

“深埋长隧洞勘察关键技术专题”编者按:“十三五”以来国家实施了滇中引水、引江补汉、引大济岷、珠三角水资源配置等重大工程,面对深埋长隧洞勘察工程挑战,进行了技术创新和应用,破解了诸多世界难题,2024年10月在四川成都召开了深埋长隧洞勘察关键技术交流会,总结了所取得的成果和经验。为此,编辑部组织了“深埋长隧洞勘察关键技术专题”,由赵远刚高级工程师担任客座主编。本专题遴选8篇论文发表,内容涵盖水平定向钻探、超前地质预报、岩石力学性质、钻孔原位测试等技术领域。该专题的出版,有利于推动水利工程勘测技术进步与成果质量提升。

定向钻探技术在水利水电深埋隧洞勘察中的应用研究

——以引江补汉工程为例

颜慧明^{1,2,3}, 项洋^{1,3*}, 齐凌轩^{1,2,3}, 常威^{1,3,4}, 左勇哲^{1,3}

(1. 长江岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 3. 国家大坝安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010; 4. 水利部水网工程与调度重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要:钻探是隧洞工程勘察最直接有效的勘察手段,然而对于深埋长隧洞,传统的垂直钻孔在勘察中存在有效进尺少、设备搬迁难度大等缺点。定向钻探技术可以选择在隧洞傍山段或沟谷内等布置钻孔,通过控制钻孔轨迹对隧洞洞身地质条件进行勘察,具有很高的经济效益。在引江补汉工程中成功实施了一个分支定向勘察孔,其中主孔深630.8 m、分支孔长度81 m,取心回次共158次,累计采取岩心166.3 m,目标取心段岩心采取率达到95%,并在孔内实施了声波、录像测试及水文试验。总结了水利水电工程定向钻探-孔内试验综合勘察方法,为水利水电深埋隧洞工程勘察提供了新的手段,也为同类型工程定向钻探技术的应用提供借鉴。

关键词:深埋长隧洞;定向钻探技术;分支孔;孔内综合测试;水利水电工程;工程勘察;引江补汉工程

中图分类号:P634.7;TV554 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0022-08

Application research of directional drilling technology for deep buried tunnel engineering investigation: Taking the water diversion project from the Yangtze River to the Hanjiang River as an example

YAN Huiming^{1,2,3}, XIANG Yang^{1,3*}, QI Lingxuan^{1,2,3}, CHANG Wei^{1,3,4}, ZUO Yongzhe^{1,3}

(1. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan Hubei 430010, China; 2. Changjiang Survey, Planning,

收稿日期:2025-02-07; 修回日期:2025-04-22 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.03.003

基金项目:国家大坝安全工程技术研究中心科研项目“超深定向钻高压灌浆与超前勘探关键技术研究”(编号:CX2023Z01-5);水利部水网工程与调度重点实验室科研项目“复杂地质条件下水工深埋长隧洞涌水突泥防治关键技术研究”(编号:CX2023Z02-1)

第一作者:颜慧明,男,汉族,1975年生,正高级工程师,工程地质水文地质专业,主要从事水利水电工程地质勘察研究工作,湖北省武汉市解放大道1863号,yyyhm@263.net。

通信作者:项洋,男,汉族,1990年生,工程师,硕士,地质工程专业,主要从事水利水电工程地质勘察工作,湖北省武汉市解放大道1863号,387839060@qq.com。

引用格式:颜慧明,项洋,齐凌轩,等.定向钻探技术在水利水电深埋隧洞勘察中的应用研究——以引江补汉工程为例[J].钻探工程,2025,52(3):22-29.

YAN Huiming, XIANG Yang, QI Lingxuan, et al. Application research of directional drilling technology for deep buried tunnel engineering investigation: Taking the water diversion project from the Yangtze River to the Hanjiang River as an example[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 22-29.

Design and Research Co., Ltd., Wuhan Hubei 430010, China; 3. National Dam Safety Engineering Technology Research Center, Wuhan Hubei 430010, China; 4. Key Laboratory of Water Grid Project and Regulation, Ministry of Water Resources, Wuhan Hubei 430010, China)

Abstract: Drilling is the most direct and effective investigation method for tunnel engineering, however, for deep-buried long tunnels, traditional vertical boreholes have limitations such as less effective footage, significant challenges in equipment relocation, etc. Directional drilling technology offers a solution by allowing off-site borehole placement (e.g., along mountainsides or valleys) and controlled drilling trajectories to investigate the geological conditions of the tunnel structure, demonstrating high economic efficiency. A branch-type directional exploration hole was successfully implemented in the water diversion project from Yangtze River to Hanjiang River. The main hole reached a depth of 630.8m, with a branch hole extending 81m, a total of 158 coring runs were conducted, recovering 166.3m of rock core, achieving a 95% core recovery rate in the target zones. Additionally, acoustic wave logging, borehole imaging, and hydrogeological tests were performed. This project established a comprehensive investigation method integrating directional drilling and in-hole testing for hydropower and water conservancy engineering. It provides a new approach for deep-buried tunnel exploration and serves as a valuable reference for applying directional drilling technology in similar projects.

Key words: deep-buried long tunnel; directional drilling technology; branch-type hole; in-borehole integration testing; hydropower and water conservancy engineering; engineering investigation; the water diversion project from Yangtze River to Hanjiang River

0 引言

近年来,根据国家重大战略和区域战略新要求、水资源供需新形势,构建国家水网主骨架和大动脉的步伐进一步加快,一大批引调水工程建设工作加快推进,深埋长隧洞越来越多,如滇中引水香炉山隧洞、陕西引汉济渭工程穿秦岭隧洞、新疆某补水工程穿天山隧洞、青海引大济湟穿大阪山隧洞、引江补汉工程等,其中最长的达194 km,最大埋深达2200 m。深埋长隧洞因其工程地质问题复杂多样,已成为目前多数引调水工程建设中的控制性工程,也是隧洞工程勘察工作中的重难点^[1-2]。引江补汉工程隧洞埋深大、线路长,隧洞开挖直径大,大洞径导致围岩失稳风险高,支护难度极大。隧洞穿越古元古界至新生界13个地层单元,涉及地应力高、水压高、地温高、断层多、软岩洞段占比较大等地质特征,施工风险高。因此,引江补汉工程隧洞的前期勘察工作是重中之重。

虽然目前深埋长隧洞都采用多种手段进行综合勘察,但国内外深埋长隧洞的工程地质勘察技术仍面临不少难题,如隧洞地面高程高,交通条件、工作环境恶劣,勘探设备难以到达洞线位置;对于埋深1000~3000 m以及高应力、高水头条件下的隧洞,缺乏适宜的勘探试验设备,直接有效获取深部资料的勘察手段与方法不多。

定向钻探技术的发展和在工程勘察中逐渐应

用,为深埋长隧洞的前期勘察、施工工程预处理等提供了一种新的方法和手段。如能在前期勘察中采用定向钻探技术,在隧洞傍山段或沟谷内等地“异位”布置钻孔,通过控制钻孔轨迹,在洞身一定范围内,沿隧洞轴线方向延伸钻孔,进行取心、孔内测试等工作,可以获取更为准确的岩性、地层结构、断层等资料,为隧洞的设计和施工提供科学依据,达到对深埋长隧洞勘察的目的。同时,在深埋长隧洞段开展定向钻探,相较于传统的垂直孔,能节约大量无效进尺,减轻钻机搬迁难度,大幅提升钻孔的经济效益。为此,在引江补汉工程隧洞勘察中,对水平定向钻探技术进行了应用研究。

1 定向钻探技术发展现状

定向钻探技术(directional drilling technology, 简称DDT),是通过造斜、测斜、导向、纠偏、稳斜等手段,使钻孔在钻进时沿预定的钻孔轨迹达到靶点的钻进技术。该技术是对传统钻探技术的创新,最早起源于石油钻井工业;1863年,瑞士工程师列晓在阿尔卑斯山铁路隧道建设过程中,率先提出定向钻探概念;1980年代之后,定向钻探技术进入了快速发展阶段,逐步诞生了随钻测量、旋转导向、压力测量等现代钻井技术。经过百余年的发展,定向钻探技术已应用到不同领域^[3-5]。

我国定向钻探技术发展迅速,已广泛应用于石

油与天然气、煤矿、地热、市政等行业,涉及矿井油气勘探,井下瓦斯抽采、水害防治,非开挖铺管等多个领域^[6-11],因其导向变轨能力强、成孔效率高、一孔多支等特点,多用于施工造孔,为油气开采、排水堵漏、管线铺设等作业提供通道条件,基本不取心。近年来,定向钻探技术逐渐在公路、铁路等线路工程勘察项目中应用,用于导向钻进、钻取岩心、并尝试开展各项孔内测试,获取关键地质信息,但该技术在水利水电工程勘察中应用较少。水利水电工程勘察项目关注各项水文地质参数,往往要求进行严格的取心、孔内录像、声波测试并开展各项水文地质试验,对孔壁的清洁度有很高的要求,现有的定向钻探技术在连续取心、孔内测试方面还存在较大差距。目前,定向钻探技术在水利水电行业滇中引水香炉山隧洞工程、山西中部引黄工程的突涌水封堵与注浆加固等领域进行了初步应用^[12-17],主要是用于工程施工辅助造孔,基本不采取岩心。2020—2021年,珠江三角洲水资源配置工程项目利用非开挖水平定向钻机在穿越狮子洋主航道段实施了一个水平定向勘察试验孔^[18],钻探长度936.20 m,间断采取岩心总长83 m,进行了压水试验探索,为过江(海)隧洞勘察提供了一种新的方法,也为山区水利水电深埋隧洞勘察提供了新的思路。此外,因地质条件复杂性、应对措施困难性前所未有,超出目前认知水平,施工困难重重的滇中引水香炉山隧洞工程,将依托定向钻探技术,采用地面“钻、探、灌”一体处理措施,针对性地对勘探过程中的不良地质条件进行灌浆预处理,具有很好的应用前景。

定向钻探技术应用在工程勘察行业中,还存在一系列适应性问题^[19-22]。如在钻探设备方面,现有工程案例多依托大扭矩的非开挖钻机或坑道定向钻机,存在提下钻效率低、给进行程短、难以适应多种钻探工艺等不足;定向仪器和信息传输方式方面,仍以有线式随钻测量系统和穿缆钻杆为主,先进的泥浆脉冲式无线测量系统尚未见在小口径勘察钻孔中的成功应用案例;在钻探工艺方面,定向钻进连续取心中绳索取心钻杆频繁折断问题、造斜段难以取心、水平段取心过程中钻孔轨迹偏移等问题尚待解决。

2 工程概况

引江补汉工程输水隧洞具有埋深大、洞线长的

特点,沿线地质条件、构造背景复杂,隧洞施工将面临涌水突泥、高外水压力等高风险工程地质问题,下穿地表水体及穿越断裂(层)、强可溶岩洞段时水害风险将更高。

输水隧洞于线路桩号约LAK134+000~LAK140+000段穿越了青峰断裂带,断裂带内正常岩体地层岩性主要为震旦系—奥陶系可溶岩。青峰断裂带内北侧临近城口—房县断裂发育有汉江一级支流南河,该河段为白水峪水库中上游段,总体流向为SWW-NEE。输水隧洞下穿南河洞段最小埋深约70 m,并穿越了与河流近平行且切割河流的郭峪断层、黄家垭断层,该段隧洞施工期因这些断层或其他长大结构面导通白水峪水库进而引发突涌水,水害风险极高。

查明输水隧洞下穿南河洞段工程地质与水文地质等条件是勘察工作的重要任务。按传统的垂直钻孔布置,需要沿隧洞轴线布置6~8孔,孔间距50~100 m,进尺约1200 m,虽然垂直孔具有纵向层位清晰,地质构造验证准确的优势,但涉及水上钻探和部分深孔,施工难度大和三通一平辅助费用高等弊端更为突出,且过多的无效进尺将导致工程造价高昂;若能在南河岸边“异位”布置钻孔,利用定向钻探技术钻至输水隧洞洞身附近,再沿隧洞轴线方向延伸钻孔,进行取心、孔内测试等,将能获得丰富的地质成果,同时大幅压缩工作量,只需布置1个钻孔,总进尺600 m,可提高勘探进度,压缩钻探成本。

输水隧洞过南河段地质剖面如图1所示^[23]。本次实施定向钻孔的主要目的如下:

(1)查明输水隧洞下穿南河洞段围岩地层岩性及地质结构、岩溶发育程度、岩体透水性;穿越断层带规模及其工程地质特性;裂隙等结构面发育程度、规模、与南河水力联系等。

(2)为施工期超前地质预报定向钻探开展先行试验,进行技术探索和技术储备。

(3)水平段连续取心技术、质量和钻进速度验证。

(4)孔内综合测试,具体包括:声波、视电阻率、瞬变电磁及水文地质测试等相关测试技术。

(5)进行复合定向钻探的成本核算,为后期定向钻探大规模应用及超前地质预报超前超深平行导孔钻探技术实施积累实际应用经验。

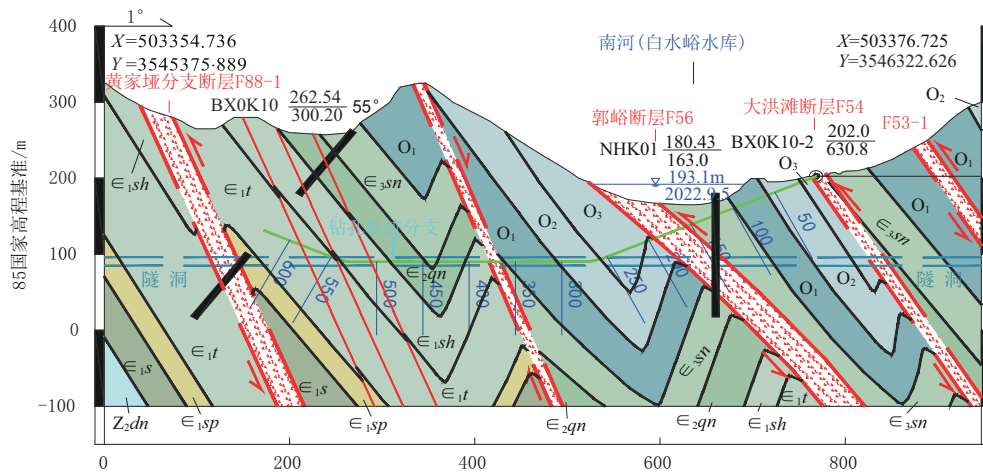
图1 输水隧洞过南河段示意^[23]

Fig.1 Schematic diagram of the section of the water transfer tunnel across the south river

3 定向钻孔施工情况

3.1 钻孔轨迹设计及钻进工艺

引江补汉工程BX0K10-2号定向钻孔布置于南河左岸输水线路南侧,孔口位于隧洞轴线右方约230 m,高程约202 m。设计开孔倾角 25° ,方位角 181° ,钻孔设计结构为五段式(图2),主孔长627 m,分为AB直线段0~219 m,倾角 -25° ;BC造斜段(变轨段)219~294 m,弧段长75 m,曲率 $1.0^\circ/3$ m;CD稳斜段(水平直线段)294~522 m,段长228 m;DE造斜段(变轨段)522~582 m,弧段长60 m,曲率 $1.0^\circ/3$ m;EF稳斜段(尾段)582~627 m,段长45 m,倾角 30° 。GH水平分支段,段长81 m。其中CD稳斜段为主要取心区间,设计埋深109 m。隧洞的底板埋深为115 m,洞高10 m。

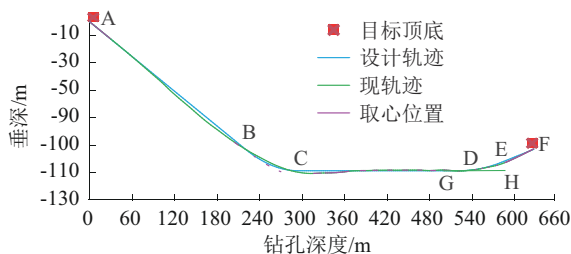


图2 定向钻孔轨迹示意

Fig.2 Schematic diagram of directional drilling trajectory

由于待穿越地层存在断层破碎带、富含承压水,为应对复杂地质条件的不利影响,本次钻孔任务采用复合定向钻进工艺、小口径螺杆马达驱动、水平段提钻取心、孔内综合测试和预注浆加固技术

(必要时注入水泥浆加固地层)相结合的施工方案。采用两级钻孔,一开采用 $\varnothing 110$ mm钻头开孔,钻至孔深25 m左右,采用 $\varnothing 153$ mm扩孔钻头扩孔,下入 $\varnothing 146$ mm套管,注浆固结;二开采用 $\varnothing 110$ mm钻头配合 $\varnothing 89$ mm螺杆钻具钻至终孔,完成造斜和取心任务。实际施工中,可视地层条件多级扩孔,下入多层套管维持孔壁稳定。

3.2 设备机具选型

钻探设备采用ZYL-7000D型履带式全液压定向钻机(图3),该钻机扭矩和起拔力大,配有独立的泥浆泵车,适用于各种煤层和岩层,配套工具完备,适用于坑道和地面工程的定向钻孔施工。



图3 定向钻孔现场施工

Fig.3 On-site construction of directional drilling

钻杆选用通缆螺旋槽钻杆,可在钻头和钻杆直径相差不大的情况下,保证排渣通畅,能有效避免钻进过程中出现的卡钻、抱钻等孔内事故。

随钻测量装置为YSX18型矿用随钻测量系统,该装置可随钻测量钻孔倾角、方位角、工具面向角

等主要参数,顶角测量的范围和精度: $(0^{\circ}\sim\pm 50^{\circ})\pm 0.1^{\circ}$ 、分辨率为 0.01° ;方位角测量范围和精度: $(0^{\circ}\sim 360^{\circ})\pm 2^{\circ}$ 、分辨率为 0.1° 。同时该装置可实现钻孔参数和轨迹的实时显示,便于施钻人员随时了解钻孔施工情况,并及时调整弯头方向和工艺参数。通过实时数据界面及表盘明暗直观显示通信状态;探管外部供电方式与双路独立信号传输;响应速度快、抗干扰能力强;探管采用插接式三翼固定,现场拆装简便。

3.3 钻孔施工过程

引江补汉工程BX0K10-2号定向钻孔终孔孔深630.80 m,累计完成工作量939.51 m(包括多次侧钻),累计取心158次,岩心总长165.02 m,取粉33次,总长35.4 m。施工历时144 d,过程颇为坎坷。

钻孔沿设计倾角开孔后,首先顺利完成了219 m的AB直线段取心任务。进入BC造斜段后,现场尝试在造斜段进行取心,共采取岩心4次,总长3.0 m,取心过程对造斜产生了不利影响,导致钻孔偏离设计轨迹;此外,因地层破碎,频繁塌孔,以及因取心钻具组合与钻孔直径不匹配,卡钻现象严重,BC造斜段进行了2次带压注浆,以固化地层,确保成孔。进入CD稳斜段后,由于钻具整体受重力影响,以及穿越断层破碎带时地层软硬不均,在孔深348.46 m处,实测数据显示钻孔轨迹已经位于输水隧洞底板以下,轨迹偏移严重,达不到地质勘察目的,决定封孔,从上部适当位置侧钻,重新导向至设计轨迹。现场从孔深190 m处侧钻,因该孔段属下行孔,侧钻难度极大,经历了多次侧钻失败、注浆、再侧钻后,耗时20 d侧钻成功,此后进入正常施工阶段,钻孔施工至630.80 m处终孔。

引江补汉工程BX0K10-2号定向钻孔施工过程中,为解决破碎地层取心困难的问题,现场在既有 $\varnothing 110$ mm钻具的基础上,进而对取心钻头结构、卡心装置、扶正装置和单动结构进行了大量的改进加工^[24],大幅提高了岩心采取率。

81 m的水平分支钻孔的实施,历经多次侧钻和带压注浆,它的成功实施验证了定向钻轨迹控制技术在取心钻探方面的技术优越性,也为超前灌浆、不良地质条件预处理积累了经验。

3.4 不同钻具组合取心效果试验

钻孔施工过程中,对钻具结构和取心钻具组合进行了大量的尝试。

3.4.1 多种钻具组合取心效果对比

现场尝试了以下12种钻具组合:(1)1.5 m单管取心管+单管取心钻头;(2)1.5 m单管取心管+单管取心钻头+卡簧;(3)直螺杆马达+1.5 m单管取心管+单管取心钻头+卡簧;(4)直螺杆马达+1.0 m单动双管取心钻具;(5)直螺杆马达+1.5 m单动双管取心钻具;(6)直螺杆马达+2.0 m单动双管取心钻具;(7)0.5°弯螺杆马达+1.0 m单动双管取心钻具;(8)0.5°弯螺杆马达+1.5 m单动双管取心钻具;(9)0.5°弯螺杆马达+2.0 m单动双管取心钻具;(10)直螺杆马达+3.0 m单动双管取心钻具;(11)螺旋槽通缆钻杆+3.0 m单动双管取心钻具;(12)钻杆+半合管单动双管取心钻具。

从取心效果来看:单动双管取心钻具>单管取心钻具+卡簧>单管取心钻具;钻杆直连取心钻具>直螺杆马达+取心钻具>弯螺杆马达+取心钻具。

3.4.2 弯螺杆马达取心试验

现场还验证了使用弯螺杆马达在稳斜段复合定向钻进取心的效果。对不同角度的螺杆钻具和不同长度的取心钻具进行组合试验,取得较好的效果。试验情况如下:

(1)钻孔于586.56 m处开始尝试采取0.5°螺杆马达+1.0 m单动双管取心钻具进行定向取心6次(第166~171回次),岩心采取率92.5%,钻孔倾角增加 1.7° ,方位角增加 1° ;

(2)于592.56 m处采用0.5°螺杆马达+1.5 m单动双管取心钻具进行定向取心1次(第172回次),岩心采取率100%;

(3)于593.76 m处采用0.5°螺杆马达+2.0 m单动双管取心钻具进行定向取心19次(第173~191回次),岩心采取率96.54%,钻孔倾角增加 2.3° ,方位角增加 0.11° 。

试验结果表面,长度 ≤ 2.0 m的取心钻具配合小角度螺杆钻具,取心效果完全可以得到保证。在稳斜效果方面,弯螺杆马达>弯螺杆马达+0.5 m取心钻具>弯螺杆马达+1.0 m取心钻具>弯螺杆马达+1.5 m取心钻具>弯螺杆马达+2.0 m取心钻具。

实践证明,稳斜复合定向钻进和取心并不完全矛盾,在小角度螺杆钻具+取心钻具组合施工时,只要选取适合的取心钻具长度和适当角度的螺杆钻具,是可以做到连续定向并取心的。取出的部分岩心如图4所示。



图4 定向钻孔岩心照片

Fig.4 Photo of directional drilling core

3.5 孔内综合测试成果

3.5.1 物探测试

因引江补汉工程BX0K10-2号定向钻孔全孔孔深达到630.8 m,且钻孔轨迹存在弯曲段,钻孔末端上扬角度达到 30° ,采用传统电缆仪器无法完成物探测试工作。根据现场实际情况,应用了无缆式声波测试、孔内录像二合一的试验设备(图5),在地表完成仪器调试后,利用转换接头,将仪器安装在钻杆柱末端的原钻头位置,随钻杆匀速推进孔内,并通过安装在孔口的钻杆计深装置,记录钻杆推进的深度值。现场完成了全孔声波录像二合一试验,仪器推送顺畅,工作状态良好,录像效果清晰,取得了较好的应用效果(图6)。

3.5.2 水文地质试验

根据现场实际情况,研制了分段式压水试验器和振荡式渗透试验设备,首次在定向钻孔中成功开



图5 无缆式声波测试、孔内录像二合一的试验设备

Fig.5 Customized two-in-one cable-free acoustic test, in-hole video test equipment

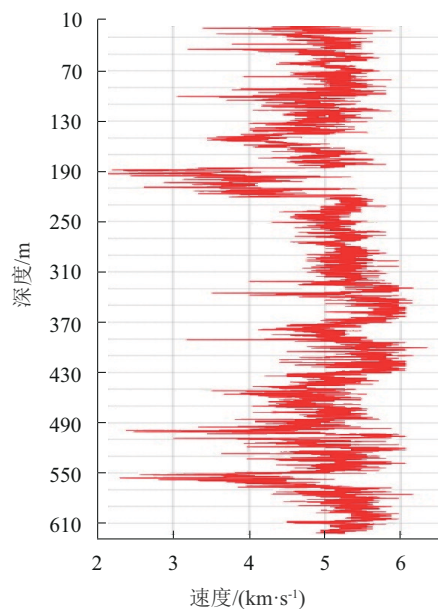
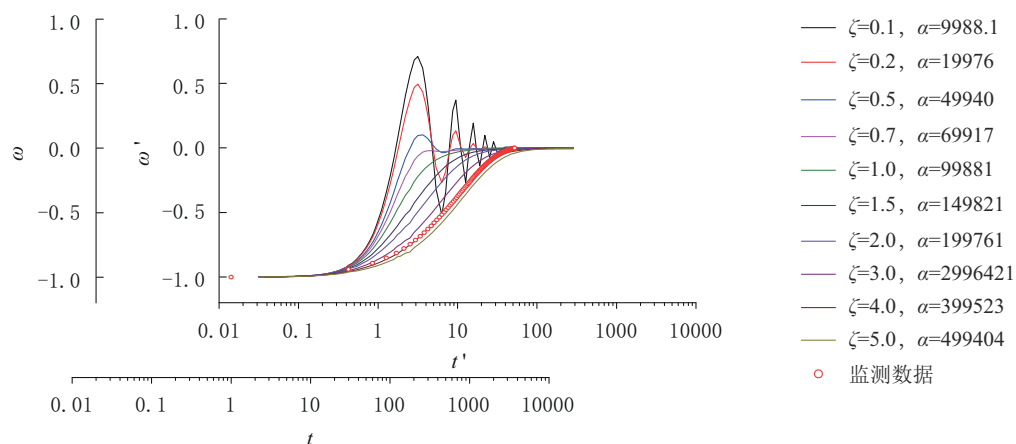


图6 声波波速成果

Fig.6 Sonic wave velocity results

展了分段压水试验和微水振荡试验:分段压水试验完成5次,试验段长3.6 m;振荡式渗透试验完成全孔段1次、分层试验6次;抽水试验完成2次,分别为0~200 m段以及0~630.8 m段(图7)。



ω —瞬时抽(注)水后 t 时刻钻孔中水位, m; t —选取匹配点对应的实测曲线记录时间, s; ω' —无量纲的水位变化量; t' —选取匹配点对应的标准曲线无量纲时间

图7 振荡式渗透试验结果

Fig.7 Oscillatory penetration test results

4 应用分析

将定向钻探技术应用于水利水电深埋长隧洞勘察,是一次将定向钻探技术、地质勘探和综合测试技术等相结合的大胆尝试和探索,在应用过程中取得了丰富的成果,同时,该定向钻孔的实施过程中也发现了以下问题:

(1)在造斜段强行提钻取心会与轨迹控制冲突,实际应用中难度很大,既难以控制定向轨迹,也容易造成孔内事故。

(2)深度较大的定向孔,采用提钻取心工艺的取心效率低、劳动强度大,使用长取心钻具能有效提高钻进效率,但影响造斜效果。应提高定向钻探设备的取心工艺适应性,大力探索绳索取心定向钻进技术及定向钻进连续取心技术^[25]。

(3)复杂地质条件下,近水平段钻孔孔壁稳定性问题突出,需重视冲洗液的携渣能力,加强循环条件下泥浆的动态调整^[26]。

(4)定向孔内开展各种测试设备仪器的安全顺利下放是一大难题,需结合实际情况做必要调整,后续需提高各项孔内测试方法对定向钻进工艺的适应性。

5 结论

BX0K10-2号定向钻孔的成功实施提高了引江补汉工程深埋长隧洞的勘探成果质量,水利水电工程深埋隧洞勘探工作提供了案例参考。

(1)引江补汉工程BX0K10-2号定向钻孔实施过程坎坷,现场通过总结经验、动态调整方案、针对性改进孔内工具等方法,成功实现了轨迹控制和取心钻进,完成了各项孔内测试及水文地质试验,钻孔资料成果足以支撑地质勘察需求。

(2)本钻孔的成功实施,初步证明定向钻探技术是水利水电工程深埋长隧洞勘察中的一种有效手段,具有广阔的应用前景。在隧洞工程勘察中,用水平孔替代传统垂直孔,勘探“点”成为勘探“线”,可大幅提升深埋长隧洞勘探成果质量与工作效率,避开地表环境不利影响,减少无用进尺。

(3)定向钻探技术在水利水电工程深埋隧洞勘察中的推广应用仍存在不利影响因素:一方面,现有的钻进工艺和配套机具设备尚不成熟,工作效率和成本影响了该技术的大规模推广;另一方面,取心定向钻探技术服务于地质勘察目的,钻孔的施工

要受到不良地质条件的影响,风险相对较大。

参考文献(References):

- [1] 陈长生,张海平,周云,等.滇中引水工程香炉山隧洞勘察关键技术[J].长江科学院院报,2022,39(12):8-14.
CHEN Changsheng, ZHANG Haiping, ZHOU Yun, et al. Key technologies of investigating Xianglushan tunnel of central Yunnan water diversion project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(12): 8-14.
- [2] 张小宝,司富安,段世委,等.深埋水工长隧洞主要工程地质问题与勘察经验[J].水利规划与设计,2021(12):55-60.
ZHANG Xiaobao, SI Fuan, DUAN Shiwei, et al. Main engineering geological problems and investigation experience of deeply buried hydraulic long tunnels[J]. Water Resources Planning and Design, 2021(12): 55-60.
- [3] 胡永鹏,张森,路伟.水平定向钻在地质勘察中的应用[J].科技创新与应用,2022,12(19):183-187.
HU Yongpeng, ZHANG Sen, LU Wei. Application of horizontal directional drilling in geological survey[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(19): 183-187.
- [4] 李术才,李利平,孙子正,等.超长定向钻注装备关键技术分析及发展趋势[J].岩土力学,2023,44(1):1-30.
LI Shucai, LI Liping, SUN Zizheng, et al. Key technology analysis and development trend of the equipment for ultra-long directional drilling and grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 1-30.
- [5] Saruev A L, Saruev L A, Vasenin S S. Development of small diameter pilot hole directional drilling for trenchless utility installation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 43(1): 012075.
- [6] Xu Y P, Wang L G, Chen X J, et al. Improvement of drilling quality using precision directional drilling technology[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2022, 12(11): 3149-3164.
- [7] Ma T S, Chen P, Zhao J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2016, 2(4): 365-395.
- [8] Bohammadzadeh Bina S, Fujii H, Tsuya S, et al. Evaluation of utilizing horizontal directional drilling technology for ground source heat pumps[J]. Geothermics, 2020, 85: 101769.
- [9] 邵玉冰,刘培培,庞云铭,等.穿越长江输气管道工程地质勘察技术研究[J].人民长江,2015(14):41-44.
SHAO Yubing, LIU Peipei, PANG Yunming, et al. Research on geological survey technology of directional drilling of gas pipeline crossing Yangtze River[J]. Yangtze River, 2015(14): 41-44.
- [10] 许学才.川气东送管道万福河穿越工程定向钻施工技术[J].人民长江,2010,41(5):37-39.
XU Xuecai. Directional drilling technologies for Wanfu River crossing works of Sichuan-to-east gas transmission pipeline[J]. Yangtze River, 2010, 41(5): 37-39.
- [11] 王勇刚,孙红林,胡志新,等.多分支定向钻探技术在隧道勘察中的应用[J].隧道建设(中英文),2023,43(9):1558-1564.

- WANG Yonggang, SUN Honglin, HU Zhixin, et al. Application of multi-branch directional drilling technology for tunnel investigation[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(9):1558-1564.
- [12] 袁玉石,苗红昌,张志强,等.水平定向钻在南水北调配套工程输水管线穿越中的应用研究:以沙颍河穿越工程为例[J].地质科技情报,2016,35(4):208-212,222.
- YUAN Yushi, MIAO Hongchang, ZHANG Zhiqiang, et al. Application of HDD in the north water transfer supporting project: Shayinghe river crossing engineering as an example[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2016, 35(4): 208-212, 222.
- [13] 王慧锋,胡兴汉.定向技术在水电站引水系统下斜井施工中的应用[J].人民长江,2019,50(S1):196-198.
- WANG Huifeng, HU Xinghan. Application of directional technology in the construction of inclined shaft under diversion system of hydropower station[J]. Yangtze River, 2019, 50(S1): 196-198.
- [14] 张超,刘鹏科,李宏斌,等.抽水蓄能电站长斜井定向钻导孔施工技术[J].人民长江,2019(S1):215-219.
- ZHANG Chao, LIU Pengke, LI Hongbin, et al. Research on construction technology of directional drilling guide hole for long inclined well of pumped storage power station[J]. Yangtze River, 2019(S1):215-219.
- [15] 铁明亮,马晓成,郭君,等.如东长江超长距离定向钻穿越设计[J].地质科技情报,2016,35(2):100-104.
- TIE Mingliang, MA Xiaocheng, GUO Jun, et al. Rudong Yangtze River extra-long directional drilling design[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2016, 35(2):100-104.
- [16] Iriaratnam S T, Guercio N. Sustainable replacement of aging drinking water lines using horizontal directional drilling technology[J]. Journal of Sustainability Research, 2020, 2(3): e200028.
- [17] 廉法宪,高生保,张鸣,等.定向钻进技术在深部薄层灰岩隐伏导水构造探查中的应用[J].中国矿业,2021,30(11):141-148.
- LIAN Faxian, GAO Shengbao, ZHANG Ming, et al. Application of near-horizontal and long-distance directional drilling technique in the exploration of hidden water diversion structure in deep thin limestone[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(11):141-148.
- [18] 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.
- [19] 胡郁乐,赵海滨,姚震桐.坑道定向钻进系统在隧洞水平勘探工程中的适应性分析[J].钻探工程,2023,50(5):116-124.
- HU Yule, ZHAO Haibin, YAO Zhentong. Adaptability analysis of tunnel directional drilling system in tunnel horizontal exploration engineering[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 116-124.
- [20] 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):135-142.
- ZHOU Mengdi, LIU Huan, HAN Lili, et al. Discussion on the horizontal directional drilling technology for engineering investigation[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2):135-142.
- [21] 赵飞涛,窦斌,陶维昱,等.定向钻探技术在复杂城区隧道勘察中的应用及探讨[J].钻探工程,2023,50(5):125-132.
- ZHAO Feitao, DOU Bin, TAO Weiyu, et al. Application of directional drilling technology in tunnel exploration in complex urban areas[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5):125-132.
- [22] 叶嗣喧.基于神经网络的坑道近水平定向孔轨迹预测研究[J].钻探工程,2024,51(3):104-110.
- YE Sixuan. Study of the predicting model for directional drilling trajectory controlling based on neural network in tunnel[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3):104-110.
- [23] 郑君,颜谢材,窦斌,等.长距离水平定向钻探在引江补汉地质勘察工程中的应用[J].钻探工程,2023,50(S1):205-210.
- ZHENG Jun, YAN Xiecai, DOU Bin, et al. Application of long distance horizontal directional drilling in geological exploration project of Yangtze-replenish-Han project[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):205-210.
- [24] 胡立,李俊萍,唐治建.水平定向钻进坚硬地层孕镶金刚石钻头的应用[J].钻探工程,2024,51(6):85-90.
- HU Li, LI Junping, TANG Zhijian. Development and application of impregnated diamond bit for horizontal directional drilling in hard formation[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 85-90.
- [25] 韩泽龙,李小洋,施山山,等.定向钻进连续取心钻具设计及取心参数仿真分析[J].钻探工程,2025,52(1):39-46.
- HAN Zelong, LI Xiaoyang, SHI Shanshan, et al. Design of drilling tool and simulation analysis of parameters for continuous coring in directional drilling[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1):39-46.
- [26] 李冰乐,王胜,袁长金,等.复杂山区水平绳索取心定向钻进聚合醇绿色防塌冲洗液研究[J].钻探工程,2023,50(6):85-91.
- LI Bingle, WANG Sheng, YUAN Changjin, et al. Research on polymer alcohol anti-collapse flushing fluid for directional drilling of horizontal wire-line coring in complex mountain areas[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6):85-91.

(编辑 王文)