

# 超长距近水平勘察孔定向钻探与超前探技术前景分析

张芳寅<sup>1</sup> 胡郁乐<sup>2</sup> 董同新<sup>3</sup>

1. 江西省地质局第三地质大队；2. 中国地质大学（武汉）；3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司

**摘要：**地质勘察技术方法正走向多元化。在复杂地表环境条件下进行勘察施工，或者在深埋隧道的地质勘探过程中，如何高精度、高效率、高质量完成勘探任务，并实现效益的最大化是值得研究的重要课题。超长距近水平勘察融合了可变轨迹技术、连续取心技术和孔内超前探测技术，实现一孔多用，一孔多分支的功能效果，并且通过该技术可以进行超前地质风险预报和灾害提前治理，是一种有广阔应用前景的新技术。论文分析总结了该技术的瓶颈问题，对未来的发展方向和实现路径进行了研究与展望。

**关键词：**超长水平孔；孔内超前探测；定向钻进

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.08.024

## 引言

近年来，地质勘察技术方法走向多元化，如地表物探技术有取代钻探的趋势，但钻探取心勘察的技术手段还是行业内公认的技术方法。特别是在非常规复杂地表施工环境对钻探装备及工艺提出了新的要求。如果采取长距离轨迹可控定向钻进和取心钻探技术进行地质勘探和超前地质风险预报意义极大。如在复杂山地环境、无人区高海拔环境进行钻探时、采用常规垂直孔超前工程（三通一平）工作量大，钻机迁移安装困难，钻进无用进尺多，安全性差，甚至青海环保红线区，破坏环境；在密集建筑群城市环境地质调查以及深埋隧道（地铁隧道、海底隧道）工程中，连续取心和超前探可以提前勘察地层岩性情况、地质构造复杂情况，保证隧洞施工安全。小口径定向钻探技术可以实现钻孔轨迹灵活调整、小口径取心技术可以查明地层岩性与断层构造的空间分布；在超前探测与潜在的地质安全风险评价方面，钻孔通道可以提供孔内综合原位测试（压水试验、物探声波及录像、变形试验、地应力测试等）的通道，可以提供灌浆和排水通道。因此，超长钻孔及探测技术为城市地质调查、TBM安全施工、不良地质体灾害评价提供重要参考依据。另外，在隧洞遇到涌水突泥、软岩或软弱带大变形等隧洞灾害时，可通过实施超前超深定向预处理灌浆措施进行预防或加固。

“十四五”规划《纲要》对钻探装备及工艺提出了绿色勘察要求，钻探行业的融合和技术集成是推动绿色勘探最直接有效的手段。2020年10月29日通过的“十四五”规划明确提出：“实施川藏铁路、西部陆海新通道、国家水网、雅鲁藏布江下游水电开发、星际探测、北斗产业化等重大工程，推进重大科研设施、重大

生态系统保护修复、公共卫生应急保障、重大引调水、防洪减灾、送电输气、沿边沿江沿海交通等一批强基础、增功能、利长远的重大项目建设。”超长距近水平勘察孔定向钻探与超前探技术与十四五规划的相关要求极为吻合，经济效益和社会效益可期。

## 一、水平定向勘察钻的技术现状和难点分析

国家推行的青山绿水政策驱动勘察工作向绿色勘探方向发展。水平勘察钻探可以回避施工环境复杂问题，相比较垂孔施工可以节省大量的无用进尺，用较小的代价和成本取得更多的经济和社会效益，水平定向钻进+取心钻探+孔内测试（包括地层原位信息测试或超前勘探）就是利用把定向钻技术、取心技术、孔内信息测试技术以及螺杆马达、钻杆柱组合技术与地质导向、控斜技术融合在一起，“一孔多支、一孔多用”能达到钻探效益的最大化，符合绿色勘探的理念。

地铁隧洞、铁路隧道建设爆发式增长。例如，新疆乌尉高速天山胜利隧道全长22.0km，最大埋深约1200m，建成后将是世界上最长的高速公路隧道；《长江干线过江通道布局规划（2020-2035年）》提出，将在2025年建成过江公路隧道180座，2035年建成240座（NDRC，2020）。川藏铁路雅安-林芝段将建设72座隧道，总长度838km，占线路总长约83%，其中埋深1000m以上、长度20km以上的特长大埋深隧道16座，累计长度455.85km，其中最长的易贡隧道长达42.5km，最大埋深约1610m；规划滇藏铁路20km以上的特长隧道6座，累计长度133.87km（Ma et al., 2021, Wu et al., 2021, Xu et al., 2022）。

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。在勘察阶段，勘探工作应提供不良地质地段详尽的资料，查明滑坡、崩塌、岩堆、岩溶、膨胀性岩土、软土、湿陷性黄土、泥石流、盐渍土、泥沼、煤层、冰川、雪崩、冻土和流沙等不良地质和特殊地质现象，查明其成因、范围、规模、水力联系等问题以及对项目可能产生的影响等，以便在确定项目位置或方案时有具体的可靠依据；在深埋隧洞施工阶段，动态掌控施工安全风险、及时处理和治理安全隐患意义较明显。常见的对施工影响较大的事故包括岩溶突水突泥，塌方、大变形、瓦斯事故等，增加了工程的安全与投资风险。因此，长距离水平勘察钻孔一方面可以提供岩心实物资料，另外可以提供孔内综合原位测试（压水试验、物探声波及录像、变形试验、地应力测试等）的通道；还可以提供治理地质灾害的灌浆和排水通道。

长距离水平定向孔“精细地质勘察”对钻探装备及工艺提出了新的需求,可以说,当前定向钻探技术与装备还无法完全适应长远距离和长大隧道施工周期和经济性的要求。客观地,地质勘察工程均邻近地表,目标地层相对较为复杂,即使是过山隧道勘察,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,存在极高和高地应力地段,多面临硬岩岩爆、软岩大变形、高地温、活动断裂、超高压富水断裂等不良地质问题,存在区域性大断层组成的宽大挤压构造带等。正因为地层较为复杂,水平钻孔孔壁稳定性极差,甚至难以成孔。

复杂地质条件对钻探装备及工艺提出了新的挑战,应从便捷、高效、精准获取岩土体地质工程信息的关键技术与装备研发入手,依托水平定向钻进技术、取心勘察钻探技术和孔内原位测试技术,是多种技术的融合与集成,提高勘察精度和钻探技术的智能化水平,开展水平定向勘察钻进的关键技术攻关与装备研究,构建安全、高效、经济合理的长距离水平定向勘察技术体系。

超长距近水平勘察孔定向钻探与超前探的技术难点问题总结如下:

(1) 轨迹为水平孔或近水平孔: 钻孔摩擦力大,“托压”严重,孔壁稳定性较差,护壁难,“岩屑床”孔内堆积易造成卡钻事故,而且孔内事故更加难以处理。

(2) 定向钻探: 强调定向钻技术,由于地理位置高程变化、地质条件复杂多样,非直线轨迹的特殊条件,要求对钻孔轨迹可控制、钻孔轨迹高精度测量、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,必须依托定向钻进技术以及先进设备、工具和仪器的配套。

(3) 勘察取心: 水平孔取心钻具与常规取心钻具相比,设计需要有一定的针对性,才能保障岩心的高效、高质量采取;定向孔造斜段取心和岩心定向取心等技术尚需进一步技术突破。

(4) 孔内泥浆循环变差和套损严重: 钻孔内泥浆循环条件发生变化,排渣较为困难,深孔施工,其套管磨损较为严重。

(5) 工勘对孔内测试需求增多: 钻孔必须满足水平孔条件下的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。

长距近水平勘察孔定向钻探与超前探需要技术的融合。小口径水平定向钻进常用于非开挖铺管和坑道钻进。非开挖定向钻进多采用无线导航仪来完成第四系地层的定向穿越。煤矿井下坑道钻定向钻进主要用于瓦斯和水的探排,采用一孔多分支来增强探排放效率。螺杆钻技术早已在石油钻井行业大量应用,主要为提高一定曲率井眼的钻进效率和大位移分支井,目前随着螺杆马

达制造水平的提高和价位的减低,螺杆钻技术已大量应用于不同口径全面钻进和取心钻进。在小口径钻探行业螺杆马达向小直径高寿命方向发展。取心钻探技术是地质岩心钻探和岩土勘察中常用的手段,以岩心采取率为主要目标,通过获取大量的岩心实物来提供更丰富的地层信息。但不可否认的是以上的技术一体化集成还存在一些行业的认知性问题和核心技术融合方面的问题。如天山某水平定向钻勘察工程虽然工艺上实现了2200m余米的超长距离水平定向钻任务,但取心比率和取心技术应用方面并不理想。

在钻机方面,地质工程勘察取心钻探在我国还是以立轴钻机为主,其主要优势是以硬岩高转速和取心钻进技术见长,以成本低为优势,但立轴钻进由于给进行程相对较短,导杆造成岩心堵塞的现象非常严重。在近水平孔定向钻进时,由于水平孔更容易失稳,其突出的缺陷是在复杂地层钻进时,如水平孔排渣困难,孔内划眼或倒划眼能力差。另外,小口径浅孔立轴钻机的扭矩一般较小,水平勘探的孔内摩阻力较大,立轴钻机的适应性存在一定问题,容易造成更多的孔内事故。对于超长水平定向钻而言,大扭矩多工艺钻机是发展方向。如陕西太合ZYL-17000D全液压智能水平定向钻机针对水平取心钻,定向钻、复杂地层钻进特点定制,可配合提钻取心、绳索取心工艺。立轴钻机为主,其主要优势是以硬岩高转速和性价比见长,具有传统的优势。但缺陷显而易见:

(1) 起下钻效率低,起下钻划眼均困难。特别是倒划眼困难,一旦中途卡住,主动钻杆对接不上。

(2) 小口径浅孔立轴钻机的扭矩一般较小,水平勘探的孔壁摩阻力大,容易造成更多的孔内事故。

(3) 地表回转对地层扰动大、水平孔壁更容易失稳,在复杂地层钻进时排渣困难。

(4) 给进行程相对较短,倒杆造成岩心堵塞的现象非常严重。

(5) 绳索取心在中深孔有优势,但由于管壁薄、环隙小,排渣困难,对于复杂地层是风险源。

全液压钻机是大趋势全液压动力头钻机转速可实现无级调速,容易实现机械化拧卸钻杆,更方便实现钻进过程的自动化,同时全液压钻机划眼功能强大,有一定“下钻划眼”和“起钻划眼”功能,可以实现起下钻排渣;通过定制设计可以实现通孔式卡盘夹杆或动力头直连式加杆方式;可实现提钻取心、绳索取心;可采用传统钻杆,可采用螺旋钻杆或智能钻杆等。钻机全液压钻机更适应工况要求,能快捷方便地实现多工艺组合钻进。

安百拓Diamec Smart 8全液压智能岩心钻机具备高效实现水平定向钻的设备优势。该款钻机具有数据采集和数据分析功能、自动化程度高,大幅度提升了勘察效

率,降低了劳动强度。Smart 8代表着未来行业发展的方向,是勘探设备的自动化、数字化和智能化的典范。

在工艺技术方面,坑道钻机+小口螺杆马达技术+定向钻全面钻进技术已经大量应用。利用非开挖定向钻进工法+小直径螺杆马达水平钻进取心工艺相结合的勘察工法已经逐步在进行推广应用。全液压水平定向钻机+孔底动力(或水平孔绳索取心)+超前预判测量+MWD技术+取心技术+快打技术已经成为钻探的发展所趋。

在仪器和信号采集传输方面,随钻测量技术,特别是MWD技术是石油钻井行业大量采用的随钻测试技术,但适合于小口径小泵量的泥浆MWD技术和电磁波MWD技术还在研制过程中。除水利水电的压水、声波、录像等孔内试验外,超前预判还需要依托更多的测试方法和仪器,在常规测井仪器基础上需要进行水平孔状态的改造和直径小型化改造,以适应超长水平孔内探测需求。

### 二、关键技术和内容

(1) 基于水平定向钻的地质勘察设计方法研究和相关标准规范的制定。传统的设计基于垂向钻探取得的实物岩心资料,上覆地层程序清晰,设计规范齐全。水平勘察必须融合地表垂向勘探、地表浅层物探、孔内原位测试等技术,形成科学的评价体系和标准规范。

(2) 大功率大扭矩超长距离定向钻机的配套和工艺适应性研究。基于实际隧洞工程,研究并应用大吨位水平定向取心钻探装备,实现多角度复合定向钻,为实现“一基多孔、一孔多支、一孔多用”的综合探测提供设备技术支持。

(3) 超长复合定向钻探工艺技术研究。形成全液压水平定向钻机+孔底动力(或水平孔绳索取心)+超前预判测量+MWD技术+取心技术+快打技术的先进技术方案。

(4) 研究并应用适应于小口径定向钻孔的随钻测量系统。小泵量复合定向钻探的随钻姿态测量,即测量钻进过程中钻具的倾角、方位角和工具面向角是实现高精度定向的最关键环节。长距离信息传输是水平定向钻实施过程中的瓶颈技术之一,随钻测量系统需要进行适应性研究和升级改造。

(5) 研究并解决小口径、大曲率钻孔螺杆马达孔底动力取芯钻进工艺以及复合定向钻进工艺相匹配的绳索取心钻进工艺难题,构建以取心为主的隧道超长水平孔定向勘察钻探技术成套体系和工艺流程。研究水平钻孔,特别是复杂地层钻进时存在钻孔稳定性差、排渣困难、大曲率取心困难,托压严重、钻具和套管磨损严重等问题。

(6) 超前探测仪器和方法研究。研究小口径水平孔综合测井系统,采用先进测量技术、配套水平孔应用场景,探索研究电阻率、声波、钻孔内光学成像仪、温度、井斜等多参数组合测量技术,探索高精度剖面精细

分层,为地层超前探测提供仪器手段。

### 三、工程实例

#### (一) 天山胜利公路隧道水平定向钻勘察工程

天山胜利隧道全长22km,最大埋深1200m,距离隧道约1900m处存在一处断裂破碎带,滑移速率为1.4~2.0mm/年,该处为隧道施工的控制性地质因素。该工程采用江苏谷登工程机械装备有限公司生产的GD3500-L型水平定向钻机,在隧道入口端实施水平定向钻勘察。该工程使用地磁导向技术控制钻头沿着隧道设计轴线钻进,再结合提钻取心、孔内电视等手段对沿线2271m钻孔围岩进行直观的探测分析。该工程通过水平定向钻勘察技术成功探明隧道沿线围岩岩性变化界面、节理裂隙发育、多个次级断裂、主断裂带及其影响范围,并利用水平钻孔完成了隧道涌水量预测。

#### (二) 广州铁路枢纽新建广州站至广州南站联络线勘察工程

工程位于珠江三角洲冲积平原区,线路自广州站引出,新建线路下穿东平水道、陈村水道与预留国铁动走线共线引入广州南站。在DK6+500~DK7+150和DK7+300~DK7+800段进行定向勘察施工,钻孔从地面钻至隧道洞身位置,在隧道底板下方1m位置沿线路方向进行主孔定向钻进勘察。采用陕西太合智能钻探定向系统和复合定向钻进工艺技术完成“一主两分支”的定向勘察作业。

### 四、结论

地质勘察技术方法走向多元化,随着城市地质调查、深埋地铁隧洞以及铁路隧道建设的需要,超长近距离水平勘察孔定向钻探与超前探技术应运而生。特别是在非常规复杂地表环境,如川藏线的勘探,深水下隧道等复杂环境条件下的勘探,对钻探设备和工艺提出了新的要求。全液压水平定向钻机+孔底动力(或水平孔绳索取心)+超前预判测量+MWD技术+取心技术+快打技术成为钻探的发展所趋。当然该技术还存在尚需解决的问题:包括基于水平定向钻的地质勘察设计方法研究和相关标准规范的制定;大功率大扭矩超长距离定向钻机的配套和工艺适应性研究、超长复合定向钻探工艺技术研究、小口径定向钻孔的随钻测量系统的研制、小口径大曲率钻孔螺杆马达孔底动力取芯钻进工艺以及超前探测仪器和方法等方面的关键技术研究。

### 参考文献

- [1] 胡郁乐,张惠.《深部地质岩心钻探关键技术》中国地质大学出版社,2018,12.
- [2] 孙云志,卢春华,肖冬顺,曾立新,陆洪智等.《水利水电工程大顶角超深斜孔钻探技术与实践》中国水利水电出版社 2018.11.
- [3] 乌效鸣,胡郁乐.《导向钻进与非开挖铺管技术》中国地质大学出版社,2004.10.