

LSZ-1型泥浆滤失量自动测量仪研制

王 强^{1,3}, 朱恒银^{*2,3}, 刘 兵³, 冯建宇⁴, 冯聪聪⁴, 孙亚军⁴, 蔡正水³

(1.安徽工业经济职业技术学院,安徽 合肥 230051; 2.安徽理工大学地球与环境学院,安徽 淮南 232001;
3.安徽省地质矿产勘查局313地质队,安徽 六安 237010; 4.北京六合伟业科技股份有限公司,北京 100160)

摘要:目前,在野外钻探现场或泥浆实验室内测量泥浆滤失量都是以传统人工测量为主,测量程序繁琐,读数误差大,工作效率低。为此开展了泥浆滤失量自动测量技术的研制,从结构设计、软件开发、传感器优选、新型过滤材料研制等方面进行技术攻关,研制了LSZ-1型中低压泥浆滤失量自动测量仪。通过实验室试验,实现了泥浆滤失量自动测量、数据储存与无线传输、装置自动清洗等关键技术突破。该仪器的研制成功,可为我国今后实施深钻工程智能化提供技术支撑,有效降低劳动强度,提高数据测量可靠性和工作效率,是钻探信息化、自动化的核心技术装备。

关键词:泥浆滤失量;自动化测量;过滤材料;自动清洗;钻探工程智能化

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)02-0128-07

Development of LSZ-1 automatic measuring instrument for mud filter loss

WANG Qiang^{1,3}, ZHU Hengyin^{*2,3}, LIU Bing³, FENG Jianyu⁴, FENG Congcong⁴, SUN Yajun⁴, CAI Zhengshui³

(1. *Anhui Technical College of Industry and Economy, Hefei Anhui 230051, China;*

2. *School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;*

3. *Anhui Geology and Mineral Bureau 313 Team, Lu'an Anhui 237010, China;*

4. *Beijing Liuhe Greatness Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China)*

Abstract: At present, the measurement of mud filter loss in the drilling site or in the mud laboratory is mainly based on the traditional manual measurement, with cumbersome measurement procedures, large reading error, and low work efficiency. For this reason, the research and development of the automatic measuring instrument for mud filtration has been carried out. LSZ-1 automatic instrument for medium and low pressure mud filtration has been developed through technical breakthrough in structural design, software development, sensor optimization, new filter material development, etc. Through laboratory tests, key technological breakthroughs such as automatic measurement of mud filtration loss, data storage and wireless transmission, and automatic cleaning of the device have been realized. The successful development of this instrument can provide technical support for the implementation of intelligent deep drilling engineering in the future, effectively reduce labor intensity, improve data measurement reliability and work efficiency, and is the core technical equipment of drilling information and automation.

Key words: mud filter loss; automatic measurement; filter material; automatic cleaning; intellectualization of drilling engineering

收稿日期:2022-08-29; 修回日期:2022-11-09 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.018

基金项目:安徽省科技重大专项“5000米新型能源勘探智能钻探装备与技术”(编号:201903a05020012)

第一作者:王强,男,汉族,1986年生,高级工程师,探矿工程专业,硕士,安徽省学术和技术带头人后备人选,享受安徽省政府特殊津贴,从事深部钻探施工技术研究与工作,安徽省合肥市梁园路1号,307211839@qq.com。

通信作者:朱恒银,男,汉族,1955年生,二级教授级高级工程师,探矿工程专业,全国劳动模范、大国工匠、全国创新争先奖、李四光地质科学奖,安徽省学术和技术带头人,享受国务院政府津贴,从事特种钻探、深部钻探施工技术研究及应用工作,安徽省淮南市泰丰大街168号,zhyhome_313@163.com。

引用格式: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.

WANG Qiang, ZHU Hengyin, LIU Bing, et al. Development of LSZ-1 automatic measuring instrument for mud filter loss[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):128-134.

0 引言

泥浆被誉为钻探工程的“血液”,起着不可或缺的作用,其性能直接影响钻探效率和质量。随着自动化、大数据、人工智能等技术的不断融合发展,钻探技术正在加快自动化并转向智能化。智能钻探技术以大量数据的实时获取、高速传输和有效挖掘为基础。国内在地面自动化控制技术、传感检测技术、机器人技术、智能钻柱和远程作业计算机支持系统方面都有研究并取得了一定的进展^[1-3],但目前钻探行业在泥浆性能自动化测试方面,研究进展缓慢,野外钻探现场测量泥浆性能仍是依靠人工测量为主。例如在泥浆滤失量测量的过程中,需要人工进行组装罐体、安装滤纸、向罐体泥浆打气加压、以目视读取滤液刻度值等测量工作。测量完成后还需要人工进行拆卸、清洗等工作^[4-5]。整个滤失量测量过程存在测量程序繁琐、人工测量目视读数误差大、工作效率低、人工接触泥浆易腐蚀手部等弊端^[6]。为了改变这一现状,开展了泥浆滤失量自动化测量系统结构设计、控制软件开发、传感器优选、新型过滤材料研制等关键技术的攻关与试验,研制了LSZ-1型泥浆滤失量自动测量仪,实现了泥浆滤失量自动测量、数据储存与无线传输以及装置自动清洗等功能^[7],为建立智能钻井液设计与管理专家系统,推动钻探自动化、智能化发展提供了一定的数据支持^[8-9]。通过实验室大量对比试验验证,LSZ-1型泥浆滤失量自动测量仪测量结果与人工测量结果基本吻合,能够满足现场钻探泥浆性能测试需求。

1 泥浆滤失量自动测量仪设计

在钻孔中液体压力差的作用下,泥浆中的自由水通过孔隙或裂隙向地层中渗透,称为泥浆的失水。失水的同时,泥浆中的固相颗粒附着在井壁上形成泥皮(泥饼),称为造壁^[10-11]。滤失量是评价泥浆性能的一项重要指标。泥浆静滤失量标准测量方法是:采用中压失水仪,在20~25℃和0.69 MPa压力条件下,30 min时测量经滤网流出的滤液体积,单位为mL/30 min^[12-14]。根据现行泥浆滤失量测量规范与原理,开展泥浆滤失量自动化测量的设计,实现一键测量泥浆滤失量^[15-16]。

1.1 整体设计要求

(1)滤失量测量精度:±0.1 mL/30 min,与人工测量滤失量偏差百分率≤5%,数据储存量512 M,

传输速度9600 bps。

(2)滤失量测量模块的密封耐压1.6 MPa,可靠性100%。

(3)测量仪外形尺寸:长×宽×高=400 mm×250 mm×620 mm。

(4)整机质量≥8 kg,整体结构框架采用06Cr19Ni10奥氏体不锈钢,性价比高。

(5)适用于野外现场工作环境,防爆,电压36 V(或220 V变压至36 V)。

(6)使用寿命:平均无故障时间(MTBF)1000 h,整机寿命8年。

(7)可实现滤失量参数自动测量和装置残留泥浆自动清洗功能。

(8)装置结构简单,各机械、电动及传感器部分具有满足野外钻探施工条件的抗震、耐腐蚀和耐潮湿性能。

(9)可实现野外钻探现场电脑端和手机端操作,界面简洁,结果显示直观,操作快捷。

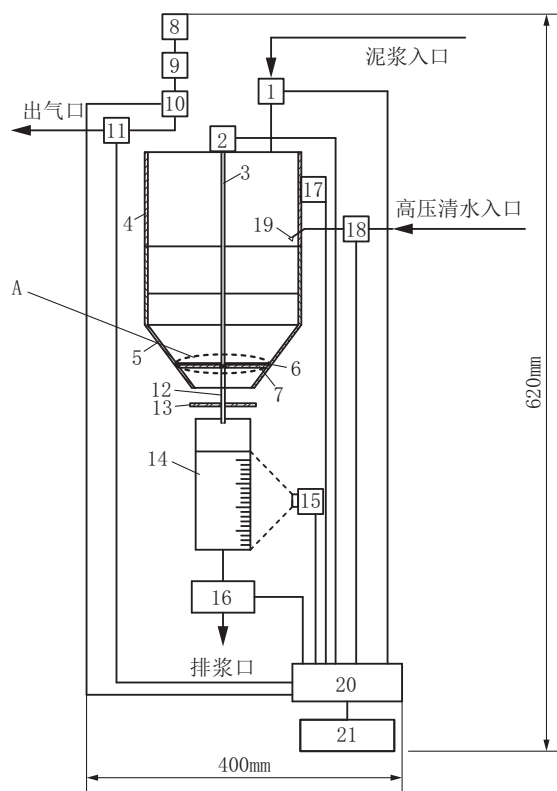
(10)具备故障自动检测系统,便于野外钻探现场操作人员维修维护。

1.2 结构设计

LSZ-1型泥浆滤失量自动测量仪主要由泥浆测试罐体总成、测量系统、清洗系统、信号处理与显示系统构成^[17],如图1所示。图1中A处过滤组件局部放大图如图2所示。

罐体总成由泥浆定量灌入液位电磁阀(1)、直线电机(2)、移动杆(3)、上罐体(4)、下罐体(5)、滤布(6)、滤网托板(7)组成。被测泥浆通过液位电磁阀定量灌入罐体内,直线电机通过移动杆可带动滤网托板上下滑动。过滤组件(图2)由钢制托板、不锈钢制40目滤网、压圈、弹性挡圈、滤布组成,滤网装置在托板上,滤布放置在滤网上,托板设置一个Φ5 mm孔眼与滤液管相连。过滤组件位于下罐体锥形下限位时,处于密封状态;上移至上限位时,过滤组件密封线打开,清水喷嘴开始清洗泥浆筒及滤布、滤网。

滤失量测量系统由气罐(8)、减压阀(9)、电磁阀(10)、电磁阀(11)、滤液管(12)、挡污板(13)、量筒(14)、光感器(15)组成。下罐体连接滤液管,滤液管插入量筒上部,量筒下部与排污电动球阀(16)相连,光感器处于量筒一侧。当罐体内灌入定量泥浆后,气罐通过减压阀向罐体送入额定气压的气体,关电



罐体总成:1—液位电动阀;2—直线电机;3—移动杆;4—上罐体;5—下罐体;6—滤布;7—滤网托板;测量系统:8—气罐;9—减压阀;10—电磁阀;11—电磁阀;12—滤液管;13—挡污板;14—量筒;15—光感器;清洗系统:16—电动球阀;17—超声波传感器;18—电磁阀;19—喷嘴;信号处理与显示系统:20—主机;21—显示屏

图1 泥浆滤失量自动测量仪结构

Fig.1 Structure of automatic measuring instrument of mud filter loss

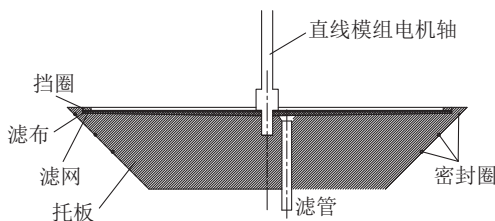


图2 过滤组件结构

Fig.2 Structure of filter component

磁阀,泥浆滤液将由滤液管滴(流)入量筒内,在规定的时间内,通过光感器测量泥浆的滤失量。测量结束,打开电磁阀泄压。

泥浆清洗系统由电动球阀(16)、超声波传感器

(17)、电磁阀(18)、喷嘴(19)组成。当测量结束后,直线电机移动杆上移至上死点,罐体内泥浆泄出,打开排污口电动球阀和高压清水电磁阀,将清水送至喷嘴,同时启动超声波传感器,以产生微振动,将罐内泥浆和滤布上的泥皮清洗干净,停送高压清水,关闭各阀门,将滤网托板下行至下死点。

信号处理与显示系统由主机(20)和显示屏(21)组成。主机与各阀、传感器、电机相连,提供电动力,控制直线电机、各控制阀开关、传感器动作等程序,接收测量中信号并进行数据处理。通过主机处理后,由显示屏(21)自动显示测量数字及控制操作界面^[18-19]。将GSM/GPRS模块集成在泥浆滤失量自动测量仪无线传感器主机中,可将测量结果实时传输至钻探现场控制中心或远程指挥中心,实现无线传输及定位。在偏僻无网络或网络较差地区,可通过与现场控制中心电脑相连接的无线收发主机发射413 MHz射频信号,测量仪中的无线传感器主机接收到信号后,解析成数据帧并与控制模块通过RS485通道,按照MODBUS RTU协议交互数据,控制模块根据指令响应动作,读取数据;测量结果通过无线传感器主机发射射频信号,无线收发主机接收信号,解析数据帧并与现场控制中心电脑通信,上传数据,可保证实现钻探现场200 m范围内的无线传输(理论距离1000 m,受现场环境影响,有衰减)。

1.3 控制软件开发

开发了1套泥浆滤失量自动测量控制软件,运行在组态屏上。组态屏操作系统为linux,内存256 M。阀口控制采用RS485串口进行数据交互。软件系统主要包括通讯和回应数据处理两部分。主要功能包括:(1)读取模块数据:通过串口按照MODBUS协议读取各模块数据,为流程控制提供判断设备动作的依据。(2)流程控制:通过控制DO模块的继电器输出,精确控制泥浆泵、清水泵、气缸等部件的动作,以控制泥浆的流动和清洗。(3)写入模块数据:串口按照协议写入DO模块数据,配合着读取模块读取到的数据,计算出泥浆滤失量。(4)组态屏通信:可设置流程控制过程中的时间参数,阈值大小,系统时间等,通过串口与控制模块进行通信,实时显示传感器数据及流程控制进度,实现数据储存、无线传输等功能。(5)故障检测功能,在测量系统出现故障时能及时准确地判断故障原因,以便于排除故障。软件操作界面如图3所示。



图3 软件操作界面

Fig.3 Software operation interface

1.4 测量工作流程

测量滤失量时,过滤组件处于下限位,罐体内放入240 mL定量泥浆后(通过泥浆筒上端液位传感器来控制),罐体气源通道阀开启,其他控制阀均处于关闭和密封状态,罐体内充气,压力保持0.69 MPa、30 min后,由光传感器测量量筒滤液量(也可采用称重法),然后气源通道阀关闭,其他各控制阀开启,过滤组件上移进入清水冲洗状态,冲洗完毕后,各阀关闭及过滤组件下移至下死点位置。滤失量测量模块过滤组件中的滤纸采用研发的高分子树脂材料滤布代替,与常规滤纸网状结构类似,并可重复使用。泥浆滤失量自动测量工作流程如图4所示。

2 新型替代滤材研制

人工测量泥浆滤失量时所用的滤纸为标准API滤纸,是一次性用品,无法重复使用。而设计泥浆滤失量自动测量仪时,需实现自动测量、清洗、复位等动作,要求各部件可重复使用、经久耐用。因此,优选或研制一种可重复使用的替代性过滤材料,是实现泥浆滤失量自动测量的前提之一,否则研制的泥浆滤失量自动测量仪每测一次就要对装置进行拆卸、更换滤纸等操作,就失去了自动测量的意义。为解决这一技术“瓶颈”,针对性地开展了泥浆滤失量测量所用的替代过滤材料的优选、研制试验。

钻井液用API滤纸规范要求:外观纸边整齐、纸面均匀,直径 90.0 ± 1.0 mm,厚度 0.13 ± 0.01 mm,紧度 ≥ 0.70 g/cm³,滤失量相对平均偏差 $\leq 2.5\%$ ^[20]。选择了纳米纤维过滤膜、尼龙滤网、不锈钢滤网、聚丙烯滤网和聚醚砜滤网等多种过滤材料进行泥浆滤失量测量对比试验,滤网孔径范围在0.1~20 μm ^[21-23]。通过试验发现,滤失量测量结果与采用API滤纸的测量结果差异过大,且测量结果重复性差。因此,通过优选现有的过滤材料来替代API滤

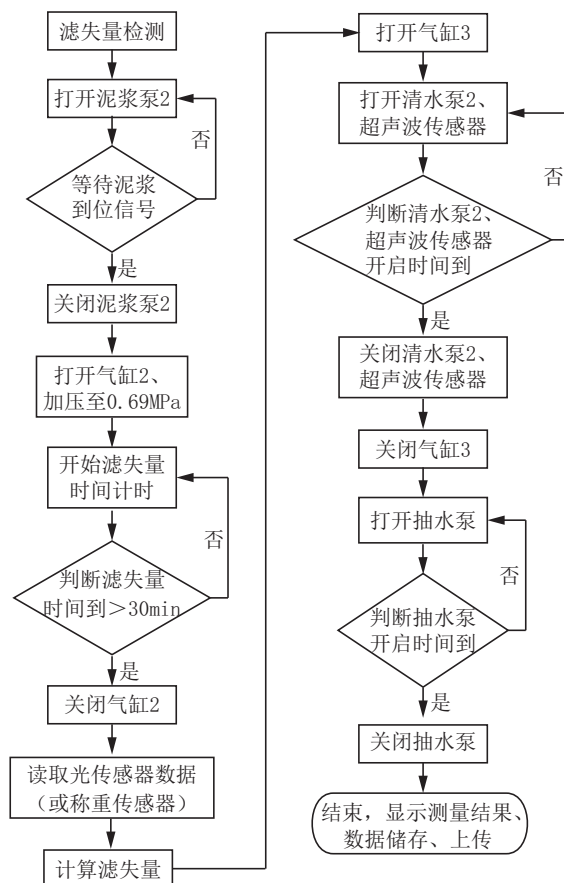


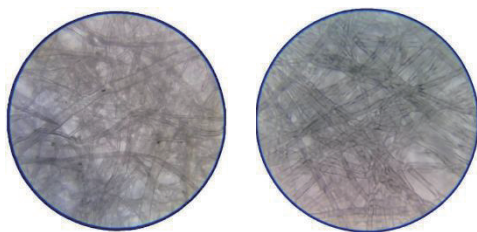
图4 泥浆滤失量自动测量工作流程

Fig.4 Automatic measurement workflow of mud filter loss

纸难度很大。通过研究API滤纸纤维交织方式与过滤特点,采用特殊工艺,经压延、双向拉伸等方法,研制了一种新型的微孔过滤材料,其表面形态呈无序微孔网状结构,孔隙分布不均匀且大小也不均匀,与API滤纸结构类似(如图5所示)。新型过滤材料表面能低,具有良好的非粘附能力,表面泥皮易于清洗;能耐120℃高温不变形;耐强酸、强碱、有机溶剂,pH值适用范围1~14;孔隙率 $\geq 85\%$;吸水率(23℃,24 h) $\leq 0.01\%$,遇水后不变形。

针对该过滤材料开展了大量的不同泥浆配方、不同滤失量条件下的对比试验。试验仪器为ZNS-1型中压滤失仪,对每一种配方的泥浆分别测量采用API滤纸和研制滤布时的滤失量,各测5次取平均值。试验数据见表1,测量结果对比见图6。

由表1和图6可以看出,研制滤布与API滤纸滤失量测量结果偏差绝对值 ≤ 0.9 mL,偏差百分率 $\leq 5\%$,性能接近API滤纸,测量结果和趋势基本吻合,满足替代API滤纸的要求。同时研制的滤布还具有



API滤纸放大图

研制滤布放大图

图5 API滤纸与研制的滤布微观结构

Fig.5 Detailed structure diagram of API filter paper and the developed filter paper

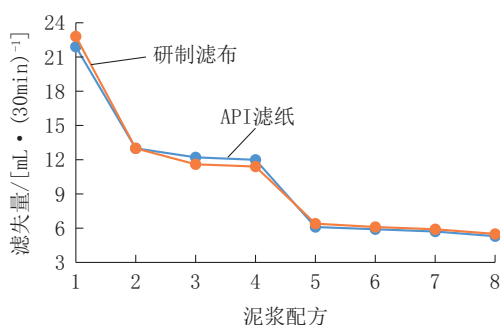


图6 不同配方条件下API滤纸与研制滤布试验结果对比

Fig.6 Comparison of experimental results between API filter paper and developed filter materials under different mud formulations

以下特点:

(1)对使用前后的滤布进行对比观察,其内部网状结构未发生改变,测量结果重复性好。

(2)易清洗,滤布上粘附的泥皮用清水冲洗30 s即可清洗干净,无残留,不影响下一回次的测量。

(3)耐腐蚀性好,使用寿命长,在添加不同泥浆处理剂的配方条件下试验,单片滤布最高使用400次后,仍未发生明显腐蚀、变形、破损等情况。

新型可重复使用替代型滤布的研制成功,为实现泥浆滤失量自动化测量奠定了基础^[20]。

3 装置试验

为检验研制的泥浆滤失量自动测量仪的可靠性和测量准确性,进行对比试验,采用不同泥浆配方,以密度、滤失量和含砂量3项指标为变量,对比自动测量与人工测量结果的差异性。根据地质岩心钻探现场常用泥浆性能指标范围^[24-26],将泥浆密度设计在1.03~1.25 g/cm³之间,漏斗粘度设计在18~35 s之间,含砂量设计在0.5%~2.0%之间,通过调节降失水剂加量,控制泥浆滤失量在20 mL/30 min以内。共配制9组不同配方的泥浆进行对比试验。

对每组泥浆的滤失量分别进行人工测量与自动测量,各重复测5次,取平均值,然后进行对比,试验数据如表2所示,结果对比如图7所示。

由表2及图7可以看出:自动测量与人工测量结果基本吻合,偏差值≤0.62 mL,偏差率≤4.82%。经分析,偏差产生原因主要有:

(1)人工肉眼读取量筒中滤液凹面刻度值时误差较大,且读数结果因人而异。而自动测量采用光传感器或称重传感器获取滤液体积数值,测量结果读取的重复性与精确性高于人工肉眼读数。

(2)自动测量时,罐体内压力通过传感器进行控制,控制精度高,且气压稳定,相比人工用打气筒

表1 API滤纸与研制滤布滤失量测量对比试验统计

Table 1 Comparison test statistics of filter loss measurement between API filter paper and developed filter material

泥 浆 配 方	密度/ (g·cm ⁻³)	pH 值	粘度/ s	滤失量/[mL·(30min ⁻¹)]			
				API 滤纸	研制 滤布	偏差值	偏差率/ %
(1)4%土	1.03	10	21	21.9	22.8	0.9	4.11
(2)4%土+0.10%HV-CMC	1.03	10	28	13.0	13.0	0	0
(3)4%土+0.15%HV-CMC	1.03	8	45	12.2	11.6	-0.6	-4.92
(4)4%土+0.2%HV-CMC	1.03	10	55	12.0	11.4	-0.6	-5.00
(5)4%土+0.1%HV-CMC+2%KHm+1.5%GPNH+1%护壁剂	1.03	10	35	6.1	6.4	0.3	4.92
(6)4%土+0.15%HV-CMC+2%KHm+1.5%GPNH+1%护壁剂	1.03	10	44	5.9	6.1	0.2	3.39
(7)4%土+0.2%HV-CMC+2%KHm+1.5%GPNH+1%护壁剂	1.03	10	56	5.7	5.9	0.2	3.51
(8)4%土+0.1%HV-CMC+2%KHm+1.5%GPNH+1%护壁剂 +0.375%PHP	1.03	10	74	5.3	5.5	0.2	3.77

表2 人工与自动测量试验对比统计

Table 2 Statistical table between manual and automatic measurement tests

试验编号	滤失量/mL			
	人工测量	自动测量	偏差值	偏差率/%
1	6.26	6.45	0.19	3.04
2	6.24	6.43	0.19	3.04
3	6.26	6.54	0.28	4.48
4	8.22	7.85	-0.37	-4.50
5	11.22	11.15	-0.07	-0.62
6	12.42	12.05	-0.37	-2.98
7	12.86	13.48	0.62	4.82
8	13.90	14.33	0.43	3.09
9	18.60	19.14	0.54	2.90

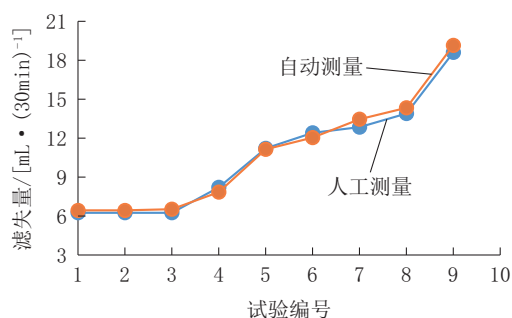


图7 人工与自动测量结果对比

Fig.7 Comparison between manual measurements and automatic measurements

加压、补压,自动测量时测试环境条件对结果影响较小。

综上,研发的泥浆滤失量自动测量仪测量精度与准确性满足钻探现场泥浆滤失量测试要求,可以用于替代人工测量。

4 结论与建议

(1)本文研制的泥浆滤失量自动测量仪,实现了泥浆滤失量的自动化测量、数据储存与无线传输、装置自动清洗等功能,有效降低了技术人员劳动强度,提高了数据测量可靠性和工作效率,可为我国今后实施深钻工程智能化提供技术支撑,是钻探信息化、自动化的核心技术装备。

(2)试验表明,本文研制的泥浆滤失量自动测量仪性能可靠,测量数值准确,精确度高,与人工手动测量结果相比误差 $<5\%$,满足钻探现场泥浆滤失

量测量的需要。

(3)本文研制的泥浆滤失量测量新型滤布,可替代一次性API滤纸,具有易清洗、可重复使用等优点。

(4)该研究成果解决了泥浆中压滤失量自动测量的关键技术“瓶颈”,下一步将针对超深孔、地热井钻探等高温高压环境下的泥浆滤失量自动测量开展研究,拓宽其应用范围。

参考文献(References):

- [1] 闫铁,许瑞,刘维凯,等.中国智能化钻井技术研究发展[J].东北石油大学学报,2020,44(4):15-21,6.
YAN Tie, XU Rui, LIU Weikai, et al. Research and development of intelligent drilling technology in China[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2020,44(4):15-21,6.
- [2] 李根生,宋先知,田守增.智能钻井技术研究现状及发展趋势[J].石油钻探技术,2020,48(1):1-8.
LI Gensheng, SONG Xianzhi, TIAN Shouceng. Intelligent drilling technology research status and development trends[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020,48(1):1-8.
- [3] 薛倩冰,张金昌.智能化自动化钻探技术与装备发展概述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):9-14.
XUE Qianbing, ZHANG Jinchang. Advances in intelligent automatic drilling technologies and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):9-14.
- [4] 翁竞.一种滤失量测定组件:CN210829238U[P].2020-06-23.
WONG Jing. Filter loss measuring assembly: CN210829238U [P]. 2020-06-23.
- [5] 李凡,李大奇,张国,等.一种改进型API滤失量测定仪:CN209231290U[P].2019-08-09.
LI Fan, LI Daqi, ZHANG Guo, et al. Improved API filter loss tester: CN209231290U[P]. 2019-08-09.
- [6] 张志财,刘保双,王忠杰,等.钻井液性能在线监测系统的研制与现场应用[J].钻井液与完井液,2020,37(5):597-601,607.
ZHANG Zhicai, LIU Baoshuang, WANG Zhongjie, et al. Development and field application of an online drilling fluid property monitoring system[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(5):597-601,607.
- [7] 朱恒银,王强,刘兵,等.5000m新型能源勘探智能钻探装备与技术研究[J].钻探工程,2022,49(1):110-119.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, LIU Bing, et al. Research on 5000m new energy exploration intelligent drilling equipment and technology[J]. Drilling Engineering, 2022,49(1):110-119.
- [8] 潘一,徐明磊,郭永成,等.智能钻井液的化学体系及辅助系统研究进展[J].精细化工,2020,37(11):2246-2254.
PAN Yi, XU Minglei, GUO Yongcheng, et al. Research progress on chemical system and auxiliary system of intelligent drilling fluids[J]. Fine Chemicals, 2020,37(11):2246-2254.

- [9] 蒋官澄,董腾飞,崔凯潇,等.智能钻井液技术研究现状与发展方向[J].石油勘探与开发,2022,49(3):577-585.
JIANG Guancheng, DONG Tengfei, CUI Kaixiao, et al. Research status and development directions of intelligent drilling fluid technologies [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022,49(3):577-585.
- [10] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Deep Core Drilling Technology and Management[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [11] 姚如钢,张振华,彭春耀,等.钻井液滤失造壁性能评价方法研究现状[J].钻井液与完井液,2016,33(6):1-9.
YAO Rugang, ZHANG Zhenhua, PENG Chunyao, et al. Status quo of methods for evaluating filtration performance and mud cake quality of drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016,33(6):1-9.
- [12] 鄢捷年.钻井液工艺学[M].东营:石油大学出版社,2001:366-369.
YAN Jienian. Drilling Fluid Technology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2001:366-369.
- [13] 张洁,刘宁,陈刚.钻井液静态/动态滤失性评价装置与方法研究[J].石油仪器,2014,28(2):50-54,9.
ZHANG Jie, LIU Ning, CHEN Gang. Study on evaluation apparatus and method of static/dynamic filtration of drilling fluid [J]. Petroleum Instruments, 2014,28(2):50-54,9.
- [14] GB/T 16783.1—2014,石油天然气工业 钻井液现场测试 第1部分:水基钻井液[S].
GB/T 16783.1—2014, Petroleum and natural gas industries—Field testing of drilling fluids—Part 1: Water-based fluids[S].
- [15] 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.
WANG Peng, LIU Wei, ZHANG Guo. Status quo and improvement suggestions of automatic monitoring equipment for drilling fluid performance[J]. Drilling and Production Technology, 2022,45(3):42-47.
- [16] 张勇,张长亮,李江,等.钻井液自动在线测量技术和应用介绍[J].石油化工自动化,2021,57(S1):141-145,162.
ZHANG Yong, ZHANG Changliang, LI Jiang, et al. Technology and application on introduction of automatic on-line measurement for drilling fluid [J]. Automation In Petro-Chemical Industry, 2021,57(S1):141-145,162.
- [17] 朱恒银,王强,冯建宇,等.一种泥浆滤失量自动测量装置:CN213275602U[P].2021-05-25.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, FENG Jianyu, et al. Automatic mud filter loss measuring device: CN213275602U[P]. 2021-05-25.
- [18] 朱恒银,王强,冯建宇,等.一种钻探泥浆性能多参数测量装置:CN214200204U[P].2021-09-14.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, FENG Jianyu, et al. Drilling mud performance multi-parameter measuring device: CN214200204U[P]. 2021-09-14.
- [19] 于倩倩,齐奔,黄子庚,等.滤失量实时监测装置:CN208187887U[P].2018-12-04.
YU Qianqian, QI Ben, HUANG Zigeng, et al. Filter loss real-time supervision device: CN208187887U[P]. 2018-12-04.
- [20] SY/T 5677—2019,钻井液用滤纸[S].
SY/T 5677—2019, Filter paper for drilling fluid[S].
- [21] 余娇,王迪,孙召霞,等.微纳米纤维复合滤纸的过滤性能研究[J].中国造纸,2021,40(3):27-34.
YU Jiao, WANG Di, SUN Zhaoxia, et al. Study on the filtration performance of micro-nano fiber composite filter paper[J]. China Pulp & Paper, 2021,40(3):27-34.
- [22] 杨圆坤,陶洪飞,马合木江·艾合买提,等.不同滤网条件的微压过滤冲洗池过滤性能研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(6):249-255.
YANG Yuankun, TAO Hongfei, Mahemujiang·AIHEMAITI, et al. Filtration performance of micro-pressure filtering and washingpool with different screen materials[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020,31(6):249-255.
- [23] 卫志美,刘振艳,王劲好,等.多种结构聚酰胺纤维过滤膜的制备及过滤性能[J].高分子材料科学与工程,2020,36(11):101-108.
WEI Zhimei, LIU Zhenyan, WANG Shaoyu, et al. Preparation and filtration performance of different structure polyether-sulfone fibrous membranes[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2020,36(11):101-108.
- [24] 乌效鸣,蔡记华,胡郁乐.钻井液与岩土工程浆材[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.
WU Xiaoming, CAI Jihua, HU Yule. Drilling Fluid and Geotechnical Slurry Material [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [25] 郭盛堂.高性能水基钻井液体系研制与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(11):26-29.
GUO Shengtang. Development and application of high performance water-based drilling fluid system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(11):26-29.
- [26] 付帆,陶士先,李晓东.绿色勘查高温环保冲洗液研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):129-133.
FU Fan, TAO Shixian, LI Xiaodong. Research on environment-friendly high-temperature drilling fluid for green exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):129-133.

(编辑 荐华)