

爆炸地震效应

BAOZHADIZHENXIAOYING

林大超 白春华 著

地质出版社

国家自然科学基金项目(批准号 19972013 和 10372017)资助

爆炸地震效应

林大超 白春华 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书较为系统地论述了爆炸地震理论的原理和基本成果,内容涉及到爆炸作用、爆炸地震波的形成与传播、爆炸地震所引起介质振动的特征以及结构物的爆炸地震效应等基本问题。全书共分7章,分别为弹性波理论基础、爆炸及其与岩土介质的作用、爆炸地震波、爆炸振动特征的时频分析、爆炸地震波的弹性动力学解、结构振动响应分析以及爆炸振动的安全性问题。本书着力阐述了爆炸地震效应理论研究的新方法、新认识和新进展。

本书可供土木、矿业、能源、兵器科学等学科从事爆炸安全和爆破技术的工程技术人员、研究人员、高校教师阅读,也可作为有关专业高年级学生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

爆炸地震效应/林大超,白春华著. —北京:地质出版社, 2007. 1

ISBN 978-7-116-05068-6

I. 爆... II. ①林... ②白... III. 地下核爆炸效应—研究 IV. TJ91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 139594 号

责任编辑:孙亚芸

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324569 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张:16

字 数:386千字

印 数:1—800册

版 次:2007年1月北京第1版·第1次印刷

定 价:38.00元

书 号:ISBN 978-7-116-05068-6

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

前 言

爆炸地震效应是一个关于常规化学爆炸与地质介质作用所引起地震现象及其结构响应规律的研究领域。它的根本目的在于通过爆炸地震产生、传播和作用特征的认识为爆炸灾害预防和爆破安全设计等工程问题提供重要的科学指导和理论基础。爆炸地震本身源于实际工程技术问题,因此其理论结果与工程应用具有相当密切的联系。自从土石方爆破地震效应的安全性问题引起人们关注以来,已经积累了大量关于爆炸地震现象的观测结果,并在理论分析基础上建立了爆炸地震安全设计规范。爆破技术在国民经济建设中的广泛应用和现代爆破技术的发展也极大地促进了爆炸(破)地震研究工作的开展。除了工程爆破这类爆炸现象之外,诸如爆炸安全事故分析、武器爆炸作用和爆炸地震波勘探技术等都与爆炸相关的地震规律。爆炸地震理论的内容逐渐丰富,并得到较为迅速的发展,已经成为爆炸力学一个重要的分支。

十多年前,在开展燃料/空气爆炸试验过程中,遇到了爆炸作用导致远距离建筑结构破损的问题,由此激起了我们对爆炸地震效应探讨的热情。此后数年间,我们花费了大量的时间和精力收集研读相关的文献资料,期望能从中找到解释这个试验现象的机制和理论分析方法。然而,以往的工作大多局限于不同场地爆炸(破)地震所引起的地面质点振动情况及其测试分析,尚未建立起较为系统的理论原理,因而难以满足相关问题认识的需要。在这种情况下,我们开始了较深入和系统的研究工作。

其实,在20世纪60年代初期,L. D. Leet就完成了一本名为《岩石爆破振动》(《Vibrations for Rock Blasting》)的小册子,它应该是论述爆炸地震最早的专著。不过,接下来的进展远远超过了这本书所涉及的内容。倒是G. A. Bollinger于1971年出版的《爆炸振动分析》(《Blast Vibration Analysis》)一书成为了这个领域最有影响力的早期经典著作。1975年,科学出版社还出版了该书的中文译本。尽管爆炸振动这一概念具有更广的含义,但是爆炸地震及其效应构成了爆炸振动理论的主体内容,通常习惯于用爆炸振动来泛指爆炸地震及其结构振动问题。在爆炸地震理论的发展中,另一部具有较强影响力的论著是C. H. Dowding于1985年出版的《爆炸振动监测与控制》(《Blast Vibration Monitoring and Control》)一书。它重点论述了结构的爆炸地震响应规律,也讨论了爆炸冲击对结构作用等问题。此外,张雪亮和黄树棠曾针对我国爆破安全技术发展的需要,于1981年出版了《爆破地震效应》,对国内相关领域的研究起到了积极的推动作用。

随着我国经济建设的飞速发展,现代爆破技术得到了相当广泛的应用。与此同时,爆破设计与施工中的安全问题日益突出。爆炸(破)地震效应带来的危害是这些安全问题的一个重要组成部分,近些年来一直受到许多学者与工程技术人员的关注。在国家自然科学基金(项目批准号:19972013)的资助下,我们开展了爆炸地震波传播规律及其破坏效应方面的研究工作。为了与广大科技工作者共同分享我们的一些看法和认识,以促进这方面的研究更为深入地展开,于是萌生了完成一部关于爆炸地震效应理论的书的想法。但

是，我们很快就发现这并不是一件容易的事情。困难主要来自于两个方面，一是爆炸地震效应分析还没有建立起合适的理论原理与方法，二是大量参考资料所讨论的都是非常具体的工程问题，因而在论述与选材上均受到了较多的限制。我们不得不立足于自身的研究基础，寻求理论系统化的突破口，这项工作持续了将近五年的时间。

非常幸运的是，我们再次获得了国家自然科学基金（项目批准号：10372017）的资助。它不仅给我们提供了继续开展爆炸地震效应研究的机会，同时，也帮助我们实现了完成这部书稿的愿望。

本书较为系统地论述了爆炸作用、爆炸地震波的形成与传播、爆炸地震所引起介质振动的特征以及结构物的爆炸地震效应等多方面的内容，其中包括了作者本人及其合作者近年来所获得的部分研究成果。书中还列举了大量的参考文献。其目的在于帮助读者全面而深入地了解爆炸地震及其相关理论，并为他们的进一步研究提供必要的基础和线索。相对于过去在这个论题上的一些出版物而言，它着力阐述了爆炸地震效应研究的新方法、新认识、新进展和新方向。本书可供有关工程技术人员阅读，尤其适合于爆炸理论、安全工程和爆破技术等领域的研究人员，也可以作为相关专业高年级学生及研究生的教学参考用书。

北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室的张奇、刘庆明、郭彦懿和王仲琦等诸位教授，刘长林、梁惠敏、林江、吴凤元等诸位老师，以及博士研究生曾德斌、张玉明、熊祖钊、阎华、赵永涛、罗艾民和硕士研究生苗常青、赵巨岩等都曾参加过部分理论或试验任务，因此书中的内容也融入了他们的劳动成果。新加坡南洋理工大学土木与环境工程学院的陆勇教授所领导的项目组也与我们具有良好的合作关系，书中关于地下爆炸试验、爆炸振动响应局部模态效应和建筑结构爆炸地震的安全性评价等内容直接取自他们的研究成果。除此之外，清华大学工程力学系的施惠基教授也曾与我们开展过一些合作研究，在此一并致谢。

书中的工作得到了国家自然科学基金项目（批准号 19972013 和 10372017）的资助。本书的出版和部分研究工作还得到了华北科技学院科研基金的资助。

衷心欢迎读者对本书提出宝贵意见。

作者
2006 年 9 月

目 次

前 言	
绪 论	(1)
第1章 弹性波理论基础	(10)
1.1 波动现象与弹性波	(10)
1.1.1 波动现象	(10)
1.1.2 弹性波	(10)
1.2 弹性波的特征参数	(12)
1.3 波的干涉	(13)
1.4 弹性波的状态方程	(15)
1.4.1 介质的弹性常数	(15)
1.4.2 运动方程	(15)
1.4.3 波动方程式	(17)
1.5 体波	(19)
1.5.1 纵波	(19)
1.5.2 横波	(20)
1.5.3 纵波与横波的传播速度	(20)
1.6 Rayleigh 表面波	(20)
1.6.1 半空间介质中的 R 波	(21)
1.6.2 R 波的传播及其特点	(23)
1.7 Love 表面波	(26)
1.7.1 L 波存在的条件	(26)
1.7.2 L 波的传播速度	(27)
1.8 波的反射和折射	(27)
1.8.1 反射和折射法则	(28)
1.8.2 弹性波的反射和折射	(28)
1.8.3 反射波和折射波的能量分配	(29)
第2章 爆炸及其与岩土介质的作用	(32)
2.1 爆炸的基本概念	(32)
2.1.1 爆炸的分类	(32)
2.1.2 炸药爆炸的基本特征	(33)
2.2 爆炸冲击波	(34)
2.2.1 扰动及其特征的变化	(35)
2.2.2 爆炸冲击波	(36)
2.2.3 冲击波一维传播的基本关系	(36)
2.2.4 多方气体近似的爆炸波基本方程	(37)
2.2.5 凝聚介质中的冲击波	(39)
2.3 爆炸冲击波与凝聚介质界面的相互作用	(39)

2.3.1	冲击波在凝聚介质表面附近的传播	(40)
2.3.2	反射稀疏波	(40)
2.3.3	反射冲击波	(41)
2.4	岩土介质的爆炸冲击动力学性能	(42)
2.4.1	岩石介质的动力学性能	(42)
2.4.2	土介质的动力学性能	(44)
2.5	岩石介质中的爆炸作用	(47)
2.5.1	岩石介质爆炸作用的初始参数	(48)
2.5.2	洞壁的膨胀	(49)
2.5.3	耦合与非耦合装药	(51)
2.5.4	岩体内部变形响应的估计	(55)
2.6	土介质中的爆炸作用	(56)
2.6.1	爆炸波在土介质中的传播特征	(56)
2.6.2	土介质爆炸作用的初始参数	(58)
2.6.3	爆炸空腔的形成	(59)
第3章	爆炸地震波	(63)
3.1	引言	(63)
3.1.1	爆炸地震波的基本类型	(63)
3.1.2	爆炸地震效应	(65)
3.2	爆炸地震波的产生与传播	(66)
3.2.1	振动强度与装药量之间的关系	(66)
3.2.2	爆炸地震波的距离衰减关系	(66)
3.3	爆炸地震波的主要影响因素分析	(70)
3.3.1	介质特征	(71)
3.3.2	装药性质	(72)
3.3.3	起爆形式	(73)
3.3.4	装药的耦合性	(76)
3.3.5	地形条件与沟槽效应	(78)
3.4	微差爆破与两次爆炸事件的联合地震效应	(81)
3.4.1	两次爆炸事件的联合作用	(82)
3.4.2	振动时间历史的随机叠加效应	(83)
3.4.3	两次爆炸事件的联合地震效应	(83)
3.4.4	场地实验结果	(84)
3.5	爆炸地震波的频谱特征	(85)
3.5.1	离散采样信号的 Fourier 级数拟合	(86)
3.5.2	地面爆炸时地震波的频谱特征	(87)
3.5.3	地下爆炸时地震波的频谱特征	(90)
3.6	爆炸地震波的持续时间长度与初始冲击特性	(91)
3.6.1	地面振动幅值的持时特征	(91)
3.6.2	爆炸地震波的初始冲击特征	(94)
第4章	爆炸振动的时频分析	(99)
4.1	非平稳随机过程的描述	(99)
4.1.1	非平稳随机信号的描述	(99)

4.1.2	非平稳随机过程谱的频率概念	(100)
4.1.3	非平稳随机过程的功率演变谱	(102)
4.2	爆炸振动的随机演变描述	(103)
4.2.1	演变分解的物理过程	(103)
4.2.2	爆炸振动演变分解的近似存在性	(104)
4.2.3	随机演变近似的理论原理	(105)
4.2.4	实例分析	(106)
4.3	基于 Fourier 变换的时频分析	(110)
4.4	连续小波变换离散化的时频分析	(111)
4.4.1	理论原理	(112)
4.4.2	小波变换的离散化	(113)
4.4.3	L-P 小波基函数的改进	(114)
4.4.4	时频特征关系式	(115)
4.4.5	爆炸振动时频特征分析	(116)
4.4.6	爆炸振动理论模型的建立	(118)
4.5	爆炸振动时频特征的多分辨分析	(119)
4.5.1	爆炸振动信号的小波分解	(120)
4.5.2	振动能量分布	(121)
4.5.3	时频特征分析	(122)
4.6	基于小波包分解的时频分析方法	(124)
4.6.1	理论原理	(124)
4.6.2	爆炸振动的小波包变换时频分析	(125)
第 5 章	弹性动力学解	(131)
5.1	球形空腔爆炸的地震波	(131)
5.1.1	质点位移的理论解	(131)
5.1.2	常压力爆炸作用下的质点振动分析	(133)
5.2	弹性半空间表面点载荷的地震波解	(135)
5.2.1	Laplace 变换与 Hankel 变换	(136)
5.2.2	问题的描述	(137)
5.2.3	位移的形式解	(138)
5.2.4	自由表面上的位移	(139)
5.3	Lamb 点载荷问题的积分变换数值分析方法	(145)
5.3.1	积分变换形式的位移解	(146)
5.3.2	Lamb 点载荷问题的数值计算方法	(146)
5.3.3	数值计算结果的对比分析	(150)
5.3.4	爆炸载荷作用下地震波的数值解	(151)
5.4	有限尺寸爆炸载荷的地震波	(153)
5.4.1	基本方程	(153)
5.4.2	位移关系的求解	(155)
5.4.3	数值计算结果	(158)
5.5	地面振动的粘弹性频率响应关系	(160)
5.5.1	弹性半空间表面的频率响应函数	(161)
5.5.2	介质粘滞特性的引入	(162)

5.5.3 粘弹性频率响应关系	(163)
5.5.4 爆炸地面振动的功率谱	(165)
第6章 结构振动响应分析	(169)
6.1 爆炸地震反应谱	(169)
6.1.1 地震动的反应	(169)
6.1.2 爆炸地震的反应谱	(173)
6.2 爆炸振动的随机演变响应	(180)
6.2.1 振源模型及其基本参数	(181)
6.2.2 单自由度系统的演变响应解	(182)
6.2.3 结构响应预测	(183)
6.3 小波变换方法	(185)
6.3.1 单自由度系统的瞬态响应	(185)
6.3.2 多自由度系统的瞬态响应	(188)
6.3.3 单自由度系统的随机输入输出关系	(191)
6.4 浮放设备的冲击振动响应	(193)
6.4.1 刚体冲击振动模型	(194)
6.4.2 浮放设备的爆炸振动响应	(195)
6.5 振动响应的局部模态效应	(196)
6.5.1 RC 框架结构模型	(196)
6.5.2 爆炸振动的高频激励特征分析	(197)
第7章 爆炸振动的安全性问题	(203)
7.1 爆炸地震的安全判据	(203)
7.1.1 爆炸地震的结构安全判据	(203)
7.1.2 振动敏感的电子仪器设备	(206)
7.1.3 人体的爆炸振动响应	(207)
7.2 建筑结构破损的评估与数值模拟分析	(208)
7.2.1 爆炸地震的激励	(209)
7.2.2 非线性动力学分析与结构损伤模型	(211)
7.2.3 三个典型的建筑结构及其简化模型	(213)
7.2.4 结构损伤指数及其分析	(215)
7.2.5 结构破损的多层次分析	(219)
7.3 计算机硬盘驱动器的爆炸振动安全性研究	(221)
7.3.1 硬盘驱动器冲击振动响应特征的理论分析	(222)
7.3.2 爆炸振动毁伤试验	(228)
7.3.3 应用实例分析	(234)
7.4 边坡的稳定性	(236)
7.4.1 岩质边坡	(237)
7.4.2 土质边坡	(238)
7.4.3 振动频率的影响	(241)

绪 论

爆炸是能量在瞬间释放的一种现象。根据爆炸发生处周围环境介质的特征，可以将它划分为空中爆炸、水中爆炸和土中爆炸三种基本类型。相对而言，土中爆炸的工程应用范围更为广泛一些。除了国防军事技术之外，许多工程爆破问题和井下爆炸事故都与土中爆炸现象具有十分密切的联系。

爆炸地震是土中爆炸作用过程中十分重要的动力学现象之一。爆炸地震波通过地质介质传播，它的距离衰减速度较爆炸空气冲击波要慢得多，因而具有远距离传输和作用的能力。如何控制和利用爆炸地震波的远距离作用能力一直是兵器科学与防御技术、爆破技术以及关键工程设施可靠性技术研究的重要内容。尤其是在军事攻击技术上，对于超过 6 m 深的地下工事还没有有效的打击手段。此时，如果能通过爆炸地震波对其中的电子仪器设备实施毁伤和干扰，将对战争局势的控制起着非常重要的作用。在工程爆破和工业爆炸事故中，爆炸地震波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。无论是利用爆炸地震波实现对目标的毁伤和干扰，还是控制由爆炸地震波对周围环境与设施带来的安全性问题，都必须掌握爆炸地震现象的基本规律。

就爆炸现象而言，一般涉及到化学爆炸、物理爆炸和核爆炸三类问题。如果不特别指明的话，通常习惯于用爆炸一词来特指化学爆炸问题。于是，我们可以将化学爆炸所引起地震现象直接简称为爆炸地震。显然，爆炸地震效应应该涉及到其产生、传播和作用三个方面的内容。在爆炸或者爆破理论中，爆炸及其作用过程是它们的基本研究对象，而爆炸地震只是其中一些爆炸作用过程所伴随的动力学效应。该动力学效应通常被称作爆炸地震效应。爆炸地震以应力（变）波的形式通过地质介质向外传播。这些应力（变）波就是所谓的爆炸地震波。地震波经过时，岩土介质质点围绕着其初始平衡位置发生振动。正是这种振动运动使地震波的能量依次向外传递。据此，许多文献习惯将地质介质质点的这种振动运动作为爆炸地震现象的特征，将爆炸地震称之为爆炸振动。不过，爆炸载荷直接作用到结构上而不是作用到地质介质上所引起的振动响应也是爆炸振动的研究范畴，因此爆炸振动这个概念本身的含义要更广一些。其实，在讨论土中爆炸或者岩石爆破这类问题时，爆炸（破）振动与爆炸（破）地震（效应）二者并没有本质性区别。爆炸振动和爆炸震动这两个概念在爆炸地震研究中可能会经常遇到。根据力学中关于振动与震动这两个概念的界定，可以简单地认为后者是前者在集合意义上的描述。也就是说，爆炸振动着重于揭示爆炸地震中地质介质的运动及结构响应规律，而爆炸震动在于强调爆炸地震发生时地质介质及结构的动力学现象。

爆炸地震现象最初的认识主要源于爆破技术在矿山开采中的应用。在 20 世纪 20 年代，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^[1,2]。两年后，Chabot 进一步讨论了爆破技术应用在密歇根州 Marquette Range 的铁矿开采中所存在的爆

破地震效应问题^[3]。那时,人们发现,与爆破相关的爆炸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炸振动测试的地震仪^[4],但是根据现场调查获得实际现象的统计规律仍是爆炸地震研究的主要方法。随着地震仪的广泛应用^[5,6],人们开始针对不同场地条件下爆炸振动情况进行测试,由此获得了一些重要的基础数据^[7]。Thoenen 和 Windes 曾对这方面的工作做了一个比较系统的总结^[8],并形成了著名的美国矿务局 442 号公报^[9]。同时,一些研究者也注意到爆炸振动测试技术的状况^[10]以及不同类型爆炸情况下地震波的特征^[11-13]。

为了研究和估计爆炸振动的效应,必须寻找评价振动强度特征的描述参数。原则上,质点的位移、速度、加速度和频率都是衡量振动运动的基本变量,但是,实际工作并不局限于简单地给出地运动本身的描述。如果仅只于此的话,通过爆炸振动测试得到的地震图(即地质质点的运动时间历程)就可以轻而易举地解决这个问题。在 20 世纪 50 年代前后,就有一些研究者意识到,若要估计爆炸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^[14]。这些参数既可以作为本征度量值用于刻划与结构效应相关的爆炸振动情况,而且也便于使用。Crandell 最先将测试结果与结构破坏联系起来^[15],用能量比的概念定义了破坏判据以及地震波的传播方程。此后, Morris 和 Westwater 建立了一个地运动振幅的统计回归公式^[16],研究了爆炸振动振幅与结构破坏之间的关系。Langefors 等^[17]、Edward 和 Northwood^[18]也注意到了爆炸地震的结构效应问题,分别建议了各种速度界限作为结构破坏的判据。Duvall 和 Fogelson 进一步对此前这方面的工作提出了较为全面的评述^[19]。爆炸振动峰值质点速度 PPV (peak particle velocity) 作为结构破坏评价参数的看法基本上得到了认可,并用于许多工程问题的分析中。与此同时,通过测试数据的统计分析,建立了爆炸地震波的传播方程^[20-22]。另一方面,爆炸振动结构效应是结构破坏判据建立的基础,因而对此也展开了讨论。Nadolski 提出^[23],考察结构物附近的地面振动界限,而不是指在房屋内部某点测试到的振动,爆炸地震波显然不同于自然地震,它的频率成分、谱能量和持续时间等都具有自身的特点。由于普遍认同的破坏判据是基于最大质点振动速度的 PPV 方法,因此没有考虑频率的影响和波的类型。Devine 等^[22]和 Duvall 等^[24]的分析指出,PPV 是指位于结构附近地面振动三个正交分量中任意一个分量而言。这些研究结果在 Northwood 的工作中得到了证明^[25]。除了结构的反应之外,关于爆炸地震波的人体效应也提出了一些探索性的研究^[26,27]。

虽然以 Lamb 弹性半空间解^[28]为基础的理论方法及其发展已经为地震波传播规律分析提供了可能的途径,但是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一直未能成为爆炸地震波研究的主要方向。不过,对爆炸近区的物理情况还是获得了一些基本认识^[29,30]。

直到 20 世纪 80 年代,关于爆炸地震的研究主要围绕着上述几个方面展开。Bollinger 的著作对这些工作的进展作了一个较好的总结^[31]。其中也涉及到关于爆炸源与爆炸地震波产生规律的一系列研究成果。虽然 Henrych 的著作旨在讨论爆炸及其作用的动力学理论原理^[32],但该书还是用大量篇幅阐述了土中爆炸动力学效应以及爆炸振动等相关内容。相对而言,它更为全面地论述了爆炸地震现象认识中的一些基本问题。

与自然地震相比,爆炸震源要简单得多。然而,爆炸直接提供给地震效应的能量比例和释放时间历程仍是一个比较复杂的问题。在爆炸近区,介质变形和爆炸作用之间的物理

过程一般很难从理论上给出描述,因此无法从爆炸作用物理机制出发建立爆炸地震的力学模型。地震学中描述震源的基本方法是采用一个等效力模型作为震源的近似。该模型不考虑震源区的非线性影响而与其线性波动方程相对应。力作用在给定点上所产生的位移与真实力作用于震源处所产生的位移一致,这样便定义了震源的等效力^[33]。等效力模型用于近似爆炸震源为爆炸地震波的弹性动力学分析奠定了一定的理论基础^[34,35]。

随着数值分析技术的发展,从频率域上进行爆炸地震波测试信号统计特征的提取开始成为普遍的理论方法。基于 PPV 的结构破坏判据也提出了一些批评性的看法,考虑地震频率的讨论开始成为了一个重要的研究内容^[36]。随机振动理论的发展也为爆炸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^[37]。爆炸的作用过程、地震波的传递介质以及结构的响应特性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触及问题的本质。Dowding 等针对爆炸地震的结构效应提出了一系列研究^[38~40],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,考虑到频率特征的结构破坏判据也开始获得应用^[41,42]。

然而,随着以电子计算机为核心的通讯、信息处理和控制系统的广泛应用,这些安全判据不再适用于分析它们工作振动敏感性特征的要求。在 20 世纪 80 年代初期,Holmberg 等人率先针对这一问题建议了一个工程调查研究^[43],使爆炸地震破坏规律这一研究领域从与建筑物和构筑物相关的工程结构问题转向了以二次结构(即建筑物与构筑物子结构或内部设备、设施等)为对象的理论建模与细致分析阶段^[44,45]。最近的研究发现^[46],爆炸地震对结构的作用与自然地震和核爆炸地震存在着本质性的区别,它的高频振动分量趋向于使结构的高阶模态率先启动,形成所谓的局部动力学效应。这种局部动力学效应正是爆炸地震波对电子仪器设备产生破坏而并不引起建筑结构破坏的机制。

与局部动力学效应相关联的振动特征在于爆炸地震波初始到达时段的冲击加载过程,而该加载过程的时间历程主要是由爆炸作用与地质介质的耦合条件、炸药爆轰过程的性质以及爆炸形式所决定的^[47,48]。就爆炸地震所引起的质点振动时间历程而言,它可以分为具有冲击特性的强振时段和自由阻尼振动时段,后者也包含着地震波传播过程中的高次(散射)效应。因为强振时段的持续时间短,因而在测试信号分析时无法提取其频率特征,只能得到由该时段所确定的自由阻尼振动阶段的频率特征^[49],这正是考虑频率特征安全判据建立所面临的困惑^[50,51]。PPV 安全判据得到实践的验证在于它所使用的参量来源于强振时段。由此可见,要控制爆炸地震对结构的作用特征首先需要解决的问题是控制爆炸地震强振时段的时间历程特征。可以说,微差爆破是控制和减小爆炸地震破坏效应最成功的典型示例。自 20 世纪 40 年代开始获得应用以来^[52],微差爆破技术不仅引起了众多研究者的高度重视^[53~55],也获得了十分广泛的工程应用^[56]。

当地质条件确定时,爆炸地震波初始到达的强振时段主要取决于爆炸的实际作用特点。也就是说,通过爆炸条件的控制可以获得所期望的爆炸地震波结构作用特征。爆炸条件所涉及到的主要因素包括炸药的性质、爆炸位置、装药结构、爆炸形式(集中和分散爆炸)以及起爆方式等。它的改变最终通过爆炸的作用范围和爆炸作用与地质介质的耦合情况得到反映。目前爆炸力学理论的研究已经注意到这一问题^[57~59]。不过,由于问题的复杂性,这些工作的对象还有一定的局限性,而且大多针对工程爆破问题展开,很少涉及到装药量较小的武器爆炸过程和爆炸条件改变时爆炸地震波特征的变化。

最近几年间,爆炸地震的研究开始步入到一个新的发展阶段。事实上,爆破技术在矿山开采和许多基础设施建设中获得越来越广泛的应用^[60,61]。具有远距离传播能力的爆炸振动或多或少都会对周边环境有所影响。如何控制和降低这种影响在很多情况下都显得相当重要^[62~65]。这应该是推动爆炸地震研究工作进步的重要原因之一。随着社会的发展,人们对安全问题日益重视,开始重新审视那些与易燃易爆物品相关的设施可能发生的爆炸事故及其可能带来的危害^[66~68]。恐怖爆炸活动的频繁发生进一步加强了这种认识^[69]。在这类爆炸事件中,除了爆炸冲击直接作用和爆炸飞散物所引起的人员伤亡和破坏之外,爆炸地震也可能导致某些安全问题。因而,有必要对爆炸地震所蕴涵规律进行深入的探讨。此外,爆炸地震波在地质勘测^[70,71]和武器技术^[72,73]等方面的技术需求也带动了爆炸地震研究工作的开展。

值得注意的是,许多尚未得到较好认识的因素都影响到爆炸地震的基本特征。来自于工程实践中的大量观测结果仍然是构成爆炸地震理论框架的基础^[74,75]。这一特点在爆炸振动安全规范的制定中得到了充分的体现^[76]。传统的实验方法仍然是爆炸地震研究必不可少的重要手段^[77,78]。不过,数值模拟技术和数值信号处理技术的发展已经为震源的描述^[79]、地震波的传播^[80~82]、地震信号特征识别^[83~85]和结构效应分析^[44~46,86]带来了新的活力。

从直观上来看,爆炸作用应该是一个确定性的震源。如果注意到这种作用通过爆生高温高压气体产物与固相岩土介质的相互作用实现能量传递的话,不难发现,在这个作用过程中,其实包含了强烈的流固耦合效应。任何影响因素的细微变化都可能导致爆炸振动情况的显著变化。由此可见,爆炸作用本身也是爆炸地震的研究范畴,其目的在于揭示爆炸近区地质介质非线性变形与破坏(损伤)规律,为爆炸地震波产生与传播的认识和理论模型的建立提供必要的基础。由于可以应用已经发展起来的许多结构动力学分析工具,相对而言,爆炸地震结构效应研究不存在太大的技术难度。目前所面临的困难主要是关于爆炸地震激励随机特性的认识还存在一定的局限性^[87,88]。另一方面,结构形式与特征千变万化,无法用一个或几个基本统一的模型达到理论简化的目的,而且,结构模型的建立也是一个长期不断的积累过程。

在国内,由于工程爆破施工安全的需要,爆破地震问题在20世纪五六十年代就引起了部分学者的重视,并获得了一些具有重要工程应用价值的研究成果^[89]。张学亮和黄树棠^[90]在80年代初期出版的《爆破地震效应》一书比较客观地反映了此前国内对爆炸地震波认识和研究的水平。随着我国国民经济建设持续稳定的高速发展,大量基础工程设施开始采用了爆破施工技术,在很大程度上促进了爆炸地震安全问题认识上的深入。地质勘探技术的进步也带动了与爆炸地震波传播规律相关问题的研究,尤其是在地震信号处理技术和地震波反演的弹性动力学理论上方面获得了创造性的成果^[91]。此外,关于土中爆炸现象及其基本规律的认识也取得了一定的进步^[92]。

应该看到,国内关于爆炸地震及其相关问题的研究主要针对工程爆破中爆炸地震效应的监测与控制等应用问题展开,在理论方面的系统性和深入程度还存在着某些欠缺。同时,目前也没有专门介绍爆炸地震及其结构效应新进展的书籍。虽然有一些新近出版的论著对土中爆炸现象或者工程爆破中的爆炸作用规律进行过论述,其中也涉及到爆炸地震的相关内容,但是爆炸振动并不是它们的重点,难以从中窥视这个理论分支的全貌。鉴于

此,我们以所承担的国家自然科学基金项目(批准号:19972013和10372017)取得的一些成果为基础,结合目前国内外在爆炸地震及其相关研究方面的主要进展,整理完成了这本书。希望它能够概括爆炸地震现象和效应的主要理论方法与基本成果,使读者读完本书后对爆炸地震理论有较系统、全面而深入的了解,并为进一步的研究提供线索。

本书较为系统地论述了爆炸作用、爆炸地震波的形成与传播、爆炸地震所引起介质振动的特征以及结构物的爆炸地震效应等多方面的内容。全书共分为7章。

第1章概述性地介绍了弹性波理论的部分基本知识和概念。虽然这方面的内容在许多相关书籍中都可以查阅得到,但是它们是认识和理解爆炸地震波传播规律的基础,所以将其作为了本书的开篇部分。这样,既能体现论述的系统性,又便于读者阅读。

第2章讲述了爆炸及其与岩土介质的作用,力图通过爆炸及其冲击加载作用理论原理的认识,阐明当爆炸发生在岩石或土介质中时爆炸区附近的动力学过程,并由此梳理从装药的爆轰获得爆炸地震震源函数的理论原理与求解方法。由于涉及到岩土介质的爆炸加载响应关系,因此在这一章中也简要介绍了岩石和土介质的动力学性质。

第3章,首先明确了爆炸地震波及其相关的基本概念,回顾了爆炸地震效应研究工作的历程。然后,讲述了描述爆炸地震波产生和传播的爆炸振动强度与装药量关系以及爆炸振动距离衰减规律,讨论了地质介质的特征、爆炸装药的性质、起爆形式、装药的耦合性和地形条件等对爆炸地震波的影响。进一步分析了在爆破地震振动控制设计中相当重要的微差爆破技术的相关理论原理。除了振动强度之外,频谱特征和时间持续长度也是描述爆炸地震波的基本参数。初始冲击特性还构成了爆炸振动一个相当突出的特点。因此,在本章的最后部分,我们分别针对这些问题进行了论述。

爆炸振动的持续时间极其短暂,是一个非平稳随机过程。鉴于此,第4章着重论述了与非平稳随机振动相关的理论描述方法,并针对爆炸振动的时频特征提出了分析。它们分别是爆炸振动的随机演变描述、基于傅立叶变换的时频分析、连续小波变换离散化的时频分析、爆炸振动时频特征的多分辨分析以及基于小波包分解的时频分析方法。相关的理论为爆炸地震特征分析提供了新的思路,其内容较为新颖。它也是爆炸振动理论现阶段研究工作一个重要的发展方向。

第5章给出了爆炸地震分析中的几个弹性动力学解。其中,球形空腔的地震波解和弹性半空间表面点载荷的地震波解都是十分经典的理论结果。然而,它们在爆炸地震的理论分析中具有相当重要的地位和作用。虽然弹性动力学理论在爆炸地震问题中的应用还比较有限,但近年来的一些工作仍然表明,在弹性动力学解的基础上建立数值模拟技术可以较好地解决爆炸地震这类无限介质问题求解中的一些技术上的困难。因此,在这一章进一步介绍了Lamb点载荷问题的积分变换数值分析方法,讨论了有限尺寸爆炸载荷所致地震波的解。最后,将介质的粘性引入到弹性动力学解中,获得了地面振动的粘弹性频率响应关系。

第6章从一般性的理论原理入手,分析讨论了结构爆炸地震效应的分析方法。该章分别涉及到爆炸地震反应谱、爆炸振动的随机演变响应、爆炸振动响应分析的小波变换方法、浮放设备的冲击振动响应和结构爆炸振动响应的局部模态效应等方面的内容。

第7章首先介绍了与爆炸振动相关的建筑结构安全判据、电子仪器设备的爆炸振动安全性和人体的反应三个方面的工程理论。然后,以建筑结构破损的评估与数值模拟分析为

线索, 论述了建筑结构爆炸地震安全性评价的数值模拟方法。同时, 以电子计算机硬盘驱动器为示例, 分析了电子仪器设备爆炸振动安全性的基本特征。最后, 简要地讨论了爆炸地震对边坡稳定性的影响。本章虽然只详细论述了建筑结构、计算机硬盘和边坡这三类典型工程实例的爆炸振动安全性问题, 但所涉及到的理论方法对其他工程技术问题也具有很好的参考和推广价值。

参 考 文 献

- [1] Rockwell E H. Vibrations caused by quarry blasting and their effect on structures. *Rock Products*, 1927, 30 (3): 58 ~ 61
- [2] Rockwell E H. Quarry blasting vibrations and their effect on structures. *Cement, Mill Quarry*, 1927, 30 (10): 30 ~ 34
- [3] Chabot L S. Field blasting at the Volunteer mine. *Proc Lake Superior Min Inst*, 1929, 27 (1): 259 ~ 270
- [4] Nona. Recording vibration meter. *Instruments*, 1929, 2 (3): 103 ~ 104
- [5] Kelly S F. Geophysics: its technique explained in simple terms. *Min Metal*, 1934, 15 (331): 293 ~ 297
- [6] Ulrich F P. Man-made earthquakes. *Eng News-Rec*, 1935, 115 (20): 680 ~ 681
- [7] Jenkins J E. Scientific method of measuring vibrations from quarry blasting. *Pit Quarry*, 1945, 38 (2): 67 ~ 68
- [8] Thoenen J R, Windes S L. Seismic effects of quarry blasting. *Concrete*, 1942, 50 (8): 223 ~ 226
- [9] Thoenen J R, Windes S L. Seismic effects of quarry blasting. *U S Bur of Mines Bull* 442, 1942: 1 ~ 83
- [10] Leet L D. Vibrations from blasting. *Explosives Engr*, 1944, 22 (2): 57 ~ 61
- [11] Sharpe J A. The production of elastic waves by explosion pressure, part 1—theory and empirical field observations. *Geophysics*. 1942, 7 (2): 144 ~ 154
- [12] Leet L D. Vibrations from blasting. *Explosives Engr*, 1946, 24 (3): 85 ~ 89
- [13] Carder D S. Seismic investigations of large explosions. *J Coast Geodetic Survey*, 1948, 1 (1): 71 ~ 73
- [14] Thoenen J R, Windes S L, Ireland A T. House movement induced by mechanical agitation and quarry blasting—progress report. *U S Bur of Mines—Report Investigations* 3542, 1940, 1 ~ 36
- [15] Crandell F J. Ground vibration due to blasting and its effect on structures. *J Boston Soc Civ Engrs*, 1949, 36 (2): 222 ~ 245
- [16] Morris G, Westwater R. Damage to structures by ground vibrations due to blasting. *Mine Quarry Eng*, 1953, 19 (4): 116 ~ 118
- [17] Langefors U, Kihlström B. *The modern technique of rock blasting*. New York: John Wiley & Sons, 1963
- [18] Edwards A T, Northwood T D. Experimental studies of the effects of blasting on structures. *Engineer*, 1960, 210 (5482): 539 ~ 546
- [19] Duvall W I, Fogelson D E. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations. *U S Bur Mines—Report Investigations* 5968, 1962: 1 ~ 19
- [20] Attewell P B, Farmer I W. Attenuation of ground vibrations from blasting. *Quarry Managers'J*, 1964, 48 (6): 211 ~ 215
- [21] Attewell P B, Farmer I W, Haslam D. Prediction of ground vibration parameters from major quarry blasts. *Min Minerals Eng*, 1965, 1 (16): 621 ~ 626
- [22] Devine J F, Beck R H, Meyer A V C, et al. Effect of charge weight on vibration levels from quarry blasting. *U S Bur Mines—Report Investigations* 6774, 1966: 1 ~ 37

- [23] Nadolski M E. Architectural damage to residential structures from seismic disturbances. Bull Seism Soc Am, 1969, 59 (2): 487 ~ 502
- [24] Duvall W I. Design requirements for instrumentation to record vibrations produced by blasting. U S Bur Mines—Report Investigations 6487, 1964: 1 ~ 7
- [25] Northwood T D. Blasting vibrations and building damage. Engineer, 1963, 215 (5600): 973 ~ 978
- [26] Jenkins J. Human response to blast produced vibrations. Crushed Stone J, 1955, 30 (2): 8 ~ 13
- [27] Wiss J F. Effects of blasting vibrations on buildings and people. Civ Eng (NY), 1968, 38 (7): 46 ~ 48
- [28] Lamb H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. Phil Trans Roy Soc London, 1904, 203A (1): 1 ~ 42
- [29] Cook M A. The science of high explosions. Reinhold: ASC, 1958
- [30] Leet L D. Vibrations from blasting rock. Cambridge: Harvard University Press, 1960
- [31] Bollinger G A. Blast vibration analysis. Carbondale: Southern Illinois University Press, 1971 (中译本: 刘锡荟, 熊建国 译. 爆炸振动分析. 北京: 科学出版社, 1975)
- [32] Henrych J. The dynamics of explosion and its use. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979 (中译本: 熊建国, 等译. 爆炸动力学及其应用. 北京: 科学出版社, 1987)
- [33] Aki K, Richards P G. Quantitative seismology: theory and methods, Vol 1. San Francisco: W H Freeman, 1980 (中译本: 李钦祖, 等译. 定量地震学: 理论和方法, 第一卷. 北京: 地震出版社, 1986)
- [34] Glen L A, Ladd A J C, Moran B, et al. Elastic radiation from explosively-loaded ellipsoidal cavities in an unbounded medium. Geophys J R Astron Soc, 1985, 81 (2): 231 ~ 241
- [35] 钟放庆, 靳平, 李孝兰, 等. 地下爆炸地震波的数值模拟及震源函数的研究. 爆炸与冲击, 2001, 21 (1): 53 ~ 56
- [36] Dowding C H. Blast vibration monitoring and control. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985
- [37] Benjamin J R, Cornell C A. Probability, statistics and decision for civil engineers. New York: McGraw-Hill, 1970
- [38] Dowding C H, Beck W K, Atmatzidis D K. Blast vibration implications of cyclic shear behavior of model plaster panels. Geotech Test J, 1980, 3 (2): 80 ~ 88
- [39] Dowding C H, Murray P D, Atmatzidis D K. Dynamical response properties of residential structures subjected to blasting vibrations. J Struct Eng ASCE, 1981, 107 (ST2): 1233 ~ 1249
- [40] Dowding C H, Fulthorpe C, Langan P T. Simultaneous airblast and ground motion response. J Struct Eng ASCE, 1982, 108 (ST11): 2363 ~ 2378
- [41] German Standards Organization (GSO). Vibrations in building construction. DIN 4150, Berlin, 1984
- [42] Dowding C H. Construction vibrations. Englewood Cliffs: Prentice - Hall, 1996
- [43] Holmberg R, Ekman G, Sandstorm H. Comments on present criteria for vibration sensitive electronic equipment. Report DS 1983: 3, Stockholm: Swedish Detonic Research Foundation, 1983
- [44] Hao H, Ma G W, Lu Y. Damage assessment of masonry infilled RC frames subjected to blasting induced ground excitations. Eng Struct, 2002, 24 (5): 799 ~ 809
- [45] Ma G W, Hao H, Zhou Y X. Assessment of structure damage to blasting induced ground motions. Eng Struct, 2002, 22 (10): 1378 ~ 1389
- [46] Lu Y, Hao H, Ma G W, et al. Simulation of structural response under high - frequency ground excitation. Earthquake Eng Struct Dyn, 2001, 30 (2): 307 ~ 325
- [47] Lee I-M. Transient ground motion in an elastic homogeneous half space to blasting loading. Soil Dyn Earthquake Eng, 1996, 15 (3): 151 ~ 159
- [48] Gibson R L, Toksoz M N, Dong W. Seismic radiation from explosively loaded cavities in isotropic and trans-

versely isotropic media. Bull Seism Soc Am, 1996, 86 (6): 1910 ~ 1924

- [49] Diaz J I, Balbas M. Frequency domain processing of mechanical blasting vibrations for environment protection. Int J Surf min Reclam Environ, 1997, 11 (3): 155 ~ 158
- [50] Dowding C H, Corser P G. Cracking and construction blasting: importance of frequency and free response. J Constr Div ASCE, 1981, 107 (C01): 89 ~ 106
- [51] 汪旭光, 于亚伦. 关于爆破震动安全判据的几个问题. 工程爆破, 2001, 7 (2): 88 ~ 92
- [52] Avery W M. Many benefits found in delay action blasts at New York trap rock quarries. Pit Quarry, 1947, 40 (4): 90 ~ 92
- [53] Aldas G U. Application of the Stockwell transform to blasting-induced ground vibration. Int J Surf Min Reclam Environ, 2005, 19 (2): 100 ~ 107
- [54] Mogi G, Adachi T, Tamada K, et al. Simulation of blast vibration controlled by delay blasting. Sci Technol Energ Mater, 2004, 65 (2): 48 ~ 53
- [55] Singh P K. Impact of initiation sequences in opencast blasting on the intensity of vibration in underground openings. J Explos Eng, 2002, 19 (2): 36 ~ 39
- [56] Singh B. Blasting in ground excavations and mines. Rotterdam: A A Balkema, 1993
- [57] Hao H, Wu C Q, Seah C C. Numerical analysis of blast-induced stress waves in rock mass with anisotropic continuum damage models, part 1: equivalent material property approach. Rock Mech Rock Eng, 2002, 35 (2): 79 ~ 94
- [58] Hao H, Wu C Q, Seah C C. Numerical analysis of blast-induced stress waves in rock mass with anisotropic continuum damage models, part 2: stochastic approach. Rock Mech Rock Eng, 2002, 35 (2): 95 ~ 108
- [59] Singh P, Vogt W. Effect of total explosive fired in a blasting round on blast vibration. Coal Int, 1998, 246 (1): 20 ~ 21
- [60] Chadwick J. Blasting advances. Min Mag, 2003, 188 (6): 246 ~ 250
- [61] Bhandari S. Engineering rock blasting operations. Rotterdam: A A Balkema, 1997
- [62] Zhang Z X, Naarttijarvi T. Reducing ground vibrations caused by underground blasts in LKAB Malmberget mine. Fragblast, 2005, 9 (2): 61 ~ 78
- [63] Dowding C H, McKenna L M. Crack response to long-term environmental and blast vibration effects. J Geotech Geoenviron Eng, 2005, 131 (9): 1151 ~ 1161
- [64] Svinkin M R. Minimizing construction vibration effects. Pract Period Struct Des Constr, 2004, 9 (2): 108 ~ 115
- [65] Adhikari G R, Theresraj A I, Gupta R N. Response of concrete and masonry dams to ground vibration due to blasting. Fragblast, 2004, 8 (1): 41 ~ 49
- [66] Folchi R. Explosion hazard assessment. J Explos Eng, 2003, 20 (2): 36 ~ 40
- [67] Carvalho E M L, Battista R C. Blast-induced vibrations in urban residential buildings. Proc Inst Civ Eng Struct Build, 2003, 156 (3): 243 ~ 253
- [68] Quek S-T, Bian C, Lu X, et al. Tests on low-ductility RC frames under high-and low-frequency excitations. Earthquake Eng Struct Dyn, 2002, 31 (2): 459 ~ 474
- [69] Hadenius P. The world's tallest building [for now]. Tech Rev, 2004, 107 (6): 51 ~ 54
- [70] Ding H, Labbas R, Zheng Z M. Features of blast-induced vibration source and identification of geostructures. J Sound Vib, 2005, 288 (1 ~ 2): 91 ~ 106
- [71] Kocharyan G G, Budkov E A, Vinogradov E A, et al. Seismic effect produced by detonation of air - fuel mixture in a borehole. J Min Sci, 2003, 39 (3): 233 ~ 246
- [72] Sharp M K, Yule D E. Ground motion and air overpressure study. Shock Vib, 1998, 5 (3): 159 ~ 170