

我国页岩气开发钻井废物污染防治技术进展*

闫伦江

(中国石油集团安全环保技术研究院有限公司)

摘 要 我国在逐步加大页岩气开发力度的同时,也在加大页岩气开发过程中的环保技术研究,以促进页岩气开发绿色可持续发展。文章分析了页岩气开发过程中钻井废物处理存在的主要问题,针对这些问题,介绍了环保型钻井液、水基钻井废物处理与资源化、油基钻井废物处理与资源化等技术及其应用进展。提出了强化源头控制,从钻井液、井身结构设计、钻完井等方面进行全面管控,提高钻井液的循环使用效率,研发高效的废液净化工艺,降低钻井废物的产出,并实现钻井废物资源化的发展思路。

关键词 页岩气; 钻井废物; 防治; 资源化

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2018.04.001

文章编号:1005-3158(2018)04-0001-03

0 引 言

我国石油天然气需求持续增长,2020 年以前天然气年均增长将达 12.2%。页岩气等非常规油气资源丰富,据统计,我国页岩气可采储量达 25 万亿 m^3 ,随着勘探开发技术的不断发展,其开发比重也在逐年上升。页岩气由于丰度不高、品质偏低,其开采难度较常规天然气大,且具有更大的环境风险。页岩气要实现绿色可持续发展,需要系统解决其面临的环境影响评估与风险监控、环境监管政策与体系、钻井废物处理与资源化、地下水与生态环境保护、逸散放空气监测与回收等方面的环保问题。2016 年,国家在大型油气田及煤层气开发重大科技专项中设立了《页岩气等非常规油气开发环境检测与保护关键技术》项目(以下简称页岩气专项),项目研究成果将为页岩气开发提供有力的技术支撑,本文重点介绍钻井废物处理的技术进展。

1 页岩气开发钻井废物处理存在的主要问题

1.1 钻井废物简介

页岩气开发产生的钻井废物是一种相当稳定的胶态悬浮体系,含有黏土、加重材料、各种化学处理剂、污水、油污及钻屑等,危害环境的主要化学成分有烃类、盐类、各类聚合物、重金属离子、重晶石和沥青等,这些污染物组成复杂,稳定性高,分为油基、水基两种。多数处理装置均只能单独处理水基钻井废物或油基钻井废物,分离效率低、减量性差,未实现两类钻井废物的一体化处理和应用。

页岩气钻井过程中使用的环保技术及装备有限,页岩气钻井废物性质复杂,尤其是油基钻井废物处理难、处理效率低及回收利用率低。由于页岩气等非常规油气开发地层的特殊性,往往需要用到抗高温、有利于井壁稳定、润滑性好、对油气层损害小的油基钻井液。油基钻井液的连续相为柴油或白油,其他成分为水、有机黏土和钻井液处理剂。因此,在页岩气开发过程中不可避免地会产生油基钻屑。单井油基钻屑产生量约 300~400 m^3 ,一般都含有重金属、酸、碱、高分子化合物以及大量的油,其中含油率约为 6%~20%,属于危险废物,这些物质通常难以通过环境中微生物自然降解,如不能妥善处理,将对人、畜和环境造成危害,因此,必须严格遵守危险废物管理办法,否则,稍有不慎将造成环境污染;另一方面由于油基钻井废物中含有大量可回收利用的基础油,若未合理回收处理将造成很大的资源浪费^[1-3]。

上述问题需要借助多学科相关的理论和方法,建立科学合理的实验研究方法和评价手段,开展废钻井液回用技术研究,开发含油钻屑脱油与无害化处理技术,实现钻井废物的资源化与无害化。

1.2 页岩气钻井废物污染防治技术现状

根据美国石油学会(API)在 20 世纪 80 年代发表的一系列关于套管和固井保护的论文和报告,美国钻井废物中的 38%回注处理,19%回收再利用,15%集中处理,11%自然蒸发,5%土壤分散处理,2.5%道路分散处理,0.4%热处理,0.4%随市政或工业垃圾填

*基金项目:本文由大型油气田及煤层气开发专项《页岩气等非常规油气开发环境检测与保护关键技术》(2016ZX05040)资助。

闫伦江,1986 年毕业于沈阳建筑工程学院,教授级高级工程师,现任中国石油集团安全环保技术研究院有限公司执行董事、总经理、党委书记。通信地址:北京市昌平区沙河镇西沙屯桥西中国石油创新基地 A 座,102206

理,9%采用其他方式处理。在我国,油气田一般采用固化填埋的方法对钻井废物进行处理,废液主要依靠现场简单的自然沉降后回用。国内油基钻井废物主要处理技术为干化技术、物化分离技术、焚烧技术、高温裂解技术、生物处理技术等,以上几种处理技术都有各自的优缺点和适用范围。

国内外为了有效解决钻井废物处理及资源化问题,加大了钻井液源头控制,开展了环保型钻井液指标制订及环保型钻井液系列产品研发,推进了钻井过程的清洁生产。

国外有一定应用的油基钻井废物除油收油技术主要有热蒸馏法、溶剂萃取法、超临界流体抽提法、微生物处理、植物修复及化学破乳等技术。但多存在处理流程较长,处理费用高等问题。

根据国内页岩气开发的生产实际情况,需要研发工艺简单、设备灵巧、能耗少、成本低、效果好的油基钻井废物除油、收油技术^[3-5]。

2 钻井废物污染源头控制技术进展

2.1 钻井液体系的环保评价指标和方法

针对目前钻井液环保性能差等问题,页岩气专项完成了钻井液添加剂分子结构与毒性和生物降解性的相关性分析,确定了添加剂经高温高压处理后基团结构变化与其可生化性、生物毒性变化规律。根据相关环保检测标准,对钻井液处理剂和钻屑样品进行了检测,确定了pH值、铬、石油类等全过程控制要素。构建了钻井液体系的环保评价指标和方法,形成了钻井液清洁生产推荐做法、钻井液体系及处理剂环保性能评价要求等标准,填补了行业内钻井液体系环保性能评价的空白,有利于环保型钻井液的监督管理。

2.2 强抑制和抗高温环保型钻井液体系

页岩气专项针对上部地层钻井液用量大,易造浆的问题,优化形成了减量化强抑制环保钻井液体系。该体系在抑制钻屑产出量方面取得了技术突破,可以有效减少返出钻屑量,体系环保性能良好,浸出毒性 $EC_{50} > 3 \times 10^4$ mg/L。针对中下部地层抗高温钻井液体系环保性能不足的问题,通过对膨润土、流型调节剂、纳米封堵剂、抑制剂及加重材料的优选,确定了环保钻井液体系配方最佳处理剂组成,形成了环保钻井液体系,在抗高温方面取得技术突破,抗高温能力达到200℃,密度2.0 g/cm³,180℃老化16 h后,测定高温高压失水量 ≤ 15 mL(150℃、3.5 MPa)。

2.3 钻井液随钻回用处理一体化技术

通过调整固控设备组合,优化固液分离参数,简

化固控系统结构,升级随钻处理设备,优化形成了随钻处理一体化集成技术,建成了钻井液固相控制与钻井废物随钻一体化处理集成设备,开展了现场工程试验,达到了不外加化学处理剂、不改变钻井工艺、不降低钻井作业速度,实现钻井废物一体化处理的效果,同时解决了常规随钻处理装备占地面积大、设备配置多、劳动强度高、经济效益不足、上部地层钻井液用量大、造浆严重、常规固相控制设备处理不及时等问题。集成设备处理能力由120 m³/h提高到200 m³/h,现场处理后钻屑含液量质量比率由70%以上降至60%以下,达到预期考核指标,产生的钻井固废达到Ⅰ类一般工业固废标准。随钻治理成套装备示范应用143口井^[4-6]。

3 水基钻井废物处理与资源化技术进展

3.1 水基钻井废物处理技术

页岩气专项针对水基钻屑pH值、COD、含油量等偏高的问题,优化形成钻井液固废无害化处理与资源化利用集成技术,该集成技术包括高强度固化技术、微乳液清洗技术、随钻生物处理技术等,处理后钻屑含油量降至1%以下。同时,建立了相关处理推荐技术清单。开发的高强度固化砌块试件28 d抗压强度达39.56 MPa,固化物浸出液COD、重金属满足GB 8978—1996《污水综合排放标准》一级要求。确定了单相水包油型微乳液优化配方,获得了微乳液处理的适宜条件。优化形成的单相水包油型微乳液体系在清洗转速为200 r/min时,仅需30 min即可将现场钻屑含油量降至1%以下。

对于含油量2%~3%的现场钻屑,通过对养分、温度、通风量及生物制剂投加量等参数的优化调控,生物修复4个月后含油量可降至1%以下,比常规的自然投菌修复时间缩短一半,处理后钻屑固相浸出液COD降至70 mg/L以下。

3.2 水基钻井废物资源化技术

针对钻井液余浆组分复杂,无害化处理成本高的问题,在经济性分析的基础上,攻关形成了钻井液堵水调剖技术和钻井液余浆循环利用技术,实现了“变废为宝”。对于上部地层低比重钻井液,形成钻井液堵水调剖技术;对于中深部地层高比重钻井液,形成钻井液余浆循环利用技术。

3.2.1 钻井液堵水调剖技术

采用泥浆处理站中的上清液,开发了废钻井液驻留调堵体系,调堵体系对岩心的封堵率 $\geq 90\%$,冲刷倍数100 PV,封堵率保持率 $\geq 80\%$ 。设计了废钻井

液堵水调剖预处理流程,设计资源化调堵处理能力 $\geq 3 \text{ m}^3/\text{h}$,处理后粒径 $\leq 20 \mu\text{m}$,用于堵调体系制备;利用形成的堵水调剖技术,开展了废钻井液堵水现场试验,共注入 350 m^3 驻留调堵体系。

3.2.2 钻井液余浆循环利用技术

页岩气专项初步形成了亚微米劣质固相选择性清除技术,开发了亚微米劣质固相选择性清除絮凝剂,加入研发的絮凝剂后,高岭土和膨润土溶液中 $2 \mu\text{m}$ 以下颗粒均明显减少, $2 \mu\text{m}$ 以下颗粒清除率大于85%。同时,开发了钻井液回收再利用网络调剂管理平台,实现钻井液回收再利用的线上调控。进行了余浆循环回用工程示范,实现了钻井余浆的全部回收再利用,示范工程已累计回收钻井液余浆 $4.39 \times 10^4 \text{ m}^3$ [5-6]。

4 油基钻井废物处理与资源化技术集成及装备开发

开发了油基钻屑可逆转换除油剂和钻屑制压裂支撑剂,优化形成以锤磨式热解析、热脱附、化学热洗为核心技术的油基钻屑处理技术以及页岩气开发钻井废物处理及资源化利用技术,完成了钻井固废减量化处理装置、钻井废物无害化处理关键装备、钻井废物撬装热脱附成套装置等装置的设计和加工。项目已配备设备11套,2016年以来累计处理油基钻屑超过 $3 \times 10^4 \text{ t}$,回收油基钻井液超过 $4 \times 10^3 \text{ m}^3$,实现了钻井废物的减量化、资源化。

4.1 油基钻井废物热脱附撬装处理装备

采用间接加热的方式,利用撬装化热脱附成套装置对油基钻屑进行安全无害化处理,处理后固相含油率满足环保要求,回收的油资源可用于重新配制油基钻井液,实现资源化再利用,外排的烟气满足环保要求。整套设备由进料输送撬、热脱附撬、出料输送撬、蒸汽回收撬、油水分离撬、冷却水撬、制氮机撬、中央控制撬组成。该装置填补了撬装热脱附成套工业装置的国产化空白,对油基钻井废物的处理具有重要意义。该装置处理能力 4 t/h ,处理后钻屑含油量 $< 1\%$,能耗小于 $45 \text{ L(柴油)}/\text{t}$ 。

4.2 含油钻屑锤磨式热解析处理装备

锤磨式热解析法主要是利用固相物与搅动叶片的相互碰撞和摩擦产生的热量,促使反应温度($230 \sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$)高于挥发性化合物的沸点,对基础油进行回收利用。待所有污染物都分离后,开始清除蒸汽、凝析物,将液相分离为水和油。研发的装置采用锤磨式热解析处理方法,通过研磨装置与钻屑的摩擦来升高处理温度,热量实现直接转化,降低了能耗,保证了钻

屑处理均一性与彻底性。该装置通过柔性密封与机械密封相结合的方式,设计加工出新型动密封装置,该装置具有密封性好、抗震性能好等特点;所研制的新型进料系统,解决了以前进料装置易堵、稳定性差、可调性差、寿命短等问题,实现均匀、可控进料;设计出具备手动、自动一体式功能的远程控制系统,实现对装置运行参数的实时监控,简化了操作步骤,提高了系统可靠性,降低了操作人员作业风险。在长宁地区,已完成设备的整体组装、调试和技术整改工作,系统设备运行正常,稳定处理量 $> 2 \text{ t/h}$,能满足油基钻屑处理的要求。

4.3 基于强化化学热洗钻井废物多功能一体化处理撬装设备

基于强化化学热洗的钻井废物多功能一体化撬装处理设备主体工艺以化学热洗和随钻处理技术为核心工艺,结合收集筛分工艺和固液分离工艺,实现固体废物的无害化处理。完成了基于强化化学热洗的钻井废物多功能一体化撬装处理设备设计和设备加工制造。

开发了油基钻屑可逆转换除油剂,完成了油基钻屑可逆转换除油剂的原料种类、配方用量及合成工艺条件优选,确定可逆转换除油剂的最佳合成工艺参数;采用红外谱图分析完成了合成产物构成分析。常温、常压下亲油和亲水性可相互转换;使用可逆转换除油剂,油基钻屑除油后含油率可达2%以下 [6-7]。

5 结束语

2016年项目正式启动至今,在威远-长宁国家页岩气示范区累计实现钻井液重复利用超过 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。对于钻井过程中无法及时有效使用的钻井液,通过钻井液转运站集中存储再进行减量及回收利用,降低了各钻井作业现场的安全环保风险。对于未来的发展,专项重点抓好三个方面工作。

①未来页岩气开发环保技术应与生产进行有效的紧密结合,强化源头控制,要实现从钻井液、井身结构设计到施工、钻完井全面的管控,持续开发新型高效的环保钻井液;

②增加钻井液的循环使用效率,研发有效的废液净化工艺,降低钻井废物产生量,并实现资源化利用。从工程技术角度,加强相关工艺技术优化与集成、关键装备研制、重大工程应用;

③对不能回收利用的固相废物,开发封闭度高的涂覆技术,并进行随钻生物处理及土壤、水体的修复研究,由源头、过程到钻完井后的修复,实现全过程无害化,以实现我国页岩气产业领域环保技术的突破和跨越发展。

(下转第6页)

②加强场地环境保护能力建设。目前,石油企业场地环境保护管理人员数量及其专业能力都还比较欠缺,应加强最新法规和先进理念的宣传,培养专业管理和技术人才,定期召开管理和技术研讨会,总结分享国际先进专业知识和最佳操作经验,建立行业性技术网站和数据库。

③加强制度和标准体系建设。我国场地污染防治法规框架已基本形成,一系列新法规和标准陆续出台。石油行业应加强行业场地污染防治标准和制度的建设,建立行业性石油场地环境调查、风险评估、修复、预防等专业标准和技术指南,逐步形成符合国家法规要求、现代企业特征和生态文明理念,并具有中国特色的石油场地环境管控制度体系。

④加强全生命周期场地环境管理。对生产设施场地环境进行全过程管理。新建设施要提前先调查场地环境背景值;运行设施要注重场地污染的预防,加强日常对“跑、冒、滴、漏”的控制和处理,进行定期的场地环境监测和调查,建立监控和预警系统;对于疑似污染地块和污染地块建立数据库,加强风险管控和修复工作;收购、出让行为中对场地污染风险进行调查和评估;对拟关闭设施,提前安排场地污染调查和修复工作。

⑤建立企业场地污染防控资金保障机制。场地修复工程往往资金需求大、技术难度大、周期长、社会影响大,对公司冲击大。我国石油企业可借鉴国际石油公司经验,建立场地污染防控拨备金,主要用于逐步减少场地环境欠债,支持开展定期和不定期调查评估,实施监测和修复,应对事故场地修复等。

⑥逐步开展生产场地环境现状调查评估工作,分级逐步降低风险。学习国际石油企业经验,加强主动性调查评估,根据污染等级和环境敏感性,开展由粗

到细的滚动调查评估和分级修复。

⑦加强相关技术、设备、产品筛选评价、研究和储备。我国石油场地污染调查评估和修复尚处于起步阶段,现有工程采用的工艺、设备和菌药剂多为国际引进,在使用中出现成本高、运行效果不理想的问题,应尽快开展行业性的技术和产品评估,加强自主设备、菌药剂的开发,开展工程示范。

参考文献

- [1] 杜卫东, 万云洋, 钟宁宁, 等. 土壤和沉积物石油污染现状[J]. 武汉大学学报(理工版), 2011(57): 311-322.
- [2] 宋云, 李培中, 郭逸飞, 等. 关于兰州石化泄漏导致自来水苯超标事件的解析[J]. 环境保护, 2015, 19(11): 311-322.
- [3] 网易财经. 埃克森美孚将为石油泄漏事件赔偿近 10 亿美元[EB/OL]. (2009-10-09) [2018-02-18]. <http://money.163.com/09/0616/17/5BUP59Q3002524SO.html>.
- [4] 郭奕涵. 埃克森美孚 2500 万美元了结 32 年前漏油诉讼案[N]. 北京商报, 2010-11-19.
- [5] 新浪财经. 埃克森美孚因污染地下水被判赔 2.36 亿美元[EB/OL]. (2013-04-10) [2018-02-18]. <http://finance.sina.com.cn/world/mzjj/143515102805.shtml>.
- [6] 冯雅因. 跨国公司环境损害的救济途径[J]. 经济与管理研究, 2011(6): 120-123.
- [7] 姜明军, 叶研, 李志刚, 等. BP 公司处理墨西哥湾漏油纠纷的经验与启示[J]. 国际石油经济, 2015, 23(8): 47-54.
- [8] Decommissioning in environmental performance of Exxon-Mobil[EB/OL]. (2018-02-24) 2018-02-28. <http://corporate.exxonmobil.com/en/community/corporate-citizenship-report/environmental-performance/decommissioning>.

(收稿日期 2018-03-22)

(编辑 王薇)

(上接第 3 页)

参考文献

- [1] 李晓歌, 任宏洋. 油基泥浆钻井废弃物处理技术研究进展[J]. 环境与发展, 2018, 30(3): 91-92.
- [2] 谢水祥, 任雯, 乔川, 等. 可实现废弃水基钻井液再生利用的电化学吸附法[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 76-80.
- [3] 谢水祥, 邓皓, 孙静文, 等. 油气田聚合物类钻井液添加剂分子结构与环境影响的相关性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6477-6489.
- [4] 钱炜, 杨海蓉, 刘宏立, 等. 油基岩屑无害化处理技术研

究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(2): 121-125.

- [5] 任雯, 谢水祥, 刘光全, 等. 聚磺钻井屑资源化处理技术研究与应用[J]. 油气田环境保护, 2017, 27(1): 10-13.
- [6] 韩来聚. 胜利油田钻井完井技术新进展及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(1): 1-9.
- [7] 宋磊, 谢水祥, 李雪凝. 页岩气开采污染治理技术比选分析[J]. 油气田环境保护, 2016, 26(6): 43-47.

(收稿日期 2018-07-24)

(编辑 王薇)