

大尺寸顶管机在富水砂层中的对接解体施工方案与案例分析

文 / 何刚刚 深圳市深水水务咨询有限公司

摘要：本文研究了大尺寸顶管机在富水砂层中的对接解体施工技术，针对地质特性以及设备对接、解体与外运等相关难题，建议改进地质、深孔监测与自动化控制、设备拆解与运输等成套技术方案。典型工程案例分析揭示了施工中地层稳定性控制、设备解体与空间利用的核心技术并分享其实际应用效果。根据研究结果，这些提出的施工技术已有效提升施工安全和效率，并为在类似复杂地质条件下使用大尺寸顶管机进行施工带来了新认知。

关键词：大尺寸顶管机；富水砂层；对接解体；地质改良；深孔监测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.011

引言

随着城市基础设施建设的快速推进，顶管施工技术因其能够穿越复杂地质条件且减少地表扰动的优势，在市政管网建设中得到了广泛应用。然而，富水砂层由于其地质结构松散、渗透性强，施工中极易引发地层沉降、涌砂、涌水等安全问题，成为顶管施工中的重要技术难题。特别是大尺寸顶管机在富水砂层中的应用，面临设备对接困难、隧道贯通控制精度要求高、解体拆运空间受限等诸多挑战。为解决上述问题，本研究依托深圳市龙华区管网提质增效工程(二期)，通过开发成套的地质改良、深孔监测及自动化控制技术，系统研究了大尺寸顶管机在富水砂层中的对接与解体施工方案。在总结工程实践的基础上，提出技术优化路径，并以典型案例验证其可行性与可靠性，为类似工程提供技术支持和参考。

一、大尺寸顶管机在富水砂层中的施工难点

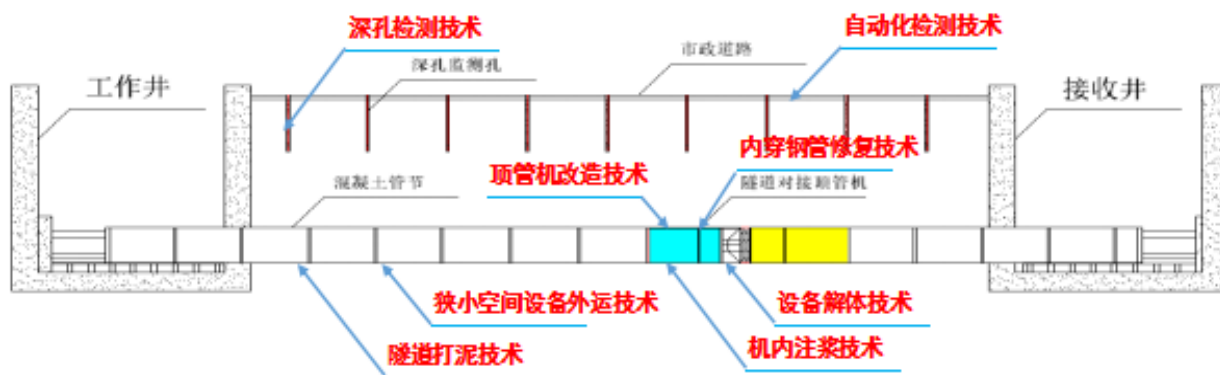
(一) 富水砂层地质特性及其施工挑战

富水砂层的高渗透性使得地下水流动性强，地层容易受到外界扰动而引发涌砂、涌水等问题。由于砂粒颗粒的排列松散，地层的黏聚力和剪切强度较低，形成一种易于变形、难以保持稳定的状态，特别是在顶管施工中，开挖掌子面容易发生坍塌，从而导致周边地层失稳。地下水压力是富水砂层的重要影响因素之一，压力过高

不仅会增加掌子面前方的泥水压力调控难度，还可能引发管道上浮、地下水流失以及渗透破坏等问题。富水砂层地质结构的不均匀性进一步加大了施工难度，其层中可能存在孤石、砾石或遗留的地下障碍物，如混凝土块或铁块等，这些障碍物对顶管机的刀盘切削能力提出了更高的要求。富水砂层往往伴随着软硬不均的土层，部分区域由于砂土颗粒之间缺乏足够的内聚力而形成局部空洞或液化现象，对施工机械的稳定运行和管道轴线的精确控制形成了严重威胁。

在富水砂层的顶管施工中，顶管机在掘进过程中，需要利用泥水加压以维持掌子面稳定，但过高的泥水压力可能导致地表隆起或土层破坏，而过低的压力则会引发掌子面坍塌或涌砂。施工过程中需要实时监测和动态调整压力参数，以适应复杂多变的地质条件。顶管施工容易引发地层沉降，对周边建(构)筑物及管线的稳定性构成威胁，尤其是在穿越高敏感区域如轨道交通、桥梁基础或既有市政管网时，沉降控制的精度要求更高。为了降低施工风险，需采用注浆技术对地层进行加固，通过注入高性能浆液，如超细水泥浆或膨润土浆，增强土体的稳定性和抗渗性。富水砂层地质条件对顶管机必须具备较强的抗压和纠偏能力，以应对砂层中可能出现的突发地质变化。

如图：顶管机对接工艺原理



(二) 大尺寸顶管机对接与解体的技术瓶颈

大尺寸顶管机在富水砂层中的对接与解体施工过程中，对接环节要求顶管机的前后段能够在复杂地质条件下实现精确的轴线对接，而富水砂层的高水压和软硬不均特性导致顶管机在掘进过程中极易发生偏移。顶管机的纠偏能力直接决定了对接成功率，而现有的纠偏技术受限于设备设计和地层干扰，可能难以满足精度要求。对接过程中，富水砂层的掌子面稳定性极为关键，若开挖面未能及时加固，可能导致塌方或地层破坏，从而影响对接施工的安全性。

大尺寸顶管机的刀盘和主轴承等核心部件重量可达数十吨，必须分区切割后分块拆除，并通过定制的吊装和运输设备移至地面。解体过程中需要确保设备核心部件的完整性，以便后续循环利用，而在富水砂层中，水压和泥浆环境可能导致部件受损或拆解难度加大。例如，刀盘的切割需要在避免掌子面失稳的情况下完成，因此通常需要先对刀盘与地层接触部位进行封闭焊接，同时采用分段分块切割技术，将刀盘分解为多个小块逐一拆卸。主轴承和齿轮箱作为顶管机的核心部件，其拆解和运输要求极高的稳定性和安全性。施工中通常在设备机壳上焊接多个吊钩，配合手拉葫芦和重型运输小车，逐步将核心部件移出隧道。

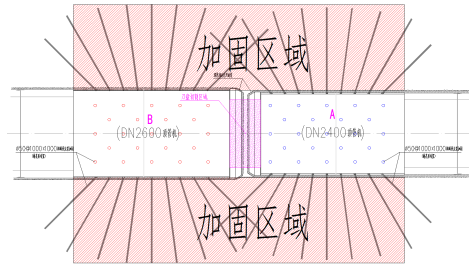
二、顶管机对接解体成套施工技术

(一) 地层改良与注浆技术

其主要目的是提高地层的抗剪强度、降低渗透性以及稳定掌子面，避免地层失稳和沉降问题的发生。通过对顶管机提前进行改造，在壳体及仓门开设 $\phi 50\text{mm}$ 注浆孔，注浆孔上安装球阀。机体环向及纵向间距按 500mm 间距开设注浆孔，仓门开孔按等边三角形位置布孔。顶管机顶进到位后，在注浆孔内安装袖阀管，袖阀管上安装单向阀，防止浆液回流，采用袖阀管从顶管机壳体内向外注浆。当顶管机顶到既定位置后，在注浆前从顶管机仓门位置沿注浆管用清水将两项管机刀盘间和土仓内渣土洗出，再进行刀盘对接区注浆，待泥浆终凝后，对最后 10 环管节及顶管机壳体外部采用二次注浆的方式进行注浆，浆液采用超细水泥：黄泥=2:1，注浆压力预定 0.3 ~ 0.5MPa，注浆压力视现场情况可适当调整。通过调整水泥与黄泥浆液配合比，使注浆效果相比水泥浆液有良好的止水性能，同时浆液凝结后硬度适中，使刀盘仓内凝结的土体较易开挖。

同时在三级钢筋混凝土管上预设 $\phi 50\text{mm}$ 注浆孔，安装好注浆球阀，顶管掘进过程中根据轴线偏差及地层变形跟踪监测数据分析，若出现地层沉降趋势及时采用专用打泥设备，在地层变形沉降段通过预设的注浆孔打浓泥浆液填充进行反抬，控制地层变形沉降，注浆材料黄泥和水的质量比为 4:1，注浆压力一般不超过 1Mpa。等地层沉降数据恢复正常后，停止打泥注浆，能有效控制顶管顶进过程中地层出现的不均匀沉降，保持土体稳定，降低地层沉降变形风险。

如图：顶管机壳体向外注浆加固



(二) 顶管机解体与设备外运方案

大尺寸顶管机在隧道内空间狭小且施工条件复杂的情况下，需对解体方案进行精细化设计。解体工作通常从刀盘开始，将刀盘分为 8 个区域，通过纵向切割分块。为防止掌子面地层受力失稳，在切割刀盘前需要进行焊接封闭，采用厚度为 1 cm 的钢板沿刀盘边缘焊接，确保与地层接触区域的封闭性。刀盘切割后，逐块使用手拉葫芦进行吊装，每块重量控制在 3 吨以内，方便运输。

(三) 深孔监测与自动化监控技术

深孔监测通过布设深层监测孔获取地层变形、沉降量及水压力等数据。监测孔深度根据地质条件确定，孔间距为 5 m，监测频率为 2 小时一次。地层沉降在施工中通过深孔监测实现实时分析，异常发现后则及时调整。全站仪、地质雷达和沉降传感器的结合使得自动化监控系统能够收集隧道周边建（构）筑物的变形数据，并同步上传至监控平台以供大数据分析趋势预测。对于铁路轨道及重要建（构）筑物不易于采用人工测量的区域设置自动化监测点，对轨道及建筑物基础沉降和变形采用全自动机器人全站仪实时监测，自动化监测布点范围为顶管路径左右各 11m，监测点分别于左、右两条轨道位置，左右对称成对布置，每断面布设监测点 4 个，地面累计变形量应小于等于 10mm（且小于等于 3mm/d），深层监测孔及自动监测数据累计变形预警值为 5mm，若出现沉降超 2mm 时及时自隧道内施打浓黄泥浆液填充地面反抬，同时根据每日沉降监测数据，实时调整注浆参数。

三、工程案例

(一) 项目背景与实施方案

本研究依托深圳市龙华区管网提质增效工程(二期)中的观澜河左岸 LHA-29 至 LHA-32 顶管段施工项目。该项目旨在解决老旧污水管网功能失效问题，通过新建 DN2400 污水管道来提升区域污水收集效率和水质净化能力。工程地质条件复杂，顶管段需穿越富水砂层，并下穿有轨电车轨道，施工区域地下水位埋深 3.5 以下，地层主要为粉质黏土、砾砂和砾质黏性土，伴有孤石和砂土夹层，存在较大的不均匀性和高渗透性。项目施工过程中，由于前期顶管机卡阻和管节抱死问题，需采用反顶方式完成贯通，同时对顶管机进行隧道内解体与外运。

面临复杂地质条件和施工难题，核心应对策略为地层改良、深孔监测、注浆加固以及自动化监控的技术方案。

该方案涵盖穿越段地层进行注浆改良提高稳定性，采用高精度激光导向系统与动态纠偏技术的对接施工以及结合空间优化与重型设备辅助外运技术的解体过程。在实施中，数字化监测平台作支持，确保了地层沉降、轴线偏差和施工压力实时调整，并保证顶管机精准对接与解体外运圆满完成。

(二) 对接解体施工中的关键问题解决

顶管机对接过程的轴线控制及保证掌子面地层稳定性的可靠性和设备解体及外运过程中的空间限制与操作难度，构成主要问题之一。在提高精度之策略里，激光导向纠偏系统实现对接数据监测，获得即时信息关于顶管机轴线的位置和偏差值，确定液压油缸推进方向调整后便可以将对接精度保持在 ±5 mm 以内。此类方法并需结合注浆多次加固处理，在环状阀门管道通路注入浆料，从地面和隧道内部同步完成注入任务，旨在改良土壤强度且形成有效抗水功能。刀盘分区切割技术在解体过程中，将其焊接

封闭并逐一拆解成 8 个区域。主轴承与齿轮箱这对整体吊装部件，在一个特制重载运输小车帮助之下，驶出隧道转移到出口。精细化设计应用于隧道内的运输路径，以确保设备运输的稳定性，地层局部注浆和反抬技术有效提升承载能力。数字化监测与动态调整策略见证了设备解体与外运的全过程，现场实时数据而确定运输速度和路径，最终让设备安全高效移出得以实现。

(三) 技术应用效果与评价

技术应用效果通过工程实例验证。LHA-29 至 LHA-32 顶管段项目中，对接施工的轴线偏差始终控制在 ±4 mm 以内，掌子面地层在注浆加固后未发生明显沉降，顶管推进过程中地表最大沉降量为 2.5 mm，均在安全范围内。设备解体与外运工作耗时 35 天，比传统施工方式缩短约 20%。隧道内设备运输效率提升显著，小车运行平稳，运输过程中未发生部件损坏或二次沉降问题。具体技术应用效果数据如下表 1 所示。

表 1 技术应用效果数据统计表

技术环节	指标	数据	评价
对接精度控制	轴线偏差	±4 mm	高精度，满足设计要求
掌子面地层稳定性	最大沉降量	2.5 mm	稳定性优异
注浆扩散半径	平均扩散半径	3.8 m	均匀覆盖注浆区域
解体效率	解体耗时	15 天	比传统方式缩短 30%
设备外运效率	外运耗时	20 天	小车运行平稳，无损伤
安全性	全过程事故发生率	0	全过程安全无事故

从上面表格可以看出，通过综合应用地层改良与注浆技术、顶管机解体与运输技术以及深孔监测与自动化监控技术，项目不仅实现了复杂地质条件下的安全施工，还显著提高了工程效率和质量，为类似工程提供了实践参考。

结语

本文的系统研究重点是大尺寸顶管机在富水砂层中的对接与解体施工技术。实例证明了此项技术具有显著可行性和有效性。地层改良与注浆技术在富水砂层中显示出强劲的能力，显著提升了地层稳定性的质量，精确控制了沉降风险。采用深孔监测与自动化监控技术能够精准定位施工参数、动态调整策略，从而形成科学支撑结构。针对顶管机解体与设备外运方案，通过细致设计和高效执行策略，在复杂情况下达到设备安全拆解和高效运输两者兼得之效果。工程应用结果证明，这些技术在提升施工精度、确保施工安全和优化工期方面具有显著优势。研究成果为类似复杂地质条件下的大尺寸顶管施工提供了重要的技术参考和实践依据，对推动非开挖

施工技术的进一步发展具有积极意义。未来可继续深化自动化控制和智能监测技术的研究，进一步提升施工效率与安全性。

参考文献

[1] 肖尊群, 邓名慧, 石银磊, 等. 大尺寸矩形截面竖向曲线顶管顶进力研究 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (29): 12744-12752.

[2] 许彩云, 石银磊, 肖尊群. 大尺寸矩形截面竖向曲线顶管顶进力估算: 基于整体位移控制有限单元模型 [J]. 武汉工程大学学报, 2024, 46 (04): 467-472.

[3] 赖俊珊, 王广贤. 大尺寸沉井与长距离顶管在取排海水工程中的应用 [J]. 水运工程, 2024 (08): 343-347.

[4] 周斌, 郑恒重. 大尺寸矩形隧道顶管应用与难点研究 [J]. 广东土木与建筑, 2024, 31 (05): 35-39.

作者简介: 何刚刚 (1993 年一), 男, 汉族, 浙江金华人, 本科, 中级工程师, 研究方向为工程管理, 水利工程, 市政工程。