

自动制浆系统及性能动态调控模拟研究

付帆, 彭博一, 熊正强, 冯美贵, 李艳宁

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要: 自动制浆系统是一套集物料输送、精确计量、投放、动态混合、性能监测和自动控制等多种功能于一体的装备, 该系统不仅可以降低配制钻井液劳动强度、缩短配制时间、提高作业效率, 还能减少人工操作错误和干预、降低操作失误风险、提高钻进过程的稳定性和安全性。处理剂加量与性能间的关系是自动制浆系统控制运行的基础。本文围绕钻井液配方、性能维护和钻井液自适应调整, 开展了一系列不同处理剂加量的室内模拟实验, 建立一套钻井液性能动态调控模型, 最终在自主研发的钻井液随钻在线自动配制系统上成功实现了上述功能的自动化运行。该研究结果对推动自动制浆系统向自动化全面发展有重要的实践意义。

关键词: 自动制浆系统; 钻井液配制; 钻井液维护; 动态调控; 模拟研究

中图分类号: P634.3; TE926 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0165-06

Laboratory simulation study on the preparation and maintenance of drilling fluid in the automatic drilling fluid preparation system

FU Fan, PENG Boyi, XIONG Zhengqiang, FENG Meigui, LI Yanning

(Beijing Institute of Exploration Engineering, CGS, Beijing 100083, China)

Abstract: The automatic drilling fluid preparation system is a set of equipment that integrates multiple functions such as material transportation, precise measurement, material feeding, mixing, performance monitoring and automatic control. It reduces labor intensity, shortens preparation time, improves work efficiency, reduces human operation errors, lowers the risk of mistakes, and contributes to improving stability and safety during drilling. The relationship between the dosage of treatment agents and the performance of drilling fluid is the basis for the control and operation of the automatic drilling fluid preparation system. In this study, centering on the drilling fluid formulation, performance maintenance, and self-adaptive adjustment of drilling fluid properties, laboratory simulation experiments with varying dosages of treatment agents were conducted. A set of dynamic regulation and control models for drilling fluid properties was established. Ultimately, the automated operation of the above-mentioned functions was successfully achieved on the self-developed online automatic preparation system for drilling fluid. The findings of this study hold great practical significance in facilitating the automation development of the automatic drilling fluid preparation system.

Key words: automatic drilling fluid preparation system; drilling fluid preparation; drilling fluid maintenance; dynamic regulation; simulation study

0 引言

钻井液被誉为钻探工程的“血液”, 其重要性不言而喻。钻井液不仅直接影响钻探成本与效率, 也是决定能源资源勘探开发和科学钻探工程能否顺

利钻至设计深度的关键因素之一。钻井液配制一直依赖人工操作, 存在劳动强度大、人工破袋产生的粉尘对人体有一定危害、配制效率低和加量误差率高导致钻井液质量难以保证等问题^[1-6], 严重制约

收稿日期: 2025-05-30; 修回日期: 2025-07-22 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.025

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20221722)

第一作者: 付帆, 女, 锡伯族, 1986年生, 高级工程师, 材料科学与工程专业, 硕士, 主要从事钻井液技术研究与应用工作, 北京市海淀区学院路29号, 120953889@qq.com。

引用格式: 付帆, 彭博一, 熊正强, 等. 自动制浆系统及性能动态调控模拟研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 165-170.

FU Fan, PENG Boyi, XIONG Zhengqiang, et al. Laboratory simulation study on the preparation and maintenance of drilling fluid in the automatic drilling fluid preparation system[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 165-170.

了钻探作业效率。自动制浆技术可有效降低劳动强度,已经广泛应用于基础施工中的水泥和混凝土搅拌^[7-9]、造纸制浆^[10]、煤矿采空区充填材料制备^[11]等。因此,针对钻井液配制,构建一套集物料输送、精确计量、投放、动态混合、性能监测和自动控制于一体的自动制浆系统具有十分重要的意义。

自动制浆系统基于反馈控制原理,用传感器实时采集物料流量或质量、液位等参数作为控制参数,经PLC或工业计算机处理后,控制计量泵、螺旋输送机、搅拌器等执行机构,按预设配方调节物料添加量,完成自动制浆和维护。同时,在系统中引入控制算法,根据井深、地层情况等变化调整钻井液配方及性能,实现制浆系统的动态响应。

为实现钻井液配制、维护及性能调整等功能自动化运行,必须在自动制浆系统中引入控制算法,控制算法的建立需依托根据钻井液配方中处理剂加量与性能间关系搭建的钻井液性能动态调控模型。因此,开展钻井液室内模拟研究,获得处理剂加量与性能间的关系数据是自动制浆系统控制运行的基础。

1 自动制浆系统国内外现状

1.1 国外现状

国外钻井液自动制浆技术起步较早,以斯伦贝谢、哈里伯顿为代表的国际石油服务公司,已研发出商业化配浆系统。例如,斯伦贝谢的AutoMud系统可实现钻井液的实时监测、自动化调整和优化,采用多组分精确计量技术和智能控制算法,可同时处理增黏剂、降滤失剂、加重材料(如重晶石)等物料,实现配方的快速切换和精准配制。该系统已经在墨西哥湾深海钻井项目中与水下机器人配合,实现远程泥浆监控。在美国德州西南部的鹰·福特页岩区的钻井工程中,不仅利用该系统优化了钻井液性能,还支撑了HiWay流道压裂技术的应用,最终实现产量的提高。

1.2 国内现状

在国内,以石油大学为主的高校和中石油、中石化等企业的研究机构均开展了钻井液自动制浆技术攻关。经过几十年的研究,在功能方面从相对单一性的破袋、传输、加药装置,逐步发展为集处理剂仓储、运输、配制为一体的自动化系统,并进一步向智能控制方向发展。

针对钻井液配制和加重存在的工人劳动强度大,加重钻井液混合效果差、加重速度慢等问题,吐哈石油勘探开发指挥部机械厂^[1]研制了一套钻井液气动配浆装置。该装置可实现钻井液所用散装粉末材料的储存、气动输送以及钻井液的自动加重功能。该装置启用后,减少了加重钻井液配制过程的劳动强度,操作人数从8~10人减少到2~3人,最大混浆速度可达 $2.0\text{ m}^3/\text{min}$ 。面对井涌等特殊情况时,可实现钻井液密度的迅速提高,防止险情的发生。

为解决因人工添加药剂时较大的加量误差导致钻井液性能不稳定的问题,西南石油大学^[2]研制了一种自动化配制钻井液装置,可直接输入钻井液配方数值,控制每种药剂的加量,从而配制成不同种类的钻井液。另外具备定时自动清洗功能,同时也使得每一次配制的钻井液加量更准确,避免搅拌轴和搅拌杯内壁上黏附残留钻井液而影响下一次钻井液配制。

为避免钻井液配制过程中人工破袋时粉尘对人体造成危害,萍乡市汇鑫化工科技有限公司^[3]研制了一台钻井液处理剂自动添加装置。该装置上部设有置袋架,可方便破袋组件顶部对固相袋装原料进行破袋处理。破袋后的固体原料经引流槽到筛板。另外,为避免固体原料结团,该装置还配有研磨杆对筛板上的固体原料进行旋转研磨下料。

四川泰锐石油化工有限公司^[4]研制了一种钻井液配送站自动化仓储配制系统。该系统根据物料状态不同,分别建立了粉料处理剂和液体处理剂存放区。根据配制水基、油基钻井液等不同钻井液类型需求,将液体处理剂和配制区都进行了区分,其中水基配制区用于进行水基钻井液配制,而油基配制区用于进行油基钻井液配制,两者可以同时工作,提高配制效率。该系统不仅提高了钻井液配制配送的效率,还实现了全程自动化配制配送,降低了工人劳动强度。

为解决钻探作业中应对突发井涌、溢流等险情时储备重浆带来的维护和转运成本高等问题,成都浩洪机械装备有限公司^[5]研制了一种大流量快速钻井液配制系统。该系统包括加重物料储存送料模块、主要钻井液处理剂储存自动送料模块、非主要钻井液处理剂储存送料模块、配浆加注撬主模块、液体物料供给模块和气源模块。配浆罐上设有超

声波液位计和插入式密度计,实时检测用户配浆罐内部物料混合的密度,以便操作人员对相关物料加量进行调整,使得配浆的钻井液参数更加准确。该系统的应用不仅可以减少重浆储备及储备罐数量,减少占地面积,同时提高了泥浆密度精度和性能稳定性,最终实现节能降本。

中国石油集团工程技术研究院肖建秋等^[6]研制了ZCZJ2×3Y-2000型液体钻井液助剂自动加药系统。该系统由多仓储液罐、输液计量泵、质量流量计、搅拌器、控制阀及定量配料控制系统等组成。钻井液配制或维护时,在定量配料控制系统设定加药参数后,一键式操作可实现钻井液助剂精准输送和配制。在华北油田进行的现场试验表明,该体系控制精度高,物料清空率、配浆效率高,显著提高钻井液配制及维护的自动化和现场HSE管理水平。

中国石油大学研制了一套智能配浆系统,采用模块化设计和分布式控制,实现了膨润土、加重剂等物料的自动输送与精确计量。据报道,该系统加料速度达2.2 t/min,是传统混浆器的5倍,解决了传统气动灰罐加重法和吨袋包装法的粉尘污染、劳动强度大等问题。后续升级的第二代系统采用集成化设计,将混浆、空气动力和除尘装置整合至单一撬体,并引入智能控制算法,显著提升了稳定性和作业效率,已在西南、西北“三高”油气田广泛应用。

总体来说,钻井液自动制浆系统在国内外的钻井作业中均已得到应用,不仅起到了降低劳动强度、缩短钻井液配制时间、提高作业效率的作用,还能减少人工操作错误和干预,降低操作失误风险,提高钻井过程的稳定性和安全性。

2 自动制浆系统技术难点分析

现有自动制浆系统的技术难点主要是在自动化和智能化水平提高、核心部件能力提升等方面,具体如下:

(1)在钻探工程中,需针对不同地层特性^[12]选择适配的钻井液类型和性能参数。不同钻井液类型的处理剂加量与其性能均呈现特定关系,并且还存在多种处理剂协同调控作用,所以在建立钻井液性能动态调控模型和控制算法时需要针对不同钻井液配方逐一开展单一处理剂或多种处理剂协同控制实验,这是一个工作量庞大、长期的积累过程。

(2)钻探工程是一个系统工程,各个环节都相

互影响,因此自动制浆系统智能化研究任重道远。除了地层特性之外,井深结构、钻进方法及参数、工程要求等也是确定钻井液性能参数的重要依据。另外,在钻探过程中也存在由于地层的不确定性导致各种事故发生。因此,自动制浆系统需要综合监测各项钻探和钻井液参数,利用大数据学习并分析各种情况的应对方法,建立协同反馈机制,最终才能实现智能化。

(3)传感器技术瓶颈是限制自动制浆系统能力提升的关键。实现各项参数的综合监控依赖于传感器,但是现有的流量、密度传感器在高温(>150℃)、高含砂(>5%)等复杂环境下均容易发生测量误差增大或失效。例如,超声波流量计在高固相钻井液中信号衰减严重,科里奥利质量流量计对管道振动敏感,无法在复杂条件下使用。因此,只有提升传感器技术,才能提高自动制浆系统的准确性,打破使用环境限制。

3 室内模拟研究

为了实现自动制浆系统的配方制备、维护和自适应性能调节功能,必须开展室内钻井液处理剂加量与性能研究。基于此,本文开展相关探索性研究。首先,围绕建立钻井液性能动态调控模型,开展处理剂加量与钻井液性能关系实验。然后,基于室内研究获得的数据建立模型,开展控制算法程序编制工作。最终,在自主研发的钻井液随钻在线自动配制系统^[13]上开展运行试验。

本实验模拟设定了3种地层情况及其钻井液性能:(1)一般稳定地层,确定适用钻井液马氏漏斗黏度为30~40 s的无固相钻井液;(2)较破碎地层,确定适用马氏漏斗黏度为70~80 s的低固相钻井液;(3)极破碎地层,确定适用马氏漏斗黏度为100~110 s的低固相钻井液。同时设定采用钻井级膨润土、羧甲基纤维素钠盐(CMC-HV)和水解聚丙烯酰胺(PHP)3种常规处理剂作为配制钻井液的材料。通过开展钻井液配方实验、黏度性能维护实验和钻井液自适应调整实验,研究3种处理剂加量与马氏漏斗黏度的关系,建立钻井液性能动态调控模型。

3.1 钻井液配方实验

采用钻井级膨润土、CMC-HV和PHP配制不同加量的钻井液,测试漏斗黏度,从中选出漏斗黏度符合上述3种黏度范围的钻井液配方,实验结果

见表1。从实验结果可知,采用配方0.05%~0.2% CMC-HV+0.01~0.04% PHP即可配制出漏斗黏度30~40 s的一般稳定地层用钻井液,即在1 m³水中加入0.5~2 kg CMC-HV和0.1~0.4 kg PHP,由于处理剂加量较少可忽略体积变化。采用配方5%钻井级膨润土+0.12%~0.14% CMC-HV可配制出漏斗黏度70~80 s的较破碎地层用钻井液,考虑膨润土加入后体积变化,即配制1 m³钻井液加入0.98 m³水、50 kg钻井级膨润土和1.2~1.4 kg CMC-HV。采用配方5%钻井级膨润土+0.16%~0.20% CMC-HV可配制出漏斗黏度100~110 s的极破碎地层用钻井液,同样考虑膨润土加入后体积变化,即配制1 m³钻井液加入0.98 m³水、50 kg钻井级膨润土和1.6~2.0 kg CMC-HV。

表1 不同黏度钻井液配方实验结果

适用地层	漏斗黏度/s	处理剂加量/%			钻 井 液 配 制				
		膨润土	CMC-HV	PHP	水/m ³	膨润土加量/kg	CMC-HV加量/kg	PHP加量/kg	配制总量/m ³
一般稳定地层	30~40	0	0.05	0.01	1	0	0.5	0.1	1
		0	0.05	0.02	1	0	0.5	0.2	1
		0	0.10	0.02	1	0	1.0	0.2	1
		0	0.10	0.04	1	0	1.0	0.4	1
		0	0.15	0.02	1	0	1.5	0.2	1
		0	0.15	0.04	1	0	1.5	0.4	1
		0	0.20	0.04	1	0	2.0	0.4	1
较破碎地层	70~80	5	0.12	0	0.98	50	1.2	0	1
		5	0.13	0	0.98	50	1.3	0	1
		5	0.14	0	0.98	50	1.4	0	1
极破碎地层	100~110	5	0.16	0	0.98	50	1.6	0	1
		5	0.17	0	0.98	50	1.7	0	1
		5	0.18	0	0.98	50	1.8	0	1
		5	0.19	0	0.98	50	1.9	0	1
		5	0.20	0	0.98	50	2.0	0	1

3.2 钻井液黏度性能维护实验

当钻井液黏度实测值不在参数范围内时,需对黏度性能进行必要调整,即对钻井液性能维护。具体方法是当钻井液黏度降低时,需补入适当CMC-HV,提高钻井液黏度;当钻井液黏度增加时,需补入适当清水,降低钻井液黏度。钻井液黏度性能维护实验分别对黏度降低和增高两种情况开展,并且为获得更精确的维护数据,实验中将黏度按每5 s为一个区间进行了更为细致的划分。从大量实验数据中选出符合维护要求的实验结果,见表2、表3。从实验结果可知,对一般稳定地层用钻井液配方进行维护时,如需增黏,即在1 m³原浆加入0.64~0.96 kg CMC-HV;如需降黏,在一定体积的原浆中加入0.06~0.31 m³清水即可混合成1 m³符合参数范围的钻井液。对较破碎地层用钻井液配方进行维护时,

如需增黏,即在1 m³原浆加入0.48~4.96 kg CMC-HV;如需降黏,在一定体积的原浆中加入0.03~0.07 m³清水即可混合成1 m³符合参数范围的钻井液。对极破碎地层用钻井液配方进行维护时,如需增黏,即在1 m³原浆加入0.24~1.28 kg CMC-HV;如需降黏,即在原浆中加入0.03~0.05 m³清水混合成1 m³符合参数范围的钻井液。

对钻井液增黏维护实验结果开展进一步分析,获得CMC-HV加量与漏斗黏度增长关系(见图1)。从图1可看出,不论是无固相钻井液,还是低固相钻井液,CMC-HV加量与漏斗黏度的增长均成非线性关系。因此,需要通过大量实验积累数据,方可实现钻井液增黏的精确控制。

对钻井液降黏维护实验结果开展进一步分析,获得清水加量与漏斗黏度降低关系(见图2)。从图

表 2 钻井液增黏维护实验结果					
适用地层	性能调整情况		钻井液配制		
	维护前漏 斗黏度/s	维护后漏 斗黏度/s	原浆/ m ³	CMC- HV 加 量/kg	配制总 量/m ³
一般稳定 地层	25~30	30~35	1	0.64	1
	30~35	35~40	1	0.96	1
较破碎地 层	40~45	70~75	1	4.96	1
	45~50	70~75	1	2.88	1
	50~55	70~75	1	1.12	1
	55~60	70~75	1	0.96	1
	60~65	70~75	1	0.8	1
	65~70	70~75	1	0.64	1
	70~75	75~80	1	0.48	1
	85~90	100~105	1	1.28	1
极破碎地 层	90~95	100~105	1	0.48	1
	95~100	100~105	1	0.45	1
	100~105	105~110	1	0.24	1

表 3 钻井液降黏维护实验结果					
适用地层	性能调整情况		钻井液配制		
	维护前漏 斗黏度/s	维护后漏 斗黏度/s	原浆/ m ³	补入清 水/m ³	配制总 量/m ³
一般稳定 地层	40~45	35~40	0.94	0.06	1
	45~50	35~40	0.93	0.07	1
	50~55	35~40	0.91	0.09	1
	55~60	35~40	0.88	0.12	1
	60~65	35~40	0.82	0.18	1
	65~70	35~40	0.69	0.31	1
较破碎地 层	80~85	75~80	0.97	0.03	1
	85~90	75~80	0.97	0.03	1
	90~95	75~80	0.96	0.04	1
	95~100	75~80	0.95	0.05	1
	100~105	75~80	0.94	0.06	1
	105~110	75~80	0.93	0.07	1
极破碎地 层	115~120	105~110	0.97	0.03	1
	120~125	105~110	0.96	0.04	1
	125~130	105~110	0.95	0.05	1

2 可看出,对于无固相钻井液,清水加量与漏斗黏度的降低成非线性关系,需要通过大量实验积累数据,方可实现钻井液降黏的精确控制。对于低固相钻井液,当黏度降低<10 s 时,清水加量与漏斗黏度

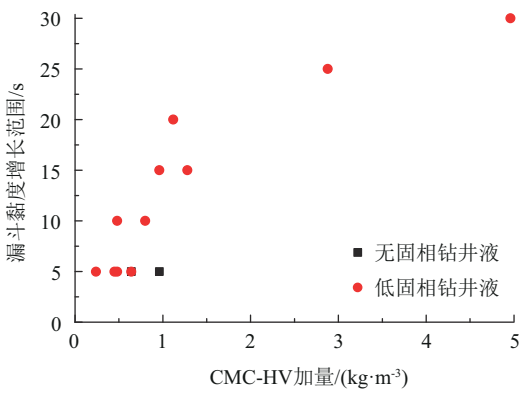


图 1 CMC-HV 加量与漏斗黏度增长关系

的降低线性关系不明确。但是,当黏度降低>10 s 时,清水加量与漏斗黏度的降低成线性关系,可通过拟合的线性方程计算出降黏维护时清水加量,实现钻井液降黏的精确控制。

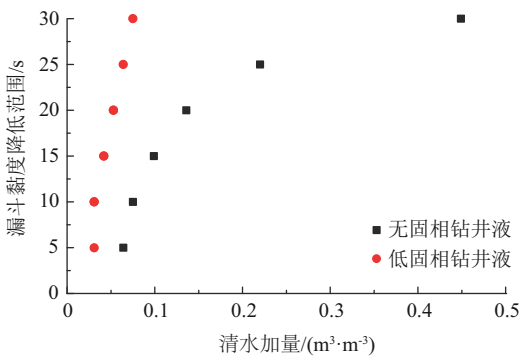


图 2 清水加量与漏斗黏度降低关系

3.3 钻井液自适应调整实验

当钻遇地层情况发生变化时,钻井液配方及性能需要进行自适应调整。即当地层情况由一般稳定地层变为较破碎地层时,钻井液漏斗黏度需由 30~40 s 调整为 70~80 s;当地层情况由较破碎地层变为极破碎地层时,钻井液漏斗黏度需由 70~80 s 调整为 100~110 s。钻井液自适应调整实验也是分别针对这两种情况开展,从大量实验数据中选出符合自适应调整要求的实验结果,见表 4。从实验结果可知,当地层由一般稳定地层变为较破碎地层,在 0.98 m³原浆加入 29.4 kg 膨润土即可将钻井液黏度调整到要求的范围。当地层由较破碎地层变为极破碎地层时,在 1 m³原浆加入 0.64~0.7 kg CMC-HV 即可将钻井液黏度调整到要求的范围。

表4 钻井液自适应调整实验结果

适用情况	自适应调整情况		补入处理剂加量/%		钻井液配制				
	调整前漏斗黏度/s	调整后漏斗黏度/s	膨润土	CMC-HV	原浆/m ³	膨润土加量/kg	CMC-HV加量/kg	PHP加量/kg	配制总量/m ³
一般稳定地层变为较破碎地层	30~40	70~80	3	0	0.98	29.4	0	0	1
破碎地层变为极破碎地层	70~80	100~110	0	0.064	1	0	0.64	0	1
			0	0.070	1	0	0.7	0	1

3.4 系统运行试验

根据上述实验结果数据编制了钻井液配制、维护和自适应调控算法。将该控制算法安装在自主研发的钻井液随钻在线自动配制系统上开展运行试验。多次室内运行试验均表明,系统自动配制的钻井液性能符合设定黏度参数范围。根据钻井液性能实时监测数据反馈的黏度数据,系统成功按照预设程序对钻井液性能进行了维护,实现了钻井液配方性能的自主维护。在钻井液随钻在线自动配制系统中选择地层变化信息后,通过自动控制程序成功将现有钻井液黏度指标调整至需要的范围,实现钻井液性能的自适应调整。最终,在该系统上成功实现了钻井液配制、维护和自适应调整的自动化运行。

4 结语

(1)国内外均开展了自动制浆系统的研究工作。实际应用均表明,该系统不仅可以降低劳动强度、缩短钻井液配制时间、提高作业效率,还能减少人工操作错误和干预、降低操作失误风险、提高钻井过程的稳定性和安全性。

(2)本文针对钻井液配方、黏度性能维护和钻井液自适应调整开展了室内模拟研究,并建立了自适应钻井液性能动态调控模型和调控算法,最终在钻井液随钻在线自动配制系统成功实现了钻井液维护和自适应调整的自动化运行。该研究结果对推动自动制浆系统向自动化全面发展具有重要的实践意义。

(3)未来钻井液自动制浆系统向智能化发展过程中,将自动配制系统与钻井大数据平台融合,实现钻井液性能的全生命周期管理,开发具有自主学习和决策能力的智能配浆系统是研究人员继续探索的方向。

参考文献:

- [1] 吐哈石油勘探开发指挥部机械厂. 钻井用气动配浆装置: CN200420059921.7[P].2005-06-22.
- [2] 西南石油大学. 一种配制钻井液的自动化装置: CN112915829 A[P].2021-02-18.
- [3] 萍乡市汇鑫化工科技有限公司. 钻井液处理剂自动添加装置: CN202222110613.3[P].2022-11-25.
- [4] 四川泰锐石油化工有限公司. 一种钻井液配送站自动化仓储配制方法及系统: CN202011636493.X[P].2022-09-16.
- [5] 成都浩洪机械装备有限公司. 一种大流量快速钻井液配制系统: CN202011220619.5[P].2022-11-01.
- [6] 肖建秋,王赢,邵强,等. ZCZJ2×3Y-2000型液体钻井液助剂自动加药系统研制[J]. 石油矿场机械, 2023, 52(1): 38-42.
- [7] 袁铸钢,孟庆金,景绍洪,等. 加气砗生产制浆过程自动控制系统[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2001, 15(3): 246-248.
- [8] 宋玉国,李士海,朱克. 全自动电脑控制集中制浆系统在灌浆施工中的应用[J]. 地质装备, 2006, 7(6): 33-34.
- [9] 杨振中. 一体式智能制浆系统的研制[J]. 科技资讯, 2015, 13(28): 56-58.
- [10] 王慧. 制浆造纸工业综合自动化的发展、现状及趋势[J]. 中国造纸学报, 2002, 17(1): 122-126.
- [11] 贾凯军,冯光明,李凤凯. 矿用超高水充填材料制浆系统研究与应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2011, 30(6): 8-14.
- [12] 陶士先. 地质钻探冲洗液技术[M]. 北京:地质出版社, 2015.
- [13] 北京探矿工程研究所. 钻井液随钻在线自动配制系统及方法: CN202211679729.7[P].2023-04-04.

(编辑 王跃伟)