



教育部高等学校地矿学科
教学指导委员会采矿工程专业规划教材



丛书主编 古德生

凿岩爆破工程

李夕兵 主编



中南大学出版社

www.csupress.com.cn

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会
采矿工程专业规划教材

凿岩爆破工程

主 编 李夕兵

副 主 编 王玉杰 屠晓利

参编人员 (按编写章节顺序)

李夕兵 王卫华 屠晓利 李启月

王玉杰 张电吉 陈宝心 张智宇

栾龙发 焦永斌 钟东望 张义平

主 审 陶颂霖



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

内 容 简 介

全书共 13 章。主要包括岩石动、静力学性质及分级；岩石中的应力波及传播机理；炸药爆炸基本理论；凿岩机具；工业炸药；起爆器材和起爆方法；爆破破岩机理；矿岩爆破；硐室爆破；控制爆破；拆除爆破以及爆破危害与控制等基本知识。

本书可作为采矿工程专业本科生“凿岩爆破工程”课程的教材，亦可作为相关专业本科生和有关工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

凿岩爆破工程/李夕兵主编. —长沙:中南大学出版社,2011.9
ISBN 978-7-5487-0387-7

I. 凿... II. 李... III. 凿岩爆破—教材 IV. TD23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 186048 号

凿岩爆破工程

李夕兵 主编

☐责任编辑 汪宜晔

☐责任印制 周 颖

☐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 长沙市华中印刷厂

☐开 本 787 × 1092 1/16 ☐印张 26.5 ☐字数 656 千字

☐版 次 2011 年 9 月第 1 版 ☐2011 年 9 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0387-7

☐定 价 55.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会
采矿工程专业规划教材

编 审 委 员 会

丛书主编

古德生

编委会委员

(按姓氏笔画为序)

王新民	伍法权	李夕兵	刘爱华	杨 鹏
吴 超	吴立新	吴顺川	张明旭	陈建宏
周科平	赵跃民	赵 文	侯克鹏	姚书振
殷 昆	高永涛	黄润秋	廖立兵	

序

站在 21 世纪全球发展战略的高度来审视世界矿业，可以清楚地看到，矿业作为国民经济的基础产业，与其他传统产业一样，在现代科学技术突飞猛进的推动下，也正逐步走向现代化。就金属矿床开采领域而言，现今的采矿工程科学技术与 20 世纪 90 年代以前的相比，已经不可同日而语。为了适应矿业快速发展的形势，国家需要大批具有现代采矿知识的专业人才，因此，作为优秀专业人才培养的重要基础建设之一——教材建设就显得至关重要。

在 2006—2010 年地矿学科教学指导委员会（以下简称地矿学科教指委）的成立大会上，委员们一致认为，抓教材建设是本届教学指导委员会的重要任务之一，特别是金属矿采矿工程专业的教材，现在多是 20 世纪 90 年代出版的，教材更新已迫在眉睫。2006 年 10 月 18～20 日在中南大学召开了第一次地矿学科教指委全体会议，会上委员们就开始酝酿采矿工程专业系列教材的编写拟题；之后，中南大学出版社主动承担该系列教材的出版工作，并积极协助地矿学科教指委于 2007 年 6 月 22～24 日在中南大学召开了“全国采矿工程专业学科发展与教材建设研讨会”，来自全国 17 所院校的金属、非金属矿床采矿工程专业和部分煤矿开采专业的领导及骨干教师代表参加了会议，会议拟定了采矿工程专业系列教材的选题和主编单位；从那以后，地矿学科教指委和中南大学出版社又分别在昆明和长沙召开了两次采矿工程专业系列教材编写大纲的审定工作会议。

本次新规划出版的采矿工程专业系列教材侧重于金属矿

床开采领域。编审委员会通过充分的沟通和研讨，在总结以往教学和教材编撰经验的基础上，以推动新世纪采矿工程专业教学改革和教材建设为宗旨，提出了采矿工程专业系列教材的编写原则和要求：①教材的体系、知识层次和结构要合理，要遵循教学规律，既要有利于组织教学又要有利于学生学习；②教材内容要体现科学性、系统性、新颖性和实用性，并做到有机结合；③要重视基础，又要强调采矿工程专业的实践性和针对性；④要体现时代特性和创新精神，反映采矿工程学科的新技术、新方法、新规范、新标准等。

采矿科学技术在不断发展，采矿工程专业的教材需要不断完善和更新。希望全国参与采矿工程专业教材编写的专家们共同努力，写出更多、更好的采矿工程专业新教材。我们相信，本系列教材的出版对我国采矿工程专业高级人才的培养和采矿工程专业教育事业的发展将起到十分积极的推进作用，对我国矿山安全、经济、高效开采，保障我国矿业持续、健康、快速发展也有着十分重要的意义。



中南大学教授

中国工程院院士

教育部地矿学科教指委主任

前 言

《凿岩爆破工程》是根据 2006—2010 地矿学科教学指导委员会审定的金属矿采矿工程专业教材出版规划编写的,是地矿类专业的专业课教材。

爆破是矿山生产过程中的一个重要环节,爆破效果的好坏对矿山生产效率和生产成本都将产生直接的重要影响。通过近 60 年的爆破实践,我国积累了丰富的经验,爆破理论和爆破技术有了长足的进步,创造了许多新技术、新工艺,在国民经济的许多领域发挥了重要的作用。与之相反,爆破专业教材却远远跟不上爆破技术发展的需要,很多教材是 20 世纪 90 年代以前出版的,亟需更新。为此,受地矿学科教学指导委员会委托,中南大学邀请国内近十所兄弟院校一起编写了本书。

本书由中南大学李夕兵担任主编,武汉理工大学王玉杰和东北大学屠晓利任副主编。全书共分 13 章,各章编写任务分工如下:第 1 章、第 3 章、第 4 章和第 5 章由李夕兵和王卫华编写;第 2 章由东北大学屠晓利编写;第 6 章由中南大学李启月编写;第 7 章由武汉理工大学王玉杰编写;第 8 章由武汉工程大学张电吉编写;第 9 章由武汉理工大学陈宝心编写;第 10 章由昆明理工大学张智宇和栾龙发编写;第 11 章由江西理工大学焦永斌编写;第 12 章由武汉科技大学钟东望编写;第 13 章由贵州大学张义平编写。全书由李夕兵负责修改定稿,并邀请中南大学陶颂霖担任主审,全面审定了本书。值本书出版之际,特向关心和支持本书编写的各位领导、专家和参考文献的作者表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误,诚恳地欢迎读者批评指正。

编 者
2011 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 凿岩爆破在国民经济建设中的作用	(1)
1.2 凿岩爆破的发展概况	(1)
1.3 凿岩爆破的发展前景	(4)
第 2 章 岩石力学性质与分级	(6)
2.1 影响岩石凿岩爆破性的因素	(6)
2.2 岩石凿岩爆破性的判据和分级	(9)
2.3 岩石的可钻性	(12)
2.4 可钻性与磨蚀性的关系	(16)
第 3 章 应力波理论基础	(18)
3.1 应力波的产生及其传播	(18)
3.2 应力波在不同介质中的传播	(21)
3.3 应力波在交界面处的反射和折射	(29)
3.4 应力波的叠加与能量	(38)
第 4 章 爆炸反应与爆轰理论	(42)
4.1 炸药的氧平衡	(42)
4.2 炸药爆炸反应方程	(44)
4.3 爆炸热化学参数	(48)
4.4 冲击波理论	(56)
4.5 爆轰与爆轰波	(61)
第 5 章 炸药爆炸的基本特征	(71)
5.1 爆炸分类与基本形式	(71)
5.2 炸药的起爆与感度	(74)
5.3 炸药的爆炸性能	(82)
第 6 章 机械凿岩原理与凿岩机械	(89)
6.1 机械凿岩原理	(89)

6.2	浅孔与中深孔冲击式凿岩	(90)
6.3	深孔凿岩机械	(96)
6.4	装药机械	(102)
第7章	工业炸药	(105)
7.1	基本概念	(105)
7.2	单质起爆药与猛炸药	(109)
7.3	硝酸铵系列炸药	(111)
7.4	浆状炸药与乳化炸药	(118)
7.5	煤矿许用炸药	(123)
7.6	其他炸药	(126)
第8章	起爆器材与起爆方法	(130)
8.1	火雷管与导火索起爆法	(130)
8.2	电雷管与电力起爆法	(132)
8.3	导爆索起爆法	(142)
8.4	塑料导爆管与导爆管起爆法	(145)
8.5	混合网路起爆法及新型起爆器材	(150)
8.6	爆破器材的安全管理	(152)
第9章	岩石爆破作用原理	(156)
9.1	岩石爆破破坏机理	(156)
9.2	单个药包爆破作用分析	(160)
9.3	成组药包爆破作用	(164)
9.4	爆破漏斗	(165)
9.5	装药量计算原理	(169)
9.6	影响爆破作用的因素	(175)
第10章	矿山井巷与采场爆破	(184)
10.1	巷(隧)道掘进爆破	(184)
10.2	竖井和天井掘进爆破	(200)
10.3	地下采场爆破	(211)
10.4	露天台阶爆破	(221)
10.5	二次破碎	(236)
10.6	爆破设计与CAD系统	(238)

第 11 章 硐室爆破	(247)
11.1 硐室爆破的分类与作用原理	(247)
11.2 硐室爆破设计程序与内容	(252)
11.3 硐室爆破主要参数选择与计算	(257)
11.4 硐室爆破施工设计	(269)
第 12 章 控制爆破与拆除爆破	(277)
12.1 挤压爆破	(277)
12.2 光面爆破	(282)
12.3 预裂爆破	(289)
12.4 拆除爆破	(293)
第 13 章 爆破危害与控制	(307)
13.1 爆破地震效应与控制	(307)
13.2 爆破冲击波、噪声及控制	(316)
13.3 爆破飞石安全距离及防护	(320)
13.4 有毒气体扩散的安全距离	(322)
13.5 早爆、拒爆事故的预防与处理	(325)
13.6 爆破事故与安全管理	(329)
附录 爆破安全规程(GB 6722—2003)	(332)
参考文献	(410)

第1章 绪论

凿岩爆破又称钻眼爆破或打眼放炮,就是用机械或人工的方法,对矿体或岩石钻凿炮眼、装填炸药实施爆破的作业。广泛用于采矿、地质勘探、水利、筑路及其他工程建设中。本章简要回顾了凿岩机具和爆破工程的发展历史,并展望凿岩爆破发展前景。

1.1 凿岩爆破在国民经济建设中的作用

采矿工业是国民经济的基础工业,为冶金、有色金属、化工、煤炭、石油、建材等部门提供矿物原料。凿岩爆破方法由于其破岩功比耗小、节省劳力、降低成本、加快工程进度等优点,目前仍然是矿山破碎坚固岩石的主要手段,占破岩比例的90%以上。在采矿作业中,凿岩爆破工程费用大约占了采矿成本的40%~50%,尤其在地下矿山的井巷掘进中,凿岩爆破工作所需工时和成本都占整个掘进工时和成本的一半以上。地下采场的崩矿、二次破碎等更离不开凿岩爆破工作。除此之外,爆破工程在国民经济的其他部门也有着日益广泛的应用:例如,铁路公路工程中的隧道掘进、路堑平场、桥基处理、冻土爆破;水路运输中的港口建设、炸礁疏浚、破冰抢险、水下码头压实软土;水利电力部门的爆破筑坝、地下厂房开挖、挡水围堰或岩坎拆除、炸堤排洪、掘沟导流;农林部门的爆炸驱雹、播种、灭火、人工降水、深翻土地、改良土壤;机械工业的爆炸成型、爆炸焊接、复合、硬化、聚能切割、人造金刚石及特种金属的加工;石油地质部门的地震勘探、射孔、压裂、切割、探矿;在医疗方面,除部分炸药原料作药用外,利用微型爆破炸碎各种结石;在航空航天、人造卫星、军事、其他科技等方面也有广泛的应用。由此可见,爆破工程在国民经济建设的许多领域,尤其在采掘工业中的地位和作用十分重要,并具有非常广阔的发展前景。

1.2 凿岩爆破的发展概况

1.2.1 凿岩机具的发展历史

在爆破作业时,为提高爆破能量利用率,须先在被爆岩体内钻凿具有一定直径、长度和方向的炮孔,用作容纳炸药的空间。在岩体内部钻凿孔洞的过程叫凿岩,其实质就是破碎岩石。凿岩机械经历了从气动到液压到电力驱动的过程,其中液压又包括油压和水压两种。1813年英国人发明了以蒸汽为动力的冲击式凿岩机。之后,1844年英国布隆顿发明了以压缩空气为动力的凿岩机,现在它已成为地下矿山传统的凿岩设备,目前我国大部分矿山仍在使用。虽然在结构性能上不断改进,产品不断更新换代,凿岩速度不断提高,但受能源和结构上的限制,致使凿岩效率低、能耗高、噪声大、粉尘污染严重等问题仍难以解决。1920年英国人成功研制了液压凿岩机,其后很多国家研发了100多种液压凿岩机及其配套的凿岩台车投入生产使用,我国也于1970年试制成功了第一台液压凿岩机。因液压凿岩机具有输出

功率大、钻孔速度快、能量消耗低、零件和钎具寿命长、凿孔精度高、液压控制完善等优点,现已在全世界获得了极广泛的应用,已成为凿岩设备发展的主流。液压凿岩机的研发成功和推广应用是凿岩设备发展史上一个重要技术突破,但也存在一些诸如废油排放和环境污染、易燃和安全及成本等问题,制约了液压凿岩机的进一步发展。在研制开发液压凿岩机的同时,国内外也开发了水压凿岩机。1990年南非研制成功水乳化液凿岩机,水乳化液中水占98%,添加剂占2%。1992年,南非矿业联合会研究中心(COMRO)又推出两种纯水压凿岩机。瑞典于1990年研制成功水压潜孔冲击器。我国的水压凿岩机应用技术仅处于研制及试验阶段,尚未达到工业推广应用水平。湘潭凿岩设备研究所于20世纪90年代前期研制了YST23型支腿式水压凿岩机。中国地质大学(北京)于90年代初研制了无阀式水压凿岩机。湖南科技大学提出动力学融合设计概念,并对水压凿岩机各部件的设计方法及机械加工工艺做了大量研究,设计研制出配套22 mm杆的YTS-25型水压凿岩机,其冲击能量为75 J,冲击频率为35 Hz,冲击速度为7 m/s。中南大学于2006年承担了“863”计划项目——水势能直接驱动的深部金属矿采掘技术与装备,在前期相关工作的基础上,成功研制水压破碎锤和导轨式水压凿岩机,其工作压力为10~15 MPa,冲击能分别为52 J和90 J,冲击频率为23 Hz和42 Hz。

凿岩机的迅速发展极大地促进了凿岩钎具的开发和进步。1938年德国人发明了碳化钨凿岩钎头,极大地提高了凿岩速度。为适应大功率凿岩机的需要,1951年美国休斯公司研制成功了冷压固齿大直径球齿潜孔钻头;1968年瑞典Secoroc公司和Sandvik公司研制成功热嵌固齿冲击凿岩用球齿钎头。到20世纪末,球齿钎头迅猛发展。我国1951年试制成功了硬质合金钎头。20世纪60年代,原武汉地质学院等院所研究出一字、十字形片状系列硬质合金钎头。国内球齿钻头的开发是从潜孔钻头开始的。1977年原冶金部钎具攻关组研制成功J-200型潜孔钻头,之后很多大学和科研院所先后开始研究中小球齿钎头。目前,国产球齿钎头产品数量不断增加,产品质量不断提高,基本上满足了国内市场需求,同时产品出口量逐年增加。1996年末,中国地质大学研制成功复合片齿系列钎头,它综合了片状和球齿钎具的优点又避免了它们各自的缺点,具有高效、低耗的特点,是凿岩钎具的一次重大进展。尽管国内凿岩钎具产品有了很大发展,但同国外工业发达国家同类产品相比还有一定差距,国内钎(钻)具产品正朝着由低技术含量常规化产品向高技术含量专业化产品方向发展。

1.2.2 爆破工程的发展历程

人类对爆炸的研究与应用,起源于我国黑火药的发明和发展。众所周知,黑火药是我国古代四大发明之一。早在6~7世纪,中国就发明了以硫磺、硝和木炭三种物质按一定比例混合配制的黑火药。但当时黑火药仅用来制造鞭炮和焰火,而未用于采掘工业,直至南宋时期才用于军事。13世纪黑火药逐渐由我国经阿拉伯国家传入欧洲。1627年匈牙利人首先将黑火药应用于采矿中。与原来的火烧法破岩相比,黑火药爆破破岩效率大大提高。此后很长一段时期内,炸药的发展较缓慢。直到18世纪末和19世纪初叶,由于化学工业的发展,一些猛炸药的相继出现,为现代爆破的发展奠定了物质基础。1771年,英国人沃尔夫(D. Woulfe)合成了苦味酸(PA);1863年德国人维尔布兰德(J. Wilbrand)制成了梯恩梯(TNT);1899年亨宁(C. Henning)发明了黑索金(RDX);1941年赖特(G. F. Wright)和巴克曼(W. E. Bachmann)发明了奥克托金(HMX),使炸药性能提高到一个新水平。在此期间做出

突出贡献的典型代表是瑞典科学家诺贝尔(A. B. Nobel), 他于1867年发明了火雷管, 同时发明了硝化甘油炸药, 从而大大推动了爆破技术的发展, 从此, 爆破在军事上和民用工程中的应用日趋广泛。

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, 但以梯恩梯为敏化剂的粉状硝铵炸药直至1924年才问世, 这种炸药的推广使用, 使爆破技术向着安全、经济、高效的方向迈进了一大步。

1956年, 迈尔文·库克(M. A. Cook)发明了浆状炸药, 之后又研制成功了水胶炸药。60年代推广使用了多孔粒状铵油炸药。这种炸药加工工艺简单, 抗水性能比粉状铵油炸药高, 成本较低。70年代研制成功了乳化炸药, 这是一种新型的抗水炸药。它不仅具有良好的爆炸性能和抗水性能, 且具有原料来源广、加工简单、生产成本低等优点, 是今后发展的主要品种。

在起爆器材方面, 1919年制成了以泰安为药芯的导爆索; 1946年制成了毫秒电雷管, 1967年, 诺贝尔公司发明了导爆管非电起爆系统, 使爆破技术又得到了进一步的发展。

随着炸药、起爆器材的发明和应用、爆破量测技术的进步以及相邻学科的发展, 岩石爆破理论先后经历了萌生、形成与发展阶段。爆破理论的萌生阶段或早期发展阶段比较有代表性的假说有: 炸药量与岩石破碎体积成比例假说; 利文斯顿爆破漏斗假说; 流体动力学假说等。岩石爆破理论基本框架是从20世纪60年代日野氏提出冲击波拉伸破坏理论和兰格福斯(U. Langefors)等人提出爆炸气体膨胀压力破坏开始, 到70年代朗(L. G. Long)明确提出爆破作用三个阶段为止, 历时十余年才基本确立。到20世纪80年代, 随着岩体结构力学、岩石动力学和计算机模拟技术的发展, 爆破理论进入了新的发展阶段。现代爆破理论的新进展主要包括以下方面: (1) 节理裂隙岩体爆破理论; (2) 岩石动载特征及其对爆破效果的影响; (3) 爆破过程的计算机模拟技术; (4) 一些新思想、新的研究方法开始进入爆破理论的研究领域。例如在工程爆破中引入概率和数理统计、模糊数学、灰色系统等不确定性理论, 推动了工程爆破研究的深入。这些都为现代爆破技术的发展奠定了基础, 并使爆破工程成为一门独立的学科提供了理论基础。

虽然, 我国是黑火药发明的文明古国, 但由于长期的封建统治和近百余年来帝国主义的侵略掠夺, 使我国近代科学技术得不到发展, 爆破技术亦远远落后于西方。新中国成立以前, 一些常用的工业炸药和起爆器材都不能自己生产, 长期依赖进口。新中国成立以后, 我国爆破工程得到了迅速发展。在炸药方面, 通过对各种系列工业炸药的研发, 已能自己生产铵梯炸药、铵油炸药、浆状炸药、乳化炸药、水胶炸药、高威力液体炸药等众多炸药品种, 且工业炸药的质量也不断提高。在起爆器材方面, 20世纪50年代初期只能生产火雷管和瞬发电雷管, 现不但能生产毫秒延期电雷管、非电雷管、高精度30段和60段的毫秒延期雷管, 同时还成功研制出无起爆药雷管和电子延期雷管。导爆索、继爆管和塑料导爆管及导爆管的连通器具也发展迅速, 并得到了广泛应用, 基本满足了我国工程爆破的需要。

随着国民经济的发展, 我国的工程爆破技术也有了长足的发展。硐室爆破、中深孔爆破、地下采掘爆破、城镇拆除爆破、水下爆破等, 通过不断的实践与应用, 积累了丰富的经验。硐室爆破的应用范围与规模不断扩大, 规模最大的广东珠海炮台山的移山填海大爆破工程, 炸药装填总量近1.2万吨, 一次性爆落破碎和抛掷的岩土总方量达1085万立方米, 抛掷率51.36%。中深孔爆破技术已广泛应用于露天与地下矿山、交通、水利水电建设的基坑路

堑开挖工程和工业场地平整等。矿山深孔爆破已根据工程的要求发展了微差爆破、挤压爆破、预裂爆破、光面爆破等。改革开放后,我国城镇建(构)筑物拆除爆破和复杂环境深孔爆破技术发展非常迅速,通过实践积累了丰富的经验,创造了许多新技术、新工艺和新经验。主要应用于水库水下岩塞爆破、挡水围堰拆除爆破、港湾航道疏浚炸礁以及淤泥与饱和砂土地基爆炸加固处理等的水下工程爆破技术,发展非常迅速,应用领域不断扩大。

1.3 凿岩爆破的发展前景

尽管凿岩爆破方法存在对环境扰动大,易造成围岩破坏,施工不连续、破碎块度不均匀等缺点,但与其他破岩方法相比,其优越性无法比拟,所以目前乃至将来很长一段时间内,它仍是一种不可替代的、有效的岩石破碎方法,特别是坚硬岩石的破碎仍将主要依赖于凿岩爆破方法。因此,如何改善凿岩机具和爆破器材的性能以及爆破工艺技术、提高爆破效率和爆破安全是目前凿岩爆破工作者最根本的任务。可以预计,凿岩爆破领域将在以下几个方面产生突破并具有广阔的发展前景。

1.3.1 提高爆破施工作业机械化水平

爆破工程的主要目的是将岩土或建(构)筑物破碎。其常用施工机械有:钻孔设备、装药和填塞设备、破碎和清运设备三部分。生产实践表明,爆破工程的机械化程度越高,其生产效率也随之提高。目前,我国爆破施工装备技术相对落后,机械化水平不高,要改变这种状况,必须在装备技术上创新。现有大中型露天矿中深孔爆破的钻孔、装药、填塞、铲装、运输虽已实现机械化作业,但为了提高钻孔精度和效率,仍需要在提高设备的智能化、自动化和遥控化等方面做出努力,发展卫星定位系统、测量新技术,实现设备优化配套,提高可视化程度。同时应积极发展乳胶炸药远程配送系统,实现露天爆破作业的装药、填塞机械化。对于一些诸如硐室爆破、定向抛掷爆破、拆除爆破、水下爆破等机械化设备较少,且其钻孔、装药、填塞、清碴等作业仍主要靠手工劳动的爆破作业,亟需加强爆破作业机械的技术更新改造,研究并发展相对应的国产机械设备,提高爆破施工机械化和自动化水平。

1.3.2 研制新型爆破器材

爆破器材与爆破技术是相互依赖和相互促进的。爆破技术的改进需要新品种的爆破器材来适应,反过来,新爆破器材的出现又推动和促进爆破技术向更高水平发展。爆破器材的创新为爆破技术的进步提供了物质基础和保证。经过 50 余年来的发展,我国爆破器材无论在品种、数量和性能上基本满足了爆破工程的需要,但也存在产品结构不合理、产品质量不均、产品性能不能满足特殊爆破环境的需要等问题,因此,要应用新技术和新工艺,发展新品种,提高产品质量。就炸药而言,要逐步淘汰污染严重、有毒有害的铵梯炸药,发展和完善环保型和安全型的含水和无梯粉状炸药新品种,尤其大力发展粉状乳化炸药。在起爆器材方面,进一步完善电雷管起爆系统,发展塑料导爆管非电起爆系统,研制开发数码电子雷管与遥控起爆系统和低能导爆索非电起爆系统,形成电与非电相互配套的安全起爆系统,提高起爆技术的可靠性和安全性。

1.3.3 加强爆破理论研究

随着爆破技术和相邻学科的发展,爆破理论的研究也有了长足的进步。人们对爆破破岩各个方面的把握在逐步深化,新的数理方法、新的测试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。特别是计算机模拟爆破技术的发展,不仅可以预估爆破效果,而且可以在计算机上再现岩石爆破的动态过程,分析各种因素对爆破效果的影响。国外有很多的爆破数学模型,已经在不同的爆破作业中获得实际应用。但是,从总体上来看,爆破理论的发展仍然滞后爆破技术的要求,理论研究和生产实际仍有一定的差距。20世纪80年代以来,我国虽在爆破理论与爆破计算模拟技术方面开展了不少研究,但内容比较分散,没有较完整的理论成果,尤其是爆破计算机模拟技术方面明显落后于国外,未能在实际工程中获得很好应用。应加强爆破理论研究,建立能广为接受的爆破数学模型,用于指导爆破工程实践。

1.3.4 进一步发展爆破安全技术

爆破安全技术的发展,有利于扩大工程爆破的应用范围,也只有解决与爆破有关的安全技术问题,工程爆破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建筑设施与环境安全的影响两大部分。前者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;而后者即周围环境安全性问题是与爆破作用机理、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,发展爆破安全技术,就要从上述两方面开展研究,采取措施,消除各种不安全因素。

改革开放以来,研究成功的塑料导爆管非电起爆系统、高精度延期雷管、无起爆药雷管和新型的安全抗水炸药,如乳化炸药等,大大地提高了爆破作业的安全性,大幅度减少了爆破事故的发生。因此,今后还应继续大力发展高质量、低成本和安全性好的爆破新材料,以满足复杂条件下爆破作业安全的需要。同时要结合爆炸理论及控制技术的研究,提高炸药爆炸能量利用率,降低爆破有害效应的影响,主要是减少爆破地震、空气冲击波、个别飞散物、和有害气体的危害,研制新的测试仪器,提高爆破效应的监测水平,使有害效应降到最低程度。此外还要研究雷电、杂散电流、射频电、感应电等外来电影响的防护措施。要通过总结工程的实践经验,加以理论分析,吸收现代爆破技术的新成就,不断修订《爆破安全规程》,并认真贯彻实施,使我国的爆破安全技术提高到一个新水平。

第2章 岩石力学性质与分级

岩石是爆破的对象,金属矿山的绝大部分、非金属矿及煤矿等矿山的多数矿岩都采用凿岩爆破的方法进行破碎和采掘。为了取得良好的爆破效果,必须了解和掌握岩石的凿岩爆破性,即凿岩性(可钻性)和爆破性(可爆性),在此基础上对岩石进行合理的分级,为爆破设计、施工和成本核算提供依据。

2.1 影响岩石凿岩爆破性的因素

凿岩性指岩石在钻孔中表现出的抵抗钻头机械作用而破坏的性质,爆破性则是指岩石在爆破作用下表现出的性质。

岩石的凿岩爆破性是岩石自身物理力学性质在凿岩爆破工艺中的综合反映,影响着整个凿岩爆破效率和效果,通常可以用岩石的单一物理力学指标来表示。

影响岩石凿岩爆破性的主要因素:一方面是岩石本身的物理力学性质(见表2-1);另一方面是炸药性质、钻头结构和凿岩爆破工艺等外在因素。前者决定于岩石的地质生成条件、矿物成分、结构构造和后期的地质作用,它表征为岩石密度或容重、孔隙性、碎胀性、弹性、塑性、脆性和岩石强度等物理力学性质;后者则取决于钻孔工艺、钻具特性、炸药类型、爆破参数等等。此外,还包括对爆破块度、爆堆形式以及抛掷距离等爆破效果的影响。显然,岩石本身的物理力学性质是最主要的影响因素。

炸药爆炸对岩石的作用主要有两个方面:其一是克服岩石颗粒之间的内聚力,使岩石内部结构破裂,产生新鲜断裂面;其二是使岩石原生的、次生的裂隙扩张而破坏。前者取决于岩石本身的坚固程度,后者则受岩石裂隙性所控制。因此,岩石的坚固性和岩石的裂隙性是影响岩石爆破性的最根本因素。

2.1.1 岩石的结构构造

岩石由固体颗粒组成,其间有空隙,充填有空气、水或其他杂物。当岩石受外载荷作用,特别是在受炸药爆炸冲击载荷作用下,将引起物态变化,从而导致岩石性质的变化。

矿物是构成岩石的主要成分,矿物颗粒愈细、密度愈大,愈坚固,则愈难于爆破破碎。矿物密度可达 4 g/cm^3 以上,岩石的容重不超过其组成矿物的密度。岩石容重一般为 $1.0\sim 3.5\text{ g/cm}^3$ 。随着密度增加,岩石的强度和抵抗爆破作用的能力增大,同时,破碎或抛移岩石所消耗的能量也增加,这就是一般岩浆岩比较难以爆破的原因。至于沉积岩的爆破性,除了取决于其矿物成分之外,很大程度受其胶结物成分和颗粒大小的影响。例如,沉积岩中细粒有硅质胶结物的,则坚固,难爆破;含氧化铁质胶结物的次之;含有石灰质和粘土质胶结物的沉积岩则易爆破。变质岩的组分和结构比较复杂,它与变质程度有关,一般变质程度高、致密的变质岩比较坚固,较难爆破,反之则易爆破。

岩石又是由具有不同化学成分和不同结晶格架的矿物以不同的结构方式所组成。由于矿

物成分的化学键各不相同,则其分子的内聚力也各不相同。于是,矿物晶体的强度便取决于晶体分子之间作用的内力、晶体结构和晶体的缺陷。通常,晶体之间的内聚力,都小于晶体内部分子之间的内聚力。并且,晶粒越大,内聚力越小,细粒岩石的强度一般比粗粒岩石的大。又因为晶体之间的内聚力小于晶体内的内聚力,所以,破坏裂缝都出现在晶粒之间。

表 2-1 几种典型岩石的物理力学特性

岩石		容重 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙度 / $\%$	抗拉强度 / MPa	抗压强度 / MPa	弹性模量 / GPa	泊松比	纵波速度 / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
岩浆岩	花岗岩	2.6 ~ 2.8	0.1 ~ 5	10 ~ 20	100 ~ 250	50 ~ 90	0.1 ~ 0.37	4.35 ~ 6.8
	石英岩	2.65 ~ 2.66	0.3	10 ~ 15	290 ~ 300	40 ~ 100	0.07 ~ 0.28	4.9 ~ 6.7
	玄武岩	2.7 ~ 2.86	0.6 ~ 19	—	300 ~ 400	70 ~ 120	0.2 ~ 0.3	5.4 ~ 7.0
	辉绿岩	2.85 ~ 3.05	0.6 ~ 12	10 ~ 20	160 ~ 230	90 ~ 140	0.2 ~ 0.32	6.3 ~ 7.5
	辉长岩	2.9 ~ 3.1	0.6 ~ 1	14 ~ 20	260 ~ 310	70 ~ 110	0.2 ~ 0.3	5.6 ~ 6.3
变质岩	石煤	1.3 ~ 1.65	0.4	0.2 ~ 0.5	1 ~ 35	3 ~ 10	0.14 ~ 0.36	1.5 ~ 2.4
	岩盐	2.0 ~ 2.2	—	1 ~ 4	20 ~ 40	16 ~ 36	0.25 ~ 0.45	4.2 ~ 5.6
	板岩	2.3 ~ 2.7	—	4 ~ 25	50 ~ 150	15 ~ 43	0.22 ~ 0.25	2.5 ~ 6.0
	砂岩	2.1 ~ 2.9	2.6	3 ~ 10	35 ~ 150	17 ~ 50	0.19 ~ 0.5	3.0 ~ 4.6
	石灰岩	2.3 ~ 3.0	1.5 ~ 15	10 ~ 15	90 ~ 160	40 ~ 75	0.2 ~ 0.33	3.2 ~ 5.5
	白云岩	2.3 ~ 2.8	3 ~ 20	30 ~ 40	100 ~ 190	50 ~ 95	0.2 ~ 0.4	5.2 ~ 6.7
沉积岩	片麻岩	2.65 ~ 2.85	—	10 ~ 20	110 ~ 280	60 ~ 80	0.28 ~ 0.4	5.5 ~ 6.0
	大理岩	2.7 ~ 2.88	0.1	6 ~ 16	60 ~ 190	60 ~ 90	0.34 ~ 0.4	4.4 ~ 5.9
	石英岩	2.65 ~ 2.9	0.71	10 ~ 15	290 ~ 300	40 ~ 100	0.15 ~ 0.19	4.3 ~ 6.5

岩石中普遍存在着以孔隙、气泡、微观裂隙、解理面等形态表现出来的缺陷,这些缺陷都可能导致应力集中。因此,微观缺陷将影响岩石的性质,大的裂隙还会影响整体岩石的坚固性,使其易于爆破,但也容易沿裂隙破裂而产生大块。

岩体的裂隙性,不但包括岩石生成当时和生成以后的地质作用所产生的原生裂隙,而且包括受生产施工、周期性连续爆破作用所产生的次生裂隙。它们包括断层、褶曲、层理、节理、不同岩层的接触面、裂隙等弱面。这些弱面对于爆破的影响有两重性:一方面,弱面可能导致爆生气体泄漏和压力的降低,减弱爆破能的作用,影响爆破效果;另一方面,这些弱面破坏了岩体的完整性,易于从弱面破裂、崩落,而且,弱面又增加了爆破应力波的反射作用,有利于岩石的破碎。但是,必须指出,当岩体本身包含着许多尺寸超过生产矿山所规定的大块(不合格大块)的结构尺寸时,只有直接靠近药包的小部分岩石得到充分破碎,而离开药包一定距离的大部分岩石,由于已被原生或次生裂隙所切割,在爆破过程中,没有得到充分破碎,在爆生气体的推力作用下,脱离岩体、移动、抛掷成大块。这就是裂隙性岩石有的易于爆破破碎,有的则易于产生大块的两重性。因此,必须了解和掌握岩体中裂隙的宽窄、