

# 钻井工程废弃钻井液处理技术

席宇栋

中原石油工程有限公司钻井二公司 河南 濮阳 457001

**摘要:** 废弃钻井液是石油开采中的关键环保难题,其成分复杂且危害多样,有效处理是行业绿色发展的必答题。本文围绕钻井工程废弃钻井液处理展开研究,先剖析其成分组成(含化学添加剂、重金属离子等)、理化性质(pH值、密度等指标)及对土壤、水体、生物与人类健康的危害;再系统阐述固化处理、化学氧化-絮凝、离心-膜分离联合、生物降解处理、热解碳化处理及一体化集成处理等关键处理技术的原理、工艺与适用场景;最后针对油基、含重金属、海上三类特殊废弃钻井液,提出针对性处理方案。研究旨在为废弃钻井液高效、环保处理提供技术参考,助力石油行业绿色可持续发展,为同类工程实践提供理论支撑。

**关键词:** 钻井工程; 废弃钻井液; 处理技术

引言: 石油工业发展中, 钻井工程产生的废弃钻井液成分复杂、危害显著, 未经处理排放会破坏土壤结构、污染水资源, 威胁生态环境与人类健康, 其处理已成为行业可持续发展的关键难题。当前虽有多种处理技术应用, 但不同技术适用场景各异, 特殊类型废弃钻井液处理仍面临挑战。基于此, 本文深入分析废弃钻井液特性, 系统梳理关键处理技术, 探索特殊类型处理方案, 以期为解决废弃钻井液污染问题、推动行业环保升级提供有效路径。

## 1 钻井工程废弃钻井液特性剖析

### 1.1 成分组成

废弃钻井液是成分复杂的多相分散体系, 给后续治理带来极大挑战, 其成分组成有: (1) 化学添加剂。为调节钻井液性能、保障钻井安全高效进行而添加, 随钻井难度增加, 添加剂种类和数量增多, 进一步加剧成分复杂性。(2) 重金属离子。包含多种被国家环保局划定为第一类污染物的离子, 这类离子易在环境或动植物体内蓄积, 对人体健康存在长远不良影响, 不同重金属离子毒性各异, 部分剧毒离子还可能引发全身中毒或特定器官损伤。(3) 有机化合物。在废弃钻井液中含丰富, 涵盖多类物质, 同时还包含高pH值溶液与高分子有机物, 且高分子有机物降解产生的低分子有机化合物, 也成为环境污染的有害成分之一。(4) 黏土、钻屑和加重材料。黏土和加重材料会产生可溶性重金属离子, 钻屑则是岩石破碎后的固相产物。

### 1.2 理化性质

废弃钻井液的酸碱度、密度、黏度、含水率、含油率等理化指标, 是判断其危险程度的关键依据。多数废弃钻井液呈碱性, pH值常大于9, 部分情况下甚至超10,

强碱性会严重干扰土壤和水体酸碱平衡, 破坏生态系统稳定性, 还会影响土壤微生物活性与植物生长。其密度通常在 $1.1-1.5\text{g}/\text{cm}^3$ , 黏度较高, 这使得它在自然环境中难以扩散稀释, 易在排放区域积聚, 形成长期污染压力, 同时高黏度还会阻碍土壤通气和透水, 破坏土壤生态功能。含水率普遍达80%-95%, 高含水率不仅增加处理难度与成本, 还提升其流动性, 易通过多种途径进入水资源系统, 威胁饮用水安全。含油率一般在1%-10%, 所含石油类物质难降解, 进入水体后会形成油膜阻碍氧气交换, 导致水体缺氧, 且自身毒性会危害水生生物, 破坏水生态平衡。

### 1.3 危害评估

未经有效处理排放的废弃钻井液, 对生态环境和人体健康构成以下多方面威胁。(1) 对土壤而言, 其高盐成分和可交换性钠离子会改变土壤理化性质, 导致土壤板结、肥力下降, 影响植物根系对水分养分的吸收, 还会干扰土壤微生物群落结构与活性, 造成土壤生态功能退化。(2) 在水体方面, 其中的石油类物质、重金属离子和有机污染物, 会通过地表径流或土壤渗透进入水系统。石油类物质形成油膜导致水体缺氧, 重金属离子和有机污染物的毒性会危害水生生物, 影响水生态系统生物多样性与稳定性, 且污染物还可能通过食物链富集, 最终危害人类健康。(3) 对生物来说, 废弃钻井液中的有害物质会经食物链富集, 损害生物神经系统、免疫系统、生殖系统等, 干扰内分泌系统, 导致生物生长发育异常、繁殖能力下降甚至死亡。(4) 对人类健康, 有害物质可通过饮用受污染水源、食用受污染食物等途径进入人体并蓄积, 损害人体器官和系统, 引发癌症、神经系统疾病等多种疾病, 严重威胁生命健康<sup>[1]</sup>。

## 2 钻井工程废弃钻井液关键处理技术

### 2.1 固化处理技术

固化处理技术是陆地油田废弃钻井液处理的成熟手段，通过添加固化剂实现有害物质的稳定化。其核心在于物理包裹、化学吸附及化学反应的综合作用，将污染物固定于固化体内，降低迁移性和生物有效性，形成符合土地利用或填埋标准的固体产物。固化剂分为无机、有机及复合三类：无机固化剂（如水泥、石灰、粉煤灰）通过水化反应生成凝胶体包裹污染物并调节pH值促进重金属沉淀；有机固化剂（如环氧树脂、聚氨酯）通过交联反应形成致密结构；复合固化剂结合两者优势，提升强度与抗渗性能，适用于复杂成分处理。

工艺流程包含预处理、混合搅拌、成型养护三环节。预处理阶段调节固液平衡，添加调理剂改善流动性；混合搅拌需控制固化剂投加量与搅拌速率，采用连续式设备确保均匀接触；成型养护阶段将物料倒入模具，常温或加热养护7-28天，监测抗压强度与浸出毒性。

### 2.2 化学氧化-絮凝处理技术

化学氧化-絮凝技术针对难降解有机物（如多环芳烃、酚类）及胶体颗粒，通过“氧化降解+絮凝分离”组合工艺实现无害化转化与固液分离。氧化阶段选用芬顿试剂、过硫酸钠、臭氧等强氧化剂，利用羟基自由基破坏污染物化学键，降解为小分子酸、CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O。不同氧化剂适用条件各异：芬顿试剂适酸性环境，高效降解酚类；过硫酸钠需活化产生自由基，适用于高温高盐体系；臭氧反应快、无二次污染，但成本较高。

絮凝阶段添加无机（PAC、PFS）、有机（PAM）或生物絮凝剂，使胶体与氧化产物形成絮体，通过沉淀或过滤分离。无机絮凝剂水解生成多核羟基配合物吸附颗粒；有机絮凝剂利用长链桥联作用快速沉降；生物絮凝剂环保可降解，但成本高。

### 2.3 离心-膜分离联合技术

离心-膜分离技术基于物理分离原理，通过“离心预分离+膜深度过滤”组合，实现固相颗粒、胶体与水相的高效分离，适用于水资源回收或高水质要求场景。离心阶段利用高速旋转产生的离心力（3000-8000r/min），分离固相颗粒（如钻屑、黏土）与水相，卧式螺旋卸料沉降离心机可去除粒径 > 10μm颗粒，降低后续膜负荷。但对 < 1μm胶体效果有限，需依赖膜分离。

膜分离阶段根据目标选择微滤（MF）、超滤（UF）、纳滤（NF）或反渗透（RO）。微滤去除残留颗粒与大分子胶体；超滤截留大分子有机物与胶体；纳滤去除小分子有机物、二价离子及重金属；反渗透截留几乎所有离

子与有机物，产纯净水但能耗高。系统配套反冲洗、化学清洗及预处理装置，减少膜污染<sup>[2]</sup>。

### 2.4 生物降解处理技术

生物降解技术利用微生物代谢作用，将有机污染物（如石油烃、酚类）降解为CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O及菌体，适用于低浓度、可生化性好的废弃钻井液。核心是构建高效降解菌群：假单胞菌属、芽孢杆菌属分解石油烃；假单胞菌、克雷伯氏菌降解酚类；复合菌群协同处理混合污染物。通过添加营养剂（C:N:P = 100:5:1）、电子受体（氧气、硝酸盐）及表面活性剂，增强微生物活性。

工艺形式包括生物反应器法、生物堆肥法和生物修复法。生物反应器（如SBR、A/O）控制温度（25-35℃）、pH（6.5-8.5）、溶解氧（DO > 2mg/L），处理效率高，周期短（3-7天）；生物堆肥法与秸秆、粪便混合，好氧发酵降解有机物，产热杀灭病原菌，产物作有机肥；生物修复法直接投加菌剂至污染场地，自然降解，成本低但周期长（数月至数年）。

### 2.5 热解碳化处理技术

热解碳化技术是在无氧/缺氧条件下加热（400-800℃），使有机污染物热解、碳化成为可燃气体、液态油及固态炭，同时固定重金属，实现减量化与资源化。原理是利用有机物热稳定性差异分阶段转化：低温（200-400℃）蒸发水分与轻组分；中温（400-600℃）大分子断链、环化生成液态油与气体；高温（600-800℃）残留物碳化，重金属与炭结合或形成氧化物，降低浸出毒性。可燃气体回用供能，液态油精制为燃料或化工原料，固态炭作吸附剂、土壤改良剂或燃料。

工艺系统包括进料、热解反应器、气液固分离、尾气处理及能源回收。进料前需脱水（含水率 < 30%）并制成颗粒；热解反应器分内热式（燃烧热解气加热，热效率高但易污染）与外热式（电加热或导热油，产物纯但能耗大）；气液固分离通过旋风分离器、冷凝器等实现；尾气处理脱硫、脱硝、除尘，确保达标排放；能源回收利用热解气热量降低成本。

### 2.6 一体化集成处理技术

一体化集成技术根据废弃钻井液成分、处理目标及现场工况，优化组合多种单一技术，形成“预处理-主处理-深度处理-资源化”全流程系统，适用于复杂成分或高要求场景。核心是技术匹配与流程优化，互补单一技术优劣势。例如油基钻井液可采用“化学破乳-离心分离-膜过滤-生物降解”组合：破乳剂破坏乳液结构，离心去除油相与固相，膜过滤深度净化水相，生物降解膜浓缩液中的有机物。含重金属有机废液可采用“固化-热解碳

化”组合：固化固定重金属，热解降解有机物并进一步稳定重金属。该技术灵活性强、效率高、适应性广，可根据工况调整参数与技术组合，满足排放或回用标准。海上平台受空间与环保限制，采用“随钻预处理-小型化离心-膜分离-回用”一体化设备，实现现场处理与水回用；陆地高盐高重金属废液采用“化学沉淀-蒸发结晶-固化”组合，沉淀重金属，结晶回收盐类，固化稳定残渣。工艺设计遵循“因地制宜、经济高效”原则，考虑场地、能源、环保约束，通过模块化设计实现设备快速组装与移动，利用物联网、大数据及AI实时监测调控，提升效率与稳定性<sup>[3]</sup>。

### 3 特殊废弃钻井液处理技术

#### 3.1 油基废弃钻井液处理

油基废弃钻井液因含大量矿物油、乳化剂及固相颗粒，具有稳定性强、难降解、污染物浓度高的特性，核心处理难点在于破除油-水-固三相乳化体系，实现油、水、固的有效分离与资源化。处理需先通过化学破乳环节，投加破乳剂破坏乳化膜结构，使油相析出；再采用物理分离手段，利用离心分离或旋流分离设备分离大部分油相，回收的油相经精制后可回用于钻井液配制；后续需对分离后的水相和固相分别处理，水相通过氧化、吸附等技术去除残留油分与有机物，固相则经干燥、稳定化处理达标处置。整个过程需严格控制破乳剂类型与投加量、分离设备运行参数，确保油相回收率与污染物去除率达标，同时避免二次污染。

#### 3.2 含重金属废弃钻井液处理

含重金属废弃钻井液中重金属离子（如汞、铬、镉等）具有强毒性、易蓄积的特点，处理核心目标是降低重金属迁移性与生物有效性，避免其进入土壤或水体循环。处理需结合重金属种类与浓度选择技术路径：对于易沉淀的重金属，可通过调节pH值配合化学沉淀剂，使重金属形成难溶盐沉淀；对于低浓度、易溶解的重金属，可采用离子交换树脂或吸附材料（如活性炭、羟基磷灰石）进行吸附去除；若钻井液中同时含有机物与重金属，需先通过氧化或生物降解处理有机物，再针对性去除重金属。处理后需对固相产物进行浸出毒性检测，

确保重金属浸出量符合环保标准，必要时需进行固化稳定化处理，形成稳定固体废弃物后合规处置，防止后续环境风险。

#### 3.3 海上废弃钻井液处理

海上废弃钻井液处理受空间限制大、环保要求严苛，且需应对高盐度、波浪晃动等特殊工况，核心难点在于实现现场高效处理与零排放或低排放。处理需采用模块化、小型化设备，优先选择“预处理-分离-回用”的闭环模式：随钻过程中先通过振动筛、除砂器等设备进行初步固液分离，去除大颗粒钻屑；再通过离心分离或膜分离技术处理钻井液，回收的水相经净化后回用于钻井作业，减少海水用量与废液排放；对于无法回用的废弃物，需经稳定化处理，通过专用储存设备转运至陆地合规处置，严禁随意排海<sup>[4]</sup>。处理系统需具备抗晃动、耐腐蚀的特性，运行过程中需实时监测污染物排放指标，确保符合海洋环境保护相关法规要求。

结束语：钻井工程废弃钻井液成分复杂且危害深远，要结合其特性选择适配处理技术。固化、化学氧化-絮凝等六大关键技术各有优势，可覆盖多数常规处理需求；针对油基、含重金属、海上等特殊类型，通过针对性技术组合能实现高效处理。未来需进一步优化技术参数、降低处理成本，推动一体化集成技术模块化与智能化发展。本文研究可为废弃钻井液处理工程提供实践指导，助力石油行业平衡生产与环保，实现绿色低碳发展目标。

#### 参考文献

- [1]林清雨.钻探工程废弃钻井液处理技术及进展[J].石油石化物资采购,2021(12):45-46.
- [2]马冠军,常胜利,胡文龙.钻井工程废弃钻井液处理技术分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2021(6):195-195+197.
- [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]彭博一,刘维平,高金华,于富安,李晓东.废弃钻井液无害化处理技术研究进展[J].地质装备,2024,25(S01):39-44.