

21 世纪高等教育土木工程系列规划教材

爆 破 工 程

主 编 戴 俊
参 编 陈士海 王小林
梁为民 马芹永 单仁亮
主 审 王树仁



机 械 工 业 出 版 社

本书是 21 世纪高等教育土木工程系列规划教材之一。本书内容共 10 章, 主要介绍了炸药及其爆炸的基本知识、爆破器材与起爆方法、岩石爆破原理与方法、周边爆破技术、地下工程掘进爆破、露天爆破技术、构(建)筑物拆除爆破与特种爆破、特殊地层条件的爆破技术、爆破安全技术以及岩石爆破理论与技术进展。

本书可作为土木工程、采矿工程专业的本科教材; 也可作为土木工程、采矿工程专业的研究生的参考书; 同时, 可供岩土工程、隧道工程、道路工程、水利与水电工程、铁道工程和城市地下工程等方面的高校教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

爆破工程/戴俊主编. —北京: 机械工业出版社, 2005. 1

(21 世纪高等教育土木工程系列规划教材)

ISBN 7-111-15974-8

I. 爆... II. 戴... III. 爆破施工—高等学校—教材 IV
. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 142748 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 马军平 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张 静 责任印制: 李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·12.375 印张·479 千字

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

序

随着 21 世纪国家建设对专业人才需求的变化，我国工程专门人才培养模式正在向宽口径方向转变，现行的土木工程专业已包括过去建筑工程、交通土建工程，矿井建设、城镇建设等 8 个专业的内容。经过几年的教学改革和教学实践，组织编写一套能真正体现专业大融合、大土木的教材的时机已日臻成熟。

迄今为止，我国高等教育已为经济战线培养了数百万专门人才，为经济的发展作出了巨大贡献。但据 IMD1998 年的调查，我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标世界排名在第 36 位，与我国科技人员总数排名第一的现状形成了极大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员，特别是工程应用型技术人才供给不足。

科学在于探索客观世界中存在的客观规律，它强调分析，强调结论的惟一性。工程是人们综合应用科学理论和技术手段去改造客观世界的客观活动，所以它强调综合，强调实用性、强调方案的优选。这就要求我们对工程应用型人才和科学研究型人才的培养实施不同的方案，采用不同的教学模式、使用不同的教材。

机械工业出版社为适应高素质、强能力的工程应用型人才的需要而组织编写了本套系列教材。教材编写的目的在于改革传统的高等工程教育教材，结合大土木的专业建设需要，富有特色、有利于应用型人才的培养。本套系列教材的编写原则是：

1) 加强基础，确保后劲。在内容安排上，保证学生有较厚实的基础，满足本科教学的基本要求，使学生日后发展具有较强的后劲。

2) 突出特色，强化应用。本套系列教材的内容、结构遵循“知识新、结构新、重应用”的方针。教材内容的要求概括为“精”、“新”、

“广”、“用”。“精”指在融合贯通“大土木”教学内容的基础上，挑选出最基本的内容、方法及典型应用实例；“新”指在将本学科前沿的新技术、新成果、新应用、新标准、新规范纳入教学内容；“广”指在保证本学科教学基本要求前提下，引入与相邻及交叉学科的有关基础知识；“用”指注重基础理论与工程实践的融会贯通，特别是注重对工程实例的分析能力的培养。

3) 抓住重点，合理配套。以土木工程教育的专业基础课、专业课为重点，做好实践教材的同步建设，做好与之配套的电子课件的建设。

我们相信，本套系列教材的出版，对我国土木工程专业教学质量的提高和应用型人才的培养，必将产生积极作用，为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

江見鯨

前 言

土木工程活动中，房屋建筑中的基础，铁路、道路施工中的路堑，各类隧道施工等都涉及到进行大量的土体或岩石体开挖。目前，爆破仍然是岩土开挖经济合理、应用最广泛的一种手段，而且在未来一段时期内这种状况不会有大的改变，因此，土木工程专业中，岩土工程、隧道工程、地下工程专业方向的学生掌握爆破工程方面的知识是十分必要的。爆破工程作为高等工科学校土木工程专业的一门必修课，已被列为地下、岩土、矿山专业课群组的核心课程和土木工程中的岩土工程、地下工程、隧道工程等二级专业评估的重要课程。

为了满足教学的需要，我们根据近年来的教学实践，编写了本书。本书以满足土木工程的本科教育为出发点，同时也兼顾采矿工程等相关专业教学的需要和相关工程技术人员的应用参考。本书的特点是：注重基本概念、基本理论，注意理论与实践的结合，充分反映爆破技术发展中出现的新技术、新方法。通过对本教材的学习，可使读者对岩石爆破理论与技术、爆破工程的发展概况和应用前景有一定的了解，并且能够掌握爆破工程设计和施工的基本知识和方法，具有一定的独立设计爆破方案的基本技能，为今后从事专业工程技术工作、科学研究工作和进一步学习岩石爆破理论打下必要的基础。

本书按 50~60 学时编写，第 1~9 章为教学大纲要求内容，第 10 章的内容使用者可根据具体情况选讲。

爆破工程的内容涉及炸药理论、爆炸力学、岩石力学和工程地质等方面的知识，根据土木工程专业课程设置的实际情况，我们建议在

教授本课程之前，学生应学习材料力学、弹性力学、岩石力学和工程地质等专业课程。

本书由戴俊主编。具体编写分工如下，绪论及第 1、3、4 章：戴俊（西安科技大学教授、博士）；第 2 章：永峰（西安科技大学副教授、博士）；第 5 章：陈士海（山东科技大学教授、博士）；第 6 章：王小林（西安科技大学副教授）；第 7 章：梁为民（太原理工大学教授、博士）；第 8 章：马芹永（安徽理工大学教授、博士）；第 9 章：单仁亮（中国矿业大学北京校区教授、博士）；第 10 章由梁为民、单仁亮和戴俊共同编写。

中国矿业大学北京校区博士生导师王树仁教授对本书进行了全面审阅，就内容的取舍和编排提出了许多宝贵意见和指导，对有关参数及名词术语进行了复核，为本书增色不少，在此深表感谢。

由于时间仓促，加之编者水平有限，本书中不当、错漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

序	
前言	
绪论	1
第 1 章 炸药及其爆炸的基本知识	9
1.1 爆炸现象	9
1.2 炸药化学反应的基本形式	12
1.3 炸药的爆炸反应方程	15
1.4 介质中的波与冲击波	27
1.5 炸药的爆轰及其参数计算	34
1.6 炸药的起爆与感度	46
1.7 炸药的爆破作用	55
1.8 炸药爆炸的聚能效应	60
思考题	63
第 2 章 爆破器材与起爆方法	65
2.1 炸药及其分类	65
2.2 起爆器材	74
2.3 起爆方法	84
思考题	97
第 3 章 岩石爆破原理与方法	98
3.1 岩石的物理力学性质	98
3.2 岩石中的爆炸应力波	108
3.3 岩石爆破破碎原理	118
3.4 爆破漏斗及利文斯顿的爆破漏斗理论	124
3.5 装药结构与起爆方法	134
3.6 炮孔的堵塞	137
3.7 毫秒爆破	140
3.8 影响炸药爆破效果的因素	144
思考题	148
第 4 章 周边爆破技术	149
4.1 概述	149
4.2 光面、预裂爆破的优点与效果评价	153
4.3 光面、预裂爆破原理	156

4.4	光面、预裂爆破的参数确定	160
4.5	光面、预裂爆破的设计与施工	167
4.6	岩石定向断裂爆破技术	172
	思考题	176
第5章	地下工程掘进爆破	177
5.1	概述	177
5.2	隧道掘进施工方法	178
5.3	掏槽爆破	181
5.4	崩落孔爆破与周边孔爆破	190
5.5	掘进工作面爆破参数设计	191
5.6	隧道掘进快速施工技术	201
5.7	立井爆破技术要点	211
	思考题	213
第6章	露天爆破技术	214
6.1	爆破工程地质	214
6.2	露天台阶爆破	220
6.3	硐室爆破	227
6.4	爆破块度统计与预报	247
	思考题	250
第7章	构(建)筑物拆除爆破与特种爆破	252
7.1	概述	252
7.2	拆除爆破的设计原则与方法	253
7.3	基础类构筑物拆除爆破	258
7.4	高耸构筑物拆除爆破	263
7.5	楼房拆除爆破	270
7.6	水压爆破	281
7.7	静态破碎	289
7.8	特种爆破技术	291
	思考题	295
第8章	特殊地层条件下的爆破技术	296
8.1	爆破引爆瓦斯的原理与条件	296
8.2	安全炸药与安全雷管	300
8.3	含瓦斯地层的爆破技术	305
8.4	冻结条件下的爆破技术	319
8.5	高地应力条件下的爆破技术	323
	思考题	327
第9章	爆破安全技术	328
9.1	概述	328

9.2	爆破地震效应与安全设防	329
9.3	爆炸空气冲击波效应与安全设防	333
9.4	爆破飞石效应与安全设防	337
9.5	早爆的预防及拒爆的预防与处理	338
9.6	爆破器材的安全管理	345
	思考题	348
第 10 章	岩石爆破理论与技术进展	349
10.1	岩石爆破过程的数值模拟	349
10.2	岩石爆破实验方法与测试技术	358
10.3	钻孔爆破的自动化控制新技术	373
10.4	新型爆破器材与起爆技术	375
	参考文献	384

绪 论

1 土木工程施工与爆破技术

土木工程是建造各类工程设施的科学、技术和工程的总称。它既指与人类生活、生产活动有关的各类工程设施，如建筑工程、公路与城市道路工程、桥梁工程和隧道工程等，也指应用材料、设备在土地上进行勘测、设计、施工等工程技术活动，土木工程在任何一个国家的国民经济中都占有举足轻重的地位。

土木工程施工是一种工程分支，指用各种建筑材料修建房屋、铁路、道路、桥梁、隧道、运河、堤坝、港口等工程生产活动和工程技术。在土木工程的这些活动中，大都需要进行大量的土体或岩石体的开挖，如房屋建筑中的基础开挖、铁路、道路施工中的路堑开挖、各类工程隧道的开挖等。当这样的开挖工程处于岩层中时，按照工程设计的基本要求，将处于开挖范围内的岩石与周围岩石分离，并破碎到合理的块度，以便高效率地装运，同时保证开挖范围以外岩石体的原有稳定性，实现工程施工的良好经济效益，这是我们追求的目标。

岩石开挖的方法有多种，但限于目前的科学技术发展水平和出于经济效益等多方面的综合考虑，爆破是应用较广泛的一种。因此，学习了解岩石爆破技术，是完成土木工程施工所必需的，具有重要的意义。

爆破技术是以埋入岩石中的炸药为能源，使其爆炸做机械功，使岩石发生变形、破坏、移动和抛掷，达到既定工程目的的工程技术。其理论基础是炸药及其爆炸理论、固体中的应力波理论、固体强度理论、岩石动力学等，有十分广泛的内容。本书着重介绍岩石爆破的基本原理和方法，不涉及过深的理论知识，目的是使读者通过本书的阅读，掌握不同工程条件下岩石爆破的设计及施工方法，了解岩石爆破破岩原理与爆破技术的知识和发展状况，并为进一步学习奠定基础。

目前，岩石爆破技术不仅在土木工程施工中得到了广泛应用，而且也在采矿、水利水电、国防、军事等众多领域中得到了广泛应用。在未来一定时期内，爆破技术仍将是岩石开挖的主要手段，因此，我们必须下功夫，学好本门课程。

2 爆破技术的发展及其在国民经济建设中的作用

爆破离不开炸药。说起炸药，每个中国人都会引为自豪，因为我国是火药的故乡，早在公元前 200 多年我们的祖先就发明了黑火药。在三国时期，我国已用火药制成火攻武器——火球和火箭。在唐朝末年，火药已经广泛用在抛射弹药上。宋朝的大火炮已经有了相当的威力，用以攻城，则“城内皆塌，城内外震死 200 余人。”

13 世纪前后火药传入欧洲，17 世纪以前火药只用于军事目的。1627 年，在匈牙利西利基亚上保罗夫的水平坑道掘进时，使用火药破坏岩石，这是第一次使用火药来代替人的体力劳动的记载。1670 年以后，在欧洲广泛应用了爆破技术，在中国用火药进行爆破也不晚于 17 世纪。18 世纪后期的工业革命中，1799 年雷汞 ($\text{Hg}(\text{ONC})_2$ ，简称 MP) 问世，1815 年首次使用起爆药制成了火帽，1846 年发现了硝化甘油 ($\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$ ，三硝酸丙三脂，又简称 NG) 和硝化棉，1865 年诺贝尔发明了雷管，获得了高速度的爆轰现象，为现代的各种工业炸药的不断完善奠定了基础。

进入 20 世纪后，爆破器材和爆破技术得到了进一步的发展。1919 年出现了以泰安 ($\text{C}_3\text{H}_3(\text{ONO}_2)_4$ ，四硝化戊四醇，简称 PETN) 为药芯的导爆索，1927 年在瞬发雷管的基础上研制成功了秒延期电雷管，1946 年研制成功了毫秒延期电雷管，1956 年库克发明了浆状炸药，解决了硝铵炸药的防水问题，其后又研制和推广了导爆索起爆系统，1967 年瑞典诺贝尔公司研制的导爆管起爆系统，进一步增加了起爆的安全性。目前，我国已在浆状炸药的基础上，开发生产了水胶炸药和乳化炸药，建立了 400 多个炸药加工厂，品种达数十种，有了比较完整的工业炸药生产体系。

新中国成立以来，我国已进行过装药量在万吨以上的土石方爆破两次，千吨级的土石方爆破十余次，百吨级的土石方爆破百次之多，创造出许多爆破新技术和新工艺，解决了许多工程建设中的难题。工程爆破技术在我国经济建设中起着重要的作用，我国现有的公路、铁路隧道、路堑和边坡工程多是采用爆破法开掘的，在煤矿、金属矿、建材矿山等工业领域，爆破方法是破碎矿岩的主要手段。我国煤炭产量的绝大部分都是用爆破方法开采的，在冶金行业和非金属行业，所消耗矿石也大多是以爆破方法为主要手段开采的。据 20 世纪 80 年代的统计，我国的工业炸药用量每年达到了百万吨。

在采矿、铁路、公路和水利工程中，采用爆破可将土石方抛掷到预定的位置，从而加快了车场、公路或大坝的建设速度。20 世纪 30 年代中期，前苏联在乌拉尔进行的工程爆破中一次使用了 1800 t 炸药。我国在甘肃白银矿山建设中，

1956年进行爆破，一次使用了15000t炸药，爆破土方量达 $9 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，爆破引起的地震波传播很远，以至有人误以为我国正在进行核试验。湘黔线凯里车站在1971年进行的一次非对称双侧抛掷爆破，按设计要求将抛方量中的63.4%抛弃到一侧，加快了调车场的建设速度；1969年，广东省南水水电站定向爆破筑坝，总装药量1394t，爆破土石方量105万 m^3 ，堆积平均坝高62.3m，与设计值相比，准确度达96%，1973年，陕西省石砭峪水库成功地进行了1575t炸药的定向爆破筑坝，准确度达到98%。

此外，露天深孔爆破也得到较快的发展，在各类工程应用中已发挥了重要的作用，而且，其应用范围正在日益扩大。由于这一爆破方法的优越性，露天深孔爆破是露天岩土开挖爆破的首选方法，有时甚至是惟一的方法。

爆破已成为经济建设中各种工业生产和开挖施工的技术手段之一，深入应用到我国国民经济生产的各个部门。目前，在冶金、煤炭、水电、铁路交通和基础设施等经济建设领域，爆破技术在矿岩开采、岩土工程、建构筑物拆除和材料加工等工程建设和生产方面取得了广泛的应用。我国每年9亿t以上的矿石生产量，平均13亿t的煤炭生产量，约1000km的新线铁路修建，逾10万km的公路修建，大、中型水库、机场、港口等基础设施的建设，都需采用爆破作为岩石开挖的手段。

同时，经济建设和生产实际中的技术难题也促进了爆破技术的丰富和发展，在应用中不断创造出了许多爆破新技术、新工艺和新方法。诸如矿山开采爆破大孔距小抵抗线大区延时爆破，地下巷道掘进的光面爆破，水利筑坝的定向爆破和引水隧洞的岩塞爆破，道路施工中的路堑爆破、填筑路堤和软土、冻土地带的爆破，埋设地下管道和过江管道以及处理油井卡钻事故的特种爆破，水下炸礁、疏浚河道、水下码头的软土压实、堤坝地基处理的水下爆破等。

随着经济建设的深入发展，在城市改建和扩建中，城市控制爆破技术得到了空前的发展。城市控制爆破技术的发展，不仅把过去危险性大的爆破作业由野外安全可靠地推进到了人口密集的城镇，更重要的是将爆破技术与安全、环保进行了结合。

此外，在机电工程中，利用爆炸能可以将金属冲压成形、将两种金属焊接在一起、将金属表面硬化和切割金属或者人工合成金刚石等，采用爆破法还可以清除高炉、平炉和炼焦炉中的炉瘤或爆破金属炽热物等。

可见，爆破工程在我国经济建设中具有重要地位，并发挥着巨大的作用。

3 爆破方法与技术分类

爆破方法，即爆破作业的步骤，指向要爆破的介质中钻出的炮孔或开挖的药

室或在其表面敷设炸药，放入起爆雷管，然后引爆。

根据敷设炸药方式的不同，爆破方法主要分为 4 大类：

(1) 炮孔法 在介质内部钻出各种孔径的炮孔，经装药、放入起爆雷管、堵塞孔口、连线等工序起爆的，统称炮孔法爆破。孔径在 50 mm 以下、孔深在 4m 以下的为浅孔爆破；孔径和孔深大于上述数值的为深孔爆破。炮孔法是岩土爆破技术的基本形式。

(2) 药室法 它是在山体内开挖坑道、药室，装入大量炸药的爆破方法，一次能爆下的土石方数量几乎是不受限制的，在每个药室里装入的炸药有多达千吨以上的。如中国四川攀枝花市狮子山大爆破（1971 年）总装药量 10162.2t，爆破 1140 万 m^3 ，是世界最大规模的大爆破之一。药室法爆破广泛应用于露天开挖堑壕、填筑路堤、基坑等工程，特别是在露天矿的剥离工程和筑坝工程中，能有效地缩短工期，节省劳动力，而且需用的机械设备少，并且不受季节和地方条件的限制。

(3) 药壶法 它是在普通炮孔底部，装入少量炸药进行不堵塞的爆破，使孔底部扩大成圆壶形，以求达到装入较多药量的爆破方法。药壶法属于集中药包类，适用于中等硬度的岩石，能在工程量不大、钻孔机具不足的情况下，以较少的炮孔爆破，获得较多土石方量。随着机械化施工水平的提高，药壶爆破的应用面有所缩小，但仍为某些特殊条件的工程所采用。

(4) 裸露药包法 它是一种不需钻孔，直接将炸药包贴放在被爆物体表面进行爆破的方法。它在清扫地基的破碎大孤石和对爆下的大块石做二次爆破等工作方面，具有独特作用，仍然是常用的有效方法。

按药包空间形状，爆破方法分为 4 种：

(1) 集中药包法 当药包的最长边长不超过最短边长的 4 倍时，称为集中药包。集中药包通常应用在药室法爆破和药壶法爆破中。集中药包起爆后产生的冲击波以均匀辐射状作用到周围的介质上。

(2) 延长药包法 当药包的最长边长大于最短边长或直径的 4 倍时，称为延长药包。实践中通常使用的延长药包，其长度要大于 17~18 倍药包直径。延长药包常常应用于深孔爆破、浅孔爆破和药室中的条形药包爆破中。延长药包起爆后，爆炸冲击波以柱面波的形式向四周传播并作用到周围的介质上。

(3) 平面药包法 当炸药包的直径大于其厚度的 3 或 4 倍时，称为平面药包。人们通常预先把炸药做成油毛毡或毛毡形状，应用时将其切割成块，包裹在介质表面，用于机械零件的爆炸加工。平面药包起爆后，大多数能量都散失到空气中，只有与炸药接触的介质表面受到爆炸作用，爆炸冲击波可以近似为平面波。

(4) 异形药包 为了某种特定的爆破作用，可以将炸药做成特定的形状。其中，应用最广的是聚能爆破法。它是将装药的一端加工成圆锥形的凹穴或沟槽，

使爆轰波按圆锥或沟槽凹穴的表面聚焦在它的焦点或轴线上，形成高能射流，击穿与它接触介质的某一部位。这种药包可用来切割金属板材、大块岩体的二次破碎以及在冻土中穿孔等。

在上述爆破方法的基础上，根据各种工程目的和要求，采取不同的药包布置形式和起爆方法，形成了许多各具特色的现代爆破技术，主要有以下几种。

(1) 毫秒爆破 毫秒爆破是 20 世纪 40 年代出现的爆破技术。它利用毫秒延期雷管，或连接在起爆网路上的延期装置，以实现延期的时间间隔，一般以 13~25ms 为一个间隔时间段。通过不同时差组成的爆破网络，一次起爆后，可以按设计要求顺序使各炮孔内的药包依次起爆，获得良好的爆破效果。

毫秒爆破的特点是各药包的起爆时间相差很小，被爆破的岩块在移动过程中互相撞击，形成极其复杂的能量再分配，使岩石破碎均匀，缩短抛掷距离，减弱地震波和空气冲击波的强度，既可改善爆破质量，不致砸坏附近的设施，又能提高作业机械的使用效率，有较大经济效益，在采矿和采石工程中广泛应用。

(2) 光面爆破和预裂爆破 光面爆破和预裂爆破是 20 世纪 50 年代末期，由于钻孔机械的发展而出现的一种密集钻孔小装药量的爆破新技术。在露天堑壕、基坑和地下工程的开挖中，采用光面爆破或预裂爆破使边坡形成比较陡峻的表面；使地下开挖的坑道面形成预计的断面轮廓线，避免超挖或欠挖，并能保持围岩的稳定。

实现周边光面的爆破技术措施有两种：一是开挖至边坡线或轮廓线时，预留一层厚度为炮孔间距 1.2 倍左右的岩层，在炮孔中装入低威力的小药卷，使药卷与孔壁间保持一定的空隙，爆破后能在孔壁面上留下半个炮孔痕迹；另一种方法是先在边坡线或轮廓线上钻凿与壁面平行的密集炮孔，首先起爆以形成一个沿炮孔中心线的破裂面，以阻隔主体爆破时地震波的传播，还能隔断应力波对保留面岩体的破坏作用。这两种爆破的效果，无论是形成光面或保护围岩稳定，均比普通爆破好，是隧道和地下厂房以及路堑和基坑开挖工程中常用的爆破技术。

(3) 定向爆破 20 世纪 50 年代末和 60 年代初期，在中国推行过定向爆破筑坝，3 年左右时间内用定向爆破技术筑成了 20 多座水坝，其中广东韶关南水大坝（1960 年），一次装药 1394.3t，爆破 226 万 m^3 ，填成平均高为 62.5m 的大坝，技术上达到了国际先进水平。

定向爆破是利用最小抵抗线在爆破作用中的方向性这个特点，设计时利用天然地形或人工改造后的地形，使最小抵抗线指向需要填筑的目标。这种技术已广泛地应用在水利筑坝、矿山尾矿坝和填筑路堤等工程上。它的突出优点是在极短时期内，通过一次爆破完成土石方工程挖、装、运、填等多道工序，节约大量的机械和人力，费用省、工效高；缺点是后续工程难于跟上，而且受到某些地形条件的限制。

(4) 拆除控制爆破 它不同于一般的工程爆破,对由爆破作用引起的危害有更加严格的要求,多用于城市或人口稠密、附近建筑物群集的地区拆除房屋、烟囱、水塔、桥梁以及厂房内部各种构筑物基座的爆破,因此,又称其城市拆除爆破。

拆除爆破所要求控制的内容是:①控制爆破破坏的范围,只爆破建筑物需要拆除的部位,保留其余部分的完整性;②控制爆破后建筑物的倾倒方向和坍塌范围;③控制爆破时产生的碎块飞出距离,空气冲击波强度和声响的强度;④控制爆破所引起的建筑物地基振动及其对附近建筑物的振动影响。

(5) 水下爆破 水下爆破是将炸药装填在海底或水下进行工程爆破的技术,是和露天爆破相对的另一个领域。凡疏通航道,炸除礁石,拆毁水下沉船、建筑物,开挖港口码头和航道基坑,以及处理码头堤坝的软弱地基等类爆破,都属于水下爆破的范畴。

水下爆破也和露天爆破一样,都是用裸露、钻孔或药室装药等方法实现爆破目的;不同的是水下施工比较复杂、困难,长期以来多由潜水员在水下进行钻孔和装药等技术作业。其工作范围既受水深的限制,又受潮汐水流的影响,效果欠佳。由于水作为介质的阻力远比空气大,因此,计算装药量时,必须考虑水的深度影响,才能保证爆破效果;同时水介质传播冲击波的能力也远大于空气,附近若有其他水工建筑物时,多采取气泡帷幕方法,降低水中冲击波的峰值压力,作为防护手段。

20世纪80年代以来,试验成功了水下压缩爆破方法,以水为传播压力的介质,压实水下淤泥等类软土地基,代替过去用机械船挖除淤泥的清基方法,既经济又方便,有效地扩大了水下爆破的应用范围。

(6) 地下掘进爆破 地下掘进爆破不同于露天和水下爆破,通常是在一个狭窄的工作面上进行钻爆作业,特点是装药量少或使用做功能力低的炸药,多炮孔,装药量分散,爆破作用力均匀分布,属于前述松动爆破的情况。为最大限度地减少对围岩的破坏程度,它在技术上要求比较严格。

地下爆破从技术上分两种:一是起掘进作用的掏槽爆破,在只有一个临空面的条件下,首先在工作面中央形成较小,但有足够深度的槽穴,这个槽穴是整个地下坑道、隧道等施工开挖中的先导;二是要使地下坑道造成一定横断面形式的成形爆破,爆破的作用力是在两个临空面上均匀分布的,除了要使炸落的岩石块度均匀,便于清碴,抛置不太远,不致打坏支撑等以外,还应保证坑道开挖限界外的围岩受到最小的破坏,以减少超挖的数量。

随着地下工业的发展,为开挖地下飞机场、库、厂房等大面积空间的工程,地下爆破技术正逐渐向大规模的大钻孔爆破技术发展。但目前地下大爆破技术经验较少。自从光面、预裂爆破技术应用于地下工程以后,促进了锚杆喷混凝土支

护技术的发展，每次爆破的超挖量减少到了最低量，围岩的稳定性大为增加，使地下工程获得了很好的经济效益。

4 爆破技术的发展趋势

对爆破技术的基本要求是在保证施工过程安全条件下完成具体爆破工程。爆破工程的高风险及其社会影响，使得从业技术人员除了要懂得应用一般的爆破方法进行爆破设计施工外，还应具备较强的安全环保意识、良好的心理素质和一定的管理协调能力。爆破工程是万无一失的工程，爆破失败往往会造成极其严重的难以弥补的后果和影响。为了适应社会发展和技术进步的要求，爆破技术正向着精确化、科学化和数字化的方向发展。

(1) 爆破控制的精确化 爆破装药的精确化将导致药包在空间的分散更为合理，不仅有利于控制爆破效应，还能有效地提高破碎矿岩的质量，为后续工序生产创造了有利条件。

爆破控制的精确化还表现在城市建构筑物拆除爆破中，通过精确设计爆破的药量及装药起爆方式，可以实现对建构筑物倾倒方向、倒塌范围、破坏区域、碎块飞散距离和地震波、空气冲击波等的有效控制。

爆破器材的发展进一步促进了起爆技术精确化。高精度雷管可使爆破毫秒延时间隔的控制提高到毫秒数量级以内，这对于改善爆破质量和控制爆破地震效应都具有重要意义。电子雷管的推广使用将使起爆精确度和安全性提高到更高的水平。

(2) 爆破技术的科学化 爆破理论落后于爆破技术发展的现状，近年来随着相关科学的进步和爆破理论的发展，尤其是计算机技术的广泛使用而有所改观。固体力学、工程力学等学科的新理论的引进，数值计算、设计智能化技术和安全与量测技术等研究工作的进步，为研究岩石爆破复杂过程提供了新的技术支持。

近年来，爆破理论研究充分借鉴了岩石损伤理论研究成果，甚至已能考虑岩体中天然节理裂隙对爆破效果的影响。在破岩机理研究中，除考虑爆炸冲击波和爆生气体作用外，更加关注自由面对爆破作用的影响。

爆破安全技术的发展和完善对于推广爆破技术的应用范围具有重要意义。非电导爆管起爆系统、高精度雷管、安全抗水炸药和乳化炸药等新型爆破器材的使用极大提高了爆破作业的安全性；同时，降低爆破地震波、空气冲击波、飞石、粉尘及气体污染等有害效应的研究和工程实践，也有力提高了爆破安全技术水平。

基础学科的发展与工程建设的未来需要，还将促进爆破理论研究的不断深入，从而更全面地认识和了解岩土爆破的作用过程，不断缩短理论与实践的距

离, 形成更加系统的岩土爆破科学理论, 使得爆破工程的设计和施工更加科学化。

(3) 爆破技术的数字化 目前的岩石爆破损伤模型考虑了岩石内部客观存在的微裂纹及其在爆炸载荷下的损伤演化对岩石断裂和破碎的影响, 能较真实地反映岩石爆破破碎过程, 但却普遍没有考虑爆生气体在岩石破碎中的作用。为了反应岩石中的天然节理裂隙和初始损伤等不连续影响和爆破后碎块飞散状况, 人们尝试用离散元和不连续变形分析方法建立爆破数值计算模型。

计算机辅助设计 (CAD) 在爆破工程中的应用在矿山较为普遍, 可方便地用于露天台阶爆破设计和咨询, 进行爆破方案设计和爆破震动分析。目前的露天矿生产爆破专家系统, 具有爆破对策选择、设备选择、方案选择、矿石块度尺寸分布预测、参数的敏感性研究及参数最优选择等多项输出功能。

电子雷管的发展和更广泛应用将是爆破技术数字化的重要方面, 具有特别的理论和实际意义。电子雷管的延期发火时间由微型电子芯片控制, 延时控制误差达到微秒级, 延期时间可在爆破现场由爆破员设定, 并在现场对整个爆破系统实施编程, 操作简单快捷。使用电子雷管除了有利于改善爆破效果, 还能提高生产、储存和使用等方面的安全性, 电子雷管将具有广泛的应用前景。

5 本书的内容与任务

爆破工程的研究内容应包括以下 5 个方面。①炸药及其爆炸的基本知识; ②爆破器材; ③爆破破岩的基本原理; ④工程 (隧道掘进、露天边坡开挖、沟槽开挖、建筑物拆除等) 中的爆破参数设计; ⑤特殊岩层条件 (如含瓦斯) 下的爆破方法; ⑥爆破安全, 包括爆破对周围环境可能引起的灾害预防, 早爆、拒爆的预防和处理。

本书主要介绍炸药起爆与爆轰的基本知识、炸药的化学反应形式、常用爆破器材、爆破破岩原理、土木工程中遇到的各种爆破方法的参数设计思想与工程实例分析, 以及爆破中的安全技术。本书还将体现目前国内外爆破技术的发展水平及工程应用中较为成熟的各种爆破新材料和新方法, 并注重应用知识的介绍和学生分析问题能力的培养。通过本书的学习, 使学生了解岩石爆破的基本原理、爆破工程的发展概况和应用前景, 掌握爆破工程设计和施工的基本知识和方法, 具有一定的独立设计爆破方案的基本技能, 并为从事专业工程技术工作和科学研究工作打下必要的基础。