

文章编号: 0253-2697(2025)01-0279-10 DOI:10. 7623/syxb202501019

致密油气钻井液技术研究现状与展望

孙金声^{1,2} 杨景斌¹ 吕开河¹ 白英睿¹ 刘敬平¹ 黄贤斌¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院 山东青岛 266580; 2. 中国石油集团工程技术研究院有限公司 北京 102206)

摘要:随着全球能源需求不断增长,致密油气资源作为非常规油气资源的重要组成部分,其勘探与开发日益受到重视。致密油气储层具有渗透率低、孔隙结构复杂等特点,因此对钻井液技术提出了更高要求。通过综述当前致密油气钻井液技术面临的挑战和研究现状,详细阐述了水基钻井液、油基/合成基钻井液以及钻井液防漏堵漏技术的作用机制以及性能特点,明确了目前致密油气钻井液技术存在的关键问题,进而提出未来致密油气钻井液技术的发展方向。水基钻井液技术应注重优化悬浮和携带能力,增强井壁稳定性,保持流变性稳定。油基/合成基钻井液技术应注重提高乳液稳定性和润湿性,增强封堵性能,解决废弃钻井液的资源化利用或无害化处理问题。钻井液防漏堵漏技术应注重研发能够适应不同地层压力和渗透性条件的新型防漏堵漏材料,提高漏失位置预测准确性。致密油气钻井液技术作为致密油气勘探开发的关键技术之一,其研究与发展对于提高致密油气资源量、保障国家能源安全具有重要意义。

关键词:致密油气;水基钻井液技术;油基/合成基钻井液技术;防漏堵漏技术;发展展望

中图分类号:TE254

文献标识码:A

Research status and prospects of drilling fluid technology for tight oil and gas

Sun Jinsheng^{1,2} Yang Jingbin¹ Lü Kaihe¹ Bai Yingrui¹ Liu Jingping¹ Huang Xianbin¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China;

2. CNPC Engineering Technology R & D Company Limited, Beijing 102206, China)

Abstract:With the continuous growth in global energy demand, the exploration and development of tight oil and gas resources, as a crucial component of unconventional oil and gas, is increasingly gaining attention. Tight reservoirs have the characteristics of low permeability and complex pore structures, posing high demands on drilling fluid technology. This paper reviews the challenges and current research status of drilling fluid technology for tight oil and gas, elaborates on the action mechanisms and performance characteristics of water-based drilling fluids, oil-based/synthetic-based drilling fluids, and drilling fluid lost circulation prevention and plugging technologies, identifies critical issues in the current drilling fluid technology, and proposes future directions for the technology. For the water-based drilling fluid technology, attention should be paid to improving suspension and carrying capacity, enhancing borehole wall stability, and maintaining rheological stability. For the oil-based/synthetic-based drilling fluid technology, special focus should be paid on improving emulsion stability and wettability, enhancing plugging performance, and addressing issues of the resource utilization or harmless disposal of waste drilling fluids. For the drilling fluid lost circulation prevention and plugging technologies, efforts should be made to develop new materials applicable under various formation pressures and permeability conditions and improve the prediction accuracy of lost circulation location. As one of the key technologies for tight oil and gas exploration and development, the research and advancement of drilling fluid technology is critical for increasing tight oil and gas resources and ensuring national energy security.

Key words:tight oil and gas; water-based drilling fluid technology; oil-based/synthetic-based drilling fluid technology; drilling fluid lost circulation prevention and plugging technology; development prospects

引用:孙金声,杨景斌,吕开河,白英睿,刘敬平,黄贤斌.致密油气钻井液技术研究现状与展望[J].石油学报,2025,46(1):279-288.

Cite:SUN Jinsheng, YANG Jingbin, LÜ Kaihe, BAI Yingrui, LIU Jingping, HUANG Xianbin. Research status and prospects of drilling fluid technology for tight oil and gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(1): 279-288.

世界致密油储量约达到 $6\,900 \times 10^8$ t,致密油资源总量要比常规石油资源储量多 1.5 倍以上^[1]。随

着科技的不断进步和勘探技术的持续发展,世界致密油资源的探明储量占油气资源的比例逐年上升。

基金项目:国家自然科学基金基础科学中心项目(No. 52288101)和国家自然科学基金面上项目(No. 52174014, No. 52374023)资助。

第一作者及通信作者:孙金声,男,1965 年 1 月生,2006 年获西南石油大学博士学位,现为中国工程院院士、中国石油大学(华东)博士生导师、中国石油集团工程技术研究院有限公司总工程师,长期从事钻井液、防漏堵漏、井壁稳定、天然气水合物钻采理论与技术等研究工作。Email: sunjsdri@cnpc.com.cn

国外的致密油储层主要集中在美国、加拿大和俄罗斯等地区^[2]。近年来,北美地区在致密油气藏开发方面取得了重大突破,Bakken 盆地、Eagle Ford 和 Niobrara 地区是美国重要的致密油资源产区,这 3 个地区进行致密油生产的油井数量大约有 8 000 多口^[3]。同时,中国也具有丰富的致密油资源,致密油分布的主要区域有鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地和四川盆地等,具有很大的勘探开发前景^[4]。其中,致密油在鄂尔多斯、松辽等盆地分布广泛,总资源储量可达 $151\times 10^8\text{t}$,已探明的致密油储量约为 $10\times 10^8\text{t}$,中国石油天然气集团有限公司探明储量为 $4.68\times 10^8\text{t}$ 、中国石油化工集团有限公司探明储量为 $5.65\times 10^8\text{t}$ ^[5]。将中国致密油储量较高的鄂尔多斯盆地与美国 Williston 盆地、Western Gulf of Mexico 盆地的致密油研究、勘探成果进行对比^[6],中国致密油具有良好的沉积环境与盖层,同时具有优质且生烃能力极强的烃源岩,大面积且连片分布的储层成为最佳的致密油储存场所。

致密油藏已经成为油田资源接替的重要阵地,其在钻井施工过程中,井眼轨迹控制难度大,摩阻扭矩难以有效控制,对钻井液抗温性、润滑性和抑制性提出了要求^[7]。国外已经形成了成熟的致密油藏钻井液技术,特别是在应用油基钻井液保障页岩油气藏开发方面取得了良好的效果,积累了丰富的经验^[8-9]。而中国在致密油藏钻井液研究和应用技术方面相对薄弱^[10]。目前中国在开采致密油气过程中主要研发了水基钻井液技术、油基/合成基钻井液技术等^[11-13]。同时,为解决致密油藏钻井过程中钻井液漏失严重的问题,研发出了一系列适用于致密油藏的防漏堵漏材料,如高失水堵漏材料、聚合物凝胶堵漏材料等^[14-19],这些材料具有良好的适应性、抗温性能和承压能力,能够实现高效封堵。针对致密油气开采过程中钻井液技术的研究现状和应用情况,笔者对致密油气钻探面临的技术挑战进行了综述,并详细阐述了水基钻井液、油基/合成基钻井液以及高失水、聚合物凝胶和可固化等堵漏材料的作用机制以及性能特点,明确了目前致密油气钻井液技术存在的关键问题,进而提出未来致密油气钻井液技术的发展方向,从而为致密油气钻井液技术的推广应用奠定理论基础。

1 致密油气钻探面临的技术挑战

致密油气钻探过程中面临的技术挑战是多方面的,这些挑战不仅涉及地质条件的复杂性,还包括工程技术难题等。其中,致密油气藏储层具有低孔隙度、低渗透率以及异常高压的特点。

(1) 低孔隙度和低渗透率

致密储层油气藏的孔隙度通常小于 10%,渗透率低于 0.1 mD,孔喉直径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$,这使得油气在储层中的释放变得困难,需要克服较大的毛细管阻力。

(2) 异常高压

由于孔隙比较小,油气在致密储层中成藏需要克服多相流体在毛细管中的阻力,因此储层内部常具有异常高压。针对致密油气藏储层的特点,钻探过程中钻井液需要满足保护储层的要求:①降低滤失量。钻井液的滤失量必须控制在较低水平,以减少对储层的污染。②优化钻井液体系。针对致密储层的特性,需要优选钻井液体系,如抑制性钻井液、有机硅防塌钻井液等,以保护储层免受损害。③加入储层保护添加剂。在钻井液中加入与储层配伍的复配暂堵剂、超低渗成膜剂等储层保护添加剂,以在钻井过程中形成保护层,减少钻井液对储层的伤害。④控制钻井液性能。钻进过程中要及时补充钻井液处理剂,保证钻井液性能稳定,避免性能大幅度波动对储层造成损害。同时,尽量降低钻井液中的有害固相含量,以减少固相对储层的伤害。

1.1 地质条件复杂性

1.1.1 地层压力与温度挑战

致密油气储层往往伴随着高温高压环境,这对钻井设备和钻井液提出了更高要求。高温可能导致钻井液稠化、工具仪器失效及次生故障等问题,而高压则增加了井控的难度和风险。如四川盆地的深地川科 1 井的井底最高温度达到 $224\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高压力达到 138 MPa ,这对钻井设备和钻井液的耐高温高压性能提出了极高要求。

1.1.2 复杂构造挑战

致密油气储层的地质构造复杂多变。如四川盆地内部地下构造变形强烈,沉积物堆积深厚,形成了多层压力系统。这种复杂构造给钻井过程中的井筒质量控制、防斜打直、井壁稳定等带来了巨大挑战。同时,超深层岩石赋存情况与常规地层不同,常规井壁稳定概念不再适用,需要发展新的井壁稳定技术。

1.2 工程技术难题

1.2.1 钻井效率与成本

致密油气储层深埋地下,钻探难度大、周期长、成本高。如何在保证钻探效率的同时降低成本,是致密油气钻探面临的重要挑战。这需要不断创新钻井技术,如采用先进的钻井设备和自动化控制系统,提高机械钻速和钻井效率;同时,通过优化钻井液配方和施工工艺,减少钻井过程中的阻力和摩擦,降低钻井成本。

1.2.2 井控安全

在致密油气钻探过程中,井控安全是至关重要的

环节。由于地层压力高、地层流体复杂多变,一旦发生井喷、井漏等事故,将对人员和设备造成严重威胁。因此,需要建立完善的井控体系,采用先进的井控技术和设备,确保钻探过程中的井控安全。

2 致密油气钻井液技术现状

2.1 水基钻井液技术

针对致密油气储层的特殊性质,研究人员致力于开发高性能的水基钻井液处理剂。这些处理剂不仅需要具备优良的抗高温、抗盐、抗污染等性能,还需要能够有效地抑制泥页岩水化膨胀,提高井壁稳定性,降低钻井液滤失量等^[20]。于盟等^[21]对辽河油田沈北地区沙河街组四段致密油储层物性进行了研究,针对储层硬脆性泥页岩纳米—微米级孔缝发育、现有钻井液抑制性不足等问题,优选了极压润滑剂、抑制剂等处理剂,研发得到水基钻井液体系。该体系封堵性能较好,应用于致密油产区进行试验,在水平井钻进过程中,无井下复杂事故发生,大幅度提高钻井效率。刘人铜^[22]针对鄂尔多斯盆地致密油水平井现有钻井液体系失水量偏大、泥饼虚厚、动塑比和黏切力偏低、岩屑滚动回收率较低且储层天然裂缝多、钻井液易漏失等问题,优选降滤失剂、防塌封堵剂、抑制剂、润滑剂等关键处理剂,研发新型环保水基钻井液体系,并在长庆油田致密油藏进行现场试验。试验结果表明,使用新型钻井液体系可使钻速提高 14%,现场井浆无毒易降解,并且钻井液体系抑制防塌性能优异,可大幅度提高水平井井壁稳定性,因此在该油气产区得到推广应用。张文哲等^[23]为了解决延长油田致密油藏延长组 7 段+6 段井壁不稳定,钻水平井过程中发生卡钻、坍塌掉块、裂缝性漏失、托压等复杂情况,优选降滤失剂 COP-FL、无荧光防塌剂 FT342、极压润滑剂 JM-1,研发了封堵性能优异的聚合醇水基钻井液体系,并将其应用于罗平 16 井。现场应用效果表明,钻井液动切力大于 6 Pa,携岩流变性能良好,API 滤失量小于 6 mL,失水造壁性优异,泥饼黏滞系数小于 0.14,对于长水平段润滑减阻性能好,机械钻速提高 30% 以上,大幅度缩短了钻井周期,降低了钻井成本,实现了延长油田优快钻完井的目标。

曹辉等^[24]为解决新疆三塘湖盆地致密油藏泥页岩水化膨胀等问题,研制钾盐聚合物钻井液。该体系可抗地层 120 ℃ 高温,一次滚动回收率达到 95%,抑制防塌性能好,在马朗凹陷山前构造区块 ML-X2H 井现场试验,创下了该区块机械钻速最高纪录,大幅度降低钻井成本,解决了长裸眼段井壁失稳、钻头泥包、井下漏失等技术难题,为安全高效钻井提供保障。崔月明

等^[25]针对吉林油田乾 246 区块致密油水平井机械钻速慢、钻井周期长、水平段摩阻扭矩大、井壁稳定性差、井漏频发等问题,开展长水平段水平井优快钻完井技术研究,采用低滤失强抑制聚合物钻井液体系,加入低荧光井眼稳定剂 HQ-1 提高钻井液防塌性能,使用 KPA 抑制剂增强钻井液抑制性能,PAC、酚醛树脂等降滤失剂使钻井液中压滤失量小于 3 mL,优选极压润滑剂,在井壁与钻具间形成油膜,提高润滑防卡性能。现场试验结果表明,钻井周期缩短 50%,钻井成本大幅度降低,平 2-14 井水平段长度延伸至 2 020 m,创下了吉林油田水平井水平段长的纪录。徐生江等^[26]针对准噶尔盆地致密油藏水平井井壁稳定难度大、地层易水化膨胀等问题,优选抑制剂、封堵剂、降失水剂等处理剂,研发了新型钾钙基钻井液体系。现场试验表明,吉 251-H 井水平段平均井径扩大率小于 5%,吉 32-H 井钻屑滚动回收率达到 99.2%,膨胀率为 6.9%,说明钾钙基钻井液体系抑制性能较强,应用效果良好。

M-I SWACO 公司的 ULTRADRIL 体系主要由聚合物包被剂、页岩抑制剂和降黏剂等处理剂构成^[27]。该体系具有较好的抑制性能、润滑性能和抗污染性能等。ULTRADRIL 体系钻井液一般可以进行多次重复利用,在很大程度上减少了钻井的费用。目前高度水敏性泥页岩地层和深水平钻井也应用此钻井液体系。Halliburton 公司的 HYDRO-GUADRTM 体系中通过添加多胺盐和铝酸盐配合物达到控制和改善体系的作用^[28]。Newpark 公司的 Evolution 体系是一种无黏土矿物的水基钻井液体系^[29]。该体系在北美密西西比河和加拿大等地区使用较为广泛,该无黏土水基钻井液体系内加入了聚合物增黏剂、流型调节剂和润滑剂,可显著地改善钻井液的润滑性能。该钻井液体系具有与油基钻井液相似的润滑性与钻进速度,因此使其能够充分应用在泥页岩地层或者碳酸盐岩高裂缝性地层。贝克休斯公司的 PERFORMAX 体系主要是由稳定剂、成膜剂、页岩抑制剂和聚合物包被剂组成^[30]。该钻井液体系中的硅铝酸盐能够包被在页岩表面,使泥页岩水化受到阻碍,进而使其抑制性能不断提升。该体系对页岩气井等水平井、大位移井比较适用,其对页岩微小孔隙的有效封堵能够不断使钻进速度得到提升。

目前,国内外致密油藏水平井钻井液体系以水基钻井液为主,该技术主要聚焦于高性能处理剂的研发,以应对致密油气储层的复杂地质条件,确保钻井作业的高效与稳定。但水基钻井液并不适用于水敏性强、盐敏性强和水锁损害严重的致密砂岩油藏。

2.2 油基/合成基钻井液技术

由于致密油地层的特殊性,水平井钻进过程中水平段较长,井壁失稳、摩阻大、携岩困难及地层污染问题突出。常规的水基钻井液在钻井过程中容易发生井壁坍塌、卡钻及井漏等复杂情况,难以满足致密油地层钻井工程的需要。油基/合成基钻井液因其优异的抗高温、抗盐、页岩抑制性和润滑性等特点,在致密油气开采中发挥着不可替代的作用^[31-35],能够更有效地保护储层,提高钻井效率,降低钻井风险。

随着致密油气开采难度的增加,油基钻井液的配方不断优化,以应对高温高压、高盐度等复杂地质条件。研究人员通过调整基础油类型、乳化剂种类和浓度、添加剂配方等,开发出具有优良性能的油基钻井液体系。江民盛等^[36]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,在 J1 井二开 3 300 m 长裸眼段钻进过程中保持井壁稳定,且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。陈浩东等^[37]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。张立新等^[38]研发了油水比为 4:1、密度为 2.20 kg/L 的高密度柴油基钻井液,其不仅乳化稳定性好,且抗污染能力强、高温高压滤失量低。在阳 101 H3-6 井长水平段的应用表明,其能够满足水平井钻井施工需求。李振智等^[39]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。M-I SWACO 公司用甲酸铯代替氯化钙作为油基钻井液内相盐水,研制了低密度固相油基钻井液,并在挪威油田试验成功。

环保型油基钻井液在保持优异性能的同时,降低了对环境的污染风险。如通过采用可生物降解的基础油和添加剂,减少废弃钻井液的处理难度和成本。目前,环保型基础油的研究主要集中在地沟油、棕榈油、菜籽油、大豆油等生物类柴油。蒋官澄等^[40]优选大豆油乙酯生物柴油作为基础油,配合改性有机土和环保型流型调节剂,研发出了环保性能优良的生物柴油基钻井液体系。张瑞等^[41]通过腐殖酸改性合成了一种棕榈油基钻井液降滤失剂,表现出良好的降滤失效果。生物毒性评价结果表明,棕榈油基钻井液对卤虫幼体

的半致死浓度为 35 520 mg/L,符合生物毒性要求。张鹏等^[42]以生物柴油为基液,通过研制相应的乳化剂、改性有机土和降滤失剂等主要处理剂,研制出了一种环保型生物柴油基钻井液体系,其生物毒性较低,半数有效浓度(EC50)值大于 25 000 mg/L,环保性能优良。在 Z-11 井三开井段使用该体系钻进,不同井深的现场钻井液性能稳定,可以达到较高的机械钻速。

合成基钻井液采用人工合成的有机化合物作为基础液,具有可调性强、性能优异等特点。近年来研究人员不断开发新型合成基材料,以降低合成基钻井液的成本并提高性能。如一些新型酯类、醚类等化合物被用作合成基材料,且展现出良好的应用前景。生物质合成基钻井液是以一些废弃油或天然物质作为主料制备合成基液,在生物质合成基础液添入处理剂。经过实验证明,生物质合成基钻井液其耐温性能与油基相似,可承受深井井筒中 150 ℃ 的高温。单海霞团队研发的生物质合成基础液 LAE-12 为中国主要应用的基液^[43]。周启成等^[44]在 LAE-12 基础上以自主研发的生物质合成树脂降滤失剂、抑制剂和润滑剂为核心部分,构建了抗高温高密度生物质钻井液体系,其抗温 200 ℃,抗 1.0% CaCl₂ 污染,岩屑滚动回收率达 94.3%,润滑系数 ≤ 0.128 ,生物毒性 EC50 为 89 230 mg/L。张式等^[45]以生物质合成基液 LAE-12 为油相,制备了一种密度为 1.21~2.50 g/cm³、抗温为 150 ℃ 的生物质合成基钻井液。

生物酯基钻井液是较早成功应用于现场的一种合成基钻井液,主要是用可生物降解的植物油代替矿物油,在保持油基钻井液优点的同时,可提高其环保性。Said 等^[46]使用棕榈油脂肪酸甲酯作为基础液制备了一种适用于致密油藏环境敏感区域的环保型钻井液。Arain 等^[47]使用蓖麻生物柴油作基础油研发了一种生物酯基钻井液,其塑性黏度和屈服点比柴油基钻井液高 10% 和 25%。Habib 等^[48]以癸酸 2-乙基己酯/月桂酸酯为基液,制备得到的钻井液在 250 ℃ 老化 16 h 后表现出良好的流变性能,并且具有优异的高温高压抗滤失性能^[49]。菜籽油也被用于配制生物型酯基钻井液,配方中的盐水越少,菜籽油钻井液的性能越好^[50]。

醚基钻井液的基础液是通过醇的缩合和氧化而制得的,醇具有与酯基相似的物理性质,不含任何芳香烃物质。实际应用中基于乙醚的钻井液比基于单醚的钻井液更容易发生微生物降解,相比较单醚基钻井液更容易产生微生物降解^[51],环保性能更好。单海霞等^[52]研发了一种新型生物质醇醚基钻井液,其制备使用的十二烷基丁醚、十四烷基丁醚、十六烷基丁醚和十八烷基丁醚均属于植物醇烷基醚类,是生物质醇醚类有机化

合物,且制备原料来自植物油提取的脂肪醇。Dardir 等^[53]评估了 2 种不同的聚醚在钻井液中作为合成醚基钻井液基础液的潜在用途。将甘油或三乙醇胺缩合反应产生的聚甘油或聚三乙醇胺用作醚基钻井液配方的基础液,其具有良好的生物降解性和流变性。单海霞等^[54]研发了一种由生物质月桂醇烷基醚为基础液的醚基钻井液,其具有较好的抑制性、低黏度、强抗温性、水解稳定性以及可生物降解性。

油基/合成基钻井液技术在致密油气开采中展现出了显著的优势,但仍面临一些技术挑战。如油基钻井液的成本相对较高,且处理废弃钻井液时存在一定的环保风险;合成基钻井液的基础材料种类有限,且部分材料成本较高。因此,需通过不断优化配方、开发新型材料和技术创新等手段,使油基/合成基钻井液在致密油气勘探开发领域发挥更加重要的作用。

2.3 钻井液防漏堵漏技术

致密油气井漏的特殊性主要体现在地质特征复杂,堵漏材料选择困难。致密油气储层的地质特征通常较为复杂,包括渗透率低、孔隙度小、地层压力大等。这些特征使得致密油气井在钻井过程中更容易发生井漏,且井漏的通道可能更加微小和难以封堵。致密油气储层的特殊地质特征对堵漏材料的选择提出了更高的要求^[55-59]。传统的堵漏材料可能无法有效封堵微小裂缝和孔隙,因此需要研发更适合致密油气储层的堵漏材料。

聚合物凝胶类防漏堵漏材料主要是借助化学交联反应或依靠分子间的相互作用力形成具有三维网络结构的高强度凝胶,对复杂地层钻井液漏失通道进行封堵。Bai 等^[60]研发了一种基于疏水缔合和离子键作用的双网络自愈聚合物凝胶堵漏材料,可有效提高对漏失地层的承压封堵能力。Jia 等^[61]制备了用于高温储层暂堵的环保型和强度增强型纳米硅基复合凝胶,其具有良好的力学和弹性性能,有利于增强封堵效果。Lécolier 等^[62]基于研发的交联聚合物堵漏剂,结合纤维、刚性颗粒等形成了固相颗粒强化凝胶段塞堵漏技术,在美国路易斯安那、伊朗北部的恶性漏失井取得了良好的现场应用效果。白英睿等^[63]针对常规化学凝胶堵漏剂抗高温和力学性能差的问题,研发了一种杂化交联复合凝胶堵漏材料,在 140 ℃ 条件下老化后仍可保持较高的储能模量和损耗模量、良好的抗拉伸和抗压缩能力,可以满足高渗透性和裂缝性漏失地层的承压堵漏需求。

可固化类堵漏材料具有承压能力高且固化性能好的优点,在循环钻进过程中,封堵层不会被钻井液液柱压力破坏,能够大幅度减少堵漏施工次数。目前已经

开发出了如环氧树脂类、聚氨酯类等多种可固化类防漏堵漏材料,这些材料具有优异的物理封堵和固化胶结能力,可有效封隔地层漏失通道,提高地层承压能力。Halliburton 公司研发了“一袋式”堵漏材料封堵漏失通道,可以控制恶性井漏,承压封堵能力高达 20 MPa,可封堵宽度为 3~25 mm 的裂缝,并且具备良好的抗温性能^[64]。郭钢等^[65]通过改性环氧树脂形成了液态堵漏树脂体系,该体系具有低黏、易注入、固化时间可控、耐压强度高等特点,在长庆油田镇 A 井及华 B 井套管堵漏作业应用效果良好,为油田稳产增产提供一条新的技术途径。张金平等^[66]为提高桥塞堵漏材料之间的固结强度和堵漏材料在地层漏失通道的滞留能力,以非离子型环氧树脂和有机胺类热固结剂作为热固性树脂堵漏基础工作液,复配桥塞堵漏材料和悬浮增黏材料,建立了热固性树脂堵漏浆体系,在陇东地区致密油和苏里格地区致密气的两口水平井堵漏过程中,表现出良好的堵漏效果,一次堵漏成功率高。

复合堵漏材料可充分发挥不同类型堵漏材料的优势,达到良好的堵漏效果。目前使用的主要复合堵漏方式有桥塞+可固化、桥塞+高失水、凝胶+水泥等。Li 等^[67]采用连续乳液聚合法制备了丁苯乙烯树脂/纳米 SiO₂ 复合堵漏材料,分析了 SBR/SiO₂ 的分散和封堵机理。该研究为解决钻井过程中油基钻井液造成的井筒失稳和储层损害提供了一条途径,通过添加堵漏剂可在页岩地层中形成致密滤饼,减少流体漏失。针对莺琼盆地高温、高压、窄安全密度窗口(小于 0.10 g/cm³)地层,韩成等^[68]研发了密度为 2.30 g/cm³ 的高密度“桥塞+高失水”复合堵漏技术,将地层安全密度窗口提高至 0.16 g/cm³,使钻井效率大幅提高。刘文堂等^[69]合成了微米—纳米尺度可变形球形凝胶,并与云母片、纤维等材料复合得到了与油基钻井液具有较好匹配性的复合堵漏材料,在涪陵地区页岩气井中得到成功应用,取得了较好的堵漏效果。王广财等^[70]通过引入不同粒径的刚性堵漏材料(核桃壳、棉籽壳、云母片)和可变形颗粒(锯末)实现封堵层紧密堆积和压实,提高地层承压能力,形成了具有防漏和堵漏双重功能的堵漏体系,在新疆火焰山腹地进行了 5 口井现场试验,比同区块平均漏失量降低 74.3%,堵漏损失时间节约 93.5%,钻井周期缩短 57.8%。

钻井液防漏堵漏技术研究取得了显著进展,但面对复杂多变的地层条件,传统堵漏剂已难以满足需求,新型堵漏材料如聚合物凝胶类堵漏材料、可固化堵漏材料等不断涌现,这些材料在适应性、抗温性能、承压能力和驻留能力等方面表现优异^[71]。同时,复合材料的研究也取得了重要突破,如复合型无机-有机材料,

提高了堵漏材料的承压封堵强度。复合堵漏材料可充分发挥不同类型材料的优势,达到良好的堵漏效果。目前,研究还关注于提高堵漏材料的环保性能、降低成本以及减少对地层的损害。总体而言,致密油气钻井液防漏堵漏技术研究正不断向更高效、更环保的方向发展。

3 致密油气钻井液技术存在问题

3.1 水基钻井液技术存在问题

3.1.1 井眼清洗难

致密油气藏的地质条件复杂,钻井过程中产生的钻屑和地层物质容易在井眼内积聚,导致井眼清洗困难。这要求钻井液必须具有良好的悬浮和携带能力,以确保钻屑和地层物质能够及时排出井眼。

3.1.2 井壁稳定性差

由于致密油气藏的岩石密度高、渗透率低,井壁容易失稳,发生坍塌或缩径^[72-73]。钻井液需要具备优良的井壁稳定性能,通过形成薄而韧的泥饼来支撑井壁,减少井壁失稳的风险。

3.1.3 流变性不稳定

在低温或高压环境下,钻井液的流变性可能会发生变化,影响其携带和悬浮能力^[74]。因此,需要研发能够适应不同环境条件、保持流变性稳定的水基钻井液。

3.2 油基/合成基钻井液技术存在问题

3.2.1 乳液稳定性问题

油基钻井液的乳液稳定性是确保其性能的关键。在钻井过程中,由于地层水侵入、钻屑进入钻井液等因素,可能导致乳化剂和润湿剂过量消耗,从而影响乳液的稳定性。乳液稳定性变差会导致钻井液性能波动,影响钻井作业的安全和效率。

3.2.2 封堵性问题

对于致密油气藏这类层理和微裂缝发育的硬脆性和破碎性地层,油基钻井液的封堵性至关重要。如果钻井液的封堵性不足,钻井液中的水相可能会侵入泥页岩等地层,导致井壁不稳定,增加钻井风险。

3.2.3 废弃钻井液处理难题

油基/合成基钻井液在钻井作业结束后会产生大量的废弃钻井液。这些废弃钻井液中含有大量的基础油、添加剂和固相颗粒等有害物质,如果不进行妥善处理,将对环境造成严重污染。

3.3 钻井液防漏堵漏技术存在问题

3.3.1 地层压力与渗透性

致密油气藏往往位于地质条件复杂的地层中,地层压力变化大,渗透性各异。这要求钻井液防漏堵漏技术必须能够应对不同地层压力和渗透性条件下的防漏堵漏需求^[75]。

3.3.2 漏层位置预测与确定难度大

准确预测和确定漏层位置是有效实施堵漏措施的前提。然而,在致密油气钻井中,由于地层条件复杂、钻井信息有限,漏层位置的预测与确定往往依赖于经验判断和综合分析方法,其准确性难以保证。传统的防漏堵漏技术可能无法有效应对这些复杂地质条件下的漏失问题。

4 致密油气钻井液技术发展展望

4.1 水基钻井液技术发展展望

4.1.1 提高井眼清洗能力

研发具有更强悬浮和携带能力的水基钻井液,通过优化钻井液配方和添加剂,提高其对钻屑和地层物质的携带和排出能力。引入先进的井眼清洗技术,如脉冲清洗等,辅助提高井眼清洗效率。

4.1.2 增强井壁稳定性

研发具有更强抑制性的水基钻井液,通过形成薄而韧的泥饼来支撑井壁,减少井壁失稳的风险。结合地质条件,优化钻井液配方,使其更适应致密油气藏的特殊地质环境。

4.1.3 保持流变性稳定

研发能够适应不同环境条件、保持流变性稳定的水基钻井液,通过添加流变性调节剂等手段,确保钻井液在不同温度和压力下的性能稳定。

4.2 油基/合成基钻井液技术发展展望

4.2.1 提高乳液稳定性

研发具有更强乳化稳定性和润湿性的油基/合成基钻井液,通过优化乳化剂和润湿剂的配方和用量,确保乳液稳定性。引入先进的乳液稳定性监测技术,实时监测乳液稳定性变化,及时调整钻井液配方。

4.2.2 增强封堵性能

研发具有更强封堵性的油基/合成基钻井液,通过添加封堵剂等手段,提高其对层理和微裂缝发育地层的封堵能力。结合致密油气地层特点,优化钻井液配方和封堵剂种类及用量,确保封堵效果。

4.2.3 解决废弃钻井液处理问题

研发环保型油基/合成基钻井液,通过添加可生物降解的添加剂等手段,降低废弃钻井液对环境的污染。引入先进的废弃钻井液处理技术,如生物处理、化学处理等,实现废弃钻井液的资源化利用或无害化处理。

4.3 钻井液防漏堵漏技术发展展望

4.3.1 适应复杂地层条件

研发能够适应不同地层压力和渗透性条件的防漏堵漏技术,通过优化堵漏材料配方和施工工艺等手段,提高防漏堵漏效果。

4.3.2 提高漏层位置预测准确性

引入先进的随钻监测技术,如随钻声波测井、随钻电阻率测井等,实时监测地层压力和渗透性变化,提高漏层位置预测准确性。结合地质勘探数据和钻井信息,运用大数据分析等先进手段,提高漏层位置预测的科学性和准确性。

4.3.3 研发新型堵漏材料和技术

研发具有更强封堵性和适应性的新型堵漏材料,如纳米堵漏材料、智能堵漏材料等,提高堵漏效果。引入先进的堵漏技术,如高压注浆堵漏、化学堵漏等,丰富堵漏手段,提高堵漏成功率。

5 结 论

(1) 目前国内外致密油藏钻井液体系以水基钻井液为主,但水基钻井液并不适用于水敏性强、盐敏性强和水锁损害严重的致密砂岩油藏。油基/合成基钻井液因其优异的抗高温、抗盐、页岩抑制性和润滑性等特点,在致密油气开采中发挥着重要作用,能够更有效地保护储层,提高钻井效率,降低钻井风险,但其成本相对较高,且处理废弃钻井液时存在一定的环保风险。致密油藏钻井液防漏堵漏技术的研究现状呈现出技术多元化、材料创新化和智能化发展的趋势。新型堵漏材料的不断涌现使其在适应性、抗温性能、承压能力和驻留能力等方面实现了大幅提升,但是目前准确预测和确定漏层位置难度较大,降低了堵漏成功率。

(2) 致密油气钻井液技术的发展将更加注重环保性、高效性和智能化。未来水基钻井液技术应注重优化悬浮和携带能力,增强井壁稳定性,保持流变性稳定。未来油基/合成基钻井液技术应注重提高乳液稳定性和润湿性,增强封堵性能,解决废弃钻井液的资源化利用或无害化处理问题。未来钻井液防漏堵漏技术应注重研发能够适应不同地层压力和渗透性条件的新型防漏堵漏材料,提高漏层位置预测准确性。

(3) 针对致密油气水基钻井液、油基/合成基钻井液以及防漏堵漏技术存在的问题,未来应重点加强技术研发和创新,提高钻井液性能和防漏堵漏效果,同时注重环保和成本控制,推动致密油气勘探开发技术的持续进步。

参 考 文 献

[1] 王文庸,唐大民. 美国致密油勘探开发现状及对我国的启示[J]. 化工设计通讯,2019,45(5):240.
WANG Wenyong,TANG Damin. Current status of exploration and development of tight oil in the United States and its enlightenment to China[J]. Chemical Engineering Design Communications,2019,45(5):240.

[2] 景东升,丁锋,袁际华. 美国致密油勘探开发现状、经验及启示[J]. 国土资源情报,2012(1):18-19.
JING Dongsheng,DING Feng,YUAN Jihua. Current situation, experience and inspiration of tight oil exploration and development in the United States[J]. Land and Resources Information, 2012(1):18-19.

[3] 林森虎,邹才能,袁选俊,等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏,2011,23(4):25-30.
LIN Senhu,ZOU Caineng,YUAN Xuanjun,et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs,2011,23(4):25-30.

[4] 陶士振,胡素云,王建,等. 中国陆相致密油形成条件、富集规律与资源潜力[J]. 石油学报,2023,44(8):1222-1239.
TAO Shizhen,HU Suyun,WANG Jian,et al. Forming conditions, enrichment regularities and resource potentials of continental tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(8):1222-1239.

[5] 慎迪. 中美致密油勘探开发对比与启示[J]. 云南化工,2018,45(3):57.
SHEN Di. Comparison and inspiration of tight oil exploration and development between China and the United States[J]. Yunnan Chemical Technology,2018,45(3):57.

[6] 李登华,刘卓亚,张国生,等. 中美致密油成藏条件、分布特征和开发现状对比与启示[J]. 天然气地球科学,2017,28(7):1126-1138.
LI Denghua,LIU Zhuoya,ZHANG Guosheng,et al. Comparison and revelation of tight oil accumulation conditions, distribution characteristics and development status between China and U. S. [J]. Natural Gas Geoscience,2017,28(7):1126-1138.

[7] 侯杰,李浩东,于兴东,等. 松辽盆地陆相致密油井壁失稳机理及钻井液对策[J]. 钻井液与完井液,2021,38(5):598-604.
HOU Jie,LI Haodong,YU Xingdong,et al. Mechanisms of borehole wall instability of terrestrial tight oil wells in Songliao Basin and drilling fluid countermeasures[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2021,38(5):598-604.

[8] KHODJA M,DEBIH H,LEBTAHI H,et al. New HTHP fluid loss control agent for oil-based drilling fluid from pharmaceutical waste[J]. Cleaner Engineering and Technology,2022,8:100476.

[9] MINAKOV A V,LYSAKOVA E I,SKOROBOGATOVA A D, et al. Experimental study of the effect of crystalline aluminum oxide nanofibers on the properties of oil-based drilling fluids[J]. Journal of Molecular Liquids,2023,388:122676.

[10] 梁旭. 大庆油田致密油钻井技术难点与关键技术优化[J]. 石油工业技术监督,2024,40(7):51-55.
LIANG Xu. Technical difficulties and key technology optimization of tight oil drilling in Daqing oilfield[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry,2024,40(7):51-55.

[11] 王博. 致密油水平井井壁稳定的钻井液技术研究与应用[J]. 西部探矿工程,2021,33(8):83-85.
WANG Bo. Research and application of drilling fluid technology for wall stabilization in tight oil horizontal wells[J]. West-China Exploration Engineering,2021,33(8):83-85.

[12] 张文哲,李伟,王波,等. 延长油田水平井高性能水基钻井液技术研究与应用[J]. 非常规油气,2019,6(5):85-90.
ZHANG Wenzhe,LI Wei,WANG Bo,et al. Research and application of high performance water-based drilling fluid technology

for horizontal wells in Yanchang oilfield[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2019, 6(5): 85-90.

[13] 邹灵战, 邹灵雄, 蒋雪梅, 等. 玛湖砂砾岩致密油水平井钻井技术[J]. *新疆石油天然气*, 2018, 14(3): 19-24.

ZOU Lingzhan, ZOU Lingxiong, JIANG Xuemei, et al. The horizontal drilling technology in tight sandy conglomerate reservoirs in Mahu sag[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2018, 14(3): 19-24.

[14] 何雷, 张硕, 何天桦, 等. 吉木萨尔页岩油油基钻井液防漏堵漏技术研究与应用[J]. *石化技术*, 2022, 29(5): 63-65.

HE Lei, ZHANG Shuo, HE Tianhua, et al. Research and application of oil base drilling fluid leak prevention and plugging technology in Jimsar shale oil[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2022, 29(5): 63-65.

[15] 孙欢. 致密油洛河组 $\Phi 311.1$ mm 井眼堵漏技术研究与应用[J]. *石油化工应用*, 2022, 41(4): 26-29.

SUN Huan. Research and application of plugging technology in well $\Phi 311.1$ mm of tight oil Luohe Formation[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2022, 41(4): 26-29.

[16] 史祥贵. 钻井工程中井漏的预防及堵漏技术分析[J]. *西部探矿工程*, 2021, 33(6): 57-59.

SHI Xianggui. Analysis of well leakage prevention and plugging technology in drilling engineering[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(6): 57-59.

[17] 王广财, 雍富华, 朱夫立, 等. 致密油藏长段水平井防漏堵漏技术[J]. *油田化学*, 2018, 35(4): 587-591.

WANG Guangcai, YONG Fuhua, ZHU Fuli, et al. Leakage prevention and plugging technology of long section horizontal well in tight oil reservoirs[J]. *Oilfield Chemistry*, 2018, 35(4): 587-591.

[18] 路宗羽, 徐生江, 叶成, 等. 准噶尔南缘膏泥岩地层高密度防漏型油基钻井液研究[J]. *油田化学*, 2018, 35(1): 1-7.

LU Zongyu, XU Shengjiang, YE Cheng, et al. High density and leak proof oil based drilling fluids for mudstone stratum in southern Junggar[J]. *Oilfield Chemistry*, 2018, 35(1): 1-7.

[19] 覃毅, 高飞, 刘振通, 等. 古潜山致密砂岩水平井钻完井技术[J]. *非常规油气*, 2015, 2(6): 71-77.

QIN Yi, GAO Fei, LIU Zhentong, et al. Drilling and completion technology for buried-hill tight sandstone horizontal wells[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(6): 71-77.

[20] 孙金声, 王韧, 龙一夫. 我国钻井液技术难题、新进展及发展建议[J]. *钻井液与完井液*, 2024, 41(1): 1-30.

SUN Jinsheng, WANG Ren, LONG Yifu. Challenges, developments, and suggestions for drilling fluid technology in China[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2024, 41(1): 1-30.

[21] 于盟, 王健, 王斐. 适用于辽河致密油地层的高性能钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(5): 578-584.

YU Meng, WANG Jian, WANG Fei. High performance drilling fluid technology for tight oil formation drilling in Liaohe oilfield[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(5): 578-584.

[22] 刘人铜. 致密油水平井环保钻井液体系研究及应用[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.

LIU Rentong. Research and application of environmental protection drilling fluid system in tight oil horizontal wells[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.

[23] 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.

[24] 曹辉, 陈磊, 陈恩让. 三塘湖盆地致密油水平井钻井液技术研究与应用[J]. *西部探矿工程*, 2021, 33(9): 86-88.

CAO Hui, CHEN Lei, CHEN Enrang. Research and application of drilling fluid technology for tight oil horizontal wells in Santanghu Basin[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(9): 86-88.

[25] 崔月明, 史海民, 张清. 吉林油田致密油水平井优快钻井完井技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(2): 9-13.

CUI Yueming, SHI Haimin, ZHANG Qing. Optimized drilling and completion technology for horizontal wells in tight oil reservoirs in the Jilin oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(2): 9-13.

[26] 徐生江, 聂明虎, 戎克生, 等. 准噶尔盆地东部致密油水平井钻井液技术研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(29): 181-184.

XU Shengjiang, NIE Minghu, RONG Kesheng, et al. Drilling fluid for horizontal well of tight oil reservoir in eastern Junggar Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(29): 181-184.

[27] ZHANG Quan, MAO Jincheng, LIAO Yuemin, et al. Salt resistance study and molecular dynamics simulation of hydrophobic-association polymer with internal salt structure[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 367: 120520.

[28] KERKHOFF E, ISMAIL A, BUTCHER J, et al. A unique high temperature, low rheology divalent brine-based reservoir drilling fluid improved horizontal drilling performance in hard sandstone formation[R]. SPE 211541, 2022.

[29] PATEL A, STAMATAKIS E, YOUNG S, et al. Advances in inhibitive water-based drilling fluids-can they replace oil-based muds? [R]. SPE 106476, 2007.

[30] 许博, 闫丽丽, 王建华. 国内外页岩气水基钻井液技术新进展[J]. *应用化工*, 2016, 45(10): 1974-1981.

XU Bo, YAN Lili, WANG Jianhua. Technical progress of high performance water-based drilling fluids for shale gas in China and abroad[J]. *Applied Chemical Industry*, 2016, 45(10): 1974-1981.

[31] 王军波, 孙晓静, 高丹. 油基钻井液堵漏体系在油田开发中的应用[J]. *化工管理*, 2024(16): 163-165.

WANG Junbo, SUN Xiaojing, GAO Dan. Application of oil-based drilling fluid sealing system in oilfield development[J]. *Chemical Engineering Management*, 2024(16): 163-165.

[32] 叶成, 徐生江, 鲁铁梅, 等. 基于低凝固点柴油的高密度油基钻井液体系构建及性能[J]. *油田化学*, 2022, 39(1): 5-10.

YE Cheng, XU Shengjiang, LU Tiemei, et al. Construction and performance of high density and low freezing point oil-based drilling fluid[J]. *Oilfield Chemistry*, 2022, 39(1): 5-10.

[33] 李俊, 王宗宝, 韩晓琳, 等. 合成基钻井液在油田钻井的应用进展[J]. *山西化工*, 2024, 44(4): 36-41.

LI Jun, WANG Zongbao, HAN Xiaolin, et al. Application progress of synthetic-based drilling fluid in oilfield drilling[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2024, 44(4): 36-41.

[34] 郭东红, 汤柏松, 张博, 等. 适用于渤海大斜度探井的环保型合成

基钻井液体系研制与性能评价[J]. 化学工程与装备, 2024(3): 25-28.

GUO Donghong, TANG Baisong, ZHANG Bo, et al. Development and performance evaluation of environmentally friendly synthetic-based drilling fluid system for large inclination wells in Bohai Sea [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2024(3): 25-28.

[35] 彭三兵, 李斌, 韩东东, 等. BIODRILL S 合成基钻井液在垦利区块首次应用[J]. 钻井液与完井液, 2024, 41(1): 60-67.

PENG Sanbing, LI Bin, HAN Dongdong, et al. First application of the synthetic-based drilling fluid in Block Kenli of Bohai oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2024, 41(1): 60-67.

[36] 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.

[37] 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.

[38] 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.

[39] 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 ap-plication of a clay-free oil-based drilling fluid [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(1): 33-38.

[40] 蒋官澄, 史赫, 贺垠博. 生物柴油基恒流变钻井液体系[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 173-182.

JIANG Guancheng, SHI He, HE Yinbo. The biodiesel-based flat-rheology drilling fluid system[J]. Petroleum Exploration and De-velopment, 2022, 49(1): 173-182.

[41] 张瑞, 徐加放, 顾甜甜, 等. 棕榈油基钻井液降滤失剂的研制[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(6): 29-34.

ZHANG Rui, XU Jiafang, GU Tianian, et al. Development of a filter loss reducer for palm oil base drilling fluid[J]. Drilling Flu-id & Completion Fluid, 2017, 34(6): 29-34.

[42] 张鹏, 孙毅平, 丁建朋, 等. 环保型生物柴油基钻井液体系研究及应 用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2023, 38(4): 119-126.

ZHANG Peng, SUN Yiping, DING Jianpeng, et al. Research and application of environment-friendly biodiesel-based drilling fluid system[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2023, 38(4): 119-126.

[43] 单海霞, 王中华, 何焕杰, 等. 生物质合成基液 LAE-12 的合成及性能研究[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(2): 1-4.

SHAN Haixia, WANG Zhonghua, HE Huanjie, et al. Synthesis and performance evaluation of bio-mass synthetic base fluid LAE-12[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(2): 1-4.

[44] 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. Re-search and Application of a high-temperature resistant and high-density biomass drilling fluid system [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 78-84.

[45] 张弋, 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.

[46] SAID M M, EL-SAYED A A H. The use of palm oil fatty acid methyl ester as a base fluid for a flat rheology high-performance drilling fluid[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 166: 969-983.

[47] ARAIN A H, RIDHA S, ALI I. Development and performance evaluation of castor oil based biodiesel as an eco-friendly ester-based drilling fluid[J]. Petroleum Science and Technology, 2023, 41(19): 1831-1851.

[48] HABIB N S H A, YUNUS R, RASHID U, et al. Transesterifica-tion reaction for synthesis of palm-based ethylhexyl ester and formulation as base oil for synthetic drilling fluid[J]. Journal of Oleo Science, 2014, 63(5): 497-506.

[49] JASSIM L, YUNUS R, RASHID U, et al. Synthesis and optimi-zation of 2-ethylhexyl ester as base oil for drilling fluid formula-tion[J]. Chemical Engineering Communications, 2016, 203(4): 463-470.

[50] APALEKE A S, AL-MAJED A, HOSSAIN M E. State of the art and future trend of drilling fluid; an experimental study[R]. SPE 153676, 2012.

[51] 张汝权. 合成基钻井液技术应用浅析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33(11): 72.

ZHANG Ruquan. An analysis of the application of synthetic-based drilling fluid technology[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 33(11): 72.

[52] 单海霞, 王中华, 周亚贤, 等. 一种生物质醇醚基钻井液及其制备方法: 201811003958. 0[P]. 2022-03-15.

SHAN Haixia, WANG Zhonghua, ZHOU Yaxian, et al. Biomass alcohol ether base drilling fluid and preparation method thereof; 201811003958. 0[P]. 2022-03-15.

[53] DARDIR M M, ABDOU M I. Ether-based muds show promise for replacing some oil-based muds [J]. Petroleum Science and Technology, 2013, 31(22): 2335-2347.

[54] 单海霞, 何焕杰, 王中华, 等. 一种月桂醇烷基醚及其制备方法和钻井液: 中国, 107304161A[P]. 2017-10-31.

SHAN Haixia, HE Huanjie, WANG Zhonghua, et al. Laurinol alkyl ether, as well as preparation method and drilling fluid thereof; CN, 107304161A[P]. 2017-10-31.

[55] 孙金声, 白英睿, 程荣超, 等. 裂缝性恶性井漏地层堵漏技术研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 630-638.

SUN Jinsheng, BAI Yingrui, CHENG Rongchao, et al. Research progress and prospect of plugging technologies for fractured for-mation with severe lost circulation [J]. Petroleum Exploration

and Development,2021,48(3):630-638.

[56] XU Chengyuan,ZHANG Honglin,KANG Yili,et al. Physical plugging of lost circulation fractures at microscopic level[J]. Fuel,2022,317:123477.

[57] AMANULLAH M. Characteristics, behavior and performance of ARC Plug-A date seed-based sized particulate LCM[R]. SPE 182840,2016.

[58] 王书琪,唐继平,张斌,等. 塔里木山前构造带高密度钻井液堵漏技术[J]. 钻井液与完井液,2006,23(1):76-77.

WANG Shuqi,TANG Jiping,ZHANG Bin,et al. Study on techniques of non-damaging solidification of waste WBM in Tarim oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2006,23(1):76-77.

[59] 张沛元.“逐级渐进法”桥接堵漏工艺[J]. 钻井液与完井液,2010,27(2):67-69.

ZHANG Peiyuan. Progressive bridge plugging technology for lost circulation[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2010,27(2):67-69.

[60] BAI Yingrui,ZHANG Qitao,SUN Jinsheng,et al. Double network self-healing hydrogel based on hydrophobic association and ionic bond for formation plugging[J]. Petroleum Science,2022,19(5):2150-2164.

[61] JIA Hu,YANG Xinyu. Environmental and strength-enhanced nanosilica-based composite gel for well temporary plugging in high-temperature reservoirs[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering,2019,14(1):e2270.

[62] LÉCOLIER E,HERZHAFT B,ROUSSEAU L,et al. Development of a nanocomposite gel for lost circulation treatment[R]. SPE 94686,2005.

[63] 白英睿,张启涛,孙金声,等. 杂化交联复合凝胶堵漏剂的制备及其性能评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(4):176-184.

BAI Yingrui,ZHANG Qitao,SUN Jinsheng,et al. Synthesis and performance evaluation of a hybrid cross-linked plugging agent [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2021,45(4):176-184.

[64] 肖京男. Halliburton 公司 Sentinel CemTM 堵漏水泥浆[J]. 石油钻探技术,2018,46(3):33.

XIAO Jingnan. Halliburton's Sentinel CemTM plugging cement slurry[J]. Petroleum Drilling Techniques,2018,46(3):33.

[65] 郭钢,李琼玮,杨立华,等. 长庆油田套管堵漏用有机树脂研发及应用[J]. 钻井液与完井液,2019,36(5):659-662.

GUO Gang,LI Qiongwei,YANG Lihua,et al. Development and application of organic resin for controlling loss of borehole fluids in cased hole[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2019,36(5):659-662.

[66] 张金平,朱明明,孙欢,等. 热固性树脂堵漏浆体系在长庆油田的应用[J]. 钻采工艺,2023,46(5):146-150.

ZHANG Jinping,ZHU Mingming,SUN Huan,et al. Application of thermosetting resin plugging fluid in oil and gas wells[J]. Drilling & Production Technology,2023,46(5):146-150.

[67] LI Wuquan,JIANG Guancheng,NI Xiaoxiao,et al. Styrene butadiene resin/nano-SiO₂ composite as a water-and-oil-dispersible plugging agent for oil-based drilling fluid[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2020,606:125245.

[68] 韩成,罗鸣,杨玉豪,等. 莺琼盆地高温高压窄安全密度窗口钻井关键技术[J]. 石油钻采工艺,2019,41(5):568-572.

HAN Cheng,LUO Ming,YANG Yuhao,et al. Key drilling technologies for HTHP wells with narrow safety density window in the Yingqiong Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology,2019,41(5):568-572.

[69] 刘文堂,郭建华,李午辰,等. 球状凝胶复合封堵剂的研制与应用[J]. 石油钻探技术,2016,44(2):34-39.

LIU Wentang,GUO Jianhua,LI Wuchen,et al. The development and application of a microsphere gel composite plugging agents [J]. Petroleum Drilling Techniques,2016,44(2):34-39.

[70] 王广财,王丰年,张军,等. 凝胶复合防漏堵漏技术在火焰山腹地表层的应用[J]. 钻井液与完井液,2017,34(3):49-53.

WANG Guangcai,WANG Fengnian,ZHANG Jun,et al. Application of a composite gel lost circulation material in the top section of wells drilled in the central region of the Mountain of Fire[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2017,34(3):49-53.

[71] 刘岩生,张佳伟,黄洪春. 中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向[J]. 石油学报,2024,45(1):312-324.

LIU Yansheng,ZHANG Jiawei,HUANG Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(1):312-324.

[72] 杨斌,许成元,张浩,等. 深部破碎地层井壁失稳机理研究进展与攻关对策[J]. 石油学报,2024,45(5):875-888.

YANG Bin,XU Chengyuan,ZHANG Hao,et al. Research progress on mechanism of wellbore instability in deep fractured formations and related countermeasures[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(5):875-888.

[73] 梁兴,单长安,张磊,等. 四川盆地渝西地区大安深层页岩气田的勘探发现及成藏条件[J]. 石油学报,2024,45(3):477-499.

LIANG Xing,SHAN Chang'an,ZHANG Lei,et al. Exploration discovery and accumulation conditions of Da'an deep shale gas field in western Chongqing,Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(3):477-499.

[74] 谢彬强,陶怀志,张俊,等. 梳型温敏聚合物对无固相水基钻井液高温流变性的调控[J]. 石油学报,2024,45(2):427-436.

XIE Binqiang,TAO Huaizhi,ZHANG Jun,et al. Regulation of comb-type thermo-sensitive polymer on high-temperature rheological properties of solid-free water-based drilling fluid[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(2):427-436.

[75] 王清华,徐振平,张荣虎,等. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报,2024,45(1):15-32.

WANG Qinghua,XU Zhenping,ZHANG Ronghu,et al. New fields,new types of hydrocarbon explorations and their resource potentials in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(1):15-32.