



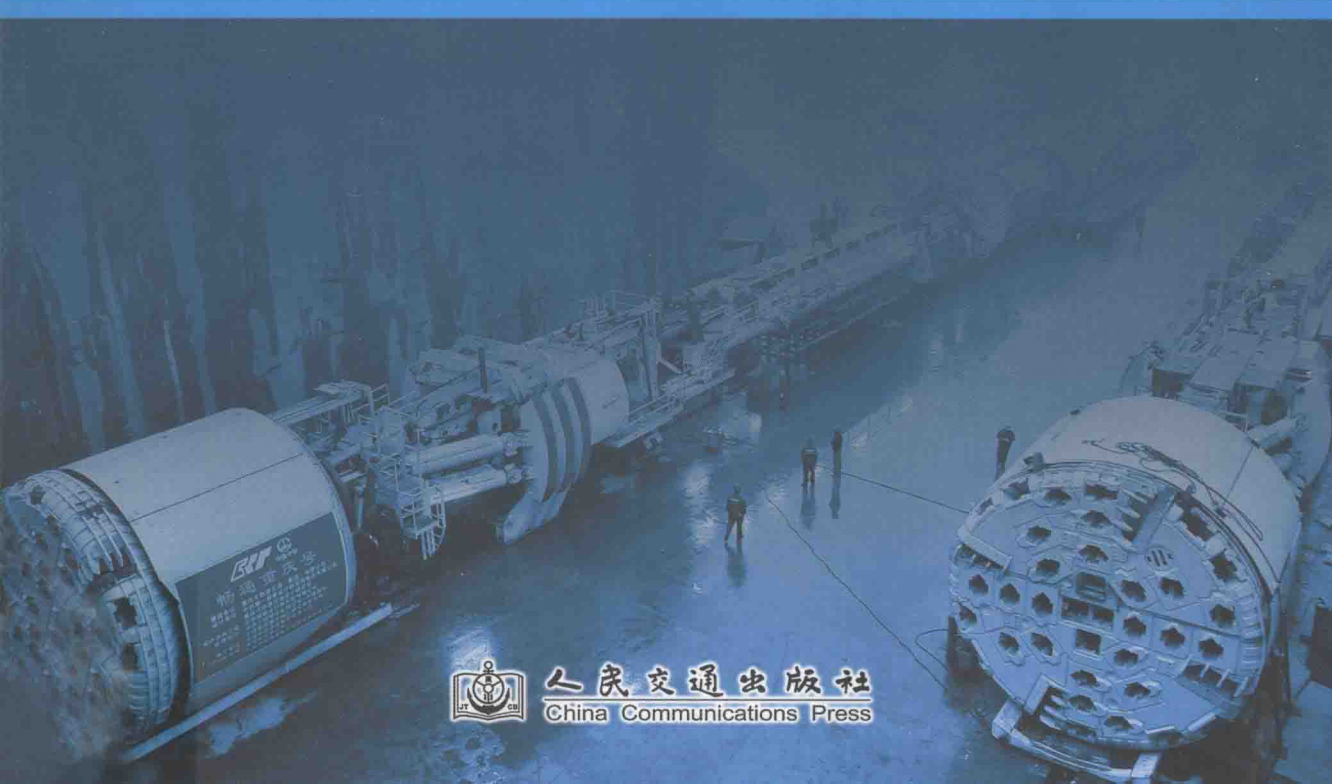
“十二五”国家重点图书出版规划项目  
中国重大隧道及地下工程建设项目技术总结

Chengshi Guidao Jiaotong  
Gongcheng Yingyan Juejinji Jishu

# 城市

# 轨道交通工程 硬岩掘进机（TBM）技术

仲建华 主编



人民交通出版社  
China Communications Press



“十二五”国家重点图书出版规划项目  
中国城市轨道交通工程建设项目技术总结



Chengshi Guidao Jiaotong  
Gongcheng Yingyan Juejinji Jishu

# 城市

# 轨道交通工程

## 硬岩掘进机（TBM）技术

仲建华 主 编



人民交通出版社  
China Communications Press

## 内 容 提 要

本书基于 TBM 技术在重庆轨道交通 6 号线的成功实践应用,全面而系统地介绍了城市轨道交通工程 TBM 技术。全书共分十一章,主要内容包括:绪论,城市轨道交通工程 TBM 设备选型及技术要求,敞开式 TBM 技术,复合式 TBM 技术,TBM 施工隧道防排水技术,TBM 过站技术,TBM 下穿建(构)筑物控制技术,TBM 小净距隧道掘进技术,TBM 施工筹划,TBM 施工控制以及总结与展望。

本书可供从事城市轨道交通、隧道及地下工程的技术人员使用,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通工程硬岩掘进机(TBM)技术/仲建华  
主编.——北京:人民交通出版社,2013.5

ISBN 978-7-114-10526-5

I. ①城… II. ①仲… III. ①城市铁路—铁路工程—  
岩石隧洞—全断面掘进机—工程施工 IV. ①  
U239.5②U455.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 067530 号

书 名:城市轨道交通工程硬岩掘进机(TBM)技术

著 作 者:仲建华

责任编辑:刘彩云 吴燕伶

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京盛通印刷股份有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:17.75

字 数:410 千

版 次:2013 年 5 月 第 1 版

印 次:2013 年 5 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10526-5

定 价:108.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 城市轨道交通工程硬岩掘进机(TBM)技术

主 编:仲建华

副 主 编:安光保 张继奎

顾 问:张 弥 薛备芳 杜彦良 徐明新

编 委:杨国柱 黄双林 刘锦华 吴焕君 赵建兴

刘 赅 洪开荣 韩珠江 叶康慨 周虎利

林 莉 史书荣 陈小平 张志勇 陈 建

胡 剑 苏明辉 王 飞 向 亮

主编单位:

重庆市轨道交通(集团)有限公司

中铁第一勘察设计院集团有限公司

中国中铁隧道集团有限公司

中咨工程建设监理公司

重庆市轨道交通设计研究院有限责任公司

重庆单轨交通工程有限责任公司



# 序

目前,中国城市轨道交通正处在快速发展时期,无论是城市轨道交通规划的城市数量、总体规模,还是已经运营里程、在建里程,中国城市轨道交通的建设规模及建设速度均在世界上首屈一指。目前,全国已批准建设地铁的城市有 25 个以上,每年投入地铁建设的资金在数千亿元以上,地铁建设市场前景广阔。国内地铁隧道建设主要采用钻爆法、浅埋暗挖法、盾构法及明挖法施工,采用 TBM(Tunnel Boring Machine)进行城市地铁隧道施工,在国内尚属首次。

TBM 是目前国际上最先进的隧道施工机械,依靠设备的强大推力和剪切力破碎岩石,使隧道的掘进、出渣、支护、洞内运输、测量导向等工序平行作业,实现一次成洞。TBM 施工对围岩扰动小,开挖面平整圆顺,无超欠挖,安全环保,可有效降低地质灾害的发生,实现连续快速作业。20 世纪 60 年代,TBM 技术引入国内,自 90 年代以来,TBM 技术逐渐广泛应用于铁路、水工及市政隧道的建设,均取得了成功,并成为岩石地层长大隧道施工的首选。采用 TBM 进行城市地铁施工,进一步拓宽了 TBM 的应用领域,成为我国隧道修建技术的一项突破。

重庆是著名的山城,两江交汇,高低起伏,轨道交通穿山越江串联各城市组团,市区内建筑密集,高楼林立,寸土寸金。重庆以岩石地层为主,传统的地铁修建采用钻爆法,其爆破开挖施工不仅振动扰民,而且污染环境、施工受限,已成为制约轨道交通快速建设的瓶颈,亟待新工艺。TBM 技术采用机械开挖,其快速、安全、优质、环保的施工特点,针对性地解决了钻爆法的诸多弊端,是一种适合于重庆地质及轨道交通特点的新工法。本书以重庆轨道交通 6 号线为依托,对 TBM 技术应用于城市轨道交通工程所遇到的设备选型、下穿建筑物、小间距掘进、TBM 过站、施工组织及施工控制等技术问题进行研究总结,并将研究成果与现场实践相互验证,是一本专业性、技术性、实用性较强的著作。本书紧密联系实际,图文并茂,系统真实地反映了 TBM 技术在重庆城市轨道交通工程中的应用情况,开创了国内城市轨道交通修建技术的先河,极大丰富和提高了我国城市轨道交通工程的设计和修建水

平。相信本书的出版,将使广大读者受益匪浅,并可供从事城市轨道交通建设的同行们学习参考。

本书主编带领的作者团队全部亲身经历过项目,大都长期从事城市轨道交通及隧道工程的方案设计研究、施工技术和施工管理工作,具有扎实的理论功底和丰富的现场经验,他们以辛勤的汗水、认真的钻研,和相关单位及人员紧密协作,经过多年的研究实践,将 TBM 在城市轨道交通中的应用技术系统总结,编著成书,对我国城市轨道交通建设及隧道地下工程事业的发展具有推动作用。

我愿意将本书推荐给大家,特别是从事城市轨道交通、隧道地下工程的技术人员以及高等院校的广大师生,相信本书将为你提供宝贵的参考资料及类似的工程经验,阅读后将大有收获。同时,还要感谢并祝贺本书的编者们,祝你们不断进步!

中国工程院院士

龙仲行

2013 年 1 月



# 前 言

随着我国城市现代化建设进程的不断加快,城市轨道交通已成为解决城市交通拥堵和控制环境污染最有效的交通方式,其具有节能、环保、快捷、高效的特点,在国内各大城市得到了飞速发展。目前,中国已成为世界上城市轨道交通发展最迅速的国家。截至 2011 年年底,中国内地已有 14 座城市拥有 56 条运营线路,总运营里程达 1714 公里;在建线路数量达 70 条,总在建里程接近 2000 公里。运营、建设及规划发展城市轨道交通的城市总数已达到 53 座,总规划线路超过 400 条,总规划里程超过 13000 公里。

城市轨道交通地下线常用的施工方法有明挖法、盖挖法、暗挖法等,采取的施工工艺主要包括钻爆法、盾构法、掘进机法、浅埋暗挖法、顶管法、新奥法等。在岩石地层,城市轨道交通地下线通常采用钻爆法施工,钻爆法具有地层适应性好、断面布置灵活、设备简单、经济性好等优势,一直是施工中最成熟、最常用的工法。但随着城市轨道交通建设规模的加大,钻爆法自身的局限性和诸多无法克服的缺点,如施工噪声、振动对城市环境和居民生活的干扰,施工爆破对城市既有建筑物的影响,施工出渣对城市环境及交通的影响等问题日益严重,成为制约城市轨道交通建设发展的瓶颈。TBM(Tunnel Boring Machine)是一种采用非爆破开挖方式的全断面隧道掘进机,集机电、液压、传感、信息技术于一体,同时完成破岩、出渣、支护等作业,具有快速、优质、高效、安全、环保、自动化、信息化等诸多优点,可以满足城市地区高速、高效、安全、文明施工的要求。从构建和谐社会、推进文明施工、加快科技创新与技术进步等层面的需求出发,TBM 的应用逐渐受到人们的青睐,应用范围也越来越广阔。

自 20 世纪 50 年代第一台现代意义上的硬岩 TBM 成功开发应用以来,国外 TBM 技术已经相当成熟。TBM 在我国实质性应用始于 20 世纪 80 年代,主要用于水利水电工程及铁路隧道工程,已积累了丰富的应用经验。我国城市轨道交通工程 TBM 技术应用的时间不长,目前仅在重庆轨道交通建设中应用。由于其对围岩扰动小,无爆破振动,一次性施工距离长,施工速度快,施工质量高,在城市施工环境中体现出了独特的优势。TBM 在重庆轨道交通 6 号线的成功应用实现了我国城市轨道交通工程岩石地层修建技术的重大突破,为同类地质条件的

城市轨道交通修建模式提供了宝贵经验和成功范例。本书在广泛总结国内外 TBM 工程应用经验的基础上,基于 TBM 在国内城市轨道交通工程中的首次应用实践,全面而系统地对城市轨道交通工程 TBM 技术进行了深入分析、研究和总结。

本书内容共分十一章:第一章对 TBM 结构组成、国外 TBM 发展历史和现状进行介绍,对国内外典型 TBM 施工隧道进行简要的介绍,同时针对城市轨道交通工程运用 TBM 的优势、意义及前景进行了详细的论述;第二章探讨了城市轨道交通工程 TBM 设备选型及技术要求,详细介绍了 TBM 的分类、TBM 设备选型原则、TBM 选型应考虑的因素、设备选型适应性分析及选型步骤;第三章对敞开式 TBM 在城市轨道交通中的应用进行分析研究,详细介绍了敞开式 TBM 在城市轨道交通应用中的结构设计方法、敞开式 TBM 掘进工作参数、敞开式 TBM 后配套及运输方式的选择以及敞开式 TBM 的始发和接收设置等;第四章介绍城市地铁复合式 TBM 技术,详细研究了复合式 TBM 在城市地铁应用中的结构设计内容及设计方法、复合式 TBM 掘进机主要工作参数、复合式 TBM 后配套及运输方式的选择方法、复合式 TBM 始发及到达设计等;第五章介绍 TBM 隧道防排水技术,针对敞开式 TBM 及复合式 TBM 施工的隧道,分别论述相应的防排水措施;第六章论述城市轨道交通工程 TBM 过站技术,针对不同的过站形式提出了与车站施工相协调的 TBM 过站方案,辅以动态调整的过站预案,形成了成套的 TBM 过站技术,填补了国内 TBM 过站技术的空白;第七章论述城市轨道交通工程 TBM 下穿建(构)筑物控制技术,并提出控制范围、控制标准及工程措施,结合工程实例,分析控制技术的可行性;第八章探讨了 TBM 小净距掘进技术,分别就水平及竖向小近距工况提出了 TBM 能够安全施工的最小净距值,以及具体的施工技术、隧道支护措施;第九章论述城市轨道交通 TBM 施工组织设计,首先概括施工组织设计分类、设计原则及主要内容,进而结合工程实例对 TBM 工程筹划、段落选择、进度、运输方式、出发场地选择、出渣进料转场选择、拆卸形式及场地选择等内容进行了详细的介绍;第十章详细介绍城市轨道交通工程 TBM 施工控制,内容包括测量及导向、掘进技术、TBM 步进施工、监控量测、拆机方法、通风及临时工程配置、设备管理等。

重庆轨道交通 6 号线在规划、TBM 论证、设计及实施过程中,邀请国内多家高校、设计单位、科研单位、施工单位先后展开了一系列针对本工程特点(轨道交通、城市环境、地质特性等)所设立的专题论证及研究,并取得了丰硕的研究成果。本书充分吸收了这些研究成果,参考了相关设计、施工和管理技术,融入了工程实施过程中存在和遇到的一些重点、难点问题及处理措施,同时借鉴了国内 TBM 施工的水利水电及铁路隧道工程经验,经反复酝酿,分析提炼,多次增删修改而成,第一次全面系统地论述了 TBM 在城市轨道交通工程中的应用技术。全书内容丰富,立足理论,注重实践,希望能为土木工程专业的学生及从事相关工程的技术人员提供一本实用的参考资料,也希望读者通过本书能对 TBM 技术有所认识和提高,进而有利于



TBM 技术在城市轨道交通工程中的推广应用。如此,笔者将深感欣慰。

在本书的编写过程中,参加重庆轨道交通 6 号线工程建设的有关专家、学者,以及设计单位、监理单位、施工单位的管理人员、技术人员毫无保留地为本书的编写提供了丰富的基础资料,并提出了很好的建议,在此对他们给予的支持和帮助表示衷心感谢!

国内著名的地下工程和城市轨道交通专家、中国工程院院士施仲衡先生为本书提出了宝贵意见,并为本书作序,在此表示衷心感谢!

受水平所限,本书虽经反复修改,数易其稿,仍难免存在疏漏甚或失误之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2013 年 1 月



# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 综述.....	1
第二节 国内外发展动态.....	5
第三节 城市轨道交通工程 TBM 技术应用 .....	21
<b>第二章 城市轨道交通工程 TBM 设备选型及技术要求</b> .....	26
第一节 全断面隧道掘进机概述 .....	26
第二节 城市轨道交通 TBM 设备选型 .....	34
第三节 城市轨道交通 TBM 设备选型实例 .....	39
<b>第三章 城市轨道交通工程敞开式 TBM 技术</b> .....	50
第一节 敞开式 TBM 工程设计方法 .....	50
第二节 敞开式 TBM 掘进工作参数 .....	68
第三节 敞开式 TBM 后配套及运输系统 .....	76
第四节 敞开式 TBM 的始发和接收 .....	85
<b>第四章 城市轨道交通工程复合式 TBM 技术</b> .....	88
第一节 复合式 TBM 结构设计 .....	88
第二节 复合式 TBM 结构计算方法 .....	95
第三节 复合式 TBM 掘进机主工作参数匹配理论与技术 .....	102
第四节 复合式 TBM 后配套及运输方式 .....	109
第五节 复合式 TBM 的始发和到达 .....	114
<b>第五章 城市轨道交通工程 TBM 施工隧道防排水技术</b> .....	120
第一节 TBM 施工隧道防排水原则及标准 .....	120
第二节 敞开式 TBM 施工隧道防排水技术 .....	121
第三节 复合式 TBM 施工隧道防水技术 .....	127

<b>第六章 城市轨道交通工程 TBM 过站技术</b> .....	135
第一节 概述 .....	135
第二节 TBM 过站方式 .....	136
第三节 TBM 车站 .....	145
第四节 敞开式 TBM 过站案例 .....	149
第五节 复合式 TBM 过站案例 .....	156
<b>第七章 城市轨道交通工程 TBM 下穿建(构)筑物控制技术</b> .....	161
第一节 TBM 下穿建(构)筑物的影响及工程措施 .....	161
第二节 隧道沿线新建建筑物的控制 .....	167
第三节 TBM 下穿建(构)筑物案例分析 .....	168
<b>第八章 城市轨道交通工程 TBM 小净距隧道掘进技术</b> .....	182
第一节 TBM 小净距隧道掘进技术 .....	182
第二节 TBM 水平小净距掘进案例 .....	185
第三节 TBM 上下立体小净距掘进案例 .....	191
<b>第九章 城市轨道交通工程 TBM 施工筹划</b> .....	196
第一节 施工筹划研究重点及原则 .....	196
第二节 敞开式 TBM 施工筹划主要内容 .....	199
第三节 复合式 TBM 施工筹划主要内容 .....	205
第四节 重庆轨道交通 TBM 施工筹划实例 .....	206
<b>第十章 城市轨道交通工程 TBM 施工控制</b> .....	222
第一节 TBM 步进施工 .....	222
第二节 TBM 掘进施工 .....	224
第三节 TBM 的测量及导向 .....	234
第四节 施工监控量测 .....	241
第五节 TBM 拆机技术 .....	247
第六节 TBM 配套临时工程及资源配置 .....	250
第七节 TBM 设备管理系统 .....	258
<b>第十一章 总结与展望</b> .....	267
第一节 总结 .....	267
第二节 展望 .....	269
<b>参考文献</b> .....	271

# 第一章

# 绪论

## 第一节 综述

### 一、TBM概况

TBM(Tunnel Boring Machine)是一种采用非爆破开挖方式的隧道掘进机,包括全断面岩石掘进机和盾构(软土掘进机),但习惯上通常所说的掘进机是专指全断面硬岩掘进机,可分为敞开式、护盾式、复合式三种主要形式。全断面掘进机采用机械式破岩,集开挖、出渣、支护、通风除尘、铺设轨线以及风、水、电延伸于一体,具有快速、优质、安全、环保等特点。

硬岩掘进机使用盘形滚刀,将刀圈的刀刃挤压楔入岩体进行破岩,其破岩形式属于楔入式碾压破碎。刀尖压入岩体,当压力大于岩石的抗压强度时,与刀尖接触部位的岩石被压碎,在刀尖前形成一压碎区,如图 1-1 所示。压碎区向外形成的压力,使压碎区的周边产生裂纹,裂纹随压力增加而扩展,直到渣片形成而剥离,完成一个成渣过程,并随刀盘的转动和刀具在岩面上继续向前滚压又开始下一渣片的形成。刀盘上的盘形滚刀在破岩掘进面上形成同心圆的滚动轨迹,轨迹之间是鱼鳞状凹坑。刀尖前的岩石被压碎,碾成细小的岩粉,而刀尖两侧的岩体被剥成一块块的渣片。岩渣是一片片形成的,有时在刀圈的内侧形成,有时是在外侧形成。刀圈碾压生成的岩渣块形状呈中间厚、周边薄的长片形,近似鱼背的形状,渣块的大小与刀间距和切深有关。

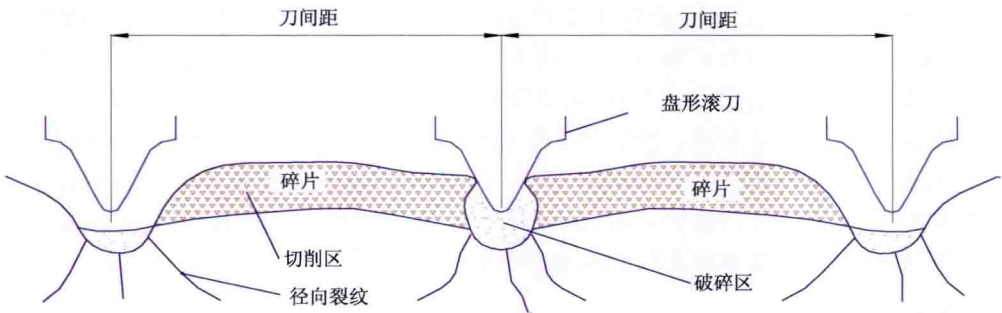


图 1-1 刀具破岩原理示意图

TBM 结构组成包括主机和后配套两大部分,是由几十个独立的子系统有机地连接成的一个完整的大系统,综合了钢结构、机械传动、起重、运输、液压、润滑、气动、水流、通风防尘、减振降温、控制噪声、电气、程序控制、监控、遥控、超前支护、喷射混凝土机械手、激光导向等多学科的技术。主机由刀盘、护盾、主轴承、支撑系统、推进系统、刀盘驱动系统等组成。后配套设备一般包括:

(1)主机的配套设备,如液压泵站、润滑系统、给排水系统、变压器与配电柜、应急发电机等。

(2)主机辅助设备,如通风除尘系统、降温设备、初期支护系统(锚杆、喷射混凝土、挂网、钢拱架等)、仰拱块铺设或者管片拼装设备等。

(3)出渣、施工材料运输、隧道通风系统等。

后配套、洞内辅助设施与主机协调匹配工作,方能顺利完成掘进施工各个工序,任何一个环节的脱节,都将影响施工全局。

## 二、TBM 基本功能

全断面岩石掘进机的结构一般由以下部分组成:切削头工作机构,切削头驱动机构,推进及支撑(护)装置,排渣装置,液压系统,除尘装置,电气和操纵等。在掘进施工时,具有掘进、出渣、导向、支护、排水五个基本功能。

### (一)掘进功能

掘进功能包括破碎掌子面岩石的功能和不断推进掘进机前进的功能。掘进机理是通过安装在刀盘上的不同作用的盘形滚刀或球齿滚刀,靠刀盘的旋转和滚刀的自转,在掘进中形成钻压,使岩石受挤压而破碎。为此,掘进机必须配置合适的破岩刀具并给予足够的破岩力,即推力和转动刀盘变换刀具破岩位置的回转力矩,还必须配置合适的支撑机构将破岩用的推力和刀盘回转力矩传递给洞壁,同时推进和支撑机构还应具有步进作用以实现掘进机前进的功能。

刀具、刀盘、刀盘驱动机构、推进机构、支撑机构是实现掘进功能的基本机构。掘进推力大于岩石破碎所需的力、刀盘回转力矩大于在推力下全部刀具的回转阻力矩、支撑力产生的比压小于被支撑物的许用比压、整机接地比压小于洞底许用比压是实现掘进功能的基本力学条件。

### (二)出渣功能

出渣功能细分为导渣、铲渣、溜渣、运渣。

掌子面上被破碎的岩石受重力作用顺掌子面会下落到洞底,在刀盘上设置耐磨的导渣条,既可增加刀盘的耐磨性,又可将岩渣导向铲斗,这就是导渣。刀盘四周设置有足够数量的铲斗,铲斗口缘配置铲齿或耐磨铲板,将每转落入洞底的岩渣铲入铲斗,这就是铲渣。随着刀盘的回转,铲斗将岩渣运至掘进机的上方,超过岩渣堆积的安息角时,岩渣靠自重下落,通过溜渣槽溜入运渣胶带机,这就是溜渣。最后胶带输送机将岩渣向机后运出。掘进机具有破、导、铲、溜、运一气呵成连续进行的特点。导渣条、铲斗、溜渣槽、胶带输送机是出渣的基本装置。

足够容积量的铲斗,合适的铲斗进、出口,合理的溜渣槽和刀盘转速,足够输送能力的胶带输送机,是实现顺利出渣基本的几何和运动学条件。

### (三)导向功能

导向功能又可细分为方向的确定、方向的调整、偏转的调整。

采用先进的激光导向装置来确定掘进机的位置。当掘进机偏离预期的洞线时,采用液压调向油缸来调整水平方向和垂直方向的偏差。当掘进机受刀盘回转的反力矩作用而整体发生偏转时,采用液压纠偏油缸来纠正。

激光导向、调向油缸、纠偏油缸是导向与调向的基本装置。

#### (四) 支护功能

支护功能可分为掘进前未开挖地质的预处理、开挖后洞壁的局部支护和全部洞壁的衬砌。对已预报的掘进机前方未开挖段不良地质的预处理,主要采用混凝土灌浆、化学灌浆和冰冻固结。对开挖后局部不良地质的处理,主要采用喷混凝土、锚杆、挂网和设置钢拱架。对开挖后的洞壁接触空气不久全线水解、风化的隧道采用全洞混凝土预制块衬砌、密封、灌浆的方法防护。

采用不同的支护方法应相应配置不同的设备,如锚杆钻机、钢拱架安装机、混凝土管片安装机、喷混凝土机、混凝土灌浆机、化学注浆泵、冰冻机等。

上述掘进、出渣、导向、支护四个基本功能中,掘进、出渣、导向这三个功能贯穿在掘进机掘进全过程中,支护功能只是在必要时才使用。

### 三、TBM 施工特点

全断面岩石隧道掘进机作为一种隧道快速施工的先进设备,其在隧道施工中的主要优点是快速、优质、安全、经济、环保。

#### (一) 快速

掘进速度快是掘进机施工的核心优点,其开挖速度一般是钻爆法的3~5倍。目前全断面岩石掘进机设计的最高掘进速度已达6m/h。实际月进尺还取决于两个因素:一是岩石破碎程度决定的实际发生的每小时进尺;二是反映管理水平的掘进机作业率。根据不同的岩质和管理水平,我们可以预测掘进机月进尺,见表1-1。

掘进机设计月进尺

表 1-1

岩石种类	每小时实际进尺 (m/h)	各种作业率下的月进尺(m/月)				
		30%	40%	50%	60%	70%
韧性片麻岩	1	216	288	360	432	504
片麻岩	1.5	324	432	540	648	756
花岗岩	2	432	576	720	864	1008
石灰岩砂岩	3	648	864	1080	1296	1512
粉砂岩	5	1080	1440	1800	2160	2520
页岩	6	1296	1728	2160	2592	3024

掘进机结构确定情况下,较高的管理水平可使作业率达到50%。在花岗片麻岩中,月进尺可达500~600m/月;在石灰岩、砂岩中,月进尺可达1000m/月;在粉砂岩中,月进尺可达1500~1800m/月。这样的速度已在秦岭隧道、磨沟岭隧道、桃花铺1号隧道、引大入秦隧洞、引黄入晋隧洞中实现,是钻爆法无法达到的。但这样的速度还不是最高的,只要进一步提高管

理水平,还有可能创造更高的月进尺。

## (二) 优质

掘进机开挖的隧道由于是刀具挤压和切割洞壁岩石,所以洞壁光滑美观。掘进机开挖隧道的洞壁糙率一般为 0.019,比钻爆法的光面爆破的糙率还小 17%。掘进机开挖的洞径尺寸精确、误差小,可以控制在 $\pm 2\text{cm}$ 范围内;开挖隧道的洞线与预期洞线误差也很小,可以控制在 $\pm 5\text{cm}$ 范围内。

## (三) 安全

掘进机开挖隧道对洞壁外围岩扰动少,影响范围一般小于 50cm,容易保持原围岩的稳定性,得到安全的边界环境。掘进机自身有局部或整体护盾,使人员能在护盾遮护下工作,有利于保护人员安全。掘进机配置有一系列支护设备,在不良地质处可及时支护。掘进机是机械破岩,没有钻爆法的炸药等化学物质的爆炸和污染。掘进机采用电视监控和通信系统沟通信息,自动化、信息化程度高,作业人员少,便于安全管理。

## (四) 经济

目前我国使用的掘进机,若只单纯核算开挖成本是会高于钻爆法的,其经济性主要表现在成洞的综合成本上。掘进机施工,使单头掘进 20km 隧道成为可能,可以改变钻爆法长洞短打、直洞折打的费时费钱的施工方法,代之以聚短为长、截弯取直的思想,从而省时省钱。掘进机施工洞径尺寸精确,对洞壁影响小,可以不设衬砌或减少衬砌,从而降低衬砌成本。掘进机的作业面少、作业人员少,人工成本低。掘进机的掘进速度快,可提早成洞,缩短工期;超挖量小,节省了大量回填费用。这些因素促使掘进机施工的综合成本降低到可与钻爆法竞争。随着人工费用的不断增长,掘进机施工手段越来越具备竞争优势。发达国家更是以法规条文将其作为隧道施工的必备手段。掘进机开挖隧道的经济性在长隧道,尤其是长度超过 3km 时更能得到体现。

## (五) 环保

掘进机施工不用炸药爆破(特殊情况除外),施工现场环境污染小;减少了长大隧道的辅助导坑数量,保护了生态环境。如果使用双护盾 TBM 还可以减少隧道内水的流失,有利于环境保护和减少水土流失。

## (六) 局限性

全断面岩石隧道掘进机作为大型施工设备也具有一定局限性,在选用时应加以考虑。

### 1. 运输困难,对施工场地有特殊要求

TBM 属大型专用设备,全套设备重达几千吨,最大部件质量达上百吨,拼装长度最长达 200 多米。同时洞外配套设施多,主要有混凝土搅拌系统、管片预制厂,修理车间、配件库、材料库、供水、供电、供风系统、运渣和翻渣系统、装卸调运系统、进场场区道路、TBM 组装场地等。这些对隧道的施工场地和运输方案等都提出了很高的要求。

### 2. 断面适应性较差

隧洞断面直径过小时,后配套系统不易布置,施工较困难;而断面过大时,又会带来电能不

足、运输困难、造价昂贵等种种问题。一般来说,较适宜采用 TBM 施工的隧道断面直径为 3~12m。对直径在 12~15m 的隧道应根据围岩情况、掘进长度、外界条件等因素综合比较。就目前的技术而言,还达不到圆满实现运用 TBM 进行硬岩开挖的水平。对于直径大于 15m 的隧道,则不宜采用 TBM 施工。虽然掘进机的动力及推力等的配置可以调整,但结构件的尺寸改动是需要时间、费用及满足一定规范要求,不易实施。

### 3. 地质适应性较差

TBM 施工对隧道的地层最为敏感,不同类型的 TBM 适用的地层也不同,一般的软岩、硬岩、断层破碎带,可采用不同类型的 TBM 辅以必要的预加固和支护设备进行掘进,但对于大型的岩溶暗河发育的隧道、高地应力隧道、软岩大变形隧道、可能发生较大规模突水及涌泥的隧道等特殊不良地质隧道,则不适合采用 TBM 施工。在这些情况下,采用钻爆法更能发挥其机动灵活的优越性。

## 第二节 国内外发展动态

### 一、TBM 技术发展

#### (一)国外 TBM 技术发展历史和现状

近两个世纪以来,隧道建设者们在努力发展并完善钻爆法技术的同时,为了从根本上克服钻爆法的缺点,也在不断探索新的隧道掘进方法,快速、安全、优质、文明施工是隧道建设者们的理想。

TBM 的诞生实现了隧道建设者们的理想。它为隧道施工走向机械化、标准化创造了条件,使施工程序大大简化,基本实现了流水线作业,隧道开挖、出渣、支护可同时进行并连续作业,独头掘进可达 15~20km。在硬岩中,TBM 的有效进尺率可达 3~5m/h,为钻爆法一个掘进循环的 1~2 倍,平均日进尺率为钻爆法的 5~8 倍。TBM 掘进技术除了有较钻爆法快速掘进的优势外,还为隧道工作者提供了更为安全、文明的施工条件,为工程的规划和设计者们提供了更多的选择,使其不再为长隧洞的施工发愁而感到困扰。过去不可避免的“Z”字形隧洞,现在可以做成“一”字形了,从而缩短了洞线长度,取消了不必要的辅助通道和相应的临建设施,减少了施工对围岩及周边环境的扰动,由此带来的经济效益、时间效益和社会效益是巨大的。为了实现这一理想,设计者们曾进行了许多尝试。

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-JosephMaus 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 设计了一台可连续开挖的掘进机,但由于设计上存在难以克服的滚刀问题和其他各种困难,无用武之地。

其后 70 年间(1851~1920 年),虽然在美国和欧洲也曾做过 TBM 掘进机的尝试,但均未达到发展此项技术的积极效果。这以后的 30 年中,TBM 掘进机渐渐从人们的脑海中消失了,也未曾有更多的尝试。

直到 1952 年,美国的 James Robbins 开始将索镐与滚刀相结合,试图克服 Charles Wilson



在设计 TBM 中存在的刀具问题,但初期的试验均失败了。4 年后,即 1956 年,James Robbins 再次仿照 100 年前 Charles Wilson 的设计,即只采用滚刀,取得了成功,美国罗宾斯公司也成为世界第一台 TBM 的生产厂家。

此后 30 年间,TBM 掘进机的应用得到了很大的推广,共生产了 200 多台掘进机,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的掘进速度。

美国罗宾斯(Robbins)公司自 1952 年开发制造出了现代意义上的第 1 台软岩 TBM 后,1956 年又研制成功中硬岩 TBM。从此,TBM 进入了快速发展时期。20 世纪 60~70 年代,全世界范围内的 TBM 制造商有 30 余家,业内普遍认为世界上有 6 家实力较强的 TBM 制造商,即美国罗宾斯公司、佳瓦公司、德国维尔特公司和德马克公司。另外,加拿大罗瓦特公司、德国海瑞克公司从 20 世纪 90 年代也开始生产掘进机,日本小松、川崎、石川岛、三菱等公司也有 TBM 制造业绩。

德马克公司早先被奥地利的奥钢联公司兼并,几经易主于 1999 年停止生产掘进机;德国维尔特公司也出现了产品转型,不再独立生产 TBM,而由法国法马通下属子公司 NFM 继续生产;德国海瑞克十几年前开始制造硬岩掘进机,并正在不断扩大;美国罗宾斯公司则仍然占有最大的市场份额。

国外掘进机公司各自生产的 TBM 产品大多自成系列,其设计、产品、零部件已经在公司内部形成系统,具有一定的通用性。掘进机产品系列的主要参数,如刀盘驱动功率、刀盘扭矩及推力是根据岩石物理性能、刀盘额定转速及每把盘形滚刀最大承载力等确定的。通常情况下,TBM 制造商均按照其系列参数设计产品,并且认为掘进机系列产品适应性强,主要性能并不局限于单一工程地质条件。

目前,TBM 主要分为以下三种类型,并分别适应于不同的地质条件。

(1)敞开式 TBM。常用于硬岩,在敞开式 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。适用于各种地质,既能适应软岩,也能适应硬岩或软硬岩交互地层。

(3)单护盾 TBM。常用于劣质地层,单护盾 TBM 推进时,要利用管片作为支护,其作业原理类似于盾构。与双护盾 TBM 相比,掘进与安装管片这两者不能同时进行,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,而盾构则采用土压力或泥水压力平衡开挖面的水土压力。

一般情况下,在整条隧道地质情况都较差的作业条件下,使用单护盾 TBM;在良好地质中,则使用敞开式 TBM;双护盾 TBM 常用于复杂地层的长隧道开挖,一般适用于中厚埋深、中高强度、地质稳定性基本良好的隧道,对各种不良地质和岩石强度变化有较好适应性。

国外全断面掘进机技术仍在不断地发展中,主要表现在以下几个方面。

(1)整机结构更加紧凑,性能更加完善,自动化程度更高,对岩层的适应范围不断扩大,整机质量和刀盘功率均向大型化方向发展。

(2)改进刀具结构及材料,提高刀具寿命,使之能够用于坚硬的岩石,并根据岩石条件,决定最佳刀具类型及刀具在刀盘上的最佳阵列方式。