



《中国工程物理研究院科技丛书》第052号

实验冲击波物理导引

Introduction to Experimental Shock-Wave Physics

谭 华 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

责任编辑 王坡麟

上架建议：核物理

<http://www.ndip.cn>

ISBN 978-7-118-04949-7



9 787118 049497 >

ISBN 978-7-118-04949-7

定价：39.00 元

《中国工程物理研究院科技丛书》第 052 号

实验冲击波物理导引

**Introduction to Experimental
Shock - Wave Physics**

谭 华 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

实验冲击波物理导引 / 谭华著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 2

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 04949 - 7

I. 实… II. 谭… III. 冲击波试验 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 003127 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 100044)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 15¼ 字数 332 千字

2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 39.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镛

委 员 (按姓氏笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

《中国工程物理研究院科技丛书》 出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编审委员会

1999 年 6 月 4 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》
第五届编审委员会

顾 问 俞大光

编委会主任 杜祥琬

副 主 任 彭先觉 孙 颖 李志民

委 员 (以姓名笔画为序)

华欣生 江 松 刘柯钊 孙承纬 陈银亮

何建国 李 凡 李泽仁 苏 伟 苏 毅

汪小琳 吴志杰 张方晓 张富堂 张 健

罗顺火 孟凡宝 郑志坚 周德惠 竺家亨

顾 援 唐永建 黄 辉 彭述明

科技丛书编辑部负责人 李代斌

本册编辑 李天惠

《中国工程物理研究院科技丛书》

已出版书目

- 001 高能炸药及相关物性能
董海山 周芬芬 主编
科学出版社 1989年11月
- 002 光学高速摄影测试技术
谭显祥 编著
科学出版社 1990年02月
- 003 凝聚炸药起爆动力学
章冠人 等编著
国防工业出版社 1991年09月
- 004 线性代数方程组的迭代解法
胡家贛 编著
科学出版社 1991年12月
- 005 映象与混沌
陈式刚 编著
国防工业出版社 1992年06月
- 006 再入遥测技术(上册)
谢铭勋 编著
国防工业出版社 1992年06月
- 007 再入遥测技术(下册)
谢铭勋 编著
国防工业出版社 1992年12月
- 008 高温辐射物理与量子辐射理论
李世昌 编著
国防工业出版社 1992年10月
- 009 粘性消去法和差分格式粘性
郭柏灵 著
科学出版社 1993年03月
- 010 无损检测技术及其应用
张俊哲 等著
科学出版社 1993年05月
- 011 半导体材料辐射效应
曹建中 著
科学出版社 1993年05月
- 012 炸药热分析
楚士晋 编著
科学出版社 1994年12月
- 013 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆 主编
科学出版社 1994年12月
- 014 放射性核素活度的测量方法和技术
古当长 编著
科学出版社 1994年12月
- 015 二维非定常流和激波
王继海 编著
科学出版社 1994年12月

- 016 抛物型方程差分方法引论
李德元 陈光南 著 科学出版社 1995 年 12 月
- 017 特种结构分析
刘新民 韦日演 主编 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 018 理论爆轰物理
孙锦山 朱建士 著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 019 可靠性维修性可用性评估手册
潘吉安 编著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 020 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析
陈元金 编著 国防工业出版社 1997 年 01 月
- 021 近代成像技术与图像处理
吴世法 著 国防工业出版社 1997 年 03 月
- 022 一维流体力学差分方法
水鸿寿 著 国防工业出版社 1998 年 02 月
- 023 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理
赖祖武 等著 国防工业出版社 1998 年 07 月
- 024 金属的环境氢脆及其试验技术
周德惠 谭云 编著 国防工业出版社 1998 年 12 月
- 025 试验核物理测量中的粒子分辨
段绍节 编著 国防工业出版社 1999 年 06 月
- 026 实验物态方程导引(第二版)
经福谦 著 科学出版社 1999 年 09 月
- 027 无穷维动力系统
郭柏灵 著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 028 真空吸取器设计及应用技术
单景德 编著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 029 再入飞行器天线
金显盛 编著 国防工业出版社 2000 年 03 月
- 030 应用爆轰物理
孙承纬 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 031 混沌的控制、同步与利用
陈式刚 等著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 032 激光干涉测速技术
胡绍楼 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 033 空气炮理论与实验技术
王金贵 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 034 一维不定常流与激波
李维新 著 国防工业出版社 2000 年 12 月

- 035 X射线与真空紫外辐射源及其计量技术
孙景文 编著 国防工业出版社 2001年03月
- 036 含能材料热谱集
董海山 等编著 国防工业出版社 2001年03月
- 037 材料中的氦及氖渗透
王佩璇 宋家树 著 国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体X射线谱学
孙景文 编著 国防工业出版社 2003年01月
- 039 激光核聚变靶物理基础
张钧 常铁强 著 国防工业出版社 2004年11月
- 040 系统可靠性工程
金碧辉 主编 国防工业出版社 2004年06月
- 041 核材料 γ 特征谱的探测和分析技术
田东风 等编著 国防工业出版社 2004年06月
- 042 高能激光系统
苏毅 万敏 编著 国防工业出版社 2004年06月
- 043 近可积无穷维动力系统
郭柏灵 高平 陈瀚林 著 国防工业出版社 2004年06月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应
陈盘训 著 国防工业出版社 2005年06月
- 045 高功率脉冲技术
刘锡三 编著 国防工业出版社 2005年08月
- 046 热电池
陆瑞生 刘效疆 编著 国防工业出版社 2005年08月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论
方泉玉 颜君 著 国防工业出版社 2006年01月
- 048 非牛顿流动力系统
郭柏灵 林国广 尚亚东 著 国防工业出版社 2006年02月
- 049 动高压原理与技术
经福谦 陈俊祥 主编 国防工业出版社 2006年03月
- 050 直线感应电子加速器
邓建军 主编 国防工业出版社 2006年10月
- 051 中子核反应激发函数
田东风 孙伟力 编著 国防工业出版社 2006年11月
- 052 实验冲击波物理导引
谭华 著 国防工业出版社 2007年2月

前 言

冲击波物理是研究凝聚介质,尤其是固体在瞬态载荷作用下产生极端高温—高压状态时发生的各种物理和化学现象及其变化规律的科学,目的是要建立能够对材料和结构在高速撞击、爆炸等载荷作用下表现的各种动力学行为进行正确预言、分析和评价的科学方法。因此冲击波物理的研究内容包括理论研究、实验研究和计算机模拟等方面。本书主要介绍冲击波物理的实验研究方法及其原理,涉及的内容包括与描述压力和密度及温度或内能相互关系的热力学物态方程相关的冲击绝热线的实验测量,与动高压下的固—液相变相关的冲击波温度测量及冲击熔化,与固体的弹—塑性或强度特性密切相关的高压声速测量及本构关系问题,与材料从高压状态卸载时的失效破坏密切相关的层裂现象,以及与固体的多形相变和 off-Hugoniot 复杂加载密切相关的准等熵压缩技术及其初步应用。有趣的是,最后这项技术本来用于较低压力动载实验研究,最终却发展成为能够将弹丸发射到 10km/s 以上无冲击驱动和开展太帕(TPa)超高压状态方程的实验加载技术的重要基础。本书介绍了开展这些实验研究的基本原理、测量技术和数据处理方法;在物理概念上深入浅出,着重于基本模型的剖析,并给出详细清晰的理论推导,在实验方法上注重于实际应用,尽量结合最新研究进展。

在第二次世界大战以后的数十年间,由于常规武器和战略武器的迫切需求,冲击波物理研究在以俄罗斯和美国为代表的西方国家中得到了迅猛发展。各种实验动高压加载技术和测量技术的发展和建立,对金属、岩石、塑料、炸药、有机物、液体和气体在冲击波载荷作用下的响应特性的广泛研究,在此过程中获得材料在动态压缩下的压缩性、力学性质、动态失效破坏、光学、电学性质、晶体结构性质(相变)等多方面的新知识,使 20 世纪 50 和 60 年代成为奠定现代实验冲击波物理的黄金时代。90 年代中期以后,由于热核聚变、超高速碰撞的需求,由于禁核试条约的签订,动高压物理的实验室研究又一次迎来了全新的发展时期。计算机数值模拟能力的飞跃发展对冲击波精密物理实验测量提出了更高、更新的要求。世界科学技术的进步也推动了中国工程物理研究院在相关领域的发展。进入 90 年代以后,我国冲击波物理实验涉及的研究领域日益扩展,尤其是具有高时—空分辨力的瞬态实验测量技术的进步和发展,使过去难以进行的冲击波物理实验测量(例如冲击波引发多形相变的高时间分辨力测量,材料失效破坏的实时诊断等)成为可能,也使我们能够从新的视角对冲击波物理中的许多问题重新进行审视。作者深感有必要写一本书总结中国工程物理研究院近年来在实验冲击波物理基础性研究方面取得的一些进展,供从事动高压物理实验科学研究的专业人员参考,也可以供相关学科感兴趣的研究人员和研究生学习和参考。

本书涉及的内容是当前国内、外动高压物理基础研究领域重点关注的方向。这些研究内容与地球物理、天体物理、力学、材料科学等研究领域密切相关,在航天器防护、新材

料合成、爆炸效应等民用和军事领域中有重要应用。本书是作者长期在中国工程物理研究院从事冲击波物理实验研究以及在研究生教学工作的基础上写作的一本专著,突出反映了近十多年来中国工程物理研究院在实验冲击波物理基础研究的一些领域取得的进展;一方面反映作者的工作积累和对一些繁杂的物理问题的思考和剖析,另一方面融合作者所在的研究集体的部分成果,包括作者在平时的学术讨论和在指导研究生的论文工作中受到的启迪。可以说,没有冲击波物理和爆轰物理重点实验室这样一个学术氛围浓厚的研究集体,就不会有现在这本专著的问世。在此,谨对长期以来共同工作、学习和生活的同事们表示深切感谢,感谢他们在长期的科研工作中给予我的帮助和支持。本书的写作自始至终得到了中国工程物理研究院科技丛书编委会和院、所主管领导的关心。衷心感谢中国工程物理研究院朱建士院士在百忙中审查书稿,诚挚感谢国防科技大学张若棋教授和宁波大学陈大年教授对书稿提出的宝贵修改意见。本书的出版得到了国防科技图书出版基金的鼎力资助。

虽然作者已经尽了极大努力,但是由于作者工作经历和专业水平的限制,本书不足之处敬请读者批评指正。

作者

2006年10月22日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 冲击波物理和状态方程研究的意义	1
1.2 流体模型近似与冲击波压缩的守恒方程	3
1.2.1 流体模型近似	3
1.2.2 冲击波压缩的守恒方程	4
1.3 高压物态方程的实验研究方法	7
1.3.1 动高压加载技术	7
1.3.2 实验测量方法	9
1.4 特征线理论基础	9
1.4.1 小扰动传播的守恒方程	9
1.4.2 特征线方程的导出	11
1.5 本书讨论的范围	14
第 2 章 冲击绝热线的实验测量	15
2.1 冲击绝热线的走向	15
2.1.1 冲击波速度与粒子速度关系的 5 种基本类型	15
2.1.2 极端高压下金属材料冲击绝热线的走向	17
2.2 冲击绝热线的基本性质	18
2.2.1 冲击绝热线是从同一始态出发的冲击压缩终态的轨迹	18
2.2.2 冲击波压缩的总功平均分配给比内能和比动能	19
2.2.3 冲击压缩的熵增	19
2.2.4 从同一始态出发的主冲击绝热线与等熵线在始点二阶相切	20
2.2.5 沿着主冲击绝热线的声速	22
2.2.6 冲击波速度与波前、波后声速的关系	23
2.2.7 等温线、等熵线和冲击绝热线的相对位置关系	24
2.3 冲击绝热线的理论预估	25
2.3.1 纯净密实材料	26
2.3.2 理想混合物	28
2.4 疏松材料的冲击绝热线	31
2.5 冲击绝热线的实验测量方法	36
2.5.1 冲击绝热线的绝对法测量——标准材料冲击绝热线的建立	36
2.5.2 冲击绝热线的对比法测量——阻抗匹配法 I	36
2.5.3 冲击绝热线的对比法测量——阻抗匹配法 II	41

2.6	冲击波在自由面的反射	42
2.6.1	与冲击绝热线相交的等熵线	43
2.6.2	卸载到零压时的比容与声速	44
2.6.3	自由面速度	45
2.6.4	沿着等熵线的温度	46
2.7	实验样品设计的一般原理	47
2.7.1	边侧稀疏波的影响	47
2.7.2	追赶稀疏波的影响	48
2.8	利用冲击绝热压缩数据建立 Gruneisen 物态方程	50
2.8.1	固体冷能的基本形式	52
2.8.2	利用等温压缩实验数据构建 Gruneisen 物态方程	55
2.8.3	利用冲击绝热数据构建 Gruneisen 物态方程	57
2.8.4	Q, q 方法	59
2.9	等熵绝热线的一种解析表达式	61
第3章	冲击波温度测量	67
3.1	冲击波温度测量的意义	67
3.2	透明材料的冲击波温度测量	68
3.2.1	辐射法测温的原理和基本假设	68
3.2.2	透明材料的冲击波温度测量	69
3.3	金属材料的冲击波温度测量	72
3.3.1	金属冲击波温度测量的主要困难	72
3.3.2	辐射高温计及其标定	73
3.3.3	“样品/窗口”界面辐射能的确定	75
3.3.4	“样品/窗口”界面温度的确定	77
3.4	理想界面模型	78
3.4.1	理想界面模型热传导方程的解	78
3.4.2	冲击波温度测量的样品设计	80
3.4.3	卸载温度和冲击波温度的导出	81
3.5	冲击波温度的理论预估	85
3.5.1	单相区的冲击波温度	86
3.5.2	固-液混合相区的状态及过热卸载模型	87
3.5.3	利用能量原理判定初始冲击状态所在的相区	91
3.6	非理想界面模型	92
3.6.1	冲击波与“样品/窗口”间隙界面的作用	93
3.6.2	四层介质热传导模型	96
3.6.3	使用镀膜样品对冲击波温度测量的影响	99
3.6.4	冲击波温度测量实验中基板和镀膜样品的设计原则	104
3.6.5	直接利用平板样品测量冲击波温度	105
3.6.6	窗口材料高压热传导率的实验测量	108

第4章 金属的冲击熔化	112
4.1 金属的冲击熔化相变	112
4.2 高压熔化规律	113
4.2.1 林德门熔化定律	113
4.2.2 几种常用的高压熔化经验规律	114
4.2.3 高压熔化温度的理论预估	118
4.3 含固—液相变的热传导方程的解	119
4.3.1 金属样品因界面热传导发生凝固相变	120
4.3.2 窗口材料因界面热传导发生熔化相变	126
4.3.3 界面热传导引起金属样品凝固和窗口材料熔化相变同时发生	133
4.3.4 金属材料辐射法冲击波温度测量的基本结果	136
4.4 冲击熔化温度的实验测量	137
4.4.1 判定金属冲击熔化压力区间的几种实验方法	138
4.4.2 直接测量金属高压熔化温度的方法	139
4.4.3 固体高压熔化线的走向	144
第5章 高压声速测量	147
5.1 一维应变加载状态的声速	147
5.2 声速测量的基本原理	149
5.2.1 光分析法	150
5.2.2 非对称碰撞的光分析法	154
5.2.3 透明窗口的光分析法	155
5.3 沿着卸载路径声速的实验测量	158
5.3.1 基本原理	158
5.3.2 实验方法的改进	160
5.4 卸载路径	163
5.4.1 纵波在“样品/窗口”界面上反射的特征线求解	163
5.4.2 卸载路径的计算方法	165
5.4.3 窗口材料的应力随粒子速度的变化	166
5.4.4 LY12 铝合金的声速和卸载路径测量	167
第6章 金属材料在冲击压缩下的强度	170
6.1 基本模型	171
6.1.1 一维应变状态的理想弹—塑性模型	171
6.1.2 Hugoniot 弹性极限	173
6.1.3 加载屈服和卸载屈服	175
6.2 硬化的影响	176
6.3 屈服强度的实验测量	178
6.3.1 AC 方法的基本假设	178
6.3.2 实验测量原理	179
6.3.3 实验数据处理方法	181

6.3.4	预冲击压缩下的应力状态	185
6.4	本构模型简介	186
6.4.1	两种常用的“低压”本构方程	187
6.4.2	SCG 本构模型	188
6.4.3	沿着冲击绝热线的剪切模量	190
6.4.4	准弹性卸载和有效剪切模量	192
6.5	层裂基础	193
6.5.1	自由面速度剖面的一般特征	194
6.5.2	材料中的应力分布	195
6.5.3	发生层裂时自由面速度变化与层裂强度的近似计算	197
6.5.4	层裂强度与负压区的卸载路径	199
6.5.5	层裂片的近似厚度	201
第7章	准等熵加载技术及其应用	202
7.1	产生准等熵压缩的实验方法	203
7.1.1	斜波法	203
7.1.2	阻抗梯度飞片(Pillow 飞片)加载法	204
7.2	准等熵压缩的实验测量方法	206
7.3	准等熵压缩与多形相变实验研究	209
7.3.1	多形相变的实验测量	209
7.3.2	钚在低压下的多形相变	211
7.3.3	铋的再凝固相变	212
7.4	利用阻抗梯度飞片驱动技术实现超高速发射	214
参考文献	217