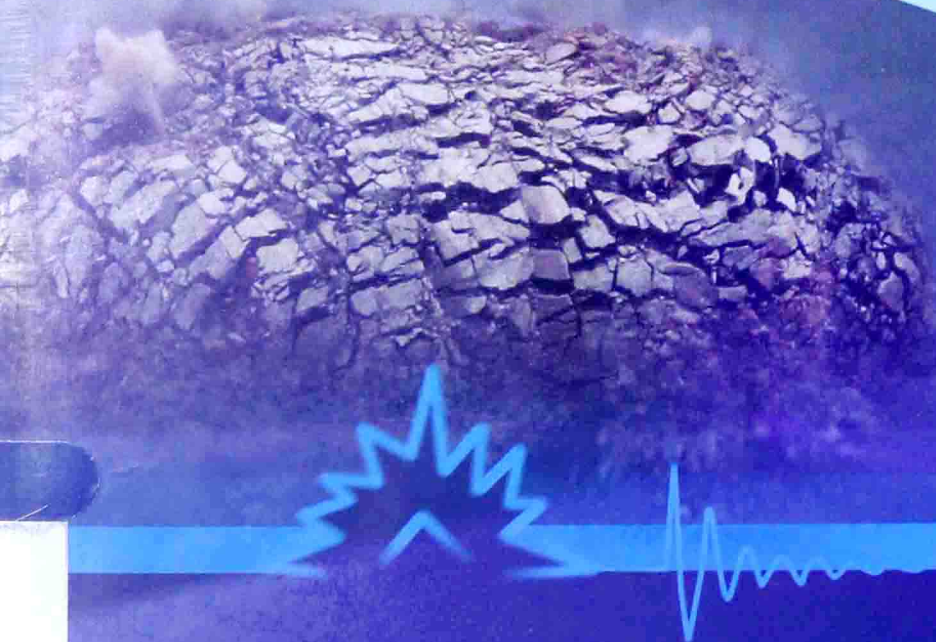




爆破振动理论 与测控技术

◎ 杨年华 著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

014058981

TB41
26

铁路科技图书出版基金资助出版

爆破振动理论与测控技术

杨年华 著



中国铁道出版社

2014年·北京



北航

C1746263

TB41
26

内 容 简 介

本书总结了大量爆破振动测试成果,基于爆破科研和工程实践,系统地论述了爆破地震波的产生、传播规律及其特征;提出了基于单孔爆破地震波的叠加仿真预报新方法;全面论述了爆破振动测试和分析的最新技术成果;解析了各类工程爆破的振动特征和测控技术;论述了应用数码电子雷管实现干扰降振的原理和实践;对爆破振动安全标准的修订提出了以人为本的理念。

本书包含了作者多年的研究成果,着力探讨和阐述爆破振动测控技术中的新观点、新方法和新进展。本书可作为高等院校土木工程、道路工程、采矿工程、安全工程等专业的研究生教材,也可供从事土木、市政、交通、水利水电、采矿、安全工程等行业的教师、科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

爆破振动理论与测控技术/杨年华著.—北京:中国铁道出版社,2014.7

ISBN 978-7-113-18352-3

I. ①爆… II. ①杨… III. ①爆破振动—研究 IV. ①0382

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第073062号

书 名:爆破振动理论与测控技术

作 者:杨年华

策划编辑:江新锡

责任编辑:曹艳芳 王 健

编辑部电话:010-51873065

封面设计:崔丽芳

责任校对:龚长江

责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京市大兴县新魏印刷厂

版 次:2014年7月第1版 2014年7月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:12 字数:300 千

书 号:ISBN 978-7-113-18352-3

定 价:32.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

序

随着国民经济建设的蓬勃发展和爆破技术的日益进步,工程爆破正越来越广泛地应用于国民经济的各个领域,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和社会效益的同时,很多爆破工程的振动危害引起了社会广泛关注,甚至是制约爆破施工正常进行的关键所在。对爆破振动的测控,已成为工程和学术界的热点研究课题。

长期以来,国内外学者开展了大量爆破振动测试、理论研究和模拟分析,对爆破振动的特性、衰减规律和危害程度已取得基本的认识,并且根据有关的理论研究成果,作出了一些有效的爆破振动控制方法。然而由于爆破振动的随机性和不确定性,以及爆破地震波在岩土介质中的复杂传播过程,爆破振动的理论研究困难较大。近年来随着爆破振动测试技术和高精度延时雷管技术的发展,爆破振动控制研究有较大发展。

作者杨年华研究员长期从事爆破振动测试和控制技术研究,紧跟现代爆破技术前沿,结合国家 863 计划、科技部及原铁道部重大科技开发项目的研究工作,完成了秦岭隧道、武广高铁、京沪高铁、合山电厂高烟囱拆除等一大批重要爆破工程的振动测控。他在整理分析了大量爆破振动测试资料的基础上,较系统地探讨了爆破地震波的产生、传播规律及其特征,提出了基于单孔爆破地震波的叠加仿真预报模型,创新了实验模拟的爆破地震研究方法,全面论述了爆破振动测试和分析的最新技术成果,重点解析了各类工程爆破的振动特征和测控技术,论述了应用数码电子雷管实现干扰降振的原理和实践,对爆破振动安全标准的修订提出了以人为本的理念。该书系统地归纳了作者多年来在爆破振动安全研究中探索的新观点、新方法和新进展,相信它对爆破振动研究工作者具有重要的参考和实用价值,也会对相关领域的科研和教学人员有所启迪。在此向工程爆破界的同志们推荐这本专著,也希望杨年华研究员继续在爆破振动控制研究中刻苦钻研,勤于总结,为爆破事业的发展多做贡献。

冯叔瑜

2014 年 1 月

前 言

随着爆破技术的广泛应用,人们越来越关注爆破对周围环境的有害影响,特别是对爆破引起的振动危害十分重视。很多爆破工程的纠纷都与爆破振动有关,建筑物裂缝、门窗振响、边坡滑塌以及人畜震惊等都是爆破施工常见的振害问题,所以对爆振动的研究一直是人们所关注的重要课题。为此人们对相关理论、测试仪器和方法、分析方法及振动破坏标准等方面进行了广泛的研究。但由于爆破振动涉及到岩土介质的传播过程,而岩土介质的复杂性给爆破振动的理论研究带来了较大困难。尽管如此,人们对爆破振动的特性、衰减规律和危害程度等方面已取得了基本的认识,并且根据有关的理论研究成果得到了一些有效的爆破振动控制方法。在爆破振动观测方面,随着电子测试技术的发展,人们已重视爆破前对周围建筑物的调查记录,通常会对重要保护物照相或录相,然后在爆破时进行振动监测和分析,采取技术措施尽可能降低爆破振动的危害,这些监测记录作为工程验收的资料,也可在发生民事纠纷时作为司法裁判的依据。爆破振动波形分析已有多种方法,如傅里叶分析法、反应谱理论法、数值模拟法、经验法等,对工程的评价分析方法各有优缺点,爆破工程师已能利用这些分析方法评价建(构)筑物的安全性,大致预报其爆破地震强度,并据此对爆破方案进行修改和优化。关于爆破振动安全标准问题,虽然人们对振动破坏准则的认识是一致的,但各国根据本国的工程特点和要求制定了不同的安全标准,它为爆破工程师控制爆破振动强度确立了依据。

在本书的撰写过程中,一方面参考了前人的研究成果,另一方面吸收了本人主持的多项科研成果和专利,这些成果的取得离不开铁科院爆破事业部同仁们的支持和帮助,在此向以张志毅为首的爆破事业部同仁表示衷心的感谢。特别需要说明本书的出稿得益于我的老师冯叔瑜院士的帮助和鼓励,他还专门为此书作了序,冯叔瑜老师给予的关怀令我终身难忘。

本书力图阐述国内外的最新技术成果。期望与从事相关行业爆破工程的技术人员进行交流,分享作者的一些看法和认识,恳请读者不吝赐教、批评指正。

作者

2014年1月

目 录

1 爆破振动的产生与传播	1
1.1 爆破地震波与波动方程	1
1.2 爆破地震波的传播特性	6
2 爆破地震效应分析	14
2.1 天然地震及爆破地震的特征	14
2.2 爆破振动信号分析	18
2.3 爆破振动传播特性分析	47
3 爆破地震预报	64
3.1 常规统计预报方法	64
3.2 单孔叠加仿真预报方法	67
3.3 新型爆破振动预报方法应用实例	73
3.4 小 结	80
4 爆破振动测试与分析	81
4.1 爆破振动的测试方法	81
4.2 爆破振动的测量仪器选择	89
4.3 爆破振动测量仪器的标定	99
4.4 传感器的固定安装	103
4.5 爆破振动的测量记录	104
4.6 误差分析和经验公式的建立	106
5 各类爆破工程的振动特征分析	112
5.1 洞室爆破或大规模深孔爆破	112
5.2 深孔爆破	116
5.3 浅孔爆破	122
5.4 冻土爆破振动效应的特点	124
5.5 软土中爆破振动效应的特点	126
5.6 隧道爆破	128
5.7 拆除爆破	141

6 爆破振动控制技术	148
6.1 爆破振动常规控制技术	148
6.2 应用数码电子雷管实现干扰降振技术	150
7 爆破振动安全标准探讨	159
7.1 爆破振动对人体的影响	159
7.2 爆破振动对建(构)筑物结构的影响	162
7.3 爆破振动对地下隧道的稳定性影响	166
7.4 爆破振动对基岩和边坡的影响	167
7.5 爆破对水生物的影响	172
7.6 爆破振动对新浇混凝土影响的安全判据标准	173
7.7 核电工程中的爆破振动安全判据	174
7.8 铁路工程中的爆破振动安全标准	175
7.9 爆破振动破坏标准的判据研究	177
7.10 我国及部分国家制定的爆破振动安全允许标准	178
参考文献	185

1 爆破振动的产生与传播

1.1 爆破地震波与波动方程

1.1.1 爆破地震波的产生

爆破地震波是由炸药在岩土介质中爆炸产生的冲击波,经过一定距离的传播衰减形成弹性振动波,它一般不会造成岩石破裂,但仍有可能使岩体内节理、裂隙发生变形、位移甚至失效。炸药在土岩介质中爆炸时,瞬间形成冲击波,冲击波向外传播的强度随距离的增加而衰减,波的性质和波形也产生相应的变化。根据波的性质、波形和对介质作用的不同,可将冲击波的传播过程分为3个作用区,如图1-1所示。在离爆源约3~7倍药包半径的近距离内,冲击波的强度极大,波峰压力一般超过岩石的动抗压强度,所以岩石产生塑性变形或粉碎。在这一范围内要消耗大部分的冲击能量,冲击波的强度也发生急剧的衰减,因而把这个区域叫做冲击波作用区。

冲击波通过该区域后,由于能量大量消耗,冲击波衰减成不具陡峭波峰的应力波,波阵面上的状态参数变化比较平缓,波速接近或等于岩石中的声速,岩石的状态变化所需时间远远小于恢复到静止状态所需时间。由于应力波的作用,岩石处于非弹性状态,在岩石中产生塑性变形,甚至导致破坏。该区域称为应力波作用区或压缩应力波作用区。其范围可达到120~150倍药包半径的距离。

应力波传过该区后,波的强度进一步衰减,变为弹性波或称地震波。波的传播速度等于岩石中的声速,它的作用只能引起岩石质点作弹性振动,而不能使岩石产生破坏,岩石质点离开静止状态的时间等于它恢复到静止状态的时间,故此区称为弹性振动区。炸药在无限岩体内爆炸作用的破坏分区如图1-1所示。

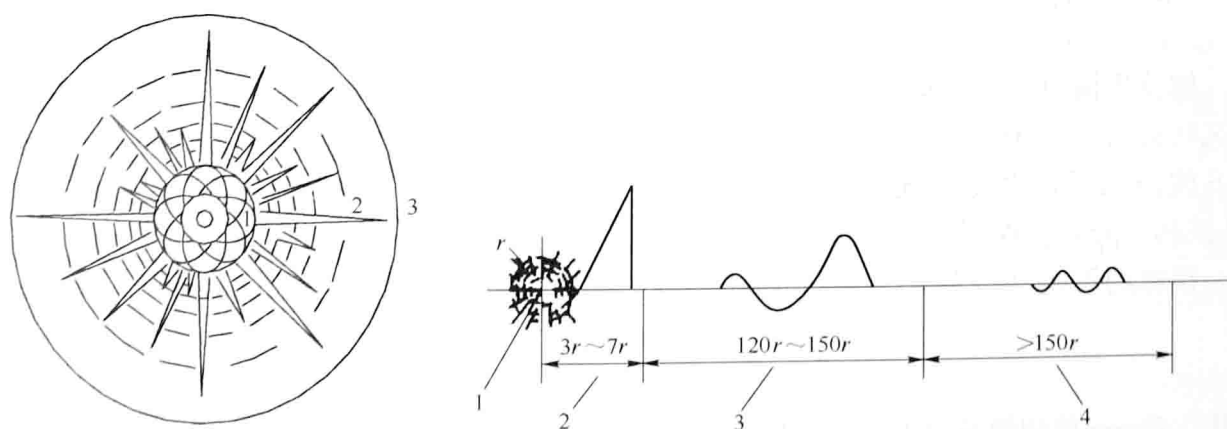


图 1-1 炸药在无限岩体内爆炸作用的破坏分区
 r —药包半径;1—粉碎区;2—冲击破裂区;3—应力波;4—地震波

因此,当炸药在土岩介质中爆炸后,只有 2%~20% 能量转换为地震波,其范围在大于 150 倍药包半径以外。爆破地震波作为一种弹性波,其传播过程是一种行进的扰动,也是能量从土岩介质的一点传递给另一点的反映。因为施加在土岩弹性体中的爆破地震力不能立刻传到爆区范围内土岩的各部分,而是通过爆破地震力所引起的形变,以弹性波的形式由近及远渐渐向外传播。

爆破地震波在形成和传播过程中,主要受到下列因素的影响:

(1) 爆源的影响:包括爆破方法、药量大小、炸药性能、爆破作用指数 n 值的大小、药包与装药孔的不耦合情况、单药包或群药包、集中药包或延长药包、临空面数目、瞬时起爆或分段延时起爆、有无预裂爆破药包等。

(2) 离爆源的距离:距爆源越远,爆破地震波的幅值越小、频率越低。

(3) 爆破地震波传播区的地质、地形条件:包括传播介质的物理力学性质、地质构造、岩土完整性、风化程度等;地形高差、沟壑、地表水体、地下水埋深等都有显著影响。

1.1.2 爆破地震波的类型

爆破地震波由若干种波组成,它是一组复杂的波系。根据波传播的途径不同,可分为体波和面波两类。体波是在地层内部传播的爆破地震波,包括纵波和横波。面波是在地层表面或介质体分界表面传播的波,包括瑞利波和勒夫波,其类型分类如图 1-2 所示。

纵波是纵向运动的波,质点的振动方向与波的传播方向一致。在其作用下介质被压缩和膨胀,故纵波又叫压缩波、疏密波、无旋波或 P 波。纵波通常表现为周期短、振幅小,传播速度快的特点。固体、液体、气体介质均能传播 P 波。P 波对结构物的破坏效应主要表现为初始速度的瞬间冲量。根据弹性波的波动方程,纵波传播速度 (C_p) 主要与介质密度、弹性模量和泊松比有关,其计算公式为:



图 1-2 爆破地震波的分类

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——介质的密度 (kg/m^3);

E ——介质的弹性模量 (MPa);

ν ——介质的泊松比。

横波为横向运动的波,质点的振动方向与波的传播方向垂直。它使介质受剪切力的作用,故又叫剪切波、等体积波、旋转波或 S 波。液体、气体介质不能传播 S 波,只有固体介质才能传播 S 波,S 波通常表现为周期长、振幅大、传播速度慢的特点。S 波在分界面上分为 SV 波与 SH 波两个分量,SV 波运动平面垂直分界面,SH 波运动平面平行于分界面。如图 1-3 所示。

横波的波速 (C_s) 与介质的剪切模量和密度有关,由波动方程求得:

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad \text{或} \quad C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1-2)$$

式中 G ——剪切模量 (MPa),若剪切模量为 0 的介质,横波速度为 0,也就是无法传播横波。

在地震学里,人们把纵波和横波统称为体波,其速度只依赖于介质的弹性参数和密度。

面波是体波经地层界面多次反射形成的次生波,是在地表或结构体表面以及结构层面

传播的波,包括勒夫波(L波)与瑞利波(R波)两种形式。L波传播时,质点作与波传播方向垂直的水平横向剪切型振动,而没有垂直分量的运动。只有在半无限空间上至少覆盖一低速地表层时,L波才会出现。其在层状介质中的传播速度介于最上层横波速度与最下层横波速度之间。R波传播时,质点在波的传播方向和表面层法向组成的平面内做逆向的椭圆运动,而在与该平面垂直的水平方向上没有横向分量的运动。瑞利波使介质体产生膨胀与剪切变形,瑞利波只在弹性体的表面传播,并不深入弹性体内部。瑞利波的波速比横波波速小,但其传递的能量在塌落地震波中是最大的,是地面介质的强烈振动源,对大多数结构有较大的破坏性。瑞利波的振幅随深度增加按指数规律衰减。它的特点是频率低,能量衰减慢。

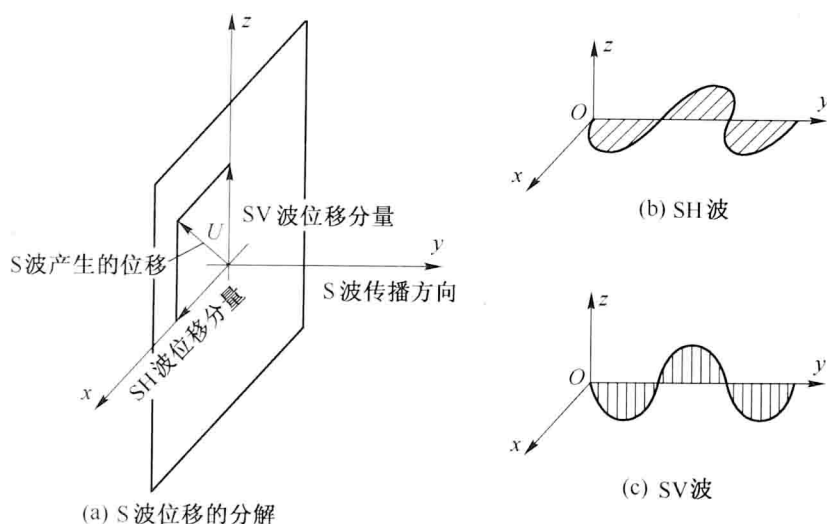


图 1-3 振动波的分解

瑞利波的波速可由下式确定:

$$C_R = f(\nu) \cdot \left(\frac{\nu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-3)$$

式中 $f(\nu)$ ——与介质的泊松比有关的函数。

大量的研究证明,在爆破地震波作用下,地表质点首先遇到纵波作用,产生振荡式的侧向位移,随后当横波到达时又产生一次振荡,最后当瑞利波到达时又有一次较大的振荡。

体波特别是纵波,由于能使介质产生压缩和拉伸变形,因此它是爆破时造成介质破裂的主要因素。表面波特别是瑞利波,携带较大的能量,是造成地表振动破坏的主要因素。假设震源辐射出的能量为 100,则纵波和横波所占能量比分别为 7% 和 26%;而表面波为 67%。由于传播速度不同,爆破地震波传播到远区,体波与面波将在时空上彼此分开。在岩石中,纵波速度为 4~7 km/s,横波速度为 2~4 km/s,瑞利波的波速略小于横波速度,是横波波速的 0.92 倍,勒夫波的波速与频率和波长有关,且有频散现象,通常爆破地震波传出 200 多米远开始区分出纵波、横波、瑞利波等不同性质的波。

1.1.3 波动方程的基本形式

根据波动理论,爆破地震波可合理假设由不同振幅和不同振动频率的简谐波叠加而成,见下式:

$$\begin{cases} \text{位移: } X = \sum_i A_i \sin(\omega_i t) \\ \text{速度: } V = \sum_i \omega_i A_i \cos(\omega_i t + \varphi_{i1}) \\ \text{加速度: } a = \sum_i \omega_i^2 A_i \sin(\omega_i t + \varphi_{i2}) \end{cases} \quad (1-4)$$

式中 A_i ——幅值系数;

ω_i ——圆频率($\omega_i = 2\pi f$ 为频率);

t ——时间(s);

$\varphi_{i1}, \varphi_{i2}$ ——相位差。

对于单自由度结构体系,爆破作用下的位移、速度和加速度的地震反应值分别为:

$$\begin{cases} \text{相对位移: } x(i, t) = \sum_j \eta_j X_j(i) \delta_j(t) \\ \text{相对速度: } \dot{x}(i, t) = \sum_j \eta_j X_j(i) V_j(t) \\ \text{绝对加速度: } \ddot{x}_0(i, t) + \ddot{x}(i, t) = \sum_j \eta_j X_j(i) a_j(t) \end{cases} \quad (1-5)$$

式中 i ——第 i 质点体系;

j ——第 j 振型;

$$\eta_j \text{——第 } j \text{ 个主振型参与系数, } \eta_j = \frac{\sum_j m_j X_j(i)}{\sum_j m_j X_j^2(i)};$$

$X_j(i)$ ——第 j 质点无阻尼时的主振型函数;

$\delta_j(t)$ ——位移反应函数, $\delta_j(t) = - (1/\omega_j') \int_0^t x_0(\tau) e_j^{-\varepsilon_j(t-\tau)} \sin \omega_j'(t-\tau) d\tau$;

$V_j(t)$ ——速度反应函数, $V_j(t) = - \int_0^t x_0(\tau) e_j^{-\varepsilon_j(t-\tau)} [\cos \omega_j'(t-\tau) - (\varepsilon_j/\omega_j') \sin \omega_j'(t-\tau)] d\tau$;

$a_j(t)$ ——加速度反应函数, $a_j(t) = n_j \int_0^t x_0(\tau) e_j^{-\varepsilon_j(t-\tau)} [(1 - \varepsilon_j/\omega_j'^2) \sin \omega_j'(t-\tau) + (2\varepsilon_j/\omega_j') \cos \omega_j'(t-\tau)] d\tau$;

其中 m_j ——第 j 质点质量,

ω_j' ——有阻尼时的圆频率,

ε_j ——阻尼系数。

结构体爆破地震力:

$$P_{ij} = m_i \sum_j \omega_j X_j(i) a_j(t) \quad (1-6)$$

式中 ω_j ——无阻尼时的圆频率。

在单自由度体系的相对坐标系下,爆破地震作用的动力方程可表示为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f(x) = -m\ddot{x}_g \quad (1-7)$$

式中 m ——体系质量(kg);

c ——体系的黏滞阻尼系数;

$f(x)$ ——体系恢复力;

$\ddot{x}_g$ ——振动地面加速度 (m/s^2);

$x, \dot{x}, \ddot{x}$ ——体系相对于地面的位移 (m)、速度 (m/s)、加速度 (m/s^2)。

如果对上式两边同时乘以相对速度 $\dot{x}$, 并在爆破振动持续时间 $[0, t]$ 求积分, 就可得到能量反应方程式:

$$\int_0^t m \ddot{x} \dot{x} dt + \int_0^t c \dot{x} \dot{x} dt + \int_0^t f(x) \dot{x} dt = - \int_0^t m \dot{x}_g \dot{x} dt \quad (1-8)$$

记为:

$$E_k + E_d + E_h = E_i \quad (1-9)$$

式中 E_k ——体系相对动能, $E_k = \int_0^t m \ddot{x} \dot{x} dt$;

E_d ——体系阻尼耗能, $E_d = \int_0^t m \dot{x} \dot{x} dt$;

E_h ——体系变形能, $E_h = \int_0^t f(x) \dot{x} dt$;

E_i ——爆破振动总输入能量, $E_i = - \int_0^t m \dot{x}_g \dot{x} dt$ 。

从能量反应方程式可看出, 体系变形能即是体系弹性变形能与滞回耗能之和, 阻尼耗能和滞回耗能随时间增加而增加, 当地震动结束、建(构)筑物静止时, 动能和弹性变形能亦趋于零, 那么地震动对结构的总输入能量全部由阻尼耗能和滞回耗能所平衡。

对于爆破地震作用下的多自由度剪切模型, 可采用相对能量方程计算:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} m \dot{x}_i^2(t) \right) + \sum_{i=1}^n \int_0^t c \dot{x}_i^2 dt + \sum_{i=1}^n \int_0^t f_i \dot{x}_i dt = \sum_{i=1}^n \int_0^t (-m \ddot{x}_g \dot{x}_i) dt \quad (1-10)$$

$$\sum_{i=1}^n E_{ki} + \sum_{i=1}^n E_{di} + \sum_{i=1}^n E_{hi} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (1-11)$$

式中 E_{ki}, E_{di}, E_{hi} ——第 i 层的动能、阻尼能和滞回能;

$\sum_{i=1}^n E_i$ ——爆破地震动输入到结构对象的总输入能量。

而在绝对坐标系中, 结构物的绝对位移 $x_t = x + x_g$, 其中, x, x_g 各自表示结构物相对地面的位移和地面运动的位移。若将 $x = x_t - x_g$ 代入, 可得到体系的绝对能量反应方程为:

$$\frac{1}{2} m \dot{x}_t^2 + \int_0^t C \dot{x} \dot{x} dt + \int_0^t f(x) \dot{x} dt = - \int_0^t m \ddot{x}_g \dot{x} dt \quad (1-12)$$

计算式中涉及地面质点运动速度和加速度, 可由测振仪获得。

地震地面运动类型不同以及结构性能差异, 使得结构主要表现为“最大位移首次超越”和“塑性累积损伤”两种破坏形式。最大瞬时输入能量是地震动作用在结构上的最大能量脉冲, 相应会引起较大的结构位移增量。研究表明, 对于大部分短时脉冲型的地震动, 单自由度结构瞬时输入能量与位移呈现一种对应关系, 最大瞬时输入能量对应结构最大位移, 如果超越结构最大允许位移, 就会破坏; 如果最大瞬时输入能量未能达到首次超越型破坏极限值, 但它使结构在地震作用下进入非线性阶段, 发生塑性变形, 也可能导致累积破坏, 通常将结构的滞回耗能作为结构的累积破坏能量。结构是通过变形与阻尼两个途径来耗散能量的, 研究最大瞬时

输入能量对结构抗震能量分析方法的研究具有重要意义。

波动理论和结构响应分析表明,爆破地震各强度描述因子(位移、速度和加速度)均是频率和时间的函数,而且各物理参数间相互联系。因此,强度和结构动力特性不但取决于质点振动幅值(速度或加速度),还与地震波的时间和频率(周期)密切相关。如果只是简单地用其中某一、二个独立的物理参数来建立爆破地震安全判据,就会忽视其他爆破地震强度影响因素,以及土岩介质体与爆破地震波之间的相互作用。

1.2 爆破地震波的传播特性

1.2.1 爆破地震波传播的基本原理

基于对波动理论的研究,爆破地震波在介质中传播依照以下原理。

(1) 惠更斯原理

惠更斯原理表明:在弹性介质中,可以把 t 时刻的同一波阵面上的各点看作从该时刻产生子波的新的点振源,经过 Δt 时刻后,这些子波的包络面就是 $t + \Delta t$ 时刻新的波阵面。由波阵面上各点所产生的子波,在观测点上相互干涉叠加,其叠加结果就是在该点观测到的总振动。惠更斯—菲涅尔原理如图 1-4 所示。

(2) 费马原理(射线原理)

费马原理又叫射线原理或最小时间原理,认为波从空间一点到另一点的传播的最小路径称为射线。费马原理讲述的是波沿射线传播的时间比沿其他任何路径传播的时间都小,即波沿旅行时最小的路径(不等于距离)传播。在任一点上,射线总是垂直于波前。

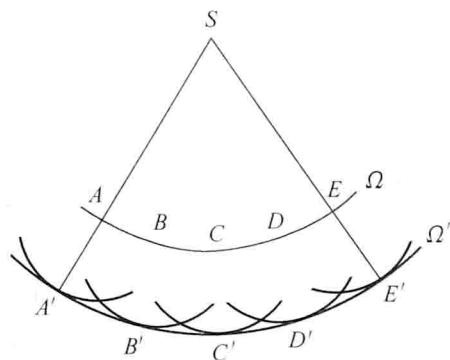


图 1-4 惠更斯—菲涅尔原理

根据波的传播理论,目前波阵面上每一点都是下一时刻波传播的波阵面的子波源,而当前波阵面又是上一时刻所有子波源共同作用的结果。此波的传播过程中出现了反射、衍射、干涉等现象。爆源和观测点穿越复杂的岩土介质,爆破地震波的体波可以直线传播到观测点,但由于岩土介质中节理裂隙较多,各种界面密集体波在介质内部发生复杂的反射、衍射、干涉,使体波的振动强度衰减较快;地面传播的面波需要绕过沟沟坎坎、坡顶坡脚才能传播到观测点。也就是说面波所传播的实际距离要大于爆源和观测点之间的平面距离。

(3) 斯涅尔(Snell)法则

爆破地震波传到自由面时均要发生发射,无论是纵波还是横波,经过自由面反射后都要再度生成反射纵波和反射横波。自由面上部为空气,与岩土介质密度相比,可认为空气的密度为零,当地震波到达自由面时将发生全反射。假设入射波为纵波,纵波的入射角和反射角均等于 α ,而反射波生成的横波反射角为 β ,根据光学斯涅尔(Snell)法则反射角存在下列关系:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{C_p}{C_s} \quad (1-13)$$

由于入射 P 波在自由面产生反射 P 波和 SV 波(在一定的入射角情况下),所以在地表所观测到的质点运动已经发生变化,它不是单一的 P 波质点运动,而是入反射 P 波和反射 SV 波的运动组合。故自由面上质点的振动速度远大于岩体内部仅有入射波的质点振动速度。梁向

前等人在研究爆破地震波对地下管线的影响时,专门观测了远处爆破在不同深度点的质点振动速度变化。如图 1-5 所示。充分说明了爆破振动波在自由面浅层受表面波、反射波的叠加组合影响,地表质点振动最大,随深度增加质点振动速度呈负指数规律衰减。

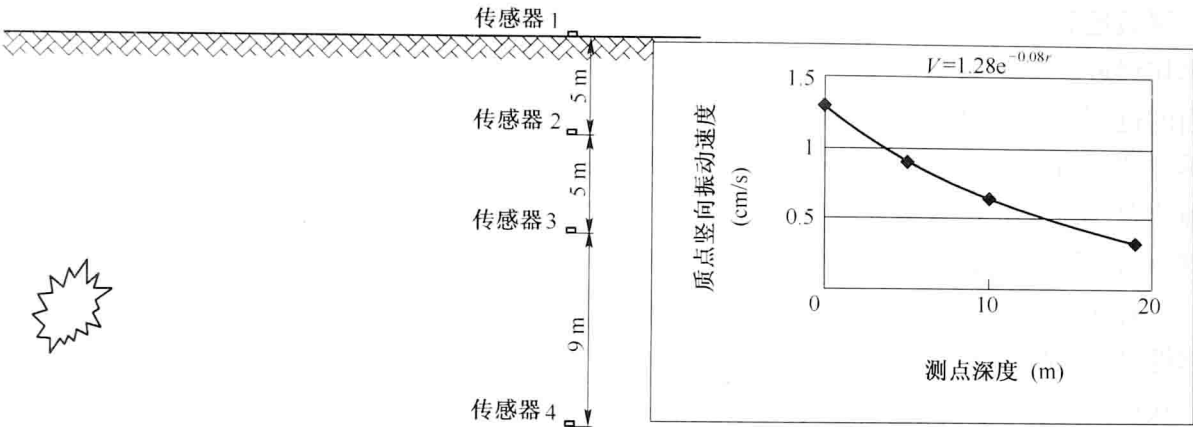


图 1-5 爆破在不同深度点的质点振动速度变化

1.2.2 爆破地震波的基本特征

爆破地震波的传播过程非常复杂,爆破振动波形的幅值、频率及相位不仅随时间发生变化,而且没有确定的规律性,其振动变化过程不能用明确的数学关系式来描述,具有很大的随机性,即使同次爆破的相同距离点测得的振动波形也存在一定的差异。测试结果表明任意质点的爆破地震波是一个随机波,图 1-6 为实测的典型爆破振动波波形,分别是同一测点的 x 、 y 、 z 三个方向的振动分量。图中 a 所示区为单一炮孔爆破地震波,图中 b 所示区为多个药包微差爆破时产生的地震波。

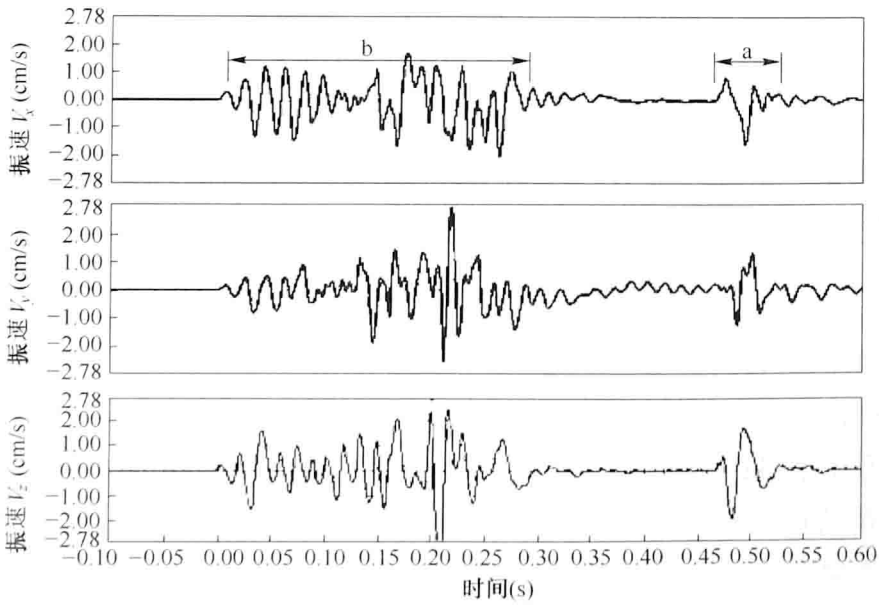


图 1-6 典型爆破振动波

对于爆破振动波的研究,需要弄清楚波速和质点振动速度两个不同概念,波速是指扰动在介质中的传播速度,即波阵面的传播速度;质点振动速度是指当介质受到波动能量扰动,其质点围绕平衡位置往复运动的速度。任一质点处的振动状态必须综合考虑振动速度峰值、主振

频率和持续时间三个要素。

1.2.3 爆破振动波的能量或振幅传递特征

爆破地震波的传播过程是能量通过介质质点的扰动向爆源四周扩展传递的过程。由于炸药爆炸释放的能量只有很小一部分转换成爆破地震波的能量,而且爆破地震波从爆源传播到地面的过程中,随着传播距离的增大,由于波阵面不断扩大和介质的内阻尼吸收作用,使爆破地震波的能量和振动幅值不断衰减。在爆破地震波的传播过程中,受炸药的性能、药量大小、爆源位置、装药结构、起爆方式、传播介质的性质及地形条件等各种因素的影响,使地震波的能量、振动幅值、频率和振动持续时间等发生很大的变化,爆破地震波具有很大的复杂性和随机性。尽管如此,对大量爆破振动观测数据进行统计分析,证明爆破地震波仍然具有一定的统计规律性,爆破地震波的传播规律可以用概率统计的方法来进行描述和研究。

众所周知,爆破振动强度可用介质质点的运动物理量来描述,包括质点位移(U)、速度(V)和加速度(a)。根据兰格福斯等许多爆破专家的研究,认为用质点振动速度描述爆破振动强度具有很好的代表性,因为岩体介质中的质点振动速度与岩体损伤破坏或建(构)筑物失稳破坏相关性最好。在实际应用中,采用线性回归的分析方法对质点振动速度峰值的衰减规律进行预测研究最为常见,若按照单药包爆破的振动波峰值进行统计分析,其规律性十分明显,相关性系数在 0.9 以上。对于爆破振动幅值随传播距离的变化规律,公认的数学表达式为:

$$A = k(Q^n/R)^\alpha \quad (1-14)$$

式中 A ——振动强度;

Q ——同时起爆药量(kg);

R ——爆源到测点距离(m);

k, α ——与地质条件有关的系数。

以质点振动速度峰值 V 为振动强度,则有 $V = k(\sqrt[3]{Q}/R)^\alpha$;它是有广泛共识、应用最多的爆破振动衰减计算公式。对于深孔爆破近距离范围地震波按柱面扩散,可近似为 $V = k(\sqrt{Q}/R)^\alpha$ 。近年有学者基于柱面波理论、长柱状装药中的子波理论以及短柱状药包激发的应力波场,提出了单孔爆破的振动峰值计算公式为:

$$V = \frac{P_0}{\rho C_p} \left(\frac{b}{R} \right)^\alpha \quad (1-15)$$

式中 b ——炮孔半径(m);

P_0 ——炮孔内爆生气体的初始压力(MPa);

ρ ——岩石密度(kg/m³);

C_p ——岩石纵波速度(m/s);

α ——爆破振动衰减指数。

该计算式较全面地反映了炸药种类、装药结构、钻孔孔径及岩性参数等因素对质点峰值振动速度的影响。

按照爆破地震波在传播过程中的能量损失原因不同,地震波的衰减有波前扩散(球面扩散)、介质对地震波的吸收和透射损失等几种情况。根据地矿部门使用爆破地震勘探方法所得到的研究结果,在黏弹性介质中球面波传播的波函数中振幅函数为:

$$A = \frac{A(R)}{R} A_0 = \frac{1}{R} e^{-\frac{\pi \cdot f \cdot r}{Q_{PD} \cdot C}} A_0 \quad (1-16)$$

式中 A ——观测地点的地震波幅值;

R ——观测点到爆破地震波源的距离(m);

$A(R)$ ——地震波的黏性衰减因子;

A_0 ——波源的初始振幅;

Q_{PD} ——地震波传播过程中所经过介质的品质因子;

f ——地震波的频率,公式是在简谐波的条件推导得出的;

C ——地震波在介质中的传播速度(m/s)。

从式(1-16)看出地震波振幅的衰减由两部分组成:一部分是以 r^{-1} 表示的“球面扩散因子”;另一部分是以指数项表示的“黏性衰减因子”。这两部分的衰减机理完全不同,一个是由波传播的“几何因素”引起的,一个是由“介质的黏性因素”引起的。

1.2.4 爆破振动波频率变化特征

爆破振动信号有很大随机性,它是一种复杂的振动信号,包括很多频率成分,其中有一个或几个频率段为主要成分。不同频率成分的信号对结构或设备的振动影响是很不相同的,有时差别非常显著。如在实际爆破工程中,同一条件下,相邻建筑物的反应可能极不相同,有的建筑物振动强烈(发生共振),而有的反应不大。其中一个重要原因是由于爆破地震波中包含很多频率成分,当其主要振动频率等于或接近某一建筑物的固有频率时,该建筑物就振动反应强烈,否则振动影响较弱。因此,在爆破振动分析中,获知爆破振动信号的主要频率成分以及建筑物结构的固有频率特性是十分必要的。频谱分析可求得爆破振动信号的各种频率成分和它们的幅值(或能量)及相位的关系,这对研究爆破地震波的频率特性及结构的动力反应很有意义。

爆破地震波与天然地震波最大的区别之一就是频域特性的差异,天然地震频率低,一般振动主频在 0.5~5 Hz;而爆破振动频率较高,一般振动主频在 10~200 Hz,爆破地震频率受多种因素影响,大多数幅值达到有破坏效果的振动,其主振频率在 (40 ± 20) Hz。根据美国矿业局的研究资料及结构动力学分析,大多数一至二层结构的民用建筑物的固有振动频率在 4~12 Hz,高层建筑物的固有振动频率更低(1~5 Hz)。因此,天然地震的主频更接近建筑物的固有频率,天然地震引起结构共振的可能性更大,其破坏性更强,而爆破振动的频率较高,破坏性相对较弱。

如前文所述,爆破地震波随着传播距离的增加,一方面波阵面不断扩大,另一方面因介质的内阻尼吸收作用,使爆破地震波的能量和幅值不断衰减。这种衰减作用与振动波的频率有关,对高频振动成分岩土介质的阻尼作用较大,即高频振动波更容易被吸收,衰减较快。表现出在较远距离上爆破地震波高频成分显著衰减,低频成分起主要作用,因此有主振频率随传播距离而降低的特性。由于建筑物的自振频率一般都比较低(2~15 Hz),当远区爆破振动的主频率与建筑物的自振频率接近甚至一致,且爆破振动仍具有一定的幅值强度时,由于共振作用,建筑物将产生剧烈的振动,并很有可能造成建筑物的破坏。因此,在爆破远区,偶见爆破地震波的低频振动破坏现象。

影响爆破振动频率的因素极为复杂,但总体来说可以分为三个主要方面:

(1) 爆源特性。包括炸药性能、药量大小、装药结构、爆破类型、起爆方式等。

(2) 传播介质特性。包括地质构造,地形条件,传播介质的物理力学性质和测点的位置、距离等。

(3) 局部场地条件。测点处的地形和地质条件,爆源的相对方向等。

在爆破振动的主要频率特征研究中,要想综合考虑各种因素的影响具有很大的难度。目前主要采用爆破试验和现场监测的手段,通过测试数据的回归分析,对爆破振动频率的变化规律及其特性进行研究。而在这些诸多的影响因素中,研究最多的是炸药量、距离、介质性质和起爆方式对爆破振动频率的影响。受地形地质条件和爆破振动波复杂性和随机性影响,目前尚未得到主振频率的理想计算公式,但是如下一些定性的认识被广泛接受。

(1) 亨利奇介绍了平坦地形和均匀地质条件下爆破地震的主振相周期随传播距离变化的经验计算公式为:

$$T = \tau \times \lg R \quad (1-17)$$

$$f = 1/T$$

式中 T ——主振周期(s);

f ——主振频率(Hz);

R ——爆源振中至计算点水平距离(m);

τ ——经验常数。

(2) 爆破地震波主频也受爆破类型影响。一般爆破规模越大,爆破振动频率越低。如隧道内小直径浅眼爆破在邻近隧道或本隧道内产生的振动主频一般在 100 Hz 以上,其影响范围通常在数十米远;而规模稍大的台阶深孔爆破主振频率在 30 Hz 左右(深圳安托山的测振数据为 15~70 Hz),影响范围一般在数百米内;大规模的洞室爆破的主振频率在 10 Hz 以下(天生桥洞室爆破主频为 7.4 Hz、尖山铁矿洞室爆破主频为 7.5 Hz、宜昌南站洞室爆破主频为 8 Hz),其有害影响范围一般在千米以内。

(3) 爆破地震波主频与传播介质特性有关,越是坚硬的岩石中高频振波成分越丰富,而在软弱风化岩或土层中传播的地震波高频成分衰减更快,例如在秦岭高地应力特硬完整花岗岩中测得的爆破振动波主频达 380 Hz,而在深圳某采石场风化花岗岩中测得的爆破振动波主频仅 15 Hz。

(4) 根据相似准则所得到的爆破地震波主频率随比例药量的变化关系,可表示为:

$$f \cdot R = k\varphi(\sqrt[3]{Q}/R) \quad (1-18)$$

式中 f ——爆破地震波主频率;

R ——观测点到爆破地震波源的距离(m);

k ——与地质条件有关的系数;

Q ——同时起爆的药量(kg);

$\varphi(\sqrt[3]{Q}/R)$ ——比例药量 $\sqrt[3]{Q}/R$ 的函数。

(5) 通过现场爆破振动测试波形的主频分析,由统计回归法获得爆破振动主频的变化规律,爆破地震波的频谱一般为不对称钟形,其外包络线可以用 λ 曲线进行近似(图 1-7):

则外包络线方程为:

$$A_{x=R}(f) = a \cdot f^3 e^{-b \cdot f} \quad (1-19)$$

式中 $A_{x=R}(f)$ ——爆破地震波在距离 R 处的频率幅值函数;

a, b ——与药量、药包直径等参数有关的系数,参照萨道夫斯基公式可表示为如下形式: