自动加药装置在地质钻探废浆处理中的应用研究

金 博[1]，冯美贵[1*]，孙平贺[2]，刘昕伟[3*]，曾 令[4]，
王 康[4]，蒋 睿[1]，李晓东[1]，彭博一[1]

（1.北京探矿工程研究所，北京 100083；2.中南大学地球科学与信息物理学院，湖南 长沙 410083；3.甘肃煤田地质局一四五队，甘肃 张掖 734000；4.核工业二九〇研究所，广东 韶关 512029）

摘要：针对地质钻探废弃泥浆处置工序中传统人工加药投加量不精确、处理效果不稳定、人工成本高昂的突出问题，研制一套集药剂自动配制、精准计量与自动化时序投放于一体的自动加药装置。该装置采用三箱一体撬装式结构，依据“破胶—絮凝—脱色”工艺时序，实现三类药剂独立存储、连续配制与时序精准分步投放；以可编程逻辑控制器（PLC）为核心搭建闭环反馈智能控制系统，依托质量流量补偿算法抵消药剂堆积密度波动、架桥结块带来的计量偏差，保障药液配制浓度稳定可控。现场示范应用结果显示：经该装置分级预处理后，固液分离出水色度由18000倍降至8倍、COD由＞10000 mg/L降至35 mg/L、悬浮物（SS）由＞50000 mg/L降至56 mg/L，各项指标均远优于《污水综合排放标准》二级标准限值，分离水色度、COD和悬浮物去除率均在95%以上；滤饼含水率由传统工艺的30%～40%稳定降至20%以下，药剂综合消耗量较人工投加模式降低约20%。该装置可显著提升废浆处理效能与稳定性，降低药剂消耗与人工成本，为地质钻探废浆处理提供了一种精准、智能、高效的解决方案，对推动绿色勘查具有重要工程应用价值。

关键词：地质钻探；废弃泥浆；废浆处理；自动加药装置；破胶絮凝；固液分离；智能控制；绿色勘查
中图分类号：P634.6；X741 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-9686(2026)06-0077-07

Study on application of automatic dosing device in geological drilling waste mud treatment

JIN Bo[1], FENG Meigui[1*], SUN Pinghe[2], LIU Xinwei[3*], ZENG Ling[4],
WANG Kang[4], JIANG Rui[1], LI Xiaodong[1], PENG Boyi[1]

(1. *Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing* 100083, *China*; 2. *School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan* 410083, *China*; 3. *Gansu Bureau of Coal Geology One Four Five Brigade, Zhangye Gansu* 734000, *China*; 4. *Research Institute No.*290, *CNNC, Shaoguan Guangdong* 512029, *China*)

Abstract: To address the prominent problems of inaccurate dosing, unstable treatment performance, and high labor costs associated with conventional manual dosing in geological drilling waste mud disposal, an automatic dosing device integrating automated reagent preparation, precise metering, and automated sequential dosing was developed. The device adopts an integrated three-tank skid-mounted structure and, following the process sequence of "gel breaking - flocculation - decolorization", enables independent storage, continuous preparation, and precise sequential stepwise dosing of three types of reagents. A closed-loop feedback intelligent control system was established with a

收稿日期：2026-03-20；**修回日期：**2026-06-24 **DOI：**10.12143/j.ztgc.2026.06.009
基金项目：深地国家科技重大专项课题（编号：2024ZD1003105）；部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目（编号：ZKKJ202423）；中国地质调查局地质调查项目（编号：DD20243154、DD202602210404）

第一作者：金博，男，汉族，1999年生，助理工程师，地质工程专业，硕士，从事钻探相关技术与废浆处理技术装备研发工作，北京市海淀区学院路29号，1670343968@qq.com。
通信作者：冯美贵，女，汉族，1981年生，正高级工程师，探矿工程专业，从事地质钻探工艺研究、钻井液循环与废浆处理技术装备研发工作，北京市海淀区学院路29号，rosy03250186@126.com。
刘昕伟，男，汉族，1986年生，高级工程师，一级注册建造师，探矿工程专业，从事钻探施工和技术管理工作，甘肃省张掖市甘州区张火公路1公里处，851773779@qq.com。

引用格式：金博，冯美贵，孙平贺，等.自动加药装置在地质钻探废浆处理中的应用研究[J].钻探工程，2026，53(6)：77-83.
JIN Bo, FENG Meigui, SUN Pinghe, et al. Study on application of automatic dosing device in geological drilling waste mud treatment [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 77-83.

programmable logic controller (PLC) as the core. Utilizing a mass flow compensation algorithm, the system offsets metering deviations caused by fluctuations in reagent bulk density and bridging/caking, ensuring stable and controllable prepared reagent concentration. Field demonstration results indicated that after graded pretreatment by the device, the chromaticity of the solid-liquid separation effluent decreased from 18000 times to 8 times, COD from >10000 mg/L to 35 mg/L, and suspended solids (SS) from >50000 mg/L to 56 mg/L. All indicators were far superior to the Class II limits of the Integrated Wastewater Discharge Standard, with removal rates of chromaticity, COD, and SS all exceeding 95%. The moisture content of the filter cake was stably reduced from 30%~40% in traditional processes to below 20%, and comprehensive reagent consumption decreased by approximately 20% compared to the manual dosing mode. This device significantly improves waste mud treatment efficiency and stability, reduces reagent consumption and labor costs, and provides a precise, intelligent, and efficient solution for waste mud treatment in geological drilling, possessing important engineering application value for promoting green exploration.

Key words: geological drilling; waste mud; waste mud treatment; automatic dosing device; gel breaking and flocculation; solid-liquid separation; intelligent control; green exploration

0 引言

地质钻探过程中,泥浆循环发挥着冷却钻头、携带岩屑、稳定孔壁等重要作用,是地质钻探工程施工中必不可少的组成部分。完钻后产生的废弃泥浆,是一种稳定的胶体悬浮体系,含有大量黏土颗粒、岩屑、加重材料及多种有机和无机化学添加剂,如降失水剂、增黏剂、润滑剂等,部分还可能携带地层中的重金属离子或油气残留物[1-2]。这种废弃泥浆具有高悬浮性、高化学需氧量(COD)、高生化需氧量(BOD_5)及潜在毒性[3],若处置不当,将对土壤和水体环境构成严重威胁[4]。

对于废弃泥浆的处理,传统的直接排放或简单填埋方式已不符合日益严格的环保法规要求。目前,主流的处理工艺是通过“加药处理+机械脱水”实现废弃泥浆的固液分离[5-6]。其中,加药处理是破坏废弃泥浆胶体稳定性、去除悬浮物、降低废浆浊度和色度、使其易于脱水的决定性步骤,常需依次投放破胶剂、絮凝剂和脱色剂[7]。然而,传统人工加药方式存在加量不精确、药剂混合不均、反应条件管控精度不足、无法实时响应泥浆性质波动等缺陷,导致处理效果不稳定,人工及材料成本高昂且不可控[8]。

随着自动化技术的发展,自动加药装置作为一种集成化、智能化的药剂投放解决方案,目前在水处理、石油生产、选煤等行业领域有着广泛应用[8-10]。各类自动加药装置在不同领域的应用原理类似,但具体结构和应用模式各不相同[11-12],目前在地质钻探废浆处理领域仍处于探索阶段。该装置通过实现药剂的自动制备与精准投放,有效解决上述痛点,成为提升废浆处理工艺效能、解决钻探相关的生态环保问题,实现绿色勘查的关键设备[13]。本文将系统阐述该装置的工作原理、系统构成及其在地质钻探废浆处理中的具体应用模式与综合效益。

1 自动加药装置的方案设计

1.1 自动加药装置的结构设计

自动加药装置的核心设计理念,是针对地质钻探废浆处理需要依次投放多种化学药剂的工艺特点,将三个独立储药箱体集成为一套完整的自动化系统。这种设计既保证不同药剂之间的物理隔离,又实现投放过程的集中控制与协同优化。装置整体结构如图1所示,实物如图2所示。

1.1.1 独立药剂制备存储箱体设计

采用三箱一体撬装式,每个箱体均为独立的药剂存储制备箱体,箱体主结构全部采用304不锈钢,

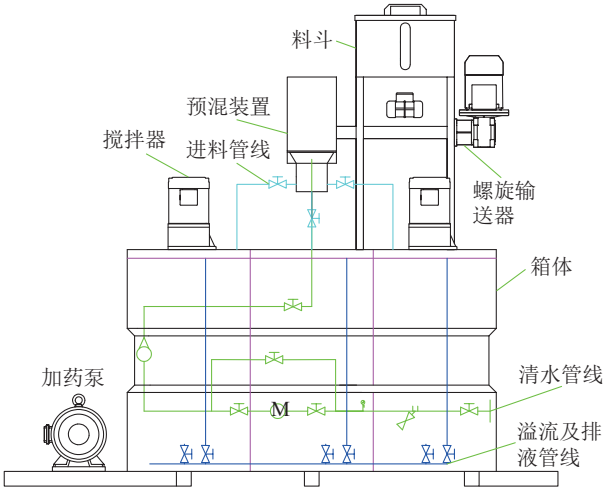

图1 自动加药装置结构示意

Fig.1 Schematic diagram of the structure of automatic dosing device



图2　自动加药装置实物

Fig.2　Physical view of the automatic dosing device

管路采用化工级硬聚氯乙烯(UPVC),具有很好的耐酸碱、耐腐蚀,且不易生锈、不易结垢等优秀性能,同时还减轻了整机质量。配备搅拌装置防止药剂沉淀或黏结,保证连续运行处理需求。

1.1.2　一体式配药系统设计

为满足地质钻探设备占地面积小、质量小等特点,将配药系统整合为一体式,通过三通管路及三台互锁切换阀门,实现三套独立药剂箱体分时配药。配药系统通过变频螺旋输送器,能够满足精准配药需求。另外料斗配有激振器、加热器及称重传感器,能够避免药剂的黏结及残留,保证药剂分散性及配药精准度。预混仓采用锥形结构,进水口配置喷淋散水结构,可让固体药剂与清水充分预混,加速粉剂水化溶解,能够有效避免药剂在箱体内结块等问题[14]。

1.1.3　中央智能控制系统设计

以可编程逻辑控制器为核心,通过人机界面、数据采集模块和控制算法,能够实现参数设定与显示、自动控制、数据记录与通信等功能。装置整体电控系统与控制界面为一体化设计,可切换手动/自动、本地/远程等不同控制模式。

1.2　自动加药操作工艺流程

自动加药装置在工作前首先需要将处理药剂按需倒入料斗中,装置启动后料斗内的螺旋输送器会根据预设参数将药剂输送至预混装置内,同时启动供水系统,将清水同时输送至预混装置内,之后混合物会按照预设参数进入对应的药剂储存箱体内备用;控制系统收到指令后,变频计量加药泵及对应药剂通道开启,将药剂溶液向外输送,完成药剂投放。

2　自动加药装置智能控制策略

处理地质钻探废浆的特殊性在于不同工程现场泥浆成分和性质的差异较大。因此,配套的智能控制系统是关键[15]。系统以PLC控制器为核心,搭载HMI触摸屏,整合多种在线传感器,并采用复合控制策略。其逻辑控制系统的主要组成包括HMI触摸屏、逻辑控制器(PLC)、电磁流量计、液位计、料位开关、称重传感器、变频器、电磁阀等。自动加药装置逻辑控制系统如图3所示。

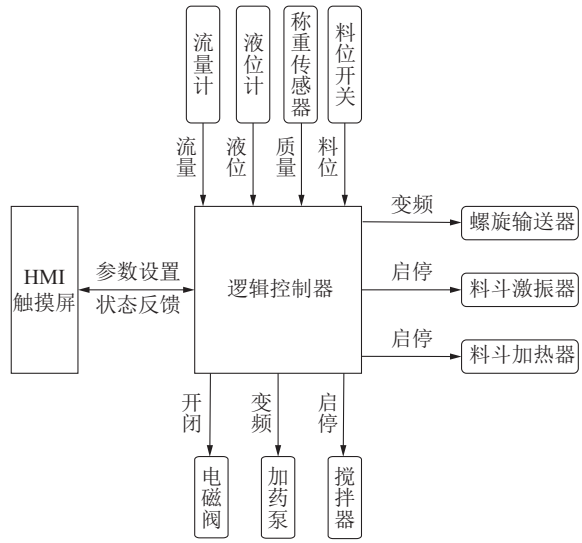

图3　自动加药装置逻辑控制系统

Fig.3　Logic control system of automatic dosing device

应用前,需要对药剂的堆积密度进行标定,即每立方厘米内药剂的质量,将该数据存入PLC预留的控制程序内。为进一步消除药剂堆积密度变化对计量精度的影响,系统在料仓集成了称重传感器进行直接称重。PLC根据单位时间内料仓质量的减少量,计算出药剂的瞬时质量流量,并与预设值对比,以此构建质量流量闭环反馈控制,抵消药剂架桥、压实堆积带来的计量偏差;系统内置算法可建立药剂投加量与螺旋输送频率的对应数学关系,实现精准给药。装置工作时,将药剂投入制备料斗,PLC接收触摸屏启动指令后,首先读取料位开关信号,判断料斗内药剂存量是否满足配药要求,料斗底部的低料位开关与控制系统联锁,当检测到药剂粉末不足时,HMI触摸屏将发出声光报警,并自动暂停配药流程,防止设备空转,提示操作人员及时加料。待料位恢复正常后,系统自动恢复配药。当药剂量满足

要求后，药剂在螺旋输送器作用下开始向装置内的预混系统输送，同时料斗激振器以预设间隔频率对料斗内药剂进行激振，以确保料斗内药剂不出现黏结、挂壁等现象，从而保证药剂分散性和落料顺畅；清水通过电磁阀和流量计控制进入预混系统。PLC内预设的算法会根据预设药剂百分质量浓度，收集药剂粉末瞬时质量流量、螺旋输送器加药量及清水流量数值，通过PLC控制器自动动态调整螺旋输送器的频率，保证药剂能够精确、恒浓度配制，实现反馈补偿控制。控制模型如图4所示。

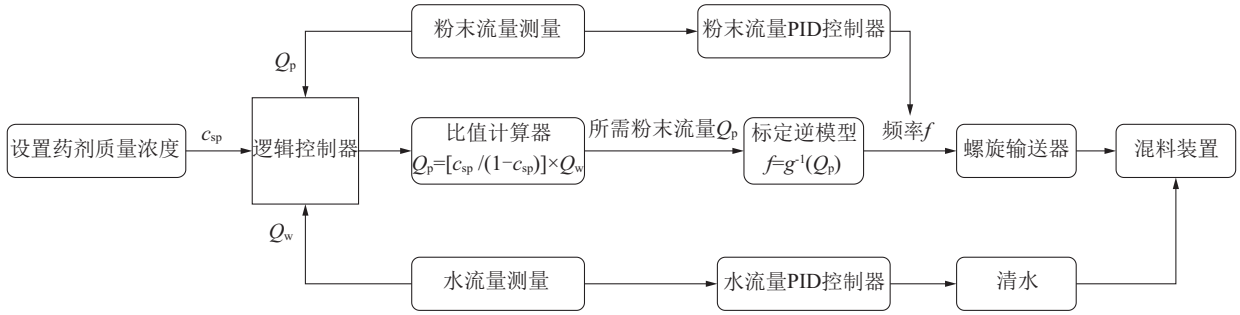

图4 混料系统反馈控制模型

Fig.4 Feedback control model of the mixing system

$$Q_p=\frac{c_{sp}}{(1-c_{sp})}Q_w \tag{1}$$

$$g=\frac{Q_p}{f} \tag{2}$$

式中：Q_p——所需粉末流量；c_{sp}——药剂质量浓度；Q_w——清水流量；g——频率流量比；f——螺旋输送器频率。

预混药液随进药管路流入对应箱体，在低速搅拌环境下完成充分水合与分子链伸展，保证药液均质性。箱体内设有液位计，在PLC程序内设置高、中、低三挡液位，在箱体液位达到低液位以上时，反馈信号至PLC，搅拌器开始按预设时间进行间歇搅拌；在箱体液位计达到高液位时，反馈信号至PLC，PLC暂停药剂配制程序，避免发生溢流造成药剂浪费；在药剂配制程序暂停后，当液位计低于中液位时，反馈信号至PLC，PLC自动继续药剂配制程序。最后由变频泵根据控制信号和待处理废浆的处理药剂用量，将箱体内的药剂溶液连续、依次、稳定地输送至投放点。针对三箱共用一套配药系统的“一拖三”结构，PLC程序内置了完善的资源管理逻辑，确保多制剂需求的有序执行。配制药剂时，系统通过互锁阀门，将料斗和预混装置与当前目标箱体“锁定”，直至该箱体达到高液位或完成预设配制量。在此期间，其他箱体的任何低液位需求都将被暂缓。当两个及以上箱体同时出现低液位配制需求时，系统根据当前工艺次序预设优先等级，通常的优先顺序为破胶剂＞絮凝剂＞脱色剂。系统先将资源分配给高优先级箱体，待其配制完成并解锁后，自动为下一优先级的箱体执行配制任务，直至所有需求均被满足，确保连续稳定。整个过程可实现全自动连续运行，形成“制备-投放”的动态平衡。此外，上述控制逻辑中涉及的所有功能均可以在HMI切换至手动进行，也可以通过远程物联网系统进行无线远程控制，多模式控制可适配各类现场工况与设备突发故障，保证装置运行的整体稳定性和可靠性。

3 自动加药装置在地质钻探废浆处理中的应用

3.1 工作区概况

为验证自动加药装置整体性能的稳定性和可靠性，在甘肃省煤炭资源普查钻探现场开展自动加药装置应用示范。现场配备XY-6型钻机采用绳索取心工艺进行取心钻进，地层岩体结构复杂，微裂隙发育，岩性硬且脆，可塑性差，比较破碎。结合现场地层情况，采用淡水配制泥浆，配方为清水＋0.1%氢氧化钠＋10%膨润土＋2%改性沥青＋1%广谱护壁剂＋0.5%增黏剂＋5%碳酸钙。泥浆基础性能为密度1.10～1.13 g/cm^3、马氏漏斗黏度35～40 s。

钻探现场产生的废弃泥浆中主要含有大量的岩屑、黏土及各类添加剂，如图5所示。



图 5　钻探现场废弃泥浆

Fig.5　Waste mud from drilling site

3.2　协同作用机理

在地质钻探废浆处理中，自动加药装置的核心价值在于实现不同药剂的精准协同投放，废浆处理通常需要按顺序经过“破胶—絮凝—脱色”三个步骤，因此要在废浆中添加三类处理剂。

3.2.1　破胶剂

钻探废浆之所以难以脱水，根本原因在于其形成了稳定的胶体体系。黏土颗粒表面吸附着有机处理剂（如羧甲基纤维素、广谱护壁剂等），形成水化膜和双电层结构，使颗粒稳定悬浮。

破胶剂的作用是破坏这种胶体的稳定性，优选以聚合硫酸铝（PAS）为主的白色粉末状复合破胶剂，其堆积密度为 0.7 g/cm^3。破胶完成后，废浆由“稳定胶体”转变为“脱稳悬浮液”，为后续絮凝创造条件。

3.2.2　絮凝剂

破胶脱稳后的微细颗粒（粒径通常在 1～100 μm）仍难以直接沉降或过滤，需要絮凝剂将其聚集成粗大絮团。絮凝剂的作用机理包括电中和作用和吸附架桥作用。絮凝剂与带负电的黏土颗粒发生电荷中和，降低颗粒间的静电排斥力；絮凝剂同时吸附多个颗粒，像“桥梁”一样将其连接在一起，形成粒径可达数毫米的粗大絮团。絮体的形成质量直接影响后续脱水效率：絮体越大、越密实，沉降越快，过滤阻力越小。

在地质钻探废浆处理中，最常用的絮凝剂是阴离子型聚丙烯酰胺（APAM），优选以 APAM 为主的白色细颗粒状复合絮凝剂，其堆积密度为 0.7 g/cm^3。

3.2.3　脱色剂

钻探废浆中常含有木质素磺酸盐、腐殖酸、沥青等有色有机物，以及铁、锰等金属离子，导致分离水呈现深褐色或黑色。即使完成固液分离，若色度超标仍不能直接排放或回用。

脱色剂的作用是去除残余色度和进一步降低 COD。优选以活性白土为主的吸附型脱色剂，通过物理吸附去除废浆中有色物质，其堆积密度为 0.75 g/cm^3。

3.3　现场参数调试

根据现场废浆配方及性能，以及处理药剂的选择，对自动加药装置进行调试。其控制界面如图 6 所示。

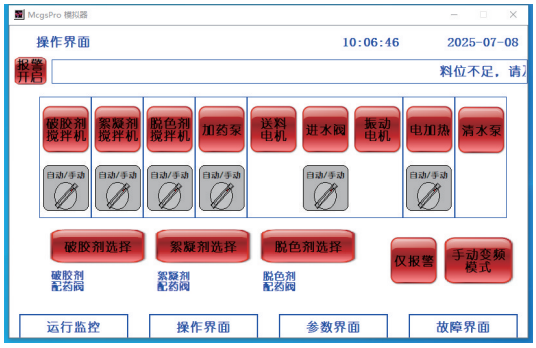

图 6　自动加药装置控制界面

Fig.6　Control interface of the automatic dosing device

首先标定螺旋输送器驱动电机的转速比，明确频率与转速之间的对应关系；其次对螺旋输送器单圈输送质量进行标定，根据药剂堆积密度，确定频率与药剂输送量之间的关系；最后对流量计脉冲当量进行标定，保证水流量测量准确。以上参数调试通常仅需设置一次，如果自动加药装置的硬件设备没有发生变化，则后续使用无需再次调试。

通过控制面板手动控制，测试所有电气设备，确保电气设备工作正常及电机旋转方向符合工作要求。通水确认管路及箱体无异常，检查并清理箱体内部杂物。

将待使用的处理药剂的堆积密度输入至 PLC 中，设置药剂浓度，破胶剂 10%，絮凝剂 2.5%，脱色剂 5%，设置完成后，将破胶剂、絮凝剂、脱色剂粉剂依次添加至料斗中，启动加药装置自动运行。

4　应用效能分析

4.1　应用效果

将自动加药装置应用于废浆处理系统，其典型工艺流程：废浆收集—筛分除砂—调节均质—自动

加药处理(破胶—絮凝—脱色)—固液分离(离心机/压滤机)—清水回用/达标排放+滤饼处置。在这一流程中,自动加药装置作为多药剂协同调节处理中枢,具有快速配药、精准加药、按需用药、处理效率高等优点。

将现场废浆按照上述工艺流程进行处理,加药处理后使用隔膜压榨装置进行机械脱水。同时,废浆不加药处理直接进行机械脱水作为对照组。现场通过自动加药装置处理4 m^3废浆,共使用破胶剂80 kg、絮凝剂20 kg、脱色剂40 kg。固液分离后的分离水如图7所示。将现场处理前后污染指标进行测定,结果如表1所示。



(a)未加药处理 (b)加药处理

图7 固液分离后的分离水

Fig.7 The separated water after solid-liquid separation

4.2 自动加药效能分析与技术优势

现场应用及表1数据分析表明,钻探废浆采用自动加药装置进行加药处理后,其污染指标大幅降低,相比未经处理直接脱水,各项污染指标显著降低,验证了破胶—絮凝—脱色工艺的有效性。经过化学加药处理后的分离水满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)二级排放标准,取得显著的综合效益。

4.2.1 处理效能提升

废弃泥浆经过加药装置处理,脱水后滤饼含水率从传统方式的30%~40%稳定降至20%以下,达到资源化利用的含水率要求;固液分离效率提高,同等设备处理能力显著提升。人工加药较为依赖经验,且加量不易控制,处理后易造成水质波动,无法保证满足排放标准,经过自动加药装置处理后分离水色度、COD和悬浮物去除率在95%以上,处理效果稳定,处理后各项污染指标远低于标准限值,充分保障后续分离水的回收或排放。

4.2.2 经济效益显著

相比于人工投放,采用自动加药装置时药剂按需投放、精准配制、定量控制,配药料斗内如存在多余粉状药剂也可回收再利用,避免了人工过量投放造成的药剂浪费,综合药剂消耗降低约20%;人工成本降低,现场仅需1~2名操作人员,且在装置开始运行后可开启远程监控无人值守模式;装置材料设计与药剂精准投放减少了管道结垢和腐蚀,延长了设备寿命,降低了设备维护成本。

4.2.3 环境效益突出

分离水水质稳定达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)二级标准,实现钻探现场废水"近零排放";分离水可直接重复用于泥浆配制及循环,分离后的固相物含水率降低、体积缩减,降低了固相废弃物运输和后处理过程中的二次污染风险;自动加药装置全封闭运行,避免了药剂暴露和废浆溢散,改善了作业环境,符合绿色勘查的要求。

5 结论

废浆处理自动加药装置为地质钻探废浆处理提供了一种多药剂协同投放、精准智能控制的解决方案,通过将破胶剂、絮凝剂、脱色剂的独立储存与

表1 分离水污染指标测定结果

Table 1 Measurement results of pollution indicators in separated water

项 目	加药处理前	未加药分离后	加药分离后	GB 8978—1996二级标准
外观形态	黑褐色不透明浆液	淡黄色液体	无色透明液体	无色透明液体
色度/倍	18000	640	8	≤80
悬浮物/(mg·L^{-1})	>50000	1685	56	≤150
COD值/(mg·L^{-1})	>10000	2227	35	≤150
pH	8	6.5	6.5	6~9

精准投放集成为一套智能化系统，有效解决钻探废浆因成分复杂、波动大而难以稳定处理的行业难题，实现了三种药剂的时序协同与剂量优化。示范应用表明，该技术在提升处理效能、降低运营成本、实现环保合规等方面展现出突出价值，有力地推动了地质钻探绿色发展。

在新一轮找矿突破战略行动全面推行绿色勘查的时代要求下，随着智能化水平的不断提升和设备的标准化发展，自动加药装置将在地质钻探废浆处理领域得到更广泛的应用。该技术的推广应用与持续优化迭代，能够助推地质勘查行业朝着绿色、高效、精准、智能方向转型升级，助力资源开发与生态保护协同发展，具备重要的现实意义与广阔的应用前景。

参考文献(References)：

[1] 陈颖，王议仟，田飞，等.油气田钻井废泥浆处理技术研究进展[J].广州化工，2025，53(7)：4-7.
CHEN Ying, WANG Yiqian, TIAN Fei, et al. Research progress on treatment technology of drilling waste mud in oil and gas gields[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2025,53(7):4-7.

[2] 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.
ZHANG Tongde, JIANG Bing, YAN Junfeng. Research on pollution characteristics and destabilization technology of waste drilling fluid in geological drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):134-139.

[3] 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.
PENG Boyi, LI Xiaodong, WANG Kang, et al. Research and application of harmless treatment technology for waste non-solid phase drilling fluid [J]. Drilling Engineering, 2025, 52 (2) : 45-50.

[4] 彭博一，刘维平，高金华，等.废弃钻井液无害化处理技术研究进展[J].地质装备，2024，25(S1)：39-44.
PENG Boyi, LIU Weiping, GAO Jinhua, et al. Research progress on harmless treatment technology of waste drilling fluid[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2024,25(S1):39-44.

[5] 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.
YU Fuan, LIU Weiping, FENG Meigui, et al. Application of diaphragm pressing waste slurry treatment device in geological drilling[J]. Drilling Engineering, 2025,52(6):116-121.

[6] 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.
JIANG Rui, LI Baijun, WANG Kang, et al. Research and application of a new type of diaphragm filter press in harmless treatment of waste pulp from geological drilling[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2024,25(S1):176-182.

[7] 王志宏，石昀，孙凤萍，等.钻井废弃物环保处理技术的研究与应用[J].当代化工，2022，51(11)：2574-2578.
WANG Zhihong, SHI Yun, SUN Fengping, et al. Research and application of environmentally friendly treatment technology for drilling waste[J]. Contemporary Chemical Industry, 2022,51 (11):2574-2578.

[8] 张瑾，马志远，段思禹，等.油田集中处理站用橇装破乳剂加药系统工艺优化研究[J].油气田地面工程，2025，44(6)：42-46.
ZHANG Jin, MA Zhiyuan, DUAN Siyu, et al. Research on process optimization of skid-mounted demulsifier dosing system for oilfield central gathering stations[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2025,44(6):42-46.

[9] 程开.选煤厂煤泥浮选自动加药装置的研究进展[J].煤炭加工与综合利用，2023(3)：23-26，30.
CHENG Kai. Research progress of automatic dosing device for slime flotation in coal preparation plant[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2023(3):23-26,30.

[10] 胡彦云，徐展，解蛟，等.基于智能加药装置的循环水系统运行优化试验[J].清洗世界，2025，41(5)：1-2，5.
HU Yanyun, XU Zhan, XIE Jiao, et al. Optimization experiment of circulating water system operation based on intelligent dosing device[J]. Cleaning World, 2025,41(5):1-2,5.

[11] 尉佳怡，黄宋魏，肖玮，等.浮选过程自动加药技术研究进展[J].化工自动化及仪表，2022，49(2)：127-132，161.
YU Jiayi, HUANG Songwei, XIAO Wei, et al. Study porgress in automatic dosing technology and its application in flotation process[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2022,49(2):127-132,161.

[12] 程贯瑞，黄宋魏，和丽芳，等.浮选加药智能化控制技术研究进展[J].化工矿物与加工，2026，55(3)：69-78.
CHENG Guanrui, HUANG Songwei, HE Lifang, et al. Research progress on intelligent control technology of flotation dosing[J]. Industrial Minerals & Processing, 2026, 55(3) : 69-78.

[13] 渠洪杰，谭春亮，冉灵杰，等.面向新一轮找矿突破战略行动绿色勘查的钻探技术研发与应用建议[J].中国矿业，2024，33(10)：246-256.
QU Hongjie, TAN Chunliang, RAN Lingjie, et al. Research and application suggestions on drilling technology of green exploration for the new round of prospecting breakthrough strategy [J]. China Mining Magazine, 2024,33(10):246-256.

[14] 朱正军.一种智能型高精度絮凝剂给料装置的设计与应用[J].煤炭加工与综合利用，2025(4)：16-19.
ZHU Zhengjun. Design and application of an intelligent high-precision flocculant feeding device [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2025(4):16-19.

[15] 严凡涛，李传伟，高嵩，等.BRFS计量泵自动加药系统开发及应用[J].中国矿业，2024，33(8)：100-106.
YAN Fantao, LI Chuanwei, GAO Song, et al. Design and development of automatic dosing system of the BRFS metering pump[J]. China Mining Magazine, 2024,33(8):100-106.

(编辑　王跃伟)