

龚秋明 著

掘进机隧道掘进概论



科学出版社

掘进机隧道掘进概论

龚秋明 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍掘进机的发展历程、应用现状与展望,掘进机的分类、组成、选型原则与实例;从掘进机与岩体相互作用的角度研究滚刀破岩规律、岩体各因素对掘进机掘进过程的影响;从优化破岩的角度研究刀盘优化设计、掘进机的推力、扭矩设计、支护体系设计原则。本书系统总结并研究与掘进机隧道施工相关的岩石和岩体的物理力学试验,指出现场掘进试验的重要性,首次提出岩体可掘性的表征方法,并评价现有岩体分类体系对掘进机施工的适用性和困难地层的可掘性。对现有掘进机施工预测模型进行全面总结与评价,提出岩体特性掘进机施工预测模型,对软硬混合地层进行全面研究并给出实例。全面应用本书的理论基础,对高地应力影响下的掘进机施工进行深入研究并给出实例。

本书可供掘进机开挖隧道勘察、设计与施工及掘进机设计制造各专业相关技术管理人员参考,也可供大专院校、科研院所相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

掘进机隧道掘进概论/龚秋明著. —北京:科学出版社,2014.3
ISBN 978-7-03-039970-0

I. ①掘… II. ①龚… III. ①隧道施工-掘进机械 IV. ①U455.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 040401 号

责任编辑:周 炜 张晓娟 / 责任校对:刘亚琦
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 3 月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:417 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

壬辰岁末冬月，秋明来我清华荷清苑居所探访，并代表北京工业大学建工学院，邀我出席“岩体力学与工程研究中心”成立暨学术交流会。遂询问其近况，秋明兴奋告诉我，其第一本学术著作《掘进机隧道掘进概论》即将付梓，闻之甚感欣慰。欢谈之余，秋明又恳请我为书作序，我欣然应允。

该书全面概括了隧道掘进机开挖理论，特别是全面分析了掘进机与岩体相互作用机理，首次提出岩体特征可掘性指数、岩体特性掘进机掘进速度预测模型并应用于实际工程，在当前国际掘进机隧道开挖研究领域堪称佳作。纵观全书，其理论构建之严谨，实例运用之精当，实验数据之翔实，同等功力之书在国内中青年学者著作中并不多见，可执其牛耳。

20世纪90年代初，秋明以优异成绩，由西安地质学院入中国科学院地质与地球物理研究所深造，完成硕士学业后，即从事勘察设计等工程地质实际工作，其“中国科学院北京天文台LAMOST观测楼工程场地岩土工程勘察及地基加固质量综合检测工程”项目曾获住房和城乡建设部优秀勘察设计二等奖。后自己申得全额奖学金，赴新加坡南洋理工大学留学，并由我推荐，师从时为土木与环境工程学院岩土工程系教授赵坚博士，继续深造，期间广泛涉猎国际工程项目，历五载，完成博士后研究工作后归国。又经已故中国工程院院士张在明引荐，执教于北京工业大学。秋明求学于中国科学院时已初显科研禀赋，常求教于我，我亦嘉其谦虚多思，勤于学而敏于行，遂倾囊而授，经年不辍，视如己出。今合卷而坐，回顾其成长经过，乃悉数历历在目，见秋明由一莘莘学子，不倦于学，渐令学业精进，又能常念修身养性，得以为人师表，至今有所建树，立足于产学研界，我心甚慰。

因嘉赏秋明多年钻研，成此佳作，特荐于圈内诸友，诚以广邀同道，切磋共进。又冀望后来之学，秉持相同之学术精神，薪火相传，继往开来，为掘进机隧道开挖研究添砖加瓦，服务于我国之建设大业。

王思敬

中国工程院院士
壬辰年腊月二十一

序 二

I was extremely happy to read through the manuscript of this book on tunnel boring machine (TBM) prepared by Dr Gong Qiuming. I was honoured to be asked to write a foreword for the book. Being a professor of tunnelling and an editor of the *Tunnelling and Underground Space Technology* international journal, I am naturally delighted to see a comprehensive book on TBM technology and tunnelling available to the readers.

Dr Gong joined Nanyang Technological University in Singapore in 2002 and started TBM research in my group. After obtaining his PhD degree, he joined Beijing University of Technology in 2006 and continued his work on TBM. Very quickly he has been recognized as a leading researcher and engineer in TBM tunnelling. For more than 10 years, he has been working on TBM research, engineering and teaching. He has established a modern and advanced TBM cutting laboratory at Beijing University of Technology and been conducting TBM research and development of international standing. He is a visiting professor and co-supervises PhD students at the Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) of Switzerland. In 2012, he was invited to become an editorial board member of the *Tunnelling and Underground Space Technology* international journal.

Mechanised tunnelling today is one of the most common tunnelling methods in China and worldwide. TBMs are used to construct tunnels in cities, under mountains, across seas, for rails and roads, for water and power transfer, serving the society and the economy. TBM tunnelling, particularly in complex geology and difficult ground conditions, is also considered to be one of the most challenging engineering works. The book by Dr Gong, covering the important aspects of TBM technology and tunneling, serves very well the need of tunnelling community. It deals in good width and depth on TBM excavation mechanism, TBM machine and cutting technologies, interaction between ground and machine, TBM performance and prediction models, laboratory and in situ testing techniques, and case studies on various international projects. I am sure it will be highly de-

manded by engineers and students involved and interested in TBM technology and tunnelling.



Zhao Jian 赵坚

Professor of Rock Mechanics and Tunnelling, Ecole Polytechnique Fédérale de
Lausanne (EPFL), Switzerland

瑞士联邦理工大学(洛桑)岩石力学与隧道工程教授

Editor, *Tunnelling and Underground Space Technology* international journal

《隧道与地下空间技术》国际学报 主编

2013. 2. 11, Montanay, Ecublens, Switzerland

前 言

滚刀破岩技术的应用是岩石隧道开挖技术领域的一次革命,使全断面岩石隧道机械掘进成为可能。自 20 世纪 50 年代利用滚刀破岩技术制造的第一台掘进机试制成功并工业化生产以来,因其具备施工环境好、速度快、长隧道施工成本低等优点,很快被广泛应用于隧道掘进施工。随着机电、液压、自动控制、计算机、传感、测量等技术的迅速发展并应用到掘进机上,掘进机的推力、扭矩、自动控制程度得到大幅度提升,促使原先的隧道建造转变成隧道制造,隧道建设犹如工业化生产。此外,刀具从最初的 V 字形滚刀,发展到现在的常切面滚刀,其破岩性能及抗磨损能力也得到提高。随着越来越多的岩石隧道采用掘进机施工,针对不同地质条件的掘进机的设计更趋于细化,掘进机的种类也随之增多,如由最初的敞开式掘进机发展为单护盾掘进机和双护盾掘进机,直至最近提出的通用简洁型掘进机及缩径式掘进机等。针对性的设计增强了掘进机对所开挖地层的适应性,大大提高了掘进效率,节约了隧道建造成本。

如何针对不同岩体条件进行掘进机的选型?在岩体条件明确后如何优化掘进机的设计?在掘进机设计制造完成后,如何在不同岩体特性条件下进行优化施工?如何对掘进机施工隧道进行合理规划?这些一直是岩石隧道工程中业主、制造商、施工方非常关心的问题。而这些问题的核心是掘进机与岩体相互作用理论,包括刀盘破岩机理、撑靴与洞壁的相互作用及掘进机对隧道的支护能力等。经过多年潜心研究与实践,本书试图在岩体与掘进机相互作用的理论框架内,厘清各个相关因素间的相互关系,在进行理论探讨的同时,希望本书的出版能对业界有所助益。

本书共 9 章,第 1 章介绍隧道掘进机的发展历史和在我国研发应用及发展前景。第 2 章介绍隧道掘进机的分类、运行机理、适用范围和典型隧道掘进机的组成,并阐述掘进机选型的原则,列举选型的实例,以资借鉴。第 3 章研究隧道掘进机的施工原理,主要是掘进机与岩体的相互作用,重点分析滚刀的破岩机理。第 4 章研究岩体的可掘性,提出岩体的可掘特性表征,分析现有岩体分类系统对评价岩体可掘性的适用性,并研究困难地层对施工的影响。第 5 章系统介绍与掘进机隧道施工相关的岩石物理力学试验,包括岩石脆性试验、岩石摩擦性试验、岩石侵入试验、滚刀破岩试验、掘进机原位掘进试验等。第 6 章研究岩体各参数对隧道掘进机施工的影响,包括岩石物理力学性质、节理特性、地应力条件及地下水条件等。第 7 章介绍并分析各隧道掘进机施工预测模型的优缺点,重点介绍作者提出的掘进机施工速度岩体特性预测模型。第 8 章研究混合地层对隧道掘进机施工的影响。

响,为此给出软硬混合开挖地层定义及分类,分析各类软硬混合地层对掘进机开挖的影响,在介绍现有的混合地层掘进机开挖施工预测模型基础上,研究混合地层中滚刀差异受力,并给出混合地层开挖实例。第9章介绍锦屏二级水电站引水隧洞掘进机施工实例,重点研究高地应力对掘进机开挖的影响,其中应用第3~7章的理论知识,对掘进机开挖隧道进行岩体分区分段,并对掘进机施工速度进行预测,对各段的优化施工给出建议,在跟踪掘进机开挖后,分析各段施工参数,对掘进机隧道施工进行评价,对施工起到了一定的指导作用。

由于各类事务繁杂,本书从初有想法到成稿历时两年多。本书即将付梓之际,我的心情十分激动,这里既有对自己多年钻研耕耘、一朝结果收获的兴奋和自豪,也饱含对鼓励我安心从事科研工作的老师和家人的感激之情。在此,要感谢我的博士指导老师赵坚教授,他引领我进入掘进机隧道开挖研究领域,并持续支持我从事该项研究。感谢在中国科学院地质与地球物理研究所攻读硕士学位时,就开始对我进行精心教导的王思敬院士,他一直关注着我的研究进展,并为我指明方向。感谢北京工业大学杜修力教授,研究工作的顺利开展和他在各方面的支持是分不开的。最感谢我的父母、岳父母,在湘中山区务农的父母从小培养了我谦虚谨慎、积极向上、坚持不懈的性格;我岳父,一名优秀的工程技术人员、船用阀门设计与制造方面的专家,常讲修身、立言,他是我坚持完成本书的动力之一。感谢我的妻子在背后默默的奉献,才使我有时间专心完成本书。我儿子的成长与书稿的撰写同行,他给我带来的快乐令略显枯燥的写作过程充满轻松和愉快。

本书撰写过程中,我的学生何冠文、李真、牛志兵、丁宇、李静静进行了大量文献查找与整理工作,没有他们的帮助,本书的出版还有待时日。感谢研究过程中的合作者吴世勇、王继敏、周春宏、余祺锐、姜厚停、侯哲生。感谢我在新加坡南洋理工大学学习、工作期间及在瑞士联邦理工大学(洛桑)访学期间的老师及合作者赵志业(新加坡)、Tay Ching Kiang(新加坡)、Teo Tiong Yong(新加坡)、江玉生、Amund Bruland(挪威)、Tsang Chao Liang(新加坡)、Sucri Sebastian(阿根廷)、Ernst Buchi(瑞士)、Ulrich Klotz(德国)、Hasfini Cen(马来西亚)、焦玉勇、蔡军刚、张喜虎、卞海英、赵晓豹。

感谢首都世界城市顺畅交通协同创新中心对本书出版的资助。

由于本书涉及较多学科,加之作者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 TBM 的发展及展望	1
1.1 TBM 的发展	1
1.1.1 TBM 简介	1
1.1.2 TBM 的出现和发展	2
1.2 TBM 在我国的研究和应用	5
1.2.1 我国 TBM 的开发研制	5
1.2.2 中外合作制造 TBM	7
1.2.3 TBM 在我国的应用	9
1.3 TBM 掘进能力的发展	13
1.4 TBM 的应用前景	14
参考文献	15
第 2 章 TBM 的分类、组成及选型	17
2.1 TBM 的分类	17
2.2 TBM 的运行机理和适用范围	20
2.2.1 敞开式 TBM	20
2.2.2 单护盾 TBM	20
2.2.3 双护盾 TBM	21
2.2.4 土压平衡盾构	22
2.2.5 泥水平衡盾构	22
2.2.6 复合式盾构或 TBM	23
2.3 典型 TBM 的组成	23
2.3.1 掘进机刀具	24
2.3.2 刀盘	27
2.3.3 刀盘驱动系统	31
2.3.4 支撑及推进系统	32
2.3.5 操作系统	34
2.3.6 支护系统	35

2.3.7 后配套系统的组成	37
2.4 针对不同岩体条件的 TBM 选型	38
2.4.1 西康铁路秦岭 I 线隧道	39
2.4.2 万家寨引黄入晋工程	40
2.4.3 大伙房水库一期输水隧道	42
2.4.4 新疆中天山隧道	43
2.4.5 陕西引红济石工程	44
2.4.6 甘肃省引大入秦工程	46
2.4.7 甘肃省引洮供水一期工程	47
2.4.8 青海省引大济湟调水工程	49
2.4.9 昆明市掌鸠河引供水工程上公山隧道	50
2.4.10 新疆伊犁大坂引水隧道工程	52
2.4.11 兰渝铁路西秦岭隧道	53
2.4.12 重庆地铁六号线一期工程	54
2.4.13 瑞士列奇堡基线隧道	55
2.4.14 台湾北宜高速公路雪山隧道	56
2.4.15 南非莱索托引水隧洞	58
参考文献	61
第 3 章 TBM 施工原理	64
3.1 滚刀破岩机理	64
3.1.1 单滚刀侵入岩石过程	65
3.1.2 滚刀切割理论	67
3.1.3 滚刀几何参数及岩石参数对破岩的影响	70
3.2 滚刀破岩数值模拟	72
3.2.1 离散单元法	73
3.2.2 单滚刀侵入的数值模拟	74
3.2.3 双滚刀间岩片形成的数值模拟	77
3.2.4 双滚刀优化间距计算	79
3.3 TBM 与岩体的相互作用	82
3.3.1 TBM 刀盘掘进工地运行研究	83
3.3.2 TBM 撑靴与岩体相互作用研究	84
3.3.3 TBM 支护过程与岩体相互作用研究	85
参考文献	86

第4章 岩体的可掘特性分析	89
4.1 岩体的可掘性	89
4.1.1 岩体特征可掘性指数	90
4.1.2 高地应力对岩体特征可掘性指数的影响	94
4.2 现有岩体分类系统对评价岩体可掘性的适用性	100
4.2.1 岩体分类系统	100
4.2.2 岩体分类系统对 TBM 开挖隧道岩体可掘性评价的实例	102
4.2.3 岩体分类系统对 TBM 开挖隧道岩体可掘性评价的适用性	105
4.3 困难地层的可掘特性及对施工的影响	106
4.3.1 密集节理化岩体	106
4.3.2 大变形地层	107
4.3.3 岩溶地层	109
4.3.4 断层破碎带	111
4.3.5 完整性好的高强度高摩擦性地层	112
参考文献	113
第5章 TBM 隧道开挖岩石物理力学试验	118
5.1 岩石脆性试验	118
5.1.1 岩石脆性定义及表征	118
5.1.2 脆性试验	120
5.2 岩石摩擦性试验	122
5.2.1 岩石的摩擦性	122
5.2.2 确定岩石摩擦性的地质方法	123
5.2.3 Vickers 试验	127
5.2.4 Cerchar 试验	127
5.2.5 LCPC 摩擦性试验	133
5.2.6 NTNU 摩擦性试验	135
5.3 岩石侵入试验	137
5.3.1 试验简介	137
5.3.2 试验原理及步骤	138
5.3.3 试验影响因素	139
5.3.4 试验的优点及发展前景	140
5.4 滚刀破岩试验	141
5.4.1 线性切割试验机	141
5.4.2 试验原理	142
5.4.3 试验结果分析	144

5.5 TBM 现场掘进试验	147
5.5.1 试验步骤	147
5.5.2 试验参数的确定	148
5.5.3 试验实例及试验结果分析	149
参考文献	163
第 6 章 岩体参数对 TBM 施工的影响	166
6.1 岩石的物理力学性质对 TBM 施工的影响	166
6.1.1 岩石抗压强度	166
6.1.2 岩石的脆性	166
6.1.3 岩石的其他物理力学性质	167
6.2 节理性质对 TBM 施工的影响	168
6.2.1 节理间距对滚刀破岩影响数值模拟	169
6.2.2 节理方向对滚刀破岩影响数值模拟	176
6.2.3 节理对掘进机开挖影响的典型实例研究	185
6.3 地应力条件对 TBM 施工的影响	194
6.4 地下水条件对 TBM 施工的影响	195
参考文献	195
第 7 章 TBM 施工预测	198
7.1 TBM 施工的评价指标	198
7.1.1 掘进速度	198
7.1.2 施工进度	199
7.1.3 掘进机利用率	199
7.1.4 刀具磨损	199
7.2 TBM 施工的单因素预测模型	200
7.3 TBM 施工的多因素预测模型	200
7.3.1 CSM 模型	200
7.3.2 NTNU 模型	202
7.3.3 岩体分类预测模型	208
7.3.4 Gehring 模型	208
7.3.5 概率模型	211
7.3.6 模糊神经网络模型	211
7.4 岩体特性预测模型	212
7.4.1 掘进速度预测岩体概念模型	212
7.4.2 建立数据库	212
7.4.3 数据库中岩体的可掘特性分析	216

7.4.4 回归分析结果	216
7.4.5 岩体参数对掘进速度的影响	218
7.4.6 模型的局限性	222
参考文献	222
第 8 章 混合地层对 TBM 开挖的影响	224
8.1 软硬混合开挖地层定义及分类	224
8.2 软硬混合地层开挖岩石破碎过程及对开挖效率的影响	227
8.2.1 第一类混合开挖地层	228
8.2.2 第二类混合开挖地层	228
8.2.3 第三类混合开挖地层	230
8.2.4 小结	230
8.3 混合地层 TBM 开挖施工预测模型	231
8.4 混合地层中滚刀差异受力数值分析	232
8.4.1 数值分析模型	232
8.4.2 新鲜花岗岩中的计算结果	234
8.4.3 混合地层中的计算结果	235
8.4.4 讨论与结论	236
8.5 混合地层开挖实例	237
8.5.1 深埋污水隧道 T05 隧道段	237
8.5.2 盾构机	238
8.5.3 区域地质特征	240
8.5.4 T05 隧道岩土工程勘察	241
8.5.5 TBM 开挖时遇到的问题	242
8.5.6 混合地层开挖所遇到的典型问题	245
8.5.7 推荐的解决方案及 TBM 的改进措施	247
8.5.8 TBM 改进及降水措施的有效性	248
参考文献	251
第 9 章 锦屏二级水电站引水隧洞 TBM 施工实例	253
9.1 引水隧洞区的工程地质条件	255
9.1.1 地形地貌	255
9.1.2 地层岩性	256
9.1.3 地质构造	257
9.1.4 地下水条件	257
9.1.5 地应力条件	258
9.2 TBM 设计参数	260

9.2.1	施工排水洞 TBM 详细参数	260
9.2.2	1 号引水洞 TBM 详细设计参数	261
9.2.3	3 号引水洞 TBM 详细设计参数	262
9.3	岩石室内物理力学试验	264
9.3.1	单轴压缩试验	264
9.3.2	巴西劈裂试验	265
9.3.3	Cerchar 摩擦试验	266
9.3.4	岩爆试验	269
9.4	TBM 原位掘进试验	283
9.4.1	1 号引水隧洞 TBM 掘进试验	283
9.4.2	3 号引水隧洞掘进试验	287
9.4.3	施工排水洞掘进试验	291
9.4.4	岩石渣片筛分试验及形状分析	293
9.4.5	不同高地应力条件下 TBM 掘进试验结果对比分析	298
9.4.6	结语	299
9.5	基于 TBM 破岩规律的引水隧洞岩体分段	300
9.6	引水隧洞 TBM 开挖预测	305
9.6.1	不同岩体条件段的 TBM 施工预测	305
9.6.2	TBM 掘进试验结果与相应点预测结果对比分析	306
9.7	TBM 开挖评价	308
9.7.1	1 号、3 号引水隧洞 TBM 施工进度	308
9.7.2	典型岩体条件段 TBM 开挖	311
9.7.3	典型撑靴洞壁破坏情况	315
9.7.4	TBM 开挖分析	321
9.7.5	滚刀磨损分析	324
9.7.6	总结	327
	参考文献	328
	附录	329

第 1 章 TBM 的发展及展望

1.1 TBM 的发展

1.1.1 TBM 简介

隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)是一种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机械。国际上所讲的 TBM 包括国内所讲的隧道掘进机及隧道盾构机。与国外进行交流时,我们所讲的 TBM 应为硬岩隧道掘进机。TBM 与隧道盾构机最大的区别是开挖方式不同。TBM 刀盘的设计是有效破岩,而盾构机隧道开挖主要是保持掌子面的稳定。当然现在发展的复合式掘进机,可以在复杂地层条件下进行开挖,如硬岩模式与泥水平衡模式复合掘进(盾构)机、硬岩模式与土压平衡模式复合掘进(盾构)机。

TBM 具有掘进、出渣、导向、支护四大基本功能。掘进、出渣、导向这三个功能始终贯穿于 TBM 掘进全过程中,支护功能只在必要时才使用,大部分 TBM 还配备有超前地质预测设备。掘进功能主要由刀盘旋转带动滚刀在掌子面破岩和推进掘进机前进的扭矩系统与推进系统完成。出渣功能一般分为导渣、铲渣、溜渣、运渣四个部分。导向功能主要包含确定方向、调整方向、调整偏转。支护功能分为掘进前未开挖的地质预处理、开挖后洞壁的局部支护以及全部洞壁的衬砌。超前地质预测系统一般由超前钻机及自带物探系统组成。

现代 TBM 采用液压、机械和电气等诸多领域的高科技成果,运用计算机自动控制、工厂化作业、闭路电视监视,是集掘进、出渣、运输、支护于一体的成套设备,所以,隧道施工概念慢慢从隧道建造向隧道制造转变。相对于传统钻爆法, TBM 具有高效、快速、优质、安全等优点。此外,采用 TBM 掘进还有利于环境保护和节省劳动力,提高施工效率,用于大于 3km 的长隧道施工更经济。

TBM 的不足之处主要有当遇到不良工程地质条件时适应性差,不如传统钻爆法施工灵活,前期的一次性投入费用较大,对施工人员的素质要求较高。

由于 TBM 设计和制造技术的持续改进,其对地质及环境条件的适应性越来越强,应用的经验也越来越丰富,许多长的大隧道偏向于使用 TBM 开挖。国际上,20 世纪 70 年代已广泛使用 TBM 进行硬岩隧道施工。我国自 20 世纪 90 年代始,才将 TBM 推广应用到引水隧道、铁路隧道及交通隧道等隧道工程中。

1.1.2 TBM 的出现和发展

1846 年, Maus 设计的岩石切割机用于开挖在法国和意大利之间穿过阿尔卑斯山的 Fréjus 铁路隧道。Maus 设计的岩石切割机被认为是第一台真正意义上的 TBM。100 个冲击转头安装在钻架台车上, 可是在开挖过程中依旧采用传统的人工方法进行开挖^[1]。

1851 年, 美国工程师 Wilson 设计开发了一台蒸汽机驱动的岩石切割机, 在花岗岩中试用, 被公认是第一台在岩石中连续掘进的机器, 如图 1.1 所示。1853 年, 这台 TBM 在美国马萨诸塞州的 Hoosac 铁路隧道中部分地段进行过试验。该隧道长 6.56km(共用 21 年时间才完成), Wilson 的掘进机只掘进了 3.48m 就被放弃了。另外两台类似的掘进机也在同一隧道中使用过, 但都没有获得成功^[2]。由于在设计上存在难以克服的滚刀问题, 不敌当时刚诞生的钻爆法, 致使掘进机被搁置^[3]。

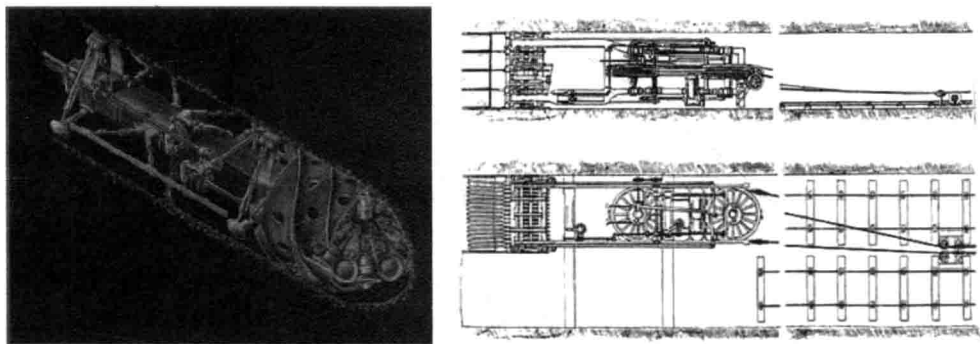


图 1.1 1851 年 Wilson 设计的 TBM^[2]示意图

在以后的 30 年, 国外设计并试制了各式各样的 TBM 共 13 台, 均有所进步。比较成功的是 1881 年 Beaumont 开发的压缩空气式 TBM^[4], 如图 1.2 所示, 成功应用于英吉利海峡隧道直径为 2.13m 的勘探导坑。这台 TBM 先后从两岸掘进, 在海底各开挖了 1.6km 长的导洞。该机采用安在转动头上的切割工具进行开挖, 其动力为压缩空气, 在白垩系地层中连续掘进了 53 个工作日, 掘进速度为每天 1.5m。

1881~1926 年, 一些国家又先后设计制造了 21 台 TBM, 因受当时技术条件的限制, TBM 的开发裹足不前^[4]。直至 20 世纪 50 年代, 欧美及日本等工业发达国家和地区又开始相继研究设计并制造 TBM, 并在实际应用中获得了较为理想的效果, 至此, TBM 才真正进入了实用阶段。美国西雅图的 Robbins 进入 TBM 制造领域^[2], 他在 1952 年建立了 Robbins 公司。1954 年, Robbins 公司制

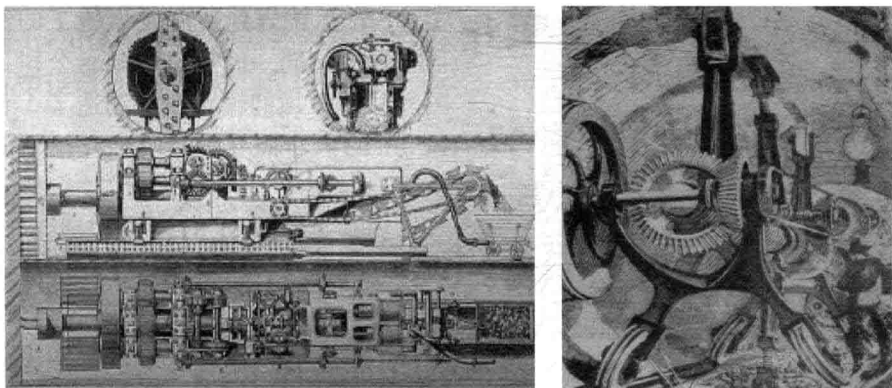


图 1.2 1881 年 Beaumont 设计的 TBM

造的 TBM 首次成功应用于美国南达科他州首府皮耶尔市 Oahe Dam 的隧洞工程中^[5],如图 1.3 所示。此 TBM 的直径为 8m,掘进的岩层为断层破碎带和节理发育的页岩,最快日进尺为 48m,是当时其他开挖方法施工进度的 10 倍以上^[1]。

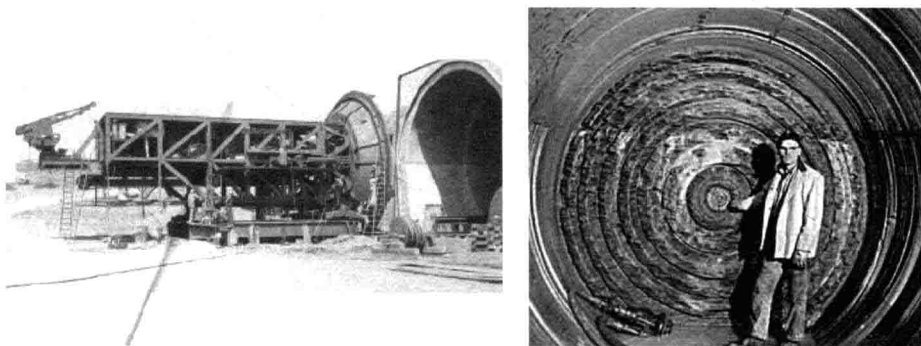


图 1.3 1952 年 Robbins 公司设计的第一台软岩 TBM

1955 年,Robbins 公司又连续制造了 3 台直径 2.44m 的 TBM,这三台 TBM 均不能认为是成功的,在对页岩、石灰岩互层岩体及灰岩岩体的掘进中,很快暴露出它们的一些弱点,主要是碳化钨刮刀的损坏率极高、传动轴的刚性不够、高压液压系统的元器件损坏、链板输送机的损坏,并且普遍存在着刚性和强度不足的问题^[4]。

1956 年,硬岩 TBM 第一次在设计上发生了重大的变革——首次成功将滚刀应用在硬岩掘进中^[5]。同年,Robbins 公司制造的直径 3.28m 硬岩 TBM,成功地通过了工业性试验,如图 1.4 所示。盘形滚刀的应用是全断面硬岩掘进机的重要标志,是 TBM 发展中的一个重要转折点^[4]。该 TBM 被应用于加拿大多伦多市的 Humber 下水道工程,掘进长度约为 4.51km,掘进的地层岩性由砂岩、页岩和灰岩组成,岩石抗压强度为 5~186MPa,最快日进尺为 35m。这个项目首次展示