



顺北油气田特深井钻井关键技术现状与发展建议

刘湘华 于洋 刘景涛

Status Quo and Development Suggestions of Key Drilling Technologies for Extra-Deep Wells in Shunbei Oil and Gas Field

LIU Xianghua, YU Yang, LIU Jingtao

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

顺北油气田鹰1井超深井段钻井液关键技术

Key Drilling Fluid Technology in the Ultra Deep Section of Well Ying-1 in the Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2019, 47(3): 113-120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019068>

顺北油气田火成岩侵入体覆盖区超深井优快钻井技术

Ultra-Deep Well Drilling Technology in the Igneous Invasion Coverage Area of the Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(2): 1-5 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020004>

顺北油气田超深井井身结构优化设计

Optimal Design of Casing Programs for Ultra-Deep Wells in the Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(2): 6-11 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020002>

顺北油气田一区超深井三开长封固段固井技术

Anti-Leakage Cementing Technology for the Long Well Section below Technical Casing of Ultra-Deep Wells in the No.1 Area of Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(6): 33-39 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020110>

顺北油气田超深碳酸盐岩储层深穿透酸压技术

Deep Penetration Acid-Fracturing Technology for Ultra-Deep Carbonate Oil & Gas Reservoirs in the Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2019, 47(3): 140-147 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019058>

顺北油气田主干断裂带深穿透酸化技术

Acidizing Technology for Deep Penetration in Main Fault Zone of Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(2): 82-87 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020014>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024028

引用格式: 刘湘华, 于洋, 刘景涛. 顺北油气田特深井钻井关键技术现状与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 72-77.

LIU Xianghua, YU Yang, LIU Jingtao. Status quo and development suggestions of key drilling technologies for extra-deep wells in Shunbei Oil and Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 72-77.

顺北油气田特深井钻井关键技术现状与发展建议

刘湘华¹, 于 洋², 刘景涛²

(1. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘 要: 顺北油气田资源储量丰富, 但油气埋藏深, 储层具有超深、高压、超高温特点, 被公认为钻完井的“世界禁区”。因此, 探索适用于顺北油气田特深井的高效钻井技术系列, 对加快该油气田高效开发具有重要意义。针对顺北油气田钻井技术难点, 通过多年技术攻关和实践, 形成了高效钻井技术系列, 主要包括井身结构优化设计技术、古生界分层提速技术、复杂地层井筒强化技术、易漏地层高效防漏固井技术、高温储层高效定向技术和断控型储层保护技术。通过强化地质工程一体化并推广应用成熟技术, 在井深逐年增加的情况下, 钻井周期逐年缩短, 保障了顺北油气田高效勘探、效益开发。指出需持续提升一井多控, 断裂间安全钻井、异常高压工程应对能力, 加强工具、材料耐温性能等关键核心技术攻关力度, 提出应加大万米深井钻探的基础理论、关键技术与装备攻关研究, 以进一步推动顺北油气田勘探开发步伐, 保障安全成井, 不断解锁“中国深度”。

关键词: 特深井; 井身结构; 分层提速; 防漏; 储层保护; 顺北油气田

中图分类号: TE245

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)02-0072-06

Status Quo and Development Suggestions of Key Drilling Technologies for Extra-Deep Wells in Shunbei Oil and Gas Field

LIU Xianghua¹, YU Yang², LIU Jingtao²

(1. Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 841699, China; 2. Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: In Shunbei Oil and Gas Field, abundant hydrocarbon resource is expected. However, the reservoirs are deeply buried, known as large depths, high pressures, and extremely high temperatures, making it widely recognized as the global forbidden zone for drilling and completion. Therefore, the exploration of a series of efficient drilling technologies tailored for the extra-deep wells in Shunbei Oil and Gas Field is desperately important in the efficient development of the oil and gas field. To address the major drilling challenges in Shunbei Oil and Gas Field, a series of efficient drilling technologies have been developed through years of technical research and practices, mainly including optimization design technology for casing program, stratified rate of penetration (ROP) increase technology for Paleozoic formations, wellbore reinforcement technology for complex formations, efficient leak prevention and well cementing technology for thief zone, efficient directional drilling technology for high-temperature reservoirs, and protection technology for fault-controlled reservoir. Through the advocacy of geological and engineering integration and the intensive application of mature technologies, with the well depth increases year by year, the drilling duration has progressively shortened, ensuring the efficient exploration and profitable development of Shunbei Oil and Gas Field. It is suggested to continuously improve the capabilities of controlling multiple production zones with one well, safely drill through fractures, and dealing with engineering challenges related to abnormally high pressures. It is also necessary to intensify efforts in key core technologies research such as the temperature resistance of tools and materials and deepen research on fundamental theories, key technologies, and equipment development for 10 000-meter wells

收稿日期: 2024-01-02; 改回日期: 2024-02-25。

作者简介: 刘湘华 (1979—), 男, 湖南湘乡人, 2002 年毕业于石油大学 (华东) 石油工程专业, 2014 年获长江大学石油与天然气工程专业硕士学位, 正高级工程师, 主要从事钻井井工程管理及相关研究工作。E-mail: liuxh387.sbsj@sinopec.com。

基金项目: 中国石化重点科技攻关项目群“顺北特深层断裂破碎带区块安全成井关键技术” (编号: PE19004)、中国石化科技攻关项目“特深层油气钻完井关键技术与装备” (编号: P21081) 部分研究内容。

drilling and exploration, so as to advance the exploration and development of Shunbei Oil and Gas Field, ensure the safe completion of extra-deep wells, and continuously break through the “Chinese depth”.

Key words: extra-deep wells; casing program; stratified acceleration; leak prevention; formation protection; Shunbei Oil and Gas Field

随着我国经济持续快速发展,对石油天然气的需求不断增长,而我国深层油气资源达 671×10^8 t 油当量,因此油气勘探开发转向深层-超深层^[1-2]。近 10 年来,经过地质理论认识探索和钻井实践,在顺北地区的超深层古老碳酸盐岩地层中获得重大勘探突破^[3-4],在 7 000 m 以深获得高产轻质油。顺北地区油气勘探开发不同阶段存在不同的钻井技术难点:2015—2017 年为初步探索阶段,主要面临二叠系火成岩、英安岩、玄武岩强度高,可钻性差^[5]。桑塔木组发育有火成岩侵入体(覆盖面积达 117 km^2),井眼坍塌压力高^[6]。通过初步探索,提出“剪切+冲击”的破岩思路,形成了“牙轮钻头冲击预破碎+PDC 钻头钻齿剪切刮削+等壁厚螺杆”的混合破岩技术,保障了二叠系的高效破岩;采用专封专打和加强封堵防塌,配合稠浆塞洗井和细化工程措施,实现了火成岩侵入体井段安全钻进。2018—2019 年为攻关突破阶段,主要面临志留系砂泥岩互层诱导裂缝发育、易漏失、承压能力低等导致的复杂多、钻井周期长等问题^[7-8]。通过采用低密度随钻封堵防塌技术和动态循环承压堵漏技术,大幅提高了志留系地层钻井效率,志留系薄弱地层应用 12 井次,地层承压能力提高 0.10 kg/L ,复漏率大幅降低。2020 年至今为优快钻井阶段,通过地质工程一体化深度融合,优化了井身结构和防漏防塌钻井液^[9-10],配套了二叠系火成岩、桑塔木组辉绿岩的安全钻进技术^[11-16],形成了以井眼稳定保障技术和安全钻井技术为核心的优快钻井技术,在井深逐年增加的情况下,钻井周期逐年缩短,保障了顺北油气田高效勘探、效益开发^[17-19]。笔者通过梳理顺北地层特征和主要钻井技术难点,回顾总结了多年的技术攻关、实践认识及形成的顺北特深层高效钻井技术,并针对顺北油气田特深层对钻井技术的需求提出了发展建议,以期推动该油气田的勘探开发进程。

1 地层特征及钻井技术难点

1.1 地层特征

顺北断控型油气藏是一种受断裂带控制、以构造破碎为主、经流体改造形成的裂缝-洞穴型储集体,被致密碳酸盐岩封盖和侧向遮挡形成圈闭,在

后期油气充注成藏后形成的特殊油气藏。顺北超深断控型储层以一间房组、鹰山组为主要目的层,岩性以灰岩为主,埋藏深度大于 7 500 m,油气藏类型多样。储层温度 $160 \sim 209 \text{ }^{\circ}\text{C}$,压力 $89 \sim 129 \text{ MPa}$ 。受断裂差异化影响,上覆地层岩性复杂:古生界岩石强度高、可钻性差;二叠系火成岩、志留系和奥陶系灰岩常伴随裂缝、孔洞发育,导致地层承压能力低,易井漏;桑塔木组发育辉绿岩侵入体,坍塌压力高,储层存在破碎带,易垮塌。顺北油气田呈现“深、高、漏、塌、硬”的地层特点,对钻井技术提出了巨大挑战。

1.2 主要钻井技术难点

顺北油气田在断裂带挤压、拉伸等构造力影响下地质条件复杂,主要存在以下钻井技术难点:

1) 井身结构设计难。顺北油气田储层埋藏深,油气藏精细描述难,钻井面临“二叠系等多套复杂岩性地层,地震波多解,精度待提高”“二叠系火成岩、志留系砂泥岩裂缝承压能力小于 1.20 kg/L ”“奥陶系桑塔木组泥岩及辉绿岩侵入体坍塌压力当量密度大于 1.60 kg/L ”“次级断裂带存在局部高压,压力系数大于 2.00”等难题,地层自古生界开始存在破碎、应力高、易漏易塌、局部高压等,压力体系复杂,井身结构优化设计难度大。

2) 钻井提速难。古生界地层厚度大,岩性差异大,对钻井技术提速提出了挑战。二叠系英安岩的单轴抗压强度平均可达 102 MPa ,可钻性级值达 7.6;玄武岩的单轴抗压强度平均达到 124 MPa ,可钻性级值达到 8.2。志留系软硬地层交错,柯坪塔格组石英砂岩研磨性强;奥陶系桑塔木组辉绿岩抗压强度高,地层倾角大,易发生井斜。

3) 井壁稳定性差。古生界地层受断裂活动影响,上覆复杂地层多,井壁稳定难度大。二叠系火成岩天然裂缝发育,易漏失和垮塌。泥盆系—志留系砂泥岩互层诱导裂缝发育,地层承压能力低,易漏失。奥陶系桑塔木组辉绿岩侵入体易坍塌、掉块,且难以携带出井。

4) 高温定向难。顺北油气田储层温度高于 $165 \text{ }^{\circ}\text{C}$,实钻最高可达 $209 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。超深定向井存在高温下测量仪器故障率高,据统计,2016—2020 年共计下钻 483 趟,出现异常达 100 趟,异常率高达 20.7%。测

量仪器失效后井眼轨迹控制难度大,无法满足高效定向和精准中靶需求。

5) 储层保护难。顺北油气田储集空间由洞穴和裂缝组成,洞穴规模大,实钻放空 3~6 m,裂缝差异大,缝宽 2 nm~100 μm 。前期钻井液漏失风险大,漏失率可达 92%。同时,碳酸盐岩高温高压裂缝性气藏气侵活跃,前期气测上窜速度可达 128 m/h。高密度压井液会直接渗漏至储层,对储层造成伤害,导致油气井产能降低。

2 钻井关键技术现状

为满足顺北超深高温断控型油气藏勘探开发需求,根据各断裂带地质特点和钻井技术难点,通过攻关井身结构优化、分层提速技术、井筒强化技术、高效防漏固井技术、高效定向技术和断控型储层保护技术,经多次技术迭代,形成了顺北特深层高效

钻井技术。

2.1 井身结构优化

勘探开发初期,为保障安全成井,采用六级井身结构,钻井周期长达 400 d 以上。通过持续进行地质工程一体化深度融合,形成以“二叠系火成岩反演、志留系断裂检测、侵入岩量化描述、一间房组异常高压预测”为核心的地质风险预测技术,其中,地质侵入体识别精度由 20 m 提升至 10 m,可精准识别局部高压,采用随钻致密封堵动态提高地层承压能力,形成了物理化学耦合防塌技术,拓宽了古生界长裸眼地层钻井液安全密度窗口,实现了志留系、桑塔木组等复杂地层同开次钻开,井身结构由六级逐步优化为四级。随着对地层认识的逐步深入及工程技术的进步,主干断裂带全面推广顺标 IA 井身结构,次级断裂带为保障井控安全,采用顺标 IIA 井身结构,同时在部分区域探索采用三级井身结构,目前已形成标准化井身结构系列(见图 1)。

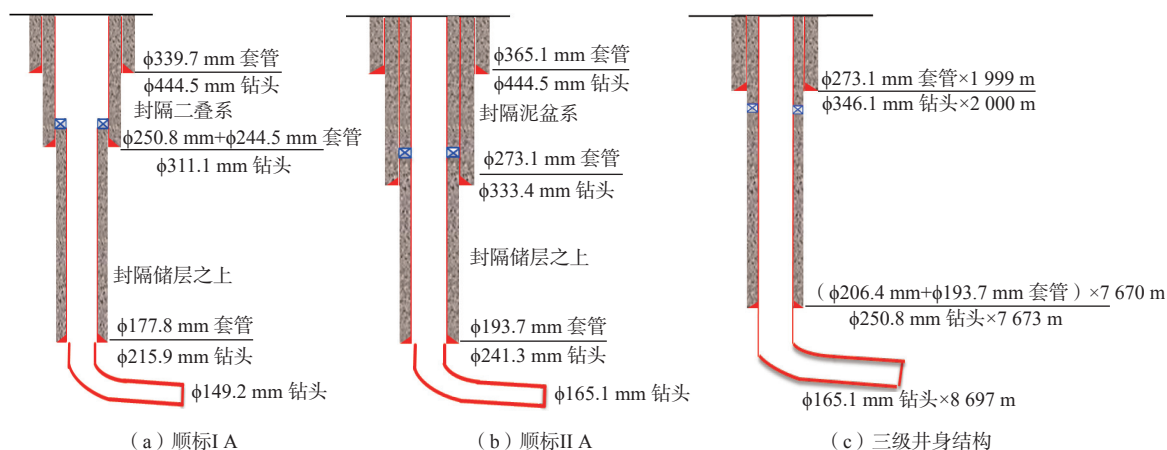


图 1 顺北油气田标准化井身结构系列

Fig.1 Standardized casing program series for Shunbei Oil and Gas Field

2.2 古生界分层提速技术

二叠系火成岩可钻性差,易发生掉块卡钻。针对玄武岩硬度高、脆性强的问题,提出“剪切+冲击”的破岩思路,形成“牙轮冲击预破碎/PDC 齿剪切刮削+等壁厚螺杆”的混合破岩技术,保障玄武岩高效破岩。针对英安岩、凝灰岩强度高、吃入困难的问题,提出“分级破岩”与“强参数复合破岩”的思路,形成“异形齿 PDC+大扭矩螺杆”的复合破岩技术,解决了英安岩、凝灰岩破岩问题。

针对志留系厚度大(1 000~2 000 m)、石英含量高、研磨性强的特征,优选“异形齿 PDC 钻头+等应力大扭矩螺杆”,根据“大钻压+大扭矩+中低转

速”的思路,提高钻头吃入深度,同时对高研磨性地层起到“防磨保径”的作用,实现了强化钻井参数提速。

针对桑塔木组对钻井参数敏感、易井斜的问题,持续深化对地层造斜规律的认识,建立了预弯曲“地层倾角-钻进参数”评价图版,明确了预弯曲钻具组合的适用条件和最优钻井参数,地层倾角小于 6°时,防斜思路由“垂钻防斜”转变为“预弯曲防斜”。钻压由 100 kN 提高至 160 kN,扭矩由 19 kN·m 提高至 26 kN·m,形成了预弯曲防斜打快技术,机械钻速与垂直钻井技术基本持平。

古生界分层提速技术在顺北油气田累计推广应

用 40 余口井,提速效果显著,二叠系机械钻速由 3.80 m/h 提高至 7.80 m/h,志留系机械钻速由 5.50 m/h 提高至 7.50 m/h,桑塔木组单井节省垂直钻井系统租赁费达 200 万元。

2.3 复杂地层井筒强化技术

针对二叠系火成岩裂缝发育、易漏失的问题,提出 2 种封堵技术:第一种为封堵防漏技术,即按照“以防为主、防堵结合”的思路,将钻井液密度由 1.28 kg/L 降至 1.21~1.24 kg/L,优化钻井液性能和配套工程技术措施(起钻前注入裸眼封闭浆,下钻分段循环,控制下钻、开泵速度),实现了随钻高效防漏;第二种为全井堵漏浆高效穿漏技术,堵漏浆中包含全尺寸颗粒堵漏材料,以粒径 3~5 mm 颗粒堵漏材料为主,加量 8%~15% 可调,配套粗筛布保证颗粒堵漏材料的加量,加密清理沉砂罐,形成了多级配堵浆快速穿漏技术。

针对志留系地层诱导裂缝发育、漏失压力低、下部侵入体、高压盐水层等潜在风险,提出 2 种承压堵漏技术:第一种为低密度随钻封堵防塌技术,将钻井液密度由 1.40 kg/L 降至 1.32 kg/L,配合使用粒径 1200/2500 目的微纳米材料,控制 K^+ 质量浓度大于 20000 mg/L,强化纳米封堵和抑制水化,严格控制滤失量,提高志留系地层钻井效率;第二种为动态循环承压堵漏技术,通过调整排量控制漏层 ECD,逐级充填、夯实地层,提高地层承压能力。

针对桑塔木组侵入体井壁易坍塌、掉块难携带问题,深化认识辉绿岩特征,明确了钻井液合理密度范围为 1.35~1.45 kg/L,形成了以“合理密度、强化封堵、严控性能”为核心的低密度协同防塌技术。

复杂地层井筒强化技术成功解决了二叠系易漏失、志留系地层承压能力低、桑塔木组辉绿岩侵入体和破碎地层易坍塌掉块导致卡钻的难题。二叠系应用封堵随钻防漏技术后漏失率降低了 55.13 百分点;二叠系应用全井堵漏浆高效穿漏技术后漏失率降低了 51 百分点;志留系应用低密度随钻封堵防塌技术后无漏失;动态循环承压堵漏技术应用 12 井次,单井漏失量由应用前的 725 m³ 降至 50 m³。应用低密度协同防塌技术后,侵入体井段井径扩大率由 43.2% 降至 7.2%。

2.4 易漏地层高效防漏固井技术

针对二叠系低密度水泥浆不完善、常规防漏固井质量差等问题,通过优化超低密度水泥浆配方、升级防漏固井工具、完善下套管技术措施等,固井工艺由以低密度水泥浆防漏为主升级为综合防漏,

二叠系固井率由 86.96% 降至 20.00%,填充率由 71.3% 提高至 85.8%。低密度水泥浆防漏是采用密度不低于 1.60 kg/L 的粉煤灰水泥浆或密度 1.50~1.60 kg/L 的微珠水泥浆,下入常规机械式分级箍,套管下入速度 60 s/根,到底后循环。综合防漏是采用密度 1.20~1.50 kg/L 的微珠水泥浆或密度 1.10~1.45 kg/L 的泡沫水泥浆,下入封隔式分级箍,套管下入速度 120~240 s/根,进行分段循环。

针对志留系地层承压能力低的问题,优化防窜水泥浆配方,升级尾管悬挂器,采用控压固井技术,固井工艺由水泥浆防窜迭代升级为综合防窜,志留系固井漏失率由 20.0% 降至 4.7%,自由段长度由 641 m 降至 276 m。水泥浆防窜是采用密度 1.45~1.50 kg/L 的常规水泥浆和内嵌式悬挂器,窄密度窗口井段采用正注反挤方式注水泥,套管下到底循环。综合防窜是采用密度 1.30~1.50 kg/L 的胶乳液硅防窜水泥浆和平衡液缸封隔式悬挂器,采用控压固井工艺,控制下套管速度,中途进行循环。

2.5 高温储层高效定向技术

针对超深定向井存在高温下测量仪器故障率高、测量仪器失效后无法控制井眼轨迹的难题,基于储层井底静止温度,提出 2 种井眼轨道设计优化方案:井底静止温度不超过 200 ℃ 时,优化为单增三段式井眼轨道,使用 1.75° 单弯螺杆在温度达到 180 ℃ 之前完成定向,之后稳斜钻进;井底静止温度超过 200 ℃ 时,优化为双增四段式井眼轨道,使用 1.75° 单弯螺杆在温度达到 185 ℃ 之前完成定向,之后进行稳斜盲打。2 种井眼轨道的井眼曲率均不高于 12°/30m,便于提高机械钻速和降低衬管下入难度。

造斜段使用“二牙轮+四刀翼”的混合钻头,使用寿命由 30 h 延长至 60 h。稳斜段使用“五或六刀翼、 $\phi 13.0$ mm 双排、尖圆齿”的异形齿 PDC 钻头,使用寿命由 70 h 延长至 120 h。选用等壁厚大扭矩螺杆,螺杆扭矩从 2850 N·m 提至 6750 N·m,使用寿命从 70 h 延长至 120 h。

通过升级耐高温 AD 板、耐高温传感器模块、耐高温中控板 MPU 和耐压筒,国产 MWD 仪器稳定工作的井底最高温度达到了 194 ℃,实现了井底温度 200 ℃ 以内可测可控。通过优化井眼轨迹预测模型,创建平衡趋势造斜率预测方法,结合稳斜钻具组合优化技术,建立了稳斜钻具组合井眼轨迹控制方法,不仅实现了井底温度大于 200 ℃ 的稳斜中靶,解决了超高温定向井眼轨迹控制难的问题,还创造了亚洲陆上定向温度(209 ℃)最高的纪录。

通过应用高温储层高效定向技术,配合强化钻井参数,排量由 12 L/s 提高至 16 L/s,钻压由 40 kN 提高至 60 kN,转速由 40 r/min 提高至 60 r/min,泵压由 22 MPa 提高至 28 MPa,储层段机械钻速由 2.40 m/h 提高至 3.50 m/h,测量仪器失效率降低了 15 百分点。

2.6 断控型储层保护技术

通过室内试验及对生产动态进行综合评价,明确了固相侵入和应力敏感是储层损害的主控因素。针对损害主控因素,提出了“低固相、少漏失、高酸溶”的储层保护理念:第一,井眼轨道从“打中心”优化为“擦头皮”,钻井液由常规暂堵升级为高温可酸溶暂堵;第二,深化储层压力认识(主干断裂无异常高压、次级断裂可能有高压),转变储层保护理念,推广“低密度工作液+控压”的施工工艺;第三,研制核心材料,提高其关键性能,构建高质量工作液体系。其中抗高温工作液的漏斗黏度由 75 s 降至 45 s,动塑比由 0.48 降至 0.31,无固相工作液中的固相含量由 5% 降至 2%。

应用断控型储层保护技术后,成井率提高 84 百分点,漏失率降低 40 百分点。钻井液漏失密度由 1.70 kg/L 降至 1.18 kg/L,漏失量降低了 56%,储层伤害率降低 51 百分点。

3 发展建议

上述钻井技术虽然取得了较好的效果,但随着顺北油气田勘探开发步伐的持续推进,对工程地质条件认识的不断深化,仍然存在一些问题,还需有针对性地进行攻关。

1) 顺北断控型储层为实现少井高产,一口井需钻穿多条断裂带,因地层破碎程度高,井壁垮塌掉块严重,导致钻井周期长、安全完井难度大。下一步亟需深化断裂带井周局部应力场分布规律研究,明确破碎地层井壁坍塌机理,以指导井眼轨道设计与破碎带防塌工艺优化,保障破碎性地层的安全高效钻进。

2) 顺北油气田断裂间、次级断裂压力预测精度低,发育异常高压概率高,部分井局部钻遇异常高压导致井筒起压快、关井压力高(顺深 1 斜井关井套压 58 MPa),采用高密度钻井液易井漏,安全密度窗口窄制约安全成井。建议深入开展异常压力识别、高效钻井、差异化压井技术研究,提升异常高压工程应对能力,保障气藏安全高效开发。

3) 随着顺北油气田勘探开发逐步向东部拓展,

储层物性变差,单井累计产量低,效益开发难度加大,降本需求迫切。目前井身结构进一步优化难度大,亟需突破现有提速技术瓶颈,引进科学钻井提速理念,科学配套提速工具,实时优化钻井参数,力争实现顺北“革命性”提速,支撑顺北油气田高质量勘探、高效益开发。

4) 为实现向地球深部要资源的战略目标,中国石化深地工程开启万米新征程,万米深层温度更高,地层压力系统、地应力环境更复杂,地质条件更苛刻,钻井工程面临多重风险叠加等情况,目前工程技术水平尚无法有效保障,建议加大关键装备、关键核心技术攻关力度,力争钻井工具、测量测井仪器、材料的耐温能力突破 200 ℃,持续引领深地工程技术发展。

4 结束语

顺北油气田特深井钻井技术的研究与实践中,取得了一系列钻井关键技术突破,并通过地质工程一体化的深度融合,对井身结构、分层提速、井筒强化、高效防漏固井、高温储层高效定向和断控型储层保护等关键技术进行持续优化与创新,顺北油气田的勘探与开发效率得到了显著提升。尽管如此,面对日益增长的勘探深度和复杂的地质条件,仍需不断深化对地层特征的认识,提高对异常高压的应对能力,提升钻井工具和材料的耐温性能,并在万米深井钻探方面进行更深入的基础理论与技术装备研究,推动顺北油气田勘探开发的进程,确保安全成井,解锁更深的地下资源,为国家的能源安全和经济发展作出更大的贡献。

参考文献

References

- [1] 谷茸,云露,朱秀香,等.塔里木盆地顺北油田油气来源研究[J].石油实验地质,2020,42(2):248-254.
GU Rong, YUN Lu, ZHU Xiuxiang, et al. Oil and gas sources in Shunbei Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 248-254.
- [2] 漆立新,云露,曹自成,等.顺北油气田地质储量评估与油气勘探方向[J].新疆石油地质,2021,42(2):127-135.
QI Lixin, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Geological reserves assessment and petroleum exploration targets in Shunbei Oil & Gas Field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 127-135.
- [3] 焦方正.塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J].石油与天然气地质,2018,39(2):207-216.

- JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei Area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 207–216.
- [4] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展 [J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 1–17.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 1–17.
- [5] 李文霞, 刘景涛, 黄勇. 顺北二叠系火成岩地层抗钻特性预测及应用研究 [J]. *钻采工艺*, 2022, 45(1): 47–52.
- LI Wenxia, LIU Jingtao, HUANG Yong. Prediction of anti-drilling characteristics of Permian igneous rock strata and its application in Shunbei Block[J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(1): 47–52.
- [6] 邱春阳, 张翔宇, 赵红香, 等. 顺北区块深层井壁稳定钻井液技术 [J]. *天然气勘探与开发*, 2021, 42(2): 81–86.
- QIU Chunyang, ZHANG Xiangyu, ZHAO Hongxiang, et al. Drilling-fluid system for deep borehole stability in Shunbei Block, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2021, 42(2): 81–86.
- [7] 孙方龙, 李子钰. 复合欠饱和盐水钻井液体系在顺北志留系复杂地层的应用 [J]. *钻探工程*, 2021, 48(7): 65–71.
- SUN Fanglong, LI Ziyu. Application of the composite under-saturated brine drilling fluid system in drilling of Silurian complex formation in Shunbei[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(7): 65–71.
- [8] 陈希, 雍自权, 邓宾, 等. 塔里木盆地顺北 5 号断裂带志留系碎屑岩地层漏失机理 [J]. *矿物岩石*, 2022, 42(2): 112–124.
- CHEN Xi, YONG Ziquan, DENG Bin, et al. Leakage mechanism of Silurian clastic rock formation in Shunbei No.5 fault belt, Tarim Basin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2022, 42(2): 112–124.
- [9] 唐磊, 王建峰, 曹敬华, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断溶体油藏地质工程一体化模式探索 [J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(3): 329–339.
- TANG Lei, WANG Jianfeng, CAO Jinghua, et al. Geology-engineering integration mode of ultra-deep fault-karst reservoir in Shunbei Area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(3): 329–339.
- [10] 张煜, 李海英, 陈修平, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断控缝洞型油气藏地质-工程一体化实践与成效 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1466–1480.
- ZHANG Yu, LI Haiying, CHEN Xiuping, et al. Practice and effect of geology-engineering integration in the development of ultra-deep fault-controlled fractured-vuggy oil/gas reservoirs, Shunbei Area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1466–1480.
- [11] 肖绪玉, 史东军, 李国楠, 等. 塔里木盆地顺北地区二叠系随钻堵漏技术 [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(10): 37–41.
- XIAO Xuyu, SHI Dongjun, LI Guonan, et al. Plugging while drilling technology for Permian in Shunbei Area of Tarim Basin[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(10): 37–41.
- [12] 罗剑波, 王伟志, 刘茂林, 等. 顺北 1-1H 井二叠系火成岩堵漏新工艺技术探讨 [J]. *西部探矿工程*, 2017, 29(11): 52–55.
- LUO Jianbo, WANG Weizhi, LIU Maolin, et al. Discussion on new leakage plugging technology of Permian igneous rock in Well 1-1H Shunbei[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2017, 29(11): 52–55.
- [13] 潘军, 李大奇. 顺北油田二叠系火成岩防漏堵漏技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2018, 35(3): 42–47.
- PAN Jun, LI Daqi. Technology of Preventing and controlling mud losses into the Permian igneous rocks in Shunbei Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2018, 35(3): 42–47.
- [14] 张俊, 杨谋, 李双贵, 等. 顺北二叠系低压易漏井固井质量影响因素探讨 [J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(4): 486–490.
- ZHANG Jun, YANG Mou, LI Shuanggui, et al. Investigation of factors affecting cementing job quality in wells penetrating low pressure Permian Formations having mud loss tendency in Shunbei Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(4): 486–490.
- [15] 董小虎, 李银婷. 塔里木盆地顺北区块二叠系井漏复杂的分析及对策 [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(2): 59–62.
- DONG Xiaohu, LI Yinping. Analysis and countermeasures for complex Permian well leakage in the Shunbei Block of Tarim Basin[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(2): 59–62.
- [16] 刘彪, 潘丽娟, 王沫. 顺北油气田二区断控体油气藏井身结构设计及配套技术 [J]. *断块油气田*, 2023, 30(4): 692–697.
- LIU Biao, PAN Lijuan, WANG Mo. Well structure design and supporting technology of fault-controlled reservoir of No.2 Block in Shunbei Oil-Gas Field[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(4): 692–697.
- [17] 白彬珍, 曹义金, 葛洪魁. 顺北 56X 特深水平井钻井关键技术 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(6): 49–55.
- BAI Binzhen, CAO Yijin, GE Hongkui. Key technologies for the drilling of ultra-deep horizontal Well Shunbei 56X[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(6): 49–55.
- [18] 陈宗琦, 刘湘华, 白彬珍, 等. 顺北油气田特深井钻井完井技术发展思考 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(4): 1–10.
- CHEN Zongqi, LIU Xianghua, BAI Binzhen, et al. Technical progress and development consideration of drilling and completion engineering for ultra-deep wells in the Shunbei Oil & Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(4): 1–10.
- [19] 陈宗琦, 刘景涛, 陈修平. 顺北油气田古生界钻井提速技术现状与发展建议 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(2): 1–6.
- CHEN Zongqi, LIU Jingtao, CHEN Xiuping. Up-to-date ROP improvement technologies for drilling in the Paleozoic of Shunbei Oil & Gas Field and suggestions for further improvements[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(2): 1–6.

[编辑 刘文臣]