

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.03.043

富水复合地层掘进盾构刀具损坏控制技术

王海峰

(中铁二十四局集团上海铁建工程有限公司, 上海市 200071)

摘要: 土压平衡盾构机在富水复合地层中掘进, 由于穿越地层的不均匀性, 加之地层溶洞发育, 盾构刀具经常会出现非正常损坏的现象, 从而降低盾构掘进功效, 增加盾构施工成本, 同时增加换刀安全风险, 为此开展富水复合地层掘进盾构刀具损坏控制技术研究意义重大。以徐州城市轨道交通 2 号线周七区间隧道为工程实例, 通过研究解决富水复合地层掘进盾构刀具损坏控制难题, 为后续同类型工程提供参考与借鉴。

关键词: 富水复合地层; 盾构刀具; 损坏控制

中图分类号: U455.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)03-0171-04

0 引言

随着中国社会经济发展, 很多城市都在进行城市地铁建设, 盾构法隧道施工工艺以其特有的优越性经常被用于地铁地下区间隧道施工。盾构掘进过程中经常会遇到各种各样的复杂地质, 这给盾构刀具的使用寿命带来极大挑战, 徐州地区地层特性复杂, 且灰岩层溶洞特别发育, 从而引起盾构刀具的瞬间冲击损坏。周喜温^[1]结合工程实践, 研究了盾构刀具的选型、盾构刀具布置的关键因素以及盾构刀盘刀具的优化布置等问题。缪楠^[2]通过介绍盾构在穿越南京上软下硬地层过程中刀盘和刀具出现异常磨损的情况, 对磨损原因及故障处理过程进行了探究。李强^[3]以杭州地铁 2 号线杭发厂站—人民路站盾构区间隧道工程为背景, 对盾构穿越上软下硬复合地层的刀具磨损情况进行了分析。本文以徐州城市轨道交通 2 号线一期工程 07 标周七区间为例, 就全断面软土层、上软下硬地层以及全断面中风化灰岩层复合地层情况下掘进, 通过改变刀圈成型模式、调整刃形、刀圈热梯度处理、刀具螺栓防松脱加固、盾构掘进参数控制等技术手段, 提出富水复合地层掘进盾构刀具损坏控制技术。

2 工程概况

2.1 区间线路概况

徐州城市轨道交通 2 号线一期工程周庄站—七里沟站区间(简称“周七区间”)。周庄站—七里沟

站区间左线隧道全长 1 168.823 m, 右线隧道全长 1 160.541 m, 线路出周庄站后下穿京沪铁路路基及货运线后接入梨园路, 最到达七里沟站。区间隧道采用盾构法施工, 洞顶埋深 10~17 m。

2.2 工程与水文地质条件

2.2.1 工程地质条件

周七区间盾构掘进穿越地层多数为上部⑤₃₋₄黏土层下部⑪₂₋₃层中风化灰岩的上软下硬地层。⑪₂₋₃层全断面中风化灰岩层, 上软下硬地层差异性较大, 中风化灰岩层溶洞发育, 岩溶裂隙水发育。周七区间地质纵断面如图 1、图 2 所示。

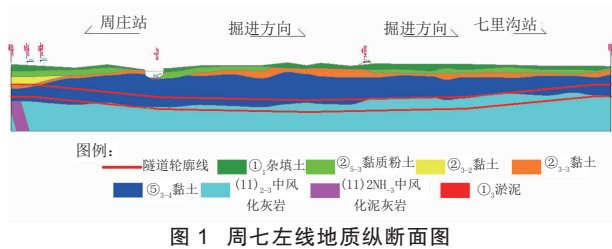


图 1 周七左线地质纵断面图

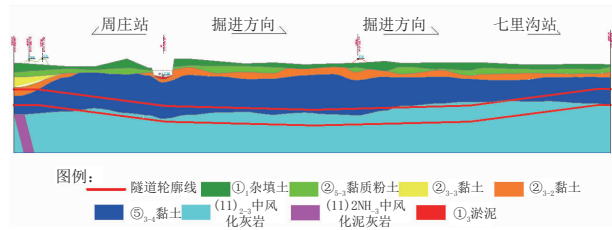


图 2 周七右线地质纵断面图

2.2.2 水文地质条件

场区地下水(潜水)埋深约 0.75~5.60 m, 水位标高约 28.79~31.77 m, 受地形影响起伏较大, 根据地区经验, 潜水位变化幅度约为 1.0 m。

岩溶裂隙水位埋深为 6.70 m, 水位标高为 28.77 m。岩溶裂隙水水位受大气降雨影响显著, 年动态随季节

收稿日期: 2022-10-16

作者简介: 王海峰(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 从事土木工程技术工作。

而变化,一般每年雨季降水高峰期过后一到两个月水位达最高点,其后水位逐渐下降,至旱季末水位下降至最低点,年变幅 5~10 m。

2.2.3 不良地质

(1)溶洞

拟建场地下伏基岩中奥陶系灰岩、泥灰岩,含有岩溶,且较为发育,钻孔见洞率 68.1%,线岩溶率 9.5%。

(2)断层

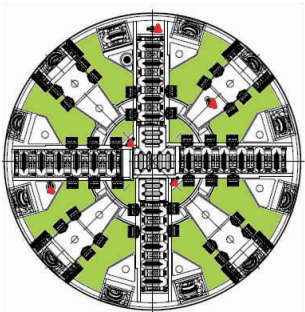
本工点线路穿越 F17 北翟山—凤山断层,两盘地层错位不连续,局部见两盘地层反错 500 m 左右。带宽 3~8 m,岩石破碎,断面平直光滑,倾向往复摆动,呈北西、南东,不同地段力学性质显示差异。次生方解石、断泥层、断层角砾岩、构造透镜体发育。两盘产状零乱不协调,局部倒转。

3 盾构刀具设计配置

刀盘体采用舞阳钢铁 Q345C 高强度钢板焊接而成,采用轴式滚刀,滚刀单个刀刃的允许承载能力为 250 kN,刀盘开口率 35%。具体刀具配置如表 1 所示。

表 1 刀盘刀具配置图

结构形式	复合式
开挖直径/mm	6 440
开口率/%	35
中心刀具	17" 双联中心滚刀 4 把,刀间距 90 mm, 刀高 175 mm
正面滚刀	22 把 17" 滚刀,间距 90 mm,刀高 175 mm
边缘滚刀	12 把 17" 滚刀
切刀	宽切刀 32 把,刀间距 220 mm,刀高 130 mm
边缘刮刀	8 对,刀高 130 mm
刀具高差设置	滚刀高出面板 175 mm; 切刀高出面板 130 mm; 边缘刮刀高出面板 130 mm
磨损检测	1 个,刀具磨损检测距 离面板 130 mm
回转接头	6 路泡沫+6 路液压+ 6 路电气



速度,所处地层为上软下硬地层,故带压进舱检查刀具,发现滚刀损坏 8 把,刀具掉落土舱 1 把。现场刀具磨损情况如图 3 至图 5 所示。由图可知,本工程更换的刀具主要为滚刀。从滚刀磨损情况来看,滚刀摩擦磨损(均匀磨损以及弦偏磨和刃偏磨损等非均匀磨损)的情况几乎没发生,其磨损形式主要为刀具断裂损失,具体表现形式主要有刀圈崩角(见图 3)、刀圈断裂(见图 4)以及轴承损坏(见图 5)。刀圈崩角主要表现为刀圈外边缘出现局部掉块。刀圈断裂一般为沿刀圈半径方向出现贯穿裂缝,有的甚至缺失一段。轴承损坏主要表现为轴承断裂。



图 3 刀圈崩角现场图



图 4 刀圈断裂现场图



图 5 轴承损坏现场图

4 盾构刀具损坏情况分析

4.1 刀具检查损坏情况

掘进至 210 环发现刀盘扭矩异常,盾构掘进无

4.2 刀具损坏分析

结合大量国内外既有资料、调研及本工程的特点,分析造成本工程刀具损坏的主要原因有以下几点。

(1) 穿越地层

本工程盾构隧道穿越的地层主要为中风化灰岩,溶洞发育,部分为上部黏土下部岩石的上软下硬地层。中风化灰岩的强度较高、硬度较大,由现场取样获得岩石自然状态下单轴抗压强度最大值达 123 MPa,严重影响了盾构机掘进的效率,也增加了刀具磨损的进度和程度。根据现场滚刀失效形式来看,初步判断主要原因为刀圈载荷突变,遭受突然冲击后过载形成贯穿式裂纹,继而延伸,循环撞击后产生局部崩块,崩块区域逐步扩大,刀圈与刀毂过紧力消失,刀圈脱落。由于溶洞的存在,加之岩石软硬不均,势必造成刀盘振动较大,加大刮刀螺栓的振动频率,一旦在刀盘反转过程中遇到岩脊的突然冲击,势必会脱落。刮刀脱落后位于岩石与滚刀之间,在刀盘推力及扭矩作用下,刀圈对刮刀进行碾压,而岩石强度较高,刮刀并不会挤入岩石当中,这就造成刀圈硬碾刮刀后崩刃。一旦个别刀圈崩断脱落后依附于开挖面并未掉入土仓,也会造成刀圈硬碾现象。

滚刀掘进过程中,在一定的掘进参数下,当滚刀由溶洞(软)切入到硬岩岩块时,如图 6 所示,刀圈切入点 A 点若设为软硬岩结合面, B 点一侧为硬岩,在一定的推力产生的贯入度、刀盘转速产生的势能作用下,在遇到硬岩岩块时滚刀的载荷相对于溶洞(软)处,将成几何倍数的增加,从这个切入点开始,这把刀带给刀盘的转动扭矩也是直线上升的。也就是说滚刀刀圈在过 A 点后的瞬间的冲击力是远大于刀圈理论承载的。此时反映在滚刀刀圈上的外在表现刀圈断裂、崩刃、安装螺栓断裂等等。

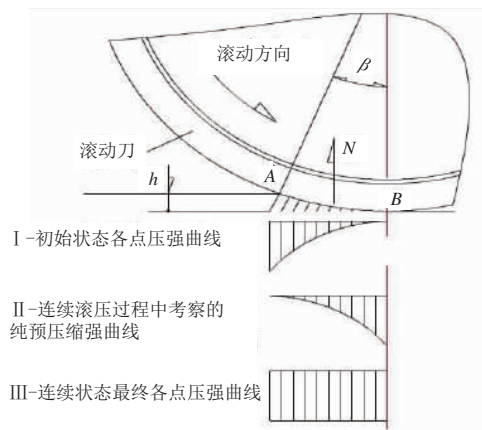


图 6 滚刀在上软下硬(溶洞)地层受力状态图

(2) 盾构掘进参数设置

影响刀具磨损主要包括盾构机的有效推力、贯入度、切削环境(包括土仓压力、土仓内温度、开挖面动摩擦系数等)、刀具管理等。盾构掘进参数设置的不合理将直接导致刀具的冲击破坏和磨损。

(3) 刀具设计和安装

一般刀具加工中采用模锻工艺制作的刀圈毛坯,金属流线沿刀圈径向延伸,在岩石强度不高的情况下,有利于提高刀圈的耐磨性能,但是在高冲击的地层里,其应力相对来讲更容易沿刀圈径向传递,造成大块崩刃或者断裂。刀刃的角度对推进过程中岩体的切削也有重要的影响,富含溶洞的灰岩地层对目前所用刀具极易造成刃角崩裂。中心滚刀为双联滚刀,滚刀螺栓在高震荡地层下易颤动、脱落。

5 盾构刀具损坏控制

5.1 改变刀圈成型模式

刀圈毛坯改用辊锻工艺(见图 7),该工艺制作的毛坯经过扩孔滚锻后,金属流线形成环状且沿刀圈法向延伸,增加了抗断裂韧性。在高冲击性岩层掘进时,对于刀圈崩刃现象有一定的抵抗力,即使有崩刃出现,也会是片状剥离脱落现象而非断裂。

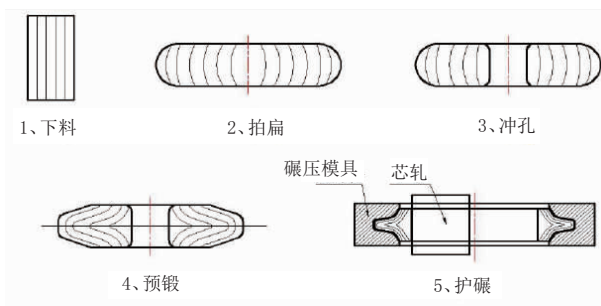


图 7 辊锻工艺流程图

5.2 调整刃形

针对软硬不均且富含溶洞的灰岩地层,刀圈角度的选择至关重要,如果角度过小,刀圈磨损很快且易崩刃;角度过大,切入岩石非常困难,破岩效率低,因此,如果在硬岩中掘进,将常规的 20° 刀圈刃形角度减小至 18° (除了更易切入岩石外,度数的减小使得刀圈形状一直保持较小的刃宽,但刀圈工作刃根部加厚);另外刃间距适量增宽到 21~23 mm(17 寸中心双联滚刀还是选取 19.3 mm 的刃宽,避免扳手效应及过载),可保证在一定贯入度下,刀圈能有效的对岩石进行研磨破碎。降低刀盘推力及扭矩,降低刀盘振动。

随着刀刃宽度的增大,引起的岩石压碎区域及

损伤范围增大,裂纹扩展范围也增大,刀圈的破坏能力及磨损寿命将提升(见图8)。

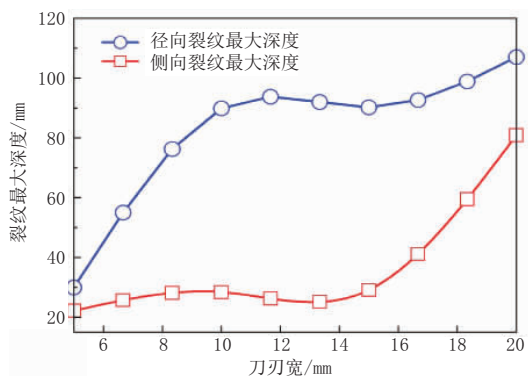


图8 刀刃宽-裂纹最大深度关系图

专门针对中硬岩、硬岩特别设计并得到良好应用的刀圈刃形形式。特别是顶 R13 圆弧设计,提高的刀圈的抗冲击性(见图9)。

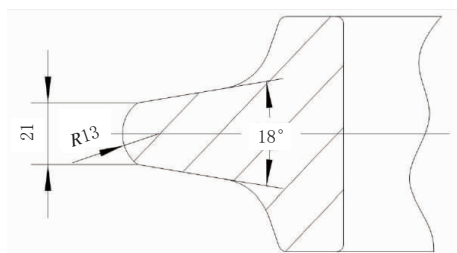


图9 硬岩掘进刀刃加工设计图

5.3 刀圈梯度热处理

梯度刀圈刃部具有较高的硬度(保证耐磨性,不出现过热后的卷边现象),中部及内圈部位的硬度自由过渡呈梯度变化(见图10)。这样的硬度变化不仅保证了刃部的耐磨性,同时也提高了刀具的抗冲击性能,能够很好地应对徐州地区地层突变。

5.4 刀具螺栓防松脱加固

(1)螺栓紧固时涂抹螺纹紧固胶,同时采用盾构机厂家提供的螺纹标准紧固扭矩或参照螺纹紧固扭矩规格参数拧紧螺栓。

(2)螺栓采用高强度 12.9 级螺栓,增加螺栓的抗拉及抗剪切强度。

(3)地层情况无法避免,但可以适当调整施工参数,降低滚刀振动力度及频率。

(4)中心滚刀螺栓拉紧后可将中心刀安装支架与刀箱电焊焊接在一起,避免因螺栓松动造成刀具脱落(但焊接后刀具拆换时需将焊口磨开或刨开,再次安装刀具前将刀箱焊口位置磨平,增加了一定拆换难度)。螺栓拉紧后将同侧两螺栓头用钢筋点焊连接在一起(搭桥形式),防止螺栓松动。

(5)单刃滚刀为轴式连接结构,由楔形块压紧,螺栓受力方式不同,松动及断裂概率较小,更换为

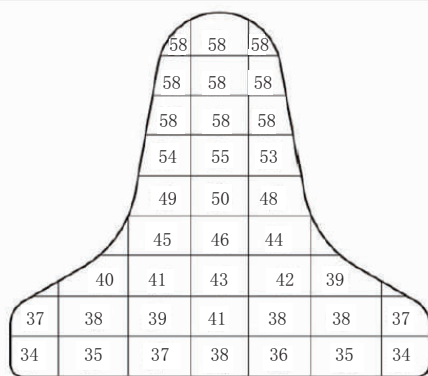
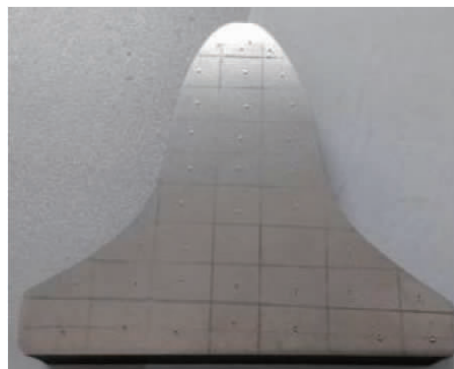


图10 刀圈梯度热处理

12.9 级高强度螺栓。

防松脱的现场处理见图11。

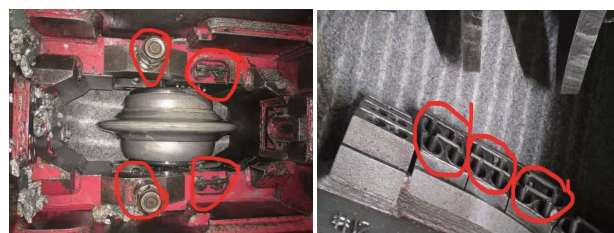


图11 防松脱现场处理图

5.5 盾构掘进参数控制

(1)开挖面前方土体改良

在掘进过程中,向刀盘切削掌子面和土仓内提前注入泡沫剂改良土体。

(2)盾构掘进贯入度控制

硬岩中的贯入度控制在 5~10 mm/r,在上软下硬地层中掘进时的贯入度应控制为 10~15 mm/r。

(3)盾构刀盘转速控制

掘进中应严格控制刀盘转速,本工程控制值为 1~2 r/min。

(4)土仓充盈性控制

上软下硬地层中进行盾构掘进,如土仓满仓,则会增加刀具的磨损概率,为此通过土仓保压系统建立气压稳定掌子面,降低土仓内切削土体仓位,降低刀具磨损。

(5)刀盘扭矩控制

(下转第 182 页)

- (3)砂浆制备:按材料参数控制水灰比,使用洁净自来水,控制搅拌时间。
- (4)喷涂控制:旋喷器居中置于井内,匀速行进,根据管径和泵送排量控制旋转速度。
- (5)养护时间:喷涂完成后,养护时间符合材料凝结时间和标准要求,缓慢通水,严禁激烈水流冲刷。
- (6)修复后检测:插入检测或标记钉检测喷涂厚度,CCTV 检测喷涂效果,需做到表面洁净、喷涂均匀、结合紧密。

4.4.4 材料性能

水泥基材料的性能指标见表 6

表 6 水泥基材料性能指标

性能	龄期	指标要求	实测指标
凝结时间 /min	初凝	≥45	35
	终凝	≤360	260
抗压强度 / MPa	28 d	≥25.0	188
抗折强度 / MPa	28 d	≥4.0	8.6
拉伸粘结强度 / MPa	28 d	≥1.0	1.05
抗渗压力 / MPa	28 d	≥1.5	1.6

5 结论与建议

(1)本项目采用紫外光原位固化等多种修复工艺对问题管道进行修复,消除了管道渗漏及其他重度缺陷,恢复了管道的排水功能,延长了管道的使用

寿命。

(2)每种非开挖修复工艺都有一定的适用条件,应根据项目需求、成本控制、管道缺陷情况和实际工况等方面因地制宜地选择最佳的修复方法,因此一个成功的非开挖修复项目往往采用多种修复工艺相结合的修复方案。

(3)收集项目完工后 1 a 内污水处理厂进水浓度数据,与同期往年平均数据相比,各项数据均有了不同程度的提高,其中 COD 提升 45.3%,氨氮提升 37.4%,总磷提升 58.3%,提升了污水处理效率。

(4)污水处理提质增效项目除了对市政排水管网进行排查、修复外,还应进行源头治理,对汇水范围内住宅小区、企事业单位等内部排水管网进行系统排查与整改,消除雨污混接,才能达到更好的实施效果。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中国城乡建设统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.

[2] 安关峰.城镇排水管道非开挖修复工程技术指南[M].北京:中国建筑工业出版社.2021.

[3] CJJ/T 210—2014,城镇排水管道非开挖修复更新技术规程[S].

[4] T/CECS 717—2020,城镇排水管道非开挖修复工程施工及验收规范[S].

(上接第 174 页)

在掘进过程中,为降低刀具非正常损坏频率,刀盘扭矩控制不超过 3 000 kN·m。

6 效果验证

徐州地层以中风化岩为主,风化程度弱,强度高,且岩溶发育,见洞率高,规律性差,富水。类似地层实属国内罕见。针对溶洞发育的富水复合地层中盾构刀具非正常损坏严重的问题,采用改变刀圈成型工艺、调整刃形、刀圈梯度热处理、刀具螺栓防松

脱加固、盾构掘进参数控制等手段,减少了刀具损坏数量,降低了刀具更换的次数,从而实现了盾构施工成本控制和换刀安全的控制。

参考文献:

[1] 周喜温.土压平衡式复合盾构刀盘的刀具优化配置研究[D].湖南:中南大学,2010.

[2] 缪楠.复杂地层盾构刀盘磨损处理技术[J].建筑机械化,2015,36(5):53-55,67

[3] 李强.盾构穿越半断面硬岩段掘进刀具磨损控制技术[D].上海:同济大学,2017.