

环保钻井液研究现状及发展趋势

罗 元

中石化西南石油工程有限公司钻井工程研究院 四川 德阳 618000

摘 要：众所周知，在石油钻井工程中，钻井液中含有的大量化学物质，如重金属、有机物和难降解添加剂等，在排放后会对土壤、水体和大气环境造成严重污染，进而威胁生态平衡和人类健康。基于此，本文对环保钻井液的研究现状进行了全面综述，分析了水基、油基和合成基等不同类型环保钻井液的特点及应用情况，探讨了当前研究中面临的挑战，如处理剂性能提升、成本控制和环境影响评估等问题。同时，结合行业发展需求，预测了环保钻井液未来在高性能化、生物可降解、智能化以及标准化等方面的发展趋势，旨在为环保钻井液技术的进一步研发和应用提供参考。

关键词：环保钻井液；研究现状；发展趋势

引言：随着全球油气资源勘探开发活动的不断深入，钻井作业对环境的影响日益受到关注。钻井液作为钻井工程的重要组成部分，在钻井过程中发挥着携带岩屑、冷却钻头、稳定井壁和平衡地层压力等关键作用。但同时因钻井液中含有的一些化学物质对环境造成了一定程度上的污染。在此背景下，环保钻井液的研发与应用成为石油工业可持续发展的必然选择。环保钻井液要求在满足钻井工程性能需求的同时，尽可能减少对环境的负面影响，具有生物降解性好、毒性低、对地层伤害小等特点。因此，针对环保钻井液的研究现状与发展趋势进行深入研究是非常有必要的。

1 环保钻井液研究现状

1.1 水基环保钻井液

水基钻井液以水为连续相，具有成本低、配制简单、对环境相对友好等优点，是目前应用最为广泛的环保钻井液类型之一。为了大幅度提高水基钻井液的环保性能和综合性能，科研人员在处理剂研发和体系优化方面开展了大量工作。

在处理剂方面，生物聚合物类处理剂因其可生物降解性和良好的增黏、降滤失性能受到广泛关注。例如，黄原胶、结冷胶等生物聚合物可在水基钻井液中形成稳定的三维网络结构，有效提高钻井液的黏度和切力，同时降低滤失量。并且，研究表明，黄原胶在淡水和盐水钻井液体系中均能表现出良好的性能稳定性，对环境无污染^[1]。除此之外，以淀粉、纤维素等天然生物物质为原料制备的改性产物也被大量应用于水基钻井液中。通过对淀粉进行醚化、酯化等化学改性，可显著提高其耐温抗盐性能，使其能够满足不同地层条件下的钻井需求。如羧甲基淀粉钠作为一种常用的降滤失剂，在水基钻井液

中能够形成致密的滤饼，有效降低钻井液的滤失量，同时其生物降解性良好，对环境友好。

在水基钻井液体系方面，近年来发展了多种环保型体系。聚合物钻井液体系通过添加不同类型的聚合物处理剂，能够有效抑制黏土颗粒的分散，大幅度提高钻井液的稳定性和抑制性。其中，阳离子聚合物钻井液利用阳离子基团与黏土颗粒表面的负电荷相互作用，显著增强了对黏土的包被和抑制效果，减少了地层中黏土矿物的水化膨胀和分散，从而提高了井壁的稳定性的。另一方面，甲酸盐钻井液体系以甲酸盐为主要成分，具有密度范围宽、腐蚀性低、生物降解性好等优点。甲酸盐在水中能够完全电离，形成的离子环境有利于稳定钻井液的性能，同时其对地层伤害小，能够满足环保和储层保护的双重要求。

1.2 油基环保钻井液

油基钻井液以油为连续相，具有良好的润滑性、抗温性和抑制性，在高温高压井、页岩气井等复杂地层的钻井作业中具有显著优势。传统油基钻井液多以柴油等矿物油为基油，但其生物降解性差，对环境危害较大。因此，研发环保型油基钻井液成为该领域的研究重点。

目前，植物油基钻井液作为一种环保型油基钻井液得到了广泛研究和应用。植物油具有来源广泛、生物降解性好、毒性低等优点，常用的植物油有蓖麻油、棕榈油、菜籽油等。以蓖麻油为例，通过对其进行化学改性，制备出的蓖麻油基钻井液具有良好的流变性能和乳化稳定性。有研究表明，蓖麻油基钻井液在高温高压条件下能够保持稳定的性能，且对页岩等易坍塌地层具有较强的抑制作用。并且，植物油基钻井液的生物降解率远高于传统矿物油基钻井液，可有效降低对环境的污染。

目前,在油基钻井液的乳化剂方面,也取得了一系列进展。开发了新型的环保型乳化剂,如酯类乳化剂、胺类乳化剂等。以上乳化剂具有良好的乳化性能和稳定性,能够在油相和水相之间形成稳定的界面膜,保证钻井液体系的稳定性。此外,一些天然产物及其衍生物也被尝试用作油基钻井液的乳化剂,如卵磷脂等。卵磷脂是一种天然的两性表面活性剂,具有良好的乳化和润滑性能,且对环境友好。

1.3 合成基环保钻井液

合成基钻井液以合成的有机化合物为基油,兼具水基和油基钻井液的优点,且其化学组成可根据需要进行设计和调整,具有良好的环保性能和应用前景。

常用的合成基钻井液基油包括聚 α -烯烃(PAO)、合成酯、醚类等。聚 α -烯烃具有低挥发性、高闪点、良好的热稳定性和润滑性等优点,以其为基油制备的合成基钻井液在高温高压井和深水钻井中表现出优异的性能^[2]。合成酯类钻井液则具有良好的生物降解性和润滑性,其分子结构中的酯键在环境中可被微生物分解,从而降低对环境的危害。醚类钻井液具有较低的黏度和良好的低温性能,适用于极地等低温环境下的钻井作业。

在合成基钻井液的添加剂方面,研发了一系列与之相匹配的环保型添加剂。如,为提高钻井液的封堵性能,开发了可生物降解的聚合物微球、纳米粒子等封堵剂。这些封堵剂能够在井壁上形成有效的封堵层,阻止钻井液的滤失,同时在完成封堵任务后可逐渐降解,减少对地层的残留影响。此外,在合成基钻井液的流变调节剂、降滤失剂等方面也进行了大量研究,以满足不同钻井工况下的性能需求。

2 环保钻井液研究面临的挑战

2.1 处理剂性能与环保性的平衡

虽然目前已经开发出多种环保型钻井液处理剂,但在实际应用中,处理剂的性能与环保性之间往往存在一定的矛盾。如,一些生物可降解的处理剂在性能上可能无法完全满足复杂地层钻井的要求,如高温高压条件下的稳定性、抗盐性等。而传统的高性能处理剂,其生物降解性和环保性又较差。那么,如何在保证处理剂环保性的前提下,进一步提高其性能,实现性能与环保性的良好平衡,是当前环保钻井液研究面临的重要挑战之一。这需从分子结构设计、合成工艺优化等方面入手,深入研究处理剂的构效关系,开发出兼具高性能和环保性的新型处理剂。

2.2 成本问题

环保钻井液的成本普遍较高,这种现象在一定程度上

限制了其大规模推广应用。具体表现如下:一是环保型处理剂的原材料成本相对较高,例如植物油、生物聚合物等原料的价格通常高于传统的化学原料。二是环保钻井液的生产工艺和质量控制要求更为严格,也增加了生产成本。三是,由于环保钻井液的市场规模相对较小,生产企业难以通过规模化生产来降低成本。为了解决成本问题,需要加强原材料的研发和替代,寻找价格低廉、来源广泛的环保型原材料。并且,还应优化生产工艺,提高生产效率,降低生产成本。除了以上措施之外,政府和行业协会也可通过制定相关政策和标准,引导企业加大对环保钻井液的研发和生产投入,促进市场规模的扩大,从而实现成本的降低。

2.3 环境影响评估体系不完善

目前对于环保钻井液的环境影响评估还缺乏统一、完善的标准和方法。不同地区、不同类型的钻井作业对环境的影响因素复杂多样,现有的评估体系难以全面、准确地评价环保钻井液在整个生命周期内对环境的影响,包括钻井液的配制、使用、排放以及废弃物处理等环节。因此,建立一套科学、完善的环保钻井液环境影响评估体系迫在眉睫。这需要综合考虑化学、生态、毒理等多学科因素,结合实际钻井作业情况,制定出全面、准确、可操作的评估指标和方法。

3 环保钻井液发展趋势

3.1 处理剂性能精准化设计与多功能化

未来环保钻井液处理剂将朝着精准化设计与多功能化方向发展。其中,分子工程突破是关键,借助计算机模拟和人工智能辅助设计,可开发出具有环境响应性的智能分子结构。比如研发兼具高温稳定性与生物降解性的聚合物,其分子链段在高温下交联形成刚性网络,降温后又能恢复降解活性,以适应不同钻井环境。并且,仿生材料应用也十分重要,模仿生物体分泌液的成分与机制设计仿生处理剂,像基于蛋白质-多糖复合体系的处理剂,能同时实现抑制黏土膨胀、润滑防卡及生物降解功能。另一方面,引入光/热/pH响应型处理剂,可使其在不同地层条件下动态调整流变性能。如在钻遇盐膏层时,注入酸性溶液触发处理剂分子构象变化,增强体系抗盐性,提高钻井效率和安全性。

3.2 成本控制的系统化解决方案

成本控制是环保钻井液发展的重要环节,为此,需构建系统化解决方案。在原料替代与循环经济方面,可利用农业废弃物如木质素、秸秆提取物替代部分合成原料,通过酶催化工艺将其转化为高性能处理剂,同时建立钻井液回收再生系统,采用膜分离-电化学组合技术实

现废弃钻井液中有效成分的回用。在此过程中,工艺革新与规模化生产也不容忽视,应积极开发连续流微反应器技术,实现处理剂的纳米级分散与原位合成,缩短反应时间50%以上,推动区域性环保钻井液生产基地建设,共享中试平台降低中小企业研发成本。除了以上提到的几点,政策激励与市场培育同样关键,政府可利用绿色税收减免和碳交易机制给予补贴,建立行业联盟制定统一认证标准,扩大市场规模,形成规模经济效应。

3.3 全生命周期环境评估的数字化与标准化

全生命周期环境评估的数字化与标准化是环保钻井液发展的必然趋势。具体实施的手段有:第一,动态监测与智能评估方面,部署物联网传感器网络,可实时监测钻井液组分在地下环境中的迁移转化规律,开发基于机器学习的影响预测模型,输入地层参数就能生成定制化环保配方。第二,建立跨学科评估框架,整合地球化学、微生物组学、生态毒理学等多维度评估体系,通过宏基因组测序分析钻井液对地下微生物群落的影响,并制定分级评价标准,区分不同生态敏感区的环保要求。第三,利用区块链技术记录钻井液从生产到废弃的全流程数据,实现环境影响的可追溯量化,有助于提高环保钻井液的环境管理水平和公信力。

3.4 智能化发展

首先,采取传感器技术和数据分析算法,及时发现钻井过程中的异常情况,如井漏、井涌等,并采取相应的措施进行处理。如,利用智能传感器实时监测钻井液的流变性能,当发现黏度异常变化时,自动添加相应的处理剂进行调节,确保钻井液性能始终满足钻井作业的要求。智能传感器可以安装在钻井液的循环系统中,实时采集钻井液的性能数据,并将数据传输到控制系统。控制系统通过数据分析算法对数据进行处理和分析,判断钻井液的性能是否正常,如果出现异常,则自动发出指令,添加相应的处理剂。

其次,智能化的环保钻井液系统还可以与钻井平台的其他设备进行联动,实现整个钻井作业过程的自动化

和智能化,提高钻井效率和安全性^[4]。并且,值得肯定的是,智能化的系统还可以对钻井作业过程进行实时监控和预警,及时发现潜在的安全隐患,采取相应的措施进行处理,进一步保障钻井作业的安全进行。

3.5 产业生态的闭环化构建

产业生态的闭环化构建是环保钻井液产业可持续发展的关键。首当其冲的是,在服务化转型方面,钻井液供应商应从产品销售转向提供“技术+服务”整体解决方案,包括定制化配方设计、环境影响评估报告及废弃物处理服务,满足客户多样化需求。产学研用协同也很重要,高校侧重基础机理研究,企业主导工程化开发,油田提供试验基地,形成“实验室-中试基地-现场应用”的快速转化链条,加速科研成果转化。此过程中,公众参与的科普教育同样不可忽视,利用虚拟现实技术展示环保钻井液的生命周期,进一步增强公众对绿色钻井的认知,以推动社会监督与产业改进的良性互动,继而营造良好的产业发展环境。

结语:环保钻井液作为实现钻井工程绿色可持续发展的关键技术,近年来在研究和应用方面取得了显著进展。水基、油基和合成基等不同类型的环保钻井液各具特点,在满足钻井工程需求的同时,有效降低了对环境的影响。而当前环保钻井液研究仍面临处理剂性能与环保性平衡、成本较高以及环境影响评估体系不完善等挑战。为应对这些挑战,未来环保钻井液将朝着高性能化、生物可降解性增强、智能化和标准化等方向发展。

参考文献

- [1]刘锋报,孙金声,王建华.国内外深井超深井钻井液技术现状及发展趋势[J].新疆石油天然气,2023,19(2):34-39.
- [2]丁超,董昆,李凯.环保钻井液技术现状及发展策略探析[J].石油石化物资采购,2022(15):106-108.
- [3]马岩,罗均龙.环保型钻井液研究现状及发展探讨[J].工程建设与设计,2019(24):129-130.
- [4]高瑞亭.水基钻井液废弃物环保无害化处理技术研究[J].能源化工,2021,42(2):69-72.