水平陀螺仪在天然碱定向对接井中的应用

周绍武，杨中立*，刘　聃，何　楠
（中国地质科学院勘探技术研究所，天津 300399）

摘要：磁导向在天然碱定向对接井水溶开采中是较成熟的对接方式，但当地层存在易被磁化的黄铁矿时，其在对接阶段会被磁化变成强磁体，一方面无磁钻具长时间暴露在强磁环境下，会使得隔磁效果下降，导致MWD方位测量产生偏差。另一方面，一旦在水平段磁中靶未能一次命中，磁场异常使得MWD磁方位测量完全失效，进行第二次中靶时侧钻缺少方位数据指导。使用水平陀螺仪，可以在造斜段就对无磁钻具进行测量，并与MWD方位数据进行校正，在水平段不依赖地磁场测方位，可以为后续钻进及侧钻二次中靶提供数据指导。在国内某天然碱对接井中，使用水平陀螺仪测井，在有强磁干扰环境下实现数口靶区宽度只有152 mm左右的对接井连通，证实了水平陀螺仪在该种工况下具有可行性与可靠性。

关键词：天然碱开采；水溶开采；定向对接井；黄铁矿；水平陀螺仪；MWD
中图分类号：P634.4；TD87　　**文献标识码**：B　　**文章编号**：2096-9686(2026)S1-0354-06

Application of horizontal gyroscope in trona directional intersecting wells

ZHOU Shaowu, YANG Zhongli*, LIU Dan, HE Nan
(*Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin* 300399, *China*)

Abstract: Magnetic guidance is a mature intersecting method applied in solution mining of trona via directional intersecting wells. However, when pyrite susceptible to magnetization exists in strata, the pyrite will be magnetized and turn into a strong magnetic body during the well intersection stage. On one hand, prolonged exposure of non-magnetic drill strings to strong magnetic environments degrades the magnetic shielding performance, causing azimuth errors in MWD measurement. On the other hand, if the target cannot be hit at the first attempt during magnetic target hitting in the horizontal section, magnetic anomalies will completely invalidate the magnetic azimuth measurement of MWD, and no azimuth data will be available to guide sidetracking for the second target hitting. The horizontal gyroscope can be adopted to measure non-magnetic drill strings in the deflection section and calibrate the MWD azimuth data. It determines the azimuth independent of the geomagnetic field in the horizontal section, providing data support for subsequent drilling and sidetracking for secondary target hitting. In several domestic trona intersecting wells, horizontal gyroscope logging was adopted. Well interconnection was successfully achieved for multiple intersecting wells with a target width of approximately 152 mm under strong magnetic interference. The results verify the feasibility and reliability of horizontal gyroscopes under such working conditions.

Key words: trona mining; solution mining; directional intersecting well; pyrite; horizontal gyroscope; MWD

0　引言

埋藏较深的可溶性矿产采用定向对接井水溶开采技术，具有劳动强度低、绿色环保、人工成本低的特点[1-2]，已在土耳其贝帕扎里、卡赞天然碱矿和国内的河南桐柏天然碱矿开采中大规模使用[3-5]，并在工程实践中衍生多种井组设计。如一口水平井

收稿日期：2026-07-28；**修回日期**：2026-09-04　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.S1.047
第一作者：周绍武，男，壮族，1996年生，工程师，地质工程专业，硕士，从事定向钻井相关技术工作，天津市东丽区锦鲤道23号，13240312778@163.com。
通信作者：杨中立，男，汉族，1999年生，助理工程师，地质工程专业，硕士，从事定向钻井相关技术工作，天津市东丽区锦鲤道23号，1648613702@qq.com。
引用格式：周绍武，杨中立，刘聃，等.水平陀螺仪在天然碱定向对接井中的应用[J].钻探工程，2026，53(S1)：354-359.
ZHOU Shaowu, YANG Zhongli, LIU Dan, et al. Application of horizontal gyroscope in trona directional intersecting wells[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 354-359.

建立单通道连通多口直井、一口水平井建立分支连通多口直井[6],采用较多的常规方式为一口水平井建立单通道,连通两口垂直井,先进行常规定向钻进,至接近靶点时,在钻具中增加磁接头,进入磁导向阶段,直至连通直井。当天然碱矿藏本身存在易被磁化的弱磁性黄铁矿时,其本身会产生一定的天然磁场[7-9],对MWD方位测量产生一定影响。在进入磁中靶阶段,磁接头随钻头旋转的过程中将黄铁矿完全磁化,导致地磁场异常,干扰MWD的磁方位测量,导致MWD方位失准,加大了施工难度。使用水平陀螺仪对MWD测量的方位进行校正,并在磁化地层中测量方位,可为轨迹控制提供参考。本文以国内某天然碱矿区中的几组井为例,介绍水平陀螺仪在有黄铁矿的天然碱定向对接井中的应用。

1　项目概况

矿区地处中纬度区,为内陆干旱的荒漠腹地,区内地表大多为戈壁滩,湖积物,区内大部分被第四系覆盖,为第四系风成砂、冲积、洪积砂砾层,附近有高速公路与国道,矿区内有柏油公路连通。所在矿区东西长约13 km,南北宽约2.5 km,面积约32.5 km^2,位于凹陷内。赋矿岩石为天然碱层,围岩主要为粉砂质泥岩,总体形态呈椭圆状,北东向展布,长轴长约8 km,短轴长约6.5 km,面积约52 km^2。

矿区地层为湖相沉积,湖盆中心地层厚度大,向湖盆边缘逐渐变薄。矿藏分布散,常为碱矿与泥岩互层,主要矿物为以$NaHCO_3$为主的重碳钠盐矿和以Na_2CO_3为主的倍半碱矿(图1),倍半碱矿所处地层含有大量的黄铁矿晶体和结核(图2),整体具有极大的开采价值。

图1　岩样切面及岩心

2　施工难点

使用水溶法开采,与常规水平对接井相比,该矿区井组施工存在以下难点。

图2　取心获得的黄铁矿

(1)直井未建立溶腔,对接难度高。作业方式为先建立直井,然后再打水平井,这种方式可以提高施工效率,但是由于配套的供热锅炉和地面管线建设相对滞后,因此直井无法提前建腔,对接靶区宽度只有152 mm左右,对中靶精度要求很高。

(2)黄铁矿磁化形成的强磁场会干扰MWD测量和影响无磁钻具的隔磁效果。碱矿存在许多黄铁矿,在进入对接阶段后,需要在钻头后加磁接头,磁接头在随钻头钻进的过程中会将地层黄铁矿磁化,磁化后的黄铁矿会反过来干扰MWD的测量,导致方位测量不准。而方位是参与磁中靶需要的参数,因此进入对接阶段后,工程师只能参考未加磁接头前测出的最后一个点的方位来对后续的方位进行预估算并参与磁中靶计算,因此要求工程师对螺杆造斜率和定向对接工艺十分熟悉。

使用时间较长的无磁钻具本身的隔磁能力有所下降,在强磁化环境工作一定时间会进一步影响其隔磁效果,导致其对地磁场屏蔽效果减弱,对MWD的方位测量有一定的影响。

3　施工工艺

施工分为两部分,以H001B井为例(图3),首先从H001B井依次水平连通V001A、V001B井矿层;完成连通后封住造斜段,然后取心钻进至设计深度。

黄铁矿磁化的影响主要发生在第一部分。通常A靶点至B靶点的距离在300 m左右,在无黄铁矿磁化干扰的情况下,完成A靶点的磁中靶后,可以带着强磁接头继续钻进至B靶点完成磁中靶。存在黄铁矿磁化干扰时,产生的地磁异常导致MWD磁方位测量完全失真,如果不摘除磁接头,就需要定向工程师在AB段钻进过程中进行300 m左右的

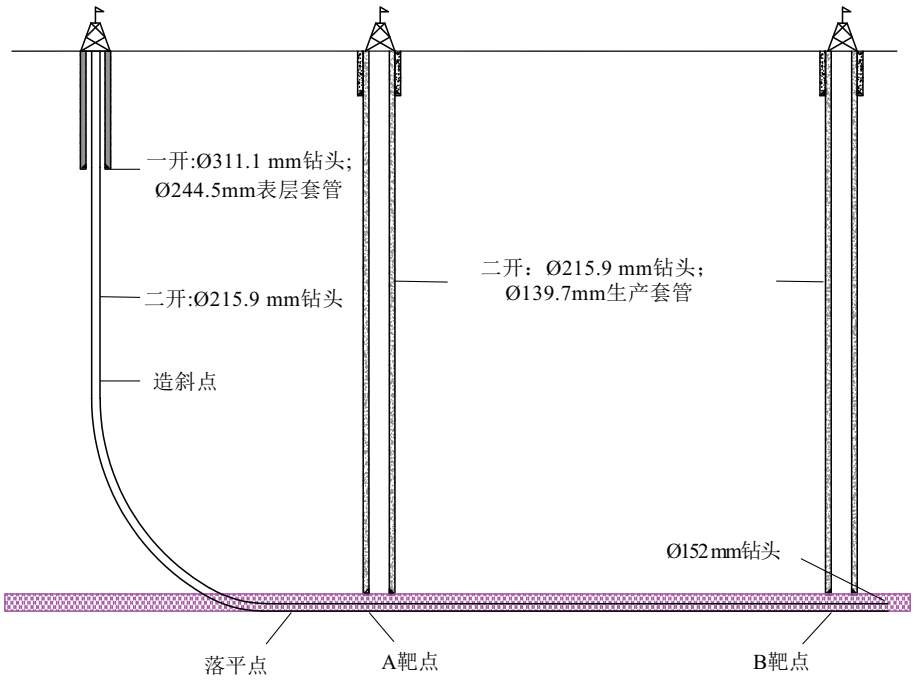

图3 H001B井身结构示意

方位预测,难度极大且不利于钻进,因此在第一部分还必须增加一次起钻,在完成A靶点磁中靶后起钻摘除强磁接头,再用常规定向钻进钻具进行AB段的钻进,在进入B靶点磁中靶范围时,再起钻增加磁接头进行磁中靶作业。

B靶点容易出现未成功中靶。一方面在A靶点的钻进过程中,无磁钻具已经长时间在强磁环境中工作,导致其隔磁效果下降,致使AB段钻进过程中,MWD磁方位测量产生一定偏差,导致在B靶点对接前最后一个磁方位与实际有偏差,从而在B靶点的中靶过程中,MWD方位始终与实际产生偏差。另一方面,螺杆钻具在水平段复合钻进的过程中,造斜能力有一定的下降,在相同钻进工艺下,方位和井斜的增减会与造斜率下降前产生偏差。两方面的因素,产生的累计误差很容易导致不能成功命中宽度152 mm左右的靶区。

在导致未中靶的两个原因中,最根本的是方位的偏差。即使螺杆的造斜能力下降了,只要知道正确的方位,可以提早发现螺杆造斜能力发生变化,从而调整每一次钻进的参数,来达到定向钻进的预期效果。

为解决这两个影响因素,增加水平陀螺仪测井作业。每次常规钻进中,在造斜段使用水平陀螺仪对MWD磁方位进行校正,解决无磁钻具在强磁环境长时间工作后隔磁能力下降,MWD磁方位测量偏差的问题;当发生未能一次中靶时,在已经发生黄铁矿磁化的水平段进行测量,获取正确的方位角,指导侧钻,进行第二次磁中靶作业。

3.1 施工过程

从水平井位打直井至设计深度,下套管固井,候凝结束后扫塞,继续钻进并取心,钻至斜点处起钻,更换钻具进行定向钻进作业,依次连通2个靶点。实现连通后进行固井作业,封住造斜段。候凝结束后,继续从水平井往下取心钻进,再进行固井、扫塞和取心作业,钻至设计取心深度后固井。完成水平井该轮次作业。

(1)第一次直井取心:Ø311.1 mm钻头一开,钻至设计深度后下套管,每2根套管加装一个扶正器。更换Ø215.9 mm钻头进行扫塞,并取心钻至造斜点。

(2)定向水平井钻进:Ø152 mm钻头进行定向水平钻进和对接,定向钻进至井斜60°左右,使用测井绞车,从钻杆中下入水平陀螺仪,进行水平陀螺仪测井作业,完成后起出水平陀螺仪。继续钻至靶点前80 m,起钻添加磁接头,进行对接中靶作业,连通靶点后起钻去掉磁接头,继续定向钻进,依次连通A、B两个靶点。

(3)封堵造斜段作业:完成对接后,进行打塞,

打塞段为造斜点以上50 m至矿层顶板下10 m,塞面要求在造斜点之上30 m。打塞完成后,候凝60 h后探塞面,达到设计高度则进行下一作业程序,否则重新打塞至设计高度。

(4)第二次直井取心:扫塞后,Ø215.9 mm钻头从造斜点取心钻进至设计深度后进行固井。

3.2　定向钻进及对接钻具组合

定向钻进及对接使用的钻具组合见表1。

表1　定向钻进与对接阶段钻具组合

钻井阶段	钻　具　组　合
定向钻进	Ø152 mm钻头+Ø120 mm螺杆钻具+Ø120 mm定向接头+Ø120 mm无磁钻杆+Ø89 mm钻杆+Ø108 mm方钻杆
对接	Ø152 mm钻头+Ø120 mm磁接头+Ø120 mm螺杆钻具+Ø120 mm定向接头+Ø120 mm无磁钻杆+Ø89 mm钻杆+Ø108 mm方钻杆

3.3　水平陀螺仪与MWD测井数据

将MWD测得的磁方位转换为真方位与水平陀螺仪测得方位进行对比,部分井结果如表2~4所示。

表2　HV001B水平陀螺仪数据与MWD数据(造斜段)

深度/m	井斜/(°)			真方位/(°)		
	MWD	水平陀螺仪	差值	MWD	水平陀螺仪	差值
576.00	34.16	34.05	−0.11	56.72	56.93	0.21
603.00	44.26	44.16	−0.10	56.67	58.17	1.50
632.00	54.85	54.92	0.07	56.44	57.93	1.49
657.00	64.63	64.55	−0.08	56.52	59.15	2.63
672.00	70.02	69.92	−0.10	56.33	57.34	1.01
680.00	73.03	73.08	0.05	56.40	60.75	4.35
690.00	76.72	76.68	−0.04	56.26	60.20	3.94
698.00	79.65	79.52	−0.13	56.03	60.49	4.46
701.00	80.76	80.63	−0.13	55.94	58.68	2.74
平均			−0.05			2.45

表3　HV004B水平陀螺仪数据与MWD数据

深度/m	井斜/(°)			真方位/(°)		
	MWD	水平陀螺仪	差值	MWD	水平陀螺仪	差值
628.00	49.97	49.93	−0.04	54.67	57.68	3.01
650.00	58.15	58.32	0.17	55.79	59.27	3.48
669.00	64.97	65.02	0.05	56.39	58.58	2.19
687.00	71.17	71.28	0.11	57.31	60.06	2.75
706.00	77.99	78.01	0.02	57.24	61.48	4.24
717.00	81.67	81.58	−0.09	56.70	61.30	4.60
728.00	85.35	85.38	0.03	55.90	60.65	4.75
738.00	88.36	88.46	0.10	55.33	57.61	2.28
平均			0.04			3.41

从表2~4可以发现,HV001B、HV004B两口井使用的无磁钻具抗磁化能力有所下降,MWD测量磁方位转换为真方位后,与水平陀螺仪测量值平均值分别相差2.45°、3.41°。

HV006B在实际钻进过程中,在B靶点对接时未能命中,从表4可以发现,自1190 m井深开始进入对接,MWD测量的磁方位已经完全没有逻辑性,地层黄铁矿的磁化干扰使得MWD磁方位测量完全失效,而在对接阶段,所有的方位均为预估值,无法得知实际的方位值,为指导下一步侧钻,使用水平陀螺仪在磁化井段进行测井,得到的数据经过分析,验证表明得到的方位是符合实际对接过程中的

表4 HV006B水平陀螺仪数据与MWD数据(水平段)

深度/m	井斜/(°)			真方位/(°)		
	MWD	水平陀螺仪	差值	MWD	水平陀螺仪	差值
1190.00	88.12	87.82	−0.30	260.32	57.93	−202.39
1200.00	88.92	88.64	−0.28	60.57	53.44	−7.13
1210.00	89.41	89.02	−0.39	45.85	52.86	7.01
1220.00	89.42	89.04	−0.38	350.85	51.61	−299.24
1230.00	89.21	88.98	−0.23	80.93	51.33	−29.60
1240.00	88.65	88.85	0.20	230.72	52.06	−178.66
1250.00	87.82	87.94	0.12	180.58	49.68	−130.9
1260.00	87.63	87.45	−0.18	30.44	51.91	21.47
1270.00	87.54	87.31	−0.23	75.85	52.46	−23.39
1275.00	87.66	87.32	−0.34	185.62	54.28	−131.34
1280.00	87.42	87.32	−0.10	140.55	51.66	−88.89
平均			−0.19			−96.64

工艺逻辑的。

3.4 定向轨迹设计与校正

以HV004B井钻进为例,该井在实钻过程中存在无磁隔磁效果下降导致MWD测量偏差与B靶点一次中靶未命中两个问题。用MWD、水平陀螺仪数据绘制钻井轨迹,得到HV004B井轨迹的水平投影如图4。其中,以水平陀螺仪数据对MWD数据进行修正后,得到实际钻进的轨迹,即实钻轨迹1;当B靶点未能一次中靶,再以水平陀螺仪在磁化段地层测量的数据,得到实际钻进的轨迹为实钻轨迹2;MWD在磁化地层测得的数据绘制得到磁干扰轨迹;以MWD测量数据进行轨迹描绘,得到图中的未修正轨迹。

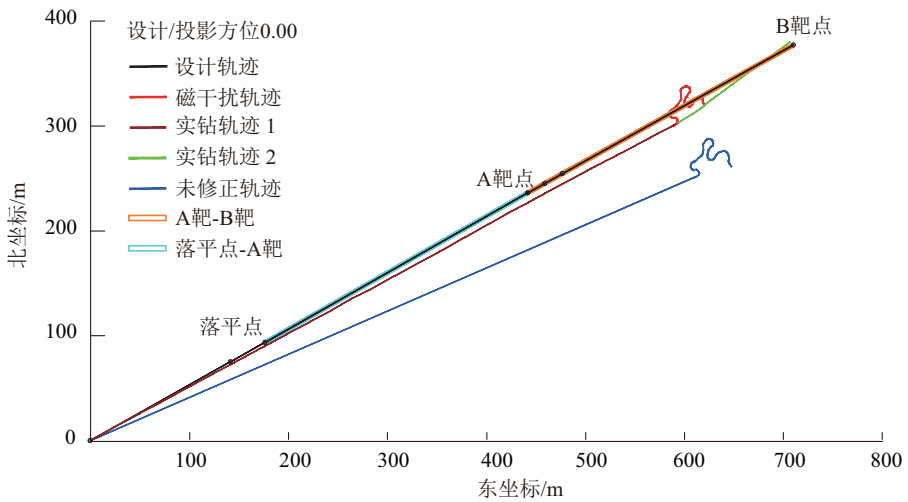

图4 HV004B轨迹水平投影

从图中的轨迹可以得出以下几点:

(1)由于MWD仪器自身测量的误差,根据其数据描绘出的实钻轨迹尽管在定向钻进阶段贴合设计轨迹,但实际上,对接的过程中,磁中靶测量系统比MWD更精确,在最终完成中靶时的位置,与设计存在一定的偏移。从实钻轨迹1可以看出,偏移的规律一致,落平点、A靶点的偏移均在设计轨迹前进方向的右侧。

(2)MWD仪器在磁化地层完全失效,使用水平陀螺仪在水平段测井,得到的数据符合实际施工工

艺逻辑。从实钻轨迹2可以看出,第一次未能连通B靶点的轨迹最终是落在设计轨迹前进方向的左侧,根据前面A靶点连通情况,要想连通B靶点,实际轨迹应当落在设计轨迹前进方向的右侧。

(3)如果不对MWD方位进行校正,整个轨迹依照MWD测量方位钻进,得到未修正轨迹与设计的轨迹偏差很大,且随着井段的延长而越来越大。这十分不利于对接工作,因为受磁接头尺寸影响,对接距离只能在靶点前80 m左右开始,如果此时在水平投影图上轨迹前进方向与靶点的位移偏差大则需要进行大幅度的扭方位,这会导致井眼轨迹曲率过大,即使全程定向以保证该靶点连通,但是井眼曲率过大,一方面降低钻进效率,另一方面会使水平段钻柱容易出现安全事故。而且当偏移量超过一定程度时,80 m的井段全扭方位也无法钻至靶点,这时就必须填掉井段,后撤到合适的位置重钻新井眼,极大影响施工进度。

4　结论

经过大量的实际钻井工作,总结出以下几点:

(1)在造斜段使用水平陀螺仪测井进行方位校正,可以提前发现方位发生偏差,从而调整实钻轨迹贴合设计轨迹,减小因轨迹偏离过大产生的侧钻风险。无磁钻具在黄铁矿磁化后的地层工作一定时间后,隔磁效果下降,会干扰MWD测量结果,不利于轨迹控制,在使用水平陀螺仪进行校正后,可以对后续井眼轨迹进行调整,使实钻轨迹能按照设计轨迹前进。在该矿区的工程实施过程中,未发生任何在对接A靶点就需要侧钻的事故。

(2)当出现一次中靶失败时,使用水平陀螺仪进行测量,为第二次中靶成功提供方位指导。含黄铁矿地层,在磁接头经过后会产生很长时间的磁化,MWD方位失真,当后续中靶过程中出现问题时,无法提供方位指导,水平陀螺仪不依靠地磁场测量方位,在磁化地层中测得的实际方位,为侧钻提供重要依据。在水平陀螺仪的指引下完成了3个靶点的二次中靶。

(3)存在一个以上的靶点时,当命中第一个靶点时,要根据对接时的推测数据,适当对后续的井眼轨迹进行方位调整,将井眼轨迹前进方向与后续靶点的方位偏差控制在可控范围内。由于MWD仪器本身精度无法满足对接作业,在完成对接后,以MWD数据及推测数据绘制出的轨迹,会与设计产生偏移,并且偏移的逻辑是靶点均往同侧偏移,如果在命中第一个靶点后不调整轨迹前进方向,可能会在后续靶点中靶时,出现偏差过大而需要重新侧钻的极端情况。在该矿区的施工过程中,发生一次在对接B靶点时因方位偏差过大而需要侧钻,参考水平陀螺仪数据最终完成后续侧钻及对接。

(4)水平陀螺仪提供的数据是可靠的,在水平陀螺仪的数据指引下,实现了数口靶区只有152 mm左右的对接井的连通,说明在地磁场异常、MWD方位测量失效的情况下,其测量数据是符合实际的。

参考文献:

[1] 黄聿铭,杨钦明,郑文龙,等.天然碱矿双水平溶腔稳定性分析及安全矿柱宽度探讨[J].矿业研究与开发,2018,38(7):1-6.
[2] 刘海翔,刘春生,胡汉月,等.土耳其天然碱矿水平对接井水溶开采技术回顾[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):7-13.
[3] 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.
[4] 李林.天然碱矿综合钻井水溶开采工艺设计[J].纯碱工业,2021(6):33-35.
[5] 杨帆.自然伽玛测井在天然碱开发中的应用研究[J].中国井矿盐,2020,51(3):21-22.
[6] 张新刚,涂运中,刘汪威,等.多分支水平对接井技术在土耳其天然碱溶采中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):43-49.
[7] 胡守云,E.Appel,V.Hoffmann,等.湖泊沉积物中胶黄铁矿的鉴出及其磁学意义[J].中国科学(D辑:地球科学),2002(3):234-238.
[8] 陈莹璐.全新世长江三角洲及宁绍平原胶黄铁矿赋存特征及古环境意义[D].上海:华东师范大学,2023.
[9] 徐海伟.腾格里沙漠WEDP06孔岩心中胶黄铁矿的识别及磁性特征研究[D].兰州:兰州大学,2022.

(编辑　王文)