

超长水平定向预注浆钻孔施工技术探讨

王义红¹, 杨增智¹, 邵东梅¹, 王朝阳¹, 李龙标¹, 常喜顺¹, 陈晓君²

(1. 陕西太合智能钻探有限公司, 陕西 西安 710086; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 水利工程的长大、深埋隧洞沿隧洞轴线往往存在大范围破碎带及富水区域, 采用地面超千米水平定向钻孔进行预注浆超前治理, 达到了良好的围岩加固和涌水封堵效果, 该项技术在水利行业得到了成功应用。本文介绍了某项目使用螺杆钻具钻进超长水平定向预注浆钻孔的成功经验, 探讨了超长水平钻孔排粉困难、应对“托压”问题、强磁场干扰随钻测量系统、绿色勘探的措施, 以及作业中钻机适应性不够、硬岩钻进效率低、注浆影响钻进等问题及解决措施。项目施工 4 个主孔、6 个分支孔, 最长钻孔 1427 m, 钻探工作量 8737.89 m。项目的实施证明, 目前定向钻进技术具有长距离精准钻进能力, 能为超长隧洞复杂地层预注浆超前处理和相关钻探工程提供保障。

关键词: 定向钻探; 超长水平钻孔; 螺杆钻具; 复合钻进; 钻孔轨迹; 预注浆; 深埋隧洞

中图分类号: P634; TV554 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2025)02-0151-09

Discussion on technology of ultra-long horizontal directional pre-grouting borehole construction

WANG Yihong¹, YANG Zengzhi¹, SHAO Dongmei¹, WANG Zhaoyang¹,
LI Longbiao¹, CHANG Xishun¹, CHEN Xiaojun²

(1. Shaanxi Taihe Intelligent Drilling Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710086, China; 2. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: A wide range of fracture zones and water-rich areas commonly exist along the axis of the tunnel in the long and deep buried tunnels of water conservancy projects, the management of pre-grouting by more than 1000 meters of ground horizontal directional drilling can achieve a good effect of the surrounding rock reinforcement and gushing water blocking, which has been a successful attempt in the water conservancy industry. This paper introduces the successful experience of drilling ultra-long horizontal directional pre-grouting holes with screw drilling tools in a project. The difficulties and problems are discussed such as cutting removal, coping with the problem of “back pressure”, measurement while drilling system in strong magnetic field, measures of green exploration, as well as the insufficient adaptability of drill, low efficiency of hard-rock drilling, and the influence of grouting on drilling operation, etc., and the countermeasures are also posed. 4 main holes and 6 branch holes were constructed, along which the longest hole is 1427m, and the drilling workload is 8737.89m. The implementation of the project proves that the current directional drilling technology has the ability to drill accurately over long distances, which can provide a guarantee for the pre-grouting and ahead-treatment in the complex strata of the ultra-long tunnels and the related drilling projects.

Key words: directional drilling; ultra-long horizontal drilling; screw drilling tools; compound drilling; drilling trajectory; pre-grouting; deeply buried tunnel

0 引言

随着我国基础建设的快速发展, 长大、深埋隧

洞工程数量越来越多, 在隧洞掘进中, 塌方、突水、突泥时有发生, 施工安全难以保障, 轻则导致工期

收稿日期: 2024-07-31; 修回日期: 2024-09-25 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.02.020

第一作者: 王义红, 男, 汉族, 1977 年生, 董事长, 勘察工程专业, 博士, 主要从事钻探装备制造研发工作, 陕西省西咸新区沣东新城丰全路 1 号, wangyihongp@163.com。

引用格式: 王义红, 杨增智, 邵东梅, 等. 超长水平定向预注浆钻孔施工技术探讨[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 151-159.

WANG Yihong, YANG Zengzhi, SHAO Dongmei, et al. Discussion on technology of ultra-long horizontal directional pre-grouting borehole construction[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 151-159.

延误,重则造成严重人员伤亡。注浆预加固处理已成为隧洞灾害控制和不良地质处理的有效技术手段。

目前,隧洞注浆预处理多是在洞内,对掌子面前方数米至数十米段进行注浆治理。在隧洞内施工时作业空间受限,浆液凝固时间长,与隧洞掘进相互制约^[1-3]。因此,本项目采用地面超长定向钻孔注浆对隧洞破碎带和涌水进行加固处理。相比于洞内处理,地表注浆处理对于灾害防控更易于调节浆液胶凝时间,同时不占用掌子面时间。

本文结合某隧洞超长水平定向钻孔预注浆处理项目,介绍了使用超长水平定向预注浆钻孔施工技术成功实施情况,探讨了超长水平钻孔排粉困难、应对“托压”、强磁场干扰随钻测量系统、绿色勘探的措施和作业中钻机适应性不够、硬岩钻进效率低、注浆影响钻进等问题及解决措施。

1 工程概况

某输水隧洞项目,主洞全长7.02 km,开挖断面尺寸7.5 m×7.4 m(宽×高),如图1所示,采用钻爆法施工。在隧洞开挖过程中,隧洞两侧发生涌水的现象比较多,造成钻爆法施工无法正常进行,剩余1455 m未能开挖,推测该段隧洞通过7条断层。

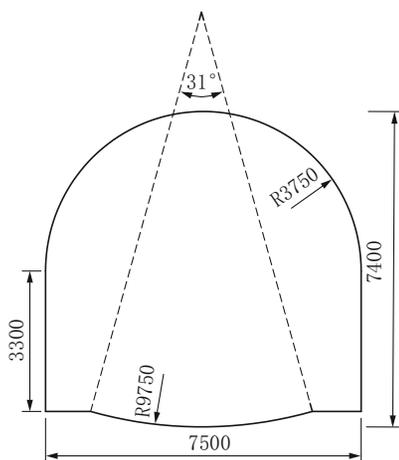


图1 隧洞横断面

Fig.1 Cross-section of the tunnel

剩余洞段存在较大断层和裂隙,且有可能连通地表河流,项目原采用的地面竖直钻孔注浆处理措施,没有收到预期效果。根据剩余洞段特殊不利的工程、水文地质条件和施工的实际作业条件,若采用掌子面循环注浆处理措施,远远达不到治理效

果,必然导致施工进度严重滞后。因此,采用在地表施工定向长钻孔沿隧洞预注浆治理技术,连续治理近千米的范围,实现对破碎带及富水区域的超前预治理,为隧洞的快速掘进创造有利条件,节约施工工期。

1.1 地质情况

该隧洞覆盖层厚4.8~36.4 m,主要为砂卵砾石层,下覆基岩为石炭系玻屑晶屑凝灰岩、玄武岩。岩体内陡倾节理发育,延伸较长,连通性较好。结合地质勘探资料,推测该段隧洞有7条断层通过,断层宽一般0.7~2.5 m,个别宽4.8~6.8 m,断层带内主要为碎裂岩、角砾岩。该段隧洞埋深158~175 m,隧洞以Ⅲ类围岩为主,通过断层影响带和节理密集带为Ⅳ类围岩,断层通过处为Ⅴ类围岩。

1.2 水文地质条件

下游位于玻屑晶屑凝灰岩中的隧洞,断层通过段涌水量500~1000 m³/h,张性节理分布段涌水量100~350 m³/h。推测玻屑晶屑凝灰岩中未开挖隧洞有5处涌水段,总长约278 m,其余玻屑晶屑凝灰岩洞段以渗水、滴水为主。

上游位于玄武岩中的未开挖隧洞,推测有7处涌水段,总长162 m,较大断层通过段涌水量500~1000 m³/h,剩余断层和张性节理通过段涌水量100~350 m³/h,其余洞段以渗水、滴水为主,见图2。

1.3 注浆钻孔设计

该项目的设计目的是在隧洞断面上,以洞轴线为圆心、半径7.02 m的布孔圈上布置4个注浆孔,注浆孔与洞轴线平行布置,与隧洞轮廓线最小距离2.5 m,通过注浆孔进行孔口封闭纯压式注浆,浆液沿裂隙及断层扩散,堵塞断层裂隙并加固隧洞围岩,最终形成注浆帷幕圈,阻断过水通道,切断隧洞与地下水、裂隙水之间的水力联系,为隧洞安全掘进创造有利条件。定向孔开孔点设在地表,以小倾角开孔施工。

隧洞治理段桩号KS80+440—KS81+247,总长807 m。隧洞两端正在掘进掌子面桩号分别在KS80+124、KS81+579。为了不影响隧洞正常掘进,从地面施工水平定向注浆孔。每组钻孔数量为4个,其中主孔2个,分支孔2个,钻孔布置剖面见图3。



(a)KS82+145.5处超前探水孔涌水 (b)KS82+177处涌水从塌方体下部渗出

图2 隧洞出水现场

Fig.2 Site plan of tunnel outflow

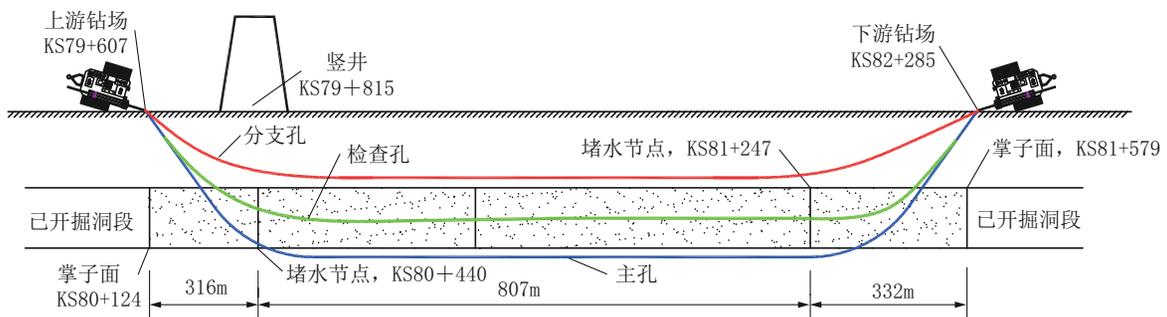


图3 钻孔布置剖面示意

Fig.3 Schematic section of drilling arrangement

钻孔均布于隧洞四周并平行于治理段隧洞轴线,布孔圈半径7.02 m,距离隧洞轮廓线最近距离2.5 m,由于工程主要目的是封堵断层及裂隙,浆液在压力作用下沿过水通道扩散,注浆压力的作用占主导地位,根据以往施工经验,在该类地层浆液扩散为10~20 m,为确保治理效果,本项目按10 m保守计算。隧洞断面布孔示意图4。

注浆初步方案有两种:方案一,从治理段上游或下游单向钻孔注浆,钻孔深度>2000 m,总体钻探工程量少,但孔深长、施工难度大、效率低、工期

长;方案二,从治理段上下游两端相向钻孔注浆,钻孔深度在1430 m以内,总体钻探工程量大,但钻孔深度小,相对施工难度小、工期短。结合项目现场施工条件及工期要求,最终确定方案二为钻孔注浆方案。另外,在上下游两端各布置1个检查钻孔,检查孔由主孔侧钻,沿隧洞轴线施工。钻场分别位于桩号KS79+607、KS82+285处,两个钻场各施工5个钻孔,单孔孔深1309~1427 m,钻探工作量合计8737.89 m,钻孔设计参数见表1。

2 钻孔施工

施工前编制《施工技术设计》,项目施工严格执行《施工技术设计》,共完成主孔4个、分支孔6个,钻探总工程量8737.89 m,灌注水泥6498.49 t,经检查孔进行压水试验检测,堵水、加固处理效果良好,隧洞可正常掘进,现已贯通。

2.1 钻孔结构

2号钻孔为两级口径一级套管结构,用 $\varnothing 120$ mm开孔钻进至完整岩层10 m,经 $\varnothing 153$ mm、 $\varnothing 203$ mm二次扩孔,下 $\varnothing 178$ mm套管至140 m,固管;二开 $\varnothing 120$ mm钻进至终孔。因为阻力大,套管未下到

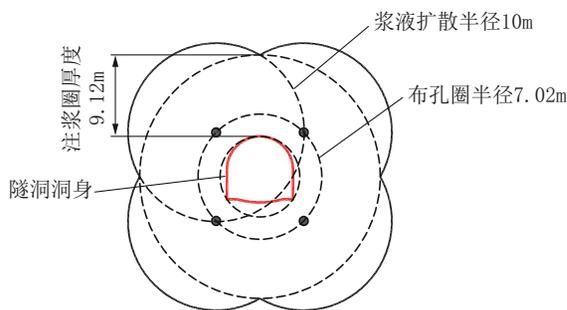


图4 隧洞断面布孔示意

Fig.4 Schematic diagram of the tunnel cross-section for borehole arrangement

表1 钻孔设计参数
Table 1 Drilling design parameters

钻场	孔号	孔径/ mm	起始位 置/m	终孔位 置/m	工作量/ m	开孔倾 角/(°)	目标方 位/(°)	最大狗腿度/ [(°)·(30m) ⁻¹]	钻孔性质	钻孔质 量	顺序
KS79 +607	1	120	0	1427.83	1427.83			2.32	主孔	合格	1
	1-1	120	600	1426.96	826.96			1.52	分支孔	合格	2
	2	120	0	1423.07	1423.07	-19	157	1.64	主孔	合格	1
	2-1	120	600	1421.63	821.63			1.67	分支孔	合格	2
	检查孔1	120	810	1419.60	609.60			1.72	检查孔	合格	3
KS82 +285	3	120	0	1311.14	1311.14			1.70	主孔	合格	1
	3-1	120	980	1309.99	329.99			2.02	分支孔	合格	2
	4	120	0	1311.92	1311.92	-21	337	1.86	主孔	合格	1
	4-1	120	1050	1313.36	263.36			1.11	分支孔	合格	2
	检查孔2	120	900	1312.39	412.39			1.68	检查孔	合格	3

孔底,耐压未达到设计指标,后多次固管处理。后面施工的1、3、4号钻孔结构调整为三级口径两级套管结构,以 $\text{O}120\text{ mm}$ 开孔钻进至完整岩层10 m左右,经 $\text{O}153\text{ mm}$ 、 $\text{O}203\text{ mm}$ 两次扩孔,下入 $\text{O}168\text{ mm}$ 套管至120 m左右,固管。二开 $\text{O}120\text{ mm}$ 钻进至360 m左右, $\text{O}153\text{ mm}$ 扩孔后下入 $\text{O}140\text{ mm}$ 套管至360 m,固管。三开 $\text{O}120\text{ mm}$ 钻进至终孔。

钻孔结构示意图见图5。

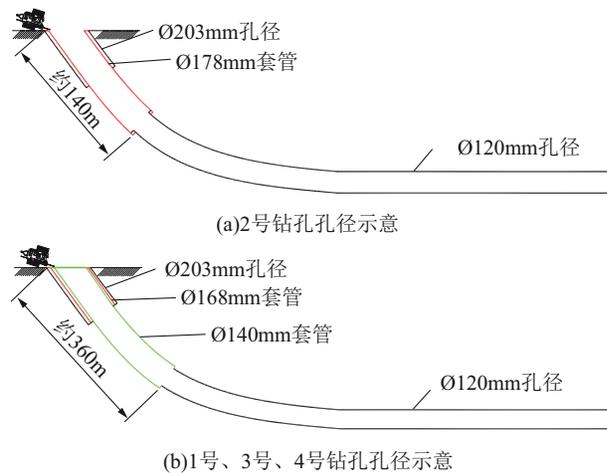


图5 钻孔结构示意图

Fig.5 Schematic of drilling structure

2.2 钻进方法和钻具组合

开孔段,使用 $\text{O}120\text{ mm}$ PDC 钻头和 $\text{O}95\text{ mm}$ 扩孔钻杆组合钻进,再使用 $\text{O}153\text{ mm}$ 、 $\text{O}203\text{ mm}$ PDC 钻头和 $\text{O}95\text{ mm}$ 扩孔钻杆组合进行两次扩孔。最后使用 $\text{O}120\text{ mm}$ PDC 钻头和 $\text{O}89\text{ mm}$ 通缆螺旋

槽定向钻杆配合 $\text{O}89\text{ mm}$ 测量系统施工至设计深度。

2.3 钻探设备

2.3.1 钻机及泥浆泵

根据该项目地质条件、工程技术要求,结合现有定向钻探装备及工艺,采用ZYL-25000D型履带式全液压定向钻机、ZYL-17000D型履带式全液压定向钻机。钻机主要性能参数见表2。

表2 钻机主要性能参数
Table 2 Main performance parameters of the drill

钻 机 型 号	ZYL-25000D	ZYL-17000D
额定转矩/(N·m)	25000	17000
额定转速/(r·min ⁻¹)	30~120	40~120
推进/起拔力/kN	370	250
推进行程/mm	1200	1200
最大推进速度/(m·min ⁻¹)	15	15
钻孔角度/(°)	-10~20	-10~20
爬坡能力/(°)	20	20

使用F-300型泥浆泵,活塞直径 $\text{O}110\text{ mm}$,额定压力15.5 MPa、最大流量750 L/min。

2.3.2 随钻测量系统

使用YSX18型随钻测量系统,系统由螺杆钻具、无磁钻杆、无磁仓、随钻测量系统及变径等组成,见图6。

随钻测量系统基本性能参数见表3。

2.3.3 钻孔护壁与泥浆不落地固控循环系统

施工区域地层较为完整,套管用作稳定开孔段



图 6 YSX18 型随钻测量系统

Fig.6 YSX18 measurement while drilling

砂卵砾石层。全孔采用泥浆冲孔护壁,正常钻进采用高黏 CMC 泥浆冲孔护壁。漏失孔段钻进,在泥浆中加入高黏堵漏剂随钻堵漏。随着钻孔深度增加,孔内阻力逐渐增大,900 m 后,在泥浆中加入植物胶、白油类润滑剂,提高排屑能力和润滑性能,减阻效果明显。采用孔口密封全孔灌注水泥浆封堵涌水,先灌注稀浆,后灌注浓浆,辅以间歇注浆的方法,水灰比由大到小分别为 2、1、0.7、0.5,最终以 8 MPa 压力稳压 30 min。

采用泥浆固控、不落地系统管理泥浆。固控系统

表 3 YSX18 型随钻测量系统基本性能参数

Table 3 Basic performance parameters of YSX18 measurement while drilling

项 目		数 值
通信距离/m		>1500
倾角/(°)	测量范围	-90~90
	精度	±0.2
方位角/(°)	测量范围	0~360
	精度	±1.0
工具面向角/(°)	测量范围	0~360
	精度	±1.0
耐水压力/MPa		≥12
工作温度/°C		-40~75

统由泥浆循环净化罐、振动筛、中速离心机等组成;泥浆不落地系统压滤机喂料泵、压滤机总成等组成。系统泥浆处理量为 60 m³/h,振动筛下层软筛布 20 目,中速离心机最小分离点 5~7 μm。

2.4 钻进参数

开孔段采用 PDC 钻头回转钻进至较完整基岩,经 2 次扩孔下入套管。下至着陆点之后,使用螺杆钻具 PDC 钻头定向钻进为主,水平段以 PDC 钻头复合钻进为主。钻进参数见表 4。

表 4 钻进参数

Table 4 Drilling parameters

岩 性	钻进方式	泵量/(L·s ⁻¹)	孔底钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)		
				钻 机	螺 杆	复合钻进
砂卵砾石	PDC 回转	5	1~2	30~40		
	扩孔	6	1~2	20~30		
凝灰岩	滑动钻进	5	12~19	0	180~200	
	复合钻进	5	12~19	80~100	180~200	260~300
玄武岩	滑动钻进	5	12~19	0	180~200	
	复合钻进	5	12~19	100~120	180~200	280~320

2.5 定向钻进

目前,定向钻进有滑动钻进和复合钻进两种形式。滑动钻进过程中,螺杆马达工具面可保持一个稳定的方向进行“滑动造斜”^[4],钻柱“只滑不转”,存在钻进摩阻大、成孔轨迹光滑度差和钻进效率低等问题,在钻孔轨迹需要调整时,进行滑动定向钻进,快速调整钻孔轨迹直至满足设计要求;在钻孔轨迹不需要调整时,进行复合钻进。与滑动定向钻进技术相比,复合钻进技术具有钻进阻力小、成孔轨迹

光滑和钻进效率高等优势^[5]。滑动定向钻进和复合钻进原理见图 7。

2.5.1 定向钻进原理

定向钻进时,钻机不回转,只提供推进力和螺杆钻具的反扭矩,高压泥浆驱动孔底螺杆钻具转子回转破岩钻进,钻杆、钻具定子向前滑动延伸钻孔,随钻测量装置反馈钻孔轨迹,并使钻孔轨迹按设计要求钻进。钻进中,由探管采集工具面向角,钻孔倾角、方位角等信息,将数据直接传递到地面监测

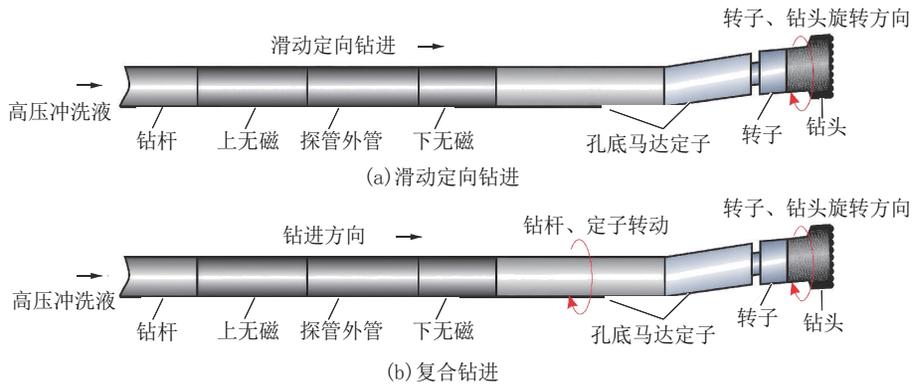


图7 滑动定向钻进和复合钻进原理示意^[4]

Fig.7 Schematic diagram of the principle of sliding directional drilling and composite drilling

系统,然后通过监测系统上的轨迹测量软件进行轨迹显示、导向及成孔曲线绘制。

钻孔轨迹的纠偏是采用调整单弯螺杆钻具的工具面向角进行控制的,通过工具面向角的调整从而改变钻孔轨迹各点的倾角及方位角,见图8。当工具面位于I象限时,其造斜效果是增斜、增方位;当工具面位于II象限时,其造斜效果为降斜、增方位;当工具面位于III象限时,其造斜效果为降斜、减方位;当工具面位于IV象限时,其造斜效果为增斜、减方位^[6-8]。工具面向角对倾角、方位角的影响见图9。

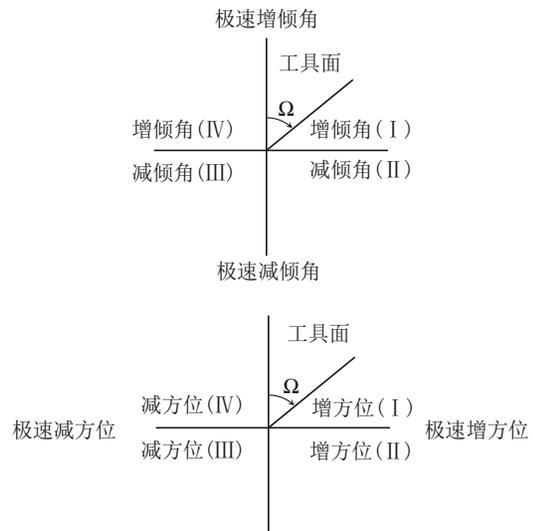


图9 工具面对倾角、方位角的影响

Fig.9 Tool face influence on dip angle and azimuth angle



图8 旋转调整螺杆马达工具面向角示意

Fig.8 Schematic diagram of rotary adjusting the tool face angle of the screw motor

定向钻进步骤:通过随钻测量系统显示钻孔的顶角、方位角及钻孔实钻轨迹的剖面图、平面图;对比实测数据及轨迹设计数据,判断实际轨迹与设计

轨迹的位置关系,计算下一钻进回次的工具面角;通过动力头转动钻杆柱,使工具面调整到预定位置,制动动力头;开泵排岩屑;钻机加压给进,螺杆钻具在高压冲洗液作用下带动钻头破岩,钻杆柱沿工具面方向滑动,实现定向钻进。

钻具组合自下而上依次为:Ø120 mm PDC 钻头+1.25°单弯螺杆钻具+变径+Ø89 mm 无磁钻杆+Ø89 mm 无磁仓(含探管)+Ø89 mm 通缆接头+Ø89 mm 无磁钻杆+Ø89 mm 通缆钻杆。

2.5.2 定向钻进注意事项

在定向钻进中应注意:(1)造斜钻进时,应根据岩石基本物理力学性质等因素选择合理的钻压、泵量等钻进参数;(2)单个造斜过程应避免工具面向角发生改变;(3)开设分支孔时,应采用新钻头,螺杆钻具弯度应大于正常造斜时所用的弯度,钻速不

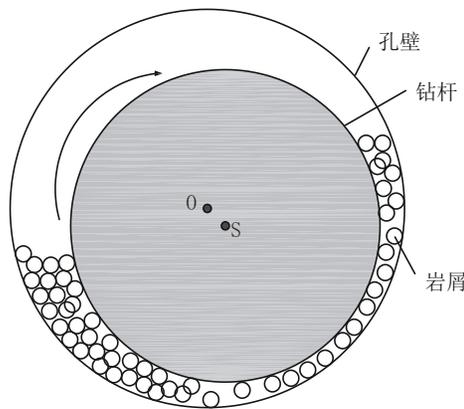
宜过快,新孔开设成功后应适当修孔;(4)造斜钻进过程中,应注意观察泥浆泵泵压变化及孔口返水情况,包括返水量、岩粉量、颜色、浑浊程度等^[9-10]。

3 钻进中遇到的主要问题及采取的措施

定向钻进技术已经得到广泛应用,在实践中也积累了大量的方法措施,但本项目实施中遇到了超长水平钻孔排粉困难、强地磁干扰无法定向、硬岩钻进效率低等主要问题,可以借鉴的经验不多,施工过程中,我们进行了不断探索和改进,取得了一定的效果。

3.1 超长水平钻孔排粉困难问题

水平孔钻进中,在重力作用下,钻具、岩屑、冲洗液在钻孔横截面内不对称,如图10所示。



0—钻孔中心; S—钻杆中心
图10 水平孔钻进示意

Fig.10 Schematic diagram of horizontal hole drilling

定向钻进时,岩屑容易在下孔壁堆积,形成岩屑床,增加摩阻和扭矩以及卡钻的风险。本项目采用PDC钻头全面钻进,岩屑量多、粒大,更不易排出。

钻进难点:轨迹为有曲率要求的近水平孔,孔内冲洗液循环状态变为水平状态,钻具与孔壁形成“偏心环空”,岩屑的浮力、切力和重力等受力条件变得更为复杂,排屑困难,孔内常常堆积“岩屑床”,施加钻压困难,钻孔摩阻力大,“托压”现象严重,且容易造成事故。钻杆外壁和套管内壁形成摩擦副,其研磨材料为岩屑,造成管具磨损严重。另外,在大曲率钻孔中起下钻时,钻杆和套管底端很容易产生挂管现象或产生键槽卡钻^[10-13]。

为解决超长水平钻孔钻进中排粉困难问题,采

取的措施有:螺旋槽钻杆与三棱螺旋槽钻杆组合使用,增加对钻孔岩屑的机械扰动,加强排屑;采用复合钻进,每滑动钻进3~9 m,视情况采用复合钻进,加强排屑;使用高分子处理的高动切力泥浆,提高排屑能力,同时适当加大了循环液量,优化钻孔轨迹等措施。

3.2 “托压”问题

随着钻孔延伸,特别是1100 m后,孔底加不上钻压,钻进摩阻明显增大,钻孔轨迹不易控制,“托压”现象明显,机械钻速由3 m/h逐渐降至1.2 m/h。钻进中,通过提高排屑能力,间隔加装扶正器修孔,在钻杆上涂抹润滑剂、向泥浆中添加白油类润滑剂降低摩阻,采用泥浆固控系统,控制泥浆含砂量,根据机械钻速、上返泥浆等情况,及时调整孔底压力,以减小“托压”产生的钻进效率影响。

3.3 随钻测量系统受强磁场干扰问题

在上游1孔600~756 m钻进期间,随钻测量系统设有53个测点,其中,24个相邻测点方位差 $\geq 5^\circ$,最大相差24.34°,判断钻孔方位角测量结果出现误差。随后,采取同点多次复测以及不同探管复测,同样出现了较大误差。收集、整理相关测量数据后,最终确认测量探管受到地磁干扰,造成方位失准。为了保证工程质量,及时进行研究攻关,研制出了小口径水平陀螺寻北有线随钻测量系统,有效解决了强地磁干扰难题,填补了国内空白,见图11。



图11 陀螺寻北有线随钻测量系统探管

Fig.11 Probe tube of gyroscopic north-finding wireline measurement while drilling

3.4 绿色勘探措施

作业区环境脆弱,必须最大限度地减少或避免对生态环境的破坏。本项目从选址、场地设置、泥浆材料选用、废固处理等方面分别进行管控,如使用固控系统、泥浆不落地系统等,从而达到减少当地生态环境地破坏的目的。

4 存在的不足

4.1 钻机适应性不够

现场使用的履带式煤矿井下定向钻机,在地面

钻进中,表现出了转速低、给进行程短的不足。

国内常用的定向钻机有非开挖钻机和坑道钻机,坑道钻机又有煤矿井下钻机和地勘类坑道钻机。非开挖钻机和煤矿井下钻机多为低转速大扭矩,非开挖钻机给进行程长,而煤矿井下钻机多为小给进行程^[14-17]。地勘类坑道钻机以及地面勘查钻机转速可调范围大,给进行程较大,但扭矩小,没有回转器制动系统,不便于定向钻进。

建议加快开发具备较高转速、较大给进行程和较大扭矩的地面定向钻机。

4.2 硬岩钻进效率低

PDC钻头钻进可钻性Ⅷ级以下岩石,平均机械钻速可以达到2 m/h以上;但钻进可钻性Ⅷ级以上岩石,平均机械钻速很低,甚至出现打滑现象。本项目在玻屑晶屑凝灰岩、玄武岩,定向钻进平均机械钻速3 m/h左右。部分玄武岩可钻性达到Ⅸ级,PDC钻头钻进机械钻速很低,甚至不进尺。采用金刚石钻进,受钻机转速和螺杆钻具钻压限制,达不到理想的钻压和转速。

建议加强硬-坚硬岩石定向钻进的金剛石类型、金刚石品级、钻头结构、参数等方面的研发,提高硬岩钻进效率。

4.3 注浆过程影响钻进效率

本次注浆采用孔口封闭纯压式全孔段灌注,注浆大体可以分为以下3个阶段:充填注浆阶段:孔口压力 ≤ 3 MPa;稳压注浆阶段:孔口压力3~6 MPa;高压注浆阶段:孔口压力6~8 MPa。

注浆要经过起钻、注浆、候凝、扫孔等过程,钻机给进行程小,起钻、扫孔时间很长。采用孔口密闭纯压式注浆,灌注管路达到数百米甚至千米以上,水泥容易沉淀,水泥在压力作用下强度增加快,扫孔过程中多次轨迹失控,偏出新孔,需要起钻复测,调整轨迹继续钻进,浪费大量有效进尺^[18]。目前,尚无超长水平定向钻孔内的分段注浆的有效手段。

5 结论与建议

(1)项目在设计中创造性的提出了采用两边相对打的施工方法,克服了超长距离钻进的施工难题。结合长距离水平定向孔钻进中摩阻和扭矩大、排屑难、复杂地层护壁困难等施工特点,合理的选择钻探设备、钻具组合、钻进工艺、随钻测量系统、

护壁与润滑措施。

(2)结合项目研发的小口径水平陀螺寻北有线随钻测量系统,解决了因磁场干扰导致的定向失准问题,填补了国内空白。

(3)建议研发转速可调范围广、大扭矩、给进行程长的地面定向钻机,以提高定向钻进效率,并进一步开发机械化、自动化和智能化程度高的定向钻机。加强长距离水平定向孔分段注浆工艺研究,提高注浆工作效率,真正实现超长距离定向钻注一体化。

参考文献(References):

- [1] 杨圣安,史建松,王洪亮.隧道壁后注浆加固工艺及效果评价研究[J/OL].地下水.(2024-03-22)[2024-07-22].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1096.TV.20240322.1144.002.html>. YANG Sheng'an, SHI Jiansong, WANG Hongliang. Research on the process and effect evaluation of post-tunnel wall grouting reinforcement[J/OL]. Ground water. (2024-03-22)[2024-07-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1096.TV.20240322.1144.002.html>.
- [2] 孙江涛,李志堂,袁敬强,等.隧道穿越大型充填溶洞超前综合探测与处治技术[J].现代隧道技术,2021,58(S1):416-425. SUN Jiangtao, LI Zhitang, YUAN Jingqiang, et al. Comprehensive advance detection and treatment technology for tunnels passing through large infilled karst caves[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021,58(S1):416-425.
- [3] 杨凯.引水工程中定向钻的标准化应用[J].大众标准化,2024(11):131-133. YANG Kai. Standardized application of directional drilling in water diversion projects[J]. Popular Standardization, 2024(11):131-133.
- [4] 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.
- [5] 董小明,褚志伟,张垒,等.顺煤层随钻测量定向钻进技术在金泰煤矿的应用研究[J].煤炭技术,2022,41(1):92-96. DONG Xiaoming, CHU Zhiwei, ZHANG Lei, et al. Application of directional drilling technology with measurement while drilling along coal seam in Jintai Coal Mine[J]. Coal Technology, 2022,41(1):92-96.
- [6] 刘启华,李刚,陈翔,等.超长距离硬岩层水平定向钻扩孔工艺研究与应用[J].化工管理,2020(4):197-201. LIU Qihua, LI Gang, CHEN Xiang, et al. Research and application of horizontal directional drilling reaming process for ultra-long distance hard rock formation[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(4):197-201.
- [7] 吴金刚,张长远,李宏.松软破碎煤层定向长钻孔高效抽采技术研究[J].煤炭工程,2022,54(5):68-73.

- WU Jingang, ZHANG Changyuan, LI Hong. Efficient gas extraction technology of directional long borehole in soft and broken coal seam[J]. Coal Engineering, 2022, 54(5):68-73.
- [8] 房勇,钱锋,周策,等.水平孔多参数综合测试仪器研发与应用[J].钻探工程,2024,51(1):97-105.
- FANG Yong, QIAN Feng, ZHOU Ce, et al. Development and application of multi-parameter integrated testing instrument for horizontal hole[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1):97-105.
- [9] 梁道富,徐界泽,李明.松软煤层穿层梳状定向钻孔瓦斯抽采工艺研究[J].内蒙古煤炭经济,2019(19):1-4.
- LIANG Daofu, XU Bize, LI Ming. Research on gas extraction process of comb directional drilling through loose coal seam[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2019(19):1-4.
- [10] 中华人民共和国国土资源部.定向钻探技术规程:DZ/T 0054-2014[S].北京:中国标准出版社,2025.
- Ministry of Land and Resources, People's Republic of China. Technical specification for directional drilling: DZ/T 0054-2014[S]. Beijing: China Standards Press, 2025.
- [11] 吴华强,李文清.水平井钻井中几个问题的处理技术[J].钻采工艺,1999,22(3):96.
- WU Huaqiang, LI Wenqing. Techniques for dealing with several problems in horizontal well drilling[J]. Drilling & Production Technology, 1999, 22(3):96.
- [12] 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.
- [13] 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.
- 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):972-978.
- [14] 叶强波.定向钻进技术在煤层走向探测钻孔施工中的应用[J].煤矿机械,2021,42(8):169-171.
- YE Qiangbo. Application of directional drilling technology in drilling construction of coal seam strike detection[J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(8):169-171.
- [15] 王文彬,张军义,王露.煤层顶板裂隙高位定向长钻孔安全高效抽采技术的研究与应用[J].能源与环保,2020,42(12):65-70.
- WANG Wenbin, ZHANG Junyi, WANG Lu. Research and application of safe and high-efficiency drainage technology with high-level directional long holes in coal roof cracks[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42(12):65-70.
- [16] 胡郁乐,赵海滨,姚震桐.坑道定向钻进系统在隧洞水平勘探工程中的适应性分析[J].钻探工程,2023,50(5):116-124.
- HU Yule, ZHAO Haibin, YAO Zhen tong. Adaptability analysis of tunnel directional drilling system in tunnel horizontal exploration engineering[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5):116-124.
- [17] 郑明高.超长距离复杂岩层定向钻穿越施工技术[J].石油工程建设,2018,44(6):60-62, 65.
- ZHENG Minggao. Crossing construction technology of ultra-long distance directional drilling in complex rock strata[J]. Petroleum Engineering Construction, 2018, 44(6):60-62, 65.
- [18] 李术才,李利平,孙子正,等.超长定向钻注装备关键技术分析及发展趋势[J].岩土力学,2023,44(1):1-30.
- LI Shucai, LI Liping, SUN Zizheng, et al. Key technology analysis and development trend of the equipment for ultra-long directional drilling and grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1):1-30.

(编辑 王文)