

市政工程新技术及工程实例丛书

隧道掘进机 施工技术

白云 丁志诚 刘千伟 ◎ 主编

(第二版)

中国建筑工业出版社

市政工程新技术及工程实例丛书

隧道掘进机施工技术

(第二版)

白 云 丁志诚 刘千伟 主编

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

隧道掘进机施工技术/白云等主编. —2 版. —北京:
中国建筑工业出版社, 2013. 9
市政工程新技术及工程实例丛书
ISBN 978-7-112-14968-1

I. ①隧… II. ①白… III. ①隧道施工-掘进机械-
工程施工 IV. ①U455. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 176418 号

本书分 10 章, 全面系统地介绍了各类隧道掘进机的基本原理及特点、盾构分类及选型、盾构法隧道施工技术和要点。第二版除保持了第一版条理清楚、数据齐全、针对具体工程实例给出了详细分析等主要特点外, 还将近几年来国内外在隧道掘进方面的最新进展成果吸收进来, 并增加了新的工程实例, 基本代表了我国当今最新的盾构法隧道的施工水平。

本书可供城市地铁隧道、越江越海隧道、取排水隧道、硬岩隧道和公共事业等隧道设计与施工的工程技术人员、施工人员、科研人员及大专院校有关师生作技术参考。

* * *

责任编辑: 王 梅 刘瑞霞

责任设计: 李志立

责任校对: 姜小莲 赵 颖

市政工程新技术及工程实例丛书

隧道掘进机施工技术

(第二版)

白 云 丁志诚 刘千伟 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京千辰公司制版

北京世知印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24¼ 字数: 602 千字

2013 年 11 月第二版 2013 年 11 月第二次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-14968-1

(24206)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

第二版前言

《隧道掘进机施工技术》第一版出版至今已历时4年，而这4年内，恰好是隧道建设有史以来发展最快的阶段，据不完全统计，我国公路隧道仅2010年就竣工完成1245条；四年内，我国新投入运营的城市轨道交通线路达27条。2008年，世界上最大的盾构隧道（直径为15.43m）——上海长江隧桥工程仍在施工阶段，今天，该隧道已运营多年。2011年，意大利设计完成了TBM-EPB直径为15.62m的SPARVO隧道。2011年7月，俄罗斯NCC公司订购了一台直径为19.25m的海瑞克泥水盾构（Mixshield）用于掘进圣彼得堡NEVA河下的公路隧道。为了尽快将隧道掘进机领域的成果及时总结，我们产生了出版本书第二版的想法，并得到出版社的大力支持。与第一版相比，第二版几乎在每一个章节都增加了不少新的内容。

然而，隧道掘进机技术仍然还有很多难题没有解决，如：复合地层中掘进隧道的困难依然存在，我们还是见到刀具被黏土粘结而无法正常工作、TBM被岩爆损坏或被高应力岩层卡住、开挖面承压水涌入隧道等事故报道。在第二版中我们力求多介绍一些这方面的内容，并喜得近年来在复合地层盾构掘进领域有较多研究的龚秋明老师加盟第5章复合式隧道掘进机掘进技术的编写，使该章内容增色不少。

本书第二版前言由白云编写，第1章隧道掘进机选型由白云、胡向东编写，第2章圆形土压平衡式盾构施工技术由丁志诚、黄德中编写，第3章泥水平衡式盾构施工技术由丁志诚、郑宜枫编写，第4章岩石隧道掘进机施工技术由刘计山和白云编写，第5章复合式隧道掘进机掘进技术由白云和龚秋明编写，第6章隧道施工运输技术由张冠军编写，第7章钢筋混凝土预制管片制作技术由丁志诚、郑宜枫编写，第8章异形盾构掘进技术由白云、郑宜枫编写，第9章掘进机隧道工程的风险管理由范益群、汤竞编写，第10章工程案例由刘千伟、郑宜枫编写。全书策划、第二版统稿由白云、丁志诚、刘千伟完成。

本书由长江学者和创新团队发展计划资助（IRT1029）。

第一版前言

今天的全球，已有一半以上的人口居住在城市，人口超过 100 万的城市已达 400 个以上。现代城市发展的模式应该是可持续的，这意味着城市向市民提供便捷交通、清洁水源的同时，还必须尽可能地减少人类的生态足迹，地下隧道为城市可持续发展提供了一个很好的解决方法。建造隧道的方法不外乎两大类，一类是明挖技术，另一类是暗挖技术。明挖技术仅适合在地下浅层建造隧道的场合，但在城市中绝大多数情况下是不允许的；暗挖技术主要可分为矿山法和掘进机法，将矿山法用于软土层建造隧道是极为勉强的，而隧道掘进机既可以在软土中建造隧道，又可以在岩石甚至软土与岩石相间的地层中建造隧道，因此，用隧道掘进机建造隧道是极为普遍的。

众所周知，世界上第一条人工开挖的盾构隧道是由法国人 Marc Brunnel 和他的儿子 Isambard Kingdom Brunel 一起在伦敦泰晤士河下建成的。1869 年，James Henry Greathead 采用圆形敞开式盾构，在泰晤士河下再建了 1 条外径为 2.18m 的行人隧道，该隧道衬砌为铸铁管片，隧道在不透水的黏土层中掘进，无地下水威胁，因此，进展相当顺利。1886 年，Greathead 在建造伦敦地铁时，首次使用了压缩空气盾构。压缩空气盾构的出现解决了含水地层的隧道修建问题。第一个机械化盾构的专利出现在 1876 年，由英国的 John Dickinson Brunton 和 George Brunton 合作申请。早期的盾构技术在英国发明并得到发展，虽然是偶然的事件，但又包含了必然的客观因素。19 世纪和 20 世纪上半叶，英国是全球最强盛的工业化国家，而对隧道掘进来讲，伦敦的黏土可说是地球上最理想的土层，因此，由当时最发达的国家率先在较理想的土层中发展盾构技术是合乎技术发展的逻辑的。

1965 年，日本首先制造了泥水盾构（Slurry Shield），泥水盾构的基本原理是用液体（水或加膨润土的水）平衡开挖面的土体。与压缩空气盾构相比，泥水盾构不需要人员在压缩空气条件下工作，但泥水处理系统比较复杂。泥水盾构虽然也可用于黏土地层，但绝大多数情况是在含水砂层中使用。1974 年，日本的 Sato kogyo 有限公司发明了土压平衡盾构（Earth Pressure Balanced Shield）。在此之前，虽然压缩空气盾构和泥水盾构已能克服含水层中的施工问题，但压缩空气对人体的危害和泥水对环境的不利影响，促使日本的隧道专家寻找一个更好的解决问题的办法，土压平衡盾构应运而生了。

泥水盾构和土压平衡盾构同属削土密封式压力平衡盾构，可称之为现代盾构技术。日本能够在现代盾构技术的发展中独领风骚也有客观原因，首先，日本从 20 世纪 60 年代中期开始步入现代化国家行列，其科学水平已逐步接近欧美国家，这为日本发展现代盾构技术提供了强有力的技术支持；其次，日本是一个人口众多、土地贫乏的多岛国家，为了扩大生存空间，不得不开发地下空间，而一些大城市（如东京）的软弱地层条件又给日本隧道专家带来了许多困难，激励着日本隧道专家寻找理想的隧道建造技术，构成了日本隧道施工技术进步的动力。

进入 20 世纪 80 年代后,盾构技术发展的主流大致从以下两个方面延伸:

(1) 日本人注重的开发不同几何形状的盾构机技术;

(2) 欧洲诸国(特别是德国)致力于研究能适合不同地层的多功能技术(Combined Shields)。

日本致力于研究异形盾构机的客观背景是:近 10 多年来,日本不仅科技水平在世界上处于领先地位,而且各大城市的地下空间利用率已经达到相当高的程度,如何在有限的地下空间中建造更多的隧道,已经摆到了日本地下工程工作者的议事日程上。此外,地面建筑物的高度拥挤又迫使日本人构想诸如竖井、隧道一体化的施工模式,从而使日本人研究出了各种类型的盾构。欧洲幅员辽阔,地层条件复杂多变,欧洲一体化发展,客观上为建造长隧道提出了必要性;在一个长隧道工程项目中,常常会遇到不同的地层条件,各种形式的盾构和各种各样的多功能盾构应运而生。

现代隧道掘进机技术发展的另一个特征就是信息技术方面的新应用。德国 VMT 公司的 SLS-T 隧道掘进机导向系统,是计算机与激光技术在隧道掘进机施工中成功应用的一个典型实例。未来隧道掘进机技术的发展方向可能是地理信息系统(GIS)的应用。我们有理由作这样的遐想:在不远的将来,你要在地球上任何一个地方建造掘进机隧道工程,只需在电子地图上点出位置和深度,计算机就能告诉你该选用何种类型的盾构机和具体施工方法。

由于隧道掘进机工程的施工过程具有周期循环特征,因此,特别适用于计算机模拟。计算机模拟具有节省费用、效率高等优点,目前,有的顾问公司已开始采用计算机模拟技术模拟以下内容:

(1) 盾构机的掘进速率(SESS)。在模拟过程中可考虑隧道长度、工作井深度、运输车能力、运输车速度、出碴量和出碴方法以及土层条件(含土体颗粒膨胀率、掘进速率等)。

(2) 隧道沿线的土体变化情况及隧道掘进速度。模拟隧道沿线土体变化是一项有挑战性的工作,由于地质调查报告通常只能给出隧道沿线间断的地层参数,模拟技术不仅需要将不连续的数据连续化,还要保证其与实际土层情况相符,这就是困难所在。显然,模拟技术只能给出各种土体变化和相应的各种掘进速度的可能性,因此,答案一定是不确定的。模拟软件对工程的模拟分析结果表明:由于试掘进期间是学习过程,各种模拟结果与实际掘进速度相差较大,但当进入正常掘进后,各种模拟结果与实际情况符合就好。

(3) 隧道掘进参数。模拟隧道掘进参数通常是根据过去在相似地层中的经验,或根据专家的观点设定的初始模拟值,此后,模拟值可通过软件的学习性不断修正,使之与实际相符并预测下阶段的最佳参数值,对于土层情况较为均匀的地区,如我国的长三角部分地区,该软件能较有效地模拟,但对于像广州地区地层条件无序多变的场合,用计算机模拟将并不可靠。

新世纪隧道掘进机技术的研究热点可以用 4 个字来描述,即:“深”、“大”、“长”、“快”。

“深”。随着地下空间的进一步开发,隧道越挖越深已是趋势。污水隧道已经建到 50m 以下的深度。瑞士的 Alp Transit Project 的山岭隧道埋深已经超过 2300m,在那里,如何降低隧道内的温度已经成为隧道施工者的一个新的难题,降温措施所占的费用已经占了

施工总费用的 10% 以上。我国将建造的南水北调西线工程隧道的埋深也将达到 1600m, 届时也会有类似的问题。

“大”。最大的盾构隧道直径已经达到 14.90m, 该盾构由 NFM 制造, 用于荷兰的 Groene Hart 隧道。将来最大的盾构隧道可望达到 20m, 但需要解决管片衬砌的承载力和精度问题、开挖面稳定等问题。

“长”。单线长度达 47km 的输水隧道已经在引黄入晋工程中建成。南水北调西线工程中的单线将达到 100km 以上。在长距离隧道中, 必须注意地质的变化、刀头耐久性和换装技术、施工运输等问题。随着人们修建长隧道能力的不断提高, 建造连接全球的地下通道将成为可能, 隧道的作用也将不断地加大。

“快”。快速建造隧道不仅意味着工程费用的大幅度下降, 而且也将减少隧道施工与人类其他活动的相互影响, 从而促使人们更多地选择隧道方法。上海的隧道工程实践表明, 均匀、快速地掘进隧道可以明显地减少地层变形, 快速掘进可使开挖面前方变形减少 80% 左右。连续掘进、高速开挖、自动运输、快速拼装是实现快速掘进的主要手段。

岩石中的隧道掘进机技术已经达到 113.21m/d 的速度。为了能像岩石隧道那样连续掘进, 国外的同行为此作了各种努力, 其中有 D2 公司提出的能边掘进边拼装的特殊管片形式和管片销钉连接方法; Herrenknecht 制造的 $\phi 9.79\text{m}$ 连续掘进盾构已在荷兰获得成功应用。

对出土和管片进行连续运输的施工组织设计是提高盾构隧道施工速度的又一种努力, 新型的管片连续运输和快速拼装系统可以将每块管片的拼装时间减少 43%。

对管片的设计进行革新也是一个不容忽视的方面。管片设计的改进, 不仅可以改善衬砌结构的受力和防水特性、降低工程造价, 而且可以大幅度提高盾构隧道的推进速度。近年来, 英国 Mott MacDonald 公司提出的通用管片 (Universal Segment), 具有不必通过另做楔子环即可形成三维曲线隧道的优点。

隧道掘进机技术的现状可概括如下:

(1) 设计概念和施工方法呈多样性;

(2) 受其他学科进展的推动, 特别是计算机技术的日新月异, 隧道掘进机技术目前正处于快速发展阶段, 而且对隧道掘进机技术的发展趋势难以预测;

(3) 世纪之交的人类比以往任何时候更注意环境保护和可持续发展, 隧道掘进机因此将获得比以往任何时候更多的应用。

在隧道掘进机施工领域, 虽然已有大量的工程实践和理论研究, 并取得了引人瞩目的进步, 但依然存在一些非常重要的、有待于业内人员进一步解决的难题, 比如:

(1) 开发能快速掘进复合地层的隧道掘进机;

(2) 软土中相邻隧道的极限最小距离确定;

(3) 开发软弱地层中更有效的同步注浆方法和安全更换盾尾技术;

(4) 开发长距离隧道施工的快速和连续运输方法;

(5) 了解泥水和土压平衡盾构开挖面稳定的动态平衡机理;

(6) 盾构施工的实时信息反馈技术、远程遥控技术、数字化技术和智能仿真技术的工程应用;

(7) 隧道掘进机越挖越深已是地下工程技术发展的必然趋势,要了解深埋隧道的掘进特点;

(8) 掘进机隧道工程和采地热能技术的结合研究;

等等。

迄今为止,国内已出版的有关隧道掘进机技术方面的专著已有不少。1990年程骁、潘国庆编著的《盾构施工技术》,主要论述了各类盾构的施工(含辅助施工)方法、主要施工设备,描述了地层的变形特征,介绍了结构试验和现场测试的内容;1991年刘建航、侯学渊编写的《盾构法隧道》,主要介绍了衬砌结构的构造和设计方法;2004年周文波编写的《盾构法隧道施工技术及应用》,主要论述了盾构隧道施工的总体规划、隧道施工测量,介绍了软件技术在盾构法隧道中的应用,阐述了盾构法隧道引起的地层沉降及防治和盾构法隧道施工的质量通病与防治;2004年张凤祥、朱合华、傅德明编写的《盾构隧道》主要以日本的盾构隧道技术为背景,介绍了盾构的基本构造和施工工法,论述了竖井的设计与施工,描述了掘进管理;2005年竺维彬、鞠世键编写的《复合地层中的盾构施工技术》,主要以广州地铁工程为背景,描述了复合地层中的盾构施工特点、难点和要点;2005年水利部科技推广中心编著的《全断面岩石掘进机》,详细介绍了全断面岩石掘进机设备、选型,论述了全断面岩石掘进机的施工组织管理与技术。我们编写本书的目的,除了想要系统地介绍隧道掘进机的具体施工工艺和方法外,还希望论述一些盾构隧道技术和管理的热点,如:施工运输优化、盾构选型的几种方法和风险管理等,以供同行参考。

本书前言由白云编写,第1章隧道掘进机选型由白云、胡向东编写,第2章圆形土压平衡式盾构施工技术由丁志诚、黄德中编写,第3章泥水平衡式盾构施工技术由丁志诚、郑宜枫编写,第4章岩石隧道掘进机(TBM)掘进技术由刘计山编写,第5章复合式盾构掘进技术由白云编写,第6章隧道施工运输技术由白云、郑宜枫编写,第7章钢筋混凝土预制管片制作技术由丁志诚、郑宜枫编写,第8章异形盾构掘进技术由张冠军编写,第9章掘进机隧道工程的风险管理由范益群、汤竞编写,第10章工程案例由刘千伟、郑宜枫编写。全书策划、统稿由白云、丁志诚和刘千伟完成。

目 录

第1章 隧道掘进机选型	1
1.1 隧道掘进机类型和对地层适应性	1
1.2 隧道掘进机选型	9
参考文献	34
第2章 圆形土压平衡式盾构施工技术	35
2.1 概述	35
2.2 施工准备	37
2.3 施工组织设计编制	39
2.4 建立施工测量及监控量测系统	40
2.5 施工现场总体布置	42
2.6 盾构机现场安装、调试及验收	44
2.7 主要施工工序及要点控制	47
2.8 盾构进洞和出洞施工技术	61
2.9 特殊段施工技术	64
参考文献	80
第3章 泥水平衡式盾构施工技术	81
3.1 概述	81
3.2 泥水平衡式盾构施工基本原理	81
3.3 泥水平衡式盾构开挖面稳定性	86
3.4 泥水平衡式盾构掘进施工关键技术	91
3.5 隧道稳定性	115
参考文献	117
第4章 岩石隧道掘进机施工技术	118
4.1 概述	118
4.2 施工前期准备	124
4.3 掘进技术	129
4.4 围岩支护与管片衬砌技术	130
4.5 超前预报技术	135

4.6 特殊洞段施工关键技术	143
参考文献	154
第5章 复合式隧道掘进机掘进技术	156
5.1 概述	156
5.2 复合式隧道掘进机的选型	162
5.3 复合式隧道掘进机隧道施工技术要点	173
参考文献	189
第6章 隧道施工运输技术	191
6.1 概述	191
6.2 施工运输问题的最优化建模和解析	200
6.3 连续运输	232
6.4 道路式运输技术	250
参考文献	252
第7章 钢筋混凝土预制管片制作技术	253
7.1 预制管片分类	253
7.2 预制管片生产	253
第8章 异形盾构掘进技术	268
8.1 概述	268
8.2 矩形土压平衡盾构	269
8.3 现浇衬砌矩形盾构施工技术	274
参考文献	280
第9章 掘进机隧道工程的风险管理	281
9.1 概述	281
9.2 掘进机隧道工程风险管理体系及安全保障	289
9.3 掘进机隧道施工的主要风险因素	294
9.4 掘进机隧道工程的风险评价方法	295
9.5 建设期间的动态风险管理	297
参考文献	311
第10章 工程案例	312
10.1 上海长江隧道工程	312
10.2 上海轨道交通8号线双圆盾构区间隧道工程	340
10.3 上海外滩通道工程	358

第 1 章 隧道掘进机选型

1.1 隧道掘进机类型和对地层适应性

1.1.1 隧道掘进机的定义

隧道掘进机可定义为：通常是在金属外壳的掩护下进行岩土层开挖或切割、岩土颗粒排运、管片拼装或衬砌现浇、整机（同时）推进和衬砌壁后灌浆的隧道挖掘机械系统。

用于土层的隧道掘进机通常被称为盾构，在实际工程中，隧道掘进机和盾构的称呼并不严格区分。

1.1.2 隧道掘进机的分类

隧道掘进机可有 3 种不同的分类方法，即：按隧道掘进机形状分类、按地层类型分类和按隧道掘进机功能分类。

1) 按隧道掘进机形状分类。有使用最多的圆形盾构（图 1-1）；也有统称为异形的盾构，如：矩形盾构（图 1-2）、双圆形盾构（图 1-3）、三圆形盾构（图 1-4）和椭圆形盾构（图 1-5）。

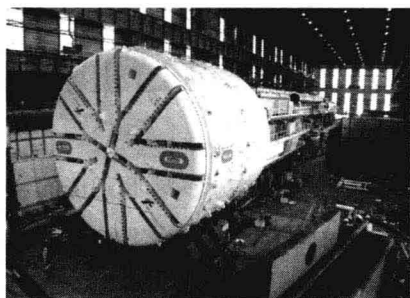


图 1-1 圆形盾构

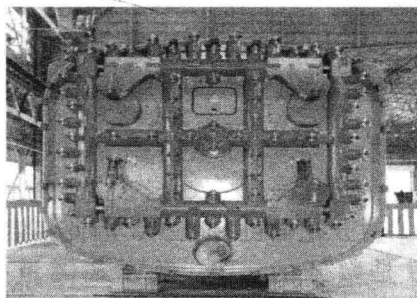


图 1-2 矩形盾构（日本）

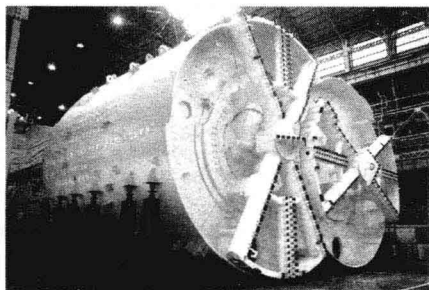


图 1-3 双圆形盾构（日本）

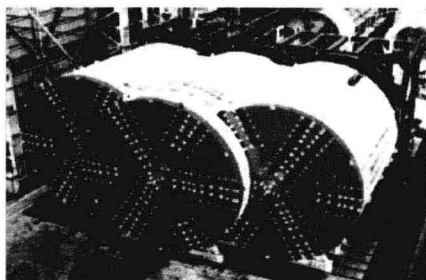


图 1-4 三圆形盾构（日本）

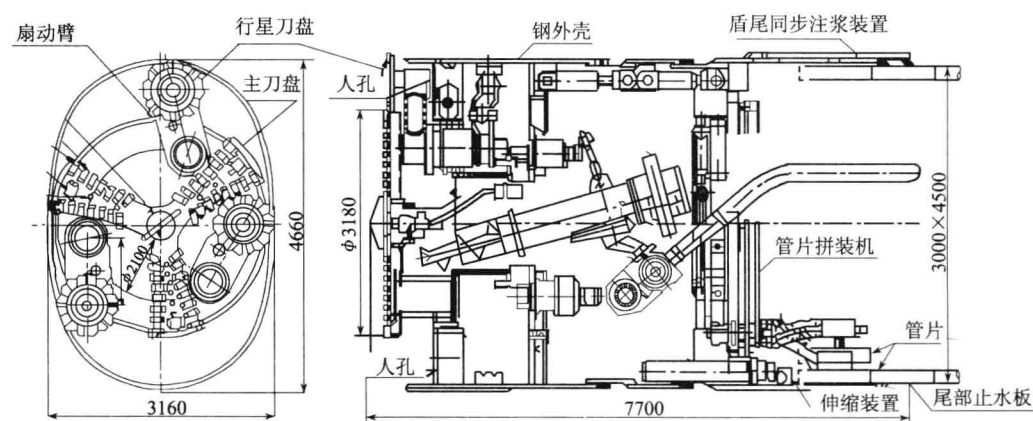


图 1-5 椭圆形盾构

2) 按地层类型分类。用于岩石地层的隧道掘进机被称为岩石隧道掘进机 (图1-6); 用于土层的隧道掘进机被称为盾构; 用于岩石和土层相间地层的隧道掘进机被称为复合盾构 (图 1-7)。

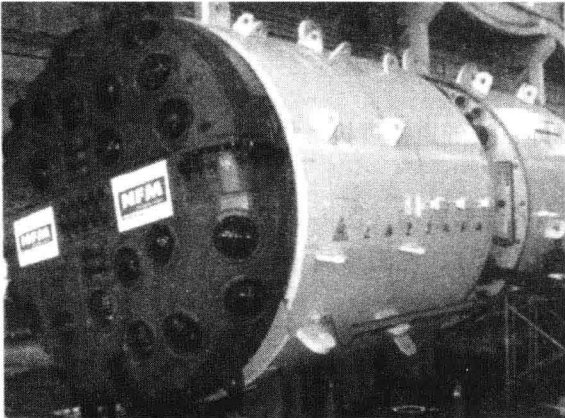


图 1-6 岩石隧道掘进机 (NFM 产品)

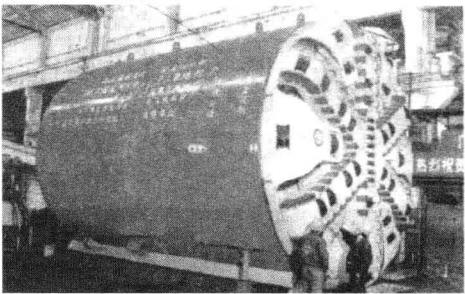


图 1-7 复合盾构

(1) 岩石地层有坚硬与软弱、均匀与不均匀、完整与破碎之分，对于完整的岩石地层，不必对开挖面进行支护，因此，隧道掘进机可以是敞开的，即：敞开式隧道掘进机 (图 1-8); 对于坚硬岩层或裂隙岩层，要采用护盾式隧道掘进机 (图 1-6)。

(2) 随着土层颗粒大小的不同，盾构机的类型也要随之改变，对于软黏土地层，通常采用土压平衡盾构 (图 1-9); 对于砂性土层，通常采用泥水平衡盾构 (图 1-10)。需要说明的是，目前的土压平衡盾构和泥水平衡盾构均已成功使用在各类土层中，因此，选择盾构类型往往是考虑多方面因素的结果。

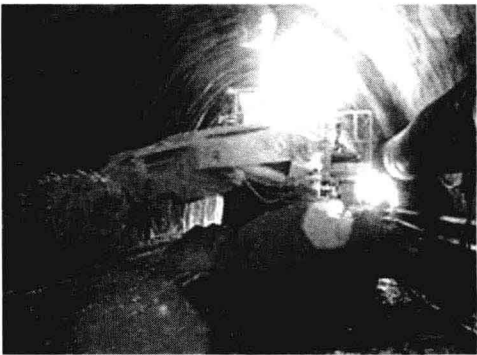


图 1-8 敞开式隧道掘进机
(Lovat 钻臂式隧道掘进机)

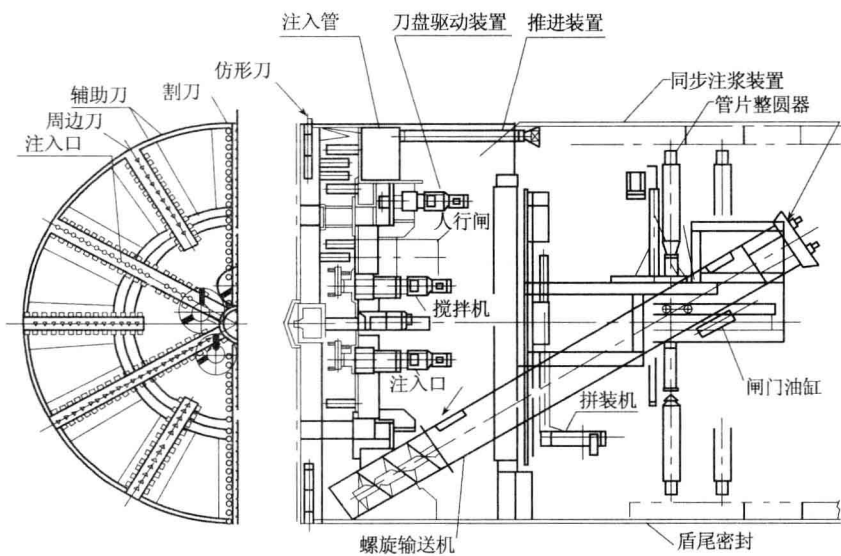


图 1-9 土压平衡盾构示意图

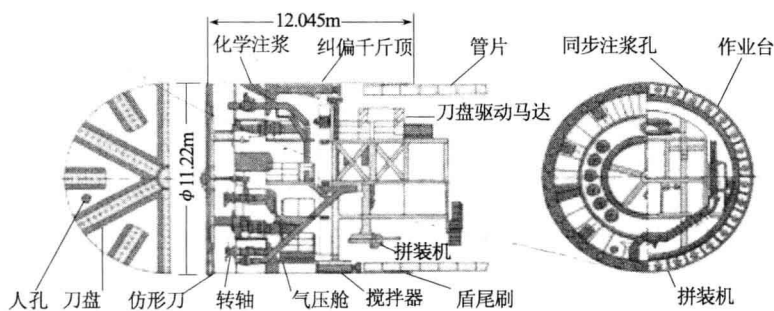


图 1-10 泥水平衡式盾构结构示意图

3) 按隧道掘进机功能分类。有全闭胸式盾构、网格式盾构、气压式盾构、机械挖掘式盾构、土压平衡式盾构、泥水平衡式盾构、敞开式隧道掘进机、护盾式隧道掘进机、复合式盾构和可转换式盾构等等。

1.1.3 不同类型隧道掘进机对地层的适应性

1) 全闭胸式盾构（图 1-11）就是开挖面用胸板封闭的盾构。当盾构推进时，让土体从胸板局部开口处挤入盾构内。由于全闭胸式盾构把土体挡在胸板外，因此对施工人员比较安全、可靠，没有塌方的危险。

全闭胸式盾构现在已不多见，该类盾构主要用于没有任何变形限制的场合，而且地层必须是非常软弱的淤泥或淤泥质黏土层。由于全闭胸式盾构推进是全挤压的，顶力相对较大，隧道轴线也不容易控制，因此相应的管片设计应有环向凹、凸榫，并应考虑通缝拼装，以减少管片环间踏步过大和被顶断的可能性。全闭胸式盾构具有价格便宜、操作方便的优势，可用于非常软弱的黏土地层中的进、排水隧道施工。

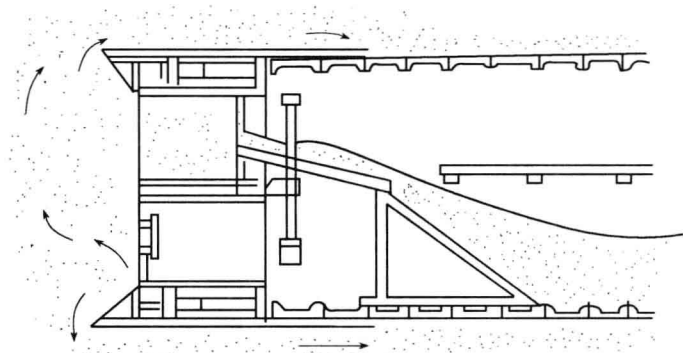


图 1-11 全闭胸式盾构

2) 网格式盾构(图 1-12)是一种在开挖面装有钢制的开口格栅,称为网格盾构。当网格式盾构向前掘进时,土体被网格切成条状,进入盾构后被运走;当盾构停止推进时,网格起到支护土体的作用,从而有效地防止了开挖面的坍塌。

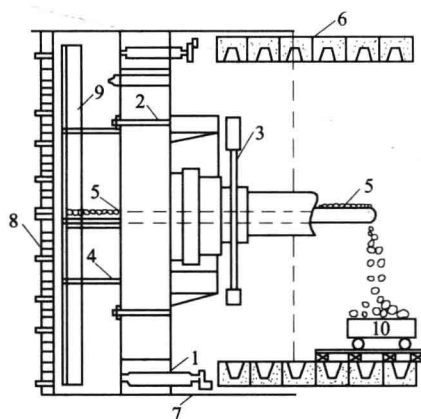


图 1-12 网格式盾构

- 1—盾构千斤顶(推进盾构用); 2—开挖面支撑千斤顶; 3—举重臂(拼装装配式钢筋混凝土衬砌用);
4—堆土平台(盾构下部土块由转盘提升后落入堆土平台); 5—刮板输送机, 土块由堆土平台进入后输出;
6—装配式钢筋混凝土衬砌; 7—盾构钢壳; 8—开挖面钢网格; 9—转盘; 10—装土车

网格式盾构与全闭胸式盾构相比,其对地层的挤压较小,因此,适应的地层可以不必太软弱,通常是淤泥质黏土层。和全闭胸式盾构一样,该类盾构现在已不多见,而且也是主要应用于没有任何变形限制的场合,网格式盾构具有价格便宜、操作方便的优势,可用于软弱黏土地层中的进、排水隧道施工。

3) 气压式盾构。顾名思义,气压式盾构就是利用压缩空气来平衡开挖面的一种隧道掘进机。这种盾构系在开胸机械式盾构的切口环和支承环之间装上隔板,使切口环部分形成一个密封舱,舱中输入压缩空气,以平衡开挖面的土压力,保证正面土体自立不坍塌。气压的另一个作用是疏干开挖面前方土层的地下水,改良土体的物理性能,以有利于施工。

目前最常见的气压式盾构是局部气压式盾构(图 1-13),加局部气压以使正面土体稳定,与隧道内加气压的全气压施工方法相比,具有衬砌拼装和隧道内其他施工人员不在气压条件下工作的优点,这无疑有很大的优越性。

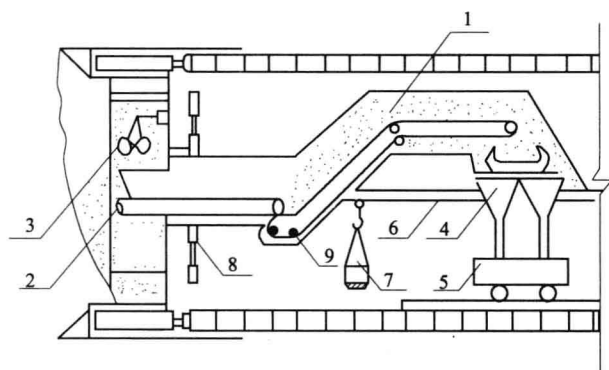


图 1-13 局部气压式盾构示意图

1—气压内出土运输系统；2—皮带运输机；3—排土抓斗；4—出土斗；
5—运土车；6—运管片车辆；7—管片；8—管片拼装机；9—伸缩接头

目前局部气压盾构的一些技术问题还尚未得到很好的解决，如：

- (1) 从密封舱内连续向外出土的装置还存在漏气和使用寿命不长的问题；
- (2) 盾尾密封装置还不能完全阻止压力舱内的压缩空气通过开挖面经盾构外表至盾尾处泄漏；

(3) 衬砌环接缝防止不了压力舱内的气体经过盾构外表通至盾构后部管片缝隙渗入隧道内。

因以上 3 处的漏气尚未彻底解决，影响到正面压力舱内的压力控制，由于压力舱容量小，因此，压力舱内压力值上下波动较大。当正面遇到有问题需要处理时，则须有工人进入压力舱工作，这种施工条件对人的生理影响较大。而正常施工中，舱内压力控制不好，正面土体稳定就没有保证，也将直接影响施工。故目前该类盾构使用已不多。

4) 敞开式盾构的种类很多，有人工挖掘式盾构，也有不同类型的半机械和机械挖掘式盾构。机械挖掘式盾构就是在开挖面装上机械挖掘装置来代替人工开挖，机械式盾构通常是反铲挖土机式（图 1-14）；土体较硬时，也可安装凿岩钻。

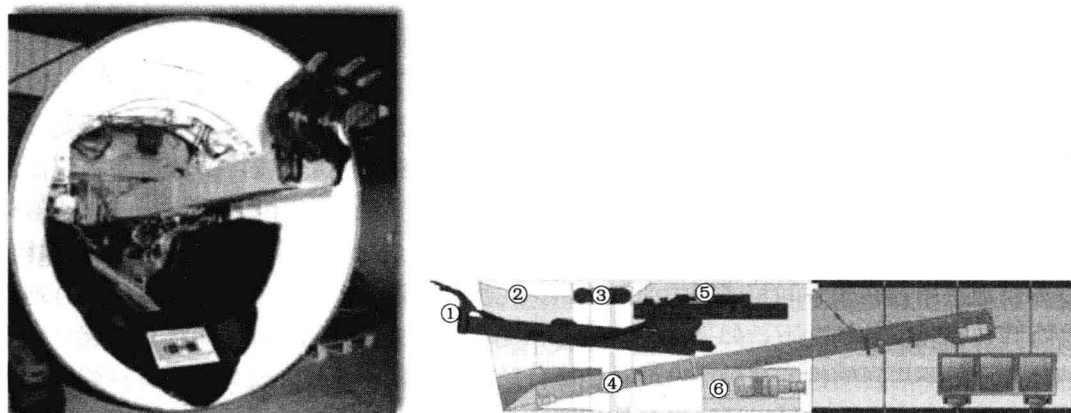


图 1-14 敞开式反铲挖土盾构（海瑞克产品）

注：① 挖机；② 盾壳；③ 顶进千斤顶；④ 皮带运输机；⑤ 衬砌；⑥ 液压系统。

敞开式盾构的主要优点:

- (1) 正面是敞开的, 施工人员随时可以观测地层变化情况, 及时采用应付措施;
- (2) 当在地层中遇到桩、大石块等地下障碍物时, 比较容易处理;
- (3) 可向需要方向超挖, 容易进行盾构纠偏, 也便于曲线施工;
- (4) 造价较低, 结构设备简单, 易制造, 加工周期短。

它的主要缺点有:

(1) 在含水地层中, 当开挖面出现渗水、流砂时, 必须辅以降水、气压等地层加固措施;

(2) 工作面若发生塌方时, 易引起危及人身及工程的安全事故;

(3) 效率低、进度慢, 在大直径盾构中尤为突出。

敞开式盾构尽管有上述缺点, 但由于简单易行, 在地质条件良好的工程中仍见应用。

5) 土压平衡式盾构是一种适用于含水饱和软弱地层中施工的盾构, 该盾构的前端通常是一个全断面切削刀盘, 在盾构中心或下部有一个长筒形螺旋输送机的进土口, 其出口在密封舱外 (图 1-9)。所谓土压平衡, 就是盾构密封舱内始终充满了用刀盘切削下来的土, 并保持一定压力, 平衡开挖面的土压力。它的螺旋输送机靠转速来控制出土量, 出土量要密切配合刀盘的切削速度, 以保持密封舱内充满泥土而又不过于饱和。这种盾构避免了前述各类盾构的主要缺点, 已成为比较成熟、可靠的盾构机种类, 广泛地在软土隧道工程中应用。

6) 泥水平衡式盾构。前面叙述了局部气压盾构的技术难题是连续出土与压缩空气的泄漏问题。在同样的地层压力差和土质相同条件下, 漏气量要比漏水量大 80 倍之多^[1-1], 因此, 若在开挖面的密封舱内用泥水压力来支撑开挖面土体, 就可大大减少泄漏。刀盘切削下来的土在泥水中经过搅拌机搅拌, 再用泵将泥浆通过管道输送到地面集中处理, 这样就解决了连续出土的技术难题, 这就是泥水平衡式盾构的优点。

泥水平衡式盾构的辅助配套设备较多, 除了要有 1 套自动控制的泥水输送系统, 还要有 1 套泥水处理系统 (图 1-10), 所以泥水盾构的设备费用较大, 这是它的主要缺点; 但泥水处理系统等辅助设备是可以重复利用的, 因此, 经济上还是可行的。为了废弃泥浆运输上的方便, 一般泥水平衡式盾构是用在邻近水域的区域。

假如在泥水盾构的泥水舱内再加入气包调节平衡压力, 则就是欧洲式泥水平衡盾构, 该类泥水平衡盾构在英语中就称之为 mixshield, 众所周知, 纯泥水压力的控制主要是靠进出浆流量差来实现的, 调整进浆 P1 泵和排浆 P2 泵的变频电机转速, 由转速差实现流量差, 这就是纯粹的泥水循环理念, 即完全依靠液体介质实现泥水压力。而欧洲式泥水盾构压力控制主要靠气压舱实现。鉴于单舱式泥水盾构在掘进中面临着泥水压力的波动风险, 即如果地层中存在较大间隙或压力泄漏通道, 泥水可能泄漏, 泥水舱压力随之降低, 地层会沉降; 在相反的情况下, 如果排浆管堵塞, 泥水舱压力则瞬间升高, 土体会隆起。由于液体介质的不可压缩性, 这种压力波动会十分敏感。相对于液体, 气体具有可压缩性, 当外界压力变化时, 气体可以通过自身体积变化来相应改变并适应外界压力, 即有自动调节压力功能, 但这种调节的幅度较小, 是一种瞬间的微调。欧洲双舱式设计就是利用气体的这一有利特性, 通过气液 2 种模式组合实现泥水压力, 即纯泥水式 (泥水流量差) 方式

和气压方式组合。

7) 敞开式隧道掘进机的种类很多,若按挖掘方法分,主要有:钻臂式隧道掘进机 (roadheader, 详见图 1-8)、扩孔式岩石隧道掘进机 (reamer, 详见图 1-15) 和摇臂式隧道掘进机 (mobile TBM, 详见图 1-16)。

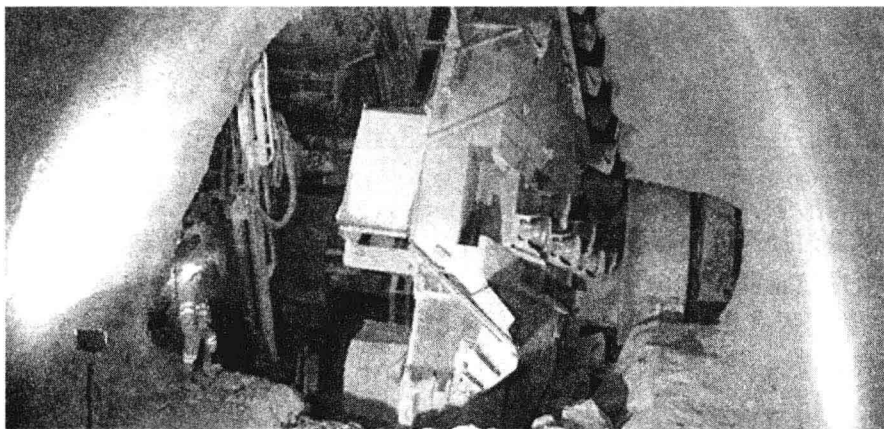


图 1-15 扩孔式岩石隧道掘进机 (Wirth 产品)

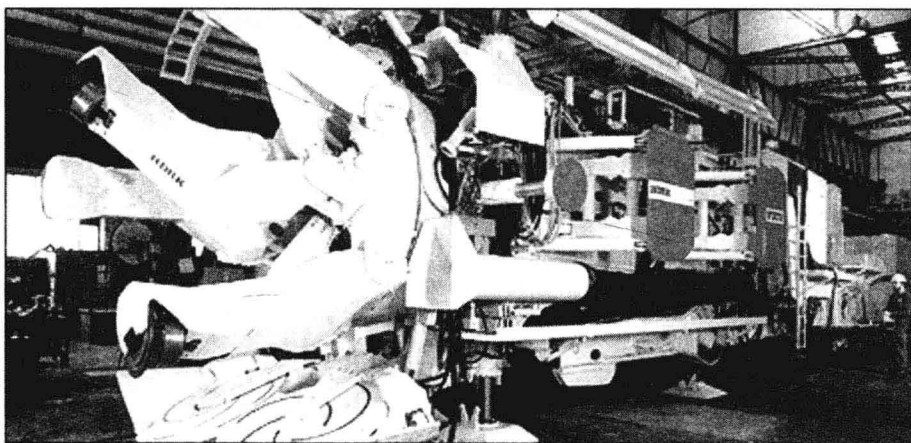


图 1-16 摇臂式隧道掘进机 (Wirth 产品)

(1) 扩孔式岩石隧道掘进机就是采用同一台隧道掘进机先挖一个直径只有隧道直径一半的导洞,该导洞具有超前地质探查的功用。扩孔式岩石隧道掘进机适用于直径较大的公路隧道。

(2) 摇臂式隧道掘进机用于硬岩,其挖掘形状可为圆形、矩形和马蹄形等。由摇臂式隧道掘进机与通常的隧道掘进机挖掘原理之差异比较图 (图 1-17) 可知,摇臂式隧道掘进机比通常的隧道掘进机更省能量,因为摇臂式隧道掘进机的挖掘原理是剪切岩石,而通常的隧道掘进机的挖掘原理是挤压岩石,显而易见,岩石的抗剪拉强度远远小于其抗压强度。此外,由于摇臂式隧道掘进机挖掘出来的碴石多为片块碴,因此,重复利用的可能性也比较大。同样道理,摇臂式隧道掘进机挖掘出来的碴石必须采用皮带机运输。