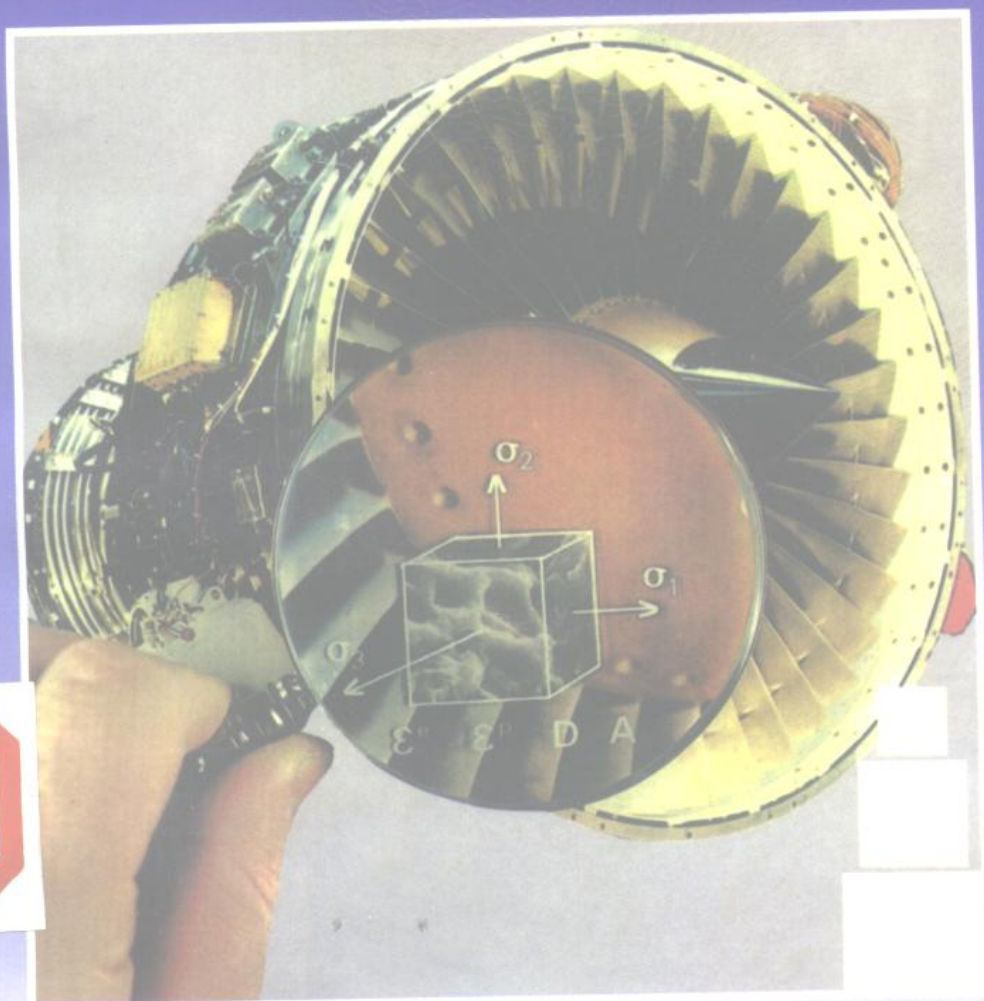


固体材料力学

[法] *J. Lemaitre* 著
J. - L. Chaboche

余天庆 吴玉树 译



国防工业出版社

固体材料力学

J. Lemaître
〔法〕 J. -L. Chaboche 著

余天庆 吴玉树 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-1996-012/号

图书在版编目(CIP)数据

固体材料力学/余天庆,吴玉树译. —北京:国防工业出版社,1997.9

ISBN 7-118-01660-8

I. 固… I. ①余 …②吴… II. 固体力学:材料力学
N. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 18318 号

“Mécanique des matériaux solides” © Dunod, 1996.

本书中文版由法国 Dunod 出版社授予国防工业出版社独家出版发行。版权所有,翻印必究。

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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 17% 449 千字

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

原 序

我的年轻同行, Jean Lemaitre 和 Jean-Louis Chaboche^①请我为他们的著作《固体材料力学》(Mécanique des Matériaux Solides)写篇序言。尽管这本书的书名、目录和引言已非常清楚地说明了该书的宗旨,同时作者的声誉已有足够的力量吸引读者,但我还是非常高兴地接受这一邀请,作为友谊和希望的表示。

如果把这本书置于最近几十年的科学发展中来评价,我可断言,该书的独创性就显而易见了。实际上,这本书是三方面知识的综合且又有了新的发展。首先,该书沿用力学和连续介质热力学的概念、体系和方法,从一些简单的概念着手,就能建立为描述固体各种不同性质所必需的许多唯象模型。其次,该书收集、整理、尤其是采用了聪明而具有丰富想象能力的世代工程师在指导和完成其工作中使用过的观察结果、图形描述和经验公式的成功之处。最后,该书还列出了一份物理现象纲目。特别要指出的是,这些都是在微观、分子或原子尺度下观察到的物理现象,这种尺度是决定并可以用来解释宏观力学行为的尺度。即使还不能用这些公式解释和表述这些物理现象,但每当阐明过程和结果时都有可能涉及到上述内容。

依我看来,不能总是强调三方面知识的继承。像连续介质力学发展得如此成熟,如果它不能从实验结果归纳出经验公式和引导人们有效地思考问题,那它也只是一种很好的理论框架而已。来源于实践的知识能推动思维的进步,有助于解释现象、验证模型,并

① 两位作者都是法国科学院终生院士 Paul Germain 教授的学生。——译注

促进理论的发展,而理论的发展只能建立在实验的基础之上。如果固体物理由一些宏观学科所替代或补充,这些宏观学科不断大胆而富有成效地支持和完善新的技术,则固体物理不断地朝着微观尺度的基本物理现象更深入的研究就具有其全部的实际意义。标志着当今研究成果的这些学科将会明确和严格在其研究范围内的研究方法,这个范围是指它与相邻学科之间的关系范围,例如,物理或化学,它们也将进一步得到发展和完善。我发现本书的主要特点是把三方面的知识汇集起来,又阐述了它们之间的关系,而且还增强了它们各自的作用。

为了成功地写一本好书,不能只满足于书中有准确的概念、明确的对象和令人感兴趣的目标与宗旨。没有必要详细指出作者在写作中会遇到的风险和困难,我认为作者已成功地予以克服。这本书不是一本《总论》,从中读者可以找到刚才提到的三方面内容的陈述。然而,这本书确实是一本论述足够全面的著作,书中没有那些容易把人弄糊涂的繁杂叙述。作者给出了各种常用固体材料的本构关系:这些材料包括室温或高温下的金属材料、从玻璃到橡胶的各种聚合物、木材和混凝土等。让我大胆地说一句,这些材料是处于损伤、开裂、老化等各种状态。首次全面论述这些问题就是这本书的精华之处。

作者在书中引用的连续介质力学的一些理论表述,恰好是读者阅读这本书所必备的知识,没有那些多余的发挥。当然在必要的时候,读者还应当看点其他资料,诸如有限元这样的计算方法,如果不用将是一个极大的损失。对于上面提到的其他学科内容作些类似的观察和证明是值得的,这也正好是在以下两个方面阐明本书宗旨所必需的:一是描述在试验中能用书中提出的写实定律的方法;二是解释在应用中利用给出的有用数据。正因为如此,我毫不犹豫地向各界人士推荐此书。由于作者给出了启发性的思路,读者很容易从书中找到工作中所需的材料:理论研究者将会满意地体会到,阅读此书所付出的努力不仅不会白花,而且为其今后的工作会从书中得到有益的启示;土木和结构工程师不仅能从书

中找到珍贵的参考资料,而且还能学到活跃而有条不紊的思维方法;冶金学家、化学家和物理学家将能从书中发掘通往宏观领域的途径。作者行文朴实简明,没有使用太专业性的术语,适合于多种公共学科的硕士研究生学习。由于读者面很广,这部著作将会广泛发行,并将得到好评。

最后,我不能不指出,这本书的出版证明了法国固体力学的研究工作具有新的生命力,还证明了法国力学工作者通过团结协作、共同努力和相互补充获得了有益的成果。

事实上,法国的各个科研部门对力学理论的发展已经做出了许多有益的贡献。Jean Lemaitre 和 Jean-Louis Chaboche 的分析就是建立在上述那些理论之上:虚功率方法、泛函分析和有限元计算方法,塑性、特别是粘塑性局部状态的本构关系,以及将这些方法应用于损伤和裂纹介质的力学问题。作者的功劳在于能汲取上述发展的成果并推向前进,将物理实验和应用技术结合起来开辟新的领域,向法国科研人员证明了他们的方向是正确的,而且通过共同努力取得卓有成效的结果。两位作者,一位在法国国家航空与宇航局(O. N. E. R. A. 即 Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales)工作,一位在卡尚力学与技术研究所(L. M. T. de Cachan 即 Laboratoire de Mécanique et Technology de Cachan)工作,他们朝气蓬勃,都在各自的研究工作中取得了成功和发展,他们通过教学,在大变形和损伤研究方面展示了上述成果。这本书的出版发行将会有很大的影响,甚至影响到整个法国力学界,它将会对我们的力学局部理论的改进并增强其生命力作出贡献。

我谨向 Jean Lemaitre 和 Jean-Louis Chaboche 致以敬意和祝贺。祝愿这部著作广泛发行,从而使国外的朋友们也知道法国力学界近几年来在固体力学方面的研究成果和精神。

法国科学院终生书记
巴黎综合工业大学教授

Paul Germain

1984 年 12 月于巴黎

中译本序

1981年在巴黎的一次学术讨论会上,我和李灏教授相识。他的渊博的知识和文化素养给我留下了深刻的印象。1983年8月,我和我的夫人(Annie Lemaitre)应他的邀请在中国愉快地渡过了一个月。我在北京、上海、广州作了学术报告。特别是在武汉,我在华中工学院讲授了损伤力学。虽然存在着语言的障碍(我每天都要学一点中文),但我发现和许多中国朋友容易交往,这里说的是我们的真诚和友谊。

在武汉,我识认了余天庆教授。1983年到1985年,他在我们的研究所(Laboratoire de Mécanique et Technologie de Cachan——Université P. et M. Curie, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique)工作,并成了我的一位好友。他来巴黎后,很快就和我们研究所材料研究室的全体成员融为一体,并融合在我们的心中。他永远是我们所的一位成员。虽然地理上我们相隔遥远,他是我们所的一位远方成员,但在学术和才智方面却是我们最亲近的一位成员。我和我的朋友 J. L. Chaboche 合写的《固体材料力学》(法文版)一书快要出版的时候,我们就有将此书译成中文出版的念头。李灏教授为出版此书的中文本付出了很大的努力。在此,我向他和中国的国防工业出版社表示衷心的感谢。

我的朋友余天庆教授为了友谊,满腔热情地接受了此书的翻译任务。翻译工作是枯燥的,但确实是非常重要的工作。我应该怎样感谢他呢?用多少个小时也写不完这篇感谢文章。然而,硕果就在于此书,这本书也是他的书,也是他的力学著作。我们在法国巴黎、在卡尚,将永远珍惜这种志同道合的科学精神。大家都知道,此书的翻译不是一项简单的翻译工作,它是友谊的象征,它为中法两

国力学工作者的亲密合作打下了更坚实的基础。

在此,我还要向在翻译过程中与余教授合作的几位中国朋友表示感谢。

力学、科学是没有国界的,我们的合作同样是为了全人类。

A Paris, le 17 Novembre 1986

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jean Lemaître', with a long horizontal stroke extending to the left.

Jean LEMAITRE

译者前言

《固体材料力学》一书，内容丰富、新颖，具有明显的欧洲体系特色，它反映了近十几年来法国力学工作者的教学和科学研究成果。对于我国从事固体力学教学和研究的力学工作者来说，这是一本难得的好书。

J. Lemaitre 教授在法国巴黎居里夫妇大学（巴黎第 6 大学）（Université P. et M. Curie——Paris 6）和法国的其他几所大学多次给研究生讲授过这本书的内容。他曾对中国和其他几个国家的听众也讲授过该书的主要内容。特别是他以不可逆热力学过程和连续介质力学为理论基础的连续损伤理论的研究成果，引起了世界各国力学工作者的很大兴趣。他成功地将这一最新理论补充到经典的固体力学之中，为研究受损材料的力学性能开创了一条新的途径，进一步丰富了固体力学的研究内容和方法，使经典的固体力学朝近代的固体力学向前跨进了一大步，这是作者对固体力学作出的重大贡献。

应 J. Lemaitre 教授的邀请，我在法国居里夫妇大学和法国国立高等技术教育师范大学（Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique）的卡尚力学与技术研究所（Laboratoire de Mécanique et Technologie de Cachan）工作期间，作者给我看过了该书的部分原稿，并表达了他们乐意将这部著作奉献给中国读者的愿望。1985 年 7 月该书（法文第一版）刚一出版，J. Lemaitre 教授就给我以及中国的几位学者寄来了赠书。按作者的意愿和李灏教授的推荐，译者本想在一、二年内把此书译成中文，后因工作调动和其他一些原因，推迟了翻译和出版时间。

在翻译过程中, J. Lemaitre 教授和我保持着密切的联系, 他曾将第 7、8 两章的补充内容寄给了我。因此, 该书的中文版比原著的第一版更为完善。1987 年深冬, Lemaitre 教授给我寄来了原著第二版的修改稿, 后来他又将正式出版的第二版新书寄给我们, 译者按 1996 年的第二版修订了译文。

我和日本名古屋大学村上澄男教授先后都在法国居里夫妇大学(巴黎第六大学)卡尚力学与技术研究所工作过, 十多年的学术交往, 使得我和村上先生都成为《固体材料力学》原作者的老朋友。1995 年 3 月至 4 日, 我应村上澄男教授的邀请, 在日本名古屋大学讲学期间, 他为《固体材料力学》中文版即将出版而感到高兴, 并给予热心关注和支持。在此向村上澄男教授表示感谢。

本书的翻译时间较长, 先后有四位朋友参加了翻译和审校工作。陈幸福先生初译第 5、8 两章, 肖锡武先生试译第 3 章, 其他章节均由我翻译。吴玉树研究员从法国留学回来后, 热情地与我合作, 共同完成了该书的翻译工作。李尧博士和王勋文博士也支持了我们的翻译工作, 最后由我审定全稿。在此, 谨向合作者致以诚挚的谢意。

我作为法国巴黎居里夫妇大学和法国国立高等技术教育师范大学卡尚力学与技术研究所的亚洲成员, 也是这个研究所同行们的老朋友, 通过翻译此书, 向广大的中国读者介绍法国力学界、尤其是卡尚力学与技术研究所的工作情况和科研成果, 进一步促进中法两国之间的科技合作与文化交流, 为发展中法两国人民的友谊, 作出自己的一点贡献, 为此而感到高兴。J. Lemaitre 教授和 P. Ladeveze 教授等曾经为我在法国工作提供了良好的工作条件和生活环境, 借此机会, 谨向他们以及所有给予我帮助的法国朋友表示感谢。

李灏教授为此书的翻译和出版给予了大力帮助, 谨向李教授致以衷心的感谢。感谢国防工业出版社杜豪年先生为编辑此书付出的辛勤劳动以及张赞宏先生和唐应恒女士编辑此书前期所做的工作。向支持过这项工作的所有同仁表示感谢。

引 言

亲爱的读者，钦佩您勇敢地翻开此书，您马上就能得到解释。

——首先是关于书名。这是一本力学著作，即讨论力（或应力）、位移（或应变）、时间、可能还有温度之间的关系，研究平衡与运动。这里讲的力学，是指应用于机械和建筑结构材料的应用力学，如金属和合金、自然界的原材料（木材）或合成材料（塑料）以及混凝土等，即研究材料抵抗变形和破坏的能力，也就是材料的固有力学性质。大部分篇幅研究与构件几何形状无关的体元的力学性能。

——关于指导思想。作者写书旨在向工程师们传授科学知识。将基础知识转化于应用，把材料的微观性质转化为本构关系的宏观描述。更确切地说，对理论与试验之间的关系进行综合。固体力学最近的发展正是以下几方面研究的决定性进展的综合结果：

- 关于基础方面，这里指的是连续介质力学和基于热力学局部状态方法的综合描述。

- 关于应用方面，就是要获得设计复杂结构既安全又经济的必备知识，还要有可能用计算机快速对非线性问题进行数值解。

- 关于微观性质方面，就是位错理论和采用电子显微镜观察。

- 关于唯象宏观方面，就是由试验结果确定数学模型中的系数的技术问题。

- 关于理论方面，就是泛函分析和变量函数的进一步发展。

- 最后，关于试验方面，当然是要在试验机和测量系统中安装电子和微信息处理装置。

——关于内容。为了突出上述知识转化思想，旨在教育青年和帮助“不太年轻”的人的继续提高，本书包括以下内容：第1、2两章复习一些基础知识，这些基础知识是为了能看懂此书所必备的。第3章综述了各种材料的不同性质。以后的五章（即第4章至第8章）对每一大类的本构关系作了独特的论述。

- 第1章讲金属和合金、聚合物、混凝土和木材变形和断裂的**物理机制**。对主要的物理机制进行总结是对宏观模型中物理假设的一种验证。

- 第2章介绍**连续介质力学**和**不可逆热力学**，这些内容是以后各章要用到的理论工具。

- 第3章讲固体性质的**图示性分类**，分类是以试验和通过试验确定有系数的工作为基础，对确定系数的一些主要方法都作了介绍。

- 从第4章开始讲如何建立各种不同材料性质的模型。以后各章采用同样的写作格式：限定模型的有效范围或使用条件，试验结果的唯象描述，基于热力学的广义描述，以常用材料为例建立一些特殊模型，并确定模型中的系数，简述相关结构计算的基础知识等。按照这样的框架，第4章介绍**弹性、热弹性和线性粘弹性**。

- 第5章讲**塑性**。经典的各向同性塑性理论，是从耗散势出发进行描述，耗散势与流动准则相关。书中特别强调了各向同性硬化。各向同性硬化能计及循环特性，这一点对预估疲劳破坏很重要。

- 第6章讲上一章同样的问题，不过这里讲常温和高温下应用于金属和合金的塑性。高温下的塑性有粘滞现象，即**粘塑性**。

- 第7章着手用**连续损伤的力学理论**研究体元的破坏。为研究和预估延性断裂、脆性断裂和疲劳断裂，建立了各种各样的模型。

- 第8章（请读者别着急，这是最后一章了！）研究含裂纹的固体。也就是用能量法论述**由裂纹导致破坏的断裂力学**。对于建

立因裂纹失稳而断裂的模型、延性断裂模型和由疲劳导致裂纹扩展的模型，与应力强度因子相对应的能量释放率的概念很有用。

以上各项内容，构成了一本内容很全面的材料力学，但本书叙述非常简明扼要。读者要想深入钻研，可参看每章后列举的最新主要著作。亲爱的读者，这本书将会帮助您掌握连续介质力学基础知识和材料力学知识，从物理意义上加深对有关概念的理解，可以用或不用计算机对产品的成型加工进行计算，或对结构进行安全分析。

再者，本书为理工院校高年级学生、研究生的学习和今后从事试验、设计和理论研究工作的工程师的学习之间起着桥梁作用。为了方便读者将此书作为教材使用，每章都是各自独立的，因此，就书的总体而言难免有些重复。大部分计算采用惯用的符号，主要结果也都用特性符号表示。

至此，聪明的读者已明白了这本书的内容涉及很广。为此目的，作者广泛地汲取了周围同行们的经验，特别是充分利用了以下两单位的有利工作条件：法国国家航空与宇航局的结构疲劳研究所（由 R. Mazet 教授首先创办）和卡尚力学与技术研究所（技术与教育师范大学——巴黎第 6 大学——法国国家科学研究中心）。作者在下列院校和单位就此书的主要内容讲授过多次：巴黎第 6 大学、卡尚技术与教育师范大学、女子综合工业大学、中央大学、各种不同水平的训练班、暑期班以及外国的几所大学。在此，谨向所有参加过讨论的全体人士致以谢意。

本书的编写得到了法国国家研究中心和大变形与损伤协会的大力支持。各章分别由下列专家审阅：A. Pineau、F. Sidoroff、A. Zaoui、M. Predeleanu、G. Duvaut、D. Marquis、G. Touzot、C. Oytana、K. Dang Van、D. François、H. D. Bui 和 R. Labourdette。由 P. Muller 总校。

作者非常赞赏这种著书方法。谨向给我们提过宝贵建议的人士表示感谢。同时还要感谢 G. Combourieux 为本书绘图，感谢

内 容 简 介

本书系统地介绍了经典的固体力学的主要内容和损伤理论的基本内容。全书共分8章:变形与断裂的物理机制基础,连续介质力学和热力学基础,真实固体的鉴别和流变学分类,线弹性、线性热弹性、线性粘弹性,塑性,粘塑性,损伤力学和裂纹力学。书中第7章详细阐述了以不可逆热力学和连续介质力学为理论基础的连续损伤理论,第8章裂纹力学是对断裂力学的新发展,这是作者为发展固体材料力学所作的贡献。

本书可供力学、应用数学、材料、机械、土木、冶金、宇航等专业的大学高年级学生、研究生和教师学习参考,也可作为研究生教材,还可作为上述各专业的科研工作者和工程技术人员学习近代力学理论的入门和提高的参考书。

目 录

符号表	1
第 1 章 变形与断裂的物理机制基础	6
1.1 金属与合金	7
1.1.1 组织	7
1.1.2 变形的物理机制	14
1.1.3 断裂的物理机制	22
1.2 其他材料	28
1.2.1 聚合物	28
1.2.2 颗粒材料:混凝土	32
1.2.3 木材	36
参考文献	39
第 2 章 连续介质力学与热力学基础	40
2.1 虚功率原理	41
2.1.1 虚位移与虚功率	41
2.1.2 参考系与物质导数	42
2.1.3 虚功率原理(Germain, 1972)	42
2.2 虚功率方法	43
2.2.1 应变率与应力	43
2.2.2 平衡方程	46
2.2.3 应变与位移	48
2.2.4 张量表示:不变量	53
2.3 热力学基础概述	55
2.3.1 守恒定律,第一定律	55
2.3.2 熵,第二定律	57
2.4 局部状态方法	59

2.4.1 状态变量	59
2.4.2 热力学势,状态定律	61
2.4.3 耗散,补充定律	63
2.5 热学基础	68
2.5.1 Fourier 定律	68
2.5.2 热学方程	69
参考文献	71
第3章 真实固体的鉴别和流变学分类	72
3.1 整体唯象方法	72
3.2 实验技术和鉴别技术的基本知识	74
3.2.1 性能试验	74
3.2.2 试验技术	79
3.2.3 鉴别方法	88
3.3 真实性能的示意图	99
3.3.1 比拟模型	99
3.3.2 刚体和理想流体	100
3.3.3 粘性流体	101
3.3.4 弹性固体	102
3.3.5 塑性固体	103
3.3.6 粘塑性固体	106
3.3.7 加工硬化特性	108
3.3.8 老化	112
3.4 断裂概述	114
3.4.1 体元损伤引起的断裂	114
3.4.2 由结构的裂纹扩展引起的断裂	116
3.5 摩擦概述	117
3.5.1 Coulomb 模型	117
3.5.2 极限层模型	118
参考文献	119
第4章 线弹性、线性热弹性和线性粘弹性	120
4.1 弹性	121
4.1.1 有效范围和应用范围	121

4.1.2 表达式	121
4.1.3 系数的确定	128
4.1.4 常用材料的弹性性能	131
4.1.5 有限元方法的基本知识	132
4.2 热弹性	136
4.2.1 表达式	136
4.2.2 系数的确定	138
4.2.3 常用材料的热弹性特性	141
4.3 粘弹性	143
4.3.1 有效范围和应用范围	143
4.3.2 热力学表达式	143
4.3.3 泛函表达式	148
4.3.4 常用材料的粘弹性特性	152
4.3.5 粘弹性结构计算基础	154
参考文献	157
第5章 塑性	159
5.1 有效范围和应用范围	159
5.2 唯象概述	160
5.2.1 一维特性	161
5.2.2 三维塑性准则	172
5.3 本构关系的一般表达式	182
5.3.1 分解假设	182
5.3.2 热力学变量的选择	182
5.3.3 加载面和耗散势	184
5.4 特殊的流动律	190
5.4.1 不同形式的准则和流动律	190
5.4.2 各向同性硬化律	192
5.4.3 线性运动硬化律	198
5.4.4 循环加载或任意加载下的流动律	205
5.4.5 不同模型的分类	228
5.5 比例加载	228
5.5.1 定义	228