

超长水平孔绳索取心定向纠斜钻进及 测井技术研究示范

张小平¹, 石绍云^{*2,3}, 梁俊俊¹, 李正前^{2,3}, 何定池¹, 杨 栋^{2,3}, 张海锋¹, 唐治建²
(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510600; 2. 成都华建地质工程科技有限公司, 四川 成都 611734;
3. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 在千米级绳索取心水平孔钻进中, 开展水平孔定向纠斜及测井技术研究示范, 创新形成超深水平定向钻孔绳索取心纠斜工艺技术, 实现了千米级深孔的钻孔轨迹精准控制; 采用钻杆内水力投送物探测试设备和钻孔电视设备的工艺, 有效解决了超长水平钻孔投送难、测试难、提出难三大难题, 形成了小口径超长水平钻孔综合测井技术体系; 成功完成孔深925 m的水平定向钻探孔钻进任务, 精准进入地质目标靶区, 实现了勘察目的。

关键词: 超长水平孔; 水平定向钻探; 绳索取心; 定向纠斜; 测井技术; 水力输送; 钻孔电视

中图分类号: P634; TE243 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0211-07

Research and demonstration of wire-line coring directional deviation correction drilling and logging technology for ultra-long horizontal hole

ZHANG Xiaoping¹, SHI Shaoyun^{*2,3}, LIANG Junjun¹, LI Zhengqian^{2,3},
HE Dingchi¹, YANG Dong^{2,3}, ZHANG Haifeng¹, TANG Zhijian²

(1. China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510600, China;
2. Chengdu Huajian Geological Engineering Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 611734, China;
3. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: In the drilling of kilometer level wire line coring horizontal holes, the research and demonstration of directional deviation correction and logging technology for horizontal holes are carried out. The technology of full hole wire line coring deviation correction for deep horizontal directional drilling was innovated and formed, and the precise control of the drilling track was realized. Using hydraulic transmission of geophysical testing equipment and drilling television equipment inside the drill pipe has effectively solved the three major problems of difficulty in delivering, testing, and proposing ultra-long horizontal boreholes, forming a comprehensive logging technology system for small caliber and ultra-long horizontal boreholes. The drilling task of 925m deep horizontal directional drilling hole was successfully completed, accurately entering the geological target area and realizing the exploration purpose.

Key words: ultra-long horizontal hole; horizontal directional drilling; wire-line coring technology; directional deviation correction; logging technology; hydraulic transportation; borehole TV

0 概述

环北部湾广东水资源配置工程是广东省迄今

为止投资规模最大、输水线路最长、建设条件最复杂、影响面最广的水利项目, 属于国内居前、行业瞩

收稿日期: 2023-05-22; 修回日期: 2023-08-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.031

第一作者: 张小平, 男, 汉族, 1981年生, 高级工程师, 工程地质专业, 长期从事水利水电勘察工作, 广东省广州市天河区沾益直街19号中水珠江设计大厦, 87117257@163.com

通信作者: 石绍云, 男, 汉族, 1966年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 长期从事探矿工艺技术和探矿科研成果转化工作, 四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路139号, 649787278@qq.com。

引用格式: 张小平, 石绍云, 梁俊俊, 等. 超长水平孔绳索取心定向纠斜钻进及测井技术研究示范[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 211-217.

ZHANG Xiaoping, SHI Shaoyun, LIANG Junjun, et al. Research and demonstration of wire-line coring directional deviation correction drilling and logging technology for ultra-long horizontal hole[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 211-217.

目的国家重大水利工程;整个线路要穿越复杂地质条件下长距离深埋隧洞,在前期勘查过程中,为了减少钻探设备运输搬迁、钻进施工造成对生态环境的破坏,沿隧道方向设计了一个千米级的超长定向取心水平孔,要求精准查明隧道沿线以及地下厂房的地质情况,实现高效、绿色钻探的环保理念,为工程建设提供可靠的地质资料^[1]。

钻孔设计孔深960 m,顶角82°,近似水平孔,将穿越多条断层和破碎带,施工地点植被茂盛、山路狭窄,运输车辆无法到达现场,采用轻便模块化钻机 and 水平绳索取心定向钻进的技术方案,在钻进过程中,进行了12次定向纠斜,成功地使钻孔进入了设计靶区;该孔还实现了水力输送测井仪器和孔内电视到达孔底,利用内置的存储式测井仪器,通过匀速提钻方式测井,圆满完成各项测试任务。

1 工程概况

1.1 地层情况

地层以变质砂岩为主,中粗颗粒,夹杂石英和氧化铁,呈淡褐色和灰色;钻孔要钻遇多个断层。地层陡倾,倾角60~70°,岩石软硬互层,以硬地层居多,岩石可钻性8级以上,钻孔需穿越多条含水量高的水沟;地层裂隙发育,岩石破碎,会遇到涌水的情况。

1.2 孔身结构

在设计超长水平孔的孔身结构时,首先要考虑的是在钻机能力允许的情况下,每一级口径的深度尽量钻进到设备的极限,确保任务的顺利实施。根据厂家提供的钻机技术指标和地层情况,该钻孔设计的孔身结构为:Ø150 mm 孔口管钻进15 m,Ø122 mm 口径钻进200 m,Ø96 mm 口径钻进至600 m,Ø76 mm 口径钻进至终孔960 m。钻孔孔身结构设计见图1。

1.3 设备、仪器、钻具配置

钻孔的地理位置在山区,考虑搬迁方便,选择1000型便携全液压模块式钻机,钻机动力由4台柴油机提供,总功率132 kW;泥浆泵除了钻机配备的小功率泥浆泵外,还配备了1台BW300/16型泥浆泵,以便在造斜钻进时使用;此外还配备绳索取心钻杆和钻具、螺杆钻具、测井仪器、定向仪器等。详见表1所示。

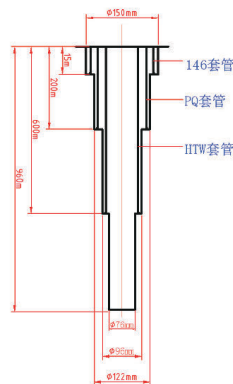


图1 设计钻孔孔身结构

表1 设备、仪器、钻具配置

序号	名称	型号	数量
1	钻机	1000	1台
2	泥浆泵	BW300/16	1台
3	测斜仪	CAV-1存储式测斜仪	1套
		KXT-CG-1型轨迹测量仪	1套
4	定向仪	LHE-2115有缆随钻测斜仪(MWD)	1套
5	物探测井仪	钻孔多参数存储式综合测井仪(I型)	1套
6	孔内电视	存储式全方位智能钻孔电视	1套
		5LZ73*7.0/1.25DW	1套
7	螺杆钻具	5LZ73*7.0/0.75DW	1套
		5LZ73*7.0直螺杆	1套
8	水平绳索取心钻具	PQ	2套
		HTW	2套
		NTW	2套
9	钻杆	PQ	200 m
		HTW	600 m
		NTW	1000 m

2 水平钻孔定向纠斜钻进

2.1 水平孔钻孔偏斜原因分析

当钻进到570 m处时,测斜发现钻孔孔底单点顶角已经达到97°,孔口至孔底的顶角为88.17°,与设计偏斜6.17°,方位角无变化。顶角虽然满足《地质岩心钻探规程》(DZ/T0227—2010)16.1.2.2条的要求:“通常情况下,在直孔施工中每100 m顶角偏斜不应超过2°,在斜孔施工中顶角不应超过3°”^[2]。但与设计孔斜方向发生了变化,往上偏斜的趋势越来越明显,测斜数据如表2所示,钻孔轨迹图如图2

所示。为了更为精准地达到勘察目的,决定采取纠斜技术措施。

表2 纠斜前测斜数据

序号	孔深/m	顶角/°	垂深/m	与设计偏差值/m
1	0	81.24	0.00	0.00
2	50	83.12	-7.60	0.64
3	80	82.92	-10.00	1.13
4	100	83.36	-12.31	1.61
5	140	83.88	-16.76	2.72
6	200	87.56	-21.04	6.79
7	260	88.19	-23.59	12.60
8	280	88.75	-24.03	14.94
9	300	89.48	-24.21	17.54
10	320	90.00	-24.21	20.33
11	340	90.15	-24.16	23.16
12	400	92.09	-22.94	32.73
13	460	94.77	-17.32	46.70
14	500	96.21	-13.19	56.40
15	540	97.05	-8.60	66.55
16	555	96.66	-6.12	71.12

在水平孔钻进中,钻机通过钻杆向钻头施加钻压,钻杆一直处于压应力状态,这是造成钻孔偏斜的主要原因,相对来说,水平孔比垂直孔钻进更容易偏斜;据不完全统计,岩心钻探水平孔钻进中的方位角变化很小,但大多数的钻孔顶角要往上翘^[3]。钻杆在孔内的运动状态是受钻孔孔身结构、钻杆钻具的组合形式、地层的稳定性、钻进的工艺技术参数(包括泥浆泵压力、流量、流速,钻的机压力、转速)等相互作用的结果。水平孔钻进中,钻具除承受重力外,还承受回转扭矩、压力、弯曲应力、离心力、涡动力、孔壁的摩擦力、孔底的碎岩阻力、岩屑偏心力、摩擦力、反作用力和反扭矩、冲洗

液的压力等^[4]。

2.2 水平孔定向钻进架桥灌浆技术

从图2可以看出,钻孔偏斜出现拐点的位置在280~300 m孔段,因此确定造斜起点在280 m处,水泥架桥封孔段为250~330 m。使用NTW钻杆对钻孔进行灌浆,建造人工孔底。

2.2.1 灌浆前的准备工作

涌水水平孔的架桥灌浆难度大,将会出现的问题有以下几方面:一是水泥浆容易被涌水稀释,造成水泥强度不够;二是钻孔的上半圆灌浆不饱满;三是替浆不彻底,钻杆里的浆液不会像垂直孔那样靠水泥浆的自重全部流出钻杆;四是上漂的钻孔灌浆后浆液会回流到低处。必须充分做好准备工作,精确计算水泥量和替浆量,严格按照规程操作,保证灌浆架桥质量。

(1)测斜。采用KXT-CG-1型陀螺钻孔轨迹测量仪精确测量钻孔顶角和方位角。

(2)提出孔内钻杆和套管。灌浆前提出孔内HTW钻杆和PQ套管,并清洗钻孔。

(3)加工木楔子。木楔子外径比钻孔尺寸小1 mm,如果尺寸过大,木楔子下放过程中遇阻,将下不到指定位置,如果尺寸过小,木楔子会受涌水压力影响而不能固定。

(4)盛水容器准备。准备3 m³和5 m³的两个塑料水桶,在桶的外沿做好刻度线,便于准确掌握搅拌水泥浆的用水量和顶替水的用量。

(5)连接泥浆泵管路。连接好BW300/16型泥浆泵的高压管和吸水管并运行试机,确认设备正常。

(6)计算水泥量和用水量水泥浆量计算:HTW钻孔灌浆长度80 m的体积为580 L,孔内损失和孔内涌水的稀释损耗按经验数据1.2倍计算,因此一共要配置696 L的水泥浆。

采用P.O42.5水泥,水灰比为0.5(质量比),按

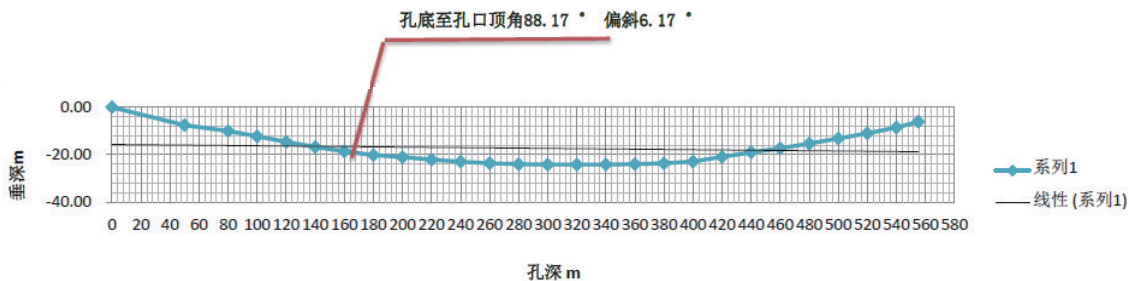


图2 钻孔偏斜轨迹

照水的密度为 1 kg/L,水泥的密度为 3.15 kg/L,水泥浆的密度是 1.835 kg/L 计算,水泥用量 0.852 t,用水量 0.427 t。

2.2.2 灌浆过程

连接 NTW 钻杆把木楔子下到 330 m 位置,提高钻杆至 300 m 处,开始试泵和试压水,检查设备运行情况。

计算顶替水量:把 696 L 水泥浆全部压出钻杆,需要注入顶替水 1110 L(300 m NTW 钻杆柱内体积 980 L+高压管路体积 50 L+泄漏量 80 L)。

(1)在 300 m 处开始灌注水泥浆量 696 L,然后注水 50 L(50 L 是地面高压管路的体积,注入 50 L 水是让高压管路的水泥浆全部进入钻杆里)。

(2)迅速拆卸主动钻杆,在钻杆里放入事先加工好的橡胶活塞,目的是加入顶替水时,水泥浆在活塞的作用下全部泵出钻杆,同时水泥浆也不被顶替水稀释,如果不加橡胶活塞,部分水泥浆会停留在钻杆里的底部,造成灌浆质量差、灌浆量不够、钻杆被水泥浆凝固等事故。

(3)合上钻杆,灌注顶替水 721 L,让钻杆内外水泥浆基本达到平衡。

(4)迅速提高钻杆至 250 m 处,再次注水 339 L。让钻杆里的水泥浆全部被替换。共注水量 1110 L。

(5)提出钻杆,清洗钻杆、泥浆泵和高压管路。

搅拌水泥浆时间控制在 10 min 以内,灌注和顶替水过程不超过 30 min。

通过扫水泥心检验钻孔灌浆质量,钻孔架桥灌浆水泥心如图 3 所示,可见灌浆质量较好,完成架桥灌浆任务。

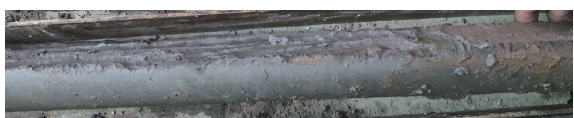


图3 钻孔架桥灌浆水泥心

2.3 水平孔定向纠斜技术

采用螺杆马达定向造斜,螺杆钻具的型号有 3 种:5LZ73*7.0/1.25DW,5LZ73*7.0/0.75DW,5LZ73*7.0 直螺杆;一般情况下,软地层使用 0.75° 的螺杆钻具,硬地层使用 1.25° 的螺杆钻具,直螺杆钻具使用在修孔铰孔过程中。

螺杆马达的工作压降超过允许值后,螺杆马达

就会被破坏,冲洗液流量也不宜超过指定的范围。5LZ73 型螺杆钻推荐钻压 15 kN,最大钻压 20 kN,流量 120~240 L/min;马达压降 2.4 MPa^[6]。

定向仪器使用 LHE-2115 型有缆随钻测量仪,通过水力输送至定向接头的键上并成功坐键,钻机在螺杆钻进中虽然不回转,不提供回转动力,但要提供钻进压力。

严格控制冲洗液的含砂量 < 0.5%,颗粒直径 < 0.3 mm^[7]。

钻具组合:96 mm 金刚石定向钻头+5LZ73*7.0/1.25DW 螺杆钻具(或者 5LZ73*7.0/0.75DW 螺杆钻具)+Ø73 mm 定向接头+Ø73 mm 无磁钻杆+NTW 绳索钻杆+变径接头+主动钻杆。

安装角:为降顶角设计初始安装角 180°,测定定向母线顺时针超前定向键的工具装合差为 30°,预计反扭转角 20°,因此实际安装角读数为 170°。因为每次的装合差都不一样,所以每次定向钻进前都要测量定向键的工具装合差,随时调整安装角。

使用 BW300/16 泥浆泵,水泵排量 100~160 L/min,泵压为 4~6 MPa,纠斜前泵压 4 MPa,螺杆钻具到达孔底后开始纠斜的工作泵压 6 MPa。

2.3.1 定向纠斜过程

方位角保持不变,顶角上漂严重,确定从 280 m 处架桥纠斜,只纠顶角,不纠方位角。当螺杆钻具的弯曲凸面安装在钻孔上帮时,母线处于探棒外径圆周的最低点,此时工具面向角(安装角)的读数为 180°,钻孔向下弯曲,顶角下垂^[8]。

前 3 次纠斜,顶角从 88.42° 降到 86.73°,降顶角 1.69°,起到了稳斜降斜效果;但从第 4 次开始,在 306.4~486.52 m 之间进行了 6 次纠斜钻进,由于变质砂岩的硬度太高,每次造斜进尺很短,造斜时效非常慢,最长的第 8 次造斜进尺了 2.71 m,由于岩石坚硬,修孔效果不好;这 6 次造斜钻进虽然顶角没有降下来,但一直维持在 89° 左右,控制了继续向上翘的趋势,为造斜打下了坚实的基础。从 513.49 m 开始,地层开始变软,造斜效果越来越好,铰孔修孔难度降低,至孔深 580.8 m,顶角从 89.51° 下降到 83.31°,整个钻孔趋势向设计趋势发展,纠斜成功。共造斜 12 次,造斜进尺 42.89 m,顶角下降了 5.11°。

造斜后钻进轨迹与设计轨迹偏差值见表 3。从表 3 中可以看出,最大的偏差距离在孔深 600 m 处达到了 43.15 m 的最高值,至终孔 924.9 m 处偏差距

离已经降到 7.95 m 的理想距离。

修孔铤孔钻头形状如图 7 所示。

表 3 造斜后钻孔与设计靶区的相差距离

序号	孔深/m	设计垂/m	实际垂深/m	与靶区距离/m
1	0	0.00	0.00	0.00
2	50	6.96	6.80	0.16
3	100	12.52	12.84	-0.32
4	200	26.42	22.21	4.21
5	300	40.32	26.22	14.10
6	400	54.22	29.74	24.48
7	500	68.12	31.25	36.87
8	600	82.02	38.87	43.15
9	700	95.92	58.23	37.69
10	800	109.82	84.23	25.59
11	900	123.72	113.35	10.37
12	924.9	128.72	120.77	7.95

钻孔实际轨迹与设计轨迹图见图 4。造斜定向取心段取出的岩心见图 5。

2.3.2 铤孔技术措施

造斜过程就是从造斜点开始强制钻头偏离原来方向向设计方位增斜钻进的过程^[9]。水平孔由于方位角没有变化,相对来说顶角比纠方位角更容易一些;造斜后要对造斜起点前后 5 m 的孔段进行修孔,修孔质量的好坏是直接影响到后续钻进能否成功的关键,对于方位角没有变化、顶角上漂的水平孔采用滑动铤孔方式效果最好。实践证明,复合铤孔和直螺杆铤孔对水平孔来说是不成功的,特别是对硬岩层更是不起作用^[10]。

针对硬岩层,研制的定向钻头如图 6 所示,钻头底唇外圆形状加工成 90°,利于定向剋取岩石,切削齿形状设计为放射状结构的水槽,胎体硬度 HRC5~8、金刚石胎体高度 8~10 mm,金刚石粒度以 80 目细颗粒为主^[11],适应于 6~8 级地层。

3 水平孔测井技术

超长水平孔孔内物探测试包括:声波(VP)测试、水压力测试、地温测试等。

传统的水平孔输送测井仪器方法是用钻杆直接连接测井仪器,随同钻杆一起推送到孔内,这种方法由于仪器裸露在钻杆的最前端,在推进过程中仪器容易被孔内掉块阻挡,造成仪器损坏等孔内事故,钻杆也无法加压和回转,经常是仪器下不到孔底,从而不能完成测井任务。针对以上难题,项目组首次采用水力输送存储式测井仪器的工艺,把绳索取心钻杆留在孔内保护钻孔不垮塌,当测井仪器到达孔底后,被钻杆的底部设计的限位装置准确固定,测试仪器露出钻杆 2 m,然后通过提钻方式测试所有测井项目。提钻速度控制在 2~3 m/min 范围内。

利用井下大容量的存储器,蓄电池供电,无需电缆,一次下井可完成孔斜、方位、井温、压力、声波、岩性、孔隙度、裂隙等测井项目^[12]。地面系统进行时间与深度记录,下井仪器存储测井数据,钻具上提测井,下井仪器状态可控,保证作业安全。存储式水力输送测井方法优势突出,操作简便^[13]。

将地球物理测井技术与数据存储技术相结合,通过相关解释处理分析软件,将各项物理参数快速分析,形成综合解释成果图,为相关工程建设提供技术支持。利用测井曲线实现岩性识别、划分地层,确定地层的深度和厚度,进行地层对比;在分析岩心、岩屑等资料的基础上,掌握不同性质的地层^[14]。

综合测井设备见图 8,钻孔电视分析解译图见图 9。综合测试技术的应用,可以配合水平钻探所取得的岩心,提高勘察成果的精度,甚至可以减少取心孔段长度以提高勘察速度、降低勘察成本^[15]。

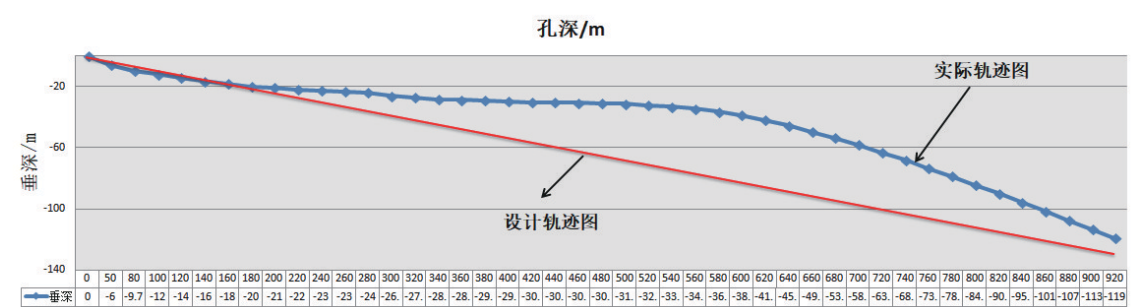


图 4 钻孔轨迹剖面



图5 定向取心段岩心



图6 定向钻头设计



图7 修孔、铣孔钻头

4 问题与不足

4.1 钻机的选择不合理

选择的1000型轻便式钻机能力偏小,动力不够,处理孔内事故能力不强,因此选择钻机时,动力选择应大于理论钻深能力的1/4比较合理。

4.2 钻具的选择不合理

在保证钻杆质量的前提下,选择薄壁钻杆和薄壁钻头是提高钻进效率的方法之一,但是钻头壁厚越薄,卡簧径向和轴向尺寸可调整范围越小,卡簧在卡簧座里面的活动空间就越小,岩心稍微有点破碎,就会造成岩心堵塞、不进尺的现象,甚至有时会造成弹卡钳在弹卡室里被卡死,无法回收内管,钢丝绳也无法脱卡,只能边提钻边锯钢丝绳。因此,在破碎的水平孔绳索取心钻进中最好使用NQ钻具,尽量不使用NTW钻具。

4.3 对地层情况了解不够

没有对现场情况做充分了解,按常规设计方案设计的开孔顶角和方位角,由于实际地层岩石偏硬,钻压加大,造成钻孔偏斜,纠斜工作花费了大量的时间。

施工前应调查该地区以往钻孔弯曲趋势和岩层走向,设计钻孔开孔角度,向容易偏斜的反方向安装一定角度,有利于利用自然偏斜规律完成钻探施工^[16]。

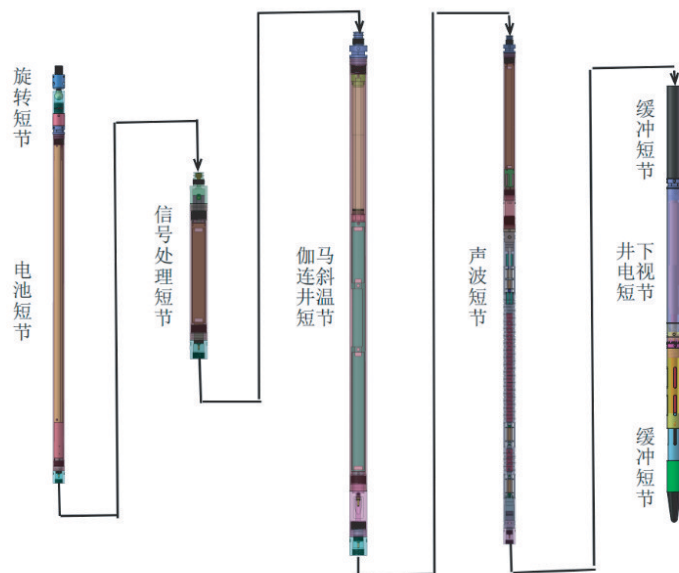


图8 多参数全方位无缆测井系统装配

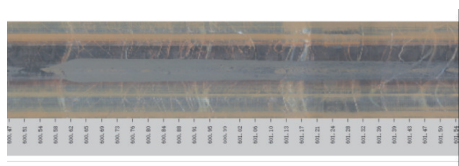


图9 钻孔电视分析解译

4.4 定向仪读数滞后于孔底

有绳定向仪是装在无磁钻杆里,距离钻孔底部有4 m以上的距离,从定向仪读出的数据不是造斜孔底数据,会出现孔底测量数据滞后现象^[17],因此不能直观的在第一时间掌握判断造斜效果的实时数据。

5 结论

该项目钻探施工单位发挥钻探技术优势,支撑国家重大工程建设,组织实施水资源配置工程地下泵房水平定向钻孔勘察与测试项目,取得了显著成效。

(1)完成水平定向钻探925 m,钻孔顶角 82.46° ,与设计顶角 82° 相差 0.46° ,岩心采取率(98%以上)、钻孔弯曲、水文观测等指标均达到或超过规范要求,精准进入地质目标靶区,达到了勘察目的;

(2)创新性采用小口径金刚石水平绳索取心随钻定向控制技术,形成了超长水平定向钻孔全孔绳索取心防斜、纠斜工艺技术体系,实现了千米级深孔的钻孔轨迹精准控制、全孔绳索取心和地质目标靶区精准勘察,解决了国内绳索取心钻进定向勘察技术的关键难题;

(3)创新性采用钻杆内水力投送物探测试设备和钻孔电视设备的工艺,有效解决了超长水平钻孔投送难、测试难、提出难三大难题,形成了小口径超长水平钻孔综合测井技术体系。

参考文献:

- [1] 石绍云,李杰,罗显梁,等.超深涌水水平孔绳索取心钻具投送和打捞技术[J].钻探工程,2021,48(11):1-7.
- [2] DZ/T 0227-2010,地质岩心钻探规程[S].
- [3] 吴金生,张统得,李晓晨,等.小直径深孔随钻定向纠斜技术在地质钻探中的应用[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会.第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2019:73-80.
- [4] 赵大军,吴金发.隧道工程勘察水平孔钻进钻具的运动与受力分析[J].钻探工程,2020,47(11):12-18,24.
- [5] 程红文,朱恒银,刘兵.南岭科学钻探NLS-D1孔防斜及纠斜技术[J].钻探工程,2022,49(3):109-117.
- [6] 程红文.定向钻进及随钻测量技术在充填孔施工中的应用[J].钻探工程,2015,42(6):11-16.
- [7] 韩明耀,柳硕林,王朝晖,等.河南省板厂矿区小直径螺杆钻定向纠斜技术[J].钻探工程,2019,46(3):36-41.
- [8] 黄忠高,李志强,潘海迪,等.江西省浮梁县朱溪矿区ZK5407深孔螺杆定向纠斜施工工艺技术[J].钻探工程,2015,42(8):43-48,54.
- [9] 张瑞平,万教育,李彬,等.直井段偏移对后期定向钻井作业的影响分析[J].钻探工程,2019,46(7):28-33.
- [10] 陈俊松,尚亚军,杨建军,等.重庆市秀山县ZK2地热井定向井段钻进工艺[J].钻探工程,2022,49(3):37-43.
- [11] 吴金生,罗显梁,徐正宣,等.高原铁路水平定向试验孔施工概况和关键技术[J].钻探工程,2022,49(6):1-7.
- [12] 李忠,赵燕来,罗光强.存储式高温高压钻孔测温仪的研制与应用[J].钻探工程,2021,48(2):35-41.
- [13] 李军,李勇,谢小国,等.狮子洋主航道水平勘察孔测井评价方法研究与应用[J].钻探工程,2022,49(6):21-29.
- [14] 谭春亮,宋殿兰,岳永东,等.钻探-物探测井技术在覆盖区填图中的应用研究[J].钻探工程,2018,45(7):44-47.
- [15] 周梦迪,刘欢,韩丽丽,等.用于工程勘察的水平定向钻探技术探讨[J].钻探工程,2023,50(2):136-143.
- [16] 易强忠,郎学伟,周兴华,等.云南金平长安安全矿大倾角钻孔绳索取心施工技术[J].钻探工程,2019,46(4):48-55.
- [17] 陈俊松,尚亚军,杨建军,等.重庆市秀山县ZK2地热井定向井段钻进工艺[J].钻探工程,2022,49(3):37-43.

(编辑 王文)