

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2023110

引用格式: 刘均一, 李公让, 黄利民, 等. 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.

LIU Junyi, LI Gongrang, HUANG Limin, et al. Research and application of environmental protection technologies for drilling fluid treatment in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 47-52.

胜利油田钻井液环保处理技术研究与应用

刘均一¹, 李公让¹, 黄利民², 马晓勇², 夏 晔¹

(1. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257100; 2. 中石化胜利石油工程有限公司黄河钻井总公司, 山东东营 257513)

摘 要: 在胜利油田钻井过程中, 废弃物总量大、污染物含量高, 废弃物污染控制集中于末端治理, 资源化利用程度低、成本高, 无法实现钻井过程中的污染控制, 严重影响油田生态环境。针对该油田钻井过程中的环保关键技术难题, 以“减量化、无害化、资源化”为目标, 进行了理论研究、装备研发、技术攻关和集成应用, 形成了钻井污染物源头控制、全井段钻井废弃物随钻过程减量化和钻井废弃物末端无害化处理与资源化利用等 3 项核心技术, 创新了覆盖“源头控制、过程减量、末端治理”的钻井液环保处理技术。“十三五”期间, 该钻井液环保处理技术在胜利油区及新疆、四川等地的中国石化工区实现规模化应用, 建成了胜利油田滨 105、盐 222、桩 146 等绿色低碳钻井示范工程, 为保障胜利油田绿色低碳开发提供了技术支撑, 也为我国陆上油气田绿色低碳开发提供了有益借鉴。

关键词: 钻井液; 环境保护; 废弃物处理; 固液分离; 资源化利用; 胜利油田

中图分类号: TE992

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)03-0047-06

Research and Application of Environmental Protection Technologies for Drilling Fluid Treatment in Shengli Oilfield

LIU Junyi¹, LI Gongrang¹, HUANG Limin², MA Xiaoyong², XIA Ye¹

(1. Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257100, China;

2. Yellow River Drilling Company, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257513, China)

Abstract: In the drilling process of Shengli Oilfield, a large amount of drilling waste was generated, with excessive pollutants. However, the pollution control of drilling wastes in Shengli Oilfield focuses on the end treatment, with low waste resource utilization and high cost, which makes it impossible to realize the pollution control in the drilling process and seriously threatens the ecological environment of the oilfield. In order to solve the key technical problems of environmental protection in the drilling process of Shengli Oilfield, theoretical research, equipment development, technical breakthroughs, and integrated application were carried out with the goal of “pollution reduction, harmlessness, and resource utilization”. Three core technologies were formed, including control of drilling pollution source, reduction of drilling waste while drilling in the whole well section, and harm-free treatment and resource utilization of drilling waste at the end. In addition, the environmental protection technology for drilling fluid treatment covering “source control, process reduction, and end treatment” was innovated. During the “Thirteenth Five-Year Plan” period, the environmental protection technology for drilling fluid treatment was widely applied in Shengli, Sichuan, and Xinjiang Oilfields, and a series of green and low-carbon drilling demonstration projects were established in B-105, Y-222, Z-146 blocks of Shengli Oilfield, which provides technical support for the green and low-carbon development of Shengli Oilfield and a useful reference for the green and low-carbon development of onshore oilfields in China.

Key words: drilling fluid; environmental protection; waste disposal; solid-liquid separation; resource utilization; Shengli Oilfield

收稿日期: 2022-10-04; 改回日期: 2023-12-11。

作者简介: 刘均一 (1988—), 男, 山东淄博人, 2010 年毕业于中国石油大学 (华东) 石油工程专业, 2016 年获中国石油大学 (华东) 油气井工程专业博士学位, 研究员, 主要从事油田化学与环保新技术方面的研究工作。E-mail: danielliu1988@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项课题“致密油气开发环境保护技术集成及关键装备” (编号: 2016ZX05040-005) 部分研究内容, 黄河三角洲领军人才项目“页岩油高效生态开发关键技术研究”资助。

胜利油田的开发区块广泛分布于中国最广阔、最年轻的湿地生态系统黄河三角洲^[1],生态环境敏感脆弱。随着胜利油田密集滚动勘探开发,钻井过程中产生的废弃物总量大、污染物含量高,在自然环境条件下难降解、易扩散、COD值高^[2-4],严重影响油田生态环境。前期,胜利油田钻井废弃物污染控制集中于末端治理,资源化利用程度低、处置成本高,未从根本上解决钻井废弃物的环保治理难题^[5]。其中,在钻井污染源控制方面,常规聚合物钻井液体系难以满足胜利油田上部松软造浆地层的废弃物减量化、中下部高温易塌地层的钻井液绿色无毒等环保要求;在废弃物过程减量方面,常规钻井液不落地处理装备的固液分离效率低、分离液相无法回收利用,且独立于现场固控系统之外,现场装备配置多、占地面积大;在废弃物末端治理方面,废弃物普遍采用固化埋存处理,存在固化强度低、重金属浸出污染等环保风险。

笔者根据胜利油田绿色、低碳、可持续发展的战略要求,依托国家“十三五”科技重大专项,针对胜利油田钻井过程环保关键技术难题,研发了减量化强抑制钻井液、抗高温环保型水基钻井液、钻井液固相控制与固液分离一体化装备、水基钻井液净化再利用技术、水基钻屑害化处理与资源化利用技术等,形成了覆盖“源头控制、过程减量、末端治理”的钻井液环保处理技术,通过创新集成与规模应用,有力支撑了胜利油田绿色低碳开发,也为我国陆上油气田的绿色低碳开发提供了有益借鉴。

表1 SLRF钻井液流变滤失性能评价结果

Table 1 Rheological and filtration property evaluation of SLRF drilling fluids

配方	实验条件	密度/ (kg·L ⁻¹)	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/Pa	静切力/Pa		API滤失量/ mL	高温高压 滤失量/mL	pH值
						初切	终切			
SLRF	常温	1.04	35.0	22.0	13.0	8	10	3.0		9.0
SLRF	120℃/16 h	1.04	30.5	20.5	10.0	7	9	2.8	6.8	9.0
SLRF+10%黏土	120℃/16 h	1.05	40.5	25.0	15.5	9	12	3.2	7.0	8.5

由表1可知,钻井液SLRF抗温达120℃,利用全絮凝剂、氯化钙的协同强抑制和强絮凝作用,在黏土侵入达10%的情况下仍保持良好的流变性能,可以抑制上部地层造浆,避免钻头泥包、井眼缩径等复杂情况,同时有利于钻井液快速固液分离,从源头上实现钻井废弃物减量。

参照石油天然气行业标准《钻井液环保性能评价技术规范》(SY/T 7467—2020),评价了钻井液SLRF的生物毒性、生物降解性、重金属含量等环保性能。钻井液SLRF的EC₅₀值大于50 000 mg/L,

1 钻井污染源控制技术

常用水基钻井液具有生物毒性,重金属含量超标,难以满足钻井液绿色无毒、废弃物减量化要求^[6-7]。针对该问题,开发了环保降滤失剂、环保润滑剂等系列环保处理剂,构建了减量化强抑制钻井液和抗高温环保型水基钻井液等2套环保钻井液体系,以期油气钻井污染源控制提供技术支撑。

1.1 上部地层减量化强抑制水基钻井液体系

胜利油田上部地层快速钻进中钻屑产生量大、泥质含量高、造浆强烈,若钻井液抑制性不足,极易造成钻具泥包、井眼缩径、起下钻困难等复杂情况,也增大了小循环钻井作业的钻井液固液快速分离难度,需要排放大量废弃钻井液,难以满足钻井废弃物的随钻减量要求^[8]。因此,依据表面扩散双电层理论,开发了高效全絮凝剂EFLO,在较低加量(0.5%~1.0%)下即可通过静电吸附、架桥交联作用促进黏土胶体粒子的快速凝聚,抑制黏土造浆,絮凝率达95%以上,优于聚丙烯酰胺等常规絮凝剂。

以高效全絮凝剂EFLO为核心处理剂,构建了适合于上部地层快速钻进的减量化强抑制钻井液体系SLRF,基本配方为:0.5%CaCl₂+4.0%膨润土+1.0%全絮凝剂EFLO+1.0%羧甲基纤维素LV-CMC+3.0%水基润滑剂+1.0%超细钙。采用六速旋转黏度计和钻井液滤失仪评价钻井液SLRF的流变性和滤失性能,结果见表1。

BOD₅/COD为13.8%,未检出镉、铅、铬等重金属,满足环保型钻井液标准要求。

1.2 中下部地层抗高温环保型水基钻井液体系

胜利油区沙河街组及以下地层具有埋藏深、温度高、硬脆性泥页岩发育等特点,为避免井壁坍塌、卡钻等复杂情况,需要加入沥青类、磺化树脂类等抗高温防塌处理剂,导致钻井液生物毒性高、难降解^[9]。因此,开发了环保降滤失剂、环保润滑剂等8种环保处理剂,抗高温180℃,抗饱和盐水,EC₅₀值大于50 000 mg/L,为抗高温环保型水基钻井液体

系构建提供了产品保障。

进一步构建了抗高温环保型水基钻井液体系 SLHB, 基本配方为: 4.0% 膨润土浆+0.2% 环保增黏剂+1.8% 环保降滤失剂+3.0% 环保防塌剂+2.0% 环保抑制剂+2.0% 纳米封堵剂+2.5% 环保润滑剂+

6.0% 氯化钠+5.0% 氯化钾。采用六速旋转黏度计和钻井液滤失仪评价了钻井液 SLHB 的流变性和滤失性能, 结果见表 2。分析可知, SLHB 钻井液抗温提高至 180 ℃, 热滚前后钻井液流变、滤失性能稳定, 高温高压滤失量仅为 7.8 mL。

表 2 SLHB 钻井液流变性和滤失性评价结果
Table 2 Rheological and filtration property evaluation of SLHB drilling fluids

实验条件	密度/(kg·L ⁻¹)	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	静切力/Pa		API 滤失量/mL	高温高压滤失量/mL	pH 值
					初切	终切			
常温	1.50	51.5	36.0	15.5	5.0	9.5	2.8		9.0
180 ℃/16 h	1.50	38.5	28.0	10.5	4.0	6.5	2.8	7.8	9.0

参照石油天然气行业标准《钻井液环保性能评价技术规范》(SY/T 7467—2020), 评价了钻井液 SLHB 的生物毒性、生物降解性、重金属含量等环保性能, 结果见表 3。分析可知, 由于钻井液 SLHB 替

代了磺化树脂类、沥青类及磷酸盐类等常规抗高温防塌处理剂, EC₅₀ 值提高至 50 000 mg/L 以上, BOD₅/COD 为 9.7%, 镉、铅、铬等重金属含量满足 SY/T 7467—2020 标准要求。

表 3 SLHB 钻井液环保性能评价结果
Table 3 Environmental protection performance evaluation of SLHB drilling fluids

钻井液体系	EC ₅₀ /(mg·L ⁻¹)	生物降解性, %	总镉含量/(mg·kg ⁻¹)	总铅含量/(mg·kg ⁻¹)	总铬含量/(mg·kg ⁻¹)
SLHB 体系	> 50 000	9.7	0.57	24.3	13.6
聚磺体系	< 10 000	1.7	20.10	127.9	104.8
评价标准	≥30 000	≥5.0	< 15.00	< 1 000.0	< 1 000.0

2 废弃物随钻过程减量化技术与装备

针对常规钻井液不落地处理装备固液分离效率低、分离液相无法回收利用, 且独立于现场固控系统之外、占地面积大等难题, 研究了钻井液固相控制与固液分离一体化技术与装备, 实现了“全井筒、全排量”条件下钻井废弃物的随钻过程减量, 废弃物随钻减量 50% 以上。

2.1 上部地层钻井液快速沉降固液分离装置

胜利油区二开上部地层的井筒尺寸大、机械钻速高、钻屑总量大, 前期由于现场固控系统、钻井液不落地装备无法快速实现固液分离, 钻井液总量大幅增加。为了保障快速钻进作业, 多余的钻井液只能排放到“大循环池”中存放, 完钻后就地固化埋存处理^[10-11]; 但“大循环池”的占地面积大, 固化埋存后极易发生泄漏, 污染土壤和地下水环境。

因此, 利用 ANSYS Fluent 有限元模拟, 明确了钻井液流场对钻屑沉降速度的影响规律, 设计研发了二流道多仓体的钻井液快速沉降固液分离装置, 混杂钻屑的钻井液沿 U 形流道流动, 流动过程中在

自身重力作用下钻屑快速沉降, 上层清液可直接利用, 从而实现快速沉降、固液分离。现场应用结果表明, 在排量 50 L/s、机械钻速 95 m/h 等快速钻进工况下, 钻井液经振动筛分离后仅需 5~8 min 即可实现快速沉降、固液分离, 处理能力达 200 m³/h, 固相清除率达 98% 以上, 真正实现了取消“大循环池”钻井作业。

2.2 钻井液固相控制与固液分离一体化技术与装备

目前, 常用的板框压滤等钻井液不落地处理装备都需要加入破胶剂破坏钻井液胶体稳定性, 存在固液分离效率低、分离液相无法回收利用等问题。此外, 钻井液不落地处理装备独立于现场固控系统之外, 设备配置多、占地面积大^[12]。针对上述难题, 基于振动与离心组合的物理分离方法, 研发了“模块化、标准化”的钻井液高效固液分离成套装备, 包括振动干燥处理、离心分离处理、快速沉降处理、应急贮存和钻屑收集输送等 5 个模块(见图 1), 在不使用破胶剂破坏钻井液胶体稳定性的情况下, 实现钻井废弃物的脱液干化、液相重复利用。

在钻井液高效固液分离成套装备的基础上, 进一步进行固控设备组合升级和固液分离参数优化,

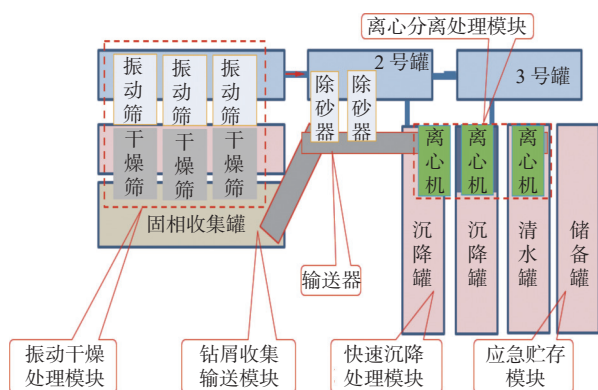


图1 钻井液高效固液分离成套装备组成

Fig.1 High-efficiency solid-liquid separation equipment for drilling fluid

首次形成了钻井液固相控制与固液分离一体化技术与装备,处理能力由 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ 提高至 $200 \text{ m}^3/\text{h}$,处理后钻屑平均含液量由 70% 降低至 40%,分离液相全部回收利用,钻井废弃物随钻减量 50% 以上,实现了钻井液固相控制与不落地工艺技术一体化、设备配套一体化、设备管理一体化及人员配置一体化,现场节约占地面积 30% 以上,满足了“全井筒、全排量”条件下废弃物随钻过程减量要求。

3 废弃物无害处理与资源化利用技术

针对钻井废弃物成分复杂、资源化利用程度低和无害化处置成本高等难题,首创了基于选择性絮凝剂的水基钻井液净化再利用技术,实现了胜利油区钻井液回收再利用“全覆盖”;集成创新了水基钻屑无害化处理与资源化利用技术,废弃物无害率达 100%,处理成本降低 30% 以上。

3.1 基于选择性絮凝剂的钻井液净化再利用技术

由于常规固控设备难以有效清除亚微米(粒径小于 $2 \mu\text{m}$)劣质固相,完钻后水基钻井液的亚微米劣质固相含量普遍大于 15%,钻井液黏度切力偏高、滤失性能恶化,显著影响机械钻速与储层保护效果,导致钻井液回收利用率不足 50%,大幅增加了废弃物总量与处置成本。目前国内外未见亚微米劣质固相的选择性絮凝剂,部分水解聚丙烯胺等高分子有机絮凝剂同时絮凝清除劣质固相与有用固相,不具备选择性絮凝作用;硫酸亚铁、聚合氯化铝等无机絮凝剂极易破坏钻井液的胶体稳定性,难以满足钻井液重复利用性能要求^[13-14]。

基于带电吸附官能团的比例与类型、分子链伸展度、分子量等优化研究,开发了一种基于“静电

中和、选择吸附”的亚微米劣质固相选择性絮凝剂 SFLO,首创了基于选择性絮凝剂的钻井液净化再利用技术,可通过静电中和、选择吸附、架桥网捕和改变颗粒电性等协同作用,提高亚微米劣质固相的清除效率,并尽可能降低对膨润土和重晶石等有用固相的絮凝作用,满足钻井液净化再利用性能要求。

采用激光粒度分析仪,测试加入选择性絮凝剂 SFLO 前后的钻井液粒径分布(见图 2),评价其选择性絮凝净化效果。由图 2 可知,现场钻井液样品的亚微米(粒径小于 $2 \mu\text{m}$)劣质固相含量达 31.76%,加入 0.8% 的选择性絮凝剂 SFLO,采用高速离心(3000 r/min)辅助处理后,亚微米劣质固相清除率最高可达 91.69%。

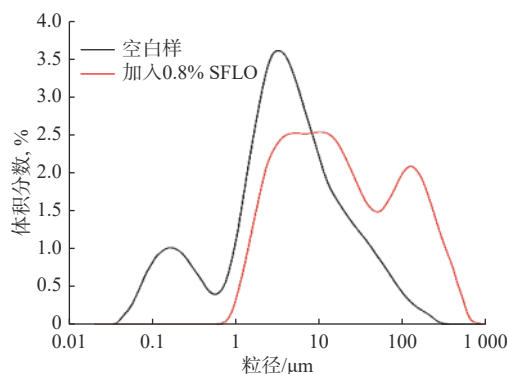


图2 絮凝作用前后钻井液粒径分布曲线

Fig.2 Drilling fluid particle size distribution before and after flocculation

“十三五”期间,胜利油田建成了河口、孤东、东安、滨南等 10 座钻井液回收处理站,开发了钻井液回收再利用网络调剂管理平台,钻井液回收再利用率达 100%,实现了胜利油区钻井液回收再利用“全覆盖”,大幅减少了钻井废弃物数量,降低了废弃物处置成本。

3.2 水基钻屑分类分质无害化处理技术

针对中下部地层水基钻屑成分复杂、高含油,无害化处置难度大等难题,围绕不同含水量的水基钻屑,研发了微乳液低温清洗技术、电化学氧化-微生物处理一体化技术、高强度固化涂覆技术,集成创新了基于“经济处置”原则的水基钻屑无害化处理技术,无害率达 100%,显著降低处理成本,实现了水基钻屑分类分质低成本处理。

3.2.1 微乳液低温清洗技术

针对含油量大于 3.0% 的高含油钻屑,选用超两亲分子表面活性剂 DOA 和阴离子表面活性剂 AEC,采用 Shah 法制备了一种单相水包油型微乳液

体系,具有界面张力低、增溶能力强、易于润湿翻转、清洗温度低等特点。在固液比 1:2、搅拌速度 100 r/min、清洗时间 30 min 条件下,随着清洗温度升高,清洗后水基钻屑含油量大幅降低(见图 3);清洗温度为 30 ℃ 时,清洗后水基钻屑含油量降至 1.0% 以下,说明该微乳液体系在较低温度下即可有效清洗水基钻屑中的油相等有机污染物。清洗完成后,通过调整微乳液的相态变化对微乳液与油相进行分离,可实现微乳液循环利用,解决了常用微乳液体系清洗温度较高(高于 50 ℃)、难以循环利用、处理成本高和产生二次污染等问题。

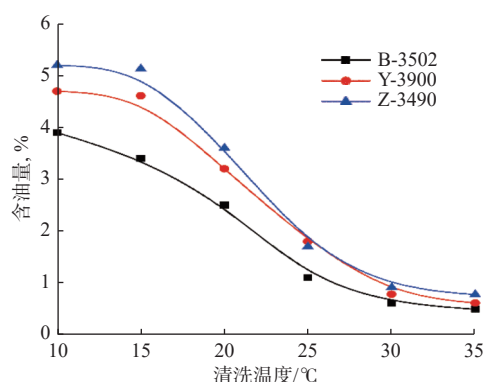


图 3 不同温度下的微乳液清洗效果

Fig.3 Microemulsion cleaning effect at different temperatures

3.2.2 电化学氧化-微生物处理一体化技术

针对含油量在 1.0%~3.0% 的中含油水基钻屑,采取高通量菌株筛选方法,培育了适合于水基钻屑修复的生物碳固定化复合靶向菌株,并引入电芬顿(DEF)高级氧化处理技术,通过电芬顿氧化处理与微生物处理的串联耦合,形成了电化学氧化-微生物处理一体化技术。电芬顿预先氧化处理改善有机污染物可生化性,微生物菌种的适应期明显缩短,菌种群落多样性明显增加,可显著提高有机污染物的去除效率,缩短修复周期。现场试验结果表明,微生物菌剂加量为 0.5%~1.5% 时,电化学氧化、微生物降解、植物修复耦合处理 90 d 后,钻屑含油量降至 1.0% 以下,浸出液 COD 值小于 100 mg/L,较常规微生物处理时间缩短 50% 以上。

3.2.3 高强度固化涂覆技术

针对含油量低于 1.0% 的低含油水基钻屑,在高强度固化配方基础上,研发了适合于低含油水基钻屑的高强度固化涂覆技术,在高强度固化物表面采用喷涂等方式形成均匀密实的氟碳树脂涂覆层,接触角增大至 79.56°,具有良好的耐水性能,连续浸泡

7 d 的抗压强度保留率达 85% 以上;浸出液 COD 值仅为 56.6 mg/L,重金属未检出,满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)。高强度固化涂覆技术尤其适用于免烧砖的表面涂覆,可杜绝固化物浸水后强度迅速降低、可溶性盐与重金属二次浸出污染环境风险^[15-16],实现污染物的高强度长效封固。

3.3 水基钻屑资源化利用集成技术

前期由于缺少合法依规的处理处置途径,胜利油田水基钻屑以集中存放处置为主,资源化利用程度低、处置成本高。按照《土壤环境质量:建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600—2018)、《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)等国家或行业标准,基于“分层处理、经济处置”原则,形成了水基钻屑资源化利用集成技术,上部地层钻屑经过干化处理直接用于井场或通井路铺垫;中下部地层钻屑经过低成本无害化处置后,用于绿植用土或路基土,解决了由于缺少处理处置途径而造成的资源化利用程度低、处置成本高的问题。“十三五”期间,胜利油田建成了以“黄大铁路路基土”为代表的水基钻屑资源化利用工程示范区,水基钻屑资源化利用量累计达 $13.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,打造了水基钻屑资源化利用技术链,实现了变废为宝。

4 现场应用

依托胜利油田绿色低碳开发先导示范区建设工程,钻井液环保处理技术在胜利油区及新疆、四川等地的中国石化工区规模化应用 2 000 余口井,建成了胜利油田滨 105、盐 222、桩 146 等绿色低碳钻井示范工程,创新形成了覆盖“源头控制、过程减量、末端治理”的钻井全过程环保控制新模式,支撑了胜利油田的绿色开发、清洁生产。

滨 105 区块毗邻白鹭湖湿地公园,钻井征地面积严格受限,钻井全程环境保护要求高,且完钻后需恢复周边环境,实现景观协调。滨 105 区块采取“井工厂”开发模式,推广应用了钻井液环保处理技术,在钻井液污染源控制方面,钻井全井段采用减量化强抑制钻井液、抗高温环保型水基钻井液等环保钻井液体系,在 12 口井实现钻井液循环利用;在废弃物过程减量方面,升级了钻井液固相控制与固液分离一体化装备,废弃物随钻减量 50% 以上,分离液相全部回收利用配浆,节约了大循环池与设备占地面积,减少永久征地两万多平方米;在废弃物末端治理方面,完钻后钻井液全部回收再利用,12 口井产生的水基钻屑达 $2 120 \text{ m}^3$,经无害化处

置后,实现了井场铺垫、路基土、绿植用土等资源化利用。滨105区块集成应用“井工厂”钻井液环保处理技术,助力白鹭湖“井工厂”建设成为“井在城中、井景共融”的绿色低碳钻井示范工程。

5 结论与建议

1)研发了减量化强抑制钻井液、抗高温环保型水基钻井液,研制了钻井液固相控制与固液分离一体化装备,首创了基于选择性絮凝剂的钻井液净化再利用技术,集成创新了覆盖“源头控制、过程减量、末端治理”的钻井液环保处理技术,有助于提升我国油气钻井过程环保技术水平。

2)建议针对胜利油田页岩油开发环保技术新难题,加快研发油基钻井液净化再利用、油基钻屑原位减量化与资源化利用技术等,进一步丰富提升油气钻井过程环保关键技术体系。

参考文献

References

- [1] 何立成. 胜利油田沙河街组页岩油水平固井技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 45–50.
HE Licheng. A cementing technology for horizontal shale oil wells in Shahejie Formation of Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2): 45–50.
- [2] 刘文士, 张烈辉, 朱进, 等. 四川盆地南部地区页岩气开发及其减污降碳再认识[J]. 天然气工业, 2023, 43(4): 165–176.
LIU Wenshi, ZHANG Liehui, ZHU Jin, et al. Recognition on shale gas development and its pollution and carbon reduction in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4): 165–176.
- [3] 王景. 临兴-神府井区废弃钻井液处理技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1): 60–64.
WANG Jing. Treatment technology of waste drilling fluids in the Linxing-Shenfu well area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 60–64.
- [4] CUI Zhisong, LUAN Xiao, LI Shujun, et al. Genotoxicity detection of oil-containing drill cuttings by Comet assay based on a demersal marine fish *Mugilogobius chulae*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: 111655.
- [5] 韩来聚, 李公让. 胜利油田钻井环保技术进展及发展方向[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 89–94.
HAN Laiju, LI Gongrang. Progress, development trends, and outlook for drilling environmental protection technologies in the Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 89–94.
- [6] 周启成, 梁应红, 单海霞, 等. 抗高温高密度生物基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. Research and application of a high-temperature resistant and high-density biomass drilling fluid system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 78–84.
- [7] 刘均一, 郭保雨, 王勇, 等. 环保型水基钻井液在胜利油田的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(1): 64–70.
LIU Junyi, GUO Baoyu, WANG Yong, et al. Study and application of environmentally friendly water base drilling fluid in Shengli Oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(1): 64–70.
- [8] 于雷, 张敬辉, 李公让, 等. 低活度强抑制封堵钻井液研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 44–48.
YU Lei, ZHANG Jinghui, LI Gongrang, et al. Research and application of plugging drilling fluid with low-activity and high inhibition properties[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 44–48.
- [9] LIU Junyi, GUO Baoyu, LI Gongrang, et al. Synthesis and performance of environmental-friendly starch-based filtrate reducers for water-based drilling fluids[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2019, 28(7): 5618–5623.
- [10] 孙露露, 耿晓光, 宋涛, 等. 响应面优化深层废弃水基钻井液无害化处理工艺[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(3): 327–333.
SUN Lulu, GENG Xiaoguang, SONG Tao, et al. Response surface optimization of biosafety disposal of waste water based drilling fluids for deep drilling[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, 39(3): 327–333.
- [11] 周佰刚, 马孟磊, 杨睐睐, 等. 废弃水基钻井液不落地高效处理技术研究[J]. 钻采工艺, 2021, 44(3): 108–111.
ZHOU Baigang, MA Menglei, YANG Jianjian, et al. Study on high efficiency treatment technology of waste water-based drilling fluid without landing[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(3): 108–111.
- [12] 蒋卓, 曹砚锋, 王荐, 等. 环保型易脱稳钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(2): 180–184.
JIANG Zhuo, CAO Yanfeng, WANG Jian, et al. Study on environmentally friendly easy-to-destabilize drilling fluid technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(2): 180–184.
- [13] 李新亮, 蒋官澄, 彭双磊, 等. 长链烷烃季铵盐 DODMAC 对钻井液中劣质固相的絮凝作用[J]. 油田化学, 2017, 34(3): 397–401.
LI Xinliang, JIANG Guancheng, PENG Shuanglei, et al. Flocculation performance of long chain alkyl quaternary ammonium salt DODMAC for inferior solid phase in the drilling fluid[J]. Oilfield Chemistry, 2017, 34(3): 397–401.
- [14] 江丽, 刘春艳, 王红娟, 等. 国内外页岩气开发环境管理现状及对比[J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 146–155.
JIANG Li, LIU Chunyan, WANG Hongjuan, et al. Domestic and foreign environmental management of shale gas development: status and comparison[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(12): 146–155.
- [15] 田文欣, 俞浩杰. 页岩储层高性能环保型水基钻井液体系及其环境影响评价[J]. 断块油气田, 2023, 30(1): 38–43.
TIAN Wenxin, YU Haojie. High performance and environment-friendly water-based drilling fluid for shale reservoir and its environmental impact assessment[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(1): 38–43.
- [16] HUANG Weian, LEI Ming, LI Gongrang, et al. Surface coating on solidified water-based drilling waste materials and its mechanism for resource reuse[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2020, 95(8): 2149–2158.