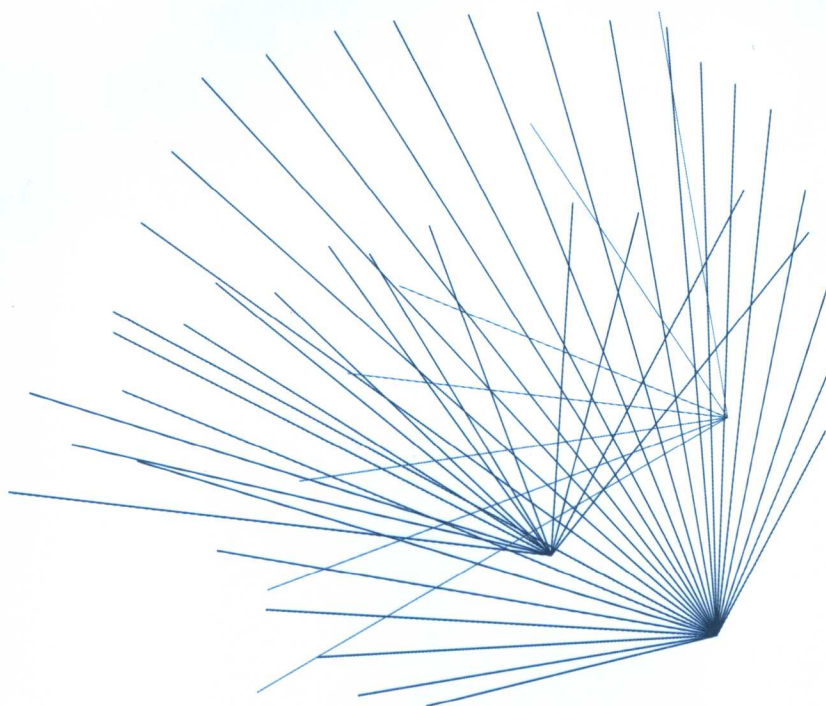


材料的动力学行为

Dynamic Behavior of Materials

(美) Marc André Meyers

张庆明 刘彦 黄风雷 吕中杰 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

责任编辑: 曲 岩 yqu@ndip.cn
余敬春 jcyu@ndip.cn
责任校对: 钱辉玲
封面设计: 王 娜 彭建华

— 上架建议: 材料/动力学 —

<http://www.ndip.cn>

ISBN 7-118-04352-4



9 787118 043525 >

ISBN 7-118-04352-4/TB · 167

定价: 56.00 元

材料的动力学行为

Dynamic Behavior of Materials

张庆明 刘彦 黄风雷 吕中杰 译
(美) Marc André Meyers

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2006-005号

图书在版编目(CIP)数据

材料的动力学行为/(美)迈耶斯(Meyers, M. A.)
著;张庆明等译. —北京:国防工业出版社, 2006. 10
书名原文: Dynamic Behavior of Materials
ISBN 7-118-04352-4

I. 材... II. ①迈...②张... III. 材料力学: 动力学—研究 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 019329 号

Dynamic Behavior of Materials

Copyright © 1994 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license.

※

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 28 字数 646 千字

2006 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 56.00 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

序 言

我很荣幸,能为 Marc André Meyers 教授的这本在国际学术界有重要影响的,非常成功的著作,写中文版的序言。

10年前,当 Meyers 教授的这本书刚刚在美国出版,他就主动地给我寄来了一本。我立即被这本书系统的内容,精湛的见解,深入浅出的叙述所吸引。这正是一本中国学术界需要的书,因为在这个具有重要应用价值的科学技术领域,我们一直还缺少这样一本系统撰写的案头参考书。记得在 20 世纪六七十年代直至八十年代初的时候,鉴于这种工作需要,国内一些单位和学者曾经就部分材料动态力学性质的调研内容编写了讲义,后来只有王礼立教授的“应力波基础”等形成了教材。对于这样一个包含了极其丰富的科学技术内容,充满了挑战性科学问题的前沿领域,缺少一本全面而系统的专著实在是一大缺憾。正如本书作者在其序言中所说的,许多科学家、工程师和研究生不得不通过口头交流,讨论会,查阅论文来逐步积累所需的知识和研究试验。这是个相当长而且困难的过程,若采用统一的方式来讨论这些课题将会带来很多的好处。本书正是满足了这一需要的一本好书。

Meyers 教授长期工作在这一领域的第一线。他通过许许多多的不同类型的研究课题,大量的反复进行的实验工作,与各类实验室和产业部门的极其广泛的联系,形成了对各类材料的各种不同的动态力学性质的深入的体会和广阔的视野。正是他的这种深厚的科学和技术的底蕴,极大地帮助了他能从全局上把握材料的各种错综复杂的动态力学响应:从材料的应变率效应,到各类波动的传播,再到一些特出的动态失效现象等等。成书之后,他又请许多专家仔细审阅书稿,进行修改。因此,在一定意义上讲,这本书又是上世纪后半叶关于材料动态力学性质研究的一个系统而又扼要的总结。所以,无论是初次涉入这一领域的研究生,还是正在此领域从事科学技术工作的学者和工程师,都能从此书的研读中,达到既提纲挈领,又获得深入钻研门道的效果。

特别值得一提的是, Marc Meyers 教授长期以来热情关注中国科学技术事业的发展,他和许多中国学者开展了合作研究,培养了大量的中国研究生。这次,当他知道本书的中文版即将问世之后,立即为此中文版写了序言,而且主动地将他所保存的所有原图提供给出版社使用。

最后,应该感谢北京理工大学的诸位老师,他们在自身教学和科研实践的基础上,完成了这本著作的翻译工作。所以,我相信,中国的读者一定会从 Meyers 教授的这本书的中文版中获取丰富的知识营养,推动这个科学前沿领域的发展。

白 以 龙

2004 年 10 月 20 日

New Preface to Chinese Edition of Dynamic Behavior of Materials

With this Chinese translation of my book, it is my hope that in some small way the dialogue with those scientists, students, and teachers in China who devote their intellectual efforts to the field of dynamic behavior will be deepened and enriched. This text, which has now been used in several US universities as well as India, European Community, Brazil, and Russia, has modest origins. The seed of this undertaking dates back to my early New Mexico Tech days. Prof. Murr and I talked about a book in 1977 but decided to first organize a conference. In fact, a series of five Explomet conferences which we organized and spanned a period of twenty years laid the foundation for my desire to bring together, in one text, a formal exposition of the diverse chemical and physical principles governing the behavior of materials under rapid change under a single discipline. During these conferences, I had the opportunity to appreciate the breadth and depth of interest for this field in China. In particular, we received in 1980 a well written and brilliantly conceived manuscript on thermoplastic shear instability by a mysterious Chinese scholar: Y. Bai. Unfortunately, he was not able to attend the conference. Although we declined to publish all submissions from researchers that could not attend the conference, we made an exception for the manuscript by Bai Yilong, due to its high quality. This was my first interaction with Chinese scholars. Since then, I had many opportunities to learn from, teach, and collaborate with Chinese researchers. My participation in the Second International Symposium on Dynamic Loading and its Effects, chaired by Prof. Zheng Zhemin and co-chaired by Profs. Ding Jing and Zhu Zhaoxiang, helped me develop a true appreciation for the breadth and depth of Chinese research in the field of dynamic behavior of materials. The scientific atmosphere surrounding dynamic material behavior is vibrant in China, and it is my sincere hope that my book will contribute to the scholarly work being carried out there. I would like to dedicate this edition to my current and former students of Chinese extraction, whose presence is vivid in my mind in spite of the many years that sometimes separate the days in which we jointly uncovered new phenomena, ideas, effects.

Marc André Meyers

20 May 2005

中文版序言

在本书中文译本出版之际,我希望通过该书能够加强与中国致力于动力学行为研究的科学家、教师、学生们之间的对话和沟通。本书已在美国的一些大学,以及印度、欧盟、巴西、俄罗斯等国家得到应用,并成为一本适中的学习起点书。

萌生写这本书的念头可追溯到我在新墨西哥理工学院工作的岁月。1977年,Murr教授和我就曾谈起过写一本书的事宜,并决定首先要组织一个会议。实际上,在跨越二十年的时间里我们曾连续组织了五届 Explomet 学术研讨会。这就为能够在单一学科范围内把快速加载下材料行为的各种化学的和物理的原理汇总在一本书中给予科学正规的阐述奠定了基础。这些会议,使我有机会体察和了解到中国在该领域所做研究工作的广度和深度。特别是在1980年,我们曾收到一篇由一位神秘的中国学者——白以龙所写的出色论文,他在这篇学术论文中论述了有关热塑性剪切不稳定问题。遗憾的是他本人没能出席这次会议。尽管当时我们规定不刊登未参会投稿人的文章,但由于白以龙先生高水平的学术论点,我们破例将该文刊发出来。这也是我第一次与中国学者打交道,自那以后,我曾获得多次机会与中国学者们进行学术交流、讲学、相互学习、共同合作。在参加了由郑哲敏教授为主席,丁懋教授和朱兆祥教授为副主席共同主办的第二届国际强动载及其效应学术会议后,使我更真实地感受到中国在材料动态力学行为领域所做的研究工作的深度和广度。研究材料动态力学行为的科学氛围在中国激荡着。我真诚希望,我的这本书能对那里所开展的学术研究有所贡献。

谨将此书奉献给过去和现在的我的出类拔萃的中国学生们,他们朝气蓬勃的身影不时地浮现在我的脑海里。让我们通力合作共同去揭示那些新的现象、新的理念和新的效应吧。

Marc André Meyers

2005年5月20日

译者的话

材料的动力学行为是爆炸力学研究的重要内容,也是材料科学研究的重要方向。材料在爆炸与冲击载荷作用下表现出的动力学行为主要有高速变形、应力波的传播、动态破坏及其他物理、化学响应。爆炸力学与材料科学在军事领域、民用领域的广泛应用,产生了丰富的材料的动力学现象和许多本领域前沿性的课题。本书对该领域以前的研究成果进行了很好的总结。

本书是作者 Marc André Meyers 在美国多所大学所讲授的课堂讲义的基础上编写而成的。作者从高应变率变形力学(弹性波、塑性波、冲击波和爆轰波)到材料的动态响应(本构模型、剪切失稳、动态断裂)系统地阐述了材料动态力学行为,最后还介绍了材料的动态响应在各个领域的应用。本书由浅入深、语言通俗,举例说明贯穿全书,既有理论分析又有实验技术还有工程应用实例。正如白以龙院士在序中所说的“对于这样一个包含了极其丰富的科学技术内容,充满了挑战性科学问题的前沿领域,缺少一本全面而系统的专著实在是一大缺憾”,该书正好弥补了这个缺憾。

本书对材料动态力学行为进行了系统而又扼要的总结,可作为高年级本科生、研究生的教材,也可作为力学与材料科学相关专业科学工作者的参考书。

本书由张庆明、刘彦、黄风雷、吕中杰翻译,张宝钲教授审校。在翻译过程中,译者对原书中发现的错误进行了修改,并加了译者注。在本书的翻译过程中,还得到了陈利副教授、武海军讲师、黄静博士的帮助和支持,在此表示衷心的感谢。

由于译者水平有限,错误及疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

译者

2005年5月

英文原文前言

本书的目的是为读者(主要是工程专业学生、工程师或材料科学家)提供材料动态行为方面的专门知识。全书兼顾了理论、实验和应用,举例说明贯穿所有章节。该书可用来指导工科/理科的高年级学生或者研究生掌握微积分知识的应用;推导过程由浅入深;为方便理解,使用通俗的语言。本书内容顺序从高应变率变形力学(弹性波、塑性波、冲击波和爆轰波)到材料的动态响应(本构模型、剪切失稳、动态断裂)。最后一章在更广的范围内阐述了不同重要技术课题的发展、应用及基本定量分析。本书并不想详尽涵盖所有的课题,为了简明起见,许多重要工作都已被省略。每章后面的参考文献为读者提供了一些额外资料。特别从第二次世界大战以来,全世界主要的研究实验室都对材料动态过程进行了广泛的研究。在过去的 50 年里,有成千上万篇研究论文发表,本作者不得不省略这部分工作的很多部分。这仅仅是一本教科书,不想全面概括这个领域,因此许多该领域的重要内容被忽略了。

本书是作者在过去的 20 年里清楚地感受到学生迫切需要这样一本书所做的回应。许多科学工作者/工程师在进入这个领域时是通过非正式学习过程获取这方面的知识的,如:讨论会、口头讨论、专题论文和研究论文。这是个冗长且低效的过程,若形成正规的课程,采用统一连续的方式来讨论相关课题将会带来很多的好处。本书可作为高年级学生或研究生教材,可在两个学期轻松地(并且全面地)学习所有内容。该书是军事工程学院(Military Institute of Engineering, 巴西),新墨西哥矿业工程学院(New Mexico Institute of Mining and Technology)和加利福尼亚大学圣地亚哥分校(University of California, San Diego, UCSD)课堂笔记的产物,也是基于作者本人的科学兴趣和应用以一种不很协调的方式编写的,书中所用的例子来源于作者的研究工作。然而,作者竭力保持它的一般性和广泛性,使其能满足更宽广范围的需要,使其更有实用价值。本书也非常适合防御/兵器实验室工程师/科学工作者的短期教学。

没有同事和学生的帮助,就没有该书的诞生。自十二岁那年,我触发雷管且炸破我的手和脸,我就经受过“炮火的洗礼”。在陆军里, Mendonca 上尉让我继续学习,我感受到了 TNT 爆炸的强烈冲击和对它的痴迷。移走外壳以后,我们尽可能地靠近爆炸点以获取爆轰过程的照片。在丹佛大学,非常感激 R. V. Orava 引领我走进这个奇妙的学科领域。在他耐心地引导下,我跨过了初涉这个领域的最困难时期。L. E. Murr 在我的专业发展上也起了关键的作用。正是他把我引进 Socorro,才有了我在 New Mexico Tech 的九年最有成果的发展。在该研究所里,他开展了关于冲击波研究的基础工作,而且我继续他的事业。在此,还要感谢 Jaimin Lee(Taejon, 韩国),他教了我许多有关波传播方面的知识。给我同样帮助的还有 Masatake Yoshida(国家工业化学实验室, 日本),他的 MYIDL 程序是一个很重要的教学工具。还有 N. N. Thadhani 博士、L. H. Leme Louro 博士、A. Ferreira 博士、U. An-

drade 博士、S. L. Wang 博士、S. N. Chang 博士、L. H. Yu 博士、J. C. La Salvia 博士、D. A. Hoke 女士、H. C. Chen、S. S. Shang 以及 Y. J. Chen、S. Christy、C. Wictman、C. Y. Hsu 和 K. C. Hsu 等一些聪明勤奋的学生。N. N. Thadhani 和我一起 Socorro 教授这门课并提供了有价值的内容。在 UCSD, 我很幸运的遇到了一个精明年轻的学者 G. Ravichandran。他对本书很有价值的贡献在本书中随处可见。也非常感激 D. Benson, A. H. Chokshi, J. Isancs, S. Nemat - Nasser, J. Starrett 和 K. S. Vecchio 的帮助与合作。在 Sandia 国家实验室和 R. Graham 接触及他的劝告(“……实验必须是定量的和可重复的……”)对我来说都很宝贵, 这使我有勇气更深入地去探讨这个课题。在陆军研究所, George Mayer 的领导和指引对我在这个领域开阔视野有很大的帮助; 在此对他表示深深的敬意。在过去的这些年里, 和 K. Iyer 的多次讨论, 也是激励我写这本书的源泉。

还有许多合作者, 从 EOD (Explosives and Ordnance Disposal, 爆炸和兵器处理) 的技术人员到研究生, 从秘书到项目经理, 在此都未提及。但是, 他们都对此作出了很大的贡献, 在此一并表示感谢。另外, 一些同事对此手稿进行了审校, 非常感谢他们的批评和建议: D. Benson 审校并重写了第 6.6 节; R. Graham 审校了第 8 章; K. H. Oh 审校了第 5 章; K. Iyer 审校了第 17 章; R. J. Clifton 审校了第 3 章; V. F. Nesterenko 一遍又一遍审校了手稿并做了相当大的修改。

最后, 同样非常感谢 Kay Baylor 和 Tina Casso 出色的录入以及陆军研究所 (A. Crowson, E. S. Chen, W. Simmons) 以及国家科学基金 (R. J. Reynik 和 B. MacDonald) 在过去 15 年以来对我的大力支持。

La Jolla, California

1994 年 1 月

目 录

第1章 动态变形和波	1	分析	65
1.1 目的和方法	1	参考文献	69
1.2 本书的结构	4	第4章 冲击波	71
1.3 绳和弹簧的振动	8	4.1 引言	71
参考文献	13	4.2 流体动力学处理方法	73
第2章 弹性波	17	4.2.1 基本假设	73
2.1 变形的动态传播	17	4.3 碰撞	79
2.2 圆柱杆中的弹性波	18	4.4 冲击参数间的关系	83
2.3 弹性波的类型	19	4.5 冲击波的实际波形	84
2.4 弹性波在连续介质中的传播	22	参考文献	86
2.5 扭转波波速的计算	29	第5章 冲击波:状态方程	88
2.6 表面(Rayleigh)波	30	5.1 获得状态方程数据的实验	
2.7 弹性波:求和约定	32	方法	88
2.8 波的反射、折射和相互作用	34	5.2 状态方程的理论计算	89
2.9 波动方程的通解	37	5.3 合金和混合物的状态方程	96
2.10 圆柱杆中的弹性波:补充		5.4 多孔物质和疏松物质的状态	
部分	40	方程	100
2.11 球形应力波	44	5.5 和冲击波有关的温升	104
2.12 用特征线法求解波方程	46	参考文献	107
参考文献	48	第6章 守恒方程的微分形式和更复杂	
第3章 塑性波	49	问题的数值解	109
3.1 引言	49	6.1 引言	109
3.2 单轴应力塑性波	51	6.2 数学回顾	110
3.3 单轴应变塑性波	55	6.3 流体流动	112
3.4 复合应力塑性波	56	6.4 欧拉和拉格朗日参考系	114
3.5 塑性波的其他研究	58	6.5 守恒方程的微分形式	115
3.6 有限长杆的碰撞	59	6.5.1 质量守恒	116
3.6.1 Taylor 实验	59	6.5.2 动量守恒	117
3.6.2 Taylor 实验的 Wilkins-Guinan		6.5.3 能量守恒	118

6.6 有限差分和人工粘性	120	10.6 在固体和液体炸药中爆轰的 传播	184
6.7 Hydorcodes	123	10.7 炸药的热起爆和冲击起爆 ..	185
参考文献	127	参考文献	188
第7章 冲击波的衰减、相互作用 和反射	128	第11章 实验技术:测试手段	189
7.1 引言	128	11.1 引言	189
7.2 冲击波的衰减	131	11.2 时间测试仪	189
7.3 冲击波的相互作用和反射	134	11.3 激光干涉仪	191
参考文献	143	11.4 压阻传感器	194
第8章 冲击波引起的相变和化学 变化	144	11.5 压电传感器	196
8.1 引言	144	11.6 电磁速度传感器	198
8.2 相变热力学	145	11.7 高速摄影和闪光 X 射线 技术	199
8.3 相变和 Rankine-Hugoniot 曲线 ..	147	11.7.1 阴影照相术	200
8.4 材料的冲击相变	151	11.7.2 转镜式摄影机	200
8.5 冲击引起的熔化、固化 和汽化	154	11.7.3 电子变像摄影机和高速 电视摄影机	201
8.6 拉应力脉冲引起的相变	155	11.7.4 闪光射线照像技术	202
8.7 冲击引起化学反应	156	参考文献	204
参考文献	160	第12章 实验技术:产生动态变形 的方法	206
第9章 炸药与材料的相互作用	162	12.1 引言	206
9.1 引言	162	12.2 高应变率下的力学响应	208
9.2 Gurney 方程	165	12.3 高应变率力学试验	210
9.2.1 圆柱形装药	165	12.3.1 中等应变率的装置	210
9.2.2 球形装药	166	12.3.2 Hopkinson(或 Kolsky)杆 ..	212
9.2.3 不对称板形装药	167	12.3.3 膨胀环技术	216
9.2.4 Gurney 能	168	12.4 爆炸驱动装置	218
参考文献	171	12.4.1 线形波发生器和平面波 发生器	219
第10章 爆轰	172	12.4.2 飞板加速	220
10.1 引言	172	12.5 轻气炮系统	221
10.2 守恒方程	173	参考文献	223
10.3 状态方程	174	第13章 高应变率下的塑性变形	225
10.4 von Neumann 峰和装药直径 效应	179	13.1 引言	225
10.5 炸药与材料的相互作用	182	13.2 经验本构方程	226

13.3 位错速度与施加应力的关系	230	第 15 章 剪切带(热塑性剪切失稳) ...	305
13.3.1 位错动力学	230	15.1 定性描述	305
13.3.2 热激活位错运动	234	15.2 本构模型:初步分析	310
13.3.3 位错阻尼机理	239	15.3 本构模型:新进展	313
13.3.4 位错运动的相对论效应	242	15.4 冶金学方面	320
13.3.5 小结	250	参考文献	327
13.4 以物理意义为基础的本构方程	251	第 16 章 动态断裂	329
13.4.1 Zerilli-Armstrong 模型	255	16.1 引言:断裂力学基础	329
13.4.2 力学阈值应力本构模型	257	16.2 动态断裂的独特特征	333
13.5 本构方程的实验验证	259	16.3 极限裂纹速度	334
13.6 塑性变形过程中的温升	260	16.4 裂纹分枝(分叉)	339
参考文献	261	16.5 裂纹的应力波加载	340
第 14 章 冲击波作用下的塑性变形	265	16.6 断裂韧性与应变率有关吗?	342
14.1 冲击波传播产生的强化	265	16.7 动态断裂韧性的测定	346
14.2 位错的形成	271	16.8 层裂	350
14.2.1 Smith 模型	276	16.8.1 定性描述	350
14.2.2 Hombogen 模型	276	16.8.2 定量层裂模型	352
14.2.3 对 Smith 模型和 Hombogen 模型的评述	276	16.8.3 微观结构效应	360
14.2.4 均匀位错成核	278	16.9 破碎	363
14.2.5 Mogilevsky 模型	280	16.9.1 Mott 破碎理论	363
14.2.6 Weertman-Follansbee 模型	281	16.9.2 Grady-Kipp 模型和 Grady 模型	365
14.3 点缺陷的产生	285	16.9.3 破片的内损伤	369
14.4 变形孪晶	288	16.9.4 冲击作用下陶瓷的破碎	371
14.4.1 材料效应和冲击波参数	288	参考文献	374
14.4.2 机理	290	附录	377
14.5 位移/无扩散相变	291	第 17 章 应用	378
14.6 其他效应	294	17.1 引言	378
14.7 亚结构的力学稳定性	297	17.2 聚能装药和爆炸成形弹丸 ...	380
14.8 陶瓷中的冲击波效应	298	17.2.1 射流形成和扩展理论 ...	381
参考文献	300	17.3 侵彻	390
		17.4 装甲	398
		17.5 爆炸焊接	404
		17.6 爆炸成形和爆炸硬化	409

17.7 粉末的冲击过程	409	17.7.5 冲击引起相变与合成 ...	422
17.7.1 引言	409	17.8 地质材料中的动态效应	424
17.7.2 实验技术	410	17.9 空间动力学事件	428
17.7.3 材料效应	415	参考文献	430
17.7.4 理论分析	417		

第 1 章 动态变形和波

1.1 目的和方法

材料的动态行为是许多学科研究的交叉领域。在快速变化的载荷作用下物体发生的过程和在静态或准静态载荷作用下发生的过程明显不同。对于这个问题, 举一个很形象的例子: 我们常常能在老式战争电影中看到熟悉的沙袋, 这些沙袋是士兵用来阻挡子弹的。柔软、可自由流动的沙子能有效地阻止速度量级为 1 英里/秒*(口径为 30.06 的子弹速度)子弹的冲击。同样, 小刀也能刺破沙袋。而一个硬木块或钢, 如果不是特别厚, 子弹可以容易地穿透它, 而小刀却不能。动态行为需要专门研究, 而且材料的惯性和内动力学是一个重要因素。希望本书能给学生提供有用的工具去独立解决本书未讨论的特殊问题。表 1.1 给出了动态过程研究中一些十分重要的科学领域, 这些领域对动态过程的广泛应用也是非常重要的。

理解材料的动态响应是非常重要的, 本节将回顾包括材料动态行为在内的一些最重要的领域, 随后介绍本书的结构。该领域的应用可以简单地分为民用和军用。在所有的应用中, 用物体速度表示的动能公式是极其重要的

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

物体的动能与其速度平方成正比。对一质量为 m 的物体来说, 动能可表示成

$$dE = Fdl$$

其中 dl 是力 F 作用下沿 F 方向的位移。这个动能可以转化为对弹丸和靶板的破坏。这可以从锤子对物体的打击现象上很直观地看到。众所周知, 打击速度越快, 钉子钉得就越深。这样, 当打击速度从 v 增加到 $2v$ 时, 钉子钉入的深度就是原来的四倍。

另外一个极其重要的概念就是静态(或准静态)变形和动态变形之间有着根本的不同。在准静态变形中, 任何时候都处于静态平衡状态, 物体内部作用在每个单元上的合力都约等于零。当变形从外部以很大速率向内传播时, 物体的一部分受应力作用, 而另一部分仍未受应力作用。换句话说, 应力必须传遍整个物体。应力(与之有关的变形, 或应变)在物体内部以一定的速度传播时, 可以进行很好的近似计算。这就叫波, 其速度通常都是确定的。因此, 动态变形通常包含波的传播, 而准静态变形可以看作是平衡状态的结果, 从而可以用大家熟悉的材料力学方程(合力等于零; 合力矩等于零; 应变相容性; 本构关系)进行处理。

* 1 英里=1.609km。——译者注

表 1.1 材料动态过程对科学发展的作用和主要应用

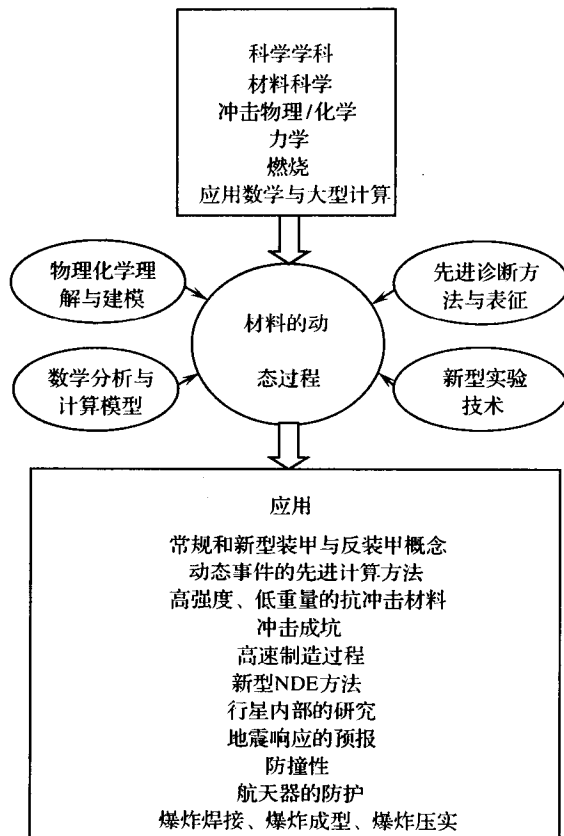


图 1.1 和图 1.2 用示意图的方式总结了动态变形的一般应用。可以说民用方面大都是试图生产，而军用则试图破坏或防护。爆炸加工金属在 20 世纪六七十年代已经发展成一门技术，产生了一些有趣和独特的技术，爆炸焊接是工业中的一项最重要的应用；两块金属顶部以一定空隙叠放在一起，在一块板的顶部爆炸使板以速度 V_p 撞击底部的另一块板。这个速度在撞击界面上形成一个很大的压力峰值，并产生射流，净化两个表面使其粘结在一起。这种技术已经用来焊接熔点很不相同而不容易焊在一起的金属。例如，铝和钛可以与钢焊接在一起。工业上已成功实现的第二个应用是爆炸成形。炸药爆炸产生的能量驱动砧座上的金属板，这可在传导介质，如水中进行，或直接接触进行(炸药和金属直接接触使其成型)。最近研究比较多的应用是冲击合成和冲击压实。DuPont 用冲击合成技术在工业上已经成功地生产了金刚石粉末(由碳合成)。目前正在研究其他材料系统。冲击压实是利用冲击波能量粘合精细的金属粉末(微米级)。冲击波在粉末中传过，通过塑性变形或破裂而使其压实。冲击波把内部能量积聚在颗粒表面，使其熔化粘结。金属、聚合物和陶瓷粉末就曾用这种方法压实过，作为切削工具方面的应用，氮化硼和金刚石的压实产品具有相当大的潜力。图 1.1 中给出了一种冲击压实粉末的方法。图 1.1 中的这种方法是把粉末放在被炸药包围的容器(管状)中，并把它们放在与装有粉末的容器同轴的圆柱形容器中。一端起爆后，驱动管壁向内运动产生非常高的压力压缩粉末。高压使得粉末粘结在一起。爆炸还常用来切割金属，通常采用线性聚能装药，炸药爆

炸产生用以切割金属的金属射流。岩石爆破是另一种重要应用，其中岩石的动态响应很重要。在岩石爆破中压缩波和拉伸波传过岩石时使其破坏，这在采矿和建筑工业中非常重要。

在油井钻探中使用的聚能装药将在本章后面进行介绍。放在岩石洞中的聚能装药，爆炸后在岩石中形成穿孔，有助于石油勘探。当微小陨石以高达 30km/s 的速度冲击空间结构和卫星时，就会出现动态变形。这种冲击会产生巨大破坏，所以对航天器防护机理的研究就需要精通损伤力学知识。地震学的研究使用了来自地球内不同水平线上的反射波和折射波，即 P 波和 S 波，这就需要对波在疏松介质中的传播十分了解。例如，中国和俄罗斯的地下核爆炸，在美国用特殊仪器，通过波的传播可以检测到(反之亦然)。实验表明，许多金属可以用传过它们的冲击波使其硬化。Hadfield 钢(锰基)通过和炸药直接接触爆炸，使其硬度明显提高，而铁轨的硬化就是一个成功的工业应用。

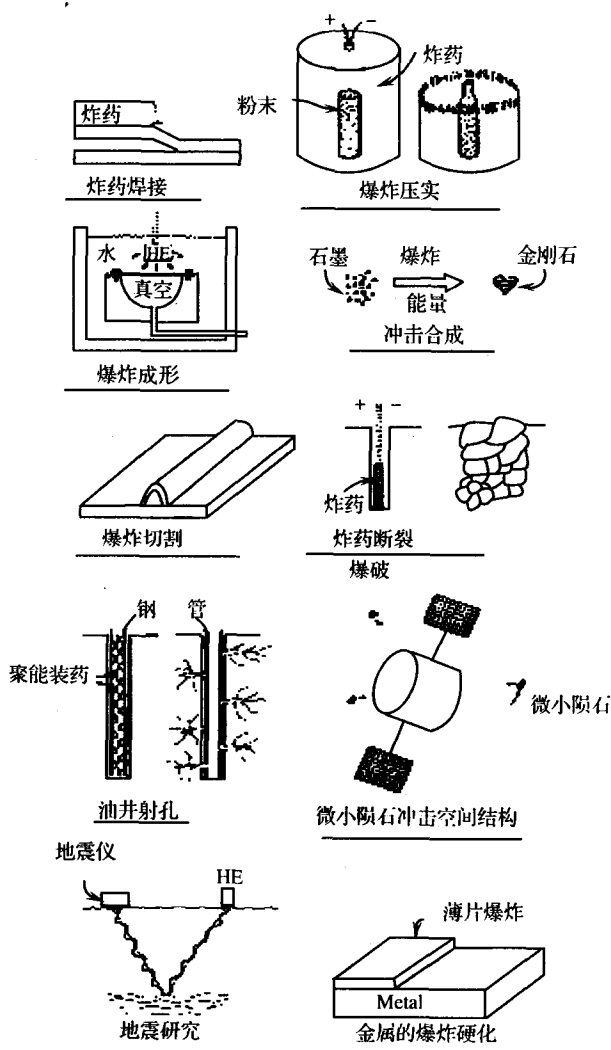


图 1.1 民用方面的应用，其中高应变率现象很重要