

# 废弃无固相钻井液无害化处理技术研究与应用

彭博一<sup>1,2</sup>, 李晓东<sup>1,2\*</sup>, 王康<sup>3</sup>, 刘维平<sup>4</sup>, 冯美贵<sup>1,2</sup>, 蒋睿<sup>1,2</sup>, 金博<sup>1,2</sup>

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国地质调查局绿色钻探技术创新中心, 北京 100083; 3. 核工业二九〇研究所, 广东 韶关 512000; 4. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264004)

**摘要:** 钻探工程所产生的废弃钻井液会给生态环境造成一系列影响, 在新一轮找矿突破战略行动中要求全面实施绿色勘查, 对废弃钻井液的处理技术提出了更为严格的要求。本文通过现场调研与室内实验结合, 对山东招远滕家金矿现场的废弃钻井液进行污染特性分析, 开展室内实验, 对废弃钻井液进行无害化处理技术研究, 优选破胶剂 GPJ-1、絮凝剂 GXN-1、脱色剂 GAC, 通过破胶、絮凝、吸附脱色处理, 再经过离心机或压滤机进行固液分离, 对固相进行固化处理。实验结果表明, 废弃钻井液经过处理后的污染指标大幅度下降, 达到污水综合排放二级标准, 采用配方“2% 破胶剂 GPJ-1+0.5% 絮凝剂 GXN-1+1% 脱色剂 GAC”, 在广东韶关诸广项目钻探现场对废弃无固相钻井液进行了无害化处理, 证实无害化处理技术的可行性。

**关键词:** 废弃钻井液; 无害化处理; 破胶; 絮凝; 固液分离; 绿色勘查

**中图分类号:** P634:X74 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)02-0045-06

## Research and application of harmless treatment technology for waste non-solid phase drilling fluid

PENG Boyi<sup>1,2</sup>, LI Xiaodong<sup>1,2\*</sup>, WANG Kang<sup>3</sup>, LIU Weiping<sup>4</sup>, FENG Meigui<sup>1,2</sup>, JIANG Rui<sup>1,2</sup>, JIN Bo<sup>1,2</sup>

(1. *Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China*; 2. *Technology Innovation Center of Green Drilling, China Geological Survey, Beijing 100083, China*; 3. *Research Institute No. 290, CNNC, Shaoguan Guangdong 512000, China*; 4. *Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai Shandong 264004, China*)

**Abstract:** The waste drilling fluid generated by drilling engineering can cause a series of impacts on the ecological environment, and it is required the comprehensive implementation of green exploration in the new round of strategic actions for mineral exploration breakthroughs, stricter requirements on the treatment technology of waste drilling fluid is posed. This article combines field research and laboratory experiments to analyze the pollution characteristics of the waste drilling fluid used at the Tengjia Gold Mine in Zhaoyuan, Shandong. Laboratory experiments are conducted to study the harmless treatment technologies for waste drilling fluid. The preferred agents of GPJ-1 (a gel breaker), GXN-1 (a flocculant), and GAC (a decolorizer) are optimized and processing by gel breaking, flocculation, adsorption, and decolorization treatment, followed by solid-liquid separation using centrifuges or filter presses, the solid phase is then treated with solidification. The experimental results show that after treatment, the pollution indicators of the waste drilling fluid have significantly decreased, meeting the secondary standards for comprehensive sewage discharge. The formulation “2% GPJ-1+0.5% GXN-1+1% GAC” was used to harmlessly treat the waste

收稿日期: 2024-12-27; 修回日期: 2025-02-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.02.006

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“绿色勘查钻探应用示范”(编号: DD20243154); 深地国家科技重大专项“绿色高效精准智能化钻探技术与装备”课题5“绿色高效精准智能化钻探技术集成”(编号: 2024ZD1003105.2)

第一作者: 彭博一, 男, 布依族, 1997年生, 助理工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻井液技术研究与应用工作, 北京市海淀区学院路29号, 1520669660@qq.com。

通信作者: 李晓东, 男, 汉族, 1984年生, 高级工程师, 应用化学专业, 硕士, 从事钻井液技术研究与应用工作, 北京市海淀区学院路29号, 286822486@qq.com。

引用格式: 彭博一, 李晓东, 王康, 等. 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.

PENG Boyi, LI Xiaodong, WANG Kang, et al. Research and application of harmless treatment technology for waste non-solid phase drilling fluid[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 45-50.

non-solid phase drilling fluid on the drilling site of Zhuguang project in Shaoguan, Guangdong, confirming the feasibility of harmless treatment technology.

**Key words:** waste drilling fluid; harmless treatment; gel breaking; flocculation; solid-liquid separation; green exploration

## 0 引言

随着绿色勘查的深入开展以及环保意识的增强,钻探产生的废弃钻井液的处理得到越来越多的重视和研究<sup>[1-3]</sup>,废弃钻井液的色度、悬浮物、COD、BOD<sub>5</sub>和重金属等污染指标远高于污水排放标准<sup>[4-5]</sup>,处理不当会造成地表、土壤以及地下水污染,给环境和人类带来直接或间接危害<sup>[6]</sup>。国内外废弃钻井液处理技术主要有回注法<sup>[7]</sup>、固液分离法<sup>[8-9]</sup>、微生物降解法<sup>[10-11]</sup>、固化处理<sup>[12-13]</sup>、吸附法<sup>[14]</sup>、电化学技术处理法<sup>[15]</sup>等,回注法是将废浆注入到所选合适的可储存浆液的地层,但有可能污染地下水及油层;微生物法是筛选培养特定菌种,利用微生物分解废浆中有机物,但耗时较长,且针对性高;电化学法对废浆进行电解,阳极上夺取电子,氧化有机物,但对设备要求高;吸附法采用独特形态和理化性质的材料吸附有机或无机污染物,但处理范围有限,工艺复杂<sup>[16-17]</sup>;固液分离技术对胶体体系脱稳絮凝,再分离出废浆的固相、液相,因其反应时间短,处理效果好,操作方便快捷,成本低廉等优点被国内外大多数科研工作者以及生产单位所采用<sup>[18-19]</sup>。与石油钻井废弃钻井液有所不同,地质钻探废弃钻井液存在废浆量少且地点分散、固相粒径小、胶体稳定性强等特点,因此,有必要针对地质钻探废弃钻井液开展无害化处理技术研究。

## 1 废弃钻井液污染特征分析

采取山东招远滕家金矿钻探现场废弃无固相钻井液样品,针对该废弃钻井液开展破胶脱稳、絮凝沉降、液相吸附脱色和固相固化处理的技术研究<sup>[20]</sup>,形成一套适合废弃无固相钻井液无害化处理的技术体系。钻井液主要成分包括聚丙烯酰胺、广谱护壁剂、高黏羧甲基纤维素、无荧光润滑剂和沥青类等材料,废弃钻井液整体呈黑褐色,组成成分比较复杂,胶体稳定性较高。对废弃钻井液进行污染特性分析,污染指标见表1。

从表1可以看出,废弃钻井液多项指标超过《国家污水综合排放标准》(GB 8978—1996)二级标准,尤其是COD、BOD<sub>5</sub>、悬浮物以及色度等指标,主要

表1 现场采取的废弃钻井液污染特性

Table 1 Pollutant characteristics of waste drilling fluid taken on site

测试项目	污染指标	GB 8978-1996 II类
外观形态	黑褐色不透明液体	无色透明液体
pH值	7	6~9
色度(倍)	640	≤80
悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )	1585	≤150
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	2721	≤150
BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	154	≤30
总汞/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.021	≤0.05
总镉/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.04	≤0.1
总铬/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.11	≤1.5
总砷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.09	≤0.5
总铅/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.91	≤1.0

污染物来源为配制钻井液所加入的泥浆材料、地层中的岩粉、钻井设备所使用的润滑油以及清洗井场产生的废水等,若直接排放会造成一定的环境污染。

## 2 无害化处理技术

针对滕家金矿水基钻井液废弃物,从以下方面开展了水基钻井液环保无害化技术的室内研究。

### 2.1 废弃钻井液固液分离技术

#### 2.1.1 破胶处理

钻井液胶体稳定性强,需对其采取破胶处理破坏其胶体稳定性。废弃钻井液中含有粒径不等的颗粒且无规律分散,利用无机破胶剂电中和作用改变泥浆中污染物颗粒表面的电位,破坏胶体颗粒之间的作用能,降低排斥势能,让高度聚集的颗粒产生聚结以破坏废弃钻井液的稳定体系使其脱稳。对废弃钻井液无害化处理,加入合适的破胶处理剂,破胶脱稳,释放出聚合物网状结构中胶体颗粒及自由水。室内选取了4种破胶剂,以处理后污染指标值评价不同破胶剂的处理效果,具体实验方法是:量取400 mL废弃钻井液,分别加入不同类型的破胶剂,加量均为2%,在室温下以100 r/min的速率搅拌10 min后,静置30 min,观察废弃钻井液的变化情况,并测试清液的污染指标,见表2。

表 2 不同破胶剂处理后废弃钻井液污染指标

Table 2 Pollutant indexes of waste drilling fluid after treatment with different breakage agents

破胶剂	外观形态	pH 值	色度(倍)	悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )
处理前	黑色废浆	7	640	1585	2721	154
加入 GPJ-1	淡黄色液体	6	128	121	339	48.5
加入 GPJ-2	黑色液体	6	300	824	1975	142
加入 GPJ-3	红色液体	6	240	658	1625	151
加入 GPJ-4	橘黄色液体	6	200	555	1427	133

从表 2 可知以 GPJ-1 处理效果最佳,经破胶后色度、悬浮物及 COD 大幅度下降。废弃钻井液中加入不同加量的破胶剂,制作不同加量破胶剂加入后的废弃钻井液破胶出水率见图 1。通过实验结果对比,优选破胶剂为 2%GPJ-1。

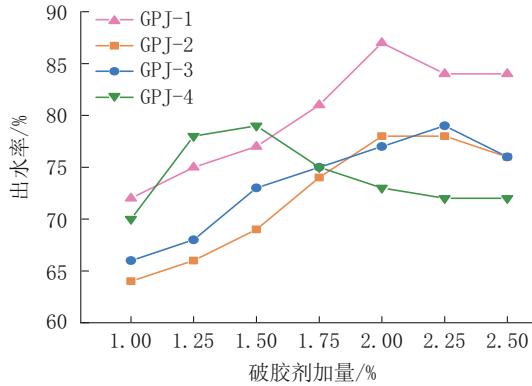


图 1 不同破胶剂出水率

Fig.1 Water losing rate using different gel breakers

2.1.2 絮凝处理

废弃钻井液中不仅有较细的岩粉等固相颗粒,还有大量的微米—亚微米活性固相颗粒,其具有较强的稳定胶体作用,即使经过破胶处理后依然无法实现自然沉淀,需加入絮凝剂,吸附体系中的大量微细颗粒,形成较大絮状物,再进行固液分离。通过在 2%GPJ-1 处理后的废弃钻井液中加入不同絮凝剂,加量均为 0.5%,观察絮凝状况以及分层后的液相状态,同时对分离后的絮体进行含水率检测,絮体含水率越低絮凝效果越好,结果见表 3。

通过絮凝实验效果对比,各絮凝剂均有较好的絮凝效果,以阴离子聚丙烯酰胺 GXN-1 脱稳絮凝效果最佳,絮体大。因此,优选阴离子聚丙烯酰胺 GXN-1 为絮凝剂。采用 0.5%GXN-1 絮凝剂处理后的浆液污染指标见表 4。

经过 GXN-1 絮凝处理后,废弃钻井液污染指标

表 3 不同絮凝剂的絮凝效果

Table 3 Flocculation effect using different flocculants

絮凝剂	絮体情况	絮体含水率/%	浆液情况
GXN-1	絮体较大,且较密集	51.77	淡黄色清水,带少量絮体残渣
GXN-2	絮体较松散	71.95	黄色清水,带部分絮体残渣
PEO	絮体较大,且较密集	63.11	黄色清水,带少量絮体残渣

表 4 GXN-1 絮凝处理后液相主要污染指标

Table 4 Main pollutant indexes of liquid phase after flocculation treatment by GXN-1

外观形态	pH 值	色度(倍)	悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )
黄色清液	6	128	97	240	18.7

降低率高,pH 值、悬浮物及 BOD<sub>5</sub> 已经达到污水综合排放二级标准,色度和 COD 指标需进一步处理。

2.1.3 脱色处理

废弃无固相钻井液经过破胶絮凝处理后,污染指标大幅度下降,加入吸附脱色剂进一步降低各项污染指标,以达标排放。经过实验,加入 1% 吸附脱色剂 GAC 进一步去除液相中的有色物质,经过脱色处理后的浆液再经过固液分离,对分离出的液相进行污染指标测试,结果见表 5。

废弃无固相钻井液经过破胶、絮凝、脱色处理后,各处理阶段的状态效果见图 2。对最终无害化处理后的液相进行了重金属检测,结果见表 6。

表 5 GAC 吸附脱色处理后液相主要污染指标

Table 5 Main pollutant indexes of liquid phase after adsorption bleaching by GAC

外观形态	pH 值	色度(倍)	悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )
无色透明	6	32	60	139	17.3

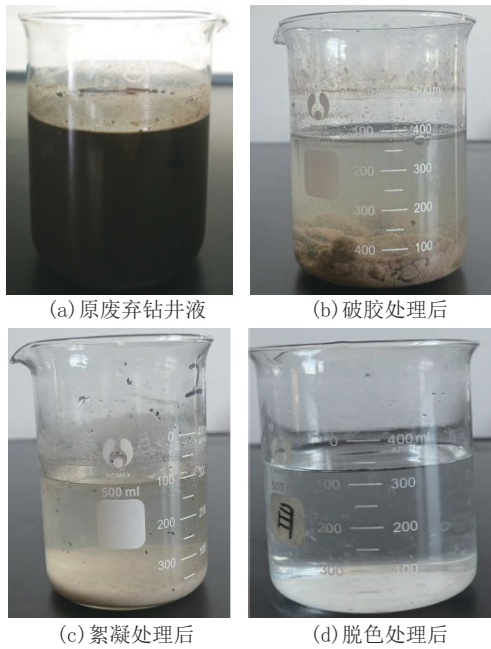


图2 各阶段处理后钻井液效果

Fig.2 Effect of drilling fluid after treatment at each stage

表6 废弃钻井液经无害化处理后污染指标

Table 6 Pollutant indexes of waste drilling fluid after harmless treatment

项 目	处理前污染指标	处理后污染指标	GB 8978-1996 II类
外观形态	黑色废浆	无色透明液体	无色透明液体
pH值	7	6	6~9
色度(倍)	640	32	≤80
悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )	1585	60	≤150
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	2721	139	≤150
BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	154	17.3	≤30
总汞/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.021	<0.1×10 <sup>-3</sup>	≤0.05
总镉/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.04	0.8×10 <sup>-3</sup>	≤0.1
总铬/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.11	1.59×10 <sup>-3</sup>	≤1.5
总砷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.09	3.9×10 <sup>-3</sup>	≤0.5
总铅/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.91	93.6×10 <sup>-3</sup>	≤1.0

由图2和表6可见,废弃无固相钻井液经过破胶、絮凝、脱色处理后的污染指标均达到污水排放二级标准,构建废弃钻井液无害化处理体系配方:2%破胶剂GPJ-1+0.5%絮凝剂GXN+1%脱色剂GAC。经过此配方处理可实现废弃无固相钻井液快速脱稳、絮凝以及脱色,固液分离后液相外观、pH值、色度、悬浮物、COD、BOD<sub>5</sub>以及重金属离子含量均达标,无害化处理取得了良好效果。

## 2.2 固化处理技术

采用固液分离设备进行固液分离处理后,废弃钻井液形成固相和液相两部分,受分离方式或分离效率等因素影响,形成的固相仍具有较大的含水率,并可能含有可溶性有机物、重金属离子等有害物质,需加入固化剂对其进行固化处理。通常固化效果的评价主要有两方面,一是其浸出液的污染指标是否满足污水综合排放标准,二是固化体抗压强度的指标,这两方面具有一定相关性,一般抗压强度越高,固化体“锁住”有毒有害物质的效果越好,固化体的浸出液中污染物浓度越低<sup>[21-22]</sup>。

### 2.2.1 固化实验

在废弃钻井液已进行破胶、絮凝、脱色和固液分离后,取出废弃固相,进行固化实验。实验中固化剂选用PO 42.5普通硅酸盐水泥,促凝剂GSN。实验方法为:取分离后固相200g,再向其中加入水泥和促凝剂(按固相质量的百分比),搅拌均匀后注入专用模具,在室温条件下自然养护72h后,测试其抗压强度。实验结果见表7,固化效果见图3。

表7 不同固化配方抗压强度

Table 7 Compressive strength using different curing formulations

编号	水泥/%	促凝剂/%	抗压强度/MPa
1	20	1	0.5
2	20	2	0.6
3	25	1	0.8
4	25	2	1.1
5	30	1	1.2
6	30	2	1.4



图3 固化后样品形态

Fig.3 Morphology of the solidified samples

由表7可看出,6号配方“30%水泥+2%GSN”固化体抗压强度最高。当水泥含量增高时,抗压强度也随之升高。说明固化体的抗压强度受水泥含量的影响最为明显。从经济效益及固化效果确定固化配方为:污泥+30%PO 42.5普通硅酸盐水泥+2%促凝剂GSN,此配方固化体抗压强度(72h)



为1.4 MPa,能够满足要求。

### 2.2.2 浸出液污染指标

在抗压强度的基础上开展了固化体浸出液污染指标检测,采用配方“30%水泥+2%GSN”对废弃钻井液进行固化后,测试固化体浸出液的各项污染指标。由于样品重金属含量较低,主要测试的污染指标为pH值、色度、悬浮物、COD及BOD<sub>5</sub>。浸出液实验《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》(HJ 557—2010):称取100 g固体试样,置于2 L提取瓶中,按液固比10:1(L/kg)加入浸泡液1 L,盖紧瓶盖后在室温情况,水平振荡装置下振荡8 h,静置16 h后,取上清液,测试其污染指标,结果见表8。

表8 固化物浸出液污染指标  
Table 8 Pollutant index of solidified leachate

指标	外观形态	pH值	色度(倍)	悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )
浸出液	无色透明	7	8	29	20	4
排放标准	无色透明	6~9	≤80	≤150	≤150	≤30

结果表明,经过固化处理后,固化体的浸出液各项污染指标均满足污水综合排放二级标准,表明固化体有效地将有毒有害物质“锁住”,避免了对环境的长期污染,且固化物强度较高,可直接拉运处理。

### 3 现场应用

在广东韶关诸广项目钻探现场进行废弃无固相钻井液无害化处理试验,该现场所用钻井液材料主要为水解聚丙烯酰胺、植物胶、腐植酸钾、防塌剂、皂化粉等,钻井液整体颜色为黑色,黏度20~30 s,钻孔完工后剩余4~5 m<sup>3</sup>废弃钻井液。结合室内实验研究成果,对其进行无害化处理。具体试验过程为:在废弃钻井液中先后加入2%破胶剂GPJ 1、0.5%絮凝剂GXN、1%脱色剂GAC,用搅拌机进行搅拌处理后,废浆出现明显破胶絮凝状态。对化学处理后的废弃钻井液进行压滤处理,压滤机流出的滤液为无色透明液体,见图4。对压滤处理后的滤液进行室内评价分析,结果见表9。

通过废弃钻井液无害化处理,测试结果表明废弃钻井液的污染指标都大幅度的降低,处理后的废浆符合污水综合排放二级标准,分离出的“污水”可作为钻井液配浆水重复利用。



(a)处理前 (b)处理后

图4 废浆处理前后对比

Fig.4 Comparison before and after treatment

表9 滤液污染指标

Table 9 Filtrate pollutant indexes

指标	外观形态	pH值	色度(倍)	悬浮物/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )
浸出液	无色透明	6	16	28	126	25
排放标准	无色透明	6~9	≤80	≤150	≤150	≤30

### 4 结论

(1)针对废弃钻井液固相粒径小、胶体稳定性强等特点,优选具有协同增效的破胶、絮凝、脱色及固化处理剂,研发了一套适合地质钻探的废弃钻井液无害化处理技术与工艺——“化学破胶絮凝+物理分离”。

(2)针对山东招远滕家金矿废弃无固相钻井液开展无害化处理室内试验,确定化学破胶絮凝配方为:2%破胶剂GPJ-1+0.5%絮凝剂GXN+1%脱色剂GAC,可实现废弃钻井液快速脱稳,有利于固液分离。经过无害化技术处理,废弃钻井液分离出液相的pH值、色度、悬浮物、COD、BOD<sub>5</sub>以及重金属含量等污染指标均大幅降低,达到污水排放二级标准。

(3)固相废弃物经过固化技术处理,确定固化配方为:污泥+30% PO 42.5普通硅酸盐水泥+2%促凝剂GSN,固化后形成的固化体抗压强度可达1.4 MPa,固化物强度较高,且固化物浸出液污染指标达到污水综合排放二级标准。

(4)采用该废弃钻井液无害化处理技术在广东韶关诸广项目钻探现场应用中取得了良好的效果,现场废弃钻井液经处理后达到排放标准。实现实时、高效地处理废弃钻井液的目的,解决了地质钻探废弃钻井液污染环境的问题。

## 参考文献(References):

- [1] 邓红琳,赵文彬,袁立鹤. 钻井液不落地技术在大牛地气田的应用[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 97-99.  
DENG Honglin, ZHAO Wenbin, YUAN Lihe. Application of without landing drilling fluid technology in Daniudi Gas Field [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(1): 97-99.
- [2] 赵雄虎,王凤春. 废弃钻井液处理研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2004, 21(2): 43-48.  
ZHAO Xionghu, WANG Fengchun. Research development of waste drilling fluids disposal [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004, 21(2): 43-48.
- [3] 胡祖彪,王清臣,陈廷廷. 基于现有固控设备的废钻井液处理及利用技术[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(1): 92-95.  
HU Zubiao, WANG Qingchen, CHEN Tingting. Treatment and use of waste drilling fluid with existing solids control equipment [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(1): 92-95.
- [4] 张统得,蒋炳,严君凤. 地质钻探废弃冲洗液污染特性及脱稳技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(4): 134-139.  
ZHANG Tongde, JIANG Bing, YAN Junfeng. Research on pollution characteristics and destabilization technology of waste drilling fluid in geological drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4): 134-139.
- [5] 吴焯,王雯璐. 钻探工程废弃钻井液处理技术及进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(3): 14-16.  
WU Ye, WANG Wenlu. Treatment technology of waste drilling fluid in drilling engineering and the progress [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(3): 14-16.
- [6] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等. 俄罗斯油气钻采废弃物处理及其利用研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 202-207.  
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Research on processing and use of wastes in oil and gas drilling and production in Russia [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 202-207.
- [7] Hernandez R M, Torres M, Leal J, et al. Drill cutting reinjection feasibility study in a critical environment, Apaika Field, Ecuador [C]//Paper presented at the SPE Latin American and Caribbean Health, Safety, Environment and Sustainability Conference, Bogotá, Colombia, 2015; SPE-174101-MS.
- [8] 黎金明,陈在君,陈磊,等. 苏里格气田废弃钻井液固液分离及回用研究[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 89-91.  
LI Jinming, CHEN Zaijun, CHEN Lei, et al. Research on solid-liquid separation and recycling of waste drilling fluid at Sulige Gasfield [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(4): 89-91.
- [9] Jiang G C, Peng S L, Li X L, et al. Preparation of amphoteric starch-based flocculants by reactive extrusion for removing useless solids from water-based drilling fluids [J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 558: 343-350.
- [10] 王志宏,石响,孙凤萍,等. 钻井废弃物环保处理技术的研究与应用[J]. 当代化工, 2022, 51(11): 2574-2578.  
WANG Zhihong, SHI Yun, SUN Fengping, et al. Research and application of environmentally friendly treatment technology for drilling waste [J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51(11): 2574-2578.
- [11] Li Z Y, Xie S, Jiang G, et al. Bioremediation of offshore oily drilling fluids [J]. Energy Sources Part A: Recovery Utilization & Environmental Effects, 2015, 37(15): 1680-1687.
- [12] Wang L, Chen L, Cho D W, et al. Novel synergy of Si-rich minerals and reactive MgO for stabilisation/solidification of contaminated sediment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 365: 695-706.
- [13] 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.
- [14] Xie S X, Ren W, Qiao C, et al. An electrochemical adsorption method for the reuse of waste water-based drilling fluids [J]. Natural Gas Industry B, 2018, 5(5): 508-512.
- [15] Adhami S, Jamshidi-Zanjani A, Darban A K. Remediation of oil-based drilling waste using the electrokinetic-Fenton method [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 149: 432-441.
- [16] 彭博一,刘维平,高金华,等. 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.  
PENG Boyi, LIU Weiping, GAO Jinhua, et al. Research progress on harmless treatment technology of waste drilling fluid [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2024, 25(S01): 39-44.
- [17] 路建萍,沈燕宾,王佳,等. 钻井废弃液处理技术的研究进展及应用[J]. 应用化工, 2024, 53(9): 2215-2220.  
LU Jianping, SHEN Yanbin, WANG Jia, et al. Research progress and application of drilling waste fluid treatment technology [J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(9): 2215-2220.
- [18] 何玉云,王发民,瞿兵,等. 宁夏宁东地区废弃冲洗液无害化处理技术初步研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(5): 17-21.  
HE Yuyun, WANG Famin, ZI Bing, et al. Preliminary study on harmless treatment of waste drilling fluid in the Ningdong area of Ningxia [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(5): 17-21.
- [19] 赵宏波,李新宝,王冲,等. 废弃钻井液固液分离-化学处理技术在长北气田的应用[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(3): 48-56.  
ZHAO Hongbo, LI Xinbao, WANG Chong, et al. The application of solid liquid Separation-Chemistry processing technology for waste drilling fluid in the Changbei Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(3): 48-56.
- [20] 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.  
GAO Ruiting. Study on environmental protection and harmless treatment technology of water-based drilling fluid waste [J]. Energy Chemical Industry, 2021, 42(2): 69-72.
- [21] 蒋炳,张统得,严君凤. 地质钻探废弃冲洗液固化处理技术研究及应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(11): 8-14.  
JIANG Bing, ZHANG Tongde, YAN Junfeng. Research and application of solidification treatment technology for waste drilling fluid in geological drilling [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 8-14.
- [22] Yang J, Sun J S, Wang R, et al. Treatment of drilling fluid waste during oil and gas drilling: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(8): 19662-19682.

(编辑 王文)