

长距离机械顶管施工工艺研究与应用

谢兵 李敏 许东

成都环境工程建设有限公司 四川 成都 610000

【摘要】随着我国城市化进程加快，地下空间开发利用日益重要。非开挖技术，特别是长距离顶管施工技术，因其对地面交通影响小、环境影响低、施工效率高等优势，在市政管道穿越河流、公路、铁路及建筑物时得到广泛应用。本文以某再生水厂干管工程为背景，系统阐述长距离顶管施工工艺的基本原理、系统构成、关键技术要点（掘进机选型、注浆减阻、轴线控制、出渣系统等），分析施工中常见问题及质量控制措施，并对未来发展趋势进行展望，旨在为类似工程提供理论参考和技术支持。

【关键词】顶管施工；长距离；泥水平衡；注浆减阻；轴线控制；施工工艺

DOI:10.12417/2811-0528.26.01.012

1 引言

传统开挖敷设管道方法在城市中心区、交通干线、历史保护区存在交通中断、环境影响大、成本高等问题。顶管法作为非开挖施工技术，能有效解决上述问题。随着技术进步，顶管施工单次顶进距离从几十米发展到上千米，在长距离穿越工程中优势显著。然而，顶进距离增长带来摩阻力增大、轴线控制难度加大、地质条件复杂等问题，因此系统研究长距离顶管施工工艺具有重要工程意义。

2 长距离顶管施工工艺原理与系统构成

2.1 工艺原理

长距离顶管施工依靠始发井内主顶油缸提供推力，将管道逐节顶入岩土；掘进机头切削岩土并维持开挖面稳定，土渣通过输送系统排出；通过注浆孔向管道外壁与土体间注入减摩泥浆，形成泥浆套，变干摩擦为液体摩擦，降低顶进阻力；当主顶推力不足时，设置中继间实行分段接力顶进，最终将管道精准顶至接收井。

2.2 系统构成

完整的长距离顶管系统包括：

(1) 工作井与接收井：施工起点与终点，用于设备安装与管道接收。

(2) 掘进机头：核心设备，根据地层选用泥水平衡、土压平衡等类型。

(3) 主顶进系统：提供顶进推力，包括主顶油缸、油泵站等。

(4) 中继间系统：在长距离顶进中分段提供辅助推力。

(5) 注浆减阻系统：通过注入减摩泥浆形成泥浆套，降低摩阻。

(6) 泥水或土砂输送系统：排出切削土体。

(7) 测量与导向系统：实时监测与调整机头姿态和管道轴线。

(8) 供电与控制系统：提供动力并实现集中控制。

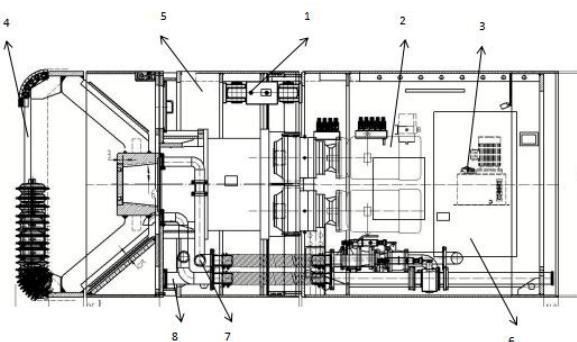


图1 泥水平衡式岩石破碎顶管机
1—纠偏油缸；2—驱动电机；3—机载液压泵站；4—切削刀盘；5—前筒；
6—后筒；7—进水管；8—排泥管；

本项目采用 HRC 岩石顶管机，具备破碎能力强、结构紧凑、自动化程度高等特点，适用于含卵石砂砾层、软岩及中硬岩地层。





3 长距离顶管施工关键技术

3.1 掘进机头的科学选型

机头选型需综合考虑地质水文条件、管道直径、顶进距离等因素。泥水平衡式顶管机适用于地下水丰富、稳定性差的砂性土、粉土和粘土层；土压平衡式适用于粘性土、粉土及砂砾层。本项目根据地质条件选用泥水平衡顶管机，配置滚刀与刮刀复合刀盘，适应填土层、粉质粘土及风化砂岩。

3.2 高效注浆减阻技术

摩阻力是限制顶进距离的主要因素。注浆减阻技术包括：

(1) 泥浆配比优化：根据土层特性确定膨润土、添加剂的最佳比例，确保泥浆具有良好稳定性、润滑性和护壁性。(2) 同步注浆与补浆：坚持“先注后顶、随顶随注、及时补浆”原则，在机头尾部同步注浆，中部设补浆孔。(3) 注浆压力与流量控制：注浆压力略大于土层静水压力和土压力，确保泥浆有效填充空隙。

本项目通过优质泥浆材料、合理布孔、可靠注浆设备及专业工艺控制，将摩阻力降至 $0.15\text{t}/\text{m}^2$ ，大幅降低顶进阻力。

3.3 精确的轴线测量与控制

长距离顶进中，微小偏差会累积成重大误差。采用自动跟踪激光导向系统实时监测机头姿态，定期人工复测；纠偏遵循“勤测微纠”原则，缓慢连续调整，避免急弯猛拐，确保管道轴线平滑回归设计轨迹。

3.4 中继间的合理设置与运用

中继间是突破顶力极限的关键技术。设置原则为当主顶推

参考文献：

- [1] 马保松,曾聪.非开挖工程学[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [2] 日本土质工学会.隧道标准规范(盾构篇)及解说[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [3] 王梦想.隧道与地下工程技术及其发展[M].北京:北京交通大学出版社,2004.
- [4] 余彬泉,陈传灿.顶管施工技术[M].北京:人民交通出版社,1998.
- [5] 张凤祥,朱合华,傅德明.盾构隧道[M].北京:人民交通出版社,2004.

力达设计推力的 70%-80%时启用第一个中继间，后续依次启动。本项目在多个顶管段设置中继间，确保顶进顺利进行。

3.5 复杂地质条件的应对措施

针对软硬不均、孤石、承压水等不良地质，采取超前地质预报、合理刀具配置与磨损监测、可靠洞口密封与降水等措施。例如，在赤水河段顶进中，遇软硬交界土层导致机头偏移，通过调整掘进参数、启用纠偏油缸等措施成功纠正轴线。

4 施工质量控制与常见问题防治

4.1 质量控制要点

- (1) 管材质量：确保管节强度、尺寸精度和接口密封性。
- (2) 初始轴线定位：精确校准导轨，保证机头入土姿态正确。
- (3) 施工参数监控：实时记录顶力、扭矩、注浆量、出土量等数据，及时调整参数。

4.2 常见问题及处理

- (1) 土质突变硬：刀盘转矩增大，向搅拌仓加水或泥浆。
- (2) 土质突变软：增加管道刚性，防止机头沉陷。(3) 顶管轴线偏差过大：分析原因，调整千斤顶参数，加固后背，循序渐进纠偏。(4) 管道接口渗漏：严控管材与密封材料质量，规范安装操作，采用环氧水泥砂浆处理渗漏点。

5 发展趋势与展望

未来长距离顶管技术将向以下方向发展：(1) 智能化与自动化：融合大数据、物联网和人工智能，实现智能感知与自适应控制。(2) 超大直径与超长距离：应用于公路隧道、综合管廊等大断面工程。(3) 绿色环保：研发泥浆环保处理与循环利用技术。(4) 新型材料与结构：应用高强轻质复合材料与自感知智能管节。

6 结论

长距离顶管施工是一项技术密集型系统工程，成功实施依赖于准确地质判断、合理设备选型与精细化管理。中继间技术与注浆减阻技术是实现长距离顶进的关键，精确测量导向系统是成型质量的保障。通过严格过程控制与科学问题预案，该技术能够安全、高效、优质地完成复杂环境下的非开挖管道敷设任务，在城市地下空间开发中具有广阔前景。