

特深科学钻探大口径绳索取心技术的可行性

——来自松科2井的试验验证

张恒春, 朱永宜, 王稳石, 闫家, 曹龙龙, 王文

(中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399)

摘要: 为提高特深科学钻探取心效率, 针对松科2井深井大口径取心需求开展了系统的器具配套与钻具创新研究。通过改进API钻杆实现内通径 ≥ 112 mm, 可同时满足提钻与绳索取心作业需求; 研发了基于钢丝绳引导式排绳机构的6500 m绳索取心绞车; 创新设计了以中空井底动力为核心的多种组合取心钻具。在 $\varnothing 311.2$ 、 $\varnothing 215.9$ 、 $\varnothing 152.4$ mm井眼的试验表明: 深井大口径绳索取心技术整体可行, 优化钻杆与自动排绳机构应用效果良好; $\varnothing 215.9$ mm及以上井眼宜采用中空井底动力钻具, 而传统“三合一”钻具则存在动力不足的问题; $\varnothing 152.4$ mm井眼中常规绳索取心钻进效果良好, 但弹卡、坐挂等部件易因岩屑堆积失效。研究验证了深井大口径绳索取心的技术可行性, 为超万米科学钻探提供了技术储备, 并提出了针对特深井环境的钻具与流体优化建议。

关键词: 科学钻探; 特深井; 大口径; 绳索取心; 取心钻具; 中空井底动力钻具; 绳索取心绞车; 松科2井

中图分类号: P634.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)04-0094-09

Feasibility of large-diameter wireline coring technology for ultra-deep scientific drilling: Experimental verification from the CCSD-SK-2 East Borehole

ZHANG Hengchun, ZHU Yongyi, WANG Wenshi, YAN Jia, CAO Longlong, WANG Wen

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China)

Abstract: To improve coring efficiency in ultra-deep scientific drilling and address the large-diameter coring requirements of the CCSD-SK-2 East Borehole, systematic research on equipment configuration and tool innovation was carried out. The API drill pipe was modified to achieve an inner drift diameter of ≥ 112 mm, accommodating both conventional trip coring and wireline coring operations. A 6500 m wireline coring winch featuring a rope-guided spooling mechanism was developed, and various combined coring tools centered on a hollow downhole power tool were innovatively designed. Tests in the $\varnothing 311.2$ mm, $\varnothing 215.9$ mm, and $\varnothing 152.4$ mm boreholes demonstrated the overall feasibility of large-diameter wireline coring technology in deep wells, with the optimized drill pipe and automatic rope spooling mechanism performing well. For boreholes of $\varnothing 215.9$ mm and above, hollow downhole power tools are preferable, whereas conventional "three-in-one" tools suffer from insufficient power. Conventional wireline coring achieved good results in the $\varnothing 152.4$ mm borehole; however, components such as the locking latch and landing device are prone to failure due to cuttings accumulation. This study verifies the technical feasibility of large-diameter wireline coring in deep wells, provides technical reserves for ultra-deep scientific drilling exceeding 10000 m, and proposes targeted optimization suggestions for drilling tools and fluids in ultra-deep well environments.

Key words: scientific drilling; ultra-deep well; large-diameter; wireline coring; coring tool; hollow downhole power drilling tool; wireline coring winch; CCSD-SK-2 East Borehole

收稿日期: 2026-03-29; 修回日期: 2026-04-19 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.04.010

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1000807)

第一作者: 张恒春, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 硕士, 主要从事取心工艺和深部钻探技术研究, 天津市东丽区锦鲤道23号, zzhcc2002@163.com。

引用格式: 张恒春, 朱永宜, 王稳石, 等. 特深科学钻探大口径绳索取心技术的可行性——来自松科2井的试验验证[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 94-102.

ZHANG Hengchun, ZHU Yongyi, WANG Wenshi, et al. Feasibility of large-diameter wireline coring technology for ultra-deep scientific drilling: Experimental verification from the CCSD-SK-2 East Borehole[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 94-102.

0 引言

提钻取心技术虽在科钻1井、松科1井、汶川科钻等科学钻探工程大口径取心钻进中占据主导地位^[1-6],但在深井、超深井取心钻进中,绳索取心具有独特的技术优势与应用预期。德国KTB先导孔长井段应用绳索取心工艺^[7],我国大陆科钻1井也进行了大量绳索取心试验^[8],国内煤炭领域也进行了大口径绳索取心应用尝试^[9-10]。但对于5000 m以深钻井,国内绳索取心技术并未取得实质性的突破。

松科2井是以获得高质量岩心为目的的科学钻探工程,井身结构如图1所示,分五个开次施工:一开 $\varnothing 660.4$ mm钻头钻至440.96 m,二开 $\varnothing 444.5$ mm钻头钻至2806.20 m,三开 $\varnothing 311.2$ mm钻头钻至4528.90 m,四开 $\varnothing 215.9$ mm钻头钻至5911.10 m,五

开 $\varnothing 152.4$ mm钻头钻至7108.88 m完钻。三至五开为连续取心段,其中 $\varnothing 311.2$ 、 $\varnothing 215.9$ mm井眼均超出了常用取心钻具的适用井径。若想避开“小眼取心、大眼扩孔”的技术路线,大口径同径取心和大口径绳索取心是两条可选的技术路线。大口径同径取心在松科2井三开 $\varnothing 311.2$ mm井眼和四开 $\varnothing 215.9$ mm井眼得到广泛应用,并发展出长钻程大口径同径取心技术,取得了巨大的成功^[11-13]。在完成提钻取心的同时,松科2井在对钻柱、取心钻具等技术革新的基础上,在 $\varnothing 311.2$ 、 $\varnothing 215.9$ 、 $\varnothing 152.4$ mm井眼均进行了绳索取心技术探索,以扩展绳索取心的应用领域和深度,为我国正在酝酿的超万米科学钻探工程储备技术。

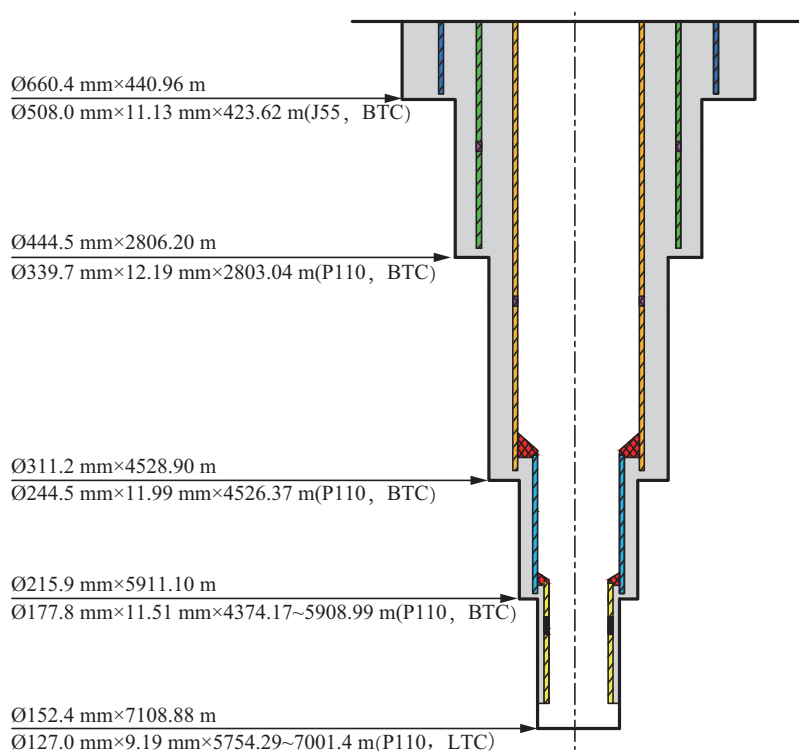


图1 松科2井井身结构

Fig.1 Casing program of the CCSD-SK-2 East Borehole

本文主要介绍松科2井大口径绳索取心相关技术配套和试验情况,并对特深科学钻探大口径绳索取心技术提出建议。

1 器具配套

1.1 钻柱

科学钻探一般进行长井段连续取心,对岩心直

径和岩心质量都有较高的要求^[8]。因此,绳索取心钻柱除了要有足够高的强度,还要有足够大的内通径,保证内管总成顺利通过。松科2井所用钻杆、加重钻杆、钻铤等管柱均兼顾了提钻取心和绳索取心的技术要求,能保证 $\varnothing 108$ mm的内管总成顺利通过,从而获得直径 ≥ 90 mm的岩心。

1.1.1 钻杆

根据松科2井井身结构,四开及以浅钻进中采用 $\varnothing 139.7$ mm 钻杆,五开钻进中采用 $\varnothing 139.7$ 、 $\varnothing 127$ mm 2种规格的塔式钻柱结构,其中上部 $\varnothing 139.7$ mm 钻杆始终不进入五开井眼。钻杆技术参数见表1。

表1 钻杆技术要求

Table 1 Technical requirements of drill pipes

管体外 径/mm	壁厚/ mm	接头外 径/mm	通径/ mm	抗拉强 度/kN	上扣扭矩/ (kN·m)
139.7	9.17	≤ 195	≥ 112	3500	≥ 60
127	7.5	≤ 145	≥ 112	2100	≥ 15

常规绳索取心钻杆强度不够,而API石油钻杆接头内径较小。以 $\varnothing 139.7$ mm 石油钻杆为例,即使内径相对较大的贯眼扣,其内径也仅为 $\varnothing 101.6$ mm,无法满足要求。松科2井钻杆设计中,保持API钻杆外形轮廓尺寸基本不变,配合通用吊卡进行起下钻作业;适当调整钻杆接头螺纹锥度,以获得 $\geq \varnothing 112$ mm的内通径。生产所用的 $\varnothing 139.7$ mm 钻杆接头外径 $\varnothing 193.7$ mm、接头内径 $\varnothing 112$ mm、管体内径 $\varnothing 121.4$ mm, $\varnothing 127$ mm 钻杆接头外径 $\varnothing 145$ mm、接头和管体内径 $\varnothing 112$ mm,各性能参数均满足表1要求,其外形轮廓如图2、图3所示。

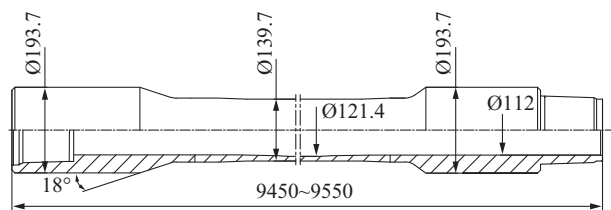


图2 $\varnothing 139.7$ mm 钻杆轮廓尺寸

Fig.2 Outline dimensions of $\varnothing 139.7$ mm drill pipe

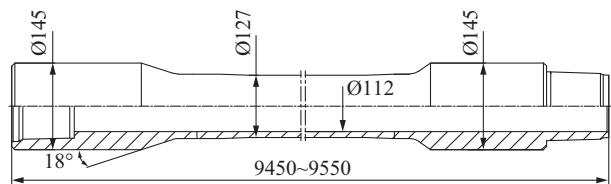


图3 $\varnothing 127$ mm 钻杆轮廓尺寸

Fig.3 Outline dimensions of $\varnothing 127$ mm drill pipe

1.1.2 加重管柱

钻进过程中,加重管柱用来给钻头施加钻压,开次不同,所用加重管柱也不尽相同。各开次绳索取心

钻进所用加重管柱的选择须坚持2个基本原则:(1)满足各开次井眼需求;(2)内通径 $\geq \varnothing 112$ mm。三开加重钻具选择 $\varnothing 254$ mm 钻铤,四开选择 $\varnothing 168$ mm 加重钻杆,五开选择 $\varnothing 139.7$ mm 加重钻杆,其结构如图4~6所示,参数见表2。

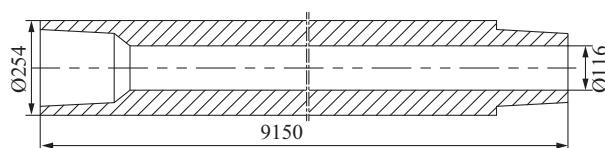


图4 $\varnothing 254$ mm 钻铤

Fig.4 $\varnothing 254$ mm drill collar

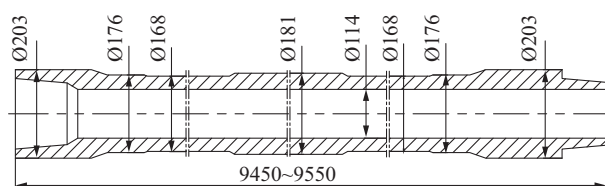


图5 $\varnothing 168$ mm 加重钻杆

Fig.5 $\varnothing 168$ mm heavy-weight drill pipe

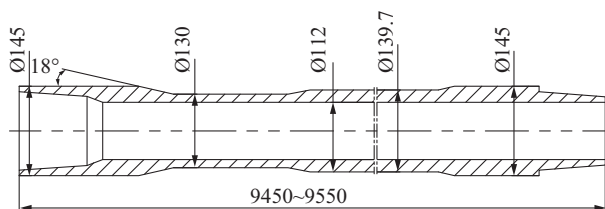


图6 $\varnothing 139.7$ mm 加重钻杆

Fig.6 $\varnothing 139.7$ mm heavy-weight drill pipe

表2 加重管柱技术参数

Table 2 Technical parameters of heavy-weight drill pipe

开次	井径/ mm	管柱类型	最大外 径/mm	通径/ mm	螺纹类型
三开	311.2	钻铤	254	116	8 $\frac{5}{8}$ REG
四开	215.9	加重钻杆	203	114	6 $\frac{5}{8}$ FH
五开	152.4	加重钻杆	145	112	特殊锥形

1.2 取心绞车

综合考虑井深、钻井液性能、钻具内总成及岩心质量大小等因素,松科2井要求绳索取心钢丝绳长度 ≥ 6500 m,拉断力 ≥ 110 kN,自重 ≤ 50 kN。松科2井配套的绳索取心绞车^[14-15]除满足基本需求外,还具有友好的人机交互界面。绞车测控系统可显示报警监控、数据监控、参数设置、钢丝绳深度调

校、井口监控视频等界面,可检测钢丝绳拉力、下放深度和速度、泵站温度、油箱液位等参数,同时可对钢丝绳拉力过载、拉力突变、剩余绳长过小、泵站温度及油箱液位高低限位等进行声光报警。绞车第一层最大拉力 80 kN,最大绳速 60 m/min,钢丝绳直径 $\Phi 13.4$ mm,钢丝绳容量 6600 m,绕绳 22 层,系统压力 20 MPa,主电机功率 110 kW,如图 7 所示。



图7 6500 m 绳索取心绞车

Fig.7 6500 m wireline coring winch

1.2.1 排绳机构

绳索取心绞车通常不重视排绳,多为自然排绳或者简单人工干预排绳,仅有部分用于较深钻孔的绳索取心绞车具有自动排绳功能。常见的排绳机构多利用往复双向螺旋丝杆实现排绳,该丝杆与卷筒以一定的传动比同步转动,带动排绳机构往复运动,从而实现自动排绳。但这种机构在现场使用过程中易受钢丝绳直径、层数变化影响,发生跳层等错乱现象。

松科2井配套的6500 m绳索取心绞车采用一种全新的排绳机构,其设计核心是由钢丝绳引导排绳机构移动,原理如图8所示。2根导杆支撑整个排绳机构,1根普通螺杆在2根导杆中间为排绳机构提供移动动力。排绳过程中,绞车测控系统实时检测收绳角度 α 的大小,当 α 超过设定范围(设定范围通常为 $3^\circ \geq \alpha \geq -3^\circ$)时,控制系统启动排绳马达,带动螺杆正转或反转,使 α 回归0位,始终保证卷筒上的钢丝绳“拉着”排绳机构走。该排绳机构不受钢丝绳直径和层数影响,在松科2井五开6400 m深处的应用实践中,能实现快速、整齐排绳,整个过程没有发生跳层、错层等现象,收绳效果良好。

1.2.2 气吹式刮泥器

气吹式刮泥器借鉴石油测井相关技术,取心绞车收绳时,在井口利用高速气流吹洗钢丝绳上的泥

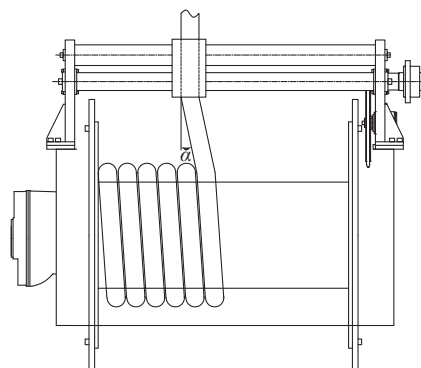


图8 排绳机构工作原理

Fig.8 Schematic diagram of rope arranging mechanism

浆,以防钻井液腐蚀钢丝绳、污染场地。其原理如图9所示,使用时,进气口接高压气源,高速气流把钢丝绳上的泥浆吹入井口。

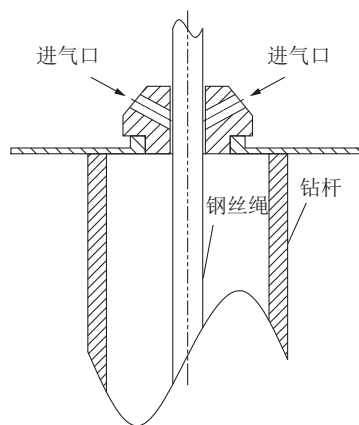


图9 气吹式刮泥器原理

Fig.9 Schematic diagram of air-blowing mud scraper

1.3 取心钻头

三开 $\Phi 311.2/95$ mm绳索取心钻头切削面较厚,专门设计了2种阶梯式复合钻头,均用金刚石钻头领眼,不同之处在于一种为牙轮扩孔,另一种为PDC扩孔,如图10所示。四开 $\Phi 215.9/95$ mm、 $\Phi 215.9/75$ mm 2种规格钻头为普通金刚石绳索取心钻头,如图11所示。五开绳索取心钻头与四开类似。与常规取心钻头相比,为应对井底动力的高速回转和震动,绳索取心钻头外保径有所加强,保径长度亦有所加长。

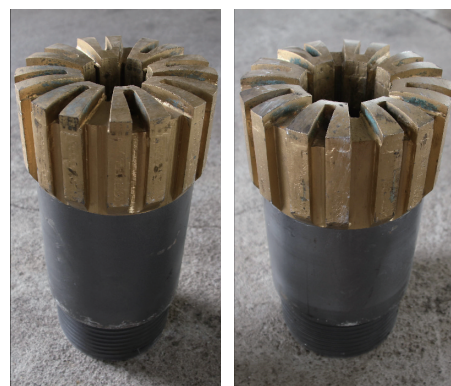
2 取心钻具及组合

2.1 取心钻具

针对井深和口径较大的特点,为提高钻进效



图10 Ø311.2/95 mm 复合钻头
Fig.10 Ø311.2/95 mm hybrid bits



(a) Ø215.9/75 mm 钻头 (b) Ø215.9/95 mm 钻头
图11 Ø215.9 mm 钻头
Fig.11 Ø215.9 mm bits

率,松科2井创新设计了一种新的“三合一”取心钻具,即中空螺杆(或中空涡轮)+中空液动锤+绳索取心钻具的中空井底动力绳索取心钻具,如图12所示。使用时,中空螺杆(或中空涡轮)、中空液动锤随钻头一起下钻至孔底,钻具内总成通过钻柱及中空井底动力钻具的中空通道投放到位。与传统“三合一”相比,该设计可增加绳索取心井底动力钻具的径向尺寸,从而增大钻具功率,提高施工效率。

另外,针对大口径及高温特点,设计了涡轮钻具+绳索取心、液动锤+绳索取心的“二合一”取心

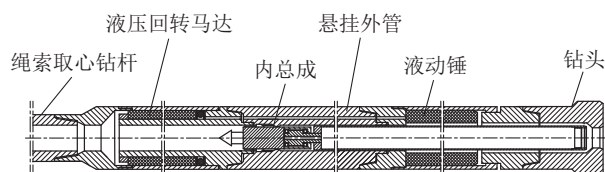


图12 中空井底动力绳索取心钻具结构示意图
Fig.12 Schematic structure of hollow downhole power wireline coring assembly

钻具,以及涡轮钻具+液动锤+绳索取心的“三合一”取心钻具,以验证相关技术在深井中应用的可行性,钻具参数见表3。

表3 绳索取心钻具规格参数
Table 3 Specifications and parameters of wireline coring tools

开次	钻具类型	钻头直径/mm	岩心直径/mm	外管外径/mm	内管外径/mm
三开	Ø273 mm 中空涡轮(或中空螺杆)+Ø273 mm 中空液动锤+绳索取心钻具	311.2	95	273	108
三开	Ø108 mm 液动锤+绳索取心钻具	311.2	95	178	108
四开	Ø108 mm 液动锤+绳索取心钻具	215.9	95	178	108
四开	Ø194 mm 中空涡轮+Ø194 mm 中空液动锤+绳索取心钻具	215.9	75	194	89
四开	Ø108 mm 涡轮+Ø108 mm 液动锤+绳索取心钻具	215.9	95	194	108
五开	Ø108 mm 涡轮+Ø89 mm 液动锤+绳索取心钻具	152.4	75	140	89
五开	Ø89 mm 液动锤+绳索取心钻具	152.4	92	140	108
五开	Ø108 mm 涡轮+绳索取心钻具	152.4	75	140	89
五开	Ø140 mm 普通绳索取心钻具	152.4	92	140	108

2.2 钻具组合

根据井径不同,各开次绳索取心钻具组合:

三开:Ø139.7 mm 钻杆+转换接头+Ø254 mm 钻铤+Ø298 mm 绳索取心钻具+Ø311.2 mm 绳索取心钻头。

四开:Ø139.7 mm 钻杆+转换接头+Ø168 mm 加重钻杆+Ø194 mm 绳索取心钻具+Ø215.9 mm 绳索取心钻头。

五开:Ø139.7 mm 钻杆+转换接头+Ø127 mm 钻杆+Ø139.7 mm 加重钻杆+Ø140 mm 绳索取心

钻具+ $\varnothing 152.4$ mm 绳索取心钻头。眼、四开 $\varnothing 215.9$ mm 井眼和五开 $\varnothing 152.4$ mm 井眼进行了不同阶段的试验,试验目的和技术指标见表 4。

3 入井试验及分析

绳索取心相关技术分别在三开 $\varnothing 311.2$ mm 井

表 4 绳索取心钻具试验情况表
Table 4 Test results of wireline coring tools

序号	井段/m	进尺/ m	心长/ m	采取 率/%	钻速/ (m·h ⁻¹)	钻头直径(外 径/内径)/mm	钻头类型	试 验 目 的
1	4513.74~4514.62	0.88	0.80	90.91	0.20	311.2/95	牙轮复合	钻头可行性试验
2	4514.62~4527.01	12.39	12.39	100.00	0.47	311.2/95	PDC 复合	$\varnothing 273$ mm 中空涡轮
3	4527.01~4528.01	1.00	0.00	0.00	0.35	311.2/95	PDC 复合	$\varnothing 273$ mm 中空涡轮+ $\varnothing 273$ mm 中空液动锤
4	4528.01~4528.90	0.89	0.80	89.89	0.16	311.2/95	PDC 复合	$\varnothing 273$ mm 中空涡轮+ $\varnothing 273$ mm 中空液动锤
5	5859.91~5859.91	0.00				215.9/95	金刚石	$\varnothing 108$ mm 涡轮+ $\varnothing 108$ mm 液动锤+绳索取心
6	5863.32~5865.08	1.76	1.23	69.89	0.70	215.9/75	金刚石	$\varnothing 194$ mm 中空涡轮+绳索取心
7	5865.08~5868.43	3.35	2.97	88.66	0.82	215.9/75	金刚石	$\varnothing 194$ mm 中空涡轮+绳索取心
8	5868.43~5868.55	0.12	0.12	100.00	0.08	215.9/75	金刚石	$\varnothing 194$ mm 中空涡轮+绳索取心
9	6419.01~6420.08	1.07	0.00	0.00	0.51	152.4/92	金刚石	常规绳索取心
10	6420.08~6430.80	10.72	10.46	97.57	0.80	152.4/92	金刚石	常规绳索取心
11	6430.80~6441.65	10.85	10.31	95.02	1.15	152.4/92	金刚石	常规绳索取心
12	6441.65~6451.77	10.12	9.30	91.90	0.63	152.4/92	金刚石	常规绳索取心

3.1 三开功能性试验

为验证中空螺杆、中空涡轮及复合钻头的功能可行性,在三开 $\varnothing 311.2$ mm 井眼进行了 4 个回次的中空井底动力钻具和复合钻头的功能可行性试验。

第一个回次, $\varnothing 311.2/95$ mm 牙轮复合钻头+ $\varnothing 228$ mm 中空螺杆入井试验,钻具内总成地表组装后入井,钻进结束后提钻(未进行投放和打捞)。泥浆泵排量 32~40 L/s,钻压 30~100 kN,进尺慢,泵压高,从 4513.74 m 钻至 4514.62 m 后不进尺提钻,进尺 0.88 m,获取岩心 0.80 m,岩性为黑色泥岩。

第二个回次, $\varnothing 311.2/95$ mm PDC 复合钻头+ $\varnothing 273$ mm 中空涡轮钻具入井试验。泥浆泵排量 35~41 L/s,钻压 5~60 kN,因涡轮软输出特性,钻压控制难,机械钻速不稳,最高 1 m/h 以上,从 4514.62 m 钻至 4527.01 m 满管提钻,进尺 12.39 m,获取岩心 12.39 m,岩性为黑色泥岩、粉砂质泥岩、灰色粗砂岩。

后续 2 个回次, $\varnothing 311.2/95$ mm PDC 复合钻头+ $\varnothing 273$ mm 中空涡轮钻具+ $\varnothing 273$ mm 中空液动

锤入井试验。泥浆泵排量 35~38 L/s,划眼、进尺困难,试验进尺效果不佳。

3.2 四开绳索打捞和取心钻进试验

四开 $\varnothing 215.9$ mm 井眼,首先进行了传统“三合一”钻具($\varnothing 108$ mm 涡轮+ $\varnothing 108$ mm 液动锤+绳索取心)的入井试验,因井内复杂情况和 $\varnothing 108$ mm 涡轮钻具动力不足,未能进尺。在 4840 m(钻进后提钻至 4840 m)井深进行首次打捞试验,钻井液密度 1.3 g/cm³、漏斗黏度 45 s、滤失量 0.6 mL/30 min、泥饼厚度 0.3 mm、初切力 1.5 Pa、终切力 4.5 Pa、含砂量 0.2%、pH=10。打捞器成功到位,钢丝绳上提拉力至 60 kN 仍无法拉动内总成,转而进行脱卡试验,成功脱卡;随后在 2560 m 井深再次打捞,打捞成功。

在 5863.32~5868.55 m 井段进行了 3 个回次的 $\varnothing 194$ mm 中空涡轮+绳索取心“二合一”钻具试验,钻井液密度 1.3 g/cm³、漏斗黏度 46 s、滤失量 0.6 mL/30 min、泥饼厚度 0.4 mm、初切力 1.0 Pa、终切力 4.0 Pa、含砂量 0.2%、pH=9.5。正常钻进时机械钻速较螺杆有明显提高,但回次进尺较短。

同时,在4500、3500、2000 m井深进行了多次打捞、脱卡试验,脱卡均能成功,但仅在2500 m以浅可打捞成功。此过程中绞车排绳效果很好。

3.3 五开超深绳索取心钻进试验

五开 $\Phi 152.4$ mm井眼,在6419.01~6451.77 m井段进行了4个回次的常规绳索取心试验。因井眼限制,未使用井底动力工具。

第一个回次,试验绳索取心双筒钻具,下钻至2263 m处,进行内总成投放和打捞测试,投放成功。下钻到底后钻进困难、蹩钻,勉强进尺1.07 m后提钻,提钻过程中发现内总成未投放到位,投放至5300 m处遇卡。

然后试验绳索取心单筒钻具,成功试验了2个打捞回次,且打了2个满筒。钻压10~30 kN,转速60 r/min,泥浆泵排量5 L/s,平均机械钻速0.8~1.15 m/h,共进尺21.57 m,获取岩心20.77 m,岩性为灰色浅变质砂岩、杂色浅变质砾岩、紫色泥质板岩,如图13所示。起钻后发现捞矛头弹卡因泥砂堆积卡死。



图13 绳索取心获取的岩心

Fig.13 Cores obtained by wireline coring

最后,在6441.65 m井深处再次试验绳索取心双筒钻具,钻压40~60 kN,转速60 r/min,泥浆泵排量5 L/s,平均机械钻速0.63 m/h,共进尺10.12 m,获取岩心9.30 m,岩性为杂色复成分砾岩。内总成上提至5375 m深度处钢丝绳发生断裂,后续未再进行绳索取心试验。

3.4 试验分析

3.4.1 配套器具方面

经过改进的 $\Phi 139.7$ mm钻杆兼顾提钻取心和绳索取心需求,在整个工程周期表现出了良好性能。松科2井从2014年4月开钻至2018年5月完

钻,共起下钻477个回次,接头螺纹表现出了良好的抗拉、抗扭、耐磨性能,处理事故过程中更是经受了极端的拉伸考验,最大上提拉力达3150 kN。

所用 $\Phi 127$ mm绳索取心钻杆入井次数有限,接头螺纹磨损较快,液气大钳夹持时易变形。为实现 $\Phi 112$ mm的通畅, $\Phi 127$ mm绳索取心钻杆牺牲了接头壁厚,特别是螺纹处净壁厚,致使螺纹设计口径受限,牙高较矮,整体降低了接头强度。在液气大钳强大的夹持力下接头变形,加剧了螺纹拧卸扣时的磨损。

$\Phi 311.2/95$ mm牙轮复合钻头进尺困难,分析原因可能是牙轮钻头不适用致密黑色泥岩地层,同时螺杆产生的摆动加剧了岩心堵塞,致使进尺困难。 $\Phi 311.2$ mm绳索取心钻头与提钻取心钻头性能接近,但绳索取心钻头岩心更小、唇面更厚,碎岩体积也更大,影响机械钻速。

6500 m绳索取心绞车使用过程中表现出了良好的排绳能力,但也有明显的不足:(1)采用液压驱动,能量利用率低,需配备较大的电机;(2)绞车最大拉力80 kN偏小,多次无法成功打捞。钢丝绳发生断裂,分析其原因是排绳导轮直径小于钢丝绳使用要求的最小直径,致使使用过程中钢丝绳的弯曲应力增大;同时排绳导轮槽设计不合理,钢丝绳受较大拉力的情况下在轮槽内变形,加速钢丝绳磨损。

3.4.2 取心钻具方面

$\Phi 273$ mm中空涡轮钻具表现出了一定的技术可行性,配合 $\Phi 311.2/95$ mm PDC复合钻头,在不堵心的情况下,最高机械钻速可达1.5 m/h。但 $\Phi 273$ mm中空涡轮钻具要求排量大,致使泵压过高,给泥浆泵及整个循环系统都带来了严峻的考验。 $\Phi 273$ mm中空液动锤入井2个回次,效果并不佳,分析原因可能是液动锤运动部件在钻井液中被沥青质材料粘住,未能正常工作。

$\Phi 108$ mm涡轮+ $\Phi 108$ mm液动锤驱动 $\Phi 215.9$ mm取心钻头,“小马拉大车”,扭矩严重不足,钻具接触井底时涡轮钻具容易制动,很难获得理想的钻进效果。 $\Phi 194$ mm中空涡轮虽能驱动 $\Phi 215.9$ mm取心钻头钻进,但钻进过程以划眼为主,机械钻速受岩心堵塞影响最大,更易发生岩心堵塞。分析原因是该井段井斜超过 13° ,钻压传递困难且不均匀,而涡轮钻具的输出特性又与钻压有很大关系。钻

压不均致使井底涡轮钻具输出转速十分不稳定,对岩心扰动大,造成岩心破碎堵心。

Ø152.4 mm 常规绳索取心钻具使用效果较好,虽然 20 m 岩心管内总成投放被卡在钻柱内,但 10 m 岩心管内总成投放打捞都比较顺畅,表现出了良好的技术可行性,但也出现了弹卡被岩屑堆积卡死的情况。分析原因是钻井液在高温环境下携砂能力下降,重晶石等固相颗粒析出并在弹卡处堆积,最终堵死弹卡。

4 特深井大口径绳索取心技术建议

松科2井绳索取心试验证明了中空井底动力、大直径绳索取心具有一定的技术可行性,但特深井大口径绳索取心技术面向更深应用深度与更高井底温度环境,技术挑战更大。基于松科2井绳索取心试验情况,对特深井大口径绳索取心技术提出如下建议。

(1)配套绳索取心绞车排绳应可靠,且具有足够的拉力和上提速度;取心钻头应与地层及井底动力钻具相适应,有足够的寿命和理想的机械钻速。

(2)设计合理的内外总成间隙,确保内总成,特别是超长内总成投放到位。

(3)Ø215.9 mm 及以上口径绳索取心钻进时,宜选用中空井底动力,以提高动力钻具输出功率;应进一步优化中空液动锤运动件结构,确保其在深井及钻井液固相含量较高的环境下正常工作;Ø152.4 mm 口径绳索取心宜采用传统“三合一”井底动力形式,但应注意对其输出特性进行优化,提高井底动力钻具效率和功率。

(4)应合理设计绳索取心钻具钻井液流道,坐挂和弹卡等关键部位应具有自动冲洗功能,防止岩屑等堆积卡死。

(5)应使用低摩阻岩心管,并优化卡簧结构,降低岩心进入岩心筒的阻力。

(6)特深井大口径绳索取心所用钻井液应为无固相或低固相钻井液,具有良好的抗高温性能。

5 结论

(1)松科2井绳索取心试验证明了深井大口径绳索取心技术的可行性,配套的改进后的 API 钻杆、绳索取心绞车排绳机构等较为成功,可为特深井大口径绳索取心技术提供参考。

(2)Ø215.9 mm 井眼钻进中,传统“三合一”取心钻具动力不足的缺陷尤为明显,很难获得理想的钻进效果;以中空井底动力钻具为基础的“三合一”取心钻具技术可行,但应对中空动力钻具及取心钻具进行结构优化。

(3)常规绳索取心在深部井段取得了良好的试验效果,但钻具坐挂、弹卡等关键部件还应进一步优化,防止卡死致使打捞失败。

参考文献(References):

- [1] 朱永宜,王稳石.松科一井(主井)取心钻进工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(9):1-5,10.
ZHU Yongyi, WANG Wenshi. Coring drilling technology in Well-1 (main shaft) of Songliao scientific drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(9):1-5,10.
- [2] 朱永宜,王稳石.中国白垩纪科学钻探松科一井(主井)钻探工程概要[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(3):1-4.
ZHU Yongyi, WANG Wenshi. Summary on China Cretaceous scientific drilling engineering in well-1 of Songliao scientific drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(3):1-4.
- [3] 王稳石,朱永宜,贾军,等.汶川地震断裂带科学钻探项目取心钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9):28-31,38.
WANG Wenshi, ZHU Yongyi, JIA Jun, et al. Coring drilling technology in wenchuan earthquake fault scientific drilling project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(9):28-31,38.
- [4] 朱恒银,朱永宜,张文生,等.汶川地震断裂带科学钻探项目WFSD-3孔施工技术与体会[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9):12-17.
ZHU Hengyin, ZHU Yongyi, ZHANG Wensheng, et al. Construction technology and experience of WFSD-3 hole of wenchuan earthquake fault scientific drilling project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(9):12-17.
- [5] 张晓西,杨甘生,朱永宜,等.大口径硬岩钻探技术在中国大陆科学钻探工程中的应用[J].探矿工程,2003(1):23-27.
ZHANG Xiaoxi, YANG Gansheng, ZHU Yongyi, et al. The application of the hard rock drilling technique with large diameter in Chinese continental scientific drilling engineering[J]. Exploration Engineering, 2003(1):23-27.
- [6] 杨甘生,王达.科钻一井取心钻进技术研究[J].石油钻探技术,2006,34(3):8-11.
YANG Gansheng, WANG Da. Research on coring technology in well CCSD-1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(3):8-11.
- [7] 李鑫森,李宽,孙建华,等.国内外绳索取心钻具研发应用概况及特深孔钻进问题分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):15-23.
LI Xinmiao, LI Kuan, SUN Jianhua, et al. Development and

- application of wireline coring tool and diagnosis of ultra-deep hole drilling problems [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4): 15-23.
- [8] 王年友, 谢文卫, 冯起赠, 等. 绳索取心钻探技术的新发展——三合一组合钻具[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(9): 70-72, 74.
- WANG Nianyou, XIE Wenwei, FENG Qizeng, et al. New development of wire-line coring drilling—"three-in-one" drilling tool [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(9): 70-72, 74.
- [9] 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.
- [10] 姚彤宝, 张春林, 刘晓刚. 大口径绳索取心钻具在特厚软煤中的取心应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(12): 25-28.
- YAO Tongbao, ZHANG Chunlin, LIU Xiaogang. Application of large-diameter wire-line coring barrel in thick soft coal [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(12): 25-28.
- [11] 朱永宜, 王稳石, 张恒春, 等. 我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系[J]. 地质学报, 2018, 92(10): 1971-1984.
- ZHU Yongyi, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, et al. Implementation overview of Chinese continental scientific drilling (CCSD) project and technical systems of core boring [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(10): 1971-1984.
- [12] 闫家, 梁健, 王文, 等. 深井高速涡轮钻配套同径取心技术研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 23-30.
- YAN Jia, LIANG Jian, WANG Wen, et al. Research on the same diameter coring drilling technology used by high-speed turbodrill for deep well [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 23-30.
- [13] 曹龙龙, 张恒春, 闫家, 等. 井底动力高效取心技术[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 156-157.
- CAO Longlong, ZHANG Hengchun, YAN Jia, et al. Efficient coring technology with downhole power [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 156-157.
- [14] 胡郁乐, 喻西, 张惠, 等. 6000 m用取心绞车电液控制及辅助监测系统的设计[J]. 矿山机械, 2016, 44(2): 31-34, 41.
- HU Yule, YU Xi, ZHANG Hui, et al. Design of electro-hydraulic control and auxiliary monitoring system of coring winch for drilling of 6000 m [J]. Mining & Processing Equipment, 2016, 44(2): 31-34, 41.
- [15] 张恒春, 胡郁乐, 陈福练, 等. 松科2井6500 m绳索取心绞车研制[C]//第十九届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 乌鲁木齐: 中国地质学会探矿工程专业委员会, 2017: 220-223.
- ZHANG Hengchun, HU Yule, CHEN Fulian, et al. Development of 6500 m wire-line coring winch in Songke 2 well [C]// Proceedings of the 19th National Academic Exchange Annual Conference on Prospecting Engineering (Geotechnical Drilling and Excavation Engineering). Urumqi: Professional Committee of Mining Engineering of the Geological Society of China, 2017: 220-223.

(编辑 王跃伟)