

工程材料的 变形与断裂力学

[美] R. W. 赫次伯格 著

机械工业出版社

工程材料的变形与断裂力学

[美] R. W. 赫次伯格 著

王克仁 罗力更 姚衡 刘国玺 译



机械工业出版社

本书以工程材料（包括金属、陶瓷、聚合物等）为对象，讨论了它们的宏观和微观的力学性能，包括应力应变（本构关系）和断裂性能，综合讨论了冶金学、材料科学和力学等方面的工作人员都感兴趣的一些问题。本书说明深入浅出，可以作为上述诸领域人员沟通的桥梁；图表丰富，辅以很多工程实例，可以作为工程技术人员案头的参考书；每章内还附有例题和习题，作为大学高年级学生和研究生的教科书也很适宜。

**DEFORMATION
AND FRACTURE MECHANICS
OF ENGINEERING
MATERIALS**

**RICHARD W. HERTZBERG
JOHN WILEY & SONS 1976**

* * *

工程材料的变形与断裂力学

[美] R. W. 赫次伯格 著

王克仁 罗力更 译
姚 衡 刘国玺

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/32 · 印张 21 · 插页 2 · 字数 463 千字

1982年9月北京第一版 · 1982年9月北京第一次印刷

印数 00,001—10,200 · 定价 2.60 元

*

统一书号：15035 · 5272

前 言

本书讨论金属、陶瓷和聚合物机械特性的宏观和微观方面，着重讨论材料科学和断裂力学的最新发展。本书内容适宜于作为冶金与材料、机械工程、土木工程等专业大学生的高级课程。在这类课程中要强调把材料和断裂力学方法结合起来的处理方法。正在从事工作的工程师如欲进一步了解机械冶金方面的情况（特别是处理固体断裂的断裂力学方法），本书也是有所裨益的。我假定本书的读者受过材料力学和初等微积分的训练，并有冶金原理（包括晶体结构）方面的入门知识。

我的目的是使读者了解在机械冶金方面正在从事工作的工程师及材料科学者所持有的一些观点：晶体物理的方法以及位错在控制机械性能方面的作用；强调微观结构和材料性能之间关系的经典的冶金方法；叙述材料韧度、设计应力和容许的缺陷尺寸之间关系的断裂力学方法。本书举例说明了每一种观点在分析晶体某些机械性能方面的应用，使读者能很快识别用什么方法可以最好地解释某一组数据或某一特定的破坏事故。我想，只有对于原子的、显微结构的以及连续统的观点在应用方面各自的局限性有一个全面的看法，读者才不至于在一个对手头问题可能并无直接关系的概念的细节部分太化功夫。确实，这对于成功地作破坏分析是至关重要的。

本书分为两大部分。第一部分研究固体的变形。这里着重讨论显微结构、晶体学以及位错在解释材料特性方面的作

用。第二部分篇幅超过第一部分，主要应用断裂力学的原理讨论固体断裂的问题。熟悉第一部分的内容对于理解第二部分的内容是有用的，但并非必须的。读者如欲集中研究断裂问题，可以在读过介绍材料拉伸特性的第一章之后，马上开读第二部分。

第一章讨论金属、陶瓷和聚合物的种种宏观机械性能和相应的拉伸应力应变曲线之间的相互关系。第二章至第五章是一紧密联系的整体，主要讨论结晶形固体的变形。第二章讨论的位错理论，为第三章至第五章讨论滑移与结构性质之间的关系，提供了初步的基础知识。第四章详尽地讨论孪晶结晶学，并根据机械纤维化及择优结晶学方向，分析了结晶态固体的冷加工结构。结晶态固体的高温蠕变是依赖于时间的变形过程，它兼有好几个学科的特点。为使读者熟悉这些内容，我们在第五章讨论的课题中，包括了蠕变应变与时间、温度和应力之间的经验关系；时间-温度的参数关系式，例如在工程材料设计中应用的 Larson-Miller 参数；以及诸如扩散率、熔点、激活能、晶粒尺寸、晶体结构和弹性模量等材料性能与蠕变应变之间关系的计算。我们还讨论了超塑性 (Superplasticity) 和变形机制图。第一部分最后讨论聚合物材料的变形。我们在讨论聚合物材料的机械性能的时候，与在讨论金属材料时一样，同时研究了其连续统的特性 (例如用线性粘弹性的关系和数学模拟描写的特性)，以及材料科学方面的种种考虑，包括诸如结构对于能量阻尼谱的影响以及晶态和非晶态聚合物变形的微观机制等题目。

第二部分讨论断裂问题，一开始是一个总的概论，内容包括从十五世纪达·芬奇对于连续统的研究，一直到近代采用高级的透射电镜和扫描电镜所作的断口检测。第八章讨论

应力强度因子和断裂力学方法在分析固体断裂方面的重要性；在第九章中把断裂力学的方法与工程设计中原有的转变温度方法进行了比较。从这个宏观的观点出发，在第十章和第十一章中重点移至考虑显微结构参数在确定材料断裂韧度以及脆化敏感性方面的作用。我们同时讨论了环境变脆（例如应力腐蚀开裂，液态金属变脆和氢脆）以及材料固有的脆性（例如回火、辐射和 300°C 脆化）。在第十二章和第十三章详细地讨论了固体的疲劳，这包括循环应力寿命，循环应变寿命，疲劳裂纹扩展的机理，以及一些试验数据。在最后一章讨论了实际工程中的破坏事故，用以说明在破坏分析中应用断裂力学原则的重要性。我们分析了一些桥梁、飞机、发电机转子的破坏事故。为了读者今后应用的目的，我们还附了一个分析工程中破坏事故所必要的资料的一览表。最后一章可以作为一个整体加以研究，或者作为说明前面一些章节中所提出的一些观点的例证。

Richard W. Hertzberg 1976年7月

目 录

前言

符号及单位换算

第一部分 工程材料的变形

第一章 材料的拉伸特性	1
1.1 应力和应变的定义	1
1.2 应力应变曲线	4
1.3 温度和应变速率对拉伸特性的影响	41
第二章 位错理论概要	45
2.1 理想晶体的强度	45
2.2 晶格缺陷——位错	49
2.3 晶格对位错运动的阻力——Peierls 力	52
2.4 位错的特征	57
2.5 位错的观察	62
2.6 位错的弹性性质	65
2.7 位错与位错的相互作用力	70
2.8 位错增殖	75
第三章 结晶体的滑移	82
3.1 滑移的结晶学	82
3.2 不全位错	88
3.3 滑移的几何学	94
3.4 屈服特性	103
3.5 一般的单晶应力应变曲线	106

3.6 单晶和多晶体应力应变曲线之间的关系	110
第四章 变形孪晶和塑性变形金属结构	115
4.1 变形孪晶	115
4.2 塑性变形金属的结构	134
第五章 晶体的高温形变特性	149
5.1 固体的蠕变: 综述	149
5.2 温度—应力—应变速率间的关系	155
5.3 变形机制	167
5.4 超塑性	171
5.5 变形机制图	176
5.6 参数关系——求蠕变断裂数据的外推方法	182
5.7 高温用材料	193
第六章 工程塑料的变形	201
6.1 聚合物结构——概述	201
6.2 聚合物加漆添加剂	219
6.3 聚合物的粘弹性响应和结构作用	221
6.4 结晶和非结晶聚合物的变形机制	238
6.5 聚合物的强化	244
6.6 聚合物的韧度 (Toughness)	249

第二部分 工程材料的断裂力学

第七章 断裂——综述	255
7.1 引言	255
7.2 理论内聚强度	258
7.3 固体中的缺陷	260
7.4 应力集中系数	262
7.5 缺口强化	267
7.6 影响断裂的外部变量	270
7.7 断裂过程的术语	271

第八章 断裂力学基础	284
8.1 Griffith裂纹理论	284
8.2 裂纹的应力分析	291
8.3 设计原则	300
8.4 能量释放率方法和应力场方法的联系	302
8.5 裂纹顶端塑性区尺寸的估计	304
8.6 断裂型式的转变: 平面应力与平面应变	311
8.7 平面应变断裂韧度试验	315
8.8 工程合金的断裂韧度	318
8.9 平面应力断裂韧度试验	322
8.10 用测量裂纹张开位移的方法确定韧度	326
8.11 用 J 积分确定断裂韧度	328
第九章 断裂控制的转变温度方法	332
9.1 转变温度现象与Charpy冲击试样	332
9.2 其他断裂实验方法	340
9.3 转变温度方法的局限性	343
9.4 冲击能和断裂韧度的关系	349
9.5 预制裂纹Charpy 冲击试验	359
第十章 断裂韧性与显微结构的关系	364
10.1 某些基本原则	364
10.2 韧性和显微结构的各向异性	367
10.3 改进合金的清洁度	376
10.4 达到最大韧性的最佳显微结构	392
10.5 显微结构的细化	401
10.6 K_{Ic} 与其他力学性能间的关系	407
10.7 补充数据	413
第十一章 环境加速的开裂和冶金脆性	422
11.1 环境加速的开裂 (EAC)	427
11.2 冶金脆性	450

第十二章 循环应力和应变疲劳	467
12.1 疲劳破坏的宏观断口观察	468
12.2 循环应力控制的疲劳	471
12.3 循环应变控制的疲劳	495
12.4 疲劳裂纹的引发	517
12.5 总的评述	520
第十三章 疲劳裂纹扩展	523
13.1 应力、裂纹长度和疲劳裂纹扩展间的关系	523
13.2 疲劳的宏观断裂方式	534
13.3 微观断裂机制	538
13.4 ΔK 在取两种极端值时的裂纹扩展特性	547
13.5 载荷交互作用的影响	557
13.6 环境加速的疲劳裂纹扩展(腐蚀疲劳)	566
13.7 冶金因素对疲劳裂纹扩展的影响	580
13.8 工程塑料的疲劳	587
第十四章 工程破坏事故的分析	612
14.1 断裂表面的宏观检查	614
14.2 金相和断口检查	620
14.3 应力强度因子的估计	621
14.4 构件破坏分析资料	625
14.5 事故分析实例	629
附录 复型技术及成象说明	655

第一部分 工程材料的变形

第一章 材料的拉伸特性

拉伸试验这一实验方法，极为广泛地用来表示材料所具有的机械性能。根据任意一个完整的试验记录，我们可以得到材料的许多重要情况，如弹性性质，塑性变形的特征和程度，屈服强度，拉伸强度以及韧性。因为从拉伸试验中可以得到如此之多的情况，所以在工程材料的研究中广泛地采用它。为了使读者对于在拉伸载荷作用下承载材料的种种不同特性的概貌有一个大致的了解，在本章中我们介绍反映不同变形特征的几种应力应变曲线。

1.1 应力和应变的定义

在讨论工程材料应力应变特性之前，应该先对应力和应变这两个词加以定义。通常人们采取的有两种做法。第一种方法是在工程实际中广泛采用的，它是这样定义的：

$$\sigma_{\text{工程}} = \text{工程应力} = \frac{\text{载荷}}{\text{加载前的截面积}} = \frac{P}{A_0} \quad (1-1)$$

$$\epsilon_{\text{工程}} = \text{工程应变} = \frac{\text{长度的改变量}}{\text{加载前的长度}} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (1-2)$$

l_f = 标距最后的长度

l_0 = 标距原来的长度

按照第二种方法，应力和应变是这样定义的：

$$\sigma_{\text{真}} = \text{真应力} = \frac{\text{载荷}}{\text{瞬时截面积}} = \frac{P}{A_i} \quad (1-3)$$

$$\epsilon_{\text{真}} = \text{真应变} = \ln \frac{\text{最后长度}}{\text{原来长度}} = \ln \frac{l_f}{l_0} \quad (1-4)$$

在真应力和真应变的定义中，最基本的特点是承认下面这一事实：由于塑性变形而引起的标距长度的变化和直径的变化之间有相互关系。由于在塑性变形的过程中体积保持不变，因此，

$$A_1 l_1 = A_2 l_2 = \text{常数} \quad (1-5)$$

也就是说，如果原来的标距长度有所伸长，则其实际直径就会有相应的缩短。例如，有一长度为25mm（1in左右）的试样，若使之在拉伸载荷 P 的作用下均匀伸长2.5mm，则其实际的应力，即真应力，会比由工程应力的定义所计算得到的应力为大。因为 $l_2/l_1 = 1.1$ ，由（1-5）式得 $A_1/A_2 = 1.1$ ，因此 $A_2 = A_1/1.1$ 。从而真应力为 $\sigma_{\text{真}} = 1.1P/A_1$ ，它比工程应力的数值大。

之所以要定义（1-4）式所代表的真应变，是因为每一时刻的实际应变与瞬时的标距长度 l_i 有关。如果固定位移增量 Δl ，相应的应变增量将会逐步减小，因为随着附加每一位移增量 Δl ，瞬时标距长度 l_i 都要随之增加。而且在由杆的总的长度变化来定义其应变时，我们有可能认为该长度变化是一步达到的，或者是任意多步达到的。用数学表示出来就是

$$\sum_n \epsilon_n = \epsilon_T. \text{ 作为一个简单的例子，我们来考虑分两步拉丝的}$$

情况，其间经过退火处理。根据工程应变的定义，两个应变值为 $(l_1 - l_0)/l_0$ 和 $(l_2 - l_1)/l_1$ 。这两个增量加起来并不得到

最后的应变 $(l_2 - l_0)/l_0$ 。在另一方面，真应变之和确实得到正确的结果。因此

$$\ln \frac{l_1}{l_0} + \ln \frac{l_2}{l_1} = \ln \frac{l_2}{l_0} = \epsilon_{\text{总的真应变}}$$

例1.1 一杆长25cm (10 in), 直径为0.25cm, 受的载荷是4500 牛顿 (1012磅)。若其直径减至0.22cm, 试计算

a) 杆的最终长度

因

$$A_1 l_1 = A_2 l_2 \quad (\text{由 (1-5) 式})$$

故

$$l_2 = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{\pi}{4}(0.25)^2}{\frac{\pi}{4}(0.22)^2} \quad (25)$$

$$l_2 = 32.3\text{cm}$$

b) 在该载荷下的真应力和真应变

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{真}} &= \frac{P}{A_i} \\ &= \frac{4500}{\frac{\pi}{4}(2.2 \times 10^{-3})^2} \end{aligned}$$

$$\sigma_{\text{真}} = 1185\text{MPa} (172000\text{Psi})$$

$$\epsilon_{\text{真}} = \ln \frac{l_f}{l_0}$$

$$= \ln \frac{32.3}{25}$$

$$\epsilon_{\text{真}} = 0.256 \text{ 或 } 25.6\%$$

c) 在该载荷下的工程应力和工程应变

$$\sigma_{\text{工程}} = \frac{P}{A_0}$$

$$= \frac{4500}{\frac{\pi}{4}(2.5 \times 10^{-3})^2}$$

$$\sigma_{\text{工程}} = 917 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{\text{工程}} = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

$$= \frac{32.3 - 25}{25}$$

$$\epsilon_{\text{工程}} = 0.292 \text{ 或 } 29.2\%$$

在考虑体积保持为常数的塑性变形过程时采用真应变还有附加的好处：这时体积不变的条件可以写成很方便的形式： $\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0$ 。与此相比较，若采用工程应变，得到的关系式是 $(1 + \epsilon_x)(1 + \epsilon_y)(1 + \epsilon_z) = 1$ ，它没有上面的关系式用起来方便。

1.2 应力应变曲线

1.2.1 弹性：第 I 种类型

大概三百年前，Robert Hooke（虎克）在其一篇经典的论文“关于弹簧”中提到观察到的下列事实^[1]：

“取一金属丝，长为20英尺或30英尺或40英尺，上部固定在一根钉子上，另一端固定一放砝码用的秤盘，以两脚规量秤盘底部与地面的距离。然后置砝码于其上，测量上述金属丝的伸长，记录之。比较金属丝的伸长可以发现，其不同伸长的比例，与引起伸长所置的不同的砝码重量的比例相同。”

这一观察结果，数学上可用下列弹簧的方程式来表示：

$$F = kx \quad (1-6)$$

这里 F = 外力

x = 由此引起的位移

k = 比例因子，常常称之为弹簧常数。

如果外力作用于截面积 A 上， x 是相对于某一参考标距长度 l 的位移，(1-6) 式可以改写成

$$\sigma = E \epsilon \quad (1-7)$$

这里

$$\sigma = F/A = \text{应力}$$

$$\epsilon = x/l = \text{应变}$$

E = 比例常数（通常称之为杨氏模量或弹性模量）

(1-7) 式——称之为Hooke定律——叙述一种应力和应变成比例的材料特性，得到的应力应变关系示于图1.1。在表1.1内给出若干材料的弹性模量。因为 E 决定于原子间作用力的强度，随材料原子结合键的形式而异，对于微观结构的变化相对来说是不敏感的。因此，虽然热处理和合金元素的微量增加会使合金钢的强度从210MPa增至2400MPa，但是其弹性模量相对来说没有多大改变，大概从200GPa变至210GPa。

随着温度的增加，金属和陶瓷的弹性模量会减小。这是因为弹性模量与原子或离子分离距离的四次方或更

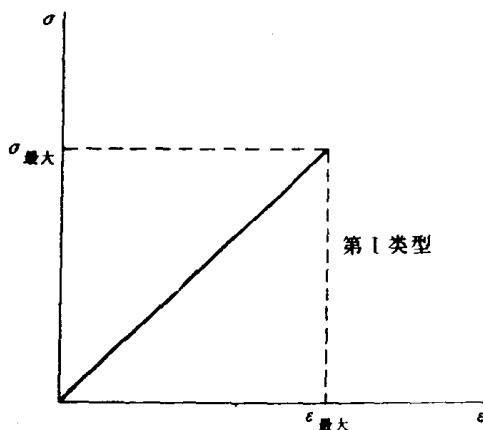


图1.1 第I种类型的应力应变关系：完全弹性的材料特性

高次方成反比的。由于在平衡的条件下，原子之间的距离随温度的升高而增加（即当加热时材料膨胀），因此弹性模量会减小。随着温度增加而引起的材料刚度的减小不是很厉害的，当温度改变 100°C (180°F) 时，刚度的变化仅为百分之几。

人们发现，如果拉伸试样在达到断裂点之前撤去载荷，相应的应变会沿着同一直线回复到零。对于任意材料来说，不管它容许的总应变可以达到多大， $\sigma-\epsilon$ 曲线这一部分应变的可逆性质，是弹性应变的基本要素。如果一种材料的特性可以用这样的应力应变曲线来刻画而且无塑性变形的话，那么这材料抗脆性（低能量）断裂的能力就是一个极需注意的问题。这问题在第七、八、九三章内详细讨论。有这种特性的典型的材料包括玻璃、岩石、多种陶瓷、横向交联很好的聚合物以及一些在低温下的金属。虽然这些材料并不适用于包含拉伸载荷的工程应用，但是它们却颇为成功地用于受压载荷的情况，这时材料抗断裂的能力要大得多。同时我们也常常发现，一些脆性材料受压时的强度比受拉时的强度大好几倍。混凝土这一工程材料是一极好的例子，它广泛地用于受压的情况，但不用于拉伸载荷。如果拉伸载荷无法避免，那么混凝土就要用钢筋加强，以此承受拉伸载荷。

1.2.1.1 广义 Hooke 定律

Hooke 定律可以加以推广，以用于多轴的载荷，并考虑材料的各向异性。关于多轴载荷，读者应该回忆一下材料力学告诉我们的事实：在一个方向（例如 Y 方向）的应力不仅在 Y 方向引起应变，而且在 X 和 Z 方向也引起应变。因此

$$\epsilon_{yy} = \frac{\sigma_{yy}}{E} \quad (1.8a)$$

表1.1a 工程材料的弹性性质^①

材料 (温度在20℃)	E (GPa)	G (GPa)	ν
金 属			
铝 (Al)	70.3	26.1	0.345
镉 (Cd)	49.9	19.2	0.300
铬 (Cr)	279.1	115.4	0.210
铜 (Cu)	129.8	48.3	0.343
金 (Au)	78.0	27.0	0.44
铁 (Fe)	211.4	81.6	0.293
镁 (Mg)	44.7	17.3	0.291
镍 (Ni)	199.5	76.0	0.312
铌 (Nb)	104.9	37.5	0.397
银 (Ag)	82.7	30.3	0.367
钽 (Ta)	185.7	69.2	0.342
钛 (Ti)	115.7	43.8	0.321
钨 (W)	411.0	160.6	0.280
钒 (V)	127.6	46.7	0.365
其 它 材 料			
氧化铝 (致密)	~ 415	—	—
金刚石	~ 965	—	—
铅玻璃	80.1	31.5	0.27
尼龙66	1.2~2.9	—	—
聚碳酸酯	2.4	—	—
聚乙烯 (高密度)	0.4~1.3	—	—
有机玻璃 (聚甲基 丙烯酸甲酯)	2.4~3.4	—	—
聚丙烯	1.1~1.6	—	—
聚苯乙烯	2.7~4.2	—	—
水晶 (熔凝石英)	73.1	31.2	0.170
碳化硅	~ 470	—	—
碳化钨	531.4	219.0	0.22

① G. W. C. Kaye 和 T. H. Laby "Tables of Physical and Chemical Constants" 第31页