

# 全断面花岗岩小净距盾构洞通掘进技术

刘少雨<sup>1</sup> 周 智<sup>1</sup> 蒋先和<sup>2</sup>

(1. 中铁建华南建设有限公司, 511458, 广州;

2. 中铁十一局集团有限公司, 430061, 武汉//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 目的:深埋大断面盾构在硬岩地层小净距并行盾构隧道的掘进过程中容易产生安全质量事故,盾构洞通接收阶段是掘进阶段的终止工序也是管控重点,需要在设备选型及施工过程中采取相应措施以防范事故发生。方法:采用了技术对比分析的方法对广州花岗岩地层小净距地铁隧道盾构接收施工实践进行研究,归纳总结了小净距硬岩地层深埋隧道盾构施工中的常见问题,并指出须从盾构刀盘选型、大埋深洞通涌水控制技术、小净距控制技术及盾构掘进控制技术(方向控制、姿态控制、纠偏控制、洞通参数控制)等方面采取技术措施。同时,结合广州地铁 18 号线陇枕出场线和横番 5~7 号盾构井右线隧道的工程特点及其掘进数据等开展工程实践。结果及结论:通过应用上述技术控制措施,在广州地铁 18 号线实践过程中较好地完成了盾构洞通接收。其实践经验可有效减少或解决硬岩地层深埋隧道盾构接收施工中的常见问题。

**关键词** 地铁;盾构洞通;现场试验;花岗岩地层;小净距并行掘进

**中图分类号** U455.43

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.12.042

## Full-profile Granite Small Clearance Shield Tunnel Breakthrough Excavation Technology

LIU Shaoyu, ZHOU Zhi, JIANG Xianhe

**Abstract** Objective: In the excavation process of deep-buried large-profile shield tunnels in hard rock strata with small clearance parallel to existing shield tunnels, safety and quality accidents are prone to occur. The shield tunnel breakthrough and reception phase is the termination procedure of the excavation phase and a key management-control point. It is required to adopt corresponding measures in equipment type selection and construction process control to prevent accidents. Method: The method of technical comparative analysis is employed to study the construction practice of Guangzhou granite stratum small clearance metro tunnel shield reception. Common problems in the construction of shield tunnels in small clearance and deep-buried hard rock stratum are summarized. It is emphasized that technical measures need to be taken in aspects such

as shield cutterhead type selection, water inrush control technology for deep-buried tunnel breakthrough, small clearance control technology, and shield tunneling control technology (direction control, posture control, deviation control, breakthrough parameter control). Additionally, engineering practice is carried out based on the engineering characteristics and excavation data of Guangzhou Metro Line 18 Longzhen Depot access line and Hengfan No. 5 to No. 7 shield shaft right line tunnel. Result & Conclusion: By applying the aforementioned technical control measures, the tunnel breakthrough reception is completed during the practice of Guangzhou Metro Line 18. The gained practical experience can effectively reduce or address common problems in the construction of shield reception in deep-buried tunnels in hard rock stratum.

**Key words** metro; shield tunnel breakthrough; field test; granite stratum; small clearance parallel excavation

**First-author's address** China Railway Construction South China Construction Co., Ltd., 511458, Guangzhou, China

随着城市化进程的不断加深,城区地上建(构)筑物、交通道路错综复杂,盾构法施工已成为城市地铁施工的主要选项<sup>[1]</sup>。然而,地下空间工程呈复杂化发展趋势,现实中受天然气及供水管线、建筑物基础、城市发展规划等诸多因素影响,城市地铁线路规划向着大埋深、小净距方向发展,所产生的许多工程问题制约着城市地铁的工程建设。

大深埋地层往往地下水丰富、裂隙发育完善,易引发开挖面坍塌、涌水、沉降等情况;小净距盾构在开挖工程中会产生二次土体扰动,后续作业面对已完成面产生不良影响,易导致管片错台、隧道超限等事故<sup>[2]</sup>。因此,在线路设计时一般会采用避开大埋深、小净距盾构洞通的方法进行设计。但随着国内城市地铁隧道建设发展的复杂化与现代化,大埋深、小净距盾构隧道也逐渐在工程中出现,且呈增多趋势。

广州市的轨道交通 18 号线工程陇枕出场线 LP1 号盾构井—LP7 号盾构井和横番 5 号盾构井—横番 7 号盾构井右线区间属于花岗岩地层大埋深、小净距盾构洞通<sup>[3]</sup>。基于本区间的工程特点和掘进数据,进行施工关键技术总结,可为在相似净距、类似岩土环境的盾构洞通提供参考。

1 工程概况

广州市轨道交通 18 号线工程陇枕出场线 LP1 号盾构井—7 号盾构井和横番 5 号盾构井—横番 6 号盾构井右线区间,位于广州市番禺区线路示意图见图 1。陇枕出场线起止里程为 CDK00 + 343.395—CDK02 + 677.611,长度为 2 334.2 m,横番 5 号盾构井—横番 7 号盾构井右线起止里程为 YDK32 + 408.398—YDK34 + 146.182,长度为 1 737.8 m。区间为单线单洞盾构结构,开挖直径为 8.83 m,管片外径为 8.50 m,管片内径为 7.70 m,出场线和横番右线洞通线最小净距为 8.00 m,最大埋深为 42.7 m(两并行隧道关系见图 2)。洞通隧道顶部地层情况主要为:〈1-1〉人工填土层;〈2-1B〉淤泥、淤泥质土;〈6H〉全风化花岗岩;〈7H〉强风化花岗岩;〈8H〉中风化花岗岩。地下水位埋深在 0 ~ 3.70 m。



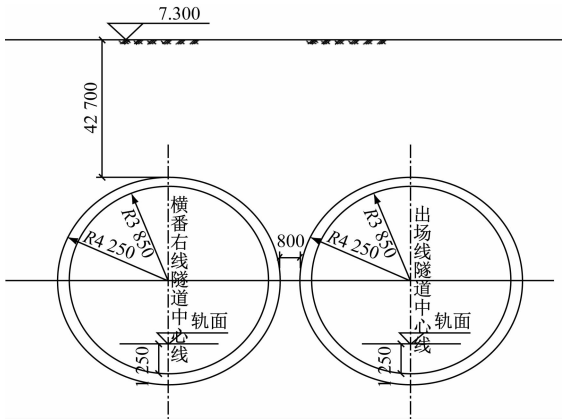
图 1 线路示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the line

2 盾构机选型及刀盘主要参数

本区间盾构(洞通段最后 89.6 m 为花岗岩地层)选用了罗宾斯公司生产的 2 台外径为 8.78 m 的土压平衡盾构机,并由中国铁建重工集团股份有限公司进行了改造。盾构机刀盘主要参数见表 1。

3 大埋深洞通涌水控制技术

由于盾构机在深埋的地下水中,岩层裂隙发育



注:标高以 m 计,其余尺寸以 mm 计。  
图 2 两并行隧道关系示意图

Fig. 2 Diagram of relationship between two parallel tunnel

表 1 盾构机刀盘主要参数

Tab. 1 Main parameters of shield machine cutterhead

主部件名称	参数或部件名	规格与数量
刀盘	开挖直径/mm	8 830
	中心双刃滚刀/把	4 寸/17 寸(13.33 cm/56.67 cm)
	单刃滚刀/把	47 寸/17 寸(156.67 cm/56.67 cm)
	齿刀/把	122
	边刮刀/把	12
	仿形刀/把	1
	周边耐磨保护/周	1
	泡沫注射口/个	8
	磨损检测刀/把	2
	主轴承直径/m	5.2
刀盘驱动	功率/kW	1 900
	转速/(r/min)	0.3 ~ 4.0
	额定工作扭矩/(Nm)	14 900
	脱困扭矩/(kNm)	17 880

良好,当施工洞通时,开挖面的土压力会逐渐减小,易导致支撑面坍塌、涌水、地面沉降和塌陷等问题。因此,在洞通前,必须根据地质条件进行合理的端头加固。

地勘资料显示,本区间始发段隧道洞身上部分别为人工填土层、淤泥、淤泥质土、全风化花岗岩,强风化花岗岩,中风化花岗岩。为保证盾构机顺利洞通,本工程对洞通端头范围进行超前土体加固。超前加固采用 WSS(二重管无收缩注浆)施工工艺,隧道顶部两排加固,第一排水平加固,第二排向上 10°加固,孔间距为 1 m,注浆压力控制在 1.5 ~ 2.0 MPa 之间。在加固完成之后,需对洞门钻芯取孔检

测,从而保障盾构安全洞通。

4 小净距施工控制技术

对于小净距盾构隧道施工而言,既有隧道会受到新建隧道扰动的不利影响。既有的隧道管片可能会出现严重的安全隐患,如轴线超限、管片形状变形、错台等。

为了确保隧道的安全贯通,本工程采取了以下措施:

1) 在隧道洞通之前,对接收端和小净距的区域进行土体加固,并严格控制加固桩的质量,以确保加固体的强度能够满足设计要求。

2) 新建隧道施工时,在成形隧洞内部设立支撑台车,对洞口通 20 m 处管片支护,以提高成型隧洞纵向总体刚性,有效分摊管片受力。

3) 洞通 15 环管片在 3、9 点位置采用 100 mm 槽钢进行连接,增加管片整体性。

4) 盾构掘进及拼装过程中要加强同步注浆和二次注浆,在管片托出盾尾 10 环之后要做二次灌浆,以保证管片背面灌浆密实<sup>[4]</sup>。

5 盾构掘进控制技术

5.1 不同掘进模式的特点及适用条件

复合式盾构机具有敞开式、半敞开式和土压平衡式 3 种开挖方法(见图 3),各种开挖方法各具特色,故其适用场景各异<sup>[5]</sup>。

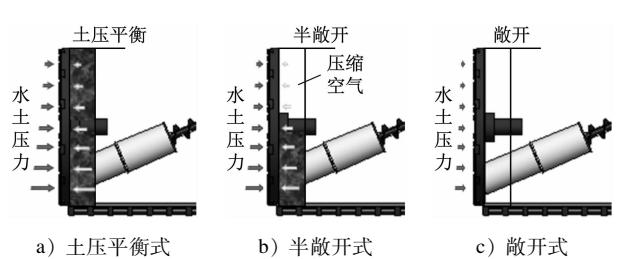


图 3 盾构掘进模式图

Fig. 3 Schematic diagram of shield tunneling modes

1) 敞开式。这种类型的钻探掘进模式与全断面硬岩隧道掘进机模式类似,在该模式中,盾构机留下的泥土在进入泥土室后由螺旋输送机排出,因此土仓中没有进一步渣土的堆积。土层基本上处于空洞状态,钻进过程中切割盘、螺旋输送机等阻力比较低,且土体内压为大气压,因此难以支持掘进面形成及预防地下水进入。该模式多应用在地下水少的自稳岩层中。

2) 半敞开式。半敞开式又被称为局部气压模式。掘进土仓不会被渣土充满,会留有一定空间,通过有效的方式来支撑开挖面和防止地下水渗入,具体措施是向土仓内注入压缩空气和渣土。该模式主要适用于具有自稳定能力且地下水压力较小的地层,其中压缩空气的压力可有效地防止地下水的渗透。

3) 土压平衡模式。土压平衡模式是将土仓用刀盘切削下来的碴土充满,并且由土压力及水压进行控制,以此稳固挖掘地层。该模式多应用在无法自行稳固的土壤层及含水较少地层上。

因洞通段隧道基本上处于全断面中风化花岗岩层内,洞通段进行了超前加固且效果良好,综合考虑决定采用气压平衡至无压模式完成洞通段掘进,根据围岩情况,制定 LP1 号盾构井—HP6 号盾构井区间出场线掘进模式。区间出场线掘进模式统计见表 2。

表 2 区间出场线掘进模式统计表  
Tab. 2 Statisticals of excavation modes for interval ecit track

里程	围岩情况	掘进模式
RDK02 + 701. 375— RDK02 + 654. 975	〈2-1B〉淤泥质土 〈5 N-2〉粉质黏土	土压平衡
RDK2 + 654. 975— RDK02 + 338. 175	〈5 N-2〉粉质黏土 〈6〉全风化泥质粉砂岩 〈7-3〉强风化泥质粉砂岩	土压平衡
RDK02 + 151. 941— RDK01 + 222. 341	〈6〉全风化泥质粉砂岩 〈7-3〉强风化泥质粉砂岩	半敞开式
RDK01 + 222. 341— RDK00 + 455. 941	〈7-2〉强风化泥岩 〈8-3〉中风化泥质粉砂岩	半敞开式
RDK00 + 455. 941— RDK00 + 347. 141	〈7H〉强风化花岗岩	半敞开式
RDK00 + 347. 141— RDK0 + 308. 741	〈8H〉中风化花岗岩	敞开式

5.2 盾构掘进方向控制

1) SLS-T(隧道自动导向)系统和人工测量技术。通过该自动导向系统对盾构机的姿态进行实时监测。用户可以实时监控隧道的设计轴线、盾构机当前的位置,并且根据监控结果,对其运行状况做出相应的调节,从而避免出现偏离预期的情况。为了更好地验证本自动导向系统的精度,建议每周至少对其进行两次人工检查,以便对自动导向系统的误差做出修订。

2) 盾构机推进油缸分区控制。基于线路特性,设置分段轴线的拟合控制方案,并利用自动导航系

统提供的盾构姿态数据,以及当前的隧道地质状况,可以对盾构机的推力油缸实施有效的分区调节。

为了更好地完成斜坡和曲线段的隧道施工,应该根据不同的情况增大某侧驱动系统的推力与速度参数。例如,在向上斜坡施工中,可调整驱动系统的下部油缸的参数;而在左向拐弯施工中,可调整驱动系统右侧油缸的参数。

在均匀地层上,应确保所有的推进器的推力和速度都是一致的;而在不同的地质界面下,应根据断面的特点,调整推进器的推力和速度,以达到最佳的掘进效果。

### 5.3 盾构掘进姿态控制

盾构掘进过程中可能存在偏离轴线的情况。为了确保安全,需要对盾构机的姿态和行为进行监控,以避免出现滚动和挖掘偏差。这些问题通常可通过以下方式解决:

1) 合理调节油缸的分区压力,以调整盾构机的姿态并纠正偏差。

2) 利用盾构机的超挖刀扩大隧道开挖面直径以适应急弯和变坡段。

3) 当盾构机滚角超限时,可以通过反转刀盘来有效地控制偏差。

### 5.4 盾构机的纠偏

根据盾构机的走向,即满足的关键点为管片圆环的轴线要与盾构机的轴线重合,在考虑纠偏调整的时候应考虑几点注意事项:首先,要根据推进油缸的行程分析,确保封顶块能拼装在行程最短的一侧;其次,需要仔细观察盾构机的运动状况,特别是当它朝右运动,且处于右侧运动轨迹最大的位置时,则需要特别留心第三个影响施工质量的关键因素——铰接,它可能会导致施工质量的下降;再次,当右侧铰接油缸的行程最小时,在拼装过程中须优先考虑将油缸拼装在行程最短处的两侧,使得圆环管片有向右的趋势,以减小管片与盾构机轴线之间的夹角;如果左侧的铰接最小时,那么拼在行程最短处也是可以的,因为盾构机已经有向左的趋势。从施工过程来看,当盾构机转弯方向与姿态方向相反时,如趋势过大(超过 $\pm 10\text{ mm}$ ),急纠的危害是巨大的,即从开始就调大推力压差,产生的结果是后点还要向外侧偏移。当盾构机掘进至 $400\text{ mm}$ 时,需适当调整压力差,即保证后点有向内侧移动的趋势,其后再调大压力差,这样更容易使前点向外侧移动,顺利完成纠偏。同时,这样也避免了过多的

超挖。

为了避免水平纠偏带来的问题,最佳做法是先保持垂直姿态,然后再进行水平纠偏。这样做可以避免在纠正一个方向时出现推进压差不足或脱顶等情况,并且可以避免因为一侧脱顶而导致管片拉开,从而保证防水和下一环的安装质量。应注意如下事项:

1) 在调整刀盘的转向时,应该留出一定的时间间隔,并且控制好刀盘切换的速度。

2) 为了确保安全,需要随着土层条件的变化而不断更新挖掘参数。在更改开挖方向之前,除需设置明确的预警值及阈值,并应制定应急处置程序。

3) 当采用蛇行施工技术来调整和校正路径时,应徐缓。在直线段施工,则需要将当前点和距离设计路径较远的点绘制成一条直线,并将其作为新的参考点,实施路径调整。如果采用曲线施工,则需要连接当前点和距离较远的点,同设计路径相切。应避免对油缸的油压进行过快或过大的调节。

4) 通过合理的安排和调整管片拼装点位,将有效地提高管道的安全性和准确性,并且让它们的端部尽可能地沿着设计轮径成 $90^\circ$ 。

5) 在盾构施工的全过程中,应按照相关技术规范进行测量和定位。

### 5.5 洞通掘进参数

在本工程区间中,对掘进参数、出土量、盾构姿态、同步注浆、设备状态等实时数据进行精准控制,并进行大数据统计分析,通过信息化系统对风险源、沉降数据等进行实时监控,顺利完成了大埋深、小间距洞通工作。其中盾构总推力控制在 $2\,000\sim 30\,000\text{ kN}$ ,刀盘扭矩控制值为 $2\,000\sim 4\,000\text{ kNm}$ ,掘进速度为 $5\sim 15\text{ mm}$ 。图4为沉降点动态检测截图。

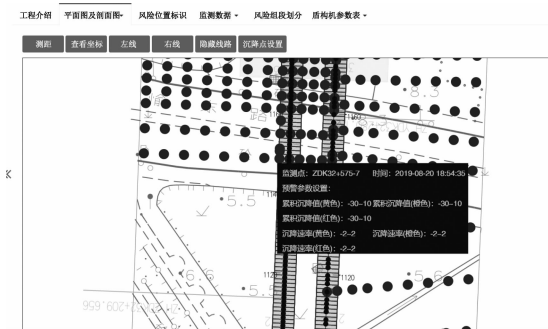


图4 沉降点动态检测截图

Fig. 4 Screenshot of dynamic detection of settlement points

## 6 结语

本文通过分析广州地铁 18 号线陇枕出场线和横番 5—横番 7 右线盾构区间盾构工程施工,详细介绍了大埋深、小净距大盾构洞通掘进过程中容易产生的工程事故及原因,并进行了针对性的研究分析,从盾构刀盘选型、大埋深洞通涌水控制技术、小净距控制技术和盾构掘进控制技术等方面对本工程进行总结分析,实现了大埋深、小净距大盾构安全高效洞通施工,为相关工程提供了数据参考和经验总结。

## 参考文献

[1] 张为善,苏斌.盾构过小半径曲线段施工技术[J].建筑工程技术与设计,2014(6):116.  
ZHANG Weishan, SU Bin. Construction technology of shield tunneling through small radius curved sections [J]. Construction Engineering Technology and Design, 2014 (6) :116.

[2] 卢岱岳,王士民,何川,等.新建盾构隧道近接施工对既有隧道纵向变形影响研究[J].铁道学报,2016,38(10):108.  
LU Daiyue, WANG Shimin, HE Chuan, et al. Research on effects of adjacent construction of new shield tunnel on longitudinal deformation of existent tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(10):108.

[3] 侯田春.广州地铁盾构施工关键技术研究[D].西安:长安大学,2017.  
HOU Tianchun. Research on key technologies of shield construction in Guangzhou Subway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.

[4] 马福东.盾构隧道穿越江底溶洞发育区若干关键技术探析[J].铁道标准设计,2018,62(1):93.  
MA Fudong. An approach to some key technologies of shield tunnel construction in Karst development area under river bottom[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(1):93.

[5] GHABOUSSI J, RANKEN R E, KARSHENAS M. Analysis of subsidence over softground tunnels[J]. Evaluation and Prediction of Subsidence, 1978:182.

(收稿日期:2021-05-17)



# 北京成为首个城市轨道交通与铁路票务融通城市

《北京城市总体规划(2016—2035 年)》提出:要将综合交通承载能力作为城市发展的约束条件,标本兼治,缓解城市交通拥堵;要坚持公共交通优先战略,加强需求调控,优化出行结构,提高路网效率,强化秩序管理,使各种出行方式和谐有序,加快构建安全、便捷、高效、绿色、经济的综合交通体系。北京市坚持以人为本,坚持慢行优先、公交优先、绿色优先,坚持优化供给、调控需求、强化治理,推进交通治理能力和治理体系现代化。

“轨道上的京津冀”初步建成,北京市域内全国铁路客运枢纽数量达到 7 个,规划的干线铁路和城际铁路基本建成,中心城区到毗邻城市时间缩短至 1 h,主要枢纽到津冀主要城市时间缩短至 2 h,提前完成规划目标。城市副中心交通框架加速形成,“一核两翼”交通联系更加便捷,京津冀交通一体化跃上新台阶。北京市绿色和集约出行环境“更友好”,城市轨道交通迈入由增量扩充到提质融合发展的新阶段。新线建设和既有线优化提升同步推进,交通与城市融合发展效果显现。中心城区和副中心轨道交通线网不断加密,“十四五”以来新开通运营 9 条(段)线路共 80 km;全面推进 11 条(段)共 231.3 km 轨道交通新线建设。截至目前,全市轨道交通线路总里程达 1 172 km,其中城市轨道交通线路 27 条、807 km。

北京铁路客运枢纽服务保障能力持续提升。朝阳站、丰台站配套交通枢纽正在加快推进主体工程建设。北京西站、清河站实现国铁和城市轨道交通安检互认,有效提升了换乘体验。通过 12306 网 App 刷码乘坐城市轨道交通业务的开通,使北京成为首个实现城市轨道交通与铁路票务融通的城市。通过持续完善“路市”协同联动机制,实现了北京各站到发旅客数据互通、信息共享;通过在客流高峰期采取城市轨道交通延时、公交加开、出租车和网约车保点等措施,提高了旅客疏散效率。

(来源:都市轨道交通网)