

油田钻井废液简易处理工艺对比分析

张 鹏

中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司胜利采油厂 山东 东营 257000

摘 要: 油田钻井废液成分复杂、污染性强,野外井场适配简易化、低成本处理工艺。本文梳理物理、化学、生物及复合四类主流简易处理工艺的原理、流程与运行参数,从处理效果、经济成本、工况适配性多维度开展对比分析。针对各工艺短板提出优化方案,结合不同井场工况给出差异化选型建议,为野外油田钻井废液无害化、资源化简易处理提供技术参考与应用依据。

关键词: 油田钻井废液; 简易处理; 工艺对比

引言: 油田钻井作业产生的废液具有高浊度、高含盐、含油污与重金属的特点,随意处置易破坏水土生态环境。传统大型处理工艺投资高、配套复杂,难以适配野外零散井场作业需求。为筛选适配野外场景的高效低成本处理技术,本文聚焦小型简易钻井废液处理工艺,系统剖析各类工艺技术特点、运行优势与局限性,通过综合对比优化,适配不同钻井工况的处理需求。

1 油田钻井废液特性及简易处理技术概述

1.1 油田钻井废液水质与组分特征

(1) 基本理化性质。钻井废液通常呈碱性, pH 值介于 8.0~11.5 之间, 浊度极高 (NTU 可达数千至数万), 含盐量差异大 (矿化度数千至十余万 mg/L), 黏度受体系影响显著, 固相含量一般高达 5%~15%。(2) 主要污染物组成。悬浮物主要源于膨润土、岩屑及加重材料, 含量达数千至数万 mg/L; 石油类有机物来自基础油与润滑剂, 含油量 50~5000mg/L; 重金属 (铬、铜、铅、锌等) 源于地层溶出及加重剂杂质; 钻井助剂为高分子有机化合物, 成分复杂且难降解^[1]。(3) 不同钻井工况废液差异。水基废液固相含量高、重金属突出, 油基废液 COD 和石油类显著偏高、毒性更强。陆上偏远井废液量小、运输困难, 集中井场废液量大、浓度波动宽, 处理规模差异明显。

1.2 钻井废液简易处理工艺界定与处理原则

(1) 简易处理工艺界定。指区别于大型成套装备的小型化、低投资、少配套技术, 具备模块化、操作直观、能耗低、维护简便等特点, 单套规模一般 $\leq 50\text{m}^3/\text{d}$, 无需蒸汽、高压电力等复杂配套。(2) 无害化处理基本原则。核心原则包括: 出水达 GB8978 或地方排放标准; 成本可控 (≤ 50 元/ m^3); 操作简便、对人员要

求低; 无二次污染; 适应野外环境 (抗温度波动、供电不稳等)。(3) 资源化利用辅助原则。无害化基础上, 液相优先回用于钻井液配制或降尘, 固相经稳定化后用于铺垫井场道路或回填, 实现减量与回收协同。

1.3 主流简易处理工艺分类

(1) 物理简易处理工艺。包括自然沉降 (沉砂池或储液罐静置)、过滤分离 (石英砂、袋式过滤器)、离心脱泥 (小型卧螺或碟式机)、气浮除油 (溶气或涡凹气浮), 依靠物理作用实现固液分离和除油。(2) 化学简易处理工艺。涵盖絮凝沉淀 (投加 PAC、PAM)、氧化破胶 (投加过氧化氢、次氯酸盐等)、中和调节 (酸碱调至中性), 药剂采用计量泵简易控制, 反应容器以罐体或槽体为主。(3) 生物简易处理工艺。包括简易生物降解 (耐盐菌种在生物反应器内降解有机物)、微生物吸附 (固定化菌体或生物质材料吸附重金属与油类)、生态塘净化 (依托氧化塘、植物塘自然净化)。该类工艺处理周期数天至数周, 运行费用低, 运维工作量小。

2 主流油田钻井废液简易处理工艺原理与流程

2.1 物理简易处理工艺技术体系

(1) 核心处理原理。物理工艺主要通过重力沉降实现固相与液相的自然分离, 利用过滤介质的截留作用去除细小悬浮颗粒, 借助离心力强化固液分离效率, 并通过气浮吸附去除分散态油类, 整个过程不改变污染物化学形态。(2) 现场处理工艺流程。沉降-过滤一体化流程为: 废液收集池 $\rightarrow$ 自然沉降 (48~72h) $\rightarrow$ 上清液泵入石英砂过滤器 $\rightarrow$ 出水回用或外排, 沉渣定期清理; 离心分离单项处理流程为: 废液 $\rightarrow$ 卧螺离心机 (转速 3000~4000r/min) $\rightarrow$ 液相回用、固相堆存, 该流程占地

小、启动快,适用于搬迁频繁的偏远井场^[2]。(3)工艺适用场景与关键参数。物理工艺适用于悬浮物含量高、含油率中等的废液预处理,单套处理规模 5~50m³/d。关键参数包括:沉降时间 ≥ 48h (冬季延长至 72h 以上),过滤流速控制在 5~8m/h,离心机差速调至 10~30r/min,气浮溶气压力 0.3~0.5MPa,回流比 25%~35%。

2.2 化学简易处理工艺技术体系

(1) 核心处理原理。絮凝剂通过压缩双电层和吸附架桥作用使胶体脱稳聚并,氧化剂(过氧化氢、次氯酸盐)将高分子有机物断链降解,酸碱中和用于调整 pH 至中性范围,同时促进重金属离子沉淀去除。(2) 标准化处理流程。采用“收集→调质→絮凝→静沉→出水”五步流程:废液泵入调质罐→投加 pH 调节剂搅拌(5min)→依次投加 PAC 和 PAM (搅拌速率 60~80r/min,反应 15~20min)→静置沉淀(1~2h)→上清液检测排放或回用,底泥进入干化池^[3]。(3) 工艺运行关键点。药剂选型需根据废液 Zeta 电位和油含量进行烧杯试验确定;PAC 投加量一般 300~1000mg/L, PAM 投加量 3~10mg/L;反应 pH 控制在 6.5~8.0 效果最佳;搅拌速度先快后慢以防絮体破碎;定期校验计量泵精度,每日监测出水浊度和含油量以动态调整加药量。

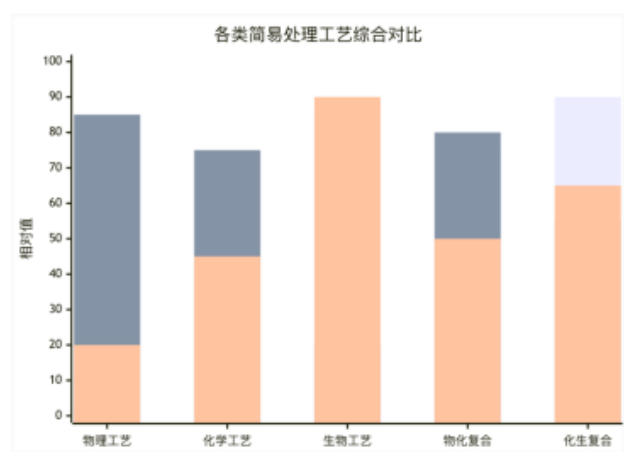
2.3 生物简易处理工艺技术体系

(1) 核心处理原理。特定功能菌群通过胞外酶作用将烃类有机物逐步降解为 CO₂ 和 H₂O,部分菌株可分泌生物表面活性剂增强油类乳化分散性,同时菌体表面官能团可吸附重金属离子,实现复合污染物的同步削减。(2) 简易处理工艺流程。简易生物填料池流程:废液经隔油沉淀→进入装有弹性立体填料的生物接触氧化池(停留时间 48~72h)→微孔曝气(气水比 10:1)→出水进入沉淀池→达标排放;自然生态净化流程:废液引入人工湿地或生态塘→依靠植物根系和微生物协同作用自然净化(停留 7~15d)→出水回用^[4]。(3) 工艺优势与局限性。优势:运行费用极低(约 5~15 元/m³),无化学药剂二次污染,操作维护简单。局限性:微生物活性对温度(适宜 15~40℃)、pH(适宜 6.5~8.5)、含盐量(≤30000mg/L)及水质波动敏感,低温季节处理效率显著下降,处理周期长(数天至数周),不适合高浓度含油废液的快速处理。

2.4 复合简易处理工艺组合模式

(1) 物理-化学复合工艺。常用组合流程为“自然沉降→絮凝反应→气浮除油→过滤”,沉降去除大颗粒,絮凝脱稳胶体,气浮分离油类和轻质絮体,过滤作为末

端保障。该模式处理出水悬浮物 ≤ 50mg/L、含油量 ≤ 10mg/L,适用于集中井场中等浓度废液的处理,COD 去除率可达 70%~85%。(2) 化学-生物复合工艺。典型流程为“絮凝沉淀(预处理段)→生物填料池(主处理段)”,絮凝段去除悬浮物和部分 COD,出水 COD 可由 3000~5000mg/L 降至 1000~1500mg/L,再进入生物系统进一步降解至 300mg/L 以下。该模式充分发挥化学段快速高效与生物段深度净化的协同优势,处理费用约 25~40 元/m³,适用于水质相对稳定且排放标准较严格的长期井场。



上图对比了五类工艺在 COD 去除率(深色)、处理速度(斜线)与经济性(浅色)三个维度的相对表现。复合工艺综合优势最为突出,其中化学-生物复合在去除率方面表现最佳,物理-化学复合在处理速度方面更具优势,各工艺的选择应依据井场实际水质、处理时限和成本预算综合权衡。

3 油田钻井废液不同简易处理工艺综合对比与优化分析

3.1 工艺处理效果对比

(1) 污染物去除效率对比。物理工艺对悬浮物去除率可达 80%~90%,但对 COD 和石油类去除率仅 30%~50%;化学工艺对悬浮物(85%~95%)、石油类(70%~85%)和 COD(60%~80%)均有较好去除效果;生物工艺对 COD 和石油类去除率可达 70%~85%,但对悬浮物去除能力有限;复合工艺综合去除效果最优,COD 去除率可达 75%~90%,石油类去除率可达 85%~95%。(2) 出水水质稳定性对比。单一物理工艺受进水浓度波动影响最大,出水水质波动幅度可达

±40%；化学工艺在药剂投加量动态调整下波动幅度约±25%；生物工艺对水质变化响应滞后，波动幅度约±30%，且恢复周期长；复合工艺凭借多级处理单元的缓冲作用，出水波动幅度可控制在±15%以内，稳定性显著优于单一工艺^[5]。（3）固相残渣处理效果对比。物理工艺底泥产出量最大（约占处理量5%~10%），含水率高（70%~85%），需进一步干化处理；化学工艺絮凝污泥量约为处理量3%~6%，经压滤后含水率可降至60%~70%，部分残渣需按危废鉴定结果处置；生物工艺剩余污泥量最少（约1%~3%），且有机质含量高，经堆肥后可资源化利用。

3.2 工艺经济与运维成本对比

（1）设备与基建成本对比。物理工艺设备构成简单，一次性投资最低，50m³/d规模约15~30万元；化学工艺需配置加药系统、反应罐等，投资约20~40万元；生物工艺基建投资（填料池、生态塘）约10~25万元，但占地较大；复合工艺投资最高，约35~60万元。（2）运行耗材与能耗成本对比。物理工艺运行成本最低（约5~10元/m³），主要为电费；化学工艺药剂费占主导，吨水处理成本约20~45元；生物工艺吨水成本约5~15元，主要为曝气电耗；复合工艺吨水成本约20~40元，介于化学与生物之间。（3）维护难度与周期对比。物理工艺设备少、维护最简便，检修周期约3~6个月；化学工艺计量泵和搅拌设备需频繁校准，检修周期约1~3个月；生物工艺填料需定期冲洗更换（约1~2年），曝气装置需季度检修；复合工艺维护工作量最大，需兼顾多单元协同管理。

3.3 工艺工况适配性对比

（1）不同井场环境适配性。偏远井场优先选择物理或生物工艺（占地灵活、无需复杂配套）；集中井场适合化学或复合工艺（处理效率高、便于集中管理）；临时钻井工程首选物理工艺（搬迁快、安装简便）。（2）不同废液水质适配性。高含油废液需化学破乳或气浮除油；高悬浮物废液适合沉降+过滤组合；高含盐废液（>30000mg/L）生物工艺受限，宜选化学工艺。（3）施工周期适配性。快速应急处理（<7d）选用物理或化学工艺；长期常态化处理（>30d）推荐生物或复合工艺。

3.4 工艺优化方案与应用建议

（1）单一工艺短板优化。物理工艺增设微絮凝单元可提升细微颗粒去除效果；化学工艺采用复配絮凝剂（PAC+阳离子PAM）降低药剂用量10%~20%；生物工艺冬季可增设保温棚或加热辅助维持处理效率。（2）差异化工艺选型方案。偏远井、短工期、低排放标准：沉降-过滤物理工艺；集中井场、中等排放标准：絮凝-沉降化学工艺；长期作业、环保要求严：化学-生物复合工艺；高含油、高悬浮物复杂废液：沉降+絮凝+气浮物化复合工艺。（3）现场应用推广展望。推广模块化复合处理装置，将物化和生化单元集成于撬装平台，实现快速转场；开发智能化加药控制系统，依托水质在线监测自动匹配药剂投加量；推进低成本生态塘+微生物强化组合模式，在西部油田开展规模化示范应用。

结束语

本文完成了各类油田钻井废液简易处理工艺的系统对比与优化研究，明确了单一工艺与复合工艺的适配场景、成本差异与处理效能。研究表明，复合工艺综合优势显著，可适配严苛环保工况，单一工艺适用于简易应急处理。后续可推广模块化、智能化集成处理装置，结合场地工况优化工艺组合，持续提升钻井废液处理的无害化、资源化与低成本化水平。

参考文献

- [1] 王瑞琦, 吉永忠, 兰清泉. 臭氧微纳米气泡技术处理油气田钻井废水的试验研究 [J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(04): 1151-1157.
- [2] 邵斌, 罗平亚, 兰军, 等. 陇东油区水基钻井液压滤废液循环利用技术 [J]. 钻井液与完井液, 2023, 40(05): 621-626.
- [3] 孙继丰, 袁琛皓, 蒋巍, 等. 废弃钻井液岩屑减量化处理技术研究与应用 [J]. 石油化工环境保护, 2025, 48(03): 45-50.
- [4] 李琦, 纵瑞耘. 油田废弃钻井液不同处置工艺适应性对比研究 [J]. 环境工程, 2022, 40(08): 132-137.
- [5] 张磊. 油田钻井废液常规简易处理工艺优化及对比分析 [J]. 油气田环境保护, 2026, 36(02): 33-37.