

中国科学院大学研究生教材系列

近代连续介质力学

Modern Continuum Mechanics

赵亚溥 著

 科学出版社

近代连续介质力学

Modern Continuum Mechanics

赵亚溥 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

连续介质力学作为工程科学的“大统一理论”，是工程科学的基础。本书为著者在中国科学院力学研究所和中国科学院大学多年授课的基础上凝练而成。该书系统地阐述了近代连续介质力学的基本概念和原理，突出地反映了该学科近年来的一些新发展。

本书共由十篇 33 章和 3 个附录构成。前三篇为基本概念和原理，突出了公理体系、守恒律和本构关系。第四篇讨论了流变学的理性力学基础；第五篇针对 DNA、液晶、生物膜、液滴等软物质，讨论了熵弹性和曲率弹性；第六篇则讨论了非协调连续统理性力学、位错连续统等理论；第七篇讨论了连续介质波动理论；第八篇则结合广义连续介质力学，讨论了非局部、梯度、偶应力和表面弹性等热点问题；作为连续介质力学的两个典型应用，第九篇讨论了大脑结构成像中的扩散张量成像以及多孔弹性介质的 Biot 本构关系。

本书可作为力学、工程科学、应用数学、材料科学等专业的研究生或本科生教材。亦可供上述专业的教师和科技人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

近代连续介质力学 / 赵亚溥著. —北京: 科学出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-03-049992-9

I. ①近… II. ①赵… III. ①连续介质力学 IV. ①O33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 229570 号

责任编辑: 刘信力 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本: 850×1168 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张: 36 插页: 1

字数: 839 000

定价: 168.00 元

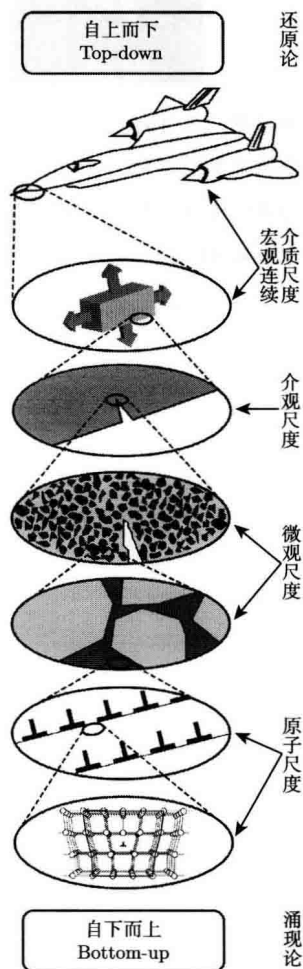
(如有印装质量问题, 我社负责调换)

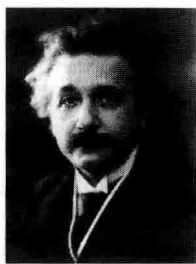
前 言

连续介质力学被誉为工程科学的“大统一理论 (grand unified theory)”，是工程科学的基础和框架。工程科学和连续介质力学之间的关系可用“鱼”和“水”、“树”和“根”来形容。根深方能叶茂，本固方能枝荣。从 20 世纪中叶以来，应用力学学科受到了科学与技术若干个发展的强烈影响：理性力学的复兴，计算机的发明和计算力学的兴起，航空航天巨大成就，信息技术、生物医学工程及微纳米技术的广泛应用等。后续新兴学科的发展为连续介质力学的发展注入了新的巨大活力。

钱学森先生将从事理性力学研究称为是“一种精神享受”，按照我的理解，理性力学像数学和物理学一样，一定含有很多“美学 (aesthetics)”的成分。连续介质力学中的美可大致概括为：(1) 对称美，对称性在连续介质力学中无处不在，在本书几乎每一个章节中都讨论到了对称性的问题；(2) 简约美，“形式的简洁性，内含的丰富性”是连续介质力学的基本特征之一，张量表示既可以体现出方程不依赖于坐标系选择的深刻内涵，又可以使极为复杂的分量方程以极为简洁的形式表示出；(3) 统一美，质量守恒、动量守恒、动量矩守恒和能量守恒方程不但是连续介质力学的核心内容，而且是统一美的具体体现，这里的统一也预示着“协调”、“一致性”、“共性”等。在经典力学中，连续对称一定导致守恒定律，这是 Noether 定理的结论，由此看来，对称美和统一美之间是相辅相成的。功的共轭的概念将不同的应力和应变度量联系在一起，成为构建正确本构关系的基石。此外，公理体系也是连续介质力学实现统一美的重要基础；(4) 客观美，连续介质力学的一个重要特点是客观性的要求，也就是标架无差异性，或者介质的力学性质与观察者无关；(5) 奇异美，本书中除了着重讲授协调方程外，还在诸如位错、缺陷、断裂等多个相关章节中讲到非协调方程，奇异性是力学美的一个重要特征，它是近代力学研究发现中的重要美学因素，力学领域中一些新观念的产生，往往就是来自对奇异美的追求；(6) 相似美或类比美，相同的数学方程或模型可以描述两类完全不同的物理系统，该方面的内容可详见本书附录 C 对物理相似性的讨论。

在艺术领域中，最对称的往往不一定是最美的，相反，“对称 + 破缺”才可能更美。通过非线性科学的发展，近代连续介质力学已经呈现出了对称性和自发性对称破缺、确定性和混沌、平衡与失稳、有序和无规、简单性和复杂性、还原论和涌现论等有机结合的多样性，这些学科美学的特点也在本书的部分章节中得到了体现。





爱因斯坦于 1916 年引入张量的求和约定并于 1936 年高度评价连续介质力学 (见本书第 11 页)

由上面的分析可知, 连续介质力学中包含的不仅仅是形式对称、变化调和、多样性及统一性等普通之美——“优美 (the beautiful)”, 更重要的是, 也包含有使心灵得到震撼的非凡之美——“壮美 (the sublime)”. 康德说: “壮美感动着人, 优美摄引着人.” 从优美到壮美, 眼界始宽, 境界乃大, 思路始广, 触动乃深.

从“精神享受”、“把关的工作”和“美”的角度去学习和研究, 连续介质力学非但不再是一门枯燥、冰冷和令人望而生畏的学科, 而且研之越深, 越发感之有趣.

国内外优秀的连续介质力学教材或专著已汗牛充栋. 讲授连续介质力学课程, 特别是撰写新的连续介质力学书不但耗时费力, 而且可用 Freeman Dyson 所称的“不合时尚的追求 (unfashionable pursuit)”来描述. 为何要花如此大的精力来撰写本书? 我的初衷是:

(1) 著者多年来一直在中国科学院力学研究所为博士生开设“连续介质力学·固体”课程, 一些毕业多年的同学仍在询问上课的讲稿和课件能否整理出版以供进一步参考. 从 2014 年开始, 著者应邀在中国科学院大学雁栖湖校区为研究生开设该课程, 听课学生来自于十余个研究所, 有一部起点高、选题新、视野宽的教材有益于巩固教学质量的稳步提高.

(2) 针对理工科学生普遍对该课程具有畏惧心理的现实, 在撰写过程中十分注重对相关内容发展史的深入挖掘和介绍, 力争使其成为既有深度又有兴趣读的书. 例如, 本书给出了力学大师 G. I. Taylor 和 L. Prandtl 以及化学家 H. Eyring 多次被提名诺贝尔物理学或化学奖而未获奖的原因, 这无疑会给青年学者以很多启示.

(3) 近年来, 连续介质力学的理论和应用都得到了快速发展. 在理论方面, 主要是在流形、非欧几何、表面界面、软物质等方面. 而在应用方面的典型例子包括: 3D 打印、扩散张量成像 (DTI)、扩散张量纤维束成像 (DTT) 等已经大量应用于临床、页岩气开采中的水力压裂等. 显示出连续介质力学这门学科不是束之高阁的理论框架, 而是在工程应用和人类自身需求的医学等中拥有巨大生命力的学科. 确实需要一本新的连续介质力学书来展示这些最新的发展和应用情况, 进而更加激发学生对这门课程的兴趣. 书名中的“近代”主要是指包含了有关微分流形、李导数、熵弹性、曲率弹性、软物质本构关系等目前的学术热点和难点问题.

应该提醒初学者注意的是, 教材、专著的撰写以及授课不得不采用“自上而下 (top-down)”的“推演法 (演绎法, deduction)”, 也就是直接从命题给出的条件出发, 运用概念、公式、定理、原理、公理等进行推理或运算, 得出结论, 选择正确答案, 这就是传统的解题方法. 而重大的科学发现往往是倒过来的, 亦即基于新现象提炼、凝练出新结论、新方法、新理论、新命题的“自下而上 (bottom-up)”的“归纳法

(induction)”。青年学者如果有志于在非线性连续介质力学方面从事研究并有所成就的话,就必须注重两种方法的结合。

古人云“学然后知不足,教然后知困。知不足,然后能自反也,知困,然后能自强也。故曰:教学相长也。《兑命》曰:‘学学半’”(《礼记·学记》)。借到中国科学院大学授课和这部书的撰写之际,我又从 Truesdell 等的两部理性力学经典著作《经典场论》(CFT)和《力学的非线性场论》(NLFT)开始,研读了国内外该领域很多优秀的专著、教材和论文,收益颇丰,特别是通过授课、知不足、知困、自反、自强、相长几个不同阶段,形成了本书稿。

本书由十篇共 33 章和 3 个附录构成。前三篇为经典连续介质力学的基本内容,突出了公理体系、守恒律和本构关系。为了使选课的学生有充足的选学内容,本书在第四篇讨论了流变学的理性力学基础;第五篇主要针对 DNA、液晶、生物膜、液滴等软物质,讨论了熵弹性和曲率弹性;第六篇则讨论了非协调连续统理性力学、位错连续统、弹塑性有限变形理论、连续介质脆性断裂理论;第七篇主要针对动力学问题和惯性效应,讨论了连续介质波动理论,特点是表面和界面波动问题;第八篇则结合近年来得到迅速发展的广义连续介质力学,讨论了非局部、梯度、偶应力和表面弹性等热点问题;作为连续介质力学的两个典型应用,第九篇的两章则分别讨论了大脑结构成像中的扩散张量成像以及多孔弹性介质的 Biot 本构关系。本书大体上可以满足 40 (基础部分) + 20 (前沿介绍) 共计 60 学时的授课要求。授课的经验表明,连续介质力学课程的期末考核采用“考试 + 大作业”的形式效果较好,故在部分的章节的思考题中给出了大作业。

本书的撰写和出版得到了国家自然科学基金委员会项目 (U1562105, 11372313) 和中国科学院“创新交叉团队”、“前沿科学重点研究计划项目 (QYZDJ-SSW-JSC019)”、“战略性先导科技专项 (B 类, 项目编号: XDB22040401)”等项目的联合资助。

容得下批评和经得起质疑是学科发展及走向成熟的基石。由于连续介质力学的内容十分丰富,特别是近年来广义连续介质力学发展迅速,本书必有很多值得进一步改进的地方,请学术前辈、同行和同学们多提宝贵意见。



钱学森将理性力学称为“把关的工作”并将从事其研究称为是“一种精神享受”(见本书 5~6 页)

赵亚溥

2016 年 3 月于中关村

目 录

前言

第一篇 基础部分

篇首语	2
第 1 章 理性连续介质力学概述	3
1.1 理性力学与连续介质力学	3
1.1.1 作为横断学科的理性力学	3
1.1.2 钱学森对理性力学的评价	5
1.1.3 Truesdell 对理性力学的评价	6
1.1.4 理性力学的复兴	7
1.2 连续介质力学的范围和兴起	8
1.2.1 连续介质力学的创立	8
1.2.2 连续介质力学的研究范围	9
1.2.3 爱因斯坦等对连续介质力学的评价	11
1.2.4 近代连续介质力学的发展	12
1.2.5 理性连续介质力学作为“场论”分支学科的进一步讨论	14
思考题	15
参考文献	18
第 2 章 连续介质力学的公理体系	26
2.1 公理和公设	26
2.1.1 基本概念	26
2.1.2 几何学公理化——从 Euclid 到 Hilbert 再到 Gödel	26
2.1.3 力学和热力学的公理化	29
2.2 冯元桢的连续介质力学公理	31
2.3 冯元桢的生物体对连续介质力学公理之改造	31
2.4 本构公理	32
2.4.1 因果性公理	33
2.4.2 确定性公理	33
2.4.3 等存在公理	34

2.4.4	客观性公理	34
2.4.5	物质不变性公理	35
2.4.6	邻域公理	36
2.4.7	记忆公理	37
2.4.8	相容性公理 (一致性公理)	37
2.5	公理化与数学在自然科学中不可思议的有效性	38
	思考题	39
	参考文献	40
第 3 章	张量分析初步	42
3.1	张量和张量分析大事记	42
3.2	矢量的点积和叉积、爱因斯坦求和约定、Kronecker 符号	43
3.3	Levi-Civita 置换符号	45
3.4	赝矢量和赝标量	47
3.5	Levi-Civita 置换符号和 Kronecker 符号所满足的恒等式	50
3.6	力学中的对偶空间、对偶基、逆变与协变	51
3.7	斜角直线坐标系的协变与逆变基矢量	51
3.8	度量张量	54
3.9	Christoffel 符号	57
3.10	张量与赝张量	58
	思考题	60
	参考文献	61
第 4 章	张量代数和微积分	63
4.1	Cayley-Hamilton 定理	63
4.2	二阶张量的微积分	66
4.2.1	二阶张量的梯度运算	66
4.2.2	二阶张量的散度运算	67
4.2.3	二阶张量的旋度运算	68
4.2.4	张量的标量函数的导数	68
4.2.5	Green 定理和 Stokes 定理	70
	思考题	73

参考文献	75
------	----

第二篇 运动学、守恒律、客观性

篇首语	78
II.1 连续介质力学的基本方程	79
II.2 连续介质力学的未知量个数	80
第 5 章 变形几何与运动学	81
5.1 参考构形和当前构形、变形梯度张量 —— 两点张量	81
5.2 参考构形、当前构形中体元和面元的变换	85
5.3 位移梯度张量 —— 两点张量	86
5.4 变形梯度张量的极分解、Hill 的主轴法	87
5.4.1 右极分解、主轴法	88
5.4.2 Green 应变张量 —— Lagrange 描述下的有限变形应变张量	91
5.4.3 左极分解	91
5.4.4 Almansi 应变张量 —— Euler 描述下的有限变形应变张量	92
5.4.5 本节讨论	93
5.5 速度梯度、应变率、旋率	94
5.6 变形梯度和 Green 应变张量的物质时间导数	95
5.7 推前与拉回操作	98
5.8 各种旋率	98
5.9 小变形理论的协调条件	99
思考题	101
参考文献	103
第 6 章 应变度量	104
6.1 应变概念大事记	104
6.2 Hill 应变度量	106
6.3 Seth 应变度量	106
6.4 Hill 应变度量的率	110
6.5 Seth 应变度量的率	112
6.6 本章结束语	113
思考题	113

参考文献	114
第 7 章 应力、功共轭、应力度量	116
7.1 应力概念大事记	116
7.2 现代连续介质力学的出生证 —— Cauchy 应力原理与基本定理	117
7.3 Cauchy 应力	118
7.4 第一类和第二类 Piola-Kirchhoff 应力、Kirchhoff 应力	119
7.5 应力张量的逆变推前和拉回操作	120
7.6 共轭变量对	120
7.7 与 Seth-Hill 应变度量功共轭的应力度量	120
思考题	124
参考文献	124
第 8 章 守恒律、Clausius-Duhem 和 Clausius-Planck 不等式	126
8.1 质量守恒定律	126
8.2 动量守恒定律	128
8.3 动量矩守恒定律	129
8.4 能量守恒定律	130
8.4.1 动能定理	130
8.4.2 能量守恒律	131
8.5 Clausius-Duhem 不等式和 Clausius-Planck 不等式	132
思考题	135
参考文献	136
第 9 章 客观性与应力的客观率	137
9.1 客观性和应力的客观性时间导数的由来	137
9.2 客观物理量	139
9.2.1 客观标量	140
9.2.2 客观矢量	140
9.2.3 客观张量	141
9.3 Truesdell 客观率	144
9.4 Green-Naghdi 客观率	146
9.5 Zaremba-Jaumann 客观率	147
9.6 Oldroyd 客观率	149

9.7 随体客观率	149
9.8 对数客观率	149
9.9 Hill 通类应力客观率	150
9.10 各类应力客观率之间的比较	150
思考题	150
参考文献	151
第 10 章 守恒律的客观性讨论	154
10.1 Ogden 关于 Truesdell 和 Hill 客观性的统一表述	154
10.2 连续性方程的客观性	155
10.3 动量方程的客观性	156
10.4 动量矩方程的客观性	157
10.5 能量守恒方程的客观性	157
10.6 熵平衡方程和 Clausius-Duhem 不等式的客观性	158
思考题	158
参考文献	158

第三篇 简单物质和弹性本构关系

篇首语	160
III.1 弹性体的三种类型	160
III.2 材料的对称性公理	161
III.3 张量函数的表示理论在材料本构关系中的应用	162
第 11 章 简单物质和 Cauchy 弹性	165
11.1 简单物质, 物质的同构性、均匀性和同质性	165
11.1.1 简单物质的定义	165
11.1.2 物质同构性、均匀性、同质性	166
11.2 梯度型物质	166
11.3 各向同性弹性物质的本构方程	167
11.3.1 各向同性张量函数的 Richter 表示定理、各向同性材料的本构方程 . . .	167
11.3.2 各向同性弹性物质本构方程的进一步讨论	170
11.3.3 各向同性弹性物质在参考构形上的微小变形	171

11.4 广义 Coleman-Noll 不等式 —— GCN 条件	175
思考题	177
参考文献	178
第 12 章 超弹性本构关系	180
12.1 超弹性与弹性张量必须满足的条件	180
12.1.1 超弹性与 Helmholtz 自由能	180
12.1.2 弹性张量必须满足的条件	181
12.1.3 热超弹性本构关系的一个例子	182
12.2 超弹性本构关系的分类	183
12.2.1 唯象型 (phenomenological) 超弹性本构模型	183
12.2.2 基于材料微结构的超弹性本构模型	185
12.2.3 唯象和基于微结构的杂交模型 —— Gent 模型	185
12.3 Mooney-Rivlin 本构模型中的材料常数	186
12.4 几种超弹性本构模型之间的对比	188
12.5 可压缩超弹性体的本构关系	191
12.5.1 可压缩超弹性体的一般性质和本构关系	191
12.5.2 可压缩各向同性超弹性体的本构关系	193
12.5.3 用应变不变量表示的可压缩各向同性超弹性体的本构关系	194
12.6 横观各向同性超弹性体的本构关系	195
12.6.1 横观各向同性超弹性体的运动学描述和五个不变量	195
12.6.2 横观各向同性超弹性体的本构关系	196
12.6.3 不可压缩横观各向同性超弹性体的本构关系	197
12.7 超弹性物质需要满足的 Coleman-Noll 不等式	198
思考题	199
参考文献	201
第 13 章 低弹性本构关系	203
13.1 低弹性材料的阶	203
13.2 零阶低弹性材料的本构关系	203
13.3 用 Zaremba-Jaumann 客观导数表示的低弹性材料本构关系	205
13.4 用 Green-Naghdi 客观导数表示的低弹性材料本构关系	206
思考题	207

参考文献	208
------	-----

第四篇 流变学的理性力学基础

篇首语	210
-----	-----

第 14 章 Rivlin-Ericksen、Stokes、Reiner-Rivlin、广义牛顿流体 214

14.1 对称群, 三斜群与固体、么模群与流体	214
14.2 Rivlin-Ericksen 张量和 n 阶复杂性微分物质	214
14.3 三阶复杂性 Rivlin-Ericksen 流体和测黏流动	216
14.4 Stokes 流体	218
14.5 Reiner-Rivlin 流体、Navier-Stokes 流体、广义牛顿流体	219
14.5.1 Reiner-Rivlin 流体的定义以及系数的热力学限制	219
14.5.2 Reiner-Rivlin 流体的两个特例 —— Navier-Stokes 流体和广义牛顿流体	221
14.6 简单物质的谱系	223
思考题	223
参考文献	224

第 15 章 非牛顿流体的本构关系和流动行为 226

15.1 时间无关行为的流变体	227
15.1.1 无屈服应力的流变体模型 —— 剪切致稀和剪切致稠	227
15.1.2 有屈服应力的流变体模型 —— Bingham 体和 Casson 体	229
15.2 血液流变学模型	229
15.3 流变体中扩散的 Stokes-Einstein-Sutherland 公式	231
思考题	233
参考文献	234

第 16 章 Boltzmann 叠加原理和线性积分型黏弹性本构方程 237

16.1 问题的背景	237
16.2 早期几个经典的黏弹性实验	238
16.3 Maxwell 和 Meyer 的微分型黏弹性模型	239
16.4 Boltzmann 叠加原理和线性积分型黏弹性模型	240
16.5 基于 Boltzmann 叠加原理的软组织准线性黏弹性理论 (QLV)	242

思考题	244
参考文献	244
第 17 章 固体黏滞性和声波在固体中的吸收	246
17.1 Kelvin 对固体黏滞性概念的引入	246
17.2 Rayleigh 耗散函数	246
17.3 声波在固体中的经典吸收理论	248
17.3.1 声波在连续介质中的经典吸收理论概述	248
17.3.2 声波在固体中的热传导和黏滞吸收的计算模型	249
思考题	252
参考文献	252

第五篇 熵弹性与曲率弹性

篇首语	254
V.1 能弹性、熵弹性与负熵	254
V.2 取向熵、转动熵与熵致相变	254
V.3 软物质力学中的构形与构象	257
第 18 章 移动接触线中的熵弹性	259
18.1 液滴铺展中的熵耗散与黏性耗散	259
18.2 液滴的铺展参数	261
18.3 润湿相变	263
18.3.1 对称性破缺与遍历性破缺	263
18.3.2 作为遍历性破缺的润湿相变	266
思考题	271
参考文献	272
第 19 章 DNA 的单分子熵弹性理论	273
19.1 常见的几个 DNA 熵力模型	273
19.2 DNA 单分子的流场拉曳行为 —— “分子个人主义”	274
19.3 DNA 超拉伸的连续统模型	276
19.3.1 基本方程	278
19.3.2 本构模型	279

思考题	286
参考文献	287
第 20 章 液晶的 Oseen-Zöcher-Frank 曲率弹性理论	290
20.1 液晶连续统弹性形变理论的引入	290
20.2 丝状液晶弹性形变的三种基本模式——展曲、扭曲、弯曲	291
20.3 丝状液晶的平衡方程和边界条件	293
20.4 丝状液晶的运动方程	295
思考题	297
参考文献	298
第 21 章 生物膜弯曲变形的 Helfrich 自发曲率模型	300
21.1 生物膜泡粗粒化处理的出发点和 Canham 模型	300
21.2 生物膜泡弯曲变形的 Helfrich 自发曲率模型和详细推导过程	303
21.2.1 Helfrich 自发曲率模型和弯曲刚度的数量级	303
21.2.2 Helfrich 自发曲率模型的推导过程	304
21.2.3 轴对称膜泡的形状方程和解答	305
思考题	306
参考文献	307
 第六篇 非协调连续统——位错、弹塑性大变形与脆性断裂	
篇首语	310
第 22 章 位错连续统理论和位错动力学	315
22.1 非协调张量、位错密度张量和 Nye 张量的引入	315
22.2 位错弹性理论	317
22.2.1 Eshelby-Eddington 方法	318
22.2.2 Mura 的 Green 函数方法	318
22.2.3 Kröner 方法	318
22.3 各向同性弹性场中匀速运动位错的极限速度——横波波速	319
22.4 位错运动的 Orowan 公式	321
22.5 超声速位错与马赫锥	322
思考题	323

参考文献	324
第 23 章 弹塑性有限变形理论	327
23.1 静水应力状态和金属塑性体积变化 —— Bridgman 的高压实验	327
23.2 应力和应变的偏张量	327
23.3 屈服面、屈服条件和一致性条件	329
23.3.1 屈服面和屈服条件	329
23.3.2 累积塑性变形、塑性功率、塑性功	330
23.3.3 一致性条件和弹塑性本构关系	331
23.3.4 Tresca 和 von Mises 屈服条件	333
23.4 Hill 最大塑性功率原理、Drucker 公设、Ilyshin 公设与正交法则	335
23.4.1 Hill 最大塑性功率原理	335
23.4.2 Drucker 公设、正交法则、Drucker 公设只适用于小变形的原因	336
23.4.3 Ilyushin 公设以及对大变形情形的推广	339
23.5 von Mises 塑性位势理论	340
23.6 变形梯度的弹塑性乘法分解 —— Lee 分解	342
23.7 速度梯度、变形率和旋率的弹塑性加法分解	344
思考题	347
参考文献	350
第 24 章 连续介质断裂理论	354
24.1 Kirsch 圆孔和 Kolosov-Inglis 椭圆孔的应力集中理论	354
24.1.1 Kirsch 的含圆孔的无限大平板的弹性解和应力集中问题	354
24.1.2 Kolosov-Inglis 的椭圆孔的应力集中问题	356
24.2 Griffith 通过引入固体表面张力所创立的脆性断裂理论	358
24.3 Irwin 的应力强度因子和能量释放率	360
24.4 断裂力学中的热力学方法和能量释放率	364
24.5 裂纹尖端 Barenblatt-Dugdale 内聚-塑性区模型	366
思考题	369
参考文献	370

第七篇 连续介质波动理论

篇首语	· 374
VII.1 三种类型的波动方程	· 374
VII.2 地震中三种类型弹性波的首次识别	· 376
VII.3 地球外核和内核的提出	· 378
VII.4 塑性波的提出	· 378
VII.5 相速度和群速度	· 379
第 25 章 矢量的 Helmholtz 分解和三维弹性波理论	· 381
25.1 Helmholtz 创立的矢量分解方法	· 381
25.2 不同坐标系下的三维弹性波理论	· 382
25.3 波动方程的自相似解	· 384
25.3.1 Chaplygin 变换	· 384
25.3.2 突加反平面线载荷情形	· 385
25.3.3 剪切波在弹性楔中的传播	· 385
思考题	· 387
参考文献	· 389
第 26 章 表面波 —— Rayleigh 波和毛细波	· 391
26.1 Rayleigh 表面波	· 391
26.2 圆柱形井筒沿轴向传播的表面波	· 395
26.3 毛细波	· 401
思考题	· 402
参考文献	· 404
第 27 章 界面波 —— Love 波和 Stoneley 波	· 405
27.1 Love 波	· 405
27.2 Stoneley 波简介	· 408
27.3 弹性流体中的压缩波	· 409
27.4 固-固界面的 Stoneley 波	· 409
27.5 圆筒状矿井中固-液界面的 Stoneley 波	· 411
27.6 海洋中洋底固-液界面的 Stoneley 波	· 415
27.6.1 海水的运动和压强	· 415