



爆炸与冲击动力学

Explosion and Shock Dynamics

宁建国 王成 马天宝 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

爆炸与冲击动力学

Explosion and Shock Dynamics

宁建国 王成 马天宝 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

爆炸与冲击动力学 / 宁建国, 王成, 马天宝编著.
—北京: 国防工业出版社, 2010. 9
ISBN 978-7-118-07043-9

I. ①爆... II. ①宁... ②王... ③马... III. ①爆炸力学②冲击动力学 IV. ①038②0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 168808 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 100048)
北京奥鑫印刷厂印刷
'新华书店经售'

开本 787 × 1092 1/16 印张 29 字数 658 千字
2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422
发行传真: (010) 68411535

发行邮购: (010) 68414474
发行业务: (010) 68472764

此书同时获得

总装备部国防科技图书出版基金资助

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镛 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 (以下按姓氏笔画排序)

于景元 才鸿年 马伟明 王小谟 甘茂治

甘晓华 卢秉恒 邬江兴 刘世参 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力

吴有生 吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰

韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

爆炸与冲击动力学是研究在强动载荷作用下产生极端高温—高压状态时发生的各种物理、力学和化学现象及其变化规律的学科。近些年来,由于军事及民用安全领域的需求牵引和学科的飞速发展,该学科的研究及其成果的应用已经成为常规兵器和尖端武器研制的重要理论基础,推动了穿甲、破甲、安全防护、工程爆破和爆炸加工等技术的发展。爆炸与冲击动力学在国防科技和国民经济中起着非常重要的作用。

本书涉及的内容是当前国内外爆炸与冲击动力学基础研究领域重点关注的问题。这些研究内容与力学、物理学及材料科学等研究密切相关,是作者长期在北京理工大学从事爆炸与冲击动力学理论、实验与数值计算以及在教学工作的基础上整理完成的,突出反映了近十多年来在爆炸与冲击动力学基础研究的一些领域取得的进展,特别是在材料动态力学性能、结构的冲击响应及爆炸力学数值计算等方面。

近些年来,各国科学家相继出版了一些有关爆炸与冲击动力学的专著。与这些专著相比,本书的特色在于以连续介质力学理论为基础,将张量分析这一工具贯穿始终,构建相关理论模型和公式。书中内容既有基础理论也有重要的实际应用结果,突出强调了解析理论、数值模拟与实验研究的结合。特别需要指出的是,爆炸与冲击问题的数值模拟理论和技术是连接学科发展和实际问题之间的桥梁。

本书共9章。第1章简要介绍爆炸与冲击的研究对象和基本特征。第2章着重介绍连续介质力学的基本理论,作为后续章节的理论基础。第3章从气体动力学的角度出发,对一维非定常连续流动和冲击波理论进行详细的介绍。第4章介绍爆炸动力学问题,包括炸药爆轰的基本理论、爆轰波参数计算及实验测量和不同介质中炸药的爆炸过程。第5章介绍固体中的应力波,包括对弹性波、塑性波、激波和卸载波等的分析讨论。第6章着重介绍简单结构的动力响应和冲击屈服问题,对于结构的动力响应问题,限于小变形条件,不考虑应力波在物体内的传播。第7章着重介绍弹体对流体和岩土介质的侵彻问题以及弹体撞击靶板时的贯穿问题。第8章详细介绍爆炸与冲击问题的数值模拟方法,具体包括 Euler 法、Lagrange 法和 SPH 方法等,包含了本书作者多年来在计算爆炸力学领域的一些原创性研究成果。第9章结合作者在材料动态力学性能方面的研究成果,对常用的动态加载实验和技术进行详细介绍,加载方式包括 Hopkinson 杆、轻气炮和平面波加载,研究材料包括混凝土/钢筋混凝土、陶瓷、钨合金和泡沫铝等。

本书内容论述完整,物理概念清楚,数学方法严谨,可作为爆炸力学、弹药工程、安全工程等专业的科研人员和工程技术人员的理论参考书,还可作为相关专业本科生和研究生的教科书。

本书编写过程中得到了太原理工大学杨桂通教授的热情帮助和大力支持,在此表示衷心的感谢。课题组的卢静涵博士、刘海峰博士和张柱博士在本书部分章节内容整理、图表编辑和文字校对等方面进行了大量工作,在此一并表示感谢。

此外,感谢国家出版基金和国防科技图书出版基金给予本书的资助。

宁建国
2010年6月

目 录

统一符号列表	1
第1章 绪论	2
1.1 研究对象和目的	2
1.2 炸药与爆炸的主要特征	2
1.3 爆炸与冲击效应	3
1.4 爆炸与冲击的传播	6
参考文献	7
第2章 连续介质力学理论基础	8
2.1 连续介质运动学	8
2.1.1 连续介质运动的描述	8
2.1.2 物质坐标法	9
2.1.3 空间坐标法	11
2.2 连续介质的变形	13
2.2.1 变形与变形梯度	13
2.2.2 变形梯度的极分解	14
2.2.3 应变与应变率	16
2.2.4 小变形	18
2.3 连续介质动力学	19
2.3.1 应力张量	19
2.3.2 动力学定理	21
2.3.3 热力学定律	22
2.4 本构方程	25
2.4.1 建立本构方程的一般原则	25
2.4.2 理想流体与 Reiner-Rivlin 流体	26
2.4.3 理想弹性与弹塑性体	30
2.4.4 过应力模型理论 Perzyna 方程	32
2.4.5 拟线性本构方程	35
2.4.6 热弹性体 - Duhamel-Neumann 法则	37
2.4.7 动态高压、较高压下的本构关系和应力变化率	38
2.5 常用基本方程小结	43
参考文献	45

第3章 气体动力学与冲击波	47
3.1 气体动力学基本方程及基本概念	47
3.1.1 气体的物理性质	47
3.1.2 热力学基础	48
3.1.3 基本方程	51
3.1.4 声速及马赫数	53
3.2 一维非定常连续流动	54
3.2.1 波的形成及分类	55
3.2.2 小扰动微幅波的运动	56
3.2.3 微幅波的反射与相交	58
3.2.4 有限振幅简单波	61
3.2.5 特征线法	63
3.3 冲击波	66
3.3.1 正冲击波的基本关系式	66
3.3.2 多方气体冲击波关系式	68
3.3.3 凝聚介质的冲击波关系式	70
3.3.4 冲击波的 Hugoniot 曲线	72
3.3.5 冲击波的基本性质	75
参考文献	77
第4章 爆炸动力学问题	79
4.1 炸药爆轰的基本理论	79
4.1.1 爆轰波的 CJ 理论	79
4.1.2 多方气体中的爆轰	83
4.1.3 爆轰波的 ZND 模型	87
4.2 爆轰波参数计算及实验测量	90
4.2.1 爆轰产物的状态方程	90
4.2.2 炸药爆轰参数的理论计算	93
4.2.3 炸药爆轰参数的实验测量	98
4.2.4 爆轰波形的控制	107
4.3 不同介质中炸药的爆炸过程	110
4.3.1 空中爆炸	110
4.3.2 水中爆炸	128
4.3.3 岩土介质中的爆炸	145
参考文献	160
第5章 固体中的应力波	161
5.1 弹性波	161
5.1.1 一维弹性波	161
5.1.2 弥散波	164
5.1.3 非线性弹性波	166

5.1.4	波的反射	169
5.1.5	一维平面波	170
5.1.6	无限介质中的弹性波 体波	171
5.1.7	半无限介质表面的波 面波	172
5.2	弹塑性加载波	176
5.3	弹黏塑性波	180
5.4	激波	188
5.5	激波阵面上的守恒条件 Hugoniot 能量方程	191
5.6	卸载波	195
5.6.1	一般概念	195
5.6.2	卸载波确定	197
5.6.3	弹塑性波的内碰撞	201
	参考文献	207
第6章	冲击动力学问题	208
6.1	概述 固体材料动力学特性	208
6.1.1	固体材料的动力特性	209
6.1.2	在高应变率下塑性变形的微观机制	210
6.2	能量原理与弹塑性动力学基本关系式	211
6.2.1	间断面的传播 动力和运动连续条件	212
6.2.2	Hamilton 原理	217
6.2.3	虚速度原理与位移限界定理	217
6.2.4	刚塑性体动力学广义变分原理	220
6.2.5	解的唯一性定理	222
6.3	简单结构的动力响应	224
6.3.1	弹塑性梁的基本方程 不同的运动阶段	224
6.3.2	简支弹塑性梁的动力响应	228
6.3.3	简单刚塑性梁的动力响应	234
6.3.4	弹塑性薄板的动力响应概述	242
6.3.5	刚塑性圆板的动力分析	250
6.3.6	塑性薄壳动力学基本关系式 壳体的屈服条件	259
6.3.7	圆柱壳体的简化屈服条件	260
6.3.8	圆柱壳在冲击压力作用下的塑性动力响应	266
6.3.9	球壳的塑性动力响应	275
6.3.10	冲击作用下球顶壳的动力学分析	281
6.4	冲击屈曲	290
6.4.1	冲击屈曲与振动屈曲	291
6.4.2	Liapunov 稳定性理论	292
6.4.3	Koiter 初始后屈曲理论	295
6.4.4	Budiansky-Hutchinson 动力屈曲理论	298

6.4.5 塑性动力屈曲分析模型	300
参考文献	304
第7章 侵彻与穿甲力学问题	306
7.1 一般概念	306
7.2 尖头楔体对流体的侵彻	307
7.2.1 流体的自模拟运动	307
7.2.2 楔体对流体的侵彻	309
7.2.3 锥体对流体的侵彻	312
7.3 弹体对土介质的侵彻	315
7.3.1 尖头弹对土体的侵彻分析	315
7.3.2 尖顶锥头与尖顶拱头弹体对两相介质的侵彻	322
7.3.3 弹体对线性变形介质的侵彻问题	327
7.4 穿甲力学问题	328
7.4.1 穿甲力学问题的特征	328
7.4.2 刚塑性平头长杆弹撞击刚性靶的泰勒理论	330
7.4.3 Hayward 能量法	332
7.4.4 杆状弹高速撞击靶板的扩孔型贯穿分析	334
7.4.5 尖头弹撞击靶板花瓣式贯穿分析	338
7.4.6 超高速侵彻	340
参考文献	344
第8章 爆炸与冲击问题的数值模拟	345
8.1 爆炸与冲击问题的数值模拟方法概述	345
8.2 Euler 型的计算方法	347
8.2.1 基本假定	348
8.2.2 控制方程组	349
8.2.3 计算域的离散(网格与变量配置)	353
8.2.4 偏微分方程组的差分离散(数值方法)	354
8.2.5 典型算例介绍	364
8.3 Lagrange 型的计算方法	371
8.3.1 控制方程组	371
8.3.2 空间有限元离散化	373
8.3.3 高斯积分与沙漏问题	375
8.3.4 时间积分和时间步长控制	378
8.3.5 应力计算	378
8.3.6 冲击波与人工体积黏性	379
8.3.7 滑移、接触算法	380
8.3.8 典型算例	382
8.4 SPH 方法	382
8.4.1 无网格法发展概况	382

8.4.2	SPH 光滑粒子流体动力学法	384
	参考文献	396
第9章	动加载实验与技术	397
9.1	理论和实验的关系	397
9.2	实验在爆炸与冲击问题研究中的重要性	397
9.3	Hopkinson 实验技术	398
9.3.1	SHPB 实验技术	398
9.3.2	冲击拉伸 Hopkinson 实验装置(SHTB)	401
9.3.3	冲击扭转的 Hopkinson 实验装置	404
9.3.4	Hopkinson 实验技术研究现状及存在问题	404
9.4	高压下材料行为的实验研究	407
9.4.1	平面波加载	407
9.4.2	气体炮	408
9.5	激光驱动加载实验测试技术	418
9.5.1	激光干涉测速技术的发展	420
9.5.2	LDA,LDV 及其与 VISAR 的区别	421
9.5.3	VISAR——可测量任意反射表面的速度干涉仪	422
9.6	实验研究	427
9.6.1	混凝土、钢筋混凝土材料冲击试验	427
9.6.2	陶瓷材料的冲击实验	433
9.6.3	钨合金材料的冲击实验	434
9.6.4	泡沫铝材料	439
	参考文献	440

Contents

Symbol Table	1
Chapter 1 Introduction	2
1.1 The Research Object and Purpose	2
1.2 The Main Feature of Explosive and Explosion	2
1.3 The Explosion and Shock Effect	3
1.4 The Explosion and Shock Propagation	6
References	7
Chapter 2 The Theoretical Basis of Continuum Mechanics	8
2.1 Continuum Kinematics	8
2.1.1 The Description of the Motion of Continuum	8
2.1.2 The Material Coordinate Method	9
2.1.3 The Space Coordinate Method	11
2.2 The Deformation of Continuum	13
2.2.1 Deformation and Deformation Gradient	13
2.2.2 The Polar Decomposition of Deformation Gradient	14
2.2.3 Strain and Strain Rate	16
2.2.4 Small Deformation	18
2.3 Continuum Dynamics	19
2.3.1 Stress Tensor	19
2.3.2 Dynamic Theorem	21
2.3.3 The Laws of Thermodynamics	22
2.4 Constitutive Equation	25
2.4.1 The General Principle of Establishing Constitutive Equation	25
2.4.2 Ideal fluid and Reiner-Rivlin Fluid	26
2.4.3 Ideal Elastic Body and Elastic-plastic Body	30
2.4.4 The Theory of Overstress Model Perzyna's Equation	32
2.4.5 Quasilinear Constitutive Equation	35
2.4.6 Thermoelastic Medium Duhamel-Neumann Rule	37
2.4.7 Constitutive Equation and Stress Rate under Dynamic High Pressures	38
2.5 The Summary of Basic Common Equations	43
References	45
Chapter 3 Gas Dynamics and Shock Wave	47

3.1	The Basic Equations and Basic Concepts of Gas Dynamics	47
3.1.1	The Physical Properties of Gas	47
3.1.2	The Thermodynamic Basis	48
3.1.3	The Basic Equations	51
3.1.4	Sound Velocity and Mach Number	53
3.2	One-dimensional Unsteady Continuous Flow	54
3.2.1	The Formation and Classification of Wave	55
3.2.2	The Motion of Micro-amplitude Wave	56
3.2.3	The Reflection and Intersection of Micro-amplitude Wave	58
3.2.4	The Finite Amplitude Simple Wave	61
3.2.5	The Characteristic Method	63
3.3	The Shock Wave	66
3.3.1	The Basic Relationships of Positive Shock Wave	66
3.3.2	The Relationships of Shock Wave in Multi-gas	68
3.3.3	The Relationships of Shock Wave in Condensed Medium	70
3.3.4	The Hugoniot Curve of Shock Wave	72
3.3.5	The Basic Properties of Shock Wave	75
	References	77
Chapter 4	Explosion Dynamics	79
4.1	The Basic Theory of Detonation	79
4.1.1	The CJ theory of Detonation	79
4.1.2	The Detonation in Multi-gas	83
4.1.3	The ZND Model of Detonation	87
4.2	The Calculation and Experimental Measurement of Detonation Parameters	90
4.2.1	Equation of State of Detonation Products	90
4.2.2	The Theoretical Calculation of Detonation Parameters	93
4.2.3	The Experimental Measurement of Detonation Parameters	98
4.2.4	The Control of Detonation Waveform	107
4.3	The Explosion in Different Medium	110
4.3.1	The Explosion in Air	110
4.3.2	The Explosion in Water	128
4.3.3	The Explosion in Rock and Soil Medium	145
	References	160
Chapter 5	Stress Wave in Solid	161
5.1	Elastic Wave	161
5.1.1	One-dimensional Elastic Wave	161
5.1.2	The Dispersion wave	164
5.1.3	The Nonlinear Elastic Wave	166

5.1.4	The Reflection of Wave	169
5.1.5	One-dimensional Plane Wave	170
5.1.6	The Elastic Wave in Infinite Medium Body Wave	171
5.1.7	The Wave on Semi-infinite Medium Surface Surface Wave	172
5.2	Elastic-plastic Loading Wave	176
5.3	Elastic-viscoplastic Wave	180
5.4	Shock Wave	188
5.5	The Conservation Conditions on Shock Wave Front Hugonint' s Energy Equation	191
5.6	Unloading Wave	195
5.6.1	The General Concepts	195
5.6.2	Unloading Wave to Determine	197
5.6.3	The Interaction of Elastic-plastic Wave	201
	References	207
Chapter 6	Shock Dynamics	208
6.1	Summary The Dynamic Characteristics of Solid	208
6.1.1	The Dynamic Characteristics of Solid	209
6.1.2	The Plastic Deformation Micromechanism under High Strain Rate	210
6.2	The Energy Principle and the Basic Elastic-plastic Dynamic Relations	211
6.2.1	The Propagation of Discontinuity Surface	212
6.2.2	The Hamilton Principle	217
6.2.3	The Principle of Virtual Velocity and the Displacement Boundary Theorem	217
6.2.4	The Generalized Variational Principle of Rigid-plastic Dynamics	220
6.2.5	The Theorem of Uniqueness of Solution	222
6.3	The Dynamic Response of Simple Structure	224
6.3.1	The Basic Equations of Elastic-plastic Beam Different Stages of Motion	224
6.3.2	The Dynamic Response of Simple Elastic-plastic Beam	228
6.3.3	The Dynamic Response of Simple Rigid-plastic Beam	234
6.3.4	The Dynamic Response of Elastic-plastic Sheet	242
6.3.5	The Dynamic Analysis of Rigid-plastic Circular Plate	250
6.3.6	The Basic Dynamic Differential of Plastic Sheet The Yield Condition of Shell	259
6.3.7	The Simplified Yield Condition of Cylindrical Shell The Approximate Yield Condition of Shell	260
6.3.8	The Plastic Dynamic Response of Cylindrical Shell under Impact Pressure	266
6.3.9	The Plastic Dynamic Response of Spherical Shell	275

6.3.10	The Dynamic Analysis of Dome Shell under Impact Pressure	281
6.4	Shocking Yield	290
6.4.1	Shocking Yield and Vibration Yield	291
6.4.2	Liapunov's Stability Theory	292
6.4.3	Koiter's Initial Postbuckling Theory	295
6.4.4	Budiansky-Hutchinson's Dynamic Yield Theory	298
6.4.5	The Plastic Dynamic Yield Analysis Model	300
	References	304
Chapter 7	Penetration and Perforation Mechanics	306
7.1	The General Concepts	306
7.2	Tip Wedge Penetrating into Fluid	307
7.2.1	The Self-simulating Motion of Fluid	307
7.2.2	Wedge Penetrating into Fluid	309
7.2.3	Pyramidal Penetrating into Fluid	312
7.3	Missile Body Penetrating into Rock and Soil Medium	315
7.3.1	The Analysis of Tip Missile Penetrating into Soil	315
7.3.2	Tip Pyramidal and Arch Missile Penetrating into Saturated Sand	322
7.3.3	Missile Penetrating into Linear Deformable Medium	327
7.4	Perforation Mechanics	328
7.4.1	The Characteristics of Penetration Mechanics Problems	328
7.4.2	Taylor's Theory of Rigid-plastic Flat-head-long-rod Shaped Missile Impacting Rigid Target	330
7.4.3	Hawyard's Energy Method	332
7.4.4	The Analysis of rod-shaped missile high-velocity impacting target	334
7.4.5	The Analysis of tip missile impacting target	338
7.4.6	Hypervelocity Penetration	340
	References	344
Chapter 8	The Numerical Simulation of Explosion and Shock Problems	345
8.1	The Summary of Numerical Method of Explosion and Shock Problems	345
8.2	Eulerian Method	347
8.2.1	Basic Assumptions	348
8.2.2	Governing Equations	349
8.2.3	Discretization of Computational Domain (Grid and Variable Configuration)	353
8.2.4	Difference Discrete of Partial Differential Equations (Numerical Method)	354
8.2.5	Introduction of Typical Examples	364
8.3	Lagrange Method	371

8.3.1	Governing Equations	371
8.3.2	Discretization of Space Finite Element	373
8.3.3	Gauss Integral and Hourglass Problem	375
8.3.4	Time Integral and Time Step Control	378
8.3.5	Stress Calculation	378
8.3.6	Shock Wave and Artificial Bulk Viscosity	379
8.3.7	Slip and Contact algorithm	380
8.3.8	The Typical Examples	382
8.4	SPH Method	382
8.4.1	The Development Situation of Element-free Method	382
8.4.2	The SPH Smooth Particle Hydrodynamics Method	384
	References	396
Chapter 9	The Dynamic Loading Experiment and Technique	397
9.1	The Relationship between Theory and Experiment	397
9.2	The Importance of Experiment in Explosion and Shock Problems Research	397
9.3	The Hopkinson Experimental Technique	398
9.3.1	The SHPB Experimental Technique	398
9.3.2	The Tensile Impact Hopkinson Test Device	401
9.3.3	The Torsional Impact Hopkinson Test Device	404
9.3.4	The Research Status and Existing Problems of Hopkinson Experimental Technique	404
9.4	The Experimental Research of Material under High Pressure	407
9.4.1	The Plane Wave Loading	407
9.4.2	The Gas Gun	408
9.5	The Laser-driven Loading Experimental Testing Technique	418
9.5.1	The Development of Laser Interference Testing Technique	420
9.5.2	LDA, LDV and the Difference from VISAR	421
9.5.3	VISAR-Velocity Interferometer System of Any Reflector	422
9.6	The Experimental Research	427
9.6.1	The Impact Test of Concrete and Reinforced Concrete Material	427
9.6.2	The Impact Experiment of Ceramic Material	433
9.6.3	The Impact Experiment of Tungsten Alloy	434
9.6.4	The Aluminum Foam Material	439
	References	440