

# 方位伽马随钻测量技术在土耳其天然 碱溶采对接井中的应用

刘春生, 陈晓林, 侯岳, 刘聃, 何楠

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000)

**摘要:**随着土耳其贝帕扎里碱矿进入开采的中后期,大量钻井只能在矿区边缘地带布井施工。由于边缘处地层具有矿层薄、起伏大的特点,在进行水平对接井连通施工过程中,普通伽马随钻测量系统已无法达到碱层钻遇率的要求,诸多井组在水溶开采过程中出现不同程度的堵井,甚至报废。研制的方位伽马随钻测量系统,在现有 MWD 随钻系统的基础上,串入聚焦伽马探管,通过记录不同的窗口角度和伽马计数值,获取特定方向的自然伽马,由脉冲信号将方位伽马数据传输至地面接收机,通过对上伽马值和下伽马值的变化进行解析,可判断出钻孔是穿出矿层进入矿层顶板还是底板,能为定向工程师及时提供定向依据,重新找回矿层,保证钻遇率。在水平对接连通井水溶采矿应用过程中,除对已堵井进行修复外,新施工水平井直接采用方位伽马测量系统,能保证水平钻孔在碱层内钻进,可大大降低堵井事故的发生。

**关键词:**方位伽马;随钻测量;聚焦伽马;上伽马值;下伽马值;地质导向;钻遇率;水平井;对接井;水溶开采;天然碱矿;土耳其

**中图分类号:**P634.7;TU87 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)08-0028-07

## Application of azimuthal gamma MWD technology in trona solution mining with intersected well in Turkey

LIU Chunsheng, CHEN Xiaolin, HOU Yue, LIU Dan, HE Nan

(*Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China*)

**Abstract:** As the Beypazari Trona Mine in Turkey turns into its middle or late period of mining, plenty of well units situate at the edge of the mine area, where the trona bed is thin and its boundary is highly variable. While drilling horizontal intersected wells at this area with conventional gamma logging system, it is very difficult to ensure that the trajectory of the well to be remained at the trona layer, and the well sets were frequently blocked, or even abandoned during the process of solution mining. The newly developed azimuthal gamma LWD system, by adding focused gamma logging probe into conventional MWD instrument, is capable of recording gamma data of different window angles, to obtain gamma data of the specified orientation. The data is transferred from downhole to the receiver at the surface via mud pulse and processed. By comparing the gamma data at top and bottom direction, it can be determined that the drill bit is about to enter the ceiling or floor of the trona bed. This is an important information for the MWD engineer to adjust the tool face of directional instrument in time, to ensure the ratio of the trajectory within the trona bed. Besides its application in the workover the blocked well sets, the technology could also be applied directly into the newly constructed horizontal wells. With the utilization of this technology, the occurrence of well set blockage is dramatically decreased.

**Key words:** azimuthal gamma; measurement while drilling; focused gamma; top gamma value; bottom gamma

收稿日期:2020-07-06; 修回日期:2020-07-31 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.08.006

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:刘春生,男,汉族,1971年生,高级工程师,探矿工程专业,主要从事受控定向钻进连通井相关科研与设计工作,河北省廊坊市金光道77号,1811315849@qq.com。

引用格式:刘春生,陈晓林,侯岳,等.方位伽马随钻测量技术在土耳其天然碱溶采对接井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):28-34.

LIU Chunsheng, CHEN Xiaolin, HOU Yue, et al. Application of azimuthal gamma MWD technology in trona solution mining with intersected well in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8):28-34.

value; geo-steering; reservoir-encountered ratio; horizontal well; intersected well; solution mining; trona mine; Turkey

## 0 引言

土耳其贝帕扎里(Beypazari)天然碱矿位于安卡拉市贝帕扎里镇境内,是土耳其境内迄今为止发现的两家最大的天然碱矿之一。该矿自 2003 年开始采用对接井水溶采矿技术以来<sup>[1]</sup>,目前矿区中部已基本钻采完毕,大量钻井只能在矿区边缘地带进行布井与施工<sup>[2]</sup>。但边缘处矿层较为复杂,具有矿层薄和起伏大的特点,给对接连通钻井施工提出了严峻的挑战。若钻井在裸眼水平开采段不能完全控制在碱层内钻进,有可能造成开采过程发生不同程度的堵井,甚至直接导致该井组报废。

在以往对接井施工中,MWD 随钻测量系统加配的是常规自然伽马短节,籍此可判断钻头是否在矿层中钻进。但如果钻孔穿出矿层,仍然无法判断钻孔轨迹是进入了顶板还是底板,无法指导现场定向工程师及时调整钻孔轨迹重新钻回矿层内。为了解决该问题,配备方位伽马地质导向随钻测井系统势在必行。通过市场调研,国外进口的近钻头方位伽马地质导向测井系统结构复杂,价格昂贵,且使用和维护成本高昂,不适于在该项目中推广应用。而国内研制的地质导向测井系统尚不成熟,没有实现商业化。因此,短期内研制出一种只需具有方位伽马功能的测井系统来解决当前项目所面临的实际困难势在必行<sup>[3-8]</sup>。

结合现场实际情况,目前该项目中已有十余套国产 MWD 仪器,若能将聚焦伽马探头集成到 MWD 仪器井下串中,钻进过程中通过脉冲器将聚焦伽马所获取的数据传输至地表,即可实现低成本

的简易地质导向,可满足该项目对碱层钻遇率的严格要求。

## 1 方位伽马随钻测量技术

### 1.1 方位伽马随钻测量原理

方位伽马也称方向伽马,和普通伽马不同的是它在普通伽马传感器的探头周围增加屏蔽层,再在屏蔽层上开出一定角度的窗口,地层里的伽马射线只可通过此窗口被探测到,通过记录不同的窗口角度和伽马计数值,从而获得特定方向的自然伽马值,见图 1。

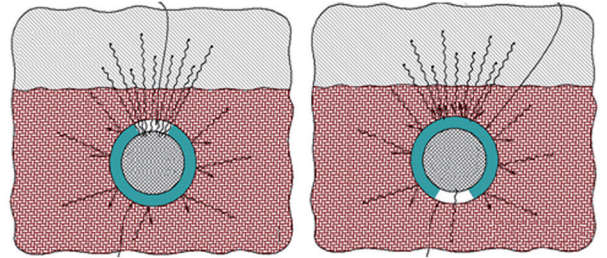


图 1 聚集方位伽马的测量特性图

Fig.1 Measurement characteristics of clustered azimuth gamma

矿区内天然碱的伽马值响应值较低,通常小于 10 API<sup>[9]</sup>,而碱层顶底板地层的伽马响应值较大,通常在 20 API 以上,最高可达 200 API<sup>[10]</sup>。通过对比上、下伽马值的变化,即可判断钻头是进入碱层顶板还是底板:当上伽马值大于下伽马值时,钻孔穿出矿层钻进矿层顶板;反之,钻孔进入矿层底板。由此可及时调整钻进工具面,将钻孔轨迹重新进入矿层内,见图 2。

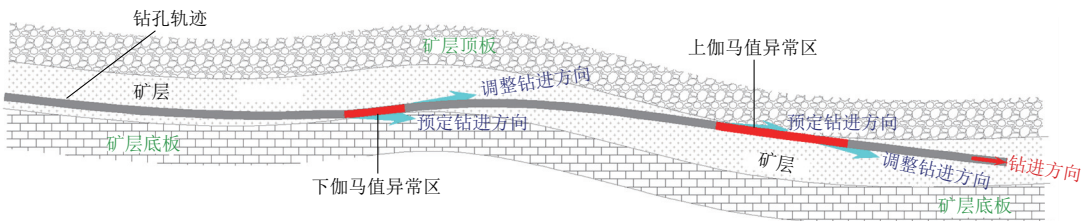


图 2 钻孔轨迹钻遇矿层顶底板示意

Fig.2 Schematic of borehole track drilling and meeting top and bottom of ore bed

### 1.2 方位伽马主要技术性能指标

随钻测斜系统 MWD 的主要性能指标见表 1,方位伽马主要技术性能指标见表 2。

相较于近钻头方位伽马测量系统,后置方位伽马所测值滞后于钻头 9~12 m<sup>[11]</sup>。若在地层倾角变化较大的区域,当方位伽马探头探测到井眼的上

表1 随钻测斜系统主要参数

Table 1 Main parameters of MWD

井斜/ (°)	方位/ (°)	工作温度/ ℃	泥浆信号强度/ PSI	探测范围/ API
±0.1	±0.5	-25~125	20~100	0~500

表2 方位伽马主要参数

Table 2 Main parameters of azimuth gamma

灵敏度/ (CPS· API <sup>-1</sup> )	精度/% (150℃)	最大 范围/ API	前后 计数比	角坐标分辨 率/(°) (8 in 井眼)	薄层分辨率 /mm (8 in 井眼)
0.65	±2	15000	2.4	75/360	223.5

伽马值和下伽马值出现差异时,钻头已进入到顶底板夹层中,即使及时调整钻孔轨迹,也只能在夹层中钻进一定距离后方能重回矿层中。钻井在矿层钻遇

率无法达到要求时,需要回撤钻具,将钻头后退至矿层内再进行侧钻分支,才能保证钻孔轨迹完全在矿层内穿行。而在地层倾角变化相对较缓的区域,当方位伽马探头探测到上、下伽马值的变化后,及时调整工具面,钻孔将紧靠矿层的边界重新回到矿层中,可避免盲目猜测钻孔穿出矿层后进入的是顶板还是底板,减少不必要的钻进工作量<sup>[12]</sup>。

### 1.3 方位伽马随钻测量系统仪器组成

方位伽马测量系统包括地面测量接收系统和井下串两大部分组成(见图3),其中地面测量接收系统由操作软件运行电脑、压力传感器、司钻显示器和专用接收机等组成,井下串部分包括脉冲发生器、方位伽马探管、MWD探管和电池筒等组成<sup>[13]</sup>。

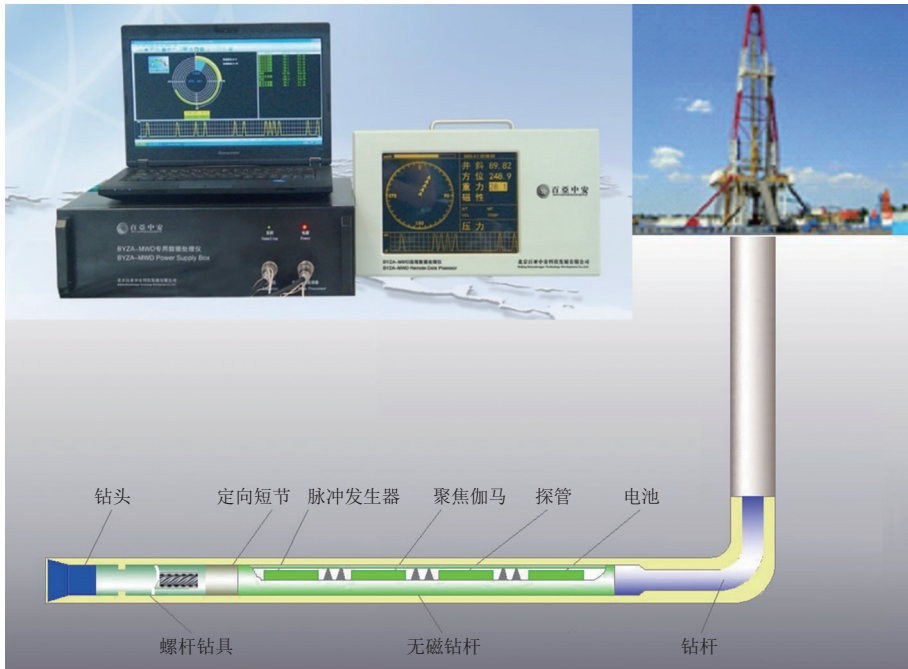


图3 方位伽马测量系统的组成

Fig.3 Composition of azimuth gamma measurement system

## 2 矿区地质概况及开发情况

该矿区碱矿层主要赋存于粘土层和含沥青页岩组成的河卡(Hirka)地层中,埋深在250~430 m之间。其围岩主要为河卡组的油页岩、粘土岩、凝灰岩及白云质石灰岩,矿体以透镜状形态产出,共有33层厚度在0.4~2 m的天然碱矿层,总厚度在矿区边缘为2.5 m,中心部位达34 m<sup>[14]</sup>。矿层在垂直方向上可分为上、下2个矿段,上部天然碱矿段展布面积8 km<sup>2</sup>,含矿段厚度40 m,其中有6个主矿层,编

号为U1~U6,矿层总厚度在8~20 m,平均总厚度约12 m;下部天然碱矿段与上矿段之间有20~25 m的含粘土岩、凝灰岩、油页岩的隔层,下矿段展布面积5.5 km<sup>2</sup>,矿段总厚度在40~60 m,共16个矿层,其中有6个主矿层,编号为L1~L6,矿层总厚度在3~15 m,平均总厚度在7~8 m,见图4。

当前,该矿区碱矿层的开发已进入第六期项目,井组主要布置在矿区边缘区域(见图5),该区域矿层厚度普遍较薄,在0.8~1.2 m之间,且矿层起伏较大。水平井施工中,钻孔轨迹极易钻出矿层,导致



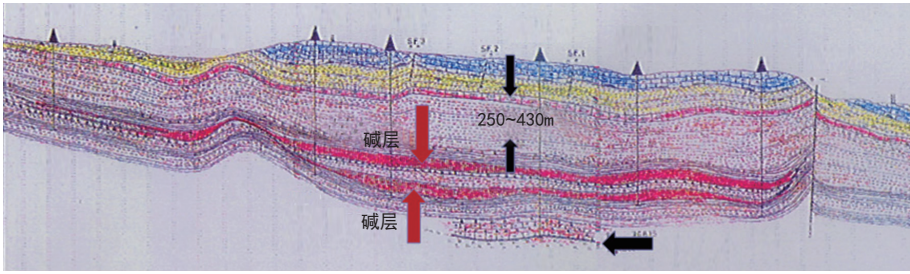


图 4 碱矿地层

Fig.4 Trona ore formation

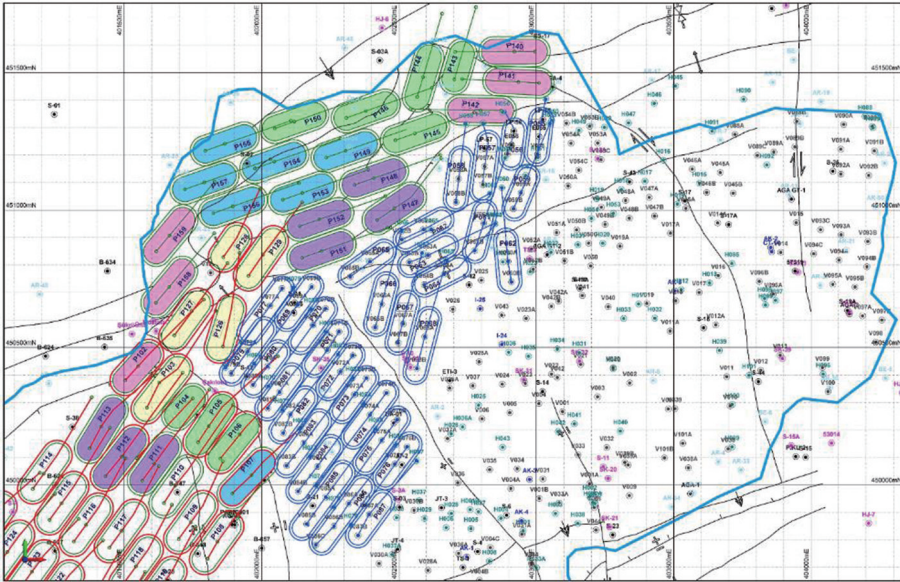


图 5 贝帕扎里矿区井组布置

Fig.5 Layout of well group in Beypazari mining area

水平开采段不能完全在碱层内,后期水溶开采时易产生堵井隐患。

方位伽马随钻测量系统在该矿区主要有 2 个方面的应用,其一是对已经完成的对接连通井组在开采初期产生的堵井事故进行修复,找出堵井孔段,并重新在碱层内钻进连通;其二是用于新施工的水平井,能确保水平开采段在碱层内钻进,可大大降低堵井事故的发生。

### 3 方位伽马地面组装测试

方位伽马井下串部分在下井前需要进行地面组装与测试工作,为此专门设计加工了一套专用的回转试验台架(见图 6),通过标定的高放源进行地面测试。每次入井前均需进行地面测试,检验方位伽马的可靠性和准确性,测试合格后方可下井进行测量<sup>[15]</sup>。

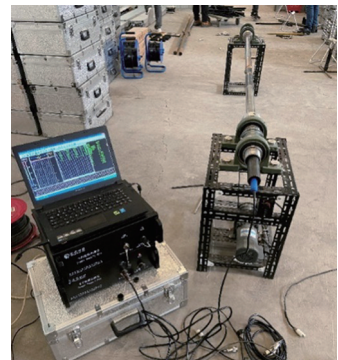


图 6 方位伽马地面测试

Fig.6 Azimuth gamma ground test

## 4 方位伽马随钻技术在 H055 井堵井事故修井中的应用

### 4.1 H055 井基本情况

水平井 H055 于 2018 年 7 月与垂直井 V055A 对接连通完井,水平钻进过程中,通过常规伽马随钻测量获得碱层钻遇率为 78%,井径为 152.4 mm。8 月份连接地面管线后开始生产,9 月 15 日开始出现注水压力异常,9 月 21 日注水压力明显升高,出卤量逐渐减少至完全不出卤水,该井组产生了堵井事故,等待修井。

### 4.2 修井施工过程

#### 4.2.1 探井,寻找堵卡点

组装方位伽马随钻测量系统,随造斜钻具组合入井,井深 296 m 处出技术套管后,进入水平裸眼开采段,采取开泵循环泥浆的措施,钻具下入至井深 381.5 m 处明显遇阻,判断该处应为第一个堵井卡点。在该卡点后约 50 m 的孔段内,原随钻普通伽马值显示偏高,原钻孔轨迹钻出矿层。

#### 4.2.2 判断矿层顶底板

在卡点处,通过方位伽马探头探测获取地层上伽马值和下伽马值,再复合钻进 4.5 m,井深 382.0~386.0 m,继续进行测点取值(见表 3),可判断钻孔轨迹是进入矿层顶板还是底板,为下一步造斜钻进提供依据。

表 3 钻孔堵井处上下伽马值

Table 3 The upper and lower gamma values at the plugged borehole

井深/m	伽马值/API										
381.5	上伽马	2.3	5.0	2.3	2.5	5.0	5.2	4.7	5.0		
	下伽马	9.2	7.0	6.2	7.5	5.7	5.3	7.8	6.8		
382	上伽马	4.3	3.0	2.9	4.2	5.6	5.9	4.3	5.0		
	下伽马	9.5	7.7	8.2	8.5	9.7	5.9	7.8	6.8		
384	上伽马	5.1	5.0	4.3	4.5	5.0	5.2	4.7	5.6		
	下伽马	9.8	10.0	8.2	7.5	9.7	6.3	7.9	8.8		
386	上伽马	6.3	5.8	7.3	7.5	5.4	6.2	6.7	5.3		
	下伽马	12.2	9.0	11.5	13.5	15.7	15.3	15.8	16.8		

该堵卡区间经过 4 个测试点的方位伽马值对比分析,其上伽马值均小于下伽马值,且随着继续往前钻进,下伽马值明显升高,说明碱层可能位于钻孔上方,原钻孔轨迹钻出碱层已进入矿层底板内。

#### 4.2.3 侧钻分支

回撤钻具至井深 364 m 处,该点经测量后钻孔完全在碱层内,且该点位置的原钻孔轨迹有利于侧钻分支。通过调整工具面,定向侧钻造斜,新井眼钻

出后将钻孔轨迹向上调整,靠近矿层中部钻进。先后在井深 396 m 和 434 m 处进行 2 次方位伽马测量,见表 4

表 4 侧钻分支中上下伽马值

Table 4 The upper and lower gamma values in sidetracking branch

井深/m	伽马值/API										
396	上伽马	3.1	5.3	4.6	2.5	5.3	4.2	4.5	5.3		
	下伽马	3.7	6.0	5.2	5.5	4.6	3.9	5.9	3.8		
434	上伽马	2.8	3.7	5.1	6.5	5.4	4.2	3.7	4.5		
	下伽马	4.2	4.0	5.5	5.5	4.7	3.3	5.8	4.8		

由此可判断出经过侧钻分支后的钻孔轨迹完全在碱矿层内钻进,实际钻进结果与测井显示结果一致。

#### 4.2.4 连通完井

侧钻分支通过堵井卡点后,钻孔轨迹调整进入到矿层中部,水平段后半段钻进过程中,参考原钻孔轨迹(原井眼的常规伽马值显示均在碱层内),按照原钻孔轨迹的垂深,平行贴近原钻孔轨迹钻进至与垂直井 V055 连通完井。该井组修复后效果良好,目前未出现堵井迹象。

## 5 方位伽马随钻技术在 H076 新开水平井施工中的应用

### 5.1 H076 井基本情况

水平井 H076 与垂直井 V076A 为一新设计连通井组,两井井距为 365 m,V076A 井技术套管下至主采层 U6 碱矿层(平均厚度 1.2 m)内,有效水平开采段长约 200 m。

### 5.2 钻进施工情况

#### 5.2.1 钻遇第一个伽马值异常点

三开扫塞后,下入方位伽马随钻测斜仪+螺杆造斜钻具组合,从技术套管管鞋处开始水平段钻进,钻进采用滑动钻进与定向造斜相结合的方式,严格按照预先设计的钻孔轨迹进行钻进,每钻进一单根进行一次伽马数据采集,在钻进至井深 525 m 时,伽马值开始出现异常,具体数据记录见表 5。

在井深 523、524、525 m 处开始进行方位伽马数据采集,判明钻孔轨迹在矿层中的位置,见表 6。

通过连续 3 m 的方位伽马值的测量,对比上、下伽马值的变化,下伽马值明显升高,说明钻孔正逐渐由矿层中向矿层底板靠近。定向工程师根据分析结果及时调整钻进工具面,将钻进方式由复合钻进

表 5 H076 井井深、垂深与伽马值对应表

Table 5 Corresponding table of well depth, vertical depth and gamma value in H076

井深/m	垂深/m	伽马值/API
438.9	429.9	2.3
448.4	439.4	3.1
458.0	449.0	2.9
467.6	458.6	4.2
477.1	468.1	3.5
486.7	477.7	5.1
496.3	487.3	4.6
505.9	496.9	3.5
515.4	506.4	4.9
525.0(1)	516.0	6.8
525.0(1)	516.0	7.1

表 6 H076A 井水平钻进中上下伽马值

Table 6 The upper and lower gamma values in H076 horizontal drilling

井深/m	伽马值/API								
523	上伽马	3.1	3.3	4.2	3.5	2.4	4.1	3.5	4.3
	下伽马	5.7	6.2	6.2	6.5	5.6	4.9	5.9	7.8
524	上伽马	4.4	5.0	4.2	2.5	4.3	4.6	3.5	5.1
	下伽马	7.7	6.3	5.2	5.8	6.6	4.9	5.8	6.8
525	上伽马	3.1	5.3	4.3	2.5	5.0	4.2	4.7	5.3
	下伽马	6.9	6.9	7.2	7.5	6.6	7.9	7.9	8.2

改为滑动钻进,全力增斜,将钻孔轨迹抬升,重新钻入矿层,并保持在矿层中部钻进,同时根据实际钻遇结果对原钻孔轨迹设计进行修改。

经过约 20 m 的定向增斜钻进,钻孔轨迹逐渐抬升,经过几组方位伽马值的对比,可确认钻孔已离开底板,见表 7。

表 7 增斜后 H076 井井深、垂深与伽马值对应表

Table 7 Corresponding table of well depth, vertical depth and gamma value in H076 after increasing hole angle

井深/m	垂深/m	上伽马值/API	下伽马值/API
529.6	520.0	4.3	8.2
534.6	525.6	4.6	9.4
539.6	530.6	4.9	9.5
544.1	535.1	5.1	11.0
549.1	540.1	5.5	10.4
553.7	449.0	5.9	10.1
563.3	554.3	4.6	8.5
572.7	563.7	3.5	6.7
582.3	573.3	4.9	5.3

据钻进过程中对方位伽马值的分析对比,已确认钻孔离开底板,按照矿层 1 m 的厚度预估,将钻孔轨迹上抬 0.5 m,并保持在这个垂深继续钻进。钻进以复合稳斜钻进为主,钻进过程中随时获取井

眼上伽马值和下伽马值数据。定向滑动钻进时,至少每钻进一个单根进行一次上伽马值和下伽马值的测量,密切关注两者的差值变化,确保钻孔轨迹始终在矿层内钻进。

### 5.2.2 钻遇第二个伽马值异常点

第一个伽马值异常点后,通过及时调整钻进方向,钻孔轨迹重新进入矿层内。在继续钻至井深 640 m 时,出现第二个伽马值异常点,仍然按照上述方法,在异常点位置进行方位伽马密集取点测量。首先应确认钻孔是穿出矿层进入底板还是顶板,再调整钻孔轨迹的钻进方向,将钻孔重新进入矿层内。

### 5.2.3 连通完井

水平井 H076 在经过 2 个方位伽马值异常点后,通过及时调整钻孔轨迹,在钻头尚未完全进入顶底板时快速将钻孔重新进入矿层内,最终与垂直井 V076A 对连通。整个水平段完全控制在 1 m 左右的碱矿层中钻进穿行,后期采卤效果良好。

## 6 结语

方位伽马随钻测量系统的开发与应用,解决了土耳其贝帕扎里碱矿区边缘区域的有效开采问题,也节省了大量因堵井导致修井和重复钻进的费用与时间,尤其是利用了该项目已有的 MWD 仪器,做到常规 MWD 随钻定向测量、普通伽马随钻测量和方位伽马随钻测量的灵活转换,既发挥着原有仪器的效率,又增加了地质导向的新功能。

但测量滞后是该方位伽马随钻系统的弱点,不能及时反应出钻头处的地层特性是与近钻头方位伽马的最大区别。建议在项目后续实施中,加强对解决近场无线通信传输的研究,将聚焦伽马探头置于钻头后方,以达到国外近钻头方位伽马等同的测量效果。

## 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 刘海翔,刘汪威,陈剑壶,等.土耳其贝帕扎里采集卤盐井三期工程井组布置的优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(11):9-11.  
LIU Haixiang, LIU Wangwei, CHEN Jianyao, et al. Design optimization of well unite layout at Beypazari Trona Solution



- Mining Project (Phase III)[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(11):9-11.
- [3] 王磊,李林,盛利民,等.煤层气方位伽马测量短节的研制[J].石油机械,2013,41(9):16-19.  
WANG Lei, LI Lin, SHENG Limin, et al. Development of CBM azimuth gamma measurement sub[J]. China Petroleum Machinery, 2013,41(9):16-19.
- [4] 贾衡天,彭浩,邓乐,等.随钻自然伽马测量系统[J].微型机与应用,2014,33(16):18-21.  
JIA Hengtian, PENG Hao, DENG Le, et al. Natural gamma measurement system while drilling[J]. Microcomputers and Applications, 2014,33(16):18-21.
- [5] 王珺,陈鹏,骆庆锋,等.随钻方位伽马测井仪器设计及试验[J].地球物理学进展,2016,31(1):476-481.  
WANG Jun, CHEN Peng, LUO Qingfeng, et al. Design and test on azimuthal gamma ray instrument of logging while drilling[J]. Progress in Geophysics, 2016,31(1):476-481.
- [6] 杨锦舟,肖红兵,张海花.随钻自然伽马刻度装置及量值传递研究[J].石油仪器,2004,18(5):24-26.  
YANG Jinzhou, XIAO Hongbing, ZHANG Haihua. Research on LWD gamma calibration device and quantity value transfer [J]. Petroleum Instruments, 2004,18(5):24-26.
- [7] 邵才瑞,曹先军,陈国兴,等.随钻伽马测井快速正演算法及地质导向应用[J].地球物理学报,2013,56(11):3932-3942.  
SHAO Cairui, CAO Xianjun, CHEN Guoxing, et al. Rapid forward algorithm for LWD gamma logging and its application in geological guidance [J]. Journal of Geophysics, 2013, 56 (11):3932-3942.
- [8] 袁超,周灿灿,张锋,等.随钻方位伽马测井探测器直径优化设计[J].石油机械,2014,42(3):1-4.  
YUAN Chao, ZHOU Cancan, ZHANG Feng, et al. Optimal design of LWD gamma logging detector diameter[J]. Petroleum Machinery, 2014,42(3):1-4.
- [9] 姚文彬,李辉,尚捷,等.随钻自然伽马测井仪研制[J].电子测量技术,2013,36(6):42-45.  
YAO Wenbin, LI Hui, SHANG Jie, et al. Development of LWD gamma ray logging instrument[J]. Electronic Measurement Technology, 2013,36(6):42-45.
- [10] 林楠,肖红兵,李勇华.影响随钻自然伽马测量精度的因素[J].录井工程,2005,16(2):38-41.  
LIN Nan, XIAO Hongbing, LI Yonghua. Factors influencing the precision of LWD natural gamma measurement[J]. Logging Engineering, 2005,16(2):38-41.
- [11] 肖红兵,马哲,李闪.随钻自然伽马井下测量仪器的研制[J].石油仪器,2002,16(2):15-17.  
XIAO Hongbing, MA Zhe, LI Shan. Development of natural gamma ray downhole measuring instrument while drilling[J]. Petroleum Instruments, 2002,16(2):15-17.
- [12] 李洪强,丁景丽,林楠,等.随钻伽马测量数据处理方法的研究及应用[J].石油钻探技术,2008,36(4):12-14.  
LI Hongqiang, DING Jingli, LIN Nan, et al. Research and application of gamma measurement data processing method while drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36 (4):12-14.
- [13] 骆庆锋,王铁永,梁羽佳,等.方位自然伽马探测器设计研究[J].石油仪器,2012,26(4):1-3.  
LUO Qingfeng, WANG Tiejong, LIANG Yujia, et al. Design of the azimuth gamma detector [J]. Petroleum Instruments, 2012,26(4):1-3.
- [14] 隆东,林修阔,王升,等.多靶点长距离水平对接连通井施工工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(9):56-60.  
LONG Dong, LIN Xiukuo, WANG Sheng, et al. Multi-target and long distance horizontal intersected wells construction technology [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(9):56-60.
- [15] 徐凤玲.一种随钻测井仪器的研制及应用[J].中国西部科技,2010,9(25):20-23.  
XU Fengling. Development and application of a logging tool while drilling [J]. Science and Technology of Western China, 2010,9 (25):20-23.

(编辑 周红军)