

海上丛式井防碰混合钻头仿真与实际应用经济性分析

江 鹏 张天亮 张玉强 丁 胜 (中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

王海峡 (中石化江钻石油机械有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘 要: 针对新钻井眼与原井眼之间的防碰问题。采用仿真和试验的方法, 提出新型防碰混合切削技术, 开展钻头套管钻穿试验。研究表明: 防碰混合钻头具有“轨迹精确控制、碰撞征兆预警、套管钻穿延时”能力; 在渤海绥中 36-1 油田成功应用 3 口井, 平均机械钻速提高 24.22%, 可以解决丛式井加密钻井效率低作业难题; 平均进尺提高 23.68%, 防碰混合钻头的应用具有较高经济效益, 对海上丛式井钻进具有重要意义。

关键词: 丛式井组; 加密钻井; 套管钻穿; 现场试验; 经济效益

中图分类号: TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 015-0061-03

Simulation of anti-collision hybrid drill bit in offshore cluster well and economic analysis of practical application

Gang Peng, Zhang Tianliang, Zhang Yuqiang, Ding Sheng (Cnooc (China) Limited Tianjin branch, Tianjin 300452, China)

Wang Haixia (Sinopec Jiangzuo Petroleum Machinery Co., LTD, Wuhan Hubei 430223, China)

Abstract: To address the problem of avoiding collisions between new and existing wellbores, a new anti-collision hybrid cutting technology was proposed through simulation and experimentation, and bit casing drill-out tests were carried out. The research shows that the anti-collision hybrid bit has the capabilities of precise trajectory control, collision warning, and delayed casing drill-out. It has been successfully applied in three wells in the Suizhong 36-1 Oilfield of the Bohai Sea, with an average ROP increase of 24.22%, which can solve the problem of low drilling efficiency in the infill drilling of cluster wells. The average footage has increased by 23.68%, and the application of anti-collision hybrid bits has high economic benefits, which is of great significance for drilling in offshore cluster wells.

Key words: Cluster well group; Encrypted drilling; The casing is drilled through; Field test; Economic benefit

近年来, 随着丛式钻井与加密井工艺技术的日益成熟, 丛式加密钻井已成海上油田稳住产能重要措施之一, 但新钻井眼与原井眼之间的防碰问题是安全高效钻井最大挑战^[1]。

目前, 在防碰井段钻进主要以牙轮钻头为主, 但由于牙轮钻头机械钻速低, 使用寿命受限, 在一般在钻完防碰井段后, 起钻更换为 PDC 钻头继续钻进, 既增大了钻井工作繁琐性, 也降低钻井工作效率。因此, 如何提高加密井钻进效率已成为钻头设计中亟待解决的重要问题。

目前, 制约丛式加密井安全高效钻进的诸多因素中, 钻头的切削结构是其中之一, 它直接涉及到钻头切削方式和钻进速度, 对井下作业安全起到了重要作用。据此, 笔者提出新型防碰混合切削技术, 开展钻头套管钻穿试验研究, 研制 $\Phi 406.4\text{mm}$ 防碰混合钻头具有“轨迹精确控制、碰撞征兆预警、套管钻穿延时”能力, 在渤海绥中 36-1 油田成功应用 3 口井, 平均进尺和平均机械钻速分别提高 23.68% 和 24.22%, 验证防碰混合钻头设计合理性, 解决了丛式井加密钻井

效率低作业难题, 具有良好应用前景。

1 加密钻井施工平台

海上油田受平台面积限制, 整体井网密集, 一般平台井槽槽口间距为 $2.0\text{m} \times 1.8\text{m}$ ^[2]。随着老油田产量下井, 丛式井加密钻井已成为稳住产能重要措施之一, 其中, 新钻井眼与原井眼之间的防碰问题是安全高效钻井最大挑战^[3]。主要表现为:

轨迹精确控制难: 井口间距较小, 新钻井眼与原井眼井眼轨迹在空间上存在交叉, 防碰距离小。在加上地层抗压强度低, 导向钻进效率低, 轨迹控制难度大。

碰撞预警判断难: 常规牙轮钻头泥岩地层切削效率低和使用寿命受限, 在中浅层井无法实现一趟, 且钻遇岩石和套管扭矩和泵压无明显变化, 碰撞预警难识别。

钻穿套管延时难: 上部导向一般钻头配弯螺杆钻具, 在高转速工况下, 常规 PDC 钻头刮削效率过高, 极易钻穿邻井套管, 难以被发现。另外, PDC 钻头在软地层存在工具面不稳, 增加施工难度。

2 防碰混合钻头仿真分析

2.1 钻头结构

防碰混合钻头融合牙轮钻头冲击压碎和 PDC 钻头刮削破岩的双重优势, 实现机械钻速可对标 PDC, 定向操控和安全性可对标牙轮钻头, 主要技术如下:

低扭矩技术: 采用 3 刀翼 +3 牙轮结构对称布局, 钻头工作平稳; 优化 PDC 布齿, 超低力平衡 ($< 1\%$), 阶梯保径, 能解决大定向井段摩阻扭矩大、托压严重和工具面不稳定的问题。

混合破岩技术: 利用混合破岩切削技术, 实现牙轮齿冲击破碎和复合片剪切切割交替接触套管, 既能产生较大振动或扭矩变化, 增强预警效果, 也降低套管钻穿风险。

2.2 布齿优化

PDC 主切削齿采用 19mm 复合片, 大齿间距中等后倾角布齿, 内锥齿间距 7~9mm, 鼻肩部齿间距 5~7mm, 能增强钻头吃入能力; 内锥后倾角 $16^\circ \sim 19^\circ$, 鼻肩部后倾角 $20^\circ \sim 25^\circ$, 能增强复合片抗冲击能力^[4]; 内锥平面片, 鼻肩部三棱齿复合片, 降低外锥 PDC 钻头攻击性, 延迟刮伤套管速度。牙轮采用“3-3-4”齿排匀形齿设计, 露齿高较 PDC 复合片 $> 3 \sim 6\text{mm}$, 在 PDC 外锥 (肩部、鼻部) 进行牙轮齿保护性覆盖, 同时在 PDC 规径 - 肩部设置球头支撑齿, 无切削刃, 目的是遇到套管延长钻穿时间, 安全性更好。

2.3 水力分析

基于钻头底部轮廓包络面和 9 个出口直径 15.87mm 水力结构, 建立防碰混合三维实体模型, 将模型导入 FLUEN 软件中进行流体力学分析。钻头内外环空流场可视为稳定不可压缩湍流流场, 钻头流场入口流量为 65L/s; 环境压力为 15MPa; 钻井液为海水, 密度 1.025g/cm^3 , 钻头表面和井壁按照固壁无滑移边界条件处理, 及相当速度为 0, 忽略钻头旋转^[5]。

图 1 为钻头表面壁面切应力云图。由图 1 可知, 钻头表面壁面切应力分布均匀, 水力设计合理, 能很好地清洗附着在牙轮钻头和 PDC 刀翼上的岩屑, 最大切应力为 4590Pa, 钻头表面和齿不会出现冲蚀, 提升钻头破岩效率和降低钻头表面温度, 延长钻头使用寿命。

井底漫流速度云图如图 2 所示。由图可以发现, 最大漫流 24.6m/s。边喷嘴处梯度较大, 形成较强的横向漫流, 顺利将岩屑推离井底, 外围部分岩屑清洗较好。通过设置中心喷嘴, 提高了钻头中心区域的井底压力, 也能形成足够的横向漫流, 加强对岩屑的运移作用、井底和钻头清洗, 防止钻头重复破碎井底岩屑,

提高钻进速度和进尺。

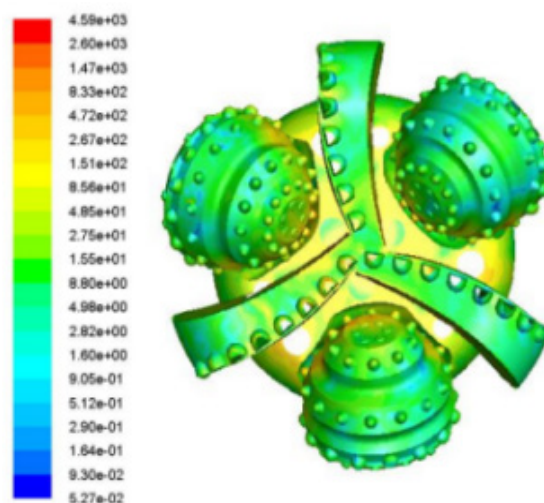


图 1 钻头表面壁面切应力云图

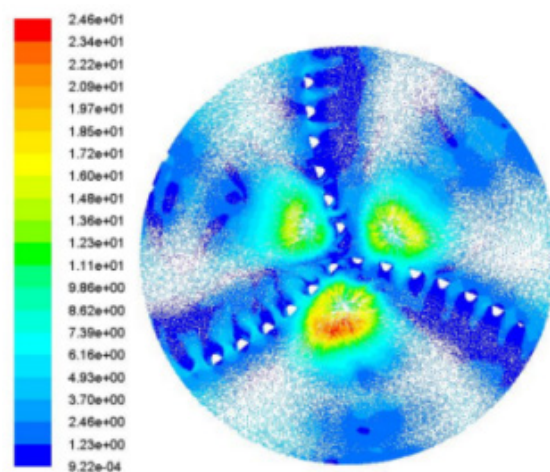


图 2 钻头井底漫流速度云图

3 室内试验

3.1 模型建立

根据海上丛式组加密钻井作业实际工况, 将钻头钻进方向与 13-3/8" 套管轴向夹角 30° , 模拟钻头钻穿临井套管, 建立防碰井段钻头钻套管实验模型, 测试不同切削结构钻头钻穿套管时效, 为新型防碰混合钻头研制提供参考依据。

3.2 实验条件

设备名称: 钻头试验台架; 规格型号: 600KN; 设备主要技术参数: 静钻压 600KN, 动钻压 350KN、转速 300rpm、钻杆行程 1.2m、扭矩 $12000\text{N} \cdot \text{m}$ 。

套管预埋: 13-3/8" 套管 + 混凝土; 实验钻头: 牙轮钻头、PDC 钻头和混合钻头; 石油套管: 42MnMo7、钢级 N80, 斜厚为 21.8mm (垂厚 10.92mm)。

钻进参数: 钻压 10KN, 转速 30RPM, 排量 10L/s,

接触混凝土后下行 300mm, 确定完成钻穿套管后即刻停止钻进。

3.3 对比分析

PDC 钻头刮削为主, 铁屑呈卷曲状, 铁屑的厚度约为 0.1–0.10mm, 长度在 1mm 到 25mm 之间; 牙轮钻头冲击破碎为主, 铁屑呈颗粒状, 形状大小不一, 厚度约为 0.1–0.21mm, 长度在 1mm 到 12mm 之间; 混合钻头铁屑形状包含卷曲状和颗粒状, 厚度约为 0.1–0.15mm, 长度在 1mm 到 20mm。

在相同参数下, 防碰混合钻头钻穿套管用时 103s, 是 PDC 钻头的 2.15 倍, 安全性好于 PDC。钻套管平均扭矩 1.15KN.m, 升高 4.12 倍, 超过 4.0 倍, 振动预警提示好于牙轮钻头。如表 1 所示。

表 1 牙轮、PDC、混合钻头钻套管速度和扭矩变化情况

钻头型号	机械钻速 m/h		扭矩 KN.m		钻穿套管用时 S
	混凝土	套管	混凝土	套管	
牙轮钻头	0.19	0.08	0.34	0.33	272
PDC 钻头	1.15	0.45	0.23	1.84	48
混合钻头	0.70	0.21	0.35	1.11	103

4 现场试验及经济性评价

绥中 36 和蓬莱 19 油田加密井防碰井段主要为一开 $\Phi 406.4\text{mm}$ 井眼, 钻遇地层为平原组、明化镇、馆陶组。以粘土、泥岩、中砂岩为主, 地层比较疏松, 抗压强度 $\leq 2000\text{psi}$, 可钻性非常好。此类地层松软, PDC 钻头工具面不稳, 一般采用牙轮钻头钻进, 但牙轮在泥岩地层机械钻速低, 提速受限。因此, 研制 $\Phi 406.4\text{mmKPM1933FST}$ 防碰混合钻头。

钻具组合: 16" 防碰钻头 +9-5/8"PDM(403mm/1.5°)+8"F/V+12-1/4"STB+8"NMDC+8"HOS(SDI)+8"NMDC+8" 液压震击器 +X/O+5-1/2"HWDP*14。

钻井参数: 钻压 0.5 ~ 2t, 排量 60 ~ 65L/s, 泵压 6 ~ 8MPa, 转速 30 ~ 40r/min, 扭矩 1 ~ 6kN.m。

应用效果: $\Phi 406.4\text{mmKPM1933FST}$ 钻头施工 6 口井, 平均进尺 428.67m, 平均机械钻速 111.83m/h, 较邻井分别提高 23.68% 和 24.22%。试验结果表明: 新型防碰混合钻头定向工具面稳定, 泵压波动小, 造斜率 $\geq 5^\circ/30\text{m}$, 轨迹控制好, 破岩效率高, 提速效果明显。

经济性评价: 单只防碰混合钻头可施工 6 口井, 是纯牙轮钻头钻井数 3 倍, 减少更换钻头时间, 且钻井效率提升 $\geq 15\%$ 。预测 $\Phi 406.4\text{mm}$ 井眼节省钻井周期约 3h。绥中 36 和蓬莱 19 油田二次调整开发计划施工井约 151 口井, 扣除钻头成本, 单井节省钻井费用

约 5.5 万元, 两油田累节省钻井费用约 830.5 万元, 如表 2 所示。

表 2 绥中 36 和蓬莱 19 油田 $\Phi 406.4$ 井眼费用节省 (万元)

油田	钻井数 (口)	节省费用 (万元)
绥中 36	21	115.5
蓬莱 19	130	715
合计	151	830.5

近海老油田开发进入中后期, 地层能量衰减、剩余油分布复杂化等问题日益凸显, 稳产压力持续加大。在此背景下, 实施二次开发调整工程已成为保障能源安全的必然选择, 防碰混合钻头备精准轨迹控制能力, 以规避邻井碰撞风险, 这为防碰混合钻头创造了更多的市场机遇, 具有显著的推广应用价值。

5 结论及建议

防碰混合钻头充分融合牙轮钻头冲击压碎和 PDC 钻头刮削破岩的双重优势, 在外锥以牙轮钻头切削齿为主, 内锥 PDC 齿切削为主, 肩部 - 规径布置无切削刃球头支撑齿。这种设计既实现钻头“轨迹精确控制、碰撞征兆预警、套管钻穿延时”, 也提升机械钻速和钻进效率。

新研制 $\Phi 406.4\text{mmKPM1933FST}$ 在绥中 36 和蓬莱 19 油田应用 6 口井, 平均进尺和平均机械钻速较牙轮钻头提高了 23.68% 和 24.22%, 解决牙轮钻头机械钻速低和 PDC 定向效率差等问题, 验证防碰混合钻头设计合理性, 解决了丛式井加密钻井效率低作业难题, 且经济更佳, 建议推广应用。

参考文献:

- [1] 姜伟. 海上密集丛式井组再加密调整井网钻井技术探索与实践 [J]. 钻井工程, 2011, 31(1): 69-72.
- [2] 赵少伟, 徐东升, 王菲菲, 等. 渤海油田丛式井网整体加密钻井防碰技术 [J]. 石油钻探技术, 2018, 40(12): 112-114.
- [3] 刘刚, 杨超, 蔡鹏, 刘澎湃. 海上多平台井眼防碰监测系统的设计 [J]. 石油机械, 2014, 42(8): 68-70.
- [4] 肖新磊, 席境阳, 杜旭, 等. 胜利油田页岩油大井眼高效钻进技术研究与应用 [J]. 钻探工程, 2023, 50(6): 122-127.
- [5] 祝效华, 邓福成, 贾彦杰, 等. PDC 钻头流场数值仿真与水力结构优化 [J]. 石油机械, 2010, 38(38): 1-4.

作者简介:

江鹏, 男, 高级工程师, 2015 年毕业于中国石油大学 (北京) 船舶与海洋结构物设计制造专业, 现任中海石油 (中国) 有限公司天津分公司钻井总监, 主要从事钻井现场监督工作。