

# 复杂地质条件下地铁盾构钢套筒始发施工技术研究

## ——以济南地铁9号线荷花路站~小清河东站区间为例

王恒旭

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

**【摘要】**：随着城市地铁建设向复杂地质区域延伸，盾构始发作为关键工序，安全与质量至关重要。钢套筒始发技术可有效解决复杂地层洞门密封、土体失稳等难题，应用广泛。本文以济南地铁9号线荷小区间为背景，结合该区间上软下硬、富水及周边环境敏感等特点，研究钢套筒始发重难点及关键技术，优化施工工序，解决多项技术难题，确保施工安全高效，旨在为类似工程提供参考。

**【关键词】**：钢套筒始发；复杂地质；盾构施工；密封防渗；施工控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.08.085

当前地铁建设常面临复杂地质与敏感周边环境的双重挑战，传统盾构始发工艺易出现渗漏、沉降等问题，制约施工安全与效率。钢套筒始发技术凭借无需大规模加固、密封性能好等优势，成为复杂地层盾构始发的优选方案。济南地铁9号线荷小区间地质水文复杂、工期紧张，且需进行钢套筒平移，施工难度大，因此开展本技术研究，具有重要的工程实践意义。

### 1 工程概况

济南地铁9号线荷小区间起于小清河东站、止于荷花路

站，全长约1959.9m，采用盾构法施工，投入2台盾构机分左右线掘进。线路纵断面为“V”字坡，始发段25%下坡转27%上坡，最小曲线半径450m，采用钢套筒辅助始发，因代建商业地块需平移钢套筒及盾构机，增加施工难度。工期紧张，右线、左线盾构始发计划分别于2024年8-9月、9-10月完成。区间穿越第四系松散层及岩浆岩风化层，地质复杂，地下水丰富，周边有济青高铁等I、II级风险源及多条市政管线，对施工沉降控制要求极高。区间内岩土体物理力学参数详见表1。

表1 荷花路站~小清河东站区间岩土体物理力学参数

地层编号	岩土名称	天然重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	固结快剪凝聚力 $c$ (kPa)	固结快剪内摩擦角 $\phi$ (°)	直剪快剪凝聚力 $c$ (kPa)	土的静止侧压力 $k_0$	饱和抗压强度 $f_{rk}$ (MPa)
⑦1	粉质黏土	19.9	32.7	14.7	24.7	0.41	—
⑨	粉质黏土	19.6	33	17	27.4	0.36	—
⑨1	粉土	19.7	19.7	25.4	15.4	0.36	—
⑨2	粉质黏土	19.9	31.8	18.4	28.6	0.34	—
⑪1	粉质黏土	19.7	33.6	16.6	33.1	0.29	—
⑫	粉质黏土	19.8	39.2	18.7	31.5	0.32	—
⑬1	粉质黏土	19.8	39.5	18.1	36.8	0.30	—
⑳2	强风化辉长岩	24	—	—	—	—	—
⑳3	中风化辉长岩	28.2	—	—	—	—	102.4

### 2 复杂地质条件下钢套筒始发施工重难点分析

结合荷小区间地质、水文及周边环境条件，钢套筒始发施工的重难点主要集中在钢套筒设计与安装、密封防渗漏、反力

架系统稳定、盾构及钢套筒平移、始发掘进参数控制等方面，具体分析如下：

## 2.1 钢套筒设计与安装重难点

钢套筒的设计与安装质量直接决定始发施工安全，荷小区间上软下硬、富水地层对其强度、刚度及密封性要求极高。重难点主要表现为：（1）需适配盾构机及始发井结构，承受推进推力和填充材料压力，需合理设计壁厚、加强肋板及连接方式，防止变形破损；（2）始发井底板平整度、高程精度直接影响安装质量，偏差过大会导致密封不严、漏水漏泥；（3）各构件连接需焊接牢固、密封严密，尤其是与洞门钢环、反力架的连接处，是渗漏高发区。

## 2.2 密封防渗漏重难点

荷小区间地下水丰富，第四系松散层孔隙水渗透性强，密封防渗漏是始发核心难点：（1）洞门与钢套筒连接处为薄弱环节，洞门混凝土表面平整度偏差导致密封材料贴合不紧密，易形成渗漏通道；（2）钢套筒本体连接端面或筒体变形，会直接造成密封失效、漏水漏泥；（3）回填材料密实度不足，会使填充材料与钢套筒、盾构机间产生空隙，地下水易渗入引发安全隐患。

## 2.3 反力架系统稳定重难点

盾构始发时，推进推力通过反力架传递至始发井结构，其稳定性直接影响施工安全。重难点为：（1）需承受巨大推进推力，设计不合理、安装不牢固易导致反力架变形、移位甚至坍塌；（2）与钢套筒、始发井底板的连接需牢固，连接部位强度需达标，避免松动失效；（3）推进过程中推力变化会改变其受力状态，需实时监测变形，及时调整掘进参数。

## 2.4 盾构及钢套筒平移重难点

受代建商业地块影响，钢套筒及盾构机下井后需向前平移，重难点为：（1）平移时两者受力不均，易导致钢套筒变形，影响密封效果及盾构姿态；（2）平移后位置、姿态偏差需控制在允许范围，定位难度大，偏差过大会影响后续施工；（3）需减少底座与底板摩阻力，同时保障平移设备稳定，避免意外事故。

## 3 复杂地质条件下钢套筒始发关键施工技术

针对荷小区间钢套筒始发施工的重难点，结合工程实际，优化制定钢套筒设计、安装、回填、平移、始发掘进等关键工序的施工技术，确保施工安全、高效进行。

### 3.1 钢套筒设计优化技术

结合荷小区间地质条件及盾构机参数，对钢套筒进行优化

设计，确保其强度、刚度及密封性满足施工要求：（1）钢套筒尺寸设计：根据盾构机主机尺寸（直径6.4m），钢套筒内径设计为6.6m，壁厚采用16mm钢板，确保钢套筒有足够的强度承受推进推力及填充材料压力；钢套筒长度根据始发井尺寸及盾构机主机长度确定为12m，分为上下两部分，便于下井组装。（2）加强肋板设计：在钢套筒筒体外壁设置环形加强肋板（间距1.5m）及纵向加强肋板（每侧4道），加强肋板采用16mm厚钢板，与钢套筒筒体焊接牢固，增强钢套筒的刚度，防止钢套筒变形。（3）密封结构设计：钢套筒与洞门钢环连接处采用双层密封结构，内层采用遇水膨胀橡胶止水条，外层采用密封胶填充，确保密封严密；钢套筒各构件连接处采用焊接密封，焊接缝需进行探伤检测，确保焊接质量，避免渗漏。（4）反力架设计：反力架采用型钢焊接而成，尺寸适配钢套筒及始发井结构，反力架与钢套筒之间设置缓冲垫，减少盾构推进时的冲击力；反力架底部与始发井底板采用膨胀螺栓固定，两侧与始发井侧壁采用型钢支撑，确保反力架稳定。

### 3.2 钢套筒安装施工技术

钢套筒安装需严格控制安装精度，确保密封严密、连接牢固，具体施工步骤及技术要点如下：（1）安装准备：清理始发井底板，平整场地，采用C30混凝土将底板找平，确保底板平整度偏差 $\leq 5\text{mm}$ ；根据盾构机安装中心线，在底板上弹出钢套筒安装定位线，标注反力架、钢套筒各构件的安装位置。

（2）钢套筒下井组装：将钢套筒上下两部分分别采用50t龙门吊下井，按照定位线进行组装，先安装下半圆钢套筒，调整其高程及水平偏差，确保偏差 $\leq 3\text{mm}$ ；再安装上半圆钢套筒，采用螺栓连接上下两部分，连接螺栓需拧紧，扭矩控制在 $300\text{N}\cdot\text{m}$ 以上。（3）钢套筒定位调整：采用全站仪对钢套筒的位置、姿态进行测量，调整钢套筒的中心轴线与盾构机安装中心线重合，水平偏差、高程偏差均控制在允许范围内；调整完成后，采用型钢将钢套筒临时固定在始发井侧壁上，防止钢套筒移位。（4）反力架安装：按照设计位置安装反力架，调整反力架的垂直度，确保反力架与钢套筒端面贴合紧密，间隙采用缓冲垫填充；反力架底部膨胀螺栓安装完成后，进行拉拔试验，确保承载力满足设计要求；反力架安装完成后，检测焊接质量，对焊接缝进行探伤检测，不合格部位及时返修。（5）密封处理：钢套筒与洞门钢环连接处，先安装遇水膨胀橡胶止水条，再填充密封胶，密封胶需填充饱满、密实，无空隙；钢套筒各构件连接处的焊接缝，采用密封胶进行二次密封，确保密封严密。

### 3.3 钢套筒回填施工技术

钢套筒回填的目的是填充钢套筒与盾构机、洞门之间的空隙，形成密封体系，同时为盾构推进提供反作用力，回填材料

采用中粗砂，具体施工技术要点如下：

(1) 回填准备：盾构机主机安装调试完成后，将盾构机向前推进至刀盘面板贴近洞门掌子面，调整盾构机姿态，确保盾构机与钢套筒同心；清理钢套筒内的杂物，检查密封结构的完整性，确保无破损、渗漏。(2) 回填施工：采用中粗砂进行回填，中粗砂需提前晾干，含水量控制在15%~20%，确保回填密实；回填采用分层回填，每层回填厚度为30cm，采用小型振捣器进行振捣，振捣密实度 $\geq 95\%$ ；回填过程中适当加水，边加水边振捣，确保中粗砂填充饱满，无空隙。(3) 回填检测：回填完成后，采用环刀法对回填密实度进行检测，每2m检测一个点，确保密实度满足设计要求；同时检查钢套筒的变形情况，若发现钢套筒变形量过大，及时采取加强措施，补加加强肋板。

### 3.4 盾构及钢套筒平移施工技术

针对荷小区间钢套筒及盾构机平移需求，制定专项平移方案，确保平移过程安全、精准，具体技术要点如下：(1) 平移准备：清理始发井底板，将底板抽水清理干净，铺设16mm厚钢板，钢板接缝焊接并打磨平整，钢板上抹黄油，减少底座与钢板之间的摩擦阻力；检查平移设备（液压千斤顶、滑轨等）的性能，确保设备正常运行；采用全站仪在底板上弹出平移定位线，标注平移距离及终点位置。(2) 平移施工：采用4台50t液压千斤顶作为平移动力，千斤顶对称布置在钢套筒两侧，同步施加推力，控制平移速度为5cm/min，确保钢套筒及盾构机平稳平移；平移过程中，安排专人实时测量钢套筒及盾构机的位置、姿态，及时调整千斤顶的推力，避免受力不均导致钢套筒变形；液压泵站操作人员与监视人员密切配合，及时反馈平移情况，发现异常立即停止平移。(3) 定位固定：平移至设计位置后，采用全站仪对钢套筒及盾构机的位置、姿态进行检测，确保偏差 $\leq 3\text{mm}$ ；检测合格后，采用型钢将钢套筒固定在始发井侧壁及底板上，拆除平移设备，对钢套筒的密封结构进行再次检查，确保密封严密。

### 参考文献：

- [1] 崔设梁.地铁盾构密封柔性钢套筒安全接收技术工艺研究[J].建筑安全,2024,39(05):19-23.
- [2] 黄国根.钢套筒始发技术在地铁盾构施工中的应用[J].城市道桥与防洪,2024,(04):166-169+192+21.
- [3] 吴向前.适用于上软下硬地层的地铁盾构钢套筒始发技术应用分析[J].四川水泥,2024,(02):209-211.
- [4] 黄江.呼市地铁2号线盾构钢套筒始发关键技术研究[J].工程机械与维修,2021,(06):111-113.
- [5] 周龙.地铁盾构钢套筒接收施工风险评价及应对措施研究[D].兰州交通大学,2020.

### 3.5 始发掘进参数控制技术

结合地层特点优化参数，保障平稳始发：(1) 推力与扭矩：始发阶段推力8000~10000kN、扭矩3000~3500kN·m，上软下硬地层调整千斤顶油压控姿态，硬岩段降速增扭矩；(2) 土仓压力：富水地层采用土压平衡模式(0.15~0.25MPa)，实时监测调整；(3) 出土量：双控制（理论每环10.8m<sup>3</sup>，实际10.8~11.3m<sup>3</sup>），避免超挖；(4) 渣土改良：注入泡沫剂(3%~5%添加剂)及高分子聚合物（富水层0.5%~0.9%），刀盘每环喷水2.5~3.8m<sup>3</sup>；(5) 管片拼装：15~20min/环，拼装后同步注浆（压力0.2~0.4MPa，每环12~15m<sup>3</sup>）。

### 3.6 密封防渗漏及应急处理技术

针对荷小区间富水地层特点，加强钢套筒密封防渗漏控制，制定应急处理方案，确保施工安全：(1) 密封监测：安排专人实时观察钢套筒的密封情况，重点检查钢套筒与洞门连接处、各构件焊接缝及钢套筒本体，发现漏水、漏泥现象，立即停止掘进，采取处理措施。(2) 渗漏处理：若出现轻微渗漏，采用密封胶填充渗漏部位，压紧压实，确保密封严密；若渗漏较为严重，立即关闭螺旋输送机后门，向钢套筒内注入双液浆（水泥-水玻璃），快速封堵渗漏通道，待浆液凝固后，再继续掘进。(3) 应急物资准备：在始发井及洞内配备足够的应急物资，包括双快水泥、水玻璃、麻袋、钢板、电焊机、水泵等，确保出现险情时能够及时处理；成立应急领导小组，实行24小时在岗制度，确保应急处置及时、有效。

## 4 结语

本文围绕济南地铁9号线荷小区间钢套筒始发施工，明确了工程概况及施工重难点，提出了针对性的关键施工技术。通过优化钢套筒设计、严控施工工序、强化应急保障，有效解决了复杂地质及敏感环境下的施工难题。研究成果验证了钢套筒始发技术在类似工程中的适用性与可靠性，可为后续复杂地质条件下地铁盾构钢套筒始发施工提供实践指导与技术支持，推动该技术的进一步推广应用。