



**Theory and Practice of Directional
Fracture Controlled Blasting**

定向断裂控制爆破 理论与实践

杨仁树 杨国梁 高祥涛/著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

定向断裂控制爆破理论与实践

Theory and Practice of Directional Fracture Controlled Blasting

杨仁树 杨国梁 高祥涛 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了切缝药包定向断裂控制爆破技术。采用超动态应变测试系统、数字激光动态焦散线测试系统等研究手段,分析了切缝药包爆轰波动态演化过程、爆炸加载下切缝管的动力学响应、切缝药包爆炸参量的时空分布规律以及影响定向断裂控制爆破效果的主要因素。揭示了切缝药包定向断裂控制爆破机理,优化设计了切缝药包装药结构,形成了切缝药包定向断裂控制爆破技术体系。

本书可供从事煤矿巷道、铁(公)路隧道建设及其他边坡工程等研究领域的科技工作者、研究生和大学本科生学习和参考,同时还可供矿山安全科技工作者借鉴使用。

图书在版编目(CIP)数据

定向断裂控制爆破理论与实践 = Theory and Practice of Directional Fracture Controlled Blasting / 杨仁树, 杨国梁, 高祥涛著. —北京: 科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-051986-3

I. ①定… II. ①杨… ②杨… ③高… III. ①凿岩爆破一定向爆破—预裂爆破 IV. ①TD235.37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 044077 号

责任编辑: 李 雪 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张: 21 1/4

字数: 501 000

定价: 298.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着国家现代化建设的飞速发展,对能源资源的需求日益显著。采掘工业是国民经济的基础,爆破是采掘业中重要的工艺环节,是破碎岩石的主要手段,在今后相当长的时期内,仍将占主导地位。为了安全高效开挖岩体,必须重视爆破理论与技术的研究,推动爆破行业的可持续发展。

采掘工程爆破按照要达到的效果可分为两个方面:一方面是破碎岩体;另一方面是保护围岩。采用光面爆破、预裂爆破、切槽孔爆破、聚能药包爆破、切缝药包爆破等方法可在一定程度上保护围岩。这些技术的爆破作用过程相似,但是其装药结构、起爆方式、作用机理等不尽相同,其主要目的是为了实现在定向断裂控制爆破。

《定向断裂控制爆破理论与实践》是在总结和借鉴前人研究成果的基础上,通过建立新的试验测试系统,研究切缝药包定向断裂控制爆破机理,从细观角度分析爆破裂纹形成过程。通过纹影试验,得到了自由场中切缝药包爆破后冲击波的传播规律。通过建立并采用动态焦散线测试系统,提取爆生裂纹尖端的应力强度因子,揭示切缝药包爆破后裂纹起裂-持续发展-止裂的规律。同时通过数值仿真分析,实现了切缝药包爆破后裂纹发展的可视化,重点分析了影响切缝药包定向断裂爆破效果的几个主要因素:不耦合装药系数、切缝宽度及切缝管材质,得到了上述几个主要因素对定向断裂控制爆破效果的综合影响规律。在此基础上,采用超声波测试手段,得到了切缝药包爆破近区的损伤规律。研究成果分别在煤矿井下岩石巷道、地铁隧道、铁路边坡以及金属矿山边坡等工程中进行了运用,均取得了良好的爆破效果。现场实践成功运用的基础上,建立了切缝药包生产线,实现了切缝药包的集成化生产。

中国矿业大学(北京)矿山建设学科组长期致力于煤矿爆破的理论与技术方面的教学和科研工作,本书凝聚了研究团队二十多年来从事爆破研究的最新成果。相关成果经过中国煤炭工业协会、中国爆破行业协会等部门鉴定。成果曾获得国家科技进步奖二等奖1项,省部级科技进步奖励多项。

切缝药包定向断裂爆破技术课题的研究和成果应用,得到了山东、山西、河南、河北、安徽等煤炭行业企业的大力支持。此外,青岛地铁集团、江西德兴铜业有限公司、北京矿冶研究总院、北京京煤化工厂等企业为课题研究提供了支持和帮助。

本课题还得到了国家“863”科技支撑计划项目课题(2007AA06Z131)的子课题“深凹露天矿邻近边坡定向断裂爆破技术及设计方法”、国家自然科学基金煤炭联合

基金重点项目“大断面巷道快速掘进与支护基础”(51134025)、国家自然科学基金面上项目“爆破动载对冻结壁(管)及支护结构的作用机理”(51274203)等基金的资助。

在本书出版之际,作者对被引用文献的作者、给予课题研究指导帮助的专家和课题研究的参与者表示衷心的感谢和诚挚的敬意!

由于作者水平有限,书中难免存在不准确或不妥之处,恳请读者批评指正。



2016年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 定向断裂爆破技术分类	2
1.2 定向断裂控制爆破技术研究现状	3
1.2.1 切槽孔定向断裂爆破	3
1.2.2 聚能药包定向断裂爆破	4
1.2.3 切缝药包定向断裂爆破	6
1.3 定向断裂爆破技术的发展趋势	8
第 2 章 切缝药包爆破基本原理	10
2.1 炸药爆炸及其破岩理论	10
2.1.1 炸药爆炸的基本特征	10
2.1.2 爆轰波传播的基本理论	12
2.1.3 爆破作用下岩石破坏理论	14
2.2 切缝药包爆破理论	19
2.2.1 炸药起爆至初始冲击波阶段	20
2.2.2 初始裂纹形成阶段	22
2.2.3 裂纹扩展阶段	24
第 3 章 切缝药包爆轰波动态演化机理	26
3.1 切缝药包爆轰波动高速纹影实验	26
3.1.1 高速纹影测试原理	26
3.1.2 切缝药包爆轰波动实验系统	30
3.2 高速纹影实验结果与分析	31
3.2.1 双缝/耦合药包爆轰过程	31
3.2.2 双缝/不耦合药包爆轰过程	35
3.2.3 单缝/耦合药包爆轰过程	37
3.2.4 单缝/不耦合药包爆轰过程	40
3.3 切缝药包爆轰波动数值模拟	41
3.3.1 数值计算方法简介	41
3.3.2 数值计算模型	48
3.3.3 自由场爆炸波的传播	49
3.3.4 不耦合装药爆轰波动模拟	53
3.3.5 切缝管材质对爆轰波动的影响	58
3.3.6 装药密度对爆轰波动的影响	59
3.3.7 SPH 法对爆生气体产物的追踪模拟	60

第4章 爆炸加载下切缝管的动力学响应	63
4.1 爆炸动力学数值计算基础	63
4.1.1 非线性动力有限元控制方程	63
4.1.2 计算动力学程序	66
4.1.3 材料的几种本构关系描述	69
4.2 切缝管的动力学模拟	72
4.2.1 爆炸后切缝管压力变化	72
4.2.2 切缝管本构模型的影响	76
4.2.3 炸药的爆速对切缝管结构的影响	79
4.2.4 切缝管动力学响应分析	80
4.3 切缝管强动载下唯象分析	81
第5章 切缝药包爆炸参量的时空分布规律	82
5.1 炸药水下爆炸理论基础	82
5.2 水下爆炸测试系统	85
5.2.1 爆炸水池	85
5.2.2 传感器固定装置的设计	86
5.2.3 传感器标定	87
5.2.4 爆炸波信号传输采集系统	90
5.2.5 药包结构设计与制作	91
5.3 切缝药包水下爆炸实验	92
5.3.1 两点同步测试切缝药包爆炸波形	92
5.3.2 切缝药包水下爆炸波动参数分析	93
5.4 切缝药包爆炸波信号谱特征	96
5.4.1 爆炸波信号处理方法简介	96
5.4.2 切缝药包爆炸冲击波信号分析结果	97
5.4.3 切缝药包气泡波信号分析结果	104
第6章 切缝药包爆破裂纹形成影响因素	105
6.1 径向不耦合装药系数影响	105
6.1.1 有限元模型	105
6.1.2 初始裂纹形成过程模拟	106
6.1.3 爆生气体尖端压力峰值	109
6.2 切缝宽度影响因素	110
6.2.1 数值计算模型	110
6.2.2 初始裂纹形成模拟	111
6.2.3 切缝处压力峰值	113
6.3 轴向不耦合装药系数影响	116
6.3.1 数值计算模型	116
6.3.2 有效应力场分布模拟	117
6.3.3 炮孔周围有效应力的衰减	123
6.4 大孔径切缝药包爆破模拟	136

6.4.1	孔径 90mm 切缝药包爆破模拟	136
6.4.2	孔径 250mm 切缝药包爆破模拟	142
第 7 章	切缝药包爆破的应变及损伤规律	148
7.1	模型试验测试系统	148
7.1.1	超动态应变测试系统	148
7.1.2	高速摄影测试系统	151
7.2	模型试块的制作与静力学性能测试	152
7.2.1	试块模型的制作	152
7.2.2	标准混凝土模型静力学性能	153
7.3	径向不耦合装药模型试验	155
7.3.1	试验模型	156
7.3.2	试验结果分析	157
7.4	轴向不耦合装药模型试验	159
7.4.1	轴向间隔装药爆破	159
7.4.2	试验模型	162
7.4.3	试验爆破结果	162
7.4.4	应变测试结果分析	164
7.4.5	高速摄影测试结果分析	171
7.5	切缝药包爆破岩石损伤的超声测试	179
7.5.1	岩体声波传播与岩体损伤的关系	179
7.5.2	岩体特点对声波传播速度的影响	180
7.5.3	岩体损伤判定标准	182
7.5.4	切缝药包爆破水泥试块的超声测试试验	182
7.6	切缝药包爆炸动、静作用分离试验	191
7.6.1	试验模型	191
7.6.2	试验方案	192
7.6.3	超动态应变测试结果	193
7.6.4	切缝药包爆破动、静作用对比	197
7.6.5	普通装药爆破动、静作用对比	200
7.6.6	应变波的时频分析	202
第 8 章	切缝药包爆破动态裂纹扩展规律	209
8.1	试验系统及数据处理	209
8.1.1	爆炸加载数字激光动焦散试验系统	209
8.1.2	动态断裂参数确定	211
8.1.3	试验误差分析	213
8.2	单孔爆破有机玻璃板试验	215
8.2.1	试验描述	215
8.2.2	不耦合装药爆破	216
8.2.3	爆生裂纹的动态断裂效应	218
8.3	双孔爆破有机玻璃板试验	222

8.3.1	试验描述	222
8.3.2	试验结果及分析	223
8.4	切槽对孔间裂纹贯穿的影响	228
8.4.1	试验模型	228
8.4.2	贯穿裂纹扩展路径对比	229
8.4.3	贯穿裂纹扩展的动态行为	231
8.5	切缝药包爆破三维有机玻璃砖试验	234
8.5.1	试验模型	234
8.5.2	玻璃砖爆破裂纹扩展	236
8.5.3	裂纹速度、加速度及角度	238
第 9 章	切缝药包掏槽爆破	246
9.1	切缝药包掏槽爆破理念	246
9.2	双炮孔切缝药包爆破数值模拟	247
9.2.1	有限元模型	247
9.2.2	应力波传播过程	248
9.2.3	切缝方向 X 应力	251
9.3	切缝药包矩形掏槽爆破模拟	253
9.3.1	有限元模型	253
9.3.2	应力波传播过程	253
9.3.3	切缝连线处有效应力	255
9.3.4	裂纹形成过程	256
9.4	切缝药包三角形掏槽爆破模拟	257
9.4.1	有限元模型	257
9.4.2	应力波传播过程	258
9.4.3	切缝连线处有效应力	259
9.4.4	裂纹形成过程	260
9.5	切缝药包掏槽爆破应用	261
第 10 章	切缝药包定向断裂控制爆破工业应用	262
10.1	煤矿井下岩石巷道光面爆破	262
10.1.1	工程概况	262
10.1.2	试验方案	264
10.1.3	爆破近区围岩损伤演化规律	267
10.1.4	爆破中远区围岩的累积损伤效应	273
10.1.5	切缝药包控制围岩损伤的探讨	289
10.2	青岛地铁隧道预裂爆破	290
10.2.1	工程概况	290
10.2.2	试验方案	291
10.2.3	结果分析	293
10.2.4	切缝药包在城市地铁中应用的探讨	303
10.3	煤矿立井周边预裂爆破	303

10.3.1	工程概况	303
10.3.2	测试原理	305
10.3.3	试验方法	307
10.3.4	试验结果分析	309
10.4	京沪高铁露天边坡预裂爆破	314
10.4.1	工程概况	315
10.4.2	试验方案	315
10.4.3	边坡平整度比较分析	316
10.4.4	岩石破碎块度比较分析	316
10.5	德兴铜矿高陡边坡预裂爆破	317
10.5.1	工程概况	317
10.5.2	四孔爆破试验	317
10.5.3	边坡整体开挖现场应用效果	318
10.5.4	切缝管轴向间隔装药爆破降振试验	319
参考文献		322

第1章 绪 论

在爆破开挖岩体工程中,对于爆破效果通常有两个方面的要求:一是要保证开挖岩体充分破碎;二是确保被保护岩体受到的破坏最小。最具有代表性的,如露天采场的边坡爆破,隧道工程和水利工程爆破中的开挖与保护问题。在露天开采中,边坡的稳定性一直是困扰露天采掘业的一个重要问题,直接影响着矿山的正常生产。爆破危害是影响边坡稳定的一个主要原因:靠帮爆破后,会对边坡造成不同程度的损伤,在被保护一侧的岩体侧壁形成许多微裂纹;而爆破振动使得先前形成的微裂纹不断发展,久而久之,随着微裂纹发展到一定程度,岩体发生松动破裂,甚至会造成边坡坍塌。

爆破振动波是炸药爆炸产生的冲击波,经由岩石介质传播到一定距离后,衰减形成的弹性波。在一般情况下,这种弹性波不会造成岩石破裂,但在其作用下岩体内节理、裂隙可以发生变形或位移。爆破振动对边坡稳定性的影响包括两个方面:一是由于爆破振动波不断地在边坡岩体中形成剪应力和拉应力,促使岩体中的节理裂隙逐渐张开,岩体结构逐渐松散,导致岩体强度降低;二是爆破本身引起的惯性力导致边坡岩体的下滑力加大,当达到一定量级后将导致整个边坡失稳。爆破使岩体产生大量的微裂纹,降低岩体的强度和抗滑力,这样就会使边坡稳定性逐渐降低。尤其是高陡边坡及岩体强度较差时,当爆破振动达到某一阈值时,就会发生边坡局部坍塌甚至整体滑坡^[1]。

根据损伤力学的观点,爆炸作用下岩石的动态断裂是一个连续损伤累积的过程,其损伤机制可归结为岩石内部微裂纹的动态演化。岩石是一种脆性损伤材料,其间存在着大量的微裂隙、微裂纹等缺陷。在爆炸作用下,岩体的破坏过程是其内部大量微裂纹的成核、贯穿,进而导致岩体的宏观力学性质劣化,最终失效或破坏的过程^[2]。实际工程中,为了降低爆破危害,在边坡爆破时通常采用预裂爆破和光面爆破等爆破方法。沿开挖边界布置密集炮孔,采取不耦合装药或装填低猛度炸药,在主炮孔之前起爆,沿开挖线形成预裂缝,以减弱主爆区爆破对受保护一侧岩体的损伤,并形成平整轮廓的爆破作业。开挖区和受保护区之间预裂缝的作用,使主爆区爆破形成的应力波传播到预裂缝时被反射掉一部分,透射到受保护一侧岩体中的应力波强度得到了很大程度上的降低,从而达到减振的目的^[3]。另外,预裂缝的存在阻断爆生裂纹的传播,避免其伸入保留岩体内部,使得受保护岩体的损伤度降到最小。

岩石定向断裂爆破是在传统光面爆破法的基础上发展起来的。传统光面爆破通常采用不耦合装药或空气间隔装药结构,来降低爆炸对炮孔壁的直接作用,避免在孔壁岩石中形成压碎区。多个炮孔同时起爆后,在炮孔中心连线方向形成应力场叠加,从而在炮孔间产生贯穿裂隙,爆破后岩面光滑平整^[4]。但是这种方法不能避免在孔壁上产生随机的径向裂纹,造成受保护侧岩壁的损伤,而且在节理裂隙发育时,光面爆破效果较差。定向断裂爆破采用改变装药结构、炮孔形状或在炮孔内增加附件等方法来改

善炮孔周围岩体的受力，即在炮孔中心的连线方向上增强装药爆炸的作用力，或者降低岩石的抗破坏能力，从而使裂纹在预定方向上优先起裂、扩展和贯通，得到光滑的爆破面，从而提高光面爆破的效果。岩石定向断裂爆破技术，目前已经被广泛地应用于井巷周边成形爆破、珍贵石材的开采爆破和大型块体切割爆破等领域。在井巷爆破中采用定向断裂爆破技术，可以有效地减少超、欠挖，提高爆后炮孔眼痕率；同时也减少了孔壁周围岩石上次生裂纹的产生，改善了爆破质量，提高了围岩的稳定性。特别是在节理、裂隙较发育的岩层中使用定向断裂爆破方法，爆破效果会明显改善，产生较好的经济效益和社会效益。

1.1 定向断裂爆破技术分类

岩石定向断裂爆破方法基本上可以分为三类^[5]（图 1.1）：①切槽孔岩石定向断裂爆破，采用机械方法形成初始定向裂纹（改变炮孔形状）；②聚能药包岩石定向断裂爆破，利用炸药聚能射流破坏机理，在炮孔周围形成定向裂纹（改变装药结构）；③切缝药包定向断裂爆破，利用切缝管对能量的导向作用，沿切缝方向形成定向裂纹（孔内增加附件）。

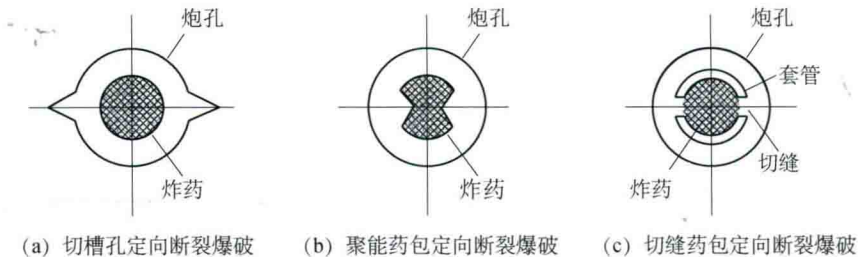


图 1.1 岩石定向断裂爆破分类

切槽孔爆破是指在炮孔轴向炮孔壁上按爆破开裂方向和设计要求，切出一定深度的 V 形槽。V 形槽炮孔是根据裂纹扩展理论，在炮孔内壁预制初始裂纹，初始裂纹起到应力集中和导向的作用，使岩石在爆炸作用下，沿着槽线方向断裂^[6]。这种爆破方法的优点在于将爆破能量集中于切槽方向，在切槽方向裂纹扩展的同时，抑制了其他方向的裂纹起裂，其裂纹起裂所需要的能量较低，引起的爆破振动很小。

聚能药包的聚能效应（shaped charges）也称为空穴效应（cavity effect），亦即炸药爆炸时释放的一部分能量，可以通过某一方实施空心装药而使其能量往这一区域的轴线方向集中。

切缝药包爆破是在具有一定密度和强度的炸药外壳上开有不同角度、不同形状和数量的切缝，利用切缝控制爆炸应力场的分布和爆生气体对（孔壁）介质的准静态作用和尖劈作用，达到控制所爆介质开裂方向的目的。

1.2 定向断裂控制爆破技术研究现状

1.2.1 切槽孔定向断裂爆破

1. 试验研究

Foster 等^[7]首先在 1905 年提出了在岩石中预制 V 形槽来控制裂纹扩展的爆破方法。1952 年, Williams 等^[8]通过建立 V 形切口问题的特征方程, 得出在切口尖端处应力奇异性的强弱与切口张开角度有关。20 世纪 60 年代, Langefors 等^[9]提出, 在孔壁沿轴向预先切槽可以控制径向裂纹生成及断裂面形成。70 年代末, Noda Nao-Aki 等^[10]采用实验方法, 在无限平面条件下, 研究了切槽角度对切口尖端的应力集中系数的影响关系。Fourney 等^[11~13]采用速燃剂作为破碎剂, 在有机玻璃上进行了切槽孔爆破模型实验。实验结果得出, 炮孔壁无压碎现象, 且有机玻璃模型均沿切槽方向断裂, 断面平整光滑。Barker^[14]采用带预制 V 形裂纹的简化方法对灰岩、粉砂岩进行了平面断裂韧性的实验研究。1981 年, 瑞典 Biarnholt^[15]对有 V 形槽的药柱进行了断裂控制的实验研究, 得出孔压数值计算结果和具体参数。Costin^[16]对油页岩进行了动态和静态裂隙发展的实验研究。

我国在 20 世纪 90 年代初期, 开始研究采用切槽孔定向断裂控制爆破技术。Yang YQ 等^[17]、Yang RS 等^[18]、宋俊生和杨仁树^[19]、杨仁树等^[20]利用动云纹和动焦散方法, 通过改变炮孔的形状对切槽孔在爆破作用下应力场的分布规律和裂纹扩展规律进行了一系列研究工作。结果表明: 沿切槽方向应力场加强, 更有利于裂纹的定向扩展。切槽孔爆破参数即切槽角度、切槽尖端半径和切槽深度是影响切槽裂纹扩展的主要因素。爆破中裂纹的起裂、扩展和止裂主要受爆生气体静压的作用。陆文等^[21,22]进行了切槽爆破现场试验的研究工作, 取得了满意的爆破效果。采用脆性介质宏观断裂力学理论, 推导出爆生气体作用于孔壁最大、最小压力, 提出合理的切槽爆破参数。李清等^[23]应用爆炸加载的透射式动焦散线测试系统, 研究了有机玻璃切槽孔爆破模型的裂纹动态特征变化规律, 并得出合理的切槽爆破参数。杜云贵和张志呈^[24]进行了圆形炮孔切槽爆破模型实验研究, 得出采用 V 形切口的炮孔合理性。徐颖和刘积铭^[25]将切槽爆破技术应用到钢筋混凝土大楼的保护性楼板拆除, 取得了较好效果。任从坡和王聚永^[26]在分段凿岩阶段矿房法回采实践中, 尝试性采用扩井、切槽爆破同步进行方案。提高了爆破作业生产效率, 缩短了爆破通风时间, 大大降低了爆破对整个矿山生产的影响。

2. 理论研究

随着爆破理论的迅速发展, 切槽孔定向断裂爆破理论研究取得了较快的发展。以弹性理论处理爆破问题的 Farvreau 模型^[27]和 Harries 模型^[28]。以线弹性断裂力学为基础的 NAG FRAG 模型^[29]和 BCM 模型^[30]。Kuszmaw 将岩石由损伤累积而导致的破坏视为一种逾渗转变的逾渗模型^[31]。此外, Grady、Thorne、Preece、Burchell 等提出了以损伤演化特别是细观损伤演化为框架的损伤力学模型^[32~35]。

切槽爆破的成缝机理研究方面: 肖正学等^[36]详细讨论了 V 形切槽炮孔在冲击波的动

态压力和爆轰气体的静压作用下所产生的力学效应。根据对比计算,得出切槽爆破能定向成缝扩展的原因。宗琦^[37]建立了不耦合装药孔壁预切槽爆破时的脆性断裂力学模型,分析了裂缝的扩展规律,并初步探讨了切槽爆破的动态效应。Chen 和 Zheng^[38]、Yan 等^[39]将切槽定向断裂爆破技术引入到松动爆破领域,对螺旋切槽孔松动爆破理论机理、数值分析等方面进行了研究。王成端^[40]提出了预制 V 形裂纹的复变应力函数,推导了 V 形裂纹尖端应力场和位移场,得出 V 形裂纹尖端的应力强度因子。李成芳等^[41,42]通过对比数值分析的方法,得出螺旋孔爆破比圆孔切槽爆破更能有效地提高破岩面积,增加能量利用率。张志呈和王成端^[43]通过研究,从理论上论证了采用 V 形炮孔的合理性,并把切槽定向断裂爆破应用于切割大理石,其切割效果令人满意。阳友奎等^[44]以爆炸理论和断裂力学为基础,探讨了切槽的导向作用机理,阐明了其初始裂纹生成的定位性及其扩展的定向性,以及裂纹优先扩展等保证破裂面得以精确控制的断裂特征。

3. 数值模拟研究

徐海清^[45]采用有限元 ANSYS 软件数值模拟了 V 形、矩形和半圆形刻槽孔,并且采用应力图可视化地显现出三种刻槽方式在刻槽尖端都具有应力集中作用。在数值解上证明 V 形、矩形和半圆形刻槽尖端是首先产生裂缝的位置,分析了 V 形刻槽角度、刻槽深度、槽孔曲率半径等因素对槽孔附近及槽孔尖端应力场的影响,并得出了 V 形槽孔各参数与槽孔周围应力分布之间的规律。张玥^[46]以显式动力分析有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 为模拟运算工具,详细计算了在动载作用下槽孔周围及双孔连心线上岩体的动态应力分布与变化规律,并运用断裂力学理论分析刻槽爆破动态成缝机理,探讨爆破参数变化对 V 形刻槽爆破效果的影响。叶晓明等^[47]利用大型 ADINA 有限元程序对三维切槽孔、二维切槽孔和圆形孔爆破做了线弹性数值分析,结果表明三维槽孔爆破具有应力高度集中现象、应力的空间分布可以人为控制、切槽效应小于二维切槽孔爆破,遵守能量守恒规律。这说明三维切槽孔爆破方法能够应用于破岩爆破,其效率明显高于传统的圆孔爆破方法。

1.2.2 聚能药包定向断裂爆破

1. 试验研究

1792 年,采矿工程师 Franz Von Baader 首先提出聚能现象,并在 1799 年观察到了爆炸刻蚀现象^[48]。1888 年,美国人 Munroe 在试验中发现,具有空穴的柱形装药不带药型罩的成形装药,在空穴端会形成爆轰产物的能量聚集,形成聚能气流。在 1940 年,Thomanek 对壁厚递增和喇叭形药型罩进行了试验研究。1943 年 Thomanek 首次发展了自旋补偿药型罩。德国人从实验中测出了有药型罩和无药型罩时对钢靶的侵彻深度及各种聚能装药在不同药型罩锥角、不同药型罩材料和壁厚,以及不同炸高时的效应。

聚能效应原理的全面研究始于二战期间。美国学者 Seely 等以及英国学者 Clark 对聚能装药爆炸过程都进行了闪光 X 射线照相^[49,50]。德国人 Schardin 和 Thomer 清晰地记录了带半球形药型罩的聚能装药压垮情况^[51]。20 世纪 40 年代末到 50 年代初, Birkhoff 等^[52]、Evans^[53]和 Pugh 等^[54]相继提出药型罩聚能装药的分析模型。80 年代后,随着计算

机技术和实验手段的发展,线性聚能装药得到了深入研究。线性聚能装药又称切割装药,是聚能装药的一种。线性聚能装药起爆后,金属罩在爆炸产物作用下压垮,形成高速的“刀片”状金属射流。瑞典学者 Bjarnholt^[55]把聚能装药引入岩石爆破,提出了线性聚能装药爆破方法。Hayes^[56]对线性聚能罩的压垮机理做了研究工作。Curtis^[57]提出轴对称不稳定模型。Hirsch^[58]等对线性聚能装药做了大量的研究工作。美国桑迪亚国家试验室进行了小锥角罩聚能装药和爆炸成型弹丸在凝灰岩中的穿孔试验研究。

此外,聚能装药装置还应用到其他领域。在矿山开采中,芬兰和南非研制了一种解决溜井堵塞问题的聚能翻转弹,其可将 1000mm 厚的石英岩穿透。聚能切割器被应用于爆破拆除中。美国应用聚能切割爆破技术成功地拆除了一座钢结构反应塔和 Tallawarra 发电站的设备;2002 年报废的澳大利亚皇家海军舰船采用线性聚能切割器,切割取得圆满成功。南非也采用聚能切割器拆除多种大型钢结构建筑物,均取得满意的效果。在俄罗斯,聚能切割器广泛地应用于各个领域,技术水平相当先进。例如,工业设施、大型容器、地上或水下的石油井架,甚至坦克、舰艇、机车、飞机等。由于聚能装药装置具有诸多优点,如装药量少、质量轻、便于搬运和携带、聚能效果佳等优点,还被广泛用于弹药销毁中^[59]。Held^[60,61]对不同角度和罩厚的聚能炸药对反应装甲的侵彻进行了研究。

国内从 20 世纪 80 年代中期开始,以中国矿业大学为代表,着重对聚能药包切割机理和应用进行了系列研究。杨永琦^[62]采用动光弹方法,对聚能作用进行试验研究。从动光弹条纹图中可以得出,聚能罩所对应的方向,条纹十分密集,条纹级数增大等特点,表明聚能方向有明显的定向爆破作用。淮南矿业学院取得了“双面切割器”专利和“大理石花岗岩切割技术应用”专利。大连理工大学研制了可快速切割各种水上与水下的钢筋混凝土和钢结构建筑的聚能线性切割器。谢源等^[63]研究了不同药包形状产生的聚能效果,得出适合岩石二次破碎的最佳爆破药包形状。Ji^[64]和季荣生等^[65]通过提高炸药爆速、增大装药密度等方法对提高聚能装药爆炸后形成射流的能量和改善聚能爆破切割石材的效果进行了研究,并在可见光条件下拍摄自制聚能药包爆轰后产生聚能射流的过程。李明等^[66]用聚能爆炸切割岩体及混凝土块体进行了试验研究,解释了试验现象,并讨论了影响切割效果的诸多因素。Luo 等^[67,68]对聚能药包导向裂缝的形成、裂纹的起裂、扩展和贯通进行了初步研究。同时对线性聚能切割器进行了设计。聚能药包也应用于矿岩切割爆破中,体现了聚能药包爆炸切割岩体的实用性。1994 年,聚能药包爆破法应用于白银公司深部铜矿 550 号溜井堵塞处理,取得了满意的效果^[69]。在水利水电工程中,Zhao 和 Wlen^[70]应用环向聚能药包开挖水平建基面,并研制出了切割型和射孔型两种不同环向聚能药包。

2. 理论研究

在理论上,Neumann 和 Neumann 论证了带空穴的装药的聚能效应。1966 年,Mohaupt^[71]博士宣布观察到了衬罩空穴效应。Bernard、Rohni 等分别针对岩石和混凝土发表了基于空穴膨胀模型的文章,对侵彻过程进行了分析^[72]。王铁福^[73]研究了药型罩材料的晶粒度对射流性能的影响机理。罩材料的晶粒细化可以增加有效连续射流长度,推迟射流断裂时间。Zhao 等^[74]研究了爆轰波阵面形状对射流性能的影响。陈启珍^[75]研究了炸药能

量对穿甲深度的影响。郑哲敏^[76]对射流失稳、断裂进行了研究。贾光辉等^[77]、蒋浩征等^[78]对药型罩做了大量的研究工作。秦承森等^[79,80]导出了聚能射流断裂时间的近似公式和相邻颗粒间速度差的理论计算公式。郭德勇等^[81,82]将聚能定向断裂爆破理论用于煤层深孔聚能爆破瓦斯抽放工程,分析了煤层深孔聚能爆破裂隙起裂、扩展和止裂的力学条件,同时分析了低透气高瓦斯煤层聚能爆破定向致裂的微观机理,为煤层聚能爆破致裂工艺设计提供了理论依据。

3. 数值模拟研究

计算机技术的应用使科技工作者能广泛采用试验、理论分析和数值计算相结合的方法来研究和设计,因而聚能射流技术在理论研究和试验研究上进展迅速。

宁建国等、郝莉等、吴开腾等^[83~85]基于多物质流体的 Euler 算法,用面向对象的 C++语言自行编制了 M-MMIC 通用多物质二维流体弹塑性程序,对锥形聚能装药射流形成过程进行了数值模拟,并用 VISC 2D 可视化软件对射流的形成过程进行动画演示。计算结果符合聚能射流形成的物理现象和规律,说明该物理模型和数值算法比较合理,可用于指导聚能破甲战斗部的工程设计。韩秀清等、曹丽娜等^[86,87]通过分析聚能射流形成的机理,利用显式动力有限元分析程序对聚能射流形成过程进行了数值仿真模拟,且针对药型罩的结构参数(锥角、壁厚和形状)对聚能射流的影响分别做了数值计算,得到了聚能射流头部速度与药型罩结构参数之间的关系。李伟兵等^[88]运用 LS-DYNA 仿真软件研究了弧锥结合罩的结构参数对侵彻体形成的影响规律。对于起爆方式为中心点和不同位置的环形起爆,通过改变弧锥结合罩的圆弧曲率半径和锥角,对比分析了形成侵彻体性能,得出弧锥结合罩的结构参数对 EFP 成型的影响规律。叶文通等^[89]采用 ANSYS AUTODYN 软件模拟了聚能装药金属射流,得出了射流形成过程以及相应物理现象。对于爆炸聚能射流对在岩石孔内进行切割工程设计与侵彻参数的计算具有一定的参考价值。冯其京等^[90]用二维有限差分欧拉程序 MEPH2Y 模拟了聚能装药的作用过程,包括爆轰波的形成、传播及与其他介质的相互作用,高温高压下射流(或射弹)的形成、延展、减压、断裂,射流(或射弹)对靶的侵彻及靶的成坑和动态响应等过程。

1.2.3 切缝药包定向断裂爆破

1. 理论研究

早在 20 世纪 70 年代, Fourney 等就提出了在炮孔中使用轴向切缝的管状药包在岩体中形成定向裂缝的方法。其特点是在切缝方向造成压应力集中和剪切应力差,沿切缝方向形成断裂破裂面。我国从 20 世纪 80 年代开始,对切缝药包爆破技术进行研究。切缝药包爆破形成定向裂缝过程分为两个阶段:第一个阶段即爆炸初期,在切缝管内腔尚未形成均布压强之前,主要是冲击波的动态作用使得切缝对应的孔壁处优先产生预裂缝。第二个阶段主要是爆生气体的准静态压力作用促使裂缝扩展和贯通。Fourney 提出在爆生气体的准静应力场作用下,在孔壁上首先形成剪切破坏面^[91]。应力集中使裂纹继续扩展,最终形成孔与孔间的裂纹或孔壁裂纹与自由面的贯通。吴金有^[92]认为,冲击波只对

岩石起预裂作用,为整个岩石破碎或开裂创造了有利条件。岩石破碎的主要因素是爆炸气体准静压作用。张志呈^[93]综述了爆破破裂过程中爆生气体作用和应力波作用,并重点分析了圆形炮孔爆破的成缝机理。在耦合装药条件下,爆生气体使裂纹增长 2~6 倍,可达到炮孔半径的 10~20 倍。李彦涛和杨永琦^[94]认为,在切缝处会产生强应力集中,应力强度因子最大。在相同条件下切缝药包爆破可增大炮孔间距、提高孔痕率。张玉明等^[95]通过模型试验并运用数理统计的方差分析理论对切缝套管的参数进行优化,在切缝外壳厚度等其他条件保持一定的情况下,当外壳外径为 32mm、切缝宽为 4mm 时爆破效果最佳,定向最好。高全臣等^[96]、戴俊等^[97]也对切缝宽度和切缝外壳厚度做了大量的研究工作。宋俊生等^[98]、王树仁等^[99]指出:影响裂纹定向扩展的主要参数是切缝宽度和外壳厚度。当在中硬石灰岩中,采用 2 号岩石炸药,塑料外壳的厚度 4.5mm,不耦合系数 $K=1.33$ 时,得出了切缝宽度对裂缝长度和宽度的影响规律。对于切缝药包爆破的不耦合系数方面的研究,Langefors^[100]根据试验数据回归分析得出了裂纹长度与不耦合系数的关系。不耦合系数为 1.67 时,爆破裂纹总长度和平均长度都是最大的。而裂纹数目随着不耦合系数的增大而减少。唐中华等^[101,102]对切缝药包爆破的聚能作用、开裂条件与力学分析,以及爆炸成缝的机理进行了研究。张玉明等^[103]论述了切缝药包破岩机理,运用弹塑性理论分析了其在定向断裂中的力学作用,对切缝药包在岩巷的推广应用情况做了简要的介绍。杨永琦等^[104]根据电测结果认为,在炮孔周围相同比例距离处,应变峰值随不耦合系数增加而下降。当不耦合值一定时,应变峰值随比例距离增加而衰减。不耦合系数的合理取值范围为 $1.33 < K < 1.7$ 。切缝药包爆破中,由于切缝外壳的存在,改变了炸药爆炸时,爆生产物对孔壁的压力作用,对于其力学机理也做了相应研究工作。杨同敏等^[105]根据岩体在爆生气体作用下成缝的开裂、扩展和止裂理论,从切缝药包爆破的动应力场分析了它的定向控制断裂爆破机理,提出了岩体开裂的相应判据,裂纹分稳定扩展和间断扩展两个过程,控制爆破影响成形的因素。高金石和张继春^[106]根据炮孔壁的变形位移用弹塑性理论,推得了半圆套管作用下炮孔壁压力分布规律;分析了套管材质与孔壁压力的关系;讨论了半圆套管在定向成缝爆破中的方向控制原理与孔壁开裂的形式和条件。

2. 试验研究

岩巷掘进中普遍采用聚能管爆破技术就是切缝药包定向断裂爆破的实际工程运用,并取得了很好的效果。中国矿业大学(北京)首次将切槽药包定向断裂、聚能药包定向断裂和切缝药包定向断裂爆破参数进行综合优化,经过对机具的实用对比和试验对比,最终得到了在岩巷中的深孔定向断裂爆破新工艺。其主要特点是利用套管切缝药包实现周边定向断裂。能够精确控制巷道的成型,大大减少了超欠挖现象。在现有机械化水平的基础上,不需增加投资即可实施中深孔爆破^[107~111]。全国多家大型煤矿,例如:大同矿务局云岗矿、新汶矿业协庄煤矿、翟镇矿、开滦(集团)赵各庄矿等在大断面岩巷掘进中采用中国矿业大学(北京)研发的聚能管,实现了大断面岩巷快速掘进。在金佳矿井+1721m 水平瓦斯抽放巷施工中,采用切缝药包爆破技术,爆破后巷道成型规整,符合设计轮廓要求。对于软岩层而言,爆破后很少产生或不产生大的爆振裂缝,提高了围岩的稳定性和承载能力,取得了较好的爆破效果^[112]。何满潮提出双向聚能拉伸爆破技术,并成功地应用于国防大型复杂断面硐室成型爆破工程中^[113, 114]。2006 年,凡口矿首次采用切缝药