



重点图书出版规划项目
及地下工程系列丛书
(2014CB046906) 资助

TBM

设计与施工



陈 馈 孙振川 李 涛 编著
谭顺辉 刘泉声 杜立杰 主审

中铁工程装备集团与中铁隧道局集团
联合研制的国内最大直径
新型TBM
(入选十大国之重器)



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

隧道及地下工程

“十三五”国家重点图书出版规划项目
面向挑战的隧道及地下工程系列丛书
国家973计划项目 (2014CB046906) 资助

TBM

设计与施工



陈 馈 孙振川 李 涛 编著
谭顺辉 刘泉声 杜立杰 主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书基于作者团队相关研究成果及多年工程实践经验,着力阐明岩石隧道掘进机(TBM)设计与施工中的关键技术。主要内容包括:TBM的概念与分类、TBM的起源与发展、TBM工法的特点;TBM的构造与工作原理;TBM的适应性设计与创新发展;TBM破岩机理、刀盘结构与刀具设计;TBM的施工组织设计、TBM运输与组装、始发、掘进、空推、维修与拆机技术;TBM在软岩地层、超硬岩地层、断层破碎带地层、突水涌泥地层、高地应力地层、岩溶地层等特殊地层的施工技术;滚刀失效形式、滚刀磨损的影响因素及刀具的管理;TBM施工风险管控;通过重大工程实例,介绍TBM设计与施工的典型案例。本书图文并茂,内容丰富,融入了我国TBM隧道施工的技术创新成果,从TBM设计、工程应用维修与保养等方面系统梳理了TBM隧道设计与施工的技术体系,对于推动相关技术发展与行业进步具有重要价值。

本书内容具有系统性、实用性、创新性等特点,适用于TBM技术领域的设计与制造人员、项目经理、施工员、土木工程师、机械工程师、监理工程师、工程编标人员、机械操作人员、维修保养人员使用和参考,同时也适用于高等院校、职业技术学校等相关专业的教师、学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

TBM设计与施工 / 陈馈,孙振川,李涛编著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.7
ISBN 978-7-114-14769-2

I. ①T… II. ①陈…②孙…③李… III. ①隧道施工—盾构法—教材 IV. ①U455.43

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第121794号

书 名:TBM设计与施工

著 者:陈 馈 孙振川 李 涛

责任编辑:王 霞 李 娜

责任校对:张 贺

责任印制:张 凯

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:中国电影出版社印刷厂

开 本:880×1230 1/16

印 张:28.25

插 页:2

字 数:832千

版 次:2018年7月 第1版

印 次:2018年7月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14769-2

定 价:148.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

《TBM 设计与施工》编委会

主 编: 陈 馈 孙振川 李 涛
副 主 编: 贺 飞 杨延栋 王江卡 季玉国 廖小春
顾 问: 刘 辉 杨华勇 李建斌
主 审: 谭顺辉 刘泉声 杜立杰
编 委: (排名不分先后)

洪开荣	陈 馈	孙振川	李凤远	季玉国
杜立杰	周建军	李 涛	贺 飞	张 兵
杨延栋	王江卡	廖小春	焦胜军	张彦伟
叶康慨	胡新朋	张晓日	于小四	宋克志
毛红梅	李阁强	郭卫社	常 翔	冯欢欢
詹金武	周 毅	游金虎	贺东泽	阳 斌
赵海雷	王 凯	郑清君	郭 璐	黄明海

责任编辑: 杨延栋

主编单位: 盾构及掘进技术国家重点实验室

中铁工程装备集团有限公司

北京交通大学

石家庄铁道大学

河南科技大学

鲁东大学土木工程学院

中铁隧道股份有限公司

力信测量(上海)有限公司

陕西铁路工程职业技术学院

第一作者简介



陈馈 1963年11月出生,男,工程博士,硕士研究生导师,教授级高工,国家一级建造师,享受国务院政府特殊津贴;获河南省五一劳动奖章。国家火炬计划专家库专家、国家重大专项评审专家、国家重点实验室评审及验收专家,航空精密轴承国家重点实验室学术委员会委员,高端工程机械智能制造

国家重点实验室学术委员会委员,全国建筑施工机械与设备标准化技术委员会委员;河南省科技成果鉴定评审专家库专家,河北省科技进步奖评审专家,广东省科技业务管理阳光政务平台科技咨询专家,浙江省自然科学基金评审专家;郑州市第十二批专业技术拔尖人才,洛阳市第八批优秀专家,中国中铁专家,中铁隧道局集团一级专家,盾构及掘进技术国家重点实验室党工委书记、常务副主任。

在学术领域兼任中国盾构再制造创新战略联盟秘书长,中国土木工程学会隧道及地下工程分会隧道掘进机专业委员会副主任委员,机械装备先进制造河南省协同创新中心学术委员会副主任,中国工程机械工业协会掘进机械分会理事,《现代隧道技术》、《隧道建设》编委,《盾构与掘进》主编;石家庄铁道大学、华北水利水电大学、河南科技大学、咸阳管理干部学院等高校兼职教授;主持国家973计划课题3项、863计划课题3项、国家国际合作专项1项,获国家科技进步一等奖1项,河南省科技进步一等奖1项、二等奖3项,中国铁道学会科学技术一等奖1项,中国施工企业管理协会科技进步一等奖5项,中国中铁科技进步特等奖1项,一等奖5项;获国家发明专利16项,在核心学术期刊发表学术论文140余篇;主持编写《盾构法隧道施工与验收规范》国家标准、《铁路隧道全断面岩石掘进机法技术指南》行业标准、《双护盾岩石掘进机》团体标准;著有《盾构施工技术》《盾构施工技术(第二版)》《国内外盾构法隧道施工实例》《盾构构造及操作维护》《盾构机司机培训教程》《中国盾构》等学术专著。

“半亩方塘一鉴开,天光云影共徘徊。问渠那得清如许,为有源头活水来”。很高兴看到《TBM设计与施工》这一著作即将付梓,它犹如一股清泉,涓涓流入TBM设计与施工的桑田。

工欲善其事,必先利其器。全断面隧道岩石掘进机(TBM)是一种集机、电、液、传感、信息技术于一体的现代隧道施工大型专用装备,能实现连续破岩、出渣、支护等作业,具有掘进速度较快、效率较高、安全、环保、自动化、信息化程度高等优点。

市场全球化使得各国装备制造企业面临严峻的国际竞争,各国政府和企业都在积极制订措施,采用先进的设计和制造技术提高产品的竞争力。对我国而言,装备制造业的综合竞争力是推动工业转型升级的引擎,是国家核心制造能力的重要体现。国家《高端装备制造业“十二五”发展规划》明确提出:“大力培育和发展高端装备制造业,是提升我国产业核心竞争力的必然要求,是抢占未来经济和科技发展制高点的战略选择,对于加快转变经济发展方式、实现由制造大国向制造强国转变具有重要战略意义。”

在新的历史机遇面前,我国掘进机行业迎来了巨大的发展空间和机遇。近年来,随着我国交通、引水等基础建设规模的扩大,隧道工程项目越来越多,隧道掘进机(TBM)的应用也越来越广泛。TBM系统设计中与施工中许多关键技术的解决对提高我国企业在世界推进装备制造业中的竞争力具有重大的影响。TBM系统设计既要考虑高承载能力,又要考虑高可靠性,高安全性和长寿命的设计要求,必须根据全程地质情况进行面向地质适应性的非标定制设计。合理的TBM系统对提高刀盘和刀具寿命、TBM掘进效率和安全性,减轻掘进机振动、降低噪声等具有重要的作用。因此,如何在最短时间内深入研究TBM系统设计与施工的关键技术,打破国外技术封锁,提高我国掘进装备制造业的自主研发水平,无疑是一项既有学术价值,又有重要实用意义和广泛应用前景的研究课题。

本书围绕TBM系统设计与施工中的关键问题,力求深入浅出,全面、透彻阐述TBM的构造与工作原理、选型与适应性设计、刀盘刀具设计、施工组织与风险管控等方面的最新技术,并论述了不同时期具有代表性的国内外重大TBM工程案例,是一本理论与实践结合非常好的书。本书在写作上去繁就简,写作思路清晰,语言质朴清新,数据翔实,图表准确,并配有大量图片,技术信息量大。数据均从工程实践中来,可信度高,可操作性强。本书将会对我国TBM设计与施工起到重要的指导作用。

本书的鲜明特色是内容新颖,系统全面,理论密切结合工程实践。其理念、观点和方法都是建立在作者及其团队长期工程实践的基础上,并集中反映了作者理论研究和工程实践的成果。我相信,本书的出版必将对读者大有裨益,对今后 TBM 的设计与施工进步产生重要的推动作用。

中国铁路工程集团有限公司副总裁、总工程师: 

2017 年 11 月

TBM 是一种集机、电、液、传感、信息技术于一体的隧道施工成套装备,在实现连续掘进的同时完成破岩、出渣、支护等作业,实现了工厂化施工,掘进速度较快,效率较高。隧道工程的大发展,促进了 TBM 法施工技术的进步。TBM 法施工的历史,始于 1846 年由比利时工程师毛瑟(Maus)开发的世界首台 TBM,发展于由美国工程师詹姆士·罗宾斯(Robbins) 1953 年研制成功的第一台现代意义的 TBM。

我国第一台 TBM 比国外晚了 120 年。1966—1984 年,是我国 TBM 技术的黎明期,我国 1966 年研制的首台 TBM,直径 $\phi 3.5\text{m}$,用于云南西洱河水电站引水隧道施工;1985—2012 年,是我国 TBM 技术的引进消化期,1985 年,天生桥二级水电站引水隧洞工程引进了美国罗宾斯公司 $\phi 10.8\text{m}$ 开敞式 TBM;从 2013 年开始,我国进入了 TBM 技术的自主创新期,开始设计制造具有完全自主知识产权的 TBM。

我国 TBM 法修建隧道虽然起步较晚,但由于注意吸收和采用先进技术和新工艺、参考和借鉴国外成功的经验和失败的教训,所以发展较快,但与国外相比仍存在较大的差距。与钻爆法相比,虽然 TBM 法具有快速、优质、高效、安全、环保及自动化、信息化程度高的优点,但由于隧道工程地质的极其复杂性,TBM 法施工时,工程事故常有发生,施工效率不太理想,制约了 TBM 技术的发展。TBM 施工的风险,总是利用或寻找“地质的复杂性”“TBM 的不适应性”“人认知的局限性、方案和措施的不合理性”等薄弱环节作为突破口,引发 TBM 工程事故或影响工期。为了尽快反映 TBM 法施工的新技术、新方法,总结 TBM 设计与施工方面的经验,以便充分发挥 TBM 法施工的技术优势,中铁隧道局集团盾构及掘进技术国家重点实验室在承担国家“973”计划项目“深部复合地层围岩与 TBM 的相互作用机理及安全控制”(2014CB046900)第 6 子课题“深部复合地层 TBM 系统适应性设计理论与评价决策系统”(2014CB046906)的基础上,组织国内多位 TBM 技术领域专家编写了《TBM 设计与施工》一书。

本书邀请了中国铁路工程集团有限公司副总裁、总工程师刘辉,中国工程院院士杨华勇,中铁高新工业股份有限公司总经理李建斌等知名专家担任编委会顾问;由盾构及掘进技术国家重点实验室教授级高工陈馈、孙振川与北京交通大学教授李涛等编著;由贺飞、杨延栋、王江卡、季玉国、廖小春等任副主编;由中铁工程装备集团教授级高工谭顺辉、武汉大学教授刘泉声、石家庄铁道大学教授杜立杰主审。该书对于提高 TBM 的自主设计能力和



TBM 施工技术水平具有重要的指导意义。

全书分为 11 章,力求深入浅出,全面、透彻阐述 TBM 的构造与工作原理、适应性设计、施工组织及施工最新技术,重点论述不同时期具有代表性的国内外重大 TBM 工程案例,主要介绍天生桥水电站引水隧道、秦岭 I 线铁路隧道、磨沟岭铁路隧道、西秦岭隧道、中天山隧道、瑞士弗莱娜(Vereina)铁路隧道、圣哥达基线隧道、引松供水工程、大瑞铁路高黎贡山隧道等使用开敞式 TBM 的案例;引大入秦引水隧洞、引黄入晋、引大济湟引水隧洞、引红济石、台湾雪山隧道、南非莱索托高原引水等工程使用双护盾 TBM 的案例;甘肃引洮供水、重庆轨道交通 5 号线等工程使用单护盾 TBM 施工的案例。

在本书编写过程中,石家庄铁道大学、中铁工程装备集团、中铁一局集团城市轨道交通工程有限公司、德国海瑞克公司、中铁隧道股份有限公司等有关专家分别参与了编写及指导,并提供了许多中肯的意见或建议,在此表示衷心的感谢。

尽管我们尽了最大的努力,但因涉及面广,难免挂一漏万,本书仍然会存在许多缺点甚至错误,恳请广大读者批评指正。

2017 年 11 月

第 1 章 绪论	1
1.1 TBM 概念与分类	1
1.2 TBM 的起源与发展	2
1.3 TBM 施工的特点	16
1.4 制约 TBM 施工性能的典型因素	19
思考题	22
第 2 章 TBM 原理及构造	23
2.1 概述	23
2.2 开敞式 TBM	23
2.3 双护盾 TBM	46
2.4 单护盾 TBM	56
2.5 主机关键零部件构造	57
2.6 TBM 后配套构造	71
思考题	84
第 3 章 TBM 选型及适应性设计	85
3.1 概述	85
3.2 TBM 选型	86
3.3 TBM 适应性设计	93
3.4 TBM 掘进适应性评价方法与模型	101
3.5 小结	130
思考题	131
第 4 章 TBM 刀盘刀具设计	132
4.1 TBM 破岩机理	132
4.2 TBM 荷载计算	134
4.3 TBM 滚刀布置	136
4.4 TBM 刀盘结构与刀具设计	140
思考题	148
第 5 章 TBM 工程施工组织	149
5.1 TBM 施工作业系统分析	149
5.2 主要施工工序组织	151
5.3 质量与安全管理	171
思考题	172
第 6 章 TBM 组装与掘进	174
6.1 TBM 的运输	174



6.2 TBM 的组装与调试	175
6.3 TBM 的掘进	184
思考题	190
第 7 章 特殊地层 TBM 施工	191
7.1 软岩地层 TBM 施工	191
7.2 坚硬岩地层 TBM 施工	195
7.3 突水涌泥地层 TBM 施工	199
7.4 断层破碎带地层 TBM 施工	201
7.5 岩溶发育洞段 TBM 施工	206
思考题	209
第 8 章 TBM 施工刀具管理	210
8.1 TBM 滚刀的失效形式	210
8.2 TBM 滚刀磨损的影响因素	212
8.3 TBM 滚刀磨损理论预测模型与室内试验	215
8.4 TBM 刀具管理流程	223
8.5 滚刀现场使用情况分析	231
思考题	236
第 9 章 TBM 维保及拆机	237
9.1 TBM 维保工作标准化作业要点	237
9.2 主机日常保养内容	239
9.3 后配套系统的保养与维修	247
9.4 拆机准备与人员配备	254
9.5 拆卸洞施工	255
9.6 拆机技术档案整理	256
9.7 洞内拆卸	257
9.8 TBM 整修和存放	263
思考题	268
第 10 章 TBM 施工风险管控	269
10.1 TBM 施工风险分类	269
10.2 TBM 施工风险分析	269
10.3 TBM 施工的不良地质与对策	270
10.4 TBM 施工风险应对的创新设计	272
思考题	277
第 11 章 TBM 设计与施工案例	278
11.1 开敞式 TBM 工程案例	278
11.2 双护盾 TBM 工程案例	361
11.3 单护盾 TBM 工程案例	408
思考题	430
参考文献	431

第 1 章

绪 论

本章重点:本章介绍 TBM(全断面岩石隧道掘进机)的概念与分类、TBM 的起源及 TBM 在国内外的的发展与应用情况,对 TBM 的优缺点、TBM 施工组织设计的特点、制约 TBM 施工性能的典型因素等进行重点论述。

1.1 TBM 概念与分类

1.1.1 TBM 的概念

TBM 是隧道掘进机的英文“Tunnel Boring Machine”缩写,在日本和我国,习惯上将用于软土地层的全断面隧道掘进机称为盾构,将用于岩石地层的全断面隧道掘进机称为 TBM。本书所述的 TBM 是指全断面岩石隧道掘进机。

TBM 是一种依靠刀盘旋转破岩推进,隧道支护与出渣同时进行,并使隧道全断面一次成形的大型专用装备。通常定义中的 TBM 是指全断面岩石隧道掘进机,是以岩石地层为掘进对象,它与盾构的主要区别就是不具备泥水压、土压等维护掌子面稳定的功能。而盾构施工主要由稳定开挖面、掘进及排土、管片衬砌及壁后注浆三大要素组成。其中开挖面的稳定方法是盾构工作原理的主要方面,也是盾构区别于 TBM 的主要方面。

现代的 TBM 采用了机械、电气和液压领域的高科技成果,运用计算机控制、闭路电视监视、工厂化作业,是集掘进、支护、出渣、运输于一体的成套设备。采用 TBM 施工,无论是在隧道的一次成型、施工进度、施工安全、施工环境、工程质量等方面,还是在人力资源的配置方面都比传统的钻爆法施工有了质的飞跃。

TBM 具有掘进、出渣、导向、支护四大基本功能,对于复杂地层,还配备超前地质预报设备。掘进功能主要由刀盘旋转带动滚刀在开挖面破岩以及为 TBM 提供动力的驱动系统和推进系统完成;出渣功能一般分为导渣、铲渣、溜渣、运渣四部分;导向功能主要包括确定方向、调整方向、调整偏转;支护功能分为掘进前未开挖的地层预处理、开挖后洞壁的局部支护以及全部洞壁的衬砌或管片拼装;超前地质预报系统一般由超前钻机和自带的物探系统组成。

1.1.2 TBM 的分类

TBM 主要分为以下三种类型,分别适应于不同的地质条件。

(1)开敞式 TBM。常用于硬岩;在开敞式 TBM 上,配置了钢拱架安装器和喷锚等辅助设备,以适应地质的变化;当采取有效支护手段后,也可应用于软岩隧道。

(2)双护盾 TBM。对地质具有广泛的适应性,既能适应软岩,也能适应硬岩或软硬岩交互的地层。

(3)单护盾 TBM。常用于软岩,单护盾 TBM 推进时,要利用管片作为支撑,其作业原理类似于盾



构,与双护盾 TBM 相比,掘进与安装管片两者不能同时进行,施工速度较慢。单护盾 TBM 与盾构的区别有两点:一是单护盾 TBM 采用皮带机出渣,而盾构则采用螺旋输送机出渣或采用泥浆泵以通过管道出渣;二是单护盾 TBM 不具备平衡掌子面的功能,而盾构则采用土舱压力或泥水压力平衡开挖面的水土压力。

随着 TBM 技术的进步以及 TBM 适应复杂地质的需要,除了上述三种类型,目前还有通用紧凑型 TBM、双护盾多功能 TBM 以及双模式 TBM 等类型。

1.2 TBM 的起源与发展

1.2.1 TBM 起源及在国外的发展

世界上第一台 TBM 是 1846 年由比利时工程师毛瑟(Maus)发明的。

19 世纪中叶,西方的文明陶醉于铁路的修建。然而,人类的梦想一次又一次被大山阻隔。理想的方法是勇往直前,开凿隧道,但这意味着巨大的支出。隧道工程的工作面小,大部分时间浪费在工序衔接上,时间就是金钱,而隧道工程却费时费力。最有效的解决方法——建造一台大机器,加大机器动力,把工业革命带入地下。

先驱者是一个叫亨利·约瑟·毛瑟(Maus)的比利时工程师。他在 1845 年得到撒丁国王的许可修建一条连接法国和意大利的铁路。毛瑟在国际采矿业具有显赫名声和超强自信。他对爬越山口的方案不以为然,坚持要走直线,尤其是在著名的 Cenis(塞尼山)山附近,要以隧道穿越 Frejus(弗雷瑞斯)山。

这是一个巨大的挑战。毛瑟的方案需要开凿长 12km 的隧道,这在当时的技术条件下几乎是不可能的。当时隧道开凿的工序为(图 1-1):在掌子面钻孔,装填炸药,点火,跑到角落里躲起来等着起爆,然后迅速带着支撑木跑回新开洞面,希望在洞顶塌方之前把支撑木架好,然后用铁锹把破碎的岩石运出。



图 1-1 最早的钻爆法开挖隧道的工序

问题是,在长隧道密闭空间中起爆会产生大量有毒气体,后续工作进行之前必须通风换气。对于当年的通风技术来说,需要很长的时间才能完成换气。毛瑟当然知道这点,所以他计划设计制造世界上第一台隧道掘进机。

毛瑟的“片山机(mountain-slicer)”于 1846 年在都灵附近的一个军工厂组装成形。庞大而复杂,体积

参观者们满腹狐疑。掘进机需要巨大的推进力,这些能量是在隧道外产生的并通过复杂的机械连接到工作面。隧道越深,连接就越长,而传输过程中的能量损失也就越大。看起来“片山机”(图 1-2)早晚会因为动力不足而僵死洞中。自信的毛瑟相信车到山前必有路,但持怀疑态度的人也并没有被说服。1848 年欧洲的政治动荡多少削弱了弥漫的乐观气氛,毛瑟的资助中断了。

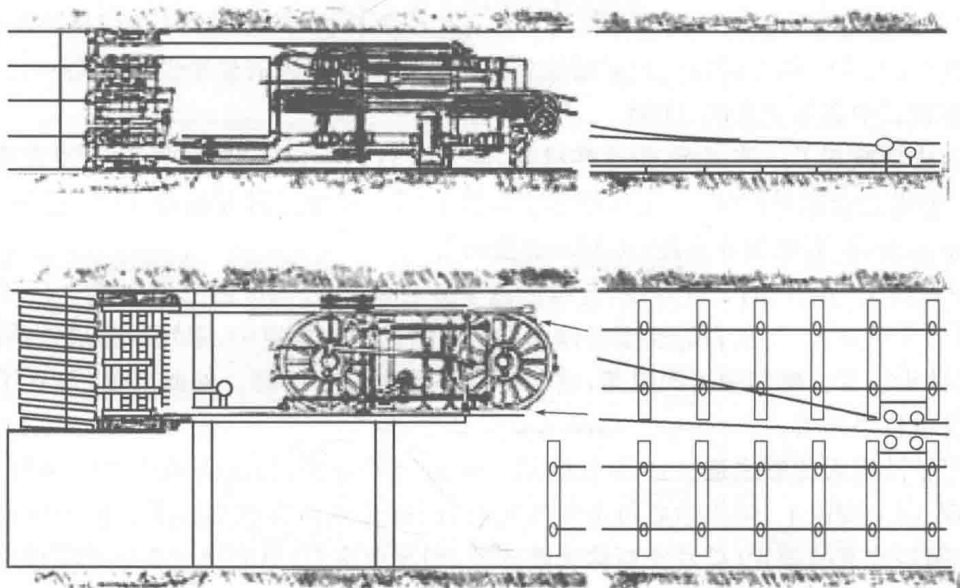


图 1-2 毛瑟的“片山机”

皮尔附近的基岩充满裂缝和断层,地质学家甚至特意将其命名为皮尔页岩。



皮尔页岩的脆弱使得爆破施工极其困难,Mittry 投标时义无反顾,他知道需要大量时间和精力解决皮尔页岩的开挖问题,但那是中标以后的事。现在他中标了,于是开始访问、咨询工程师。

罗宾斯给他出了一个主意。当时采矿业刚刚开始非爆破开挖技术的发展。基本思路是将一批金属齿或者镐,切入采煤工作面,然后旋转,在工作面上形成一个切口。而悬挂于金属尖齿之间的旋转轮则将表面的松散煤层带下。

当然,其使用的隧道环境截然不同。隧道的精度要求远高于煤矿挖掘,而且断面尺寸也大为不同。但 Mittry 独具慧眼,一举选定罗宾斯的方案并委托其制造一台机器。

1953 年机器研制成功,这是世界上第一台现代意义上的软岩 TBM,其直径为 7.85m。与以前不同的是,这台 TBM 的表现令人惊奇。大转盘将岩石像花生壳那样搅碎,隧道以每天 160ft 的速度推进。这是一个惊人的数字,几乎十倍于同时代的钻爆法施工。罗宾斯虽然没有建造世界上第一台 TBM,但他制造了第一台能在软岩中高效工作的 TBM。

皮尔项目的成功掀起了一阵风潮,但这些机器,除了对软岩行之有效之外,对于硬岩均以失败告终。罗宾斯看到了 TBM 发展前景广阔,于是他创办了世界上第一家专门研究制造 TBM 的公司——S. Robbins & Associates 公司[后来的罗宾斯(Robbins)公司]。

1955 年,罗宾斯又为某坝的工程建设,连续制造了 3 台直径 2.44m 的 TBM,这 3 台 TBM 均不能认为是成功的,因为在对页岩、石灰岩的互层岩体及硬石灰岩的岩体掘进中,很快暴露出一些弱点。最难的问题是,碳化钨钻头经常会碰到硬岩而脱落,结果不得不停机进行维修。如此反复,浪费了大量时间,更不用说钻头本身也价格昂贵。

罗宾斯绞尽脑汁思索化解之道。1956 年的某一天他突发奇想,决定去掉所有的钻头。这个想法乍一看似乎不合理,因为理论上,钻头主要负责切入岩石,而碟片则负责收集碎石。但他的直觉是对的,去掉钻头后,那些稍经改造的碟片(被罗宾斯称为破碎轮,即盘形滚刀)更能独立高效地完成作业,并能有效破碎单轴抗压强度 140MPa 的岩石。

同年,罗宾斯制造的直径 3.28m 中硬岩 TBM,成功地通过了工业性试验,盘形滚刀的应用是全断面硬岩 TBM 的重要标志,是硬岩 TBM 发展中的一个重要转折点。这一时期,罗宾斯又为国外某一大坝的输水隧道制造了 1 台直径为 9m 的全断面 TBM。

到了 1960 年,TBM 的发展进入新的阶段,罗宾斯公司为塔斯玛尼亚隧道工程制造 1 台直径 4.89m 的 TBM。在结构设计上第一次把支撑和推进机构组合为一个全浮动的系统,采用了球铰式结构,通过支撑靴板压紧并固定在洞壁上,以此获取推进时 TBM 的反力。这是第一台创纪录(6 天中掘进了 229m)的罗宾斯 TBM。

罗宾斯公司是发展双护盾 TBM 的先驱。截至 2001 年,罗宾斯公司已制造了 383 台开敞式 TBM、35 台双护盾 TBM、15 台单护盾 TBM。2006 年 8 月,罗宾斯公司又制造出了目前世界上最大直径的 14.44m 硬岩 TBM(图 1-3),用于加拿大尼亚加拉隧道工程。

德国维尔特(Wirth)公司于 1967 年开始制造 TBM,其生产的第一台 TBM 的直径为 2.14m,用于奥地利长 263m 的 Ginzling 隧道。1982 年 1 月为南美金矿制造了 1 台直径 3.4m 的 TBM,应用较成功,其自制的滚刀也有较高的承载力。1983 年,维尔特公司开始制造双护盾 TBM;1994 年,为瑞士长 19.062km 的弗莱娜(Vereina)隧道制造了 1 台直径 7.64m 的开敞式 TBM;为我国秦岭隧道制造了 2 台直径 8.8m 的开敞式 TBM。1999 年,为西班牙制造了 1 台直径

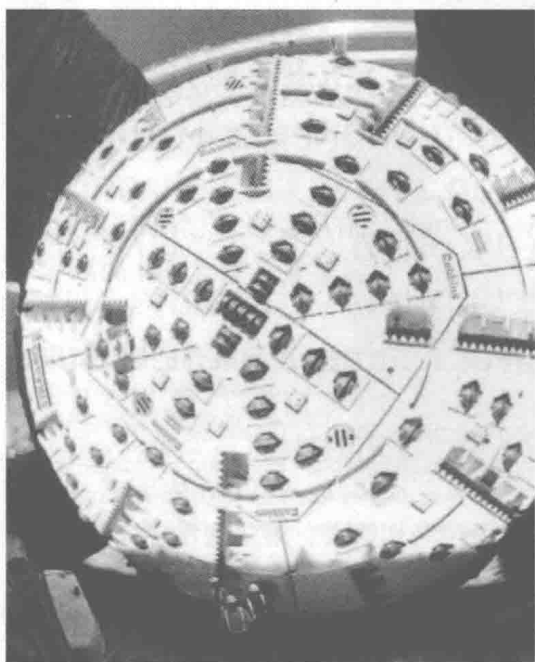


图 1-3 罗宾斯公司直径 14.44m TBM



12.5m的开敞式 TBM。截至 2001 年,维尔特公司已制造了 112 台开敞式 TBM,10 台双护盾 TBM,8 台扩孔式 TBM。

目前,在世界范围内的 TBM 生产商有 30 余家,已生产 TBM 700 多台,最具实力的是美国罗宾斯公司、德国维尔特公司、德国(Herrenknecht)公司等。国外硬岩 TBM 技术已经相当成熟,结构上不断完善,有开敞式、单护盾、双护盾等不同类型,以适应不同的地质条件。在国外使用 TBM 施工隧洞已很普遍,尤其是 3km 以上的长隧洞,建设单位在招标书中明确规定投标商必须采用 TBM 施工。

以下为国外 TBM 应用的典型案例(表 1-1)。

国外主要 TBM 应用案例列表 表 1-1

项目时间 (年)	名 称	用途	TBM 掘进 长度(km)	地 质	TBM 直径 (m)	TBM 类型	国家地点
1990 至今	南非莱索托南水北调工程	输水隧道	200	玄武岩、砂岩、软弱泥岩、黏土岩	4.95	开敞式 TBM	南非
1995—1999	瑞士弗莱娜铁路隧道	铁路隧道	19	沉积岩、岩浆岩、花岗岩	7.64	开敞式 TBM	瑞士
2002—2003	格鲁吉亚卡杜里水电站引水隧洞工程	引水隧道	6.5	砂岩、页岩、石英岩、石英砂岩	3.00	单护盾 TBM	格鲁吉亚
2002—2007	西班牙 Guadarrama 高速铁路隧道工程	铁路隧道	28.4	片麻岩、沉积岩、变质沉积岩	9.45	双护盾 TBM	西班牙
2003—2016	瑞士 Gotthard 铁路隧道工程	铁路隧道	56.3	硬岩、两端角砾破碎岩体	8.83~9.53	开敞式 TBM	瑞士
2005—2010	西班牙 Pajares 铁路隧道	铁路隧道	30.4	硬岩砂岩、板岩	双护盾 10.16 单护盾 9.90	双护盾 TBM 单护盾 TBM	西班牙
2006—2013	加拿大尼亚加拉瀑布水电站工程隧洞工程	引水隧道	10.4	硬岩、玄武岩	14.4	开敞式 TBM	加拿大
2008—2009	瑞士 Choindez 安全隧道	安全逃生隧道	3.2	硬岩、磨砾层灰岩	3.63	开敞式 TBM	瑞士
2008—2016	瑞士 N. D. 德朗斯抽水蓄能电站	引水隧道	5.6	片麻岩、硬砂岩、花岗岩	9.4	开敞式 TBM	瑞士
2009—2011	美国南科布隧道	排污隧道	8.7	硬岩、片麻岩、花岗岩	8.3	开敞式 TBM	美国
2013	奥地利 Bärenwerk 水电站引水隧道	引水隧道	2.8	硬岩、千枚状板岩、石英岩	3.8	开敞式 TBM	奥地利

(1)南非莱索托南水北调工程

南非莱索托南水北调工程(Lesotho Project),包括总长约 200km 的 4 条引水隧洞和 2 条输水隧洞、6 座坝、2 座电站等水工建筑物,采用 TBM 法施工,工程自 20 世纪 80 年代末开始动工,总工期计划为 30 多年。在建的第一期工程 I A 隧洞工程总长 82km,其中从卡泽水库进水口到莫拉水电站地下厂房的引水隧洞总长 45km,开挖直径 4.95m,地质主要由莱索托地层玄武岩组成;输水隧洞南段围岩为克莱伦斯地层块状砂岩,输水隧洞北段地质条件复杂,围岩主要由软弱泥岩、砂岩、黏土岩及粒玄岩岩脉组成。该工程共采用 5 台 TBM 施工。

(2)瑞士弗莱娜铁路隧道工程

瑞士的弗莱娜铁路隧道全长 19km,于 1995 年开工,1997 年 3 月贯通。使用了德国维尔特公司制造的直径 7.64m 的开敞式 TBM,穿越阿尔卑斯山,穿过的岩石主要为花岗岩,同时还有沉积岩和岩浆岩。其因构造运动导致沉积岩和岩浆岩被严重切割,产生大量构造破碎带。这些破碎带地段的隧道埋深达



1200m。用时4年完工,日进尺13.6~22.9m。该隧道TBM施工成功的关键在于,设计阶段充分考虑了TBM施工中可能遇到的地质情况、岩石特征和需要采取的相应措施,并将有关的措施融汇到TBM的选型、主要技术参数的确定和设计中去。

(3) 格鲁吉亚卡杜里水电站引水隧洞工程

卡杜里水电站距格鲁吉亚首都第比利斯198km,是一座引水式水电站,装机容量24MW。引水隧洞全长6491.3m,洞径3.0m。隧洞地区主要为砂岩、页岩、石英岩和石英砂岩。TBM施工时,遇到有破碎软弱岩体、断层、地下水、岩爆等不良地质条件。引水隧洞于2002年9月开始掘进,2003年6月竣工。

(4) 西班牙 Guadarrama 高速铁路隧道工程

西班牙 Guadarrama 高速铁路隧道由两条单线隧道组成,全长28.4km,分别使用2台直径9.45m的德国海瑞克公司制造的双护盾TBM和2台德国维尔特公司制造的双护盾TBM,于2002年开工,平均日进尺16m,最高月进尺1000m。

(5) 瑞士 Gotthard 铁路隧道工程

瑞士圣哥达基线隧道(德语 Gotthard-Basistunnel),又称为哥达基线隧道,是欧洲南北轴线上穿越阿尔卑斯山最重要的通道之一。隧道建设用时17年,共耗资120亿瑞士法郎(约合110亿欧元)。长约35mile(约合56.3km),穿越瑞士阿尔卑斯山脉底部,距地面8000ft(约2438.4m),超过日本的青函隧道(全长约53.9km),是世界上最长与最深的交通隧道(含铁路隧道和公路隧道)。该工程采用4台直径8.83~9.53m变断面开敞式TBM施工。

(6) 西班牙 Pajares 铁路隧道

从马德里经莱昂(Leon)到希洪(Gijon)的铁路线沿西班牙的大西洋海岸线横跨坎塔布连山脉(Cantabrian Mountains),中央山脉皮科斯德欧罗巴(the Picos de Europa)高达2648m。列车必须蜿蜒通过山谷并跨过高山口。新的铁路线上有一个Pajares双洞隧道,长24.5km,投入了1台单护盾TBM和1台双护盾TBM,分别于2005年7月和9月开始启动。单护盾以周进尺达233m从南面向山脉挺进。第一台机器掘进超过15km,于2008年8月实现了隧道贯通。第二台机器从位于Follo-Viadangos的过渡平洞出发,先挖了一条5km的斜长通道,然后是两条3.9km的平行隧道。2007年11月实现了隧道贯通。经过全面翻新和定制之后,单护盾TBM在北部Pajares-Sotiello标段继续着它的掘进任务。在2009年7月~2010年3月期间,又建成了一条长5.9km的新铁路隧道。

(7) 加拿大尼亚拉加大瀑布水电站工程隧洞工程

尼亚加拉隧洞总长10.4km,开挖直径14.44m,衬砌后直径12.5m,最大埋深140m,引水流量500m³/s,走向大致与原SAD2号引水隧洞相同,采用美国罗宾斯公司的开敞式TBM,于2006年开工,是目前世界上直径最大的硬岩TBM项目。

(8) 瑞士 Choindez 安全隧道

鉴于瑞士多山的状况,运用隧道是理所当然的事情。但新的高速公路A16(Transjurane)有点特别,这条公路长84km,有11条隧道,每条隧道至少长1km。项目要求修建一条3.2km长的隧道绕过Choindez峡谷。开挖这条公路隧道之前,一台开敞式TBM挖掘了一条未来用于逃生的安全隧道。同时,从2008年9月~2009年11月,机器机械化掘进穿过各种山体地质和水文特征的地层,从而加快了后续的公路隧道施工。

(9) 瑞士 N. D. 德朗斯抽水蓄能电站

瑞士N. D. 德朗斯(Nant de Drance)抽水蓄能电站设施正在地下进行建设。一台海瑞克开敞式TBM挖掘了5.6km长的入口隧道。完成其他项目之后,这台硬岩TBM为这个施工项目专门进行了改装。比如,为该次掘进过程特别配置的后配套系统,以适应隧道坡度。TBM需要处理达12%的坡度和500m的转弯半径。穿过扰动区域时通过超前钻探系统进行探测。在水压很高的区域,需钻穿的岩石通过灌注混凝土来进行稳定。两个垂直的压力竖井,即压力引水隧洞,将Vieux Emosson水库与阿尔卑斯山里的电站厂房连接起来。