◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2025008

引用格式：蒲文学，李伟，王宇飞，等. 胜利页岩油牛页一区试验井组旋转导向钻井技术 [J]. 石油钻探技术，2025，53(1)：24–30.
PU Wenxue, LI Wei, WANG Yufei, et al. Rotary steerable drilling technology for test wells in Niuye Block I in Shengli Shale Oil Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(1): 24–30.

胜利页岩油牛页一区试验井组旋转导向钻井技术

蒲文学， 李 伟， 王宇飞， 赵海滨， 薄玉冰， 林 珂

（中石化经纬有限公司地质测控技术研究院，山东青岛 266071）

摘 要：胜利页岩油牛页一区地质工程条件复杂，为了提升该区块试验井组定向钻井施工质量，开展了旋转导向钻井技术研究。通过开展旋转导向及配套工具优选、三维井眼轨道优化及井眼轨迹控制、造斜率预测及修正、井温风险预测模型等技术研究与应用探索，建立了钻具组合优选模板、井眼轨迹控制策略、导向力标准指令集、高温作业管控程序等方法，形成了页岩油旋转导向钻井标准作业模式，并在牛页一区 20 口井进行了现场应用。应用效果表明，该作业模式有效提升了机械钻速，增大了单趟钻进尺与单井旋转导向进尺，实现了牛页一区 2 000 m 长水平段一趟钻完成。研究结果为胜利济阳坳陷页岩油高效开发提供了新的技术途径。

关键词：页岩油；旋转导向；井眼轨迹控制；定向钻井；高温作业；牛页一区；胜利油田

中图分类号：TE249 **文献标志码：**A **文章编号：**1001–0890(2025)01–0024–07

Rotary Steerable Drilling Technology for Test Wells in Niuye Block I in Shengli Shale Oil Field

PU Wenxue, LI Wei, WANG Yufei, ZHAO Haibin, BO Yubing, LIN Ke

(*Geosteering & Logging Research Institute, Sinopec Matrix Corporation, Qingdao, Shandong,* 266071*, China*)

Abstract: The geological and engineering conditions of Niuye Block I in the Shengli Shale Oil Field are complex. To enhance the quality of directional drilling in test wells within this block, a study on rotary steerable drilling technology was conducted. Through research and practical exploration of technologies such as rotary steerable systems, tool optimization, 3D trajectory optimization, trajectory control, built-up rate prediction and correction, and well temperature risk prediction models, several methods were developed. These included an optimization template for bottom hole assembly, trajectory control strategies, standard instruction sets for steering forces, and procedures for high-temperature operations. As a result, a standard operational mode for rotary steerable drilling in shale oil was established and applied in 20 wells in Niuye Block I. The application results demonstrate that this operational mode effectively improves the rate of penetration (ROP), increases the footage per single run and well using the rotary steerable system, and enables the construction of a 2,000-meter-long horizontal section in a single run. These findings provide a new technical approach for the efficient development of shale oil in Jiyang Depression of Shengli Shale Oil Field.

Key words: shale oil; rotary steerable; trajectory control; directional drilling; high-temperature operation; Niuye Block I; Shengli Oilfield

胜利页岩油国家级示范区是我国首个陆相断陷盆地国家级页岩油示范区，储量达 410×10^8 t 左右[1–3]。2019 年以来，相继在博兴、牛庄、民丰洼陷取得重大战略突破，多口页岩油井峰值日产油量超百吨，展现了良好的勘探开发前景[4–5]。然而，济阳坳陷页岩地层为新生界陆相沉积，地层压力系统复杂，平面、

收稿日期：2023–07–23；**改回日期：**2025–01–01。

作者简介：蒲文学（1981—），男，山东莒县人，2003 年毕业于石油大学（华东）石油工程专业，2012 年获中国石油大学（华东）油气井工程专业工程硕士学位，高级工程师，主要从事旋转导向钻井技术研究与管理工作。E-mail: puwx5.osjw@sinopec.com。

通信作者：李伟，liw1420.osjw@sinopec.com。

基金项目：青岛市自然科学基金项目“多源激励作用下旋转导向高频扭转振动形成机理及调控方法”（编号：24–4–4–zrjj–65–jch）和中国石化“十条龙”项目“旋转地质导向核心技术攻关及应用”（编号：P21080）联合资助。

纵向非均质性强，储层埋藏深、温度高、夹层多，给钻井施工带来了极大的挑战[6−7]。

牛页一区为胜利页岩油主力区块，采用“平面上平行、纵向上多层交错”的多层系立体开发模式，以实现资源一次动用最大化，但此开发模式的定向钻井难度与邻井碰撞风险较大，且缺乏相关施工经验[8−10]。因此，为解决牛页一区试验井组三开井段地质工程条件复杂、井眼轨迹控制难度大和井下高温等难点，亟待开展页岩油旋转导向钻井技术研究。为此，笔者开展了旋转导向工具优选、三维井眼轨道优化及井眼轨迹控制、造斜率预测及修正、井温风险预测及管控等关键技术研究，建立了页岩油旋转导向钻井标准作业模式，并在牛页一区 20 口井进行了应用，机械钻速、单趟钻进尺与单井旋转导向进尺大幅提升，实现了长水平段一趟钻完成，为高效开发胜利页岩油提供了技术支持。

1　旋转导向钻井技术难点

胜利页岩油牛页一区地质工程条件复杂，面临储层埋藏深度大、非均质性强、地层压力系统复杂、地温梯度高、井眼轨迹控制难度大等技术难点[11−12]，具体表现为：

1）地质条件复杂。受构造环境影响，胜利页岩油地层压力体系复杂、局部发育高压，钻井过程中易发生井涌、溢流、油气侵；目的层周边断层发育，地层倾角变化大，水平段追层调整幅度大，优质储层钻遇率提升难；目的层不规则发育条带状高灰质夹层、可钻性差，钻进中易造成旋转导向工具超限振动和钻头崩齿。

2）井眼轨迹控制难度大。牛页一区 4 个平台共部署了 20 口开发井，具有“平面上平行、纵向上多层交错”的特征。立体“井工厂”开发模式易导致三维井眼轨道偏移距增大，增大了井眼轨道的复杂程度、中靶及长水平段井眼轨迹控制的难度，且多井密集也增大了邻井碰撞风险。

3）井底温度高。牛页一区预测地温梯度约为 3.6～4.0 ℃/100m，水平段井底平均温度高于 150 ℃。井下高温对旋转导向系统的使用寿命及稳定性的影响较大，主要是对电路板及电子元器件的破坏，要求旋转导向工具和螺杆钻具具有良好的抗高温性能，否则极易引起旋转导向工具发生故障，影响钻井时效。

2　旋转导向钻井关键技术

旋转导向钻井系统是在钻柱旋转钻进的同时完成井眼轨迹导向控制的，全程保持高速旋转，无需滑动钻进，井眼平滑、井径规则，井眼质量高，为完井作业和后期压裂作业奠定良好基础，是开发页岩油气藏的钻井利器。

2.1　旋转导向类型优选

由于立体“井工厂”三维水平井井眼轨迹控制难度大、邻井碰撞风险高，且泥页岩层长水平段滑动钻进时钻具极易发生粘卡、托压等现象。为此，选用旋转导向技术进行三开造斜段及水平段施工。

牛页一区先后使用 Geo-Pilot 7600 系统和“经纬领航”系统进行定向钻井施工。施工过程中发现 Geo-Pilot 7600 系统托压较为严重，切向振动较高，平均机械钻速较低，且起下钻多次遇阻。研究发现，Geo-Pilot 7600 系统长 18.50 m，带有长 4.00 m、外径 194.0 mm 的非旋转外套，有 3 个满眼稳定器，整体刚性较大，施工时岩屑返出程度较低，在井眼扩大率较小的牛页一区钻进中易发生托压问题。静态推靠式导向原理的“经纬领航”系统长 11.50 m，带有长 1.20 m、外径 192.0 mm 的非旋转外套，有 1 个满眼稳定器和长约 4.50 m 的柔性短节，整体刚性较小，施工时岩屑返出程度更高，对牛页一区的适应性更好。

“经纬领航”系统与 Geo-Pilot 7600 系统在牛页一区的应用效果见表 1。“经纬领航”系统和 Geo-Pilot 7600 系统均入井 15 趟，但经纬领航”系统总进尺多 5 066.00 m，平均单趟钻进尺多 337.74 m，平均机械钻速提高 8.5%，说明“经纬领航”系统具有更好的稳定性、更高的破岩效率和更强的耐高温适应性，更适合于牛页一区施工作业。

表 1　经纬领航系统与 Geo-Pilot 7600 系统应用效果对比

Table 1　Comparison of application effects between MatriNavi and Geo-Pilot 7600

导向系统	入井趟数	进尺/m	单趟钻进尺/m	循环时间/h	纯钻时间/h	机械钻速/(m·h^{-1})	最高循环温度/℃
经纬领航	15	17 442	1 162.80	2 088.14	1 167.4	14.94	144
Geo-Pilot 7600	15	12 376	825.06	1 884.50	898.3	13.77	138

2.2　旋转导向配套工具优选

2.2.1　配套钻头优选

牛页一区三开下部地层为大段硬质泥岩、灰质夹层，可钻性差，钻头吃入困难、磨损快，破岩效率低。Geo-Pilot 7600 系统与五刀翼、五水眼的史密斯 SDi516 钻头配套使用。SDi516 钻头具有高内锥、短保径特征，适用于静态指向式旋转导向，兼顾了造斜能力与稳定性。

“经纬领航”系统应用初期配套 SDi516 钻头，应用发现造斜能力与机械钻速均不理想，这是由于具有高内锥特性的 PDC 钻头，钻出井底的形状为凸”形，不适合静态推靠式旋转导向工具进行侧向切削造斜[13]。通过分析钻头的布齿、内锥角、保径长度，选用了 TK56 钻头。该钻头采用脱钴 ION 复合片技术，设计采用单排齿结构，具有较强攻击性，并可以兼顾振动控制能力。此外，该钻头还布置了 3−2−3−2−3 排布的倒划眼齿，为井下工具安全提供保障。“经纬领航”系统与 TK56 钻头和 SDi516 钻头配套的应用效果如表 2 所示，可以看出 TK56 钻头的造斜率、机械钻速与单趟钻进尺更具优势，分别提高了 22%、14% 和 31%。因此，综合考虑造斜能力、攻击性与稳定性，确定牛页一区选用 TK56 钻头与“经纬领航”系统配套施工。

表 2　“经纬领航”系统与 TK56 和 SDi516 钻头配套的应用效果

Table 2　Comparison of application effects between TK56 and SDi516 using MatriNavi

钻头型号	造斜率/((°)·(30m)$^{-1}$)	机械钻速/(m·h^{-1})	单趟钻进尺/m
TK56	4.25	15.33	1 179
SDi516	3.48	13.44	899

2.2.2　配套螺杆选型

牛页一区全部选用旋转导向专用的 7 头 4.5 级低速高扭螺杆，其最大输出扭矩可达 19 kN·m，更适用于长度 20 m 左右的旋转导向底部钻具，低转速、高扭矩配比传动机构的性能更优，可稳定输出扭矩，确保高载荷下平稳运行，减少旋转导向底部钻具反扭矩的冲击。

2.3　三维井眼轨道优化及井眼轨迹控制方法

为了提升储层钻遇率与井眼轨迹控制效率，采用取地质−工程一体化模式协同优化井眼轨道，控制靶点的数量和位置，形成了“直—增—稳—增扭—增—平”的三维六段制轨道、动态 A 靶框、水平段轨迹控制窗的轨道设计方法[14]。

三维六段制轨道如图 1 所示，OA 为直井段；AB 为第一增斜段，采用铅垂面圆弧曲线进行设计；BC 为稳斜段；CD 为增斜扭方位段，要求在 D 点对准目标方位；DT_A 为第二增斜段，此时方位角已对准只需增斜中靶；T_AT_B 为水平段。设计思路是，将传统三维五段式轨道中第二个增斜扭方位的圆弧段拆分为三维增斜扭方位段与二维铅垂面上的增斜段，即先对准靶点方位再二维增斜中靶，可有效降低中靶难度，并且可提前预留调整空间，以便灵活控制井眼轨迹。为了保证牛页一区储层钻遇率，地质导向时一般会在大井斜段根据随钻伽马数据调整 A 靶垂深，若不预留调整空间，将无法保证储层钻遇率。

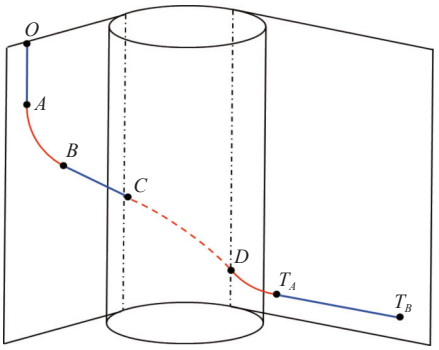


图 1　三维六段制轨道示意

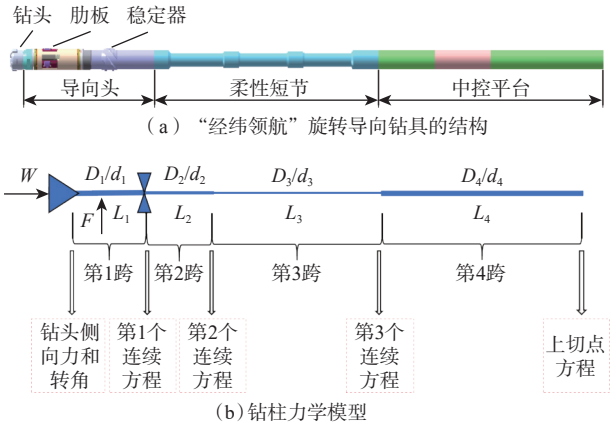
Fig.1　3D six-section trajectory

动态 A 靶框以最优 A 靶点为圆心，以一定的设计半径（牛页一区为 50 m）作为平面 A 靶框，实际 A 靶控制在动态 A 靶框内即可，以便于降低钻井难度、提高钻井速度。为解决水平段盲目追层导致的轨迹调整频繁、局部狗腿度较大的问题，水平段采用动态井眼轨迹控制窗[15]。首先根据夹层发育特征及构造特征设计一条最优轨道，然后根据压裂规模设计上下轨道控制线，水平段井眼轨迹控制在上下轨道控制线内即可，实现靶点追踪不停钻，既能保证储层钻遇率，又能减少井眼轨迹调整幅度和次数，从而达到提高钻井时效、降低施工难度的目的。

2.4　造斜率预测及修正方法

基于纵横弯曲梁理论[16−17]，考虑“经纬领航”系统钻具的结构及工作原理，将推靠力视为集中力，在稳定器接触点处、柔性短节上下两端变截面处设置梁节点，将底部钻具划分为 4 个跨梁，构建了“经纬领航”旋转导向钻柱力学模型（见图 2）。图 2(b) 中，F 为导向力，N；W 为钻压，N；L 为梁结构长度，m；D 为结构外径，m；d 为结构内径，m。综合运用钻头−地层相互作用模型[18] 与平衡趋势角法[19]，形成“经纬领航”系统造斜率预测方法，预测流程如

图 3 所示。



（a）“经纬领航”旋转导向钻具的结构

（b）钻柱力学模型

图 2　“经纬领航”旋转导向钻具的结构及力学模型

Fig.2　Structure and mechanical model of MatriNavi rotary steerable drilling tool

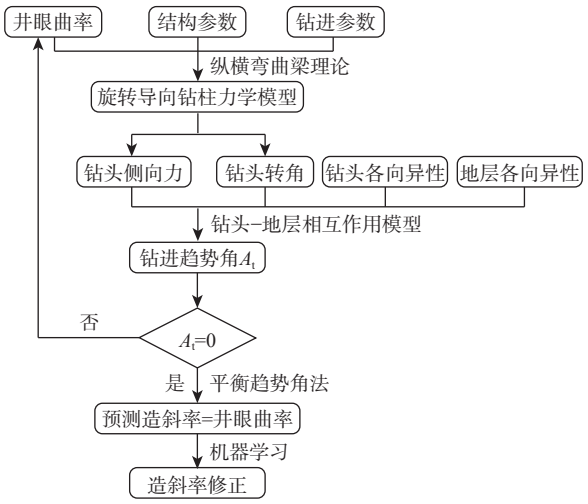


图 3　“经纬领航”旋转导向造斜率预测流程

Fig.3　Flow chart for build-up rate prediction by rotary steerable system using MatriNavi

为了确定目标造斜率对应的所需导向力，采用该方法计算得到了导向力百分比与理论造斜率变化曲线，如图 4 所示。导向力百分比代表实际所用导向力与最大导向力的比值，“经纬领航”系统最大导向力为 25 kN，即为 100% 导向力。然而，由于牛页一区断层发育、构造变化幅度大，导致理论造斜率与实钻井眼曲率会有一定偏差，影响了导向指令的准确性，需多次调整指令进行试钻，影响钻井时效。为此，建立了牛页一区关键层位不同机械钻速下的实钻曲率与导向力数据库，通过机器学习校正导向力–理论造斜率对应曲线，进而形成了牛页一区不同层位的导向力标准指令集（见表 3），以便在控制井眼轨迹时，根据目标造斜率直接选用对应的导向力，减少反复调试指令造成的时效损失。

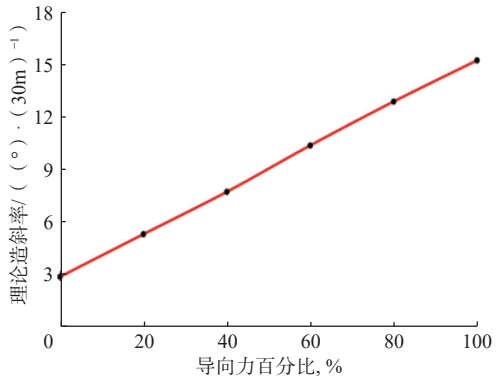


图 4　理论造斜率随导向力百分比变化的曲线

Fig.4　Change in steering force percentage and theoretical build-up rate

表 3　不同层位与机械钻速下的导向力标准指令集

Table 3　Standard instruction set for steering force at different layers and ROPs

层位	目标造斜率/((°)·(30m)$^{-1}$)	不同钻速的导向力百分比, %		
		10～15 m/h	15～20 m/h	>20 m/h
沙三下	4.0～4.5	21～25	32～38	
	4.5～5.0	32～38	38～45	
	5.0～6.0	40～44	45～51	
	>6.0	44～48	51～57	
沙四纯上	4.0～4.5	30～34	32～38	38～45
	4.5～5.0	32～38	38～42	45～48
	5.0～6.0	41～48	51～54	54～61
	>6.0	48～52	54～58	>63

2.5　高温风险预测及管控方法

2.5.1　钻前井温风险预测

基于流体力学和传热学理论，采用有限元模拟与室内试验、现场实测相结合的方法，考虑储层物性、井眼轨迹、钻具组合、摩擦生热等地质和工程因素的影响，研究钻井液性能、循环参数对井底温度场时空演化规律的影响，形成了循环与停泵条件下的页岩油井下温度预测模型[20]，用于钻前预测页岩油长水平段温度变化规律，计算流程如图 5 所示。

基于牛页一区 4 口已钻井实测井下温度数据，反演得到预测模型中的地层导热系数、流固边界对流换热系数，利用校验后的模型预测了后续 4 口井的随钻井下温度；NYX–803HF 等 4 口井引入了降温设备，利用这 4 口井实测数据反演井下降温设备的最大降温能力，并预测了后续 8 口井的随钻井下温度，结果如图 6 所示。由图 6 可知，预测结果与随钻

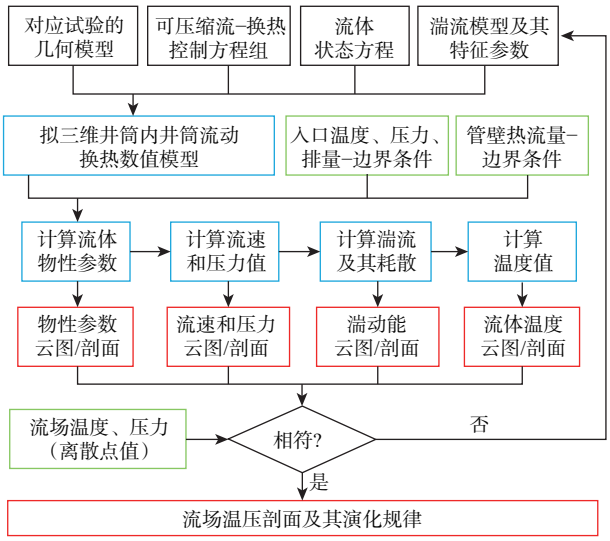


图 5　页岩油井下温度预测流程

Fig.5　Temperature prediction under shale oil wells

测试结果吻合较好，误差控制在 5%～8%。可在钻前利用该方法有效预测井底温度，并根据预测结果优选不同耐温性能的“经纬领航”系统。若预测井底温度低于 145 ℃，选用 150 ℃ 常温型系统；若预测温度高于 145 ℃，选用 165 ℃ 高温型系统。

2.5.2　引入地面降温装置

牛页一区引入“风冷+水冷”的地面降温装置，其采用清水喷洒在换热器盘管外表面形成均匀的水膜、受热后形成饱和温热蒸汽，空气由塔体下方的进风口进入塔内，喷淋水洒在换热管表面进行蒸发热交换，热量由风机排入大气层，从而实现全过程降温。引入降温装置后，循环温度平均可降低 10～15 ℃，保证了旋转导向钻具可长时间在 125～135 ℃ 温度下进行钻进，降低了工具因高温造成的不可逆损毁风险。

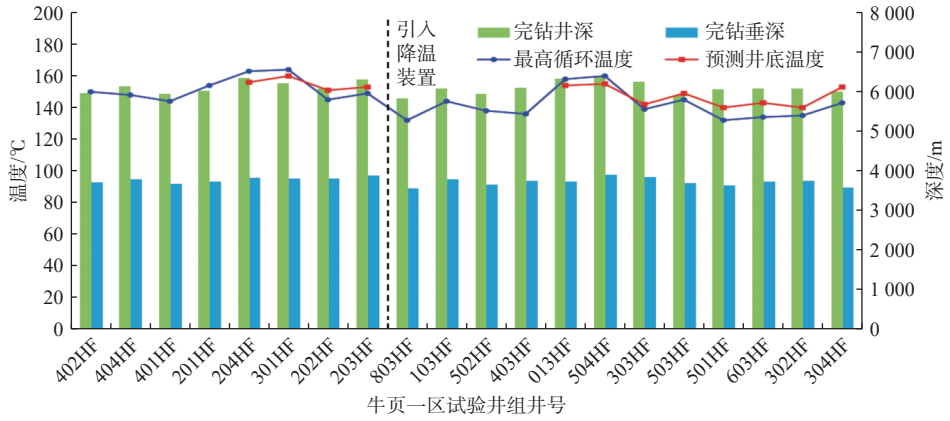


图 6　牛页一区井底实测温度与预测温度对比

Fig.6　Comparison between measured and predicted temperatures at bottom of wells in Niuye Block I

2.5.3　钻中高温作业管控程序

旋转导向钻进中高温作业管控程序包括以下步骤：1）若实时温度达到 125 ℃，需要开启降温设备，密切关注工具工作状态及温度上升速度；2）实时温度达到 130 ℃ 以上时，每升高 5 ℃，便需要在钻完一柱后划眼循环降温，直至实时循环温度稳定并降低 2～3 ℃，其间可以上下活动钻具，尽量避免高转速旋转，严禁不开泵旋转工具；3）若提离井底循环 45 min 后温度仍无法降低或在恢复钻进 10 min 内温度又升至原温度，则认为温度无进一步降低空间，认可该温度并继续钻进；若不满足上述条件，则认为温度有进一步降低空间，返回步骤 2）；4）若钻具提离井底循环 45 min 温度仍无法降低或恢复钻进 10 min 内温度又升至 150 ℃，必须停止作业，按照高温作业起钻程序进行起钻。

3　页岩油旋转导向钻井标准作业模式

牛页一区通过应用积累，细分工序流程，排查生产时效关键点，结合旋转导向工具优选、三维井眼轨道优化及井眼轨迹控制、造斜率预测及修正、高温风险预测及管控等关键技术，形成了页岩油旋转导向钻井标准作业模式，其中关键技术包括：

1）钻前难点分析。一是借鉴邻井及前期施工井资料，分析区块地质与工程技术难点，增强工作的预见性、主动性和有效性；二是综合评价旋转导向系统入井时机和入井次数，算好“经济账”，确定旋转导向系统的使用时机。

2）旋转导向及系统配套工具优选。一是选用“经纬领航”系统，其地层适应性好、造斜能力强，

无额外压降要求，连续施工性能稳定；二是选用TK56钻头，其兼顾了造斜能力、攻击性与稳定性；三是选用7头4.5级低速高扭旋转导向专用螺杆，进一步提高工具的破岩能力。

3）地质−工程一体化井眼轨迹控制。一是采用三维六段制轨道，降低中靶难度，提前预留调整空间，提高井眼轨迹控制的灵活性；二是基于随钻参数识别层位和井眼轨迹动态着陆，充分利用箱体厚度，优选“地质+工程”的双甜点层段，减少井眼轨迹调整次数；三是根据层位划分、层位机械钻速和井眼轨迹控制效果进行钻后一体化分析，总结单井施工经验，促进技术迭代提升。

4）施工工序优化。一是综合待钻层位、机械钻速等因素，拟合导向力与井眼曲率的关系，形成导向力标准指令集，提升导向指令控制精度，提升井眼轨迹控制时效；二是优化指令下传工序，将指令下传工序与划眼工序结合，在划眼过程中完成指令下传；三是结合实钻情况优化改进测斜脉冲序列，缩短测斜工序等待时长。

5）高温管控技术。一是利用页岩油井温预测方法，进行钻前长水平段高温风险预测，为旋转导向耐温系列工具优选提供依据；二是引入地面钻井液循环降温装置，循环温度达到125 ℃时开启，保证旋转导向工具长时间处于“舒适温度区间”，避免工具因高温过早失效；三是形成高温作业管控程序，保证钻井过程中井底温度不会急剧升高，降低电子元器件高温损坏风险，延长工具趟钻进尺。

6）其他施工工艺。一是强化固控设备使用，降低劣质固相含量，保证井筒钻井液的性能，保持更好的携岩效果；二是按照钻井设备以及旋转导向工具的可耐受范围，尽可能将排量提至34～36 L/s施工，以保障井眼清洁程度尽可能最高，减少短起下钻次数；三是在振动管控允许前提下，使用更高的钻进参数，钻压100～120 kN，转速70～80 r/min+螺杆，以获得尽可能高的机械钻速。

4　现场应用效果

胜利页岩油牛页一区试验井组共完钻20口井，钻井施工可分为前期摸索、作业模式试验和标准作业模式推广等3个阶段。摸索阶段由于缺乏页岩油藏定向钻井施工经验，进行了各类技术组合的应用实践；试验阶段论证了不同旋转导向系统的适用性，选用了更适用的“经纬领航”旋转导向系统及配套工具；推广阶段进一步完善配套施工工艺，形成了旋转导向标准作业模式。不同阶段的现场应用情况如表4所示。

表4　不同阶段的现场应用效果对比

Table 4　Comparison of field application effects in different stages

阶段	应用井数	机械钻速/（m·h^{-1}）	单趟钻进尺/m	单井进尺/m
摸索阶段	12	13.79	862.11	1 220.50
试验阶段	4	14.63	976.40	1 293.17
推广阶段	4	15.52	1 345.43	2 354.50

由表4可知，页岩油旋转导向钻井标准作业模式推广阶段的机械钻速比前期摸索阶段提高了12.55%，单趟钻进尺提高了56.04%，单井旋转导向进尺提高了92.91%。此外，推广阶段的4口井中，NYX−501HF井、NYX−603HF井和NYX−302HF井等3口井实现了2 000 m长水平段一趟钻完成。其中，NYX−603HF井一趟钻进尺2 644 m，“经纬领航”旋转导向系统入井时间376.0 h，循环时间310.6 h，纯钻时间201.0 h，创该系统循环时间最长纪录。现场应用表明，旋转导向钻井标准作业模式能够有效提升机械钻速，大幅提升单趟钻进尺与单井旋转导向进尺，能有效保障牛页一区试验井组2 000 m长水平段一趟钻完成。

5　结论与建议

1）针对胜利页岩油牛页一区旋转导向钻井技术难点，开展了旋转导向系统及配套工具优选、三维井眼轨道优化及井眼轨迹控制、造斜率预测及修正、井温风险预测与管控等技术的研究与应用探索，形成了页岩油旋转导向钻井标准作业模式。

2）页岩油旋转导向钻井标准作业模式能够有效提升机械钻速、增大单趟钻进尺与单井进尺，牛页一区2 000 m长水平段一趟钻完成，实现了胜利济阳页岩油的高效开发。

3）受济阳坳陷复杂地质工程条件影响，当前旋转导向钻井技术的针对性和适用性还存在一定不足，尚需进一步完善立体“井工厂”定向开发模式，建议开展耐温175 ℃旋转导向工具的研发、三维井眼轨迹闭环控制导向和远程智能控制等技术攻关，形成更为完善的胜利页岩油旋转导向钻井技术体系。

参　考　文　献

References

[1] 马永生, 冯建辉, 牟泽辉, 等. 中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展 [J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 22–30.
MA Yongsheng, FENG Jianhui, MU Zehui, et al. The potential and exploring progress of unconventional hydrocarbon resources in Sinopec[J]. Strategic Study of CAE, 2012, 14(6): 22–30.

[2] 孙焕泉, 蔡勋育, 周德华, 等. 中国石化页岩油勘探实践与展望 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 569–575.
SUN Huanquan, CAI Xunyu, ZHOU Dehua, et al. Practice and prospect of Sinopec shale oil exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 569–575.

[3] 李阳, 曹小朋, 赵清民, 等. 济阳坳陷陆相断陷盆地页岩油开发的几点思考 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(4): 1–7.
LI Yang, CAO Xiaopeng, ZHAO Qingmin, et al. Thoughts on shale oil development in continental fault basin in Jiyang Depression[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(4): 1–7.

[4] 孙焕泉, 周德华, 赵培荣, 等. 中国石化地质工程一体化发展方向 [J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 269–280.
SUN Huanquan, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Geology-engineering integration development direction of Sinopec[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 269–280.

[5] 张锦宏. 中国石化页岩油工程技术新进展 [J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 1–8.
ZHANG Jinhong. Progress in Sinopec shale oil engineering technology[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 1–8.

[6] 赵波, 陈二丁. 胜利油田页岩油水平井樊页平 1 井钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 53–58.
ZHAO Bo, CHEN Erding. Drilling technologies for horizontal shale oil Well Fan Yeping 1 in the Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 53–58.

[7] 宋明水. 济阳坳陷页岩油勘探实践与现状 [J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 1–12.
SONG Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 1–12.

[8] 田启忠, 戴荣东, 王继强, 等. 胜利油田页岩油丛式井提速提效钻井技术 [J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(4): 404–409.
TIAN Qizhong, DAI Rongdong, WANG Jiqiang, et al. An efficient and fast shale oil cluster well drilling technology for Shengli Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(4): 404–409.

[9] 余朝毅. 四川盆地深层页岩气钻井关键技术新进展及发展展望 [J]. 天然气工业, 2024, 44(3): 1–9.
SHE Chaoyi. New progress and development prospect of key technologies for drilling of deep shale gas wells in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(3): 1–9.

[10] 赵文庄, 韦海防, 杨赟. CG STEER 旋转导向在长庆页岩油 H100 平台的应用 [J]. 钻采工艺, 2021, 44(5): 1–6.
ZHAO Wenzhuang, WEI Haifang, YANG Yun. Application of CG STEER rotary steerable tool in Changqing shale oil H100 platform[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(5): 1–6.

[11] 袁建强. 济阳坳陷页岩油多层立体开发关键工程技术 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 1–8.
YUAN Jianqiang. Key engineering technologies for three-dimensional development of multiple formations of shale oil in Jiyang Depression[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 1–8.

[12] 韩来聚, 杨春旭. 济阳坳陷页岩油水平井钻井完井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 22–28.
HAN Laiju, YANG Chunxu. Key technologies for drilling and completion of horizontal shale oil wells in the Jiyang Depression[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 22–28.

[13] 张辉, 付豪, 秦永和, 等. PDC 钻头对推靠式旋转导向工具的适配性 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(2): 73–80.
ZHANG Hui, FU Hao, QIN Yonghe, et al. Adaptability of PDC drill bit with push-the-bit rotary steerable tools for inclined drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(2): 73–80.

[14] 赵廷峰, 叶雨晨, 席传明, 等. 七段式三维水平井井眼轨道设计方法 [J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(1): 25–30.
ZHAO Tingfeng, YE Yuchen, XI Chuanming, et al. Design of seven-section 3D horizontal well trajectory[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(1): 25–30.

[15] 李志鹏, 杨勇, 杜玉山, 等. 渤南洼陷 “济阳” 夹层型页岩油评价及水平井一体化设计 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(2): 24–35.
LI Zhipeng, YANG Yong, DU Yushan, et al. Integrated design of horizontal wells and evaluation in Jiyang interlayer shale oil of Bonan Sag[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 47(2): 24–35.

[16] 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.
SHI Yucai, TENG Zhixiang, BAI Jing, et al. Improved mechanical model of the static push-the-bit rotary steerable bottom-hole assembly[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(5): 75–80.

[17] 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.
WANG Heng, SUN Mingguang, ZHANG Jinshuang, et al. Buildup rate prediction of a static push-the-bit rotary steerable tool[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(2): 15–21.

[18] 高德利, 徐秉业, 刘希圣. 钻头与地层相互作用模型及其应用 [J]. 石油钻探技术, 1992, 20(1): 13–17.
GAO Deli, XU Bingye, LIU Xisheng. Drill bit and formation interaction model and its application[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1992, 20(1): 13–17.

[19] 许红恩. 长水平段水平井稳斜钻具组合造斜特性预测研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
XU Hongen. Study on the build-up character prediction of holding assembly in long horizontal section horizontal well[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2013.

[20] 宋维强, 倪红坚, 王瑞和, 等. 超临界二氧化碳控压钻井控压方法 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 787–792.
SONG Weiqiang, NI Hongjian, WANG Ruihe, et al. Pressure controlling method for managed pressure drilling with supercritical carbon dioxide as the circulation fluid[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 787–792.

[编辑　滕春鸣]