



施工技术(中英文)
Construction Technology
ISSN 2097-0897,CN 10-1768/TU

《施工技术(中英文)》网络首发论文

题目: 高压富水硬岩地层双护盾 TBM 前置式超前注浆堵水技术研究
作者: 冀国栋, 王立川, 陈典华, 王灿林, 王宝友, 李庆斌, 黄江帆, 陈霞飞
网络首发日期: 2023-04-19
引用格式: 冀国栋, 王立川, 陈典华, 王灿林, 王宝友, 李庆斌, 黄江帆, 陈霞飞. 高压富水硬岩地层双护盾 TBM 前置式超前注浆堵水技术研究[J/OL]. 施工技术(中英文). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1768.TU.20230418.1715.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

高压富水硬岩地层双护盾 TBM 前置式超前注浆堵水技术研究

冀国栋^{1,2}, 王立川², 陈典华³, 王灿林³, 王宝友², 李庆斌², 黄江帆², 陈霞飞³

(1. 天津大学, 建筑工程学院, 天津 300072;

2. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300350; 3. 中铁十八局集团市政工程有限公司, 天津 300350)

[摘要] 晋中引黄输水隧洞双护盾 TBM 施工穿越高压富水裂隙, 掌子面高压大流量突涌水严重, 采用常规后置式超前注浆技术对掌子面突涌水进行超前处置效果不佳, 主要原因是受外插角影响, 采用常规后置式超前注浆存在注浆目标区域受限、钻探效率低、超前注浆控制难度大等问题, 难以形成有效的止水帷幕结构。对隧洞水文地质条件、突涌水情况及超前注浆技术进行系统研究分析, 提出双护盾 TBM 前置式超前注浆堵水工艺, 通过优化注浆设备, 在掌子面处实施超前注浆堵水。开展现场注浆试验, 对坚硬岩面钻孔施工、注浆材料、注浆参数控制及注浆段长优化等技术进行研究, 并根据现场试验信息, 不断优化注浆设备及工艺。通过对晋中引黄输水隧洞实施前置式超前注浆堵水技术, 洞内平均出水量降至 3702m³/d, 降幅达到 75.9%, 同时在一定程度上提高了 TBM 施工效率。实践证明该技术方法有效, 可为类似高压富水硬岩地层大流量突涌水处治提供参考。

[关键词] 硬岩地层; 双护盾 TBM; 突涌水; 前置式超前处置; 注浆堵水

[中图分类号] TV522

[文献标识码] A

Research on front-mounted advanced grouting water-stop technology of double shield TBM crossing high-pressure water-rich hard rock tunnel

Ji Guodong^{1, 2}, Wang Lichuan², Chen Dianhua³, Wang Canlin³, Wang Baoyou²,

Li Qingbin², Huang Jiangfan², Chen Xiafei³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072;

2. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300350;

3. China Railway 18th Bureau Group Municipal Engineering Co., Ltd., Tianjin 300350)

Abstract: The double shield TBM-bored Jinzhong Yellow River diversion tunnel crosses high pressure and water-rich fissures, and high-pressure water inrush of tunnel face is serious during TBM construction. The effect of advanced treatment with conventional postpositioned advanced grouting technology is not ideal, for which the causation is that as the influence of external insertion angle, the advanced grouting cannot be well controlled by the conventional advanced grouting technology with the problems of limited grouting target area, low drilling efficiency, etc., and then an effective waterproof curtain structure is difficult to be formed. Based on the systematic analysis of the hydrogeological conditions, water inrush and advanced grouting technology of the tunnel, the front-mounted advanced grouting water-stop technology of double shield TBM is put forward, with which the advanced grouting is carried out ahead of tunnel face by optimizing the grouting equipment. A field grouting experiment is carried out to study the drilling in hard rock surface, grouting material, grouting parameter control and grouting section length optimization, while the grouting equipment and technology are continuously optimized according to the field test result. The application result of the technology, the average water inrush amount is decreased to about 3702m³/d with the decreasing amplitude of 75.9%, indicates that the technology adopted is effective. The technology improves the TBM boring efficiency, which can provide reference for the treatment of large-flow water inrush in similar high-pressure water-rich hard rock tunnel.

[作者简介] 冀国栋, 注册岩土工程师, 博士, E-mail: jgd2034@163.com Tel: 18663535881

中铁十八局集团有限公司科技研发项目(G21-13); 国家自然科学基金面上项目(52278390)

Key words: hard rock ground; double shield tunnel boring machine; water inrush; front-mounted advanced treatment; grouting and blocking water

0 引言

经过约半个世纪的引进、吸收和发展, TBM 技术被广泛应用于我国铁路、公路、水利及市政等地下工程建设中^[1]。相比钻爆法施工而言, TBM 施工具有安全性高、掘进速度快、机械化水平高及施工环境好等优点, 但在面对不良地质条件时, TBM 由于设备及作业空间限制, 其灵活性远不如钻爆法, 易出现各种工程地质问题, 使掘进效率大大降低^[2]。突涌水是隧道建设的主要工程地质灾害之一^[3-8], TBM 隧洞施工过程中因遭遇突涌水灾害及处置不当而造成严重后果的情况时有发生, 如印度 Dul Hasti 水电工程引水隧洞、昆明掌鸠河引水工程上公山隧洞、台北宜兰高速公路雪山隧道等, 均在 TBM 隧洞掘进时遭遇了大规模突涌水, 严重影响了工程的经济和社会效益。

双护盾 TBM 受护盾及管片影响, 无法在设备后方对暴露岩面出水点采取针对性堵水措施, 在穿越富水洞段施工且洞内出水量接近或超出排水能力时, 通常需要进行超前注浆以封堵地下水。掌子面超前注浆多采用在刀盘隔舱内利用刀孔、刮碴孔、人孔等空间通过人工施作注浆管的施工方案^[9], 但该方法受操作空间限制, 施工难度很大, 钻孔注浆效率和质量均难以保证。近年来, 基于对超前地质预报的重视程度逐渐加大, TBM 设备设计时考虑配备超前钻机的方案逐渐流行, 施工期间可采取后置式超前注浆技术, 即通过预设的超前钻机对掌子面前方地层进行超前处置^[10-13], 该方法机械化程度较高, 安全性较好, 但由于超前钻及外插角的影响, 在实际工程应用中仍存在钻孔区域受限、注浆控制难度大等问题。针对掌子面自稳能力较好的硬岩地层, 一些工程在局部富水段落尝试采用了刀盘前方掌子面处超前处置的方式^[14], 该方法可对前方地层任意角度进行钻孔注浆施工, 但由于作业空间狭小, 硬岩地层人工造孔困难, 作业效率极低。

本文依托引黄入晋山西中部引黄(以下简称“晋中引黄”)输水隧洞工程实践, 通过研究分析施工期间高压富水洞段历次注浆处置过程, 创新提出适宜双护盾 TBM 的前置式超前注浆堵水工艺; 开展现场试验优化钻孔设备和注浆参数, 确实解决高压富水段掌子面突涌水问题, 具有重要的工程意义, 可为类似地层条件下双护盾 TBM 施工突涌水处置提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

晋中引黄输水隧洞 TBM1 标位于山西省吕梁市, 属中低山区, 地面高程 1246~1605m。隧洞总体走向由北向南, 施工段主洞全长 21.05km (Z(k)77+020~Z(k)98+070), 设计纵坡为 0.04%, 最大埋深 610m, 采用一台 5.06m 双护盾 TBM 反坡独头掘进施工。

1.2 地质构造

根据勘察资料显示, 工程线路涉及天桥泉域、柳林泉域两个泉域, 泉域分水岭在桩号 Z(k)94+700 的黑茶山一带, 如图 1 所示, 地下水的补给为大气降水补给及其他类水的侧向补给或越流补给。隧洞沿轴线方向共穿越 5 条断层, 其中 F4、F5 断层位于地下水位以下, F4 断层破碎带里程为 Z(k)93+650.0~+914.2, 上盘出露地层为石墨透闪石大理岩, 下盘出露地层为黑云斜长片麻岩; F5 断层破碎带里程为 Z(k)94+700.0~+914.2, 断层上覆片麻状花岗岩, 下伏地层为斜长角闪片麻岩。两断层均为倾角较陡的正断层, 且两盘发育脆硬岩体, 断层内构造裂隙发育, 且裂隙连通性好, 利于地下水储存和流通, 同时 F4、F5 断层距离较近, 两断层形成地堑式的断层组合, 成为有利的富水构造。

1.3 地层岩性

隧洞穿越地层可按岩性分为三类, 其中桩号 Z(k)77+020~Z(k)90+425 段穿越地层为古生界奥陶系灰岩、泥灰岩; 桩号 Z(k)90+425~Z(k)92+374 段穿越地层岩性以寒武系白云岩为主; 桩号 Z(k)92+374~Z(k)98+070 段穿越地层为太古界河口群奥家湾组变质岩, 主要岩性包括石墨透闪石大理岩、中强定向黑云长英质构造片麻岩、变质含砾石英砂岩等, 隧洞围岩强度较高, 岩体完整性较好。

1.4 水文地质

隧洞主洞段沿线地下水类型主要有碳酸盐岩裂隙岩溶水和变质岩类裂隙水。根据地下工程界研究成果, 定义水压力 $P>0.6\text{MPa}$ 时为高压水^[15], 晋中引黄隧洞自桩号 Z(k)90+425 以后, 隧洞多位于地下水位以下, 地下水位高于洞顶 130~350m, 设计预测最大涌水量为 $19687\text{m}^3/\text{d}$, 为典型的高压富水隧洞, 施工中易发生较大规模突涌水。

1.5 隧洞施工及突涌水情况

自 TBM 掘进至桩号 Z(k)90+924 后, 隧洞内多次发生突涌水。其中, 桩号 Z(k)94+563 处发生的大

型突涌水,出水沿层面裂隙向外喷出,压力约 2.0~3.5MPa,现场测定涌水量达到 26448m³/d,远超设计涌水量。分析认为突涌水为变质石英砂岩高压裂隙水,TBM 掘进施工扰动和高压水的共同作用下使裂隙贯通,地下水沿贯通裂隙向隧洞排泄,引发突涌水。

根据前期钻孔及揭示围岩情况推测,掘进前方

存在裂隙出水的可能性非常大,且涌水量可能超过隧洞排水能力,继续掘进存在较大淹机风险和施工安全风险。结合以往工程经验,现场采用常规后置式超前注浆对掌子面进行超前堵水,但效果并不理想。TBM 掘进至桩号 Z(k)94+589,掌子面再次发生大型突涌水致现场停工。

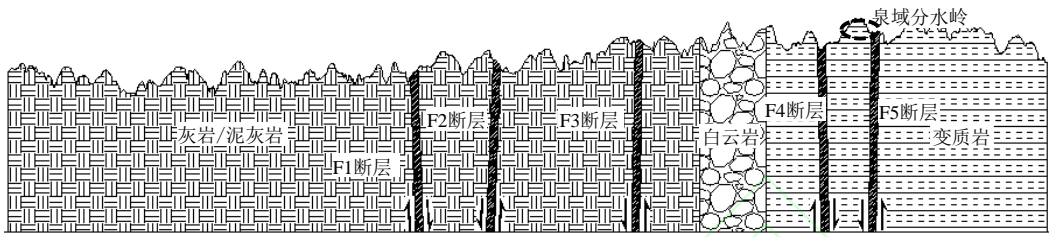


图 1 晋中引黄输水隧洞 TBM1 施工段工程地质剖面图

Fig.1 Geological profile of TBM1 section of Central Yellow River Diversion tunnel

2 常规超前注浆存在的问题

2.1 后置式超前注浆过程分析

晋中引黄输水隧洞施工进入高压富水洞段后,采用常规后置式超前注浆技术,利用 TBM 设备搭载的超前钻机自盾体 14 个预留导孔入岩,经护盾区域向掌子面前方地层进行超前注浆堵水,但并未形成有效的止水帷幕,致使突涌水再次发生。对历次后置式超前注浆过程进行分析,主要存在以下问题:

(1)注浆目标区域受限。TBM 盾体预留钻机导孔与洞轴线间角度为 7 度,如图 2 所示,超前钻机经护盾处预留导孔进行钻孔时,难以向正前方钻探,造成注浆难以穿过隧洞前方岩层多条贯通性较差的平行裂隙,无法达到有效的堵水效果。

(2)超前注浆效率较低。本段落围岩为坚硬致密的变质岩,岩石抗压强度达到 158MPa,对钻孔效率影响极大,且小直径 TBM 由于空间限制,施工可操作性较差,根据多次超前注浆过程统计分析,钻孔长度在 15~20m 时效率最高,但由于机载超前钻机需自尾盾处进行钻探,导致大部分钻孔范围为无效注浆段落,实际单次有效注浆长度仅约 5~10m。

(3)浆液可注性差。施工统计资料显示,超前注浆采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥浆,注浆压力达到 6MPa 以上,浆液注入率约 40kg/m。一方面,浆液的水灰比较大时,水泥用量非常少,对于水压大、水量足的钻孔,浆液很容易被水流稀释,无法起到

堵水作用;另一方面,浆液的水灰比较小时,由于石英砂岩裂隙较小,浆液在进入围岩裂隙前已在孔内凝胶,导致浆液有效注入量小,注浆效果较差。

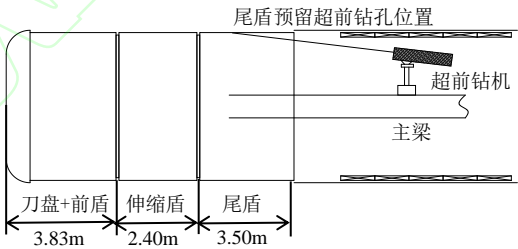


图 2 双护盾 TBM 搭载超前钻机位置示意图

Fig.2 Sketch map of double shield TBM carrying advance drilling system

综上所述,由于注浆钻孔方向受限,浆液无法穿过隧洞前方平行裂隙;浆液有效注入量不足,导致难以形成有效的止水帷幕,所以掌子面突涌水情况仍可能会出现。

2.2 超前注浆堵水的重难点分析

超前注浆堵水的重点和难点如下:(1)钻孔注浆效率较低、效果较差。尾盾处后置式超前处置多存在钻孔和施工效率不高、注浆效果有限的问题。如何有效提高超前钻孔注浆的效率和效果,是目前急需解决的关键问题。(2)微裂隙注浆封堵困难。后续穿越地层中包含变质石英砂岩段,根据前期施工情况,该段落存在密集微裂隙,当使用水泥浆液对微裂隙岩体进行注浆时,会有渗滤效应发生,导致水泥颗粒会在裂隙开度变化处发生堆积并逐渐堵塞

裂隙通道，需要进一步解决注入浆液的有效性。

3 前置式超前注浆堵水技术及现场试验

3.1 前置式超前注浆堵水技术

鉴于常规后置式超前钻孔注浆技术在晋中引黄输水隧洞突涌水防治施工的局限性，研究提出“前置式超前注浆堵水技术”，使超前钻探作业位置可由常规的尾盾处前置到刀盘前方掌子面处。考虑到 TBM 掌子面处作业空间较为狭小，对钻孔施工有所限制，采用拆卸拼装方便的柱架式液压钻机，并结合实际需求进行优化，如图 3 所示：

(1)对液压钻机的柱架工作高度及机身长度进行了重新设计，设计后钻机柱架的工作高度为 4.8~5.2m，机身全长为 1.2m，满足作业空间限制要求；

(2)在柱架的顶部与底部分别设置两个可伸缩油缸，油缸外接定位连接板，连接板外侧设计与掌子面弧度基本一致，以便固定时将连接板与岩面顶紧；

(3)钻机两柱架间设置钻机支架连杆，钻机安装在支架连杆上，并采用三角支撑连接柱架与钻机，钻机可上下滑行到目标位置后固定。

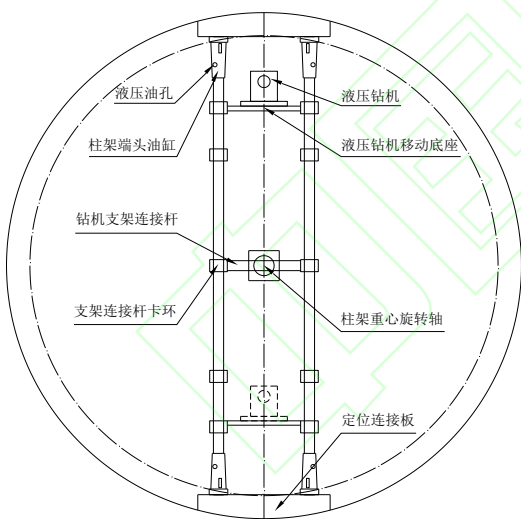


图 3 液压钻机结构示意图

Fig.3 Sketch map of hydraulic drill structure

液压钻机安装的关键工艺流程为：TBM 停机时确保其主推油缸与辅推油缸均处于伸开状态，停机后通过依次回收油缸可使刀盘后退距离达到 2.0~2.5m，为掌子面处超前钻探提供作业空间。将钻机柱架、机身、托盘、液压油缸等通过刀盘人孔运至刀盘前方，对柱架进行拼装后在其两端安装可伸缩油缸，柱架中部安装液压钻机机身，并延伸柱脚油缸与掌子面处岩壁顶紧。连接液压钻机机身尾部的

液压装置油管与控制阀，将为钻杆中心孔供水的冷却水管连接至水泵后进行钻孔施工。

3.2 现场试验

3.2.1 注浆堵水方案设计

超前注浆的基本目的是对导水通道进行封堵。注浆孔按照 2 圈设计，外圈 8 孔，半径 2.3m；内圈 8 孔，半径 1.5m。隧洞外圈孔钻孔应在同一孔位附近，采用不同角度向外打孔，为防止孔位偏离隧洞过远，终孔位置应在隧洞边界以外 3~6m；内圈孔应设计切向角，以提高其穿越裂隙的概率，见图 4。

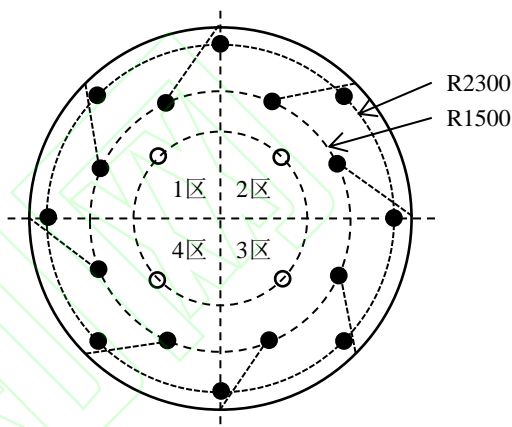


图 4 超前注浆孔位布置

Fig.4 Layout of advance grouting holes

3.2.2 注浆材料及配比

针对围岩以变质石英砂岩为主的高压富水段落，为提高微裂隙岩体条件下浆液的有效注入率，选用凝结时间较短的抗裂快凝快硬 42.5 硫铝酸盐水泥+UWB-II 型水下不分散混凝土絮凝剂作为注浆材料，初凝时间 10~20min，终凝时间 2~3h，固结后强度可达 30MPa，可有效防止浆液在高压水作用下离析。

3.2.3 注浆参数

隧洞全断面注浆时采用“先外后内”的原则，首先对外圈孔进行注浆，封堵洞身周边主要裂隙，形成止水洞身，再对内圈孔进行注浆封堵。每循环注浆长度初设为 45m，采用由浅到深渐进式注浆，分段梯度初设 5m，施工时可视钻孔涌水情况进行适当调整。

注浆时根据超前钻探时钻孔涌水压力和涌水量选择不同的注浆压力，一般在高于涌水压力的 1.5~2.5 倍范围内进行。注浆速率应控制不超过 10L/min，尽量使浆液扩散半径加大，达到闭浆标准后，采用双液浆进行浓浆封孔，缩短待凝时间，加快堵水进度。试验室测试双液浆胶凝时间 56s，

初凝时间 1min45s，终凝时间 1h8min。

3.2.4 注浆结束标准

注浆段在设计最大压力下，单位时间内注浆量不大于 1L/min 后，继续灌注 30min 结束注浆。注浆封堵完毕后，在注浆重点区域加设检查孔，检查孔数量不少于 4 个，如图 6 所示。以单个检查孔涌水量均小于 1.2L/（min·m），且所有检查孔总涌水量不超过 30m³/h 为判断标准，注浆质量不合格时，可加密钻孔作补注浆处理，直到注浆效果达到要求。

3.2.5 试验结果分析

采用新型注浆材料进行前置式超前注浆堵水施工，单次循环注浆 16 孔，浆液平均单位注入量为 111kg/m，相比于此前采用水泥浆液后置式注浆，浆液平均单位注入量增加了 177.5%。注浆效果明显提升。

4 前置式超前注浆堵水施工优化

将前置式超前注浆堵水技术应用于晋中引黄输水隧洞全部高压富水洞段施工，为进一步提高钻孔注浆效率，基于试验段实施情况，对钻孔注浆设备及施工工艺进行优化。

4.1 设备优化

前置式超前注浆堵水施工时，由于更换孔位时需移动钻机柱架，且多次拆装费时严重，致使钻孔效率极低。根据现场钻孔注浆耗时统计，钻孔所消耗时间约占整体钻注施工时间的 70%。为提高钻孔工作效率，在柱架中部加装横向连接杆及重心旋转轴，使两根平行的柱架可形成以掌子面圆心为轴 360° 转动的整体，有效减少钻机移动和柱架搭设时间，如图 5 所示。

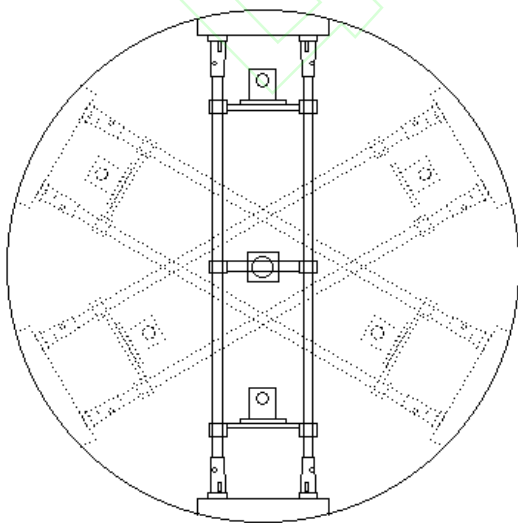


图 5 钻机角度调整示意图

Fig.5 Hydraulic drilling angle adjustment

超前钻机安装完成后，首先在掌子面中心处打设 1 个固定孔，钻孔深度为 2~3m，在固定孔内安装厚壁钢管，通过重心旋转轴与刀盘固定作为柱架旋转轴。更换孔位时，收缩柱架端头油缸使定位连接板与岩面脱离后，通过旋转柱架使钻机调整至所需位置。针对多个对称分区注浆时，可在柱架上部和下部对称安装两台液压钻机，实现全断面多孔同步钻注。经过现场验证，钻孔作业效率提高约 4 倍，见表 1。

表 1 钻孔注浆作业效率对比

Tab.1 Comparison of operation efficiency of drilling and grouting

	掌子面处钻注	全断面多孔同步钻注
钻孔工艺	不同角度换孔位时，需重新拆装柱架	任意角度换孔位时，只需沿圆心旋转柱架
钻机数量	1 台	2 台
钻孔时间	14.75min/m	4.3min/m
钻注时间	82.75min/m	20.21min/m

4.2 注浆段长优化

前置式超前注浆堵水施工时，每一循环段落注浆所用时间包括 TBM 设备停机回收油缸、超前钻机设备安装、注浆效果检查等固定工序的占用时间和循环段落的钻注时间，即 TBM 掘进效率=掘进长度/（注浆准备和效果检查时间+钻孔注浆时间+实际掘进时间）。注浆循环段落长度将影响 TBM 掘进速度，收集施工相关数据对 TBM 掘进效率随注浆段长变化规律进行分析，如图 6 所示，以确定最优的注浆段长。根据图 6 分析可知，每循环注浆段长为 35 ~ 45m 时，TBM 掘进效率最高。考虑较长段落注浆时预留 5m 掌子面搭接岩盘，该段地层最优注浆段长约为 45 ~ 50m。

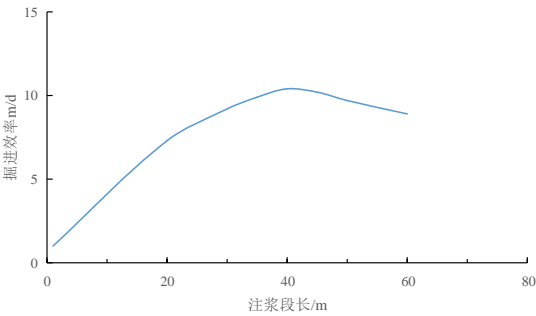


图 6 TBM 掘进效率随注浆段长的变化曲线

Fig.6 Curve of relationship between TBM boring efficiency and grouting length

4.3 施工效果评价

晋中引黄输水隧洞在高压富水段落采用前置式全断面多孔同步超前钻孔注浆堵水技术,实践证明该技术具有显著的优越性:钻孔不受外插角限制,可向掌子面前方任意角度实施钻孔注浆,且可同时安装两台液压钻机实现多孔同步钻注,作业效率提高 4 倍以上;注浆效果显著提升,浆液平均单位有限注入量增加 177.5%,后续掘进施工期间再无发生掌子面突涌水,洞内平均出水量由 15361m³/d 降至 3702m³/d,降幅达到 75.9%。

5 结语

(1)针对晋中引黄输水隧洞高压富水段落掌子面突涌水问题,研究分析表明采用常规后置式超前钻孔注浆工艺存在注浆目标区域受限、钻探效率低、浆液有效注入量不足、超前注浆控制难度大等问题,难以形成有效的止水帷幕结构。

(2)通过改进注浆设备及工艺,研究提出适用于双护盾 TBM 施工的“前置式超前注浆堵水”新技术,具有显著的优越性。试验和应用表明,该工艺完全可以解决高压富水硬岩地层掌子面突涌水防治难题,作业效率高、注浆效果好。

(3)基于现场钻孔注浆试验段实施情况,对钻孔注浆设备及工艺进行优化。形成了全断面多孔同步钻注作业模式,极大地提高了钻孔作业效率,可在类似工程推广应用;明确了最优注浆段长,可以进一步提高 TBM 掘进效率,节约施工工期。

参考文献:

[1] 洪开荣. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J]. 隧道建设, 2017, 37(02): 123-134.

HONG Kairong. Development and prospects of tunnels and underground works in China in recent two years[J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (02): 123-134.

[2] 尚彦军, 杨志法, 曾庆利等. TBM 施工遇险工程地质问题分析和失误的反思[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(12): 2404-2411.

SHANG Yanjun, YANG Zhifa, ZENG Qingli, et al. Retrospective analysis of TBM accidents from its poor flexibility to complicated geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

Engineering, 2007, 26(12): 2404-2411.

[3] 王亚萍. 超长深埋隧洞(道)突涌水灾害危险性评价及水量预测方法[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

WANG Yaping. Risk assessment and water volume prediction method for water inrush disaster in extra-long and deep-buried tunnels[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

[4] 李召朋, 李鹏. 引汉济渭秦岭隧洞 TBM 施工段突涌水涌泥施工技术探讨[J]. 水利建设与管理, 2015, 35(03): 12-14.

LI Zhaopeng, LI Peng. Discussion on Hanjiang river diversion to Weihe river Qinling tunnel TBM construction segment sudden surge water gushing mud construction technology[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2015, 35(03): 12-14.

[5] 钱富林. 关角隧道突涌水机理分析及处治技术[J]. 铁道建筑, 2014(10): 52-58.

QIAN Fulin. Mechanism analysis and treatment technology of gushing water in Guanjiào tunnel[J]. Railway Engineering, 2014(10): 52-58.

[6] 王在敏, 陈瑜林, 许模等. 西南水电工程水工隧洞涌突水问题分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(01): 27-32.

WANG Zaimin, CHEN Yulin, XU Mo, et al. Study on water inflow and burst in the hydraulic tunnel of hydropower projects in southwest China[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(01): 27-32.

[7] 陈其学, 江勇顺, 唐浩. 飞仙关特长隧道高压涌突水形成机制及处治技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(04): 143-147.

CHEN Qixue, JIANG Yongshun, TANG Hao. Formation and treatment of the high-pressure water inflow in the extra-long Feixiangguan tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(04): 143-147.

[8] 朵生君. 中天山隧道大埋深高水压节理密集带涌水处理[J]. 铁道标准设计, 2013(06): 101-104.

DUO Shengjun. Countermeasures against water gushing of Zhongtianshan tunnel at deep-buried and high water-pressed and dense-joined area[J]. Railway Standard Design, 2013(06): 101-104.

[9] 王尽忠, 王玉锁, 曾宏飞等. 中天山隧道 TBM 施工破碎围岩段新型注浆加固技术[J]. 铁道建筑, 2014(3): 41-43.

WANG Jinzhong, WANG Yusuo, Zeng Hongfei, et al. New grouting reinforcement technology for crushing surrounding rock section in TBM construction of

Zhongtianshan tunnel[J].Railway Engineering , 2014(3): 41-43.

[10] 杨腾添,李恒,周冠南等.软弱地层敞开式 TBM 超前注浆加固技术研究[J].隧道建设, 2021, 41(05): 858-864.

YANG Tengtian, LI Heng, ZHOU Guannan, et al. Pregrouting reinforcement technology of open TBM in soft stratum[J].Tunnel Construcion, 2021, 41(05): 858-864.

[11] 杨帆.复合式 TBM 穿越富水地层常见危害及解决办法[J].都市轨道交通, 2015, 28(01): 101-104.

YANG Fan. Composite TBM crossing water-rich rock formation of common harm and the solution[J].Urban Rapid Rail Transit, 2015, 28(01): 101-104.

[12] 蒋志雄. 破碎围岩 TBM 隧洞掘进面稳定性分析及超前加固研究[D].安徽: 安徽理工大学, 2022.

JIANG Zhixiong. Stability analysis and advance reinforment of TBM tunnel face in broken surrounding rock[D].Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2022.

[13] 冯欢欢,洪开荣,杨延栋等.极端复杂地质条件

下 TBM 隧道施工关键技术研究及应用[J].现代隧道技术, 2022, 59(01): 42-54.

FENG Huanhuan, HONG Kairong, YANG Yandong, et al. Research and application of key construction technologies for TBM-driven tunnels under extreme complex geological conditions[J].Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(01): 42-54.

[14] 李广涿.TBM 连续遭遇超大突涌水施工技术措施探讨[J].西北水电, 2019(06): 79-83.

LI Guangzhuo. Discussion on construction technical measures of TBM continuously encountered super large gushing water[J]. Northwest Hydropower , 2019(06): 79-83.

[15] 郑波,王建宇,吴剑.高水压富水隧道地下水处治理念与对策[J].现代隧道技术, 2019, 56(S1): 51-57.

ZHENG Bo, WANG Jianyu, WU Jian.Treatment concept and countermeasures for groundwater in water-rich tunnel with high water pressure[J].Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S1): 51-57.