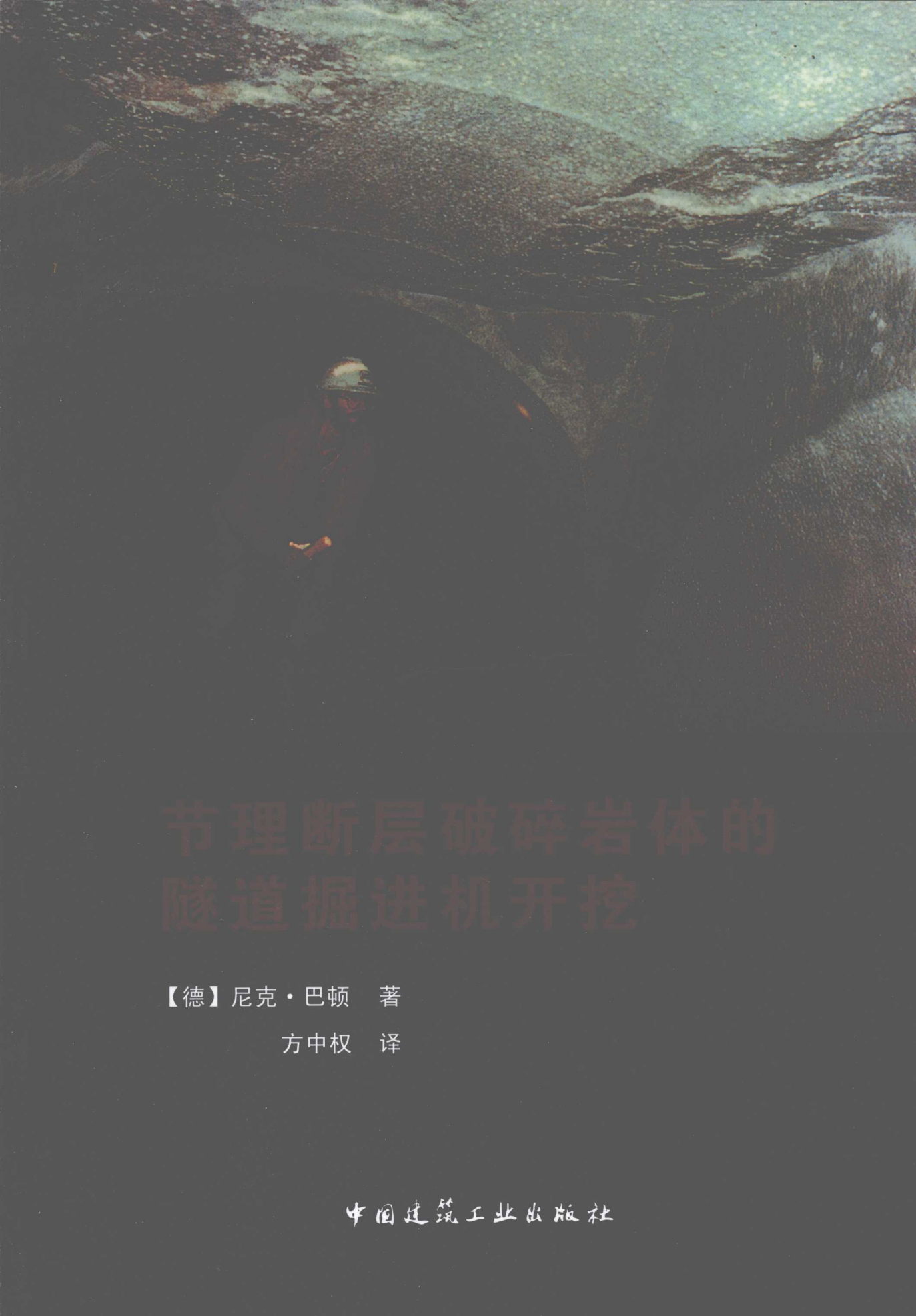




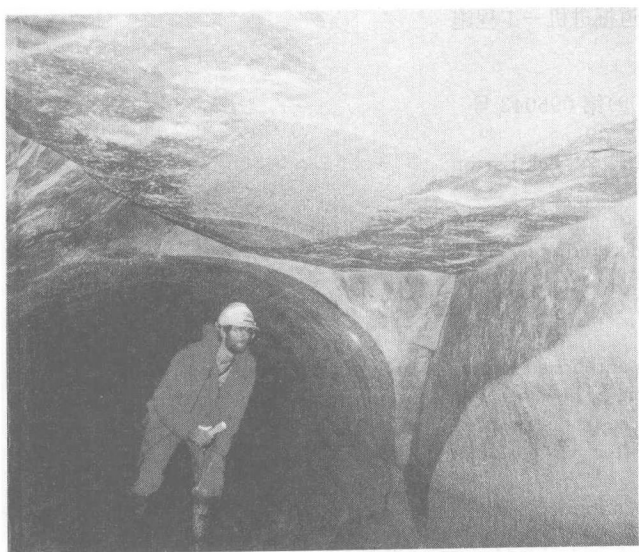
节理断层破碎岩体的 隧道掘进机开挖

【德】尼克·巴顿 著

方中权 译

中国建筑工业出版社

节理断层破碎岩体的隧道掘进机开挖



[德] 尼克·巴顿 著
方中权 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2009-3041 号

图书在版编目(CIP)数据

节理断层破碎岩体的隧道掘进机开挖/(德)巴顿著;
方中权译. —北京:中国建筑工业出版社, 2009
ISBN 978-7-112-11037-7

I. 节… II. ①巴…②方… III. 隧道掘进机—工程施
工 IV. U455.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 096043 号

TBM Tunnelling in jointed and faulted rock/Nick Barton
Copyright © 2000 A. A. Balkema

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by Routledge, a member of the Taylor & Francis Group.

Chinese Translation Copyright © 2009 China Architecture & Building Press

China Architecture & Building Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体字翻译版由英国 Taylor & Francis Group 出版公司授权中国建筑工业出版社独家出版并在中国销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书贴有 Taylor & Francis Group 出版公司的防伪标签,无标签者不得销售

责任编辑:王 梅 孙 炼

责任设计:郑秋菊

责任校对:兰曼利 梁珊珊

节理断层破碎岩体的隧道掘进机开挖

[德] 尼克·巴顿 著

方中权 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:11 字数:275 千字

2009 年 9 月第一版 2009 年 9 月第一次印刷

定价:30.00 元

ISBN 978-7-112-11037-7
(18282)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

原 序

作者于 1970 年代初期 Q-系统开发之后长期涉足国际钻爆法隧道开挖工程，尽管最初有些勉强，但在此期间也涉及隧道掘进机开挖隧道。其中的主要问题是：在几乎没有超挖的情况下，如何适当地判断节理类型？大量超挖的低质量岩体为何造成开挖困难？

作者参与的隧道掘进机项目中，重点关注于业主及承包商间的纠纷，间或也有承包商与分包商间的纠纷。这类纠纷争执均不可避免地涉及工程地质或水文地质，但双方对隧道掘进机及操作人员的施工便利并不关心，更不必提其他相关人员。

上面提到的两大岩土工程难题是隧道掘进机所特有的。没有超挖则不易准确判断岩体的质量，这可能会成为危险源。反之，以作者浅见，在低质量岩体中开挖时隧道掘进机的顶盖或盾顶妨碍了先期地质处理。近期的文献也支持这一观点。

尽管隧道掘进机有某些局限性，但是，其开挖进度超过 150m/日，500m/周，2km/月，150km/年的进度保证，使得隧道工程师不得不接受隧道掘进机。

本书的主要目的在于量化并了解隧道掘进机在恶劣岩体中的真实表现及所受的限制，不论是因为坚硬、磨损性的厚层岩体，还是因在断层带中细料流失或形成“天窗”所致。隧道专业人员需要解释这些真实表现、偶发的坍塌以及其他各种多变岩体，这些对隧道施工的准确预测有重要影响。

致 谢

笔者很幸运的以专业身份参与过多项性质和工程条件都差异极端巨大的使用掘进机开掘隧道掘凿建造计划，能够和很多承包商、业主、专家顾问们一同工作，这实际上是笔者研发演绎 Q_{TBM} 最为重要的组成内涵。

基于很多原因以及方方面面的考量，包括上面提到的原因，笔者谨在此向欧洲隧道组织 (Euro Tunnel)、英国 Unirex 岩土工程公司 (UK Unirex and Geo-Engineering in UK)、Statkraft 挪威及克什米尔分公司 (Statkraft in Norway and Kashmir)、Kraftbyggarna 瑞典分公司 (Kraftbyggarna in Sweden)、NOCON 挪威及意大利分公司 (NOCON in Norway and Italy)、日本富士公司 (Fuji RIC in Japan) 致谢意。当然在地质条件有疑问，并且和水文、隧道埋深问题交互纠结的情况之下也要谢谢上苍。

在此也向挪威地质研究所往日同事，如弗莱德瑞克·罗塞特 (Frederic Løset) 埃斯坦·格林姆斯特 (Eystein Grimstad) 诸位的讨论与切磋的得益，或者直接采用他们深厚而丰富的隧道建造规划经验，致最诚恳衷心的感谢。

佩蒂·库和林小姐 (Pat Coughlin)、M·M·亚伯拉翰姆先生 (Marcelo Medina Abrahão) 专业投入精心制作的书内文字、图表方便本书读者可以无错误地使用 Q_{TBM} ，笔者也在此表示谢意。

最后谨将本书献给依达·卡德罗 (Eda Quadro)，以感谢她多年来对笔者在挪威地质研究所担任各项专业工作时，全力营造一种氛围以及契机，使笔者得以数年如一日在挪威地质研究所专心一志怡然从事专业工作。巴西圣保罗大学 L. A. 达席尔瓦教授 (Professor Lineu da Silver) 和 C·马斐教授 (Professor Carlos Maffei) 大方而非直接地参与本计划，慨然提供办公室，对此，笔者也甚为感激。

目 录

原序	V
致谢	VI

第 1 部分 岩体与隧道掘进机的基本相互作用

第 1 章 绪论	3
第 2 章 隧道掘进机的基本设计	4
第 3 章 常见岩土工程问题简述	7
第 4 章 隧道掘进机开挖扰动区	9
第 5 章 影响钻掘速率的基本因素	12
第 6 章 钻掘速率与切削推力	19
第 7 章 应力与强度之比可能产生的影响	23
第 8 章 滚动切削刃形成岩屑的基本原理	26
第 9 章 抗拉强度及其各向异性	28
第 10 章 钻掘速率与结构各向异性	30
第 11 章 钻掘速率、节理间距及节理特性	33

第 2 部分 Q 、 Q_{TBM} 及岩体变异性

第 12 章 隧道掘进机性能与岩体分类	39
第 13 章 Q -系统参数与隧道掘进机性能的关系	45
第 14 章 隧道掘进机性能与“ Q_{TBM} ”的初始要求	49
第 15 章 前进速率衰减定律	51
第 16 章 使用率及其随时间的衰减	56
第 17 章 意外事件及其 Q -值	57
第 18 章 隧道掘进机开挖的涌水问题	63
第 19 章 隧道掘进机开挖中岩体有限自立时间的效应	65
第 20 章 钻掘速率(PR)、前进速率(AR)与 Q_{TBM} 的相关性	70

VIII 目录

第 21 章	岩体变异性对预测开掘性能的影响	74
第 22 章	考虑不等向性对 Q_{TBM} 进行微调	77
第 23 章	切削刃磨损对钻掘速率及前进速率的影响	80
第 24 章	孔隙率及石英含量对斜率 m 及钻掘速率的影响	84
第 25 章	隧道的尺度效应	86
第 26 章	在特高韧性及高应力状况下钻凿	89
第 27 章	再论切削力效应	93
第 28 章	预测断层破碎岩体中的前进速率	97

第 3 部分 纪录、隧道支护、探查与设计验证

第 29 章	隧道掘进机 Q -值纪录隧道尺度效应	105
第 30 章	隧道掘进机开挖中常用的岩体支护法	111
第 31 章	隧道掘进机开挖中支护细部设计	115
第 32 章	探查及收敛量测	120
第 33 章	钻孔探查以及地震波震测或超声波探查	126
第 34 章	用数值模型验核隧道掘进机支护等级	129
第 35 章	岩体质量纪录及支护需求	134
第 36 章	选择隧道掘进机开挖还是钻爆法开挖?	138
第 37 章	结论	143

附录

A1	Q -方法的岩体分类	146
A2	Q_{TBM} -图 44 的最终版本	149
A3	应用 Q_{TBM} 预估 PR 及 AR 输入数据的汇总	149
A4	范例	151
参考文献		156
译后语		167

第 1 部分

岩体与隧道掘进机的基本相互作用

第 1 章

绪 论

封面上是世界上第一座利用隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)掘削隧道的照片。这张照片同时也是节理影响超挖的极佳例子。1881~1882年,波蒙隧道(Beaumont Tunnel)的探查导洞在白垩质灰泥(chalk marl)中开挖,那时隧道开挖所遇到的最大困难是三组节理与隧道侧壁相交而形成的典型岩楔崩塌。110年后,英法海峡隧道(Channel Tunnel)使用更大的掘进机开挖时也面临同样的困难。波蒙隧道采用的隧道掘进机直径2.5m,每周钻掘速率约为30~60m不等[瓦尔利与华伦(Varley and Warren),1996],当时是极为骄人的进度,但和海峡隧道相比,则是小巫见大巫。8.7m直径双管的海峡隧道在1990~1991年完工时,最高的一周钻掘速率达426m(华伦等人,1996)。

隧道掘进机最高极限钻掘速率可达10m/h,而前进速率有时却低至0.005m/h,甚至为0。这一事实说明需要有可预测的模型并要彻底了解各项重要的变量。也许相对其他岩体工程,岩体分类对隧道工程来说重要得多。

使用隧道掘进机开挖所用的时间在隧道开挖总时程中所占比例——隧道掘进机使用率(U),如式(1),与岩体的状况有很大的相关性,也和其他很多因素有关。尼尔逊(Nelson,1993)曾建议钻掘速率(PR)和隧道掘进机使用率(U)分开考虑,且各自对应一套岩体分类。

$$AR=U \times PR \quad (1)$$

本书的目的就是希望能精确地做到这一点。但和尼氏建议的不同之处在于: PR 以及 U 部分地对应于同一基本岩体分类方法(Q -值法),而所采用的岩体质量指标(RQD)要作必要的“修正”(因其必须根据隧道开挖前进方向修正)。书中还使用了一个新的应力-强度名词,以反映节理各向异性等特殊性质及其与掘进机能力(即掘进机的推力 F)的相互影响。

由于岩体状况非常重要, Q_{TBM} 这一新名词就从 Q -系统开始,以岩体-掘进机、掘进机-岩体的互动参数为终结逐步形成。 Q_{TBM} 可用于在隧道开挖的初始阶段预估钻掘速率(PR),也可以根据实际施工情况反算求得。前进速率(AR)则应用公式(1)来估计,但是重要的差异在于将隧道掘进机使用率 U 重新定义为与时间及岩体质量相关的变量。

第 2 章

隧道掘进机的基本设计

隧道掘进机在 20 世纪最后 25 年中有了长足的改进，主要是通过改进对前进速率的控制以使其能够处理更多种类的岩体状况。图 1 和图 2 所示的是隧道掘进机的两种基本形式，分别是敞开式(open type)和双护盾(shielded)，机头的后方尚挂有长几百米的后配套组件。为使隧道掘进机设备的巨额资金投入及等待交货的漫长时日物有所值，特别需要对岩体状况的可靠预测。

尼尔逊(Nelson, 1993)和佛西特(Fawcett, 1993)都已针对隧道掘进机操作技术方面进行了简要说明。隧道掘进机的常用技术名词、机体各部分构造特性见图 3。

常说“一幅好图片胜过千言万语”，特别是另加附注的图片。故此本书采用佛西特的三种类型图解(图 3)来说明。在此必须指出，为保持图面简洁清晰，图内前进钻孔台、预灌浆、锚杆以及喷浆工作台都省略了。同样，图 1 所示为 Atlas Copco 公司的隧道掘进机三维立体草图。该图很好地说明了敞开式隧道掘进机对于必要的临时支护及喷浆机组(图中未显示)所具有的优势。

在后面各章中，将逐一讨论开挖前处理、临时支护以及永久支护方法，并说明工法的选择。本书不讨论隧道掘进机机械开挖的辉煌成果，重点强调的是隧道掘进机机械式隧道开挖所面对的岩体和水文地质的挑战，以及隧道掘进机、制造商、施工方和业主如何运用智慧达成其地下开挖的目标。

作者深知隧道掘进机的设计这样一个大标题，应该要用几本厚重的书本描述，并非这么仅有数页薄薄的一本书所能涵盖。幸而过去 100 年来隧道掘进机设计与发展这引人入胜的题目自有胜任的专家执笔。

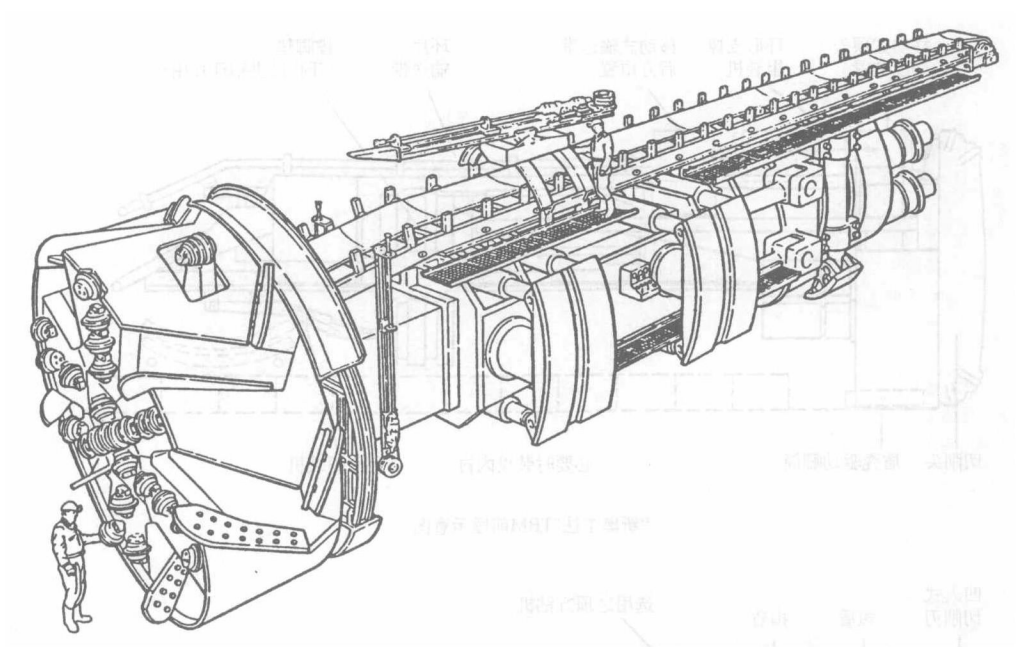


图1 Atlas Copco 公司制造的 6.5m 直径隧道掘进机，具有前进探查钻机，可打设锚杆、并可超挖(Nordmark & Franzer, 1993)

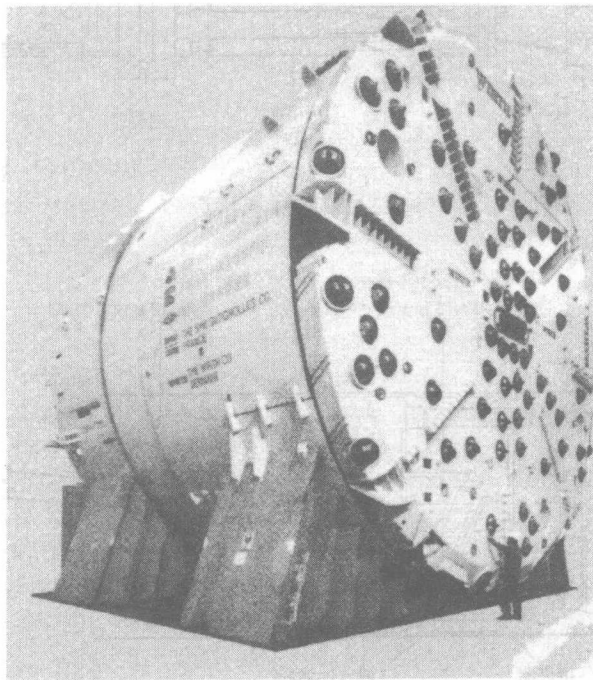
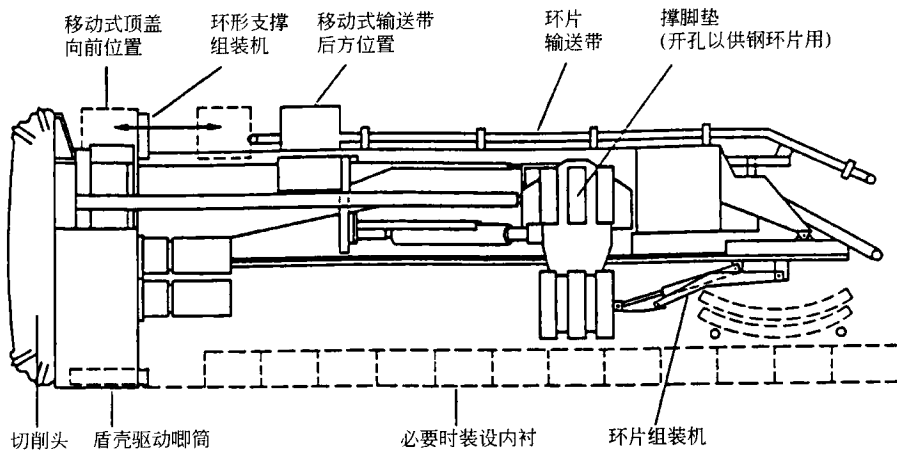
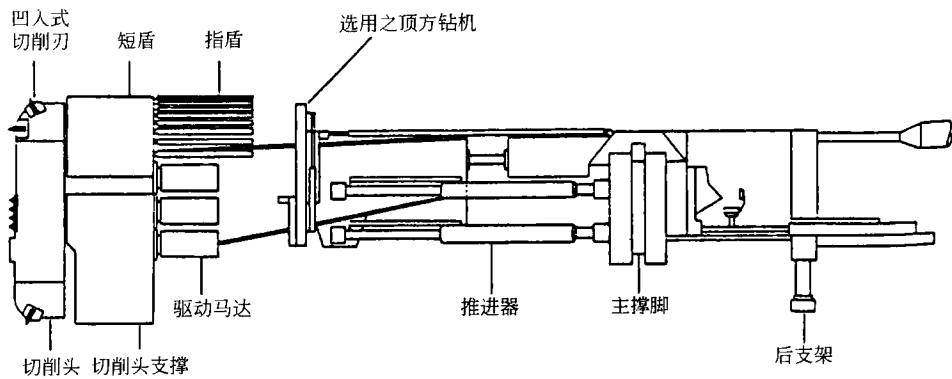


图2 Wirth 公司制造的 11.7m 直径隧道掘进机。为伸缩盾型，可凿掘断层岩体

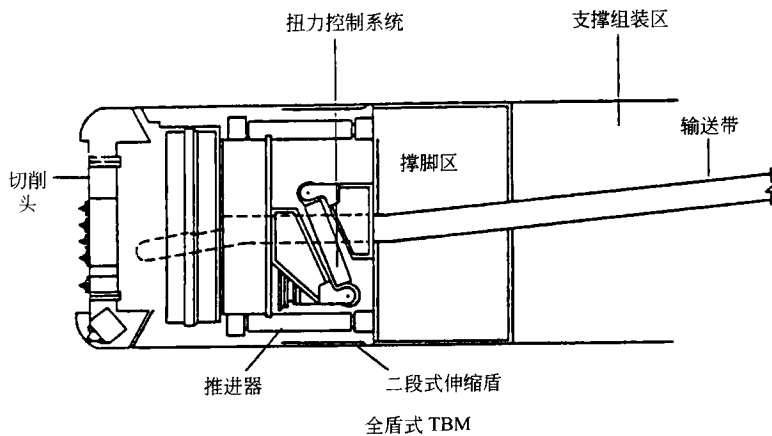
6 第 1 部分 岩体与隧道掘进机的基本相互作用



“新奥工法”TBM前段示意图



典型短盾 TBM



全盾式 TBM

图 3 三种不同类型隧道掘进机及常用技术名词(Fawcett, 1993)

第 3 章

常见岩土工程问题简述

与钻爆法、挖岩机(road header)或人工开挖隧道等其他方法相比,利用隧道掘进机开挖隧道最根本的不同在于其机器-岩体-岩体稳定性之间的相互作用关系极强。在软弱岩体中,尤其是应力高的情况下,弃渣和岩体支护可能是延误隧道开挖进度的主要原因,并且可能耽误混凝土管片的拼装。反之,在坚硬或耐磨损、高石英含量的岩体中,机具在必要的高荷载下的磨损以及切削刃的消耗便成为降低隧道掘进机使用时间的的主要原因。极高的涌水量则不论岩体软硬皆可形成困难的情况。

以下简要列举典型岩土工程问题及开挖机器与岩体相互作用的问题。所列项目的 2/3 是基于尼尔逊(Nelson, 1993)文献。

- 在岩体潮湿且不稳定状况下架设支撑;
- 因开挖面岩块崩塌,造成切削刃及削刀头损坏,并造成削刀头卡死;
- 开挖面崩塌岩块被刀头拖曳旋转,造成该处的超挖;
- 出碴斗及输送带被碴料堵塞;
- 从仰拱清除超挖或磨损料;
- 侧壁不稳定或超挖对撑脚产生的不良相互作用;
- 岩块或泥碴料堆在盾上造成推力损耗、掘进困难及不能按时到达需立即加固或支护的地方;
- 仰拱不稳定,导致掘进困难或造成轴线偏离;
- 断层碎片的松动及坍落,仰拱被埋及隧道被水淹;
- 断层带石块因高涌水冲蚀,形成天窗(chimney)及崩塌;
- 断层空隙崩塌损坏衬砌;
- 高磨损性岩体造成过度的切削刃磨损。

这些岩土工程问题及机器-岩体相互作用问题导致了开挖条件改变或支护方式的更改,由此延误工期。每种状况均导致施工效率的降低(Nelson, 1993)。

在节理发达或断层剪裂的岩体中,原本的高钻掘速率可能因必须处理支护形式、岩块卡夹使削刀头不能转动或撑脚遭遇困难而下降。这种状况下,原本高达 5m/h 的钻掘速率(PR)可能因持续的极端情况而降为前进速率仅为 0.5m/h、0.05m/h 甚至 0.005m/h。

8 第1部分 岩体与隧道掘进机的基本相互作用

以上所列举的岩土工程技术难题作为导言引出开掘更长和更深隧道所面临的重重困难。后面的章节将对其中一些问题详细探讨。尤其是对于断层带、高涌水的挑战和高应力或不利的节理破碎岩体带来的困难，后文将通过多个案例定量描述。

第 4 章

隧道掘进机开挖扰动区

图 4 摘自万纳(Wanner, 1980), 显示了采用隧道掘进机开挖的隧道和采用钻爆法开挖的隧道周围扰动区的明显差异。在中等至好的岩体条件下以小型隧道掘进机开挖隧道, 量测到岩石基本性质(诸如透水层、震波传递速度、变形模量等)改变区域仅限于围绕隧道的几十厘米厚范围内, 但在钻爆法隧道周边受影响区域厚度则为此值的数倍, 特别是在仰拱的下方更为严重。在不稳定岩石中用钻爆法容易形成超挖, 且不需要立刻架设支护来维持开挖断面。而隧道掘进机开挖后则需立即支护。在不稳定区中隧道掘进机开挖常会遇到撑脚问题, 这也是隧道掘进机开挖独有的难题。这些情况可发生在隧道掘进机开挖削刀头受阻而形成空隙后数小时或数日、数周, 甚至数月之后。

英国海峡隧道开挖的最早数公里区段是潮湿、上覆岩层薄且节理发达的地质段。这段地区因未能及时完成开挖断面而延误了衬砌的形成。由于混凝土管片没有栓合, 进而影响了契合稳定, 导致必须进行很多回填工作。这一长 5km 的困难地段, 典型的 Q -值都在 5~10 范围内(属一般岩体, 参见附录)。其 Q 参数往往如下所示:

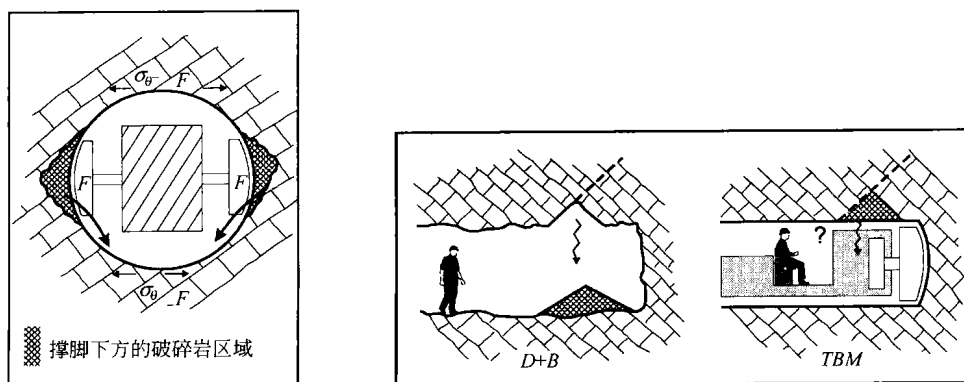


图 4 隧道掘进机开挖隧道与钻爆法开挖隧道的主要差异(来自 Wanner, 1980)

$$Q \approx \frac{90}{6} \times \frac{1}{1} \times \frac{0.66}{1} = 10$$

开挖前的数据资料, 包括前述波蒙隧道的数据显示:

$$Q \approx \frac{100}{9} \times \frac{1}{1} \times \frac{1}{1} = 11$$

是最常见的岩石质量等级 [巴顿与华伦 (Barton and Warren), 1995 夏普等人, (Sharp et al.), 1995]。每一工程案例中, 遇到非张裂性节理以及多组的节理均发生超挖及需要早期支护。有护盾的隧道掘进机可能不需支护设备, 且若盾壳太长, 或掘进太慢, 则隧道掘进机将同时承载着散落的岩屑前进。岩体裸露时间过长会因新开挖裸露岩面的松动而引起一串连锁反应, 这时如果不能及时形成支撑衬砌, 也可能造成超挖。

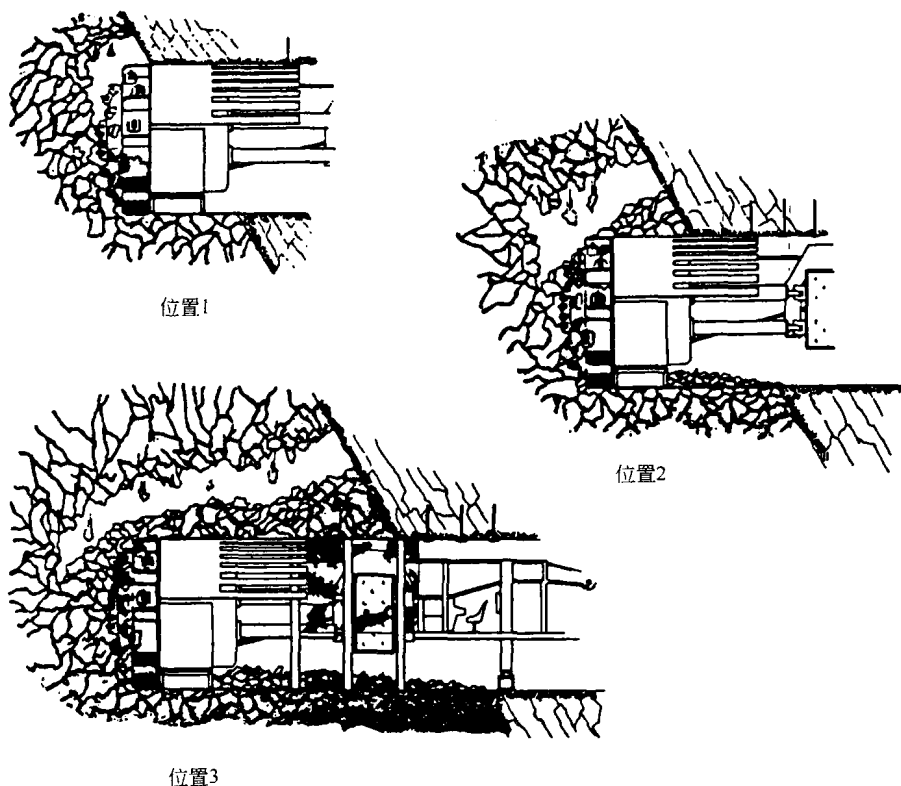


图5 断层破碎自立时间很短的岩体的典型隧道掘进机开挖难题 (Robbins, 1982)

海峡隧道建造时, 在这一易发生超挖岩段中, 平均钻掘速率约为 127m/周, 其余 10km 长的英国开挖段, 其平均钻掘速率约为 338m/周, Q -值最低达 40。

图4还显示了隧道掘进机独有的撑脚荷载问题。在某种情况下, 撑脚问题可能会损坏隧道侧壁, 因而引起顶拱的不稳定。在有些工程中, 曾通过纪录撑脚变