

# 废弃钻井液处理技术研究进展 及发展趋势

马 磊<sup>1</sup>, 蒲晓林<sup>1\*</sup>, 张 舒<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 西南石油大学理学院, 四川 成都 610500)

**摘要:**通过对国内外废弃钻井液处理技术的调查研究,重点论述了吸附技术、电化学技术、固液分离技术、固化技术和微生物处理技术的机理和进展。对未来废弃钻井液处理技术的发展趋势进行了预测和展望。

**关键词:**废弃钻井液; 吸附; 电化学; 絮凝; 固化; 微生物

**中图分类号:** TE992.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2017)04-0042-04

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.04.010

## Research progress and development trend of drilling waste treatment technology

MA Biao<sup>1</sup>, PU Xiao-lin<sup>1\*</sup>, ZHANG Shu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University,

Chengdu 610500, China; 2. School of Science, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** The mechanism and progress of adsorption treatment, electrochemical treatment, solid-liquid separation treatment, solidification treatment and microbial treatment are comprehensively reviewed through the investigation on the drilling waste treatment technology at home and abroad. The development trend of drilling waste treatment technology is forecasted and prospected.

**Key words:** drilling waste; adsorption; electrochemistry; solid-liquid separation; solidification; microbe

钻井液被誉为石油工业的血液,具有携带岩屑、冷却、润滑钻头、控制和平衡地层压力等作用。随着石油勘探难度的增加,各种高性能钻井液被应用于钻井作业,这意味着越来越多的各类化学物质被添加到钻井液中,而其中大部分化学物质对环境具有潜在的危害。因此对废弃钻井液的妥善处理 and 重复利用成为当前亟需解决的问题。

## 1 国内外油田现场应用现状

废弃钻井液的产生对于钻井作业来说是一个无法避免的问题。通过文献调研发现,阿曼、挪威、加拿大、委内瑞拉和我国辽河油田等地的陆地钻井平台主要采用热处理或添加表面活性剂的方法对废弃钻井液进行初步处理后通过添加固化剂将其固化,然后就地填埋、筑路或作为开钻泥浆使用。伊朗阿瓦士油田采用回注法将废弃钻井液回注到指定地层。我国长庆气田将废弃钻井液加入肥化剂后用于

改善当地的荒漠化土壤。墨西哥湾和挪威北海等地区的海洋钻井平台除了采取将废弃钻井液运回陆地处理以外,较常采用的是回注法和热处理法。其中热处理法是将废弃钻井液研磨成细小颗粒,同时控制研磨温度,以免废弃钻井液中的油类物质受热燃烧。该方法处理后的油类物质被回收利用,其余颗粒和水则被排放至海洋。

可以看出,目前油田现场所采用的废弃钻井液处理技术仍有一定的局限性。其中回注法虽然节约了大量成本,但当回注井的井筒完整性失效后,该方法则无法进行。热处理法则存在处理不彻底,温度控制难度大、能耗高,产生二次污染等缺点。

鉴于目前油田现场废弃钻井液处理技术的局限与不足,世界各地专家学者展开了对废弃钻井液处理技术的深入研究,探索出多种处理方法,吸附技术、电化学技术、固液分离技术、固化技术与微生物处理技术等。因此,调研分析上述技术方法对于指

收稿日期:2016-12-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB228003)

作者简介:马磊(1991-),男,博士生;蒲晓林(1957-),男,教授,博士生导师,研究方向为油气井工作液及应用,通讯联系人, puxiaolin@vip.sina.com。

导新型废弃钻井液处理技术的开发及其与油田现场的有效结合具有重大意义。

## 2 废弃钻井液处理技术研究进展

### 2.1 吸附技术

纳米级吸附材料由于其具有独特的物理化学形式和适应能力,被认为是从环境中去除有机或无机污染物的最佳物质。与其他处理工业废水的传统工艺相比,纳米级吸附材料不仅具有巨大的比表面积,还具有较低的内扩散阻力。尤其是在传统工艺很难处理的低浓度金属离子领域,具有得天独厚的优势。

Alimohammadi 等<sup>[1]</sup>首次采用纳米吸附剂来处理废弃水基钻井液。其主要针对的是废弃水基钻井液中的金属铬离子。其在研究中采用聚丙烯酸、碳化二亚胺、六水三氯化铁、氯化亚铁四水合物、氢氧化铵、二亚乙基三胺和四氯代氢金合三水合物合成了一种新型纳米吸附剂。研究表明,纳米吸附剂对金属铬离子的去除效果非常理想,同时还具有占地面积小、环保、经济的优点。与传统工艺相比,其在金属离子浓度较低时,具有更高的去除效率。纳米吸附剂的作用效果高度依赖溶液的 pH。研究表明,使吸附效果最佳的 pH 为 6,另外,搅拌器的旋转速率也会影响处理效果。

Leonard 等<sup>[2]</sup>采用高碳粉煤灰作为吸附剂来处理石油废液中的碳氢化合物,同时也将其添加到水泥中作为固化剂的成分之一来处理石油相关的固体废物。研究发现,高碳粉煤灰的吸附性主要源于非极性及其疏水性。含碳量越高,吸附效果越好,废液与高碳粉煤灰的最佳质量比例为 40:1。另外,高碳粉煤灰在使用之后,可经过 NaOH 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液处理后重复使用<sup>[3]</sup>。

虽然吸附技术有诸多优点,但是目前只局限于用于处理废弃水基钻井液,处理对象也只是针对重金属离子,废弃油基钻井液目前也仅能作为制备纳米复合材料中的填料使用<sup>[4]</sup>。吸附技术对于废弃钻井液中其他污染物的处理有待进一步深入研究。

### 2.2 电化学技术

目前在石油工业中用于处理废弃钻井液的电化学技术主要包括电絮凝技术和电氧化技术。电絮凝技术是利用铝或铁阳极溶出,原位生成高活性的多形态聚铝或聚铁絮凝剂,将水体中污染物微粒聚集成团并沉降或气浮分离的除污工艺<sup>[5]</sup>。电氧化技术是在电解池中放入有机物的溶液或悬浮液,通过

直流电,在阳极上夺取电子使有机物氧化或是先使低价金属氧化为高价金属离子,然后借助高价金属离子再使有机物氧化的方法。

Ighilahriz 等<sup>[6]</sup>分别采用电絮凝和电氧化技术对废弃油基钻井液的滤液进行处理。其研究发现,电絮凝技术能够减少处理时间且不需要添加化学物质,对处理分布均匀的胶体具有较高的速率,然而对于去除有机物的能力则不如电氧化技术,但是电氧化技术需要较长的处理时间。在同样的时间内,采用电絮凝技术的处理效率可以达到 95%,而电氧化技术的处理效率则为 78%。pH 和电流密度为整个电化学处理过程中 2 个非常重要的因素。研究表明,在 pH=8、电流密度为  $190 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> 时,COD 达到最低值,但是随着 pH 和电流密度的增大,COD 则呈现上升趋势。Cañizare 等<sup>[7]</sup>和 Wang 等<sup>[8]</sup>的研究也印证了 pH 和电流密度的重要性。

Bensadok 等<sup>[9]</sup>在采用电絮凝技术处理油品乳化液时为了提高离子交换的速度和效率,向样品中加入了电解质 NaCl,除了能加速离子交换外,其产生的 Cl<sup>-</sup>可在钝化的铝电极表面造成坑蚀,从而破坏铝电极表面的氧化膜,让铝电极加速溶解,提高电絮凝的处理效率。

电化学处理技术具有处理效率高,操作简单等优点,但目前仅能用于处理废弃水基钻井液或含油乳状液,对于将电化学技术直接用于处理废弃油基钻井液的问题,尚待深入研究。

### 2.3 固液分离技术

固液分离技术经十几年的试验研究,技术逐步成熟,目前已得到广泛应用。该技术是将废弃钻井液固液分离,使分离的液体达标后排放,对固相进行掩埋或再处理。它是在化学混凝催化氧化法基础上发展起来的,结合机械法处理的先进技术方法<sup>[10]</sup>。其工作流程是破乳-絮凝-分离。分离出的固相物质含水率小于 70%,然后对出水进行二次絮凝-脱色-沉降-过滤,使排出液达到国家排放标准。该工艺简单、灵活,对悬浮物、胶体物质去除率高。该技术主要适应于因采用磺化钻井液或聚磺钻井液而产生的废弃钻井液,同时对高浓度、COD、色度超标钻井液的处理有明显效果,处理后的水达标可外排或回用<sup>[11-12]</sup>。

该技术中最关键的部分为破乳剂和絮凝剂等处理剂的研制。Zhang 等<sup>[13]</sup>研制了一种新型阳离子絮凝剂 CAPAM,由丙烯酰胺、2-甲基丙烯酰氧乙基

三甲基氯化铵、 $\text{Al}(\text{OH})_3$  胶体聚合而成。其反应时间为 4 h, 控制温度为  $70^\circ\text{C}$ 。该新型絮凝剂能将经过处理的废弃钻井液中的水分含量控制在 21% 左右。其最佳反应条件为  $\text{pH} = 9$ , 随着  $\text{pH}$  的升高, 处理效率随之下降; 随着温度的升高, 处理效率随之升高, 当温度为  $35^\circ\text{C}$  时, 达到最佳效果。

Zou 等<sup>[14]</sup> 研制了一种复合型絮凝剂 CSSAD 用于处理废弃钻井液。该复合型絮凝剂由玉米淀粉、丙烯酰胺、2-甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵和  $\text{SiO}_2$  溶胶合成。其控制温度为  $70^\circ\text{C}$ , 反应时间为 4 h, 2-甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵和玉米淀粉的质量之比为 1.5:1, 丙烯酰胺和玉米淀粉质量之比为 3:1。而其最佳使用剂量为 0.3 g/100 g 废弃钻井液, 最佳搅拌速度为 60 r/min, 最佳搅拌时间为 2 min。该新型絮凝剂能将经过处理的废弃钻井液中的水分含量控制在 21.34%。

Atta 等<sup>[15]</sup> 研制出了一种两性离子溶液 HEOD-TS 作为破乳剂用于除油。具体方法为: 用氢氧化钠、2,2-二氯二乙基醚和四甘醇对十八胺进行醚化, 然后将其产物 HEOD 与对甲苯磺酸一水合物反应, 从而得到该两性离子溶液 HEOD-TS。HEOD-TS 的阴离子和阳离子之间的静电作用使其倾向于构建新的网状结构, 增加了 HEOD-TS 分子的表面积, HEOD-TS 分子可以吸附在油滴表面, 一方面通过其网状结构将油滴分割成更小的油滴, 使其不能聚集, 另一方面 HEOD-TS 分子增加了油滴表面的静电斥力, 使得除油效率得以提高。

虽然在固液分离技术中已开发出许多处理剂, 但其处理效率还存在较大的提高空间, 研制备更方便、处理更高效、排放更环保、成本更低廉的新型处理剂是未来的研究重点。

## 2.4 固化技术

固化技术是向废弃钻井液中加入固化剂, 使其转化为土壤或胶结强度很大的固体的处理工艺<sup>[16]</sup>。该技术能够将废弃钻井液中的金属离子和有机物隔离在特定的固体中, 避免废弃钻井液对水体、土壤和生态环境产生的影响和危害, 是一种比较传统的处理废弃钻井液的技术, 应用范围比较广泛。

尹亚君等<sup>[17]</sup> 对新疆塔河油田钻井过程中产生的废弃钻井液的污染情况进行研究, 提出了以多个井场废弃钻井液为试样, 采用水泥、生石灰、粉煤灰等固化剂进行固化处理, 研究结果表明, 固化剂中的水泥及生石灰对固化效果起着决定性的影响, 16%

水泥 + 2% 生石灰 + 8% 粉煤灰 + 1% 氯化钙 + 5% 石膏为最佳配比方案。通过对新疆油田多口油井的实验分析得出, 在最合适范围内的固化剂配方条件下, COD 可达到标准值, 但  $\text{pH}$  略微偏高。

Al-Ansary 等<sup>[18]</sup> 采用 5 种不同的固化剂配方, 分别对高含油废弃合成基钻井液和低含油废弃合成基钻井液进行处理。通过对固化产物进行的无侧限抗压强度测试以及对滤液  $\text{pH}$ 、 $\text{Cl}^-$  和链烷烃类物质浓度检测表明, 石灰 + 波特兰水泥配方的固化效果最好, 能有效地封固有害物质。

Leonard 等<sup>[19-21]</sup> 采用高碳粉煤灰 + 波特兰水泥与废弃钻井液反应, 用因子设计试验研究固化时间和反应物比例对固化产物的无侧限抗压强度、渗透性、滤液  $\text{pH}$  以及酸中和能力等参数的影响。结果表明, 废弃钻井液和高碳粉煤灰的增加均会降低固化产物的无侧限抗压强度, 高碳粉煤灰能够提高固化产物的渗透性, 而废弃钻井液的增加几乎对酸中和能力没有影响。通过进一步研究固化产物的滤出性, 尤其是固化产物滤液中主要污染物的影响因素, 发现高碳粉煤灰的增加能够显著减少碳氢化合物的滤出。另外还发现高碳粉煤灰和废弃钻井液的增加均会减少固化剂水解产物的数量, 虽然固化剂水解产物对污染物质有一定吸附作用, 但固化作用的主要机理是固化剂的水解产物对污染物质物理上的包被。

随着环保法规的日益严格, 固化技术的应用会受到一定程度的限制, 但将废弃钻井液固化后添加相关处理剂, 变废为宝, 将处理过的废弃钻井液用于改善土壤环境将是该技术未来的发展方向。

## 2.5 微生物处理技术

微生物处理技术利用微生物细菌对废弃钻井液进行功能修复和改善, 借助微生物分解废弃钻井液中的石油烃类和其他有机物。微生物处理技术所需要的场地面积较大, 时间较长, 同时受到温度、 $\text{pH}$ 、养料、湿度、氧气和光照等条件的限制<sup>[22]</sup>。国外某些油田已经开始使用微生物处理技术处理废弃钻井液<sup>[23-24]</sup>, 同时在国内的部分油田环保施工中也进行了应用性试验<sup>[25]</sup>。

常用的微生物有无色杆菌、不动杆菌、产碱杆菌、节杆菌、芽孢杆菌、黄杆菌、诺卡氏菌、假单胞菌和棒状杆菌等, 其中假单胞菌的应用最为广泛<sup>[26]</sup>。常用的辅助植物则为黑麦草, 也有研究人员使用蚯蚓辅助处理废弃钻井液<sup>[24,27]</sup>。

Fan 等<sup>[28]</sup>利用微生物修复和植物修复相结合的处理方法,仅需 48 h 就可将废弃聚磺钻井液中的 TOC 值由 89 800 mg/kg 降到 21 700 mg/kg,色度去除率达到 81.5%。再经过 240 d 的植物(黑麦草)修复,TOC 值的去除率可达 84.6%。该方法不仅去除率高,而其处理时间比以往微生物修复和植物修复有了很大提高。

Li 等<sup>[29]</sup>培育出了 SDJY-1、SDJY-2 和 SDJY-3 3 种细菌,其中 SDJY-1 和 SDJY-2 属于芽孢杆菌,SDJY-3 属于不动杆菌。而后将这 3 种细菌两两分组或共同协作处理海上废弃油基钻井液,结果发现,当这 3 种细菌同时协作时除油效果最好,除油率可达 98% 以上。

Deuel 等<sup>[30]</sup>利用石灰和土壤中所含的微生物对废弃油基含盐类钻井液进行处理。其主要机理为:通过石灰调节土壤的 pH,使之能够达到适合土壤中微生物生长的条件,从而使微生物分解相关有害物质。实验结果显示,该方法能够显著降低废弃钻井液中盐类和烃类物质的浓度。石灰:废弃钻井液:土壤的最佳质量比例为 1:2:2,处理时间为 120 d。

微生物处理技术具有无二次污染、处理彻底等优点,但由于其需要的时间过长,占地面积过大,相关菌种培育过程复杂及植物种类受限等缺点,目前在废弃钻井液处理领域的应用受到很大限制。微生物处理技术未来的研究重点在于简化菌种培育过程,增强菌种对废弃钻井液的处理能力,减少处理时间等方面。

### 3 结论与展望

吸附技术和电化学处理技术将会是未来废弃钻井液处理技术研究的重点,虽然目前并未大规模应用,但是其处理过程高效环保符合未来发展趋势,也是环保形势发展的必然要求。新型吸附材料的研制和电絮凝技术和电氧化技术协同处理的研究将会是该领域的热点。

固液分离技术、固化技术和微生物处理技术的联合协作则会未来废弃钻井液处理技术工业化的发展方向。其中除油剂、絮凝剂和固化剂等相关处理剂的研制以及新型菌种的培育是该项研究工作的核心。

随着环保要求的不断提高,废弃钻井液处理技术将向绿色化和工业化发展。这种发展趋势则建立在对“来源广泛、价格低廉、无毒无害”的各类新型

原材料和处理剂的不断探索之上。废弃钻井液处理过程中不产生二次污染、提高废弃钻井液的处理效率和废弃钻井液的二次利用是未来废弃钻井液处理技术研究的更高目标。

### 参考文献

- [1] Alimohammadi N, Shadizadeh S R, Kazeminezhad I. Removal of cadmium from drilling fluid using nano-adsorbent[J]. *Fuel*, 2013, 111(9):505-509.
- [2] Leonard S A, Stegemann J A, Roy A D. High carbon fly ash as a sorbent for the treatment of petroleum contaminated residues[J]. *Environmental Engineering Science*, 2010, 27(2):199-207.
- [3] And H L W, Jiang W F. Adsorption of dinitro butyl phenol (DNBP) from aqueous solutions by fly ash[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(16):5405-5411.
- [4] Adegbotolu U V, Njuguna J, Pollard P, et al. Waste to want: Polymer nanocomposites using nanoclays extracted from oil based drilling mud waste[C]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, 64(Conference 1):012023.
- [5] Lakshmanan D, Clifford D A, Samanta G. Ferrous and ferric ion generation during iron electrocoagulation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(10):3853-3859.
- [6] Ighilahriz K, Ahmed M T, Djelal H, et al. Electrocoagulation and electro-oxidation treatment for the leachate of oil-drilling mud[J]. *Desalination & Water Treatment*, 2014, 52(31):5833-5839.
- [7] Cañizares P, Martínez F, Jiménez C, et al. Coagulation and electrocoagulation of oil-in-water emulsions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151(1):44-51.
- [8] Wang Y, Yan J N, Li Z Y, et al. The mechanism of removing the organic matter in heavy oil sewage by the electric flocculation method[J]. *Petroleum Science & Technology*, 2012, 535/536/537(13):2201-2208.
- [9] Bensadok K, Benammar S, Lapique F, et al. Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(1):423-30.
- [10] 周迅. 废钻井液的处理技术综述[J]. *油气田环境保护*, 2001, 11(4):10-12.
- [11] 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.
- [12] 吕方, 向兴金, 舒福昌. 废弃水基聚合物钻井液物化处理试验研究[J]. *长江大学学报: 自科版*, 2007, 4(2):238-240.
- [13] Zhang Y, Miao Z, Zou J. A new cation-modified Al-polyacrylamide flocculant for solid-liquid separation in waste drilling fluid[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(11):41641-41649.
- [14] Zou J, Zhu H, Wang F, et al. Preparation of a new inorganic-organic composite flocculant used in solid-liquid separation for waste drilling fluid[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 171(1):350-356.

回流收集,处理后的残留液根据其性质进行相应的处理。通常采用加入浓硫酸蒸发工艺和负压蒸发工艺解决回用酸浓度低的问题。张孟民等<sup>[8]</sup>以宝鸡瑞星化工机械厂和宝鸡铁塔厂提供的废液为原料,对废液进行加热升温并减压蒸馏回收盐酸,通过向残留液加入浓硫酸二次蒸发回收盐酸,得到的盐酸质量分数为 $\omega(\text{HCl}) = 34\%$ ,作为副产品的母液可以用于生产磷肥,该方法不仅处理了酸洗废液,又可以得到磷肥和氧化铁红,具有良好的经济和环境效益。万金保等<sup>[14]</sup>利用盐酸采用负压外循环蒸发工艺回收盐酸废液的酸和亚铁盐,该方法可以连续、稳定、高效地运行,操作简单,反应过程中不需要投加酸,运行费用低,可完全实现废酸的零排放。

### 1.3 结晶法

结晶法的工作原理主要是通过改变酸洗废液的理化性质,回收得到回用酸的同时,也可以使铁盐以晶体的形式从废液中析出。该方法从废液中回收到的铁可以再次使用,但在盐酸酸洗废液中铁盐回收率低。田莹莹等<sup>[15]</sup>根据同离子效应的原理,向酸洗废液中不断地通入HCl气体,1.5 h后便可以得到氯化亚铁绿色晶体,该方法在常温下也可以进行。

Forsberg等<sup>[16]</sup>以硝酸酸洗废液为原料,采用连续结晶法来合成 $\beta\text{-FeF}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 晶体,研究发现, $\beta\text{-FeF}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的合成速率为 $10^{-12} \sim 10^{-11} \text{ m/s}$ ,该速率在温度升高的情况下会显著提高,最佳反应温度应该控制在 $45 \sim 50^\circ\text{C}$ ,若温度高于 $60^\circ\text{C}$ ,则会引起设备腐蚀和废气外泄等问题。

### 1.4 离子交换法

离子交换法是利用离子交换剂中的可交换基团与溶液中各种离子间的离子交换能力的不同来进行分离的一种方法。考虑到离子交换树脂的再生性和树脂污染等问题,该方法未大规模地使用,但对于低浓度的酸洗废液或者高浓度稀释过的废液,离子交换法十分有效。李菲等<sup>[17]</sup>利用强酸性阳离子交换树脂分离酸洗废水中的铁,从动力学吸附角度分析,吸附速率与树脂性质和温度有关,用质量浓度为 $7.4 \text{ g/L}$ 的硫酸溶液洗脱负载树脂,铁洗脱率达 $99.5\%$ 以及树脂可以再生使用。Marañón等<sup>[10]</sup>同时将阳离子交换树脂、阴离子交换树脂以及螯合树脂共同作用下来处理盐酸酸洗废液,结果表明,对于大孔羧酸型离子交换树脂(MP-500)的去除效果最好,阴离子交换树脂对氯离子和 $\text{Fe(III)}$ 形成带负电

(上接第45页)

[15] Atta A M, Al-Lohedan H A, Abdullah M M S, *et al.* Application of new amphiphilic ionic liquid based on ethoxylated octadecylammonium tosylate as demulsifier and petroleum crude oil spill dispersant [J]. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 2015, 33: 122 - 130.

[16] 杜国勇. 钻井废弃泥浆土壤化实验研究[J]. *天然气工业*, 2010, 30(8): 95 - 97.

[17] 尹亚君, 谢海燕, 王博远, 等. 塔河油田钻井废弃泥浆无害化处理技术研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(1): 90 - 93.

[18] Al-Ansary M S, Al-Tabbaa A. Stabilisation/solidification of synthetic petroleum drill cuttings [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 141(2): 410 - 21.

[19] Leonard S A, Stegemann J A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1/2/3): 463 - 472.

[20] Leonard S A, Stegemann J A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings: Leaching studies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1/2/3): 484 - 491.

[21] Leonard S A, Roy A D, Stegemann J A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings: Thermal and microstructural studies of binder hydration products [J]. *Environmental Engineering Science*, 2010, 174(1/2/3): 463 - 472.

[22] Dong J T, Sun Y D, Dong J Y. Treatment of oil and drilling

wastewater [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 726/727/728/729/730/731: 2997 - 3000.

[23] Rusjanto J, Asmaradewi G, Safitri D, *et al.* Enhancing bioremediation of oily waste by bioaugmentation method [C]. IPTC 15316, 2011.

[24] Paulsen J, Jonathan G, Roald S. Vermicomposting and best available technique for oily drilling waste management in environmentally sensitive areas [C]. SPE 86730, 2004.

[25] Zhu Z, Li J, Xie S, *et al.* Research and application on resource utilization technology of oily waste drilling fluid [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2011, 29(14): 1470 - 1481.

[26] Hahn W J, Loehr R C. Biological treatment of petroleum oily sludges [C]. SPE 23997, 1992.

[27] Sørheim R, Amundsen C E, Kristiansen R, *et al.* Oily drill cuttings - from waste to resource [C]. SPE 61273, 2000.

[28] Fan Y Y, Wang G C, Fu J H, *et al.* The remediation of waste drilling muds by a combined plant-microbe system [J]. *Petroleum Science & Technology*, 2014, 32(17): 2086 - 2092.

[29] 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.

[30] Deuel L E, Holliday G H. Lime treatment of oily saline drilling wastes [J]. *SPE Production & Facilities*, 2001, 16(3): A56 - A57. ■