

# 矩形顶管施工技术在城市地下空间开发中的应用和发展

余磊 金灏 杨慧婷

湖北神龙市政建设工程有限公司 湖北武汉 430058

**摘要:** 矩形顶管施工技术作为非开挖技术的重要分支,通过多刀盘协同切削与土压或泥水压力平衡控制,达到矩形顶管切削土体、稳定掌子面并向前掘进的目的,让城市地下空间得以高效的开发,而且矩形顶管的超大断面,使其在空间利用率上具有天然的优势,越来越多的用在城市地下空间的开发中。本文系统分析了其技术原理、设备构成及地质适应性和工程特点,结合地铁出入口、城市隧道及综合管廊等典型工程案例,验证了该技术在城市地下空间发展下的施工优势与经济效益。研究表明,矩形顶管技术可减少地面交通干扰、降低环境影响、提高内部的空间利用率,为城市地下空间开发提供了创新解决方案。

**关键词:** 矩形顶管;非开挖技术;城市地下空间;顶管法;地铁施工;综合管廊

## 引言

随着城市化进程加速,地面交通拥堵、管线复杂化与土地资源紧张问题日益凸显。传统明挖法施工周期长、环境破坏大,而暗挖法虽减少地面干扰,但对复杂地层适应性有限。圆形顶管通常仅适用于地下给排水管道的建设,若在其他领域中使用,受限于圆形截面空间利用率不高的影响,无法满足地下通道、地铁出入口、综合管廊等地下设施的建设。所以在城市地下空间不断开发的今天,矩形顶管技术凭借其非开挖、高空间利用率及低环境影响的特点,成为城市地下空间开发的核心技术之一。本文通过理论分析与工程实践结合,探讨矩形顶管技术的核心原理、设备创新及应用场景,为未来技术优化提供参考。

## 一、矩形顶管施工技术的理论基础

### (一) 顶管法的基本概念与原理

顶管法是一种非开挖的施工方法,它通过液压千斤顶或顶进设备产生顶力,将预制管道按照设计的坡度顶入土层,从而实现地下管道或隧道的施工。该技术的核心思想是,通过主顶油缸与管道之间的推力,驱动掘进机穿越土层,并利用螺旋输送机(土压式)或泥浆泵(泥水式)将掘进过程中产生的土体排出。在施工阶段,管道是分阶段推进的,每当完成一个管道段落,会继续下一个段落的推进,直到成功连接到接收井。这项技术利用土压平衡或泥水平衡来控制开挖面的稳定性,从而避免地面沉降,特别适合于穿越现有的建筑、交通路线、河流湖泊和复杂的地下管线区域。它的主要优点是避免了大规模的地面挖掘,大大减少了对交通、环境和

附近设施的干扰,同时利用触变泥浆技术降低了推进的阻力,从而提高了施工的效率。

### (二) 顶管施工的机械原理与工作过程

顶管施工机械原理和工作过程与土体切削及排渣、顶进驱动和地层支护三个核心环节密切相关。掘进机头上装有若干组旋转刀盘由液压马达带动高速旋转对土层进行切割,被切割下来的土由螺旋输送机或者泥浆管送到地面以保持开挖面上压力平衡。主顶油缸组为动力核心在预设推力作用下实现预制混凝土管节由始发井到接收井的逐节顶进,每节管节装完后油缸返缩装新管节构成持续推进。管节与管节之间采用承插口或者钢套环进行密封连接以保证结构的整体性。在整个施工过程中依靠激光导向系统对轴线偏差进行实时监控,利用纠偏油缸对机头姿态进行微调以保证轨迹的准确性。同时触变泥浆从注浆孔灌入管节外壁和土体之间的缝隙中形成泥浆套,以减小摩擦阻力和抑制地层沉降。

### (三) 顶管施工技术的分类与特点

顶管施工技术有敞开人工手掘式和密封机械式两种,而密封机械式中泥水平衡式、土压平衡式使用最多。敞开人工手掘式是针对软土、黄土和强风化岩的土质而设计的掘进机,其构造简单,可以按土质的不同加工成全敞开、半敞开或者活瓣式的,但是有顶速缓慢、流砂层不易控制的特点,造成沉降大。泥水平衡式是利用刀盘切削和泥浆循环来平衡土压和地下水压的一种施工方式,具有施工持续快速、不需要地基改良和降水处理、地表沉降少等特点,适合松软地层或者高水位环境下使用,但是对于卵石地层的适应性受到一定的限制。土压平衡式是一种通过向切削仓注入混合材料来平衡土压的方法,

它不需要泥浆泵或其他后部设备，成本较低，并且不需要泥浆处理，特别适用于黏性土和其他稳定性较差的土层。

#### （四）地质与工程学基础

顶管施工所依据的地质和工程学基础，直接决定了技术可行性和施工安全，土体的物理力学特性至关重要，软黏土由于其高压缩性容易诱发沉降，需要采用触变泥浆充填管节外壁间隙来降低对地层的扰动；砂性土具有较强的透水性，需要配合泥水平衡技术对开挖面的稳定性进行控制，以规避涌砂的危险；在卵石地层中需要使用带有撕裂刀或者滚刀的刀盘进行切割，通过对螺旋机转速进行优化来避免卡机现象。岩层的硬度和完整性对切削效率有影响，在中风化岩中需要配置高扭矩刀盘和控制顶进速度以避免刀具过多的磨损。地下水文条件也不容忽视，在高水位的环境中需要利用泥水循环系统来保持掌子面压力的平衡，并对泥浆比重进行监测以防漏水；承压水层需要提前进行降水或者注浆加固。

#### 二、矩形顶管的主要特点

伴随着城市地下空间的不断开发，城市地下空间呈现了多样化的需求，其中包括地下商业综合体、地下通道（人行通道和车行通道）、地铁出入口的连接通道、综合管廊等。传统的圆形顶管已无法满足使用要求，尤其圆形顶管的空间利用率不高，大大的限制了城市地下空间的开发利用。而矩形顶管能充分利用结构大断面的特性，提高空间利用率，与传统的圆形顶管断面相比，矩形顶管在空间利用率上能多出20%的空间，同时矩形顶管相比圆形顶管有更好的浅覆土适应能力，从而可以大大降低下穿各类构筑物坡度和深度。近年来，城市地下空间不断开发，矩形顶管也因为其自身的技术特点，而广泛用于城市地下空间开发的建设中。

#### （一）矩形顶管管道内部的有效使用面积更大，空间利用率更高

在方形的长度和圆形的直径相同的情况下，方形的面积更大。传统的圆形顶管管道截面为圆形，其结构虽然更加稳定，但受限于弧形结构，通常适用作流体的通道，如：给排水管道、蒸汽热力管道、石油天然气管道等。随着城市的发展，对地下空间的不断开发，城市地下管道的使用呈现了多样性的特征，不仅要作为流体的通道，也在各种人行通道、车行通道、地下商业综合体和综合管廊中使用，这就导致顶管管道内部的截面越趋近于矩形，其空间利用率越高。充分体现了矩形顶管在空间利用率上的优势。

#### （二）矩形顶管的覆土要求小

矩形截面没有圆形截面的弧顶设计，加之其矩形结

构的特殊性，使得矩形顶管在顶进施工过程中，对覆土要求不高，可在0.8倍的管径以上的浅覆土层中进行施工。所以适合城市交通繁忙、地下管网密集的区域，能够有效降低社会影响。

#### （三）矩形顶管单段顶进长度不长

矩形顶管相比较与传统的圆形顶管，受其截面结构形状的限制，没有圆形顶管好受力，所以通常情况下，矩形顶管无法像圆形顶管那样一次性完成长距离和超长距离的顶管段。矩形顶管单段顶进长度一般在100米以内。

因其具备的高空间利用率的优点，虽然单段顶进距离不长，但是在城市地下空间的建设中也使用非常广泛，能够满足一些特定的工程建设要求。

### 三、矩形顶管施工技术在城市地下空间开发中的应用

#### （一）地铁施工中的应用

顶管施工技术在地铁工程中已成为优化工期、减少环境干扰的关键手段，尤其在出入口通道、区间联络线及特殊断面隧道建设领域展现显著优势。在地铁出入口施工和车站连接线施工中，顶管技术可避免传统明挖法对道路交通的长期阻断。以合肥地铁2号线东延线为例，该工程需穿越繁忙的裕溪路高架桥及密集居民区，采用6.9m×4.2m矩形顶管机建设5个出入口，通过泥水平衡系统控制掌子面压力，将地表沉降控制在3mm以内，同时利用激光导向系统实现轴线偏差≤20mm的精准控制，较明挖法缩短工期40%，并减少管线迁改费用。在区间联络线施工中，顶管技术可实现复杂线路的灵活穿越。郑州红专路下穿中州大道项目首次将10m×7m超大断面矩形顶管应用于地铁联络线，通过分区控制土压平衡系统适应上软下硬地层，刀盘扭矩动态调节技术降低硬岩段刀具磨损，成功实现双车道与非机动车道分离的立体交通结构，较传统矿山法减少弃土量60%。对于浅覆土或邻近建构筑物等特殊工况，顶管技术通过优化施工参数保障安全。武汉地铁5号线烽火村站4号出入口下穿107国道，覆土厚度仅4.5m且邻近高架桥桩基，项目采用6.9m×4.9m矩形顶管机，通过同步注浆填充管节外壁间隙并实施自动化监测，将桥桩沉降控制在1.2mm以内，同时创新应用管节预应力张拉技术提升结构抗裂性。此外，顶管技术还推动了地铁车站附属设施的模块化建设，佛山南海区越秀星汇云锦项目通过4条6.9m×4.9m矩形隧道互联，形成集商业、疏散于一体的地下空间，为城市中心区地铁建设提供了高效解决方案。

#### （二）城市隧道工程中的应用

顶管施工技术在城市隧道工程中凭借其非开挖、高

精度、低扰动的特性，成为复杂城市环境下隧道建设的优选方案，尤其在车行隧道、人行通道及特殊地质穿越中表现突出。在车行隧道领域，苏州胥涛路对接横山路隧道项目通过9.8m×5.9m超大断面矩形顶管，实现了京杭大运河下方浅覆土（3m）条件下的长距离（215.9m）顶进。该工程采用泥水平衡系统与高精度导向技术，结合自动化监测网络实时反馈地层变形数据，将隧道轴线偏差控制在±30mm以内，同时通过优化注浆参数形成稳定泥浆套，有效抵御运河侧向水压，避免传统明挖法对河道生态及航运的破坏。针对城市密集区人行通道建设，武汉地铁5号线武昌段采用6.9m×4.9m矩形顶管下穿107国道，在覆土厚度仅4.2m且邻近高压燃气管线的工况下，通过刀盘分区切削技术减少对土体的扰动，并创新应用管节接缝防水密封工艺，实现隧道结构零渗漏。施工过程中，同步注浆系统根据地层特性动态调整浆液配比，将道路沉降控制在2mm以内，保障了国道交通的正常运行。此外，顶管技术为复杂地质条件下的隧道施工提供了创新路径。南昌大桥西侧超浅覆土双孔矩形顶管工程需穿越砂卵石与强风化泥岩交互地层，项目通过复合式刀盘设计（滚刀与切刀组合）提升破岩效率，同时采用预加固技术对掌子面前方10m范围进行袖阀管注浆，形成5MPa抗压强度的加固圈，确保顶进过程中刀盘扭矩稳定。该工程还引入智能纠偏系统，通过千斤顶分组控制实现±15mm的轴线精度，较传统矿山法减少工期55%，并降低碳排放30%，为城市隧道建设的高效化、绿色化提供了实践范本。

### （三）城市地下商业体及综合管廊的施工

顶管施工技术在城市地下商业体及综合管廊建设中，通过非开挖工艺实现空间高效利用与城市功能整合，成为破解城市核心区施工难题的关键手段。在地下商业体开发中，顶管技术可规避大规模地面开挖对商业运营的影响。佛山南海区越秀星汇云锦项目通过4条6.9m×4.9m矩形顶管隧道，在既有商业中心下方构建互联互通的地下商业街，隧道顶板距地面建筑基础最近仅3.8m。施工过程中采用土压平衡模式，结合刀盘转速与螺旋机排土量联动控制，将地表沉降控制在1.5mm以内，确保上方商场正常营业。管节接缝处应用双组分聚硫密封胶与可压缩橡胶止水带，形成多级防水屏障，同时通过BIM技术模拟管线排布，实现商业空间与市政管线的立体化整合。

在综合管廊建设中，顶管技术为复杂环境下的管线集约化铺设提供创新路径。武汉武九线综合管廊工程需下穿友谊大道及既有砖砌箱涵，覆土厚度仅5.2m且邻

近运营中的地铁7号线。项目采用9.8m×5.2m矩形顶管机，通过刀盘仿形切割技术精准避让箱涵桩基，并利用三维激光扫描实时监测既有结构变形，将箱涵沉降控制在0.8mm以内。施工过程中，创新应用管节预应力张拉与注浆加固协同工艺，在管节接缝处施加0.8MPa预压应力，结合同步注浆填充管土间隙，形成复合承载体系。此外，管廊内部采用标准化预制支架与智能巡检机器人，实现电力、通信、给排水等管线的模块化安装与数字化运维。顶管技术在该工程中的应用，较明挖法减少弃土量70%，缩短工期8个月，并降低对友谊大道日均8万辆车流的影响，为城市地下空间的高效开发与可持续运营提供了技术支撑。

### 结论

顶管施工技术在城市地下空间开发中展现出显著的技术优势与综合效益，其非开挖特性有效规避了传统明挖法对地面交通、商业活动及生态环境的破坏，尤其适用于城市核心区高密度建成环境。通过泥水平衡、土压平衡等工艺创新，该技术可精准控制地层变形，将地表沉降量控制在毫米级，保障邻近建构筑物安全。在超大断面、长距离及复杂地质条件下，顶管机头的智能化纠偏系统与复合式刀盘设计显著提升了施工效率与适应性。其所具有的超大断面的优势，在空间利用率上显得尤为突出，为城市地下空间的开发和利用提供了非常有利的技术优势。未来，需进一步推动顶管设备模块化、智能化、监测系统数字化发展，并完善技术标准体系，以支撑其在城市地下综合体、地下深部空间的开发等领域的规模化应用。

### 参考文献

- [1] 贾连辉. 矩形顶管在城市地下空间开发中的应用及前景[J]. 隧道建设, 2016, 36(10): 8.
- [2] 汤东桑, 肖尊群, 覃晓敏, 等. 黏土地层大尺寸矩形顶管施工土体沉降及影响规律研究[J]. 市政技术, 2023, 41(11): 137-141.
- [3] 高毅, 冯超元, 程鹏. 浅埋矩形顶管的“整体背土效应”研究[J]. 2018.DOI: 10.11779/CJGE201810022.
- [4] 唐建忠, 唐韶军, 陈愉. 土压平衡式矩形顶管在深覆土中施工应用[C]// 施工机械化新技术交流会. 2010.
- [5] 彭立敏, 王哲, 叶艺超, 等. 矩形顶管技术发展与研究现状[J]. 隧道建设, 2015, 35(1): 1.
- [6] 万华, 张梦琦, 龚昌斌, 张良, 韩思佳. 超大断面矩形顶管施工技术[J]. 道路与桥梁, 2025, 05: 183-185.