

湘娄页1井废浆循环利用与无害化处理技术

徐秋文^{1,2}, 王虎^{1,2}, 周成建^{1,2*}, 王杰^{1,2},
蔡隽^{1,2}, 方国庆^{1,2}, 焦丁³, 肖明君³

(1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙410600; 2. 长沙市深部钻井工程技术创新中心, 湖南长沙410600; 3. 河北省煤田地质局第二地质队(河北省干热岩研究中心), 河北邢台054001)

摘要:为落实绿色勘查理念, 针对湘娄页1井施工中产生的800 m³钻井液废浆, 设计了一套循环利用与无害化处理系统。该系统通过废浆池收集废浆, 经泥砂分离器初步分离大颗粒固相后, 将合格浆液返回钻井循环系统; 不合格浆液添加聚合氯化铝(PAC)和阴离子型聚丙烯酰胺(PAM)破胶处理, 再经固液分离装置压滤为泥饼和清水; 清水可回用或达标排放, 固相用于道路建设或安全填埋。现场应用显示, 该系统全井循环利用废浆400 m³、清水200 m³, 直接节省材料费用约16万元, 实现了污染物零排放, 为页岩气勘探中的钻井液环保处理提供了可行技术方案。

关键词: 钻井液; 废浆; 循环利用; 无害化处理; 固液分离; 绿色勘查

中图分类号: P634.6; TE254 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0290-07

Recycling and harmless treatment technology of waste drilling fluid for Xianglouye-1 well

XU Qiuwen^{1,2}, WANG Hu^{1,2}, ZHOU Chengjian^{1,2*}, WANG Jie^{1,2},
CAI Juan^{1,2}, FANG Guoqing^{1,2}, JIAO Ding³, XIAO Mingjun³

(1. Changsha Center for Comprehensive Natural Resources Survey, China Geological Survey, Changsha Hunan 410600, China; 2. Changsha Engineering Technology Innovation Center for Deep Drilling, Changsha Hunan 410600, China; 3. The Second Geological Team of Hebei Coalfield Geology Bureau (Hebei Dry Hot Rock Research Center), Xingtai Hebei 054001, China)

Abstract: To implement the concept of green exploration, a recycling and harmless treatment system was developed for the 800 m³ waste drilling fluid generated during the construction of Xianglouye-1 well. The waste fluid is collected in a waste mud tank. After coarse solid particles are preliminarily separated by a desander, qualified slurry is returned to the drilling circulation system. Unqualified slurry is subjected to gel-breaking treatment by adding polyaluminium chloride (PAC) and anionic polyacrylamide (PAM), followed by solid-liquid separation with filter press to produce mud cake and clean water. The clean water can be recycled or discharged up to standard, and the solid phase can be used for road construction or safely landfilled. Field application results show that 400 m³ waste drilling fluid and 200 m³ clean water of the whole well were recycled by this system, saving more than 160000 RMB in material cost directly. Zero pollutant emission was achieved, which provides a feasible technical scheme for environmental treatment of drilling fluid in shale gas exploration.

Key words: drilling fluid; waste slurry; recycling; harmless treatment; solid-liquid separation; green exploration

收稿日期: 2026-03-09; 修回日期: 2026-08-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.037

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD202602410505)

第一作者: 徐秋文, 男, 汉族, 1989年生, 助理工程师, 主要从事钻井工程管理工作, 湖南省长沙市宁乡市城郊街道学府路258号, xlys768716188@qq.com。

通信作者: 周成建, 男, 汉族, 1985年生, 助理工程师, 主要从事钻探工艺技术、钻井液、钻进机具等研究工作, 湖南省长沙市宁乡市城郊街道学府路258号, 601101424@qq.com。

引用格式: 徐秋文, 王虎, 周成建, 等. 湘娄页1井废浆循环利用与无害化处理技术[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 290-296.

XU Qiuwen, WANG Hu, ZHOU Chengjian, et al. Recycling and harmless treatment technology of waste drilling fluid for Xianglouye-1 well[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 290-296.

0 引言

在钻完井过程中,钻井液的循环利用与无害化处理对绿色勘查具有重要意义^[1]。钻井液中含有重金属、有机物等有害物质,若不进行妥善处理,会对土壤、水源和海洋环境造成严重污染,威胁生态系统和人类健康^[2-5]。通过无害化处理,可以显著降低钻井液中的污染指标,使其达到排放标准,从而减少对环境的破坏^[6-7]。钻井液的循环利用可以减少对新资源的需求,降低原材料消耗。例如,通过钻井液处理设备对钻井液进行净化和循环使用,不仅可以节约成本,还能提高资源利用率,实现可持续发展^[8-10]。绿色勘查强调在资源开发过程中最大限度地减少对环境的影响。钻井液的循环利用和无害化处理是落实绿色勘查理念的重要措施,有助于实现勘查活动的清洁化和可持续化。通过无害化处理技术,不仅可以降低钻井液的综合处理成本,还能将处理后的固化物用于道路铺设和房屋建设^[11-14],提高资源的重复利用率,从而带来显著的经济效益和社会效益。综上所述,钻井液的循环利用与无害化处理不仅是绿色勘查的重要组成部分,也是实现环境保护、资源节约和可持续发展的关键措施。

湘娄页1井是一口页岩气参数井,施工期间共产生钻井液废浆约800 m³,项目组通过合理的场地布置结合泥砂分离器、固液分离装置等废浆处理设备,形成了一套钻井液废浆循环利用与无害化处理系统,降低了施工成本,减少了环境污染。

1 设计思路

图1为湘娄页1井钻井液废浆循环利用与无害化处理系统工艺流程设计示意图。该系统结合现场固相控制系统进行整体布置,在原有固相控制系统的基础上,增设了一个废浆池和一个废渣池,废浆池用于收集废浆废液,废渣池用于暂存废渣,并引进了泥砂分离器和固液分离装置。使用泥砂分离器将废浆中的大颗粒固相初步分离后,使用固液分离装置最终将废浆处理成泥饼和清水。整体设计思路如下:

(1) 钻探施工产生的废浆先被收集到废浆池内保存。

(2) 废浆池内的废浆先通过螺杆泵泵送到泥砂分离器内,经泥砂分离器处理后,废浆被分离为大颗粒固相和不含大颗粒的废浆。其中,大颗粒固相被

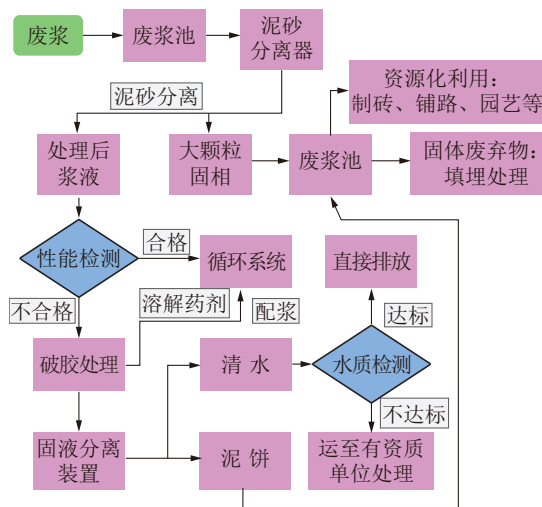


图1 钻井液废浆循环利用与无害化处理系统工艺流程

输送到废渣池内暂存;处理后的废浆则被输送到废浆罐内等待下一步处理。

(3) 废浆罐内的废浆,经检测后,性能满足钻进使用要求的,泵送到分流箱,经振动筛二次处理后,重新进入循环系统;性能不能满足钻进使用要求的,加入絮凝剂、混凝剂等破胶处理药剂后,泵送到固液分离装置内。

(4) 固液分离装置将破胶絮凝后的废浆处理成干燥的泥饼和清水^[15],其中泥饼被运到废渣池内暂存;清水可用于重新配浆或溶解破胶处理药剂,清水经检测符合排放标准的可以直接排放,不符合排放标准的,则需要运输到有处理资质的废水处理厂处理。

(5) 暂存在废渣池的大颗粒固相及泥饼,可用于道路建设、绿化带建设及烧砖^[16]等资源化利用,也可以作为一般固体垃圾,运输到固体垃圾填埋场填埋处理。

2 系统组成与整体布局

根据前述设计思路,设计了钻井液废浆循环利用与无害化处理系统,该系统依托现场钻井液固相控制系统,主要包括废浆池、废渣池、废浆罐、泥砂分离器、固液分离装置以及相关的输液泵组、传送带等(见图2)。

钻井液废浆循环利用与无害化处理系统现场平面布置如图3所示,具体如下:

(1) 在固相控制系统振动筛、清洁剂及离心机出口处设置一废浆池,用来收集废浆。

了泥砂分离器和固液分离装置两套关键设备。

3.1 泥砂分离器

泥砂分离器的工作原理主要基于离心沉降,通过高速旋转产生的离心力分离砂水混合物中的不同密度组分,实现粗颗粒(如砂石)与细颗粒(如泥砂)及水的分离。该设备主要由泵系统、振动筛、旋流器等核心部件组成。泵系统由进浆泵、内部砂泵、驱动电机和流量控制分配阀组成,其中进浆泵用于将废浆泵送到泥砂分离器,内部砂泵则负责将初筛后的废浆泵送至旋流器和将处理好的废浆排出。振动筛由两台振动电机、一个振动筛箱、一副粗筛板、一副细筛板、四组隔振弹簧组成。振动电机是振动筛的激振源,由电机直接带动偏心装置产生离心力。两台振动电机作同步反向运转,使振动筛产生直线振动。通过调整偏心块的夹角可实现激振力的变化。振动筛箱为框架式焊接结构,由四组隔振弹簧支撑。良好的结构刚性使其能可靠地承受安装在其顶部的振动电机传递的激振力。通过斜面楔紧机构和标准件的连接紧固,粗细筛分上下两层装于振动筛箱内。上层为细筛,下层为粗筛。粗细筛板均为不锈钢条缝筛板,筛孔尺寸粗筛为 $2.0\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,细筛为 $0.4\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 。旋流器可利用离心原理将废浆中 $40\sim 60\text{ }\mu\text{m}$ 粒级的固相分离除去。

图 4 为泥砂分离器工作原理图,其具体工作过程如下:

(1)由进浆泵从废浆池抽吸来的废浆通过泥砂分离器振动筛的进浆口进入振动筛的底层粗筛进行初筛处理,废浆中粗颗粒被筛分出来,处理后废浆则进入储浆槽。

(2)泥砂分离器内自带的砂泵从储浆槽内抽吸经过初筛的废浆,并将废浆打入旋流器内,在离心力

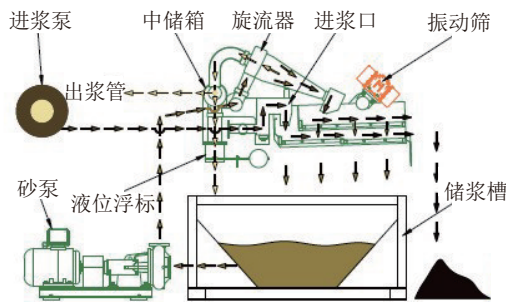


图 4 泥砂分离器工作原理

作用下废浆内的轻浆从旋流器顶部溢流管进入中储箱,然后沿出浆管输送出去或回归到储浆槽。

(3)废浆中粒径细微的泥砂则从其下端的底流嘴排出落入振动筛的上层细筛上,经细筛脱水筛选后,较干燥的细渣料分离出来,透过细筛的钻井液再次返回储浆槽内。

钻井液处理过程中,由中储箱与储浆槽之间的一个液位浮标保持储浆槽内的液面高度恒定。一旦储浆槽内输出的钻井液量大于供给的,那么液位浮标将随液面的下降而下落,此时中储箱的钻井液就通过开启的补浆管转送到储浆槽内,液面因此上升而恢复原状;如果供浆量大于输出量,储浆槽将溢流以防止漫浆。当要求更高质量的钻井液时,可通过减少总进浆量,重复旋流器中的钻井液分选过程以达到目的。

3.2 固液分离装置

固液分离装置的工作原理是通过压力系统将料液中的固体颗粒截留,实现固液分离。图 5 是固液分离装置结构示意图,该装置由机座、压紧板、主梁、滤板、止推板等组成,其主要技术指标见表 1,其工作流程是周期性的,主要包括四个核心阶段:压紧、进料、过滤、压榨和卸料。

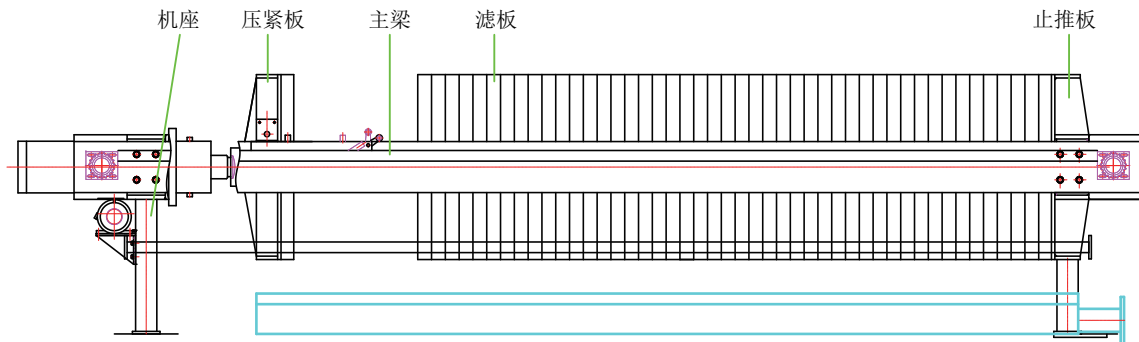


图 5 固液分离装置结构

表 1 固液分离装置主要技术指标

指标名称	指标值
滤板数量/块	24(含头尾)
膜板数量/块	23
滤板规格/mm	870×870
滤室数量/个	45
滤室容积/m ³	约 0.95
过滤面积/m ²	60
进料方式	止推板中心进料孔 DN80 法兰
出液方式	双明流出液
进料压力/MPa	≤0.8
鼓膜压力/MPa	≤1.2
压紧压力/MPa	18~22
外形尺寸/mm	6794×1350×1920

(1)压紧阶段:这是工作循环的开始。液压系统启动,推动压紧板,将按顺序排列的滤板和滤框紧密地压在一起,形成一个个密封的滤室。当压紧力达到设定值后,液压系统会自动保压或停止,确保在后续的高压过滤过程中滤室密封,防止物料泄漏。

(2)进料过滤阶段:滤室压紧后,启动进料泵,将待处理的钻井液废浆从止推板的进料口泵入各个滤室。在泵的压力作用下,液体透过滤布,沿滤板表面的沟槽流至下方的出液孔排出,而固体颗粒则被滤布截留在滤室内,逐渐堆积形成滤饼。随着滤饼增厚,过滤阻力增大,进料压力也会随之升高。当滤室被滤饼完全充满,出液量变得极少或不再出液时,表明进料过程完成。

(3)压榨阶段:此阶段主要用于进一步降低滤饼的含水率。向安装在滤板内的弹性隔膜后方通入高压水或压缩空气,使隔膜鼓起,对滤室内的滤饼进行二次机械挤压,挤出其中的水分。

(4)卸料与复位阶段:所有脱水操作完成后,液压系统动作,松开压紧板,停止保压。随后,拉开装置(如拉板小车)会自动或手动将滤板依次拉开。滤饼会因失去压力而产生裂缝,并依靠自重从滤布上脱落,掉入下方的收集装置中。

卸料完成后,通常需要清理滤布上残留的滤渣,并检查滤布是否完好。将滤板重新合拢、压紧,即可开始下一个工作循环。

4 现场应用概况

4.1 泥砂分离

废浆中的钻渣等较大颗粒的固相主要通过泥砂分离器完成分离,图6为泥砂分离器现场工作情况。



图 6 现场泥砂分离器进行废浆泥砂分离

实际处理过程中,进浆泵供液速度较大时,出现振动筛跑浆的现象,因此,进浆泵进浆管道应增设分流管道或加装阀门控制流量,减少振动筛的废浆量,保证振动筛的初筛质量。

振动筛下层粗筛筛网为 40 目,上层细筛筛网为 80 目。根据现场筛分情况,经过一次筛分后的废浆,进行第二次细筛时,仍有较多的细砂筛出,说明一次旋流细筛不能达到泥砂充分分离效果,原因可能是以下一种或几种:(1)筛网网眼过大,部分细砂透过筛网重新落回储浆槽和中储箱内;(2)旋流器性能不足,不能一次性将细砂分离。所用 FX-150 型旋流器理论最大废浆处理量可达 250 m³/h,实际操作中,因废浆中有害固相含量过高,一次旋流不能全部清除需要清除的固相,需要多次处理才能将废浆中 40 μm 以上固相清除干净,经反复验证,最优废浆处理量为 30~50 m³/h;(3)泥砂分离器内部密封存在缺陷,为保证筛分质量,实际操作中,当启动进浆泵时,先不打开中储箱的出浆口;待储浆槽满后,关闭进浆泵,使用旋流器循环处理储浆槽和中储箱的废浆,直到

振动筛基本无细砂筛出,再将出浆口打开,将处理好的浆液全部泵送到废浆罐内,等待下一步处理。

在实际操作中,有时废浆池内的废浆固相含量过高,进浆泵泵送困难,为解决此问题,在出浆口处增加了一处三通,在废浆池内废浆固相含量过高时,将一部分中储箱内处理过的废浆泵送到废浆池内,稀释废浆池内的废浆后,再泵送到泥砂分离器处理。

4.2 废浆破胶处理

废浆进行固液分离前,先要进行破胶处理^[17-18]。废浆破胶需要使用絮凝剂聚丙烯酰胺(PAM)^[19]和混凝剂聚合氯化铝(PAC)^[20],在处理废浆时,它们通过“一破一聚”的协同机制,能将难以沉降的细小颗粒迅速聚集成大絮团,从而实现固液分离。

湘娄页1井使用聚合物防塌钻井液体系,后期因地层水敏造浆严重,且地层压力增大,逐步转变为聚磺钻井液体系。钻井液配方为钠基膨润土4%~5%+纯碱0.2%+烧碱0.1%+无荧光防塌剂0.8%~1%+低黏聚阴离子纤维素1%~1.2%+乳化石蜡0.5%+水解聚丙烯腈铵盐0.5%~0.8%,后期随着地层水敏性增加,逐步加入腐殖酸钾1%,磺化沥青0.5%和磺化褐煤树脂0.5%,根据地层压力情况,加入适量重晶石。钻井液密度1.15~1.20 g/cm³,后期因地层压力增大,钻孔有掉块现象,密度提升至1.27~1.30 g/cm³;API滤失量4~8 mL;pH值9~11。处理废浆前,现场通过大量室内实验确定了破胶剂添加量:按照原浆体积,1 m³原浆添加PAC 20 kg、PAM 2 kg。此外,室内实验还发现了以下规律:

(1)选择合适的PAM类型才能达到好的处理效果:PAM有阴离子型、阳离子型和非离子型等多种类型,实验数据显示,使用阴离子型PAM效果最好。

(2)添加剂需要先配制成胶液,再添加到废浆内:两种添加剂都需要先配制成胶液,再加入废浆中,否则添加剂无法混合均匀,一方面造成材料浪费,增加处理成本,另一方面添加剂效果不稳定,可能无法达到预期的破胶目的。根据实践经验,PAC需要配制成5%~10%的溶液,PAM需要配制成0.8%~1.0%的稀溶液,且必须充分溶解(通常需搅拌40~60 min)后再投加,避免结块导致材料浪费。

(3)投加顺序会影响破胶效果:必须先加PAC,搅拌混合反应均匀,让颗粒脱稳形成微絮体后,再加PAM。如果顺序颠倒,PAM的长链会被水中的杂质

“缠住”或被后续加入的PAC破坏结构,导致失效,甚至让废浆变得更黏、更难处理。

破胶后的废浆如图7所示。

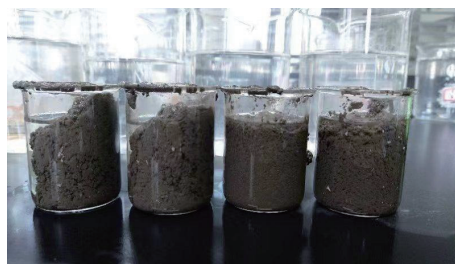


图7 破胶后的废浆

4.3 固液分离

经过破胶处理后的废浆,由供液泵泵送到固液分离装置^[21-22]进行处理。固液分离装置已经较为成熟,但是因其高液压系统的存在,使用中应特别注意安全操作和设备的保养维护:操作前应检查确认滤板、滤布、液压系统及管路有无异常;运行中应控制好压紧压力、进料压力,规范操作设备;卸料前应确定液压系统已完全卸压;卸料后应清理残渣,清洗滤布。

固液分离后的泥饼如图8所示。



图8 固液分离后的泥饼

4.4 处理效果

现场泥砂分离器每天可以处理废浆200 m³,满足钻井全过程废浆处理需求;固液分离装置每天可处理废浆15 m³,满足钻井日常废浆处理需求。

钻井结束时,因一次性产生废浆量较大,需要额外时间处理废浆。此时,如果设备不急于搬迁,可安排专人继续处理废浆;如果急于搬迁,一方面可以先

行搬迁其他设备,另一方面可以对部分废浆进行固化处理,固化处理剂可以使用水泥、废浆固化剂及生石灰等。

湘娄页1井全井施工过程中,共产生废浆约800 m³,经过处理后循环利用废浆约400 m³,使用固液分离装置处理废浆约400 m³,其中回收的清水循环利用约200 m³,排放清水约200 m³。分离出的固相运出场地交由有资质的单位处理,其中大部分固相用于附近道路、场地铺设及绿化用土,少部分运至固体垃圾填埋场填埋处理。

该井全周期未因固、液废弃物对周边造成影响。处理后的钻井液及清水的循环利用节省了施工材料费用。该井钻井液平均造价约400元/m³,循环利用的钻井液直接节省材料费约16万元。

5 结论

湘娄页1井钻井液废浆循环利用与无害化处理系统的成功应用,验证了该设计思路和处理工艺的可行性与有效性。通过“废浆收集-泥砂分离-破胶处理-固液分离”的工艺路线,实现了钻井液废浆的分级处理和资源化利用。现场应用结果表明,该系统能够有效分离废浆中的固相颗粒,经处理后回收的废浆和清水可重新用于钻井施工,显著降低了新鲜钻井液材料的消耗,直接节约了材料成本约16万元。同时,通过对分离出的固相进行合规处置,避免了固液废弃物对周边环境造成污染,实现了钻井施工的绿色环保目标。

该系统在实际运行中也展现出一定的灵活性和可操作性,针对废浆固相含量过高、振动筛跑浆等问题,通过增设分流管道、优化旋流器循环处理流程、调整破胶剂投加方式等措施,保障了处理效果和设备稳定运行。然而,在面对钻井结束时一次性产生的大量废浆时,现有固液分离装置的处理能力略显不足,未来可考虑进一步优化设备配置或引入备用处理单元,以提高应急处理能力。

综上所述,湘娄页1井钻井液废浆循环利用与无害化处理技术的实践,为页岩气等油气资源勘探开发过程中的钻井液废浆处理提供了可借鉴的经验和模式。该技术不仅具有显著的经济效益和环境效益,也符合国家绿色发展和节能减排的要求,对推动石油天然气行业的可持续发展具有积极意义。后续

可在此基础上,进一步优化处理工艺参数,提升自动化控制水平,降低人工操作强度,以期在更多钻井工程中推广应用。

参考文献:

- [1] 冯美贵,蒋睿,徐军军,等.泥浆不落地技术在地质岩芯钻探中的应用[J].地质论评,2023,69(S1):518-520.
- [2] 徐俊文,马国俊,雷士博.钻井废弃液处理技术的研究与应用[J].清洗世界,2023,39(1):85-87.
- [3] 马春亮.水基钻井液废弃物无害化处理技术探讨[J].石化技术,2024,31(11):86-88.
- [4] 方圆.油田废弃钻井液无害化处理技术[J].化工管理,2021(18):86-87.
- [5] 叶斌.海上废弃钻井液的无害化处理方法研究[J].石化技术,2020,27(4):42-43.
- [6] 张统得,蒋炳,严君凤.地质钻探废弃冲洗液污染特性及脱稳技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):134-139.
- [7] 彭博一,李晓东,王康,等.废弃无固相钻井液无害化处理技术研究与应用[J].钻探工程,2025,52(2):45-50.
- [8] 徐力,董怀荣.废弃钻井液深度净化技术研究[J].西部探矿工程,2014,26(2):64-68.
- [9] 段晓东,吕晓平,王涛,等.钻井废弃物无害化处理技术研究与应用[J].西部探矿工程,2016,28(11):106-108,111.
- [10] 曾彦波.基于无害化的海上废弃钻井液处理方法分析[J].广州化工,2016,44(9):149-150,218.
- [11] 汤凤林,赵荣欣,李博,等.关于钻井液净化及岩屑回收利用的试验研究[J].钻探工程,2026,53(1):79-84.
- [12] 李凤娟,张敏,孙素艳,等.水基钻井液废弃物资源化处理技术研究进展[J].石油化工应用,2025,44(6):1-4,12.
- [13] 崔紫微,牛明勇,吴国磊,等.聚磺岩屑制备免烧砖中钡和石油烃的释放特性[J].环境工程学报,2025,19(12):3281-3290.
- [14] 陈红硕,陈锦玉,周毅.陈腐工艺在利用脱油岩屑合成压裂支撑剂中的作用研究[J].石油化工应用,2025,44(11):81-86,98.
- [15] 赵世华.砂卵石地层泥水盾构泥浆绿色处理技术研究[J].山西建筑,2026,52(1):174-177.
- [16] 雷芸.泥浆处理新工艺的低碳化研究与应用[J].江苏建材,2025(6):3-5.
- [17] 王恩成.环保絮凝剂对高黏粒高含水废弃泥浆絮凝性能影响[J].天津建设科技,2024,34(5):54-59.
- [18] 边汉亮,吕文瑞,吴振宇,等.复合絮凝-碳化固化处理工程废弃泥浆试验[J].复合材料学报,2026,43(9):5807-5817.
- [19] 肖琪莹.废弃泥浆有机高分子絮凝剂联合絮凝机理研究[D].长沙:中南大学,2024.
- [20] 陈焱.泥水平衡盾构废弃泥浆高效分离及综合处理试验研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [21] 蒋睿,李柏军,王康,等.新型隔膜压滤装置在地质钻探废浆无害化处理中的研究与应用[J].地质装备,2024,25(S1):176-182.
- [22] 于富安,刘维平,冯美贵,等.隔膜压榨废浆处理装置在地质钻探中的应用[J].钻探工程,2025,52(6):116-121.

(编辑 王文)