



Research
Tunnel Engineering—Article

异形掘进机设计制造的关键技术研究及工程应用

李建斌

China Railway Hi-Tech Industry Corporation Limited, Beijing 100070, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 March 2017

Revised 13 July 2017

Accepted 31 July 2017

Available online 6 December 2017

关键词

异形 TBM

矩形顶管机

马蹄形 TBM

地下空间开发

摘要

随着地下空间开发进程的加快,越来越多的大型掘进机(TBM)应用于地下工程开挖。目前,常规TBM已无法完全满足地下工程对断面形式和空间利用率追求,异形TBM成为理想断面开挖设备成为市场新的增长点。本文首先介绍了异形TBM的技术特点及发展现状,然后结合典型工程与工法创新,针对矩形顶管和马蹄形TBM开展了盾体结构设计优化、多刀盘联合开挖、异形管片拼装、黄土层渣土改良等多项关键技术研究,为异形断面TBM的设计、制造和施工提供了一套可行的解决方案。相关工程实践表明,采用针对性设计、制造的异形TBM,在施工进度、地表沉降控制和空间利用等方面具有巨大优势。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

随着我国基础设施建设以及城镇化的快速推进,城市土地资源严重紧缺,空间容量供需矛盾日益突出。针对此问题,国家提出交通和市政公用设施地下化和集约化的发展理念,在“十三五”规划中明确了建立和完善城市地下空间的发展要求,以地下综合管廊、城市地下停车场和海绵城市等为代表的地下空间开发指导意见相继出台,其中仅综合管廊每年的建设目标即达2000 km。掘进机(TBM)作为轨道交通、市政工程、铁路公路隧道、引水隧道等非开挖地下工程施工的主要设备,在可以预见的未来将会发挥越来越重要的作用。

常规圆形TBM施工效率高、环境干扰小、安全可靠等优势明显,作为暗挖法常用设备在城市轨道交通工程中发挥了重要作用,但也存在开挖空间利用率低、开挖

断面单一等固有缺陷。未来地下空间工程的浅覆土、高空间利用率、异形断面等特点已成为重要发展趋势,双圆(DOT)、矩形、马蹄形等异形TBM中部分设备经过实际工程验证,表现出较强的适应性、经济性和安全性,成为未来TBM发展的重要方向之一。

2. 异形 TBM 发展概述

2.1. 双圆、多圆、类矩形盾构机

目前,双圆、多圆盾构机技术主要集中在日本,比较具有代表性的是DOT盾构机[1]和三圆盾构机(MF)[2],见图1(a)、(b)。此类盾构机的优点在于宽度上比相邻的双孔隧道、高度上比浅埋单孔隧道占据更少空间,常用于地铁车站及综合管廊的整体开挖,见图1(c)。DOT及MF盾构开挖断面复杂,掘进对地层扰动大,易

* Corresponding author.

E-mail address: lijianbin@crectbm.com

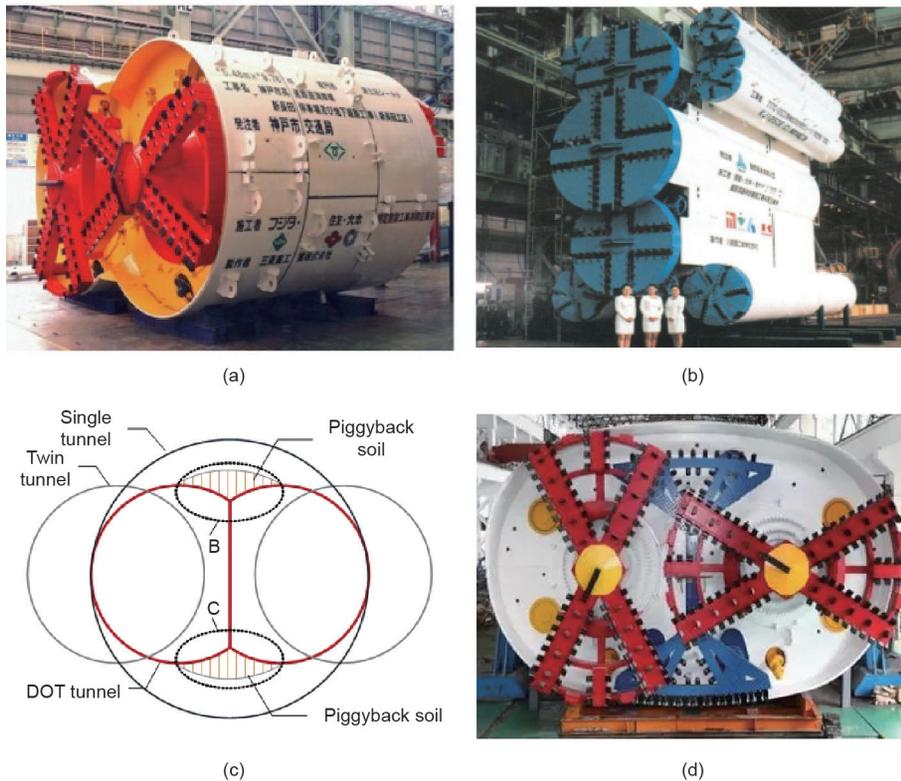


图1. (a) DOT盾构机; (b) MF盾构机; (c) 单圆与DOT盾构开挖断面对比; (d) 阳明号类矩形盾构机[†]。

造成设备海鸥块处土层坍塌和背土现象，地表沉降难以控制。

类矩形TBM在DOT盾构机的基础上通过增加偏心多轴式刀盘等方法，实现对海鸥块处盲区（B、C区域）[图1（c）]的开挖，整体断面呈近似矩形的椭圆状，隧道断面上部和底部均为圆弧形，既改善了设备和管片的承载受力，又解决了背土问题，减小地层扰动，见图1（d）、（e）。

2.2. 矩形 TBM

矩形TBM整体开挖后空间利用率高、开挖土方少、对周边环境干扰小，特别适用于综合管廊、人行通道、地铁出入口等矩形断面地下工程。为满足对矩形断面全覆盖开挖，开挖系统常用的结构形式有平行中心轴式[3,4]、偏心多轴式[5,6]和模块式[7,8]等，见图2(a)~(f)。

2.3. 马蹄形 TBM

马蹄形（图3）隧道支护结构受力性能好、空间利用率高，是铁路和公路隧道常用断面形式之一。

马蹄形TBM可一次性完成切削、排渣、管片支护等工序，具有安全、环保、高效等特点。在铁路或公路

的施工过程中，需要在暗挖隧道底部铺设预制仰拱。由于马蹄形仰拱体积远远小于圆形隧道，因此通过马蹄形TBM挖掘隧道可节省大约30%的混凝土。但马蹄形盾构施工中易自转、隧道管片结构复杂、掘进过程中铺设预制仰拱块等问题难度大，对施工要求非常严格。

3. 矩形顶管机的关键技术研究及工程应用

3.1. 项目概况

红专路下穿中州大道隧道工程位于郑州市中州大道与红专路交叉口，工程平面图见图4所示。隧道断面为10.12 m×7.27 m的矩形，规划包括两条双向四车道和两条非机动车道。掘进长度为105 m，覆土为3.2~4 m，穿越地层以粉土和粉细砂为主。掘进设备为特制超大断面矩形顶管机，宽10.12 m，高7.27 m，驱动总功率为1080 kW，最大推力11 000 t，设计最大推进速度40 mm·min⁻¹。

3.2. 矩形顶管的关键技术研究

3.2.1. 超薄矩形盾体优化设计

相比常规圆形TBM，矩形顶管盾体横向跨度大，上

[†] <http://www.tunnelling.cn/PNews/WeChatDetail.aspx?weChatId=102>.

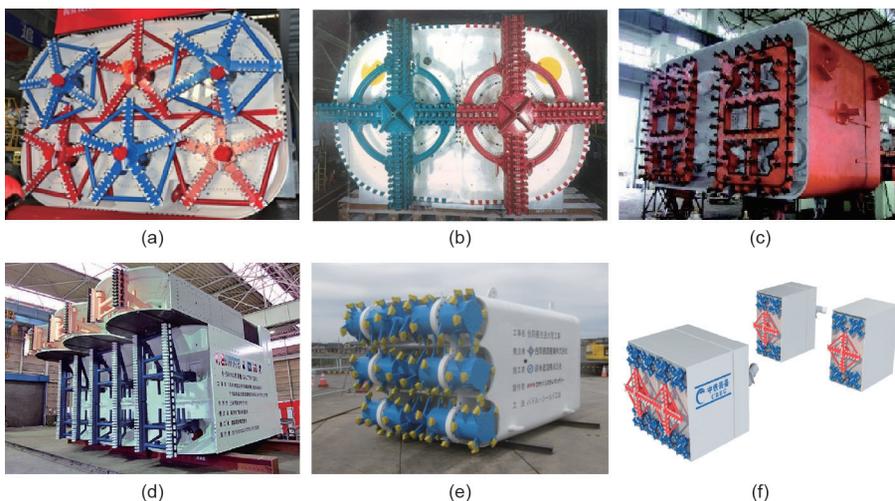


图2. (a) 错置组合刀盘; (b) 同平面仿形刀盘; (c) 摆动式刀盘; (d) 三联式TBM; (e) 滚筒式组合刀盘; (f) 装配式组合刀盘。



图3. 世界首台马蹄形TBM。

部覆土难以形成稳定自然拱，此外盾体自身重量大，结构受力复杂。如盾体变形过大会降低泥浆套形成质量，盾体重量过大会增加制造、运输和使用成本。因此需要在满足强度、刚度的要求下做到盾体轻量化[9]。

(1) 载荷计算模型。由于覆土较浅，地面动载不可忽略，除自身重量外，矩形盾体还要承受水土压力及地

面动载荷压力，因此应对隧道上部荷载进行定量分析。矩形顶管荷载分布如图5所示。

当TBM上覆土层厚度小于1倍盾体外径，按浅埋隧道计算盾体上部垂直土压力标准值[10]:

$$F_{s1} = \sum_{i=1}^n \gamma_{si} h_i + F_q \quad (1)$$

式中， F_{s1} 为TBM顶部垂直土压力标准值 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)； γ_{si} 为TBM上部各土层容重 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)； h_i 为TBM上部各土层厚度 (m)； F_q 为地面动载 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)。

隧道处于地下水位以上，不考虑水头荷载的影响，侧向土压力标准值按下式计算[10]:

$$F_c = (F_{s1} + \gamma_{si} D_1 / 2 + F_q) K_a \quad (2)$$

式中， F_c 为侧向土压力标准值 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)； D_1 为盾体高度； K_a 为主动土压力系数。

(2) 盾体结构的设计与优化。由于矩形顶管盾体横向跨度大，为了改善结构受力性能，前盾设计为上部起拱，前端环截面呈锥形，后端环截面为箱形，如图6 (a)

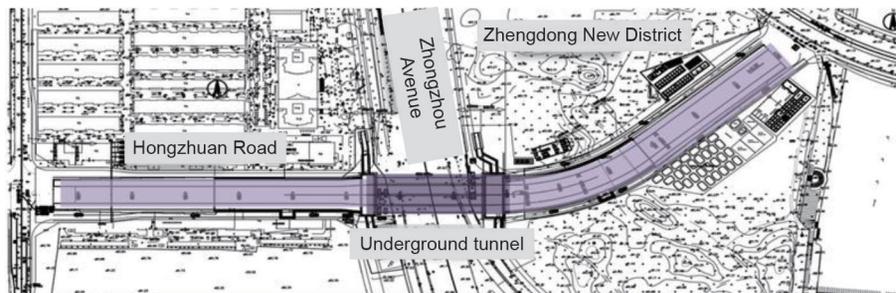


图4. 红专路下穿中州大道隧道平面图。

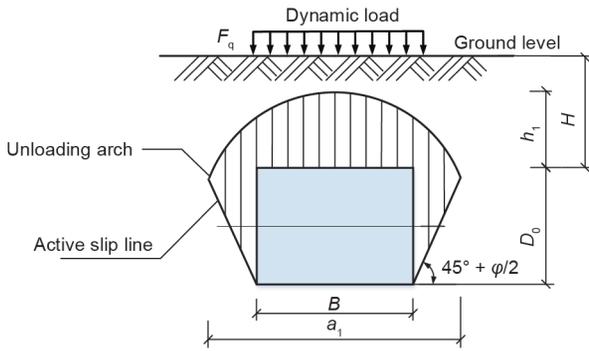


图5. 矩形顶管外部荷载计算模型。 B : 隧道外部宽度; a_1 : 卸荷拱宽度; D_0 : 隧道高度; $\varphi = \tan^{-1} f_{kp}$, f_{kp} 为土壤的固定系数; h_1 : 卸荷拱高度; H : 卸荷拱深度。

所示。根据公式(1)、(2)计算结果施加盾体荷载, 对其进行有限元分析[11]。结果显示, 前盾所承受最大应力为85.329 MPa, 以满足操作要求, 见图6(b)。前盾最大变形量为4.6134 mm, 出现在前盾箱体后部的中间位置, 见图6(c)。

为改善盾体受力及变形, 对盾体结构进行优化, 在筋板之间设计垂直支撑梁以增加结构刚度, 如图6(d)所示。优化后相同荷载条件下的前盾应力、变形分布分别见图6(e)、(f)。

结构优化后前盾的最大变形量降低26.0%, 最大应力降低31.6%, 对比结果如表1所示, 应力薄弱点仍然存在, 但盾体刚度明显增加。

3.2.2. 多刀盘联合开挖系统设计

隧道顶板覆土厚度最小仅为3 m, 开挖扰动过大将破坏原有道路的行车功能, 甚至引发交通事故。针对矩

表1 盾体结构优化前后计算结果对比

	Before optimization	After optimization	Decreased percentage
Maximum deformation	4.6134 mm	3.4121 mm	26.0%
Maximum stress value	85.33 MPa	58.39 MPa	31.6%

形隧道开挖面积过大、单一圆刀盘切削盲区过多等问题, 矩形顶管设计了平行中心轴式多刀盘联合开挖系统。

(1) 多刀盘联合开挖系统设计。设计采用6个辐条式刀盘组合开挖, 其中前层刀盘呈倒品字形, 后层刀盘呈正品字形分布, 相邻刀盘的切削区域相互重叠。刀盘的开挖直径与管片的圆角外径相同, 其开挖率可以达到90%以上。后层刀盘主动搅拌棒数量多于前层刀盘, 以增大搅拌区域, 保证渣土输送流畅。同时通过在盾体周边布置盾体切刀, 保证开挖断面尺寸。

(2) 多刀盘联合开挖渣土流场分析。基于ANSYS Fluent软件中的Herschel-Bulkley流变模式对土体进行流场模拟, 根据对郑州粉质黏土性质的测定, 确定满足Herschel-Buckly非线性本构方程模型。取改良土体密度 $1480 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 屈服黏度 $\mu_0 = 680 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 静切应力 $\tau_0 = 13 \text{ kPa}$, 稠度指数 $k = 1$, 幂律指数 $n = 1.1$, 刀盘转速为 $1 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 其动力黏度 η 与剪切速率 v 之间的关系为[12]:

$$\eta = \frac{\tau_0 + k[v^n - (\tau_0/\mu_0)^n]}{v} \quad (3)$$

模拟结果如图7所示, 每层刀盘可将旋转和交叠区域内的土壤搅拌均匀, 对周围土体扰动较小, 但土仓中仍然存在一定的搅拌盲区。

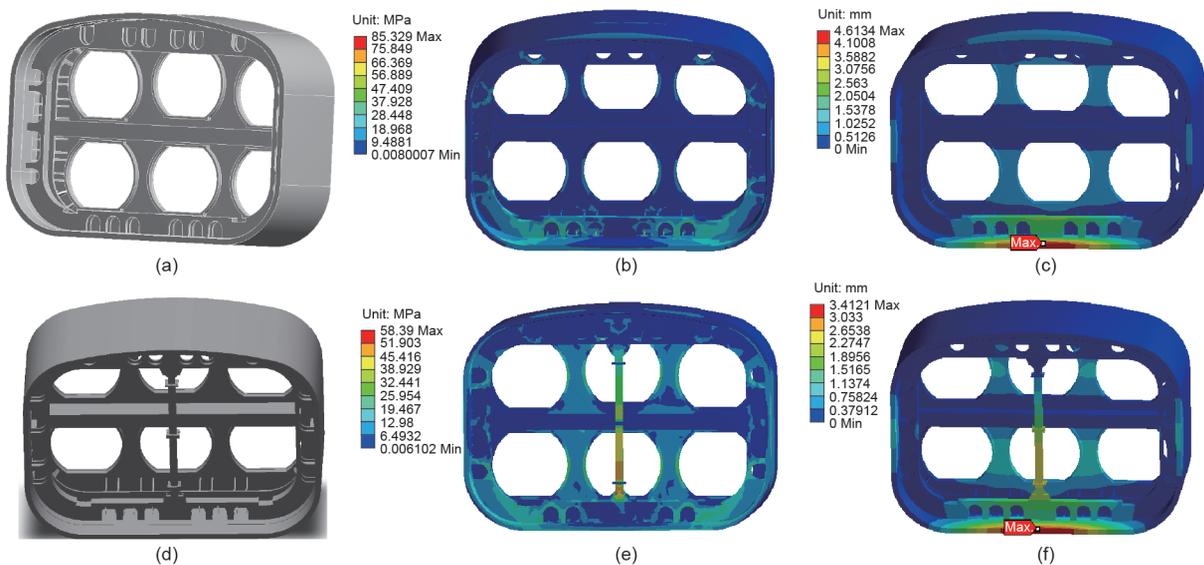


图6. (a) 前盾的结构设计; (b) 前盾的应力分布; (c) 前盾的变形; (d) 优化后的前盾结构模型; (e) 优化后的前盾应力分布; (f) 优化后的前盾变形。

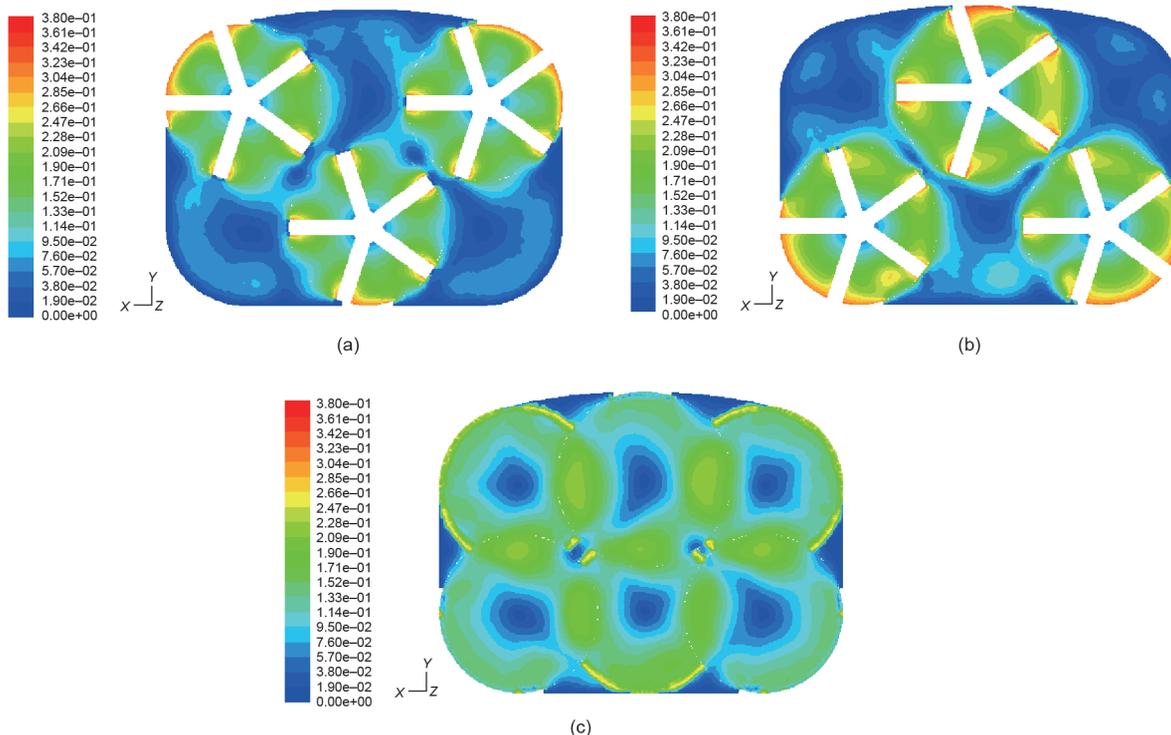


图7. 渣土流场Z向速度分布。(a)前刀盘渣土流场速度分布 ($Z=600$)；(b)后刀盘渣土流场速度分布；(c)双层刀盘流场渣土速度分布。

图8表明，刀盘在不同断面上形成各自的流场，刀盘旋转促使渣土在断面之间大范围地流动，并最终流向螺机，保证了土体与改良剂的充分混合，利于渣土达到塑性流动状态，提升了出渣效率。

3.3. 工程应用

矩形顶管实物样机见图9 (a)，目前，由一条机动车道和一条非机动车道组成的隧道已成功贯通，掘进过

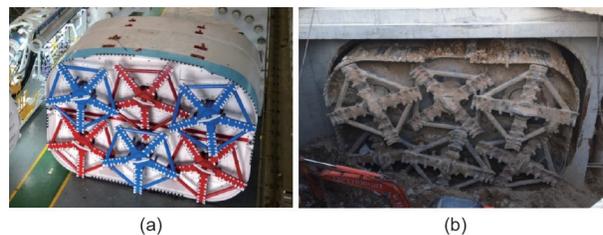


图9. (a) 超大矩形断面顶管机样机；(b) 贯通后的前盾。

程中设备运行良好。

(1) 施工过程中顶管机盾体受力良好，盾体顶部中心最大变形量为3.2 mm，无疲劳裂纹产生，如图9 (b) 所示。

(2) 施工过程中，矩形顶管土仓两侧压力最大值小于0.5 bar (1 bar= 10^5 Pa)，最大地表沉降量小于18 mm，如图10所示。表明多刀盘联合开挖下，土仓压力分布均匀稳定，渣土流动性良好，土体扰动小。

4. 马蹄形 TBM 的关键技术研究及工程应用

4.1. 项目概况

蒙华铁路连接内蒙古自治区西部与华中地区，蒙华铁路白城隧道位于陕西省靖边县境内，隧道全长3345 m，为时速120 km的双线电气化铁路隧道。隧道断面呈马

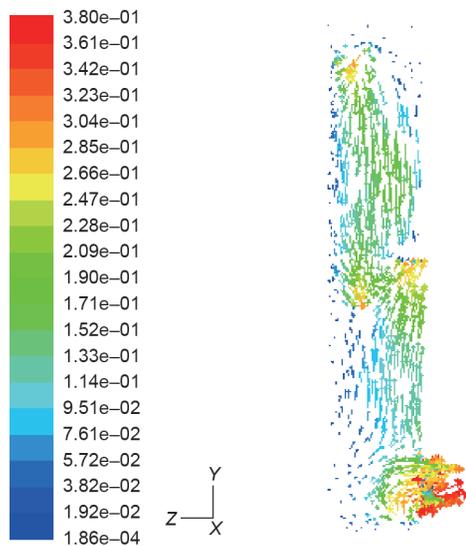


图8. 渣土流场X向(螺机中心面)速度矢量图。

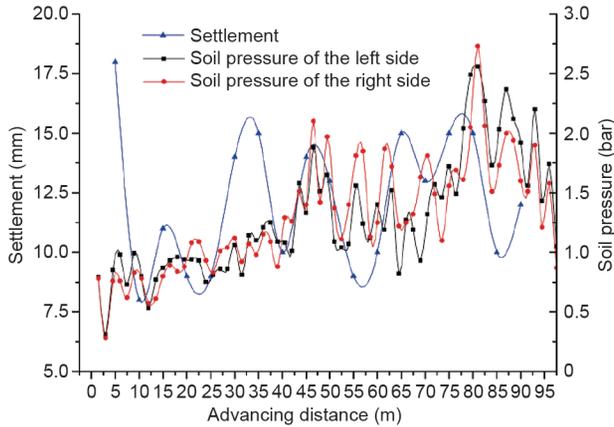


图10. 施工过程中地层沉降及土仓压力变化曲线。

蹄形，上部为圆拱，下部稍扁，左右两翼下侧的弧度较小，隧道最大埋深为81 m。隧道洞身范围内地层主要为粉砂、细砂、砂质黄土等，如图11所示。隧道全段位于直线上，隧道纵坡为人字坡，坡度/坡长依次为4.5%/1935 m、-3%/900 m、-11%/510 m。

针对白城隧道设计的马蹄形TBM，宽11.9 m，高10.95 m，开挖断面面积约为106 m²，驱动总功率1980 kW，最大推力14 080 t，最大推进速度60 mm·min⁻¹。

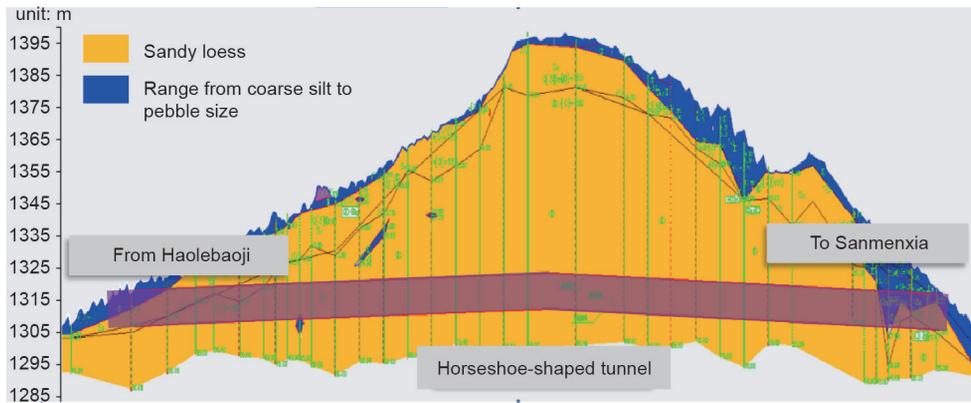


图11. 白城隧道地质剖面图。

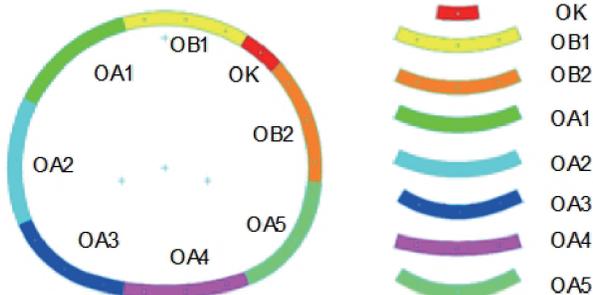


图12. 马蹄形隧道支护管片结构示意图。

4.2. 马蹄形 TBM 的关键技术研究

4.2.1. 异形管片拼装系统

大跨度异形断面预制管片拼装面临诸多难题：表面曲率不一、形状多样、重心偏置、重量较大、拼装路径复杂、拼装精度要求高。支护管片结构示意图如图12所示。

(1) 多自由度管片拼装系统。为减少管片组对误差，提高管片多点抓取的稳定性，研发设计了一种多自由度管片拼装系统，主要结构包括回转机构、径向伸缩机构和管片抓取机构，如图13 (a) 所示。回转机构绕Z轴进行旋转运动，径向伸缩机构在油缸的驱动下实现伸出和回缩。

管片抓取机构安装于径向伸缩机构上，结构如图13 (b) 所示。由平移油缸驱动沿Z'轴移动，由横摇油缸驱动绕Z'轴作旋转运动，由俯仰油缸驱动绕X'轴作旋转运动，由偏转油缸驱动绕Y'轴作旋转运动，多自由度运动最终实现对复杂管片拼装轨迹的适应。异形管片拼装系统样机如图14所示。

(2) 拼装系统柔性控制技术。为消除拼装系统对管片的刚性冲击，增强系统稳定性。采用电液柔性控制技术减小系统冲击，无级比例调速和压差补偿克服变

负载带来的速度影响，电液集成控制系统中植入时间斜坡，管片拼装过程如图15 (a)~(h) 所示，分别表示管片OA4、OA3、OA、OA2、OB2、OA1、OB1和OK的安装姿态和顺序。

4.2.2. 渣土改良试验研究

(1) 试验方案设计。马蹄形TBM开挖断面大，各刀盘渣土搅拌效果不均，渣土流动状态复杂。渣土改良不佳会导致刀盘扭矩过大、出渣不畅、严重时会造成

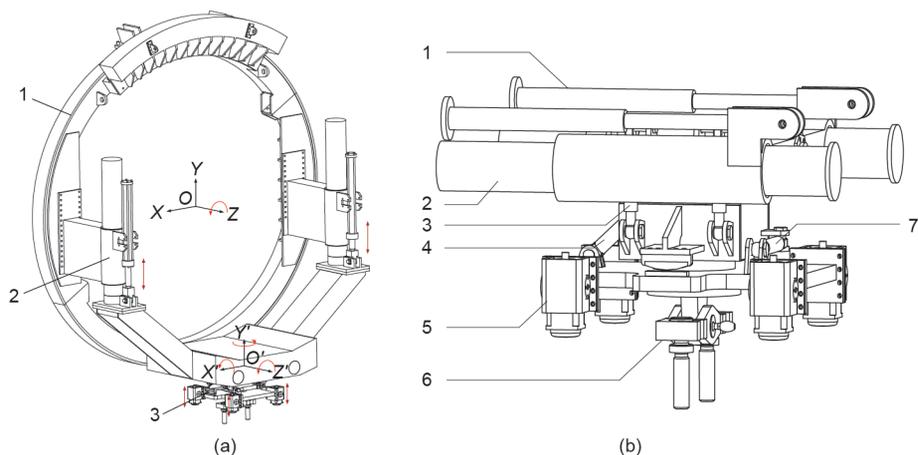


图13. (a) 管片拼装系统图: 1. 回转机构, 2. 径向伸缩机构, 3. 管片抓取机构; (b) 管片抓取机构: 1. 平移油缸, 2. 导向柱, 3. 横摇油缸, 4. 俯仰油缸, 5. 锁紧油缸, 6. 锁紧装置, 7. 偏转油缸。



图14. 异形管片拼装机。

成螺旋输送机的损坏。为了得到适合本项目, 具有良好塑性和流动性的渣土改良方案, 采集现场土样, 使用泡沫、膨润土浆液、泡沫和水作为改良介质进行渣

土改良, 通过塌落度试验、搅拌试验、透水性试验等, 对其改良效果进行试验分析, 试验方案设计如图16所示[13]。

(2) 试验分析。黄土土样坍落度随着含水量的增加而增大, 加水后土样流动性较好, 但塑性稍差, 如图17(a)所示; 黄土土样坍落度随泡沫、膨润土浆液注入比的增大而增大, 当泡沫添加到一定程度后, 坍落度不再随泡沫的添加量增加而变化, 如图17(b)所示。泡沫使土体变得松散, 土体塑性明显增强。土样黏聚性随着膨润土浆液注入比的增大而显著增强, 但是与泡沫改良的效果相比较, 其塑性和流动性提升幅度较小, 经济性较差。

根据以上分析结果, 采用泡沫改良的方式能提高土体坍落度, 增加土体的流动性、黏聚性和保水性, 满足渣土“流塑状”要求, 膨润土浆液改良虽能有效增加土体黏聚性, 但成本较高, 经济性差。经多组试验对比, 项目施工采用泡沫注入比为27%的改良方案。

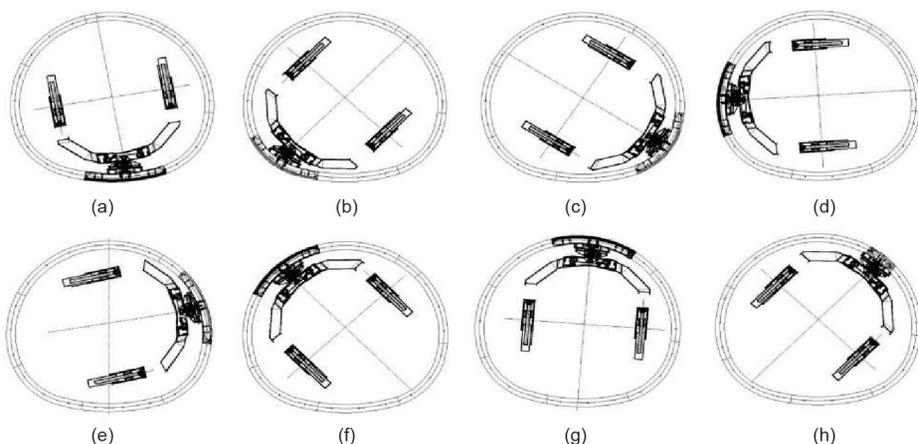


图15. 异形管片拼装过程。

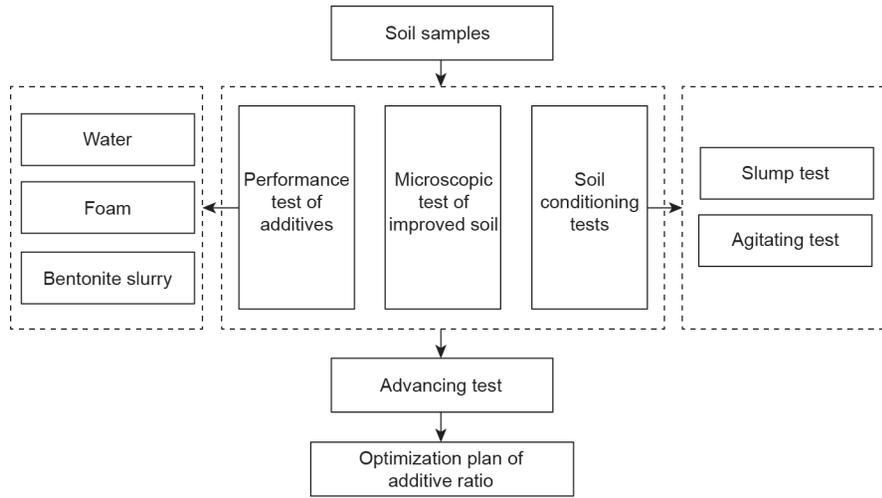


图16. 渣土改良试验方案。

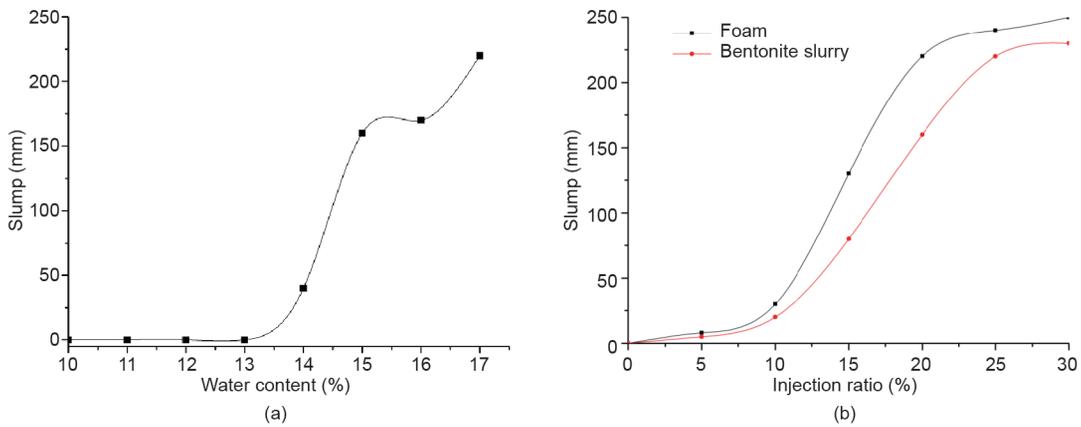


图17. (a) 注水改良下土样塌落度曲线；(b) 泡沫、膨润土浆液改良下土样坍落度曲线。

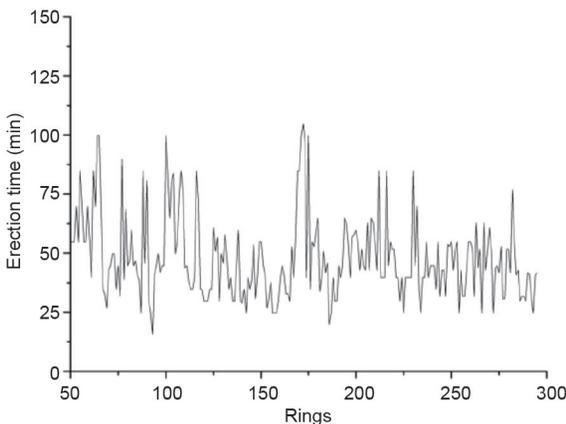


图18. 每环管片拼装用时统计曲线。

4.3. 工程应用

截至2017年6月，马蹄形TBM在白城隧道已完成掘进1704 m，平均日进度12 m，设备运行状态良好。

(1) 施工过程中，管片拼装系统能很好适应异形断面管片拼装，每环管片拼装平均用时55 min，实现了管

片安全、高效拼装，如图18所示。

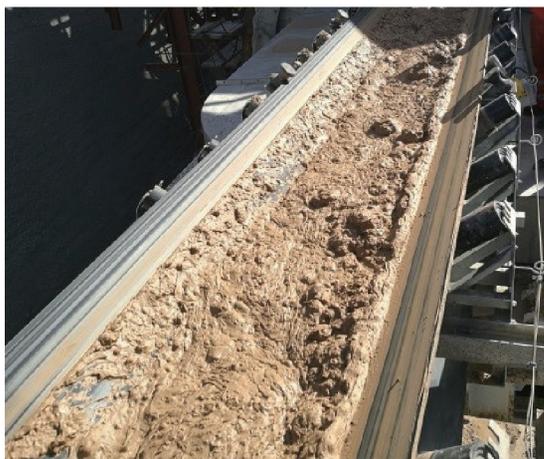
(2) 施工过程中，改良后的渣土具有很好的流塑性，改良效果良好，如图19 (a) 所示。渣土改良后，刀盘扭矩平均值减小了6%，并且大大降低了刀盘扭矩值的波动性，提高了刀盘可靠性，如图19 (b) 所示。

5. 结论与展望

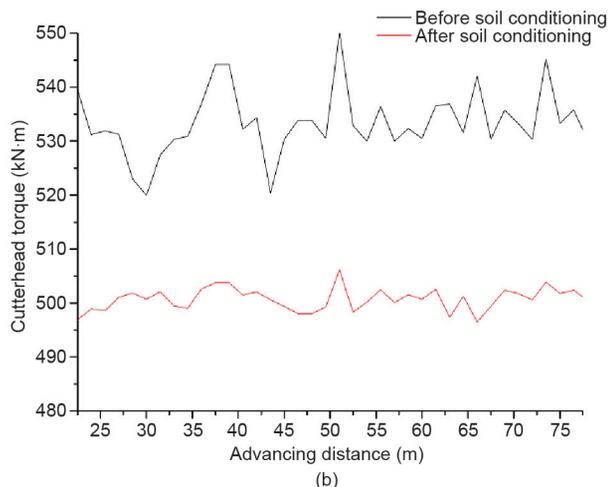
5.1. 结论

本文以矩形顶管机和马蹄形盾构机实际工程为例，通过结构优化设计、多刀盘联合开挖、异形管片拼装和渣土改良试验等关键技术研究，解决了异形掘进机设计、制造和施工过程中容易出现的盾体变形、地层扰动、掘进困难等实际问题，为异形掘进机的实际应用和推广提出了一整套解决方案，本文主要结论如下：

(1) 矩形盾体采用箱型和上部起拱结构可以明显增强盾体刚度，在前盾尾部设置中间支撑梁可以有效减小



(a)



(b)

图19. (a) 现场渣土改良效果; (b) 渣土改良前后刀盘扭矩对比曲线。

盾体变形。

(2) 多刀盘联合开挖采用刀盘前后错置排布, 保证异形断面较大的覆盖率, 同时刀盘之间渣土流动合理充分, 有利于渣土改良和提升出渣效率。

(3) 多自由度冗余驱动的管片拼装机可以较好地适应多曲率隧道管片的拼装, 电液柔性控制技术能大幅提高管片抓取的安全性和稳定性。

(4) 大断面异形TBM宜在施工前采集现场土样进行渣土改良系列试验, 确定最佳改良介质和注入比。

5.2. 展望

为解决城市土地资源紧缺难题, 大力开发地下空间已迫在眉睫。长期以来, 城市市政公用管线管理混乱, “马路拉链”问题屡见不鲜。因此容电缆、水、气管道于一体, 具备检修、监测功能, 适于暗挖法施工的综合管廊, 具有安全、经济、低环境干扰、不占用地面资源等优势, 已成为地下空间开发的优先发展方向。从当前综合管廊的发展来看, 断面形式设计为矩形和马蹄形, 并且采用盾构工法施工开挖具有非常广泛的应用前景, 见图20。

未来地下空间的多样性对异形TBM需求方兴未艾, 在常规TBM日渐成熟的基础上, 异形TBM必须不断增强设备和工法对异型断面的适应性, 具备与大数据应用和智能制造相结合的能力, 成为精密、智能的高端设备。具体体现在以下方面:

(1) 异形断面适应技术。实现异形断面全覆盖开挖,



(a)

(b)

图20. (a) 矩形综合管廊[‡]; (b) 马蹄形综合管廊。

优化渣土搅拌与盲区处理, 通过渣土实时分区改良, 维持土仓压力平衡稳定, 减少地层扰动, 提高管片拼装效率和准确性, 研发智能推进和姿态精准控制系统等。

(2) 远程运维及大数据技术。借助物联网和大数据理念, 提高异形TBM的信息化水平, 通过设备实时状态监控, 实现异形TBM运行预警和故障预报、诊断等功能; 采集、存储异形TBM设计、制造、施工和运维全生命周期数据, 通过大数据分析挖掘获取新的知识和规律, 促进异形TBM的全面升级。

(3) 智能控制技术。增设智能工业传感器, 提高设备对地层和自身状态感知能力, 研究TBM控制策略, 建立智能控制专家系统, 实现异形TBM“感知-学习-判断-决策”智能控制目标, 避免过渡依赖人为操作经验, 实现设备安全、高效掘进。

References

- [1] Ryunosuke Kashima, Takuya Nakagawa, Toru Goto. Application Of Double-

[‡] http://www.sohu.com/a/123557058_481408.

- O-Tube TBM In Soft Ground, XIAN, The Seventh China-Japan Conference On Shield Tunneling proceedings, 2013:533-543
- [2] T. Sukegawa. Development of the Removable Three-Centered Slurry Shield Method for Station Using Running Shield Machine. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers., 2010:49-55.
- [3] Li JB, Zhao H, Fan L, Jia LH, Zhuo XJ, Dong YP, et al. Super-large rectangular pipe jacking machine. China patent ZL201410247831.9 2014. Chinese.
- [4] Kazunari Kawai, Takashi Minami, Development of Rectangular Shield , KOMATSU Technical Report., 2002.3, 47(148):46-54
- [5] Q. Lv ,D. M. Fu, H. L. Wang. Study of eccentric multi-axes particular shape tunnel borer and its application. Construction Mechanization., 2005, 26(8): 33-36
- [6] Kajima Corporation. R-SWING construction method and internet [Internet]. Tokyo: Kajima Corporation; 2011 [updated 2011 Sep 12; cited 2017 Mar 16] Available from: <http://www.kajima.co.jp/news/press/201109/12c1-j.htm>. Japanese.
- [7] Ooki Chiaki. Development of close type rectangular shielded machine (slurry shield). New Technology New Method., 2015(17):1-6
- [8] Li JB, Jia LH, Fan L, Dong YP, Jiang PP, Wang XT, et al. Rectangular TBM used for underground parking lot. China patent CN2016103920048 2016. Chinese.
- [9] P. Liu, Y. C. Dai. Research and design of a rectangular pipe jacking machine. Municipal engineering technology., 2005, 23(2): 92-95
- [10] C. H. Ge. Pipe Jacking Project Design and Construction. Beijing: CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS, 2012.1: 84-86
- [11] P. Zheng, L. Wu. Stress analysis and improvement of shell of earth pressure balancing shields. CFHI technology., 2015(1): 70-74
- [12] W. Guo, J. Hu, J. Q. Liu, et al. Analysis of soil of excavation face with shield cutter head based on computational fluid dynamics. Journal of Tianjin university., 2012.12, 45(12):1039 - 1044
- [13] L. H. Jia. Key technologies for design of super-large rectangular pipe jacking machine. Tunnel construction, 2014.11, 34(11): 1098-1106