

岩溶地层新型双模盾构选型及掘进适应性评价研究

石红伟

中交一公局集团有限公司, 北京 100024

[摘要]文章以富水岩溶地层隧道工程为研究对象, 针对灰岩地层溶洞、土洞发育、地质条件复杂多变、施工风险高的特点, 开展新型双模盾构选型及掘进适应性评价研究。基于掘进施工数据, 分析了 II-VI 级不同围岩等级下盾构土仓压力、推力、扭矩等关键掘进参数的变化规律; 研究了小半径曲线段通过调整推进油缸压力与行程分布、铰接角度实现盾构姿态控制的方法; 从掘进参数匹配、姿态控制、地表沉降控制及刀具磨损控制等方面进行适应性评价。结果表明, 该新型双模盾构能够适应高富水灰岩岩溶地层的复杂地质条件, 有效解决了传统单一模式盾构的喷涌、堵管、沉降难控制等问题, 为同类富水岩溶地层隧道施工提供了参考。

[关键词]富水岩溶地层; 新型双模盾构; 围岩分级; 掘进参数; 盾构姿态控制; 适应性分析

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18624

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

Research on Selection and Adaptability Evaluation of New Dual Mode Shield Tunneling in Karst Strata

SHI Hongwei

CCCC First Highway Engineering Group Co., Ltd., Beijing, 100024, China

Abstract: This article takes the tunnel engineering in rich water karst strata as the research object, and focuses on the characteristics of limestone strata with karst caves, soil caves, complex and variable geological conditions, and high construction risks. It conducts research on the selection and adaptability evaluation of a new dual-mode shield tunneling machine. Based on excavation construction data, the variation patterns of key excavation parameters such as pressure, thrust, and torque in shield soil chambers under different rock mass grades of II-VI were analyzed; Studied the method of controlling the attitude of shield tunneling by adjusting the pressure and stroke distribution of the propulsion cylinder, as well as the hinge angle, for small radius curved sections; Conduct adaptability evaluation from the aspects of excavation parameter matching, attitude control, surface subsidence control, and tool wear control. The results show that the new dual mode shield can adapt to the complex geological conditions of high water rich limestone karst strata, effectively solve the problems of gushing, pipe plugging, and settlement control of the traditional single mode shield, and provide a reference for the construction of tunnels in similar water rich karst strata.

Keywords: rich water karst strata; new dual-mode shield tunneling machine; rock classification; excavation parameters; shield tunnel attitude control; adaptability analysis

引言

近年来,随着城市轨道交通向复杂地质区域延伸,富水岩溶地层中盾构施工面临喷涌、塌陷、刀具异常磨损及地表沉降等多重风险,成为工程界研究热点。针对此类问题,学者们从盾构选型、施工参数控制、地层预处理及沉降预测等方面展开系统研究。李忠伟等^[1]在深惠城际铁路项目中论证了 EPB/TBM 双模盾构在岩溶发育、软硬不均复合地层中的适应性,凸显设备选型对施工安全的关键作用。齐明山^[2]通过有限元模拟贵阳地铁区间,揭示溶洞位置与形状对地表横向 V 形沉降影响显著,且进出洞阶段为高风险期,需强化地层加固与动态监测。张玉龙等^[3]基于济南泉域岩溶地层,优化刀盘配置,并通过掘进参数耦合分析建立刀具状态评估模型。徐树军^[4]则聚焦岩溶与破碎带叠合地层,提出 MJS 地面加固、刀具优化与参数调整等综合措施应对大直径泥水盾构施工困境。郑中刚^[5]

进一步引入 PCA-GA-BP 智能模型,提升富水岩溶区地表沉降预测精度。综上,鲜有关于岩溶地层串联螺旋输送机的泥水盾构选型及掘进适应性评价方面的研究,因此基于广州轨道交通 12 号线棠溪-南航新村区间项目设备选型和适应性评价的相关研究非常必要。

1 工程概况及设备选型

棠溪-南航新村区间(棠南区)线路出棠溪站后,下穿棠乐路北侧厂房,左线 360m 半径(右线 350m 半径)右偏曲线向北偏东方向下穿嘉悦物业厂房,南航新村停车楼,大埔南一街,污水顶管、棠溪十二经济合作社厂房及大埔南一街北侧厂房等进入南航新村站。其中左线全长 728.45m,隧顶埋深 12.06m~26.61m,隧道纵断面采用单向坡(最大纵坡 24.655%)。隧道结构内径 5.8m、外径 6.4m、宽度 1.5m,单环管片数为 6 块,楔形环为 48mm 双面楔量管片。

隧道主要穿越灰岩地层,根据地质详勘资料见图 1

本区间灰岩地层，溶、土洞发育强烈，见洞率超过 75%，存在一处断裂带。且溶洞涌水量巨大。盾构在岩溶区域施工时，姿态易失控，同时土压难保持，容易诱发岩溶失稳、地面沉降和塌陷等，施工风险较大。在地质差异较大的富水岩溶发育符合地层中施工时，传统单一模式的盾构机难以适应复杂多变的地质环境。如土压盾构的喷涌、沉降难控制问题，泥水平衡盾构堵管问题等。

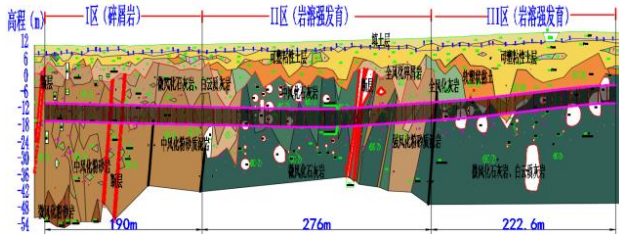


图1 棠南区间地勘剖面图

因此，盾构机设计时和施工时应考虑完善的溶/土洞处理方案。最终选择开挖直径为 6.70m 土压/高密度泥水双模式盾构机。创新性采用了串联破碎机的泥水模式施工见图 2，来保持开挖面的稳定。并配备辊筒式破碎机于螺旋输送机出口，用于将大颗粒块石破碎，防止泥浆箱与排浆泵堵塞，提升出渣能力并降低了滞排的发生。如图 3 刀盘开口率 35%（中心 35%），辐条+面板形式，初装刀配镶齿型滚刀。

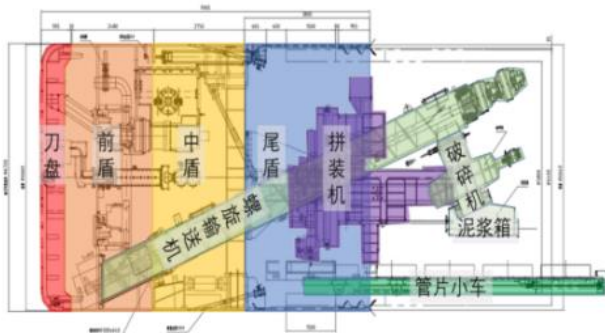


图2 串联螺旋输送机的泥水盾构机



图3 刀盘配置及中心冲洗情况

2 不同围岩等级掘进参数分析

本次分析基于广州地铁 12 号线棠南区左线隧道施工数据，掘进 506 环，共包含 502 条记录，涵盖 5 个围岩等级（II、III、IV、V、VI），统计出不同围岩等级对应的

盾构土仓压力、推力、扭矩和贯入度、推进速度和刀盘转速的均值，分析单一掘进参数随围岩等级的变化规律。沿线地质情况如表 1 所示：

所有围岩等级中，土仓土压（右下）均高于土仓土压（右上），差值稳定在 0.32~0.43bar 如图 4，说明土仓内压力呈现梯度分布，土压力传感器运行稳定。随着围岩级别的升高从 II 到 VI 级，岩性变差，土仓土压（右上）由 1.40bar 升高至 2.47bar，需要泥水仓更高的压力支撑掌子面稳定。

总体来看，从 II 到 VI 级随着围岩变差，盾构总推力和刀盘扭矩逐渐降低如图 5 图 6。从 II 到 III 级围岩，盾构推力从 18961.52 略升高至 19132.74kN，增幅为 0.9%，因 III 级围岩局部存在硬岩夹层，饱和抗压强度 104.1MPa，但 III 级 QRD 数值 12.7%~30.5%明显低于 II 级的 42.2%，因此需略增盾构推力。从 II 到 III 级围岩，从 II 到 IV 级围岩，刀盘扭矩缓慢下降；从 IV 到 V 级围岩降幅加大，由 1280kNm 降到 1020kNm，降比-20.3%，反映低级围岩切削阻力降低，盾构刀盘负载减小。

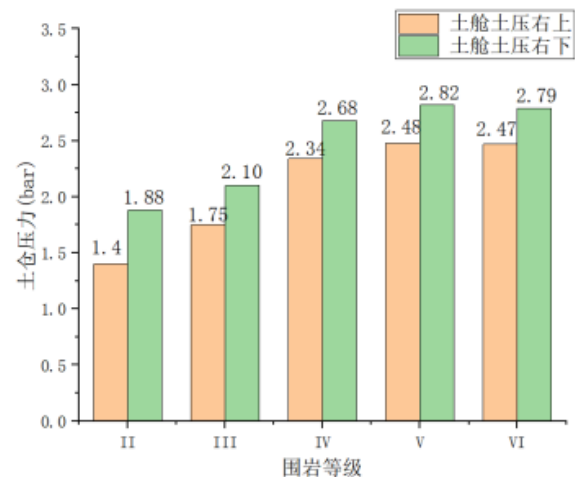


图4 不同围岩泥水仓压力

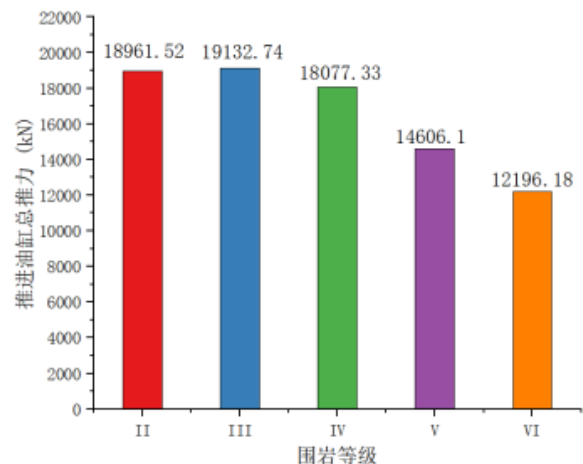


图5 不同围岩盾构推力图

表1 棠南区间各环对应围岩等级及地质情况

环号	围岩等级	围岩描述
0-78	VI级	拱顶: 分布溶槽及<3-2> <3-3> <4-2B>; 洞身: 主要为<8C-2>, 局部遇溶槽, 端头段为<3-3A>、<5N-1>、<7-3>等不均匀地层; 洞底: 主要为<8C-2>端头为<6>层、<7-3>层, 端头存在硬岩与软岩的突变分界面。硬质岩天然抗压强度 61.7MPa~70.3MPa, RQD 值为 41.7%~75.8%。上软下硬问题突出。
79-104	V级	拱顶: 主要为<8C-2>, 但厚度较小 (<4m), 且上覆有砂层; 洞身及底板: 主要为<9C-2>, 局部<8C-2>天然抗压强度 66.3MPa~149.7MPa, RQD 值为 44.4%~58.6%。受岩溶地下水影响, 围岩分级下降一级至 V 级。
105-143	VI级	拱顶: 主要为<5C-1B>、<6C>, 局部遇溶槽; 洞身: 主要为<8C-2>, 局部<9C-2>、遇 8.7mm 深溶槽, 底板: 主要为<9C-2>, 局部为<8C-2>、遇 8.7m 深溶槽底。天然抗压强度 43.9MPa~132.5MPa。RQD 值为 44.4%~58.6%。存在上硬下软的问题。
144-229	V级	拱顶: 主要为<8C-2>, 串珠状溶洞发育, 局部遇溶槽, 且上覆可塑黏性土<5C-1B>及砾砂<3-3>; 洞身: 主要为<8C-2>局部遇 3m 溶洞, 见洞率达到 80%; 底板: 主要为中闪化石灰岩<8C-2>, 最那为<9C2>, 互层 Bm 潘澜, 厚高比小于 1, 易不稳定溶洞。天然抗压强度 65.7MPa~149.7MPa, RQD 值为 21.0%~56.7%
230-339	IV级	拱顶: 主是为<8C-2>。局部遇 5.7m 高溶洞; 洞身: 主是为<8C-2>, 局部遇小溶洞, 底板: 主要为中风化北石灰岩<8C-2>, 局部 9C-2>。局部遇小溶洞; 灰岩岩溶发育、溶洞和溶蚀沟槽分有不均匀, 盾构掘进时掌子面涌水风险高, 宜采用注浆法对溶洞提前进行人理。局部可能夹<8C-1>相对软弱岩层、可能导致掌子面身塌。天然抗压强度 37.2MPa~92.9MPa, RQD 值 17.8%~57.1%。
240-372	III级	拱顶: 主要为<8C-2>; 洞身及底板: 主要为微风化石灰岩<9C-2>。天然抗压强度 56.3MPa~85.1MPa, RQD 值为 34.7%~39.1%。
373-447	IV级	拱顶: 主要为<8C-2>, 局部遇断层及 6.5m 高串珠状溶洞; 洞身: 主要为<8C-2>, 局部为<9C-2>, 局部遇 5.8m 溶洞; 底板: 主要为中风化石灰岩<8C-2>, 局部为<9C-2>。天然抗压强度 56.3MPa~79.9MPa, RQD 值为 8.9%~28.1%。
448-482	III级	拱顶及洞身: 主要为<8C-2>; 底板: 主要为微风化石灰岩<9C-2>。饱和抗压强度 50.9MPa~104.1MPa, RQD 值为 12.7%~30.5%。
483-506	II级	拱顶、洞身及底板: 主要为微风化石灰岩<9C-2>。饱和抗压强度 57.9MPa~63.1MPa, RQD 值约为 42.2%。

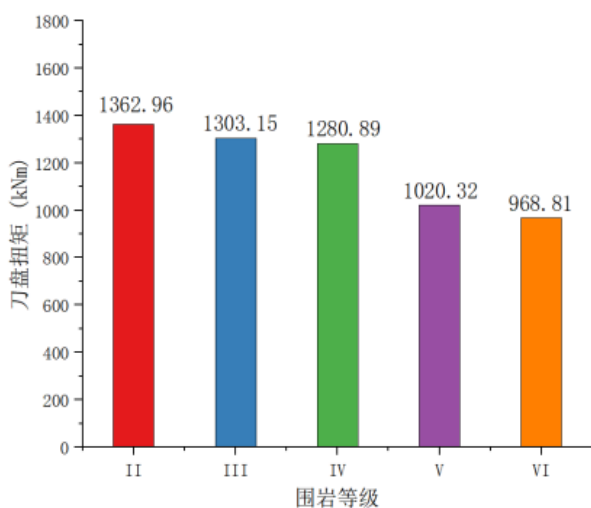


图6 不同围岩刀盘扭矩图

从 II 到 IV 级围岩, 刀盘转速在 1.11rpm~1.34rpm 之间如图 7。总体来看, 从 II 到 IV 级围岩, 围岩越差越松散, 刀具贯入度越高见图 8 图 9, 其中 IV 级围岩贯入度为 5.44mm/rev。然而, V 级围岩贯入度 4.44mm/rev, 为所有围岩中最低。V 级围岩区段串珠状溶洞发育, 局部遇溶槽, 且上覆可塑黏性土及砾砂或拱顶岩层薄上覆有砂层。在可塑黏性土中掘进, 贯入度高容易引起泥水仓的滞排, 土仓压力波动大, 击穿地表风险增高。在拱顶岩层薄上覆有砂层区段掘进时, 超挖极易发生沉降, 需降低贯入度, 使泥浆有充足的时间在掌子面形成泥膜, 维持掌子面的稳定和地表的微变形。

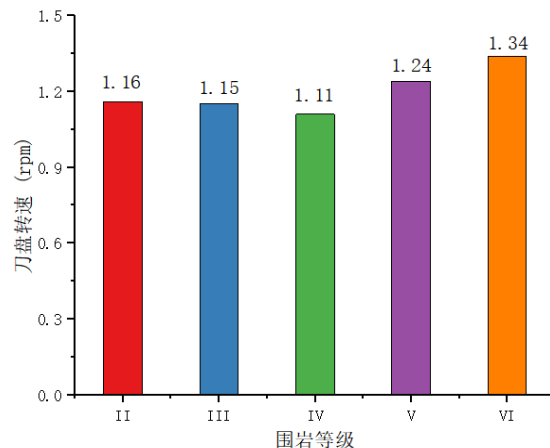


图7 不同围岩盾构的刀盘转速

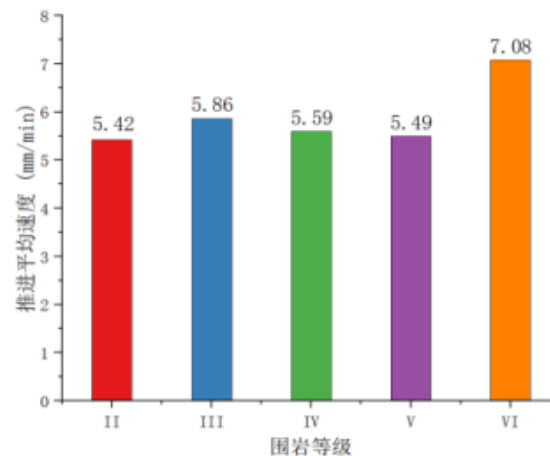


图8 不同围岩盾构推进速度

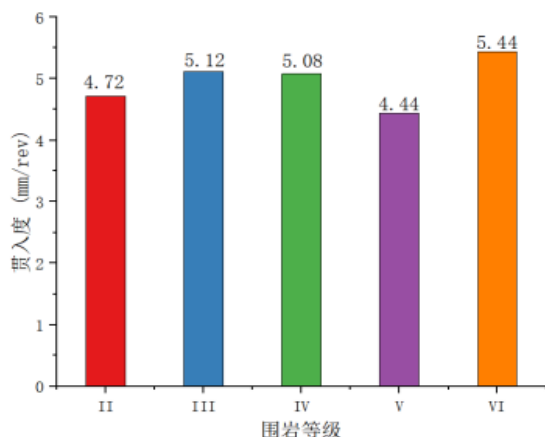


图9 不同围岩盾构的贯入度

3 小半径曲线段盾构姿态调整

棠南区区间左线线路特征如表 2 所示, 0-84 环为直线段, 85-128 环和 495-506 环为缓和曲线段, 129-494 环为圆曲线段。

表 2 棠南区区间左线线路特征

序号	环号	线路特征
1	0-46	ZDK18+164.400 (18+194.503)~ZDK18+096.017 (18+126.12) 直线段, 此段为半径 3000m 的竖曲线段, ZDK18+095.000=ZDK18+064.897, 长链 30.103m
2	47-84	ZDK18+096.017 (18+126.12)~ZDK18+039.092 (18+069.195) 直线段; DK18+095.000=ZDK18+064.897, 长链 30.103m
3	85-128	ZDK18+069.195~ZDK18+004.195 缓和曲线段, 长度 65m
4	129-231	ZDK18+004.195~ZDK17+849.138 圆曲线段, 曲线半径 360m
5	232-263	ZDK17+849.138~ZDK17+800.862 圆曲线段, 曲线半径 360m, 竖曲线 5000m
6	264-494	ZDK17+800.862~ZDK17+447.5 曲线段, 曲线半径 360m
7	495-506	ZDK17+453.119~ZDK17+435.941 曲线段, 缓和曲线段, 竖曲线 3000m

通过改变盾构各工作区千斤顶推力、油缸伸长量及铰接角度三个方式, 在施工过程中控制盾构机姿态和成型隧道的线型最终效果如图 10。



图 10 区间缓和曲线+圆曲线段施工效果图

3.1 调整盾构推进油缸压力分布

以盾构右区推进油缸压力与左区压力差为指标如图 11, 分析压力差在直线段、缓和曲线段和圆曲线段的数据分布情况。直线段压力差在[-5MPa, 7MPa], 数值呈正负对称分布; 缓和曲线段右-左压力差总体上逐渐增大, 在[0, 15MPa]范围; 小半径圆曲线段线路一直左转, 压力差在[0, 23MPa], 因地层存在软硬不均, 压力差偶尔呈现出一定的波动。

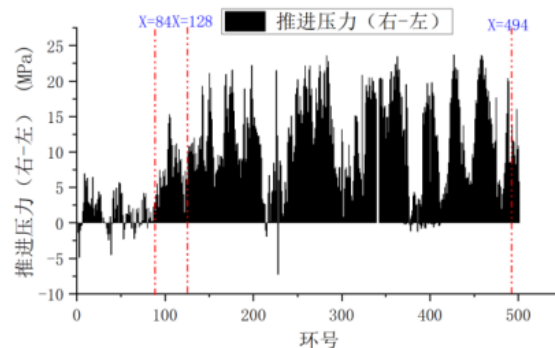


图 11 掘进油缸压力差 (右区-左区)

3.2 调整盾构推进油缸行程分布

当隧道的转弯半径为 $R=360\text{m}$ 时, 管片宽度 1.5m 、外径 6.4m , 平均单环楔形量为: $\Delta h=HD/R=1.5 \times 6.4/360=0.026\text{m}=26\text{mm}$ 。以盾构右区推进油缸行程与左区油缸行程差为指标如图 12, 分析行程差在直线段、缓和曲线段和圆曲线段的数据分布情况。直线段行程差在[-40mm, 40mm], 数值呈正负对称分布; 缓和曲线段行程差总体上逐渐增大, 在[-20mm, 86mm]范围; 小半径圆曲线段线路一直左转, 行程差主要在[0, 90mm], 为调整设计轴线、盾构机和管片三线合一, 部分推进油缸行程差呈现出一定的波动。

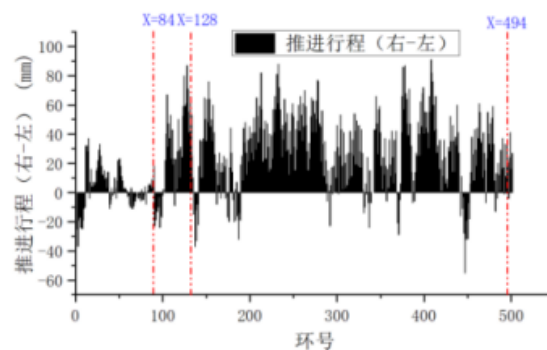


图 12 掘进油缸行程差 (右-左)

3.3 调整盾构铰接的角度

以盾构水平和垂直方向的铰接油缸的角度为指标, 统计分析铰接角度在直线段、缓和曲线段和圆曲线段的数据分布情况如图 13。直线段水平铰接基本控制在 0.3deg 左右, 垂直铰接在[0.1deg , 0.2deg]; 缓和曲线段水平铰接[- 0.5deg , 0.1deg], 垂直铰接在[- 0.5deg , 0.1deg]; 小半径曲线段水平铰接[- 0.8deg , -0.25deg], 垂直铰接在[- 0.05deg , 0.4deg]

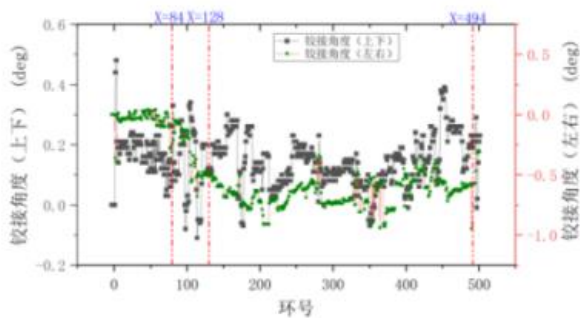


图 13 盾构机铰接使用情况

4 盾构掘进适应性评价

从区间盾构掘进参数与设备设计参数比较、软硬不均地层盾构姿态控制、地表沉降控制和刀具模式等方面，依次分析盾构掘进的适应性。

4.1 盾构掘进参数与设备设计参数的比较

区间施工中，盾构最大推力为 27379.43kN，扭矩 2580.19kNm，刀盘转速 1.79rpm，推进速度 29mm/min。盾构设计参数为额定推力 44000kN，扭矩 7162kNm，刀盘转速 3.73rpm，推进速度泥水模式 40mm/min。施工中盾构最大参数占设计阈值参数比例分别为 62.23%、36.03%、47.99%、72.50%。其中扭矩占比仅为 36.03%，主要原因是通过串联了螺旋输送机、仓外破碎机和泥浆箱，控制了土仓压力的波动，保持开挖面的稳定。减少了盾构渣土在土仓中的滞排，大幅降低了盾构刀盘的扭矩。

4.2 盾构姿态控制效果分析

如图 14 图 15 盾构在直线段水平偏差基本控制在 $[-50\text{mm}, 30\text{mm}]$ ，垂直偏差在 $[-50\text{mm}, 30\text{mm}]$ ；缓和曲线段水平偏差 $[-50\text{mm}, 5\text{mm}]$ ，垂直偏差在 $[-50\text{mm}, 25\text{mm}]$ ；小半径曲线段水平偏差 $[-50\text{mm}, 50\text{mm}]$ ，垂直偏差在 $[-50\text{mm}, 50\text{mm}]$ 。盾构机姿态基本控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内，满足现场施工控制要求，最终管片错台控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内。

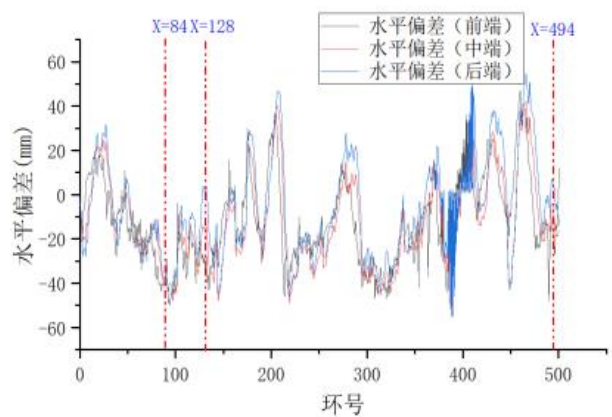


图 14 盾构机切口、铰接、尾盾水平偏差

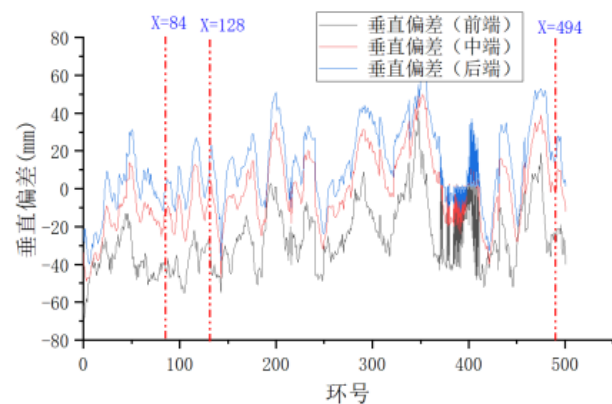


图 15 盾构机切口、铰接、尾盾垂直偏差

4.3 地表沉降控制方面

岩溶发育区盾构掘进过程难免会遇到未填满的溶洞、溶隙等空洞。双模盾构机在泥水掘进模式下，当土仓压力短时间内下降超标时，盾构机控制系统打开容器底部的阀门向土仓快速输送泥浆，缓解压力下降（如图 16 所示），避免引起地面沉降超限。

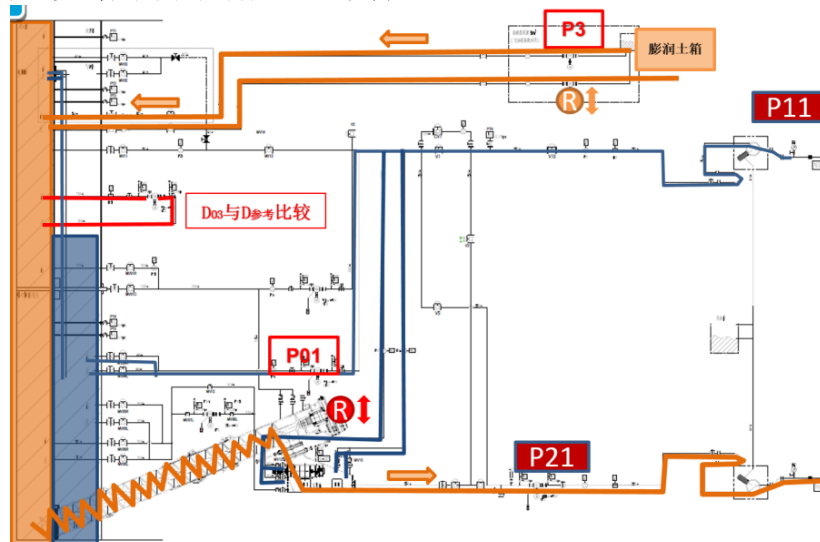


图 16 泥水循环及补浆示意图

双模盾构机在泥水掘进模式下,能通过螺旋输送机排出更大粒径的岩块,减少滞排风险,稳定掌子面压力,降低了泥水击穿地表的风险,保障了地表沉降变形有序可控。统计了不同围岩等级处隧道轴线上地表沉降累计值见图 17,地表沉降累计值控制在-7mm~-18mm,控制效果良好,满足区间地表沉降控制要求。

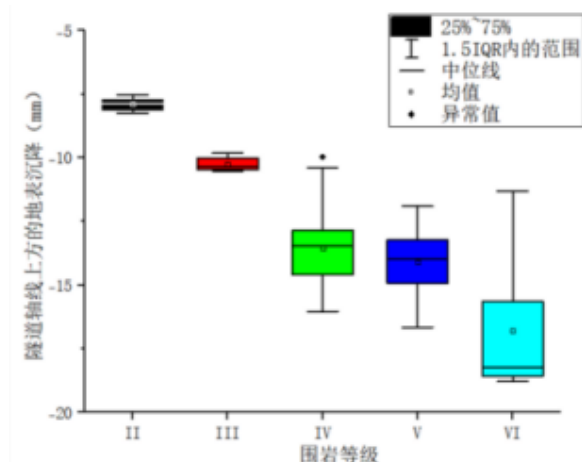


图 17 不同围岩等级区间地表沉降累计值

4.4 刀具磨损控制方面

区间隧道地段主要穿越灰岩地层,部分地段为上软下硬地层,同时岩溶溶槽、溶隙发育密集,掘进开挖面通常凹凸不平,滚刀在凹凸不平的岩面上掘进时无法形成完整的轨迹曲线。刀具受冲击力大,易发生偏磨,导致刀具硬质合金崩裂,对刀具承载性要求较高。在灰岩地层采用 17 英寸镶齿滚刀,滚刀高 175mm,刮刀高 135mm,刀高差 40mm。主刀设计考虑低刀口、大合金块设计,提高主刀在硬岩地层掘进时的使用寿命。同时主刀背面增加防撞块,提高抗冲击性如图 18。



图 18 进仓后 17 英寸镶齿滚刀情况

4.5 富水岩溶地层不同类型盾构机选择

基于广州地铁 12 号线多个区间及本地区岩溶地层盾

构掘进情况,从设备制造、工程技术经济性方面对比了不同类型盾构机在富水岩溶地层中的应用情况。在岩溶和土洞发育、隧道区域无上覆岩层或过薄、地表建筑物林立的场景下,优先选用串联式泥水/土压双模盾构机。

5 结语

选用的 6.70m 土压/高密度泥水泥双模盾构,有效解决了大颗粒岩块堵管、滞排问题;刀盘刀具采用 35% 开口率及镶齿型滚刀配置,适配中微风化灰岩及软硬不均地层的切削需求,刀具抗冲击性与使用寿命得到提升,保证了现场稳步施工。

掘进参数规律清晰:随着围岩等级从 II 级降至 VI 级(岩性变差),土仓土压从 1.40bar 升至 2.47bar,总推力与刀盘扭矩总体呈下降趋势;贯入度在 IV 级围岩达最大值 5.44mm/rev,刀盘转速维持在 1.11rpm~1.34rpm 之间,参数调整符合不同围岩的力学特性与施工需求,且均在设备性能参数的 65% 以内。

姿态控制效果优异:通过优化推进油缸压力差在 0~23MPa,行程差在 0~90mm 及铰接角度,实现了 R=360m 小半径曲线段的盾构姿态的精准控制和隧道成型质量,偏差均控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内,管片错台 $\leq \pm 3\text{mm}$,满足施工规范要求。

双模盾构在泥水模式下通过快速补浆系统缓解土仓压力波动,结合高效出渣能力,将地表沉降累计值控制在 -7mm~-18mm,即使围岩溶洞发育区段也满足控制要求。该双模盾构在富水岩溶地层的适应性更强,隧道清洁度高,综合施工功效良好。

【参考文献】

- [1]李忠伟,鲁伟,井向阳.复杂岩溶地质条件下城际铁路 9m 级盾构机选型研究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(11):53-57.
- [2]齐明山,王祥,王春凯.复杂岩溶地层盾构隧道施工变形分析[J].施工技术(中英文),2025,54(21):123-130.
- [3]张玉龙,李毅,李少华,等.盾构穿越泉域岩溶地层掘进参数分析评价[J].工业建筑,2026,1(4):1-6.
- [4]徐树军.大直径泥水盾构穿越岩溶区与破碎带叠合地层施工技术研究[J].公路,2025,70(3):381-385.
- [5]郑中刚.基于 PCA-GA-BP 模型的富水岩溶盾构施工地表沉降预测研究[J].铁道建筑技术,2026,1(4):1-6.

作者简介:石红伟(1989.2—),男,工程师,本科,主要从事地下工程与盾构施工技术研究。