



《中国工程物理研究院科技丛书》第074号

实验冲击波物理

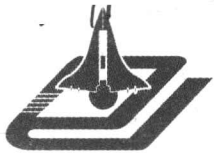
Experimental Shock Wave Physics

谭华 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

《中国工程物理研究院科技丛书》第 074 号

实验冲击波物理

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 / 谭华著. —北京:国防工业出版社, 2018. 5

ISBN 978-7-118-11562-8

I. ①实… II. ①谭… III. ①冲击波-物理学 IV. ①O347. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 100358 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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 27 $\frac{3}{4}$ 字数 610 千字

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 168.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,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。这是一项具有深远意义的创举。

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中央军委装备发展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,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展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。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,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
第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜
副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥
秘书长 赵伯桥
副秘书长 许西安 谢晓阳
委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书 甘茂治
(按姓氏笔画排序) 甘晓华 卢秉恒 巩水利 刘泽金 孙秀冬
芮筱亭 李言荣 李德仁 李德毅 杨伟
肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军
陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起 郭云飞
唐志共 陶西平 韩祖南 傅惠民 魏炳波

《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 50 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技任务。通过完成任务,在许多专业领域里,不论是在基础理论方面,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 50 年来在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的二十几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书自 1989 年开始出版,在今后一段时期还将继续编辑出版。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 50 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

2008 年 5 月 8 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》 第七届编审委员会

学术顾问 杜祥琬

编委会主任 彭先觉

副主任 孙承纬 汪小琳 赵武文

委员 (以姓氏笔划为序)

王 韬 帅茂兵 田 勇 李 凡 李正宏
李泽仁 李敬明 吴兴春 何建国 何宴标
张 凯 张 健 张文平 张方晓 张保汉
陈贤林 罗文华 孟凡宝 赵 锋 赵 强
赵小东 袁光伟 莫 军 黄秀光 彭述明
曾 超 魏晓峰

科技丛书编辑部

负责人 唐 勇

本册编辑 王立楠

《中国工程物理研究院科技丛书》 公开出版书目

- | | | | |
|-----|--------------------------|---------|----------|
| 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 陈大年 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 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 著 | 国防工业出版社 | 1992年10月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式的粘性
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 | 半导体材料的辐射效应
曹建中 等著 | 科学出版社 | 1993年05月 |
| 012 | 炸药热分析
楚士晋 著 | 科学出版社 | 1993年12月 |
| 013 | 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆 等著 | 科学出版社 | 1994年12月 |
| 014 | 放射性核素活度测量的方法和技术
古当长 著 | 科学出版社 | 1994年12月 |
| 015 | 二维非定常流和激波
王继海 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 编著 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 近代成象技术与图象处理
吴世法 编著 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 编著 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 实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 著 国防工业出版社 2000年03月
- 030 应用爆轰物理
孙承纬 卫玉章 周之奎 著 国防工业出版社 2000年12月
- 031 混沌的控制、同步与利用
王光瑞 于熙龄 陈式刚 编著 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 气体炮原理及技术
王金贵 编著 国防工业出版社 2000年12月
- 034 一维不定常流与冲击波
李维新 编著 国防工业出版社 2001年05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08月
- 036 含能材料热谱集
董海山 胡荣祖 姚朴 张孝仪 编著 国防工业出版社 2001年10月
- 037 材料中的氦及氡渗透
王佩璇 宋家树 编著 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06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 特征谱的测量和分析技术
田东风 龚健 伍钧 胡思得 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 2004年06月
- 045 高功率脉冲技术
刘锡三 编著 国防工业出版社 2004年08月
- 046 热电池
陆瑞生 刘效疆 编著 国防工业出版社 2004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03月
- 053 核军备控制核查技术概论
刘成安 伍钧 编著 国防工业出版社 2007年03月

- 054 强流粒子束及其应用
刘锡三 著 国防工业出版社 2007年05月
- 055 氙和氟的工程技术
蒋国强 罗德礼 陆光达 孙灵霞 编著 国防工业出版社 2007年11月
- 056 中子学宏观实验
段绍节 编著 国防工业出版社 2008年05月
- 057 高功率微波发生器原理
丁武 著 国防工业出版社 2008年05月
- 058 等离子体中辐射输运和辐射流体力学
彭惠民 编著 国防工业出版社 2008年08月
- 059 非平衡统计力学
陈式刚 编著 科学出版社 2010年02月
- 060 高能硝胺炸药的热分解
舒远杰 著 国防工业出版社 2010年06月
- 061 电磁脉冲导论
王泰春 贺云汉 王玉芝 著 国防工业出版社 2011年03月
- 062 高功率超宽带电磁脉冲技术
孟凡宝 主编 国防工业出版社 2011年11月
- 063 分数阶偏微分方程及其数值解
郭柏灵 蒲学科 黄凤辉 著 科学出版社 2011年11月
- 064 快中子临界装置和脉冲堆实验物理
贺仁辅 邓门才 编著 国防工业出版社 2012年02月
- 065 激光惯性约束聚变诊断学
温树槐 丁永坤 等 编著 国防工业出版社 2012年04月
- 066 强激光场中的原子、分子与团簇
刘杰 夏勤智 傅立斌 著 科学出版社 2014年02月
- 067 螺旋波动力学及其控制
王光瑞 袁国勇 著 科学出版社 2014年11月
- 068 氟化学与工艺学
彭述明 王和义 主编 国防工业出版社 2015年04月
- 069 微纳米含能材料
曾贵玉 聂福德 等 著 国防工业出版社 2015年05月
- 070 迭代方法和预处理技术(上册)
谷同祥 安恒斌 刘兴平 徐小文 编著 科学出版社 2016年01月
- 071 迭代方法和预处理技术(下册)
谷同祥 徐小文 刘兴平 安恒斌 杭旭登 编著 科学出版社 2016年01月
- 072 放射性测量及其应用
蒙大桥 杨明太 主编 国防工业出版社 2018年01月

073 核军备控制核查技术导论

刘恭梁 解 东 朱剑钰 编著

中国原子能出版社 2018年02月

074 实验冲击波物理

谭 华 著

国防工业出版社 2018年05月

前 言

冲击波物理是研究凝聚态物质,尤其是固态物质,在瞬态外力作用下的状态和性质变化规律的一门基础科学。目的是建立能够对物质受到高速碰撞和爆炸等极端外力作用时的动力学行为正确地进行预言、分析和评价的科学方法。众所周知,在第二次世界大战后,由于核武器研究的迫切需求,冲击波物理学科在苏联和美国等西方国家中得到了迅猛发展。到20世纪80年代初,国外就公布了金属、岩石、塑料、炸药、无机化合物、有机化合物、液体和气体等许多物质的冲击绝热压缩数据,建立了比较完备的、描述这些物质受到冲击压缩的响应特性的数据库。随着冲击波物理研究领域的不断拓展、实验测量技术的不断进步和计算模拟能力的迅速提高,这些数据库一直在不断修订和扩充之中。

我国冲击波物理的系统性研究始于20世纪50年代后期。因战略武器发展的需求,中国工程物理研究院的老一代科学家在非常困难的条件下开始了这项极具挑战性的工作。与其他核大国一样,首先发展和建立的动高压实验手段是用炸药爆轰释放的化学能产生高压冲击波的实验技术和相应的测量技术,后来又发展了以二级轻气炮为代表的气炮加载实验技术。早期的实验研究也集中在强冲击压缩下相关材料的冲击绝热参数测量上。作者有幸从20世纪70年代初参加到实验冲击波物理研究工作中。到90年代初,国内外冲击波物理研究已经发展到了较高水平。90年代中期《禁止核试验条约》的签订使战略武器的可持续发展面临严峻的挑战,也为冲击波物理学科的发展带来了新机遇。特别是进入21世纪以后的10多年以来,我国在发展极端条件下的动高压物理的实验研究能力方面取得了长足进步,包括:在实验室条件下产生太帕(10^7 bar)超高压平面冲击波压缩的三级炮技术;具有极端应变率的斜波加载技术;对具有亚纳秒至皮秒时间分辨力的瞬态动力学过程的精密实时诊断的能力;对实验测量数据的物理解读能力。从而标志着我国冲击波物理实验研究进入了国际先进行列。作者深感有必要对10年前出版的《实验冲击波物理导引》进行全面修订扩充,以便与有关领域的研究者分享作者和所在研究团队近20年来在实验冲击波物理的基础研究方面取得的成果。

多年来,已经有不少论述冲击波物理基本问题的经典著作问世。本书主要讨论当前实验冲击波物理研究领域最感兴趣的一些重要问题。由于当时实验研究重点关注内容的不同和研究能力的限制,这些问题在以往的著作中较少或基本没有涉及。本书注重于对实验研究中引用的基本概念和描述的物理图像进行剖析,从不同角度对本构关系这类经典问题和极端应变率斜波加载这类新问题进行讨论,引导读者认识当今冲击波物理实验的研究现状和发展方向;注重于建立具有实用价值的实验装置的设计方法,以及对实验数据的物理解读,以便能够从实验测量数据中获得规律性的认识。

本书第1章至第4章聚焦于冲击压缩产生的高温-高压状态的实验研究。第1章对冲击绝热压缩 Hugoniot 状态及流体近似模型的含义进行分析,这是能够把冲击绝热数据用于 Grüneisen 物态方程计算的基础;对小扰动传播的特征线理论及所描述的物理图像

进行剖析,这是分析和研究连续应力波的基础;从拉格朗日(拉氏)坐标的含义出发推导拉氏坐标下的守恒方程、拉氏声速及拉氏坐标下的特征线方程。在第2章中重点介绍冲击绝热线的实验测量方法,专门介绍苏联在极低密度疏松材料的冲击绝压缩研究方面的进展;尽管对金属材料冲击温度的辐射法实验测量研究工作已经持续了半个多世纪,但至今尚有许多问题没有得到很好解决。在第3章和第4章中分别对冲击波温度测量的非理想界面模型、能够直接获得冲击熔化温度的TDA模型及冲击波温度测量的实验数据解读方法重新进行梳理。还对“金属样品/透明窗口”界面热传导引发的窗口材料的熔化对辐射法测温的影响进行深入分析,有可能找出以往的辐射法测温实验中有时出现奇异温度数据的原因。

第5章至第7章重点讨论极端应力冲击压缩技术和高应变率连续应力加载实验技术及动力学性质的实验研究问题。第5章以声速测量技术的发展历程为主线,介绍各种测量方法的基本原理,引导读者理解不同声速测量技术的适用性。首先阐述小扰动应力波传播速度的实验测量方法,这是开展固体材料在极端应变率斜波加载下的动力学响应实验测量的基础;然后重点介绍从反向碰撞实验测量的粒子速度剖面获取声速及原位粒子速度的方法,以及计算卸载路径的方法;最后阐述从冲击压缩状态卸载时发生的准弹性-塑性转变与冲击压缩时出现的弹-塑性转变的本质区别。

第6章围绕单轴应变极端条件下金属材料的弹-塑性屈服和剪切强度展开讨论。重点关注在兆巴压力和 $10^6/s$ 以上应变率的斜波加载下固体材料的强度的测量方法。首先阐述单轴应变加载下固体材料强度的含义及表征强度特性的两个基本力学方程;然后阐述沿着再加载路径或卸载路径的准弹性区的有效剪切模量的测量方法,根据有效剪切模量判定发生准弹-塑性屈服的原理。对测量金属材料在冲击压缩 Hugoniot 状态下的强度的AC方法,在单轴应变斜波加载下的测量强度的双屈服面法的基本原理,进行深入剖析;讨论固相区的 Hugoniot 状态偏离冲击加载的屈服面,而准等熵斜波加载状态能保持在屈服面上的原因。在分析 LY12 铝合金的剪切模量和屈服强度测量数据的基础上,对传统的 Steinberg 本构关系中的剪切模量方程提出修正,给出描述沿着准弹性卸载路径的有效剪切模量随卸载压力变化的修正方程。第6章还对层裂的图像和测量方法进行初步讨论。6.6节就单轴应变条件下的泊松比与声速的关系进行了讨论,给出了准弹性区的声速与泊松比的关系,揭示了发生冲击熔化时的泊松比随冲击熔化压力的变化规律。

第7章首先介绍产生极端应变率斜波加载的三种基本方法。重点介绍根据叠层型阻抗梯度飞片产生的无冲击驱动原理研制的三级炮、三级炮超高速发射技术以及在太帕超高压区冲击绝热线测量中的应用。对利用准连续型阻抗梯度飞片产生具有兆巴峰值应力和 $10^5 \sim 10^6/s$ 峰值应变率的斜波加载的原理、实验测量技术、实验装置设计方法,以及从实测的粒子速度剖面计算原位应力-应变状态的反向积分算法原理,进行剖析。本章讨论的第二个问题是聚心球面冲击波压缩。推导球面冲击压缩下的守恒方程;从守恒方程出发,对聚心球面冲击波后流场的图像进行分析。阐明球面冲击波后的状态与平面冲击 Hugoniot 状态的本质区别:球面冲击波阵面后不存在平台应力区;球面冲击压缩的瞬时冲击状态虽然位于 Hugoniot 线上,但冲击波阵面过后被压缩材料立即进入 off-Hugoniot 状态并沿着 off-Hugoniot 线连续变化。因此,球面冲击波阵面后紧跟着斜波。该图像将球面冲击压缩与高应变率斜波加载关联起来。在此基础上,对球面冲击压缩下

基于平均冲击波速度的对比法实验测量及可能引入的偏差进行分析。最后对三种宏观相变动力学模型进行深入剖析;就如何利用两共存相区的冲击绝热数据构建两相物态方程的方法进行初步讨论。

第8章讨论具有超快时间分辨力的激光干涉技术。为了深刻理解传统激光速度干涉仪(VISAR)的本质,也为了理论叙述的条理性和系统性,便于非激光专业人员阅读,作者以不同的视角对多普勒频移、拍频干涉原理和Barker型离散VISAR的基本结构、光路设计方法及数据解读方法进行详细分析;论证导致VISAR条纹丢失的根源是VISAR测量的条纹与界面的加速度直接关联而不是与界面速度直接关联。虽然许多动力学过程的速度变化非常有限,但由于过程变化极其迅速因而其加速度极大,导致VISAR测量有时会丢失干涉条纹。基于这一认识,提出通过激光位移干涉测量获得界面速度的设想,因为即使加速度很大但极短时间间隔内发生的位移依然非常有限。论述基于多模-单模模式转换思想和位移干涉原理发明的全光纤激光位移干涉仪(DISAR)的基本原理、光路基本结构和数据解读方法;给出DISAR在多种超快动力学过程的测量结果,证明了DISAR设计思想的正确性,能够避免丢失干涉条纹;简要介绍在DISAR技术的基础上进一步发明的光波-微波混频干涉仪(OMV)的性能和优点,以及在超高速实验测量中的应用。

本书可供从事凝聚态物理、地球物理、天体物理和材料科学等研究领域的研究者,以及从事航天器防护、新材料合成、爆炸及其效应等应用研究的有关人员阅读;也可作为相关专业的大学本科生、研究生和教师的教材或参考书。

本书是作者在中国工程物理研究院长期从事冲击波物理实验研究以及研究生教学工作的基础上撰写的一本专著,融合了作者所在研究团队的部分研究成果。没有他们在长期的科研工作合作,给予作者的帮助和支持,不可能完成本专著的写作。部分章节也参考引用了国外相关研究的成果(均列出参考文献)。衷心感谢戴诚达博士、俞宇颖博士、翁继东博士、柏劲松博士和谭叶博士对本书部分章节的校阅及提出的宝贵修改意见。感谢中国工程物理研究院赵宪庚院士、宁波大学陈大年教授和中国工程物理研究院流体物理研究所吴强研究员对本书出版的支持和帮助。

谨以此书献给50年来一起工作、相互学习、共同生活的同事们和朋友们。

感谢我的家人在本书5年多的写作过程中给予的鼓励和支持。

本书的出版得到了国防科技图书出版基金、《中国工程物理研究院科技丛书》出版基金的鼎力资助。感谢国防工业出版社于航编辑为本书的顺利出版付出的辛勤劳动。

不足之处敬请读者批评与指正。

谭 华

2017年4月30日

于四川绵阳

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 冲击波物理和物态方程研究的意义	1
1.2 流体近似模型与冲击波压缩的守恒方程	5
1.2.1 流体近似模型	5
1.2.2 平面冲击波压缩的守恒方程	6
1.2.3 冲击绝热线测量在物态方程研究中的意义	8
1.3 冲击波物理的实验研究技术	9
1.3.1 实验加载技术	10
1.3.2 实验测量技术	13
1.4 小扰动传播的特征线理论基础	14
1.4.1 小扰动传播的守恒方程	14
1.4.2 小扰动传播的特征线方程	16
1.5 拉格朗日坐标及守恒方程	20
1.5.1 拉格朗日坐标与拉格朗日坐标系	20
1.5.2 拉格朗日坐标系中的守恒方程	23
1.5.3 拉格朗日坐标系中的特征线方程	25
第 2 章 冲击绝热线的实验测量	27
2.1 冲击绝热线的基本走向	27
2.1.1 冲击波速度与粒子速度关系的五种基本类型	27
2.1.2 极端高压下金属材料的冲击绝热线	31
2.1.3 不同压力区 $D-u$ 冲击绝热线的基本特点	32
2.2 冲击绝热线的基本性质	34
2.2.1 冲击绝热线是从同一始态出发的经平面冲击压缩达到的所有终态 的轨迹	34
2.2.2 冲击波压缩的总功平均分配给比内能和比动能	35
2.2.3 冲击压缩的熵增	35
2.2.4 从同一始态出发的等熵线与主 Hugoniot 线在始点二阶相切	36
2.2.5 沿着主 Hugoniot 的体波声速	38
2.2.6 冲击波速度与波前声速及波后声速的关系	39
2.2.7 等温线、等熵线和冲击绝热线的相对位置关系	40
2.3 冲击绝热线的理论预估	42
2.3.1 纯净密实材料	42
2.3.2 理想混合物	45

2.4	疏松材料的冲击绝热线	48
2.4.1	极低密度疏松材料 $D-u$ 冲击绝热线的一般特征	49
2.4.2	极低密度疏松材料的 $p-\rho$ 冲击绝热线的一般特征	51
2.4.3	依据密实材料的冲击绝热线估算疏松材料的冲击绝热线	52
2.4.4	冲击压缩下疏松材料的空穴塌缩模型	55
2.5	冲击绝热线的实验测量方法	57
2.5.1	冲击绝热线的绝对法测量及标准材料冲击绝热线的建立	57
2.5.2	冲击绝热线的对比法测量	59
2.5.3	第二类对比法实验装置	64
2.5.4	对比法实验测量中隐含的基本假定	66
2.5.5	冲击波通过两种不同物质之间的界面时反射波的性质	67
2.5.6	疏松材料冲击绝热线的对比法实验测量	68
2.6	冲击波在自由面的反射	69
2.6.1	与冲击绝热线相交的等熵线	70
2.6.2	卸载到零压时的比容与声速	72
2.6.3	自由面速度	73
2.6.4	沿着等熵线的温度	73
2.7	实验样品设计的一般原理	74
2.7.1	边侧稀疏波的影响	75
2.7.2	追赶稀疏波的影响	76
2.8	利用冲击绝热压缩数据建立 Gruneisen 物态方程	78
2.8.1	固体冷能的基本形式	80
2.8.2	利用静高压实验数据构建 Gruneisen 物态方程	83
2.8.3	利用冲击绝热数据和静高压数据构建 Gruneisen 物态方程	85
2.8.4	关于 Q, q 方法	88
2.9	等熵绝热线的一种解析表达式	89
2.9.1	以冲击绝热线为参考的等熵线的解析式	90
2.9.2	与主 Hugoniot 有公共始点的等熵压缩线	93
第3章	冲击波温度测量	95
3.1	冲击波温度测量的意义	95
3.2	透明材料的冲击波温度测量	96
3.2.1	辐射法测温的原理和基本假定	96
3.2.2	透明材料的辐射法冲击波温度测量	97
3.3	金属材料的冲击波温度测量	101
3.3.1	金属冲击波温度测量的主要困难	101
3.3.2	多通道瞬态辐射高温计及其标定	103
3.3.3	“样品/窗口”界面辐射能的确定	105
3.3.4	光纤高温计	106
3.3.5	“样品/窗口”界面温度的确定	107