

机械式静态推靠垂钻工具在西部山前 高陡构造的应用

孙 峰^{1,2}

(1. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:为了解决西部山前高陡构造大倾角地层等复杂工况条件下的防斜打直技术难题,应用了低成本机械式静态推靠自动垂直钻井工具。该工具为纯机械式三层独立旋转结构,由偏重稳定平台等部件组成,能够在钻井过程中主动防斜纠斜,具有耐高温、高转速、耐强振及低成本等特点。在西部山前构造FSCZ-9井三开 $\varnothing 311$ mm井眼应用4井次,累计进尺1680.16 m,全井段井斜基本能够控制在 1° 以下,取得良好的防斜打直效果。与传统技术及国外系统相比,纯机械式结构提高了可靠性,降低了成本,能有效释放钻压,提高机械钻速。通过现场应用验证了工具的可行性、稳定性及可靠性,为工具进一步推广应用提供了技术支撑,为复杂地层钻井提供了高效可靠的解决方案,对钻井技术发展具有重要意义。

关键词:机械式;垂钻工具;静态推靠;井斜;防斜纠斜

中图分类号:TE921⁺.2;P634.4 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0325-05

Field application of mechanical static-push vertical drilling tool in high-steep piedmont structures of western China

SUN Feng^{1,2}

(1. CNPC Engineering Technology R & D Company Limited, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to solve the technical problem of anti-deviation and straight drilling under complex working conditions such as the high dip angle formations in the high and steep structures of western China, a low-cost mechanical static push-against automatic vertical drilling tool has been applied. This tool has a pure mechanical three-layer independent rotation structure and is composed of components such as a gravity-biased stable platform. It can actively prevent and correct deviation during the drilling process, and has the characteristics of high temperature resistance, high rotational speed, strong vibration resistance, and low cost. It was applied 4 times in the third section of the $\varnothing 311$ mm borehole of Well FSCZ-9 in high-steep piedmont structures of western China. The cumulative footage was 1680.16m. The inclination of the entire well section could basically be controlled below 1° , achieving good test results for anti-deviation and straight drilling. Compared with traditional technologies and foreign systems, the pure mechanical structure improves reliability, reduces costs, effectively, releases the weight on bit, and increases the rate of penetration. The on-site application has verified the feasibility, stability, and reliability of the tool, providing technical support for the further on-site promotion and application of the tool, offering an efficient and reliable solution for drilling in complex formations, and being of great significance for the development of drilling technology.

Key words: mechanical; vertical drilling tools; static-push; well deviation; trajectory control

收稿日期:2024-10-10; 修回日期:2025-04-22 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.052

基金项目:国家重点研发计划课题“复杂油气智能钻井理论与方法”(编号:2019YFA0708300)

作者简介:孙峰,男,汉族,1975年生,高级工程师,油气井工程专业,博士,主要从事随钻测控技术及装备等方面研究工作,北京市昌平区百沙路197号,sunfeng.sripe@sinopec.com。

引用格式:孙峰.机械式静态推靠垂钻工具在西部山前高陡构造的应用[J].钻探工程,2025,52(S1):325-329.

SUN Feng. Field application of mechanical static-push vertical drilling tool in high-steep piedmont structures of western China[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):325-329.

0 引言

塔里木油田山前构造天然气资源丰富,是实现油田增储上产的主力勘探区块,地质条件复杂,高陡构造地层广泛分布,其盐上地层普遍存在倾角大(最高 87°)、自然造斜能力强等特点,导致井斜控制困难、机械钻速低、钻井周期长、复杂情况多,依靠常规直井的井斜控制技术已不能满足工程要求^[1-5]。

自德国KTB主孔(井深9101 m)成功应用自动垂直钻井系统(VDS)以来,国内外已有十余种垂直钻井工具在现场成功应用,效果较好的有Baker-Hughes公司的Verti-Trak、SLB公司的Power-V等垂直钻井系统,均为机电液一体化系统,含有敏感且昂贵的电子元器件,维护及租用成本高,并且在深井、超深井等井下高温($>150^{\circ}\text{C}$)、强振动等复杂条件下,存在适应性差、可靠性低等问题^[6-10]。

国内中石油西部钻探克拉玛依钻井工艺研究院研制的 $\text{Q}311\text{ mm}$ 垂直钻井系统分别在T82066井和T82065井进行了现场应用试验,取得了一定的效果。中石油渤海钻探公司研制的VDT5000型自动垂直钻井系统在塔里木克深207井成功试验应用。中石化胜利油田钻井工艺研究院的捷联式自动垂直钻井系统(AVDS),采用动态推靠方式,以及全新的捷联算法和高性能传感器件,在安顺1井取得了很好的应用效果。然而这些工具都采用了相对复杂的测控系统和电子元器件,限制了工具的控制精度和寿命,开发成本高,推广难度大。

近年来,经济、安全、可靠的纯机械式自动垂直钻井工具逐渐受到关注,尤其在如今低油价的经济形势下,成为“防斜打快”钻井施工的最佳选择。静态推靠垂钻工具采用纯机械结构,具有耐高温、高转速及成本低等优势^[11-15]。

国外同类型的机械式垂钻工具在10年时间里已经迭代到第8代产品,采用没有电子元器件及锂电池的纯金属结构,具有成本低、耐高温、隔离强振动冲击及高速直螺杆驱动等技术优势。该工具目前已经具有 $152.4\sim 444.5\text{ mm}$ 的全尺寸规格系列,2012—2023年在北美得克萨斯州完成了 $1.3\times 10^6\text{ m}$ 进尺,累计钻进时间 $8\times 10^4\text{ h}$,约94%的现场应用中井斜控制在 1.25° 以下,在直井段完全替代了旋转导向系统全程定向控制作业进行防斜打直的工程应用。该类型的垂钻工具广泛应用在盐下油藏钻井,复杂夹层、断层带、高地层倾角地层等直井容易打

斜的地区,可以完全释放钻压,提高机械钻速,降低非生产时间效果明显。

机械式静态推靠垂钻工具在FSCZ-9井成功应用,具有重要的现实意义和广阔的发展前景。其稳定性、可靠性及使用寿命等得到了进一步验证。不仅为该地区的油气勘探开发提供了一种高效、可靠的钻井技术手段,也为我国钻井工程技术的创新与发展提供了有力的支持。

1 机械式静态推靠垂直钻井工具

1.1 工具结构

机械式静态推靠自动垂直钻井工具为纯机械式结构,包括偏重稳定平台、双层互锁推靠翼肋、动力芯轴及PDC复合轴承等部件组成,能够在钻井过程中实现主动防斜纠斜,是一种井下自动闭环钻井工具^[16-20],其结构如图1所示。



图1 静态推靠自动垂钻工具结构示意图

偏重平台包括偏重模块、环形阀组、两端轴承组及支撑筒等零部件,主要实现小排量高压钻井液的定向分配,为推靠提供一定大小和方向的动力源。双层互锁推靠机构包括推靠骨架、互锁翼肋、活塞及机械密封环等零部件,主要是对井壁施加作用力,实现井眼轨迹的调整。动力芯轴包括传动芯轴、研磨过滤短节等零部件,主要是传递钻进过程中钻压、扭矩。复合轴承包括PDC推力轴承、TC径向轴承及其连接件,主要对外筒旋转起到减摩降阻作用,减缓振动冲击等对重力测斜平台的影响,保证高精度重力井斜响应,实现机械式垂钻工具井下闭环主动纠斜防斜。

1.2 工作原理

机械式静态推靠垂钻采用静态推靠的方式实现钻井过程中的主动防斜纠斜,是三层独立旋转系统。该工具通过偏重平台动态响应井斜变化,响应精度 1° ,动力芯轴传递钻压扭矩,隔离钻头破岩产生的振动冲击,经过滤的小排量高压钻井液,可以给两端PDC轴承降温及润滑,安装在近钻头的双层静态推靠机构利用钻头压降准静态推靠井壁,推靠力达到 20 kN 以上,其工作原理如图2所示。

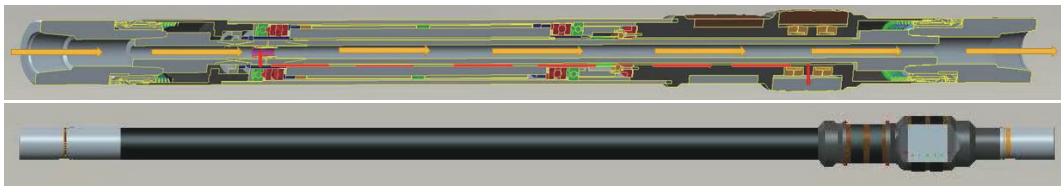


图 2 静态推靠垂钻工具工作原理

实际钻进中,通过芯轴实现高钻压、高转速等工程参数的调整,套在芯轴上的导向外筒不受其影响,基本上处于静止或缓慢转动状态,在钻头压降的作用下,利用小排量钻井液驱动推靠机构,与井眼高边相互作用,有效地静态推靠钻具。当井斜超标时,位于导向外筒内的偏重块在重力作用下转动,带动下端的上环形阀转到工具低边方向,并保持在一定的动态稳定精度范围内。位于下环形阀上高边方向的流道口打开,小排量的钻井液流入导向外筒高边位置的高压流道,进入相应的活塞腔,推动活塞沿径向滑动,驱动翼肋向外伸出,静态推靠井壁,给井眼高边位置施加静态推靠力,推动钻具向井眼低边方向偏转,从而实现钻进过程中的纠斜。

1.3 技术性能参数

根据 FSCZ-9 井现场需求及相关技术要求,选用 228 型静态推靠垂钻工具,其主要性能参数见表 1。

表 1 228 型静态推靠垂钻工具规格参数

性能参数	参数值
工具稳定平台响应精度/(°)	1
工具长度/mm	6500
适应井眼尺寸/mm	311
推靠外径(伸出)/mm	320
推靠外径(缩回)/mm	300
工具内径/mm	70
排量范围/(L·s ⁻¹)	20~80
钻头最大水压差/MPa	5.5
钻头最小水压差/MPa	2.8

1.4 技术特点

机械式静态推靠垂钻工具采用纯机械式结构,没有电控单元及锂电池等温度及振动敏感的元器件,大大提高了其可靠性,并降低了成本。该工具可有效释放钻压,传递扭矩,从而提高机械钻速;独

特的芯轴结构可以搭载螺杆以提高转速,降低井眼曲率,保证井眼轨迹光滑,最高可在 230 ℃ 环境下工作,可应用于各种钻井液体系;采用了轴向双层推靠翼肋机构,翼肋互锁可拆卸以及硬质合金球冠活塞设计,提高可靠性及稳定性。

2 FSCZ-9 井概况

FSCZ-9 井是国内新疆新区勘探部署在塔里木盆地西南坳陷西昆仑冲断带柯东构造带的一口预探井。该井设计井深 5350 m,井身结构为 5 个开次,完钻层位为二叠系杜瓦组,井身质量要求见表 2。

表 2 井身质量要求

井段/m	井斜/(°)	水平位移/ m	全角变化率/[(°)· (30 m) ⁻¹]
0~1000	≤1	≤10	≤1.2
1000~2000	≤1.5	≤30	≤1.4
2000~3000	≤2.5	≤40	≤1.6
3000~4000	≤3	≤60	≤2.0
4000~5090	≤4	≤70	≤2.5
5090~5350	≤12	≤200	≤3.25

该井自上而下依次钻遇断层上盘第四系 Q₃₋₄、二叠系,断层下盘古近系、白垩系、侏罗系、二叠系杜瓦组。根据地质设计,易斜井段地层为二叠-石炭系,在钻井过程中存在高陡地层倾角大、易井斜,地层古老、含硅质而钻速慢等技术难题。该井段上部地层主要为泥岩与灰质泥岩互层,中部主要为细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩,下部主要为灰岩;古近系上部以泥岩为主,中部主要为泥质粉砂岩,下部主要为泥岩、灰质泥岩。

3 现场试验

2022 年 9 月 17 日,在塔西南山前高陡构造带 FSCZ-9 井三开 Ø311 mm 井眼开展了机械式静态推靠自动垂直钻井工具的现场应用 4 井次,施工井段 2392.00~4072.16 m,累计进尺 1680.16 m,施工

过程中完全释放钻压,机械钻速大幅提高,平均机械钻速为3.16 m/h,3185.91 m处井斜最大为1.76°,3701.57 m处最小为0.18°,全井段井斜基本控制在1°以下,取得了较好的防斜打直效果。

采用的钻具组合是:Ø311.15 mm钻头×0.36 m+Ø244.5 mm垂钻工具×6.31 m+双公接头×0.37 m+Ø244 mm直螺杆(螺扶Ø308 mm)×11.36 m+Ø309 mm扶正器×1.42 m+Ø228.6 mm无磁钻铤×9.29 m+仪器悬挂×0.98 m+转换接头×0.37 m+Ø228.6 mm钻铤6根+Ø127 mm钻杆。试验期间采用的工程参数:钻压230~250 kN,转盘转速65

r/min+螺杆90~110 r/min,扭矩14~18 kN·m,排量45~48 L/s,泥浆密度1.58 g/cm³。工具连续入井4趟钻,井下循环时间为698 h,累计纯钻531 h,进尺1680 m,平均机械钻速3.16 m/h。

表3为垂钻工具在该井的施工情况统计,从表中看出,起钻原因基本上都是达到钻头使用寿命而钻时变慢。工具出井后进行了拆检,表观无明显磨损,推靠翼肋活动灵活,磨损均匀。应用结果表明:机械式静态推靠垂钻工具性能稳定,结构可靠,能够满足工程应用需求。

表3 机械式静态推靠垂钻在FSCZ-9井的应用情况统计

序号	施工井段/m	单趟进尺/m	纯钻时间/h	井斜变化范围/(°)	机械钻速/(m·h ⁻¹)	原因	备注
1	2392.00~2925.75	533.75	134	0.18~1.67	3.98	换钻头	1号工具
2	2925.75~3212.00	286.25	106	0.57~1.76	2.70	换钻头	2号工具
3	3212.00~3506.51	294.51	112	0.35~1.63	2.63	换钻头	2号工具
4	3506.51~4072.16	565.65	179	0.18~0.70	3.16	换钻头	3号工具
合计	2392.00~4072.16	1680.16	531	0.18~1.76	3.16		

图3为利用多点测量井斜数据绘制的的FSCZ-9井三开井斜随井深的变化曲线。

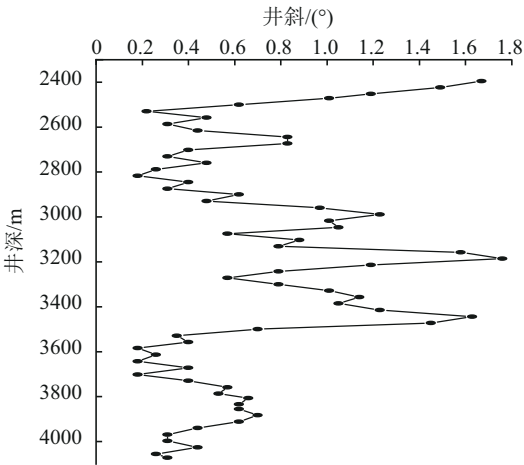


图3 FSCZ-9井三开井段井斜随井深的变化曲线

第一趟钻应用1号工具,使用5刀翼双排非平面齿PDC钻头,工具钻进约100 m,井斜由1.67°降至1°以下,然后一直保持在1°以下,因钻时慢起钻。出井后工具轻微磨损。

第二趟钻应用2号工具,使用6刀翼双排非平面齿PDC钻头,井斜控制在1°左右波动,没有达到

工具初始设定的0.5°井斜控制精度,出井钻柱扶正器的磨损较大(Ø309~305 mm),判断工具对控制井斜起到了作用,但是入井扶正器尺寸未达到垂钻工具所需的满眼尺寸要求,所以工具控斜没有发挥最优效果。

第三趟钻重复下入2号工具,更换Ø309 mm扶正器,螺扶尺寸保持Ø304 mm不变,控斜纠斜效果仍然没有达到最优,井斜仍然在1°左右波动。

第四趟钻下入3号工具,更换了Ø308 mm螺扶以及Ø309 mm钻杆扶正器,仍使用6刀翼双排非平面齿PDC钻头,满足工具的BHA应用要求,该井段井斜控制较好,基本上达到了工具的控斜精度,在0.5°左右波动。

在塔里木山前高陡构造大倾角等易斜地层钻井施工,在保证井斜不超标前提下,通过释放钻压大幅提高机械钻速,利用低成本的机械式垂钻工具是解决直井防斜打快的有效途径。静态推靠工具在FSCZ-9的成功应用,表明在重力稳定平台的高精度响应及高低压流体可控精准分配等关键技术都得到了有效解决,工程技术指标已经接近国外机电液垂钻系统技术水平。表4为垂钻工具在克拉区块应用指标对比情况。

表 4 垂钻工具在克拉区块应用指标对比情况

井号	钻头型号	井段/m	进尺/m	纯钻/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)	工具类型
克深 501	311.1CK506	4053~4330	277	91.5	3.03	常规
	311.1CK605KG	4330~4520	190	63.3	3	常规
	311.1CK605KG	4520~4733	213	71	3	常规
	311.1DM665	4733~5310	576	156	3.6	常规
克深 503	333.4FX65D	3776~4283	507	305	1.66	进口
	333.4SF55H3	4283~4558	275	41	6.7	进口
克深 506	311.1TS1952	4015~5053	1038	144	7.2	进口
克深 508	333.4MD9542Z	4124~4785	661	174.5	3.79	进口
FSCZ-9	311	2392~4072	1680	531	3.16	静推垂钻

4 结论

(1)机械式静态推靠自动垂钻工具,具有“低成本、高耐温、高可靠”等技术特点,采用纯机械式三层独立旋转结构,井下闭环实时动态响应井斜变化,利用钻头压降作为动力源,采用准静态推靠方式推靠井壁,实现钻进过程中主动防斜纠斜。

(2)FSCZ-9 井三开 $\varnothing 311$ mm 井眼高陡构造大倾角地层应用机械式静态推靠自动垂直钻井工具 4 趟钻,累计进尺 1680.16 m,完全释放钻压,全井段平均机械钻速为 3.16 m/h,井斜最大为 3185.91 m 处的 1.76°,最小为 3701.57 m 处的 0.18°,全井段井斜基本能够控制在 1°以下,取得了较好的防斜打直效果。

(3)机械式静态推靠垂钻系统井下工作正常,防斜纠斜模式转换准确,验证了工具的可行性、稳定性及可靠性,为西部新区深井超深井钻探提供一种防斜打直工具。

参考文献:

[1] 苏义脑.油气井工程中的一个新领域——井斜控制工程学浅谈[J].地质科技情报,2005,24(S1):1-8.

[2] 张绍槐.现代导向钻井技术的新进展及发展方向[J].石油学报,2003,24(3):82-89.

[3] 白家祉,苏义脑.井斜控制理论与实践[M].北京:石油工业出版社,1990.

[4] 周琴,姚爱国.自动控向垂钻系统的纠斜原理和液压技术的实现[J].矿山机械,2003,(11):7-9,4.

[5] 刘白雁,陈新元,谢剑刚,等.自动垂直钻井工具的理论与技术研究[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2008,(1):6-10.

[6] 杨春旭,王瑞和,韩来聚.推靠式旋转导向系统底部钻具组合动态安全评价方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(2):64-70.

[7] 彭勇,闫文辉,李继博.旋转导向钻井工具导向力优化设计[J].

石油钻探技术,2006,(2):10-14.

[8] 贾建波,兰洪波,菅志军,等.475型静态推靠式旋转导向钻具组合的弯曲应力分布规律[J].地球物理学报,2023,66(1):95-100.

[9] 史玉才,岳德胜,张德军,等.静态推靠式导向翼肋陷入井壁风险分析[J].石油钻采工艺,2021,43(6):713-718.

[10] 毕研涛,柳贡慧,杨宁宁,等.柔性短节对静态推靠式旋导工具造斜力的影响[J].石油机械,2022,50(5):9-15.

[11] 狄勤丰,芮子翔,周星,等.带旋转导向工具的底部钻具组合横向振动特性研究[J].石油钻探技术,2021,49(6):8-16.

[12] 毕研涛,柳贡慧,马清明,等.静态推靠式旋转导向钻具静力学特性分析[J].石油机械,2021,49(7):1-7.

[13] 王恒,孙明光,张进双,等.静态推靠式旋转导向工具造斜率预测分析[J].石油机械,2021,49(2):15-21.

[14] Zhu J, Zou D, Zhang Y, et al. Design and experimental study of non-contact power transmission device in static push-type rotary steering drilling system [J]. Advances in Petroleum Exploration and Development, 2019, 18 (1): 73-82.

[15] Shi Y, Teng Z, Bai J, et al. Analysis on the weight-on-bit transmission efficiency of the static push-the-bit rotary steerable system [J]. Natural Gas Industry B, 2019, 6 (3): 250-256.

[16] Ramalakshmi M, Dodagoudar G R. Lateral response analysis of GRS bridge abutments under passive push [J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 2018, 49 (4):49-54.

[17] 史玉才,滕志想,白璟,等.改进的静态推靠式旋转导向钻具组合力学模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(5):75-80.

[18] 李立鑫,薛启龙,刘宝林,等.机械式自动垂直钻具的纠斜行为及研究进展[J].西安石油大学学报(自然科学版),2018,33(1):90-97.

[19] 史玉才,孙海芳,岳步江,等.静态推靠式旋转导向钻井工具防自锁设计方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):80-86.

[20] 李士斌,王业强,张立刚,等.静态推靠式旋转导向控制方案分析及优化[J].石油钻采工艺,2015,37(4):12-15.

(编辑 王跃伟)