

定向钻探技术在隧洞超前地质预报中的应用初探

许琦^{1,2,3}, 叶健^{1,2}, 张广厦^{1,2}, 贾建红^{1,2}

(1. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 长江设计集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 3. 水利部水网工程与调度重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要:深埋长隧洞工程在施工前勘察期间很难全面查明相关工程地质问题,可能对工程的顺利实施造成一定影响。探索将定向钻探技术运用于深埋长隧洞施工超前地质预报工作,利用水平定向钻机较好的导向功能及长距离快速钻进特点,实现对隧洞掘进前方重大风险的超前探测,有效弥补常规技术手段下长距离超前探测的不足。本文结合引江补汉工程7号施工支洞,根据不同的地质条件及预报重点,采用了不同类型钻机进行了超前预报技术方法探索,并对比分析了超前预报成果及实际开挖揭露的地质条件。分析认为定向钻探技术旨在超前探测开挖面前方重大致灾构造,结合钻进特征、物探测试等手段可基本实现目的,为提高预报时效性,钻孔宜减少取心的比率。基于现有技术水平分析,定向钻探钻进效率高于钻爆法、TBM法开挖掘进效率,可实现超前探测,在钻爆法、TBM法施工隧洞的超前探测方面具备可行性。

关键词:深埋长隧洞;超前地质预报;水平定向钻机;定向钻探技术;引江补汉工程

中图分类号:P634.7;TV554 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0030-07

Preliminary probe into application of directional drilling technology in geological forecast of tunnels

XU Qi^{1,2,3}, YE Jian^{1,2}, ZHANG Guangxia^{1,2}, JIA Jianhong^{1,2}

(1. Three Gorges Geotechnical Consultants Co., Ltd., (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China; 2. Changjiang Design Group Co., Ltd., Wuhan Hubei 430010, China; 3. Key Laboratory of Water Grid Project and Regulation, Ministry of Water Resources, Wuhan Hubei 430010, China)

Abstract: It is difficult to achieve a clear understanding during the survey period before deep buried long tunnels construction, which may affect the construction of the project to some extent. The application of directional drilling technology for the geological forecasts before the construction of deep buried long tunnels is proposed, in which the good guiding function and rapid long distance drilling characteristics are utilized to achieve advanced detection of major risks ahead of tunnel excavation, and it can compensate for the shortcomings of conventional long-distance advanced detections. In this paper, different types of drills are used for geological forecast of 7# tunnel in the water diversion project from Yangtze River to Hanjiang River based on different geological conditions and prediction priorities, moreover, the advanced forecast results and the geological conditions revealed by excavation are compared and analyzed. It is thought that the directional drilling application is aiming to detect major disaster bodies in front of the tunnel excavation face in advance, and the goals can be generally achieved combining the drilling characteristics and physical measures. Furthermore, the timeliness of forecast can be improved while drilling without coring. Based on the current technological level, the efficiency of directional drilling is higher than tunnel excavation of blasting and TBM method, which is feasible in the advanced detection of tunnels constructed by blasting or TBM method.

Key words: deep buried long tunnel; geological forecast in advance; horizontal directional drill; directional drilling technology; the water diversion project from Yangtze River to Hanjiang River

收稿日期:2024-10-08; 修回日期:2024-12-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.03.004

基金项目:长江设计集团有限公司科研项目“复杂地质条件下水工深埋长隧洞涌水突泥防治关键技术研究”(编号:CX2023Z02-1)

第一作者:许琦,男,土家族,1982年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,主要从事水利水电工程地质勘察工作,湖北省武汉市洪山区光谷创业街99号,xuqi1125@126.com。

引用格式:许琦,叶健,张广厦,等.定向钻探技术在隧洞超前地质预报中的应用初探[J].钻探工程,2025,52(3):30-36.

XU Qi, YE Jian, ZHANG Guangxia, et al. Preliminary probe into application of directional drilling technology in geological forecast of tunnels[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 30-36.

0 引言

随着定向钻探技术的发展,定向钻机可以在煤、岩层中成孔达千米以上,在煤矿井下以瓦斯抽放、探排水、城市非开挖、管道穿越工程中广泛应用^[1-4]。水平定向钻探技术也逐渐在工程勘察领域^[5-6]中开展应用。在交通运输、水利水电等隧洞的工程地质勘察中,通常是沿隧洞线路布置垂直勘探孔采取岩心、原位测试、取样试验进行,由于垂直孔只能是“点”式的勘察,导致在隧洞这种线性工程勘察中效率低、成本高。国内外众多学者开始研究将水平定向钻探技术引入工程地质勘察领域,以实现将垂直孔的“点”式勘察转为沿隧洞轴线的“线”式勘察。

陈湘生等^[7]、严金秀^[8]在论述长大隧道建设面临的挑战与关键技术时,大力提倡采用水平定向钻进技术加孔内物探技术对隧道进行地质勘察。挪威的Bømlafjord海底隧道进行了长900 m的水平定向取心,并成功地检测出一个深度侵蚀甬道^[9]。我国在天山胜利隧道勘察过程中采用了水平定向钻进技术,钻进深度2271 m,对钻进速度、钻进压力等参数进行了精确记录,并进行了间断取心、水压致裂、综合测井和孔内电视等工作^[10],获取了围岩岩性变化、断层破碎带范围等地质条件。针对川藏铁路沿线地形高差大,隧道长、埋深大,交通条件极差,竖向深孔勘探无法实施等难题,研究人员提出开展超长绳索取心定向钻探器具与装备研发、钻进技术与工艺研发、勘探模式研究及铁路超深定向勘探应用与示范工程^[11-12]。郑君等^[13]结合定向钻进技术在引江补汉工程输水隧洞勘察应用情况,提出钻进实施过程中的“取心钻进+定向钻进”交替进行的长距离水平复合定向钻进施工工艺方法。

定向钻探技术在工程勘察领域应用日趋成熟,但是未见应用于深埋长隧洞超前地质预报相关研

究,本文结合引江补汉工程7号施工支洞,探索将定向钻探技术应用于隧洞超前地质预报工作。

1 工程概况及基本地质条件

1.1 工程概况

引江补汉工程作为南水北调中线工程的后续水源,工程将打通长江三峡向我国北方地区的输水通道,具有重大战略意义^[14]。输水线路长194.3 km,全程采用有压单洞自流输水,过水洞径10.2 m(等效洞径)。采用钻爆法和TBM法施工,钻爆段一般开挖洞径12.0~12.6 m,TBM开挖洞径12.2 m,为国内在建洞径最大的长距离有压引调水隧洞^[15]。其中7号施工支洞位于TBM4、TBM5之间,隧洞长约3680 m,进口底板高程445 m,与输水隧洞相交处高程约105.48 m,高差约340 m,最大纵坡约9.3%采用钻爆法、TBM法施工,钻爆施工段为马蹄形断面,最大净断面尺寸12.6 m×12.6 m(宽×高),TBM施工段为圆形断面,开挖直径12.2 m。

1.2 基本地质条件

7号施工支洞位于黄陵断穹北缘可溶岩盖层区,区内地层为震旦系(Z)—奥陶系(O)地层,整体为一套中厚—厚层碳酸盐岩,岩层整体呈单斜展布,NE缓倾,倾角8°~15°。地表三游洞组(ϵ_3sn)、南津关组(O_1n)强可溶岩段岩溶化程度高,峰丛、岩溶洼地、落水洞等广泛分布,线路附近出露多个岩溶大泉。线路区呈多层含水结构特征,分别为寒武系天河版组、石龙洞组(ϵ_1t+sh)岩溶含水层,寒武系上统—奥陶系下统(ϵ_3+O_1)岩溶含水层,奥陶系中上统(O_{2+3})岩溶含水层,地下水具多层级水系统特征,见图1。

2 研究背景

目前工程中常采用的超前地质预报方法主要

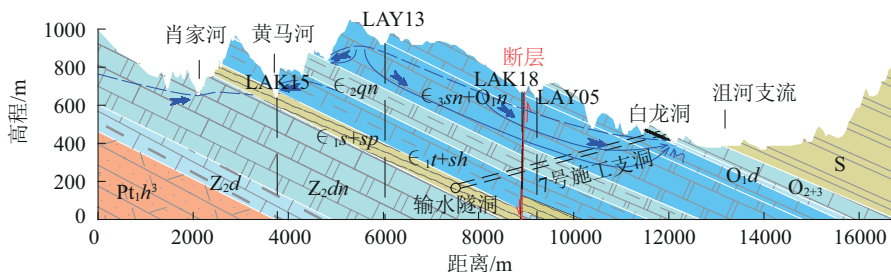


图1 黄陵断穹北翼盖层岩溶水文地质结构剖面示意

Fig.1 Karst hydrogeological structure profile of the north wing of Huangling Fault Dome

有地质调查法、物探法和超前钻孔法等,每一方法都有其特定的适用条件,现行业规程、规范没有明确何种条件下采用那一类方法,但不同地质条件下选择合适的预报方法则可以达到事半功倍的效果。针对地质条件复杂、隧洞施工风险大等特点,不少研究人员都提出了综合超前地质预报技术的思想^[16-17],即以地质分析为核心,多种预报方法相结合,地表和地下相结合,长、中、短距离预报相结合,做到相互补充和验证,见图2。

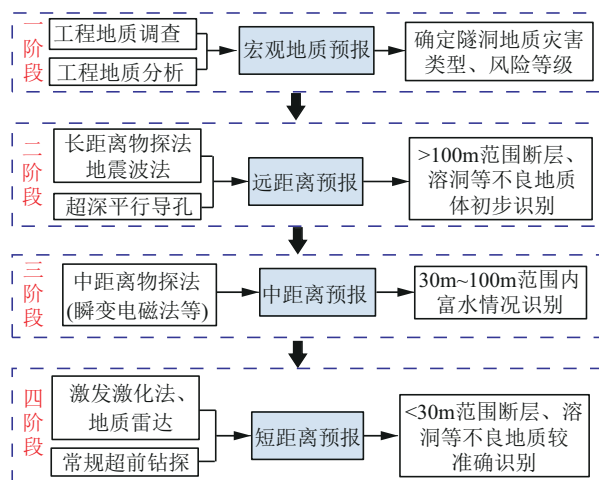


图2 隧洞综合超前地质预报流程

Fig.2 Flow chart of advanced comprehensive geological forecast method

对于深埋长隧洞,深部地质条件变化较大,地质分析具有一定局限性;物探测试具有多解性,在TBM施工条件下,受TBM空间及自身电磁系统影响,物探测试实用性受到多种限制;常规超前钻探其探测深度较小,一般在30~50 m,且需TBM停机进行作业,影响TBM工作效率。因此,在深埋长隧洞建设日益增多、TBM应用日趋广泛的背景下,充分利用定向钻探技术长距离钻进的特点,以超前探测开挖面前方不良地质特征,特别是宽大富水断裂带、岩溶管道系统等可能产生较为严重灾害的致灾构造空间分布,为后续短距离更准确识别定位及处理措施提供支撑,可弥补传统超前地质预报存在的不足。

7号施工支洞经方案优化研究,最大程度绕避了白龙洞岩溶管道系统排泄区。但其进口段穿奥陶系中上统(O_{2+3})岩溶含水层,隧洞遇短程岩溶管道系统产生涌水可能性较大;隧洞下穿寒武系上统一奥陶系下统(ϵ_3+O_1)岩溶含水层时,由于该含水

层发育白龙洞岩溶管道系统,隧洞可能遭遇白龙洞岩溶系统支管道而产生涌水突泥。为确保施工期安全,避免施工过程直接揭露岩溶管道系统,在隧洞穿(O_{2+3})岩溶含水层洞段布置CQZK1超前探测孔,穿寒武系上统一奥陶系下统(ϵ_3+O_1)岩溶含水层上部布置CQZK2超前探测孔,见图3。

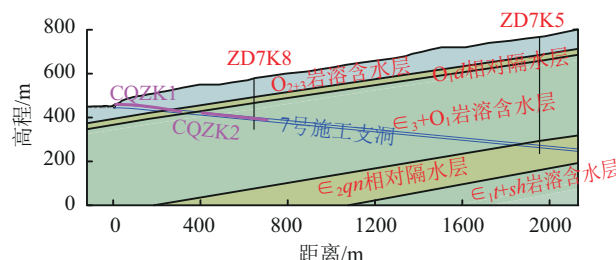


图3 超前钻孔布置示意

Fig.3 Layout of drilling in advance

为减少勘察成本、提高勘察效率,“钻进+靶点取心+地质测井”的综合勘察技术已被证明先进有效^[18]。在超前地质预报应用中,其时效性要求更高,为分析对比不同钻机类型、不同方法下超前预报效果,根据两个钻孔涉及到不同的地质条件设计不同的实施方案。CQZK1孔采用冲击钻,不具备定向、取心功能,钻孔布置充分利用隧洞自身坡降与隧洞轴线协调一致;由于CQZK1孔穿过 O_{2+3} 岩组地层岩性较复杂,涉及多层页岩、灰岩,为此,设计全孔进行声波、孔内电视测试,并于钻进特征进行综合分析。CQZK2孔采用定向钻机,具备定向纠偏及取心功能,地层岩性较为单一,主要为白云岩,设计根据钻进过程特征在出现较大异常段进行间断取心及声波、钻孔电视测试。

3 隧洞进口超前钻孔实施情况

3.1 钻孔实施情况

CQZK1孔完钻孔深300 m;终孔直径 ≥ 100 mm,全孔采用空气潜孔锤钻进工艺完成,加设扶正器,经现场测斜,钻孔终点处垂直向下偏差为4.99°(约8.6%),与隧洞坡降基本一致,施工过程见图4。

3.2 超前探测情况与开挖揭露对比分析

CQZK1钻孔对应隧洞围岩主要为奥陶系中上统地层,为泥质灰岩、页岩。超前钻孔目的为超前探测隧洞附近奥陶系中上统(O_{2+3})含水层是否发育短程岩溶管道系统及页岩段范围。

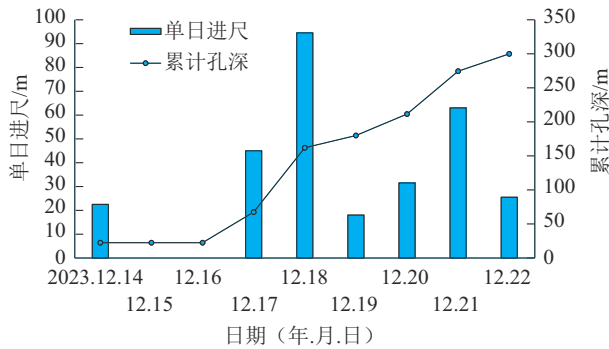


图4 CQZK1孔实施过程

Fig.4 Drilling process of Hole CQZK1

钻孔钻进过程中,钻进速度均匀,无卡钻、掉钻、涌水、漏水现象,同时孔内电视测试显示岩体整体微新,结构面以层面为主,推测该段无岩溶管道系统发育;2024年1月,7号施工支洞掘进至K0+300附近,揭露围岩整体微新,未见较大溶洞、溶缝等,掘进过程未产生岩溶管道、涌水突泥现象。

根据钻孔与隧洞空间关系,综合分析钻孔岩屑、钻孔声波、孔内电视特征,见图5。页岩段岩屑主要为岩粉夹少量页岩碎石,声波平均值约3890 m/s,孔内电视岩体层面清晰可见;灰岩整体为岩粉,局部因夹灰岩起伏较大,声波平均值约5300 m/s,相对平稳;预测页岩段位于隧洞桩号K0+160~K0+207段,为IV、V类围岩,实际开挖揭露相应页岩IV、V类围岩位于桩号K0+158~K0+202段,超前探测成果与开挖揭露条件基本一致。

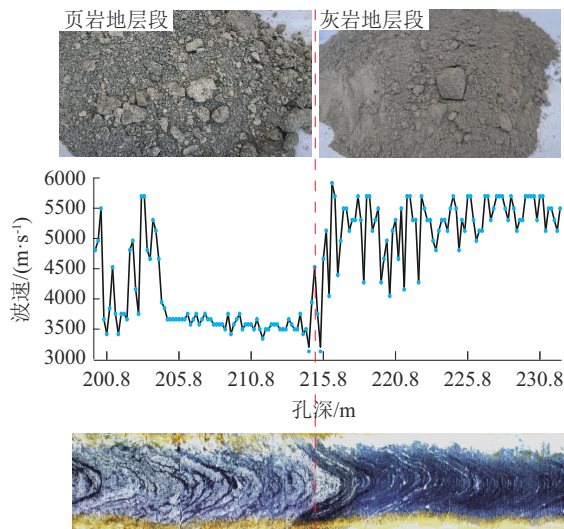


图5 CQZK1孔揭露页岩、灰岩特征

Fig.5 The characteristics of shale and limestone exposed by Hole CQZK1

3.3 存在的问题

(1)冲击钻效率较高,但不具备纠偏功能,实施过程中难以有效控制偏移度,其钻进轨迹随着孔深加大向下偏移逐渐加大,因此,其不适用于水平或纵坡较小隧洞,且孔深不宜过大。

(2)由于冲击钻仅能采集岩屑,对重要地层、关键断层的判断必须结合物探测试综合分析。

4 隧洞洞身段定向钻孔实施情况

4.1 钻孔实施情况

为不占用开挖工作面以减少超前钻孔对隧洞开挖的影响,于隧洞桩号K0+410右侧边墙实施作业耳洞,耳洞尺寸设置为6 m(长)×4 m(高)×3 m(宽),耳洞开挖及支护2 d完成。因隧洞内施工条件限制,采用尺寸较小的分体式钻机,最初采用HRD800F型电动液压岩心钻机,钻机参考水平钻进深度800 m,最大转速1180 r/min,最大扭矩4200 N·m。试钻后因故障调试及工期限制,改用HRD3S型电动液压岩心钻机,钻机参考水平钻进深度700 m,最大转速560 r/min,最大扭矩2400 N·m,见图6。



图6 水平定向钻孔施工现场

Fig.6 Construction field of horizontal directional drilling

钻孔平行于隧洞轴线布置,角度为5°向下,钻孔定向采用YSX18型矿用随钻测量系统,该系统包含探棒、通缆钻杆、计算机定向系统、传输线缆等组成,自带LED屏显示开孔俯仰角、方位角等,采用高精度三轴光纤陀螺寻北、测量开孔、方位角精度高、不受磁场影响。CQZK2孔累计进尺270.4 m,钻探实施过程见图7。由于实施过程中与爆破开挖存在交叉作业干扰,钻进效率受到一定程度影响,单日最大进尺约31.3 m,平均单日进尺约13.5 m。

4.2 超前探测情况与开挖揭露对比分析

CQZK2孔探测段整体为奥陶系南津关组

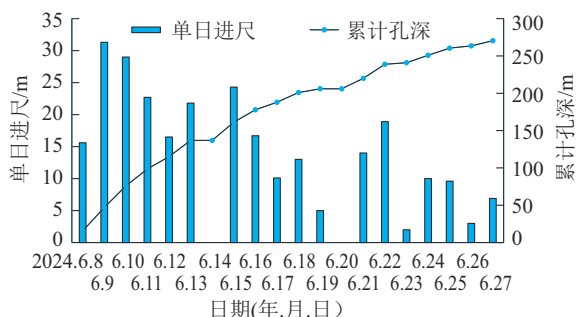


图7 CQZK2孔实施过程

Fig.7 Drilling process of Hole CQZK2

(O_1n)、寒武系三游洞组(ϵ_3sn)中厚层灰岩、白云岩。本孔旨在超前探测隧洞附近寒武系上统一奥陶系下统(ϵ_3+O_1)岩溶含水层是否发育岩溶管道系统。

钻进过程中钻机转速:226 r/min(滑动钻进)、326 r/min(复合钻进),泵量280 L/min,螺杆马达压力2~4 MPa。钻孔施工整体平稳,钻进过程中无卡钻、掉钻、涌水等异常情况;在钻进过程中,对应桩号K0+592~K+606、K0+647~K+650段,钻进回水量明显小于进水量(图8)。且该孔段附近孔内返水由常规灰白色变成土黄色,推测该处存在溶缝等不良地质体,隧洞开挖可能产生线状流水、涌水问题。

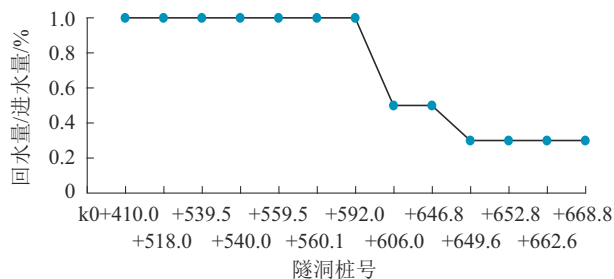


图8 CQZK2孔回水量过程

Fig.8 Return water process curve of Hole CQZK2

隧洞开挖至桩号K0+606.8附近时,根据CQZK2孔探测成果,在隧洞开挖掌子面实施了50 m超前钻探进行短距离预报,同样揭示K0+606.8附近存在溶缝,并赋水。在加密炮孔及锚杆孔探测时,揭露溶缝产生涌水,瞬时出水量约3000 m³/d,随即进行灌浆处理后顺利穿过该洞段。隧洞开挖至K0+647~K+650段仅揭露规模较小的溶缝。

技术人员很难在超前钻孔不取心、无物探测试条件下对不良地质体做出精确判断,但定向钻探技术作为长距离预报手段,根据钻进特征变化可对重要不良地质体的分布、性质进行宏观预测,满足预报需要。

4.3 存在的问题

(1)钻进与隧洞爆破开挖交叉干扰,爆破时,需停止作业进行避让,影响作业效率。

(2)钻孔施工所需风、水、电通常与隧洞爆破开挖共用一套系统,钻机易受施工因素影响而停待。

(3)钻前对钻机准备不足,试钻后因故障调试导致工期加长而更换钻机,增加施工时间。

5 基于定向钻技术的超前地质预报可行性探讨

5.1 钻爆法施工效率估算

引江补汉已施工支洞围岩涵盖了岩浆岩、变质岩、沉积岩三大岩类,岩性涉及花岗岩、片麻岩、灰岩、白云岩、粉砂岩、页岩,围岩类别II类~V类均有涉及。按照不同围岩类别,分别统计了相应的开挖施工进度,见图9。统计表明,在洞径(8~12 m)条件下,II类、III类、IV类、V类围岩平均开挖进尺分别约5、3.6、2.4和1.2 m/d。

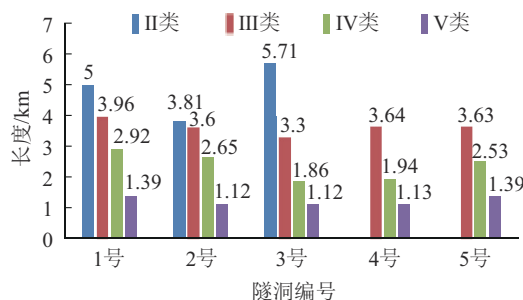


图9 不同围岩类别钻爆开挖效率统计

Fig.9 Statistical chart of excavation efficiency in different surrounding rocks

5.2 TBM掘进效率估算

由于TBM掘进效率与地质条件密切相关,TBM施工中不可避免遭遇到断层破碎带、涌水突泥、软岩变形及超硬岩等难掘洞段;同时,TBM掘进效率还受到隧洞洞径等因素影响;一般条件下TBM掘进效率变化较大。杜立杰^[19]结合我国30多年来TBM设计与施工技术,论述了大小直径敞开式、双护盾、单护盾TBM以及超长隧洞、超大埋深隧洞集群TBM、斜井TBM施工工程经验和技巧积累,敞开式和护盾式TBM最高月进尺1226 m和1868 m,TBM平均月进尺约600 m。孙振川等^[20]总结了国内不同时间TBM应用情况,根据20个项目实施情况,隧洞TBM一般掘进效率约200 m/月~600 m/月,平均约400 m/月,见图10。

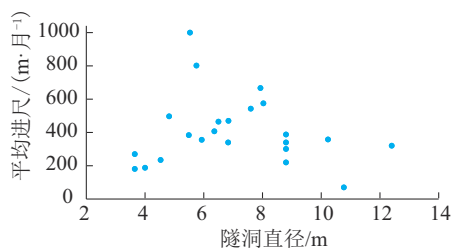


图10 不同工程TBM掘进效率分布

Fig.10 Diagram of TBM excavation efficiency of different projects

研究认为,除地质复杂及高风险隧道,一般地质条件下的隧道施工,敞开式TBM和护盾式TBM掘进效率分别约300~400、400~500 m/月,见表1^[21]。

表1 不同地质条件下TBM掘进效率
Table 1 TBM excavation efficiency under different geological conditions

掘进机	掘进效率/(m·月 ⁻¹)			
类型	I类围岩	II类围岩	III类围岩	IV类围岩
敞开式	230~250	360~420	400~480	300~330
护盾式	270~300	420~450	520~550	360~400

综合上述成果,结合正在实施TBM调研成果,一般条件下TBM掘进效率按300~500 m/月考虑。

5.3 定向钻进效率估算

徐正宣等^[11]对川藏铁路多个全孔绳索取心定向勘探钻孔的钻进情况进行了统计;其中500 m以上定向钻孔20个,钻进平均速率约326 m/月,最快约688 m/月;超过1000 m超深水平钻孔5个,钻进平均速率约363 m/月,最快约713 m/月。结合引江补汉7号施工支洞实施情况,考虑隧洞内有限空间对钻机机型限制,定向钻孔钻进效率受爆破开挖等因素影响,干扰较为频繁,平均钻进速度按15 m/d计算;TBM施工环境下超前钻探利用开挖耳洞作业,不存在与爆破开挖交叉作业干扰问题,其钻进效率按30 m/d计算。

5.4 不同施工条件可行性探讨

考虑爆破影响,爆破开挖段施工作业耳洞滞后掌子面约20 m,耳洞开挖支护时间按2 d估算,按一般条件下约10 m洞径,II类~IV类围岩隧洞开挖进尺约2.4~5 m/d。估算5 d后钻孔可超过爆破掌子面,实现对开挖面前方地质条件预测,见图11。

TBM整机长度按200 m计算,作业耳洞位于

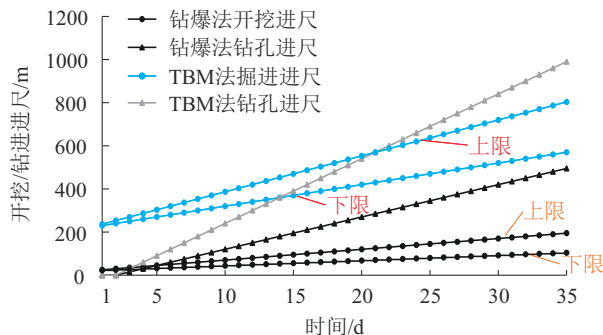


图11 不同条件下超前钻探与开挖关系

Fig.11 Relationship diagram between advanced drilling and excavation under different conditions

TBM尾部,考虑耳洞爆破开挖影响,耳洞滞后掌子面约220 m;耳洞开挖支护时间按2 d计算。估算21 d后钻孔可超过掘进掌子面,实现对掌子面前方地质条件预测,参见图10。为充分发挥超前钻孔利用率,超前钻孔孔深较钻爆法洞段明显增大。

6 结论及建议

(1)本文仅是采用超深孔技术对隧洞超前地质预报的初步探索,受现场不同因素干扰,部分工作未实施完成,综合分析钻进过程特征、岩屑特征及物探测试成果,基本实现了超前探测设计目的。基于已有研究,在钻爆法、TBM施工环境下,定向钻机可利用其速率优势实现对隧洞超前探测,由于地质体的非均一性及钻孔获取围岩地质信息的局限性,有必要研究相应的物探测试技术,实现对定向钻孔一定范围内不良地质体的综合探测分析。

(2)定向钻探所需费用较高,不可能全洞段实施,其工作布置应建立在对隧洞宏观地质结构已具备一定认识基础上针对性布置,其目的不在于全面预测,不宜追求面面俱到,主要针对岩溶管道系统、宽大断层带及关键地质界线等,后续可有针对性的进行短距离预报。

(3)考虑超前钻探工作的时效性,一般条件下,钻孔的目的层以外孔段可不取心要求,以最大程度提高效率,结合钻进特征、物探测试等综合手段实现超前探测目的。定向钻孔作业时间相对较长,钻孔与隧洞开挖交叉作业,实施前参建各方应充分达成一致,作业耳洞的布置、钻机的性能及相应尺寸等都应在实施前做统一规划,以提高工作效率。

参考文献(References):

- [1] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
MA Baosong. The Science of Trenchless Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [2] 熊灵阳. 瓦斯隧道的地质勘察问题探讨[J]. 铁道工程学报, 2013(4): 74-78.
XIONG Lingyang. Discussion on problems of geological exploration for gas tunnels[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013(4): 74-78.
- [3] 文旭. 水平定向钻大深度穿越海上航道的控向方案[J]. 工程建设与设计, 2019(11): 229-231.
WEN Xu. Direction control scheme for horizontal directional crossing deep sea channel[J]. Construction & Design for Project, 2019(11): 229-231.
- [4] 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 Zhentong. Adaptability analysis of tunnel directional drilling system in tunnel horizontal exploration engineering [J]. Drilling Engineering, 2023, 50 (5) : 116-124.
- [5] 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.
- [6] 卢纯青. 水平定向钻技术在岩土工程勘察中的应用研究[J]. 福建建设科技, 2023(2): 51-55.
LU Chunqing. Application of horizontal directional drilling technology in geotechnical engineering investigation[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2023(2): 51-55.
- [7] 陈湘生, 徐志豪, 包小华, 等. 中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 1-14.
CHEN Xiangsheng, XU Zhihao, BAO Xiaohua, et al. Challenges and technological breakthroughs in tunnel construction in China[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 1-14.
- [8] 严金秀. 大埋深特长山岭隧道技术挑战及对策[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3): 1-5.
YAN Jinxiu. Technical challenges of super-long mountainous tunnels at great depth [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(3): 1-5.
- [9] Dammyr O, Nilsen B, Gollegger J. Feasibility of tunnel boring through weakness zones in deep Norwegian subsea tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 69: 133-146.
- [10] 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, 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.
- [11] 徐正宣, 刘建国, 吴金生, 等. 超深定向钻探技术在川藏铁路隧道勘察中的应用[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(2): 21-29.
XU Zhengxuan, LIU Jianguo, WU Jinsheng, et al. Application of ultra-deep directional drilling technology in the investigation of Sichuan-Tibet Railway Tunnel[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(2): 21-29.
- [12] 肖华, 刘建国, 徐正宣, 等. 川藏铁路勘察超长水平孔绳索取心钻探技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(5): 18-26.
XIAO Hua, LIU Jianguo, XU Zhengxuan, et al. Wire-line core drilling technology of ultra-long horizontal investigation boreholes for the Sichuan-Tibet Railway[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 18-26.
- [13] 郑君, 颜谢材, 窦斌, 等. 长距离水平定向钻探在引江补汉地质勘察工程中的应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 205-210.
ZHENG Jun, YAN Xiecai, DOU Bin, et al. Application of long distance horizontal directional drilling in geological exploration project of Yangtze-replenish-Han Project[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 205-210.
- [14] 钮新强, 万蕙, 刘琪. 引江补汉工程关键技术挑战[J]. 中国水利, 2022(18): 15-17, 11.
NIU Xinqiang, WAN Hui, LIU Qi. Key technical issues and challenges of water diversion project from the three gorges reservoir to the Hanjiang River[J]. China Water Resources, 2022 (18): 15-17, 11.
- [15] 长江设计集团有限公司. 引江补汉工程可行性研究报告[R]. 武汉: 长江设计集团有限公司, 2021.
Changjiang Design Group Co., Ltd. Feasibility study report on the water diversion project from Yangtze River to Hanjiang River [R]. Wuhan: Changjiang Design Group Co., Ltd., 2021.
- [16] 洪庆仁, 吴勇, 卓勇, 等. 综合超前地质预报在大秦岭隧道中的应用[J]. 人民长江, 2017, 48(7): 56-59.
HONG Qingren, WU Yong, ZHUO Yong, et al. Application of integrated advance geological forecast in daqingling tunnel[J]. Yangtze River, 2017, 48(7): 56-59.
- [17] 张杨, 周黎明, 夏波. 滇中引水工程隧洞综合超前地质预报分析及应用[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(10): 124-132, 139.
ZHANG Yang, ZHOU Liming, XIA Bo. Analysis and application of comprehensive advanced geological prediction technologies for tunnel of central Yunnan water diversion project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024, 41 (10) : 124-132, 139.
- [18] 王汇明, 李军, 李勇, 等. 狮子洋主航道特大水垂比大位移科学钻孔施工实践[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 135-141.
WANG Huiming, LI Jun, LI Yong, et al. Novel drilling technology for an extended reach horizontal borehole with high horizontal displacement/vertical depth ratio in the Shiziyang main channel[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 135-141.
- [19] 杜立杰. 中国TBM施工技术进展、挑战及对策[J]. 隧道建设, 2017, 37(9): 1063-1075.
DU Lijie. Progresses, challenges and countermeasures for TBM construction technology in China [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(9): 1063-1075.
- [20] 孙振川, 陈馈, 杨延栋. 山区复杂地质长大隧道岩石掘进机(TBM)及其掘进关键技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
SUN Zhenchuan, CHEN Kui, YANG Yandong. Key Technologies for Rock Tunnel Boring Machine and Long-and-large Tunnelling in Mountainous Complex Geologies [M]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [21] 中国科技产业化促进会. 岩石隧道掘进机法技术规程: T/CSPSTC 54—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
China Association for the Promotion of Science and Technology Industrialization. Technical specification for rock tunnel boring machine method: T/CSPSTC 54—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

(编辑 王文)