

临近边坡 精确延时控制爆破及振动分析

钟冬望 何 理 李琳娜 司剑峰 著



科学出版社

临近边坡精确延时控制爆破及振动分析

钟冬望 何 理 李琳娜 司剑峰 著

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书对爆破振动作用下的爆破地震效应、岩体损伤及其稳定性研究的历史及现状进行了较为系统的总结,分别围绕临近边坡精确延时控制爆破的几个相关问题进行了详细阐述。主要包括:爆破模型试验研究方法和振动信号分析方法及其应用、精确延时控制爆破及可靠性分析、精确延时控制爆破地震波传播衰减规律、合理微差延期时间的选取方法、边坡岩体爆破累积损伤计算方法及控制措施、反应谱模态组合法在爆破地震反应总效应对边坡稳定性影响研究中的应用等内容。本书还特别对临近边坡精确延时控制爆破进行了现场及混凝土试件的数值计算和试验研究,试验结果具有很强的参考价值。

本书可作为工程力学、爆炸力学、岩土工程、采矿工程、土木工程、水利工程等专业的研究生教材,也可供相关专业科研人员和采矿、煤炭、交通和水利等部门从事爆破工程的技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

临近边坡精确延时控制爆破及振动分析/钟冬望等著. —北京:科学出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-03-046856-7

I. ①临… II. ①钟… III. ①边坡-凿岩爆破-爆破振动-研究
IV. ①TD235

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 303102 号

责任编辑:吉正霞 王迎春/责任校对:董艳辉

责任印制:高 嵘/封面设计:苏 波

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>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: B5(720×1000)

2015 年 12 月第 一 版 印张: 12 1/4

2015 年 12 月第一次印刷 字数: 231 000

定价: 45.00

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

临近边坡爆破地震效应及其危害的有效预测及控制是工程爆破领域亟待解决的一个重要研究课题,历来深受国内外学者重视。近年来,爆破技术正逐渐向着精细化、数字化和科学化的方向发展,高精度数码电子雷管的出现进一步推进了爆破技术的发展,基于数码电子雷管的精确延时控制爆破技术已被广泛应用于爆破工程实践中,并取得了较理想的降震与岩石破碎效果。本书是在国家自然科学基金“精确延时控制爆破对边坡稳定性影响规律研究”(No. 51174147)、“爆炸载荷作用下岩质高边坡的动力响应与破坏机理研究”(No. 50774056)的资助下完成的,归纳了作者近年来从事相关研究的成果,包括爆破模型试验研究方法和振动信号分析方法及其应用、精确延时控制爆破技术及地震波传播衰减规律、合理微差延期时间的选取方法、边坡岩体爆破累积损伤计算方法及控制措施、模态组合法在边坡振动响应研究中的应用等内容。

尽管广大科研工作者针对爆破地震效应及其危害控制开展了大量研究工作,并已取得许多有价值的成果,一定程度上推动了爆破技术的发展,但总体实际上依然存在着理论与试验研究严重滞后于生产实际需要的矛盾,只有不断引进新理论和采用新的研究方法,借鉴相关应用学科的前沿成果,才有望取得长足进步。本书的写作目的在于使我们对临近边坡精确延时控制爆破地震效应及危害有更为深入、系统、科学的认识,同时为改善爆破效果、优化爆破参数、控制爆破地震波对周边建(构)筑物危害提供借鉴,进一步促使爆破技术向精细化、科学化方向发展。

本书第1章和第3章由钟冬望撰写,第2章由司剑峰撰写,第4章由李琳娜撰写,第5~8章由何理撰写,全书由钟冬望统一审定。在本书出版之际,谨向书中所有参考文献的作者以及支持和参与本课题研究的同事和研究生表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中不足之处在所难免,尚希读者见谅并提出宝贵意见。

作 者

2015年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 精确延时控制爆破研究现状及进展	1
1.2.1 国外数码电子雷管的发展现状	2
1.2.2 国内数码电子雷管的发展现状	3
1.2.3 数码电子雷管的现场应用	3
1.3 边坡爆破地震效应预测及控制研究现状	4
1.4 临近边坡精确延时控制爆破研究中存在的主要问题	11
参考文献	12
第 2 章 模型试验研究方法	23
2.1 模型试验发展简介及意义	23
2.1.1 模型试验发展简介	23
2.1.2 模型试验的意义	24
2.2 相似律在模型试验中的应用	25
2.2.1 相似第一定理	25
2.2.2 相似第二定理	26
2.2.3 相似第三定理	26
2.2.4 相似三定理之间的关系	27
2.2.5 线弹性模型及破坏模型的相似关系	27
2.3 模型试验测试方法及手段	29
2.3.1 模型材料的选择	29
2.3.2 常用模型试验测量方法	30
2.3.3 模型试验测试技术	32
参考文献	44
第 3 章 爆破振动信号分析方法及其应用	46
3.1 傅里叶变换	46
3.2 小波变换	48
3.2.1 连续小波变换	48

3.2.2 离散小波变换	49
3.3 小波包分析	49
3.4 希尔伯特-黄变换	50
3.5 精确延时控制爆破振动信号的振波分离	51
3.5.1 小波变换的时-能密度法分析原理	52
3.5.2 微差爆破振动信号振波分离	52
3.5.3 精确延时控制爆破试验	53
3.5.4 信号处理与分析	54
参考文献	59
第4章 精确延时控制爆破及可靠性分析	62
4.1 数码电子雷管及起爆系统	62
4.1.1 数码电子雷管基本原理	62
4.1.2 数码电子雷管起爆系统	65
4.1.3 数码电子雷管及起爆系统的安全性	65
4.2 起爆网路可靠性	68
4.2.1 起爆网路可靠性理论	68
4.2.2 影响非电起爆网路系统可靠度的因素	69
4.2.3 起爆网路系统可靠性模型	70
4.2.4 常用的几种起爆元件可靠度	71
4.3 精确延时控制爆破起爆网路设计及可靠性计算	71
4.3.1 微差爆破起爆网路设计	71
4.3.2 延时起爆网路系统可靠性计算	72
4.3.3 数码电子雷管起爆网路可靠性技术	74
4.4 起爆网路延时误差分析	75
4.4.1 毫秒延期雷管跳段概率的计算	75
4.4.2 非电导爆管接力式起爆网路系统各传爆点延时	79
4.4.3 数码电子雷管起爆网路延时误差分析	80
4.4.4 精确延时控制爆破延时误差	81
4.5 精确延时控制爆破工程应用	82
4.5.1 工程背景	82
4.5.2 数码电子雷管起爆系统的应用	83
4.5.3 精确延时控制爆破对爆破效果的影响	84
参考文献	85
第5章 临近边坡精确延时控制爆破地震波传播衰减规律研究	87
5.1 爆破地震波的生成与传播	88

5.1.1 爆破地震波的形成	88
5.1.2 爆破地震波的分类	89
5.2 爆破地震波影响因素分析	89
5.2.1 爆源因素	89
5.2.2 传播路径的影响	91
5.2.3 传播介质特征的影响	92
5.3 精确延时控制爆破振动峰值速度分析	92
5.3.1 等效药量取值方法探讨	92
5.3.2 爆心距对精确延时控制爆破振动速度影响规律分析	93
5.4 精确延时控制爆破振动持续时间研究	96
5.4.1 振动持续时间影响因素分析	96
5.4.2 振动持续时间预测公式的量纲理论	97
5.4.3 振动持时预测公式的工程验证	98
5.5 精确延时控制爆破振动信号能量研究	100
5.5.1 信号频带能量分布的小波包分析方法	100
5.5.2 爆破振动信号能量的小波包分解	101
5.5.3 信号能量的分布及传播衰减规律	104
5.6 精确延时控制爆破应力场研究	106
5.6.1 动态应变测试系统	106
5.6.2 动态应变监测方案	107
5.6.3 减震沟对应力场传播衰减规律的影响研究	107
5.6.4 延期时间对应力场叠加程度影响规律研究	108
参考文献	110
第6章 临近边坡精确延时控制爆破合理微差延期时间优选	113
6.1 微差爆破的基本原理	113
6.1.1 新自由面和辅助自由面理论	113
6.1.2 应力波叠加理论	114
6.2 微差爆破延时理论	114
6.3 微差爆破延时理论的几点看法	115
6.4 基于降低爆破振动强度的合理微差延期时间选取	116
6.4.1 爆破地震波线性叠加原理	116
6.4.2 合理微差延期时间的选取方法	118
6.4.3 工程实例应用	121
6.5 基于改善岩体爆破效果的合理微差延期时间选取	121
6.5.1 高速摄影及动态应变监测综合实验研究系统	121

6.5.2	合理微差延期时间的确定原则及计算方法	123
6.5.3	单孔爆破裂纹扩展过程高速摄影监测试验方案	124
6.5.4	临近边坡逐孔爆破动态应变监测试验方案	125
6.5.5	合理微差延期时间的选取	125
6.6	基于炸药能量分配原理的合理微差延期时间计算方法	130
6.6.1	基于 HHT 的信号瞬时能量分析法	130
6.6.2	合理微差延期时间的计算方法	131
6.6.3	试验研究	133
6.6.4	工程实例应用	136
6.7	合理微差延期时间选取方法分析	138
	参考文献	139
第 7 章	边坡岩体爆破累积损伤计算方法及控制措施	141
7.1	爆破破岩机理	141
7.2	岩石爆破理论模型	143
7.2.1	岩石爆破的弹性理论模型	144
7.2.2	岩石爆破的断裂理论模型	146
7.2.3	岩石爆破的损伤理论模型	149
7.3	岩体爆破损伤理论	152
7.3.1	岩体爆破损伤形成机理	152
7.3.2	岩体爆破损伤的描述方法	153
7.4	爆破累积损伤计算方法修正	154
7.4.1	岩体爆破累积损伤计算方法的修正	154
7.4.2	岩体爆破累积损伤修正算法计算示例	155
7.4.3	损伤修正算法与经典算法的工程应用对比分析	157
7.5	控制边坡岩体爆破损伤累积的技术措施	161
7.5.1	爆破能量控制	163
7.5.2	爆破能量传递过程控制	164
	参考文献	165
第 8 章	基于反应谱理论的边坡爆破振动响应研究	167
8.1	引言	167
8.2	反应谱理论	167
8.2.1	反应谱基本概念	168
8.2.2	反应谱曲线及其物理意义	169
8.2.3	反应谱的数值计算	170
8.3	爆破地震反应谱模态组合方法	173

8.3.1	SRSS 法	173
8.3.2	CQC 法	173
8.3.3	DSC 法	174
8.4	基于 CQC 模态组合法的边坡振动响应试验研究	174
8.4.1	实验方案	174
8.4.2	加速度信号获取	174
8.4.3	边坡地震反应谱特性分析	176
8.4.4	边坡模态分析	177
8.4.5	振型相关系数求解	177
8.4.6	边坡爆破地震反应总效应	178
8.5	工程实例应用	179
8.5.1	工程概况	179
8.5.2	加速度时程信号获取	179
8.5.3	模态求解	180
8.5.4	边坡振动响应分析	181
	参考文献	182

第1章 绪 论

1.1 引言

随着我国经济建设的繁荣与发展,各类建筑工程如雨后春笋般拔地而起,与此同时,许多岩土工程难题摆在我们面前,严峻而棘手。日渐增多的大型岩土工程,形成了越来越多的人工高边坡,同时边坡在逐渐变高变陡,爆破地震效应对高陡边坡稳定的影响问题日益突出,人工维护边坡稳定的难度与费用越来越大^[1-3]。边坡稳定是露天安全生产的前提,是岩土工程持续发展的基础,露天边坡稳定是露天施工中最关心的安全问题,施工过程中,边坡一旦失稳发生滑坡,将产生不可估量的后果,轻则危及生产设备安全,使企业蒙受经济损失,致使生产瘫痪、停产^[4],重则造成工作人员伤亡,乃至造成不可预知的经济损失。因此,加强对露天高陡边坡的变形破坏机理及稳定性研究,分析爆破地震作用下岩体损伤机理,探寻岩体动力失稳破坏机制,寻求爆破地震危害控制的有效途径,对我国经济建设以及持续发展具有重要的理论和现实意义,对岩石动力学理论与爆破安全控制技术具有推动与完善作用,已成为爆破工程界与岩石力学界亟待解决的重要研究课题之一。

近年来,岩土工程中作为主要开挖手段的爆破技术正逐渐向着精细化、数字化和科学化的方向发展^[5,6],高精度数码电子雷管的出现进一步推进了爆破技术的发展。由于其能保证设计延期时间与实际延期时间高度一致,所以已被广泛应用于爆破工程实践中^[7-11],并取得了较理想的降震与岩石破碎效果。加强高精度数码电子雷管在岩土工程爆破开挖中的相关应用研究,充分利用其优势实现爆破最优,具有重大工程实际意义。

1.2 精确延时控制爆破研究现状及进展

通常大规模的露天深孔台阶爆破中,毫秒延时爆破技术运用非常广泛,主要包括大区毫秒延期爆破技术、等间隔毫秒延期爆破技术以及孔内与孔外毫秒延期爆破技术等。传统的毫秒延期雷管主要是依靠内部化学延期药的稳定燃烧来实现延时功能,因此延时准确性较低且不稳定,往往不能满足精细爆破技术要求。随着高

精度数码电子雷管的出现,凭借其优良的延期精度和稳定性,使得工程爆破人员有效地控制炸药爆炸能量释放、作用过程及效应成为可能。利用数码电子雷管的精确延期功能对爆破振动效应及危害实现有效控制的爆破技术称为精确延时控制爆破技术,该技术的关键在于基于合理的单孔药量及装药结构条件,确定合理的孔间延期时间,并通过数码电子雷管实现延期药包的精确延时。

数码电子雷管是 20 世纪 80 年代初出现的一种新的精确毫秒延期雷管,通常简称电子雷管或数码雷管。20 世纪 80 年代,发达国家开始了数码电子雷管的研发与试验工作,到 90 年代对数码电子雷管及起爆系统的研究有了飞速发展,产品的现场应用日趋成熟,能够满足工程爆破的使用要求^[12-14]。

数码电子雷管与普通毫秒延期雷管的最大区别在于:普通雷管的毫秒延时功能是通过延期药来实现的,而数码电子雷管则采用微型电子芯片来控制毫秒延时,雷管的延时精度达到了毫秒级,从而实现了真正意义上的毫秒延时起爆,同时毫秒延时可以通过电子芯片由现场工程技术人员任意设置,并能通过控制通往引火头的电源,减少引火头的误触发,从而大大提高了雷管的安全性。

数码电子雷管发展至今经历了两个阶段:第一阶段,数码电子雷管内部没有储能电容,依靠外部能量点火起爆;第二阶段,数码电子雷管内部自带储能电容,由储能电容起爆。目前,现有数码电子雷管品种众多,根据其功能差异可分为三种类型:一是毫秒延期时间可任意编程的数码电子雷管,这类雷管的毫秒延时可以根据需要在爆破现场临时设定;二是毫秒延期时间不能编程的数码电子雷管,这类雷管的毫秒延时在出厂时已经设定为固定时间,不能根据现场情况进行调整;三是非电不可编程的数码电子雷管,这类雷管采用导爆管或其他传爆材料直接触发延时芯片,实现精确延时起爆^[15-17]。与普通毫秒延期药雷管相比,数码电子雷管具有延时精确可靠、使用安全等特点。

1.2.1 国外数码电子雷管的发展现状

在 20 世纪 80 年代初,日本公司就在瞬发电子雷管的基础上成功地加装电子延期电路,使雷管的延时可以在 1~8000 ms 范围内以 1 ms 为间隔任意设定,同时雷管毫秒延时误差不超过 0.2 ms,这种雷管的最大直径为 17 mm,长度为 110 mm,是现代数码电子雷管的雏形。1993 年,Dynamit Nobel 公司和 AEL 公司也研制出了自有知识产权的第一代数码电子雷管,分别为 Dynatronic 和 ExEx1000。20 世纪 90 年代,数码电子雷管及其起爆系统进入快速发展阶段,Dynamit Nobel 公司和 AEL 公司在 1996 年、1998 年分别研制出了第二代数码电子雷管。1998 年,Dynamit Nobel 公司为抢占数码电子雷管市场,成立了 Davey Bickford 公司,开展了 Daveytronic 数码电子雷管及其起爆系统的研发和生产工作。随后,Dynamit Nobel 公司又与 Orca 公司合资成立了精确爆破公司,负责研制 PBS 型数码电子

雷管及其起爆系统;1999年,该公司又研发了I-kon系列数码电子雷管及其起爆系统(electronic blasting system,EBS)。2001年,Orica公司开始在全世界推广I-kon系列数码电子雷管。此外,南非的Sosal公司和AECI公司也分别研发了自有知识产权的数码电子雷管^[18-20]。

1.2.2 国内数码电子雷管的发展现状

国内数码电子雷管研究虽然起步较早,但是发展比较慢。1985年,冶金部安全环保研究院与多家单位联合,开始了数码电子雷管的研发工作,于1988年成功研制出了我国第一代数码电子雷管,从而填补了我国在数码电子雷管研制领域的空白。随后数码电子雷管的研制工作归于沉寂,直到1996年,云南燃料一厂又重新进行数码电子雷管的研发工作,2001年12月,该厂实现了数码电子雷管的设计定型和技术鉴定。其后,贵州久联民爆集团也开展了数码电子雷管的研发工作,历时两年多的时间,研发出了自主知识产权的数码电子雷管,并于2006年5月26日通过了原国防科工委的技术鉴定。2006年1月,赣州9394厂与南京理工大学合作共同研制了数码电子雷管及其起爆系统,经过两年多的方案设计和性能试验,其成品各项性能指标均达到了国家规定的标准,并通过了技术鉴定,开始小批量的生产。2007年1月,中国兵器工业系统下属部门研发的“隆芯1号”数码电子雷管通过了国防基础科研项目验收,验收专家组认为“隆芯1号”数码电子雷管的主要技术指标处于国际先进水平。2009年7月,山西壶化集团经工信部许可,从国外引进了数码电子雷管的生产工艺和设备,完成了国内第一条数码电子雷管装配线的建设工作,该数码电子雷管装配线的建成填补了我国在数码电子雷管生产应用上的空白。目前,以贵州久联民爆集团和北方邦杰为首的公司都拥有了自主知识产权的数码电子雷管,并进行了工业化生产,推动了我国爆破行业的发展,但与国外发达国家仍存在一定差距,进行大规模的工程应用及推广工作还需要更多的时间和人力、物力投入^[20,21]。

1.2.3 数码电子雷管的现场应用

目前数码电子雷管主要应用于围堰拆除、隧道控制爆破等工程,在中深孔台阶爆破工程中也有少量应用。2006年6月6日,三峡大坝三期碾压混凝土围堰爆破拆除工程采用I-konTM型数码电子雷管实施了精确延时起爆,起爆时,左右两岸炸碎部分临空炮孔首先起爆,随着两岸各堰块分别按从左至右和从右至左的顺序依次起爆并倾倒,爆破后,被拆除的围堰均淹没在水中,爆破效果与设计意图完全相符^[22]。重庆市新建渝利铁路长洪岭隧道在穿越江池镇区段时,爆区周围环境极其复杂,为有效控制爆破振动,减少对保留岩体和周围建构筑物的影响,施工方决定采用数码电子雷管进行精确毫秒延时起爆,通过数码电子雷管和普通毫秒雷管的对比试验得出:采用数码电子雷管进行精确延时爆破,可使爆破振动降低50%~

60%,炮孔利用率提高到98%^[23]。贵广高速铁路棋盘山隧道在爆破开挖时,采用隆芯1号数码电子雷管进行精确延时爆破施工,提高了隧道掘进的光面爆破效果,降低了炸药单耗,同时实现了减振降噪的工程目的^[24]。在露天矿采用数码电子雷管进行抛掷爆破的工程应用表明:采用数码电子雷管进行精确延时抛掷爆破,能够有效提高爆堆的松散度和爆后岩块的抛掷率,改善爆破块度及边坡的平整度,从而降低爆破的综合成本^[25]。

目前,数码电子雷管在深孔台阶爆破工程中的应用尚处于试验阶段,其研究也主要集中在利用数码电子雷管的精确延时功能有效控制爆破振动的危害上。赵根^[26]利用数码电子雷管的精确延时功能进行了精确毫秒延时爆破的现场试验,并对爆破地震波进行了监测。通过测试波形的对比分析发现:每段爆破产生的地震波一般经历3个周期,即主振周期、第一次振周期和第二次振周期,主振周期的时间一般为5.8~8.8 ms,均值为7.6 ms;第一次振周期的时间一般为5.0~10.6 ms,均值为6.9 ms;第二次振周期的时间一般为2.8~7.8 ms,均值为5.4 ms。经过分析认为,基于振动幅值不叠加的原理,相邻段的延期时间应至少保证地震波的主振幅值不发生叠加,即相邻段的间隔时间应满足地震波主振峰值不与第一次振或第二次振的峰值发生叠加。因此,建议相邻段间毫秒延期间隔时间应大于主振周期的平均值8 ms。高文学等^[27]通过对复杂环境深孔条件下采用数码电子雷管起爆技术的爆破振动的监测分析表明:采用数码电子雷管可有效控制爆破振动的危害效应,改善爆破破碎效果;同时采用预裂爆破能更好地控制爆破振动的强度。此外,通过优化毫秒延期间隔时间,可将低频地震波转换为均匀分布的高频地震波,从而实现爆破振动危害的有效控制。

1.3 边坡爆破地震效应预测及控制研究现状

爆破振动作用下的爆破地震效应预测与控制、岩体损伤及其稳定性问题一直是岩土工程界的重要研究课题,我国早在“七五”期间就将其列为国家科技攻关重点科研项目。对此,国内外学者也开展了大量的研究工作,且已取得了丰硕的研究成果,主要体现在以下几方面。

(1) 在改善炸药爆炸后的能量分布问题上,人们通过改变爆破方式、装药结构及孔网参数,降低或削弱了炸药爆炸产生的地震波能量,在一定程度上达到了降低爆破地震危害、改善爆破效果、维护边坡保留岩体稳定的目的^[28-47]。

王先等^[28]将被保护建筑物人为设计在对地震波衰减能力较强的岩种之外,在爆源与建筑物之间形成“防波墙”。许名标等^[29]、Hustrulid^[30]结合工程实践主张从控制能量源(炸药品种、炸药量、装药结构、药包布置方向)出发考虑减震,效果明显。Park等^[31]提出在爆破区域与保留岩体间按一定排列方式钻取空孔,达到降

低爆破振动强度的目的,并最终通过离散元法及非线性数值法对防波孔的减振效率进行了验证。Paley 等^[32]结合精确延时控制爆破技术,在美国 Red Dog Mine 中使用精确延时电子雷管将延期时间由 25 ms 缩短到 17 ms,岩石大块率降低约 30%,极大地改善了破碎效果、降低了爆破振动危害。Achenbach^[33]、Lewis^[34]、McKinstry^[35]、Siskind^[36]、Khandelwal^[37]等先后通过试验论证了精确延时控制爆破技术在降震和改善岩石破碎效果上的优势。傅洪贤等^[38]结合隧道开挖爆破实践,借助声波测试技术,研究得到采用导爆管雷管所形成爆破损伤区域比使用电子雷管时大,声波速度降低率高,电子雷管起爆网络对维护保留岩体稳定有显著优势。韩国仁荷大学土木工程学院^[39]提出隧道爆破开挖前,在隧道底板以上预切半弧形自由面,沿隧道掘进方向的长度越长,隧道爆破对掌子面处爆破振动危害越小,爆破损伤区范围小,且半弧形自由面能使得应力汇集于爆破区,从而进一步提高爆破效果,减小超深,降低生产成本。季峰等^[40]对隧道钻爆法及全断面隧道掘进法(TBM)情况下围岩力学反应机制进行了深入研究,发现全断面隧道掘进时,隧道开挖岩块具有更强的抵抗破坏能力,且隧道围岩松弛深度更小。付天光和孙莹^[41]对电动推装载情况下的岩石爆破效果进行了统计研究,指出逐孔爆破技术可有效改善岩石爆破效果。Rathore 等^[42]提出通过将药卷制成凹形锯齿长条状态,可实现较好的岩体爆破效果,并降低了对保留岩体的振动损伤危害。Jhanwar 等^[43,44]通过试验研究及数值计算得到空气间隔装药结构能使得炸药能量轴向分布均匀,延长应力时间,降低冲击波压力峰值,有效改善爆破块度,降低爆破地震强度。Johansson 等^[45]在小尺度模型试验下,基于孔间爆炸冲击波相互作用对改善岩体破碎效果的延迟时间进行了研究,发现孔间以 $0 \sim 1.1W$ (W 为抵抗线大小,单位为 ms) 逐孔起爆时,岩体爆破效果较 $2W$ 及以上延期时好,大块率降低 20% 左右。中国矿业大学崔振东教授^[46]结合重庆铁山坪隧道开挖实践,提出水和炮泥组合堵塞的爆破方法,此法能提高岩石破碎效果,减少炸药用量,且对围岩稳定性有积极作用。黄炳祥等^[47]通过水压爆破试验研究得出,水压爆破方法综合炸药爆炸破碎岩石及水压导致岩石破裂两方面因素,能达到更优良的破碎效果。

(2)在研究爆破地震波传播规律的基础上,通过测试发现影响其传播规律的因素,提出了相应的安全判据,采取预裂爆破、缓冲爆破以及在特定工程环境下通过开挖减震沟等办法,以耗散地震波在传播过程中的能量,最终达到降低爆破地震效应的目的^[48-66]。

许名标等^[48]基于预裂爆破地震波传播衰减规律,采用 ANSYS/LS-DYNA 对爆破参数进行了优化,提出增加炮孔超深值及钻孔精度,从而达到降震的目的。许文耀等^[49]基于压缩应力波和准静态气体压力共同作用理论,在司家营铁矿主张采用不同的线装药密度 q 、孔距 a 和最小抵抗线 w 与炮孔直径 ϕ 相对应,最终取得了较好的预裂效果,预裂缝两侧降震率达到 44.8%。丁凯等^[50]通过爆破振动信号小

波包能量谱分析,研究得到减震沟可大幅衰减地震波能量,但沟后一定距离存在能量放大现象,且对信号能量分布具有换频作用,减震沟距离边坡保留岩体不宜过近。Ak 等^[51]结合土耳其 MAS 露天矿台阶爆破实际,通过对监测数据进行统计学分析,可准确预报特定爆破参数下不同地点爆破振动强度,最终根据建(构)筑物振动破坏标准,适当调整爆破参数,在不影响爆破规模的基础上降低爆破地震效应。张袁娟^[53]、张伟^[54]、何国敏^[55]等均通过爆破振动监测分析或数值模拟等研究得出缓冲爆破可大幅降低爆破地振动强度。曹寄梅等^[56]通过深孔爆破时在孔底填充缓冲吸能材料降低爆炸源输出能量,实现爆破降震。李恒勇^[57]通过在地震波传播路径上设置缓冲垫层有效地降低水塔倾倒触地振动强度。Nateghi 等^[58]在 Gotvand 大坝并筒掘进过程中,通过在大坝周边构筑物附近设置缓冲沟槽,控制爆破诱发的振动。张丹等^[59]指出改变药包群包络面倾角能有效改善边坡开挖爆破地震效应,降低边坡质点振动强度。宗琦等^[60]提出同时减小最大段药量和开挖减震沟减小爆破地震效应。张艺峰等^[61]基于灰色关联理论,研究得到爆破参数中爆破地震效应影响因素的主次关系,优化钻孔超深、孔网参数是降低爆破地震效应最有效的方法。宗琦等^[62]基于爆炸应力波的界面反射与折射理论,建立了爆炸能量反射率与折射率的计算公式以及岩石与炸药的最佳阻抗匹配关系,探讨了不同装药结构对爆炸能量传递的影响,进而确定了改善爆破地震效应的装药结构方式。林士炎等^[63]结合京秦高速公路路堑边坡爆破开挖实例,采用数值模拟方法对爆破地震波在边坡介质中的应力场、速度场、位移场等分布规律进行了研究,得到边坡在爆破地震作用下易发生破坏的薄弱部位,主张在爆破开挖前,应对薄弱部位进行主动防护。Anderson 等^[64]通过对大量爆破工程实践资料统计研究,最终将微差延期时间与爆破振动主频间关系通过灰度图表示出来,得到合理延期时间,可有效降低爆破振动对构筑物的破坏程度。史秀志等^[65]结合现场试验,通过降低单段最大段药量并将微差爆破延期时间设置为 15 ms,降低爆破振动强度达到 24.5%。李宏男等^[66]也提出采取微差爆破,且减小单段最大药量,设置最优延期间隔时间来降低爆破地震效应,改善爆破质量。

(3) 在爆破振动危害及效应预测方面,大量学者针对传统经验公式、模型或方法的不足,基于理论分析,结合试验及数值模拟等方式,根据装药类型、地震波传播路径、爆破方式等差异又总结推导出一些能正确指导施工的爆破振动危害及效应预测模型及方法^[67-87]。

卢文波等^[67]基于柱面波、长柱状装药中子波理论及短柱状药包激发的应力波场 Heelan 解,推导出反映炸药种类、孔径、炸药特性、装药结构及岩性参数等综合影响的质点峰值振速预测公式,并通过室内外试验及数值模拟验证了其有效性。唐海等^[68]采用量纲分析方法推导出能较准确反映高程放大效应的速度预测公式,其平均预测误差仅为 10%~14%。Sambuelli^[69]基于弹性波理论,推导了质点峰

值振速预测公式 $V = KR^{-3}(2Q\Phi_r f / \rho c R)^{1/2}$, 并初步验证了其可行性。孟建^[70]结合溪洛渡水电站左岸开挖爆破振动监测, 对萨道夫斯基公式进行修正, 得到考虑高程因子的衰减公式, 线性相关性显著。张袁娟^[71]、张文煊^[72]、何理^[73]也从不同角度验证了高程放大效应的存在并对峰值速度预测公式进行了探讨。梁清国等^[74]针对迄今几种应用最为广泛的爆破振动峰值速度预测公式进行了对比分析研究, 得到不同地质条件适用于不同形式公式, 当比例距离小于 0.1 时, 适用于美国矿务局给出的预测公式 $V = K_1(Q^{1/2}/R)^\alpha$, 其他情况下则适用于萨道夫斯基公式 $V = K_2(Q^{1/3}/R)^\beta$, 最后建议采用合速度作为爆破振动安全判据标准。胡建华等^[75]运用最小二乘法理论建立了爆破振动衰减规律多元线性数学模型, 提出的多元线性回归公式可靠度高, 公式中的参量能有效反映锌铜矿岩体特性。杨年华等^[76]将单孔爆破振动波形作为基波, 通过将基波按一定比例系数折算不同药量爆炸时、不同爆心距处的单段振波, 最后采用地震波线性叠加原理将折算得到的各单段振波按不同延期时间进行叠加合成, 从而预测微差爆破中特定点峰值振动强度, 预测模型可用于优选微差爆破延期时间。Yan 等^[77]提出通过贝叶斯方法对振动峰值进行预测, 该方法基于少量的振动数据集即可得到特定点的速度拟合系数, 且计算方法简便。Khandelwal 等^[78]基于量纲分析理论给出了峰值速度预测公式, 并通过 105 条实测爆破振动数据对公式中的位置系数进行求解。Mesec 等^[79]等基于爆破地震监测及工程地质观测, 建立了爆破振动强度与地质强度指标间的经验关系, 用以振动强度预测。Mohsen^[80]、Duan^[81]等建立了爆破振动峰值速度 BP 神经网络预测模型, 相较于传统的萨氏公式, 预测精度显著提高。Görgülü^[82]、Amnieh^[83, 84]、Álvarez-Vigil 等^[85]先后利用人工神经网络(ANN)模型预测爆破振动速度峰值, 均取得了良好效果, 相关性均达到了 0.95 以上。其中 Görgülü 通过 ANN 模型预测爆破振动强度时发现场地系数 K 随着岩体等级的降低逐渐减小。Mohamadnejad 等^[86]结合伊朗 Masjed-Soleiman 水坝爆破振动监测, 通过比较分析振动速度经典预测公式、神经网络(GRNN)预测模型以及支持向量机(SVM)预测方法, 得到质点峰值振动速度 SVM 预测模型具有较高线性相关性, 预测精度与速度都高于经典公式和 GRNN 法。Hajihassani 等^[87]基于粒子群算法, 采用人工神经网络预测模型对爆破引发的空气冲击波超压进行了准确有效的预测, 训练相关系数达到 0.94, 并预期将此法应用于爆破振动速度预测。除此之外, Monjezi^[88, 93]、Esmaili^[89]、Faramarzi^[90]、Sari^[91]、Kulatilake^[92]等先后借助神经网络模型、岩石工程系统方法抑或蒙特卡罗模拟等建立了岩体爆破超挖值、岩体破碎平均粒度及爆破飞石距离和风险的预测模型, 均得到良好的工程应用效果。

(4) 在爆破地震效应研究方面, 测试技术、信号分析、危害机制以及安全判据等研究均取得了长足的进展^[60, 94-106]。例如, 对振动波形的分析最初只注重振动强度, 随着分析手段的丰富与加强, 逐步开始了针对主振频率以及振动持续时间的研

究,并将主频与振动持续时间逐渐纳入安全判据中;测试系统也实现了远程遥控和数据实时传输,大大提高了振动监测工作效率,改善了监测环境。

宗琦等^[60]基于工程实践,研究得到小药量工程爆破情况下振动频率集中在30~100 Hz,均远大于结构物自振频率,大药量情况下爆破振动主频与结构物自振频率较为接近,危害更大,并将振动频率纳入爆破振动危害评价标准中来。史秀志等^[95]首次采用重排平滑伪 Wigner-Ville 分布揭示了不同条件下爆破振动信号时频特征,主张综合考虑爆破振动信号峰值振速、振动主频、持续时间以及被保护结构物动力特性对爆破地震危害进行预测。马瑞恒^[96]、林大超^[97]等先后结合小波变换(WT)或小波包变换(WPT)分析技术全面、细致地研究爆破振动信号细节特征,由工程爆破人员进行爆破设计,实现最佳的爆破效果及降低爆破振动效应。宋光明等^[98]等借助 WPT 分析对短时、非平稳随机爆破振动信号研究得到,随着段药量的增加,高频能量所占比例逐渐降低,卓越频带向低频过渡,爆破振动不仅仅取决于最大段药量。王振宇等^[99]基于希尔伯特-黄变换(HHT)成功提取微差爆破振动信号固有模态函数(IMFS),得到信号瞬时能量的传播衰减规律,并指出 HHT 在识别信号峰值能量点时结合 WT 技术可提高结果分辨率。凌同华等^[100]通过综合考虑振动幅值、频率和持续时间对结构物的影响,创造性地提出了将振动信号时-能密度曲线积分值(integral of the time-energy density, TEDI)作为评估爆破振动效应强弱的定量指标。刘敦文等^[101]利用小波包分解得到信号各频带能量分布,将信号主频所在频域能量与结构物自振频率所在频域能量之和与信号总能量的比值作为爆破危害评定参数 α ,工程实例研究表明,随着 α 的增大,建筑物受损程度加剧。闫国斌等^[102]基于爆破振动监测,分析研究得出振动速度反应谱积分值 S_R 能反映爆破振动综合效益及对结构物振动影响的动态特性,提出将 S_R 值作为爆破振动安全评价标准。凌同华等^[103]借助小波包分析对短时、非平稳随机爆破振动信号研究得到,随着段药量的增加,高频能量所占比例逐渐降低,卓越频带向低频过渡,爆破振动不仅仅取决于最大段药量。中国生等^[104]结合 WPT 技术研究得到受控对象在爆破振动作用下的频带响应系数,建立了响应能量评判准则,该评判准则不仅包含爆破振动信号强度、频率、持时三个因素,还反映了受控对象自身固有特性(固有频率和阻尼系数),并用实例验证了其可行性。印度孟加拉工程和科学大学 Mohan 等^[105]针对爆破技术日益精细化、科学化,开采环境日益复杂化,在露天矿山开采监测区域内给出了 PPV 云图及空气超压值,从而能够对爆破区域周围任意点进行监测,大大提高了工程的安全性与可靠性。近年来,随着互联网的普及与发展,新兴的爆破振动测试技术应运而生^[106],由中科测控最新研制开发的 TC-4850N 无限网络测振系统实现了远程遥控和测试数据的实时传输,大大改善了振动监测工作条件,使得振动监测更加高效、公正、客观。

(5) 在爆破损伤理论及模型研究方面,种种岩石爆破损伤理论模型被依次提