

狮子洋主航道水平勘察孔测井评价方法研究与应用

李 军¹, 李 勇^{*2}, 谢小国^{3,4}, 王军朝², 李 维^{3,4}, 罗 兵^{3,4}, 莫家齐^{3,4}

(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;

3. 四川省华地建设工程有限责任公司, 四川 成都 610081;

4. 四川省地质矿产勘查开发局成都水文地质工程地质中心, 四川 成都 610081)

摘要:为解决狮子洋主航道洋底深埋长隧洞精准勘探难题,在狮子洋主航道特大水垂比大位移科学钻孔(SZYS-1S)中,采用存储式测井系统,通过获取自然伽马、电阻率、井深、井温、井斜等参数,利用测井数据交汇精准划分地层岩(土)性,结合垂直钻孔与本孔地质情况精准判识隐伏断层、划分围岩级别与风化程度、岩体渗透系数和渗透性,建立了一种用于深埋长隧道(洞)的小直径地球物理测井评价方法。SZYS-1S孔测试结果表明,第四系与白垩系地层岩(土)性、断层破碎带的测井响应特征差异明显,岩体完整性系数为6%~82%,岩体质量为较完整—极破碎4个级别,风化程度为全风化—弱风化等4类,渗透系数为 $1.01 \times 10^{-7} \sim 1.18 \times 10^{-3}$ m/s,渗透性为弱透水—强透水,测井评价结果与实际试验结果基本一致。该方法是实现洋底深埋长隧洞精准勘察的一种必要手段,有效支撑服务粤港澳大湾区建设。

关键词:水平勘察孔;定向钻探;岩石质量;渗透系数;测井评价;深埋长隧洞;狮子洋

中图分类号:P634.7;P631 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)06-0021-09

Research and application of the logging evaluation method for horizontal holes in the main channel of Shiziyang

LI Jun¹, LI Yong^{*2}, XIE Xiaoguo^{3,4}, WANG Junchao², LI Wei^{3,4}, LUO Bing^{3,4}, MO Jiaqi^{3,4}

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

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

3. Sichuan Hua Di Building Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610081, China;

4. Chengdu Center of Hydrogeology and Engineering Geology of Sichuan Provincial Geology and Mineral Resources Bureau, Chengdu Sichuan 610081, China)

Abstract: In order to solve the problem of precise investigation for deep-long tunnels in the ocean floor of the main channel of Shiziyang, the storage logging system was adopted to obtain parameters such as natural gamma, resistivity, well depth, well temperature, well inclination, etc. in the long reach scientific drilling hole (SZYS-1S) with large horizontal displacement/vertical depth ratio in the main channel of Shiziyang. The logging data were correlated to accurately divide the rock (soil) properties of the formation; and the geological conditions of vertical holes and the horizontal hole were combined to accurately identify the hidden faults, and divide the surrounding rock level and weathering degree, and the permeability coefficient and permeability of the rock mass. A small-diameter geophysical logging evaluation method was established for deeply buried long tunnels (holes). The results of SZYS-1S hole test

收稿日期:2022-08-29; 修回日期:2022-10-27 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.06.003

基金项目:珠江三角洲水资源配置工程(编号:发改农经[2018]1105号)“狮子洋主航道定向钻探勘察与科学研究试验”

作者简介:李军,男,汉族,1976年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,主要从事工程地质、岩土工程勘察与地球物理勘探工作,广东省广州市天寿路116号,4628372@qq.com。

通信作者:李勇,男,汉族,1974年生,高级工程师,现从事地质工程(钻探方向)及相关研究工作,四川省成都市郫都区现代工业港港华路139号,317315539@qq.com。

引用格式: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.

LI Jun, LI Yong, XIE Xiaoguo, et al. Research and application of the logging evaluation method for horizontal holes in the main channel of Shiziyang[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6):21-29.

show that the logging response characteristics of the rock (soil) and the fault fracture zones of the Quarternary and Cretaceous strata are obviously different: the integrity coefficient of rock mass ranges from 6% to 82%, the rock mass quality falls into four levels from relatively complete to extreme fractured with the weathering degree four categories from full weathering to weak weathering, the permeability coefficient ranges from 1.01×10^{-7} to 1.18×10^{-3} m/s with the permeability from weak permeability to strong permeability. The logging evaluation results are basically consistent with the actual test results. This method is a necessary means to achieve accurate investigation for deep-long tunnels in the ocean floor, and effectively support the construction of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.

Key words: horizontal investigation holes; directional drilling; rock quality; permeability coefficient; logging evaluation; deep-long tunnels; Shiziyang

0 引言

近年来随着我国轨道交通、引水干线、输油气管线等重大建设项目的大力推进,定向钻探技术在服务重大国家项目上得到了广泛的应用^[1]。川藏铁路沿线地形、地质及气候条件复杂,开展水平定向钻探有助于提高隧道勘察效率、真实了解隧道地质情况^[2-3]。城市市政管线工程建设、油气管道定向穿越勘察等领域受城市密集建(构)筑物的影响,采用非开挖定向钻技术,具有环保、高效、低成本等优点^[4-5]。断层、富水区、陷落柱、溶(裂)隙等地质问题严重制约着矿产资源的勘探开发与利用,采用水平定向钻探探测地质问题、超前注浆加固,有效地防治矿灾发生^[6-7]。页岩气、煤层气等非常规油气资源勘探开发过程中,水平井钻进技术应用广泛,取得了良好的经济效益^[8-9],水平井测井技术的工艺、采集、处理、解释与评价技术也日趋成熟^[10-14]。但是在工程勘察领域,测井工艺、评价内容多集中于直孔勘察^[15-17],对于定向钻探勘察的测井研究较少,付天池等采用水平定向钻探技术对岩溶区进行勘探,并采用存储区测井系统采集了电阻率、自然伽马、声波时差等参数,分析了钻遇地层岩性、岩溶发育规律等^[18]。但对于定向钻探勘察的测井工艺、测井评价内容及应用鲜有研究。本文以珠江三角洲资源配置工程狮子洋主航道定向钻探勘察与科学研究试验项目^[19]为例,结合工程地质与水文地质特征,在水利工程勘察领域首次开展了定向钻探勘察测井与评价研究,分析了钻遇地层的岩性与构造、岩体完整程度、风化程度及渗透性等地质问题,以期为后续类似项目提供借鉴与参考。

1 工程概况

珠江三角洲水资源配置工程是国务院部署的

172项节水供水重大水利工程之一,是广东省历史投资额最大、输水线路最长、受水区域最广的水资源调配工程,它对保障珠江三角洲地区城市供水安全和社会经济发展具有重要作用,同时也将对粤港澳大湾区发展提供战略支撑。因此本工程主要采用地下空间深埋盾构方式建造。

本项目穿越狮子洋国际水道段宽约2.4 km,最大水深约27 m;以东为珠江口东岸三角洲平原,沿线地表为道路和湿地公园,高程约2.4~4.5 m;以西为冲积平面,地表多为农田鱼塘,高程约0~2 m。狮子洋地区断裂构造主要为北北西向,断裂面倾角较陡,断层破碎带发育^[20-21];主要岩土包括人工填土、淤泥质土、砂卵石、细砂以及细砂岩、泥质粉砂岩、泥岩等,岩体风化程度高,破碎、透水性强,分化差异大,这些工程地质问题易造成突泥涌水、开挖失稳等盾构风险^[22-23]。因此为更好地了解狮子洋水道下伏地层、构造及其岩土体性质,在狮子洋水道东岸,广龙高速以北实施水平定向勘察钻孔SZYSD-1S,钻孔基本垂直水道向西进行定向钻进,完钻孔深936.20 m,并采用存储式测井仪对该孔进行综合测井。工作区位置见图1。

2 定向测井工艺

油气测井领域常用的定向测井工艺包括湿接头式测井、泵出式测井、存储式测井等。湿接头式测井系统为电缆测井系统,所获数据具有精度高的特点,但其接头容易损坏、测速慢,承压能力和安全性较差都制约了其在深部测井中的应有,泵出式测井则因工艺流程较为复杂、成本高、耗时长亦主要应用在投入较大的石油钻井中,而存储式测井工艺具有操作简单、时效短、质量高等特点^[24-25],张钰^[25]在井况复杂和存在井控风险的井中试验表明了存储式测井系

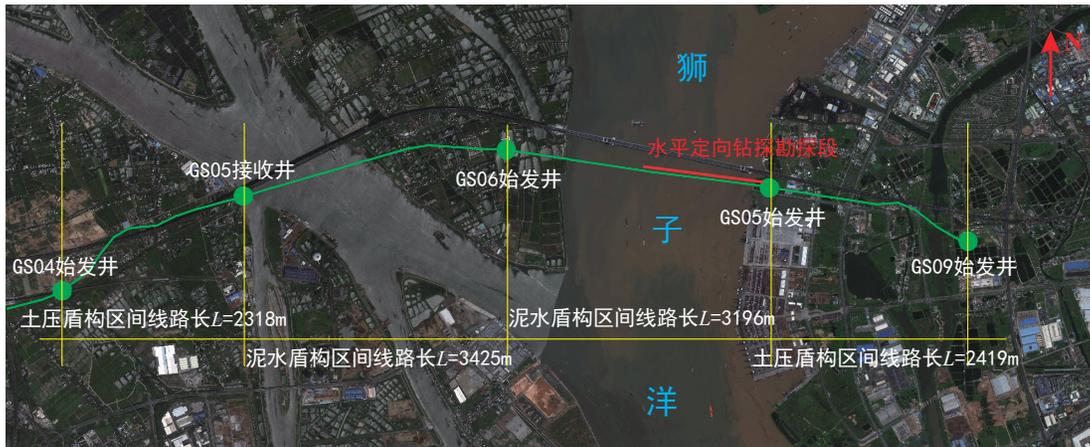


图1 工作区位置

Fig.1 Location of the work area

统的优势。定向钻探工程勘察领域因其钻探工艺的
差异,接头式、泵出式测井具有风险大、成本高等困
难,因而存储式测井系统具有良好的应用前景。

2.1 系统组成

定向钻探工程勘察存储式测井仪器为西安瑞达
物探设备有限公司生产的存储式组合测井系统(型
号:RDML3CSX),该系统由井下测井仪器、地面深
度采集系统、地面处理软件构成,该仪器通过电池
供电。测井前地面深度采集系统与井下仪器时间
同步,然后依靠钻杆将井下仪器输送到井内;测井
完成后通过数据线将井下测井数据和地面深度数
据读出,地面处理软件以时间为标尺,将井下测井
数据和地面深度数据合并成测井曲线。该测井系
统采集的测井参数包括电阻率、自然伽马、井温、
井斜等参数,可根据需要增减相应测井短节。

2.2 主要技术指标

本次井下测井仪器最高工作温度 125°C ,最大
工作压力 80 MPa ,最大工作时间 100 h ,仪器外径
 70 mm ,仪器供电 $24\sim 32\text{ V}$,存储容量 1 G ,深度
计量范围 $\leq 9999.99\text{ m}$,深度分辨率 0.01 m ;测井
参数精度误差为:自然伽马 $\pm 5\%$ 、侧向电阻率
 $\pm 5\%$ 、井温 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、井斜角 $\pm 0.3^{\circ}$ 、方位角
 $\pm 3^{\circ}$ 。

狮子洋定向钻探SZYSD-1S孔定向测井时间
为2021年1月13日,有效测井时间为10:40至
20:50,时长 $10\text{ h } 10\text{ min}$,测井速率约为 1.5 m/s 。
定向测井工作现场见图2。



图2 定向测井工作现场

Fig.2 Directional logging site

3 测井评价研究

3.1 地层结构与构造划分

区内出露地层主要包括上覆第四系全新世桂洲
组(Q_4g)和下伏的更新世礼乐组(Q_3l)的三角洲相
淤泥质土和泥质粉砂层,结构松软、强度低;下伏基
岩为白垩系下统百足山组(K_1b)泥质粉砂岩为主,
夹粉砂质泥岩、砂岩、泥质含砾砂岩、泥岩、钙质
泥岩等,产状 $N20^{\circ}\sim 30^{\circ}W/NE\angle 10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,厚层—
中厚层结构,较软—较硬岩。钻孔布置及揭示地
层情况见图3。

结合定向钻孔和已有垂直钻孔的岩心岩性,自
然伽马与电阻率相结合,可有效地划分出钻遇地
层的基本属性。从表1和图4可以看出,不同岩土
体的测井响应特征差异明显。第四系自然伽马变
化较大,有机质含量与自然伽马呈正相关;泥质粉
砂岩、粉砂质泥岩、含砾砂岩等,随着泥质含量
增加,自然伽马增大,同时受风化程度、含水性等
影响,同一岩

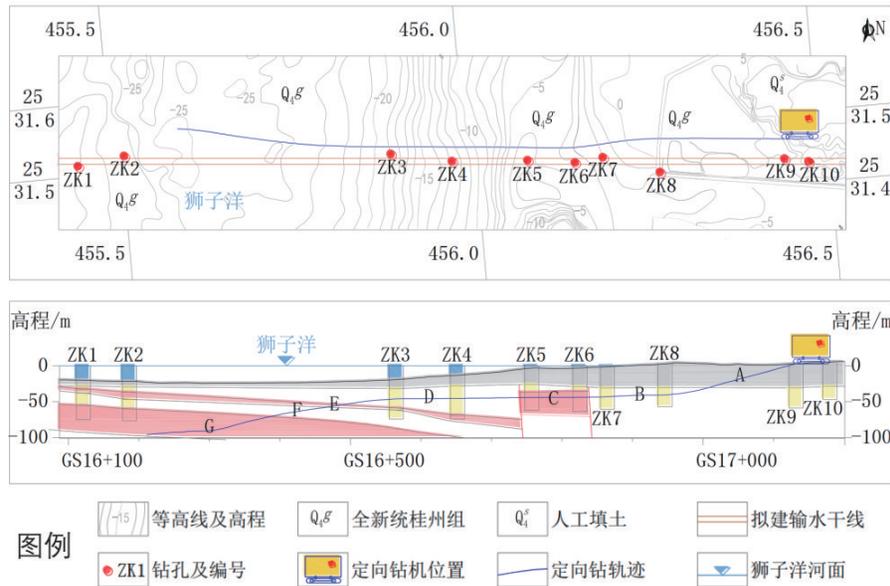


图3 SZYSD-1S井水平剖面

Fig.3 Plan and cross-section of SZYSD-1S

性电阻率差异较大,但总体的测井响应差异仍取决于岩性的差异。如图5所示,基于测井响应差异,对水平定向钻孔SZYSD-1S进行岩土体划分,共划分了8个层位4种岩土体,测井解释结果与定向钻遇地层基本吻合。

表1 典型岩土体测井响应特征值

Table 1 Logging response values of typical rocks and soils

岩土性	自然伽马(API)	电阻率/($\Omega \cdot m$)
淤泥质土	118~486/260	
砂卵石	127~185/145	
粉砂质泥岩	125~203/155	12~82/18
泥质粉砂岩	157~269/213	9~26/15
含砾砂岩	132~298/216	13~151/26

注:最小值~最大值/平均值

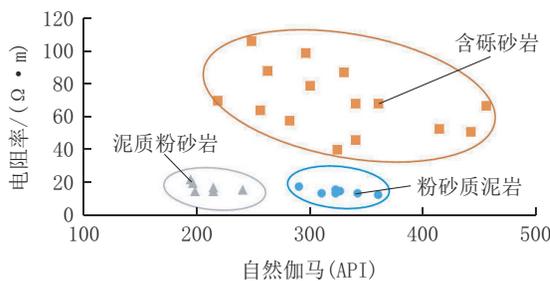


图4 自然伽马与电阻率测井交汇图

Fig.4 Correlation of natural gamma and resistivity

从图3、图5中可见,ZK5钻孔36.84 m、ZK6钻孔35.50 m以下为一套含砾砂岩,与两侧的其他钻孔同一深度范围内岩性差异较大,同时SZYSD-1S孔297.4 m处电阻率从43 $\Omega \cdot m$ 陡然下降至23 $\Omega \cdot m$,在380.0 m处电阻率有一明显抬升界线。结合区域地质构造,推断ZK5、ZK6钻孔两侧存在断层,断层为北北东向,倾角较陡,岩体破碎,这也是297.4~380.0 m电阻率整体表现为变化较小的低值的原因之一。

总体来看,定向钻孔揭示的岩体分化差异大,且存在断层破碎带的影响,岩土体软硬不均,对后续盾构带来一定的不利影响。

3.2 岩石质量评价与分级

岩体质量评价与分级是工程勘察的基础性工作,岩体完整性(级别)包括完整(I)、较完整(II)、较破碎(III)、破碎(IV)、极破碎(V)5类,岩石风化程度包括未风化、微风化、中风化、强风化、全风化5类。目前对岩体完整性评价指标主要有RQD、岩体完整性指数 K_v 、岩体体积节理数 J_v 等^[26-28],其中岩体完整性指数 K_v 是波速测试评价岩体完整性常用指标。在缺少波速测试数据时,化希瑞等^[28]提出了基于岩体电阻率定量表征岩体完整性指标的参数 K_r :

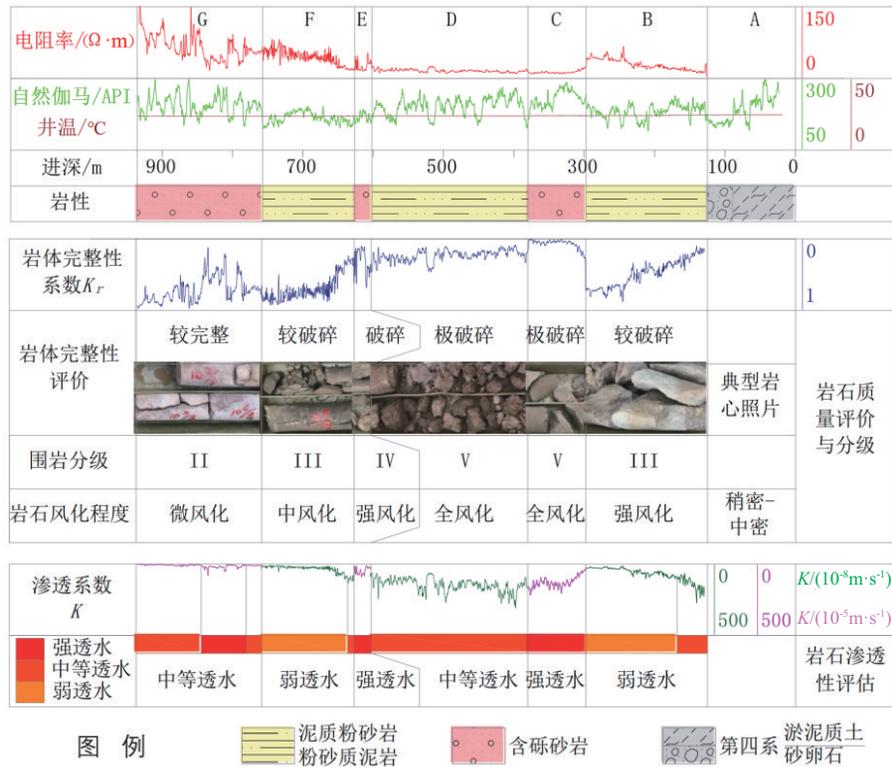


图 5 SZYSD-1S 井综合测井解释成果

Fig.5 Integrated logging interpretation results of SZYSD-1S

$$K_r = \frac{R_{max}(R^2 - R_{min}^2)}{R_{max}(R^2 - R_{min}^2) + R_{min}(R_{min}^2 - R^2)}$$

式中： K_r ——岩体完整性系数； R_{max} ——岩石骨架电阻率，取未风化地层电阻率最大值， $\Omega \cdot m$ ； R ——岩体电阻率，取地层电阻率平均值， $\Omega \cdot m$ ； R_{min} ——岩体中软弱介质电阻率，取地层电阻率最小值， $\Omega \cdot m$ 。

K_r 、 K_v 均为岩体完整性指标参数，两者量化指标见表 2。

根据测井结果，全井基岩的骨架电阻率 R_{max} 为 $151 \Omega \cdot m$ ，泥质粉砂岩、粉砂质泥岩的 R_{min} 为 $9 \Omega \cdot m$ 。计算获得 B—G 层段不同岩性的 K_r ，全孔 K_r 为 $6\% \sim$

82% ，共划分出极破碎（V）、破碎（IV）、较破碎（III）、较完整（II）4 个级别的岩体质量。岩石风化程度与波速比、风化系数具有较强的相关关系^[29]，基于 K_r 与 K_v 的相关性，根据《岩土工程勘察规范》（GB 50021—2001（2009 年版））^[30]，可获得岩石风化程度与 K_r 的相关关系，因此 B—G 层段不同岩性的风化程度包括全风化、强风化、中风化、弱风化等 4 类。不同岩石具有不同的电阻率，相同岩石因岩体完整性、风化程度以及富水情况也不尽相同，结合钻井井身位置及工况条件分析，SZYSD-1S 井电阻率的影响因素主要包括岩体的风化程度、断层破碎带、地下水矿化度、岩石成分等影响。SZYSD-1S 井岩石质量评价与分级见表 3 和图 5。

3.3 渗透系数估算

渗透系数是表征含水层特性的一个关键因素，目前主要采用压水试验、水流数值模拟、渗流试验等方式确定，这些方法精度高，但是成本高、工艺繁琐。研究表明，电阻率与渗透系数之间存在合理的转化关系，国内外学者采用电阻率分析地层渗透系数取得了较好的应用效果^[31-34]，最常用的方法是利

表 2 K_r 划分岩体完整性及分级参数^[29]

Table 2 Using K_r to divide rock mass integrity and classification parameters^[29]

$K_r/\%$	$K_r/\%$	岩体完整性	围岩分级
<15	<25	极破碎	V
15~35	25~50	破碎	IV
35~55	50~75	较破碎	III
55~75	75~90	较完整	II
75~100	90~100	完整	I

表3 SZYSD-1S井岩石质量评价与分级表

Table 3 Evaluation and classification of rock quality of SZYSD-1S

层段	钻孔进深/m	岩性	$R/(\Omega\cdot m)$	$K_r/\%$	岩体完整性	围岩分级	岩石风化程度	影响电阻率的因素
B	126.85~297.95	泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	33	60	较破碎	Ⅲ	强风化	风化程度
C	297.95~378.75	含砾砂岩	13	6	极破碎	V	全风化	断层破碎带、海水浸泡、风化程度
D	378.75~603.15	泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	16	23	极破碎	V	全风化	海水浸泡、风化程度
E	603.15~626.60	含砾砂岩	28	34	破碎	Ⅳ	强风化	风化程度为、主海水浸泡为辅
F	626.60~757.60	泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	35	62	较破碎	Ⅲ	中风化	风化程度
G	757.60~934.00	含砾砂岩	70	82	较完整	Ⅱ	微风化	岩石成分为主、风化程度为辅

用 Archie 公式与 Kozeny-Carman 公式结合,建立电阻率与渗透系数的相关关系:

Archie 公式:

$$S_w = \left(\frac{a \cdot R_w}{\varphi^m \cdot R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

式中: a ——岩性系数; m ——胶结指数; n ——饱和度指数; S_w ——岩石含水饱和度; R_w ——地层水电阻率, $\Omega\cdot m$; R ——地层电阻率, $\Omega\cdot m$; φ ——岩石有效孔隙度,小数。

Kozeny-Carman 公式:

$$K = \frac{\delta_w g d^2 \varphi^3}{180 \mu (1 - \varphi)^2} \quad (2)$$

式中: K ——渗透系数, m/s ; δ_w ——流体密度, kg/m^3 ; g ——重力加速度, m/s^2 ; d ——粒径, m ; μ ——运动粘滞系数, $kg/(m\cdot s)$ 。

百足山组为饱和含水层, $S_w=1$ 。地层水电阻率(R_w)与矿化度、温度相关,谢伟民^[35]分析工区地层水为 Cl-Na 型,矿化度 ≤ 21.70 g/L;根据测井资料,基岩段温度为 25.6~26.4 °C,平均为 26.1 °C;利用“NaCl 溶液电阻率与其矿化度及温度的关系图版”查询^[35], R_w 约 0.3 $\Omega\cdot m$ 。由于本地区缺少百足山组地层相关测试数据,其它参数采用经验数据, $a=1$ 、 $m=2$ 、 $\delta_w=1000$ kg/m^3 、 $g=9.8$ m/s^2 、 $\mu=0.0014$ $kg/(m\cdot s)$ ^[36-39],根据《岩石分类和命名方案 沉积岩岩石分类和命名方案》(GB/T 17412.1—1998)^[40],本次粉砂岩粒径取 0.0001 m、含砾砂岩粒径取 0.0025 m。

谢伟民^[35]、付新喜^[39]、洪开荣等^[41]对狮子洋地区百足山组砂泥岩的渗透系数进行统计,渗透系数

一般为 $3.82 \times 10^{-7} \sim 6.39 \times 10^{-4}$ m/s ,泥质粉砂岩透水性为弱透水,砂岩透水性为中等透水—强透水。SZYSD-1S 井岩体渗透系数估算及渗透性评价见表 4,全井岩石孔隙度为 0.04~0.25,平均为 0.11;渗透系数为 $1.01 \times 10^{-7} \sim 1.18 \times 10^{-3}$ m/s ,平均为 1.69×10^{-4} m/s ,根据《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)^[42],全井渗透性为弱透水—强透水,平均为中等透水。其中粉砂质泥岩、泥质粉砂岩渗透系数为 $1.01 \times 10^{-7} \sim 1.00 \times 10^{-5}$ m/s ,渗透性为弱透水—中等透水;含砾砂岩渗透系数为 $2.36 \times 10^{-5} \sim 1.18 \times 10^{-3}$ m/s ,渗透性为中等透水—强透水。测井分析结果与试验分析及前人研究成果基本吻合。

4 结论

(1)综合分析对比,定向钻探工程勘察领域因其钻探工艺的差异,湿接头式、泵出式测井具有风险大、成本高等困难,因而存储式测井系统具有良好的应用前景。

(2)结合研究区地质情况,综合测井数据分析了钻遇地层岩(土)性、构造,基于电阻率参数开展了岩石完整性计算、围岩分级、岩石风化程度评价,分析了影响测井电阻率各类因素,半定量估算了钻遇地层的渗透系数,并进行了渗透性评价。分析计算结果与钻遇地层基本吻合,有效解决了狮子洋主航道洋底深埋长隧洞精准勘探难题,为粤港澳大湾区重大工程建设提供了技术支持。

(3)通过在水利工程领域首次实践,本文系统地描述了定向(水平)工程测井系统组成与技术指标,

表4 SZYSD-1S井岩体渗透性评估分级

Table 4 Assessment and classification of permeability of rock mass in SZYSD-1S

层段	钻孔进深/m	岩性	$R/(\Omega \cdot m)$	φ /小数	$K/(m \cdot s^{-1})$	渗透性
B	126.85~297.95	泥质粉砂岩、 粉砂质泥岩	9~66/33	0.09	$1.37 \times 10^{-7} \sim 3.54 \times 10^{-6} / 4.04 \times 10^{-7}$	弱透水—中等透水
C	297.95~378.75	含砾砂岩	9~30/13	0.15	$3.00 \times 10^{-4} \sim 2.21 \times 10^{-3} / 1.19 \times 10^{-3}$	强透水
D	378.75~603.15	泥质粉砂岩、 粉砂质泥岩	9~26/16	0.14	$6.05 \times 10^{-7} \sim 3.54 \times 10^{-6} / 1.38 \times 10^{-6}$	中等透水
E	603.15~626.60	含砾砂岩	15~52/28	0.10	$1.25 \times 10^{-4} \sim 9.33 \times 10^{-4} / 3.42 \times 10^{-4}$	强透水
F	626.60~757.60	泥质粉砂岩、 粉砂质泥岩	16~80/35	0.09	$1.01 \times 10^{-7} \sim 1.34 \times 10^{-6} / 3.84 \times 10^{-7}$	弱透水—中等透水
G	757.60~934.00	含砾砂岩	13~151/70	0.07	$2.36 \times 10^{-5} \sim 1.18 \times 10^{-3} / 7.81 \times 10^{-5}$	中等透水—强透水

注:最小值~最大值/平均值

有助于明确类似项目定向测井工法,能够满足对地层结构、构造的判识,具有原位测试研究的优点,可实现对定向钻探勘察有效的技术补充,能够为工程勘察设计、盾构施工、关键问题识别提供基本依据。

参考文献(References):

- [1] 向军文.定向钻探技术应用现状及发展趋势[J].矿床地质,2012,31(S1):1097-1098.
XIANG Junwen. Application status and development trend of directional drilling technology [J]. Mineral Deposits, 2012, 31 (S1):1097-1098.
- [2] 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.
- [3] 马映辉,贾宏福,李成志,等.某铁路勘察近水平孔取心钻探施工技术[J].地质与勘探,2021,57(1):190-197.
MA Yinghui, JIA Hongfu, LI Chengzhi, et al. Nearly-horizontal borehole coring and drilling techniques in the survey of a railway [J]. Geology and Exploration, 2021, 57(1):190-197.
- [4] 赵春会,钱铁柱.水平定向钻技术在排水管道工程中的应用[J].水利水电技术,2019,50(S1):262-264.
ZHAO Chunhui, QIAN Tiezhu. Application of horizontal directional drilling technology in drainage pipeline engineering [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(S1):262-264.
- [5] 王峰,张琪,赵庆磊,等.管道非开挖穿越勘察采用斜孔钻探的可行性[J].油气储运,2017,36(10):1196-1200.
WANG Feng, ZHANG Qi, ZHAO Qinglei, et al. Feasibility of inclined drilling in the investigation of pipeline nonexcavation crossing engineering [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(10):1196-1200.
- [6] 叶兰肃,马卫东,王雷浩,等.水平分支孔定向钻探技术及其在煤矿水害防治中的应用——以东庞煤矿ZKxx3孔钻探施工为例[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(5):105-111.
YE Lansu, MA Weidong, WANG Leihao, et al. Application of directional drilling technology of horizontal branch hole in the drilling of ZKxx3 hole in Dongpang Coal Mine water disaster prevention and control [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5):105-111.
- [7] 许峰,杨茂林.定向钻探技术在神东矿区防治水中的应用[J].矿业安全与环保,2017,44(1):70-73.
XU Feng, YANG Maolin. Application of directional drilling technology in water control in Shendong coal mining area [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(1):70-73.
- [8] 顾岳,高德利,杨进,等.页岩气大型丛式井三维轨道优化设计模型[J].钻采工艺,2020,43(6):13-16,6.
GU Yue, GAO Deli, YANG Jin, et al. Optimal design model of 3-D wellbore trajectory for large-scale cluster wells for shale gas [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43 (6):13-16,6.
- [9] 张双斌,刘国伟,季长江.煤层气水平井技术应用分析及优化[J].煤炭工程,2021,53(3):93-97.
ZHANG Shuangbin, LIU Guowei, JI Changjiang. Application and optimization of CBM horizontal wells [J]. Coal Engineering, 2021, 53(3):93-97.
- [10] 李湘涛,秦羽乔,陈四平,等.水平井测井仪器输送技术及其应用[J].石油机械,2014,42(8):98-102.
LI Xiangtao, QIN Yuqiao, CHEN Siping, et al. The horizontal well logging instrument conveying technology and its applications [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(8):98-102.
- [11] 王磊,刘英明,王才志,等.水平井随钻电磁波测井实时正反演方法[J].石油勘探与开发,2021,48(1):139-147.
WANG Lei, LIU Yingming, WANG Caizhi, et al. Real-time forward modeling and inversion of logging-while-drilling electro-

- magnetic measurements in horizontal wells[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1):139-147.
- [12] 申鹏磊,白建平,李贵山,等.深部煤层气水平井测-定-录一体化地质导向技术[J].*煤炭学报*,2020,45(7):2491-2499.
SHEN Penglei, BAI Jianping, LI Guishan, et al. Integrated geo-steering technology of logging and orientation in deep coal-bed methane horizontal well[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7):2491-2499.
- [13] 王磊,范宜仁,操应长,等.大斜度井/水平井随钻方位电磁波测井资料实时反演方法[J].*地球物理学报*,2020,63(4):1715-1724.
WANG Lei, FAN Yiren, CAO Yingchang, et al. Real-time inversion of logging-while-drilling azimuthal electromagnetic measurements acquired in high-angle and horizontal wells[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(4):1715-1724.
- [14] 徐波,汪忠浩,伍东.基于常规电测井资料的各向异性储层水平井测井解释[J].*测井技术*,2018,42(6):652-657.
XU Bo, WANG Zhonghao, WU Dong. Log interpretation of horizontal well in anisotropic reservoir based on wire-line resistivity logging[J]. *Well Logging Technology*, 2018, 42(6):652-657.
- [15] 魏定勇,杨良权,刘爱友,等.综合物探技术在崇青水库安全鉴定勘察中的应用[J].*水利水电技术*,2019,50(S1):214-219.
WEI Dingyong, YANG Liangquan, LIU Aiyu, et al. Application of integrated geophysical prospecting technology in safety appraisal investigation of Chongqing Reservoir[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(S1):214-219.
- [16] 张建清.工程物探检测方法技术应用及展望[J].*地球物理学进展*,2016,31(4):1867-1878.
ZHANG Jianqing. Engineering geophysical detection methods technology application and prospects[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(4):1867-1878.
- [17] 付代光,周黎明,肖国强,等.综合地球物理测井技术在滇中引水隧洞工程勘察中的应用[J].*长江科学院院报*,2016,33(4):67-70,77.
FU Daiguang, ZHOU Liming, XIAO Guoqiang, et al. Application of comprehensive geophysical well logging technology to the engineering exploration of water diversion tunnel in central Yunnan[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(4):67-70, 77.
- [18] 付天池,何宝林,李宁.水平定向钻与综合测井在岩溶发育区轨道交通工程勘察中的应用探讨[J].*能源技术与管理*,2020,45(5):145-147.
FU Tianchi, HE Baolin, LI Ning. Application of horizontal directional drilling and comprehensive logging in rail transit engineering investigation in karst development area [J]. *Energy Technology and Management*, 2020, 45(5):145-147.
- [19] 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.
- [20] 丘善森.狮子洋地区断块活动性研究[D].广州:中山大学,2009.
QIU Shansen. Study of the fault-block activities in the Shiziyang area [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2009.
- [21] 陆岸典,肖惠,沈翔,等.狮子洋输水隧洞泥水盾构设计及施工技术分析[J].*现代隧道技术*,2020,57(5):226-231.
LU Andian, XIAO Hui, SHEN Xiang, et al. Design and construction technology of slurry shield used in Shiziyang water conveyance tunnel[J]. *Modern Tunnel Technology*, 2020, 57(5):226-231.
- [22] 王焰.城际铁路大直径泥水盾构施工风险及对策——以佛莞城际铁路狮子洋隧道工程为例[J].*隧道建设(中英文)*,2019,39(6):983-988.
WANG Yan. Construction risks and countermeasures for large-diameter slurry shield used in Shiziyang tunnel on Foshan-Dongguan intercity railway[J]. *Tunnel Construction (Chinese and English)*, 2019, 39(6):983-988.
- [23] 孙玉刚.裸眼存储式测井技术在页岩气测井中的应用[J].*中国石油和化工标准与质量*,2020,40(13):205-206.
SUN Yugang. Application of open hole storage logging technology in shale gas logging [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2020, 40(13):205-206.
- [24] 杨孟芝,吴海欧,王恒,等.页岩气水平井裸眼测井工艺及应用[J].*江汉石油职工大学学报*,2020,33(6):18-20.
YANG Mengzhi, WU Haiou, WANG Heng, et al. Openhole logging technology and application in shale gas horizontal wells [J]. *Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers*, 2020, 33(6):18-20.
- [25] 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.
- [26] 李明超,史博文,韩帅,等.基于对穿声波波速的岩体完整性多尺度评价新指标与分析方法[J].*岩石力学与工程学报*,2020,39(10):2060-2068.
LI Mingchao, SHI Bowen, HAN Shuai, et al. New index and analysis method for multi-scale rock mass integrity assessment based on P-wave velocity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(10):2060-2068.
- [27] 马超锋,李晓,成国文,等.工程岩体完整性评价的实用方法研究[J].*岩土力学*,2010,31(11):3579-3584.
MA Chaofeng, LI Xiao, CHENG Guowen, et al. Study of practical approach to assess integrality of engineering rock mass

- [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3579-3584.
- [28] 化希瑞, 刘铁, 刘剑. 隧道工程岩体完整性新的评价参数及方法[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(2): 43-46, 86.
HUA Xirui, LIU Tie, LIU Jian. A new coefficient and method to appraise tunnel rock mass integrity [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(2): 43-46, 86.
- [29] 李日运, 吴林峰. 岩石风化程度特征指标的分析研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004(22): 3830-3833.
LI Riyun, WU Linfeng. Research on characteristic indexes of weathering intensity of rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004(22): 3830-3833.
- [30] GB 50021—2001(2009年版), 岩土工程勘察规范[S].
GB 50021—2001(2009), Code for investigation of geotechnical engineering[S].
- [31] 姜振蛟, 卞建民, 查恩爽, 等. 高密度电阻率成像法在水文地质领域中的应用[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(2): 21-26.
JIANG Zhenjiao, BIAN Jianmin, ZHA Enshuang, et al. The application of the electrical resistivity tomography in hydrology: An overview [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(2): 21-26.
- [32] 喻永祥, 吴吉春. 利用ERT数据推求非均质多孔介质渗透系数初探[J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(2): 41-44.
YU Yongxiang, WU Jichun. Application of electrical resistivity tomography data to estimate hydraulic conductivity in porous medium [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(2): 41-44.
- [33] BOUDERBALA A, REMINI B, HAMOUDI S. Geoelectrical investigation of saline water intrusion into freshwater aquifers: A case study of Nador coastal aquifer, Tipaza, Algeria [J]. *Geofisica Internacional*, 2016, 55(4): 239-253.
- [34] SINGH S, SINGH V S. Estimation of hydraulic characteristics from electrical resistivity data in coastal aquifers of southern India [J]. *Journal Geological Society of India*, 2016, 88(1): 77-86.
- [35] 谢伟民. 浅析新建广深港高速铁路狮子洋隧道的水文地质条件[J]. *中国水运*, 2008(8): 181-183.
XIE Weimin. Analysis of hydrogeological conditions of Shiziyang tunnel of Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong high-speed railway [J]. *China Water Transport*, 2008(8): 181-183.
- [36] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2007.
YONG Shihe, ZHANG Chaomo. *Logging Data Processing and Comprehensive Interpretation* [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2007.
- [37] Fetter C W. *Applied Hydrogeology* (3rd edn) [M]. New York, 1994.
- [38] 许增光, 王雪, 柴军瑞, 等. 基于电阻率求解渗透系数不同方法的对比研究[J]. *西安理工大学学报*, 2018, 34(1): 43-47.
XU Zengguang, WANG Xue, CHAI Junrui, et al. Comparative study of different methods for calculating hydraulic conductivity based on resistivity [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2018, 34(1): 43-47.
- [39] 付新喜. 广深港客运专线狮子洋隧道水文地质特征研究[J]. *资源环境与工程*, 2007(2): 152-155.
FU Xinxi. Hydrogeological feature of the Shiziyang tunnel of Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong passenger dedicated railway [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2007(2): 152-155.
- [40] GB/T 17412.2—1998, 岩石分类和命名方案 沉积岩岩石分类和命名方案[S].
GB/T 17412.2—1998, Classification and nomenclature schemes of the rocks classification and nomenclature schemes of sedimentary rock[S].
- [41] 洪开荣, 杜闯东, 王坤. 广深港高速铁路狮子洋水下盾构隧道修建技术[J]. *中国工程科学*, 2009, 11(7): 53-58.
HONG Kairong, DU Chuangdong, WANG Kun. Shield tunneling technology of Shiziyang subaqueous tunnel of Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong high-speed railway [J]. *Strategic Study of CAE*, 2009, 11(7): 53-58.
- [42] GB 50487—2008, 水利水电工程地质勘察规范[S].
GB 50487—2008, Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower[S].

(编辑 荐华)