

盾构在钢套筒内纠偏的新型填充工艺与应用

汤家兴

深圳地铁建设集团有限公司

摘要：盾构钢套筒始发在地质差、环境复杂条件下广泛使用。当盾构初始姿态超预期时，容易导致管片错台、渗漏、超限等问题，现有技术通过顶升、重新安装盾构等方式进行调整，造成工期延误和经济损失。为解决该问题，利用密闭钢套筒创造纠偏条件，在盾构重心位置设置虚拟支点，通过千斤顶分区加压提供偏转力实现盾构纠偏。文章对纠偏的原理、做法、应用效果进行详细阐述，实践证明，该技术可以在钢套筒内盾构初始姿态差的工程中推广应用。

关键词：盾构；钢套筒；曲线始发；纠偏；新型填充工艺

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.06.019

引言

国内对盾构纠偏技术有广泛研究：中铁十一局提出了盾体注浆辅助盾构始发姿态调整的方法^[1]；成都轨道公司报道了一种盾构始发用反力架及纠偏负环的方法^[2]；成都建工提出了一种盾构始发掘进与到达施工方法^[3]；中天建设集团提出了一种纠偏盾构机滚动角的方法^[4]；中铁二十三局报道了上软下硬地层中盾构姿态纠偏方法^[5]；文章^{[1]~[5]}对盾构进入土体后的纠偏机理和方法进行了阐述，但都没有在始发井内解决初始姿态差的问题。报道^[2]提出了利用可调整的反力架解决负环和反力架接触面不紧密的问题。尚未有在钢套筒内进行盾构姿态纠偏的研究。

当盾构机初始姿态超预期时，容易导致后续管片错台、渗漏等诸多问题，现有技术往往需要顶升、平推乃至重新安装盾构，造成工期延误和经济损失。为了解决该问题，利用密闭钢套筒创造纠偏条件，在盾构重心位置填砂袋设置虚拟支点，通过盾构机上的千斤顶分区加压提供偏转力，实现盾构在钢套筒内纠偏。研究新型填充工艺将钢套筒内的填料振密实^[6]，避免填料在震动和渗漏情况下产生渗流和砂土液化^[7]。通过工程实践发现盾构机在初始姿态超限50mm以内的时，采用新方法纠偏避免重新吊装产的经济损失和工期延误，提升盾构设备和钢套筒始发工艺的容错率。

一、泥水盾构在钢套筒内纠偏的概述

(一) 泥水盾构

泥水加压盾构法施工，指在盾构开挖面的密封隔仓内注入泥水，通过泥水加压和外部压力平衡，以保证开挖面土体的稳定。

(二) 钢套筒

钢结构拼装形成包裹盾构机的桶体结构，向钢套筒

内填砂等材料形成压力以抵御土体水土压力，改变常规始发、接收对掌子面无支护力，能有效避免产生掌子面坍塌风险。

(三) 曲线始发与纠偏

1. 曲线始发

隧道中线是盾构隧道掘进的中线，也是交付使用的线路。当隧道中线的曲线段处于盾构始发井结构内时，即为曲线始发。

2. 纠偏

测量中盾上的特征点，根据盾构参数，计算盾构姿态（盾构机实际位置与设计位置偏差值）与纠偏量。

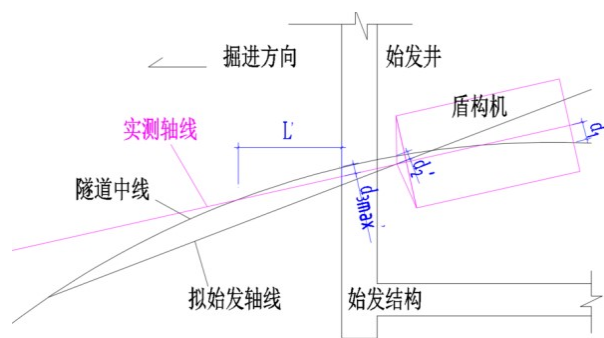


图1 曲线始发姿态图

二、采用新型填料方法进行盾构纠偏的原理

新型的填料方法在既有保持掌子面安全和稳定盾体、管片的基础上，具备纠偏能力。即在盾构重心位置填码3圈装有级配砂的砂袋，盾构在缓慢掘进过程中，级配砂在盾构机“揉搓”与砂袋约束作用下，嵌挤紧密，盾构纠偏以此作为支点，推进过程中采用千斤顶分区油缸控制施加偏转力，依靠杠杆原理实现盾体偏转。如图2。

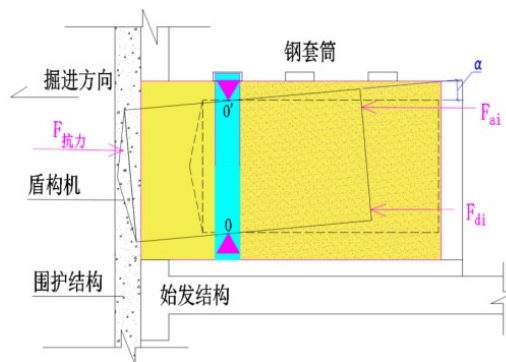


图2 纠偏原理图

纠偏前，泥水盾构泥浆透过砂在钢套筒和盾体之间的密封空间内对盾体形成浮力，抵消一部分盾体自重，减轻待纠偏抗力。前盾、中盾、尾盾采用楔形设计且 $D_{前盾} > D_{中盾} > D_{尾盾}$ 。在前盾外设置沙袋形成虚拟支点，不同部位千斤顶推进力差使盾体偏转，刀盘切削围护结构时，结构对盾体的抗力使盾体偏转。通过盾构刀盘抵近结构阶段和刀盘切削结构2个阶段的调整，使盾构机在始发井恢复到正常的设计线路状态。

钢套筒内的填料受盾体震动或者在管片接缝渗漏的作用下砂土抗剪强度为：

$$r = (\sigma - \Delta \mu) \operatorname{tg} \phi$$

式中： σ 为砂土所受的正应力； $\Delta \mu$ 为砂土所在位置的超静孔隙水压力； ϕ 为砂土的内摩擦角。当振冲力作用于在填料时， $\Delta \mu$ 增长，使 $\Delta \mu$ 趋近 σ ，此时导致填料抗剪强度为零。填料结构遭到破坏，出现填料液化现象。中、粗砂和泥浆混合料在激振力作用下，砂土颗粒重新排列，使砂土颗粒间孔隙比减少，相对密度增加，承载力提高。

三、操作方法

泥水盾构钢套筒内盾构初始姿态调整流程为：①确定纠偏目标，②反力架角度修正，③码沙袋、填料，④注入泥浆建立压力，⑤推进，提供盾体纠偏力，⑥纠偏完成。

（一）确定调整目标值

测量中盾上的特征点，根据盾构参数，计算盾构姿态。对比与拟始发姿态差别，重新评估始发轴线。若 $L' \geq L$ ，且 $d_{3max} \leq \pm 50\text{mm}$ ，正常始发。当 L' 小于 L ，或 $d_{3max} \geq \pm 50\text{mm}$ 时，确定需要纠偏的调整角度 α 。如图1。

（二）反力架角度修正

反力架是盾构向前推进力的钢结构基座。为使反力架和推进纠偏方向保持一致，使反力架朝着纠偏方向扭转一定角度，使扭转的角度： $\beta = L_{盾体长度} \times \alpha / D_{管片直径}$ 。定位后对反力架底部焊接固定，安装反力架上半部分，并安装支撑。如图3。

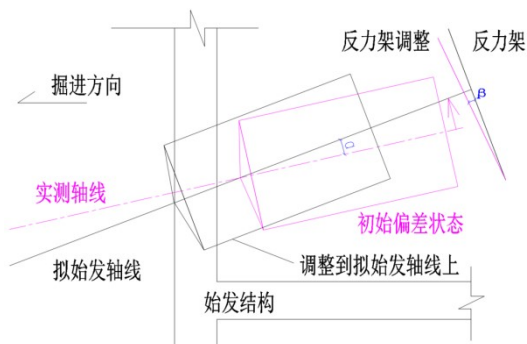


图3 调整反力架方向示意图

（三）码沙袋、填料

拼装2环负环管片，使管片和钢套筒基准环贴紧，向头部端盖内填码3圈沙袋，沙袋内装填级配砂，码放位置距离为盾构机重心位置（盾构机厂家设计图确定）。打开中部、尾部端盖填充中粗砂。向盾尾注入油脂使管片、盾构、钢套筒内形成密封空间。通过气垫仓向钢套筒内加气进行密闭性试验。

（四）分层注入泥浆、激振密实

分2次注入泥浆并分次振捣。第一次注入泥浆高度在隧道中心线以上2m左右，采用附着式振动器从下而上振捣。如图4。

第一次振捣完成达到设定的预沉值后补充填中、粗砂，再次注满泥浆，进行上部振捣，直到密实。第二次振捣过程中应向钢套筒顶部加高的填料孔不断给料，激振密实以沉降值达到填料总高度的10%为准。附着式振动器按照2m~3m梅花形布置，从上到下依次震动，振动器功率1.5kW，频率150Hz，振幅0.8mm。

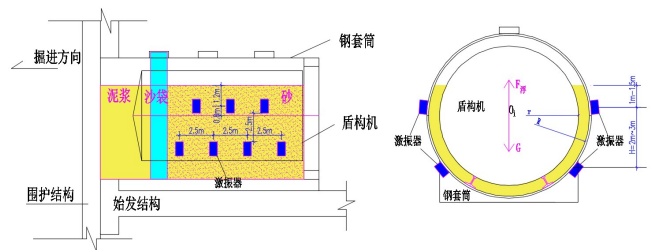


图4 泥浆和振捣方法

（五）建立泥浆压力

振捣密实后，开启泥水平衡盾构进浆泵，继续逐步加压到设定压力，使设定压力和掌子面水土压力一致，带压泥浆对盾构形成浮力，减弱纠偏抗力。

（六）推进、提供纠偏力

盾构机上设置有上下、左右四组分区推进油缸，控制不同分区的油缸，使各分区的推进力大小不同，实现盾构机偏转。

（七）纠偏完成

当盾体转动角度 $\alpha_1 < \alpha$ （设定偏航角）时，继续顶进，切削围护结构时，围护结构混凝土的 F 抗力形成对盾体的偏转分力，盾体在分组油缸推进力和围护结构抗力作用下进一步转动，直到偏转角度达到设定的 α ，至此，盾体实现钢套筒内纠偏。偏转角度达到设定的 α 后，盾体达到预设的割线始发轴线姿态。控制千斤顶压力，使 $F_{a1} \approx F_{d1}$ 即千斤顶压力相同，这样盾构机沿着设定的轴线直线掘进。直到盾体完全进入土体后再沿着设计轴线掘进。

四、应用情况

（一）工程应用案例

(1) 深圳地铁13号线北延某区间工程, 盾构始发曲线半径为550m。盾构原设计“抬头”20mm始发, 实际“低头”29mm始发, 盾构机的垂直姿态与设定线路的偏差超过49mm, 且表现为“栽头”趋势。经计算分析, 采用上述方法在钢套筒内纠偏, 盾构机在切削完洞门前将盾体纠正到合理状态。始发后正环管片姿态良好, 远低于规范规定的偏差值。

(2) 郑州地铁某盾构区间工程, 隧道断面直径6700mm, 始发曲线半径300m。盾构机吊装下井后, 盾构机的水平姿态与设定线路的偏差超过35mm, 拟合计算正环第5环到第10环的严重超限(>100mm)。采用上述方法在钢套筒内纠偏, 盾构机在切削完洞门前将盾体纠正到合理状态, 保证了始发质量安全。

(二) 填料振捣控制

(1) 填料期间, 砂袋堆叠应紧密, 砂袋间填充薄棉絮, 避免泥浆串流。

(2) 震动前, 应进行填料振动试验确定震动参数和停震标准。

(3) 严禁附着式振动器空振钢套筒, 振捣过程中, 检查振动器与钢套筒壁的密贴情况。

(4) 应严格控制附着式振动器的开启顺序、振捣时间和振捣频率, 切忌振动器出现空振、欠振。

(三) 其他注意事项与参数控制

1. 加压与接缝处理

钢套筒与洞门钢环焊接接缝, 钢套筒拼装接缝, 管片间接缝, 钢套筒基准环与管片接缝, 等4类接缝容易出现泄漏, 导致钢套筒内无法建设定的压力, 将增大纠偏抗力, 不利于负环管片稳定。

始发纠偏施工前应严格按照流程进行分级加压试验, 加压大小和持压时间应按照设计图纸规定要求执行。

2. 防止负环管片和反力架错位

纠偏前对反力架受力进行模拟, 使任意位置、任意时间点的分区千斤顶推进力 $\text{Max}\{F_{ai}, F_{di}\}$ 小于计算的反力架承载力值并有一定的安全系数。当盾体产生偏转情况下, 应使压力差 ΔF 尽可能小, 避免纠偏过大造成的次生问题。

工程纠偏时, 作用在负环管片上的偏转分力为: $F_{\text{偏转分力}} = F_{\text{总推力}} \times \alpha$; 施工中, 一般采用焊接“7字块”对负环管片进行限位, 应当计算“7字块”焊缝能承载的最大纠偏力。必要时增加焊缝长度。

3. 钢套筒接缝处加强支撑

钢套筒三处接口位置, 设置双拼型钢支撑, 型钢支撑一端支撑在盾构始发井结构的预埋钢板上, 一端头垂

直支撑在钢套筒上。尤其在“砂袋支点”附近的接缝除了增加支撑以外, 纠偏前后应对钢套筒连接螺栓进行检查、复紧。

五、结论

(1) 纠偏前对反力架受力进行模拟, 使任意位置、任意时间点的盾构分区千斤顶推进力 $\text{Max}\{F_{ai}, F_{di}\}$ 小于计算的反力架承载力值并有一定的安全系数。当盾体产生偏转情况下, 应使压力差 ΔF 尽可能小, 避免纠偏过大造成的次生问题。

(2) 采用新型填料方法的钢套筒内纠偏方法对盾构机始发姿态的要求降低, 有利于小半径曲线始发的质量安全, 节约常规吊装出井后重新纠偏造成的资源浪费。

(3) 在始发钢套筒内对盾构机纠偏有利于钢套筒始发工艺的推广, 尤其在曲线始发或条件受限严重的狭小空间始发具有优势。

(4) 新型填料方法除了对纠偏有益提高钢套筒始发的安全性。表现在: 盾构机破除地连墙前, 砂袋在掌子面和管片之间形成封堵墙, 在负环管片错台、渗漏、破损情况避免掌子面水土向管片后方串流。新型填料方法通过震动密实对钢套筒中的填料, 提高填料承载力, 避免填料在盾构掘进震动和管片拼装接缝渗漏情况下产生渗流和砂土液化现象。

参考文献

- [1] 中铁十一局武汉重型装备有限公司. 一种盾体注浆辅助大直径盾构始发姿态调整的方法: CN202210269453.9 [P]. 2022-06-10.
- [2] 成都轨道建设管理有限公司. 一种盾构始发用反力架以及使用其纠偏负环的方法: CN201911287349.7 [P]. 2020-03-31.
- [3] 成都建工第九建筑工程有限公司. 一种盾构始发掘进与到达施工方法: CN202111148081.6 [P]. 2021-12-24.
- [4] 中天建设集团有限公司. 一种纠偏盾构机滚动角的装置及其施工方法: CN202110143021.9 [P]. 2021-04-30.
- [5] 中铁二十三局集团有限公司. 上软下硬泥岩复合地层中盾构机姿态上飘的纠偏方法: CN202010451868.9 [P]. 2020.08.25.
- [6] 刘志义, 张学权, 唐忠林, 李雪峰. 预制T梁混凝土浇筑振捣质量关键控制措施[J]. 内蒙古公路与运输, 2022(04): 5-8.
- [7] 叶青. 无填料振冲法在机场吹填砂地基处理中的应用探讨[J]. 四川建筑, 2023, 43(03): 151-153.