

· 工程力学丛书 ·

塑性动力学

(新 版)

Dynamic Theory of Plasticity

(New Edition)

杨桂通 著

高等教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

塑性动力学 (新版) / 杨桂通著. — 北京: 高等教育出版社,
2000 ISBN 7-04-007653-5

I. 塑… II. 杨… III. 塑性力学: 动力学 IV. 0347

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 69031 号

塑性动力学 (新版)

杨桂通 著

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009

电 话 010-64054588 传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国农业出版社印刷厂

开 本 850×1168 1/32

版 次 2000 年 8 月第 1 版

印 张 18.375

印 次 2000 年 8 月第 1 次印刷

字 数 460 000

定 价 32.10 元

凡购买高等教育出版社图书, 如有缺页、倒页、脱页等
质量问题, 请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内 容 简 介

本书系统地阐述了塑性动力学的基本理论、重要概念和分析计算方法,并力图将本领域的最新研究成果和理论与应用有机地联系起来,力求概念清晰,论证严谨,理论与实际相结合。

本书的新版对原版做了较大幅度的调整与增删,以图更便于阅读与自学。新增动力塑性大变形问题一章是为高年级研究生进一步研究塑性动力学问题而准备的。

全书共分为11章。第1~3章为塑性动力学理论基础。第4~6章主要讲述梁、板、壳类结构在强动载荷作用下的塑性动力响应。第7~10章讨论了各类弹塑性应力波的传播及与之相关的一些问题。第11章介绍动力塑性大变形的基本理论,有限变形的基本关系式和应用例子。

本书可作为有关专业的研究生和高年级大学生的教学用书,也可供工程技术人员学习参考。

责任编辑	黄 毅
封面设计	张 楠
责任绘图	吴文信
版式设计	史新薇
责任校对	马桂兰
责任印制	杨 明

作者简介



杨桂通 1931年生，河北新河人。太原理工大学教授，博士生导师。曾任太原理工大学校长。1963年获苏联科学院技术科学副博士学位(Ph. D.)。研究方向为弹、塑性动力学。主要著作(含合著)有《弹性力学》、《弹性动力学》、《弹塑性力学》、《生物力学》及《医用生物力学》等。曾任中国力学学会常务理事、生物力学专业委员会主任、国家教委工科力学课程教学指导委员会委员及《固体力学学报》主编等职。

GAN 49/03

新版前言

本书新版仍保留了原版的写作意图和撰写原则，即主要介绍塑性动力学的基本概念、基本理论和主要方法，力图使读者对塑性动力学有一个完整的、深刻的了解，在可能的情况下，尽量介绍一些最新研究成果。

新版在结构和内容安排上都做了较大的调整，包括：删去了原版中的第二章。作为补充，在第一章中增加了一个启发性简例。其他章节中删去了一些过于冗赘的叙述和推导以及可以舍弃的内容。同时在第3章增加了模态解方法一节。新增了第11章动力塑性大变形问题等内容。

如原版所言，阅读本书不需做更多的数学力学的准备，只求读者具有基础力学和弹性力学的基础知识，新版增加的内容只有动力塑性大变形问题涉及到有限变形理论和张量代数的基础知识。为了阅读方便起见，增加了一个简明的张量基础知识，作为附录，以备参考。全书统一采用的符号均列入“主要符号表”中，而局部采用的符号则由当时定义给定。

塑性动力学有极为丰富的内容。由于篇幅有限，本书难以包括本来是非常重要的课题。例如，侵彻与穿甲力学问题，弹塑性动力稳定性问题，动力损伤、断裂与动力失效问题，以及相应的实验技术和计算方法理论，等等。近年来这些问题的研究都有很好的进展，特别是我国学者的一些新成果，如：王仁等对圆柱壳塑性冲击屈曲的重要发现；王礼立、李永池等对复合应力波的研究成果；余同希、杨嘉陵等关于塑性动力弯曲的一系列新问题、新现象的研究成果；黄筑平等关于塑性损伤本构理论的研究成果；华中理工大学关于结构动力响应、动力屈曲的研究；太原理工大学应用力学研究所关于冲扭屈曲问题及非线性动力行为的非规则运

动现象的研究成果,等等。以上这些我们期待着另有专门报导。这次只在参考文献中增列了有关文献,以供查阅。

在本书的原版和新版写作过程中,作者得到了许多老师、同学和朋友们的帮助。北京大学王仁老师给予了许多鼓励和支持。在原版出版过程中,湖南大学熊祝华教授曾热心地审阅了书稿,校订了公式和图表,给予了许多宝贵意见。十分感谢他们对本书的贡献。

这次修订出新版,清华大学徐秉业教授、太原理工大学张善元、蔡中民、赵隆茂教授等给予作者以多方面的帮助。太原理工大学应用力学研究所的我的学生、朋友和同事们都热情地帮助我做了不少技术性工作。特向他们致以深切的谢意。

我们的许多研究课题都属于塑性动力学问题,多年来多次得到国家自然科学基金委员会和山西省自然科学基金委员会的资助。部分研究成果总结在本书中。北京航空航天大学杨嘉陵教授审阅了新版书稿,提出了宝贵意见。特致谢意。

杨桂通

1998年12月25日于太原理工大学

原版前言

本书于十年前写成初稿，后几经修改，并作为固体力学专业研究生教材用过两遍，最后经过全面增删修订而成。本书的目的在于介绍塑性动力学的基本理论和实际应用，并限于小变形范围，只在适当的地方介绍了一些新近的成就。我们希望这本书能在塑性动力学的研究工作和工程应用方面为初学者打好基础。

本书注重基本概念和基本理论的阐述，力求由浅入深，便于学习。主要内容可分为三部分：第一部分是基础理论（第一章和第三章），第二部分是结构塑性动力响应（第二章、第四章至第七章），第三部分是弹塑性应力波的传播（第八章至第十一章）。后两部分在内容上是相互独立的，可以根据具体情况自由选读。本书读者只需具有理论力学、材料力学和弹塑性力学的基础知识，毋需有更多的力学和数学的准备。

本书插图按章编写，公式则按节编写。在后面章引用前面章的公式时，则在公式号前加一罗马字母，以示该式所在章次。例如“Ⅱ-8-24”则表示第二章第8节的24号公式。引用本章公式时，则略去章号。

北京大学王仁教授在本书的编著过程中，经常给以关怀和热心帮助，并仔细地审阅了书稿，提出了许多宝贵意见；作者也曾与重庆大学杨绪灿教授和清华大学徐秉业副教授进行过多次有益的讨论，得到了他们的帮助；张善元、杨绍瑞和孙学伟同志细心审核了书稿；特此一并致以衷心的感谢。

我的朋友和合作者湖南大学熊祝华教授仔细地审阅了我的全部书稿，推证了全部公式，书中的图表与论述都做了校核与修正。为阅读方便起见，他修改了原稿的一些叙述方式，增加了公式的推演步骤和文字说明。所以本书不少地方也反映了他的学术思想，

大大地增加了本书的光彩。而这些工作都是他在一个很短的时间内完成的。由于作者水平有限，本书仍会有许多不妥之处，希予多加指正。

杨桂通

1982年8月24日于太原工业大学

原 版 序

物体在冲击载荷下应力进入塑性阶段问题，很早就在生产实践和国防工程中占有重要的地位。其重要性随着技术的发展而日益增长。在抵抗爆炸载荷吸收冲击能量方面，既要防止冲击和爆炸载荷引起材料的破坏又要节省材料，这就需要进行细致的变形和应力分析。而另一方面，利用冲击和爆炸载荷最有效地使物体发生塑性变形也是工程中的重要应用，例如爆炸成形、穿甲等问题。这些方面的研究工作一直受到国际科技界的重视，文献是大量的，理论和实验方面的专著也很多。然而在国内还缺少这样一本全面系统地阐述这方面基本理论的书籍。本书介绍塑性动力学的基本理论和实际应用以及有关的新成就，值得欢迎。它将有助于从事这方面工作的同志系统地掌握塑性动力学的基本概念、基本理论和分析方法，对“四化”建设是一个有意义的贡献。

塑性动力学与准静态塑性力学问题的差别，在于前者不再能忽略惯性项，变形也较大，因而在数学处理上引起许多困难。同时由于应变率较大，不能忽略它对本构关系的影响，经常要考虑粘性效应，因而需要从物理上对变形机理做进一步探讨。

塑性动力学所处理的问题大致可分为两类。一类是应力波的传播，这时要考虑物体每个质点的惯性，质点的运动通过应力波的形式传播给它的邻近质点。在数学上表现为波动方程，运动沿方程的特征线以一定的波速传播开去，质点是在波到达之后才开始运动的。当应力超过弹性极限时，塑性变形将以塑性波的速度传播，这时波速的快慢随变形的大小和应变率的大小而异。另外由于应力波在边界上的反射和折射造成十分复杂的图像，在一些条件下，虽然初始的波动是弹性的，波干涉的结果会在某些地区产生塑性变形或破坏，在实际问题中也常有这种情况发生。另

一类问题是结构物的动力响应。在这类问题中由于物体的尺寸较小, 载荷作用的时间长于波通过物体的时间, 波在物体内经过多次反射已造成物体的整体运动, 因而可以不再考虑应力波在体内的传播, 而直接考虑整体性的惯性运动。这时人们研究结构物在动力载荷下的变形过程, 求其最终的变形形状和大小。

至于从第一类问题如何过渡到第二类问题的细节, 以及两类情况同时存在的交叉性问题, 诸如厚板穿甲、结构的动力稳定性等问题就更为复杂, 因而通常只从一个方面加以分析。

塑性动力学遇到的关键问题在于如何寻找出一个既便于计算又能正确代表材料动力性能的本构关系。从宏观实验来讲, 目前均在一维情况下进行, 在复杂应力状态下的实验要比准静态情况困难得多, 因此通常是将准静态本构关系加上一个应变率的修正。这也有两种做法。一个简单的做法是将静态屈服条件乘上一个考虑整体平均应变率效应的因子, 在结构物动力响应问题中较常用。更精细一点的做法是把应变率效应考虑在本构关系以内, 在计算上就要繁复得多, 然后将计算结果和宏观实验进行比较以确定一个较好的模型。本书第三章对此做了较全面的介绍。另一方面是从微观变形机理进行本构关系的探讨, 它牵涉到位错的运动, 不可逆热力学等内容, 这也是目前研究的一个重要方面。本书在第一章中对位错动力学做了一些基本的介绍, 这对于进一步理解塑性动力过程将是有帮助的。

在固体中应力波的传播过程所引起各质点的位移是较小的, 通常还可以按小变形情况处理。而在结构物塑性动力响应问题中, 则常要遇到大变形情况, 其结果与小变形分析的差别较大, 需要加以考虑, 这也是目前这方面的研究重点。本书着重于在小变形方面打好理论基础, 有了这个基础以后, 读者就不难从文献中做进一步的探讨。我们也希望作者以后在这方面再做些介绍。

全书除系统地整理了散在文献中的工作, 还补充了作者尚未发表的工作。作者以其丰富的教学经验, 以细腻的推导, 处理了

每一个问题，使读者便于掌握。此书内容对于从事这方面工作的同志，将起到很好的引导作用。

北京大学 王 仁

1983 年 2 月

主要符号表

c_0	弹性波波速
c_f	快塑性波波速
c_s	慢塑性波波速
c_{kl}	Cauchy 变形张量
C_{kl}	Green 变形张量
$\dot{D}$	塑性比功率
D_{ij}	变形率张量
E_t	总势能
E_k	动能
E_{0l}	侧限强化模量
E_{ij}	Lagrange (Green) 应变张量
e_{ij}	Euler (Almansi) 应变张量
G	切变模量
G_p	塑性切变模量
H	切应变率强度
H_a	表征应力历史的参数
H_b	表征应变历史的参数
H_c	表征温度影响的参数
E_H	表征材料强化的参数
I_1, I_2, I_3	应变偏张量的第一、第二、第三不变量
J	Jacobi 函数行列式
J_1, J_2, J_3	应力偏张量的第一、第二、第三不变量
J_h	Hamilton 作用量
K	体积模量
L	速度梯度
M_s, m_s	屈服弯矩
s_{ij}	应力偏张量

S_{ij}^0	Kirchhoff 应力张量
t_c	滞后时间
t_d	运动持续时间
t_f, τ_f	运动(变形)终止时刻
T_{ij}	Lagrange 应力张量
w_f, δ_f	运动终止时的挠度(位移)
σ_{ij}	Cauchy 应力张量
σ_H	Hugoniot 弹性极限, 侧限屈服极限
σ_s	屈服应力
σ_{ds}	动屈服极限
$\Delta\sigma_{ij}^I$	Jaumann 应力增量张量
ρ_0	材料(介质)密度
η	粘性系数
ω	固有(角)频率
ψ	自由能密度
λ	应变率敏感系数
τ_8	八面体切应力
φ_n, ψ_n	振型函数

目 录

主要符号表	1
第 1 章 绪论	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 固体材料的动力特性	3
1-2-1 材料动力特性的某些实验结果	3
1-2-2 固体材料的动力特性	4
§ 1-3 最简单的弹塑性系统的动力响应	13
第 2 章 本构方程	20
§ 2-1 屈服函数与加载函数	20
2-1-1 初始屈服条件	21
2-1-2 强化规律 加载函数	22
2-1-3 强化材料的加载、卸载准则	25
§ 2-2 Drucker 公设与 Илюминин 公设	28
§ 2-3 应变率无关理论	33
2-3-1 理想塑性材料的增量理论	34
2-3-2 强化材料的增量理论	35
2-3-3 全量理论	37
2-3-4 简单卸载定理	39
§ 2-4 过应力模型理论	39
§ 2-5 粘塑性模型理论 Perzyna 方程	43
§ 2-6 拟线性本构方程	53
§ 2-7 Bodner-Partom 理论	55
第 3 章 限界定理与变分原理 模态解方法	59
§ 3-1 质量守恒定理	59
§ 3-2 动量定理	60
§ 3-3 虚速度原理	61
§ 3-4 Hamilton 型变分原理	62

§ 3-5 位移限界定理	65
§ 3-6 最小加速度原理	70
3-6-1 应变加速度的特性	70
3-6-2 关于应变加速度的等式和不等式	72
3-6-3 最小加速度原理	74
3-6-4 加速度场的唯一性	75
3-6-5 加速度间断的影响	76
§ 3-7 广义变分原理	77
§ 3-8 模态解方法	81
第 4 章 弹塑性梁的动力分析	86
§ 4-1 基本方程	86
§ 4-2 弹塑性梁在突加载荷作用下的动力响应	93
§ 4-3 弹塑性梁受冲击波作用时的动力响应	102
§ 4-4 刚塑性梁动力分析的基本关系式	111
4-4-1 塑性铰处的运动连续条件	112
4-4-2 刚性区和塑性区的运动方程	115
§ 4-5 刚塑性梁的动力响应	119
§ 4-6 限界定理与变分原理的应用	136
第 5 章 薄板塑性动力响应	146
§ 5-1 刚塑性薄板动力分析	146
5-1-1 基本假设	146
5-1-2 基本方程	147
5-1-3 塑性铰环 塑性铰环处的连续条件	155
§ 5-2 刚塑性圆板在矩形脉冲载荷作用下的动力响应	158
5-2-1 静态极限分析	158
5-2-2 板运动的第一种性态	159
5-2-3 板运动的第二种性态	162
§ 5-3 刚塑性圆板在其他形式载荷作用下的动力响应	171
5-3-1 给定初速度的情况	171
5-3-2 冲击波载荷的情况	174
§ 5-4 应变率效应的影响	179
§ 5-5 刚塑性方板的动力响应	189