



爆破地震效应及安全

言志信 王后裕 著



科学出版社

内 容 简 介

本书在总结岩石爆破和爆破地震波理论及其发展基础上, 基于爆破地震观测, 结合工程实践和所做的研究工作, 重点论述爆破地震波的产生、传播、特性及爆破地震观测, 全面分析和研究爆破地震动强度预报, 探讨爆破地震作用及结构和环境的爆破地震效应, 论述爆破地震安全等问题。

全书共 7 章, 包括绪论、岩体爆破理论、爆破地震波、爆破地震观测、爆破地震动强度预报、爆破地震作用、爆破地震动安全标准。本书围绕爆破地震效应及安全, 着力探讨理论研究和工程实践发展的新观点、新方法、新进展、新理论、新成果。

本书可作为高等院校土木工程、地质工程、道路工程、水利水电工程、采矿工程、安全工程等专业的教材, 也可供从事土木、采矿、建材、煤炭、交通、地质、水利水电等行业的教师、科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

爆破地震效应及安全/言志信, 王后裕著. —北京: 科学出版社, 2011
ISBN 978-7-03-029554-5

I. ① 爆… II. ① 言… ② 王… III. ① 爆破-人工地震-地震效应-研究 IV. ① TB41 ② P315.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 225008 号

责任编辑: 刘凤娟 / 责任校对: 张怡君
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2011 年 1 月第一次印刷 印张: 9

印数 1—2 000 字数: 168 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着经济建设的高速发展,爆破技术在城市建设、公路、铁路、采矿、水利水电、地质等工程中获得广泛应用,并且应用领域还在不断拓展,渗透到国民经济建设的各个领域,成为不可或缺的重要施工手段之一.在工程爆破带来巨大经济效益的同时,爆破地震效应亦日显突出,居爆破公害之首,为人们关注.

爆破地震效应是炸药爆炸对爆源周围一定区域内岩土体介质、建筑结构及周围环境作用所引起的地震现象及结构响应.长期以来,国内外许多学者和工程技术人员结合爆破工程实例进行了爆破地震动的测试、理论研究和数值分析,取得了不少成果.但由于爆炸本身的高速性、危险性、复杂性和爆破地震波传播介质的多样性、不确定性,加之测试仪器本身反应特性等影响因素多,且极其复杂,时至今日,还有太多的东西等待学者和工程技术人员进行研究探索,以致该领域一直是岩土界研究的热点之一.

作者基于爆破地震观测,较系统地探讨了爆破地震波的产生、传播规律及其特性;分析了爆破对周围岩土体的作用、爆破地震激发介质质点振动以及建筑结构和环境的地震效应;分析了爆破地震动强度预报方法,重点进行了爆破地震动强度的人工神经网络预报研究;分析和论述了爆破安全规程中爆破地震安全标准及存在的问题,提出了改进方法,最后阐述了降低爆破地震效应的方法.

作者立足学科前沿,在前人研究成果基础上,结合工程实践和所做的研究工作,重点探索和分析了爆破地震效应及安全研究的新观点、新方法、新理论、新进展,介绍了相关的新成果,以期与广大学者和工程技术人员进行交流,共同分享作者的一些看法和认识.恳请各位专家和学者不吝赐教,以促进这一研究更深入地开展.

本书的出版得到甘肃省科技计划资助(1011GKCA019)和兰州大学资助.在此,作者深表感谢!

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 爆破地震波研究	3
1.2.2 爆破地震动强度预报研究	4
1.2.3 爆破地震作用与效应研究	5
1.2.4 爆破地震安全标准研究	6
1.3 主要研究内容	8
第 2 章 岩体爆破理论	10
2.1 爆破对岩体的破碎	10
2.1.1 岩体爆破破碎原因	10
2.1.2 岩体爆破破碎形式	11
2.1.3 成组药包爆破时破碎的特征	16
2.2 岩体爆破破碎的理论	16
2.2.1 岩体爆破破碎的弹性理论	16
2.2.2 岩体爆破破碎的断裂理论	18
2.2.3 岩体爆破破碎的损伤理论	20
第 3 章 爆破地震波	26
3.1 爆破地震波和波动方程	26
3.1.1 地震波	26
3.1.2 波动方程	27
3.2 爆破地震波的类型及传播	32
3.2.1 体波	32
3.2.2 表面波	33
3.3 爆破地震波的特性	34
3.4 对爆破地震动的傅里叶谱分析	38
3.5 对爆破地震动分析的其他方法	44

第 4 章 爆破地震观测	46
4.1 测试物理量的选择	46
4.1.1 爆破地震波的三要素	46
4.1.2 爆破振动测试物理量的选择	47
4.2 爆破地震测试系统	48
4.3 爆破地震观测及分析	49
4.3.1 爆破地震观测方法	49
4.3.2 测点布置	49
4.3.3 爆破地震观测要求	50
4.3.4 地震波的传播规律	50
第 5 章 爆破地震动强度预报	56
5.1 爆破地震动强度预报的公式法	56
5.2 Fourmap 法	60
5.3 爆破地震动峰值人工神经网络预报研究	61
5.3.1 爆破地震动预报中的问题	61
5.3.2 人工神经网络	61
5.3.3 BP 学习算法	65
5.3.4 改进 BP 算法	69
5.3.5 神经网络模型预报爆破地震动峰值振速	70
5.4 爆破地震动强度预报方法	73
5.4.1 爆破地震动强度预报方法比较	73
5.4.2 爆破地震动强度预报	74
第 6 章 爆破地震作用	75
6.1 爆破地震效应	75
6.2 爆破地震动对结构作用的特征	76
6.3 爆破地震作用下的运动方程	78
6.4 爆破地震作用下的运动方程的能量形式	80
6.5 爆破地震动特性与结构物的动力特性对结构反应的影响	82
6.6 爆破地震作用下单自由度弹性体系的反应	84
6.6.1 单自由度体系的自由振动	84
6.6.2 单自由度体系的强迫振动	85
6.6.3 爆破地震作用下弹性单自由度体系反应分析	86
6.7 多自由度体系弹性爆破地震反应	86

6.8	爆破地震动对边坡稳定性的影响	88
6.8.1	爆破对边坡稳定性的影响	89
6.8.2	受爆破地震动作用后残留边坡的坍塌失稳	89
6.9	爆破地震动反应谱	91
6.10	反应谱和傅里叶谱之间的关系	95
第 7 章	爆破地震动安全标准	99
7.1	爆破地震动安全标准的探讨	100
7.1.1	存在的问题	100
7.1.2	爆破地震效应	101
7.1.3	各国爆破振动的安全标准对比	103
7.1.4	对爆破地震安全振速的思考	106
7.2	新的《爆破安全规程》(GB 6722—2003) 振动安全允许标准	108
7.3	有关新的爆破安全标准的讨论	109
7.4	爆破振动统一安全判据	111
7.5	爆破地震安全距离	115
7.6	爆破地震的影响因素及降震措施	120
7.6.1	分散装药	120
7.6.2	微差爆破	121
7.6.3	预裂爆破	123
7.6.4	土岩条件和地形的影响	124
7.6.5	爆破地震动的其他降震措施	124
参考文献		126

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

爆炸是一种剧烈的、极为迅速的能量释放过程,亦即能量在瞬间释放的一种现象.它必须具备两个条件:其一,单位体积能量密度很大;其二,能量释放或转化极快^[1].利用炸药爆炸产生的能量做功,以达到一定工程目的,即工程爆破.

我们的祖先早在约公元 600 年就发明了火药,掌握了火药的制造技术,以后一段时期,黑火药主要用于军事.直至 17 世纪,德国人马林 (Marlin)、韦格尔 (Weigel) 用其爆破岩石 (1613 年),从而开创了工程爆破的先河.19 世纪诺贝尔 (Nobel) 制成 Dynamite 炸药,有力地推动了工程爆破的发展,从而极大地提高了筑路和采矿及多行业的效率,有人谓之:没有炸药,就没有近代的物质文明.西方真正意义的工业革命是从应用工业炸药来修路和采矿开始的.

20 世纪以来,随着我国大规模经济建设地开展,工程爆破已广泛应用于地质工程、公路工程、铁路工程、矿山工程等的建设活动中,成为不可或缺的重要施工手段之一;并且,工程爆破的应用领域还在不断拓展,逐步深入到国民经济建设和人们生活的各个领域.与此同时,工程爆破的规模也在不断扩大,已达到一次爆破药量 12 万吨的规模.人们普遍承认,工程爆破是工程施工的一种特殊方法,是完成人力和机械力所不能胜任的工作的一种非同寻常的施工方法.

在工程爆破带来巨大经济效益的同时,爆破地震导致的振动效应等亦日益突出,居爆破公害之首^[2],为人们所关注.爆破地震效应是炸药在岩土中爆炸后,在一定范围内产生的地震现象和效果.爆破地震作用包括四个阶段:地震波的产生、地震波的传播、地震作用、爆破振动现象和效果.爆破振动和爆破震动这两个词在爆破地震研究中经常遇到,它们均指由爆破地震波传播所导致的地面运动,没有本质性区别;不过,前者描述的是单个质点的往复运动,而后者应是前者在集合意义上的描述,是爆破地震波在土岩中传播而引起大地的振动.爆破振动达到足够的强度时,会造成各种破坏现象,致使建筑物或构筑物变形、受损甚至破坏.

爆破地震波通过岩土体介质传播,随距离增大而缓慢衰减,因而具有远距离传播和作用的能力,对周围环境与设施存在着不利影响,因此,采用合理的技术设计,避免由此带来的损失,对国民经济建设具有十分重要的意义.控制由爆破地震波对

周围环境与设施带来的不利影响, 必须掌握爆破地震现象的基本规律, 诸如爆破地震波传播机理、爆破地震动对结构的破坏、损伤和作用机制、爆破地震波与天然地震波的共性和区别, 尤其是爆破地震动强度预报、结构爆破地震安全标准及观测等一直受到人们的普遍关注. 人们通过模型实验、现场观测、理论分析和数值计算等手段进行了广泛的研究, 取得了大量的研究成果, 但由于爆炸本身的危险性、复杂性、高速性、地震波传播介质的多样性和不确定性, 加之测试仪器本身反应特性等, 涉及因素很多且极其复杂, 因此, 时至今日, 还有很多东西有待研究, 由此而被学者所重视. 这一领域一直成为岩土界研究的热点之一.

1.2 研究现状

对爆破地震现象的了解源于矿山建设和采矿爆破. 据资料记载, 早在 1927 年, 美国的 E. H. Rockwell 率先就采石爆破地震及其对附近建筑结构的影响进行了研究. 两年后, Chabot 进一步讨论了爆破技术应用在密歇根州 Marquette Range 的铁矿开采中的爆破地震效应问题. 人们发现爆破振动可能引起施工场地周围建筑结构的破坏现象. 虽然当时已经出现了一些可以用于爆破振动测试的地震仪^[3], 但是根据现场调查获得规律仍是爆破地震研究的主要方法. 随着地震仪被应用于爆破振动测试^[4,5], 人们通过对不同场地条件下爆破振动情况的测试, 获得了一些重要的基础数据^[6]. Thoenen 和 Windes 在对测试数据系统总结的基础上^[7], 形成了著名的美国矿务局 442 号公报^[8]. 此外, 人们也研究爆破振动测试技术^[9], 并注意到装药条件对地震波的特征的影响^[10~12].

20 世纪中叶, 随着地下核试验的开展和核工程的修建以及工程爆破的广泛应用, 以 Thoenen、Windes、Crandell、Duvalland、Fogelson、Edwards、Northwood、Devine、Attwell、Langefors 和 M. A. 萨道夫斯基等为代表的美国、英国、加拿大、德国、瑞典和苏联等国家相继对包括爆破地震波的传播规律、影响爆破振动强度的因素、爆破振动的破坏准则等工程爆破的地震效应问题进行了分析研究.

20 世纪 50 年代开始, 在天然地震研究的基础上, 中国科学院地球物理研究所的谢毓寿等^[13]通过对不同地质条件下的岩石爆破试验, 获得了地面质点振动速度衰减的经验公式, 以及不同建筑物的破坏标准. 随后, 铁道科学研究院、长沙矿山研究院等科研院所, 结合国家科研攻关项目及大型岩土工程的爆破实践, 重点对爆破地震波的特征和破坏作用机理等进行了一系列理论和试验研究工作, 并在爆破地震对边坡稳定性的影响、不同装药条件下的爆破地震波的传播规律、爆破振动安全判据的建立以及城市控制爆破的地震效应等方面取得了一定进展^[14]. 例如, 参加

“七七工程”的科研人员就达 300 余人,他们进行了一系列大型爆破试验,运用先进的测试手段做了大量的现场测试,对爆破地震效应做了系统、深入的研究,取得了一大批研究成果.这些都为爆破地震效应的预测预报及控制技术研究工作的进一步开展奠定了坚实的基础.20 世纪 80 年代后,随着计算技术的发展,运用数值模拟等研究爆破地震的特性和结构响应成为一个重要的研究方向.总之,我国虽对爆破的研究起步较晚,但做了大量的测试和研究工作.

1.2.1 爆破地震波研究

Lamb 弹性半空间解^[15]为基础的理论方法及其发展为地震波传播规律分析提供了可能的途径.不过,虽对爆破近区获得了一些基本了解^[16,17],但是建立在弹性动力学方法基础上的理论分析一直未能成为爆破地震波研究的主要方向.

Henrych 不仅讨论了爆破及其作用的动力学理论原理^[18],还阐述了土中爆破动力学效应以及爆破振动等,较全面地论述了爆破地震现象中的一些基本问题.

随着数值计算方法的发展,地震波的频率成为重要的研究内容^[19],从而推动爆破地震波的频率特征的研究得到了较大发展.随机振动理论的发展也为爆破地震波的传播和结构响应分析提出了更为切合实际的理论工具^[20].Dowding 等针对爆破地震动对结构的作用和效应做了一系列研究^[21~23],这些工作克服了此前一直借用自然地震反应谱理论所引起的不足.此外,考虑频率特征的结构破坏判据也开始获得应用^[24,25].

爆破地震波是一种复杂的随机复合波,其特性常跟爆源条件、传播介质的物理性质、地形地貌等因素密切相关.爆破地震波特性包括振幅、频率和持续时间三个重要的因素(简称爆破振动三要素),对爆破地震波的特性进行研究,具有非常重要的意义,它不仅是地震波的传播规律、作用机理、爆破地震效应、安全评价和振动控制研究的基础,也是爆破地震动观测、预报、模拟和计算的重要内容.直到现在,对爆破地震波特性的研究,主要是通过爆破地震动的测试,并借助于信号分析和处理方法进行研究的.

早期国内外学者通过现场观测和分析获得爆破振动强度的经验公式,进而确定爆破装药量和爆破安全距离、预报爆破振动强度、进行爆破安全评价等.吴其苏、龚亚莉、于亚伦、李保珍、言志信等学者以地面峰值振动速度或峰值加速度等为参数,对爆破地震波的传播规律进行了研究^[26~30].这些研究成果,促进了对爆破地震波衰减和传播规律的认识,并对爆破设计、爆破振动控制和安全起到了较好的指导作用.同时,一些研究者和工程技术人员结合工程实践,运用经验公式摸索了一套爆破振动控制的方法和手段^[31~39].同时,学者们通过对爆破地震波的观测研究,

探讨了不同爆破装药条件和爆破场地条件下的爆破地震波传播规律,总结了爆破参数、地质地形条件等因素对爆破地震效应的影响。

借助于经典的傅里叶变换 (Fourier transform), 对爆破振动信号进行频谱分析, 许多学者开展了爆破地震频率特性方面的研究。在爆破振动测试基础上, 通过傅里叶变换和频谱分析, 研究爆破振动频谱随爆破地震波传播距离的变化规律以及传播路径、装药量、装药类型、起爆方式对爆破振动频谱的影响。此外, 还有人研究了岩体结构面对爆破地震频率特性的影响^[40]。

傅里叶变换只能获得信号的频谱特征, 而爆破振动是一种典型的非平稳随机信号, 其频率随时间的变化比较大, 出于了解爆破地震时频局部特征的需要, 小波(包)分析方法被引入爆破地震特性的研究中^[41], 并且随着计算机技术的迅速发展, 小波(包)分析方法成为爆破振动特征研究中的一个重要工具, 小波变换在爆破地震时频、能量等特性的研究中得到广泛的应用。通过将小波分析理论应用到爆破振动信号分析中, 研究爆破装药条件、传播介质、爆心与测点位置等对爆破振动信号时频特征的影响, 运用小波分析识别微差爆破中的实际延迟时间, 并对爆破地震效应及其灾害的主动控制进行研究。

爆破地震的能量综合反映了幅值、频率和持时等特性, 近年来, 人们通过小波分解研究爆破地震能量按照频率分布的特征也取得了一定成果。

1.2.2 爆破地震动强度预报研究

从理论研究爆破地震波的影响十分困难, 这不仅因为爆破地震动的影响因素复杂, 而且因为爆破介质复杂, 边界条件模拟困难。因此, 工程施工设计中多以理论分析指导下提出的各种经验公式进行计算确定。具体做法是: 通过实验和现场测试得出一定条件下的装药量、爆心距、装药结构、起爆方式、炸药种类等与质点振动速度(或加速度)的关系, 进而确定公式中的参数, 这些参数在同一场地地层岩性、岩体结构、地质构造、地形地貌等工程地质条件和其他爆破装药条件均不改变的情况下往往比较稳定^[13], 从而在除装药量和爆心距外的其他条件不改变时, 一般采用近似的方法作预报, 即可运用公式法预报爆破振动峰值, 该方法即保存全部变量, 将几个独立变量视为常数, 然后研究因变量与少数几个剩下的独立变量间的函数关系。因为影响地震动强度的主要因素是炸药量、爆心距, 因此, 通常近似地选择炸药量和爆心距作为主要变量。

此外, 虽然选择的主要变量是相同的, 但由于各自的观测数据是在特定的条件下采用不同的观测仪器得到的, 由这些数据得到的回归系数相差是相当悬殊的。因此, 由回归分析得到的公式在实际应用中是很困难的。

随着计算技术的发展,联系爆破效果与其影响的各变量之间复杂关系的更为有效的一种新方法(模拟人脑神经元和大脑之间信息传递的新的计算机编程技术——神经网络模拟方法^[42,43]),在许多领域已有应用。如地下油田的定位以及确定气田的蕴藏量等。

神经网络模拟在爆破上的应用虽刚起步,但存在着巨大的潜力。徐全军等对秦山地震动预报作了论证^[44],认为人工神经网络用于爆破地震动预报可行^[45,46]。言志信对地下工程开挖爆破地震动进行了预报研究,建立了人工神经网络模型,用C语言编写了BP人工神经网络计算程序,并对爆破开挖导致的地震动预报作了分析研究,进行了爆破地震动峰值振速预报,并将实测值与预报值进行了对比,进而进行了误差分析^[47,48]。

1.2.3 爆破地震作用与效应研究

为了研究和估计爆破振动效应,必须寻找评价振动效应的物理量。原则上,质点的位移、速度、加速度都是衡量振动效应的基本变量。

在20世纪50年代前后,已有一些研究者意识到,若要估计爆破地震对人或者结构物的扰动和破坏能力,必须首先明确哪些参数最有意义^[2,49],这些参数应既可以表征和度量爆破地震动的强度,同时又与结构的爆破地震效应关系密切,而且也便于应用。

Crandell用能量比的概念定义了破坏判据以及地震波的传播方程,并最先将测试结果与结构破坏联系起来^[50]。此后,Morris和Westwater建立了一个地震动振幅的统计回归公式^[51]。Langefors^[52]、Edwards和Northwood^[53]也注意到了爆破地震动对结构的作用和效应,分别建议了各种速度界限作为结构破坏的判据。Duvall和Fogelson进一步探讨和综合分析了上述研究工作成果^[54]。

经过反复研究和长期的工程实践,质点爆破振动的速度、加速度峰值被普遍作为表征爆破地震动强度、地震效应和安全评价的物理量,工程界人士更多地采用质点爆破振动峰值速度(peak particle velocity)作为爆破地震动强度、地震效应和安全允许振动速度的指标,并用于许多工程的设计、分析研究和安全评价中。与此同时,通过测试数据的统计分析和谱分析,获得爆破地震波的特性和爆破地震波的衰减及传播规律^[55~57]。

此外,关于如何界定爆破振动对结构的效应和安全,Nadolski^[58]认为,考察结构物附近的地面振动情况,而不是房屋内部某点的振动。

普遍认同的破坏判据是基于质点峰值振动速度,而没有考虑频率的影响和波的类型。Duvall等^[57,59]一些学者指出,可采用位于结构附近地面质点峰值振动速度

的三个正交分量中任意一个分量作为爆破判据^[57,59]。

除了对结构的爆破地震效应研究外,关于爆破地震波的人体效应也做了一些探索性的研究^[9,60]。

爆破作用对周围岩土体的冲击加载过程及其与周围岩介质的耦合作用,不但决定了岩体爆破破碎,还决定了爆破对岩体的扰动,从而在一定程度上决定了爆破地震波的特性^[61~63]。爆破地震引起的质点振动,可以分为具有冲击特性的强迫振动时段和自由阻尼振动时段。强迫振动时段的持续时间短,因而在测试信号分析时无法提取其频率特征,只能得到自由阻尼振动阶段的频率特征^[64],这是考虑频率特征安全判据建立所面临的困惑^[65,66]。以质点峰值振动速度界定安全与否,此即被扰动质点强迫振动时段的最大速度。因此,要控制爆破地震对结构的作用特征及效应,根本问题在于要控制爆破地震作用下强迫振动时段的时间历程,即强迫振动时段的能量对结构的输入和转化。为了实现对爆破地震动强度的有效控制,可以采用控制爆破装药量、进行微差爆破和预裂爆破等多种方法。

当地质条件一定时,爆破地震波主要取决于爆破的装药条件。也就是说,通过爆破装药条件的控制,可以改变爆破地震波特性,从而间接地控制爆破地震作用和效应。爆破条件所涉及主要因素包括炸药的品种和性质、装药量、装药结构、装药的集中度、起爆方式等。

1.2.4 爆破地震安全标准研究

早在 20 世纪 20~40 年代,美国和苏联就开展了爆破地震安全标准研究工作^[65~68],Rockwell(1922 年)和 Thoenen、Windes(1942 年)在观测研究的基础上,分别提出距离爆破点 200~300ft(1ft=3.048×10⁻¹m)的结构不会受到损坏和以质点加速度作为界定结构损坏标准,并提出大于 0.1g 结构受损坏,小于 0.1g 不受损坏;随后,Crandell(1949 年)提出依据能量比的量来界定结构的安全,当能量比 ε 低于 3 时是安全的, ε 大于 6 的区域称为危险区。

1950~1960 年,学者们进行了大量的研究^[69],相继提出了各种不同的标准。Devine 提出质点位移 0.03in(1in=2.54cm)作为爆破安全限值;Langefors、Kihlstorm 等提出以结构附近地面速度作为安全界定标准,小于 2.9in/s 结构未受损伤,大于此值开始损坏;而 Edwards、Northwood(1960 年)也提出以振速作为损坏标准,认为 2in/s 以下是安全的。

自 20 世纪 70 年代,H. Y. Fang 和 R. M. Koermer 在分析前人工作的基础上,对结构安全标准进行了研究。U. Langefors(1978 年)研究了毫秒延期雷管对爆破振动的影响。K. Medearis(1977 年)和 D. E. Siskind 研究后得到爆破振动频率与导致

结构损坏有关的结论; G. H. Klans(1988 年) 和 A. B. Richards(1994 年) 等对爆破振动叠加进行了研究 [67,70]。

随着爆破理论和技术的发展, 国内外的研究者发现, 除了振动强度对建(构)筑物破坏有影响外, 振动频率亦有影响, 采用单一强度参数作为爆破振动破坏的评定标准具有很大的局限性。因此, 一些国家制定爆破振动安全标准时, 普遍考虑了振动速度和频率两个因素的关联影响, 如美国、德国和瑞士等发达国家的爆破振动安全标准。

随着数值分析技术的发展, 对爆破地震波测试信号频率统计特征的分析得到发展, 地震波频谱特性成为一个重要的研究内容 [19]。学者们更清楚地认识到仅考察单参数的结构安全标准的缺陷和不足, 言志信等提出了一些改进办法和修改建议 [71]。与此同时, 随机振动理论的发展也为爆破地震波的研究和结构响应分析提供了更为切合实际的理论工具 [20]。爆炸的作用过程、传播地震波的介质以及结构的爆破地震响应等都具有强烈的随机性, 因此, 建立在随机过程理论基础上的统计分析才能真正反映问题的本质。Dowding 等对爆破地震动作用下的结构反应和效应做了一系列研究, 将爆破地震动峰值振动速度-频率相关联, 并区分结构(按结构类型)地震动力反应特性的结构安全标准得到应用和推广。

并且, 研究发现 [72] 爆破地震动对结构的作用与天然地震不同, 它的高频振动分量趋向于使结构的高阶模态率先启动, 高阶振型变得不可忽略。同时, 爆破地震动形成所谓的局部动力学效应, 它造成爆破地震波对电子仪器设备产生破坏而不至于引起建筑结构破坏。

我国在这一领域的研究起步较晚, 但做了许多工作, 取得了好的效果, 其中有代表性的主要有: 进行了深入细致的观测工作, 积累了大量的实测数据, 依此为依据制定了爆破安全规程 [73]; 吴德伦、言志信等在对各国爆破地震安全标准综合研究基础上, 提出安全标准应考虑频率的影响, 并提出了建议标准 [71,74,75]。

在国内, 对有关爆破振动的频率影响问题也做了大量的研究。吴德伦、唐春海等 [74,76] 根据建筑物的结构形式和构筑质量, 考虑对地面振动的敏感性程度, 将建(构)筑物分类, 并参照欧洲国家的做法, 将地震波的频带划分为若干个范围。焦永斌 [77] 则将振动强度和振动响应频率结合起来, 对萨道夫斯基公式进行修正, 提出以折合速度来作为爆破地震的安全评定标准。

在大量国内外研究成果和实践经验的基础上, 我国在 2003 年制定了新的《爆破安全规程》(GB 6722—2003) [78], 该规程对原有的爆破振动安全判据做了修改和调整, 对于地面建(构)筑物采用以峰值质点振动速度和主振频率作为联合判据, 并且要求在实际应用中, 应综合考虑建筑物的重要性、建筑质量、新旧程度、自振频

率及地基条件等因素。

随着对爆破地震能量这一能够综合反映爆破振动三要素参数的关注, 有关研究人员提出了一些以能量为基础的安全判据。黄文华等^[79]提出了“折合能量”的安全判据, 根据不同频带的地震波对结构的危害程度取加权系数, 将地震波信号在各个频带上的主震相的能量按加权系数合成, 提出了合成后的能量值作为爆破地震危害程度的判据, 对加权系数的取值参照美国矿业局 (USBM) 的爆破安全控制标准。徐国元、中国生等^[80,81]也利用小波变换能量分析方法得到了爆破地震信号在不同频带上的能量分布, 然后根据爆破地震信号不同频带能量的特征频率与受控建筑物自振频率之间的关系, 确定爆破地震对建筑物的影响, 提出将爆破地震危险度纳入爆破振动安全判据, 建立多参数安全判据, 以提高评估爆破振动安全的准确性和合理性。

凌同华^[82]通过对爆破振动信号时能密度的积分值与爆破振动三要素进行关联分析, 提出用时能密度的积分值作为评估爆破振动效应强弱的定量指标, 并用模糊神经网络对爆破振动实测数据时能密度的积分值预测。

张义平等^[83]基于建筑物受震能量破坏机理, 提出了基于最大瞬时输入能量等效速度的爆破振动统一安全判据。

1.3 主要研究内容

根据爆破作用的基本原理^[84~86], 炸药在有临空面的半无限介质中爆炸, 从药包中心向外分成粉碎区 (压缩区)、爆破漏斗区、破裂区 (裂隙区) 和振动区。工程爆破中, 应通过精心设计, 采用各种施工技术措施, 严格控制爆炸能的释放过程和介质的破碎过程, 达到预期的被爆介质爆破破碎效果^[87~97]。同时, 随着人们对安全和环保关注程度增加, 越来越严格的安全和环保法规的出台, 迫切要求爆破工程做到安全、科学、可控、准确、可预测, 并严格控制爆破地震。鉴于上述对工程爆破的要求, 爆破工程应运用先进的爆破技术手段、观测技术和计算技术, 将爆破地震动的危害控制在规定的限度之内, 以达到控制爆破不仅创造好的经济效益, 而且能有效控制爆破地震效应的目的。

根据上述要求, 作者将对地震波传播机理、爆破地震动对结构的破坏机制、爆破地震波与天然地震波的共性和区别、爆破地震动强度预报、结构爆破地震安全标准及观测等热点和重点问题进行深入研究。

考虑到爆破本身的复杂性、地震波传播介质的多样性和不确定性、加之测试仪器本身反应特性等, 因而研究难度大, 研究工作将通过现场观测、理论分析、编程

计算等手段相结合,开展综合研究,力图取得具有应用价值和创新性的成果.

主要研究内容为:

- (1) 结合傅里叶谱、反应谱等研究爆破地震波特性和特征.
- (2) 结合大量工程需要进行爆破地震观测研究,探讨和研究爆破地震衰减规律.
- (3) 探讨了爆破地震动峰值的预报方法.
- (4) 研究爆破地震动对周围环境的作用和结构对爆破地震的反应.
- (5) 在研究我国《爆破安全规程》和国外爆破地震安全标准的基础上,深入探讨安全标准的相关问题.

第2章 岩体爆破理论

爆破是应用最广泛、最频繁的一种破碎岩体的有效手段。研究炸药爆炸作用下岩体的破碎机理,是一项长期而重要的课题。几百年来,针对岩体的不均质性、各向异性、岩体结构面等工程地质条件和水文地质条件以及高温、高压、高速等爆炸特征,世界各国众多学者通过长期的生产实践和经验总结,并利用高速摄影等测试手段,借助模拟爆破试验和对爆破过程中的岩体内发生的各种现象(如应力、应变、破裂、飞散等)的观测,进行了探索并提出了各种理论和学说。

2.1 爆破对岩体的破碎

2.1.1 岩体爆破破碎原因

可以归纳为三大类基本观点^[85]。

1) 爆炸气体产物膨胀压力破坏理论

该理论的代表人物:村田勉等。该理论认为,岩体主要是由于装药空间内爆炸气体产物的压力作用而破坏的。炸药包爆炸时,爆炸气体产物迅速膨胀,气体以极高压力作用于炮眼壁而产生压应力场。这种应力引起应变,从而导致应力场内岩体质点的径向位移,而径向位移又产生径向压应力。如果岩体的抗拉强度低于此压应力在切向衍生的拉应力,则将产生径向裂隙。当药包附近存在自由面时,岩体位移的阻力在最小抵抗线方向最小且岩体质点位移速度最高,而在阻力不等的不同方向上,不等的质点位移速度必然引起剪切应力。如果剪切应力超过该处岩体的抗剪强度,则岩体产生剪切破坏。当上述破坏发生时,如果爆炸气体产物还具有足够强大的压力,则爆炸气体将推动破碎岩块做径向抛掷运动。

该理论一方面认为,炸药的能量中,动能仅占5%~15%,绝大部分能量包含在爆炸气体产物之中;另一方面,认为岩体发生破裂和破碎所需时间小于爆炸气体施载于岩体的时间。因此,岩体的破碎主要是由爆炸气体产物的膨胀压力引起的。

2) 冲击波引起应力波反射破坏理论

该理论的代表人物:日野熊雄(Kunao Nino)、美国矿业局的戴维尔(W. L. Duvall)等。该理论认为,爆破时岩体的破坏主要是由自由面上应力波反射转变成

的拉应力波造成的。爆轰波传播到炮孔壁,在岩体内引起一股压应力波,这种应力波遇到自由面时便反射回来成为拉伸应力波。如果这股反射拉伸应力波超过该处岩体抗拉强度,则岩体便因拉坏而破碎。

岩体的破碎是由自由面开始逐渐向爆心发展的;冲击波阵面的压力比爆炸气体产物膨胀压力大得多,而岩体的抗拉强度比抗压强度低得多,而且在自由面处也确实常常发现片裂、剥落等现象。结论是:爆轰波这种特殊的冲击波所引起的应力波及其反射,乃是岩体破碎的主要原因。

3) 爆炸气体膨胀压力和冲击波所引起的应力波共同作用理论

支持该理论的代表人物: C. W. 利文斯顿、Φ. A. 鲍姆、伊藤一郎、P. A. 帕尔逊、H. K. 卡特尔 L. C. 朗和 T. N. 哈根等。该理论认为,爆破时岩体的破坏是爆炸气体和冲击波共同作用的结果,它们各自在岩体破坏过程的不同阶段起重要作用。

如前所述,爆轰波传播到装药空间岩壁时在岩体表层中迅速衰减成为应力波。这股强烈压缩应力波在药包近区造成岩体的“压碎”,而在压碎区域之外造成径向裂隙。爆炸气体产物的“气楔作用”使开始发生的裂隙继续向前延伸和使之进一步张开,直到能量的消耗和衰减不足以使岩体开裂。因此,尽管动能在爆炸总能量中只占百分之几至百分之十几,然而冲击波在使岩体开始破裂的阶段仍是非常重要的因素。

爆炸气体产物膨胀的准静态能量是破碎岩体的主要能源。冲击波作用的重要性则同所破坏的介质特性有关。哈努卡也夫认为,不同波阻抗值,它所需要的应力波波峰值也不同。

波阻抗值较高时,要求有较高的应力波波峰值,此时冲击作用更为重要,岩体按波阻抗值分为三类。

2.1.2 岩体爆破破碎形式

1) 爆破的内部作用

埋置在地表以下很深处的药包爆炸时,如果药包威力并不很高,则地表不会出现明显的破坏,这种作用叫做爆破的内部作用。随着至爆源距离的增大,岩体破坏特征发生明显变化。依破坏特征,岩体可大致分为三个区域^[85]:

(1) 粉碎区。

密闭在装药空间中的药包爆炸时,一般可达到 5 000~10 000MPa 的超高压,其值远远超过被爆岩体的动抗压强度。装药空间固壁表层受到强烈压缩而形成—个空腔,这个空腔就叫做压缩区。此区内岩体多被压成粉末,因此又叫粉碎区。

压缩区处于坚固岩体的约束条件下,动抗压强度增大,可压缩性很差,所以压