

Application of the Bi-directional Swinging System in Deep-Offset Horizontal Wells

Li Yu

Jiangnan Petroleum Engineering Co., Ltd., Second Drilling Company, Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

To address the “support pressure” challenge in sliding drilling of ultra-deep horizontal shale gas wells, this study conducted field tests and mechanism analysis using a 5000m-level deep-offset horizontal well platform. By comparing Well A (without the swinging system) and Well B (with the system), we systematically analyzed its mechanisms for drag reduction, pressure transmission, directional efficiency, and anti-sticking. Results demonstrate: The swinging system converts static friction to dynamic friction, reducing average friction coefficient by 35.3%, improving pressure transmission efficiency by 20%, and enhancing sliding drilling efficiency by 50%. Tool face stability reached 96%, with significantly fewer directional adjustments required. The “angle compensation” algorithm maintains inclination loss below 3%. Additionally, the system effectively clears cuttings beds, suppresses stick-slip vibrations, and reduces filter cake thickness, preventing keyway and differential pressure stuck pipe incidents. This study shows that the swinging system significantly improves drilling efficiency and safety in deep shale gas wells without requiring additional downhole tools.

Keywords

two-way torsional swing; large displacement horizontal well; support pressure; friction; shale gas

双向扭摆系统在大位移水平井中的应用

李宇

江汉石油工程有限公司钻井二公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

针对页岩气超深长水平井滑动钻进中的“托压”难题, 本文以某平台5000m级大位移水平井为研究对象, 开展了双向扭摆系统的现场试验与机理研究。通过对比未使用扭摆系统的A井与使用扭摆系统的B井, 系统分析了扭摆系统在减阻、钻压传递、定向效率及防卡方面的作用机制。结果表明: 扭摆系统通过将静摩擦转化为动摩擦, 使平均摩擦系数下降35.3%, 钻压传递效率提升20个百分点, 滑动钻进效率提高50%; 工具面稳定率达96%, 定向调整次数显著减少; 通过“角度补偿”算法可将造斜率损失控制在3%以内; 同时, 系统有效清除了岩屑床、抑制粘滑振动并降低滤饼厚度, 实现预防键槽与压差卡钻事故的发生。研究表明, 扭摆系统在无需增加井下工具的前提下, 显著提升了深层页岩气水平井的钻井效率与安全性。

关键词

双向扭摆; 大位移水平井; 托压; 摩擦; 页岩气

1 引言

随着页岩气开发走向深层、长水平段, 滑动钻进“托压”已成为制约钻井效率与井眼质量的核心瓶颈^[1-2]。旋转导向系统(Rotary Steering System)虽能彻底解决该问题, 但单井工具费用高达600–800万元, 难以在国内页岩气平台大规模推广。双向扭摆系统自2015年Noble公司首次提出以来, 在北美二叠纪盆地取得显著成效^[3], 但针对中国南方海相页岩“超深、超长、超高扭”水平井的适应性研究尚属空白。本文以某示范页岩气田5000m级大位移水平井为对象,

开展扭摆系统现场试验与机理研究, 重点回答以下三个科学问题:

- 扭摆减阻的关键力学机制及敏感参数;
- 扭摆对螺杆钻具造斜率与卡钻风险的定量影响;
- 扭摆预防卡钻的作用。

2 技术原理与试验设计

2.1 扭摆系统组成

地面系统由顶驱扭矩控制单元、扭摆主控箱、实时通信模块及人机界面组成, 通过设定扭摆角度 θ (500–900°) 与转速 ω (5–50rpm/min) 产生周期性正反扭转。井下无需额外工具, 保持原有滑动导向工具面不变。

【作者简介】李宇(1990–), 男, 中国湖北仙桃人, 硕士, 工程师, 从事石油与天然气钻井研究。

2.2 减阻机理

扭摆将钻柱一井壁静摩擦转化为动摩擦，宏观上降低轴向摩擦系数，微观上通过钻柱径向微动（振幅0.2–0.4mm）破坏岩屑床剪切强度，同时产生0.5–1.2Pa的附加环空剪应力，提高岩屑启动效率^[4]。

2.2.1 工具面平衡模型

工具面平衡旨在通过调整泵冲和钻压，使扭摆系统在螺杆处施加的扭矩与螺杆反扭矩相互抵消，从而稳定工具面。螺杆反扭矩 T_r 与泵压 P_p 和钻压 WOB 相关，并假设为线性关系：

$$T_r = \alpha \cdot P_p + b \cdot WOB$$

其中：

T_r 为螺杆反扭矩（单位：Nm）；

P_p 为泵压（单位：Pa）；

WOB 为钻压（单位：N）；

α 和 b 为常数，取决于螺杆类型和井眼条件（单位：

α 为 m^2 ， b 为 m ）。

扭摆系统从井口施加振荡扭矩 T_o ，该扭矩沿钻柱衰减，在螺杆处的有效扭矩为 $T_o \cdot e^{-\alpha L_m}$ ，其中 α 为扭矩衰减系数（单位：1/m）， L_m 为螺杆深度（单位：m）。为达到工具面平衡，要求： $T_o \cdot e^{-\alpha L_m} = -T_r$

整理得井口扭摆扭矩公式：

$$T_o = -(\alpha \cdot P_p + b \cdot WOB) \cdot e^{\alpha L_m}$$

此公式表明，通过调整泵压和钻压，可控制井口扭摆

扭矩，使螺杆处净扭矩为零，实现工具面平衡。

2.2.2 传导点深度优化模型

传导点深度 L 是扭摆作用力的终点，理论上越接近螺杆效果越好，但需平衡造斜率。卡点计算公式为：

$$L = K \frac{\lambda}{P}$$

其中：

L 为传导点深度（单位：m）；

K 为计算系数，取决于钻柱的轴向刚度（单位：N·m/cm）；

λ 为三次平均伸长（单位：cm）；

P 为三次扭转周期中正转最大拉力与原悬重的差值（单位：N）。

为优化效果，则有：

$$L_o = K \frac{\lambda}{P}$$

此公式用于在扭摆过程中通过测量 λ 和 P 来验证或调整扭摆参数，使传导点深度接近螺杆深度。

3 试验井概况

3.1 施工数据对比

在某坝区块某平台选择了地质条件、井身设计相似的A井（未使用扭摆系统）和B井（使用扭摆系统）进行对比。两口井的对比井段均为增斜扭方位作业段，地层为志留系龙马溪组硬质页岩。（表1）。

表1 扭摆系统减阻与钻压传递效果对比

对比参数	A井 (未使用扭摆系统)	B井 (使用扭摆系统)	效果对比	对比参数	A井 (未使用扭摆系统)	B井 (使用扭摆系统)	效果对比	对比参数
平均摩阻系数	0.34	0.22	下降 35.3%	平均摩阻系数	0.34	0.22	下降 35.3%	平均摩阻系数
钻压传递效率	65%	85%	提高 20 个百分点	钻压传递效率	65%	85%	提高 20 个百分点	钻压传递效率
等效额外钻压	基准	+4.0 吨	钻头获更大破岩力	等效额外钻压	基准	+4.0 吨	钻头获更大破岩力	等效额外钻压
钩载波动幅度	±150kN	±90kN	降幅 40%	钩载波动幅度	±150kN	±90kN	降幅 40%	钩载波动幅度
滑动钻进效率	12m/h	18m/h	提高 50%	滑动钻进效率	12m/h	18m/h	提高 50%	滑动钻进效率

效果分析：

减阻效果显著：摩阻系数的显著降低直接转化为钻压的有效传递。在相同钩载下，B井能够传递更多钻压至钻头，相当于为钻头额外增加了4吨的有效钻压，极大提高了机械钻速。

作业平稳性提升：钩载波动幅度下降40%，表明井下钻柱的“粘-滑”现象得到有效抑制，降低了疲劳损伤风险。

3.2 定向效率

B井工具面稳定率96%，较A井提高18个百分点；定向调整次数由29次降至17次；滑动机械钻速由4.2m/h提高至5.1m/h，节约纯钻时间8.7h。

3.3 对造斜率的影响

在造斜率 $> 8^\circ / 30m$ 的强增斜段，扭摆导致螺杆弯外壳指向方位产生 $\pm 15^\circ$ 瞬时偏移，钻头切削轨迹呈螺旋形，实测狗腿度下降11.3%。通过引入“角度补偿”算法（扭摆中心角提前 $8-12^\circ$ ），可将造斜率损失控制在3%以内^[5-6]。

3.4 防卡机理

岩屑床破坏：扭摆附加剪应力使岩屑启动临界流速降低22%，ECT显示环空岩屑浓度由8.3%降至4.1%；

粘滑抑制：周期性能量预加载使钻柱扭转振动幅度削弱60%，消除20–50Hz高频粘滑；

微环空效应：0.2MPa/周期压力脉冲阻断滤饼增厚，井径扩大率减少28%，显著降低压差卡钻风险。

表2 扭摆系统防卡钻效果监测数据（B井水平段2396m平均值）

监测项目	单位	无扭摆邻井平均值	启用扭摆井平均值	绝对差值	相对改善	测试方法/仪器
环空岩屑浓度	%	8.3	4.1	-4.2	-51%	ECT电导率断层扫描
岩屑床厚度	mm	7.5	4.2	-3.3	-44%	超声井径仪+钻柱夹持力反演
滤饼厚度	mm	1.2	0.45	-0.75	-62%	井下显微摄像+岩心爪取样
井径扩大率	%	12	8.6	-3.4	-28%	多臂井径仪60臂
粘滑振动幅度	rad	0.35	0.14	-0.21	-60%	扭转加速度计1kHz采样
粘滑振动主频	Hz	42	18	-24	-57%	FFT频谱分析
扭矩波动幅度	kN·m	6.5	2.8	-3.7	-57%	顶驱扭矩传感器
钩载波动幅度	kN	180	110	-70	-39%	死绳传感器
微环空间隙	mm	0	0.25	0.25	—	井径-钻柱外径差值
微环空压力脉冲	MPa	0	0.2	0.2	—	存储式压力计
滤饼渗透率	mD	8.5	3.2	-5.3	-62%	室内岩心流动实验
页岩水化膨胀应力	MPa	2.4	1.6	-0.8	-33%	应力应变传感器
键槽卡钻事故次数	次/井	3	0	-3	-100%	钻井日报统计
压差卡钻时间	h	15.3	0	-15.3	-100%	钻井日报统计
划眼次数	次	18	5	-13	-72%	钻井日报统计
划眼时间	h	32	9	-23	-72%	钻井日报统计
井壁剥落面积	m ² /100m	2.8	1.1	-1.7	-61%	超声成像测井
钻柱摩擦系数	无因次	0.34	0.21	-0.13	-38%	大钩载荷模型反演

4 结语

扭摆系统将深部页岩水平井摩擦系数降低35%，钻压传递效率提升20%，滑动钻速提高50%，以“零井下附加工具”方式显著缓解“托压”瓶颈。

扭摆通过瞬时方位扰动降低造斜率11%，但采用角度补偿算法可控制损失在3%以内，同时工具面稳定率提升至96%，定向效率显著改善。

扭摆通过附加环空剪应力与周期压力脉冲，有效清除岩屑床、减薄滤饼并消除高频粘滑，实现键槽与压差卡钻事故“零发生”，为深层页岩气安全快速钻井提供了可靠技术保障。

参考文献

[1] 李根生,黄中伟,田守崧.页岩气长水平井钻井完井关键技术与挑

战[J].石油钻采工艺,2023,45(1):1-10.

[2] 王建华,张来斌,刘刚.大位移井滑动钻进托压机理及控制方法研究进展[J].中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(4):95-104.

[3] NobleCorporation.SurfaceDrillstringOscillationSystemforExtended-ReachDrilling[R].SPE-174434-MS,2015.

[4] 陈峰,杨进,胡永雄.钻柱扭转振荡对岩屑床清除的力学机制[J].石油学报,2021,42(3):365-373.

[5] 张凯,熊继有,魏武.某示范页岩气田超长水平井钻井技术实践[J].天然气工业,2024,44(2):85-92.

[6] 刘清友,许洁.基于MWD实测的滑动钻进钻压传递效率评价方法[J].钻探工程,2020,47(8):1-6.