

油基钻屑现场热解析处理技术现状及展望

冯美贵¹, 翁 炜¹, 马卫国², 任 重³, 石 凯¹, 朱迪斯¹

(1.北京探矿工程研究所,北京 100083; 2.长江大学,湖北 荆州 434023;
3.湖北创联石油科技有限公司,湖北 荆州 434023)

摘要:深部石油勘探和页岩气、致密气等非常规油气开发过程中会产生大量的油基钻屑,热解析技术被认为是最有效的油基钻屑环保处理技术,也是实现油基钻屑废弃物资源化利用的有效途径。本文重点介绍油基钻屑现场热解析处理典型的先进技术、装置与应用情况;针对油基钻屑成分和组分性质复杂多变、热解化学反应过程复杂,热解析设备能耗高、热解温度不确定、进料物性不稳定、不均匀性等问题,建议开展油基钻屑复杂体系在移动床中动态连续热解的动力学及机理分析,建立动力学模型,明确不同组分油基钻屑的最优热解析工艺参数;建立技术经济效益、环境效益及可持续发展等评价体系和准则,为不同体系油基钻屑的高效低耗安全环保热解析现场随钻处理提供科学可靠依据和理论支撑。

关键词:油基钻屑;油基钻井液;动态连续热解析;移动床;动力学模型;最优热解析工艺参数;现场随钻处理
中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)03-0007-06

Present situation and prospect of thermal desorption technology for oil-based drill cuttings

FENG Meigui¹, WENG Wei¹, MA Weigu², REN Zhong³, SHI Kai¹, ZHU Disi¹

(1.Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;
2.Yangtze University, Jingzhou Hubei 434023, China;

3.Hubei Chuanglian Oil of Science and Technology Co., Ltd., Jingzhou Hubei 434023, China)

Abstract: A large amount of oil-based drilling cuttings is produced during deep oil exploration and unconventional oil and gas development, such as shale gas and tight gas. Thermal desorption technology is considered as the most effective technology for environmental protection treatment of waste oil-based drilling cuttings, and also an effective way to realize the resource utilization of oil-based drilling cuttings. This paper mainly introduces the typically advanced technology, equipment and application of thermal desorption of oil-based drill cuttings. In view of the complex and variable nature and composition of oil-based drilling cuttings, the complex pyrolysis chemical reaction process, the high energy consumption of thermal desorption equipment, the uncertain pyrolysis temperature, unstable and inhomogeneous feeding material, it is suggested to carry out investigation of continuous desorption dynamics and mechanism of the complex oil-based drilling cuttings system in the moving bed, establish the dynamic model, and define the optimal thermal desorption parameters for different components of oil-based drilling cuttings; meanwhile, establish the evaluation system and criteria of technical and economic benefits, environmental benefits and sustainable development, providing scientific and reliable basis and theoretical support for high efficiency, low consumption, safety and environmental protection thermal desorption of oil-based drilling cuttings in different systems.

Key words: oil-based drill cuttings; oil-based mud; dynamic continuous thermal desorption; moving bed; dynamic model; optimal thermal desorption process parameters; in-situ processing while drilling

收稿日期:2018-09-30; 修回日期:2019-02-15 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.03.002

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“共和盆地恰卜恰干热岩试验性开发与评价(北京探矿工程研究所)”(编号:202027000000180204)

作者简介:冯美贵,女,汉族,1981年生,高级工程师,机械工程专业,从事钻井液固相控制与废浆处理技术装备和岩土钻掘机具的研发工作,北京市海淀区学院路29号,rosy03250186@126.com。

通信作者:翁炜,男,汉族,1977年生,室主任,教授级高级工程师,博士,地质工程专业,从事地质钻探及岩土钻掘机具研究与开发工作,北京市海淀区学院路29号,wengw77@163.com。

引用格式:冯美贵,翁炜,马卫国,等.油基钻屑现场热解析处理技术现状及展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(3):7-12.

FENG Meigui, WENG Wei, MA Weigu, et al. Present situation and prospect of thermal desorption technology for oil-based drill cuttings[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(3):7-12.

0 引言

油基钻井液^[1]具有良好的流变性、滤失性、润滑性,耐高温、抗盐钙侵蚀,有利于井壁稳定、保护储层等特点,广泛应用于深部石油勘探和页岩气、致密气等非常规油气开发过程中,由此也会产生大量的废弃油基钻屑。油基钻屑^[2]中含有大量矿物油、酚类化合物、重金属等有毒物质,若不经处理直接排放或填埋,将严重污染土壤、地表水和地下资源,土地难以复垦,对生态环境造成严重的破坏,直接对人类健康造成危害,因此必须对油基钻屑加强源头控制和全过程综合治理,以实现绿色钻井、人与自然和谐共享绿色可持续发展。同时全球环保法规日益严格,世界许多地区的排放标准规定,钻屑中总石油烃(TPH)^[3]的质量百分数低于1%才能排放。我国已将含矿物油废物列为危险废弃物,危险类别为HW08;《海洋石油勘探开发污染物排放浓度限值》(GB 4914—2008)对海上含油钻屑排放的要求按海域的不同分为三级:含油率 $\leq 1\%$ (一级海域)、 $\leq 3\%$ (二级海域)、 $\leq 8\%$ (三级海域),渤海海域则禁止含油钻屑的排放。

目前,国内外油基钻屑的处理技术^[4-16]主要有回注技术、固化技术、焚烧填埋技术、溶剂萃取技术(常温化学脱附技术)、微生物处理技术等,这些技术有一定的处理效果,但存在局限性:回注、固化与焚烧填埋技术无法回收油基钻屑中的基础油,造成资源浪费,同时存在潜在威胁,焚烧会放出有毒有害物质,存在二次污染;溶剂萃取技术工艺复杂,处理药剂费用高;微生物处理技术处理周期长,占地面积大,同时受温度、湿度等环境条件的制约等。热解析技术以其适应性强、除油效果彻底(残渣TPH含量小于1%),具备“不落地”处理能力、设备占地面积小,具备全天候工作能力等优点迅速成为解决含油固体废弃物污染问题的热门环保技术和设备。本文重点介绍目前国内外油基钻屑热解析处理典型的先进技术、装置与应用情况,以及存在的问题和建议今后开展油基钻屑重点研究方向,为不同体系油基钻屑的高效低耗安全环保热解析现场随钻处理提供科学可靠依据和理论支撑。

1 热解析技术概述

热解析技术^[2-3]也称为热脱附技术,是指在缺氧(氧气体积含量低于8%)或无氧条件下,加热油

基岩屑到一定的热解温度(略低于有机物及烃类物质热分解温度),以惰性气体或蒸气等作为吹扫气,使烃类及有机物解析附,保持一定的停留时间,直至除去所有的油;将岩屑中绝大部分液相分离冷凝后回收,从而实现钻屑与油分离的目的,其中不凝气可作为脱附炉供热系统的燃料循环利用,油与水实现回收利用。脱附炉按照加热介质不同,加热方式有燃料加热、电加热及锤磨热解析技术。使用燃料加热的热解析技术可以直接利用燃料(如柴油、天然气、伴生气等)加热,或利用燃料加热蒸汽,再利用蒸汽加热解析设备。

2 油基钻屑热解析处理典型的先进技术、装置与应用

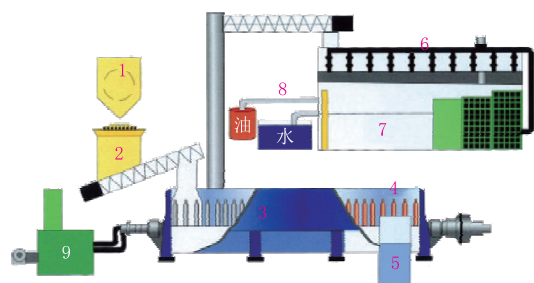
2.1 美国 Brandt NOV 公司热解析装置

Brandt NOV 在全球五大洲 50 万 t 油基废弃钻屑的处理经验表明^[17],目前还没有一种机械方法能够连续将钻屑中的油含量降低至低于 1%,也没有一套化学清洗系统或化学改造油类的系统能够满足严格的环保排放标准,化学处理法通常需要使用有毒的或有害的化学药剂。因此,在许多情况下化学药剂会增加问题而不是解决问题,添加化学药剂会使废弃物数量增加,并且会将污染物从固相中转移到液相中,使问题复杂化,造成二次污染。

从 1999 年第一套钻屑热解析装置被工业化应用,已处理了超过 50 万 t 的油基钻屑,地点遍及五大洲。先后为 BP、Gupco、Chevron、Shell、ConocoPhillip、CN R、Britannia、AGIP、Petrobras、Total、Sonatach Halliburton、Baker Drilling Fluids 和 MI Swaco 等公司进行了服务。

Brandt NOV 公司作为钻屑热解析装置及其工程服务的原制造企业,已经拥有 25 年的历史和经验。其热解析装置工作原理是钻屑送入热解析装置,循环加热的导热油换热或电热元件加热解析装置内的旋转转子和筒体,从而间接加热钻屑。钻屑进入热解析装置的开始旋转转子将水分从钻屑中蒸发掉,旋转转子推动钻屑移动到热解析装置的后段,随着钻屑加热温度的升高,油将从钻屑中蒸发掉,此时温度将加热到 500 °C。冷凝器将热解析装置中排出的蒸汽液化成水和油,然后进入水/油分离器进行油水分离。解析后的干钻屑从解析罐的后端排出,并进行冷却;用冷凝水喷淋干钻屑,避免钻屑灰尘。

Brandt NOV 公司的钻屑热解析系统工艺流程图如图 1 所示。



1—钻屑预处理;2—进料斗;3—热解析装置;4—高温区域;
5—干钻屑排放;6—冷凝器;7—油水分离器;8—油/水收集
与排放;9—高温氧化锅炉

图 1 NOV 公司钻屑热解析系统工艺流程图

Fig.1 Thermal desorption process of NOV

其中 NOV500 型(Model 500)移动式热油热解析装置处理钻屑最大能力为 2.5 t/h,根据钻屑含水量,平均处理钻屑能力在 1.5~2.0 t/h,该型装置能够处理油基泥浆钻屑和合成基泥浆钻屑。整个系统操作消耗的能量以发动机燃料消耗量计算,处理每吨钻屑消耗 40 L 柴油。系统装置模块按标准集装箱包装运输。

该热解装置采用热油循环加热、电加热以及分段加热技术,技术相对成熟。2014 年重庆涪陵页岩气钻井过程中使用 NOV 公司的热解析装置处理含油钻屑、回收基础油,但是国外对国内采取技术垄断,因此每日的设备费和服务费用相当昂贵。

2.2 加拿大 Thermal-flite 公司螺旋型热解析装置

Thermal-flite 公司的 Holo-Scru[®] 热解析系统包括以下主要部分(如图 2 所示):螺旋型热解析装置,供料系统;供料、卸料和排出气锁系统,解析装置物料排出冷却系统,热蒸汽冷凝和回收系统等。螺旋型热解析装置是解析系统的核心,包括解析腔体及其内部的螺旋转子,螺旋转子可以是单螺旋、相互啮合的双螺旋或四螺旋。间接加热方式加热腔体内的钻屑。解析腔内排出的干钻屑经循环水冷却螺旋输送机排出。解析腔内钻屑中的油水在高温作用下发生蒸馏汽化,并从解析腔内排出进入冷凝系统,实现油水分离并回收油。导热流体加热可以使得解析腔内的物料温度达到 454 °C,两级加热可以使得物料温度达到 649 °C,被加热的物料脱挥,残留碳氢化合物可以少于 0.05%;气锁的作用是采用纯氮或

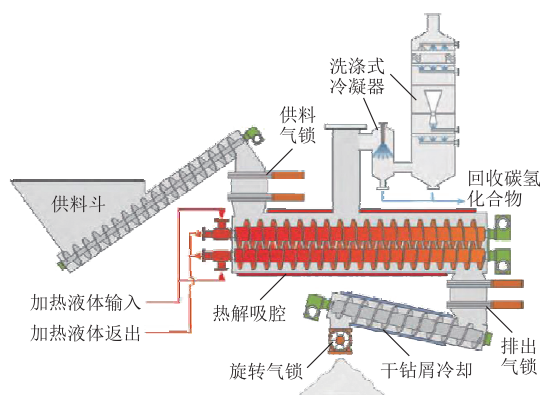


图 2 Therma-Flite 公司 Holo-Scru[®] 热解析系统

Fig.2 Therma-Flite Holo-Scru[®] thermal desorption systems

二氧化碳替换气锁腔内的空气,使得高温物料处于无氧状态,避免物料发生燃烧和闪爆。

通常钻屑中柴油含量 10%~30%,水含量 20%,Therma-Flite 公司 Holo-Scru[®] 热解析系统从钻屑中脱挥和油回收率达到 97%~99.5%。

螺旋型热解析可使物料达到 649 °C 的较高温度,因此对密闭螺旋腔的无氧状态、保温、散热及密封技术要求比较高。

2.3 Halliburton Baroid Bara phase[™] 热摩擦钻屑热解析清洁装置

锤磨热解析技术(TCC, Thermomechanical Cuttings Cleaner)与其他热解析技术的区别在于热能由摩擦力产生:利用高速旋转的转臂带动固体颗粒高速运动产生摩擦,摩擦产生的温度达到油的沸点之上,油、水汽化后克服毛细管力脱附固体颗粒的孔隙实现固液分离。蒸汽经过冷凝分离后回收油、水。

Halliburton Baroid Bara phase[™] 热摩擦钻屑热解析清洁装置包含一个锤磨机,将钻屑粉碎成粉末(60%的钻屑粉碎成直径约 50 μm 的颗粒),粉碎的过程摩擦生热。锤磨机可以使得钻屑温度达到 240~260 °C,也可以高达 300 °C。这个温度范围足以除去吸附在钻屑中的水和油。微真空状态下从热解析装置中抽吸解析出来的油水蒸汽,并进入旋流器除去细小颗粒物,然后进入一个两级冷凝器分离油和水。

Halliburton Baroid Bara phase[™] 热摩擦钻屑热解析清洁装置工艺流程如图 3 所示。Halliburton Baroid Bara phase[™] 热摩擦钻屑热解析装置启动后大约需要 30 min 的时间使得钻屑产生足够的热。

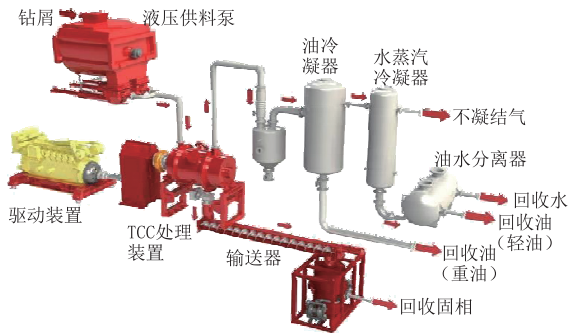


图3 Halliburton Baroid BaraPhase™热摩擦钻屑清洁工艺流程图
Fig.3 Halliburton Baroid BaraPhase™ thermomechanical cuttings cleaner (TCC)

该装置结构非常紧凑,轻便,模块化。在北海平台上使用,处理后的干燥钻屑可以直接排海。该装置结构体积小,可以应用于陆上与钻屑橇配套使用。

锤磨机摩擦生热热解析装置采用电动机或柴油发动机驱动,每吨钻屑(含水25%)需要160 kW的功率消耗。这种摩擦生热热解析装置处理的钻屑总石油碳氢化合物含量(TPH)可以少于0.1%。另外,锤磨机研磨钻屑颗粒使得颗粒粒径减小,可容易除去钻屑空隙中的油和水。

由于锤磨热解析的温度 $\geq 330\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5],远低于白油的裂解温度;且水的比热容和汽化焓均大于白油,其液相汽化及过热消耗的能量更高,从而高含水率比高含油率对处理量的影响更大,因此建议在锤磨热解析之前,增设预处理含油钻屑降低含水率,提高处理量。

2.4 化学热解析装置

化学热解析装置是采用化学方法产生与锤磨机技术相似的结果。用浓酸混合钻屑,其结果是化学氧化和酸液溶解热导致水加热的联合作用使得颗粒分解并产生热,然后添加一些基本化合物,有助于稳定被分解的钻屑颗粒中和pH值。解析结果是产生与水泥同样细小的干燥粉末,冷凝器回收蒸汽。处理过程中化学反应非常快,以致于在螺旋混合器中所需要的总时间仅仅几分钟。为了产生热和必须的化学反应,钻屑中水与油比例必须是1:1或更小。酸在水中的溶解产生热,所以要求有最小水量。

在所有的热解析装置操作过程中,钻屑必须含有一定量的水提供足够的水蒸气,以强化油的蒸馏。但是较高的水油比需要过多的化学添加剂以致不经济。化学热解析需要非常少的电能,仅仅需要几个小功率的电动机驱动螺杆、旋转阀和化学剂喂料设

备。该装置在当时已经建立了试验装置并进行了试验,但是一直没有商业应用。

2.5 直接加热热解析装置

直接加热热解析装置是应用于土壤修复的热解析装置,使用一个带燃烧器的旋转鼓,在旋转鼓内直接燃烧除去土壤中的油。但是,与含油较低的土壤相比,钻屑中油一固比高,使得装置中的油燃烧很难控制,所以该项技术没有被广泛应用于钻屑中油解析。

3 热解析处理存在的问题

热解析技术处理油基钻屑具有较大优势,也被公认为一种清洁、高效和高附加值的技术^[11],但制约热解析技术和以上先进装置推广的因素也较为突出,主要表现在以下几个方面:

(1)热解析装置总体能耗高,难以大面积工业推广应用;

(2)不同体系的油基钻井液、不同地层特性,油基钻屑成分和组分性质复杂多变,热解化学反应过程复杂,热解温度不确定,造成回收的基础油品质起伏不定;

(3)热解析主体内部压力控制不当,可燃气体和氧气混合达到一定浓度时,就有可能发生燃烧和闪爆,存在安全隐患;

(4)油基钻屑成分和组分性质复杂多变,热解析时进料物性不稳定、不均匀性,造成处理效果不稳定。

4 结论与展望

4.1 结论

大量文献及油基钻屑处理研究结果表明,热解析方法被公认为是最有效的方法,可以实现固相物得到净化及永久性处理、油得到净化及重复使用、水得到净化并循环利用或排放,气体得到净化排放处理的目标。但是,深部油气勘探和页岩气、致密气等非常规油气开采地域的广阔性、油气区块的分散性、岩石性质多样性、钻探方法的相适性等等,使得油基钻屑成分和组分性质复杂多变,热解化学反应过程复杂,几乎不可能以一种工艺、一种热解析方法处理油基钻屑。含油钻屑的热解特性研究^[18-26]是基于固定床或者回转窑热固载体情况下开展的热解终温、升温速率和含水率对热解产物(热解油、热解油

残渣与不冷凝气体)产率分布的影响规律研究,目前还没有开展在移动床中动态连续进料的热解行为研究。

4.2 展望

综上所述,建议开展对油基钻屑复杂体系在动态连续移动床中伴有热解反应过程和热质同时传递过程的复杂行为全息动力学研究,揭示油基钻屑复杂体系动态连续热解析机制和规律,建立热解—传质—传热动力学模型,明确不同组分油基钻屑的最优热解析工艺参数,建立技术经济效益、环境效益及可持续发展等评价体系和准则,为不同体系油基钻屑热解析处理提供科学可靠依据和技术支撑,为高效低耗安全环保热解析随钻处理,撬装化、小型化的现场应用提供理论和实验支撑。重点有以下几个方面:

(1)研究油基钻屑动态连续热解机理和规律,探索动态连续移动床中油基钻屑复杂体系热解—传质—传热过程,建立动力学模型;

(2)评价加热系统的温度梯度与温度控制对动态连续移动床中油基钻屑热解析效果的影响,建立评价方法;

(3)摸索出不同组分的动态连续移动床中油基钻屑的最优热解析工艺参数;

(4)建立技术经济效益、环境效益及可持续发展等评价体系和准则,综合评价分析动态连续移动床中油基钻屑的工业化推广应用价值。

参考文献 (References):

[1] 张炜,刘振东,刘宝锋,等.油基钻井液的推广及循环利用[J].石油钻探技术,2008,36(6):34—38.
ZHANG Wei, LIU Zhendong, LIU Baofeng, et al. Popularization and recycling of oil-based drilling fluid[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008,36(6):34—38.

[2] 许毓,史永照,邵奎政,等.废油基钻井液处理及油回收技术研究[J].油气田环境保护,2007,17(1):8—12.
XU Yu, SHI Yongzhao, SHAO Kuizheng, et al. Study on waste oil-based drilling fluid treatment and oil recovery technology[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2007,17(1):8—12.

[3] 周浩.含油钻屑的热解特性研究[D].江苏南京:东南大学,2017.
ZHOU Hao. Investigation of pyrolysis characteristics of oil-contaminated drill cuttings[D]. Nanjing Jiangsu: Southeast University, 2017.

[4] 王铭剑,汤克敏.解析技术在有机污染场地环境修复中的应用初探[J].广东化工,2011,38(8):262—263.

WANG Mingjian, TANG Kemin. Preliminary discussion on thermal-desorption technology application in environmental remediation of organic pollution sites[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011,38(8):262—263.

[5] 黄志强,徐子扬,权银虎,等.锤磨热解析处理油基钻井液钻屑的效果评价[J].天然气工业,2018,38(8):83—90.
HUANG Zhiqiang, XU Ziyang, QUAN Yinhu, et al. Effect evaluation of hammer-milling thermal desorption technology on oil-based drilling fluid cuttings[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(8):83—90.

[6] 蔡浩,姚晓,华苏东,等.页岩气井油基钻屑固化处理技术[J].环境工程学报,2017,11(5):3120—3127.
CAI Hao, YAO Xiao, HUA Sudong, et al. Solidification treatment technology of oil-based drilling cuttings in shale gas well[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017,11(5):3120—3127.

[7] 王超,李刚,单军锋,等.海上含油钻屑的热解析除油处理[J].化工环保,2017,37(1):101—105.
WANG Chao, LI Gang, SHAN Junfeng, et al. Oil removal from offshore oily drilling cuttings by thermal desorption[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2017,37(1):101—105.

[8] 孙静文,许毓,刘晓辉,等.油基钻屑处理及资源回收技术进展[J].石油石化节能,2016,6(1):30—33.
SUN Jingwen, XU Yu, LIU Xiaohui, et al. Progress of oil-based mud treatment and resource recovery technology[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2016,6(1):30—33.

[9] 张明昭.油基泥浆钻屑处理技术发展现状及展望[J].石化技术,2016,23(6):61—61.
ZHANG Mingzhao. Prospect of oil-base drillings cuttings processing technologies[J]. Petrochemical Industry Technology, 2016,23(6):61—61.

[10] 张博廉,操卫平,赵继伟,等.油基钻井岩屑处理技术展望[J].当代化工,2014,(12):2603—2605.
ZHANG Bolian, CAO Weiping, ZHAO Jiwei, et al. Prospect of oil-base drilling cuttings processing technologies[J]. Contemporary Chemical Industry, 2014,(12):2603—2605.

[11] 单海霞,何焕杰,刘晓宇,等.油基钻屑的生物处理[J].江南大学学报(自然科学版),2013,12(4):470—474.
SHAN Haixia, HE Huanjie, LIU Xiaoyu, et al. Study on biological treatment of oil-based drilling cuttings[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2013,12(4):470—474.

[12] 李世刚,吴明霞,王宝辉,等.废弃油基钻井液处理技术研究进展[J].化学工业与工程技术,2012,33(5):33—37.
LI Shigang, WU Mingxia, WANG Baohui, et al. Research progress on treating technology of waste oil-based drilling fluid[J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2012,33(5):33—37.

[13] 陈永红.废弃油基钻井液处理技术研究[D].湖北武汉:长江大学,2012.
CHEN Yonghong. The research on treatment technology of waste oil-based drilling fluid[D]. Wuhan Hubei: Yangtze University, 2012.

- [14] 李学庆,杨金荣,尹志亮,等.油基钻井液含油钻屑无害化处理工艺技术[J].钻井液与完井液,2013,30(4):81-83.
LI Xueqing, YANG Jinrong, YIN Zhiliang, et al. Novel harmless treating technology of oily cuttings[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2013,30(4):81-83.
- [15] 王智锋,李作会,董怀荣.页岩油油基钻屑随钻处理装置的研制与应用[J].石油机械,2015,43(1):38-41.
WANG Zhifeng, LI Zuohui, DONG Huairong. Apparatus for oil-base cuttings processing while drilling in shale oil wells[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015,43(1):38-41.
- [16] Ralph L. Stephenson, Simon Seaton, Halliburton Baroid, et al. Thermal desorption of oil from oil-based drilling fluids cuttings: Processes and technologies[J]. SPE 88486, 2004.
- [17] 柳亚芳,严新新.在五大洲处理50万吨油基钻屑的经验[J].国外油田工程,2007,23(7):35-39.
LIU Yafang, YAN Xinxin. Lessons learned from treating 500,000 tons of oil-based drill cuttings on five continents[J]. *Foreign Oilfield Engineering*, 2007,23(7):35-39.
- [18] 李彦,胡海杰,屈撑囤,等.含油污泥催化热解影响因素研究及热解产物分析[J].现代化工,2018,(1):67-71.
LI Yan, HU Haijie, QU Chengtun, et al. Influencing factors for catalytic pyrolysis of oily sludge and analysis of pyrolysis products[J]. *Modern Chemical Industry*, 2018,(1):67-71.
- [19] 吴小飞.含油污泥固定床热解特性研究[D].北京:中国石油大学(北京),2016.
WU Xiaofei. Study on pyrolysis performance of fixed bed for oil sludge[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2016.
- [20] 马蒸钊.含油污泥回转窑热固载体热解特性研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2014.
MA Zhengzhao. Study on pyrolysis characteristic of oily sludge in the rotary kiln with solid heat carrier[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2014.
- [21] 何敏,张思兰,王丹,等.油基钻屑热解处理技术[J].环境科学导刊,2017,36(S1):57-60.
HE Min, ZHANG Silan, WANG Dan, et al. Pyrolysis technology of oil-based drill cuttings[J]. *Environmental Science Survey*, 2017,36(S1):57-60.
- [22] 孙静文,刘光全,张明栋,等.油基钻屑电磁加热脱附可行性及参数优化[J].天然气工业,2017,37(2):103-111.
SUN Jingwen, LIU Guangquan, ZHANG Mingdong, et al. Desorption in the treatment of oil-based drill cuttings by electromagnetic heating: Feasibility and parameters optimization[J]. *Natural Gas Industry*, 2017,37(2):103-111.
- [23] 黄维巍,周泽军,何勇,等.页岩气开发油基钻屑真空热解资源化处理[J].环境工程学报,2017,11(8):4783-4788.
HUANG Weiwei, ZHOU Zejun, HE Yong, et al. Resources utilization of oil-based drilling cuttings vacuum pyrolysis in shale gas developing[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017,11(8):4783-4788.
- [24] 王万福,金浩,石丰,等.含油污泥热解技术[J].石油与天然气化工,2010,39(2):173-177,90.
WANG Wanfu, JIN Hao, SHI Feng, et al. Pyrolysis technology overview of oily sludge[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2010,39(2):173-177,90.
- [25] 宋薇,刘建国,聂永丰.含油污泥热解和燃烧的反应过程[J].清华大学学报(自然科学版),2008,(9):1453-1457.
SONG Wei, LIU Jianguo, NIE Yongfeng. Comparative study of pyrolysis and combustion process of oil sludge by TG-FT-IR analysis[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008,(9):1453-1457.
- [26] 陈超,李水清,岳长涛,等.含油污泥回转式连续热解——质能平衡及产物分析[J].化工学报,2006,(3):650-657.
CHEN Chao, LI Shuiqing, YUE Changtao, et al. Lab-scale pyrolysis of oil sludge in continuous rotating reactor: mass/energy balance and product analysis[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2006,(3):650-657.

(编辑 韩丽丽)