

爆炸冲击波测量技术

(电测法)

张 挺 编著

国防工业出版社

爆炸冲击波测量技术

(电 测 法)

张 挺 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分两篇：第一篇为空中和水中冲击波测量；第二篇为土岩介质中冲击波和应力波测量。分别介绍了空中、水中及土岩介质中的爆炸物理过程及主要参数的估算方法；各种主要形式的压力传感器的工作原理、结构、特点和设计要点；压力传感器的性能试验方法；典型的测量系统和有关的现场测量技术。

爆炸冲击波测量技术

(电 测 法)

张 挺 编著

责任编辑 蒋 怡

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张8¹/₁₆ 202千字

1984年4月第一版 1984年4月第一次印刷 印数：0,001—2,650册

统一书号：15034·2647 定价：1.00元

序 言

爆炸是自然界经常发生的一种物理过程或物理化学过程。爆炸作用在军事上和和平建设中得到了广泛应用。爆炸作用的主要特征是：爆炸产生的高压、高温、高速产物对周围介质做功，因此在爆炸中心周围的介质中产生压力突跃（冲击波）。这是造成破坏的直接原因。

二次世界大战期间及以后，出于军事上的目的，国外对空中爆炸和水中爆炸过程进行了系统的研究。相应地研制和发展了各种用于空中和水中爆炸冲击波压力测量的传感器和测量仪器。并对传感器的校准技术和装置进行了研究。二次世界大战以后，由于地下核试验的需要，刺激和促进了土和岩石介质中爆炸冲击波和应力波测量装置的研制和发展。

建国以来特别是六十年代以后，国内有关单位分别开展了上述各项研究工作。有关的测量技术也得到了发展，并初步形成了一支爆炸测量技术队伍。

有关爆炸冲击波测量技术问题，国内外都无专著，而是零星分散在有关著作和资料中，给从事这方面工作的同志带来不便。作者根据积累的资料和工作中的总结和体会编写了此书，期望能成为此技术学科分支的入门之阶。

本书共有两篇，第一篇为空中和水中冲击波测量，第二篇为土岩介质中冲击波和应力波测量。分别介绍了空中、水中及土岩介质中的爆炸物理过程及主要参数的估算方法，各种主要形式的压力传感器的工作原理、结构、特点和设计要点，压力传感器的性能试验方法，典型的测量系统和有关的现场测量技术。

出于精简、扼要和实用的考虑，作者不准备对每种测量系统及其组成环节的基本原理作泛泛地叙述，这些在有关的书刊中都

作了介绍，而是重点介绍常用的一些传感器和测量系统的特点，以及设计传感器和组建爆炸冲击波测量系统时的技术要点，从而使读者具有一个完整的技术概念。在书中根据作者在现场测量实践中的体会，对有关的现场测量技术也作了一定的介绍，这些对于爆炸现场的实验研究人员来说可能是有益的。

在编写本书的过程中得到了有关同志的热情支持并引用了他们的研究成果，其中：

BJ-1000 型压电式压力传感器引自于力学研究所九室研制总结报告；CSR型空气冲击波速度测量系统引自于冶金部武汉安全技术研究所研究报告；DYC 型压阻传感器引自于 89004 部队和邮电部 508 厂研究报告；机械式空气冲击波压力传感器，BY 型土应力计，TYC 型土应力计和变磁阻式岩石应力计引自于 89002 部队的研究总结报告。

对此作者表示衷心的感谢。

由于作者水平的限制，加之爆炸冲击波测量技术本身也在不断地发展，在本书中不可能概括这一技术领域的全部知识，并可能有错误和不当之处。恳切希望读者和有关同志批评指教。

编著者

目 录

第一篇 空中和水中爆炸冲击波测量

第一章 爆炸产生的空气冲击波和水中冲击波	3
§ 1-1 基本物理现象	3
§ 1-2 几个主要参数	5
§ 1-3 冲击波参数计算	6
一、空气冲击波特征参数的计算	6
二、空气冲击波在刚性表面上的反射	13
三、水中爆炸冲击波特征参数的估算	15
四、冲击波速度 D 与峰值压力的关系	19
第二章 测量系统的组成	20
§ 2-1 冲击波速度测量系统的组成	20
§ 2-2 冲击波压力历史测量系统的组成	22
第三章 压力传感器	24
§ 3-1 概况	24
§ 3-2 应变式压力传感器	26
一、应变片的工作原理和结构	26
二、应变式压力传感器测量电路	31
三、膜片应变式压力传感器	36
四、应变筒式压力传感器	39
五、应变式压杆传感器	46
六、应变式压力传感器设计要素	49
§ 3-3 压电式压力传感器	51
一、压电效应	51
二、压电方程和压电材料	53
三、几种主要的压电式压力传感器	61
四、压电式压力传感器小结	76
§ 3-4 压阻式压力传感器	77
§ 3-5 机械式压力传感器	81
第四章 压力传感器的技术性能和校准方法	83

§ 4-1 压力传感器的主要性能指标	83
§ 4-2 压力传感器的动态响应	86
§ 4-3 压力传感器的校准方法	91
一、静态校准方法	91
二、动态校准方法	93
第五章 典型的测量系统	99
§ 5-1 冲击波速度测量系统	99
§ 5-2 应变式压力传感器测量系统	104
一、载波调制—放大—解调系统	104
二、直流供电的电桥测量系统	106
三、直流供电的电位计电路测量系统	108
四、应变式压力传感器现场使用的注意事项	108
§ 5-3 压电式压力传感器测量系统	109
一、高输入阻抗的电压放大器	109
二、电荷放大器	113
三、电压放大器和电荷放大器的比较	116
四、采用电压放大器的冲击波压力测量系统	117
五、采用电荷放大器的冲击波压力测量系统	121
§ 5-4 水中冲击波测量系统	122
§ 5-5 现场测量的有关技术问题	124
一、传感器的现场安装质量问题	124
二、联接电缆的防振和防护	125
三、前置放大器、联结插件和接头的防潮和防振	126
四、长线的匹配和标定	127
五、试验场地的平整	127
六、压力传感器的热防护问题	127
参考资料	128

第二篇 土、岩介质中冲击波和应力波测量

第六章 土、岩介质中的爆炸物理过程	132
§ 6-1 无限介质中的封闭爆炸过程	132
§ 6-2 岩石中的爆炸破坏分区概念	133
§ 6-3 具有一个自由面的爆炸破坏过程	134
§ 6-4 土、岩介质中的爆炸冲击波和应力波	138
一、冲击波（应力波）的主要特征参数	138
二、土中爆炸冲击波（应力波）参数估算	139

三、岩石中爆炸冲击波(应力波)参数及估算方法	141
第七章 应力计在土、岩介质中的测量性能	144
§ 7-1 基本技术要求	144
§ 7-2 静态匹配误差分析	146
§ 7-3 动态匹配误差分析	150
§ 7-4 小结	154
第八章 应力计	156
§ 8-1 土应力计	156
一、应变式土应力计	156
二、半导体压阻式土应力计	164
三、压电式土应力计	165
§ 8-2 岩石应力计	169
一、应变式岩石应力计	170
二、变磁阻式岩石应力计	171
三、压电式岩石应力计	172
§ 8-3 岩石介质中强冲击波的测量	177
一、石英应力计	179
二、压阻式应力计	180
三、电磁质点速度计和应力计	183
第九章 应力计的技术性能和试验方法	187
§ 9-1 应力计的技术性能指标	187
§ 9-2 应力计的静态校准试验	188
§ 9-3 应力计的动态校准试验	191
§ 9-4 土应力计的静态匹配试验方法	193
§ 9-5 岩石应力计的静态匹配试验方法	196
第十章 现场测量系统和有关的现场测量技术	200
§ 10-1 现场测量系统	200
一、应变式应力计现场测量系统	200
二、压电式应力计现场测量系统	201
三、压阻式应力计现场测量系统	204
四、变磁阻式应力计现场测量系统	205
§ 10-2 应力计现场埋设方法	206
一、土应力计的现场埋设方法	206
二、岩石应力计的现场埋设方法	207
§ 10-3 有关的现场测量技术	210

一、应力计及联接电缆的密封防潮问题	210
二、电缆的防护问题	211
三、前置仪器的防震问题	212
四、测量系统的同步和遥控测量的有关问题	212
§ 10-4 结束语	214
第十一章 常用的记录仪器	215
§ 11-1 阴极射线示波器	215
一、阴极射线示波管	216
二、阴极射线示波器的方框图	218
三、示波器的主要性能指标	220
四、使用示波器的注意事项	221
§ 11-2 磁带记录器	223
一、概述	223
二、磁带记录器的特点	228
三、磁带记录器的分类	228
四、磁带记录器的组成和工作原理	229
五、磁带记录器的主要技术特性	234
六、磁带记录器的使用和维护、保养注意事项	237
§ 11-3 瞬态记录仪	243
一、瞬态记录仪的原理和组成	243
二、瞬态记录仪的主要技术性能指标	246
三、使用注意事项	247
参考资料	249

第一篇 空中和水中爆炸

冲击波测量

爆炸作用在军事上和国民经济建设中日益得到广泛的应用。空中和水中爆炸现象的研究已有一段历史，对典型的爆炸问题已获得了具有指导意义的理论和实验结果。但在实践中经常遇到的是各种特定条件下的爆炸现象，因而仍然希望测量各种条件下的爆炸冲击波参数。

在军事上，各种弹药和爆破器材利用爆炸作用来达到杀伤和破坏的目的。在空气中和水中爆炸产生的冲击波是某些武器产生杀伤和破坏作用的主要因素。弹药结构和装药的不同，其杀伤和破坏效应也有所不同。因此新型武器和爆破器材的研制，以及对武器效应及其防护的研究，都期望获得爆炸产生的冲击波及其传播规律的资料。

爆炸在工业和国民经济建设中应用时也遇到了类似的问题。如矿山爆破、定向爆破和水中爆破中炸药的一部分能量亦将以空气或水中冲击波的形式释放。在这类研究中，无论是机理研究，合理设计方案的确定，还是工程防护课题的研究，也期望获得爆炸产生的冲击波及其传播规律的资料。

在爆炸器材的安全生产、运输和贮存方面，有时也要求测量由于意外事故所形成的空气或水中冲击波。对于工业用的可爆气体意外爆炸的防护来说，同样也提出了类似的要求。

综上所述，进一步研究和发展爆炸冲击波测量技术是有现实意义的。

爆炸力学学科发展的同时，爆炸冲击波测量技术也在不断地发展和完善。目前已经研制了各种形式的冲击波压力传感器和相应的测量系统。对于从事爆炸力学实验研究的人员来说，一方面

需要掌握爆炸物理的基本知识，同时也应对现有的各种传感器和测量系统的原理、特点以及技术发展前景具有比较全面和深入的了解。此外，他们也应该具备一些基本的现场试验知识和经验。这对于正确和合理地设计和选择测量系统，确保测量结果的精确、可靠都是有益的。

压力（应力）单位的换算：

目前国内外使用的压力（应力）计量单位有多种，常用的有：

(1) 千克力/厘米² (kgf/cm²)。

(2) 大气压（严格说应为标准大气压）(atm)，

1 大气压 = 760 毫米汞柱 = 1.0332 千克力/厘米²。

(3) 巴 (bar)，

1 巴 = 10⁶ 微巴 = 10⁶ 达因/厘米²。

(4) 磅力/英寸² (psi)。

(5) 牛/米² (N/m²)。

这些压力计量单位的换算关系见下表。

常用压力计量单位换算表

	千克力/厘米 ²	巴	大气压	磅力/英寸 ²	牛/米 ²
千克力/厘米 ²	1	0.9807	0.9678	14.22	9.807×10^4
巴	1.020	1	0.9869	14.50	10^5
大气压	1.033	1.013	1	14.70	1.013×10^5
磅力/英寸 ²	0.0703	0.0689	0.0680	1	0.6895×10^4
牛/米 ²	1.02×10^{-5}	10^{-5}	0.9869×10^{-5}	1.450×10^{-4}	1

第一章 爆炸产生的空气冲击波和水中冲击波

§ 1-1 基本物理现象

当炸药在空气中或水中爆炸时，其周围介质直接受到具有高温、高速、高压的爆炸产物作用。在装药和介质的界面处，爆炸产物以极高的速度向周围扩散，如同一个超音速活塞一样。它强烈地压缩着相邻的介质（空气或水），使其压力、密度、温度突跃式地升高，形成初始冲击波。与此同时，由于相邻介质的初始压力很低，因而同时有一个稀疏波从界面向爆炸产物内传播。

爆炸产物这个“活塞”最初以极高的速度运动，由于能量的传递和损耗，它的速度很快衰减，一直到零为止。当爆炸产物膨胀到某一特定体积（有人称之为“极限体积”）时，它的压力降至周围介质未扰动时的初始压力 p_0 ，但爆炸产物并没有停止运动，由于惯性作用而过度膨胀，一直到某一最大容积。此时爆炸产物的平均压力低于介质未经扰动时的初始压力，出现了“负压区”。出现负压后，周围介质反过来对爆炸产物进行第一次压缩，使其压力不断增加。同样，由于惯性作用产生过度压缩，爆炸产物的压力又稍大于 p_0 ，并开始第二次膨胀——压缩脉动过程。经过若干次脉动后，最终停止，达到了平衡状态。对于空气而言，有实际意义的只是第一次膨胀——压缩脉动过程。在水中爆炸时，爆炸产物以气泡的形式也产生类似的过度膨胀和压缩的脉动过程。但由于水的密度大，惯性大，这种气泡脉动次数要比空气中爆炸时的脉动次数多，有时可达十次以上。对水中爆炸来说，也只是第一次脉动所形成的压力波才有实际意义（有人称之为“二次压力波”）。研究表明：水中爆炸时，尽管二次压力波的峰值压力不超过冲击波峰值压力的 10~20%，但它的冲量却和

冲击波的冲量相近。因此不能忽视它的破坏作用。在水中冲击波测量中,有时也要求同时测量二次压力波。

典型的空中和水下冲击波和脉动压力波形如图 1-1 和图 1-2 所示。

空气冲击波在传播过程中,由于下列原因,波阵面上的压力、速度等参量下降较快。

1) 设空气冲击波以球面波的形式向外传播,随着半径的增大,波阵面的表面积不断增大,即使没有其它能量

的损耗,通过波阵面单位面积的能量(能流密度)也不断减小(对于柱面波或其它形式的波阵面也是如此)。

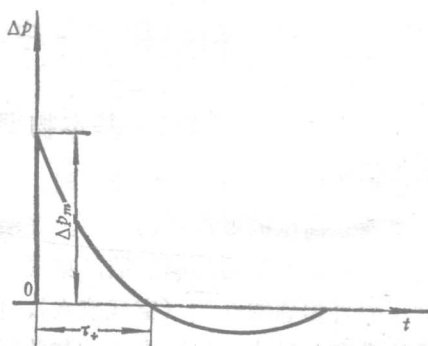


图 1-1 空气冲击波 $\Delta p(t)$ 曲线

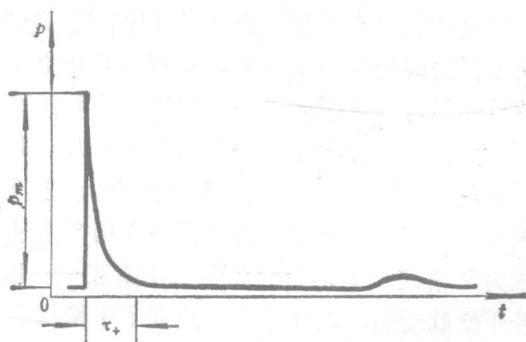


图1-2 水中冲击波 $p(t)$ 曲线

2) 由于单位面积能量的减小,冲击波速度降低,空气冲击波压缩相(正压区)在传播过程中不断拉宽,压缩区内的空气量不断增加,因而单位质量空气的平均能量下降。

3) 在强度较大的空气冲击波作用下,空气受到冲击绝热压缩,温度升高,消耗了部分冲击波的能量。

对于水下爆炸而言，情况也相类似。

由于水中的声速要快得多（约为 1500 米/秒），而且水中冲击波波阵面速度和它的尾部速度相差较小，因而对相同药量的水下和空中爆炸来说，在相同距离的测点处水中冲击波的作用时间比空气冲击波的作用时间短。在较远距离处，水中冲击波压力随时间近似地按线性规律下降。

图 1-3 和图 1-4 所示分别为爆炸冲击波在空气中和水中传播的情况，图中 $t_1, t_2 \dots$ 等分别表示爆炸后的不同时刻。

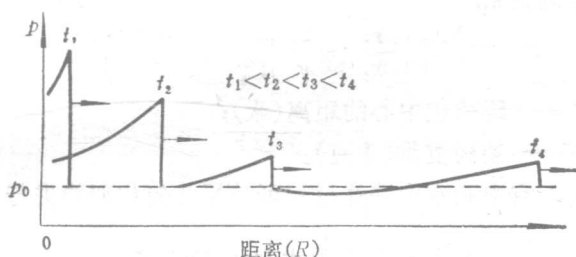


图1-3 空气冲击波的传播过程

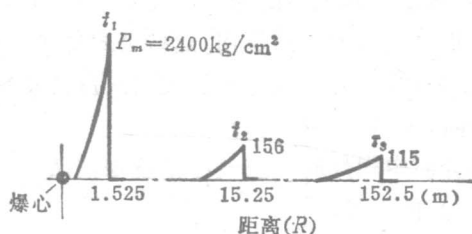


图1-4 水中冲击波的传播过程

§ 1-2 几个主要参数

由图 1-1 和图 1-2 看到，空气或水中冲击波的能量主要集中在正压区。就破坏作用来说，正压区的影响比负压区大得多，一般可以不考虑负压区的作用（对水中冲击波来说，有时还要考虑二次压力波的作用）。

因此，冲击波对目标的破坏作用可以用三个参数来度量：

(1) 波阵面压力即冲击波的峰值压力(或超压) Δp_m (Δp_m 亦可通过冲击波波阵面速度换算获得)。(2) 正压区作用时间(或冲击波正压持续时间), 以 τ_+ 表示。(3) 比冲量(或冲量密度), 即正压区压力函数对时间的积分值, 以 I_+ 表示。 $I_+ = \int_0^{\tau_+} p(t) dt$ 。上述三个参数表征了冲击波的破坏作用的大小, 因而是冲击波的主要特征量。

应该指出: 空中和水中爆炸过程都遵循几何相似的规律, 即存在着下列关系。

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt[3]{\frac{W_1}{W_2}}$$

式中 r ——距药包中心的距离(米);

W ——装药重量(千克)。

因此, 空中和水中爆炸过程可采用几何相似律进行分析。

§ 1-3 冲击波参数计算

考虑到爆炸测量技术人员的需要, 在本节中列出一些常用的参数计算公式, 供试验前预报估算用。这些公式都是在各种爆炸条件下进行大量试验后归纳的经验公式, 使用时应注意特定的条件。

一、空气冲击波特征参数的计算

1. 在无限介质中爆炸时, 空气冲击波峰值超压 Δp_m (即所谓自由场峰值超压)的计算。

(1) 装药密度为 1.6 克/厘米³ 的球形梯恩梯药包在空中爆炸时, 峰值超压 Δp_m 的计算:

萨道夫斯基公式:

$$\Delta p_m = p_1 - p_0 = 0.84 \frac{\sqrt[3]{W}}{r} + 2.7 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{r} \right)^2 + 7 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{r} \right)^3 \quad (1-1)$$

或:

$$\Delta p_m = \frac{0.84}{\bar{r}} + \frac{2.7}{\bar{r}^2} + \frac{7}{\bar{r}^3} \quad (1-2)$$

(适合于 $1 \leq \bar{r} \leq 10 \sim 15$)

式中 p_1 ——冲击波波阵面绝对峰值压力(千克力/厘米²);

p_0 ——介质的初始压力(千克力/厘米²);

Δp_m ——冲击波峰值超压(千克力/厘米²);

W ——装药重量(千克);

r ——测点至药包中心的距离(米);

$\bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{W}}$ ——比例距离(米/千克重^{1/3})。

从式(1-1)或(1-2)的适用范围来看,它们的使用局限性较大,在参考资料〔1〕中归纳了球状梯恩梯药包的两个超压计算公式:

$$\Delta p_m = \frac{20.06}{\bar{r}} + \frac{1.94}{\bar{r}^2} - \frac{0.04}{\bar{r}^3} \quad (1-3)$$

(适用于 $0.05 \leq \bar{r} \leq 0.50$)

$$\Delta p_m = \frac{0.67}{\bar{r}} + \frac{3.01}{\bar{r}^2} + \frac{4.31}{\bar{r}^3} \quad (1-4)$$

(适用于 $0.50 \leq \bar{r} \leq 70.9$)

上述两公式的应用范围较宽。

(2)使用其它炸药或装药密度不同时,峰值超压的计算。

由于炸药或装药密度的不同,装药的爆热不同,可以根据能量相似原理将装药换算成等效的梯恩梯当量再按(1-1)~(1-4)式进行计算。

等效的梯恩梯当量计算公式如下:

$$W_T = W_i \frac{Q_i}{Q_T} \quad (1-5)$$

式中 W_i ——所用炸药的重量(千克);

Q_i ——所用炸药的爆热(千卡/千克);

W_T —— W_i 折算的梯恩梯当量(千克);

Q_T ——梯恩梯的爆热(千卡/千克)。

表 1-1 列举了某些常用炸药的有关参数。

2. 地面装药爆炸时空气冲击波峰值超压 Δp_{me} 的计算。

装药在地面爆炸时,若忽略对地介质做功的那部分能量的

表1-1 某些炸药的有关参数

炸药名称	代 号	密度 ρ_0 (克/厘米 ³)	爆速 D (千米/秒)	爆热 Q_V (千卡/千克)	
梯 恩 梯	TNT	1.64	6.95	980~1093	
叠氮化铅		4.71	5.60	367	
泰安(喷特儿)	PETN, TЭH	1.67	7.98	1385~1489	
黑 索 金	RDX	1.80	8.75	1230~1510	
B 炸 药	B 炸 药	1.713	8.030	1205	64RDX/ 36TNT
*2岩石硝铵 炸药加23%的 铝粉		—	~3.00	~1500	
*2岩石硝铵 炸药		1.0	~3.00	1000	
硝酸-硝基苯		1.39	7.00	1260	
铍油炸药		0.9	~3.00	~900	

话，空气冲击波强度可近似与两倍装药在无限空间爆炸相当，即等效于两倍装药在无限空间的爆炸。以 $W_T = 2W$ 代入式(1-2)可得到：

$$\Delta p_{mc} = \frac{1.06}{\bar{r}} + \frac{4.3}{\bar{r}^2} + \frac{14}{\bar{r}^3} \quad (1-6)$$

(适用于 $1 \leq \bar{r} \leq 10 \sim 15$)

式中 $\bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{W}}$;

W ——地面实际装药量(千克)。

3. 装药在坑道、矿井巷道和地道中爆炸时空气冲击波峰值超压的计算。

装药在巷道中爆炸时，在装药附近是一个很复杂的过程，此时在巷道内不仅有入射波，而且有各种反射波产生，它们相互叠加。约在 4~8 倍巷道直径的距离上，形成沿巷道轴向传播的平面波波阵面。因而它的传播规律和无限介质中的爆炸冲击波有所不同。

此外，巷道表面的粗糙程度，有无支架以及装药爆炸条件(裸露装药、深孔爆破、硐室爆破等)对空气冲击波的强度都有