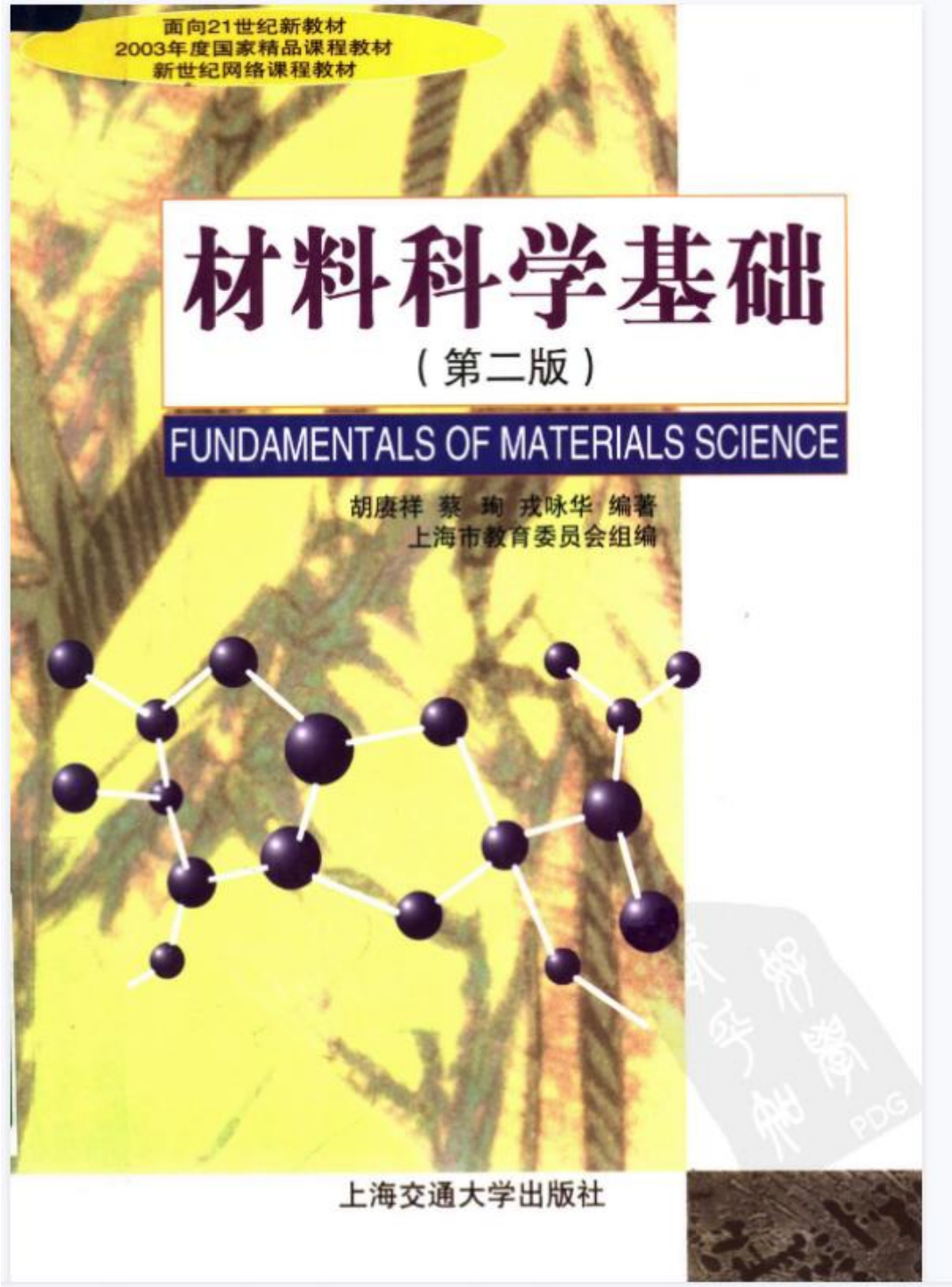
2025061-专业技术岗04-材料试讲教材-03



第 5 章　材料的形变和再结晶

材料在加工制备过程中或是制成零部件后的工作运行中都要受到外力的作用。材料受力后要发生变形，外力较小时产生弹性变形；外力较大时产生塑性变形，而当外力过大时就会发生断裂。图5.1为低碳钢（软钢）在单向拉伸时的应力-应变曲线。图中 σ_e，σ_s 和 σ_b 分别为它的弹性极限、屈服强度和抗拉强度，是工程上具有重要意义的强度指标。

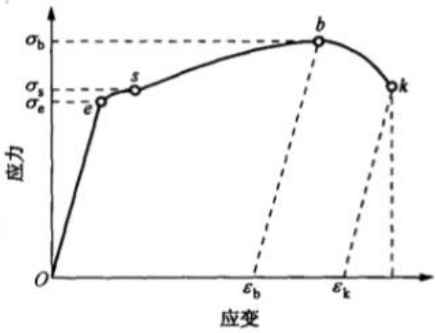


图 5.1　软钢在拉伸时的应力-应变曲线

材料经变形后，不仅其外形和尺寸发生变化，还会使其内部组织和有关性能发生变化，使之处于自由焓较高的状态。这种状态是不稳定的，经变形后的材料在重新加热时会发生回复和再结晶现象。因此，研究材料的变形规律及其微观机制，分析了解各种内外因素对变形的影响，以及研究讨论冷变形材料在回复、再结晶过程中组织、结构和性能的变化规律，具有十分重要的理论和实际意义。

5.1　弹性和黏弹性

从材料力学中得知，材料受力时总是先发生弹性变形，即弹性变形是塑性变形的先行阶段，而且在塑性变形中还伴随着一定的弹性变形。

5.1.1　弹性变形的本质

弹性变形是指外力去除后能够完全恢复的那部分变形，可从原子间结合力的角度来了解它的物理本质。

当无外力作用时，晶体内原子间的结合能和结合力可通过理论计算得出，它是原子间距离的函数，如图 5.2 所示。

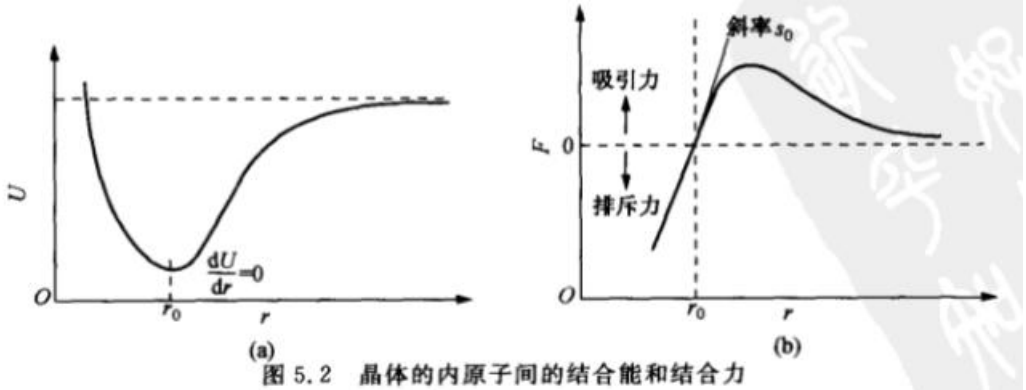


图 5.2　晶体的内原子间的结合能和结合力

（a）体系能量与原子间距的关系　（b）原子间作用力和距离的关系

原子处于平衡位置时，其原子间距为 r_0，势能 U 处于最低位置，相互作用力为零，这是最稳定的状态。当原子受力后将偏离其平衡位置，原子间距增大时将产生引力；原子间距减小时将产生斥力。这样，外力去除后，原子都会恢复其原来的平衡位置，所产生的变形便完全消失，这就是弹性变形。

5.1.2 弹性变形的特征和弹性模量

弹性变形的主要特征是：

(1) 理想的弹性变形是可逆变形，加载时变形，卸载时变形消失并恢复原状。

(2) 金属、陶瓷和部分高分子材料不论是加载或卸载时，只要在弹性变形范围内，其应力与应变之间都保持单值线性函数关系，即服从胡克(Hooke)定律：

$$\begin{aligned} &\text{在正应力下} \quad \sigma = E\varepsilon, \\ &\text{在切应力下} \quad \tau = G\gamma, \end{aligned} \tag{5.1}$$

式中，σ，τ 分别为正应力和切应力，ε，γ 分别为正应变和切应变，E，G 分别为弹性模量(杨氏模量)和切变模量。

弹性模量与切变弹性模量之间的关系为：

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \tag{5.2}$$

式中，ν 为材料泊松比，表示侧向收缩能力，在拉伸试验时系指材料横向收缩率与纵向伸长率的比值。一般金属材料的泊松比在 0.25～0.35 之间，高分子材料则相对较大些。

前已指出，晶体的特性之一是各向异性，各个方向的弹性模量不相同，因此，在三轴应力作用下各向异性弹性体的应力应变关系，即广义胡克定律可用矩阵形式表示为：

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix}, \tag{5.3}$$

式中，36 个 C_{ij} 为弹性系数，或称刚度系数。

上式还可改写为：

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix}, \tag{5.4}$$

式中，36 个 S_{ij} 为弹性顺序，或称柔度系数。

大多数情况下刚度矩阵与柔度矩阵互为逆矩阵：

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{S}^{-1}, \quad \boldsymbol{S} = \boldsymbol{C}^{-1} \quad 。$$

依据对称性要求，$C_{ij} = C_{ji}$，$S_{ij} = S_{ji}$，独立的刚度系数和柔度系数均减少为 21 个。由于晶

体存在对称性，独立的弹性系数还将进一步减少，对称性越高，系数越少。立方晶系的对称性最高，只有 3 个独立弹性系数；对于六方晶系为 5 个，正交晶系则为 9 个。

晶体受力的基本类型有拉、压和剪切，因此，除了 E 和 G 外，还有压缩模量或体弹性模量 K。它定义为压力 P 与体积变化率 $\frac{\Delta V}{V_0}$ 之比：$K=\frac{PV_0}{\Delta V}$，并且与 E、ν 之间有如下关系：

$$K=\frac{E}{3(1-2\nu)}。\tag{5.5}$$

弹性模量代表着使原子离开平衡位置的难易程度，是表征晶体中原子间结合力强弱的物理量。金刚石一类的共价键晶体由于其原子间结合力很大，故其弹性模量很高；金属和离子晶体的则相对较低；而分子键的固体如塑料、橡胶等的键合力更弱，故其弹性模量更低，通常比金属材料的低几个数量级。正因为弹性模量反映原子间的结合力，故它是组织结构不敏感参数，添加少量合金元素或进行各种加工、处理都不能对某种材料的弹性模量产生明显的影响。例如，高强度合金钢的抗拉强度可高出低碳钢的一个数量级，而各种钢的弹性模量却基本相同。但是，对晶体材料而言，其弹性模量是各向异性的。在单晶体中，不同晶向上的弹性模量差别很大，沿着原子最密排的晶向弹性模量最高，而沿着原子排列最疏的晶向弹性模量最低。多晶体因各晶粒任意取向，总体呈各向同性。表 5.1 和表 5.2 列出部分常用材料的弹性模量。

表 5.1　各种材料的弹性模量

材　料	$E/\times10^3$ MPa	$G/\times10^3$ MPa	泊　松　比　ν
铸铁	110	51	0.17
α-Fe，钢	207～215	82	0.26～0.33
Cu	110～125	44～46	0.35～0.36
Al	70～72	25～26	0.33～0.34
Ni	200～215	80	0.30～0.31
黄铜 70/30	100	37	—
Ti	107	—	—
W	360	130	0.35
Pb	16～18	5.5～6.2	0.40～0.44
金刚石	1 140	—	0.07
陶瓷	58	24	0.23
石英玻璃	76	23	0.17
火石玻璃	60	25	0.22
有机玻璃	4	1.5	0.35
硬橡胶	5	2.4	0.2
橡胶	0.1	0.03	0.42
烧结 Al_2O_3	325	—	0.16
尼龙	2.8	—	0.40
蚕丝	6.4		
聚苯乙烯	2.5		0.33
聚乙烯	0.2		0.38

表 5.2 某些金属单晶体和多晶体的弹性模量(室温)

金属类别	E/GPa			G/GPa		
	单晶		多晶体	单晶		多晶体
	最大值	最小值		最大值	最小值	
铝	76.1	63.7	70.3	28.4	24.5	26.1
铜	191.1	66.7	129.8	75.4	30.6	48.3
金	116.7	42.9	78.0	42.0	18.8	27.0
银	115.1	43.0	82.7	43.7	19.3	30.3
铅	38.6	13.4	18.0	14.4	4.9	6.18
铁	272.7	125.0	211.4	115.8	59.9	81.6
钨	384.6	384.6	411.0	151.4	151.4	160.6
镁	50.6	42.9	44.7	18.2	16.7	17.3
锌	123.5	34.9	100.7	48.7	27.3	39.4
钛	—	—	115.7	—	—	43.8
铍	—	—	260.0	—	—	—
镍	—	—	199.5	—	—	76.0

工程上，弹性模量是材料刚度的度量。在外力相同的情况下，材料的 E 越大，刚度越大，材料发生的弹性变形量就越小，如钢的 E 为铝的 3 倍，因此钢的弹性变形只是铝的 1/3。

(3) 材料的最大弹性变形量随材料的不同而异。多数金属材料仅在低于比例极限 σ_p 的应力范围内符合胡克定律，弹性变形量一般不超过 0.5%；而橡胶类高分子材料的高弹形变量则可高达 1000%，但这种弹性变形是非线性的。

5.1.3 弹性的不完整性

上面讨论的弹性变形，通常只考虑应力和应变的关系，而不甚考虑时间的影响，即把物体看作理想弹性体来处理。但是，多数工程上应用的材料为多晶体甚至为非晶态，或者是两者皆有的物质，其内部存在各种类型的缺陷，在弹性变形时，可能出现加载线与卸载线不重合、应变的发展跟不上应力的变化等有别于理想弹性变形特点的现象，称之为弹性的不完整性。

弹性不完整性的现象包括包申格效应、弹性后效、弹性滞后和循环韧性等。

1. 包申格效应

材料经预先加载产生少量塑性变形(小于 4%)，而后同向加载则 σ_e 升高，反向加载则 σ_e 下降。此现象称之为包申格效应。它是多晶体金属材料的普遍现象。

包申格效应对于承受应变疲劳的工件是很重要的，因为在应变疲劳中，每一周期都产生塑性变形，在反向加载时，σ_e 下降，显示出循环软化现象。

2. 弹性后效

一些实际晶体，在加载或卸载时，应变不是瞬时达到其平衡值，而是通过一种弛豫过程来完成其变化的。这种在弹性极限 σ_e 范围内，应变滞后于外加应力，并和时间有关的现象称为

弹性后效或滞弹性。

图 5.3 为弹性后效示意图。图中 Oa 为弹性应变，是瞬时产生的；$a'b$ 是在应力作用下逐渐产生的弹性应变，称为滞弹性应变；$bc = Oa$，是在应力去除时瞬间消失的弹性应变；$c'd = a'b$，是在去除应力后随着时间的延长逐渐消失的滞弹性应变。

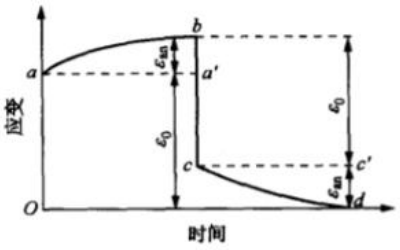


图 5.3 恒应力下的应变弛豫

弹性后效速率与材料成分、组织有关，也与试验条件有关。组织越不均匀，温度升高、切应力越大，弹性后效也越明显。

3. 弹性滞后

由于应变落后于应力，在 σ-ε 曲线上使加载线与卸载线不重合而形成一封闭回线，称之为弹性滞后，如图 5.4 所示。

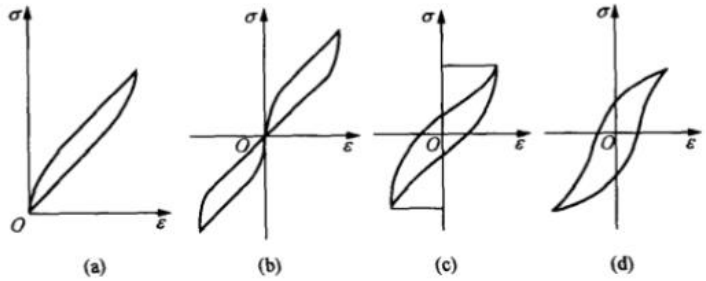


图 5.4 弹性滞后(环)与循环韧性

(a) 单向加载弹性滞后(环) (b) 交变加载(加载速度慢)弹性滞后

(c) 交变加载(加载速度快)弹性滞后 (d) 交变加载塑性滞后(环)

弹性滞后，表明加载时消耗于材料的变形功大于卸载时材料恢复所释放的变形功，多余的部分被材料内部所消耗，称之为内耗，其大小即用弹性滞后环的面积度量。有关内耗问题将在以后的“物理性能”课程中详谈。

5.1.4 黏弹性

变形形式除了弹性变形、塑性变形外还有一种黏性流动。所谓黏性流动是指非晶态固体和液体在很小外力作用下，会发生没有确定形状的流变，并且在外力去除后，形变不能回复。

纯黏性流动服从牛顿黏性流动定律：

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \tag{5.6}$$

式中，σ 为应力，$\frac{d\varepsilon}{dt}$ 为应变速率，η 称为黏度系数，它反映了流体的内摩擦力，即流体流动的难易程度，其单位为 Pa·s。

一些非晶体，有时甚至多晶体，在比较小的应力时可以同时表现出弹性和黏性，这就是黏弹性现象。黏弹性变形既与时间有关，又具有可回复的弹性变形性质，即具有弹性和黏性变形

两方面的特征，而且外界条件（如温度）对材料（特别是高聚物）的黏弹性行为有显著的影响。

黏弹性是高分子材料的重要力学特性之一，故它也常被称为黏弹性材料。这主要是与其分子链结构密切相关。当高分子材料受到外力作用时，不仅分子内的键角和键长，即原子间的距离要相应发生变化，而且顺式结构链段之间也顺着外力方向舒展开；另一方面，分子链之间还产生相对滑动，产生黏性变形。当外力较小时，前者是可逆的弹性变形，而后者是不可逆形变。显然，这里时间因素必须加以考虑。与此有关的将在 5.6 和 9.3 节进一步分析讨论。

为了研究黏弹性变形的表象规律，可以弹簧表示弹性变形部分，黏壶表示黏性变形部分，以两者的不同组合构成不同的模型。图 5.5 展示了其中两种最典型的模型：麦克斯韦（Maxwell）模型和瓦依特（Voigt）模型。前者是串联型的，而后者是并联型的。这里，弹簧元件的变形同时间无关，应力、应变符合胡克定律，当应力去除后应变即回复为零。黏壶由装有黏性流体的气缸和活塞组成。活塞的运动是黏性流动的结果，因此，符合牛顿黏性流动定律。

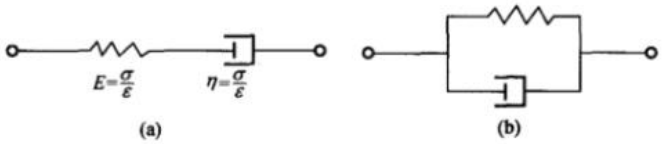


图 5.5　黏弹性体变形模型

(a) Maxwell 模型　(b) Voigt 模型

Maxwell 模型对解释应力松弛特别有用。经计算可得出应力随时间变化关系式：

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{Et}{\eta}\right) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right), \tag{5.7}$$

式中，$\tau' = \frac{\eta}{E}$，称为松弛常数。

Voigt 模型可用来描述蠕变回复、弹性后效和弹性记忆等过程。经计算，可得到

$$\sigma(t) = E\varepsilon + \eta\frac{d\varepsilon}{dt}。 \tag{5.8}$$

黏弹性变形的特点是应变落后于应力。当加上周期应力时，应力-应变曲线就成一回线，所包含的面积即为应力循环一周所损耗的能量，即内耗。其图示类似于图 5.4 滞弹性引起的应力-应变回线。