

钻井液离心机预防绳索取心钻杆内壁结垢研究

冯美贵¹, 刘启栋², 郭伟³, 张培丰^{*1}, 蒋睿¹,
翁炜¹, 徐军军¹, 吴烁¹, 金博¹

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 甘肃煤田地质局一三三队, 甘肃 白银 730900;
3. 青海省第一地质勘查院, 青海 海东 810600)

摘要: 针对钻杆内壁结垢严重制约绳索取心安全、优质、高效实施的技术难题, 开展了金刚石绳索取心钻进钻杆内壁的结垢机理与影响因素综合研究, 结果表明: 当钻具结构与钻井液性能一定的情况下, 钻井液中的固相含量与颗粒大小是影响钻杆内壁结垢的主要因素。金刚石岩心钻进所产生的岩屑粒径在5~100 μm之间, 总体偏细, 难以依靠自然沉降清除。为此, 研制了TGLW系列小型离心机, 现场试验表明: 该离心机可使钻井液中固相颗粒的峰值从5~80 μm降到3~10 μm, 固相粒度中值从11.189 μm降到3.513 μm, 固相清除率达90%以上, 控制钻井液固相含量在0.5%以下, 既维护了钻井液性能, 又预防了绳索取心钻杆内壁结垢。

关键词: 钻井液离心机; 预防钻杆结垢; 固相控制; 绳索取心钻进

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2024)03-0118-07

Research on the prevention of scaling on the inner wall of the wire-line drill rod by drilling fluid centrifuge

FENG Meigui¹, LIU Qidong², GUO Wei³, ZHANG Peifeng^{*1}, JIANG Rui¹,
WENG Wei¹, XU Junjun¹, WU Shuo¹, JIN Bo¹

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

2. Brigade 133 of Gansu Coalfield Geology Bureau, Baiyin Gansu 730900, China;

3. The First Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Haidong Qinghai 810600, China)

Abstract: In order to resolve the puzzle that the scaling on the inner wall of the drill pipe seriously restricts the safe, high-quality, and efficient implementation of wire-line core drilling, the comprehensive study was conducted on the scaling mechanism and influencing factors of diamond wire-line core drilling on the inner wall of the drill pipe. The results indicate that: When the structure of the drilling tool and the performance of the drilling fluid are constant, the solid content and particle size in the drilling fluid are the main factors affecting the scaling of the inner wall of the drill pipe. The particle size of rock cuttings produced by diamond core drilling ranges from 5 to 100 μm, it is generally small and difficult to remove by the natural settlement. For the reason, the TGLW series small centrifuge is developed. Field tests have shown that the centrifuge can increase the peak value of solid particles in drilling fluid from 5~80 μm to 3~10 μm, the median particle size of the solid phase ranges from 11.189 μm to 3.513 μm, the solid phase clearance rate reaches over 90%, and the solid phase content of the drilling fluid is controlled below 0.5%, which not only maintains the performance of the drilling fluid but also prevents scaling on the inner wall of the wire-line drill rod.

Key words: drilling fluid centrifuge; preventing the drill pipe wall scaling; solid control; wire-line core drilling

收稿日期: 2023-08-02; 修回日期: 2024-03-18 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.03.015

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“绿色勘查钻探应用示范”(编号: DD20243154)

第一作者: 冯美贵, 女, 汉族, 1981年生, 正高级工程师, 机械工程专业, 从事钻井液固相控制与废浆处理研究及装备研发工作, 北京市海淀区学院路29号, rosy03250186@126.com。

通信作者: 张培丰, 男, 汉族, 1965年生, 正高级工程师, 探矿工程专业, 长期从事科学钻探、环境钻探与钻井工艺研究工作, 北京市海淀区学院路29号, 1071119779@qq.com。

引用格式: 冯美贵, 刘启栋, 郭伟, 等. 钻井液离心机预防绳索取心钻杆内壁结垢研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 118-124.

FENG Meigui, LIU Qidong, GUO Wei, et al. Research on the prevention of scaling on the inner wall of the wire-line drill rod by drilling fluid centrifuge[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 118-124.

0 引言

绳索取心钻进技术是一种先进的取心工艺方法,取心过程中无需提升全套钻具,而采用带绳索的打捞器从钻杆中提出内岩心管;相对于普通单、双管提钻取心工艺具有钻进效率高、岩心采取质量好、劳动强度低、钻头寿命长、单位进尺成本低等诸多优点,尤其在深孔钻探取心更能发挥其特长,因此在地质岩心钻探中得到了广泛地应用。

但在高转速金刚石绳索取心钻进过程中,由于其特殊结构,钻杆内径较大、环空间隙小,钻杆与孔壁间的外环空间隙多为1.5~3.0 mm、钻杆内壁与内岩心管或悬挂系统间的内环空间隙多为0.5~1.0 mm。钻井液中的固相含量使钻杆内壁结垢(俗称“结泥皮”),尤其钻遇水敏性自然造浆严重地层时,钻井液粘度和切力大幅度增大、固相含量升高,如不及时净化处理,上部钻杆内壁泥皮厚度可达10 mm^[1],导致钻杆实际内径缩小,直接影响打捞器下放和内管提升,造成打捞器投放不到底、甚至取心失败,或捞取打捞器过程中卡阻、甚至上提过程中内管卡死而拉断钢丝绳,被迫提钻;不仅增加提下钻具辅助时间、严重影响施工进度、加重现场劳动强度,也提高钻探成本、降低钻进效率,发挥不出高转速金刚石绳索取心高效快速钻进的技术优势。

因此,研究绳索取心钻进钻杆内壁的结垢机理,分析结垢的影响因素,合理控制钻井液固相含量、维护钻井液性能,预防绳索取心钻杆内壁结垢,对提高钻进效率、降低钻探成本具有重要的工程意义。

1 绳索取心钻杆内壁结垢机理与影响因素分析

1.1 绳索取心钻杆内壁结垢机理

绳索取心钻杆内壁上的结垢,实际上是钻井液中的固相物质,包括粘土颗粒、岩粉、未完全溶解的化学处理剂或有机物等产生的各种絮状物等,以及其它的固相微粒,在钻杆高速旋转所产生的离心力场作用下,发生径向沉积,聚集在钻杆内壁上,形成“泥垢”,导致钻杆实际内径缩小。这一现象称为钻杆内壁结垢效应^[2-4]。钻井液中的固相颗粒在离心力作用下在钻杆内壁不断沉积和压实,加之粘土和有机聚合物的粘结作用使得沉积物脱水变得更加结实并牢固地粘附在钻杆内壁上。因此,打捞器下放或内管提升时,无论冲击或提拉,都很难通过垢层障碍。影响钻井液结垢的因素很多,可分为内因和外

因。内因包括钻井液中的固相含量和粘度等;外因有钻井液流速、钻杆旋转速度、钻杆内径、钻杆长度和钻杆弯曲程度等。

绳索取心钻杆内壁常见的结垢形式主要有3种:延伸式积垢、涡区积垢和接头渗滤积垢。3种泥垢的形成机理、特征和出现部位各不相同。

1.2 绳索取心钻杆内壁结垢特性评价

固体颗粒在高速旋转的钻杆内的受力较为复杂,而对结垢产生影响的主要为离心力和粘滞力。根据颗粒在离心力场中的沉降规律和结垢形成规律,可用结垢指数 I ^[3]评价钻井液的结垢特性,其物理意义为一个回次进尺钻井液中的固相颗粒在钻杆内壁形成的泥垢厚度影响打捞岩心内管的难易程度。

$$I = \frac{\pi(\rho_s - \rho) D n^2 T_c}{16200 \xi \eta_c \delta_c} \cdot \frac{C_s}{\rho_s} \sum_{i=1}^m \rho_{si} d_{si}^2$$

式中: ρ ——钻井液密度,kg/m³; ρ_s ——岩屑密度,kg/m³; D ——钻杆内径,m; δ_c ——钻杆与岩心管之间的间隙, $\delta_c = (D - D_0)/2$; D_0 ——岩心管外径,m; n ——钻杆转速,r/min; T_c ——回次时间,s; C_s ——钻井液总固相颗粒含量,kg/m³; ξ ——与比流核 φ 有关的常数; η_c ——钻井液卡森粘度, $\eta_c = [0.03779(\theta_{600}^{1/2} - \theta_{300}^{1/2})]^2$,Pa·s; d_{si} ——固相颗粒粒径,m; ρ_{si} ——粒径为 d_{si} 的钻井液固相颗粒所占固相的质量百分比,无因次。

当结垢指数 $I < 0$ 时,钻杆内壁没有结垢,或有极少结垢,但不影响打捞岩心管;当结垢指数 $0 < I < 1$ 时,钻杆内壁的结垢厚度随结垢指数增大而增大,但钻杆内壁的结垢厚度不影响内岩心管的打捞;当结垢指数 $I = 1$ 时,钻杆内壁结垢厚度与内环空间隙相同,影响内岩心管打捞;当结垢指数 $I > 1$ 时,钻杆内壁出现严重结垢,无法打捞内岩心管。

1.3 绳索取心钻杆内壁结垢影响因素分析

从上述结垢指数(I)的计算公式可得出,绳索取心钻杆内壁结垢分别与固相颗粒与钻井液之间的密度差、钻井液中的固相颗粒含量(C_s)、钻杆转速(n)的平方、回次时间(T_c)、钻杆内径(D)、固相颗粒直径(d_s)的平方、固相颗粒密度(ρ_s)成正比,与钻杆和内岩心管之间的间隙(δ_c)成反比,与钻井液流变参数(ξ, η_c)有关。

当钻具结构、泵量与钻井液性能一定时,钻杆转

速、钻井液中的固相含量与固相粒度大小是影响钻杆内壁结垢的主要因素。就金刚石绳索取心钻进而言,转速越高,机械钻速越高。如果降低转速,就意味着降低金刚石钻进效率。因此,只有降低钻井液固相含量与岩屑粒度大小才是预防和降低钻杆内壁结垢的主要技术手段。

2 金刚石岩心钻进岩屑粒度分布

钻井液中的固相按作用可分为:有用固相,如膨润土、加重材料以及非水溶性或油溶性的化学处理剂;无用固相,如钻屑、劣质土和砂粒等。按固相粒度的大小可分为:胶质类,指粒径 $<2\ \mu\text{m}$ 的固相,主要包括膨润土和粘土等;泥,指粒径在 $2\sim 73\ \mu\text{m}$ 范围内的固相,如膨润土、粘土及重晶石等;砂,指粒径 $74\sim 2000\ \mu\text{m}$ 范围内的固相,即能通过10目而不能过200目筛子的固相颗粒,如砂子、钻屑等;砾,指粒径 $>2000\ \mu\text{m}$ 的固相,如大块的钻屑、砾石块等。

地质钻探金刚石岩心钻进钻遇地层不同,采用的钻井液性能、钻头类型、金刚石参数以及转速、钻压、泵量等钻进参数各异,所产生的岩屑粒径也有所差异,但该钻进方法产生的岩屑粒径总体偏细偏小。在地质岩心钻探中,使用孕镶金刚石钻头最为广泛。采用孕镶金刚石取心钻进时,钻压较低,转速相对较高;随着胎体的磨损,金刚石出刃不断出露。钻头碎岩主要靠金刚石的微量出刃对岩石进行磨削,当旧出刃失去工作能力或脱掉时,新出刃就相继出露而参与碎岩工作^[5]。由于孕镶金刚石钻头的特殊碎岩机理,磨削状态下产生的岩粉粒径非常细小。

根据张培丰等^[3,6]对金刚石岩心钻进岩屑粒度分布的相关研究,CCSD-1井金刚石取心钻进时,特别是硬岩、超硬岩钻进时所产生的岩粉颗粒的粒度分布如图1所示,粒度 $<12\ \mu\text{m}$ 岩粉颗粒约占37%;对使用S75型绳索取心孕镶金刚石钻进方法进行绳索取心钻杆内壁结垢颗粒粒度分布研究,钻杆内壁结垢层颗粒粒度分布见表1和图2,粒径 $<5\ \mu\text{m}$ 泥垢颗粒占总泥垢2.2%, $<10\ \mu\text{m}$ 占9.1%; $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 占总63.2%,是钻杆泥垢的主要部分,也是绳索取心钻进必须清除的粒径范围。加上 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 泥垢颗粒, $5\sim 50\ \mu\text{m}$ 的泥垢占总泥垢70.1%。

刘徐三等^[7]对金刚石钻进岩粉粒度的分析研究表明,汶川地震断裂带科学钻探三号孔(WFSD-3)采用孕镶金刚石钻头在泥质粉砂岩中进行取心钻进

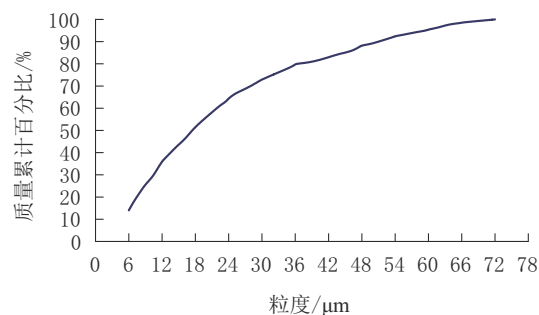


图1 金刚石钻进岩粉粒度累计分布

Fig.1 Accumulated distribution of rock powder particle size in diamond drilling

表1 金刚石钻进岩粉粒度累计分布

Table 1 Accumulated distribution of rock powder particle size in diamond drilling

粒度/ μm	质量百分比/%	累计质量百分比/%
0~5	2.2	2.2
5~10	6.9	9.1
10~15	7.1	16.2
15~20	8.9	25.1
20~30	19.5	44.6
30~40	14.4	59.0
40~50	13.3	72.3
50~60	7.7	80.0
60~74	2.2	82.8
>74	17.8	100.0

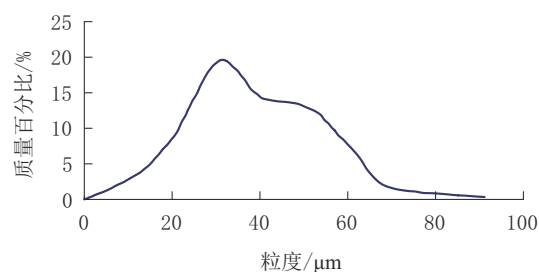


图2 绳索取心钻杆内壁结垢颗粒粒度分布

Fig.2 Particle size distribution of scaling on the inner wall of wireline coring drill pipe

所产生的岩粉粒径主要分布于 $2\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间,岩粉较细,为典型的非均匀颗粒。其中,小于 $100\ \mu\text{m}$ 颗粒占岩粉颗粒总量近90%,岩粉平均粒度 $17\sim 40\ \mu\text{m}$;中值粒径 $10\sim 20\ \mu\text{m}$,如图3所示。

综上,金刚石取心钻进时,产生的岩屑颗粒粒径一般在 $5\sim 100\ \mu\text{m}$ 较多。这些细微的固相颗粒在含

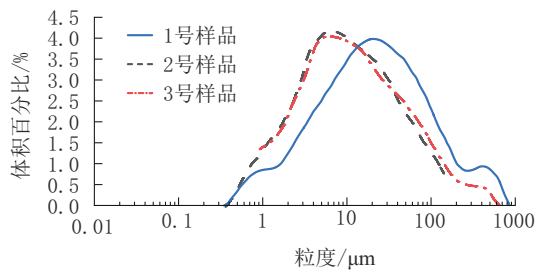


图3 泥质粉砂岩岩屑的粒径分布频率曲线

Fig.3 Particle size distribution frequency curve of argillaceous siltstone cuttings

有高分子胶类的浆液中仅靠地表循环系统很难彻底自然沉降净化,造成钻井液恶性循环,岩屑在孔底重复破碎以及在搅拌装置内的再度分散,导致其以胶体或悬浮体状态分散在钻井液中,使钻井液密度增大、固相含量增高,严重影响钻井液的流变性能。表象是由于钻井液粘度高、结垢多,但实际上是由于钻井液的粘度和切力增大导致沉砂困难,以及粘度升高导致含砂量增加致使钻杆内壁结垢更加严重,这是钻杆内壁结垢的根本原因。即使采用无固相钻井液,钻遇泥页岩水敏地层时,钻井液粘度、切力也会升高,岩屑变细且更难清除,导致钻井液密度增加,无固相钻井液变为有固相钻井液。若固相颗粒较大、钻井液粘度和切力较高,钻杆内壁更容易结垢。因此钻井液中细小颗粒岩屑已成为制约小口径地质绳索取心钻探安全、快速、高效施工进程的关键。

3 钻井液离心机对绳索取心钻杆内壁结垢的预防

3.1 地质钻探离心机性能特点

目前,钻井液固相控制技术广泛应用于石油钻井,配套的多级固控系统具有质量大、占地面积大、不便搬移,处理量大、装机功率大、能耗高等特点,难以满足小口径地质岩心钻探轻便、快速、高效的设备配置要求。石油钻井口径大、钻屑多,而地质岩心钻探相对口径小、钻屑少且细,不需要石油钻井的多级

净化配置,同时振动筛、除砂器和除泥器在地质岩心钻探钻井液净化过程中清除岩屑能力有限,并存在跑冒滴漏、筛网与底嘴易堵塞情况;而仅靠岩粉自然沉降效果一般,需每隔一定时间及时清理有害固相与补充新钻井液^[8-11]。而钻井液离心机作为固控设备中固液分离的重要设备,采用机械离心沉降螺旋推料工作机理,可清除细小的岩屑。

针对地质岩心钻探特点和小型轻量化需求,笔者采用单电机、双皮带轮、上下分体式、轻型模块化结构设计,研发了适用于小口径地质岩心钻探的TGLW系列小型轻便高效离心机^[12-15],其处理量为2~15 m³/h、最小装机功率为7.5 kW、最大模块质量<80 kg、最高转速3500 r/min、分离因素高达2000,主要性能参数见表2。具有小型模块化、能耗低、易搬迁等优势,尤其适应高原高寒、车辆难进入地区,在作业空间狭小场地的优势尤为明显。该离心机可配套全变频自动控制技术^[16-17],实现自动/手动变频无级调速,一机多用,既可作为中速离心机进行钻井液固相控制,也可作为高速离心机进行废浆处理。

3.2 预防结垢作用原理

从金刚石绳索取心钻杆内壁结垢影响因素分析得知,当钻具结构、泵量与钻井液性能一定时,同时绳索取心钻杆转速不变的情况下,降低钻井液固相含量与岩屑粒度大小是预防和降低钻杆内壁结垢的主要技术手段。由于金刚石取心钻进岩屑颗粒粒径一般在5~100 μm,而钻井液离心机分离因素高达2000,可清除2 μm及以上的细小固相颗粒,避免岩屑在孔底重复破碎以及在搅拌装置内的再度分散,同时降低钻井液中固相含量,因此可有效预防绳索取心钻杆内壁结垢。

4 钻井液离心机应用效果

研发的钻井液离心机已有效支撑服务100余家地勘单位实施的多领域钻探工程,如汶川科学钻探

表2 TGLW系列钻井液离心机主要性能参数

Table 2 Main performance parameters of TGLW series drilling fluid centrifuge

型号	处理量/ (m ³ ·h ⁻¹)	电机功率/ kW	辅电机功 率/kW	转鼓转速/ (r·min ⁻¹)	最小分离 粒度/μm	最大模块 质量/kg	整机质 量/kg	控制方法
TGLW220	0~2	7.5		0~3500	2~5	75	265	VFD变频控制、在线远程控制、反馈自动控制
TGLW350	0~6	11.0		0~3000	2~5	90	800	
TGLW450	0~15	18.5	7.5	0~2800	2~5	120	1250	

等重大工程及山东、山西、青海、甘肃、新疆、黑龙江、河北、安徽、河南、辽宁等能源资源勘查工程。本文以山东乳山金青顶金矿区危矿专项ZK43-1示范钻探工程、山东莱州三山岛矿区ZK112-2钻探工程、甘肃省文县阳山金矿区ZK1330钻探工程为例,介绍钻井液离心机在金刚石绳索取心钻进现场的应用情况。

4.1 山东乳山金矿区危矿专项钻探现场

山东乳山金青顶金矿区危矿专项ZK43-1示范钻探工程采用金刚石绳索取心钻进施工,在使用TGLW350型离心机前,泥皮厚度达3 mm,严重影响取心作业。采用离心机净化前后钻井液粒度分布如图4所示,钻井液中固相颗粒的峰值从5~80 μm 降到3~10 μm 、固相粒度中值(或称中位数)从11.189 μm 降到3.513 μm ,固相含量从8%降低到0.5%,固相清除率达93.75%,降低了钻井液粘度和密度,维护了钻井液流变性能稳定,绳索取心钻杆内壁结垢现象大有好转。

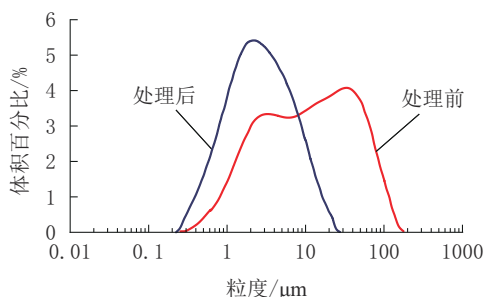


图4 乳山金矿离心机净化处理前后钻井液中固相粒度分布

Fig.4 Particle size distribution of solid phase in drilling fluid before and after centrifuge purification treatment in Rushan Gold Mine

4.2 山东莱州三山岛矿区钻探现场

山东莱州三山岛矿区ZK112-2钻探工程采用绳索取心钻进工艺,为保障钻探工程安全高效顺利实施,采用TGLW350型离心机维护钻井液性能,应用离心机处理前后的钻井液粒度分析结果如图5所示,钻井液中的固相峰值从20~100 μm 降到3~10 μm ,固相粒度中值从39.369 μm 降到5.188 μm ,高于20 μm 的粗粒岩屑基本被清除,对防止绳索取心钻杆内壁结垢发挥了重要作用。

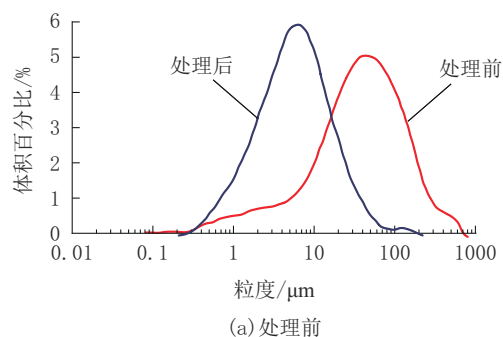


图5 三山岛矿区离心机净化处理前后钻井液中固相粒度分布

Fig.5 Particle size distribution of solid phase in drilling fluid before and after centrifuge purification treatment in Sanshan Island mine area

4.3 甘肃阳山金矿区钻探现场

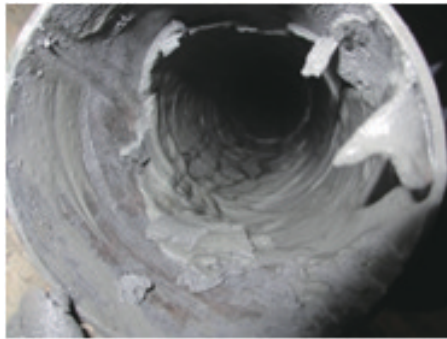
甘肃省文县阳山金矿区ZK1330钻探工程,采用金刚石绳索取心钻进工艺,未使用TGLW350型离心机前,钻杆内壁结泥皮非常严重、泥皮厚而且疏松;使用后,钻杆内壁也形成一定的泥皮,但泥皮薄而致密,且具有一定韧性,有利于保护孔壁,预防孔内次生事故发生,使用前后钻杆内壁的泥皮质量如图6所示,岩心打捞顺利。

5 结论与建议

(1) 钻井液中的固相颗粒在钻杆高速旋转所产生的离心力作用下结实并牢固地粘附在钻杆内壁上,形成“泥垢”。影响钻杆内壁结垢的因素很多,对于金刚石绳索取心钻进来说,当钻具结构、泵量与钻井液性能一定的情况下,钻杆转速、钻井液中的固相颗粒大小与固相含量是影响钻杆内壁结垢的主要因素,因此控制钻井液固相含量与岩屑粒度大小是预防绳索取心钻杆内壁结垢的主要技术手段。

(2) 金刚石取心钻进岩屑颗粒粒径一般在5~100 μm ,钻井液离心机可清除2 μm 及以上的细小固相、降低钻井液固相含量。现场应用表明,使用离心机后钻井液中固相颗粒的峰值从5~80 μm 降到3~10 μm ,钻井液固相含量控制在0.5%以下,既维护了钻井液性能、又预防了绳索取心钻杆内壁结垢。

(3) 预防绳索取心钻杆内壁结垢对提高钻进效率、降低钻探成本具有重要的工程实践意义,建议地勘单位及现场技术人员认识和重视钻井液净化维护管理的重要性。



(a) 处理前



(b) 处理后

图6 使用离心机前后绳索取心钻杆内壁泥皮质量
Fig.6 Quality of mud on the inner wall of rope coring drill pipe before and after using centrifuge

(4) 钻井液离心机配套全变频自动控制技术, 可一机多用, 既可作固相控制、也可作随钻或钻后废浆处理, 可为新一轮找矿突破战略行动提供支撑服务, 助力绿色勘查自动化智能化实施^[18], 建议加大、加快推广应用。

参考文献 (References):

- [1] 邓清松, 张中. 绳索取芯钻杆内壁泥皮的成因及预防[J]. 四川地质学报, 2013, 33(A01): 138-139.
DENG Qingsong, ZHANG Zhong. The cause and prevention of mud skin on the inner wall of rope coring drill pipe[J]. Acta Geologica Sichuan, 2013, 33(A01): 138-139.
- [2] 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.
TAO Shixian, TANG Songran, PENG Butao. Mechanism and prevention of scaling on the inner wall of rope coring drill pipe[J]. Exploration Engineering (Rock & Solid Drilling and Tunneling), 2007, 34(S1): 155-159.
- [3] 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, 2007: 14, 52.
ZHANG Peifeng. Dispersion mechanism study on bentonite for wire-line core drilling mud used in the scientific drilling[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2007: 14, 52.
- [4] 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.
YANG Yi. Analysis of scale formation on the inner wall of drill pipe and selection of mud system in rope coring drilling[J]. Science & Technology Information, 2011(12): 383-389.
- [5] 赵小军, 康鑫, 潘飞飞, 等. 孕镶金刚石钻头破碎花岗岩岩屑粒径分布研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(1): 84-88.
ZHAO Xiaojun, KANG Xin, PAN Feifei, et al. Particle size distribution of granite swarf by impregnated diamond bit[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(1): 84-88.
- [6] 张培丰, 王达. 螺杆马达在科钻一井先导孔取心钻进中使用效果分析[J]. 地球科学, 2005, 30(S1): 62-66.
ZHANG Peifeng, WANG Da. Application effect analysis of screw motor in coring drilling of the pilot hole in well CCSD-1[J]. Earth Science, 2005, 30(S1): 62-66.
- [7] 刘徐三, 张化民, 陈礼仪, 等. 汶川地震科钻WFSD-3孔金刚石钻进岩粉粒度分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(3): 21-23.
LIU Xusan, ZHANG Huamin, CHEN Liyi, et al. Study on rock powder particle size analysis in diamond drilling of hole WFSD-3 in Wenchuan Earthquake Scientific Drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Solid Drilling and Tunneling), 2013, 40(3): 21-23.
- [8] 冯美贵, 翁炜, 刘家荣, 等. 雄安新区地热D20井钻井液固控循环系统应用分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10): 38-42.
FENG Meigui, WENG Wei, LIU Jiarong, et al. Drilling fluid solid control circulation system for drilling of geothermal exploration and production well D20 in Xiongan New Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 38-42.
- [9] 刘振新, 翟育峰, 徐志权, 等. 小秦岭整装勘查区综合普查钻探技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 37-43.
LIU Zhenxin, ZHAI Yufeng, XU Zhiqian, et al. Drilling technology applied during comprehensive prospecting in the Xiaoqinling integrated exploration area[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 37-43.
- [10] 张强, 战启帅, 张文良, 等. 页岩气地质调查井小口径绳索取心钻探技术分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 72-79.
ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, ZHANG Wenliang, et al. Application of small diameter wire line core drilling in shale gas geological wells[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 72-79.
- [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.
ZHENG Wenlong, WU Xiaoming, WU Di, et al. Drilling fluid technology suitable for core drilling in deep salt beds[J]. Geology and Exploration, 2015, 51(5): 977-983.
- [12] 冯美贵, 朱迪斯, 翁炜, 等. 小口径地质钻探用TGLW220×

- 660型冲洗液离心机的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程), 2014,41(12):40-43.
- FENG Meigui, ZHU Disi, WENG Wei, et al. Development of TGLW220×660 flushing fluid centrifuge for the small-diameter geological drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(12):40-43.
- [13] 冯美贵,朱迪斯,翁炜,等.地质岩心钻探冲洗液固控系统及配套工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(5):67-70.
- FENG Meigui, ZHU Disi, WENG Wei, et al. Research on solid control system of flushing fluid circulation in geological core drilling and the matching technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(5):67-70.
- [14] 冯美贵,王健策,高元宏,等.地质岩心钻探钻井液固相控制技术现场应用[J].西部探矿工程,2022,34(2):100-104.
- FENG Meigui, WANG Jiance, GAO Yuanhong, et al. Application of solid control technology for drilling fluid in Geological Core Drilling [J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(2):100-104.
- [15] 张飞,熊虎林,张建,等.蓄能式绳索取心液动潜孔锤的应用研究[J].地质与勘探,2017,53(6):1188-1196.
- ZHANG Fei, XIONG Hulin, ZHANG Jian, et al. Application of the drilling tool with energy-storage-type rope coring hydro hammer [J]. Geology and Exploration, 2017,53(6):1188-1196.
- [16] 温得全,冯美贵,李斌,等.智能高效小型一体化泥浆不落地系统的研究与应用[J].钻探工程,2022,49(4):49-54.
- WEN Dequan, FENG Meigui, LI Bin, et al. Research and application of the intelligent and efficient small-size integrated mud non-landing system [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4):49-54.
- [17] 冯美贵,蒋睿,徐军军,等.泥浆不落地技术在地质岩心钻探中的应用[J].地质论评,2023,69(S1):518-520.
- FENG Meigui, JIANG Rui, XU Junjun, et al. Application of mud non landing technology in geological core drilling [J]. Geological Review, 2023,69(S1):518-520.
- [18] 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.

(编辑 荐华)