

小口径岩心钻探冲洗液流量计研制与应用

洪毅^{1,2}, 万宇航¹, 宋永朋¹, 张所邦¹, 赵子栋^{1*}, 李永超¹, 肖雨¹, 陈敏¹

(1. 湖北鄂西新能源有限公司, 湖北宜昌 443100; 2. 宜昌市地质资源与地质工程重点实验室, 湖北宜昌 443100)

摘要:小口径岩心钻探过程中, 冲洗液流量监测困难。为了实时精确监测冲洗液流量, 及时发现钻进过程中异常流量变化并进行调节和处理, 确保钻头安全钻进, 防止烧钻和埋钻等孔内事故发生, 创新性地设计了一种基于浮子流量计基本结构、结合磁传导技术、可精确测量小口径冲洗液流量的流量计。分别设计了直线与环状刻度两种流量示数方案, 并对直线刻度磁传导错位进行了试验, 同时对浮子、锥管等主要零部件进行了参数优选试验。试验结果表明: 采用8颗磁体时, 主被动磁铁无错位现象; 浮子直径33.8 mm、锥管两端直径52/34 mm的流量检测数据趋于线性, 更适应实际需要。钻探现场应用情况表明: 该冲洗液流量计具有良好的精度、灵敏度、适应性和可靠性, 可实现孔内冲洗液流量的实时监测, 减少孔内事故发生。

关键词: 冲洗液流量计; 浮子流量计; 磁传导; 直线刻度; 环状刻度

中图分类号: P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0171-07

Development of drilling fluid flowmeter for small diameter core drilling

HONG Yi^{1,2}, WAN Yuhang¹, SONG Yongpeng¹, ZHANG Suobang¹,

ZHAO Zidong^{1*}, LI Yongchao¹, XIAO Yu¹, CHEN Min¹

(1. Hubei EXI New Energy Co., Ltd., Yichang Hubei 443100, China; 2. Yichang Key Laboratory of Geological Resources and Geological Engineering, Yichang Hubei 443100, China)

Abstract: During small-diameter core drilling, monitoring drilling fluid flow is challenging. To enable real-time and accurate monitoring of flow rate, promptly detect abnormal flow changes during drilling, facilitate timely adjustment and handling, ensure drill bit safety, and prevent downhole accidents such as bit burning and pipe sticking, an innovative flowmeter has been designed. Based on the fundamental structure of a float flowmeter and incorporating magnetic induction technology, this flowmeter can accurately measure drilling fluid flow in small-diameter drilling. Both linear and annular scale display schemes were designed for flow indication. Tests were conducted to address magnetic misalignment in the linear scale system, and parameter optimization experiments were carried out on key components such as the float and tapered tube. The results show that when eight magnets are used, no misalignment occurs between the active and passive magnetic assemblies. The flow measurement data exhibit a highly linear trend when using a float diameter of 33.8mm and a tapered tube with end diameters of 52mm and 34mm, making it more suitable for practical applications. Field tests in drilling operations demonstrate that this drilling fluid flowmeter offers high accuracy, sensitivity, adaptability, and reliability. It enables real-time monitoring of downhole drilling fluid flow, thereby helping to reduce the occurrence of downhole accidents.

Key words: drilling fluid flowmeter; float-type flowmeter; magnetic conduction; linear scale; annular scale

0 引言

小口径岩心钻探相较于油气钻井, 冲洗液流量

的监测更为困难, 一是井眼环空小, 冲洗液上返速度快; 二是由于井眼尺寸小, 循环系统压力大, 流量

收稿日期: 2025-06-13; 修回日期: 2025-08-12 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.026

基金项目: 湖北省地质局科技项目“钻孔流量计试验研制”(编号: KJ2017-14)

第一作者: 洪毅, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 探矿工程专业, 博士, 主要从事地热井及页岩气井的钻完井工程技术研究与管理工作, 湖北省宜昌市夷陵区夷兴大道35号, 710829272@qq.com。

通信作者: 赵子栋, 男, 汉族, 1993年生, 工程师, 探矿工程专业, 主要从事地热井及页岩气井的钻完井工程技术研究与管理工作, 湖北省宜昌市夷陵区夷兴大道35号, 854057772@qq.com。

引用格式: 洪毅, 万宇航, 宋永朋, 等. 小口径岩心钻探冲洗液流量计研制与应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 171-177.

HONG Yi, WAN Yuhang, SONG Yongpeng, et al. Development of drilling fluid flowmeter for small diameter core drilling [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 171-177.

监测更加困难。在现场施工时,供水不足或钻具刺漏等异常工况,易导致烧钻、埋钻等孔内事故^[1]。因此,冲洗液流量的精确测量是预防上述安全事故发生的重要手段。

国外已经研发了多款精确测量冲洗液流量的产品。斯伦贝谢、Geolog等公司均有依托钻井液进出口流量精确检测的早期井涌、井漏预警系统,系统主要服务于海上平台和国际高端市场(基于科里奥利质量流量计的早期井涌探测系统)。目前国内使用较广的有挡板流量计、超声波流量计、质量流量计、电磁流量计、声纳流量计等。挡板流量计精度不高^[2],超声波流量计受固相含量的影响较大^[3],电磁流量计只能测量导电流体^[4],声纳流量计虽有较好的精度和兼容性但成本较高^[5]。相较于上述流量计,浮子流量计具有结构简单、流量稳定、可测低流速介质等优点^[6]。其中金属管浮子流量计坚固可靠、测量稳定,与测量介质的参数无关,且采用新型材料及精密加工技术可以将其最大耐压、耐高温能力分别提高至100 MPa、300 ℃,测量精度可达±1%,可适用于小口径岩心钻探。

传统的金属管浮子流量计通过电磁感应耦合和机械连杆结构带动指针显示或者远传结构向远端输出,其弊端是机械磨损严重、精度低^[7]。此外,由于浮子为可动部件,当流体流速超过一定值或介质压力不稳时,浮子稳定性变差,容易发生跳动,严重影响作业安全^[8]。因此,目前多数流量计不适用小口径岩心钻探。本文基于浮子流量计基本原理,设计了一种小口径冲洗液流量计,并利用磁传导结构代替连杆结构,极大改善了机械磨损,精确度得到明显提高,能在高温高压等恶劣环境下监测冲洗液流量,通过试验验证了其可行性,具有广阔的应用前景。

1 冲洗液流量计工作原理

浮子流量计由一个锥形管和一个置于锥形管中可以上下自由移动、截面为圆形的浮子组成(见图1)。流量计本体两端用法兰连接或螺纹连接的方式垂直安装在测量管路上,使流体自下而上流过流量计,推动浮子。节流作用下两侧产生压差 ΔP ,使得浮子受到迎面的压差阻力,浮子在锥管中上升,流通面积 A 增大,环隙中流体的平均速度减小,直到该阻力与浮子的自重和浮力平衡时,浮子停留

在某一高度。体积流量 Q 与流通环形面积 ΔS 成正比,通过计算浮子高度 H 可得流通环形面积 ΔS 。

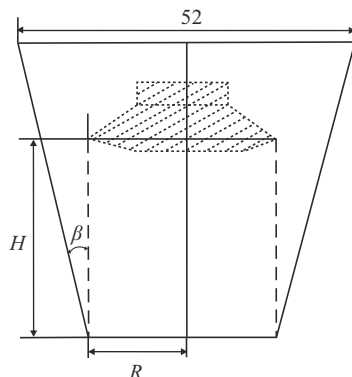


图1 锥管横截面示意

$$Q = V \cdot \Delta S \quad (1)$$

$$\Delta S = \pi (H \tan \beta + R)^2 - \pi R^2 \quad (2)$$

式中: Q ——体积流量, m^3/s ; V ——流体流速, m/s ; ΔS ——浮子最大外径与锥管内径的流通环形面积, m^2 ; H ——浮子在锥管内的上升高度, m ; β ——锥管的圆锥角, $(^\circ)$; R ——浮子的最大半径, m 。

2 流量计结构设计

2.1 直线刻度流量计结构设计

浮子可以在变量室内随着冲洗液流量的变化而上下移动,使导向管、浮子与磁力传导管构成的上浮机构随之移动,在某一位置上浮机构受浮力与其重力达到平衡(图2),此时浮子与变量室锥管间的流通环隙面积保持不变,浮子流量计的浮子位移与流量之间存在一定的函数关系,通过指针示数即可确定流量的大小。

2.1.1 磁传导结构设计

在上导管内安装磁铁元件,形成主动磁-浮子组件;在套管外部安装可移动磁铁元件,形成被动磁-显示组件;通过磁传导将浮子的位移传递给显示组件。在流体通过锥管时,主动磁-浮子组件发生位移,带动被动磁-显示组件同步位移,将浮子的位移通过显示组件显示。主动磁中间部位为同极,将被动磁对称排列,置于主动磁的中间部位(图3)。当主、被动磁铁有错位趋势时,主动磁的中间部位始终对被动磁铁存在吸力,两端对被动磁铁产生斥力作用,保证被动磁铁稳定在主动磁铁的中间,传导管与无磁导管不接触,避免发生摩擦。

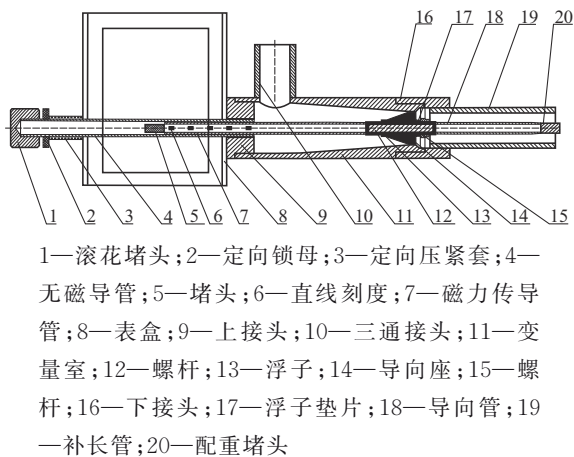


图2 直线刻度小口径钻孔流量计结构示意图

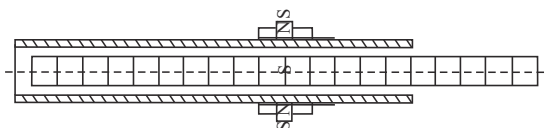


图3 直线刻度流量计磁传导

2.1.2 表盘显示设计

如图4所示,将检测的流量数据标记于对应的刻度盘,从而形成了流量的显示组件。直线刻度流量计的检测流量读数即为刻度尺读数^[9]。

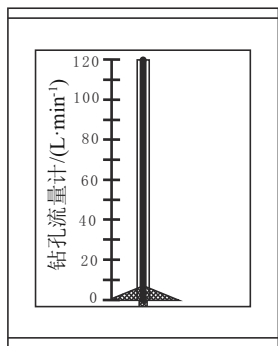


图4 直线刻度流量计仪表盘

2.2 环状刻度流量计结构设计

同理,由于浮子上升过程中带动磁力导向管向上移动,从而带动套管外刻度盘上的被动磁铁运动,刻度盘旋转,在某一位置上浮机构所受浮力与其重力达到平衡(图5),浮子流量计的浮子位移与流量之间存在一定的函数关系,达到平衡后通过指针示数即可确定流量的大小。

2.2.1 磁传导结构设计

如图6所示,主动磁从上至下依次均以同极对

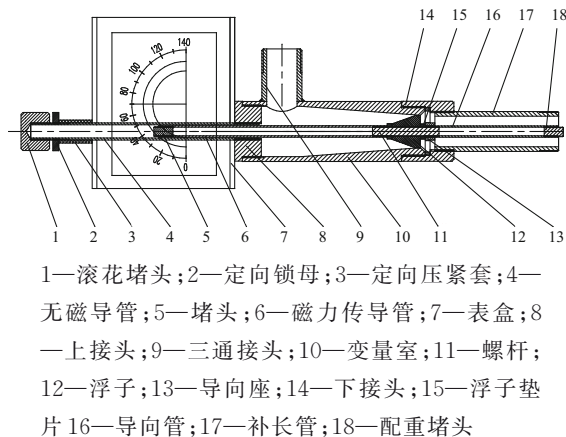


图5 环状刻度流量计

同极排列,被动磁安装在转动的圆盘上与主动磁保持垂直,当主动磁向上产生位移时,被动磁转盘随其转动,且主动磁与被动磁始终保持异性相吸。当主、被动磁铁有错位趋势时,主、被动磁的对位磁均存在吸力,而相邻的同性极磁均存在斥力,阻止了错位现象。

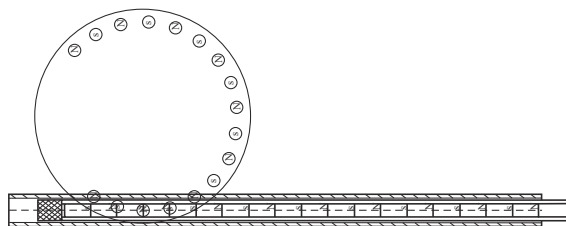


图6 环状刻度流量计磁传导

2.2.2 仪表盘结构设计

如图7所示,蔡崇和等^[10]根据锥管内有效行程为120 mm,设计的磁转盘圆周为240 mm,180 mm转盘圆周对应锥管内行程120 mm,转盘圆周设计为原设计的1.5倍。

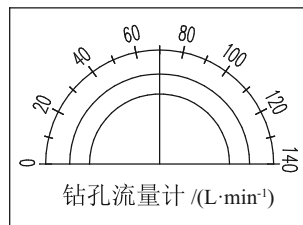


图7 环状刻度流量计仪表盘

2.3 浮子传导组件结构设计

为了使浮子沿锥管的中心线上下运动,浮子上、下均装有导管,上导管内装主动磁,下导管内装

配重。浮子在锥管中的高度和通过的环形截面的流量存在对应关系,从而形成浮子传导组件(图8)。

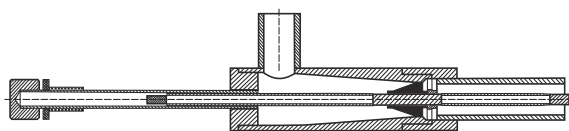


图8 浮子传导构件

3 流量计的室内试验

3.1 直线刻度磁力传导错位试验

试验条件:电子秤、磁力传导组装元件、细砂、用线连接的塑料杯。

试验内容:设计被动磁铁分别为2、4、6、8颗(图9)进行静、动态试验,分别测出磁传导的最大承重值和在瞬停、快速往返运动中,主、被动磁错位情况。

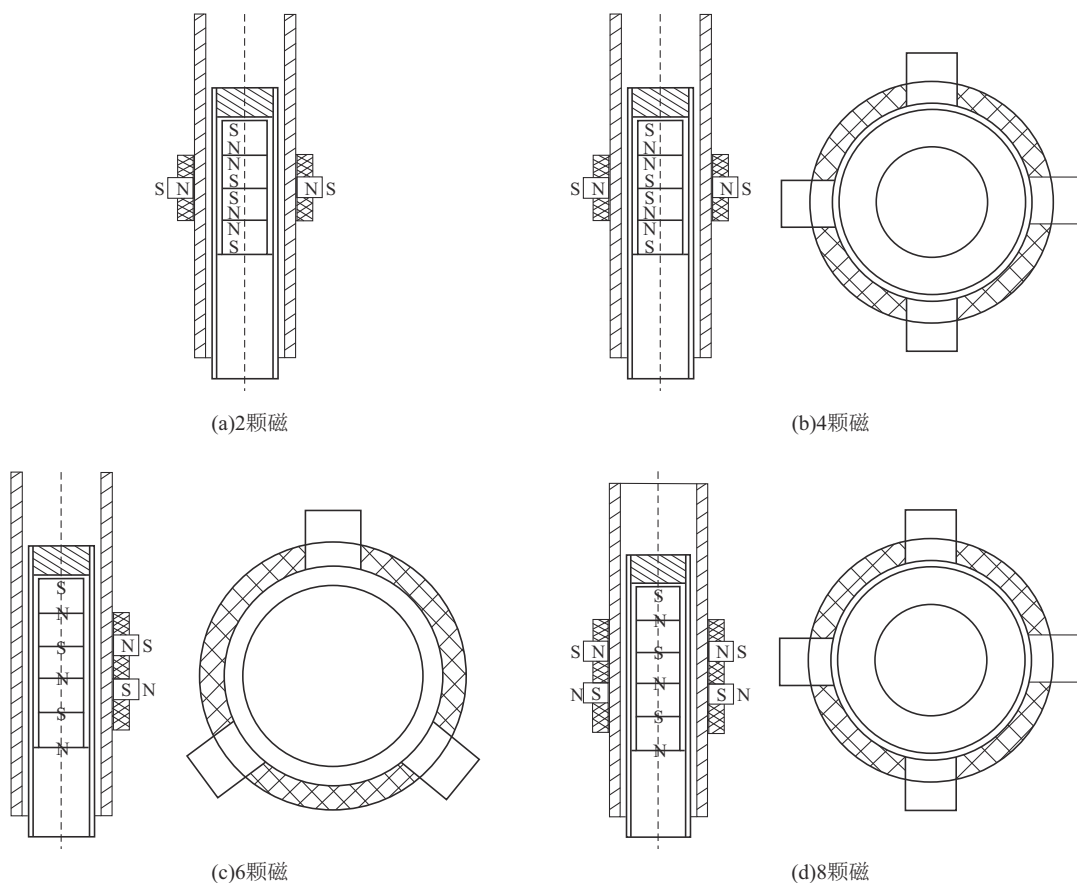


图9 被动磁铁数量

试验步骤(静态):(1)将磁力传导元件按原理图进行加工、组装,将其倒立放置,同时将主、被动磁铁安放在对应位置;(2)将塑料杯用线系在外部磁铁元件上;(3)向塑料杯内缓缓不断地加入细砂,直至主、被动磁铁元件错位、脱落;(4)称量脱落时的砂、连接线、塑料杯的质量总和,作为磁传导最大承重值。

试验步骤(动态):(1)将磁力传导元件按原理图进行加工、组装,将其垂直放置,同时主、被动磁铁安放在对应位置;(2)人工快速移动浮子总成,往

返速度3 m/s左右,运行至刻度盘中间部位后突然停止,观察主、被动磁铁是否错位;(3)统计主、被动磁铁错位现象发生的次数。

试验结论:当磁铁数为8颗时,被动磁铁磁传导承重达到最大值726 g,在瞬停和快速往返运动中,无主、被动磁错位现象,因此,将8颗被动磁的设计确定为最终方案。

3.2 主要部件优选试验

试验条件:BW-250型泥浆泵、清水、秒表、500 kg电子秤、水箱等。

试验步骤:(1)安装BW-250型泥浆泵、水箱、电子秤等设施,组成流量检测平台;(2)将检测组件安装至泥浆泵上,启动泥浆泵至正常工作状态;(3)对设定时间内流入水箱中的水量进行称重。通过改变回水量和挡位来调节泥浆泵工作流量,分别调至20、40、60、80、100、120、140 L/min,对被动磁铁的位移进行测量,记录数据;(4)对不同设计的主要部件的位移测量数据进行比较,选择最佳的结构设计组合。

3.2.1 浮子直径、锥管锥度优选

试验内容:分别进行浮子直径34 mm、锥管两端直径52/34 mm(1号),浮子直径35 mm、锥管两端直径58/35 mm(2号),浮子直径33.8 mm、锥管两端直径52/34 mm(3号)进行试验,使处于相同挡位、不同流量中,测被动磁铁位移与前后位移差值,根据所测数据(表1),绘制折线图(图10)。

表1 浮子直径、锥管的锥度选择试验数据

1号			2号			3号		
流量/ (L· min ⁻¹)	位 移/ mm	差 值/ mm	流量/ (L· min ⁻¹)	位 移/ mm	差 值/ mm	流量/ (L· min ⁻¹)	位 移/ mm	差 值/ mm
0	0		0	0		0	0	
20	16	16	20	13	13	20	18	18
40	32	16	40	28	15	40	39	21
60	52	20	60	46	18	60	57	18
80	72	20	80	64	18	80	73	16
100	92	20	100	82	18	100	89	16
120	112	20	120	100	18	120	104	15

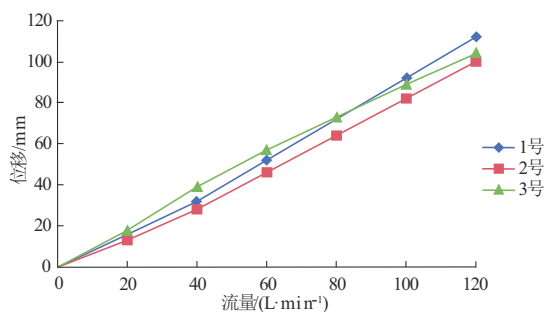


图10 浮子直径、锥管的锥度选择试验折线图

试验表明:浮子直径为33.8 mm、锥管两端直径为52/34 mm(3号),随着流量以相同幅度增加,位移变化基本保持相同,优选该类型。

3.2.2 浮子形状优选

试验内容:设计A、B型浮子(图11),两浮子直径均为33.8 mm,锥管两端直径为52/34 mm,在同一挡位、不同流量下试验,测被动磁铁位移和前后位移差值,并根据所测数据(表2),绘制折线图(图12)。试验结果:优选浮子形状为A,差值整体较小,波动较小,更符合流量的线性变化。

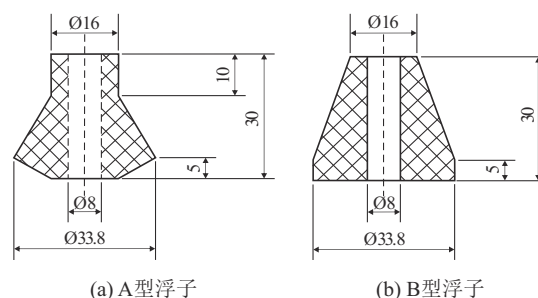


图11 浮子设计

表2 浮子形状的选择试验数据

浮子形状 A			浮子形状 B		
流量/(L· min ⁻¹)	位移/ mm	差值/ mm	流量/(L· min ⁻¹)	位移/ mm	差值/ mm
0	0		0	0	
20	18.5	18.5	20	18	18
40	37	18.5	40	39	21
60	53.5	16.5	60	57	18
80	69	15.5	80	73	16
100	87	18	100	89	16
120	101	14	120	104	15

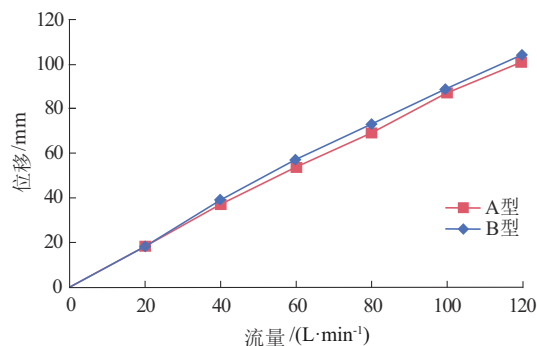


图12 浮子形状选择试验折线图

3.2.3 内、外导管优选

试验内容:以浮子直径33.8 mm、锥管两端直径52/34 mm、浮子形状A,在清水中,取直线刻度内管直径为12 mm、外管直径为18 mm和环状刻度内管

直径为10 mm、外管直径16 mm在不同流量下进行试验,记录被动磁铁位移与前后位移差值(表3)。结果表明:直线刻度流量计内、外管直径分别为12、18 mm,环状刻度流量计内、外管直径分别为10、16 mm(图13)时,随着流量以相同幅度增加,每一级流量之间的位移变化差值基本保持相同,环状刻度流量计较优。

表3 内、外导管设计选择试验数据					
直线刻度内径12 mm、 外径18 mm			环状刻度内径10 mm、 外径16 mm		
流量/(L· min ⁻¹)	位移/ mm	差值/ mm	流量/(L· min ⁻¹)	位移/ mm	差值/ mm
0	0		0	0	
20	12	12	20	16	16
40	32	20	40	34	18
60	48	16	60	52	18
80	62	14	80	67	15
100	78	16	100	82	15
120	89	11	120	94	12
140	101	12	140	106	12

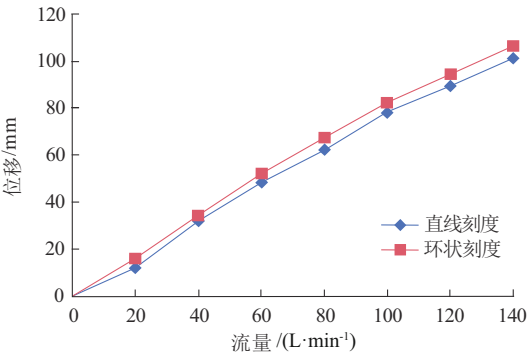


图13 内、外导管设计优选试验

3.2.4 浮子总成质量的确定

试验内容:分别对直线、环状刻度流量计取浮子总成质量分别为305.1、244.1和354.1 g,在同一挡位、不同流量下进行试验,记录被动磁铁在直线(表4)、环状刻度流量计的位移与差值(表5)。

结果表明:在浮子的配重管内加入配重体,解决了因浮子总成质量不一致导致测量过程中检测数据刻度不统一的问题。随着流量以相同幅度增加,位移变化基本保持相同,确定浮子总成质量为305.1 g的直线刻度流量计和浮子总成质量244.1 g的环状刻度流量计较优,见图14、图15。

表4 直线刻度流量计浮子总成质量试验								
浮子总成质量 305.1 g			浮子总成质量 244.1 g			浮子总成质量 354.1 g		
流量/ (L· min ⁻¹)	位 移/ mm	差 值/ mm	流量/ (L· min ⁻¹)	位 移/ mm	差 值/ mm	流量/ (L· min ⁻¹)	位 移/ mm	差 值/ mm
0	0		0	0		0	0	
20	15	15	20	16	16	20	12	12
40	31	16	40	34	18	40	28	16
60	47	16	60	52	18	60	46	18
80	63	16	80	67	15	80	61	15
100	78	15	100	85	18	100	79	18
120	93	15	120	97	12	120	91	12
140	105	12	140	109	12	140	103	12

表5 环状刻度流量计浮子总成重量的试验								
浮子总成质量 305.1 g			浮子总成质量 244.1 g			浮子总成质量 200.1 g		
流量/ (L· min ⁻¹)	位 移/ mm	差 值/ mm	流量/ (L· min ⁻¹)	位 移/ mm	差 值/ mm	流量/ (L· min ⁻¹)	位 移/ mm	差 值/ mm
0	0		0	0		0	0	
20	14	14	20	16	16	20	18	18
40	30	16	40	33	17	40	35	17
60	48	18	60	50	17	60	53	18
80	62	14	80	65	15	80	68	15
100	78	16	100	80	15	100	86	18
120	90	12	120	94	14	120	99	13
140	102	12	140	108	14	140	111	12

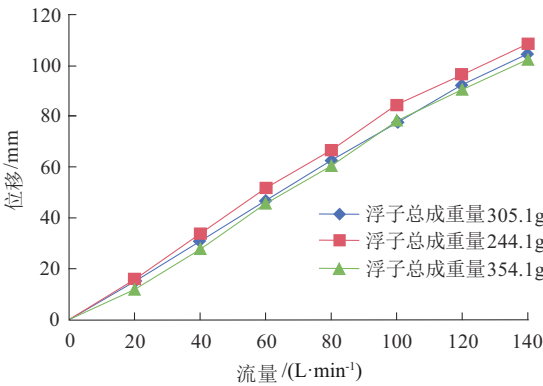


图14 直线刻度流量计浮子总成质量

4 流量计现场试验

如图16、图17所示,根据野外生产实际情况,在宜昌磷矿北部整装勘查项目竹园沟-下坪矿区的

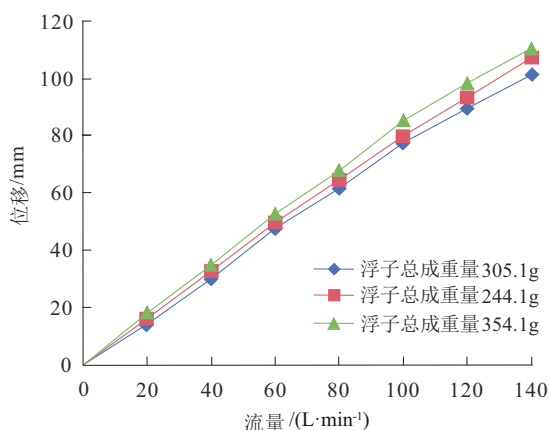


图15 环状刻度流量计浮子总成质量

ZK3211、ZK3008、ZK3212孔,兴山育林矿区的ZK1014孔和小阳坪矿区ZK105孔进行现场试验。



图16 直线刻度流量计



图17 环状刻度流量计

试验条件:根据实际生产需要选择冲洗液材料、配方及性能参数。1%聚丙烯酰胺+5%腐植酸钾+5% SW 植物胶+3%磺化沥青。冲洗液性能:密度 1.01 g/cm^3 ,漏斗黏度 $18\sim 21 \text{ s}$,表观黏度 $42 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

试验内容:将钻孔流量计安装于野外机台,观察在钻探施工中流量计是否出现错位、卡死、断指针和渗漏问题。

试验结论:流量计能准确测量注入孔内流量,无渗透,未出现错位、卡死现象。

5 结论

本文针对小口径岩心钻探中冲洗液流量监测

困难的问题,依据浮子流量计结构、磁传导原理设计了一种冲洗液流量计,进行室内试验优选了主要部件的相关参数,制作了样机并进行了现场试验,取得主要成果如下:

(1)设计了直线、环状刻度流量计仪表盘,并进行了直线刻度磁传导错位的静、动态试验,试验表明直线刻度流量计仪表盘精度高、稳定性好。

(2)针对浮子直径、锥管锥度和直线刻度、环状刻度的浮子总成质量等主要部件参数进行了优选试验,试验结果显示浮子直径 33.8 mm 、锥管两端直径 $52/34 \text{ mm}$ 时检测数据波动小,更趋于线性变化,性能最好。直线刻度流量计浮子总成质量为 305.1 g 、环状刻度流量计浮子总成质量为 244.1 g 时,试验结果最好,精度最高。

(3)现场试验表明研制的冲洗液流量计灵敏度高,测量误差小,指示清晰明确,无渗透,耐高压且不会出现错位、卡死现象。

(4)因小规模室内和室外试验不足以说明问题,建议开展大范围野外验证试验,并在实践中发现问题、改进设计。

参考文献:

- [1] 朱冬钰,赵娟,王海滨.浅谈岩心钻探烧钻事故及预防措施[J].地质装备,2020,21(3):44-46.
- [2] 王振淮.简易电动档板流量计[J].自动化与仪表,1989,(1):50-52.
- [3] 邓凯.基于时差法超声波流量计的设计与研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [4] 杨双龙,徐科军,梁利平,等.基于DSP的浆液型电磁流量计的研制[J].仪器仪表学报,2011,32(9):2101-2107.
- [5] 蔡武昌.流量仪表应用和发展若干动态[J].自动化仪表,2006,(7):1-7.
- [6] 宁新宇.浮子流量计的设计与应用[J].南方金属,2019(2):47-50.
- [7] 栾晓东,陈博宇,沈峰,等.采用磁平衡结构的金属管浮子流量计[J].科技创新与应用,2017(1):17.
- [8] 翟孝伟,崔宝,孙俊杰.基于工业需求的浮子流量计选型策略[J].计量与测试技术,2025,51(5):58-61.
- [9] 蔡崇和,王爱军,谭建国,等.一种带有直线刻度的小口径钻孔流量计:CN208043135U[P].2018-11-02.
- [10] 蔡崇和,王爱军,谭建国,等.一种带有环状刻度的小口径钻孔流量计:CN207946122U[P].2018-10-09.

(编辑 王跃伟)