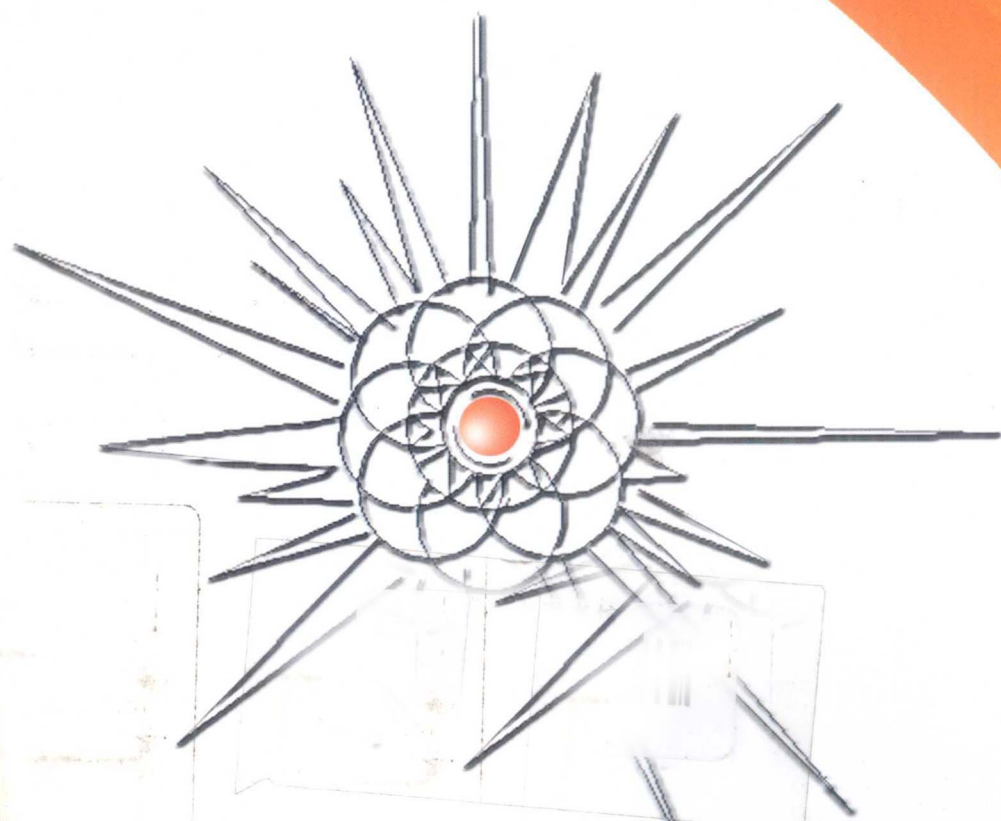


爆破动力学基础

BAOPO
DONGLIXUE
JICHU

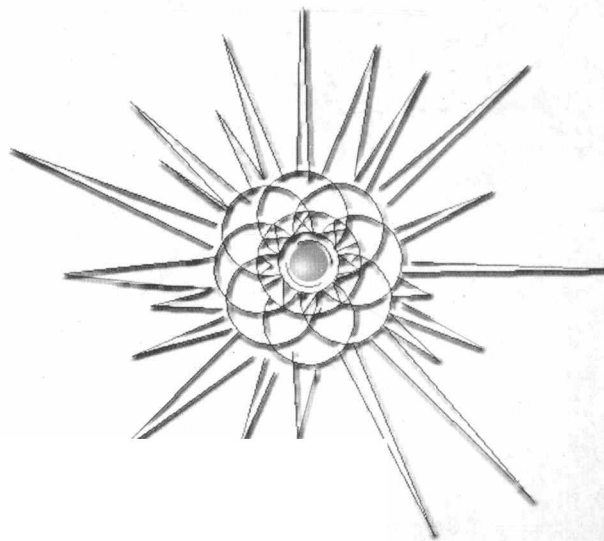
陈宝心 杨勤荣 编著



爆破动力学基础

BAOPO
DONGLIXUE
JICHU

陈宝心 杨勤荣 编著



湖北科学技术出版社
HUBEI SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

爆破动力学基础

© 陈宝心 杨勤荣 编著

责任编辑：熊木忠

封面设计：张 浩

出版发行：湖北科学技术出版社

电话：87679468

地 址：武汉市雄楚大楚268号湖北出版文化城B座12-14层 邮编：430070

印 刷：湖北恒泰印务有限公司

邮编：430223

787毫米×1092毫米

16开本

11.5印张

273千字

2005年2月第1版

2005年2月第1次印刷

印数：0 001-2 000

ISBN 7-5352-3312-0/O · 51

定价：25.00 元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

内 容 提 要

本书主要介绍爆炸动力学基本理论及其在土木、采掘、机械、安全等工程中的应用。主要内容有:爆炸载荷的特点;固体中的应力波;流体介质中的波;冲击波和爆轰波;空中、水中爆炸冲击波参数及其作用载荷计算原理;岩土中爆炸波的产生及其传播规律,爆炸腔、炮孔压力、爆破装药量计算原理;爆炸地震波及其效应等。

本书可作为采矿工程、安全工程、土木工程(爆破工程和动力学研究方向)专业研究生的教学参考书。也可供相关专业高校教师、科研人员以及工程技术人员参考。

前 言

爆炸技术已广泛地用于矿山采掘工程、土木工程、机械工程等各个领域。随着爆炸技术向科学化、精确化和数字化方向发展,爆炸动力学越来越受到人们的重视。爆炸动力学是一门边缘性学科,它涉及爆轰物理学、爆炸气体动力学、固体动力学等学科。

本书是为爆破工程和安全工程的研究生编写的参考书。作为教学参考书,它应不同于以反映当前学术水平为主、理论深厚、内容系统、广泛的学术专著,应是一本能达到教学目的,且能在较短时间内学习并接受爆炸动力学研究和解决问题的基本方法和思路的教材,基于上述考虑编写了本书。编写原则是理论联系实际,主要结果来龙去脉既要介绍清楚又要简明扼要,既要反映主要内容,又要将烦琐、复杂的内容写得容易理解。编写时我们将不时引进一些假设来简化复杂的问题,使得对问题可能入手来分析,并能用较简单的数学工具得到工程上可以应用的近似结果。引进这种简化假设的主旨在于突出问题的主要特点,把问题的本质揭露出来,避免因繁杂的数学推导,使读者望而生畏,反而掩盖问题的物理本质。

在各章节的安排上,全书共分8章,前4章是基础部分,是爆炸动力学最基本的内容,后4章是理论应用部分。第1章主要介绍爆炸载荷的特点和波的概念及其波的分类。第2章主要介绍固体中应力波一维运动方程及其特征线解法,应力波的互相作用及其效应、材料动力学性能测量原理,本章是爆破技术的最基本的理论基础。第3章主要介绍工程中常用的流体状态方程,流体一维运动方程及其特征线解法,本章是为爆轰参数和爆炸流场计算打下一定的基础。第4章主要介绍冲击波和爆轰波基本方程的建立及其特点,爆轰波参数工程计算方法和测试原理以及冲击波和爆轰波对介质的作用,本章是爆炸动力学最重要的内容之一。第5章主要介绍空气冲击波的产生、传播、破坏作用规律、空气冲击波相似律以及空气冲击波对结构物作用载荷计算方法。旨在为爆破工程和安全工程的研究生提供空气冲击波防护原理,为爆炸事故的调查和评估,安全防护结构物设计提供基本理论。第6章主要介绍水下爆炸冲击波产生、水中爆炸波参数的计算以及水中爆炸波对结构物作用载荷计算方法,旨在为水下爆破、水压爆破和爆炸成型的设计与计算等提供理论依据。第7章主要介绍炸药在岩土中爆炸时,爆炸波的产生及其传播规律,爆炸腔、爆破漏斗和炮孔压力计算方法,装药量计算原理。旨在为合理利用工业炸药,降低爆破危害,提供基本理论。第8章主要介绍爆炸地震波的产生及其传播规律,建筑物对爆破地震波的动力响应,地震波的振幅、频率、持续时间等对建筑物的动力响应影响以及爆破地震波测量原理。

本书是在给爆破工程和安全工程的研究生授课讲义基础上编写而成。可作为采矿工程、安全工程、土木工程(爆破工程和动力学研究方向)专业研究生的教学参考书。也可供相关专业高校教师、科研人员以及工程技术人员参考。

我们衷心希望能为广大读者提供一本易学易懂实用的参考书。由于作者水平有限,书中仍会有不妥与错误之处,敬请读者批评指正。

编者

2004.9

目 录

第 1 章 爆炸载荷与波	1
1.1 爆炸载荷及其作用的特点	1
1.1.1 爆炸载荷强度随介质特性变化	1
1.1.2 爆炸载荷局部效应和整体效应	2
1.1.3 材料性质随爆炸载荷变化	2
1.1.4 介质惯性起重要作用	2
1.2 介质中的波	3
1.3 介质中波的分类	3
1.3.1 流体介质中的波	3
1.3.2 固体介质中的波	3
第 2 章 固体中的应力波	5
2.1 一维应力波控制方程组	5
2.1.1 一维连续波的控制方程组	6
2.1.2 波动方程	7
2.1.3 一维间断应力波阵面上的守恒方程	8
2.2 波动方程特征线解法	9
2.3 直杆中的弹性应力波	11
2.4 半无限直杆中弹塑性加载波(简单波)	13
2.5 波形与波速的关系	14
2.6 弹性波的相互作用	16
2.6.1 弹性波的叠加原理	16
2.6.2 弹性波在自由端和固定端的反射	17
2.6.3 弹性波在界面上的反射和透射	18
2.7 弹性体的相互碰撞	23
2.7.1 刚性块对远端固定的等截面直杆的碰撞	24
2.7.2 两根半无限长弹性杆的共轴碰撞	25
2.7.3 有限长杆对半无限长杆的共轴碰撞	26
2.7.4 两根均匀直杆的共轴碰撞能量分配	28
2.8 应力波引起的断裂	29
2.8.1 层裂现象	29
2.8.2 角裂现象	31
2.9 材料动力学性能测试原理	32

第 3 章 流体介质中的波	35
3.1 流体的状态参数和状态方程	35
3.1.1 理想气体的状态方程	36
3.1.2 稠密气体状态方程	36
3.1.3 液体和高压下固体的状态方程	37
3.2 一维等熵流动的控制方程组	37
3.2.1 质量守恒方程(连续方程)	37
3.2.2 动量守恒方程	38
3.2.3 能量守恒方程	38
3.3 一维流动方程的特征线解法	39
3.3.1 特征线方程和相容关系	39
3.3.2 特征线方程和相容关系的物理意义	41
3.3.3 特征线的数值解法	42
3.4 简单波	43
3.5 中心膨胀波	45
第 4 章 冲击波与爆轰波	47
4.1 冲击波	47
4.1.1 正冲击波基本关系	47
4.1.2 斜冲击波基本关系	49
4.1.3 冲击波性质	51
4.2 爆轰波	51
4.2.1 爆轰波的基本关系	52
4.2.2 气相炸药爆轰参数计算	53
4.2.3 凝聚炸药爆轰波参数计算	54
4.2.4 瞬时爆轰参数计算	56
4.3 冲击波、爆轰波对介质的作用	57
4.3.1 接触爆炸时反射波性质的判据	57
4.3.2 爆轰波垂直入射时介质中的冲击波初始参数	58
4.3.3 爆轰波斜入射时介质中的冲击波初始参数	61
4.3.4 爆轰波斜入射时反射波类型的判别	72
4.4 冲击波、爆轰波参数测量原理	72
4.4.1 自由表面速度法	72
4.4.2 水箱法	75
4.4.3 电磁法	76
第 5 章 空气中爆炸理论及其应用	78
5.1 空中爆炸的物理现象	78
5.2 爆炸产物的作用范围估计	79
5.3 空气冲击波关系	80
5.4 空中爆炸时冲击波的初始参数	82
5.4.1 正常爆轰时空气冲击波的初始参数	83

5.4.2 瞬时爆轰时空气冲击波的初始参数	84
5.5 爆炸冲击波的传播	84
5.5.1 空中爆炸波的相似律	85
5.5.2 空气冲击波超压峰值和正压作用时间的计算	86
5.5.3 空气冲击波超压时间曲线与比冲量的计算	89
5.6 空气冲击波作用于障碍物上的载荷	89
5.6.1 空气冲击波作用于障碍物上一般现象	89
5.6.2 爆炸波擦射时的载荷	91
5.6.3 爆炸波在无限大刚性障碍物上的冲击载荷	91
5.6.4 环流主宰时爆炸波作用于障碍物的载荷	96
5.6.5 有绕流时爆炸波作用于障碍物的载荷	97
5.7 爆炸容器设计计算	98
5.8 空气冲击波对目标物的破坏作用	99
5.8.1 空气冲击波对建筑物的破坏作用	99
5.8.2 空气冲击波对人员的损伤	100
第 6 章 水中爆炸理论及其作用	102
6.1 水中爆炸的物理现象	102
6.1.1 爆炸产物膨胀和气泡脉动现象	102
6.1.2 水中冲击波形成和传播	103
6.1.3 水面和水底对水中爆炸的影响	104
6.1.4 气泡脉动和二次压缩波	104
6.1.5 水中爆炸的特点	105
6.2 水中冲击波的基本关系	105
6.2.1 水的状态方程	106
6.2.2 水中冲击波阵面上参数关系	106
6.2.3 水中弱冲击波近似计算($p \leq 0.1 \times 10^3 \text{ MPa}$)	107
6.3 水中冲击波的初始参数	108
6.4 水中冲击波的传播规律	109
6.4.1 水中冲击波超压随距离衰减规律	109
6.4.2 水中冲击波压力随时间衰减的规律	111
6.4.3 水中冲击波作用的比冲量	111
6.5 水中冲击波作用于障碍物上的载荷	112
6.5.1 水中冲击波作用于固定的刚性壁面上的载荷	112
6.5.2 水中冲击波作用于可运动刚性平板上的载荷	113
6.6 薄壁圆筒在水中冲击波作用下的运动	115
6.7 水中冲击波的破坏作用	117
6.7.1 水中爆炸对水中建筑物和船舶的破坏	117
6.7.2 水中爆炸对水中人员的损伤作用	118
第 7 章 岩土中爆炸理论及其作用	120
7.1 岩土中爆炸的基本现象	120

7.1.1	装药在无限岩土介质中的爆炸	120
7.1.2	装药在半无限岩上介质中的爆炸	122
7.2	高压下岩土的状态方程	122
7.2.1	一维应变压缩与静水压缩	123
7.2.2	默纳汉状态方程	124
7.2.2	三相介质组合形式状态方程	124
7.2.3	岩土的冲击绝热 $D-u$ 线	125
7.2.4	固体介质实用状态方程	126
7.3	岩土中爆炸波的性质	126
7.3.1	各种波的判据	126
7.3.2	冲击波传播的极限压力估计	128
7.4	岩土中爆炸波的参数关系	129
7.4.1	采用三相组合状态方程时爆炸波参数关系式	129
7.4.2	采用实用状态方程时爆炸波参数关系式	130
7.4.3	采用冲击绝热 $D-u$ 曲线时爆炸波参数关系式	131
7.5	岩土中冲击波初始参数	131
7.5.1	反射波为冲击波情况	131
7.5.2	反射波为稀疏波情况	132
7.6	孔壁受到的初始冲击压力计算	133
7.6.1	耦合装药情况下孔壁的初始压力计算	133
7.6.2	不耦合装药情况下孔壁的初始压力计算	133
7.7	岩土中的爆炸波传播	134
7.7.1	超压和超压作用时间	134
7.7.2	最大质点速度	135
7.7.3	波形曲线与比冲量	135
7.8	爆炸腔最大半径估算	135
7.9	破裂区半径的确定	138
7.10	爆破漏斗	139
7.10.1	爆破漏斗的形成	139
7.10.2	爆破漏斗动力学问题	140
7.10.3	爆破漏斗计算经验公式	142
第8章	爆炸地震及其效应	145
8.1	地下爆炸地震波的形成	145
8.1.1	表面振源在半无限介质中所形成的波	145
8.1.2	地下爆炸地震波类型	146
8.2	爆炸地震波参数	148
8.2.1	纵向压缩波的参数	148
8.2.2	纵向稀疏波的参数	149
8.2.3	横波和瑞利波的参数	150
8.2.4	地震波波速的换算关系	151

8.3	建筑物对爆炸地震波的响应	153
8.3.1	建筑物地震波响应的分析方法	153
8.3.2	单自由度弹性体系的地震响应	154
8.3.3	单自由度弹性体系的地震载荷和反应谱	157
8.4	爆炸地震波特性对建筑物动力响应的影响	159
8.4.1	地震波幅值和频率对建筑物动力响应的影响	159
8.4.2	爆破地震波波长对建筑物动力响应的影响	160
8.4.3	地震波持续时间对建筑物动力响应的影响	162
8.4.4	本节小结	164
8.5	爆炸地震波破坏作用	164
8.6	爆炸地震波测量原理	166
8.6.1	拾振器运动方程	166
8.6.2	拾振器工作原理	167

第 1 章 爆炸载荷与波

爆炸是指系统的物理或化学能量突然释放过程。在这个过程中,系统内能(压力能、化学能、核能等)急剧地转变为机械能,同时伴随声、光、热效应的现象。爆炸具有各种不同的形式,根据引起爆炸原因不同,可将爆炸分为物理爆炸、化学爆炸和核爆炸。

物理爆炸是指在爆炸前后,物质的化学成分不变,仅发生状态变化的爆炸。例如,蒸汽锅炉爆炸、电爆炸等。物理爆炸时涉及到能量变化范围很大,小至汽球爆炸,大至地震、物体的高速碰击所引起的爆炸。

化学爆炸是指在爆炸前后,物质的化学成分和物理状态均发生变化的爆炸。例如,炸药爆炸、瓦斯爆炸,粉尘爆炸,石油与空气混合物爆炸等均属于此类。其中,炸药爆炸时,温度可达 $3000\sim 5000^{\circ}\text{C}$,压力可达 10^4MPa 量级。

核爆炸是指由核裂变(U^{235})或核聚变(氘、氚的核聚变)引起的爆炸。例如原子弹、氢弹爆炸等。核爆炸所释放能量极大,压力可达 $10^8\sim 10^9\text{MPa}$ 量级,温度可达 $10^6\sim 10^7\text{K}$,同时还有很强的光、热和各种粒子辐射。因此,核爆炸比炸药爆炸的破坏力大得多。 1kg 核爆炸物爆炸时所释放的能量相当于 10^{10}kg TNT 炸药的能量。

在表观上,爆炸共同特征表现在对周围介质强烈的作用,引起爆炸点周围介质状态(如压力、温度、密度、速度)发生急剧变化,以致造成介质的严重变形和破坏。爆炸动力学的任务就是研究介质在爆炸载荷作用下的运动、变形以及破坏的规律。在以后讨论中,我们将只涉及化学爆炸以及它们的效应。

1.1 爆炸载荷及其作用的特点

爆炸载荷的共同特点可用短脉冲强载荷来概括,也就是说爆炸载荷强度是很高的,作用时间是很短的,载荷随时间变化的极为迅速,在瞬间就达到峰值,随即在很短时间内衰减。例如,炸药在固体表面爆炸时的压力可在几微秒内突然上升到 10^4MPa 量级,持续时间也不过毫秒量级。

介质在爆炸载荷作用下,它们之间的作用是互相影响,互相制约的过程,爆炸载荷使介质变形、运动、甚至破坏,而介质变形、运动又反过来改变爆炸载荷的强度、波形等。这与静载荷有显著的不同,主要表现在如下几个方面。

1.1.1 爆炸载荷强度随介质特性变化

同样的爆炸载荷作用于不同的介质将产生不同的载荷强度。例如,同样 TNT 药包在钢板上爆炸时,接触压力是 $2.5\times 10^4\text{MPa}$;在水面上爆炸时,接触压力是 $1.3\times 10^4\text{MPa}$;而在空气中爆炸时,接触压力只有 10^2MPa 。

1.1.2 爆炸载荷局部效应和整体效应

当爆炸载荷作用于介质时,开始时刻只有受载荷作用部位介质发生变形运动,接着载荷传递给邻近的介质使之也发生变形运动。在爆炸载荷传递过程中,爆炸载荷使介质产生局部运动、变形和破坏等称为局部效应。局部效应典型的例子是局部破坏,如层裂效应和角裂效应。

图 1.1.1 为混凝土杆爆炸层裂试验布置和试验结果。一根混凝土杆水平放置,其一端设置一个小炸药包,当炸药包引爆后,紧靠炸药包一端的混凝土杆被炸得粉碎,另一端被炸成几段,而中间部分几乎不受到破坏。但若将混凝土杆放在压力机上进行静载压缩实验,则混凝土杆不是发生失稳破坏而折断,就是发生剪切破坏,出现与混凝土杆轴线斜交断裂。

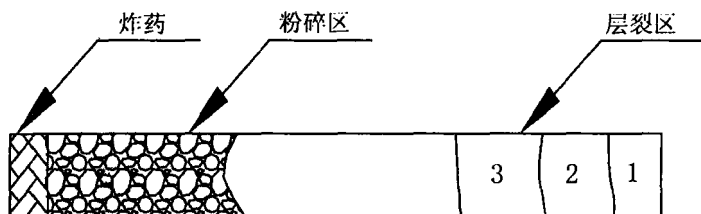


图 1.1.1 混凝土杆的层裂现象

图 1.1.2 为中间带有圆孔的方形筒爆炸角裂试验布置和试验结果。若在方形筒内部圆孔中装上炸药,炸药引爆后筒壁将发生如图 1.1.2 所示形状破裂。但若向该圆孔内慢慢充入高压液体,使它胀破,其破裂之处显然要发生在筒壁的最薄弱处 AB 线上,而不会像炸药爆炸那样发生在 CD 线上。

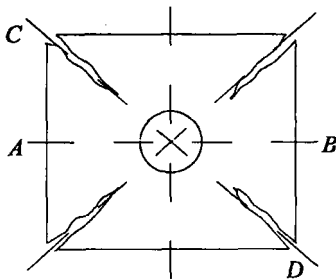


图 1.1.2 带槽截面圆筒破裂现象

爆炸载荷整体效应是指爆炸载荷作用于结构物一段时间后结构物的整体反应(如结构物的整体变形、位移和振动)。例如一根悬臂梁,其上部受到均布爆炸载荷,最初只有梁的上部感受到载荷,然后载荷传到梁的底部,又由梁的底部返回到梁的上部,再向梁的底部传递,这样载荷通过多次反复传递使整根梁产生的位移和振动,即使载荷撤离后,因惯性作用梁的振动还将持续。在这种情况下,爆炸载荷从梁的上部传到底部的传递时间与载荷持续时间相比是很短的,通常我们不考虑载荷传递过程,而只考虑梁的整体位移和振动,即只考虑爆炸载荷整体效应。

1.1.3 材料性质随爆炸载荷变化

在爆炸载荷作用下,材料的应力应变曲线(本构关系)与加载速度有关,材料的屈服强度和断裂强度以及弹性模量都将提高,而且加载速度越快强度变化越多。例如岩石材料,在爆炸载荷作用下,抗压强度可提高10倍左右,抗拉强度可提高2倍左右。

当爆炸载荷比固体材料屈服强度高得多时,固体材料将失去抗剪能力呈现出流体的性质。

1.1.4 介质惯性起重要作用

在处理爆炸载荷时必须考虑介质惯性。这是因为在静力学问题中,我们是在较长的时间尺度内研究物体受力后的平衡状态,忽略了介质的惯性,认为载荷的传递过程是瞬间完成的。这只是在载荷强度随时间变化不显著的时候才是允许和正确的。但对于爆炸载荷,其强度随时间变化是极其强烈的,而且往往载荷前沿才传播了一小段距离,载荷已作用完毕。在这种情况下,介质的惯性不能忽略,必须考虑载荷的传递时间。一般地,若载荷作用时间与扰动从被研究物的一端传到另一端所需要的时间相比是同一数量级甚至是更小数量级,就必须考虑介质的惯性和载荷的传播过程,即波的传播过程。

此外,爆炸作用过程极短,通常可把爆炸载荷作用过程看作是绝热过程。

1.2 介质中的波

扰动在介质中传播就形成波,如声带振动使空气受到扰动,形成一种气体的疏密状态交替进行,并由近及远地向外传播出去的声波。扰动是介质在受到外界作用(如爆炸、振动、敲打、冲击等)时,介质状态的局部变化。而空气、水、岩石、金属、炸药等一切可以传播扰动的物质,统称为介质。波与扰动、介质是分不开的,波就是扰动在介质中的传播,换言之就是介质状态变化的传播。

扰动之所以能够在介质中传播,其基本原因是介质可以看成是由连续分布的质点所组成,而质点之间存在着相互作用力。当扰动作用在物体表面上时,开始时仅物体表面那部分的质点受到扰动,产生变形和运动,然后影响到其邻近的质点,使它们也受到扰动,发生变形和运动,但由于惯性作用,在时间上要落后一点,这些受到扰动的质点又影响其邻近的质点,使其邻近质点也发生运动,这样如此不断继续下去,使得介质表面的扰动,从表面由近到远地逐步传播出去,然后传遍介质所有的质点。任一时刻扰动区域与未扰动区域的分界面,称为波阵面。扰动在介质中传播的速度称为波速。由于扰动的传播而引起介质质点的运动速度称为质点速度。波在介质中的传播速度,与波引起的介质质点运动速度是两个完全不同的概念。前者是波阵面在介质中传播的速度,它表示扰动信号传播速度,后者是介质质点本身的运动速度。在固体介质中,它们要相差1~2数量级。

1.3 介质中波的分类

爆炸在介质中所产生的波称为爆炸波。介质可分为固体和流体(液体和气体)两大类型,因此根据波传播的介质不同,可将波分为流体中的波和固体中的波两大类。

1.3.1 流体介质中的波

流体中的爆炸波可分为冲击波、压缩波和膨胀波(稀疏波)。冲击波是波阵面前后流体状态(压力、密度、温度等)发生突跃变化的超声速压缩波。压缩波是扰动过后,使介质的压力、密度等状态参数都增加的波。膨胀波是扰动过后,使介质的压力、密度等状态参数都降低的波。

1.3.2 固体介质中的波

固体中的爆炸波通常称为应力波。对于应力波的分类,根据理论研究和工程实用上不同的需要,可以有各种各样的分类方法。

1.3.2.1 按应力类型分类

因为应力可分为拉应力、压应力和剪应力,所以相应地,应力波分为压缩波、拉伸波和剪切波。

1.3.2.2 按质点运动方向分类

按质点运动方向,应力波分为纵波和横波。纵波是指波的传播方向与质点运动方向相平行的波,也称为 P 波。纵波可引起介质体积变化,它既可以在固体中传播、也可以在气体或液体中传播。横波是指波的传播方向与质点运动方向相垂直的波,也称为 S 波。横波仅引起介质形状的变化,而不改变其体积。横波不能在不能承受剪力的流体介质中传播。

1.3.2.3 按应力大小分类

在固体应力应变曲线上,根据应力的不同阶段,可将应力波分为弹性波、塑性波和冲击波等。当介质所受的应力在其弹性极限范围内,介质处于弹性状态,发生在这个区域传播的应力波称为弹性波。当介质所受的应力超过其弹性极限,介质内部结构已被破坏,介质处于塑性状态,这个区域传播的应力波称为塑性波。当介质所受的应力远远超过其抗剪强度极限,介质就像流体一样,将形成超声速的冲击波。这个区域通常发生在炸药爆炸附近。对于一维平面弹性波,波在传播过程中不改变波形(无弥散)形状,也不改变波幅大小(无衰减),而塑性波、冲击波在传播过程中,波形和幅值都会发生变化。

1.3.2.4 按波阵面形状分类

应力波在传播过程中,根据所形成的波阵面形状的不同,可将应力波分为平面波、柱面波和球面波等。

1.3.2.5 按波传播位置分类

如果介质的一部分边界为自由边界,则只能在自由边界附近传播的波,称为表面波,相应把在介质内部传播的应力波称为体积波。上面提到的压缩波、拉伸波和剪切波都是体积波。表面波具有如下特性:首先是波幅随着距自由边界的法向距离增大而迅速减弱;其次是随着沿自由边界的距离增大,波幅衰减比体积波慢。

第2章 固体中的应力波

炸药在岩石、金属等固体介质中爆炸将产生爆炸波。开始的瞬间,爆炸波强度很高,可达 10^4 MPa量级,其压力远高于固体材料屈服极限,以致可以忽略固体材料的强度效应,而把固体当作流体处理,此时固体介质中传播的波是冲击波。随着爆炸波在固体介质中传播,爆炸波压力迅速衰减。当爆炸波的压力低于材料屈服极限时,此时固体介质中传播波的是弹性波,而当压力与材料屈服极限同数量级时,传播波的则是弹塑性波。可见,在爆炸载荷下,固体中应力波传播问题是非常复杂的。

应力波理论是研究爆炸及其效应的基础。研究三维应力波传播问题时,一般需要建立三维空间坐标系,但这往往会由于几何上的复杂性而导致冗长的数学推导,而繁杂的数学推导过程往往容易掩盖问题本身的物理意义。因此本章将只介绍一维应力波的传播问题。由于一维应力波控制方程中只出现一个空间变量,使得方程得以简化,数学推导简单明晰。但是相对简单的一维应力波理论却几乎包括了所有应力波理论的基本概念、涉及到处理应力波问题重要的基本方法和应力波效应问题。如波速、波的反射与透射、弥散、波传播时的能量关系和群速度;波动方程及其特征线解法;层裂、角裂效应等等。显然,一维应力波理论是解决二维和三维应力波传播问题的基础。

2.1 一维应力波控制方程组

下面以一维杆中的应力波为例来建立应力波传播控制方程组。对于一维杆几何尺寸和材料特性作如下假设:

1. 平截面假设

认为杆的横截面上仅承受纵向应力,且纵向应力在横截面上是均匀分布的,当应力波在杆中传播时,该横截面仍然保持为平面。在此假设下,杆中应力、应变、质点位移、质点速度都只是截面的坐标和时间的函数。这样,杆中应力的传播问题就成为一维平面应力波问题。这个假设在杆的横向尺寸远小于应力波的波长时(如杆的直径与波长之比小于10的细长杆)是接近实际的。但是直杆又不能过细,过细的直杆在应力波作用下会发生失稳现象,即发生直杆在纵向应力作用下突然弯曲的现象。

2. 忽略横向惯性力假设

直杆在纵向应力作用下,必然会发生横向变形,从而使质点具有横向速度。现在假定横向速度很小,因此横向运动的动能可以忽略不计,亦即假设杆横截面保持不变。本假设也要求直杆是细长杆。

3. 应变率无关假设

认为杆材料的应力应变曲线和加载速度无关。事实上材料的屈服强度和应力应变曲线都

与加载速度有关,快速加载时屈服强度有所提高。有些材料如铝合金、高强度合金钢等对应变率(应变对时间的导数)不太敏感。有些材料对应变率特别敏感,例如,像铝、锌、锡、铅那样的低熔点金属材料。

一维杆中的应力波按波阵面前后状态连续与否分为间断波和连续波。

间断波是指波阵面前方介质与后方介质的状态参量之间有一个有限的差值,使得状态参量沿着波的传播途径上,分布在波阵面上的状态参量陡度是无限大的,在数学上叫做强间断。间断波通过介质时,使状态参量发生突然的跳跃。但波阵面前后位移是连续的,否则意味着介质已出现断裂。

连续波是指波阵面前后方介质的状态参量的差值为无限小,或者说状态参量沿着波的传播途径上的分布是连续的,分布在波阵面上的状态参量陡度是有限的。

2.1.1 一维连续波的控制方程组

连续波运动过程各物理量(位移 w 、速度 u 、应力 σ 、应变 ϵ)不能随意变化,它们必须满足质量守恒方程,动量守恒方程以及材料的本构关系。各物理量满足这些守恒方程的关系式就构成连续波的基本方程。

图 2.1.1 表示一个纵波沿着等截面细杆传播。取杆端为拉格朗日坐标原点, x 为初始状态下杆中每一截面至杆端的距离,杆在变形前的原始面积为 A_0 ,原始密度为 ρ_0 , dx 为杆变形前微元的长度。

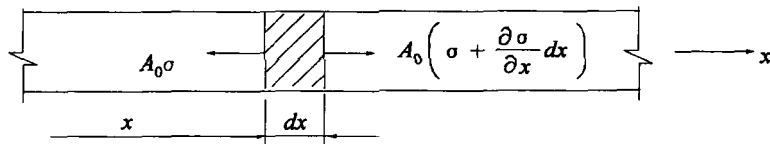


图 2.1.1 直杆微元上的作用力

根据前面一维杆的假定,任一时刻 t , x 截面上的位移 w 、应变 ϵ 、质点速度 u 、以及应力 σ 等都只是坐标 x 和时间 t 的函数,即

$$w=w(x,t) \quad u=u(x,t) \quad \epsilon=\epsilon(x,t) \quad \sigma=\sigma(x,t)$$

而在 t 时刻, $x+dx$ 截面上的位移 $w(x+dx,t)$, 应力 $\sigma(x+dx,t)$ 分别为

$$w(x+dx,t)=w(x,t)+\frac{\partial w}{\partial x}dx \quad \text{或} \quad w(x+dx,t)-w(x,t)=\frac{\partial w}{\partial x}dx$$

$$\sigma(x+dx,t)=\sigma(x,t)+\frac{\partial \sigma}{\partial x}dx \quad \text{或} \quad \sigma(x+dx,t)-\sigma(x,t)=\frac{\partial \sigma}{\partial x}dx$$

在 $t+dt$ 时刻, x 截面上的位移 w 为

$$w(x,t+dt)=w(x,t)+\frac{\partial w}{\partial t}dt \quad \text{或} \quad w(x,t+dt)-w(x,t)=\frac{\partial w}{\partial t}dt$$

根据应变定义, t 时刻, x 截面上应变为

$$\epsilon(x,t)=\frac{w(x+dx,t)-w(x,t)}{dx}=\frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.1.1)$$

根据速度定义, t 时刻, x 截面上速度为

$$u(x,t)=\frac{w(x,t+dt)-w(x,t)}{dt}=\frac{\partial w}{\partial t} \quad (2.1.2)$$

2.1.1.1 质量守恒方程(连续方程)