

时代教育 · 国外高校优秀教材精选

PEARSON

Mechanical Behavior of Materials

工程材料力学行为

—— 变形、断裂与疲劳的工程方法

Engineering Methods in Fracture, and Fatigue

中文版 · 原书第4版

[美] 诺尔曼 E. 道林 (Norman E. Dowling) 著
江树勇 张艳秋 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

时代教育·国外高校优秀教材精选

工程材料力学行为

——变形、断裂与疲劳的工程方法

Mechanical Behavior of Materials

Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue

(中文版·原书第4版)

[美] 诺尔曼 E. 道林 (Norman E. Dowling) 著
江树勇 张艳秋 译



机械工业出版社

Authorized translation from the English language edition, entitled MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS, 4E, 9780131395060 by Norman E. Dowling, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall, Copyright© 2013 by Pearson Education.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD. , and China Machine Press Copyright© 2016.

This title is published in China by China Machine Press with license from Pearson Education, Inc. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字版由培生教育出版公司授权机械工业出版社合作出版, 未经出版者书面许可, 不得以任何形式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签。无标签者不得销售。

本书由培生教育出版公司授权机械工业出版社在中国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2014-2042 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料力学行为: 原书第4版/(美)道林(Dowling, N. E.)著; 江树勇, 张艳秋译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 12

书名原文: Mechanical Behavior of Materials, 4/E

时代教育·国外高校优秀教材精选

ISBN 978-7-111-52955-2

I. ①工… II. ①道…②江…③张… III. ①工程材料—材料力学性质—高等学校—教材 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 027503 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 丁昕祯 责任编辑: 丁昕祯 程足芬 杨璇

版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉 纪敬

封面设计: 张静 责任印制: 李洋

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 43.5 印张 · 1081 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 52955 - 2

定价: 98.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务 网络服务

服务咨询热线: 010-88379833 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649 机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版 金书网: www.golden-book.com

前 言

设计机器、车辆及机械结构时，为了保证设计的安全性、可靠性和经济性，要求既要保证材料的有效使用，又要确保不发生结构失效。因此，对于本科工程专业学生来说，学习材料力学行为是非常合适的，尤其是诸如变形、断裂和疲劳等相关主题的知识。

本书可以用作大学三年级或四年级学生的关于材料力学行为课程的教材，也可以侧重后面的章节而作为一年级研究生的学习用书。本书涉及的范围包括该领域的传统主题，如材料试验、屈服与塑性、基于应力的疲劳分析和蠕变。相对较新的断裂力学和基于应变的疲劳分析也有所涉及，实际上进行了更为详细的处理。对于一个具有学士学位的实践工程师而言，本书提供了有助于理解相关主题的参考文献资源。

本书重点介绍了工程设计者为避免结构失效而采用的分析方法和预测方法。这些方法是从工程力学的角度建立起来的，而且材料抵抗失效的能力可以通过屈服强度、断裂韧性、疲劳或蠕变应力-寿命曲线等性能指标进行量化。对材料性能数据的获得方法有所了解才能合理利用这些数据，因而它们的限制和意义是非常明显的。因此，在考虑分析方法和预测方法之前，通常要对各个领域中使用的材料试验进行讨论。

在所涉及的许多领域中，金属材料的现有技术要比非金属材料的现有技术发展得更为完善。然而，本书也适当包含了非金属材料（如高分子材料和陶瓷材料）的数据和例子。高度各向异性的材料（如连续纤维增强复合材料）也有所涉及，但只是在有限的程度上进行了介绍。本书并没有对这些复杂材料进行详细的介绍。

在本序言的其余部分，首先对本书最新版所做的变化进行了重点介绍。然后是为了帮助本书的读者所进行的评论，这些读者包括学生、教师和实践工程师。

这一版中什么是新的？

相对于第3版，第4版全面进行了改进和更新。在修订过程中特别引起关注的方面如下：

- 每章末的习题进行了较大的修订，35%是新增加的或者进行了很大的改动，总数由54增加到了659。在每章中，至少有33%的习题是新增加的或者进行过改动，这些修订侧重于教师最可能关注的更多基本主题。

• 这一版新增加的内容还有本书接近最后部分所给出的近一半习题的答案, 包括数值或一个新公式的建立过程。

• 对章末的参考文献列表重新进行了整理和更新, 包含了最近的出版物, 含有材料性能数据库。

• 对第 10 章中估算 $S-N$ 曲线方法的处理进行了修订, 同时也进行了更新, 反映了广泛使用的力学设计教科书中所发生的变化。

• 在第 12 章中, 对关于拟合应力-应变曲线的例题进行了改进。

• 另外在第 12 章中, 对多向应力的讨论进行了精练, 并且增加了一个新的例子。

• 对第 14 章中关于应变-寿命曲线平均应力效应的主题给出了修订和更新的范围。

• 关于多向应力下蠕变断裂部分被移到了第 15 章的开头部分, 使之与时间-温度参数一起包括在内了。

前序课程

基础材料力学也称为材料强度或变形体力学, 主要介绍工程构件 (如梁和轴) 在线弹性行为下的应力和应变分析方法。修完一门这类的标准课程 (一般针对大学二年级学生) 是学习本书的基本前提。附录 A 中给出了这一方面的一些有用的复习和参考材料, 同时也给出了对完全塑性屈服分析的处理方法。

许多工程课程体系都包含一门关于材料科学的导论课程 (一般也是针对大学二年级学生), 所涉及的主题包括晶体和非晶体结构、位错与其他缺陷、变形机理、材料加工以及材料命名系统。建议学生提前了解这一领域的研究。然而, 由于可能会错过对这一前序课程的学习, 因而在第 2 章和第 3 章对其进行了有限的介绍。

对于本书的学习, 还需要有关基本计算的数学知识。许多工程实际例题和习题都需要用数值分析进行求解, 这些数值分析方法包括最小二乘方曲线拟合法、方程迭代求解法和数值积分法。因此, 具有有关这方面的一些背景理论知识是非常有用的, 能够在个人计算机上进行绘图和数值分析也是非常有益的。所需要的数值分析方法在关于这一学科的大多数导论性教科书 [如在本书前言结尾处列出的参考文献 Chapra (2010)] 中都有所介绍。

参考文献与参考书目

每章的结尾都有一个参考文献列表, 以便提供进一步阅读和信息的来源。在某些情况下, 对这些文献列表进行了分类, 如分为一般参考文献、材料性能文献来源以及有用的手册。对于在文中所提到的参考文献, 给出了第一作者的名字及出版年代, 这有助于在该章的结尾处快速查到相应的参考文献。

当使用其他出版物的具体数据或插图时，这些出版物的来源是以方括号的信息来识别的，如 [Richards 61] 或 [ASM 88]，其中的两位数字表示出版年代。所有这样的参考文献目录，都列在了本书末尾的一个独立章节中。

材料性能的描述

对于具体材料的实验数据，本书从始至终都是以大量的插图、表格、例题和习题的形式给出的。这些实验数据一直都是从实验室中实际获得的。然而，这样做的目的只是为了给出典型数据，而不是给出材料性能的综合信息。对于实际工程问题，应该根据需要查询其他关于材料性能的文献，例如在各章结尾处所列的文献。另外，材料性能值都存在统计学上的差异，这在附录 B 中已经进行了讨论，因此本书或任何其他文献来源给出的典型值都需要适当谨慎地使用。

如果所给出的材料性能数据都出自于外来文献，则这些文献都将以参考文献目录的形式列出。如果没有给出文献来源，则这些数据出自作者的研究或者来自于弗吉尼亚理工大学实验课程所获得的试验结果。

单位

本书以国际单位为主，但在大多数数据表中，也包含了美国常用单位。在坐标图中，标尺单位为国际单位或两者兼而有之，只是在几种情况下，来自于其他出版物的插图保留了其原始形式，因而单位也保留了原始形式。大多数习题中以及文中所给数值都只给出了国际单位，在这些情况下使用双重单位容易造成混淆。

力的国际单位是牛顿 (N)，而美国单位是磅 (lb)。应用千牛顿 (千牛, kN) 或千磅 (千磅, kip) 经常是非常方便的。因而应力和压力的国际单位是用牛顿/每平方米 (N/m^2) 表示的，在国际单位制中是以特殊名称帕斯卡 (Pa) 命名的。在我们的应用中，采用百万帕斯卡 (兆帕, MPa) 通常是非常合适的。则有

$$1 \text{ MPa} = 1 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

式中，有时采用后面以毫米 (mm) 为单位的等价形式是非常方便的。在美国单位制中，应力通常用千磅/每平方英寸 (ksi) 表示。

上面这些单位和其他常用单位以及转换系数都已在文中做了介绍。为了说明这个表的使用方法，让我们将 20ksi 的应力转换为 MPa。因为 1ksi 等价于 6.895 MPa，则有

$$20 \text{ ksi} = 20 \text{ ksi} \left(6.895 \frac{\text{MPa}}{\text{ksi}} \right) = 137.9 \text{ MPa}$$

在相反方向的转换方法中,除以等价值,则有

$$137.9\text{MPa} = \frac{137.9\text{MPa}}{\left(6.895 \frac{\text{MPa}}{\text{ksi}}\right)} = 20.0\text{ksi}$$

注意到应变是无量纲的量,因而是没有单位的。最常见的应变表示方法就是直接采用长度变化与长度之间的比值,但有时也采用百分数,即 $\varepsilon\% = 100\varepsilon$ 。

数学规则

在大多数情况下,都采用标准规则。函数 \lg 表示以 10 为底的对数,函数 \ln 表示以 $e=2.718\cdots$ 为底的对数(即自然对数)。为了表示几个值当中最大的部分,则采用函数 $\text{MAX}()$ 。

符号

在期刊论文、其他书籍以及各种试验标准和设计规范中,都会采用各种不同的符号来表示所需要的某些变量。对于这种情况的处理方法是整本书中都采用一套一致的符号,同时尽可能遵循最为常用的规则。然而,有时为了避免混淆,相对于常规用法可能会出现几种例外情况,或者会有所改变。

例如, K 用来表示断裂力学中的应力强度因子,而不是用来表示应力集中系数,应力集中系数则用 k 表示。另外, H 代替 K 或 k 来表示描述某些应力-应变曲线的强度系数。符号 S 表示名义应力或平均应力,而 σ 表示一点处的应力,也可以表示受均布应力作用的构件上的应力。除了在本书单独部分出现的不同用法之外,避免了符号的双重使用。最常用的符号已列于书后。更详细的符号列表在每章临近末尾处以新术语与符号的形式给出。

用作教材

构成本书的章节较多,以便尽可能使所选择的研究主题更为宽泛。作为一学期的课程,至少要包含第 11 章以前的所有各章的内容,还要包括第 15 章的内容。这包括第 1~6 章的前言和回顾等相关内容,还包括第 7 章中不含裂纹材料的屈服准则和断裂准则。断裂力学适用于第 8 章中的静态断裂以及第 11 章中的疲劳裂纹扩展。另外,第 9 章和第 10 章包含了基于应力的疲劳分析方法,第 15 章包含了蠕变。如果时间允许,一些关于塑性变形的主题可以从第 12 章和第 13 章中予以补充,也可以从第 14 章中基于应变的疲劳分析方法中予以补充。如果学生具有材料科学的背景,则可以不需要学习第 2 章和第 3 章,但第 3.8 节中关于材料选择的内容仍是有用的。

某些章的特定部分内容并不是十分需要作为该章其余部分的预备知识,它们对后面各章也不是至关重要的。因此,虽然相关的主题从其自身而言是重要的,但如果需要的话,可以删除或搁置,不会显著影响本书的连续性。这些内

容包括 4.5 节、4.6 节~4.9 节、5.4 节、7.7 节~7.9 节、8.7 节~8.9 节、10.7 节、11.7 节、11.9 节和 13.3 节。

完成第 8 章的断裂力学内容之后，可以直接选择进入第 11 章的学习，该章将断裂力学内容扩展到疲劳裂纹扩展。这可以通过越过第 9 章和第 10 章中除了 9.1 节~9.3 节之外的所有内容来实现。另外，虽然第 12 章~第 15 章相对高级的主题范围是有限的，但仍然保持了内容的连贯性，仍存具有各种多样化的选择空间。例如，包含第 14 章中基于应变的疲劳分析方法的一些内容是非常有益的，而且针对这方面的内容，需要第 12 章和第 13 章的一些内容作为预备知识。在第 15 章，15.1 节~15.4 节对于蠕变主题给予了合理的介绍，除了第 4 章外，这部分内容不会对任何其他章节的内容产生明显的依赖性。

关于教师的补充材料

对于从事课堂教学工作的教师（如在学院机构工作）而言，可以获得以下四种补充材料：（1）一套可以打印和可以下载的图表文件；（2）用于求解课本中除最简单例题之外的所有问题的微软 Excel 数字文件；（3）包含每章末近似一半习题的求解方法的指南，这些习题需要进行计算或进行复杂的推导；（4）涉及数值计算或建立一个新方程的所有习题的答案。这些补充材料均发布在一个安全的网站上，只有被授权的教师才可以获取。

参考文献

- [1] ASTM. 2010. "American National Standard for Use of the International System of Units (SI): The Modern metric System," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 14.04, No. SI10, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [2] CHAPRA, S. C. and R. P. CANALE. 2010. Numerical Methods for Engineers, 6th ed., McGraw-Hill, New York.

译者的话

历时半载，终于完成了本书的翻译工作。该书可以称为是 Norman E. Dowling 教授的经典之作，其富含的知识内容是恢宏而博大的，在保留了一些经典理论知识的同时，也融入了大量的现代最新科技成果，体现了经典与现代、科学与工程完美结合。该书的知识体系具有极强的交叉性，涉及材料科学、固体力学、断裂力学和机械工程等相关知识，完全可以作为相关专业的本科生、研究生和工程技术人员的教材和工具书。本书的第 1 章概要介绍了变形、断裂与疲劳三种失效形式及其在国民经济中的重要地位。第 2 章和第 3 章介绍了材料的基本分类与结构，虽然篇幅较小，但言简意赅，使人们能初步认识到材料的基本晶体结构、晶体缺陷以及金属材料、高分子材料、陶瓷与玻璃和复合材料的基本结构特点，尤其是从原子尺度、纳观尺度、介观尺度和宏观尺度等多尺度的视角，诠释了科学与工程之间的联系与区别。第 4 章介绍了材料基本力学试验方法，包括拉伸试验、压缩试验、弯曲试验、扭转试验、硬度试验和缺口冲击试验，并从工程应力与工程应变以及真实应力与真实应变的基本概念出发，阐述了塑性、强度、硬度和韧度等基本力学性能指标的物理意义及工程价值。第 5 章通过建立弹性变形、塑性变形和蠕变变形的基本模型，介绍了各种模型下的应力-应变本构模型。第 6 章从平面应力状态入手，介绍了复杂应力状态、复杂应变状态以及主应力和主应变的概念。第 7 章首先介绍了最大正应力断裂准则、最大切应力屈服准则和八面体切应力屈服准则等三种基本失效准则，然后介绍了 Coulomb-Mohr 断裂准则和修正的 Mohr 断裂准则。第 8 章从线弹性断裂力学出发，介绍了断裂韧度的物理意义，介绍了断裂韧度的试验方法以及在含有裂纹构件的工程设计中的重要作用，同时也介绍了裂纹尖端塑性区尺寸对线弹性断裂力学应用的限制。第 9 章介绍了疲劳的相关定义以及疲劳损伤的物理本质，描述了疲劳试验方法以及应力-寿命 ($S-N$) 曲线，并探讨了平均应力、多向应力和可变应力水平循环载荷对疲劳寿命的影响。第 10 章从基于应力的疲劳分析方法入手，介绍了缺口效应对疲劳强度的影响以及如何采用传统的工程方法估算 $S-N$ 曲线，同时也介绍了如何采用实际构件试验得到的 $S-N$ 曲线分析疲劳强度和寿命。第 11 章将线弹性断裂力学中的应力强度因子 K 应用于疲劳裂纹扩展，介绍了疲劳裂纹扩展试验方法和疲劳裂纹扩展速率曲线，并给出了在恒幅加载和变幅加载下对疲劳裂纹扩展失效寿命的估算方法。第 12 章基于材料塑性

变形应力-应变曲线,给出了四种典型的应力-应变本构关系,并基于塑性变形理论探索多向应力状态对应力-应变行为的影响。第13章针对各种形式的应力-应变曲线,对简单弯曲和扭转弹塑性应力-应变进行了分析,介绍了近似估算局部发生塑性变形的缺口处的应力和应变的 Neuber 法则,并将相关分析推广至卸载情况以确定残余应力和残余应变。第14章从基于应变的疲劳分析方法入手,介绍了应变-寿命曲线、平均应力与多向应力对疲劳寿命的影响以及结构构件的寿命估算。第15章介绍了蠕变的物理机制,并描述了在变化应力和多向应力下的蠕变变形,给出了估算蠕变断裂寿命的时间-温度参数法,提出了评价工程材料的应力-应变-时间模型,并对材料的阻尼机制进行了简要介绍。

在本书的翻译工作中,江树勇教授翻译了第4章、第5章、第6章、第7章、第8章、第12章、第13章、第15章及序言和致谢部分,张艳秋博士翻译了第1章、第2章、第3章、第9章、第10章、第11章、第14章以及附录A、附录B和习题答案部分,并且本书由江树勇教授和张艳秋博士互相进行了校对,最后全书由江树勇教授统校。在翻译过程中,感谢博士研究生胡励和梁玉龙,硕士研究生谢海增、王磊、杨英飞所做的一些公式录入和文字录入工作。

在本书的翻译过程中,我们尊重原作者的写作方式和思维习惯,尽量做到原汁原味,但为了便于国内读者的理解,我们必然要做一些中英文语言习惯的转换。另外,对于一些理论、法则、准则的提出者和文献的作者,除了大家广为熟知的人名之外,其余均保持英文名字,以便于读者检索文献。对于每章后面的新的术语与符号部分,保留了中英文形式,便于读者丰富英文专业词汇知识。总之,我们不得不惊叹于 Norman E. Dowling 教授在编写此书过程中所表现出来的博学、睿智和严谨,在篇幅如此之大的书籍中,几乎没有发现任何理论知识的错误,即使排版上的错误也不超过五处(也只是个别单词、数字和符号的差错),这实在令我们肃然起敬。面对这样一本著作,在翻译过程中,我们不敢有任何的懈怠和疏忽。但由于出版时间的限制,我们也不能尽享翻译之乐,难免有仓促之感。本书虽经四遍校稿,但由于我们的知识水平有限,翻译不当之处,敬请读者谅解。

译者

致 谢

我非常感谢我的许多同事们尽其所能帮助我完成了这本书。对本书这一版的修订工作做出具体贡献的同事有 Masahiro Endo (日本福冈大学)、Maureen Julian (弗吉尼亚理工学院)、Milo Kral (新西兰坎特伯雷大学)、Kevin Kwiatkowski (普拉特和米勒工程公司)、John Landes (田纳西大学)、Yung-Li Lee (克莱斯勒集团有限责任公司)、Marshal McCord III (弗吉尼亚理工学院)、George Vander Voort (Vander Voort 咨询公司) 和 William Wright (弗吉尼亚理工学院)。其他许多同事也给了我极有价值的帮助, 我已经在上一版的致谢中列出来了。我再一次对这些同事们表示感谢, 尤其是他们的贡献使目前这一版得到了更大的提高。

自从本书的上一版问世以来, 这几年的时光因为三位卓越的同事和良师的逝去而令人怀念, 他们对我的职业生涯产生了深远的影响, 他们对本书当中所介绍的技术的发展起到了巨大的推动作用, 他们是 JoDean Morrow、Louis Coffin 和 Gary Halford。

Virginia Tech 以各种形式给予了我很大的支持与鼓励。我特别感谢材料科学与工程系主任 David Clark 和工程科学与力学系主任 Ishwar Puri (作者本人同时在这两个系任职)。另外, 我非常感谢 Norma Guynn 和 Daniel Reed, 他们是工程科学与力学系的两个职员, 给予了我各种各样的帮助。

我非常感谢普伦蒂斯·霍尔出版社那些致力于本书这一版的编辑和生产的工作人员, 特别感谢 Gregory Dulles、Scott Disanno 和 Jane Bonnell, 我与他们有着非常深厚的友谊, 彼此受益匪浅。

我也非常感谢英特格拉软件服务公司的 Shiny Rajesh 以及与之合作的工作人员, 他们的认真与勤奋确保了本书内容的精准与质量。

最后, 我要感谢我的妻子 Nancy 和我的家人在本书的编写工作中给予我的鼓励、耐心和支持。

目 录

前言

译者的话

致谢

第1章 概论 1

 1.1 前言 1

 1.2 材料的失效形式 1

 1.3 设计和材料选择 7

 1.4 技术挑战 10

 1.5 断裂的经济意义 12

 1.6 小结 12

 参考文献 14

 习题 14

第2章 材料的结构与变形 16

 2.1 前言 16

 2.2 固体中的键 17

 2.3 晶体材料的结构 20

 2.4 弹性变形和理论强度 23

 2.5 非弹性变形 26

 2.6 小结 29

 参考文献 31

 习题 31

第3章 工程材料概述 33

 3.1 引言 33

 3.2 金属材料的合金化与加工 33

 3.3 铁和钢 37

 3.4 有色金属及其合金 43

 3.5 高分子材料 46

 3.6 陶瓷和玻璃 53

 3.7 复合材料 57

 3.8 工程构件的选材 61

 3.9 小结 65

 参考文献 67

 习题 68

第4章 力学试验：拉伸试验及其他

基本试验 71

 4.1 前言 71

 4.2 拉伸试验简介 74

 4.3 基于工程应力-应变的力学性能 77

 4.4 拉伸力学行为的变化规律 84

 4.5 拉伸试验中的真实应力-应变 89

 4.6 压缩试验 96

 4.7 硬度试验 99

 4.8 缺口冲击试验 105

 4.9 弯曲试验和扭转试验 107

 4.10 小结 111

 参考文献 113

 习题 114

第5章 应力应变关系及行为 124

 5.1 前言 124

 5.2 变形行为模型 124

 5.3 弹性变形 132

 5.4 各向异性材料 140

 5.5 小结 147

 参考文献 149

 习题 150

第6章 复杂应力应变状态及主应力

应变状态 155

 6.1 前言 155

 6.2 平面应力 155

 6.3 主应力和最大切应力 163

 6.4 三维应力状态 168

 6.5 八面体平面上的应力 173

 6.6 复杂应变状态 174

 6.7 小结 178

 参考文献 179

 习题 180

第7章 复合应力下的屈服与断裂 184

 7.1 前言 184

 7.2 失效准则的一般形式 186

 7.3 最大正应力断裂准则 187

 7.4 最大切应力屈服准则 189

 7.5 八面体切应力屈服准则 194

 7.6 基本失效准则的探讨 198

7.7	Coulomb-Mohr 断裂准则	203	极限)	344	
7.8	Mohr 断裂准则的修正	210	10.5	中、短寿命下的缺口效应	348
7.9	失效准则的补充说明	215	10.6	缺口和平均应力的复合效应	351
7.10	小结	217	10.7	S-N 曲线的估算	359
	参考文献	218	10.8	构件 S-N 数据的使用	364
	习题	219	10.9	避免疲劳失效的设计	371
第 8 章	含裂纹构件的断裂	226	10.10	讨论	374
8.1	前言	226	10.11	小结	375
8.2	初步讨论	227		参考文献	377
8.3	数学概念	233		习题	378
8.4	应力强度因子 K 在设计和分析中的应用	237	第 11 章	疲劳裂纹扩展	390
8.5	关于应力强度因子 K 应用的补充说明	244	11.1	前言	390
8.6	断裂韧度值及其变化趋势	252	11.2	初步讨论	391
8.7	塑性区尺寸以及线弹性断裂力学 (LEFM) 的塑性限制	259	11.3	疲劳裂纹扩展速率试验	396
8.8	断裂韧度试验的讨论	264	11.4	$R = S_{\min}/S_{\max}$ 对疲劳裂纹扩展的影响	400
8.9	断裂力学在线弹性范围之外的推广	265	11.5	疲劳裂纹扩展行为的变化趋势	407
8.10	小结	270	11.6	恒幅加载的寿命估算	412
	参考文献	272	11.7	变幅加载的寿命估算	419
	习题	274	11.8	设计依据	423
第 9 章	材料的疲劳: 概述和基于应力的方法	282	11.9	疲劳裂纹扩展中线弹性断裂力学的塑性问题及限制	425
9.1	前言	282	11.10	环境裂纹的扩展	429
9.2	定义和概念	283	11.11	小结	433
9.3	循环载荷的来源	291		参考文献	435
9.4	疲劳试验	293		习题	436
9.5	疲劳损伤的物理本质	296	第 12 章	材料的塑性变形行为及相关模型	447
9.6	S-N 曲线的变化趋势	298	12.1	前言	447
9.7	平均应力	306	12.2	应力-应变曲线	449
9.8	多向应力	314	12.3	三维应力-应变关系	455
9.9	变幅加载	318	12.4	基于流变模型的卸载和循环加载行为	462
9.10	小结	326	12.5	真实材料的循环应力-应变行为	469
	参考文献	327	12.6	小结	478
	习题	329		参考文献	480
第 10 章	基于应力的疲劳: 缺口构件	337		习题	481
10.1	前言	337	第 13 章	塑性变形的应力-应变分析	489
10.2	缺口效应	338	13.1	前言	489
10.3	缺口敏感性与 k_t 的经验估算	341	13.2	弯曲塑性	489
10.4	估算长寿命疲劳强度 (疲劳		13.3	弯曲的残余应力和残余应变	496
			13.4	圆轴的扭转塑性	499

13.5 带缺口的构件	501	15.9 工程构件的应力-应变分析	607
13.6 循环载荷	510	15.10 材料中的能量耗散(阻尼)	610
13.7 小结	519	15.11 小结	617
参考文献	520	参考文献	619
习题	521	习题	620
第 14 章 基于应变的疲劳分析方法	529	附录 A 材料力学中精选主题的回顾	630
14.1 前言	529	A.1 引言	630
14.2 应变-寿命关系曲线	530	A.2 应力和挠度的基本公式	630
14.3 平均应力效应	538	A.3 截面的性质	631
14.4 多向应力效应	544	A.4 梁的剪切、弯矩和挠度	633
14.5 结构件的寿命估算	547	A.5 压力容器、管和盘内的应力	634
14.6 讨论	556	A.6 缺口弹性应力集中系数	636
14.7 小结	561	A.7 完全塑性屈服载荷	638
参考文献	562	参考文献	643
习题	563	附录 B 材料性能中的统计变量	645
第 15 章 与时间相关的行为: 蠕变和		B.1 引言	645
 阻尼	572	B.2 平均偏差和标准偏差	645
15.1 前言	572	B.3 正态分布或高斯分布	646
15.2 蠕变试验	573	B.4 材料性能的典型离散	648
15.3 蠕变的物理机制	578	B.5 单侧容限	649
15.4 时间-温度参数与寿命估算	585	B.6 讨论	651
15.5 在变化应力下的蠕变失效	594	参考文献	651
15.6 应力-应变-时间关系	596	部分习题答案	652
15.7 变化应力下的蠕变变形	600	参考文献	665
15.8 多向应力下的蠕变变形	605		

关注的就是构件内的应力不能超过材料的强度。这个强度就是造成变形或断裂失效的应力。通常需要对导致失效的其他复杂性或特殊情况进行进一步的分析,如下面所述的情况:①经常存在不止一个方向作用的应力,即应力状态是二维或三维的;②实际构件内可能会存在缺陷甚至裂纹,这些都必须要加以特别考虑;③应力可能会作用很长一段时间;④应力可能会反复地加载和卸载,或者应力的方向会反复地出现变化。

在本章概论内容的其余部分,我们将对材料失效的各种形式加以定义并概要地进行讨论,并且将讨论材料力学行为与工程设计、新技术和经济之间的关系。

1.2 材料的失效形式

变形失效是指构件的物理尺寸或形状发生变化,并足以导致其功能丧失或削弱。当裂纹扩展到将一个构件分割成两块或多块的程度时称为断裂。腐蚀是因为化学作用而造成的材料损失。磨损是指由于两个相互接触的固体表面之间发生摩擦或黏附而导致的表面材料缺失。如果这种磨损是由流体(气体或液体)造成的,则称为侵蚀,尤其易发生在流体中含有颗粒物的情况下。虽然腐蚀和磨损也非常重要,但本书主要考虑变形和断裂。

第1章 概论

学习目标

- 了解影响机械和结构设计的材料失效类型的全貌。
- 大体上理解在工程设计中如何处理材料强度和塑性的极限问题。
- 了解新技术的发展对新材料以及评估材料力学行为的新方法有哪些要求。
- 了解断裂造成的巨大经济成本。

1.1 前言

机器、车辆和结构设计者要求产品的性能和成本必须达到可接受的水平，同时还要尽量保证其安全耐用。为保证产品的性能、安全性和耐用性，必须避免其产生过量变形——机器、车辆和结构构件（零件）的弯曲、扭转或拉伸变形。另外，还要完全避免或严格控制构件内部的裂纹，以使其不再发展到完全断裂的程度。

材料变形和断裂方面的研究称为材料的力学行为。该领域的知识为避免工程应用中上述形式的失效奠定了基础。本学科的一个方面是通过施加载荷和变形对材料试样进行物理试验。一旦给定材料的力学行为可以通过试验或对已发布的测试数据进行量化，就可以评价其在某种特定工程设计中的成功性。

为了避免结构发生断裂，在设计中最需要关注的就是构件内的应力不能超过材料的强度。这个强度就是造成变形或断裂失效的应力。通常需要对导致失效的其他复杂性或特殊情况进行进一步的分析，如下面所述的情况：①经常存在不止一个方向作用的应力，即应力状态是二维或三维的；②实际构件内可能会存在缺陷甚至裂纹，这些都必须加以特别考虑；③应力可能会作用很长一段时间；④应力可能会反复地加载和卸载，或者应力的方向会反复地出现变化。

在本章概论内容的其余部分，我们将对材料失效的各种形式加以定义并简要地进行讨论，并且将讨论材料力学行为与工程设计、新技术和经济之间的关系。

1.2 材料的失效形式

变形失效是指构件的物理尺寸或形状发生变化，并足以导致其功能丧失或削弱。当裂纹扩展到将一个构件分割成两块或多块的程度时称为断裂。腐蚀是因为化学作用而造成的材料损失。磨损是指由于两个相互接触的固体表面之间发生擦伤或黏附而导致的表面材料缺失。如果这种磨损是由流体（气体或液体）造成的，则称为侵蚀，尤其易发生在流体中含有硬质颗粒的情况下。虽然腐蚀和磨损也非常重要，但本书主要考虑变形和断裂。

材料失效的基本形式为变形和断裂,如图 1.1 所示。由于存在几种不同的原因,因此正确区分给定设计中可能存在的失效原因是非常重要的,有助于选择合适的分析方法来预测其力学行为。基于对这种分类需求的考虑,下面将对变形和断裂的不同形式进行定义和简要描述。

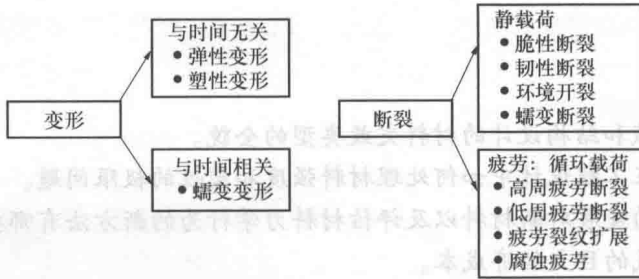


图 1.1 变形和断裂的基本类型

1.2.1 弹性变形和塑性变形

在基础材料力学中,变形可以用正应变和切应变进行量化。一个构件中应变的累积结果就是变形,如弯曲、扭转或拉伸。变形有时对构件功能的实现是必要的,比如弹簧中的变形。而过量的变形,尤其是永久性的变形,经常是有害的。

材料在快速加载时表现出来的变形可分为弹性变形和塑性变形,如图 1.2 所示。弹性变形在卸载后会迅速恢复。在只有弹性变形存在的条件下,应力和应变通常是成正比例的。对轴向加载来说,这个比例常数称为弹性模量 E ,如图 1.2b 所示的定义。例如:一很高的建筑物在风中摇动,虽然会造成居民不舒服,但还远不至于倒塌,这是一个弹性变形失效的例子,可以应用材料力学基础及在其基础上扩展的知识来对弹性变形进行分析,见有关弹性理论和结构分析方面的书籍。

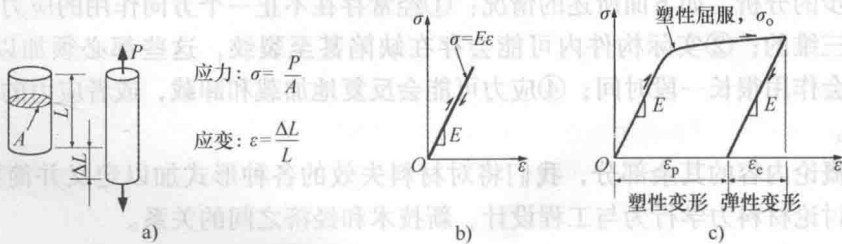


图 1.2 构件变形

a) 经历轴向加载和卸载构件 b) 弹性变形 c) 弹性变形和塑性变形同时存在

塑性变形在卸载后不能恢复,因而是永久变形。弹性变形和塑性变形的区别如图 1.2c 所示。一旦塑性变形开始后,通常很小的应力增长就能造成相当大的额外变形。这种相对容易的进一步变形过程称为屈服。对某一给定材料,这个变形开始时的应力值称为屈服强度 σ_0 。

能够承受大塑性变形的材料称为塑性材料,而那些没有发生很大塑性变形就发生断裂的材料则称为脆性材料。塑性行为经常发生在许多金属材料中,如低强度钢、铜和铅,也发生

在一些塑料中，如聚乙烯。脆性行为发生在玻璃、石头、丙烯酸塑料以及一些金属中（如用来制作锉刀的高强度钢）。

经常采用拉伸试验来评价材料的强度和塑性，如图 1.3 所示。该试验是通过缓慢拉伸一棒状材料至其断裂来实现的。材料在断裂前达到的最高应力值即为抗拉强度 σ_u 。它是与屈服强度及断裂时的应变 ε_f 一起获得的。后者是度量塑性的指标，通常用一个百分数来表示，于是将其称为伸长率。既具有高 σ_u ，又具有高 ε_f 的材料称为韧性材料。韧性材料通常是理想的设计材料。

大塑性变形几乎总是造成失效。例如在地震中钢桥或建筑物的倒塌就是由于塑性变形造成的。但是，当塑性变形相对很小时也可能会造成构件发生故障。例如：在一根旋转的轴类件上，一个轻微的永久性弯曲变形就会引起转动失稳，进而导致支承该轴的承力件发生振动，甚至可能过早失效。

屈曲是由于压应力引起的变形。它会引起柱状件或板类件的直线度发生很大的变化，甚至可能会造成一定程度的折叠或崩塌。屈曲可以由弹性变形或塑性变形单独引起的，也可以是由两者联合作用引起的。在有关材料力学基础和结构分析的书中，通常都是要考虑屈曲的。

1.2.2 蠕变

蠕变是随着时间累积的变形。蠕变变形取决于作用应力的大小及持续时间的长短，这种变形可能会非常大，以至于构件不再能够发挥应有的功能。塑料和低熔点金属可以在室温发生蠕变，几乎任何材料在接近其熔点温度时都会发生蠕变。因此蠕变是高温环境中遇到的一个重要问题，如在燃气轮机和飞机发动机中。由蠕变变形引起的屈曲也会以与时间有关的方式发生。

涉及蠕变变形的应用例子是钨灯丝的设计，其具体情况如图 1.4 所示。由于灯丝本身的重力作用会造成灯丝的下垂变形，使得灯丝线圈在其两个支点间的下垂量随着时间而增大。当变形过大时，相邻的两圈灯丝便会互相接触而导致电线短路和局部过热，这将很快导致灯丝失效。因

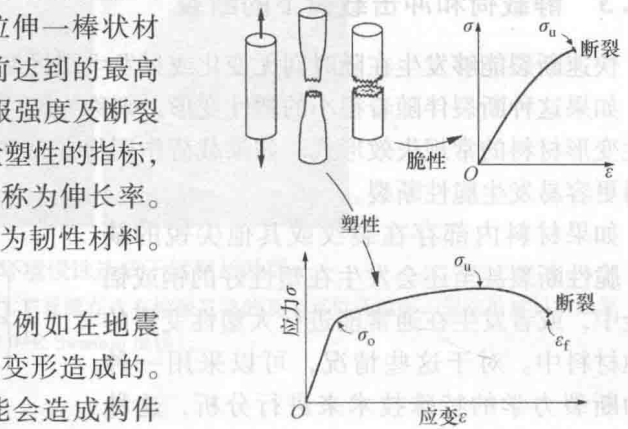


图 1.3 表现脆性和塑性行为的拉伸试验，表现为脆性时只有少量的塑性变形发生，而表现为塑性时则有大量的塑性变形发生

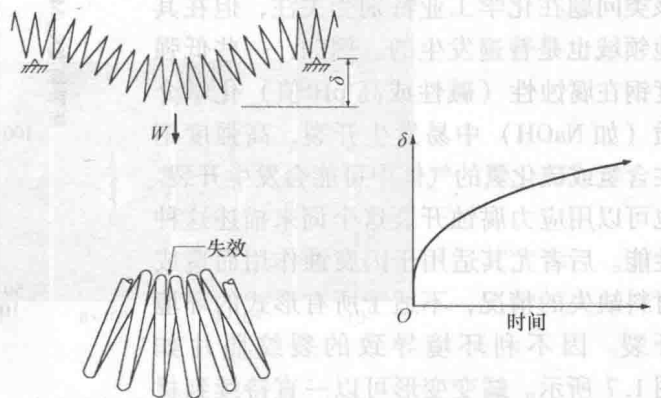


图 1.4 钨灯丝在自身重力作用下发生下垂，灯丝挠度由于蠕变而随着时间增大，将引起相邻的线圈发生接触而造成灯泡失效