

爆破科学技术丛书

爆破量测技术研究

中国力学学会

《爆破量测技术研究》编委会主编

山东矿业学院建井研究室编印

爆 破 量 测 技 术 研 究

中国力学学会

《爆破量测技术研究》编委会编辑

530617-20

TB 41

923

内部文献

出版：山东矿业学院建井研究室
承印单位：山东省肥城县印刷厂
印刷日期：一九八二年七月三十一日
主编：胡峰
校对：曲秉印 林从谋 张金荣
崔恩文 李金建 郑传英
刘谦 毕维国

3.00元

编 委 会

主编：胡 峰（山东矿业学院）

编委：（以下按姓氏笔划为序）

王中黔（铁道部科学研究院）

刘汉丞（电力部东北勘测设计研究院科研所）

朱吾龙（浙江大学）

李伯松（89002部队）

黄正平（北京工业学院）

前 言

爆破虽然早已是生产建设和军事战争中普遍应用的一种手段,但由于其历时短,速度快,能率大,看不清,摸不得,所以长期以来,对其过程和实质的了解很少,对于其能量的控制和利用则更差。在土岩爆破工程中,有效利用的炸药能量只有百分之五至二十五,其余的大量能量不仅浪费,而且还可能造成巨大的危害作用,诸如:瞎炮、冲炮、超爆、半爆、飞块、振动、激波和炮烟等,常常致使需要爆破者未爆好,而不需要爆破者却被爆得乱七八糟,使周围的人、物、建筑和环境受到不同程度的威胁、危害、破坏或损伤。在有可燃气体和粉尘的地点,还有可能引起连续爆燃和火灾,这一切都影响了爆破手段的应用。近几年虽已开始从流体动力学、热力学、固体静力学等学科移植、推论和发展出了一门初具眉目的爆炸力学和一些初级的爆破控制技术,但是关于固体特别是土岩爆破的理论和技術,基本上还停留在某些未经实证的猜想和片断的经验基础上。因此,基于现在的科学技术发展水平与条件,必须大力开展对爆破过程及其参量的测量研究。实践表明,只有通过测试,才能深入了解造成各种爆破作用的性质和数量关系,检验已有理论假说和经验的实际价值,才能透彻了解在各种介质、各种情况下爆破能量的转化过程、转化条件及其产生有益作用和有害作用的定量机理,从而创造出真正符合实际的爆炸化学、爆炸物理、爆炸力学和精细控制技术及抗爆技术,例如:近些年来通过爆破振动参数的测试,逐渐创出了一些减震爆破技术和消震、抗震的结构措施;通过空中、水下爆破参数的测试,逐渐摸清了空气冲击波和水中冲击波的传播规律,初步建立了流体爆炸力学和爆破技术基础;通过土岩爆破鼓包、抛掷运动过程的高速摄影,比较清楚地了解了土岩爆破过程和抛掷飞石的运动规律,从而大大发展了定向抛掷爆破的技术;通过爆破裂隙发展情况与炮孔规格、装药结构关系的测试与高速摄影,初步创立了光面、预裂爆破的技术与理论;通过管道(或深孔)爆破情况的高速摄影和爆速、爆压测试,逐渐摸清了被爆介质对炸药爆炸反应的反馈作用即管道效应的机理。可以说,没有测量,就没有现代的爆破科学和技术。所以,不论是从事爆破施工、设计、研究、管理、教学的人员和学生,或者是从事动态测量仪器仪表的设计、制造、试验、操作的人员和学生,一句话,凡是想搞好爆破和抗爆、防护工作的人,都必须重视学习和研究爆破测量技术。

广义的爆破测量内容是非常广泛的,按被测爆破的能源来讲,包括化爆(各种炸药爆炸)、核爆,和各种人为的和自然的爆炸;按被测的时间过程来讲,从起爆前到爆破后;按被测的空间过程来讲,从爆源近区、中区到远区;按被测的种类来讲,包括有力学量、几何量、光学量、电磁量、热学量、化学量和其他各种物理量;按被测爆破的介质状态来讲,包括有固态、液态、气态、离子态和各种混合态、过渡态;按被测量的

变化速度和频率来讲,从普通的静态到高速高频的动态,几乎包括了所有静态测量和动态测量的全部内容。但是,作为爆破测量的特征内容,一般认为主要是指固体爆破的动力参量及其效应图象,即爆炸波、冲击波、应力波、振动波的动力学参量及其后续效应;例如使固体介质破裂、抛散、塑变、振动、在空气中产生冲击波和噪音等等,即使只限于这些内容,爆破测量仍然是非常复杂的,仍可算是各种动力学测量中最复杂最完善的代表,因此,需要用到现代动静态测量科学技术中的最新成就,需要具有现代力学、电学、光学、数学、物理学、化学、仪器仪表技术和爆破工程技术等多方面知识,需要采用精密、灵敏、稳定、可靠的测试仪表系统,还需要具有严格、细心、刻苦、机智的工作态度,实际上近三十年才初步发展起来的爆破量测技术,也就是集中了现代动静态测量技术之大成。

我国爆破测量工作自五十年代后期开始采用机械式的压力自记仪和测振仪以来,不论在测量仪表、测试工艺或测试数据处理等方面都已经有了很大发展,在爆破的中远区采用电磁感应式测振仪、电阻应变法和压电法测量固体表面应变波、振动波和空气冲击波,采用高速分幅摄影法观测爆破过程和爆渣轨迹,采用弹性波法测量土岩爆破范围等方面已经比较成熟,已完全具备由科研试验阶段转为生产建设服务的条件。对爆破中近区物理和力学参量的测量技术(如装药室壁爆压的测量,岩体自由场应力应变的测量,爆炸产物喷流温度的测量)近几年来在国家计委的大力组织下也开始展开了有成效的研究,对爆破测记波形和数据的数学分析与电子计算机快速处理,也有许多单位进行了大量的探索,从而已逐渐形成爆破测量技术中不可分割的部分。为了发展我国爆破事业,提高我国爆破量测技术水平,总结交流有关各系统、各方面的研究成果和经验,中国力学学会爆炸力学委员会在国家计委某工程筹备处的赞助下,于一九八〇年十一月在湖北省随州市召开了第一次全国土岩爆破量测技术交流会。本书就是根据这次会议的决定,并得中国力学学会的批准组织编辑的,考虑到我国迄今还没有一本系统介绍爆破量测技术的书籍出版,为了便于广大读者学习和参考,本书的编辑决定以提高为主,尽量兼顾普及,以专题研究论文为骨架,系统编写了必要的基本知识和概况介绍为皮肉,兼具专业论文集、学习参考书和科普资料等多种性质。所以本书的第一部份就专门编写了几篇基本知识和概况介绍,以作为阅读本书的台阶,而后主要按被测对象的性质分三个部分选编了各种量测技术方法的研究成果。第五部份选编了几篇关于数据处理方面的专题论文,最后一部份则收集了几篇关于仪器仪表研制方面的专题资料。由于我们的水平有限,力量单薄,时间仓促,内容繁杂,经费缺乏,印刷变迁等客观问题,使这本书经过了一年的周折,才编印出来,实在是个丑妇的难产儿,在此只能请广大读者批评原谅。在编印过程中,几位编辑费了许多心血和劳动,长江水利水电科学研究院,铁道部科学研究院等单位给予了很大支持和帮助,山东矿业学院矿建系刘清泉主任和建井研究室的其他许多同志对印校工作也出了大力,特此致谢。

主编 胡 峰

一九八一年十二月

目 录

前 言	胡 峰
-----	-----

第一部分 基本知识概述

§ 1—1	若干爆破量测技术的基本原理与测试方法	胡峰 王中黔 (1)
§ 1—2	我国工程爆破量测技术的应用和发展现状	冯叔瑜 王中黔 (25)
§ 1—3	国外爆破量测技术研究的若干动向和看法	张 挺 (36)
§ 1—4	化爆冲击震动的量测与数据处理方法评介	陈汉军 葛学宽 (44)

第二部分 岩体爆破情况的量测

§ 2—1	岩体爆破过程的高速立体摄影量测	张建华 吴灵光 丁耀轲 (55)
§ 2—2	岩体爆破范围的弹性波量测法	朱传统 (67)
§ 2—3	装药洞壁爆压的压杆压电量测法	俞瑞华 马剑吟 (80)
§ 2—4	岩体爆破动应变变量测方法的研究	仲跻云 (91)
§ 2—5	岩体爆破应力波用变电容量量测时的长线效应	洪桐萱 唐仁明 (105)
§ 2—6	在爆破作用下地下拱结构动应变的测量与计算方法	黄铁昆 刘汉丞 (114)

第三部分 地层爆破震动的量测

§ 3—1	相对振动参量测试方法的研究	应怀樵 徐 慧 (125)
§ 3—2	爆破振动加速度的测量及标定误差分析	林继清 (134)
§ 3—3	爆破引起的地面振动及其衰减规律	龚亚丽 (144)
§ 3—4	爆破引起的两次地表振动过程	殷旦黔 (153)
§ 3—5	爆破振动反应谱的测试及分析	孟吉复 (160)

第四部分 流体爆炸激波的量测

§ 4—1	压电测量系统的问题与改进	杜清和 沈 杨 (173)
§ 4—2	压电系统量测模拟核爆冲击波射入水中压力的研究	朱吾龙 (180)
§ 4—3	电阻应变法量测空气冲击波的误差分析	李香灿 竺忠水 (196)
§ 4—4	爆炸测量中传感器的选择	李伯松 (206)
§ 4—5	爆破噪音的测试	于亚伦 (220)

- § 4—6 炸药爆炸产物流温度测量.....孙建民 刘荫生 (226)
- § 4—7 空中爆炸波峰压强测量问题与估算方法.....黄正平 (238)
- § 4—8 爆炸管道效应的测试研究.....胡 峰 (246)

第五部分 量测数据处理

- § 5—1 爆破动力学量测数据处理与频谱分析计算方法.....应怀樵 (258)
- § 5—2 深孔松动爆破动应变测量频谱分析计算方法.....程盘庆等 (276)
- § 5—3 爆破振动加速度记录的常规分析与计算
.....李沙白 胡成祥 于双久 (281)

第六部分 若干仪表研制

- § 6—1 钻孔彩色电视设备及其应用.....曹先玉 毛 炜 (290)
- § 6—2 BWF—1型电感位移计, 放大器及其应用.....李长生 (299)
- § 6—3 DWG1型变磁阻式位移传感器的研制与试验.....王德盛 欧良建 (306)
- § 6—4 BY2型变磁阻式压力传感器的研制与
试验.....王德盛 朱文奎 欧良建 (313)

第一部份 基本知识概述

§1—1 若干爆破量测技术的基本原理 和 测 试 方 法

山东矿业学院 胡 峰

铁道部科学研究院 王中黔

目前常用的较成熟的爆破量测技术主要有以下四个方面。

- 1、爆炸冲击波压力和固体应力应变的电测法。
- 2、爆破地震波波形与参数的电测法。
- 3、爆破范围的声测法。
- 4、爆破过程的摄影法。

本文作为本书的导引由于篇幅限制，只能着重介绍上述四个方面的测试原理和基本知识，关于一些正在研究中的新的测试技术和仪器仪表原理、构造，可参阅有关专门书籍和资料。由于爆破对象和条件的复杂，量测内容的多种多样，以及测试手段的日新月异，再加上笔者的水平有限，本文肯定有许多片面和误漏之处，请读者批评指正。

一 压力和应力、应变的测试

爆炸荷载对周围介质的扰动是以一种波动形式向外传播的。如果爆炸发生在岩体中（参见图1—1—1），通常认为：在爆破近区（药包半径的10~15倍），传播的是冲击波，其特点是冲击波传播速度大于未扰动岩石中声波的速度，并且具有陡峭的波阵面。中区（药包半径的15~400倍），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。在与应力波对应的区域里，岩石每一微元的应力都表现出完整的应力张量的特性。在远区（大于药包半径的400倍），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。

本节主要叙述压力和应力应变的测试技术。地震波作为一项独立完整的测试技术，将在下节叙述。

（一）冲击波压力的测量

1、冲击波的基本参数

炸药爆炸时，在炸药中传播着爆轰波。当爆轰波到达炸药和介质的分界面时，高速运动的爆轰产物受到约束将猛烈地撞击介质，从而形成了介质中的冲击波。成为炸药向周围介质释放能量的一种方式，也是引起介质变形和破坏的一种主要因素。

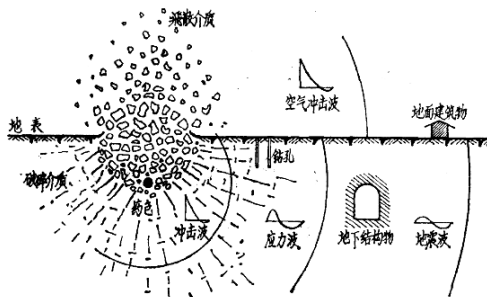


图 1—1—1 炸药爆炸产生的外部效应

冲击波是一种以高于波前介质声速的速度传播的波，其特征是在冲击波的最前部有一个陡峭的波面，称为波阵面。在波阵面处，介质的状态参数（压力 P 、温度 T 、密度 ρ 、质点运动速度 V 等）发生突变。通常用实验方法确定这些参数中的一个，就能计算出所有其它参数。而冲击波压力是测量中最简单也是工程中最需要的一个参数。

冲击波阵面上的压力 P_A 称为峰压，其后的压力将按指数衰减。通常，冲击波传至某一距离处的压力随时间的变化状态，可用 $P-t$ 曲线（图 1—1—2）来描述。峰压 P_A 与环境压力 P_0 之差称为冲击波超压 ΔP 。冲击波压缩相的作用时间称为正相作用时间 t_+ ， $P-t$ 曲线所包围的面积即为正相作用的冲量 I_+ ；在压缩相后面有一个负压区（也叫稀疏区）其相应的参数为 F_B 、 t_- 和 I_- 。冲击波对周围目标的破坏程度，主要取决于这些参数。因此，在工程爆破中希望能直接测得离爆源某一距离处的冲击波 $P-t$ 曲线。

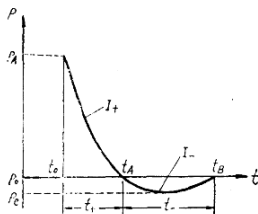


图 1—1—2 冲击波 $P-t$ 曲线

对于空气介质来说，冲击波理论表明当多方指数 γ 为常数时波阵面上的超压 ΔP 与冲击波的传播速度 D 有如下关系。

$$\Delta P = P_A - P_0 = \frac{\gamma}{6} P_0 \left(\frac{D^2}{C_0^2} - 1 \right) \quad (1-1-1)$$

式中 P_0 、 C_0 ——为未扰动空气介质中的初始压力和声速。

因此直接测量冲击波的传播速度也可求得冲击波的超压，但是不能得到它的历时过程。

下面主要叙述空气和水中冲击波压力的量测系统和方法。关于土岩介质中冲击波的测量虽然与前者大同小异，但在传感器的制作和埋设工艺等方面难度较大，目前一些科研设计单位正在研究，因此本文从略。

2. 冲击波压力的测量

测量与时间成函数的冲击波压力，有压电式、电阻式、电容式、电感式和机械式多种压力传感器。

目前在爆破工程中，采用得比较广泛的是电阻应变式压力传感器。但是，近年来，随着各种压电式压力传感器的试制成功以及电测技术的发展，特别是其本身对于测量瞬态压力所固有的优点，正被推广使用。

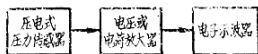


图 1-1-3 压电式压力测量系统方框图

① 压电式压力测量系统

图 1-1-3 是压电式压力测量系统的方框图。

这一类测量系统的传感器是利用了某些电介质材料的压电效应制成的。所谓压电效应，即是材料在某一特定方向上受到外力作用而变形时，材料内部发生极化或老极化现象，同时在其表面产生电荷（图 1-1-4），当外力消失后，又重新回到不带电的状态：

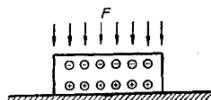


图 1-1-4 压电效应

$$q = kF$$

(1-1-2)

式中：F——加在电介质材料上的力（千克）；q——在力作用下材料表面料上产生的束缚电荷（库仑）；K——压电系数，它是表征压电材料性能的一个重要参数，也称该材料的压电灵敏度。

因此，这一类物质可以将力的讯号转换成电讯号。目前能用于测量的压电元件有两类：一是天然压电晶体，如石英、电气石等。另一类是经过人工极化处理的压电陶瓷，如钛酸钡、铌酸锂、锆钛酸铅（PZT）和锆钛锡酸铅（ZTS）等。用于传感器的压电晶体，应当具有较高的压电效应和介电常数、较低的侧向效应和温度效应并且有一定的机械强度。

压电式压力传感器的优点是：动态测量范围宽，可测 $10^{-2} \sim 10^4$ 公斤/厘米² 的压力；它的频响特性也很好，能够反映上开前沿为微秒量级的压力脉冲。除此而外，还具有结构坚固、体积小、重量轻和使用寿命长的优点。

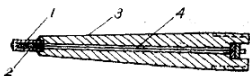


图 1-1-5 YY₂型压电传感器

1. 压电陶瓷；2. 电极片；
3. 金属支撑杆；4. 导线。

图 1-1-5 是采用压电陶瓷 ZTS 作感受元件的 YY₂ 型压电式自由场压力传感器，用来测量水中或空气中的冲击波压力。其测量范围为 0.01~100 公斤/厘米²，

电荷灵敏度 $> 100 \text{ PC/kg} \cdot \text{cm}^2$ ，固有电容为 1000 Pf，绝缘电阻 $> 10^{10} \Omega$ ，固有频率 75 KHZ，外形尺寸为 $\Phi 10 \times 140$ 毫米。

图 1-1-6 是一种采用石英晶体的压力传感器的基本结构。

表征压电式压力传感器的质量指标有：a) 压力前沿的建立时间 t_s ，这一时间用来衡

传感器的瞬态反应特性。b) 过冲比 $\gamma_s, \gamma_s = \frac{P_v - P_0}{P_0}$, 即前沿的过冲幅度 ($P_v - P_0$) 与平台幅值 P_0 的比值。c) 噪声比 $\gamma_L, \gamma_L = \frac{\pm \Delta P_L}{2 P_0}$, 即纵向振动的正负幅值与平台幅值的比值。d) 波形的失真程度。

这些指标可以通过在激波管上进行标定来检验, 因为激波管可以产生强间断面, 激波压力具有阶跃讯号的特征。同时, 在激波后面有一定常流动区, 持续时间可达数十毫秒。因此, 是对压力传感器进行动态标定的良好设备。

此外, 在激波管上还可以检查传感器的灵敏度, 即其输出量 (电荷或电压) 与输入量的比值:

$$\text{电荷灵敏度: } K_q = \frac{q}{P} \quad (\text{库仑/公斤/厘米}^2) \quad (1-1-3)$$

$$\text{电压灵敏度: } K_u = \frac{U}{P} \quad (\text{伏/公斤/厘米}^2) \quad (1-1-4)$$

由于 $U = q/C$, 所以 K_u 也可用下式表示:

$$K_u = \frac{q}{P C} \quad (\text{伏/公斤/}^2\text{厘米}) \quad (1-1-5)$$

当传感器的压电元件上两个表面在力的作用下聚集电荷时, 它实际上就是一个电容器。因此, 可以把压电传感器等效为一个电压源与一个串联电容的电压等效电路或是一电荷源与一个并联电容的电荷等效电路。由于压电传感器的输出讯号非常微弱, 一般需要将电信号进行放大才能测量出来。但因为压电传感器的内阻抗相当高, 它所采用的前置放大器与一般的放大器不同。其主要作用是将压电传感器的高阻抗输出转换成低阻抗输出。经这一阻抗变换后就可以采用一般的放大、检波指示或通过功率放大至记录和数据处理设备。

按照压电式传感器的工作原理及其等效电路, 可以采用以下两种前置放大器。

第一种是电压放大器 (亦称作阻抗变换器), 其输出电压与输入电压成比例。通常压电传感器本身要求绝缘电阻足够大, 才能保证其输出电压 (或电荷) 不变而近似看作开路。与此相应, 电压放大器的输入电阻也要求在上千兆欧以上, 才能避免传感器的电荷在传送过程中漏掉。在采用电压放大器时, 连接电缆不能太长, 电缆越长电缆电容越大, 传感器的电压灵敏度就要迅速降低。这就带来两个问题: a) 在测量过程中, 更换出厂配套的电时, 应对传感器的出厂电压灵敏度进行修正;

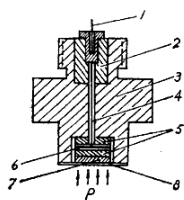


图 1-1-6 石英晶体压力传感器

1. 引电极; 2. 垫套; 3. 外壳; 4. 导线; 5. 石英晶体; 6. 电极片; 7. 垫片; 8. 膜片。

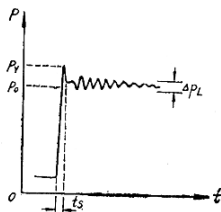


图 1-1-7 用激波管标定的压力传感器的动态特性

$$K_{u'} = \frac{K_u (C_a + C_c + C_i)}{(C_a + C_{c'} + C_i)} \quad (1-1-6)$$

式中: K_u 、 $K_{u'}$ ——分别为出厂和现场实际采用的电压灵敏度; C_a 、 C_i ——分别为传感器的电容和放大器的输入电容; C_c 、 $C_{c'}$ ——则为出厂电缆和实际采用的电缆电容。

b) 为了避免降低传感器的电压灵敏度, 电压放大器必须远离记录装置而靠近传感器设置。这在爆破时就必须对放大器采取有效的防护措施, 并且给现场调试和操作带来不便。尽管如此, 电压放大器由于电路简单、元件少、价格便宜, 工作可靠而被广泛采用。

第二种是电荷放大器, 它可将高内阻的电荷源转换为低内阻的电压源, 其输出电压正比于输入电荷。因此, 电荷放大器同样也起着阻抗变换的作用, 其输入阻抗高达 10^{10} 欧、输出阻抗小于 100 欧。电荷放大器的一个突出优点是, 在理论上即使连接电缆长达数百米甚至数千米其灵敏度也不会下降。但在实际使用中, 随着电缆的增长, 电缆噪声也将增大, 所以其使用电缆的长度还是有一定的限制。不过与电压放大器相比, 它可以远离传感器直接放在测试人员的身旁, 便于调试操作。但是, 电荷放大器的价格高、电路复杂、调试也困难, 这是其不足之处。

在压电传感器与放大器之间, 为了减少电缆噪声, 一般需要采用特制的低噪声电缆。如 STYV—2 型低噪声电缆, 其电缆电容每米为 85 PF 左右。

记录冲击波压力讯号的仪器, 大都采用 SBR—1 和 SBE—7 之类的电子示波器显示压力波形用照相机拍摄记录。采用记忆示波器便于观察和分析波形。利用 A/D 变换器采样, 然后再输入示波器中显示波形或直接输入电子计算机计算当然更好。但它们目前都还没有达到广泛使用的程度。

冲击波是一个瞬时动态讯号。为了及时捕捉到波形清晰的压力信号, 必须采用一种单次自锁触发装置。触发传感器应置于需要接收压力的讯号传感器的前面。使冲击波首先作用在触发传感器上, 然后通过单次自锁触发器输入到示波器中, 使示波器荧光屏上显示出触发增辉的扫描线。以便后面的讯号传感器接收到的压力波形落在这一扫描线上, 从而被照相机拍摄下来。在野外测试时, 应把触发系统的触发灵敏度调整到合适的程度, 不致于为外来的干扰讯号引起误触发。晶体管触发器大多用于电池供电, 避免电源系统的干扰。压力波形在示波器扫描线的五分之一处开始出现为合适。因此, 可以根据冲击波传播速度, 确定触发器相对于讯号传感器提前设置的距离 ΔS ;

$$\Delta S = \frac{T}{5} \times C \quad (1-1-7)$$

式中: T ——示波器扫描全程的时间; C ——冲击波的传播速度。

②电阻应变式压力测量系统

图 1-1-8 是电阻应变式压力测量系统的方框图。

这一系统的传感器由两个主要部件组成: 弹性敏感元件和应变片。弹性元件在被测物理量(压力)的作用下, 产生一个与它成正比的应变, 然后

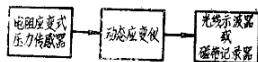


图 1-1-8 电阻应变式压力测量系统方框图

用应变片作为传感元件将应变转换为电阻变化。

目前在工程爆破中,大都采用BPR—2型电阻应变式压力传感器来测量空气冲击波的压力。其结构如图1—1—9所示,采用薄壁圆筒和垂链式膜片作弹性敏感元件,是国内定型产品。其产品规格为:压力测量的范围分0~10、15、30、50、70、100、150、200和250公斤/厘米²九挡;固有频率在25000~37000赫芝之间。传感器的最大供桥电压为12伏,灵敏度在0.5毫伏/伏左右。在受到25g、40~80周的振动加速度或100g的冲击加速度作用下,引入误差不大于额定压力的1%。传感器的最大直径为Φ25毫米,长度为46毫米。

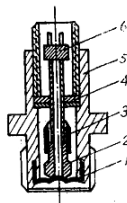


图1—1—9
BPR—2型压力
传感器

传感器的输出信号需要经过动态应变仪放大以后,才能为光线示波器或磁带记录器接收。BPR—2型压力传感器本身的电阻丝片组成了一个半桥,它与动态应变仪的电桥盒中的精密无感线绕电阻组成全桥后,作为应变仪的输入部份。其后的测量方法则与一般的应变测量没有什么区别。目前广泛采用的动态应变仪的型号为Y6D—3型,其工作频率为0~1500赫。后接的记录设备多数为SC系列光线示波器,振动物为FC6型。如果采用固有频率较高的振子,虽然可使其工作频率提高到2000赫左右,但其灵敏度将大大降低。因此,这一测量系统的工作频率受到了动态应变仪和光线示波器的限制,这对于测量爆炸空气冲击波是不利的。对快速上升的压力脉冲来不及响应而常常出现削峰的现象。因此,在有条件的情况下,如果采用超动态应变仪并配用工作频率为几十千赫的磁带记录器,就能使这一系统的测量性能得到改善。

1.垂链式膜片; 2.薄壁圆筒弹性元件; 3.应变片; 4.压垫; 5.外壳; 6.接线柱。

3、传感器安装中的几个问题

为了正确测量出冲击波的入射压力或反射压力,传感器承压面的安装方向必须绝对正确。如测入射压力,传感器的承压面应与波传方向平行;测反射压力则应与波传方向垂直。否则稍有出入,测到的将是冲击波斜反射的结果。传感器的承压面应与测点表面一致,稍有凸出或凹入,实测的冲击波面压力波形会发生畸变。

为了避免冲击波在传播过程中受到障碍物的干扰,应清理测点周围的地形和地物。

无论是压电式还是电阻应变式传感器,在野外测试时,其绝缘防潮是十分重要的。传输导线的接头也应做好绝缘防潮处理。导线要固定牢靠,避免导线中各层之间发生相对运动带来电噪声。如导线埋在电缆沟中,有接头的地方应作好标记,以便在出现故障时好寻找检查。传感器的安装要牢靠,如果是设置在地表,应先把传感器装在具有一定体积和重量的混凝土物体上,然后再埋在土中。

(二)应力应变的测量

应力应变的测量包括两个方面。一是在爆炸荷载作用下,介质内部应力波参数的变化特征;另一是处在这一区域内的地下或地面建筑物和结构物的响应,由此而产生的各个部件上的力学状态的变化。

这一物理量的测量大都采用电阻应变片作为传感元件,把介质或构件上应变的变化

转换成电阻的变化，然后输入到电测仪表中进行放大和记录。其测试方框图如下。

测量岩石或混凝土介质中的动态应变，常常需要模拟介质的动力特性制作成应变砖这一类的应变传感器，埋入介质中相应部位进行测量。这一传感器的制作、埋设安装工艺等等在本书其它文章中已有详细论述。



图 1-1-10 应力应变测试方框图

测量地下或地面建筑物和结构物构件表面的应力应变，通常采取直接在表面粘贴电阻应变片的办法。有关这一系统的测试基本原理和方法，在高等学校的材料力学或其它有关课程中均有详细叙述，因此本文一一从略。

二、爆破振动的测试

爆破振动测试包括两个方面。一是研究爆炸地震波的传播规律、特性和地质地形条件对它的影响；另一是研究地下和地表建筑物、结构物的振动响应及其状态。两者在测试上有相似之处，但对振动的分析和要求不全相同。本节主要叙述爆破地震波的测试。

(一) 爆破地震波的产生

炸药在爆炸过程中释放出来的能量，部分使岩体产生弹性振动。这就是通常爆破破坏机理中所指的振动圈。这部分弹性振动消耗的能量在岩石中占爆破总能量的2~6%，于土中2~3%，湿土中为5~6%。

振动圈内的介质获得弹性能后，将产生弹性扰动，并以地震波的形式从爆源向外传播。地震波有体波和面波。体波又可分为纵波(P波)——由爆源向外传播的一种压缩波，质点振动方向与波的前进方向一致；横波(S波)——由爆源向外传播的一种剪切波，质点振动方向与波传方向相垂直。通常纵波速度大于横波。面波是沿介质表面或分界面传播的波。它又分为勒夫波(L)和瑞雷波(R)。勒夫波的特征是质点仅在水平横向作剪切运动，只有在半无限空间上至少覆盖有一层表面层时才会出现。瑞雷波存在于径向垂直平面内，即在完全介质中它没有横向分量。瑞雷波的质点作椭圆的和逆进的运动。

为了简化所研究的问题，可近似地假定：地震波在均匀弹性介质中传播时，质点作简谐运动。其力学状态可用位移、速度和加速度表示，其数学表达式为：

$$\text{位移} \quad X = A \sin \omega t \quad (1-1-8)$$

$$\text{速度} \quad V = \frac{dx}{dt} = \omega A \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (1-1-9)$$

$$\text{加速度} \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \omega^2 A \sin (\omega t + \pi) \quad (1-1-10)$$

式中：A——质点运动的最大振幅； ω ——角频率， $\omega = 2\pi f$ ；f——振动频率。

原则上，测量了上述三个物理量中的一个，就可以确定其它两个物理量。但是由于数值换算中存在的固有误差和量测仪器频率特性的影响，在实际测试中最好是直接测量

所需要的那个物理量。

质点的实际运动参数，应由三个互相垂直的分向量（垂直向、水平径向和切向）的矢量和求得，即：

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (1-1-11)$$

质点运动的力学状态和炸药量、距离、介质特性、爆破条件和方法等主要因素有关。特别是爆破地震波途经的地质地形条件的影响尤为重要。由于山体、沟谷、陡壁地形以及岩性、层理、夹层、构造和覆盖土层等地质构造的影响，到达测点的振动波形已是经过多次反射折射的各种复合波，并且有比较宽的频率域。因此，对波形的处理最好采用福里哀分析法对振动参量进行详细的频谱分析。

但是，迄今为止，对于工程爆破中的地震波，往往只需从波形中解析出最大位移、速度、加速度、主振频率、波传播速度和振动持续时间等有关参数后，从中择其一、二个参数作为经验判据，来衡量爆破振动对周围建筑物和结构物的破坏程度。

(二) 量测系统和方法

测量爆破振动的传感器，一般简称拾振器或测振仪。它的作用是把被测对象的振动讯号，正确地检测并传输出去，甚至直接显示出来。由于爆破地震波的振动频率远远高于天然地震，地震仪是不适宜于测量爆破振动的。

爆破振动测试系统由拾振部分、讯号放大部分和记录装置三大部分组成。根据振动讯号检测和转换的方式，可把爆破振动测试系统分成：电动式、压电式和应变式三类。

1、电动式测振系统

这类系统可用来测量位移、速度和加速度。有的拾振器在采用高灵敏度振子时，可不用放大器而直接记录。这个系统的拾振器不耗电源，输出讯号大、阻抗中等，长导线的影响较少，抗干扰性能好。

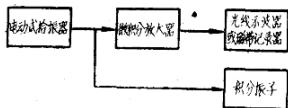


图 1-1-11 电动式测振系统
配套方式

2、压电式测振系统

这类仪器大多用来测量加速度。通过积分网路也可获得一定范围内的速度和位移。拾振器的输出阻抗很高，因此要求放大器的输入阻抗也很高。导线和接插件要求有较高的绝缘电阻，以免影响系统的阻抗。系统频响宽、输出讯号大，但抗干扰性能差易受电磁场的干扰。

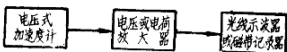


图 1-1-12 压电式测振系统
配套方式

3、应变式测振系统

这类系统的拾振器有电阻式加速度计、位移计等。放大器采用电阻应变仪。系统的频率响应可以从零赫芝开始，因此低频响应较好，但是阻抗较低。使用长导线时系统的灵敏度要降低，也容易受到干扰。

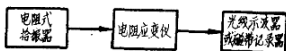


图 1-1-13 应变式测振系统
配套方式

在本书的其它文章中，列有国产爆破测振用拾振器的型号和性能，可供选择。目前，国内大都采用SC系列的光线振子示波器作

记录装置。如采用磁带记录器更好，不仅记录的波形可通过光线振子示波器再现，而且可以输入各种类型的讯息分析仪直接进行数据处理。

目前在爆破振动安全的分析中，主要采用振动速度作为建筑物的破坏判据。因此，大都采用第一种电动式测振系统检测爆破振动速度波形。其拾振器叫作电动式（或磁电式）换能器。它利用可动线圈感应地震动后，在固定的磁缸中运动，切割磁力线在线圈中产生感应电动势；或相反利用可动磁钢在固定的线圈中运动。感应电动势的大小可由下式决定：

$$E = BL \frac{dx}{dt} \sin \alpha \times 10^{-8} \text{ (伏)} \quad (1-1-12)$$

式中：B——磁感应强度（高斯）；L——线圈导线的总长度（厘米）； dx/dt ——线圈和磁场的相对运动速度（厘米/秒）； α ——运动方向与磁力线之间的夹角。

从公式可知，线圈的感应电动势E与振动速度 dx/dt 成正比。因此构成了一个测量速度的换能器。若需要记录位移时，须通过积分网路；而测量加速度时，则只需要接上一个微分电路就可以了。线圈的输出电压，经过放大后可输入电磁示波器中的振子进行记录。

（三）测振仪器的选择与标定

国内的爆破振动量测仪器，无论在所测物理量中，还是在可测量程和频率的范围等方面，都还没有形成定型的系列产品。因此，必须针对具体的研究对象选择合适的爆量测系统。

对于测量爆破振动速度的拾振器，必须根据爆炸药量的大小、测点到爆破中心的距离以及爆破地震波传播所经介质的特性对振动速度和频率进行估算后选择。下列公式可供预测爆破振动速度和频率时参考。

爆破振动速度：

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{\alpha} \text{ (厘米/秒)} \quad (1-1-13)$$

式中：Q——炸药量（公斤）。齐发爆破时取总炸药量，秒差和毫秒延时取最大一段的炸药量。R——爆破中心到测点的距离（米）。K、 α ——与土岩介质特性等因素有关的系数（见表1-1-1）。

爆破振动频率：

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\tau \lg R} \text{ (赫芝)} \quad (1-1-14)$$

式中：T——振动周期（秒）； τ ——与岩石特性有关的系数，坚硬岩石 $\tau=0.01\sim0.04$ ，含水土壤 $\tau=0.11\sim0.13$ ，冲积层 $\tau=0.06\sim0.08$ 。

一般来说，对于几公斤到数百公斤的小药量爆破，f在30~100赫芝之间，有时甚至更高；几吨至数十吨爆破为10~40赫芝；上百吨以上的爆破为7~20赫芝。总之爆破规模越大，振动频率越低。

所选择的传感器，包括放大和记录部分，量程的选择要恰当，彼此接近一致。实测结果超出满量程时，将使测试系统工作在非线性状态使记录波形失真。过小时，则难于