

# 盾构机分体钢套筒始发掘进施工技术

曹智俊 王少鹏

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

**摘要：**城市地铁建设中常面临盾构分体钢套筒始发施工难题，受场地、车站等条件限制。本文以深圳地铁某盾构区间为例，针对场地狭小、加固受限、需提前凿除洞门钢筋、下穿雨水箱涵、孤石侵入地质等问题，进行研究并成功应用，安全克服难题，提升施工效率与工程质量，为类似工程提供宝贵技术参考和实践经验。

**关键词：**地铁；盾构机；分体始发；施工技术

## 引言

随着城市轨道交通快速发展，盾构法成为地下隧道建设的主流方法。但在都市区施工，常面临场地狭小、地质复杂等挑战。如何安全、经济、高效地实现盾构钢套筒分体始发掘进成为研究重点。本文以实际项目为依托，深入剖析盾构机分体钢套筒始发掘进技术研究应用，旨在为类似工程提供成功案例和有效参考，推动工程技术的进一步发展。

## 1 工程概述

深圳地铁某盾构区间始发端车站场地长度约80m，始发洞门处因车站施工过程线路调整导致地连墙型钢和钢筋网部分侵入到隧道范围约2.5m影响盾构始发掘进，盾构始发即下穿4m×7m的雨水箱涵（水库泄洪通道）、埋深约4m的污水管道、电缆管沟等，始发段地层有微风化孤石侵入现象（孤石强度约83Mpa），盾构始发井与轨排井联通。针对该工况采取了盾构机分体钢套筒始发掘进的技术完成了施工任务，核心在于，面对施工现场空间受限问题，通过技术比选研究和规划，合理利用旋喷桩和水平袖阀管加固止水和分段洞门破除与回填法清除侵入洞门的型钢和钢筋；盾构机主机、台车部分进行合理分节改造进行阶段性掘进施工，提升了作业灵活性；对轨排井处钢套筒安装及加固技术应用使盾构机提前具备安全、封闭、压力稳定的掘进条件，通过填充适当的渣土、砂子和注水等，模拟真实的地层压力环境提前平衡地层水土压力，有效防止地层塌陷等潜在风险，保障施工安全；通过盾构掘进控制技术应用连续安全高效得通过了雨水箱涵以及局部孤石侵入的地段。该技术在轨道交通隧道的建设中得到了广泛采纳，成为推动城市交通基础设施建设的重要技术支撑<sup>[1]</sup>。

## 2 施工技术原理

### 2.1 盾构机分体改造技术

盾构分体始发技术专为解决场地狭小、施工难度大

等问题而设计。该技术基于复合式土压平衡盾构机的模块化构造，通过灵活调整盾构机主机与台车的组合，实现在有限空间的高效掘进。工作井内仅配置主机及必要辅助设备，如管片拼装机、注浆系统等，并对皮带机出渣口进行改造，以满足施工需求；分节断开部分采用特制延长管线连接，尽量减少液压系统断开，以降低改造难度；非必需台车可暂放于工作井外，待隧道长度足够后，再按顺序吊装下井组装，恢复盾构机完整功能，进入正常掘进状态。

### 2.2 钢套筒原理

钢套筒是一种密闭且坚固的钢结构容器，精确安装于工作井与隧道接口。盾构机主机在钢套筒内组装，随后填充渣土砂等固体散料并注水，以建立稳定可控的水土压力环境，平衡地层压力；此举旨在防止盾构机破洞后地层流失塌陷，从而控制地面沉降，保护周边建筑与地下管线。钢套筒的密闭性确保掘进过程中无外部水土侵入，保压性则维持套筒内压力稳定，避免地层扰动。钢套筒具备足够强度和刚度，能承受掘进中的各种荷载，如盾构机推力、土压力、水压力等，确保掘进过程平稳进行；此技术原理的应用，有效解决了盾构施工在复杂条件下的难题，提升了施工效率与安全性<sup>[2]</sup>。

## 3 施工流程与关键技术

### 3.1 施工准备

施工准备阶段主要是盾构分体钢套筒始发施工中的地质勘察、端头加固及洞门围护结构中型钢和钢筋的破除与回填、设备机具准备等工作。（1）地质勘察，深入勘探沿线的地质条件、周边环境、地下管线分布以及可能的障碍物等，获取地层的岩性、有无孤石或砂层侵入、各类土层厚度、地下水位、雨水箱涵、道路、管线等现状信息，为后续工作提供依据。（2）始发前对雨水箱涵底部1~3m厚的砾砂层进行钢花管水平注浆加固：主要加固范围6m×3m雨水箱涵下方砂层段，厚度3m，孔深

13.05m；2排钢花管1.6m×1.5m平行布置。（3）在始发端有限场地内采取3排三重管旋喷桩加固措施使围护结构附近形成止水帷幕，防止凿除过程出现地层水土流失失稳问题；加固范围至隧道轮廓线以外2m、纵向长度2.65m；其中影响的φ800mm砼污水管在加固完成后明挖施工恢复管道。（4）洞门凿除前在洞门范围水平钻孔（不小于2个/线）至加固区检查止水效果，而后自上而下分段进行地连墙围护结构中钢筋和型钢的破除，完成一段喷射砼恢复一段直至完成，喷射混凝土中加入一层玻璃纤维筋。（5）针对孤石侵入地段，通过地质加密钻探法勘察孤石分布、对揭露孤石进行深孔静态胀爆、注浆加固固结等预处理措施，有条件的进行深孔爆破处理。（6）明确盾构机分体的具体位置和改造方案、钢套筒的尺寸和安装方式、掘进参数的选择、延长管线的布置与保护措施、应急处理预案等，安装设备、刀具、润滑油、密封件等施工设备机具和物资材料准备充分。

### 3.2 盾构机及钢套筒安装

钢套筒尺寸内径6.8m、长11.4m，轴线到其底面高度3.55m，后部加强环采用内外环设计，活塞式内环设计（变形量 < 150mm）。管片作用在钢套筒的活塞式加强钢环内环上，中和反力作用下的变形量更好的紧贴反力架受力，避免出现钢套筒筒体受力变形问题。因盾构井与轨排井联通导致反力架上部无直接加固支撑点，须重点解决钢套筒及反力架支撑加固问题，防止反力架上部变形或浮动导致钢套筒变形问题。安装顺序如下：

（1）钢套筒下半部分分节安装并与洞门预埋钢环焊接加固紧密，测量辅助定位轴线拟合设计轴线；（2）钢套筒底部预填约15cm砂层并压实；（3）在下半部分钢套筒内组装盾体并与后配套连接；（4）盾体安装完成后，安装钢套筒上半圆，而后进行剩余部分反力架以及钢套筒加强钢环上半部分安装，安装完成后检查并复紧连接螺栓和接缝密封，对反力架上部进行双排300mmH型钢焊接的横梁加固至中板结构；（5）安装负环、盾构机刀盘推进至洞门掌子面，而后向钢套筒内回填充渣土或砂密实、注水充满，并通过1.5倍以上对应水土压力试验要求；（6）在盾构机调试完成后进行负环管片拼装和同步注浆<sup>[3]</sup>。

### 3.3 分体改造与始发掘进

（1）针对区间涉岩段、粘性土/风化岩地段的地质变化，优化区间盾构机选型适应性配置针对性的优化，选择6主梁的重型刀盘、35把18吋单刃滚刀、6把双联滚刀（约56HRC梯度硬度高韧性刀圈、刃口22mm、冲击韧性 $R \geq 30J/cm^2$ 以适应孤石地层）：刀盘、搅拌棒、螺旋机

等耐磨处理，增加泡沫管路确保渣土改良防止结泥饼，土仓可视化配置，土仓压力传感器检查校准，超前钻探装置等。（2）针对学北区间盾构始发端站内场地不满足盾构始发长度问题，盾构始发后配套（1节连接桥+7节台车）台车、皮带输送机、各类管线等进行分体改造，调整电瓶车配置（车头+2个渣斗+1个砂浆罐+1个管片车 = 31.6m，2趟/环）使满足始发施工要求。依照设备构造确定连接桥+（1#~5#）台车下井组装改造可满足基本掘进要求，6#（风冷系统）、7#（水管卷盘、风管）暂不下井不影响盾构机正常掘进；在2#（液压泵站）台车和3#（配电系统）台车中间管线延长（约50m）、皮带输送机及其出渣口改造使满足出渣要求。（见图1）（3）在2#台车（液压泵站）和3#台车（配电系统）之间管线延长50m；2#拖车以前部分随盾构机推进移动（3#~5#台车不移动），始发掘进后至2#/3#台车之间管线长度不足继续推进，将3#~5#台车向前迁移恢复与2#拖车连接，6~7#待前方拖车全部进入隧道不影响出渣口出渣后下井完成全部拖车组装。（4）皮带输送机及其出渣口改造：因受车站结构出渣口位置限制，须将皮带输送机出口（结构总重约3吨）从5#台车尾部改装至2#台车尾部并采用型钢对临时托架加固，皮带输送机运行范围从5#台车改装至2#台车尾部（皮带另行焊接）；在皮带机出口进入反力架之前拆除（3~5#拖车连接后不影响电瓶车渣土垂直运输，使用龙门吊拆除较洞内拆除方便），也可等隧道满足整机长度后拆除（延长管线较长、皮带机出渣口在洞内改造过程难度较大）。（5）6~7#台车恢复、分体始发台车改造全部完成恢复连接。（6）待5#台车前部分全部进入隧道内满足6~7#台车长度后，安排6~7#台车下井至底板电瓶车轨道上，使用电瓶车牵引与以前部分连接完成台车的全部组装恢复。

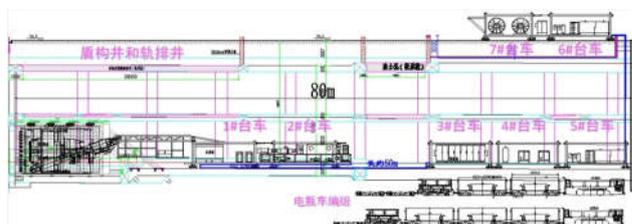


图1 盾构始发端场地布置纵剖面图（2列不满编的电瓶车编组）

### 3.4 延长管线保护与拆除

在分体始发过程中，延长管线长期处于动态变化状态，因管线种类较多，先在车结构底板铺设塑胶垫板再将管线沿线路轴线方向线性折叠铺设（电缆、冷却水管为软管），分别将水管、电缆等管线用盘带束紧；为防

止管线束拖拉力过大影响管线安全,在管线束下方2m间距放置小托车以便管线随推进移动,减少线路上的拖拉力保护线路。对延长管线定期检查和维修,确保其始终处于良好的工作状态。当掘进长度达到预定要求后停止掘进拆除延长管线和组装剩余台车。在拆除过程中,须注意保护周围设备及管线,避免拆除作业对其造成任何损坏;拆除完成后,还将对拆除区域进行彻底清理和整平,为后续整机掘进作业的顺利进行做好充分准备。

### 3.5 盾构始发掘进段关键施工技术

(1) 主要掘进参数控制技术。1) 土仓压力: 设置根据静止土压力 $K_0\gamma H$ 公式计算( $K_0 = 0.5$ ,  $\gamma = 20$ , 始发端 $h = 9\sim 11.8\text{m}$ , 即 $0.9\sim 1.2\text{bar}$ 、波动范围 $\pm 0.1\text{bar}$ ); 在下穿雨水箱涵、孤石段土仓压力大于计算土压 $0.2\sim 0.3\text{bar}$ , 保压困难时高仓位掘进。掘进过程中土压保持相对稳定, 具体压力值根据地表监测反馈适当调整。2) 刀盘转速: 一般土层时 $1.0\sim 1.3\text{r/min}$ , 遇到孤石或破桩时 $0.8\sim 1.1\text{r/min}$ (波动较大是取小值; 有卡刀盘、卡螺旋机或判断孤石跟随刀盘转动时 $0.1\sim 0.8\text{r/min}$ 尝试逐步调节)。3) 掘进速度: 孤石群强度较大(主要抗压强度范围 $70.4\sim 99.8\text{Mpa}$ , 局部 $45\sim 70\text{Mpa}$ ), 主控掘进速度, 实现控制贯入度的目的; 根据岩体抗压强度、破岩滚刀承载能力参数、刀具轨迹参数, 通过计算滚刀破岩作用力及扭矩理论范围, 来控制破刀具刃口切入掌子面岩体的深度和转速。4) 刀盘扭矩: 刀盘扭矩是刀具切削掌子面受到冲击力大小的直接体现, 通过减小总推力和掘进速度, 以及做好渣土改良来降低刀盘扭矩。当扭矩波动较大时, 应立即停止掘进, 停止刀盘转动, 进行转换刀盘转向, 并降低掘进速度; 当扭矩长时间波动较大时, 应停机, 并根据地质情况选择带压进仓或常压进仓方式进行刀具的检

查。多数情况下扭矩居高不下时, 刀具均受到不同程度的磨损, 需要更换新刀。刀盘扭矩控制波动范围 $\leq 1800\text{KN}\cdot\text{m}$ , 瞬时扭矩波动 $< 400\text{KN}\cdot\text{m}$ 。5) 总推力: 始发段总推力不宜过大, 保持专人观测反力架、洞门、钢套筒处有无变形异常等, 第4环(破桩)~第30环总推力 $< 1000\text{KN}$ , 后续根据掘进地层不同适当调整总推力(主控范围 $\leq 15000\text{KN}$ ), 掌子面压力+盾体摩擦力+尾盾铰接拉力+土仓压力+设备桥铰接拉力=总推进力。(2) 壁后注浆“注浆压力、注浆量”双控, 根据地表沉降和壁后注浆效果检查适当调整二次注浆量; 洞门处前10环以水泥-水玻璃双液浆为主、单液浆辅助并钻孔检查注浆效果。(3) 在掘进过程中, 对周围环境的排专人值班观察和反馈现场有无异常, 尤其是地层沉降、地下水位波动等关键指标, 提前完成应急准备和预防措施, 确保施工安全。

### 结束语

盾构机分体钢套筒始发掘进技术在复杂地质与有限场地条件下成功应用, 地表沉降、环境变形可控, 顺利完成穿越建构筑物 and 孤石掘进, 展现安全可靠经济等优势。展望未来, 该技术将适应地下隧道建设复杂环境, 展现独特魅力, 成为行业发展的重要推动力量。本文案例为类似工程提供宝贵经验, 助力行业技术进步。

### 参考文献

- [1]马伟东.盾构密闭钢套筒平衡始发施工工艺研究[J].工程技术研究,2020,4(10):53-54.
- [2]郭清华.采用钢套筒进行盾构始发的关键施工技术[J].建筑机械化,2020(10):64-66.
- [3]李建平,叶丽君.承压水砂性地层中盾构钢套筒始发技术应用[J].市政技术,2020,35(5):89-92.