

页岩气油基钻屑脱油灰渣资源化利用进展*

熊德明^{1,2} 廖朋³ 张烨² 田竞⁴ 王朝强^{1,2} 张春^{1,2}

(1. 重庆市页岩气开发环境保护工程技术研究中心;
2. 页岩气勘探开发国家地方联合工程研究中心(重庆地质矿产研究院);
3. 长江师范学院; 4. 重庆市涪陵生态环境监测站)

摘 要 针对页岩气开发过程中产生的油基钻屑在堆放、运输和处理过程中均有可能对环境造成危害的问题,研究油基钻屑脱油灰渣的处置和资源化利用现状。在实际应用中,各种资源化利用技术由于政策、环保标准、经济性等原因,除水泥窑协同处置技术外,很多技术还不能大量推广应用。文章通过系统调研,阐述了各项技术的原理、优缺点及资源化利用所面临的政策障碍、实际应用及二次污染等问题,指出了资源化利用技术在开发过程中需要加强过程污染控制、开展相关政策和标准制定、提高产品高附加值等方面研究。

关键词 页岩气; 油基钻屑; 资源化利用

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2021.01.002

文章编号:1005-3158(2021)01-0006-05

Current Research Processes in Utilization of Oil-based Drilling Cuttings Residue

Xiong Deming^{1,2} Liao Peng³ Zhang Ye² Tian Jing⁴ Wang Chaoqiang^{1,2} Zhang Chun^{1,2}

(1. Chongqing Environmental Protection Engineering Technology Center for Shale Gas Development;
2. National Joint Engineering Research Center for Shale Gas Exploration and Development
(Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources);
3. Yangtze Normal University;
4. Chongqing Fuling Ecological Environment Monitoring Station)

ABSTRACT Oil-based drilling cuttings (OBDC) are a typical hazardous waste in drilling process of exploration for shale gas resources. The production, storage, transportation and processing of OBDC may have negative impact on the local ecological environment and residents' health. The disposal and utilization of OBDC & residues have become hot topics. Currently, the promotion of OBDC utilization technologies have been limited by policies, environmental standards and economics, except co-processing in cement kiln. This study demonstrated a systematic investigation on the mechanism, advantage/disadvantage, policy obstacle in resource utilization, application and secondary pollution of OBDC treatment technologies. Furthermore, this study provided three prospects for the follow-up studies: develop environmentally friendly treatment method, develop relevant policies and standards, and improve the added value of products.

KEY WORDS shale gas; oil-based drilling cuttings; resource utilization

0 引 言

油基钻井液作为页岩气开发的关键,在广泛使用的同时也产生了大量油基钻屑(单井约为 200 m³)。已列为危险废物(编号 HW08)。目前,油基钻屑主要是通过热脱附、溶剂萃取、汽提、微生物等方法处理后,

再采用固化填埋的方式进行处置。但这些油基钻屑处理方法存在处理成本高、对处理设备要求高、环境风险大等问题;其脱油灰渣仍含有少量的重金属、石油类、大分子有机物等有害物质,固化填埋易引起地表水污染、土壤污染、地下水污染等环境问题^[1-4]。因

* 基金项目:重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0043),重庆市技术创新与应用发展(重点研发项目),cstc2018jszx-zdyfmx0011。

熊德明,2015年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所地球化学专业,博士,高级工程师,现在重庆市页岩气开发环境保护工程技术研究中心从事油气地球化学、注气提高采收率和油气田开发环境保护等方面的研究。通信地址:重庆市涪陵区新城区太白大道3号重庆市涪陵页岩气环保研发与技术服务中心,408000。E-mail:xiongdeming2004@126.com。

此,油基钻屑资源化利用的各种技术纷纷涌现。本文在现场研究和文献调研的基础上,阐述了各种油基钻屑资源化利用技术的原理和优缺点,并展望了油基钻屑脱油灰渣(以下简称脱油灰渣)资源化利用技术的发展方向。

1 油基钻屑理化特征

油基钻屑是页岩气开发过程中产生的,含有油基钻井液、岩石碎屑、水、添加剂等,呈现为黑色黏稠状流体,具有较重的油气味。油基钻井液基础油主要包括白油、柴油等重质油,其有机物种类达50余种,主要由多环芳烃、烷烃、苯系物、环氧烷烃、醛、羧酸和烯烃组成。添加剂主要包括有机添加剂和无机添加剂,有机添加剂主要有乳化剂、润湿剂、有机土等,无机添加剂主要有加重剂(BaSO_4)、降滤失剂等。岩石碎屑由可被灼烧分解的无机物和不可分解无机物组成,其主要矿物成分为石英(SiO_2)、方解石(CaCO_3)、铝硅酸盐黏土矿($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、赤铁矿(Fe_2O_3)等。从涪陵页岩气田样品测试结果来看,油基钻屑浸出液pH值为8.7~9.05,呈弱碱性,水分含量为5.21%~10.65%,有机物含量为15.72%~20.48%,灰分含量为72.18%~74.31%。

2 油基钻屑的危害

油基钻屑属危险废物,成分复杂,且具有高毒性,其主要危害包括:

1)有机物和重金属等有害物质对人类健康的危害。一是油基钻屑含有萘、蒽、二苯并[a,h]蒽、芴、苯并[k]蒽、蒽、苯并[a]芘、苯并[a]蒽、菲等可致癌多环芳烃类化学物质,这些多环芳烃类化学物质难被降解,易导致肺癌、皮肤癌和胃癌等疾病^[5]。二是油基钻屑中的多环芳烃影响有孔虫类、鱼类等生物的生殖发育,从而导致生物种类、生物密度及生物量下降^[6-9]。三是油基钻屑含有钡、铬、铜、镍、铅、锌等多种重金属元素,一定程度上接触或吸入有害物质,将影响人体皮肤、肺等多个器官的正常功能^[10-13]。

2)油基钻屑高浓度的可溶性盐类和有机物会对当地微生物、动物、植物的生长及生物多样性产生影响^[13]。

3)油基钻屑主要来源于地下岩层,可能携带了某些含有放射性的矿物,引起放射性危害^[5]。

3 油基钻屑及灰渣资源化利用技术现状

3.1 返回大自然的资源化技术

3.1.1 油基钻屑的调剖技术

油基钻屑调剖技术是采用“取之地层,还于地

层”的思路,利用油基钻屑配伍性好、憎水亲油的特点,在油基钻屑体系中加入分散剂、悬浮剂、增黏剂等药剂,使其乳化为油层调剖剂的技术。在施工过程中,将油基钻屑调剖剂注入地层后,乳化剂在地层岩石吸附作用和地层水稀释作用下,蜡质、胶质、沥青质黏联聚集形成“团粒结构”,流入高渗层,形成封堵带堵住高渗层,增加水的波及系数,提高水驱油效率,从而提高油层原油采收率^[14]。其技术优点为:悬浮性能好、黏度低($\leq 0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)、沉降时间大于3 h、可泵性好^[15-17]。现场应用表明油基钻屑调剖剂具有抗污染性强、抗剪切力强、热稳定性好等特点。该技术优点在于现场施工应用成本低,调剖驱油效果好,不仅使油基钻屑得到了资源化利用,又实现了油田调剖堵水,增产增效的目的。但是,由页岩气开发现场经验可知,页岩气的主要储集空间为微裂缝和微孔隙,其渗透率极低,所以油基钻屑调剖技术不适用于页岩气开发。

3.1.2 土地利用技术

土地利用技术是利用土壤中微生物降解、土壤吸收、土壤吸附等功能和作用,降低油基钻屑污染物含量,或去除油基钻屑污染物,提高贫瘠土壤肥力的技术。其主要原理为:一是油基钻屑中含有丰富的氮、钙、磷、钾、镁及微量的钡、锰、铜、锌、镍、钴、铬、锶等,为植物或微生物提供必要的元素条件;二是油基钻屑中含有大量的有机物,将油基钻屑和贫瘠土壤互配后,有助于改善土壤的性质、提供植物生长必要的养分、增强微生物活性、促进植物生长等^[18]。近年来,国内外学者^[18-20]均进行了油基钻屑制备土壤改良剂的试验研究,研制了堆肥法、生物培养法、生物反应器法等土壤改良剂技术;油基钻屑改良后,其相关指标满足GB 4284—2018《农用污泥污染物控制标准》和GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》,改良的油基钻屑可用作绿化建设或湿地改造^[19]。该方法的优点是运输费用低、能耗低、成本低等;缺点是需要占用大量土地,施工耗时长,且易受到当地气候温度的影响;另外也可能会引起地下水VOCs污染、土壤重金属污染、土地沙化等环境问题。

3.2 作为生产原料的资源化技术

3.2.1 制备免烧砖技术

脱油灰渣制备免烧砖技术是指油基钻屑(或含油污泥)经过萃取、离心、热解等前处理后,在脱油灰渣含油率小于2%的条件下,将脱油灰渣按照一定的比例与水泥、河沙、交联剂、添加剂等混合,然后在约10 MPa

液压下制成免烧砖的技术。该技术通过物理化学方法将脱油灰渣中的重金属离子、油类、有机物等污染物固化或包裹在惰性固化基材中。在页岩气开发之前,国内外学者^[21-24]就尝试了基于固化工艺的生产建筑材料试验研究,将油田含油污泥与固化添加剂混合后,制成免烧砖,其产品质量达到 JC/T 422—2007《非烧结垃圾尾矿砖标准》,产品浸出液满足 GB 8978—1996《污水综合排放标准》一级标准。王朝强^[25]、李开环^[26]进行了页岩气脱油灰渣制备免烧砖试验,研究表明脱油灰渣具有制备免烧砖原料的特性,可用作制备免烧砖,但是其添加量不得超过 50%,否则免烧砖内部会出现孔隙明显增多、结构蓬松等特征,从而影响免烧砖的强度。该技术优点是工艺简单,操作方便,易大规模推广应用,且能固结重金属元素等;缺点是其中的有机物并未完全去除,仍残存于免烧砖中,存在一定的环境风险。

3.2.2 制备烧结砖技术

脱油灰渣制备烧结砖技术是指油基钻屑经过萃取、离心、热解等处理后,在脱油灰渣含油率小于 2% 的条件下,将脱油灰渣按照一定的比例和黏土混合,制成砖胚,而后烧制成砖的技术。Vaquero^[27]、Li^[28]、Wang 等^[29] 研究表明油基钻屑脱油灰渣的主要成分是黏土、石英、碳酸盐等,具备制造烧结砖原料的特性,可作为制备烧结砖的替代原料。在油基钻屑脱油灰渣制造烧结砖的过程中,随着温度的增加,所制烧结砖的孔隙度逐渐降低、吸水率逐渐降低、干缩率逐渐升高、容重逐渐增加、抗压强度逐渐增强。当烧结温度为 1 050℃ 时,脱油灰渣烧结砖强度达 GB/T 5101—2017《烧结普通砖》MU20 级别;烧结砖浸出液中重金属含量达到 GB 16889—2008《生活垃圾填埋场污染控制标准》中的相关要求。该技术优点是工艺简单,能够去除有机物,固结重金属元素;缺点在于成本高、能耗高、产品附加值低、易致二次空气污染等。

3.2.3 铺垫井场及制备混凝土技术

脱油灰渣铺垫井场及制备混凝土路基材料是指油基钻屑经过萃取、离心、热解等前处理后,在含油率小于 2% 的条件下,按照一定的比例将脱油灰渣与固化剂、水泥、河沙、交联剂、添加剂等混合,然后利用搅拌机搅拌均匀,实现脱油灰渣中重金属离子、油类、有机物等稳定固化处理,并用作路基材料的技术。高昌胜^[20]、Chen^[23]、Tuncan^[30]、Wasiuddin^[31]、Dhir^[32]、Abdieva^[33]、李梦妮^[34] 等国内外学者开展了油基钻屑铺垫井场及制备混凝土技术研究,研究表明当油基钻屑添加量小于 30% 时,油基钻屑脱油灰渣制作的

混凝土的稳定性、渗透性、强度、弹性模量等性能均达到 JTG F10—2006《公路路基施工技术规范》规定路基材料质量标准,其产品中钡、铜、镉、铅、汞、铬、锌、砷、镍等元素含量与浸出毒性均满足 GB 8978—1996《污水综合排放标准》一级标准要求。Abdieva 等^[33] 认为油基钻屑脱油灰渣不仅可用于通井路和垫井场,还可用于铺设沥青路面。该技术的优点是工艺简单、成本低、能耗低等,缺点是产品中仍含有有机污染物和重金属元素,存在环境污染的可能性。

3.2.4 制备水泥技术

油基钻屑脱油灰渣中的固体主要含有铝硅酸盐黏土矿($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、重晶石(BaSO_4)、石英(SiO_2)、方解石(CaCO_3)、赤铁矿(Fe_2O_3)等。这些也是生产水泥所需的矿物成分,可以补充水泥生产必要的元素。为此,英国 Page^[35]、意大利的 Bernardo 等^[36] 开展了油基钻屑脱油灰渣烧制水泥试验,研究表明油基钻屑脱油灰渣可以作为烧制水泥熟料时黏土和石灰石的替代原料,所制水泥熟料的胶凝性能并未下降。目前,该方法已经在涪陵页岩气田大规模应用,已经处理油基钻屑脱油灰渣约 10 万 t,应用效果较好。该技术的优点是成本低,可去除有机物,固结重金属元素,且不会影响产品质量;缺点是要加强尾气监控和处理,且油基钻屑脱油灰渣为危险废物,水泥厂必须具备危废处置资质才可进行生产。

3.2.5 其他技术

除了上述比较成熟的资源化利用方法外,许多学者尝试了其他提高油基钻屑脱油灰渣产品附加值的资源化利用方法研究,如油基钻屑脱油灰渣改质流体燃料技术^[37-38]、制备免烧陶粒技术^[39]、制备多孔陶瓷技术^[40]、制备轻骨料技术^[41]、制备压裂支撑剂技术^[42-43]、制备沸石技术^[44]、制作生物复合材料 ϵ -聚己内酯的富硅改良剂技术^[45] 等,这些新技术的研究为油基钻屑脱油灰渣高附加值利用提供许多新的思路和方法。

4 相关政策及标准

1) 石油天然气行业缺乏含油固废处置及资源化利用相关的国家环保标准。在 2017 年以前,含油固废处理处置只能参考 GB 4284—84《农用污泥中污染物控制标准》(2018 年修订为 GB 4284—2018《农用污泥污染物控制标准》),矿物油最高允许含量不得超过 0.3%。2017 年 5 月 1 日之后,可参考 SY/T 7301—2016《陆上石油天然气开采含油污泥资源化综合利用及污染控制技术要求》,总石油烃小于 2% 时,可以铺路,但是环保部门并未明确是否可以执行这个标准。

2)各个地方制定了含油污泥资源化利用污染控制标准。国家的《危险废物污染防治技术政策》(环发[2001]199号)指出“国家鼓励危险废物回收利用技术的研究与开发”。因此,各地制定了相应的地方标准,如黑龙江省制定了DB23/T 1413—2010《油田含油污泥综合利用污染控制标准》,陕西省制定了DB61/T 1025—2016《含油污泥处置利用控制限值》,新疆制定了DB 65/T 3998—2017《油气田含油污泥综合利用污染控制要求》,四川制定了《四川省页岩气开采业污染防治技术政策》(公告2018年第3号),江汉油田制定了Q/SH 3140—0154—2017《页岩气开发钻屑资源化利用技术要求》等,即含油污泥经处理后,其污染控制限值满足一定标准限值的条件下,可用于铺设井场、等级公路、工业生产原料等,不作为固体废物管理。

5 结论及展望

从文献资料和现场调研可知,目前油基钻井液尚无替代产品。所以,油基钻屑在未来一段时间内仍是页岩气开发的必然产物,其能否安全处置或资源化利用已成为页岩气开发的瓶颈问题。虽然涌现了油基钻屑调剖技术,土地利用技术,制备免烧砖、烧结砖、混凝土、水泥、新型燃料、多孔陶粒、支撑剂、沸石、生物复合材料等新型技术,但在实际应用中,由于政策、环保标准、经济成本等原因,只有脱油灰渣水泥窑协同处置是可行的。因此,要克服这些障碍,进行新技术推广应用,还有许多工作要做。

1)开展以油基钻屑及脱油灰渣为原料进行生产的过程污染控制技术研究,解决生产过程二次污染问题。

2)开展新技术相关产品的质量和环境综合评价,以及相关产品使用过程的环境跟踪监测评价,并以此为据,向生态环境部申请脱油灰渣危险废物鉴定及豁免,为油基钻屑脱油灰渣资源化利用提供政策依据。

3)开展油基钻屑及脱油灰渣资源化产品污染物控制研究,制定国家钻井固废资源化利用污染物控制标准,为油基钻屑资源化利用提供标准依据。

4)加强脱油灰渣资源化利用技术基础研究,提高产品附加值,使其产品具有更大的竞争力。

参考文献

[1] 熊德明,张思兰,冯斌,等.涪陵页岩气勘探开发环保现状分析[J].西安石油大学学报(自然科学版),2016,31(6):48-53.

[2] BALL A S, STEWART R J, SCHLIEPHAKE K. A review of the current options for the treatment and safe disposal

of drill cuttings[J]. Waste management & research, 2012, 30(5):457-473.

[3] SOEDER D J, SHARMA S, PEKNEY N, et al. An approach for assessing engineering risk from shale gas wells in the United States[J]. International journal of coal geology, 2014(126):4-19.

[4] WARD M, BREAU J, CAMPBELL B. A successful drilling waste management program that reduce operating costs[J]. World oil magazine, 2004, 225(12):37-40.

[5] JONES F V, RUSHING J H, CHURAN M A. The chronic toxicity of mineral oil wet and synthetic liquid wet cuttings on an estuarine fish[C]. SPE health, safety and environment in oil and gas exploration and production conference. The Hague, 10. 2118/23497-MS. 1991.

[6] DENOYELLE M, GESLIN E, JORISSEN FJ, et al. Innovative use of foraminifera in ecotoxicology: a marine chronic bioassay for testing potential toxicity of drilling muds[J]. Ecological indicators, 2012, 12(1):17-25.

[7] BAKKE T, KLUNGSOYR J, SANNNI S. Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry [J]. Marine environmental research, 2013(92):154-169.

[8] JAGWANI D, SHUKLA P, KULKARNI A, et al. Organ specific distribution of PAHs in a carnivorous fish species following chronic exposure to used synthetic-based drilling Mud[J]. Polycyclic aromatic compounds, 2011, 31(4):227-242.

[9] 张亮,叶芳,王尽文,等.黄河口埕岛油田周边海域的生态环境特征及变化趋势[J].海洋学研究,2015(3):75-83.

[10] 黄海,屈展,周立辉,等.废弃钻井液重金属检测及其污染性评价[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2012(5):52-55.

[11] BREUER E, SHIMMIELD G, PEPPE O. Assessment of metal concentrations found within a North Sea drill cuttings pile[J]. Marine pollution bulletin, 2008, 56(7):1310-1322.

[12] KUJAWSKA J, CEL W, WASAG H. Leachability of heavy metals from shale gas drilling waste[J]. Rocznik ochrona srodowiska, 2016(18):909-919.

[13] 陈则良.页岩气油基钻屑的污染特性和蒸汽浸洗研究[D].重庆:中国科学院大学,2017:2,21-25.

[14] 王志勇.含油污泥无害化技术试验研究[J].石油规划,2012(3):40-43.

[15] 常国胜.含油污泥调剖技术研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2008:16-24.

[16] 胡雪滨,邓卫东,肖文.含油污泥调剖剂的研制与应用[J].油田化学,2004,21(3):251-254.

[17] 沈聪.污泥调剖技术的研究与应用[J].当代化工,2015,44(6):1307-1308.

[18] 王会,谢康,向龙斌.关于含油污泥处理现状研究[J].环

- 境与可持续发展, 2016(5):122-127.
- [19] 籍国东, 隋欣, 孙铁珩, 等. 封闭式芦苇湿地处理钻井泥浆的可行性研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4):426-430.
- [20] 高昌胜. 基于含油污泥热解残渣的路基材料制备与性能评价[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6):38-41.
- [21] MOSTAVI E, ASADI S, UGOCHUKWU E. Feasibility study of the potential use of drill cuttings in concrete[J]. Procedia engineering, 2015, (118):1015-1023.
- [22] 陆林峰, 易畅, 管勇, 等. 钻井固体废物制免烧砖技术及试验[J]. 石油与天然气化工, 2012, 41(2):235-238.
- [23] CHEN T L, LIN S, LIN Z S. An innovative utilization of drilling wastes as building materials, in: SPE E & P Environmental and safety conference, Galveston, TX, USA [C]. 2007:735-741.
- [24] ACCHAR W, MARQUES S K J. Ecological soil-cement bricks from waste materials. Springer briefs in applied sciences and technology [M]. Cham (Switzerland): Springer International Publishing, 2016:25-50.
- [25] 王朝强. 页岩气钻井岩屑建材资源化利用中重金属污染预警、迁移及控制[D]. 绵阳:西南科技大学, 2019:20-55.
- [26] 李开环. 涪陵地区页岩气开采固体废物污染特性及资源化环境风险研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016:35-52.
- [27] VAQUEIRO R L C, ARARUNA J T, PIRES P J M. The use of drilling cuttings as building materials in Baiano, Brazil[C]. SPE 98550:1-9.
- [28] LI XIANGGUO, LV YANG, MA BAOGUO, et al. Influence of sintering temperature on the characteristics of shale brick containing oil well-derived drilling waste[J]. Environmental science and pollution research, 2011, 18(9):1617-1622.
- [29] WANG CHAOQIANG, LIN XIAOYAN, XIONG DEMING, et al. A Study on the oil-based drilling cuttings pyrolysis residues resource utilization by the exploration and development of shale gas[J]. Environmental science and pollution research, 2017, 24(21):17816-17828.
- [30] TUNCAN A, TUNCAN M, KOYUNCU H. Use of petroleum contaminated drilling wastes as sub-base material for road construction[J]. Waste management & research, 2000(18):489-505.
- [31] WASIUDDIN N M, ALI N, ISLAM M R. Use of offshore drilling waste in hot mix asphalt (HMA) concrete as aggregate replacement, in: Proceedings of ETCE 2002 on ASME engineering technology conference on energy, Houston, TX, USA [C]. 2002:528-536.
- [32] DHIR R K, CSETENYI L J, DYER T D, et al. Cleaned oil-drill cuttings for use as filler in bituminous mixtures [J]. Construction and building materials, 2010, 24(3):322-325.
- [33] ABLIEIEVA IRYNA, PLYATSUK LEONID. The immobilization of heavy metals during drilling sludge utilization[J]. Environmental technology & innovation, 2016(6):123-131.
- [34] 李梦妮. 油基岩屑在钻前公路无机稳定基层中的应用研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2018:35-62.
- [35] PAGE P W, GREAVES C, LAWSON R, et al. Options for the recycling of drilling cuttings, in: SPE/EPA/DOE Exploration and production environmental conference, San Antonio, TX, USA, Paper SPE 80583, Soc. Petrol. Eng. Houston, Texas [C]. 2003:332-341.
- [36] BERNARDO G, MARROCCOLI M, NOBILI, A M, et al. The use of oil well-derived drilling waste and electric arc furnace slag as alternative raw materials in clinker production[J]. Resources, conservation and recycling, 2007(52):95-102.
- [37] 周成华. 油基钻屑改质流体燃料处理技术研究[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4):86-88.
- [38] 王梅. 油基钻屑改质流体燃料技术研究与应用[J]. 石油化工安全环保技术, 2018, 34(2):59-64.
- [39] 徐亚红. 页岩气油基钻屑降解固化处理及其制备免烧陶粒的技术研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2018:35-60.
- [40] 熊德明, 廖朋, 方俊毅, 等. 油基钻屑残渣制备多孔陶粒的试验研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(增刊1):25-27.
- [41] BAMDAD AYATI, CHLOE MOLINEUX, DARRYL NEWPORT, et al. Manufacture and performance of lightweight aggregate from waste drill cuttings[J]. Journal of cleaner production, 2019(208):252-260.
- [42] 中石化节能环保工程科技有限公司, 山东纳瑞环保科技有限公司. 具有亲油特性的陶粒压裂砂及其制备方法: 中国, 106747371A [P]. 2017-05-31.
- [43] 中石化节能环保工程科技有限公司, 山东纳瑞环保科技有限公司. 一种利用热解析油基钻屑残渣的亲油陶粒及其制备方法: 中国, 106518147A [P]. 2017-03-22.
- [44] 中石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司, 中国科学院城市环境研究所. 油基钻屑热解灰分为原料的沸石制备方法: 中国, 108046284A [P]. 2018-05-18.
- [45] HEJNA ALEKSANDER, PISZCZ KARA KATARZYNA, FILIPOWICZ NATALIA, et al. Structure and performance properties of environmentally-friendly biocomposites based on poly (ϵ -caprolactone) modified with copper slag and shale drill cuttings wastes[J]. Sci total environ, 2018(640/641):1320-1331.

(收稿日期 2020-05-18)

(编辑 王薇)