

# 狮子洋主航道特大水垂比大位移科学钻孔施工实践

王汇明<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 李勇<sup>2\*</sup>, 庄生明<sup>2</sup>, 赵远刚<sup>2</sup>, 钱锋<sup>2</sup>

(1.广东省水利电力勘测设计研究院有限公司,广东广州 510635;

2.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都 611734)

**摘要:**粤港澳大湾区狮子洋主航道地质勘察无法采用垂直点状钻探勘察施工,为此采用水平孔勘察方案,设计了一个特大水垂比大位移科学钻孔。该孔设计孔深940 m,取心靶点14个,靶区半径5.0 m,水平段长380 m,垂深60 m,水垂比14,是国内单孔作业靶点最多、水垂比最大的钻孔之一。研究制定了一套多靶点定向钻进、水平螺杆马达原状性取心、地质录井和存储式钻杆输送测井的综合勘察技术,在水利水电勘察中首次应用,取得了良好的效果。该孔完钻孔深936.20 m,中靶率85.71%,其中,取心进尺81.70 m,机械钻速2.38 m/h,岩心采取率89.84%,精准实现了洋底主航道的地质超前预报,大幅度减少了勘察孔数量,降低了环境破坏,提高了勘察效率,保证了地质资料的连续性和可靠性,是一项值得在隧道勘察中推广使用的先进技术。

**关键词:**水电勘察;定向钻进;特大水垂比钻孔;大位移钻孔;水平孔取心;存储式测井;综合勘察技术

**中图分类号:**TV213.9;P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)01-0135-07

## Novel drilling technology for an extended reach horizontal borehole with high horizontal displacement/vertical depth ratio in the Shiziyang main channel

WANG Huiming<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, LI Yong<sup>2\*</sup>, ZHUANG Shengming<sup>2</sup>, ZHAO Yuangang<sup>2</sup>, QIAN Feng<sup>2</sup>

(1.Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510635, China;

2.Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

**Abstract:** Geo-technical investigation of the Shiziyang main channel in the Guangdong—HongKong—Macao Greater Bay Area cannot be carried out with vertical point drilling. Therefore, an extended-reach novel horizontal borehole with high horizontal displacement/vertical depth ratio was designed for investigation: designed hole depth of 940m, 14 coring targets, target radius of 5.0m, horizontal section length of 380m, vertical depth of 60m, and horizontal displacement/vertical depth ratio of 14. It is one of the boreholes with the most working targets per single hole and the highest horizontal displacement/vertical ratio in China. A set of comprehensive exploration technologies, including multi-target directional drilling, undisturbed coring by the mud motor, geological logging and drill string—conveyed storage logging have been developed, and applied for the first time in water conservancy and hydropower investigation with good results. The completed drilling depth of the hole was 936.20m, and the target hit rate was 85.71% with the coring footage of 81.71m, the penetration rate 2.38m/h, and the core recovery rate 89.84%. With the novel drilling technologies, accurate advance geological prediction of the main channel on the ocean floor was achieved with great reduction of the number of exploration holes, less environmental damage, higher exploration efficiency; and the continuity and reliability of geological data was ensured. It is an advanced technology worth popularizing in tunnel

收稿日期:2021-09-21; 修回日期:2021-12-10 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.01.018

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“银额盆地西部—北山盆地群油气地质调查”(编号:DD20190093);珠江三角洲水资源配置工程(编号:发改农经[2018]1105号)

第一作者:王汇明,男,汉族,1965年生,副总工程师,教授级高级工程师,地质工程专业,主要从事工程地质和岩土工程勘察等工作,广东省广州市天寿路116号, wang.huiming@gpdiwe.com。

通信作者:李勇,男,汉族,1974年生,高级工程师,探矿工程专业,主要从事钻探工程施工、水工环地质和岩土工程勘察等工作,四川省成都市郫都区港华路139号,317315539@qq.com。

引用格式:王汇明,李军,李勇,等.狮子洋主航道特大水垂比大位移科学钻孔施工实践[J].钻探工程,2022,49(1):135-141.

WANG Huiming, LI Jun, LI Yong, et al. Novel drilling technology for an extended reach horizontal borehole with high horizontal displacement/vertical depth ratio in the Shiziyang main channel[J]. Drilling Engineering, 2022,49(1):135-141.

exploration.

**Key words:** hydropower exploration; directional drilling; extra-large horizontal displacement/vertical depth ratio drilling; extended reach drilling; horizontal coring; storage type logging; comprehensive investigation technology

## 0 引言

珠江三角洲水资源配置工程是国务院批准《珠江流域综合规划(2012—2030年)》中提出的重要水资源配置工程,是国务院确定的172项重大节水供水工程之一,是解决珠江三角洲城市群生态建设用水的重大工程。由一条干线、两条分干线、一条支线、三座泵站和四座调蓄水库组成。全长113.2 km,年供水量17.08亿 $m^3$ ,总投资354亿元,总工期5年。工程概况如图1所示。该工程旨在促进粤港澳大湾区高质量可持续发展,从珠江三角洲河网区西部的西江水系向东引水至珠江三角洲东部,解决广州市

南沙区、深圳市和东莞市等缺水地区供水难题。其中,穿越狮子洋段设计采用泥水平衡盾构机建设施工,需要对地质情况提前做出精准预测。狮子洋主航道勘察方案设计采用垂直点状钻探勘察施工,需要施工10个钻孔,因受航道管理及通航运输的影响,无法施工。为解决此问题,广东省水利电力勘测设计研究院与中国地质调查局探矿工艺研究所共同开发了一套“四合一”综合勘察技术取代垂直点状钻探勘察的施工方案,施工了一口狮子洋主航道补充勘察特大水垂比大位移科学钻孔(以下简称“SZYSD-1S孔”)。

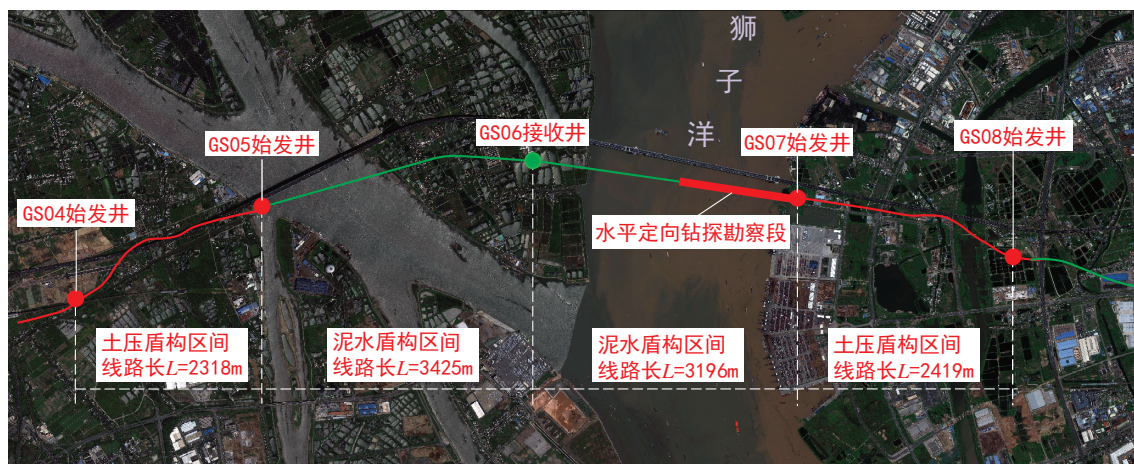


图1 狮子洋主航道定向钻探勘察示意

Fig.1 Directional drilling exploration for the Shiziyang main channel

## 1 工程概况

狮子洋水道宽2.40 km,其中主航道宽约380 m,最大水深27 m,盾构隧洞设计埋深48.00 m。为查明主航道上覆地层情况,补充设计了SZYSD-1S孔。该段地质构造以断层为主,多为掩埋基底断层,广泛分布第四系地层,含水层和透水层较多<sup>[1]</sup>。

### 1.1 地质概况

SZYSD-1S孔上部地层为第四系全新统桂洲组,厚度4.90~29.20 m,岩性为淤泥质粘土、淤质粉细砂、细砂、含砾粗砂、砾砂,变化大,在两岸分布较厚,水道中间较薄或已冲蚀消失,砂层较连续,为主

要含水层,强透水,与江水连通,砂层覆盖在全风化或强风化基岩上。下部地层为白垩系基岩,厚度0.70~18.70 m,产状 $N20^{\circ}\sim 30^{\circ}W/NE\angle 10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ,岩性为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、细砂岩、含砾粗砂岩、砾岩等,全风化,较薄,为可塑—硬塑状粉质粘土、粘土,透水性微弱,分布不连续,局部缺失,基岩面从右岸向水道中间和左岸逐渐降低。地层情况如表1所示。

### 1.2 勘察目的

由于主航道区域无法实施垂直点状钻探勘察施工,为获取该段准确的地质勘察资料,设计采用水平孔勘察方案<sup>[2]</sup>,实现以下勘察目的:

表 1 SZYSD-1S 孔地层概况  
Table 1 Lithology at SZYSD-1S hole

| 地 层    | 岩 性                    | 顶面高程/m        | 厚度/m       | 透水性         |
|--------|------------------------|---------------|------------|-------------|
| 第四系    | 淤泥质粘土、淤质粉细砂、细砂、含砾粗砂、砾砂 | -5.00~-27.00  | 4.90~29.20 | 主要含水层,与江水连通 |
| 白垩系    |                        |               |            |             |
| 上部全风化层 | 粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、细砂岩、       | -15.07~-31.30 | 0.70~10.90 | 透水性微弱       |
| 中部强风化层 | 含砾粗砂岩、砾岩               | -35.00~-19.38 | 0.50~18.70 | 中-弱透水性      |
| 下部弱风化层 |                        | -49.70~-22.08 |            | 弱透水         |

(1)查明主航道区域输水盾构隧道轴线段基本地层、岩性、构造等情况。

(2)查明隧道上覆基岩顶板厚度。

(3)为主航道泥水平衡盾构机施工提供换刀设计地层信息。

1.3 技术要求

SZYSD-1S 孔设计孔深 940 m,水平距离 850 m,垂深 60 m,靶点为 380 m 主航道沿线上的 14 个取心勘察点,取心总进尺  $\geq 80$  m,岩心采取率  $\geq 65\%$ ,中靶率  $\geq 70\%$ ,靶圈直径 5.0 m,水垂比 14,水平段钻孔轨迹位于隧洞顶板以上 5 m。该孔属特大水垂比大位移钻孔,是国内单孔作业靶点最多、水垂比最大的钻孔之一。

1.4 施工难点分析

(1)靶点多,靶区范围小,中靶率要求高,无相关工程经验支撑项目实施。

(2)垂深浅,采取 15°倾斜开孔,定向钻孔的轨迹精度控制困难。

(3)浅软地层或卵砾石地层易垮塌,需要采取泥浆和套管护壁。

(4)水平段取心要求保持岩心原状,取心质量高。

(5)岩性和层位精准划分困难,采用的勘察技术手段具有多样性和复杂性的特点,需要水平控向进入靶点与地质录井卡层取心综合判断,并依据存储式地球物理测井验证结论。

1.5 勘察方案

根据施工难点分析,SZYSD-1S 孔简化为三开孔身结构,通过水平段变径增加开次长度,优化钻孔轨迹,优选钻机设备,采用定向钻探技术,依靠物探测井和地质录井技术手段,最终确定采用“多靶点定向钻进、水平螺杆马达原状性取心、地质录井和存储式钻杆输送测井”的“四合一”综合勘察技术<sup>[3-5]</sup>。

2 施工概况

SZYSD-1S 孔于 2020 年 10 月 12 日进场,11 月 22 日正式开钻,2021 年 1 月 16 日完钻,完钻孔深 936.20 m,终孔口径 150 mm,终孔井斜 97.0°,方位角 277°,钻井周期 48 d,完井周期 56 d。钻探施工进度情况见图 2。

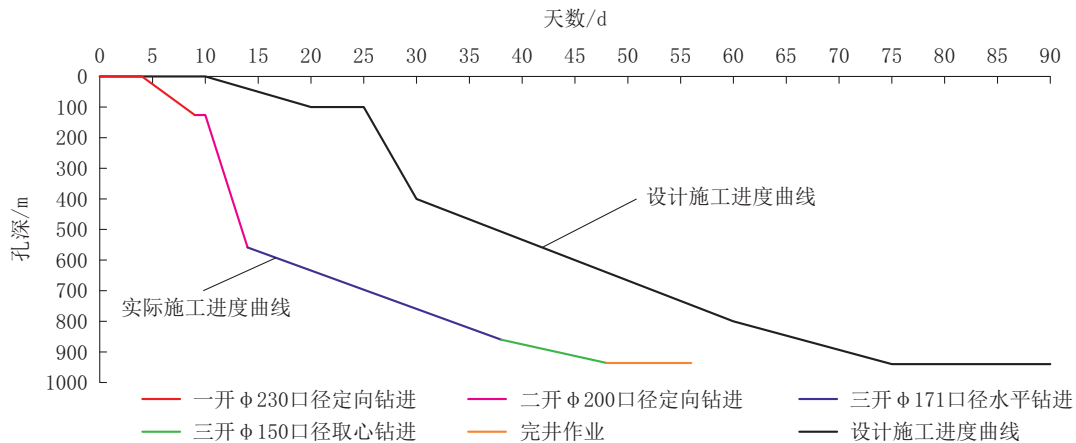


图 2 项目施工进度

Fig.2 Project construction schedule

## 2.1 钻机及附属设备

采用S1200型水平定向钻机、雪威MGS导向仪、BW-800型泥浆泵,CAV-1型存储式测斜仪和RD6600型存储式地球物理测井仪。钻机和主要设备参数见表2。

## 2.2 孔身结构

该孔三开孔身结构完钻,一开 $\Phi 230$  mm口径钻至孔深126.00 m,下入 $\Phi 219$  mm套管固井;二开采用 $\Phi 200$  mm口径定向造斜钻进,钻至孔深562.40 m,根据地层复杂情况下入 $\Phi 178$  mm套管至孔深558.80 m,因钻进中岩性较稳定未下入该层技术套管;三开采用 $\Phi 150$  mm口径间断取心,取心钻进1~

表2 钻机主要技术参数

| 编号 | 技术指标  | 参数       |
|----|-------|----------|
| 1  | 发动机功率 | 264 kW   |
| 2  | 最大推拉力 | 1200 kN  |
| 3  | 最大扭矩  | 40 kN·m  |
| 4  | 泥浆泵压力 | 10 MPa   |
| 5  | 最高转速  | 92 r/min |

3个回次后采用 $\Phi 171$  mm口径扩孔和稳斜钻进,钻至孔深860.00 m,换 $\Phi 150$  mm口径钻进至孔深936.20 m完钻<sup>[6-10]</sup>。完钻孔身结构示意图见图3。

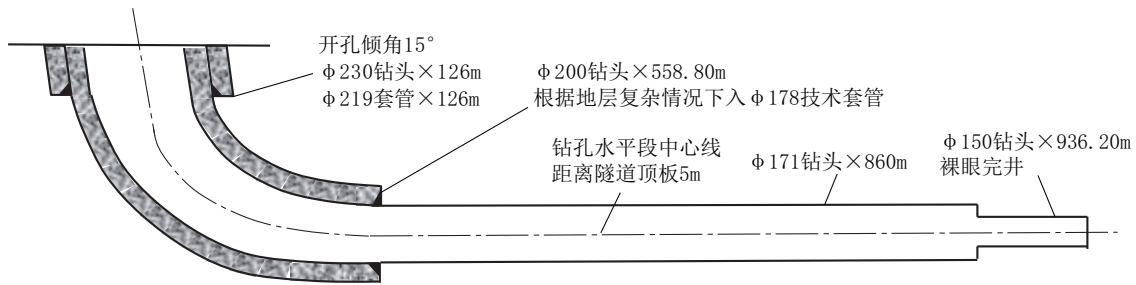


图3 SZYSD-1S孔完钻孔身结构

Fig.3 Completion structure of SZYSD-1S hole

## 2.3 钻具组合

施工中主要使用的钻具组合如下。

(1)套管钻进: $\Phi 230$  mm硬质合金钻头+ $\Phi 219$  mm套管+ $\Phi 178$  mm钻铤+ $\Phi 114$  mm钻杆+通缆水龙头。

(2)定向钻进、复合钻进和滑动钻进: $\Phi 200$  mm三牙轮钻头+ $\Phi 120$  mm弯螺杆马达(角度 $1.75^\circ$ )+ $\Phi 159$  mm无磁定向接头+ $\Phi 159$  mm无磁钻铤+ $\Phi 114$  mm钻杆+通缆水龙头。

$\Phi 171$  mm三牙轮钻头+ $\Phi 120$  mm弯螺杆马达(角度 $1.75^\circ$ )+ $\Phi 127$  mm无磁定向接头+ $\Phi 127$  mm无磁钻铤+ $\Phi 114$  mm钻杆+通缆水龙头。

(3)取心钻进: $\Phi 150$  mm金刚石取心钻头+ $\Phi 139.7$  mm岩心管(单动双管)+ $\Phi 120$  mm螺杆马达+ $\Phi 114$  mm钻杆+通缆水龙头。

(4)水平段稳斜复合钻进: $\Phi 150$  mm三牙轮钻头+ $\Phi 120$  mm螺杆马达(角度 $1.00^\circ$ )+ $\Phi 127$  mm无磁定向接头+ $\Phi 127$  mm无磁钻铤+ $\Phi 114$  mm钻杆+适用通缆水龙头。

$\Phi 171$  mm三牙轮钻头+ $\Phi 120$  mm直螺杆+ $\Phi 127$  mm无磁钻铤(带存储式测斜仪)+ $\Phi 114$  mm钻杆+通缆水龙头。

## 2.4 泥浆配方及性能

针对水平段的覆盖层、含砾泥质粉砂岩和粉砂质泥岩地层,采用高粘切、防塌水基泥浆,取心钻进和水平定向钻进过程中未发生严重坍塌掉块、卡钻和遇阻等复杂工况<sup>[11]</sup>。泥浆配方和性能参数如下。

(1)泥浆配方:3.0%膨润土+0.05%水解聚丙烯酰胺+4.0%植物胶+0.02%烧碱+0.05%其他。

(2)性能参数:密度 $1.05\sim 1.06$  g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度 $56\sim 82$  s,初切 $0.5\sim 0.6$  Pa,终切 $1.0\sim 1.1$  Pa,失水量 $5.0$  mL/30 min,泥皮厚度 $0.5$  mm。

## 2.5 定向钻进施工

### 2.5.1 钻进施工过程

SZYSD-1S孔开孔至孔深126.00 m采用 $\Phi 230$  mm口径套管钻进和 $\Phi 200$  mm口径定向钻进,造斜至井斜角 $74.3^\circ$ ,方位角 $297^\circ$ ;孔深126.00~562.40 m采用 $\Phi 200$  mm口径定向钻进和滑动钻进,造斜至井



斜角  $90.1^\circ$ , 方位角  $270^\circ$ ; 孔深 562.40~860 m 采用  $\varnothing 150$  mm 原状取心钻具间断定深取心和  $\varnothing 171$  mm 口径稳斜钻进, 井斜稳定在  $85^\circ\sim 95^\circ$ ; 完成目的层靶点取心后, 继续钻进至孔深 936.20 m 终孔。

### 2.5.2 钻孔轨迹测量

该孔共计使用了3种井斜监测方式, 包括地磁有线随钻定向测斜、CAV-1型存储式测斜和地球物理测井仪测斜。其中, 在定向钻进阶段, 采用地磁有

线定向测斜实时监测钻孔的顶角、方位角和钻具的工具面向角, 垂深位移和水平位移, 调整钻孔轨迹进入靶区范围; 在间断取心钻进阶段, 利用存储式测斜仪对该孔段进行测量记录; CAV-1型存储式测斜用于验证地磁有线随钻测量数据, 确定是否进入取心靶点; 地球物理测井仪测斜数据作为判定钻孔轨迹和靶点的最终依据。

钻孔设计轨迹和实际钻进轨迹见图4。

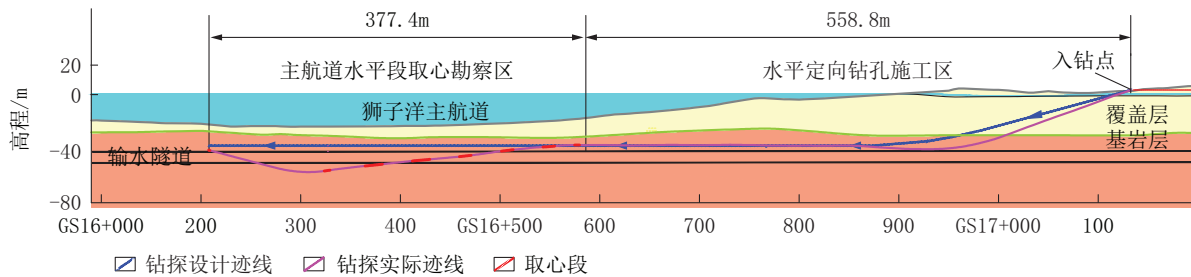


图4 SZYSD-1S孔钻进轨迹

Fig. 4 Drilling trajectory of SZYSD-1S hole

### 2.6 水平段靶点取心

三开  $\varnothing 171$  mm 口径定向钻进至孔深 562.40 m, 进入第一个取心靶点区域, 采用 5LZ120×7.0L-3.3-660 型螺杆马达和 GC-150 型半合管取心钻具, 参考石油钻井和地质钻探取心钻进工艺施工<sup>[12]</sup>。第1靶点(562.40~567.40 m)钻遇地层岩性主要为泥质粉砂岩, 因采用钻压(推力 20 kN)偏小, 钻进效率低, 平均机械钻速 1.97 m/h, 排量 9.17 L/s 偏大, 导致岩心磨损(图5)。从第2回次开始调整钻进参数, 泥浆管汇安装三通泄压阀优化排量, 增大钻压至 40 kN, 降低排量, 由 9.17 L/s 降低至 6.0~7.0 L/s, 取心效果得到改善(图6)。

水平段靶点取心使用的主要钻进参数为: 钻压



图6 第2靶点 588.46~594.36 m 孔段岩心

Fig.6 Cores from 588.46 to 594.36m hole section at the second target

(推力) 20~40 kN, 转速 100~115 r/min (螺杆马达), 排量 6.0~7.0 L/s。

水平段靶点取心使用了热压半隔水底喷式金刚石钻头(图7), 取心钻进 14 回次, 累计进尺 81.70 m, 平均回次进尺 5.84 m, 机械钻速 2.38 m/h, 获取岩心长度 73.40 m, 岩心采取率 89.8%。取心钻进施工时间 214.17 h, 其中纯钻时间占 16%, 起下钻与加钻杆时间占 51%, 辅助时间占 17%, 修理时间占 5%, 其他时间占 11%。

### 2.7 地质录井

全井进行地质录井, 水平取心钻进段采用岩心录井, 水平稳斜定向钻进孔段进行岩屑录井。定向钻进过程中密切关注岩屑变化情况, 当地层出现变



图5 第1靶点 562.40~567.40 m 孔段岩心

Fig.5 Cores from 562.40 to 567.40m hole section at the first target



图7 第2个取心回次钻具和钻头

Fig.7 Drill tool and the bit for the second coring run

化或进入靶点时,及时取心<sup>[13]</sup>。

### 2.8 存储式钻杆输送测井

采用RDML3CSX型存储式测井系统,通过 $\varnothing 114$  mm钻杆输送测井,测井参数包括自然伽马、电阻率、井温、井斜等,完成地层结构和构造划分、岩石质量评价与分级和渗透系数估算等<sup>[14-15]</sup>,同时,验证水平取心靶点14个,中靶12个,中靶率85.7%。全孔测井时间仅为10.17 h,测井速率稳定,测量速率约为1.5 m/s,大大提高了SZYSD-1S孔测井的安全性、可靠性和施工效率。

### 2.9 取得的技术指标

该孔一开 $\varnothing 230$  mm口径使用LS517G牙轮钻头定向钻进,机械钻速18.60 m/h。二开 $\varnothing 200$  mm口径使用LS517G牙轮钻头定向钻进,平均机械钻速2.01 m/h。三开 $\varnothing 171$  mm口径完成水平段稳斜定向钻进和间断取心,总进尺377.40 m,稳斜定向钻进最大机械钻速11.33 m/h,取心钻进最大机械钻速3.50 m/h。

## 3 主要成果与应用前景分析

### 3.1 主要成果

(1)在国内水利水电勘察领域,SZYSD-1S孔首次中使用多靶点定向钻进、水平螺杆马达原状性取心、地质录井和存储式物理测井“四合一”综合勘察技术,设计了特大水垂比大位移钻孔,按要求完成了总体项目目标任务,实现了深埋长隧道(洞)的综合勘察与超前地质预报,给传统垂直点状勘察方法向水平线状超前地质预报方法体系带来重要的技术革新,验证了工艺方法的先进性和可行性。

(2)采用半合管原状性取心、地球物理测井、孔

内电视、压水、原位测试、地质录井等技术手段,准确查明隧道轴线一定范围内的不良地质发育情况、地层岩性、地质构造、地层厚度等地质信息,较准确判定狮子洋主航道上覆基岩顶板厚度,为后期泥水平衡盾构机施工提供了换刀设计所需地质信息。

(3)SZYSD-1S孔是国内单孔作业靶点最多、水垂比最大的钻孔之一。通过集成转化“大直径定向钻进技术”、“半合管原状性取心技术”和“套管护壁技术”等地质调查成果,有效解决了SZYSD-1S孔的水平段孔斜精确控制、水平钻孔原状性取心和大位移钻孔不稳定地层的护壁等技术难题。

(4)拓展了“低转速、大扭矩”S1200型水平定向钻机的应用领域,采用BW-800型泥浆泵,泥浆管汇安装专用三通泄压阀调整排量,可在 $\varnothing 150$  mm以上口径的同一钻孔中满足全面钻进和取心钻进的施工需求,解决了垂深60 m的千米级大口径水平定向钻孔施工难题。

### 3.2 应用前景

狮子洋主航道SZYSD-1S孔所形成的“四合一”综合勘察技术,成功取代了传统垂直点状钻探勘察,可应用于各种深埋长隧道(洞)勘察工程,精准实现勘察目标。同时,为解决国家重大工程项目勘察施工中的难题,也提供了一种解题思路,即:在工程勘察施工中创新集成不同领域先进、成熟的技术手段。

## 4 结语

通过SZYSD-1S孔的工程实践,验证了多靶点定向钻进+水平螺杆马达原状性取心+地质录井+存储式物理测井“四合一”综合勘察技术的先进性、可靠性和经济性,大幅度减少了工作量,降低了环境破坏,节约了成本,提高了勘察效率和质量,保证了地质资料的连续性和可靠性,是一项值得在穿越障碍隧道勘察中推广应用的先进技术。

### 参考文献(References):

- [1] 石道华,王焰.狮子洋隧道建设方案探讨[J].珠江水运,2007(3):41-43.  
SHI Daohua, WANG Yan. Discussion on construction scheme of Shiziyang Tunnel[J]. Pearl River Water Transport, 2007(3): 41-43.
- [2] 肖冬顺,马明,项洋.水利水电钻探技术进展及发展趋势[J].钻探工程,2021,48(1):103-111.

- XIAO Dongshun, MA Ming, XIANG Yang. Progress and development trend of water conservancy and hydropower drilling technology[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(1): 103-111.
- [3] 庄生明, 吴金生, 张伟, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-4 孔取心钻进技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(9): 126-129.
- ZHUANG Shengming, WU Jinsheng, ZHANG Wei, et al. The core drilling technology used in the borehole WFSD-4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(9): 126-129.
- [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.
- WU Jixiu, YIN Hao, ZHANG Hengchun, et al. Application status and R & D trend of horizontal directional investigation technology for long tunnel investigation [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(5): 1-8.
- [5] 向军文, 陈晓林, 胡汉月, 等. 定向造斜及水平钻进连续取心技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2007, 34(9): 33-36.
- XIANG Junwen, CHEN Xiaolin, HU Hanyue, et al. Directional inclination and horizontal drilling continuous coring technology [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2007, 34(9): 33-36.
- [6] 付小营. 大斜度近水平井定向技术分析[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2011, 31(4): 267.
- FU Xiaoying. Directional technology analysis of highly deviated near horizontal wells[J]. *Petroleum and Chemical Standards and Quality of China*, 2011, 31(4): 267.
- [7] 周策, 陈文俊. 时空多点连续定向取心技术应用研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2004, 31(8): 36-38.
- ZHOU Ce, CHEN Wenjun. Application of space-time multi-point continuous directional coring technology[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2004, 31(8): 36-38.
- [8] 闫铁, 许瑞, 刘维凯, 等. 中国智能化钻井技术研究发展[J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(4): 15-21.
- YAN Tie, XU Rui, LIU Weikai, et al. Research and development of intelligent drilling technology in China [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(4): 15-21.
- [9] 樊腊生, 王达. 螺杆马达驱动连续造斜器在科钻一井中的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2005, 32(S1): 38-41.
- FAN Lasheng, WANG Da. Application of continuous deflector driven by screw motor in Well No.1 of scientific drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2005, 32(S1): 38-41.
- [10] 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.
- ZHANG Hengchun, LIU Guang, WU Jixiu, et al. Technical plan for 3000m long horizontal directional drilling for Sichuan-Tibet Railway[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(11): 1-6.
- [11] 赵远刚, 樊腊生, 李前贵, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-4 孔套管护壁技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(9): 109-113.
- ZHAO Yuangang, FAN Lasheng, LI Qiangui, et al. Wall casing protection technology in WFSD-4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(9): 109-113.
- [12] 张波, 赵远刚, 罗冠平, 等. 深部钻探 GC 系列单动双管取心钻具的研制[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集. 北京:地质出版社, 2015: 155-158.
- ZHANG Bo, ZHAO Yuangang, LUO Guanping, et al. Development of GC series single-acting double-tube coring tools for deep drilling[C]//Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Eighteenth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2015: 155-158.
- [13] 李先民. 地质录井地层对比技术研究与应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2021, 41(14): 156-157.
- LI Xianmin. Research and application of stratigraphic correlation technology in geological logging [J]. *Petroleum and Chemical Standards and Quality of China*, 2021, 41(14): 156-157.
- [14] 张钰. 直推式存储测井工艺在西北油田的应用[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(1): 121-126.
- ZHANG Yu. Application of direct-push storage logging technology in the northwest oilfield [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(1): 121-126.
- [15] 杨勇. 过钻杆存储式测井技术研究[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2020, 40(18): 235-236.
- YANG Yong. Storage logging technology research through drill pipe[J]. *Petroleum and Chemical Standards and Quality of China*, 2020, 40(18): 235-236.

(编辑 荐华)