

新近系地层大直径取心质量影响因素 分析及对策研究

王松珍^{1,2}, 杜双杰^{1,2}, 张雷鹏^{1,2}, 孙红伟^{1,2}

(1. 河南省地质局地质灾害防治中心, 河南 郑州 450045;

2. 河南省自然资源科技创新中心(豫北地热能清洁能源研究), 河南 郑州 450012)

摘要:在郑州市主城区与东部新城地区地热资源勘查评价项目中, 勘查目的层为新近系明化镇组和馆陶组, 在勘查初期存在取心质量不稳定的问题。通过对影响取心质量的地质因素和工程因素的分析发现, 初期采用的川7-4型单动双管取心工具配装的卡箍式岩心爪, 难以适应胶结程度差异大、复杂多变的新近系地层。针对影响取心质量的因素, 采用了钙化泥浆, 优化了钻进参数, 改进了钻头结构, 设计加工了卡板式岩心爪与卡箍式岩心爪组合的双作用岩心爪。在后续的勘查施工中, 有效提高了岩心采取率, 解决了取心质量不稳定的问题。

关键词:新近系地层; 取心质量; 地质因素; 工程因素; 单动双管取心工具; 双作用岩心爪; 地热资源勘查

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2024)02-0146-08

Analysis of factors influencing the quality of large diameter coring in Neogene strata and research on countermeasures

WANG Songzhen^{1,2}, DU Shuangjie^{1,2}, ZHANG Leipeng^{1,2}, SUN Hongwei^{1,2}

(1. The Prevention and Control Center for the Geological Disaster of Henan Geological Bureau,
Zhengzhou Henan 450045, China;

2. The Center of Technological Innovation for Natural Resources in Henan Province (The Research on Clean Energy
of Geothermal Energy in Northern Henan), Zhengzhou Henan 450012, China)

Abstract: In the geothermal resources exploration and evaluation project in the main urban area and the eastern new urban area of Zhengzhou City, the Neogene Minghuazhen Formation and Guantao Formation is the target layer, where the problem of unstable coring quality exists in the early stage of exploration. Through the analysis of geological and engineering factors which affect the coring quality, it was found that the early used Chuan7-4 type single move double tube coring tool with slip-collar type core gripper is difficult to adapt to the Neogene strata which is of large difference of cementation degree, complex and changeable. In view of the factors that affect the coring quality, calcified mud was used, drilling parameters were optimized, structure of the drilling bit was improved, double action core gripper with card plate and slip-collar was designed and processd. As a result, the coring rate was effectively improved and the problem of instable coring quality was solved in the subsequent exploration construction.

Key words: Neogene strata; coring quality; geological factors; engineering factors; single-move double-tube coring tool; double-action core gripper; geothermal resource exploration

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-12-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.02.020

基金项目: 郑州市自然资源与规划局项目“郑州市主城区与东部新城地区地热资源勘查评价”(编号: 郑财招标采购-2020-239)

第一作者: 王松珍, 男, 汉族, 1967年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 从事钻探工程技术工作, 河南省郑州市金水区郑花路86号, 13137109285@163.com。

引用格式: 王松珍, 杜双杰, 张雷鹏, 等. 新近系地层大直径取心质量影响因素分析及对策研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 146-153.

WANG Songzhen, DU Shuangjie, ZHANG Leipeng, et al. Analysis of factors influencing the quality of large diameter coring in Neogene strata and research on countermeasures[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 146-153.

0 引言

钻探取心是研究地下资源最直接的方法,绳索取心钻进技术凭借钻进效率高、施工成本低、取心质量好等优点,目前在固体矿产勘探、天然气水合物及页岩气等非常规能源勘探领域得到了较为广泛的应用^[1-3]。但在地热资源勘查中往往要求取心直径较大,绳索取心一般难以胜任。

生产实践中常用的可实现大口径同径取心的钻具主要有:四川川庆石油钻采科技有限公司研制的川7-4型、川8-3型、川8-4型,中石化胜利石油管理局钻井工艺研究院研制的Y-8100/Yb8100型和中国地质调查局勘探技术研究所研制的KT型钻具^[4-6]。以上几种取心钻具均为单动双筒(三筒)取心工具,针对不同的地层选取特定的岩心爪。对于有特殊要求的地层,国外多采取的是全封闭速冻取心,成本高且工艺复杂^[7]。

2022年我单位承担了“郑州市主城区与东部新城地区地热资源勘查评价”项目,其中水文地质钻探部分设计探采示范井3眼,单井钻深1500~2200 m。取样目的主要是了解岩土体密度、渗透率、孔隙度、含水量等常规力学指标及热导率、比热容、扩散系数等热物性参数。勘查初期遇到了取心质量不稳定的问题,经过对影响取心质量的地质因素和工程因素进行分析,采取了相应的技术措施,通过改进取心工具、优化钻进参数,解决了软硬不均、胶结程度差异大等复杂多变地层的取心质量不稳定的问题。

1 工程概况

1.1 区域地层情况

0~300 m为第四系上覆层,粒径较大、泥质含量低、厚度大、渗透性好。300~1500 m为新近系明化镇组,上部以灰黄、淡棕色细中砂和粗砂砾石为主,夹棕红、棕色粘土;下部以红棕色泥岩和绛红色粘土为主,夹浅黄色细砂、中细砂。1500~2200 m为新近系馆陶组,上段为灰绿、灰棕、棕红色半胶结泥岩夹黄白色细砂、中砂;中段为棕红、棕黄色半胶结泥岩与灰黄、灰白、黄白色中砂、中粗砂互层;底部为砂岩、砾岩;下段为棕红、棕色半胶结泥岩与细中砂、中砂互层。

区域内地层以砂层与粘土层为主,局部出现钙锰质胶结。由于胶结成分的差异,岩土的物理力学

性能有明显的差异(参见图1)。



图1 深度740 m的砂层中出现的特殊胶结段

Fig.1 Special cementing section appearing in the sand layer at the depth of 740m

1.2 井身结构设计

本工程布置3口探采结合示范井,ZK1井深1500 m,ZK2和ZK3井深均为2200 m。0~300 m井径445 mm,安装 $\varnothing 339.7 \text{ mm} \times 9.65 \text{ mm}$ API套管;300~1500 m/2200 m井径311 mm,安装 $\varnothing 177.8 \text{ mm} \times 8.05 \text{ mm}$ API套管。取水段安装同径打孔缠丝滤水管组合,管外投粒成井。

1.3 取心要求

自600 m以深井段取心,3口井共取心200件,岩心直径 $\leq 90 \text{ mm}$,长度200 mm。最小间隔1 m取样1组,回次最大进尺 $\leq 9 \text{ m}$,回次均匀分布。

1.4 钻机与钻具选择

因成井工艺和取心需求,选择了TSJ-3000/445型水文钻机,钻塔高37 m,该钻机最大的优点是在频繁的起下钻中可以一次提出3根9.5 m长的钻杆,节约起下钻时间。

配备 $\varnothing 89 \text{ mm}$ 钻杆、 $\varnothing 159 \text{ mm}$ 钻铤,川7-4型单动双管取心筒,初期使用常规的环形自锁式取心卡箍。计划每回次取心钻进9 m,取心5~6件,取心35回次。

2 影响取心质量的因素

2.1 地质因素

地质因素是指岩层的物理力学性质和化学性质对取心的影响,包括岩石的强度、硬度、完整度、纯洁性、研磨性和易溶性等。新近系地层影响取心的最重要性质是强度和易溶性^[8]。

从钻探施工角度来看,在坚硬、完整、致密、均

质、不怕冲、不怕振的岩层中钻进时,容易获得完整的、代表性高的岩心。而在岩性松散、酥脆、胶结性差、构造破碎、风化严重、裂隙多、节理发育、易溶蚀地层中钻进时,取心困难大,质量也难以保证。从取心难易角度,新近系地层可分为以下几类:

第一类是胶结差的砂性土。成松散状,颗粒直径 $0.01\sim 2\text{ mm}$,孔隙率大,主要成分为粉砂、细砂、中砂、粗砂,埋藏深度一般在 800 m 以浅。

第二类是粘性土。颗粒直径 $<0.002\text{ mm}$,吸水性强,易糊钻、缩径、堵心,埋藏深度 1500 m 以浅。

第三类是具有一定胶结度的砂岩、泥岩。受温度、压力以及盐分的影响,埋深在 1500 m 以深。

取心难度最大的是第一类地层,其次是第二类地层,岩性特征为强度差、水敏、易碎^[9]。在实施取心施工时从工艺上要尽可能的减少对岩心的扰动,以提高岩心采取率和保证岩心的原状。

2.2 工程因素

2.2.1 钻井液

在工程施工中绝大多数采用水基钻井液,其具有平衡地层压力、保护井壁、携带钻渣、冷却钻具等作用,但是也会侵蚀岩心。钻井液对于取心的侵蚀一方面是物理性的冲刷,对于胶结性差的地层可能造成岩心的丢失;另一方面是钻井液中的水对地层的溶蚀作用,在盐岩地层会溶解矿物使岩心变细或者丢失,粘土矿物则遇水膨胀、散落导致撻心或顶心^[10]。

地层中的粘土矿物极易分散进入钻井液中,使得钻井液增稠、密度变大,进而悬浮更多固相,影响钻进速度和取心质量。为降低钻井液对地层的侵蚀,需要选择适宜的钻井液体系并控制其性能。

2.2.2 钻头

因地层矿物成分、埋深、沉积环境和胶结介质等因素的差异,造成地层岩性和物理特性有较大的差异,所选用的钻头要与地层的特性相适应^[11]。虽然地层具有埋深越大、密度强度越大的基本规律,但其自身的矿物成分与胶结介质的不确定性决定了地层强度的随机性,对钻头的结构齿形与水眼的布局有较高的要求。既要适应强度的要求运转平稳,又要有利于切削地层、清洗钻头、排出钻渣,提高钻进速度。在取心施工中还要避免对岩心过度冲刷破坏,适应软岩钻进^[12]。

2.2.3 取心钻具岩心爪

取心钻具中的岩心爪是影响岩心采取率的关键因素,传统的单动双管取心器由内管、外管、悬挂器及钻头组成,外管带动钻头旋转完成钻进,内管保持不旋转套取岩心,钻井液从内外管之间通过,避免了对岩心的冲刷。钻进完成后上提钻具,管内岩心推动卡箍相对下移,在锥形卡箍座的约束下卡箍开口直径缩小,卡取岩心。从卡箍式岩心爪工作原理上看其适应于强度大于 5 MPa 结构完整的中硬—硬岩地层。对于软岩或者破碎地层取心则要用其他方式的岩心爪^[13-14]。

2.2.4 钻具

钻进过程中钻具承受拉、压、弯、扭等载荷,其在井下的受力情况非常复杂,在井壁、钻井液的约束下回转的同时往往伴随着各种振动,这些振动会破坏岩心的完整性,影响取心质量。钻柱的振动主要有纵向振动、横向振动和扭转振动这3种表现形式^[15]。

粘滑运动是最严重的扭转振动,由于钻柱旋转过程中不可避免地与井壁产生摩擦,导致井下钻具实际转速变小甚至停转,当井下累积的扭矩足够克服井壁与钻柱之间的摩阻时,将出现瞬间释放现象。钻柱的粘滑运动包括粘滞和滑脱。研究表明,粘滑运动时扭转振动能量最大,横向振动能量次之,轴向振动能量最小。钻柱与井壁、钻头与地层间的摩擦是导致钻柱粘滑运动的直接原因,钻进过程中应采取合理措施,如降低转速和提高钻井液润滑性能等。降低钻柱与井壁、钻头与地层间的摩擦阻力,可降低钻柱发生粘滑运动的概率^[16]。

钻柱在井眼内以地面转速按顺时针方向绕自身轴线旋转时,也以一定的速度绕井眼轴线旋转,形成涡动。涡动是钻柱横向振动和扭转振动的耦合。研究表明,钻头与井底的相互作用是引起钻柱振动的主要激励源,发生涡动时横向振动能量最大,轴向振动能量次之,扭转振动能量最小^[17]。横向振动能量又与钻具与井壁的间隙成正比。

2.2.5 施工工艺

施工工艺对于取心质量的影响是最直接的因素,同时也影响着钻进速度。

在中深井钻进施工中,压力来自于钻铤的重力差,压力给的比例越大中性点越靠上,反之中性点越靠下,中性点越靠下钻具的稳定性越好,涡动不

容易被激发。但是,压力越小钻进速度越慢。为了获取理想的钻进速度又不激发涡动,需要增加钻具组合中钻铤的数量。

转速是影响井下钻具稳定性的另一重要因素,降低转速能够减少粘滑运动的发生,使钻具稳定地运转,对于岩心的影响较小。

泵量首先应满足携带钻渣的需要,但是取心钻进并不需要很大的泵量,大泵量对岩心的冲刷比较严重,尤其是砂层取心。为了减少对岩心的冲刷需要优化钻头结构。

操作的规范性是提高取心质量的最后一道保障。

3 提高取心质量的措施

钻探取心工作中遇到的问题,地质因素是客观存在不可改变的。在工程实践中,我们通过对影响取心的地质因素和工程因素进行分析,采取了合理的技术措施。通过优化钻具组合、改进钻头结构和取心工具,减少了工程因素对取心的影响,提高了钻进效率和取心质量。

3.1 钻井液处理

针对新近系粘土层遇水膨胀的特点,为了提高钻速和岩心采取率,抑制地层水化缩径、卡心等情况,从经济性和适用性方面选择使用钙处理钻井液。钙处理钻井液具有较强的抗钙污染、盐污染和粘土污染的能力;能够一定程度抑制粘土矿物水化膨胀,有利于井壁稳定;固相含量相对较低,有利于提高钻速。加入润滑剂提高钻井液的润滑性能,可减少动力消耗和防范粘滑运动的发生,改善钻具回转的平稳性,减小对岩心的扰动。钙处理钻井液的性能见表1。

表1 钻井液性能参数

Table 1 Performance parameters of the drilling fluid

性能参数	参数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.10~1.20
漏斗粘度/s	30~50
含砂量/%	<2
失水量/mL	5~10
泥饼厚度/mm	<0.5
钙离子含量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	200~500
pH值	10~12

钙处理钻井液的配制遵循先分散后絮凝的原则,先配备细分散基浆再加入石灰乳液,边加石灰乳液边搅拌边测量钻井液粘度。初始加入石灰乳液时粘度增大,肉眼可见流动性变差,继续加入粘度明显降低流动性增加,此时停止继续加入,充分搅拌后测量钻井液各项性能指标。

钻井液的日常维护:

(1)根据不同井段地质特点采用不同的维护处理方法,粘土(泥岩)厚的井段钙离子含量较高,反之较低。

(2)1800 m以深加入抗温材料,适当提高钻井液体系的pH值,以充分发挥处理剂的作用^[18]。

(3)根据钻遇的地层、井深调整钻井液密度、粘度、失水量等参数,降低维护成本。

(4)充分利用振动筛、离心机等设备严控钻井液中固相含量。

(5)建立钻井液管理台账,处理剂、测试仪器和有关设备的使用保管维护工作有专人负责。

3.2 优化钻头结构

针对新近系明化镇组上部砂层胶结程度差的特点,为减小钻井液对岩心的冲刷,对取心钻头增加了导流孔设计,既提高了对切削刀具的清洗能力又降低了钻井液对岩心的冲刷;设计使用四刀翼钻头(图2),兼顾了钻头运转的稳定性。实际使用中既提高了取心质量,又兼顾了钻进速度。



图2 四刀翼取心钻头

Fig.2 Four-blade coring bit

四刀翼钻头在600~1800 m段使用效果良好。随着深度的增加,地温升高压增大,地层逐步胶结成岩强度增大,在1800~2200 m段选用六环布局的金刚石复合片钻头(见图3)。



图3 金刚石复合片钻头

Fig.3 Diamond compacted coring bit

3.3 改进取心钻头岩心爪

针对新近系砂层强度低、粘土易遇水膨胀导致岩心表面光滑柔软不易被卡取的特点,设计了卡板式岩心爪(见图4)。

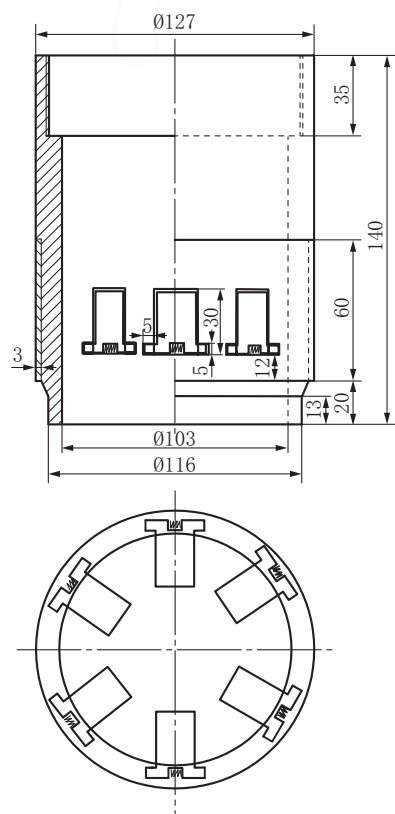


图4 卡板式取心器结构设计

Fig.4 Structural design of coring tool with card plate

卡板可翻转 90° , 直立时可隐藏于管壁内, 平放时封堵取心器出口, 使得取心器具有单向性。当钻具钻进下行, 岩心通过取心器进入岩心管内, 钻具

上提,卡板在复位弹簧的作用下向内旋转缩小并截断岩心。翻板水平时取心器出口面积收小,已进入取心管内的岩心在6个翻板的阻碍下极难滑出岩心管。卡板式岩心爪仅适用于非流塑状的软岩。

新近系地层中常出现结核层和特殊胶结成岩段,卡板式岩心爪又难以截断岩心。为了适应软硬交互、强度变化大的地层特点,将卡箍式取心器和卡板式取心器串联组成了双作用岩心爪(见图5),以适应复杂多变的地层取心。实践证实可有效提高岩心采取率,尤其是岩心在多种因素的影响下变得较细(小于卡箍抱紧时的内径)时,卡箍式取心器往往会丢心,双作用取心器则能顺利获取岩心。



图5 双作用取心器

Fig.5 Double action coring tool

3.4 优化钻具组合与井身结构

取心管的振动来源于偏心量,同时更多的是受约束大小的影响^[19],川7-4型单动双管取心钻具配装 $\varnothing 216$ mm钻头,上接头最大外径172 mm,为了减少取心管的摆动,尝试在岩心管连接处加装 $\varnothing 216$ mm扶正器,但扶正器安装后回转阻力增大。最后通过增加 $\varnothing 159$ mm钻铤数量提高钻具的稳定性,实际使用8根钻铤,有效减小了钻具的轴向振动^[20]。

成井结构设计为 $\varnothing 311$ mm完钻,间隔取心。为了减少起下钻对井壁的破坏,原计划采用 $\varnothing 216$ mm取心后 $\varnothing 311$ mm扩孔并钻进至下一段取心处,这样施工进度较快但每次取心时钻铤和岩心管都在 $\varnothing 311$ mm孔内运转,孔壁对钻具约束小;因取心工作

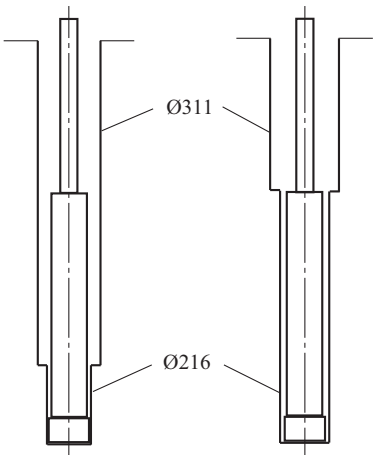
对钻具稳定性的要求,改为阶段性扩孔即每次扩孔预留 50~60 m 不扩,使钻铤和岩心管运转在 $\varnothing 216$ mm 孔内(见图 6)。经实践验证,阶段性扩孔减少了钻具与井壁的间隙,增加约束可减少涡动,保持钻具回转的稳定性,有利于提高取心质量。

3.5 优化钻进参数

岩心管在井底受压,钻具回转伴随着多种复杂运动,过大的压力会导致岩心管外管弯曲变形,产生粘滑运动或涡动。对于粘土或者泥岩地层,钻压过大容易造成泥包钻头,影响进尺。不同井深所需的钻压也不相同。钻压要依据地层和井深情况控制在最佳范围。本项目使用 8 根 $\varnothing 159$ mm 钻铤,总重力 100 kN,钻压控制在 10~65 kN 较适宜。

钻具弯曲和偏心不可能完全避免,转速越大离心力越大,越容易造成钻具抖动,影响取心,所以转速需要限定在一定范围^[5],经实践验证,转速在 40~90 r/min 效果较好。

泵量大小对新近系地层岩心采取率影响较大,



(a) 原计划取心钻孔结构 (b) 实际取心钻孔结构

图 6 取心钻进井身结构

Fig.6 Well structure with core-drilling

尤其是对于胶结程度较差的砂层,泵量越大对岩心的冲刷侵蚀越大^[21],经实践验证取心时泵量在 15~20 L/s 比较合适。

不同井段取心钻进时具体的钻进参数见表 2。

表 2 不同井段取心时钻进参数

Table 2 Drilling parameters in diffrentes well sections

井深/m	钻压/kN		转速/(r·min ⁻¹)		泵量/(L·s ⁻¹)	
	砂(岩)层	粘土(泥岩)	砂(岩)层	粘土(泥岩)	砂(岩)层	粘土(泥岩)
600~800	10~20	20~30	40~50	60~70	15	20
800~1000	15~25	25~30	40~50	60~70	15	20
1000~1200	20~30	25~30	50~60	70~90	15	20
1200~1500	25~35	25~35	50~60	80~90	18	20
1500~1800	35~45	35~45	50~60	70~80	20	20
1800~2200	45~60	50~65	60~70	60~70	20	20

3.6 规范操作

3.6.1 取心钻具的日常维护

(1)悬挂器轴承因泥浆中的砂粒磨损很快,每钻进 48 h 需更换一次。

(2)每次取心后检查卡板式取心器的卡板和弹簧是否复位正常,有无过度磨损,发现问题及时更换。

(3)检查岩心内管有无弯曲变形。

(4)调整岩心爪卡与钻头内壁的间距在 10~12 mm。

(5)组装完好后的岩心管总成垂直放置,不得平放在场地。

3.6.2 取心操作

(1)下钻时不投钢球,钻具下至孔底 5~10 m 前开泵冲洗,清洗孔底后投入钢球正常取心钻进。

(2)取心钻进中途不提钻,钻进完毕停泵上提钻具割心。

(3)取心钻具在 $\varnothing 216$ mm 钻孔内放缓提钻速度,出小孔进入 $\varnothing 311$ mm 孔段正常提钻。

(4)提钻时遵守“两慢一快”起钻原则,起动慢,停放慢。

通过采取上述措施,既保证了岩心采取率,又提高了取心质量,取心情况见图 7。



图7 采取的岩心

Fig.7 The core taken out

4 结论

在新近系地层中取心,常常因地层软硬交互,粘土(泥岩)层遇水膨胀而影响取心质量,只要对影响取心质量的地质因素和工程因素进行分析,通过改进工程技术和取心工具就能找到提高取心质量的方法。

(1)松散砂层取心时要避免钻井液对岩心的冲刷,传统的取心钻头是通过中心孔向外分流,在泵量较大时难免对岩心过度冲刷造成岩心变细或者丢心;清洗钻头、携带钻渣则需要较大泵量。通过改进钻头水口布置解决了既适应较大泵量又避免了对岩心冲刷的矛盾。

(2)粘土层遇水膨胀易发生缩径卡钻事故,取心时易发生顶心或撸心影响岩心采取率,依据粘土矿物交换不同离子膨胀不同的特性,选用成本较低的钙处理钻井液体系并加入润滑剂,抑制了粘土膨胀,钻具运转平稳,既解决了粘土层取心问题,也同时提高了钻进速度。

(3)针对地层松软、岩心不易被卡取的问题,设计制作了卡板式和卡箍式组合的双作用岩心爪,实践证明双作用岩心爪既能适用于松软地层的岩心截取,又能应对偶尔出现的强度较高的胶结层段,在新近系地层取心效果良好。

(4)实践证明适当增加钻铤重力有助于抑制钻具轴向振动,缩小钻具与孔壁的间隙增加约束能减轻横向振动,提高钻井液的润滑效果能降低粘滑运动发生,采取综合措施改善钻具回转的平稳性有利于提高岩心的采取质量。

参考文献(References):

[1] 杨芳,张明德,王勇军,等.深部钻探绳索取心跨口径钻具的应用研究与拓展[J].钻探工程,2023,50(4):25-31.
YANG Fang, ZHANG Mingde, WANG Yongjun, et al. Research and development of cross-diameter wire-line coring system in deep drilling [J]. Drilling Engineering, 2023, 50 (4) : 25-31.

[2] 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.

[3] 邓都都,阮海龙,赵义,等.保压取样钻具内岩心温压采集器的研制与应用[J].钻探工程,2022,49(6):116-121.
DENG Dudu, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. Development and application of the temperature and pressure collector in the pressure core sampler[J]. Drilling Engineering, 2022, 49 (6) : 116-121.

[4] 朱芝同,伍晓龙,董向宇,等.松辽盆地页岩油勘探大口径取心技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):45-50.
ZHU Zhitong, WU Xiaolong, DONG Xiangyu, et al. Large diameter coring technology for shale oil exploration in Songliao Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(1):45-50.

[5] 曹龙龙,张恒春,王稳石,等.准噶尔盆地玛页1井长筒取心技术[J].钻探工程,2022,49(5):94-99.
CAO Longlong, ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, et al. Long barrel coring technology for Well Maye-1 in Junggar Basin [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5):94-99.

[6] 张恒春,王稳石,李宽,等.KT178型取心钻具在共和干热岩钻井中的应用[J].钻探工程,2021,48(2):29-34.
ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, LI Kuan, et al. Application of the KT178 core tool in Gonghe hot dry rock exploratory wells[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):29-34.

[7] 许俊良,宋淑玲,成伟.国外钻井取心新技术[J].石油机械,2000,28(10):53-57.
XU Junliang, SONG Shuling, CHENG Wei. Foreign new technology of coring [J]. China Petroleum Machinery, 2000, 28 (10):53-57.

[8] 张丽,白永辉,王长城,等.古近系地层取心钻进速度影响因素初步分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):24-28.
ZHANG Li, BAI Yonghui, WANG Changcheng, et al. Preliminary analysis of the influencing factors of core drilling rates in the Paleogene strata[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12):24-28.

[9] 石绍云,房勇,邓伟,等.松散砂岩取心技术的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(8):34-38.
SHI Shaoyun, FANG Yong, DENG Wei, et al. Application of coring technology in the loose sandstone[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45 (8) : 34-38.

[10] 马日,王月河.钙处理泥浆在内蒙古芒来煤矿钻探生产中的应用

- 用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(2): 55-56.
- MA Ri, WANG yuehe. Calcium-treated mud is applied in the drilling and production of Manglai Coal Mine in Inner Mongolia [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(2): 55-56.
- [11] 吴金生, 陈礼仪, 张伟. 破碎松软地层取心钻头孔底流场数值模拟及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(7): 107-110.
- WU Jinsheng, CHEN Liyi, ZHANG Wei. Numerical stimulation of bottom flow field of core bit in broken soft formation and the application[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(7): 107-110.
- [12] 杨相茂, 彭汉华, 许华松. 破碎带取心钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(3): 33-35.
- YANG Xiangmao, PENG Hanhua, XU Huasong. Coring drilling technology in fracture zone [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(3): 33-35.
- [13] 赵明, 邵玉涛, 宋刚, 等. $\phi 215.9$ mm 四牙轮取心钻头设计与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 41-48.
- ZHAO Ming, SHAO Yutao, SONG Gang, et al. Design and application of $\phi 215.9$ mm four-cone coring bit [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 41-48.
- [14] 欧阳涛坚, 程春红. 新型双管取心钻具及其在软土地层中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(9): 65-67, 88.
- OUYANG Taojian, CHENG Chunhong. Application of new type double-tube core barrel in soft soil stratum [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(9): 65-67, 88.
- [15] 毛良杰, 马茂原, 王元, 等. 平井钻柱横向振动分析[J]. 应用力学学报, 2023, 40(3): 690-701.
- MAO Liangjie, MA Maoyuan, WANG Yuan, et al. Analysis on the lateral vibration of drillstring in horizontal wells [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(3): 690-701.
- [16] 陈会娟. 井下钻柱振动信号的测量及振动激励源研究[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 57-63.
- CHEN Huijuan. Measurement of the downhole drill string vibration signal and analysis of the vibration excitation sources [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 57-63.
- [17] 高德利, 黄文君. 井下管柱力学与控制方法若干研究进展[J]. 力学进展, 2021, 51(3): 620-647.
- GAO Deli, HUANG Wenjun. Some research advances in downhole tubular mechanics and control methods [J]. Advances in Mechanics, 2021, 51(3): 620-647.
- [18] 熊虎林, 张飞, 甘辉敏, 等. 页岩气调查泉参1井大口径同径取心钻进工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(6): 19-25.
- XIONG Hulin, ZHANG Fei, GAN Huimin, et al. Coring technique for shale gas survey Quancan Well-1 [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(6): 19-25.
- [19] 景龙, 李伟. 沧州盐矿古近系塑脆性地层取心钻头选型研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(6): 71-78.
- JING Long, LI Wei. Study on coring bit selection for Paleogene plastic-brittle strata in Cangzhou Salt Mine [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 71-78.
- [20] 李晓晖, 程林, 李艳丽, 等. 深孔及松软地层大口径绳索取心钻具的研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(12): 49-52.
- LI Xiaohui, CHENG Lin, LI Yanli, et al. Study on large diameter wire-line coring tool in deep hole and soft formation drilling and the application [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(12): 49-52.
- [21] 杨联锋, 段云星. 水源钻机在超深层绳索取心钻进中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(11): 44-50.
- YANG Lianfeng, DUAN Yunxing. Application of water well drilling rig in wire line core drilling in ultra deep soft soil layer [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(11): 44-50.

(编辑 荐华)