

# 第一篇 轮机工程材料

## 绪 论

### 一、工程材料的分类

材料是人类生活及生产的物质基础，材料的品种、数量和质量标志着一个国家现代化的程度。现代材料的种类繁多，我们只介绍机械工程中使用的材料。工程材料按化学组成为：

#### 1.金属材料

金属材料是机械工业中应用最广、最重要的材料，分以下两大类：

(1)黑色金属 以铁或以铁为主而形成的合金，主要是钢和铸铁，在各种机器设备所用材料中占 90% 以上。

(2)有色金属 除黑色金属以外的其他金属及其合金，如铜及其铜合金，铝及其铝合金等。

#### 2.高分子材料

高分子材料是以有机合成高分子化合物为主要组成成分的材料（又称高聚物）。

按高分子材料的性能和用途可分为塑料、橡胶、纤维、胶粘剂及涂料等。

高分子材料原料来源丰富，成型加工容易、生产率高，而且具有高的比强度、高弹性，良好的电、热绝缘性及耐腐蚀、耐磨、吸振性等，因而在工程上获得广泛应用。

#### 3.陶瓷材料

陶瓷是以天然硅酸盐或人工合成的化合物为原料，经高温处理工艺所合成的无机非金属材料。一般包括无机玻璃（硅酸盐玻璃）、玻璃陶瓷（或称微晶玻璃）和陶瓷三大类。工程上应用最多的是陶瓷。

#### 4.复合材料

复合材料是由两种以上在物理和化学上不同的物质组合起来而得到的一种多相固体材料。复合材料集中各类材料的优异性能于一体，从而能充分发挥各类材料的潜力，是一种很有发展前途的材料。

### 二、轮机工程材料的内容

轮机工程材料是船舶轮机管理专业的技术基础课程。其目的是使学生获得有关机械零件常用的金属材料和非金属材料的基本理论知识，为使用维护船舶设备提供正确选材和合理用材的基本原则、方法和知识。

轮机工程材料内容包括：

1. 金属材料的基础理论 即材料的性能、结构与结晶、二元合金与铁碳合金相图、金属塑性变形与再结晶、钢的热处理原理与工艺。
2. 船舶工程材料 即船用碳钢、合金钢、铸铁、有色金属及合金和船用非金属材料。
3. 船舶主要零部件的选材与热处理。

## 第一章 金属的性能

金属的性能包括使用性能和工艺性能。金属的使用性能是指在使用过程中表现出来的性能，包括力学性能、物理性能和化学性能；工艺性能是指在制造过程中金属的适应性。

### 第一节 金属的力学性能

金属机械零件或结构件工作过程中承受着载荷的作用。载荷的作用性质多种多样，可以是大小不变或变动缓慢的静载荷；可以是突然增加的冲击性载荷；也可以是大小与方向周期性变化的交变载荷。外力的作用性质不同，金属所表现出来的抗失效能力的特点也不同。金属在外力作用下 当外力达到一定程度时 金属就会产生弹性变形 进而产生塑性变形 最终发生断裂现象。金属的力学性能就是指金属在各种外力作用下抵抗变形和断裂的能力，又称金属的机械性能。

金属的力学性能指标是通过各种试验方法测定出来的。常用的方法有：拉伸试验、硬度试验、冲击试验和疲劳试验等。根据使用温度的不同，分室温和高温力学性能指标。

#### 一、室温下金属的力学性能

室温下的力学性能指标包括刚度、强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度。其中刚度、强度和塑性是通过拉伸试验获得的。

按照国标 GB 396—86 制作截面为圆形的标准试样， $d_0$  为试样截面原始直径 (mm)， $L_0$  为试样原始标距长度 (mm)。试样在拉伸机上缓慢加力拉伸，随着轴向拉力 ( $P$ ) 的增加，试样的伸长量 ( $\Delta L$ ) 不断增加，直至试样被拉断为止。绘制出应力 ( $\sigma = P/F_0$ ) 和应变 ( $\epsilon = \Delta L/L_0$ ) 的关系曲线 ( $F_0$  为试样原始截面积) 图 1-1-1 为低碳钢的应力—应变曲线。

从图 1-1-1 可以看出 低碳钢试样在拉伸试验中 从受力开始到拉断为止 它的变化分为以下几个阶段：

弹性变形阶段 (  $oe$  直线段 ) ——此范围内应力与应变成正比关系，去掉外力后，试样完全恢复原状。

塑性变形阶段 (  $sz$  段 ) ——根据塑性变形特点不同分为三个阶段：屈服阶段 (  $sc$  ) 在这个阶段 即使外力不再增加 试样也会继续变形 所以  $sc$  呈水平趋势，这种现象称为屈服现象， $s$  点称为屈服点。去掉外力后，试样将出现残余变形 ( $\Delta L$ )；均匀塑性变形阶段 (  $cb$  ) 在此阶段内，欲使试件继续伸长则必须增加外力 所以  $cb$  呈上升趋势；不均匀塑性变形阶段 (  $bx$  ) 当外力达到  $b$  点后 变形集中在局部区域进行 产生“颈缩”现象。由于颈缩处截面积急剧减小 使变形

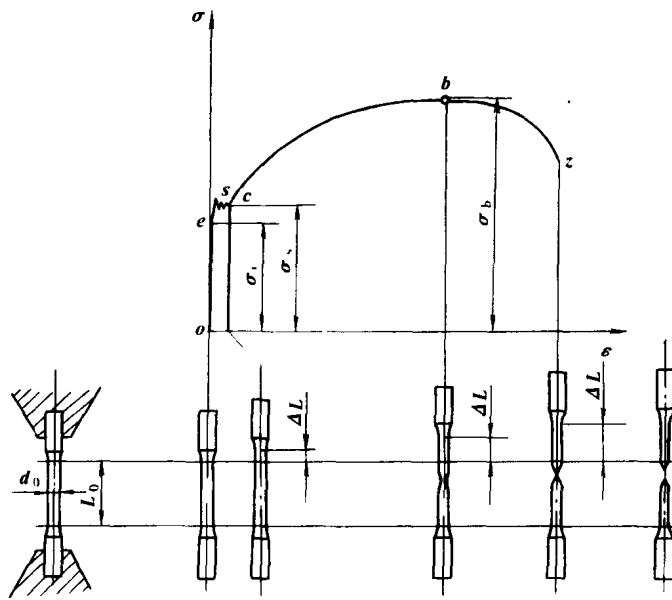


图 1-1-1 低碳钢拉伸应力—应变 (σ-ε) 曲线

所需外力减小 所以  $bz$  呈下降趋势。

断裂—— $z$  点为断裂点。

根据应力—应变 (σ-ε) 曲线可以得到金属材料的下列力学性能指标。

### 1. 刚度

刚度是金属材料在受力时抵抗弹性变形的能力。金属在弹性变形范围内，应力与应变成正比，通常将此范围内的应力与应变之比  $E = \sigma / \epsilon$  称为弹性模量，用它作为衡量材料刚度的指标。弹性模量  $E$  越大，刚度越大，表明在一定的应力作用下产生的弹性变形越小。一般机械零件大多在弹性状态下工作，要求零件具有一定的刚度。例如，柴油机的机座和机体直接或间接支承着曲轴、连杆、活塞等运动件及其他零件，因此要求机座和机体必须有足够的刚度以保证运动件之间正确的相对位置和各自的运动状态。

弹性模量  $E$  的大小同材料原子间作用力的强弱有直接关系，而对材料内部由晶体结构变化反映出显微组织的变化则不敏感，热处理与合金化等对它的影响很小。

### 2. 强度

在外力作用下，材料抵抗塑性变形和断裂的能力称为强度。零件承受拉力时的最重要的强度指标是屈服强度和抗拉强度。

#### (1) 屈服强度

屈服强度是材料抵抗微量塑性变形的能力，也就是材料刚开始产生塑性变形时的应力，又称屈服极限 用  $\sigma_s$  表示。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \text{ N/mm}^2$$

式中： $P_s$ ——材料屈服时的载荷，N；

$F_0$ ——试件的原始截面积， $\text{mm}^2$ 。

但并不是所有的材料都有明显的屈服现象。工程上对不产生明显屈服现象的材料，规定将产生 0.2% 残余伸长量的应力值作为屈服强度，又称名义屈服强度或条件屈服强度，用  $\sigma_{0.2}$

表示。

大多数零件都以在工作中不产生塑性变形为原则，故以屈服强度作为设计计算时的主要依据。 $\sigma_s$ 是工程技术中最重要的力学性能指标。

### (2) 抗拉强度

抗拉强度又称强度极限，是金属材料抵抗断裂的能力，也就是材料从开始受力到断裂为止所能承受的最大应力值，用 $\sigma_b$ 表示。

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \text{ N/mm}^2$$

式中： $P_b$ ——试样在断裂前所能承受的最大拉力，N。

工程上常用屈强比 $\sigma_s/\sigma_b$ 作为重要的参数。材料的屈强比越小，表示材料的 $\sigma_s$ 越小，零件的储备强度越大，可靠性越大，可免于因突然超载而引起的破断。

## 3. 塑性

在外力作用下，材料产生塑性变形而不断裂的能力称为塑性。衡量金属塑性的指标有延伸率和断面收缩率。

### (1) 伸长率

伸长率表示拉伸试验时，试样拉断后标距增长量与原标距长度之比，用 $\delta$ 表示，即

$$\delta = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中： $L_0$ ——试样原标距长度，mm；

$L$ ——试样拉断后标距长度，mm。

伸长率 $\delta$ 与试样的标距长度 $L_0$ 有关，对同一材料而言，用短试样测得的伸长率比长试样测得的伸长率要稍大一些。 $\delta_5$ 和 $\delta_{10}$ 分别表示试样的标距长度为其直径的5倍和10倍时的伸长率，使用时必须注明。 $\delta_{10}$ 通常简写为 $\delta$ ，一般情况下 $\delta_5 = (1.2 \sim 1.5)\delta_{10}$ 。

根据材料伸长率的大小，工程上又将材料分为塑性材料和脆性材料两大类。塑性材料的伸长率大于5%，脆性材料的伸长率小于5%。

### (2) 断面收缩率

断面收缩率表示拉伸试验时，试样拉断后截面积的缩减量与试样原始截面积之比，用 $\Psi$ 表示，即

$$\Psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100\%$$

式中： $F_0$ ——试样原始截面积， $\text{mm}^2$ ；

$F$ ——试样拉断处的截面积， $\text{mm}^2$ 。

$\delta$ 和 $\Psi$ 越大，表示金属材料的塑性越好。具有良好塑性的材料，可使某些冷加工成型工艺如冷拉、冷弯等顺利进行。

## 4. 硬度

硬度是金属表面抵抗局部塑性变形（压陷、划痕、摩擦、切割等）的能力，是衡量金属软硬程度的指标。

测定金属材料硬度的方法比较简单。通常采用压入法测定，即用一定载荷把一定形状的压头压到金属表面上，通过测定压痕面积或深度来确定硬度值。压痕越大或越深，说明材料的硬度越低。常用的硬度测定方法有如下几种：

### (1)布氏硬度

用一定大小的载荷  $P$  把一定直径 (约  $10\text{mm}^2$ ) 的淬火钢球或硬质合金球压入被测金属表面,保持一定时间后卸去载荷,用单位压痕面积上的压力作为硬度值,用 HB 表示。

$$HB = \frac{P}{F} \quad \text{N/mm}^2$$

式中:  $F$  为压痕面积,  $\text{mm}^2$ 。

图 1-1-2 为布氏硬度试验示意图。

国标 GB 231—84 规定 布氏硬度值  $< 450$  时 采用淬火钢球压头 用 HBS 表示 硬度值  $\geq 450$  时,采用硬质合金球压头,用 HBW 表示 (但硬度值不超过 650)。HB 值越大表明材料越硬。布氏硬度多应用于测定普通碳钢、铸铁、有色金属及其合金、各种退火及调质钢材等。布氏硬度测出的硬度值较准确,但由于压痕较大,不适于直接在成品上检验。

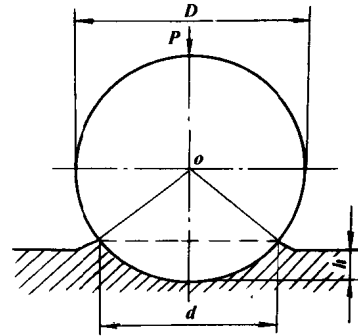


图 1-1-2 布氏硬度试验原理示意图

### (2)洛氏硬度

洛氏硬度试验法用测量压痕的深度来确定硬度值。根据所用压头及载荷的不同 分别用 HRA、HRB、HRC 表示。其适用范围如表 1-1-1。

常用洛氏硬度的试验条件和应用范围表 1-1-1

硬度符号	压头类型	总载荷(N)	硬度值测量范围	应用范围
HRA	120°金刚石圆锥体	588.4	60 ~ 85	极硬材料,如硬质合金
HRB	φ1.588mm 淬火钢球	980.7	25 ~ 100	较软材料,如退火钢、有色金属等
HRC	120°金刚石圆锥体	1471.0	20 ~ 67	较硬材料,如淬火钢、调质钢等

洛氏硬度测量方法是:在初始试验力  $P_0$  及总试验力  $P_0 + P_1$  先后作用下,将压头压入试样表面,经保持规定时间后卸除主试验力  $P_1$ ,用保持初始试验力的条件下测量的残余压痕深度增量来计算硬度。图 1-1-3 为洛氏硬度试验示意图。依图示,洛氏硬度值 HR 计算公式如下:

$$HR = K - e$$

式中:  $K$ ——常数 用金刚石圆锥体压头时  $K$  为 100 用钢球压头时  $K$  为 130;

$e$ ——残余压痕深度增量 单位为  $0.002 \text{ mm}$ 。

洛氏硬度测定法操作迅速简便,压痕较小,可测定各种材料的硬度。测量结果直接由表的读数显示。在三种洛氏硬度指标中以 HRC 应用最为普遍,但不宜测定硬而脆的薄层,如渗碳层、氮化层。洛氏硬度试验法 由于压痕小 可直接测量成品或较薄的工件 但只能代表材料或试样的局部硬度,所以当材料化学成分或组织不均匀时,容易产生误差。

### (3)维氏硬度

维氏硬度试验原理基本与布氏硬度相同,也是根据单位面积压痕表面上所承受的试验力来测定硬度值。不同的是:维氏硬度试验采用夹角为  $136^\circ$  的金刚石四棱锥体做压头。维氏硬度用符号 HV 表示。

$$HV = 0.1891 \frac{P}{d^2}$$

式中:  $P$ ——试验力, N;

$d$ ——压痕两对角线长度算术平均值, mm。

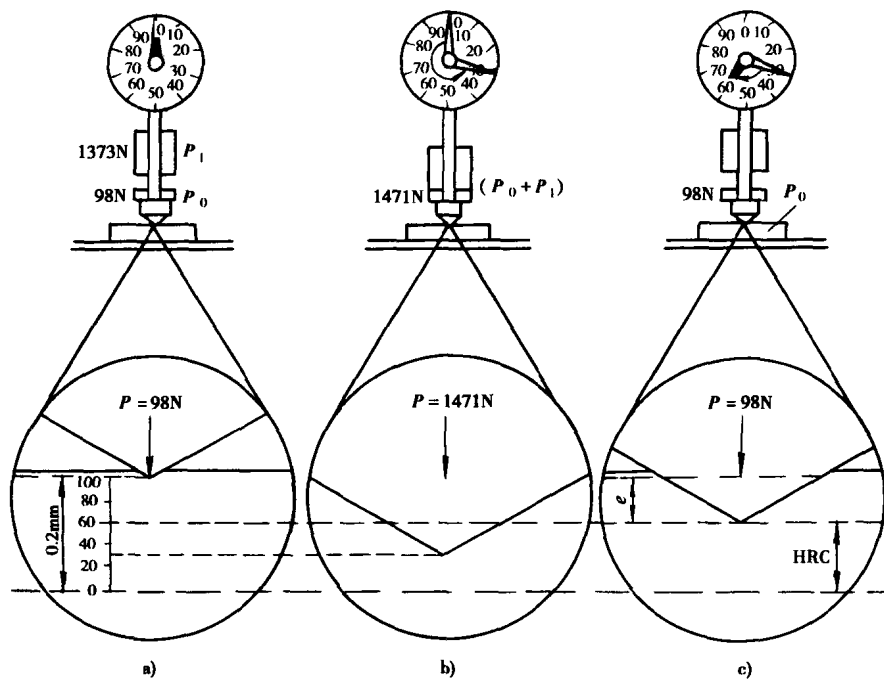


图 1-1-3 用金刚石圆锥体试验示意图

a)加初始试验力  $P_0$ ;b)加总试验力  $(P_0 + P_1)$ ;c)卸除主试验力  $P_1$

图 1-1-4 为维氏硬度试验示意图。

维氏硬度具有从最软到极硬的统一硬度标准，是一种较精确的硬度测定方法。适用于测定很薄的工件或工件经化学热处理后渗层表面的硬度。缺点是操作较麻烦，不如洛氏硬度法直接和迅速。

各种硬度值由于测量条件不同，相互之间没有理论的换算关系。但根据试验结果，可获得粗略换算公式如下当硬度 HBS 或 HBW 在 200 ~ 600 范围内， $HRC \approx 1/10HBS$  或 HBW；当硬度 HBS 小于 450 时， $HBS \approx HV$ 。

上述刚度、强度、塑性和硬度等力学性能指标，是在静载荷作用下测定的。此外，还有

动载荷作用下的测定指标，动载荷是明显地随时间而改变的载荷，包括冲击载荷和交变载荷。

### 5. 冲击韧性

冲击韧性是材料在冲击载荷作用下抵抗破坏（断裂）的能力。材料的冲击韧性值长期以来都在一次摆锤冲击试验机上进行测定，如图 1-1-5 所示。把冲断试样时断口单位面积所消耗的功作为冲击韧性值用  $\alpha_k$  表示。

$$\alpha_k = \frac{A_k}{F} \quad \text{J/cm}^2$$

式中： $A_k$ ——冲断试样时所消耗的冲击功，J；

$F$ ——试样折断处的截面积， $\text{cm}^2$ 。

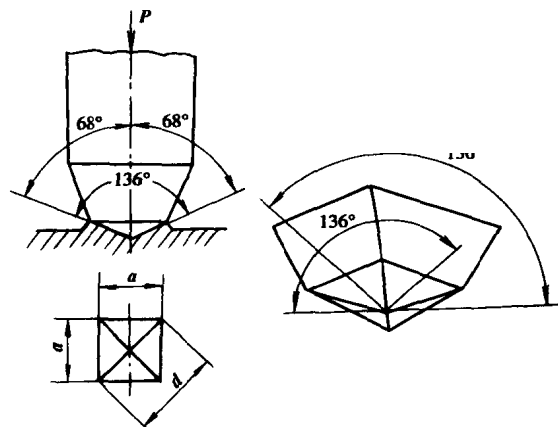


图 1-1-4 维氏硬度试验原理示意图

$\alpha_k$  越大 材料的韧性越好。

某些材料的  $\alpha_k$  值与温度有关，随着工作温度的降低， $\alpha_k$  值会显著降低，例如低碳钢在  $-40^\circ\text{C}$  以上  $\alpha_k$  较高 而在  $-40$  以下时  $\alpha_k$  便明显降低，这种现象称为脆性转变。使  $\alpha_k$  明显降低的温度，称为脆性转变温度。在脆性转变温度以下，材料由韧性状态变成脆性状态，材料的脆性转变温度越低，说明低温冲击韧性越好。因此，对在严寒地区工作的构件和零件，应具有较好的低温冲击韧性。

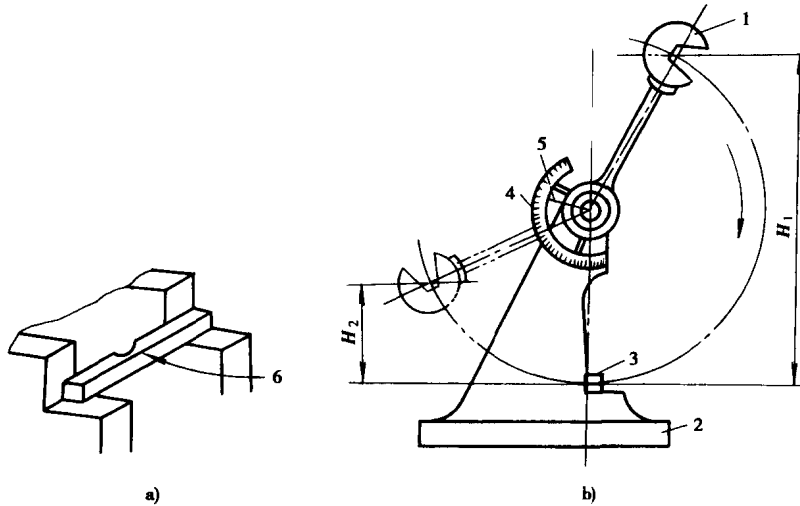


图 1-1-5 冲击试验示意图

1-摆锤;2-机架;3-试样;4-刻度盘;5-指针;6-冲击方向

在实际使用中，绝大多数的零件是在小能量多次重复冲击载荷下工作的。大量试验研究和生产实践证明，材料在多次冲击下的破坏过程根本不同于一次冲击的破坏过程。所以，多冲抗力指标不能用  $\alpha_k$  值表示。多次冲击虽属疲劳型，但它的加载是以很大速度作用于机件上的，因此也不能用疲劳强度反映。事实上多冲抗力是一个取决于材料强度和塑性的综合力学性能。对通常承受冲击载荷的机件，其多冲抗力主要取决于强度。

## 6. 疲劳强度

在静载荷作用下，零件所受到的外力小于  $\sigma_b$  时，材料是不会断裂的。但当零件承受大小与方向周期性变化的交变载荷时（例如柴油机曲轴在旋转时，整个曲轴承受交替变化的弯曲应力和扭转应力）金属会在小于  $\sigma_b$  甚至小于  $\sigma_s$  的情况下发生突然断裂，这种现象称为金属的疲劳，由此而产生的断裂称为疲劳断裂。在机件的断裂事故中，80%~90%以上为疲劳断裂。疲劳断裂与在静载荷作用下的断裂不同，不论是脆性材料还是塑性材料，疲劳断裂都是突然发生的 断裂前没有明显的塑性变形 因此具有很大的危险性 常常造成严重的后果。

疲劳断口的特征 如图 1-1-6 所示 可以分成三个部分 疲劳核心区——疲劳源 疲劳裂纹扩展区——疲劳弧线 最终瞬时断裂区——呈脆断特征。

疲劳强度是工程上用来评定材料承受交变载荷能力的指标。它是由疲劳试验测出的，试样在不同的交变应力下试验 测定试样发生疲劳断裂时的应力及交变次数（循环次数）绘出金属所受交变应力  $\sigma$  与其循环次数  $N$  的关系曲线（疲劳曲线）如图 1-1-7 所示，疲劳曲线表明，金属承受的交变应力越大，则断裂时应力循环的次数  $N$  就越少 反之 则  $N$  越多。

从图 1-1-7 可以看出，当应力低于一定值时，试样可以经受无限次交变载荷循环而不破坏，

理论上将此应力值规定为疲劳强度或疲劳极限。在对称循环应力条件下的疲劳强度，用  $\sigma_r$  表示 单位为  $N/mm^2$ 。

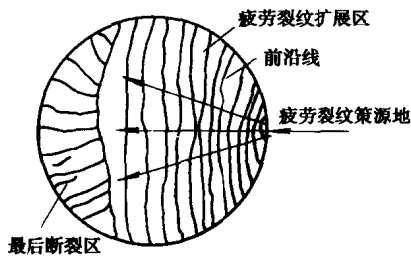


图 1-1-6 疲劳断裂断口的一般特征

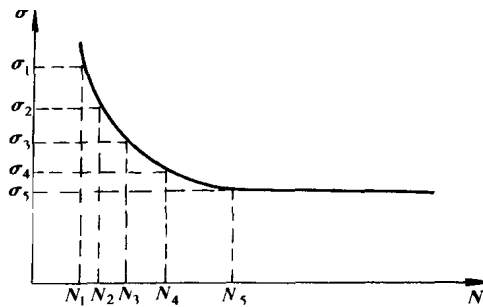


图 1-1-7 疲劳曲线示意图

一般规定 钢铁材料以经受  $10^7$  次循环应力作用而不发生破坏的最大应力作为疲劳强度；有色金属以经受  $10^8$  次循环应力作用而不发生破坏的最大应力作为疲劳强度。

影响零件疲劳强度的因素很多，零件材料本身的强度较高，则其疲劳强度也就较高；与零件的工作条件有关，工作温度升高或零件在腐蚀性介质中工作时，则疲劳强度会降低；与零件表面的粗糙度有关 表面越光洁 则疲劳强度也越高。

## 二、高温下金属的力学性能

很多零件是在高温条件下长期工作的，例如，蒸汽锅炉中的高温、高压管道，柴油机的进排气阀 废气涡轮增压器的喷嘴环、涡轮叶片 以及高速切削刀具等。对于这类零件 常温下的力学性能是不能满足高温下的工作要求的。表 1-1-2 是 20 号钢在室温和高温下的抗拉强度的比较。

20 号钢在不同温度和时间  $T$  工作时的强度比较

表 1-1-2

温度/时间	室温/短时	室温/长时	450℃/短时	450℃/300h	450℃/1000h
$\sigma_b(N/mm^2)$	420	420	330	230	120

表 1-1-2 说明金属在常温下的静载强度与载荷持续时间关系不大，但在高温下却与载荷的持续时间关系很大，随着载荷作用时间的延长，强度便不断降低。金属零件长时间在高温和一定应力作用下 即使应力小于  $\sigma_s$ ，也会缓慢地产生塑性变形，这种现象称为蠕变。温度越高蠕变越严重，蠕变发展到最后也能导致断裂，造成设备的重大事故。当材料温度超过  $0.3T_{熔}$  以热力学温度表示熔点 时 蠕变才显著。

金属在高温下的力学性能指标，主要有热强度和热硬性。

### 1. 热强度

热强度是应力、应变、温度和时间综合作用的结果。热强度指标有蠕变极限和持久强度。

#### (1) 蠕变极限

蠕变极限是金属材料长期在高温和载荷作用下抵抗塑性变形的能力。蠕变极限与  $\sigma_{0.2}$  有些相似 用  $\sigma_{\delta,t}^T$  表示 单位为  $N/mm^2$ 。意思是在一定的温度  $T(^\circ C)$  下和一定的时间  $t(h)$  内 产生一定塑性变形量  $\delta(\%)$  时所能承受的最大应力。例如，国内外多用 1Cr13 制作汽轮机叶片，该材料的蠕变极限  $\sigma_{0.1 \times 10^{-4}}^{500} = 57 N/mm^2$  意即零件在  $500^\circ C$  温度下工作  $10\ 000h$  产生  $0.1\%$  变形量时的最大应力值为  $57N/mm^2$ 。

(2)持久强度

持久强度是金属长期在高温和载荷作用下抵抗断裂的能力。持久强度与  $\sigma_b$  有些相似 用  $\sigma_t^T$  表示 单位为  $N/mm^2$ 。意思是在一定的温度  $T(^\circ C)$  下 工作一定的时间  $t(h)$  后产生断裂时的应力。例如 1Cr13 的持久强度  $\sigma_{10}^{500} = 190N/mm^2$  意即在  $500^\circ C$  温度下工作  $100\ 000h$  发生断裂时的应力为  $190N/mm^2$ 。

2.热硬性(高温硬度)

热硬性又称红硬性，是金属材料在高温下仍具有较高硬度的性能。它是高温轴承、高速切削刀具、热作模具材料和某些机器零件材料的重要指标。例如机械加工中，对于切削刀具不仅要求在室温下有较高的硬度，而且在高速切削温度升高，刀具刃部达  $600^\circ C$  或更高时 仍能保持高的硬度。将经过热处理的刀具在不同温度重复加热四次，每次  $1h$ ，以能保持材料具有 HRC60 硬度时的温度作为热硬性的评定标准。

力学性能的基本指标及其含义小结于表 1-1-3。

常用的机械性能指标及含义

表 1-1-3

机械性能	性能指标			载荷性质	含 义	
	符号	名称	单位			
常 温 条 件	刚度	$E$	弹性模量	MPa ( $N/mm^2$ )	材料的应力与应变的比值	
	强度	$\sigma_s$	屈服极限		材料刚开始产生塑性变形时的应力	
		$\sigma_b$	抗拉强度		材料从开始受力到断裂为止所能承受的最大应力	
		$\sigma_{0.2}$	名义屈服极限		规定产生 0.2% 残余伸长量时的应力	
	塑性	$\delta$	延伸率		%	标距的伸长量与原标距的百分比
		$\Psi$	断面收缩率			颈缩处横截面积的最大减缩量与原横截面积的百分比
	硬度	HBS(W) HRA HRB HRC HV	布氏硬度值 洛氏 A 标硬度值 洛氏 B 标硬度值 洛氏 C 标硬度值 维氏硬度值			球形压痕单位表面上所承受的平均压力 HRA = $100 - e$ } 用洛氏硬度相应标尺刻度 HRB = $130 - e$ } 满量程与残余压痕深度增量 HRC = $100 - e$ } (e) 之差计算的硬度值 正四棱锥形压痕单位表面上所承受的平均压力
韧性	$\alpha_k$	冲击韧性	$J/cm^2$	冲击载荷	冲击试样缺口处单位横截面积上的冲击吸收功	
疲劳强度	$\sigma_{-1}$	疲劳极限		交变载荷	对称循环时,材料在指定循环基数下不破坏的最大应力	
高 温 条 件	热强度	$\sigma_{0.1}^T$ $\sigma_t^T$	蠕变极限 持久强度	MPa	在一定的温度 $T(^\circ C)$ 下和一定的时间 $t(h)$ 内,产生一定塑性变形量 $\delta(\%)$ 时所能承受的最大应力	
					在一定的温度 $T(^\circ C)$ 下,工作一定的时间 $t(h)$ 后产生断裂时的应力	
热硬性	—			—	将经过热处理的刀具在不同温度重复加热四次,每次一小时,以能保持材料具有 60HRC 硬度时的温度作为热硬性的评定标准	

## 第二节 金属的物理性能和化学性能

### 一、物理性能

物理性能是金属材料所具有的固有属性。这些属性包括密度、熔点、热膨胀性、导电性、导热性、磁性等。

1.密度 单位体积的物质的质量称为密度。密度小于  $5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$  的金属称为轻金属，密度大于  $5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$  的金属称为重金属。

2.熔点 金属或合金从固态向液态转变时的温度称为熔点。金属都有固定的熔点。

3.热膨胀性 金属材料随温度变化而膨胀、收缩的特性称为热膨胀性。一般来说，金属受热时膨胀而体积增大，冷却时收缩而体积减小。

4.导电性 金属材料传导电流的性能称为导电性。

5.导热性 金属材料传导热量的性能称为导热性。

6.磁性 金属材料在磁场中受到磁化的性能称为磁性。

金属的物理性能对于选材、热加工工艺等有较大影响。如大功率高速柴油机的活塞材料广泛使用密度小、导热性好的铝合金，有利于降低往复惯性力和提高效率；燃气轮机、喷气飞机等采用高熔点金属制造耐高温零件；散热器、热交换器则采用导热性好的铜合金制作热交换元件。

### 二、化学性能

金属材料的化学性能有耐腐蚀性和抗氧化性。

耐腐蚀性是指金属材料在常温下抵抗氧、水蒸气及其他化学介质腐蚀破坏作用的能力。抗氧化性是指金属材料在加热时抵抗氧化作用的能力。

腐蚀作用对金属材料的危害很大，很多设备、机械零件在腐蚀介质或高温条件下工作，根据金属的化学性能正确选材并使用，对于延长材料的使用寿命具有现实的经济意义。

## 第三节 金属的工艺性能

金属机械零件或其他构件在制造过程中要经受各种冷、热加工工艺，如铸造、锻造、焊接、切削加工及热处理等。材料不同，接受各种加工工艺的能力也不同。因此，把金属材料在加工过程中的特性称为金属材料的工艺性能。

金属材料的工艺性能主要有铸造性、锻造性、焊接性、切削性、热处理性，冷变形性等。

### 一、铸造性

金属材料通过铸造的方法获得完好铸件的能力，称为金属材料的铸造性。其优劣表现在以下几个方面：

1.流动性 流动性是铸造金属在浇注时本身的流动能力或充填铸型的能力。凡流动性好的液体金属就能够浇注出薄壁、形状复杂和轮廓清晰的铸件。流动性差的金属则容易出现浇

不足、夹渣、气孔等缺陷。

2. 收缩性 收缩性是指金属液在铸型内的全部冷却过程中，内部产生缩孔和外部尺寸缩小的程度。收缩的结果，一方面铸件内产生缩孔，另一方面由于铸件各部分的冷却速度不一致，导致收缩不一致使铸件中产生内应力。当内应力超过金属的  $\sigma_s$  时，铸件会变形；当内应力超过金属的  $\sigma_b$  时，铸件会开裂。所以铸造金属的收缩性是关系到铸件中产生缩孔、变形和裂纹等缺陷的重要因素。

3. 偏析 偏析是液态金属凝固后化学成分不均匀的现象。偏析越严重，铸件的性能越差。

灰口铸铁、锡青铜和铸造铝合金具有优良的铸造性。钢的铸造性较差。

## 二、锻造性

锻造性是指金属承受压力加工（狭义的指锻造）变形的能力。锻造性的优劣取决于金属的塑性和变形抗力两个方面。塑性好的金属变形时不易开裂；变形抗力小的金属，锻压时省力，而且工、模具不易磨损。

常用的金属材料中，中、低碳钢的锻造性好，而高碳钢差，灰铸铁则根本不能锻造。

## 三、焊接性

焊接性是指被焊金属在一般的焊接工艺条件下，获得优质焊缝的能力。焊接性优劣依据焊接过程中产生裂纹的倾向和焊缝在使用中的可靠性来评价。

影响钢材焊接性的主要因素是化学成分，对于碳钢，随着碳含量的不断增加，钢材的焊接性不断变差。对于合金钢，除碳含量的影响外，还受到其他合金元素的影响。铸铁是焊接性很差的金属。

工程中广泛用于焊接结构（如桥梁、建筑物、锅炉、船体等）的材料是低碳钢和低合金高强度钢，因这两种钢均具有良好的焊接性。

## 四、热处理性

衡量金属材料热处理性能好坏，是根据其淬硬性、淬透性、晶粒长大倾向、回火脆性倾向等来评定的，其中以前两者最重要。

## 五、切削加工性

切削加工性是指金属可被切削加工的难易程度。切削性与材料的种类、成分、硬度、塑性、组织等有关。切削性好的材料硬度在 HBS160~250 之间，加工时消耗动力少，刀具寿命长，切屑易折断，同时被加工表面光洁等。灰口铸铁和易切钢是切削性能很好的金属材料。

## 六、管材与其他型材的冷变形工艺性

许多工业部门（如造船、石油、化工等）需要使用大量金属结构件。例如船舶建造中需使用大量钢板和型钢，机舱中必需设置各种管路系统等。在施工与安装中，对构件要进行各种冷变形，所以要求这些材料具有良好的冷变形工艺性能。

## 第二章 金属与合金的理论基础

金属材料在性能上的差异，从本质上来说，是由其内部结构所决定的。因此，了解金属的内部结构及其对金属性能的影响，对于选用和加工金属材料具有非常重要的意义。

### 第一节 金属与合金的晶体结构

#### 一、晶体的基本知识

##### 1. 晶体与非晶体

自然界中的固态物质根据其内部原子排列的规则性可以分成两大类。一类是原子呈不规则的排列 这类物质称为非晶体 如松香、玻璃等 另一类是原子呈周期性有规则的排列 这类物质称为晶体，如食盐、冰等。绝大多数的金属和合金都属于晶体。

晶体与非晶体除原子排列方式不同外，它们的性能也有差异。晶体具有固定的熔点，其性能各向异性 非晶体则没有固定熔点 表现为各向同性。

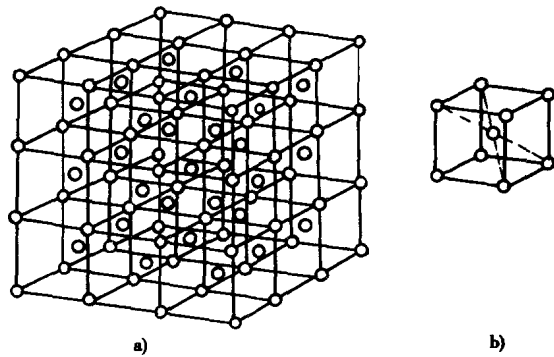


图 1-2-1 晶格和晶胞

a 晶格 b 晶胞

##### 2. 晶体结构的基本知识

(1) 晶格 为了便于分析金属晶体内部原子排列的规律，将各原子的中心用假想的线条联结起来构成一个空间格子，所有原子全都位于该空间格子的各结点上。这种空间格子，称为晶格。如图 1-2-1a 所示。

(2) 晶胞 晶格中能够代表其原子排列规则的最基本几何单元 称为晶胞。如图 1-2-1b) 所示。

(3) 晶格常数 晶胞各边的尺寸 如长、宽、高 称为晶格常数 单位为  $\text{\AA}$  (埃) ( $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$ )。

(4) 晶面 晶格中通过原子中心的平面称为晶面。如图 1-2-2 所示为简单立方晶格中的某些晶面。

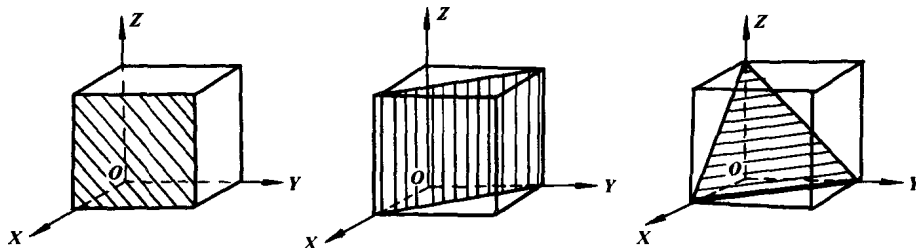


图 1-2-2 立方晶格中的几个晶面

(5)晶向 通过原子中心的直线代表晶格空间的一定方向 称为晶向 如图 1-2-3 所示。同一晶格中不同晶面和晶向上的原子数及原子间距离不同，故原子间的结合力也不同，从宏观上表现出不同的性能，即各向异性。

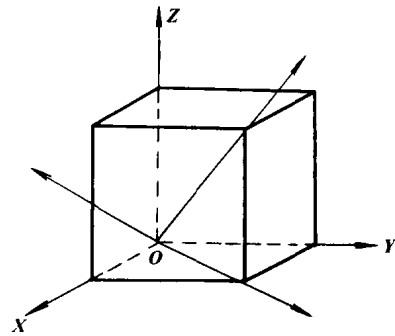


图 1-2-3 立方晶格中的几个晶向

## 二、常见的金属晶体结构

金属晶体中的原子大都具有趋于紧密排列的倾向，以致原子排列组合成具有几类典型高对称性的晶格，常见的金属晶格有三种：

### 1. 体心立方晶格

如图 1-2-4 所示，体心立方晶格的晶胞是由八个原子构成的立方体，在晶胞中心还有一个原子，晶胞各棱边长相等，用一个晶格常数  $a$  表示。具有这类晶格的金属有铁 ( $< 912^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$ -Fe)、钨 (W)、钨 (Cr)、钒 (V)、钼 (Mo) 等。

### 2. 面心立方晶格

如图 1-2-5 所示，面心立方晶格的晶胞也是由八个原子构成的立方体，并在晶胞的每个面的中心还各有一个原子，故称为面心立方晶格。其晶格常数也只用一个  $a$  表示。具有这类晶格的金属有铝 (Al)、铜 (Cu)、镍 (Ni)、铅 (Pb) 等。

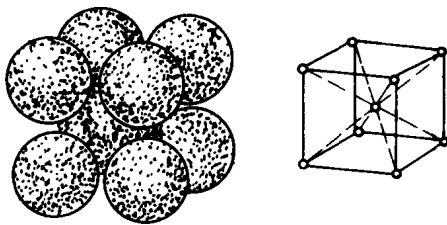


图 1-2-4 体心立方晶胞

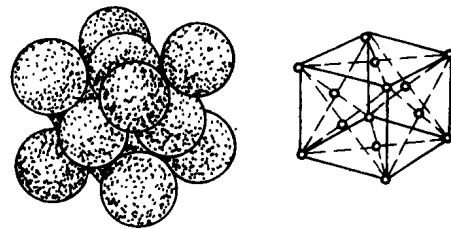


图 1-2-5 面心立方晶胞

### 3. 密排六方晶格

如图 1-2-6 所示，这种晶格的晶胞是正六棱柱体，上下两个正六方底面的六个顶点和中心共有 14 个原子，在晶胞的六个棱柱面中的三个棱面中心各有一个原子。晶格常数有二：一个是正六边形的边长  $a$ ，另一个是上下两底面间的距离  $c$ 。具有这类晶格的金属有锌 (Zn)、镁 (Mg)、铍 (Be)、镉 (Cd) 等。

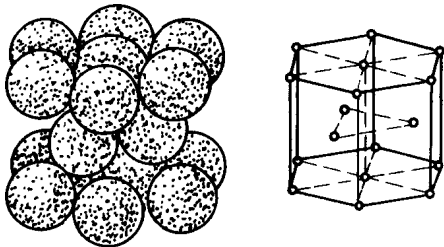


图 1-2-6 密排六方晶胞

## 三、合金的晶体结构

由于纯金属的种类有限、提炼困难、力学性能较低，无法满足人们对金属材料提出的多品种和高性能的要求。生产中，通过配制各种不同成分的合金，可以改变金属材料的结构、组织和性能。合金具有比纯金属更高的力学性能和某些理化性能，合金材料的应用要广泛得多。

### 1. 合金的基本概念

(1)合金 由两种或两种以上金属元素或金属元素与非金属元素组成的具有金属特性的

物质，称为合金。例如，黄铜是由铜和锌两种元素组成的合金；碳钢和铸铁是由铁和碳两种元素组成的合金。

(2)组元 组成合金的最基本的、独立的物质叫做组元。组元通常是金属元素或非金属元素，但也可以是稳定的化合物。根据组成合金组元的多少，合金可以分为二元合金、三元合金和多元合金等。

(3)合金系 相同的组元，按不同的比例配制出一系列成分不同的合金，这一系列合金就构成一个合金系。

(4)相 合金中，具有同一化学成分且结构相同的均匀部分叫做相。合金中相与相之间有明显的界面。液态合金通常都为单相液体。合金在固态下，由一个固相组成时称为单相合金，由两个以上固相组成时称为多相合金。

(5)组织 组成合金的各相成分、结构、形态、性能和各相的组合情况称为组织。合金的性能由其组织决定。

## 2.合金的相结构

### (1)固溶体

合金在固态下，组元间仍能互相溶解而形成的均匀相，称为固溶体。形成固溶体后，晶格保持不变的组元称溶剂，晶格消失的组元称溶质。固溶体的晶格类型与溶剂组元相同。

#### 固溶体的分类

置换固溶体：溶质原子部分地占据溶剂晶格结点位置形成的固溶体 如图 1-2-7a) 所示。

间隙固溶体：溶质原子占据溶剂晶格间隙而形成的固溶体 如图 1-2-7b) 所示。

溶质溶于固溶体中的量为固溶体的浓度，用质量百分数或原子百分数表示。在一定温度、压力条件下，溶质在固溶体中的最大浓度即为溶质在固溶体中的溶解度。影响固溶体类型和溶解度的主要因素是组元的原子半径、电学特性及晶格类型等。原子半径、电学特性接近和晶格类型相同的组元易形成置换固溶体。原子半径相差较大的组元易形成间隙固溶体。

#### 固溶体的性能

由于固溶体的晶格发生畸变 塑性变形抗力增加 因而使固溶体强度、硬度提高 塑性、韧性下降。这种现象称为固溶强化。固溶强化是提高金属材料力学性能的重要途径之一。

当溶质的质量百分数适当时，固溶体不仅有比纯金属高的强度和硬度，而且保持较好的塑性和韧性，有些固溶体甚至能提高塑性和韧性。因此，对综合力学性能要求较高的结构材料，都是以固溶体为基体的合金。

固溶体常用希腊字母  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  等或符号 A(B)来表示 意为溶质 B溶于溶剂 A中)

### (2)金属化合物

金属化合物是合金组元间发生相互作用而生成的一种新相。由于金属化合物的晶格与其组元晶格完全不同，因此其性能也不同于组元。一般熔点较高，性能硬而脆。当合金中出现金属化合物时，其强度、硬度和耐磨性提高，而塑性和韧性降低。金属化合物在合金中常作为强

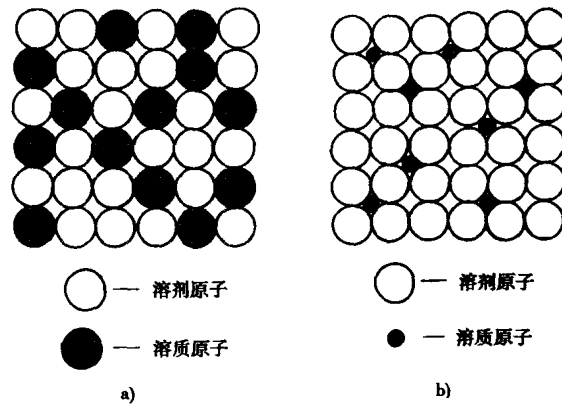


图 1-2-7 固溶体的两种类型  
a)置换固溶体 ;b)间隙固溶体

化相，是许多合金的重要组成相。

固态合金中的基本相结构是固溶体和化合物。在具体的合金中，由于化学成分及组元间相互作用不同，合金中的组织可能是单相固溶体，也可能是单相化合物。但一般不用单相化合物。绝大多数工业合金的组织是机械混合物，即由两种或两种以上的相所构成，这些相之间不发生相互作用，各以自己的晶体而混合存在。机械混合物可以由不同组元的晶粒构成，或者由固溶体与化合物构成等。机械混合物的性能取决于各组成相的数量、形态、大小与分布等。

#### 四、实际金属晶体结构

##### 1. 多晶体

前面研究金属的晶体结构时，是把晶体看成由原子按一定几何规律作周期性排列而成，即晶体内部的晶格位向是完全一致的，这种晶体称为单晶体。在工业生产中，只有经过特殊制作才能获得单晶体。

实际使用的金属材料是由许多细小颗粒所组成的。如果用金相显微镜对经磨平、抛光、化学腐蚀后的金属断口进行观察，能清楚地看到颗粒的大小形态及分布情况。这些颗粒称为晶粒。用 X 射线衍射仪对金属的晶粒内部进行结构分析发现，每个晶粒内部的原子都是以一定的规则重复排列。而各晶粒彼此间的位向都不同。一般情况下金属的晶粒平均直径大约在  $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{mm}$ ，又称为小晶体。金属是由无数小晶体所组成，或者说金属是多晶体，多晶体示意图如图 1-2-8 所示。

由于实际金属是由许多位向不同的晶粒组成的多晶体，一个晶粒的各向异性在许多位向不同的晶粒之间可以互相抵消或补充，故金属呈现出各向同性。

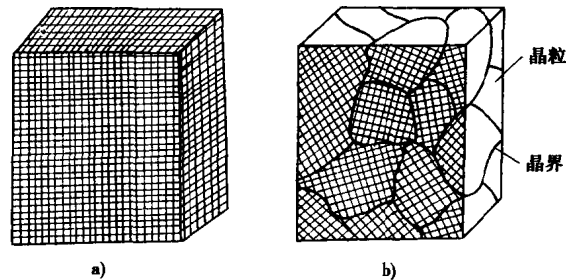


图 1-2-8 单晶体与多晶体示意图  
a)单晶体 b)多晶体

##### 2. 实际金属晶体结构的缺陷

原子完全呈规则排列的晶体只是理论上的假设。实际上，由于种种原因金属内部的原子排列规则受到破坏，从而产生各种各样的缺陷。晶体缺陷对金属性能必然产生影响，因此有必要了解和重视这些缺陷。根据晶体缺陷的几何特点，常分为以下几种：

###### (1) 点缺陷

最常见的点缺陷是晶格空位、间隙原子和置换原子。如图 1-2-9 所示。在实际晶体结构中，某些原子由于某种原因（如热振动的偶然偏差等）脱离其晶格结点而转移到晶格间隙时造成晶

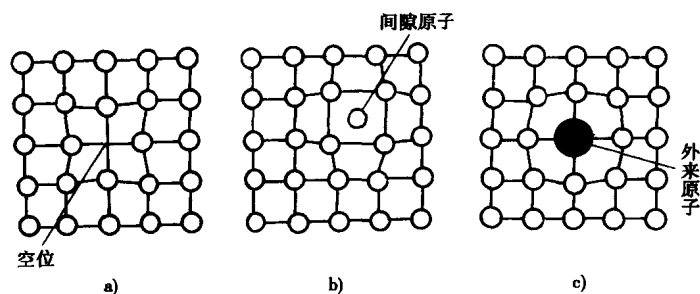


图 1-2-9 点缺陷示意图

格空位和间隙原子。金属原子的位置被其他元素的原子所取代，称为置换原子。在晶格空位、间隙原子和置换原子附近，由于原子间作用力的平衡被破坏而发生晶格畸变，使金属的强度提高、塑性降低。

### (2) 线缺陷

晶体中的线缺陷通常是指各种类型的位错。位错是晶体中一层或几层原子排错了位置而形成的一种缺陷。这里只简单介绍刃型位错。图 1-2-10 是晶体中刃型位错示意图。由图 1-2-10a 可见 晶体的某一水平晶面  $ABCD$  上，多出一个垂直原子面  $EFGH$  这个多余原子面像刀刃切入晶体，使晶体中上下两部分的原子产生了错排现象，称为刃型位错。多余原子面的底边  $EF$  称为位错线。在位错线附近产生晶格畸变，位错线上方邻近原子受到压应力，下方邻近原子受到拉应力。离位错线越远，应力越小。

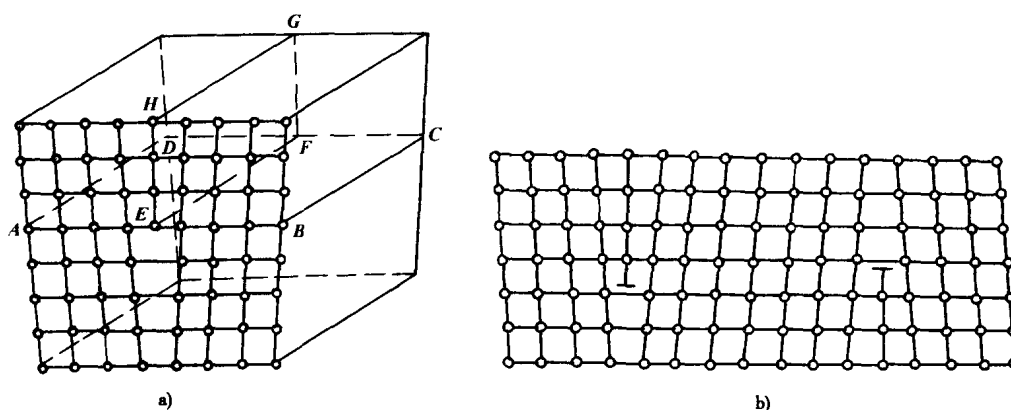


图 1-2-10 刃型位错示意图

a) 立体图 b) 平面图

位错的存在对金属的机械性能会产生重要影响。理想晶体没有位错，不易塑性变形，强度极高。当晶体有位错存在时，使得实际金属材料的强度降低。但位错数量很大时，强度反而提高。用提高位错密度来提高金属强度是强化金属的有效途径之一。

### (3) 面缺陷

这类缺陷主要是指晶界和亚晶界。

晶界 多晶体金属中两个相邻晶粒之间的位向不同，所以晶粒交界处原子逐渐从一种位向过渡到另一种位向 该过渡层称为晶界 其原子排列是不规则的 晶格处于歪扭畸变状态。如图 1-2-11 所示。因而在常温下会对金属塑性变形起阻碍作用。从宏观上来说，即表现出晶界处具有较高的强度和硬度。晶粒越细小 晶界越多 它对塑性变形的阻碍作用越大 金属的

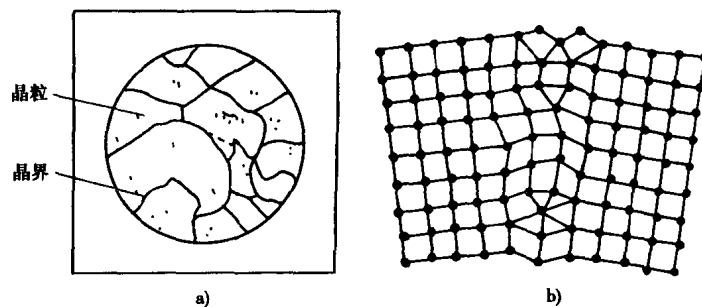


图 1-2-11 晶界示意图

强度、硬度就越高。

**亚晶界** 实验证明，晶粒内部的晶格位向也不是完全一致的。实际上每个晶粒皆是由许多位向差很小（最多不超过  $2^\circ$ ）的小晶块互相镶嵌而成，这些小晶块称为亚晶粒。亚晶粒之间的边界称为亚晶界。亚晶界处原子排列也是不规则的，亚晶界与晶界作用相似，对金属强度也有着重要影响。

## 第二节 金属与合金的结晶

物质由液态冷却转变为固态的过程称为凝固，如果凝固的固态物质是原子（或分子）有规则排列的晶体，则这种凝固又称为结晶。掌握金属结晶过程及其规律，对于控制零件的组织 and 性能是十分重要的。

### 一、纯金属的结晶

#### 1. 纯金属的冷却曲线及过冷度

研究金属的结晶规律通常采用热分析法，将金属加热到熔化状态，然后将其缓慢冷却，记录下液体金属的冷却时间和温度的变化关系，绘出金属材料的冷却曲线，如图 1-2-12a)所示。而实际生产中，结晶是以较快的速度冷却的，得到的冷却曲线如图 1-2-12b)所示。由冷却曲线可见，无论是理论结晶还是实际结晶，冷却曲线都有一段水平线，说明结晶是在恒温下进行的（结晶时放出结晶潜热补偿散热损失）的。但实际结晶温度与理论结晶温度之间有一差值，即实际金属总是要在理论结晶温度  $T_0$  以下的某一温度  $T_1$  才开始结晶。 $T_1$  称为实际结晶温度。实际结晶温度  $T_1$  低于理论结晶温度  $T_0$  的现象称为过冷现象，而  $T_0$  与  $T_1$  之差  $\Delta T$  称为过冷度，即

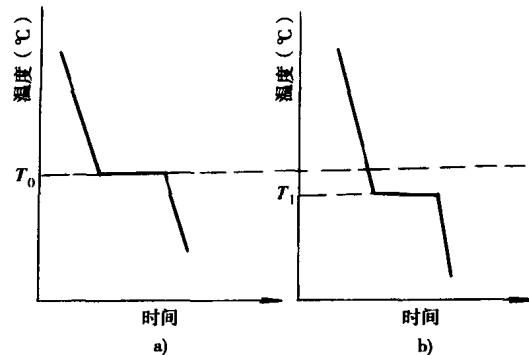


图 1-2-12 纯金属结晶时的冷却曲线  
a)理论结晶时 b)实际结晶时

$$\Delta T = T_0 - T_1$$

过冷度并不是一个恒定值，液体金属的冷却速度越大，实际结晶温度就越低，即过冷度  $\Delta T$  就越大。

实际金属总是在过冷情况下进行结晶的，所以过冷是金属结晶的一个必要条件。

#### 2. 纯金属的结晶过程

液态金属的结晶是在一定的过冷度条件下进行的。实验证明，液态金属中的原子并非完全混乱而无规律，在略高于金属熔点时，总是存在着许多原子呈近程有序排列的小原子团。这些小原子团是不稳定的，时聚时散，此起彼伏。当低于理论结晶温度时，这些小原子团的一部分就成为稳定的结晶核心，形成自发晶核。与此同时，某些外来的难熔质点也可充当晶核，形成非自发晶核。随着时间的推移，温度的降低，已形成晶核四周的原子按一定规律不断排列促使晶核长大，同时又有新的晶核继续产生并长大，直到液态金属全部消失，各晶体彼此接触为止。因此结晶过程就是不断地形成晶核和晶核不断长大的过程，整个结晶过程如图 1-2-13 所示。