

固体的冲击波压缩

—— 力学、物理和化学

〔美〕罗伯特·阿尔伯特·格拉汉姆 著

贺红亮 译

祁美兰 校



科学出版社

www.sciencep.com

固体的冲击波压缩

——力学、物理和化学

[美] 罗伯特·阿尔伯特·格拉汉姆 著

贺红亮 译

祁美兰 校

科学出版社

北京

图字:01-2010-3891

内 容 简 介

本书系统地总结了冲击波压缩科学在力学、物理和化学方面的研究成果,从冲击波压缩的基本概念出发,讲述了冲击波压缩科学的起源、良性学说和灾变学说,冲击波压缩下固体的弹性、塑性、加载波和卸载波等力学响应,固体的压电、铁电、铁磁、电阻率、电极化等物理性质,以及冲击波压缩下固体的活化、改性、化学合成等化学效应。本书从力学、物理和化学的多学科角度,阐述了固体的强度效应、局域变形、高浓度缺陷等特性在冲击波压缩过程中的意义,介绍了冲击波压缩科学的发展方向。

本书可作为力学、物理、化学、材料科学、地球和天体科学等专业高年级本科生和研究生的参考书,也可供动高压物理、爆炸与冲击动力学研究领域的科研人员参考使用,对国防、民用工程和新材料开发领域的工程技术人员有着重要的参考价值。

Translation from the English language edition:

Solids Under High-Pressure Shock Compression by R. A. Graham

Copyright © 1993 Springer-Verlag New York, Inc.

Springer-Verlag New York is part of Springer Science + Business Media All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

固体的冲击波压缩:力学、物理和化学/(美)格拉汉姆(Graham, R. A.)著. 贺红亮译. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-025854-0

I. 固… II. ①格…②贺… III. 冲击波—压缩—固体—研究 IV. 0347.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 195936 号

责任编辑:张 静 杨 然/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 7 月第一次印刷 印张: 13 1/2

印数: 1—2 000 字数: 255 000

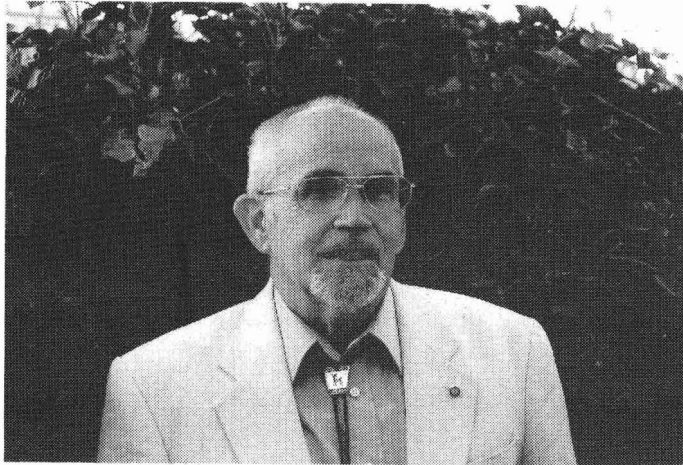
定价: 48.00 元

如有印装质量问题,我社负责调换

原作者简介

罗伯特·阿尔伯特·格拉汉姆(Robert Albert Graham)博士生于1931年,在高压冲击波与固体物质相互作用的基础领域研究了38年,于1996年4月从美国圣地亚国家实验室、先进材料物理和化学研究部退休,并被授予杰出研究员的荣誉称号。他在该研究领域开展了大量先驱性的研究工作,享有广泛的赞誉。他完成了200多篇研究论文和大量综述性评论,如1977年他和Duvall合作发表了“冲击波压缩下的固体相变”(Reviews of Modern Physics, 1977, 49(3):523-579),以及1979年他和Davison合作发表的“固体的冲击波压缩”(Physics Reports, 1979, 55:255-379)。

他是该研究领域许多重要学术丛书和刊物的倡导者。例如,他率先组织了Springer-Verlag出版社的*High-Pressure Shock Compression of Solids*系列丛书,并担任该丛书的主编。他参与创立了“凝聚介质中的冲击波压缩专业委员会”,该委员会隶属于美国物理学会(APS)。1983年,他被美国能源部授予杰出贡献奖。1993年,他荣获了美国物理学会、冲击波压缩科学领域的George E. Duvall奖。1996年,他获得法国圣·路易斯研究所颁发的圣·路易斯勋章。他是美国物理学会和美国先进科学协会的会员,也是美国电气电子工程师协会(IEEE)的高级



罗伯特·阿尔伯特·格拉汉姆(Robert Albert Graham)博士
2008年摄于美国得克萨斯州,尤瓦尔德

会员。

格拉汉姆博士近期的研究兴趣包括：陨石撞击条件下地质材料的性质、美国的当地历史等。他已经出版了多本历史书籍，他的成就被美国名人榜收录。

罗伯特·阿尔伯特·格拉汉姆，1954年获得美国得克萨斯大学奥斯汀分校土木工程专业的理学学士，1958年在该校获得工程力学专业的理学硕士；1990年，受日本东京工业大学的特别邀请，获得材料科学与工程专业的理学博士。

中文版序

1992年本书的英文版对冲击波压缩下固体的力学、物理和化学性质作了全面的阐述，书中所描述的固体是基于冲击波压缩“灾变学说”的观点，强调的是固体缺陷对冲击波压缩性质的影响，这种观点与传统冲击波理论有着本质的不同。传统理论中，冲击波压缩下固体的性质被等效为“流体”，其中固体的“强度效应”仅是一种修正。这种采用“强度修正”的流体动力学模型可以被称为“伪流体”模型[07G01]、“弹性流体”模型[79D01]，或者“良性冲击波压缩”模型[93G02]等。这些流体力学模型把受到冲击波压缩的固体看作是热力学平衡态中各向同性的弹性流体，这与固体在静态高温高压中所处的状态相当。

流体力学近似的确解决了许多工程应用问题，但是它显然忽略了局域变形，特别是剪切变形问题。伴随着局域塑性变形，固体内部温度的不均匀性显著增加，并且受到周围介质热传导性质的影响，这种温度不均匀性导致的结果可能会异常严重。目前看来，对于很多问题的回答，我们必须依靠“晶粒尺度”的数值计算。对于低对称性结构的固体，局域变形效应更是凸显了其重要性。

在冲击波压缩的固体化学问题中，正如Graham的Ballotechnic模型所描述的，局域变形效应也充分地起到了主导作用。该模型从4个方面归纳了局域变形对固体化学性质的影响：形态变化、机械混合、冲击活化和加热。冲击波压缩诱导的固体化学反应在很多文献中也被描述为一种强烈塑性变形的力化学过程（如Graham及其合作者，Anderson, Holman, Morosin, Horie, 以及Thadhani等的文献[89G01], [93G02], [88H02], [07S01], [02Y01]）。

自1992年本书的英文版出版以来，人们已经在纳秒量级时间分辨率的应力率测量技术上取得了突破性进展（如采用PVDF压电应力计），这些测量结果提供了其他测量方法不能提供的信息，也为在“晶粒尺度”上开展计算模拟奠定了基础。目前有大量已出版的文献讨论了这方面的工作，美国佐治亚理工学院的Thadhani教授是该研究领域的一位杰出代表[09E01]。2002年在Springer-Verlag出版社发行的*High-Pressure Shock Compression of Solids*系列丛书中，Asay和Chhabildas对目前该领域的研究状况也做了出色的综合评述[03A01]。

在本书中文版发行的时刻，我再次引用瑞典著名固体化学家J. Arvid Hedvall的那句名言：“注意人类习惯势力的催眠力量”，提醒有志于冲击波压缩科学

的研究者，不要被传统的冲击波理论所束缚。



罗伯特·阿尔伯特·格拉汉姆

美国得克萨斯州，尤瓦尔德

2008年10月17日

译者序

1986年译者刚涉足冲击波压缩科学的研究领域，和许多初学者一样，R. A. Graham的许多研究论文便是我经常阅读的重要文献。例如，译者与Duvall教授1977年合作发表的“Phase transitions under shock-wave loading”一文，系统总结和评述了冲击波压缩下物质结构相变的基本原理和性质，这些认知不仅是对冲击波物理研究的深刻理解和科学提炼，更是为拓展冲击波压缩科学研究的新领域提供了强有力的理论指导。事实表明，21世纪的今天冲击波压缩科学正迎来了蓬勃发展的历史性机遇，物质研究的尺度从宏观伸展到了细观、微观，实验诊断的时间分辨率从微秒精确到了纳秒、皮秒，在凝聚态物理、材料科学、地球物理和天体物理等学科领域，冲击波压缩科学正在获得越来越广泛的认同和发展。正如Graham在书中写到的那样：“冲击波压缩科学，这项为发展核武器而铸造的剑成为引领物质材料高压科学的犁头。”

译者翻译的本书取自R. A. Graham的英文版*Solids Under High-Pressure Shock Compression—Mechanics, Physics, and Chemistry*，该书全面阐述了冲击波压缩下固体的力学、物理和化学性质，是R. A. Graham学术著作中非常重要的一部。尤其是在冲击波压缩科学发展到今天的时候，R. A. Graham以非常深邃的眼光，看到了冲击波压缩科学未来的发展方向。冲击波压缩科学的最初建立无疑是得益于力学研究，但是冲击波压缩下的固体行为以及冲击波压缩过程，要比单纯的力学问题复杂得多。描述冲击波压缩下的固体行为不能简单地把研究问题抽象成一个均匀的、各向同性的、外加简单载荷的力学模型，而是需要从物理和化学的观点、从原子分子的尺度以及缺陷浓度的变化来理解冲击波压缩过程。这就需要我们重新构筑已有的冲击波压缩科学，以发展的眼光来应对未来挑战。

该书从冲击波压缩的基本概念出发，没有复杂的计算推演，以浅显易懂的语言讲述了冲击波压缩科学在过去四十多年里获得的研究认识，将力学、物理和化学三者之间的关系和问题展示给读者，启发读者的进一步思考。

贺红亮

2009年正月于绵阳

前 言

1955~1985年，在历史上这一时期会被认为是冲击波压缩科学的黄金时期。在这期间，冲击波压缩科学从最初只有少数杰出科学家参与的独特领域，发展到对科学知识和工业技术等诸多方面都有重要贡献的学科。各国科学家对这样的发展机遇抱以极大的热情，在前所未有的压力状态下研究了物质的性质，并使冲击波压缩科学成为一门国际性的学科。基于对高压物态方程和物质多晶相变的研究，我们关于地球物理、行星物理和天体物理的知识从根本上得到了改善；冲击波加工技术也在材料合成和材料加工领域成为普通的工业方法；冲击波压缩数据被用于静高压标定的基准；固体在极高应变率下的弹性、黏弹性和塑性形变等性质也基本得到了阐述；大变形下的弹性、压电效应和介电效应，极高压力下的化学合成，以及极高缺陷浓度下固体的物理性质等问题也都不同程度地开展了研究；测量冲击波压缩过程的时间分辨率至少提高了3个量级。结合物理学、电子工程学、固体力学、冶金学、地球物理和材料科学等学科的知识，冲击波压缩下的物性研究得到了极大地扩展和丰富。

尽管取得了这样的成就，但冲击波压缩科学迄今还没有较为完善的专著出版，该系列丛书将试图弥补这个不足。正如本书展示的那样，基于物理和化学观察得到的物质冲击波压缩模型将与仅仅基于力学观察而演绎的经典描述有着显著不同。本书希望能为对此感兴趣的科学家和工程师们提供充足的介绍。

本书是作者在原日本东京工业大学材料科学与工程专业博士论文的基础上扩编而成，导师是Akira B. Sawaoka教授。书中大多数内容都取材于Lee Davison和作者一起撰写的一些综述文章，这些综述文章包含了800多篇参考文献，在完成本书时，作者又增添了100余篇新文献。

作者在科学研究方面曾经获得了一个极佳的机会，较早地参与了这样一个迅速发展的科学领域，并有幸成为一个拥有突出能力和迅速成长的研究小组的成员，该小组（即美国圣地亚国家实验室固体物理研究小组）为发展冲击波压缩科学作出了许多重要贡献，留下了不可磨灭的印迹。因此，本书也反映了许多同事和合作者对作者的影响，作者对他们表示深深的感激，因为人数众多，这里就不将他们一一列出来了。此外，作者也深深地感谢美国圣地亚国家实验室的管理者和督导者，感谢他们对作者工作一贯的支持，他们以最好的技巧和智慧对美国圣地亚国家实验室进行了管理和督导。

目 录

原作者简介	
中文版序	
译者序	
前言	

第一部分 冲击波压缩科学

第 1 章 引言	3
1.1 固体的冲击波压缩	3
1.2 冲击波压缩下固体的类流体形变	4
1.3 冲击波压缩学说：良性学说和灾变学说	5
1.4 冲击波压缩科学的起源	6
1.5 事件的压力定标	7
1.6 综述文献	8
1.7 本书的布局.....	11
1.8 本书约定符号注释.....	12

第二部分 冲击波压缩下固体的力学响应

第 2 章 基本概念和模型	15
2.1 力学响应区.....	16
2.2 非线性弹性压缩.....	20
2.3 应力张量.....	24
2.4 Hugoniot 弹性极限	26
2.5 弹-塑性形变	30
2.6 流体动力学.....	34
2.7 相变.....	34
2.8 卸载波.....	38
2.9 其他力学问题.....	41
2.10 一阶、二阶特性	47
第 3 章 实验方法	49
3.1 冲击波加载技术.....	50

3.2	波剖面测量	57
3.3	探测器的分类	59
3.4	探测器的不确定性	61
3.5	测试技术的发展	61

第三部分 冲击波压缩下固体的物理性质

第4章	弹性冲击波压缩下固体的物理性质	65
4.1	非线性压电性能	65
4.2	正常电介质	77
4.3	弹性电介质中冲击波引起的电导通	79
4.4	弹性大应变下的半导体	81
4.5	弹性区固体的物理性质	86
第5章	弹-塑性冲击波压缩下固体的物理性质	88
5.1	弹-塑性区域晶体的压电响应	89
5.2	压电聚合物	94
5.3	铁电固体	102
5.4	铁磁固体	103
5.5	金属的电阻	114
5.6	冲击引起的电极化	116
5.7	电化学	120
5.8	弹-塑性区固体的物理性质	123

第四部分 冲击波压缩下固体中的化学效应

第6章	冲击波压缩下的固体化学	127
6.1	背景	127
6.2	冲击波压缩下固体化学的基本特征	130
6.3	数学模型	133
6.4	粉末混合物的冲击波压缩特性	133
6.5	样品回收技术	136
第7章	冲击波压缩下固体粉末的改性与活化	143
7.1	冲击波改性及表征	143
7.2	冲击波活化及应用	154
第8章	冲击波压缩下的固体化学合成	161
8.1	铁酸锌	162

8.2 金属间化合物	165
8.3 金属-氧化物体系	173
8.4 冲击波压缩下的固体化学合成	174
第五部分 冲击波压缩下固体的力学、物理和化学过程	
第9章 固体的冲击波压缩过程	179
9.1 固体物理和固体化学	179
9.2 冲击波压缩科学的发展方向	180
参考文献	181
主题词索引	195
作者索引	200

第一部分 冲击波压缩科学

第 1 章 引 言

提要 本章将介绍冲击波压缩科学的研究范畴、冲击波压缩下固体的类流体形变、冲击波压缩模型的良好学说和灾变学说、冲击波压缩科学的起源、压力标定以及本书的概况。

1.1 固体的冲击波压缩

当固体受到某种巨大能量的作用时，固体物质便被迫获得了一种不寻常的加载条件，在惯性约束下固体内部形成了高压冲击波。这种应力非常高、作用时间非常短的冲击波，将迫使物质不可逆地进入那些在其他任何激活方式下都不曾遇到的物质状态。关于这种独特的压缩和卸载过程中固体的物性变化研究是冲击波压缩科学发展的源泉。

在极端情况下，加载可以产生非常强的冲击波，达到峰值应力的时间甚至短于 1ns（纳秒，即 10^{-9} s）。在指明的假设框架内，研究固体在高压冲击波下的响应，可以为建立高压物态方程以及描述固体在极高压力下的力学、物理和化学性质提供依据。

就多数情况而言，加载的强度或冲击波幅值不是很强，达到峰值应力的时间可能是数百纳秒或者更长。研究固体在这种载荷下的响应能够获得大应变、高压和高应变率等条件下固体相关物性的认识。

与气体和液体不同，固体中由于快速加载引起的温度上升很小，只有当压力大于几十吉帕斯卡（GPa）* 以后，密实固体中的升温才较为明显。在多孔固体的冲击波压缩中，剧烈的升温通常非常显著，但是即使这样（在较低压力下）起主要作用的行为仍可能是力学效应而不是热效应。

产生瞬态高压需要强大的能源，这些能源包括从高能炸药爆轰获得的化学能、高速弹丸碰撞释放的动能、脉冲粒子束的动能、脉冲激光的光能，以及来自中子或 X 射线的核能等。

从历史的角度看，研究者所从事的研究工作以及解决问题的能力强烈地受到他们所能获得的加载方式和诊断工具的制约。因此，全面地、科学地描述冲击波压缩物质的性质需要来自多方面的、彼此独立的观察，尽管这些观察也许常常相

* 1GPa \approx 1 万标准大气压（atm）。

互不一致、不相符，甚至模棱两可或者存在显著分歧。

在冲击波压缩科学中，把波当作一种探测载体的兴趣要远大于对波自身的研究。作为物质加载的一种惯性响应，波包含了描述那些不常见物质状态的力学、物理学和化学等性质以及变化过程的详细信息，尽管其中的物理和化学变化可以进一步用光学、电子学或者磁学等方法探测，但是它们的变化行为与波的力学特征是紧密相关的。

在科学研究中，人们关注的重点是解释、识别和度量观察到的力学、物理和化学性质；而在技术应用中，关心的主要是如何利用物质的响应或者特殊的冲击波压缩过程。两者各有侧重。

1.2 冲击波压缩下固体的类流体形变

也许固体在高压冲击波压缩下表现出的最显著和最独特的响应就是在一个宽阔的变化环境下像流体一样具有超强的形变能力。这种观察到的流体状的形变现象是固体在力学加载条件下物质发生变化的一种直接表现。对冲击波压缩固体的基本描述需要了解这些过程，认识它如何从初始状态转化到高压、流体状的变化过程。如果没有对这些过程的正确认识，那么冲击波压缩理论、物质的冲击波压缩描述，就不是建立在坚实的科学基础之上。犹如现代的以太理论，人们可以设想：有一种神秘的物质（我们可能称它为“hugonium”），它存在于固体中，导致固体在高应变速率的力学加载下呈现不同程度的流体状流动。

然而，我们没有必要依靠这种“hugonium”的设想，因为现今的固体形变理论和实践已经得到了很大的发展，表明冲击形变的流体状流动是对固体施加的剪切应力超过剪切强度后的一种必然响应，是缺陷运动的一种自然结果。在大多数冲击加载中，剪切应力都远远超出了固体的剪切强度，对此已有大量的理论和实验定性地确证了缺陷的存在，及其产生和运动等特征。因此，我们可以确信在所有超出“Hugoniot 弹性极限”的冲击形变中，固体物质都将产生高浓度的缺陷，无论固体是处于冲击压缩状态，还是处于冲击压缩过后的状态。当然，由于后续的熔化或重结晶等过程的影响，缺陷状态可能发生改变。

我们可以定性地确定冲击形变的流体状流动是缺陷运动的一种必然结果，但是迄今我们尚无法定量描述缺陷的浓度、细节及其影响结果。事实上，冲击波压缩科学一项主要未完成的事业就是如何科学地描述各种情形下出现的固体缺陷。

缺陷运动也是区别于固体和液体冲击波压缩性质的基本特征。在液体中，我们不需要一种特殊的形变机制用于解释观察到的冲击形变现象。虽然，在固体和液体的冲击形变中存在一些表现的、宏观的相似性，但是这两种情况形变的根本问题是不相同的。事实上，液体在经受瞬态的强黏性剪切应力作用时，也可能部

分地产生缺陷，但整体力学响应的数据却不需要用缺陷理论来解释。

1.3 冲击波压缩学说：良性学说和灾变学说

冲击波压缩下固体呈流体状流动，这一概念迄今已被广泛接受。的确，弹性-流体形变学说现在是如此全面、牢固地树立在冲击波压缩理论和实践中，以致缺陷问题的影响还没有被当作是一个基本的主流话题。由于这样的历史状态，在描述或者分析某些理论和实践问题时，我们应该充分地意识到也许不同的学说假设在事先没有声明的情况下就被不自觉地采用了。其中，冲击波压缩“良性学说”的假设基础是固体晶格的完整变形、各向同性以及热力学平衡态等，在传统冲击波压缩科学中占主流地位，被广泛应用于发展理论和解释实验；“灾变学说”[79G01, 80G01]则很少在主流冲击波压缩科学中被提及，基于缺陷晶体及其不均匀性、各向异性和热力学非平衡态等因素来发展理论和解释实验是“灾变学说”的基本出发点。

尽管“良性学说”是一种近似，但被证明是非常有效的；“灾变学说”虽然反映的是更为真实的物理、力学和化学过程，但在描述上却难以量化。

在很大程度上，某项工作采用什么样的学说强烈地受到这项工作的目的、研究者的知识背景，以及被研究材料的真实特性等因素的影响。例如，从流体力学、流体动力学，以及连续介质力学的观点来看，晶格缺陷并不是一个重要的问题。即使在固体力学框架内，固体缺陷虽然是一个值得注意的问题，但也不是主要的。然而在固体物理的讨论中，诸如光、电、磁等在冲击波压缩下的效应，如果晶体物质存在缺陷，那么问题可能是非常严重的。基于固体化学的观点，缺陷问题也是非常重要而有意义的。

由于固体性质和缺陷性质的重要性，我们不能在冲击波压缩流体和冲击波压缩固体两者之间假设某种等价关系，所以本书就是针对这样一种特殊的固体，它与流体具有明显不同的特征。

Kormer [68K02] 在许多年前基于灾变学说对冲击波压缩固体的性质进行了如下描述：

“冲击波是一个强大的缺陷产生器，缺陷来自于波阵面上发生的强烈塑性变形。这些缺陷，如同常规条件下那样，在很大程度上也决定了冲击状态下物质的光学、电学和其他物理特性。正如许多研究者报告的那样，缺陷的产生使得物质相变加快、电导率增加、吸收谱增强，以及可能引起电介质极化等物理现象。”

冲击波压缩科学中流体力学的概念起源可以追溯到早期的一些文献报道，它们关心的主要是波的传播问题，而不是固体材料的物性。的确，从历史发展来看，人们是基于力学波的传播测量，而不是缺陷研究，建立了冲击波压缩科学。