

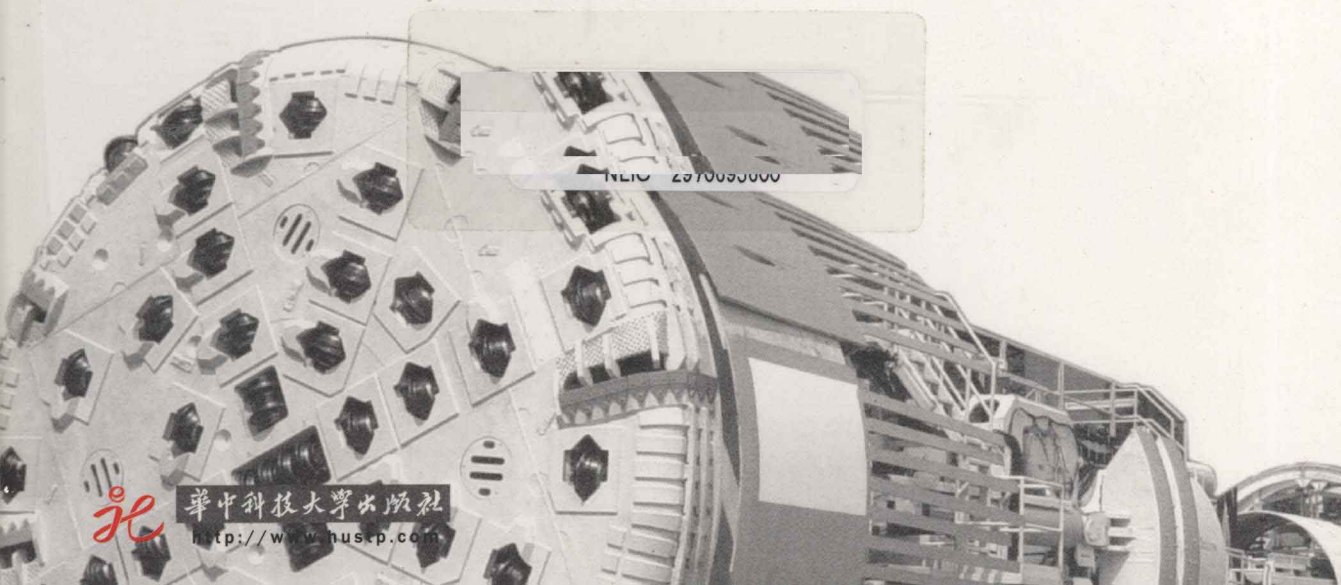
Full Face Hard Rock Tunnel Boring Machine – System Principles and Integrated Design

TBM

“十一五”国家重点图书出版规划项目

全断面岩石隧道掘进机 ——系统原理与集成设计

■ 杜彦良 杜立杰 等 编著



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

全断面岩石隧道掘进机 ——系统原理与集成设计

Full Face Hard Rock Tunnel Boring Machine
— System Principles and Integrated Design

■ 杜彦良 杜立杰 等 编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

全断面岩石隧道掘进机——系统原理与集成设计/杜彦良 杜立杰 等编著. —武汉: 华中科技大学出版社, 2011. 3

ISBN 978-7-5609-6777-6

I. 全… II. ①杜… ②杜… III. 隧道工程-全断面掘进机 IV. U455.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 236776 号

全断面岩石隧道掘进机——系统原理与集成设计 杜彦良 杜立杰 等编著

责任编辑: 万亚军

封面设计: 范翠璇

责任校对: 周 娟

责任监印: 张正林

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编: 430074 电话: (027)87557437

录 排: 武汉佳年华科技有限公司

印 刷: 湖北恒泰印务有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 16 插页: 1

字 数: 371 千字

版 次: 2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 98.00 元



本书若有印装质量问题, 请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

作者简介



杜彦良，教授，博士生导师，石家庄铁道大学副校长，石家庄铁道大学大型结构健康诊断与控制研究所所长、河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室主任。杜彦良教授长期从事交通基础设施安全保障技术研究，在长期自动监测、健康诊断、安全评估，以及TBM设计施工技术 with 故障诊断方面进行了开创性的研究，为我国交通基础设施建设与发展作出了突出贡献。共获省部级以上科技进步奖12项，其中国家科技进步一等奖1项、二等奖2项；获国家发明专利4项，实用新型专利2项；发表学术论文160余篇，其中被SCI、EI等收录70余篇；出版专著、教材6部；获省部级以上教学成果奖6项，其中国家级教学成果一等奖1项、二等奖1项。被评为铁道部、河北省有突出贡献中青年专家，铁道部火车头奖章获得者，河北省优秀省管专家，河北省“燕赵学者”，国家级教学名师，国家杰出专业技术人才，享受国务院政府特殊津贴。



杜立杰，教授，留美学者，研究生导师，石家庄铁道大学TBM研究室主任，国家重大工程评估咨询专家，长期从事TBM领域的科研和工程实践，被众多企业聘请为TBM技术咨询专家、TBM招投标和评标专家、TBM对外首席谈判专家，多年来常驻TBM施工现场，为我国西康铁路秦岭隧道、辽宁大伙房水库输水工程、云南那邦水电站等多个重大工程TBM设计、监制、组装、步进、始发、施工、维护保养与监测诊断、招投标、技术商务谈判、培训等进行了全程、全方位的科技攻关和技术支持，获得国家科技进步二等奖和国家级教学成果一等奖。

内 容 简 介

本书从实际工程施工的角度,对全断面岩石隧道掘进机(TBM)及其后配套系统的结构原理和集成设计进行了详细、系统的论述,包括 TBM 的主机结构、后配套设备、液压系统、电气控制系统、激光导向系统、通风除尘系统、支护设备等内容。其中,TBM 施工连续皮带机出渣系统和电气控制系统等内容在国内是首次全面阐述。本书内容包含作者多年来在 TBM 理论研究和工程实践方面所取得的部分成果,已在我国多个重大工程中得到推广应用。

本书可供 TBM 隧道工程设计、施工、监理和 TBM 设计制造等领域的技术人员,以及高等院校师生和企业相关技术、商务与管理人员阅读和参考。

序

随着我国大规模基础设施项目的实施,未来五十年,铁路、公路、水利、水电、城市地铁、越江、海底隧道等大批不同断面、不同类型长大隧道需要建设,其中采用开敞式全断面岩石隧道掘进机(TBM)法隧道施工技术,可以创造很高的掘进记录,并且能够快速穿越不良地质段,具有很好的生态环境效益和社会效益,正成为我国今后长大隧道设计施工必选的施工方法。

我国目前拥有 TBM 法建设的巨大市场,而且正在从 TBM 设备和施工技术的引进国向自主研制和施工技术输出国迈进。这对 TBM 研发部门和设计制造企业及工程施工单位,都将是巨大的挑战。掌握 TBM 设计制造和施工技术,将使企业在隧道施工领域获得新的竞争力。《全断面岩石隧道掘进机——系统原理与集成设计》、《全断面岩石隧道掘进机——维护保养与监测诊断》、《全断面岩石隧道掘进机——施工管理与施工技术》的编写出版,无疑将为企业获得这一竞争力提供强有力的帮助和支持。

本书作者长期驻扎在 TBM 施工现场,参与了我国大量 TBM 工程项目的科技攻关和技术支持,理论研究与工程实践紧密结合,使得该书不仅具有很高的学术价值,而且具有很好的工程应用价值。该书论述深入浅出、内容新颖、视角独特,是从科研成果和工程实践经验中总结出来的精华。我相信,TBM 工程设计与施工、研发与设计制造等领域的相关技术人员都能从中获益,该书的出版将进一步推动我国 TBM 设计制造和施工技术的发展作出新的业绩和贡献。

中国工程院院士



2010 年 10 月

前 言

全断面岩石隧道掘进机(简称 TBM)是机械、电子、液压、激光技术一体化的大型工厂化隧道施工作业系统。TBM 法具有掘进速度快、施工工期短、作业环境好、对生态环境友好、综合效益高等优点,是国内外隧道施工方法的重要选择。对于部分长大隧道,从线路、工期和生态环境等方面考虑,TBM 法已成为其必选的施工方法。

进入 21 世纪,随着我国大规模基础设施项目的实施,铁路、水利、水电、城市地铁、公路、石油燃气管道、越江和海底隧道等建设中大量长隧道需要开挖,同时西康铁路秦岭隧道、辽宁大伙房水库输水工程等多个重大工程采用 TBM 法施工取得成功,其示范作用使 TBM 施工技术在我国迅速得到大规模的推广应用,我国在 TBM 的研究开发和施工技术积累上也取得了显著进展。然而,我国掌握 TBM 施工技术的企业还很少,完全实现 TBM 自主设计、制造尚有待进一步努力。而且,TBM 是非标定制产品和系统,每个 TBM 隧道工程有其不同的特点和条件,因此,不同工程 TBM 系统集成设计与施工技术方案,既需要有个性的考虑,又需要做出共性的总结。为此,作者以多年 TBM 科研和工程实践的成果为核心,编写了《全断面岩石隧道掘进机》,以支持我国更多的施工企业在 TBM 大发展的前景下掌握 TBM 施工技术,更好地运用 TBM,推动我国 TBM 的自主研发。《全断面岩石隧道掘进机》由三部分组成,分别为《全断面岩石隧道掘进机——系统原理与集成设计》、《全断面岩石隧道掘进机——维护保养与监测诊断》、《全断面岩石隧道掘进机——施工管理与施工技术》。这三部分互为姊妹篇,涵盖了 TBM 工程的主要议题,被国家新闻出版总署评为“十一五”国家重点图书出版规划项目。

《全断面岩石隧道掘进机——系统原理与集成技术》是作者长期驻扎工程现场,针对我国 TBM 重大工程进行科技攻关和技术支持,在理论研究和工程实践的基础上编写而成的,具有以下特点。

(1) 本书主要论述 TBM 的系统原理与设计,特别是 TBM 系统的集成设计;且从工程施工的角度论述设计中的问题,以及什么样的设计是最佳合理设计;是科研成果和工程实践经验的总结,而不是只针对某个具体工程的介绍。

(2) 本书对 TBM 及其后配套系统整机的论述,以及机械、电子、液压、激光等各个 TBM 分系统的论述,更加深入、系统和具体,特别是本书首次系统论述了 TBM 施工连续皮带机出渣系统、TBM 电气控制系统等。

(3) 本书理论与实践相结合,既有学术性,又有很好的工程应用价值;无论是从事 TBM 设计与制造、TBM 隧道工程设计与施工的技术人员还是进行 TBM 教学与培训的工作人员,都能从中获得较为全面、系统的知识和信息,以及从事相关工作所需的理论、技术和方法。

(4) 本书采用了大量来源于实际工程的图片进行详解,而且绝大部分图片是首次出版使用,这些图片将有助于读者对 TBM 设计原理与施工技术的理解和掌握。

本书由杜彦良教授和杜立杰教授主笔,马立明参与了 TBM 供电和电气控制系统的编写,贾粮棉参与了 TBM 液压系统的编写,李亚宁参与了 TBM 通风除尘系统的编写,朱齐平参与了 TBM 主机结构部分内容的编写。另外,马怀祥、吕仲军、郭文武参加了本书部分章节的编写工作。

TBM 设计与施工技术在我国仍处在积累和高速发展阶段,由于时间仓促和作者认识上的局限性,本书疏漏和不当之处在所难免,敬请广大读者不吝赐教。对本书的意见和建议请发送到邮箱 tbm_du@sohu.com。

作 者

2010 年 10 月

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 TBM 类型及原理	(1)
1.2 TBM 主机及其后配套系统构成	(4)
1.2.1 TBM 主机系统构成	(4)
1.2.2 TBM 后配套系统	(6)
1.3 TBM 工程主要关键技术	(6)
1.3.1 TBM 选型及系统集成设计	(6)
1.3.2 TBM 施工组织管理	(6)
1.3.3 TBM 掘进参数匹配技术	(7)
1.3.4 TBM 在不良地质地段的施工技术	(7)
1.3.5 TBM 监测诊断与维护技术	(7)
1.3.6 TBM 刀具技术	(7)
1.3.7 TBM 掘进方向测量控制技术	(7)
1.3.8 TBM 出渣和物料运输技术	(8)
1.3.9 TBM 施工供电和通信技术	(8)
1.3.10 TBM 施工供排水技术	(8)
1.3.11 TBM 施工通风技术	(8)
1.3.12 TBM 组装拆卸和步进始发技术	(8)
1.3.13 TBM 施工作业分析	(9)
1.3.14 TBM 施工成本分析	(9)
1.4 TBM 工程应用现状	(9)
1.4.1 国外著名 TBM 工程	(9)
1.4.2 国内 TBM 重要工程	(10)
1.5 TBM 设计制造及其技术发展	(12)
1.6 TBM 工程主要阶段和任务	(15)
第 2 章 TBM 选型及系统集成	(17)
2.1 TBM 选型设计中的地质因素	(17)
2.1.1 TBM 对地质条件的适应性	(17)
2.1.2 影响 TBM 掘进效率的主要地质因素	(18)
2.1.3 TBM 类型的选择	(19)
2.2 TBM 选型设计中的掘进性能要求	(20)
2.2.1 贯入度和纯掘进速度	(20)
2.2.2 设备完好率	(20)

2.2.3	掘进作业利用率	(21)
2.2.4	刀具消耗量	(21)
2.3	TBM 主参数设计	(21)
2.3.1	刀盘直径	(21)
2.3.2	刀具直径	(22)
2.3.3	刀间距和刀具数	(23)
2.3.4	刀盘转速	(23)
2.3.5	刀盘扭矩	(24)
2.3.6	刀盘驱动功率	(24)
2.3.7	主轴承及其寿命	(25)
2.3.8	推进系统及其推进力	(26)
2.3.9	支撑系统及其支撑力	(27)
2.4	TBM 系统间的匹配设计	(27)
2.4.1	掘进速度计算分析	(28)
2.4.2	支护能力计算分析	(28)
2.4.3	出渣能力计算分析	(29)
2.5	TBM 与外部系统的接口	(29)
2.5.1	TBM 与出渣运输车辆的接口	(29)
2.5.2	TBM 与隧道轨道系统的接口	(29)
2.5.3	TBM 与隧道通风系统的接口	(30)
2.5.4	TBM 与高压供电系统的接口	(30)
2.5.5	TBM 与隧道照明的接口	(30)
2.5.6	TBM 与洞外通信的接口	(30)
2.5.7	TBM 数据视频传输的接口	(31)
2.5.8	TBM 供水系统的接口	(31)
2.5.9	TBM 与隧道排水的接口	(31)
2.5.10	TBM 组装和步进的接口	(31)
2.6	TBM 系统集成设计案例	(32)
2.6.1	TBM 选型	(32)
2.6.2	TBM 及其后配套系统主要特性	(32)
2.6.3	TBM 设备主要技术参数	(33)
2.6.4	TBM 及其后配套系统设计描述	(36)
第 3 章	TBM 主机结构	(41)
3.1	TBM 主机总体构造	(41)
3.1.1	开敞式 TBM 主机总体构造	(41)
3.1.2	双护盾 TBM 主机总体构造	(42)
3.1.3	单护盾 TBM 主机总体构造	(46)
3.2	TBM 主机部件及其结构	(48)
3.2.1	刀盘	(48)
3.2.2	刀具	(53)

3.2.3	主驱动(含主轴承)	(59)
3.2.4	护盾	(66)
3.2.5	主梁和后支腿	(67)
3.2.6	推进和撑靴系统	(70)
3.3	TBM 主机附属设备	(75)
3.3.1	钢拱架安装器	(75)
3.3.2	锚杆钻机和超前钻机	(77)
3.3.3	主机皮带机	(78)
第 4 章	TBM 后配套系统	(82)
4.1	后配套系统功能与构成	(82)
4.1.1	后配套系统功能	(82)
4.1.2	后配套系统构成	(82)
4.2	后配套系统台车的结构类型	(84)
4.3	后配套系统主要设备及其布置	(87)
4.3.1	主控室及液压动力站	(87)
4.3.2	供电及电气控制系统	(87)
4.3.3	空气压缩机系统	(88)
4.3.4	供水系统	(89)
4.3.5	排水系统	(91)
4.3.6	通风系统	(91)
4.3.7	除尘系统	(92)
4.3.8	后配套系统皮带机	(94)
4.3.9	混凝土喷射系统	(95)
4.3.10	注浆系统	(97)
4.3.11	材料吊运设备	(98)
4.3.12	清渣设备	(99)
4.3.13	推车器	(100)
4.3.14	应急发电机	(100)
4.3.15	灭火系统	(101)
4.3.16	气体监测系统	(102)
4.3.17	视频监视系统	(103)
4.3.18	通信系统	(104)
4.3.19	管线布置	(104)
第 5 章	TBM 液压系统	(106)
5.1	TBM 液压系统组成、功能及特点	(106)
5.1.1	TBM 液压系统构成元件	(106)
5.1.2	TBM 液压系统组成特点	(107)
5.1.3	TBM 液压系统回路功能	(108)
5.1.4	TBM 液压系统设计原则	(109)
5.2	TB880E 型 TBM 液压系统分析	(110)

5.2.1	概述	(110)
5.2.2	高压撑紧回路	(110)
5.2.3	撑靴快速复位回路	(114)
5.2.4	高压推进回路	(114)
5.2.5	快速推进回路(空载)	(115)
5.2.6	后支撑回路	(115)
5.2.7	前支撑(护盾)回路	(116)
5.2.8	刀盘辅助驱动回路	(118)
5.2.9	扩孔装置回路	(118)
5.2.10	后配套系统拖拉回路	(119)
5.2.11	连接桥支撑及拖动回路	(119)
5.3	MB264-311 型 TBM 液压系统分析	(119)
5.3.1	概述	(120)
5.3.2	高压撑紧回路	(127)
5.3.3	撑靴快速复位回路	(128)
5.3.4	撑靴快速伸出回路(撑靴接触洞壁前)	(129)
5.3.5	高压推进回路	(129)
5.3.6	快速推进回路(空载)	(130)
5.3.7	竖向调向回路	(130)
5.3.8	水平调向回路	(131)
5.3.9	前支撑(护盾)回路	(131)
5.3.10	后支撑回路	(132)
5.3.11	润滑油回油泵驱动马达回路	(132)
5.3.12	主机皮带机回路	(132)
5.3.13	输送机提升液压缸回路	(133)
第 6 章	TBM 供电系统	(134)
6.1	TBM 供电系统总体设计	(134)
6.1.1	TBM 供电系统设计原则	(134)
6.1.2	TBM 装机总功率	(134)
6.1.3	TBM 供电系统总体结构设计	(135)
6.2	低压配电系统接地方式	(135)
6.2.1	TN 系统	(136)
6.2.2	TT 系统	(138)
6.2.3	IT 系统	(139)
6.3	TBM 洞外供电系统	(139)
6.3.1	TBM 洞外供电系统设计	(139)
6.3.2	典型 TBM 施工洞外供电系统简介	(141)
6.4	TBM 本机供电系统	(142)
6.4.1	TBM 本机供电系统设计	(142)
6.4.2	典型 TBM 供电系统介绍	(150)

第 7 章 TBM 电气控制系统	(160)
7.1 TBM 电气控制系统设计原则	(160)
7.2 大型机械设备电气控制系统基本形式	(161)
7.2.1 继电器-接触器控制系统	(162)
7.2.2 计算机控制系统	(167)
7.2.3 可编程控制器及其控制系统	(169)
7.2.4 现场总线及现场总线控制系统	(173)
7.3 TBM 电气控制系统总体设计	(175)
7.3.1 单 PLC 方式 TBM 电气控制系统	(175)
7.3.2 多 PLC 方式 TBM 电气控制系统	(176)
7.3.3 远程 I/O 方式 TBM 电气控制系统	(177)
7.3.4 现场总线方式 TBM 电气控制系统	(177)
7.4 TBM 自动控制方式及实现	(178)
7.5 典型 TBM 电气控制系统	(179)
7.5.1 威尔特 TB880E 型 TBM 电气控制系统	(179)
7.5.2 罗宾斯 MB264-311 型 TBM 电气控制系统	(179)
7.6 TBM 数据采集系统	(181)
7.6.1 TBM 数据采集系统需求与功能分析	(181)
7.6.2 TBM 数据采集系统设计	(182)
7.6.3 TB880E 数据采集系统(WDAS)简介	(183)
第 8 章 TBM 施工通风除尘系统	(185)
8.1 TBM 施工通风系统	(185)
8.1.1 TBM 通风系统功用及组成特点	(185)
8.1.2 TBM 施工通风系统设计	(187)
8.1.3 TBM 施工通风系统应用举例	(192)
8.2 TBM 施工除尘系统	(194)
8.2.1 TBM 除尘系统功用及组成	(194)
8.2.2 TBM 除尘系统设计	(195)
第 9 章 TBM 掘进导向系统	(197)
9.1 PPS 激光导向系统	(197)
9.1.1 坐标系统及偏差定义	(197)
9.1.2 系统构成及原理	(197)
9.1.3 系统硬件	(199)
9.1.4 系统软件	(200)
9.2 VMT 激光导向系统	(203)
9.2.1 坐标系统及偏差	(203)
9.2.2 系统构成及原理	(205)
9.2.3 系统软件及显示界面	(207)
9.2.4 导向系统维护保养	(212)
9.3 TBM 调向	(213)

第 10 章	TBM 施工连续皮带机出渣运输系统	(215)
10.1	TBM 施工出渣运输技术国内外现状	(215)
10.2	TBM 施工出渣运输系统方案选择	(216)
10.2.1	连续皮带机出渣运输系统的优点	(216)
10.2.2	TBM 施工出渣运输系统方案比选	(217)
10.3	连续皮带机出渣运输系统构成及布置	(217)
10.3.1	连续皮带机运输系统构成及原理	(217)
10.3.2	连续皮带机出渣运输系统布置方案	(220)
10.4	连续皮带机主要部件结构特点	(222)
10.4.1	连续皮带机移动尾段	(222)
10.4.2	连续皮带机皮带储存仓	(222)
10.4.3	连续皮带机驱动装置	(224)
10.4.4	连续皮带机皮带架	(224)
10.5	连续皮带机主要技术参数	(227)
10.6	连续皮带机运行维护与故障分析	(228)
10.6.1	连续皮带机运行维护要点	(228)
10.6.2	连续皮带机故障率	(229)
附录	TBM 专业术语英汉对照	(231)
参考文献		(237)
致谢		(238)

第 1 章 概 论

随着我国大规模基础设施建设的开展,铁路、公路、调水工程、水电工程、城市地铁、市政供水供电和排污等重大工程越来越多,需要修建的长大隧道也越来越多。我国未来 20 年将有 6 000 km(平均每年 300 km)隧道(洞)需要开挖。由于工程规模大,地质条件复杂,工程施工速度、环保、质量和效益要求高,传统钻爆法施工技术已经难以应对这一艰巨挑战。因此,全断面岩石隧道掘进机(full face hard rock tunnel boring machine,简称 TBM)技术必将在我国得到长足发展,推动我国装备制造业和施工企业的科技进步。同时,掌握全断面岩石隧道掘进机技术将使企业获得巨大的市场竞争力。

1.1 TBM 类型及原理

隧道掘进机一般分为盾构机和岩石掘进机两种:盾构机主要应用于软土地层的开挖,岩石掘进机主要用于硬质地层的开挖。另外,两种掘进机在破岩机理和需要解决的根本问题上有很大不同:岩石掘进机主要是利用滚刀解决如何高效破岩的问题,盾构机主要是利用刮刀开挖软土并解决掌子面不稳定和地面沉陷的问题,当然,目前也开发和应用了安装滚刀和刮刀的复合盾构机。本书介绍的是适用于硬岩开挖的全断面岩石隧道掘进机。

TBM 由主机和后配套系统组成。主机主要由刀盘、主驱动系统(含主轴承)、护盾、主梁、推进系统、撑靴系统、后支腿、主机皮带机、支护系统等部分组成,是 TBM 系统的核心部分,完成主要掘进和部分支护工作。后配套系统与主机相连,由一系列彼此相连的钢结构台车组成,其上用于布置液压动力系统、供电和控制系统、供排水系统、通风除尘系统、出渣系统、支护系统等。

TBM 一般可分为开敞式 TBM 和护盾式 TBM 两大类型,护盾式 TBM 又有双护盾 TBM 和单护盾 TBM 之分。开敞式 TBM 目前主要有两种结构形式:一种为前后共有两组“X”形支撑的双支撑(凯氏)TBM(含有内凯机架(Inner Kelly)和外凯机架(Outer Kelly)),如图 1-1 所示;另一种为单支撑主梁开敞式 TBM,如图 1-2 所示。从地质角度来讲,软弱围岩所占比例较大的隧道一般选用护盾式 TBM,而岩石稳定性好、软弱围岩较少的隧道一般选用开敞式 TBM。此外,还要根据工程设计、工期及工程造价进行综合分析确定。

双护盾 TBM 如图 1-3 所示,其特点是主机在护盾的保护下进行掘进作业,护盾包括前盾、伸缩护盾、撑靴护盾,主机后部一般装有衬砌管片安装器。随着 TBM 的向前掘进,双护盾 TBM 可同时进行管片安装作业,后配套系统则完全在已经完成管片衬砌的隧道内作业,同时完成豆粒石喷射和灌浆作业。当岩石太软,无法实现径向支撑而需要辅助推进液压缸提供所需推进力时,推力作用于衬砌管片上,掘进作业与管片安装作业此时不能同时进行,相当于“单



图 1-1 双支撑(凯氏)开敞式 TBM

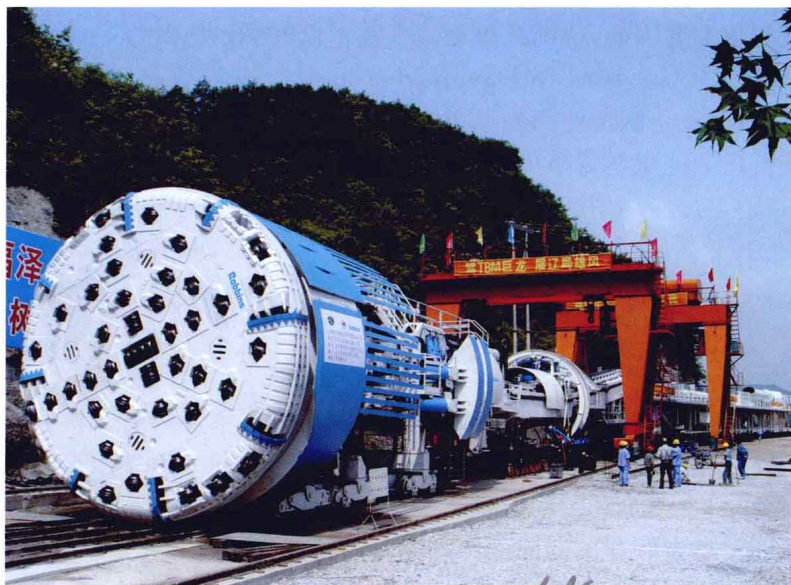


图 1-2 单支撑主梁开敞式 TBM



图 1-3 双护盾 TBM

护盾模式”的作业方式,相应掘进效率较低。开敞式 TBM 则只设有较短的护盾,在其主机和后配套系统上安装有支护设备,随着 TBM 的向前掘进,一般可以同时进行安装锚杆、挂网、钢拱架和喷射混凝土等支护作业。开敞式 TBM 刀盘推力和扭矩通过机架或主梁传递到支撑系统,支撑系统径向作用于岩壁上承受推力和扭矩。

TBM 掘进破岩工作原理(见图 1-4)为:主机前部是装有若干滚刀的刀盘,由刀盘驱动系统驱动刀盘旋转,并由 TBM 推进系统给刀盘提供推进力,撑靴系统支撑洞壁承受支反力,在推进力的作用下滚刀切入掌子面岩石,不同部位的滚刀在掌子面上留下不同半径的同心圆切槽轨迹(见图 1-5),在滚刀的挤压下岩石产生破裂,裂纹不断扩展连通,使相邻切槽的岩石在

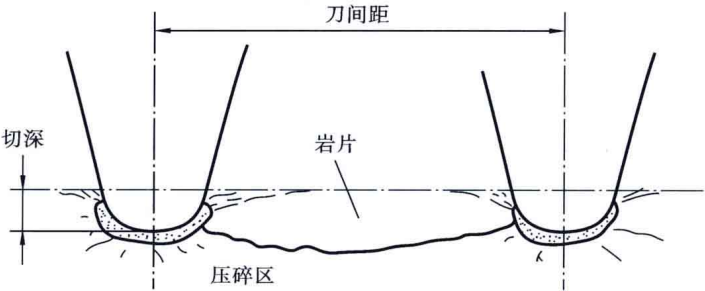


图 1-4 TBM 破岩工作原理



图 1-5 掌子面 TBM 刀具破岩行走轨迹(同心圆)