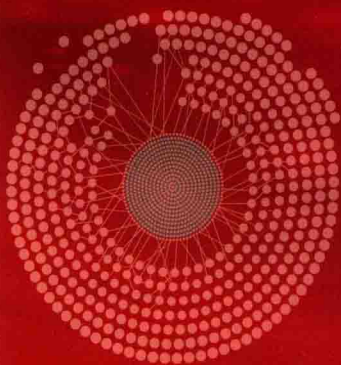


特殊赋存条件

岩石爆破理论与技术

张宪堂 著



TESHU FUCUN TIAOJIAN
YANSHIBAOPU
LILUN YU JISHU



化学工业出版社

山东省矿山灾害预防控制国家重点
实验室培育基地（山东科技大学）
开放基金（NO. MDPC2012KF12）资助

特殊赋存条件岩石 爆破理论与技术

张宪堂 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书利用理论研究、物理模型试验和数值模拟相结合的方法研究了几种特殊赋存条件的岩石爆破机理与爆破技术应用及效果预测。全书共分为7章,主要包括:绪论,岩石爆破作用理论基础,单自由面岩石掏槽爆破理论模型,岩石掏槽爆破过程数值模拟研究,节理裂隙岩体爆破效果预测研究,巷道聚能切缝爆破装置优化试验研究及应用,富含水下山巷道掘进爆破理论与试验研究等。

本书可供工程爆破、矿山建设工程、采矿工程、隧道工程、水利水电工程、城市地下空间工程、防灾减灾工程及防护工程等专业的高年级大学生和研究生阅读,亦可供从事爆破工程、矿山建设工程、采矿工程、隧道工程、水利水电工程、地下工程等相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

特殊赋存条件岩石爆破理论与技术/张宪堂著. —北京:化学工业出版社, 2015.1

ISBN 978-7-122-22296-1

I. ①特… II. ①张… III. ①凿岩爆破—研究
IV. ①TD23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 260672 号

责任编辑: 尤彩霞

装帧设计: 杨 北

责任校对: 边 涛

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张 9½ 字数 212 千字 2015 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

前 言

目前在采矿、路堑边坡、井巷隧洞和水利水电等开掘工程中,钻眼爆破法依然是主要破岩方法。随着矿山的大型综合化和大型基础设施的建设,井巷挖掘深度超过千米,露天台阶、隧道和基础沟槽等的开挖需要穿过复杂的地质构造带。由于岩石赋存条件的复杂多变,给爆破理论研究和爆破参数设计带来了许多不可预测的因素,而且无固定的规律可循。随着矿井的深度不断加深,隧道和地铁的里程不断延长,水利水电、大型港口等大型基础设施工程向更大更深发展,需爆破开挖的岩石赋存条件愈来愈复杂,这些复杂因素都对岩石爆破效果和灾害预测控制提出了更高的要求,需要更先进的理论和技术作为指导。因此,利用数值模拟和物理试验研究特殊赋存条件下的岩石爆破机理及其应用技术,对于降低穿爆总成本,减少爆破灾害,增强对生命财产安全和环境保护等方面,不但具有十分重要的理论意义和重大的工程应用价值,更具有明确的应用前景。

岩石爆破理论与技术的发展依托于爆炸力学、爆轰理论、岩石动力学等基础学科的研究成果新进展,与机械设备、工业炸药、测量技术、工程地质领域的发展密切相关。随着爆破理论研究的不断深入,以及先进测试技术、电子计算机技术的发展及其在爆破中的广泛应用,现代岩石爆破技术的发展朝着机械化、自动化、精细化和数字化方向发展。目前岩石爆破理论研究主要以物理模型试验和数值模拟研究为主。国内目前拥有爆破塔十余座,并且配备了先进的高速摄影等测试系统,但由于物理模型实验涉及知识复杂,受场地限制,需大幅度缩小比尺,由于比尺效应而影响结果的精确度。此外,物理模型中一般使用混凝土进行模型实验,因而材料相似性受到限制,同时爆破试验均为破坏性试验,无法重复使用模型。其实验结果能否正确反映工程实际状况,其精度能否满足研究和设计的要求,要取决于研究人员对试验的设计和理解。另一种趋势是随着计算机技术的提高,数值模拟在工程中得到越来越广泛的应用。数值模拟是在一定边界初始条件下求解微分方程,具有很好的重复性,条件易于控制,可以长时间模拟过程,也便于改变边界条件,而物理模型不易实现。由于以上优点,数值模拟在爆破理论研究中发挥着越来越大的作用。一些研究人员尤其是年轻的研究人员更倾向于用数值计算来研究爆破破岩过程机理。

本书是作者近年来在岩石爆破理论与技术应用方面研究成果的集中反映。在本书有关内容的前期研究过程中,得到了华侨大学陈士海、林从谋两位教授的悉心指导与帮助;在理论实验和现场研究过程中得到了山东科技大学赵锦桥、毕卫国、高文乐、逢焕东、张金泉、孙文进、李廷春等老师的支持与帮助。多年来,各位老师

无论在专业知识还是在工作、生活方面都给予了作者无私的指导和帮助，同时为本书提供了许多素材和资料，在本书出版之际，谨向以上各位老师表示衷心的感谢。另外，感谢山东科技大学爆破研究所毕业的研究生蔡小虎、崔新壮、汪学清、李建军、魏海霞在试验和数值模拟方面提供的帮助。研究生代晓东、李晓龙、高康宁、柏毅、王晨、燕永峰、王兆东、黄锦梅、曹宏波、韩福洲、田长超、许妍、陈秀谨、任艳云、张立明、郑鸿飞、赵娜、吕红营等承担了本书部分研究内容的试验、绘图和文字图表等整理工作。

本书相关内容及出版得到了山东省矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地（山东科技大学）开放基金（NO. MDPC2012KF12）、山东省自然科学基金（ZR2013EEM023）、山东省泰山学者建设工程专项资金（NO. tshw20130956）、青岛市建设科技计划项目（JK2012-24）和山东省高等学校科技计划项目（J14LG06）的资助，特此致谢。

我们深知岩石爆破理论研究涉及多个学科领域，难度极大，也非常复杂，需进行长期的深入研究，还有大量的研究和试验工作需要去完善。由于作者才疏识浅，书中错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。鉴于本书专业性较强，如果同行读者有需要请教、咨询、交流的话，可联系本书著作者，Email: zzxhtm@163.com。

张宪堂

2014 年 11 月于青岛

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外岩石爆破技术现状	2
1.2.1 爆破器材研制生产进展	2
1.2.2 岩石爆破理论进展	2
1.2.3 地下工程挖掘爆破技术	3
1.2.4 岩石定向断裂控制爆破技术	4
第2章 岩石爆破作用理论基础	6
2.1 岩石爆破作用	6
2.1.1 爆破过程	6
2.1.2 内部作用	6
2.1.3 外部作用	10
2.2 岩石中的爆炸应力波	12
2.2.1 冲击波	15
2.2.2 应力波	16
2.2.3 地震波	20
第3章 单自由面岩石掏槽爆破理论模型	23
3.1 单自由面岩石爆破掏槽类型与形式	23
3.1.1 斜眼掏槽方式	23
3.1.2 直眼掏槽方式	26
3.1.3 混合掏槽方式	29
3.1.4 分阶掏槽与分段掏槽	30
3.2 掏槽爆破岩体破坏机理研究	30
3.2.1 掏槽爆破岩体破坏的原因	30
3.2.2 岩体爆破破坏的判据	31
3.2.3 掏槽区细观损伤岩体的破坏过程分析	31
3.3 掏槽腔堵塞部分的破坏运动机理	34
3.3.1 堵塞部分的破坏机理	34
3.3.2 堵塞部分破碎岩块的运动	34
3.4 掏槽腔内的岩块受力分析与运动模型	34

3.4.1	掏槽腔内岩块的受力状况	34
3.4.2	掏槽腔壁的摩擦作用	37
3.4.3	掏槽腔内的两相流动模型	38
第4章	岩石掏槽爆破过程数值模拟研究	41
4.1	岩石掏槽爆破数值模型的建立	41
4.1.1	数值模型工程概况	41
4.1.2	单元类型与材料模型	41
4.1.3	数值计算模型建立	43
4.2	岩石掏槽爆破数值模拟过程及分析	45
4.2.1	计算方法分析	45
4.2.2	不同数量炮孔下的爆破规律研究	46
4.2.3	不同岩石性质条件下同种炸药的爆破效果	55
4.2.4	有中心抛渣孔的掏槽爆破数值模拟	58
4.2.5	楔形掏槽爆破岩体破坏过程数值模拟	61
第5章	节理裂隙岩体爆破效果预测研究	63
5.1	爆生气体在节理裂隙岩体破坏中的作用	63
5.1.1	在气体压力作用下岩体内部的应力状态	63
5.1.2	爆生气体对裂隙的扩展作用	64
5.1.3	爆生气体对破碎岩块的运动作用	65
5.2	节理裂隙对爆破破碎的影响	66
5.2.1	节理裂隙对岩体强度的影响	66
5.2.2	节理裂隙对应力波传播的影响	66
5.2.3	节理裂隙对岩体爆破质量的影响	69
5.3	节理裂隙岩体的动态损伤演化模型	69
5.3.1	节理裂隙岩体初始损伤的测试	69
5.3.2	节理裂隙岩体损伤演化模型描述	72
5.4	损伤演化模型材料参数的确定	76
5.4.1	节理裂隙岩体爆破破坏过程数值模拟	77
5.4.2	模型建立	77
5.4.3	节理岩体爆破屈服准则	78
5.4.4	计算模型的无反射边界条件与初始条件	79
5.4.5	算例分析	80
5.5	节理裂隙岩体爆破块度和爆堆形状的预测研究	88
5.5.1	柱状装药爆破抛掷初速度的计算	88
5.5.2	节理裂隙岩体爆破块度计算	92
5.5.3	爆堆形状预测研究	95

5.6	实验及其与理论的对比	98
5.6.1	实验模型的建立	98
5.6.2	实验过程	101
5.6.3	爆破碎块移动初速度的验证与对比	101
5.6.4	爆破后块度分布与理论计算的对比	105
5.6.5	爆堆形状的预测与理论计算的对比	107
第6章	巷道聚能切缝爆破装置优化试验研究及应用	109
6.1	岩石定向断裂控制爆破技术分类	109
6.1.1	切槽孔岩石定向断裂爆破技术	109
6.1.2	聚能药包岩石定向断裂爆破技术	110
6.1.3	切缝药包定向断裂爆破技术	111
6.2	岩石聚能爆破机理研究	112
6.2.1	光面爆破概述	112
6.2.2	光面爆破基本原理	112
6.3	聚能切缝管设计及地面试验	116
6.3.1	主要参数的确定	116
6.3.2	聚能切缝管设计及试验	118
6.3.3	现场地面试验	118
6.4	一端封闭聚能切缝管在井下巷道中的实际应用	120
6.4.1	工程概况	120
6.4.2	原作业规程爆破设计	121
6.4.3	试验方法和流程	123
6.4.4	现场试验结果	124
第7章	富含水下山巷道掘进爆破理论与试验研究	127
7.1	概述	127
7.2	富含水炮孔爆破水介质作用机理分析及应用	128
7.2.1	水下爆破原理和特点	128
7.2.2	水下冲击波基本理论	130
7.2.3	水中爆炸冲击波参数计算	131
7.2.4	水体界面对水中冲击波的影响	131
7.2.5	水下爆炸气泡脉动及参数计算	131
7.2.6	浅水爆炸水喷和波浪效应	132
7.3	含水炮孔爆破水介质作用分析	132
7.3.1	炮孔底部水垫层作用	132
7.3.2	炮孔水压爆破作用	133
7.3.3	水封作用	134

7.3.4 水楔作用	135
7.4 井下积水对下山巷道爆破震动的影响	135
7.4.1 含水岩体中爆破速度计算	135
7.4.2 装药结构	137
7.5 现场试验	137
参考文献	140

第1章 绪 论

1.1 引言

目前在采矿、路堑边坡、井巷隧洞等开掘工程中, 钻眼爆破法依然是主要破岩方法。岩石爆破技术的发展不仅取决于机械设备、工业炸药、测量技术、工程地质领域的发展, 而且依托爆炸力学、爆轰理论、岩石力学等基础学科的研究成果。随着岩石爆破理论、断裂力学、爆炸力学研究的深入, 以及先进测试技术、电子计算机技术的发展及其在爆破中的广泛应用, 现代岩石爆破技术的发展朝着机械化、自动化、精细化、数字化方向发展。

岩石指天然产出的具有一定结构构造的矿物集合体, 它构成地球上层部分(地壳和上地幔); 有的岩石由一种矿物组成, 如石灰岩有方解石组成, 但大多数岩石由几种矿物组成。岩石按成因分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。岩浆岩主要由高温熔融的岩浆侵入地壳或喷出地表冷凝形成的岩石, 主要包含矿物成分有橄榄石、斜长石、辉石、角闪石、黑云母、正长石、长石、石英、云母等, 普氏系数一般在10以上。沉积岩是母岩(先生成的岩浆岩、沉积岩及变质岩)被风化、剥蚀的产物, 经搬运后在地表条件下沉积成岩的岩石。沉积岩的最主要特征是呈层状分布。沉积岩根据成因不同, 分为碎屑岩类、黏土岩类和化学岩及生物化学岩类。常见的沉积岩有: 角砾岩及砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩和石灰岩等。岩石坚固性系数较小, 一般在8以下。变质岩是由于高温、高压或外来物质的加入, 引起已形成的岩石结构、构造或化学成分及矿物成分的改变而形成的岩石。常见的几类变质岩有: 片麻岩、片岩、千枚岩、板岩、石英岩、角岩、大理岩等, 岩石坚固性系数小于岩浆岩。

岩体是指赋存在一定地质环境(应力场、渗流场和地温场)中的经受过变形, 遭受过破坏, 由一定岩石成分组成, 含有一定结构的地质体。岩体要有足够大的体积, 且含不确定的节理、裂隙、断层或层理等结构面(或称弱面, 裂隙系统), 因此, 岩体是非均质、非连续和各向异性的不确定性裂隙体。岩体内存在初始地应力, 即原岩应力。

由于岩体由不同成分的岩石组成, 岩石或岩体会受到地应力变化、各种构造地质作用、各种风化作用、地下水、地温以及人类各种应力等的作用, 其坚固性和可爆性也千差万别。各种岩石甚至是同种岩石的受荷历史、成分和结构特征都各有差异, 从而使岩石或岩体呈现明显的非线性、不连续性、不均质性和各向异性等复杂

特性。

炸药爆炸本身是一个高温高压高速的复杂过程,再加上岩石的不均质性和各向异性,致使岩石爆破机理的研究进展缓慢。多年来,各国学者在研究破岩过程中,通过优化爆破参数,试图达到控制爆破效果的目的。尽管在某些方面取得了一定的进展,但各种实验及现场经验表明,对不同结构的岩体,所产生的爆破效果往往有明显的区别。作者基于生产现场遇到的实际问题,开展了几种特殊岩石赋存条件下的爆破技术研究和技术应用,取得了良好的效果。

1.2 国内外岩石爆破技术现状

1.2.1 爆破器材研制生产进展

爆破器材的质量和适用性直接决定了爆破效果的好坏。20世纪50年代以来,随着国民经济和科学技术的飞跃发展,我国的爆破器材行业也取得较大进步。爆破器材生产厂家已由建国初期的6家发展到400多家;工业炸药年产量由7200t增加到120万~130万吨;工业雷管由4152万发增加到22亿发;导火索由906万米增加到6.3亿米;非电导爆管和工业导爆索已研制成功并大量推广应用,开发研制成功无起爆药工业雷管并已向瑞典诺贝尔公司转让该技术。

我国的工业炸药品种已由建国初期的黑火药、硝酸炸药、硝酸甘油炸药发展到能生产铵梯炸药、铵油炸药、浆状炸药、水胶炸药、乳化炸药等多个工业炸药品种,还有新研制的膨化硝酸炸药和粉状乳化炸药。工业炸药生产工艺和产品质量也得到了不断提高,自20世纪70年代我国开始引进研制乳化炸药和水胶炸药等含水炸药,因不含梯恩梯,爆破炮烟浓度低,生产使用安全,抗水性能好而迅速发展,目前乳化炸药及粉状乳化炸药已实现全连续化及连续化生产,达到国际先进水平。乳化炸药及其相关技术已出口到俄罗斯、瑞典、德国、哈萨克斯坦、缅甸、蒙古、赞比亚、越南等国。

工业雷管除了火雷管和瞬发雷管外,还发展了毫秒延期电雷管、非电雷管、高精度30段和60段的毫秒延期雷管。特殊条件下使用的煤矿毫秒雷管、低密度光爆炸药、煤矿导爆索、高低威力导爆索、深水导爆索、双向继爆管、非电起爆系统、无起爆药雷管、矿用电雷管发爆器、电雷管性能测试仪等,也全部实现了规模化生产,同时还成功研制出超高精度的电子延期雷管,可以实现精确地控制爆破时序,缩短了我国雷管工业与国际先进水平的差距。这些爆破器材为工程爆破理论与技术的发展奠定了基础。

1.2.2 岩石爆破理论进展

在岩石爆破机理研究中,一般认为造成岩石破坏的原因是冲击波和爆生气体膨胀压力共同作用的结果。其中,爆轰气体膨胀对岩石造成的剪切作用和应力波的传

播及其反射引起的拉伸等复杂的应力状态都是岩石爆破破坏的原因。但是爆炸气体产物膨胀的准静态能量,是破碎岩石的主要能源。冲击波作用所占比例则与所破坏的介质特性密切相关。其破坏作用原理为:①在应力波作用下,岩体内首先形成径向初始裂隙;②应力波受到自由面反射,在反射拉伸波作用下,自由面附近岩石可能产生片落;③气体渗入应力波形成的径向裂隙中,起着气楔作用,增大了裂隙前端岩体内的拉应力,使裂隙继续扩展,直至发生岩石抛掷过程。对于不同性质的岩石和不同爆破目的,可通过调整爆破作用的应力波强弱和爆炸气体作用时间的长短来达到良好的经济效果。对坚硬岩石,要得到好的爆破效果就需要在岩石中造成较高的应力值和一定的气体膨胀作用时间。对于采煤和饰面石材开采,不希望煤块过度粉碎或石材受到损伤,应当降低应力值,并延长爆炸气体作用时间。

岩体爆破块度分布的研究一直作为优化爆破参数的主要目标,从20世纪50年代至今,国内外许多学者在这一领域做了大量的工作,提出了一系列描述岩体爆破块度分布的方法,并且应用应力波理论、能量理论和概率分布函数建立了十多种爆破块度的计算模型,有的采用爆破块度质量分布模型来弥补爆破块度尺寸分布模型的不足。目前,国外爆破数学模型已经在不同爆破作业中获得实际应用,尤其SABREX, HARRIES模型和JKMRC模型等应用尤其广泛。实验表明这些模型对部分岩体爆破是基本吻合的,但对不同结构的岩体,往往现场与理论又产生了较大的差距。经分析,之所以出现这样的差距,是由于人们对岩体爆破块度的研究大多局限于均质、连续岩体,未能充分考虑岩体的节理裂隙和爆破后岩块之间的相互碰撞挤压作用对爆破块度的影响,从而使岩体爆破块度的控制问题至今还不能得到很好的解决。目前各国学者正致力于应用分形、损伤等新的数学物理方法,试图对岩体的天然结构进行全面、真实地描述;结合卫星定位系统,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;利用新的爆破破碎块度分布光学量测分析技术,以求实现对爆破破碎效果的全面定量评定;研究开发新型矿用炸药,调节爆破破岩的能量输入的大小;同时大容量、高速度计算机的出现也为爆破破碎复杂系统的模拟提供了硬件基础。

1.2.3 地下工程挖掘爆破技术

爆破不仅直接影响到地下工程的掘进开挖速度,而且还与地下工程质量和造价有着密切的关系。近几年,采掘矛盾在矿山建设和生产中日益凸现。特别是随着综采放顶煤技术等现代化高效开采技术的应用和高产高效矿井建设的迅猛发展,开采速度和掘进速度不匹配的问题非常突出。目前我国各类矿山每年都要掘进大量的巷道。据不完全统计,冶金和煤炭等地下矿山,每年掘进岩石巷道近3000km。我国修建的铁路隧道6876座,长度3670km,居世界首位,近两年则以每年200km的速度快速增长。这些工程及其所处复杂环境因素都对单自由面爆破效果和灾害预测控制提出了更高的要求,需要更先进的理论和技术作为指导。

近年来,煤炭、冶金、铁路和水利等行业专家学者结合生产需要,深入研究测

试了地下工程爆破的机理和参数,如光面爆破成缝机理和光面爆破参数设计,合理微差时间、深孔直眼掏槽爆破和分段直眼掏槽爆破机理与参数设计,爆破冲击波在井巷中的传播规律与安全防护机理与措施,矿用炸药、雷管安全爆炸机理,由爆破引燃引爆瓦斯机理和防护措施,煤矿安全爆破条件与危害因素,井巷掘进爆破参数专家系统研制与开发,岩石的爆破分级等。这些研究大都取得了较为理想的效果,且已应用于生产现场。有的因仪器测试条件的限制,虽然研究不够深入,但也居于国内外该方面研究的前沿。众多的科学研究成果,从本质上认识和揭露了许多地下工程爆破的实际问题,从而对应用和发展地下工程爆破技术,使我国地下工程爆破器材迅速发展,起到了理论指导作用。

随着国家基础设施建设和投资的快速发展、爆破器材的不断更新和凿岩设备大型化和高效化,地下工程爆破技术也有了较大发展。在国内外较早试验成功并采用毫秒微差爆破技术,以合理的微差间隔时间爆破,利用先期炸药爆炸产生的应力场、自由面以及岩块间的相互碰撞,达到改善破岩效果、降低炸药单耗和控制爆堆较为集中的目的。大型钻凿机械的出现及抗水型岩石水胶炸药、乳化炸药的应用,克服了普通铵梯炸药的管道效应和通水失效问题,使立井深孔和中深孔爆破技术得以快速发展。通过理论分析、实验室试验和现场工业测试,提出了适用于立井深孔爆破的两阶槽眼同深直眼掏槽和分段直眼掏槽方法,克服了炮孔上部欠挖问题和改善了爆破块度;同时采用较为先进的电磁雷管起爆系统和非电导爆管起爆系统,提高了爆破作业安全性和缩短了爆破作业时间,炮眼利用率超过 90%,抓岩生产率提高了 20% 以上。此外,在周边聚能光面爆破、立井冻结段掘进爆破、石门揭煤爆破、钻井井壁破底爆破等方面也处于世界先进水平。近年来我国还开始研究试验了无掏槽爆破技术、连续微分爆破技术、巷道掘进无抛掷爆破技术、揭煤遥控起爆技术等,有些已在生产中试用并产生了良好的经济效益,有些也已取得了阶段性成果。此外,计算机辅助设计、计算机爆破模拟也亦成功应用于地下工程爆破领域。

1.2.4 岩石定向断裂控制爆破技术

岩石定向断裂控制爆破技术是为了减少或避免爆破超挖欠挖和更有效地保护围岩而提出的有效爆破技术之一。所谓岩石定向断裂控制爆破,即采用一种特殊方法,首先在周边炮孔之间的连线方向上形成初始裂纹,为炮孔之间贯通裂纹的形成确定方向。然后在炮孔内爆炸载荷作用下,初始定向裂纹不断扩展并形成孔间贯通裂纹,最终达到提高周边光滑断裂面的目的。岩石巷道定向断裂控制爆破技术是在光面爆破技术的基础上发展的新型岩巷掘进爆破技术,与光面爆破周边眼的贯通裂缝形成机理不同,定向断裂爆破是通过装药结构的改变,使爆炸能量在炮孔内就具有定向作用,实现了孔壁的定向破裂,大大减小了爆破对周边围岩的扰动和损伤,使光面爆破效果提高了一步。

在岩石中预制裂缝用以控制爆破开裂方向的设想最早由 Foster 提出。到 20 世纪 60 年代,这一方法得到进一步发展,并完成了实验室模拟实验,在现场试验中

取得了一些成效,从而促使岩石定向断裂爆破技术日趋成熟。Fourney 等在 1978 年提出采用切缝管状药包进行岩石爆破,从而使岩石成型更好。自 20 世纪 90 年代,聚能切缝管爆破技术在国内得到了迅速发展和应用,从聚能切缝爆破机理分析和数值模拟、切缝管的选材、聚能切缝爆破参数计算和设计,以及在地面和地下岩石爆破工程中的应用等方面都取得了许多研究成果,试验研究和现场应用均已充分证实了其有效性,且施工工艺简单,易于推广应用。

本书利用理论研究、物理模型试验和数值模拟相结合的方法对几种特殊赋存条件下的岩石爆破机理与爆破技术及效果开展研究,在取得理论与技术成果的基础上,在山东、江苏等矿区进行了推广应用。

第2章 岩石爆破作用理论基础

被爆岩石介质与其赋存条件存在多样性和复杂性,这使得岩石的爆破作用机理至今仍未完全得到解释。岩石的爆破作用机理是工程爆破学的基础,也是该领域学者研究的热点和难题。本章主要介绍岩石爆破作用理论基础,将系统地对岩石爆破作用原理进行基础性论述。

2.1 岩石爆破作用

2.1.1 爆破过程

球形装药和柱形装药是工程上常用的两种装药形式。目前,柱形装药一般是指装药长度大于装药直径6倍的装药形式。不论采用何种装药形式,爆炸发生以后,紧接着会在被爆介质中形成冲击波或应力波,从而引起爆生气体的膨胀。炸药性能的好坏和被爆介质的性质是决定冲击波和应力波的关键因素。爆生气体的破岩作用分为先期作用和后期作用两个阶段。先期作用表现为爆生气体的膨胀过程,这主要反映了冲击波和应力波作用的时效性;后期作用表现在爆生气体的“气刃作用”,爆生气体像一把锋利的尖刀,刺入应力波在被爆介质中产生的径向裂缝,使之扩展。爆炸冲击波或应力波和爆生气体的联合作用使被爆介质产生裂隙,甚至对被爆介质形成破碎和抛掷。爆破效果还与装药的空间位置有关,不同的装药位置引起不同的破坏现象。装药位置主要指炸药与爆破自由面的相对位置。内部作用和外部作用是爆破作用的主要结果。

2.1.2 内部作用

岩石介质与空气的接触面称为爆破自由面。装药中心到自由面的最短距离称为最小抵抗线,又称最小抵抗。在装药量一定的情况下,如果最小抵抗超过某一临界值,装药爆炸后,自由面上不会看到爆破迹象。这一最小抵抗的临界值为临界抵抗 W_c 。此时,爆破作用只发生在岩体内部,称为内部作用。临界抵抗取决于炸药性能、装药结构、装药量和岩石性质,其关系为:

球形装药:

$$W_c = E \sqrt[3]{Q} \quad (2.1)$$

柱状装药:

$$W_c = E\sqrt{q} \quad (2.2)$$

式中: W_c 为临界抵抗; Q 为集中装药的药量; q 为每米装药量; E 为变形势能系数, 主要取决于岩石性质, 脆性岩石 E 值较大。

当装药只发生在内部作用时, 根据岩石的变形和破坏情况, 孔壁(或峒室)周围可以分为四个区域, 即空腔区、压碎区(也称粉碎区或粉碎圈、压碎圈)、破裂区(也称裂隙区或裂隙圈或破裂圈)和震动区(也称震动圈), 如图 2.1。

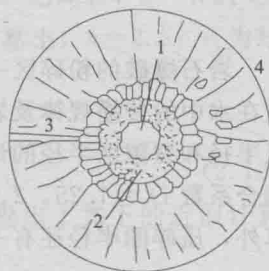


图 2.1 无限介质中的爆破作用分区

1—空腔; 2—压碎圈;
3—破裂圈; 4—震动圈

2.1.2.1 压碎圈

装药爆炸时, 在岩体内产生的冲击荷载越过岩石冲击变形曲线上的临界应力后(约等于岩石的体积压缩模量), 就会在岩体内激起冲击波, 使岩体产生强烈压缩和塑性变形, 岩石结构遭到严重破坏, 从而形成压碎圈。这一区域范围一般不超过装药半径的 3~7 倍。王文龙教授认为, 在压碎圈界面上, 冲击波波速衰减为弹性波波速 c_p , 并根据冲击波在岩体内的衰减规律:

$$p_s = p_0 / \bar{r}^2 \quad (2.3)$$

式中: p_s 为冲击波作用在压碎圈界面上的冲击压力; p_0 为冲击波作用在岩体上的最大初始冲击压力; $\bar{r}$ 为比例距离, $\bar{r} = \bar{r}/r_b$, 其中 r_b 为炮孔半径。

得出压碎圈的半径为:

$$r = \left[\frac{bp_0}{\rho_m c_p (c_p - a)} \right]^{\frac{1}{3}} r_b \quad (2.4)$$

式中: ρ_m 为岩石的初始密度; a 、 b 值如表 2.1。式(2.4) 没有考虑装药的形状。

表 2.1 岩石的 a 、 b 值

岩石	花岗岩	玄武岩	辉长岩	大理岩	页岩
$a/(m/s)$	3600	2600	3500	4000	3600
b	1.00	1.60	1.32	1.32	1.34

张奇认为在粉碎区的边界上, 冲击波的压应力应等于岩石的动态抗压强度, 并根据波后流场的不可压缩性得到柱形装药和球形装药的粉碎区半径。

对于柱形装药, 粉碎区半径 r 为:

$$r = r_b \left(\frac{V_0 \rho_m c_p}{N[\sigma]} \right) \quad (2.5)$$

式中: c_p 为岩体内的纵波波速; $[\sigma]$ 为岩石的静态单向抗压强度; N 为动压强度提高系数, $N=10 \sim 15$, 应变率越高, N 越大; V_0 为孔壁的质点速度, $V_0 = 0.5(\sqrt{A^2 + 4B} - A)$, $A = (\rho_1 D_1 + \rho_m a)/\rho_m b$, $B = D_1^2 \rho_1 / 4b\rho_m$, ρ_1 为装药密度;

D_1 为装药爆速; a 、 b 值为常数, 如表 2.1。

对于球形装药, 粉碎区半径为:

$$r=r_b \left(\frac{V_0 \rho_m c_p}{N[\sigma]} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

岩石爆破的粉碎区一般不超过炮孔半径的 3 倍。林从谋和陈士海根据爆炸冲击波在水中的传播规律及岩体内的爆炸作用, 建立了水介质不耦合装药岩体内的粉碎区半径和裂隙区半径的计算模型, 其中粉碎区半径是按 TNT 炸药来考虑的, 按不耦合系数 $D_e=1.25$ 、2、3 三种情况下得到粉碎区半径的计算结果。除上述理论计算外, 压碎圈半径还有一些经验公式:

$$r=R_k \left(\frac{\rho_m c_p^2}{5[\sigma]} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

式中: R_k 为空腔半径的极限值, 其他符号意义同上式。

对于核爆炸, 压碎圈半径的经验公式有:

$$R_k=kR_0 \quad (2.8)$$

$$r \approx 3.5R_k \quad (2.9)$$

式中: R_0 为空腔初始半径; k 为系数, 对难爆岩石, $k=1.1$, 中等可爆岩石 $k=2$, 易爆岩石 $k=3$; R_k 为空腔半径极限值; r 为压碎区半径。

对于核爆炸, 压碎区半径也可由下式估算:

$$r=k\sqrt[3]{Q} \quad (2.10)$$

式中: k 为系数, 对于密度为 2000kg/m^3 , 纵波波速为 3000m/s , 含水率为 15%, 空隙率为 25% 的凝灰岩, $k=16\sim33.6$; Q 为药包质量, kg ; r 为粉碎区半径, m 。

对于凝灰岩中的核爆炸, 约 68% 的能量消耗于强烈的破碎区。

2.1.2.2 裂隙圈

塑性变形或剪切破坏形成了压碎圈, 拉伸破坏则形成了裂隙圈。当冲击波衰减为压缩应力波时, 径向方向产生压力和压缩变形, 而切向方向将产生拉应力和拉伸变形。因为岩石抗拉能力较弱, 所以, 当拉伸应变超过破坏应变时, 岩石的径向方向就会产生裂缝。对大多数岩石, 通常认为应力波造成的破坏主要决定于应力值, 以第一强度理论作为破坏准则。

径向裂缝在裂隙区内的发展速度一般是纵波波速的 $0.15\sim0.4$ 倍。由实验得出, 径向裂隙在初始阶段的发展速度可以超过声速。裂隙延伸也受爆生气体“气刃作用”影响, 但目前相关研究很少。径向裂隙在硬岩中一般可延伸到炮孔半径的 $8\sim10$ 倍。通常认为裂隙区范围为装药半径的 $8\sim15$ 倍。

在裂隙区内除了存在径向裂隙外, 还存在着剪切破坏和环向拉断。原因是由于破裂圈范围内径向作用的应力为压应力, 环向作用的应力为拉应力, 则在与径向成 45° 的面上必然作用最大剪应力, 该剪应力数值介于拉应力和压应力之间。当最大剪应力超过岩石的极限抗剪强度时, 就会引起剪切破坏。剪切裂缝与径向裂缝呈 45° 角。而环向拉断则认为是由于波头过后的弹性能释放所引起的。