石油钻探技术
PETROLEUM DRILLING TECHNIQUES
中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》（CA）收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》（AJ）收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊（美）
AAPG协会期刊出版平台收录期刊（美）
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

苏北陆相页岩油高性能水基钻井液技术

高书阳

Technique of High-Performance Water-Based Drilling Fluid for Continental Shale Oil in Subei Basin

GAO Shuyang

在线阅读 View online: http://doi.org/10.11911/syztjs.2024061

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

准噶尔盆地硬脆性页岩强化致密封堵水基钻井液技术

Enhanced Tight Plugging Water-Based Drilling Fluid Technology for Hard and Brittle Shales in Junggar Basin

石油钻探技术. 2022, 50(5): 50–56 http://doi.org/10.11911/syztjs.2022022

废弃高性能水基钻井液循环利用电吸附处理方法

Electro-Sorption Treatment Method for Waste High Performance Water-Based Drilling Fluid

石油钻探技术. 2020, 48(4): 50–55 http://doi.org/10.11911/syztjs.2020046

威远区块深层页岩气水平井水基钻井液技术

Water Based Drilling Fluid Technology for Deep Shale Gas Horizontal Wells in Block Weiyuan

石油钻探技术. 2019, 47(2): 21–27 http://doi.org/10.11911/syztjs.2019022

大港油田页岩油水平井钻井液技术

Drilling Fluid Technology for Horizontal Shale Oil Wells in the Dagang Oilfield

石油钻探技术. 2021, 49(4): 59–65 http://doi.org/10.11911/syztjs.2021012

满深1井奥陶系桑塔木组高性能防塌水基钻井液技术

High Performance Anti-Sloughing Water Based Drilling Fluid Technology for Well Manshen 1 in the Ordovician Sangtamu Formation

石油钻探技术. 2020, 48(5): 49–54 http://doi.org/10.11911/syztjs.2020070

深水钻井抗高温强抑制水基钻井液研制与应用

The Development and Application of High Temperature Resistant and Strong Inhibitive Water-Based Drilling Fluid for Deepwater Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(3): 82–88 http://doi.org/10.11911/syztjs.2019036

扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2024061

引用格式：高书阳. 苏北陆相页岩油高性能水基钻井液技术 [J]. 石油钻探技术，2024, 52(4): 51-56.

GAO Shuyang. Technique of high-performance water-based drilling fluid for continental shale oil in Subei Basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(4): 51-56.

苏北陆相页岩油高性能水基钻井液技术

高书阳[1,2]

（1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室，北京 102206；2. 中石化石油工程技术研究院有限公司，北京 102206）

摘　要：为解决常规油基钻井液在苏北页岩油工区钻井施工中面临的井壁失稳、环境污染等技术问题，在研究井壁失稳机理的基础上，提出了“外防水侵、内控膨胀”的井壁稳定控制方法，制定了“封堵为主+强化抑制+润湿反转+合理密度”的技术措施，研发了可变形微纳米聚合物封堵剂、页岩润湿反转剂和原油乳化分散降黏剂等关键助剂，构建了高性能水基钻井液体系 SM-ShaleMud-II。该钻井液体系高温高压滤失量小于 6.0 mL，极压润滑系数小于 0.12，可有效降低储层泥页岩力学性能的弱化程度。苏北页岩油区块的 10 口井应用了该钻井液体系，钻井过程中井壁稳定，套管下入顺利，取得了良好的应用效果。高性能水基钻井液体系 SM-ShaleMud-II 的成功研制，为非常规页岩油气低成本绿色开发提供了一种有效的技术手段。

关键词：苏北盆地；页岩油；水基钻井液；井壁稳定；钻井液添加剂

中图分类号：TE254.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001–0890(2024)04–0051–06

Technique of High-Performance Water-Based Drilling Fluid for Continental Shale Oil in Subei Basin

GAO Shuyang[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing,* 102206*, China*; 2. *Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing,* 102206*, China*)

Abstract: In order to solve the technical problems such as borehole instability and environmental pollution faced by conventional oil-based drilling fluid in the shale oil working area of Subei Basin during drilling, a new control method of borehole stability was put forward, featuring external waterproofing and internal expansion control by studying the mechanism of borehole instability. The technical measures of “dominant plugging + strengthened inhibition + wetting reversal + reasonable density” was developed, and the key additives such as deformable micro-nano polymer plugging agent, shale wetting reversal agent, and crude oil emulsifying dispersion viscosity reducing agent were developed. Finally, a high-performance water-based drilling fluid system, SM-ShaleMud-II, was established. The high temperature and high pressure filtration loss of the drilling fluid system was less than 6.0 L, and the extreme pressure lubrication coefficient was less than 0.12, which could effectively reduce the weakening degree of the mechanical properties of the reservoir shale. The drilling fluid was applied to 10 wells in the shale oil area of Subei Basin, ensuring borehole stability and smooth casing running and achieving good application results. The successful development of high-performance water-based drilling fluid, SM-ShaleMud-II, provides an effective technical means for low-cost and green development of unconventional shale oil and gas.

Key words: Subei Basin; shale oil; water-based drilling fluid; wellbore stability; drilling fluid additives

页岩油是国家“十四五”石油增产的重要战略性接替资源[1–3]；其中，苏北地区页岩油的地质资源量达 3.5×10^8 t，是近期国内页岩油增储上产的有利阵地，展现出良好的勘探潜力。其主体位于江苏省泰州市和盐城市，水网发达，环保要求严格。构造主要包括海安凹陷、溱潼凹陷、高邮凹陷和金湖凹

收稿日期：2023-12-04；**改回日期：**2024-06-23。

作者简介：高书阳（1984—），男，山东聊城人，2010 年毕业于中国石油大学（北京）油气井工程专业，2017 年获中国地质大学（北京）钻井工程专业博士学位，副研究员，主要从事钻井液工艺技术及井壁稳定方面的研究工作。E-mail: gaosy.sripe@sinopec.com。

基金项目：中石化科技部重点攻关项目“苏北页岩油藏高效钻井与压裂关键技术研究”(编号：P22096) 资助。

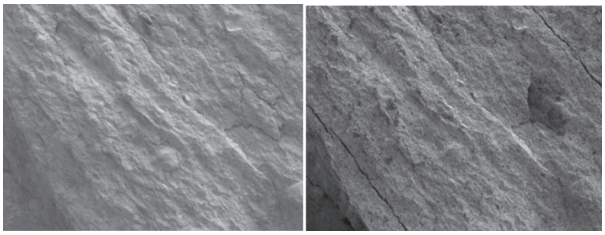
陷[4]；主力储层古近系阜宁组烃源岩具有埋藏深（>3 800 m）、优质页岩厚度大（>150 m）、应力高（>70 MPa），纵向岩性复杂的特点。地层温度 136～145 ℃，地层压力系数 1.31～1.45。地层岩性以富有机质纹层状/层状灰云质页岩为主，局部发育含有机质层状灰云质页岩、块状泥岩等岩相。阜宁组泥页岩储层微裂缝、层理缝和溶孔较发育。微裂缝尺寸为纳米、微米级，主要为沉积形成的层理缝及后期构造活动形成的构造缝[5]。苏北页岩油区块阜宁组泥页岩前期所钻的 6 口井均出现了井壁坍塌，导致扭矩异常、钻具脱落、卡钻、埋钻及套管未下至设计位置等事故，复杂处理时间长，时效损失巨大。为保证陆相页岩地层井壁稳定性，科研人员先后构建了强抑制性水基钻井液和白油基钻井液体系[6–11]。然而实践表明强抑制性水基钻井液未能实现对阜宁组井壁稳定性的有效控制，阜宁组存在井壁失稳、掉块严重、卡钻、侧钻等现象。2 口使用白油基钻井液的井均遭遇地层水侵入，导致钻井液性能恶化，引发井壁严重垮塌，造成卡钻，损失进尺超过 5 000 m。原有钻井液体系无法满足阜宁组井壁稳定性的要求。

为此，笔者针对苏北页岩油工区前期钻井施工中出现的技术问题，深入分析阜宁组陆相泥页岩地层井壁失稳机理，提出了井壁稳定技术对策，研发了适用于苏北地区陆相页岩油储层的高性能水基钻井液体系，并在 10 口井进行了现场应用，这 10 井钻井过程中井壁稳定，套管顺利下至设计位置。

1　技术难点

1）陆相页岩井壁失稳风险高。测试分析表明，阜宁组陆相泥页岩黏土矿物含量高达 55%；黏土矿物以伊/蒙混层为主，占黏土矿物总量的 50.9%，不含蒙脱石；清水条件下页岩线性膨胀率达 17.5%，滚动回收率为 72.68%，具有较强的水化分散性。阜宁组二段泥页岩层理性强、微裂缝发育，裂缝宽度集中在 0.1～10.0 μm；润湿特征呈明显的双亲性。因此，钻井液滤液在压差和自吸作用下，易于沿地层微裂隙侵入，引起泥页岩局部水化[12–14]，产生水化膨胀（见图 1），导致大量微裂缝沿层理面方向萌生延伸扩展，破坏岩石整体性[15–16]，地层岩石力学性能大幅降低，引发井壁失稳坍塌。

2）降摩减阻性能要求高。苏北页岩油水平井钻井时通常采用随钻测井（LWD）常规导向钻具，在造斜段滑动定向时容易形成台阶，造成托压、工具面不稳定[17–18]；水平段施工时，由于狗腿严重度大等原因造成钻具与井壁之间摩擦力大，对钻井液润滑降摩减阻要求更高。



（a）浸泡前　（b）浸泡后

图 1　阜二段掉块岩样水化前后微观形貌对比

Fig.1　Comparison of micromorphology before and after hydration of straggly rock samples in the second member of Funing Formation

3）阜宁组二段页岩储层裂缝发育，储层物性好。水平井钻井时，钻井液易与裂缝系统中的原油发生置换，造成原油污染钻井液，黏度控制困难。

2　技术对策及关键助剂研选

苏北页岩油水平井钻井过程中，钻井液需具有良好的井壁稳定控制能力、降摩减阻能力和优异的抗原油污染能力。

2.1　井壁稳定性控制

井壁稳定是苏北页岩油水平井正常钻进的基础和关键[19]。基于井壁失稳机理分析，提出了“内控膨胀、外防水侵”的井壁稳定性控制方法，制定了“封堵为主+强化抑制+润湿反转+合理密度”的技术措施。

“内控膨胀”是在选择合理钻井液密度保持对井壁有效应力支撑的基础上，强化钻井液对页岩油储层所含大量黏土矿物的抑制能力，控制黏土矿物内部晶层间水化膨胀分散作用。通过室内评价，优选无机盐抑制剂 KCl，与聚胺抑制剂配合，提高阜二段页岩岩屑的滚动回收率。

“外防水侵”的井壁稳定性控制思路是因为阜二段页岩微裂缝极为发育，需及时有效封堵微裂缝、防止钻井液中的水相大量侵入来维持井壁稳定性。基于苏北页岩油储层岩石微裂缝的宽度范围，研发可变形微纳米聚合物封堵剂 SMNP-2 和纳米乳液 SMNR-1，提高裂缝封堵率，减少钻井液滤液的侵入量（见图 2）。此外，针对页岩油储层呈明显双亲性的特性，研发了页岩润湿反转剂 SMSWET-1。该

润湿反转剂主要由两性离子表活剂和聚醇单元构成，可在页岩表面快速成膜，改变页岩表面的润湿性，使岩石由“亲水”向“憎水”转变（见图 3），进一步提高钻井液体系阻止水相侵入的能力。

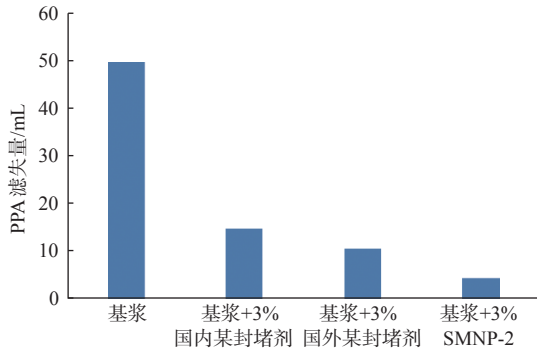


图 2　封堵剂 SMNP-2 的封堵效果

Fig.2　Sealing effect of plugging agents SMNP-2

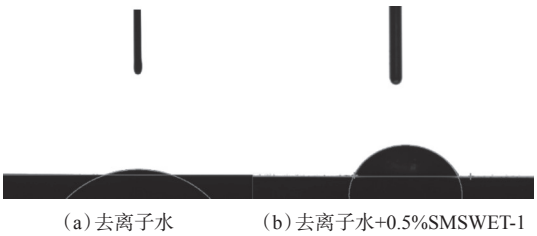


图 3　页岩润湿反转剂 SMSWET-1 的作用效果

Fig.3　Effect of shale wetting reversal agent SMSWET-1

2.2　润滑减阻技术对策

在保证优良的携岩能力的同时，提高钻井液的润滑性能是降摩减阻的关键。为达到高效润滑效果，提出“液+固”复合成膜润滑减阻技术对策，通过液体类润滑剂极性基团在钻具和岩石界面高效吸附，形成结构规整的疏水吸附润滑膜[20–23]；辅以石墨类固体润滑剂改善滤饼摩阻系数，达到协同润滑的效果。通过室内试验，对醇醚类、改性植物油类、固体类等 10 余种国内外润滑剂进行系统评价，优选极压润滑剂 SMJH-1、环保润滑剂 SMLUB-E 和固体润滑剂 SMSL-1 作为润滑的关键助剂（见表 1）。

表 1　不同润滑剂的润滑效果

Table 1　Effect comparison of lubricant agents

润滑剂及加量	极压润滑系数	黏滞系数
	0.237	0.16
1.5%SMJH-1+1.5%SMLUB-E	0.122	0.07
2%SMJH-1+2%SMLUB-E	0.106	0.06
2%SMJH-1+2%SMLUB-E+1%SMLS-1	0.092	0.04

2.3　流变性控制

针对水基钻井液被原油污染后流变性能难以控制的问题，基于表面化学原理，根据原油乳化分散降黏剂本身表面活性基团的高分散作用，优选出具有优异降黏度效果的、适用于水基钻井液的原油乳化分散降黏剂 EMU-1，抑制沥青质、石蜡等组分聚集，减弱堆积作用，以达到控制钻井液流变性的目的。

3　钻井液体系构建与评价

通过优选处理剂种类和优化其加量，形成了高性能水基钻井液体系 SM-ShaleMud-II：2.0%～3.0% 膨润土+0.8%～1.0% 聚合物降滤失剂+3.0% 环保降滤失剂 SMCQ-1+2.0%～3.0% 温敏防塌封堵剂+2.0%～3.0% 变形微纳米聚合物封堵剂 SMNP-2+2.0% 纳米乳液 SMNR-1+3.0%QS-2+0.5% 页岩润湿反转剂 SMSWET-1+1.0%～2.0% 环保润滑剂 SMLUB-E+1.0%～2.0% 高效润滑剂 SMJH-1+1.0%SMLS-1+0.3%～0.5% 聚胺 SMJA-1+5.0%～7.0%KCl+0.5% KOH+重晶石。

3.1　基础性能评价

室内评价试验结果表明：高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 在不同密度下均具有良好的流变性能，塑性黏度 22～26 mPa·s，动切力 7～9 Pa，动塑比均大于 0.30；室内 150 ℃ 条件下高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-I 的高温高压滤失量小于 6.0 mL，显著低于常规水基钻井液（见表 2）。

表 2　高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 的基础性能评价结果

Table 2　Basic performance evaluation results of high-performance water-based drilling fluid SM-ShaleMud-II

编号	密度/（kg·L^{-1}）	表观黏度/（mPa·s）	塑性黏度/（mPa·s）	动切力 /Pa	动塑比	静切力/Pa	高温高压滤失量/mL	API滤失量/mL
1	1.20	29	22	7	0.32	2.0/13.0	6.0	1.8
2	1.50	31	23	7	0.30	2.5/12.5	5.8	1.6
3	1.80	35	26	9	0.35	3.5/14.0	5.4	1.2

3.2　井壁稳定性评价

采用线性膨胀试验和岩石力学试验，评价去离子水、聚合物钻井液、水基钻井液 SM-ShaleMud-II 和油基钻井液对阜宁组地层井壁稳定性的控制能力。去离子水由 Elga Micra 纯水仪制得。聚合物钻井液的配方为：3.0% 膨润土+0.8%LV-CMC+0.2%KPAM+0.5%NaOH +2.0%YH-8+2.0%DF-1+重晶石。油基钻井液的配方为白油+2.0% 有机土+1.5% 主乳化剂+1.0% 辅乳化剂+2.0% 降滤失剂+25.0%$CaCl_2$ 溶液+1.5% 流型调节剂+2.0%CaO+重晶石。

阜宁组二段页岩在不同流体条件下的线性膨胀率评价结果如图 4 所示。由图 4 可以看出，阜宁组二段页岩在去离子水中的最终线性膨胀率为 17.84%，在高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 中的线性膨胀率仅为 2.85%，与在油基钻井液中线性膨胀率接近。表明高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 可大幅度降低阜二段泥页岩的膨胀率，起到良好的抑制作用。

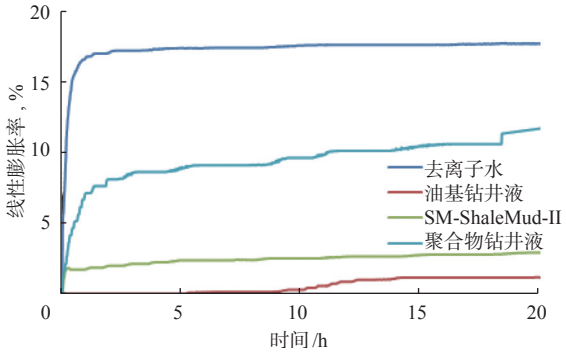


图 4　阜二段易塌地层页岩的线性膨胀率

Fig.4　Linear swell rate of fragile formation shale in the second member of Funing Formation

采用 TerraTek 三轴抗压强度测试系统，评价阜二段泥页岩在 4 种流体中常温浸泡 48 h 后的力学性能，测试结果如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可以看出：阜二段泥页岩经 4 种流体浸泡后力学性能均呈降低趋势，其中经去离子水浸泡后的降低幅度最大，其单轴抗压强度由 30.42 MPa 降至 16.77 MPa，弹性模量由 14.66 GPa 降至 9.82 GPa；经油基钻井液和高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 浸泡后，单轴抗压强度和弹性模量降低幅度相对较小，其中，经高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 浸泡后，单轴抗压强度仅降至 29.22MPa，弹性模量仅降至 12.44GPa，与经油基钻井液浸泡后相当，说明抑制性和封堵性得到强化的高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 可有效维持阜二段页岩地层的力学性能，起到稳定井壁的作用。

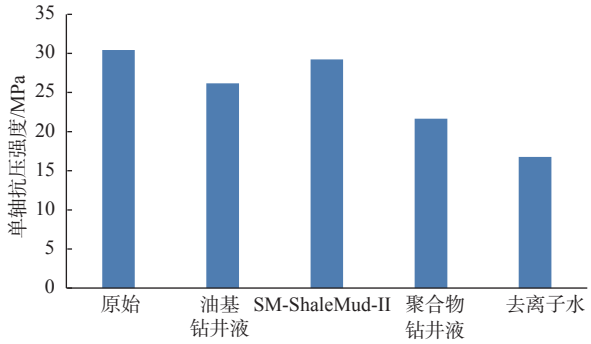


图 5　储层岩心经不同流体浸泡 48 h 后的单轴抗压强度

Fig.5　Uniaxial compressive strength of reservoir cores after soaking in different fluids for 48 h

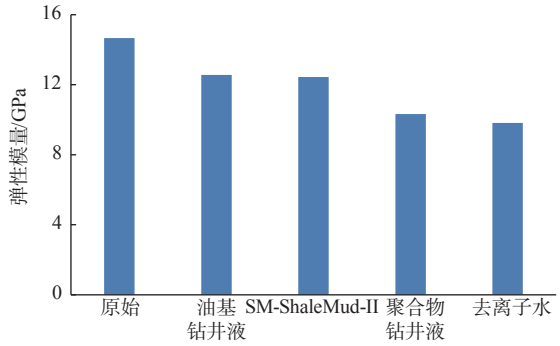


图 6　储层岩心经不同流体浸泡 48 h 后的弹性模量

Fig.6　Elastic modulus of reservoir cores after soaking in different fluids for 48 h

3.3　润滑性能评价

采用 E-P 极压润滑仪和 NZ-3A 黏滞系数测定仪，评价高性能水基钻井液体系 SM-ShaleMud-II 的润滑性能。对比可见，SM-ShaleMud-II 具有极佳的润滑性能，极压润滑系数为 0.092，滤饼黏滞系数为 0.041，润滑性能略差于油基钻井液，但远好于常规聚合物钻井液体系。

3.4　抗原油污染能力评价

采用 Fann35 六速旋转黏度计，测定常规水基钻井液和高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 在不同原油侵入量下的表观黏度，结果如图 7 所示。由图 7 可以看出：在原油侵入量达到 10% 后，常规水基钻井液的表观黏度开始呈指数增大，流变性能失去控制；高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 的表观黏度随原油侵入量增大缓慢增大，在原油侵入量达 40% 时，其表观黏度为 64 mPa·s，表现出良好的抗原

油污染能力。

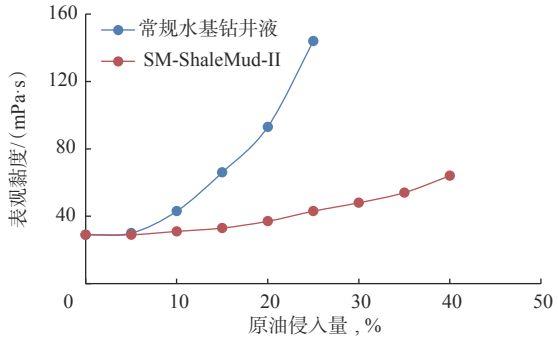


图 7　不同钻井液在不同原油侵入量下的表观黏度

Fig.7　Apparent viscosity of different drilling fluids with different crude oil invasion

4　现场应用效果

高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 在苏北页岩油区块的 10 口井进行了应用。与前期完钻的井相比较，取得了显著的井壁稳定效果和经济效果。具体表现在以下 3 个方面。

1）井下复杂情况大幅度降低。有效保持了苏北页岩油阜宁组的井壁稳定性，避免了油基钻井液遇水后性能恶化引发的复杂情况，复杂时效由 16% 降至 0，应用井均起下钻通畅，套管一次成功下入至设计位置，其中 SY3-7HF 井有效保持阜二段页岩储层井壁稳定 110 d。

2）解决了大量原油侵入后流变性能难以控制的问题。通过应用原油乳化分散降黏剂，实现了对原油侵入后钻井液黏度的有效控制，减少了因钻井液黏度升高而带来的漏失等复杂情况。QY1-1S3HF 井施工后期，原油含量高达 32%，钻井液漏斗黏度仍可控制在 80 s 以内，保持了良好的流变性。

3）大幅度降低了钻井成本。通过应用该技术防止了井壁垮塌，避免了处理垮塌造成的钻井周期的增长和成本增加。同时，以水基钻井液 SM-ShaleMud-II 替代油基钻井液，从源头上避免了油基钻井液对环境的潜在危害，节省了废弃钻井液昂贵的处理费用，平均单井节约 100 万元。

现场应用表明，高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 解决了苏北阜宁组页岩储层钻进中所遇到的井壁垮塌问题，可有效控制原油侵入后的增黏问题，避免了井下复杂，大幅度降低了钻井成本和环保风险。

5　结论与建议

1）采用“内控膨胀、外防水侵”的井壁稳定控制方法，通过应用高性能水基钻井液技术，有效解决了钻井过程中的井壁失稳难题，降低了复杂时效和钻井成本。

2）研发了变形微纳米聚合物封堵剂、页岩润湿反转剂和环保润滑剂等关键助剂，构建了高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II。该钻井液的高温高压滤失量小于 6.0 mL、极压润滑系数小于 0.12，可有效降低泥页岩力学性能的弱化程度。

3）建议在其他陆相页岩油气区块开展高性能水基钻井液 SM-ShaleMud-II 体系适用性评价，并进行推广应用，以达到降低钻井成本和环保风险的目的。

参　考　文　献

References

[1] 王敏生，光新军，耿黎东. 页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向 [J]. 石油钻探技术，2019，47(5)：1–10.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, GENG Lidong. Key drilling/completion technologies and development trends in the efficient development of shale oil[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 1–10.

[2] 张锦宏. 中国石化页岩油工程技术现状与发展展望 [J]. 石油钻探技术，2021，49(4)：8–13.
ZHANG Jinhong. Present status and development prospects of Sinopec shale oil engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 8–13.

[3] 王中华. 国内钻井液技术现状与发展建议 [J]. 石油钻探技术，2023，51(4)：114–123.
WANG Zhonghua. Current situation and development suggestions for drilling fluid technologies in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 114–123.

[4] 昝灵，骆卫峰，印燕铃，等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油形成条件及有利区评价 [J]. 石油实验地质，2021，43(2)：233–241.
ZAN Ling, LUO Weifeng, YIN Yanling, et al. Formation conditions of shale oil and favorable targets in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(2): 233–241.

[5] 姚红生，昝灵，高玉巧，等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集高产主控因素与勘探重大突破 [J]. 石油实验地质，2021，43(5)：776–783.
YAO Hongsheng, ZAN Ling, GAO Yuqiao, et al. Main controlling factors for the enrichment of shale oil and significant discovery in second member of Paleogene Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 776–783.

[6] 胡进科，王宗敏，邹宽. 华东油气田阜宁组储层保护效果分析 [J]. 石化技术，2018，25(9)：12–14.
HU Jinke, WANG Zongmin, ZOU Kuan. Reservoir protection effect evaluate of Funing Group of East China oil and gas fields[J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(9): 12–14.

[7] 肖超，李瑞磊，杨春国，等. 江苏新生代脆性泥页岩井眼稳定技术 [J]. 石油钻探技术，2001，29(6)：25–27.
XIAO Chao, LI Ruilei, YANG Chunguo, et al. Well stabilizing techniques in brittle shale formations in Jiangsu[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001, 29(6): 25–27.

[8] 杨超. 钻井液智能检测评价系统的研制与现场应用 [J]. 钻井液与完井液，2023，40(3)：319–324.
YANG Chao. Development and field application of a drilling fluid intelligent testing and evaluating system[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2023, 40(3): 319–324.

[9] 李凡，李大奇，金军斌，等. 顺北油气田辉绿岩地层井壁稳定钻井液技术 [J]. 石油钻探技术，2023，51(2)：61–67.
LI Fan, LI Daqi, JIN Junbin, et al. Drilling fluid technology for wellbore stability of the diabase formation in Shunbei Oil & Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 61–67.

[10] 周启成，梁应红，单海霞，等. 抗高温高密度生物质钻井液体系研究及应用 [J]. 石油钻探技术，2022，50(6)：78–84.
ZHOU Qicheng, LIANG Yinghong, SHAN Haixia, et al. Research and application of a high-temperature resistant and high-density biomass drilling fluid system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 78–84.

[11] 秦春，刘纯仁，陈文可，等. 苏北盆地 HY1HF 井钻完井关键技术 [J]. 复杂油气藏，2022，15(3)：17–23.
QIN Chun, LIU Chunren, CHEN Wenke, et al. Key technologies for drilling and completion of HY 1HF in Subei Basin[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2022, 15(3): 17–23.

[12] 陶怀志，明显森，马光长，等. 水基钻井液强吸附多元醇酯键合润滑剂及作用机理 [J]. 钻井液与完井液，2022，39(5)：579–586.
TAO Huaizhi, MING Xiansen, MA Guangchang, et al. Study on mechanisms of a highly adsorptive polyol ester bonded lubricant for water based drilling fluids[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, 39(5): 579–586.

[13] 韩正波，刘厚彬，张靖涛，等. 深层脆性页岩力学性能及井壁稳定性研究 [J]. 特种油气藏，2020，27(5)：167–174.
HAN Zhengbo, LIU Houbin, ZHANG Jingtao, et al. Research on the mechanical properties and borehole stability of deep brittle shale[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(5): 167–174.

[14] 罗鸣，高德利，黄洪林，等. 钻井液对页岩力学特性及井壁稳定性的影响 [J]. 石油钻采工艺，2022，44(6)：693–700.
LUO Ming, GAO Deli, HUANG Honglin, et al. Effects of drilling fluids on shale mechanical properties and wellbore stability[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(6): 693–700.

[15] 田增艳，杨贺卫，李晓涵，等. 大港油田页岩油水平井钻井液技术 [J]. 石油钻探技术，2021，49(4)：59–65.
TIAN Zengyan, YANG Hewei, LI Xiaohan, et al. Drilling fluid technology for horizontal shale oil wells in the Dagang Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 59–65.

[16] 林永学，甄剑武. 威远区块深层页岩气水平井水基钻井液技术 [J]. 石油钻探技术，2019，47(2)：21–27.
LIN Yongxue, ZHEN Jianwu. Water based drilling fluid technology for deep shale gas horizontal wells in Block Weiyuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(2): 21–27.

[17] 闫林，陈福利，王志平，等. 我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究 [J]. 石油钻探技术，2020，48(3)：63–69.
YAN Lin, CHEN Fuli, WANG Zhiping, et al. Challenges and technical countermeasures for effective development of shale oil in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 63–69.

[18] 曹辉，李宝军，赵向阳. 厄瓜多尔 Tambococha 油田水平井钻井液技术 [J]. 石油钻探技术，2022，50(1)：54–59.
CAO Hui, LI Baojun, ZHAO Xiangyang. Drilling fluid technology for horizontal wells in Ecuador Tambococha Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 54–59.

[19] 刘均一，柴金鹏，李光泉，等. 准噶尔盆地硬脆性页岩强化致密封堵水基钻井液技术 [J]. 石油钻探技术，2022，50(5)：50–56.
LIU Junyi, CHAI Jinpeng, LI Guangquan, et al. Enhanced tight plugging water-based drilling fluid technology for hard and brittle shales in Junggar Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 50–56.

[20] 钱晓琳，宣扬，林永学，等. 钻井液环保润滑剂 SMLUB-E 的研制及应用 [J]. 石油钻探技术，2020，48(1)：34–39.
QIAN Xiaolin, XUAN Yang, LIN Yongxue, et al. Development and application of an environmental-friendly drilling fluid lubricant SMLUB-E[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1): 34–39.

[21] 王琳，董晓强，杨小华，等. 高密度钻井液用润滑剂 SMJH-1 的研制及性能评价 [J]. 钻井液与完井液，2016，33(1)：28–32.
WANG Lin, DONG Xiaoqiang, YANG Xiaohua, et al. Development and evaluation of a high density drilling fluid lubricant[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(1): 28–32.

[22] 宋瀚轩，叶艳，周志世，等. 石蜡微乳液的研制及其在水基钻井液中的应用 [J]. 钻井液与完井液，2022，39(5)：550–557.
SONG Hanxuan, YE Yan, ZHOU Zhishi, et al. Development of paraffin microemulsion and its application in water-based drilling fluids[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, 39(5): 550–557.

[23] 孔维升，李晓明，韩成福，等. 致密气藏二开结构水平井钻井液体系及现场应用 [J]. 钻井液与完井液，2023，40(1)：73–81.
KONG Weisheng, LI Xiaoming, HAN Chengfu, et al. The field application of a drilling fluid for a two-interval horizontal well penetrating tight gas reservoir[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2023, 40(1): 73–81.

[编辑　曹耐]