

露天台阶爆破 地震效应

吕淑然 / 著

OPENCAST MINES BENCH
BLASTING SEISMIC
EFFECT

TD235
L-759

露天台阶爆破 地震效应

吕淑然 / 著

OPENCAST MINES BENCH
BLASTING SEISMIC
EFFECT

图书在版编目(CIP)数据

露天台阶爆破地震效应/吕淑然著. —北京:首都经济贸易大学出版社, 2006. 12

ISBN 7 - 5638 - 1396 - 9

I. 露… II. 吕… III. 表面爆破 - 爆破效应 IV. TD235. 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 146100 号

露天台阶爆破地震效应

吕淑然 著

出版发行 首都经济贸易大学出版社

地 址 北京市朝阳区红庙(邮编 100026)

电 话 (010)65976483 65065761 65071505(传真)

网 址 <http://www.sjmcb.com>

E-mail publish@cueb.edu.cn

经 销 全国新华书店

照 排 首都经济贸易大学出版社激光照排服务部

印 刷 北京永生印刷有限责任公司

开 本 880 毫米×1230 毫米 1/32

字 数 224 千字

印 张 8.75

版 次 2006 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1~1 500

书 号 ISBN 7 - 5638 - 1396 - 9/TD · 2

定 价 26.00 元

图书印装若有质量问题,本社负责调换

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

本书介绍了国内外露天台阶爆破地震效应的最新研究进展、爆破地震波的理论及分析技术、不同装药结构爆炸冲击波的能量分布、露天台阶爆破地震波的特征研究、露天台阶爆破地震效应的主要影响因素研究、爆破地震波数值模拟、靠帮爆破新技术研究以及台阶爆破振动速度的预报问题,包括了作者近年从事矿山爆破振动控制研究的主要研究成果。

全书分9章。第1章介绍了国内外地震波研究最新进展;第2章介绍了露天台阶爆破振动对边坡稳定的影响分析;第3章介绍了爆破振动理论与爆破地震信号分析技术,重点介绍了小波分析技术;第4章介绍了炮孔不同装药结构爆炸作用及冲击波能量分布;第5章介绍了露天台阶爆破地震效应特征实验研究;第6章介绍了露天台阶爆破地震效应的主要影响因素研究;第7章介绍了不同装药结构爆破地震波数值模拟;第8章介绍了光面缓冲爆破新技术研究;第9章介绍了神经网络在地震速度预报中的应用。

本书可作为高等院校采矿工程、爆破工程专业研究生的教学参考书,也可供采矿工程、爆破工程、防护工程、铁路工程、水利水电工程、公路工程的高校教师、研究人员、研究生及工程技术人员参考。

前言

PREFACE

爆破施工广泛应用于各类边坡工程,爆破地震效应是其最常见的危害,爆破地震波是工程爆破领域内研究最为活跃的课题之一,不同地质体内地震波的传播规律和毁伤效应则是工程爆破设计的主要依据。爆破振动可能导致周围岩体产生破坏,以致影响工程围岩及边坡岩体的稳定,所以,爆破施工应采取必要的措施,尽可能减少爆破对围岩的损害,以使边坡岩体保持较好的稳定状态。爆破产生的边坡失稳灾害分为两类:一类是爆破振动引起的自然高边坡失稳;另一类是爆破开挖后残留的边坡遭受破坏,经日后风化作用不断引发的塌方失稳。

各种建筑物、构筑物、电子仪器和设备在爆炸地震载荷下的毁伤、失效程度不

仅取决于爆炸地震波的幅值，还取决于地震波的频率和作用时间。当爆炸地震波的频率与建筑物、电子仪器和设备的自振频率相近时，将造成较大的毁伤效应。建筑物或电子仪器的损伤总要经历一个发展过程，爆炸地震波的作用时间越长，它们的损伤就越快也越严重。因此，应根据预毁伤的目标，合理地确定产生爆炸地震波的爆源，这首先就涉及爆源特征与爆炸地震波特征（幅值、频率、作用时间）的关系问题。传递爆破地震波的岩土介质通常具有两个特点：地形的不规则性和介质内部的复杂性（介质分层、结构面等），致使地震波的传播具有明显的方向性和多变性。

地震波特征（幅值、频率、作用时间）、爆源特征（装药性质、装药状态与位置、起爆方式）、传播介质特征（地质、地形条件）、传播方向（爆炸地震波沿地层表面和地层深处）的相互关系，以及爆破地震波对目标（特别是电子仪器和设备）的毁伤效应，均是工程爆破地震效应控制中的重要课题，需要我们系统地进行研究。

近几年来，爆破地震波测试、分析方法及数值模拟技术都有了较大进展。计算机与测试系统配合，使人们可以迅速、准确地获取地震信号的参量特征；神经网络、小波分析等非线性分析方法被引入爆破地震效应预测，成为研究爆破地震灾害控制的重要手段；大型动力学数值计算软件的发展，使爆破地震的数值模拟成为可能。但这些方法和理论的应用尚有许多问题须深入研究，如计算参数的选

取、介质各向异性的设定、岩土深层振动信号的采集、计算空间域和时间域等，都需要高性能的计算设备。由于爆破振动问题的存在及其所具有的复杂性，使现有的一些预防和控制爆破地震的技术措施都带有一定的盲目性，爆破地震波的危害效应尚不能根据爆源、地形、地质条件进行准确的预测预报。

露天深孔爆破技术广泛应用于资源开发、铁路、公路路堑和大型水利水电枢纽工程基础的开挖。深孔爆破是露天矿山的主要生产手段。本书主要介绍作者近年来从事露天台阶爆破地震效应的研究成果，其中包括露天台阶爆破地震效应及其控制、炮孔不同装药结构的爆炸效应、装药在岩石介质内冲击波的能量分布、台阶爆破地震效应实验、爆破地震波形频谱特性分析、爆破地震波传播规律的数值模拟等。本书可供相关领域的科学工作者、工程技术人员参考，也可作为相关专业高校教师及学生的教学参考书。

我的导师杨军教授、张奇教授以及首都经济贸易大学安全工程系的领导对本书的写作完成给予了大力的支持和热情的帮助，在此表示衷心感谢。此外，在本书的写作过程中，参考了国内外同行公开发表的众多研究成果（详见各章后的参考文献），在此一并对相关作者表示感谢。

由于作者水平所限，加之时间仓促，因此书中的不妥之处，敬请读者批评指正。

吕淑然

2007年3月于北京

目 录

CONTENTS

1 绪论 / 1

1.1 引言 / 1

1.2 研究现状回顾 / 2

1.2.1 爆破地震效应研究 / 2

1.2.2 数值模拟方面 / 12

参考文献 / 15

2 露天台阶爆破振动对边坡稳定的影响分析 / 27

2.1 炸药爆炸传入岩石中的爆炸载荷 / 27

2.1.1 耦合装药时传入岩石中的爆炸载荷 / 28

2.1.2 不耦合装药时传入岩石中的爆炸载荷 / 32

2.2 应力波速度与岩石力学性质参数的关系 / 34

2.3 岩石中爆炸应力波的传播特征与衰减规律 / 36

2.3.1	冲击载荷作用下岩石变形规律与特征	/ 37
2.3.2	岩石中爆炸应力波的衰减	/ 39
2.4	岩石中炸药爆炸能量与地震效应的关系分析	/ 42
2.5	爆破地震波主频对边坡稳定的影响	/ 44
2.6	预裂阻隔降振理论分析	/ 51
	参考文献	/ 55
3	爆破振动理论与爆破地震信号分析技术	/ 59
3.1	爆破振动的理论	/ 59
3.1.1	爆破振动表征参量	/ 59
3.1.2	爆破振动波的特征	/ 61
3.1.3	爆破地震波振动速度的衰减	/ 62
3.2	爆破振动信号分析技术	/ 63
3.2.1	傅里叶变换	/ 63
3.2.2	小波变换	/ 66
3.2.3	小波变换时频能量密度分析原理	/ 71
3.2.4	多分辨分析与小波包分析	/ 73
3.2.5	小波基函数的选择	/ 77
3.3	Matlab 计算语言及编程	/ 79
	参考文献	/ 79
4	炮孔不同装药结构爆炸作用及冲击波能量分布	/ 83
4.1	不同装药结构炮孔壁压力的计算	/ 84

- 4.1.1 耦合装药结构炮孔壁的初始压力 / 84
- 4.1.2 炮孔轴向不耦合装药结构炮孔壁的
初始压力 / 85
- 4.2 不同装药结构炸药爆炸应力波破坏半径 / 90
 - 4.2.1 耦合装药结构爆炸应力波破坏半径 / 90
 - 4.2.2 轴向不耦合装药结构爆炸应力波破坏半径 / 95
 - 4.2.3 轴向空气间隔装药结构爆炸应力波
破坏半径 / 98
- 4.3 不同装药在岩石中爆炸的冲击波能量分布 / 99
 - 4.3.1 耦合装药在岩石中爆炸的冲击波能量分布 / 100
 - 4.3.2 轴向水间隔装药在岩石内爆炸的冲击波
能量分布 / 103
 - 4.3.3 轴向空气间隔不耦合装药在岩石内爆炸的冲击波
能量分布 / 108
- 4.4 不同装药结构爆炸效应及冲击波能量分布分析 / 109
- 参考文献 / 111

5 露天台阶爆破地震效应特征实验研究 / 113

- 5.1 实验条件和研究方法 / 115
- 5.2 监测仪器和监测系统 / 117
- 5.3 基于傅里叶变换的时频分析 / 118
 - 5.3.1 不同装药结构炮孔在相同监测距离上的垂直分量
时、频域比较 / 118

5.3.2	不同装药结构炮孔爆破地震波三分量时域内的比较 / 124
5.3.3	不同装药结构炮孔爆破地震波三分量频域内的比较 / 127
5.4	基于小波变换的时频特征分析 / 132
5.4.1	时频域小波分析 / 132
5.4.2	时频域小波包分析 / 137
5.5	间隔方式对地震效应的影响 / 143
5.5.1	轴向空气间隔方式对爆破地震效应的影响 / 143
5.5.2	地震波三分量在时、频域内的特征 / 147
5.5.3	分段装药与连续装药对爆破地震效应的影响 / 157
	参考文献 / 165

6 露天台阶爆破地震效应的主要影响因素研究 / 167

6.1	雷管精度对爆破地震效应的影响分析 / 167
6.1.1	普通雷管的精度对爆破地震效应的影响 / 168
6.1.2	不同段位雷管的爆破地震效应分析 / 174
6.2	预裂面对爆破地震效应的影响分析 / 177
6.2.1	基于傅里叶变换的时频特征分析 / 178
6.2.2	基于小波变换的时频特征分析 / 188
6.3	台阶高程对爆破地震效应的影响 / 192
	参考文献 / 197

7 不同装药结构爆破地震波数值模拟 / 199

7.1 引言 / 199

7.2 近区模拟分析 / 200

7.2.1 数值模型 / 200

7.2.2 材料模型与状态方程 / 201

7.2.3 计算结果与压力数据的提取 / 202

7.3 远区地震波模拟 / 210

7.3.1 数值模型及材料模型 / 210

7.3.2 加载曲线 / 210

7.3.3 计算结果与实验对比分析 / 213

参考文献 / 222

8 光面缓冲爆破新技术研究 / 223

8.1 光面缓冲靠帮爆破技术 / 225

8.1.1 光面缓冲靠帮爆破的原理 / 225

8.1.2 柱状装药爆破漏斗理论计算 / 226

8.2 黑山铁矿靠帮爆破现状分析 / 228

8.3 光面缓冲靠帮爆破布孔原则 / 231

8.4 光面缓冲爆破技术 / 233

8.4.1 不同围岩光面缓冲爆破推荐参数 / 233

8.4.2 靠帮施工原则 / 233

8.4.3 爆破效果分析 / 234

8.5 光面缓冲爆破地震效应分析 / 237

8.5.1 光面缓冲爆破地震波时域分析 / 237

8.5.2 光面缓冲爆破地震波频域分析 / 240

参考文献 / 242

9 神经网络在地震速度预报中的应用 / 245

9.1 BP 网路理论 / 245

9.1.1 BP 网路结构 / 246

9.1.2 BP 网路学习公式推导 / 247

9.2 爆破振动峰值速度的回归分析 / 254

9.3 爆破振动速度峰值的神经网络预测 / 255

9.3.1 神经网络模型的建立及学习算法 / 256

9.3.2 神经网络预测模型在工程中的应用 / 259

9.3.3 振动峰值的网路预测 / 263

参考文献 / 264

1 绪 论

Chapter 1

1.1 引 言

爆破是矿山生产的主要生产手段和生产工艺，具有规模大、次数频繁、振动持续时间长和伴随整个矿山开采的特点。尤其是随着开采深度的日益增加，当山坡露天逐渐转为深凹露天时，露天边帮也日益增高，爆破振动危害问题将更加突出。目前，爆破振动效应的预防与控制问题，已成为维持矿山正常生产、安全生产的重要技术难题。实践表明，进入深凹陷露天开采后的爆破地震效应与山坡露天开采的爆破地震效应不同，爆破振动对边坡稳定的不利

影响更加明显。大量研究和生产实践表明,爆破振动是影响边坡稳定的众多因素中最为重要的因素之一^[1]。因此,如何降低爆破振动效应及其对边坡稳定的影响,使边坡在服务期间保持稳定,已成为亟待解决的问题。只有充分了解和掌握了爆破地震效应的产生、发展及传播的规律,并在爆破生产中采取相应的技术措施,才有可能将爆破振动控制在允许的范围内,才能有效地保证其周围设施的安全、露天边帮的稳定和矿山生产的正常进行。

研究露天爆破地震效应和地震控制问题具有十分重要的意义,其不仅对矿业具有重要的现实意义,而且对水电、公路、铁路建设也具有重要的现实指导意义。仅就我国露天铁矿山而言,全国 18 座大、中型露天矿山,目前已有 16 座进入深凹陷露天开采^[2],而美国、加拿大、澳大利亚等国的露天铁矿山的凹陷深度则比较小。

1.2 研究现状回顾

1.2.1 爆破地震效应研究

20 世纪 40 年代以后,地震测试仪器开始用于爆炸地震波的现场测试,并获得了大量的测试结果,地震效应的研究开始步入定量分析阶段。天然地震的研究成果和核爆炸技术的发展,也为爆炸地震波的理论分析和实验研究注入

了新的活力。由于爆炸过程涉及复杂的物理和化学现象,因此长期以来研究者都未能获得爆炸中心附近冲击作用的细节。虽然以 Lamb 弹性半空间解为基础的理论方法及其发展,已经为地震波传播规律的分析 and 研究提供了可能的途径,但爆炸的真实冲击加载模型并没有取得突破,建立在弹性动力学方法基础上的理论分析也一直未能在爆炸地震波研究方面取得进展。但是,对爆炸近区和中区物理过程的研究还是获得了一定成果。在 Cook^[3] (1958), Leet^[4] (1960), Kisslinger^[4], Langefors^[5], Kihlstrom^[6] (1963) 等人的著作中对此均有具体论述。

20 世纪 70 年代前后一直到 20 世纪 80 年代,随着观测设备和实验技术的迅速发展,对炸药在岩土介质中爆炸产生的地震波频谱及效应的研究与早期相比有了较大进步。地震测试仪器的广泛应用,使研究者获得了大量的实测数据;理论分析和数据处理手段的迅速发展也为地震波传播规律的研究提供了良好的条件^[7-9]。进入 20 世纪 90 年代以后,各种新型测试仪器的出台、实验手段的提高^[10-12]以及各种处理方法的应用,进一步提升了爆破地震波效应的研究水平。但大多研究仅限于从工程安全性出发,去进行对地震波的传播、衰减规律以及爆破地震效应的预防和控制等具体问题的探讨^[13-18],而对地震效应仍缺乏系统性的研究。

1.2.1.1 信号分析技术

从众多爆破振动的实际监测结果看,爆破振动信号具

有持续时间短、突变快等特点,属于非平稳随机过程^[19-23]。信号分析技术(包括相应的分析仪器)的发展,主要依靠信号分析数学方法的进步以及对爆破振动信号认识的深化。

在对爆破地震波的分析方面,爆破振动信号传统的分析技术是建立在FFT(快速傅里叶变换)和STFT(短时傅里叶变换)技术基础之上的,但实际上FFT和STFT分析技术虽然对于平稳信号分析能获得较好的精度,但在分析像爆破振动这样的非平稳信号时却不很合适。傅里叶变换(Fourier Transform)是从时域到频域相互转化的有力工具,其实质是把时域信号波形 $f(t)$ 分解成许多不同频率的正弦波的叠加和,这样就把原始信号的研究转化为对其加权系数即FFT变化 $F(\omega)$ 的研究。 $F(\omega)$ 的标准基由正弦波及其高次谐波组成,在频域内是局部化的。虽然从FFT变换可以了解爆破振动信号的时域及频域特征,但不能将两者很好地结合起来。

传统的傅里叶变换已成为频谱特征提取的基本手段^[24]。但是,爆破振动本质上是一个短时、非平稳的随机过程^[25],与傅里叶变换建立的理论基础并不一致,因此新方法的应用将是不可避免的发展趋势。近年来,在数值信号分析中提出并得到广泛应用的小波变换理论^[26],在处理非平稳随机信号方面具有十分突出的特点。它不仅能给出信号的时域特征,而且还可以给出信号的频域特征。对于像爆破振