

北京地铁 17 号线朝十区间盾尾刷更换技术研究

常润安¹ 胡俊²

(1. 北京正远监理咨询有限公司, 北京 100102; 2. 海南大学, 海南海口 570228)

摘要: 对北京地铁 17 号线朝阳港站-十里河站区间的盾尾刷更换原因和施工风险进行了分析, 给出了风险应对措施; 详细介绍了该工法的施工工艺、施工参数和主要应急措施等。以北京地铁 17 号线朝阳港站-十里河站区间左线盾构机更换盾尾刷为工程背景, 介绍了一种盾尾刷更换的施工方法, 该方法在盾构机掘进至更换盾尾刷位置时, 通过盾体和管片上的注浆孔先后向盾尾、土仓和盾体四周注高粘度膨润土及注聚氨酯, 并施做了止水环箍; 之后打开管片更换盾尾刷并涂盾尾油脂, 管片拼装后盾构机恢复掘进。该工法在实际工程中得到了成功应用, 取得了很好的实施效果, 可为今后类似工程提供技术参考依据。

关键词: 盾尾刷; 北京地铁; 止水加固; 尾刷更换; 应急措施

中图分类号: U455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)S1-0213-07

The replacement of shield tail brushes for Chaoyang section of Beijing metro line 17

Chang Run'an¹ Hu Jun²

(1. Beijing Zhang yuan Supervision and Consulting Co., Ltd., Beijing 100102, China; 2. Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Analyzed the reasons for the replacement of the shield tail brush and construction risks in the section between Chaoyang Port Station and Shilihe Station of Beijing Metro Line 17, and provided risk countermeasures; the construction technology, construction parameters and main emergency measures of this construction method are introduced in detail. Taking the replacement of the shield tail brush of the shield machine on the left line of the Chaoyanggang Station-Shilihe Station section of Beijing Metro Line 17 as the engineering background, a construction method of shield tail brush replacement is introduced. In this method, when the shield machine is tunneling to the position of replacing the shield tail brush, inject high-viscosity bentonite and polyurethane through the grouting holes on the shield body and the segments of the shield body, the soil bunker and the surroundings of the shield body, and make a water stop ring; then open the segment to replace the shield tail brush The shield tail grease is applied and the shield machine resumes driving after assembling the segments. The construction method has been successfully applied in actual projects and achieved good implementation results, which can provide technical reference for similar projects in the future.

Keywords: shield tail brush; Beijing metro; waterstop reinforcement; tail brush replacement; emergency measures

E-mail: 183633299@qq.com

引 言

目前, 使用盾构法修建的城市地铁隧道越来越多, 越江海盾构隧道工程呈现出“高水压、长距离、大直径”的趋势和特点, 对盾构隧道工程的安全问

题提出了更为严峻的挑战。如何防治与控制盾尾渗漏问题是盾构隧道施工中的一个关键课题^[1-3]。在盾构掘进的过程中, 管片的拼装是在盾壳的保护下进行的, 因此盾壳的内径与隧道的外径直接存在间隙, 由于盾尾间隙的存在, 需要做好相应的盾尾密封, 否则会出现渗漏等难以挽回的损失。由于管片拼装不当、盾构长距离掘进等原因, 盾尾刷会不可避免地出现损坏, 盾尾刷的损坏是导致盾尾密封性下降的主要原因, 严重的会影响盾构正常掘进^[4-6]。在这种情况下, 需对损坏的盾尾刷进行更换。盾尾刷更换时, 常用的盾尾四周土体加固方式主要为两种: 注浆法和冻结法。工程实践中常用注浆法, 采取加

基金项目: 海南省重大科技计划(ZDKJ201803)、海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC148, 2019RC351)和芜湖市科技计划(2019yf21)

作者简介: 常润安, 学士, 工程师

通讯作者: 胡俊, 博士, 副教授

收稿日期: 2020-06-15

大盾尾同步注浆量以及改变注浆配比以加快浆液凝固等措施^[7-10]。相较于注浆帷幕,冻结法形成的冻土帷幕具有较好的连续性、均匀性、封水性和柔韧性,且强度高^[11-15],但是冻结法价格昂贵。

本文以北京地铁 17 号线朝阳港站-十里河站区间左线盾构机更换盾尾刷为工程背景,介绍一种盾尾刷更换施工方法,对该工程盾尾刷更换原因和施工风险进行分析,给出风险应对措施;详细介绍该工法的施工工艺、施工参数、主要应急措施和最终实施效果等,为今后类似工程提供技术参考依据。

1 工程概况

1.1 区间概况

北京地铁 17 号线朝阳港站~十里河站区间盾构机由东南四环向东南三环方向掘进。区间工程设计所采用的施工方法包括明挖法、盾构法及矿山法。整个区间共设置 5 处联络通道。其中盾构区间起终里程:左 K12+658.162~左 K16+174.717,全长 3517m;右 K12+658.162~右 K16+113.851,全长 3456m。区间最小转弯半径为 400m,最大转弯半径为 3000m。工程在实施后进行了变更,在区间上大羊坊路与西大望路南延相交路口南侧增设了十八里店站,新增车站沿大羊坊路设置。线路东南-西北走向敷设,车站设计起止点里程为:右 K14+553.200~右 K14+852.400。区间平面图如图 1 所示。



图 1 区间平面图

Fig.1 Interval plan

1.2 左线盾构机停机位置

本工程左右线盾构机由朝阳港站端头始发,区间左线 3516.56m(共 2931 环)、右线 3455.689m(共 2880 环)。长距离掘进尾刷磨损量已到达极限(根据施工经验盾尾刷使用寿命约为 2km)。左线盾

构机目前已经掘进 2138.4m,距掘进至十里河站接收井剩余 1378.16m。依据地质勘测可知,新加十八里店站之后的区间地层为有水地层(水位在盾构开挖范围刀盘中心位置)。为了保证施工安全,盾构机尾刷需要进行更换。同时考虑到施工安全问题(地表沉降要求、地面是否有管线、建筑物)、施工工期等因素;故选择在十八里店站内距第二道地连墙前 40m 进行左线盾尾刷的更换(只更换 2 道尾刷,不更换最后一道钢板束)。盾尾刷更换示意图如图 2 所示。

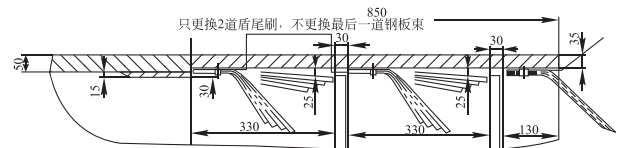


图 2 盾尾刷更换示意图

Fig.2 Shield tail brush replacement diagram

更换盾尾刷位置为始发后 2138.4m(1782 环),位于新增十八里店车站围护结构(地连墙)内。更换位置地表无构(建)筑物,管线改迁已完成。更换尾刷时,避免施工期间此位置地表行走重型机械、堆载重物,保证更换盾尾刷施工期间的安全。左线盾构机停机位置平面图如图 3 所示。

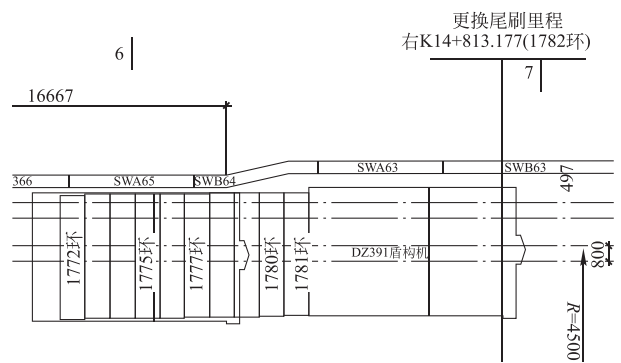


图 3 左线盾构机停机位置平面图

Fig.3 Floor Plan of Stop Position of Left Line Shield Machine

1.3 工程地质条件

更换盾尾刷位置隧道顶部地质从上往下为:杂填土、素填土、粉质黏土、黏质粉土、粉砂、粉质黏土、黏质粉土。更换盾尾刷位置隧道洞身开挖范围内从上往下为:黏质粉土、粉细砂、黏质粉土。盾构机埋深与水位线关系:盾构机从地面距隧道拱顶埋深为 10.625m,地下水位线在 18.25~22.4m,位于隧道结构底板下 2.21~4.67m。左右线停机位置地质剖面图如图 4 所示。

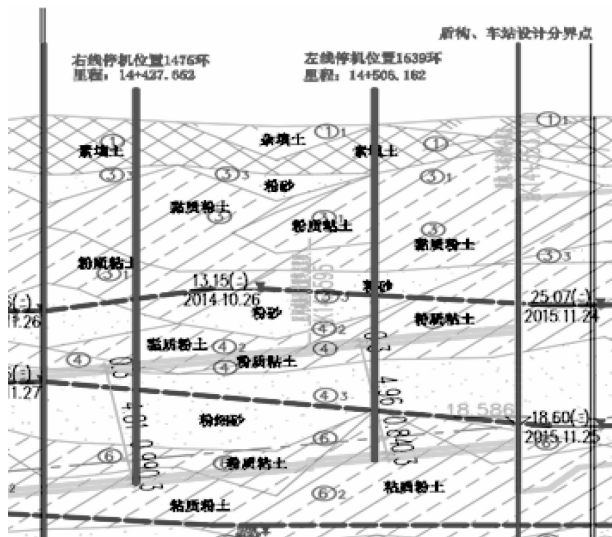


图 4 左右线停机位置地质剖面图

Fig. 4 Geological profile of parking position of left and right line of shield machine

2 更换盾尾刷施工风险分析及措施

2.1 风险分析

因更换盾尾刷需拆除管片，刨除及焊接尾刷需要持续一段时间的动火作业，所以更换盾尾刷存在一定的风险性，具体分析如下：

(1) 长时间停机保压具有一定的风险。

- 1) 地面沉降较大，甚至出现地面坍塌等情况；
- 2) 盾构机出现下沉、后退和“栽头”现象；
- 3) 盾尾出现渗漏，甚至涌水涌砂；
- 4) 盾构机与周围土体固结，导致盾构机被裹死；
- 5) 注浆管路、泡沫管路堵塞，刀盘结泥饼。

(2) 管片拆卸时，拆卸吊运具有一定的风险。

(3) 如发现盾构机顶部的盾尾刷需更换，人员高处作业存在风险。

(4) 盾尾刷更换动火作业时间长，易产生起火冒烟现象，具有一定的风险。

(5) 盾体上部尾刷刨除安装时可能掉落，对作业人员造成危险，具有一定的风险。

2.2 相应措施

为避免长时间停机出现的风险，停机时应采取以下措施：

(1) 利用高黏度膨润土置换土仓内渣土，并隔一段时间(4 小时左右)在土压下降时利用注浆泵向土仓内泵送膨润土。

(2) 利用同步注浆系统和盾体径向孔，向盾体周围及盾尾加注膨润土，防止盾构机下沉后退、盾构

抱死，并在停机前，保持抬头趋势(姿态前端比后端高约 1~2cm)。

(3) 值班人员对盾尾勤加检查，并在停机后最后一环增加盾尾油脂用量，停机后每天正常补脂一圈。

(4) 管片拆除过程中持续对盾尾情况进行观察，发现盾尾出现渗漏水情况立即采取注浆等措施。管片拆除需按照顺序，逐块进行。

(5) 拆除相应块管片后，沿盾尾一周用海绵条或棉纱堵塞盾尾刷与管片的缝隙。

(6) 如在施工过程中出现严重的涌水、冒泥现象，必要时需立即安装管片、恢复掘进。出现极端涌水、涌浆等情况，可利用提前准备好的沙袋进行反压封堵，同时通过管片注浆孔进行聚氨酯注入。

(7) 作业人员佩戴防护用品，配备二次送风机，作业面保持良好通风。

(8) 动火作业前须履行动火审批手续并开具动火证，配备消防器材、看火人配备足量的沙袋。

(9) 上部尾刷如需更换，作业人员必须系安全绳并戴好安全帽，安全员监督作业过程，盾体下部严禁有人，防止物体掉落伤人。

(10) 盾构停机时间较长，盾构停机地层为粉细砂粉质黏土地层，提前调整好盾构姿态，盾构机保持抬头姿态停机。

3 更换盾尾刷施工方案

左线盾构机盾尾刷更换时，提前调整好盾构姿态，盾构机到达 1782 环后再继续向前推进，当油缸行程达到 1650mm 左右时停机，准备更换尾刷。施工人员、材料、机具均到位且技术交底完成后，开始下一步作业。

3.1 施工工艺流程

本工法施工工艺流程如图 5 所示。

3.2 更换盾尾刷施工控制

3.2.1 停机保压及止水施工

(1) 停机后土仓不断注入膨润土，维持上土仓压力在 1.1bar 左右，土压稳定后停止注入。

(2) 先通过盾尾 1#、4#路注浆管注入黏度 30s 以上膨润土 1~2 方，在通过盾体内预留径向注浆孔向外注黏度 30s 以上膨润土 1~2 方，防止盾体被浆液包裹。

(3) 膨润土注入完成后，向盾壳外(前、中盾)及盾尾后 2 环管片注入聚氨酯(60 桶左右)。聚氨酯注入压力控制在 0.25~0.45MPa 左右，引孔深度为管片壁后 20cm，注入顺序为沿管片圆周方向自下而上(6 孔)。



图 5 整个施工工艺流程图

Fig. 5 Flow chart of the entire construction process

(4) 在盾尾后 10 环、7 环、5 环位置二次注浆做止水环。二次注浆开孔深度为管片壁后 20cm，采用双液浆形式，A 液：B 液=1：1；浆液初凝时间控制在 20~30s，每环注浆顺序为自下而上(如果有点位无法注浆，则在相邻环找点位配合注入)，注浆压力不超过 0.5MPa。同时注意土仓顶部土压变化防止浆液流入土仓。

(5) 对注浆效果进行检查。在 1779 和 1780 环吊装孔装上球阀开孔，如有水流出则继续注浆直至开孔后无水流出为止，由白夜班班长确认。

停机后拆除管片前加固止水措施施工顺序如图 6 所示。

3.2.2 盾尾刷更换施工

止水达到理想效果且应急物资到位后，开始管片拆卸。施工顺序如下：

(1) 先拆除 K 块，K 块拔出一小段距离，如盾尾情况良好无渗水，则继续拆除 K 块，检查密封刷情况；如 K 块拔出一小段距离后盾尾发生流水、流砂，则立即拼回 K 块，并泵送盾尾油脂，在管片壁后继续注聚氨酯，直至盾尾无渗漏。

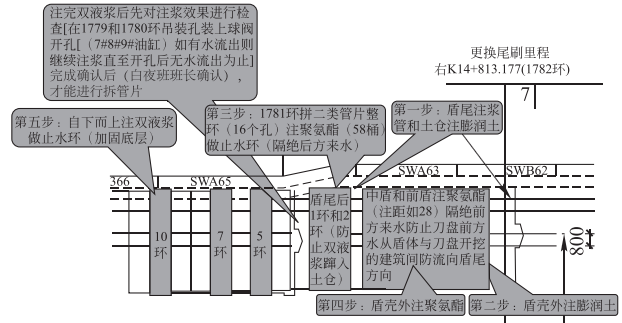


图 6 加固止水措施施工顺序图

Fig. 6 Construction sequence diagram of reinforcement water stop measures

(2) K 块拆除后检查盾尾密封刷损坏情况，并在第二道尾刷与管片间隙间塞入止水海绵条；若无异常情况，将剩余管片依次(B2 块、B1 块、A1 块、A3 块、A2 块)全部拆除，并在第二道尾刷与对应块管片间隙间塞入止水海绵条。

(3) 清理暴露在外的第一道油脂仓，彻底铲除油脂仓中旧盾尾油脂及水泥块。对外露二道旧尾刷进行刨除，砂轮机打磨焊接表面。检查尾刷对应盾尾油脂注入管路是否通畅，如有问题先行修复并做好记录。

(4) 在刨除部位焊接新尾刷，尾刷与尾刷之间形成压接，达到最大承压力，防止超限变形效果。尾刷连接平整紧密，底座钢板焊接饱满无气孔。

(5) 为防止盾体后退，在拆除 B1 块、A1 块、A3 块、A2 块管片的过程中，分别在拼装 4 点、12 点、7 点、9 点位置分别加一根带有封板的 1m 长工字钢(两端封口)。为防止 4 点位和 12 点位工字钢顶撑掉落，需加 L 形挂钩固定。

(6) 尾刷更换完成检查合格后，在盾尾刷钢丝束层与层之间人工涂抹手抹油脂，油脂填入饱满，经检查合格后方可安装管片。管片安装完成后，继续进行泵送油脂工作，直到油脂充满尾刷油脂腔内(约 5~6 桶)。

3.2.3 涂抹油脂

盾尾刷更换完成检查合格后，在盾尾刷钢丝束层与层之间人工涂抹手抹油脂，油脂填入饱满，经检查合格后方可安装管片。手抹油脂时要严格按照图 7 手抹油脂工艺流程施工。

3.2.4 管片拼装

拼装盾尾内管片时，管片拼装人员通过伸缩管片拼装机油缸调整管片，盾尾间隙在 50mm 左右且与停机环无明显错台。拼装配合人员安装紧固盾尾环和停机环管片螺栓并伸出对应点位推进油缸顶住管

片,依次按正常顺序安装管片,安装完成在油脂腔内手动注脂至 4bar,恢复掘进,完成尾刷更换。

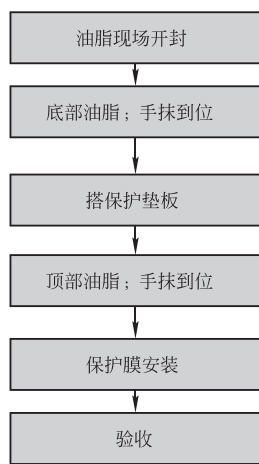


图 7 手抹油脂工艺流程图

Fig. 7 Hand wipe grease flow chart

3.3 主要应急措施

3.3.1 盾尾涌砂涌水

管片拆除后及盾尾刷更换的过程中,盾尾可能会发生涌砂涌水,发生险情后应采取的措施如下:

(1) 管片拆除过程中,拼装机拉动 K 块管片向外移动一小段距离,如发生盾尾涌砂涌水,则立即将 K 块拼装回原位,盾尾进行注浆、注聚氨酯止水。

(2) 如在盾尾刷更换过程中盾尾发生涌水涌砂,应在第二道尾刷与管片之间的缝隙内塞入海绵条后用环形钢板进行封堵,环形钢板上预留球阀打开,钢板通过管片纵向螺栓进行固定,盾尾进行注浆、注聚氨酯封堵,检查盾尾封堵合格后拆除环形钢板。

(3) 地面对应位置设置隔离区,增加地表、管线及建筑物监测频率,地面发生下沉、坍塌等情况,立即上报,并通知相关产权单位。

3.3.2 发生火灾

在割除或焊接盾尾刷时容易发生火灾,发生险情后应采取的措施如下:

(1) 盾尾刷刨除之前需将密封腔内油脂清除干净。

(2) 密封腔内起火立即用灭火器灭火,险情解除后清理密封腔内杂物,再进行作业。

(3) 作业人员衣物起火应进行湿布扑打、灭火器灭火,动作应迅速准确。灭火后查看伤势,需要送医者紧急送医治疗。

(4) 洞内尾刷更换作业期间,严禁施工人员吸烟,焊机作业周围不放置易燃物品。

3.3.3 气体中毒

如洞内气体流通不畅,有毒气体含量增加,或

者在聚氨酯注浆过程中用丙酮清洗设备管路,可能会发生气体中毒,应做好以下应急措施:

(1) 如作业人员出现呼吸不畅等气体中毒征兆,应先立即转移至通风口处,待其症状缓解后其他人员陪同至地面。

(2) 情况严重者先进行人工呼吸等措施后,拨打 120,转移至地面送医。

(3) 洞内保持 24 小时通风,每隔 4 小时用手持式气体检测仪检查洞内空气质量。

3.3.4 坠落或严重物体打击

(1) 一旦发生坠落或物体打击事故,安全员负责组织人员迅速利用软爬梯等工具将伤员抢救出地面,并移至安全地带。

(2) 保持伤者呼吸畅通,若发现呼吸困难或呼吸心跳停止,则将伤员仰卧在平地上或平板上立即进行人工呼吸或同时进行体外心脏按压。

(3) 应在第一时间组织抢救,向急救中心求援,并详细说明事故地点、严重程度、本部门的联系电话,并派人到路口接应。

(4) 在接到事故报告后,立即通知项目部医务室赶赴现场,并且组织义务抢险队采取措施防止事态进一步扩大。迅速组织领导小组各成员达到现场后,判明事故情况并及时向总监办和业主代表报告。

(5) 组织现场非抢险人员立即撤离到安全地区,维持好秩序,稳定现场人员情绪,如有受伤人员,派人立即送往医院进行治疗。组织人员保护好事故现场,凡与事故有关的物体、痕迹、状态,不得破坏。

3.3.5 坍塌

一般坍塌,未有作业人员伤亡时的处理:

(1) 坍塌一旦出现,值班工班长必须暂停施工,向工区负责人汇报的同时迅速组织人员立即准备抢险物资,并检查是否有涌水、涌砂现象。

(2) 工区负责人接到汇报后,到达现场做坍塌方处理准备工作的同时向经理部及驻地监理汇报。会同总工程师及监理工程师进行原因分析,确定处理方案。

(3) 对坍塌方处进行处理,控制坍塌面积扩展,待处理完毕无危险时再进行下步施工。

4 方案实施效果

根据北京地铁 17 号线工程的整体工程筹划,本工程左线盾构机在 2019 年 12 月 17 日开始启动盾尾刷更换工作,2019 年 12 月 17 日至 12 月 18 日,向盾

尾和土仓内注膨润土和向盾体周围注膨润土，2019年12月19日至12月20日，盾尾2环注聚氨酯、盾壳外注聚氨酯；2019年12月21日开始做10环、7环、5环止水环；2019年12月22日，检查止水环效果完成；2019年12月23日，拆除管片(1782环)；2019年12月24日，盾尾内清理；2019年12月24日至12月25日，盾尾刷刨除；2019年12月26日至12月27日，盾尾刷焊接；2019年12月28日，涂抹盾尾油脂；2019年12月29日，管片拼装，2019年12月30日现场清理，2019年12月31日盾构机恢复掘进。

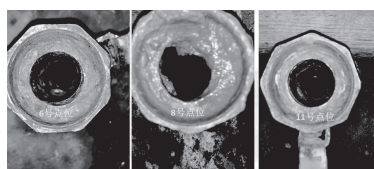
本工程盾构机所处位置进行了地面定位测量，地面警示标识及隔离带设置合理，地面情况如图8所示。



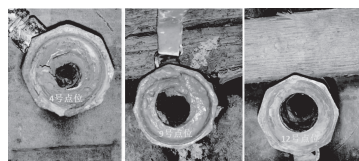
图8 现场地面情况

Fig.8 Ground conditions on site

本工程按照方案要求对盾尾10环、7环、5环后管片背后土体止水并通过超前探测，加固措施效果好。1781环6、8、11号点位打孔观察止水情况，以及1780环4、9、12号点位打孔观察止水情况，均检查无水，止水效果达到预期。止水效果如图9所示。



(a) 1781环观测孔情况



(b) 1780环观测孔情况

图9 止水效果图

Fig.9 Water stop effect chart

在2019年12月24日至12月29日对盾尾刷进

行刨除和焊接时，发现盾尾刷损坏主要发生在盾构隧道的正下方和右下方；随即对这两道盾尾刷进行了更换，保证了后续施工的安全，损坏和焊接情况如图10所示。



(a) 损坏情况

(b) 焊接情况

图10 盾尾刷更换现场情况

Fig.10 Shield tail brush replacement site situation

本工程左线盾构机2019年12月17日开始盾尾刷更换前注膨润土、聚氨酯，到2019年12月30日完成清理现场，总工期为14天。之后左线盾构机正常掘进，运行良好，达到预期效果。

5 结 论

本文以北京地铁17号线朝阳港站~十里河站区间左线盾构机更换盾尾刷为工程背景，介绍了一种盾尾刷更换的施工方法，该方法在盾构机掘进至更换盾尾刷位置时，通过盾体和管片上的注浆孔先向盾尾、土仓和盾体四周注高黏度膨润土，再在盾尾后2环和盾壳(前中盾)外注聚氨酯，之后在盾尾后10、7、5环做止水环箍；确保止水效果良好后打开管片开始更换盾尾刷，之后新尾刷涂盾尾油脂，管片拼装后盾构机恢复掘进。该工法在实际工程中得到了成功应用，取得了很好的实施效果，可为今后类似工程提供技术参考依据。

参 考 文 献

[1] 胡向东,程烨尔.盾构尾刷冻结法更换的温度场数值分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增2):3516-3525 (Hu Xiangdong, Cheng Yeer. Numerical analysis of temperature field during replacement of shield tail brush by freezing method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (S2): 3516-3525 (in Chinese))

[2] 胡俊,张皖湘,汪磊,等.一种盾尾刷更换时环形冻结加固止水结构及其施工方法:中国,201610188081.1 [P]. [2019-09-03] (Hu Jun, Zhang Wanxiang, Wang Lei, et al. Shield tail brush replacement annular freezing reinforcing water seal structure and construction method thereof.: China, 201610188081.1 [P]. [2019-09-03] (in Chinese))

[3] 陈成,杨平,张婷.液氮冻结盾尾密封加固温度场的数值分析[J].南京林业大学学报:自然科学版,2012,36(3):120-124 (Chen Cheng, Yang Ping, Zhang Ting.

- Numerical analysis of temperature field during liquid nitrogen freezing in high-confined aquifer reinforcement [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2012, 36(3): 120-124 (in Chinese))
- [4] 胡俊. 高水压砂性土层地铁大直径盾构始发端头加固方式研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012 (Hu Jun. Study on the reinforcement methods of subway large-diameter shield launching in the sandy clay with high water pressure[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012 (in Chinese))
- [5] 高如超, 孔茜, 刘毅. 南湖区间泥水盾构盾尾刷更换技术[J]. 施工技术, 2019, 48(3): 88-90 (Gao Ruchao, Kong Qian, Liu Yi. Replacement technology for shield brush of slurry balanced shield in Nanzhuang-Huyong subway station [J]. Construction Technology, 2019, 48(3): 88-90 (in Chinese))
- [6] 胡俊, 王效宾, 袁云辉. 盾构隧道端头杯型冻结壁温度场发展与分布规律研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015
- [7] 杜娟, 刘冰洋, 申彤彤, 等. 有机质浸染砂水泥土的力学特性及本构关系[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 140-147 (Du Juan, Liu Bingyang, Shen Tongtong, et al. Mechanical properties and constitutive relation of cement-stabilized organic matter-disseminated sand[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(2): 140-147 (in Chinese))
- [8] 胡俊, 唐益群, 张皖湘. 水泥改良前后土体热物理参数试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1198-1204, 1225 (Hu Jun, Tang Yiqun, Zhang Wanxiang. Experimental study on the thermo-physical property of pre and post cement-soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(5): 1198-1204, 1225 (in Chinese))
- [9] 胡俊, 欧阳素娟, 李春芳, 等. 新型管幕冻结法不同冻结管布置方案温度场数值分析[J]. 森林工程, 2018, 34(3): 86-92 (Hu Jun, Ouyang Sujuan, Li Chunfang, et al. Numerical analysis of development of freezing temperature field in different arrangement of new pipe freezing method[J]. Forest Engineering, 2018, 34(3): 86-92 (in Chinese))
- [10] 陶云超. 海瑞克盾构机盾尾刷更换技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2018(3): 77-80 (Tao Yunchao. Research on replacement technology for shield tail brush of Herrenknecht shield machine[J]. Railway Construction Technology, 2018(3): 77-80 (in Chinese))
- [11] 胡俊, 杨平. 大直径杯型冻土壁温度场数值分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 523-531 (Hu Jun, Yang Ping. Numerical analysis of temperature field within large-diameter cup-shaped frozen soil wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 523-531 (in Chinese))
- [12] Liu Y, Hu J, Xiao H W, et al. Effects of material and drilling uncertainties on artificial ground freezing of cement-admixed soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(12): 1659-1671
- [13] Hu J, Liu Y, Li Y P, et al. Artificial ground freezing in tunnelling through aquifer soil layers: a case study in Nanjing metro line 2 [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22: 4136-4142
- [14] 马俊, 胡导云, 杨平. 平面斜交联络通道水平冻结及实测分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(12): 1965-1972 (Ma Jun, Hu Daoyun, Yang Ping. Horizontal freezing and measurement analysis of plane oblique connection gallery [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(12): 1965-1972 (in Chinese))
- [15] 陶勇, 杨平, 杨国清, 等. 冻融作用对海相软土压缩性及抗剪强度影响研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 637-645 (Tao Yong, Yang Ping, Yang Guoqing, et al. A study on influence of freezing and thawing on compressibility and shear strength of marine soft soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 637-645 (in Chinese))

常润安(1968—),男,学士,工程师。主要从事隧道及地下工程方面的研究。

胡俊(1983—),男,博士,副教授。主要从事隧道及地下工程方面的研究。

(上接第 212 页)

- [14] 王剑晨, 张顶立, 张成平, 等. 近接施工上覆既有车站变形动态反分析及预测[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 58-66 (Wang Jianchen, Zhang Dingli, Zhang Cheng-

ping, et al. Dynamic back-analysis and prediction of overlying subway station displacement induced by approaching excavation [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(4): 58-66 (in Chinese))

赵江涛(1986—),男,硕士,工程师,主要从事隧道及地下工程检测、监测及安全风险评估工作。

苏洁(1980—),女,博士,副教授,主要从事城市地下工程方面的研究工作。

王剑晨(1985—),男,博士,高级工程师,主要从事城市地下工程方面的研究工作。

牛晓凯(1979—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事地下空间的开发利用方面的研究工作。

程兰婷(1991—),女,硕士,工程师,主要从事城市轨道交通病害治理方面的研究工作。