙轮钻头三开钻进增产。三开钻进可以使涌水层中的“堆砌体”重新分选,将小颗粒的砾石及泥砂排除,将大颗粒角砾进一步磨圆,形成一个井底反滤层而增大涌水量。但三开在破碎带钻进亦存在较高风险。

由前所述,涌水增大带动地层角砾上涌,在二开下管完毕后,从井中冲出大量的角砾石及岩屑即验证了该现象。根据钻头、钻铤与上部井管的级配,形成的间隙最大不足 84mm,因此控制上返角砾颗粒大小不能超过 80mm 是三开安全钻进的关键。

实际钻进至 154.25m 时涌水量增大至 150m³/

h, 当时涌水携带的角砾明显增大, 大者颗粒大小接近 70mm。将钻头提离孔底 10m 稳定 30min 后再次下钻探井底, 钻头已无法下入。再行钻进憋跳钻剧烈, 向下钻进难度明显增大。此时水量未减, 可以判断井底反滤层已形成, 具备终孔条件。将钻具全部提出, 井内涌水量再次增大。

4.3 成井效果

三开提钻后涌水浑浊, 水中携带出大量的碎石块, 均呈棱角状。6h 以后涌水渐清, 自流 24h 后变清澈, 未见大颗粒角砾, 一般携带 10mm 以下的岩屑及细砾, 48h 后水清砂净, 水流稳定在 290m³/h。

水清砂净后安装井口装置, 按照设计进行了放水试验, 最终安全封闭井口, 测得闭井压力为 0.33 MPa。

5 结论

ZK1 井的施工工艺克服了该区高压自流热储条件下成井难题, 同时实现了井口的有效关闭, 可见采用二开及三开的成井结构是可行的。由此可以总结三马坊地区温泉井的成井要点:

(1) 根据该区的地质条件, 成井时必须在揭穿高压层之前将表套管下入, 利用水泥将管外封固, 同时及时完成井口处理(井口法兰焊接等工作); 经试压检验固井合格后才能进行二开, 由此保证关闭井口时管外密封牢固。

(2) 二开必须保证技术套管安全、快速下入至断层角砾岩内。钻进时要合理控制泥浆比重, 力求平衡钻进; 当平衡钻进难以维持时, 需以涌水限量(宜为 70 m³/h) 为指标把握下管时机, 及时抢下技术套管; 技术管底部应开窗, 保证进水面积, 设置便捷的挂管结构使井管快速脱开也是成井的关键。

(3) 三开的目的是增产, 钻进必须保证施工安全。施工时要充分考虑井管与钻具的级配间隙, 以涌出碎石颗粒大小不至卡钻为依据判断钻进的安全性, 同时要合理控制进尺、勤提钻, 确保安全完井。

[注释]

① 河北省地质调查院, 河北省地矿局第四水文工程地质大队. 2009. 河北省阳原县三马坊地区地热资源勘察报告

[References]

Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province. 1989. Geological memoirs of Hebei Province, Beijing Municipality and Tianjin unicity[M]. Beijing: Geological Publishing House; 580 (in Chinese)

Chang Lu. 1987. Well drilling and complete technique of the Huitang geothermal hot water supply wells[J]. Geology and Exploration, 11: 69-70 (in Chinese with English abstract)

Chang Yong-sheng. 2000. Defending and treating with the collapse drill hole[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 27(3): 56-57 (in Chinese with English abstract)

Gao Zhen-dong. 2003. Surface anchoring manually and practice in petroleum drilling[J]. West-china Exploration Engineering, 15(4): 79-80 (in Chinese with English abstract)

Huang Bo-gao. 1994. Shallow geothermal development and well completion technology[J]. Exploration Engineering, 6: 44-45 (in Chinese with English abstract)

Lin Hua-ling. 1984. Well completion technology and permanent stagnant water of geothermal water blow well[J]. Geology and Prospecting, 11: 66-67 (in Chinese with English abstract)

Liu Wen-xin, Zhang Chang-mao, Bao Hong-zhi. 2008. Examination of casing abutment scaling failure in HLS geothermal well and the plugging method[J]. Exploration Engineering, 35(12): 17-18 (in Chinese with English abstract)

Qin Pei, Qin Jun-sheng, Zheng Guo-hai. 2005. Geothermy well drilling technology in conglomerate rocks[J]. Exploration Engineering, 32(12): 43-45 (in Chinese with English abstract)

Wang Shi-guang, Cao Ri-zhao, Zhou Zhen-sheng, Xiu Xian-min, Jiao En-yuan. 1987. Exploration Engineering(lower) [M]. Beijing: Geological Publishing House; 5-6 (in Chinese)

Wang Wei. 2008. Difficulty on drilling engineering and its treatment measure at Hanshan gold field in Anxi county[J]. Geology and Prospecting, 44(3): 95-98 (in Chinese with English abstract)

Wei Hong-zhang. 2006. Discussion on origin of underground hot water in Zhang Jiakou[J]. Coal Geology of China, 18(4): 38-41 (in Chinese with English abstract)

Wei Wen-zhong, Wang Guang-shu, Lv Guo-jian. 2006. Technical troubles and countermeasures while penetrating severe fracture zones in Xin 1 well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 34(6): 27-29 (in Chinese with English abstract)

Xie Nan-ping. 1997. Drilling engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press; 215-216 (in Chinese)

Yang De-shou, Ren Wu-xing, Liu Bai-zheng. 2007. Convenient measurement of drilling gush and lost circulation water[J]. Geology and Prospecting, 43(4): 88-90 (in Chinese with English abstract)

Yan Jie-nian. 2001. Drilling Fluids Technology[M]. Dong Ying, Shandong: China University of Petroleum Press; 118-120 (in Chinese)

Zhang Xiao-yan, Zhao Rang-qian, Lu Dun-hua. 2004. Application of

simplified liner well cementation in geothermy well[J]. Exploration Engineering,31(12):44-45(in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

常 璐.1987. 宁乡灰汤地热供水管井的钻井及成井工艺[J]. 地质与勘探,11:69-70

常永生.2000. 钻孔坍塌的预防及处理[J]. 水文地质工程地质,27(3):56-57

高振东.2003. 石油钻井中的人工表层固井与实践[J]. 西部探矿工程,15(4):79-80

河北省地质矿产局.1989. 河北省北京市天津市区地质志[M]. 北京:地质出版社:580

黄伯皋.1994. 浅层地热的开发与成井工艺[J]. 探矿工程,6:44-45

林化岭.1984. 地热水喷井永久性止水与成井工艺[J]. 地质与勘探,11:66-67

刘文新,张长茂,鲍洪智.2008. HLS 地热井井管对接密封失效的检查方法及封堵措施[J]. 探矿工程,35(12):17-18

秦 沛,秦俊生,郑国海.2005. 北京北苑地区洼里砾岩地层地热井钻井技术[J]. 探矿工程,32(12):43-45

王世光,曹日照,周振声,修宪民,焦恩远.1987. 钻探工程(下)[M]. 北京:地质出版社:5-6

王 伟.2008. 安西县寒山金矿区钻探施工难点及解决措施[J]. 地质与勘探,44(3):95-98

魏洪章.2006. 张家口地下热水资源成因探讨[J]. 中国煤田地质,18(4):38-41

魏文忠,王广书,吕国俭.2006. 新 1 井严重破碎带地层钻井技术难点及对策[J]. 石油钻探技术,34(6):27-29

谢南屏.1997. 钻井工程[M]. 北京:石油工业出版社:215-216

杨德寿,任武行,刘伯政.2007. 钻孔涌、漏失水测量的简易方法[J]. 地质与勘探,43(4):88-90

鄢捷年.2001. 钻井液工艺学[M]. 山东东营:石油大学出版社:118-120

张晓延,赵让乾,卢敦华.2004. 简易尾管固井技术在地热井中的应用[J]. 探矿工程,31(12):44-45

Research on Well Completion Technology of Hot-Spring Wells in the Sanmafang Area of Yangyuan County, Hebei Province

JING Long, WANG Yan-jing, ZHAO Li-mei, CHANG Lin-zhen

- (1. No. 4 Hydrogeology Survey & Engineering Geology Brigade of Hebei Geological Exploration Bureau, Cangzhou 061000;
2. The Agency for Geological Relics National Natural Protective Area of Liujiang Basin in Hebei, Qing huangdao 066000)

Abstract:In the Sanmafang region, Yangyuan county in Hebei province, there are abundant geothermal resources. Many hot-spring wells were drilled, but very few were successful in recent years. Even if wells are finished, their tops cannot be closed, leading to wasting resources. In this work, we have analyzed the problems in the previous well construction, and used the third-interval of well completion technology. In the first interval, after the $\phi 273\text{mm}$ surface casing pipe was tripped in the steady aquifuge above the high pressure hot reservoir, cement sealing was implemented which was ensured by pressure test. In the second interval, the drilling was balanced by increasing the slurry proportion. At the end of drilling, the $\phi 219\text{mm}$ casing was tripped timely based on the limited inrush of water. In the third interval, with the precondition of safety drilling, the well was completed by fresh water-drilling on the basis of debris size to increase the yield. Finally, the well completion was realized favorably with the safe well closure.

Key words: Sanmafang, geothermal resources, hot-spring well, well completion technology