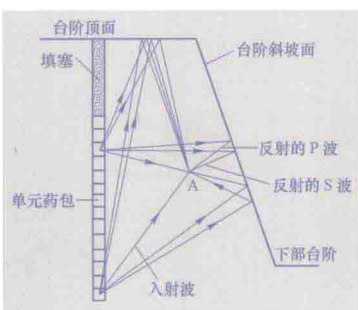


■ 邹定祥 编著

土木工程岩石开挖

| 理论和技术 |



冶金工业出版社

www.cnmp.com.cn

土木工程岩石开挖 理论和技术

邹定祥 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2017

内 容 简 介

本书总结了近几十年来在岩石开挖领域中技术新进展和各国学者（包括西方国家及中国和俄罗斯学者）所提出的各种理论。书中重点阐述了岩石爆破的理论和技術，并详尽地介绍了各种非爆破方法，包括用机械和机具进行岩石开挖技术。书中还对岩石开挖中的安全和环保的有关理论、技术和法律法规进行了介绍。全书分为三篇，分别为第一篇基础知识、第二篇露天开挖和第三篇地下开挖。书中也收集了大量技术方法和数据，使它成为一本既有理论又有实际应用的工具书。

本书适合于从事岩石开挖领域的研究人员和学者使用，也可作为土木工程专业和采矿专业师生的教学参考书以及供现场工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程岩石开挖理论和技术/邹定祥编著. —北京:
冶金工业出版社, 2017. 5

ISBN 978-7-5024-7474-4

I. ①土… II. ①邹… III. ①土木工程—岩石基础
IV. ①TU471

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 070733 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 程志宏 徐银河 美术编辑 吕欣童 版式设计 彭子赫

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7474-4

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2017 年 5 月第 1 版, 2017 年 5 月第 1 次印刷

210mm×297mm; 21.75 印张; 4 彩页; 717 千字; 330 页

109.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

序 一

岩石开挖是一项复杂而艰巨的工程。《土木工程岩石开挖理论和技术》一书总结了几十年来土木工程中岩石开挖的理论和技术,不仅系统地阐述了岩石开挖涉及的各种理论观点,也详尽地介绍了各种开挖技术。该书理论联系实际,图文并茂,既可作为相关专业的参考教材,又不失为一本难得的工具体书。

邹定祥曾是中国工程爆破协会的常务理事。早在上世纪八十年代在马鞍山矿山研究院工作期间,他开发的“露天矿台阶爆破过程的三维数学模型”(BMMC模型)曾被编入我国爆破学科研究生教材中。于亚伦教授主编的《工程爆破理论与技术》和我主编的《爆破手册》中都作了介绍。

邹定祥既有扎实的理论基础,又在长期的工程实践中积累了丰富的经验,特别是近二十多年来在中国香港的工作中,有机会更多地接触到世界各国的先进理论和技术,这些都在书中得以充分体现。

邹定祥几十年来勤奋工作、刻苦钻研,退休后仍用三年时间完成了该书的中、英文版本的撰写工作,令人赞赏。此次约我为该书作序,我欣然应允。在此特荐予各位同行,诚以广邀同道,切磋共进;冀望后来之学秉持相同之科学精神,继往开来,为土木工程中岩石开挖的理论和技术添砖加瓦,服务于全人类。

中国工程院院士
中国爆破行业协会会长
2016年5月



序 二

岩石开挖是人改变地球表层岩石面貌的举措，而爆破是它最有效的手段。在局外人看来，开挖爆破是“一声巨响，山河改样”，三分神秘加七分惊险。对践行者而言，每次成功的爆破，都会给他带来无比的兴奋和内心的喜悦。这是因为他手中掌握的雷霆万钧之力，在岩层里完成了又一件“雕塑”的作品。本书作者五十多年的职业生涯，几乎都是在所谓岩石开挖爆破中度过的。

当本书作者在年逾古稀之后回顾一生，历数一次次爆破，在感慨万端之余，却还希望能为后生、为社会再奉献点什么。他用了三年工夫，把积累的实际经验和学科思考，都融汇编织在这本《土木工程岩石开挖理论和技术》之中。这本著作，虽然在知识的海洋里，只添加了一点一滴，仅仅有一个小小的涟漪，可是这是他自己学识的体现，是生命留下的痕迹，也是给青年人留下最难能可贵的交代。

本书涉及面广，凡岩石开挖学科的方方面面都包括在内。从岩石的地质结构到工程性质；从开挖的设备、工具到爆破用的炸药、火工品；从光面开挖到预先加固，事后衬砌；从施工技术数据资料，到开挖设计的专家系统；从环保安全到施工组织管理，在各个环节无不做了阐述。在许多章节里，都融入了作者独到的见解和恰当的评价。本书数据资料翔实，内容丰富则可与“手册”相比美，实是岩石工程方面的一本力作。

作者有过三年的学位研究生经历，培养了富有理论思考的素养。在本书中，尤其在爆破理论方面，突破了传统的“爆破漏斗”理论。强调作为爆破对象的岩石，是被弱面切割过带有某种块度分布的结构物体，爆破就是对这种“天然块度”的再破碎，形成新的分布。在这个基础上，他还利用应力波传递的原理，编制了BMMC爆破模型程序，它更深刻地反映出实际爆炸破碎岩石的过程。

作者长期在中国香港工作，更早更多地接触到世界各国的先进设备、器材、观点和方法。这些新颖的内容构成了本书的特色。中国香港又是地窄人众的地方，对施工的安全、环保要求十分严格，在管理上也比较健全。书中详细介绍了这方面的成功经验，很值得内地借鉴。

由于地域不同行业相异的原因，本书个别用词术语与内地不尽一致，这是可以理解的。有的术语十分生动、形象，比如“主炮王”，也许有朝一日会被大家接受而流行。

中国是当今世界上岩石开挖工程量最多，规模最大的国家。希望从事岩石开挖的青年朋友，在读这本《土木工程岩石开挖理论和技术》中得到启迪，为中国的伟大复兴作出贡献。

徐小莉
2016年5月20日于东北大学

前 言

自从人类进入文明社会以来，为了开拓和改善生存空间以及从地球中获取各种资源，人类对地球的表层并逐步深入地球深层进行开挖，后经总结逐渐形成了土木工程和采矿业的重要内容。从早期的人工开挖到近代的机械开挖和爆破，人类经历了几千年的漫长历程，并随着科学技术的发展，积累了大量的知识，提出了各种理论来解释和预测开挖过程中遇到的各种问题。

本书作者曾在地下矿山工作了十一年，在研究领域又深造和工作了十一年，而后到中国香港工作了二十多年。五十年的职业生涯都没有离开过岩石开挖。长期的现场技术工作使作者积累了不少的实际经验和知识。1984年在瑞典的短期进修使作者开阔了视野。在研究领域的深入钻研使作者的理论水平得以提升的同时，在中国香港的工作更使作者有机会接触到世界各国在岩石开挖中的先进理论和技术。这五十多年的经验和知识积累为这本书打好了坚实的基础。

本书作者总结了近几十年来各国学者和工程师们在开挖工程中——主要是岩石开挖（因为岩石开挖的难度使其更具有挑战性）技术的进展和提出的各种理论。考虑到采矿工程另具其更为复杂的特点，本书将其涉猎限于土木工程的范畴，但它的绝大部分内容仍适用于采矿工业。由于岩石爆破至今仍是岩石开挖工程的最重要的手段，本书中对岩石爆破的理论和技术较之其他开挖方法阐述得更为详细。

作者在浏览岩石开挖领域的各种书刊时发觉欧美国家（包括印度、日本和南非）的作者极少介绍中国和俄罗斯（包括苏联）学者在这一领域中所做的大量工作和提出的各种有价值的理论。因此，本书在介绍欧美各国学者们的论述的同时也对至今仍被广泛应用的一些中国和俄罗斯学者的著述进行了介绍。

本书内容分为三个部分。

第一部分是基础知识，包括开挖工程的对象——岩石和岩体的基本知识和有关理论、作为岩石开挖的最重要手段（钻孔爆破）必备的基本知识、基本的技术、主要材料和设备以及相关的基础理论。

第二部分讲述岩石的露天开挖。在介绍了非爆破开挖的各种技术后，重点阐述了各种露天爆破理论和技术以及计算机数字模拟技术和CAD技术在露天爆破中的应用。

第三部分讲述岩石的地下开挖。在详尽阐述地下开挖的钻爆、通风、装运、岩体支撑加固技术和理论以及计算机技术应用之前，也详尽地介绍了各种机械开挖的各种技术，包括隧

道、天井和竖井掘进机技术。

由于岩石开挖的工作环境复杂，而地下开挖时岩体条件复杂多变，特别是爆破开挖时要应用爆炸品，因此在本书中作者用了较多的篇幅还尽可能详尽地阐述施工中的各项安全和环保事项、各种检测技术和设备、安全生产所必须采取的安全防护措施等。

为了使本书更具有实用性，书中也尽量收集了各种技术方法和技术数据，使本书尽可能成为一本既有理论又联系实际的应用型工具书。

本书可供从事岩石开挖的工程师们、该领域的研究人员或学者阅读，也可作为土木工程专业和采矿专业师生的教学用书或参考书。本书详细介绍了各国在该领域的成就，内容严谨、详尽，由于东西方的差异，国内尚未见到一本对岩石开挖的理论和技术的如此全面阐述的著作，希望本书对读者有所帮助。

本书的英文版已由施普林格（Springer）出版社和冶金工业出版社在全球联合出版发行。

本书在写作过程中得到了很多朋友和同行们的支持和鼓励。特别要提到的是，作者的师弟杨瑞林博士（美国奥瑞克公司的首席研究员），广州宏大爆破工程有限公司郑炳旭总经理，香港 AMS 公司的张耀祥先生，石家庄成功机电有限公司的唐秋明董事长，中钢集团马鞍山矿山研究院爆破工程有限责任公司的刘为州总经理。阿特拉斯公司，山特维克公司除对本书给予支持外，也为本书提供了有价值的资料并对书中有关内容进行了审阅和修改。作者的同学和最好的朋友，东北大学资源与土木工程学院前院长陈宝智教授从一开始就积极鼓励和支持作者完成此书，在此一并致谢！

在书中作者明显流露出对母校——中国东北大学的偏爱。书中作者介绍了一些前辈们所做的至今也不失光彩的成就。作者的导师，一位备受尊敬的学者，年已八十多高龄的徐小荷教授还为本书作序，使作者备受鼓舞。

使作者感到特别荣幸的是，中国工程院院士、中国爆破行业协会理事长，尊敬的汪旭光教授特地为本书写了第一序言，在此作者表示由衷的感谢。

由于本书涉及较多学科，加之作者水平有限，书中如有不妥之处，恳请读者批评指正。

邹定祥

2016 年秋于中国香港

目 录

第一篇 基础知识

1 地质	1
1.1 岩石的分类	1
1.1.1 岩浆岩 (Igneous Rocks)	1
1.1.2 沉积岩 (Sedimentary Rocks)	2
1.1.3 变质岩 (Metamorphic Rocks)	4
1.2 岩石的性质	4
1.2.1 岩石的物理性质	4
1.2.2 岩石的力学性质	6
1.3 岩体的地质构造	7
1.3.1 褶皱	8
1.3.2 断层	8
1.3.3 不连续面: 层面、节理和裂隙	10
1.3.4 复式构造-不整合面	11
1.3.5 地质构造要素的描述方法	11
1.4 岩体的特性对开挖工程的影响	14
1.4.1 岩体中不连续面的特征描述	14
1.4.2 岩体特性的现场勘测	15
1.4.3 地下水	15
1.4.4 岩体性质对开挖工程的影响	15
1.5 岩石的坚固性分级	18
1.5.1 普洛托吉雅柯诺夫 (М. М. Протоdjаконов) 岩石分级	18
1.5.2 岩石的三性综合分级	20
1.5.3 中国国家标准《工程岩体分级标准》(GB 50218—2014)	20
参考文献	23
2 岩石钻孔及钻孔机械	25
2.1 钻进岩石破碎机理及岩石的可钻性	25
2.1.1 钻进岩石破碎机理	25
2.1.2 岩石的可钻性及其分级	27
2.2 钻孔机械	32
2.2.1 钻机操纵方式分类	32
2.2.2 钻进方法分类	33
2.2.3 回转-冲击式钻进	34
2.3 回转式钻进	39
2.3.1 牙轮钻机及钻具	39
2.3.2 具切削型钻头的回转式钻进	40

2.4 钻具	41
2.4.1 回转-冲击式钻进之钻具	41
2.4.2 钻机和钻具的选择	46
参考文献	50
3 炸药	51
3.1 炸药发展的历史	51
3.2 炸药爆炸的特点	52
3.3 炸药化学分解反应的形式及炸药的爆轰过程	52
3.3.1 炸药化学分解反应的形式	52
3.3.2 炸药的爆轰过程	53
3.4 炸药的氧平衡	55
3.4.1 氧平衡	56
3.4.2 氧系数	57
3.5 炸药的热化学	57
3.5.1 炸药的爆热	57
3.5.2 炸药的爆温	60
3.5.3 炸药的爆容	61
3.5.4 炸药的爆压和爆速	62
3.6 炸药的分类	62
3.6.1 按组成分类	62
3.6.2 按敏感度分类	63
3.6.3 按爆轰速度分类	63
3.6.4 按用途分类	63
3.6.5 按联合国危险品运输规则分类	64
3.7 炸药的性能及其测试技术	65
3.7.1 密度	65
3.7.2 爆速	65
3.7.3 威力和能量	67
3.7.4 殉爆	69
3.7.5 感度	69
3.7.6 防水性	69
3.7.7 炮烟和炮烟分级	70
3.7.8 钝化	71
3.7.9 炸药贮存稳定性和贮存期	71
3.8 工业炸药(商用炸药)	72
3.8.1 硝化甘油(NG)类炸药	73
3.8.2 铵梯类炸药	73
3.8.3 含水炸药	75
3.8.4 散装爆破剂	77
参考文献	81
4 起爆系统	82
4.1 雷管	82
4.1.1 雷管的简略发展历史	82

4.1.2 火雷管和导火索	83
4.1.3 电雷管	85
4.1.4 电磁雷管	88
4.1.5 非电导爆管雷管	88
4.1.6 电子(数码)雷管	92
4.2 导爆索	93
4.3 起爆药柱(继爆器)	94
参考文献	95
5 岩石爆破破碎机理	96
5.1 爆破在岩石中产生的冲击波和应力波	96
5.1.1 冲击波和应力波	96
5.1.2 应力波的种类	96
5.1.3 从自由面反射的应力波	96
5.2 岩石爆破破碎机理	97
5.2.1 冲击波形成的粉碎区	97
5.2.2 应力波产生的径向裂隙区	98
5.2.3 应力波从自由面反射	98
5.2.4 爆炸气体的作用	98
5.3 在岩石爆破破碎过程中炸药能量分配和利文斯顿爆破漏斗理论	100
5.3.1 在岩石爆破破碎过程中炸药能量分配	100
5.3.2 利文斯顿爆破漏斗理论	101
5.4 岩石的可爆性分级	102
5.4.1 岩石的可爆性及其影响因素	102
5.4.2 岩石的可爆性分级准则	104
5.4.3 典型的岩石的可爆性分级	105
参考文献	109
6 爆破评估报告	111
6.1 资料收集	111
6.1.1 从有关政府部门收集资料	111
6.1.2 确定爆破工程所影响的范围	111
6.1.3 与影响区内所有单位联络并收集的信息	111
6.1.4 收集有关现有土力工程、气象和水文的资料	112
6.2 现场勘测	112
6.2.1 对爆破影响区内所有对象的现有状况进行摄影和量测	112
6.2.2 对爆破影响区内的土力工程及地质地貌进行勘测	112
6.2.3 记录已有缺陷	112
6.3 爆破工程对环境影响的评估	112
6.3.1 运输和储存爆炸品对环境影响的评估(EIA)	112
6.3.2 爆破飞石的潜在风险	113
6.3.3 爆破振动的影响	113
6.3.4 爆破工程引起的空气冲击波的影响	115
6.3.5 设置所有受影响对象的监测点	115
6.4 消除和控制爆破工程产生的负面影响的措施	115

6.4.1 防止和防护爆破飞石	115
6.4.2 保护对象的爆破振动限制标准及爆破振动的控制	115
6.4.3 对空气冲击波超压的限制	119
6.4.4 监测爆破振动和空气冲击波超压的设备	122
6.4.5 爆破振动和空气冲击波超压的警戒程序及其相应的要求和措施	122
6.5 概述爆破开挖设计方案	123
6.5.1 开挖工程的整体安排	123
6.5.2 开挖工程的规模、开挖方法和主要设备	123
6.5.3 工程中将要使用的爆炸品和爆破设计方案	123
6.5.4 安全措施、疏散范围和疏散程序	123
6.5.5 对设立工地爆炸品仓库的可行性进行评估并提出相应的安排和安全措施	123
参考文献	124

第二篇 露天开挖

7 非爆破法开挖	127
7.1 人工开尖和液压破碎锤开挖	127
7.1.1 人工开尖	127
7.1.2 液压破碎锤开挖	127
7.2 液压岩石劈裂机	128
7.2.1 楔劈类液压岩石劈裂机	128
7.2.2 活塞型液压岩石劈裂机	129
7.3 静态裂石剂	129
7.4 其他非爆破方法开挖	131
7.4.1 可控泡沫射流	131
7.4.2 气体压力破碎岩石技术	131
参考文献	133
8 台阶爆破	134
8.1 台阶爆破的几何参数	134
8.1.1 炮孔倾斜角 β	134
8.1.2 炮孔直径 d	134
8.1.3 台阶高度 H	134
8.1.4 负荷 W	135
8.1.5 孔距 S	137
8.1.6 超深 h	138
8.1.7 填塞高度 l_2	139
8.1.8 炮孔排列	139
8.2 炸药单耗（炸药系数）及炸药量计算	140
8.2.1 炸药单耗（炸药系数）	140
8.2.2 炸药量计算	140
8.3 炮孔装药结构	141
8.3.1 连续装药结构	141
8.3.2 连续分段装药结构	142

8.3.3 分段间隔装药结构	142
8.4 起爆方法和起爆顺序	142
8.4.1 电雷管起爆系统	142
8.4.2 非电导爆管雷管起爆网路设计	143
8.4.3 电子雷管起爆网路设计	146
8.5 炮孔起爆延时的选择	146
参考文献	147
9 沟槽爆破	148
9.1 炮孔布置和起爆顺序	148
9.1.1 炮孔直径	148
9.1.2 炮孔布置	148
9.1.3 起爆顺序	148
9.2 沟槽爆破的炮孔装药设计	150
9.3 沟槽爆破安全	153
参考文献	153
10 露天开挖的轮廓爆破技术	154
10.1 轮廓爆破的种类	154
10.2 预裂爆破和光面爆破	154
10.2.1 预裂爆破和光面爆破炮孔的特点	154
10.2.2 预裂爆破和光面爆破炮孔的机理	154
10.3 预裂爆破和光面爆破炮孔的参数	155
10.3.1 理论方法	155
10.3.2 经验方法	156
10.4 预裂爆破和光面爆破的设计、装药和起爆	158
10.4.1 预裂爆破和光面爆破设计	158
10.4.2 预裂爆破和光面爆破的装药	158
10.4.3 轮廓炮孔的填塞和起爆	159
10.5 缓冲爆破和密集钻孔	160
10.5.1 缓冲爆破	160
10.5.2 密集钻孔	161
参考文献	161
11 露天爆破安全	162
11.1 爆破操作的一般规程	162
11.2 爆破飞石及其控制	162
11.2.1 爆破飞石及其产生的原因	162
11.2.2 飞石距离计算	164
11.2.3 飞石的预防和保护措施	165
11.3 爆破振动及其控制	167
11.3.1 爆破产生的地层振动	167
11.3.2 影响爆破振动波强度的因素	169
11.3.3 爆破中控制爆破振动的措施	171
11.3.4 岩石爆破中预测和限制爆破振动的准则	172

11.3.5 测监爆破振动的设备	174
11.4 爆破产生的空气冲击波超压及其控制	174
11.4.1 露天爆破产生的空气冲击波超压	174
11.4.2 影响空气冲击波超压的因素	175
11.4.3 空气冲击波超压的预测	176
11.4.4 在露天爆破中限制空气冲击波超压的标准	176
11.4.5 减低露天爆破产生的空气冲击波超压的措施	177
参考文献	178
12 台阶爆破计算模型和计算机辅助设计	179
12.1 概述	179
12.1.1 爆破计算模型	179
12.1.2 计算机辅助设计	179
12.1.3 岩石爆破块度分布规律	179
12.2 几个典型的爆破数学模型	181
12.2.1 哈里斯模型	181
12.2.2 法夫里的模型和 BLASPA 模拟程序 ^[12]	182
12.2.3 Kuz-Ram 模型 ^[13]	183
12.2.4 BMMC 数学模型	185
12.2.5 节理发育岩体的爆破模型	190
12.2.6 SABREX 模型	191
12.3 几个典型的计算机辅助爆破设计程序	191
12.3.1 BLAST MAKER	191
12.3.2 EXPERTIR	193
12.3.3 Blast-Code 模块	194
12.3.4 IESBBD 专家系统	194
参考文献	197

第三篇 地下开挖

13 绪论	199
13.1 地下开挖的种类和特点	199
13.2 地下开挖同环境的关系	200
13.2.1 地下开挖对环境的影响	200
13.2.2 周围环境对地下开挖的限制	201
13.3 岩石中地下开挖的方法	201
参考文献	202
14 岩石的地下机械开挖	203
14.1 钻孔和液压锤开挖	203
14.2 臂式掘进机开挖	204
14.3 向上式(天井)全断面掘进机	206
14.3.1 天井掘进机的掘进方式	206
14.3.2 天井掘进机在土木工程中的主要应用	208

14.3.3 采用天井掘进机的主要优点	208
14.4 全断面隧道掘进机 (TBM)	208
14.4.1 引言	208
14.4.2 隧道掘进机面 (TBM) 的分类	209
14.4.3 刀具破碎岩石的机理	211
14.4.4 TBM 的操作系统	213
14.4.5 TBM 选型	216
14.5 竖井的机械开挖	216
14.5.1 臂式掘进机开挖-垂直井开挖机 (VSM)	216
14.5.2 全断面竖井挖掘机	217
14.6 岩石中钻孔灌注桩	218
14.6.1 小至中直径的钻孔灌注桩	218
14.6.2 大直径混凝土灌注桩	219
参考文献	220
15 其他地下开挖方法	221
15.1 明挖法	221
15.1.1 明挖法的建造方法	221
15.1.2 明挖法边帮的支撑方法	222
15.2 箱涵隧道顶入法和顶管法	223
15.2.1 箱涵隧道顶入法 (jacked box tunneling)	223
15.2.2 顶管法	223
参考文献	225
16 地下开挖的钻孔爆破法概论	226
16.1 引言	226
16.1.1 钻孔爆破法的工作循环	226
16.1.2 钻孔爆破法的工作条件	226
16.1.3 钻孔设备、炸药和爆破设计	226
16.2 隧道和硐室的开挖方法	226
16.2.1 全断面开挖	227
16.2.2 部分断面开挖	227
16.3 直井开挖方法	228
16.3.1 竖井开挖	228
16.3.2 天井开挖	229
参考文献	232
17 光面爆破技术	233
17.1 光面爆破的特点和机理	233
17.2 光面爆破炸药量计算	233
17.3 光面爆破的装药结构和方法	234
参考文献	235
18 地下开挖的爆破设计	236
18.1 隧道及硐室的爆破设计和施工	236

18.1.1	炮孔布置及爆破顺序	236
18.1.2	掏槽(抽炮)孔布置	236
18.1.3	对掏槽孔和隧道爆破的讨论	238
18.1.4	平行孔掏槽设计	240
18.1.5	崩落孔布孔设计	241
18.1.6	抬炮孔	243
18.1.7	轮廓孔	243
18.1.8	炮孔的线性装药密度	243
18.1.9	隧道爆破设计的其他参考资料	244
18.2	全断面掘进竖井的爆破设计	246
18.2.1	掏槽(抽炮)孔设计	246
18.2.2	竖井爆破参数	246
18.3	地下爆破的起爆设计	247
18.3.1	起爆设计的原则	247
18.3.2	电子雷管用于隧道爆破	249
18.4	计算机辅助隧道爆破设计和管理	251
18.4.1	山特维克的 iSURE®——隧道管理软件	251
18.4.2	阿特拉斯的“地下工程管理 MWD”软件	254
	参考文献	258
19	地下工程的装载和运输	259
19.1	隧道开挖的装载和运输	259
19.1.1	轮胎式装载机配自卸式卡车	260
19.1.2	连续装载机配梭车或皮带运输机	260
19.1.3	轨道运输	261
19.2	竖井开挖的装载和提升	263
19.2.1	人工竖井开挖的装载和提升	263
19.2.2	机械化竖井开挖的装载和提升	263
	参考文献	265
20	地下开挖的通风	266
20.1	开挖工程对通风的要求	266
20.1.1	地下空间空气质量的要求	266
20.1.2	对新鲜空气供气量的要求	266
20.2	通风设备	266
20.2.1	对通风设备的要求	266
20.2.2	地下通风系统的风机种类	267
20.3	通风系统设计	267
20.3.1	通风机流量计算	267
20.3.2	风压计算	268
20.3.3	风机和风筒设计	268
20.3.4	风机选择	269
20.3.5	通风筒	269
20.4	地下开挖工程的通风方式	270
20.4.1	压入式通风	270

20.4.2 抽出式通风	270
20.4.3 混合式通风	270
20.5 优化通风	271
参考文献	271
21 地层的加固和支撑	272
21.1 岩体的稳固性对地下开挖的影响	272
21.1.1 地压的概念和地下空间周围的应力分布	272
21.1.2 地层条件对地下开挖的影响	274
21.1.3 岩体开挖的稳定性分级	274
21.2 开挖前对地层的预先加固	281
21.2.1 冻结法开挖	281
21.2.2 地层预注浆开挖	283
21.3 新开挖空间的初始支护	287
21.3.1 岩钉、岩石锚杆和岩石锚固	287
21.3.2 岩石锚杆的种类	288
21.3.3 岩石锚杆的安装	289
21.3.4 铁网在岩石面上的安装	293
21.3.5 喷射混凝土和钢纤维喷射混凝土	293
21.3.6 钢拱架和钢肋拱架	294
21.3.7 超前锚杆和管棚预支撑	295
21.3.8 软弱地层的坑口开挖	296
21.4 地下开挖的永久支护	297
21.4.1 永久支护的选择	297
21.4.2 永久支护的种类	297
21.5 新奥隧道工法	300
参考文献	301
22 地下开挖的监测及其设备	302
22.1 绪言	302
22.2 沉降监测	302
22.2.1 地面沉降监测	302
22.2.2 公用设施和建筑物沉降监测	302
22.3 位移和变形监测	305
22.3.1 倾斜仪监测	305
22.3.2 磁性沉降计	305
22.3.3 测斜器	306
22.3.4 裂缝监测	307
22.3.5 收敛矩阵监测	307
22.3.6 时域反射计传感装置——斜坡位移探测器	308
22.4 地下水监测	308
22.4.1 测水管/水压计	308
22.4.2 振弦式水压计	309
22.4.3 孔隙水压力传感器	309
22.5 爆破振动和空气冲击波超压监测	310

22.6 监测设备管理..... 310

 22.6.1 设备选择..... 310

 22.6.2 监测数据采集频率..... 312

 22.6.3 警报机制..... 312

参考文献..... 314

23 地下工程的健康、安全和风险管理..... 315

 23.1 引言..... 315

 23.2 地下开挖的一般安全要求..... 317

 23.2.1 员工识别系统..... 317

 23.2.2 照明..... 317

 23.2.3 通讯..... 317

 23.2.4 信号/警戒标志..... 317

 23.3 地下工程的主要危害和危险及其排除措施..... 318

 23.3.1 地层塌陷..... 318

 23.3.2 爆破产生的地层振动..... 318

 23.3.3 隧道掘进机 (TBM)..... 319

 23.3.4 隧道运输..... 320

 23.3.5 建造中的竖井..... 320

 23.3.6 隧道空气和空气质量控制..... 321

 23.3.7 消防和救护..... 322

 23.3.8 炸药和爆破工作..... 324

 23.4 工地临时炸药仓及炸药在工地内的运输..... 325

 23.4.1 工地内临时炸药仓..... 325

 23.4.2 爆炸品运输..... 327

 23.4.3 爆炸品仓库和运输车辆的消防设备 and 应用..... 328

 23.4.4 紧急计划..... 328

参考文献..... 329