

CHONGJI YU  
BAOZHA DONGLIXUE  
JICHU JI YINGYONG

# 冲击 与 爆炸动力学

基础及应用

曾祥国 陈华燕 陈 军 杨 鑫 盛 鹰  著



四川大学出版社

CHONGJI YU  
BAOZHA DONGLIXUE  
JICHU JI YINGYONG

# 冲击与 爆炸动力学

## 基础及应用

曾祥国 陈华燕 陈军 杨鑫 盛鹰 著



四川大学出版社

责任编辑:唐 飞  
责任校对:蒋 琦  
封面设计:墨创文化  
责任印制:王 炜

### 图书在版编目(CIP)数据

冲击与爆炸动力学基础及应用 / 曾祥国等著. —成都: 四川大学出版社, 2017. 12  
ISBN 978-7-5690-2650-4

I. ①冲… II. ①曾… III. ①冲击(力学) ②爆炸力学—动力学 IV. ①TB301.2②O38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 294231 号

### 书名 冲击与爆炸动力学基础及应用

著者 曾祥国 陈华燕 陈 军 杨 鑫 盛 鹰  
出版 四川大学出版社  
地址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)  
发行 四川大学出版社  
书号 ISBN 978-7-5690-2650-4  
印刷 四川盛图彩色印刷有限公司  
成品尺寸 185 mm×260 mm  
印张 25.75  
字数 625 千字  
版次 2019 年 2 月第 1 版  
印次 2019 年 2 月第 1 次印刷  
定 价 68.00 元



版权所有◆侵权必究

- ◆读者邮购本书, 请与本社发行科联系。  
电话: (028)85408408/(028)85401670/  
(028)85408023 邮政编码: 610065
- ◆本社图书如有印装质量问题, 请  
寄回出版社调换。
- ◆网址: <http://press.scu.edu.cn>

# 前 言

冲击与爆炸现象既普遍存在于自然界，又被广泛应用于人类的生产生活中，是一种重要且高效的解决工程问题的手段和方法。例如，采矿、锻造、武器穿甲、动能武器、高楼拆除等是人们利用冲击与爆炸载荷解决实际问题的最好例子；又如，地震、台风、瓦斯突出、太空撞击、油气管道爆炸、核电站爆炸等是时有发生的故事和灾害，其产生的有害强动载荷往往导致人们生命和财产的重大损失。从冲击与爆炸动力学的角度研究强动载荷作用下结构动力响应和损毁规律，既是一个重大的科学问题，又具有重要的工程实用价值。

近年来，随着科学技术日新月异的发展，机器设备的服役条件越来越苛刻，并朝着高速、高压、高温的极端条件发展。这预示着国防军事，以及民用安全领域将迎来新一轮的挑战。同时，诸如地震、台风、海啸、战争、恐怖袭击和生产生活中的意外爆炸事故频繁发生，这些极端现象严重干扰和限制了人类社会文明的发展与进步。冲击与爆炸动力学涉及力学、材料、物理与化学等相关的学科领域，对研究上述问题具有特殊作用。

近 20 年来，与冲击与爆炸动力学学科相关的高水平杂志在力学界和工程界的影响越来越大；国际上，冲击与爆炸动力学的科学研究非常活跃。在这样的背景下，作为工科力学相关专业研究生，掌握冲击与爆炸动力学的基本知识，对适应学科发展及进一步深造都具有十分重要的意义。为此，作者根据多年致力于强动载荷作用下结构动态响应的相关课题的研究，编写了这本《冲击与爆炸动力学基础及应用》。本书可作为固体力学、工程力学、安全防护工程、结构工程等相关专业学科的硕士、博士研究生的教学参考书，也可作为相关科研及工程技术人员的参考用书。

全书共 6 章。第 1 章简述爆炸与冲击动力学的研究内容。第 2 章概述了爆炸、冲击、地震载荷等常见的强动载荷的获取方法。第 3 章从应力波基本理论出发，重点阐述了应力波传播基本规律。第 4 章重点阐述了率相关弹塑性本构方程。第 5 章基于 Hamilton 变分原理，建立了弹塑性、弹粘塑性动力学控制方程。除此之外，作者结合近 10 年完成的多项涉及冲击和爆炸的科研项目，在第 6 章介绍了基于 VC++ 面向对象的编程方法，并对冲击与爆炸动力学相关软件进行二次开发，获得的软件操作方便，界面友好。同时，进一步介绍了该软件在爆炸、冲击、地震动载荷作用下结构动态响应的实际工程算例，希望这部分内容对相关专业的研究生和科研人员以及工程技术人员进行科学研究能提供一定的参考和借鉴。

本书是在国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金（基金编号：U1430119）与四川大学研究生课程建设项目（项目编号：2016KCJS050）的大力支持

下所取得的成果。作者感谢北京空军指挥学院韩荣辉教授对本书提出的建设性意见和给予的大力支持；感谢在读研究生李云飞、崔晔晖、颜虹州、田何易、肖雨果、杨友山、陈文俊的大力支持，同时对已经离开研究小组的郭杨、廖异、徐涛龙、袁玉全、石宵爽、刘永杰、吕大立、史筱红博士，以及赵师平、刘世品、李济良、许书生、邢义峰、刘卫国、朱文吉、徐荣鹏、徐文彬、刘盛川、李星、杨喻淇、陈成、赵新威、王豪、杨圳、韩悌信、李洋、穆怀、张润民硕士等表示衷心的感谢，他们过去几年的研究工作为本书增添了丰富的内容。

本书在编写过程中引用了大量参考文献，在此谨向相关作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，本书不足之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

编者

2018年11月20日于成都九眼桥



# 目 录

第 1 章 引 论	( 1 )
第 2 章 动载荷形式——爆炸、冲击与地震	( 8 )
2.1 动载荷的概念、分类与特点	( 8 )
2.2 爆炸现象	( 10 )
2.3 冲击现象	( 32 )
2.4 地震现象	( 49 )
第 3 章 固体中的应力波简介	( 64 )
3.1 强脉冲载荷与应力波	( 64 )
3.2 一维应力波的控制方程	( 67 )
3.3 一维应力连续波的特征线解	( 69 )
3.4 半无限长杆中弹塑性加载连续纵波	( 71 )
3.5 连续波·冲击波	( 76 )
3.6 冲击波阵面上的守恒条件	( 78 )
3.7 杆中弹性冲击波的相互作用	( 80 )
3.8 应力在自由面反射引起的拉应力与断裂	( 84 )
3.9 一维应力从塑性态卸载的卸载波	( 88 )
3.10 杆中弹塑性波的迎面相互作用	( 89 )
3.11 杆中弹塑性波的追赶卸载	( 94 )
3.12 几点重要内容概述	( 98 )
第 4 章 率相关弹塑性本构关系	( 103 )
4.1 两类直观弹塑性动态本构关系	( 104 )
4.2 基于物理背景热力学理论的粘弹性—粘塑性本构模型	( 132 )
4.3 NiTi 合金的本构模型研究	( 138 )
4.4 Bodner—Partom 和 Perzyna 动态应力—应变模型	( 148 )
4.5 强冲击载荷下金属材料的动态本构行为	( 157 )
4.6 本构行为与损伤的分子动力学方法	( 172 )
第 5 章 基于 Hamilton 原理的弹塑性动力学控制方程	( 221 )
5.1 变分基础	( 221 )
5.2 Hamilton 原理	( 222 )
5.3 Hamilton 弹塑性动力学控制方程	( 232 )
5.4 Hamilton 弹·粘塑性动力学控制方程	( 235 )

第 6 章 冲击与爆炸载荷作用下结构动态响应	(238)
6.1 动力学数值处理技术简介	(238)
6.2 地震载荷作用下含裂纹结构的动态响应分析	(242)
6.3 冲击载荷作用下结构的动态响应分析	(261)
6.4 爆炸载荷作用下结构的动态响应分析	(328)
附录 1 车辆撞击下跨线桥的动态响应面向对象程序设计	(377)
附录 2 桥梁爆炸损毁的动态响应面向对象程序设计	(381)
参考文献	(385)
后 记	(404)

# 第1章 引 论

物体在爆炸与冲击载荷作用下的动态力学响应往往与静载荷下力学行为有着显著不同。例如，飞石打击在窗户玻璃上、炸药在混凝土板上爆炸都会在玻璃、混凝土板的背面造成碎裂崩落，同时碎甲弹对坦克装甲的破坏原理也基本上如出一辙。又如，对一金属杆端部施加轴向静载荷时，变形基本上是沿杆均匀分布的，但当施加轴向冲击载荷时（如打钎、打桩等），则变形分布极不均匀，残余变形集中于杆端。子弹着靶时，变形呈蘑菇状也正类似于此。固体力学的动力学理论的发展正是与解决这类力学问题的需要分不开的。

爆炸效应是多种多样的，包括物理、化学、力学、数学等多个学科领域，如主要以力学的观点和方法来研究爆炸，则可称之为“爆炸力学”。郑哲敏教授和朱兆祥教授提出：“爆炸力学是力学的一个分支，是主要研究爆炸的发生和发展规律以及爆炸的力学效应的应用和防护的学科。”

爆炸力学从力学角度研究化学爆炸、核爆炸、电爆炸、粒子束爆炸（也称辐射爆炸）、高速碰撞等能量突然释放或急剧转化的过程，以及由此产生的强冲击波（又称激波）、高速流动、大变形和破坏、抛掷等效应。自然界的雷电、地震、火山爆发、陨石碰撞、星体爆发等现象也可用爆炸力学方法来研究。

爆炸力学是流体力学、固体力学和物理学、化学之间的一门交叉学科，在武器研制、交通运输、水利建设、矿藏开发、机械加工、安全生产等方面有广泛的应用。

爆炸力学的一个基本特点是研究高功率密度的能量转化过程，大量能量通过高速的波动来传递，历时特短，强度特大。另一个特点是爆炸力学中的研究，常需要考虑力学因素和化学物理因素的耦合、流体特性和固体特性的耦合、载荷和介质的耦合等。因此，多学科渗透和结合成为爆炸力学发展的必要条件。

爆炸研究促进了流体和固体介质中冲击波理论、流体弹塑性理论、粘塑性固体动力学的发展。爆炸在固体中产生的高应变率、大变形、高压和热效应等推动了凝聚态物质高压状态方程、非线性本构关系、动态断裂理论和热塑不稳定性理论的研究。爆炸的瞬变过程的研究则推动了各种快速采样的实验技术，其中包括高速摄影、脉冲 X 射线照相、瞬态波形记录 and 数据处理技术的发展。爆炸力学还促进了二维、三维、具有各种界面的非定常计算力学的发展。

爆炸力学在军事科学技术中起着重要作用。在发展核武器、进行核试验、研究核爆炸防护措施方面，爆炸力学是重要工具，同时在各种常规武器弹药的研制、防御方面，炸药爆轰、应力波传播等是理论基础。激光武器、粒子束武器和航天工程的控制装置也需要从爆炸力学的角度进行研制。爆炸力学实验技术（如冲击波高压技术）为冲击载荷



下材料的力学性能的研究提供了方法和工具。

在矿业、水利和交通运输工程中，用炸药爆破岩石（爆破工程）是必不可少的传统方法。现在光面爆破、预裂爆破技术的应用日益广泛。在城市改造、国土整治中，控制爆破技术更是十分重要。爆炸在机械加工方面也有广泛的应用，如爆炸成型、爆炸焊接、爆炸合成金刚石、爆炸硬化等。

目前全世界每年消耗炸药几千万吨，我国每年炸药的消耗也有几百万吨之巨，80%以上都是民用消耗。工程爆破的规模小到几毫克，大到万吨级的都有。例如，用炸药碎石治疗膀胱结石的方法，用药量一般在2~20 mg；而1992年12月28日珠海炮台山大爆破的总装药量达到1.2万吨，爆破总方量达到1085.2万立方米。进行如此规模的爆破，需要复杂的爆破设计和高难度的技术，仅靠经验是不行的。这就要求我们对炸药爆炸作用下介质的动力学性质有足够的了解和掌握，事先要进行精确的计算和设计（这里所说的精确是相对我们的要求来说的，并不是绝对的精确）。因此要求我们研究爆炸在除金属以外一般介质中的传播和作用机理。而我们所要学习的爆炸力学方面的知识，主要就是着重于民用爆破理论的研究，学习炸药爆炸后其爆炸波在空气、岩石、土、混凝土、水等的传播和作用机理。

爆炸力学是一门交叉科学，它涉及流体动力学、气体动力学、固体力学、物理学和化学动力学等多学科的知识。通过爆炸力学的学习，使同学们看一般爆破设计时都知道其理论依据，毕业后再加上一定的实际工作经验，很快就能独立地进行爆破工程设计，对爆破过程中出现的一些问题和现象有一个思路，知道应该从哪个方面去解决。

爆炸力学近几十年来虽然发展很快，但它还不能算是一门成熟的学科。在爆炸力学的许多问题上还都有争议，各有各的一套理论和数据、公式。其中许多公式都不是纯理论推导的，而是建立在实验之上的经验或半经验公式。因为是以实验为基础的；由于各自的实验条件不同，再加上爆炸本身具有一定的不确定性，所以个人得出的数据就不尽相同。因此，对同一个参数具有不同的公式表达形式。

炸药爆炸后，爆炸作用是以爆炸波的形式在介质中传播的，因此在讲爆炸对介质的作用之前有必要讲一些应力波的基本知识。

为什么在爆炸与冲击载荷下会发生诸如此类的特有现象呢？为什么这些现象不能用静力学理论给以说明呢？固体力学的动力学理论与静力学理论的主要区别是什么呢？

首先，固体力学的静力学理论研究处于静力平衡状态下的固体介质，以忽略介质微元体的惯性作用为前提。这只是在载荷强度随时间不发生显著变化的时候，才是允许和正确的。而爆炸与冲击以载荷作用的短历时为其特征，在以毫秒（ms）、微秒（ $\mu\text{s}$ ）甚至纳秒（ns）计的短暂时间尺度上发生了运动参量的显著变化。例如，核爆炸中心压力可以在几微秒内突然升高到 $10^7\sim 10^8$ 大气压（ $10^3\sim 10^4$  GPa）量级；炸药在固体表面接触爆炸时的压力也可在几微秒内突然升高到 $10^5$ 大气压（10 GPa）量级；子弹以 $10^2\sim 10^3$  m/s的速度射击到靶板上时，载荷总历时几十微秒，接触面上压力可高达 $10^4\sim 10^5$ 大气压（1~10 GPa）量级。在这样的动载荷条件下，介质的微元体各物理量（如空间位置、力与加速度等）处于随时间迅速变化的动态过程中，表明这是一个动力学问题。对此必须计及介质微元体的惯性，从而就导致了对应力波传播的研究。

事实上,当外载荷作用于可变形固体的某部分表面上时,一开始只有那些直接受到外载荷作用的表面部分的介质质点离开了初始平衡位置。由于这部分介质质点与相邻介质质点之间发生了相对运动(变形),当然将受到相邻介质质点所给予的作用力(应力),但同时也给相邻介质质点以反作用力,因而使它们也离开了初始平衡位置而运动起来。不过,由于介质质点具有惯性,相邻介质质点的运动将滞后于表面介质质点的运动。依此类推,外载荷在表面上所引起的扰动就这样在介质中逐渐由近及远地传播出去而形成应力波。扰动区域与未扰动区域的界面称为波阵面,而其传播速度称为波速。常见材料的应力波波速为 $10^2 \sim 10^3$  m/s量级。此外,必须注意区分波速和质点速度。前者是扰动信号在介质中的传播速度,而后者则是介质质点本身的运动速度。如果两者方向一致,称为纵波;如果两者方向垂直,则称为横波。根据波阵面几何形状的不同,可分为平面波、柱面波、球面波等。地震波、固体中的声波和超声波,以及固体中的冲击波等都是应力波的常见例子。

一切固体材料都具有惯性和可变形性,当受到随时间变化着的外载荷的作用时,它的运动过程总是一个应力波传播、反射和相互作用的过程。

强冲击载荷所具有的在短暂时间尺度上发生载荷显著变化的特点,必定同时意味着高加载率或高应变率。一般常规静态试验中的应变率为 $10^{-5} \sim 10^{-1}$  s $^{-1}$ 量级,而在必须计及应力波传播的冲击试验中的应变率则为 $10^2 \sim 10^4$  s $^{-1}$ ,甚至可高达 $10^7$  s $^{-1}$ ,即比静态试验中的应变率高出多个量级。大量实验表明,在不同应变率下,材料的力学性能行为往往是不同的。从材料变形机理来说,除了理想弹性变形可看作瞬态响应外,各种类型的非弹性变形和断裂都是以有限速率发展、进行的非瞬态响应,因而材料的力学性能本质上是与应变率相关的。通常表现为:随着应变率的提高、材料的屈服极限提高、强度极限提高、延伸率降低,以及屈服滞后和断裂滞后等现象变得明显起来等。因此,除了上述的介质质点的惯性作用外,物体在爆炸与冲击载荷下力学响应之所以不同于静载荷下的另一个重要原因是,材料本身在高应变率下的动态力学性能与静态力学性能的不同,即由于材料本构关系对应变率的相关性。从热力学的角度来说,静态下的应力—应变关系过程接近于等温过程,相应的应力—应变曲线可近似视为等温曲线;而高应变率下的动态应力—应变关系过程则接近于绝热过程,因而是一个伴有温度变化的热—力学耦合过程,相应的应力—应变曲线可近似视为绝热曲线。

这样,如果将一个结构物在爆炸与冲击载荷下的动态响应与静态响应相区别的话,则实际上既包含了介质质点的惯性效应,也包含着材料本构关系的应变率效应。当我们处理爆炸与冲击载荷下的固体动力学问题时,实际上面临着两方面的问题:其一是已知材料的动态力学性能在给定的外载荷条件下研究介质的运动,这属于应力波传播规律的研究(正问题);其二是借助于应力波传播的分析来研究材料本身在高应变率下的动态力学性能,这属于材料力学性能或本构关系的研究(反问题)。问题的复杂性正在于:一方面应力波理论的建立要依赖于对材料动态力学性能的了解,是以已知材料动态力学性能为前提的;而另一方面材料在高应变率下动态力学性能的研究又往往需依赖于应力波理论的分析指导。因此,应力波的研究和材料动态力学性能的研究之间有着特别密切的关系。

虽然从本质上说材料本构关系总是或多或少地对应变率敏感,但其敏感程度视不同材料而异,也视不同的应力范围和应变率范围而异。在一定的条件下,有时可近似地假定材料本构关系与应变率无关。在此基础上建立的应力波理论称为应变率无关理论。其中,根据应力—应变关系是线弹性的、非线性弹性的、塑性的等,则分别称为线弹性波理论、非线性弹性波理论、塑性波理论等。反之,如果考虑到材料本构关系的应变率相关性,相应的应力波理论则称为应变率相关理论。其中,根据本构关系是粘弹性的、粘弹塑性的、弹粘塑性的等,则分别称为粘弹性波理论、粘弹塑性波理论、弹粘塑性波理论等。

近 50 年来,应力波的研究和应用取得了迅速发展,广泛地应用于地震研究,工程爆破(采矿、交通、水利水电等),爆炸加工(成型、复合、焊接、硬化等),爆炸合成(人造金刚石、人造氮化硼等),超声波和声发射技术,机械设备的冲击强度,工程结构建筑的动态响应,武器效应(弹壳破片的形成、聚能破甲、穿甲、碎甲、核爆炸和化学爆炸的效应及其防护等),微陨石和雨雪冰沙等对飞行器的高速撞击,地球和月球表面的陨星坑的研究,动态高压下材料力学性能(包括固体状态方程)、电磁性能和相变等的研究,材料在高应变率下的力学性能和本构关系的研究,动态断裂的研究,以及高能密度粒子束如电子束、X 射线、激光等对材料的作用的研究等。

随着我国工农业生产、国防建设和科学技术的发展,人们一方面在机器设备或工程构筑物的设计、制造或施工和安全运营工作中不可避免要解决安全问题;另一方面在军事、采矿、构筑物拆除等工程领域面临如何实现对构筑物进行有效的毁坏问题。例如,当前,跨江河桥梁的大量修建和通航船舶的规律化,加上桥区环境的改变,导致船桥碰撞事故时有发生,近年来发生的广东九江大桥、宁波金塘大桥等船撞事故,引起了社会各界的高度重视。船撞桥事故不但威胁船舶的通行安全,还严重影响桥梁的运营安全,造成了巨大的生命和财产损失。2014 年 8 月 2 日,昆山中荣金属制品有限公司的 1 号除尘器发生爆炸,爆炸冲击波沿除尘管道向车间传播,扬起的除尘系统内和车间集聚的铝粉尘发生系列爆炸。当场造成 47 人死亡、当天经送医院抢救无效死亡 28 人,185 人受伤,事故车间和车间内的生产设备被损毁。又如,2013 年 11 月 22 日 10 时 25 分,位于山东省青岛经济技术开发区的中国石油化工股份有限公司管道储运分公司东黄输油管道泄漏原油进入市政排水暗渠,在形成密闭空间的暗渠内油气积聚遇火花发生爆炸,造成 62 人死亡、136 人受伤,直接经济损失达 75172 万元。在爆破拆除工程中,有相关从业人员缺乏对控制爆破和应力波理论缺乏深入了解,恶性事故屡见不鲜。例如,2001 年 10 月 30 日,被称为“西南第一爆”的云南宣威电厂 120 m 烟囱(2600 t)及 54000 m<sup>2</sup> 厂房拆除爆破过程中出现严重意外事故,导致 1 人死亡,46 人受伤。

造成以上重大人员伤亡和财产损失的原因多种多样,甚至是复杂的,但是也暴露出人们对爆炸引起的后果缺乏科学(动态响应及失效方式)的判断,规划和管理部门缺乏相应的行业标准进行构筑物的设计。这样惨痛的教训是令人惋惜的,但更遗憾的是,类似的恶性安全事故还在不停地发生。因此,对爆炸和冲击等高能密度条件下的动力学研究已显得日益重要和迫切。近 20 年来,国内外与强冲击和爆炸力学学科相关的高水平杂志在力学界和工程界的影响越来越大,如《爆炸与冲击》《振动与冲击》《岩石力学与

工程学报》, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *Shock Waves*, *International Journal of Impact Engineering* 等, 同时强冲击和爆炸力学方面的研究变得非常活跃。

在一些如地震, 工程爆破, 高速加工、爆炸成型和焊接, 结构物的抗爆或抗冲击性能, 弹体对装甲和各种介质的碰撞效应, 核爆炸及其防护, 陨星体及雨、雪、冰雹和固体粒子对飞行器的撞击, 液体和固体粒子撞击引起的固体腐蚀和断裂, 以及星球表面陨石坑形成等的研究中, 都会遇到动力学问题。这些问题的解决, 虽然各有其工程技术上的特殊性, 但都有一些共同的内容: 工程材料在高压、高应变率甚至高温条件下本构方程的理论模型和实验研究, 连续介质力学基本控制方程组, 应力波传播理论以及瞬时动力学实验技术等。由于强冲击动力学的内容极其丰富, 涉及多学科研究领域, 全面详细总结这些内容是非常困难的。在综合了大量现有文献和书籍的基础上, 作者总结出爆炸与强冲击动力学的主要研究内容如图 1-1 所示。

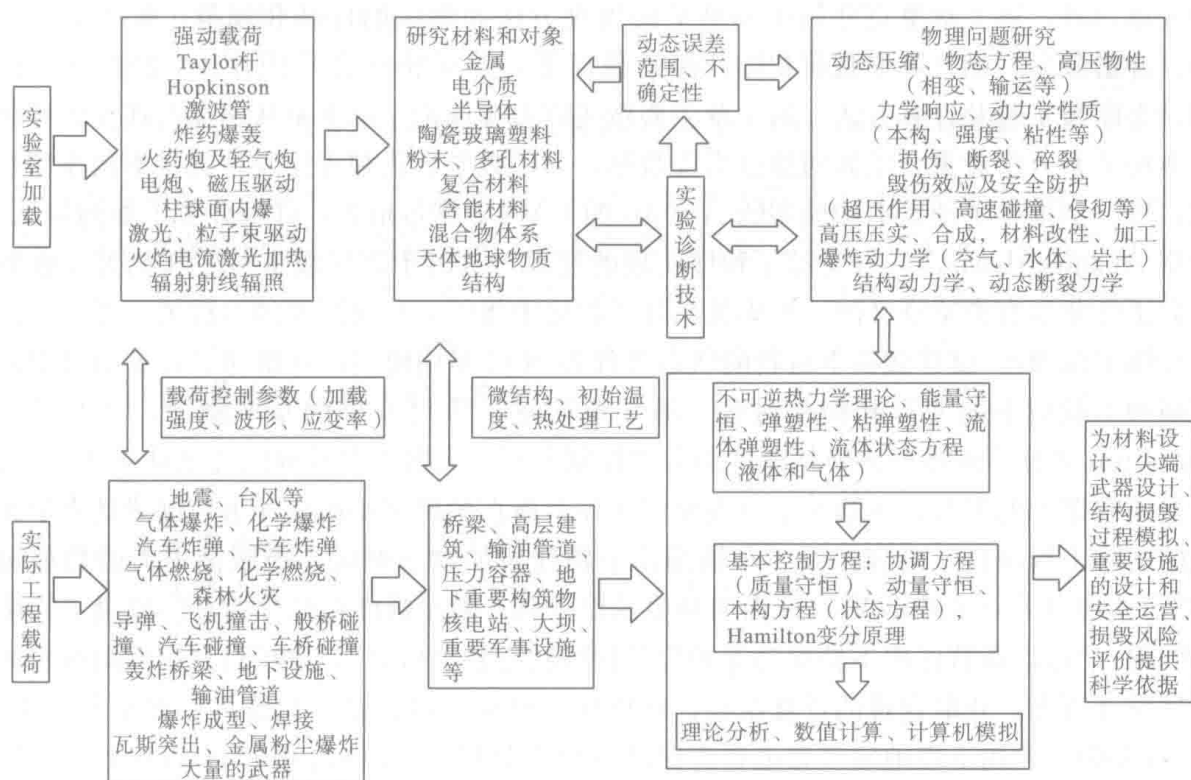


图 1-1 爆炸与强冲击动力学的主要研究内容

前面的简述表明, 对爆炸与强冲击动力学的深入研究和不断认识, 不仅会解决许多科学问题, 解释一些新现象、新规律; 同时又具有很大的产业背景。为了进一步促进这一充满了挑战性科学问题的前沿领域的深入研究和基本知识的推广, 国际上有不少的专著和教材问世, 有的并已经翻译成中文。例如, Meyers (迈耶斯) 编写的《材料的动力学行为》, Meyers 教授长期工作在这一领域, 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力学性质的深入的体会和广阔视野。此外, 国内在这方面的相关书籍也不少, 如王礼立教授编著的《应力波基础》, 杨桂通教授编著的《塑性动力



学》，张宝平教授等编著的《爆轰物理学》，孙承纬教授等编著的《应用爆轰物理》，马晓青教授编著的《冲击动力学》，李翼祺教授等编著的《爆炸力学》等。作者多年从事“冲击动力学”这门课程教学和科研工作，学生涉及的专业包括力学、采矿、机械、土木、材料、高分子材料、水利、物理、航空航天、石油工程等，主要采用王礼立教授编著的《应力波基础》，同时参考了以上所列出的书籍。这些教材普遍的理论水平高，学生感到学习难度大。研究生们在接触到实际课题时，由于涉及动力学课题的环节多，很难将知识点串起来。作者所在的研究小组近十几年通过与各类实验室和产业部门的极其广泛的联系，其中包括桥梁和道路、石油天然气管道、军事作战效能的评价、发射系统的破仓及设备保护、高压容器、激光焊接、高速列车转向架动力减振，完成了大量以爆炸和冲击为背景的实际工程项目，几十名本科生、硕士生和博士生参加并完成了这些项目，这些学生毕业后都成为工作单位的业务骨干。作者深感有必要写一本将冲击与爆炸动力学基本理论和实际工程相结合的参考书。按照处理工程问题的方式和步骤，本书共分6章内容：第2章重点介绍了动载荷的处理方法和响应的标准和规范，包括地震载荷、冲击载荷、燃气爆炸载荷和炸药爆炸载荷等，并穿插介绍了 SHPB 中的高率实验和动态断裂实验及计算方法。第3章主要概述应力波理论。第4章从两类直观弹塑性动态本构关系入手着重介绍如何通过实验数据，采用数学方法和程序设计确定本构模型参数，进一步推导了动态本构模型的 Abaqus 的 UMAT 增量形式，详细介绍了如何定义、使用 Abaqus-UMAT，并介绍了程序实现的过程，这对于高年级本科生和相关专业的研究生是非常有借鉴意义的。本构关系除了叙述中等压力和应变率的本构关系外，还扼要介绍了强冲击/爆炸载荷下材料的状态方程和 SCG 本构模型，并增加了分子动力学模拟强冲击载荷下的变形和损伤过程。第5章简述了等时变分的基本概念，以及基于 Hamilton 变分原理推导出弹粘塑性动力学控制方程。根据作者及其研究团队近10年的大量研究课题的实践，在第6章重点介绍了作者所在的研究小组在冲击与爆炸动力学相关的实际工程项目，内容涉及“车辆撞击下跨线桥的动态响应与极限撞击力的数值研究”，该项目采用了基于 VC++ 面向对象的设计和有限元软件相结合的方法解决工程实际问题；“爆炸荷载作用下桥梁动态响应及损毁状态数值仿真”，该项目利用面向对象的程序设计理念，获取直观的计算结果，软件用户界面友好，便于交流推广和工程应用；“地震和爆炸作用下埋地输气管道和桥梁动态响应分析”，该项目基于 Hamilton 原理的结构动力学控制方程，利用 Hopkinson 压杆实验获得材料的动态应力应变曲线，采用拉丁超立方抽样、Spearman 秩相关分析的参数敏感度整体综合分析方法和改进小生境算法、全局最优点判断策略和局域精确搜索技术的改进遗传算法，即先对参数敏感度作整体性分析，以确定本构模型参数离散区间的疏密程度，再运用改进遗传算法识别钛合金本构模型的各待定参数。通过对埋地输气管道和桥梁动态响应分析和损毁过程进行了深入的分析，项目提供的数据和分析方法对相关领域的研究生和工程技术人员具有一定的参考价值；项目“管道与结构动态破坏过程的数值模拟及其安全性评定”从工程实际的2个重要的方面展开，基本技术路线如图1-2所示。

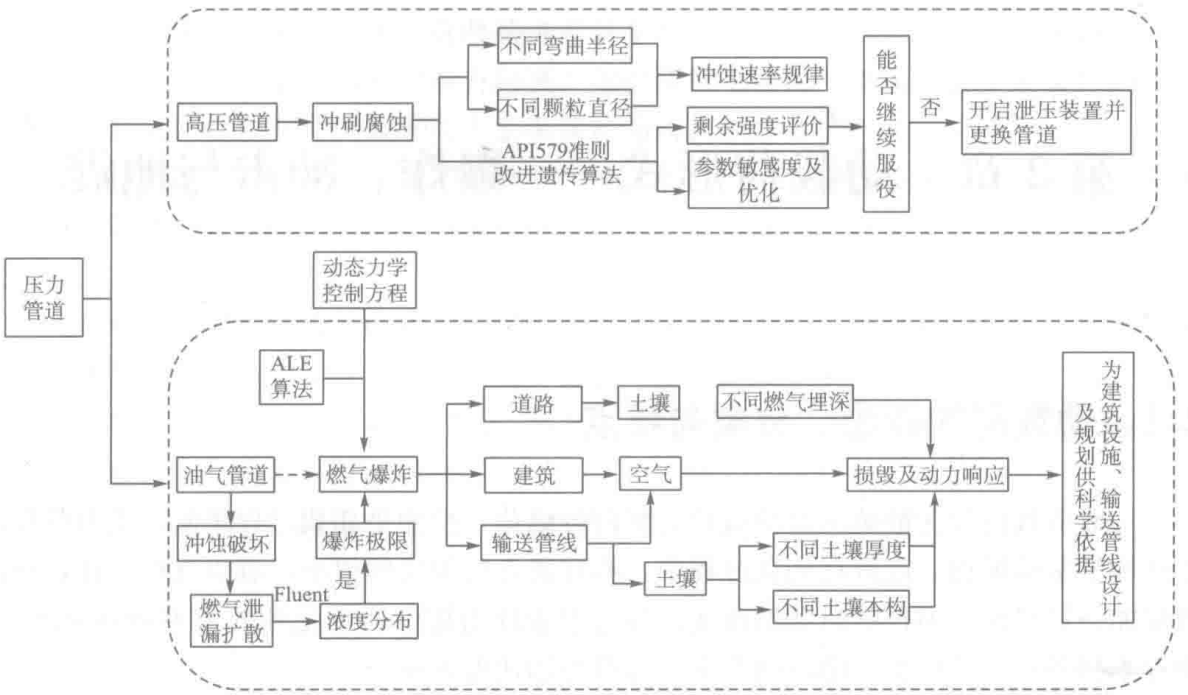


图 1-2 管道与结构动态破坏过程的数值模拟及其安全性评定路线图

在安全方面，首先对燃气泄漏扩散过程进行数值分析，可以预测燃气泄漏扩散后浓度分布并根据爆炸极限确定危险区域。再根据获得的燃气泄漏浓度分布，对燃气爆炸后不同工况下道路、建筑的损毁及重要管线的动力响应和损毁过程进行研究。项目提供的数据和分析方法可为输气管线的规划、爆炸后的救援抢险、建筑设施的抗爆设计以及保证人们生命安全等提供定量的参考依据。

### 思考题

1. 简述爆炸力学的定义、应用范围。
2. 简述强冲击载荷下材料的动态响应与应力波之间的关系。



## 第2章 动载荷形式——爆炸、冲击与地震

### 2.1 动载荷的概念、分类与特点

一般将载荷分为静载荷与动载荷。所谓静载荷，指的是加载过程缓慢，认为载荷从零开始平缓地增加，以致在加载过程中，构件各点的加速度很小，可以忽略不计，并且载荷加到最终值后不再随时间而改变。其特点表现为构件所承受的外力不随时间改变，构件本身各点加速度也不随时间改变，可看作加速度为零。

然而在实际工程问题中，由于整个构件或构件某一部分在外力作用下速度有了明显改变，即产生了加速度（含线加速度和角加速度），研究的整个构件或构件某一部分的应力和应变问题就属于动载荷问题。例如，起重机加速提升的绳索；涡轮机的长叶片，由于旋转时的惯性力所引起的拉应力可以达到相当大的数值；山坡滚石对山脚防护网的冲击；采矿工程中炸药爆炸开采矿石；地震现象等。这些现象都涉及动载荷问题。相关实验结果表明，只要应力不超过比例极限，虎克定律仍适用于动载荷下应力、应变的计算。图 2-1 给出了不同载荷随时间的变化关系。

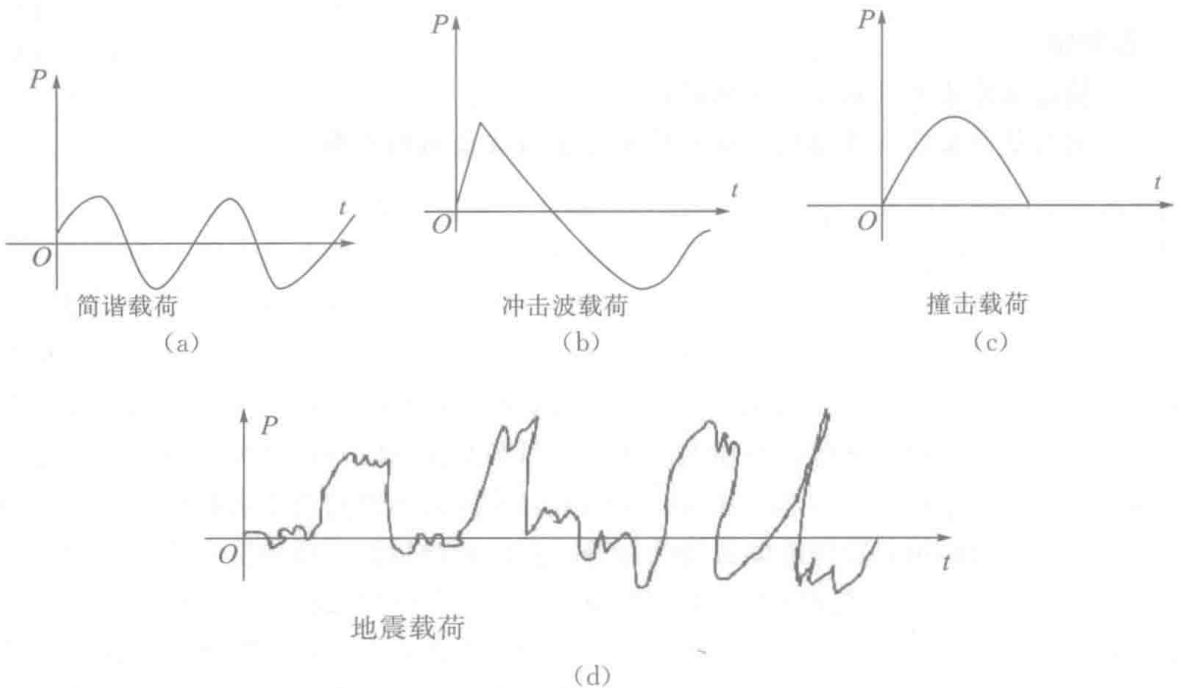


图 2-1 不同载荷随时间的变化关系

根据其作用方式的不同，动载荷问题主要分为以下三类：

(1) 构件做一般加速运动。这时构件的各个质点将受到与其加速度有关的惯性力作用，故此类问题习惯上又称为惯性力问题。此时所产生的应变率还不会引起构件的材料性能发生变化，处理此类问题方法主要采用动静法。

(2) 载荷以一定的速度施加于构件上，或者构件的运动突然受阻，这类问题称为爆炸或冲击问题。此类问题加速度不易求解，材料的力学性质变化较大，可采用能量法简化求解。

(3) 构件受到的载荷或由载荷引起的应力的方向或大小，是随着时间而呈周期性变化的，这类问题称为交变应力问题，其中振动与疲劳问题尤为值得关注。

从材料受力变形考虑，虽然不同应变率下表现出不同的动态问题，但是总体而言，动态问题基本上会表现出以下特点：

(1) 作用时间短，幅值变化大，引起材料变形、破坏局部化效应。表 2-1 给出了一些动力学现象载荷变化特点。

表 2-1 不同动力学现象载荷历时和压力变化情况

现象	载荷历时	压力变化
核爆炸	几微秒	$10^3 \sim 10^4$ GPa
炸药在固体表面接触爆炸	几微秒	10 GPa
子弹以 $10^2 \sim 10^3$ m/s 射击靶板	几十微秒	1~10 GPa

(2) 要考虑介质微元体的惯性、波的传播与相互作用，这一过程中包括了特殊的破坏现象，如层裂、心裂、角裂以及穿甲弹侵彻过程的自锐化效应等。

(3) 高加载率与高应变率 ( $dp/dt$ ,  $d\sigma/dt$ ,  $d\epsilon/dt$ ) 特点。此时，材料强度一般会提高，且变硬、变脆。

一般来说，准静态试验的应变率为  $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  量级，而考虑应力波传播的冲击试验的应变率范围为  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  量级，有时甚至可达到  $10^8 \text{ s}^{-1}$  量级，见表 2-2。

表 2-2 不同加载情况下的应变率变化

加载方法	应变率 ( $\text{s}^{-1}$ )	物理效应
准静态试验	$10^{-5} \sim 10^{-1}$	静力学变形
机械装置或压缩气炮	$10^{-1} \sim 10^0$	弹性、局部塑性
机械装置或压缩气炮	$10^0 \sim 10^2$	主要是塑性
火药炮	$10^2 \sim 10^4$	粘性，材料强度仍很重要
一级轻气炮	$10^4 \sim 10^6$	强度不可忽略，密度是主要参数
二级轻气炮	$10^6 \sim 10^8$	可压缩性效应
二级轻气炮	$>10^8$	气化

(4) 温度效应。材料受冲击作用，会出现热软化、瞬态相变、绝热剪切破坏等现象。从热力学角度而言，静力学加载过程相当于恒温过程，而动力学加载过程相当于绝热过程，其能量立即转化为冲击压缩能和塑性变形功。

(5) 在冲击载荷作用下,材料在高应变率下的动态力学性能与静态力学性能不同,即材料的本构关系不同,具有应变率效应。

在自然界中,动力学问题比比皆是,本章重点关注爆炸与冲击方面、地震方面的相关内容。

## 2.2 爆炸现象

### 2.2.1 爆炸分类

在日常生活中,我们随处可见爆炸现象,如燃放烟花和火炮、汽车爆胎、锅炉爆炸、燃气爆炸、炸弹爆炸等。爆炸是一种极为迅速的物理或化学的能量释放过程,即在极短时间内,爆源的某种形式内能释放出大量能量(包括大量高温高压气体),造成周围介质中高压的化学反应或状态发生变化。同时,爆源造成其周围的介质受力状态发生急剧突变,这是爆炸一个重要的特征。压力差的急剧变化是产生爆炸破坏的直接原因。

爆炸分类可按照初始能量、爆因、反应速率、反应相分、燃烧速度等进行分类。表 2-3 给出了爆炸按照初始能量的分类。

表 2-3 爆炸按照初始能量的分类

类型	反应方式	爆炸效应	应用或自然现象
核爆炸	原子核的裂变或聚变	中子辐射、光辐射、热辐射、冲击波、火球	核武器
化学爆炸	爆轰(炸药、火药)	冲击波、火球	爆破工程、瓦斯和粉尘爆炸、爆炸加工、常规武器发射药、矿山和水利建设
电爆炸	电能转化为机械能	冲击波、火球	水下放电、雷电
物理爆炸	一种机械能转化为另一种机械能	冲击波、飞散物	高压容器爆炸、火山爆发
高速碰撞	一种机械能转化为另一种机械能	冲击波、崩落、击穿、成坑	弹丸穿甲、碰甲、陨石碰撞
激光、X 射线或其他高能粒子束照射引起的爆炸	粒子束能量转化为机械能	崩落、击穿、成坑	激光或粒子束武器

如爆炸按照爆炸成因分类,可分为核爆炸、物理爆炸和化学爆炸等。

核爆炸是通过核裂变、核聚变或者这两者的多级串联组合引起的爆炸,其爆炸威力巨大,相当于几万吨至几千万吨 TNT 当量。核反应区的温度能达到数千万开,压力增加到几十亿大气压。反应区产生的高温高压等离子体辐射 X 射线,同时向外迅猛膨胀并压缩弹体,使整个弹体也变成高温高压等离子体并向外迅猛膨胀,发出光辐射,接着