

绳索取心钻进钻杆防垢除垢系统的研究

赵建刚^{1,2}, 许云博^{1*}, 石凯¹, 李慧想¹, 王雪竹¹, 魏瑞¹, 李进¹

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 本文针对金刚石绳索取心钻进过程中钻杆内壁结垢影响岩心顺利打捞的问题, 在借鉴国内外研究成果的基础上, 系统梳理了影响钻杆内壁结垢的主要因素, 编制了可以方便、快捷地计算结垢指数 I 和临界通径 D_c 的计算程序系统, 系统可根据计算结果提出相应的防垢除垢措施。在工程中进行了现场应用, 为现场钻探工程师进行防垢除垢、确保钻探安全高效进行提供了有益的科学指导。

关键词: 防垢除垢; 结垢指数; 临界通径; 绳索取心钻进; 计算程序

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2024)S1-0222-04

Research on scale prevention and removal system for drill pipe of wire-line core drilling

ZHAO Jiangang^{1,2}, XU Yunbo^{1*}, SHI Kai¹, LI Huixiang¹, WANG Xuezhu¹, WEI Rui¹, LI Jin¹

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: This article focuses on the problem of scaling on the inner wall of the drill pipe during the diamond wire-line coring drilling process, which affects the smooth salvage of the core. Based on the research results at home and abroad, the main factors affecting the scaling on the inner wall of the drill pipe are systematically sorted out, and a calculation program that can conveniently and quickly calculate the scaling index I and critical diameter D_c is developed. It has been applied on site in scientific drilling projects, providing useful scientific guidance for on-site drilling engineers to prevent scaling and ensure safe and efficient drilling.

Key words: scale prevention and removal; scaling index; critical diameter; wire-line coring; calculation program

0 引言

绳索取心钻进与普通钻进方法相比, 由于不需要将钻杆提升到孔外, 大大节约了起下钻具时间, 具有钻探效率高、生产成本低和取心效果好等优点, 在小口径岩心钻探中得到了广泛应用。

金刚石绳索取心钻进过程中, 泥浆中的各种固相微粒在钻杆高速旋转所造成的离心力场的作用下, 会不断沉积于钻杆内壁上, 形成所谓的“泥垢”

(或称“泥皮”), 导致钻杆实际的内径(又称“流动通径”)的缩小。这一现象, 被称为钻杆内壁结垢效应。当钻杆内壁结垢超过一定厚度时, 打捞器或携带岩心的取心管在钻杆内的上下运动将会受阻, 这时可能不得不提出几根或数十根带结垢的钻杆后, 才能进行岩心的打捞工作, 大大影响了钻进效率。

绳索取心钻进钻杆内壁上的泥垢, 是泥浆内的固相物质(如粘土颗粒、岩粉、未完全溶解的化学处

收稿日期: 2024-07-02; 修回日期: 2024-08-05 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.033

基金项目: 国家科技部重大仪器设备开发专项“超高温高压钻井液流变仪的研发及产业化”(编号: 2012YQ050240); 中国地质调查局地质调查项目“战略性矿产资源调查评价——绿色勘查钻探应用示范”(编号: DD20240122)

第一作者: 赵建刚, 男, 汉族, 1969年生, 正高级工程师, 从事钻井液和固井水泥测试仪器方面研发工作, 北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)院内探工楼602室, 2446526534@qq.com。

通信作者: 许云博, 女, 汉族, 1980年生, 工程师, 探矿工程专业, 从事钻井液和固井水泥测试仪器方面研发工作, 北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)院内探工楼602室, 1612629607@qq.com。

引用格式: 赵建刚, 许云博, 石凯, 等. 绳索取心钻进钻杆防垢除垢系统的研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 222-225.

ZHAO Jiangang, XU Yunbo, SHI Kai, et al. Research on scale prevention and removal system for drill pipe of wire-line core drilling [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 222-225.

理剂、絮凝物)以及其他各种固体微粒在钻杆内壁上的沉积物。泥浆中的这些固相颗粒由于离心力的作用,被甩向管壁,不断沉积和压实,加之各种粘土颗粒和有机聚合物的粘结作用,沉积物将逐渐脱水而变得十分结实,并牢固地粘在钻杆内壁上^[1-5]。因此,在打捞器下放或内管提升时,无论冲击或提拉,往往难以通过垢层的障碍,不仅降低钻进效率,同时增加上下钻具辅助时间。

在钻探现场,防垢除垢是绳索取心钻进的难题之一,如果能够方便、快捷地预测钻杆结垢和由此导致的取心管打捞受阻风险,并提供合理的防垢除垢措施建议,无疑会减少打捞受阻风险,大大提高钻探效率。

1 泥浆冲蚀作用与结垢关系

众所周知,泥浆在钻杆内以恒排量流动时,其流速将随通道直径变小而增大,雷诺数也将升高。绳索取心钻杆内平均流速一般为0.1~0.5 m/s,结垢前的流态常为层流,对钻杆内壁几乎没有冲蚀作用,管壁结垢将自然发展而不受抑制。但是,当钻杆内壁上的垢层发展到雷诺数达到临界值时,钻杆内的泥浆将由层流转变为紊流。紊流流态下的质点运动是无序的,除了宏观的轴向流动外,还存在微观的径向紊动,径向紊动动量将随雷诺数的增大而急剧增长。这样,对钻杆内壁结垢效应产生了下述两个方面的作用:

(1)质点的紊乱流动部分抵消了离心力场的影响,沉降作用不按正常进行,一些层流中原来极易沉降的颗粒,在紊流下难于结垢,延伸了结垢长度。

(2)同时,由于流体的径向冲蚀,各种颗粒不断冲击泥垢,使其表面不断冲刷剥蚀,直至通径扩大到雷诺数降低至临界值为止。

这一水力学原理,能被用来控制泥垢的形成,包括两种方式:

(1)控制泥浆流态为紊流,抑制颗粒的沉降,达到除垢防垢的目的;

(2)当管壁出现泥垢时,增大排量或降低流变参数(用清水稀释泥浆或用离心机等各种设备除去泥浆中部分固相颗粒),人为地提高雷诺数,以增强径向冲蚀作用,来清除钻探内壁上的泥垢。

由于雷诺数与冲蚀能力呈非线性关系,直观判断困难。所以还需要引用临界通径概念,来定量评

价冲蚀范围和结垢稳定后的自然通径的大小。

2 临界通径的研究

2.1 临界通径的概念

所谓临界通径,即是雷诺数为临界值时的通道直径。

2.2 临界通径的计算公式

根据有关资料和文献^[6],可以得到计算临界通径 D_c 的隐函数式,如式(1)所示:

$$A^4 D_c^{16} - 28 A D_c^4 + 48 A^{1/2} D_c^2 + 21 B D_c - 21 = 0 \quad (1)$$

$$A = \frac{\pi^2 R_{e.c} \tau_c}{128 \rho_m Q^2}, B = \frac{\pi R_{e.c} \eta_c}{4 \rho_m Q}$$

式中: τ_c ——钻井液卡森屈服值,Pa; η_c ——钻井液卡森塑性粘度,Pa·s; ρ_m ——钻井液密度,kg/m³;Q——泥浆泵排量,m³/s; $R_{e.c}$ ——临界雷诺数,无因次,是泥浆层流与紊流相互转换的临界值,视条件在2000~4000范围内选取,常取值为2100。

临界通径 D_c 的计算使用了牛顿迭代法,计算过程为:

首先由已测得的参数和计算出的流变参数(τ_c 、 η_c)计算出A、B两个系数,并代入方程中求得方程的各个系数。并设 $D_c = X$, $a_1 = A^4$, $b_1 = -28A$, $c_1 = 48A^{1/2}$, $d_1 = 21B$,则可将原方程转化为下面的函数^[2]:

$$f(X) = a_1 X^{16} + b_1 X^4 + c_1 X^2 + d_1 X - 21 \quad (2)$$

由式(2)可得其偏微分方程为:

$$f'(X) = 16a_1 X^{15} + 4b_1 X^3 + 2c_1 X + d_1 \quad (3)$$

由牛顿迭代法可得迭代公式:

$$X_{k+1} = X_k - [f(X_k)/f'(X_k)] \quad k=0,1,2,3 \quad (4)$$

取 $X_0 = D$, (D 为钻杆内径)代入迭代公式,进行迭代计算,直到 $|X_{k+1} - X_k| \leq 0.00000001$ 为止,则临界通径 $D_c = X_{k+1}$ 。

2.3 临界通径的影响因素及其调节

影响临界通径的因素有:排量Q,卡森粘度 η_c ,卡森屈服值 τ_c 和泥浆密度 ρ_m ,与管径无关。

排量Q是最容易调节的参量,Q大, D_c 也大;

提高 η_c 和 τ_c 或提高其中任意一个,都可明显降低 D_c ,两参数中以 τ_c 的影响为大。

4个因素中, η_c 和 ρ_m 主要受泥浆固相的影响, η_c 还与所用的材料有关, ρ_m 值过高易引起循环漏失,因而可调范围受到限制。最容易调节的因素是 τ_c 和Q。降低 τ_c ,往往伴随着静切力下降,有利于地表的

岩屑沉降。

3 泥浆结垢特性的评价与结垢指数

结垢特性是绳索取心钻进泥浆的重要指标之一。众所周知,在取心钻具的钻杆内壁与岩心管外壁之间实际上存在着一定的间隙 δ_c :

$$\delta_c = 1/2(D - D_0) \quad (5)$$

式中: D ——钻杆内径; D_0 ——岩心管外径。

如果在回次时间 T_c 内,生成的泥垢厚度 $\neq \delta_c$,则岩心打捞作业将不会出现障碍。因此,可以根据这一条件来评价泥浆的结垢特性。根据有关资料和文献^[6-7],可以得到结垢指数 I 的计算公式:

$$I = \frac{\pi^2(\rho_s - \rho_m)DN^2T_c}{16200\xi\eta_c(D - D_0)} \cdot \frac{C_s}{\rho_s} \cdot \sum_{i=1}^m P_i d_{si}^2 \quad (6)$$

式中: ρ_s ——岩屑密度, kg/m^3 ; ρ_m ——钻井液密度, kg/m^3 ; D ——钻杆内径, m ; D_0 ——岩心管外径, m ; N ——转杆转速, r/min ; T_c ——回次时间, s ; C_s ——总固相含量, kg/m^3 ; η_c ——钻井液卡森塑性粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; d_{si} ——固相粒径, m ; P_i ——固相粒径所占质量百分比,无因次; ξ ——一个仅与比流核 φ 有关的常数,并且 $\xi \geq 1$ 。

其中,钻井液和岩屑密度(ρ_m, ρ_s)、钻杆内径(D)、岩心管外径(D_0)、钻杆转速(N)、回次时间(T_c)、固相含量(C_s)、以及固相粒径(d_{si})及其质量百分比(P_i)都可由现场测量获得,流变参数 ξ 和 η_c 还要经过一些计算得到。

η_c 为钻井液卡森塑性粘度,由下式计算:

$$\eta_c = [0.03779(R_{600}^{1/2} - R_{100}^{1/2})]^2 \quad (7)$$

其中, R_{600} 和 R_{100} 分别为钻井液在600和100转时的读数。

ξ 计算过程:

$$\Pi = \pi D^3 \tau_c / (32Q\eta_c) \quad (8)$$

当 $\Pi \geq 5$ 时,可用以下近似公式计算,其相对误差 $\neq 0.5\%$:

$$\varphi^{1/2} = \frac{24 - (441/\Pi - 12)^{1/2}}{28 - 21/\Pi} \quad (9)$$

由式(9)计算出比流核 φ 之后,将其代入下式中,即可求出 ξ :

$$\xi = 21 / (21 - 48\varphi^{1/2} + 28\varphi - \varphi^4) \quad (10)$$

将以上参数代入式(6)中,即可计算出结垢指数 I 。

影响结垢特性的主要参数是转速、颗粒浓度、

颗粒大小及其级配,此外还有打捞岩心的回次时间。虽然提高粘度和降低排量,也有助于缓解结垢现象,但收效不明显,却带来许多其他困难。

4 防垢除垢专家系统设计与使用

4.1 计算程序的设计

我们使用可视化编程语言 Visual Basic 6.0 设计了结垢指数 I 和临界通径 D_c 计算程序系统——“防垢除垢专家系统”。该系统具有以下功能:

- (1)各个参数现场输入;
- (2)保存现场参数至计算机硬盘;
- (3)提取上次保存的参数;
- (4)自动计算和显示结垢指数 I 和临界通径 D_c ;
- (5)根据计算结果提出相应的防垢、除垢措施。

4.2 系统的使用方法

防垢除垢专家系统的使用界面如图1所示,使用者既可以自己输入每个参数,也可以单击“提取上次参数”按钮,自动输入每个参数,然后再修改个别参数;单击“保存本次参数”按钮,就将本次参数保存在磁盘中,以备以后直接调用;单击“计算结垢指数 I 和临界通径 D_c 参数”按钮,则计算以上两参数,并根据两参数计算结果,提出相应的防垢除垢措施,具体如图2所示。



图1 科学钻探钻杆防垢除垢专家系统

当单击“结束运行”按钮时,结束程序运行。

本系统程序已全部调试完毕,并对多组实验数据进行了计算(见表1);同时已将程序打包发行,运行里面的安装程序,就可在“开始-程序-防垢除垢专家系统”程序组中创建启动程序,用户只需单击即可启动运行该程序系统。

该系统先后在大庆汶川科学钻探、松科1井等重大工程及山东、青海、甘肃、黑龙江、河南等能源

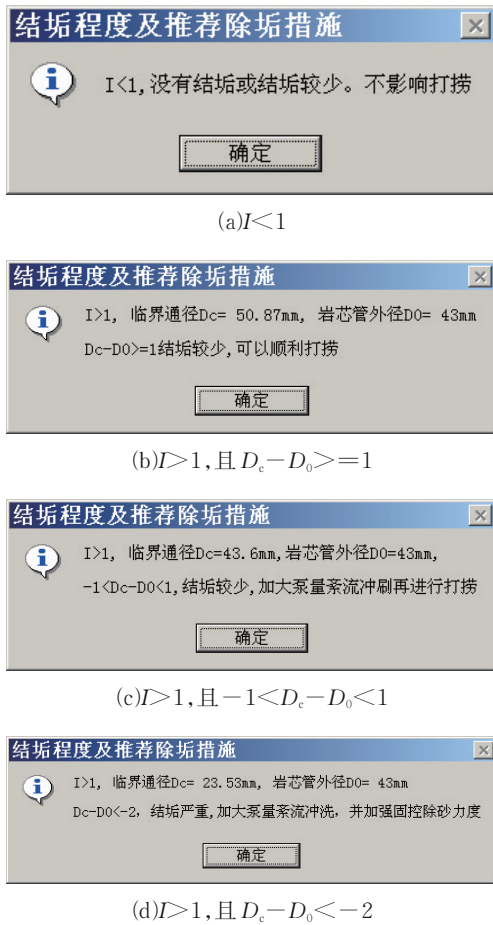


图 2 不同计算结果显示界面

资源勘查工程进行了现场应用^[8-11], 现场钻探工程师可以快捷方便地计算结垢指数 I 和临界通径 D_c , 为现场进行防垢除垢提供技术指导, 避免了不必要的安全事故, 确保钻探安全高效进行。

5 结论

钻杆内壁结垢是影响绳索取心钻进效率的重要因素, 将钻探现场测量获得的泥浆密度 ρ_m 、岩屑密度 ρ_s 、钻杆内径 D 、岩心管外径 D_0 、钻杆转速 N 、回次时间 T_c 、固相含量 C_s 、固相粒径 d_{s1} 及其质量百分比 P_1 , 以及计算获得的流变参数 ξ 和 η_c 输入专门编制的结垢指数 I 和临界通径 D_c 的计算程序, 可以方便、快捷地计算和显示以上两个参数, 并根据两个参数计算结果, 给出是否可以顺利打捞岩心管及相应的防垢除垢措施, 指导绳索取心钻进安全、高效进行。

表 1 一些典型泥浆的临界通径计算 ($R_{cc}=2100$)

泥浆类型	流动条件				临界通径 D_c /mm
	$R_{600}/$ (Pa·s)	$R_{100}/$ Pa	$\rho/$ (kg·m ⁻³)	$Q/$ (m ³ ·s ⁻¹)	
典型的低固相泥浆	18.3	5.8	1030	0.00025	14.88
				0.0005	23.53
J01 低固相泥浆	7.5	1.5	1030	0.00025	30.15
				0.0005	49.70
B01 低固相泥浆	33.0	7.5	1030	0.00025	10.12
				0.0005	18.67
J02 低固相泥浆	16.0	3.0	1010	0.00025	18.05
				0.0005	32.74
B02 低固相泥浆	14.0	4.5	1010	0.00025	16.83
				0.0005	26.22
2% LBM 泥浆	6.4	1.3	1020	0.00025	32.73
				0.0005	53.33
1.5% LBM 泥浆	5.1	1.0	1020	0.00025	39.99
				0.0005	65.21
1% LBM 泥浆	3.9	0.7	1010	0.00025	50.88
				0.00033	62.59
清水	2.0	0.33	1000	0.00042	73.23
				0.00025	151.57
				0.0005	303.15

参考文献:

- [1] 陶士先, 汤松然, 彭步涛. 绳索取心钻杆内壁结垢机理与防治[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(S1): 155-159.
- [2] 李恩海. 绳索取心钻杆内壁结垢原因分析与对策[J]. 中国煤田地质, 1989, 1(3): 3.
- [3] 邓清松, 张中. 绳索取心钻杆内壁泥皮的成因及预防[J]. 四川地质学报, 2013, 33(A1): 138-139.
- [4] 张培丰. 科学钻探绳索取心钻进泥浆膨润土分散机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2007: 14, 52.
- [5] 杨亿. 绳索取心钻进钻杆内壁结垢及其泥浆体系的选型分析[J]. 科技信息, 2011(12): 383-389.
- [6] 汤松然. 绳索取心钻进泥浆[Z]. 1988: 52-63.
- [7] 汪仲英, 汤松然. 钻杆内壁的结垢效应与临界流动通径的计算[C]. 中国地质学会第一次全国钻井液学术会议. 1986: 15-25.
- [8] 李宽, 李鑫森, 韩丽丽. 绳索取心钻杆内壁结垢成因与预防及清理装置的研发[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(2): 5.
- [9] 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.
- [10] 冯美贵, 翁炜, 刘家荣, 等. 雄安新区地热 D20 井钻井液固相循环系统应用分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10): 38-42.
- [11] 郑文龙, 乌效鸣, 吴笛, 等. 深部盐岩层绳索取心钻井液技术研究与应用[J]. 地质与勘探, 2015, 51(5): 977-983.

(编辑 王文)