

川藏铁路勘察超长水平孔绳索取心钻探技术

肖 华¹, 刘建国², 徐正宣², 马映辉¹

(1. 四川省地质矿产勘查开发局四〇二地质队金钻公司, 四川 成都 611743;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要:新建川藏铁路途经川西高原地区,区内地势险峻、生态脆弱、道路交通条件差,开展工程勘察钻探的难度很大。其中涉及到大量特长深埋隧道的勘察。水平取心钻探是隧道勘察的重要手段之一。针对工区条件,EP600Plus型便携式钻机原设计无法施工水平孔、水平孔钻进阻力大、大量高压涌水制约取心效率等问题,通过改造升级和加工创新等多种方法灵活运用,配套辅助设备并首创架管便桥便道等环保措施,采用绳索取心钻探技术,完成最深903.28 m的水平取心钻孔。探索建立的整套技术方案现已逐渐应用成熟,其主要成果可为同类型工程项目提供参考。

关键词:超长水平钻孔;绳索取心钻探;便携式钻机;绿色勘察;架管便桥;川藏铁路

中图分类号:P634;U452.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)05-0018-09

Wire-line core drilling technology of ultra-long horizontal investigation boreholes for the Sichuan-Tibet Railway

XIAO Hua¹, LIU Jianguo², XU Zhengxuan², MA Yinghui¹

(1. Jinzuan Company of Team 402, Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Chengdu Sichuan 611743, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: The newly-built Sichuan-Tibet Railway passes through the Western Sichuan Plateau. Precipitous topography, vulnerable ecology and poor traffic conditions of the region bring about many obstacles for carrying out investigation drilling, especially for lots of extra-long deep tunnels. Horizontal core drilling is one of the important means for investigation for tunnels. In view of these conditions, the original design of the portable drilling rig EP600Plus will face such problems as inability to drill horizontal boreholes, high drilling resistance, low coring efficiency due to frequent high-pressure water gushing. With flexible application of various methods including drill upgrading, process innovation, supply of auxiliary equipment, and building access bridges and roads with steel pipes for the first time as environment protection measures, use wire-line core drilling technology, a horizontal coring borehole was completed at depth of 903.28m with a full technical plan established and proven with application. The main achievements can provide important reference for similar investigation projects.

Key words: ultra-long horizontal borehole; wire-line core drilling; portable drilling rig; green exploration; access bridge built with steel pipe; Sichuan-Tibet Railway

0 引言

川藏铁路号称“世纪工程”,是人类历史上极具挑战性的铁路建设工程,作为我国中东部地区进入

西藏自治区的大通道,其战略意义重大。工程所处川西高原平均海拔高、生态脆弱、人烟稀少、交通不便,特别是横断山脉原始森林茂盛、地形切割大、地

收稿日期:2020-02-27; 修回日期:2020-05-13 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.05.003

作者简介:肖华,男,汉族,1966年生,高级工程师,探矿工程专业,从事固体岩心钻探、工程地质钻探、油气深孔钻探、大口径灌注桩、锚固工程等技术研究和管理工作,四川省成都市郫都区港通北三路260号,464692452@qq.com。

引用格式:肖华,刘建国,徐正宣,等.川藏铁路勘察超长水平孔绳索取心钻探技术[J].钻探工程,2021,48(5):18-26.

XIAO Hua, LIU Jianguo, XU Zhengxuan, et al. Wire-line core drilling technology of ultra-long horizontal investigation boreholes for the Sichuan-Tibet Railway[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 18-26.

质构造复杂。特有的地质、地理条件给川藏铁路勘察带来了很大的难度和挑战^[1]。依据工程勘察和保护生态环境、践行绿色勘察^[2]需要,超长水平取心钻探在新建川藏铁路勘察中应运而生。

新建川藏铁路桥隧占比高达80%以上^[3],超长水平取心钻孔主要服务于铁路隧道勘察,目的是先了解隧道岩层完整性、地质构造及水文地质情况,对有毒有害气体进行探测,为铁路建设工程设计提供原始数据和实物资料。

2019年10月19日—2020年1月4日,我单位在新建川藏铁路某隧道勘察项目完成了孔深903.28 m的超长水平取心钻孔,刷新了国内工勘同类水平钻孔孔深纪录。本文就该孔钻探设备的选型与改进、钻进工艺、水平钻孔绳索取心等方面的探索进行总结,以为同类型工程项目提供参考。

1 工程概况

1.1 地理环境

工区位于四川省甘孜州境内,海拔3250 m,距雅江县城约60 km,距国道G318线约12 km。区内植被茂盛,地形切割强烈,设备进出场需修筑1.6 km简易小道和搭建4座便桥。设备物资运输和生产后勤保障比较困难。

1.2 地质情况

工区钻孔位于布西断层附近。断层破碎带宽约20~30 m,从东到西可分为劈理化带(宽约12 m),碳化带(宽约10 m),碎裂岩化带(宽约8 m)。断层错断雅江组一段地层,为右行平移断层,断层两盘出露岩性以灰色中层-块状(夹薄层)变质细-中粒岩屑石英砂岩、变质长石岩屑砂岩、变质泥质粉砂岩为主夹深灰、黑色粉砂质绢云板岩。

施工中,钻孔钻遇岩石主要有板岩、砂岩、变质砂岩和砂质板岩。砂岩和板岩互层呈现。大部分地层岩石较完整,硬度中等,研磨性中等。部分孔段岩石破碎、钻进困难。

1.3 钻孔目的及要求

钻孔设计孔深600 m,设计倾角0°,目的是查明钻孔揭露地段地层岩性、地质构造、岩体完整性、水文地质情况、地温地应力情况,对有毒有害气体进行探测等。主要有以下要求:

(1)施钻过程中每钻进50 m测量孔斜一次,钻孔顶角偏差 $\leq 3^\circ/100$ m。

(2)地表块石土堆积层岩心采取率 $\geq 80\%$,断层破碎带 $\geq 75\%$,完整基岩岩心采取率 $\geq 85\%$ 。

(3)为保证试验及采样的要求,终孔孔径 ≥ 75 mm。

(4)及时编录、采取岩样水样等。

(5)及时观测钻孔水位、水温、涌水量和水头高度等。

(6)钻探机组须配合完成物探测井和其他测试。

2 超长水平钻探工艺技术研究与应用

应用于工程勘察中的水平钻孔孔深大多在500 m以内。例如滇中引水工程水平钻孔深310.60 m^[4]、建德抽水蓄能电站水平钻孔深350 m^[5]、大崗山石灰石矿水平钻孔深420 m左右^[6]。我们已完成的水平、近水平钻孔深度一般在400~600 m。

根据钻孔设计深度和施工要求,结合区内地层复杂、交通不便等因素,就钻机选型与改进、钻孔结构、取心工艺、钻进参数等方面^[7-11]进行分析研究和总结如下。

2.1 钻探设备

2.1.1 设备选型

根据钻孔设计、不同类型岩心钻机结构特点和施工经验,本次钻探选择珠海市英格尔特种钻探设备有限公司生产的EP600Plus型便携式全液压钻机,见图1,其性能参数见表1。该型钻机采用模块化设计,结构紧凑,钻进能力强、质量轻、易搬迁、拆装便捷,适合高海拔交通不便的工区。另外,该钻机可通过快速更换动力头马达来调节钻机转速和扭矩范围,有利于整机能力的额外提升。

2.1.2 钻机改进

2.1.2.1 定制动力头马达

根据该超长钻孔钻进回转扭矩需要,考虑到



图1 原装EP600Plus型便携式全液压钻机

Fig.1 EP600Plus portable fully hydraulic drilling rig

表1 EP600Plus型钻机主要参数

Table 1 Main parameters of EP600Plus drilling rig

名 称	性能参数
钻探能力/m	HTW 200 NTW 600 BTW 800
取心直径/mm	HTW 71 NTW 56 BTW 42
钻进倾角/(°)	45~90
动力头	最大扭矩/(N·m) 800 最高转速/(r·min ⁻¹) 1300 给进行程/m 1.83 提升力/kN 50(双油缸力加倍) 给进力/kN 30(双油缸力加倍) KUBOTA, 发动机 3×33 kW/3000 (r/min ⁻¹)
外形与质量	机台尺寸/m 4×4×5 模块数量 12 最重模块/kg 180 总质量/kg 1150

EP600Plus型钻机原配动力头马达扭矩略小。在对钻机性能参数、液压系统的工作原理的分析研判基础上,认为该钻机扭矩在原配动力头马达的基础上仍有较大提升空间。而后在厂家的帮助下,定制了3个不同转速的大扭矩动力头马达(性能参数见表2),钻进能力超过了原钻机的最大理论设计值,实际应用效果非常好。

表2 马达性能参数

Table 2 Performance parameters of the motor

型 号	参考扭矩/(N·m)	参考转速/(r·min ⁻¹)
150(原配)	385	1100
180	469	888
E6-315	1000	480
E6-400	1300	382

2.1.2.2 加装支撑架

EP600Plus型钻机原设计施工倾角为45°~90°。钻机桅杆与地面的夹角受制于下方泥浆泵、打捞绞车的存在而不能继续减小,因而无法施工更小倾角

的钻孔(见图2)。充分研究其结构和工作原理后,我们在原钻机机架部位前后分别加装了高度0.5 m的支撑架(见图3),将钻机桅杆和钻机动力头导轨整体抬高,从而使钻机桅杆和动力头导轨处于水平状态时不会影响泥浆泵和绞车的正常工作。同时,由于机体的整体抬升而更加方便孔口员工的操作。调节后部支撑架高度可使钻进倾角在0°~45°内变化,从而使钻机具备0°~90°任意倾角的施工能力。

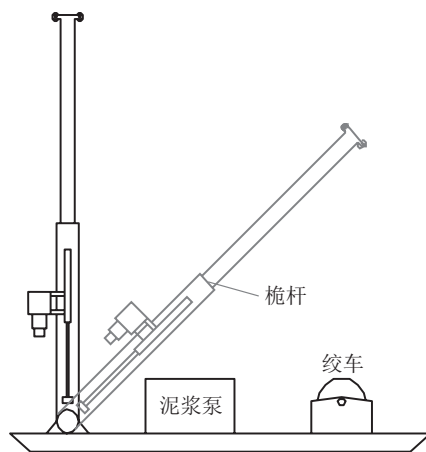


图2 原钻机示意

Fig.2 The existing drilling rig

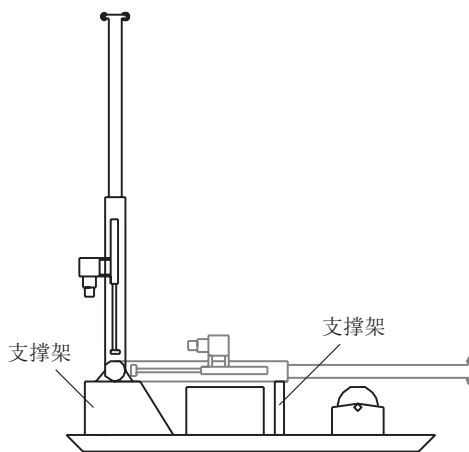


图3 加装支撑架后的钻机示意

Fig.3 The drilling rig with the support frame

2.1.3 钻机固定

EP600Plus型钻机原配机台底座由8根4000 mm×150 mm×150 mm规格的机台木组成。利用打地锚(一般在底座前部,钻孔旁边)固定底座后用铁链将钻机与底座连接的方式固定钻机。该方式一般适用于45°~90°钻孔。水平钻孔在钻进、提拔和

下钻过程中,钻机受到沿钻孔方位的作用力后,易前后移动。故需要加强前后方向对底座和钻机的约束才能保证其安装牢固。通过采用工字钢底座与钻机机架螺栓连接,且底座前后向下打地锚,地锚与工字钢相联的方式有效解决了钻机的固定问题,同时也有利于支撑架的安装(见图4)。

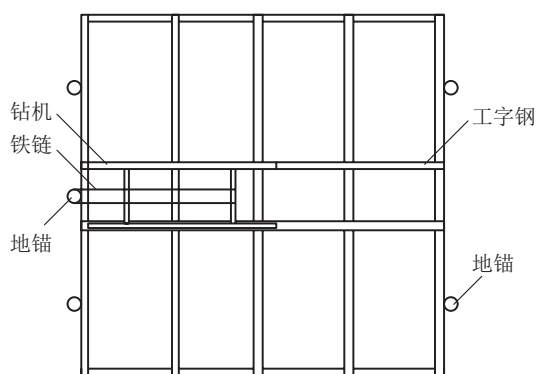


图4 钻机固定示意

Fig.4 Fixation of the drilling rig

2.2 钻孔结构与套管程序

根据地质情况和施工经验,钻孔结构设计为P、H、N、B规格四径,其中BTW($\varnothing 60$ mm)口径为技术储备口径。

钻孔实际结构及套管程序如下:

(1)开孔口径PQ($\varnothing 122$ mm),PQ金刚石绳索取心钻进至25 m时见完整基岩,在孔深30 m处停钻下PQ钻杆作为井口管。

(2)换径采用HTW($\varnothing 95$ mm)薄壁金刚石绳索取心钻进至孔深50 m时孔内出现涌水,钻进至孔深336 m停钻,下HTW钻杆作套管隔离孔内涌水。

(3)自孔深336 m换径,采用NTW($\varnothing 75$ mm)薄壁金刚石绳索取心钻具和NQ规格单管取心钻具钻进至终孔。

实际钻孔结构见图5。

2.3 钻进参数及注意事项

2.3.1 钻进参数

水平钻孔施工过程中,钻压沿水平方向的钻杆传递到孔底。随着钻孔加深,钻杆刚性减弱、柔性增加,发生弹性变形。钻杆与孔壁间的摩擦力、钻杆承受的扭矩、钻机发动机负荷均会随着孔深的增加而加大。为保证持续正常钻进,实际操作过程中钻杆转速、钻压、泵量等钻进参数的合理匹配很重要^[12]。

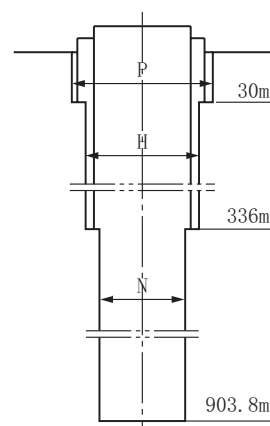


图5 实际钻孔结构示意

Fig.5 The actual borehole structure

不同口径优选不同的钻进参数(见表3)。开孔时应低压慢速回转,待孔口导向作用完成后方可加快转速和加大压力。钻进过程中,及时优化钻进参数,以便与不同地层达到最佳匹配关系。参数确定后不能随意更改,严禁钻进过程中钻压忽大忽小。

表3 钻进参数

Table 3 Drilling parameters

口径规格	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	泵量/(L·min ⁻¹)
PQ	20~25	200~300	80~100
HTW	10~15	350~700	40~60
NTW	9~12	500~850	30~50

2.3.2 水平孔钻进注意事项

- (1)金刚石钻进坚持钻头、扩孔器排队使用。
- (2)新钻头到达孔底后必须进行“初磨”后,方可采用正常参数钻进。
- (3)换径处、探头石段应控制钻进速度防止孔斜。
- (4)地层由硬变软时应减压并控制钻进速度。
- (5)在涌水钻孔中钻进应注意泵压、泵量情况,避免埋钻、烧钻事故发生。
- (6)涌水钻孔泵送打捞器或内管时应注意观察,及时泄压,防止仪表损坏。
- (7)投送打捞器时钢丝绳释放速度应等于或快于钢丝绳进入速度,防止缠绕。
- (8)打捞器提升时,人员应尽量远离钢丝绳,并注意观察,防止其断裂伤人。
- (9)破碎易堵心地层应及时取心,堵心后不宜继

续钻进。

(10)做好冲洗液性能维护,给金刚石钻进创造良好条件。

2.4 水平钻孔取心技术

2.4.1 薄壁金刚石绳索取心钻探工艺

水平孔钻进时,钻杆柱与孔壁的摩擦远大于同等深度的垂直孔^[13],尤其是钻遇复杂地层或深孔段,对钻杆的强度要求更高。根据钻孔设计和技术要求,经研究比选,决定采用薄壁金刚石绳索取心钻探工艺,器具规格参数如表4所示。

表4 薄壁钻具钻杆规格

Table 4 Specification of thin-walled drill tools and drill pipes

规格	钻杆		钻头		扩孔器	钻杆长度
	外径	内径	外径	内径		
PQ	114	103	122	85	122.5	1500
HTW	91	81.5	96	71	96.5	1500
NTW	73	64.2	75	56	75.5	1500
BTW	56.5	48.5	60	42	60.5	1500

薄壁金刚石绳索取心钻探工艺优势如下:

(1)钻柱系统具有“满、刚、直”的特点,孔斜易控制。

(2)钻杆质量轻,钻进扭矩小,切削速度快,钻速高。

(3)薄壁钻杆钢材质量好,螺纹精度高,钻杆强度大。

(4)薄壁金刚石钻头胎体厚度薄,钻头底面环状面积小,同等压力工况下相比常规金刚石钻头钻进速度更快,钻进效率更高。

(5)薄壁金刚石钻头内径大,所取岩心直径大,岩心直径能够满足工程勘察技术要求。

(6)钻孔环状间隙小,不易发生掉块卡钻事故。

(7)钻杆口径级配合理,钻孔换径时钻杆可作套管使用。

2.4.2 特制泄压钻杆

水平钻孔绳索取心用内管和打捞器的投送均需以泵送的方式进行。当遇孔内涌水特别是承压水时,内管投送和打捞过程可能会变得特别困难,所需时间明显增长,且内管是否准确到位难以判断。

该孔钻进至50 m时开始涌水,孔深600 m时钻

遇承压水(图6),且水量随孔深增加而加大。曾一度因水压过大内管无法投送而中断施工(图7)。为此,加工制作了投送钻具专用泄压钻杆(图8),使泄压排水和孔口操作更加方便,有效避免了场地积水湿滑和缓解了内管投送难题。



图6 钻孔涌水

Fig.6 Water gushing out from the borehole

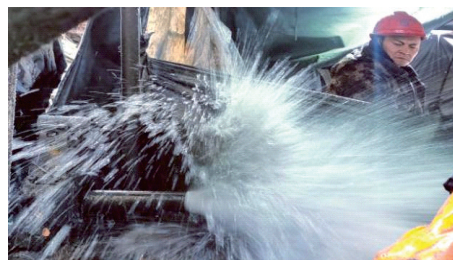


图7 涌水状态卸扣时水花飞溅

Fig.7 Water spurts out when breaking up the drill pipes on water gushing

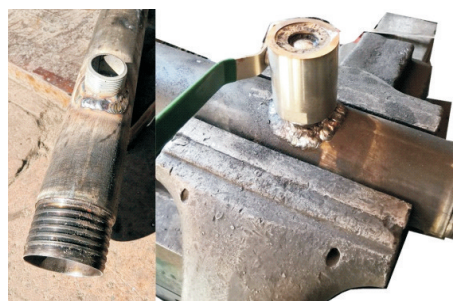


图8 特制泄压钻杆

Fig.8 Special pressure relief drill pipe

具体做法如下:

在NTW钻杆公扣以上约10 cm位置钻一个 $\varnothing 30$ mm的孔,焊上球阀,即制成泄压钻杆。球阀突出高度不能大于钻杆与动力头导轨之间的距离,否则钻杆就不能进行丝扣连接。可视孔内涌水情况大小,按需焊接多个泄压球阀。

投送内管或打捞器前,先将泄压钻杆与孔内钻

杆连接上,打开球阀引导排水一段时间。然后将内管装入泄压钻杆,钻泄压钻杆与机动力头连接,关闭球阀,开泵将内管或打捞器送至孔底。最后卸下泄压钻杆重新接上常规钻杆后便可正常钻进。

2.4.3 正循环钻进,水力反循环连续取心技术

钻孔孔深730 m时,封闭孔口周围,测得水压力为1.5 MPa左右,投送内管困难且耗时特别长。施工过程中发现,打捞内管时打捞器将弹卡收回后,不用提拉打捞器,孔内涌水就可以直接将内管推出孔口。根据这一现象,结合水力反循环钻探原理,在完整地层,举一反三,大胆运用正循环钻进,水力反循环取心的钻进方法^[14-15]取得了成功。该方法大量节省了取心时间,劳动强度低,且岩心采取率在90%以上。具体操作方法如下。

采用直联钻杆的单管钻具,定制外径75 mm,内径56 mm单管金刚石钻头,视孔内情况单管钻进。单管正循环钻进2~3 m后,将钻具提离孔底约1 m,卸开动力头视钻杆涌水情况判断钻具内孔底岩心是否拔断,当钻杆内涌水大时,说明岩心已通过水压正顺钻杆返出,反之继续钻进0.5~1 m,按之前方法重复操作直到岩心返出。

2.5 冲洗液与钻具润滑减阻

水平孔施工过程中,冲洗液不能在孔内形成液柱压力,故平衡地层压力和护壁防塌的作用较弱。因此,如何有效运用冲洗液在破碎复杂地层进行钻孔护壁防塌仍需进一步探索研究。同时基于绿色勘察和施工成本,冲洗液处理剂应经济环保^[16-18]。

工区内钻孔冲洗液选择主要考虑环保和高效钻进两个因素。根据地层条件,首选环保型植物胶类冲洗液。具体配方为:1 m³水+5~10 kg植物胶或2~5 kg黄原胶。

该配方冲洗液简单、易操作,具有较好的悬浮岩屑和携带岩屑的能力,能在井壁上形成薄而韧的聚合物膜,有较好的护心护壁防塌和润滑减阻作用^[19]。冲洗液成分以植物胶为主,不含有毒有害化学成分,可实现自然降解,不会对生态环境造成负面影响,具有显著的环保性^[20]。

完整地层可用清水钻进。钻遇破碎地层或深孔段阻力增大时可采用涂抹钻杆润滑脂的方法^[21],起到减阻润滑和一定程度的护壁作用。

2.6 孔内事故与处理

钻探工程是一种隐蔽的地下作业,地上地下多

种因素都可能导致孔内事故^[22]。由于缺乏经验,水平钻孔孔内事故处理难度可能加大。该孔深562 m时,发生一起钻具(弹卡挡头)断裂事故。提钻后,钻具和内管遗留在孔底。将打捞器头部连接在钻杆下端后下钻打捞,第一次失败,第二次尝试后成功打出内管。然后使用公锥成功打出钻具残留部分。

3 绿色勘察技术应用与创新

绿色勘察是新发展理念在工程勘察领域的具体体现之一,是地勘企业主动服务于党中央生态文明建设战略的必由之路^[23-24]。近年来,我单位践行绿色勘察理念,逐渐形成了较完善的制度体系和一整套行之有效的具体做法。就本项目而言,主要有以下措施与创新。

3.1 架管便桥

钻孔所处区域海拔约3250 m,属原始森林保护区。区内植被茂盛,多以杉树、松树及灌木丛为主。孔位距乡村公路(土石路)直线距离约1 km且无道路相通,需修建简易道路和便桥。由于地处保护区,为了减小对环境的影响,更好地保护自然生态,独创了环保实用的架管便桥(见图9),未因修路搭桥破坏原始河道,未伤及任何林木,有效保护了林区生态环境。



图9 架管便桥

Fig.9 Access bridge built with steel pipes

3.2 小型履带式运输车

根据钻探设备和地形条件,配备了能适应崎岖、湿滑冰雪路面的小型履带运输车(图10),其履带材质为橡胶,具有以下优点。

(1)体积小、质量轻,只需1 m宽的路面便可正常运输作业。

(2)接地比压小、牵引性好、转向灵活、机动性



图10 小型履带式运输车

Fig.10 Small crawler-type transportation vehicle

好、安全可靠。

(3)越野能力强、作业效率高、操纵舒适性良好、噪声低、缓冲性好^[25]。

运输车大大减轻了工人劳动强度,极大地减少了修路占地面积和修路费用,提高了工作效率。

4 施工效果

钻孔施工历时77 d,终孔口径75 mm,终孔孔深903.28 m。平均台月效率356 m。计入台月时间1820 h,其中纯钻时间838 h,占比46%。打捞岩心时间712 h,占比39%。提下钻时间116 h,占比6%。机修时间50 h(包括等待配件的时间),占比3%。事故处理时间45 h,占比3%。其他原因停钻时间58 h,占比3%。可见,纯钻时间利用率较高,取心时间占比较大,设备故障和事故处理时间较少。台时分配见图11。

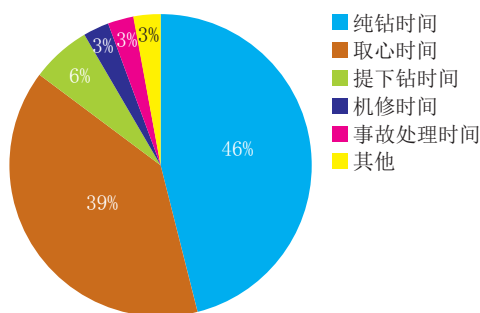


图11 钻进台时分配

Fig.11 Allocation of drilling time

相同深度(长度)条件下,水平钻孔正常绳索取心钻进期间打捞岩心时间较垂直孔长。随孔深增加,尤其是随涌水量和孔内水压力增大,打捞岩心和送内管时间大幅增加。该钻孔取心和送内管时间统

计与常规直孔取心送内管时间对比见图12。

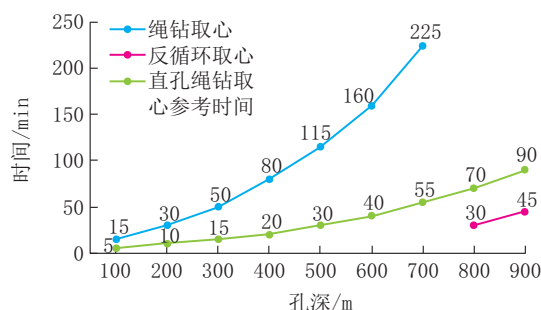


图12 取心和送内管时间统计

Fig.12 Time chart for coring and running in the inner tube

钻孔各项质量技术指标完成良好,均达到设计和铁路勘察规范要求。平均岩心采取率95%,钻孔弯曲度 $<1^{\circ}/100\text{ m}$,孔深误差率 $<1\%$ 。采用反循环方式取心时采取率达到90%,满足地质要求。

5 结语

903.28 m超长水平钻孔的顺利终孔得益于科学合理的设备选型与改进、多种方法与器具的灵活应用和机组员工的精心操作。通过分析总结,得出以下结论。

(1)设备器具性能要好。使用结构形式便于施工操作的全液压力头钻机。钻机动力应强劲、具备足够大的回转扭矩、具备足够的起拔和提升能力。绳索取心钻杆材质要好,强度要大,螺纹加工精度要高。

(2)钻机安装固定要可靠。钻机施工水平钻孔较垂直钻孔受力方向不同。便携式钻机质量轻,加强钻机的固定,尤其是钻机前后方向的固定约束必须可靠。

(3)钻孔结构和钻进参数应合理。钻孔口径级配必须合理,水平孔开孔口径宜尽可能大,钻进过程中尽量少换径,尽可能每径钻进至最大深度后才下套管变径,以此弥补冲洗液在水平孔钻进过程中护壁能力的不足。钻孔开孔很关键,直接决定着最终钻孔能否顺利实施;科学合理的钻进参数,细致到位的精准操作,能起到事半功倍的作用。在实际钻进过程中的技术参数,应严格遵循“换班换人,参数不换”的原则。

(4)正循环钻进、水力反循环连续取心技术的应

用与前提。应用正循环钻进、水力反循环连续取心技术,可节省钻探辅助工作时间,提高效率。该项技术的应用需同时满足以下3个条件:钻孔水平或近水平、孔内涌水量和水压必须达到一定值、地层完整。

(5)复杂破碎地层水平钻孔施工过程中环保型冲洗液的选用和如何利用冲洗液有效护壁、润滑减阻仍需探索研究。

川藏铁路工程给勘察施工带来新的挑战,也推动了钻探工程技术的发展与创新。水平钻孔长度记录有望继续突破。现有设备、技术方法还需不断探索研究与改进创新,存在的施工难题尚需进一步解决。施工单位应坚持贯彻绿色发展理念,结合设备、地层和施工现场等实际情况,把新技术、新产品与实践经验有机结合起来并加以灵活运用,真正做到绿色勘察,科学钻探,不断提高服务重大工程建设的能力与水平。

参考文献(References):

- [1] 郭长宝,张永双,蒋良文,等.川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J].现代地质,2017,31(5):877-889.
GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, JIANG Liangwen, et al. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area [J]. Geoscience, 2017, 31(5): 877-889.
- [2] 吴金生,李子章,李政昭,等.绿色勘查中减少探矿工程对环境影响的技术方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):112-116.
WU Jinsheng, LI Zizhang, LI Zhengzhao, et al. Technological methods of reducing impact on environment by exploration engineering in green exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10): 112-116.
- [3] 杨德宏.川藏铁路昌都至林芝段主要工程地质问题分析[J].铁道标准设计,2019,63(9):16-22.
YANG Dehong. Analysis of main engineering geological problems in Changdu to Linzhi section of Sichuan-Tibet Railway[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(9): 16-22.
- [4] 谢实宇,谢柳杨.云南滇中引水工程超深水平孔钻探实践与技术探讨[J].西部探矿工程,2015,27(6):69-71.
XIE Shiyu, XIE Liuyang. Drilling of ultra-deep horizontal boreholes in the water-diversion project in central Yunnan and technical discussion[J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 27(6): 69-71.
- [5] 许启云,周光辉,牛美峰,等.超深水平钻孔施工技术措施[J].西北水电,2017(4):72-74.
XU Qiyun, ZHOU Guanghui, NIU Meifeng, et al. Technical measures for construction of extra deep and horizontal boring[J]. Northwest Hydropower, 2017(4): 72-74.
- [6] 李占锋,翟东旭.CS1000P6L型钻机在地表水平钻孔中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(12):72-75.
LI Zhanfeng, ZHAI Dongxu. Application study on CS1000P6L drilling rig in surface horizontal drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(12): 72-75.
- [7] 张金昌.深部找矿关键钻探技术问题与对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(11):1-6.
ZHANG Jinchang. Challenges and countermeasures of key drilling techniques for the deep prospecting [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(11): 1-6.
- [8] 孙建华,王林钢,梁健,等.深孔小直径绳索取心钻进施工调研分析和技术建议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(2):12-17.
SUN Jianhua, WANG Lingang, LIANG Jian, et al. Analysis on small diameter wire-line core drilling technology in deep hole [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(2): 12-17.
- [9] 张伟,王达,刘跃进,等.深孔取心钻探装备的优化配置[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(10):34-38,41.
ZHANG Wei, WANG Da, LIU Yuejin, et al. Optimized configuration of deep exploration core drilling equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(10): 34-38, 41.
- [10] 贾美玲,欧阳志勇,马秀民,等.深孔钻探金刚石钻头技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(12):71-73.
JIA Meiling, OUYANG Zhiyong, MA Xiumin, et al. Study on diamond bit for deep hole drilling technology [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(12): 71-73.
- [11] 蔡家品,贾美玲,沈立娜,等.难钻进地层金刚石钻头的现状和发展趋势[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):67-73,91.
CAI Jiapin, JIA Meiling, SHEN Lina, et al. Present situation of diamond bit used in difficult drilling formations and the development trend [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(2): 67-73, 91.
- [12] 汤凤林,Чихоткин В.Ф.,高申友,等.关于金刚石钻进规程参数合理配合的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):76-80.
TANG Fenglin, Чихоткин В.Ф., GAO Shenyou, et al. Analytical research on rational combination of drilling parameters in diamond drilling engineering [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(10): 76-80.
- [13] 郝永进,赵江鹏.煤矿井下复杂地层近水平钻孔绳索取心钻进工艺试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):

- 33-37.
- HAO Yongjin, ZHAO Jiangpeng. Experimental research on wire-line coring drilling technology for near-horizontal boreholes in complex stratum in underground coal mine[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11):33-37.
- [14] 张永勤,孙建华,刘秀美,等.水力反循环连续取心(样)钻探在浅海砂矿勘查中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(6):15-18.
- ZHANG Yongqin, SUN Jianhua, LIU Xiumei, et al. Application of hydraulic reverse circulation continuous coring (sampling) drilling in placer mineral prospecting in shallow sea[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008,35(6):15-18.
- [15] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社,2014.
- WANG Da, HE Yuanxin, et al. Geological drilling handbook [M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [16] 付帆,陶士先,李晓东.绿色勘查高温环保冲洗液研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):129-133.
- FU Fan, TAO Shixian, LI Xiaodong. Research on environment-friendly high-temperature drilling fluid for green exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):129-133.
- [17] 孙丙伦,陈师逊,陶士先.复杂地层深孔钻探泥浆护壁技术探讨与实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(5):13-16.
- SUN Binglun, CHEN Shixun, TAO Shixian. Discussion and practice on wall protection with slurry in deep-hole drilling in complicated formation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008,35(5):13-16.
- [18] 贾宏福,罗刚,付兆友,等.MBM-GTQ盐水冲洗液体系的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(12):23-27.
- JIA Hongfu, LUO Gang, FU Zhaoyou, et al. Study on MBM-GTQ saltwater drilling fluid system and the application[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(12):23-27.
- [19] 陈礼仪,牛文林,朱宗培.植物胶冲洗液在岩土工程勘察中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(S1):314-316.
- CHEN Liyi, NIU Wenlin, ZHU Zongpei. Application of plant glue flush fluid in geotechnical engineering investigation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005,32(S1):314-316.
- [20] 王胜,陈礼仪,刘科宇.KL植物胶钻井液的环保特性研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(5):13-15.
- WANG Sheng, CHEN Liyi, LIU Keyu. Study on environmental protection performance of KL plant glue drilling fluid[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009,36(5):13-15.
- [21] 马德义,贾宏福,廖志新,等.新疆哈密白山铜矿深孔钻探施工工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(5):28-31.
- MA Deyi, JIA Hongfu, LIAO Zhixin, et al. Construction technology of deep hole drilling in Baishan molybdenum mine of Xinjiang [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(5):28-31.
- [22] 孙建华,刘秀美,王志刚,等.地质钻探孔内复杂情况和孔内事故种类梳理分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(1):4-9.
- SUN Jianhua, LIU Xiumei, WANG Zhigang, et al. Classification and analysis on complex cases and accidents in geological drilling holes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(1):4-9.
- [23] 张新虎,刘建宏,黄万堂,等.绿色勘查理念:认知、探索与实践[J].甘肃地质,2017,26(1):1-7.
- ZHANG Xinhua, LIU Jianhong, HUANG Wantang, et al. Green exploration: cognition, explore and practice[J]. Gansu Geology, 2017,26(1):1-7.
- [24] 雷晓力,张瑶,张福良,等.新时期我国绿色勘查典型实践与技术应用研究[J].中国矿业,2019,28(S2):124-128.
- LEI Xiaoli, ZHANG Yao, ZHANG Fuliang, et al. Research on typical practice and technology application of green exploration in China in the new period [J]. China Mining Magazine, 2019,28(S2):124-128.
- [25] 张拓,岳高峰,刘好.橡胶履带底盘的研究进展[J].重庆理工大学学报(自然科学),2018(5):82-88.
- ZHANG Tuo, YUE Gaofeng, LIU Yu. Research progress of rubber tracked chassis[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2018(5):82-88.

(编辑 荐华)