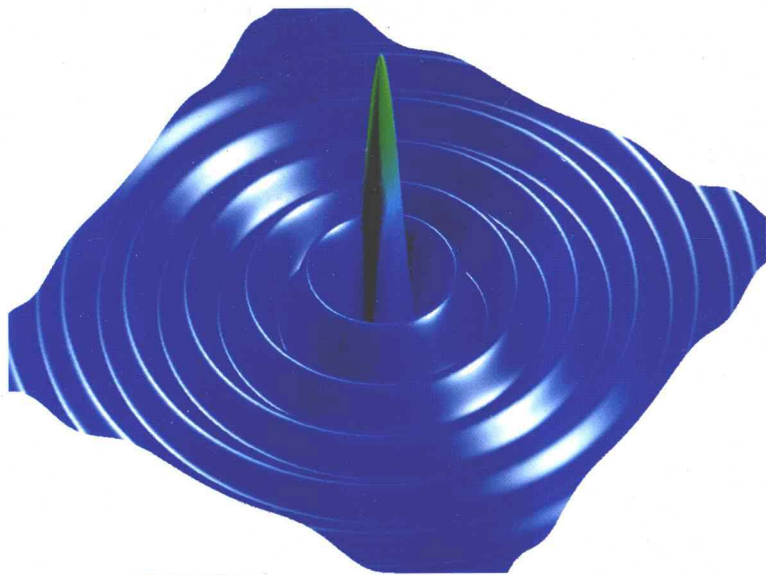
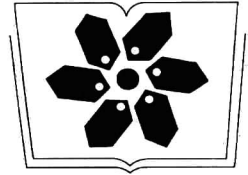


冲击相变

唐志平 编著



 科学出版社
www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

冲击相变

唐志平 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地总结了半个世纪以来冲击相变的研究方法、成果、现象和规律。全书 12 章, 主要分为以下几个组成部分: 冲击波和冲击实验基础、冲击相变基本理论、冲击相变实验研究成果、冲击相变本构和相变波传播、冲击相变对材料和结构破坏的影响。

本书可作为物理、力学、材料科学、地球科学等专业的高年级本科生和研究生教材, 也可作为动高压物理、爆炸与冲击领域的科研人员参考书, 对国防、民用工程和新材料开发等领域的工程技术人员有着重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

冲击相变/唐志平编著. —北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-021507-9

I. 冲… II. 唐… III. 冲击(力学)—相变 IV. O313.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 041694 号

责任编辑: 孙立新 刘凤娟 胡 凯 / 责任校对: 鲁 素

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 5 月第 一 次印刷 印张: 21 1/2

印数: 1—2 500 字数: 407 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(路通))

序 言

材料相变研究的历史悠久,但作为一门科学还是在热力学和冶金学研究兴起之后才逐步建立起来的,它与人类认识世界和改造世界的永不停息的求索精神是密切相关的。

“冲击相变”属于冲击波物理的一个重要研究方向。自 1956 年 Minshall 等用爆轰冲击压缩方法,发现铁在 13 GPa 压强下的 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 同质异构相变现象以来,由于冲击相变对高温高压极端条件下材料物性研究的科学意义及其在高新技术领域的应用背景,因而对它的研究受到了广泛的关注。材料相变也属于一种交叉学科研究,材料物理、冶金学和化学家,通常关注于偏离常温常压不大的区域(比如压强不高于 10 MPa,温度不高于 2000 K)内的材料物性研究,包括相变行为研究;高压物理学家更为关注的是对更高压强和温度区域(比如压强超过几百 GPa,温度接近 10000K)内的材料物性研究,因而得以发现在此极端条件下更新颖的材料物性,既拓宽了高新技术的视野,也深化了人类对高温高压极端条件下材料物性本质的认识,例如用于解决对类地行星内部结构、组分及其物性的研究。在高压物理学中(冲击波物理是其中的一个部分),由诺贝尔奖获得者 Bridgman P W 教授率先发展起来的静高压技术,主要研究在静水压缩条件下的材料性态,被研究材料的受压状态主要限于球量应力作用;但在冲击压缩条件下的材料压缩状态,既包括了球量应力作用,也包括了偏量应力作用,并且还会受到应变速率的影响,因而必将显现出更加绚丽多彩的材料性态图像,“冲击相变”也就因此而发展起来。

该书内容主要限于对几十 GPa 压强下固体相变的研究,这个压强区内的相变多属同质异构相变,即固-固相变,不涉及固-液-气态相变。该书的主要特点有:① 归纳与总结了半个世纪以来国内外冲击相变研究的成就,包括作者本人对冲击相变本构模型与相变波传播方面的研究成果;② 书内侧重于力学效应的分析,但对相变的物理机制和与冲击波物理相关的基础知识,也做了较为系统的介绍;③ 该书是一本专著,既可以作为有关专业的教材,也可作为从事高压物理、固体力学、材料物理及地球和行星物理学等领域科技工作者的参考书。

我与唐志平教授相识近 30 年。唐志平教授长期从事冲击动力学的教学和研究,曾于 1985~1988 年在美国华盛顿州立大学物理系 Gupta Y 教授领导下从事过对 CdS 冲击相变的研究,回国后还进一步做出了比较系统的研究成果。该书主要内容早在 1992 年编成讲义,在中国科学技术大学力学系作为研究生教材使用 10 余年。

该书是在上述基础上补充修订而成的, 内容安排上既涉及学科前沿又自成体系, 相信该书的出版有助于推动我国对冲击相变研究的进一步发展.

纪福泽

2007.8.31

前 言

1978年,在改革开放和科学的春天的感召下,作者重回阔别了十年之久的科学殿堂——中国科学技术大学,在著名冲击动力学家朱兆祥和王礼立教授指导下进行学习和科学研究.1985年,作者有幸赴美国华盛顿州立大学物理系冲击动力学研究所,在该所所长、国际著名冲击波物理学家 Gupta 教授指导下从事 CdS 冲击相变的研究,接触到相变的奇异现象,从此踏入了冲击相变的领域.

相变是自然界中普遍存在的一种临界现象,如三态变化.相变能引起材料的力、电、磁、声、光等一系列物理、力学性质的显著变化.例如,形状记忆合金的神奇形状记忆特性就是由于热弹性马氏体相变引起的.因此,继塑性之后,力学家又面临着相变的新挑战.20世纪80年代以来,在国内外著名力学家和材料科学家如 Hutchinson, Budiansky, Evans, Knowles, 黄克智院士等的联合参与和推动下,该领域取得了突破性进展,已初步形成固体力学的新分支“相变固体力学”,并成为当今固体力学最为活跃的领域之一,国际力学界权威刊物“应用力学评论”亦将相变固体力学列为未来固体力学的十大基础前沿研究领域之一.然而目前的研究主要集中在准静态,有关冲击相变固体力学的研究还相去甚远.

相变是典型的涉及时间的过程.固体材料在受到高速撞击、爆炸等强冲击载荷的作用时,可能会屈服甚至发生相转变.冲击下材料的相变特性对于材料和结构物的动态响应有着重大影响,因为相变后的材料实质上已经成为一种新材料,如石墨至金刚石的相变.相变引起的材料非线性会强烈地改变冲击波波形,造成冲击相变所特有的三波结构波阵面和卸载冲击波.因此开展材料中冲击相变及其影响的研究是十分重要和必要的,是冲击波物理、材料科学和冲击动力学共同关心的问题.冲击相变研究在基础理论、国防工程和工业生产方面,特别是在新材料合成方面,有重要的应用价值.

1956年,Minshall 等人采用炸药加载发现了铁的 α 相至高压 ϵ 相的转变,开辟了冲击相变研究的新领域.半个世纪以来,该领域已经取得了丰硕的研究成果,但是迄今为止,尚未有一本冲击相变方面的专著问世,有关文献散见于各种期刊、会议文集之中.1977年 Duvall 和 Graham 曾在《现代物理评论》杂志上发表了题为:“固体在冲击波加载下的相变”的综述文章,归纳了自 Minshall 等人发现铁的高压 ϵ 相以来前 20 年冲击相变研究的主要成果.之后 30 年来又有了许多新的进展,特别是改革开放以来,我国冲击力学和物理工作者取得了不少可喜的成果,因此迫切感到

有必要编写一本专著,供读者较全面地了解国内外冲击相变研究的概况、进展及意义,并可作为有志于从事这一领域工作的年轻科学工作者的入门书。

1992年,作者编写了一本“冲击相变基础”的讲义,作为中国科学技术大学近代力学系研究生教材,至今已讲授了15载。本书是在该讲义的基础上经修订增补而成,主要补充了20世纪90年代以来的新进展,以及作者课题组近年来在冲击相变本构模型和冲击相边界传播规律方面的研究成果。由于是直接从事的浩瀚文献中整理成书,没有现有著作可资参考,因此工作量大,书中一定存在许多不妥乃至谬误之处,衷心期望读者提出宝贵意见,使之逐步得到丰富和完善。

2008年9月20日是作者母校——中国科学技术大学50周年校庆日,仅以此书献给母校50华诞,以感谢母校的培育之恩;同时衷心感谢恩师朱兆祥教授和王礼立教授对作者的长期的栽培和关怀;感谢华盛顿州立大学Gupta教授将作者领入冲击相变的科学领域;感谢我国动高压物理先驱者、中国工程物理研究院经福谦院士对作者的长期支持和指导;感谢国家自然科学基金委对作者研究的长期连续的资助以及中国科学院科学出版基金的资助。另外,作者课题组的研究生们,王文强博士,郭扬波博士,戴翔宇博士,张兴华博士生,徐薇薇博士生等以及实验室的工作人员,在该领域的研究中作出了重要的贡献,听过作者的课程的历届研究生们,曾提出许多宝贵意见,可以说,没有他们本书的完成是不可能的,在此一并表示感谢。

作 者

2007年夏于合肥

目 录

序言	
前言	
第 1 章 绪论	1
第 2 章 冲击波和本构方程基础	5
2.1 概述	5
2.2 流动方程	6
2.2.1 应力、应变约定	6
2.2.2 流动方程	7
2.3 固体高压状态方程	7
2.3.1 Bridgman 方程	8
2.3.2 Murnagham 方程	8
2.3.3 Gruneisen 方程	9
2.4 间断条件和冲击绝热线	11
2.5 Hugoniot 线的进一步讨论	14
2.5.1 Hugoniot 线的主要特点	14
2.5.2 Hugoniot 线以外状态的计算	17
2.5.3 冲击波后温度的计算	19
2.6 激波稳定性	20
2.7 流体弹性介质	23
2.8 常用率相关低压本构模型	24
2.9 固体高压本构模型	26
2.10 附录: 沿等压方向求解卸载等熵线	26
第 3 章 动态实验技术	29
3.1 冲击加载技术	29
3.1.1 分离式 Hopkinson 压杆	29
3.1.2 气炮	30
3.1.3 化爆加载技术	32
3.1.4 高能辐射加载	33
3.1.5 静高压技术	34

3.2	宏观量的瞬态测试方法	34
3.2.1	概述	34
3.2.2	粒子速度的测量	35
3.2.3	压力传感器	38
3.2.4	温度测量	40
3.3	微观量的瞬态测试方法	41
3.3.1	X 射线衍射测量	42
3.3.2	光谱学测量	43
3.4	回收技术及显微分析	44
3.5	实验数据处理和 Lagrange 分析方法	45
第 4 章	相变热力学	49
4.1	相、相变及其分类	49
4.2	相变的热力学关系	53
4.3	相变的热力学理论	57
4.3.1	Landau 理论	57
4.3.2	λ 型相变的 Tizza 理论	62
4.4	化学热力学基础	64
4.4.1	化学势	65
4.4.2	化学势的图解法	67
4.4.3	平衡条件和反应方向	68
4.4.4	相率	70
4.5	冲击相变的 R-H 线	72
4.5.1	P - V - T 空间中的 R-H 线	72
4.5.2	混合相 R-H 线初始斜率的确定	74
4.5.3	相变点等熵线斜率的间断	77
4.5.4	u_S - u_P 平面上相变材料的 R-H 曲线	78
4.6	高密度相性质的确定	81
4.7	附录: 热力学势函数	85
第 5 章	相变动力学	87
5.1	均匀成核	87
5.1.1	成核功	87
5.1.2	温度、外力与成核的关系	89
5.1.3	应变和界面能对成核的影响	91
5.2	成核速率	94
5.2.1	成核速率	94

5.2.2	温度和外力的影响	94
5.3	非均匀成核	95
5.3.1	界面成核	95
5.3.2	晶界成核	98
5.3.3	其他晶体缺陷的作用	98
5.4	生长	99
5.5	相变速率方程	102
第 6 章	冲击相变本构模型	107
6.1	相变本构模型概述	107
6.2	Hayes 冲击相变本构模型	108
6.3	三线性热弹性马氏体相变本构模型	112
6.4	考虑静水压和偏应力共同作用的相变临界准则	119
6.5	三维冲击相变本构模型	124
6.5.1	冲击下“应力诱发”相变的本构模型	124
6.5.2	冲击下“形变诱发”相变的本构模型	134
第 7 章	马氏体相变和有序-无序相变	137
7.1	马氏体相变的特点	137
7.2	马氏体相变热力学	139
7.3	马氏体相变动力学	141
7.4	马氏体相变晶体学	143
7.5	有序-无序相变	148
7.6	有序-无序转变的热力学	149
7.7	Spinodal 分解	150
7.8	软模现象和相变	152
7.8.1	Landau 理论和软模	153
7.8.2	晶格振动与软模	153
第 8 章	固态多形性冲击相变的实验现象	156
8.1	概述	156
8.2	铁的 $\alpha \rightleftharpoons \epsilon$ 的相变	156
8.3	铁基合金	160
8.3.1	铁基合金的 $\alpha \rightleftharpoons \epsilon$ 相变	160
8.3.2	铁基合金的 $\gamma \rightleftharpoons \alpha'$ 相变	162
8.4	锑、铋和锡	167
8.4.1	锑	167
8.4.2	铋	169

8.4.3	锡	172
8.5	形状记忆合金	174
8.5.1	概述	174
8.5.2	应用	175
8.5.3	形状记忆合金的动态响应研究	176
8.6	其他金属材料	180
8.7	石墨-金刚石相变	182
8.8	锗和硅	184
8.9	碱金属卤化物 KBr, NaCl 和 KCl	185
8.10	III-V 族和 II-VI 族化合物 CdS, InSb 和 BN	188
8.10.1	CdS 单晶的冲击相变特性	188
8.10.2	InSb	193
8.10.3	BN	194
8.11	简单氧化物的冲击相变行为	195
8.11.1	石英 (SiO ₂)	195
8.11.2	金红石 (TiO ₂)	197
8.11.3	赤铁矿 (Fe ₂ O ₃)	198
8.11.4	氧化铌 (Nb ₂ O ₅)	198
8.12	一些矿物材料的冲击相变	199
8.13	岩石	199
8.13.1	花岗岩等几种岩石	199
8.13.2	石灰岩和大理岩的冲击相变研究	201
8.14	陶瓷材料	205
8.14.1	一般陶瓷	205
8.14.2	高 T _c 超导材料	207
8.15	聚合物	208
8.16	氢	208
第 9 章	二级相变、冲击熔化和气化	210
9.1	二级相变	210
9.2	冲击熔化的理论考虑	212
9.2.1	高压熔化方程	212
9.2.2	冲击熔化和 Hugoniot 方程	214
9.3	正常材料的均匀熔化	216
9.4	铁的冲击熔化研究	219
9.5	铋的冲击熔化	220

9.6 不均匀熔化	222
9.7 凝固	223
9.8 冲击气化和等离子体相变	223
第 10 章 相变塑性和剪力作用	226
10.1 相变塑性现象	226
10.2 相变塑性的位错模型	227
10.2.1 位错模型基础	228
10.2.2 相变时的微观位错模型	229
10.3 相变增韧和相变塑性	230
10.3.1 相变增韧计算	231
10.3.2 实验研究	233
10.3.3 相变准则及相变本构关系的研究	233
10.3.4 小结	235
10.4 剪力对固体相变压力的影响	236
10.4.1 相变点的应力分析	236
10.4.2 动高压与静高压相变压力的比较和讨论	240
10.4.3 小结	242
10.5 石灰岩冲击相变中的应力偏量的作用	243
第 11 章 冲击相边界	247
11.1 概述	247
11.2 相变模型和基本方程	248
11.2.1 热弹性马氏体相变模型	248
11.2.2 基本方程	249
11.3 一级可逆相变材料中的冲击相边界	250
11.3.1 不同类型的间断面及其相互作用	250
11.3.2 半无限长杆中相边界的传播	255
11.3.3 弱间断卸载条件下相边界的传播	257
11.3.4 小结	259
11.4 不可逆相变材料中的相边界和梯度材料	259
11.4.1 强间断卸载条件下相边界传播的解析解	259
11.4.2 连续卸载条件下相边界传播的数值方法	261
11.4.3 连续卸载条件下梯度材料的形成	263
11.5 有限杆中的不可逆相边界	269
11.5.1 右端为自由面时的相边界传播	269

11.5.2	右端为刚壁时的相边界传播	272
11.5.3	相变 Taylor 杆实验	273
11.6	二级相变材料中相边界的传播	274
11.6.1	二级相边界传播的一般规律	275
11.6.2	外场作用下二级相变和一级相变的互相转化	276
11.6.3	小结	279
11.7	温度对相边界传播的影响	280
11.7.1	绝热过程	280
11.7.2	温度变化对相边界传播的影响	281
11.7.3	间断面与温度界面的相互作用	284
第 12 章	冲击相变对材料和结构破坏特性的影响	288
12.1	概述	288
12.2	绝热剪切中的相变带	288
12.3	高聚物压剪联合加载下的绝热剪切熔化	293
12.4	相变对层裂的影响	295
12.4.1	弹丸对厚板的高速撞击	295
12.4.2	纯铁的相变等厚层裂	297
12.4.3	FeMnNi 合金的浅表层裂	300
12.4.4	相变对层裂强度的影响	302
12.5	脉冲强激光的作用	304
参考文献		310

第 1 章 绪 论

物质在一定温度和压力下, 会产生物相转变, 如三态变化, 这就是所谓相变. 相变是自然界中普遍存在的一种临界现象, 属于固体物理学和材料科学的重要研究内容之一. 相变能引起材料的力、电、磁、声、光等一系列物理、力学性质的显著变化, 这对于工程材料的应用和开发, 具有十分重要的意义.

固体材料在受到高速撞击、爆炸等强冲击载荷的作用时, 可能会屈服甚至发生相转变. 冲击下材料的相变特性对于材料的动态性质和结构物的动态响应有重大的影响, 这一点可以粗略地从两方面来说明: 其一, 相变后的材料具有和初始材料不同的物理、力学性质, 实质上已经成为一种新材料, 如石墨 \rightarrow 金刚石的相转变; 其二, 相变会强烈地改变介质中冲击波的波形, 造成所谓的冲击波阵面的三波结构和卸载冲击波. 图 1.1 示意地画出相变波形的构成, 图中 S_1 和 S_2 是材料屈服引起的弹、塑性波阵面, S_3 是由于材料相变产生的相变波波阵面, 加载阵面形成“三波结构”. R_2 则为卸载时由于相的逆转变产生的卸载冲击波 (或称为稀疏冲击波). 显见, 材料性质和应力波形的改变必然会影响到材料和结构物对冲击载荷的响应和破坏特性. Shockey 等 (1975) 和 Bertholf 等 (1975) 的实验和计算表明, 钢靶在受到超高速碰撞时产生的层裂破坏受到靶材相变的强烈影响 (详见第 12 章). 因此开展材料中冲击相变及其影响的研究是十分重要和必要的.

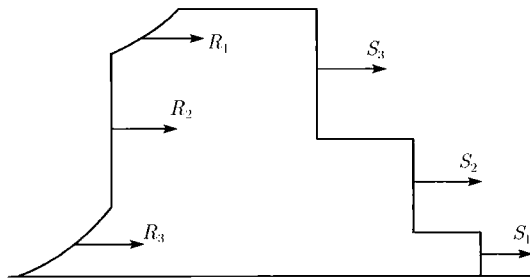


图 1.1 相变材料中的应力波形

关于物相变化的观察可以追溯到史前, 相变的科学研究则开始于 19 世纪下半叶. 冶金学家利用金相显微技术对于钢铁热处理中的奥氏体、马氏体、珠光体等金相组织进行鉴定, 初步掌握了钢铁相变的一些规律. 矿物学家则发现了多种晶体的多形性 (polymorphism) 相转变. 物理学家对气-液相转变的研究发现了临界点和临

界现象. 1878 年, Gibbs 发布了题为“论复相物质的平衡”的著名论文 (Gibbs, 1878), 对于复相平衡的热力学规律进行了全面的阐述, 并首次提出了有关相变动力学中诸如新相的成核等基本概念. 20 世纪以来, 相继提出了成核、生长理论, 唯象相变理论 (Landau, 1937), 软模 (soft mode) 理论 (Cochran, 1959; Anderson, 1959), 以及重正化群理论 (Wilson, 1972) 等, 已基本建立起相变临界现象的近代理论框架.

不过上述相变理论及研究主要针对常压下由于温度变化所引起的相变, 因为通常相变发生在常压条件下. 但是据体系 Gibbs 自由能 $G(P, T)$ 的定义, 压力 P 达到临界值时同样能够引发相变. 不少星球包括地球在内, 内部处于高温高压极端状态. 在人类活动的局部范围内也常出现类似的高温高压情况, 如陨石落地, 工程爆破, 工业生产, 军事破坏等. 这就要求人们研究高压极端条件下物质的性状, 包括相变, 这就是高压物理的研究领域. Bridgman 在 20 世纪 20 年代用油压机产生静高压, 开始了高压物理的研究, 当时压力仅有几千大气压. 随着技术的发展, 逐步提高到二三十万大气压, 近年来利用金刚石压砧已取得百万大气压以上的高压. 这项技术称之为静高压技术, 人们利用它进行了大量高压下物质相变的研究, 以及超硬材料如金刚石的合成 (Bridgman, 1958; 沈主同等, 1989).

与传统静高压方法不同, 实验室内利用控制化爆或高速撞击可以产生短历时 (微秒量级), 高压 (100 GPa 以上) 的平面冲击波, 为研究高压下物质相变及其特性提供了一种新的冲击加载手段, 一般称为动高压技术 (经福谦等, 2006). 利用炸药加载引发相变的可能性至少在 1941 年就已经提出了 (Schardin, 1941), 但是直到 1956 年 Minshall 等 (Bancroft et al., 1956) 用炸药冲击波压缩的方法发现铁在 13 GPa 压力下发生 σ - ϵ 多形性相变后, 才受到高度重视. 铁在 13 GPa 的多形性相变的发现具有重要的科学意义, 因为这一相变以前用其他方法不曾被观察到过, 这说明冲击加载是一种独特而有效的方法, 它揭开了冲击相变研究的序幕. Minshall 研究组以及后来美国 Los Alamos 国家实验室的 McQueen 等和美国华盛顿州立大学的 Duvall 等, 以及前苏联的 Al'tshuler 等, 在冲击相变方面作出了重要的开拓性的贡献, McQueen 等、Duvall 博士以及 Al'tshuler 曾因此分获美国物理学会第一、二、三届冲击波科学奖. 半个世纪以来, 人们对冲击相变的广泛探索, 极大地丰富了人们对于材料冲击响应的认识. 随着现代科学技术的发展, 今天在实验室内利用弹速达 10km/s 的多级气炮、轨道炮等超高速发射装置, 功率密度达 10^{15}W/cm^2 的强激光或强流粒子束, 已可达到陨石撞击或核爆中心的压力和温度极端条件 (10^3GPa , 10^7C), 可使靶材瞬间产生气化乃至等离子体的一系列相变化. 高时间分辨率的诊断技术已经使得研究纳秒量级的瞬态相变成为可能, 这为冲击相变研究提供了广阔的前景.

由于冲击加载历时很短, 相变过程中晶格结构变化的实时测量是十分困难的, 少数场合可以设法回收试样进行结构分析. 尽管目前在微观结构变化的原位实时诊

断技术方面取得了很大的进展 (Gupta et al., 1999), 然而, 在一般情况下, 尤其对于可逆相变而言, 往往求助于把宏观力学量的实验测试结果 (如 P - V 曲线) 与静高压数据进行比较, 以确定新相的结构, 相变的类型及性质. 但是, 静高压和动高压在实验条件上存在着一些基本的不同点, 研究中须予以注意: ① 静高压由于加载速率慢, 可以认为是一个等温加载过程, 加载曲线在 P - V - T 空间中位于某一等温面上; 而冲击加载由于加载速率快, 样品来不及和外界进行热交换, 可以认为是一个绝热过程, 在 P - V - T 空间中, 其终态位于冲击绝热 Hugoniot 线上; ② 静高压通常由液体传递压力, 所以试样一般只承受静水压的作用; 动高压则常用一维平面应变波加载, 有剪应力存在, 测到的通常是轴向应力; ③ 鉴于动高压的瞬时性, 相变过程和机理也许和静高压不尽相同, 例如可以基本上排除扩散型机制. 由于以上原因, 比较动、静高压结果时, 应持审慎的态度. 已经观察到的一些实验现象显示 (Duvall et al., 1977; Tang et al., 1997), 冲击相变过程涉及多相稳定性, 非平衡态, 非均匀性, 时间相关效应, 剪力影响, 塑性耦合及各向异性等多种非线性非平衡因素. 这在宏观上将造成波传播的不稳定性, 材料性质、结构物响应的显著非线性变化, 微观上则涉及点阵原子的快速非扩散性迁动, 电子结构的改变以及与微缺陷如位错, 杂质, 晶界的相互作用. 对冲击相变现象及其机理的深入了解, 需要物理工作者、材料科学工作者和力学工作者的共同努力.

冲击相变研究在基础理论、国防工程和工业生产方面有重要的应用价值. 特别是在新材料合成方面 (经福谦, 1987), 如金刚石、立方结构氮化硼等超硬材料的合成, 对金属氢的探索, 并可利用冲击过程中的快速“淬火”特性得到具有特异性能的亚稳相结构材料等.

国外比较全面的介绍相变的专著有《固体中的相变》(Rao et al., 1978), 《金属与合金的相变理论》(Christian, 1975), 以及《凝聚系统相变导论》(Fine, 1964). 近年来国内相继推出了若干本有关相变的专著, 有《马氏体相变和马氏体》和《相变原理》(徐祖耀, 1981, 1988), 《合金相与相变》(肖纪美, 2004), 《金属物理学第二卷相变》(冯端等, 1990) 等, 说明了国内近年来对相变研究的重视. 不过上述著作主要论述温度变化条件下的相变现象和理论, 至于应力诱发 (或应变诱发) 的相变, 特别是在冲击加载下的相变及其力学效应的研究, 则几乎没有涉及. 迄今为止, 国际上尚未有一本冲击相变方面的专著, 相关文献散见于各种期刊、会议文集中. 1977 年 Duvall 和 Graham 在《现代物理评论》杂志上发表了题为: “固体在冲击波加载下的相变”的综述文章 (Duvall et al., 1977), 归纳了自 Minshall 等发现铁的高压 ϵ 相以来前 20 年冲击相变研究的主要成果. 之后 30 年来又有了许多新的进展, 特别是改革开放以来, 我国冲击力学和物理工作者也取得了不少可喜的成果, 因此迫切感到有必要编写一本专著, 供读者较全面的了解国内外冲击相变研究的概况、进展及意义, 并可作为有志于从事这一领域工作的年轻科学工作者的入门书.

相变是一门跨学科的学术领域,涉及物理、化学、金属学、地质学、材料科学、力学等多种学科,并且各学科有各自的“语言”。有关相变的著作,即使标题相近,内容由于作者背景不同往往相差很大,因此需要各学科之间相互沟通和通力合作。本书主要介绍材料的冲击相变实验和理论研究的进展,侧重于力学效应,并试图在沟通与物理、材料科学方面的联系做一些初步尝试。鉴于冲击相变研究的难度,其理论体系,尤其是微观理论尚未很好地建立起来,主要地还停留在实验阶段。我们将以较多篇幅介绍实验方面的进展。

如何联系一般相变理论并用于解释冲击相变现象,建立冲击相变模型和理论,是冲击相变研究的艰巨任务。从力学角度看,建立冲击相变材料的宏、微观结合并能包括多种主要因素的非线性本构数学模型,以用于冲击问题的计算与预测,是一个重要目标。

全书共分 12 章。第 1 章是绪论。第 2、3 章扼要介绍冲击波理论基础和实验技术,为非冲击力学的读者和学生提供必要的基础知识和实验方法,由于篇幅有限,主要涉及一维平面应变冲击波的理论 and 实验技术。第 4、5 章分别叙述相变热力学和相变动力学方面的内容,讨论相变对 Hugoniot 线的影响、相变速率、高压相状态方程,新相的成核、生长等,是冲击相变的理论基础。第 6 章分析动、静态相变本构模型研究的发展,并介绍三种有代表性的冲击相变本构模型。第 7 章主要讨论马氏体相变和有序-无序相变等常见相变以及简要介绍软模的概念。第 8 章叙述固-固多形性冲击相变的实验观察,分为金属、非金属以及矿物材料,是全书的主要内容之一。第 9 章讨论二级相变、冲击熔化和气化等现象。第 10 章介绍相变塑性和剪力影响,这也是冲击相变研究的前沿课题。第 11 章研究冲击相边界的传播规律,属于最新的研究成果,将传统的弹塑性应力波的概念拓展到相变波的领域。相变波分隔着未相变区与相转变区,构成所谓的“宏观相边界”。相边界与加、卸载波系和边、界面的相互作用,在时空区域内不断演变发展,形成复杂的相边界传播图案,这是一个十分有趣的物理数学问题。最后一章(第 12 章)介绍冲击相变对材料和结构物的动态破坏的影响,如绝热剪切带、层裂等。第 6~12 章实际上是对半个世纪以来冲击相变研究主要成果的小结,其中不乏中国学者的贡献。需说明的是,由于篇幅和作者知识的局限,此小结不可能也不必要是穷尽的,目的在于提供研究现状和已往走过的历史,引起读者的兴趣,供学生和新参加的研究人员找到研究的起点。书中没有介绍相变结构学的内容,读者可参见《相变原理》(徐祖耀, 1988),《固体中的相变》(Rao et al., 1978) 等著作,以及有关晶体化学方面的著作。