

文章编号:1674-2869(2018)05-0473-06

含油钻屑处理技术的研究进展

商 辉¹, 翟云娟², 汪天也¹, 张文慧¹

1. 中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 昌平 102249;

2. 北京华油联合燃气开发有限公司, 北京 海淀 100176

摘 要:油基钻井液在钻井过程中的广泛使用,产生了大量的含油钻屑。目前各个国家对环保的要求越来越严格,因此由油基钻井液所产生的钻井废弃物必须经过一定的处理,达到环境要求方可排放。目前国内含油钻屑的处理方法主要有回注法、固化法、机械分离法、生物法、溶剂抽提法以及热处理等。其中固化、回注和填埋,由于并未对其中的有机物进行处理,仍留有安全隐患;生物法存在菌种选择复杂,处理周期长,废水和废渣仍需处理的问题;热处理法中的热解析法最为有效,可以实现含油钻屑的资源化和无害化,尤其是微波热解析法,效率高、设备简单、占地面积小,该方法处理含油钻屑具有很好的潜力。

关键词:含油钻屑;热解析;资源化;无害化

中图分类号:TE254 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2018.05.001

Progress in Treatment of Oil-Contaminated Drill Cuttings

SHANG Hui¹, ZHAI Yunjuan², WANG Tianye¹, ZHANG Wenhui¹

1. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. Beijing Huayou Union Gas Development Co. LTD, Beijing 100176, China

Abstract: A large number of oil-contaminated drill cuttings are produced with the extensive usage of oil-based muds in the drilling process. These cuttings must be treated before discharge to meet the requirements of the stringent environmental legislation. Recently, the main treatment technologies include re-injection into the dedicated wells, solidification, mechanical separation, bio-remediation, solvent extraction and thermal treatment methods. The potential safety problems exist in solidification, landfill and re-injection due to the presence of the organic materials remained. The biological method shows some disadvantages such as the difficulty in bacteria selection, long time of treatment and waste water/solid residue. Thermal pyrolysis, especially microwave pyrolysis has been proved to be the most suitable and potential method with high efficiency, simple equipment and small land occupation, which can accomplish harmlessness of the treated cuttings and the resource recovery.

Keywords: oil-contaminated drill cuttings; thermal pyrolysis; resource recovery; hazard-free treatment

随着钻井深度的增加,以及地层结构的复杂性,油气钻探过程广泛应用油基钻井液。油基钻井液起着平衡压力、润滑和冷却钻头、保持井壁稳定性并将岩屑运回陆地等作用。其中的有机物主要是在制作油基泥浆时加入的柴油或矿物油。在钻井过程中,这些钻井液的使用会产生大量的含

油废弃物(主要为含油钻屑)。据统计,我国每钻一口井,能产生300 m³左右的钻屑,每年产生的废弃钻屑可达200多万吨,若直接排放必然会对环境造成一定的危害^[1]。含油废弃物不仅仅是对环境和人体构成了极大的危害,还关系到可持续发展性^[2]。世界各国目前都指定了较为严格的环境保

收稿日期:2018-03-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(21476258)

作者简介:商 辉,博士,副教授。E-mail:huishang@cup.edu.cn

引文格式:商辉,翟云娟,汪天也,等. 含油钻屑处理技术的研究进展[J]. 武汉工程大学学报,2018,40(5):473-478.

护政策,由油基钻井液所产生的钻井废弃物的无害化和资源化的研究迫在眉睫。

1 常规含油钻屑处理技术

20世纪70年代起,国外开始了对钻屑的无害化处理技术的研究开发,并就污染物对生态环境产生的影响进行了评测,随后出台了一系列法律法规实现对污染物排放的控制^[1]。我国对废弃钻屑的处理虽然发展稍晚,但发展较快,并已经取得了一些成果。国内外处理技术主要有:回注法、固化法、固液分离法、生物法、溶剂抽提法以及热处理等方法^[3-7]。

1.1 回注法

回注处理是指将含油钻屑经过研磨、剪切和筛选,使钻屑的粒度满足回注要求后注入到废弃的油井或保留在井眼环空中,该方法在海上钻井平台应用较多。回注法采用地下灌注与水力压裂相结合,又称为浆体压裂灌注,以废弃的油井或专用井作为回注井。注入层通常是压裂梯度较低,渗透性较差的地层,而且上下盖层必须强度高、致密。此外,由于回注前并未对钻屑进行净化处理,因此存在污染地下水和油层的风险,这就要求回注深度必须大于600 m;该方法受地层孔隙度影响较大,不是任何地区都能采用;如果含油钻屑注入地层后,油田继续实施注水开采,地层孔隙度和压力可能会受到破坏,注入的含油钻屑可能会返回到地面或者海面,再次造成污染;其次,该方法没有对其中的油进行回收,形成了资源的浪费。此外对地面相关设备要求较高,系统复杂,费用较高,不能被普遍采用^[8]。

1.2 填埋与固化法

固化法是指向废钻屑中加入固化剂,使之通过一系列物理和化学变化,将钻屑中的有害成分(重金属、高聚物及制备油基钻井液所使用的油等)固封起来,之后可以直接填埋覆土耕种或用做建筑材料等^[9]。该技术的优点是能兼顾钻屑中的有机物和重金属,方法简单,固封后回填或还耕比较容易,认为是一种可靠实用的治理含油钻屑污染的方法,对COD(Cr)、pH值和总铬等有害物浓度含量高、处理难度大的含油钻屑最为有效,该方法近年来受到了国内外广大学者的重视。

所用固化剂有粉煤灰、水泥、石灰、炉渣及其复合剂,新型的粘结剂主要有MgO水泥、沸石水泥窑粉尘等^[10-15]。固化剂中需要含有提供较高比表面的吸附剂,有助于金属和有机物的吸附。由于

每个油田地层结构不同,与之相对应的钻井液的物理化学组成也不相同,这就要求使用不同的固化剂以达到最佳效果。Kogbara等^[12]采用固化和生物法相结合,在适宜的条件下可以取得很好的结果。所用固化和稳定粘结剂为波兰水泥,当稳定/固化与生物处理方法相结合时,处理效果取决于细菌的密度,当体系中加入化肥(可以作为生物的营养物质^[13-15])、活性炭(吸收烃类物质以便于细菌的消解)^[16]和高密度的细菌时,可使钻屑中的石油烃类物质减少99%,但此时的金属含量仍旧较高。当采用低密度的细菌时,可同时减少石油烃类(98%)和其中的金属含量。

该方法处理过程简单,成本低,在一定程度上能够消除钻屑中有机物质对水体、土壤和生态环境的影响,是当前各大油田废弃物处理采用较多的方法之一。但仍存在一些问题,主要表现在:固化法需要使用大量的固化剂,且固化后体积增大,需要较大的填埋空间;长时间堆放或填埋后出现油类或污染物泄露等风险;该方法并没有实现对有机物资源的回收。

1.3 固液分离法

固液分离法包括机械分离和化学固液分离。化学分离是通过向钻屑中加入化学药剂,破坏胶体稳定性,从而实现固液分离的目的;机械分离则是将液态的含油钻屑在离心机中进行水、泥、油分离的过程。其中,水可以循环使用,泥渣杂质需进一步处理,油则可以回收利用。然而由于黏土具有很强的吸附能力,钻屑中除油之外还混有一定的地下水,其中的油水充分乳化,造成分离困难。现有的无机絮凝剂(硫酸铁、硫酸铝、氯化铁以及聚合氯化铁等)和有机高分子絮凝剂效果均不理想^[1]。需加入调质剂,实现油、水、渣三相分离^[17]。污泥调质-机械脱水在国内外获得了较为广泛的发展^[18-20]。Swaco公司VERTI-G和德国HILLER公司开发的此技术是向预处理后的污泥中加入药物,然后加热,再将其中比较大的固体杂质用振动筛除去。被分离出的水经检测后如果符合标准可以直接排放,再用微生物处理固体杂质。在污泥预处理后通常采用机械脱水工艺,目前应用的含油污泥机械脱水工艺主要有:真空过滤、加压过滤、滚压脱水、离心脱水等。在脱水的过程中,做到三相分离干净,才能使处理成本降低,因此要实现此目标,研制出三者一体的分离设备是该技术的关键。

1.4 清洗法

清洗法是指采用热水对含油钻屑进行冲洗,

然后进行分离。分离出的泥饼可以继续热解析,释放出的油气部分进行冷凝回收,部分可燃烧为热解析系统提供热量。通过此联合工艺可以将钻屑中的油含量降低至1%以下。但该方法会产生大量的含油废水,造成进一步的环境污染。

除了直接清洗外,目前还采用加入表面活性剂的方法对钻屑进行清洗,烷基盐类是清洗剂的主要组分,其中烷基为亲油基,磺酸基为亲水基,其用量一般高于0.1%。目前常用的有ABS(烷基苯磺酸钠)、AS(烷基磺酸钠)及ABSN(十二烷基磺酸钠三乙醇胺)等^[21-22]。国外对此技术的发展主要注重设备开发方面,如新型密闭式浮选箱、水力旋流器、振动式钻屑清洗机以及各种组合式油水分离器等。这些装置体积小、成本较低^[23],已在钻井平台上使用。

1.5 生物法

生物处理法是利用微生物分解石油烃类,使其降解转化为无害的二氧化碳和水,减轻含油废弃物对环境的危害。该方法的关键是成功获得高效烃类分解微生物,同时可通过人为控制条件,提高生物降解效率^[24-25]。据文献报道^[26],通过培养高效烃类分解微生物,燃料油和润滑油的脱除率可以达到98%以上。但针对不同废弃物所用菌种处理效果会有所不同,如Ladousse等研究发现生物降解的方法进行的并不完全,最后还会有将近10%的油进入到土壤中^[27]。

生物堆法也被广泛用来处理污染的土壤,是指将油泥收集并运送到专门的场所,通过曝气和/或添加营养物质、水分和膨胀剂来刺激生物降解,所用膨胀剂通常为稻草、木屑等^[28]。Ma等^[29]通过生物堆法对含油钻井废弃物进行了研究,结果表明通过加入无机养分和膨胀剂比加入微生物菌剂更能有效提高生物堆法的性能,通过90 d的试验,有机物脱除率能达到87.4%。

生物法处理工艺与其他方法相比较,安全性更好,易于管理;缺点是处理费用较高,处理周期长,但受生物生存环境的影响很大。

1.6 溶剂萃取法

萃取工艺利用了“相似相溶”原理,含油钻屑中的有机物溶解于有机溶剂中进行抽提,将萃取物进行蒸馏、分离从而将石油烃类解析出来回收使用^[30-31]。萃取法若萃取剂选择适当可回收大部分石油烃类,从而将含油钻屑中的有害物质去除,减少污染,该方法具有操作简单、反应速度快、选择性高等优点。

超临界流体萃取技术是利用超临界流体的较大溶解力,将钻屑中的烃类物质溶解到超临界流体中,然后经过减压分离达到对烃类物质回收的目的。所用超临界流体有低分子烃类,如甲烷、乙烷、丙烷、乙烯以及二氧化碳等,是良好的超临界萃取剂,并且密度小,便于分离。尤其是超临界二氧化碳,在较低条件下就可以达到超临界状态,且溶解力较强,效率较高,受到广大研究者的青睐。李赵^[32]通过采用超临界二氧化碳对含油钻屑进行处理,可以除掉99.2%的油,但使用的压力较高为25 MPa。然而有些研究其结果并不好,如Godarznia等的研究采用超临界二氧化碳在温度范围为328 K~352.5 K,压力 1.6×10^4 kPa~ 2.2×10^4 kPa条件下进行萃取,但有机物脱除率只有22.4%^[33],这可能与钻屑本身的性质以及操作条件相关。由于超临界所需条件比较苛刻,对原料组成要求较高(如其中的水含量),成本较高,目前还未实际应用于炼厂含油污泥或油田含油钻屑处理中。

1.7 热化学处理法

该法主要包括高温焚烧法和较低温度的热解析法。

1.7.1 高温焚烧法 高温焚烧法是采用很高的温度对含油污泥进行焚烧,一般含油污泥需预先进行脱水处理,焚烧后的灰渣可以进行综合利用。我国目前研发了多种类型的焚烧炉,如方箱式、流化床式、固定床式或回转窑等^[34]。高温焚烧法也在一些石油公司得到了应用,如燕山石化和长岭石化,均取得了较好的效果。该方法的优点是:对有害物质能有效脱除;但其缺点也很明显:操作温度高(可高达1 500 ℃),对设备要求较高,对其中的有机物并没有进行回收,浪费了宝贵的资源,焚烧过程的烟气中可能含有二氧化硫以及其中的粉尘均可造成二次污染。

1.7.2 热解析法 热解析法是在较低温度下,微正压和绝氧的条件下采用加热的方法对石油烃类进行分离和回收,包含高温热解析和低温热解析法。高温热解析法温度可达520 ℃^[35]。低温热解析法通常用来处理含有轻油的钻屑,而高温热解析法则可以处理含有重油污染的钻屑^[35]。该方法由于所需要的温度条件并不高,产生有害物质较少,不易形成二次污染,达到了保护资源与环境的综合效果。RotoMillTM^[36]研究的热处理法采用较低温度250 ℃~260 ℃,利用闪蒸的方式,通过旋转炉将废弃物中的油进行脱除。该技术占地面积小,目前已经成功用于英国北海海上钻井平台的废弃

钻屑处理。

不同于焚烧法,热解析法能够回收有机物资源^[35],且所用设备不需耐高温、高压,运行成本较低,是一种新兴的含油污泥无害化、减量化和资源化的处理技术。

1.7.3 微波热解析法 微波加热不同于传统的加热方式,其作用原理是微波电磁场与物质分子之间的相互作用,微波加热具有穿透性、瞬时性和选择性加热的特点。将微波加热技术应用于含油钻屑方面已经取得了较好的结果^[37-45]。对于含油钻屑,由于其中的油通常为柴油或矿物油,其沸点较低,因此通过微波热解析的方法可以在不发生化学反应的条件下对其中的油进行回收^[40-45]。研究认为:影响微波热解析效果的最重要因素为物料处的功率密度,该密度与反应器和反应腔体的设计相关,还受微波输入功率的影响;此外处理效果还与岩石类型,含水率、钻屑颗粒大小等相关^[37,46-47]。英国诺丁汉大学的几位学者^[40-43,46]经过对不同含

油钻屑的研究,设计了连续式微波热解析含油钻屑中试实验,研究发现微波功率与残余油含量具有明显的正相关性。在微波腔体一定的条件下,空隙中水分的存在对微波处理效果起着关键性作用,该部分水分可以被加热成过热水,使油在较高温度下气化,从而在载气的作用下被移除。将微波加热技术应用于含油钻屑的处理过程中,在很短的时间内(如几秒钟到几十秒钟),即可脱除含油钻屑中的绝大部分油,且操作成本低^[38,40-43]。

以上研究表明,采用微波加热技术代替传统加热技术,可以大大提高加热效率和油品的脱除效率,使得处理成本大幅降低;且微波法可以回收脱除的有机物,实现固体废弃物的无害化和资源化,微波加热也因此能源环保领域具有重要的发展前景。

2 含油钻屑处理技术综合对比

含油钻屑的处理技术要因因地制宜,表 1 对不同的方法进行比较。

表 1 各种含油钻屑处理方法比较

Tab. 1 Comparison of different treatment methods for oil-contaminated drill cuttings					
序号	处理方法		说明	优点	缺点
	方法				
1	填埋法	简单填埋 固化填埋	直接填埋 固化后填埋	简单易行	占用土地,留有环境污染隐患,浪费资源
2	生物法	堆肥 生物反应器	添加一定养分,生物分解 利用不同菌种完成脱水、脱油和脱除有机物	处理后可做绿化用或土壤改良 节省能源,无需化学药剂	处理周期长,残余油含量较高 菌种选择复杂,废水、废渣仍需处理
3	分离法	脱水	自然干化 压滤	简单易行 脱水较彻底	占用场地,影响环境 需加化学剂对含油钻屑破乳
		萃取油	加入溶剂萃取	可脱除回收大部分油	有的溶剂有毒或易燃
		热水洗涤	用含碱热水洗涤,将油和泥砂分开	不加或少量加入化学药剂,回收油	废水、废渣仍需处理
		三相分离	加温、破乳、分油、脱水实现 油水泥分离	可一次完成三相分离,回收油	废水、废渣仍需处理
5	焚烧法	焚烧炉 固化焚烧	在焚烧炉中焚烧,同时回收热量 固化后制成仿煤燃料,与煤掺和在燃煤锅炉中焚烧	有机物处理彻底 可有效利用热能,不需专门的焚烧设施	需专门的焚烧装置,要求高温,有废气排放 粘接性不好,不易成型,产生废气
6	热解析法	普通法 微波法	通过加热的方式将有机物进行回收,实现资源化和无害化 采用微波加热的方式来实现	设备简单,且无需耐高温、高压,运行成本低,能量回收率高 设备简单,占地面积小,效率高(处理时间为普通热解析法的5%~10%)	对废渣中尚存重金属,还需进一步处理
7	综合利用	做建材 发电	将除油后的含油钻屑砂制成建筑材料 将炼厂“三泥”用于发电	综合利用 处理效果理想,资源得到利用	技术有待完善 工艺技术复杂,投资高,多适用于大型炼厂

3 结 语

随着环保要求的不断提高,含油钻屑由于含有机物对环境污染较为严重,必须经过处理达标后才能排放。目前所采用的方法主要有:填埋法、固化法、溶剂萃取法、生物法、固液分离法以及热处理方法。其中热处理法中的低温热解析法最为有效,可以实现对含油钻屑的资源化和无害化,采用微波热解析的方法目前实验证明更有效,可以大大提高热效率。

参考文献:

[1] 王彩林. 废弃钻井泥浆随钻无害化处理[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.

[2] RIPA M, FIORENTINO G, VACCA V, et al. The relevance of site-specific data in life cycle assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 445-460.

[3] KJEILEN G, AABEL J P, CRIPPS S J. Disposal of oil-based drilling muds and cuttings: a pre-study, RF-96/022 [R]. Stavanger, Norway: Rogaland Research Report, 1996.

[4] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 北京: 石油大学出版社, 2001.

[5] SANTOS J M, PETRI I J, MOTA A C S, et al. Optimization of the batch decontamination process of drill cuttings by microwave heating [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 163: 349-358.

[6] 蔡利山, 刘四海, 郭才轩. 石油钻井环境保护技术综述[J]. *西部探矿工程*, 2002 (3): 132-134.

[7] 李建中. 废弃钻井液的治理与利用[J]. *油气田环境保护*, 1996, 6(2): 21-23.

[8] 牟顺泉, 董怀荣, 丁希军, 等. 钻屑随钻处理技术研究[J]. *西部探矿工程*, 2012, 41(6): 18-22.

[9] ORESHKIN D V, CHEBOTEAV, A N, PERFILOV V A. Disposal of drilling sludge in the production of building materials [J]. *Precedia Engineering*, 2015, 111: 607-611.

[10] 郑立稳, 张闻, 王磊磊, 等. 胜利油田废弃钻井泥浆复合固化剂研究[J]. *山东科学*, 2017, 30(2): 106-109.

[11] KOGBARA R B, AL-TABBAA A, YI Y, et al. pH-dependent leaching behaviour and other performance properties of cement-treated mixed contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(9): 1630-1638.

[12] KOGBARA R B, AYOTAMUNO J M, ONUOMAH I, et al. Stabilisation/solidification and bioaugmentation treatment of petroleum drill cuttings [J]. *Applied Geochemistry*, 2016, 71: 1-8.

[13] KOGBARA R B. Ranking agro-technical methods and environmental parameters in the biodegradation of petroleum-contaminated soils in Nigeria [J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2008, 11(1): 113-125.

[14] AYOTAMUNO J M, KOGBARA R B, AGORO O S. Biostimulation supplemented with phytoremediation in the reclamation of a petroleum contaminated soil [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2009, 25: 1567-1572.

[15] AYOTAMUNO J M, KOGBARA R B, AGELE E A, et al. Composting and phytoremediation treatment of petroleum sludge [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2010, 19: 686-695.

[16] BAKHAEVA L P, VASILYEVA G K, SUROVSEVA E G, et al. Microbial degradation of 3, 4-dichloroaniline sorbed by activated carbon [J]. *Microbiology*, 2001, 70(3): 277-284.

[17] 黄铃, 高蕊, 党博, 等. 油田含油污泥产生途径及处理方法[J]. *油田地面工程*, 2010, 29(2): 75-76.

[18] 胡小刚, 康涛, 柴占文, 等. 国外钻井岩屑处理技术与国内应用研制分析[J]. *石油机械*, 2009, 37(9): 159-161.

[19] 彭文强, 杨帅强, 石国芳, 等. 油泥中原油回收的实验研究[J]. *武汉工程大学学报*, 2010, 32(3): 1-4.

[20] 沈喜洲, 王道楠, 尹先清, 等. 渤海油田含油污泥处理效果的改进[J]. *武汉工程大学学报*, 2015, 37(6): 1-4, 20.

[21] 赵姗姗, 鄢捷年, 刘晓平, 等. 西非深水钻井含油钻屑清洗方法室内研究[J]. *钻井液与完井液*, 2011, 28(4): 8-10.

[22] 李伟娜, 刘志红, 谢皓雪. 表面活性剂的结构特点及应用研究进展[J]. *长春医学*, 2008(6): 68-70.

[23] 陈李斌. 国外油田含油污水处理技术现状与发展[J]. *中国石油和化工*, 2005(3): 38-40.

[24] 许怡. 生物法处理钻井液废水的实验研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.

[25] 林立强. 油基钻井液含油钻屑无害化处理工艺技术[J]. *化工设计通讯*, 2018(4): 220, 235.

[26] SCHOLZ W, FUCHS W. Treatment of oil contaminated wastewater in a membrane bioreactor [J]. *Water Research*, 2000, 34(14): 3621-3629.

[27] LADOUSSE A, TALLEC C, CHAINEAU T, et al. Landfarming of drill cuttings [C]// *Society of Petroleum Engineers' International Conference on Health, Safety and the Environment*. Louisiana: New Orleans, 1996.

- [28] JORGRNSEN K S, PUUSTINEN J, SUORTTI A M. Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107(2): 245–254.
- [29] MA J, YANG Y, DI X, et al. Effects of adding bulking agent, inorganic nutrient and microbial inocula on biopile treatment for oil-field drilling waste [J]. *Chemosphere*, 2016, 150: 17–23.
- [30] 王曼琳, 张梁, 王勇, 等. 声-化联合法清洗含油钻屑[J]. *化工环保*, 2018, 38(2): 222–226.
- [31] 白鹤, 武卫锋, 翁良宇, 等. 化学清洗处理高含油率油基钻屑的研究[J]. *天然气与石油*, 2018(3): 76–80.
- [32] 李赵. 超临界二氧化碳处理油基钻井固体废弃物研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [33] GOUDARZANIA I, ESMAEILZADEH F. Treatment of oil-contaminated drill cuttings of South Pars gas field in Iran using supercritical carbon dioxide[J]. *Iranian Journal of Science & Technology Transaction B Engineering*, 2006, 30(5): 607–611.
- [34] 魏平方, 邹斌, 陈俊. 油田废钻井液固化处理实验研究[J]. *化学与生物工程*, 2003(6): 34–35.
- [35] HUANG Z, XU Z, QUAN Y, et al. A review of treatment methods for oil-based drill cuttings: 2nd International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science [C]. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018(170): 022074.
- [36] THOMAS D, SMITH G. Offshore cuttings processing-a case history of rotomill operations [R]. *Drilling Operations-The Environmental Challenge*, 2004.
- [37] PEREIRA M S, DE ÁVILA PANISSET C M, MARTINS A L, et al. Microwave treatment of drilled cuttings contaminated by synthetic drilling fluid [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 124: 68–73.
- [38] SANTOS J M, PEREIRA M S, PANISSET C M, et al. Different effects on microwave drying of drilled cuttings [C]// Houston: AADE Fluids Technical Conference, 2014.
- [39] MENENDEZ J A, INGUANZO M, PIS J J. Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge [J]. *Water Research*, 2001, 36(13): 3261–3264.
- [40] SHANG H, ROBINSON J P, KINGMAN S W, et al. Theoretical study of microwave enhanced thermal decontamination of oil contaminated wastes [J]. *Chemical Engineering Technology*, 2007, 30(1): 121–130.
- [41] SHANG H, SNAPE C E, KINGMAN S W, et al. Treatment of oil-contaminated North Sea drill cuttings in a multimode cavity [J]. *Separation and Purification Technology*, 2006, 49: 84–90.
- [42] SHANG H, SNAPE C E, KINGMAN S W, et al. Treatment of oil contaminated drill cuttings by microwave heating in a high power single mode cavity [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2005, 44: 6837–6844.
- [43] ROBINSON J P, KINGMAN S W, SNAPE C E, et al. Remediation of oil-contaminated drill cuttings using continuous microwave heating [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 152(2/3): 458–463.
- [44] SANTOS J M, PEREIRA M S, JUNIOR I P, et al. Microwave drying of drilled cuttings in the context of waste disposal and drilling fluid recovery [J]. *Energy Technology*, 2014, 2(9/10): 832–838.
- [45] JUNIOR I P, PEREIRA M S, DOS SANTOS J M, et al. Microwave remediation of oil well drill cuttings [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 134: 23–29.
- [46] ROBINSON J, KINGMAN S, LESTER E, et al. Microwave remediation of hydrocarbon-contaminated soils-Scale-up using batch reactors [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 96: 12–19.
- [47] JUNIOR I P, MARTINS A L, ATAIDE C H, et al. Microwave drying remediation of petroleum-contaminated drill cuttings [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 659–665.

本文编辑: 张 瑞