

用于工程勘察的水平定向钻探技术探讨

周梦迪¹, 刘欢¹, 韩丽丽^{*2}, 石磊¹

(1. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053; 2. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要: 在工程勘察中采用水平定向钻探技术, 可以高效地解决一些垂直钻孔无法解决的问题。论文概述了水平定向钻探技术在非开挖铺设管线、油气钻井、地质勘探等领域的技术现状, 认为在工程勘察领域的应用前景广阔。分析了应用水平定向钻探进行工程勘察在适用能力、勘察速度、勘察精度等方面具有的优势, 提出水平定向钻探适用于深埋隧道等水平线状工程、既有建筑加固工程、考古发掘探测等领域的勘察。最后对应用于工程勘察的水平定向钻探技术需要研发的重点方向提出了建议, 包括超长孔钻进技术、轨迹控制技术、连续取心技术、综合测试技术等。

关键词: 水平定向钻探; 工程勘察; 深埋隧道; 既有建筑加固; 考古发掘探测; 超长孔钻进; 轨迹控制; 连续取心; 综合测试

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2023)02-0135-08

Discussion on the horizontal directional drilling technology for engineering investigation

ZHOU Mengdi¹, LIU Huan¹, HAN Lili^{*2}, SHI Lei¹

(1. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The horizontal directional drilling technology for engineering investigation can solve some problems that the vertical drilling fails to solve. This paper introduces the status of the horizontal directional drilling technology in trenchless pipeline laying, oil and gas drilling, geological exploration, and the application in engineering investigation. The advantages of the horizontal directional drilling in engineering investigation in terms of applicability, survey speed and survey accuracy is discussed, we conclude that the horizontal directional drilling is suitable for investigation in the fields of deep buried tunnels and other horizontal linear projects, existing building reinforcement projects, archaeological excavation and exploration. Finally, this paper puts forward suggestions for the development of the horizontal directional drilling technology applied to investigation, including super-long hole drilling, trajectory control, continuous coring, and comprehensive measurement.

Key words: HDD; engineering investigation; deep buried tunnel; existing building reinforcement; excavation detection for archaeological; super-long hole drilling; trajectory control; continuous coring; comprehensive measurement

0 引言

工程勘察是工程建设中一个必不可少的环节,

任何工程项目在建设前, 都要进行详细的工程地质勘察, 查明地下岩土的物理力学性质, 评估存在的

收稿日期: 2023-02-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.02.019

第一作者: 周梦迪, 女, 汉族, 1996年生, 助理工程师, 硕士, 从事工程勘察和文物保护等相关工作, 北京市西城区西便门内大街79号, 295456399@qq.com。

通信作者: 韩丽丽, 女, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探工程和岩土工程研究工作, 北京市西城区百万庄大街26号, hanll885218@163.com。

引用格式: 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.

安全风险,并为选择工程处理措施提供依据,以保证拟建建筑物的安全。钻探技术是最常用、最可靠,也是最直接的勘察技术手段,常规的高层、超高层建筑,通常从地面垂直向下钻进几十米甚至几百米的钻孔,通过取心技术获取拟建建筑物地下的岩(土)心,然后进行分析测试,判定地下的地质情况。

随着工程建设的快速发展,建设工程场地越来越复杂,常规的钻探技术已不能满足工程勘察的需要。如城市轨道交通、山区深埋隧道、输水隧洞等水平线状工程建设项目,一方面,这些工程受场地限制布孔及施工困难,另一方面,受布孔密度的影响勘察精度不能满足工程建设需要;在某些已有工程的整治加固或是名胜古迹的考古发掘勘察工作中,不允许对上部建筑造成损伤。在这种情况下,采取水平定向钻探技术进行勘察,则可以最大程度地避免垂直钻探的弊端,提高勘察质量,满足工程建设的需要。

1 水平定向钻探技术应用现状

水平定向钻探技术(Horizontal Directional Drilling, HDD)是指利用造斜、导向等技术手段,使钻孔根据预先设定好的轨迹,沿水平或近水平方向钻进。定向钻探技术最早起源于石油行业,目前水平定向钻探技术广泛应用于非开挖铺设管线、油气钻井、地质勘探等领域,在工程勘察领域的应用也在逐步推广。

1.1 非开挖铺设管线领域的应用

目前水平定向钻探技术应用最广泛的领域就是非开挖铺设地下管线。我国首次应用是20世纪80年代从国外引进定向钻进技术用于输油管道穿越黄河的施工。1994年,中国地质科学院勘探技术研究所率先利用国产钻机采用非开挖技术在河北省廊坊市完成一个燃气管线的铺设工程,并于1995年研制出国内第一台导向钻进非开挖铺管钻机,河北省地勘局于1994年研制成功了非开挖导向孔探测仪,此后非开挖铺设管线技术在全国各城市逐步推广应用,彻底解决了城市建设中铺设地下管线时开挖马路形成马路“拉链”的问题^[1]。目前,非开挖铺设管线技术广泛应用于城市燃气、电力、通讯、给排水等地下管线的铺设,避免了因开挖对城市交通的影响;以及应用于穿越河流、铁路、高速公路、机场跑道等无法开挖或不允许开挖施工的管线铺设工程中,以

输油管线为主。国内水平定向钻进铺设管线最长的工程是香港国际机场第3跑道航油管道改线工程,钻孔长度达到了5200 m^[2]。

非开挖管线铺设水平定向钻进施工,大部分是在软土层钻进,不需要取心,钻孔轨迹是下倾—水平—上倾,一般情况下钻孔直径比工程勘察钻孔大,有时需要通过多级扩孔完成。在地面通过导向仪器进行探测并引导钻孔沿设计轨迹延伸,或者在钻孔中通过随钻测量仪器定向钻进。

1.2 油气钻井领域的应用

定向钻探技术起源于油气钻井,世界上第一口有记录的定向井于1932年在美国加利福尼亚州亨延滩油田完成^[3],我国的第一口定向井于1956年在玉门油田钻成^[4]。目前国内外油气钻井已广泛应用水平井技术,包括分支井技术、大位移井技术、超长水平井技术、对接井技术、旋转导向钻井技术等。世界上最长的油气水平井钻井长度达到了15240 m,是2022年10月由阿联酋阿布扎比国家石油公司利用中国东方宏华公司制造的3000HP型钻机施工的^[5];油气井最长水平段长度超过了10000 m。国内最深井9300 m的顺北56X井也是一口水平井^[6]。

油气钻井一般采用全面钻进方式,不取心或局部井段少量取心,先钻进较深的垂直井再通过造斜钻进至水平段,形成的钻孔轨迹是垂直井段—造斜井段—水平井段。所用钻井设备庞大,目前的发展趋势是水平段越来越长。与工程勘察相比,油气定向钻井的主要特点是口径大、设备能力大、成本高,无论是钻井的垂深还是水平段长度都大得多。

1.3 地质勘探领域的应用

在地面施工的地质勘探钻孔大部分是直孔和斜孔,施工到一定深度后可定向造斜施工短距离水平段或水平分支孔。典型的工程如1988年安徽省地质局321地质队首次在国内采用液动螺杆钻受控定向钻探技术,在一个主干孔中施工了6个分支孔^[7]。

井下巷道中施工的勘探孔多采用水平孔,如煤矿井下瓦斯抽放孔。中煤科工集团西安研究院有限公司等单位研制了系列煤矿井下定向钻机,发明了煤矿井下防爆型随钻测量系统,2018年创造了煤矿井下顺煤层定向钻孔2311 m的世界纪录^[8],2019年把最大钻孔长度提高到了3353 m^[9]。瓦斯抽放钻孔直径一般比工程勘察钻孔大。

国内典型的水平定向钻探工程见表1。

表1 国内典型的水平定向钻探工程

Table 1 Typical horizontal directional drilling projects in China

工程领域	工程名称	施工年份	钻孔长度/m	终孔直径/mm	备注
非开挖铺设管线	河北省廊坊市燃气管线铺设工程 ^[10]	1994	60	108	国内第一个非开挖管线铺设工程
	香港国际机场第3跑道航油管道改线工程 ^[2]	2018	5200	508	国内最长的水平定向钻进钻孔
油气钻井	华H90-3井 ^[11]	2021	7339	215.9	亚洲陆上水平井最长水平段5060 m
	顺北56X井 ^[6]	2022	9300	149.2	国内最深油气水平井
地质勘探	安徽冬瓜山勘探孔 ^[7]	1988	854	59	国内最早最复杂的定向分支孔,1个主孔中6个分支孔
	神东煤炭集团保德煤矿井下顺煤层钻孔 ^[9]	2019	3353	120	世界最长的煤矿井下顺煤层定向钻孔

1.4 工程勘察领域的应用

国外水平定向钻探技术应用于工程勘察比较早,1964年日本青函隧道第一次使用小直径水平定向钻探技术进行勘察^[12],1997年挪威Bømlafjord隧道进行水平定向钻探勘察^[13],1998年美国马萨诸州地铁供水隧道进行水平定向钻探勘察^[3],意大利阿尔卑斯山隧道勘察中水平定向钻探长度达到了2200 m^[3]。

国内近年才逐步开始在城市轨道交通工程、深埋隧道工程、管廊建设工程的勘察中应用水平定向钻探技术。许多专家针对长距离水平定向钻探勘察开展研究,马保松等^[2]在对水平定向钻进应用于管道穿越工程分析的基础上介绍了天山胜利隧道水平钻进勘察的应用情况,钻进长度为2271 m,进行了2

次取心;徐正宣等^[14]结合川藏铁路的需求,对超长水平定向勘察技术与装备进行研究,研发了千米级全液动力头定向钻机和超长绳索取心定向钻进技术,可实现超深斜孔、水平孔、仰斜孔施工,解决了川藏铁路水平深孔钻探装备与工艺难题,2021年完成了中国铁路史上最深的的全孔取心水平孔的钻探,孔深达到1888.88 m;王汇明等^[15]则针对粤港澳大湾区狮子洋主航道供水工程勘察难题,对水平定向钻进取心、地质录井和存储式钻杆输送测井的综合勘察技术进行了研究应用,是我国水利水电工程中首次应用。

国内一些典型的水平定向钻进勘察工程如表2所示。

表2 国内典型的水平定向钻进勘察工程

Table 2 Typical horizontal drilling investigation projects in China

工程领域	工程名称	施工年份	钻孔长度/m	终孔直径/mm	取心情况
城市轨道交通	徐州市轨道交通1号线勘察 ^[16]	2016	364	180	
	广州地铁7号线二期工程勘察 ^[17]	2021	190.1		Ø45 mm全孔连续取心
山区深埋隧道	乌尉高速公路天山胜利隧道勘察 ^[2]	2020	2271		2次间断取心
	川藏铁路孜拉山隧道勘察 ^[14]	2021	1888.88	78	全孔连续取心
输水管廊	狮子洋主航道供水隧道勘察 ^[15]	2021	936.2	150	14次间断取心
	“引大济岷”引水隧洞勘察	2022	200~500	76	全孔连续取心

2 水平定向钻探应用于工程勘察的优势及适用领域

2.1 水平定向钻探勘察的优势

与采用传统的垂直孔进行工程勘察相比,在一些工程项目中采用水平定向钻孔进行勘察,具有明显的技术优势。

2.1.1 适用能力强

在高山峡谷地区或是穿越江河湖海修建隧道、引水隧洞等工程,如果采用垂直钻孔勘察方法,需要在山坡、山顶、水上布置钻孔,钻机安装搬迁困难。而采用水平定向钻进,则可以避开这些不宜布孔的位置,选择山脚下或者岸上布设水平钻孔,即可对工

程全线按设计轴线进行精准勘察,如图1所示。

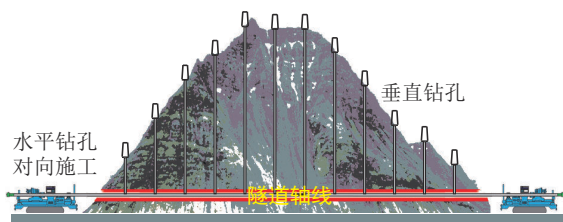


图1 深埋隧道垂直勘察孔与水平勘察孔对比

Fig.1 Comparison of vertical and horizontal investigation holes in deep buried tunnels

在城市地下轨道交通建设工程中,如果施工线路上地面存在大量重要建筑物而不宜布孔,则可在线路的起始点位置布设水平孔进行勘察,如图2所示;也可以在采用垂直孔进行勘察的情况下,遇到不宜布孔的位置时调整开孔位置,采用定向钻孔方式进行勘察。



图2 城市地下轨道水平勘察孔示意

Fig.2 Horizontal investigation holes in urban underground track

2.1.2 钻孔工作量少,勘察速度快

高山峡谷地区隧道工程,隧道埋深大,如果采用传统的垂直孔勘察方法,需要施工大量大深度钻孔,存在大量无用的钻探工作量、勘察速度慢,而采用水平定向钻孔进行勘察,仅需要1~2个长距离水平钻孔即可了解清楚整个隧道线路的地质情况(参见图1),提高勘察效率,节省勘察成本和工期。

2.1.3 勘察精度高

对于水平线状建筑工程,水平定向钻进可以沿着工程建设的轴线进行勘察,通过全孔取心,可以对整个建筑轴线上的地质情况进行不间断勘察,与垂直孔的点状勘察相比,具有更高的勘察精度。

钻进过程中,采用随钻测量系统实时监测孔内情况,还可以通过声波、自然伽马、电阻率等综合测

井技术,以及全景钻孔摄像,压水试验等技术,对孔内的围岩岩性、裂隙发育程度、破碎带情况进行评价。

2.2 水平定向钻探勘察的适用领域

针对水平定向钻探勘察在一些特定的工程中具有的明显技术优势,在以下领域应大力推广水平定向钻探勘察技术。

2.2.1 水平线状工程勘察

水平线状工程建设中采用水平定向钻探进行工程勘察,既可以解决一些垂直孔布孔及施工困难的问题,又可以解决垂直孔勘察精度不能满足工程建设需要的问题,还可以提高勘察效率、节省勘察成本,是一种经济、高效、高质量的勘察手段。前面提到的川藏铁路等高原山区深埋隧道工程、城市轨道交通工程、引水隧洞工程等,采用水平定向钻探勘察都取得了很好的效果。建议在此类工程建设中,尽量采用水平定向钻探进行工程勘察。

2.2.2 既有建筑的加固勘察

随着建成年限的延长,很多建筑物会因地质或地基问题发生沉降或倾斜,需要进行加固,加固之前需要对其地下情况进行勘察取样,找出发生沉降、倾斜的原因,从而制定针对性的加固措施。在某些特殊情况下,如重点建筑或文物建筑,不允许对其结构造成破坏,或是建筑空间受限无法布置钻探设备,则可以采用定向钻孔或水平钻孔,从既有建筑外围钻入建筑物下部进行勘察,如图3所示。既解决了勘察问题,又保护了建筑结构不被破坏。

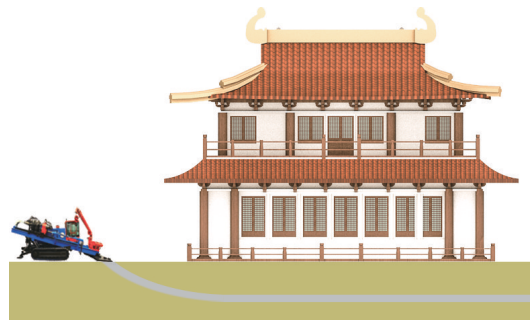


图3 既有建筑修复加固水平勘察示意

Fig.3 The horizontal investigation of the restoration and reinforcement of existing buildings

2.2.3 考古发掘探测

考古发掘工作中,最重要的一点就是不能对文物造成损坏。一些古墓、地下古建筑的考古发掘,首

先要了解清楚其地下的情况。通过水平定向钻探技术,从拟发掘的文物外围进行导向钻进,到达一定深度后进行水平钻进,这样既不破坏其内部结构,又能对其下面的基础进行探测,从而为制定发掘方案提供指导。还可以通过不同角度的钻孔结合孔内摄像技术,从最有利的部位进入其内部进行探测(如图4所示),早在2004年,赵国隆等^[18]就提出,可以利用水平孔或斜孔结合影像技术对秦陵地宫进行探测,在尚不具备发掘条件的情况下提前了解清楚其内部情况,为将来保护性发掘提供技术依据。

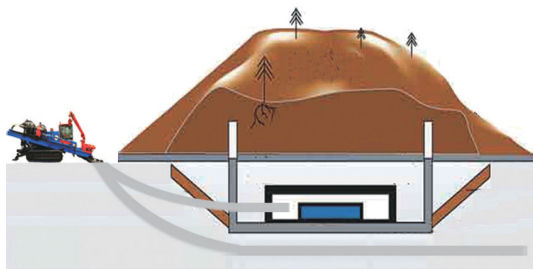


图4 水平孔考古发掘探测示意

Fig.4 The excavation detection for archaeological by horizontal hole

3 工程勘察中水平定向钻探的关键技术问题

如前所述,目前的水平定向钻探技术应用已非常广泛,技术发展也比较成熟,在工程勘察领域的应用也得到了逐步推广,需求越来越大。现有的水平定向钻探技术,并不完全适用于工程勘察领域,如油气钻井技术设备庞大、运移性差,垂直开孔、不取心,井眼直径大;非开挖铺设管线技术更适宜软地层施工,不取心;地质勘探以施工垂直孔和斜孔为主,煤矿井下定向钻主要以瓦斯抽采和探放水为主,生产过程中很少需要硬岩连续取心。水平定向钻探技术应用于工程勘察,有很多关键技术问题需要攻关研究。

3.1 超长水平勘察孔钻进技术

水平定向钻进目前能够施工的长度在油气钻井中已超过了万米,在非开挖管线铺设中超过了5000 m,在煤矿井下钻孔中超过了3500 m。但是应用于工程勘察中,全孔连续取心的钻孔长度尚不到2000 m,少量取心的情况下也仅达到了2271 m。从工程的需求看,如川藏铁路的72座隧道中,长度 >10000 m的就有35座^[19],占比将近50%,2000 m的水平定向勘察孔很难满足勘察的需求,需要结合目前的钻

探技术研发更长的水平定向钻孔施工技术。

与垂直孔相比,长水平钻孔施工,存在地层压力平衡难、孔底加压难、孔壁摩阻大、存在岩屑床^[20]、钻进效率低等问题。一些专家在长水平孔施工技术方面进行了探索,石智军等^[9]结合山西保德煤矿超3000 m水平定向钻孔开展钻进关键技术研究并成功完成3353 m超长定向钻孔施工;张恒春等^[21]从钻进设备及钻进工艺等方面提供了一种应用于超长隧道勘察的3000 m水平定向钻进技术方案;吴纪修等^[3]分析了开展3000 m水平定向钻进技术的必要性和可行性。

3000 m长度的水平勘察孔,单纯从技术原理上看是可行的,如采用滑动钻进技术、绳索取心技术或长钻程提钻取心技术、存储式测斜技术或泥浆脉冲式无线随钻测斜技术等。但是存在水平状态取心扰动大、造斜曲率大的位置难以取心、绳索取心钻具应用于水平钻进风险大、环隙小不易变向、小口径无线随钻测量仪器严重不足、钻机适应能力不足等问题。近期应在适宜性与经济性方面加以研发,重点研发具有较大钻深能力的轻量化和模块化钻机、钻孔结构的优化设计确保小直径取心、岩屑录井及全景摄像代替取心技术等。远期要考虑3000 m长度的钻孔能否满足工程的需要,占川藏铁路隧道50%的超过10000 m的隧道,如果采用对向施工水平孔进行勘察的方式,对钻孔长度的需求超过了5000 m,因此,应借鉴非开挖工程、油气钻井工程中的超长水平孔钻进技术,以勘察取心需求为导向,研发5000 m长水平孔勘察钻进技术,重点攻关小直径水平孔硬岩钻进技术、破碎地层钻进技术等,以提高超长水平孔勘察钻进效率和钻孔安全性。

3.2 轨迹控制技术

水平孔施工中,钻具受重力作用容易向钻孔下方偏斜,加压钻进钻具容易发生弯曲,而水平孔测斜也更加困难,这些都使得水平钻孔尤其是超长水平钻孔的轨迹控制难度更大。在川藏铁路水平勘察钻孔施工中,吴金生等^[22]、徐正宣等^[14]都是通过加长粗径钻具、减小环空间隙、换径使用导向钻具、低钻压钻进、使用高胎体钻头等措施控制钻孔轨迹,同时使用随钻测量系统,分别完成了长度1212、1888 m的水平勘察钻孔的施工。而要高质量完成更长的3000~5000 m超长水平勘察孔的施工,钻孔轨迹控制技术还需要加强研发,如采用无线随钻测量系统

实时获取钻具的姿态信息并实时控制调整钻头的钻进方向,保证钻孔沿着设计轴线延伸,确保钻孔的偏斜在允许范围之内。

3.3 连续取心技术

工程勘察的目的是要查明地下的工程地质情况,最直接的手段就是通过岩心进行分析测试,所以取心质量关系到工程勘察的质量,包括岩心采取率和岩心原状性。小直径全孔连续取心技术是目前水平定向钻探勘察的一项关键技术,尤其是超长水平孔的取心技术,目前最深的全孔连续取心水平勘察钻孔尚不足 2000 m。

1974年我国第一套 $\varnothing 56$ mm 小口径绳索取心钻具研制成功,1985年小口径绳索取心钻探技术在全国全面推广应用,相继研制成功了系列普通绳索取心钻具,系列水平孔、仰斜孔用绳索取心钻具^[1],20世纪80年代形成的以绳索取心钻进为主的小口径金刚石钻进技术目前仍然是地质岩心钻探的主体技术,该技术的最大优势就是在深孔钻进中减少提下钻辅助时间,提高钻进效率,提高岩心采取率和取心质量。

绳索取心钻进技术在水平勘察孔中的应用还存在一些不足^[21,23],如水平钻机的施工能力、钻头钻具的寿命、无固相冲洗液防塌问题、绳索取心钻具的投送和打捞等。需要进一步开展小直径水平绳索取心有缆随钻定向仪器水平输送和打捞机构的研发,以及集成无磁钻杆、绳索取心钻杆、定向接头、螺杆马达等器具总成,解决小直径水平孔绳索取心定向钻进技术难题^[14]。

3.4 综合测试技术

采用存储式测井系统,通过获取自然伽马、电阻率、声波时差等参数,可以分析地层的岩性与构造、岩体完整程度、风化程度及渗透性等地质问题^[24]。采用数字全景钻孔摄像技术^[25]、全孔壁超声成像技术^[26]、孔内电视技术等,可在钻进过程中实现钻孔孔壁的实时成像,并实现钻孔全景图像及其平面展开图和虚拟岩心图的实时同步显示(如图5所示),提供相关的空间形状和位置信息,记录钻孔孔壁岩体结构特征和岩层信息。综合测试技术的应用,可以配合水平钻探所取得的岩心或岩屑,提高勘察成果的精度,甚至可以减少取心孔段长度以提高勘察速度、降低勘察成本。

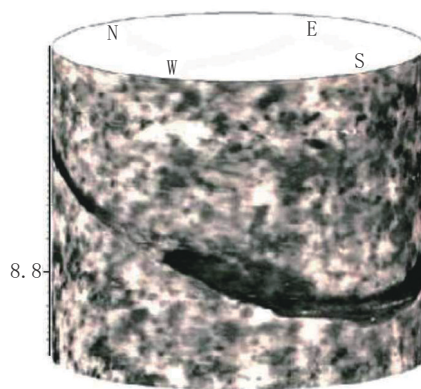


图5 孔内实时成像技术形成的虚拟岩心^[25]

Fig.5 The virtual core formed by real-time imaging in the holes

3.5 绿色勘察技术

随着绿色发展、双碳目标的提出,钻探施工必须考虑对环境的影响,绿色勘察、绿色钻探技术的应用越来越多。与垂直孔相比,采用水平定向钻探进行工程勘察,工作量的减少、避开重要位置的布孔,本身就是对环境的一种保护,是一种绿色勘察方法。

为了减少勘察过程中对环境的破坏,做到真正的绿色勘察^[27],需要加强绿色环保水平定向钻探技术的研发,如低碳排放钻探设备、直升机搬迁、无污染冲洗液及其综合利用技术等。

4 结语

水平定向钻探技术应用非常广泛,技术发展日益成熟,但是在工程勘察领域的应用还处于逐步推广阶段,有很多技术还需要攻关研究。随着水平定向钻探技术的不断研究发展,在工程勘察领域的应用将会越来越广泛,从而大幅度提高一些特殊工程项目的勘察效率和勘察质量,构建绿色勘察体系。

参考文献(References):

- [1] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望——回顾探矿工程事业70年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):1-31.
WANG Da, ZHAO Guolong, ZUO Ruqiang, et al. The development and outlook of geological drilling engineering—To review the 70th anniversary of exploration engineering [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46 (9):1-31.
- [2] 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.
- MA Baosong, CHENG Yong, LIU Jiguo, et al. Tunnel accurate geological investigation using long-distance horizontal directional drilling technology [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6):972.
- [3] 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.
- [4] 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(19):183-187.
- HU Yongpeng, ZHANG Sen, LU Wei. Application of horizontal directional drilling in geological survey [J]. Technology Innovation and Application, 2022(19):183-187.
- [5] 《钻探工程》编辑部.2022年探矿工程十大新闻[J].钻探工程,2023,50(1):1-4.
- Editorial Office of Drilling Engineering. 2022 top 10 news in exploration engineering [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1):1-4.
- [6] 白彬珍,曾义金,葛洪魁.顺北56X特深水平井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2022,50(6):49-55.
- BAI Binzhen, ZENG Yijin, GE Hongkui. Key technologies for the drilling of ultra-deep horizontal Well Shunbei 56X [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6):49-55.
- [7] 朱永宜.应用螺杆钻施工受控定向孔的实践[J].探矿工程,1990(6):33-37.
- ZHU Yongyi. Practice of controlled directional drilling with PDM [J]. Exploration Engineering, 1990(6):33-37.
- [8] 李泉新,石智军,许超,等.2311 m 顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术[J].煤炭科学技术,2018,46(4):27-32.
- LI Quanxin, SHI Zhijun, XU Chao, et al. Efficient drilling technique of 2311m ultra-long directional borehole along coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4):27-32.
- [9] 石智军,董书宁,杨俊哲,等.煤矿井下3000 m 顺煤层定向钻孔钻进关键技术[J].煤田地质与勘探,2019,47(6):1-7.
- SHI Zhijun, DONG Shuning, YANG Junzhe, et al. Key technology of drilling in-seam directional borehole of 3000m in underground coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6):1-7.
- [10] 王鹏,王洪龄,周升凤,等.导向钻进非开挖铺管技术[J].探矿工程,1996(6):16-18.
- WANG Peng, WANG Hongling, ZHOU Shengfeng, et al. Trenchless pipeline installation technique using guided boring [J]. Exploration Engineering, 1996(6):16-18.
- [11] 孙欢,朱明明,王伟良,等.长庆页岩油水平井华H90-3井超长水平段防漏堵漏技术[J].石油钻探技术,2022,50(2):16-21.
- SUN Huan, ZHU Mingming, WANG Weiliang, et al. Lost circulation prevention and plugging technologies for the ultra-long horizontal section of the horizontal shale oil well Hua H90-3 in Changqing Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2):16-21.
- [12] 青函隧道水平钻探实例[J].隧道建设,1983,3(3):98.
- An example of horizontal drilling in Seikan tunnel [J]. Tunnel Construction, 1983, 3(3):98.
- [13] Dammyr O, Nilsen B, Gollegger J. Feasibility of tunnel boring through weakness zones in deep Norwegian subsea tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 69(1):133-146.
- [14] 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.
- XU Zhengxuan, LIU Jianguo, WU Jinsheng, et al. Application of ultra-deep directional drilling technology in the investigation of Sichuan-Tibet railway tunnel [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(2):21-29.
- [15] 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.
- [16] 刘春香,史继彪,朱元武.轨道交通工程长水平勘察孔施工技术[J].勘察科学技术,2017(2):37-40.
- LIU Chunxiang, SHI Jibiao, ZHU Yuanwu. Construction technology of long horizontal survey hole for rail traffic engineering [J]. Site Investigation Science and Technology, 2017(2):37-40.
- [17] 郭永顺,温晓虎,陈素敏,等.可变定向连续取芯技术在城市轨道交通勘察中的应用[J].铁道勘察,2022,48(6):77-82,107.
- GUO Yongshun, WEN Xiaohu, CHEN Sumin, et al. Application of variable directional continuous coring technique in engineering investigation of urban rail transit [J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(6):77-82, 107.
- [18] 赵国隆,李常茂.采用综合探测技术,揭开秦皇陵地宫千古之谜[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(4):1-3.
- ZHAO Guolong, LI Changmao. Use comprehensive tech. to reveal eternal underground palace of Qinshihuang Mausoleum [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004, 31(4):1-3.
- [19] 田四明,王伟,李国良,等.川藏铁路隧道设计理念与主要原则[J].隧道建设(中英文),2021,41(4):519-530.
- TIAN Siming, WANG Wei, LI Guoliang, et al. Design concept and main principles of tunnel on Sichuan-Tibet Railway [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(4):519-530.
- [20] 王震,崔景川,彭文波,等.水平定向钻隧道地质勘察孔岩屑运移与地层相关性研究[J].地质科技通报,2022(网络首发).

- WANG Zhen, CUI Jingchuan, PENG Wenbo, et al. Correlation study of cuttings and formation during tunnel geological investigation using HDD technology [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022.
- [21] 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.
- [22] 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.
WU Jinsheng, LUO Xianliang, XU Zhengxuan, et al. Construction overview and key technology for the horizontal directional coring test hole on plateau railway[J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):1-7.
- [23] 胡萍.复杂艰险山区铁路水平绳索取心钻进技术应用现状与展望[J].四川地质学报,2022,42(S1):109-113.
HU Ping. The application present situation and prospect of horizontal wire-line coring drilling technology to the construction of railway engineering in complex and difficult mountainous area [J]. Acta Geologica Sichuan, 2022,42(S1):109-113.
- [24] 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.
- [25] 石春娟,翟慧明.数字全景钻孔摄像技术在文物遗址保护工程中的应用[J].物探与化探,2020,44(6):1490-1494.
SHI Chunjuan, ZHAI Huiming. The application of digital panoramic borehole camera technique to the protection engineering of cultural relics sites [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020,44(6):1490-1494.
- [26] 周福军,杜世回,孟祥连,等.高原山区铁路勘察多角度钻探和测试技术研究[J].铁道工程学报,2021(12):1-6.
ZHOU Fujun, DU Shihui, MENG Xianglian, et al. Research on the multi-angle drilling and testing technology for railway exploration in the plateau mountainous area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021(12):1-6.
- [27] 张永勤.论地质钻探技术的担当使命及智能化与绿色发展[J].钻探工程,2023,50(1):5-9.
ZHANG Yongqin. Discussion on aspiration and mission and AI & green development of the drilling techniques [J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):5-9.

(编辑 荐华)