

# 基于同井双目的层地热勘探井井身结构设计与实践

杨忠彦<sup>1</sup>, 任鸿飞<sup>2</sup>, 林圣明<sup>1</sup>, 朱怀亮<sup>1</sup>, 朱挺<sup>1</sup>

(1. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250; 2. 河南省有色金属地质矿产局, 河南 郑州 450016)

**摘要:**河南 WR-1 地热勘探井设计有新近系馆陶组和奥陶系 2 个勘探目的层, 需要各自进行成井和测试工作, 馆陶组成井测试完成后需要继续钻进完成奥陶系成井。在井身结构设计时, 从套管设计、固井结构等方面进行优化改进, 解决了馆陶组成井管柱固井、钻孔与套管级配以及过滤器参数设计等问题, 并通过实钻验证。本文主要介绍了该地热勘探井井身结构设计过程中需要考虑的重点要素、设计过程等, 并结合实钻过程, 对井身结构的设计进行了调整和优化, 使其更具现场操作性, 为其它类似同井双目的层地热勘探井工程提供理论和实践参考。

**关键词:** 双目的层; 地热井; 井身结构; 固井; 优化设计

**中图分类号:** P634; TE249 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2022)06-0162-07

## Geothermal exploration well structure design and drilling for two geothermal reservoirs

YANG Zhongyan<sup>1</sup>, REN Hongfei<sup>2</sup>, LIN Shengming<sup>1</sup>, ZHU Huailiang<sup>1</sup>, ZHU Ting<sup>1</sup>

(1. Tianjin Geothermal Exploration and Development-Designing Institute, Tianjin 300250, China;

2. Henan Province Non-ferrous Metals Geological Mineral Resources Bureau, Zhengzhou Henan 450016, China)

**Abstract:** The WR-1 geothermal exploration well in Henan province is designed for two exploration target zones, the Neogene Guantao Formation and the Ordovician, which is necessary to be completed and tested separately. After the completion of the Guantao Formation well test, it is necessary to continue drilling to complete the Ordovician section. In the design of the wellbore structure, optimization and improvement were conducted on various aspects, including casing design, cementing structure, to address completion tubing string cementing, matching of the wellbore and casing sizes and filter parameter design for the Guantao Formation section, and verified with actual drilling. This paper mainly introduces the key elements that need to be considered and the design process in the design of the geothermal exploration well structure. The design of the well structure was adjusted and optimized in regard to the actual drilling works, so that it will be operable on site and provide theoretical and practical guidance for other similar two geothermal reservoirs exploration wells.

**Key words:** two geothermal reservoirs; geothermal wells; well structure; cementing; optimal design

## 0 引言

在钻井工艺设计中, 井身结构设计是基础<sup>[1-3]</sup>, 也是关系到钻井能否安全、优质、高效和经济完成钻探目的的重要因素<sup>[4-7]</sup>, 其主要任务是根据井身结构设计确定套管的下入层次、下入深度、固井水泥浆返深等。

地热井一般没有异常高压地层, 故不同于油气井, 其井身结构设计不以地层压力为设计主线。与此同时, 在地热资源的勘探过程中, 为了高效地利用勘探资金, 往往在 1 眼勘探井中设立 2 个以上的勘探目的层, 这就对钻井工艺提出了更高的要求。基于上述原因, 为了保证在安全经济的条件下完成

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2022-03-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.06.022

第一作者: 杨忠彦, 男, 汉族, 1970 年生, 副总工程师, 高级工程师, 探矿工程专业, 从事地热钻井技术工作, 天津市河东区卫国道 189 号, y83009@163.com。

引用格式: 杨忠彦, 任鸿飞, 林圣明, 等. 基于同井双目的层地热勘探井井身结构设计与实践[J]. 钻探工程, 2022, 49(6): 162-168.

YANG Zhongyan, REN Hongfei, LIN Shengming, et al. Geothermal exploration well structure design and drilling for two geothermal reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 162-168.

钻探目的,笔者在长期实践中总结出来一套基于同井双目的层的地热勘探井井身结构设计方法,并在河南 WR-1 地热勘探井设计工作中进行了验证。

## 1 河南 WR-1 地热井概况

WR-1 地热井是服务 2017 年度河南省财政勘查项目“郑州航空港经济综合试验区(尉氏段)地热资源调查”的地热勘探井。根据区域地质情况、邻井地层情况及物探解译结果,地质设计给出了该井可能钻遇的地层情况,如表 1 所示。

表 1 WR-1 地热勘探井钻遇地层预测  
Table 1 Predicted lithology in WR-1 well

地 层	底板埋深/m	地层厚度/m
第四系(Q)	200	200
新近系(N)	明化镇组(Nm)	750
	馆陶组(Ng)	1200
三叠系(T)	1700	500
二叠系(P)	2800	1100
石炭系(C)	2850	50
奥陶系(O)	3000(未穿)	150(未穿)

### 1.1 成井方法

WR-1 井共设置 2 个勘探目的层,其中馆陶组地层采用过滤器成井,奥陶系地层采用先期裸眼成井。

### 1.2 主要技术难点

设计过程中,需要兼顾钻探目的与钻井安全,充分考虑井身结构各要素的关系,重点解决以下问题:

(1) 选择正确合理的套管封隔点,减少 2 个目的层的干扰因素,以保证安全施工。

(2) 目的层馆陶组过滤器成井,测试后继续钻进,成井管柱兼做技术套管,需要兼顾成井效果和安全生产。

(3) 馆陶组成井管柱固井设计问题。

## 2 基于双目的层地热勘探井井身结构设计

针对地层情况及施工难点,在本次施工中提出了一种基于双目的层地热勘探井井身结构设计方法,相比于传统井身结构,能够更好地起到固井防塌、封隔地层的作用。

### 2.1 套管程序设计

#### 2.1.1 套管封隔点确定思路

常压地层,主要按照地层岩性特征、构造特征及钻成井工艺要求、钻井成本等方面确定各级套管的封隔点。而基于双目的层地热勘探井井身结构设计方法,则需要考虑独立成井及各自目的层位置结合地层岩性、钻井安全经济来确定封隔点位置<sup>[8-10]</sup>,因此对表层套管和技术套管的设计也提出了更高的要求。

##### 2.1.1.1 表层套管

在此次设计中,表层套管的作用是防止浅部水层受到污染和上部松散地层塌孔,与此同时也需要兼作泵室管。本井第四系地层预测厚度 200 m,初选表层套管下入深度为 200 m,同时根据区域内储层压力和开发情况,可以满足作为泵室的要求<sup>[11-13]</sup>。

##### 2.1.1.2 技术套管

一般情况,基岩面上下地层可钻性差异大,上部地层成岩性差,稳定性差,因此需要一级技术套管封隔<sup>[12-14]</sup>。由于本井预测三叠系顶板(基岩面)深度达 1200 m,同时馆陶组是勘探目的层,需要独立成井,因此选定二开技术套管封隔点 1200 m。此时二开技术套管也作为馆陶组目的层的成井管柱<sup>[13-16]</sup>。

奥陶系目的层采用先期裸眼成井方法,因此顶板以上需要套管封隔水敏不稳定地层。故三开技术套管深度 2850 m。

### 2.1.2 套管尺寸与井眼直径的选配

根据套管封隔点确定后的情况,将 WR-1 地热勘探井设计为四开钻井结构,需要下入三级套管。

地热井设计套管尺寸和井眼直径时一般考虑几点因素:表层套管兼作泵室管,直径应满足下入潜水泵要求;套管之间的间隙主要从钻井工艺要求、钻井任务要求和成本方面考虑;套管与井眼间隙应考虑地层岩性特性、井斜角、曲率等情况<sup>[1]</sup>。

实际设计过程中,无特殊情况下,通常采用“13/9/7”配合系列。具体内容即:套管尺寸(英制)依次为 13 $\frac{3}{8}$ 、9 $\frac{5}{8}$ 、7 in(1 in=25.4 mm,下同),配合的井眼直径(英制)为 17 $\frac{1}{2}$ 、12 $\frac{1}{4}$ 、8 $\frac{1}{2}$  in。

按照“13/9/7”套管系列确定本井套管尺寸与井眼直径的配合系列如下:

一开  $\varnothing$ 444.5 mm,深度 200 m,下入表层套管尺寸  $\varnothing$ 339.7 mm,深度 200 m。

二开  $\varnothing$ 311 mm,深度 1200 m,下入  $\varnothing$ 244.5 mm

技术套管(兼做成井套管),下入井段170~1200 m,与表层套管重叠30 m。

三开 $\varnothing 215.9$  mm,深度2850 m,下入 $\varnothing 177.8$  mm技术套管,下入井段1170~2850 m,与二开套管重叠30 m。

四开 $\varnothing 152.4$  mm,深度3000 m。

## 2.2 套管设计

在双目的层地热井设计过程中,由于产层复杂,在设计套管时需要通过强度校核选择符合要求且合理的壁厚和钢级<sup>[1]</sup>。

地热井一般为常压地层,不存在高压气体等,不考虑抗内压,一般工况以抗外挤为主,本井预测没有高塑性地层、岩盐地层,因此以常规工况校核外挤强度,选择合适的钢级和壁厚,然后再进行抗拉强度校核。安全系数可以参考石油钻井的相关要求。

### 2.2.1 表层套管

表层套管兼作泵室管,使用功能对性能的要求高于钻井技术的要求,一般不做校核,综合考虑泵室的抗腐蚀、使用寿命等因素,选用钢级J55、壁厚9.65 mm的石油套管。

### 2.2.2 二开技术套管

#### 2.2.2.1 通过抗外挤压力选择钢级和壁厚

一般按下套管时井内最大钻井液静液柱压力作为套管的最大的外挤载荷,套管外挤力计算公式如下<sup>[1]</sup>:

$$P_j = 0.00981 \times \rho_m H_j$$

式中: $P_j$ ——外挤压力,MPa; $\rho_m$ ——钻井液密度, $g/cm^3$ ; $H_j$ ——井深,m。

地热井极端外挤工况为空压机洗井掏空,一般按掏空700 m来计算, $\rho_m$ 取 $1.15 g/cm^3$ ,则计算出外挤压力 $P_j = 7.9$  MPa。取安全系数1.125,故套管的抗外挤压力必须大于 $P_j \times 1.125 = 8.89$  MPa<sup>[2]</sup>。几种常用的 $\varnothing 244.5$  mm地热井套管的相关性能见表2。

表2中前2种套管虽然也能满足抗挤要求且成本低,但不常用,采购困难,故选用第3种套管,其壁厚8.94 mm,J55钢级,抗挤13.9 MPa。

#### 2.2.2.2 抗拉强度校核

套管柱轴向拉力是由套管柱自重产生,套管柱自下而上轴向拉力变大,最顶端套管所承受的轴向拉力最大,计算套管最大轴向拉力<sup>[1]</sup>。

表2 几种 $\varnothing 244.5$  mm套管相关性能

Table 2 Specifications of different types of 244.5mm casing

序号	规格/ mm	钢级	壁厚/ mm	抗挤压力/ MPa	接头连接强度/ kN
1	244.5	H40	7.92	9.4	1130
2	244.5	H40	8.94	11.9	1130
3	244.5	J55	8.94	13.9	1753

$$T_z = 0.00981 \times \sum_{i=1}^n q_i l_i$$

式中: $T_z$ ——套管自重产生的轴向拉力,kN; $q_i$ ——第*i*段套管单位长度质量, $kg/m$ ; $l_i$ ——第*i*段套管长度,m。

$q_i$ 为 $53.57 kg/m$ ,段长 $l_i$ 为1030 m,计算出套管轴向拉力为 $T_{z1} = 541.3$  kN,以接箍连接强度进行抗拉校核,据规范查得接头连接强度为1753 kN,安全系数取2.0,有 $T_{z1} \times 2.0 = 1082.6$  kN < 1753 kN,抗拉强度满足要求。

### 2.2.3 三开技术套管

三开技术套管在本井钻井及利用过程中少有抗挤工况,只需校核抗拉强度。地热井施工中 $\varnothing 177.8$  mm石油套管常用以下几种类型<sup>[2]</sup>,其相关性能见表3所示。

表3 几种 $\varnothing 177.8$  mm套管相关性能

Table 3 Specifications of different types of 177.8mm casing

序号	规格/ mm	钢级	壁厚/ mm	抗挤压力/ MPa	接头连接强度/ kN
1	177.8	J55	8.05	22.5	1383
2	177.8	J55	9.19	29.8	1633
3	177.8	N80	8.05	26.4	1967
4	177.8	N80	9.19	37.3	2309

表3中第1种套管成本最低,对其进行抗拉强度校核。设计段长1680 m,套管单位质量 $34.23 kg/m$ ,安全系数取1.7。计算得 $T_{z2} = 564$  kN,接头连接强度为1383 kN,安全系数取2.0,有 $T_{z2} \times 2.0 = 1128$  kN < 1383 kN,满足抗拉要求。

三开 $\varnothing 177.8$  mm套管选择的壁厚为8.05 mm,钢级为J55。

### 2.2.4 过滤器设计

馆陶组目的层过滤器成井,  $\text{O}311\text{ mm}$  井眼下入  $\text{O}244.5\text{ mm}$  过滤器, 常规过滤器无法满足要求, 因此需要进行重新设计。

根据储层性质确定过滤器类型为缠丝笼式过滤器, 为了提高挡砂效果设计内包网结构; 骨架管尺寸需与技术套管一致; 过滤器最大外径应与井眼直径相匹配, 以能够安全下入为前提, 原则上过滤器最大外径  $\gt$  骨架管接箍外径, 参数见表4。设计过滤器最大外径  $268\text{ mm}$  (骨架管接箍外径  $269.9\text{ mm}$ )。

表4 过滤器设计参数

Table 4 Design technical parameters of the filter

组成	技术参数	材质
骨架管	外径 $244.5\text{ mm}$ ; 打孔直径 $18\text{ mm}$ ; 孔密度 $280\text{ 孔/m}$	石油套管
垫筋	高度 $6\text{ mm}$	不锈钢
内包网	目数为 $40\text{ 目}$	不锈钢
缠丝	直径 $2.5\text{ mm}$ ; 间距 $0.5\sim 0.7\text{ mm}$	不锈钢

### 2.3 固井设计

#### 2.3.1 表层套管固井

采用内管固井方法, 套管内下入内管, 封井口, 顶替水泥浆进行固井作业, 如图1所示。该方法的优点是操作简单, 顶替液浆量小, 容易准确计量。表层固井多采用  $\text{R}32.5$  普通硅酸盐水泥, 水泥浆密度  $\lt 1.70\text{ g/cm}^3$ , 水泥塞高度  $\lt 10\text{ m}$ 。

#### 2.3.2 二开技术套管固井

##### 2.3.2.1 过滤器底部“穿鞋”固井

二开馆陶组目的层过滤器成井, 技术套管兼做

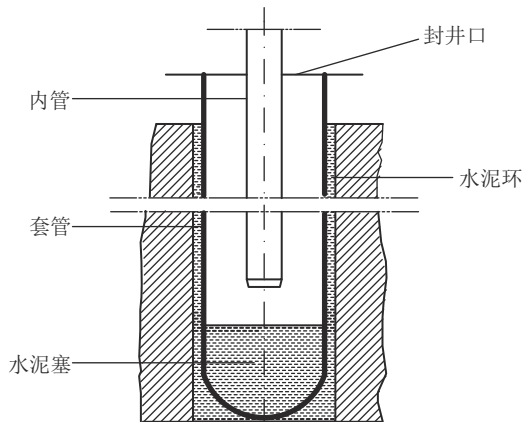


图1 表层套管固井

Fig.1 Surface casing cementing

成井管柱, 底部“穿鞋”固井目的是稳固套管, 保证三开钻井安全。采用内插管固井方法, 下管时将内插底座连接在过滤器底部预定位置, 下井到位后, 下入内插接头与底座密封连接, 这样就可以在过滤器下部进行注水泥固井作业<sup>[17]</sup>。过滤器底部固井如图2所示。

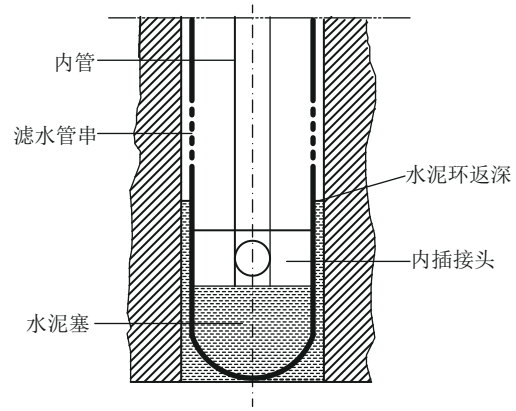


图2 过滤器底部固井

Fig.2 Cementing of the filter bottom

水泥返高不得超过过滤器底界, 避免水泥封固水层。采用  $\text{G}$  级油井水泥, 水泥浆密度  $\lt 1.80\text{ g/cm}^3$ , 水泥浆上返至过滤器下部  $50\text{ m}$ 。

##### 2.3.2.2 重叠段挤水泥固井

底部固井完成后, 与表层套管重叠部分采用挤水泥固井, 起到止水和固定套管的目的。操作步骤为下入钻杆, 封井口, 通过固井泵压裂地层挤入水泥浆封固重叠部分, 重叠段挤水泥固井如图3所示。采用  $\text{G}$  级油井水泥, 干水泥用量  $\lt 5\text{ t}$ , 水泥浆密度  $\lt 1.80\text{ g/cm}^3$ , 技术套管顶部水泥塞高度  $\lt 10\text{ m}$ 。

#### 2.3.3 三开技术套管固井

##### 2.3.3.1 底部“穿鞋”固井

钻具连入管柱送至井内, 到位后顶替循环进行“穿鞋”固井, 如图4所示。  $\text{G}$  级油井水泥, 水泥浆密度  $\lt 1.80\text{ g/cm}^3$ , 水泥浆上返高度  $\lt 400\text{ m}$ , 套管内水泥塞高度  $\lt 20\text{ m}$ 。

##### 2.3.3.2 重叠部分挤水泥固井

重叠部分挤水泥固井原理及参数同 2.3.2.2。

### 2.4 设计的井身结构

通过上述设计过程, 确定了该勘探井井身结构的全部要素, 设计的井身结构数据见表5。

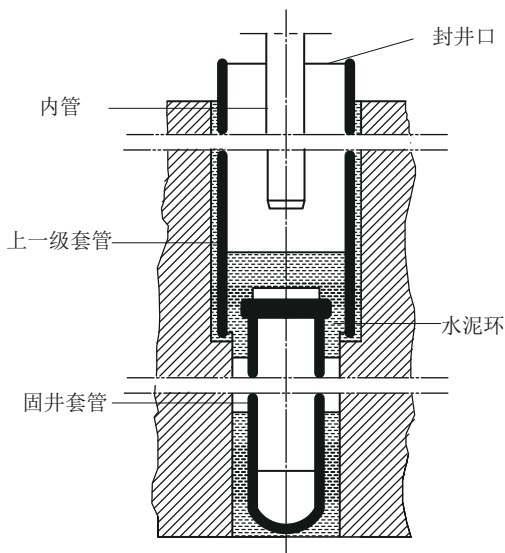


图3 重叠段挤水泥固井

Fig.3 Squeezing of cement along the overlaying casing interval

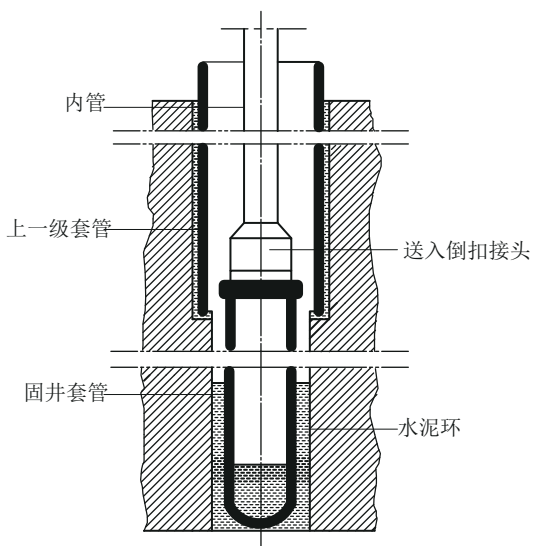


图4 底部“穿鞋”固井

Fig.4 Cementing of the casing bottom

### 3 钻井实践

河南 WR-1 地热井严格按照表 5 井身结构设计进行了施工,实际井身结构见图 5,圆满完成了各项勘探任务,井身结构的合理性和可行性得到了验证。

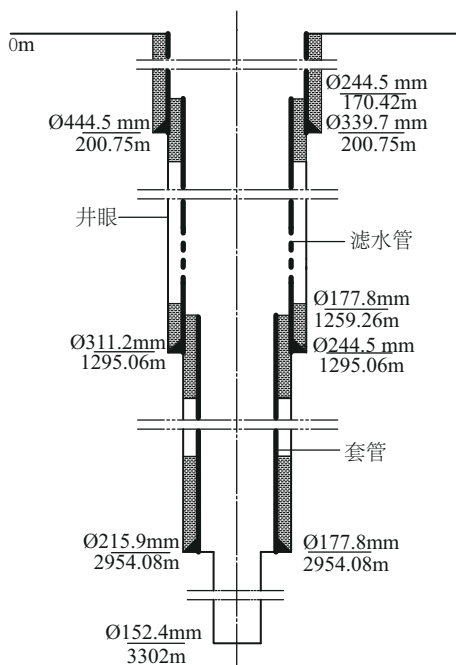


图5 河南 WR-1 井身结构

Fig.5 Structure of WR-1 well

#### 3.1 施工验证过程简介

##### 3.1.1 一开钻井施工

一开 Ø444.5 mm 钻头钻至井深 200.75 m 完钻,按设计下入 Ø339.7 mm、壁厚 9.65 mm、钢级 J55 的表层套管 200.75 m,对应井深 0~200.75 m。内管法固井,R32.5 矿渣硅酸盐水泥,干水泥用量 16 t,水泥浆密度为 1.75 g/cm<sup>3</sup>,水泥浆返至地面。

##### 3.1.2 二开钻井施工

二开 Ø311.2 mm 钻头钻进至 1150 m 钻穿馆陶

表 5 河南 WR-1 井身结构设计数据

Table 5 Casing program of WR-1 well

开次	井眼直径/mm	深度/m	套管直径/mm	壁厚/mm	下入深度/m	水泥返深/m	备注
一开	444.5	200	339.7	9.65	200	地面	
二开	311.2	1200	244.5	8.94	170~1200		过滤器成井
三开	215.9	2850	177.8	8.05	1170~2850	2450	
四开	152.4	3000			裸眼成井		

注:套管全部采用 API 石油套管, J55 钢级; 二开固井水泥返深为目的层底界以下 50 m

组,为了保证固井质量,继续加深至1295.06 m二开完钻。下入 $\varnothing 244.5$  mm、壁厚8.94 mm、钢级J55的成井管柱,长度1124.64 m,对应井深170.42~1295.06 m,其中过滤器长度80.71 m。

过滤器底部采用内插管固井,内插接头安装位置1280.68 m,过滤器底界1129.29 m,预计水泥返深1180 m,G级油井水泥5 t,水泥浆密度 $1.81 \text{ g/cm}^3$ ,套管内水泥塞20 m。上部重叠段挤水泥固井,G级油井水泥7.5 t,水泥浆密度 $1.81 \text{ g/cm}^3$ 。 $\varnothing 339.7$  mm套管内水泥塞20 m,候凝时间36 h。

馆陶组热储层测试结果,静水位50.4 m,动水位114.95 m,出水量为 $100.39 \text{ m}^3/\text{h}$ ,出水稳定流温为 $55^\circ\text{C}$ 。

### 3.1.3 三开钻井施工

三开 $\varnothing 215.9$  mm钻头钻进至井深2954.08 m完钻。下入 $\varnothing 177.8$  mm、壁厚8.05 mm、钢级J55的石油套管1694.82 m,对应井深1259.26~2954.08 m,与上一级套管重叠35.8 m。底部固井使用G级油井水泥11 t,水泥浆密度 $1.81 \text{ g/cm}^3$ 。重叠段挤水泥固井,G级油井水泥5 t,水泥浆密度 $1.80 \text{ g/cm}^3$ ,候凝48 h。

### 3.1.4 四开钻井施工

四开采用 $\varnothing 152.4$  mm钻进奥陶系目的层,至井深3302 m完钻终孔。奥陶系裸眼成井,后进行一系列洗井及产能测试,结果该储层在本井发育不理想,不具备开发价值。

## 3.2 实践效果分析

从上述施工验证过程来看,本文提出的设计方案能够满足指导实际生产的要求,但在实施过程中也出现了一些与理论不相符合的情况,针对这些情况对本设计方案也进行了一定的调整修改。

(1)井身结构设计时,对馆陶组储层测试后如何封闭有2种方案,一是注水泥封堵,二是钻进中钻井液封堵。实钻中水泥封堵难度大,采用了第二种方案。三开钻进过程中,当钻井液密度 $>1.16 \text{ g/cm}^3$ 时,馆陶组储层发生了钻井液漏失,为了钻井安全,钻井液密度严格控制在 $1.15 \text{ g/cm}^3$ 以下。但当钻进至2440 m左右时二叠系泥岩地层压力高,有坍塌掉块现象,需要加重钻井液平衡地层压力,以保持井壁稳定。处理过程中经常出现上漏下塌的复杂情况,最终采用先堵漏再逐渐加重的方案解决了问题。

(2)实钻馆陶目的层粒度很细,属于粉砂层,原

设计的过滤器内包40目铜网无法有效挡砂,常规情况下,这种地层最有效的工艺为填砾成井,由于井身结构限制而无法实现。施工中采用再外包一层60目尼龙网工艺,实现了有效挡砂<sup>[18]</sup>。

(3)二开馆陶组过滤器成井,为了提高洗井效果,实践中将化学洗井加到固井工艺中,即底部固井注水泥前,注入0.8%焦磷酸钠溶液 $20 \text{ m}^3$ ,使其与井壁泥皮充分反应,更好地发挥了化学洗井的作用。水泥候凝约72 h后,进行了空压机洗井,只用了10 h就疏通了储层,达到了预期目的。

## 4 结论

(1)本井通过合理的井身结构设计,达到了安全勘探2个目的层并兼顾独立成井测试的目的,为同井多目的层勘探提供了实践经验。

(2)二开中为了兼顾成井与继续钻进,重新设计了过滤器,实践证明完全可以达到常规过滤器的性能效果。

(3)二开底部固井是关键环节,既要保证固井过程中第一目的层不被封堵,又要使套管稳固,保证继续施工的安全。实践中采用内插法固井达到了目的,丰富了地热井固井方法,可为其它类似项目提供借鉴。

(4)同井多目的层一般用于勘探井,从节约科研资金和对比分析的角度,通过一眼勘探井对不同储层进行科学研究,是目前一些项目比较流行的做法,合理的井身结构设计是实现这一目的的关键。

## 参考文献(References):

- [1] 唐海,周开吉,陈冀嵘.石油工程设计:钻井工程设计[M].北京:石油工业出版社,2011.  
TANG Hai, Zhou Kaiji, Chen Jimei. Petroleum Engineering Design: Drilling Engineering Design [M]. Beijing: Petroleum Press, 2011.
- [2] 王胜启,高志强,秦礼曹.钻井监督技术手册[M].北京:石油工业出版社,2008.  
WANG Shengqi, GAO Zhiqiang, QIN Licao. Drilling Supervision Technical Manual [M]. Beijing: Petroleum Press, 2008.
- [3] 孙莉.隆平1井钻井设计与施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程), 2019,46(6):36-40.  
SUN Li. Drilling design and practice of Well Longping-1[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(6):36-40.
- [4] 唐志军.井身结构优化设计方法[J].西部探矿工程,2005,17

- (6):78-80.  
TANG Zhijun. Optimization design method of well structure[J]. West-China Exploration Engineering, 2005,17(6):78-80.
- [5] 刘奥,曹光福,谢建安,等.霍尔果斯背斜深井井身结构优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(2):26-29.  
LIU Ao, CAO Guangfu, XIE Jianan, et al. Casing program optimization of deep well in Horgos Anticline[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(2): 26-29.
- [6] 朱忠喜,李思豪,关志刚,等.红153井区井身结构优化设计及应用[J].钻采工艺,2018,41(6):114-117.  
ZHU Zhongxi, LI Sihao, GUAN Zhigang, et al. Optimization design and application of well body structure in Hong 153 well area [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(6): 114-117.
- [7] 潘德元,何计彬,杨涛,等.雄安牛驼镇地热田岩溶热储层地热深井井身结构优化设计[J].钻探工程,2021,48(2):78-84.  
PAN Deyuan, HE Jibin, YANG Tao, et al. Optimization design of the geothermal wellbore structure in karst reservoir[J]. Drilling Engineering, 2021,48(2):78-84.
- [8] 唐志军.川东北河坝区块井身结构的优化与实践[J].石油钻探技术,2011,39(1):73-77.  
TANG Zhijun. Casing optimization and practice at Heba Block of Northeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(1):73-77.
- [9] 刘颖彪,朱忠喜,刘彪,等.西湖1井井身结构优化设计研究[J].钻采工艺,2013,36(2):124-127.  
LIU Yingbiao, ZHU Zhongxi, LIU Biao, et al. Research on optimization design of well structure of Xihu 1 well[J]. Drilling & Production Technology, 2013,36(2):124-127.
- [10] 刘小康,田智生.页岩气井钻遇破碎地层的井身结构优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):89-91.  
LIU Xiaokang, TIAN Zhisheng. Optimal design of casing program of shale gas drilling in broken formation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(7):89-91.
- [11] 边杰,和鹏飞,侯冠中,等.渤海低渗油田定向井井身结构优化[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(1):52-56.  
BIAN Jie, HE Pengfei, HOU Guanzhong, et al. Optimization of casing program for directional wells in Bohai low permeability oilfield [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(1):52-56.
- [12] 王吉平.超深地热井设计及施工工艺[J].西部探矿工程,2015,27(11):65-68.  
WANG Jiping. Ultra-deep geothermal well design and construction process [J]. West-China Exploration Engineering, 2015,27(11):65-68.
- [13] 赵光贞.山东地区地热井钻井工艺技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(6):43-45.  
ZHAO Guangzhen. Drilling techniques of geothermal well in Shandong region [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006,33(6):43-45.
- [14] 于洪波.复杂地质条件下S形定向井的井身结构优化及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(6):28-31,35.  
YU Hongbo. Casing program optimization of S-shaped directional well in complicated geological conditions and the application [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(6):28-31,35.
- [15] 于孝民,杨春光,董国明,等.唐山市第一眼蓟县系地热井钻探及成井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(2):41-44.  
YU Xiaomin, YANG Chunguang, DONG Guoming, et al. Drilling and completion technology in the first geothermal well construction in Jixian System in Tangshan [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(2): 41-44.
- [16] 马忠平,庞海,王艳宏,等.天津地区地热钻井及成井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(12):9-11.  
MA Zhangping, PANG Hai, WANG Yanhong, et al. Geothermal well drilling and completion in Tianjin area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(12):9-11.
- [17] 周战云.井口坐封式内管法注水泥工具的研制与应用[J].石油钻探技术,2009,37(6):58-60.  
ZHOU Zhanyun. Studies and applications of inner-string cementing tools with wellhead setting [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009,37(6):58-60.
- [18] 李进安.内蒙古哈素海地热井施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):55-57.  
LI Jinan. Construction technology of Hasuhai geothermal well in Inner Mongolia [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(5):55-57.

(编辑 李艺)