

油基岩屑资源化处理及应用现状和展望

郇月华¹, 郑冠一^{1,2}, 秦建鲲^{1,2}, 董慧敏¹, 戴荣东^{1*}

(1. 中石化胜利油田分公司石油工程技术研究院, 山东 东营 257000;

2. 中国石化胜利油田博士后科研工作站, 山东 东营 257000)

摘要:综述了页岩油气开发中油基岩屑的无害化处理(物理法热脱附、离心分离, 化学法溶剂萃取、热化学清洗, 生物法微生物降解、酶催化)与资源化利用(水泥基材料制备等)技术进展, 分析各技术原理及经济性。结果表明, 热脱附因油分回收率 85%~95% 应用最广, 但能耗高且易产生挥发性有机物; 溶剂萃取适配低黏度油分却受成本与污染制约; 生物降解绿色低碳但周期长、受环境影响大; 特种水泥浆等资源化高值技术具潜力未规模化, 当前未形成“高效-低碳-低成本”体系。建议研发低碳高效技术, 完善危废鉴定与产品标准, 推动油基岩屑闭环利用。

关键词:油基岩屑; 无害化处理; 资源化利用; 热脱附; 技术经济分析

中图分类号: TH3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)07-0084-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.016

Research status, applications and prospects of resource-oriented treatment of oil-based drilling cuttings

TAI Yue-hua¹, ZHENG Guan-yi^{1,2}, QIN Jian-kun^{1,2}, DONG Hui-min¹, DAI Rong-dong^{1*}

(1. Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China;

2. Postdoctoral Research Station of Sinopec Shengli Oilfield, Dongying 257000, China)

Abstract: This paper reviews the research progress of harmless treatment (physical methods: thermal desorption, centrifugal separation; chemical methods: solvent extraction, thermochemical cleaning; biological methods: microbial degradation, enzyme catalysis) and resource utilization (cement-based material preparation, etc.) technologies for oil-based drilling cuttings in shale oil and gas development, and analyzes the principles and economics of each technology. The results show that thermal desorption is the most widely used method with an oil recovery rate of 85%–95%, but has high energy consumption and produces volatile organic compounds; solvent extraction is suitable for low-viscosity oil but restricted by cost and pollution; biological degradation is green and low-carbon but has a long cycle and is greatly affected by the environment; high-value resource technologies such as special cement slurry have potential but not yet scaled, and no “efficient-low carbon-low cost” system has been established currently. It is suggested to develop low-carbon and efficient technologies, improve hazardous waste identification and product standards, and promote the closed-loop utilization of oil-based drilling cuttings.

Key words: oil-based drilling cuttings; harmless disposal; resource utilization; thermal desorption; techno-economic analysis

随着全球能源需求与日俱增、环保标准日趋严苛, 能源结构优化与转型成为世界各国关注的焦点。我国作为能源消费大国, 为保障能源安全与经济可持续发展, 正在积极开发非常规能源。页岩油气作为非常规油气资源中的战略型能源, 其资源开发不仅有效补充了传统石油供应体系, 更为能源结构转型提供关键支撑。中国页岩油地质储量 $100 \times 10^8 \sim 3772 \times 10^8$ t, 可采资源量 $30 \times 10^3 \sim 900 \times 10^3$ t, 主要分布在鄂尔多斯、松辽、准噶尔、四川盆地和渤海湾^[1], 开发前景广阔。

为降低页岩油气井井壁因水敏造成的膨胀垮塌、缩径等钻井风险, 油基钻井液被大量应用。但其与钻井岩屑混合产生的油基岩屑, 含多种石油烃、重

金属、高分子化合物, 对人体健康和生态环境危害极大, 被列入《国家危险废物名录》^[2]。如何通过化工技术实现油基岩屑“无害化-资源化-高值化”, 平衡油气开发与环保需求, 对页岩油开采行业健康发展具有重要意义。本文中系统梳理油基岩屑无害化处置、资源化利用及高值化技术的研究进展, 明确各技术瓶颈与适配场景, 以期页岩油气开发与环保协同提供技术参考。

1 油基岩屑的组成及危害

油基岩屑由循环油基泥浆和钻孔产生的岩屑共同组成, 其成分取决于井眼岩层的组成和油基钻井液配方, 油基钻井液由基础油(白油为主, 含 $C_{14} \sim$

收稿日期: 2025-09-24; 修回日期: 2026-05-08

作者简介: 郇月华(1999-), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为钻井液技术工程, taiyuehua.slyt@sinopec.com; 戴荣东(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为钻完井工程技术, 通讯联系人, dairongdong.slyt@sinopec.com。

C₂₄饱和链烷烃与环烷烃)、水、膨润土和油溶性化学处理剂组成^[3]。从井眼中携钻屑返排出来的油基泥浆经固控系统的处理之后含油率 15%~20%,含水率为 10%~15%,含固率 65%~75%。主要矿物成分为 BaSO₄、Fe₂O₃、SiO₂、Al₂O₃、CaO 等。

页岩油气开采产生的油基岩屑主要含有机物、碱性物质、重金属 3 类有毒物质。碱性物质的危害最小,但大量长期释放到土壤中将导致土壤盐碱化,影响植被生长。有机物含量高且难降解,自然条件下 180 d 的降解效率不足 5%^[4]。油类、重金属易随雨水入地下水或地表水,污染饮用水源、危害水体生态,重金属更可通过食物链威胁人类健康。Xu 等^[5]经过研究发现,重庆页岩区油基钻屑中 Ni、Cu、Zn、Pb 等 7 种元素的含量均超出背景值,如表 1 所示。

表 1 油基岩屑中重金属含量 mg/kg

金属	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
测定值	5.02	65.52	72.51	0.18	25229.92	67.08	345.13	642.84
背景值	0.08	79.00	31.10	0.06	657.00	32.60	30.90	86.50

表 2 油基岩屑处置技术现状对比

处理方法	优点	缺点	技术现状	费用
固化/稳化法	简单易行	不能回收油品	不推荐	低
焚烧、填埋回注地层	处理彻底	产生废气排放,油品不能回收	不推荐	较高
溶剂萃取法	处理能力大	岩屑成分复杂,萃取效率低,成本高	实验室阶段	高
热解脱附法	剩余固相含油率<0.3%	能耗高,回收油成分复杂	工程应用	较高
化学清洗法	工艺简单	化学药剂筛选困难,技术难度大	实验室阶段	高
生物修复法	节约能源	处理周期长,不能回收原油	实验室阶段	较低
三相分离法	分离后固相污染物浸出率低	污染小,技术成熟	工程应用成熟	较高
超临界流体氧化法	萃取效率高	能耗高,成本高	初步工业化试验	高

2.1 溶剂萃取法

溶剂萃取法基于“相似相溶”原理,利用有机溶剂(如正己烷、柴油、复合萃取剂)对油基岩屑中油相的高溶解度,实现油-固分离,工艺流程如图 1 所示,该方法处理规模较大,油基岩屑含油率可降低至 1%以下,但受油基岩屑化学成分复杂性影响,单一有机溶剂萃取效率有限:例如正己烷对 C₁₄~C₁₈短链烷烃萃取率超 80%,对 C₁₉~C₂₄长链烷烃萃取率

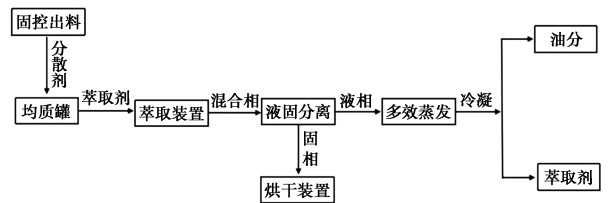


图 1 油基岩屑萃取工艺流程

吴娜等^[6]发现其 Ni、Cu、Zn、Pb 和石油烃含量超过《危险废物鉴别标准毒性物质含量鉴别》(GB 5085.6—2007)的标准限值。

2 油基岩屑无害化处置技术现状

根据《危险废物鉴别通则》(GB 5085.7—2019),油基岩屑经热解、化学水洗等设施处理后的残渣需先鉴定危废特性,再判定是否按危废进行管理。该标准为油基岩屑残渣资源化拓宽了路径。

从资源回收角度来看,每处理 1 t 油基体物质,可回收 0.134~0.152 m³ 合格基浆。以年度新增油基岩屑处置规模核算,可创造 100 万~120 万元的经济价值。倘若把油基岩屑转变为无害化甚至资源化材料,经济效益将提升 3~5 倍^[7]。

国外早期采用固化、焚烧、填埋以及回注地层法处理油基岩屑,这类方法未能回收油品且存在环境隐患,正逐步被以高效、稳定、可回收油品为优势的溶剂萃取法、热解吸附-脱附法等技术取代。技术对比见表 2。

仅 50%~60%;柴油对长链烷烃适配性较好,但萃取后油相纯度低(含 3%~5%杂质),需进一步提纯^[8]。

目前该技术仅停留在实验室阶段,核心瓶颈在于“溶剂回收-成本控制”的化工难题:溶剂回收通常采用蒸馏法,能耗占 60%~70%,且蒸馏过程中部分溶剂会与岩屑中的极性物质(如黏土矿物)发生吸附作用,导致溶剂损耗率达 5%~10%,进一步推高处理成本。未来需研发“复合溶剂体系+高效回收工艺”,例如采用减压蒸馏等方式减少溶剂损耗。

2.2 热解吸法

热解吸法是目前油基岩屑工业化处理的主流技术,通过直接或间接加热使岩屑中的水、矿物油达到沸点后脱附挥发,矿物油裂解为小分子有机物挥发,气液产物冷凝分离后回收油品,流程如图 2 所示。研究表明,回收的油品烃类组成与新鲜基础油相似

度高达 90%,可重新用于合成油基钻井液。从处置设备来看,不同企业技术路线存在差异:2015 年,重庆涪陵页岩气钻井应用间歇式热解脱附设备处理油基岩屑,但该设备处理能力较小;随后涪陵页岩气区使用美国 Brandt NOV 公司研发的旋转式热解脱连续处理装置,采用电热元件间接加热,通过旋转筒体使岩屑均匀受热(温度波动 $\pm 5^{\circ}\text{C}$),处理能力提升至 5~8 t/h,油分回收率稳定在 90%以上^[9-10]。此外,川庆钻探工程有限公司^[11]、中国石油集团安全环保技术研究院有限公司^[12-14]等公司也相继研发出了同类连续式和回转式热解脱附处理装置,核心改进在于“加热方式-温度控制”,避免局部过热,同时增加尾气处理装置,进一步满足环保要求。

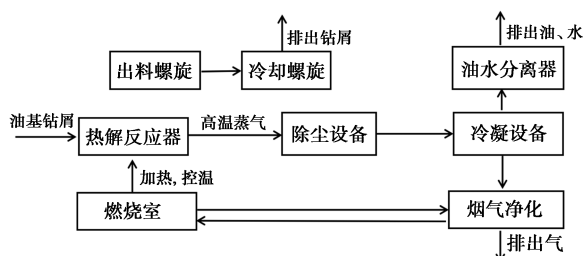


图 2 传统热解脱附(间接燃烧加热)技术工艺流程

热解脱技术目前面临有 3 大技术挑战:能耗高;配套工艺要求高,装置成本高(200 万~300 万元/套),中小企业难以承担;油分性质复杂,致使热解温度不易确定,回收的油成分复杂,影响钻井液稳定性。未来该技术提升重点需放在“余热利用”和“油品稳定性提升”2 方面,以逐步扩大工业化应用。

2.3 化学热洗技术

化学热洗技术通过添加表面活性剂等物质,改变岩屑表面润湿性,通过破乳洗涤去除油分,结合加热、超声等措施实现固液分离,再利用油、水、固相密度差分离油分^[15],工艺流程见图 3。该技术的核心在于“药剂体系适配性”:针对不同岩屑,需开发适应性广的破乳剂。未来提高破乳效率,减少药剂使用造成的“二次污染”有可能打破该技术的限制,使

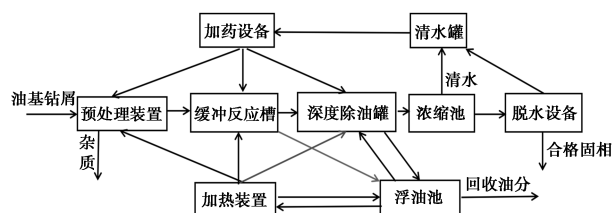


图 3 化学热洗技术流程

其得到有效应用。

2.4 生物修复法

生物修复法一般是利用嗜油微生物处理油基岩屑的方法,经过生物代谢可将钻屑上的基础油分解为无害、低毒的小分子物质,如 CO_2 、 NO 。该方法成本较低,环境友善,但是对于微生物的筛选条件严格,耗时长,通常要配套油基钻屑现场处理装置进行前期的预处理^[16]。同时,微生物处理过程中矿物油通常作为生物生长的碳源,若未进行有效回收,将造成浪费。

2.5 三相分离法

采用化学强化的三相分离法是处理废弃钻井液的核心技术之一,原理为:经过脱稳、絮凝、除油之后,再利用强机械固液分离。赵宏波等^[17]研发形成了废弃钻井液固液分离-化学处理技术,经长北气田 5 口井试验,处理后钻井液污水、岩屑和泥饼浸出液的各项指标均满足相关排放标准,且成本低于常规的固化-净化法。该方法已相对成熟,但一次性建站投资大、运输与处理费用均较高。未来优化方向聚焦“设备-药剂优化”,进一步降低成本。

2.6 超临界氧化法

超临界流体氧化法利用超临界 H_2O 、 CO_2 兼具气体穿透力与液体溶解度的特性,在高温高压下与废弃油基钻屑混合,将油类物质萃取到超临界流体中,再经减压后析出,减压后的溶剂可循环利用^[18]。Street 等^[19]的研究结果表明,超临界 CO_2 可有效去除钻井油基岩屑中的烃类物质,优化后工艺的萃取效率高达 97%,且萃取过程不改变烃类物质成分。陈忠^[20]针对重庆页岩气油基钻屑,采用超临界水氧化法进行处理研究。结果表明,该技术能有效降解有机物、稳定重金属,有机物去除率达 89.2%;连续式反应器处理效果更优,处理后产物达标,具备推广应用价值。但是该技术的缺点也很明显,压力高、能耗高、对技术要求严格,设备存在一定的风险。未来需研发“低临界压力溶剂”和“轻量化设备”提升技术经济性。

3 油基岩屑资源化利用技术

在油基岩屑“减量化、无害化、资源化”协同推进的行业需求下,资源化利用技术已从单一处置转向多元化高值化,从化工视角看,岩屑资源化路径可分为“矿物成分转化”(SiO_2 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow$ 建材/功能材料)与“油分回收复用”($\text{C}_{14} \sim \text{C}_{24}$ 烷烃 $\rightarrow$ 钻井液基础油)2 类,具体有水泥窑协同处置、混凝土制备、制砖

等。这些技术既依托成熟工业体系实现油基岩屑的规模化消纳(如水泥窑、建材生产),又通过工艺优化挖掘其潜在价值(转化为功能材料),是平衡油气

开发环保压力与资源循环效益的关键抓手,表 3 系统阐述了上述各类资源化利用方法的优缺点和目前的应用现状。

表 3 油基岩屑资源化利用技术现状

处理方法	优点	缺点	技术现状	费用
水泥窑协同处置法	成本低,岩屑中油分利用充分	对水泥造成不利影响,环境要求高	工程应用	低
制备混凝土	工艺简单、能耗低	产品中含有有机污染物	工程应用	低
制砖	易大规模推广、能固化重金属	能耗高、产品附加值低	工程应用	较高
制备陶粒	处理成本低、消除大量固相残渣	陶粒行业市场不理想,滞销	工程应用较少	低
制备路面材料	操作简单易行	存在环境风险	工程应用	低
用作吸附材料和催化剂	产品高附加值	处理工艺复杂	实验室阶段	较高

3.1 水泥窑协同处置

水泥窑协同处置技术,是把油基岩屑投入高温运转的水泥窑内煅烧。有害矿物油在高温环境下焚烧分解,残留残渣(含 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 SiO_2)可作为原料应用于水泥生产,实现资源的循环利用^[21]。涪陵页岩气田开发国家示范基地先通过热馏炉、回转窑热脱附分离油基岩屑中矿物油,再将残渣入水泥窑烧制水泥熟料,日处理能力约 200 t^[22]。该技术可充分利用油基岩屑中的油分,降低成本,但难点在于油基岩屑中的 Cl^- 、 S^{2-} 在高温下会形成 HCl 、 SO_2 ,需严格把控 Cl、S 元素,确保水泥有害物质达标。

3.2 制砖和陶粒

3.2.1 制砖

油基岩屑制砖技术是利用处置后的油基岩屑中的灰渣组分与黏土矿物组分具有较高相似度,可以用于烧结砖。制成砖的建筑性能基本满足要求,但残渣掺混量受烧结温度等因素影响。烧结温度在 1 000℃后会过度玻璃化,并降低烧结砖的抗压强度。同时,由于地层岩石中含有 CaCO_3 、 CaO 等矿物组分, CaO 不断水化成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,将在砖体重产生应力集中,少量的 CaO 可诱发砖体表面破坏,大量的 CaO 则造成砖体开裂,一般要求 CaO 含量小于 10%。

3.2.2 制备陶粒

陶粒的生产主要以黏土、页岩为原材料高温煅烧而成,油基岩屑热脱附后的灰渣(含 SiO_2 30%~40%、 Al_2O_3 15%~20%)与页岩相似, Al_2O_3 是制备陶粒的关键成分,可用于烧制陶粒。该技术的产业化受限于市场需求;陶粒主要用于轻质混凝土、滤料等领域,市场容量有限(国内年需求量约 1 000 万 t),且油基岩屑陶粒的生产成本相较传统陶粒无明显优势。未来需开发“功能性陶粒”,例如添加其他物质,使陶粒具有磁性,可用于废水处理中的磁性吸附,提升产品附加值。

3.3 制备水泥基材料

3.3.1 制备混凝土

油基岩屑制备水泥基材料主要有 2 类:一是将油基岩屑初步处理之后的固相与水泥、砂和其他外加剂以一定的比例掺合,充分搅拌后得到混凝土。该技术生产的混凝土能满足生产要求,简单易行,但在工业生产中,需要控制固相掺量,避免固相颗粒团聚导致强度不均。

3.3.2 制备固井水泥浆

针对油基岩屑回收油品后安全绿色处置的难题^[23],有研究人员创新性地提出将其作为固井水泥浆外掺料,优选关键处理剂,制备特种水泥浆体系,实现油基岩屑高价值资源化利用。中石油研发出了掺混 25~45 份的含油岩屑的固井水泥浆体系,密度可在 1.70~2.10 g/cm³ 调节,游离液含量为质量分数 0%,API 失水量≤50 mL,(80℃×50 MPa)稠化时间≥180 min,24 h 抗压强度≥12 MPa,48 h 抗压强度≥16 MPa。该研究实现了油基岩屑固井水泥浆体系的密度可调、延长稠化时间和高抗压强度,有效保证水泥环的长期完整性。

李伟等^[24]针对渤海油田废弃 PEC 钻井液,优选出适用于其钻井液体系的配方:PEC 钻井液+50%碱激粉煤灰+4.5% DHM101+2.5% DHM201+0.5% DHM401+0.5% DHM301,构建的 PEC 钻井液水泥浆体系滤失量为 25.6 mL/30 min,稠化时间为 316 min,水泥石抗压性能优异,皆能满足现场工程需要。

中原石油勘探局^[25]提出了通过研究增强型 MTC 配方,提高 MTC 水泥浆形成的固化体的强度,保证固井二界面的胶结强度,从而提高固井质量的观点。此类技术可减少水泥用量 25%~45%,降低固井成本 15%~20%,可广泛用于表层套管、技术套管、回接套管固井,工业化前景广阔。

3.4 吸附材料

油基岩屑二次热解后的剩余固相材料可以加工成为新型吸附材料用于去除废水中的重金属元素,以实现资源利用^[26]。还可以利用剩余固相中含有的过渡金属元素作为工业催化剂的制备原料,通过活化过硫酸盐和高碘酸盐来促进有机污染物的降解,使其最终生成无害的 H_2O 和 CO_2 ^[27]。这2种方法虽然实现了资源化利用,但是处理工艺复杂,成本较高,短时间不能实现工业化应用^[28]。

由梳理油基岩屑资源化技术可知,水泥窑协同处置、建筑材料化等技术虽实现工业化落地,但属低附加值利用;吸附材料、催化剂制备等技术虽具高潜力,却受限于工艺与成本,难规模化。当前低附加值技术已难匹配产业需求,亟需转向高价值利用,而油基岩屑特种水泥浆技术(可降低固井成本15%~20%)、功能性吸附材料,正是突破价值瓶颈的重要探索方向。

4 结论与展望

基于对现有处理方法的分析发现:①无害化处理技术各具特点但均存在局限。热脱附、三相分离法已工程应用,但前者能耗高、后者成本高,溶剂萃取、生物修复等仍处实验室阶段,目前尚未形成“高效-低碳-低成本”的协同技术体系。②资源化技术仍以低附加值应用为主,高值化技术受限于工艺成本。③核心瓶颈,无害化技术“高效与低碳”矛盾(如热脱附高效但高能耗);资源化技术“价值与规模”失衡(如吸附材料高价值但小规模);缺乏统一的“危废属性-产品质量”标准,制约技术推广。

未来需重点开发多技术联合处理体系,构建无害化-资源化闭环链,从源头研发绿色钻井液,降低后续处理压力;聚焦油基岩屑特种水泥浆等高值化技术,突破工艺与成本制约;完善体系标准,规范产业发展,建立“技术经济性评价方法”引导产业资源向低碳绿色技术倾斜。

参考文献

- [1] 袁士义,雷征东,李军诗,等.陆相页岩油开发技术进展及规模效益开发对策思考[J].中国石油大学学报:自然科学版,2023,47(5):13-24.
- [2] 赵安洋,王茂仁,张海兵,等.油基岩屑残渣资源化利用技术研究进展[J].现代化工,2024,44(12):67-71.
- [3] 陈红硕.川渝地区油基岩屑处理技术研究现状及展望[J].石油化工应用,2022,41(5):1-5,8.
- [4] 陈则良,陈忠,陈乔,等.典型页岩气油基钻屑的组成分析及危害评价[J].环境工程,2017,35(8):125-129.
- [5] Xu T, Wang L A, Wang X, et al. Heavy metal pollution of oil-based drill cuttings at a shale gas drilling field in Chongqing, China: A human health risk assessment for the workers[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 165: 160-163.
- [6] 吴娜,聂志强,李开环,等.页岩气开采钻井固体废物的污染特性[J].中国环境科学,2019,39(3):1094-1100.
- [7] 黎然,杨欢,朱冬昌,等.页岩气油基岩屑热解回收基油再利用研究:第33届全国天然气学术年会论文集[C].南宁:中国石油学会天然气专业委员会,2023:101-106.
- [8] 李乐军,彭青松,张宇,等.四川页岩气油基岩屑处置现状与未来趋势[J].环境生态学,2023,5(2):97-100.
- [9] 陈刚,王鹏,赵毅,等.废弃钻井液处理技术研究与应用进展[J].钻井液与完井液,2020,37(1):1-8.
- [10] 汤超,由福昌,吴江.国外废弃钻屑处理技术调研[J].四川化工,2014,17(2):19-21.
- [11] 郭亮,翟永帆,葛思佳,等.油基钻屑热解吸处理装置的现场应用[J].钻采工艺,2020,43(5):130-133.
- [12] 史志鹏,许毓,邵志国,等.热脱附处理页岩气油基钻屑的研究与应用[J].油气田环境保护,2019,29(6):37-40,65.
- [13] 何茂金,方基垒,张树立,等.热脱附设备国产化研制分析[J].石油化工安全环保技术,2018,34(4):26-27.
- [14] 张建甲,郭宏亮,单通,等.油基岩屑回转式热解脱附技术的工程应用实践[J].浙江化工,2024,55(7):37-41.
- [15] 肖超,方基垒,岳勇,等.非常规油气开发含油钻屑危险特性分析[J].油气田环境保护,2018,28(4):11-13,60.
- [16] 何焕杰,单海霞,马雅雅,等.油基钻屑常温清洗-微生物联合处理技术[J].天然气工业,2016,36(5):122-127.
- [17] 赵宏波,李新宝,王冲,等.废弃钻井液固液分离-化学处理技术在长北气田的应用[J].石油钻探技术,2017,45(3):48-56.
- [18] 胥腾屯.页岩气钻井油基钻屑的催化热解及污染迁移研究[D].重庆:重庆大学,2019.
- [19] Street C G, Tesche C, Guigard S E, et al. Treatment of hydrocarbon-based drilling waste using supercritical carbon dioxide[J]. SPE Drilling & Completion, 2009, 24(3):413-417.
- [20] 陈忠.页岩气油基钻屑的超临界水氧化处理研究[D].重庆:中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院),2018.
- [21] 黎亮,胡端义,刘寅,等.油基岩屑无害化处置及资源化应用探索[J].科技与创新,2023,(16):157-159.
- [22] 梅绪东,廖新睿,王朝强,等.涪陵页岩气田油基岩屑安全处置与利用实践[J].油气田环境保护,2019,29(2):28-32,61.
- [23] 许云川,张磊,欧海湖,等.油基岩屑处理利用技术研究分析[J].江西建材,2018,(10):19-21.
- [24] 李伟,武同良,卜继勇,等.渤海废弃 PEC 钻井液 MTC 技术研究[J].当代化工研究,2022,(12):180-182.
- [25] 杨振杰,吴修宾,叶海超,等.矿渣 MTC 固化体的脆裂问题及改进途径[J].石油钻采工艺,2001,23(3):31-35,84.
- [26] Liuyang X Y, Yang H, Huang S, et al. Resource utilization of secondary pyrolysis oil-based drilling cuttings ash for removing Cr(VI) contaminants: Adsorption properties, kinetics and mechanism[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(6):104474.
- [27] Zhao Y, Yang H, Sun J, et al. Activation of peroxymonosulfate using secondary pyrolysis oil-based drilling cuttings ash for pollutant removal[J]. ACS Omega, 2021, 6(25):16446-16454.
- [28] 胡端义,黎亮,周素林,等.油基岩屑热解后剩余固相资源化利用研究[J].油气田环境保护,2023,33(4):15-19. ■