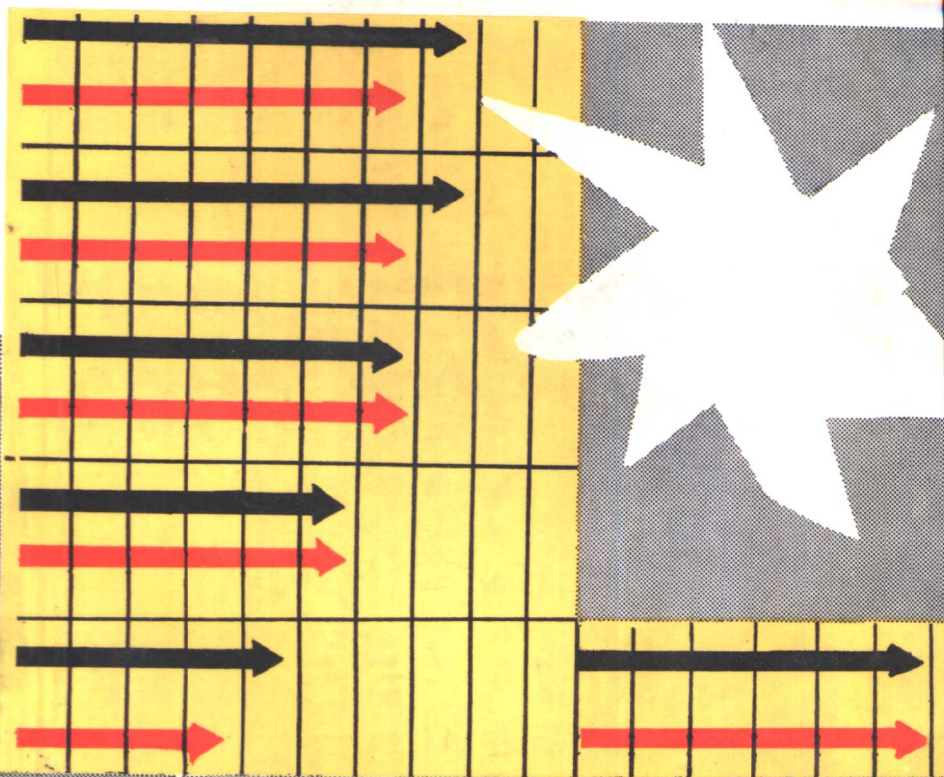


工程爆破 测试技术

刘建亮 编著



北京理工大学出版社

TD 235
L-423

工程爆破测试技术

刘建亮 编著

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

内 容 简 介

本书全面介绍了工程爆破测试技术,具有较强的实用性。全书共九章,分别论述了测试系统的基本理论,数学模型;爆破过程中冲击波压力,应力应变,振动,噪声及爆速测试;高速摄影测试,弹性波测试,现场测试及数据分析和误差处理。

本书可供从事爆破领域的研究人员、工程技术人员参考,也可供大专院校有关学生及研究生参考。

工程爆破测试技术

刘建亮 编著

*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

地质印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 32 开本 7 印张 153 千字

1994 年 7 月第一版 1994 年 7 月第一次印刷

ISBN 7-81013-933-9/TK·1

印数:1-1200 册 定价:7.50 元

前 言

爆破测试技术在整个爆破技术领域中具有重要的作用。建国以来,国内有关科研单位、大专院校及一些产业部门在这方面做了不少的工作,取得了可喜的成果。但总的看来,仍满足不了爆破技术发展的需要,尚须做很多的工作。爆破过程的特点,使得爆破测试不同于一般的工程测试。此外,爆破测试要涉及到各种介质,从而增加了测试的复杂性和难度。

本书基本上包括了工程爆破测试的主要内容。第一章介绍了爆破测试包含的内容,目前发展的现状及今后发展趋势。第二章介绍了测试系统的基本理论、基本概念及必要的知识和有关数学模型。第三章至第七章分别论述了爆破过程岩石介质的应力应变测试,结构应变测试;冲击波压力测试;爆破振动测试;爆速及爆破噪声测试;土岩介质中鼓包运动的高速摄影测试,介质破坏的声波测试。这几章内容基本上涉及了工程爆破测试的全部内容。第八章论述了野外现场测试,第九章是数据处理及误差分析。这部分内容是当前工程测试中相当活跃和发展迅速的领域。

由于新材料、新仪器的出现,一些新的手段和方法正在发展,书中如有不当之处,敬请读者批评指正。

承蒙刘殿中高级工程师对全书进行了审阅并提出宝贵意见,在此表示深深的谢意。

最后,向广东省水电三局珠海公司、北京恩菲爆破公司表示深深的谢意。

作者

1993. 12

目 录

第一章 爆破测试技术概述	(1)
§ 1 爆破过程的研究方法	(1)
§ 2 工程爆破测试技术的内容	(3)
§ 3 工程爆破测试技术发展的历史、现状 及发展方向	(4)
第二章 测试系统基本特性	(7)
§ 1 基本概念与基本知识	(7)
§ 2 信号与系统	(17)
§ 3 爆破测试系统	(24)
§ 4 传感器特性	(29)
第三章 爆破过程动应变测试	(37)
§ 1 爆炸荷载作用下岩石的动力学性质	(37)
§ 2 应变测试的内容与方法	(40)
§ 3 应变测试系统	(41)
§ 4 岩体应力应变测试	(57)
§ 5 构筑物应变测试	(60)
§ 6 数据处理	(65)
第四章 冲击波压力测试	(76)
§ 1 爆破过程的冲击波	(76)
§ 2 测试内容及一般方法	(82)
§ 3 测压传感器	(83)
§ 4 二次仪表及记录装置	(90)
§ 5 压力测试系统	(102)

§ 6 读数及波形处理	(108)
第五章 爆破振动测试	(114)
§ 1 爆破振动测试的主要内容及一般方法 ...	(114)
§ 2 爆破振动测试系统	(118)
§ 3 振动反应谱测试	(129)
§ 4 振动测试中的若干问题	(132)
§ 5 波形分析和数据处理	(136)
第六章 岩石介质变形破坏及运动过程测试	(139)
§ 1 爆炸荷载作用下岩石的破坏效应	(139)
§ 2 岩石鼓包运动的高速摄影测试	(140)
§ 3 高速立体摄影测量法简介	(149)
§ 4 岩体爆破破坏范围的声波测试技术	(152)
第七章 爆速与爆破噪声测试	(160)
§ 1 炸药爆速测试	(160)
§ 2 爆破噪声测试	(163)
第八章 现场测试	(168)
§ 1 概述	(168)
§ 2 测试方案的确立	(169)
§ 3 现场操作注意事项	(172)
§ 4 抗干扰措施	(174)
§ 5 其它有关问题	(178)
第九章 误差分析及数据处理	(181)
§ 1 误差的分类、评定和处理	(181)
§ 2 测试数据处理	(187)
§ 3 动态误差修正方法	(193)
§ 4 频谱分析在爆破测试数据处理中的应用	(198)

附录.....	(205)
主要参考文献.....	(212)

第一章 爆破测试技术概述

§ 1 爆破过程的研究方法

炸药在介质中爆炸,产生高压、高温,并伴有大量气体生成物,从而对介质产生作用。这种作用,称为爆炸荷载的外部效应。它和爆炸能量在介质中的作用、传递方式有关,也和介质本身特性有关。

当药包在土岩介质中爆炸时,通常认为:在爆破近区传播的是冲击波;在中区,冲击波逐渐转化为应力波,其波传速度逐渐接近于声波速度;在远区,则为近似于弹性振动的地震波。当岩体破坏,爆炸产物向空中逸散时,还会在空气中产生空气冲击波。

因此,对于爆破现象的研究,主要是研究爆炸荷载的外部效应。它包含两个方面的内容:一是爆炸能量和爆破方式的关系及不同的爆破方式对这种能量在介质中分布、传递的影响;其二是介质在爆炸荷载作用下发生的变化和介质本身特性,能量作用方式的关系以及介质如何发生变形、破坏。

目前,工程上对于爆破现象的研究,主要是通过各种试验以及结合工程实践进行。采用的手段是宏观观测及仪器观测。仪器观测由于能深入到介质的内部,了解整个过程,得到定量结果,因而成为主要的手段,并进而发展成专门的测试技术。测试过程中,采用的传感器和仪器种类繁多,几乎涉及到工程测量中所采用的各种手段:机械的、电的、光学的,但主要以电

测手段为主。

试验研究包括野外和实验室两部分。野外试验根据目的不同,规模也大小不等。大规模的野外试验,由于资金、场地、时间及其它各种因素的影响,实现起来困难较多。现场条件复杂,影响因素多,全面精确地掌握介质的物理性能和地质资料是困难的,测试精度和数据的可靠性也存在不少问题,不易得出明显的规律。为此,试验研究正向模拟试验发展。

模拟试验,就是缩小爆破规模,突出主要目的,对可能涉及的各种因素和影响进行简化处理。通过人为地对某些因素加以控制,使一个多因素的复杂过程成为一个主要因素起作用的过程,以利于对现象本质的认识。

为了对某一因素的作用进行深入的了解,试验就要具有重复性和类比性,对于爆破过程,这一条件遇到一定困难。主要表现在:

(1) 即使炸药、药包布置、爆破方式等条件完全一致,但介质条件的复杂性而使前述的要求受到限制。众所周知,爆破过程和介质特性有密切关系,使两次试验完全相同是不可能的。因而满足不了重复性的要求,只具有类比性。只能在一定条件下,在主要方面满足重复性的要求。这自然影响测试结果的精度。

(2) 对模拟试验的结果进行外推,要有可靠的理论依据,这涉及到爆破相似律的问题。对爆破过程,几何相似容易满足,但物理相似问题在爆炸动态过程必须认真考虑。为此,必须要在理论依据上做进一步探讨。目前,一般采用如下的办法:用少量的原型试验验证模拟试验得出的结论,进行对比和修正,或建立外推的前提和范围。

(3) 材料和技术问题。主要包括炸药、起爆技术、介质材

料性能的模拟。众所周知,炸药的稳定爆轰均存在临界直径和临界起爆药量问题。模拟试验中,按一定几何比例缩小,必然要解决这方面的问题,否则,就无法进行试验。

(4) 小型试验对测试系统、测试技术提出了更高的要求,如仪器的频响特性、稳定性、抗干扰能力等,传感器元件的微型化,高灵敏度和抗干扰性能等等。

随着电子计算机的应用发展,可在进行一定假设及对条件进行简化的基础上,建立适当的数学模型,进行数值或模拟计算,以减少试验次数。通过必要的试验,给出合理的边界条件及初始条件,检验、修正假设的合理性,不断完善数学模型,从而使研究深化。

§ 2 工程爆破测试技术的内容

工程爆破测试的内容是十分广泛的。按能源分,有化爆(各种炸药的爆炸)、核爆;按测点位置分,有近区、中区和远区;被测量包括力学量、热学量等物理量;介质涉及固态、液态、气态;被测量的变化速度和频率范围也相当广泛。它是工程测试技术的一部分,但由于爆破过程的特点,又有自己的特殊性。

工程爆破测试主要是指下述内容测量:

(1) 不同爆破方式及条件下,爆炸荷载中的能量分布特点。

(2) 爆炸波在介质中的传播规律。

(3) 土岩介质在爆炸荷载作用下的变形和物理力学特性的变化规律。

(4) 结构物在爆炸荷载作用下的破坏形式及破坏规律。

爆破测试技术涉及的内容是广泛的。它涉及到诸多学科的内容。测试技术的发展也和诸多学科的发展水平有关,尤其是测试仪器的发展水平及材料科学的发展水平有密切关系。因此,尽量的吸收其它学科的新思想、新方法、新技术、新材料,才能使测试技术不断发展,更好地解决测试技术的问题。

§ 3 工程爆破测试技术发展的 历史、现状及发展方向

爆破测试技术在国外发展较早。我国自 50 年代后期起步。从最初采用机械式压力自记仪和测振仪以来,大体可分成如下几个阶段:

(1) 从静态的机械式量测技术发展到采用现代电子技术,光学技术的各种动态测试技术。

(2) 测试系统逐步配套,测试内容不断增加。

(3) 测试范围从地表进入到岩体内部自由场,从爆破远区,中区已逐步发展到爆破近区,甚至直接在药室和炮孔中进行测量。

(4) 测试规模越来越大,从单项测量发展到大规模的综合性测试。

尽管我国测试技术发展很快,但总的看来,仍满足不了爆破理论研究的需要,主要存在以下几个方面的问题:

(1) 传感器缺乏标准化,系列化的研究。

(2) 测试仪器品种少,配套不够合理,更新换代的速度慢。

(3) 缺乏合理的动态标定设备。

(4) 数据处理水平相对落后。

(5) 对测试误差的分析研究工作,测试结果精度分析等还不深入,尤其是系统的动态测试误差分析。

国外由于材料科学及仪器仪表的发展水平,工程爆破测试技术发展快,其表现为:

(1) 传感器研制正向小型化,组合化方向发展,同时不断提高传感器的灵敏度和强度。

(2) 仪器的数字化,组合化。这方面模一数转换的 A/D 变换器及瞬态记录仪发展很快,其采样速度及容量完全能用于爆破试验。测试中同一主机配用不同的插件可进行不同测试,从而实现一机多用,多功能测试。

(3) 宽频带、多通道记录设备,主要是磁带记录器发展迅速,以 DR 方式工作的磁带记录器上限频率已达到数兆赫。

(4) 数据采集和处理装置计算机化。目前的趋势是:程序的简化和标准化;接口的标准化和通用化;终端设备功能多样化,并发展了计算机图像处理装置。

(5) 遥测技术的应用。

综合国内外工程爆破测试技术发展的历史和现状,这个领域将沿着以下两个方面发展:新型传感器和新的测试方法、手段的研究;其二是数据处理方法和设备的研究。具体表现在如下几个方面:

(1) 传感器的小型化、高强度、高灵敏度 工程爆破测试,尽管测试内容多,涉及到不同的仪器和设备,但传感器是核心。随着新材料,新工艺,新技术的出现,更重要的是爆破测试对传感器的要求,使其向小型、轻便、牢固,可靠,高灵敏度和抗干扰方向发展,从而带动对传感器作用机理及测量性能的深入研究,也使其在安装工艺,与介质匹配等方面的工作更加深入。

(2) 测试系统本身 其测试性能的分析、测试误差,特别是动态测试误差的分析,系统标定方法的研究,也是今后发展的一个方向。这方面的工作深入了,测试中出现的问题和新的物理现象才能得出正确的判断和解释。

(3) 新的测试方法,测试技术 主要是遥测技术在工程爆破测试中的应用和推广方面的研究。这无疑对提高测试效率和测试质量,节省人力物力方面都是非常有意义的工作。

(4) 多通道、宽频带记录装置的研制 主要是宽频带磁记录器及高采样频率 A/D 变换器的研究,这个问题的解决,一方面能突破目前某些测试系统在性能方面受到记录器的限制,同时也能和数据处理系统衔接起来。

(5) 数据处理方法和装置的研究 对于爆破测试而言,测点多,记录的都是单次瞬态信号,测量参数也多。因而,实现测试数据的自动采集和处理,自然是必须要解决的问题,由于数字技术和电子计算机的应用发展,目前这一领域发展迅速。

(6) 模拟试验将会得到更大的发展并被广泛采用。

(7) 计算机对爆破试验的模拟 随着计算机动态管理系统的出现及对一些动态现象的模拟成功,随着计算机图像系统的发展,实现计算机模拟爆破试验完全是有可能的。尽管目前仍处在起步阶段,尚有一系列技术问题需要解决,但这个目标一定会达到。

第二章 测试系统基本特性

§ 1 基本概念与基本知识

1.1 频谱分析

作为一种有力的工具,频谱分析在测试中有广泛的应用。
频谱分析的基础是傅里叶变换。

1. δ 函数(Dirac 函数)

δ 函数又称“单位脉冲”函数,或单位冲激函数,它由下式定义:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) \phi(t) dt = \phi(0) \quad \phi(t) \text{ 在 } t=0 \text{ 处连续}$$

δ 函数有两个明显的特点:

$$\delta(t) = \begin{cases} +\infty & t=0 \\ 0 & t \neq 0, \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$$

2. 傅里叶级数与傅里叶积分

(1) 傅氏级数 有限区间 $[t_0, t_0+T]$ 上的函数 $x(t)$, 在一定条件下可以展成傅氏级数

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{i2\pi n f_0 t} \quad t \in [t_0, t_0+T] \quad (2-1-1)$$

$$\text{式中 } f_0 = 1/T, C_n = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) e^{-i2\pi n f_0 t} dt \quad (2-1-2)$$

称 C_n 为有限区间 $[t_0, t_0+T]$ 上信号 $x(t)$ 的离散频谱。 $|C_n|$ 为离散振幅谱, $\text{Arg} C_n$ 为相位谱。

(2) 傅氏积分 下述积分变换对

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \quad (2-1-3)$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2-1-4)$$

为傅氏积分。 $X(f)$ 为 $x(t)$ 的傅氏变换, $x(t)$ 为 $X(f)$ 的反变换。 $X(f)$ 称为信号 $x(t)$ 的连续频谱,简称为频谱。进一步,可将 $X(f)$ 表示为

$$X(f) = A(f) e^{i\phi(f)}$$

$A(f) = |X(f)|$ 称为信号 $x(t)$ 的振幅谱

$\phi(f) = \text{Arg} X(f)$ 称为信号 $x(t)$ 的相位谱

由信号 $x(t)$ 求出它的频谱 $X(f)$,就称为对信号 $x(t)$ 作频谱分析。

表 2-1 给出了一些信号的频谱。表 2-2 列出了频谱的基本性质。

表 2-1 信号和频谱表

信 号 $x(t)$	频谱 $X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt$
方波 $x(t) = \begin{cases} 1 & t < \delta \\ 0 & t > \delta \end{cases}$	$\sin 2\pi \delta f / \pi f$
三角波 $x(t) = \begin{cases} 1 - t /\delta & t < \delta \\ 0 & t > \delta \end{cases}$	$\sin^2 \pi \delta f / \pi^2 \delta f^2$
钟形波 $x(t) = e^{-\beta^2 t^2} \quad (\beta > 0)$	$\frac{\sqrt{\pi}}{\beta} e^{-\pi^2 f^2 / \beta^2}$
半余弦波 $x(t) = \begin{cases} \cos(\pi t / 2\delta) & t \leq \delta \\ 0 & t > \delta \end{cases}$	$\frac{4\delta}{\pi} \cdot \frac{\cos 2\pi \delta f}{1 - (4\delta f)^2}$
单边指数衰减波 $(a > 0)$ $x(t) = \begin{cases} e^{-at} & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$	$1/a + 2\pi i f$
双边指数衰减波 $(a > 0)$ $x(t) = e^{-a t }$	$\frac{2}{a} \cdot \frac{a^2}{a^2 + (2\pi f)^2}$

表 2-2 频谱的基本性质

	时间函数(信号)	频 谱
	$x(t)$	$X(f)$
	$y(t)$	$Y(f)$
线性叠加原理	$ax(t)+by(t)$	$aX(f)+bY(f)$
共轭定理	$\overline{x(t)}$	$\overline{X(-f)}$
	$x(t)$ 为实信号时	$\overline{X(-f)}=X(f)$
时移定理	$x(t-t_0)$	$e^{-i2\pi f t_0}X(f)$
对称定理	$X(t)$	$x(-f)$
频移定理	$x(t)e^{i2\pi f_0 t}$	$X(f-f_0)$
	$x(t)\cos 2\pi f_0 t$	$\frac{1}{2}(X(f-f_0)+X(f+f_0))$
	$x(t)\sin 2\pi f_0 t$	$\frac{1}{2i}(X(f-f_0)-X(f+f_0))$
时间展缩定理	$x(at) \quad a \neq 0$	$\frac{1}{ a }X(f/a)$
翻转定理	$x(-t)$	$X(-f)$
时域微分定理	$d^n x(t)/dt^n$	$(2\pi i f)^n X(f)$
频域微分定理	$(-2\pi i t)^n x(t)$	$d^n X(f)/df^n$

3. 频域抽样定理及信号抽样定理

(1) 频域抽样定理(连续谱抽样定理) 设信号 $x(t)$ 的连续频谱为 $X(f)$, 当 $x(t)$ 满足条件

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ x(t) & t \in [t_0, t_0+T] \\ 0 & t > t_0+T \end{cases}$$

时(即信号为有限长度时)以 $1/T$ 为间隔对 $X(f)$ 取值(抽样)

得 $X(n/T)$ $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 由这些离散值 $X(n/T)$ 可以恢复出在 $[t_0, t_0+T]$ 上的信号 $x(t)$ 及其频谱 $X(f)$ 。

此定理给出了连续谱与离散谱的关系。

(2) 信号抽样定理 对连续信号按一定的时间间隔 Δ 进行取值, 得到 $x(n\Delta)$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) $x(n\Delta)$ 为离散信号。

设连续信号 $x(t)$ 的频谱为 $X(f)$, 如果频谱 $X(f)$ 和抽样间隔满足下述条件:

$$X(f) = \begin{cases} X(f) & |f| < f_c \\ 0 & |f| \geq f_c \end{cases} \quad \Delta \leq 1/2f_c$$

则可由离散信号 $x(n\Delta)$ 完全确定频谱 $X(f)$:

$$X(f) = \Delta \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n\Delta) e^{-i2\pi f n\Delta} \quad f \in [-1/2\Delta, 1/2\Delta] \quad (2-1-5)$$

由 $x(n\Delta)$ 完全可以确定信号 $x(t)$, 即

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n\Delta) \sin[(\pi/\Delta) \cdot (t-n\Delta)] / (\pi/\Delta) \cdot (t-n\Delta) \quad (2-1-6)$$

上述条件中, f_c 称为截频, $f_N = 1/2\Delta$ 称为奈魁斯特频率。

(3) 连续化定理 当 $\Delta \leq 1/2f_c$ 条件不满足时, 设连续信号 $x(t)$ 的频谱为 $X(f)$, 以 Δ 间隔抽样得到的离散信号为 $x(n\Delta)$, 它的频谱为

$$X_\Delta(f) = \Delta \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n\Delta) e^{-i\pi f n\Delta}$$

则可按下式

$$\tilde{x}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n\Delta) \sin[(\pi/\Delta) \cdot (t-n\Delta)] / (\pi/\Delta)$$