

渝西区块深层页岩气钻完井废弃物处理技术

王 言¹, 雷 彬¹, 廖晓玲², 张 旭³, 文科智¹, 严莉莎¹, 郭 超¹

¹重庆页岩气勘探开发有限公司, 重庆

²重庆科技大学冶金与材料工程学院, 重庆

³重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年11月25日; 录用日期: 2025年2月24日; 发布日期: 2025年3月7日

摘要

针对深层页岩气井钻井废液和压裂返排液重金属离子现场实时检测难、钻井废液和压裂废液产出量大, 现场回用处理效率低、油基岩屑无害化治理与资源化利用成本高等环保工程难题, 建立了重金属离子现场实时快速检测的高通量进样与定量分析方法, 研发了高精度、高通量和高信噪比的现场检测设备, 建立了压裂返排液新型光催化剂处理技术, 提出了油基岩屑源头减量措施, 研发了油基岩屑源头减量处理装备, 技术应用实现了渝西区块深层页岩气钻完井废弃物的高效治理。

关键词

钻井废液, 压裂返排液, 重金属离子, 光催化剂, 油基岩屑, 源头减量

Waste Treatment Technology for Deep Shale Gas Drilling and Completion in Yuxi Block

Yan Wang¹, Bin Lei¹, Xiaoling Liao², Xu Zhang³, Kezhi Wen¹, Lisha Yan¹, Chao Guo¹

¹Chongqing Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Chongqing

²Metallurgy and Materials Engineering College, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

³Petroleum and Natural Gas Engineering College, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Nov. 25th, 2024; accepted: Feb. 24th, 2025; published: Mar. 7th, 2025

Abstract

In response to the difficulties of real-time on-site detection of heavy metal ions in drilling waste liquid and fracturing backflow fluid of deep shale gas wells, the large output of drilling waste liquid and fracturing waste liquid, the low efficiency of on-site reuse treatment, and the high cost of harmless treatment and resource utilization of oil-based drill cuttings, a high-throughput injection and

文章引用: 王言, 雷彬, 廖晓玲, 张旭, 文科智, 严莉莎, 郭超. 渝西区块深层页岩气钻完井废弃物处理技术[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(1): 24-30. DOI: 10.12677/jogt.2025.471003

quantitative analysis method for real-time and rapid on-site detection of heavy metal ions has been established. High precision, high-throughput, and high signal-to-noise ratio on-site detection equipment has been developed, and a new photocatalyst treatment technology for fracturing backflow fluid has been established. Measures for reducing the source of oil-based drill cuttings have been proposed, and equipment for reducing the source of oil-based drill cuttings has been developed. The technology has been applied to achieve efficient treatment of deep shale gas drilling and completion waste in the Yuxi block.

Keywords

Drilling Waste Liquid, Fracturing Flowback Fluid, Heavy Metal Ions, Photocatalyst, Oil-Based Drill Cutting, Source Reduction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

深层页岩气是端牢能源饭碗和实现“双碳”目标的重要底气。然而，页岩气开发环保问题一直是国内外关注的焦点，页岩气开发井数多，专业广，环境影响因素较常规油气更加复杂。渝西深层页岩气区块地处长江上游，属于水源涵养保护区，人口密集、植被丰富、水系丰沛，部分区域喀斯特地貌属性导致地表沟壑纵横，页岩气有利区域内环境敏感点多，环境风险管控要求高。深层页岩气钻完井过程中的废弃物包括钻井废水、压裂返排液、水基岩屑和含油岩屑等。深层页岩气钻完井钻井废液、压裂废水产出量大，且存在重金属污染(如铜、镉、银、铅等)，同时，长水平段油基岩屑产出量大，成分复杂，含油率高达10%~25%，具有毒害性，属于危险废物，处置难度和处理成本高，且处理不当会造成严重环境污染[1]。如何防治这些环境风险源，为实现低碳能源清洁开发、变生态环境约束为绿色革新驱动力，确保页岩气的绿色开发一直是个重大难题。

本文针对经典钻井液和压裂液重金属离子的原子发射或吸收光谱等检测技术设备体积大、操作复杂，难以开展现场实时快速检测与监管的问题，提出了重金属离子现场实时快速检测的高通量进样与定量分析方法，研发了高精度、高通量和高信噪比的现场检测设备；针对深层页岩气钻井废液、压裂废水产出量大，成分复杂，污染物多，且高黏度、高浊度、高稳定性，高效处理和重复利用难度大的问题，提出了一种无选择性、绿色、环保、经济的钻井液、压裂废水光催化处理技术；针对油基岩屑无害化治理与资源化利用成本高，提出了油基岩屑源头减量措施，研发了油基岩屑源头减量处理装备，技术应用实现了渝西区块深层页岩气钻完井废弃物的高效治理。

2. 钻井废水和压裂返排液重金属离子现场实时检测技术

目前钻井液和压裂液重金属离子(铜、镉、银、铅)的原子发射[2]或吸收光谱[3]等检测技术，存在设备体积大、操作复杂等局限，缺乏一种现场实时快速检测的高通量进样与定量分析方法和高精度、高通量和高信噪比的现场检测设备。

2.1. 基于微流控技术的高通量检测芯片集成系统

针对钻井废水和压裂返排液重金属离子实时检测需求，提出了基于微流控技术的高通量检测芯片新方法，由废水处理系统、滤液收集系统、多通道检测系统集成，通过微流控芯片技术集成手段，实现了

钻井液和压裂液重金属离子现场实时快速检测的小型化高通量进样与定量分析, 检测精度 $<2\%$, 检测时间低至 15 分钟。

2.2. 基于微流控技术的钻井废水油水分离前处理技术

受到自然界中鱼鳞在水中不易被油污污染这一现象的启发, 对聚丙烯酰胺复合水凝胶材料的特殊浸润性以及将其应用于不锈钢滤网的表面改性进行了系统的研究, 设计了具有超亲水且水下超疏油的聚丙烯酰胺复合水凝胶改性滤网体系, 解决了钻井废水中的油污严重影响重金属离子检测精准度的难题。

2.3. 基于微流控技术的多色荧光定量检测试剂

研制了高亮度、荧光寿命长、均一化的 CQDs@AuNCs、CdSe/ZnSQDs@AuNCs 等系列多色荧光定量检测试剂, 实现了复杂钻井废水和压裂返排液样本中重金属离子的特异性识别与高效、稳定标记, 见图 1 和图 2 所示。试剂的最低检测限 $\leq 0.2 \text{ ng/mL}$, 检测精度 $<5\%$, 检测速度 ≥ 120 个/小时, 降低检测成本 70%, 解决了石油废水重金属离子的快速实时定量检测难题。

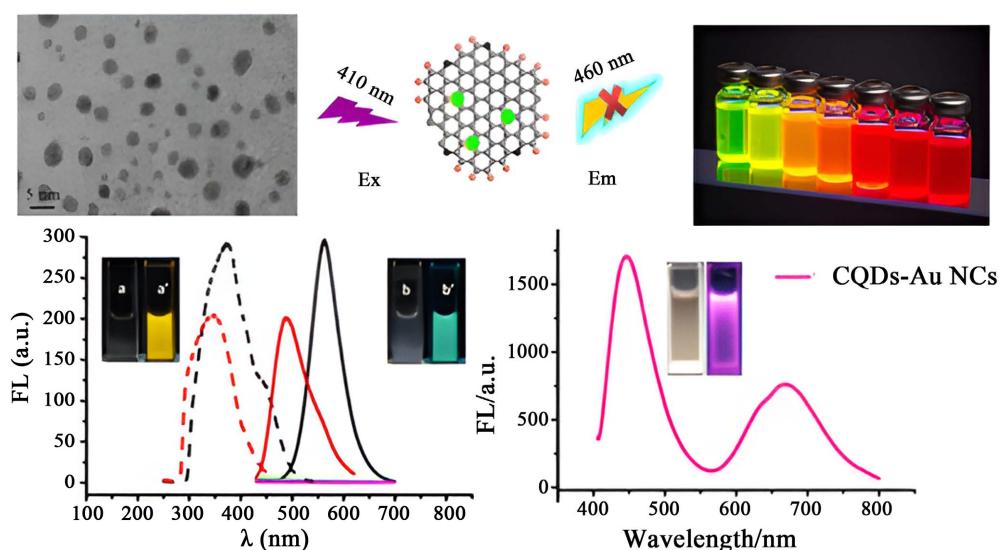


Figure 1. Diagram of CQDs@AuNCs fluorescent probe and fluorescence effect in heavy metal detection
图 1. CQDs@AuNCs 荧光探针与重金属检测荧光效应

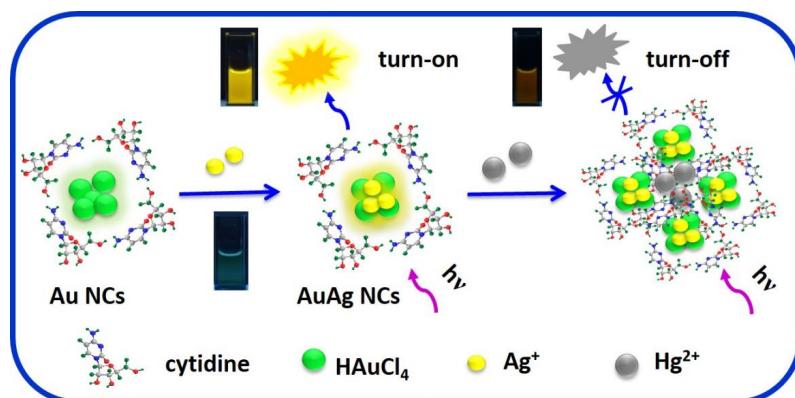


Figure 2. Diagram of multi-color fluorescence detection of heavy metals
图 2. 重金属多色荧光检测示意图

3. 压裂返排液高效处理技术

深层页岩气钻完井钻井废液、压裂废水产出量大,成分复杂,污染物多,具有高黏度、高浊度、高稳定性等特征,高效处理和重复利用难度大。传统的油气田返排液处理技术如微生物处理技术、吸附技术、超声波技术、电絮凝技术等虽然取得了一定的成效,但超声波技术成本高、效率低、效果不理想,吸附法不能降解污染物、电化学法会形成二次污染、生物法不容易培养合适的菌种,电絮凝技术不能去除有机物等。

光催化技术是用光催化剂把光能转化为化学能,无选择性地氧化,彻底降解污染物,是一种高效环保的处理方法[4] [5]。光催化光技术的核心是光催化剂,用于环境污染处理的光催化剂历经传统的氧化物、氮化物、硫化物,目前发展到新型的银基、铋基、金属单质等光催化剂。 $BixOyXz$ 是一类新型的卤化氢铋光催化剂,有较好的催化性能,近年来受到了广泛重视。虽然光催化技术在废液处理方面取得了一定进展,但催化剂性能、对污染物降解效率等方面,仍存在一些问题,限制了其推广应用。目前常见的光催化半导体材料,如 TiO_2 等,主要能量源为紫外光,太阳光利用率较低,同时,由于光催化剂活性低,对油田污染物的降解效果差。

3.1. 基于自掺杂改性的新型光催化剂制备技术

传统的光催化剂,具有较大的禁带宽度,只能吸收不到 5% 的太阳光。通过自掺杂改性技术,获取了 Bi_3O_4Br 光催化剂和富铋复合光催化剂,有效减小光催化剂的禁带宽度,降为 2.91 eV,同时提高了光催化剂的载流子分离效率,具有无选择性、氧化能力强、反应速度快、处理效率高,无二次污染等优点,提升了光催化材料的活性。如图 3 和图 4 所示。

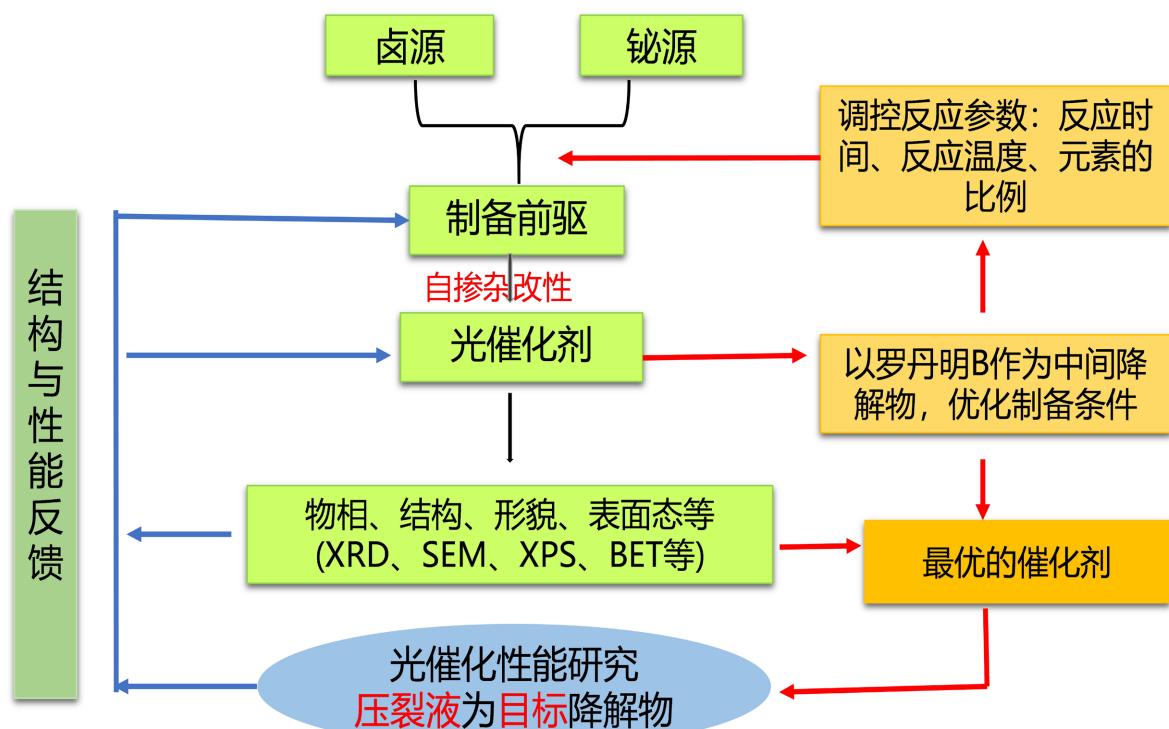


Figure 3. Diagram of photocatalyst preparation technology route
图 3. 光催化剂制备技术路线

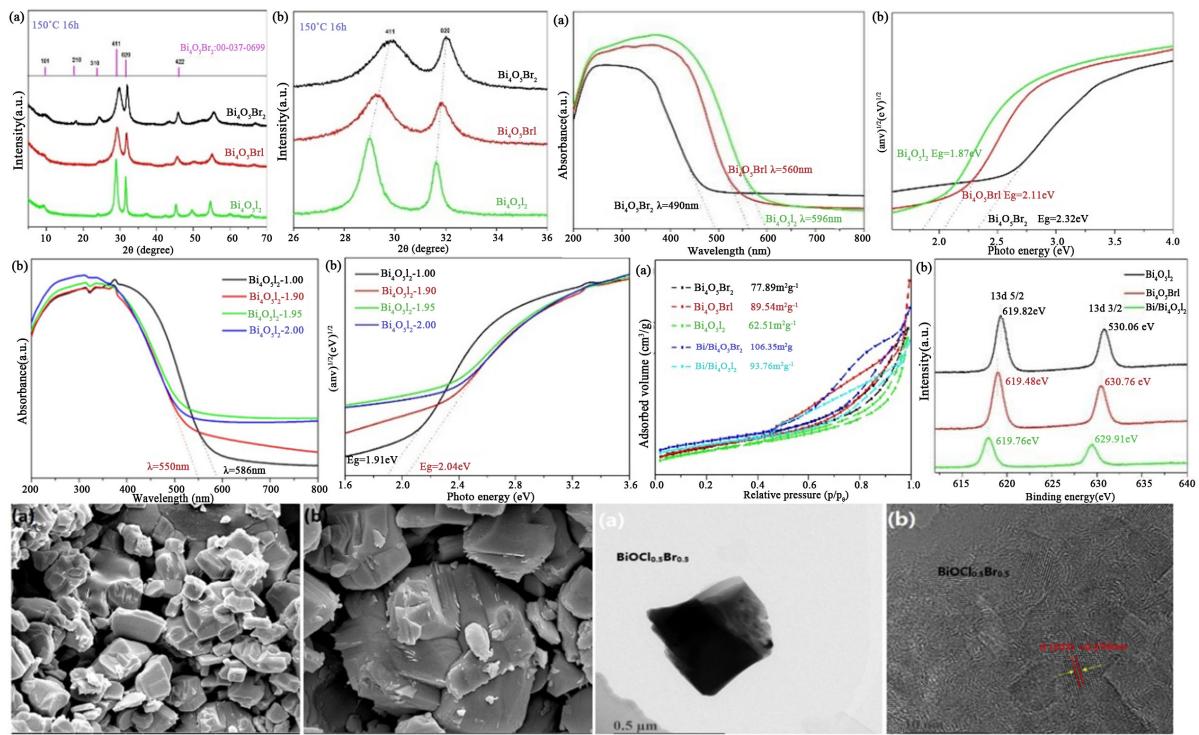


Figure 4. Diagram of morphology, structure and catalytic activity enhancement of photocatalysts
图 4. 光催化剂形貌、结构及其催化活性提升

3.2. 压裂返排液新型光催化剂处理技术

基于新型光催化剂，在光照作用下，改性的光催化剂被激发，产生超氧负离子、羟基自由基、光生空穴等活性物质，对返排液进行无选择性地氧化，污染物被转化成了无毒小分子、水、和二氧化碳，污染物降解率达 89% 以上，大幅降低了返排液的 COD 值，并具有较好的循环稳定性，多次重复使用后，继续有效，提高了光催化效率，可高效处理压裂返排液。如图 5 和图 6 所示。

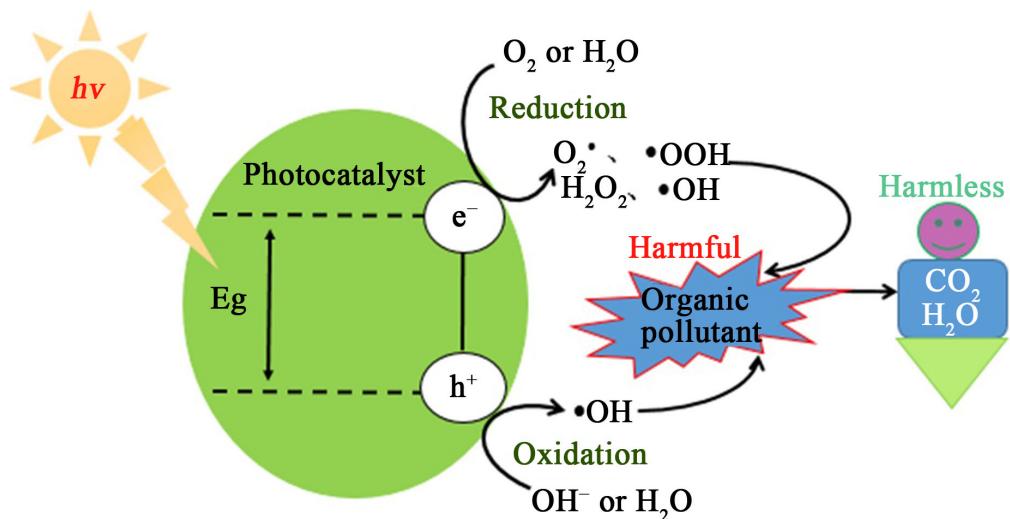


Figure 5. Diagram of mechanism of photocatalytic degradation of organic pollutants
图 5. 光催化降解有机污染物机理

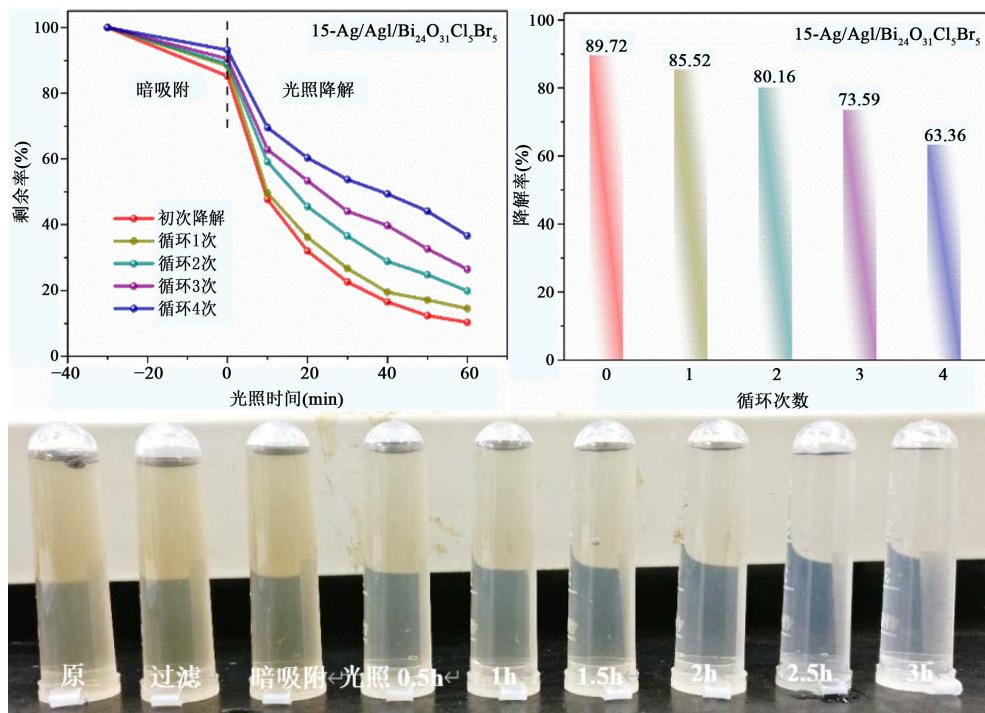


Figure 6. Diagram of the effect of photocatalytic treatment on flowback fluid
图 6. 光催化处理返排液效果

4. 油基钻屑源头减量措施

油基岩屑中含有多环芳烃等有毒化学物质，长期接触可能导致皮肤过敏、瘙痒、湿疹等皮肤病；油基岩屑中还含有苯等神经毒性物质，长期接触可能导致头痛、头晕、乏力、神经衰弱等症状；油基岩屑中同时含有重金属等有害物质，长期接触可能对肝脏、肾脏等内脏器官造成损害，引发消化系统疾病。矿物油在环境中自然降解困难，处置不当容易造成严重环境污染。因此，业界把油基岩屑油含量作为环境危害大小的评价指标。HJ 607-2011《废矿物油回收利用控制标准》要求“含油岩屑经油屑分离后油含量应小于 5%，分离后的岩屑宜采用焚烧装置”。因为焚烧方式环境危害依然大，现场主要参照 GB4914-2008《海洋石油勘探开发污染物排放浓度限值》的一级要求(油含量小于 1%)执行。

国外对油基岩屑处理的研究开始较早，从初期的固化法、坑内密封填埋法、焚烧法、注入安全地层或环形空间法等，逐步发展形成脱干法 + 微生物代谢降解法、化学清洗法等，上述方法均属于环保末端治理思路，一方面难以从根本上消除环境污染的隐患，另一方面造成了对可利用资源的浪费。目前热解析技术因其高效、稳定、可回收油资源等优势成为国际上应用较广的废弃油基钻屑处理技术。此外，萃取技术以安全高效环保的特点，越来越引起人们的重视，但处理成本高[6]-[8]。

因此，从源头上减少油基岩屑产生可以大幅度降低环保风险，减少油基岩屑处置费、运输成本、基础油购置费等，可以大幅度降低处理成本。现场应用表明，单井回用 100 方油基泥浆，可减少油基岩屑处置费、运输成本、基础油购置费约 60 余万元，同时，还可以有效降低转运过程中的泄漏风险，提升环保系数。

- (1) 强化钻井施工现场油基岩屑收集过程精细化管理，在水基转油基、固井、掏罐、掏方井等环节对油基和水基进行分开收集、分开处理，从源头上控制油基岩屑数量。
- (2) 利用油基岩屑干燥、热脱附、油液分离处理与回收等装置，单井油基岩屑平均减量 35%，渝西区

块深层页岩气一口井平均产出油基岩屑 800 吨, 单井可减量油基岩屑 280 吨, 按平均油基岩屑处理费为 1400 元/吨, 一口井可节约油基岩屑处理费 39.2 万元。

5. 结论与认识

- (1) 钻井废液和压裂返排液重金属离子的高通量进样与定量分析方法和高精度、高通量和高信噪比的现场检测设备, 可以实现重金属离子实时快速检测, 检测精度高、速度快、成本低。
- (2) 改性的光催化剂可对返排液进行无选择性地氧化, 提高了光催化效率, 污染物降解率达 89% 以上, 大幅降低了返排液的 COD 值, 并具有较好的循环稳定性, 可高效处理压裂返排液。
- (3) 油基岩屑收集过程的精细化管理和油基岩屑的分离、干燥等措施, 可从源头上减少油基岩屑产生, 大幅度降低油基岩屑处理成本和环保风险。

参考文献

- [1] 杨德敏, 喻元秀, 梁睿, 袁建梅. 我国页岩气重点建产区开发进展、环保现状及对策建议[J]. 现代化工, 2019, 39(1): 1-6.
- [2] 程龙军, 彭娟, 吉飞, 郑晓凤, 马千里, 温炎燊. Chelex 100 树脂固相萃取-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定高氯高盐废水中 6 种重金属元素[J]. 理化检验-化学分册, 2021, 57(3): 252-257.
- [3] 唐安娜, 高榕志, 王恪. 石墨炉原子吸收光谱法用于环境水样中重金属离子测定——基体改进剂[J]. 大学化学, 2021, 36(9): 132-136.
- [4] 宋生南, 卓祖优, 黄明培, 卢贝丽, 陈燕丹. 压电-光催化技术及其降解有机染料废水的研究进展[J]. 绿色科技, 2022, 24(20): 86-94, 98.
- [5] 何焕杰, 马雅雅, 张淑侠, 位华, 詹适新, 杨云鹏, 马金. 混凝-微电解-催化氧化法处理普光气田试气酸压废液[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 103-106.
- [6] 付韶波, 马跃, 岳长涛. 油基钻屑无害化处理和资源利用研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(8): 2207-2214.
- [7] 李惠心, 周庆元, 陈容, 林辉, 李邵楠, 王博学. 页岩气井油基钻屑新型环保无害化处理技术[J]. 钻采工艺, 2021, 44(2): 90-93.
- [8] 熊德明, 廖朋, 张烨, 田竟, 王朝强, 张春. 页岩油气基钻屑脱灰渣资源化利用进展[J]. 油气田环境保护, 2021, 31(1): 6-10.