

# 高海拔地区油气管道山体定向钻施工关键技术研究与应用

王富强

西藏青藏石油管道有限公司，西藏 拉萨

收稿日期：2023年4月3日；录用日期：2023年6月19日；发布日期：2023年6月26日

---

## 摘要

针对高海拔长距离油气管道山体定向钻穿越，开展山体定向钻控向技术及长距离硬岩对穿技术研究、山体长距离硬岩扩孔工艺技术研究及高度发育破碎岩层裂隙的泥浆防漏失技术研究，形成高海拔长距离油气管道山体定向钻穿越施工关键技术，为项目的顺利开展提供技术支撑，为后续山体定向钻施工提供参考。

---

## 关键词

高海拔，油气管道，山体定向钻施工

---

# The Research and Application of Key Construction Techniques for Mountain Directional Drilling of Oil and Gas Pipelines in High Altitude Area

Fuqiang Wang

Tibet Qingzang Petroleum Pipeline Co., Ltd., Lhasa Tibet

Received: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Jun. 19<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 26<sup>th</sup>, 2023

---

## Abstract

For high-altitude and long-distance oil and gas pipeline mountain directional drilling crossing, carry out research on mountain directional drilling direction control technology and long-distance hard rock cross-penetration technology, research on long-distance hard rock hole reaming tech-

**文章引用：**王富强. 高海拔地区油气管道山体定向钻施工关键技术研究与应用[J]. 石油天然气学报, 2023, 45(2): 170-175. DOI: 10.12677/jogt.2023.452022

**nology in mountain body, and mud leakage prevention technology with highly developed fractures in broken rock formations. The key technology of directional drilling crossing construction in distance mountain provides technical support for the smooth development of the project and provides reference for subsequent mountain directional drilling construction.**

## Keywords

**High-Altitude, Oil and Gas Pipeline, Mountain Directional Drilling Crossing**

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

水平定向钻是国内普遍使用的非开挖管道施工方法，因其具有对环境影响小、不影响交通通航、施工占地少、工期短、造价相对低等优点，得到业主、设计以及施工单位广泛推广。目前，国内定向钻的研究内容及目标主要在于设备(钻杆、钻具)大型化，大管径、长距离定向钻穿越技术研究，专门针对山体定向钻的穿越技术研究甚少。2005年，西部管道工程仁寿山水平定向钻穿越一次性回拖成功，是中国管道首次采用水平定向钻穿越山体成功[1] [2]，但由于山体定向钻缺乏穿越适应性准则以及合理的、完善的费用计算依据，之后鲜有这类工程施工。国外山体定向钻理论及工程应用研究比较早，已经形成了一套比较成熟的理论体系，设备研究主要向大尺寸、模块化、数字化方面发展，专门针对山体定向钻的穿越技术研究依然甚少。国外主要山体定向钻穿越有阿根廷的 Oran, Mountain El Oculto 1412 Km 硬岩穿越以及英国 LM 公司 Chonais 水利工程项目 710 Km 变质岩穿越等。本文通过对高海拔地区油气管道山体定向钻施工(长度自 740 m~2661 m)进行研究总结，形成高海拔山体定向钻控向技术及长距离硬岩对穿技术、山体长距离硬岩扩孔工艺技术及山体定向钻高度发育破碎岩层裂隙的泥浆防漏失技术，为后续山体定向钻穿越施工提供借鉴。

## 2. 高海拔地区山体定向钻穿越施工特点及优点

本工程山体定向钻穿越都位于高海拔地区，海拔高度 3800 m~4500 m，穿越轴侧相对高差 156 m~278 m，穿越最长的山体定向钻长度近 2661 m，穿越区斜坡坡度 20°~60°，局部地段可达 70°以上，甚至陡立。采用定向钻施工将有效降低山区施工沟下作业管沟塌方、山体滑坡、设备倾覆、坡地吊装以及隧道施工塌方、透水等高危作业风险，大幅减少征地和扰动土地面积，最大限度的保护高原脆弱生态，避免对山体自然和生态环境破坏，还能减少投资，缩短项目工期。同时，也对定向钻穿越山体提出了较高的技术要求：一是穿越轴线整体与国道及铁路并行，最近点距离只有 40 m，一旦控向不准，可能会对交通产生影响。二是青藏高原高海拔地区生态极其脆弱，如定向钻泥浆控制不好发生泄露，将对生态环境造成不良影响。三是本工程岩体完整性差、构造破碎带发育、各种结构面发育、可能有软质和硬质岩石交互发育，加之最长穿越长度达 2661 m，如控向和硬岩对穿等技术采用不当，很可能造成穿越失败案例。为此，我们结合现场实际，开展了大量的理论和实践论证。

## 3. 山体定向钻控向技术及长距离硬岩对穿技术研究

目前常用的水平定向钻控向技术有无线控向系统及有线控向系统[3]。无线导向系统主要是用电磁波

等方式向地面无线发射地下信线导向系统，该系统传输方式选择只适用于穿越深度 30 米以内，受到地面或地下构筑物如通信基站、高压线、管道等的磁干扰，可靠性较差，只能在短距离，浅地层，地面无障碍的条件下使用。有线控向系统使用电缆传输信号，不受穿越深度影响，数据传输率高，因此在长距离和埋深大的穿越通常使用有线控向系统，一般能够做到精准导向孔钻进，误差较少。但有线控向中每根钻杆都需连接信号电缆线一次，施工效率低下，在长距离水平定向钻穿越中，容易出现电缆线长时钻杆内磨损造成短路、断裂等情况，给施工成本和工期造成很大的影响，特别是长距离施工中需要人工布置磁场进行校正，依赖性比较强。一般磁场信号校正有效范围在 150 m 以内比较精确。

经过调研，陀螺仪导向校准系统是目前应用于定向钻穿越的一种全新的惯性导向系统，该系统不依赖磁场信号进行定位测量和校正，能够进行长距离大深度精确定位导航，基本可以解决项目山体导向所面临的无磁场校正问题。

通过收集以往工程定向钻及其它穿越方式的控向技术，进行多方案适宜性理论分析，并优化组合，选取可行的方法进行试验，根据试验控向精度情况，形成不同山区段的经济适用的定向钻控向及长距离硬岩对穿技术。经过多方比选，创造性的提出陀螺仪导向 + P2 组合方法进行控向，而陀螺仪导向系统也是目前国内首次在定向钻领域内进行应用。

鉴于项目山体定向钻穿越曲线埋深达从 70 m 到 250 m，大部分无法布置线圈和磁靶，并且地下有磁场干扰导致导向测量误差较大。项目先采用 P2 导向系统在出入土点磁场信号较强和磁场干扰较小区域进行短距离导向，然后再启用陀螺仪设备对导向数据进行复测，确保陀螺仪复测数据的准确度后，再进行无磁场区域的复测。通过陀螺仪设备对原 P2 系统导向曲线位置参数进行复测和校正，完成对导向孔曲线的修正，成功实现了长距离山体定向钻的导向孔贯通，精度满足规范要求，实现长距离大埋深无磁场导向孔成功的记录。

由于是在高海拔地区进行的最长距离(2661 m)山体定向钻施工，为保证穿越成功，项目采取了对接穿越技术。对接穿越技术就是在穿越曲线的入、出土点各设置一台钻机，两台钻机同时按设计穿越曲线相对进行导向孔施工<sup>[4]</sup>。导向孔对接方式主要是利用轴向磁铁和旋转磁铁两种来对接。通过定向钻穿越对接实践，旋转磁铁对接优势远远大于轴向磁铁，山体中岩石较硬，钻头调整角度难度较大，调整范围十分有限。通常岩体调整 1 度比普通地层花费 2~3 倍的时间，旋转磁铁对接目前是最新的对接方式，减少山体对接难度和时间周期。但是旋转磁铁多为国外设备，以往施工需要国外公司授权和专家现场指导操作，技术保密性较强。为此，项目开展了国产旋转磁铁研制，并在项目山体定向钻中成功进行了应用，对接有效范围可达到在 60 m<sup>[5]</sup>。

目前国内类似陀螺仪体积较大，无法安装到钻杆内部，无法做到随钻测量，通过先进行钻后复测再校正，不断改进和优化。本次对陀螺仪系统的实际应用，一方面测试陀螺仪与 P2 系统数据融合程度，另一方面检验陀螺仪系统本身的性能指标，为以后定向钻导向方法提供可以借鉴的经验。

#### 4. 山体长距离硬岩扩孔工艺技术研究

根据地层情况、设备种类、能力以及周边施工环境，山体施工常用的扩孔工艺方法为：反拉回转扩孔、正向回转扩孔。反拉回转扩孔是山体定向钻中最常用的方法，扩孔工作通过回拉并回转钻杆来完成。因此，钻机的扭矩与轴向拉力是衡量钻机扩孔能力的关键指标，对硬岩石和大口径的扩孔施工，这两个参数显得尤为重要。正向回转扩孔是指通过钻杆施加给扩孔钻头轴向推力和扭矩，完成扩孔的工艺方法。它与传统的地质钻探扩孔施工类似，该方法扩孔效率低，钻杆折弯断裂风险大，较少使用。该方法一般仅用于山体出土点空间很小，无法连接回拉钻杆或管线，或环保严格无法进行反扩的场合<sup>[6] [7]</sup>。

使用镶齿型岩石扩孔器扩孔，具有硬度较好，抗磨性能强，能够使用较长时间，研磨的钻屑较均匀，

泥浆携带方便等优点。因扩孔地层破碎带较多，塌孔和碎石掉落，扩孔器卡钻或更换回撤困难，采用双向式扩孔器进行扩孔，回退时进行反向扩孔，降低了扩孔器卡住危险。

在长距离扩孔时，为了减少扭矩损失和钻杆断裂风险，采用出入土点先进行正扩，根据钻机和钻具性能两边进行正扩总长度的 20%~30%，最后在采用反扩剩余的中间阶段。这样可以减少泥浆携带钻屑返流距离，减少钻屑堆积，降低卡钻和断裂风险，另外可减少钻机和泥浆设备满负荷工作时间，降低设备故障和维修维护时间。在进行扩孔时，由于距离较长，钻机的扭矩和推拉力都需要很大，对于钻杆钻具长时间工作疲劳断裂风险很大。一般扩孔是每个级别扩完后进行下一级，但山体的扩孔级别设计成交替进行，例如 20" 扩孔完成 150 m 后回退更换 24" 扩孔施工，24" 扩孔完 150 m 后，重新使用 20" 进行扩孔。即每个级别扩孔扭矩要控制在钻杆最大扭矩的 60% 以内，减少疲劳断裂的风险，另外这种交替尺寸进的扩孔增加了泥浆返流的环形空间，减少钻屑堆积和泥浆压力，大大降低了施工风险。山体穿越需要采用高性能设备和钻具，正常扭矩压力参数要控制在安全系数在 50% 以内，对于 2000 m 以上的山体穿越，需要两台主辅两台钻具，钻机吨位要采用 500~1000 吨，正常工作扭矩要能达到 100,000 N·M，钻杆最低尺寸在 6-5/8"，钻具有效使用寿命要达到 100 小时以上。通过以上关键措施，保持了高效安全的施工进度[8][9]。

## 5. 断层成孔稳定性及泥浆漏失控制技术研究

断层是导致山体定向钻失败的主要原因，项目通过理论分析找出断层成孔难、泥浆漏失的内在机理，并结合模拟分析泥浆漏失范围及分布情况，提出优化泥浆性能的要求，有效控制泥浆漏失率并保证成孔稳定。为此，项目开展了以下几方面研究[10]。

一是开展了矿物纤维复合浆液配方优选与性能调控技术研究，先采用正交试验方法对矿物纤维复合浆液的基本性能进行优选试验，再采用极差分析法(R 法)对试验结果进行分析，得出各因素水平对符合浆液性能的影响趋势，优选出性能表现良好的复合浆液配方。最后在优选出的复合浆液配方基础上，合理调整各因素的水平幅度，进行二次正交试验，分析复合浆液各配浆材料的添配作用机理，形成浆液表现黏度、动切力、滤失量和悬浮稳定性等参数的调控技术。

二是针对孔、裂隙地层中矿物纤维堵漏机理开展研究。采用全尺寸堵漏装置进行矿物纤维复合浆液堵漏试验，选用直径为 3 mm、5 mm、10 mm、20 mm 的钢珠进行排列组合，模拟孔洞孔喉直径为 0.45~8.20 mm 的情况，采用 1、2、3、4、5 mm 的缝板模拟不同宽度的地层裂缝。基于优选出的矿物纤维复合浆液配方，配制多组复合浆液，充分搅拌后，在堵漏仪上进行静态和动态堵漏实验，对封堵成功组的弹子床及缝板中矿物纤维分布情况进行扫描观察，研究纤维材料在孔、裂隙地层中的堵漏机理。

三是针对矿物纤维复合浆液对近孔壁地层加固机理开展研究。利用已建成的室内箱体注浆模型，在室内模型上进行注浆试验，研究复合浆液对不同类别近孔壁地层岩土体的力学性能影响。结合电镜扫描微观分析手段，从微观角度对复合材料的加固堵漏进行解释，以探明复合纤维浆液护壁的机理。

四是开展山体穿越堵漏试验研究。采用扩孔器在导向孔位置中心按照隔离套管直径进行正扩，扩孔完毕后安装隔离套管，孔洞内预先安装气囊封堵水流，用速干水泥对套管外壁和孔壁间隙进行密封，完后气囊撤出。隔离套管安装密封后，在隔离套管内部安装中心定位器并用法兰连接，同时旋转喷嘴外接头与隔离套管法兰连接和密封。在钻机侧的位置安装辅助套管进行加固。在隔离套管外侧安装压力表，末端安装排污管。封堵安装完毕后查看泥浆封堵情况，无泄漏后进行正常扩孔。此次扩孔过程中，孔口系统起到了良好的泥浆封堵效果，既能抑制山体透水外泄，减少泥浆稀释，节省用量；又能同时进行正常的扩孔施工，清除钻屑。特别是在管道回拖中，保证了孔洞泥浆含量，增加管道浮力和减少防腐层的磨损，确保了管道的顺利回拖。

近几年来，随着对堵漏技术的重视，各种以桥接堵漏材料为主的堵漏产品不断涌现。但由于对各类堵漏材料的堵漏机理并没有进行深入的研究，这些产品大多是根据经验将某类材料混合在一起，在使用中效果并不是很理想。一般来说，堵漏的成功与否，与堵漏材料的选择及地层的具体情况有很大的关系。

通过以上研究，并在室内对泥浆基本性能进行试验和测试，确定了堵漏材料及泥浆配方、施工工艺，开展了在裂隙及微裂隙发育地层条件下堵漏材料选取及堵漏效果影响因素的室内试验与测试，减少了裂隙地层对工程施工的不良影响；通过设计配方满足防止孔壁坍塌、浆液漏流失或携排钻渣，保证了泥浆有效循环，保证了施工过程中孔壁稳定，确保了施工进度及施工质量，有效控制了泥浆漏失。

## 6. 保险风险防范与作用

相比河流定向钻而言，国内山体定向钻成功实施的案例并不很多，特别是在位于高寒、高海拔山区进行长距离山体穿越，对施工设备、泥浆、功效、人员安全等存在较大风险，例如定向钻施工中大量使用水基泥浆设备，青藏地区不可避免要在冬季进行施工，大量的泥浆设备、泥浆管都急需进行保温处理，一旦发生泥浆冻结，轻则堵塞泥浆管汇，造成泥浆逆流，重则冻胀设备，造成泥浆设备致命的伤损，因此施工中势必会面临较多难题需要攻克。如何回避风险，保障建设施工正常高效实施，将这种不确定的风险转化为固定的费用，工程保险的风险防范和经济补偿作用就得到了充分凸显，有着重要的实务价值与发展意义。

工程成立之初，便将保险工作提到重中之重的位置。在投保过程中，由于山体定向钻赔付概率过高，保险公司原本计划将该保险标的风脸责任剔除，经多方沟通积极争取，最终将上述风险纳入保单，实现了山体定向钻穿越风险的转嫁。自山体穿越施工以来，由于山体穿越所处施工地域地质的复杂性，山体地下水系发达，施工难度极大。共发生三次险情：两次山体穿越钻杆断落，一次山体穿越钻杆卡钻。事故发生后，承保公司第一时间进场查勘，获取第一手资料，加快理赔办理进度，在扣除免赔额后最终获得赔付金额 1080 万元，各方加快赔保工作推进，实现 90 天内赔款拨付到账，极大缓解了施工单位经营压力，提升了经济效益，提高高原地区长距离山体定向钻穿越施工技术水平。

通过以上实践，针对本工程山体定向钻保险作用具体体现在以下几方面：一是减轻风险发生后经济损失，保障财务上稳定性，增强业主及承包商抵御风险的能力，最终增强企业竞争能力和生存能力。二是在保险手段加持下，推动高寒高海拔地区长距离山体定向钻穿越技术的探索创新。诸多内外部风险，新技术、新材料和高科技在建设中的应用，相应地使巨灾损失的概率增加，企业将承担更大风险或者承受巨大的压力，导致各方谨慎微放弃探索创新。通过保险手段可以一定程度上化解风险，达到鼓励支持技术创新，推动工程建设专业化发展的目的。三是承保公司的参与有助于加强风险管理的监督。在共同利益的前提下，承保公司在承保工程保险后，将会投入足量的资源为保险标的提供优质高效的风险管理支持服务，对工程安全、质量等进行监管，这种监督更加客观和公正，促使工程安全、质量得到更好的保证。

## 7. 结语

通过对高海拔地区油气管道山体定向钻技术研究，首次提出了高大理深定向钻陀螺仪 + 有线磁场 + 旋转磁铁的对穿导向方案，形成了特有的导向工法，扩孔技术采用先入土点进行正扩总长度的 20%~30%，最后反扩剩余部分，解决了高大山体定向钻传统方法无法实现的导向难题。针对长距离硬岩山体定向钻穿越，通过采用综合的扩孔工艺，提高了扩孔效率，降低了钻杆疲劳折弯断裂风险。通过理论分析找出断层成孔难、泥浆漏失的内在机理，并结合数值模拟，模拟钻机钻进时断层带孔洞成孔情况，为后续修孔、洗孔及泥浆漏失控制方案提供支持。针对定向钻穿越山体破碎岩层泥浆跑冒问题，借鉴国内外钻井

堵漏、矿井注浆堵漏等相关经验，开展复合堵漏剂配置、随钻预堵漏材料配比和不同工序注浆方案及堵漏性能研究，有效控制泥浆漏失率并保证成孔稳定，形成一套高效的泥浆漏失控制方案，为山体破碎岩层定向钻工程提供技术指导。通过保险进行风险转移，最终在扣除免赔额后获得赔付金额 1080 万元。通过一系列技术措施，本项目在现场得到成功应用，确保了工期和质量，降低了施工费用，保护了脆弱高原生态环境，山体定向钻穿越再次获得成功，将为后续山体定向钻关键技术创新提供有价值的参考。

## 参考文献

- [1] 甄俊华, 杨方武. 我国水平定向钻首次穿越山体成功[N]. 中国石油报, 2005-10-14(1).
- [2] 刘立岩, 甄俊华, 李勇. 我国首次定向钻穿越山体在西部管道获得成功[N]. 石油管道报, 2005-10-11(1).
- [3] 蔡晓春. 地磁控向系统在水平定向钻施工中的应用[J]. 上海煤气, 2019(3) 35-38.
- [4] 胡超. 双向对钻中间对接技术在燃气管道穿越的应用[J]. 煤气与热力, 2016, 36(9): 33-36.
- [5] 贾雷, 李静涛. 定向钻法长距离穿越岩石山体难点分析及应用[J]. 建筑科学与工程, 2022, 566(4): 4-9.
- [6] 江建海, 刘翔, 王升. 定向钻正推工艺在大落差山体穿越的应用[J]. 煤气与热力, 2017, 37(7): 25-27.
- [7] 郭大平. 浅析天然气管道定向穿越枫树岭山体施工[J]. 科技创新与应用, 2016(17): 83-85.
- [8] 周海东. 高落差、长距离、岩石层管道定向钻穿越施工技术[J]. 科技创新导报, 2013(1): 2-5.
- [9] 李德选, 王雪强, 王军卫, 等. 地质条件对定向钻穿越的影响与应对措施[J]. 油气储运, 2012, 31(3): 175-177.
- [10] 闫相祯, 丁鹏, 杨秀娟. 水平定向钻技术在管道穿越工程中的应用研究[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 292-295.