

石油钻井液环保处理技术研究

罗永强 林 刚 王小安

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：油气钻井作业产生的废弃钻井液成分复杂，含有石油烃、重金属及化学助剂等污染物，随意处置易造成土壤和地下水污染，制约油田绿色开发。本文以石油钻井液环保处理技术为研究对象，系统分析钻井液的基本类型、污染特性及行业处理指标，梳理传统物理、化学、生物处理技术的现场应用短板。重点研究高效絮凝净化、固化稳定化、微生物复合降解及资源化回收四类新型环保核心技术。针对技术适配性弱、集成度低、运行成本高等问题，提出多技术联用、工艺优化、标准化施工等改进策略，可为油田钻井液无害化、资源化处理及绿色钻井施工提供技术参考。

关键词：石油钻井液；传统处理技术；环保处理技术；改进策略

引言：随着国内油气资源开发力度持续加大，钻井施工规模不断扩大，废弃钻井液产量逐年增加。钻井废液污染物组分复杂、自然降解难度大，长期堆放与无序排放会破坏区域生态环境，油气开采的环保压力持续增大。传统钻井液处理工艺较为单一，难以适配深井、复杂地层产生的高污染废液，处理效果稳定性不足，无法完全满足现行生态环保标准。为解决油田钻井废液处置难题，提升废弃物治理水平，本文结合现场施工工况，系统开展钻井液环保处理技术研究。通过对比传统与新型处理技术的应用差异，梳理现存技术短板，提出切实可行的优化方案，助力油田实现清洁生产与资源高效利用。

1 石油钻井液污染特性与环保处理要求

1.1 钻井液的成分及分类

钻井液俗称泥浆，是石油钻井作业的核心配套介质，主要作用是携带岩屑、平衡地层压力、保护井壁与冷却钻具。其组成成分以水或油为基底，搭配黏土、加重剂、抑制剂、润滑剂、防腐剂等功能性助剂调配而成，成分配比会根据钻井地层条件动态调整。行业内普遍按照基底介质划分类型，主流分为水基钻井液、油基钻井液和合成基钻井液三类。其中水基钻井液成本低、应用范围广，是常规油气钻井的首选；油基钻井液抗高温、防坍塌性能优异，多用于深井、复杂地层钻井，但污染风险更高；合成基钻井液性能均衡、污染性较低，属于新型环保钻井介质，目前推广规模逐步扩大。

1.2 废弃钻井液的主要污染物及危害

钻井作业完成后产生的废弃钻井液，是油气开发的主要污染物之一。废液中主要包含悬浮固相颗粒、重金属离子、石油烃类、化学添加剂残留等有害物质。这类废弃物若直接排放，会直接污染土壤结构，造成土壤板结、盐碱化，破坏地表植被生长环境。渗入地下后会

污染地下水水体，导致水质恶化，影响区域水生态环境平衡。废液中的石油烃和化学助剂难以自然降解，长期堆积会持续释放污染物，不仅会破坏钻井区域的生态系统，还会对周边动植物生存造成威胁，不符合油气开采绿色生产的基本要求。

1.3 钻井液环保处理核心技术指标

结合油气行业环保规范与现场处理需求，废弃钻井液处理需满足多项核心控制指标，保障处理后废液达标排放或资源化利用。主要指标包含固相含量、含油量、重金属含量、pH值及化学需氧量。常规处理后废液pH值需维持在中性范围，固相杂质去除率需满足场地排放标准，石油烃残留量需控制在限定数值内。重金属、有害添加剂残留需达标，化学需氧量需降至合规区间。各项指标不仅是判定钻井液无害化处理效果的核心依据，也是现场工艺调试、设备参数优化的重要标准，直接决定钻井液环保处理的合规性与实用性^[1]。

2 传统石油钻井液处理技术

2.1 物理处理技术

物理处理技术是油田废弃钻井液预处理的主流工艺，依靠物理分离方式去除固相与杂质，现场应用成熟。（1）固液分离技术，依托振动筛、离心机、除砂除泥设备，分级清除钻井液中的岩屑、粗颗粒固相，实现初步净化；（2）重力沉降技术，利用废液与固相密度差，通过沉降罐静置沉淀细小悬浮颗粒；（3）固化处置技术，将固化材料与废弃钻井液混合，封闭污染物，多用于钻井泥浆落地废弃物处置。该工艺无需化学反应，但仅能去除大颗粒杂质，对胶体、溶解性有机物处理效果极差，深度处理能力不足。

2.2 化学处理技术

化学处理技术多用于钻井液深度净化，通过药剂反

应改变污染物结构实现无害化处理。(1)絮凝处理,投加聚合氯化铝、聚丙烯酰胺等药剂,促使胶体微粒凝聚沉降,降低废液浊度;(2)氧化处理,采用氧化药剂分解废液内石油烃、有机助剂等污染物;(3)酸碱中和,调节废液pH值,满足基础排放标准。该技术短板突出,现场药剂投加量难以精准把控,易造成药剂残留,产生化学污泥等二次污染物,大幅增加后续处置成本。

2.3 生物处理技术

生物处理技术依托微生物代谢作用降解钻井液有机污染物,环保性优势显著。目前油田常用工艺为自然生物降解、复合菌剂降解两种方式。该技术无二次污染、运行成本低,但适配性较差。钻井液高盐、高油、高矿化度的特性,会严重抑制微生物活性,导致降解效率低、处理周期长,仅适用于低污染、稀释后的钻井废液,无法满足深井、复杂地层废弃钻井液的处理需求^[2]。

3 新型石油钻井液环保处理核心技术

3.1 高效絮凝净化环保处理技术

高效絮凝净化技术是在传统絮凝工艺基础上优化升级的新型环保处理技术,针对性解决传统絮凝药剂适配性差、沉降效果弱、污泥产量大等现场难题,是目前油田废弃钻井液深度预处理的核心理念。具体技术工艺分为两大核心环节:(1)药剂改性优化,采用无机高分子与有机阳离子复合型絮凝剂,替代单一聚丙烯酰胺、聚合氯化铝药剂。改性药剂可精准中和钻井液胶体颗粒表面负电荷,破坏胶体稳定结构,同时通过高分子链架桥吸附作用,捕捉细小悬浮颗粒、乳化油滴及微量重金属微粒,解决传统工艺细小颗粒难以去除的痛点;(2)分级絮凝沉降工艺,摒弃传统一次性投药方式,采用分段投加、慢速搅拌、静态沉降的分级处理模式。先通过低剂量调节剂破除废液乳化体系,再投加复合絮凝剂形成密实絮体,最后通过沉淀池快速固液分离。该技术现场应用优势显著,抗水质波动能力强,絮凝沉降速度快,可有效处理高矿化度、高乳化程度的废钻井液体系,适配复杂地层钻井产生的废液工况。相较于传统工艺,该技术大幅减少松散絮体残留,污泥产出量显著降低,有效减轻后续固废处置压力。处理后废液浊度、悬浮固体含量大幅降低,且药剂残留量低,不会产生二次污染,适配各大油田规模化钻井废液预处理作业,能够为后续深度处理工艺提供稳定的进水条件。

3.2 无害化固化稳定化处理技术

无害化固化稳定化技术针对传统固化工艺固化体稳定性差、重金属易析出、固化剂用量大等缺陷优化升级,主要用于无法回收利用的废弃钻井液、钻井污泥的

末端无害化处置,是油田落地废弃物合规处置的关键技术。技术要点包含两部分:(1)复合固化体系配比,摒弃单一水泥、石灰固化原料,采用水泥、粉煤灰、矿渣、螯合剂复配的新型固化剂。工业固废复配原料可降低固化成本,螯合剂可精准络合废液中铅、铬、汞等重金属离子,避免重金属随雨水淋滤析出,大幅提升固化体环保安全性;(2)一体化固化成型工艺,现场采用均质搅拌、压实成型、养护固化一体化流程。将废弃钻井液与复合固化剂按比例混合搅拌均匀,通过机械压实降低固化体孔隙率,经过短期养护后形成高强度、抗渗透、稳定性极强的固化土体。成型后的固化体结构致密,耐雨水冲刷、耐土壤腐蚀,抗自然风化能力较强,污染物浸出浓度完全符合油田环保排放标准。该技术有效解决了传统固化体强度不足、长期服役易开裂渗漏的问题,极大提升了钻井固废长期处置的安全性,可直接用于井场场地平整、路基铺垫,实现废弃物无害化处置与就地消纳,真正达成油田固废减量化、无害化、资源化的治理目标^[3]。

3.3 微生物复合降解环保技术

微生物复合降解技术通过筛选、驯化耐高盐、耐油污的专属功能菌群,构建复合微生物体系,依托微生物新陈代谢作用分解有机污染物,将复杂有机物转化为二氧化碳和水,实现彻底无害化降解。核心技术内容分为两点:(1)复合功能菌群构建,摒弃单一菌种投放模式,结合钻井液污染物特性,搭配石油烃降解菌、有机物分解菌、耐盐适配菌等多种功能菌种。复合菌群可协同作用,分别靶向降解烷烃、芳烃、有机添加剂等不同类型污染物,弥补单一菌种降解范围窄的缺陷;(2)环境适配调控技术,针对钻井液高盐、高矿化度的恶劣环境,通过人工调控体系温度、pH值、溶解氧,搭配专属营养剂,改善微生物生存环境,提升菌群活性与耐胁迫能力。相较于传统生物处理工艺,该技术无需化学药剂加持,运行成本低廉,无固废、废液二次产出,环保性突出。经过工艺优化后,可适配大部分常规钻井废液处理,对石油烃类污染物降解率显著提升,完全满足绿色开采的环保要求。

3.4 钻井液资源化回收再利用技术

钻井液资源化回收再利用技术主要针对可回收的水基、低污染油基废弃钻井液,通过多级净化处理去除杂质,保留有效钻井组分,重新调配为合格钻井液。具体工艺分为三个核心环节:(1)多级杂质净化处理,通过振动筛分、离心分离、精细过滤多级工艺,彻底去除废液中的岩屑、惰性固相杂质,保障回收原液洁净度;

(2) 组分提纯与性能修复, 废弃钻井液经长期使用会出现助剂损耗、性能衰减问题, 通过检测原液组分含量, 针对性补充抑制剂、润滑剂、增稠剂等功能性材料, 修复钻井液流变性能、护壁性能与携屑性能; (3) 分级回收复用, 根据净化后钻井液的性能指标进行分级, 性能达标的原液可直接用于同区块浅层钻井作业, 性能一般的废液经深度改性后用于浅层探井、浅井钻井施工。该技术可大幅降低新钻井液采购成本, 有效减少钻井施工废液外排总量, 从源头降低油田固废处置与尾液治理压力, 是目前各大油田推广应用的主流绿色技术, 适配规模化、常态化钻井作业的环保与节能需求^[4]。

4 石油钻井液环保处理技术现存问题与改进策略

4.1 环保处理技术现存实际问题

现阶段新型钻井液环保处理技术虽已在各油田推广应用, 但在复杂工况落地过程中仍存在以下诸多问题:

(1) 技术适配性不足, 多数单一环保技术仅适配常规水基钻井液处理, 针对深井、超深井高盐、高黏度油基废弃钻井液的处理效果不稳定, 污染物去除合格率波动较大。(2) 技术应用成本偏高, 微生物降解、复合絮凝等新型技术所需药剂、菌群培育及专用设备运维成本较高, 中小型油田及零散井区难以规模化落地。(3) 技术集成度较低, 现场多采用单一工艺或简单组合工艺, 未形成系统化联用处理体系, 无法同步实现污染物深度去除与资源高效回收。(4) 野外施工条件有限, 设备抗恶劣环境能力弱, 低温、沙尘天气会直接降低工艺处理效率, 影响现场环保施工质量。

4.2 针对性改进优化策略

结合油田现场应用痛点, 针对现有技术缺陷制定适配性改进策略。(1) 推行多技术联用工艺, 根据废弃钻井液类型、污染浓度搭配絮凝净化、固化稳定、微生物降解技术, 形成预处理、深度处理、末端处置的一体化工艺体系, 提升复杂废液处理效果。(2) 优化技术成

本管控, 研发低成本复合药剂与耐胁迫复合菌群, 改造简易化、模块化处理设备, 降低设备运维与药剂消耗成本, 适配中小型油田施工需求。(3) 强化技术工况适配性, 针对低温、高矿化度等特殊钻井工况, 优化工艺参数, 提升设备与技术的环境适应能力。(4) 建立标准化施工体系, 统一不同区块钻井液处理工艺参数与操作规范, 规范现场施工流程, 保障环保处理效果稳定达标^[5]。

结束语: 本文通过对石油钻井液环保处理技术的系统性研究, 明确了不同类型钻井液的污染特征与环保管控指标, 总结了传统处理技术在现场应用中的局限性。新型絮凝净化、固化稳定、微生物降解及资源化回收技术, 有效弥补了传统工艺的不足, 能够适配复杂工况下钻井废液的无害化与资源化处理需求。目前油田环保处理技术仍存在适配性不足、集成度低、施工成本偏高的现实问题。通过采用多技术联用工艺、优化设备与药剂体系、统一现场施工标准, 可显著提升钻井液环保处理效果, 降低现场处置成本, 为油气钻井绿色、高效、合规施工提供技术支撑。

参考文献

- [1] 聂利红. 高温聚合物水基钻井液环保处理与资源化利用[J]. 石化技术, 2026, 33(3): 97-99.
- [2] 董怀荣. 钻井柴油机烟气综合处理与利用技术研究[J]. 西部探矿工程, 2026, 38(2): 29-33.
- [3] 彭博一, 李晓东, 王康, 刘维平, 冯美贵, 蒋睿, 金博. 废弃无固相钻井液无害化处理技术研究与应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 45-50.
- [4] 刘伟, 邢炳强. 石油钻井液环保处理技术研究[J]. 石油石化物资采购, 2024(12): 121-123.
- [5] 刘均一, 李公让, 黄利民, 马晓勇, 夏晔. 胜利油田钻井液环保处理技术研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(3): 47-52.