

脉冲束辐照材料动力学

Materials Dynamics Under Pulse Beam Radiation

周南 乔登江 著



国防工业出版社

脉冲束辐照材料动力学

**Materials Dynamics Under Pulse
Beam Radiation**

周 南 乔登江 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

脉冲束辐照材料动力学/周南,乔登江著. —北京:
国防工业出版社, 2002. 8
ISBN 7-118-02640-9

I. 脉... II. ①周... ②乔... III. 材料辐照效应
IV. TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 060084 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)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 21 1/8 546 千字
2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月北京第 1 次印刷
印数:1—2000 册 定价:38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员 (以姓氏笔划为序)	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

序

强脉冲射线束的研究是 60 年代开始发展起来的一门新兴科学技术,它研究的对象包括强 X 射线、强激光、强电子束、强离子束等,主要研究射线束的产生、传播以及与物质的作用。强脉冲射线束的研究已经在许多科学研究、工程技术和国防科技的领域中得到应用,受到高度重视。

脉冲束与物质作用可以产生多种效应,辐照半导体材料将引起电离效应和位移效应,造成电子器件和电路的损伤;在材料和结构中将产生各种热—力学效应,这些效应在理论上和实际应用中均有重要意义。辐照效应的研究对现代科学的许多领域也有重要的促进作用,例如惯性约束聚变、高功率激光器、材料动态性能和物理力学参数测定、材料表面工程技术等。

作者在本书中集中于辐照在材料与结构中产生的各种热—力学效应,并且将其作为“脉冲束辐照材料动力学”来阐述。对脉冲束辐照产生的热—力学效应的研究与一般的爆炸、高速碰撞等问题有某些相同之处,又有许多自身的特点,因此作者将其归结为独立的学科,作为“冲击动力学”的一个分支学科来对待,它将丰富和充实“冲击动力学”的内容。

30 多年来国外对脉冲束与材料相互作用的研究十分重视,在理论和应用方面都取得不少进展。我国许多单位也开展了这一领域的研究工作,但是至今未有一本比较系统阐述辐照热—力学效应的论著。从人才培养和研究工作继续深入的角度考虑,都需要一本专著或教科书,深入浅出地叙述相关的理论和研究方法。本书正是全面论述这个问题的一本专著,该书的出版将弥补上述的不足。

本书作者长期潜心从事该领域的研究,做了大量的理论计算工作,有比较丰富的经验。本书系统地论述了脉冲束辐照材料与结构时产生的各种热—力学效应;从射线与物质作用产生能量沉积,产生物质的高温高压状态,材料中激波的产生与传播,对物体的破坏等各个过程进行阐述。书中包括了必要的基础理论,将数值模拟计算方法和相似性分析结合,介绍了不同脉冲束辐照的等效性研究,并在有条件时与实验结果进行了比较。本书内容丰富,注重实用,总结和阐述了作者和课题组同志们在该领域多年的理论分析和数值模拟研究的成果和经验,给出了许多有实用意义的辐照热—力学效应规律,对工程实际应用有参考价值。

由于这一领域是蓬勃发展的新兴学科,内容丰富而广泛,因此本书不可能包括所有的理论和实际问题,在书中讨论的内容中也有不少问题尚属于探索性的课题,有待读者深入思考提出意见,希望本书能起到抛砖引玉的作用。

我相信“脉冲束辐照材料动力学”的出版,必将进一步促进与辐照热—力学效应相关的理论和实验研究,可以期望,在此领域研究的同行们不懈努力下,将更拓宽该领域的研究范围,并取得更多、更深入、更实用的成果。

中国科学院院士



2001年6月

前 言

随着现代军事和民用科学技术,尤其是高新技术的发展,脉冲束辐照技术受到人们越来越多的重视和运用。

脉冲束辐照材料动力学研究材料与结构对脉冲 X 射线、脉冲低能强流电子束(包括离子束)和脉冲激光等辐照的动力学响应问题,包括所产生的热效应、力学效应(简称热—力学效应)。脉冲束辐照的脉宽一般约为几十纳秒至百纳秒量级,材料响应的持续时间则为微秒或几微秒量级,局部材料经受高温、高压状态,并发生固—液—气相变,在材料中产生并传播的热激波的强度要求计及材料的强度和可压缩性。

脉冲束辐照材料动力学是一门新兴学科,它与科学的许多分支,诸如气体动力学、固体弹塑性力学、原子分子物理、等离子体物理、激波物理、粒子输运理论及计算物理等,是密切相关的。这一学科在国防、航天、能源、工业、医疗、材料(包括物理、力学参数的测量,高温、高压下的性质及表面处理与改性等)及高速碰撞的实验模拟等许多科学研究领域和工程实际中,都有十分重要的作用。对它的研究不仅丰富了冲击动力学的内容,也进一步推动了冲击动力学向更深层次的发展。

材料与结构对脉冲束辐照的动力学响应初略地可分为三个过程:光子、电子(包括离子等)与物质的相互作用及能量沉积;物质的喷射及热激波的传播、反射;波效应之后的结构响应。其中,能量沉积的作用是至关重要的,它可以改变固体物质的能量,引起熔融、汽化相变,且导致高压的产生,形成喷射运动和热激波。

研究脉冲束辐照下材料的动力学响应规律有三种途径,即现场试验,实验室模拟和以数值模拟为主的理论研究。只有将这三

种途径有机地结合起来,才能比较全面地了解和掌握脉冲束辐照材料与结构时的整个动力学过程。

一般的现场试验,尤其是 X 射线辐照,代价高,不可能多次进行,相比之下,实验室模拟比较容易实现。由于不同脉冲束辐照时材料与结构的响应过程大体相似,所产生的许多宏观热—力学效应现象也基本相同,因此可进行各种实验手段相互间的模拟研究。当前,国内实验室模拟 X 射线辐照的主要模拟源是脉冲低能(平均电子能量小于 1MeV)强流(MA 量级)电子束和脉冲短波长激光,国际上实验室模拟 X 射线辐照的模拟源除了上述两种外,还采用能量为 1~3keV 的线辐射 X 射线。其它的模拟实验包括主要用于结构响应模拟的薄层炸药和金属箔电爆炸等。由于材料与结构在不同脉冲束辐照下的响应又各具特点并存在差异,因而我们不能完全直接用某种脉冲束的辐照实验结果替代和推断相同辐照条件(包括脉宽、能量密度及时间谱形状等)下另一种脉冲束的辐照效应,还需要建立某些近似的等效条件。

脉冲束辐照材料动力学的理论研究是要建立能正确反映和描述材料与结构在实际的辐照环境下所发生的物理、力学过程的解析研究理论和数值模拟方法,揭示和分析辐照热—力学效应特征和规律,沟通不同脉冲束辐照之间的内在联系,为各个相关领域的研究和实际应用提供手段。

从 20 世纪 70 年代初,中国科学院程开甲院士在国内首先指出脉冲束辐照材料问题的重要性,并领导开创了理论与效应试验研究开始,近 30 年的研究得到他与吕敏院士的悉心指导,陈雨生研究员及李景高级工程师,在各方面给予支持和帮助。实验方面,我国建立了低能强流相对论电子束加速器“晨光一号”与“闪光二号”,利用这些装置,许多研究者进行了能量沉积、热烧蚀、热激波、冲量及冲量耦合系数、层裂及结构响应等方面的实验研究,取得许多成果。与此同时,许多理论工作者开展了以数值模拟为主的理论研究,积累了经验,取得了进展。这些工作促进了脉冲束辐照材料动力学的研究,对本书的完成有所裨益。

本书是在著者过去多年研究工作的基础上完成的。本书的主要内容是著者在该学科中的研究成果。我们着重阐述脉冲束辐照所产生的材料响应,对结构响应的有关论述仅涉及薄壳的简单情形。由于 γ 射线和X射线同属电磁辐射波,与物质的相互作用机理基本一致,因此,对于 γ 射线辐照的材料动力学响应问题,本书也是适用的。

全书大致分为四部分。第一部分论述脉冲束辐照材料动力学的基本理论(第一章至第十章),它们是工程分析、解析研究及数值模拟的基础。第二部分讨论了脉冲X射线辐照材料时的热—力学效应研究(第十一章至第十六章)。第三部分讨论了脉冲电子束(包括离子束)辐照材料时的热—力学效应研究(第十七章、第十八章)。第四部分介绍了薄壳的热应力与结构响应(第十九章)。为了实验模拟和近似的工程分析需要,使本书内容更为全面,第二十章对于脉冲束辐照所产生的热激波和冲量进行了量纲分析和相似律讨论,第二十一章论述了脉冲束辐照热—力学效应的实验测试技术。

中国科学院陈能宽院士、朱建士院士等许多专家仔细审核了本书并提出了许多宝贵意见,吕敏院士为本书写了序言,书中的许多数值计算由丁升副研究员、程漱玉研究员完成,作者谨向他们致以衷心的感谢。在此,作者还要向总装备部国防科技图书出版基金评审委员会、国防工业出版社及杜豪年编辑等表示衷心感谢,没有他们的努力和辛勤劳动,本书的出版是难以完成的。本书引用了一些国内外的资料和数据,来源较多,不能一一列出,在此一并表示感谢。

脉冲束辐照材料动力学是一门交叉学科,由于目前国内外尚无有关这一问题的专著可借鉴,作者虽尽力使本书能反映该领域的最新成果,书中仍可能存在疏漏、错误之处,望读者予以指正,以便修正。

内 容 简 介

脉冲束辐照材料动力学是冲击动力学的一个新的分支,是一门交叉学科。本书系统地阐述了脉冲束(X射线,电子束及离子束等)辐照材料及结构产生的热—力学效应的基本概念、理论分析、数值模拟、基本规律和相似律,不同脉冲束之间的等效性和实验测量等。本书也包括了必要的弹塑性流体动力学的理论基础。

Materials dynamics under pulse beam radiation is a new branch of shock dynamics, it is a interdisciplinary subject. This book expounds systematically fundamental concepts, theoretical analyses, numerical simulations, basic laws and similitude laws of thermo-mechanical effects generated by pulse beam (x-ray, electron beam and ion beam etc.) on materials and structures, the equivalence of different pulse beams and experimental measurements etc.. This book also includes necessary theoretical bases of elastic-plastic hydrodynamics.

目 录

第一章 脉冲束辐照在材料及结构中产生的热—力学现象	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 脉冲 X 射线辐照	3
§ 1.3 脉冲 REB 辐照	12
§ 1.4 激光辐照	13
参考文献	21
第二章 脉冲束辐照材料动力学方程组	23
§ 2.1 引言	23
§ 2.2 脉冲束辐照材料动力学基本方程组	25
参考文献	35
第三章 物质结构及缺陷	36
§ 3.1 物质的原子结构	36
§ 3.2 晶体的结合力和结合能	39
§ 3.3 材料的缺陷	42
参考文献	45
第四章 弹塑性应力—应变关系	46
§ 4.1 应力和流体压力	46
§ 4.2 应变	48
§ 4.3 弹性应力—应变关系	53
§ 4.4 塑性及屈服条件	61
§ 4.5 塑性应力—应变关系	67
参考文献	69
第五章 材料对强冲击的响应	70
§ 5.1 引言	70

§ 5.2 脉冲束辐照产生的冲击载荷的一般特征	71
§ 5.3 材料对脉冲束辐照的冲击响应	73
§ 5.4 应变速率效应	75
§ 5.5 冲击相变	86
参考文献	94
第六章 弹性波传播	96
§ 6.1 固体中的弹性波	96
§ 6.2 一维纵向应力弹性波	97
§ 6.3 二维平面应力波在界面的反射和透射	101
参考文献	104
第七章 弹塑性波	105
§ 7.1 一维应力弹塑性波	105
§ 7.2 一维应变弹塑性波	107
§ 7.3 固体材料中的几种声速	116
§ 7.4 固体中应力波的衰减	118
参考文献	124
第八章 材料中的冲击波传播	125
§ 8.1 冲击波及其传播	125
§ 8.2 冲击波关系式	127
§ 8.3 熵增	130
§ 8.4 冲击 $D-u$ 关系	133
§ 8.5 激波间的相互作用及在界面的反射和透射	153
§ 8.6 冲击过程与其它过程的比较	158
参考文献	160
第九章 拉伸波与层裂	161
§ 9.1 拉伸波与层裂	161
§ 9.2 断裂类型及机理	165
§ 9.3 材料的断裂准则	171
§ 9.4 材料动态断裂的工程估算	176
§ 9.5 影响层裂效应的主要因素	182

参考文献	187
第十章 高压、高温下固体的热力学性质	189
§ 10.1 引言	189
§ 10.2 冷物质的压缩特性	191
§ 10.3 Grüneisen 方程	199
§ 10.4 三项状态方程式	202
§ 10.5 几种状态方程的相互关系	205
§ 10.6 气态方程及过渡 PUFF 状态方程	207
§ 10.7 GRAY 三相状态方程	211
§ 10.8 卸载方程	214
§ 10.9 混合及多孔材料的状态方程预估	218
参考文献	224
第十一章 X 射线在物质中的沉积和透射	226
§ 11.1 X 射线	226
§ 11.2 核辐射的黑体近似	228
§ 11.3 X 射线与物质的相互作用机理	232
§ 11.4 X 射线的衰减和吸收	236
§ 11.5 X 射线的能量沉积和透射	281
参考文献	287
第十二章 脉冲束辐照产生的热效应及破坏	288
§ 12.1 概述	288
§ 12.2 热效应分析	292
参考文献	303
第十三章 X 射线辐照的一维热激波理论	304
§ 13.1 X 射线辐照的一维弹塑性流体力学方程组	304
§ 13.2 一维热激波的解析解	306
§ 13.3 辐照热—力学效应的数值模拟方法	318
§ 13.4 数值模拟的人工粘性及稳定性	320
§ 13.5 X 射线辐照的一维应变问题的数值模拟	332
§ 13.6 弹塑性流体动力学数值模拟的自由面格式	353

参考文献	360
第十四章 X 射线辐照的一维热—力学效应特性	362
§ 14.1 软 X 射线辐照的热—力学效应特性	362
§ 14.2 硬 X 射线辐照的热—力学效应	377
§ 14.3 软 X 射线与硬 X 射线辐照热—力学效应的比较	386
参考文献	400
第十五章 X 射线辐照的二维平面热—力学效应	401
§ 15.1 引言	401
§ 15.2 二维弹塑性流体力学方程组	402
§ 15.3 差分方程	410
§ 15.4 断裂模拟	431
§ 15.5 分层介质界面的处理	434
§ 15.6 二维平面热—力学效应的数值模拟	436
§ 15.7 X 射线辐照圆柱壳体时的能量沉积及应力峰值	447
§ 15.8 热—力学效应的二维图像分析	457
参考文献	460
第十六章 X 射线辐照的二维轴对称热—力学效应	461
§ 16.1 二维轴对称弹塑性流体力学方程组	461
§ 16.2 拉格朗日差分方程组	466
§ 16.3 二维轴对称热—力学效应	481
参考文献	484
第十七章 电子束辐照的一维热—力学效应	485
§ 17.1 引言	485
§ 17.2 电子与物质的相互作用	487
§ 17.3 电子束能量沉积的解析计算	496
§ 17.4 电子束能量沉积的 Monte—Carlo 计算	505
§ 17.5 电子束辐照产生的热—力学效应的数值模拟	527
§ 17.6 电子束辐照的热—力学效应特性	535
§ 17.7 电子束与 X 射线辐照的等效性分析	548
§ 17.8 强脉冲离子束辐照热—力学效应	558

§ 17.9 脉冲束辐照热激波与压缩应力波	570
参考文献	579
第十八章 电子束辐照的二维热—力学效应	581
§ 18.1 引言	581
§ 18.2 能量沉积的 Monte-Carlo 计算	582
§ 18.3 圆柱壳的二维热—力学效应数值模拟	587
§ 18.4 有界平板的二维热—力学效应数值模拟	593
参考文献	597
第十九章 脉冲束辐照产生的热应力及结构响应	598
§ 19.1 引言	598
§ 19.2 辐照热应力及基本方程	601
§ 19.3 一维平板热应力	603
§ 19.4 脉冲束辐照下圆柱壳中的热应力及变形	608
§ 19.5 脉冲束辐照下圆柱壳的结构响应	615
参考文献	620
第二十章 脉冲束辐照的量纲与相似性理论分析	621
§ 20.1 引言	621
§ 20.2 X 射线辐照热—力学效应的相似律	622
§ 20.3 电子束辐照热—力学效应的相似律	625
§ 20.4 脉冲束辐照下结构响应的相似律	627
§ 20.5 辐照热—力学效应的量纲分析	628
参考文献	631
第二十一章 辐照热—力学效应实验测试技术	632
§ 21.1 辐照热—力学效应实验	632
§ 21.2 热激波测试技术	634
§ 21.3 数据处理	642
§ 21.4 冲量测量	645
§ 21.5 噪声的对抗	647
参考文献	649