

隧道盾构掘进土力学

(国家“973”项目研究成果)

Soil Mechanics on Shield Tunnelling

张义同 高 健
乔金丽 齐德瑄 编著

隧
道
盾
构
掘
进
土
力
学

隧道盾构掘进土力学

(国家“973”项目研究成果)

Soil Mechanics on Shield Tunnelling

张义同 高 健 编著
乔金丽 齐德瑄

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

前 言

盾构施工首先是从西方开始的,随后又在日本等国的地铁施工中应用并获得了进一步的发展。近 20 年来,盾构施工在国内的地铁施工中获得了广泛的应用,盾构设备的制造在中国方兴未艾。由于起步较晚,我们在盾构施工和设备制造技术方面都落后于西方和日本。国外的施工技术和设备也不完全适合国内的地质条件。盾构施工事故不时见诸报端,有一些社会影响不大的事故(如断轴等)虽没有见诸报端,但对相关人员的压力和挑战是巨大的。我们已为这些付出了不小的经济代价。于是,国内的地铁施工单位、重型机械制造行业、有关科研院所和大专院校开始了相关的研究和技术攻关,国家科技部针对地铁盾构施工先后设立了“863”和“973”项目,“复杂地质掘进过程的界面行为”就是“973”项目的一个子课题。本书的内容是我们这几年对该子课题研究的部分成果的汇编。

地铁施工中社会影响较大的事故是由于地面的塌陷或隆起造成的。而地面的塌陷或隆起是由于盾构施工中造成了掘进界面的失稳,进而导致土体的过大变形所造成的。对不同的地质条件,为了将土体变形控制在许可的范围内,回答以下问题是必要的:土体掘进界面的失稳机理和形式如何?如何控制盾构的土舱压力或泥浆压力?采用多高的掘进速度?是否需要采用附加措施(如超前注浆管棚支护等)?……我们这几年的工作部分回答了这些问题。

我们的研究发现,当掘进界面的支护力小到某一值后,掘进界面的土体轴向位移便会迅速增大,土体的塑性变形区迅速向地面扩展,把这一值作为理论上的界面失稳极限支护力是合适的。这一临界失稳现象,也由浙江大学土木工程实验室的盾构模拟实验所证实。

复杂多层地质和渗流条件下的掘进界面失稳的研究对工程施工有重要意义,书中有较多篇幅介绍了我们在这方面的研究成果。

对盾构施工中实际遇到的一些工程问题,我们也致力于建立模型进行分析,如泥浆渗透和泥浆膜的形成对极限支护力的影响,超前注浆管棚支护的模型建立和分析,掘进速度对极限支护力的影响等等。

书中注意理论分析和工程施工相结合,给出了理论分析和工程测量结果的对照。

实验已经证实,沙土可以发生应变局部化,并可以在荷载几乎不变的情况下扩展。本书介绍了平面应变状态下关于沙土应变局部化及其扩展的解析分析,并和实验结果进行了比较。由于沙土应变局部化及其扩展而导致的掘进界面的失稳分析,放在了我们的另一本专著《应变局部化理论及应用》(2010 年 8 月天津大学出版社出版)中。

本书主要内容由我们这几年所发表的论文所组成,包括了博士研究生乔金丽、高健的主要研究成果和博士生齐德瑄的部分研究成果,也包括硕士生朱源、谢晓晖的部分计算工作。

张义同
2010 年 2 月

目 录

第 1 篇 盾构施工简介

第 1 章 盾构法施工概述	(1)
1.1 隧道施工的发展历史	(1)
1.2 盾构施工简介	(3)
第 2 章 盾构的基本结构和分类	(5)
2.1 盾构的基本结构	(5)
2.2 盾构的分类	(9)
第 3 章 盾构施工的事故举例及施工发展趋势	(13)
3.1 盾构施工事故举例	(13)
3.2 盾构施工的发展趋势	(14)
参考文献	(17)

第 2 篇 土力学的基础理论

第 4 章 大变形分析	(19)
4.1 变形、运动和变形梯度	(19)
4.2 微体积和微面积的变化	(20)
4.3 微线段的变形——伸长和剪切	(21)
4.4 变形梯度张量的极分解与刚体转动	(22)
4.5 应变张量	(25)
4.6 运动分析	(26)
第 5 章 土力学控制方程	(29)
5.1 质量守恒	(29)
5.2 动量和动量矩守恒	(30)
5.3 Cauchy 公式和 Cauchy 应力	(31)
5.4 控制方程	(32)
5.5 名义应力张量	(33)
5.6 Lagrange 型控制方程	(33)
5.7 共轭应力张量	(34)
第 6 章 土体的弹塑性本构模型	(36)
6.1 屈服条件的一般形式	(36)
6.2 加载曲面和加载准则	(37)
6.3 Drucker 公设	(38)
6.4 弹塑性本构方程	(38)

第7章 土力学中的稳定性问题与强度理论	(41)
7.1 土体和岩石的应变软化行为与应变局部化	(41)
7.2 沙土中的剪切带分析	(43)
7.3 土体的 Mohr-Coulomb 强度理论	(50)
第8章 渗流理论	(53)
8.1 地下水的贮存形式	(53)
8.2 地下水运动规律	(56)
8.3 渗透力与渗透变形	(57)
8.4 渗流基本微分方程	(58)
参考文献	(60)

第3篇 盾构掘进界面稳定性和地表隆降分析

第9章 概述	(63)
9.1 掘进面失稳研究方法	(63)
9.2 盾构掘进中的地表隆起和沉降	(69)
9.3 地表沉降分析方法	(71)
第10章 均匀土层掘进面的稳定性分析	(75)
10.1 确定均匀土层掘进面极限支护压力	(76)
10.2 沙土地层掘进面稳定性数值模拟计算与分析	(78)
10.3 黏土地层掘进面稳定性数值模拟计算与分析	(100)
10.4 本章小结	(119)
第11章 多层土层盾构隧道掘进面的稳定性分析	(121)
11.1 多层土层掘进面稳定性的数值分析	(121)
11.2 掘进面支护压力大小对围岩变形的影响规律研究	(124)
11.3 掘进面稳定性影响因素敏感性分析	(127)
11.4 多层土层掘进面极限支护压力计算模型	(129)
11.5 本章小结	(142)
第12章 盾构隧道掘进面稳定的强度折减安全系数法	(143)
12.1 概述	(143)
12.2 强度折减法介绍	(143)
12.3 工程算例概况	(145)
12.4 强度折减法确定掘进面稳定的可行性	(146)
12.5 影响稳定安全系数的参数敏感性分析	(150)
12.6 本章小结	(153)
13章 基于遗传规划的盾构隧道掘进地表最大沉降预测	(154)
13.1 遗传规划算法及其特点和结构	(154)
13.2 初始群体的形成	(156)
13.3 适应度的评价方法及基本算子	(157)
13.4 验证遗传规划非线性回归的可行性	(160)

13.5	盾构隧道掘进引起地表沉降的遗传规划模型	(162)
13.6	本章小结	(165)
第14章	考虑刀盘开口面积的掘进面稳定性分析	(166)
14.1	刀盘设计	(166)
14.2	考虑开口作用下掘进面稳定性数值模拟	(167)
14.3	掘进面稳定性影响因素敏感性分析	(170)
14.4	本章小结	(184)
第15章	盾构隧道掘进面稳定性分析的软件集成	(185)
15.1	系统总体设计构思	(185)
15.2	系统的主要功能	(186)
15.3	系统操作说明	(187)
15.4	工程实例	(188)
15.5	本章小结	(193)
	附录:盾构隧道掘进面支护压力预测的 fish 语言	(194)
	参考文献	(212)

第4篇 考虑渗流的掘进面稳定性分析

第16章	沙土地层掘进面失稳分析	(216)
16.1	计算模型与材料参数	(216)
16.2	影响隧道掘进面稳定性的因素分析	(216)
16.3	沙土地层掘进面变形与破坏规律	(227)
第17章	黏土地层掘进面失稳分析	(229)
17.1	计算模型与材料参数	(229)
17.2	影响隧道掘进面稳定性的因素分析	(229)
17.3	黏土地层掘进面变形与破坏规律	(235)
第18章	掘进面稳定分析的垂直条分法	(237)
18.1	垂直条分法	(237)
18.2	分层土上覆土压力计算	(239)
18.3	渗流分析	(240)
18.4	支护力估算	(241)
18.5	数值分析	(243)
18.6	工程实例分析	(246)
18.7	本章小结	(248)
第19章	泥浆渗透对泥水盾构掘进面稳定性的影响	(249)
19.1	泥水盾构掘进面稳定机理	(249)
19.2	考虑泥浆渗透的掘进面稳定性分析	(250)
19.3	工程实例	(258)
19.4	本章小结	(261)
第20章	实施超前注浆管棚支护的隧道掘进面稳定性分析	(262)

20.1	隧道超前预支护技术	(262)
20.2	实施管棚支护的掘进面稳定极限分析	(263)
20.3	工程实例分析	(266)
20.4	本章小结	(271)
第 21 章	考虑盾构掘进速度的隧道掘进面稳定分析	(272)
21.1	稳态条件下的流体流动	(272)
21.2	考虑盾构掘进速度的渗流分析	(273)
21.3	考虑盾构掘进速度的掘进面稳定机理	(278)
21.4	本章小结	(282)
	附录:有限单元数值计算程序 TME(主程序)	(282)
	参考文献	(285)

第1篇 盾构施工简介

第1章 盾构法施工概述

盾构法是暗挖法施工中的一种全机械化施工方法。它利用盾构机械在地下推进,通过盾构外壳和管片支撑四周土体,防止发生往隧道内的坍塌,同时在掘进前方用切削刀盘进行土体挖掘,并通过出土输送系统将挖掘下的土体运出洞外。掘进中靠千斤顶在后部加压顶进,并拼装预制混凝土管片,在管片和隧道的空隙间注浆。盾构法具有以下优点:

①对周围环境影响小,特别是对附近的交通影响很小,对大城市城区的地铁建设几乎是唯一的选择;

②可以穿越河道和建筑物;

③机械化程度高,噪声小,占用场地少;

④隧洞成型质量好;

⑤施工受天气影响小,掘进速度快。

现年50岁以上的人可能会有20世纪六七十年代北京地铁2号线和天津地铁一期工程“开肠破肚”的施工记忆。那种施工方式的土方工程之大、工期之长、对工地周围交通和居民生活影响之大是现在都市生活所难以承受的。现在,地铁施工在我们的脚下不知不觉地穿行而过,便是盾构施工的功劳。

盾构施工首先是从西方开始的。从盾构施工发展的历史可以看到,隧道盾构施工的发展经历了长期的、艰难的历程。

1.1 隧道施工的发展历史

1788年英国人提出了在伦敦泰晤士河下修建隧道的设想,但因竖井挖不到预定的深度而停工。4年后,L. Torevix决定在泰晤士河下修建另一条隧道,但当工程施工到最后30 m时,掘进面急剧涌水,隧道被淹没而未成功。

1802年,英国采矿工程师A. Mathieu提出修建英吉利海峡隧道的计划。设计从英法两岸用一种有掩体结构的挖掘机修筑隧道,每侧各挖掘18.7 km,最后在瓦恩·班克海滩对接贯通。1803年爆发的英法战争使得A. Mathieu的计划未能付诸实施。

1818年,法国人M. I. Brunel发现船上腐烂的木板中,有一种蛀虫钻出许多孔道,并用它们自己分泌的液体来支护孔壁。M. I. Brunel由此得到启发,发明了盾构并取得了专利,这便是敞开式手掘盾构的原型。Brunel于1823年拟定了下穿泰晤士河的另一条隧道的计划,1825

年英国国会通过后动工,中途因地层下沉,工程只好终止。Brunel 总结了失败的教训,制作了一个改进型的房型铸铁框架盾构,于 1834 年再次动工,经过 7 年的精心施工,于 1841 年终于贯通了下穿泰晤士河的隧道,Brunel 对隧道盾构法施工做出了重要的贡献。

1830 年,T. L. Cochrane 为解决盾构穿越饱和含水地层的涌水问题,发明了施加压缩空气阻止涌水的“压气式盾构”。1865 年,P. W. Barlow 首次采用圆形盾构,并用铸铁管片作为隧道衬砌。1869 年,P. W. Barlow 和 J. H. Great Head 用压气式圆形盾构在泰晤士河下成功建成了外径为 2.21 m 的隧道。

1874 年在伦敦地铁南线建造了内径为 3.12 m 的隧道,其穿越的地层主要为黏土和含水沙砾土。为解决这一问题,J. H. Great Head 综合了以往所有盾构法施工的特点,提出了压气式盾构法的整套施工工艺,并首创了在盾尾管片衬砌完成后进行注浆的施工方法,为现代盾构法奠定了基础。

1896 年,申请专利的 Prier 盾构是根据发明者的名字命名的(图 1-1)。1897 年,这台机器成功地应用于伦敦黏土地层,它第一次将 Great Head 盾构与旋转刀盘组合在一起,切削轮由四个辐条臂组成,在臂上装有切削和刮削的刀具,切削轮上设有铲斗,将土料提升并倒入斜槽,再滑落至备好的料车中,然后运至地面。

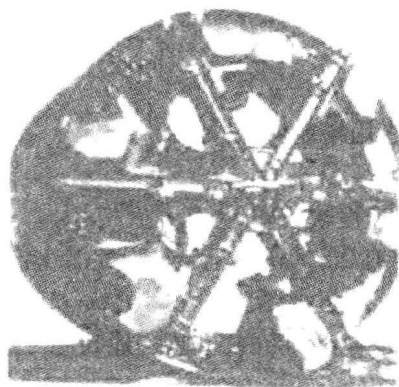


图 1-1 Prier 机械化盾构

19 世纪末到 20 世纪中叶,盾构法相继传入美国、德国、日本、苏联及我国,并得到了大的发展。这一时期盾构法有诸多的技术改进,并在世界各国得以推广普及,仅在美国纽约就采用压气式盾构法建成了 19 条水底隧道。此时,盾构法施工的隧道有公路隧道、地铁、上下水道以及其他市政公用设施管道等。

1917 年,日本引进盾构施工技术,成为欧美国家以外第一个引进盾构法施工的国家。日本国铁羽越的折渡隧道(总长 4 719 m)的第一段,曾采用盾构法施工,但由于地质条件差而被迫中途停工。

20 世纪 60 年代中期至 80 年代,盾构法继续得到发展,尤其在日本迅速发展。1964 年,在荒山左岸流域下水道工程中,首次采用泥水平衡式盾构,该技术是对法国在 1961 年提出的泥水平衡式盾构设想的实践。1974 年,日本独立研制了土压平衡式盾构机,随后又研制了砾石泥水平衡盾构、加压式土压平衡盾构等,统称为闭胸式盾构。这一时期,除了城市的地铁隧道大量采用闭胸式盾构修建外,在城市下水道等市政工程中也得到了广泛应用,目前泥水平衡式

盾构和土压平衡式盾构成为盾构的主流机型。

20世纪80年代以来,盾构施工的发展速度极快,已经成为地铁、通信、电力和上下水道等城市隧道的主要施工方法。尤其在日本,无论是新型盾构的开发,还是盾构的制作数量,抑或盾构法建造的隧道长度、承包海外盾构隧道工程(设计及施工)的长度均名列前茅。日本采用泥水平衡式盾构(直径14.14 m)修建了东京湾横断公路隧道,该隧道采用双层衬砌,钢筋混凝土管片衬砌外径为13.9 m,内径为12.6 m,管片厚度为65 cm,内侧现浇35 cm厚的二次衬砌。

1986年日本研制出世界上第一台双圆泥水加压式盾构,又称双头型泥水盾构或双连体泥水盾构,由日本日立造船株式会社为日本承包商制造。这台双圆泥水加压式盾构是由两个直径7.42 m的盾构组合而成。盾构横向总宽度为12.19 m,刀盘呈半重叠状。1988年用于日本新建京叶线的京桥双线隧道施工,长度约620 m。

英、法两国在会聚了英、法、日、美和德等国的先进盾构施工技术的基础上,联合建造了世界上最长的英吉利海峡隧道。该隧道全长48.5 km,海底段37.5 km,最大埋深为水平面下100 m,管片衬砌承受的最大压力为1.0 MPa。1999年,英法两国又提出建造第二条英吉利海峡隧道,隧道直径为15 m,该工程已于2008年完工。2004年完工的荷兰格雷厄姆特隧道使用了当时世界上最大的泥水盾构(直径14.87 m),该盾构由法国迈通公司设计制造。

我国的盾构技术在新中国成立前为空白。新中国成立后,在第一个五年计划内,就在东北阜新煤矿的输水港道工程及1957年的北京市下水道工程中进行过小直径盾构隧道法施工的尝试。

1963年,在上海正式进行了网格式挤压盾构法施工的全面实验,并于1969年成功建成第一条黄浦江水底公路隧道——打浦路过江隧道(直径10.22 m)。1970年以来,上海接着用盾构法在黄浦江边及海边建成六条外径4.3 m的排水及引水隧道。1984年上海研制出外径为11.32 m的大型盾构,并于1988年建成了第二条黄浦江水底公路隧道——延安东路过江隧道。1990年以来,上海又成功地采用土压式平衡盾构和泥水平衡式盾构,建成了地铁隧道(直径6.34 m)100 km以上,过江隧道(直径11.22 m)5条。

20世纪70年代以来,在北京、江苏、福建、浙江等省市也采用不同类型的盾构修建了各种不同用途的隧道。随着我国城市地铁的兴建,广州地铁、深圳地铁、南京地铁、天津地铁和北京地铁纷纷成功运用盾构法修建了地铁区间隧道。在南水北调工程中,也成功运用盾构法修建了穿越黄河河底的引水隧道(直径8.8 m)。

但总的来说,我国目前的盾构设备制造和施工技术还比较落后,与国际先进水平差距较大,盾构的关键部件以及施工技术对国外的依赖还较大。为此,国家科技部先后设立了关于隧道盾构施工的“863”项目和“973”项目,开展关于盾构制造的关键技术以及施工技术的基础理论研究。盾构施工的主要对象是土体,研究与盾构施工相关的土力学问题就显得十分重要,“973”项目中的一个子课题就是关于“复杂地质掘进过程的界面行为”的研究。本书是这一问题研究的部分成果的汇编。

1.2 盾构施工简介

地铁隧道施工广泛采用的圆形闭胸式盾构法施工的概况如图1-2所示,其主要施工步骤如下。

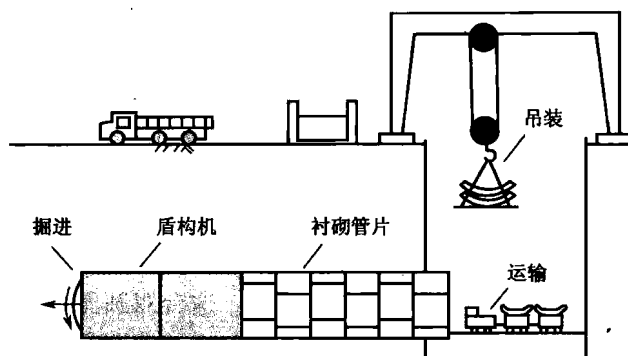


图 1-2 盾构法施工示意图

①在隧道施工的始发端和到达端各修建一个竖井。竖井用于盾构设备的运入、运出、组装,挖掘的土体的运出,衬砌管片的运入,施工人员的出入,供电、给排水、通风等。

②盾构组装后靠尾部的千斤顶从始发井内始发,向前推进,同时,盾构前端挖掘土体。挖掘出的土体经传送带或管道从盾构尾部排出,再经竖井提升到地面运走。由于挖掘方式的不同,导致了盾构的不同类型。

③当挖掘出的长度够一段衬砌的长度时,安装衬砌管片,并向衬砌和隧道的空隙内注浆,防止地层下沉并提高衬砌管片的防渗水功能。

衬砌是承受盾构隧道周围土压力、水压力以确保隧道净空的结构物。衬砌分为一次衬砌和二次衬砌。在盾构隧道中,一次衬砌通常采用的是装配式管片环,二次衬砌是在一次衬砌内侧现浇的混凝土。一般而言,管片衬砌为隧道的主体结构,用于承受外部荷载,而二次衬砌多用于管片衬砌的防蚀、防渗及校正中心线偏离,同时使表面光洁和用于隧道内部装饰等。

④盾构到达端竖井后,将盾构拆解,将各部件提升出竖井;或盾构到达预定地点后,偏离隧道线路“自掘坟墓”。

第2章 盾构的基本结构和分类

针对不同的地质条件,盾构有不同的掘进方式,相应地也就有了不同的结构类型。不同的地质条件要采用不同的盾构进行施工,这对施工效率和施工安全十分重要。世界上第一条用盾构施工的隧道是法国人 Brunel 在伦敦泰晤士河下建成的。隧道施工过程中遭遇多次涌水,并有 6 个隧道工人付出生命的代价,这与缺乏经验、盾构掘进方式与地质条件不相适应有关。1991 年 6 月贯通的英法海底隧道,在短短 3 年内取得举世瞩目的业绩,与隧道盾构正确选型密不可分。

2.1 盾构的基本结构

这里以基本的圆形盾构为例。盾构在掘进过程中要承受很大的轴向和环向荷载,所以盾构整体要求有足够的强度和刚度。盾构主体用钢板成型后焊接制成。大型盾构考虑到水平运输和垂直吊装的困难,可制成分体式,到现场进行就位拼装,各部件的连接一般采用定位销定位、高强度螺栓连接,最后再焊接成型。

盾构主体结构由盾壳、开挖系统、推进系统、管片拼装系统和控制系统等组成,见图 2-1。

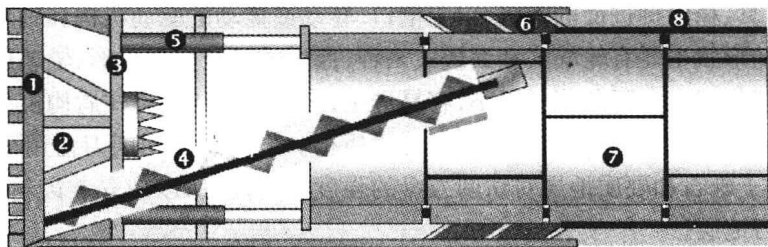


图 2-1 盾构主体结构示意图

1、2、3、4—开挖系统;5—推进系统;6—管片拼装系统;7—控制系统;8—盾壳

1. 盾壳

盾壳是指盾构的外壳,它的作用是保护切削土体、出土、掘进和拼装管片衬砌等所有作业的安全进行,整个外壳用钢板制成,并用环形肋支撑加固。一台盾构的外壳沿纵向从掘进面开始,依次分为切口环、支撑环和盾尾三部分。

(1) 切口环

在切口环上装有切削机械和挡土设备,故又称切削挡土部。

在敞开式盾构中,切口环上装有挡土支护装置。通常采用阶梯形、斜撑形和垂直形等形状。阶梯形和斜撑形切口环的上半部分较下半部分突出,呈帽檐状。为了作业的安全,有时需要设置一组可以用千斤顶控制的移动式切口环,一方面可以替代盾构本体顶部突出的部分,另一方面还可以满足因地层条件差需要对固定环加长的要求。切口环的刀口顶端部分加工成刀片状,加强肋部分做成斜坡状。

在密封式盾构中,前端装有切削刀盘,刀盘后方到隔板的空间称为土舱(或泥水舱)。土舱内设有搅拌装置,底部设有进入螺旋出土器的出土口,上部留有添加材料的注入口。

(2) 支撑环

支撑环是承受作用于盾构上全部荷载的主体结构,在环向和纵向都有很大的刚度和强度。在大、中断面盾构上,大多数采用梁柱进行加固,故支撑环板壳的厚度有时会比盾尾和切口环部分设计得稍薄一些。

(3) 盾尾

盾尾即盾构的后部结构,其长度需要根据管片在盾构设备内的组装长度和盾尾止水带的形状及其层数确定。此外,还需考虑由于隧道的曲线施工等因素增加的一些富余量,其厚度在不产生过大变形的范围内尽可能薄一些,但必须确保盾尾止水带安装所需要的厚度。

为了防止地下水和壁后注浆材料深入盾构设备内,在盾尾板壳和管片之间需设置止水带及盾尾止水带。其材料常用橡胶、树脂、钢材、不锈钢或其中几种材料的复合体等,常用的形状有刷状和板状等。

2. 开挖系统

不同盾构安装有不同的开挖机构:对于手掘式盾构,开挖机构包括鹤嘴锄、风镐、铁锹等;对于半机械式盾构,开挖机构是铲斗和切削头;对于机械式盾构和封闭式盾构,开挖机构指的是切削刀盘。

(1) 切削刀盘

切削刀盘为可转动或摇动的盘状切削器,具有边旋转、边保持掘进面稳定和边开挖岩体的功能,由切削刀具、稳定掘进面的面板、出土槽口、转动或摇动的驱动机构和轴承机构等组成。

切削刀盘的形状主要有轮辐式和面板式两种,面板式又分为平板形、轴芯形和鼓筒形等。

轮辐式的切削刀盘实际负荷扭矩小,容易进土,多用于土压平衡式盾构机。面板式的切削刀盘具有掘进面挡土功能,用于土压式和泥水式盾构。鼓筒式的切削刀盘用于掘进面自稳定性强的地层,由于砾石和硬质地层对切削刀盘的强度要求高,所以应安装齿轮钻切削刀头,有利于开挖沙砾石地层。

(2) 刀盘扭矩

刀盘扭矩需根据围岩条件、盾构形式、盾构结构和盾构直径来确定,一般认为刀盘所需扭矩由下式计算:

$$T_N = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6$$

式中: T_N 为刀盘所需总扭矩; T_1 为切削土阻力扭矩; T_2 为与土间摩擦阻力扭矩; T_3 为土的搅拌阻力扭矩; T_4 为轴承阻力扭矩; T_5 为密封决定的摩擦力扭矩; T_6 为减速装置的机械损失扭矩。

(3) 切削刀头

切削刀头的形状和材料可以根据地层条件来确定,其形状主要是确定其前角和后角,对于胶结黏性土,前角和后角要大些,而砾石则相对小些。

常见的切削刀具有单刃滚刀、双刃滚刀、甲型切削刀、锥形切削刀等。

刀头的安装高度往往需要根据由地层条件和旋转距离推算出其磨损量、掘进速度、切削转速以及根据设定位置求出的切入深度等确定。配置则需根据地层条件、盾构外径、切削转速及施工总长等确定。

(4) 刀盘的支撑方式

切削刀盘的支撑方式可分为中心支撑式、中间支撑式及周边支撑式三种。支撑方式与盾构直径、土质对象、螺旋出土器、土体黏附状况等多种因素有关。确定支撑方式时必须综合考虑各种影响因素,通常多选用中心支撑式和中间支撑式(图2-2)。

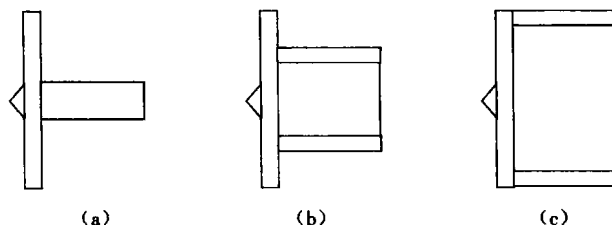


图2-2 刀盘支撑方式

(a) 中心支撑式; (b) 中间支撑式; (c) 周边支撑式

(5) 轴承止水带

设置轴承止水带的目的是保护切削轴承,防止土沙、地下水及添加剂等侵入,故要求轴承止水带能够承受压力舱内的泥水压力、地下水压力、泥土压力、添加剂注入压力及气压等。

轴承止水带的安装位置应根据刀盘支撑方式来确定,即支撑方式中切削轴承的支撑部位就是轴承止水带的安装位置。轴承止水带材料应满足耐压性、耐磨损性和耐热性等要求,一般使用丁腈橡胶、聚氨酯酸橡胶等。

轴承止水带密封件形状有单唇形和多唇形两种,不管哪一种,都是多层组合配置,并供应给润滑脂或润滑油,防止止水带滑动磨损和土沙侵入。

3. 推进系统

推进系统指可以使盾构设备在土层中向前掘进的机构,它是盾构设备关键性的构件,而其主要设备是设置在盾构外壳内侧环形布置的千斤顶群。该系统的总推力和切削系统的总扭矩是设计、制造盾构设备的最基本依据。所以,正确地选择总推力和总扭矩是设计和制造盾构设备的关键。

(1) 总推力的计算

盾构的总推力应根据各推进阻力的总和及其所需的富余量决定,其计算表达式如下:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6$$

式中: F 为盾构总推力; F_1 为盾构周围外表和土之间的摩擦阻力或黏结阻力; F_2 为掘进时切口环刃口前端产生的贯入阻力; F_3 为掘进面前方阻力,封闭式盾构为压力舱内压力,机械式盾构为作用于刀盘上的推进阻力; F_4 为变向阻力(曲线施工、蛇形修正、变向用稳定翼和挡板阻力等); F_5 为盾尾内的管片和板壳之间的摩擦阻力; F_6 为后方台车的牵引阻力。

(2) 盾构千斤顶的选型和配置

千斤顶的选型和配置应根据盾构的操作性及管片组装施工方便性等确定,在其选型与配置时,需注意下列事项。

1) 千斤顶选型 应选用结构紧凑的高液压千斤顶;宜选用重量轻、耐久性好、易于维修和更换的千斤顶;应充分考虑千斤顶的运转性能。

2) 千斤顶配置 千斤顶等间距配置在盾构壳体内侧附近,在管片全周施加均等推力。但

是,由于土质的关系,有时也采用不等间距配置。

千斤顶配置时,应使推进轴平行于盾构轴线。为了防止盾构设备转动,有一部分也采用倾斜配置。此时会有弯曲作用于活塞杆上,应予以注意。

千斤顶的推力和台数应根据盾构外径、总推力、管片结构和隧道路线等因素确定。一般一台盾构千斤顶的推力,在中小断面盾构上为 600 ~ 1 500 kN,大截面时则为 2 000 ~ 4 000 kN。

3) 压力垫 千斤顶的活塞杆顶端需设置压力垫,其结构应能保证推力均匀分布在管片的端面上;为了减小作用于管片上的偏心力,有时让支座中心偏离千斤顶中心线;设置压力垫大小时,须遵循不会出现过大的局部力作用在管片上的原则;根据管片的材质,有时需在压力垫接触面上覆盖橡胶板,以保护管片端面。

(3) 盾构千斤顶的工作速度

当采用普通全装备千斤顶时,盾构千斤顶的工作速度为 50 ~ 100 mm/min。从提高施工效率来讲,千斤顶回程速度要尽可能快一些。

4. 管片拼装系统

管片拼装系统设置在盾构的尾部,由管片拼装机械手和真圆保持器构成。

(1) 管片拼装机械手

管片拼装机械手是在盾尾内把管片按照所定形状安全、迅速地拼装成环的装置,包括搬运管片的钳夹系统和上举、旋转和拼装系统。

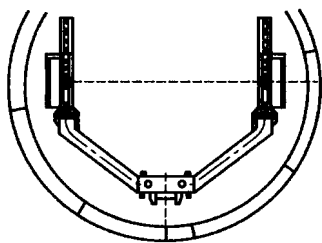


图 2-3 环式拼装机械手

常见的拼装机械手有环式(图 2-3)、空心轴式和齿条齿轮式三种。因环式是空心的圆形旋转体,即使在驱动中也可以确保作业的空间,同时土沙运出作业不受影响,故使用较多。

钳夹系统随着管片的形状而异,会影响管片组装效率。因此,设计时应以夹具能安全、迅速地夹住管片为目的,夹具有手动螺旋式和液压千斤顶式等。

(2) 真圆保持器

当盾构向前掘进时管片拼装环就从盾尾脱出,由于管片接头缝隙、自重力和土压的作用等原因,管片环会产生横向变形,使横断面成为椭圆形。当管片环发生变形时,前面装好的管片环和现拼装的管片环在连接时会出现高低不平(错台),给安装纵向螺栓带来困难。为了避免管片环的高低不平,需要用真圆保持器。真圆保持器支柱上装有上、下可伸缩的千斤顶,上、下装有圆弧形的支架,它在动力车架挑出的梁上是可以滑动的。当一环管片拼装成环后,就让真圆保持器移到该管片环内,支柱的千斤顶使支架圆弧面密贴管片后,盾构就可进行下一环的推进。盾构推进后由于它的作用,圆环不易产生变形而保持真圆状态。

5. 控制系统

盾构控制系统可使各设备可靠地工作,使开挖、掘进、出土等相互关联设备和其他设备能平衡地发挥功能,但需要注意下列事项。

- ①自始至终显示出各设备的运行状态,发生异常时,要清楚地显示出相关信息。
- ②设置连锁装置和报警系统,即便出现操作失误,也能确保设备安全。
- ③电源断开和紧急停止时,各工作部分应立即停止工作或停止在安全位置上。

2.2 盾构的分类

按掘进面与作业室之间的密闭情况,盾构可分为全敞开式、半敞开式及密闭式三种,见图2-4。

1)全敞开式盾构 全敞开式盾构是指掘进面呈敞露状态的盾构,根据开挖方式不同,又分为手掘式、半机械式及机械式三种。这种盾构适用于开挖自稳定性好的地质。在掘进面不能自稳定的地层中施工时,需采用压气盾构法等辅助施工法,以防止掘进面坍塌。

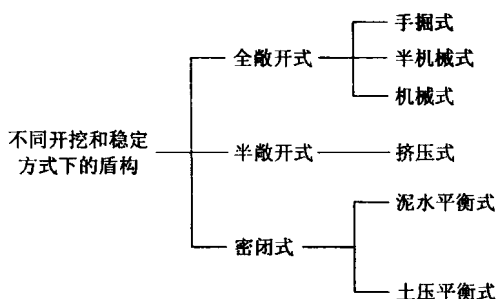


图2-4 盾构设备分类

2)半敞开式盾构 半敞开式盾构是指挤压式盾构,这种盾构的特点是在刀盘上设置可调节开口面积的排土口,在盾构推进的同时,土体从排土口排出,然后再运出地面。

3)密闭式盾构 密闭式盾构是指采用旋转刀盘切削掘进面土体,然后让土体进入刀盘与盾尾间的土舱内,采用出土器或出泥管输出,盾构掘进中采用泥水压力和土压力来保持掘进面的稳定。密封式盾构又分为泥水平衡式盾构和土压平衡式盾构。

2.2.1 手掘式盾构

如图2-5所示,手掘式盾构的掘进面是敞开的,通常设置防止掘进面坍塌的活动前檐及上承千斤顶、工作面千斤顶及防止掘进面坍塌的挡土千斤顶。掘进面采用铁锹、镐、碎石机等工具并人工进行。

这种盾构适应的地层是自稳定性强的洪积层密实沙、沙砾、固结粉沙和黏土等。对于掘进面不能自稳定的冲积层软弱沙层、粉沙和黏土,施工时必须采用稳定掘进面的辅助措施,如压气施工法、地层改良法、降低地下水水位法等方法。

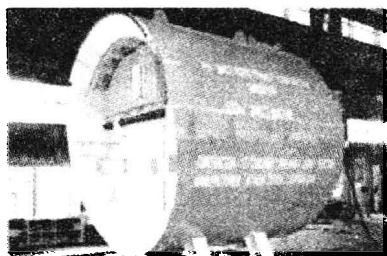


图2-5 直径5.93 m手掘式盾构掘进机

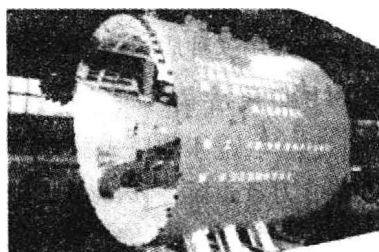


图2-6 直径6.14 m半机械式盾构掘进机
(带臂式切削和反铲)

2.2.2 半机械式盾构

如图 2-6 所示,半机械式盾构进行开挖及装运石渣都采用专用机械,配备液压铲土机、臂式刀盘等挖土机械和皮带运输机等出渣机械,或配备具有开挖与出渣双重功能的机械。为防止掘进面顶面坍塌,盾构内装有活动前檐和半月形千斤顶。

与手掘式盾构一样,应采取保护掘进面稳定的辅助措施。适应地层是以洪积层的沙、沙砾、固结粉沙和黏土为主。

2.2.3 机械式盾构

如图 2-7 所示,机械式盾构前面装有旋转式刀盘,增大了盾构的开挖能力,开挖的沙土通过旋转铲斗和斜槽装入皮带运输机。由于土体开挖和排土可以连续进行,提高了工作效率,可缩短建设工期,并减少作业人员。

在开挖自稳定性差的地层,机械式盾构适应的地层与手掘式盾构、半机械式盾构一样,需采用辅助施工法。

2.2.4 挤压式盾构

如图 2-8 所示,挤压式盾构是将闭胸式盾构的刀盘设计成网格状,同时配上可调的出土装置。施工中,盾构由后方油压千斤顶推进正面贯入围岩,使贯入部位土沙流动,由网格的开口处进入机器内部,再运送至地面。掘进面的稳定是靠调节开口大小,使千斤顶推力和掘进面土压力达到平衡来实现的。

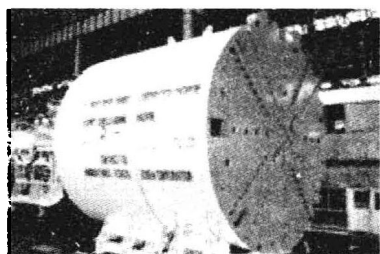


图 2-7 直径 6.14 m 机械式盾构掘进机

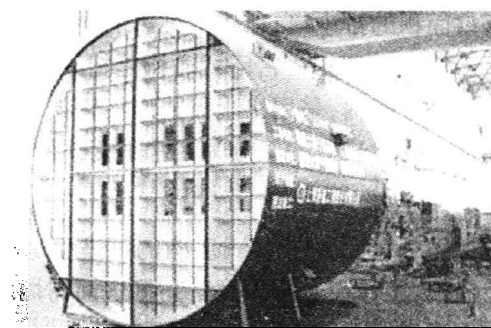


图 2-8 挤压式盾构掘进机

这种盾构适用于自稳定性很差、流动性很大的软黏土和粉沙土地层,而不适用于含沙率高的围岩和硬质地层。若液性指数过高,则流动性过大,也不能获得稳定的掘进面。由于使用地质范围狭窄,目前采用这种盾构的工程较少。

2.2.5 泥水平衡式盾构

泥水平衡式盾构(泥水加压式盾构)的外形如图 2-9 所示,它是在机械式盾构的前部设置了泥水舱,并装有刀盘面板,输送泥浆的送、排泥管,同时在地面上还配有分离排出泥浆的泥浆处理设备。其内部结构和施工的示意图见图 2-10。

泥水平衡式盾构掘进面的稳定是靠将泥浆送入泥水舱内,渗透到掘进面并形成不透水的泥膜,通过该泥膜保持水压力,以便泥水舱内的泥水与掘进面的土压力和水压力保持平衡。

掘进面的土体以泥浆形式输送至地面,通过泥水处理设备分离为土粒和泥水,分离后的泥