

TBM SHIGONG

SUIDONG GONGCHENG DIZHI

YANJIU YU SHIJIAN

TBM施工

隧洞工程地质研究与实践

杨继华 景来红 李清波 王学潮 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TBM施工

隧洞工程地质研究与实践

杨继华 景来红 李清波 王学潮 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书根据 TBM 施工的技术特点, 结合相关工程实例, 研究了 TBM 施工中的工程地质问题, 并提出相关的应对措施。全书共 8 章, 包括: TBM 隧洞施工技术概述, 基于工程地质条件的 TBM 选型及工程应用, TBM 施工隧洞工程地质勘察, TBM 施工隧洞围岩分类, 不同地质条件下的 TBM 滚刀磨损及掘进能耗, TBM 施工隧洞超前地质预报, TBM 施工隧洞地质灾害与对策, 结论与展望。本书理论与工程实践相结合, 对提高 TBM 施工效率、避免或减轻 TBM 施工中的地质风险有较好的指导和借鉴意义。

本书可供从事隧洞与地下工程行业的勘察、设计、施工及科研工作的技术人员参考, 也可供相关专业院校师生阅读。

图书在版编目 (C I P) 数据

TBM施工隧洞工程地质研究与实践 / 杨继华等编著
— 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 3
ISBN 978-7-5170-6367-4

I. ①T… II. ①杨… III. ①隧道施工—盾构法—工程地质—研究 IV. ①U455. 49

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第056822号

书 名	TBM 施工隧洞工程地质研究与实践 TBM SHIGONG SUIDONG GONGCHENG DIZHI YANJIU YU SHIJIAN
作 者	杨继华 景来红 李清波 王学潮 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 16.75 印张 397 千字
版 次	2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—1200 册
定 价	108.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《TBM 施工隧洞工程地质研究与实践》

编 撰 人 员

杨继华 景来红 李清波
王学潮 齐三红 郭卫新

章 名	主要撰写人
第 1 章 TBM 隧洞施工技术概述	景来红 王学潮 杨继华
第 2 章 基于工程地质条件的 TBM 选型及工程应用	杨继华 景来红 王学潮
第 3 章 TBM 施工隧洞工程地质勘察	李清波 景来红 杨继华
第 4 章 TBM 施工隧洞围岩分类	杨继华 李清波 郭卫新
第 5 章 不同地质条件下的 TBM 滚刀磨损及掘进能耗	王学潮 杨继华 景来红
第 6 章 TBM 施工隧洞超前地质预报	齐三红 李清波 杨继华
第 7 章 TBM 施工隧洞地质灾害与对策	郭卫新 杨继华 齐三红
第 8 章 结论与展望	杨继华

前 言

, QIANYAN

随着国民经济的快速发展及国家对基础设施建设的持续投入,预计在未来 20 年中,我国在铁路、水利水电工程、公路、地铁及城市隧道、采矿业等领域的隧道建设将达到 6000km,在建和规划建设的工程规模之大、数量之多、经费投入之重都是前所未有的。近年来,我国实施了多项跨流域引调水工程,这些工程都设计了较多的深埋长隧洞,例如,已完成的山西万家寨引黄入晋工程隧洞总长 124km,辽宁大伙房水库一期工程输水隧洞长 85.3km;在建的云南滇中调水工程香炉山隧洞长 63.4km,陕西引汉济渭工程秦岭隧洞长 81.6km;拟建的南水北调西线一期工程 7 段隧洞总长 252.7km,单洞最长约 72km。

这些隧洞工程的共同特点是单洞长度长、洞径大、埋深大、工程地质条件及水文地质条件复杂,受地形地貌、施工工期、环境保护等条件的限制,钻爆法施工实施起来存在较大的困难,有时甚至不可行,因此采用 TBM 施工就成了唯一的选择。

隧道掘进机 (Tunnel Boring Machine, TBM) 是一种系统化、智能化、工厂化的高效能隧洞开挖施工机械,可一次成洞,同时完成开挖掘进、岩渣运输、通风除尘、导向控制、支护衬砌、超前处理、风水电及材料供应等工序,并实现了自动化控制,适用于长距离隧洞的施工。TBM 施工的最大特点是广泛使用电子、信息、遥控等高新技术对全部作业进行控制,使掘进过程始终处于最佳状态,相对于钻爆法具有高效、快速、优质、安全等优点,掘进速度一般是钻爆法的 3~10 倍。采用 TBM 技术还有利于环境保护、节省劳动力、提高施工效率,整体上比较经济。

相对于钻爆法,TBM 对地质条件的适应性差,隧洞的工程地质条件及水文地质条件对 TBM 选型、施工组织与管理、工程造价及工期等起着决定性的作用。在国内外的 TBM 隧洞施工过程中,由于不良地质条件造成的 TBM 掘进受阻、工期延误、工程造价剧增的事故时有发生。例如,青海引大济湟工程隧洞 TBM 施工过程中发生了多次涌水、突泥塌方等隧洞地质灾害,出口段 TBM 施工累计受阻和卡机 10 次,造成工程进度严重滞后,TBM 掘进处于停滞状态达 6 年之久;新疆达坂隧洞存在强膨胀泥岩、断层、富水等严重不良地质问题,造成频繁卡机,工期延误 1 年以上;云南掌鸠河引水工程上公山隧洞

受断层破碎带塌方、围岩大变形、涌水、突泥等地质灾害的作用，发生了多次 TBM 卡机事故，设备受到严重的损坏，最长一次停机时间达 10 个月，最终业主与承包商决定放弃 TBM 施工，将 TBM 拆除，改用钻爆法施工。

目前，国内尚无与 TBM 施工隧洞相关的地质工作规范、标准，施工前的工程地质勘察工作多是参考钻爆法隧洞施工的成熟方法，但 TBM 施工的隧洞具有其特殊性，如洞线长、穿越的地层多导致地质条件复杂，由于 TBM 设备庞大、灵活性差，不良地质条件对 TBM 的影响远大于钻爆法。因此，针对 TBM 隧洞施工的技术特点，研究隧洞的工程地质问题并提出对策，对保障 TBM 快速、安全施工具有重要的意义。

本书针对 TBM 施工隧洞的工程地质问题，以厄瓜多尔 CCS 水电站引水隧洞、兰州市水源地建设工程输水隧洞 TBM 施工为依托，结合“十一五”国家科技支撑计划重大项目“南水北调工程若干关键技术研究与应用”主课题“西线超长隧洞 TBM 施工关键技术”（编号：2006BAB04A06）的研究成果，开展了相关工程地质问题的研究并应用到工程实际。

本书共 8 章，包括：TBM 隧洞施工技术概述，基于工程地质条件的 TBM 选型及工程应用，TBM 施工隧洞工程地质勘察，TBM 施工隧洞围岩分类，不同地质条件下的 TBM 滚刀磨损及掘进能耗，TBM 施工隧洞超前地质预报，TBM 施工隧洞地质灾害与对策，结论与展望。全书由杨继华统稿。

在本书的策划和写作过程中，黄河勘测规划设计有限公司的戴其祥教授级高级工程师从书的框架到最后的修改定稿，倾注了大量的时间和精力，给予了悉心指导，在此表示深深的敬意和最诚挚的感谢；李金都教授级高级工程师对本书的写作提出了很多有益的建议，李今朝高级工程师、张党立高级工程师、姚阳高级工程师、娄国川工程师、魏斌工程师、杨风威高级工程师、苗栋工程师等为本书提供了部分资料和图片，并参与了资料整理，在此深表感谢。本书在资料、数据的收集过程中，得到了中国水利水电第十四工程局有限公司、中国水利水电第十工程局有限公司、中国水利水电第四工程局有限公司、中国水利水电第三工程局有限公司、德国 Herrenknecht 股份公司、中国中铁工程装备集团有限公司、中国铁建重工集团有限公司的支持和帮助；书中参考了较多专家、学者的论著，在此一并深表谢意。

本书涉及内容较多，由于编著者水平有限，错误之处在所难免，恳请广大专家、读者批评指正。

编著者

2018 年 2 月

目 录

MULU

前言

第 1 章 TBM 隧洞施工技术概述	1
1.1 现代隧洞工程特点	1
1.2 隧洞开挖方法	2
1.3 TBM 隧洞施工技术发展历史	9
1.4 TBM 隧洞施工技术特点	17
1.5 TBM 隧洞施工中的工程地质问题	35
第 2 章 基于工程地质条件的 TBM 选型及工程应用	37
2.1 TBM 选型的原则	37
2.2 TBM 类型	39
2.3 影响 TBM 选型的地质因素	46
2.4 厄瓜多尔 CCS 水电站引水隧洞 TBM 选型及应用	47
2.5 兰州市水源地建设工程输水隧洞 TBM 选型及应用	57
2.6 小结	71
第 3 章 TBM 施工隧洞工程地质勘察	72
3.1 TBM 隧洞工程地质勘察的目的和内容	72
3.2 TBM 隧洞工程地质勘察方法	76
3.3 TBM 隧洞的综合勘察	85
3.4 兰州市水源地建设工程输水隧洞工程地质勘察	86
3.5 小结	91
第 4 章 TBM 施工隧洞围岩分类	92
4.1 隧洞围岩分类的意义	92
4.2 隧洞围岩分类的发展历史	92
4.3 隧洞围岩稳定性分类方法	93
4.4 TBM 施工隧洞围岩适宜性分级	109
4.5 护盾式 TBM 施工隧洞围岩稳定性分类	112
4.6 基于掘进效率的 TBM 施工隧洞围岩分类	121
4.7 小结	135

第 5 章 不同地质条件下的 TBM 滚刀磨损及掘进能耗	136
5.1 盘形滚刀磨损	136
5.2 兰州市水源地建设工程 TBM 施工盘形滚刀损耗及对策	144
5.3 基于实测数据的刀圈磨损预测模型及工程应用	150
5.4 不同地质条件下 TBM 掘进能耗研究	156
5.5 小结	164
第 6 章 TBM 施工隧洞超前地质预报	166
6.1 隧洞超前地质预报的研究及应用现状	166
6.2 隧洞超前地质预报的内容和目的	167
6.3 隧洞超前地质预报分类	169
6.4 TBM 施工隧洞超前地质预报	171
6.5 超前地质预报在 CCS 水电站引水隧洞双护盾 TBM 施工中的应用	186
6.6 超前地质预报在兰州市水源地建设工程输水隧洞双护盾 TBM 施工中的应用	203
6.7 小结	208
第 7 章 TBM 施工隧洞地质灾害与对策	209
7.1 TBM 施工隧洞常见地质灾害类型及防治措施	216
7.2 CCS 水电站引水隧洞 TBM1 卡机及脱困处理	228
7.3 CCS 水电站引水隧洞 TBM2 卡机及脱困处理	231
7.4 兰州市水源地建设工程输水隧洞双护盾 TBM 施工不良地质条件及处理	238
7.5 小结	246
第 8 章 结论与展望	247
8.1 结论	247
8.2 展望	249
参考文献	252

第 1 章 TBM 隧洞施工技术概述

1.1 现代隧洞工程特点

近年来,世界经济快速发展,人口密度急剧增加,各类基础设施(如水电、水利、公路、铁路、矿山及国防等领域)的建设正密集展开。在这些工程的建设中,由于地形、地貌、地质、经济及社会的原因,往往布置有大量的隧洞工程。现代的隧洞工程建设逐渐呈现出如下特点:

(1) 应用范围越来越广,包括水工隧洞、铁路隧道、公路隧道和城市轨道交通及综合管廊等。

(2) 长隧洞数目越来越多且隧洞越来越长,如国外的英吉利海峡隧道全长 49.2km,由 3 条平行的隧道组成^[1],日本青函海底隧道长 53.9km,南非莱索托调水工程隧洞总长 200km,拟建的直布罗陀海峡隧道长 60km,白令海峡海底隧道长 90km^[2]。国内方面,辽宁大伙房水库一期工程输水隧洞长 85.3km^[3],山西万家寨引黄入晋工程隧洞总长 124km^[4],拟建的南水北调西线一期工程 7 段隧洞总长 252.7km^[5]。

(3) 洞径越来越大,日本东京湾高速公路工程海底隧道开挖直径 13.9m^[2],荷兰生态绿心隧道设计直径 13.3m^[6],锦屏二级水电站引水隧洞开挖直径 12.4m^[7]。

(4) 埋深越来越大,法国谢拉水电站引水隧洞最大埋深 2619m^[8],拟建的从德国罗森海姆(Rosenheim)穿越阿尔卑斯山脉至意大利维罗纳(Verona)的欧洲货运铁路隧道,埋深 1200~2400m^[9],锦屏二级水电引水隧洞大部分洞段埋深在 1000m 以上,最大埋深 2525m^[7]。

(5) 地质条件复杂,存在各种不良地质条件,如断层破碎带、软岩、膨胀岩、超硬岩、高耐磨性岩石、高地下水压力、涌水、突泥、岩爆、高地温、瓦斯及有害气体等,这些因素都会在一定程度上影响隧洞的施工方法选择、工程进度及工程投资,有些还会成为决定性的因素。

我国水资源在空间上分布极不均匀,总体上呈南多北少的特点,各省内的水资源同样呈不均匀分布。为缓解或解决部分地区的工业、农业、生活、生态等的缺水状态,国家和地方规划、开建、完成了较多的调水工程,如国家层面的南水北调东、中、西线工程。各省内的调水工程较多,已完成的有甘肃省引大入秦工程、青海引大济工程、甘肃引洮供水工程、辽宁大伙房水库输水工程、云南昆明掌鸠河供水工程、山西万家寨引黄工程等,这些完建的工程已经发挥了引调水功能,取得了良好的社会、经济效益。在建的工程有吉林



省中部城市引水供水工程、陕西省引汉济渭工程、山西省中部引黄工程、北疆供水二期工程、广西桂中治旱乐滩水库引水灌区一期工程、兰州市水源地工程等；拟建的有南水北调西线工程、云南滇中调水工程及新疆北疆调水二期工程等。这些长距离调水工程穿越山区时，受地形条件限制，长隧洞成为最优选择，如兰州市水源地建设工程单条隧洞长 31.5km，引汉济渭工程秦岭隧洞长 81.6km。在这些长隧洞的施工中，受通风、出渣、材料运输等的影响，钻爆法独头施工长度一般不超过 2km，这就要求布置较多的施工支洞、竖井、斜井以新开工作面。但受地形条件及环境保护等的限制，多数地区不具备布置施工支洞的条件，因此 TBM 法施工成为这些长隧洞施工的首选。TBM 在中国的大规模应用正是从甘肃引大入秦工程、山西万家寨引黄入晋工程等长距离调水工程开始的，TBM 法在这些调水工程中的成功使用，为我国长隧洞的施工技术和 TBM 设计、制造水平的提高积累了丰富的经验。

隧洞指的是埋置于地层内的工程建筑物，是人类利用地下空间的一种形式。各行业对隧洞的所采用的名称有所不同，如水利、水电工程称为隧洞，铁路行业、交通行业称为隧道，采矿行业称为巷道，轴线与地面垂直或呈较大的角度的称为竖井或斜井，本书在涉及具体工程时采用各行业的名称。

1.2 隧洞开挖方法

隧洞及地下洞室的开挖历史悠久，早在公元前 2180 年至前 2160 年，古人在幼发拉底河下修建的了一条长约 900m 的砖衬砌人行通道，是迄今已知的最早用于交通的隧道，采用的施工方法是在旱季将河流改道后用明挖法建成。公元前 36 年，在那不勒斯和普佐里之间开凿的婆西里勃道路隧道，长约 1500m，宽 8m，高 9m，是在凝灰岩中凿成的一条长隧道。中国最早用于交通的隧道是古褒斜道上的石门隧道，建成于东汉永平九年（公元 66 年）。古隧道为省去衬砌，多建于较坚硬的岩石中。隧道在施工时先将岩壁烧热，随即浇以冷水，使岩石先发生膨胀后突然收缩而开裂，以利开凿。在中世纪，隧道主要是用于采矿和军事。17 世纪和 18 世纪，随着运输事业的发展和技术的进步，尤其是工程炸药的应用，交通隧道也发展起来。19 世纪铁路建筑的发展，促使隧道工程迅速发展，修建的隧道数量也很多。20 世纪以来，汽车运输量不断增加，公路路线标准相应提高，公路隧道也逐渐增多。

就隧洞开挖掘进的历史而言，主要的开挖技术方法共经历了四代，在第一代隧洞开挖中完全依赖于人工，人工劳动强度大、施工效率极低；在第二代的隧洞开挖中，引入了工程炸药，采用人工手持风钻钻孔后装药爆破，提高了隧洞开挖效率，但同样存在人工钻孔效率不高、劳动强度大的缺点；在第三代的开挖中，引入了多臂台车代替人工钻孔，大大提高了钻孔的效率；在第四代的隧洞开挖中，引入了全断面隧洞 TBM，实现了隧洞开挖的机械化、自动化，相比前三代开挖方法，开挖效率、工作环境等有了巨大的提高。

目前，根据隧洞的工程目的和所处的地质条件，形成了多种不同的开挖方法，如图 1.1 所示。对于岩质隧洞来说，如公路、铁路的山岭隧道以及水利、水电工程的引水、输水隧洞，常用的开挖方法主要有两种，即钻爆法和 TBM（掘进机）法。

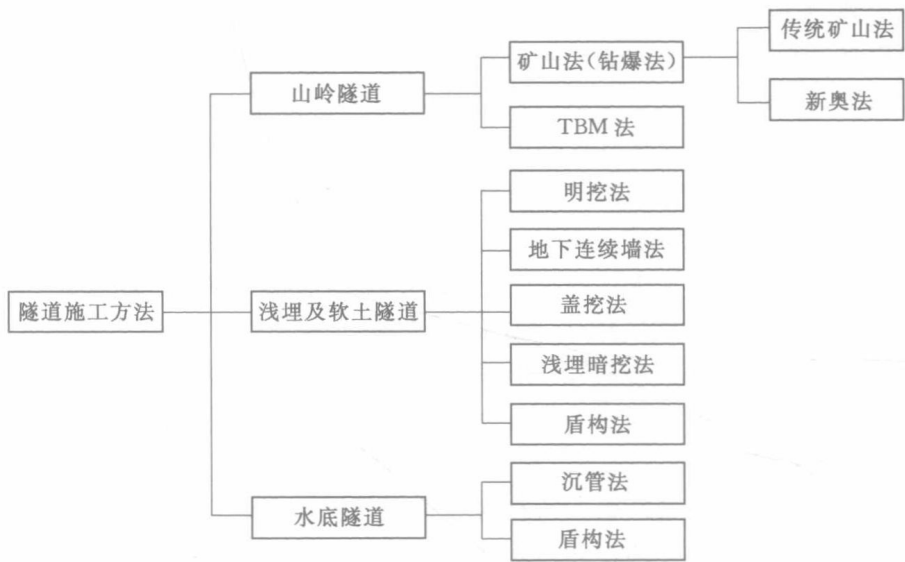


图 1.1 现代隧洞常用施工开挖方法

1.2.1 钻爆法

1.2.1.1 工序

钻爆法 (drilling and blast method)，即通过钻孔、装药、爆破开挖岩体的方法^[10-12]。钻爆法开挖作业程序包括测量、钻孔、装药、爆破、通风、出渣、支护（锚杆、立钢拱架、挂网、喷混凝土）等工序。

(1) 钻孔。先设计炮孔方案，然后按设计的炮孔位置、方向和深度严格钻孔。隧洞全断面开挖时，采用钻孔台车人工手持风钻配合多臂钻孔台车，钻孔直径为 4~5cm，钻孔深度根据循环开挖进尺确定，为 2.0~4.0m。炮孔分为掏槽孔（开辟临空面）、掘进孔（保证进尺）和周边孔（控制轮廓）。

(2) 装药。在掘进孔、掏槽孔和周边孔内装填炸药。一般装填硝胺炸药，有时也用胶质炸药。炸药装填率约为炮孔长度的 60%~80%，周边孔的装药量要少些。为缩短装药时间，可把硝胺炸药制成长的管状药卷，以便填入炮孔，也可利用特制的装药机械把细粒状药粉射入炮孔中。

(3) 爆破。19 世纪上半期以前用明火起爆。1867 年美国胡萨克铁路隧道开始采用电力起爆，此后电力起爆逐渐推广。在全断面开挖中，为了减少爆破对围岩的震动和破坏，并保证爆破的效果，多采用分时间阶段爆破的电雷管或毫秒雷管起爆。一般拱部采用光面爆破，边墙采用预裂爆破。近期发展的非电引爆的导爆索应用日益广泛。

(4) 施工通风。目的是排出或稀释爆破后产生的有害气体和由内燃机产生的氮氧化物及一氧化碳，同时排除烟尘，供给新鲜空气，保证隧洞施工人员的安全和改善工作环境。通风可分系统通风和局部通风：系统通风可利用管道（直径一般为 0.60~2.50m）或巷道（平行导坑等），配以大型或中型通风机；局部通风多用小型管道及小型通风机。隧洞通风一般采用压入式，新鲜空气由风管送到开挖掌子面附近，将污浊空气由正洞排出洞外。新

鲜空气不易达到的工作面,须采用局部通风机补充压入。

(5) 装渣与运输。爆破后,岩渣需要运出洞外,装渣机可采用多种类型,如后翻式、装载式、扒斗式、蟹爪式和大铲斗内燃装载机等。运输机车有内燃牵引车、电瓶车等,运输车辆有大斗车、槽式列车、梭式矿车及大型自卸汽车等。运输线分有轨和无轨两种。

(6) 施工支护。隧洞开挖后须及时支护,以减少围岩松动、防止塌方、维持围岩的稳定性。施工支护分为构件支撑和喷锚支护。构件支撑一般有木料、金属、钢木混合构件等,现在使用钢支撑者逐渐加多。喷锚支护是 20 世纪 50 年代发展起来的一种支护方法,其特点是支护及时、稳固可靠,具有一定柔性,与围岩密贴,能给施工场地提供较大活动空间,适应的地质条件广,中国在一些老黄土隧洞中应用喷锚支护也获得成功。喷射混凝土工艺分为干喷和湿喷,现多采用干喷法,即将干拌混凝土内掺入一定数量的速凝剂,用压缩空气将混凝土由管内喷出,在喷口加水喷射到岩石面上,一次可喷 3~5cm 的厚度,可在喷射混凝土中掺入一些钢纤维,或在岩面挂钢丝网以提高喷混凝土支护的强度。锚杆安装在岩层面上的钻孔内,其长度和间距视围岩性质而定,一般长度为 2~5m,通常用树脂胶和水泥砂浆沿杆体全长锚固。在岩层较好洞段仅喷混凝土即可得到足够的支护强度。在围岩坚硬稳定的洞段也可不加支护。在软弱围岩洞段喷混凝土和锚杆可以联合使用,锚杆应加长,以加强支护力。

钻爆法施工过程中由测量至支护完毕称为一个开挖循环。根据钻爆法隧洞开挖经验,其固定的工序决定了每个循环所需的最少时间,一般情况下,从放样到出渣及延长风管、水管线完毕,需要 6~8h,因此在较理想的状态下,一天可掘进 3 个循环,每个循环进尺 2~4m,日进尺可达 12m。但在实际开挖中经常会遇到设备故障及断层、软弱围岩、涌水等不良地质条件,处理起来需要占用大量时间,不易保持每日的掘进进尺,所以每月单工作面实际进度多低于 200m。在我国的秦岭终南山特长公路隧道进口段的开挖中,采用了缩短钻孔、装渣、运输时间、提高钻爆效果、提高通风效率、防治岩爆地质灾害等的快速掘进方案,最高月进尺 305m,连续半年平均月进尺达到 250.5m^[12]。

从钻爆法作业流程可以看出,其开挖循环作业的特点是各工序顺序作业,前一个工序完成后方可以进行下一个工序,各工序必须逐项按时完成,否则前一工序的推迟就会影响下一工序,因而拖长循环时间。其中最主要的工序为钻孔及出渣,所用时间占全部作业时间比例较大。

1.2.1.2 开挖方法

钻爆法开挖采用的方法有全断面开挖法和分部开挖法。

(1) 全断面开挖法。一次开挖成型的方法。一般采用多臂台车钻孔、毫秒爆破、喷锚支护、大型运输机械装渣和强通风设备。全断面开挖法又演变为半断面法,半断面法是弧形上半部领先,下半部隔一段距离施工。

(2) 分部开挖法。先用小断面超前开挖导坑,然后将导坑扩大到半断面或全断面的开挖方法。这种方法主要优点是可采用轻型机械施工,多开工作面,各工序间拉开一定的安全距离。缺点是工序多、有干扰、用人多。根据导坑在隧洞断面的位置分为上导坑法、中央导坑法、下导坑法以及由上下导坑互相配合的各种方法,另有把全断面纵向分为台阶进行开挖而各层台阶距离较短的台阶法。上导坑法适用于软弱岩层、衬砌顺序是先拱后墙,



曾于 1872—1881 年为圣哥达隧道采用, 中国短隧洞一般用这种方法。中央导坑法是导坑开挖后向四周打辐射炮孔爆破出全断面或先扩大上半部, 20 世纪 20 年代美国新喀斯喀特隧道采用这种方法。下导坑法即下导坑领先的方法, 其中包括: ①上下导坑法, 利用领先的下导坑向上预打漏斗孔, 便于开展上导坑等多工序平行作业。衬砌顺序多用先拱后墙, 遇围岩较好时亦可改为先墙后拱。②漏斗棚架法, 适用于坚硬地层, 以下导坑掘进领先, 由下而上分层开挖, 设棚架, 先衬砌边墙后砌拱, 1961—1966 年在中国成昆线关村坝铁路隧道应用, 1964 年取得平均单月成洞 152m 的纪录。③蘑菇形法, 同漏斗棚架法类似, 也设棚架, 但先衬砌拱部后砌边墙, 1971—1973 年在枝柳线彭莫山单线隧道应用, 取得平均单口月成洞 132m 的纪录。④侧壁导坑法, 两个下导坑领先, 环形开挖, 最后挖掉中心土体, 衬砌顺序为先墙后拱, 多用于围岩很差的双线隧道, 也有采用上导坑领先及两个下导坑成品字形的方法。

全断面开挖法和分部开挖法是钻爆法开挖常用的方法, 但施工中时常遇到各种困难情况, 如断层、流沙、膨胀地层、溶洞、涌水等, 需要采取特殊的处理措施。

钻爆法已有一百多年的历史, 自从炸药发明以后, 钻爆法的施工方法得到了迅猛的发展, 加上喷锚支护、爆破控制、快速出渣、高效通风等技术, 使得隧洞施工向全断面、大断面、机械化、高效率方向发展。但钻爆法对围岩的扰动破坏大, 有时由于爆破震动会使围岩产生坍塌, 故以前只适用于岩质隧洞。随着控制爆破技术的发展, 钻爆法的应用范围也逐渐加大, 目前也可用于软岩及硬土的松动爆破。由于钻爆法自身的局限性和诸多无法克服的缺点, 如工序复杂、进度慢、工作条件差、工人劳动强度大、超欠挖严重、独头开挖长度受限、对围岩扰动大、安全性差等, 难以实现高速、高效、安全、文明施工。另外, 当隧洞长度超过 2km 后, 通风排烟成为关键, 若没有最近的通风排烟口, 排烟所需时间将大大加长, 严重影响隧洞的开挖速度。钻爆法特别适合短隧洞和地质条件复杂的隧洞, 对于长大隧洞, 为增加工作面及通风排烟的要求, 往往不得不布置大量的辅助洞, 如竖井、斜井、施工支洞等, 极端情况下, 辅助洞的工作量会超过正洞的工作量, 这进一步降低了施工速度, 延长了工期, 增加了施工成本。

1.2.2 TBM 法

TBM 的技术名称在我国过去很不统一, 各行业均冠以习惯性名称, 如铁路和交通行业称为隧道掘进机, 煤炭行业称为巷道掘进机, 水电行业又称为隧洞掘进机。1983 年《全断面岩石掘进机名词术语》(GB 4052—1983) 统一称为全断面岩石掘进机 (Full Face Rock Tunnel Boring Machine, TBM), 其定义为: 一种靠边旋转边推进刀盘, 通过盘形滚刀破碎岩石而使隧洞全断面一次成形的机器^[13]。目前常用的盾构机也是一种全断面掘进机, 主要适用土质隧洞, 本书不作论述, 本书所述的 TBM, 指的是用于岩石隧洞施工的全断面掘进机。

TBM 是一种系统化、智能化、工厂化的高效能隧洞开挖施工机械, 可一次成洞, 同时完成开挖掘进、岩渣运输、通风除尘、导向控制、支护衬砌、超前处理、风水电及材料供应等工序, 并实现了自动化控制, 适应于长距离隧洞的施工。其最大特点是广泛使用电子、信息、遥控等高新技术对全部作业进行控制, 使掘进过程始终处于最佳状态。相对于



传统钻爆法具有高效、快速、优质、安全等优点，其掘进速度一般是传统钻爆法的 3~10 倍。同时采用 TBM 技术还有利于环境保护、节省劳动力、提高施工效率，整体上比较经济。因此，TBM 技术已广泛地应用于交通、市政、水利水电、矿山等隧洞工程的掘进开挖。对深埋长隧洞，如采用钻爆法开挖时，必须开挖若干支洞以供主洞施工时出渣、通风等之用，当地形条件、环境条件等不允许开挖支洞时，TBM 法则成为唯一的选择。

TBM 也存在一定的弱点，作为隧洞快速施工的设备有一定适用范围和局限性，如果以下因素存在，则应慎用或不宜采用 TBM 法^[14,15]：①非圆形断面隧洞，除非 TBM 带有特殊可靠的辅助开挖装置，一般不宜采用；②无法筹集到购买 TBM 及后配套设备的高昂资金；③签订 TBM 采购订单到设备运到工地组装调试完毕一般需要一年左右时间，对急于开工的隧洞工程，时间上来不及使用 TBM 的则无法采用；④对于长度在 1km 以下短洞，TBM 及后配套一次投入费用高，对短洞群需要频繁装拆转移工地导致 TBM 施工效率低下、经济性差，应慎用；⑤工程地质与水文地质条件极差，如溶洞多且大、断层多且宽、涌水、洞内泥石流、长距离破碎带等组合岩层，采用 TBM 法施工时地质风险极大时，不宜采用 TBM 法。

1.2.3 两种隧洞掘进开挖方法比较

目前常用的两种隧洞开挖方法钻爆法和 TBM 法各有其优点及缺点，现就一些项目进行比较，比较结果见表 1.1。

表 1.1 钻爆法和 TBM 法隧洞开挖方法比较

比较项目	钻 爆 法	TBM 法
开挖情况	①月平均进尺 150~250m； ②钻孔、装药、爆破、通风排烟、出渣、支护等作业间断进行；大断面隧洞分部开挖，不能一次成洞； ③需要布置出渣、通风支洞，约间隔 2~3km 布置一条支洞	①月平均进尺 400~1000m； ②连续掘进，开挖、出渣、支护等作业同时进行，一次成洞； ③可独头掘进 20km 以上，10km 以内一般不需要布置支洞
围岩质量	①爆破成洞，围岩震裂，扰动大，易渗漏水； ②洞壁粗糙不平，超、欠挖量较大； ③适用于各种隧洞断面	①机械破岩对围岩震动破坏小； ②洞壁完整光滑，超挖量小于开挖隧洞断面面积的 5%； ③开挖洞径尺寸精确、误差小； ④一次施工只适应一种断面，以圆形断面为最佳
安全保障	①爆破具有不确定因素，有一定风险； ②对围岩扰动大，不利于围岩稳定，对人员设备安全造成威胁； ③人员伤亡、设备损坏事故经常发生	①TBM 主机及后配套具有各项安全连锁系统、安全监控及应急措施，保证人员、设备的安全操作运行； ②对隧洞围岩扰动少，容易保持原围岩的稳定性，有利于人员的安全； ③TBM 带有局部或整体护盾，人员在护盾下工作，有利于人员安全； ④带有一系列支护设备，对不良地质段可及时支护以保证安全

续表

比较项目	钻 爆 法	TBM 法
施工环境	①炸药爆破化学反应产生有毒气体及大量岩粉影响施工现场环境及人员健康； ②凿岩机振动与噪声大，对操作人员健康伤害大	①机械破岩，产生有毒气体少，配置灭尘系统，粉尘少； ②振动与噪声相对小，对操作人员健康影响小
人员及技术水平	①所需要作业人员多； ②劳动强度大，以体力劳动为主； ③对人员技术水平要求较低	①所需作业人员较少； ②劳动强度较低，以机械、电子设备操作为主； ③对人员技术水平要求较高
对地质条件适应性	①对不良地质条件适应性强； ②可采用多种方式对围岩进行支护	①对地质条件敏感，对不良地质条件适应性较差； ②若采用管片衬砌，则不易采用其他支护方式
经济性	①掘进慢，工期长，影响效益的发挥； ②超挖量大，围岩震裂，增加了衬砌量和灌浆量并增加了相应费用、延长了工期； ③设备投资相对较低	①掘进快，缩短了工期，大大提高了经济效益与社会效益； ②超挖量小，围岩质量高，减少了衬砌量和灌浆量并节省了相应费用； ③TBM 主机及后配套设备一次性投资高，掘进过程中主机大修费用高，刀具消耗量大

从表 1.1 可以看出，TBM 法施工从掘进速度、围岩质量、安全保障、施工环境等方面均优于钻爆法，在地质条件适应性方面 TBM 法则不如钻爆法灵活，若只考虑纯开挖成本，TBM 法也高于钻爆法。但 TBM 法的主要体现在成洞的综合成本上。由于采用 TBM 施工，使隧洞独头掘进 20km 成为可能，可以改变钻爆法长洞短打、直洞折打等费时费钱的施工方法，代之以聚短为长、裁弯取直从而更省时省钱。TBM 施工洞径尺寸精确，对围岩影响较小，可以不衬砌或减小衬砌从而降低衬砌成本；TBM 的作业面少、作业人员少，人力的费用少。

文献 [16] 研究了成洞洞径 4m、埋深 100~500m、坡度 1/800、Ⅱ类以上围岩占 40%、Ⅲ类围岩占 30%、Ⅳ类围岩占 20%、Ⅴ类围岩占 10% 的圆形水工无压隧洞，其在长度分别为 3km、5km 及 10km 三种情况下钻爆法、开敞式 TBM、双护盾 TBM 的经济对比，结果表明：当洞长为 10km，钻爆法每延米造价为 2.88 万元，开敞式 TBM 每延米造价为 2.31 万元，双护盾式 TBM 每延米造价为 2.83 万元，钻爆法较洞长 3km 上升幅度约为 65%，而开敞式 TBM 的每延米造价开始下降，较洞长为 5km 时降低 6%，双护盾式 TBM 的每延米造价也有所下降，较洞长为 3km 时降低 12%。开敞式 TBM 施工造价最低，工期较双护盾式 TBM 长 3 个月，较钻爆法工期短 16 个月，双护盾式 TBM 施工的总造价和钻爆法持平，工期较钻爆法缩短 19 个月。不考虑工期效益，洞长为 5km 以下的隧洞采用钻爆法经济性较好；洞长为 5~9km，钻爆法造价增加明显，TBM 开始逐渐体现出优势，且采用开敞式 TBM 经济性



较好；洞长为 9km 以上，钻爆法造价增加更明显，TBM 施工优势明显，采用 TBM 经济性较钻爆法好，开敞式 TBM 经济性较双护盾式 TBM 好，双护盾式 TBM 较钻爆法经济性好。

结合文献 [17] ~ [21] 的研究，若查明隧洞的工程地质条件及水文地质条件，选择合适的 TBM 类型并有针对性的制订施工对策，则可以把不良地质条件的影响降到最低。TBM 掘进速度快，提早完工，可获得巨大的经济效益和社会效益。这些理由，可促使 TBM 施工的综合成本可降低到与钻爆法相竞争。

1.2.4 TBM 与钻爆法相结合的施工技术

从上一节的分析可以看出，钻爆法具有技术相对成熟、易于根据地质条件变化调整施工方案等优点，缺点是掘进速度慢、对围岩扰动大；TBM 法具有施工速度快、自动化程度高、对围岩扰动小、工作环境好等优点，缺点是对地质条件适应性差。如果能将钻爆法和 TBM 结合起来，充分发挥二者的优势，可取得较好的效果，因此国内、外发展了 TBM 法与钻爆法相结合的施工技术。

TBM 与钻爆法相结合的施工技术主要有两种：一种是利用小直径 TBM 开挖导洞，然后用钻爆法扩挖至设计断面；另一种是 TBM 和钻爆法均为全面断面开挖，地质条件好的洞段由 TBM 开挖，地质条件差的由钻爆法开挖。

研究表明，当 TBM 滚刀的线速度大于 3m/s 时，刀间岩石的裂纹来不及扩展贯通，滚刀破岩效率大大降低，滚刀的线速度与 TBM 刀盘转速和刀盘直径成正比。在刀盘直径一定的条件下，为满足此条件，只有降低刀盘转速，对于大直径隧洞来说，只有在低转速下运行才能保证滚刀的破岩效率，而 TBM 掘进速度与刀盘转速成正比，低转速会导致 TBM 掘进速度降低，因此大直径隧洞采用 TBM 施工效率并不高。由此产生了先用小直径 TBM 开挖导洞，然后用钻爆法扩挖至设计断面的施工方法，这种方法的优点在于：既利用了小直径 TBM 的成熟技术，又避免了使用大直径全断面 TBM 所带来的低效率的风险，可以实现提高掘进速度的目的；扩挖采用钻爆法可以满足任意断面的形状，减少开挖和衬砌的工程量；由于 TBM 开挖的导洞不仅可以为后期钻爆提供临空面，而且可以为控制爆破设计提供地质依据，因此可以显著降低开挖对围岩的扰动；TBM 开挖的导洞可达到探洞的效果，通过导洞查明围岩的地质条件，特别是不良地质条件，降低地质风险，避免地质灾害的发生或减轻地质灾害造成的损失。该方法已经被许多欧洲国家采用，特别是大断面的公路、铁路隧道领域。自 1982 年以来，意大利已经用该方法修建公路、铁路隧道 30 余座，总长度超过 100km。

对于长大隧洞，地质条件复杂，不良地质条件发育的概率大，当全部采用 TBM 施工时，地质风险很大。这就产生了围岩条件较好的洞段用 TBM 施工、条件差的洞段用钻爆法施工的方法，充分发挥二者的优势，以提高施工效率。采用这种方法的典型工程实例是我国辽宁大伙房输水隧洞工程，该隧洞全长 85.3km，地质条件差的穿越区域断层洞段、浅埋过沟洞段等约 25km 由钻爆法施工，其余约 60km 分为三个标段，由 TBM 施工，该隧洞已于 2009 年 4 月实现了全线高精度贯通，工程实践表明，该工程采用 TBM 和钻爆法相结合的施工是成功的。



1.3 TBM 隧洞施工技术发展历史

1.3.1 国外 TBM 发展历史

早在 15 世纪,意大利著名科学家、艺术家、发明家莱昂纳多·达·芬奇就提出了隧洞掘进机(TBM)的概念,但限于当时技术条件的限制,TBM 并没有真正被制造出来。到了 19 世纪以后随着工业革命的到来,机械、电子、电气、液压等技术的迅速发展,TBM 设备制造所需要的技术得以积累,到 20 世纪中叶,实用化的 TBM 终于被研制出来。目前,随着世界范围内的隧洞与地下工程的大规模建设以及人力成本的提高、环境保护的加强、人员健康要求的提高等,TBM 隧洞施工技术及 TBM 设备制造迎来了发展的高峰。

1846 年,在意大利与法国之间的 MONCENIS 隧洞施工中,为加速隧洞施工,Henri-Joseph Maus 开始将一组机械岩钻安装在钻架台车上掘进。1851 年,美国工程师 Charles Wilson 设计了世界上第一台可连续掘进的 TBM。但由于设计存在难以克服的滚刀问题和其他种种困难,使其难以与当时刚诞生的钻爆法技术相竞争。在随后的 30 年中,各国工程师又设计试制了多台 TBM,比较成功的是 1884 年博蒙特设计的 TBM,并在英法海峡水底隧道掘进直径为 2.1m 的导坑,掘进长度近 10km。

1956 年,美国工程师 James Robbins 仿照 100 多年前 Charles Wilson 的设计,只采用滚刀,获得了成功。此后的 30 年间,TBM 掘进技术得到了很大的推广,各制造商共研制了数百台 TBM,掘进总长度超过 5000km,从软岩到中硬岩,均取得了成功。在刀具和其他机械系统方面,也做了许多改进和发展,使 TBM 在硬岩中的掘进速度超过了钻爆法^[22-24]。

国外近年来成功地使用 TBM 掘进机的著名实例有英吉利海峡隧道工程、瑞士费尔艾那铁路隧道、日本东京湾高速公路工程、荷兰生态绿心隧道及南非莱索托高原输水隧洞等,其中英吉利海峡隧道的成功修建在世界隧道建设史上具有里程碑意义,TBM 在英吉利海峡隧道的应用获得了巨大的成功,为近 20 年来 TBM 施工技术的迅猛发展起到了巨大的推动作用。

(1) 英吉利海峡隧道。英吉利海峡隧道^[25,26]全长 49.2km,其中海下部分 37.0km,由三条平行的隧道组成,总长度约为 150km。隧道围岩为蓝色白垩系沉积岩地层,此种岩层密实但强度不高,透水性差,是理想的 TBM 掘进地层,隧道地质状况十分稳定,断层、褶皱等地质构造不发育,地震活动少。英吉利海峡隧道施工中共使用 11 台不同类型的 TBM,分别由罗宾斯、罗宾斯-川崎、三菱、豪登、豪登-马卡姆公司生产,服务隧道掘进机直径为 5.38~5.77m,铁路隧道掘进机直径为 8.36~8.72m。其中一台豪登-马卡姆掘进机在 T9 海底南运行隧道于 1991 年 1 月创造了 1487m 的最高月进尺记录。英吉利海峡隧道于 1986 年开工,1994 年 5 月 7 日正式通车,历时 8 年多,是人类在工程技术领域中一项杰出的创举,在世界隧道建设史上具有里程碑意义。世界范围内 TBM 的大规模应用正是从英吉利海峡隧道的成功建设后开始的。