

doi:10.11911/syztjs.2023028

引用格式: 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.

国内钻井液技术现状与发展建议

王中华^{1,2}

(1. 中石化中原石油工程有限公司, 河南濮阳 457001; 2. 中石化石油工程钻完井液技术中心, 河南濮阳 457001)

摘 要: 近年来, 通过持续研究和现场实践, 国内钻井液技术取得了新的进展。为系统了解国内钻井液技术研究与应用情况, 促进钻井液体系完善与性能提高, 综述了国内近期的强抑制性聚合醇钻井液、胺基抑制钻井液、有机盐钻井液和超高温钻井液、微泡钻井液、强封堵钻井液、环保钻井液和无土/固相水基钻井液等水基钻井液体系, 全油基钻井液、油包水乳化钻井液和无土相油基钻井液等油基钻井液体系, 以及烃类合成基钻井液、生物质合成基钻井液等合成基钻井液体系的研究与应用情况, 指出了钻井液研究与现场应用中存在的问题, 分析了问题产生的原因, 并从现场需要和钻井液研究、应用与规范出发提出了钻井液技术发展建议, 对国内钻井液技术的开发与应用具有一定的参考借鉴价值。

关键词: 水基钻井液; 油基钻井液; 合成基钻井液; 技术现状; 发展建议

中图分类号: TE254

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)04-0114-10

Current Situation and Development Suggestions for Drilling Fluid Technologies in China

WANG Zhonghua^{1,2}

(1. Sinopec Zhongyuan Oilfield Service Corporation, Puyang, Henan, 457001, China; 2. Drilling and Completion Fluid Technology Center of Sinopec Oilfield Service Corporation, Puyang, Henan, 457001, China)

Abstract: Thanks to continuous research and field practice in recent years, new progress has been made in drilling fluid technologies in China. In order to systematically understand the research and application of drilling fluid technologies in China and improve drilling fluid systems and performance, research and application of water-based drilling fluid systems recently emerging in China, including polyalcohol drilling fluid with strong inhibitive ability, amine inhibiting drilling fluid, organic salt drilling fluid, ultra-high temperature drilling fluid, micro-bubble drilling fluid, strong plugging drilling fluid, environmentally friendly drilling fluid, and soil-free/solid-free water-based drilling fluid. Furthermore, oil-based drilling fluid systems, such as all-oil-based drilling fluid, water-in-oil emulsion drilling fluid, and soil-free oil-based drilling fluid were summarized, and synthetic-based drilling fluid systems including hydrocarbon synthetic-based drilling fluid and biomass synthetic-based drilling fluid were studied. The problems in the research and field application of drilling fluid were identified, and the causes of these problems were analyzed. Suggestions for developing drilling fluid technologies were put forward according to the field needs and drilling fluid research, application, and specification, which are of certain reference value for the development and application of drilling fluid technologies in China.

Key words: water-based drilling fluid; oil-based drilling fluid; synthetic-based drilling fluid; technical status; development suggestions

钻井液技术的发展既与油气勘探开发、所适用处理剂的合成技术发展有关。近年来, 针对页岩地的作业环境和安全高效钻井工艺的要求有关, 也与层和强水敏性易塌地层, 以及深井超深井、海洋深

收稿日期: 2022-11-24; 改回日期: 2023-02-02。

作者简介: 王中华 (1965—), 男, 河南柘城人, 1985 年毕业于郑州大学化学专业, 正高级工程师, 享受国务院政府特殊津贴, 主要从事钻井液技术研究与管理。系本刊编委。E-mail: wangzh.oszy@sinopec.com。

基金项目: 中国石化集团公司科技攻关项目“抗高温聚多糖水基钻井液技术研究”(编号: JP22300) 和中国石化科技攻关项目“特深层安全高效钻井关键技术”(编号: P21081-2) 联合资助。

水钻井的需要, 钻井液研究人员围绕钻井液体系的完善与性能提高, 以及新型钻井液体系的开发开展了大量研究与探索, 尤其是随着油基钻井液体系逐渐成熟配套, 基本能够满足不同条件下安全钻井的需要。水基钻井液方面, 为适应新的要求, 主要是在传统钻井液体系的基础上进行改造、完善与提高, 如在聚合醇、胺基抑制、有机盐和甲基葡萄糖苷等强抑制钻井液体系的基础上, 形成了强抑制高性能水基钻井液等^[1-3], 从而奠定了水基钻井液在强水敏性易塌或页岩地层钻井中推广应用的基础, 同时为保证深井超深井、低压易漏地层安全钻井, 以及储层保护、环境保护的需要, 相继研发了超高温钻井液、微泡钻井液、强封堵钻井液、环保钻井液和无土/固相水基钻井液等体系^[4-7], 尤其是超高温水基钻井液取得了突破性进展^[8-9], 促进了水基钻井液技术水平的提高。油基钻井液方面, 随着油基钻井液在页岩油气水平井, 以及深层、超深层及复杂水敏性地层钻井中表现出良好的效果^[10-11], 油基钻井液的应用不断扩大, 也激发了人们对油基钻井液的研究兴趣, 尤其是在页岩气水平井钻井中, 油基钻井液已成为主要应用的钻井液体系^[12-14]。针对油基钻井液使用中的安全、环保和健康风险, 合成基钻井液也有了一些应用^[15], 同时尝试采用高性能水基钻井液来替代油基钻井液用于页岩气水平井钻井, 虽然在应用中见到了初步效果, 但也暴露出一些固有缺陷, 限制了其推广应用^[3]。

尽管钻井液研究与应用已取得了一些可喜的成果, 积累了一些成功的经验, 但在降低钻井液费用和缺少高质量处理剂的大环境下, 国内钻井液, 尤其是水基钻井液的使用水平还有待提高, 特别在认识上还缺少从配方优化、工艺参数、过程控制等方面进行综合考虑, 使钻井液技术发展前景堪忧。为此, 笔者系统总结了近期国内钻井液研究与应用现状, 简要分析了目前存在的主要问题, 并对今后的发展提出了有益的建议。

1 水基钻井液

在水基钻井液方面, 围绕提高钻井液的抑制性以适用于页岩气水平井和强水敏性易塌地层, 以及深井超深井、海洋深水钻井的需要, 不仅优化完善了一些在用钻井液体系, 同时开展了新型钻井液的研究和应用探索, 尤其是近油基钻井液的成功应用, 为水基钻井液部分替代油基钻井液奠定了

基础, 也为环境敏感地区复杂地层钻井提供了技术支持。

1.1 抑制性钻井液

抑制性钻井液除了传统抑制性钻井液体系外, 聚合醇、胺基、烷基糖苷和有机盐钻井液仍然是关注的重点, 但大多是在传统抑制性钻井液基础上进行改进, 鲜见完全创新的钻井液体系。

1.1.1 聚合醇钻井液

聚合醇钻井液是利用聚合醇的浊点效应, 通过优化其加量和选择浊点而得到, 具有良好的抑制、润滑和封堵等性能。在聚合醇钻井液的基础上, 通过引入 Ca^{2+} 、有机盐和硅酸盐等, 可以得到强化型的聚合醇钻井液体系, 与聚合醇钻井液相比, 其热稳定性、封堵性能和抑制性得到提高, 能解决钻进过程中强水敏性地层的水化、弱水敏性地层的掉块与垮塌和钻屑水化导致的钻井液流变性不稳定等问题^[16-17]。

聚合醇钻井液用于水平井钻井, 能够保持较好的流变性、悬浮稳定性和润滑性, 抑制能力强, 携岩、防漏和封堵效果较好, 可以有效减少井下复杂, 保证水平段施工顺利^[18]。近年来, 尝试将该类钻井液用于页岩气水平井钻井, 但与油基钻井液相比还存在一些难以克服的问题, 故现场应用较少。聚合醇钻井液用于海洋深水钻井时, 钻井液不仅具有良好的流变性、滤失性、润滑性、抑制性和封堵性, 还可以防止天然气水合物的生成, 是深水钻井常用的一种钻井液体系^[19]。

1.1.2 胺基抑制钻井液

以胺基抑制剂为主剂的胺基抑制钻井液, 因其具有良好的抑制性、润滑性和携岩能力, 能满足储层保护和环保要求而深受重视, 并常用于钻进各种易坍塌地层^[2, 20]。由胺基抑制剂、钙盐、钾盐与其他处理剂配制钻井液, 可进一步提高钻井液的性能, 尤其是钻井液的抑制性。例如, 低活度高钙聚胺钻井液和多元抑制防塌的高性能防塌水基钻井液可以满足水敏性易塌地层对抑制、封堵防塌及高温稳定性的要求, 钻进过程中钻井液性能稳定, 无井壁失稳现象, 施工顺利^[21-22]。

实践表明, 氯化钾聚合物钻井液体系中引入胺基抑制剂, 可以使氯化钾聚合物钻井液的抑制防塌能力更强^[23]。氯化钾聚合物钻井液在柴达木盆地第一口超高温超深井(昆 2 加深井)的应用表明, KCl 与有机盐及聚胺的结合, 极大地提高了钻井液的抑制性能, 泥岩岩心膨胀量降低率达 93.33%^[24]。

1.1.3 烷基糖苷钻井液

甲基葡萄糖苷(MEG)钻井液体系具有良好的抑制、润滑性能及突出的储层保护和环境保护特性,特别适用于大位移井和大斜度井,能够满足油气田开发在储层保护及环境保护等方面的要求。针对页岩气水平井钻井需要,在MEG钻井液的基础上,开发了改性烷基糖苷钻井液体系。例如,以阳离子烷基糖苷和聚醚胺基烷基糖苷为主剂的ZY-APD高性能水基钻井液在川南黄金坝和长宁区块3口井的应用表明,该钻井液体系对川南龙马溪组页岩井壁稳定周期较长,润滑性与相同密度的油基钻井液相当,长期稳定性良好,便于维护与回收利用,环保性能优异^[3];使用该钻井液体系钻进武隆等常压页岩地层时井壁稳定,润滑性好,定向无托压,机械钻速高,井眼清洁度高,起下钻通畅,解决了小河坝组、龙马溪组等页岩地层的井壁稳定难题,可满足常压页岩气钻完井的施工要求^[25]。在分析上述钻井液体系存在的问题和应用经验基础上形成的近油基钻井液在现场应用中也见到明显效果,有望完全替代油基钻井液^[26]。

1.1.4 有机盐钻井液

实践证明,有机盐钻井液在生态保护、油层保护、抑制地层坍塌及抗高温抗污染方面都有显著优势,特别适用于钻进高温高压层、产层、易水化膨胀易坍塌泥页岩层、岩盐层和盐膏层等地层,也适用于小井眼和环境保护要求高的地区。为解决高温深层水平井钻井液储层保护问题,利用甲酸盐与碳酸钙复配形成的高温高密度低固相钻井液抗温能力较好,抗氯化钙、硫酸钙、页岩岩屑侵污能力强,储层保护效果良好,能够满足不同温度条件下的水平井钻进要求^[27]。针对玛东油田长水平井面临的三叠系泥页岩地层失稳和井眼净化问题,应用了钾钙基聚胺有机盐钻井液,钻井过程中钻井液性能稳定,维护方便,井壁稳定性好,井眼净化能力强,同比机械钻速提高45.6%,复杂时率降低79.0%^[28]。实践表明,高性能有机盐钻井液用于页岩气井钻完井作业,不仅为页岩气顺利钻井施工提供了技术支持,也有利于安全钻进和环境保护^[29]。

1.2 超高温钻井液

近年来,国内井底温度高于200℃的深井、超深井普遍增加,针对现场需要,在超高温钻井液方面开展了一些新的探索,但多以满足应用为主,缺乏系统性研究。例如,针对碱探1井钻井需要(完钻井深为6343m,实测井底最高温度达到235℃),在

有机盐钻井液的基础上,通过优化降滤失剂、封堵防塌剂、润滑剂和热稳定剂等,形成的抗240℃超高温有机盐水基钻井液,高温老化72h后,高温高压滤失量小于10mL,润滑系数小于0.10,砂床侵入深度小于12cm,满足了超高温井碱探1井的钻探需求^[30];为解决长探1井(完钻井深5400m)三开井段中存在的井底温度高、设计钻井液密度低、火成岩地层坍塌掉块和CO₂侵等技术难点,形成了一套抗温200℃、流变性好、封堵性强的抗温防塌水基钻井液。现场应用表明,该钻井液高温稳定性好,抗污染和抑制能力强,解决了火成岩地层坍塌及井底火成岩掉块携带问题^[31]。翼探1井设计完钻井深6500m,预测井底温度235~266℃,应用抗240℃高温的高密度复合有机盐钻井液后,全井施工顺利,钻井液高温流变性良好,高温高压滤失量小于12mL,较好地解决了高温流变性、沉降稳定性、漏失、破碎性地层垮塌和酸性气体污染等难题^[32]。

此外,超高温钻井液用于干热岩钻井也引起关注,并在青海共和盆地高温干热岩钻探GR1井施工中见到初步效果,为下步应用积累了经验^[33]。

1.3 微泡钻井液

微泡钻井液是针对枯竭地层开发需要而开发的,属于泡沫钻井液范畴。微泡钻井液的特性使其能减轻钻井液侵入渗透性地层或微裂缝性地层,维护处理容易方便,井眼清洁和携岩效果好。文23储气库是以巨厚盐层为盖层的枯竭砂岩气藏型储气库,地层孔隙度高,渗透率变化大,压力系数低,亏空严重,钻井过程中井漏、地层污染等问题突出,为此开发了抗温120℃微泡钻井液。现场66口井应用了该钻井液,这66口井的漏失发生率为13.6%,钻井期间井壁稳定,防漏效果良好,有效保护了储层,为文23储气库安全建设提供了保障^[34]。抗高温强封堵硬胶微泡沫钻井液流变性良好,稳泡效果优异,密度在0.60~1.00kg/L之间可调,配制及维护处理不需要特殊设备,可用于高温深井低压易漏地层防漏堵漏^[35]。

为解决煤层储层段钻井过程中出现的易伤害、易塌等技术难题,采用双子型阴离子起泡剂LHPF-1、两性离子起泡剂BS-12和XC增黏剂复配形成低伤害高性能微泡沫钻井液。在滇东地区老厂勘探区应用该钻井液后,钻井施工安全顺利,井径规则,滤失量低,该钻井液表现出良好的流变性、携岩性、抑制性、封堵性和储层保护性能^[36]。

1.4 其他钻井液

除上述钻井液体系外,近年来从强调封堵和环保的角度,针对性应用了一些强封堵和环保钻井液;从改善储层保护效果和提速提效出发,应用了无土/固相钻井液体系。但这些钻井液体系多是基于实验数据在传统钻井液体系的基础上改良而得,缺少必要的理论支撑。

1.4.1 强封堵性钻井液

钻遇水敏性强、胶结性差,以及裂缝发育、裂缝走向杂乱、破碎等复杂地层时,为了保证钻井过程中不出现井壁失稳、掉块卡钻和电测遇阻等复杂情况,常通过引入与地层特征相匹配的封堵剂形成具有良好封堵性能的钻井液。实践表明,强封堵性钻井液可以改善滤饼质量、阻止压力传递、减小进入地层的滤液量、保证井壁稳定,减少井下复杂^[37]。例如,通过优选封堵剂、润滑剂等形成的 BH-KSM-Shale 和 BH-WEI-Shale 强抑制强封堵高性能水基钻井液,能降低页岩渗透率,阻止压力传递,保证井壁稳定,大港油田 36 口页岩油水平井应用该钻井液后,平均井径扩大率 6.8%,未发生井下复杂^[38];具有较好封堵和防塌性能的非磺化低活度钻井液在玛湖油田 MaHW1602 井三开井段的应用结果表明,疏松易塌井段井壁稳定,井眼规则,平均井径扩大率 6.5%,且钻进中无明显托压现象,电测、下套管顺利^[39]。为解决顺北油气田奥陶系碳酸盐岩破碎性地层易发生井壁坍塌问题,通过强化封堵、控制高温高压滤失量和优化钻井液动塑比等形成了防塌钻井液,其在顺北 X 井的试验表明,钻进中扭矩稳定,机械钻速较高,井径扩大率较小,防塌效果良好^[40]。

1.4.2 环保钻井液

废弃钻井液一直是钻井工程的主要污染物之一,而研发环保型水基钻井液体系,从源头上控制废弃钻井液污染环境,已成为现阶段实现绿色钻井、清洁生产的重要途径。易生物降解的环保型可循环利用 BIODRILL A 水基钻井液在渤海油田的应用表明,可从浅层软泥岩直接开钻,实现全程“零排放”、零置换;现场 46 口井应用后,钻井井眼稳定,并实现钻井液连续重复使用,平均单井钻井液使用量减少约 60%、减排 60%,大大节省了环保处理费用^[41]。以天然高分子/无机纳米复合材料环保降滤失剂 EFR-1 等形成的抗温 170 ℃ 的高温高压高性能环保水基钻井液,组分简单,流变性和滤失性能稳定,高温高压滤失量为 7.8 mL,生物毒性 EC_{50} 为 56 800 mg/L,在胜利油田、新疆准中区块等现场

应用 20 余口井,钻井施工顺利,应用井段井径扩大率不大于 5%^[42]。用改性淀粉类环保降滤失剂 HBFR 等形成的抗高温(150 ℃)环保型水基钻井液体系 SLHB,不仅具有良好的流变性、滤失性、抑制性及抗污染性能,且 EC_{50} 大于 1×10^5 mg/L, BOD_5/COD_{Cr} 为 16.2%,可达到国家污水排放二级标准,现场 10 余口井应用表明,其能够满足胜利油田环保钻井液技术需求^[43]。

1.4.3 无土/固相水基钻井液

针对不同地质特点,开发应用了一些无土/固相钻井液,实践表明,无土/固相钻井液可以减少对储层的污染,有利于提高机械钻速。例如,具有解除水锁、抑制水敏及储层保护效果显著等优点的无土相防水锁低伤害钻井液,适用于长北区块压力衰减储层,长北区块 2 口气井试验表明,钻井过程中未发生井下复杂,起下钻顺畅,井眼净化效果好,能够满足长水平段水平井钻井安全及储层保护要求^[44]。无黏土低固相水基钻井液在陕北神木气田米 38 区块致密砂岩气藏 3 口水平井的应用表明,该钻井液流变性良好、抑制性和封堵能力强,钻进中摩阻小、无明显托压,起下钻顺畅,未出现井下复杂,钻井周期较设计平均缩短 10.85 d,下套管一次成功,单井产气量与邻井相比显著提高^[45]。南海东部惠州区域使用储层保护性能好的抗高温 150 ℃ 的无固相钻井液体系,满足了前古近系地层高温和储层保护要求,不仅确保了井下作业安全,也为测试作业顺利进行提供了保障^[7]。尽管无土/固相钻井液在应用中见到了一定效果,也积累了一些经验,但构建时还不够规范,不同体系缺乏统一的构建依据。

2 油基钻井液

近年来,油基钻井液的应用范围不断扩大,从页岩油气水平井、复杂水敏性地层到深层、盐膏层等,有效解决了井壁稳定、携岩和润滑防卡等难题,应用的钻井液体系包括柴油基和白油基钻井液。

2.1 纯油基钻井液

纯油基钻井液也称全油基钻井液,与油包水乳化钻井液相比,更有利于提高机械钻速、稳定井壁和保护储层。由于纯油基钻井液在高温下的悬浮稳定性和流变性控制难度大,且对增黏剂和提切剂性能要求高,国内应用较少,一般只在特别复杂的地质条件下使用。例如,针对准噶尔盆地吉木萨尔凹陷长裸眼段钻井过程中极易因泥岩吸水膨胀引发井

壁垮塌、阻卡等问题,采用具有良好的流变性、抑制性、抗污染和抗温能力的全白油基钻井液,解决了泥岩地层井壁易失稳的问题, J1 井二开 3 300 m 长裸眼段钻进过程中井壁稳定,二开井段平均机械钻速大幅度提高,钻井周期显著缩短,钻井成本大幅降低^[46];针对北部湾盆地涠洲组断层多、易垮塌、易井漏、易卡钻和储层保护难度大等难题,通过优化配方形成的全油基钻井液不仅比常规油基钻井液具有更强的封堵和抑制能力,且润滑性好、抗污染能力强、井眼清洁和储层保护效果好,能有效提高机械钻速^[47]。

2.2 油包水乳化钻井液

油包水乳化钻井液对乳化剂、润湿剂的性能要求比纯油基钻井液要高,由于水的存在,处理剂在高温下的稳定性比纯油基钻井液差,无形中会增大处理剂的消耗。多数人认为,由于水的引入,油包水乳化钻井液的安全性和环保性能比纯油基钻井液有所改善,故油包水乳化钻井液的应用更多,尤其在页岩气水平井钻井施工。例如,油水比 80:20、密度 2.20 kg/L 的高密度柴油基钻井液不仅乳化稳定性、流变性好,且抗污染能力强、高温高压滤失量低,阳 101H3-6 井长水平段应用表明,其能够满足页岩气水平井钻井施工需求^[48]。长宁区块现场 10 余口井应用强封堵油基钻井液后,龙马溪组和五峰组水平段均未出现井壁失稳的问题,与同区块采用常规钻井液钻井相比,井径扩大率大幅降低,建井周期平均缩短 4.5 d,解决了长宁区块页岩气水平井龙马溪组和五峰组水平段井壁失稳的问题^[49]。

除页岩气水平井钻井外,在钻进盐层、高温高压地层和强水敏性地层时,为了满足安全顺利钻井的需要,也逐步采用油基钻井液^[50-51],尤其在钻进盐层时应用油基钻井液,钻进过程中钻井液性能稳定,未出现卡钻或其他井下复杂,解决了深井钻遇巨厚盐膏层或高压盐水层污染的问题。尽管油基钻井液在钻进复杂地层时取得了较好的效果,但使用过程中还存在高温下稳定性变差、井壁失稳和起下钻遇阻、卡钻等问题,需要针对存在的问题不断完善提高。

2.3 无土相油基钻井液

无黏土相油基钻井液是在传统的油基钻井液组成中去掉有机土组分,并对各种组分进行优化形成的不含有有机土的油基钻井液体系。它克服了传统的油基钻井液高温易降解失效和高密度下流变性差的缺点,特别是在钻遇油气层时能够有效地控制滤失

量,并尽可能在不用或少用强亲油性处理剂的情况下使钻井液保持良好的流变性、悬浮稳定性和滤失性,降低循环压耗,不仅有利于提高机械钻速,还能降低储层损害程度。例如,在传统油基钻井液的基础上用聚合物增黏提切剂代替有机土,通过优选乳化剂、润湿剂和降滤失剂等,形成了柴油基无土相油包水乳化钻井液,在现场应用中取得良好效果^[52]。但由于可选的处理剂较少,目前无土相油基钻井液还没有规模化应用。

为了降低油基钻井液对环境可能造成的污染,不断探索应用低毒油基钻井液^[53],但由于成本和配套处理剂的限制,目前成熟的低毒油基钻井液还很少,从而限制了其广泛应用,今后应在这方面开展研究,以尽可能降低油基钻井液对环境的影响。

3 合成基钻井液

与油基钻井液相比,合成钻井液的使用范围相对较窄,合成基钻井液作为油基钻井液的替代或补充,其成本相对较高,因此,应用没有油基钻井液广泛。通常应用的合成基钻井液以烃类合成基为主,如准噶尔盆地南缘的永进油田钻进清水河组和西山窑组时井壁失稳问题突出,数口井的钻井实践表明,采用全合成基钻井液体系,解决了井壁失稳、悬浮携岩和润滑防卡等难题^[54]。合成基钻井液具有良好的环保性能和易于达到恒流变的特点,在海洋深水钻井中比较受重视,是深水、超深水钻井常用的钻井液体系。例如,南海东部超深水井荔湾 22-1-1 井作业水深达 2 619.35 m,实测海底温度为 1.9 ℃,为满足窄安全密度窗口作业的要求,使用了黏度、切力受温度和压力影响小,尤其是动切力、静切力和低剪切速率黏度等在 4.0~65.5 ℃ 温度下变化平稳的 FLAT-PRO 合成基钻井液体系,现场作业时其恒流变性能稳定、携岩能力强、井眼清洁效果好和 ECD 较低,起下钻及测井顺利^[55]。

实践证明,酯类和生物质合成基比烃类合成基环保性能更好。四川长宁区块 HA 平台 3 口页岩气井在水平段试用了改性植物油酯基油包水乳化钻井液,发现其抑制性、封堵性和润滑性好,钻进、电测和下套管等施工顺利,环保风险和废弃物处理成本低,能满足安全环保要求^[56]。利用天然生物油脂,通过催化加氢、分子异构等合成了生物合成基础油,形成的生物合成基钻井液乳液稳定,抗污染性能、润滑性、抑制性、储层保护性能和安全环保性能

良好, 滤失量低, 96 h 半致死浓度大于 1.0×10^6 mg/L, 能满足钻井及环保要求^[57]。

生物酯基钻井液在长期高温和碱性条件下会发生水解, 使钻井液性能变差, 维护处理难度增大, 且无法重复使用, 为此, 研制了基于生物质合成基液 LAE-12 的抗温 150 °C 的生物质合成基钻井液^[58], 密度 1.20~2.50 kg/L 可调。该钻井液不仅具有良好的流变性、滤失量控制能力、乳液稳定性、润滑性和抑制性, 且钻井液在钻屑上吸附量小, 无毒、易降解, 可满足安全和环保要求, 在中江 204H 井首次现场试验中表现出良好的效果, 具有推广前景。

4 存在的问题与发展建议

4.1 存在的问题

1) 钻井液体系命名不规范。构建钻井液体系时, 没有从关键材料所起的主体作用出发, 多数情况下钻井液体系命名存在随意性, 很少针对钻井液组成、性能与特征命名, 名称与实际存在偏差, 从名称难以看出钻井液的实质性内容。钻井液体系(名称)、组成与钻井液应具有的性能缺乏内在联系, 命名时缺少对其综合或基本性能的准确理解, 很少考虑不同处理剂之间的协同增效作用和处理剂的性能变化等因素, 常以某一种材料或处理剂或处理剂作用作为命名依据, 而很少考虑其是否决定钻井液体系的性质。

2) 钻井液体系配方设计不明确。很少考虑某一材料的标志作用或产生的突出效果, 配方设计缺乏理论和实践依据(没有明确为什么采用该材料和该配方), 未针对现场需要和处理剂本质特性, 常常是将几种处理剂列出就是所谓钻井液体系的配方, 对为什么要用某一处理剂、处理剂的主要和辅助作用, 以及如何确定主要材料和辅助材料等往往论述不清楚。对材料的基本要求或执行标准、选择依据等也很少体现。支撑构建钻井液体系的基础研究还存在大的差距。

3) 水基钻井液体系不仅缺少高质量、高效的处理剂, 还缺少科学的评价方法和标准。正是由于缺乏高效处理剂, 使井下高温条件下具有良好悬浮稳定性的钻井液、海洋深水恒流变钻井液、适用于环境敏感地区的绿色钻井液等仍不完善, 适用于页岩油气水平井的水基钻井液依然不成熟; 由于标准和评价方法的限制, 对于一些从名称看具有储层保护和环境保护性能的钻井液, 由于缺少其应用时储层

保护和环保性能的评价结果, 体现不出储层和环境保护效果。

4) 油基和合成基钻井液体系还没有完善配套, 整体水平与国外存在差距。在油基钻井液的井壁稳定、携岩清砂能力, 有效的防漏、堵漏、回收利用, 以及含油钻井废液等废弃物高效处理方面, 仍然还存在一些不足, 需要在将来的研究和实践中继续努力、不断攻关。

5) 对固相控制技术, 尤其是固相控制对钻井液性能维护和复杂预防的重要性认识不足, 缺少从系统工程的角度去制定钻井液性能维护与处理措施或方案。在水基钻井液固相及颗粒分布优化、通过控制固相改善钻井液性能、减少处理剂消耗、降低钻井液维护处理次数和减少处理费用等方面没有引起足够重视, 甚至缺少基本的认识, 还未形成系统、有效的清除和利用固相的方法。

6) 钻井作业时, 对钻井液配制、维护处理、工艺参数设置, 以及复杂预防与处理等, 经验仍然占主导作用, 缺乏科学的实验、分析和规范。钻井液性能参数优化不够, 不能视具体情况灵活掌握, 常常由于为满足某一性能指标而过度处理, 甚至牺牲其他性能, 这不仅不利于钻井液作用的有效发挥, 也不利于降低处理费用和钻井液总费用。

7) 钻井液配方或组分复杂, 处理剂类型多、数量多, 用量大。如目前有相当多的钻井液体系中处理剂种类超过 10 种, 而处理剂总用量在 20% 以上, 维护处理时难以确定哪一种处理剂是关键处理剂, 降低了维护处理的针对性。尽管处理剂种类或数量很多, 但适用于复杂地层, 尤其是高温超高温、高密度, 以及长水平段水平井水基钻井液的处理剂依然较少。

4.2 发展建议

为了更好地开展钻井液体系研究, 规范钻井液体系, 降低钻井液成本, 以及合理地选用、优化钻井液体系, 提高钻井液维护处理效果, 满足安全钻井的需要, 结合存在的问题和不足, 对未来钻井液的发展提出如下建议。

1) 深入开展机理或基础研究。随着固相控制水平及钻井液清洁性能的提高, 水基钻井液膨润土含量越来越低, 传统的基于高膨润土含量钻井液的一些机理或规律会随之改变, 需要进一步研究证实膨润土含量下降时滤失、降黏和井壁稳定机理等是否有所改变, 并根据研究结果对原有机理或规律进行完善或修正。同时, 需要完善有效的储层保护和环

境保护性能评价方法。

2) 重视低成本钻井液开发及寻找降本途径。石油工程降本增效之路会持续不断, 因此, 如何实现钻井液的高性能、低成本就显得非常重要。为此, 必须考虑寻找实现低成本高性能钻井液的途径。钻井液材料中膨润土最廉价, 在一定条件下能更有效地降滤失、增黏, 保证钻井液具有良好的流变性、造壁性和润滑性等综合性能, 因此, 要用好膨润土, 使其在不同钻井液体系中保证最适宜的加量, 从而更有效地发挥作用。在目前处理剂种类比较混乱的情况下, 直接使用一些天然材料(如褐煤、栲胶、淀粉等)或农副、工业下脚料, 既有利于降本, 又有利于环保。重视老浆的有效利用, 关键是充分发挥老浆中有效成分的作用, 老浆作为可用固相和处理剂的载体用于配浆成分, 不仅有利于减少废浆排放, 也有利于降低作业成本, 可见, 开展基于老浆的钻井液体系改造方法研究非常有意义。

3) 规范钻井液体系命名。由于长期以来钻井液体系命名缺乏规范, 随机性强, 导致使用混乱, 不仅影响了钻井液体系的有效选择和维护处理的针对性, 也影响了钻井技术的进步, 因此, 今后应建立规范的钻井液体系命名方法, 保证体系名称与内容相对应, 有利于促进钻井液体系健康发展。

4) 优化钻井液性能参数, 简化钻井液配方。合理确定、优化钻井液性能指标, 在满足井壁稳定和安全钻井施工要求的前提下, 设计钻井液性能指标时不要一概而论, 要视具体情况而定, 以尽可能减少处理剂的用量。在准确认识处理剂作用及优化钻井液性能参数的前提下, 尽可能简化钻井液配方; 构建钻井液配方时, 利用处理剂之间的协同增效作用或开发多功能长效处理剂, 从有利于钻井液性能稳定和维护处理的角度出发, 减少构成钻井液处理剂的品种和用量, 不仅有利于钻井液性能控制, 也可以减少由于钻井液液相黏度升高而带来的循环压耗增加、剪切稀释能力变差和钻具泥包等现象, 减少井下复杂。

5) 针对性地选择和合理使用钻井液体系。选择钻井液体系时, 要视具体情况而定, 要准确把握油基和水基钻井液的特征和二者的异同, 尤其是作用机理和稳定机理。要认识到油基钻井液和水基钻井液不存在取代或替代关系, 只是适用环境不同, 能使用水基钻井液, 就尽可能不用油基钻井液, 以减少油基钻井液带来的安全环保风险; 从安全作业角度考虑, 在不适用水基钻井液的情况下, 应毫不犹

豫地选用油基或合成基钻井液。对于油基钻井液而言, 使用全油基钻井液更有利于钻井液性能维护与稳定, 以及其综合性能的发挥。

6) 优化固相控制参数, 完善钻井液固相控制技术, 充分利用好固相。要认识到固相控制不仅仅是清除固相, 还要合理利用固相, 合理设计或优化固相控制参数, 确保钻井液性能良好, 充分利用钻井液中不同粒径的固相颗粒来防漏堵漏, 提高封堵能力; 维护钻井液性能时尽可能减少外加固相, 不仅能减少废弃物排放, 也有利于减少封堵材料的用量, 从而降低处理费用。提高对钻井液中低密度固相控制的认识, 通过控制低密度固相、减少抑制剂或其他处理剂在钻井液中固相颗粒表面的吸附与消耗, 以提高钻井液井壁稳定能力。围绕提高钻井液性能和有利于钻井液重复利用, 开展钻井液固相控制技术优化和有关基础研究等, 为进一步优化钻井液配方和性能提供支撑。

7) 形成真正意义上的环保钻井液。在建立有效环保性能评价方法的基础上, 研发能够满足环境保护要求的钻井液, 尤其是钻进非储层时, 若能有针对性地使用环保钻井液, 可有效减少处理费用, 降低综合成本。建议采用有肥田作用的材料, 以及能满足环保要求的可生物降解的抑制性材料, 避免无机钠盐的使用。从环保的角度讲, 当前所谓的去“磺化”虽不科学, 也不现实, 但仍有必要寻找能降低钻井液高温高压滤失量的新材料。

8) 不断完善适用于特殊地质条件的钻井液体系。研究解决超高温钻井液, 尤其是超高温高密钻井液在井底高温静止状态下长期稳定的问题。通过开发树形聚合物和无机聚合物处理剂, 进一步完善适用于井底温度大于 200 ℃ 的具有长期老化悬浮稳定性的高温高密度钻井液体系。进一步寻找提高水基钻井液综合性能的途径, 强化钻井液的抑制性和封堵能力, 尤其是研发生物质合成基及与油基钻井液性能相近的近油基钻井液体系, 以尽可能减少油基钻井液在页岩气水平井钻井中的使用, 减轻安全与环保压力。

5 结束语

近年来, 尽管围绕深井超深井、强水敏性复杂地层, 以及页岩油气水平井安全钻井的需要, 改造或开发应用了一系列钻井液体系, 取得了一定的成果, 基本解决了钻井过程中易发生“漏、塌、卡、

慢”等问题,实现了钻井提质提效的目标,但钻井过程中与钻井液有关的井下复杂仍时有发生,高温下钻井液性能不稳定问题仍然突出,钻井液规范、高效和绿色化,以及固相控制等方面仍然存在一些问题和不足。为此,需要针对存在的问题,开展适合不同地层的高性能钻井液体系研究,并完善评价方法,优化钻井液性能和固相控制参数,简化钻井液配方,降低钻井液成本,降低钻井液对环境安全和健康的影响,以促进钻井液技术进步。

参 考 文 献

References

- [1] 王亚宁,郑和,陈文可,等. YJJS- I 高性能水基钻井液技术的研究与应用[J]. 复杂油气藏, 2022, 15(3): 24-29.
WANG Yaning, ZHENG He, CHEN Wenke, et al. Research and application of YJJS-1 high-performance water-based drilling fluid technology[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2022, 15(3): 24-29.
- [2] 赵素娟,游云武,刘浩冰,等. 涪陵焦页 18-10HF 井水平段高性能水基钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(5): 564-569.
ZHAO Sujuan, YOU Yunwu, LIU Haobing, et al. High performance drilling fluid for horizontal drilling in the Well Jiaoyel8-10HF in Fuling Shale Gas Field[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(5): 564-569.
- [3] 赵虎,孙举,司西强,等. ZY-APD 高性能水基钻井液研究及在川南地区的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(3): 139-145.
ZHAO Hu, SUN Ju, SI Xiqiang, et al. ZY-APD high-performance water-based drilling fluid and its application to southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019, 42(3): 139-145.
- [4] 邱春阳,周建民,张海青,等. 车古潜山油藏抗高温无固相钻井液技术[J]. 断块油气田, 2020, 27(3): 390-393.
QIU Chunyang, ZHOU Jianmin, ZHANG Haiqing, et al. Solid-free anti-temperature drilling fluid technology for buried-hill pool in Chegu Block[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(3): 390-393.
- [5] 林永学,王伟吉,金军斌. 顺北油气田鹰 1 井超深井段钻井液关键技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 113-120.
LIN Yongxue, WANG Weiji, JIN Junbin. Key drilling fluid technology in the ultra deep section of Well Ying-1 in the Shunbei Oil and Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 113-120.
- [6] 徐运波,于雷,黄元俊,等. 抗高温无固相钻井液在埕北潜山油藏的应用[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2020, 34(1): 33-40.
XU Yunbo, YU Lei, HUANG Yuanjun, et al. Application of high temperature resistant solid free drilling fluid in Chengbei buried hill reservoir[J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2020, 34(1): 33-40.
- [7] 陈彬,张伟国,姚磊,等. 基于井壁稳定及储层保护的钻井液技术[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(2): 184-188.
CHEN Bin, ZHANG Weiguo, YAO Lei, et al. Drilling fluid technology based on well stability and reservoir protection[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 184-188.
- [8] 董晓强,方俊伟,李雄,等. 顺北 4XH 井抗高温高密度钻井液技术研究及应用[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(2): 161-167.
DONG Xiaoqiang, FANG Junwei, LI Xiong, et al. Research and application of a high-temperature high-density drilling fluid system in Well Shunbei-4XH[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(2): 161-167.
- [9] 宣扬,刘珂,郭科佑,等. 顺北超深水平井环保耐高温低摩擦阻钻井液技术[J]. 特种油气藏, 2020, 27(3): 163-168.
XUAN Yang, LIU Ke, GUO Keyou, et al. Environmental anti-temperature low friction drilling fluid technology of ultra-deep horizontal well in Shunbei Oil & Gas Field[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 163-168.
- [10] 王星媛,陆灯云,吴正良. 抗 220℃ 高密度油基钻井液的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(5): 550-554.
WANG Xingyuan, LU Dengyun, WU Zhengliang. Study and application of a high density oil base drilling fluid with high temperature resistance of 220℃[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(5): 550-554.
- [11] 白彬珍,曾义金,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, ZENG Yijin, GE Hongkui. Key technologies for the drilling of ultra-deep horizontal Well Shunbei 56X[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 49-55.
- [12] 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.
- [13] 王中华. 油基钻井液技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2019: 132-319.
WANG Zhonghua. Oil based drilling fluid technology[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2019: 132-319.
- [14] 陈海宇,王新东,林晶,等. 新疆吉木萨尔页岩油超长水平段水平井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 39-45.
CHEN Haiyu, WANG Xindong, LIN Jing, et al. Key drilling techniques for horizontal wells with ultra-long horizontal section in the shale oil reservoir in Jimusar, Xinjiang[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 39-45.
- [15] 韩来聚,杨春旭. 济阳拗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.
- [16] 李乾,杜明锋,黄达,等. 甲酸盐聚合醇钻井液在 WZ 油田储层段应用的研究分析[J]. 海洋石油, 2021, 41(4): 73-79.
LI Qian, DU Mingfeng, HUANG Da, et al. Research and analysis on the application of formate polyol drilling fluid in the reservoir section of WZ Oilfield[J]. Offshore Oil, 2021, 41(4): 73-79.
- [17] 蒋巍. 海上硅酸钠聚合醇钻井液的研制[J]. 石油化工高等学校学报, 2019, 32(4): 52-57.
JIANG Wei. Research on sodium silicate polyalcohol drilling fluid for marine[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2019, 32(4): 52-57.
- [18] 张文哲,李伟,王波,等. 延长油田致密油藏水平井强封堵钻井液优选与现场应用[J]. 油田化学, 2019, 36(2): 191-195.
ZHANG Wenzhe, LI Wei, WANG Bo, et al. Optimization and application of strong plugging drilling fluid for horizontal well in tight oil of Yanchang Oilfield[J]. Oilfield Chemistry, 2019, 36(2): 191-195.

- [19] 杨军虎, 赵林, 全继昌, 等. 一种深水低温复合醇钻井液实验研究[J]. *西部探矿工程*, 2019, 31(12): 35-37.
YANG Junhu, ZHAO Lin, TONG Jichang, et al. Experimental study on a deep-water low-temperature compound alcohol drilling fluid[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2019, 31(12): 35-37.
- [20] 张坤, 王磊磊, 董殿彬, 等. 多元聚胺钻井液研究与应用[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(3): 301-305.
ZHANG Kun, WANG Leilei, DONG Dianbin, et al. Study on and application of a polyamine drilling fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(3): 301-305.
- [21] 翟科军, 蓝强, 高伟, 等. 低活度高钙聚胺钻井液在淮北101井的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(4): 444-449.
ZHAI Kejun, LAN Qiang, GAO Wei, et al. Application of a low activity high calcium content polyamine drilling fluid on Well Zhunbei101[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(4): 444-449.
- [22] 于得水, 徐泓, 吴修振, 等. 满深1井奥陶系桑塔木组高性能防塌水基钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(5): 49-54.
YU Deshui, XU Hong, WU Xiuzhen, et al. High performance anti-sloughing water based drilling fluid technology for Well Manshen 1 in the Ordovician Sangtamu Formation[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(5): 49-54.
- [23] 张卫国, 狄明利, 卢运虎, 等. 南海西江油田古近系泥页岩地层防塌钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(6): 40-47.
ZHANG Weiguo, DI Mingli, LU Yunhu, et al. Anti-sloughing drilling fluid technology for the Paleogene shale stratum of the Xijiang Oilfield in the South China Sea[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6): 40-47.
- [24] 郝少军, 徐珍焱, 郭子枫, 等. 昆2加深井超高温聚胺有机盐钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(4): 449-453.
HAO Shaojun, XU Zhenyan, GUO Zifeng, et al. Ultra-high temperature polyamine organic salt drilling fluid for deepened Well Kun-2[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(4): 449-453.
- [25] 赵虎. ZY-APD 高性能水基钻井液在常压页岩气井的应用[J]. *精细石油化工进展*, 2020, 21(2): 12-15.
ZHAO Hu. Application of ZY-APD high performance water based drill fluid in ordinary pressure shale gas wells[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2020, 21(2): 12-15.
- [26] 司西强, 王中华, 吴柏志. 中国页岩油气水平井水基钻井液技术现状及发展趋势[J]. *精细石油化工进展*, 2022, 23(1): 42-50.
SI Xiqiang, WANG Zhonghua, WU Baizhi. Current situation and development trend of water-based drilling fluids technology for shale oil and gas horizontal wells in China[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2022, 23(1): 42-50.
- [27] 曾佳, 程慧君, 杨雪. 高温高密度无黏土低固相钻井液研究[J]. *石油化工应用*, 2022, 41(3): 11-14.
ZENG Jia, CHENG Huijun, YANG Xue. Study on high density and clay free low solid drilling fluid with high temperature resistance[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2022, 41(3): 11-14.
- [28] 张雄, 房炎伟, 李卫东, 等. 玛东井区长水平井钻井液防塌技术研究[J]. *能源化工*, 2020, 41(4): 61-65.
ZHANG Xiong, FANG Yanwei, LI Weidong, et al. Study on anti-sloughing technology for long horizontal well drilling fluid in Madong Oilfield[J]. *Energy Chemical Industry*, 2020, 41(4): 61-65.
- [29] 刘亚龙, 张磊, 彭军, 等. 高性能有机盐水基钻井液在昭通国家级页岩气示范区的应用[J]. *天然气工业*, 2021, 41(增刊1): 197-201.
LIU Yalong, ZHANG Lei, PENG Jun, et al. Application of high-performance organic-salt water-based drilling fluid in Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(supplement1): 197-201.
- [30] 郝少军, 安小絮, 韦西海, 等. 碱探1井超高温水基钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(3): 292-297.
HAO Shaojun, AN Xiaoxu, WEI Xihai, et al. Ultra-high temperature drilling fluid technology for drilling Well Jiantan-1[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(3): 292-297.
- [31] 刘腾蛟, 于洋, 曾祥禹, 等. 吉林油田长探1井三开钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(4): 479-485.
LIU Tengjiao, YU Yang, ZENG Xiangyu, et al. Drilling fluid technology for the third interval of Well Changtan-1 in Jilin Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(4): 479-485.
- [32] 张民立, 庄伟, 徐成金, 等. 抗240℃高密度复合有机盐钻井液在冀探1井的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(4): 431-437.
ZHANG Minli, ZHUANG Wei, XU Chengjin, et al. Application of ultra-high temperature high density compound organic salt drilling fluid in Well Jitan-1[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(4): 431-437.
- [33] 秦耀军, 李晓东, 赵长亮, 等. 耐240℃高温钻井液在青海共和盆地高温干热岩钻探施工中的应用[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(5): 1302-1313.
QIN Yaojun, LI Xiaodong, ZHAO Changliang, et al. Application of high temperature (240℃)-resistant fluid to a HDR drilling project in the Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(5): 1302-1313.
- [34] 刘自广. 文23枯竭砂岩型储气库微泡钻井液技术[J]. *钻探工程*, 2022, 49(2): 117-122.
LIU Ziguang. Drilling fluid technology for the Wen-23 depleted sandstone gas storage[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(2): 117-122.
- [35] 杨倩云, 王宝田, 张高峰, 等. 抗高温强封堵硬胶微泡沫钻井液构建技术[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(6): 721-727.
YANG Qianyun, WANG Baotian, ZHANG Gaofeng, et al. Formulation of high temperature stiff micro foam drilling fluid with strengthened plugging capacity[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(6): 721-727.
- [36] 马腾飞, 周宇, 李志勇, 等. 新型低伤害高性能微泡沫钻井液性能评价与现场应用[J]. *油田化学*, 2021, 38(4): 571-579.
MA Tengfei, ZHOU Yu, LI Zhiyong, et al. Evaluation and field application of new microfoam drilling fluid with low-damage and high-performance[J]. *Oilfield Chemistry*, 2021, 38(4): 571-579.
- [37] 陈晓华, 邱正松, 冯永超, 等. 鄂尔多斯盆地富县区块强抑制强封堵防塌钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(4): 462-468.
CHEN Xiaohua, QIU Zhengsong, FENG Yongchao, et al. An anti-collapse drilling fluid with strong inhibitive and plugging capacity for use in the Fuxian Block in Ordos Basin[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(4): 462-468.
- [38] 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.
- [39] 郑成胜, 蓝强, 张敬辉, 等. 玛湖油田MaHW1602水平井低活度钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(6): 48-53.

- ZHENG Chengsheng, LAN Qiang, ZHANG Jinghui, et al. Low-activity drilling fluid technology for the MaHW1602 horizontal well in the Mahu Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6): 48–53.
- [40] 陈修平, 李双贵, 于洋, 等. 顺北油气田碳酸盐岩破碎性地层防塌钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 12–16.
- CHEN Xiuping, LI Shuangui, 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.
- [41] 雷志永, 郭磊, 耿铁, 等. 环保型可循环利用 BIODRILL A 水基钻井液评价与应用[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(3): 139–145.
- LEI Zhiyong, GUO Lei, GENG Tie, et al. Evaluation and application of environmentally friendly and recyclable BIODRILL A water-based drilling fluid[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(3): 139–145.
- [42] 宿振国, 王瑞和, 刘均一, 等. 高性能环保水基钻井液的研究与应用[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(5): 576–582.
- SU Zhenguo, WANG Ruihe, LIU Junyi, et al. Study and application of environmentally friendly high performance water base drilling fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(5): 576–582.
- [43] 刘均一, 郭保雨, 王勇, 等. 环保型水基钻井液在胜利油田的研究与应用[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(1): 64–70.
- LIU Junyi, GUO Baoyu, WANG Yong, et al. Study and application of environmentally friendly water base drilling fluid in Shengli Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(1): 64–70.
- [44] 凡帆, 刘伟, 贾俊. 长北区块无土相防水锁低伤害钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(5): 34–39.
- FAN Fan, LIU Wei, JIA Jun. Clay-free drilling fluid with anti-water locking and low damage performance used in the Changbei Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(5): 34–39.
- [45] 杜坤, 李秀灵, 王本利, 等. 无黏土水基钻井液在长庆油田米 38 区块水平井的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(3): 331–336.
- DU Kun, LI Xiuling, WANG Benli, et al. Application of a clay-free low solids water based drilling fluid in Block Mi-38 in Changqing Oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(3): 331–336.
- [46] 江民盛, 阮彪, 徐新组, 等. 全白油基钻井液在吉木萨尔凹陷泥岩地层中的应用[J]. *能源化工*, 2019, 40(6): 46–50.
- JIANG Minsheng, RUAN Biao, XU Xinniu, et al. Application of whole white oil-based drilling fluid in mudstone formation of Jim-sar sag[J]. *Energy Chemical Industry*, 2019, 40(6): 46–50.
- [47] 陈浩东, 李龙, 郑浩鹏, 等. 北部湾盆地全油基钻井液技术研究与应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(12): 1–4.
- CHEN Haodong, LI Long, ZHENG Haopeng, et al. Development and application of full oil-based drilling fluids in Beibu gulf basin[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(12): 1–4.
- [48] 张立新, 刘瑞. 高密度油基钻井液在阳 101H3-6 井长水平段的应用[J]. *钻探工程*, 2021, 48(7): 79–83.
- ZHANG Lixin, LIU Rui. Application of high-density oil-based drilling fluid in the long horizontal section of Well Yang101H3-6[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(7): 79–83.
- [49] 王志远, 黄维安, 范宇, 等. 长宁区块强封堵油基钻井液技术研究及应用[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(5): 31–38.
- WANG Zhiyuan, HUANG Weian, FAN Yu, et al. Technical research and application of oil base drilling fluid with strong plugging property in Changning Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(5): 31–38.
- [50] 王建华, 闫丽丽, 谢盛, 等. 塔里木油田库车山前高压盐层油基钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 29–33.
- WANG Jianhua, YAN Lili, XIE Sheng, et al. Oil-based drilling fluid technology for high pressure brine layer in Kuqa piedmont of the Tarim Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 29–33.
- [51] 张雄, 余进, 毛俊, 等. 准噶尔盆地玛东油田水平井高性能油基钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(6): 21–27.
- ZHANG Xiong, YU Jin, MAO Jun, et al. High-performance oil-based drilling fluid technology for horizontal wells in the Madong Oilfield, Junggar Basin[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(6): 21–27.
- [52] 李振智, 孙举, 李晓岚, 等. 新型无土相油基钻井液研究与现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(1): 33–38.
- LI Zhenzhi, SUN Ju, LI Xiaolan, et al. The development and application of a clay-free oil-based drilling fluid[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(1): 33–38.
- [53] 孙玉学, 郭春萍, 赵景原, 等. 低毒高性能油基钻井液研制与评价[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(2): 95–102.
- SUN Yuxue, GUO Chunping, ZHAO Jingyuan, et al. Development and evaluation of the low-toxicity high-performance oil-based drilling fluid[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(2): 95–102.
- [54] 孙荣华. 全油合成基钻井液在永 3-侧平×井的应用[J]. *钻采工艺*, 2019, 42(4): 97–99.
- SUN Ronghua. Application of all-oil synthetic drilling fluid in Well Yong 3-Ceping X[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(4): 97–99.
- [55] 狄明利, 赵远远, 邱文发. FLAT-PRO 合成基钻井液在南海东部超深水井的应用[J]. *广东化工*, 2019, 46(20): 38–40.
- DI Mingli, ZHAO Yuanyuan, QIU Wenfa. Application of FLAT-PRO synthetic base drilling fluid in ultra-deepwater well in the eastern South China Sea[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2019, 46(20): 38–40.
- [56] 范宇, 钟成旭, 牟乃渠, 等. 一种生物合成基钻井液在长宁气田的应用[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(1): 133–139.
- FAN Yu, ZHONG Chengxu, MU Naiqu, et al. Application of a bio-synthesis-based drilling fluid in the Changning Gas Field[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2020, 42(1): 133–139.
- [57] 解宇宁. 可再生生物合成基钻井液体系研究[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(6): 34–39.
- XIE Yuning. Research on renewable biosynthetic-based drilling fluid systems[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6): 34–39.
- [58] 张式, 单海霞, 李彬, 等. 生物质合成基钻井液性能评价[J]. *油田化学*, 2019, 36(4): 594–599.
- ZHANG Yi, SHAN Haixia, LI Bin, et al. Performance evaluation of biomass synthetic base drilling fluid[J]. *Oilfield Chemistry*, 2019, 36(4): 594–599.