

现代爆破技术

杨 军 陈鹏万 胡 刚 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

现代爆破技术

杨军 陈鹏万 胡刚 编著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书力争反映国内外爆破技术领域最新理论成就和先进技术成果,满足各相关专业教学课程体系改革和对爆破技术专业人才培养的需要。全书共分十章,主要内容包括概论、炸药及爆炸的基本理论、爆破器材、岩石爆破机理、掘进爆破技术、台阶爆破技术、建构筑物爆破拆除技术、特种爆破技术、爆破安全技术和爆破施工机械等。每章附有习题,附录列有常用爆破术语英汉对照,以方便读者自学和查阅外文资料。

本教材既适用于军工院校工程力学、弹药工程与爆炸技术等专业的本科生的专业课教学,也适用于普通高等学校矿业、交通、铁路、水电、土建等相关专业爆破技术课程教学,还可作为上述专业硕士研究生、博士研究生及相关工程技术人员教学、科研参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

现代爆破技术/杨军,陈鹏万,胡刚编著. —北京:北京理工大学出版社,2004.8

ISBN 7-5640-0330-8

I. 现… II. ①杨…②陈…③胡… III. 爆破技术 IV. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 067002 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室) 68912824 (发行部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / chiefedit@bitpress.com.cn

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 13.75

字 数 / 290 千字

版 次 / 2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1~1000 册

定 价 / 24.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 刘京凤

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

现代爆破技术,是一门迅速发展的实用型跨学科专业课程。随着我国经济建设与国防建设的发展和基建投入的增加,爆破技术得到了广泛的应用;各种爆破技术名目繁多,新方法新技术层出不穷,极大地促进了这门学科的发展。爆破技术是目前大规模岩石开挖的惟一有效手段,也是民用炸药和爆破器材的主要消耗市场。为了适应爆破技术的广泛应用和发展,需要加快培养掌握最新爆破技术且具有一定专业水平的从业技术人员。

本教材编写宗旨是提供一部不受具体工业门类限制的广泛适用的爆破技术专业教材,打破行业局限和现有教材框架,致力于从爆破理论研究和工程实践中吸取成熟的最新理论和先进技术成果,充实教学内容,突出现代特色。不仅可为相关军工学科培养工程爆破技术人才教学服务,填补军工专业爆破技术教学专用教材的空白;也可作为矿业、交通、铁路、水电土建等行业相关专业改进课程设置,拓广专业范围的新教材。

爆破工程技术是一门涉及专业面广、新技术多、发展变化快的学科,因此现代爆破技术作为教材不能面面俱到,必须克服教材编写的手册化倾向,而采取以点带面,突出重点,使读者能通过学习精选章节的重点内容,掌握基本原理和方法,通过课后作业和多媒体教学等教学环节,对相关爆破技术问题也能作到举一反三,融会贯通。借鉴了经典教材的优点,以爆破技术的基本理论和基本原理为重点,结合工程实践,深入浅出,既极力介绍先进技术和理论研究成果,又能充分考虑工程应用现状,以达到理论联系实际,为爆破工程服务的目的。考虑到学生专业基础水平和专业特点,进行适当的章节取舍,略去与其他相关课程重复的章节,便于学生在有限的学时内,掌握较多的爆破先进技术,以胜任实际工作需要。除增加了近年来出现的最新爆破技术和先进爆破器材外,还新增了有关岩石工程地质条件影响和爆破施工设备等章节。

本教材共分10章,建议授课时间为60学时,主要内容由四大部分组成:其中第1章概论、第2章炸药及爆炸基本理论和第3章爆破器材等三章内容为炸药及爆炸部分;第4章岩石爆破机理为爆破理论部分;爆破技术部分由第5章掘进爆破技术、第6章露天台阶爆破、第7章建构筑物爆破拆除技术、第8章特种爆破技术和第9章爆破安全技术等五章内容构成;最后是第10章爆破施工机械部分。本书的第1、4、6、7章及第3章部分章节由杨军撰写,第8、9、10章及附录由陈鹏万撰写,第2、5章及第3章部分章节由胡刚撰写。全书由杨军负责统稿和定稿。

中国矿业大学王树仁教授在百忙中认真审阅了全书,并就内容取舍、参数核实、名词术语等细节提出了许多宝贵意见和指导。著名爆破专家、中国工程院冯叔瑜院士欣然为本书作序,对作者给予了殷切的希望和热情的鼓舞。作者在此一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,编著过程时间仓促,书中难免不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正。

序 言

时间进入 21 世纪,国民经济建设有了更为深入的发展,大量城市建筑物的拆除、改建或扩建,许多新建工程不断增加;随着爆破器材的新品种相继出现,工程爆破的技术水平也在继续提高。据不完全统计,全国从事爆破工程的专业公司已超过千家,有关的从业人员达一百多万,其中专业技术人员有一万多人。事实表明,各个专业公司的技术水平差异很大,因而这些技术人员的素质也有着大的差别。由于社会对爆破作业人员的需求越来越多,对爆破作业的安全要求越来越高,为此公安部在中国工程爆破协会的积极配合下,先后培训了爆破技术人员一万二千多名,仍然不能满足客观的需要。

工程爆破是一门重实践的技术科学,许多工程实例都要通过实践来验证。但是没有正确的理论基础去指导实践,却也难得收到良好的工程效果。

杨军等三位作者,从事理论研究和爆破专业教学,并积累了一定的工程实践经验,合著了这本《现代爆破技术》,内容丰富,增加了一些新技术和新工艺,有利于大学本科相关专业和现场工作者的学习参考,相信他们能够从中得到裨益。

我高兴地看到了《现代爆破技术》书稿,在即将出版问世之际,乐于介绍给新学本专业和爆破界广大同仁,希望今后能有更多的著作出版,丰富和充实工程爆破理论和技术内容,培养和造就更多的优秀的爆破专业人才,促进我国爆破技术的不断创新和发展。

冯叔瑜

2004.7.2 于北京

目 录

1 概 论	(1)
1.1 从黑火药发明到现代爆破技术	(1)
1.2 现代爆破技术学科内容	(2)
1.3 现代爆破技术的发展趋势	(5)
2 炸药及爆炸的基本理论	(8)
2.1 炸药及其爆炸作用	(8)
2.2 炸药的氧平衡及爆轰产物	(10)
2.3 炸药的起爆与传爆	(17)
2.4 炸药的爆炸性能	(29)
思考题	(32)
3 爆破器材	(33)
3.1 工业炸药	(33)
3.2 起爆器材	(40)
3.3 起爆方法	(52)
思考题	(60)
4 岩石爆破机理	(61)
4.1 岩石的基本性质及其分级	(61)
4.2 爆炸作用下岩石破坏过程分析	(68)
4.3 装药量计算原理	(77)
4.4 影响爆破作用的因素分析	(81)
思考题	(88)
5 掘进爆破技术	(89)
5.1 掏槽方法及炮眼布置	(89)
5.2 掘进爆破设计	(95)
5.3 光面爆破技术	(103)
思考题	(108)
6 台阶爆破技术	(109)
6.1 台阶炮眼布置与爆破参数选择	(109)
6.2 大区毫秒爆破技术	(113)
6.3 预裂爆破	(117)
6.4 台阶爆破施工技术	(122)
思考题	(126)
7 建构筑物爆破拆除技术	(127)
7.1 烟囱水塔类高耸建筑物拆除技术	(128)
7.2 房屋类建筑爆破拆除技术	(133)

7.3	基础拆除爆破	(138)
7.4	水压爆破技术	(142)
7.5	静态破碎方法	(145)
	思考题	(148)
8	特种爆破技术	(149)
8.1	聚能爆破	(149)
8.2	爆炸加工	(155)
8.3	爆炸合成新材料	(162)
8.4	油气井爆破	(167)
	思考题	(171)
9	爆破安全技术	(172)
9.1	起爆安全及拒爆处理	(172)
9.2	爆破地震效应及减震措施	(177)
9.3	爆炸空气冲击波及其防护	(181)
9.4	爆破飞石及其他有害效应	(184)
	思考题	(187)
10	爆破施工机械	(188)
10.1	浅眼冲击式凿岩机械	(188)
10.2	中深孔钻孔机械	(193)
10.3	装药机械	(198)
10.4	破碎及铲装机械	(201)
	附录 常用爆破技术术语英汉对照	(204)
	主要参考文献	(211)

1 概 论

1.1 从黑火药发明到现代爆破技术

1.1.1 爆破技术发展历史

爆破技术是利用炸药爆炸释放的能量进行岩石开挖或介质破碎的专门技术。炸药的始祖是黑火药,为世界公认的中国对人类文明做出了重要贡献的四大发明之一。

中国人最先发明黑火药的记载可追溯到6—7世纪。早在唐代孙思邈所著的《丹经内伏硫黄注》中已出现硫、硝、炭三种成分的黑火药。郑思远在《真远妙道要略》中描述了硝、炭的化学反应。9世纪就出现了完整的黑火药的配方,直到南宋时期黑火药才用于军事目的。黑火药传入欧洲是在13世纪,1627年,匈牙利人首先将黑火药用于采矿过程的爆破工序,从此开始了爆破技术的萌芽。

爆破技术是伴随着各种爆破器材的发明而发展的,爆破技术的进步又促进了爆破器材的发展。1799年英国人高瓦尔德发明了雷汞炸药。1831年W. Bickford发明了导火索。A. Nobel在1867年发明了火雷管,同年又发明了以硅藻土为吸收剂的确化甘油炸药(Dynamite),1875年研制成功胶质硝化甘油炸药。硝化甘油炸药后来逐渐取代了黑火药。19世纪随着许多工业炸药新品种的发明及凿岩机械和起爆技术的出现,爆破技术得到了很大的发展。如1831年Richard Treuitch研制成功蒸汽式钻机,1862年Sommeiller研制出压气冲击式凿岩机,结束了人工掌钎抡锤打孔的历史;1895年出现的秒延期雷管解决了大规模爆破同时起爆多个药包的难题,并为延时起爆技术发展创造了条件。

1925年以硝酸铵为主要成分的粉状硝酸铵炸药问世,使爆破工程技术朝着安全、经济的方向迈出了决定性的一大步。在此前后出现的以泰安为药芯的导爆索(1919)和毫秒延期电雷管(1946),加上大型凿岩设备的出现,使大规模土石方开挖工程出现了深孔爆破,起爆形式也从齐发爆破发展到毫秒延时爆破。1956年迈尔文·库克发明的浆状炸药,以及上世纪70年代乳化炸药的研制成功,彻底解决了硝铵类炸药的防水问题。1967年瑞典诺贝尔公司研制发明的导爆管起爆系统,克服了电雷管起爆系统易受外来电干扰的弊端,进一步提高起爆的安全性,成为爆破工程的主流起爆器材。

爆破技术的不断发展,新技术不断涌现,使一些过时的技术逐渐淘汰。硐室爆破是以专用硐室或巷道作为装药空间的一种爆破技术,由于该技术爆破规模大、成本低、效率高,不需大型机械设备,曾在我国露天矿剥离、路堑开挖、基建平场和堤坝堆筑等工程中发挥出重要作用。硐室爆破药室的容量可达数千吨,我国曾成功进行过多次千吨和万吨级的硐室大爆破。随着机械化程度的提高和工程投资状况的改善,大规模硐室爆破的应用日益萎缩,加之爆破副作用大和二次破碎工程量繁重,发达国家和地区已不再使用此种爆破技术。近年来,随着起爆规模的增加和起爆器材品种的更新,火雷管起爆已趋于淘汰,电雷管的使用范围也逐渐萎缩;乳化炸药的兴起和普及,使固体防水硝铵类炸药退出爆破市场。

长期以来,使用爆破技术几乎是破碎岩石的惟一手段,就是在逐渐与隧道掘进机和液压冲

击锤等重型机械竞争的今天,爆破技术在较硬岩石和混凝土介质破碎和开挖工程中,仍然没有失去其不可替代的优势。

我国的爆破技术在改革开放以来取得了突飞猛进的发展,如今不仅在爆破技术开发应用上成果显赫,炸药技术输出和理论研究方面也取得了令世人瞩目的成就,21世纪更是一跃跨进世界爆破技术先进国家行列。

1.1.2 爆破技术在国民经济建设中的作用

现代爆破技术,是直接为国民经济建设服务的各种工业生产和开挖施工的技术手段之一。目前,在冶金、煤炭、水电、铁路交通和基础设施等国民经济建设领域,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领域取得了广泛的应用,为国民经济建设做出了重大贡献。我国冶金矿山、非金属矿山,年产9亿吨以上的矿石量,平均年产13亿吨煤炭,每年修建新线铁路近千km,公路逾10万km,大、中型水库、机场、港口等基础设施建设,都需采用爆破技术作为岩石施工手段。由此可见,爆破工程在我国国民经济建设中具有重要地位和作用。据统计,我国军工厂TNT年产量的90%,用于生产2号岩石工业炸药,而整个炸药产品的95%是用于爆破工程的,所以,民用爆破是军工企业火工品生产主要消耗市场。同时我国的雷管产量近年来已经突破年产21亿发水平,火工品生产和贸易每年为国家创造可观的经济效益。

现代爆破技术不仅已深入应用到我国国民经济生产的各个部门,而且在爆破实践中不断创造出了许多新技术、新工艺和新方法,提高了生产效率。诸如矿山开采爆破大孔距小抵抗线大区延时爆破;地下巷道的掘进的光面爆破;水利部门用以筑坝的定向爆破和打开水库引水隧洞的岩塞爆破;铁道交通部门的路堑爆破,填筑路堤和软土、冻土地带的爆破;石油化工部门埋设地下管道和过江管道以及处理油井卡钻事故的特殊爆破;还有水下炸礁、疏浚河道和为压实软土的水下码头、堤坝地基处理的水下爆破等等;不仅解决了工程建设和生产实际中的技术难题,同时也发展和丰富了现代爆破技术。

随着国民经济建设的深入发展,许多城市也在进行改建和扩建,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推进到了人口密集的城镇,更重要的是将爆破技术与安全和环保问题结合起来。考虑建筑物和围岩稳定的控制爆破技术,配合爆破测试手段监测爆破引起的周围环境的影响,不仅改进了爆破工艺,还使得在城市复杂环境中可以从容的进行爆破工程施工。跨入新世纪,大型机械设备的普及,高技术产品的不断涌现,以及环保意识的增强,无不给爆破技术的提高带来了新的机遇。

此外,近年来利用炸药爆炸原理在机械工业部门加工处理机械零部件的爆炸加工方法,为表面硬化的金属淬火处理,不同材质的金属爆炸焊接等新技术,在理论和经验方面都取得了很大的成就。爆炸合成新材料技术,在人工合成金刚石及超硬材料方面近年来取得了重要进展。

1.2 现代爆破技术学科内容

现代爆破技术是研究炸药在岩石等介质中爆炸破坏作用及其效果控制的一门学科。利用炸药的爆炸能量对介质做功,以达到预定工程目标的作业过程称做爆破(blasting)。现代爆破技术是一门发展迅速的实用型跨学科专业技术,主要研究爆破理论及其在岩石介质破碎、开挖

和城市拆除工程等领域的应用。随着经济建设的发展,爆破技术在国民经济建设和国防工程各部门得到了广泛的应用;各种爆破技术名目繁多,新方法新技术层出不穷,极大地促进了这门学科的发展,使爆破的含义已远远超出世人对其的传统理解和认识。

1.2.1 现代爆破技术的主要内容

现代爆破技术的主要内容由四大部分组成。炸药及爆炸的基本理论和岩石爆破机理是现代爆破技术发展的理论基础;工业炸药和各种安全实用的起爆器材,以及现代化施工机械,是爆破技术应用的物质条件;岩石中掘进爆破、露天台阶爆破、建构筑物拆除爆破和形形色色的特殊爆破,共同组成了现代爆破技术的丰富内容;而爆破安全技术是爆破技术推广应用的保证。

(1) 爆破理论,包括炸药及爆炸基本理论和岩石爆破机理等内容。炸药及爆炸作用的基本概念,阐述与爆破技术密切相关的炸药特性的感度及起爆传爆原理、氧平衡爆炸功及其炸药的主要性能;岩石爆破机理,则通过研究爆破作用下岩石破坏过程、爆破漏斗理论和成组药包作用,推出装药量计算原理,并深入分析了包括工程地质在内的影响爆破作用的因素。爆破理论模型研究成果也为爆破过程数值模拟奠定了基础。

(2) 爆破的物质基础,包括爆破器材和施工机械等内容。常用工业炸药、起爆器材及其起爆方法,具体如电雷管起爆方法和非电导爆管起爆法的连接网络,这些都是实施各种爆破方法的物质条件;爆破工程施工中所涉及的钻孔、装药、挖运及其破碎机械等机械设备对改进施工条件,促进施工现代化具有重要影响。

(3) 爆破技术,包括岩石爆破技术、建构筑物爆破拆除技术和特种爆破技术等内容。掘进爆破技术和台阶爆破技术的炮眼布置、爆破参数设计是爆破技术的核心,光面爆破、大区毫秒延时爆破和预裂爆破等技术构成了控制爆破技术的主要内容;烟囱水塔类高耸建筑物拆除技术、房屋类建筑拆除技术的爆破方案选择、控制原理和参数设计是拆除爆破的重点,基础地坪拆除技术、水压爆破技术和静态破碎等技术丰富了拆除爆破的方法;特殊形状药包的应用、金属破碎和切割技术、爆炸合成新材料、油气井爆破技术、软地基处理技术等特种爆破技术,进一步拓展了爆破技术的应用范围。

(4) 爆破安全,包括早爆、拒爆的预防和处理,爆破地震波效应及减震技术,空气冲击波、飞石及其防护技术,噪音、粉尘等环境危害的预防和减灾措施,以及相关的爆破测试技术等内容。

现代爆破技术的结构框架可概括如图 1-1 所示。

1.2.2 现代爆破技术特点

现代爆破技术具有基本理论发展快,各种爆破技术更新周期短,涉及的应用范围广,且社会影响力大的特点。现代爆破的基本方法是凿岩爆破法(包括深孔爆破和浅眼爆破),凿岩爆破法占整个爆破工程量的 85% 以上,代表了现代爆破技术的发展方向。

1. 掘进爆破(exploitation blasting)

凿岩爆破是矿山生产、水电工程、交通和基础设施建设的岩石开挖的主要施工手段。岩石中掘进工程是地下矿山开拓、交通水电工程以及地下洞库开挖不可或缺的项目,掘进爆破(exploitation blasting)技术是整个掘进工程的首要部分,爆破效果直接关系着工程质量和使用年限。

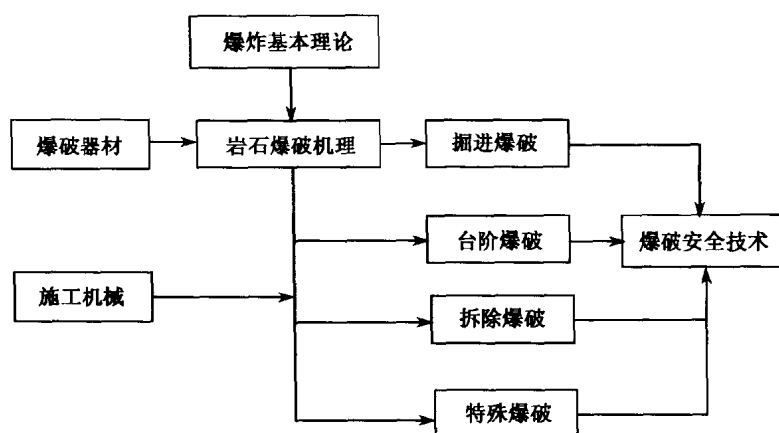


图 1-1 现代爆破技术基本框架

在一个自由面条件下进行巷道掘进,爆破的夹制作用很大,掏槽技术是举足轻重的。为了保护围岩及推广新奥法施工,光面爆破技术得到了广泛应用。光面爆破是当爆破接近开挖边界线时,预留一圈保护层,然后对此保护层的密集钻孔进行少量装药的爆破,以求得到光滑平整的坡面和轮廓面。

除掘进爆破以外,浅眼爆破还广泛地应用于小规模土石方开挖爆破、城市建构筑物拆除爆破和一些地下矿开采等工程中。

2. 台阶爆破

台阶爆破(bench blasting)是现代爆破工程应用最广的爆破技术。露天矿开采、铁路和公路路堑工程、水电工程及基坑开挖等大规模岩石开挖工程都离不开台阶爆破。由于台阶爆破可与装运机械匹配施工,机械化水平高,因此施工速度快、效率高、安全性好。随着深孔钻机等机械设备的不断改进发展,深孔爆破技术在石方开挖工程中占有越来越重要的地位。台阶爆破中的毫秒延时爆破和预裂爆破是控制爆破技术发展的重要方向。

毫秒延时爆破(millisecond delay blasting)是一种巧妙地安排各炮孔起爆次序与合理时差的爆破技术,能有效减少爆破后出现的大块率,减少地震波、空气冲击波的强度和碎块的飞散距离,得到良好的便于挖运的堆积体。1986年葛洲坝围堰爆破,创造了将3000多炮孔分为300多段起爆的成功经验。目前在露天及地下开挖和城市控制爆破中已普遍采用,这种技术还有更为广阔的发展前途。

预裂爆破(presplitting blasting)与光面爆破(smooth blasting)在获得光滑的岩面、保护围岩免遭破坏方面具有相同的目的。预裂爆破在完整的岩体开挖前预先爆破预裂孔,使沿着开挖部分和保留部分的分界线裂开一道缝隙,用以隔断爆破作用对保留岩体的破坏。国内露天矿靠帮爆破所采取的控制爆破措施中,多数矿山采用预裂爆破,少数矿山采用缓冲爆破和光面爆破。

3. 拆除爆破

拆除爆破(demolition blasting)是近50年来迅速发展起来的一类控制爆破技术。拆除爆破具有如下特点:首先,拆除爆破一般处在闹市区、居民区或厂区,爆区附近的环境十分复杂对爆破设计提出了更高的要求;其次,爆破拆除的对象各不相同,其建筑结构也各不相同,针对不同

的拆除对象必须采用不同的爆破方式。如对于烟囱、水塔和高层建筑物拆除,爆破设计只需炸毁结构的要害部位,利用结构失稳倒塌实现整体破碎;对于基础、地坪等实体构筑物破碎,爆破时则按照单位炸药消耗量参考岩石松散爆破有关规律设计。

拆除爆破的关键在于控制爆破规模和药包重量的计算与炮孔位置的安排,以及有效的安全防护手段。使用炸药并不是拆除爆破的惟一的手段,近些年来出现的燃烧剂、静态膨胀破碎剂等方法,扩大了爆破手段的选择范围。大型机械化拆除技术的兴起,对爆破拆除市场形成了巨大的冲击,机械破碎配合爆破拆除可以改善工作条件,提高爆破拆除效率。使用时可以根据爆破的规模、安全要求和被爆破对象的具体条件选择合理有效的拆除方法。

4. 特殊爆破技术

特种爆破,是指爆破介质和对象、爆破方法及药包结构、爆破环境或爆破目的等不同于普通爆破的特殊爆破技术。近年来金属爆炸冲压成形、金属焊接、表面硬化和切割技术、爆炸合成金刚石、高温超导材料、非晶和微晶新材料等技术的应用领域越来越广,已建立和发展一批具有特殊装备的爆炸加工专业队伍。

炸药爆炸的聚能原理和它所产生的效应一直用作穿甲弹的军事目的,近年来才逐渐转为民用。利用聚能效应在冻土内穿孔,为炼钢平炉的出钢口射孔,为石油井内射孔或排除钻孔故障,以及在工程上用来切割金属板材和大块二次破碎等方面都取得了广泛的应用,其中油气井爆破技术,包括地震勘探、测井、射孔、压裂和修井技术已成为特殊爆破的重要分支。

水下爆破技术在水库岩塞爆破、挡水围堰拆除、港湾航道疏浚工程和淤泥与饱和沙土软地基爆炸处理等方面,发展非常迅速,尤其是淤泥软基爆炸处理技术具有投资少、工效高和施工简便等优势,在沿海开发区建设中得到了广泛的应用。

5. 爆破安全技术

爆破安全技术包括爆破施工作业中使用火工品的安全问题和爆破对周围建筑设施与环境安全影响两部分。一部分涉及爆破器材性能、适用条件、检验方法和起爆技术等问题,另一部分为爆破安全准则、爆破引起的公害及控制标准,以及防护技术和减灾技术等问题。

使用先进的爆破器材,可以消除早爆和拒爆等各种安全隐患。非电导爆管起爆系统、高精度毫秒延期雷管、无起爆药雷管和乳化炸药为首的安全防水炸药等新产品的推广使用,极大提高了爆破作业的安全可靠性,也大幅度减少了爆破事故的发生。随着爆破技术的进步及其在复杂工程城市环境的广泛使用,爆破引起的有害影响,包括地震、空气冲击波、飞石、噪音、毒气和粉尘等现象的控制和削弱,已经成为爆破设计与施工的必要部分;只要在爆破设计中采取有效的控制和防范措施,严格执行《爆破安全规程》,加强安全监测管理,可使各种爆破有害效应降低到最低程度。

1.3 现代爆破技术的发展趋势

现代爆破技术的特点是在保证施工过程安全条件下完成具体爆破工程。爆破工程的高风险性及其社会影响,使得从业技术人员除了掌握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。因为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后果和影响。为了适应社会发展和技术进步的要求,现代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

装药形式和装药结构的变化导致药包分散更为合理。集中药包是爆破理论中相似法则和最小抵抗线原理的典型装药形式,也是爆破设计中确定单位炸药消耗量 q 的依据。硐室爆破多用集中药包,但在大规模硐室爆破使用条形药包较为普遍。扩壶爆破属于集中药包,适用于中等硬度以下的岩石爆破,能在钻孔机具不足的施工条件下,获得较高的单位炮孔岩石爆破量。扩壶就是在普通炮孔的底部,装入小量炸药进行不堵塞的爆破,使孔底逐步扩大成圆壶状空间,以便装入较多药量的爆破方法。随着现代机械化施工水平的提高,扩壶爆破的运用面越来越小,但仍为某些特殊工程条件所采用。

钻眼爆破中绝大多数药包属于柱状药包,但为了满足预裂爆破、毫秒延时爆破等控制爆破的要求,常采取不耦合、间隔装药等装药技术。随着爆破装药的精确化,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。

控制爆破过程中不同空间位置药包的起爆间隔时差是改善爆破质量和减小地震效应的得力手段,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1 ms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。

爆破控制的精确化还表现在城市建构筑物拆除爆破中,对于烟囱、水塔和高层建筑物拆除,爆破设计不仅需要将结构要害部位的炸毁,形成失稳倒塌切口,为了降低建筑物倒塌冲击造成的地震效应,还需在炸毁切口以外位置布置药包,以实现结构空中解体 and 减缓冲击落地姿态。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、空气冲击波等公害有效控制。

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,甚至开始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。在爆破实践中大孔距小抵抗线毫秒延时爆破技术,充分利用自由面作用,采取斜线起爆,尽可能产生多个人为制造自由面,从而极大改善了爆破质量。

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。

3. 爆破技术的数字化

数值计算方法的发展,经历了连续介质材料模型和非连续介质材料模型等发展阶段。岩石爆破损伤模型因其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,能较真实地反映了岩石爆破破碎过程。但是目前的岩石爆破损伤模型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。露天矿生产爆破专家系统,利用模糊数学理论帮助用户进行爆破对策的选择和最优台阶高度的确定,对于某些决策系统可以给出置信水平。整个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。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。

电子雷管具有数码延时控制精度高和可灵活设定两大技术特点。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,所以电子雷管将具有广泛的应用前景。

2 炸药及爆炸的基本理论

2.1 炸药及其爆炸作用

2.1.1 炸药及爆炸的定义

1. 炸药

炸药(explosive)是在一定能量作用下,发生快速化学反应,释放能量,生成大量热和气体产物的化合物或混合物。炸药的化学成分主要由碳、氢、氮、氧四种元素组成。在通常条件下,炸药是比较安定的物质,一旦受外界条件作用获得足够的活化能,炸药内各种分子的运动速度和相互间碰撞能力增加,便会发生剧烈化学反应,引起炸药爆炸。炸药爆炸通常是从局部分子被活化、分解开始的,其反应热又使周围炸药分子被活化、分解,如此循环下去,直至全部炸药反应完毕。

2. 爆炸的定义及分类

爆炸(explosion)是物质系统的迅速变化过程。在爆炸过程中,物质系统瞬间放出巨大的能量,对系统周围介质做功,产生巨大的破坏作用,并伴随有强烈的声、光、热和电磁波等效应。各种爆炸现象按其作用产生的原因可分为物理爆炸、核爆炸和化学爆炸三类。

(1) 物理爆炸,指由物理原因造成的爆炸,爆炸过程中不发生化学变化。例如,锅炉爆炸、氧气瓶爆炸和轮胎放炮等都是物理爆炸。

(2) 核爆炸,指由核裂变或核聚变引起的爆炸。核爆炸放出能量极大,相当数万吨至数千万吨梯恩梯当量爆炸能,并辐射出很强的各种射线。

(3) 化学爆炸,指由化学变化造成的爆炸,炸药爆炸、瓦斯或煤尘爆炸、汽油与空气混合物的爆炸等都是化学爆炸。化学爆炸是工业生产和现代战争中广泛使用的类型。

2.1.2 炸药爆炸的基本特征

炸药爆炸的三个基本特征包括反应的放热性、生成气体产物和反应的高速性,是构成爆炸的必要条件,又称为爆炸的三要素。

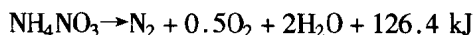
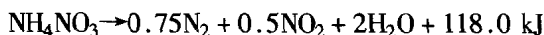
1. 反应的放热性

放出大量热能是形成爆炸的必要条件,吸热反应或放热不足都不能形成爆炸。从各种草酸盐的反应热效应与其爆炸性的比较可以证实这一点。

$(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO} + \text{CO}_2 - 263.3 \text{ kJ}$	不爆炸
$\text{CuC}_2\text{O}_4 \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{Cu} + 23.9 \text{ kJ}$	爆炸性不明显
$\text{HgC}_2\text{O}_4 \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{Hg} + 72.4 \text{ kJ}$	爆炸
$\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{Ag} + 123.5 \text{ kJ}$	爆炸

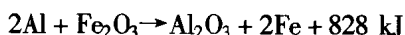
对于同一种化合物,由于激起反应的条件和热效应不同,也有类似的结果。例如,硝酸铵,在常温至 150 °C 时的反应为吸热反应;加热到 200 °C 时,分解反应虽为放热反应,但放热量不大,仍然不能构成爆炸;若迅速加热到 400 °C ~ 500 °C,或用起爆药柱强力起爆,由于放热量增

大,就会引起爆炸。其爆炸反应方程式为



2. 生成气体产物

炸药爆炸放出的能量必须借助气体介质才能转化为机械功。因此,生成气体产物是炸药做功不可缺少的条件。在炸药能量转化的过程中,放出的热能先转化为气体的压缩能,后者在气体膨胀过程中转化为机械功。即使物质的反应热很大,但如果没有气体生成,就不会具有爆炸性。例如,铝热剂反应



铝热剂单位放热量要比梯恩梯高,并能形成 3 000℃ 高温,可使生成产物熔化,但却不能形成爆炸。若浸湿铝热剂或在松散铝热剂中含有空气,就可能产生类似爆炸现象。

虽然炸药爆炸放出的热量不可能全部转化为机械功,但生成气体越多,热量利用率越高。

3. 反应的快速性

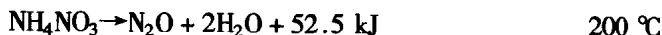
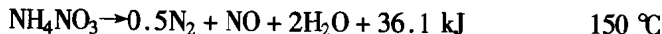
炸药爆炸反应中,在反应区内炸药变成爆炸气体产物的时间只需要 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ s}$ 。爆炸过程的高速度决定了炸药能够在很短时间内释放大能量,使得单位体积内聚集很高的热能,使反应产物被迅速的加热到 2 000 ~ 3 000℃ 的高温,从而具有极大的威力。这是爆炸反应区别燃烧及其他化学反应的一个显著特点。如果从单位质量放出的能量比较,炸药还不及一般的燃料。例如,1 D 单位重量煤在空气中燃烧可放出 10 032 kJ/kg 的热量,比单位炸药放出的热量 (2 900 ~ 6 300 kJ/kg) 多很多,但在煤的燃烧过程中,所产生的热量通过热传导和热辐射不断散失,所以不会发生爆炸。

2.1.3 炸药化学反应的形式

炸药的化学反应是一种氧化还原反应。由于环境和引起化学反应的条件不同,一种炸药可能有不同形式的化学反应,即热分解、燃烧和爆炸。

1. 热分解

炸药在常温条件下,若不受其他外界能量作用,常常以缓慢速度的形式进行热分解反应,环境温度越高,分解越显著。热分解的特点是:炸药内各点温度相同;在全部炸药内反应同时进行,没有集中的反应区;分解时,既可以吸热,也可以放热,决定于炸药类别和环境温度。但当温度较高时,所有炸药的分解反应都伴随有热量放出。例如,硝酸铵在常温或温度低于 150℃ 时,其分解反应为吸热反应;当加热至 200℃ 左右,分解时将放出热量



分解反应若为放热反应,如果放出热量不能及时散失,炸药温度就会不断升高,促使反应速度不断加快和放出更多的热量,最终引起炸药的燃烧和爆炸。因此,在储存、加工和使用炸药时,要随时注意通风,防止由于炸药分解产生热积累而导致意外爆炸事故的发生。

衡量炸药在不同温度条件下的化学安定性指标称为炸药的热安定性。

2. 燃烧

燃烧(combustion)是可燃元素(如碳、氢等)被激烈氧化的反应。炸药在加热条件下也会产生燃烧,但与其他可燃物燃烧的区别在于炸药燃烧时不需要外界供氧。炸药的快速燃烧又称

爆燃,其燃烧速度可达 10^2 m/s。

燃烧与缓慢分解反应不同,燃烧不是在全部物质内同时展开的,而只在局部区域内进行并在物质内传播。进行燃烧的区域称为燃烧区或称为反应区。反应区沿物质向前传播,其传播的速度称为燃烧速度。

炸药在燃烧过程中,若燃烧速度保持定值就称为稳定燃烧,否则就称为不稳定燃烧。炸药燃烧主要靠热传导来传递能量。因此,稳定燃烧速度不可能很高,一般为 10^{-3} m/s ~ 10 m/s,最高只能达到 10^2 m/s,低于炸药内的声速,且燃烧速度受环境条件影响较大。约束条件下药柱燃烧时,燃烧产物向外部空间排出,燃烧反应区则向尚未反应的炸药内部传播,二者运动方向相反。

3. 爆炸

在炸药爆炸的过程中,化学反应区只在反应区内进行并在炸药内传播,反应区的传播速度称为爆炸速度。燃烧与爆炸的主要区别在于:燃烧靠热传导来传递能量和激起化学反应,受环境影响较大;而爆炸则靠冲击波的作用来传递能量和激起化学反应,基本上不受环境影响;爆炸反应也比燃烧反应更为激烈,放出热量和形成温度也高;燃烧产物的运动方向与反应区传播方向相反,而爆炸产物的运动方向则与反应区传播方向相同,故燃烧产生的压力较低,而爆炸则可产生很高的压力;燃烧速度是亚音速的,爆炸速度是超音速的。

爆炸同样存在稳定爆炸和不稳定爆炸两种情况,爆炸速度保持定值的称为稳定爆炸,否则为不稳定爆炸。稳定爆炸又称为爆轰。爆炸是爆轰的不理想状态。爆轰速度可达 2 000 ~ 9 000 m/s,产生压力可达 10^3 ~ 10^4 MPa。

炸药上述三种化学变化的形式,在一定条件下,都是能够相互转化的:缓慢分解可发展为燃烧、爆炸;反之,爆炸也可转化为燃烧、缓慢分解。

2.2 炸药的氧平衡及爆轰产物

2.2.1 炸药的氧平衡

2.2.1.1 氧平衡的概念

炸药内的主要元素是碳、氢、氧、氮,有些炸药还含有氯、硫、金属及其他成分。若炸药内只含有前四种元素,无论是单质炸药还是混合炸药,都可以把它们写成通式 $C_aH_bO_cN_d$, a 、 b 、 c 、 d 分别代表一个炸药分子中碳、氢、氧、氮原子的个数。单质炸药的通式通常按 1 mol 写出,混合炸药则按 1 kg 写出。

炸药爆炸的化学反应,是氧化反应,而且所需氧元素是由炸药本身提供。按理想氧化反应生成的产物应为: H_2O 、 CO_2 和其他元素的高级氧化物,由于氮和多余的游离氧量不足,在生成产物中,除 H_2O 、 CO_2 、 N_2 外,还会有 H_2 、 CO 、固体碳和其他氧化不完全的产物。

炸药内含氧量与可燃物氧化所需氧量之间的关系称为氧平衡(oxygen balance)。氧平衡用每克炸药中剩余或不足氧量的克数或百分数来表示。一些炸药及物质的氧平衡见表 2-1。

2.2.1.2 氧平衡的计算

炸药发生爆炸反应时,若碳、氢原子完全氧化则

