

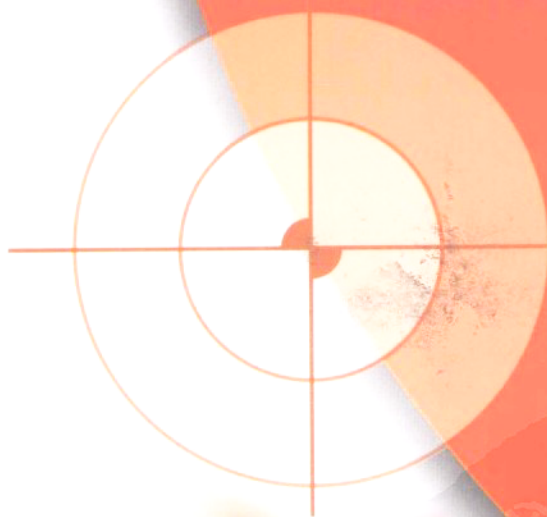


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

爆炸测试技术

BAOZHACESHISHU

李国新 蒋建伟 王树有 编著



兵器工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

爆炸测试技术

李国新 蒋建伟 王树有 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

《爆炸测试技术》是以捕捉和处理爆炸及快速反应过程的动态信息为目的的一本综合性技术教材。它以爆轰学、爆炸力学、冲击动力学、电磁学和光学等学科为基础, 主要介绍爆炸、冲击和燃烧过程中的热力学和运动参数随时间和空间高速变化的关系。

本书是力学工程、安全工程和特种能源工程等专业本科生的必修课教材, 也可作为相关学科和专业研究生、工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

爆炸测试技术/李国新, 蒋建伟, 王树有编著. —北京:
兵器工业出版社, 2008. 8
ISBN 978-7-80248-063-6

I. 爆… II. ①李…②蒋…③王… III. 爆炸—测试技术
IV. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 106859 号

出版发行: 兵器工业出版社
发行电话: 010-68962596, 68962591
邮 编: 100089
社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京市登峰印刷厂
版 次: 2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
印 数: 1—1200

责任编辑: 张小洁
封面设计: 李 晖
责任校对: 郭 芳
责任印制: 赵春云
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 16.75
字 数: 412 千字
定 价: 30.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

本书的原版是2005年1月北京理工大学出版的内部教材《爆炸测试技术》，由李国新主编。经过3年在弹药工程与爆炸技术、特种能源工程与烟火技术、安全工程几个本科专业的应用，得到比较好的教学效果，并列入校精品课程。

这本原版内部教材是在原《爆炸与冲击过程测试技术》（黄正平主编，北京理工大学内部讲义，1994.10印刷）、《爆炸测试技术（下）》（张鹏程主编，内部讲义，1988.10印刷）、《火工品试验与测试技术》（李国新主编，普通高等教育“95”兵工类规划教材，1998.6出版）的基础上汇编和修改而成。教材中积累了原作者及相关专业多年的研究成果，是集体智慧的结晶，这些成果是爆炸测试领域的宝贵财富。

《爆炸测试技术》是火炮、自动武器与弹药工程、军事化学、特种能源工程与烟火技术、弹药工程与爆炸技术、工程力学、武器系统与运用工程、安全工程等学科与专业的一门通用和基础教材。《爆炸测试技术》是以捕捉和处理爆炸、快速反应和燃烧过程的动态信息为目的的一门综合性教材。文中主要介绍了爆炸、冲击和燃烧过程中的热力学和运动参数随时间和空间高速变化的关系，其具有高速、高压、高温和瞬时性等特点。

本书主要内容包括爆炸、冲击、燃烧测试系统及功能、测试原理和方法、测试误差分析及其在相关领域的应用、虚拟测试技术与应用。测试的物理量主要有压力、冲量、速度、加速度、时间、位移、光强变化、作用过程等。选用的测试方法包括电测和光测两大类。电测部分以动高压测量为主，中、低压测量为辅，适用于动高压测量的有电探针法、电磁法、压阻法和压电法等；适用于中、低压测量的有应变法、靶网法、压电法和压阻法等。光测部分包括扫描和分幅高速摄影、光电法、脉冲X射线高速摄影、激光干涉测速法和高速摄像等。

除上述内容外，本书还提供了6个实验和详细的实验指导书，其目的是为了使读者更深刻地理解教材中的测试方法。

每章结尾附有思考题，归纳了各章的重点内容。

本书的第1章~第8章、第11章实验1~5由李国新编写，第9章~第10章、7.8节和第11章实验6由蒋建伟和王树有编写。李国新和王树有对全书进行了审核。

感谢刘玲和叶耀坤为本书插图所做的工作，感谢历届“爆炸测试技术”课程组的授课教师为教材所作的贡献，感谢与本书有关领域的教师、研究生和科技工作者提供的研究成果。由于作者水平有限，书中错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编著者

2008年7月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 爆炸测试技术的目的及应用范围	1
1.2 爆炸测试技术的特点	1
1.3 爆炸信号特征	3
1.4 爆炸测试技术的地位与发展	5
第 2 章 测试系统	9
2.1 测试系统的组成和误差	9
2.2 线性系统特性	11
2.3 系统的静态特性	12
2.4 系统的动态特性	14
2.4.1 传递函数	15
2.4.2 一阶时间响应	16
2.4.3 一阶频率响应	17
2.4.4 二阶时间响应	18
2.4.5 二阶频率响应	19
2.4.6 确定测试系统传递函数的实验方法	20
2.5 爆炸测试信号的传输	21
2.5.1 均匀传输线一般原理	23
2.5.2 同轴电缆	24
2.5.3 传输线的匹配	25
2.6 常用测量仪器	27
2.6.1 时间测量仪	27
2.6.2 瞬态记录仪	28
2.6.3 示波器	28
第 3 章 电探针测试方法	32
3.1 概述	32
3.2 电探针测试原理	33
3.3 电探针种类与结构	34
3.3.1 电探针结构	34

3.3.2	靶网、箔靶和靶线	39
3.4	脉冲形成网络	40
3.4.1	RLC 脉冲形成网络	41
3.4.2	晶体管脉冲形成网络	42
3.4.3	电缆元件脉冲形成网络	44
3.4.4	断靶脉冲形成网络	45
3.5	电探针在爆速测试中的应用	45
3.5.1	爆轰波阵面区域的电导率	45
3.5.2	定常爆速	46
3.5.3	脉冲形成网络单通道和多通道输出	46
3.5.4	电探针测量药柱爆速	48
3.5.5	火工品作用时间的测量	52
3.5.6	雷管底部飞片速度的测定	53
3.5.7	弹丸破片速度的测量	54
3.5.8	其他应用	55
第4章	电磁法测量爆速和爆压	57
4.1	概述	57
4.2	电磁速度传感器测试原理	58
4.2.1	基本原理	58
4.2.2	电磁速度传感器有限厚度的力学响应	60
4.3	电磁速度传感器	62
4.3.1	金属箔结构	62
4.3.2	电磁装置	64
4.3.3	电磁速度传感器性能	66
4.4	电磁冲量传感器	67
4.4.1	电磁冲量传感器的结构	67
4.4.2	电磁冲量传感器原理	68
4.4.3	电磁冲量传感器有限厚度的力学响应	71
4.4.4	电磁冲量传感器性能	72
4.5	电磁法测试系统	72
4.6	爆轰产物导电性对测量的影响	73
4.6.1	一般性试验分析	73
4.6.2	爆轰产物导电性影响及修正方法	75
4.6.3	G^* 和 I^* 的实验测量	76
4.6.4	g_0 的实验测量	77
4.6.5	导电产物中环电流产生的附加磁场的影响	77
4.6.6	讨论	78
4.7	电磁法应用	79

4.7.1 电磁速度传感器测量爆轰参数	79
4.7.2 电磁法测量雷管隔板冲击波输出压力	81
4.7.3 电磁法测量雷管底部破片输出能量	84
第5章 压阻法和应变法	87
5.1 概述	87
5.2 压阻和应变传感器的工作原理	88
5.2.1 锰铜压阻传感器工作原理	88
5.2.2 应变传感器的工作原理	90
5.3 压阻计和应变计结构	92
5.3.1 锰铜压阻计结构	92
5.3.2 电阻应变计结构	93
5.4 压力传感器	94
5.5 压阻法和应变法压力测试系统	96
5.5.1 高、低压测试分类	96
5.5.2 低压测试系统	97
5.5.3 高压测试系统	100
5.6 压阻(应变)片的一种标定方法	104
5.7 应用	104
5.7.1 电阻应变法测量 $p-t$ 曲线	104
5.7.2 锰铜压阻法测量雷管输出压力	107
5.7.3 压阻法和应变法同时测量雷管输出压力	110
5.7.4 锰铜法在撞击实验中的响应分析	111
第6章 压电法	113
6.1 概述	113
6.2 压电效应	114
6.2.1 压电晶体单晶压电效应	114
6.2.2 多晶体压电陶瓷效应	116
6.2.3 有机压电陶瓷	116
6.3 压电切片的连接及等效电路	116
6.4 压电法测试系统	117
6.4.1 电荷放大器基本原理	118
6.4.2 电压放大器基本原理	119
6.5 压电电流法	120
6.5.1 Sandia 石英传感器结构	121
6.5.2 Sandia 传感器的工作原理	121
6.5.3 Sandia 传感器的应用方法	124
6.6 固体冲击极化效应传感器	125

6.7 压杆式压电压力传感器	126
6.7.1 压杆式压电压力传感器结构	126
6.7.2 压杆式压电压力传感器工作原理	128
6.8 自由场压电压力传感器	134
6.8.1 自由场压电压力传感器的一般结构	134
6.8.2 自由场压电压力传感器的工作原理	135
6.8.3 自由场压电压力传感器测压精度分析	137
6.9 压力传感器的标定	140
6.9.1 静态压力标定	141
6.9.2 动态压力标定	141
6.10 压电法压力测试技术	144
6.10.1 压电法测量压力时间曲线	144
6.10.2 空气冲击波压力和速度测量	147
6.10.3 水中冲击波的测量	149
6.10.4 推冲器推力试验	150
第7章 高速摄影技术	153
7.1 概述	153
7.2 高速摄影及分类	154
7.2.1 高速摄影的描述	154
7.2.2 高速摄影分类	155
7.3 间歇式高速摄影仪	158
7.4 补偿式高速摄影仪	158
7.5 鼓轮式高速摄影仪	159
7.6 转镜式高速摄影仪	160
7.6.1 转镜式高速扫描摄影仪	161
7.6.2 转镜式高速分幅摄影仪	167
7.6.3 可控与等待工作方式	171
7.7 变像管高速摄影机	172
7.8 高速摄像系统	174
7.8.1 固态图像传感器	174
7.8.2 高速摄像系统的基本构成及原理	175
7.8.3 高速摄像机的主要参数设置	176
7.9 摄影相关技术	177
7.9.1 光源	177
7.9.2 采光技术	178
7.9.3 高速摄影胶片	178
7.10 高速摄影和摄像技术的应用	178
7.10.1 电雷管爆炸轴向冲击波波形测试	178

7.10.2	小剂量传爆药柱爆速增长过程测试	181
7.10.3	间隙发光法在高速摄影中的应用	182
7.10.4	桥丝的爆炸过程测试	184
7.10.5	水箱法高速摄影	185
7.10.6	激光高速摄影系统在战斗部破片飞散试验中的应用	189
第8章 脉冲X射线高速摄影		191
8.1	概述	191
8.2	脉冲X射线装置	192
8.2.1	脉冲X射线的产生	192
8.2.2	X射线管的种类	194
8.2.3	脉冲X射线管的电源	195
8.3	X射线的物理特性	198
8.3.1	X射线的波长	198
8.3.2	X射线量及其衰减	199
8.3.3	X射线脉冲持续时间	200
8.3.4	单个脉冲剂量	201
8.3.5	脉冲X射线源的大小	201
8.3.6	脉冲电压和电流	202
8.4	X射线摄影仪	202
8.4.1	脉冲X射线摄影装置	202
8.4.2	摄影形式	205
8.5	图像记录	205
8.5.1	底片	205
8.5.2	荧光增感屏	207
8.5.3	影响图像质量的因素	208
8.5.4	速度计算	210
8.6	脉冲X射线摄影技术	210
8.6.1	爆破弹脉冲X射线摄影	211
8.6.2	射流形成过程测量	212
8.6.3	炮弹运行状态摄影	212
8.6.4	炸药爆轰性能研究	213
第9章 激光干涉测速技术		216
9.1	概述	216
9.2	基本原理	216
9.2.1	光学多普勒频移	217
9.2.2	光学混频原理	217
9.2.3	位移干涉仪	218

9.2.4 速度干涉仪	219
9.3 VISAR 测速系统	220
9.3.1 VISAR 系统的基本组成	220
9.3.2 VISAR 的改进	221
9.3.3 VISAR 在炸药驱动平板实验中的应用	222
第 10 章 虚拟测试技术概论	225
10.1 概述	225
10.2 虚拟仪器	225
10.2.1 虚拟仪器的基本概念、构成及其特点	225
10.2.2 虚拟仪器开发环境——LabVIEW	226
10.2.3 虚拟仪器的应用	226
10.3 虚拟实验测试技术	227
10.3.1 概述	227
10.3.2 虚拟实验原理	228
10.3.3 虚拟实验应用实例——炸药室内爆炸冲击波参数虚拟实验	232
第 11 章 爆炸测试技术实验	234
实验 1 雷管输出压力测试实验	234
实验 2 脉冲 X 射线辐射摄影技术实验	237
实验 3 压电压力传感器动态标定实验	242
实验 4 导爆索和导爆管爆速实验	246
实验 5 高速粒子（飞片）对靶板的侵彻和速度测试	249
实验 6 爆炸冲击波反射及绕射虚拟实验	252
参考文献	254

第1章 概 论

在传爆序列 (High explosive train) 或传火序列 (Low explosive train) 作用下, 引爆主装炸药或其他含能材料, 炸药在输入能量的激发下, 经历燃烧、爆炸 (不稳定爆轰) 和爆轰过程, 产生巨大的能量。爆炸是物理或化学能量迅速释放的过程, 爆炸是靠原有高压气体、爆炸瞬间形成的高温高压气体和蒸气的骤然膨胀做功。

1.1 爆炸测试技术的目的及应用范围

爆炸测试技术是以捕捉和处理燃烧、起爆、爆炸等快速反应过程的动态信息为目的的一门综合性技术。它以爆轰学、爆炸力学、冲击动力学、燃烧学、电磁学和光学等学科为基础, 介绍燃烧、爆炸和冲击过程中的热力学和运动参数随时间和空间高速变化的关系。

爆炸测试技术是弹药工程与爆炸技术、特种能源工程与烟火技术、工程力学、安全工程等专业, 武器系统与运用工程、火炮、自动武器与弹药工程、军事化学与烟火技术等学科的一门通用测试课程, 主要对起爆、传爆、燃烧、爆炸、冲击等作用过程中的物理参数进行测试, 观察这些过程中温度、压力、密度分布等热力学参数和燃速、爆速、加速度、位移等运动学参数随时间和空间高速变化的关系, 找出规律, 为武器装备、航天器件和民用爆破器材装药的研究和设计提供可靠的试验数据。由于测试过程具有高速、高压、高温和瞬时性等特征, 使测试难度明显增加, 形成了与一般动态测试技术所不同的鲜明个性。

本教材主要介绍测试系统功能、多种测试方法、测试原理及其在相关领域的应用。测试的物理量主要有压力、冲量、速度、加速度、密度、时间、位移、光强变化、作用过程等。选用的测试方法包括电测和光测两大类。电测部分侧重于压力、速度、时间、冲量等的测量, 适用电测的方法有电探针法、电磁法、压阻法、压电法、应变法和靶网法等。光测部分包括扫描高速摄影、分幅高速摄影、多脉冲激光高速摄影、光纤测速法、光电法、脉冲 X 射线和激光高速摄影、数字式高速摄影等方法。

除上述内容外, 书中还介绍了动态测试系统的特性和误差、现代虚拟测试技术和部分实验内容。

1.2 爆炸测试技术的特点

爆炸测试技术的覆盖面很宽, 其测试对象、测试要求、测试条件差别很大。针对爆燃、爆炸的特殊性, 爆炸测试技术的特点主要表现在下列几方面:

(1) 单次性

试验过程具有单次特性, 即一次试验后, 所选用的样品也随试验而遭到破坏。例如, 炸

药爆炸、雷管起爆、发动机点火、火炮射击和导弹发射等，其性能参数是在瞬间作用过程中测试而获得的，一旦过程结束，样品也彻底毁坏。如果还需要重新测试，只能再从同类产品中另选一发样品，但要找到性能完全相同的样品是很困难的。由于无法对单个样品进行重复性试验，对一批产品的动态参数也无法做到百分之百地检验，通常采用的办法是在一批产品中抽取一定数量的样品进行性能测试，其测试过程的误差，总体分布服从统计规律。

希望测试的样品尽量少，而获得的信息又尽可能反映该批产品的整体特性，因此在测试中，除考虑测试方法、手段外，还要选择一种最佳的数据处理与可靠性评定方法，即以数理统计和概率论为依据，对样品测试性能的分布类型、上下限指标及误差等做出正确的估算和判断，这种方法既可以获得可信的数据，也很大程度减少了测试样品数量。

(2) 高速

爆轰波沿爆炸物传播的速度是爆炸测试中的重要参量。弹丸的初速一般在 $300 \sim 2000 \text{ m/s}$ ，聚能装药破甲弹作用形成的金属射流，其头部速度在 $7000 \sim 10000 \text{ m/s}$ 之间。常用密度条件下，炸药的爆速在 $6000 \sim 10000 \text{ m/s}$ ，塑料导爆管的爆速大于 1700 m/s ，普通导爆索的传爆速度在 6500 m/s 以上。点火和起爆药中斯蒂芬酸铅从燃烧到爆轰成长，速度可达 2000 m/s ，氯化铅爆速为 $2500 \sim 5000 \text{ m/s}$ 。聚能材料爆轰冲击波、自由表面速度也在 $6000 \sim 10000 \text{ m/s}$ 之间。

(3) 高压

压力突变是爆炸破坏作用的关键性能指标。高膛压反坦克火炮峰值压力可达 700 MPa ，爆炸与冲击过程产生的压力高达数十万个大气压，相当于 10^{10} Pa 。爆炸使爆炸点周围介质发生急剧的压力突变，以达到做功和毁伤的目的，因此瞬间压力越高，破坏效果越显著。

(4) 高温

爆温是炸药爆炸瞬间释放出的热量将爆炸产物加热到的最高温度，它是爆炸性能的重要参数。战斗部内炸药装药在爆炸时温度可达 $3000 \sim 5000^\circ\text{C}$ ，火箭发射时，推进剂燃烧温度也可达 3000°C ，火药燃烧温度在 $2000 \sim 3000^\circ\text{C}$ 。

(5) 瞬时性

由于燃烧—爆炸使用的材料为含能材料，它们具有燃烧爆炸释放能量的特点。从系统接受外界刺激能量到爆炸，中间经历了极为迅速的物理和化学的能量反应，即炸药的燃烧转爆轰过程（Deflagration to Detonation Transition, DDT），是多阶段不定常的物理—化学反应过程，从燃烧到爆轰，反应传播速度从 10^{-1} cm/s 上升到 10^6 cm/s ，压力从 10^2 Pa 跳变到 10^{10} Pa 气压。在此过程中，被测系统的内能转变为机械能、光能和热能等，原有的高压气体或爆炸瞬间形成的高温高压气体迅速膨胀。在测试时，从开始采集到信号消失，整个的作用过程在很短的时间就完成了。弹丸在膛内 10 ms 可发射完毕； 10 m 长导爆索，爆轰波从一端传到另一端，只需要 0.15 ms ；爆轰与冲击过程从启动到结束所用的时间为 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ s}$ ；燃烧过程比爆燃和爆轰过程要长得多，一般在毫秒数量级。

(6) 破坏性与安全操作

燃烧与爆炸产生破坏作用，不仅样品自身毁坏，测试用的模具、传感器和辅助工具也受到不同程度的破坏。如果试验考虑不周，还可能引起仪器设备受损和人员受伤。例如，用电探针采集触发信号、用电磁、电容和压阻传感器采集时间、压力等参数时，电探针和各种传

传感器都会随着燃烧和爆炸过程被损坏。这一特点使试验费用明显增加，为了减少开支，测试人员往往采用结构简单、成本低的传感器，同时尽量采用间接测量方法，以便减小爆炸造成的损失。

进行试验时，一定要按安全操作规程执行，每一个试验环节、操作步骤都不能麻痹。例如，一般操作是先安装调试好仪器、装上炸药样品，在起爆电路短路或断开的情况下，再连接起爆元件。起爆或点火元件一旦接入测试系统，必须关闭防爆门或防爆箱，待操作人员离开爆炸现场后，才可以接通起爆线路，进行爆炸性试验。

综上所述，由于测试过程具备高压、高速和瞬时性等特征，在设计试验时，为了能准确捕捉信号并使其具有真实性，对测试系统的时间响应、频率响应及干扰等因素必须做全面的考虑。

1.3 爆炸信号特征

对于被测对象，它的反应过程和运动状态，是通过一系列物理参数随时间的变化过程反映出来的，这就是信号。燃烧—爆炸物理化学反应过程中获取的信号是一种动态信息，它是随时间连续快速变化的，并且大多数具有单次性。

图 1.1 ~ 图 1.8 中列出了一些具有代表性的燃烧、爆炸和冲击测试信号波形。图 1.1 表示战斗部内部炸药爆炸时，金属壳体膨胀破碎，产生具有一定质量和速度的破片，破片的飞散方向和密度的关系，近似高斯函数分布。图 1.2 所示为起爆药或烟火药爆燃或低速爆轰，产生燃烧气体推动活塞做功，形成瞬间的压力。

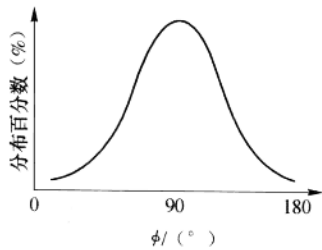


图 1.1 破片分布曲线

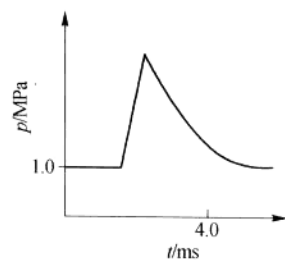


图 1.2 燃烧气体推动活塞压力曲线

图 1.3 所示为冲击波的压力—时间曲线，冲击波阵面上的压力为峰值压力，其后的压力按指数衰减， $p-t$ 曲线包围的面积为正相作用冲量 I ；负压区为稀疏区，冲击波对目标的破坏程度，取决于该区的参数指标。

图 1.4 表示位于激波管上不同点处压力传感器测量的压力波形，反映了激波的特点。图

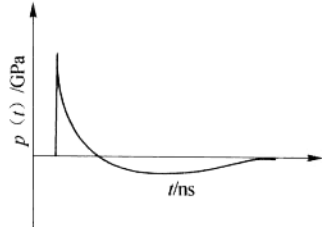


图 1.3 介质中冲击波压伸曲线

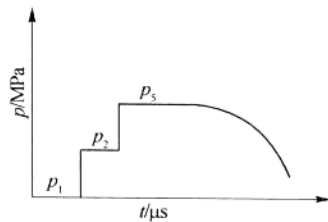


图 1.4 激波管内压力分布

1.5 所示为冲击波自由传播，即无外界能量不断补充的情况下，波的强度随传播距离的增加而逐渐衰减。图 1.6 所示为电雷管中桥丝加热时其温度随时间的变化规律，桥丝材料和输入能量不同，温度曲线的上升速率也不同，起爆药的点火和起爆时间也随之有较大的变化。图 1.7 利用电磁速度传感器安装在炸药端面处，测量爆轰波产生的感应电动势，然后求出爆轰波 C-J 面处爆轰产物的质点速度和爆压。图 1.8 所示为用压电测压弹测得的 155mm 榴弹炮发射时膛内压力随时间的变化规律。

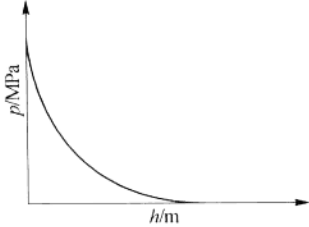


图 1.5 平面一维冲击波衰减曲线

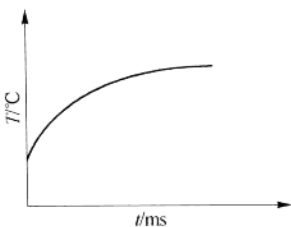


图 1.6 电雷管桥丝温度变化曲线

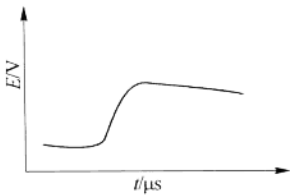


图 1.7 感应电动势随时间的变化规律

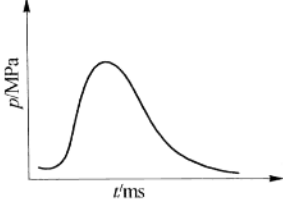


图 1.8 测压弹测试炮压曲线

图 1.9 所示为冲击波对传播媒体产生的弹性衰减振荡，随着时间和传播距离的增加，振荡波形的幅度迅速减小。图 1.10 所示为二阶线性测试系统的压力信号波形，当测试系统输入阶跃压力信号后，系统自身的时间域动态响应会出现一定的失真。

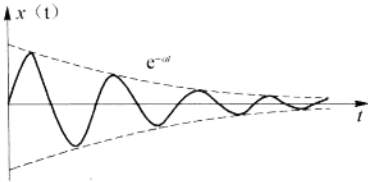


图 1.9 测试系统振荡曲线

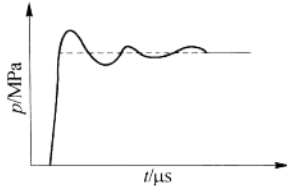


图 1.10 阶跃信号压力曲线

分析以上图中所示的波形，其共同特点是具有单次性；曲线普遍有明显的上升沿或下降沿；横坐标表示时间时，时间单位多数在 ms ~ ns 范围内；纵坐标表示压力时，压力范围在 MPa ~ GPa 之间。这些特点说明，燃烧爆炸反应过程是迅速发生和消失，持续时间很短，但反应过程中释放的能量很大。

爆炸测试技术接触的大部分信号是瞬变信号，它可以用明确的数学关系式描述，但不具有周期性。例如：

$$x(t) = x_0 e^{at} \tag{1-1}$$

是一种指数信号。公式中 a 是实数，若 $a > 0$ ，信号将随时间增加而增长，若 $a < 0$ ，信号将随时间增加而衰减， a 的绝对值的大小，反映了信号增长和衰减的速率。在燃烧爆炸测试技术中，这是一种常见的信号形式， a 的绝对值一般比较大，即曲线的变化速率很大。

单边衰减指数信号:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ e^{-\frac{t}{\tau}} & (t \geq 0) \end{cases} \quad (1-2)$$

在 $t=0$ 点处, $x(0)=1$; 在 $t=\tau$ 处, $x(\tau)=0.368$ 。说明经时间 τ 后, 信号衰减的百分数。其典型实例见图 1.5。

另一种带有上升斜率为 α 的常见曲线表达式为:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ a + e^{-at} & (t > 0) \end{cases} \quad (1-3)$$

图 1.8 所示的波形近似这种表达规律。

高斯脉冲信号:

$$x(t) = x_0 e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (1-4)$$

其典型实例类似于图 1.1。

衰减正弦信号是爆炸测试技术中常见的一种振荡衰减曲线, 见图 1.9, 其表示为:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ x_0 e^{-at} \sin \omega t & (t \geq 0, a > 0) \end{cases} \quad (1-5)$$

瞬变信号通过傅里叶级数变换, 可得到频域函数:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (1-6)$$

公式表明, 非周期信号可以展开成为一系列正(余)弦信号的叠加, 即 $x(t)$ 是由从零到无限大的无穷多的 $X(f) e^{j2\pi ft}$ 谐波分量叠加而成。爆炸测试装置在测量瞬变信号时, 要考虑基波、一次谐波和高次谐波等对测试的影响, 因此, 用于本领域的测试仪器、传感器和连接元件等, 往往具有很宽的频带、较高的固有频率和响应速率。

除瞬变信号外, 爆炸释放的能量引起岩层的弹性振动、传感器动态特性分析产生的正弦波等则为周期衰减信号。

1.4 爆炸测试技术的地位与发展

获取燃烧、爆炸反应和冲击过程中包含的各种物理量、化学量是人们认识和研制武器装备、含能材料和爆破器材的首要条件。任何科学理论的建立都要通过大量的实验与测量, 对获取的信息进行分析以验证理论的正确性和可靠性。可以说, 各种信息测试手段的技术水平是科学技术和生产力发展水平的重要标志。

随着电子技术、计算机技术的发展, 使得爆炸力学工程计算、含能材料燃烧爆炸热力学参数计算、爆轰数值模拟和材料动态力学响应等的研究也获得迅速发展。但是, 关于爆炸、燃烧与冲击过程的数值计算要获得准确结果, 除了有正确的物理模型和有效的计算方法外, 还需要由爆炸、燃烧和冲击实验提供足够多的数据, 以建立和完善数据库的内容, 并对计算结果进行修正。如测试可以提供材料的经验状态方程、热点起爆的参照条件、一些爆炸和冲击现象的初始条件和边界条件、瞬时的空间影像等。实验和理论相互关联, 没有正确理论指导的测试会带有很大的盲目性, 而没有经过实验验证的理论是不可信服的。实践是检验理论

的标准,只有通过试验去验证理论,才能找出理论中的缺陷,推动其完善和发展。

脉冲闪光 X 摄影技术推进了聚能装药破甲弹及其作用机理的研究,扫描高速摄影技术提供弹丸的转速、速度、飞行姿态等弹道参数,高速录像技术为分析燃烧、飞片运动创造了很好的条件。随着传感技术的发展,动高压、高温和高爆速的测试器件和测试手段越来越多。目前常用的电测法可以测量空气、介质和水中冲击波的传播速度和压力,爆炸粒子运动速度,破片和飞片速度,火工品输出威力,发射装置膛压,炮弹飞行速度,点火和推进系统的 $p-t$ 曲线等。光测方法应用较多的是狭缝扫描高速摄影、分幅高速摄影、变像管高速摄影、多脉冲激光高速摄影、纹影高速摄影、阴影高速摄影、脉冲 X 射线摄影、光电测量、光纤测试、多普勒激光、雷达测速等。主要用于测试爆压、弹丸速度、飞片轨迹、侵彻靶板状态、爆炸过程、触发信号采集、自由表面位移、激波和冲击波运动轨迹、起爆器的传爆过程等弹道学、爆炸力学、高速碰撞、等离子体历程的研究。

爆炸测试技术今后的发展方向主要有以下几个方面:

(1) 提高测试仪器的测试精度和动态响应

测试系统的测试精度高,动态响应特性好是保障测试结果可靠的重要条件。在选用传感器和测试仪器时,要考虑到对各次谐波的不失真采集和放大。

人们常说“征服了传感器,就等于征服了科学技术”,由此可见,传感技术在现代科学技术中占据的地位十分重要。传感器及其配套设施的测试精度和动态响应特性直接影响测量结果。目前,传感器多数产品的精度在 0.2%、0.05%,也有部分产品的精度优于 0.001%。传感器正在向智能化、多功能化、高可靠性、小型化和数据融合技术方向发展。

测量仪器的量程、测试精度、测量速度、界面平台和通信系统在不断提高,如 TEK 公司的 TDS5000 系列传感器,带宽 1GHz,采样速率为 5GS/s,确保了信号重现的精确度;记录长度可达 8MB,波形捕捉速率 100000wfms/s;采用开放式 Windows 平台,备有多种易于连接的接口,如 LAN、GPIB、USB、PS-2、RS-232、Centronics 等,考虑联网的需求,将测量和协作工具通过网络引向世界,用户可全方位访问 Windows 桌面,和其他与试验相关人员分享和探讨测量数据,并在示波器上收发电子邮件。此外,还能直接在示波器桌面上运行 Excel、MATLAB 和 MathCad 等分析软件。

(2) 拓宽测试领域

一般对火炸药爆炸性能的评价指标有燃烧热、爆热、爆温、爆速、爆容和爆轰压力。由于高温高压气体产物具有强烈的破坏作用,以及爆燃和爆轰反应过程的瞬时性,使得燃烧热、爆热、爆温和爆容的精确测定变得十分困难,目前,只能用近似的方法测试水温 and 气体产物静压力,然后通过计算求得对应的燃烧热、爆热和爆容。爆温的实验测定比较困难,一些单位用热电偶和热敏器件直接接触爆炸源进行过测试,但都因为温度场变化速度快,而温度传感器动态响应特性不高,因此测得的爆温远低于实际爆炸产物的峰值温度。目前采用红外辐射和比色计测温等方法对爆炸温度进行间接测量,这种测量仪器的时间常数是热电偶的 1/10,比较适应于快速变化的温度场测量。它的缺点是不能测定温度场中某一点的温度,因此在实际测量中,它与热电偶测温仪配合使用,互相校正,才能得到较为满意的结果。还有些研究人员尝试用光导纤维或其他新的感温材料测爆温。如何在这一领域找到有效的测温材料和测试方法,是目前燃烧爆炸测试技术中十分关注的研究内容。

爆速和爆轰压力的测试方法比较多,采用直接测定方法可以得到较好的实验数据。但随

着高科技的不断发展,精确制导和精确打击武器成为发展重点,灵巧型、智能化、小型化和高效能成为装备主要研究方向。大量新的做功器件性能指标需要进行测定,这为燃烧爆炸测试技术带来了生机,同时也带来了新研究课题。如冲击片或飞片速度测量,可以用电探针和光测法得到实验数据,但对于爆炸箔一类的直径小于1mm的小型飞片,由于瞬间极小空间内的高压脉冲产生很强的电磁干扰,使得电探针无法正常工作,而常用的光测方法,也因冲击片的直径太小而难以适应,因此需要采用更先进的测试手段或途径。

DDT过程的精确测量和表述,需要采用多传感器数据融合技术得到更可靠的测试结果和分析数据。各种装备在运行中燃烧爆炸参数的测定,尚存在很多需要解决的技术难题。因此,拓宽测试领域是今后人们关注的重点。

(3) 加强数值模拟和仿真技术

燃烧、爆炸和冲击过程的测试需要花费大量的资金和使用很多贵重的仪器设备,特别是进行弹箭发射和打靶试验等,一批试验完成,价格十分昂贵。因此,国内外都在开发各种模拟仿真软件,配以实物或半实物仿真技术,以减少试验数量和过大的资金投入。

目前本领域常用的一维、二维和三维模拟计算程序很多,针对不同的爆炸反应物和产物,可选用适当的计算模型。例如,用TVD (Total Variation Diminishing) 差分格式与MacCormack格式结合,进行气液两相爆轰数值模拟。ANSYS动力学计算软件,是集结构、流体、电场、磁场、热分析于一体的通用有限元分析软件,能与多数CAD软件连接实现数据的共享和交换,是现代产品设计的高级CAD工具,用于爆炸过程及效应的模拟仿真。Fluent软件是应用计算流体力学理论和方法,编制计算机运行程序,数值求解满足不同种类流体的运动和传热传质规律的三大守恒定律,及附加的各种模型方程所组成的非线性偏微分方程组,得到确定边界条件下的数值解,为现代科学中复杂流动与传热问题提供了有效的解决方法。AUTODYN动力学计算软件,是美国世纪动力公司研制的非线性动力分析软件之一,它是一个显式有限元分析程序,用来解决固体、流体、气体及其相互作用的高度非线性动力学问题。广泛应用于包含碰撞、侵彻、冲击和爆炸问题的数值模拟。在战斗部设计、航天飞机与火箭等点火发射、装甲和反装甲的优化设计、爆炸驱动、内弹道气体冲击波、高速动态载荷下材料的特性和爆破工程中得到较好的使用效果。AUTOREGAS软件,是三维气体燃烧、爆炸和冲击效应的计算流体分析软件,可用于模拟仿真。REAL软件是一个通用的热力学程序,用来计算模拟高温(最高6000K)高压(最高600~800MPa)下复杂化学系统的化学平衡。该软件可以用来确定任意化学系统在给定条件下的化学组成和相组成,也可以用于计算热力学和热物理性质,可完成含能材料燃烧爆炸热力学的参数计算。MDT辅助设计软件主要解决燃烧爆炸装置等的设计。JV SIGNAL动态测试及数据处理软件,用于动态测试自动化及数据处理。DYNA软件是以显式为主,只需建立一次有限元模型,利用LS-DYNA核心求解程序,即可求解各式不同的物理现象及多阶段分析,隐式为辅助的通用非线性动力分析有限元程序,可以求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成形等非线性问题。以结构分析为主,兼有热分析、流体—结构耦合功能。

有关燃烧爆炸过程的数值模拟和仿真,要获得准确的计算结果,除了有相关的物理数学模型和有效的计算方法外,还需要通过试验提供更多的数据对模拟结果进行验证,不断完善各种计算软件。

目前“虚拟实验技术”得到各领域的关注,这种技术的支撑平台是由计算机和计算软