

doi:10.11911/syztjs.2024027

引用格式: 胡文革. 顺北油气田“深地工程”关键工程技术进展及发展方向[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 58-65.

HU Wenge. Progress and the way forward of key engineering technologies for “deep underground engineering” in Shunbei Oil and Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 58-65.

顺北油气田“深地工程”关键工程技术 进展及发展方向

胡文革^{1,2}

(1. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 中国石化碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘 要: 为推动超深层油气资源开发, 总结了顺北油气田的关键工程技术进展情况, 该油气田研究形成了地质工程一体化、井身结构设计方法、破碎带垮塌防治技术、井眼轨迹与地质甜点优化技术、储层保护技术及超深超高温定向技术等钻井关键技术, 高精度应力场反演算法、高性能酸压液体、工具-暂堵复合分段改造技术和高效支撑技术等完井关键技术, 采油气管柱安全经济决策技术、经济效益配产优化、油气藏开发一体化方案设计和深层泡沫调驱、堵水技术等采油关键技术, 构建了超深层开发工程技术体系。指出下一步的技术攻关方向, 需聚焦于提高储量动用率的钻井技术、深井高效智能完井技术和深层油气藏提高采收率技术, 以实现更低丰度储量区的高效开发, 拓展油气藏类型, 形成可持续发展的深层油气开发新局面。

关键词: 深地工程; 碳酸盐岩; 断控型油气藏; 工程技术; 顺北油气田

中图分类号: TE245

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)02-0058-08

Progress and the Way Forward of Key Engineering Technologies for “Deep Underground Engineering” in Shunbei Oil and Gas Field

HU Wenge^{1,2}

(1. Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China; 2. Sinopec Key Laboratory of EOR in Carbonate Fractured-Vuggy Reservoir, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: To promote the development of ultra-deep oil and gas resources, some key engineering technologies were developed in the Shunbei Oil and Gas Field, summarized in this paper. A series of key drilling technologies were applied in this field, including geology-engineering integration, casing program design method, wellbore collapse prevention technology in fractured zones, well trajectory and geological sweet spot optimization method, reservoir protection technology, and directional drilling technology in ultra-deep and ultra-high temperature formation, etc. Additionally, a series of key completion technologies were also developed, including high-precision stress field inversion algorithm, high-performance acid fracturing fluid, tool-temporary plugging composite multi-stage fracturing technology, and high-efficiency wellbore support technology, etc. Furthermore, several key oil recovery technologies were also established, including safe and economic decision-making technology for oil and gas production strings, allocation optimization approach of economic benefits, integrated development program design of oil and gas reservoirs, water shut-off and foaming profile control technology in deep reservoirs, etc. Together, these technologies constitute an engineering technology system for ultra-deep reservoir development. Future research topics are also proposed in this paper, which will focus on the drilling technology that can enhance reserve utilization ratio, the efficient and intelligent completion technology for deep wells, and the enhanced oil recovery technology in deep reservoirs. This will facilitate efficient development of lower abundance reserves, discover new types of oil and gas reservoirs, and create a new sustainable development situation for deep oil and gas exploitation.

收稿日期: 2024-01-04; 改回日期: 2024-02-20。

作者简介: 胡文革 (1966—), 男, 河南濮阳人, 1988 年毕业于成都理工大学石油地质专业, 2005 年获中国石油大学 (华东) 油气田开发工程专业硕士学位, 2014 年获中国石油大学 (北京) 油气田开发工程专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事油气田开发方面的研究与管理工作。E-mail: huwg.xbsj@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“塔里木盆地碳酸盐岩油气田提高采收率关键技术示范工程” (编号: 2016ZX05053) 资助。

Key words: deep ground engineering; carbonate rock; fault controlled oil and gas reservoirs; engineering Technology; Shunbei Oil and Gas Field

顺北油气田是中国石化“深地一号”工程,是我国第一个以“深地工程”命名的深层油气探索项目。顺北油气田的成功开发,回答了超深层(6 000 m 以深)油气资源高效开发的问题^[1]。顺北油气藏埋深达 7 300~9 000 m,具有“高温高压、储层破碎、藏内组分复杂”的特点,油气藏地层温度高达 160~209 ℃,地层压力高达 80~165 MPa,储集空间以断裂破碎形成的裂缝为主,在一条断裂带分布着挥发性油藏、凝析气藏、高气油比油藏,油气藏内高含 H₂S、CO₂ 和 N₂ 等,对安全钻井、分段完井、腐蚀防护等提出了更高要求,工程技术除满足一般油气藏开发共性外,必须满足超深、复杂工况对工程技术的需求。该项目实施以来,初步构建了超深层开发工程技术体系,提交探明地质储量 2.766×10^8 t 原油, 2.628×10^8 m³ 天然气,建成 300×10^4 t 油气当量生产基地,实现了 35 美元/桶盈利能力,走出了一条可持续发展的高效开发之路。

1 顺北油气田地质简况

顺北地区位于塔里木盆地北部,构造位置主要处于顺托果勒低隆,地层自上而下发育新生界第四系、新近系、古近系,中生界白垩系、三叠系,古生界二叠系、石炭系、泥盆系、志留系、奥陶系、寒武系等多套地层^[2]。二叠系发育火成岩,存在漏失、垮塌风险。志留系裂缝发育,地层承压能力弱。上奥陶统地层倾角大,发育侵入岩,钻井时易发生井斜、垮塌掉块等复杂井况,严重影响安全高效钻进^[3-4]。油气藏分布在奥陶系一间房组—鹰山组碳酸盐岩地层,主要沿区域内主干走滑断裂带分布,储集空间主要为断裂活动形成的裂缝和破碎岩块间空隙,是走滑断裂带控制的深层—超深层油气藏。

2 工程技术发展概况

针对断裂破碎带带宽 300~1 500 m、储层厚度近千米、块状裂缝—破碎体储层特征,确立了“一井多控、多动常稳、少井高产、全周期提效”开发策略,对应配套钻完采工程技术实施原则,完善已有技术、攻关新技术,探索出一条保障超深层油气高效开发的工程发展之路。

2.1 钻井技术发展概况

上覆地层钻井坚持“特殊地层攻关、特殊情景优化、地质工程一体化优化、全方位提速”原则,全力推进全要素、全流程降低钻井成本。

1)地质工程一体化迭代提升,形成复杂地层预测技术及提速对策^[5-7]。侵入体等复杂地层预测吻合率提高至 78%;二叠系火成岩地层机械钻速提高 43%,志留系高石英含量地层机械钻速提高 33%;桑塔木组易斜地层采用预弯曲防斜打快技术,单井节省垂直钻井系统租赁费 200 万元;地质工程迭代优化井口位置避复杂,钻井复杂周期降低 85%。

2)建立基于风险量化评估的超深井井身结构设计方法^[8-14],持续推进井身结构优化与标准化,井身结构方案由前期 6 套优化为目前的 2 套,井身结构由五级变成四级、大尺寸套管下深变浅,平均钻井周期由前期的 350 d 缩短至目前的 139 d。

目的层钻井坚持“水平段尽可能多穿断裂带、纵向上尽可能多控缝洞体,防治兼施保成井、轨道优化保完井”的原则,全流程保障井筒高质量。

1)发展破碎带垮塌防治技术,成井率由初期的 55% 提高至目前的 100%,垮塌异常处理周期由前期的 42.9 d 缩短至 5.4 d,缩短了 87%。

2)完善井眼轨迹与地质甜点优化技术,形成“通源主断面+缝洞集合体+应力场方向”三参数轨迹空间精准定位技术,规模储集体控制率由 71.0% 提高至 87.5%。

3)采用“低密度、低固含、可酸溶、可控压”储层保护技术,钻井液平均密度由初期的 1.70 kg/L 降至目前的 1.18 kg/L,固相含量降低 43.4 百分点,平均表皮系数由前期的 19.0 降至 -4.0,达到了多揭破碎地层和保护储层的目的。

4)攻关超深超高温定向技术,创建“低温定、高温控”的轨迹控制方法,采用耐温 200 ℃ 国产随钻测量仪器,实现了不高于 200 ℃ 井段井眼轨迹参数的测量和井眼轨迹的控制;采用稳斜钻具组合进行定向钻进,实现了高于 200 ℃ 储层的稳斜中靶,中靶率 100%。

2.2 完井技术发展状况

完井技术坚持“目的井段充分动用,每段实现深部沟通,保障全生命周期井筒完整性”的原则,抓关键节点提高效率、产能、累计产量,提高油气开

发的整体效益。

1)建立了“地质-力学”双约束高精度应力场反演算法,局部应力场计算误差从18%降至6%,为钻井井眼轨道设计和酸压沟通多套缝洞体提供了支持。

2)研发高性能酸压液体,交联缓速酸的耐温能力由160℃提高至180℃,在12 m³/min排量注入条件下,改造距离由120 m增大至160 m,实现了“压得远”的目标。

3)发展工具-暂堵复合分段改造技术,针对与井眼轨迹关联的不同缝洞体,缝洞体间采用工具分段,缝洞体内采用暂堵分段或体内转向;研发不同强度(5~20 MPa)、不同类型(绒囊、纤维及溶胀颗粒)的暂堵材料及105 MPa/200℃的裸眼封隔器,单井控制储量动用率由20%提高至50%。

4)配套破碎储层高效支撑技术,形成“易钻管、碳钢管”2种井壁支撑方式,研制高强度耐酸易钻衬管和工具,裸眼井壁完整率由初期的75%提高至目前的100%。

2.3 采油技术发展概况

采油技术坚持“安全第一、效益为本,全流程降低投入、全周期提投资效益”的原则,考虑超深油气藏开发的高投入,油藏与工程联动,努力实现快回收、高回报。

1)发展采油气管柱安全经济决策技术。针对高温、高含硫、高含二氧化碳腐蚀条件,建立了全生命周期管柱安全服役寿命图版,针对不同开发阶段,进行管柱规格和壁厚设计优化,利用P110S油管替代行业标准规定的镍基合金油管,成本降低幅度高达55%。

2)推进经济效益配产,实现全生命周期效益最大化。基于地层稳定性、管柱安全性和地层供液能力,以全生命周期效益最大化与现金流最快回收为原则,优化配产;顺北二区4号带投产井初期油当量产能365 t,实现了3.3年回收投资成本,开发3年创造利润0.8亿元/井,较塔河油田投资回收期缩短了2.8年,投入产出比高25百分点。

3)探索油气藏开发全寿命一体化方案设计,基于“控制井网、注采井网、提高采收率”三网合一原则,完善“概念设计-分期构建-迭代优化”注采井网设计方法。

4)同步储备试验深层泡沫调驱堵水技术。聚焦立体块状储层、高温高压油气藏,探索提高水驱气驱效率的方法,研究了耐高温天然气泡泡沫调驱、

耐高温堵水技术,开展了2井次先导试验,调驱和堵水材料成功耐受了试验井170℃的高温,取得了一定的防气窜和控水效果,初步验证了技术的可行性,为后期开展规模试验奠定了基础。

3 钻完井、采油关键技术

3.1 钻井关键技术

3.1.1 特殊地层分层提速技术

针对二叠系玄武岩可钻性差的问题,建立了全尺寸钻头破岩数值模拟方法,通过模拟明确“斧形-锥形”复合齿的破岩比功最小(较常规齿降低40%),形成了“异形齿PDC钻头+扭冲/大扭矩螺杆”提速技术^[15-19]。针对志留系石英含量高、钻头易磨损的问题,采用“大钻压+大扭矩+中低转速”来提高钻头的吃入深度和破岩效率,降低钻头磨损^[20]。针对桑塔木组地层倾角大易井斜的问题,研究应用了预弯曲防斜打快技术。该技术利用钻具动态侧向力实现防斜打直,机械钻速与采用垂直钻井技术持平,但单井钻井费用比采用垂直钻井技术可节省200万元。通过持续建立超深井分层提速技术系列,机械钻速提高43%。

3.1.2 破碎带垮塌防治技术

针对破碎垮塌储层成井难的问题,采用数值模拟方法分析井壁坍塌的影响因素,明确主控因素为钻井液封堵性能,揭示了埋深8 000 m破碎带垮塌的核心机理是“传压失稳”,需阻隔传压通道防止垮塌^[21]。为此,采用半连续乳液聚合法,在纳米二氧化硅表面包裹一层丙烯酸树脂聚合物膜,研发出一种以纳米二氧化硅为“内核”、聚合物为“外壳”的耐温200℃的纳米变形封堵剂,其兼具无机材料的刚性、热稳定性和聚合物覆膜的弹韧性,可实现对微裂缝的填充封堵,最小阻隔尺度100 nm,比常规堵漏剂大幅降低,阻隔保护时间由10 h延长至720 h以上^[22]。

3.1.3 井眼轨迹与地质甜点最优化配套技术

通过高产、中产及低产井的井震标定,研究明确了顺北断控油藏的“栅状”规模储集体在地震上的识别模式为“主断裂面+串珠状异常体”。通过攻关形成了“通源主断面+缝洞集合体+应力场方向”三参数靶点空间精准定位技术,利用通源主断面分析确定钻井平面靶点位置,利用串珠强波谷确定栅状结构储层的纵向靶点位置,根据靶点位置与现今应力场方向较大夹角确定井眼轨迹方位,尽

(见图2)。该封隔器采用水力扩张式胶筒结构,胶筒长度1.20 m,是常规胶筒的4倍,扩张比达到1.2以上,实现了小外径封隔大井径,同时保障了超深井的安全下入和对不规则、井径扩大率大的裸眼的高压密封。设计了6.35 mm级差投球滑套,配套“可溶基体+耐酸涂层”高强度耐酸可溶憋压球,高温承压能力达到70 MPa以上,实现酸压后可控快速溶解。通过高性能裸眼封隔器一级承压“硬分段”,暂堵材料实现段内“软分段”,运用井筒听诊器技术监测精准布缝,建立了破碎带储层5~6级地质分段能力。

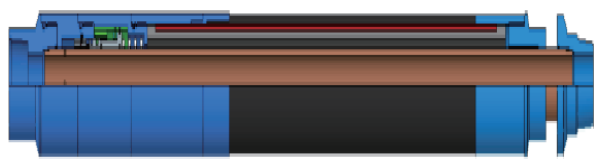


图2 耐200℃/90 MPa扩张式裸眼封隔器

Fig.2 Expansion type open hole packer resistanting 200℃/90 MPa

3.2.4 破碎储层高效支撑与井筒完整性管控技术

通过加强地质构造特征认识和岩石力学参数等研究,逐步形成“碳钢管、易钻管”2种衬管井壁支撑方式。基于现场岩屑粒径分布规律及径向流驱替模拟评价试验,结合现场典型生产和出砂工况,形成了一套深层碳酸盐储层岩屑/泥砂防塌完井方式与筛管参数优化设计方法。基于高强度铝合金管材研发、耐酸涂层设计并配套特殊螺纹,研发出耐高温、高矿化度及盐酸酸蚀的易钻磨衬管及井下工具。基于五维度裸眼质量评价模型,配套下入性模拟分析、高抗扭油管 and 可酸溶开孔筛管冲划下入技术,实现“钻达即可下入”。

针对顺北油气田开发初期油套管损坏或泄漏、封隔器密封失效等问题,编制了“顺北超深油气井井完整性推荐做法”,建立并完善了完井-改造-生产全生命周期完整性综合管控技术方案。

3.3 采油技术

3.3.1 管柱安全经济决策与设计优化

顺北油气田井下硫化物应力腐蚀(SSC)开裂风险位于3区,SSC开裂/氢脆风险高,温度超过160℃,按行业标准需选择镍基合金油管,其成本高达30万元/t。结合不同材质油管在不同温度、硫化氢分压、含水条件下的腐蚀试验结果,基于温度、压力、载荷、CO₂/H₂S、含水率、Cl⁻浓度等腐蚀因素分析,利用神经网络法拟合多因素耦合作用下的腐蚀速率,建立了管柱安全服役寿命决策优化方程^[28-33]。

3.3.2 全生命周期效益最大化经济效益配产与优化

由相态可知,顺北超深层凝析气藏的地层压力与露点压力的差较大(46 MPa),地层压力大于露点压力时,不同采油气速度对单井可采储量影响较小,具备优化产能的条件。基于储集体及流体相态认识,建立了顺北凝析气藏3段式配产原则,缩短投资回收年限。

3.3.3 油气藏开发一体化方案设计思路

顺北断控缝洞型油气藏内幕缝洞体呈不规则立体空间分布,含油气高度在380~1 044 m,宽度在100~300 m,底水欠发育。鉴于超深层投资巨大,根据油气藏空间形态、缝洞体空间分布状态、流体特征,充分考虑井间驱替和后期提采需求,设计“油气藏评价-注采驱替-提高采收率”一体化概念方案,整体设计,分期实施,迭代优化。

3.3.4 天然气泡沫调驱技术

针对顺北油气田天然气驱气窜的问题,利用泡沫封堵气窜通道,扩大气驱波及体积^[34-37]。为此,研发了耐温170℃、耐盐20×10⁴ mg/L的天然气泡沫配方。该天然气泡沫在170℃、30 MPa条件下的发泡率大于400%,半衰期147 min。在SHB1-26H井组开展了天然气泡沫调驱先导试验,注气压力由调驱前的28 MPa升至32 MPa,验证了天然气泡沫在破碎带储层具有封窜改向的能力。

4 发展方向

4.1 大幅度提高储量动用的钻井技术

围绕降低投入提高经济累计产量的目标,研究“一个缝洞体内多控裂缝带、多个缝洞体一体动用”钻井技术。

1)多分支井。对于井周发育多个互不连通储集体,发展超深高温高压状态下的多分支井钻井技术,重点攻关可回收斜向器、超高温壁挂式悬挂器、分支井重入工具等关键工具,完善分支井眼固井或支撑技术。

2)多靶井。鉴于断裂带内裂缝平面分带分布、缝洞体立体不规则分布,为实现多控多动目标,突破千米破碎体内钻井技术。提升钻遇漏失、短距放空后继续钻进的能力、攻关暂堵-储层保护一体化技术、放空稳定工具等,提高储层钻遇率。

3)断裂带内“垂穿”钻井。顺北油气藏油柱高度达千米,纵向缝洞体存在分隔,因此需攻关断裂带内部“垂穿”技术,实现断裂带内纵向多套储

集体立体动用。

4) 跟管钻井。针对破碎带钻孔垮塌重入难题, 攻关超深井跟管钻井技术, 研发新型专用扩孔钻头, 在破碎地层中“边扩孔钻进, 边跟进下套管”, 支撑保护井壁, 保障破碎地层安全钻进。

4.2 深井高效智能完井技术

随着顺北油气田向万米特深层(储层温度 200 ℃、埋深 10 000 m)油气进发, “深地工程”完井将从材料、工具、技术及监测等方面开展系列研究与攻关。

1) 井下温控式井眼强化衬管技术。开展温控型形状记忆衬管攻关, 形成井下可主动膨胀的衬管完井技术^[38]。利用形状记忆特性研制温控式井眼强化衬管, 利用钻杆或油管将形状记忆式井眼强化衬管送至目的层, 通过地层温度激发形状记忆衬管, 使其膨胀后贴于井壁产生挤压力, 改善不稳定地层的应力状态, 降低剪切效应, 保障破碎储层井壁完整性。

2) 多分支智能完井技术。攻关井下智能流量控制工具与数据传输系统, 获取井下温度、压力、分支流量等信息, 合理控制分支井间、纵向储集体间产出, 预防生产层和混采层之间出现窜流, 提高采收率。

3) 耐温 200 ℃ 高浓度缓速酸。研发最高耐温可达 230 ℃、可逐步释放氢离子实现缓速、酸岩反应速率为胶凝酸的 1/20、酸液黏度 2~3 mPa·s(交联酸 50 mPa·s)的缓速酸, 注入过程中可以形成黏性指进, 实现非均匀溶蚀, 建立深部沟通通道, 扩大沟通范围。穿透相同距离时, 该缓速酸的消耗量只有盐酸的 1/10。

4) 光纤压裂监测技术。针对超深井高温高压的特点, 攻关光纤监测精准校正技术、低频应变信号解释技术等^[39-41], 以指导压裂设计和压裂施工时进行参数优化, 为油气井生产精细化管理提供数据支持。

4.3 深层油气藏提高采收率技术

1) 攻关以注气为核心的提高采收率技术。顺北油气田的油藏条件远超常规化学驱技术的适用极限, 气驱是三次采油的必然选择。在目前泡沫驱先导基础上, 深化剩余油气赋存状态的精细描述, 通过试验对比天然气驱、氮气驱、泡沫气驱、气水复合驱等的驱替效率。探索规模注气与深层储气库、深层碳埋存协同建设的经济可行性; 研制大排量、高压增压设备和“快注快采”配套井口管柱等。

2) 攻关扩大水气驱波及体积的技术。在地质-油藏-工程一体化深入结合的基础上, 针对天然底水或注入次生底水活跃单井, 重点攻关深源控水技术。针对井组水窜、气窜, 发展流道调整技术。研发适合块状裂缝破碎体特点的深部转向堵剂, 发展注入水或泡沫携带的低成本流道调整剂。

3) 配套储层保护作业用剂。围绕储层保护需求, 配套升级含硫化氢工况下带压作业设备, 研发耐温 180 ℃ 井筒屏蔽暂堵剂、泡沫修井液等关键处理剂和工作液, 以降低工作液的漏失量。

5 结束语

顺北断控型油气藏为非常规油气藏, 经过多年探索攻关, 在“深地工程”领域取得了一系列重要成果, 构建了 12 项关键工程技术, 初步形成了支撑超深层油气藏高效开发的工程技术体系。顺北油气田的成功实践, 展示了深地油气领域具有广阔发展前景。下一步的技术攻关方向是大幅度提高储量动用钻井技术、深井高效智能完井技术和深层破碎油气藏提高采收率技术, 以进一步提高技术的针对性和较低丰度储量区的开发效益, 拓展高效动用的油气藏类型, 形成可持续发展的深层油气开发新局面。

参 考 文 献

References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘景涛, 张文, 于洋, 等. 二叠系火成岩地层井壁稳定性分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(1): 75-80.
LIU Jingtao, ZHANG Wen, YU Yang, et al. Analysis on wellbore stability in Permian igneous rock formation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(1): 75-80.
- [4] 刘景涛, 尹飞, 赵宁, 等. 顺北区块超深井侵入体井壁稳定性分析

- [J]. 西部探矿工程, 2021, 33(10): 30-34.
- LIU Jingtao, YIN Fei, ZHAO Ning, et al. Analysis of wellbore stability of ultra deep well intrusion in Shunbei Block[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(10): 30-34.
- [5] 梁瑶, 霍守东, 李学良, 等. 利用绕射信息在裂缝型地层中进行钻前风险评估[J]. 地球物理学报, 2023, 66(1): 46-53.
- LIANG Yao, HUO Shoudong, LI Xueliang, et al. Pre-drilling risk assessment using seismic diffraction information in fractured formations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(1): 46-53.
- [6] 李海英, 刘军, 龚伟, 等. 顺北地区走滑断裂与断溶体圈闭识别描述技术[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 107-120.
- LI Haiying, LIU Jun, GONG Wei, et al. Identification and characterization of strike-slip faults and traps of fault-karst reservoir in Shunbei Area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 107-120.
- [7] 刘雨晴, 邓尚, 张荣, 等. 深层火成岩侵入体和相关构造发育特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 105-117.
- LIU Yuqing, DENG Shang, ZHANG Rong, et al. Characterization and petroleum geological significance of deep igneous intrusions and related structures in the Shunbei Area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 105-117.
- [8] 路保平, 袁多, 吴超, 等. 井震信息融合指导钻井技术[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1227-1234.
- LU Baoping, YUAN Duo, WU Chao, et al. A drilling technology guided by well-seismic information integration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1227-1234.
- [9] 彭达, 郝诚, 龙隆, 等. 基于神经网络井震多信息融合的碳酸盐岩缝洞体预测方法[C]//中国地球物理学会油气地球物理专业委员会, 中国石化石油物探技术研究院, 江苏省地球物理学会. 2019年油气地球物理学术年会论文集. 北京: 中国地球物理学会油气地球物理专业委员会, 2019: 257-261.
- PENG Da, XI Cheng, LONG Long, et al. A prediction method for carbonate rock fractures and cavities based on neural network well seismic multi information fusion[C]//Committee on Petroleum Geophysics, Chinese Geophysical Society, Sinopec Petroleum Geophysical Technology Research Institute, Geophysical Society of Jiangsu Province. Proceedings of the 2019 academic annual conference on oil and gas geophysics. Beijing: Committee on Petroleum Geophysics, Chinese Geophysical Society, 2019: 257-261.
- [10] 谢光泽. 地球物理属性融合技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- XIE Guangze. Study on the fusion technology of geophysical attributes[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.
- [11] 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.
- [12] 李轲. 顺北三区井身结构优化与钻井提速关键技术研究与应用[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- LI Ke. Research and application of key technologies for wellbore structure optimization and drilling speed improvement in Shunbei Block 3[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [13] 李双贵, 罗江, 于洋, 等. 顺北5号断裂带南部压力剖面建立及井身结构优化[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 9-15.
- LI Shuanggui, LUO Jiang, YU Yang, et al. Establishing pressure profiles and casing program optimization in the southern Shunbei No.5 Fault Zone[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(1): 9-15.
- [14] 邓虎, 贾利春. 四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(12): 82-94.
- DENG Hu, JIA Lichun. Key technologies for drilling deep and ultra-deep wells in the Sichuan Basin: current status, challenges and prospects[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(12): 82-94.
- [15] 刘彪, 潘丽娟, 王圣明, 等. 顺北油气田超深井井身结构系列优化及应用[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(2): 130-136.
- LIU Biao, PAN Lijuan, WANG Shengming, et al. Casing program optimization and application of ultradeep wells in Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(2): 130-136.
- [16] 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.
- [17] 刘彪, 吴杰, 张俊, 等. 基于离散元方法的PDC钻头切削齿破岩机理数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(2): 165-169.
- LIU Biao, WU Jie, ZHANG Jun, et al. Numerical simulation on the rock breaking of cutter teeth of PDC cutter based on discrete element method[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(2): 165-169.
- [18] 刘彪, 许瑞, 王居贺, 等. 基于改进的主成分分析法的钻头优选评价模型[J]. 石油机械, 2020, 48(9): 8-14.
- LIU Biao, XU Rui, WANG Juhe, et al. Bit selection and evaluation model based on improved principal component analysis[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(9): 8-14.
- [19] 祝效华, 李瑞, 刘伟吉, 等. 深层页岩气水平井高效破岩提速技术发展现状[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 1-18.
- ZHU Xiaohua, LI Rui, LIU Wei, et al. Development status of high-efficiency rock-breaking and speed-increasing technologies for deep shale gas horizontal wells[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(4): 1-18.
- [20] 于洋, 南玉民, 李双贵, 等. 顺北油田古生界钻井提速技术[J]. 断块油气田, 2019, 26(6): 780-783.
- YU Yang, NAN Yumin, LI Shuanggui, et al. Technology for increasing drilling speed of Paleozoic stratum in Shunbei Oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(6): 780-783.
- [21] 范胜, 蒋官澄, 易浩, 等. 抗高温封堵固壁防塌水基钻井液研究与应用[J]. 钻采工艺, 2023, 46(2): 146-152.
- FAN Sheng, JIANG Guancheng, YI Hao, et al. Research and application of high-temperature plugging anti-sloughing water-based drilling fluids for wellbore strengthening[J]. *Drilling & Production Technology*, 2023, 46(2): 146-152.
- [22] 陈修平, 李双贵, 于洋, 等. 顺北油气田碳酸盐岩破碎性地层坍塌钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2): 12-16.
- CHEN Xiuping, LI Shuanggui, YU Yang, et al. Anti-collapse drilling fluid technology for broken carbonate formation in Shunbei

- Oil and Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 12–16.
- [23] 方俊伟, 董晓强, 李雄, 等. 顺北油田断溶体储集层特征及损害预防[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 201–205.
FANG Junwei, DONG Xiaoqiang, LI Xiong, et al. Characteristics and damage prevention of fault-karst reservoirs in Shunbei Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 201–205.
- [24] 翟科军, 高伟, 李文霞, 等. 钻井液用聚合物分子结构与环保性能的关系研究[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(1): 47–53.
ZHAI Kejun, GAO Wei, LI Wenxia, et al. Study on the relationship between molecular structure of polymer for drilling fluids and performance of environmental protection[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(1): 47–53.
- [25] 李文霞, 王居贺, 王治国, 等. 顺北油气田超深高温水平井眼轨迹控制技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 18–24.
LI Wenxia, WANG Juhe, WANG Zhiguo, et al. Wellbore trajectory control technologies for ultra-deep and high-temperature horizontal wells in the Shunbei Oil & Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 18–24.
- [26] 刘湘华, 刘彪, 杜欢, 等. 顺北油气田断裂带超深水平井优快钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 11–17.
LIU Xianghua, LIU Biao, DU Huan, et al. Optimal and fast drilling technologies for ultra-deep horizontal wells in the fault zones of the Shunbei Oil & Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 11–17.
- [27] 于洋, 李双贵, 高德利, 等. 顺北 5-5H 超深 $\phi 120.65$ mm 小井眼水平井钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(3): 276–281.
YU Yang, LI Shuanggui, GAO Deli, et al. Drilling techniques used in Well Shunbei 5-5H, an ultra-deep slim-hole $\phi 120.65$ mm horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(3): 276–281.
- [28] 杨兰田, 张江江, 李芳, 等. 西部某油田高温高盐环境油套管选材实验研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(4): 44–46.
YANG Lantian, ZHANG Jiangjiang, LI Fang, et al. Experimental research on material selection of high-temperature and high-salt environmental oil casing in western oil field[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(4): 44–46.
- [29] 张志宏, 张江江, 高秋英, 等. 塔河油田某侧钻深井油管断裂失效原因[J]. 科技导报, 2014, 32(7): 62–66.
ZHANG Zhihong, ZHANG Jiangjiang, GAO Qiuying, et al. Analysis of rupture failure of sidetrack deep well pipe in Tahe Oilfield[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(7): 62–66.
- [30] 张江江, 刘冀宁, 高秋英, 等. 湿相 CO_2 环境管道内沉积物及对腐蚀影响的定量化研究[J]. 科技导报, 2014, 32(32): 67–71.
ZHANG Jiangjiang, LIU Jining, GAO Qiuying, et al. Sediment in the formation in wet CO_2 environment of pipeline and quantitative study of its corrosion effect[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(32): 67–71.
- [31] 石鑫, 李大朋, 张志宏, 等. 温度对注气井 P110 油管钢耐蚀性能的影响[J]. 材料保护, 2017, 50(12): 8–10.
SHI Xin, LI Dapeng, ZHANG Zhihong, et al. Effect of temperature on corrosion resistance of tubular steel in gas injection wells[J]. Materials Protection, 2017, 50(12): 8–10.
- [32] 张宇, 郭继香, 杨琦琦, 等. 耐高温抗 $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ 缓蚀剂的合成及评价[J]. 精细化工, 2019, 36(11): 2309–2316.
ZHANG Yu, GUO Jixiang, YANG Yuqi, et al. Synthesis and evaluation of high temperature resistant $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ corrosion inhibitor[J]. Fine Chemicals, 2019, 36(11): 2309–2316.
- [33] 赵海洋, 石鑫, 刘冬梅, 等. 适用高温、高 Cl^- 工况下的缓蚀剂合成及评价[J]. 油田化学, 2020, 37(1): 155–158.
ZHAO Haiyang, SHI Xin, LIU Dongmei, et al. Synthesis and evaluation of corrosion inhibitors under high temperature and high Cl^- conditions[J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(1): 155–158.
- [34] 闫立伟, 宋智灵, 杜朝锋, 等. 天然气泡沫体系流度控制能力影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(2): 109–118.
YAN Liwei, SONG Zhiling, DU Chaofeng, et al. Influencing factors of fluidity control ability of natural gas foam system[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(2): 109–118.
- [35] 黄兆海. 深层稠油高盐驱油藏深部化学调驱技术的应用: 以吐哈油田鲁 X 区块为例[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(6): 110–113.
HUANG Zhaohai. Application of deep chemical profile control and flooding technology in deep heavy oil and high salt water drive reservoir: by taking Lu X Block of Tuha Oilfield as an example[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021, 35(6): 110–113.
- [36] 张利军, 谭先红, 焦钰嘉, 等. 海上低渗油藏 CO_2 微泡沫驱提高采收率实验与数值模拟研究[J]. 中国海上油气, 2023, 35(5): 145–153.
ZHANG Lijun, TAN Xianhong, JIAO Yujia, et al. Experimental study and numerical simulation on enhanced oil recovery by CO_2 microfoam flooding in offshore low-permeability reservoirs[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(5): 145–153.
- [37] 程宏杰, 陈玉琨, 李铁栓, 等. 低渗透油藏再生氮气泡沫驱实验与应用[J]. 特种油气藏, 2022, 29(6): 104–110.
CHENG Hongjie, CHEN Yukun, LI Tieshuan, et al. Test and application of regenerative nitrogen foam flooding in low-permeability reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(6): 104–110.
- [38] 段友智, 艾爽, 刘欢乐, 等. 形状记忆筛管自充填防砂完井技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(5): 86–90.
DUAN Youzhi, AI Shuang, LIU Huanle, et al. Shape memory screen self-packing sand control completion technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 86–90.
- [39] 韦坚, 王小军, 梁财海, 等. 基于卡尔曼滤波的分布式光纤 Raman 测温系统[J]. 光学技术, 2016, 42(3): 264–267.
WEI Jian, WANG Xiaojun, LIANG Caihai, et al. Distributed optical fiber Raman temperature measurement system based on Kalman filter[J]. Optical Technique, 2016, 42(3): 264–267.
- [40] 郑金中, 姜广彬, 陈伟, 等. 井下永久式光纤温度-压力测试技术研究[J]. 石油机械, 2010, 38(10): 55–57.
ZHENG Jinzhong, JIANG Guangbin, CHEN Wei, et al. Research on the testing technology of the borehole permanent optical fiber temperature-pressure[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(10): 55–57.
- [41] 任利华, 陈德飞, 潘昭才, 等. 超深高温油气井永久式光纤监测新技术及应用[J]. 石油机械, 2019, 47(3): 75–80.
REN Lihua, CHEN Defei, PAN Zhaoai, et al. Field application of permanent fiber monitoring for ultra-deep high temperature oil and gas well[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(3): 75–80.