固体的变形与断裂

〔美〕罗伯特 M. 凯德 著

DEFORMATION AND FRACTURE OF SOLIDS

机械工业出版社

固体的变形与断裂

[美]罗伯特 M. 凯德 著
张以增 等 译
杨宗发 校

机械工业出版社

本书系美国密执根大学机械工程系罗伯特 M. 凯德教授为美国的工科研究生和高年级大学生所编写的金属机械性能课程教材。

本书讨论了应力、应变、弹性理论、延性金属的宏观力学行为、粘弹性、位错理论、断裂与断裂力学、复合材料以及疲劳等方面的内容。叙述简明扼要，基本概念清晰，编排合理。内容以固体的宏观力学行为为主，兼顾微观。书中附有大量的例题和习题，比较结合工程实际。本书可以作为我国工科高等院校金属材料及热处理专业"金属机械性能"课程的教学用参考书，也可供有关专业的工程技术人员参考。

Deformation and Fracture of Solids

1980

Robert M. Caddell

Prentice—Hall, Inc.

* * *

固体的变形与断裂

[美]罗伯特 M. 凯德 著

张以增等 译

杨宗发 校

*

责任编辑：丁孝模

封面设计：刘 代

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 · 印张$10^{1}/_{2}$ · 字数270千字

1988年7月重庆第一版 · 1988年7月重庆第一次印刷

印数 0.001—3.300 · 定价：4.25元

*

ISBN 7-111-00058-7/TG·29

序　言

固体的力学性能，或者说固体的变形与断裂，是工程学科中一个重要的基础领域。然而美国大学生的课程在这方面所提供的知识大多十分不足，这是作者从20多年大学的教学经验中得出的结论。不论是大学生，还是研究生；不论是工科各类专业，还是其他学科专业的学生，作者都曾给他们讲授过这门课程。高年级的大学生和研究生经常选修我一直在讲授的固体的变形与断裂这门课程。这些学生学习的专业是很不相同的。他们学习的专业有机械工程、造船、材料科学与冶金、航天工程以及应用力学等。可能问题就出在这里，要适应如此众多又有着不同专业背景人员的要求是相当困难的。这些学生大都进修过工程材料和传统的材料力学，以便能够作设计。有些学生将来还要学习冶金学、机械设计和应力分析等课程。可是，实际上，上述课程中却没有一门涉及到断裂这个重要的内容。即使是力学性能方面的一些基本概念，在有些教材中也根本没有涉及，或者叙述得含混不清，使人迷惑不解。而这些基本概念在学习后续内容时却又是要求学生必须弄清楚的。本书的编排和取材试图在这些方面作些改进。教学实践证明这些改进是成功的。

第一章到第三章简明扼要地介绍了应力、应变和弹性理论，着重阐明了学生经常会混淆不清的一些基本概念。莫尔圆的应用比同类教材叙述得更为详细。这是因为，据我了解，许多学生既不了解这种分析方法的应用范围，又不了解这种方法的理论依据。一般，机械设计和材料科学的课程通常强调固体的弹性行为而忽视塑性力学。为此，第四章、第五章所概括的这方面内容比同类教材要广泛得多。第六章讨论受时间因素所制约的力学性能，着重说明在研究受时间效应所影响的力学性能参数的时候，

速率方程的重要性。第七章并不是写给位错理论方面的专家们看的。它只是提供了一个直接而有效的方式来解释对工程师来说比较重要的宏观力学现象。断裂与断裂力学的基本概念在第八章中讨论。在现代设计的某些领域中，断裂设计已成为一个重要的内容。因此，断裂应该是大学生必须学习的内容。然而，在大多数大学里即使这方面予以注意，但也还是不够的。除了阐述应力强度因子和应变能释放率的概念和应用以外，对能量平衡概念的应用也进行了讨论。掌握能量平衡概念，可以帮助我们对于实验测定的断裂韧性的物理涵义有一个较好的理解，而这个概念在别的类似教材中却很少介绍。第九章介绍了复合材料的一些基本知识。毫无疑问，复合材料在工程中的应用将会越来越广泛。在本章简明的叙述中，指出这种材料的优点的同时，也指出了其局限性。第十章较为广泛地讨论了疲劳，经典的疲劳设计方法和近代断裂力学关于疲劳的一些观点都得到了相当深入的讨论。最后用失效分析的一个简短总结来结束这一章的讨论。

我在讲授中曾经使用过好几种其他教材，学生对这些教材提出了不少意见和建议，正是这些意见和建议才促使我撰写这本书。通常这类教材的篇幅过长，不可能在一个学期内学完。学生埋怨说，他们要付一大厚本书的钱去买教材，却又看不完。为了避免学生的这种埋怨，我尽量精选内容，做到少而精。有些内容则全部略去。这样做不过是我个人的一种选择，并不意味着这些内容不重要。如果使用本书的教师认为需要补充，可以适当地发一些补充讲义。考虑到学生对教材的其他意见，每章都有一些例题。必要时尽可能地介绍各种不同的解题方法，每章之后附有大量习题。有些习题涉及到基本概念和基本定义，另外一些习题则稍有难度，需要深入思考。

本书使用英制和国际单位制两种单位符号。两种单位的一些重要转换关系简明地列在序言之后。如果我们客观地看问题，没有疑问，使用国际单位将更为方便。广泛使用英制单位的传统倾向理应克服，这是大势所趋。不过同时使用两种单位可以减少向

国际单位过渡时必然会遇到的习惯阻力。

大多数习题给出了解题所需要的性能数据。但是，有一些习题则有意识地没有给出。这就使学生不得不在别的资料上去查阅所需要的数据。凡是有工程技术实际工作经验的人都会同意，查找数据也是解决实际问题的一个关键工作。要使学生懂得这一点，而且越早越好。

所列参考文献只限于一些基本的学术论文，或者是那些对有关内容作进一步详细阐述的其他教材。除非是从事研究工作，学生似乎对查对文献并不十分感兴趣。我少列文献就为的是希望年轻的读者能够养成查阅文献这个重要的习惯。

我要感谢我的一些同事和我以前的一些学生。特别是A. G. Atkins, D. K. Felbeck, W. F. Hosford Jr., K. C. Ludema和Y. W. Mai等博士。在与他们多年的交往中，我们进行了许多有益的讨论。他们对本书提出了许多很深刻的意见。要把他们对本书的帮助一一列出来是不可能的，为此，我对他们中的每一位都表示我的衷心感谢。在许多提供过帮助的学生中，我要特别提到R. S. Raghava和A. R. Woodliff两位博士。他们从学生的角度提出来的建议是每一位教师都乐意接受的。最后，我还要感谢Karen Almas, Mary Anne Brocious, Gloria Hartman和Karen Chapin等女士，感谢她们花了不少时间协助我完成这本书的打字初稿。她们的耐心和细致是十分宝贵的。

Robert M. Caddell
安阿伯，密执根

译者的话

这本书是译者之一（张以增）1980年在美国纽约理工学院冶金系访问期间，由 Prentice-Hall, Inc. 的 John W. Wait 博士赠送的。读后觉得 Robert M. Caddell 教授相当有教学经验。1981年在国内有关会议上对此书作过介绍，同志们认为有必要将其翻译出版，介绍给读者。本书的第一章到第五章由张以增翻译，第六章到第十章分别由袁朝晖、邹鸿承、李国安、苗丕峰、金邓建初译，后又经张以增重译。全书的译文整理由张以增负责。

由于水平所限，错误在所难免，望读者指正。

单位转换关系及（SI）单位

国际单位制(SI)的一些基本单位及其缩写符号

量　　度	单　　位	缩写符号
长　度	米	m
质　量	千克	kg
时　间	秒	s
力①	牛[顿]	$N=kg\cdot m/s^2$
应　力①	牛/米²	N/m^2
应力或压力①	帕[斯卡]$=1N/m^2$	Pa
能　量①	焦[耳]	$N\cdot m$

①这些是由基本单位导出的。

国际单位制所采用的方次符号

因　数	词头名称	符　号	因　数	词头名称	符　号
10^{12}	tera	T	10^{-6}	micro	μ
10^{9}	giga	G	10^{-9}	mano	n
10^{6}	mega	M	10^{-12}	pico	p
10^{3}	kilo	k	10^{-15}	femto	f
10^{-3}	milli	m	10^{-18}	atto	a

由英制转换为国际单位的转换关系

英制单位	转换为	乘　以
in	m	2.54×10^{-2}
ft	m	3.048×10^{-1}
in^2	m^2	6.452×10^{-4}
ft^2	m^2	9.29×10^{-2}
in^3	m^3	1.639×10^{-5}
ft^3	m^3	2.832×10^{-2}
lbf	N	4.448
lbf/in^2	N/m^2	6.895×10^{3}

$1lbf/in^2=10^{-3}ksi=1psi$。

一些有用的转换关系

$1\ \mu m = 10^{-4} cm = 10^{-6} m$

$1\ \text{Å} = 10^{-8} cm = 10^{-10} m$

$1\ dyn/cm^2 = 1.44 \times 10^{-5}\ lbf/in^2$

$10\text{Å} = 1nm$

体心立方点阵单位晶胞， $a_0 = 4r/\sqrt{3}$

面心立方点阵单位晶胞， $a_0 = 4r/\sqrt{2}$

其中 r=原子半径，a_0=点阵常数

目　　录

第一章　应力 ………… 1

1-1　引言 ………… 1

1-2　均匀应力状态的普遍三维分析 ………… 5

1-3　应力变换 ………… 12

1-4　莫尔圆——它的应用及其局限性 ………… 16

习题 ………… 31

第二章　应变 ………… 36

2-1　引言 ………… 36

2-2　二维小应变 ………… 37

2-3　三维小应变 ………… 40

2-4　应变变换 ………… 42

2-5　分析应变的莫尔圆 ………… 45

2-6　工程应变与真应变 ………… 47

参考文献 ………… 50

习题 ………… 50

第三章　各向同性的弹性力学 ………… 52

3-1　引言 ………… 52

3-2　理想的弹性固体模型 ………… 52

3-3　本构关系 ………… 53

3-4　弹性常数 ………… 55

3-5　应力莫尔圆和应变莫尔圆的关系 ………… 57

3-6　由弹性变形功而引起的应变能 ………… 60

3-7　两种重要的实际状态——平面应力和平面应变 ………… 61

参考文献 ………… 62

习题 ………… 62

第四章　塑性力学 ………… 65

4-1　引言 ………… 65

4-2 弹性力学与塑性力学的比较 ······ 66
4-3 塑性变形的模型 ······ 67
4-4 屈服轨迹和屈服表面 ······ 70
4-5 屈服判据 ······ 73
4-6 屈雷斯加判据 ······ 74
4-7 密席斯判据 ······ 75
4-8 畸变能 ······ 81
4-9 八面体切应力 ······ 83
4-10 流动法则或者塑性应力-应变的关系 ······ 84
4-11 正交性和屈服表面 ······ 89
4-12 塑性功 ······ 94
4-13 应力莫尔圆与塑性应变增量的莫尔圆之间的比较 ······ 95
参考文献 ······ 97
习题 ······ 97
第五章 延性金属材料的宏观力学行为 ······ 101
5-1 引言 ······ 101
5-2 单轴拉伸下延性金属的变形 ······ 101
5-3 载荷与伸长的关系 ······ 102
5-4 工程或名义应力和应变 ······ 105
5-5 屈服应力的测定 ······ 107
5-6 塑性指标 ······ 108
5-7 真实应力和真实应变 ······ 110
5-8 由单轴拉伸引起的应变强化 ······ 112
5-9 应变强化方程的测定 ······ 116
5-10 缩颈后的行为 ······ 121
5-11 平衡双轴拉伸（鼓胀试验）······ 125
5-12 平面应变压缩 ······ 127
5-13 预先冷变形金属的延性 ······ 128
5-14 小结 ······ 132
参考文献 ······ 133
习题 ······ 133
第六章 粘弹性 ······ 137
6-1 引言 ······ 137

6-2 描述与时间相关的或粘滞性质的模型 ……139
6-3 复合模型 ……141
6-4 Maxwell模型 ……141
6-5 Voigt 或 Kelvin 模型……146
6-6 三元件模型 ……150
6-7 四元件模型 ……152
习题 ……154
第七章 位错理论概要……157
7-1 引言 ……157
7-2 最大理论剪切应力 ……158
7-3 纯刃位错和纯螺位错模型 ……161
7-4 位错运动和柏格斯矢量 ……164
7-5 位错所引起的应力和应变的数学推导 ……165
7-6 位错运动引起的剪切应变 ……174
7-7 位错引起的应变能 ……177
7-8 外加应力作用于位错上的力 ……179
7-9 位错间的交互作用力 ……181
7-10 位错的增殖 ……187
7-11 攀移和交滑移 ……191
7-12 宏观行为的定性解释 ……192
参考文献 ……199
习题 ……204
第八章 断裂和断裂力学 ……209
8-1 引言 ……209
8-2 断裂的类型 ……210
8-3 固体的最大理论结合强度 ……213
8-4 应变能释放率 ……221
8-5 设计上的考虑 ……224
8-6 线弹性断裂力学 ……225
8-7 应变能释放率和应力强度因子之间的关系 ……242
8-8 断裂韧性——Gurney 法……243
8-9 裂纹稳定性的物理意义 ……252
8-10 裂纹稳定性的数学意义 ……255

8-11 裂纹的起始扩展速率 ……258
8-12 试样尺寸对断裂韧性测试的影响 ……260
参考文献 ……264
习题 ……265
第九章 复合材料 ……273
9-1 引言 ……273
9-2 复合材料的定义 ……273
9-3 连续纤维复合材料以及复合定则 ……274
9-4 复合的修正定则(MROM) ……278
9-5 不连续纤维复合材料 ……279
9-6 平均纤维应力的概念 ……282
9-7 综合讨论 ……285
参考文献 ……290
习题 ……291
第十章 疲劳 ……294
10-1 引言 ……294
10-2 影响疲劳的因素 ……295
10-3 宏观设计 ……300
10-4 疲劳与断裂力学 ……310
10-5 裂纹的扩展 ……310
10-6 失效分析 ……315
参考文献 ……319
习题 ……320

第一章 应 力

1-1 引言

我们定义应力为单位面积上的力的强度，利用这个简单的概念已经解决了许多问题。有时把单轴拉伸、压缩和扭转试验作为实际例子来说明上述应力的定义。然而这种简单的说明并不能完整地概括应力的本质。我们经常会遇到双向或者三向的应力状态，而过分强调单向的应力情况会引起误解。

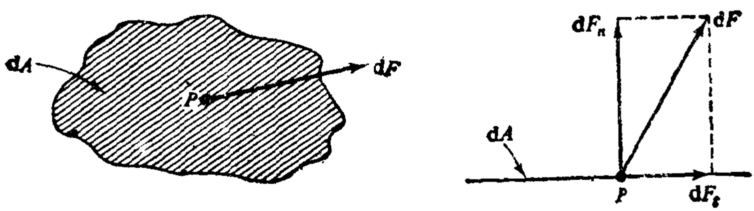
上面我们一开始就使用了力和面积这两个名词。它们都是矢量，需要用大小和方向两种量才能完整地描述。应力则需要用两个系列的方向余弦才能完整地描述。如果要将应力分量从一个坐标系变换到另一个坐标系，则一定要遵循某一定的数学法则。这就是张量变换。张量变换及其所使用的符号，使用起来相当方便。这是因为用张量符号所表示的应力表达式比较简明、好记。本书的目的虽不在于张量分析的阐述，但是，仍有必要指出以下几点：

1. 应力是二阶张量（通常就称之为张量），它的变换需要两个系列的方向余弦。
2. 力是一阶张量(通常称之为矢量)，它的变换只需要一个系列的方向余弦。
3. 温度是零阶张量（通常称之为标量），它与方向无关。

还可以举出其他的实际例子来说明张量的性质，但是，以上几点足以说明应力不是矢量。

十分明显，承受载荷的物体中每一点的应力状态是不同的。例如，拉伸一延性金属试样，在缩颈以后，尽管力在整个长度上是相同的，可是由于发生了颈缩，试样的截面积不同（包括几何形状上的不同），使得试样中的每一点的应力不相同。为了说明

这种情况，我们要应用点应力的概念。



(a)　　　　(b)

图1-1　作用于面元上的力

(a)表示作用于P点的力　　(b)表示其分力

有一力，dF，作用于面元 dA 上的一点 P，如图 1-1(a)所示。通常 dF 既不垂直于也不平行于 dA。于是，dF 可分解为法向分力dF_n和切向分力dF_t，如图 1-1(b)所示。当 $dA\rightarrow 0$，接近其极限时，应力可定义为：

$$\sigma=\frac{dF}{dA},\quad \sigma_n=\frac{dF_n}{dA},\quad \sigma=\frac{dF_t}{dA}$$

其中σ为P点的总应力，代表了P点的应力状态，σ_n和σ_t分别为法向和切向应力分量。我们注意到在上述定义中的面积都是相同的。

如果我们想像P点是在一个非常小的平行六面体的中心（这不过是数学上的抽象），在这个平行六面体模型中的变化是这样的小，以致于我们可以认为在P点的应力状态是均匀的，它可以用这个六面体模型来描述。如果有一些力作用于物体，那么它们对P的作用（坐标可任意选择），可用图1-2表示。受力以后如果物体处于静平衡状态，六面体的一个面，与其对应的对面，将作用着相同的应力分量。这将使沿x轴方向的力得到平衡，即 $\Sigma F_x=0$。如果受力以后物体也没有转动，则围绕x轴方向的力矩之和也将等于零，即$\Sigma M_{Px}=0$。当然，对y轴和z轴方向上也会有类似的关系。

于是，几个应力分量组成了应力张量，通常用σ_{ij}表示：

$$\sigma_{ij}=\begin{vmatrix}\sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx}\\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy}\\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz}\end{vmatrix}$$

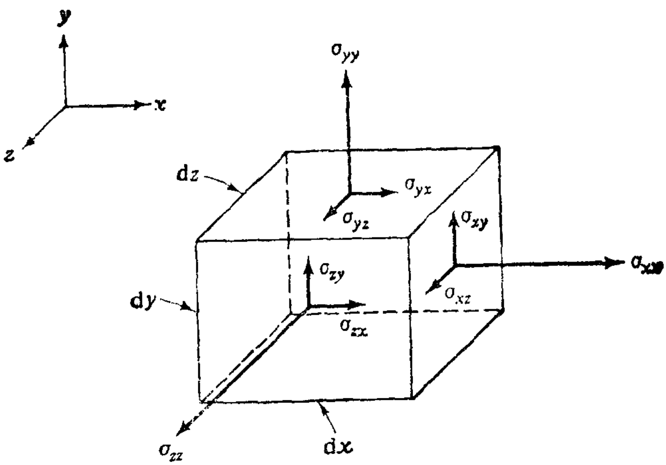


图1-2　一点均匀应力状态的应力分量。按照约定，如图所示的应力分量均为正方向

i和j依次代表了x、y和z。张量分析并不是本书讨论的主要内容，所以，我们准备采用通俗的符号。通常我们用σ_x，σ_y，σ_z表示正应力（拉应力或压应力），用τ_{xy}，τ_{yz}，τ_{zx}表示切应力。我们注意到$\Sigma M_P=0$，$\tau_{xy}=\tau_{yx}$等等，因此，应力张量的九个独立分量可减少到六个。我们把拉应力作为正，压应力为负，所以，图 1-2 中所示的正应力，符号均为正。同样的，我们对于切应力的符号也有一个约定。在教材中由图 1-2 所示的切应力，均定义为正方向。

如果物体中的每一点的应力状态不相同，则从某一点转换到另一点，其应力变化要符合图 1-3 所示的规定。在这个图上我们只画出了x-y平面，这仅仅只是举一个例子，作为参考，还可以有y-z，x-z平面。从这个图上，我们要注意下列几点：

1. 由P点移动到其他的点，应力的任何变化都假设是线性的。
2. 在所有的应力项中表示变化率的正负符号并不意味着此项的值是增加的或者是减少的。例如，当P点沿着正的x方向移动时，应力项$\sigma_x+(\partial\sigma_x/\partial x)(\mathrm{d}x/2)$并不表示$\sigma_x$的变化一定是增加的。
3. σ_z，τ_{yz}和τ_{xz}应力分量垂直于x–y面，没有与此面平行的力的分量。

如果我们只考虑x方向上的力，则只涉及到σ_x，τ_{yx}和τ_{zx}这三个应

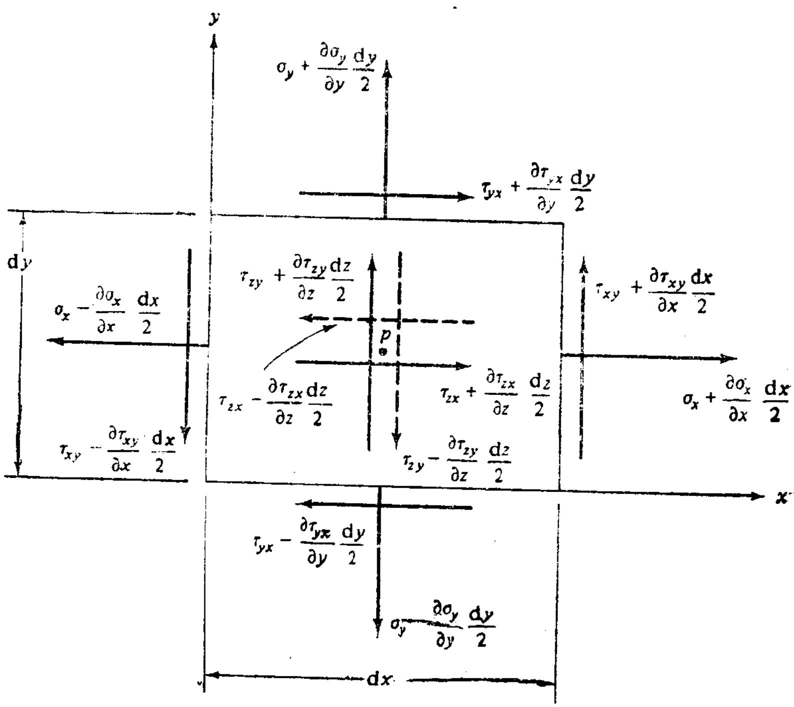


图1-3　在x–y平面上一点的应力平衡

力分量。如果此时体元处于平衡状态，则

$$\Sigma F_x=0=\Sigma(\text{应力})(\text{面积})$$

由此可得到下式，其求导运算可作为一个习题：