

力学

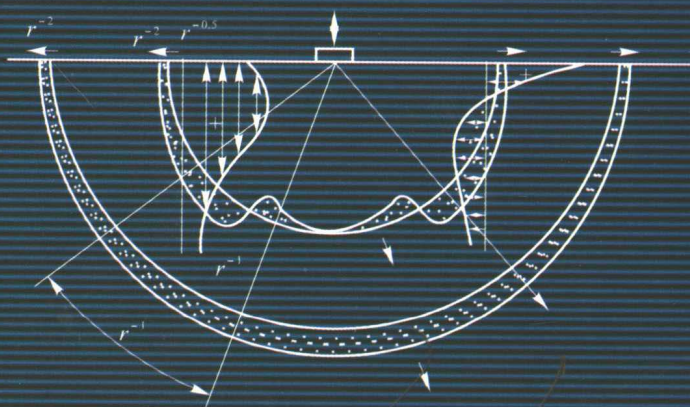


国防科工委「十五」规划教材

# 应力波基础简明教程

●郭伟国 李玉龙 索涛 编

刘元镛 审校



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

0347.4

5

2007



国防科工委“十五”规划教材·力学

# 应力波基础简明教程

郭伟国 李玉龙 索 涛 编

刘元镛 审校

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书共7章,系统地介绍了固体介质中应力波传播理论和动态测试技术。其主要内容包括弹性波基础理论、一维弹性应力波、杆中弹性波的相互作用、塑性波基本理论、弹塑性波的相互作用、一维应变弹塑性波、固体材料的应变率效应与试验技术。全书取材注重基本理论,内容介绍上注重循序渐进,由浅入深,论述条理清楚,符合教学和认识规律。

本书可作为高等院校力学类专业本科生和研究生教材,也可供兵器、航空航天、机械、土木等相关专业师生和技术人员使用和参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

应力波基础简明教程/郭伟国,李玉龙,索涛编. —西安:西北工业大学出版社,2007.4  
ISBN 978-7-5612-2184-6

I. 应… II. ①郭…②李…③索… III. 应力波—高等学校—教材 IV. O347.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第026164号

## 应力波基础简明教程

郭伟国 李玉龙 索涛 编

责任编辑 方敏 雷军

责任校对 相里敏

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路127号(710072)

市场部电话:029-88493844 88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:10.5 字数:217千字

2007年4月第1版 2007年4月第1次印刷

印数:3 000册

ISBN 978-7-5612-2184-6 定价:16.00元(平装) 31.00元(精装)

# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯  
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春  
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡  
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章  
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山  
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



## 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,产生和传播国防科技



新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴





国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



# 前 言

随着现代科学技术的发展,工程研究人员对结构及材料在动态载荷下的力学响应问题越来越关注,因此对这方面知识的需求也在不断提高。然而在国内,关于在冲击载荷作用下的力学响应问题的专著较少。为了适应本科及研究生教学对这方面教材的需要,我们从应力波的传播和结构动态响应的基础出发,参考国内外已有的出版文献和参考资料,并且根据教学需要及国防科工委有关文件精神,组织编写了这本教材。

全书共分7章,系统地描述了固体介质中应力波传播理论以及动态测试技术等方面的知识。第1章系统地论述了固体中的弹性波基础,对弹性波进行了分类,并推导了弹性波波速的计算方法,给出了弹性波在介质界面的反射、透射和相互作用的特点。第2章和第3章详细地描述了一维杆中的弹性波问题,推导了基本的控制方程,给出了求解方法以及应力波传播的特点。从两弹性杆的共轴撞击入手,着重分析了弹性波的相互作用,在固支及自由端的反射以及在不同介质界面反射、透射等,还介绍了弹性波与裂纹尖端相互作用的算例。第4章介绍塑性波的基本理论,描述了非常著名的泰勒(Taylor)实验及其分析。第5章论述了弹塑性波的相互作用问题。第6章介绍了一维应变弹塑性波。第7章介绍了固体材料的应变率效应及高应变率试验技术,包括霍普金森(Hopkinson)杆系统、膨胀环技术、平板剪切试验。

本书遵循由浅入深、简明扼要、重点突出的原则,有以下几方面的特色。

(1) 根据当代科学技术发展的最新动态和我国高等学校专业拓宽、学科归并的现实需求,坚持面向一级学科、加强基础、拓宽专业面、更新教材内容的基本原则。

(2) 注重优化课程体系,探索教材新结构。即针对固体力学学科,同时兼顾材料工程类学科、制造工艺类学科的共性与个性的结合,体现多学科知识的交叉与渗透。





(3) 尽量反映当代科学技术的新概念、新知识、新理论、新技术,突出教材内容的先进性。

(4) 坚持体现教材内容深广度适中、够用的原则,增强教材的适用性和针对性。

(5) 在教材编写过程中,注意国内外最新研究成果和同类教材的对比研究,吸收国内外同类研究成果的精华,重点反映新教材体系结构特色,把握教材的科学性、系统性和适用性。

本书是为高等院校力学专业的高年级本科生及研究生所编写的教材,也可供兵器、航空航天、机械、土木等专业的师生及工程技术人员使用和参考。

参加本书编写的有郭伟国(第1,4,5和6章)、李玉龙(第2,3章)和索涛(第7章)。全书由李玉龙教授统稿和修订,刘元镛教授审定并提出了许多宝贵意见。本书编写过程中,侯兵对书中文字、公式、图表作了全面的校对和绘制,魏萍进行了文字、图表的排版打印工作,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,加之时间仓促,编写中有疏漏和不妥之处敬请读者指正。

编者

2006年4月于西北工业大学

# 目 录

绪 论	1
<b>第 1 章 固体中的弹性波</b>	
1.1 固体变形的动态传播	6
1.2 细长圆柱杆中的弹性波	7
1.3 弹性波的类型	9
1.4 连续体中的弹性波传播	12
1.5 畸变剪切波速的计算	17
1.6 表面波	18
1.7 弹性波:下标符号约定	21
1.8 波动方程的通解	23
习题	25
<b>第 2 章 一维弹性应力波</b>	
2.1 细长杆中应力的传播	26
2.2 波的反射和叠加	27
2.3 在不同材料与截面杆中的应力波	30
2.4 横向惯性引起的弥散效应	31
2.5 冲击波问题	35
习题	42
<b>第 3 章 杆中弹性波的相互作用</b>	
3.1 两半无限长弹性杆的共轴撞击	43
3.2 弹性波的相互作用	44
3.3 有限长杆与半无限长杆的共轴撞击	47
3.4 弹性波在不同介质界面上的反射与透射	52
3.5 弹性波与裂尖的相互作用	55
习题	57



## 第 4 章 塑性波基本理论

4.1 塑性波的定义 .....	59
4.2 一维塑性应力波 .....	59
4.3 一维塑性应变波 .....	62
4.4 有限长杆的撞击 .....	63
习题 .....	72

## 第 5 章 弹塑性波的相互作用

5.1 材料本构关系的简化 .....	73
5.2 弹塑性加载波的相互作用 .....	76
5.3 弹塑性加载波在固定端和自由端的反射 .....	84
5.4 卸载波的控制方程和特征线 .....	87
5.5 应变间断面和接触面对波的干扰 .....	89
5.6 加载、卸载边界的确定 .....	95
习题 .....	99

## 第 6 章 一维应变弹塑性波

6.1 一维应变问题与一维应力问题的异同点 .....	101
6.2 一维应变弹塑性波在自由面反射 .....	108
6.3 一维应变弹塑性波在不同介质中的传播 .....	111
习题 .....	119

## 第 7 章 固体材料的应变率效应与试验技术

7.1 固体材料的应变率效应 .....	120
7.2 中低应变率测试技术 .....	126
7.3 霍普金森杆测试技术 .....	128
7.4 膨胀环测试技术 .....	146
7.5 斜板撞击试验(压剪试验) .....	151
习题 .....	154

参考文献 .....	155
------------	-----

# 绪 论

随着现代科学技术的发展,越来越多的物体或结构经常会受到冲击载荷的作用。例如,穿甲弹对坦克装甲的打击,飞鸟对飞机挡风玻璃的撞击,炸药爆炸对结构的冲击等。这些载荷作用的时间都非常短,通常在以毫秒、微秒,甚至纳秒计的短时间内发生运动参量的显著变化。

在这种冲击载荷的作用下,人们观察到很多与静态情况下不同的奇妙的现象。例如,将一个重物用一根绳缚住缓缓将重物拉起悬空,使绳自然伸长,只要绳足够结实,重物将保持悬空状态。然而,如果将重物升高到一定的高度然后突然松开,使其呈自由落体状态下降,常常会观察到绳子从根部崩断。又如,在子弹穿甲过程中,子弹变形后往往呈蘑菇状,变形分布极不均匀。引起这些静态和动态载荷情况下物体或结构表现出不同响应的一个主要原因就是载荷是在很短暂的时间尺度上发生的,而受力物体在加载方向上尺寸足够大,这就不能够再用传统的静力学理论来分析物体或结构对于冲击载荷的响应。在动态条件下,物质微元不再像静力学情况下那样处于静力平衡状态,而是处于随着时间迅速变化的动态过程中,这属于动力学问题,因此在分析过程中必然要考虑到介质质点惯性效应的影响。

此外,这种在短暂时间尺度上发生显著变化的冲击载荷意味着高加载率或者高应变率。通常情况下,常规静态实验的应变率大约为  $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  量级的,然而在冲击载荷作用下,应变率为  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ ,有时甚至高达  $10^7 \text{ s}^{-1}$ ,要比静态试验中高得多。根据材料科学的知识,在不同的应变率下,材料将会表现出不同的力学性能。通常,随着应变率的提高,材料的屈服应力和强度极限都会升高,但是材料的塑性会降低,而屈服滞后和断裂滞后现象也变得更加明显,材料的本构关系也会随着应变率的变化发生改变。这也是物体在动态载荷下的响应和静态时不同的另一个重要原因。

## 一、波传播的一般问题

首先给出波传播的定义:

传播——一种介质中某一处的局部扰动向介质中其他部位的扩散就叫传播。

如空气中的声波、水波、无线电波和地震波等都有传播的现象。本书研究的重点放在固体中弹性波的传播,并且仅考虑机械扰动形成的波,而不考虑电磁等扰动形成的波。

尽管波传播问题最后可以归结为固体中相邻原子间的相互作用,但是,本书仍从宏观力学的角度去探讨波传播的问题,即认为介质是连续体,介质的密度和弹性模量等参数都是连



续的。

波传播的一般研究方法。为了研究波传播的物理图像和基本特征,首先选择一个代表性单元体(即单元体模型),从动力学角度建立该单元体的控制方程,然后解其控制方程得到波传播的特性,及其各物理量之间的相互关系。

固体中的波按其传播方式可分为两类,即纵波与横波。传播方向与介质运动方向相同或相反的波为纵波;传播方向与介质运动方向垂直的波称为横波。两类波往往具有不同的传播特性。

按材料不同的本构关系,固体中的波可以分为两类:第一类为弹性波,其应力和应变之间的关系遵循胡克定律;第二类为非弹性波,其应力和应变的关系不遵循胡克定律,如塑性波和黏弹性波。

## 二、冲击动力学的特点

下面通过两个例子来说明冲击动力学的特点。

**[例 1] 圆柱的压缩。**如图 1 所示,圆柱被压缩前的形状用实线表示,压缩载荷施加后,圆柱的变化用虚线表示, $b$  表示载荷作用面, $a$  表示圆柱体内任一点。

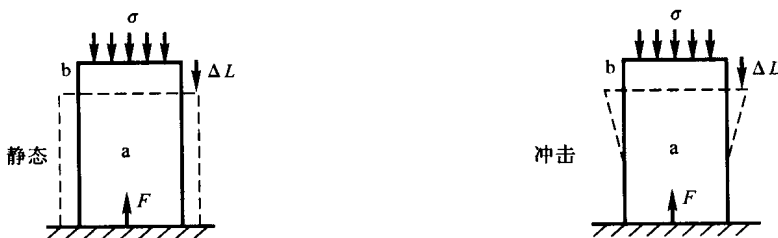


图 1 圆柱的压缩

在静态载荷作用下,圆柱均匀地受到压缩,圆柱变短变粗,仍为圆柱状(不计支撑面处的摩擦效应),而支反力  $F$  与压缩的外载荷相同,于是可以通过测量  $F$  与变形量  $\Delta L$  的关系得到圆柱材料的单向压缩本构关系( $\sigma - \epsilon$  曲线),如图 2 所示。

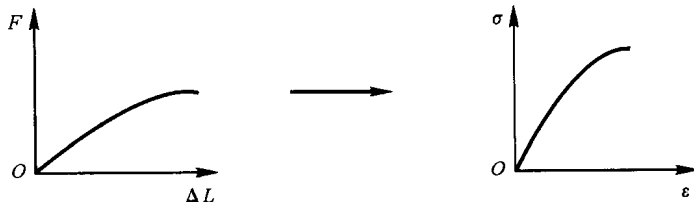


图 2 材料的单向压缩本构关系

在冲击载荷作用下,圆柱出现非均匀的变形(变形后圆柱已不再保持圆柱状),支反力已不



再是  $F$ , 所以, 由所测得的支反力和变形关系不能得出在冲击载荷作用下材料真实的本构关系 ( $\sigma-\epsilon$  曲线)。

在静态载荷作用下, 载荷对圆柱所做的功全部转变成圆柱的应变能; 而在冲击载荷作用下, 外力对圆柱所做的功, 除一部分使圆柱产生变形能, 还存有一部分用于产生圆柱体的惯性。

**[例 2]** 霍普金森父子早年所做的实验。

实验结果如下:

- 1) 钢丝的破坏与质量  $W$  无关, 而与高度  $H$  有关;
- 2) 断面的位置在顶部;
- 3) 超过屈服极限的载荷仍使钢丝不断。

如图 3 所示。

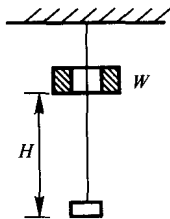


图 3 重物对钢丝的冲击

前两条结果为应力波效应, 后一条结果为率相关本构关系所致。

通过以上两个例子可以看出动力学与静力学的区别。动、静力学的主要区别:

(1) 短历时。如果用  $t$  表示冲击载荷历时,  $C$  表示构件材料的波速,  $L_0$  为构件的特征尺寸, 并记  $t_0 = L_0/C$ , 则当  $t/t_0$  较小时, 可以认为该问题为冲击动力学问题。

(2) 高强度。高强度载荷是由载荷的局部集中所致, 高强度载荷常常使构件产生大的变形, 同时也将导致几何非线性和物理非线性问题的产生。

(3) 高应变率。高应变率常常导致不同于静态情况下的应力与应变关系, 即率相关的本构关系。

如果说, 考虑扰动的传播就是应力波问题, 那么, 考虑每一个质点(而不是总体)的惯性作用的问题就是结构动力学问题; 考虑率相关本构关系的问题就是材料动力学问题。在某种程度上, 冲击动力学是由结构动力学和材料动力学构成的。

结构动力学与材料动力学并不是相互独立的, 它们是不可分开的(耦合的)。求解结构动力学问题时, 须已知材料的动态物理关系 ( $\sigma-\epsilon$  关系), 而只有通过波的信息才能确定出材料的动态物理关系。这也正是冲击动力学的困难之处。

### 三、应力波理论的应用

应力波理论的应用主要集中在以下几个方面:



- (1) 冲击和爆炸载荷下结构的动态响应。
- (2) 冲击载荷下材料的动态性能。
- (3) 动态断裂的问题。

在一般强度的瞬态载荷作用下,整体结构均处在弹性条件时,用弹性波理论可以较好地预估其结构的响应;在高强度瞬态载荷下,可能发生局部的塑性变形、断裂或结构的穿孔,在这种情况下,用弹性波理论仍可以预估远场的响应,用弹塑性波理论可预估(或推测)撞击发生处的局部行为。

此外,应力波的理论还在无损探伤、地震波的测量以及煤、石油勘探方面有着广泛的应用。



# 第 1 章 固体中的弹性波

本章首先介绍什么是固体中的应力波,并对几个概念加以解释。波是自然界的一种现象,波的形成与扰动分不开,实际上波是扰动的传播。振动和冲击是最明显的扰动源。波通过周围的介质传播,波在介质中的传播是一种能量传递的过程。物质在动载荷下的力学响应与静载荷下的不同,主要表现在强动载荷下介质微元体的惯性不能忽略。当强动载荷作用于介质时,首先直接受到载荷作用的介质点离开了初始平衡位置。由于这部分介质质点与相邻介质质点之间发生了相对运动(变形),当然将受到相邻介质质点所给予的作用力(应力),但同时也给相邻介质质点以反作用力,因而使它们也离开了初始平衡位置而运动起来。外载荷在物质上所引起的扰动就这样在介质中逐渐由近及远传播出去而形成应力波。下面,介绍若干在弹性波理论中经常使用的术语及其基本概念。

(1) 质点。在连续介质力学中,最基本的出发点之一是不从微观上考虑物体的真实物质运动而只在宏观上数学模型化地把物体看做由连续不断的质点所构成的系统,即把物体看做质点的连续集合。质点的存在以其占有空间位置来表现,不同的质点在一定时刻占有不同的空间位置,一个物体中各质点在一定时刻的相互位置的配置称为构形。为了使质点能相互区别,对质点就需要命名。

(2) 波阵面。介质中扰动区域与未扰动区域的界面称为波阵面。在波阵面上,质点运动的相位一致,波阵面的几何形状可为平面波、柱面波和球面波等。以平面波波阵面为例,其本身有间断波波阵面和连续波波阵面之分,间断波波阵面就是波阵面前方介质微团和后方微团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的分布在波阵面上出现一个无限大的陡度,数学上称此间断为强间断;而连续波波阵面是波阵面前方介质微团和后方微团的状态参量之间的差值无限小。状态参量沿着波的传播途径上的分布在波阵面是连续的,数学上称此间断为弱间断。

(3) 波速。扰动在介质中的传播表现为波阵面的前进,波阵面(即扰动)的传播速度即为波速,它的传播方向就是波阵面的推进方向。常见材料的应力波波速约为  $10^2 \sim 10^3$  m/s。

(4) 质点速度。介质质点本身的运动速度,注意质点速度与波速的区别。

(5) 纵波。应力波波速的方向与质点速度方向一致。

(6) 横波。应力波波速的方向与质点速度方向垂直。

(7) 弥散波。若某介质使得高应力水平的增量波传播速度较低,这族连续波的波形就会在传播中逐渐拉长、散开,这种类型的连续波叫做弥散波。

(8) 冲击波。若某介质使得高应力水平的增量波传播速度较高,原处于后面的高波速的增



量波就会不断追赶前面的低速增量波,使得整个连续波的波形逐渐缩短,以形成汇聚波。在一定的条件下,后面高波幅的增量波追赶上前面低波幅的增量波形成统一波速传播的强间断波阵面,连续波便转换成了冲击波。

(9) 加载波与卸载波。对介质加压,使介质压密就是加载;对已经受压的介质减压,使介质稀疏就是卸载。当波阵面通过一个介质微团时,其效果是使微团压密的就是加载波(也称做压缩波);使微团稀疏的是卸载波(也称做拉伸波)。

## 1.1 固体变形的动态传播

当外力作用于物体上,如果所作用的外力随时间的变化率很低,物体的变形过程可看成是由一系列“阶跃”组成,且在每个阶跃中,物体是处于平衡状态。例如,当外力作用在图 1.1(a)所示的由排列理想的原子结构所组成的物体时,图 1.1(b)和 1.1(c)呈现出了其中变形的两个阶段, $F$  是作用力。在每个变形阶段中,可认为物体是处于平衡状态,可以利用材料力学的方法确定物体的内阻抗应力,并可获知 AA 和 BB 截面上的应力相同。

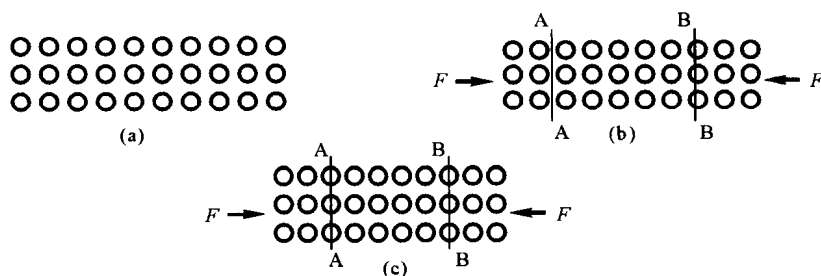


图 1.1 简单的二维原子排列的准静态弹性变形过程

实际中,物体中的内应力通常不可能“瞬间”从力作用区传到其他区域。应力或应变是按某一特定的速度从一个原子传递到另一个原子。例如在图 1.2 中,当外力以  $dF/dt$  的速率作用于物体后,应力和相应的应变将会从一个截面传播到另一个截面。在  $t$  时刻,截面 AA 上已感应到外力的作用,而截面 BB 仍未感应到外力的影响。

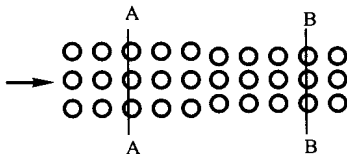


图 1.2 理想原子排列下的动态弹性变形过程