

万米特深井机械式自动垂直钻井技术 研究进展与展望

田龙军^{1,2}, 薛启龙^{1,2*}, 王 晋^{1,2}, 曲 骏^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083)

摘要:随着大陆科学钻探向万米特深井迈进,井底超300℃、175 MPa的极端工况导致电控垂钻系统失效,机械式垂钻技术凭借纯机械结构与300℃耐温潜力,成为超高温深井防斜打直的核心手段。本文系统梳理了机械式垂钻技术的工作原理与研究进展,对比分析了国内外代表性产品的结构特点与应用效果,指出国内外在纠斜精度、耐温能力和工程化程度方面的显著差距。在此基础上,剖析机械式稳定平台动力学响应、新型推靠执行机构、高温材料与密封三大关键技术问题,指出现有翼肋推靠式系统存在导向能力对地层敏感、翼肋易磨损及稳定平台受黏滑振动影响导致纠斜精度下降等不足。未来应重点突破纠斜精度提升、耐300℃高温材料研发、多场耦合动力学机理研究及国产化工程应用,推动执行机构从“翼肋推靠”向“钻头流体导向”跨越式升级,为万米级大陆科学钻探工程提供技术支撑。

关键词:大陆科学钻探;特深井;自动垂直钻井;机械式垂钻系统;防斜纠斜;稳定平台;翼肋推靠;钻头流体导向
中图分类号:P634.7;TE921+.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)04-0036-08

Research progress and prospects of mechanical automatic vertical drilling technology for ultra-deep wells

TIAN Longjun^{1,2}, XUE Qilong^{1,2*}, WANG Jin^{1,2}, QU Jun^{1,2}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: As continental scientific drilling advances toward 10000-meter ultra-deep wells, the extreme downhole conditions of temperatures exceeding 300 °C and pressures over 175 MPa render electrically-controlled vertical drilling systems ineffective. Featuring a purely mechanical structure and a temperature resistance potential of up to 300 °C, mechanical vertical drilling technology has become the core solution for deviation prevention and straight-hole drilling in ultra-high temperature deep wells. This paper systematically reviews the working principles and research progress of mechanical vertical drilling technology, comparatively analyzes the structural characteristics and field application performance of representative domestic and international products, and identifies significant gaps between China and foreign countries in deviation correction accuracy, temperature resistance, and engineering maturity. On this basis, three key technical issues are examined: the dynamic response of the mechanical stabilization platform under downhole vibrations, innovative push-the-bit actuators, particularly the bit fluid steering concept, and high-temperature materials and sealing. It is pointed out that existing rib-type push-the-bit systems suffer from the inherent limitation of formation-sensitive steering performance, rib wear, and the degradation of deviation correction accuracy caused by stick-slip vibration affecting the stabilization platform. Future research should focus on improving deviation correction

收稿日期:2026-04-19; 修回日期:2026-06-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.04.004

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(编号:2024ZD1000904)

第一作者:田龙军,男,汉族,1999年生,博士研究生,地质资源与地质工程专业,研究方向为机械式垂钻工具,北京市海淀区学院路29号,17812023265@163.com。

通信作者:薛启龙,男,汉族,1983年生,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,主要从事自动垂直钻井技术、旋转导向技术、井下钻具动力学、机械式井下钻具测控方法等方面的研究工作,北京市海淀区学院路29号,xql@cugb.edu.cn。

引用格式:田龙军,薛启龙,王晋,等.万米特深井机械式自动垂直钻井技术研究进展与展望[J].钻探工程,2026,53(4):36-43.

TIAN Longjun, XUE Qilong, WANG Jin, et al. Research progress and prospects of mechanical automatic vertical drilling technology for ultra-deep wells[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 36-43.

accuracy, developing materials resistant to 300 °C, investigating multi-field coupled dynamic mechanisms, and advancing domestic engineering applications, thereby promoting a transformative upgrade of the actuator from "rib-type pushing" to "bit fluid steering" and providing technical support for 10000-meter continental scientific drilling projects.

Key words: continental scientific drilling; ultra-deep well; automatic vertical drilling; mechanical vertical drilling system; deviation prevention and correction; stable platform; rib push-the-bit; bit fluid steering

0 引言

随着“向地球深部进军”战略的推进,大陆科学钻探深度不断向万米迈进,井身轨迹的防斜保直成为制约特深井顺利实施的瓶颈^[1-2]。苏联科拉超深井最初设计终孔 15000 m,实际仅钻至 12262 m,德国 KTB 先导孔纠斜 3 次,中国 CCSD-1 井侧钻纠斜 2 次,均耗费了大量时间和费用^[3-5]。传统钟摆、满眼等被动防斜技术多需轻压吊打,以牺牲钻速换取井身质量,难以满足特深井高效钻进需求。

自动垂直钻井技术通过井下闭环控制实现主动防斜纠斜(其与常规钻井的井眼轨迹对比见图 1),具有随钻、随测、随纠的功能,已成为解决深井超深井井斜问题的核心手段^[6-7]。自动垂直钻井工具(简称垂钻工具)按井斜感应及控制机理不同,可分为电控式和机械式两类。电控式精度高($\leq 0.5^\circ$),但耐温能力有限(通常 $\leq 175^\circ\text{C}$),机械式以纯机械结构实现重力感应与主动纠斜,耐温能力最高 232 °C,工程目标可达 300 °C,是万米特深井超高温环境下防斜打直的优选方案^[8]。本文聚焦机械式自动垂直钻井技术,系统分析其技术挑战、国内外研究进展与未来发展方向。

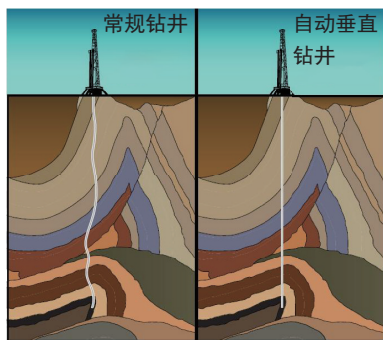


图1 常规钻井与自动垂直钻井井眼轨迹对比

Fig.1 Comparison of borehole trajectories between conventional drilling and automatic vertical drilling

1 机械式垂钻系统工作原理及应用挑战

1.1 机械式垂钻系统基本工作原理

机械式自动垂直钻井系统(简称机械式垂钻系

统)的核心由机械式稳定平台(控制单元)与推靠执行机构(纠斜单元)构成(图2)。其工作原理:当钻具出现井斜时,稳定平台内的偏重块在重力作用下稳定于井眼低边位置,带动上盘阀定位;随钻具旋转的下盘阀的阀孔与上盘阀阀孔对齐时,接通液压流道,高压钻井液进入活塞腔将推靠翼肋推向井眼高边,钻头相应产生指向井眼低边的侧向切削力,实现主动纠斜^[9-10]。按执行机构是否随钻柱旋转可分为静态推靠式与动态推靠式两类,按导向执行机构又分为推靠式和指向式两类。

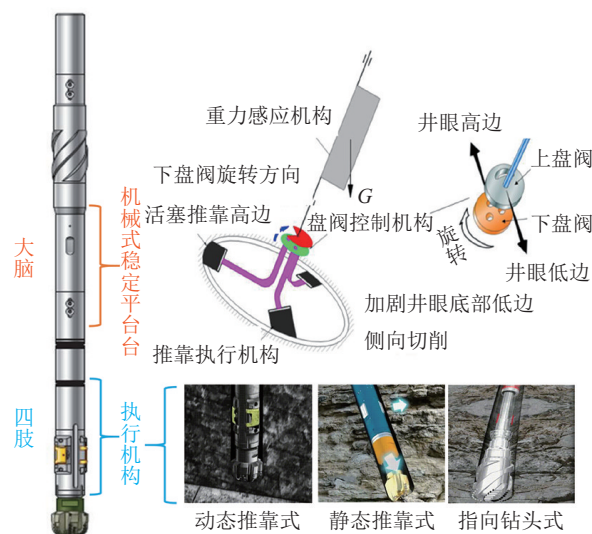


图2 机械式垂钻工具工作原理

Fig.2 Working principle of mechanical automatic vertical drilling tool

1.2 机械式垂钻系统在特深井中应用挑战

近年来我国相继在塔里木、准噶尔、四川等盆地完成了多口万米级特深井,如我国首口万米科探井深地塔科1井(完钻井深 10910 m,井底温度 223 °C)、西南首口万米科探井深地川科1井(完钻井深 10520 m,井底温度 224 °C,地层压力 138 MPa)、准噶尔盆地新安1井、塔里木盆地信源22井与信科6井等(表1)。按平均地温梯度 3 °C/100 m 估算,13000 m 井底温度将达 390 °C,正常地层压力条件下

地层压力约 130 MPa,考虑压力异常系数 1.2~2.1,实际压力可达 156~273 MPa。此外,深部硬岩地层(白云岩、花岗岩、石英岩)易激发钻柱黏滑振动、螺

旋涡动等非线性振动,实测轴向冲击加速度可达 50g,横向冲击可达 624g^[11-12]。

表 1 国内近年已完钻万米特深井概况

Table 1 Overview of completed ultra-deep wells (over 10000 m) in China in recent years

井名	位置	完钻井深/m	井底温度/℃	地层压力/MPa	完钻时间	备注
新安 1 井	准噶尔盆地	11156	210		2025	
信源 22 井	塔里木盆地	11116	230	183	2026	
深地塔科 1 井	塔里木盆地	10910	223	145	2025	
深地川科 1 井	四川盆地	10520	224	138	2025	硫化氢 46 g/m ³
信科 6 井	塔里木盆地	10393	220		2026	

上述极端工况对机械式垂钻系统提出四大核心挑战:(1)耐温性与控制精度的矛盾,机械式耐高温但纠斜精度受井下振动影响较大;(2)稳定平台动态响应,偏重块在振动下摆动导致上盘阀定位精度下降;(3)关键部件高温可靠性,轴承润滑失效、密封老化、金属蠕变等问题突出;(4)推靠力与纠斜效率,硬岩地层需更大推靠力才能产生有效侧向切削。相应地,机械式垂钻系统应满足:(1)所有关键部件(轴承、密封、执行机构)具备优异的高温强度和抗蠕变、抗氧化特性,确保 300℃以上环境中长期稳定工作;(2)重力感应灵敏度高、抗振性能强,井斜控制精度达到 1°以内;(3)承压外壳与密封可满足 175 MPa 以上超高压环境要求。

2 机械式自动垂直钻井技术的研究进展

2.1 国外研究进展

哈里伯顿 V-Pilot 系统(图 3)于 2007 年推出,采用静态推靠式设计,配合钟摆式偏重块,推靠力来源于高压钻井液,适用于 $\Phi 311\sim 559$ mm 井眼。其推靠总成包含 4 组周向均布活塞(每组 4 个,沿轴向等距排列),可获得 4 倍于单一活塞的推靠力,当井斜 $>0.2^\circ$ 时激活纠斜,最高工作温度 200℃。该系统在加拿大 Alberta 地区直井作业中,仅钻进 27 m 即将井斜从 0.79°降至 0.4°。

哈里伯顿 VertiSteer 系统是新一代机械式垂钻产品,采用全旋转动态推靠模式与双层弧面推靠板方案,最高工作温度达 232℃,是目前耐温能力最高的机械式垂钻产品之一。在 Papua New Guinea 超高压页岩构造带完成 $\Phi 444.5$ mm 井眼纠斜作业与 $\Phi 311$ mm 井眼直井作业,狗腿度仅 1.76°/30 m。

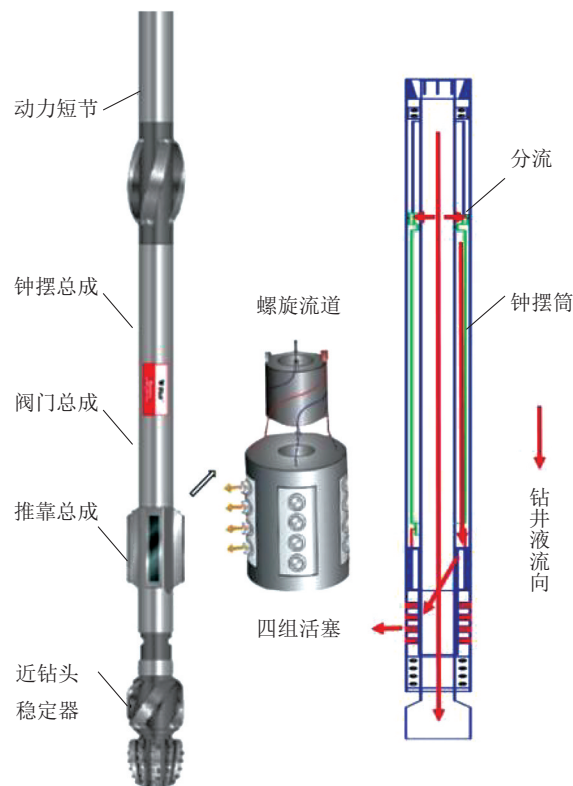


图 3 V-Pilot 外观及结构示意图

Fig.3 Appearance and structural schematic of V-Pilot

Scout Downhole 公司 Vertical Scout(图 4)采用静态推靠设计,适用于 $\Phi 152\sim 660$ mm 井眼。其推靠机构为双层呈十字交叉排布的 4 个弧面推靠板,推靠板半径与井眼半径一致,大面积接触提升稳定性。理论上该系统在井斜 $>0.03^\circ$ 时即产生纠斜能力, $>0.06^\circ$ 达到最大纠斜能力,已在北美地区累计使用超 80000 h,进尺超 1300000 m。

综合国内外代表性机械式垂钻系统,其在推靠

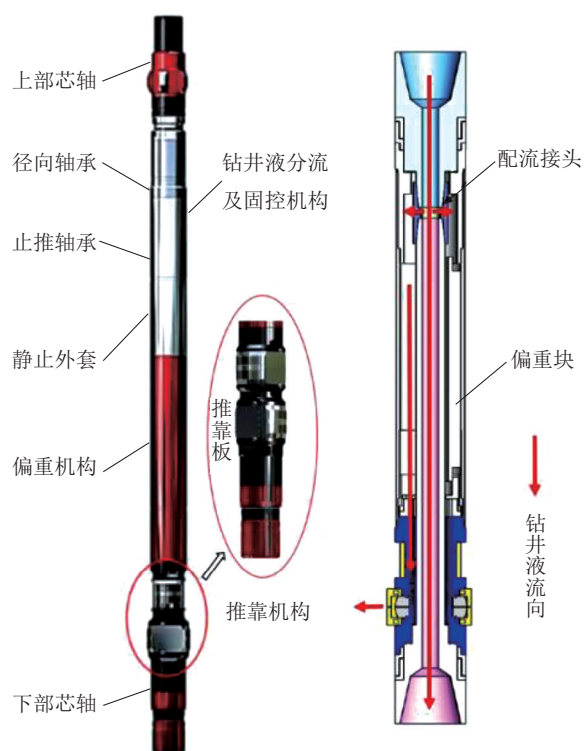


图4 Vertical Scout 结构及工作原理示意

Fig.4 Structure and working mechanism of Vertical Scout

方式、最高工作温度、井斜控制精度及适用井径等关键参数上各具特点,见表2。

2.2 国内研究进展

近年来,国内多家高校和企业开展了机械式垂钻工具的研制开发,如中国石油大学(北京)设计的具有外偏置机构的机械式垂钻工具,中石油西部钻探工程有限公司设计的含液压系统的垂钻工具等,均为机械式垂钻工具的设计提供了新颖的思路。其中,前者采用外偏置结构,利用偏心块在重力作用下感知井斜方向,进而为钻头提供指向井眼低边的纠斜导向作用,结构相对简单;后者则引入井下液压系统,通过液压驱动推靠机构主动向井眼高边施加推靠力实现纠斜,纠斜能力可在较大范围内调节。二者在感斜方式与纠斜执行机构布置上各具特点。

目前,国内仅有中石化胜利钻井院的UPC-VDS垂钻系统(图5)成功进行了现场应用,采用机械式稳定平台取代电控式稳定平台,适用于 $\Phi 311$ mm井眼,耐温 >125 $^{\circ}\text{C}$ ^[6]。其工作原理:井眼发生倾斜时偏重块在重力作用下稳定于井眼低边,对位的上盘阀扇形流道稳定在井眼高边,控制下部旋转执行机构进行纠斜。但偏重式稳定平台控制精度受横向、纵向及黏滑振动影响较大,纠斜精度约为 3° ,与国际先进水平仍有差距^[8,13]。

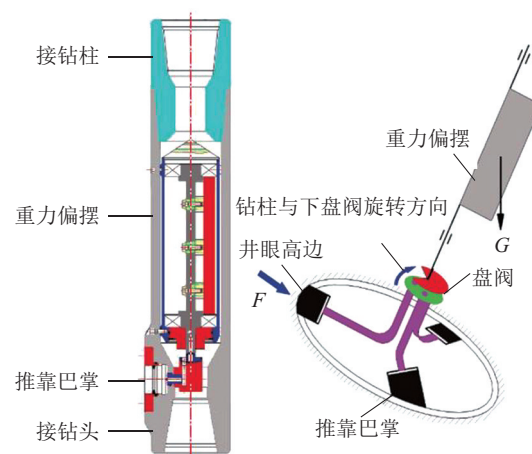


图5 UPC-VDS系统结构及纠斜原理

Fig.5 Structure and deviation-correction principle of UPC-VDS system

此外,中国地质大学(武汉)、武汉科技大学、中国地质大学(北京)、宝鸡石油机械有限责任公司与西安石油大学等单位也相继研制了多种结构的机械式或机电液一体化垂钻工具样机。中石油工程研究院与武汉科技大学联合研制了CGVDS垂钻系统,适用于 $\Phi 311$ mm井眼,主要由执行单元、控制单元和测量单元组成(图6)。该系统由旋转钻柱提供动力,通过钻柱与不旋转外套的相对运动驱动柱塞泵,将钻柱机械能转化为液压能,形成液压系统内的高压油源。

表2 国内外代表性机械式垂钻系统对比

Table 2 Comparison of representative mechanical vertical drilling systems

系统名称	推靠方式	最高工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	井斜控制精度/ $^{\circ}$	适用井径/mm	研发单位
V-Pilot	静态	200	≤ 0.5	311~559	哈里伯顿
VertiSteer	动态	232	≤ 1.76		哈里伯顿
Vertical Scout	静态	>200	≤ 1.0	152~660	Scout Downhole
UPC-VDS	动态	>125	≤ 3.0	311	中石化胜利钻井院

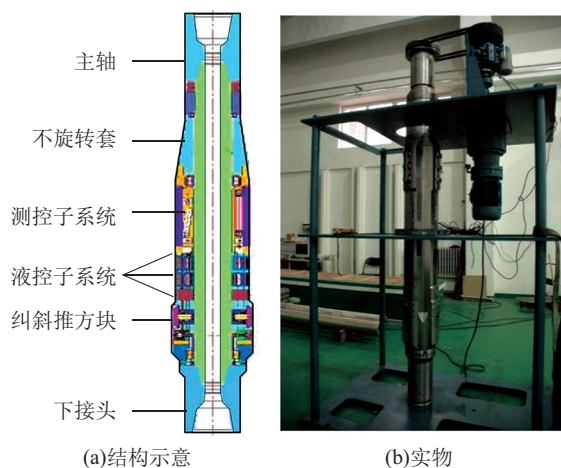


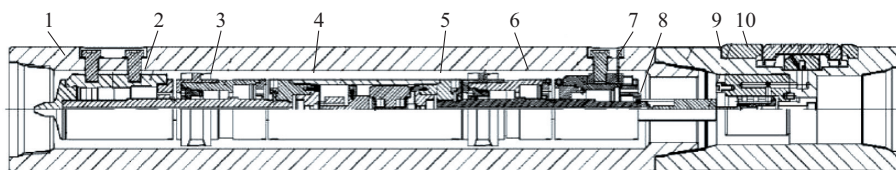
图6 CGVDS垂钻系统

Fig.6 CGVDS vertical drilling system

宝鸡石油机械有限责任公司与西安石油大学联合,成功研制了具有自主知识产权的全旋转推靠式垂钻工具。其结构与Power-V类似,适用于 $\varnothing 311$ mm井眼。该系统主要由工具外筒、全密封上

悬架支撑单元、上下涡轮发电机单元、测控存储单元、全密封下悬架支撑单元、执行机构单元、控制轴、执行活塞和执行矩形推力板等组成(图7),其主要模块均由我国自主研发。

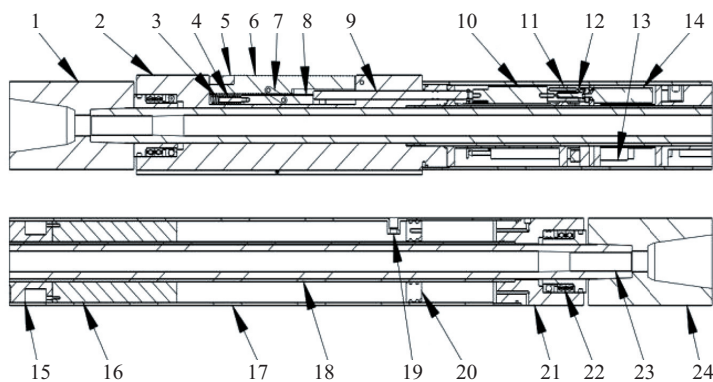
针对地质钻探小井眼特点,中国地质大学(北京)研制出适用于 $\varnothing 152$ mm井眼的电机驱动式垂钻工具(图8)。该工具执行机构采用静态推靠式设计,推靠翼肋为门式(上开式),配合电控稳态式稳定平台,由电机驱动产生推靠力。井斜发生时,系统控制电机正转,带动电机连接螺栓拧紧,电机旋转扭矩经键连接转换为对氮气弹簧传动轴的推力,驱动氮气弹簧及与其相连的推杠轴向运动,从而为连杆式推靠装置提供推出所需的驱动力;翼肋推出过程中由位移传感器检测推杠位移,达到设定位移后电机停止工作,推靠翼肋保持伸出状态推靠井壁进行纠斜。完成纠斜后,系统控制电机反转,带动连接螺栓从氮气弹簧传动轴中旋出,在键连接约束下氮气弹簧轴向运动至初始位置,推靠翼肋在连杆作用下收回。



1—工具外筒; 2—全密封上悬架支撑单元; 3—上涡轮发电机单元; 4—测控存储单元; 5—下涡轮发电机单元; 6—全密封下悬架支撑单元; 7—执行机构单元; 8—控制轴; 9—执行活塞; 10—执行矩形推力板

图7 全旋转推靠式垂钻工具示意

Fig.7 Schematic diagram of full-rotation push-the-bit automatic vertical drilling tool



1—钻头连接套; 2—执行机构壳体; 3—复位弹簧; 4—弹簧支撑轴; 5—镶合金耐磨块; 6—推靠板; 7—连杆; 8—滑车; 9—推杠; 10—氮气弹簧; 11—氮气弹簧传动轴; 12—电控定位法兰; 13—位移传感器; 14—电动机; 15—芯片安装筒; 16—电池节; 17—电控部分外套; 18—电控部分内壳; 19—注油孔; 20—活塞; 21—轴承连接套; 22—轴承部分; 23—内钻杆; 24—钻杆连接套

图8 电机驱动式垂钻工具结构示意图

Fig.8 Structural schematic diagram of motor-driven vertical drilling tool

与此同时,中国地质大学(北京)还研制了适用于 $\varnothing 216$ mm井眼的动态推靠机械式垂钻系统(图9)。该系统工作原理与UPC-VDS垂钻系统相近,区别在于其上下盘阀采用PDC (Polycrystalline

Diamond Compact)凸台结构设计,有效减小了上下盘阀间的当量摩擦半径与流体压差作用面积,从而降低了上下盘阀间的摩擦力矩。

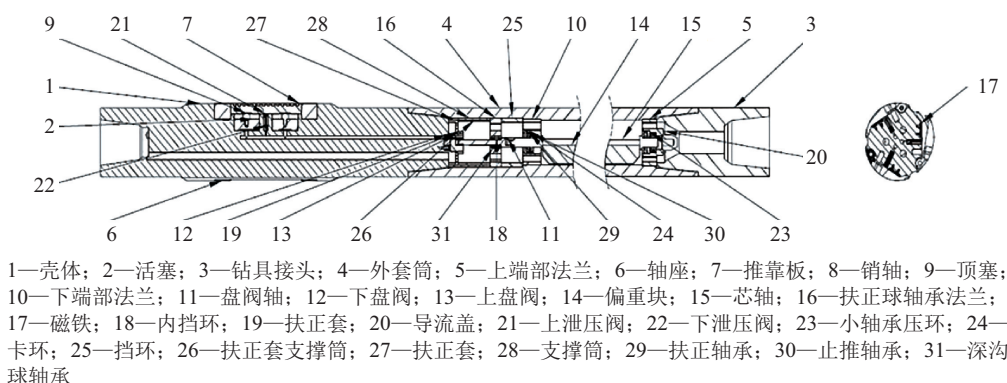


图9 动态推靠机械式垂钻系统结构示意图

Fig.9 Structural schematic diagram of dynamic push-the-bit mechanical vertical drilling system

近两年来,我国万米特深井工程取得重大突破:2025年初,我国首口万米科探井深地塔科1井顺利完钻,井深10910 m,井底温度223℃、压力145 MPa^[14-15];同年10月,我国第二口万米科探井深地川科1井钻探深度也突破万米大关^[16-17]。我国已在海洋超深水钻完井^[18]、致密气定向井优快钻井^[19]、PDC钻头高效破岩^[20]及煤层气水平井^[21]等方向形成了一批自主技术与应用经验,这些工程一方面验证了我国深井钻探关键技术体系的自主可控性,另一方面对机械式垂钻系统的耐温耐压能力、纠斜精度与工程化水平提出了更高要求。

总体而言,我国在机械式垂钻领域与国际先进水平的差距主要体现在:(1)重力感应灵敏度偏低,偏重块受井下振动影响大;(2)纠斜精度与国外1°以内的水平仍有差距;(3)耐温能力偏低,多为125~200℃级别;(4)现场应用井次少,工程化程度不足;(5)相关理论研究尤其是动力学机理研究薄弱。

3 关键技术问题与未来展望

3.1 关键技术问题

(1)机械式稳定平台的动力学响应。稳定平台依靠偏重块在重力下维持井眼低边位置来感知井斜方向,但实际工况中黏滑振动(0.1~5.0 Hz,扭转为主)、钻头跳动(1.0~10.0 Hz,振幅可达1000g)、涡动等动态扰动使偏重块在低边附近摆动,直接影响上

盘阀定位精度,导致纠斜力方向与大小产生波动^[11-12]。近年来,围绕深地塔科1井等万米工程的超高温钻井液与井筒工作液体系已取得重要进展^[22-23],为机械式垂钻系统关键部件在超高温环境中的润滑与密封方案设计提供了参考。此外,针对超深井钻柱的动态疲劳失效规律^[24]及抗超高温随钻测控技术的系统研究^[25],也为稳定平台的动力学建模与振动抑制提供了理论基础与实验参考。因此,深入研究复杂振动环境下稳定平台的动力学响应机制,建立多因素耦合动力学模型,是提升控制精度的关键。

(2)新型推靠方式与执行机构,即钻头流体导向技术(图10)。现有机械式垂钻系统普遍采用翼肋推靠式执行机构,导向能力对地层敏感,翼肋磨损、地层变化及操作参数波动均会影响推靠力传递效率。为突破此固有局限,国外已率先探索“钻头流体导向”新型执行机构。该技术起源于ENTEQ公司推出的SABER旋转导向工具^[26],依靠工具内部由压差驱动的流线型流道对钻头直接施加可控推靠力,实现真正意义上的“钻头导向”,而非“钻具导向”,具有磨损小、可靠性高、单次入井作业时间长、成本低等显著优势,代表了传统推靠模式的一次全面革新。然而,目前国外对该技术实行严格保密,执行机构实现方式与测控方式均未公开,亟需开展自主研发。未来研究方向包括:基于伯努利原理构建流固耦合分析模型,建立执行机构设计理论

与轨迹控制预测模型,研制原理样机并开展室内实验验证,推动机械式垂钻系统从“翼肋推靠”向“流体导向”升级。

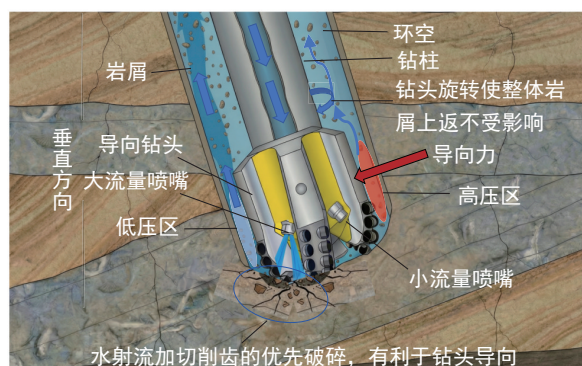


图 10 钻头推靠执行机构纠斜原理
Fig.10 Deviation-correction principle of bit-steering actuator

(3)高温环境下的材料与密封。在 $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温环境中,传统钢材屈服强度显著下降、蠕变加剧。关键部件需选用镍基、钴基高温合金,轴承可采用陶瓷滚动体或固体润滑,密封需采用金属-石墨复合密封或镍基合金C形密封环替代传统橡胶密封。

3.2 未来展望

(1)提升纠斜精度。优化偏重块设计与几何参数提高重力感应灵敏度,改进盘阀结构提高液压流道控制精确性,开发新型阻尼减振机构降低振动干扰,建立精确动力学模型为结构优化提供理论支撑。

(2)突破耐高温关键材料。研发耐温高强度合金材料,开发耐 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固体润滑轴承与密封系统,研制耐高温耐磨推靠翼肋材料和涂层,提高整体耐腐蚀性能以适应 H_2S 等腐蚀介质环境。

(3)深化动力学机理研究。建立考虑摩擦非线性、流固耦合、热力耦合的多场动力学模型,开展实验室模拟与数值仿真,揭示偏重块动态响应规律,研究推靠行为对底部钻具组合和井斜趋势的影响机制。

(4)加快国产化工程应用。推动垂钻工具与绳索取心工艺深度融合,加快国产机械式垂钻系统的工程化应用与测试标准体系建设,打破国外技术垄断。

4 结论

(1)机械式垂钻工具以耐高温、高可靠性、低成

本等优势成为万米特深井超高温环境下防斜打直的最佳选择。国外 V-Pilot ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$)、VertiSteer ($232\text{ }^{\circ}\text{C}$)、Vertical Scout 等产品井斜控制精度可达 $0.5^{\circ}\sim 1.0^{\circ}$,但对市场实施技术垄断和只租不售政策,极大增加了我国钻井企业的负担。国内虽然在机械式垂钻系统方面也取得了一定进展,但在稳定性、可靠性、耐温性和使用寿命等方面与国际先进水平仍存在较大差距,尤其在井斜控制精度和重力感应灵敏度方面差距明显,尚无法满足超万米特深井的垂钻需求。

(2)机械式垂钻系统面临的核心问题是稳定平台在复杂振动下的动力学响应机制不明确、纠斜精度待提高、翼肋推靠方式对地层敏感、关键部件高温可靠性需加强。未来应聚焦新型“钻头流体导向”执行机构研发、纠斜精度提升、耐高温材料突破、动力学机理研究与国产化工程应用,推动机械式垂钻执行机构从“翼肋推靠”向“钻头流体导向”的跨越式升级,为万米级大陆科学钻探工程提供可靠的技术保障。

参考文献(References):

- [1] 苏义脑.地质导向钻井技术概况及其在我国的研究进展[J].石油勘探与开发,2005,32(1):92-95.
SU Yinao. Geosteering drilling technology and its development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1):92-95.
- [2] 百家社,苏义脑.井斜控制理论与实践[M].北京:石油工业出版社,1990.
BAI Jiazhi, SU Yinao. Theory and Practice of Well Deviation Control[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [3] Oppelt J, Chur C, Feld D, et al. New concepts for vertical drilling of boreholes[C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: SPE/IADC Drilling Conference, 1991:SPE-21905-MS.
- [4] 樊腊生,王达.科钻一井钻探施工技术路线和钻探施工概述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(7):72-76.
FAN Lasheng, WANG Da. Summary of drilling techniques applied in China's first deep scientific drilling Well CCSD-1 and drilling operation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(7):72-76.
- [5] Chur C, Oppelt J. Vertical drilling technology: a milestone in directional drilling[C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: SPE/IADC Drilling Conference, 1993:SPE-25759-MS.
- [6] 韩来聚,倪红坚,赵金海,等.机械式自动垂直钻井工具的研制[J].石油学报,2008,29(5):766-768.
HAN Laiju, NI Hongjian, ZHAO Jinhai, et al. Development of mechanical tool for automatic vertical drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5):766-768.
- [7] 柴麟,张凯,刘宝林,等.自动垂直钻井工具分类及发展现状[J].石油机械,2020,48(1):1-11.

- CHAI Lin, ZHANG Kai, LIU Baolin, et al. Classification and development status of automatic vertical drilling tools[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(1): 1-11.
- [8] 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.
- LI Lixin, XUE Qilong, LIU Baolin, et al. Straightening behavior analysis and research progress of mechanical automatic vertical drilling tools[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2018, 33(1): 90-97.
- [9] Ligrone A, Oppelt J, Calderoni A, et al. The fastest way to the bottom: straighthole drilling device-drilling concept, design considerations, and field experience[C]//European Petroleum Conference. Milan: Society of Petroleum Engineers, 1996: SPE-36826-MS.
- [10] Foster P E, Aitken A. Offshore application of a novel technology for drilling vertical boreholes[J]. SPE Drilling & Completion, 1996, 11(1): 37-43.
- [11] 张龙, 张凯, 周琴, 等. 机械式自动垂钻工具粘滑振动抑制方法研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(11): 43-49.
- ZHANG Long, ZHANG Kai, ZHOU Qin, et al. Stick-slip vibration suppression method for mechanical automatic vertical drilling tools[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11): 43-49.
- [12] 李然然, 张凯, 柴麟, 等. 黏滑振动下机械式自动垂直钻具稳定平台的控制性能研究[J]. 工程设计学报, 2021, 28(6): 746-757, 775.
- LI Ranran, ZHANG Kai, CHAI Lin, et al. Research on control performance of mechanical automatic vertical drilling tool stabilization platform under stick-slip vibration[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2021, 28(6): 746-757, 775.
- [13] 李立鑫, 薛启龙, 刘宝林, 等. 机械式自动垂直钻具控制性能分析及优化[J]. 地质科技通报, 2018, 37(3): 268-274.
- LI Lixin, XUE Qilong, LIU Baolin, et al. Analysis and optimal design of control performance in automatic mechanical vertical drilling tool[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(3): 268-274.
- [14] 《钻探工程》编辑部. 2024年探矿工程十大新闻[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 1-3.
- Editorial Office of Drilling Engineering. 2024 top 10 news in exploration engineering[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 1-3.
- [15] 汪海阁, 黄洪春, 纪国栋, 等. 中国石油深井、超深井和水平井钻完井技术进展与挑战[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 1-11.
- WANG Haige, HUANG Hongchun, JI Guodong, et al. Progress and challenges of drilling and completion technologies for deep, ultra-deep and horizontal wells of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 1-11.
- [16] 刘岩生, 张佳伟, 黄洪春. 中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 312-324.
- LIU Yansheng, ZHANG Jiawei, HUANG Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 312-324.
- [17] 余朝毅. 四川盆地超深层钻完井技术进展及其对万米特深井的启示[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 40-48.
- SHE Chaoyi. Progress in ultra-deep drilling and completion technology in the Sichuan Basin and its implications for extra-deep wells of more than ten thousand meters in depth[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 40-48.
- [18] 杨进, 李磊, 宋宇, 等. 中国海洋油气钻井技术发展现状及展望[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2308-2318.
- YANG Jin, LI Lei, SONG Yu, et al. Current status and prospects of offshore oil and gas drilling technology development in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2308-2318.
- [19] 罗翰. 川西新场构造带须二段致密气藏定向井优快钻井关键技术[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 132-140.
- LUO Han. Key technology for optimal fast drilling of directional well in Xujiahe-2 Formation of Xinchang Structure, western Sichuan[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 132-140.
- [20] 汤凤林, 赵荣欣, Нескоромных В В, 等. PDC钻头钻进岩石破碎过程及其与钻进规程参数关系的分析研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 5-14.
- TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, Нескоромных В В, et al. Analytical research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in PDC bit drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 5-14.
- [21] 鲜保安, 高德利, 徐凤银, 等. 中国煤层气水平井钻完井技术研究进展[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1974-1992.
- XIAN Baoan, GAO Deli, XU Fengyin, et al. Research progress of coalbed methane horizontal well drilling and completion technology in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1974-1992.
- [22] 孙金声, 王建华. 深地塔科1井钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2025, 42(2): 155-166.
- SUN Jinsheng, WANG Jianhua. Drilling fluid technology for deep subsurface Tako-1 well[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2025, 42(2): 155-166.
- [23] 孙金声, 王韧, 龙一夫. 我国钻井液技术难题、新进展及发展建议[J]. 钻井液与完井液, 2024, 41(1): 1-30.
- SUN Jinsheng, WANG Ren, LONG Yifu. Challenges, developments, and suggestions for drilling fluid technology in China[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2024, 41(1): 1-30.
- [24] 王文昌, 徐祖凯, 周星, 等. 超深井钻柱动态疲劳失效特征及参数优选[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 118-125.
- WANG Wenchang, XU Zukai, ZHOU Xing, et al. Dynamic fatigue failure characteristics and parameter optimization of drill strings in ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 118-125.
- [25] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯, 等. 油气井随钻测量技术发展思考与展望[J]. 石油科学通报, 2023, 8(5): 535-554.
- SU Yinao, DOU Xiurong, GAO Wenkai, et al. Discussion and prospects of the development on measurement while drilling technology in oil and gas wells[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(5): 535-554.
- [26] Enteq Technologies plc. The SABER tool: steer-at-bit enteq rotary tool[EB/OL]. (2024-03-18) [2025-12-01]. <https://www.enteq.com/products/rotary-steerable-system-srss/>.