

近十年来钻井液新技术发展动态与未来展望

郑文武¹, 毛云杰¹, 刘 福¹, 李昕潼^{2*}, 李永正¹, 韩 婧¹

¹中石化华北石油工程有限公司技术服务公司, 河南 郑州

²中石化中原油田分公司, 河南 濮阳

收稿日期: 2025年3月5日; 录用日期: 2025年5月29日; 发布日期: 2025年6月11日

摘 要

介绍了国内外几种钻井液体系的最新发展, 包括甲酸盐钻井液、恒流变钻井液、纳米处理剂钻井液、油基钻井液、合成基钻井液和气体钻井流体; 阐述了国内外最新研制的几种新型的钻井液处理剂及其作用机理; 分析了人工智能技术在钻井液体系设计中的应用现状; 并对钻井液技术发展趋势进行了展望。目前钻井液新技术表现在对钻井液体系的设计上更加注重添加剂添加量的准确性, 添加剂之间的相互作用, 添加剂对地层的相互作用; 合理利用废料合成添加剂, 带来环境和经济的多重效益; 设计理念更加注重突破传统, 增加创新性; 在钻井液性能的评价时注重数学模型、软件模拟等人工智能的应用, 建立各种因素对响应的定量关系, 以求提升工作效率, 节约成本。

关键词

钻井液新技术, 设计理念, 人工智能, 发展动态, 展望

Development Trends and Future Prospects of New Drilling Fluid Technologies in the Past Decade

Wenwu Zheng¹, Yunjie Mao¹, Fu Liu¹, Xintong Li^{2*}, Yongzheng Li¹, Jing Han¹

¹Technical Service Company, Sinopec North China Petroleum Engineering Co., Ltd., Zhengzhou Henan

²Sinopec Zhongyuan Oilfield Branch Company, Puyang Henan

Received: Mar. 5th, 2025; accepted: May 29th, 2025; published: Jun. 11th, 2025

Abstract

The latest developments of several drilling fluid systems in China and abroad are introduced,

*通讯作者。

文章引用: 郑文武, 毛云杰, 刘福, 李昕潼, 李永正, 韩婧. 近十年来钻井液新技术发展动态与未来展望[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(2): 186-200. DOI: 10.12677/jogt.2025.472022

including formate drilling fluid, constant rheological drilling fluid, nano-treatment agent drilling fluid, oil-based drilling fluid, synthetic-based drilling fluid and gas drilling fluid. Several newly developed drilling fluid treatment agents and their action mechanisms at home and abroad are described. The application status of artificial intelligence technology in drilling fluid system design was analyzed. The development trend of drilling fluid technology is prospected. At present, the new drilling fluid technology pays more attention to the accuracy of additive dosage, the interaction between additives and the interaction between additives and strata in the design of drilling fluid system. Rational use of waste to synthesize additives will bring multiple environmental and economic benefits; the design concept pays more attention to breaking through the tradition and increasing innovation; in the evaluation of drilling fluid performance, the application of artificial intelligence such as mathematical model and software simulation is emphasized, and the quantitative relationship between various factors and response is established in order to improve work efficiency and save cost.

Keywords

New Drilling Fluid Technology, Design Concept, Artificial Intelligence, Development Trends, Outlook

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近些年来,随着对钻井液技术的要求不断提高,钻井液技术得到了长足的发展。在水基钻井液、油基钻井液、合成基钻井液和气体钻井液均出现了新技术和新发展,引起了国内外石油同行的重视。本文对有代表性的研究成果进行简要的探讨,并分析了钻井液新技术的发展动态,提出了钻井液技术在未来发展过程中面临的问题与解决措施。

2. 甲酸盐钻井液

在钻探深井过程中,为避免钻井液中固相对地层损害,发展出了低固相钻井液体系。无固相甲酸盐钻井液体系是无固相钻井液中应用较广的一类,是近年来研究开发的环保型钻井液体系。根据使用的甲酸盐不同,可分为甲酸钠、甲酸钾和甲酸铯钻井液。其中甲酸钠钻井液因价格相对较低,在中国的吉林油田、江汉盆地、内蒙古自治区鄂尔多斯地区、辽河油田和大港油田均有应用;在沙捞越近海、俄罗斯的 AKROS LLC 和 GAZPROMNEFT 油田、挪威 Huldra 油气田、挪威北海 Kvitebjørn 油田和 Martin Linge 油田和欧洲南部油田均有应用[1]-[14]。

2018 年, Jøntvedt E 开发了一种抗高压高渗透甲酸铯钻井液,成功的应用在马丁林格地区。钻井液配方: 甲酸铯 + 甲酸钾 + 纯化黄原胶 + 高温改性淀粉 + $K_2CO_3/KHCO_3$ + 中等粒径碳酸钙($D_{50} = 24 \mu m$) + 小粒径碳酸钙($D_{50} = 11 \mu m$)。该钻井液体系是由浓缩的铯/甲酸钾盐水组成,包括黄原胶、高温改性淀粉和碳酸钙桥接材料组成。该钻井液体系相比装载固体的 NABM 流体系统,具有储层段的渗透率显著提高,钻头重量较低,油液成本没有显著增加,在跳闸操作、完成操作和清理结果方面也具有优势,在技术上和商业上取得了成功[13]。

2019 年,许杰将两种新型聚合物材料 HTV-8 和 HTFL 加入甲酸盐钻井液体系中,构建了一种抗高温无固相甲酸盐钻井液体系。钻井液配方: 海水 + NaOH + HTFL + HTV-8 + Na_2CO_3 + PF-SSY + PF-LUBE +

HCOOK。该钻井液抗温可达 200℃；滚动回收率达 92.8%，线性膨胀率仅为 9.2%，充分表明了该钻井液体系对粘土矿物、泥页岩的水化膨胀和分散问题起到了良好的抑制效果；通过 CaCl_2 、 NaCl 和污染土对钻井液抗污染能力测试，表现出较好的抗无机盐能力。该钻井液体系在渤海地区 BZ13-2-2 井成功应用，表现出长期抗温稳定性、流变性较好、封堵性较好等特点，满足现场钻井的需要[15]。

2019 年，Zheng W 采用了高温高压下动态流变分析和静态热滚老化试验两种实验室研究方法，测试了甲酸盐对水基溶液流变特性的影响。通过对高温高压下的流变学进行分析，发现甲酸钠在高温高压下仍然保持着较好的动态粘度。热滚实验的结果表明：预加热后的甲酸钠在室温下能够对聚物流体的流变特性产生明显的影响。两种方法的测试结果均表明甲酸钠能够在高温高压条件下作为钻井液的稳定剂[16]。

2021 年，Valentin Morenov 为应对海上油田高层压力断面中存在膨胀性粘土岩的情况，开发了一种 PHPA-polymer 甲酸钾钻井液体系。甲酸钾与 PHPA 具有协同效应，能够达到相互补充的效果，提高抑制性，达到缩短了各种阳离子的溶解时间和提高机械转速的效果。该钻井液体系具有高抑制能力；通过将天然固相的泥浆重量最小化，达到减少泥浆的体积目标；通过减少钻井液中钻屑的分散来促进其性能的调节；它可以消除活性粘土岩石的水化膨胀问题；稳定容易坍塌的泥质岩。低固体含量、低过滤率和良好的抑制性赋予了钻井液稳定的流变特性，即使在较高的地层压力作用下依然保持油气藏的生产力[17]。

3. 恒流变钻井液

深水、超深水钻井面临最大的问题之一就是钻井液会在 4~150℃内作业，引起流变性能的急剧变化。典型钻井液流型调节剂已无法满足深水、超深水钻井的要求。因此，学者提出了恒流变钻井液用流型调节剂，使其在宽温度范围下依然能保持性能稳定的工作[18]。

2019 年，Davoodi S 采用乳液聚合法合成高疏水性丙烯酸胺共聚物(SBASC)，构建了一套抗高温高压钻井液体系。钻井液配方：氯化钠 + 氯化钾 + 氢氧化钠 + 碳酸钠 + 碳酸钙 + 黄原胶 + HT 淀粉 + 聚阴离子纤维素 + SBASC + 淡水。加入 SBASC 的钻井液比加入商用淀粉添加剂的钻井液性能更加优异，显著降低了 API 滤失量和 HTHP 滤失量；热滚后钻井液的流变特性均显著增强；SBASC 改善了钻井液中岩屑的运输与悬浮能力。SBASC 具有良好的经济效益，可以作为商业淀粉添加剂的替代品，可以作为解决与淀粉有关的钻井问题的一个解决方案[19]。

2021 年，舒义勇以抗高温聚合物降滤失剂 APS220 和新型高温稳定剂 HTS220 为主剂，构建了一种抗高温恒流变钻井液体系。钻井液配方：膨润土粉 + NaOH + APS220 + SMP-3 + SPNH + 阳离子沥青粉 + 胺基抑制剂 + KCl + HTS220 + 润滑剂 + 重晶石粉。该钻井液体系具有显著的高温恒流变特性，抗 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 复合污染达到 2%，抗钠膨润土污染达到 10%。塔里木油田跃满西区块深部底层具有安全密度窗口窄，易出现井漏、井塌等复杂的井下问题。高温恒流变钻井液体系在跃满西区块 2 口井进行了现场实验，流变性能稳定，钻后井眼畅通，减少了井下复杂情况的发生，取得了良好的效果[20]。

2021 年，Xie B 利用热结合聚合物和膨润土的协同作用，通过新和成的热敏大分子单体(BA)制备了一种新型的热缔合聚合物(PGBA)，形成了一种适合于海上深层钻井的恒流变钻井液体系。该钻井液体系具有良好的流变稳定性；良好的热稳定性，抗高温效果可达 300℃；良好的静电稳定性，PGBA 可以通过氢键和离子键吸收和包裹在粘土颗粒上，磺酸基可以显著提高粘土颗粒的 ζ 值[21]。

2021 年，Kamali F 采用沉淀法，在含氨溶液中合成了 Fe_3O_4 -CMC 纳米粒子，形成了 Fe_3O_4 -CMC NC 钻井液体系。该钻井液体系和传统的钻井液体系相比，具有更强的抗水渗透性，其成本较低，添加剂合成简单，流变性能良好，钻井液的液体损失显著下降，滤饼厚度均匀且薄，在离子水和咸水中的粘度增强[22]。

4. 纳米处理剂钻井液

纳米技术是指在纳米尺度范围内,研究电子、原子和分子的内在规律和特征,并用于制造各种物质的一门崭新的综合性科学技术。通常将纳米尺寸范围定义为 1~100 nm 的超细材料,处于团簇(尺寸小于 1 nm 的原子聚集体)和亚微米级体系之间,其中纳米微粒是该体系的典型代表,纳米材料是纳米技术发展的重要基础和重要研究对象在中国的大庆油田、胜利油田和华北油田均有应用;在阿根廷的 KoluelKaike 油田、阿布扎比近海和加拿大均有应用[23]-[34]。

2020 年, Li H 以苯乙烯(ST)、丙烯酰胺(AM)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)和二甲基二烯丙基氯化铵(DMDAAC)为单体,通过无肥皂乳液聚合合成了具有双交联结构的聚合物纳米微球(PNS)。PNS 具有良好的热稳定性,初始分解温度可达 315℃;与水处理的页岩样品相比,页岩岩屑的比表面积和孔隙体积均大幅减少;加入 PNS 后的水基钻井液在高温下具有良好的封堵性,降低了水基钻井液的 API 和 HTHP [35]。

2021 年, Mirzaasadi M 通过一种简单的合成方法,以农业工业废料水稻壳为原料生产出纳米硅颗粒 NPS 和 NPT。钻井液配方:淡水 + NaOH + Na₂CO₃ + KCl + XC-聚合物 + PAC-LV + PHPA + 乙二醇 + 石灰岩 + NPS/NPT。生产工艺简单,纳米材料纯度分别高达 94.5%和 97.4%,能够大幅度降低使用纳米材料的费用。在模拟井下温度为 121.11℃和 148.88℃的条件下,加入 NPT 纳米颗粒的钻井液表现出了更加良好的流变性能。NPT 纳米颗粒不仅能够防止钻井液中使用的聚合物的热降解,还能防止表观浓度和静切力的急剧下降。还具有合成成本低,减少稻壳等问题,为纳米处理剂的合成发展方向提供了新的思路 [36]。

2021 年,大多数的研究人员研究应用纳米技术提高常规水基钻井液的性能,但 Kalhor Mohammadi M 以降低盐浓度、去除盐浓度为方向开发了新一代环保纳米低盐水泥浆(NBLS-WBM)。钻井液配方:淡水 + KCl + 流变性稳定剂 + NaOH + 聚合物 FLC + 铝化合物 + 粉末碳酸钙 + 液体润滑剂 + NBLS-WBM + BIO-CIDE。NBLS-WBM 中的主要添加剂是纳米级页岩抑制剂/井筒稳定剂,具有孔隙堵塞和物理吸附(物理吸收)机制的协同作用,能够组织水扩散到地层壁,减少入侵区域,提高井的稳定性;抑制没有氯化钾的页岩/粘土的反应,增强钻井液的润滑性,降低扭矩和阻力。NBLS-WBM 钻井液具有高效的钻井效率,降低了钻井/废物管理成本;具有较高的页岩回收率,流变性能适当且稳定,较低的 API 和 HTHP [37]。

5. 油基钻井液

油基钻井液是指以油作为连续相的钻井液。现如今油基钻井液逐渐发展成为以柴油为连续相的两种油基钻井液:全油基钻井液和油包水乳化钻井液。在全油基钻井液中,水是无用的组分,其含水量不应超过 7%;在油包水乳化钻井液中,水作为必要组分均匀分散在柴油中,其含水量一般为 10%~30%。在中国的松辽盆地、塔里木盆地和南海地区均有应用;在俄罗斯 Kharyaginskoe 油田、挪威的 Statoil's Aasgard 油田和 Statfjord 油田、西非、墨西哥湾均有应用[38]-[45]。

2019 年, Zhong H 采用甲基丙烯酸甲酯(MMA)、丙烯酸丁酯(BA)和甲基丙烯酸十二酯(LMA)悬浮聚合制备可膨胀聚合物微球(SPM),建立了一套高温高压油基钻井液。钻井液配方:白油 + 有机粘土 + 初级乳化剂 + 辅助乳化剂 + 润湿剂 + 流变改性剂 + CaCl₂ 溶液 + CaO + 重晶石 + SPM。在本质上,SPM 比褐煤添加剂和沥青产品具有更好的滤失性能,其浓度低于传统要求。该产品作为滤失剂,在各种钻井液配方中都能表现出良好的性能,即使在 200℃的高温下保持良好的滤失控制性能;具有高比表面积和丰富微孔的独特特性,因此能够吸收基础油使体积上明显膨胀;在压力或剪切应力下具有良好的变形性能和可压缩性能,使其更有效地与其他细小固体包裹形成滤饼;具有良好的变形性能与可压缩性能,通过填补滤饼的空隙,达到降低渗透量、滤失量,减少固体侵入的目的。SPM 可能是钻探高温井的良好

替代品,特别是在深油井、天然气井和地热井中[46]。

油基钻井液是一种油包水乳化液,当封堵剂可以连续在两相中分散时,其封堵率可以达到最大化效果。2020年, LiW 在以达到封堵率最大化的前提下,以纳米二氧化硅、3-甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷和十二烷基硫酸钠等为原料,通过连续乳液聚合法合成了苯乙烯丁二烯树脂/纳米二氧化硅(SBR/SiO₂)复合材料,建立了一套油基钻井液体系。钻井液配方:矿物油 + 改性脂肪酸 + 聚氨酯脂肪酸 + SBR/SiO₂ + 盐水 + 有机粘土 + 重晶石。在具有微交联结构的聚合物链相互缠绕形成外部滤饼时,SBR/SiO₂可进入页岩孔隙形成内部滤饼,在氢键和纳米尺寸效应特性进一步增加了 SBR/SiO₂与页岩基质以及 SBR/SiO₂内部间的相互作用力。SBR/SiO₂可以进入页岩地层中的纳米级孔隙,显著减少流体对页岩的侵入,从而提高了井筒的稳定性;钻井过程中,能够提高滤饼的致密性,减少页岩地层流体损失,提高封堵效率[47]。

2022年, JIANG G 以转基因大豆油和乙醇为原料制备出一种大豆油乙酯生物柴油,以此油作为油基钻井液的基础油,建立了一套油基钻井液体系。钻井液配方: CaCl₂ + Span80 + 二次乳化剂(Span85 + 十八烷基三甲基氯化铵) + CaO + PER + OC16 + TBHQ + AW700 + 氧化沥青 + 碳酸钙 + 重晶石。油水比为 90:10 条件下,将阳离子表面活性剂加入到辅助乳化剂中,有效地消除了高温老化后生物柴油基乳化液的增厚问题。使用十六烷基三甲基氯化铵阳离子改性剂制备出有机粘土,加入到钻井液后,可以达到防止低温增厚,提高钻井液的流变性能、稳定性和流体损失的效果。用二聚体脂肪酸和椰子脂肪酸二乙酰胺合成了一种平面流变改性剂,加入到生物柴油基钻井液中形成强大的网络结构,能够保持良好的平流变性能。以基础油和关键处理剂相结合,建立了一种平流变油基钻井液体系。密度为 1.2 g/cm³, 耐温可达 160℃,耐海水盐度 5%,耐页岩岩屑 10%,具有环境友好性[48]。

6. 合成基钻井液

合成基钻井液是以人工合成或改性的有机物为连续相,盐水为分散相,再加入乳化剂、降滤失剂、流型改进剂(有机土、生石灰等)、加重材料等组成。使用的地区包括墨西哥湾、北海、远东、欧洲大陆、南美等地区和澳大利亚、墨西哥及俄罗斯等国家[49]-[55]。

2018年, Paul A A L 以脂肪酶为催化剂,在最佳温度和压力条件下对菜籽油进行乙醇酶交换,合成了菜籽油酶脂,形成了菜籽油酶脂合成基钻井液体系。酯化菜籽油的浊点和凝点均显著降低,可以在较低的温度环境下进行操作;闪点和燃点降低到理想的水平,可以在较高的温度环境下进行操作,更有利于储存和运输;与合成前的菜籽油相比,酯化菜籽油比重降低了 5.50%,有助于配置中等密度的水泥浆,进而提高钻速和降低成本。菜籽油酶脂合成基钻井液体系具有无毒性、生物降解性和环境友好性等特点[56]。

2018年, Kania D 为研究多元醇酯对合成基钻井泥浆(SBM)的影响,将季戊四醇酯(PEE)、三甲基丙烷酯(TMPE)和新戊二醇酯(NPGE)三种类型的多元醇酯分别加入 SBM 中作为稀释剂和润滑增强剂,并测试了加入后 SBM 的性能。在 SBM 中加入 PEE、TMPE、NPGE 等多元醇酯,可以中和泥浆中粘土颗粒间的相互作用,降低泥浆的屈服点和静切力等流变性能;降低滤液体积和泥饼厚度;大幅降低 SBM 的摩擦系数,改良磨损疤痕直径,具有良好的抗摩擦性和润滑性能。其中效果最好的是 PEE,表现出最可控的流变性能和滤失性能,在金属表面上提供良好的保护,使其免受施加荷载和泥浆中固体添加剂的影响[57]。

季戊四醇酯(PEE)在油水界面上的吸附可能会干扰泥浆中阴离子二次乳化剂和化学稀释剂的作用,这些添加剂之间的相互作用可能会影响到合成基钻井泥浆(SBM)的乳液粘度。2021年, Kania D 采用全因子设计评估了表面活性剂、二次乳化剂和有机粘土之间的相互作用,利用期望函数对复配条件进行优化,

确定了最佳配方浓度：1.0 lb/bbl 二次乳化剂 + 6.2 lb/bbl 有机粘土 + 1.0%PE 酯。采用因子设计减少了实验次数、时间和整体工艺的成本，带来了非常高的经济效益。同时建立了各种因素和响应之间的定量关系，可以预测钻井作业所需的流变性能[58]。

7. 气体钻井流体

气体钻井流体，亦称“气体钻井液”。气体钻井中采用的循环流体被称为气体型流体□，以空气、天然气和稳定泡沫等作为钻井循环流体的钻井液。是近年来发展起来的一种欠平衡钻井方式。用气体压缩机向井内注入压缩气体，依靠环空高压气体的能量，把钻屑从井底带回地面，并在地面进行固、气分离，将分离出的可燃气体燃烧释放、除尘、降噪。在中国的四川、长庆、新疆、玉门、山西、大牛地、大庆、中原及中石化普光、元坝、大邑气田均有应用；在伊朗 TABNAK 油田、美国俄克拉荷马州和阿肯色州的 Arkoma 盆地和加拿大均有应用[38] [59]-[65]。

消泡技术是提高泡沫钻井效率的关键技术。2019 年，Cao P 为了提高在泡沫钻井过程中机械泡沫破碎器的性能，设计研究了一种新型的空气动力泡沫破碎器，该泡沫破碎器具有两个环形缝。利用 ANSYS Fluent 计算流体力学程序对泡沫破碎器内部的速度和压力分布进行了模拟，分析了内部的流动现象，并根据模拟方法确定了两环隙之间的最佳距离。当压缩空气从环形缝中喷射出来时，会在附近形成一个主要的负压区。第二狭缝的设计是为了加强泡沫流体与气流之间的动量传递过程，有利于提高该气动式泡沫破碎器的性能。该项研究验证了空气动力泡沫破碎器的实用性，分析了不同参数对消泡率的影响，更为以后消泡技术的发展提供了新思路[66]。

纳米材料润湿性会显著影响不同类型起泡剂的泡沫质量。2020 年，李强为提高泡沫钻井液的稳定性，向体系中引入纳米材料。根据 Box-Behnken Design 设计原理，采用三因素三水平响应曲面法，确定了配方添加剂的种类和浓度，建立了一套泡沫钻井液体系。钻井液配方：0.6%BS-12 + 4%亲水性纳米 SiO₂ + 0.3%XC + 3% CMS + 0.2% KPAM。该体系表观黏度为适中，密度较低，半衰期长达 60 h，能长时间保持性能稳定；抑制性强，能有效抑制泥页岩水化和膨胀，线性膨胀率较清水下降 65%，储层保护效果好；煤岩岩心气测渗透率恢复率在 90%以上，携岩效果好，岩屑和煤屑的沉降速度较清水降低 92%以上，能够满足现场煤层气钻井的需要[67]。

2020 年，Vaziri E 通过仿真研究，探讨了泡沫在斜井和水平井中钻井岩屑运输中的潜力。使用 ANSYS FLUENT 软件进行了一系列计算流体动力学仿真，采用多相欧拉流模型和非牛顿幂律流体模型来描述离散流动路线的动量和质量守恒方程。对泡沫质量、泡沫注射速度、油井倾角、钻管偏心率和钻管旋转对岩屑运输效率的影响进行了详细的敏感性分析。计算时比较重要的公式有以下几个：

$$e = \frac{E}{R_o - R_i} \times 100 \quad (1)$$

其中， E 是内管与外管轴线的偏移量， R_o 和 R_i 是外管和内管的半径。偏心度的值从 0 到 100%不等，其中零百分比表示同心管道，100%表示完全偏心状态。

$$\Gamma = \frac{V_g}{V_g - V_l} \times 100 \quad (2)$$

其中， Γ 为泡沫质量， V_g 和 V_l 为泡沫中气体和液体的体积。

$$R_T = \frac{V_c}{V_a} = \frac{V_a - V_s}{V_a} \quad (3)$$

其中， R_T 为岩屑输送比， v_s 钻井颗粒进入静止流体中的速率， v_c 和 v_a 是岩屑的净向上速度和环空内的流

体环形平均速度。

结果表明高质量的泡沫对岩屑运输效率有积极的影响,泡沫会对岩屑颗粒施加额外的阻力和升力,因此增加泡沫速度会导致岩屑浓度降低;钻管偏心率会减少环空较窄部分的流动管道,会导致泡沫速度急剧下降,在井筒中积累岩屑;钻管旋转会在静态岩屑床上施加切向速度,导致井筒中形成不对称的床层;形成静态床层会增加井倾角,导致泡沫承载能力的突然降低;对偏心倾斜井施加旋转速度可以防止静态岩屑床的形成,从而泡沫提供更有效的岩屑输送[68]。

8. 新型钻井液处理剂

8.1. 降滤失剂

2013 年, Dias F 用月桂酸乙烯酯(C-12)或硬脂酸乙烯酯(C-18)和淀粉在碱性催化剂的条件下进行了酯交换反应的化学修饰。在温度 383K、惰性气氛(N₂)下在二甲亚砜(DMSO)中进行淀粉改性反应,反应 24 小时。使用鼓泡器将乙醛气体副产物通过碱性溶液中,使副产物被碱性溶液吸收,达到将副产物从体系中除去的目的。使用商用甲醇进行回收和纯化产物,并在 343K 温度的烘箱中干燥。合成了编码为 SVS-01、SVS-02、SVS-03、SVL-01、SVL-02 和 SVL-03 的 6 种结构类型的淀粉脂酯。首字母缩写 SVS 和 SVL 分别是指从硬脂酸乙烯酯和月桂酸乙烯酯中获得的材料。指数 01、02 和 03 分别是指乙烯基酯/淀粉摩尔比为 1:1、2:1 和 3:1 [69]-[71]。

2015 年, Dias F 研究调查了使用脂肪酸乙烯基酯修饰的淀粉衍生物作为降滤失剂来控制转化乳液(W/O)钻井液中滤液的潜力,在此之前没有关于使用改性淀粉作为添加剂来控制非水性体系中滤液的报道。通过对物理化学性能的研究结果表明,以 2:1 和 3:1 摩尔比合成的乙烯基酯/淀粉的降滤失剂比标准商用降滤失剂更稳定,滤液体积更低,即使在老化后依然保持良好的性能。由淀粉脂肪酸酯开发的配方具有良好的流变性能和滤失性能以及电稳定性值,没有絮凝或凝胶化的倾向,能够在技术上与标准商业产品竞争。该研究制备的添加剂有希望成为市场销售合成材料的替代品,对开发在极端温度和压力条件下具有低毒性和良好性能的降滤失剂提供了新的思路,鼓励了该领域的研究[72]。

2017 年, Onuh C.Y 将玉米芯和椰壳混合作为油气钻井水泥浆中的降滤失剂,配置了水基钻井泥浆。使用 pH 计确定 pH 值,泥浆平衡器确定泥浆密度,在 90℃和 100 psi 条件下使用低压低温(LPLT)压滤机评估降滤失剂对过滤性能的影响。结果表明添加降滤失剂后的钻井泥浆的 pH 值随着降滤失剂浓度的增加而降低,密度下降,降低了水基泥浆流体的损失。该降滤失剂满足了在环保、经济、技术等多方面上的要求,是可生物降解的环境友好性材料,作为局部材料是一个良好的 pH 改性剂,能够满足石油和天然气行业防止海洋资源被破坏和沿海栖息地方面的环境友好性的要求[73]。

丙烯酰胺类聚合物具有粘度范围广、功能多样性等优点,但随着合成复杂性的增加,该类聚合物在溶解性、耐温性、耐盐性等方面的缺点逐渐暴露了出来。2020 年, Ma J 为制出一种性能优越的丙烯酰胺类聚合物降滤失剂,以丙烯酰胺(AM)/2-丙烯酰胺-2-甲基-1-丙烷磺酸(AMPS)为研究对象,采用反相乳液聚合法合成了反相乳液聚合物(E-AM/AMPS)。采用傅立叶红外光谱、核磁共振、透射电镜、扫描电镜和粒径分析对 E-AM/AMPS 进行了表征。结果表明, E-AM/AMPS 分子基团与分子链之间形成了较多的氢键,该类聚合物降滤失剂性能提高的主要原因就是分子结构的改变; E-AM/AMPS 形成交联的网状结构,使得 E-AM/AMPS 具有较高的粘度,能够更好地吸附在膨润土颗粒上,表现出优异的流变性和过滤性能; E-AM/AMPS 粉末具有较高的比表面积,可以更快地溶于水,减少配置钻井液的时间和难度。使用 Herschel-Bulkley 模型拟合 E-AM/AMPS 流变数据,结果表明 E-AM/AMPS 具有良好的剪切稀释性;具有良好的热稳定性,在 200℃条件下,仍能表现出良好的流变性和过滤性能;具有良好的抗盐性和抗钙性,抗 Na⁺浓度可达 10wt%,抗 Ca²⁺浓度可达 20wt% [74]。

提高凝胶材料长期耐久性和可持续性的理想解决方案之一就是增强其自愈性能。2022 年, Liu M 成功制备了硅氧烷接枝的降滤失剂 FLA-V, 与商用的降滤失剂相比, FLA-V 具有更好的降滤失性能。FLA-V 中的 Si-OH 可以与水泥颗粒表面的 -OH 发生反应, 因此聚合物能够吸附在水泥颗粒表面形成疏水膜。使用 FLA-V 预处理水泥颗粒, 制备一种水泥-聚合物复合自愈剂(CPCA)。该自愈剂可以延缓水泥颗粒的水化过程, 降低地层中水泥浆的滤失量; 使硬化水泥的微观结构致密化, 提高水泥的抗压强度; 裂缝发生时, 预处理的水泥能够再水化和碳化作用进行裂缝修复[75]。

8.2. 井壁稳定剂

2019 年, Bai X 在反应温度为 60℃ 条件下, 按聚乙二醇甲苯磺酸盐(PEG-OTs)/乙二胺的摩尔比为 1:3.6, PEG-OTs/三乙胺(酸结合剂)的摩尔比为 1:4, 进行离基法成功合成一种新型端胺型聚醚(ATPE)页岩抑制剂。对 ATPE 进行了页岩滚动分散实验、线性膨胀实验和激光粒度测试, 对加入 ATPE 的钻井液进行了性能评价。ATPE 在 16 h 的页岩回收率达到 71.33%, 8 h 线膨胀率仅为 6.99%; 使预水合化膨润土颗粒的比表面积达到相对最小值(0.391 m²/g); 与蒸馏水相比, 3wt%浓度的 ATPE 溶液中的粘土颗粒的平均直径从 5.479 μm 增加到 37.533 μm。结果表明, 与传统抑制剂相比, ATPE 具有更好的页岩抑制性能。钻井液体系性能评价结果表明, 加入 ATPE 的钻井液具有优良的流变性、低滤失性和良好的页岩缓蚀性能, 保证了页岩气钻井过程中的井壁稳定性, 该体系具有良好的工程应用价值[76]。

2019 年, Chu Q 以超支化聚乙烯亚胺(HPEI)与甲基丙烯氧基丙基三甲氧基硅烷进行迈克尔加成反应, 将硅氧烷基团引入 HPEI 分子中, 合成了硅烷偶联剂(Si-HPEI)改性的超支化聚乙烯亚胺作为页岩抑制剂。对 Si-HPEI 进行了 X 射线衍射测量(XRD), 吸附测量和原子力显微镜观察(APM), 从 XRD 谱图、吸附量和 AFM 观察结果可知, Si-HPEI 分子链上的硅氧烷基团对提高 Si-HPEI 的高温缓蚀性能有积极作用; 进行了线性膨胀试验、岩屑分散试验和膨润土抑制试验, 结果表明, 当热滚时效温度为 140℃ 时, Si-HPEI 页岩岩屑回收率仍保持在 68% 以上, 表现出良好的水化分散抑制能力; 在高温下能够有效地抑制膨润土浆料的形成, 有效地抑制页岩的水化膨胀, 并表现出优异的耐温性能。机理分析表明, Si-HPEI 分子链中的硅氧烷基团能够引起 Si-HPEI 对水敏粘土矿物的强的、稳定的化学吸附, 从而阻碍了水分子的渗透, 最终抑制了水敏粘土矿物的水化膨胀和分散。Si-HPEI 在苏 4-4HF 井上进行了现场应用, 并取得了良好的应用效果[77]。

纤维素是一种生物聚合物, 具有巨大的表面积、卓越的韧性、大量的官能团和相对无毒的性质。纤维素的表面结构可以被赋予特定的功能。苯乙烯改性纤维素(MC)可作为环境友好型页岩抑制剂和溶胀控制剂。2021 年, Saleh T A 为了提高其耐高温性能和抑制性能, 采用湿化学法对纤维素进行改性, 得到了苯乙烯改性纤维素(MC)。将 MC 加入水基泥浆(WBM)中, 形成苯乙烯改性纤维素水基泥浆(MC-WBM)。使用傅立叶变换红外光谱(FTIR)分析、热重分析(TGA)和扫描电镜(SEM)等多种技术对 MC 进行表征。结果表明, MC 阻断了页岩表面的纳米孔隙, 阻止了水分子的入侵, 使膨润土的溶胀率显著降低。MC 预期的溶胀抑制机制表明, MC 携带的官能团可以中断水分子和粘土表面之间的氢键。因此, 粘土表面被保护免受水反应作用。通过分散度恢复试验、页岩缓蚀稳定性试验和线性膨胀试验对 MC-WBM 的抑制性进行了评价。MC-WBM 的分散采收率为 77.8%, 膨润土在 MC 中的线性膨胀率为 31%, 流变性基本不变。结果表明 MC-WBM 性能要优于商业页岩抑制剂[78]。

水基钻井液(WBDF)抑制页岩膨胀的性能是钻井液工程中的一个重要问题。与赋予钻井液这种性质的添加剂的性质相比, 添加这些添加剂的顺序也很值得关注。2021 年, Bazyar H 试验了 23 种不同添加顺序的钻井液样品, 提出了标准 WBDF 配方中添加剂的优化顺序。通过研究分析 23 种不同的钻井液, 发现各种抑制剂和稳定剂对钻井液的最终性能都能产生很大的影响。溶胀曲线分析结果表明, 在添加添加

剂的情况下,错误的选择顺序会导致溶胀值很高,甚至超过 25%。通过对溶胀曲线和添加剂顺序的分析,表明在泥浆制备初期,应先添加页岩抑制剂(PHPA、KCl、聚乙二醇),然后再添加与流变学相关的添加剂(PAC、XC 聚合物)。泥饼的作用和其它药剂的封装也很重要,因此膨润土也应作为早期组分加入到钻井液中。这些结论适用于选定的 WBDF 配方,对其它新配方的应用应进行评价。由于页岩膨胀的机理众所周知,而且添加剂的化学成分在某种程度上是相同的,这些分析的结果可以推广到使用类似添加剂的其他配方[79]。

8.3. 堵漏剂

聚丙烯酰胺及其衍生物具有良好的相容性,是一种应用广泛的材料。2015 年,An Y 采用自由基聚合合法在水溶液中合成了丙烯酰胺(AM)、2-丙烯酰胺-2-甲基-1-丙烷磺酸(AMPS)、n-乙烯基吡咯烷酮(NVP)的纳米三元共聚物(AM/AMPS/NVP)。用乙醇的加入来控制三元共聚物的分子量。以 AM/AMPS/NVP 为原料,通过聚合条件控制分子量,合成了纳米聚合物封堵剂,可用于封堵纳米级孔隙页岩储层。AM/AMPS/NVP 相互作用机理的关键点在于骨架和纳米级尺度上的官能团。通过使用傅立叶变换红外光谱、粒度分析仪、透射电子显微镜和钻井液压滤机对 AM/AMPS/NVP 进行了研究。结果表明,该三元共聚物的粒径均在纳米范围内,结构符合设计要求;在钻井液中能够保持纳米尺度的稳定性;滤失性能与滤失剂相当。AM/AMPS/NVP 具有良好的耐高温、耐盐、耐钙性能,性能优于目前商用产品[80]。

2016 年,Yuxiu A 将氧化石墨烯分散于蒸馏水中,加入乙二胺,在 80℃的烧瓶中回流 8 h,合成了乙二胺改性石墨烯(EDA-G)。开发了一种基于 EDA-G 的页岩纳米级孔隙堵漏剂,该堵剂既具有堵漏性能,又具有抑制性能。与无机纳米材料相比,在特定条件下加入 EDA-G 的钻井液滤失量最低。当含碳量为 0.2 wt%时,EDA-G 溶液表现出良好的缓蚀剂性能。在线性膨胀试验的研究中,EDA-G 溶液的加入使膨胀高度最低。EDA-G 能够吸附在页岩表面形成致密膜,防止了页岩地层水的侵入。EDA-G 溶液具有良好的堵孔性能和抑制粘土水化性能,而这两种性能是水钻井液钻井作业中稳定页岩地层的最关键因素[81]。

2020 年,Yang E 根据泡沫综合指数对暂堵剂的配方进行了优化。优化后的配方:清水 + 十六烷基磺酸钠 + 羧甲基纤维素钠 + 可溶性淀粉。通过极差分析法设计了多组分凝胶堵剂的配方。设计配方:丙烯酰胺(AM) + 丙烯酸(AA) + PVA + N、N-亚甲基双丙烯酰胺 + 过硫酸铵 + 氢氧化钠。多组分凝胶封堵剂体系初凝时间为 4 h,突破压力梯度达到 23.0 MPa/m,满足低温油藏快速高强封堵的要求。通过对发泡剂、稳定剂、增强剂、表面活性剂等处理剂进行优化设计,设计出各种微泡暂堵剂。微泡暂堵剂的封堵机理是微尺度泡沫流经孔隙时产生的贾敏效应。微泡暂堵剂在中、低渗透岩心应用中表现出较高的封堵强度。水驱岩心渗透率恢复率在 94%以上,对储层的污染较小。对低压层采用微泡沫暂堵剂进行临时封堵,对高压层采用多组分凝胶进行封堵,可达到控制主导流道、提高低压层效果的目的。现场试验表明,测试井高压层产液量由 13.7 m³/d 下降到 0.6 m³/d,减少了 95.6%;低压层产液量由 8.4 m³/d 增加到 12.9 m³/d,增加了 53.6% [82]。

2020 年,Li H 采用无皂乳液聚合法,以苯乙烯(ST)、丙烯酰胺(AM)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)和二甲基二烯丙基氯化铵(DMDAAC)为单体,加入 N、N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)、(3-氨基丙基)-三乙氧基硅烷(KH550)、氢氧化钠(NaOH)和过硫酸钾(K₂S₂O₈),合成了具有双交联结构的聚合物纳米微球(PNS)。PNS 的粒径在 10~600 nm 之间,平均粒径为 133 nm。经 150~200℃高温处理后,可以保留原有粒径的一半左右。PNS 的初始分解温度在 315℃左右。与水处理后相比,经 PNS 封堵后,页岩岩屑的比表面积和孔体积均明显减小,对页岩孔隙具有良好的封堵效果。PNS 有利于降低 WBM 的 API 和 HTHP 失水。在高温条件下,PNS 在水基泥浆(WBM)中具有热稳定性,能够有效封堵页岩孔隙[35]。

9. 人工智能在钻井液中的应用

当量循环密度(ECD)是钻井高温高压井和深水井的一个非常重要的参数。目前,油田采用的方法主要依赖于使用昂贵的井下传感器来提供ECD的实时值。这些工具有作业限制,可能无法在所有井下条件下使用。2018, Elzenary M 提出一种不需要井下工具就可以预测钻井ECD值的新技术。该技术利用地面钻进参数: 钻速(ROP), m/hr、入井泥浆比重(MWI), ppg、钻杆压力(DPP), psi。通过人工智能(AI)技术精确评估ECD值。该模型采用了两种人工智能技术, 人工神经网络(ANN)和自适应神经模糊推理系统(ANFIS)。该模型的精度很高, 实际ECD值与预测值的误差系数小于0.22%。使用该技术可以节省成本和时间, 无需使用昂贵、复杂的井下工具, 准确选择泥浆密度, 保证安全钻井产生[83]。

地层顶是油气勘探圈定阶段所收集的重要信息之一。这些有价值的信息有助于在开发阶段正确下套管, 并确保不同层间的层间隔离。2018年, Al-AbdulJabbar A 采用反向传播人工神经网络模式识别函数(nprtool)构建模型, 设计了一种更好的选择地层顶部的方法。该技术利用钻进机械参数和钻速来提高预测精度, 并且使用人工神经网络(ANN)来获得最佳结果和预测精度。即使在钻井参数波动的情况下, 也有助于检测机械钻速的实际增加或减少。这种新技术既不需要处理测井数据, 也不需要等待岩屑到达地面, 因此可以更快地检测地层变化。该项技术使用了现有的实时数据, 可以在几乎没有额外成本的情况下, 以良好的精度实时选择地层。数据充足情况下可以绘制整个油田的地图, 因此该方法非常具有前景[84]。

渗透率是许多钻井运营商非常关注的重点。由于钻井过程的复杂性, 到目前为止还没有建立可靠的预测渗透率的模型。2018年, Al-AbdulJabbar A 选择平均绝对百分比误差(AAPE)和相关系数(R)作为控制因素。采用试错法选择了层数和神经元数的最佳搭配: 采用1层、12个神经元。通过线性传递函数建立了人工神经网络前馈网络模型。输入的参数包括泵速、钻压、转速、扭矩、立管压力和无侧限抗压强度。该模型能够有效预测渗透率, 平均相关系数为0.94, 平均绝对误差为8.6%, 与现有方法性能相比提高了22%。该模型可以只用一口井的数据便对另外两口井进行数据预测。数据充足情况下可以绘制整个油田的地图, 因此该方法非常具有前景[84]。

能否高精度地预测钻速(ROP)取决于以下几个因素: 钻井参数、钻井液性质和钻井地层特征。2021年, Elkatatny S 利用人工神经网络(ANN)、自适应神经模糊推理系统(ANFIS)和支持向量机(SVM)等三种不同的人工智能(AI)技术, 开发一个新的经验公式来实时预测机械钻速。这是首次使用聚金刚石晶体(PDC)钻头设计参数、总流道面积、泥浆密度(MWin)、伽马射线(GR)和钻井参数来建立AI模型。研究中使用在中东地区钻井作业期间记录的数据进行测试。结果表明ANN、ANFIS和SVM均可用于复杂岩性的机械钻速预测, 并且预测精度均较高。经统计分析表明, 采用1个隐层、20个神经元、fitnet为网络函数、trainbr为训练函数、tansig为传递函数的神经网络变量参数组合, 可以较好地预测ROP。新的ROP方程可以不需要人工神经网络的Matlab代码或特殊的软件来使用[85]。

人工智能在石油勘探领域的应用主要集中在测井处理与解释(如岩性识别、曲线重建等)、地震处理与解释(如初断拾取、断层识别等)、水驱开发实时控制、产量预测。智能算法的应用提高了集成分析软件的智能化水平, 嵌入式芯片提供了智能化设备。机器学习在岩性识别、测井曲线重建、储层参数估计等测井处理解释方面已得到初步应用, 潜力巨大。计算机视觉在地震初断点的提取、断层识别和其他地震处理和解释方面是有效的。研究成果可归纳为三个方面: 第一, 智能设备的初步应用。例如无人机和机器人被用来代替人类巡逻、覆盖管道、无人值守的平台和其他场合。第二, 应用大数据、机器学习等IT技术进行数据处理和分析, 进行探索 and 开发。第三, 大多数企业已经意识到数据共享的重要性, 并开始研发集成分析平台、集成软件等。由于人工智能算法依赖于大数据, 因此算法的输入和输出之间的映射关

系必须清晰和明确。但储层地下条件复杂多样,勘探作业存在多解、样本小等问题,人工智能的应用难以推广[86]。

10. 钻井液技术的挑战与展望

10.1. 钻井液技术面临的挑战

随着技术的不断完善和提高,现在的钻井液技术发展更加重视与相关学科的交叉发展,不断完善发展现代钻井液体系,性能更加全面。在提高钻井效率的同时,对于钻井液在储层保护方面和环境友好性方面的要求越来越高。发展新型钻井配套设备能够为钻井过程中带来更高的效益。钻井液新技术的挑战表现在以下几个方面:

1. 在钻井液体系的设计上。应更加注重添加剂之间的协同作用,添加剂与地层物质之间的协同作用,达到更高的性能。
2. 对于钻井液添加剂的要求更高。需要一种处理剂可以同时适应应用多种不同情况;使用废料合成钻井液添加剂,可以带来环境与经济上的双重收益。
3. 设计理念应更加注重创新型。跳出传统研究方向,大胆提出新的研究思路、方法和观念,为钻井液的发展拓宽道路。
4. 在钻井液性能的控制过程中应更加注重模型、软件模拟等人工智能的应用。全面的、准确的分析各种因素对钻井液性能的影响,建立各种因素对响应的定量关系,持续地创造可观的经济效益,提升工作效率,节约大量的成本。

10.2. 钻井液新技术的展望

通过调研国内外钻井液技术的发展现状,今后的钻井液技术发展注重从以下几方面开展研究:

1. 深井、超深井钻井液技术,满足恶劣地质条件的地层钻井要求。
2. 无毒、可降解、环境友好性钻井液技术,满足钻井过程中对环境保护的要求。
3. 低密度、超低密度钻井液技术,满足枯竭地层、低压地层和超低压地层的钻井需要。
4. 强抑制性钻井技术,比如阳离子聚合物钻井液、无渗透性钻井液。
5. 合理开发利用工业废料,创造环境与经济上的多重收益。
6. 充分利用纳米材料的小尺寸效应、表面效应、量子效应和宏观量子隧道效应等四大效应,研制性能优越的纳米级添加剂。
7. 深水、超深水钻井液技术,在形成适合的钻井液体系的同时,也应该注重配套适合的钻井液设备。
8. 开发完善能够动态模拟井下条件的钻井液性能的新设备。
9. 人工智能在钻井液体系设计中的应用。

参考文献

- [1] 吕国俭. 抗高温无固相甲酸盐钻井液研究与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 34(1): 71.
- [2] 吴飞, 陈礼仪, 周应华, 等. 甲酸盐无固相钻井液研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(3): 322-326.
- [3] 李瑞丰, 李东进. 吉林油田甲酸盐无固相欠平衡钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(6): 24-27, 87.
- [4] 唐文明. 甲酸盐钻井液在 SH9-X13 井的现场应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(7): 177-178.
- [5] 赵向阳, 张小平, 陈磊, 等. 甲酸盐钻井液在长北区块的应用[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(1): 40-44.
- [6] 孙睿. 新型甲酸盐钻井液体系配方的研究[J]. 硅谷, 2013, 3(9): 127.
- [7] 齐海鹰, 宋博宇. 一种可替代甲酸盐钻井液的改型甲酸盐钻井液的应用研究[J]. 中外能源, 2014, 19(3): 60-64.

- [8] 张举政, 杨远光, 孙勤亮, 等. pH 值和稀释剂对固井前甲酸盐钻井液性能的影响[J]. 油田化学, 2019, 36(1): 7-11.
- [9] Carnegie, A.W., Omar, M., Colman, G. and Supriyono, H. (2013) Experience with Formate Fluids for Managed Pressure Drilling and Completion of Subsea Carbonate Gas Development Wells. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Jakarta, 22-24 October 2013, SPE-165761-MS. <https://doi.org/10.2118/165761-ms>
- [10] Ryabtsev, P.L., Khomutov, A.Y., et al. (2018) The First Experience of Formate Based Drilling Fluids Application in Russia. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Moscow, 15-17 October 2018, SPE-191503-18RPTC-MS.
- [11] Downs, J. and Fleming, N. (2018) Evaluating Formation Damage Predictions Drawn from HPHT Core Flooding Tests on Brent Group Sandstone Reservoir Cores with Heavy Formate Drill-In Fluids: A Case Study from the Huldra Field. *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*, Lafayette, 7-9 February 2018, SPE-189530-MS. <https://doi.org/10.2118/189530-ms>
- [12] Arpini, F., Bussaglia, L., Cascone, A., et al. (2019) Viscoelastic Water-Based Drilling Fluid Minimizes Formation Losses While Drilling of Shallow Carbonate Sections in Southern Europe. *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*, Ravenna, 27-29 March 2019, OMC-2019-0995.
- [13] Jøntvedt, E., Fjeldheim, M., Løchen, J., Howard, S., Leon, S., Busengdal, C., et al. (2018) Deployment of Cesium Formate Drill-In and Openhole Completion Fluid in the Martin Linge High Pressure, High Permeability Gas Reservoir Enhances Total's Operational Efficiency and Radically Improves Well Performance. *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*, Lafayette, 7-9 February 2018, SPE-189550-MS. <https://doi.org/10.2118/189550-ms>
- [14] Downs, J.D. and Fleming, N. (2020) Profiling the Production Performance of Five HPHT Gas Condensate Wells Drilled and Completed with High-Density Cesium Formate Fluids in the Brent Group Formations of the Kvitebjørn Field. *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*, 19-21 February 2020, SPE-199286-MS. <https://doi.org/10.2118/199286-MS>
- [15] 许杰, 何瑞兵, 谢涛, 等. 抗高温无固相甲酸盐钻井液体系研究[J]. 石油化工应用, 2019, 38(6): 36-40.
- [16] Zheng, W., Wu, X. and Huang, Y. (2019) Thermal Stability of Sodium Formate in Polymer Drilling Fluids. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 55, 174-182. <https://doi.org/10.1007/s10553-019-01018-4>
- [17] Morenov, V., Leusheva, E. and Liu, T. (2021) Development of a Weighted Barite-Free Formate Drilling Mud for Well Construction under Complicated Conditions. *Polymers*, 13, Article 4457. <https://doi.org/10.3390/polym13244457>
- [18] 杨双春, 宋洪瑞, 郭奇, 等. 钻井液用流型调节剂的研究进展[J]. 精细化工, 2020, 37(9): 1744-1754.
- [19] Davoodi, S., Ramazani S.A., Soleimanian, A. and Fellah Jahromi, A. (2019) Application of a Novel Acrylamide Copolymer Containing Highly Hydrophobic Comonomer as Filtration Control and Rheology Modifier Additive in Water-Based Drilling Mud. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 180, 747-755. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.069>
- [20] 舒义勇, 孙俊, 曾东, 等. 塔里木油田跃满西区块高温恒流变钻井液研究与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 39-45.
- [21] Xie, B., Tchameni, A.P., Luo, M. and Wen, J. (2021) A Novel Thermo-Associating Polymer as Rheological Control Additive for Bentonite Drilling Fluid in Deep Offshore Drilling. *Materials Letters*, 284, Article ID: 128914. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128914>
- [22] Kamali, F., Saboori, R. and Sabbaghi, S. (2021) Fe₃O₄-CMC Nanocomposite Performance Evaluation as Rheology Modifier and Fluid Loss Control Characteristic Additives in Water-Based Drilling Fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, Article ID: 108912. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108912>
- [23] 崔迎春, 王贵和. 钻井液技术发展趋势浅析[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(1): 60-62, 70.
- [24] 王辉, 王富华. 纳米技术在钻井液中的应用探讨[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(2): 50-53, 80-81.
- [25] 吴飞鹏, 施盟泉, 张云龙, 等. 纳米水溶性微凝胶驱油材料及其制备方法[P]. 中国专利, CN1903974. 2007-01-31.
- [26] 施盟泉, 吴飞鹏, 张云龙. 纳微米水溶性微凝胶驱油材料及其制备方法[P]. 中国专利, CN1927895. 2007-03-14.
- [27] 吴飞鹏, 施盟泉, 张玉玺, 等. 核壳自交结丙烯酰胺共聚物深部调剖堵水剂及其制备方法[P]. 中国专利, CN1940008. 2007-04-04.
- [28] 雷光伦. 亚微米聚合物活性微球调剖驱油剂[P]. 中国专利, CN1594493. 2005-03-16.
- [29] 雷光伦. 一种阳离子聚丙烯酰胺凝胶微球及其制备方法[P]. 中国专利, CN101037493. 2007-09-19.
- [30] Lei, G., Li, L. and Nasr-El-Din, H.A. (2011) New Gel Aggregates to Improve Sweep Efficiency during Waterflooding. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 14, 120-128. <https://doi.org/10.2118/129960-pa>
- [31] 王鸣川, 朱维耀, 王国锋, 等. 纳米聚合物微球在中渗高含水油田的模拟研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(5): 105-108, 191.

- [32] Pritchett, J., Frampton, H., Brinkman, J., Cheung, S., Morgan, J., Chang, K.T., *et al.* (2003) Field Application of a New In-Depth Waterflood Conformance Improvement Tool. *SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific*, Kuala Lumpur, 20-21 October 2003, SPE-84897-MS. <https://doi.org/10.2118/84897-ms>
- [33] Kutty, S.M., Kuliyeve, M., Hussein, M.A., Chitre, S., Mustafa, H., Penny, G., *et al.* (2015) Well Performance Improvement Using Complex Nano Fluids. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Abu Dhabi, 9-12 November 2015, SPE-177831-MS. <https://doi.org/10.2118/177831-ms>
- [34] 郭永峰. 加拿大 Calgary 钻井液公司宣布纳米钻井液投入工业化应用[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(6): 795.
- [35] Li, H., Lv, K., Huang, X., Lu, Z. and Dong, X. (2020) The Synthesis of Polymeric Nanospheres and the Application as High-Temperature Nano-Plugging Agent in Water Based Drilling Fluid. *Frontiers in Chemistry*, **8**, Article 247. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00247>
- [36] Mirzaasadi, M., Zarei, V., Elveny, M., Alizadeh, S.M., Alizadeh, V. and Khan, A. (2021) Improving the Rheological Properties and Thermal Stability of Water-Based Drilling Fluid Using Biogenic Silica Nanoparticles. *Energy Reports*, **7**, 6162-6171. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.130>
- [37] Kalhor, M.M., Taraghikhah, S., Karimi, R.M.S., *et al.* (2021) Developing New Generation of Environmentally Friendly Nano Based Low Saline Water-Based Drilling Fluid. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, 25-27 May 2021, SPE-202111-MS.
- [38] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2012.
- [39] 华桂友, 舒福昌, 向兴金, 等. 适用于钻水平井的可逆转油包水钻井液研究[J]. 国外油田工程, 2010, 26(8): 53-55.
- [40] 梁勇. 油包水钻井液技术在古龙 1 井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(5): 15-17, 88.
- [41] 余可芝, 李自立, 耿铁, 等. 油基钻井液在番禺 30-1 气田大位移井中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(2): 5-9, 95.
- [42] 牛晓, 方静, 王海波. 塔中定向井油基钻井液技术[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(7): 77-80.
- [43] Fimreite, G., Asko, A., Massam, J., Taugbol, K., Omeland, T.H., Svanes, K., *et al.* (2004) Invert Emulsion Fluids for Drilling through Narrow Hydraulic Windows. *IADC/SPE Drilling Conference*, Dallas, 2-4 March 2004, SPE-87128-MS. <https://doi.org/10.2118/87128-ms>
- [44] Fossum, P., Moum, T., Sletfjerding, E., Taugbol, K., Brechan, B., Hogstol, H., *et al.* (2007) Design and Utilization of Low Solids OBM for Aasgard Reservoir Drilling and Completion. *Proceedings of European Formation Damage Conference*, Scheveningen, 30 May-1 June 2007, SPE-107754-MS. <https://doi.org/10.2523/107754-ms>
- [45] Khvoshchin, P., Lyadova, N., Iliasov, S., Nekrasova, I., Garshina, O. and Kuznetsov, A. (2014) The Results of Horizontal Well Drilling Using Invert-Emulsion Fluid at Kharyaginskoe Field. *SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition*, Moscow, 14-16 October 2014, SPE-171283-MS. <https://doi.org/10.2118/171283-ms>
- [46] Zhong, H., Shen, G., Qiu, Z., *et al.* (2019) Minimizing the HTHP Filtration Loss of Oil-Based Drilling Fluid with Swellable Polymer Microspheres. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **172**, 411-424.
- [47] Li, W., Jiang, G., Ni, X., Li, Y., Wang, X. and Luo, X. (2020) Styrene Butadiene Resin/Nano-SiO₂ Composite as a Water-And-Oil-Dispersible Plugging Agent for Oil-Based Drilling Fluid. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **606**, Article ID: 125245. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125245>
- [48] Jiang, G., Shi, H. and He, Y. (2022) The Biodiesel-Based Flat-Rheology Drilling Fluid System. *Petroleum Exploration and Development*, **49**, 200-210. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(22\)60016-8](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(22)60016-8)
- [49] Friedheim, J.E. and Conn, H.L. (1996) Second Generation Synthetic Fluids in the North Sea: Are They Better? *IADC/SPE Drilling Conference*, New Orleans, 12-15 March 1996, SPE-35061-MS. <https://doi.org/10.2118/35061-ms>
- [50] 杨贤友. 保护油气层钻井完井液现状与发展趋势[J]. 钻井液与完井液, 2000, 17(1): 29-34.
- [51] Terry Prater, Bill E Henn, 唐代绪, 等. 成功的钻井液体系[J]. 国外油田工程, 2000(4): 22-25.
- [52] Burrows, K., Evans, J., Hall, J. and Kirsner, J. (2001) New Low Viscosity Ester Is Suitable for Drilling Fluids in Deep-water Applications. *SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference*, San Antonio, 26-28 February 2001, SPE-66553-MS. <https://doi.org/10.2118/66553-ms>
- [53] Trotter, N. and Rojas, J.C. (2007) Synthetic-Based Fluid with Constant Rheology Reduces Downhole Losses in Deep-water Operations. *Drilling Contractor*, **63**, No. 3.
- [54] 罗健生, 莫成孝, 刘自明, 等. 气制油合成基钻井液研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(2): 7-11, 129.
- [55] 蒋卓, 舒福昌, 向兴金, 等. 全油合成基钻井液的室内研究[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(2): 19-20, 130.
- [56] Paul, A.A.L. and Adewale, F.J. (2018) Novel Synthetic-Based Drilling Fluid through Enzymatic Interesterification of Canola Oil. *International Journal of Chemical Engineering*, **2018**, Article ID: 6418090.

- <https://doi.org/10.1155/2018/6418090>
- [57] Kania, D., Yunus, R., Omar, R., Abdul Rashid, S., Mohamed Jan, B. and Arsanjani, N. (2018) Nonionic Polyol Esters as Thinner and Lubricity Enhancer for Synthetic-Based Drilling Fluids. *Journal of Molecular Liquids*, **266**, 846-855. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.07.014>
 - [58] Kania, D., Yunus, R., Omar, R., Abdul Rashid, S. and Mohamed Jan, B. (2021) Rheological Investigation of Synthetic-Based Drilling Fluid Containing Non-Ionic Surfactant Pentaerythritol Ester Using Full Factorial Design. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **625**, Article ID: 126700. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126700>
 - [59] 马光长, 杜良民. 空气钻井技术及其应用[J]. 钻采工艺, 2004, 27(3): 4-8.
 - [60] 许爱. 气体钻井技术及现场应用[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(4): 16-19.
 - [61] 王洪英, 赵德云. 气体钻井在大庆徐家围子地区应用探讨[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(1): 179-181.
 - [62] 李志刚, 窦金永, 董玉辉, 等. 大庆油田气体钻井技术现状[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(7): 43-44, 47.
 - [63] 肖洲, 颜小兵, 周长虹, 等. 气体钻井作业面临的风险及控制措施探讨[J]. 钻采工艺, 2015, 38(3): 112-114.
 - [64] 李飞, 徐恩信. 实用欠平衡钻井技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2000.
 - [65] 晁文学, 林勇. 国外空气钻井钻头的应用[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(1): 39-40.
 - [66] Cao, P., Chen, Z., Liu, M., Cao, H. and Chen, B. (2019) Numerical and Experimental Study of a Novel Aerodynamic Foam Breaker for Foam Drilling Fluid. *Energy Science & Engineering*, **7**, 2410-2420. <https://doi.org/10.1002/ese3.428>
 - [67] 李强, 李志勇, 张浩东, 等. 响应面法优化纳米材料稳定的泡沫钻井液[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(1): 23-30.
 - [68] Vaziri, E., Simjoo, M. and Chahardowli, M. (2020) Application of Foam as Drilling Fluid for Cuttings Transport in Horizontal and Inclined Wells: A Numerical Study Using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **194**, Article ID: 107325. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107325>
 - [69] Junistia, L., Sugih, A., Manurung, R., et al. (2008) Synthesis of Higher Fatty Acid Starch Esters using Vinyl Laurate and Stearate as Reactants. *Starch—Stärke*, **60**, 667-675. <https://doi.org/10.1002/star.200800025>
 - [70] Junistia, L., Sugih, A.K., Manurung, R., Picchioni, F., Janssen, L.P.B.M. and Heeres, H.J. (2009) Experimental and Modeling Studies on the Synthesis and Properties of Higher Fatty Esters of Corn Starch. *Starch—Stärke*, **61**, 69-80. <https://doi.org/10.1002/star.200800076>
 - [71] Dias, F., de Souza, R. and Lucas, E. (2013) Starch Fatty Esters for Potential Use in Petroleum Industry. *Chemistry & Chemical Technology*, **7**, 451-456. <https://doi.org/10.23939/chcht07.04.451>
 - [72] Dias, F.T.G., Souza, R.R. and Lucas, E.F. (2015) Influence of Modified Starches Composition on Their Performance as Fluid Loss Additives in Invert-Emulsion Drilling Fluids. *Fuel*, **140**, 711-716. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.074>
 - [73] Onuh, C.Y., Igwilo, K.C., Anawe, P.A.L., Daramola, O. and Ogunwomoju, O. (2017) Environmentally Friendly Fluid Loss Control Agent in Water-Based Mud for Oil and Gas Drilling Operations. *International Journal of Applied Engineering Research*, **12**, 1520-1523.
 - [74] Ma, J., Xia, B., Yu, P. and An, Y. (2020) Comparison of an Emulsion- and Solution-Prepared Acrylamide/Amps Copolymer for a Fluid Loss Agent in Drilling Fluid. *ACS Omega*, **5**, 12892-12904. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00665>
 - [75] Liu, M., Hu, M., Li, P., Zhang, H., Zhao, J. and Guo, J. (2022) A New Application of Fluid Loss Agent in Enhancing Autogenous Healing Ability and Improving Mechanical Properties of Oil Well Cement. *Cement and Concrete Composites*, **128**, Article ID: 104419. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104419>
 - [76] Bai, X., Zhang, X., Koutsos, V., Fu, Z., Ning, T., Luo, Y., et al. (2018) Preparation and Evaluation of Amine Terminated Polyether Shale Inhibitor for Water-Based Drilling Fluid. *SN Applied Sciences*, **1**, Article No. 94. <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0112-x>
 - [77] Chu, Q., Lin, L. and Zhao, Y. (2019) Hyperbranched Polyethylenimine Modified with Silane Coupling Agent as Shale Inhibitor for Water-Based Drilling Fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **182**, Article ID: 106333. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106333>
 - [78] Saleh, T.A. and Rana, A. (2021) Surface-Modified Biopolymer as an Environment-Friendly Shale Inhibitor and Swelling Control Agent. *Journal of Molecular Liquids*, **342**, Article ID: 117275. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117275>
 - [79] Bazayr, H. and Monfared, M.S. (2021) Defining the Optimum Sequence in Addition of Shale Inhibitor Agents in WBDF Considering Inhibition of Swelling of Cuttings. *Upstream Oil and Gas Technology*, **7**, Article ID: 100051. <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2021.100051>
 - [80] An, Y., Jiang, G., Qi, Y., et al. (2015) Synthesis of Nano-Plugging Agent Based on AM/AMPS/NVP Terpolymer. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **135**, 505-514.
 - [81] An, Y.X., Jiang, G.C., Qi, Y.R., Huang, X.B. and Shi, H. (2016) High-Performance Shale Plugging Agent Based on

-
- Chemically Modified Graphene. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **32**, 347-355. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.04.048>
- [82] Yang, E., Fang, Y., Liu, Y., Li, Z. and Wu, J. (2020) Research and Application of Microfoam Selective Water Plugging Agent in Shallow Low-Temperature Reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **193**, Article ID: 107354. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107354>
- [83] Elzenary, M., Elkatatny, S., Abdelgawad, K.Z., Abdulraheem, A., Mahmoud, M. and Al-Shehri, D. (2018) New Technology to Evaluate Equivalent Circulating Density While Drilling Using Artificial Intelligence. *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*, Dammam, 23-26 April 2018, SPE-192282-MS. <https://doi.org/10.2118/192282-ms>
- [84] Al-AbdulJabbar, A., Elkatatny, S., Mahmoud, M. and Abdulraheem, A. (2018) Predicting Formation Tops While Drilling Using Artificial Intelligence. *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*, Dammam, 23-26 April 2018, SPE-192345-MS. <https://doi.org/10.2118/192345-ms>
- [85] Elkatatny, S. (2021) Real-Time Prediction of Rate of Penetration While Drilling Complex Lithologies Using Artificial Intelligence Techniques. *Ain Shams Engineering Journal*, **12**, 917-926. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.014>
- [86] Kuang, L., Liu, H., Ren, Y., Luo, K., Shi, M., Su, J., et al. (2021) Application and Development Trend of Artificial Intelligence in Petroleum Exploration and Development. *Petroleum Exploration and Development*, **48**, 1-14. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(21\)60001-0](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(21)60001-0)