

页岩气钻屑资源化利用的环境风险控制与治理经济效益

李思睿 (中石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司, 重庆 408000)

摘要: 本研究聚焦于其资源化利用过程中的关键风险问题, 开展了全过程污染控制与治理工作。借助识别钻屑理化特性及风险源、梳理风险路径, 构建起涵盖污染因子、暴露通道及环境敏感性的评价指标体系, 结合环境风险指数法 (即 ERI) 和模糊综合评价法 (也就是 FCE) 判定风险等级。针对水基与油基钻屑, 提出多阶段无害化处理与资源化技术路径, 形成可推广的控制方案; 从法规建设、现场监管、产品追溯三方面, 构建全过程治理体系, 实现钻屑资源化利用及环境风险协同管控, 达到了经济效益与环境效益的双赢目标。

关键词: 页岩气钻屑; 资源化利用; 环境风险评价; 治理; 经济效益

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 006-0031-03

Environmental Risk Control and Economic Benefits of Resource Utilization of Shale Gas Drilling Waste

Li Sirui (Sinopec Chongqing Fuling Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Chongqing 408000, China)

Abstract: This research focuses on the key risk issues during the resource utilization process of drilling cuttings and conducts pollution control and treatment throughout the entire process. By identifying the physical and chemical characteristics of the drilling cuttings and the risk sources, and by sorting out the risk paths, an evaluation index system covering pollution factors, exposure channels and environmental sensitivity is established. The risk level is determined by combining the environmental risk index method (ERI) and the fuzzy comprehensive evaluation method (FCE). For water-based and oil-based drilling cuttings, a multi-stage harmless treatment and resource utilization technology path is proposed, forming a controllable solution that can be promoted. From the aspects of regulation construction, on-site supervision and product traceability, a full-process governance system is also established to achieve the coordinated control of drilling cuttings resource utilization and environmental risks, reaching a win-win goal of environmental and economic benefits.

Key words: Shale gas drill cuttings; Resource utilization; Environmental risk assessment; Governance; Economic benefits

页岩气作为我国推进能源结构转型与实现“双碳”目标的重要支撑, 其大规模开发过程中所产生的钻屑固体废弃物数量庞大、成分复杂, 已成为制约绿色开发与生态保护的关键因素^[1]。钻屑中常含有重金属、有机烃类及高盐离子等污染因子, 若处置不当将对土壤、水体和生态系统造成持续性影响。资源化利用作为提升固废利用率、减少环境负荷的重要手段, 虽具有一定应用基础, 但其在实际推广中仍面临污染物残留、工艺稳定性差及风险监管不到位等问题。为此, 应先系统识别钻屑的污染特性与环境风险, 建立科学的风险评价模型, 开发差异化控制技术, 再完善全过程监管体系, 把钻屑处置从末端治理转向源—控—用—体化管理, 最终实现资源利用与环境安全协同发展, 助力企业完成经济与环境的可持续发展。

1 页岩气钻屑污染特性与环境风险识别

1.1 页岩气钻屑的污染特性与风险源

页岩气钻屑是钻井过程中地层岩屑与钻井液混合形成的固体废弃物, 成分复杂、粒径细小、有机质含量高。根据岩性与钻进阶段差异, 钻屑中常富集重金属 (如 Cd、Cr、Hg、Pb)、有机污染物 (TPH、

PAHs) 及可溶性盐类。油基钻屑含油量可达 50 g/kg, 生物毒性显著高于水基体系, 易引发土壤和水体污染。部分页岩层还富含 ²²⁶Ra、²²⁸Ra 等天然放射性核素, 增加累积性环境风险。钻屑中污染物波动大、迁移性强, 风险源覆盖钻进过程、钻井液选型与现场堆存等多个环节, 呈现显著的区域差异性与全周期复合风险特征。

1.2 钻屑资源化利用过程的环境风险

钻屑资源化通常包括固化、热解、改性与建材化利用, 虽可减少填埋压力, 但各处理环节存在潜在风险。预处理过程可能释放 VOCs、NO_x 等气态污染物, 滤液中亦含有毒残留; 再生产物在服役期内存在重金属淋溶和有机物再释放风险, 尤其在酸性或渗透环境下更为显著。运输、储存及应用环节若监管不力, 易引发污染转移和责任界限不清等问题。因此, 须从源头至末端建立全过程风险识别与控制机制, 确保资源化路径在环境安全前提下实施。

2 页岩气钻屑资源化利用环境风险评价

2.1 风险评价指标体系的构建

构建科学的环境风险评价指标体系是实现页岩气

钻屑资源化全过程风险量化的前提。基于“源-路径-受体”风险传递机制,本研究从污染源特性、暴露路径强度及环境承载能力三个维度出发,形成涵盖物理化学属性、生物毒性特征、迁移释放潜力、环境敏感性、风险管理能力的五类指标体系。其中,污染源指标包括钻屑中重金属(如Pb、Cd、Cr)、有机物(TPH、PAHs)浓度,以及可溶性离子(Cl^- 、 Na^+)释放速率;暴露路径则考虑钻屑与环境介质的接触界面、地表径流影响系数与地下水渗透系数等;环境敏感性涵盖地下水等级、水源保护区距离与土地利用类型等指标^[2]。各项指标采用归一化处理,结合专家打分法与层次分析法(AHP)确定权重系数,确保指标结构科学、权重分配合理,具备工程应用可操作性。

2.2 风险评价模型的选择与应用

在指标体系基础上,环境风险综合值采用模糊综合评价法(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)与环境风险指数法(Environmental Risk Index, ERI)相结合的双模型策略进行计算,以增强定性一定量融合能力。其中,ERI模型用于直接量化风险等级,公式如下:

$$\text{ERI} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

在环境风险指数评价中,ERI为环境风险指数, W_i 为第*i*项指标的权重系数, C_i 为实测污染物浓度, S_i 为对应环境基准限值。

ERI值越大风险越高,为避免单一指标极端值主导判断,引入模糊隶属函数 $\mu(x)$ 对每类风险等级进行模糊赋权,实现多指标协同判断,各指标通过模糊矩阵,结合权重向量 $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$,计算综合风险隶属度 $R^{[3]}$:

$$R = W \cdot M \quad (2)$$

依据最大隶属原则确定风险等级,并对高风险因素进行溯源敏感性分析,最终明确资源化过程中的控制节点。

3 页岩气钻屑资源化利用污染控制技术

3.1 钻屑源头减量与清洁生产工艺

实现源头减量清洁过程,降低钻屑环境风险,提升资源化利用效率的重要节点,控制策略主要包括以下几个方面:①优化钻井液配方设计。采用低固相低毒易降解型钻井液,优先选用聚合物型水基钻井液替代传统黏土基,精细控制泥浆比重和滤失量,有效减少无效钻屑产生量,降低钻井过程中无效切削泥浆污染负荷^[4]。②提升钻头机械效率。选用聚晶金刚石复合片高效钻头参数优化的钻井程序,减少重复切削过钻过程,降低钻屑产出量,实时监测ROP(机械钻速)和TOB(钻压扭矩),明确了对钻屑产率动态控制。

③集成井场封闭式循环系统。部署封闭循环罐固控设备高效离心分离,实现了钻井液岩屑的快速分离再利用,固控系统选用振动筛+旋流器+高速离心组合工艺,使钻井液综合回收率稳定达到85%以上。④实施数字化泥浆监测与预警。在钻井液管理环节,通过M-I SWACO、Halliburton提供的智能钻井液管理,实现钻井关键参数,钻屑产出量,及潜在污染物浓度的在线监测动态调控,从源头削减污染物生成量。

3.2 水基钻屑无害化处理与资源化利用

水基钻屑中的水率和污染强度适宜,通过物理-化学联合工艺进行资源处理,主要包括以下几个技术单元:①机械脱水与热干化处理。采用带式压滤与低温热干化联合工艺,将含水率由60%降低至15%以下。干化系统温控在80-120℃,避免有害挥发物释放。所得干化固体便于后续处置输送。②稳定化/固化处理。通过添加水泥、石灰或粉煤灰类固化剂,将钻屑中重金属固化转换成惰性状态,控制其在浸出液中的释放浓度,稳定化反应公式如下: $\text{M}^{2+} + \text{OH}^- + \text{SiO}_3^{2-} \rightarrow \text{M-Si-OH} \downarrow$ 其中 M^{2+} 为金属离子,通过生成低溶解度的硅酸盐沉淀形式实现稳定。③建材资源化利用。稳定化产物可替代天然骨料应用于非承重型建材中是道路基层非结构砖块,压制强度控制在2-4MPa,使其满足地方建材标准《JG/T 505-2016》对于固废砖制品的各项要求。④全过程排放控制与环境监测。对处理过程中的滤液干化尾气进行收集净化,滤液经混凝沉淀+DTRO处理,尾气通过活性炭和除雾器吸附处理,确保VOC和COD排放浓度分别低于20mg/m³与100mg/L。

3.3 油基钻屑无害化处理与资源化利用

对含油率较高且富含毒性有机物的油基钻屑,本节采用热解析+催化氧化+深度资源化的三段式控制技术,通过缺氧密闭热脱附高效去除石油类污染物,对挥发组分进行气相净化回收,将处理后的残渣转化为可利用价值的产品。

①热解析脱附处理。在缺氧密闭环境下,将油基钻屑加热至320-420℃,使其中石油类污染物挥发分离,控制8-12℃/min的加热速率,防止油雾发生爆炸风险。处理后残渣中含油率可降低至0.3%以下,完全满足《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599-2020)填埋处置要求。②挥发组分气相净化与回收。脱附气体经冷凝-分离-吸附联合净化,加上低热值燃料的回收油相物质,气相经由二级冷凝器与分子筛吸附塔处理,VOCs去除率达98%以上^[5]。③残渣资源化利用。解析残渣因颗粒均匀和比表面积大,可作为改性组分掺入沥青路面基料,或者用作水泥窑的替代燃料(RDF)。测试表明,残渣的

热值可达 12 - 16 MJ/kg, 重金属浸出量小于限值标准的 30%。④污染控制与环境评价闭环。全过程设有在线监控点位, 部署红外气体分析仪和烟尘监测仪浸出液自动采样, 定期对处理设施进行气密性检测, 对操作人员职业暴露进行评估, 建立符合《危险废物鉴别技术规范》(HJ 298-2019) 规范的环境风险防控档案, 实现全过程可追溯闭环管理。

4 页岩气钻屑环境风险的全过程监管对策

4.1 强化勘探开发阶段的现场环境监督

钻屑污染风险具有高度的现场依赖性与动态性, 需在勘探开发阶段构建基于动态感知 + 分级响应的智能监督机制。建议在井场部署具备 GIS 定位、LoRa 传输与 AI 识别能力的“智能固废监测终端”, 实时监测钻屑产量、堆放状态、污染物浓度等关键参数。监管平台应与企业生产系统、地方环保部门平台实现数据互通, 构建“井场—平台—监管”三位一体的数据闭环管理体系。对于关键环境节点, 如油基钻屑暂存点、固化区与脱附站, 应设立高风险响应等级, 启动“视频 + 传感器 + 人巡”的复合监管机制, 并建立违法风险企业的信用惩戒制度, 形成全生命周期监管链条。

4.2 构建资源化利用产品的追溯与管理机制

页岩气钻屑资源化产品的终端流向分散, 易出现产品质量不达标、非法倾倒等“污染转移”问题, 必须构建基于区块链与数字标签系统的全过程追溯管理平台。建议在每批资源化产品(如固化砖、道路基层料)出厂前赋予唯一“电子标签”, 包含原料信息、处理工艺、环境检测数据与流向记录。通过区块链技术实现数据防篡改存储, 各级监管机构可随时调阅流向路径、质量记录与责任主体, 实现事前可溯、事中可控、事后可究的闭环治理。同时, 应推动产品端纳入“绿色建材认证”与“碳足迹标识”体系, 促进其在公共基础设施项目中的优先使用, 建立以市场机制驱动的合规激励体系, 实现“资源利用—环境友好—产业闭环”三重目标协同。

5 页岩气钻屑资源化利用与治理取得的经济效益

页岩气钻屑资源化利用与环境风险治理实现了环境与经济协同共赢, 核心经济效益体现在成本节约、资源增值、产业带动及政策红利四大维度, 有效打破“治污只增成本”的误区。

传统填埋油基和水基钻屑成本分别达 2000-3000 元/t、800-1200 元/t, 还需承担后续修复费用, 以年产 10 万 t 钻屑区块为例, 采用资源化技术后年减填埋 9 万 t, 直接节约成本超 1.2 亿元。源头减量工艺已有明显成效, 优化钻井液配方可使单井成本节约 8-12 万元, 井场循环让钻井液回收率超 85%, 间接降低处

理成本 30% 以上。

油基钻屑热解析后, 每吨可回收 30-50kg 油品, 单吨收益 200-300 元, 残渣和水基钻屑固化产物可替代天然骨料生产建材, 使成本降低 30%-50%。某区块年产 8 万 t 钻屑建材, 年增收益 400 万元, 稀有金属回收后, 可进行拓展增值空间。

页岩气钻屑的资源需求有效拉动了相关产业的发展, 某钻屑处理设备商年销售额增 30% 以上, 一个年 10 万 t 的项目, 可直接创造 80 至 120 个就业岗位, 间接带动上下游超 500 人就业, 助力区域经济。

企业可享有 70% 固废利用的增值税即征即退, 还可享有每吨 50-100 元治理补贴, 合规治理规避单井数百万元的污染罚款停产损失, 绿色企业形象更有助于招投标融资, 提升综合效益。

6 结语

页岩气钻屑为非常规能源开发过程中产生的重要固体废弃物, 实现绿色低碳目标, 提升废物利用效率, 本文分析了钻屑的污染特性环境风险来源, 构建了科学的风险评价指标, 明确了水基与油基钻屑差异化处理技术, 针对性的多段式无害处理, 提出了覆盖源头控制、过程清洁化控制, 与末端高值利用的全过程污染控制策略, 相关分析表明, 优化钻井液配方和钻井工艺, 强化过程治理效能, 实现源头清洁生产, 智能全过程监管手段, 有效降低钻屑环境风险, 实现资源利用与生态安全的双重协同, 未来应加快标准制定监管机制创新, 推动页岩气钻屑资源利用, 使其更加规范化、数字化与高值化的方向持续发展。

参考文献:

- [1] 张显河. 页岩气油基钻屑脱油灰渣用作道路混凝土掺合料活性激发及性能研究 [D]. 西南科技大学, 2024.
- [2] 梁敏, 朱天菊, 谢贵林, 等. 川南页岩气开发油基钻屑对玉米的生物毒性效应研究 [J]. 生态毒理学报, 2024,19(01):286-294.
- [3] 焦艳军, 罗方宇, 秦丰, 等. 页岩气油基钻屑剩余固相建材资源化利用进展 [J]. 油气田环境保护, 2023, 33(03):15-19.
- [4] 肖全林. 页岩气油基钻屑热解机理及热馏炉温度场分析研究 [D]. 四川轻化工大学, 2023.
- [5] 谢水祥, 任雯, 司庆柯, 等. 页岩气井油基钻屑氟碳除油剂的研制及作用机理 [J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(04):422-429.

作者简介:

李思睿 (1995.08—), 男, 汉族, 山东潍坊人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 地质工程。