

水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望

吴纪修^{1,2}, 尹浩^{1,2}, 张恒春^{1,2}, 孙华峰³, 袁维⁴, 曹龙龙^{1,2},
李鑫森^{1,2}, 施山山^{1,2}, 王文^{1,2}, 薛倩冰^{1,2}, 梁楠^{1,2}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;
2. 中国地质调查局深部地质钻探技术研究中心, 河北廊坊 065000;
3. 自然资源实物地质资料中心, 北京 100192; 4. 石家庄铁道大学, 河北石家庄 050043)

摘要:西南高山峡谷区是我国重大铁路交通工程规划建设重点区域, 如川藏铁路建设等, 深埋、长大隧道数量多, 常规垂直孔勘察方法无法满足精细化地质勘察的需求。采用水平定向勘察技术沿隧道设计轴线施工水平定向孔为隧道勘察提供了一种有效的手段。水平定向勘察技术的核心包括钻进技术、取心技术、钻孔轨迹控制技术、随钻测量/随钻测井技术、综合测井技术等。结合国内外水平定向勘察技术的发展应用现状, 分析了目前存在的问题, 提出了开展单次钻探长度超 3000 m 的水平定向多工艺钻进关键技术与装备攻关, 构建安全、高效、经济合理的水平定向勘察技术体系的建议。

关键词: 长大隧道; 水平定向勘察技术; 定向钻探技术; 川藏铁路

中图分类号: P634; U452.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)05-0001-08

Application status and R & D trend of horizontal directional investigation technology for long tunnel investigation

WU Jixiu^{1,2}, YIN Hao^{1,2}, ZHANG Hengchun^{1,2}, SUN Huafeng³, YUAN Wei⁴, CAO Longlong^{1,2},
LI Xinmiao^{1,2}, SHI Shanshan^{1,2}, WANG Wen^{1,2}, XUE Qianbing^{1,2}, LIANG Nang^{1,2}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;
2. Deep Geological Drilling Technology Research Center, CGS, Langfang Hebei 065000, China;
3. Cores and Samples Center of Natural Resources, CGS, Beijing 100192, China;
4. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China)

Abstract: The alpine valley region in southwest China is the key area where Chinese major railway projects are planned such as Sichuan-Tibet Railway. However, most tunnel works designed in the alpine valley region has the characters of deep burial and great length, and conventional vertical drilling methods cannot satisfy the sophisticated investigation requirements. This paper puts forwards horizontal directional investigation technology, by which horizontal directional holes can be designed along the tunnel axis to provide an effective method for tunnel investigation. The key components of directional investigation technology includes drilling technology, coring technology, drilling trajectory control technology, MWD / LWD, comprehensive logging technology. The existing problems are examined with analysis of the development and application status of horizontal directional investigation technology at home and abroad, and it is proposed to develop a safe, efficient, economical and reasonable horizontal directional investigation technology system through R & D on key technology and equipment for horizontal directional multi-process drilling with capacity over 3000m in a single trip.

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-04-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.05.001

基金项目: 国家重点研发计划项目“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”(编号: 2018YFC0603400)

作者简介: 吴纪修, 男, 汉族, 1984年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探工艺技术研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, Wujixiu2008@126.com。

引用格式: 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.

Key words: long tunnel; horizontal directional investigation technology; directional drilling technology; Sichuan-Tibet Railway

0 引言

西南地区是我国“十四五”期间重大交通工程建设重点区域,主要由川滇块体、甘青块体、西藏块体和喜马拉雅块体以及高峻陡峭、剧烈起伏的山链构成,地貌形态以高原盆地和深切峡谷为主,是我国地质灾害最严重的地区之一^[1-4],规划建设中的深埋、长大隧道数量多。例如^[4-5]:新建川藏铁路雅安—林芝段20 km以上特长隧道16座,累计长度455.85 km;规划滇藏铁路20 km以上特长隧道6座,累计长度133.87 km。受西南山区陡峻地形对大型钻探装备进出场和轻便钻探装备钻深的限制,目前用于深埋隧道常规垂直孔的钻探设备和工艺无法满足精细化地质勘察的需求,导致沿隧道设计轴线的勘察精度低、围岩工程地质情况不清,设计与实际地质情况有一定差距,甚至严重不符,隧道建设和安全运营风险大^[6]。因此,发展水平定向勘察技术,沿隧道设计轴线钻长距离水平勘察孔,对降低由极高地应力岩爆和大变形、构造混杂岩、岩溶高压突水突泥、超高地温热害等地质^[7-8]安全风险可能带来的生命财产危害具有重要意义。

1 水平定向勘察技术概况

定向钻进技术是指为满足地质勘探目的,采用一定的技术手段,使井身沿着预先设定的方位和井斜钻达目的层的钻进方法。最早起源于石油钻井工业,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廷滩油田完成。定向钻进技术目前已广泛应用于石油与天然气、煤矿和固体矿产的勘探开发等领域^[9-10]。近年来,定向钻进技术逐步扩大到深埋长大隧道勘察中。在挪威,定向钻探技术被大量应用于探明海底隧道地质情况^[5,11-12],如1997年挪威将定向钻进技术成功应用于Oslofjord隧道和Trekantsambandet隧道勘察,对拟建海底隧道线路进行连续定向取心钻探,探明了其地质情况;1998年美国马萨诸州水资源局(MWRA)将定向钻进技术应用于地铁供水隧道勘察,并在63 m深的隧道顶部钻取水平岩心,以评估隧道围岩的工程地质条件;意大利Geodata公司在阿尔卑斯山隧道勘察中,采

用定向钻探技术钻深长度2200 m,取心长6 m。

2 水平定向勘察技术组成

水平定向勘察技术将定向钻进技术与钻探取心技术结合,辅以随钻测量技术、综合测井技术,对隧道围岩的岩性变化、混杂岩发育情况、破碎带分布、构造岩溶或裂隙水涌水情况、温度变化、有毒有害气体等进行探查,是目前查明沿隧道设计轴线围岩工程地质情况的有效方法。主要包括钻进技术、取心技术、钻孔轨迹控制技术、随钻测量技术(Measuring While Drilling,简称MWD)/随钻测井技术(Logging While Drilling,简称LWD)、综合测井技术(Integrated Well Logging)等核心技术。图1为水平定向钻进技术与装备系统组成示意图。

2.1 钻进技术

传统常规回转钻进工艺在水平孔钻探方面存在设备钻深能力不足、进度慢、钻孔轨迹不可控、钻孔口径小、钻孔利用率低、孔内事故率高等缺点^[13-15],不能满足深埋长大隧道精细化勘察要求。因此,目前水平定向勘察技术以全面钻进为主,包括滑动钻进和复合钻进2种形式。

滑动钻进过程中,高压泥浆驱动螺杆钻具、钻头和转子转动,钻机动力头和钻杆不回转,仅向孔内施加钻压,钻具的其余部分沿轴向滑动,此时螺杆马达工具面可保持一个稳定的方向进行“滑动造斜”。滑动钻进排渣能力弱,钻进阻力大,钻探装备负载大。

复合钻进过程中,高压泥浆驱动螺杆马达带动钻头,同时钻机动力头带动钻具回转并向孔内施加钻压,实现“滑动造斜”和“回转稳斜”两种钻进模式的复合^[16]。在钻遇极坚硬地层时可采用“涡轮钻具驱动金刚石钻头”或采用“螺杆钻具+液动锤”二合一复合钻进,增加冲击载荷^[17-18]。

复合钻进较滑动钻进有更强的钻进能力,钻孔口径大利用率高,处理孔内事故能力强,钻机动力头带动钻具旋转具有调节螺杆马达定向造斜实现“回转稳斜”和减阻作用,同时提高碎岩效率与排渣能力,在长距离定向钻进中具有较高的成孔率^[19-22]。图2为滑动定向钻进与复合定向钻进工艺示意图。

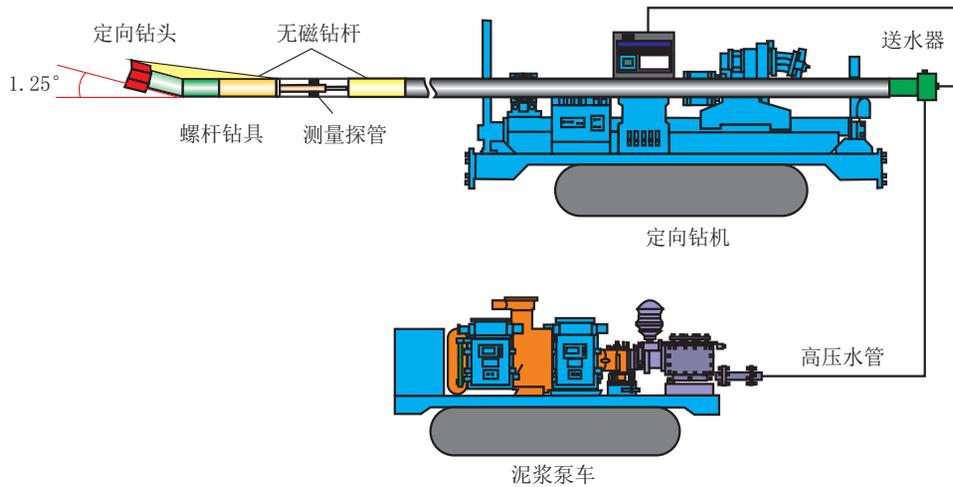


图 1 水平定向钻进技术与装备系统组成

Fig.1 Directional drilling technology and equipment system

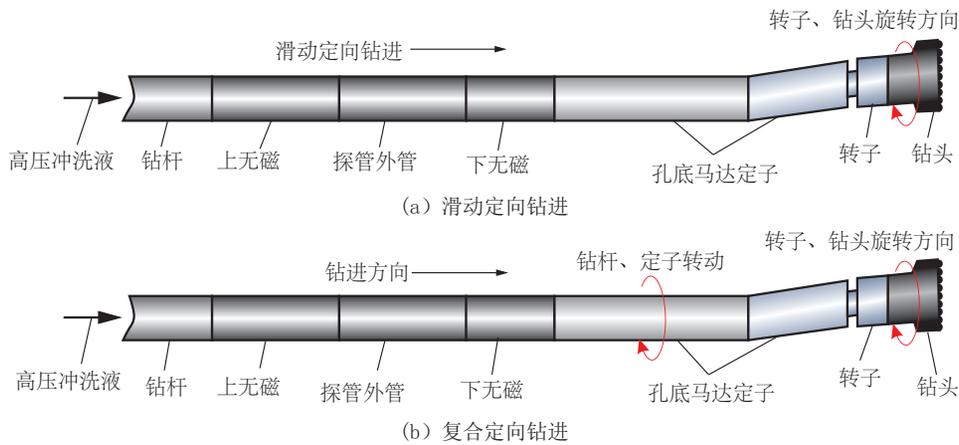


图 2 滑动定向钻进与复合定向钻进工艺^[23]

Fig.2 Slide directional drilling and compound directional drilling

2.2 取心技术

水平孔取心相较常规垂直孔取心技术难度大, 钻具扭矩增大, 钻进中需大的钻压克服钻进中的钻具托压, 岩心管在回转中因易弯曲影响岩心原状形态和采取率, 而且易发生岩屑床和掉块卡钻, 若岩心是近似平行于层理方向, 钻具卡取岩心更加困难。

目前取心技术主要有 2 种: 绳索取心和提钻取心。绳索取心钻进技术因效率高在地质岩心钻探行业内已广泛应用, 但是基于我国现有的管材规格、材质、机加工精度及热处理水平等实际情况, 采用绳索取心技术完成的水平孔钻探深度较浅, 即使对绳索取心钻具进行特殊设计, 造斜后采取常规回转钻进取心也经常会出现卡钻、断钻杆、塌孔等孔内事故, 严重时甚至导致钻孔报废^[24-28]。2020 年 1 月 4 日四

川省地矿局四〇二地质队在西南某隧道中采用常规回转钻进绳索取心工艺完成了 903.28 m (75 mm 口径) 水平绳索取心钻孔, 是目前绳索取心工艺水平孔的最深记录。

采用绳索取心钻进工艺进行水平孔施工其核心技术难点是解决定向钻进在造斜钻进时不能取心的缺陷, 攻克定向造斜取心技术难题, 在对钻孔轨迹进行高精度控制的同时进行连续取心。该技术一直由挪威 Devico 公司垄断, 他们只提供技术服务, 使用成本高, 但因其明显的技术优势已在世界各地广泛应用, 在勘探领域完成的定向钻探和定向取心重大工程达 10 余项。例如: 新加坡海底油库地质勘探, 以及美国、加拿大、中国香港隧道勘探或坑道钻探均是采用该公司技术实施完成^[10, 29-30]。图 3 为 De-

vico定向取心岩心管示意图。



图3 Devico定向取心岩心管
Fig.3 Devico directional core barrel

国内对于小口径定向造斜取心技术的研究起步较晚,早期部分研究仅局限于岩心定向(划痕)技术,均未能实现造斜状态下的连续取心功能^[31-34],直至2005年始至2014年,由中国地质科学院勘探技术研究所通过“具有取心和冲击功能的定向钻进系统的研究”、“小口径定向造斜取心技术的研究”、“地质调查导向取心钻孔技术示范”等地质调查项目成果研制出与常规N规格绳索取心钻探设备兼容同时具备定向造斜功能的绳索取心钻具(造斜取心钻具直径73 mm,定向造斜孔径76 mm),并对配套的定向造斜取心钻探工艺进行了研究,取得了很好的研究成果,为打破国外垄断奠定了良好的基础。但由于项目调整的原因,该项技术的研究未能继续,目前仍存在钻进中钻具磨损严重、易损件寿命短等问题,同时在设计上取心直径仅为27 mm,钻孔造斜率为0.1~0.5(°)/m,而国外同类产品的造斜率指标可达到0.67°/m。

目前水平孔提钻取心技术多以短钻程工具为主,同时亦存在长水平孔取心综合钻探效率低,在硬

岩、致密类岩层和破碎岩层中钻进效率低,钻具稳定性差、岩心采取率不足等问题。2020年5月30日,中科非开挖技术股份有限公司在乌尉高速天山胜利隧道项目采用提钻取心技术于1900 m处获取了博阿断裂带的少量岩心,终孔钻进长度2271 m,是目前国内2000~3000 m级水平勘察孔采用提钻取心的最深记录。

2.3 钻孔轨迹控制技术

钻孔轨迹控制技术是定向钻进的关键技术。20世纪70年代后我国对地质勘探孔受控定向钻进技术进行了系统研究和开发,取得了突破性进展和多项研究成果^[35-36],自1974年中国地质科学院勘探技术研究所开始研究螺杆钻具,80年代初研制成功,定名为“YL”螺杆钻具并形成了系列产品,使我国定向钻进技术上了一个新的台阶^[37-39]。采用螺杆钻具进行钻孔轨迹控制的定向钻进技术是在钻进过程中通过随钻测量仪器实时监测钻孔参数和钻具姿态信息来确定造斜方向,并利用螺杆钻具使钻孔轨迹按照设计要求延伸。孔深可根据钻具累计长度获得,钻孔倾角和方位角可通过随钻测量系统测量获得,在已知孔深、倾角和方位角的前提下计算得出钻孔轨迹的空间姿态参数,并通过不断调节工具面角,即螺杆马达(单弯螺杆或可调弯螺杆)的弯外壳朝向(一般为0°~3°)来达到钻孔轨迹受控定向钻进延伸的目的。螺杆钻具可将冲洗液压力能转换为机械能,当高压液体进入钻具时,迫使转子在定子中转动(定子和转子组成了马达),马达产生的扭矩和转速通过万向轴传递到传动轴和钻头回转破碎岩石。图4为螺杆钻具结构示意图。

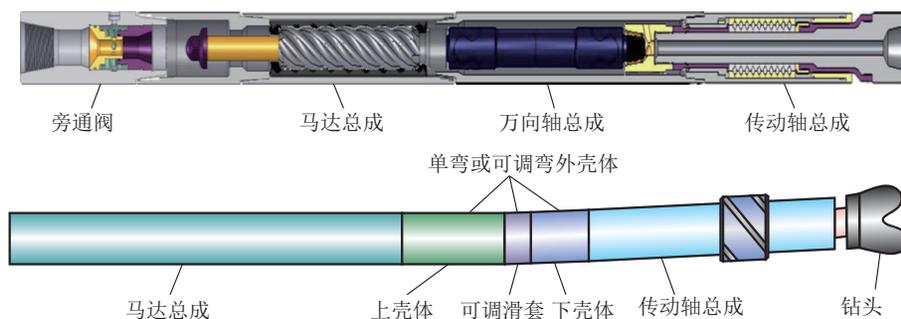


图4 螺杆钻具结构示意图
Fig.4 Structure of PDM

2.4 随钻测量(MDW)/随钻测井(LWD)技术 随钻测量(MWD)/随钻测井(LWD)和先进的

录井工具是目前钻井技术的重要组成部分,应用这些高新技术产品可提高大位移井、高难度水平井的

工程控制能力和地层评价能力。MWD是在钻井过程中进行井下信息实时测量和上传的技术,其传输方式有有线、泥浆脉冲、电磁波、声波和光纤4种,主要是测量井眼轨道参数即井斜角(α)和方位角(Φ)以及用井下动力钻具滑动钻进时的工具面角(ω),目前最常用的定向测量仪器为泥浆脉冲式无线随钻测量仪,具备钻孔测量和钻具定向双重功能。LWD是在MWD基础上发展起来的一种功能更齐全、结构更复杂的随钻测量系统,与MWD相比,LWD传输的信息更多,除具有MWD的基本功能外,增加若干用于地层评价的参数传感器,如补偿双侧向电阻率、自然伽马、方位、中子密度、声波、补偿中子密度等。

2.5 综合测井技术

综合测井技术是指通过井下专门的仪器,沿钻井剖面测量岩层导电、声学、放射性等特性的方法。该技术具有多任务能力,支持不同任务的同时处理,仪器组合能力强、精度高,可快速提高井场效率和评价能力^[40]。可根据工程需要,选用多种测井组合序列对地层进行综合评价,如裂缝评价、岩性评价、物性评价等。尤其对于复杂的地层,通过优化测井系列,除常规测井外,按需选用岩性密度测井、交叉偶极测井、核磁共振测井、声电成像测井等,可以准确对井眼进行成像并且能够评价地层的微裂缝和岩石力学参数,以便更好地解决复杂地质和工程难题。

3 水平定向勘察技术在深埋、长大隧道勘察中的适用性分析

截止目前地表垂直孔勘探仍然是国内铁路勘察中普遍采用的方法,但如遇高山、峡谷陡峻地形、河道等大型钻探装备难以到达隧道上方的地区,采用轻便钻探装备其勘探深度又达不到勘察要求的地区,则会导致隧道围岩工程地质情况不清,设计与实际地质情况有一定差距,甚至严重不符,并且垂直勘探孔的有效钻探进尺占总进尺的比例仅为13%^[41-45],用于真实反映隧道穿越区的围岩地质特性的信息量并不大。若采用水平定向勘察技术可在隧道傍山段、沟谷内布设水平孔钻至隧道洞身附近,并沿隧道设计轴线进行延伸,从而获得详细的隧道围岩的地质特征,其优点主要体现在以下几个方面:

(1)可避免由大量布置垂直勘察孔封堵效果差对后期隧道施工阶段带来的人为钻孔突涌水风险。

(2)采用钻孔轨迹控制技术,可沿隧道设计轴线一定范围内进行钻探,提高勘察精度,将垂直孔“点”勘察,优化为水平孔“线”勘察。

(3)采用多工艺复合钻进技术,可进行长距离水平钻探,其装备受地形和隧道埋深的影响相对于垂直孔要小,一次成孔即可获取隧道洞身范围的地质信息,钻孔利用率高。

(4)采用取心技术,可进行连续或间断取心,可对节理、构造发育情况进行精确刻画,对岩心进行基本物理测试后可详细分析隧道沿线岩性的物理特性,为隧道围岩分级提供确切的岩性参数。

(5)采用随钻探测技术,可对钻进过程中的工程参数进行实时监测,建立钻进参数与围岩的关联模型,同时可实时获取孔内的温度、水压力、有害气体等参数为隧道掘进施工提供数据支撑。

4 水平定向勘察技术的研究应用现状及存在的问题

水平定向钻进技术在铁路勘察中的应用目前还存在如下问题:

(1)长距离水平定向钻进,在高水压、高地应力硬岩层、破碎岩层中钻进施工效率低,施工周期长,还没有形成完全适用于深埋、长大隧道勘察的水平定向勘察的装备和技术;

(2)还没有形成水平定向钻进技术在工程勘察应用方面的技术规范,对钻孔长度、孔径、岩心直径、岩心采取率、孔位的选择等方面缺乏统一的标准;

(3)受隧道施工工艺限制,在掘进过程中无法采用水平定向钻进技术在隧道掌子面正前方钻探长距离超前地质预报孔,同时无法对沿隧洞轴线平行的岩体结构面进行有效探测。

5 水平定向勘察技术展望

目前国内采用定向钻进技术和提钻取心单次完成的隧道勘察终孔钻进长度为2271 m,在技术和经济的合理性上距离高效、低成本完成长大隧道精细化勘察的要求有一定的差距,亟须在综合对比分析单次不同长度水平定向钻探的效率和成本的基础上,对钻探装备、钻进技术、取心技术以及随钻测量技术等方面进行系统的攻关。因此,为破解极艰险复杂山区等重大铁路工程规划建设长距离大深埋隧道勘察程度低、常规钻探方法无法全面获取沿设计

轴线精细化多维地质信息,当前定向钻探技术与装备无法完全适应长大隧道施工周期和经济性的难题,提高勘察精度和钻探技术的智能化水平,超前探测与评价铁路建设潜在的地质安全风险,应从便捷、高效、精准获取铁路工程深部岩体工程地质、岩体力学参数的关键技术与装备研发入手,开展单次钻探长度超3000 m的水平定向多工艺钻进关键技术攻关与装备研制,构建安全、高效、经济合理的水平定向勘察技术体系,主要包括以下几个方面:

(1)研制3000 m级智能化、模块化、多工艺水平定向钻机;

(2)开展超长水平定向钻进技术研究,针对不同工况,创新融合绳索取心钻进及全面钻进技术形成安全高效的超长水平孔多工艺复合钻进技术;

(3)开展超长水平孔多工艺定向取心技术研发,实现在轨迹定向的同时进行连续取心作业;

(4)开展随钻测量技术研发,研制新型无线随钻测量仪和多功能探测短节及配套的数据高速传输技术,在实现钻孔高精度测绘的同时,对近钻头孔内地层参数进行实时采集和评价。

6 结语

(1)西南高山峡谷区是我国“十四五”期间重大交通工程建设的重点区域,规划建设中的深埋、长大隧道数量多。采用水平定向勘察技术沿隧道设计轴线施工水平勘察孔可为隧道详细勘察提供有效的手段,在未来必然会发挥重要的作用。

(2)如何将水平定向勘察技术更好地服务于重大铁路工程建设,需要从国家需求层面出发,在“十四五”期间深化“产学研用”合作模式,充分发挥科研院所、高等院校、龙头企业、典型用户的互补优势,形成协同创新环境,攻关超3000 m的水平定向多工艺钻进关键技术与装备,构建安全、高效、经济合理的水平定向勘察技术体系。

参考文献(References):

- [1] 莫宣学. 青藏高原地质研究的回顾与展望[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 841-853.
MO Xuanxue. A review and prospect of geological researches on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geology in China, 2010, 37(4): 841-853.
- [2] 许志琴, 杨经绥, 候增谦, 等. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 1-42.

- XU Zhiqin, YANG Jingsui, HOU Zengqian, et al. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 1-42.
- [3] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. 中国地质, 2010, 33(2): 221-238.
XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. The Qinghai-Tibet plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau[J]. Geology in China, 2010, 33(2): 221-238.
- [4] 田四明, 巩江峰. 截至2019年底中国铁路隧道情况统计[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(2): 292-297.
TIAN Siming, GONG Jiangfeng. Statistics of railway tunnels in China as of end of 2019[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(2): 292-297.
- [5] 赵大军, 吴金发. 隧道工程勘察水平孔钻进钻具的运动与受力分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(11): 12-18, 24.
ZHAO Dajun, WU Jinfa. Analysis of movement and force of horizontal drilling tools for tunnel engineering investigation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(11): 12-18, 24.
- [6] 赵存明, 沈斐敏. 长隧道地质灾害超前综合探测技术的探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(4): 38-41.
ZHAO Cunming, SHEN Feimin. Discussion of the technology for integrated pre-detecting geological disaster for long tunnel[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2005, 1(4): 38-41.
- [7] 郭长宝, 王保弟, 刘建康, 等. 川藏铁路交通廊道地质调查工程主要进展与成果[J]. 中国地质调查, 2020, 7(6): 1-12.
GUO Changbao, WANG Baodi, LIU Jiankang, et al. Main progress and achievements of the geological survey project of Sichuan-Tibet Railway traffic corridor[J]. Geological Survey of China, 2020, 7(6): 1-12.
- [8] 郭长宝, 吴瑞安, 蒋良文, 等. 川藏铁路雅安-林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 1-17.
GUO Changbao, WU Ruian, JIANG Liangwen, et al. Typical geohazards and engineering geological problems along the Yaan-Linzi section of the Sichuan-Tibet Railway, China[J]. Geoscience, 2021, 35(1): 1-17.
- [9] 薛凤龙. 定向钻探技术应用现状分析及发展趋势[J]. 技术研发, 2016, 23(5): 158-159.
XUE Fenglong. Application status analysis and development trend of directional drilling technology[J]. Technology and Market, 2016, 23(5): 158-159.
- [10] 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.

- [11] 兰利敏. 采用定向取芯钻探技术勘察供水隧洞岩层条件[J]. 隧道及地下工程, 2000(4):9-16.
LAN Limin. Survey rock condition of water supply tunnel using directional drilling technology[J]. Tunnel and Underground Engineering, 2000(4):9-16.
- [12] 傅冰骏. 国际隧道及地下工程发展方向——“2002年世界隧道及地下工程博览会暨学术交流会”情况报道[J]. 探矿工程, 2002(5):54-57.
FU Bingjun. Development trend on international tunnel and underground engineering—The circumstance report “2002 Tunnel and Underground Works Congress”[J]. Exploration Engineering, 2002(5):54-57.
- [13] 隆东, 李杰, 向军文. 物探与水平定向钻进在工程勘察取心中的结合应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(12):42-44.
LONG Dong, LI Jie, XIANG Junwen. Combinative application of geophysical prospecting and horizontal drilling in engineering survey sampling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(12):42-44.
- [14] 王光明, 熊德全. 金沙江其宗水电站水平孔钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(4):49-52.
WANG Guangming, XIONG Dequan. Study on drilling technology for horizontal hole in Qizong Hydropower Station of Jinsha River[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(4):49-52.
- [15] 石智军, 李泉新. 煤矿区钻探技术装备新进展与展望[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10):150-153, 169.
SHI Zhijun, LI Quanxin. New progress and prospect of drilling technology and equipment in coal mine area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10):150-153, 169.
- [16] 李建林, 李泉新. 基于轨迹控制的煤矿井下复合定向钻进工艺[J]. 煤矿安全, 2017, 48(7):78-81.
LI Jianlin, LI Quanxin. Composite directional drilling technology for underground coal mine based on trajectory control[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(7):78-81.
- [17] 段会军. 区域瓦斯超前治理大功率定向钻进装备与技术[J]. 煤矿机械, 2020, 41(4):60-63.
DUAN Huijun. Equipment and technology of high power directional drilling for regional gas advanced control[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(4):60-63.
- [18] 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.
- [19] 王鲜, 李泉新, 许超, 等. 顶板复杂岩层无线随钻测量复合定向钻进技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(9):88-91.
WANG Xian, LI Quanxin, XU Chao, et al. Composite direc-
- tional drilling technology for wireless measurement while drilling in roof complex rock formations[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(9):88-91.
- [20] 任海慧, 李泉新, 方俊. 顶板高位定向钻孔无线随钻测量定向钻进技术及应用[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9):110-113.
REN Haihui, LI Quanxin, FANG Jun. Technology and application of directional drilling with mud pulse measurement with drilling in high level directional drilling of roof[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9):110-113.
- [21] 刘明军. 长距离定向钻进精准探测断层技术研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(7):73-76.
LIU Mingjun. Study on accurate detection of fault in direction drilling technology with long distance[J]. Coal Technology, 2020, 39(7):73-76.
- [22] 蔚保宁, 陈永亮, 王志峰, 等. 井下定向钻进技术在探测断层中的应用研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(7):12-14.
WEI Baoning, CHEN Yongliang, WANG Zhifeng, et al. Application research on directional drilling technology in fault exploration in underground coal mine[J]. Coal Technology, 2019, 38(7):12-14.
- [23] 郭恩超. 顶板大直径钻孔定向钻进技术优化研究与应用[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(2):102-105, 108.
GUO Enchao. Optimization research and application of roof directional drilling technology for large diameter drilling[J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(2):102-105, 108.
- [24] 向军文, 向昆明, 张新刚, 等. 绳索定向造斜及取心技术应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(8):18-21.
XIANG Junwen, XIANG Kunming, ZHANG Xingang, et al. Application of wire-line directional drilling and coring technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(8):18-21.
- [25] 魏欢欢, 殷新胜. 近水平孔坑道用绳索取心钻具[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(3):74-80.
WEI Huanhuan, YIN Xincheng. Wire-line coring drilling tool and pipe used in nearly horizontal boreholes in tunnel[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(3):74-80.
- [26] 李占峰. 地表近水平孔绳索取心工艺钻探实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(1):48-50.
LI Zhanfeng. Drilling practice of wire-line core drilling in quasi-horizontal hole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(1):48-50.
- [27] 段会军, 郝世俊, 王毅. 定向钻进技术与装备在顶板大直径长钻孔中的应用[J]. 煤矿机械, 2020, 41(10):145-148.
DUAN Huijun, HAO Shijun, WANG Yi. Application of directional drilling technology and equipment in roof large diameter long hole[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(10):145-148.
- [28] 谢实宇, 谢柳杨. 云南滇中引水工程超深水平孔钻探实践与技术探讨[J]. 西部探矿工程, 2015, 27(6):69-71.
XIE Shiyu, XIE Liuyang. Practice and discussion on ultra deep horizontal drilling technology in central yunnan water diversion

- project[J]. West-China Exploration Engineering, 2015,27(6): 69-71.
- [29] 张新刚,刘志强,林修阔.定向钻进连续取心技术在深部矿产勘探中的应用[J].矿床地质,2012,31(S1):1101-1102.
ZHANG Xingang, LIU Zhiqiang, LIN Xiukuo. The application of constant coring technology while directional drilling in deep mineral deposits exploration[J]. Geology of Mineral Deposits, 2012,31(S1):1101-1102.
- [30] 张伟.深孔岩心钻探技术问题探讨和发展展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):1-6.
ZHANG Wei. Discussion and development prospect of the deep hole core drilling technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(S1):1-6.
- [31] 林志强,杨甘生,张建,等.定向取心技术在松科1井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(10):69-71.
LIN Zhiqiang, YANG Gansheng, ZHANG Jian, et al. Application of oriented coring techniques in the SLCORE-1[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007,34(10):69-71.
- [32] 王强,朱恒银,卜长根.一种新型电动定向取芯器及定向取芯技术研究[J].安徽地质,2017,27(2):127-131.
WANG Qiang, ZHU Hengyin, BU Changgen. Study on a new type of electrical-driven directional coring unit and relevant coring technique [J]. Geology of Anhui, 2017,27(2):127-131.
- [33] 陈晓林.国内水平井定向取心技术及工具[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(7):75-81.
CHEN Xiaolin. Directional coring technology and tools for horizontal wells in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007,34(7):75-81.
- [34] 刘志强,林修阔,陈晓林,等.小口径定向造斜取心技术的研究[R].廊坊:中国地质科学院勘探技术研究所,2015.
LIU Zhiqiang, LIN Xiukuo, CHEN Xiaolin, et al. Research on minor-caliber directional deviation coring[R]. Langfang: Institute of Exploration Techniques,2015.
- [35] 向军文.受控定向钻探技术及对接井钻探技术现状与发展前景[J].探矿工程,1999(S1):164-168.
XIANG Junwen. The present situation and development prospect of directional drilling technology and docking well drilling technology[J]. Exploration Engineering, 1999(S1):164-168.
- [36] 向军文,陈晓林.定向连通井技术的发展及其展望[J].探矿工程,2003(1):20-22.
XIANG Junwen, CHEN Xiaolin. Development and prospect of directional connected well technology[J]. Exploration Engineering, 2003(1):20-22.
- [37] 刘广志.用受控定向钻探勘探深部矿产资源[J].地质与勘探,1999,35(1):51-55.
LIU Guangzhi. Directional drilling used to exploration deep mineral resources[J]. Geology and Prospecting, 1999,35(1): 51-55.
- [38] 张伟.定向钻探中测斜和纠(造)斜方式的演变[J].探矿工程,1996(3):31-32,44.
ZHANG Wei. Evolution of inclinometer and inclinometer in directional drilling [J]. Exploration Engineering, 1996(3): 31-32,44.
- [39] 刘汪威,涂运中,刘海翔,等.土耳其卡赞碱矿对接井水溶开采技术创新综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):14-23.
LIU Wangwei, TU Yunzhong, LIU Haixiang, et al. Review on innovative techniques for solution mining with intersected well sets at Kazan Trona Mine in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8): 14-23.
- [40] 林有志,曹志锋,张浩,等.新一代快速平台综合电缆测井PEX适应性分析[J].测井技术,2017,41(4):438-442.
LIN Youzhi, CAO Zhifeng, ZHANG Hao, et al. Adaptability research of a new platform express integrated wereline logging [J]. Well Logging Technology, 2017,41(4):438-442.
- [41] 冀东,何松,邵铖,等.青岛地铁勘察技术手段分析及发展对策建议[J].城市勘测,2016(2):161-171.
JI Dong, HE Song, SHAO Cheng, et al. Analyses and development strategies of survey technical means in Qingdao metro [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2016(2): 161-171.
- [42] 赵文辉.川藏铁路复杂地层水平孔钻探护壁堵漏研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):19-24.
ZHAO Wenhui. Wellbore protection and sealing for directional drilling in complicated formation at the Sichuan-Tibet Railway [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):19-24.
- [43] 向军文,陈晓林,胡汉月.定向造斜及水平钻进连续取心技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(7):33-36.
XIANG Junwen, CHEN Xiaolin, HU Hanyue. Continuous coring technology in inclination drilling & horizontal drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007,34(7):33-36.
- [44] 王小龙.LFMCW随钻雷达信号模拟分析[J].煤田地质与勘探,2012,40(1):85-88.
WANG Xiaolong. Simulation analysis of LFMCW Radar-while-drilling signal [J]. Coal Geology & Exploration, 2012,40(1):85-88.
- [45] 张海波,腾鑫森,毛为民,等.基于高频电磁波的随钻探层测距雷达技术研究[J].石油机械,2016,44(12):7-11.
ZHANG Haibo, TENG Xinmiao, Mao Weimin, et al. Research on the drilling radar for real time reservoir boundary detection based on the high frequency electromagnetic wave[J]. China Petroleum Machinery, 2016,44(12):7-11.

(编辑 李艺)