

地质钻探废弃冲洗液污染特性及脱稳技术研究

张统得¹, 蒋炳², 严君凤¹

(1.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都 611734; 2.成都理工大学环境与土木工程学院,四川成都 610059)

摘要: 废弃冲洗液无害化处理是落实绿色勘查理念的一项重要工作。通过室内测试分析与现场调研,对地质钻探不同领域的钻孔废弃冲洗液进行污染特性研究,了解其基本性质以及对环境的影响方式。结合湘桃地 2 井废弃冲洗液开展脱稳技术室内研究,对破胶剂及絮凝剂进行了优选,并获得了脱稳处理的基础配方。实验结果表明,经过处理后废弃冲洗液能实现快速脱稳絮凝,COD、悬浮物、色度等污染指标大幅下降,为下一步深度处理实现无害化排放创造了有利条件。

关键词: 深部钻探; 废弃冲洗液; 污染特性; 无害化处理; 脱稳技术

中图分类号: P634.6; X708 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)04-0134-06

Research on pollution characteristics and destabilization technology of waste drilling fluid in geological drilling

ZHANG Tongde¹, JIANG Bing², YAN Junfeng¹

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;
2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology,
Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: Harmless treatment of waste drilling fluid is an important job for us to implement the concept of green exploration. Through laboratory test analysis and site survey, the pollution characteristics of waste drilling fluid in different fields of geological drilling were studied, and also its basic properties and its influence on the environment were investigated. With waste drilling fluid from Well Xiangtaodi-2 as the subject of study, research was done on the destabilizing technology with optimization of the gel breaker and flocculant materials to obtain the basic formula for destabilization treatment. The experimental results showed that de-stabilization and flocculation can be achieved of the waste drilling fluid rapidly, and pollution indicators, such as COD, suspended solids, chroma, declined significantly; which can create favorable conditions for the next deep treatment to achieve harmless emissions.

Key words: deep drilling; waste drilling fluid; pollution characteristics; harmless treatment; destabilization technique

0 引言

近年来,随着我国生态文明建设在地质勘查行业中的逐步推进,要求在进行资源能源勘探时务必最大限度地减轻对环境的污染,实现绿色勘查。然而在进行勘查工作时不可避免地产生大量污染物,其中废弃冲洗液是最大的污染源之一。

废弃冲洗液是在进行钻探施工过程中产生的一

种含粘土、化学添加剂(各种护胶剂、降失水剂、润滑剂、加重剂等)、污水、油污及岩粉等多相稳定胶状悬浮体,其组分复杂,其中的总铬、六价铬、总汞、总砷、总镉、总铅、COD、石油类、pH 值等污染指标中多数高于国家污染物综合排放标准。通常每施工完成一个钻孔,即产生几十方甚至是上百方的废弃冲洗液,由于废弃冲洗液的稳定性好、直接脱水困难而且含

收稿日期:2020-01-20 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.020

基金项目:国家重点研发计划项目“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题六“绿色环保冲洗液体系与废浆处理技术”(编号:2018YFC0603406)

作者简介:张统得,男,汉族,1987年生,工程师,地质工程专业,硕士,主要从事钻探技术方面的研究工作,四川省成都市郫县成都现代工业港北区港华路139号,ztd8795@126.com。

引用格式: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.

有保水性能极好的特殊性质,不经处理直接排放会对周边生态环境造成严重的污染^[1]。因此,废弃冲洗液的无害化处理是落实绿色勘查理念的一项重要工作^[2]。

目前废弃冲洗液无害化处理技术较为成熟,并取得了一些成果,但其主要研究对象为大口径油气钻井工程废弃冲洗液^[3-6]。而针对地质岩心钻探的废弃冲洗液处理技术与现场应用相对较少,同时因废弃冲洗液体系、成分、性能、污染特性等与油气钻井又具有较大区别,现有油田钻井废弃冲洗液

处理技术及装备不能完全适用。因此,需要针对地质钻探废弃冲洗液开展无害化处理技术研究。

1 废弃冲洗液的污染特性研究

1.1 基本性质

由于地质钻探通常所面临的施工领域较为广泛,冲洗液类型多样,因此,在研究中分别从油气调查、页岩气调查、煤矿、大深度铁路隧道勘查工程中采集了 4 种不同体系的废弃冲洗液进行测试分析。其基本性能见表 1。

表 1 废弃冲洗液基本性能
Table 1 Basic properties of waste drilling fluid

钻孔编号	冲洗液体系	胶体率/%	密度/(g·cm ⁻³)	固相含量/%	表观粘度/(mPa·s)
油气调查新乌地 1 井	钾基聚合物泥浆体系	97	1.09	12.39	28.0
川藏铁路隧道勘查孔	磺化泥浆体系	98	1.11	14.67	36.0
胡家河煤矿监测孔	普通低固相泥浆体系	96	1.10	16.23	17.0
页岩气调查湘桃地 2 井	聚磺泥浆体系	98	1.13	17.22	12.5

从表 1 可以看出,各钻孔废弃冲洗液基本以普通低固相及聚合物、磺化泥浆体系为主,均为一种较为粘稠的相对高固相含量稳定流体。

由于目前地质岩心钻探主要采用金刚石绳索取心钻进工艺,产生的岩粉颗粒较细^[7],而现场又普遍缺乏固相控制设备,导致岩粉被进一步重复破碎,以极细的状态分散在冲洗液中,更难以清除。在对页岩气调查湘桃地 2 井废弃冲洗液的粒度分析研究中可以得出(见图 1),所产生的岩粉粒径主要分布于

0.3~200 μm,其中<58 μm 的颗粒占岩粉颗粒总量近 90%,岩粉的中值粒径 $D_{50}=11.77 \mu\text{m}$,根据美国石油学会(API)标准,将钻井液中固相颗粒按照其粒度大小分类该岩粉主要为泥^[8]。因此,相对于大直径油气钻井废弃冲洗液^[9-10],地质钻探废弃冲洗液的最大特点是其中分散有大量极细固相颗粒,同时加之各类处理剂产生较强的护胶作用,废弃冲洗液的胶体稳定性极好,悬浮物含量高,常规手段处理难度较大。

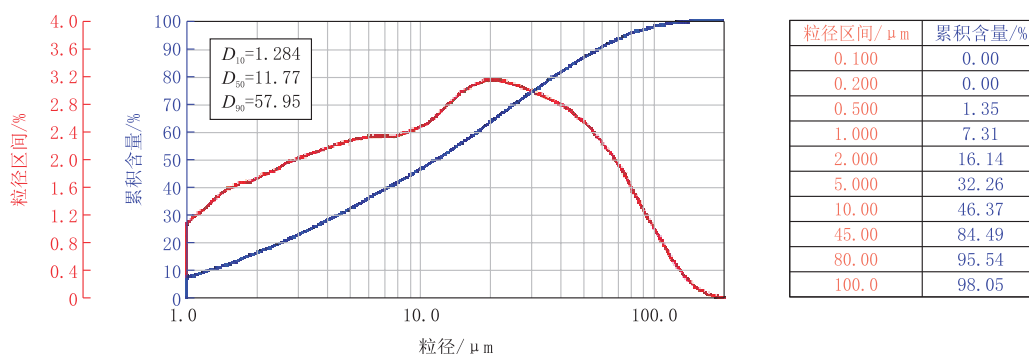


图 1 粒径分布频率与概率累积曲线

Fig.1 Particle size distribution frequency vs probability accumulation curve

1.2 主要污染物成分

为了进一步了解废弃冲洗液的污染特点,分别对收集的各类样品送至专业机构进行污染物成分检测分析,并参照《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)^[11]进行对比,其结果见表 2。

从表 2 可以看出,各钻孔废弃冲洗液均有多项指标超过国家污水排放标准,尤其是 COD、BOD₅、色度、悬浮物以及铅、铬、汞等重金属指标,若直接排放会造成严重的环境污染。

1.3 废弃冲洗液对环境的影响

表2 废弃冲洗液主要污染成分及实测结果

Table 2 Main pollution components and measured results of waste drilling fluid

钻孔编号	表观形态	pH值	Cr/ (mg·L ⁻¹)	Cd/ (mg·L ⁻¹)	Pb/ (mg·L ⁻¹)	Hg/ (μg·L ⁻¹)	As/ (μg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	色度 (稀释 倍数)	石油类/ (mg·L ⁻¹)	悬浮物/ (mg·L ⁻¹)
油气调查新乌地1井	黑褐色液体	9.3	0.20	未检出	2.39	33.64	188.28	20990.50	6270.44	3000	1.20	9693
川藏铁路隧道勘查孔	黑色液体	9.5	4.02	未检出	3.17	66.26	278.70	18060.00	6060.44	2400	0.80	45050
胡家河煤矿监测孔	褐色液体	9.5	0.24	未检出	0.52	23.22	203.60	7570.00	206.44	2000	未检出	25012
页岩气调查湘桃地2井	灰黑色液体	8.5	19.10	未检出	19.29	58.60	255.30	15050.00	1624.35	2400	1.30	37540
国家污水排放标准值		6~9	1.50	0.10	1.00	50.00	500.00	150.00	60.00	80	10.00	200

现场实地调研发现,目前单个地质钻孔产生的废弃冲洗液量为30~80 m³,由于缺乏强有力的法律约束,同时受工程成本制约等多方面因素,多数钻孔废弃冲洗液的处理方式均采用现场开挖废浆池集中统一露天储存(见图2),待施工结束后直接覆土填埋。这样由于废浆池缺少有效的避雨措施,容易因暴雨而溢出造成环境污染;同时废弃冲洗液不经处理直接填埋,随着长时间雨水浸泡,其中有害物质析出也会对土壤、地下水、动植物等造成严重危害。



图2 地质钻探废弃冲洗液露天存放

Fig.2 Storage of waste drilling fluid in geological drilling in the open air

根据对冲洗液主要污染指标测试结果及实地调研,其对环境造成的影响主要有如下几个方面^[12-15]:

(1)有机物污染。废弃冲洗液中COD、BOD₅等指标超标100多倍,其主要原因来自于冲洗液在配制过程中会加入大量的羧甲基纤维素钠、聚丙烯酰胺、聚丙烯腈铵盐、磺化沥青等一些有机处理剂,该类物质对环境的影响主要表现在造成水体富营养化,导致水生动植物死亡,而且还可通过食物链的富集,最终对人体健康造成威胁;同时有些人工合成的有机物因合成反应不彻底或降解后重新产生一些毒

性单体而对环境造成毒性污染。

(2)重金属离子的污染。通过污染指标测试,废弃冲洗液的另一大污染物便是重金属离子污染,尤其是铅、铬、汞等,该污染物主要来源于冲洗液各类添加剂和地层自带的重金属离子。其在废弃冲洗液中以碳酸盐、有机物结合态、吸附状或残渣等形式存在,进入土壤后很难随水发生迁移,生物降解对重金属离子的作用也收效甚微,随着时间推移造成重金属的富集,最终形成有毒的甲基类化合物,再经过长期的雨水冲刷后污染地表和地下水资源,进而影响农作物、植物的生长发育,最终通过食物链影响到人和动物的生命安全。

(3)无机盐污染。为了保证冲洗液的体系稳定性及抑制性,通常会在冲洗液中加入大量的碳酸钠、氯化钾、氢氧化钠等无机盐和强碱,虽然该类物质本身不具有较强的毒性,但若不经处理直接排放会造成土壤板结,加剧土壤的盐碱化,同时含盐量过高也会造成水体的污染。

2 废弃冲洗液的脱稳技术研究

根据冲洗液的胶体化学原理,粘土颗粒在水中电离水化,形成扩散双电层结构,该结构具有较强的胶体稳定性^[16],而加入的高分子材料(如羧甲基纤维素钠、磺化酚醛树脂、聚丙烯酰胺等)中具有大量的吸附和水化基团,通过与粘土颗粒的吸附及水化作用,形成布满整个空间的混合网状结构,从而进一步提高粘土颗粒的聚结稳定性^[17]。

由于地质钻探中废弃冲洗液中极细颗粒较多,水化分散作用更为显著,是一种极为稳定的胶体,其中含有大量的有害物质。为了实现废弃冲洗液的无害化处理,首先必须向其中加入合适的处理剂,破坏原有的稳定状态,释放出粘土-聚合物网状结构中的胶体颗粒及自由水,以便形成有效的絮凝

体^[18],进而实现固液分离以及分离后的液相回收利用或深度处理。

2.1 实验试剂与仪器

实验试剂:选取目前行业中破胶效果较好的 HCl(浓度为 1.2 mol/L)、氯化钙、硫酸铝、氯化铁及自制破胶剂 GB-1、聚合氯化铝(PAC)、XN-1、XN-2、XN-3 型高分子絮凝剂等。

主要仪器:DQJ180 型强力搅拌机、ZNN-D6B 型电子六速旋转粘度计、ZNS-2A 型中压失水仪、6B-200 型 COD 快速测定仪、TRS-1000 型悬浮物测定仪、色度仪、pH 计等。

2.2 实验方法

实验选用页岩气调查湘桃地 2 井废弃冲洗液,其主要由粘土、羧甲基纤维素钠、广谱护壁剂、褐煤树脂、聚丙烯腈铵盐、特效润滑剂等化学处理剂组成。

(1)破胶实验:分别取 200 mL 废弃冲洗液,向其中加入不同破胶剂,以 200 r/min 的转速搅拌 5 min,考察废弃冲洗液在不同破胶剂种类及加量的情况下破胶效果,主要通过测试其破胶后的 2 h 析出水量(出水率)来具体评价破胶效果^[19-20],出水率越高表明破胶效果越好。

(2)絮凝实验:通过破胶处理可降低废弃冲洗液的聚结稳定性,但由于其中含有大量的微纳米颗粒,在自然重力条件下分离困难,因此需要向其中加入絮凝剂,以对悬浮颗粒及有色物质等进行吸附、网捕絮凝,降低废弃冲洗液中悬浮物质的沉降稳定性。在实验中取破胶后的废弃冲洗液 100 mL,分别向其中加入不同絮凝剂,考察各絮凝剂的絮凝效果,通过 COD、悬浮物、色度的降低率评价其絮凝效果^[21-24]。

2.3 结果与讨论

2.3.1 破胶剂的筛选

在废弃冲洗液中加入不同破胶剂,考察处理效果,绘制不同破胶剂加量条件下的出水率曲线。具体见图 3。

从图 3 中可以看出,不同破胶剂对废弃冲洗液处理后的出水率有较大不同,其中氯化铁出水率最低,且受加量影响较小;HCl 及 GB-1 破胶剂处理后出水率相对最高,破胶效果最佳,硫酸铝及氯化钙次之;其中当 HCl 加量到 1.2% 时即达到最佳的破

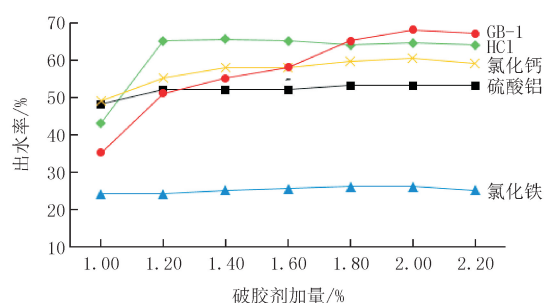


图 3 不同破胶剂出水率数据

Fig.3 Data on effluent rates of different gel breakers

胶效果,出水率达到 65%,而 GB-1 最优加量为 2.0%,出水率为 68%。但由于 HCl 加入后导致 pH 降低至 3.5,需要二次处理,同时 HCl 具有较强的腐蚀性,在使用中有一定的危险性,因此,综合考虑选用 GB-1 作为该废弃冲洗液的破胶剂。

2.3.2 絮凝剂的筛选

原废弃冲洗液经过破胶后,其稳定的胶体体系基本得到了脱稳,但其中仍存在较多微纳米颗粒,需要进一步处理,向其中加入不同絮凝剂后形成絮体情况及水体情况见表 3。

表 3 不同絮凝剂的处理效果

Table 3 Treatment results with different flocculants

絮凝剂编号	絮体形成情况	水体情况
XN-1	絮体较大且松散	褐色清水
XN-2	絮体较大且致密	淡黄色清水
XN-3	絮体较小,致密	淡黄色清水
PAC	絮体较大,较松散	黄色清水,有部分杂质

从表 3 可以看出,在相同加量条件下的不同絮凝剂处理效果表现上有较大区别,其中在絮体的形成上,XN-1、XN-2 及 PAC 均能形成较大的絮体,有利于进一步沉淀分离;在水体方面 XN-2 及 XN-3 相对更为清澈。

絮凝后分离水体的 COD、悬浮物、色度去除率等污染指标见图 4。

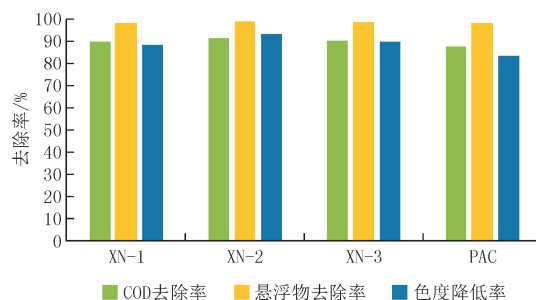


图 4 絮凝处理后水体污染指标变化情况

Fig.4 Change of water pollution index after flocculation treatment

从图4中可以看出,废弃冲洗液在经过絮凝后废液中的COD、悬浮物、色度等污染指标均大大降低,各污染指标的去除率均超过了80%,XN-1、XN-2、XN-3处理剂效果要优于PAC,其中XN-2絮凝剂在对破胶后的废弃冲洗液处理中,COD由15050 mg/L降低至1265 mg/L,降低率达到91.59%,悬浮物及色度降低率分别为99.39%及93.33%,处理效果最佳,因此选用该处理剂作为絮凝剂使用。XN-2絮凝剂为阳离子型高分子长链聚合物,能借助高分子链的吸附架桥作用形成致密絮体,更重要的是分子链中的阳离子基团能迅速与废液中带负电胶粒相吸引,降低其表面电荷,压缩扩散双电层使微粒脱稳,进一步增强了处理剂的架桥吸附能力,因此具有较强的絮凝能力^[25]。

为了进一步确定XN-2的最优加量,分别向破胶后废弃冲洗液中掺入不同加量的絮凝剂,絮凝后通过压滤进行固液分离,测试分离固体中的含水率,含水率越低表明处理效果越好,实验结果见图5。

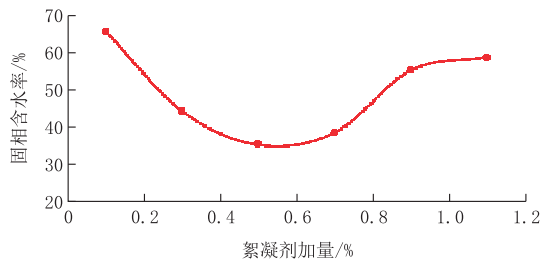


图5 XN-2絮凝剂加量对固相含水率的影响

Fig.5 Effect of XN-2 flocculant dosage on the water content of the solid phase

从图5可以看出,随着絮凝剂的加量逐渐增加,分离出固相中的含水率呈现先降低再升高的趋势,其中在加量为0.5%时达到最低值,表明在该加量条件下更容易分离出固相,分离质量最佳。随着絮凝剂的加量增加,胶粒表面吸附过多阳离子基团后出现 ζ 电位反转,重新形成较为稳定的胶体,导致分离后的固相含水率升高,因此XN-2絮凝剂的最优加量为0.5%。

综上,针对页岩气调查湘桃地2井废弃冲洗液开展脱稳技术研究,得出了其基本配方为2.0%GB-1破胶剂+0.5%XN-2絮凝剂,经过该配方处理后可实现废弃冲洗液稳定胶体的快速脱稳絮凝,固液分离后水体中COD降低至1265 mg/L,悬浮物为230.66 mg/L,色度为160倍,各项污染指标去除率均超过了90%,取得了良好的效果。

3 结论

(1)通过室内测试分析与实地调研,地质岩心钻探废弃冲洗液中主要以微纳米固相颗粒和化学处理剂共同形成较为稳定的胶体,常规破胶脱稳处理难度大;同时体系中普遍存在各项污染物严重超标的情况,其对环境的影响主要为有机物污染、重金属离子污染和无机盐污染;而在施工现场对废弃冲洗液的管理手段相对缺失,进一步加剧了废弃冲洗液对环境的污染程度。

(2)针对地质钻探废弃冲洗液的污染特性,采用“破胶+絮凝”的脱稳处理方法,优选了GB-1破胶剂及XN-2絮凝剂,并确定了各自最优加量,基本能够实现废弃冲洗液的快速脱稳,有利于固液分离。同时,经过处理后污染物指标大幅下降,为下步深度处理实现无害化排放创造了有利的条件。

参考文献(References):

- [1] 徐力,董怀荣.废弃钻井液深度净化技术研究[J].西部探矿工程,2014,26(2):64-68.
XU Li, DONG Huairong. Research on deep purification technology of waste drilling fluid[J]. West-China Exploration Engineering, 2014,26(2):64-68.
- [2] 卢予北,范晓远,吴焯,等.云南腾冲科学钻探废弃钻井液固化处理技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(8):14-17.
LU Yubei, FAN Xiaoyuan, WU Ye, et al. Research on waste drilling fluid solidification technology of Tengchong Scientific Drilling in Yunnan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(8):14-17.
- [3] 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.
- [4] 冯金禹,闫铁,李卓,等.钻井作业废弃物处理技术研究与应用进展[J].应用化工,2019,48(8):1966-1969.
FENG Jinyu, YAN Tie, LI Zhuo, et al. Research and application progress of drilling waste treatment technology[J]. Applied Chemical Industry, 2019,48(8):1966-1969.
- [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] 刘音,崔远众,常青,等.油田钻井废液处理研究进展[J].石油化工应用,2014,33(10):1-5.
LIU Yin, CUI Yuanzhong, CHANG Qing, et al. Research progress on treatment of drilling waste fluid[J]. Petrochemical

- Industry Application, 2014, 33(10):1-5.
- [7] 赵小军, 康鑫, 潘飞飞, 等. 孕镶金刚石钻头破碎花岗岩岩屑粒径分布研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(1):84-88. ZHAO Xiaojun, KANG Xin, PAN Feifei, et al. Particle size distribution of granite swarf by impregnated diamond bit[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(1):84-88.
- [8] 刘徐三, 张化民, 陈礼仪, 等. 汶川地震科钻 WFS-3 孔金刚石钻进岩粉粒度分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(3):21-23. LIU Xusan, ZHANG Huamin, CHEN Liyi, et al. Study on rock powder particle size analysis in diamond drilling of Hole WFS-3 in Wenchuan Earthquake Scientific Drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(3):21-23.
- [9] 李爱民, 车晓峰, 何成树, 等. 金刚石钻头岩屑录井效果分析及录井方法探讨[J]. 断块油气田, 1995, 2(4):13-17, 44. LI Aimin, CHE Xiaofeng, HE Chengshu, et al. The logging effect analysis of cuttings drilled by diamond bits and the discussion of logging methods[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1995, 2(4):13-17, 44.
- [10] 易先中, 王利成, 魏慧明, 等. 钻井岩屑粒径分布规律的研究[J]. 石油机械, 2007, 35(12):1-4. YI Xianzhong, WANG Licheng, WEI Huiming, et al. Study of the size distribution of drill cuttings[J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(12):1-4.
- [11] GB 8978-1996, 污水综合排放标准[S]. GB 8978-1996, Integrated wastewater discharge standard [S].
- [12] 宋延博. 胜利油田钻井废弃泥浆固化处理技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2007. SONG Yanbo. Study on solidification treatment technology for waste drilling mud in Shengli Oilfield[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [13] 金永辉, 于小龙. 延长油田废弃钻井液污染控制技术适用性分析[J]. 中国石油和化工, 2011(2):56-58, 61. JIN Yonghui, YU Xiaolong. Analysis on the applicability of pollution control technology to waste drilling fluid in Yan-chang Oilfield[J]. China Petroleum and Chemical Industries, 2011(2):56-58, 61.
- [14] 徐力. 钻井废弃物深度处理技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. XU Li. Research on processing technology of the drilling waste[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [15] 刘俊. 钻井废液对环境影响分析[J]. 能源环境保护, 2009, 23(1):57-59. LIU Jun. Analysis of environmental effect about waste drilling fluid[J]. Energy Environmental Protection, 2009, 23(1):57-59.
- [16] 王蓉沙, 邓皓, 谢水祥, 等. 油气田废弃钻井液对生态环境的影响评价研究[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(2):152-156. WANG Rongsha, DENG Hao, XIE Shuixiang, et al. The in-
- fluence of abandoned drilling fluid in oil-gas field on ecological environment[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(2):152-156.
- [17] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001:132-136. YAN Jienian. Drilling fluid technology[M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2001:132-136.
- [18] 赖晓晴, 楼一珊, 孙金声, 等. 废弃聚磺钻井液固液分离技术[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(1):71-74. LAI Xiaoqing, LOU Yishan, SUN Jinsheng, et al. Solid-liquid separation of waste polymer-sulfonate drilling fluids[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27(1):71-74.
- [19] 李广环, 吴文茹, 黄达全, 等. 废弃水基钻井液用新型破胶絮凝剂的研制与应用[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(5):46-48. LI Guanghuan, WU Wenru, HUANG Daquan, et al. Development of new gel-breaking flocculant for waste water base drilling fluid treatment[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2015, 32(5):46-48.
- [20] 张爱顺, 曹孜英, 董殿彬, 等. 废弃聚磺钻井液破胶-絮凝-膜处理实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(1):47-49. ZHANG Aishun, CAO Ziyang, DONG Dianbin, et al. Laboratory study on breaking-flocculation-membrane treatment of waste polysulfonate drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(1):47-49.
- [21] 李斌. 钻井废弃泥浆化学脱稳技术研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013. LI Bin. Research on chemical technology unstability for the waste drill mud[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2013.
- [22] 薛玉志, 刘建民, 刘刚. 废弃钻井液化学脱稳与分离处理的室内研究[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(2):111-113. XUE Yuzhi, LIU Jianmin, LIU Gang. Laboratory study on chemical destabilization and separation of waste drilling fluids [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(2):111-113.
- [23] 方晓虎, 杨志承, 石仲, 等. 废弃钻井液脱稳处理的研究[J]. 辽宁化工, 2018, 47(1):21-23. FANG Xiaohu, YANG Zhicheng, SHI Zhong, et al. Study on destabilization of waste drilling fluid[J]. Liaoning Chemical Industry, 2018, 47(1):21-23.
- [24] 毛志新, 张太亮, 赵德银. 煤层气钻井废液无害化处理工艺技术研究[J]. 天然气勘探与开发, 2011, 34(4):88-91, 103. MAO Zhixin, ZHANG Tailiang, ZHAO Deyin. Harmless treatment technology of waste drilling fluid during CBM production [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2011, 34(4):88-91, 103.
- [25] 刘明华. 水处理化学品手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016. LIU Minghua. Handbook of water treatment chemicals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

(编辑 韩丽丽)