

工程爆破

BLASTING
ENGINEERING

主 编 张敢生 孙俊鹏
副主编 陈庆凯 孔祥雷 高毓山



東北大學出版社
Northeastern University Press

工程爆破

主 编 张敢生 孙俊鹏

副主编 陈庆凯 孔祥雷 高毓山

东北大学出版社

·沈阳·

© 张敢生 孙俊鹏 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

工程爆破 / 张敢生, 孙俊鹏主编. —沈阳: 东北大学出版社, 2014.8
ISBN 978-7-5517-0756-5

I. ①工… II. ①张… ②孙… III. ①爆破技术 IV. ①TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 185961 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路3号巷11号

邮编: 110819

电话: 024—83680267(社务室) 83687331(市场部)

传真: 024—83680265(办公室) 83680178(出版部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 三河市天润建兴印务有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

印 张: 18.5

字 数: 462千字

出版时间: 2014年10月第1版

印刷时间: 2014年10月第1次印刷

组稿编辑: 孙 锋

责任编辑: 郎 坤

责任校对: 文 浩

封面设计: 刘江旻

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-0756-5

定 价: 65.00 元

前 言

随着工程爆破的迅速发展，爆破工艺、技术、装备水平等都有很大的提高，工程爆破正在向科学化、精细化和数字化方向发展。为了适应这种发展趋势和采矿工程本科生应用型人才培养的需要，我们编写了本教材。

本教材以满足采矿工程专业本科教学的需要为出发点，系统地介绍了工程爆破的基本知识、基本理论和基本技能；侧重于工程实践知识和技术，力求理论联系实际，将近年来爆破工程中出现的新工艺、新技术，特别是将新工艺、新技术在工程爆破中的应用编进教材中。本教材也可作为矿山和工程爆破技术人员的培训教材和应用参考书。

本教材共分11章，主要内容包括：绪论，炸药与爆破作用的基本知识与原理，爆破器材，常用起爆方法，爆破工程地质，工程爆破施工机械，岩石爆破基本原理，露天矿台阶爆破，地下矿爆破，硐室爆破，爆破危害控制与安全。

参加本教材编写工作的有辽宁科技学院张敢生、孔祥雷，大连经济开发区金源爆破工程有限公司孙俊鹏，东北大学陈庆凯和本钢南芬露天铁矿高毓山。其中孔祥雷编写绪论和工程爆破施工机械；张敢生编写炸药与爆破作用的基本知识与原理、岩石爆破基本原理、地下矿爆破、爆破危害控制与安全；孙俊鹏编写爆破工程地质、常用起爆方法和硐室爆破；陈庆凯编写露天矿台阶爆破；高毓山编写爆破器材。全书由张敢生、孙俊鹏担任主编，陈庆凯、孔祥雷、高毓山担任副主编。

本教材编写时参阅和引用了大量的图书专著、教材和学术期刊文章，限于篇幅，仅将主要的参考文献附后。本教材在编写过程中得到许多同行、矿山工程技术人员的支持和帮助，在此谨向文献作者及提供帮助者表示诚挚的谢意！

由于编者水平有限，教材中难免有疏漏失误之处，恳请读者多加批评指正。

编 者

2013年7月

目 录

0 绪 论	1
0.1 工程爆破的历史与现状	1
0.2 工程爆破的内涵与基本特点	5
0.3 工程爆破的发展前景	6
1 炸药与爆破作用的基本知识与原理	9
1.1 基本概念	9
1.2 炸药的氧平衡与热化学参数	19
1.3 炸药的爆炸性能指标	24
本章小结	34
复习思考题	34
2 爆破器材	35
2.1 工业炸药	35
2.2 起爆器材	47
2.3 爆破器材的贮存与运输	59
2.4 爆破器材的检验与销毁	64
本章小结	69
复习思考题	69
3 常用起爆方法	70
3.1 电力起爆法与电爆网路	70
3.2 导爆索起爆法	74
3.3 塑料导爆管起爆系统	77
3.4 新型起爆方法	81
3.5 混合网路起爆法	84
本章小结	85
复习思考题	85
4 爆破工程地质	86
4.1 岩石性质及其分级	86

4.2 地形地质条件对爆破的影响	100
4.3 爆破对工程地质的改变	110
4.4 爆破工程地质勘察	114
本章小结	119
复习思考题	119
5 工程爆破施工机械	120
5.1 凿岩机	120
5.2 潜孔钻机	128
5.3 牙轮钻机	132
5.4 凿岩钻车	134
5.5 空压机	141
5.6 钻孔机械计算及石方工程机械配套	149
5.7 现场装药机械	155
本章小结	161
复习思考题	161
6 岩石爆破基本原理	162
6.1 岩石爆破破坏基本理论	162
6.2 单个药包爆破作用	164
6.3 装药量计算原理	167
6.4 影响爆破作用的主要因素	170
本章小结	174
复习思考题	174
7 露天矿台阶爆破	175
7.1 露天矿深孔台阶爆破	175
7.2 露天矿浅孔台阶爆破	190
7.3 药壶爆破及二次爆破	192
7.4 预裂爆破和光面爆破	197
本章小结	207
复习思考题	207
8 地下矿爆破	208
8.1 井巷掘进爆破	208
8.2 地下采场深孔爆破	221
8.3 地下采场浅眼爆破	228

8.4 地下深孔挤压爆破	230
本章小结	232
复习思考题	232
9 硐室爆破	233
9.1 基本概念	233
9.2 设计依据与基本内容	235
9.3 药包布置方法	237
9.4 药包参数选择与装药量计算	242
9.5 爆破施工与管理	246
本章小结	253
复习思考题	253
10 爆破危害控制与安全	254
10.1 爆破地震安全距离	254
10.2 爆炸冲击波安全距离	258
10.3 爆破堆积体与个别飞散物计算	261
10.4 爆破粉尘产生与预防	265
10.5 爆炸有害气体扩散安全距离	266
10.6 爆破噪声及其控制	269
10.7 早爆、拒爆事故预防与处理	270
10.8 爆破环境调查与有害效应监测	283
本章小结	285
复习思考题	285
参考文献	286

0 绪 言

0.1

工程爆破的历史与现状

0.1.1 工业炸药的历史与现状

人类对爆炸的研究与应用，源于我国黑火药的发明和发展。早在公元808年以前，我国炼丹家就发明了用硫磺、硝石和木炭3种组分配制的黑火药。公元10世纪，我国开始将黑火药用于军事，世界历史上第一个爆炸性武器是我国发明的铁火炮（震天雷）。大约在11—12世纪，黑火药开始传入阿拉伯国家，后传入欧洲，阿拉伯人称硝石为“中国雪”或“中国盐”。约在1613年，黑火药应用于矿业，标志着工业革命的开始。黑火药作为独一无二的炸药，延续了两百多年，直到1865年瑞典化学家阿尔弗雷德·诺贝尔（Alfred Nobel）发明了以硝化甘油为主要组分的达纳迈特（Dynamite）炸药以及1867年奥尔森（Olsson）和诺宾（Norrbein）发明了硝酸铵和各种燃料制成的混合炸药之后，工业炸药才步入了多品种的时代，并奠定了硝铵类炸药与硝甘类炸药相互竞争发展的基础。

长期的封建统治和新中国成立前百余年来帝国主义的侵略掠夺，严重阻碍了我国科学技术的发展。工业炸药也是如此。新中国成立前，我国仅有的两座硝铵炸药工厂，也是日本帝国主义为掠夺我国矿产资源而开办的。抗日战争时期，解放区人民发明和使用了对硝酸铵和液体可燃物组成的炸药，这可以说是铵油炸药的雏形。新中国成立后，随着国民经济的迅速发展，我国的炸药工业也有了很大的发展，建立了一批专门生产硝铵炸药和硝甘炸药的工厂，基本满足了国民经济发展的需要。铵油炸药和浆状炸药等含水炸药的相继发明和推广应用，标志着我国工业炸药步入了一个新的发展时期。1963年以来，铵油炸药得到了全面推广，20世纪70年代中期，冶金矿山铵油炸药使用量已占炸药总消耗量的70%左右，还制造、应用了多种气动装药设备，如YC-2型铵油炸药装药车和FZY-1型风动装药器，其后又研制应用了铵沥蜡炸药和铵松蜡炸药。

我国从1959年开始研制浆状炸药，20世纪60年代中期在矿山爆破作业中获得应用，其代表性品种是4号浆状炸药。70年代初期，随着胶凝剂（田菁胶、槐豆胶）和交联技术取得重要突破，我国浆状炸药的品种不断增加，浆状炸药装药车与可泵送浆状炸药的出现，更好地满足了露天爆破作业的需要。80年代中期，煤炭部淮北910厂引进了美国杜邦公司水胶炸药生产技术与设备。目前，我国910厂和太原兴安化学材料厂等厂家仍在生产、销售水胶炸药。我国从20世纪70年代后期开始研制乳化炸药，政府、企业和科研单位都非常重视乳化炸药技术的发展，不仅采用连续化、自动化生产工艺技术、设备生产岩石型、煤矿许用型乳化炸药，而且独创了国外没有的粉状乳化炸药。不仅有了露天型乳化炸药混装车，而且利用水环减阻技术发展了地下小直径乳化炸药装药车。乳化炸药生产技

术和装药车不仅满足了国内的需要,而且出口到瑞典、蒙古、俄罗斯、越南和赞比亚等国。我国研制开发了多品种乳化炸药、粉状乳化炸药和乳化粒状铵油炸药计算机控制连续化生产线。

新中国成立初期,我国只能生产导火索、火雷管和电雷管。经过科技人员的努力,很快就能生产和应用毫秒延期电雷管和秒延期电雷管。20世纪70年代初期,阜新12厂还生产、销售了导爆索-继爆管毫秒延期起爆系统。70年代末期,我国自行研制、生产了塑料导爆管及其配套的非电毫秒延期雷管,并在工程爆破作业中获得了广泛的应用。80年代中期,我国根据电磁感应原理研制、生产了磁电雷管,这种雷管在油、气井爆破作业中获得了应用。21世纪初,30段等间隔(25ms)毫秒延期电雷管研制成功并投入使用,并且出口到周边国家、非洲和我国香港地区。低能导爆索(3.0g/m, 1.5g/m)、高能导爆索(34g/m及以上)、普通导爆索和安全导爆索已形成了配套的系列产品。油气井燃烧爆破、地震勘探爆破和许多特种爆破需用的爆破器材亦已形成系列产品。

数码电子雷管是一种延期时间可以根据实际需要任意设定并精确实现发火延期的新型电能起爆器材,具有使用安全可靠、延期时间精确度高、设定灵活等特点。目前,我国的北方邦杰、京煤化工、久联集团、213所等单位均推出了各自的电子雷管产品,并已在爆破工程中获得初步应用。数码电子雷管为推进我国爆破器材和工程爆破行业的技术进步提供了有效的装备和手段。

我国是爆破器材生产和消耗大国,已经建立了比较完整的爆破器材生产、流通和使用体系。全国现有生产企业146家,其中雷管生产企业55家,2010年工业炸药产量达到351万吨,工业雷管产量达到24亿发,工业索类火工品产量达到1.5亿米,油气井用、地震勘探用及特种爆破的爆破器材也有相当的规模。我国已从2008年1月1日起停止生产导火索、火雷管和铵梯炸药,同年6月30日起停止使用,这标志着我国爆破器材在科学发展观的指导下,进入了一个依靠技术进步,提升民爆产品质量的发展新阶段。

0.1.2 爆破技术的历史与现状

新中国成立以后,我国才有了自己的爆破队伍。但新中国成立初期,我国工程爆破技术力量十分薄弱,施工设备简陋,只有抚顺、阜新、鞍山等几座矿山有从事爆破作业的技术人员,远不能满足经济建设的需要。随着建设的迫切需要,从第一个五年计划开始,党和政府就十分重视培养、选用工程爆破技术人才和发展壮大工程爆破施工力量与装备,使我国逐步具备独立从事大规模爆破设计与施工的能力。例如,1956年我国甘肃省白银露天矿建设的剥离硐室爆破,其炸药用量达15640t,爆破方量为 $907.7 \times 10^4 \text{m}^3$,这次大爆破是我国首次万吨级硐室大爆破,它的成功实施标志着我国在硐室爆破等大规模爆破领域里有了较高的技术水准。从那时起,硐室爆破在我国矿山、铁道、水利水电和公路等建设工程中获得了广泛应用,定向爆破筑坝技术在矿山尾矿库、大中型水库等工程建设中已经成功应用,全国已爆破筑坝60余座,取得了丰富的经验。由于硐室爆破一次爆破装药量大,随着爆破对周围地区影响控制程度要求的提高,在20世纪90年代初,铁路路堑爆破中推广采用条形药包硐室爆破技术,随后,该技术的应用领域和规模逐渐扩大。我国现已成功进行了上百次大型条形药包硐室爆破工程,爆破的规模从数十吨到上千吨炸药量,这些爆破都取得了很高的技术经济成果。在高速公路、铁路的新线建设中,采用条形硐室药

包加边坡预裂爆破一次成形技术,不仅发挥了硐室爆破方法快速、成本较低的优点,还有效地控制了硐室爆破对边坡的破坏影响。焦晋高速公路某段长170m的路堑采用了这种技术,使稳定的边坡最高达92m,形成了一道亮丽的风景线。中深孔爆破技术是现代工程爆破技术的主要发展方向,现已得到非常广泛的应用。矿山深孔爆破已根据工程的要求发展了毫秒延期爆破、挤压爆破、预裂爆破和光面爆破等。例如,三峡工程永久船闸约 $1.0 \times 10^7 \text{m}^3$ 深闸室开挖百米高稳定边坡的控制爆破技术,青岛市环胶州湾高速公路山角村段一次实施路堑长470m、203排和3080孔的深孔拉槽导爆管雷管起爆的控制爆破技术,南芬等大型露天矿山在大区实施多排深孔毫秒延期爆破,显著地提高了爆破质量与技术经济指标;德兴铜矿在有自燃自爆危险的难爆矿岩实行机械化预装药爆破技术,准格尔、安太堡等露天煤矿采用高台阶深孔抛掷爆破技术,一次爆破规模达到上千吨炸药量,并取得了逐孔毫秒延期爆破的丰富经验。

地下矿山除应用常规的浅孔、中深孔爆破外,大直径深孔爆破得到了推广应用,并已形成VCR、台阶深孔、束状深孔、高阶阶段深孔和阶段深孔等效球形药包等各具特色和运用条件的大直径深孔爆破技术。如安庆铜矿的高阶阶段达120m。又如,2005年3月28日广西南丹铜坑矿150t炸药地下大爆破,采用阶段密集束状深孔为主,辅之以中深孔及小硐室药包的爆破方案,并采用了预裂爆破降震与柔性波阻墙等技术,有效控制了地下爆破的有害效应。

岩巷全断面一次爆破、毫秒延期爆破和光面爆破是标志我国煤矿岩巷爆破技术提高发展的三个重要阶段。20世纪80年代后期,中国矿业大学等单位开展的岩巷定向断裂控制爆破技术的研究,可精确地控制超挖量,大大节约材料费用,具有可观的经济效益与社会效益。近几年来,在特小净距平行隧道开挖爆破、繁华地区浅埋暗挖双层隧道爆破技术、浅埋过江隧道爆破、繁华地区地下铁道爆破开挖、隧道减振控制爆破技术等方面都获得了新的突破。

我国城镇拆除爆破和复杂环境深孔爆破技术发展非常迅速,不仅将过去危险性大的爆破作业由野外安全可靠地移植到人口密集的城镇,尤为重要地创造了许多新技术、新工艺,并积累了许多新经验。我国已成功地在复杂环境中采用定向倒塌、双向折叠和三向折叠等控制爆破方法拆除了近百座高100m以上的钢筋混凝土烟囱,还成功完成了数十座高60m以上的大型冷却塔的爆破拆除工程。在高大建筑物方面,典型工程有中山市岐山顶花园34层楼房爆破拆除、温州中银大厦(高93m)爆破拆除和上海长征医院综合楼爆破拆除等。沈阳五里河体育场爆破拆除工程一次准确起爆超过1.2万个炮孔,显示了可靠、先进的起爆技术;广东宏大爆破工程有限公司在天河城西塔楼爆破拆除中首次实现了环保清洁爆破,受到国内外学者和媒体的高度关注,产生了巨大的社会效益。

水下工程爆破技术主要应用于挡水围堰或岩坎拆除爆破、港湾航道疏浚炸礁、淤泥与饱和沙土地基爆炸加固处理以及水库水下岩塞爆破等,发展非常迅速,应用领域不断扩大,工程实例颇多。例如,20世纪70年代初广州黄埔港大濠洲2km航道 $5.0 \times 10^5 \text{m}^3$ 水下炸礁成功,创造了当时具有国际先进水平的水下爆破作业施工方法。长江三峡水利枢纽三期上游碾压混凝土围堰拆除爆破工程拆除围堰的总长度为480m,拆除方量 $18.6 \times 10^4 \text{m}^3$,最大爆破水深达38m,采用现场混装的乳化炸药总装药量为191.3t,它的成功实施,表明我国在围堰拆除爆破技术上已处于国际领先水平。爆破排淤技术先后在连云港建港工程、深

圳电厂煤码头工程、珠海高兰港口工程、粤海铁路通道轮渡码头港口防波堤工程以及其他类似工程的建设中采用,筑堤总长超过60km,为我国沿海港口建设作出了重大贡献。

工程爆破在地震勘探、测井、射孔、完井、压裂增产改造和油气井整形修复等工程中具有不可替代的作用,特别是油气井射孔技术是关系到油气井产油气量的关键技术。1959年发现大庆油田以后,油气井燃烧爆破技术也随着众多油田的开发得到了迅速的发展。我国科技人员根据油田开发的需要,独立设计、自主实施聚能射孔技术,高能气体压裂技术,爆炸切割技术,套管爆炸整形、焊接技术,井壁取芯技术和桥塞药包施放技术等,较好地满足了陆地和海洋油田开发的需要。

利用炸药爆炸的能量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,切割金属,人工合成金刚石、高温超导材料、非晶和微晶材料等。我国在爆炸焊接复合板消裂技术和复合板界面微缺陷控制技术方面也取得了突破。电力系统的科技人员采用爆炸压接技术,解决了野外高压输电线的压接问题,并且该技术已成为成熟的工艺,得到了实际应用。此外,利用高温爆破技术还可以消除高炉、平炉和炼焦炉中的炉瘤或爆破金属炽热物等。如今,我国已具有了一支爆炸加工技术专业队伍和大批装备,形成了新兴产业,爆炸加工技术应用的领域越来越广泛。

随着爆破环境和条件越来越复杂,对爆破安全的要求也越来越高。我国在爆破安全技术的研究方面进行了大量工作,积累了丰富的经验。20世纪70年代末,国家计委组织的“七七工程”历时7年,对爆破有害效应进行了大规模的系统观测研究,在爆破地震、冲击波、个别飞散物、噪声和有害气体等方面取得了大量的宝贵科学数据,这对了解爆破有害效应产生的规律性,制定安全与环保的控制措施是极为重要的。1986年以来,为了使爆破安全技术管理有法可依,我国先后制定并颁布实施了《爆破安全规程》《大爆破安全规程》《拆除爆破安全规程》等国家标准,中国工程爆破协会成立后,又组织专家对这几个标准进行了修订,2003年形成了统一的《爆破安全规程》(GB 6722—2003),并颁布实施,针对爆破器材与爆破技术的快速发展和爆破安全管理新的要求,2010年,中国工程爆破协会又组织专家对该标准进行进一步修订。近年来,爆破施工企业对控制爆破有害效应对周围环境的不利影响也给予了足够的重视,积累了不少经验,取得了显著的成绩。经修订的《民用爆炸物品安全管理条例》已由国务院在2006年颁布执行。条例强调国家支持和鼓励提高爆炸物品安全性能的技术进步和科技创新;建立民用爆炸物品信息管理系统,对民用爆炸物品实行标志管理,监控民用爆炸物品的流向;对爆破作业实施许可证制度,强化了爆破作业单位和从业人员的安全工作责任,明确了爆破作业单位和爆破作业的基本安全要求。值得指出的是,为提高我国工程爆破技术人员的素质,加强爆破专业队伍的管理,在公安部门的支持和中国工程爆破协会的具体组织下,1997年以来已先后对3万余名爆破技术人员进行了安全技术培训考核,并实行持证上岗制度。为适应市场经济,强化竞争机制,择优汰劣,对爆破公司实施资质分级管理。对重大爆破工程的设计施工开展安全评估,并推行爆破工程监理制度。无疑,这些制度的实施,使我国工程爆破安全管理逐步有序化和规范化,并迈上了一个新台阶。

0.2

工程爆破的内涵与基本特点

0.2.1 工程爆破的内涵

如前所述,20世纪50年代以来,钻孔机具、爆破器材和计算机技术的发展为工程爆破现代化提供了坚实的物质基础,大大地促进了工程爆破的发展,拓宽了它的应用领域。目前工程爆破已从传统的岩土爆破渗透到国民经济建设的各个领域,可以毫不夸张地说,由于现代爆破技术的发展,人们完全有能力利用炸药的爆炸能量去完成大量机械或人力难以完成的工作。现代爆破技术在众多领域发挥了巨大作用,产生了良好的社会、经济效益,甚至已超越常人对“爆破”的传统理解和认识。

工程爆破作为人类改造自然的有力工具,也具有特定的工程对象和质量、安全、工期及主要技术经济指标等目标要求,项目密切结合工程实际,爆破效果要通过实践评价检验。因此,工程爆破设计和施工要做到技术可行、经济合理和安全可靠。

技术可行,是指爆破设计方案所采用的各项技术在施工中是可行的,通过精心设计,能够达到预期的工程目标和各项要求。

经济合理,是指不仅能够实现工程项目提出的主要技术和质量指标,而且可以控制爆破成本,避免因爆破不当引起额外工程和开支,使企业盈利。

安全可靠,是指采取必要的安全防护和监测措施,保证爆破作业与环境安全,把爆破地震、空气冲击波、个别飞散物、有害气体、噪声、粉尘和对生态环境破坏等爆破公害限制在允许范围以内,保证施工与爆破安全。

0.2.2 工程爆破的基本特点

工程爆破涉及的领域广阔、内容丰富、方法手段各异,且作业环境条件复杂,其基本特点可以概括归纳为以下几个方面。

① 工程爆破是一种高风险的涉及爆炸物品的特种行业。实践表明,炸药和雷管等爆破器材是工程爆破作业中必不可少的物质保证,购买、运输、贮存和使用爆炸物品是爆破工作者必然涉及的事情。尽管工程爆破的设计、钻孔、装药与网路连接等施工环节较多,准备工作比较复杂,但由于炸药爆炸是瞬时完成的,因此一项工程爆破的效果通常是在几秒钟内体现出来的,且是不可逆转的,故工程爆破是一种涉及爆炸物品的高风险特种行业。

② 工程爆破外部环境特定且复杂。一般地说,工程爆破都是在特定的条件下进行的,其外部环境复杂且要求严格。例如,城市楼房拆除爆破通常是在闹市区和交通要道进行的,且与保留建筑物毗邻或结构相互连接,又有市政铺设的各种管道和线路等。在这样复杂的环境条件下进行拆除爆破,就会对爆破设计、防护、环保、施工扰民等环节提出更高、更难的要求。又如油、气井燃烧爆破通常是在套管内指定井深处(如油层)进行射孔、压裂、整形、切割等工程内容。油井内空间有限,深度不一,而且井内还充满了压井液,在这样特定的条件下进行爆破,就要求爆破器材设计制造应非常精细、结构严密,并且施工技术应要求十分严格。

③ 对爆破器材有特定的严格要求。尽管不同工程爆破使用的炸药等爆破器材的品种会有所不同,但是对爆破器材的质量、性能的严格要求却是一致的。例如,矿山大区毫秒延期爆破时,对雷管的准爆率和延期精度及炸药爆炸性能的可靠性有很高要求;又如,水下爆破,特别是深水爆破时,要求爆破器材必须具有良好的抗水和抗压性能;高温爆破则对爆破器材的耐高温性能有特殊的要求。

④ 工程爆破施工环节多而复杂。一般地说,爆破工作者应首先熟悉被爆对象的工程地质条件以及爆破要求,搜集有关资料,然后再着手设计(包括可行性研究、技术设计、施工图设计和设计审查与安全评估)、钻孔(包括布孔、钻孔、测量与验收)、装药(包括炸药和雷管等起爆器材的选择、合理位置的确定、合理装填)、连接爆破网路、起爆、警戒、监测爆破有害效应。爆破周围环境的安全涉及社会和民生问题等诸多环节,每一个环节都必须慎之又慎,才能获得良好的爆破与安全效果。

⑤ 爆破从业人员必须经过严格的培训考核,实行持证上岗,熟悉并严格遵守政府关于爆炸物品的管理规定和国家标准——《爆破安全规程》。这些规定都是从成千上万例事故中总结出来的,是血的教训,爆破工作者必须严格遵守。

0.3

工程爆破的发展前景

中国工程爆破协会根据国家经济建设的需要,从我国工程爆破行业实际出发,在提出的《中国工程爆破行业中长期科学和技术发展规划(2006—2020年)》里描绘了加快我国工程爆破事业发展的蓝图,明确了工程爆破行业科技发展的指导思想是:企业主导、强化创新、重点突破、跨越发展。

企业主导:建立以企业为主体、产学研相结合的技术创新体系,使企业成为研究开发的主体、科技创新活动的主体、技术集成应用的主体,大幅度提升企业的自主创新能力。

强化创新:高效配置科技创新资源,坚持不懈地开展集成创新、消化吸收再创新,有选择地进行原始创新,使之成为工程爆破行业全面、协调、可持续发展的不竭动力。

重点突破:从支撑行业发展的需求出发,立足中长期,着眼长远,突破国家重大建设项目、爆破安全和工程爆破前沿技术领域中的关键课题,支撑工程爆破行业持续发展。

跨越发展:通过持续自主创新,使行业的工艺、技术和装备水平达到世界一流,使我国的工程爆破技术走向世界。

长时间的研究与应用实践表明,工程爆破正在向科学化、精细化和数字化方向发展。我国加入世界贸易组织(WTO),为工程爆破走向世界、参与国际竞争创造了良好氛围,工程爆破界应抓住这个发展的有利契机,紧跟国际工程爆破发展的大趋势,在以下几个方面加强研究开发工作,以谋求更好的发展前景。

① 研究发展工程爆破施工装备技术,提高施工的机械化和自动化水平。为改变我国工程爆破施工装备技术相对滞后的状况,通过引进、消化吸收并发展先进的工程爆破施工装备技术,提高施工的机械化和自动化水平,实现装备技术上的创新配套。现有大中型露天矿山深孔爆破的钻孔、装药、填塞、铲装和运输已实现了机械化作业,但尚需要迅速发

展卫星定位系统、完善品种规格的配套、改善作业安全和环保条件,做到全程机械化、自动化。为了满足特种爆破作业的要求,应尽快研究开发新的机械,尤其是机械手、机器人和遥控技术等,以保证高温、低温、高空、深井、地下、水下和有毒气体环境条件下爆破作业的有效性与安全性。

② 爆破器材要向高质量、多品种、低成本、高安全和生产工艺连续化方向发展。爆破器材的品种与质量直接影响工程爆破技术的发展。60余年来,我国爆破器材有了很大的发展,但与发达国家相比,我国爆破器材在产品高质量、品种系列化方面仍有差距。要应用新技术、新工艺加快改造、提升传统的工艺设备,提高机械化、自动化和连续化水平,提高劳动生产率,降低生产成本,改善安全与环保条件,既满足国内爆破的需要,又积极开拓国际市场,扩大出口爆破器材产品与专有技术。

就工业炸药而言,要发展完善铵油炸药、重铵油炸药、乳化炸药、粉状乳化炸药和膨化硝铵炸药,使其在密度、威力、抗水等性能上实现品种系列化;积极发展乳胶远程配送系统,实现露天和地下爆破作业的装药、填塞机械化;根据各种特种爆破的需要,研制、生产各种耐高温、高压和高抗水、高威力的炸药品种。

就起爆器材而言,要大力发展完善30段等间隔毫秒延期雷管产品与技术,研制不同系列数码电子雷管并推广应用,在电与非电起爆系统中均能实现可靠起爆与准确延时,做到一个炮孔只放置一个起爆雷管;要着力研究发展广适性的遥控起爆系统,实现爆破作业的远程安全控制;研究发展并积极推广低能导爆索(0.5~1.5g/m炸药)起爆系统和微型起爆药柱。

③ 加强爆破理论和数值模拟技术的研究以指导工程实践。研究炸药能量转化过程的精密控制技术、提高炸药能量利用率、降低爆破有害效应是工程爆破在21世纪的发展战略,因此,必须深入研究和不断创新,通过对各种介质在爆炸强冲击动载荷作用下的本构关系、选择与介质匹配的炸药、不耦合装药、控制边界条件的影响、起爆分段顺序等的实验研究,寻找提高炸药能量利用率的新工艺或新措施,尽量降低能量转化过程中的损失,控制其对周围环境的影响。

新的数理方法、新的观测与分析技术为研究爆破破岩的复杂过程提供了新的技术支持。应用分形、损伤等数理新方法,有可能对岩体的天然结构进行全面、真实的描述;结合卫星定位系统,可以对炮孔进行准确定位,并利用钻机工作参数获取岩体性质数据;新型矿用炸药为调节爆破破岩的能量输入提供了可能;高精度电子雷管使精确地控制爆破时序成为现实;新的爆破破碎块度分布光学量测、分析技术,为爆破破碎效果的定量、全面评定提供了手段;大容量、高速度计算机可以满足爆破破碎复杂系统的模拟要求。高科技手段使人们已能全面审视爆破作用机理,从而首先在露天爆破设计方面实现系统优化,继而把自创研制的数学模型用于指导各种爆破实践,使爆破真正走向科学化、数字化。

④ 努力实现工程爆破精细化。精细爆破是我国工程爆破界本着“从效果着眼,从过程着手”的原则提出的工程爆破新理念,是以精确地实现预期爆破效果和节能、环保为目的,追求设计、施工、管理等工程要素的精细化的工程爆破。

精细爆破,即通过量化的爆破设计、精心的爆破施工和精细化的爆破管理,进行炸药爆炸能量释放与介质破碎、抛掷等过程的控制,既达到预期的爆破效果,又实现爆破有害效应的控制,最终实现安全可靠、技术先进、绿色环保及经济合理的爆破作业。同时,

精细爆破以社会可持续发展理论、科学发展观和低碳经济为理论指导,是它们在工程爆破领域的重要应用和体现。

⑤ 密切关注国外工程爆破技术的发展动态,发展完善我国特种爆破技术。近年来,国外研究开发的油、气地震勘探和油、气井开发中的特种爆破技术发展迅速。例如,将小型高能震源器材应用于三维地震勘探,可大大地提高地震勘探质量和安全,降低成本费用;新近发展起来的井下套管爆炸补贴和整形等特种爆破技术,可以解决那些用传统和常用方法难以解决的井下问题;稠油地层、高致密低渗透地层等特殊地层的射孔爆破技术的开发;等等。与此同时,关于聚能射流对岩石的侵彻机理的规律、金属粉末罩所形成的射流特性和影响稳定性的因素等基础研究课题,国外均取得了可以用于指导生产实践的研究成果。

此外,国外在城市拆除爆破、软基爆破处理技术、超长孔预裂爆破、孔内多段装药爆破、爆炸加工、微型爆破等方面均取得了可喜的进展,爆破监测仪器也正向自动化、微型化、多功能方向发展,较好地满足了爆破技术发展的需要。不言而喻,我国工程爆破界应密切关注国外在这些方面的发展,并发展完善我们自己的特种爆破技术,形成自己的体系。

⑥ 进一步创新与发展工程爆破安全技术。爆破安全技术的发展,对爆破技术应用范围的扩大有着重要的意义。只有解决与爆破有关的安全技术问题,爆破技术的应用才能发挥更大的作用。爆破安全技术包括爆破施工作业中的安全问题和爆破对周围环境的安全影响两大部分。爆破施工作业安全主要涉及爆破器材性能、使用条件、检验方法和起爆技术等安全性问题;爆破对周围环境的安全影响是与爆破作用机理、爆破参数与设计方法、安全准则与控制标准有关的技术问题。因此,爆破安全技术的创新与发展,必须从上述两方面开展研究。改革开放以来,研究成功的导爆管雷管起爆系统、高精度延期雷管、数码电子雷管、无起爆药雷管和现场混装车等,大大提高了爆破作业的安全可靠性,大幅度减少了爆破事故的发生。

爆炸理论及控制技术的研究,除研究提高炸药能量利用率以外,还要从另一方面研究降低爆破有害效应的影响,包括爆破地震、空气冲击波、水下冲击波、噪声、个别飞散物、滚石、粉尘、有害气体、边坡滑落等。要发展爆破效应的监测工作,研制新的测试仪器,提高监测水平,在爆破作业安全、环境安全和爆破安全测试技术等方面有新的突破。要通过总结工程的实践经验,加以理论分析,吸收现代爆破技术新成就,组织力量编制修订爆破行业有关安全管理、设计施工、安全监理和爆破监测方法等标准,逐步形成工程爆破行业标准体系,并认真贯彻实施,把我国的爆破安全技术提高到一个新水平。

在21世纪,我国已将建设资源节约型、环境友好型社会作为重要的战略目标。对爆破工程来讲,要把保护修复自然生态,防止水土流失作为重要的设计和施工原则,要大力倡导在爆破工程中贯彻循环经济、低碳经济,使工程爆破技术为我国经济建设作出更大的贡献。

创新是工程爆破技术发展的不竭动力。21世纪高新科学技术的发展将推动新的工业革命,工程爆破技术也必将随之产生新的飞跃。

1 炸药与爆破作用的基本知识与原理

1.1

基本概念

1.1.1 爆炸及其分类

自然界有各种各样的爆炸现象，如自行车爆胎、燃放鞭炮、锅炉爆炸、原子弹爆炸等。爆炸时，往往伴有强烈的发光、声响和破坏效应。从广义的角度来看，爆炸是指物质的物理形态或化学性质发生急剧变化，在变化过程中伴随有能量的快速转化，内能转化为机械压缩能，且使原来的物质或其变化产物及周围介质产生运动，进而产生的机械破坏效应。

按引起爆炸的原因不同，可将爆炸区分为物理爆炸、核爆炸和化学爆炸三类。

① 物理爆炸。这是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、雷电、氧气瓶爆炸和轮胎爆胎等都是物理爆炸。在实际生产中，除了煤矿利用内装压缩空气或二氧化碳的爆破筒落煤外，很少应用物理爆炸。

② 核爆炸。这是由核裂变或核聚变引起的爆炸。核爆炸放出的能量极大，相当于数万吨至数千万吨三硝基甲苯（TNT，俗称“梯恩梯”）爆炸释放的能量，爆炸中心区温度可达数百万至数千万摄氏度，压力可达数十万兆帕以上，并辐射出很强的各种射线。目前，在岩石工程中，核爆炸的应用范围和条件仍十分有限。

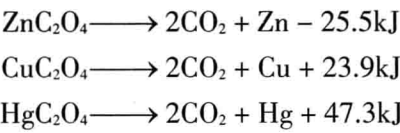
③ 化学爆炸。这是由化学变化造成的爆炸。炸药爆炸、井下瓦斯或煤尘与空气混合物的爆炸、汽油与空气混合物的爆炸以及其他混合爆鸣气体的爆炸等，都是化学爆炸。与物理爆炸不同，化学爆炸后有新的物质生成。岩石的爆破过程是炸药发生化学爆炸做机械功、破坏岩石的过程。因此，化学爆炸将是本书研究的重点。

炸药既是安定的又是不安定的。在平常条件下，炸药是比较安定的物质。除起爆药外，炸药的活化能值是相当大的，但当局部炸药分子被活化达到足够数目时，就会失去稳定性，引起炸药爆炸。以鞭炮中装填的黑火药为例，在点燃时，黑火药迅速燃烧，发生化学反应，并放出热量和气体产物，同时发出声响和闪光，完成爆炸过程。

1.1.2 炸药爆炸的基本条件

炸药是在一定的条件下，能发生急剧的化学反应，在有限的空间和极短的时间内迅速释放大量的热量和生成大量气体，并显示爆炸效应的化合物或混合物，主要由碳、氢、氮、氧四种元素组成。实践表明，炸药爆炸必须具备3个基本条件。

① 反应的放热性。放热是炸药爆炸必备的条件之一。爆炸反应只有在炸药自身能够提供能量的条件下才会持续进行。没有这个条件，爆炸过程就根本不能发生，反应也就不能自行延续，因而也不可能出现爆炸过程的反应传播。依靠外界供给能量来维持其分解的物质，不可能具有爆炸的性质。草酸盐的分解反应便是典型例子



第一种反应是吸热反应，只有在外界不断加热的条件下才能进行，因而不具有爆炸性质；第二种反应具有爆炸性质，但因放出的热量不大，爆炸性质不强；第三种反应具有显著的爆炸性质。

爆炸反应所释放的热量是炸药对外界做功的能量来源。

② 反应过程的高速度。反应过程的高速度是爆炸反应区别一般化学反应的重要标志。炸药爆炸反应时间大约是 $10^{-7} \sim 10^{-6}\text{s}$ 量级。虽然炸药的能量储藏量并不比一般燃料大，但由于反应的高速度，使炸药爆炸时能够达到一般化学反应所无法比拟的高得多的能量密度。石油、煤和几种炸药的放热量和能量密度数据如表 1-1 所示。

表 1-1 石油、煤和几种炸药的放热量和能量密度

物质名称	单位质量物质的放热量 /($\times 10^3\text{kJ/kg}$)	单位体积炸药或燃料空气混合物的 能量密度/(kJ/L)
煤	8.96	17.16
石油	41.87	3.68
黑火药	2.78	3341
梯恩梯	4.19	6808
黑索金	5.86	10467

1kg 煤块燃烧可以放出 $8.96 \times 10^3\text{kJ}$ 的热量，这个热量比 1kg 梯恩梯炸药爆炸放出的热量要多 1 倍，可是这块煤燃烧完成的时间大约需要几分钟到几十分钟，在这段时间内放出的热量不断以热传导和辐射的形式传送出去，因而虽然煤的放热量很多，但是单位时间的放热量并不大。同时还要注意到煤的燃烧是与空气中的氧进行化学反应而完成的，1kg 煤完全反应就需要 2.67kg 的氧，这样多的氧必须由 9m^3 的空气才能提供，因而作为燃烧原料的煤和空气的混合物，单位体积所放出的热量也只有 17.16kJ/L ，能量密度很低。

爆炸反应就完全相反。炸药反应一般都是以 $(3 \sim 8) \times 10^3\text{m/s}$ 的速度进行。一块 10cm 见方的炸药爆炸反应完毕只需要 $10\mu\text{s}$ 的时间。由于反应速度极快，虽然总放热量不是太大，但在这样短暂时间内的放热量却比一般燃料燃烧时在同样时间内放出的热量高出上千万倍。同时，由于爆炸反应无须空气中的氧参加，在反应所进行的短暂时间内放出的热量来不及散出，以致可以认为全部热量都聚集在炸药爆炸前所占据的体积内，这样炸药单位体积所具有的热量就达到 10^3kJ/L 以上，比一般燃料燃烧要高数千倍。

由于反应过程的高速度使炸药内所具有的能量在极短时间内放出，达到极高能量密度，所以炸药爆炸具有巨大的做功功率和强烈的破坏作用。

③ 反应中生成大量气体产物。反应过程中生成大量气体产物，是炸药爆炸对外做功