

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

应力波基础

Foundation of Stress Waves

(第2版)

王礼立 编著 朱兆祥 审校



国防工业出版社

National Defense Industry Press

责任编辑：曲 岩 yqu@ndip.cn
封面设计：李 娜

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐



<http://www.ndip.cn>

ISBN 7-118-04015-0



9 787118 040159 >

ISBN 7-118-04015-0/O · 266

定价：36.00 元

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

应力波基础

(第2版)

王礼立 编著

朱兆祥 审校

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

应力波基础 / 王礼立编著. —2版. —北京: 国防工业出版社, 2005.8

ISBN 7-118-04015-0

I. 应... II. 王... III. 应力波 IV. 0347.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 074329 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 24½ 563 千字

2005 年 8 月第 2 版 2005 年 8 月北京第 2 次印刷

印数:4001—8000 册 定价:36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

第 1 版序言

近 40 年来,应力波理论越来越受到人们的重视。这一方面是由于在生产和军事技术上、在科学研究上要求对应力波传播起重要作用的地震现象、高速撞击、爆炸和武器效应,以及冲击载荷下材料和结构的反应等作出深入而准确的解释;另一方面也是由于应力波理论发展内在矛盾的需要,要求由浅入深,由简单到复杂,由特殊到一般。这样就由线性弹性波的研究发展到大变形的非线性弹性波;由低压的弹性波和极高压的流体应力波的研究发展到弹塑性波和粘塑性波;由单纯波发展到复合波;由连续波的研究发展到具有各阶间断的奇异面的传播如冲击波和加速度波等。应力波知识的大量积累又开辟了应力波在自然探索和技术开发等方面应用的广阔前景。例如利用爆炸后地应力波的传播、反射和折射来研究地球内部结构,查明地表地层分布和勘探石油资源等;用超声波进行无损探伤,利用声发射监视断裂的进展;用高速撞击产生的应力波研究材料的动态力学性能;用应力波铆接金属板件;利用应力波的破坏机制研制破碎装甲的武器以至击碎人体内脏结石以达到治疗的目的,等等,这些应用工具的发展又反过来进一步促进应力波理论的深入研究。这一切说明应力波理论是当前固体力学中极为活跃的前沿,是现代声学、地球物理学、爆炸力学和材料力学性能研究的重要基础。

应力波理论最早是从弹性波开始发展起来的。出乎人们意料之外的是,最初推动弹性波理论发展的强大力量竟来自光的本性研究的需要。1821 年著名的物理学家 Fresnel 宣称,关于偏振光干涉的实验事实只能用横向振动假设来解释。他证明:以中心力相联结的分子所组成的介质可以实现这种横向振动并传播这种横波。在当时的自然科学界还从来没有在介质内部可以传播横波的概念。所以这一问题立刻吸引了两位第一流数学家 Cauchy 和 Poisson 的注意。通过他们的努力,前者建立了目前形式的弹性力学普遍方程组,后者据此发现了在弹性介质中可以传播两种性质不同的波,即纵波和横波。虽然这个发现给刚刚出现一线希望的光传播的弹性以太说带来了新的困难,但是毕竟从此开创了应力波理论。其后,用弹性波理论研究光波被球体或球腔衍射的还不乏其人,包括著名的物理学家 Clebsch(1863), Lorentz(1890), Lamb(1900)等,甚至光的电磁理论的提出也没有阻止这种势头,直到二十世纪初爱因斯坦相对论的出现从根本上否定了弹性以太的存在才停止。菲涅耳的光学冲击诞生了弹性应力波理论,然而它没有完成原来期望由它完成的任务,径自成长了。

第二个冲击来自碰撞问题。早期用振动中的正态振型法来处理弹性固体的碰撞问题,没有获得成功。赫兹所处理的撞击问题是质点动力学和接触问题的揉合。开始用应力波传播的概念来处理碰撞问题是 Boussinesq(1883)和 Saint-Venant(1883),他们分别讨论了重块对直杆的撞击和二杆对撞问题。后继 60 年中除了解法的改进之外,几乎没有实质的进展,这可能是由于当时的力学还只擅长于线性问题,不足以处理实际中强烈撞击引起

的塑性变形问题所致。

下继的巨大冲击来自地震。泊松论证弹性体中纵波和横波的存在是在 1831 年,46 年后 Rayleigh 论证了表面波的存在。到 1900 年 R. D. Oldham 终于在远震记录中识别出这三种波的存在,从此地震学找到了有力的理论工具。地震记录中表面水平偏震横波的存在和弥散促使 Love(1911)提出地表覆盖层的模型而发现了勒夫波。兰姆在 1904 年发表了一篇影响深远的文章,论述地表和内源初始局部扰动所产生的应力波系, Sommerfeld 于 1909 年在电磁波研究中发现沿层间界面传播的折射波,这二者促使 Mohorovičić(1909)导出大陆地壳的分层。H. Jeffreys 于 1926 年解决了这个“折射震相”问题理论上的困难,就使爆炸地震勘探法无可怀疑地被广泛应用了。弹性波在两个半无限空间和层状空间中的传播问题吸引了 20 世纪 20 年代和 20 世纪 30 年代许多数学家、力学家和地层学家,其中有著名的苏联的索勃列夫和日本的妹泽克惟等。

第二次世界大战期间,由于军事技术上的要求开辟了应力波理论的新局面。为提高装甲强度等所推动,英国的 G. I. Taylor,美国的 Karman 在 1942 年,苏联的 Рахматулин 于 1945 年各自独立地创立了塑性波理论。非线性加载波的传播问题可以用当时已经发展成熟的气体动力学中特征线方法来解决,困难在于卸载时材料遵循不同的本构关系,如何确定由于应力应变曲线所包含的间断引起的弹塑性边界的传播轨迹成为塑性波理论中一个核心问题。后继的讨论者如 E. H. Lee(1953), Clifton(1968), 丁启财(1968 - 1971)不断改进研究结果,直到最近才把一维应力和一维应变中的问题解决得比较完备了(参见本书有关章节)。复合应力波的研究是塑性波理论发展的一个必然趋向,从压缩剪切复合,二剪切复合到压缩和二剪切复合,在薄管中的压扭复合,最后是复合应力柱面波。在 20 世纪 60 年代里,当时一些著名的塑性动力学专家几乎都参加了这方面的工作,丁启财在 1973 年提出了平面和柱面复合应力波的统一理论作为总结。在复合波中最重要的是发现了弹塑性耦合的快波和慢波,复合波中弹塑性边界的处理是饶有兴趣的,这方面的工作只能说刚刚开了一个头。与此同时,各向同性和各向异性材料中三维弹塑性波的理论框架也建立起来了。

对弹塑性波理论的实验验证表明有些应变率敏感材料在冲击载荷之下波传播的性能是和理论的预测不符的。Сокаповский 和 Malvern 分别于 1948 年和 1951 年观察到材料的动态应力应变曲线一般高于静态曲线,他们假定塑性应变率是超出部分应力的函数。由这种广义马克斯威尔本构关系的粘塑性波理论预言增量应力波以弹性波速传播,这和实验观察相符。从弹塑性波和粘塑性波的理论建立和实验验证过程中可以看到,在应力波基本方程组中必须包含合适的材料本构方程才能正确地预测应力波形。而材料动态本构关系的函数形式和其中的材料常数只有通过应力波波形的分析处理才能确定。应力波理论和材料本构关系之间这种“狗咬尾巴”的关系当然会给研究工作带来困难。实践证明了这两门学科之间存在的血缘联系,力学家只有不断克服这种循环周转的困难才能前进。

用应力波作为实验工具来确定材料动态力学性能的方法,由于在第二次世界大战期间电子仪器的发展使得精密的瞬态测量成为可能,才蓬勃发展起来。这时发展了用超声波来测量材料的动态弹性系数和粘性耗散的办法,又在 Hopkinson(1914)压杆的基础上发展了 Davis 杆、Kolsky 杆等测量材料的动态应力应变曲线。许多实验家也以杆撞击的应力

波数据反推材料的本构关系或者作计算机实验试凑的依据。

20世纪40年代核武器的研制和防护研究大大推动了对材料在高压和高速变形下力学性能的研究,发展了用爆炸驱动的或轻气炮驱动的平板撞击技术来测定材料的冲击绝热数据。由于测试仪器分辨力的不断提高,平板撞击技术已发展到可以用毫微秒展开的应力波形来确定弹粘塑性材料的本构函数,用以研究应力波引起的层裂现象。最近又发展了用平板斜撞击技术来研究复合应力波和动态屈服条件。

核爆炸又推动了弹性介质中球腔爆炸波的研究以及应力波的绕射和孔壁动态应力集中问题,特别是大大推动了固体中冲击波理论的研究,以及在流体弹塑性介质中应力波传播的数值计算等。

最后值得提一提奇异面理论在应力波研究中的巨大作用。100年以来,许多数学家和理论力学家在这方面作出了巨大的贡献。最早是由 Christoffel 于 1877 年和 Hugoniot 提出的,把波看成严格地限制在一个曲面上的扰动。Hadamard 于 1900 年建立了奇异面的完整理论。这一理论在冷落了 60 年之后,在 20 世纪 60 年代初期又突然复兴了,用此研究了线性弹性体、非线性弹性体、粘弹性体、弹塑性体以及热弹性体、磁弹性体中各阶间断面的传播,其中冲击波和加速度波的传播特别引人注目,成果很丰富,以致无法列上众多作家的名字。

国内近 30 年来在应力波研究方面也获得了丰硕的成果,如中国科学院地球物理研究所傅承义教授领导下的地震波的研究,声学研究所应崇福教授领导下的弹性波散射和超声波的研究,力学研究所郑哲敏教授领导下的流体弹塑性体模型及其在核爆炸和穿甲方面应用的研究以及材料动态力学性能的研究,工程力学研究所在刘恢先教授领导下的弹塑性波的有限元计算和动态应力集中问题的研究,太原工学院在杨桂通教授领导下的关于塑性动力学的研究,北京大学在王仁教授领导下的动态屈曲和高速撞击的研究等。中国科学技术大学进行了应力波引起的层裂、弹塑性边界的传播,以及金属和高分子材料动态力学性能的研究。为了适应应力波理论日新月异迅速发展的局面,使学习固体力学和爆炸力学的学生在面临冲击载荷下材料和结构的反应问题时具备必需的基础知识,中国科学技术大学近代力学系从 1962 年开始开设“应力波”课程。曾经用过的课程名字有“弹性动力学”,“塑性动力学”,“塑性波理论”,“冲击波物理”,“核爆炸固体力学”,“应力波”等,而其内容基本上都是固体中的应力波。先后参与讲座的教师有尹祥础、王礼立、杨振声、郭汉彦、李永池、王肖钧等,我也有机会参与其事。近 20 年来,在许多教师的共同努力之下,先后编著了许多版本的讲义和讲稿,逐步形成了应力波课程的体系。现在由王礼立教授执笔,把讲义中较为基础和实用的部分如一维应力和一维应变的弹塑性波、粘弹性波和粘塑性波,柱面和球面的弹塑性波,三维线性弹性波基础等整理出来,编辑成书,定名为《应力波基础》,正式出版,以应各方面的迫切需要。至于应力波理论中较现代的部分,待以后继续整理出版。在这本书稿中凝结了许多人的经验和智慧。我有机会从头到尾校读了全书的原稿,觉得有些话要向广大读者交代,也应该向为本门课程的形成作过贡献的老师们表示感谢,向为本书原稿的誊写、画图、提供习题的老师们表示感谢,故为之序。

朱兆祥

1983年6月4日于中国科学技术大学

第 2 版前言

本书自 1985 年正式出版以来,承蒙各高等院校、科研院所和生产部门的有关科研人员、大学教师、工程技术人员、研究生和高年级本科生们的关爱,早已告罄。多次接到各方鼓励和催促,希望尽快出版第 2 版。我也感到有责任借此机会对第一版中的错误和不足之处加以改正和补充。酝酿多年,一再搁延,终于在国防工业出版社的大力支持下,现在得以问世。

此时此刻,不禁让我想起几件往事。20 世纪 60 年代初,在中国科学院力学研究所时,我有幸在钱学森所长倡导、郭永怀副所长领导和郑哲敏室主任直接带领下,与谈庆明、邵丙璜等几个青年人一起参与了爆炸力学这一新兴边缘学科的探索开拓工作。由于研究工作的需要,我们如饥似渴地查阅了当时几乎所有能找到的文献,并结合任务进行讨论和钻研;又由于当时为中国科技大学首届爆炸力学本科生开设新课的需要,承担了主讲《材料(在冲击载荷下)的力学性能》和《塑性动力学》课程的任务,并编写了相应的教材(中国科技大学内部刊印出版)。那个时期,在力学研究所的青年学者们,几乎都是夜以继日地为完成研究任务而拼搏工作,在工作中又不断学习提高,至于论文和著作似乎只是工作的“副产品”而已。以柳永的著名诗句——“衣带渐宽终不悔,为伊消得人憔悴”,来描述那段时期知识分子普遍的好学精神,实不为过。想不到从此我竟和应力波结下了不解之缘。遗憾的是,1963 年我被迫依依不舍地离开了力学研究所。《塑性动力学》的定稿实际上是在离开力学研究所后,在朱兆祥先生的鼓励下继续完成的,这可以被追溯为《应力波基础》的第一稿。

1978 年,在朱兆祥先生的关怀筹划下,在曾经听过我“应力波”课的中国科技大学第一届毕业生周光泉的帮助下,我好不容易从大西北“归队”回到中国科技大学,重新讲授“应力波”等课程。我是属于“历经坎坷心不老”那一类的,为了追回十年来所损失的时间,惟有不顾年龄地加倍努力,再次夜以继日地去补读大量重要文献和书籍。面对好些已经生疏、甚至于看不懂的文獻,真有一番“雄关漫道真如铁,而今迈步从头越”的感受。

改革开放迎来了科学研究的第二春,也在全国掀起了新一波的学习高潮。20 世纪 80 年代初,我们曾先后应兵器工业部、中国工程物理研究院 901 所和 909 所、航天工业部等各有研究机构和高校之盛情邀请,多次作“应力波”理论的培训讲学。为适应广泛的需求,《应力波基础》第 1 版由国防工业出版社于 1985 年正式出版。书稿虽然由我执笔,实际上凝结了许多同仁、特别是朱兆祥先生在中国科技大学 20 年来讲授“应力波”的经验和智慧。当我将刚出版的《应力波基础》送呈钱学森老所长请他指正时,很快收到了他的亲笔回信。欣喜之中,被他如下一段意味深长的话所感动:“您经历了 20 年的艰难困顿,这正是祖国在建设中国式的社会主义走弯路的时期;也可以说,是像您这样的许许多多有志之

士,付出了代价,才换来了今天的正确方针、政策!您对祖国有贡献呵!”我在回信时曾写下这样几句话以谢钱老的勉励:“悠悠逆境心不移,昭昭赤诚志更坚。不怨半生多磨练,惟喜中华春满园。”

第1版出版当年,本书荣获中国科技大学优秀教材一等奖。翌年,有关科研成果“弹塑性波的理论和应用研究”荣获中国科学院科技进步二等奖。1989年,在黄克智先生主持下,经国家教育委员会高等工业学校工程力学专业教材委员会审定,本书被推荐为工程力学专业教学用书。通过国际学术交流,本书还流传到了海外的华人学者手中,这是完全始料不及的。借此机会,特别要感谢国际非线性波权威、美籍华人教授丁启财(T. C. T. Ting)先生,他于1982年底应邀来中国科技大学作“固体中的非线性波”的系列讲座(讲稿经整理后以同名专著于1985年由中国友谊出版公司正式出版),又连年接收大陆赴美的访问学者和研究生,推动了国内在应力波方面的研究。他还将我们以中文发表的研究成果向国际学术界进行介绍,对我们在弹塑性边界传播方面的若干研究论文,高度评价为“在一维波传播的弹塑性边界上应力和速度间断的系统研究中,最重要最精采的结果”(Ting T C T, 1990)。

1990年-1991年,承蒙包玉刚爵士推荐、由“中英友好学者计划(Sino British Friendship Scholarship Scheme)”提供资助,我有幸先后访问英国剑桥大学 Cavendish 实验室和利物浦大学冲击研究中心。在剑桥大学, J. Field 教授建议我进行“预应力高强度高聚物纤维束在刀刃横向撞击下的动态响应”方面的研究;而在利物浦大学, N. Jones 教授建议我进行“横向冲击下梁的剪切破坏和弯曲失效分析”方面的研究,分别涉及有关弦中和梁中应力波传播的研究。碰巧我在早年编写《塑性动力学》讲义时,除了《应力波基础》第1版中所包含的一维弹塑性波方面的内容外,其实还包含了“弦中弹塑性纵波与横波”和“梁中弹塑性弯曲波”等两章。因此,在我完成这两项合作研究回国时就有了一个打算:应该在出版《应力波基础》第2版时补充这两章,以利于读者从更广泛的视角来认识和研究应力波。此外,为适应当前电子计算机数值模拟的迅速发展和广泛应用,特邀请杨黎明教授(浙江省“钱江学者”特聘教授)增写了第十二章,概括地介绍了应力波数值求解的方法。

第1版之所以能迅速出版,离不开北京理工大学周兰庭教授、何顺禄教授和国防工业出版社崔金泰责任编辑的支持和努力。现在第2版之所以能迅速出版,则要感谢经福谦院士、黄克智院士、北京理工大学黄风雷教授和国防工业出版社曲岩责任编辑的支持和努力。我还要感谢很多采用《应力波基础》作为教材的教授们,特别是胡时胜教授、虞吉林教授和李永池教授,他们帮我发现和汇总了第1版书稿中的各种错误,使之能在第2版中得以改正。胡时胜教授还根据他多年的讲授经验补充了习题。此外,要感谢我的几位研究生朱珏、王永刚和孙紫建,他们利用酷热的暑假,帮我把铅印第1版的全部文字和图转换成为 Word 文件,大大方便了我对书稿的修改和补充,也加快了编辑出版和印刷。

最后,特别要向我的妻子卢维娴表示深深的感谢,没有她的长期关心和支持,尤其是在我最困难的时刻所给予我的信任和鼓励,是几乎不可能完成本书的第1版和第2版书稿的。在第2版书稿即将完成之际,恰逢我俩银婚纪念,我谨以此书稿和以下四句短诗赠她致谢:“三生有缘同苦甘,两度遭劫共患难;不图富贵惟情真,相扶相依庆银

诞。”

时代在前进,祖国在前进,科学教育在前进!愿这本凝结了很多前人的心血与辛酸的书稿,能为后来的青年学者们铺出一条路,祝愿他们在攀登新的科学高峰中有更美好的未来!

王礼立

古稀之年于宁波

目 录

第一章 绪论	1
第二章 一维杆中应力波的初等理论	5
2.1 物质坐标和空间坐标	5
2.2 物质坐标描述的杆中纵波的控制方程	7
2.3 特征线和特征线上相容关系	9
2.4 半无限长杆中的弹塑性加载纵波	12
2.4.1 线性弹性波	12
2.4.2 弹塑性加载波	16
2.5 空间坐标描述的控制方程	18
2.6 强间断和弱间断,冲击波和连续波	20
2.7 波阵面上的守恒条件	24
2.8 横向惯性引起的弥散效应	29
2.9 杆中扭转波	35
第三章 弹性波的相互作用	39
3.1 两弹性杆的共轴撞击	39
3.2 两弹性波的相互作用	40
3.3 弹性波在固定端和自由端的反射	41
3.4 有限长弹性杆的共轴撞击	42
3.5 弹性波在不同介质界面上的反射和透射	45
3.6 弹性波在变截面杆中的反射和透射	47
3.7 Hopkinson 压杆和飞片	51
3.8 分离式 Hopkinson 压杆	52
3.9 应力波反射卸载引起的断裂	60
第四章 弹塑性波的相互作用	65
4.1 弹塑性加载波的相互作用	65
4.1.1 强间断弹塑性波的迎面加载	65
4.1.2 弱间断弹塑性波的迎面加载	67
4.2 弹塑性加载波在固定端的反射	69

4.3	卸载波的控制方程和特征线	71
4.4	强间断卸载扰动的追赶卸载	74
4.4.1	线性硬化杆中强间断波的突然卸载	74
4.4.2	线性硬化杆中连续波的突然卸载	79
4.4.3	塑性中心波的突然卸载	82
4.5	弱间断卸载扰动的追赶卸载	86
4.5.1	塑性中心波的连续卸载	87
4.5.2	线性硬化材料中冲击波的衰减	88
4.6	冲击波在追赶卸载作用下的衰减	92
4.7	半无限长杆中卸载边界的传播特性	94
4.8	迎面卸载	100
4.9	有限长杆在刚砧上的高速撞击	104
4.9.1	线性硬化杆的撞击	104
4.9.2	递增硬化杆的撞击	109
4.9.3	递减硬化杆的撞击	112
4.10	弹塑性边界的一般传播特性	113
4.10.1	加载边界和卸载边界	113
4.10.2	作为奇异面的弹塑性边界	115
4.10.3	强间断弹塑性边界	116
4.10.4	一阶弱间断边界	116
4.10.5	二阶弱间断边界	120
4.10.6	高于二阶的弱间断边界的讨论	122
4.10.7	弹塑性边界上的高阶孤立点	124
4.10.8	加载边界上的补充条件	129
第五章	刚性卸载近似	133
5.1	半无限长杆中的刚性卸载	133
5.1.1	线性硬化塑性材料的刚性卸载	133
5.1.2	线弹性—线性硬化塑性材料的刚性卸载	134
5.1.3	线弹性—递减硬化塑性材料的刚性卸载	136
5.2	有限长杆中的刚性卸载	140
5.3	冲击波传播中的刚性卸载	143
5.3.1	半无限长杆中冲击波的刚性卸载	143
5.3.2	有限长杆中冲击波的刚性卸载	145
第六章	一维粘弹性波和弹粘塑性波	148
6.1	线性粘弹性本构关系	148
6.1.1	Maxwell 体	149
6.1.2	Kelvin-Voigt 体	151

6.1.3	标准线性固体	152
6.2	应力波在线性粘弹性杆中的传播	153
6.2.1	Kelvin-Voigt 杆中的粘弹性纵波	153
6.2.2	Maxwell 杆中的粘弹性纵波	154
6.2.3	标准线性固体杆中的粘弹性纵波	155
6.2.4	线性粘弹性杆中纵波的特征线解法	157
6.2.5	粘弹性分离式 Hopkinson 压杆	160
6.3	非线性粘弹性本构关系	166
6.4	应力波在非线性粘弹性杆中的传播	169
6.5	弹粘塑性本构关系	172
6.6	应力波在弹粘塑性杆中的传播	175
第七章	一维应变平面波	178
7.1	控制方程	178
7.2	一维应变弹性波	179
7.3	一维应变下的弹塑性本构关系	181
7.4	一维应变弹塑性波	186
7.5	反向屈服对于弹塑性波传播的影响	188
7.6	固体高压状态方程	191
7.7	高压下固体中的冲击波	196
7.7.1	冲击突跃条件	197
7.7.2	冲击绝热线	200
7.8	高压下固体中冲击波的相互作用,反射和透射	208
7.9	流体弹塑性介质中的平面波	213
7.10	流体弹塑性介质中冲击波的衰减	218
7.11	一维应变弹粘塑性波	224
第八章	球面波和柱面波	227
8.1	连续方程和运动方程	227
8.2	弹性球面波和柱面波	228
8.3	弹塑性球面波	234
8.4	球形弹壳破碎的近似分析	238
8.5	弹粘塑性球面波和柱面波	240
第九章	柔性弦中弹塑性波的传播理论	245
9.1	基本方程	246
9.2	半无限长直弦的突加恒值斜向冲击	251
9.3	无限长直弦的突加恒值斜向点冲击	254
9.4	预张力作用下的弦的横向冲击	263

9.4.1	预张力弦中波速的试验研究	265
9.4.2	由预张力弦中纵波波速的试验测定来研究弦材料的本构关系	267
9.4.3	由预张力弦中纵波波速的试验测定来确定横波波速	268
第十章	横向冲击下梁中弹塑性波的传播(弯曲波理论)	270
10.1	基本假定和方程	270
10.2	弹性弯曲波	274
10.3	塑性弯曲波(弹塑性梁)	278
10.4	刚塑性分析	293
10.5	梁在横向冲击下的剪切失效	300
第十一章	一般线弹性波	308
11.1	无限介质中的线弹性波	308
11.2	弹性平面波的斜入射	311
11.3	表面波	317
第十二章	应力波的数值求解方法	322
12.1	特征线数值方法	323
12.1.1	一维波传播的特征线数值方法	323
12.1.2	二维波传播的特征面数值方法	327
12.2	有限差分方法	332
12.2.1	差分格式的建立	333
12.2.2	差分格式的收敛性	335
12.2.3	差分格式的稳定性	335
12.2.4	人工粘性	336
12.3	有限元方法	339
12.3.1	有限元方法求数值解的基本步骤	339
12.3.2	算例	341
附录	347
附录 I	压力或应力单位换算表	347
附录 II	解二阶拟线性双曲型偏微分方程的特征线方法	347
附录 III	自模拟运动的简介	350
附录 IV	习题	351
参考文献	368
索引	374

第一章 绪 论

在各类工程技术、军事技术和科学研究等领域的一系列实际问题中,甚至就在日常生活中,人们都会遇到各种各样的爆炸/冲击载荷问题,并且可以观察到,物体在爆炸/冲击载荷下的力学响应往往与静载荷下的响应有显著的不同。例如,飞石打击在窗玻璃上时往往首先在玻璃的背面造成碎裂崩落。碎甲弹对坦克装甲的破坏正类似于此。又如,对一金属杆端部施加轴向静载荷时,变形基本上是沿杆均匀分布的,但当施加轴向冲击载荷时(如打钎,打桩……),则变形分布极不均匀,残余变形集中于杆端。子弹着靶时,变形呈蘑菇状也正类似于此。固体力学的动力学理论的发展正是与解决这类力学问题的需要分不开的。

为什么在爆炸/冲击载荷下会发生诸如此类的特有现象呢?为什么这些现象不能用静力学理论来给以说明呢?固体力学的动力学理论与静力学理论的主要区别是什么呢?

首先,人们知道,固体力学的静力学理论所研究的是处于静力平衡状态下的固体介质,以忽略介质微元体的惯性作用为前提。这只是在载荷强度随时间不发生显著变化的时候,才是允许和正确的。而爆炸/冲击载荷以载荷作用的短历时为其特征,在以毫秒(ms)、微秒(μs)甚至纳秒(ns)计的短暂时间尺度上发生了运动参量的显著变化。例如核爆炸中心压力可以在几微秒内突然升高到 $10^3\text{GPa} \sim 10^4\text{GPa}$ 量级;炸药在固体表面接触爆炸时的压力也可在几微秒内突然升高到 10GPa 量级;子弹以 $10^2\text{m/s} \sim 10^3\text{m/s}$ 的速度射击到靶板上时,载荷总历时约几十微秒,接触面上压力可高达 $1\text{GPa} \sim 10\text{GPa}$ 量级。在这样的动载荷条件下,介质的微元体处于随时间迅速变化着的动态过程中,这是一个动力学问题。对此必须计及介质微元体的惯性,从而就导致了对应力波传播的研究。

事实上,当外载荷作用于可变形固体的某部分表面上时,一开始只有那些直接受到外载荷作用的表面部分的介质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。不过,由于介质质点具有惯性,相邻介质质点的运动将滞后于表面介质质点的运动。依此类推,外载荷在表面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。扰动区域与未扰动区域的界面称为波阵面,而其传播速度称为波速。常见材料的应力波波速约为 $10^2\text{m/s} \sim 10^3\text{m/s}$ 量级。必须注意区分波速和质点速度。前者是扰动信号在介质中的传播速度,而后者则是介质质点本身的运动速度。如果两者方向一致,称为纵波;如果两者方向垂直,则称为横波。根据波阵面几何形状的不同,则有平面波、柱面波、球面波等之分。地震波,固体中的声波和超声波,以及固体中的冲击波等都是应力波的常见例子。

一切固体材料都具有惯性和可变形性,当受到随时间变化着的外载荷的作用时,它的运动过程总是一个应力波传播、反射和相互作用的过程。在忽略了介质惯性的可变形固

体的静力学问题中,只是允许忽略或没有必要去研究这一在达到静力平衡前的应力波的传播和相互作用的过程,而着眼于研究达到应力平衡后的结果而已。在忽略了介质可变形性的刚体力学问题中,则相当于应力波传播速度趋于无限大,因而不必再予以考虑。对于爆炸/冲击载荷条件下的可变形固体,由于在与应力波传过物体特征长度所需时间相比是同量级或更低量级的时间尺度上,载荷已经发生了显著变化,甚至已作用完毕,而这种条件下可变形固体的运动过程常常正是我们关心所在,因此就必须考虑应力波的传播过程。

其次,强冲击载荷所具有的在短暂时间尺度上发生载荷显著变化的特点,必定同时意味着高加载率或高应变率。一般常规静态试验中的应变率为 $10^{-5}\text{s}^{-1} \sim 10^{-1}\text{s}^{-1}$ 量级,而在必须计及应力波传播的冲击试验中的应变率则为 $10^2\text{s}^{-1} \sim 10^4\text{s}^{-1}$,甚至可高达 10^7s^{-1} ,即比静态试验中的高多个量级。大量实验表明,在不同应变率下,材料的力学行为往往是不同的。从材料变形机理来说,除了理想弹性变形可看做瞬态响应外,各种类型的非弹性变形和断裂都是以有限速率发展、进行的非瞬态响应(如位错的运动过程,应力引起的扩散过程,损伤的演化过程,裂纹的扩展和传播过程等),因而材料的力学性能本质上是与应变率相关的。通常表现为:随着应变率的提高,材料的屈服极限提高,强度极限提高,延伸率降低,以及屈服滞后和断裂滞后等现象变得明显起来等。因此,除了上述介质质点的惯性作用外,物体在爆炸/冲击载荷下力学响应之所以不同于静载荷下的另一个重要原因,是材料本身在高应变率下的动态力学性能与静态力学性能不同,即由于材料本构关系对应变率的相关性。从热力学的角度来说,静态下的应力—应变过程接近于等温过程,相应的应力—应变曲线可近似视为等温曲线;而高应变率下的动态应力—应变过程则接近于绝热过程,因而是一个伴有温度变化的热—力学耦合过程,相应的应力—应变曲线可近似视为绝热曲线。

这样,如果将一个结构物在爆炸/冲击载荷下的动态响应与静态响应相区别的话,则实际上既包含了介质质点的惯性效应,也包含着材料本构关系的应变率效应。当我们处理爆炸/冲击载荷下的固体动力学问题时,实际上面临着两方面的问题:其一是已知材料的动态力学性能,在给定的外载荷条件下研究介质的运动,这属于应力波传播规律的研究(正问题);其二是借助于应力波传播的分析来研究材料本身在高应变率下的动态力学性能,这属于材料力学性能或本构关系的研究(反问题)。问题的复杂性正在于:一方面应力波理论的建立需要依赖于对材料动态力学性能的了解,是以已知材料动态力学性能为前提的;而另一方面材料在高应变率下动态力学性能的研究又往往需要依赖于应力波理论的分析指导。因此应力波的研究和材料动态力学性能的研究之间有着特别密切的关系。

虽然从本质上说材料本构关系总是或多或少地对应变率敏感,但其敏感程度视不同材料而异,也视不同的应力范围和应变率范围而异。在一定的条件下,有时可近似地假定材料本构关系与应变率无关,在此基础上建立的应力波理论称为应变率无关理论。其中,根据应力—应变关系是线弹性的、非线性弹性的、塑性的等,则分别称为线弹性波、非线性弹性波、塑性波理论等。反之,如果考虑到材料本构关系的应变率相关性,相应的应力波理论则称为应变率相关理论。其中,根据本构关系是粘弹性的、粘弹塑性的、弹粘塑性的等,则分别称为粘弹性波、粘弹塑性波、弹粘塑性波理论等。

应力波理论的发展,首先是从应变率无关理论开始的。线弹性波理论是在19世纪20

年代由 Poisson, Остроградский, Stokes 等人以及随后由 Rayleigh 等人与弹性振动的研究相联系而发展起来的(Kolsky H, 1953)。

塑性波理论的建立几乎比线弹性波理论晚了整整 100 年。关键在于需要解决两个难题:一是由于塑性加载时的非线性应力应变关系,相应地需要发展非线性加载波理论;二是由于塑性变形的不可逆性,卸载与加载对分别遵循不同的应力应变关系,相应地需要发展卸载波理论。从这一角度出发,最早的塑性波的研究可追溯到 L. H. Donnell(1930)的工作。但塑性波理论的真正建立和发展,是直到第二次世界大战时由于军事技术的需要,由 T. von Kármán(1942)在美国, G. I. Taylor(1940)在英国和 X. A. Рахматулий(1945)在苏联分别独立发展的,直到战后才公开宣布。从理论发展的思路来说,他们所建立的一维杆塑性波理论,是沿着把较低应力下的线弹性波理论推广到较高应力下的塑性波理论这一途径发展的。

另外,在第二次世界大战期间,人们又沿着另一途径发展了塑性波理论,即把很高压力下的固体当作可压缩流体来处理而忽略其剪切强度,从而把流体动力学中有关冲击波的研究推广到高压固体,发展了固体冲击波理论(流体动力学近似),其典型代表是 Rice, McQueen 和 Walsh 等在 20 世纪 40 年代所做的大量工作。此后这一理论又推广到次高压或中等压力下以计及固体剪切强度的影响(郑哲敏,解伯民,1965;Lee E H, 1971; Chou P C, Hopkins A K, 1972),从而建立和发展了一维应变塑性波理论(流体弹塑性模型)。

至于与应变率相关的粘塑性波理论是 20 世纪 50 年代前后由 B. V. Соколовский(1948)及 L. E. Malvern(1951)等提出弹粘塑性波一维理论后才开始发展起来的。P. Perzyna(1963)把这一理论推广到了三维情况。

近 50 年来,应力波的研究和应用取得了迅速发展,广泛地应用于地震研究,工程爆破(开矿、修路、筑坝……),爆炸加工(成型、复合、焊接、硬化……),爆炸合成(人造金刚石、人造氮化硼……),超声波和声发射技术,机械设备的冲击强度,工程结构建筑的动态响应,武器效应(弹壳破片的形成、聚能破甲、穿甲、碎甲、核爆炸和化学爆炸的效应及其防护……),微陨石和雨雪冰沙等对飞行器的高速撞击,地球和月球表面的陨星坑的研究,动态高压下材料力学性能(包括固体状态方程)、电磁性能和相变等的研究,材料在高应变率下的力学性能和本构关系的研究,动态断裂的研究,以及高能量密度粒子束如电子束、X 射线、激光等对材料的作用的研究等。

本书从第二章开始将首先讨论一维杆中应力波的初等理论。在建立基本关系式以后,将由浅入深地依次对弹性波(第三章)、弹塑性加载波和卸载波(第四章)、刚性卸载(第五章)、粘弹性波和弹粘塑性波(第六章)等逐一加以讨论。内容的取舍不追求包罗万象而取决于系统叙述的需要,并且不停留于原文献的转述或简单综合,而是按照统一的逻辑系统和处理方法进行的。书中主要采用 Lagrange 描述法,但对 Euler 描述法也作了介绍。我们希望通过这样的叙述使读者对应力波理论有一个初步而又比较系统的了解。

对于初次接触应力波理论的读者来说,前五章是基础性的。虽然其内容限于简单的一维运动,但由于数学处理上较简单,所以更便于初学者掌握和理解应力波的概念和解题方法。应力波理论主要关心的是介质不断随坐标和时间变化着的非均匀、非定常运动,着重于动载荷对介质的局部效应和早期效应的分析。应力波分析中要注意载荷与介质之间的耦合作用,要注意应力波和材料动力学性能之间相互依赖的密切关系。这些正是固