

Automation, Intellectualization & Digitalization
Three Ways Breakthrough for the Shield Tunnelling Technology

Shield Tunnelling Technology

盾构法隧道施工技术及应用



周文波 编著

Bob-Chow

中国建筑工业出版社

China Architecture & Building Press

U
U455.43

2

盾构法隧道施工技术及应用

周文波 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

盾构法隧道施工技术及应用 / 周文波编著. - 北京:
中国建筑工业出版社, 2004
ISBN 7-112-06776-6

I.盾... II.周... III.隧道工程-盾构(隧道)-
施工技术 IV.U455.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 075891 号

内容提要

本书共分 12 章, 全面系统地介绍盾构法隧道的起源及发展、基本原理及特点、盾构分类及选型、盾构法施工筹划、盾构法通用施工技术、盾构法隧道垂直顶升、盾构法施工测量、盾构法施工对地层的影响和防治、盾构法隧道施工管理软件及应用、施工质量通病及防治和盾构法隧道新概念等内容, 特别是通过工程实例, 阐述了盾构法隧道工程技术的三大突破: 自动化、智能化和信息化。

文中给出的实例均为隧道工程施工经验总结, 条理清楚, 数据齐全, 结果置信度高, 对隧道工程的设计、施工和管理都有较大的借鉴价值。

本书可供城市地铁隧道、越江越海隧道、取排水隧道和公共事业等盾构法隧道设计与施工的工程技术人员、施工人员、科研人员以及大专院校有关专业师生作技术参考。

特邀编辑: 楼如岳 赵晓霞

责任编辑: 徐 纺

盾构法隧道施工技术及应用

周文波 编著

中国建筑工业出版社 出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店 经销

伊杰印刷有限公司 制版、印刷

开本: 787×1092mm 1/16 开

印张: 22.5 字数: 550 千字

2004 年 11 月第一版 2004 年 11 月第一次印刷

印数: 1-5500 册 定价: (精装) 100.00 元 (平装) 65.00 元

ISBN 7-112-06776-6

TU·6023-(12730)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退还

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

隧道网: <http://www.tunnelling.cn>

序 一

《盾构法隧道施工技术及应用》是一本可读性很强的施工技术专著。

自世界上第一条人工开挖盾构隧道建成以来，盾构法隧道发展历史已经有180年了。给我们留下最深刻印象是1823年布鲁诺尔在伦敦泰晤士河建设的隧道工程，它开创了盾构法隧道的先河。随后，英国、德国、美国、日本和中国等进一步发展了盾构法隧道。20世纪90年代，盾构法隧道取得了惊世成就，日本东京湾道路隧道被称为世界超大型道路交通盾构法海底隧道工程的范例，英法海峡隧道更是成为集英、法、美、日、德等国TBM施工技术大成的典型工程。

中国于1962年2月开始启动盾构法试验隧道工程，1970年建造出中国建造的第一条水底公路隧道——打浦路隧道，实现了中国盾构法隧道零的突破。20世纪90年代以后，中国各大城市先后应用盾构法建设轨道交通地铁隧道如雨后春笋，上海、北京、广州、深圳、南京、天津等隧道施工都应用了盾构掘进机，盾构法技术日趋成熟。期间，上海外滩观光隧道工程在自行研发的“盾构法隧道施工智能化辅助决策系统”指导下，实现了城市复杂地层近距离叠交隧道施工的技术创新。2003年，上海隧道工程股份有限公司率先采用双圆隧道工程掘进机施工上海M8线地铁区间隧道，将中国盾构法隧道工程建设带入一个与世界先进水平同步发展的新时代。

通览全书，《盾构法隧道施工技术及应用》不仅再现了盾构法隧道的起源及历史，而且还向人们展示了其无以伦比的盾构法隧道技术发展所取得的显著成就。它告诉读者，盾构法隧道的关键成功因素，不仅是技术上突破，更是致力于追求多样化技术的有机融合，这一点我们将在本书各个章节都能看到。此书的作者是隧道工程的直接实践者，《盾构法隧道施工技术及应用》编著的完成，同样也是盾构法学术最新水平的融合。

《盾构法隧道施工技术及应用》论述了众多隧道建设者参与的重点工程、风险工程以及神秘的双圆隧道工程，浓缩了中国40多年的隧道建设的发展，总结了国内外盾构法隧道施工的成功经验。

《盾构法隧道施工技术及应用》给了我深深的启发，那就是盾构法隧道的技术创新是什么。

《盾构法隧道施工技术及应用》通过大量实例，介绍了盾构法隧道技术创新的过程，所以，我将此书推荐给各位，供大家一起学习、总结、实践和超越已有的盾构法技术。

“开卷有益”，我愿与大家一起学习。



2004年3月25日

序 二

历经数十年的施工积累和技术储备，经历一年多的精心编著，《盾构法隧道施工技术及应用》终于在千万隧道建设者的企盼中面世了！

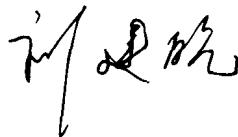
如果说 20 世纪是桥梁建设的世纪，那么 21 世纪就是地下空间开发的世纪。21 世纪以来，城市基础建设日益与人文、自然环境和谐，地下空间进入了一个前所未有的发展阶段。作为地下空间开发中的核心技术，盾构法隧道施工技术已在能源、交通等领域的隧道建设中得到广泛应用。在复杂地层和软土隧道工程中，它以安全、可靠、劳动强度低及环境影响小等显著优点，受到地下工程界越来越广泛的关注，因此，积极推广这一施工技术尤为迫切。《盾构法隧道施工技术及应用》正是适应这一形势而编写的。

本书深入浅出地阐述了盾构法隧道施工技术的发展过程，从最初的网格挤压盾构到目前广泛应用的土压盾构、泥水盾构和双圆盾构，还阐述了盾构法施工理论和大量的工程实例，在兼顾技术的系统性和完整性同时，注重总结提高在实用背景下所取得的实践经验。因此，理论与实践紧密结合是本书的一个特色。

参与本书编写的作者都是从事盾构法隧道施工的技术人员，有着丰富的施工经验，对盾构法隧道施工技术有着深刻的认识，他们将多年的实践经验和对盾构法隧道施工技术的领悟溶于本书，着力阐述如何根据隧道工程实际，制定相应的盾构法施工组织设计及对策措施；如何进行盾构掘进机的选型、隧道施工总体筹划、隧道施工测量；如何减少盾构施工对地层的影响；如何开发应用其他由盾构施工技术衍生出来的相关技术。因此，实用性是本书一个突出特征。

本书还用一定的篇幅论述了盾构法隧道施工的监控系统设计与应用、盾构法隧道施工智能化辅助决策系统的设计与应用和盾构法隧道施工远程智能管理系统的设计与应用，阐明了盾构法隧道技术由自动化向智能化、信息化发展的趋势。

《盾构法隧道施工技术及应用》汇聚了大量国内外盾构法隧道施工技术理论和实践经验，有助于工程界和学术界在隧道工程领域中的不断探索和创新。希望读者能从本书中得到借鉴和参考，为共同提高和完善盾构法隧道施工技术作贡献！



2004年6月18日

目 录

第一章 盾构法隧道概论	1
第一节 盾构法隧道的起源及发展史	1
第二节 盾构法隧道基本原理及特点	18
一、盾构法隧道基本原理	18
二、盾构法隧道优缺点	21
第二章 盾构分类及选型	23
第一节 盾构的构造	23
一、盾构外形和材料	23
二、盾构的基本构造	23
三、盾构的基本参数选定	26
第二节 盾构分类	30
第三节 盾构选型	32
一、盾构掘进机选型依据	32
二、盾构掘进机选型的一般程序	32
三、辅助工法的使用	34
第三章 隧道施工总体筹划	37
第一节 工程概述及分析	37
一、工程概述	37
二、工程地质及分析	38
第二节 工程施工目标	39
一、工程质量目标	39
二、工程安全目标	40
三、工程进度目标	40
第三节 施工总平面设计	41
一、施工用地规划及部署	41
二、现场施工用电及一般要求	42
三、给排水、消防设计	43
第四节 施工进度筹划	44
一、施工进度计划内容	44
二、施工进度计划编制	44
三、施工总进度计划调整与修正	44
第五节 施工资源的需求及计划	44
一、综合劳动力和主要工种劳动力计划	45
二、施工机具需求计划	45
三、构件、材料需求计划	45
第四章 隧道通用施工技术措施	46

第一节 常见的洞门结构形式及进出洞土体加固技术·····	46
一、常见的洞门结构形式·····	46
二、进出洞土体加固技术·····	49
第二节 管片拼装技术·····	62
一、技术名词·····	63
二、装配式衬砌(管片)的类型、特点·····	63
三、管片的拼装·····	63
四、盾构推进与管片拼装成环轴线的相互关系·····	66
第三节 施工监测·····	67
一、施工监测项目的选择·····	67
二、土体介质的监测·····	68
三、邻近构筑物及地下管线的保护监测·····	68
四、隧道变形监测·····	71
五、施工监测数据的处理和反馈·····	73
第五章 盾构法隧道施工技术及工程实例分析 ·····	74
第一节 网格挤压式盾构·····	74
一、施工技术简介·····	74
二、工程实例·····	78
1、上海打浦路越江隧道—中国盾构法隧道零的突破·····	78
2、延安东路隧道北线·····	82
3、外高桥电厂二期取排水隧道·····	85
第二节 土压平衡式盾构·····	89
一、施工技术简介·····	89
二、工程实例·····	95
1、上海地铁2号线人民公园站至河南中路站区间隧道·····	95
2、上海地铁1号线向北延伸段新客站至中山北路站区间隧道·····	97
3、上海外滩观光隧道工程·····	99
第三节 泥水平衡式盾构·····	105
一、施工技术简介·····	105
二、工程实例·····	116
1、上海延安东路隧道南线·····	116
2、大连路隧道工程·····	132
3、日本东京湾道路隧道·····	140
4、德国汉堡易北河第四隧道·····	148
第四节 复合式盾构·····	153
一、施工技术简介·····	153
二、工程实例·····	157
1、广州地铁2号线海珠广场站至市二宫站区间隧道工程·····	157
2、新加坡 DTSST01 标隧道工程·····	161

第五节 双圆加泥式土压平衡盾构	163
一、施工技术简述	163
二、工程实例	168
1、上海轨道交通杨浦线黄兴绿地站至翔殷路站双圆盾构区间隧道	168
2、地铁双圆盾构施工名古屋市高速铁路第4号线砂田桥东工区	172
第六节 TBM 盾构施工	180
一、施工技术简介	180
二、工程实例	181
1、甘肃引大人秦工程(30A 隧道)	181
2、英法海峡隧道工程	187
第六章 垂直顶升	208
第一节 概述	208
一、概述	208
二、工艺原理	209
三、结构设计	209
第二节 施工技术简介	210
一、工艺流程	210
二、主要施工设备	211
三、施工技术	212
第三节 工程实例	214
一、北仑港电厂二期取排水隧道取水口工程	214
第七章 隧道施工测量	217
第一节 施工前期测量工作	217
一、领桩及接桩、踏勘施工现场	217
二、布设测量施工控制网	217
三、仪器及人员配备	218
四、盾构仪安装及测定	218
第二节 建立地面控制网	219
一、地面控制测量	219
二、高程控制测量	220
第三节 竖井联系测量	220
一、定向测量	221
二、高程传递	229
第四节 地下导线测量	230
一、井下导线测量	230
二、地下水准测量	231
第五节 盾构施工测量	232
一、盾构姿态测定	232
二、管片姿态测定	235

第六节 盾构贯通测量·····	237
一、地面控制网复测·····	237
二、接收井门洞中心位置测定·····	237
三、竖井联系测量和井下导线测量·····	239
第七节 隧道沉降测量·····	240
第八节 现代测量技术的发展·····	241
一、精密测角仪器的发展史·····	241
二、电磁波测距仪发展史·····	241
三、精密水准仪发展史·····	242
四、GPS自动定位系统·····	242
第八章 盾构法施工对地层的影响和防治 ·····	243
第一节 地层隆沉的研究方法·····	243
一、实测数据回归法·····	243
二、室内模拟试验法·····	245
三、理论分析·····	246
第二节 沉降机理分析·····	248
一、地层隆沉的原因·····	248
二、地层隆沉的发展过程·····	249
三、地层隆沉的分布范围·····	252
四、引起地层隆沉的因素·····	253
第三节 地层隆沉的估算·····	254
一、经验沉降计算公式的运用与修正·····	254
第四节 数值分析法预测沉降·····	261
一、原理概述·····	261
二、综合数据样本选取方法·····	262
三、实测数据曲线拟合·····	263
第五节 地层隆沉的防治·····	265
一、最佳盾构推进状态·····	265
二、建筑物安全预测与保护·····	266
三、叠交隧道施工的环境保护·····	268
第九章 盾构法隧道施工管理软件及应用 ·····	272
第一节 概述·····	272
第二节 盾构施工监控系统·····	272
一、土压平衡盾构电气监控系统·····	272
二、泥水平衡盾构电气监控系统·····	277
第三节 盾构法隧道施工智能化辅助决策系统·····	280
一、系统介绍·····	280
二、系统功能·····	281
三、系统在工程建设中的应用·····	289

第四节 盾构隧道信息化施工智能管理系统	290
一、系统介绍	290
二、系统功能	292
三、系统原理	293
四、系统应用	295
第十章 盾构法隧道施工质量通病及防治	298
第一节 盾构进、出洞	298
一、盾构基座变形	298
二、盾构后靠支撑位移及变形	299
三、凿除钢筋混凝土封门产生涌土	300
四、盾构出洞段轴线偏离设计	300
五、盾构进洞时姿态突变	301
六、盾构进、出洞时洞口土体大量流失	301
第二节 盾构掘进	302
一、网格挤压式盾构推进施工正面阻力过大	302
二、土压平衡式盾构正面阻力过大	303
三、泥水加压平衡式盾构正面阻力过大	303
四、土压平衡盾构正面平衡压力的过量波动	304
五、泥水加压平衡盾构正面平衡压力过量波动	304
六、网格盾构正面进土过量	305
七、网格盾构正面进土不畅	306
八、土压平衡盾构螺旋机出土不畅	306
九、泥水平衡盾构吸口堵塞	307
十、盾构掘进轴线偏差	307
十一、泥水加压平衡盾构施工过程中隧道上浮	308
十二、盾构过量地自转	309
十三、盾构后退	309
十四、盾尾密封装置泄漏	310
十五、泥水加压平衡盾构施工过程中地面冒浆	310
十六、盾构切口前方地层过量变形	311
十七、运输过程中管片受损	311
第三节 盾构机械设备	312
一、盾构刀盘轴承失效	312
二、盾构推进压力低	312
三、盾构推进系统无法动作	313
四、液压系统漏油	314
五、皮带运输机打滑	314
六、千斤顶行程、速度无显示	315
七、盾构内气动元件不动作	315

第四节 隧道压浆	316
一、浆液质量不符合质量标准	316
二、沿隧道轴线地层变形量过大	316
三、单液注浆浆管堵塞	317
四、双液注浆浆管堵塞	317
第五节 管片拼装	318
一、圆环管片环面不平整	318
二、管片环面与隧道设计轴线不垂直	319
三、纵缝质量不符合要求	320
四、圆环整环旋转	320
五、连接螺栓拧紧程度没达到标准要求	321
六、管片碎裂	322
七、错缝拼装管片碎裂	323
八、管片环高差过大	324
九、管片椭圆度过大	324
第六节 管片防水施工	325
一、管片压浆孔渗漏	325
二、管片接缝渗漏	325
第十一章 盾构法隧道新概念	327
第一节 MF盾构法	327
一、MF盾构法的特点	328
二、工程实例	328
第二节 偏心多轴盾构法	329
一、偏心多轴盾构特点	329
二、工程实例	330
第三节 自由断面盾构法	330
一、自由断面盾构法特点	331
二、工程实例	331
第四节 球体盾构法	332
一、纵横式连续推进球体盾构	332
二、横横式连续推进球体盾构	333
三、长距离开挖球体盾构	333
四、工程实例	333
第五节 MSD盾构法	334
一、MSD盾构法特点	334
二、工程实例	334
第六节 MMST盾构法	335
一、MMST盾构法特点	336
二、施工实例	336

第七节 气泡盾构法	337
一、特点	337
二、工程实例	338
第八节 CPS 盾构法	339
一、CPS 盾构法特点	339
二、工程实例	339
第九节 DOT 盾构法	340
一、特点	340
二、工程实例	340
第十节 H&V 盾构法	341
一、特点	342
二、工程实例	342
第十一节 局部扩大盾构法	342
一、局部扩大盾构法特点	343
二、工程实例	343
后记	345
参考文献	346

第一章 盾构法隧道概论

进入 21 世纪,世界经济的迅猛发展加速了城市化建设。随着城市密集度的提高和高层建筑的不增加,地面可利用空间越来越少,而地下又布满了各种用途的管线,所以,如何更有效利用和创造地下空间已成为当今城市现代化建设的重要课题,采用盾构法来开发地下空间则是一种最佳选择。

城市化建设带动了社会文明的发展,人文自然景观留在地面,而发电厂、储存库、安全区、管道、隧道等地下都市设施都建在地下,采用盾构施工技术掘进隧道的方法也得到了不断的完善(图 1-1)。

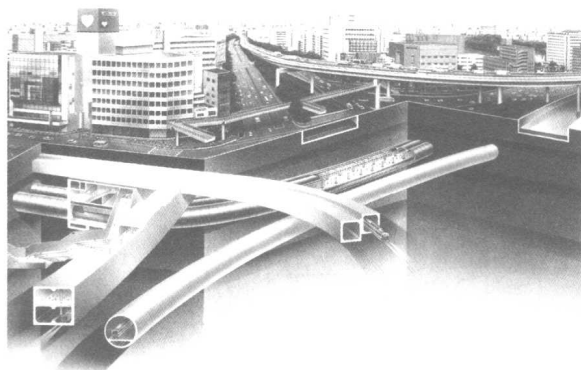


图 1-1 开发地下空间是当今城市现代化建设的重要课题

基础设施密集的大都市中心区利用率较高。大都市中心区的基础设施和较高利用率的地区,对创造地下空间提出了更多更高的要求,大深度、长距离、狭空间隧道开挖技术的开发和利用是决定现代都市可持续发展的重要因素。

第一节 盾构法隧道的起源及发展史

据记载,人类设想建造各种用途的隧道的历史已有上千年。

1802 年,英国采矿工程师阿贝尔·马蒂厄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(图 1-2),每侧各挖掘 18.7km,最后在瓦恩·班克浅滩对接贯通。他建议在海峡地下通道的中间设计一个人工岛,隧道的照明由油灯提供,而烟囱将提供通风。

1803 年爆发的英法战争,使得阿贝尔·马蒂厄的计划未能付诸实施。法国工程师布鲁诺尔(Mare Isambard Brunel)在伦敦从船蛀在船板上蛀孔,再用分泌物涂在孔的四周中得到启示,

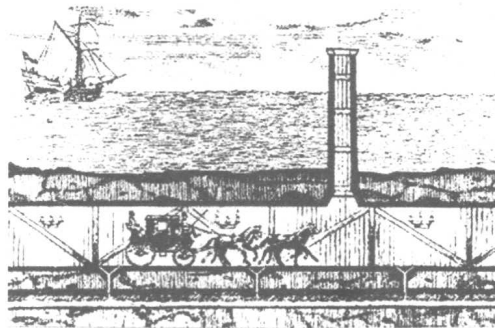


图 1-2 阿贝尔·马蒂厄设计的隧道

发现了盾构法掘进隧道的原理。当时，圣·彼德斯勃格（St. Petersburg）正规划一项跨越 Neca 河的工程，布鲁诺尔参与了此项目的设计研究。布鲁诺尔看到每年桥墩总是遭受从 Lagoda 湖上漂流的大冰块的破坏，曾提议修建一隧道（用盾构法挖掘）。后来，布鲁诺尔完善了构思，注册了专利（图 1-3）。布鲁诺尔构想的盾构机械内部结构由不同的单元格组成，每一个单元格可容纳一个工人独立工作并对工人起到保护作用。采用的方法是将所有的单元格牢靠地装在盾壳上。当时设计了两种施工方法，一种是当一段隧道挖完后，整个盾壳由液压千斤顶借助后靠向前推进；另一种方法是每一个单元格能单独地向前推进。第一种施工方法后来被采用，并得到推广应用，演变为成熟的盾构法，目前所有的封闭式盾构都是基于这种方法。此后，布鲁诺尔逐步完善了盾构结构的机械系统，设计成用全断面螺旋式开挖的封闭式盾壳，衬砌紧随其后的方式（图 1-4）。

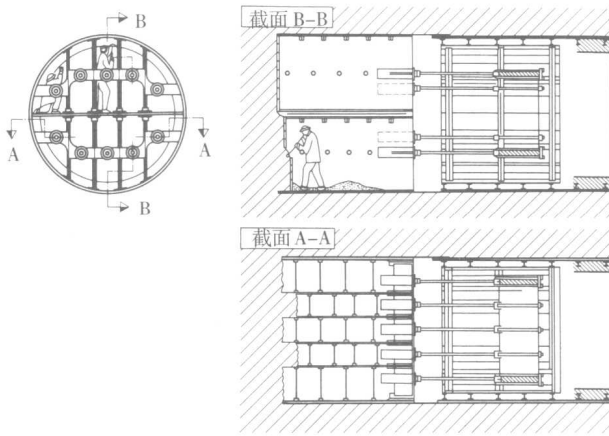


图 1-3 布鲁诺尔注册专利的盾构（1806 年）

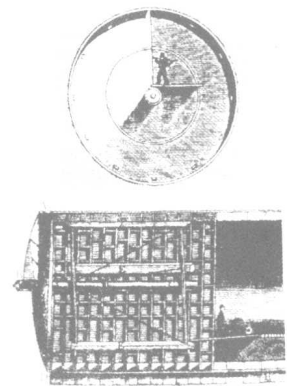


图 1-4 M.I. Brunel 螺旋盾构（1818 年）

布鲁诺尔在伦敦泰晤士河下的隧道工程中首次使用这种盾构，设想成为现实。这台矩形盾构断面为 $11.3\text{m} \times 6.7\text{m}$ ，并由 12 个邻接的框架组成。每一个框架分成 3 个舱，每一舱里有一个工人，这样，共有 36 名工人。此系统按照以下模式工作：首先，借助螺杆（spindles）将鞍型框架（cobs）压入前方的土中。从上部撤除隧道工作面上的木料并掘土约 6 英寸，然后，隧道工作面重新用木料覆盖并用螺杆支撑，紧接着盾构后部砌砖，把它作为整个机架的支座。泰晤士河下的隧道工程始于 1825 年，施工期间遇到了许多困难（图 1-5），在经历了五次以上特大洪水后，直到 1843 年才全部完工。

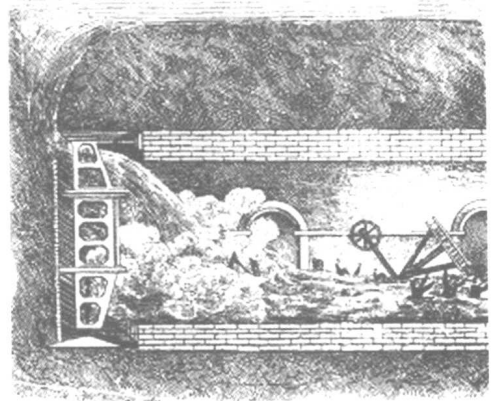


图 1-5 泰晤士河底隧道施工时涌水

1866 年，莫尔顿申请“盾构”专利。盾构最初称为小筒（cell）或圆筒（cylinder），在莫尔顿专利中第一次使用了“盾构”（shield）这一术语。

1869 年，工程师詹尼斯·亨利·格瑞海德（Janes Heary Greathead）用圆形盾构再次在

泰晤士河底修建了一条隧道，隧道衬砌第一次采用了铸铁的衬砌管片。隧道线路长 402m，外径为 2.18m。隧道基本上是在不透水的粘土层中掘进，所以，在地下水控制方面没有遇到什么困难。格瑞海德的圆形盾构成为后来大多数盾构的模型。

1874 年，格瑞海德发现在强渗水性的地层中很难用压缩空气支撑隧道工作面，因此，开发了用液体支撑隧道工作面的盾构（图 1-6）。通过液体流，以泥浆的形式出土。

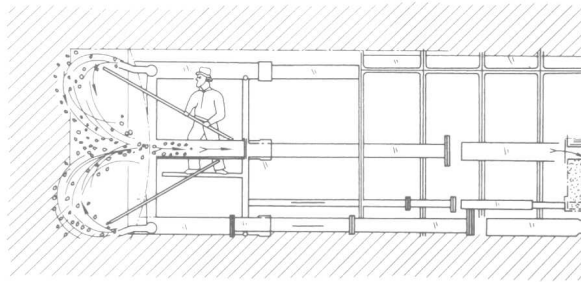


图 1-6 格瑞海德泥浆盾构

1886 年，格瑞海德在伦敦地下施工中将压缩空气方法与盾构掘进相组合使用。在压缩空气条件下施工，标志着在承压水地层中掘进隧道的一个重大进步，它填补了隧道施工中一项空白，并使得世界范围内采用盾构掘进隧道的数目有了很大增加，20 世纪初，大多数隧道都是采用格瑞海德盾构法修建的。

1891 年，约瑟夫·霍布森承担建设的圣克莱河隧道通车。该隧道采用气压盾构施工，隧道衬砌采用直径 6.08m 的铸铁管片，水下隧道全长约 1830m，该隧道至今仍在在使用。

布鲁诺尔发明盾构法之后的另一个技术进步是用机械开挖代替人工开挖。第一个机械化盾构专利可追溯到 1876 年，英国人约翰·狄克英森·布伦敦（John Dickinson Brunton）和姬奥基·布伦敦（George Brunton）申请专利。这台盾构有一个由几块板构成的半球形的旋转刀盘，开挖的土料落入径向装在刀盘上的料斗中，料斗将渣料转运至胶带输送机上，再将它转到后面从盾构中运出，这一构想后来被用于修建地铁隧道工程。

1896 年申请专利的普莱斯（Price）盾构是根据发明者命名的（图 1-7）。1897 年，这台机器成功地应用于伦敦粘土地层。它第一次将格瑞海德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工具，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，然后运到地面。

1896 年，哈姬（Haag）在柏林为第一台德国盾构申请了专利，它是一台用液体泥水支撑隧道工作面并把开挖舱密封作为压力舱的盾构掘进机（图 1-8）。

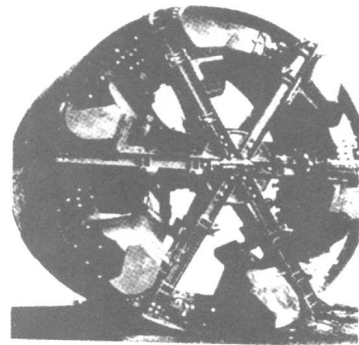


图 1-7 普莱斯机械化盾构，英国 Markham 公司

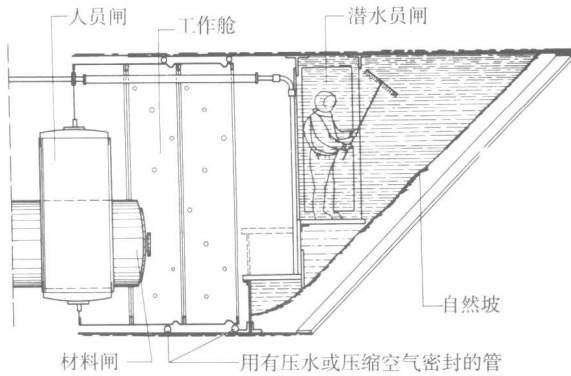


图 1-8 哈姬泥水盾构（1896 年）

表 1-1 早期盾构法隧道施工（1825 ~ 1911）

年份	工程	长度(m)	直径(m)	日进尺(m/d)	附注	衬砌
1825 ~ 1843	Thames 隧道 (London)	460	11.3×6.7	1.50	Brunel 盾构(矩形)	砖砌
1869 ~ 1870	Broadway (New York)	90	2.85		Breach 盾构	砖砌
1869	Tower Subway (London)	403	2.20	2.6	Greathead 盾构	铸铁衬砌
1886 ~ 1890	City South Subsay (London)	10200	3.10 ~ 3.45	4.00	初期用 压缩空气	铸铁衬砌
1890 ~ 1893	Glasgow (Harbour road)	580	5.20	1.00	压缩空气	铸铁衬砌
1892 ~ 1894	Sewer gallery (Clichy)	465	2.5	2.00 ~ 3.00	压缩空气 到 2.9bar	铸铁衬砌
1896 ~ 1899	Spree road 隧道 (Berlin)	375	4.00	1.40	压缩空气	轧制钢
1898	Orleans Railway (Paris)	1230	9.75		管片盾构	砖砌
1899 ~ 1904	Sewer 隧道 (Hamburg)	2150	3.05	1.30	压缩空气 0.6 ~ 1.5bar	砖砌
1907 ~ 1911	Elb 隧道 Clichy	920	5.95	1.70	压缩空气 2.0 ~ 2.7bar	内填钢与 混凝土

注：1 bar=10⁵Pa

根据记载，1825 ~ 1911 年为世界早期盾构法隧道发展时期，表 1-1 为该阶段盾构法隧道发展概况。1907 ~ 1911 年，德国受到伦敦泰晤士河隧道用压缩空气盾构建造的启发，决定在汉堡 St.-Pauli-Landungsbrücken 建设易北河隧道，以在汉堡从城区到易北河左岸的港口之间建造一条陆路。这条隧道采用 Alter Elbtunnel 盾构建造（图 1-9）。

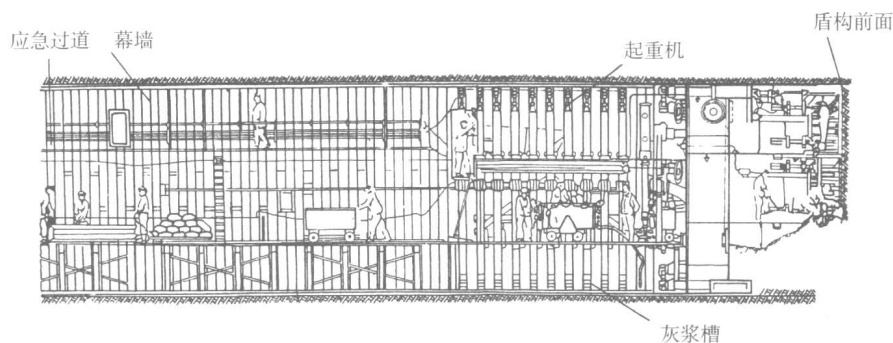


图 1-9 汉堡掘进隧道的盾构“Alter Elbtunnel”

1917年，日本引进盾构施工技术，是欧美国家以外第一个引进盾构法的国家。日本国铁羽越线的折渡隧道（总长4719m）的一段，曾采用盾构法施工，但由于地质条件差而被迫中途停工。

1939年日本采用盾构法施工国铁关门隧道下行线门司方向的海底隧道部分（盾构直径7.182m，隧道总长725.8m）工程。

1942年6月，世界上第一条海峡隧道单线路（下行线）关门隧道完工，两年后第二条单线（上行线）关门隧道完工。但由于战争及战后困难时期的缘故，盾构法技术一直没有得到发展。

1957年，日本东京地铁丸之内线又一次采用盾构法施工技术修建了一段区间隧道。

1959年，用液体泥水支撑隧道工作面的想法由噶登纳（Elmer C.Gardner）成功地试用于一条直径为3.35m的排污隧道。

1960年，斯内德瑞特（Schneiderit）提出了用膨润土悬浮液的活动工作面支撑。在这之后，罗瑞兹（H.Lorenz）申请了用加压膨润土浆来稳定隧道工作面的专利。

1961年，墨西哥城第一台盾构应用于软粘土地层的排水隧道施工。盾构外径4m，在当地制造。

1962年2月，中国上海市城建局隧道处开始塘桥试验隧道工程。采用直径为4.16m的一台普通敞胸盾构（图1-10）在两种有代表性的地层下进行掘进试验（图1-11），用降水或气压来稳定粉砂层及软粘土地层。在经过反复的论证和地面试验之后，选用由螺栓连接的单层钢筋混凝土管片作为隧道衬砌，环氧煤焦油作为接缝防水材料。试验获得成功，采集了大量盾构法隧道数据资料。

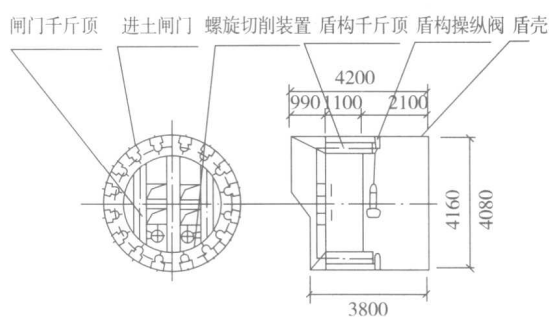


图 1-10 直径 4.16m 试验型盾构掘进机示意图

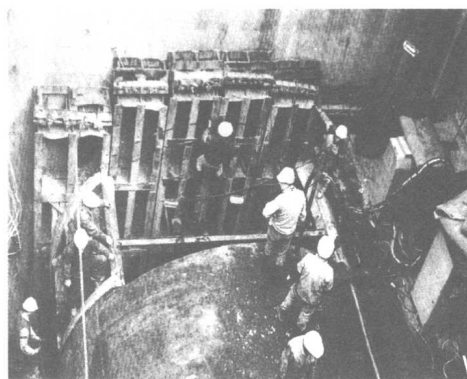


图 1-11 试验隧道盾构掘进机准备始发推进