

材料对强冲击载荷的 动态响应

周培基 A. K. 霍普肯斯 主编

科学出版社

材料对强冲击载荷的 动态响应

周培基 A. K. 霍普肯斯 主编

张宝轩 赵衡阳 李永池 译

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书较系统地阐述了爆炸力学的基本知识。主要内容为：守恒方程；冲击波理论及其与高压下固体状态方程的相互关系；非线性本构方程和相应的波传播理论；特征线方法；有限差分法；各种瞬态实验技术及爆炸力学方法的某些实际应用。

Pei Chi Chou Alan K. Hopkins

DYNAMIC RESPONSE OF MATERIALS TO INTENSE IMPULSIVE LOADING

1972, Printed in the United States of America

材料对强冲击载荷的动态响应

周培基 A. K. 霍普肯斯 主编

张庭铨 赵衡阳 李永池 译

王礼立 校

责任编辑 李成香

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985 年 9 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1985 年 9 月第一次印刷 印张：16 7/8

印数：0001—2,700 字数：384,000

统一书号：13031·3197

本社书号：4401·13-2

定 价：3.95 元

译 者 的 话

随着我国工农业生产、国防建设和科学技术的发展,在爆炸和冲击等高能量密度条件下的短时动力学的研究已日益显得重要和迫切。在诸如地震、工程爆破、高速加工成型、工程结构的抗冲击或抗爆强度、弹体对装甲的侵彻、贯穿和层裂效应、弹体对地和水面的冲击、核爆炸及其防护、微陨石及雨雪冰沙等对飞行器的撞击、以及星球表面陨石坑的形成等方面的研究中,都会遇到这类问题。但这类问题的解决,除了各有其工程技术上的特殊性的一面外,就其共性而言,则都离不开以下一些基本内容:材料在高压和高应变率甚至高温条件下本构方程的理论模型和实验研究,连续介质动力学基本方程组的建立和应用;波传播中的特征理论和奇异面理论(包括冲击波理论);以及各种短时动力学实验技术。这些内容也正是我国爆炸力学界及有关的工程技术、科研、教育部门的广大科技人员所共同关心的。因此,能有一本较全面地阐述这些基本内容的书,对我国爆炸力学界具有不同特长和不同基础知识的各类人员都会是有益的。我们翻译这本书的目的,正是希望在这些方面起点促进作用,同时也便于了解在这一领域的进展情况和发展趋势。

本书由P. C. Chou (周培基)和 A. K. Hopkins 负责组织编辑。各章由不同的作者分别写出,有相对的独立性;但又互相呼应,互有补充,保证了全书作为一个整体的系统性和连贯性。第一章为引言,概述本书意图和内容。第二章讲连续介质动力学中积分和微分形式的守恒方程组,第三、四章介绍

冲击波理论及其与高压下固体状态方程间的相互关系,第五章在现代连续介质力学理论的基础上,从有限变形角度讨论材料的非线性本构方程和相应的波传播特性,第六章讲特征线方法,第七章讲有限差分数值方法,第八章讲各种瞬态实验技术,第九章介绍爆炸力学方法的某些实际应用。本书实际上既提供了足够多的爆炸力学的基本知识,又介绍了有关爆炸力学领域的最新进展。

书的第一、二、四、六、九章及附录部分由北京工业学院张宝钲翻译,第三、八章由赵衡阳翻译,第五章和第七章由中国科技大学李永池翻译,全书由中国科技大学近代力学系副教授王礼立校订。对某些已发现的印刷错误和不妥之处译校者已作了校订或注解,但译文不当之处定所难免,欢迎读者批评指正。

译校工作得到了中国科技大学朱兆祥教授的支持和指导,他曾选用本书部分章节作为他给研究生讲授“非线性本构理论”的参考教材,并为本书的译校提供了宝贵的意见,特此致谢。

译者

1984年3月

前 言

出版这本书的意图是向学术界介绍一个与美国空军的需要有关的研究领域。与“学科定向”(discipline-oriented)的六十年代相反,七十年代的工艺技术正在成为“问题定向”(problem-oriented),这时一种跨几个学科的统一方法在现代的解题努力中是必不可少的。我期待有其他的书今后随之陆续出版。

除了要对编者和各位撰稿者表示感谢之外,我要特别感谢 Stephen W. Tsai,他作为我的实验室的首席科学家首先提出了这种想法,同时,我还要对责任设计工程师 Ronald F. Prater 少校表示谢意。

Alan M. 洛夫拉斯

1972 年 8 月

目 录

译者的话

前言

第一章	绪言	1
第二章	守恒方程	7
2.1	引言	7
2.2	运动学预备知识	11
2.3	可变形体中的一般应力体系	14
2.4	守恒方程的积分形式	16
2.5	运动方程和本构关系	23
2.6	冲击波	39
第三章	间断应力波	51
3.1	控制体积法	52
3.2	在弹性介质中的间断	56
3.3	形成双波的条件	57
3.4	弹-塑性材料	61
3.5	单向应变问题	62
3.6	单向应力问题	66
3.7	弹-塑性-流体动力学材料	67
3.8	复合材料中的波阵面	74
3.9	靠近波阵面处的界面剪应力	78
第四章	冲击波和状态方程	83
4.1	完全的状态方程	84
4.2	单向应变及静水压缩	88
4.3	冲击波跃迁过程中的不可逆效应	95
4.4	影响状态方程的因素	104

4.5	由状态方程计算 Hugoniot 线	112
4.6	Hugoniot 数据的处理	115
第五章	非线性本构方程	119
5.1	引言	120
5.2	本构方程的表示法	123
5.3	波传播	133
5.4	弹性材料	143
5.5	热弹性材料	163
5.6	粘热弹性材料	180
5.7	粘弹性材料	192
附录一	记号	227
附录二	标架无关性和材料对称性	230
附录三	守恒定律	239
附录四	运动方程的线性化	246
附录五	不可逆性方程的化简	250
附录六	平衡态热力学关系	254
附录七	平衡态 Hugoniot 线的性质	267
第六章	特征线方法	283
6.1	引言	284
6.2	一维不定常问题	286
6.3	含三个自变量的问题	335
第七章	有限差分方法	359
7.1	引言	359
7.2	有限差分法理论	365
7.3	用于流体中的冲击波的方法	372
7.4	用于固体力学的方法	377
7.5	二维 Lagrange 方法	381
7.6	二维 Euler 方法	386
7.7	一般的二维方法	391
第八章	实验技术和设备	400

8.1	引言	401
8.2	实验设计和分析中用到的一些理论结果	403
8.3	实验室产生应力波的方法	417
8.4	测量技术	429
第九章	应用	471
9.1	引言	471
9.2	科学方面的应用	475
9.3	在工程和商业方面的应用	485
9.4	在军械方面的应用	490
附录	超速碰撞	508

第一章 绪 言

周 培 基

这本书论述材料对强冲击载荷的动态响应问题。所考虑的材料主要是固体,不过本书的大部分讨论对流体也适用。加载和响应一般是在很短(微秒量级而不是毫秒量级)的时间内发生的。加载的持续时间,不论是机械撞击还是热力学能量输入,有时可用毫微秒来描绘。加载幅度是这样的,材料中的初始应力很高,随后便衰减到中等数值,以致可压缩性和强度效应二者都是重要的。

我们将只讨论材料的响应问题,而不讨论结构的响应。这两种响应的区别并不很明确,特别是牵涉到复合材料时更是如此。一般说来,材料的响应问题主要涉及“跨过厚度”(across the thick)的波的运动,而把像板,壳,以及梁之类的结构问题排除在外。

关于杆中的单向应力波问题,除了在第三章中简要提到一些之外,在本书中将不进行讨论。杆和棒中的波传播实验比较容易进行,但是由于几何形状上的原因,达不到高压力和高应力。此外,杆中的单向应力状态只有在忽略侧向运动时才是近似正确的。这就把杆的问题限于长波长或低应变率问题。假如分析中考虑杆的侧向运动,那么,对于研究本构关系,计算就太复杂了。因此,本书的重点放在围绕平面冲击波的单向应变问题上。本书也讨论二维及三维运动的控制方程、本构方程和数值方法。

材料响应问题大致可分为流体动力学的、有限塑性的及线弹性的三个范围。当压力很高, 如比材料的屈服应力高好多倍时, 就可忽略强度效应, 而把介质作为非粘性可压缩流体处理。这时, 控制方程组为非线性的, 并且可以用把三个状态变量联系起来的一个状态方程来描述本构关系。由于用压力代替应力张量而使问题得以简化。把高压下的固体当作可压缩流体来处理的方法被称为“流体动力学”方法 (这一点有时使工程师们感到迷惑不解, 因为流体动力学这个词通常意味着不可压缩流体)。自二次世界大战以来, 用这一方法已对固体中的稳态冲击波, 相变及状态方程等理论进行了广泛的研究^[1.1, 1.2]。

当材料中的应力状态低于屈服应力时, 线性虎克定律是适用的, 而且所有的控制方程都是线性的。鉴于方程的线性性质, 问题便可用各种数学解法来处理。关于弹性波传播问题的论述可参阅 Miklowitz 的书^[1.3]。关于包含边缘的弹性波的现代评述也是由 Miklowitz 编写的^[1.4]。Scott 对各向异性介质中的弹性波问题做了广泛的工作^[1.5]。近来, 正如 Peck 所讲的那样, 目前已集中注意到复合材料中的弹性波问题^[1.6]。

在中等应力范围内, 所有方程都是非线性的, 并且必须考虑有限应变张量, 故问题非常复杂。在这类可称之为有限应变塑性的问题中, 一种方法是把线弹性 Hook 定律加以推广, 使之包含塑性及可压缩性效应。遵循这类固体力学方法的著述和书籍是由 Hopkins^[1.7] 以及 Cristescu^[1.8] 提供的。其他近期的论述可在 Huffington^[1.9] 及 Lindholm^[1.10] 编辑的书中找到。另一种方法是从 (可压缩流体的) 流体动力学模型着手, 同时考虑材料强度效应的方法。Murri 等人在他们的报告^[1.11] 当中对固体中冲击波这一综合论题做了评述。在 Burke 和 Weiss 所编辑的文集^[1.12] 中, 介绍了关于金属、复合材料、多孔

材料、岩石以及陶磁中冲击波问题的最近进展情况。

材料响应的这三个范围扼要地列于表 1.1 中。

表 1.1 材料响应的三个范围

类 别	压力和应力	本构方程组	控制方程组
流体动力学	高	状态方程	非线性
有限应变塑性	高于屈服限	复杂(速率效应,记忆等)	非线性
线弹性	低于屈服限	虎克定律	线性

这本书是面向广大的普通读者的。我们力图充分提供一些基本的论题,以便使这本书能成为一本高等教科书,同时,还包含到现在为止的有关资料,以便能对目前在这一领域工作的人员有所裨益。

在第二章里,介绍了基本守恒定律的场控制方程以及冲击波方程,所有这些均来自于经典的流体力学观点。书中其他章节的许多方程都和这一章导出的公式有关。在第三章中,用控制体积法研究了稳态间断应力波的传播问题。把弹性波阵面及塑性波阵面与可压缩流体中的冲击波联系起来。把无限小应力-应变关系与状态方程的球形分量相组合显然是不甚严格的,然而,直到目前为止它在大多数计算机编码中被采用了。我们打算在这一章中阐明该方法中的某些关系。

第四章从热力学和物理学观点对冲击波进行了研讨。对于从冲击波数据建立状态方程的过程做了细致的讨论。值得指出的是,间断应力波及冲击波几乎在本书的每一章中都受到重视。在应力场为连续的区域中,控制方程通常只能用数值方法求解。对于间断应力波,其传播速度可作为本构关系的函数直接地导出来。有关间断波传播的知识将可以帮助我们理解完整的材料响应过程。

第五章从现代连续介质力学观点出发对固体的本构关系

和波的传播问题做了全面的论述。利用 Lagrange 坐标描述法表述了有限变形。以更为严格的方式表述了非线性本构关系。既然对经典的固体力学和流体动力学理论进行修正的方法对于中等应力范围不甚令人满意,那么,本章中提出的方法对今后材料响应问题的研究将证明是很有价值的。

第六章打算当作材料非稳态响应问题中特征线方法的基本教材。其基本原理首先用两个一阶偏微分方程表示,随后,将其推广到含有 n 个变量的 n 个方程。通过特征线和特征面的应用,引进了依赖域和间断传播的概念。而这些概念在理解波的传播问题时是至关重要的。在这一章中还介绍了沿特征线进行积分的数值方法以及现有的计算机编码。

第七章对数值分析,包括收敛性和稳定性的基本概念做了介绍。而后又阐述了用于流体和固体中的有限差分方法。其次,对于二维 Lagrange 和 Euler 方法,包括在 HEMP, TOODY 以及 PIC 编码中所用的方法做了说明。由于大多数动态响应问题需要用数字计算机进行数值解,因而计算机编码程序,诸如本章所述的那些编码,便成了分析工作者们决定性的工具。

我们所了解的动态材料性质方面取得的最新进展,是和诸如激光干涉仪、电磁传感器等新的仪器设备及实验技术的发展分不开的。第八章对于目前主要用于测定状态方程和本构方程的实验室实验技术做了描述。这些实验技术包括标准炸药,轻气炮,爆炸箔以及近代辐射技术等。本章还简要地介绍了各种测量方法,同时还引述了最近的参考资料。

冲击波及材料的高压动态响应问题在科学技术、工程以及军事上的应用是很广的。第九章对其中某些应用问题进行了详细的讨论。同时还提出了其他方面的应用,并且援引了有关资料。在科学方面的几种应用包括炸药,固体物理学,高

压下材料的性质,以及地球物理学中的新发展,诸如“冲击变性”和月球表面结构受流星碰击的研究等。所提及的工程和工业方面的应用包括有爆炸焊接与复合,冲击合成金刚石,以及岩石破碎等。虽然现在的有关冲击波和材料响应问题方面的大量知识是在军事应用推动下取得的,但是我们在这里只能做简略的讨论,而没有提供壳体破碎、粒子加速、爆炸效应以及核武器设计等的具体情况。对于穿甲作用,尤其是 Wilkins 最近所做的工作,我们做了较为详细的介绍。关于核效应的某些应用问题还可在 Wan^[1,13] 的著作中找到。

在最初计划写这部书时,作者没有打算写超高速碰撞问题;那时 Kinslow 的“高速碰撞现象”一书^[1,14]即将出版。在 1971 年期间,当手稿几乎全部完成时,才感到近几年来又出现了相当多的新成果,有理由把这方面的内容编进这本书中。因此,Swift 关于这一问题的概述也就作为本书的一部分。

参 考 文 献

- [1.1] Zel'dovich, Ya. B. and Raizer, Yu. P., *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*, edited by W. D. Hayes and R. F. Probstein, Academic Press, New York, 1967.
- [1.2] Zharkov, V. N. and Kalinin, V. A., *Equations of State For Solids at High Pressures and Temperatures*, Consultants Bureau, New York — London, 1971.
- [1.3] Miklowitz, J., “Elastic Wave Propagation”, *Applied Mechanics Surveys*, Spartan Books, Washington, D. C., 1966.
- [1.4] Miklowitz, J., “Analysis of Elastic Waveguides Involving an Edge”, in *Wave Propagation in Solids*, edited by J. Miklowitz, ASME, New York, 1969.
- [1.5] Scott, R. A., “Transient Anisotropic Waves in Bonded Elastic Media”, in *Wave Propagation in Solids*, edited by J. Miklowitz, ASME, New York, 1969.
- [1.6] Peck, J. C., “Pulse Attenuation in Composites”, in *Shock Waves and the Mechanical Properties of Solids*, edited by J. J. Burke and V. Weiss, Syracuse University Press, Syracuse, New York, 1971.

- [1.7] Hopkins, H. G., "Dynamic Nonelastic Deformation of Metals", in *Applied Mechanics Surveys*, 847, Spartan Books, Washington, D. C., 1966.
- [1.8] Cristescu, N., *Dynamic Plasticity*, Interscience Publishers, New York, 1967.
- [1.9] Huffington, Jr., N. J., editor, "*Behavior of Materials Under Dynamic Loading*", ASME, New York, 1965.
- [1.10] Lindholm, L. S., "*Mechanical Behavior of Materials Under Dynamic Loads*", Springer-Verlag, New York, 1968.
- [1.11] Murri, W. J., Curran, D. R., Petersen, C. F., and Crewdson, R. C., "Response of Solids to Shock Waves", Poulter Laboratory Technical Report 001-71, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, May 1, 1971.
- [1.12] Burke, J. J. and Weiss, V., Editors, *Shock Waves and the Mechanical Properties of Solids*, Syracuse University Press, Syracuse, New York, 1971.
- [1.13] Wan, C. C., "*Applied Mechanics Aspects of Nuclear Effects in Materials*", ASME, New York, 1971.
- [1.14] Kinslow, R. *High-Velocity Impact Phenomena*, Academic Press, New York, 1970.

第二章 守恒方程

F. K. Tsou

符 号 表

英文字母

a 加速度

B_i 体积力

E 比内能

e_{ij} 应变率张量

ϕ 广延量

f 内涵量

f_i 单位质量体积力

H 比焓

M 质量

p 压力

p_a (2.80) 式中定义的动压力

Q 传给系统的热量

希腊字母

Δ (2.78) 式中给出定义

λ (2.79) 式中给出定义

μ 粘性

μ' (2.81) 式中给出定义

ρ 密度

q_i 热流矢量

S_i 表面力

t 时间

ℓ 应力矢量

T 温度

U 波的传播速度

u_0 质点速度

v 速度

w 系统所做的功

X Lagrange 坐标

x Euler 坐标

x_i 第 i 组分的质量分数

σ 基体对纤维的体积比

σ_{ij} 应力张量

τ 剪应力

τ_{ij} (2.16) 式中给出定义

ϕ (2.103) 式中给出定义

2.1 引言

在这一章里我们将介绍在质量、动量和能量守恒的基础

上建立起来的控制方程。这些控制方程既可用于固体，又可用于流体。为了强调可压缩性效应，在这里采用了流体动力学中所应用的方法。

近几年来，已经采用了利用强冲击波获得高压力和高度压缩的动力学方法。数量级为几十兆巴的压力是通过实验在固体中传播的冲击波阵面后面测得的，相应地，固体被压缩 $1/2$ 或更多。这就表明，从固体力学观点出发研究材料响应问题的经典方法是不够的，因为在这种方法中，考虑的是低应变率、长持续时间但忽略了可压缩性效应的问题。

鉴于强冲击波所引起的高度压缩，因此通常可以忽略材料的强度，此时，材料的性态类似于可压缩的粘性流体。实际上，可压缩粘性流体的概念对于冲击波压力大大低于几十兆巴时的情况也是适用的。因此，流体力学的基本知识对于帮助理解这类问题是需要。为此目的，我们将引入真实流体的概念，阐述研究流体运动的 Lagrange 和 Euler 方法，根据守恒定律推导控制积分方程和微分方程，研讨本构关系，并且最后把这些控制方程用到包含冲击波的问题中去。而重点将放在冲击波在复合材料中传播的问题上。

2.1a 粘性

分析流体动力学问题时，我们通常或是以理想流体或是以真实流体为基点。前者指不可压缩的、无粘性的流体，而后者则是指可压缩的粘性流体。关于理想流体的流动问题在上世纪后半叶就已进行了广泛的研究。随之发展起来的数学理论对于潮汐波动，机翼上升等问题给出了令人满意的结果。对于其他有实际意义的问题，如管子里的压力损失，表面摩擦，固体表面上无滑动的条件以及冲击波与附面层的相互作用等等，有必要研究真实流体的流动问题。