

# 水平定向钻探与综合测试技术研究及应用

吴金生<sup>1</sup>, 罗显梁<sup>1</sup>, 王子忠<sup>2</sup>, 黄晓林<sup>1</sup>, 房勇<sup>1</sup>, 钱锋<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734; 2. 四川水发勘测设计研究院有限公司, 四川成都 610200)

**摘要:**西部重大工程建设勘查面临“地形险峻、陡倾构造、生态脆弱”等恶劣的环境条件,采用竖向钻探无法实施,采集的地质信息不全,水平定向钻探和综合测试技术是解决重大工程长大深埋隧道勘察难题的关键技术。但超长水平绳索取心钻进存在陡倾构造地层多变轨迹控制难、高寒缺氧地层破碎钻机动力不足及生态环境保护要求高等问题。本文介绍了系列化水平定向取心钻探装备、多参数全方位无线测井系统和水平绳索随钻轨迹控制等技术装备的研发进展,以及成功在川藏铁路及引大济岷工程中的应用,在西部高原地区起到示范与推广作用。

**关键词:**水平定向钻探;综合测试;长大深埋隧道勘察;川藏铁路;引大济岷

**中图分类号:**P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0200-05

## Research and application of horizontal directional drilling and comprehensive testing technology

WU Jinsheng<sup>1</sup>, LUO Xianliang<sup>1</sup>, WANG Zizhong<sup>2</sup>, HUANG Xiaolin<sup>1</sup>, FANG Yong<sup>1</sup>, QIAN Feng<sup>1</sup>

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Sichuan Shuifa Survey, Design and Research Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610200, China)

**Abstract:** The exploration of major engineering construction in the west is faced with harsh environmental conditions such as “steep terrain, steep structure and fragile ecology”. The geological information that cannot be implemented and collected by vertical drilling is incomplete. Horizontal directional drilling and comprehensive testing technology are key technologies to solve the exploration problems of large and deep buried tunnels in major projects. However, there are difficulties in controlling the variable trajectories of steeply dipping formations, insufficient power for drilling machines in high cold and hypoxic formations, and high ecological and environmental requirements in ultra long horizontal rope coring drilling. This article introduces the development of a series of horizontal directional coring drilling equipment, a multi-parameter all-round wireless logging system, and horizontal rope drilling trajectory control technology and equipment, which have been successfully applied in the Sichuan Tibet Railway and the Water Diversion Project from Daduhe to Minjiang river, Play a demonstration and promotion role in the western plateau area.

**Key words:** horizontal directional drilling; comprehensive testing; large and deep buried tunnel exploration; Sichuan Tibet Railway; the Water Diversion Project from Daduhe to Minjiang river

### 1 水平定向钻探的目的及意义

西部重大铁路交通工程,地处高原高寒山区,面临“地形险峻、陡倾构造、生态脆弱”等恶劣地理环境条件,交通条件极差,采用竖向深孔勘探无法实施,采集的地质信息不全且单一,不能满足线状

构筑物长大深埋隧道工程地质勘察要求,超长水平定向钻探技术能够克服地形陡峻和环保要求,减少搬迁修路,保护生态,克服陡倾岩层竖向钻探的缺点,改变过去垂直“点”勘察为“线”勘察,直接探测沿隧道洞身地质情况,为隧道施工提出合理建议。

收稿日期:2023-05-29 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.029

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“复杂地层钻探关键技术智能升级与应用示范”(编号:DD20221652)

第一作者:吴金生,男,汉族,1971年生,教授级高级工程师,工学博士,地质工程专业,主要从事深孔复杂地层钻探技术及科学钻探研究与开发工作,四川省成都市郫县成都现代工业港(北区)港华路139号,542768373@qq.com。

引用格式:吴金生,罗显梁,王子忠,等.水平定向钻探与综合测试技术研究及应用[J].钻探工程,2023,50(S1):200-204.

WU Jinsheng, LUO Xianliang, WANG Zizhong, et al. Research and application of horizontal directional drilling and comprehensive testing technology[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):200-204.

水利引水工程大多采用平硐勘察,但平硐勘察周期长、成本高,水利水电系统正在探索采用水平定向取心钻探+综合测井技术替代平硐勘察。“引大济岷”工程为四川省2022年一号工程,首次采用水平定向取心钻探、地质编录和孔内综合测试技术替代平硐勘察,取得了较好的应用效果,西部YX水电开发工程也正在实施超长水平定向钻。

重大工程地质勘察超长水平定向孔常采用绳索取心钻进,国内外水平定向取心钻探装备扭矩小、动力不足,钻遇复杂地层时,事故处理能力弱。笔者单位开展了水平绳索取心钻探技术装备研发,研发系列化水平定向取心钻机、水平绳索随钻定向钻进器具和多参数全方位无缆测井系统,构建一套水平绳索取心定向钻进、随钻轨迹控制和综合测试技术,联合相关单位,成功完成川藏铁路超长水平定向试验孔和引大济岷工程水平定向勘探与测试技术研究项目,支撑西部重大交通与水利工程建设。

## 2 水平定向钻探取心装备

针对高寒缺氧、构造复杂的西部山区水平钻孔,钻机必须具备足够的动力和扭矩,以处理在钻进断

层、软弱夹层、破碎带、节理发育层可能出现的垮孔、卡钻和抱钻等孔内事故。自主研发GXD-3S、GXD-5S、GXD-6S系列化水平定向取心设备,取心钻进深度分别可达600、1500、2000 m,终孔直径76 mm,比国内外同类钻探设备扭矩大3倍以上。

GXD-3S型钻机采用模块化结构设计,复合多级油缸直接推进,充分发挥多级油缸结构短行程长的优点,最大限度地减小钻架的长度和质量,搬迁方便,可实现600 m NQ系列水平绳索取心钻进;GXD-5S型钻机创新设计升降平台和变幅机构,提高了水平钻进稳定性,体积减少1/3,多挡无极变速,输出扭矩大,可实现1500 m NQ系列水平绳索取心钻进,关键技术指标达到国内领先水平;GXD-6S型钻机优化结构设计,重心降低增加稳定性,长行程大扭矩,可随钻采集孔内钻进参数,采用数字化显示,自动存储数据,为钻进过程分析和地质重构提供实时信息,可实现2000 m NQ系列水平绳索取心钻进。

钻机所有功能均为液压驱动,操作方便,控制精准,取心作业效率高,可满足高山峡谷区工程勘察水平定向取心钻探需求。3种钻机实物见图1。



图1 GXD系列水平定向钻机

## 3 水平定向钻探关键技术

### 3.1 水平孔防斜技术

水平绳索取心轨迹偏斜比竖直孔严重,其主要原因:(1)水平定向钻探钻具的回转轴线与自身重力方向不在一条直线上;(2)钻遇地层破碎,软硬互层,钻进方向与岩层有夹角;(3)开孔和钻机固定不好;(4)孔口加压,地层坚硬,钻压大,易上漂,地层破碎,易下降;(5)防斜保直钻进工艺不到位。

为防止钻孔偏斜,可采取以下措施:(1)把好开孔关,固定好钻机,钻机基础采用C20混凝土浇筑,厚度80 cm,采用 $\Phi 32$  mm螺纹钢将钻机与地基锚固,孔口采用锚杆与山体锚固;(2)加长粗径钻具,

以刚保直,开孔全部采用同径钻杆钻具,钻具刚性强度高,不易偏斜;(3)减小环空间隙,以满保直,开孔钻头环空间隙比一般情况小,其他开次不增大钻头外径尺寸,钻孔轨迹不易偏斜;(4)换径时采用导向钻具,一开、二开钻进完成后,采用导向钻进措施,在下套管之前,将原有钻具前面连接0.6 m左右的下一级钻具,轻压钻进0.4~0.6 m,为下一级钻进开好导向孔,再下套管,导向钻具如图2所示;(5)采用高转速、低钻压钻进工艺参数,钻压较大时,地层坚硬,钻孔顶角一般会上漂;(6)取心钻进时选用高胎体、低胎体硬度的钻头,高胎体可以增加钻头导向性,低胎体硬度便于金刚石出刃,提高钻进速度,有利于钻

孔按设计轨迹钻进。

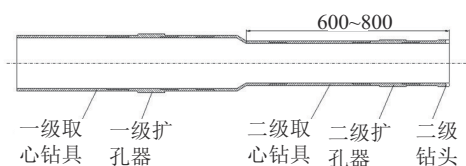


图2 导向钻具

### 3.2 水平绳索随钻轨迹控制技术

当水平绳索取心钻孔轨迹偏离原设计轨迹较大时,不能满足地质设计要求,必须进行纠斜纠偏,纠斜的“狗腿度”不能过大,不能影响下一步的绳索取

心钻进,必须采用水平随钻定向纠斜,钻杆采用绳索取心钻杆。为解决水平绳索取心钻孔偏斜难题,自主研发了水平绳索随钻定向输送机构,攻克了水平绳索随钻定向仪器的推送、固定和打捞工艺,同时集成小直径有缆定向仪器、无磁钻杆、仪器固定限位机构、定向接头、螺杆马达和定向钻头,创新形成一套水平绳索定向钻进器具(如图3所示),构建水平绳索随钻定向钻进方法(如图4所示),攻克了小直径水平绳索取心轨迹偏斜难题,并在川藏铁路多吉隧道和环北部湾广东水资源配置工程水平孔成功进行随钻定向纠斜,取得了良好的示范效果。

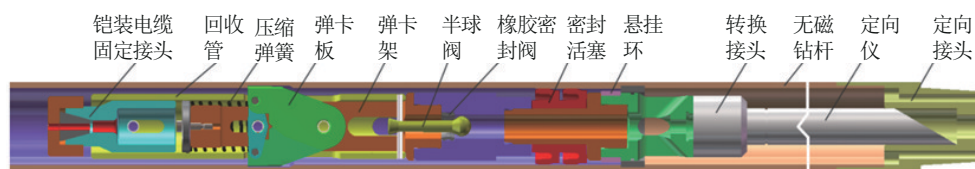


图3 水平绳索定向钻进器具

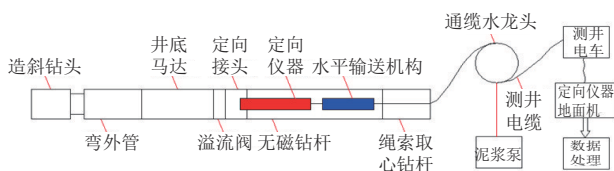


图4 水平绳索定向钻进方法

定向仪器采用有缆随钻测斜仪(MWD),有缆随钻测斜仪连接在铠装电缆上,通过电缆绞车将定向仪器水平送入到无磁钻杆内,座键,将孔底信号传输到地表。密封信号电缆,防止泥浆流出。井下造斜工具选用 $\varnothing 73\text{ mm}$ 、 $\varnothing 60\text{ mm}$ 螺杆马达,弯外管度数 $1.0^{\circ}\sim 1.25^{\circ}$ ,根据造斜强度和地层情况进行选择。钻孔轨迹计算采用平均角法。采用定向钻进与复合钻进交替进行,复合钻进通过钻具回转减少摩擦阻力,消除“狗腿”,降低造斜强度,保证定向钻进轨迹光滑。

川藏铁路多吉隧道CSDZ-DJ-1水平钻孔设计定向钻孔倾角 $-12.30^{\circ}$ (设定水平倾角为 $0^{\circ}$ )。地层为花岗岩,钻进速度慢,孔口加压,导致钻孔偏斜,钻孔直径 $96\text{ mm}$ 。根据测斜数据,水平孔顶角上漂, $671\text{ m}$ 测斜数据为 $-3.1^{\circ}$ ,已偏离设计顶角 $9.2^{\circ}$ ,顶角上漂趋势一直在增加,方位角变化不大。采用定向钻进和复合钻进交替进行,共进尺 $21\text{ m}$ ,其中钻孔定向纠斜进尺 $3.13\text{ m}$ ,复合钻进进尺 $18\text{ m}$ ,成功地控制了钻孔上漂趋势,并降斜 $3^{\circ}$ ,为后续顺利钻进打

下了坚实的基础,达到了本次水平孔定向纠斜的目标任务。环北部湾广东水资源配置工程地下泵房超长水平钻探SPZK1施工,地层坚硬顶角上漂,后采用水平绳索随钻定向纠斜,成功完钻。

### 3.3 复合基孕镶金刚石钻头

自主研发了复合基预合金化胎体金刚石钻头。通过铁基等多种预合金粉末的调整与补充,提高胎体合金化程度,改善胎体对金刚石颗粒的包镶程度;通过惰性硬质相对性能进行调整,改善胎体对地层的自适应功能,提高钻头锋利度。耦合胎体材料、惰性硬质相和金刚石切削单元的多重作用,提高钻头胎体耐磨性与地层岩性的适应性,实现坚硬地层的高效快速钻进。

在四川省“引大济岷”工程2号孔和3号孔进行了试验,其地层岩性为石英闪长岩和石英花岗岩,其主要矿物成分为长石、石英、角闪石等,岩质坚硬且研磨性强,对胎体消耗较快。采用复合基金刚石钻头,平均钻速约 $1.0\text{ m/h}$ ,钻头最高使用寿命达 $170\text{ m}$ 。5号孔地层为钾长花岗岩,岩质坚硬、研磨性弱,钻进速度慢,现场试验了4家钻头厂家共8种配方的金刚石钻头,最高钻速为 $0.48\text{ m/h}$ ,平均钻速为 $0.3\text{ m/h}$ 。复合基钻头钻速可达约 $1\text{ m/h}$ ,与现场其他钻头相比平均钻速提高约2倍。钻取岩心如图5所示,使用后钻头如图6所示。





图5 “引大济岷”工程水平孔岩心照片

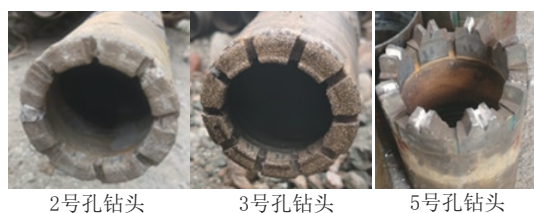


图6 “引大济岷”工程水平孔使用后的钻头

### 3.4 川藏铁路水平定向试验孔应用

利用自主研发的千米级钻机和水平定向钻进技术,顺利完成了川藏铁路水平定向试验01孔——卡子拉一号隧道1212.0m水平钻孔,方位偏差 $\leq 1^\circ$ ,孔斜 $0.76^\circ/100\text{ m}$ ,机械钻速 $3.09\text{ m/h}$ ,台月效率 $350.29\text{ m}$ ,创造国内水平绳索钻杆PQ、HQ深度588 m和974 m两项最新记录。

水平穿越断层与破碎带,提供原状岩心,为查明洞身结构和测井通道提供支撑。钻孔成功穿越3000万 $\text{m}^3$ 巨型滑坡,探明陡倾岩层构造,揭露3条断层和19处节理破碎带,克服了严重涌水( $60\text{ m}^3/\text{h}$ )、地层易水敏水化、井斜等难题。提供原状岩心,岩心采取率达97.76%,为地质查明洞身结构和测井通道提供支撑。直观查明隧道洞身段地层岩性、陡倾岩层构造、水文地质条件等情况,为解决长大深埋隧道勘察难题提供借鉴。

## 4 水平孔综合测试技术装备

### 4.1 多参数全方位无缆测井系统

自主研发一套小口径多参数全方位无缆测井系统(I型),适用于小直径水平孔内综合测试,实物与孔内连接如图7所示,一次性完成水平孔全景成像、声波测试、水压力测试、地温测试、井斜方位、岩性综合测试,攻克了水平孔内结构面成像计算方法和存储方法,声波模块实现了全波列的采集及存储,通过钻杆输送将仪器输送到水平孔内,实现井下电视(可视化)和多个物理参数组合在一起,一趟钻实现所需数据的采集,再通过处理分析软件,形成综合解释成果图,实现了地质目的。

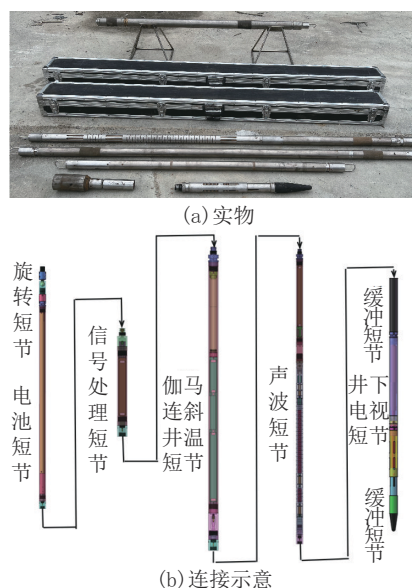


图7 测井仪器实物与连接

仪器主要技术指标:

井下电视:可测量任意全方位倾角的钻孔结构产状角度,同时实现数字视频、拼图成像;

声波:时差测量精度 $2\text{ }\mu\text{s/m}$ ;声速时差 $\Delta t$ 范围 $105\sim 650\text{ }\mu\text{s/m}$ ;纵向分辨率 $\leq 100\text{ mm}$ ;

孔斜方位:倾斜角 $0\sim 90^\circ$ ,方位角 $0\sim 360^\circ$ ,倾斜角精度 $\pm 0.2^\circ$ ,方位角精度 $\pm 2^\circ$ ;

水压力:压力测量精度 $0.1\text{FS}\%$ ;压力范围 $0\sim 60\text{ MPa}$ ;分辨率 $0.006\text{ MPa}$ ;

温度:温度测量范围 $0\sim 125^\circ\text{C}$ ,分辨率 $0.2^\circ\text{C}$ ,误差 $\pm 1^\circ\text{C}$ ;

自然伽马: $0\sim 150\text{ API}$ 为 $\pm 10\text{ API}$ ,大于 $150\text{ API}$ 为 $\pm 6\%$ ,稳定性 $\pm 5\%$ ,伽马的纵向分辨率 $50\text{ mm}$ 。

## 4.2 引大济岷工程的应用情况

中国地质调查局探矿工艺研究所承担“引大济岷”工程可行性研究阶段水平定向勘探与测试技术研究项目,共完成了10个水平孔钻探、岩心编录和综合测井任务,共计进尺超过2900 m,岩心采取率达97.8%,完成岩性鉴定、构造识别、RQD统计和岩层划分等地质编录工作,完成全景成像、声波波速( $V_p$ )、水压力、地温、井斜方位和伽马测试等,取得了较好的应用效果,国内首次以水平定向钻探+综合测试技术替代平硐勘察,是一次创新与探索。声波测试和孔底全景成像如图8所示。

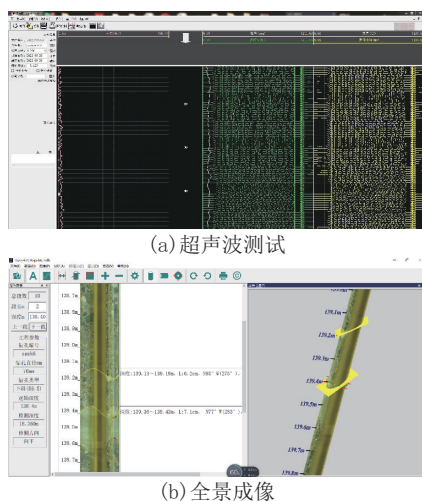


图8 声波测试与孔底电视

## 5 结论

西部重大交通与水利工程建设勘察面临恶劣的地理环境与生态条件,水平定向钻探和综合测试技术克服了竖向钻探无法实施以及采集的地质信息不全的缺点,解决了线状构筑物长大深埋隧道勘察难题,实现高原生态脆弱区绿色勘察目标。

自主研发的GXD系列化水平高转速绳索取心钻机,可实现2000 m以内水平定向绳索取心钻探,长行程大扭矩动力大,复杂地层处理事故能力强;针对陡倾构造地层多变轨迹偏斜,研发 $\varnothing 96$  mm和 $\varnothing 76$  mm口径的水平绳索随钻定向钻进技术器具,可实现随钻定向钻进纠斜和轨迹控制;小直径多参数全方位无缆测井系统(I型),攻克了水平孔内结构面

成像计算方法和存储方法,一次性完成水平孔全景成像/声波测试/水压力测试/地温测试/井斜方位/岩性综合测试,并成功在川藏铁路及引大济岷工程中应用,国内首次以水平定向钻探+综合测试技术替代平硐勘察,是一次创新与探索。

随着西部重大工程建设的不断推进,超长水平定向钻探技术应用将越来越广泛,还存在一些亟需攻克难题,水平绳索导向取心钻进和水平随钻定向钻进与探测一体化技术装备还需进一步攻关。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 张恒春,刘广,吴纪修,等.川藏铁路3000 m水平定向钻井技术方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):1-6.
- [4] 吴纪修,尹浩,张恒春,等.水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望[J].钻探工程,2021,48(5):1-8.
- [5] 常江华,凡东,刘庆修,等.水平孔绳索取心钻进技术在金矿坑道勘察中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):40-43.
- [6] 易亚东.小倾角钻探工艺技术在绿色勘查中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(12):49-54.
- [7] 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.
- [8] 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].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(3):36-41.
- [9] 李忠.基于PDA和蓝牙的无缆钻孔测斜仪[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(5):49-52.
- [10] 许启云,牛美峰,方意平,等.绳索取心钻进技术在水平钻孔中应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(12):34-36.
- [11] 常江华,凡东,刘庆修,等.水平孔绳索取心钻进技术在金矿坑道勘察中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):40-43.
- [12] 钟勋.孕镶金刚石岩心钻探孔底过程模拟系统研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [13] 吴金生,黄晓林,蒋炳,等.水平绳索随钻定向钻进技术研究与应用[J].煤田地质与勘探,2021,49(5):260-264.
- [14] 孙吉伟.适用于坚硬致密地层的孕镶金刚石钻头唇面结构设计[D].北京:中国地质大学(北京),2019.

(编辑 李艺)