

工程勘察近水平定向钻探技术解读和规范编制的建议

胡郁乐¹, 周治刚², 胡志新³, 项洋^{*2}

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北武汉430074; 2. 长江岩土工程有限公司, 湖北武汉430010;

3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北武汉430063)

摘要:工程勘察技术方法向多元化方向发展,依托小口径定向钻进和孔内测试技术的工程勘察技术已成为近年来一个新的聚焦点。工程勘察定向钻探技术可有效地应用于非常复杂地表环境下的勘察施工、超前地质预报以及地质灾害防控、环境监测与治理等领域。为进一步发挥该技术的优势和规范市场,目前多个行业协会或团体开始编制与工程勘察定向钻探相关的技术规程或标准。本文系统总结了工程勘察近水平定向钻探技术的应用场景,分析了其技术内涵和关键技术,提出并讨论了规程编制过程中应重点关注的方向和关键技术内容,从轨迹设计、设备选择、工艺技术、钻具组合、取心工具、冲洗液体系、定向仪器、孔内测试等方面提出建议,对相关标准的编制具有参考意义。

关键词:工程勘察;近水平定向钻探;标准和规范;地质超前探测;水平孔取心

中图分类号:P634 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2023)S1-0530-07

Technical interpretation of horizontal directional drilling in engineering exploration and suggestions for preparation of relevant specifications

HU Yule¹, ZHOU Zhigang², HU Zhixin³, XIANG Yang^{*2}

(1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Changjiang Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430010, China;

3. China Railway SIYUAN Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: Engineering investigation technology and methods are developing in a diversified direction, and relying on small diameter directional drilling and in-hole testing technology has become a new focus in recent years. Directional drilling technology for engineering exploration can be effectively applied to survey and construction under very complex surface environments, advanced geological prediction, geological disaster prevention and control, environmental monitoring and governance, etc. In order to further exploit the technical advantages of directional drilling in engineering exploration and standardize the market, many industry associations or groups have begun to prepare technical regulations or standards related to directional drilling in engineering exploration. The paper systematically summarizes the application scenarios of near-horizontal directional drilling technology in engineering exploration, analyzes and summarizes the technical connotation and key technologies, proposes and discusses the key directions and key technical content that should be paid attention to during the preparation of procedures, makes recommendations in terms of trajectory design, equipment selection, process technology, drilling tool combinations, coring tools, mud systems, directional instruments, in-hole testing, etc., which has reference significance for the preparation of relevant standards.

Key words: engineering geologic investigation; horizontal directional drilling; standards and specifications; drillhole advanced prediction; coring in horizontal hole

0 引言

尽管地质勘察技术方法实现了多元化,但目前

钻孔法还是行业内公认的技术方法。利用钻孔取心能获取真实的岩心实物资料;利用钻孔能作为超

收稿日期:2023-04-09 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.087

第一作者:胡郁乐,男,汉族,1970年生,教授,地质工程专业,博士,主要研究方向为钻探工艺技术和钻井仪表,湖北省武汉市鲁磨路388号, ylhuezhou@163.com。

通信作者:项洋,男,汉族,1990年生,地质工程专业,硕士,主要从事水利水电工程勘察及施工工作,湖北省武汉市江岸区解放大道1863号, 387839060@qq.com。

引用格式:胡郁乐,周治刚,胡志新,等.工程勘察近水平定向钻探技术解读和规范编制的建议[J].钻探工程,2023,50(S1):530-536.

HU Yule, ZHOU Zhigang, HU Zhixin, et al. Technical interpretation of horizontal directional drilling in engineering exploration and suggestions for preparation of relevant specifications[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):530-536.

前探测通道和原位测试通道;利用钻孔在一定程度上可以实现有害气体、水等物质的探排放、区域性应力释放和灾害治理的注浆通道等^[1-3]。近水平定向钻进方法作为一种具有轨迹可控、可一孔多用、一孔多分支等优势 的钻探技术,成为近年来绿色勘探的重要方法和行业的关注点。特别是在长距离工程勘察中,水平定向钻探技术把定向钻进技术、勘察取心技术和孔内测试技术融合为一体,成为行业的聚焦点之一。近几年来,在工程勘察中涌现出了一批成功应用水平定向钻进技术的案例,如天山胜利隧道工程勘察和狮子洋主航道地质勘察等,同时水利、铁路和公路等不同的行业也都在积极地布局工程勘察定向钻进市场,推动相应标准和规范的制定。

工程勘察定向钻进的场景和要求不同于石油天然气定向钻井、地质矿产定向钻探、非开挖铺管定向钻进和煤矿坑道定向钻进。石油天然气定向钻井的装备庞大复杂,钻井深度较大,口径较大,以全面钻进为主,取心比率较低,造斜位置多处于完整地层,目标任务多为油气的增产增收;地质矿产定向钻探最初以防斜保直、依据自然造斜规律进行初级定向而达到目标靶区,发展到定向孔、分支孔找矿,也利用定向方法绕斜和避障等,孔深一般较大,造斜位置选择在均匀完整的岩层^[4];非开挖定向钻进一般用于浅表地层的管线铺设,采用导向钻进工艺、反扩孔工艺和推拉管工艺完成铺管程序,不需要取心,导向仪器多为近地表无线导航仪(一般深度 $<20\text{ m}$),为防止找不到原孔,孔内始终保持有钻柱或管线,对后期钻孔的完整性要求不严格^[5];煤矿坑道定向钻进主要以瓦斯和水的探排放为主,一般对取心不做要求,以防爆型低速动力头钻机为主,轨迹设计以高效排放为依据,多以预留筛管作为后期支撑通道。

1 应用领域和难点问题分析

近几年,工程勘察定向钻探技术是应勘探市场的需求而生。主要应用场景如下:

(1)在非常复杂的地表环境下进行工程勘察或灾害防控。如高海拔陡峭区域、山高谷深、无人区或红线区、深水下隧道勘探等。由于环境的复杂性,对钻探设备和工艺提出了新的要求。传统的垂向直孔施工对钻探设备限制大,无法安装设备或迁移困难,且高程大时垂向直孔的无用进尺偏多,经济性差。如果采用水平定向钻进技术,便于设备迁移,而且钻

孔轨迹可根据目标任务和要求进行灵活设计,高性价比穿越目标靶区,弥补了垂向直孔的不足,可以产生较大的社会和经济效益。

(2)在高密度构筑物城市环境下进行城市地质调查、工程勘察、地铁隧洞勘察或地下污染监控。在拥塞环境下,勘察施工的物理空间非常有限,传统高密度布孔施工难度大,即使有可利用的历史钻孔数据,但往往不足以支撑新的构筑物设计要求。目前因地制宜采用斜孔或定向孔方式进行取心勘察或成孔成为了不可或缺的手段。“地上车水马龙,地下暗渡陈仓”,定向钻探技术凭借轨迹设计灵活,施工轨迹可控,钻位不严格受限等优势成为城市大面积勘察的有效选择^[6]。

(3)近年来,随着大埋深隧道的增加,安全风险急剧增加,严重影响安全生产。水平定向钻探用于隧道勘察以及灾害的评估(超前地质预报)和治理。隧道超前探测工程采用超前钻方式实现。通过超前钻孔采取代表性的岩土样的同时,可以实现系列孔内测试,并形成后期注浆加固治理的通道。在勘察阶段,需查明滑坡、崩塌等不良地质问题。如常见的对隧道施工影响较大的事故主要有岩溶突水突泥、塌方、大变形、瓦斯事故、衬砌开裂等,通过孔内测试查明地应力方向和大小、分段测试水量和水压。定向取心钻探技术因钻孔轨迹可控制、可精确命中靶点,钻进距离可灵活调整等优点,在长距离隧洞前期勘察、隧洞开挖等领域有很大的应用前景。通过定向孔的实施来查明隧道地层的岩性特征、层厚、RQD、地质构造、富水性等工程地质条件和水文地质条件,并开展相关地应力测试、放射性测试、地温测试、有害气体测试、孔内物探综合测试等^[7]。

综上所述,基于定向钻进的工程勘察技术具有广泛的应用前景。目前,该领域依托的传统技术包括定向钻进、钻探取心技术以及孔内原位测试和随钻测量技术等。

关于定向钻进的概念,如果简单地认为定向钻机实施的钻孔就是定向孔,或者简单地认为水平孔或斜孔就是定向孔的观念是不科学的,垂向孔的轨迹只是被设计成垂向直线,而水平孔或斜孔的轨迹被设计为其他方向的直线。针对直孔规范中有钻孔弯曲度的质量要求,如地质岩心钻探施工中每 100 m 顶角偏斜 $\nlessgtr 2^\circ$,在斜孔施工中每 100 m 顶角偏斜 $\nlessgtr 3^\circ$,实测钻孔顶角 $\leq 3^\circ$ 时,每钻进 50 m 测一次顶角

(不测方位角),并且规定:定向孔和易斜钻孔,应当缩短测量间距^[8]。因此,定向孔强调以高密度测控,方便精确的轨迹调控为特征,而且更加强调轨迹的高精度可控性和实时性。复杂的定向孔则可能被设计为多分支、多曲率、多靶点,轨迹更为复杂,技术难度和要求更高。回避定向钻进变轨技术,而只强调近水平孔的成孔或取心技术均是不全面的。

基于定向钻进的工程勘察,其技术内涵也有别于常规的地质取心钻探。工程勘察取心钻遇的对象,多为近地表覆盖层或风化程度不一的岩层,特别是在松散地层的岩心采取率偏低。加之是浅表近水平定向钻孔,为了尽快改变轨迹方向,造斜段的位置多处于不稳定的低强度或松软地层段,使得影响造斜强度或曲率的因素多而且敏感,造斜后也难以形成稳定的通道,频繁的起下钻取心很容易形成新的钻孔,需要下入套管或进行强化处理以稳固造斜段。水平孔取心也与传统垂向钻孔取心有较大区别,一是取心钻具处于近水平状态时,岩屑和岩心管下帮在重力作用下,多贴近下孔壁,在强研磨地层钻具磨损严重,进入内筒的岩心同样处于摩擦翻转的扰动状态,即使采用单动双管取心钻具,内管的单动机构在水平状态下的性能难以保障,使得在松散地层中岩心采取率极低;二是基于螺杆马达的定向钻进,由于螺杆马达工作的泵量需求,小泵量无法驱动螺杆马达,使得泵量较大,在一些非固结松散地层中对岩心的冲刷较严重,必须有针对性的措施以保障在相对大泵量条件下取得保真度高的岩心。

除了以上技术特征外,工程勘察近水平定向钻的难点问题还包括:由于轨迹复杂,特别是在近水平状态下,非固结地层或松软地层孔壁稳定性较差,排渣较为困难;且由于孔内有不同的测试需求,必须满足水平孔仪器下入和测试条件,如超前探、抽压水、孔内电视、俯仰角、方位角测试、声波地层成像等。

2 标准编制内容建议

工程勘察设计中引入定向钻进方法不仅是对勘察方法的新补充,而且利用定向钻孔取得的实物资料和数据成果对勘察工程开展多维度、高质量设计具有重要的支撑作用。为了进一步规范工程勘察定向钻进技术,形成对工程设计有据可依的规范标准,近年来,多个行业协会或团体开始编制工程勘察定向钻进相关的技术规程或标准。本文将探讨一些关

键技术环节和应重点关注的内容。

2.1 分类方法和定义

按轨迹形状应分为高精度直线孔(含水平孔、斜孔)、弯曲孔(含不同曲率和不同轨迹形状)、多分支孔(含一孔多分支)等。

按工程的主要目标任务可分为:取心勘察孔(含部分取心)、超前预报及探排放孔(含固、气、液)、通道孔(含注浆、环境治理)、信道孔(含原位测试和孔内物探)和多目标综合孔。

不同应用领域钻孔划分标准不同,地质岩心钻探按深度等级划分为:浅孔(<100 m)、中深孔(100~300 m)、深孔(300~500 m)和超深孔(≥ 500 m)^[8]。按水利水电行业标准则划分为:浅孔(<50 m)、中深孔(50~150 m)、深孔(150~300 m)、超深孔(300~500 m)和特深孔(≥ 500 m)^[9],其划分依据主要针对水电行业岩性多样、复杂地质构造(如断层、破碎带、溶洞)的特点,以取得连续完整性岩心为主要目标,同时要保证孔内进行综合原位测试(压水试验、物探声波及录像、变形试验、地应力测试等)。工程勘察竖向钻探孔深度大多在100 m以内,有的深度为200~300 m,甚至达到500 m,极少达到1000 m。总之,近水平定向孔难度更大,应按钻孔长度或距离划分:短距离孔、中长距离孔、长距离孔和超长距离孔。建议在规范编制时,孔深定义要结合行业特点、地层复杂程度、工程目标任务、技术难易程度、效率效益成本等,如有的企业参考地质岩心钻探,结合隧道建设的地层条件,将水平轨迹直线孔分为4级:短距离孔(0~300 m)、中长距离孔(300~1000 m)、长距离孔(1000~2000 m)和超长距离孔(>2000 m)。如果针对大跨度复杂地层的工程勘察,其钻孔距离的规定应根据难度系数相应缩小,形成更为科学的划分标准。

2.2 主要参考标准和依据

工程勘察定向钻进由于涵盖了勘察取心、定向钻进、孔内测试等多个内容,是多项技术的融合,目前已有的相关规范的技术内涵和工程目标并不适用于工程勘察定向钻进,缺乏针对性和适应性。因此,在编制标准时需要结合行业实际,在参考相关的技术规范基础上进行专项编制。建议的主要参考依据包括:(1)《工程勘察通用规范》(GB 55017—2021)^[10];(2)《定向钻进技术规程》(DZT 0054—2014)^[11];(3)《地质岩心钻探规程》(DZT 0227—

2010)^[8]; (4)《水电工程钻探规程》(NB/T 35115—2018)^[9]; (5)《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)^[12]; (6)《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[13]; (7)《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307—2012)^[15]; (8)《煤矿井下定向钻进技术规程》(NBT 10173—2019)^[15]; (9)《油气输送管道工程水平定向钻穿越设计规范》(SY/T 6968—2021); (10)《铁路工程地质钻探规程》(TB 10014—2012); (11)《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2019); (12)《建筑工程地质勘探与取样技术规程》(JGJ/T 87—2012); (13)《公路工程地质勘察规范》(JTGC 20—2011); (14)《定向井测量仪器测量及检验》(SY/T 5416.1—2016)第1部分:随钻类; (15)《定向井测量仪器测量及检验》(SY/T 5416.4—2007)第4部分:有线随钻类; (16)《伽马随钻测井仪》(SY/T 6907—2012); (17)《随钻电磁波电阻率测井仪》(SY/T 6974—2013); (18)北京六合伟业科技股份有限公司企业标准《LH系列测斜仪》(Q/FTL-HW 001—2023); (19)《矿井井下高压含水层探水钻探技术规范》(GB/T 24505—2009); (20)《水利水电工程钻孔抽水试验规程》(SL 320—2005)等。

2.3 定向孔轨迹规划与设计

工程勘察定向孔轨迹规划和设计取决于工程任务目标、地表环境条件、地层条件、地下既有障碍物、设备和工艺条件、钻具组合及造斜强度、套管允许曲率、成本效率以及风险规避等因素。如城市地铁隧道勘察孔的轨迹是在地表施工环境许可下,以隧道主轴为定向方向,施工轨迹应避开城市地下管网和地下既有构筑物,在取心校正既有地层资料的同时,获取未知穿越路线的全程地质信息。另外,也需要考虑勘察钻孔施工时可能的孔内遗留物对隧道TBM施工的潜在风险,勘察钻孔的轨迹宜设计在隧道上下帮或侧帮。

由于工程勘察对象主要为浅部地层,地层强度相对较低,尽量规划简单轨迹和短距离的定向钻孔,一主多分支、大曲率、复杂轨迹变化以及长距离的勘察定向孔难度系数很大,成本高。

造斜段或分支孔段的曲率与钻具组合、地层造斜强度、钻具规格等参数有关,在靶点条件许可下,尽量设计小曲率定向孔,以避免键槽卡钻,减小回转阻力和轴向推/拉阻力。

2.4 定向钻进设备的选择

目前理想的定向钻进系统相对缺憾,多借用非开挖钻机、坑道钻机、立轴钻机、锚杆钻机等,宜针对复杂地层和取心钻进工艺的要求进行适应性改进设计。非开挖钻机的动力头转速低,当采用绳索取心工艺时钻进效率极低;大多数坑道钻机同样存在转速低,起下钻杆速度低,对于取心为主的工程勘察而言,效率极低;立轴钻机扭矩低,在起下钻时,不能同步划眼,应付复杂地层的能力差;锚杆钻机同样存在扭矩低问题,不适合复合定向钻进工艺。应更加关注和开发理想的专用定向钻机及系统:

(1)针对近水平定向钻进、复杂地层取心钻进等特点进行改进设计,满足提钻取心、绳索取心工艺、孔底动力造斜和取心工艺。且施工单位可以根据工程设计要求以及施工效率和效益,能自主决策转换工艺方法。

(2)由于多回次取心需要,钻机动力头应具备高效起下钻的能力,主轴倾角可在一定范围内调节,且要求钻机给进行程大,以减少辅助工作时间。

(3)由于近水平定向孔的孔内回转阻力和孔壁摩擦阻力大,且孔壁稳定性相对差,岩粉排出困难等因素,要求钻机具有较大的轴向推/拉力和扭矩。

(4)针对特别复杂地层,宜采用双动力头、定向跟管钻机。

2.5 定向钻进工艺技术的选择

工程勘察定向孔以取心为主要目的。取心工艺可采取地表高速动力头普通钻进取心、绳索取心、孔底动力提钻取心及其多工艺复合钻进工艺等。当需要取心时,对于直线形定向孔或复杂轨迹孔的直线段开孔可采用普通钻进取心或绳索取心工艺,也可以采用直螺杆+取心钻具提钻取心工艺。对于完整和坚硬地层直线段宜采用满眼钻具,如绳索取心钻具和螺扶满眼钻具,以保证钻孔的直线度。大曲率造斜段和分支孔段可采取增斜钻具组合或弯螺杆钻具组合,宜采用基于孔底动力的造斜钻具组合,配套随钻测量仪器,通过复合钻进、滑动钻进等工艺组合提高钻进效率和造斜效率;对于长距离定向勘察孔的稳斜段宜采用直螺杆钻具组合、复合钻进工艺,以减少钻柱高速回转对钻杆的磨损和对孔壁稳定性的影响,因为地表回转对地层扰动大、水平孔壁更容易失稳。对于多分支孔宜采用基于弯外壳螺杆的复合钻进工艺。对于低速动力头钻机宜利用孔底动力复

合钻进工艺,以增加回转线速度,提高钻进效率。在复杂地层、强研磨地层或出现孔内复杂时,不宜采用绳索取心工艺,因为绳索取心钻进的环隙小,钻杆壁厚薄,摩阻力大;在大曲率造斜段也不适宜采用绳索取心钻进,因为当狗腿度 $>2^{\circ}/30\text{ m}$ 时,绳索取心钻杆易出现断钻杆事故。同样地,螺杆钻具造斜后再采用绳索取心工艺时,也容易引起绳索取心钻杆的频繁断裂。如仍还需要采取同径绳索取心钻具进行后续钻进,可设置全角变化率的安全阈值,如把安全曲率阈值设在 $6^{\circ}/30\text{ m}$ 以内,超过该值则为不安全。当长距离破碎带或松散地层钻进时应采用多层技术套管护壁,且宜采用跟管钻进工艺^[16]。

2.6 钻具组合和造斜率

工程勘察定向钻探工程钻遇地层多为近地表土层或风化岩。在直线段或开孔稳斜段钻进时,采用的钻具组合形式尽量为稳斜钻具组合和满眼钻具形式。除了钻具组合和级配合理外,钻机安装时应进行初始定向,孔口宜预埋定向外管,钻进时逐级加长取心管。同时要求动力头主轴不旷动(特别是开孔时),并采用高锋利钻头高效率穿越、勤测量等方式,以保障钻孔的直线度^[17-19]。

造斜段造斜点的位置或分支孔分支点位置宜选择完整地层段进行造斜;在地表环境有限、地层复杂、且要求快速进入靶区时,宜对造斜段进行加固预处理,提高造斜区地层的安全性;当造斜段需要取心时,宜在造斜完成后对造斜段下入护管或加固处理,以保证后续的施工。

造斜段或分支孔段的钻具组合,除采用传统的增斜、降斜钻具组合外,宜采用基于孔底动力和随钻测量技术的钻具组合。造斜时,考虑经济性和施工效率,宜设计和采用全面钻进,钻具组合为:全面钻头+螺杆钻具(一般为弯外壳)+无磁钻杆+随钻仪器仓+无磁钻杆+钻杆(含敷缆钻杆、绳索取心钻杆、普通钻杆等)。造斜段也可取心,大曲率(曲度)的取心需采用特殊设计的取心钻具组合;确有取心需求时,造斜段可设计成较小曲率,采用短岩心管,配合孔底动力进行多回次取心,造斜段完成后,进行修孔,以保证后续大刚度取心钻具的可通过性。取心钻具组合:短尺寸取心钻具+螺杆钻具(一般为弯外壳)+无磁钻杆+随钻仪器仓+无磁钻杆+钻杆(含敷缆钻杆、绳索取心钻杆、普通钻杆等)。近年来为满足水平孔小口径定向钻进要求,出现了小口径

无磁螺杆钻具、外螺旋小口径螺杆钻具等。

绳索取心钻杆在现场也常用于定向钻具组合中,但需要级配优化,由于绳索取心钻杆属于满眼钻具,刚度大、环隙小,同级口径造斜难度大,需要级配的优化。譬如在S95绳索取心钻进可以采用的钻具组合: $\text{O}95\text{ mm}$ 定向钻头+ $\text{O}73\text{ mm}$ 单弯螺杆+ $\text{O}89\text{ mm}$ 绳索取心钻杆; $\text{O}95\text{ mm}$ 定向钻头+ $\text{O}73\text{ mm}$ 单弯螺杆+ $\text{O}71\text{ mm}$ 绳索取心钻杆+ $\text{O}89\text{ mm}$ 绳索取心钻杆; $\text{O}95\text{ mm}$ 定向钻头+ $\text{O}73\text{ mm}$ 单弯螺杆+ $\text{O}76\text{ mm}$ 无磁钻挺+ $\text{O}89\text{ mm}$ 绳索取心钻杆。优化后采用的钻具组合: $\text{O}95\text{ mm}$ 定向钻头+ $0.93^{\circ}\text{O}73\text{ mm}$ 弯螺杆+ $\text{O}76\text{ mm}$ 无磁钻挺 $\times 2$ 根+ $\text{O}89\text{ mm}$ 绳索取心钻杆。钻进参数为:钻压 $15\sim 20\text{ kN}$,排量 250 L/min ,能取得较好效果。

小口径钻孔,如果使用弯接头+动力钻具进行造斜,包括不取心造斜和取心造斜,考虑钻具的可通过性,弯曲点到钻头的距离约为 $4\sim 6\text{ m}$,一般最大造斜率 $\geq 5^{\circ}/30\text{ m}$ 。而采用弯外壳螺杆钻具时,由于弯曲点向前移动,使弯曲点到钻头的距离大大缩短,从而使造斜能力大大提高。小口径弯螺杆马达的外壳弯度常用的弯度角有 0.62° 、 0.93° 、 1.25° 、 1.5° 、 2° 等几种。一般弯外壳螺杆钻具的弯曲点与钻头的距离 $< 2\text{ m}$,连续造斜钻进时,造斜率甚至可以达到 $30^{\circ}/30\text{ m}$ 。为了安全施工,应用动力钻具造斜的曲率控制范围推荐: $(2^{\circ}\sim 6^{\circ})/30\text{ m}$ 。

为避免井眼曲率偏大,宜采用复合钻进,复合钻进时宜采用小弯度(弯度 $< 1.25^{\circ}$)螺杆,复合钻进工艺时,一般井段曲率 $< 6.0^{\circ}/30\text{ m}$,有时为了增加侧钻,在弯螺杆侧壁补焊一层支撑块,可以平衡间隙,增大钻头对孔壁的侧向力,侧向力在钻头破岩时转化为对钻孔侧壁的切削作用。

2.7 钻具和取心工具的选择

小口径定向钻进钻杆常采用 $\text{O}42$ 、 50 、 60 、 63 、 73 或 89 mm 的圆截面钻杆。

在复杂地层如软破碎地层中造斜钻进时,根据需要宜采用螺旋截面或其他异形截面的钻杆,有利于机械排渣和减少“岩屑床”的产生,以提高排渣能力,有效预防卡钻、埋钻等孔内事故。定向造斜钻进采用有线随钻仪器时,应配套采用智能敷缆钻杆。在使用MWD或电子多点测斜仪等时,应配套具有良好的低磁导率、高机械性能无磁钻杆或钻挺。

工程勘察定向孔取心工作量应根据工程目的、

已完成的既有工作量和历史数据、穿越地层的岩性变化和均质性、施工效率与成本来进行综合决策。取心工艺、取心部位、取心频度、岩心采取率和全孔采取比率、回次长度等应根据以上因素合理选择。

在取心钻具的选择方面,由于单管钻具的钻头唇面薄,同级口径所取得的岩心直径大,有利于提高钻进效率,在完整硬岩取心时,宜采用单管取心钻具,卡簧卡取岩心。针对易扰动和易冲刷的地层取心,宜采用单动双管取心钻具,特别是针对水平定向孔取心,单动双管钻具应具备良好的单动性能和内外管高同心度的要求,以减少岩心的进入难度和管内岩心的翻转扰动。对于普通钻具配套的单动双管要求上接头(“脑袋”)特殊设计,使之具有一定的倒划眼切削能力,以防卡钻;对于岩石完整、长距直线轨迹的钻孔取心时宜采用绳索取心打捞的单动双管钻具;对于极松散地层宜采用多层管特殊设计的取心钻具;对于极易垮塌或引起孔内岩屑堆积的取心钻孔,取心宜采用外螺旋外管和具有外螺旋特征的钻头。基于螺杆马达的取心钻具,由于泵量较大,宜采用低压耗、防冲刷的取心钻具,并配套大水口和底喷或侧喷钻头。如5LZ73×7.0螺杆正常工作泵量要求接近240 L/min,自身压降为2.4 MPa,因此,对工程勘察用泵的要求高,需要设备的配套。

选择钻头时,应根据设备、工艺条件、地层岩性和可钻性进行合理选择。覆盖层、松散地层取心钻进时应选择扰动小、抗冲刷有利于保护岩心的复合片或硬质合金钻头,宜选择特殊结构的底喷侧喷钻头;钻进岩石时,应针对岩石风化程度、硬度、研磨性、完整性、裂隙发育程度或破碎程度选择高锋利度的金刚石钻头;非取心造斜钻进时应根据地层物性选择专用定向钻头,如软土层可选择斜板式定向钻头,硬地层应结合孔底动力选择高锋利侧钻钻头;修孔或扩孔钻进时应选择导向性好的专用钻头。

2.8 冲洗液体系的选择

地质勘察工程均邻近地表,大多为第四系地层和风化、半风化岩。受地下水影响较大,受自然侵蚀或人工影响较大。同样,隧道、隧洞勘察工程的目标地层也较为复杂,复杂的造山带地质运动,形成了多种地质不良体,地应力极其复杂,存在高或极高地应力地段,多面临一系列不良地质问题。在施工过程中涌水或漏失较为常见,尤其是富水地层的高压水突涌现象。如隧洞穿越700 m山峰,在富含水条件

下,可能产生7 MPa水压,对施工产生严重影响^[20-23]。

相比较竖向钻孔,近水平孔的孔壁稳定问题较为突出。其孔壁稳定性较差,护壁困难,排屑困难。特别是具有曲率要求的定向钻孔,孔内冲洗液循环条件变化,孔底常常堆积“岩屑床”,钻孔摩阻力大,施加钻压困难,“托压”现象严重,而且易造成卡钻事故,孔内事故也更加难以处理。因此泥浆的重要性尤为突出。针对排渣困难和岩屑床问题,应选择具有一定悬渣切力和流变性好的冲洗液;针对松散水敏性强的地层应选择具有一定粘结能力和失水量小的冲洗液体系;针对松散、破碎及漏失地层应选用合理的冲洗液密度,具有一定封堵能力的防坍塌冲洗液体系或堵漏材料;针对涌水、气体突出地层应选择具有一定封堵性能的大密度冲洗液体系。针对水平定向孔和复杂轨迹孔的回转和起下钻阻力大的问题,宜选择高润滑性的冲洗液体系;针对螺杆马达工艺,冲洗液所含的各种硬颗粒必须予以限制,否则会加速轴承、马达转定子的磨损而降低钻具的使用寿命,例如含砂量达到5%时,钻具寿命会降低50%,因为建议固相含砂量 $\geq 1\%$ 。针对开孔段和造斜段地层不稳定问题,推荐采用带有水泥浆或其他固化浆液的冲洗液体系进行钻进和预处理。针对较完整地层,如果采用绳索取心钻进工艺,宜选用无固相冲洗液和低固相冲洗液体系。

2.9 定向仪器的选择

定向钻孔需要精确控制轨迹,必须依托高精度的定向仪器。在小口径定向钻进中,由于钻具直径小,柔性大,曲率变化更加频繁,对定向仪器的精度和测量实时性要求更高。特别是长距离钻进的中靶精度要求高,如果要精确控制轨迹,必须依托先进的定向钻进技术以及先进的设备、工具和仪器。在定向钻进仪器系统方面,随钻测量MWD(Measurement While Drilling)系统是一种先进的技术手段,可以间断或不间断测量孔内定向钻进信息,并将信息即时传送到孔口,可实时监测传输倾角、方位、工具面向角等多项数据信息。

目前,坑道定向钻进采用的仪器包括有线式YSX15/18矿用随钻测量系统、无线式YSX16矿用随钻测量系统以及泥浆脉冲无线随钻测量系统等。低频电磁波MWD(1~3 Hz)测量系统对地层比较敏感,实践中传输距离还十分有限(一般 < 800 m)。

传统的泥浆脉冲MWD产品主要应用于石油钻井,工作泵量要求大(一般泵量 $>6\text{ L/s}$),难以适应工程勘察行业的小泵量、小口径要求,需要改进设计。目前,小口径、小泵量、小尺寸、低能耗的泥浆脉冲器产品已成雏形。中国地质大学(武汉)与北京六合伟业科技股份有限公司、陕西太合智能钻探有限公司等单位合作形成了仪器长度 $\geq 3\text{ m}$ 的产品,并应用于实践,可以满足地表地质工程勘探的基本要求。

非开挖铺管定向钻进主要采用雷迪(Radio)、马克(Mark)、月食(Eclipse)等无线电磁波仪器,能精确控制近地表钻孔轨迹,测量深度、俯仰角、工具面角等参数,电磁波频率在 $4\sim 41\text{ kHz}$ 间选择,一般可探测深度 $\geq 25\text{ m}$ 。目前相关产品,如CTX110探头通过加强模式探测深度可达 $80\sim 110\text{ m}$ 。工程勘察定向钻进可以根据实际环境和目标深度选择使用。

2.10 孔内测试内容和方法

除以上的空间轨迹参数之外,孔内测试方法和可测试的参数有很多,工程勘察小口径定向孔的测试内容需要根据工程目的和成本要素等来进行综合选择。定向孔测试仪器也需要适应水平定向孔和分支孔的孔内测试要求,便于送入,规避仪器风险。目前通常通过孔内电视、声波测井或声波成像测井来描述并反演孔内围岩的岩性、岩性分界面、结构构造、节理裂隙发育程度,绘制工程的有利结构面和不利结构面,定量评价围岩质量等;通过孔内原位压水或抽水试验获取孔内涌漏水位置、地下水的水力联系状况等信息;孔内岩心定向可以定向仪器和工具获得岩心的原始产状信息,岩心地表复原地层倾向、产状和走向等信息;声波测量可获得地层的波速、密度、围岩质量指标(RQD)等。总之,随着孔内测试方法和测试技术的不断发展和优势组合,基于小口径工程勘察定向孔的测试手段更为完善,所获的孔内信息将更加丰富。

3 结语

(1)工程勘察水平定向钻探技术把定向钻进技术、勘察取心技术和孔内测试技术融合为一体,是勘察技术方法的一种应用创新。能有效用于非常复杂地表环境下的勘察施工、超前地质预报以及地质灾害防控、环境监控与治理等领域,基于定向钻进的工程勘察技术具有广泛的应用前景。

(2)简单地认为定向钻机实施的钻孔就是定向

孔,或者简单地认为水平孔或斜孔就是定向孔的观念是不科学的,在规范编制时,要结合行业特点、地层复杂程度、工程目的和目标任务、技术难易程度和效率成本等进行科学划分和定义。

(3)标准编制时应关注的重点内容包括:分类方法、主要参考标准和依据、定向孔轨迹规划与设计、定向钻进设备的选择、定向钻进工艺技术的选择、钻具组合和造斜率、钻具和取心工具的选择、冲洗液体系的选择、定向仪器的选择、孔内测试内容和方法。

参考文献:

- [1] 李泉新,石智军,田宏亮,等.我国煤矿区钻探技术装备研究进展[J].煤田地质与勘探,2019,47(2):1-6,12.
- [2] 石智军,姚克,姚宁平,等.我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(4):1-34.
- [3] 李术才,刘斌,孙怀凤,等.隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.
- [4] 胡郁乐,张惠.深部地质岩心钻探关键技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.
- [5] 乌效鸣,胡郁乐.导向钻进与非开挖铺管技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.
- [6] 胡郁乐,张惠.钻探信息测试技术与工程案例[M].武汉:中国地质大学出版社,2021.
- [7] 姜来峰,刘卫东.绿色勘探技术[M].北京:地质出版社,2022.
- [8] DZT 0227-2010,地质岩心钻探规程[S].
- [9] NB/T 35115-2018,水电工程钻探规程[S].
- [10] GB 55017-2021,工程勘察通用规范[S].
- [11] DZT 0054-2014,定向钻探技术规程[S].
- [12] CECS 382-2014,水平定向钻法管道穿越工程技术规程[S].
- [13] GB 50021-2001,岩土工程勘察规范[S].
- [14] GB 50307-2012,城市轨道交通岩土工程勘察规范[S].
- [15] NBT 10173-2019,煤矿井下定向钻进技术规程[S].
- [16] 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.
- [17] 单治钢,周光辉.复杂条件地质钻探与取样技术[M].北京:中国水利水电出版社,2022.
- [18] 马明,蒋国盛,孙志峰.水利水电钻探手册[M].武汉:中国地质大学出版社,2021.
- [19] 孙云志,卢春华,肖冬顺,等.水利水电工程大顶角超深斜孔钻探技术与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2018.
- [20] 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.
- [21] 马保松,程勇,刘继国,等.超长距离水平定向钻进技术在隧道精准地质勘察的研究及应用[J].隧道建设(中英文),2021,41(6):972-978.
- [22] 徐正宣,刘建国,吴金生,等.超深定向钻探技术在川藏铁路隧道勘察中的应用[J].工程科学与技术,2022,54(2):21-29.
- [23] 王江明,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.

(编辑 李艺)