

# 土耳其卡赞天然碱矿溶采对接井质量控制措施

张正元<sup>1</sup>, 涂运中<sup>1</sup>, 刘海翔<sup>1</sup>, 刘 广<sup>1</sup>, 王 万<sup>2</sup>

(1.中国地质科学院勘探技术研究所,河北 廊坊 065000; 2.辽宁省东煤地质 103 队有限责任公司,辽宁 辽阳 111000)

**摘要:**土耳其卡赞天然碱矿水溶采卤对接井施工项目技术规范中对工程质量的要求非常严格。由于矿区地质构造复杂、地层倾角大、含水层多等原因,易出现直井易斜、岩心采取率低、固井质量差,水平对接井轨迹控制难等问题。针对这些问题,在前期施工经验的基础上,通过调查研究、方案优选等手段,分别提出了针对性的措施,有效地解决了这些钻井难题,优化了钻井工艺,从而保证了施工质量,加快了施工进度。该项目钻井质量控制成果对于今后类似工程的施工具有一定的借鉴意义。

**关键词:**天然碱矿;水溶开采;水平对接井;井斜控制;固井质量;岩心采取率;土耳其卡赞碱矿

**中图分类号:**P634.7;TD87 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)08-0077-08

## Quality control measurements for solution mining with intersected well sets of Kazan Trona Mine in Turkey

ZHANG Zhengyuan<sup>1</sup>, TU Yunzhong<sup>1</sup>, LIU Haixiang<sup>1</sup>, LIU Guang<sup>1</sup>, WANG Wan<sup>2</sup>

(1.*Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;*

2. *Liaoning Northeast Coalfield Geology 103 Team Co., Ltd., Liaoyang Liaoning 111000, China*)

**Abstract:** The requirement on the quality control in the technical specifications is very strict for drilling of the solution mining intersected well sets at Kazan Trona Mine. The vertical wells were easily deviated, with low core recovery and poor cement bonding due to the complex geology, the high dip angle of the formation, and presence of several aquifers; meanwhile, for the horizontal well, it was very difficult to control the trajectory. After a thorough analysis of data obtained from previously drilled wells and a study of related issues and optimization of solutions, several measurements were put forward and applied. The results showed that all the drilling problems were effectively solved, the drilling process was improved, and the construction period was reduced. The experience acquired from the project could be used as reference for the similar works.

**Key words:** trona mine; solution mining; intersected well; deviation control of vertical well; cement bonding; core recovery; Kazan Trona Mine in Turkey

### 1 项目概况及钻井质量要求

土耳其卡赞天然碱矿位于土耳其首都安卡拉市西北 35 km 处 Incirlik 村与 Fethiye 村之间。矿区属低山地形,矿区内大部分为荒岗、荒坡,植被较少。矿区属安纳托利亚气候区,夏季炎热干燥,冬季阴冷多雨。前期勘探调查结果表明,该碱矿从上至下分布了 12 层碱矿,其中在 Bed3 矿层 10 m 等厚线以内范围内,包括相邻的 Bed4 和 Bed5 矿层,天然碱

资源蕴藏丰富,具有商业开发利用价值。碱矿业主经过充分调研,选择厚度最大的 Bed3 作为主采层,兼采相邻的具有较高品位的 Bed4 和 Bed5 碱层,利用钻井水溶法进行采矿。钻井水溶采矿法通过定向钻探施工水平对接井组,其中每个井组含 2 口垂直井和 1 口水平井,形成一个地下采矿通道。通过管线注入热水溶解地下矿藏,从另一口井返出卤水,从而实现钻井水溶开采。该方法具有节约土地、污染

**收稿日期:**2020-07-01; **修回日期:**2020-07-15 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.08.013

**基金项目:**中国地质调查局地质调查项目“土耳其卡赞-贝帕扎里天然碱矿探采方法技术合作”(编号:DD2019090602)

**作者简介:**张正元,男,汉族,1987 年生,资源勘查工程专业,主要从事定向钻探技术管理工作,河北省廊坊市金光道 77 号,529641624@qq.com。

**引用格式:**张正元,涂运中,刘海翔,等.土耳其卡赞天然碱矿溶采对接井质量控制措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):77-84.

ZHANG Zhengyuan, TU Yunzhong, LIU Haixiang, et al. Quality control measurements for solution mining with intersected well sets of Kazan Trona Mine in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8):77-84.

少、开采成本低等优点,适用于埋藏较深的水溶性矿藏,已在我国河南吴城、安棚,土耳其贝帕扎里等一系列工程中得到了成功应用<sup>[1-5]</sup>。土耳其卡赞碱矿共规划7期进行开发,中国地质科学院勘探技术研究所作为钻探项目的总承包单位,已完成了一期至三期的100余组对接井组的施工任务,并即将开始四期工程的施工。

该工程中部分垂直井为探采结合井,为取全取准地质资料,结合后期可能下入潜水泵抽取卤水的需要,同时出于提高矿藏的回采率,保证井组开采年限的考虑,项目技术规范中对垂直井和水平井的施工质量提出了很高的要求。

对于直井,每100 m井斜增加值不得超过 $0.75^\circ$ ,井底最大偏移距离必须处于以井口为圆心、半径6 m的靶圈范围内。对于水平井,根据矿层倾角的不同,允许钻井轨迹在垂直方向上处于Bed3矿层底板以上1.0~1.8 m,允许偏差 $\pm 0.5$  m;在水平方向上,允许偏离落点与第二靶点连线 $\pm 5.0$  m。在岩心采取率方面,非矿层段不得低于85%,矿层段不得低于90%,且单回次进尺不得低于85%,否则为不合格。在固井方面,通过CBL/VDL电测井检查固井质量,要求低声幅井段长度不低于井深的85%,表层套管能完全封隔深部含水层,技术套管下到Bed3顶板下0.5~1.0 m,注井时井口不得有涌水。

## 2 前期施工中出现的质量问题

由于矿区地质构造复杂,地层倾角大,断层、含水层发育等方面的原因,易出现直井自然造斜,取心质量、固井质量较差,水平对接井轨迹控制难等问题。

### 2.1 地层软硬互层多,倾角大,直井易井斜

卡赞矿区内主要有新近纪和始新世2个沉积年代的地层,其中新近系Neogene地层可分为河流碎屑岩和新近系湖相碎屑岩。始新世地层可划分为Akpınar、Sarıkaya、Fethiye、Asmalidere与İncirlik地层。天然碱矿矿体赋存于始新统下层的İncirlik地层中,平均埋深600~700 m。表1所示为V140-1A井岩性描述,从中可看出,深度0~250 m范围内,存在大量的粘土岩、泥岩与硬质泥灰岩互层,Fethiye地层以硬质泥灰岩为主,Asmalidere地层则为较软的棕色白云质泥岩为主,目的层所在的In-

cirlik地层则为白云质泥岩、油页岩与碱的不等厚互层。此外,矿区矿层的三维地质模型表明,矿层普遍具有较大倾角,其中Bed3碱层底板等高线图显示,其平均地层倾角达到 $10^\circ\sim 16^\circ$ 。

表1 卡赞碱矿V140-1A井岩性描述  
Table 1 Lithological description of Borehole V140-1A at Kazan Trona Mine

地层	深度/ m	层厚/ m	岩性描述
Neogene	0~113	113	黄棕色泥岩,绿色泥灰岩,棕绿色粘土岩与泥岩互层
Akpınar	113~230	117	淡绿、棕绿色粘土岩与泥岩互层,底部含少量泥灰岩
Sarıkaya	230~257	27	浅灰、棕灰色粘土岩与泥岩互层
Fethiye	257~425	168	深绿、绿、棕绿色泥灰岩
Asmalidere	425~510	85	棕色白云质泥岩,底部为碎屑岩楔
İncirlik	510~		上部棕色白云质泥岩、深棕色黑色油页岩互层,下部白云质泥岩、油页岩、碱互层和Bed10、Y、X、3、2、1等碱层

钻遇地层频繁的软硬交错和较大的地层倾角使地层具有较强的自然致斜特性。如图1所示为一期工程4口垂直井一开完钻时通过电测井获得的井斜数据,从中可看出,从开孔到150 m区间,井斜均保持在 $1^\circ$ 以内,而从150 m开始,井斜角有迅速增大的趋势。对于一开深度为350 m左右的V044B和V053-1B井,井斜角达到 $4^\circ\sim 5^\circ$ ,而当一开设计深度为450 m左右时,井斜角高达 $5^\circ$ 以上。若不采取防斜、纠斜措施,当二开结束时,井底偏移距离将达到25~30 m。而根据卡赞碱矿项目技术规范要求,每100 m井斜增加值不得超过 $0.75^\circ$ ,井底最大偏移距离必须处于以井口为圆心、半径6 m的靶圈范围内。如井斜超标时,业主要求必须用水泥封孔,候凝后分支重钻。据统计,因施工经验不足,未采取防

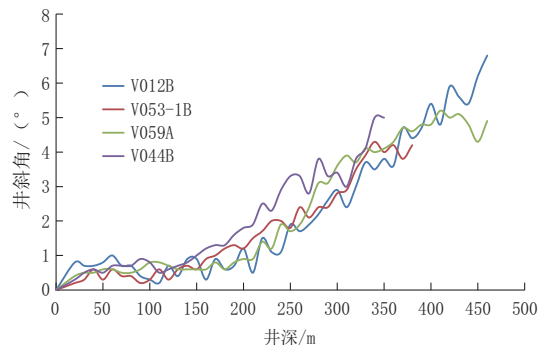


图1 一期工程4口直井一开井斜数据  
Fig.1 Inclination data of the first sections of 4 vertical wells on Phase I Project

斜措施和盲目抢工期等原因,一期项目前期共出现 5 井次因井斜超标导致填井侧钻。为避免这种情况的发生,在一开施工过程中,需要频繁起钻测井斜。若发现井斜有偏大趋势时,必须下入带弯螺杆的纠斜钻具进行定向纠斜作业。纠斜完成后,再下入一开口径钻头带 MWD 仪器和弯螺杆进行扩孔,并进行反复划眼修复井壁,控制“狗腿”度大小。

综上所述,矿区地层较强的自然致斜特性极大增加了钻井、测井和定向人员的工作量,影响了钻井周期。当出现井斜超标时,填井侧钻还会增加材料损耗。

## 2.2 取心作业时间长,岩心采取率低

施工技术规范要求,直井二开钻进时,先使用  $\text{O}215.9\text{ mm}$  钻头钻进至第一个碱层以上约 10 m 处,起钻换取心钻具进行取心作业。取心钻头外径为 140 mm,内径 118 mm。在项目初期,所有钻机均使用双管双动取心管、通过停泵不停转烧结方式提断岩心的取心工艺。此工艺要求司钻具有非常丰富的操作经验,能精确控制钻压及烧结时间。若钻压控制不当时或烧结时间不足时易出现丢心,加之矿区断层、裂缝等地质构造较发育,岩心完整性差(见图 2),导致岩心采取率不达标。而当钻头因烧结过度导致损坏时,则会影响岩心出心操作,有时需要数小时才能取出岩心,且会造成部分岩心损坏。因天然碱具有较好的溶解度,当取心钻进速度较慢时,岩心在泥浆中浸泡时间过长,导致缩径,也会增加丢心的风险。



图 2 直井岩心样品

Fig.2 Core samples obtained from a vertical well

在一期项目施工中,为加快施工进度,经与业主商议,在同一个井组的 2 口直井中,如果其中一口井的取心质量达标,另外一口井可不取心直接钻进。然而,由于取心质量难以保证,项目前期多数井组不

得不在 2 口井都进行取心作业。根据施工统计,一期工程平均取心长度 95.70 m,而工程前期施工的 18 口井,平均取心钻井时间为 11.7 d,其中 V022B 井取心时间长达 27.0 d,平均岩心采取率 87.50%。

## 2.3 地下含水层发育,地层强度低、断层多,固井质量差

通过收集矿区的水文地质资料,结合钻井过程中进行的简易水文观测数据可知,在矿区从表层到 Incirlik 地层上部,分别分布有 3 个独立的地下含水层,包括浅层弱含水层、中部含水层、深部含水层,分布深度为 100~500 m。矿区所有直井均为二开制,其中一开井径为 311.2 mm,钻进至深部含水层以下 35~30 m,然后下入  $\text{O}244.5\text{ mm}$  套管固井以封隔含水层。二开井径为 215.9 mm,钻进至 Bed3 层以下 15 m 完钻,下  $\text{O}139.7\text{ mm}$  套管至 Bed3 层顶板下 0.5~1.0 m 处固井。根据合同要求,表层套管和技术套管固井时均要求水泥浆返至地表,且水泥浆密度  $\leq 1.80\text{ g/cm}^3$ 。然而,在一期工程前期实际固井过程中,因为含水层的影响,以及 Incirlik 地层中断层发育,且碱层强度低等原因,地层漏失、水泥浆被水层污染等情况非常普遍,声幅和变密度测井资料显示第一和第二交界面固井质量均不理想,因井漏水泥浆无法返至地表,或仅有少量薄浆返出,固井质量达不到合同要求。固井质量与井组的使用年限直接相关,必须采取有效措施解决固井质量差的问题。

## 2.4 矿层品位低、倾角大,地质构造多,水平井轨迹控制难

通过前期勘探和三维地震勘探,前人对矿区的地质构造进行了研究。研究发现,矿区所在的卡赞盆地褶皱结构非常发育,2 个沿 NE-SW 方向延伸的主背斜结构把整个盆地分为东、西 2 个部分,在新近系地层发育的  $\text{N}40^\circ\text{--}45^\circ\text{E}$  方向的褶皱也在这一区域普遍发育。在始新统和中新统地层中普遍发育单斜构造,在盆地两侧边缘的侧翼均有发现。在矿区范围内有 40 多条褶皱,其中大多数相互平行,主要为 NE-SW 走向,其长度从数百米到数千米不等。断层也是卡赞盆地一种非常常见的地质构造,存在几个逆走滑断层和正断层,有 NE-SW 方向,也有 NW-SE 方向。在始新统和新近系地层中还普遍发育断裂构造,一般成对出现,走向为  $\text{N}45^\circ\text{--}50^\circ\text{W}$  和  $\text{N}60^\circ\text{--}66^\circ\text{E}$ <sup>[6-7]</sup>。前期勘探资料显示,矿

区 Bed3 矿层 10 m 等厚线范围内碱层平均厚度为 17.04 m, 平均品位仅为 37.08%。Bed3 碱层从上到下, 可划分为 C、B、A 3 个亚层, 每个亚层之间均为不可溶的油页岩与泥岩的不等厚互层, 每个碱层内部也含有大量杂质, 如果井眼轨迹控制不当, 在采卤生产时易发生堵井, 导致生产中断甚至是井组报废。

本工程主要有 A、B 两种类型的“1 水平+2 垂直”溶采对接井组, 如图 3 所示<sup>[8]</sup>。其中 A 型井组适用于 2 口垂直井距离 < 150 m 的情况, 水平井三开落平点即为与第一口靶井连通点, 在连通 2 口直井后, 在水平井二开与三开的变径处下入水泥塞进行固井, 水泥浆返浆至水平井表层套管内, 水平井仅起连通作用。B 型井组适用于 2 口垂直井距离 > 150 m 的情况, 水平井在进入矿层底部时落平, 下入技术套管进行固井, 候凝完成后再次依次连通 2 口靶井, B 型井组的水平井成为注采通道的一部分。

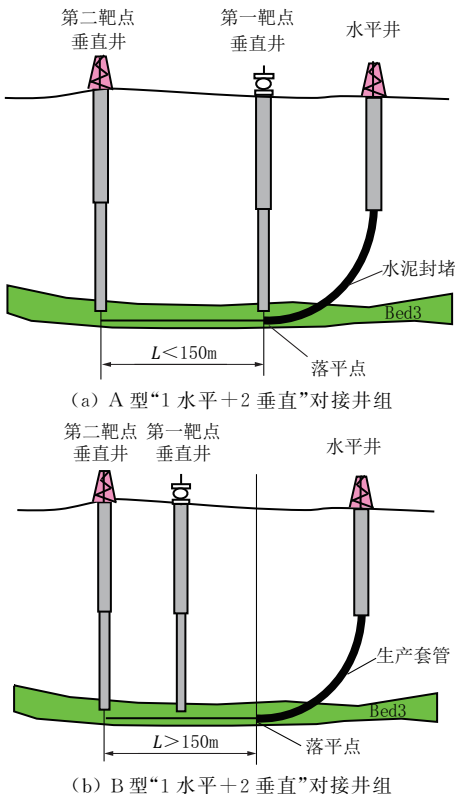


图 3 溶采对接井组示意

Fig. 3 Schematic of solution mining intersected well sets

如前所述, 矿区 Bed3 矿层倾角大, 加之地质构造的高度发育, 给矿区的布井造成了很大的困难, 也加大了矿层顶底板预测的难度, 这对水平井的井位轨迹控制提出了更高要求。根据天然碱溶采溶腔发

育特征的研究可知, 碱层在不同方向上具有不同的溶解速度, 一般来说, 上溶速度最快, 侧溶次之, 下溶速度最慢<sup>[9-12]</sup>。为提高矿藏回采率, 水平井水平段轨迹应始终处于 Bed3 矿层内, 并尽量靠近 Bed3 底板, 即 Bed3 层底部。表 2 所示为项目工程技术规范中对水平段轨迹在垂直和水平方面的偏移量要求。根据矿层倾角的不同, 允许井眼轨迹高出 Bed3 矿层底板距离为 1.0~1.8 m, 而在水平方向上偏移距离则要求控制在落平点与第二靶井连线的 5.0 m 范围内, 对定向工程师的井眼轨迹控制水平要求极高。

表 2 水平井水平段轨迹控制要求

Table 2 Requirements on trajectory control for the horizontal section of the horizontal well

矿层倾角/ (°)	允许由 Bed3 底板 抬高距离/m	允许水平方向 偏移距离/m
6	1.0	± 5.0
8	1.2	± 5.0
10	1.4	± 5.0
12	1.6	± 5.0
14	1.8	± 5.0

### 3 施工质量控制措施

针对上述出现的问题, 在前期施工经验的基础上, 通过调查研究、方案优选等手段, 分别提出了针对性的措施, 有效解决了这些钻井难题, 优化了钻井工艺, 从而保证了施工质量。

#### 3.1 直井防斜、纠斜措施

##### 3.1.1 优化钻具组合及钻进参数

在一期工程前期施工时, 一开钻进时钻具组合为  $\varnothing 311.2$  mm 牙轮钻头 +  $\varnothing 158.8$  mm 钻铤 × 4 根 +  $\varnothing 88.9$  mm 钻杆 + 主动钻杆。钻压为 30~40 kN, 转速为 110~120 r/min。经研究, 本着“塔式钻具结构, 轻压吊打, 先成孔, 后扩孔”的原则, 将钻具组合调整为  $\varnothing 215.9$  mm PDC 钻头 +  $\varnothing 177.8$  mm 钻铤 × 2 根 +  $\varnothing 158.8$  mm 钻铤 × 4 根 +  $\varnothing 88.9$  mm 钻杆 + 主动钻杆, 井底增加 2 根  $\varnothing 177.8$  mm 钻铤, 可提高钻具刚性。钻压控制在 10~20 kN, 特别注意在软硬地层交错段, 不可因钻速较低盲目加压。适当提高转速至 130~140 r/min, 成孔后再更换为  $\varnothing 311.2$  mm 牙轮钻头扩孔。经过多口井的试验, 当一开为 400 m 左右时, 井底井斜能控制在  $2.5^\circ$  以内, 降斜效果明显, 这样避免在一开井段就进行纠

斜,从而缩短了钻井周期,有效减少了电测井和定向钻进工作量。

### 3.1.2 适度反向过量纠斜

由于矿区地层倾角大,自然造斜严重,必须依靠纠斜定向钻进才能进入技术规范要求的靶区范围内。在一开固井候凝完成后,首先下钻扫塞,测一开固井质量,然后根据一开测斜结果,下入纠斜钻具组合进行纠斜,直到取心深度。纠斜应控制“狗腿”度,避免因“狗腿”度过大影响下套管、固井等后续作业。纠斜施工时应考虑地层的自然致斜特性,适度反向过量纠斜。这样在取心作业时,井眼会自然向 6 m 靶圈内偏斜,保证井底偏移量满足技术规范要求。而对于不需要进行取心的直井,则可直接纠斜到二开结束。

### 3.1.3 适当调整施工坐标

在一期工程施工一段时间后,对已完钻井的井斜数据进行了统计分析。结果发现,在未进行纠斜钻进时,大多数直井的一开井底方位落在  $270^{\circ} \sim 320^{\circ}$  的区间范围内,如图 4 所示。这一方向与地层的倾向相反,即钻头具有向垂直于地层倾向偏移的趋势。掌握此规律后,提前与负责准备井场的业主方沟通,在布置井场时,可根据现场地形条件和设计钻井深度,将井口设置在原设计靶点  $90^{\circ} \sim 140^{\circ}$  方位上,这样在钻进施工时,钻孔会自然向设计的靶点位置偏移,从而减少或省去纠斜钻进作业。

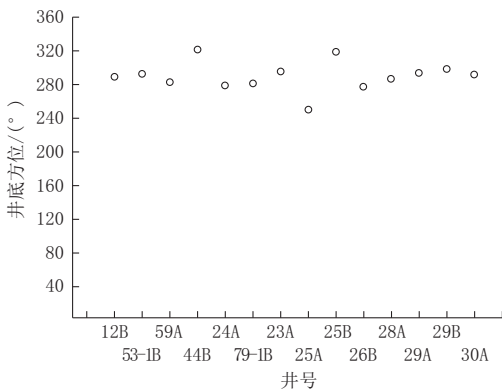


图 4 部分直井一开井底方位统计

Fig.4 Statistics of the first section wells bottom azimuths

例如在业主准备 V032-2B 井井场时,项目部提前介入与业主进行沟通,把原设计施工坐标  $E=458425.301\text{ m}$ ,  $N=4440883.165\text{ m}$ , 调整为实际施工坐标  $E=458435.958\text{ m}$ ,  $N=4440867.647\text{ m}$ 。坐标之间的相对位移为  $18.82\text{ m}$ , 相对方位为

$325.52^{\circ}$ 。施工时按优化后的钻井参数和钻具组合进行钻进,二开钻进结束时测得闭合距为  $1.02\text{ m}$ , 闭合方位为  $176.08^{\circ}$ ,如图 5 所示。这样,在未进行纠斜作业的情况下很好地控制了井斜角和井底偏移量,从而保证了施工质量,并有效节省了工作量,节约了施工周期。

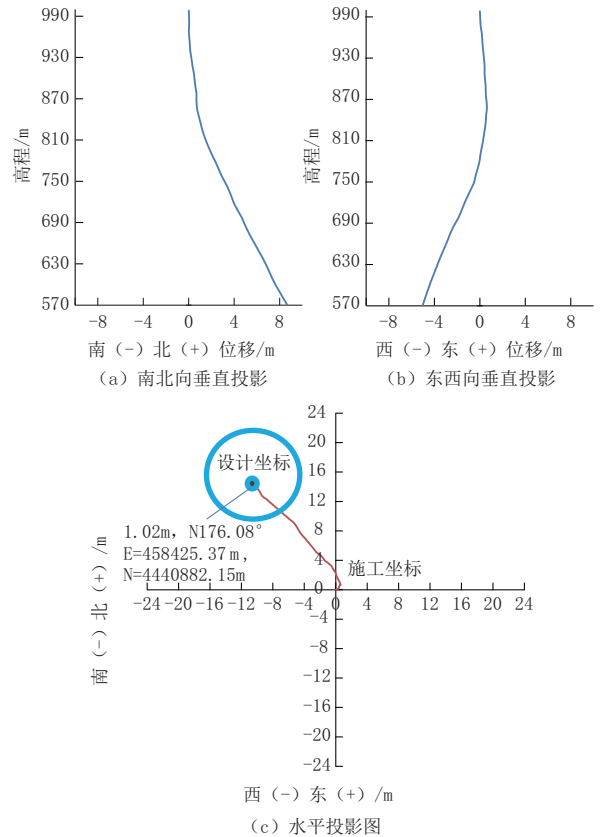


图 5 V032-2B 井垂直和水平投影

Fig.5 Vertical and horizontal projection of the V032-2B well trajectory

## 3.2 提高取心质量措施

在提高取心质量方面,一般有 2 种方案。一是改用绳索取心工艺,二是采用双管单动取心钻具。由于现场配套钻机钻具、钻井结构、岩心直径、岩心采取率等原因,现有的绳索取心钻具及配套取心器无法满足现场使用要求。因此,项目组决定采用双管单动取心器。该取心器具有结构简单、组装和拆卸方便的优点,在取心时只需直接提拉钻具即可切断岩心,操作简单且取心效果好,取心钻头、接头和取心管长度均可根据现场情况进行加工调配。此外,为防止岩心缩径,在钻进至碱层前,在泥浆中加入适量的碳酸钠粉末,抑制岩心的溶解和井眼的扩径。限定单回次取心钻进时间,当钻速较慢时,要求

司钻提前起钻检查钻头、钻具,避免岩心长时间浸泡在泥浆中。特别是在地层较破碎时,适当提前割心起钻。在矿层取心时,按照设计确定的矿层顶底板数据,调整单回次进尺,尽量使除 Bed3 外的完整碱层岩心在同一个回次中取出。

在采取这一系列措施后,岩心采取率显著提高,且平均单回次进尺也明显增加,通过取心能确定各碱层顶底板的位置。表 3 为采用改进措施后的 V051-2A 井取心数据,从中可看出,经过改进后,单回次进尺大大增加,总取心回次数显著降低,且平均岩心采取率达到 98% 以上。在总取心长度不变的情况下,取心周期由前期的 11.7 d 缩短至 3.5 d。因取心质量的提高,每个井组均只有 1 口直井需要进行取心,进一步节省了钻井工作量,缩短了钻井周期。

表 3 V051-2A 井取心数据  
Table 3 Coring data of V051-2A

回次	取心区间/ m	取心长 度/m	岩心采 取率/%	岩心描述
1	520.36~527.16	6.30	92.65	Bed9(525.77~527.16)
2	527.16~534.66	7.55	100.67	Bed8(532.40~)
3	534.66~542.38	7.34	97.80	Bed8(~538.05), Bed7(542.06~)
4	542.38~549.72	7.02	100.00	Bed7(~545.50)
5	549.72~556.74	7.10	100.00	Bed6(552.42~554.43)
6	556.74~563.84	7.57	100.00	Bed5(562.37~)
7	563.84~571.56	7.32	98.06	Bed4(571.56~572.50), Bed3(574.94~)
8	571.56~578.88	7.73	100.00	Bed3
9	578.88~586.49	6.32	101.58	Bed3
10	586.49~592.89	7.45	98.75	Bed3
11	592.89~600.21	7.45	101.78	Bed 3(~597.41)
12	600.21~607.92	7.71	100.00	白云质泥岩,油页岩
13	607.92~612.95	4.95	98.41	白云质泥岩,油页岩

### 3.3 提高固井质量措施

针对固井质量存在的问题,开展了一系列调查研究,首先对固井用水、水泥等材料进行了化验,对固井工艺流程进行了梳理,最终排除了固井材料的问题,确认了导致固井质量差的原因主要是地质因素,参考国内外类似工程固井技术的基础上<sup>[13-15]</sup>,结合现场实际条件,从固井工艺、材料使用等方面进行了多次尝试。

#### 3.3.1 固井前井眼准备

在固井作业开始前,对井眼进行清洗,清除井壁泥皮。特别是对于一开井段,完钻后下入通井钻具

通井。固井前,先注入清水,并进行 2 个循环以上,直到返出地面的液体变清为止,防止大量泥皮附着在井壁上影响水泥胶结。

#### 3.3.2 变水泥浆密度固井工艺

针对薄弱地层,特别是在钻井工程中井漏较严重的地层,在固井前打水泥浆堵漏。在固井开始时,控制水泥浆密度在 1.70 g/cm<sup>3</sup> 左右,然后逐步提高,保证顶替的后半段水泥浆密度达到 1.85 g/cm<sup>3</sup>。为防止憋漏薄弱地层,控制替浆速度在 0.5 m<sup>3</sup>/min 左右。

#### 3.3.3 使用水泥伞等附件

固井工艺中对套管扶正器的使用进行了严格要求,以确保套管居中。0~200 m 井段每 3 根套管下 1 只扶正器,200~400 m 之间每 2 根套管下 1 只扶正器,400 m 以深段每根套管下入 1 只扶正器。使用了双胶塞水泥头,安装了浮箍浮鞋,有效控制了水泥浆的混浆。为保证套管鞋底部段有较好的固井质量,还尝试使用了水泥伞等工具,确保浮箍浮鞋处有足够的水泥浆。

经过一系列措施后,经 CBL/VDL 测井确认,固井质量有明显提高,基本上未出现注井时套管环空漏水的情况。

### 3.4 水平井施工轨迹控制措施

#### 3.4.1 地质模型不断更新

准确的矿层分布地质模型是进行水平井轨迹设计和控制的前提。收集了大量前期勘探井资料,建立了初步的地质模型。在分析垂直井中岩心样品和电测井数据的基础上,及时对模型进行更新,获得更准确的矿层分布数据,利用最小曲率半径法推测出周围矿层的赋存情况,从而在最大程度上准确地预测钻进方向,避免重复分支作业。

#### 3.4.2 随钻伽马的使用

为满足技术规范对井眼轨迹的严格要求,在前期工程积累经验的基础上,创新性的提出了在 MWD 仪器中增加伽马探管,从而对井底的自然伽马数据进行随钻监测并进行记录,伽马数据表作为技术资料的一部分放入该井的完井报告中。具体做法是当钻进至 Bed5 碱层时,起钻加伽马探管,每钻进 0.5 m 记录一次自然伽马数据,并与靶井的电测井数据进行对比,判断井底所处的位置,为现场的决策提供参考。当伽马数据异常升高时,说明井眼轨迹有出矿层的危险,需要立即进行调整。在使用随

钻伽马后,水平井施工轨迹控制水平明显提高,除井底有断层等地质构造造成碱层底板出现不规则变化外,基本上未出现因穿矿层底板导致分支侧钻的情况。

### 3.4.3 地质录井

当水平井井眼轨迹延伸方向上出现断层等地质结构时,矿层底板会有较大的抬升或下降。因伽马探管的位置处于钻头后方约 10 m 处,此时随钻伽马数据并不能及时反映出地层变化。例如,若矿层底板出现抬升时,当钻头已经出 Bed3 底板数米时,随钻伽马仍处于碱层内,所显示的数值仍然是碱层的伽马数值,而当发现伽马数值异常升高时,钻头已经进入底板 10 m 以上。若此时抬高施工轨迹,至少需要十几米甚至几十米才能返回碱层内,水平井的遇矿率不满足技术规范要求,井组投产后会因采矿通道内不溶物质过多影响卤水浓度的提升和增加堵井的风险。针对这一问题,在三开阶段 24 h 观察岩粉上返情况,如岩粉中含有白质泥岩,则钻进轨迹已经进入底板,应立即调整工具面,抬高钻井轨迹。

### 3.4.4 “慧磁”导向中靶系统的应用

“慧磁”导向中靶系统是专门为对接井中靶作业研发的磁测量系统,系统由安装在钻头处的磁接头、提前下入靶井的探棒和地面机组组成。当水平井钻进到“慧磁”测量范围内时,起钻下入磁接头。开泵后,磁接头随钻头的转动产生一个旋转的磁场,探棒处接收到的磁信号通过电缆传送到地面机,通过解析信号,能够得到钻头与靶井的空间位置关系,从而为及时调整造斜钻具工具面、优化钻井轨迹提供重要依据。经过不断改进,该系统具备测量精度高、信号传输距离远(>70 m)等优点,有效克服了传统 MWD 随钻测量系统测量精度的不足,避免了对靶井提前建腔扩大目标的依赖,成为控制井眼轨迹、顺利进行中靶作业的利器。

### 3.4.5 井眼轨迹控制效果

图 6 为 H093-1 井的随钻伽马测井曲线,从中可看出在水平井钻进至落平点后直到连通第二靶点前,伽马数值始终处于 25~35 之间,与两靶井的伽马电测曲线在 Bed3 碱层处的数值相当,说明水平井段保持在 Bed3 碱层内。从图 7 可看出井眼轨迹处于落平点与第二靶点连线左右两侧 5 m 范围内,从图 8 可看出实钻井眼轨迹与设计轨迹具有很好的

一致性,说明井眼轨迹控制完全满足工程技术规范要求。

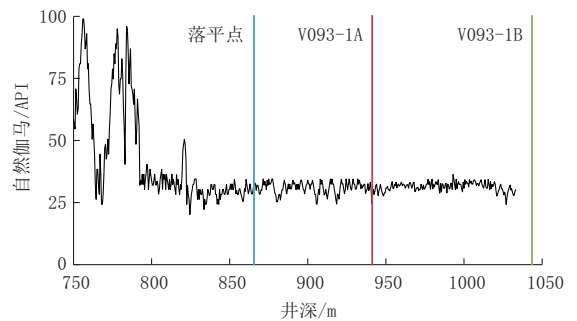


图 6 H093-1 井随钻伽马测井数据

Fig.6 Gamma logging curve of H093-1

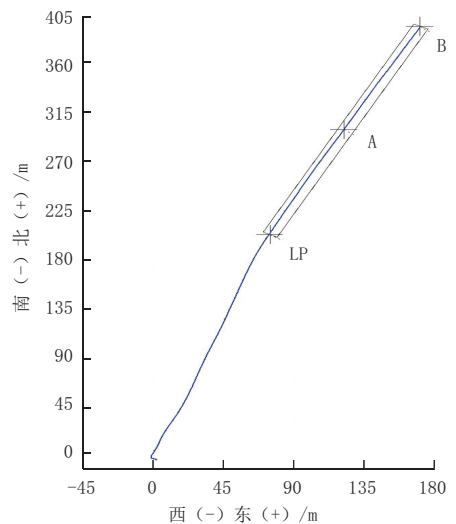


图 7 H093-1 井水平投影

Fig.7 Horizontal projection of the H093-1 trajectory

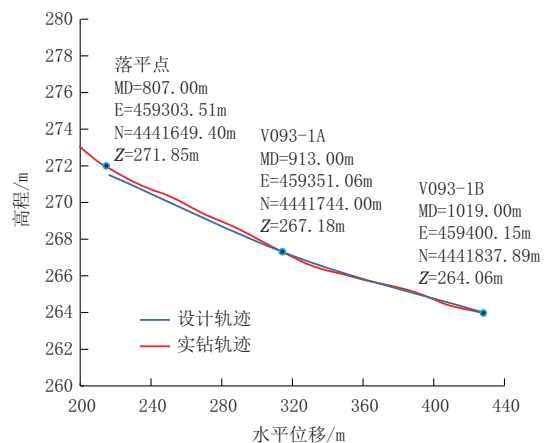


图 8 H093-1 井垂直投影(部分)

Fig.8 Partial vertical projection of the H093-1 trajectory

## 4 结论与展望

(1)通过优化钻具组合和钻进参数,适度反向过量纠斜,提前调整施工坐标等方式,有效控制了直井

井斜,减小了纠斜工作量。

(2)通过优化取心钻具,调整碱层钻进时的泥浆,优化取心工艺等方式,有效提高了取心质量,节约了取心钻进时间。

(3)通过固井前清理井眼,固井时改变水泥浆密度,使用固井附件等措施,有效提高了固井质量;针对强度较低地层,可在固井前进行承压堵漏作业,提高地层强度。后续区块可能出现地下含水层或溶腔紊乱造成的井漏问题,可考虑采用空间网架堵漏材料进行封堵。此外,还可引入低密度水泥浆体系,以确保低强度地层具有足够的水泥浆返高。

(4)通过不断更新地质模型,观察随钻伽马数据和地质录井及采用“慧磁”导向中靶系统等手段,有效解决了水平井轨迹控制难的问题。后续针对薄层碱矿易出矿的问题,可考虑使用方位伽马等工具,更好地预知钻头的位置,以便能更迅速地调整井眼轨迹,保证对接井组的遇矿率,延长井组使用年限。

## 参考文献(References):

- [1] 董正亮,刘加杰,王鹏,等.国内井矿盐钻井技术新进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):67-72.  
DONG Zhengliang, LIU Jiajie, WANG Peng, et al. Advances in drilling technology for borehole salt mining[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(8):67-72.
- [2] 尹邦勇,王鹏,吴城天然碱矿水平分支对接井钻井施工难点与对策[J].中国井矿盐,2019,50(1):28-32.  
YIN Bangyong, WANG Peng. Difficulties and measurements on horizontal intersected well construction of Wucheng Trona Mine[J]. China Well and Rock Salt, 2019, 50(1):28-32.
- [3] 向军文,胡汉月,刘志强.土耳其天然碱矿30对对接井钻井工程[J].中国井矿盐,2007,38(5):25-28.  
XIANG Junwen, HU Hanyue, LIU Zhiqiang. Well drilling in 30 pairs of butted wells in a trona mine in Turkey[J]. China Well and Rock Salt, 2007, 38(5):25-28.
- [4] 李鑫淼,张永勤,尹浩,等.水平对接井钻井技术在天然气水合物试采中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):13-17.  
LI Xinmiao, ZHANG Yongqin, YIN Hao, et al. The application of horizontal butted well drilling technology in the test mining of natural gas hydrate[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(8):13-17.
- [5] 刘汪威,胡汉月.三维地质建模在安棚碱矿的首次应用[J].中国井矿盐,2014,45(3):23-26.  
LIU Wangwei, HU Hanyue. First application of 3D geological modeling in Anpeng Trona Mine[J]. China Well and Rock Salt, 2014, 45(3):23-26.
- [6] M. L. Suez, V. Toprak, B. Rojay. High-altitude plio-quaternary fluvial deposits and their implication on the tilt of a horst,

Western Anatolia, Turkey[J]. Geomorphology, 2006, 74:80-99.

- [7] M. Z. Camur, C. Er, H. Yazicigil. Modeling of lithology induced chemical anomalies in the aquifer systems of the Kazan trona deposit area, Ankara, Turkey [J]. Environment Geology, 2008, 54:777-789.
- [8] 刘汪威,张正元,林修阔,等.土耳其卡赞碱矿对接井分层同时开采设计方案探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):57-63.  
LIU Wangwei, ZHANG Zhengyuan, LIN Xiukuo, et al. Design for simultaneous mining of multiple trona layers with an intersected well set at Kazan Soda Trona Mine in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(8):57-63.
- [9] 高丽,苏如海,戴鑫,等.盐井水溶开采上溶速度影响因素研究[J].中国井矿盐,2017,48(6):11-13.  
GAO Li, SU Ruhai, DAI Xin, et al. The study of main fluential elements for the up-dissolved rate of production of the salt well[J]. China Well and Rock Salt, 2017, 48(6):11-13.
- [10] 任松,唐康,易亮,等.小间距双井水溶造腔腔体扩展特性[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(11):1654-1658.  
REN Song, TANG Kang, YI Liang, et al. Properties of two-well dissolution cavity-building expansion with small well space[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(11):1654-1658.
- [11] 陈必权.浅谈水平连通卤井堵塞的原因与处理[J].中国井矿盐,2014,45(1):18-20.  
CHEN Biquan. Brief introduction on the causes of block of horizontal docking wells and the treatment[J]. China Well and Rock Salt, 2014, 45(1):18-20.
- [12] 那云宏,苏祖军,胡炜.乔后盐矿斜井溶腔形状初探[J].中国井矿盐,2014,45(6):19-20.  
NA Yunhong, SU Zujun, HU Wei. Preliminary study on salt mine inclined shaft cavity shape of Qiaohou[J]. China Well and Rock Salt, 2014, 45(6):19-20.
- [13] 王彬,刘永鹏,张胜利,等.安棚深层系固井技术研究[J].河南石油,2003,17(6):37-38.  
WANG Bin, LIU Yongpeng, ZHANG Shengli, et al. The study on deep well cementing of Anpeng Trona Mine[J]. Journal of Henan Petroleum, 2003, 17(6):37-38.
- [14] 潘广业,陈玉同,孙瑞良,等.安棚注采碱井固井技术[J].石油地质与工程,2008,22(2):104-106.  
PAN Guangye, CHEN Yutong, SUN Ruiliang, et al. Cementing techniques of trona injection and recovery well of Anpeng Trona Mine[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(2):104-106.
- [15] 文湘杰,宋艳霞,李保东,等.低密高强度水泥浆在下二门油田的应用[J].河南石油,2004,18(5):44-45.  
WEN Xiangjie, SONG Yanxia, LI Baodong, et al. The application of low density high strength cement slurry in Lower Ermen Oilfield[J]. Journal of Henan Petroleum, 2004, 18(5):44-45.