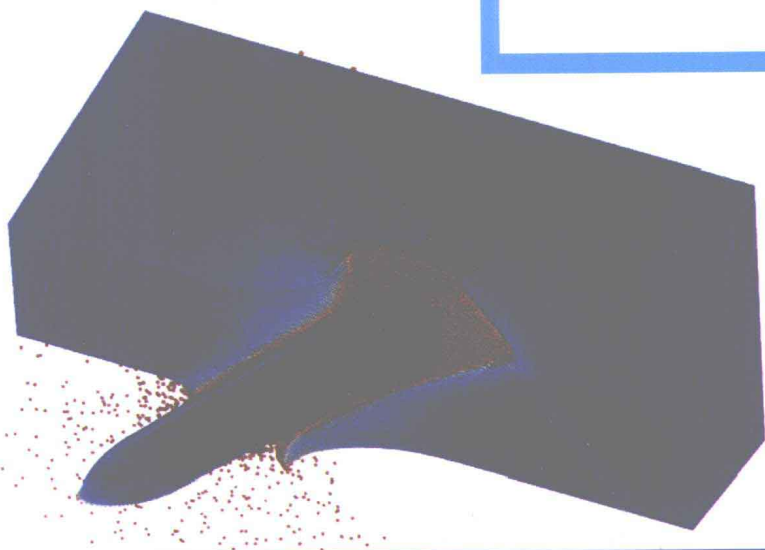
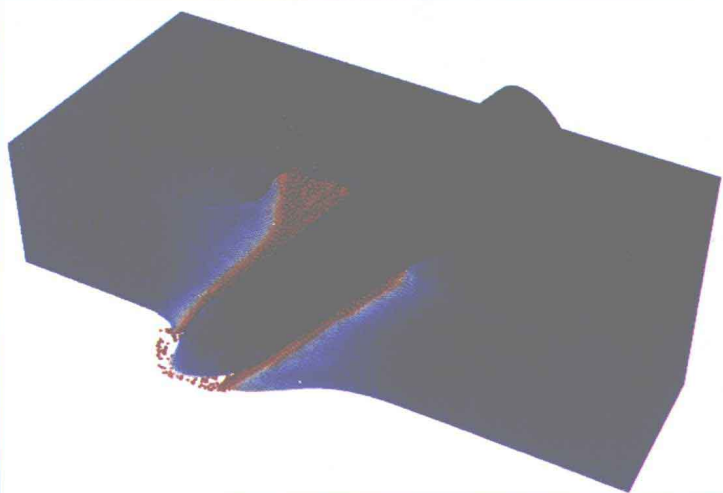


研究生力学丛书
Mechanics Series for Graduate Students



冲击动力学

余同希 邱信明 编著

清华大学出版社

研究生力学丛书
Mechanics Series for Graduate Students

冲击动力学

余同希 邱信明

编著

清华大学出版社

北京

内 容 提 要

全书分为四篇,第一篇包括弹性波和弹塑性波两章。第二篇介绍了不同应变率下的动态力学实验技术,概述了目前常用的高应变率下材料的本构关系。第三篇着重分析了刚塑性梁和板的动态响应,其中第5章介绍了惯性效应和塑性铰,第6章分析了悬臂梁的动态响应,第7章探讨了轴力和剪力对梁的动态行为的影响,第8章介绍了模态分析技术、界限定理和刚塑性模型的适用性,第9章给出了刚塑性板的动力响应分析。第四篇研究了材料与结构的能量吸收,其中第10章讨论了材料和结构能量吸收的一般特性,第11章介绍了典型的能量吸收结构和材料。

本书着重阐述冲击动力学的基本概念、基本模型和基本方法;同时涉及动态实验方法,以及冲击动力学在冲击和防护问题中的应用。各章均附有习题和主要参考文献,以便于教学和研究参考。

本书作为教材,可供40学时左右的研究生课程采用,为固体力学、航空航天、汽车工程、防护工程及国防工程专业的研究生提供冲击动力学领域的前沿科学知识和相关的研究方法,为他们从事有关的科学研究打下基础。同时,也可以供相关专业的教师、研究人员、工程师和大学高年级学生自学和参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

冲击动力学/余同希,邱信明编著. --北京:清华大学出版社,2011.11
(研究生力学丛书)

ISBN 978-7-302-26527-6

I. ①冲… II. ①余… ②邱… III. ①冲击动力学—研究生—教材 IV. ①O342

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第173586号

责任编辑:佟丽霞 李 嫚

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170×230 印 张:15

字 数:297千字

版 次:2011年11月第1版

印 次:2011年11月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:29.00元

产品编号:040001-01

前言

PREFACE

冲击碰撞是在日常生活和体育运动中经常遇到的力学现象,同时又与航空航天、汽车、船舶、海洋平台、核能、防护工程乃至国防工程息息相关。大至载人航天器的着陆、飞机与飞鸟的相撞及汽车碰撞的安全防护,小至手机的跌落、安全帽的设计和对乒乓球的抽击,都需要对冲击碰撞现象有充分的理解与科学的分析。冲击动力学就是专门研究在短暂而强烈的动载的作用下材料行为和结构响应的一门科学。其主要内容涵盖固体中的应力波(弹性波,一维弹塑性波),材料在高应变率下的动态本构关系,结构的动力响应,以及材料和结构的动态能量吸收等。其重点在于阐述基础理论模型和分析方法,同时涉及动态实验方法,以及冲击动力学在冲击和防护问题中的应用。

考虑到工程领域的热切需求和学科自身的迅速发展,国内有关专业急需开设冲击动力学的研究生课程,但又缺少一本适用的教材。这就是我们编写这本研究生教材的初衷。事实上,自1985年起,本书的第一作者(余同希)先后在北京大学、英国曼彻斯特理工大学(UMIST)和香港科技大学(HKUST)多次为研究生讲授冲击动力学课程,从教学实践和学生反馈中积累了较丰富的经验;同时,作者在这一领域多年积累的前沿研究成果,以及作者的几本专著(如《塑性结构的动力学模型》,余同希与斯壮合著;《材料与结构的能量吸收》,余同希与卢国兴合著)中的核心内容,都为本书提供了丰富的素材。

本书的特点是强调冲击动力学的基本概念、基本模型和基本方法,首先阐明冲击动力学的三个要素(应力波、材料的动态行为和结构动力响应中的惯性效应),然后着重通过简明的实例解说简化模型和分析方法,既避免沉湎于数学推演而忘却工程应用背景,又不因陈述技术细节而迷失学科的核心价值。2010年9月,应清华大学航空航天学院的邀请,我们抱着这样的

教学理念,在清华大学讲授了 40 学时的冲击动力学研究生课程,并组织课堂讨论,获得了一致好评。这也极大地鼓舞了我们撰写和出版这本书的信心。

作者衷心感谢清华大学汽车工程系周青教授对开设冲击动力学研究生课程和编写研究生教材的热情支持,同时十分感谢清华大学出版社佟丽霞和李嫚编辑在出版过程中给予的大力帮助。

余同希 邱信明

2011 年 7 月

绪论	1
第一篇 固体中的应力波	
第 1 章 弹性波	7
1.1 圆杆中的弹性波	7
1.2 弹性波的分类	9
1.3 波的反射和相互作用	12
思考题	19
习题	19
第 2 章 弹塑性波	20
2.1 一维弹塑性波	20
2.2 有限长度杆在高速冲击下的大变形	29
2.2.1 Taylor 模型	30
2.2.2 用能量法求解 Taylor 杆问题	34
思考题	36
习题	36
第二篇 材料在高应变率下的动态行为	
第 3 章 动态力学实验技术	39
3.1 材料的应变率	39
3.2 中、高应变率下的材料动态力学性质	41
3.2.1 压缩试验的应变率效应	42
3.2.2 拉伸试验的应变率效应	43
3.2.3 剪切试验的应变率效应	44

3.3	中、高应变率下的力学实验技术	45
3.3.1	中等应变率的实验装置	45
3.3.2	Hopkinson 杆	47
3.3.3	膨胀环技术	54
3.4	爆炸驱动装置	56
3.4.1	线形波发生器和平面波发生器	56
3.4.2	飞板加速	57
3.5	轻气炮系统	59
	习题	61
第 4 章	高应变率下材料的本构关系	62
4.1	应变率相关的本构方程概述	62
4.2	本构方程的经验公式	63
4.3	外加应力与位错运动速度之间的关系	66
4.3.1	位错动力学	66
4.3.2	热激活位错运动	69
4.3.3	位错阻尼机制	72
4.3.4	位错运动的相对论效应	74
4.3.5	小结	74
4.4	基于物理模型的本构方程	75
4.5	本构方程的实验验证	77
	习题	78

第三篇 结构在冲击载荷下的动态响应

第 5 章	惯性效应和塑性铰	81
5.1	波传播与结构整体响应之间的关系	81
5.2	杆和梁中的惯性力	82
5.3	刚塑性自由梁在脉冲载荷作用下的塑性铰	87
5.3.1	刚塑性梁的动态响应	87
5.3.2	自由梁受到集中载荷作用	89
5.3.3	自由梁受中点冲击作用的结论	91
5.4	自由环受径向载荷作用	92
	思考题	94
	习题	95

第 6 章 悬臂梁的动态响应	96
6.1 悬臂梁受阶跃载荷作用	96
6.2 悬臂梁受脉冲载荷作用	100
6.2.1 矩形脉冲载荷	100
6.2.2 一般脉冲载荷	104
6.3 悬臂梁受集中质量撞击后的动态响应	105
6.4 移行铰的特性分析	111
习题	114
第 7 章 轴力和剪力对梁的动态行为的影响	115
7.1 轴向无约束的简支梁	115
7.2 轴向有约束的简支梁	119
7.2.1 刚塑性梁中的弯矩和轴力	119
7.2.2 支承点有轴向约束的简支梁	121
7.3 分析轴力效应的膜力因子法	125
7.3.1 塑性能量耗散与膜力因子	125
7.3.2 用膜力因子法求解梁在动载下的塑性大变形	127
7.4 剪力和剪切变形的影响	129
7.4.1 简单弯曲理论	129
7.4.2 弯曲-剪切理论	131
7.5 在冲击载荷作用下梁的失效模式和失效准则	134
7.5.1 实验观察到的三种失效模式	134
7.5.2 初等失效准则	135
7.5.3 能量密度失效准则	136
7.5.4 剪切失效的深入研究	136
思考题	138
习题	138
第 8 章 模态分析技术、界限定理和刚塑性模型的适用性	140
8.1 变形的动模态	141
8.2 模态解的性质	142
8.3 模态解的初始速度	144
8.4 模态技术的应用	145
8.4.1 Parkes 问题的模态解	145

8.4.2	受局部冲击载荷的固支梁的模式解	147
8.5	理想刚塑性结构的界限定理	149
8.5.1	最终位移的上限	150
8.5.2	最终位移的下限	150
8.6	刚塑性理想模型的适用性	152
	习题	154
第9章	刚塑性板的响应分析	156
9.1	刚塑性板的静态承载能力	156
9.1.1	正方形板的承载能力	157
9.1.2	矩形板的承载能力	159
9.1.3	正多边形板的承载能力	161
9.1.4	外边界固支的圆环板的承载能力	163
9.2	脉冲载荷作用下板的动力响应	165
9.2.1	任意脉冲的等效替换	165
9.2.2	在矩形脉冲作用下正方形板的动力响应	165
9.2.3	在矩形脉冲作用下圆环板的动力响应	169
9.3	板的大变形承载能力和动力响应	171
9.3.1	圆板发生准静态大变形后的承载能力	171
9.3.2	圆板的大变形动力响应	174
	习题	176

第四篇 材料和结构的能量吸收

第10章	能量吸收的一般特性	179
10.1	能量吸收结构介绍	179
10.1.1	工程背景	179
10.1.2	能量吸收的一般原理	181
10.2	能量吸收能力的分析	183
10.2.1	能量吸收结构的常用研究方法	183
10.2.2	理想化的局部接触模型	185
10.3	惯性敏感能量吸收结构	191
10.3.1	两种类型能量吸收结构	191
10.3.2	折板的动力学行为	193
	习题	196

第 11 章 典型的能量吸收结构和材料	197
11.1 圆环、圆管、方管	197
11.1.1 圆环和圆环系统	197
11.1.2 轴向压溃的圆管和方管	200
11.1.3 圆管的翻转	204
11.2 多胞材料	207
11.2.1 蜂窝和格栅	207
11.2.2 泡沫	213
11.2.3 多胞材料的动力学响应	216
习题	220
结束语	221
参考文献	222

绪 论

冲击碰撞是在日常生活和体育运动中广泛遇到的力学现象,同时又与航空航天、汽车、船舶、海洋平台、核能、防护工程乃至国防工程息息相关。大至载人航天器的着陆、飞机与飞鸟的相撞及汽车的安全防护,小至手机的跌落、安全帽的设计和对乒乓球的抽击,都需要对冲击碰撞现象有充分的理解与科学的分析。冲击动力学就是专门研究在短暂而强烈的动载的作用下材料的行为和结构的响应的一门科学。

在通常的弹性力学和塑性力学中,讨论的都是准静态的问题。在这些问题中,假定外载荷是缓慢地施加到材料或结构上的,相应的变形也进行得很缓慢。由于不必考虑物质和结构在变形过程中的加速度,惯性力与外载荷相比可以忽略不计,因此可以按平衡问题来分析处理。

但是,在工程实际应用中经常会遇到动态问题,特别是外载荷很强,随时间变化又很快(简称强动载荷)的情况下。在突加载荷作用下,材料或结构的变形也将会有很快的变化,这时就需要处理弹塑性体和结构的动力学问题。例如:

(1) 运载工具的碰撞。汽车、火车、轮船、飞机等运载工具在事故中的相互碰撞或与周围物体的碰撞,会引起结构的变形破坏、人员的伤亡,并造成严重经济损失。随着经济的发展,汽车已经逐渐进入千家万户,而汽车交通事故造成的人员伤亡已经占意外伤亡之首,每年全球约有 120 万人因此丧生。船舶之间的碰撞、船舶与礁石、桥梁之间的碰撞都会造成巨大的经济损失。随着轨道车辆的高速化,发生碰撞事故时乘员的安全保障已引起了更多的社会关注。飞鸟对飞机的撞击,如果发生在驾驶舱或者发动机上将很危险,虽然鸟的速度不快,但飞机速度很高,二者相向飞行时相对速度很大。有数据表明,当鸟重 0.45 kg,起飞(或降落)时的飞机速度 80 km/h,相撞将产生大于 1500 N 的冲击力;一只 7 kg 重的大鸟撞在时速 960 km/h 的飞机上,产生的冲击力将达 1.44×10^6 N。以飞机起飞或降落时的速度,一只麻雀足以撞毁其发动机。人类越来越频繁的太空活动,造成了太空垃圾的泛滥。由于空间碎片撞击的相对速度平均为 10 km/s,因此这些高速的太空碎片一旦撞上高速运行着的航天器,将会带来极高的破坏力。有人比喻:一个 10 g 的碎片打在卫星上,从双方质量来比较就相当于一个小石块打在一辆正在高速公路上疾驰的汽车上。但是由于撞击速度高,产生的冲击力是石块重量的 13 万倍。

(2) 爆炸载荷的毁伤效应。由于工业事故、军事行动或恐怖袭击,建筑物、桥梁、管道、车辆、舰艇、飞机等都可能受到爆炸载荷的作用,这种载荷通常以空气中的冲击

波等形式突然作用在结构物上。

(3) 自然灾害载荷。地震、海啸、台风、洪水等自然灾害对水坝、桥梁和高层建筑等结构也会产生强动载荷及毁坏。

(4) 各种贮能结构由于局部的破裂诱发能量释放而产生的强动载荷。例如核电站或化工厂输送高压液体的管道在局部破裂后产生的管道甩动；压力容器、水坝等在局部损坏后引起的灾难性溃裂等。

(5) 高速成形加载。在爆炸成形、电磁成形等各种金属动力成形的过程中，工件受到强动载荷而发生迅速的塑性变形；锻造和高速冲压等过程中也有类似的问题。

(6) 生活和运动中的冲击碰撞。例如高空坠物，冰面上摔倒，运动中人与人的碰撞，快速运动的足球或高尔夫球撞击人的头部和身体，等等。

工程实际和生活中遇到的这些多种多样的问题要求我们对强动载荷作用下的固体材料和结构的行为加以科学的认识和系统的研究。为什么材料和结构的动态特性通常与其准静态特性不同呢？这在力学上主要归结为以下三大类原因：

(1) 材料和结构中的应力波。材料和结构的局部表面受到动载荷作用或位移扰动时，所产生的应力和变形将以波的形式传播开去。当这种载荷或扰动比较弱时，产生的是弹性波；载荷或扰动较强时，产生的应力将达到或超过材料的初始屈服应力，于是产生塑性波。假设材料中的应力波速为 c ，物体的特征尺度为 L ，外载荷的特征时间（例如外载荷上升到最大幅值所经历的时间，或载荷脉冲的持续时间）为 t_c ；如果在某一问题中， $t_c \ll L/c$ ，那么物体在这一尺度上的应力和变形的不均匀性是不可忽略的，即必须考虑波的效应。例如，地壳的特征尺度大，地震和地下爆炸的效应主要通过波的形式表现出来。又如在打桩和分离式 Hopkinson 压杆（简称 SHPB，是一种研究材料动态性质的重要实验装置，详见第 3 章）等问题中，扰动是沿着杆长（杆的大特征尺度）方向传播的，因而波的反射、透射、弥散等对问题的分析至关重要。当梁、板、壳等结构元件受到横向载荷作用时，由于厚度方向特征尺度小，情况就有所不同。金属材料中的弹性波速通常为每秒数公里（例如钢的弹性波速为 5.1 km/s ），因此一般在微秒量级的时段内就使结构厚度方向的所有质点受到波及，并产生整体的加速运动。结构的这种整体性运动就叫做结构的弹塑性动力响应（在本书第三篇中将详细分析），通常要经历毫秒量级或者更长的时间才会达到结构的最大变形状态。正是由于结构中波的效应和结构动力响应在时间上相差好几个数量级，通常可以区分为两类问题，分别予以考虑，即：考察波效应时认为结构尚未发生运动和变形；而分析结构动力响应时则不再考虑波传播的影响。

(2) 材料的动态行为。在强动载荷作用下，固体和结构物的材料将发生高速变形。由材料的微观变形机制所决定，材料对高速变形的抵御能力通常高于对缓慢变形的抵御能力。这一点已经为众多的材料实验所证实。例如，金属塑性变形的机理主要是位错的运动，而位错在金属晶格中高速通过时所遇到的阻力比缓慢通过时更

大,这就造成了大多数金属在高速变形时呈现的较高屈服应力和流动应力。对材料动态性能研究的一项主要任务,就是在实验资料的基础上归纳出应变率对材料应力-应变关系的影响,从而建立与应变率相关的材料动态本构关系。当把这些动态本构关系应用于结构动力学问题时,由于结构内不同微元在不同时刻所经历的应变历史和瞬时应变率各不相同,所以往往需要对本构方程作很大简化。

(3) 结构响应中的惯性影响。在结构的动力响应过程中,通常总是既有弹性变形,又有塑性变形,这两种变形以及它们之间的分界面都随时间而变化。因此,在求解结构动力响应时,不仅需要对不同区域采用不同的本构关系,而且要处理复杂的动边界问题。为了减少数学上的复杂性,在结构动力响应的理论分析中,常常对材料的本构关系做出大幅度的简化,一个最常用也是最成功的理想化是把结构假定为由理想刚塑性材料制成的,不仅忽略了材料的弹性,也忽略了材料的应变强化效应和应变率效应。这样做的背景和依据是:在强动载荷作用下,被考察的结构通常要经历相当大的塑性变形,外载荷做的功绝大部分将转化为塑性变形能被耗散掉,只有很小一部分转化为结构的弹性变形能;因而,忽略弹性变形及相应的能量,对工程上关心的结构最终变形和失效方式等总体性态并不会造成很大的影响,却可以大大简化问题的数学提法和解法。由于材料理想化上的相似性,结构的刚塑性动力响应分析同塑性力学中的结构极限分析在概念和方法上有着密切的联系。例如广泛应用运动许可速度场(机动场)的概念和含有塑性铰的运动机构等。同时,也要注意二者之间的很大不同,主要表现在惯性的介入。塑性力学中的极限分析原理告诉我们,如果结构的材料是理想弹塑性或者理想刚塑性的,那么该结构在外载荷作用下存在一个极限状态,即:外载荷达到某个极限载荷时,结构将变成机构而丧失进一步承载的能力。但是,若从动力学的观念来考察同一个问题,就会发现:当动载荷超过静极限载荷时,结构必然会产生加速度,按照达朗贝尔原理,就相当于结构的惯性力参加承受外载荷、抵抗变形。外载荷越大,加速度越大,惯性力也就越大,因而结构可以在短时间内承受比静极限载荷高得多的外载荷,这是结构动力响应不同于静力极限分析的一个显著特点。

概括来讲,但凡有事故,十之八九就有冲击载荷和冲击动力学问题存在。目前数值方法发展得很快、应用越来越广,部分研究者认为遇到冲击动力学问题,只要用有限元软件进行数值模拟就可以了。事实上,对于数值仿真来说,正确理解最基本的动力学原理、概念和动态变形机制是准确建立模型的前提。数值计算虽然可以给我们提供大量的数据,但是这些数据能说明什么问题,恰恰要求研究者在理解冲击动力学原理的基础上,才能弄清动态变形机制和准静态问题的根本差别。掌握广泛适用的分析方法,从大量数据中提取最重要的影响因素和规律性的结果,这是研究冲击动力学问题的核心所在。

本教材将为固体力学、航空航天、汽车工程、防护工程及国防工程专业的研究生

提供的这一领域的前沿科学知识和相关的研究方法,为他们从事有关的课题研究打下基础。其主要内容涵盖固体中的应力波(弹性波,一维弹塑性波),材料在高应变率下的动态行为及实验方法,结构的动力响应,以及材料和结构的动态能量吸收等。重点在于如何建立力学模型,以及如何将这些模型应用到各种冲击问题中去。

第一篇 固体中的应力波

第 1 章

弹性波

在可变形固体介质中,对力学平衡状态的扰动表现为质点速度的变化和相应的应力、应变状态的变化。由于可变形介质的特性,当固体中的某些部分受到扰动因而处于力学上的不平衡状态时,固体中的其他部分需要一定的时间才能感受到这种不平衡。这种因应力和应变的变化而引起的扰动以波的形式在固体中传播,就称为应力波。

1.1 圆杆中的弹性波

弹性压缩波的传播

如图 1.1 所示,考虑一个各向同性材料制成的半无限长的均质圆杆,坐标原点 O 点固定于半无限长杆的自由端。设 x 表示杆上某点到原点 O 的距离; $u(x)$ 表示杆上距 O 点初始距离为 x 的平面 AB 发生的位移;平面 $A'B'$ 平行于 AB 且距离原点 O 的初始距离为 $x + \delta x$,该平面的位移为 $u + \frac{\partial u}{\partial x} \delta x$ 。从 $t=0$ 时刻起,在 $x=0$ 的端面上作用一个集中压力,它将引起一个沿杆传播的弹性扰动。在 t 时刻,扰动传播至截面 AB ,因此该截面上受压应力 $-\sigma_0$ 的作用。需要注意的是,这里的分析采用了细长杆假设,即认为脉冲载荷的长度至少是杆横截面尺度的 6 倍。在这种情况下,可以忽略横向应变和横向惯性效应。此外,在分析中还忽略了杆的重力和材料的阻尼。

如图 1.2 所示,取均质圆杆中的一个单元进行受力分析。设 A_0 是杆的初始截面积, ρ_0 是材料初始密度, $-\sigma_0$ 是杆中传播的应力水平,负号表示压应力。

由牛顿第二定律,该单元的运动方程, $-\frac{\partial \sigma_0}{\partial x} \cdot \delta x \cdot A_0 = \rho_0 \cdot A_0 \cdot \delta x \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$,即