

SAGD 平行井套管内磁引导模拟实验

陈剑垚

(中国地质科学院勘探技术研究所,河北廊坊 065000)

摘要: SAGD 平行井是稠油开采的重要方法,它对两井的空间轨迹要求较高。相比较常规随钻仪器,借助于 MGT 磁定位的磁引导技术有利于进一步提高钻孔轨迹检测精度和检测效率。目前还未见国产同类成熟仪器应用的报道。主要介绍了室外套管地面模拟实验,研究轨迹精度与套管内磁响应之间的关系,为仪器的实际应用提供修正数据和技术支撑。实验以通电螺线管作为磁发射源,并置于 $\varnothing 139.7$ mm 套管中,以磁传感器为接收源,采集数据,最后由电脑解析数据算出两者的相对位置。实验时不断改变传感器与套管的相对位置,以模拟钻头钻进的真实情况。实验共采集了 18 种形态,共 198 点位数据。在修正前,计算的总距离平均误差在 7% 左右,平面误差为 9.4% 左右。修正后误差为之前的一半。结果表明,计算点能够真实反映轨迹的实际方向。

关键词: 螺线管;SAGD;双平行井;定位技术;磁场;导向

中图分类号: P634.7;TE243+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)09-0021-05

Simulation Experiment of Guiding with a Magnetic Source inside the Casing of SAGD Twin Well/CHEN Jian-yao
(The Institute of Exploration Technology, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: SAGD twin well is an important technology for producing heavy crude oil, which demands a lot controlling about the two wells' trajectory. It's good to improve the drilling trajectory measuring accuracy and efficiency with the help of MGT technology instead of MWD. At present, there is no report on the application of similar mature instruments made in China. This article mainly introduces an experiment performed on the ground, which tries to find the relationship between the trajectory accuracy and magnetic source inside a casing to provide data and technical support to the practical application. A solenoid which is put into a 139.7mm casing as a magnetic emitter and a magnetic sensor are placed to simulate real drilling situations of SAGD, the relative positions of the twin well are finally worked out by computer analytic data. In the experiment, the relative position between the sensor and the casing is continuously changed to simulate the actual situation of bit drilling. 18 trajectory patterns are collected with 198 point sites data. Before correction, the average errors of calculated total distance was about 7% and the plane errors are about 9.4%; after correction, the errors are reduced to only half the previous ones. The results show that the calculated points can really reflect the actual direction of the trajectory.

Key words: solenoid; steam assisted gravity drainage; twin wells; location technology; magnetic field; guidance

0 引言

SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage)蒸汽辅助重力泄油技术,是稠油油藏开采的重要手段,近年来得到广泛试验与应用,该技术效果显著,使稠油成为油田原油生产的又一亮点。有数据显示,超稠油采用 SAGD 技术开发,采收率一般大于 50%^[1]。与常规的蒸汽吞吐开采不同,SAGD 技术以双水平井组方式开采,即上部一个注汽井,下部一个生产井。作业时,向上部注汽井内注入高温蒸汽,加热周围稠油,稠油在融化后由于自重流入到下部生产井中^[2]。为确保 SAGD 水平井的开采效率,施工时要求上下两井水平段在剖面上尽量保持平行,间隔通常为 5 m,平

面上两井尽量在一条直线上,误差不超过 ± 1 m。

常规 SAGD 轨迹控制在理论上可保证两井眼轨迹在方位上的一致性,但在实际控制过程中,由于测量仪器受到磁场干扰,以及钻进过程地层、钻具等方面的原因,都不能保证轨迹稳定在要求范围内^[3]。为满足钻井需要,国外研发出多种基于电磁原理的空间定位工具,如 MGT 和 RMRS 等^[4-6]。MGT (Magnetic Guidance Tool)即磁导向工具,是一种用于 SAGD 双水平井定向钻井的导向工具,在国外有 95% 的双水平井都采用了 MGT 进行导向^[7]。RMRS(Rotating Magnet Ranging System)系统主要用于煤层气、盐碱等可溶性矿产对接井施工,也有用于

收稿日期:2017-01-16;修回日期:2017-08-02

作者简介:陈剑垚,男,汉族,1982年生,勘查技术与工程专业,从事定向钻进和磁导向技术研究工作,河北省廊坊市金光道77号,chen86813995@163.com。

平行井的案例,但数量较少。近些年,国内也研发出了“慧磁”对接引导系统,并已商用化^[8-10]。MGT的发射源是一种大功率的螺线管,作业时放在生产井中,引导上部正钻井施工。相比于主动测量如RMRS、慧磁系统等,MGT具有耐温高、数据传输量要求少等优点,正钻井无需磁接头,马达负担较小,不会影响钻头造斜率^[11]。国内有文献介绍了类似的技术^[12],但仅局限于原理公式,没有相关实验。本文重点介绍了室外套管内SAGD模拟实验和数据分析,并对常见案例进行了总结,推测出套管对磁场的扭曲影响和特征。

1 螺线管定位技术原理

1.1 基本原理

如图1所示,螺线管在正反向通电时会在空间某点产生两个大小相等、方向相反的磁矢量,磁传感器采集到信号后由电脑根据磁场分布特性,推算出两者的相对位置关系。

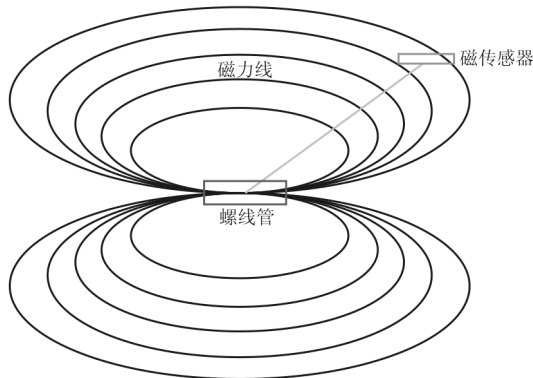


图1 螺线管磁场分布

1.2 数学模型

螺线管可看作是多个线圈的简单叠加,图2所示为其中的一个。

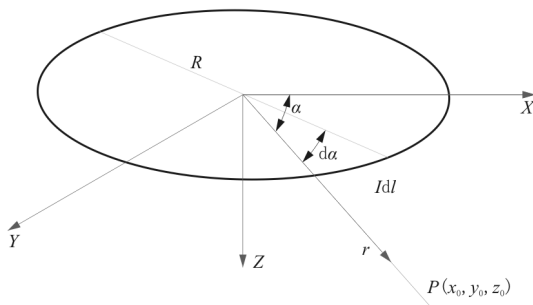


图2 环形电流磁场模型

$$Idl = IR(-i \sin\alpha + j \cos\alpha + 0k) d\alpha \quad (1)$$

式中: I ——通电电流, A; R ——线圈半径, m; α —— OP 与 X 轴的夹角, rad; i, j, k ——分别为三个坐标轴的单位矢量。

导线元的坐标为 $(R\cos\alpha, R\sin\alpha, 0)$,导线元在场点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 产生的磁场为^[13]:

$$\begin{cases} H_x = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z_0 R \cos\alpha d\alpha}{[(x_0 - R\cos\alpha)^2 + (y_0 - R\sin\alpha)^2 + z_0^2]^{3/2}} \\ H_y = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z_0 R \sin\alpha d\alpha}{[(x_0 - R\cos\alpha)^2 + (y_0 - R\sin\alpha)^2 + z_0^2]^{3/2}} \\ H_z = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(R^2 - x_0 R \cos\alpha - y_0 R \sin\alpha) d\alpha}{[(x_0 - R\cos\alpha)^2 + (y_0 - R\sin\alpha)^2 + z_0^2]^{3/2}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)通过数值方法求得近似解,用传感器捕获到磁场的变化值,代入计算公式,经过解析程序推导出两者的相对坐标。

2 模拟实验

2.1 实验仪器

主要包括铝制支架,磁传感器(封装在探管内,下称探管),螺线管和电脑等。

2.2 实验方法

实验采用点测量方法,即螺线管位置固定不变,探管按照设计轨迹,每前进一段距离,螺线管正反向通电各一次,探管在采集两次磁场信号后继续前进,模拟钻头进尺,如此重复测量。实验共测量6条轨迹,18种姿态,覆盖了钻井中可能出现的大部分情况。图3所示为测试平面投影图,每条轨迹在剖面又分为上倾、水平和下倾3种变化。图4为测量时部分波形截图。

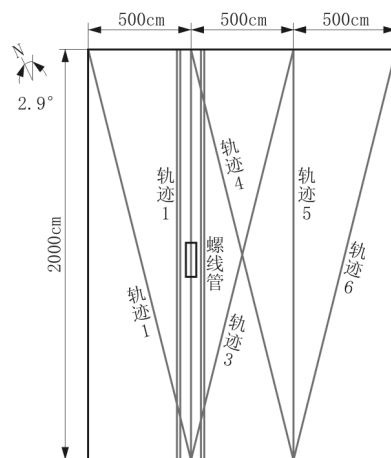


图3 平面投影轨迹

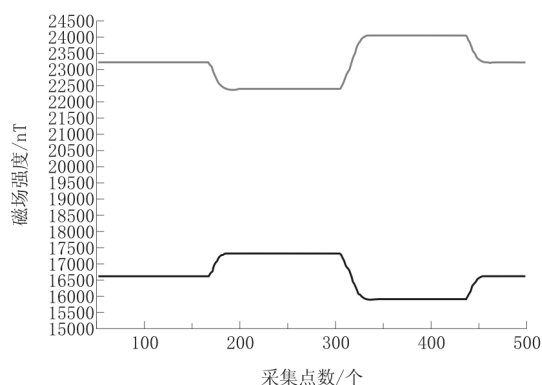


图 4 部分波形截图

2.3 注意事项

2.3.1 磁环境

磁实验对环境的要求比较严格,除了远离高压电线、大规模建筑群外,也要与大功率电器车辆等保持一定距离。尤其在探管附近及探管与发射源之间,不能有除实验外的铁磁体出现。本次实验位于一幢一层建筑外,仪器架子使用铝制材料。为增加结果的准确性,螺线管采用 12 V 直流电源供电,测试半径控制在 2 m 之内,在此范围内发射源的信号强,能保持较高的信噪比。此外,还要考虑套管对探管的干扰。在 SAGD 引导作业时,发射源一般放在生产井中,通常情况下,生产井都已经完钻并下入套管,为模拟真实情况,本实验采用 $\varnothing 139.7 \text{ mm} \times 7.72 \text{ mm}$ J55 套管。套管会被地磁场磁化产生一个干扰场^[14],干扰探管的磁方位。因此在布置套管前,要先测量好轨迹的方位。图 5 为现场实验照片场景。



图 5 现场实验照片

2.3.2 磁矩值校核

根据静磁屏蔽理论,铁磁体对静磁场的屏蔽是利用其自身磁阻小从而对磁路进行分流来实现的^[15](如图 6 所示)。同理当磁发射源位于相对磁导率远大于 1 的套管内时,在外部接收的场强也会减弱。公式(3)是圆筒屏蔽体径向磁屏蔽系数的计

算公式^[16]。另外还有衰减问题,衰减系数的计算较为复杂,与材料、使用时间和环境等有关^[17],本文暂不考虑。找到屏蔽规律,确定合适的磁矩值对于解析结果有重要意义。

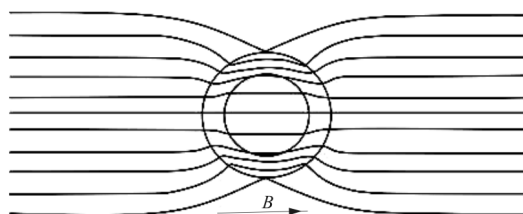


图 6 套管对外磁场的屏蔽

$$k = \frac{1}{1 + (1/4)(1 - b^2/a^2)(\mu_r + 1/\mu_r - 2)} \quad (3)$$

式中: k ——磁屏蔽系数; a 、 b ——套管的外半径和内半径,m; μ_r ——套管的相对磁导率,无量纲。

计算磁矩值最简单的方法是标定校核。标定过程与 2.2 所述测量方法一样,但探管与螺线管的位置关系是已知的,通过反推的方法算出磁矩值。图 7 所示是磁矩校核曲线图。

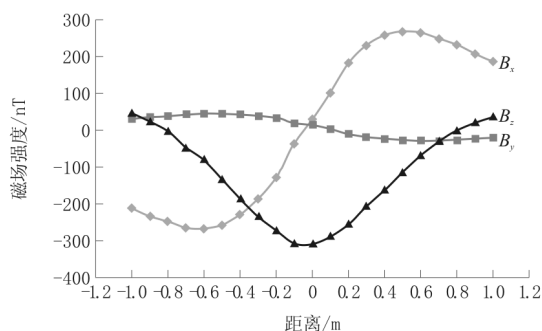


图 7 校核曲线

3 结果及分析

误差统计如表 1 所示,实验平均总距离误差在 7% 左右,其中平面距离误差百分比为 9.4%。

表 1 误差统计表(未修正)

路径	平面距离 误差/cm	总距离误 差/cm	平面误差 百分比/%	总距离误差 百分比/%
轨迹 1	7.88	8.66	9.2	6.0
轨迹 2	8.74	10.14	11.3	7.3
轨迹 3	6.85	7.79	8.1	5.4
轨迹 4	7.73	9.46	9.0	6.7
轨迹 5	10.57	11.35	11.0	9.5
轨迹 6	8.45	9.41	7.9	7.2

注:统计有效数据。

3.1 轨迹 1 结果(见表 2)

表2 轨迹1部分结果

轨迹姿态	实际/cm			计算/cm			误差百分比/%	
	北	东	上	北	东	上	平面	空间
轨迹水平	-98.813	-4.737	107	-94.02	-1.96	107.96	5.6	3.9
	-80.277	-9.067	107	-81.58	-10.39	111.83	2.3	3.9
	-60.623	-12.773	107	-61.41	-13.31	107.52	1.5	0.9
	-40.998	-16.629	107	-45.17	-17.61	108.93	9.7	4.1
	-21.577	-20.446	107	-28.85	-23.43	109.83	26.4	7.5
	-1.749	-24.342	107	-8.04	-38.88	107.33	64.9	14.4
	17.876	-28.199	107	11.43	-28.04	114.49	19.3	8.8
	37.501	-32.056	107	29.82	-35.23	112.15	16.8	8.3
	57.125	-35.912	107	48.06	-39.59	112.42	14.5	8.8
	76.750	-39.769	107	64.19	-41.59	113.48	14.7	10.4
	96.374	-43.626	107	80.38	-44.97	111.74	15.2	11.1

注:以螺线管为坐标原点,磁北坐标系。

从表2中可以看出,当测点与螺线管连线垂直于螺线管轴线时,磁场径向分量接近于零,计算结果误差较大,此类测点的结果不可靠,属于无效数据,解析时应注意舍去。

3.2 误差原因分析

与前期室内实验相比,本次误差增大了近一倍。此次实验的最大特点是引入套管,虽然在实验初进行了磁矩校核,但从结果来看是不够的。套管不仅影响了磁场的大小,也改变了方向。

要证实磁场在经过套管后方向发生了改变,直接的方法是对比磁力线的分布情况。而磁力线本身不可见,实验室内常用铁粉的方法显示磁力线分布。在本次实验中套管也是铁磁体,考虑到会影响铁粉的显示效果,需要找到另外的方法。

图8所示为无套管时螺线管磁力线正常分布示意图。从图中可以看出,每条磁力线上,都存在这样的两个点:该点的切线方向与螺线管轴线垂直。如果探管恰好位于此点上,且其Z轴与螺线管轴线平行,则磁力线垂直于Z轴,即在Z轴方向的投影为

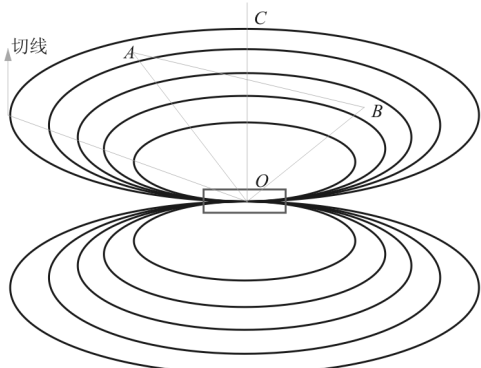


图8 螺线管磁力线分布

零,磁强为零。如果将螺线管放入套管后,上述切点发生偏移,证明磁力线发生了扭曲。

图9所示为两种情况下探管采集到切点连线的对比图。采集时探管Z轴与螺线管方向平行,且各点基本处于一个平面。从图中可以推论,磁力线在经过套管后,发生“折射”变化,切点向螺线管轴线两侧偏移,即磁力线经过套管后被放大。理论上螺线管两侧的偏移应该相同,本例应为两次采集时螺线管位置偏差造成的。图10显示了套管对磁力线的扭曲变作用。

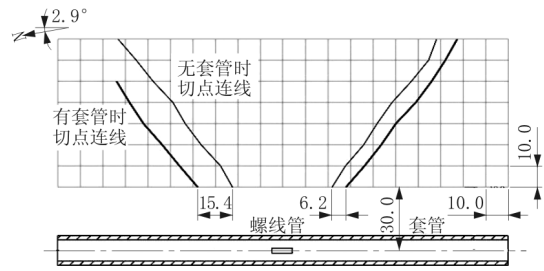


图9 磁力线对比

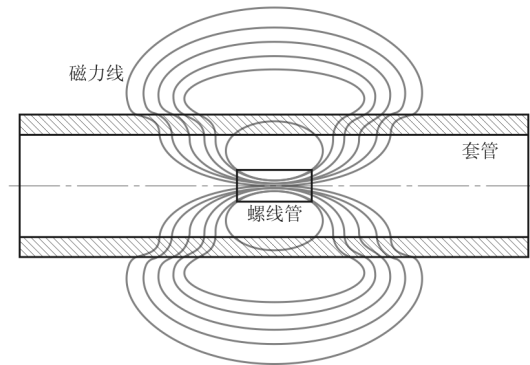


图10 套管扭曲后的磁力线分布

表3所示为根据两根切点连线的距离差,对平面坐标进行修正后的数据。对比表2,平面和总体距离误差减小了近一倍,尤其是后半部分,误差减小非常明显。图11和图12分别为修正后轨迹1的水平和剖面投影图。

3.3 常见轨迹分析

轨迹2路径是实际钻进中较常见的情况。其路径在套管正上方,方位与螺线管相同且在同一条投影线上,但在高程有上倾、水平和下倾3种情况。表4是轨迹2路径水平时,即轨迹完全与套管平行时的计算结果。图13是轨迹2三种路径下的径向磁场强度值。

从图13可以看出,当两者方位相同时,径向磁场在发射源前后各出现一个波峰,两个峰值的

表 3 轨迹 1 修正结果

轨迹 姿态	实际/cm			修正后结果计算/cm			误差百分比/%	
	北	东	上	北	东	上	平面	总距离
轨 迹 水 平	-98.813	-4.737	107	-100.21	-2.28	107.96	2.9	2.1
	-80.277	-9.067	107	-85.61	-10.59	111.83	6.9	5.5
	-60.623	-12.773	107	-63.28	-13.40	107.52	4.4	2.3
	-40.998	-16.629	107	-44.89	-17.59	108.93	9.1	3.8
	-21.577	-20.446	107	-26.41	-23.30	109.83	18.9	5.7
	-1.749	-24.342	107	-3.45	-38.65	107.33	59.0	13.1
	17.876	-28.199	107	18.18	-27.70	114.49	1.8	6.7
	37.501	-32.056	107	38.73	-34.78	112.15	6.1	5.1
	57.125	-35.912	107	59.13	-39.03	112.42	5.5	5.2
	76.750	-39.769	107	77.41	-40.92	113.48	1.5	4.8
	96.374	-43.626	107	95.76	-44.19	111.74	0.8	3.2

注:以螺线管为坐标原点,磁北坐标系。

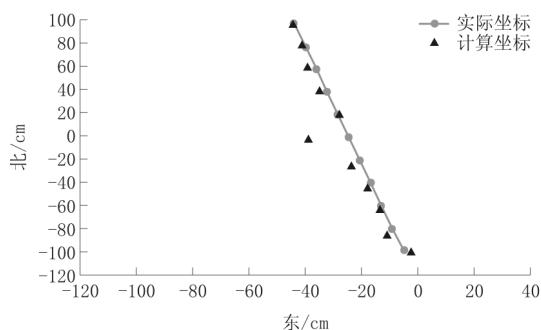


图 11 轨迹 1 水平投影

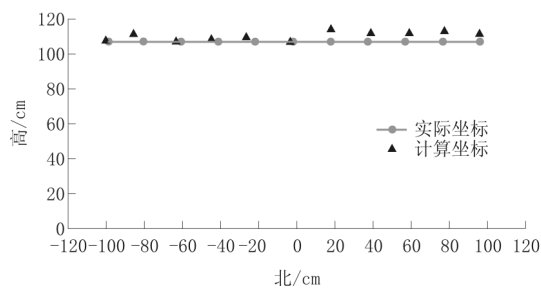


图 12 轨迹 1 剖面投影

表 4 轨迹 2 部分计算结果(修正后)

轨迹 姿态	实际/cm			计算/cm			误差百分比/%	
	北	东	上	北	东	上	平面	总距离
轨 迹 水 平	-99.872	-5.059	107	-100.19	-2.83	107.98	2.25	1.68
	-79.898	-4.047	107	-83.99	-3.08	111.99	5.26	4.89
	-59.923	-3.036	107	-61.27	-13.64	107.49	17.82	8.72
	-39.949	-2.024	107	-43.88	2.05	109.92	14.15	5.57
	-19.974	-1.012	107	-21.93	6.70	111.73	39.79	8.50
	0	0	107	-2.34	58.13	95.71	N/A	55.39
	19.974	1.012	107	23.31	-10.21	111.42	58.55	11.50
	39.949	2.024	107	43.15	-3.38	111.86	15.70	6.95
	59.923	3.036	107	63.19	-0.62	111.93	8.18	5.67
	79.898	4.047	107	83.23	2.37	115.99	4.66	7.28
	99.872	5.059	107	101.40	2.51	113.97	2.97	5.17

注:以螺线管为坐标原点,磁北坐标系。

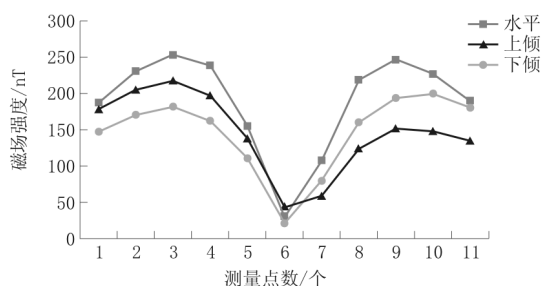


图 13 轨迹 2 径向磁场强度值

大小关系如下:

- (1) 当轨迹在垂直剖面与螺线管轴线平行时,两个峰值相当;
- (2) 当轨迹在垂直剖面上倾远离螺线管时,前峰值大于后峰值;
- (3) 当轨迹在垂直剖面下倾靠近螺线管时,前峰值小于后峰值。

轨迹 2 中探管下倾路径如图 8 所示中 AB 线段,探管与螺线管方位相同时,两者在同一剖面内。螺线管磁场以 OC 为中心线两端对称,当 AB 两点到 OC 线段的距离相同,但到螺线管轴线距离不同时,根据公式(2)、(3),径向磁场大小与总距离的三次方成反比,距离越小者径向磁强越大。

4 结论

MGT 磁引导系统广泛用于 SAGD 稠油开采中,是一种以螺线管为磁信号发射源的定位系统,目前国内还没有同类成熟仪器的相关报道。本文在磁定位理论上,重点介绍了实验过程,并用自编程序进行解析。通过对误差的分析,推导出套管对磁场的扭曲效果,再次应用实验的方法加以证实。从整个实验中得出以下结论。

- (1) 当螺线管处于套管内部时,计算的总距离误差在 7% 左右,其中平面距离误差为 9.4%,修正后,误差可减小到原来的一半,与无套管屏蔽时误差基本相当^[18];
- (2) 当螺线管与探管方位相同时,可以从径向磁场判断探管在剖面上的变化;
- (3) 当磁发射源位于套管内部时,磁场经过套管时会被扭曲,方向和大小都会发生变化;
- (4) 需要深入研究套管对磁场的扭曲作用,找到其中的量化关系。

实验中所使用的套管是全新的,没有任何腐蚀和
(下转第 31 页)

表5 钻孔倾角测量记录

序号	深度/ m	倾角/ (°)	序号	深度/ m	倾角/ (°)	序号	深度/ m	倾角/ (°)
1	20.00	0.37	13	260.00	0.53	25	500.00	3.40
2	40.00	0.49	14	280.00	1.02	26	520.00	3.51
3	60.00	0.81	15	300.00	1.10	27	540.00	4.22
4	80.00	0.76	16	320.00	1.23	28	560.00	4.45
5	100.00	0.85	17	340.00	1.25	29	580.00	4.75
6	120.00	0.56	18	360.00	1.13	30	600.00	7.65
7	140.00	0.15	19	380.00	1.49	31	620.00	8.38
8	160.00	0.35	20	400.00	1.91	32	640.00	10.14
9	180.00	0.41	21	420.00	2.03	33	660.00	10.15
10	200.00	0.70	22	440.00	2.66	34	680.00	12.11
11	220.00	0.66	23	460.00	2.11	35	700.00	12.68
12	240.00	0.44	24	480.00	3.52	36	720.00	13.39

泥浆非常重要,但其性能要求与固体矿产钻探截然不同。它需要超重的密度(最大可达 1.5 g/cm^3)、超高的粘度(最大可达 90 s)和较高的失水量,同时在循环过程中要控制好含砂率 $>10\%$ 即可。

总之,最终经专家组验收,全孔平均岩心采取率 $>90\%$,经终孔后测井认为该孔全孔通畅无孔壁坍塌现象,20 m一测点表明全孔倾角均 $<2^\circ/100\text{ m}$ 的

(上接第25页)

变形,对磁力线的屏蔽较为规则。实际应用中,磁发射源即螺线管的摆放位置十分重要,要注意避开套管接箍或其它厚度不均匀位置,使发射源经过套管扭曲作用后的磁力线保持各向同性。此外,在仪器下井前可在地面使用同类型套管做地面实验,确定屏蔽系数,计算磁矩大小,为井下实际测量做好准备。

参考文献:

- [1] 杨立强,陈月明,王宏远,等.超稠油直井水平井组合蒸汽辅助重力泄油物理和数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2007,31(4):64-69.
- [2] 杨明合,夏宏南,屈胜元,等.磁导向技术在SAGD双水平井轨迹精细控制中的应用[J].钻采工艺,2010,33(3):12-14.
- [3] 路宗羽,刘颖彪,罗增,等.套管内磁导向技术应用[J].西部探矿工程,2015,(12):46-48.
- [4] GRILLS T L. Magnetic ranging technologies for drilling steam assisted gravity drainage well pairs and unique well geometries: a comparison of technologies [R]. SPE 79005,2002.
- [5] VANDAL B, GRILLS T, WILSON G. A comprehensive comparison between the magnetic guidance tool and the rotating magnet ranging service [C]//Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta: Petroleum Society, 2004:176-181.
- [6] 吴志永,高德利,刁斌斌. SAGD双水平井随钻磁导向系统的研

规范要求,各项质量记录齐全,综合评定:钻孔质量优秀。

参考文献:

- [1] 吴金生,张伟,李旭东,等.汶川地震断裂带科学钻探项目FSD-4孔钻探施工概况和关键技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):120-125.
- [2] 徐云龙.川西采气厂首口地质导向水平井钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(2):1-3.
- [3] 姜桂春.聚炳烯酰胺无固相冲洗液在复杂地层中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(1):34-37.
- [4] 徐波,王智洪.钾铵基聚合物钻井液抑制性研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(7):30-33.
- [5] 卢予北,李艺,陈莹,等.国家地下水监测井建设关键问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(6):1-6.
- [6] 郑继天,李小杰,关晓琳.水文地质钻探冲洗液的选用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):242-244.
- [7] 吴跃钢,徐菁.无固相弱凝胶钻井液在水井施工中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):261-264.
- [8] 李友东,王国辉.滨海复杂地层超深旋挖钻孔灌注桩质量问题改进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(11):80-83.
- [9] 制[LM]及应用[J].电子测试,2014,(11):107-109.
- [7] 胡汉月,向军文,陈剑奎.“慧磁”SmartMag钻井中靶导向系统加强性工业试验研究[J].中国井矿盐,2011,42(3):12-15.
- [8] 陈剑奎,胡汉月.SmartMag定向钻进高精度中靶系统及其应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(4):10-12.
- [9] 武程亮,商敬秋,陈剑奎,等.两水平井“点对点”精确中靶对接施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):4-7.
- [10] ROGER H. VanNOORT, CHIP Abrant, JAMES N. TowleWell, Planning Based On Passive Magnetic MWD Ranging And Magnetized Casing[C]. SPE159404, 2012, Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, USA, October 8-10.
- [11] 刁斌斌,高德利.螺线管随钻测距导向系统[J].石油学报,2011,32(6):1061-1066.
- [12] 周耀忠,张国友.舰船磁场分析计算[M].北京:国防工业出版社,2004:141-142.
- [13] 李刚,张勇,肖桂龙,等.垂直套管周围磁场分布规律研究[J].石化技术,2015,(11):144-144.
- [14] 胡叶青,林春生,周建军.多层圆柱壳屏蔽体的径向静磁屏蔽效能分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012,36(6):1306-1309.
- [15] 赵代弟,张晓明,王宇,等.磁性套管中磁测斜仪误差建模分析[J].科学技术与工程,2015,15(6):226-230.
- [16] 任志平,党瑞荣.套管磁化与过套管介质识别[J].仪器仪表学报,2009,30(9):1813-1816.
- [17] 陈剑奎,岳刚.螺线管磁定位技术初探[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(8):53-57.