

高等学校教学参考书

固体的形变与断裂

张宏图 陈易之 编著

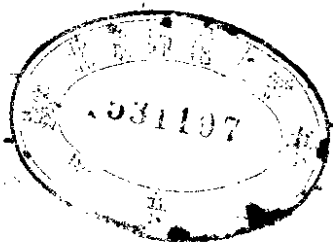
高等教育出版社

高等学校教学参考书

固体的形变与断裂

张宏图 陈易之 编著

下 1192/11



高等教育出版社

内 容 提 要

本书包括固体的形变与断裂方面的基础知识和一些专题介绍;从宏观理论和基本的实验事实出发,本书用宏观与微观相结合的观点,介绍有关微观理论和实验结果。全书共十二章,包括弹性理论基础、宏观强度理论概要、晶体的范性形变、固体内应力场的计算、椭球体夹杂、位错理论、加工硬化、合金强化、位错与裂纹、断裂力学基础、疲劳裂纹的扩展及蠕变等章。书中一、二、三、六及九—十二章为基本内容,四、五、七、八等四章带有专题性质,供深入学习参考。

本书可做固体物理、材料科学专业大学及研究生的教材或教学参考书,亦可供有关学科的科技工作人员阅读、参考。

高等学校教学参考书

固体的形变与断裂

张宏图 陈品之 编著

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

民族印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 14 字数 340 000

1989年5月第1版1989年10月第1次印刷

印数 0001—1 350

ISBN 7-04-000978-4/O·32

定价 3.70 元

出版者前言

为适应高等学校固体物理学及其各分支学科课程教学的需要，高等学校理科物理学教材编审委员会固体物理编审小组和高等教育出版社组织编写了一套固体物理学学科的教学参考书，其中包括固体物理学及其各分支学科的基础课程和实验课程用的教学参考书和一部《固体物理学大辞典》。这些书将由高等教育出版社陆续出版。

本书是这套丛书中的一本，由兰州大学张宏图教授等编著，由中国科学院金属研究所龙期威研究员审订。

序 言

固体的形变与断裂,即固体力学性质的两个主要方面,一直是固体物理学、冶金学和材料科学中的一个重要领域。编者从1957年起在兰州大学物理系和材料科学系,多年担任这方面课程的教学和科研工作,经过多次的教学实践,曾于1965年写成此书的初稿。但是此后的二十多年中,在这一领域又有许多新的发展和重要突破。因此,与原稿相比我们在编写中做了很多重要修改和补充,有些章节完全是新写的。

固体的宏观力学性能与其微观结构,特别是与晶体缺陷密切相关。我们采用宏观与微观相结合的观点,力图使读者能够对这个领域掌握比较全面的基础知识和具备一定的科研工作能力。夹杂理论近二十年来受到很大重视,并且因为它与位错理论有密切关系,本书用两章内容加以介绍。固体范性形变中最基本的,也是难度最大的问题是加工硬化,但这个问题迄今尚未彻底解决。在这方面我们也尽可能地对新近发展的一些理论加以介绍。还值得提出的是70年代以后发展起来的断裂力学,其重要性是人所共知的。因此,我们除了补充了“位错与裂纹”一章以外,还有一章是介绍断裂力学基础知识的。

本书的主要部分可做为理工科有关专业本科生教材,部分章节可做为研究生的参考书。在编写中我们尽量做到深入浅出,但是一些专题性章节,由于篇幅限制可能有叙述不够详尽之处。

限于编者的业务水平,书中难免出现一些不妥或错误之处,敬希广大读者指正。以便再版时修改。

编 者

1986年9月1日

符 号 表

b	位错的伯格斯矢量
bcc	体心立方结构
c_{ij}	弹性常数 (Voigt 表示法)
C_{ijkl}	弹性常数 (张量表示法)
COD	裂纹张开位移
d	晶粒尺寸
$\varrho(p)$	位错分布函数
e	真应变
E	杨氏模量
E_L	位错线单位长度的能量
F_i	作用于弹性奇点上的力
fcc	面心立方结构
$F(x, y)$	Airy 应力函数
g	滑移方向单位矢量
G (或 μ)	切变模量
G_c	临界应变能释放率
$G_{km}(x-x')$	格林函数
(hkl)	晶面的密勒指数
hcp	六角密排结构
K	体积弹性模量
K_{eff}	有效应力强度因子
K_I	应力集中因子
K_I, K_{II}, K_{III}	I, II, III 型裂纹的应力强度因子
K_{Ic}	临界应力强度因子 (断裂韧性)
l	Frank-Read 源的长度
n	硬化指数
n	滑移面法向单位矢量

n_i	面元的法向单位矢量
r_y	塑性区的特征尺寸
T	绝对温度
T	应力矢量
$T(l)$	位错的线能量或线张力
$[uvw]$	晶向的密勒指数
u_i	位移函数
u_i, j	总畸变
U_0	应变能密度
α_{in}	位错密度张量
β_{jt}	弹性畸变
β_{ji}^*	本征畸变或塑性畸变
γ	表面能
γ_{mn}	总应变
δ_0	临界裂纹张开位移
δ_{ij}	Kronecker 符号
$\delta(x-x')$	Dirac 的 δ -函数
ΔK	应力强度因子范围
ΔK_{th}	ΔK 的阈值
$\dot{\epsilon}$	应变速度
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	主应变
ϵ_{ij}	应变张量
ϵ_{ijk}	置换张量
ϵ_{mn}^*	本征应变张量
η_{ij}	应变张量的歧度
θ	硬化曲线的斜率
$\theta_I, \theta_{II}, \theta_{III}$	硬化曲线阶段 I, II, III 中的硬化系数
$\Theta = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$	体积应变
λ	拉梅 (Lamé) 常数
μ	单晶体的取向因子
$\bar{\mu}$	多晶体的平均取向因子
ν	泊松比

ρ	平均位错密度
ρ_p	主位错的平均密度
ρ_f	林位错的平均密度
σ_{ij}	应力张量
$\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$	体积应力分量
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力
σ_{ys}	屈服强度
$\sigma_{ys0.2}$	永久形变为 0.2% 的屈服强度
σ_{oct}	八面体法向应力
τ_0	单晶体临界切应力
τ_{oct}	八面体切应力
τ_{max}	最大切应力或理论切变强度
ω_f	旋转矢量

目 录

符号表	6
第一章 弹性理论基础	1
§ 1-1 应力张量和平衡方程	1
§ 1-2 应力主轴和 Mohr 圆	6
§ 1-3 应变和协调方程	11
§ 1-4 本构关系-胡克定律	18
§ 1-5 弹性力学问题的解法	23
§ 1-6 圆柱极坐标	27
§ 1-7 应力集中	31
§ 1-8 应变能	37
§ 1-9 弹性基本方程总结	38
第二章 宏观强度理论概要	42
§ 2-1 应力-应变曲线	42
§ 2-2 应力和应变张量的分解	47
§ 2-3 八面体切应力和切应变	49
§ 2-4 屈服判据	50
§ 2-5 复合应力试验	53
第三章 晶体的范性形变	55
§ 3-1 晶体范性形变的分类	55
§ 3-2 理论切变强度	57
§ 3-3 滑移要素和滑移的几何关系	60
§ 3-4 单晶体的拉伸试验	64
§ 3-5 临界切应力	71

§ 3-6	形变孪晶	76
§ 3-7	晶粒边界和多晶体的形变	81
§ 3-8	形变织构	87
第四章	固体内应力场的计算	96
§ 4-1	本征应变	96
§ 4-2	β_{ji}^* 或 e_{ji}^* 的傅里叶变换	100
§ 4-3	格林函数	106
§ 4-4	Eshelby 方法	108
§ 4-5	由 e_{ji}^* (或 β_{ji}^*) 的突变引起的应力突变	110
§ 4-6	立方和六方晶体的情况	111
附录:	静态格林函数 $G_{km}(x-x')$	112
第五章	椭球体夹杂	115
§ 5-1	各向同性介质中的椭球体夹杂	115
§ 5-2	等效夹杂法	122
§ 5-3	各向异性介质中的椭球体夹杂	126
§ 5-4	各向同性介质的情况	135
§ 5-5	扁平椭球体	137
第六章	位错理论	142
§ 6-1	位错概念的引入	142
§ 6-2	典型晶体中的位错	148
§ 6-3	位错的弹性应力场	154
§ 6-4	作用在位错及其它弹性奇点上的力	161
§ 6-4-1	弹性奇点和歧度	161
§ 6-4-2	力的定义	163
§ 6-4-3	弹性奇点与其它应力场的交互作用	165
§ 6-4-4	作用在异性夹杂上的力	166
§ 6-4-5	作用于点缺陷的力	168
§ 6-4-6	作用于位错线的力	171

§ 6-4-7 位错的线张力·····	174
§ 6-5 位错的增殖与交互作用·····	176
§ 6-6 位错墙和晶界的位错模型·····	185
§ 6-7 平面位错塞积·····	190
§ 6-8 位错与夹杂的关系·····	195
第七章 加工硬化 ·····	204
§ 7-1 前言·····	204
§ 7-2 硬化曲线·····	205
§ 7-3 滑移线观测结果·····	210
§ 7-4 位错分布·····	211
§ 7-5 流变应力·····	221
§ 7-6 加工硬化理论·····	225
§ 7-6-1 阶段 I·····	227
§ 7-6-2 阶段 II·····	234
§ 7-6-3 阶段 III·····	248
第八章 合金强化 ·····	255
§ 8-1 Peierls 力和弯折运动·····	255
§ 8-2 fcc 金属的固溶强化·····	262
§ 8-2-1 溶质原子与位错的交互作用·····	263
§ 8-2-2 固溶强化理论 ($T=0$)·····	266
§ 8-2-3 温度的影响·····	271
§ 8-3 bcc 金属的固溶强化·····	273
§ 8-3-1 溶质原子与螺型位错的交互作用·····	275
§ 8-3-2 固溶体中弯折的平均速度·····	279
§ 8-3-3 宏观屈服应力·····	286
§ 8-3-4 间隙溶质原子引起的强化·····	292
§ 8-4 沉淀强化·····	294
§ 8-4-1 位错与单个粒子列间的交互作用·····	295
§ 8-4-2 无规粒子列阵引起的强化·····	302

§ 8-4-3 应变硬化	304
第九章 位错与裂纹	313
§ 9-1 理论抗拉强度	313
§ 9-2 断裂的基本类型	316
§ 9-3 作为 Somigliana 位错的特例——物理位错与裂纹的弹性模型	320
§ 9-4 裂纹表示为平移位错的连续分布	322
§ 9-5 裂纹看作弹性常数为零的异性夹杂	328
§ 9-6 能量关系:作用在缺陷上的力	335
§ 9-7 材料的非线性效应:裂纹理论中的内聚带 (Barenblatt) 模型	338
第十章 断裂力学基础	348
§ 10-1 Griffith 裂纹理论	348
§ 10-2 裂纹的应力分析	353
§ 10-3 裂纹顶端的塑性区	357
§ 10-4 平面应变断裂韧度试验	362
§ 10-5 裂纹张开位移	366
§ 10-6 J 积分	370
第十一章 疲劳裂纹的扩展	375
§ 11-1 疲劳裂纹扩展速度	375
§ 11-2 裂纹在高 ΔK 和低 ΔK 的扩展行为	380
§ 11-3 疲劳断裂的宏观特征	382
§ 11-4 疲劳断裂的微观特征	384
§ 11-5 疲劳裂纹扩展的冶金因素	389
§ 11-6 疲劳裂纹扩展速率的理论分析	394
第十二章 蠕变	400
§ 12-1 回复和再结晶	400

§ 12-2	蠕变的实验规律·····	403
§ 12-3	蠕变机制·····	411
§ 12-4	蠕变试验数据的外推方法·····	414
主题索引 ·····		419

第一章 弹性理论基础

§1-1 应力张量和平衡方程

加在物体上的外力可分为两种类型：一种是直接作用在构成物体的所有质点上的体力，如重力、惯性力和热应力；另一种是直接作用在物体表面质点上的表面力或接触力，如压力。必须注意，体力也能产生接触力，如人体重力引起的作用于趾部的压力；表面力通过传递也可间接地作用到物体内部的质点上。

应力是由形变体内发生了相对位移的质点间的相互作用产生的遍及整个物体的一种力的状态。因为原子间的相互作用是短程力（作用距离为原子尺度），所以在宏观应力理论中，可以将物体的一部分与另一部分的相互作用看作是穿过（这两部分的）界面作用的接触力。这样，我们就可把应力作为物体内部紧相邻的两层之间的

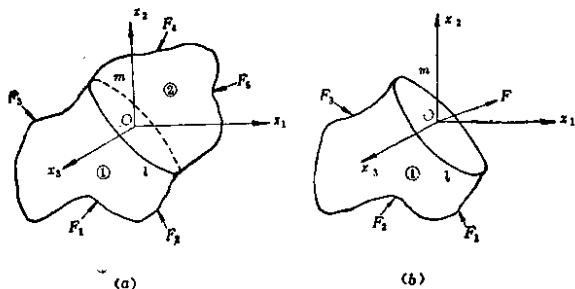


图 1.1 (a) 物体在外力作用下的平衡
(b) 作用在切割截面上的力

接触力的分布来处理。

设想沿 lm 截面,把物体切割成①和②两部分,然后把②拿走(图 1)。这时,为使①保持原先的平衡,必须在 lm 截面上施以一定的力的分布。它与物体在切割前,部分②通过截面 lm 对部分①的作用力等效。考虑到这个力的分布可能是不均匀的,我们在截面上的 O 点附近取一微小面元 ΔS ,并设作用在 ΔS 上的力为 ΔF ,则

$$\mathbf{T} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{F}}{\Delta S} \quad (1-1)$$

即代表截面 lm 上 O 点处的应力矢量。与流体静压强比较, $\mathbf{T}$ 具有两个特点: (1) 应力矢量与作用截面的法线方向 $\mathbf{n}$ 间可以有任何夹角,不像在流体内部,静压强总是反平行于 $\mathbf{n}$; (2) 作用截面(法向 $\mathbf{n}$)不同时, $\mathbf{T}$ 的量值和方向均可改变,而流体静压强却与作用截面的方向无关。由此可见固体内应力状态的描述要复杂得多。

为了完全描述物体内一点的应力状态,我们考虑一个包围该点的小立方体,在立方体的每一个面上分布着接触力(图 1.2)。将这些力分别除以它们所作用的面积,然后将它们分解为平行于坐标轴的分量,就可得到以下 9 个应力分量,它们完全地定义了由立方体包围的一点的应力状态:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (1-2)$$

这 9 个应力分量构成了应力张量 $\{\sigma_{ij}\}$ 。每个分量的第一个下标表示应力作用的截面,第二个下标表示该力的作用方向;即分量 σ_{ij} 表示一个作用在垂直于 x_i 轴的截面上,方向指向 x_j 的应力。据此,分量 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ 代表与作用截面垂直的法向应力,符号为正时表示拉应力,负号时表示压应力。分量 $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{21}, \sigma_{23}, \sigma_{31},$

σ_{32} 则代表平行于作用截面的切向应力, 它们的符号如下规定: 力的方向指向正(或负)轴向, 且作用截面的外法线也指向正(或负)轴向时, 切应力为正, 否则为负。这个规则也适用于法向应力。根据这一规定, 显然图 1.2 中标出的所有应力均为正值。

在上述 9 个应力分量中只有 6 个是独立的, 因为应力张量是一个二阶对称张量。由物体平衡时作用力矩的平衡, 很容易证明。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (1-3)$$

要知道一点的应力状态, 我们必须能确定作用在通过该点的

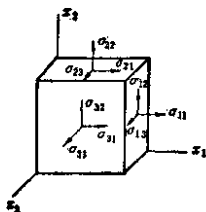


图 1.2 应力分量

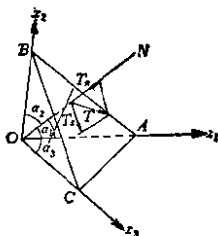


图 1.3 应力在任意截面上的分解

一个任意截面上的应力。考虑图 1.3 中的一个具有任意截面 ABC 的小四面体 $OABC$ (ABC 截面通过我们欲求应力的一点), 当四面体体积 $V \rightarrow 0$ 时, 作用于其上的体力 ($\propto V$) 可忽略, 而只需考虑与表面积 ($\propto V^{2/3}$) 成正比的接触力。设 ABC 的外法线与坐标轴的夹角为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, 相应的方向余弦为 n_1, n_2, n_3 。为方便起见, 取 ABC 的面积为 1, 则 OBC, OCA 和 OAB 的面积分别为 n_1, n_2, n_3 。令作用在 ABC 上的应力 T 沿坐标轴的分量为 T_1, T_2, T_3 。我们考虑四面体上的作用力沿 x_1 轴的平衡: 在 x_1 方向 OBC, OCA 和 OAB 所作用的力分别为 $\sigma_{11}n_1, \sigma_{21}n_2$ 和 $\sigma_{31}n_3$, 平衡时应有 $T_1 = \sigma_{11}n_1 + \sigma_{21}n_2 + \sigma_{31}n_3$ 。推广到任一坐标轴 x_i , 并利用式 (1-3), 我们有

$$T_i = \sigma_{ij} n_j, \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (1-4)$$

上式确定了对物体内任意一点所作用的应力 $\mathbf{T}$ 的分量。这里以及以下，我们采用 Einstein 的求和约定，即在一项中出现重复的指标时，应对 1, 2 和 3 求和。将 T_i 沿法向 ON 分解，即可得到作用在 ABC 面上的法向应力为 T_n ：

$$T_n = T_1 n_1 + T_2 n_2 + T_3 n_3 = T_i n_i \quad (1-5)$$

利用式(1-4)，上式可改写成

$$T_n = \sigma_{ij} n_i n_j \quad (1-6)$$

ABC 截面上的切应力 T_s 的值由下式给出：

$$T_s^2 = T^2 - T_n^2 = T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 - T_n^2 \quad (1-7)$$

作为一个例子，我们考虑受单轴拉伸的棒状试样的一个任意截面 ABC 上的应力，该面的法线与拉伸轴成 α 角(图 1.4)。这种情况下， $\sigma_{11} =$

σ ，其它的 $\sigma_{ij} = 0$ ； $\alpha_1 = \alpha$ ， $\alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha$ ， $\alpha_3 = \frac{\pi}{2}$ 。由式(1-5)——(1-7)，可得到

$$T_n = \sigma_{11} n_1^2 = \sigma \cos^2 \alpha \quad (1-8)$$

$$T_1 = \sigma_{11} n_1 = \sigma \cos \alpha; T_2 = T_3 = 0 \quad (1-9)$$

$$T = (T_1^2 + T_2^2 + T_3^2)^{\frac{1}{2}} = \sigma \cos \alpha \quad (1-10)$$

$$\begin{aligned} T_s &= (T^2 - T_n^2)^{\frac{1}{2}} = \sigma \cos \alpha (1 - \cos^2 \alpha)^{\frac{1}{2}} \\ &= \sigma \cos \alpha \sin \alpha \end{aligned} \quad (1-11)$$

由式(1-11)可知，当截面与拉伸轴成 45° 时，切应力达到最大值 $\sigma/2$ 。

现在我们利用静力学平衡条件来推导一组弹性理论的基本方程式。考虑一个体积为 V 、表面为 S 的连续均匀物体，在物体内部和表面上分别分布着体应力 f 和面应力 $\mathbf{T}$ 。沿 x_1 方向的平衡条

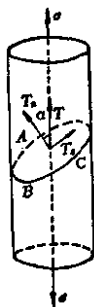


图 1.4 拉伸应力在任意截面上的分解