



教育部高等学校地矿学科教学指导委员会
地质工程专业规划教材

JIAOYUBUGAODENGXUEXIAODIKUANGXUEKE
JIAOXUEZHIDAOWEIYUANHUI
DIZHIGONGCHENGZHUANYEGUIHUAJIAOCAI



岩土钻掘工艺学

鄢泰宁 主编



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

014032463

TU4-43
44

内容简介

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会
地质工程专业规划教材

岩土钻掘工艺学

主 编 鄢泰宁
副主编 陈宝义 石永泉 彭振斌 吴 立
编委会 殷 琨 蒋国盛 陈礼仪 隆 威
鄢泰宁 赵大军



中南大学出版社

www.csupress.com.cn



北航

C1720826

TU4-43

44

内 容 简 介

《岩土钻掘工艺学》是二级学科“地质工程”下属“勘查技术与工程”专业高年级的专业必修课教材。“勘查技术与工程”专业以现代钻(探)掘(进)技术为手段,以岩、土体为工作对象,服务于矿产资源的勘查、开发与技术管理,基础工程(含岩土加固、地质灾害治理)的勘查、设计、施工与管理 and 地质科学探测等领域。

2008 年秋在长沙召开的“教育部高等学校地矿学科教学指导委员会”会议上,决定《岩土钻掘工艺学》作为全国地质工程专业规划教材之一。该教材主要包括岩土钻掘破碎原理,钻孔弯曲原理,施工过程最优化准则,现代钻探工艺原理及取样技术,岩土钻掘现场工程设计等基本原理,涵盖当代本科生所需的“三基”内容,注重培养学生分析工程问题和解决实际问题的能力,以适应本专业毕业生今后面向矿产资源的探采结合和城乡建设、交通水利、油气钻采等行业的工作需求。

本教材将亦可作为“地质工程”相近专业的辅修教材和地质矿产、冶金、煤炭、油气钻采和岩土工程行业相关技术人员与管理人员的培训参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩土钻掘工艺学/鄢泰宁主编. —长沙:中南大学出版社,2014.3
ISBN 978-7-5487-1048-6

I. 岩... II. 鄢... III. 岩土工程-高等学校-教材 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 035890 号

岩土钻掘工艺学

鄢泰宁 主编

☐ 责任编辑 刘石年 史海燕

☐ 责任印制 易红卫

☐ 出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐ 印 装 长沙超峰印刷有限公司

☐ 开 本 787×1092 1/16 ☐ 印张 26 ☐ 字数 633 千字

☐ 版 次 2014 年 3 月第 1 版 ☐ 2014 年 3 月第 1 次印刷

☐ 书 号 ISBN 978-7-5487-1048-6

☐ 定 价 65.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前言

随着社会进步和国民经济的繁荣,人类与赖以生存的地球资源、环境及以岩土地质体为基础的各类建筑物的关系越来越密切。“地质工程”下属的“勘查技术与工程”专业正是适应这一需求,以原传统学科“探矿工程”全部和“工程地质、水文地质”的一部分为依托(详见国家“普通高等学校本科专业目录(草案)”),相互交叉渗透发展起来的。它以现代钻(探)掘(进)技术为手段,以岩、土体为工作对象,服务于矿产资源的勘查、开发与技术管理,基础工程(含岩土加固、地质灾害治理)的勘查、设计、施工与管理 and 地质科学探测等领域。其中,科学探测涉及“上天”(月球钻探、火星钻探)、“入地”(岩石圈超深钻探)、“下海”(海底钻探取样)、“登极”(极地钻探取样)的各个高技术领域,是人类科技进步必不可少的重要技术手段。本专业有两个方向与“石油钻井工程”、“土木工程(岩土工程、地下建筑)”的部分内容相近。

《岩土钻掘工艺学》是“勘查技术与工程”专业本科生在教学实习后学习的第一门专业必修课教材,将为后续“岩土钻掘设备”、“岩土钻掘泥浆工艺学”和“岩土施工工程学”课程和学生的课程设计及毕业设计(论文)打好专业知识基础。该教材也可作为“地质工程”相近学科和“钻井工程专业”本科生的辅修教材。还可作为在地质矿产、冶金、煤炭、油气钻采和岩土工程行业中从事相关工作技术人员和管理人员的培训参考书。

本教材的前身是2001年中国地质大学出版社出版的各校合编部级重点教材《岩土钻掘工程学》。该教材及其课程“岩土钻掘工程学”(包括电子教案、多媒体课件、试题库、实验指导书等)于2005年被评为国家精品课程。考虑到原教材毕竟已出版12年,而且是在当时国家教委“宽口径,大专业”指导思想下组织编写的,有些教师和读者反映原教材内容偏简练。按照2008年秋在长沙召开的“地矿教指会”关于配套教材内容划分的意见,这次改编在原有基础上删掉了钻塔、钻机和泵、泥浆护壁与堵漏等章节,适当弱化掘进方面的内容,并根据当前行业形势与技术进步增补与扩展了以下新内容:铝合金钻杆、PDC钻头及其钻进工艺、涡轮与螺杆钻具及其钻进工艺、冲击回转绳索取心技术、反循环绳索取心技术、定向钻进工艺、水文地质钻探与水井钻工艺、复杂地层钻进工艺及事故防治、钻孔施工设计及钻探环境保护等,定名为《岩土钻掘工艺学》。新教材在编写的内容安排上力图反映岩土钻掘破碎原理,钻孔弯曲原理,施工过程最优化准则,现代钻探工艺原理及取样技术,岩土钻掘现场工程设计等内容,从近年来成熟的国内外教材和公认的专业技术成果中吸取营养,提炼出当代本科生

所需的“三基”内容，注重培养学生分析工程问题和解决实际问题的能力，适应本专业毕业生今后面向矿产资源的探采结合和城乡建设、交通水利、油气钻采等行业的工作需要。

本教材由鄢泰宁教授主编，各章节的编写分工如下：第1章、第2章、第4章、第5章、第14章，由中国地质大学(武汉)鄢泰宁教授编写；第3章、第8章、第9章，由成都理工大学石永泉教授编写；第6章、第7章、第11章，由吉林大学陈宝义教授编写；第12章，由中南大学彭振斌教授编写；第13章，由中南大学张绍和教授编写；第10章由鄢泰宁教授和石永泉教授编写；第15章、第16章，由中国地质大学(武汉)吴立教授编写。为了尽量求得全书的风格统一，层次清晰，覆盖本专业拓宽后的知识领域并力求文字精练，主编在统稿过程中，对许多章节进行了内容上的删节、合并和文字上的修饰，并补充了较多反映本专业近年来技术进步的内容，还对各校来稿中所有不清晰和不规范的图件用电脑重新进行了绘图。

虽然早在2000年前我们的祖先就开始用原始的工具进行岩土钻掘施工，虽然探矿工程学科在我国诞生与发展已有60多年的历史，但是由于该学科的许多工艺过程发生在地下深处，所受到的影响因素非常复杂，加之专业技术不断更新，所以“岩土钻掘工艺学”作为一门应用性技术学科，其学科体系还处在不断完善与定型的过程中。学科内容中属于生产经验总结与定性分析的叙述性内容还占有较大比例，在新一轮教材的编写中这一特点也难以避免。该书的编者们均是长期从事本专业教学与科研的骨干教师，但是，毕竟他们的学术经历和实践体会存在着差异，因此在教材的编写中必然会反映出一些学术观点难以完全统一的现象。我们认为，这种情况对学科的发展并非坏事。希望使用该书的教师和广大技术人员提出自己的见解，以促进学科的发展和教材的进一步完善。

本教材在编写过程中，参考了原探矿工程专业和兄弟专业(石油钻井、地下建筑工程)的多本教材与教学参考书，翻译并引用了21世纪以来钻探技术强国俄罗斯出版的多本高校教材和乌克兰超硬材料研究所新出版的专著，参考了各参编学校近年来的研究生论文，得到了各参编学校有关院系领导和同行的支持与协助，得到了中国地质科学院勘探技术研究所、探矿工艺研究所、探矿工程研究所、西安煤炭科学研究院、安徽313地质队等单位的支持，在该书的编辑出版过程中，中南大学出版社给予了积极热情的帮助。在此，我们一并表示衷心的感谢。

经过近五年的组稿、统稿，五易其稿，在征得教育部高等学校地矿学科教学指导委员会地质工程专业规划教材编委会审查后，新教材《岩土钻掘工艺学》终于与广大师生及读者见面了。由于编者的水平有限，书中的缺点错误在所难免，恳请读者给予批评指正。

编者

2014年1月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 “岩土钻掘工艺学”课程的内容、地位和任务	(1)
1.2 岩土钻掘工艺的渊源和发展概况	(1)
1.3 钻探的基本概念	(4)
第2章 岩土性质及其破碎机理	(10)
2.1 岩石的物理-力学性质	(10)
2.1.1 岩石按黏结状态的分类	(10)
2.1.2 岩石的密度与容重	(11)
2.1.3 岩石的孔隙度	(12)
2.1.4 岩石的各向异性	(13)
2.1.5 岩石的强度	(14)
2.1.6 岩石的硬度	(16)
2.1.7 岩石的变形特征及其分类	(17)
2.1.8 岩石的弹性、脆性和塑性	(18)
2.2 土的物理-力学性质特征	(19)
2.2.1 土的物理性质特征	(19)
2.2.2 土的力学性质特征	(20)
2.2.3 土的工程分类	(21)
2.3 岩石的钻进特性	(21)
2.3.1 岩石的研磨性及研磨性分级	(21)
2.3.2 岩石的可钻性及可钻性分级	(25)
2.3.3 岩石的坚固性系数及其分级	(27)
2.3.4 岩石完整程度及裂隙性分级	(28)
2.3.5 岩石的稳定性及稳定性分级	(30)
2.4 岩石在外载作用下的破碎机理	(30)
2.4.1 压模压入时岩石中的应力状态	(30)
2.4.2 压模压入时的岩石破碎机理	(32)
2.4.3 双向力共同作用下岩石中的应力分布	(34)
2.4.4 双向力共同作用下的岩石破碎机理	(35)
2.4.5 影响碎岩效果的因素	(36)
2.5 本章知识在钻探工艺设计中的应用	(36)
2.5.1 岩石性质是制定钻探工艺的依据	(36)
2.5.2 根据岩石钻进特性选择钻进方法	(37)

2.5.3 根据岩石钻进特性设计套管系列	(37)
第3章 钻杆柱与钻孔结构	(39)
3.1 钻杆柱功能与组成	(39)
3.1.1 钻杆柱的功用	(39)
3.1.2 钻杆柱的材质	(39)
3.1.3 地质岩心钻探用钻杆柱的代号	(41)
3.1.4 钻杆柱的结构	(41)
3.1.5 铝合金钻杆	(44)
3.2 钻杆柱的工况	(46)
3.2.1 钻杆柱的工作状态	(46)
3.2.2 钻杆柱的受力	(47)
3.2.3 钻杆柱的疲劳破坏	(50)
3.3 套管柱与钻孔结构	(50)
3.3.1 套管柱	(50)
3.3.2 钻孔结构设计	(51)
第4章 回转钻进的孔底过程及钻头	(54)
4.1 硬质合金钻进的孔底碎岩过程	(54)
4.1.1 钻探用硬质合金	(54)
4.1.2 硬质合金钻进的孔底碎岩过程	(56)
4.1.3 硬质合金切削具的磨损	(60)
4.2 硬质合金钻头	(62)
4.2.1 取心式硬质合金钻头结构要素	(62)
4.2.2 取心式硬质合金钻头	(65)
4.2.3 硬质合金钻头选型表	(67)
4.3 金刚石钻进的孔底碎岩过程	(69)
4.3.1 钻探用金刚石	(69)
4.3.2 金刚石钻进的孔底碎岩过程	(71)
4.4 金刚石钻头和扩孔器	(75)
4.4.1 表镶金刚石钻头	(76)
4.4.2 孕镶金刚石钻头	(78)
4.4.3 金刚石扩孔器	(81)
4.4.4 金刚石钻头及扩孔器选型表	(82)
4.4.5 金刚石钻头及扩孔器的制造	(82)
4.5 PDC 钻头及其孔底碎岩过程	(84)
4.5.1 钻探用复合片	(84)
4.5.2 PDC 钻头的孔底碎岩过程	(85)
4.5.3 PDC 钻头	(88)
4.6 钢粒钻头及其孔底碎岩过程	(90)

4.6.1	钢粒及钢粒钻进用钻具	(90)
4.6.2	钢粒钻进的孔底碎岩过程	(91)
4.7	牙轮钻头及其孔底碎岩过程	(92)
4.7.1	牙轮钻头的结构	(92)
4.7.2	牙轮钻头的孔底碎岩过程	(92)
4.7.3	牙轮钻头的分类法	(96)
4.8	全面钻头	(97)
4.8.1	硬质合金全面钻头	(98)
4.8.2	金刚石全面钻头	(102)
4.8.3	PDC 全面钻头	(104)
第5章	回转钻进工艺	(105)
5.1	钻进效果指标及钻进规程参数间的关系	(105)
5.1.1	钻进效果指标	(105)
5.1.2	钻进规程	(106)
5.1.3	钻进过程中各参数间的基本关系	(107)
5.2	硬质合金钻进工艺	(109)
5.2.1	钻头压力的选择	(109)
5.2.2	钻头转速的选择	(111)
5.2.3	冲洗液泵量及其性能的选择	(111)
5.2.4	P 、 n 、 Q 参数间的合理配合	(112)
5.2.5	确定最优回次钻程时间的方法	(112)
5.2.6	自磨式硬合金钻头的规程特点	(114)
5.3	金刚石钻进工艺	(114)
5.3.1	合理选择金刚石钻头	(114)
5.3.2	金刚石钻进规程	(115)
5.3.3	金刚石钻进的临界规程	(119)
5.3.4	金刚石钻头的合理使用	(121)
5.4	PDC 钻进工艺	(122)
5.4.1	PDC 钻进规程参数	(122)
5.4.2	PDC 钻头的使用	(122)
5.5	钢粒钻进工艺	(125)
5.5.1	影响钢粒钻进效果的因素	(125)
5.5.2	钢粒钻进的规程选择	(125)
5.5.3	钻进规程合理性的判断	(127)
5.6	牙轮钻进工艺	(127)
5.6.1	牙轮钻头的选用	(127)
5.6.2	牙轮钻头钻进工艺	(129)
5.7	全面钻头钻进工艺	(134)
5.7.1	硬质合金全面钻头的规程选择	(135)

5.7.2	金刚石全面钻头的合理使用及规程选择	(138)
5.8	涡轮与螺杆钻具钻进	(139)
5.8.1	涡轮钻具	(139)
5.8.2	涡轮钻具钻进的工艺特点	(142)
5.8.3	螺杆钻具	(144)
5.8.4	螺杆钻具钻进的工艺特点	(146)
5.8.5	螺杆钻具与涡轮钻具的性能对比	(147)
第6章	冲击回转钻进与冲击、振动钻进	(149)
6.1	概 述	(149)
6.2	液动冲击器和气动潜孔锤	(150)
6.2.1	液动冲击器的结构与工作原理	(150)
6.2.2	气动潜孔锤的结构与工作原理	(155)
6.3	冲击回转钻进用钻头	(159)
6.3.1	液动冲击回转钻进用钻头	(159)
6.3.2	气动潜孔锤钻头	(162)
6.4	冲击回转钻进工艺	(165)
6.4.1	冲击回转碎岩机理	(165)
6.4.2	影响冲击回转碎岩效果的因素	(166)
6.4.3	冲击回转钻进规程	(167)
6.5	钢丝绳冲击钻进与振动钻进工艺	(171)
6.5.1	钢丝绳冲击钻进工艺	(171)
6.5.2	振动钻进工艺	(174)
第7章	钻孔取样技术与工艺	(177)
7.1	土样的采取	(177)
7.1.1	原状土样的概念	(177)
7.1.2	取土的方法	(177)
7.1.3	取土器的基本技术参数	(178)
7.1.4	取土器的类型和结构	(180)
7.1.5	减少土样扰动的注意事项	(181)
7.2	岩矿心采取	(181)
7.2.1	岩矿心采取的基本要求	(181)
7.2.2	影响岩矿心采取率与品质的因素	(182)
7.2.3	关于岩心堵塞问题	(183)
7.2.4	岩矿层取心难度分类	(185)
7.3	提钻取心钻具及工艺	(186)
7.3.1	卡取岩矿心的方法	(186)
7.3.2	单层岩心管	(188)
7.3.3	普通双层岩心管	(189)

7.3.4	改进型双层岩心管	(191)
7.3.5	孔底局部反循环取心工艺	(193)
7.3.6	组合循环式强制取心单动双管	(196)
7.4	绳索取心钻具及工艺	(197)
7.4.1	绳索取心钻具及辅助工具	(197)
7.4.2	绳索取心钻进工艺	(203)
7.4.3	液动冲击回转绳索取心技术	(205)
7.4.4	局部反循环绳索取心技术	(210)
7.5	全孔反循环连续取心(样)工艺	(211)
7.5.1	水力反循环连续取心	(212)
7.5.2	气举反循环连续取样	(215)
7.6	采集气体样品、岩屑和补取岩样	(219)
7.6.1	采集气体样品	(219)
7.6.2	采集岩粉	(220)
7.6.3	补取岩样	(221)
第8章	地下坑道钻探	(223)
8.1	概 述	(223)
8.1.1	坑道钻探的意义与特点	(223)
8.1.2	坑道钻探的类型	(223)
8.2	坑道钻探设备与钻具	(224)
8.2.1	坑道钻探设备的选择和安装	(224)
8.2.2	坑道钻探用钻具	(230)
8.3	坑道钻进工艺	(235)
8.3.1	坑道钻进工艺参数	(236)
8.3.2	坑道水平孔钻进工艺特点	(236)
8.3.3	坑道定向钻进的工艺特点	(238)
8.3.4	松软突出煤层钻进的排粉工艺	(239)
第9章	钻孔弯曲与测量	(241)
9.1	钻孔的空间状态要素	(241)
9.2	钻孔弯曲的原因与规律	(244)
9.2.1	钻孔弯曲的条件	(244)
9.2.2	钻孔弯曲的原因及危害	(244)
9.2.3	钻孔弯曲的规律	(249)
9.3	钻孔弯曲的测量与仪器	(251)
9.3.1	测量钻孔弯曲的原理	(251)
9.3.2	测斜仪的分类与选用原则	(254)
9.3.3	非磁性矿体用测斜仪	(255)
9.3.4	磁性矿体用测斜仪	(261)

9.4	钻孔测斜数据处理	(266)
9.4.1	测斜误差的产生与消除	(266)
9.4.2	基于测斜数据绘制钻孔轨迹	(267)
9.4.3	建立矿区(施工区)孔斜规律数学模型	(267)
9.5	钻孔弯曲的预防与纠正	(268)
9.5.1	钻孔弯曲的预防	(268)
9.5.2	钻孔弯曲的纠正	(271)
第10章	定向钻进工艺	(273)
10.1	定向钻进设计	(273)
10.1.1	定向钻孔的分类	(273)
10.1.2	定向钻进的设计原则与内容	(274)
10.1.3	定向孔轴线基本参数的计算方法	(275)
10.2	定向钻进造斜工具	(276)
10.2.1	偏心楔	(277)
10.2.2	连续造斜器	(278)
10.2.3	辅助造斜工具	(279)
10.2.4	造斜工具的特性对比	(281)
10.3	定向钻进随钻测量仪器概述	(282)
10.3.1	有缆 MWD 系统	(282)
10.3.2	泥浆脉冲式 MWD 系统	(282)
10.3.3	电磁波式 MWD 系统	(285)
10.4	定向钻进施工工艺	(286)
10.4.1	多孔底定向钻进工艺概述	(286)
10.4.2	偏心楔定向钻进工艺	(288)
10.4.3	连续造斜器定向钻进工艺	(288)
10.4.4	螺杆钻具定向钻进工艺	(289)
10.5	定向取心技术与工艺	(291)
10.5.1	岩心定向方法	(291)
10.5.2	定向取心钻具及其工作原理	(292)
10.5.3	由定向岩心求解岩层产状	(294)
第11章	水文地质钻探与水井钻	(296)
11.1	水文地质孔和水井的钻进方法	(296)
11.1.1	钻孔结构	(296)
11.1.2	回转钻进工艺	(300)
11.2	水井成井	(306)
11.2.1	下过滤器	(306)
11.2.2	止水与封闭	(309)
11.2.3	洗井方法	(311)

11.3 抽水试验	(314)
11.3.1 抽水试验概述	(314)
11.3.2 射流泵抽水	(314)
11.3.3 潜水泵抽水	(316)
11.3.4 空气压缩机抽水	(316)
11.3.5 抽水时水位水量的测量	(319)
第12章 复杂地层钻进工艺及事故防治	(321)
12.1 复杂地层的分类	(321)
12.1.1 复杂地层综合分类	(321)
12.1.2 不稳定地层分类	(323)
12.1.3 冲洗液漏失地层分类	(323)
12.2 复杂地层钻进工艺	(324)
12.2.1 力学不稳定地层钻进工艺	(324)
12.2.2 遇水不稳定地层钻进工艺	(327)
12.3 典型钻探事故的分类及处理原则	(329)
12.3.1 典型事故分类	(329)
12.3.2 防治钻探事故的原则	(330)
12.3.3 处理钻探事故的常用方法	(330)
12.4 处理钻探事故的常用工具	(331)
12.4.1 打捞工具	(331)
12.4.2 切割工具	(335)
12.4.3 专用接头	(337)
12.4.4 孔内振动器	(338)
12.5 典型钻探事故的处理工艺	(339)
12.5.1 孔壁塌陷与崩落	(339)
12.5.2 钻具折断与脱落	(340)
12.5.3 卡钻、埋钻、糊钻与烧钻事故	(342)
12.5.4 套管事故与孔内落物	(344)
12.5.5 钻孔漏失和涌水事故	(345)
12.5.6 钻头事故与偏斜事故	(346)
第13章 封孔	(348)
13.1 封孔材料	(348)
13.1.1 水泥封孔	(348)
13.1.2 黏土封孔	(349)
13.2 封孔工艺	(350)
13.2.1 洗孔换浆	(350)
13.2.2 下隔离塞	(350)
13.2.3 孔内注浆方法	(351)

第 14 章 钻孔施工设计及钻探环境保护	(355)
14.1 钻孔施工组织设计	(355)
14.1.1 单孔施工组织设计	(355)
14.1.2 矿区施工组织设计	(357)
14.2 钻探环境保护	(360)
14.2.1 我国钻探环境保护的现状	(360)
14.2.2 钻探环境保护的规范	(361)
第 15 章 坑探技术与工艺	(364)
15.1 勘探坑道的类型及用途	(364)
15.1.1 勘探坑道的类型	(364)
15.1.2 勘探坑道的用途	(365)
15.2 坑探的基本工序及岩石分级	(366)
15.2.1 坑探的基本工序	(366)
15.2.2 岩土掘进工程中岩石的分级	(366)
15.3 坑探用基本设备与机具	(368)
15.3.1 凿岩设备	(368)
15.3.2 凿岩机具	(375)
15.3.3 通风设备	(380)
15.3.4 排水设备	(381)
15.3.5 装岩设备	(381)
15.3.6 运输设备	(384)
15.4 坑探施工工艺	(385)
15.4.1 凿岩爆破	(385)
15.4.2 巷道通风	(390)
15.4.3 装岩运输	(391)
15.4.4 坑道支护	(392)
15.4.5 劳动和施工组织	(392)
15.4.6 坑探技术的进步	(393)
第 16 章 槽探施工工艺	(394)
16.1 探槽的功能与规格	(394)
16.2 探槽开挖方法	(395)
16.2.1 手工挖掘	(395)
16.2.2 机械挖掘	(395)
16.2.3 爆破法挖掘	(400)
参考文献	(403)

第1章 绪论

1.1 “岩土钻掘工艺学”课程的内容、地位和任务

大诗人李白曾在诗中感叹“蜀道之难，难于上青天”，似乎世界上最难的事是“上天”。其实不然，目前人类已经把宇航员送上了距地球 384401 km 的月球，把仪器和微型取样钻机送上了更遥远的火星，但“入地”的世界记录只有 12262 m。因为地壳的密度比大气层大数千倍，而且随深度增大地层的压力和温度升高，这些因素都使得“入地”更难。所谓“入地”指的是我们从事的岩土钻掘工程(钻探、钻井工程、掘进工程)。

“岩土钻掘工艺学”和其他学科一样，是人类长期与自然界抗争和协调发展的经验总结，是伴随着人类对矿产资源和地下水资源的渴求而产生的。它的研究内容是如何借助机械方式或化学方式(爆破能)破碎岩土层，在地下形成其规格和质量符合设计要求的钻孔或坑道，并获取地下实物地质资料，服务于矿产资源勘查与开发、地基与基础工程施工、地质灾害防治和科学钻探等领域，涉及人类面临的资源和环境两大主题。“岩土钻掘工艺学”与地质学、机械工程、矿业工程、土木工程等学科有着密切的关系。随着近代工业技术的进步，尤其是大量高新技术的应用，“岩土钻掘工艺学”也得到了快速发展。

“岩土钻掘工艺学”是二级学科“地质工程”和三级学科“勘查技术与工程”的必修课程。顾名思义，岩土钻掘工艺应包括“钻探工艺”和“掘进工艺”两大内容。但考虑到近年来广大毕业生涉及与“钻”有关的业务量更大，因此，本教材在选材上以“钻”为主，兼顾“掘”的内容，将重点讲授岩石在外载作用下的破碎机理，钻柱结构，各类岩石破碎工具及其钻进工艺原理和参数控制，岩矿心取样技术与工艺，钻孔弯曲与测量原理，防斜、纠斜和定向钻进技术，水井钻进工艺等内容；并兼顾地下坑道钻探及坑探、槽探技术与工艺。教材注重理论与实际相结合，培养学生运用所学知识和技能解决实际技术问题和组织钻掘施工的能力，为本专业毕业生今后进入地质矿产资源勘探、水资源探采结合及城乡建设、水利水电、油气钻采等行业从事技术、管理工作或进一步深造奠定基础。

“岩土钻掘工艺学”是一门实践性很强，多学科综合应用的技术学科，其自身的理论正处于不断发展和完善中。由于经验总结的成分在课程中占有较大比例，故而叙述性和定性分析的内容较多。这是实践性技术课程的固有特点，也是阅读和学习本教材时应注意的地方。

1.2 岩土钻掘工艺的渊源和发展概况

中国是世界上最早发明岩土钻掘工具的国家。大约在公元前 3 世纪，汉人便开始在四川南部开挖取盐水的深井，当时这些盐井中不时喷出天然气，从而以“火井”而闻名。最迟在公元前 1 世纪我们的祖先已开始有组织地钻这种井来采盐水，同时提取地层深处的天然气用于

燃烧和照明。这些情况在公元 2 世纪已见诸文字记载。先民们用传统的方法于清道光 6 年 (1835 年) 钻成了第一口超千米 (1001.42 m) 的井, 使钻井技术达到了新高峰。该井被联合国教科文组织定为 19 世纪中叶前的钻井世界纪录, 自 1835—1997 年沿用传统方法 (裸眼采气、竹管输气) 已累计产气 1.4 亿 m^3 。

英国著名科学史专家李约瑟博士在其《中国古代科学技术文明史》一书中认为, 中国钻探科学技术对世界石油天然气勘探开发技术产生了巨大的启蒙、奠基和推动作用, 在国际上领先数百年至一千多年。李约瑟指出: “中国的卓筒井工艺在 11 世纪就传入西方, 在公元 1900 年以前世界上所有的深井基本上都是采用中国人创造的工艺打成的”。因此, 在美、英、德、俄等国出版的石油钻井教材和钻探手册中, 开篇都要介绍中国古代的钻探史料: 中国人借助麻绳把装在竹竿上的加重金属钻头提离孔底, 再从一定高度落下来破碎孔底岩石, 然后周期性地用小直径提桶把被破碎的岩屑与水混合物由孔底舀出。至今世界上广泛使用的钢丝绳冲击钻进的基本原理几乎完全参照中国古代的工艺。中西方早期绳式冲击钻设备与方法对比见图 1-1。有的学者还将中国这一伟大的创造誉为是继指南针、火药、造纸、印刷术之后中国古代的第五大发明。

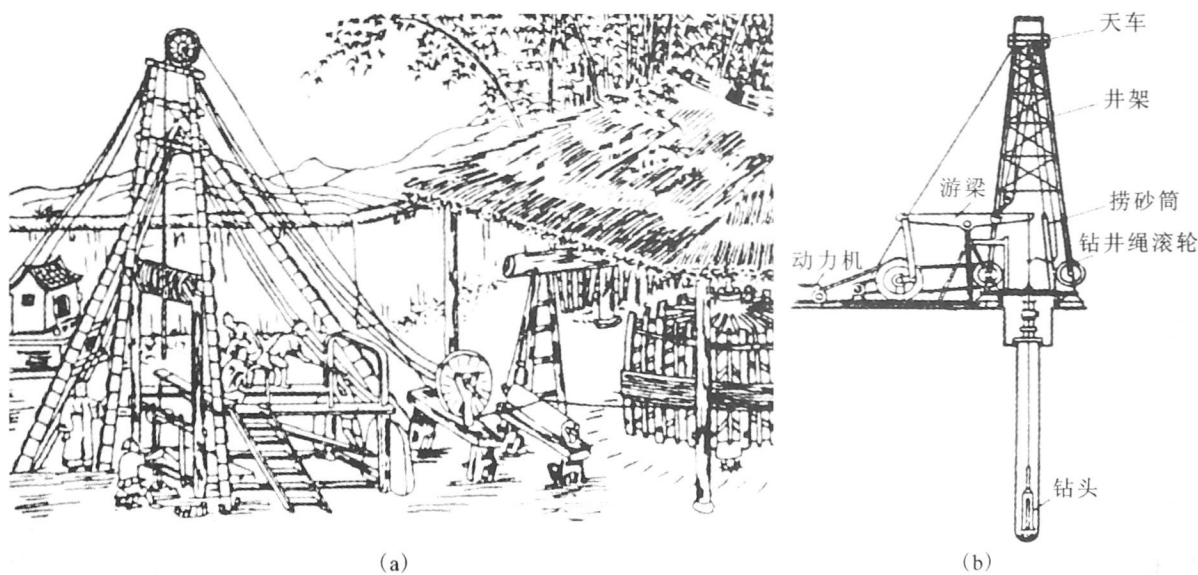


图 1-1 中西方早期绳式冲击钻设备与方法对比图

(a) 中国古代借助人力、畜力和麻绳、竹竿、金属钻头进行冲击钻进的示意图; (b) 西方现代钢丝绳冲击钻进原理图

钻探作为地下资源勘探和开采的方法, 在古埃及和欧洲也早有应用。至今在埃及尼罗河谷地还保留下来许多古人钻成的水井, 有的至今仍在为沙漠中的人们提供地下水。欧洲大陆有记载的第一口井是 1126 年在法国南部钻成的, 从此诞生了一个现代名词“自喷井”。1818 年法国农业部创立了钻探基金, 1830 年巴黎钻探技师杰古谢在图尔地区钻成了一口 120 m 深的自喷水井。到 1839 年后开始用套管加固孔壁, 从而进一步加深了钻孔深度。1855 年在巴黎曾钻成 528 m 深的水井, 日产水量 1.5 万 m^3 。其他国家也在工业化之前就开始了地下水的钻探工作。俄罗斯还通过改进水井钻探工艺并用于其他工程目的——开采岩盐矿床。俄罗斯人于 17 世纪完成了第一部关于勘探与开采岩盐的钻探工艺手稿, 详细描述了所用的钻探工

具、设备和工艺。该手稿中首次出现了起源于俄罗斯的128个钻探专业术语,表明当时其钻探技术达到了相当高的水平。1859年美国塞尼加石油公司在宾夕法尼亚州泰特斯沃尔镇用机械钻探方法打成了第一口石油开发井(深约21 m,日产原油4.8 t)。

钻探工艺的质的飞跃发生在第一次工业革命。19世纪中叶,随着重工业的发展和大量矿区投产,地质勘探工作量猛增,以勘探网为代表的新的钻探体系逐步取代昂贵而低效的山地勘探作业。钻探工艺的任务也发生了变化,已提出必须保证实物地质资料取样完整性、可靠性,保持钻孔空间形态,为孔内地球物理勘探创造条件等要求。这些新的要求从本质上使钻探工艺的内容更加系统化。

由于钻探技术在开发地下矿产资源方面的不可或缺性,美国、澳大利亚、南非和瑞典的一些采矿公司都把大量资金投向发展钻探技术和工艺。在钻探工艺发展的历史中,作为影响钻进过程关键要素之一的岩石破碎工具经历了几个主要的里程碑或转折点:

1909年出现了一种原理上全新的孔底机具——牙轮钻头(美国工程师休斯),它改变了钻头的回转运动形式,通过牙轮齿对孔底施加冲击与刮削破岩作用。

20世纪20年代,出现了以碳化钨为基体的硬质合金切削具环形取心钻头,比以前各种钢制切削具钻头具有更高的硬度和耐磨性,在Ⅶ~Ⅷ级以下的岩层中可以有效地钻进。

20世纪40年代,出现了特殊的细粒金刚石取心钻头和全面钻头。这种钻头可以破碎最坚硬的岩石,它的出现逐渐取代了另一种曾发挥重要作用但效率低的钻进方法——钻粒(又称钢粒)钻进。

由于天然金刚石资源有限,价格昂贵,从而制约了它的大面积推广普及。1953—1954年瑞典和美国通用电气公司分别用人工方法合成了单晶人造金刚石,几年后投入了工业生产。前苏联1966年研制成功人造金刚石孕镶钻头。我国从20世纪70年代末开始大批量生产人造金刚石钻头并迅速普及,目前已成为人造金刚石及其钻头的第一生产大国。70年代后期,在人造金刚石基础上美、俄等国先后开发了聚晶金刚石(PCD)、金刚石复合片(PDC)和斯拉乌基奇等新型超硬复合材料,极大地丰富了钻探磨料。虽然后来岩石破碎工具不断翻新,但其基本工作原理并未摆脱上述类别。

为了进一步提高钻探效率,工程师们开始尝试用流体能量直接驱动孔底动力机破碎岩石。俄罗斯工程师B·沃尔斯克于20世纪初叶研制了利用冲洗液水击现象破碎岩石的冲击脉冲发生器,并在高加索山区钻了几个深孔。美国工程师贝辛若尔于1949年制成了结构简单的高频液动冲击器,标志着现代液动冲击钻进工艺的开端。后来又出现了风动冲击器并得到广泛应用。1923年俄罗斯工程师卡佩柳什尼克研制和应用了结构原理全新的涡轮式孔底动力机,到目前为止涡轮钻进仍是中硬岩石中钻进大口径油气探采孔的有效方法之一。美国人于1962年研制成功另一种容积式孔底动力机——螺杆钻具并用于生产,它结构简单,转速适中,更适用于小口径地质钻探孔钻进。

近50年来,随着科技进步涌现了大量岩土钻掘新技术、新工艺,并产生显著的经济效益。

岩土钻掘工程在国民经济中的服务领域可划分为6个方面:

(1)矿产资源勘探和部分矿产的开采。固体矿产勘探钻孔的深度可在几米至几千米的范围内变化。南非的小口径金刚石钻探孔深达4.5 km;石油钻井的深度一般为2~5 km,而最深者已达9 km。除了开采液态、气态矿产外,还可通过钻孔(借助孔内浸析作用)开采铜、稀

土元素和卤族元素。

(2)工程地质、水文地质勘查和地下水开采。用于查明土(岩)层的工程力学特性,地下水的埋藏条件,可能的产水量和化学成分,以及地下水开发(含热水井钻探)。

(3)地质灾害的防治与环境治理。用钻孔和锚固技术加固危岩,在坑道周围钻孔形成水力幕墙保护地下采矿作业安全或防治地下灾害。

(4)工民建和道路桥梁的基础工程。施工钻孔灌注桩等基础工程,非开挖管道铺设钻进工程,建筑物管道孔钻进工程等。现代钻探技术还用于施工矿山竖井、通风井和运输井。

(5)地球岩石圈、水圈的科学研究。为了研究与保护人类赖以生存的地球,国际上有大陆科学钻探、大洋科学钻探、深海钻探、生态环境钻探等计划。俄罗斯1992年完成的CF-3科拉超深科学钻探孔深度达12262 m,至今没有哪个国家打破这个世界纪录。美国领衔的深海钻探计划(DSDP)在各大洋钻孔1092口,为验证大陆漂移和海底扩张理论,创建板块构造学说立下了丰功伟绩。

(6)国防工程。包括地下军工试验孔、核废料填埋孔等。

改革开放以来,资源短缺已经成为制约我国经济高速发展的主要瓶颈,已探明后备资源储量明显不足。以铜矿为例(参见图1-2),我国1991—2005年铜的消费量急剧上升,而铜矿的产量却基本未增加。据不完全统计,我国2005年进口铁矿石2.75亿t,铜矿石406万t;而到2011年进口铁矿石6.86亿t,2012年铜精矿进口量达创纪录的783万t。为落实《国务院关于加强地质工作决定》(国发[2006]4号文),大力推进深部和外围找矿工作,近年来,作为深入地球内部勘探与开发资源的重要手段,岩土钻掘技术得到了迅速发展。我国地质岩心钻探及工程钻探的工作量剧增,迎来了钻探的春天。面向未来,我们相信,随着学科交叉和高新技术的引入,岩土钻掘工艺将展现出更强的生命力和适应性。

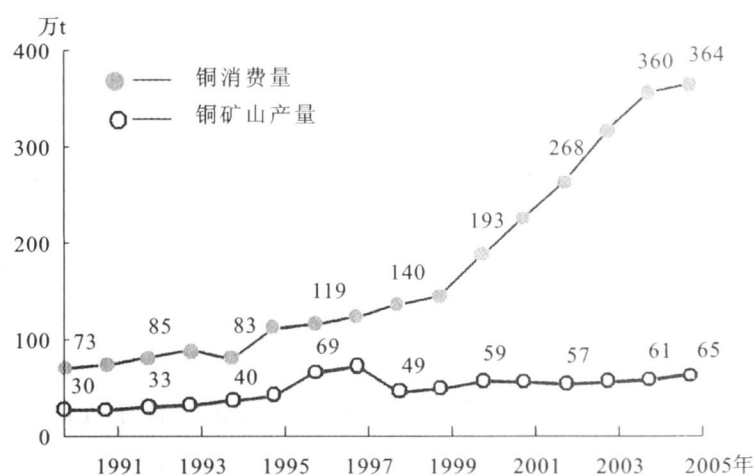


图1-2 自1991—2005年我国铜消费量与产量的对比示意图

1.3 钻探的基本概念

钻探作业的目的是借助于专门的技术手段(钻探设备和钻具)在人无法到达的地下岩土