

城市核心区小半径曲线地铁盾构施工风险防控技术

刘龙飞

四川通发广进人力资源管理咨询有限公司 四川 成都 611730

【摘要】：城市核心区小半径曲线地铁盾构施工受线路曲率、地层扰动、建构筑物密集和交通占道限制共同约束，风险由曲线超挖、盾尾间隙、同步注浆和地表沉降链条传递到管线、桩基和既有隧道。本文界定小半径曲线盾构风险及核心区特殊性，辨析沉降控制、姿态纠偏、管片拼装、注浆协调和组织衔接难点，提出地表沉降监测平台、分环姿态控制、同步注浆联动和敏感区应急流程。土仓压力、推进速度、盾尾间隙、每环注浆量和沉降速率应纳入同一控制窗口。

【关键词】：城市核心区；小半径曲线；地铁盾构；风险防控；同步注浆

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.022

引言

城市核心区地铁区间常要避让既有建筑桩基、地下管线、桥梁基础和既有轨道交通结构，线路平面半径被压缩后，盾构机在曲线段的盾体姿态、管片环面和开挖轮廓很难保持平行的对称受力状态。盾构机械状态、推进节奏和周边环境响应之间存在明显耦合，单项参数偏离可能经停机、超挖、欠注或过量纠偏放大施工风险。小半径曲线段防控应把开挖面平衡、盾尾注浆、管片成环和地表监测纳入连续判断。

1 核心区小半径地铁盾构风险防控概述

1.1 小半径曲线盾构施工风险界定

小半径曲线盾构施工风险由线路曲率、盾体长度、盾尾间隙和周边敏感目标共同决定。曲率半径减小时，盾构机外侧应要更大的超挖或通过铰接调整盾体姿态换取空间，内外侧油缸油压差、刀盘扭矩波动和盾壳摩擦不再沿轴线均匀分布；土体损失区随曲线向外侧偏移，地表沉降槽也会出现非对称形态^[1]。轨道交通盾构施工的风险管控已从单一掘进安全扩展到土体、管片、注浆和周边环境的联合控制。本题所称风险防控技术，指对开挖面平衡、姿态纠偏、管片成环、同步注浆、地表沉降和敏感目标响应进行连续识别与处置的施工技术组合。

1.2 城市核心区盾构施工风险特殊性

核心区地下空间的风险边界更窄，盾构上方可能分布多层管线、浅基础建筑、地下通道和道路荷载，沉降控制不能只按隧道中心线附近的最大值判断。新建道路及管线临近地铁区间施工时，施工扰动会改变既有结构与周边土体的相互作用，局部位移、差异沉降和管线接头张开常比整体沉降更早暴露风险^[2]。小半径曲线段还会使盾尾同步注浆在内外侧形成不同填充效率，若监测点布设仍沿直线段对称展开，外侧地层损失和内侧管片受压很容易被平均值掩盖。核心区防控应要把建构筑物、管线和既有隧道作为受影响对象分区管理，并把沉降速率、水平位移和结构倾斜纳入同一预警口径。

1.3 小半径曲线掘进防控技术应用价值

小半径曲线掘进防控技术的价值在于把线形控制、环境保

护和施工效率统一到可执行的参数窗口。曲线段若只强调低速推进，盾构停留时间延长会增加开挖面扰动和盾壳摩擦；若只追求快速推进，姿态偏差、管片错台同步扩大和盾尾间隙又会缩小。小净距叠落地铁隧道盾构施工相互影响案例说明，盾构施工对既有或邻近隧道的影响不仅取决于净距，还取决于空间关系、掘进顺序和注浆补偿能力。小半径曲线防控技术依托提前预偏、分环纠偏、差异化油缸推力和分区注浆，把不可避免的曲线扰动分散到多个施工环，降低单环突变对地层和管片的冲击。

2 城市核心区小半径曲线盾构施工风险防控难点分析

2.1 建构筑物密集与沉降控制的约束困境

建构筑物密集区的沉降控制难点落在差异变形链条上。曲线外侧土体损失增大后，沉降槽最大点偏离隧道轴线，邻近桩基先承受附加弯矩，管廊接口随后出现局部拉开，柔性管线接头再表现为剪切错动。盾构下穿既有运营隧道时，上覆结构变形和地表沉降之间会出现时间差，施工风险不能等到地表累计沉降值接近限值后再处置^[3]。同一阈值覆盖全部测点会削弱敏感建筑附近快速沉降的辨识能力，过度降低推进速度还会增加盾壳停滞摩擦和掌子面压力波动。建筑基础形式、管线材质、埋深和曲线外侧距离共同决定分区阈值，曲线段接近浅基础建筑时，外侧沉降点读数应与盾尾注浆量、出土量和相邻环姿态对齐，再判断地面补浆或建筑临时加固动作。

2.2 曲线姿态识别与纠偏预警的精准性不足

曲线姿态识别的核心问题是设计轴线、盾构实际轴线和管片分环轴线并不完全重合。盾构机刀盘及前盾沿曲线进入目标方向时，盾尾仍受上一环姿态约束，若只依据当前盾构姿态作大幅纠偏，盾尾间隙会缩小和管片环面容易产生偏压。城市核心区常存在钢筋混凝土结构、车辆振动和管线保护套管，自动测量数据会受到遮挡、反射和施工车辆占位影响，短时异常读数不宜直接转化为油缸推力调整^[4]。曲线段预警应要同时读取水平偏差、竖向偏差、滚转角、盾尾间隙和相邻管片错台，只

有多个指标沿同一方向持续偏离时才进入参数调整。精准性不足往往不是仪器精度单项问题，而是测量频次、数据清洗、纠偏幅度和施工环号没有形成同一时间坐标。

2.3 管片拼装适配与同步注浆协调的结构性矛盾

管片拼装和同步注浆在曲线段承担相反但必须协调的任务：管片应要按设计曲线形成稳定环面，注浆则要尽快填充盾尾空隙并抑制地层损失。外侧超挖增大后，若每环注浆量仍按直线段平均控制，外侧空隙填充不足会诱发沉降，内侧过量注浆又可能推挤管片并引起错台。地铁施工中周边管线和建构筑物沉降控制技术强调监测、注浆和施工参数的联动关系，曲线段更应要把注浆压力、注浆量和管片姿态放到同一环号下核对。管片拼装适配还受楔形量、螺栓复紧和盾尾刷密封状态影响，单纯提高注浆压力不能替代环面质量控制；注浆协调必须服务于管片成环后的空隙分布，而不是追求全断面压力均衡。

2.4 施工组织能力与专项技术应用的断层问题

专项技术能否发挥作用，取决于施工组织能否把监测、掘进、拼装、注浆和应急处置连成同一作业节奏。核心区夜间施工窗口短，渣土外运、材料进场和交通疏解受到外部条件约束，盾构掘进支护参数及姿态调整常被现场组织节拍打断。地铁车站明挖法施工管理经验显示，关键技术管理应要把施工工序、质量控制和现场创新放在统一调度下执行；区间盾构施工同样应要把测量复核、管片供应、浆液制备、设备维保和出渣情况前置到曲线段掘进计划中。断层问题通常出现在交接位置：监测读数、盾构姿态、注浆方量和工期调度若分别进入不同指挥口径，现场处置会在同一环号上互相牵制。风险防控技术若缺少共同判据，现场会形成多套局部正确但相互抵消的动作。

3 核心区小半径地铁盾构风险防控技术策略

3.1 构建地表沉降监测平台

地表沉降监测平台应围绕曲线外侧、建筑基础边线、管线接头和既有隧道投影设置分级测点，测点间距和采集频次随施工环号动态调整。常规段可按日读数控制，盾构进入敏感区前20环应提高到每环或每两环一次的快速复核，曲线外侧沉降点、既有建筑倾斜计和管线位移点同时进入预警判断。平台不只是数据展示界面，还要把盾构环号、土仓压力、推进速度、注浆压力和每环注浆量同步写入同一时间轴^[5]。沉降监测平台据此把地层损失区、超挖间隙和敏感目标位置对应起来，避免预警只停留在地表单点位移。平台还应保留测点失效、遮挡和异常跳变记录，读数进入预警前先完成相邻测点趋势比对，避免单个测点误差直接改变盾构参数。图1给出了曲线段风险剖面中的主要受影响对象。

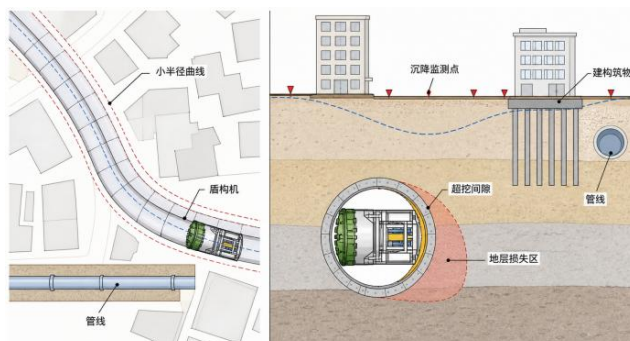


图1 小半径曲线盾构施工风险剖面示意

图1中，超挖间隙和地层损失区集中在曲线外侧，沉降监测点与建构筑物、管线位置形成同一风险剖面；监测平台据此把曲线段的空间偏移纳入点位布设。

3.2 优化小半径曲线姿态控制技术

小半径曲线姿态控制宜采用提前预偏、缓慢纠偏和分环校核的组合方法。盾构进入曲线前先根据曲率半径、盾构机长度和铰接能力设定预偏量，进入曲线后依托铰接偏量，内外侧油缸推力差、推进速度和刀盘扭矩控制姿态变化，单环纠偏量不宜过大，严禁追求纠偏一次到位。预偏环数设为20环时，盾构进入敏感曲线段前开始调整，单环水平纠偏控制在8mm以内，连续3环转角变化不超过0.15°，盾尾间隙低于35mm时暂停加大推力差，外侧超挖量控制在45mm以内^[6]。姿态控制的关键是把纠偏动作分散到多个环号，使盾构机前盾、盾尾和已拼管片之间保持连续过渡。当实际轴线持续贴近曲线外侧时，纠偏动作优先分配给后续连续环，管片拼装同步检查螺栓增加复紧次数和管片楔形量调整，使盾尾间隙恢复过程不再制造新的错台风险。图2展示了设计轴线、实际轴线、分环轴线和盾尾间隙之间的控制关系。

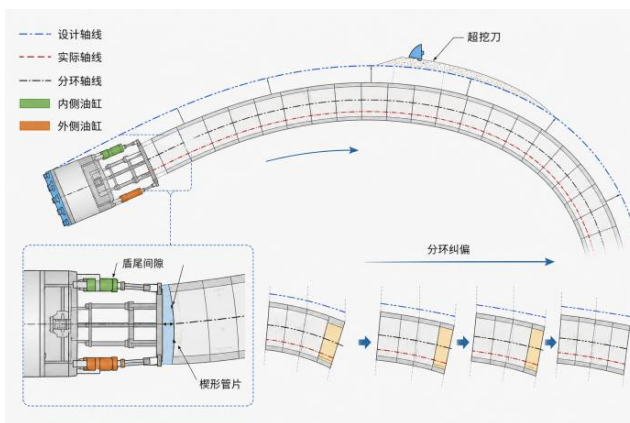


图2 小半径曲线盾构姿态分环控制示意

图2中，实际轴线相对设计轴线缓慢贴合，内外侧油缸推力差和楔形管片共同控制盾尾间隙，分环纠偏序列表明曲线姿态调整应分散完成。

3.3 推进掘进注浆控制深度融合

掘进参数和同步注浆应按同一风险窗口调整,土仓压力用于稳定开挖面,推进速度影响扰动持续时间,总推力和刀盘扭矩反映地层阻力变化,每环注浆量和注浆压力决定盾尾空隙补偿效率。隧洞开挖直径 6.28m 普通曲线段土仓压力取 0.18MPa、推进速度取 32mm/min、每环注浆量取 5.20m³;建构筑物密集段土仓压力取 0.22MPa、推进速度取 24mm/min、每环注浆量取 5.80m³;既有管线穿越段注浆压力取 0.34MPa,沉降预警取 8mm,姿态偏差取 18mm。监测回传链条能够把地层响应直接转化为下一环参数修正,避免掘进班组和注浆班组分离决策。沉降响应曲线在 20 环后若仍向下发展,下一环应先压缩推进速度并加大外侧注浆补偿;曲线趋于回稳后,注浆压力保持在可建立浆液扩散的区间内,避免过压推挤管片。表 1 列出小半径曲线段参数窗口。

表 1 小半径曲线盾构掘进注浆控制参数窗口

控制工况	土仓压力 (MPa)	推进速度 (mm/min)	每环注浆量 (m ³)	注浆压力 (MPa)	沉降预警 (mm)	姿态偏差 (mm)
普通曲线段	0.18	32	5.20	0.28	12	24
建构筑物密集段	0.22	24	5.80	0.32	10	20
既有管线穿越段	0.20	22	5.60	0.34	8	18
曲线外侧超挖段	0.21	26	6.10	0.36	9	18
盾尾间隙偏小段	0.19	20	5.40	0.30	8	15
二次补浆跟进段	0.18	18	6.40	0.38	6	12

表 1 中,建构筑物密集段的推进速度为 24mm/min,每环

注浆量为 5.80m³;既有管线穿越段沉降预警为 8mm,姿态偏差为 18mm;二次补浆跟进段每环注浆量为 6.40m³,沉降预警为 6mm,参数窗口对应敏感目标越近、变形余量越小、注浆补偿越及时的控制逻辑。

表 1 完成参数窗口配置后,沉降响应还要沿环号观察变化过程。普通曲线段、建构筑物密集段和二次补浆跟进段的曲线差异,能够把静态参数窗口转化为连续施工响应,并进一步区分沉降持续发展、逐步趋缓和补浆后回稳三种状态。这种承接关系使参数调整不只停留在单环数值,而是对应到曲线外侧地层损失能否被及时补偿。图 3 将土仓压力、推进速度、总推力、刀盘扭矩、同步注浆和沉降响应放在同一反馈链中。

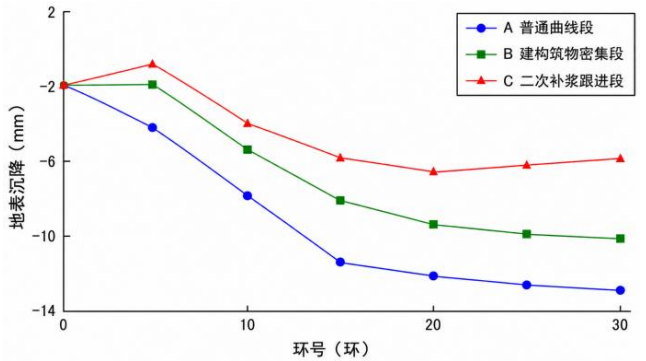


图 3 小半径曲线盾构沉降响应参数曲线

图 3 中,普通曲线段沉降随环号持续加深,建构筑物密集段因推进速度和注浆窗口收窄而逐步趋缓,二次补浆跟进段在 20 环后出现回稳,说明注浆时机对曲线外侧地层损失补偿具有直接影响。

4 结语

城市核心区小半径曲线地铁盾构施工风险防控,应把曲率引起的非对称扰动作为主线处理。盾构外侧超挖、盾壳摩阻、盾尾间隙、同步注浆和地表沉降在同一环号内连续传递,建构筑物、管线和既有隧道密集分布时,单点沉降值不足以支撑风险判断。分区监测、提前预偏、分环纠偏、掘进注浆联动和敏感区应急流程共同收窄控制窗口,使曲线段施工在安全、质量和城市运行约束之间保持可校核边界。

参考文献:

- [1] 胡欣,谭毅,尹璨.系统动力学视角下施工机械对地铁施工进度影响研究[J].山西建筑,2026,52(17):159-162.
- [2] 孟拓.轨道交通土建工程的盾构施工技术与管理[J].四川水泥,2026,(8):238-240.
- [3] 马鑫弟,陈鹏.新建道路及管线临近地铁区间施工安全影响分析[J].建筑技术开发,2026,53(8):85-87.
- [4] 雷保国,李浩然,谢开晋,等.小净距叠落地铁隧道盾构施工相互影响研究[J].建筑技术开发,2026,53(8):77-81.
- [5] 苏春旭.盾构下穿隧道开挖对上部地铁变形影响及施工风险分析[J].中国建筑金属结构,2026,25(14):49-51.
- [6] 张晓云,张龙,王东辉,等.地铁施工中周边管线及建构筑物沉降控制技术研究[J].汽车周刊,2026,(8):113-115.