

地质岩心钻探泥浆设备智能化研究现状 及发展趋势

蒋 炳¹, 王 猛^{2*}, 张之武², 程 春², 陈泳桥³, 李 岩², 程悦瀚¹

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300; 3. 正元地理信息集团股份有限公司, 北京 101300)

摘要: 泥浆作为地质岩心钻探技术重要的组成部分, 在钻探施工中起到了举足轻重的作用。随着地质岩心钻探钻孔深度的增加, 施工难度逐渐增大, 对泥浆的性能也提出了更高的要求。鉴于目前地质岩心钻探泥浆体系较复杂, 传统的人工配制泥浆、手动检测泥浆性能、填埋处理废浆等均逐渐不再符合地质钻探的要求。本文立足于绿色勘查理念, 通过技术调研、资料搜集等方式, 结合石油天然气钻探行业相关设备发展, 分析了地质岩心钻探领域的泥浆智能设备的研究现状, 展望了智能化在未来地质岩心钻探行业的发展前景, 为未来泥浆设备的智能化发展提供了支撑。

关键词: 地质岩心钻探; 泥浆体系; 绿色勘查; 泥浆智能设备

中图分类号: P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0016-06

Research status and development trends of intelligent drilling fluid equipment for geological core drilling

JIANG Bing¹, WANG Meng^{2*}, ZNANG Zhiwu², CHENG Chun², CHEN Yongqiao³, LI Yan², CHENG Yuehan¹

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300, China; 3. Zhengyuan Geographic Information Group Co., Ltd, Beijing 101300, China)

Abstract: Drilling fluid, as an important component of geological core drilling, plays a crucial role in drilling construction. With the increase of drilling depth in geological core drilling, the difficulty of construction gradually increases, and higher requirements are put forward for the performance of drilling fluid. Considering the complexity of the drilling fluid system in geological core drilling, traditional manual drilling fluid preparation, manual testing of drilling fluid performance, and landfill disposal of waste drilling fluid are gradually no longer in line with the requirements of geological drilling. This article is based on the concept of green exploration, and through research, data search, and other methods, combined with the development of relevant equipment in the oil and gas drilling industry, analyzes the research status of intelligent drilling fluid equipment that can be applied to geological core drilling, and looks forward to the development prospects of intelligence in the future geological core drilling industry, providing support for the intelligent development of drilling fluid equipment in the future.

Key words: geological core drilling; drilling fluid system; green exploration; intelligent drilling fluid equipment

收稿日期: 2025-05-29; 修回日期: 2025-08-06 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.003

基金项目: 中国冶金地质总局矿产资源研究院未来勘探系统一期工程“智能钻探系统智能泥浆子系统”(编号: CMGBKYW20250305); 中国地质调查局地质调查项目“四川盆地及周缘页岩气地质调查与评价项目”(编号: DD20240200504)

第一作者: 蒋炳, 男, 汉族, 1995年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事钻井液及岩土钻掘技术研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 455671041@qq.com。

通信作者: 王猛, 男, 满族, 1980年生, 正高级工程师, 钻井工程专业, 硕士, 北京市顺义区机场东路2号, 19807881@qq.com。

引用格式: 蒋炳, 王猛, 张之武, 等. 地质岩心钻探泥浆设备智能化研究现状及发展趋势[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 16-21.

JIANG Bing, WANG Meng, ZNANG Zhiwu, et al. Research status and development trends of intelligent drilling fluid equipment for geological core drilling[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 16-21.

0 引言

泥浆作为地质岩心钻探的“血液”,在钻探施工中起到了举足轻重的作用,具有冷却和润滑钻头、传递孔内信息、携带岩粉、平衡地层压力、传递水动力等作用。随着浅层资源的枯竭,深部资源勘查所需钻孔逐渐加深,对施工中所用泥浆性能的精确性和稳定性提出了越来越高的要求。

石油与天然气钻探在智能化及自动化方向的发展主要集中在机械方面,例如管柱输送系统、立根排放系统、集成司钻系统、集成控制系统等。而在泥浆方面,因深部地层复杂多变,泥浆体系复杂,研究难度相对较大,相关设备方面的自动化、智能化研究处于相对落后的状态。

而地质岩心钻探泥浆相关设备的智能化、自动化则更加落后。例如,泥浆的配制始终停留在人工阶段,即人员称量泥浆材料后向搅拌机中加入材料并搅拌成浆液,随后排入泥浆池中开始循环。对泥浆性能的监测,部分地质岩心钻探凭借钻工经验了解泥浆性能,即使进行相关性能测试,也仅仅采用漏斗黏度计、密度计、含砂量测定仪及中压失水仪测试部分参数,无法及时获取泥浆的表观黏度、塑性黏度、切力等参数数据。地质岩心钻探的固相控制,大多依靠现场开挖沉淀池,泥浆流经沉淀池,通过沉淀进行无用固相分离,分离效率低且效果差。部分有条件的现场可能配置振动筛,受限于筛网目数单一,无法进行精细分离,亦应对地层的复杂多变。而废浆无害化处理方面,则更是空白,目前许多地质钻探施工现场采用就地填埋、直接排放等方式,对环境污染极大,与绿色勘查要求相悖,部分钻孔初处理后排放,但许多有害物质,例如石油类、重金属离子也无法得到有效处理,同样导致环境的污染。

智能化、信息化的快速发展,为泥浆设备的迭代升级提供了基础。本文通过技术调研、资料搜集等方式,结合石油钻探领域在相关设备上的发展,浅析了地质钻探领域泥浆设备的未来发展趋势,为下一步泥浆设备在智能化发展方面的攻关和升级提供参考。

1 泥浆设备智能化研究现状

1.1 自动配浆系统

在石油钻探领域中,配浆设备主要经历了人工

操作阶段、机械化阶段、半自动化阶段以及智能化与集成化阶段。

人工操作阶段完全依赖人工完成原料的称量、混合与运输,劳动强度大、粉尘污染严重、配比精度低,易导致原料浪费和混合不均。机械化阶段引入了基础机械设备,如搅拌机、传送带和计量泵,部分替代人力搬运,但无法动态调整参数,依赖人工经验,难以满足复杂工况需求。随着流量计、密度计等传感器的应用,泥浆配制进入了半自动化阶段,通过PID控制算法,初步实现配比自动调节,但仍需人工设定配方,可能存在单点故障风险的局限性。智能化与集成化阶段目前处于高速发展中,此阶段目标通过PLC与DCS系统,取代继电器控制,实现全闭环动态调整,适应原料波动,并与MES/ERP系统集成,实现生产数字化管理。中海油张超等^[1]研制的海上固定平台模块化钻机自动配浆装置,对搅拌器、自动散料割袋机、变频旋转进料器、快速混料机和密度仪等进行设计,通过PLC控制程序控制实现了配浆的自动化。杨鲲鹏等^[2]则对快速配浆系统的电控设计进行了相应优化,通过PLC控制电路和HMI组态以及工作模式切换电路设计,指出了电控设计在自动配浆系统中需要注意的相关问题及解决方法。张铜鋈等^[3]开展了快速自动加重配浆系统的研制,该系统主要由快速混浆装置、空气动力装置、除尘装置、钻井液密度自动检测装置、自动控制系统、HMI人机交互终端等组成,最大配浆速度为2.2 t/min。

在地质岩心钻探领域,目前受限于管理、成本、场地等条件,基本都还停留在机械化阶段,甚至没有进入半自动化阶段,大多还是依靠人工经验手动添加材料,材料的种类与加量无法得到有效识别和控制。地质岩心钻探口径偏小,环空间隙窄,在未来深地钻探过程中对泥浆性能的要求将会逐渐提高,所以发展适用于地质岩心钻探的小型化自动配浆系统有非常广阔的应用前景。

1.2 泥浆性能自动监测系统

泥浆性能自动监测系统由于其技术实现难度大,就泥浆流变性能参数中的六速参数监测来说,从20世纪90年代至今没能面市一款真正意义上的监测系统^[4]。目前地质岩心钻探在泥浆性能监测上基本依赖人工手动取样、手动测试,存在安全风险和手动监测误差。而在现场施工过程中,由于实验

器材缺乏、实验精度不高,导致泥浆性能数据在关键节点上存在滞后^[5-7],因此亟需推动泥浆性能自动监测设备的研制和发展,以便及时获得钻探相关信息,同时供后续记录、调阅等。

目前泥浆性能自动监测系统研究主要集中于石油与天然气领域。美国、以色列、挪威等国家率先开展了研发,国内中石化、川庆钻探等也先后开展了研发工作,见表1^[8-12],基本可实现密度、六速黏

度、离子含量、固相含量等多种数据监控,也基本实现了无人化。地质岩心钻探行业,王强等^[13]研制了LSZ-1型泥浆滤失量自动测量仪,实现了泥浆滤失量的自动化测量、数据存储、无线传输和自动清洗等功能,滤失量测试精确度较高。但这些系统普遍还存在监测功能不齐、精度不高、成本偏高等问题,不适用于地质岩心钻探,尤其是仍未包含地质钻探中非常重要的“漏斗黏度”这一参数。

表1 部分冲洗液性能自动测试系统

国别	来 源	型 号	监 测 性 能	价 格
美国	Haliburton	DRU	六速黏度、温度、密度	日租金 3000~4000 美元
以色列	Aspect AI	FLOWSCAN	六速黏度、温度、密度	40 万美元
挪威	IMS	Rheo Sense	密度、温度、流变性能	
中国	中石化胜利钻井研究院	Dream-DF	密度、温度、流变性能、pH、S ²⁻ 、Cl ⁻	170 万人民币
中国	川庆钻探公司	CQ-DRILLING FLUID I	黏度、API滤失量、离子	200 万人民币

1.3 固相控制系统

20 世纪 60 年代,固控设备开始逐步应用于油田勘探系统,最初油田钻探使用简单的振动筛加沉砂器组合,去除大颗粒砂砾,到了 80 年代,Derrick Corporation 引入了高频振动筛,使用更细的筛网,提升了无用固相的去除效率,保证了钻井液的清洁度和性能稳定性。90 年代,Schlumberger 公司首次推出离心机设备用于精细固相的分离,离心机的加入对加重钻井液的分离效果更佳,显著提高了固控效率。进入 21 世纪,Haliburton 公司研发了泥浆清洁剂,结合了振动筛与除砂器的功能,能够在保留重晶石的前提下去除无用固相。Baker Hughes 引入了智能固控设备,利用传感器和自动控制技术,实时监控、调整设备参数,提高固控效率,减少人工操作引起的钻井液性能变化,2010 年以后在全球得到推广应用。2020 年以后,Exxonmobil 公司开展了低密度钻井液研制,同时改进固控设备,以提高钻井效率^[14-17]。

国内石油行业自 20 世纪 80 年代开始引进国外的振动筛和离心机,主要用于分离固相颗粒。西南石油大学研发了适用于西部油田的高效振动筛,用于复杂地层钻进条件下的钻井液净化处理^[18]。进入 21 世纪后,四川中创石油设备有限公司研制了智能固控系统,该系统按固控设备不同的组合方式选用不同的程序,通过程序控制系统,实现了固控系

统的信息监测和远程操控^[19]。张鹏等^[20]结合国内外极地轮轨钻机固控系统配套要求,研制了 7000 m 极地轮轨钻机固控系统,并优化和完善了固控系统配套方案、设备布局和工艺流程,实现了低温条件下满足钻井施工的相关固控要求。刘永峰等^[21]布置二级净化方式,通过并联布置 4 台振动筛和 1 台干燥装置,去除了除砂除泥器,同时在振动筛上使用三向细波形筛网,使处理量提高了 70%,大大节约了占地空间。西安科讯机械制造有限公司采用多功能设计,将固控设备安装在底撬座上,可根据现场需求调整固控等级与对应设备。该系统优势主要在于安装方便,集成化程度高,占地面积较小^[22]。雷先革等^[23]针对水基钻井液废弃物总量大和回收利用率低的问题,对钻井废弃物不落地随钻处理与固控系统进行一体化设计,实行二级固控装备,即振动筛+离心机的形式,有效实现固液分离,并降低钻井成本。在地质岩心钻探行业,温得全等^[24]针对固体矿产勘查研发了一体化小型泥浆不落地系统,引入 PID 控制和物联网技术,实现自反馈控制和可视化控制,有效净化地质岩心钻探过程中使用的泥浆。核工业二〇三研究所针对铀矿钻探施工周期短、设备搬迁频繁等特点,研发了小体积、模块化的绿色勘查泥浆随钻处理装备,主要由过渡罐、沉砂罐、净化罐、循环罐以及振动筛、除泥器等组成,处理量可达 6 m³/h^[25]。冯美贵等^[26]针对

钻杆结垢影响绳索取心效率问题,研发了TGLW系列小型离心机,可有效去除无用固相,保证泥浆的固相含量稳定。

地质岩心钻探固控设备主要从油气领域发展

而来,相较于油气钻探,地质岩心钻探返出岩粉更细,钻进过程中对泥浆要求更高。常用的固控设备主要以振动筛、旋流器、离心机为核心,不同钻探场景需灵活配置,见表2。

表2 不同钻探场景固控设备使用情况

钻 探 类 型	主 要 固 控 设 备	特 点
浅孔钻探(<500 m)	振动筛+沉砂池	成本低,维护简单
中深孔钻探(500~2000 m)	振动筛+旋流器(除砂/除泥)	平衡效率与成本
深孔/超深孔钻探(>2000 m)	振动筛+旋流器+离心机+除气器	高精度固控,保障泥浆稳定性
环保敏感区钻探	全封闭固控系统+泥浆回收装置	减少废浆排放,符合环保法规

虽然目前泥浆固控设备正朝着高效化、智能化、环保化发展,但是在地质岩心钻探领域依然存在技术难题,特别是如何在岩粉较细的情况下提高离心机的分离效率,以及如何实现设备的集成化和便携性,都还存在一定的技术壁垒。

1.4 废浆处理系统

在废浆处理设备方面,美国NEW PARK公司开发了一种油田污物净化装置,主要由污水处理装置、固体颗粒控制装置和钻井液脱水装置等处理单元组成,占地面积较小,模块组装灵活^[27]。YOB钻井污水处理装置是乌克兰石油工业联合公司于21世纪初研制,主要采用了化学混凝和多级沉淀工艺处理钻井污水^[28]。法国PAU国际石油设备公司开发了撬装闭路式污水处理装置,主要采用中和、混凝和离心分离工艺,设备运行灵活可靠,可根据现场需要间歇或连续操作,其处理量可达36 m³/h,出水可重复利用^[29]。此外还有钻机真空抽吸系统、海上钻机真空容器抽吸系统、真空抽吸机、岩屑收集站、废弃物收集箱、罐清洗装置、便携式罐清洗装置、钻屑回注系统、岩屑干燥机、化学强离心系统等不落地设备。程玉生等^[30]在北部湾地区钻探中应用了一套较为成熟的固相控制技术,通过分析废弃钻井液的粒径分布情况,优化设备搭配和相应的设备参数配置,针对性进行了筛布选择,优化了离心机布局、数量及分离能力,固相控制效率得到了有效提高。鲍泽富等^[31]设计了一套钻井液回收净化再利用系统,包括输送系统、净化系统、干燥系统、自动粉碎包装系统。李满江^[32]通过对旧式振动筛的改进,提高了振动筛处理效率,满足了现有不落地系统的处理要求。王崇刚^[33]提出了取消泥浆池

的新技术措施,以此保证钻井液不落地、不接触土地,在处理工艺中,首先通过絮凝反应实现固液相分离,分离出水可重新用于配制钻井液,实现重复循环利用。彭博一等^[34]通过破胶、絮凝、脱色等一系列手段,实现了废浆无害化处理。蒋炳等^[35]通过水泥、促凝剂、复合早强剂、支撑剂等复配,形成了一套固化废弃固相的配方,抗压强度能达到1.41 MPa,浸出液能达国家二级污水排放标准。基于废浆无害化处理工艺,蒋炳等^[36]通过模块化、智能化手段,研制了FJS-1A型废浆处理设备,主要包括初分离模块、破胶-絮凝模块、固液分离模块和氧化模块,通过智能控制程序,基本可实现废浆一键处理。

综合行业目前的研究成果,废浆处理设备在地质岩心钻探应用依旧受限于各种条件,尤其是我国西部地区海拔高、切割深的山区,无法有效运送大型设备至钻探场地,导致废浆的处理方式多数为简单处理后填埋或排放,无法保证环境的友好性,所以模块化、智能化、小型化废浆处理设备将成为地质钻探行业未来的发展趋势。

2 泥浆设备智能化发展趋势

智能化是一项非常复杂的技术体系,涉及到多种学科交叉,其基础条件要通过传感器及芯片实现实时感知,通过模拟和大数据分析实现智慧分析,利用物联网、云平台、宽带、移动终端这些基础设施实现机器与机器之间的高速对话,主动满足各种需求。泥浆对钻探工作的重要性不言而喻。“泥浆设备智能化”就是将智能控制与泥浆设备有效地结合起来,有效提高工作效率,实现少人甚至无人操作。

2.1 实现AI配方优化

未来的自动配浆系统将以大数据为基础,通过收集大量不同区域、地层、岩性的泥浆配方用于训练随机森林或神经网络模型。当钻遇相同地层岩性时自动推荐性能最好的泥浆配方,实现地层自适应配浆。并且在钻进过程中不断监测泥浆性能,不断修正泥浆配方,真正意义上实现高效集约、绿色环保。

2.2 实现监测与采集的精准性

目前大多数监测设备基本上能完成流变性能的监测,但是对于高温高压失水量和离子分析等则遇到了挑战。从体系上来讲,大多数只适用于水基泥浆的监测。未来泥浆监测设备必然要求能适应各种泥浆体系,能彻底取代人工进行全自动的监测,并且还能与整个泥浆设备系统进行实时数据传输。如当监测系统实测泥浆黏度降低,数据信号将传输到自动配浆系统,通过自动配浆系统进行增黏。或者当监测系统发现泥浆中含砂量上升,数据信号将自动传输到固控设备来提高离心机功率。同时由于地质岩心钻探场地受限,设备小型集约也需要攻关升级。

2.3 实现固控设备升级迭代

未来的固控设备应进一步朝着标准化和模块化的方向发展,以增强设备的互换性和兼容性。通过采用标准化接口和模块化设计,不仅可以降低维护成本,还能提升系统的灵活性和扩展性。这种设计理念将使设备更易于升级和改造,从而满足不断变化的钻探需求。高效节能是未来固控设备发展的关键方向。通过研究和开发高效的超细目振动筛和高速变频离心机,可以显著降低能耗。同时,针对地质岩心钻探岩粉较细这一问题,需要提升设备的处理能力和净化效果。通过物联网技术,使固控设备能与其他泥浆设备进行数据传输,通过实时监控和智能调整,固控系统能够更灵活地适应各种工况,确保泥浆性能的稳定性。

2.4 实现废浆处理设备模块化与智能化

未来废浆处理技术在解决成本和技术问题的前提下,极可能朝着反渗透处理或者蒸馏处理方式迈进,而地质钻探行业的废浆处理设备的空白也将被逐步填补。受限于地质钻探场地,未来废浆处理设备将以模块化形式出现;受限于人工,废浆处理设备也必将智能化取代繁杂的人工操作流程,避

免浪费人力物力。

3 认识与展望

随着自动化、信息化的发展,地质岩心钻探泥浆设备将进入智能化时代。未来在配浆过程中将通过大数据自动识别出最优泥浆配方;在钻进过程中将以自动监测系统对泥浆性能进行实时监测,并且将监测到的数据信号及时传递给其他各个系统,对泥浆性能实时动态调整;在废浆处理过程中将实现绿色无害化处理,真正意义上实现智能化、无人化、绿色化。

参考文献:

- [1] 张超,孙旭涛.海上固定平台模块钻机自动配浆装置及其适用性研究[J].石化技术,2023,30(6):76-78.
- [2] 杨鲲鹏,黄进云.快速配浆系统的电控设计与研究[J].石油化工自动化,2018,54(1):72-74.
- [3] 张铜盛,李胜忠,徐钰佳,等.快速自动加重配浆系统研制与应用[J].石油矿场机械,2021,50(6):74-78.
- [4] 王鹏,刘伟,张果.钻井液性能自动监测装置的现状及改进建议[J].钻采工艺,2022,45(3):42-47.
- [5] 李建,习文凤.钻井液设计专家系统规则库的检测算法[J].计算机工程与应用,2020,56(4):256-261.
- [6] 孙宏博,倪卫宁,李新,等.基于C4D技术的油基钻井液随钻侧向电阻率测井信号检测[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(5):1281-1288.
- [7] 周晓蕾.钻井液用处理剂检测准确性影响因素研究[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(2):43-46.
- [8] 牛成成. Halliburton公司 Bara Logix 钻井液检测器[J].石油钻探技术,2016,44(5):39.
- [9] 中国石油天然气集团有限公司.伸缩式多功能钻井液检测装置:CN202010642820.6[P].2020-10-16.
- [10] 翁竞.钻井液综合性能自动检测系统:CN201921970028.2[P].2020-09-15.
- [11] 高卫东,陈勋.一种钻井液在线全自动差压检测系统:CN201920106220.0[P].2020-01-31.
- [12] 中国石油天然气股份有限公司.钻井液性能的检测方法及装置:CN201811614909.0[P].2020-07-07.
- [13] 王强,朱恒银,刘兵,等.LSZ-1型泥浆滤失量自动测量仪研制[J].钻探工程,2023,50(2):128-134.
- [14] 董怀荣,李宗清,李琴,等.钻井液固控系统技术现状与发展趋势[J].西部探矿工程,2015,27(11):49-52.
- [15] 康晓龙.基于复杂钻井作业中的固控系统优化[J].设备管理与维修,2019,(10):172-173.
- [16] 朱明明,孙欢,贺会锋,等.水基钻井液废弃固液处置及配套技术[J].石油化工应用,2024,43(4):38-42.
- [17] 牛廷婷.浅析如何加强固控设备在钻井中的应用[J].化工管理,2017,(27):222.
- [18] 邵斌,兰军,赵双,等.水基钻井泥浆不落地技术改进及应用[J].化工管理,2023,(23):147-150.
- [19] 黄虎.浅析钻井废液固液分离技术应用[J].西部资源,2022,

- (6):188-190.
- [20] 张鹏,于浩,王福贵,等.7000m极地轮轨钻机固控系统的研制[J].石油机械,2020,48(7):49-55.
- [21] 刘永峰,张伟国,覃建宇,等.小型模块撬装化油基钻屑深度固控设备在海上油田的实践探索[J].中国设备工程,2020,(11):240-241.
- [22] 张虎山,周天明,惠川川,等.两级净化固控系统应用分析[J].石油矿场机械,2020,49(2):83-88.
- [23] 雷先革,牟长清,涂志威,等.钻井固控环保一体化装备的研制与应用[J].石油机械,2017,45(12):28-31.
- [24] 温得全,冯美贵,李斌,等.智能高效小型一体化泥浆不落地系统的应用[J].钻探工程,2022,49(4):49-54.
- [25] 温得全,王贵,邵盛元,等.铀矿绿色勘查泥浆随钻处理装备研究[J].钻探工程,2021,48(10):88-94.
- [26] 冯美贵,刘启栋,郭伟,等.钻井液离心机预防绳索取心钻杆内壁结垢研究[J].钻探工程,2024,51(3):118-124.
- [27] Khanpour R, Sheikhi-Kouhsar M R, Esmailzadeh F, et al. Removal of contaminants from polluted drilling mud using supercritical carbon dioxide extraction[J]. The Journal of Supercritical Fluids,2014(88): 1-7.
- [28] Kroken A, Jan Kristian V, Arild S. A new fluid management system and methods for improving filtration and reducing waste volume, introducing a step change in health and safety in the mud processing area[J]. 2013, SPE163522.
- [29] Chávarro Roa M R. Drilling waste-water post-treatment by osmosis method: discussion and practical results [J]. 2015, SPE 174111.
- [30] 程玉生,张立权,莫天明,等.北部湾水基钻井液固相控制与重复利用技术[J].钻井液与完井液,2016,33(2):60-63.
- [31] 鲍泽富,刘江波,王江萍,等.钻井液回收净化再利用系统的设计[J].石油机械,2006,(6):46-49,3.
- [32] 李满江.如何让钻井液振动筛更高效——泥浆不落地系统振动筛的研究[J].化学工程与装备,2016,(5):108-110.
- [33] 王崇刚.石油钻井泥浆处理技术优化[J].云南化工,2017,44(12):79-80.
- [34] 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.
- [35] 蒋炳,张统得,严君凤.地质钻探废弃冲洗液固化处理技术研究及应用[J].钻探工程,2021,48(11):8-14.
- [36] 蒋炳,张统得,罗显梁,等.FJS-1A型地质钻探废浆处理设备的研制[J].钻探工程,2023,50(S1):437-442.

(编辑 王跃伟)