

## 0 绪 论

材料在人类历史进程中的地位是人所共知的。史学家根据生产工具使用的材料来划分历史时代,即划分为石器时代、青铜时代和铁器时代。这说明了材料的发展,标志着社会的进步和发展。

我们的祖先在原始社会就开始使用石器,后期已人工制作陶器,并由此发展到汉代象征中国古代文化的瓷器。夏、商、周时已炼制青铜,并将其应用于制造工具和兵器。春秋战国时已炼铁,到汉代已有“先炼铁后炼钢”的技术,居世界领先地位。18世纪世界各国工业的迅速发展,主要应用以力学性能为主的金属材料。

现代工业技术与材料的发展关系更为密切。众所周知,早先的飞机是木质结构,最快时速不过几十公里,只是在生产出了密度小且具有一定强度的铝及铝合金后,飞机的时速才得以提高到几百公里。近代超音速飞机表面的摩擦热,使飞机表面温度达到 300 以上,此时就发展出了诸如钛合金不锈钢等新材料。为提高飞机性能,航空发动机功率不断增加,随之发动机的工作温度也不断增加,如新型发动机的涡轮叶片工作温度高达 1000 以上,此时就必须发展高温合金。

现代航空航天技术的发展,除要求性能更好的金属外,还必须发展非金属结构材料,如高分子化合物、陶瓷材料和复合材料,以减少总体结构重量,并能满足诸如重返大气层等一些特殊性能的要求。如最新研制的航天飞机东方快车号蒙皮温度高达 1649℃,最新式的超音速喷气发动机燃烧室温度竟达 1927℃,此时只能选用高温合金、钛基复合材料及先进碳/碳等新型材料。

历史上,由使用天然非金属材料发展到使用金属材料,标志着社会的进步。如今在发展高性能金属材料的同时,迅速发展和应用人工非金属材料,也标志着现代技术的进步。可以说,人类正在进入人工合成非金属材料 and 复合材料的时代。

在人类的生产活动中,对材料性能提出的要求是材料的使用性能和加工工艺性能。使用性能是指材料在使用过程中能够安全可靠地工作必须具备的性能。它包括材料的力学性能、物理性能和化学性能。力学性能是指材料受到各种不同性质和大小的载荷作用时所反映出来的性能。比如金属材料的强度、刚度、硬度、韧性和塑性等;物理性能是指材料的密度、熔点、导热性能和导电性能;化学性能是指材料在室温或高温下抵抗各种介质化学侵蚀的能力,如抗氧化性和抗腐蚀性等。

材料的工艺性能即材料的可加工性,如金属材料的铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。评价一种材料的优劣,既要看其使用性能,也要看其工艺性能。

材料的性能都是化学成分和组织结构在一定外界因素作用下的综合反映,所以研究材料的成分、内部结构和性能之间的关系是至关重要的。

作为一个工程技术人员,特别是航空技术人员,必须了解和熟悉材料的成分、组织和性能,并且能根据材料的使用性能、工艺性能和经济性(如材料的价格和国家的资源状况等)来适当地选取材料,更好地为发展国民经济和提高综合国力服务。

# 1 纯金属的结构与结晶

## 1.1 纯金属的晶体结构

固体物质凡其内部原子是有规则排列的，就称为晶体。固体金属内部的原子是有规则排列的，所以固体金属都是晶体。

金属的晶体结构是指晶体原子的排列方式。研究金属的晶体结构之所以重要，是因为固体金属的性能和性能变化是与金属的晶体结构密切相关的。例如铝、铜、金和镁、铈的晶体结构类型不同，即原子的排列方式不同，前三者具有很好的塑性，可以顺利地进行压力加工，甚至可辗压成极薄的金属箔；而后两者的性能很脆，难以进行压力加工。又如钢经过淬火后，其强度、硬度显著提高，而塑性、韧性显著降低，其原因就在于钢在淬火前后的晶体结构发生了很大的变化。

### 1.1.1 金属原子的结合方式及金属的特性

金属原子的构造特点是围绕原子核运动的最外层电子数很少，绝大多数金属原子最外层只有 1~2 个价电子。这些价电子和原子核的结合较弱，很容易摆脱原子核的束缚。当金属原子结合成晶体时，它们将失去价电子而成为正离子。正离子按一定的几何规则排列，并在各自的一定位置上做热振动。脱离了原子核束缚的价电子成为自由电子，在各正离子之间不停地做高速运动。这些自由电子属于整个金属所共有，形成所谓的“电子云”。金属原子的这种结合方式，通常称为金属键结合。但是，脱离了原子核束缚的自由电子又有可能与某一正离子重新结合成中性原子，当然这种结合是个别和暂时的。所以金属晶体中绝大多数是正离子作有规则的排列，但也有极个别的金属原子存在。如图 1-1 所示。

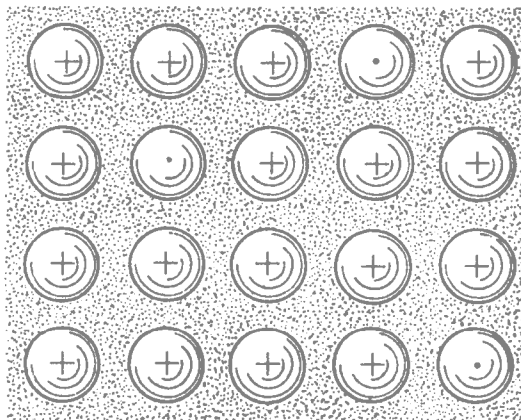


图 1-1 金属键示意图

金属的特性是与金属键结合的性质密切相关的。由于金属键结合有自由电子存在，所以金属在很小的外电场作用下，自由电子即可沿着电流方向流动，使金属具有良好的导电性。另外，不仅正离子的热振动可以传导热能，自由电子的运动也可以传递热能，所以金属也具有有良好的导热性。金属在外力作用下，晶体中一部分正离子相对于另一部分正离子可以进行相对的位移，即发生塑性变形。塑性变形时自由电子也随之移动，仍保持原来正离子与自由电子间的结合关系，即保持了正离子之间的牢固结合，故金属可以进行较大的塑性变形而不致破坏，即金属具有良好的塑性。

### 1.1.2 金属晶体的基本概念

在研究金属的晶体结构，即晶体的原子（为了简便，以后称原子，不再称正离子）排列规律时，我们通常将一个原子当作一个刚性小球，并把在作不停热振动的原子看作在它的平衡位置上静止不动。这样晶体中原子的排列就可用许多刚性小球的堆砌来示意地表示。如图 1-2(a) 所示的是  $\alpha\text{-Fe}$  晶体原子堆砌排列示意图。

这种原子堆砌模型，由于许多小球紧密地堆积在一起，仍很不容易看清楚原子排列的规则。为此用一些假想的几何线条在几个方向上把各原子的中心连接起来，并把一个原子视为一个几何质点，这种抽象地构成的几何空间格架，原子处于几何线条的交点即空间格架的结点上。这种描述晶体原子排列规律的空间格架简称为晶格。图 1-2(b) 所示的是  $\alpha\text{-Fe}$  晶体的晶格。

但用这种晶格来研究晶体的结构仍感不便。因为晶格中原子按照一定的规律排列，我们只要在晶格中选取一个能代表原子排列规律的最小几何单位就可以了。这个代表晶体排列规律的最小几何单位称为晶胞。图 1-2(c) 所示的就是  $\alpha\text{-Fe}$  晶体的晶胞。

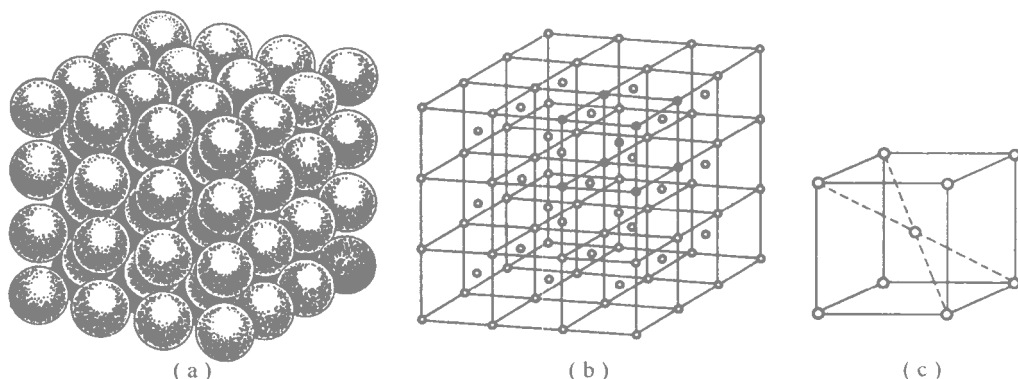


图 1-2  $\alpha\text{-Fe}$  晶体中铁原子排列示意图

(a) 原子堆砌模型；(b) 晶格；(c) 晶胞

为了表示晶胞的形状和大小，可以用图 1-3 所示的晶胞的三条棱长  $a$ 、 $b$ 、 $c$  及三条棱之间的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  来表示。这些参数称为晶格常数。棱边长度国外仍以  $\text{\AA}$  ( $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ ) 作为度量单位。立方晶胞的三个棱长相等即  $a = b = c$  三个棱轴间的夹角都为  $90^\circ$  ( $\alpha = \beta = \gamma$ ) 因此这种晶胞的晶格常数只要用一个棱边长度  $a$  表示就可以了。

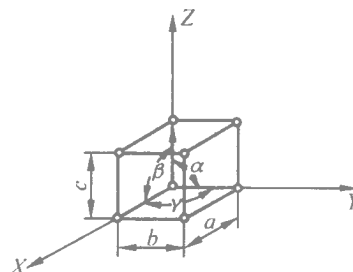


图 1-3 晶胞及晶格常数的表示方法

### 1.1.3 常见金属的晶格类型

金属的种类虽然很多但是常见的金属类型即晶体的原子排列方式，一般可归纳为三种类型。

#### 1. 体心立方晶格

图 1-4 所示的是体心立方晶格的晶胞。晶格的八个角上各有一个原子，晶胞的中心

还有一个原子。它的晶格常数可用晶胞的一个棱边长度  $a$  来表示。由于不同的金属的原子有不同的直径，所以其晶格常数也是不同的。属于体心立方晶格的金属有： $\alpha$ -Fe(912℃以下的纯铁)、Cr、W、Mo、V 等。

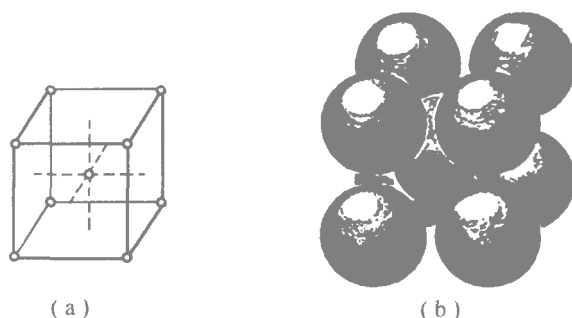


图 1-4 体心立方晶格的晶胞

## 2. 面心立方晶格

图 1-5 所示的是面心立方晶格的晶胞。除了在晶格的八个角上各有一个原子以外，在立方体六个面的中心还各有一个原子。它们的晶格常数也只要用晶胞的一个棱边长度  $a$  来表示即可。属于面心立方晶格的金属有： $\gamma$ -Fe(912℃~1394℃之间的纯铁)、Al、Cu、Ni 等。

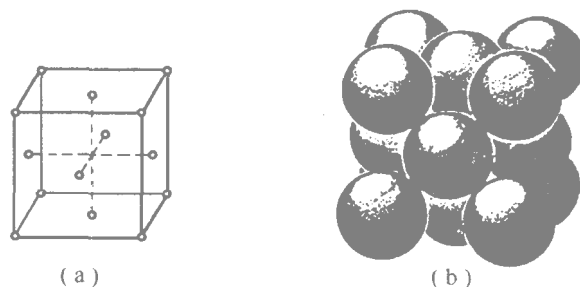


图 1-5 面心立方晶格的晶胞

## 3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞原子排列如图 1-6 所示。在晶胞六方柱体十二个角和上下六角形底面中心各有一个原子，晶胞的中间还另有三个原子。这种晶胞的晶格常数要用棱边长度  $a$  和  $c$  来表示。密排六方晶格的  $c/a$  值，一般介于 1.57~1.64 之间。属于密排六方晶格的金属有：Zn、Mg、Be 等。

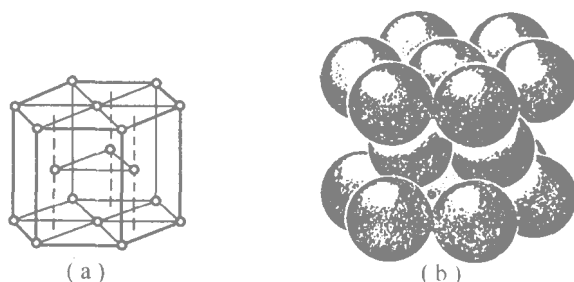


图 1-6 密排六方晶格的晶胞

### 1.1.4 晶面和晶向的概念

晶体中任何一系列原子构成的原子平面叫晶面；任何两个原子连成的直线，它所指的方向叫晶向。不同晶面上的原子排列密度是不同的如图 1-7 所示晶面  $A$  的原子排列就比晶面  $B$  的排列紧密。同样，不同晶向上的原子排列密度也是不同的，如图中晶向  $a$  的原子排列比晶向  $b$  的原子排列紧密。

一个晶体中的原子如果都按照一个规律和一致的位向排列,这种晶体就称为单晶体。单晶体的不同晶面和晶向上的原子排列密度不同,因此单晶体在不同方向上的物理、化学和机械性能也不同。单晶体在不同方向上性能不同的现象叫做晶体的各向异性。例如,铁单晶体  $\alpha\text{-Fe}$  的弹性模量  $E$ ,在图 1-7 中的  $a$  向为  $29000\text{kg/mm}^2$  而沿  $b$  向只有  $13500\text{kg/mm}^2$ 。

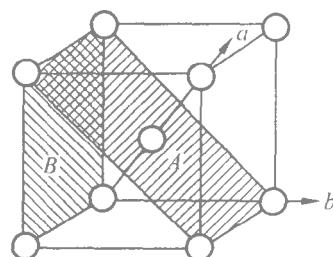


图 1-7 不同晶面和晶向上原子排列密度的差异

### 1.1.5 实际金属的内部结构

#### 1. 实际金属是多晶体

我们用肉眼或放大镜观察金属的断面,可以看到断面由许多小颗粒组成。如果把断面磨平抛光并适当腐蚀,在显微镜下观察,就可以看到许多蜂窝状的颗粒,我们把它称为晶粒。晶粒与晶粒的交界处称为晶界。金属中各个晶粒的原子排列规律虽然相同,但各个晶粒的

原子排列位向却各不相同。如图 1-8 所示,图中箭头所指的方向表示立方晶体的一个棱边方向。金属内部的一颗晶粒相当于一个单晶体,实际金属由许多晶粒组成,所以实际金属是多晶体。正因为如此,由于各个晶粒的晶格位向不同,各个晶粒的各向异性现象,可互相抵消和补充。所以实际金属显示出各向同性,即金属的性能在各个方向上基本是一致的。

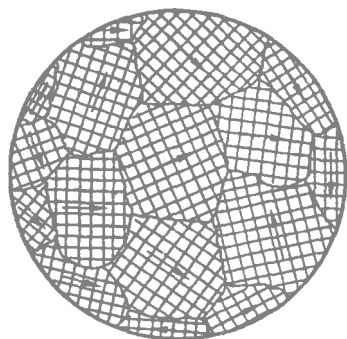


图 1-8 晶粒位向示意图

#### 2. 实际金属内部结构的缺陷

金属的晶粒,是一个单晶体,好像它的原子排列完全整齐,没有缺陷。但是,实际上在它的某些部位存在着某些原子错排的各种缺陷。此外,晶界处的原子排列也不规则。实际金属内部存在的这些结构缺陷

对金属的性能和组织转变都有很大的影响。按照缺陷的几何特性,可将金属内部的结构缺陷分为三类。

##### (1) 点缺陷

点缺陷是在空间长、宽、高三个尺寸方向上都很小的一种缺陷。

前面我们已经介绍过,晶体中原子在晶格结点处作不停的热振动,在一定温度下,各个原子的振动能量并不一样,能量特别高的原子可能脱离它的结点位置,而形成一个“空位”。离开结点的原子可能跑到晶界处,也可能跑到晶格的间隙中形成间隙原子。如图 1-9 所示,晶体中的空位和间隙原子不是固定不变的,也就是移动的。这种空位或间隙原子的移动是化学热处理中原子扩散的一种主要方式。

##### (2) 线缺陷

线缺陷是指在空间的一个方向上尺寸较长,而在其它两个方向上的尺寸都很小的一种缺陷。线缺陷主要指的是位错。所谓位错就是晶体中某处有一行或几行原子排错位置形成的一种缺陷。这里只介绍简单形式的刃型位错和螺型位错。

刃型位错如图 1-10 所示。即在晶体的某一晶面(如图中  $ABC$  晶面)以上某处(沿  $EF$ )多插入了一排原子,它好像一把刀刃插入了晶体中,所以把它叫做刃型位错。图中符号

“ $\perp$ ”表示正刃型位错，即晶体的上半部在该处多了一排原子 符号“ $\Gamma$ ”表示负刃型位错 即晶体下半部在该处多了一排原子。

图 1-11 是螺型位错的示意图。由图 (b) 可以看出，在  $BC$  线以右的晶体，沿着  $ABCD$  晶面的上下两部分原子发生了移动。在  $aa'$  线与  $BC$  线之间这个区域内形成了上下层原子互相不对准的原子错排。其立体模型如图 (a) 表示 上下层原子是按  $a \rightarrow B \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$  这样一条螺旋线错排的，所以把这种位错叫螺型位错。

### (3) 面缺陷

面缺陷是在空间的两个尺寸方向上都较大，而在第三个尺寸方向上很小的一种缺陷，面缺陷主要是在晶界上。

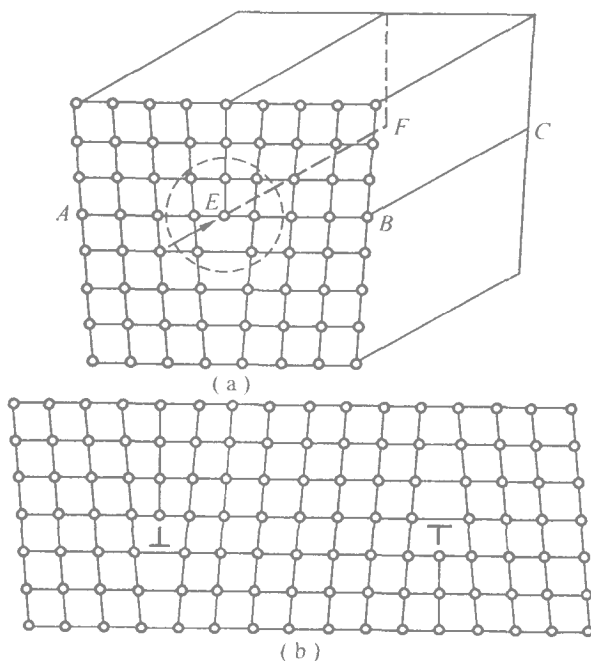


图 1-10 刃型位错示意图

此，原子沿着晶界扩散的速度比在晶粒内部快；

(4) 晶界具有较高的能量，所以金属在腐蚀性介质中，晶界容易被腐蚀，在显微镜下观察 容易看到晶界线 就是因为晶界容易被腐蚀的缘故。

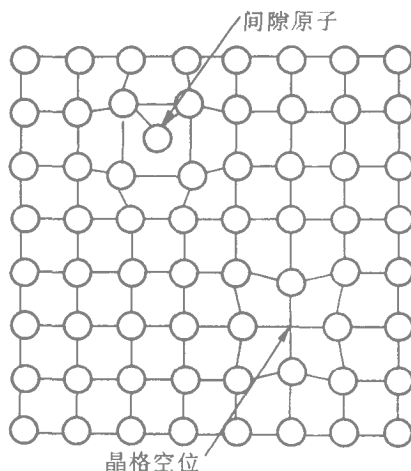


图 1-9 点缺陷示意图

由于相邻晶粒的原子排列位向不同，晶界处的原子为了适应相邻晶粒的不同位向，就处于一种不规则的过渡状态。相邻晶粒的位向差大于  $15^\circ$  的晶界称为大角度晶界。此处的原子往往处在一种折衷的位置。如图 1-12 所示。

相邻晶粒的位向差小于  $15^\circ$  的晶界称为小角度晶界，它可设想由许多刃型位错构成。晶界处的原子是不规则的，处于一种不稳定的状态。它的特性主要有：

(1) 晶界处于较高的能量状态 因而在常温下 晶界对滑移（即塑性变形）起阻碍作用，这种阻碍作用即表现为晶界的强度较高；

(2) 晶界具有较高的能量，因而当金属发生晶体结构转变时，容易先在晶界发生；

(3) 晶界具有较多的空位，因

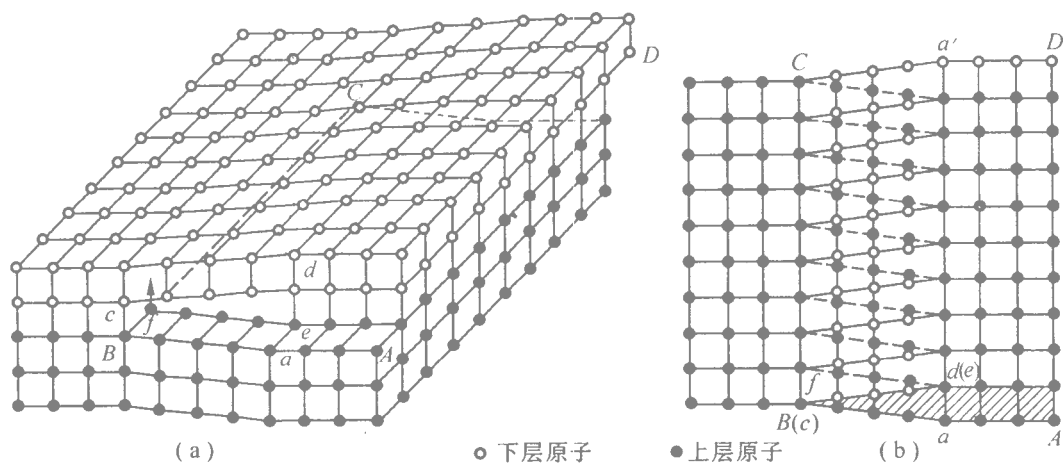


图 1-11 螺型位错示意图

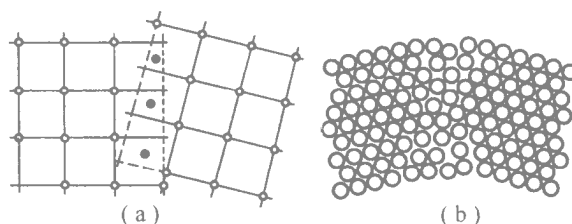


图 1-12 大角度晶界原子示意图

(a) 原子的折衷位置 ; (b) 晶界的过渡结构模型

## 1.2 纯金属的结晶

金属由液态转变为固态的过程叫金属的结晶。了解金属的结晶过程与基本规律，对控制铸件的质量等有重要的意义，也为研究固态相变打下基础。

### 1.2.1 金属结晶的基本规律

#### 1. 金属结晶的过冷现象

将纯金属加热到熔液状态，然后让它适当缓慢冷却，在冷却过程中，每隔一定时间测定并记录下它的温度，直到凝固完毕。这样可以得到一系列的时间与温度相对应的数据，并可画出时间与温度的关系曲线，如图 1-13 所示。这条曲线叫冷却曲线。

纯金属的冷却曲线上有一段温度不变的平台。这是因为冷却到该温度时，金属液已开始结晶，结晶时要放出结晶潜热，使冷却散失的热量与放出的结晶潜热相平衡，所以保持温度不变，直到结晶完毕。结晶完毕之后，不再放出结晶潜热，所以温度又开始下降。

纯金属冷却曲线上出现平台时的温度是金属的实际结晶温度  $T_n$ 。它的高低与冷却速度有关，冷却速度减慢，实际结晶温度就升高。当冷却速度十分缓慢时，即使再降低冷却速

度 其实际结晶温度对某一金属来说 就基本稳定在某一个固定的温度不再升高了。这个在极缓慢冷却时的结晶温度称为平衡结晶温度  $T_s$ 。所以 金属的实际结晶温度总是低于它的平衡结晶温度。这种现象称为过冷现象。而把  $T_s$  与  $T_n$  的差  $\Delta T$  称为过冷度。过冷度的大小与冷却速度有关 冷却速度越大 过冷度也越大 反之冷却速度减小 则过冷度也减小。实际上 金属的结晶都是在一定的过冷度下进行的。所以, 过冷是金属结晶的必要条件。

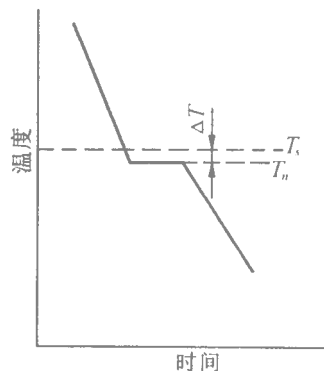


图 1-13 纯金属的冷却曲线

## 2. 金属结晶的一般过程

液态金属结晶时, 总是先在金属液中形成一些微小的晶体 并以这些微小的晶体为核心而不断长大 同时金属液中继续产生微小的晶体并长大, 直到结晶完毕。这种作为结晶核心并长大的微小晶体称为晶核。所以, 金属结晶的一般过程是, 不断地形成晶核和晶核不断长大的过程。

### 1.2.2 晶核的形成与长大

#### 1. 自发形核与非自发形核

金属液在一定的过冷条件下, 仅由它本身的原子有规则排列而形成晶核的过程叫自发形核。金属液在结晶时, 金属原子依附于外来的物质或外来微小粒子表面形成晶核的过程叫非自发形核。

实际金属不可避免地会含有微量的杂质, 有些杂质熔点很高, 它在金属液中可以固态微粒存在。当金属结晶时, 金属原子就依附于这些微粒表面形成晶核并长大。在实际生产中往往有意识地向金属液中加入某些物质, 使它在金属液中形成大量分散的固态质点, 起到非自发形核的作用, 从而获得细小的铸造晶粒组织。这种处理方法称为变质处理。例如, 在铝中加入微量的钛, 这样就可以显著地细化铸造的晶粒。

#### 2. 晶核的长大

在结晶过程中, 形成晶核之后, 随即是晶核的长大。晶核长大初期外形比较规则, 但随着晶核的长大, 晶体的棱角形成, 棱角处散热条件优于其它部位, 因而优先长大, 如图 1-14 所示。其生长方式像树枝一样, 先形成树干, 称为一次晶轴, 然后再形成分枝, 称为二次晶轴。依此类推, 还可形成三次晶轴或更多次晶轴。多次晶轴彼此交错, 尤如枝条茂密的树枝 故被称为树枝状晶体 简称枝晶 如图 1-15 所示。在多次晶轴形成的同时, 多次晶轴均在不断伸长并长粗, 直到多次晶轴相互接触, 晶轴间隙都被填满, 结晶便告完成, 形成一颗晶粒。

### 1.2.3 影响生核与核长大的因素

#### 1. 过冷度的影响

单位体积的液态金属在单位时间内形成的晶核数叫形核率, 以  $N$  表示。单位时间内晶体长大的线长度叫生长线速率 以  $G$  表示。很明显, 在结晶过程中, 如果形核率越大, 生长线速率越小, 则金属结晶后可得到越细的晶粒组织, 它在常温下的机械性能就越好。

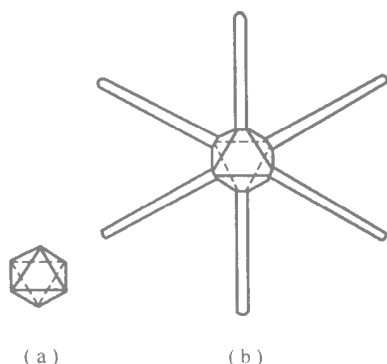


图 1-14 面心立方晶格金属一次晶轴形成示意图

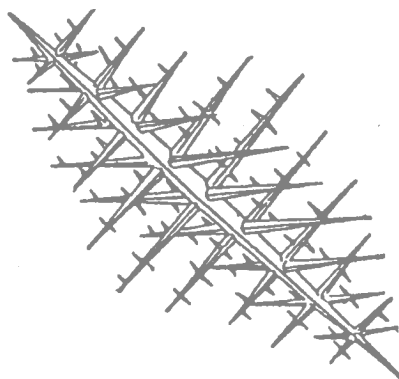


图 1-15 枝晶生长示意图

实验表明 形核率  $N$  和生长线速率  $G$  都与金属液的过冷度有关,如图 1-16 所示 随着过冷度的增加,形核率和生长线速率都增加,但它们的增长程度不同,形核率增长程度大些。这表明随着过冷度的增加,金属结晶后的晶粒变细。过冷度是随冷却速度的增加而增加的。不同铸造工艺的冷却速度不同,所得铸件晶粒粗细也不同。例如,金属型铸造冷却速度比砂型铸造的大,所以金属型铸件的晶粒比砂型铸件要细。

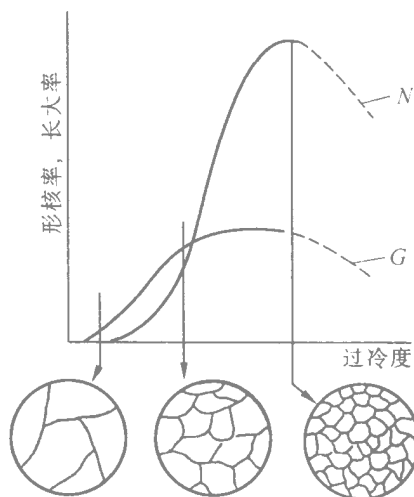
从图 1-16 还可以看出,当过冷度增大到某一程度时,随着过冷度的再增加,形核率与生长线速率都反而下降,如图中虚线部分所示。这是因为过冷度很大时,金属液的温度也很低,原子的扩散能力也极大地降低,所以使形核率和生长线速率反而下降。实际上,液态金属很难达到这样大的过冷度。一般在此过冷度以前,早已结晶完毕。但对于金属的固态相变来说,可以达到很大的过冷度,而且符合这一规律。

## 2. 细化铸件晶粒的其它途径

一般来说 在常温下使用铸件 它们的晶粒越细,机械性能越好。所以我们希望获得细晶粒的铸件。细化铸件晶粒的基本途径是提高铸型的冷却速度,但这种办法受到铸件尺寸的限制,当铸件较大时,其心部的冷却速度就不可能很快,因此前面提到的变质处理也是一种常用的方法。另外,采用机械振动、超声波振动或电磁搅拌等措施,使铸型中的金属液发生运动,从而使结晶初期形成的枝晶因受到冲击而被破碎,破碎的枝晶能起晶核作用,也可获得细晶粒组织。

## 2.4 金属的同素异构转变

有些金属 如铁、钴、钛、锡等 在液态结晶完成后的继续冷却过程中 还会发生晶体结构的转变,即从一种晶格类型转变成另一种晶格类型。金属在固态下发生晶格类型转变叫同

图 1-16 过冷度对形核率  $N$  和生长线速率  $G$  的影响

素异构转变。

铁的同素异构转变具有十分重要的意义，这是钢能够进行热处理强化的重要原因。铁在液态结晶后是体心立方晶格（在  $1538^{\circ}\text{C} \sim 1394^{\circ}\text{C}$  之间）称  $\delta$  铁（ $\delta\text{-Fe}$ ）；当冷至  $1394^{\circ}\text{C}$  时，它转变为面心立方晶格（在  $1394^{\circ}\text{C} \sim 912^{\circ}\text{C}$  之间）称  $\gamma$  铁（ $\gamma\text{-Fe}$ ）；当冷至  $912^{\circ}\text{C}$  时，又转变为体心立方晶格，称  $\alpha$  铁（ $\alpha\text{-Fe}$ ），以后一直冷至室温，晶格类型不再发生转变。

金属的同素异构转变，也是原子重新排列的过程。所以，它与金属的液态结晶是相似的，不过它是在固态下的结晶。这种固态下的结晶叫做重结晶。

## 2 金属的机械性能

金属材料的性能可分为使用性能和工艺性能。使用性能包括：(1)机械性能 如强度、硬度、塑性和韧性等；(2)物理性能 如电性、磁性及热性能等；(3)化学性能，如抗腐蚀性、高温抗氧化性等。工艺性能包括铸造性、锻造性、焊接性及切削加工性等。

机械性能是材料最重要的性能指标，下面就阐明各种性能指标的意义及应用时应注意的一些问题。

### 2.1 强度与塑性

测定金属材料强度与塑性指标的最基本方法是拉伸试验。取钢的标准拉伸试样及拉伸后的示意图如图 2-1。低碳钢的拉伸曲线如图 2-2。由拉伸曲线可确定下列性能指标。

#### 2.1.1 强度指标

##### 1. 弹性极限

拉伸曲线上  $oe$  段是一条直线。这个阶段是弹性变形阶段，即当除去外力后，试样可恢复到原来的尺寸。

##### 2. 屈服强度

当外力超过  $P_e$  后，试样将产生塑性变形。曲线上出现一个小平台，表明此时外力没有增加，而试样却继续伸长，好像金属已经失去了抵抗外力的能力而被屈服了。屈服强度以  $\sigma_s$  表示。但是，并不是所有金属材料的拉伸曲线上都出现屈服平台，工程上常常规定塑性

图 2-1 钢的标准拉伸试样  
(a)及拉伸后 (b) 的示意图

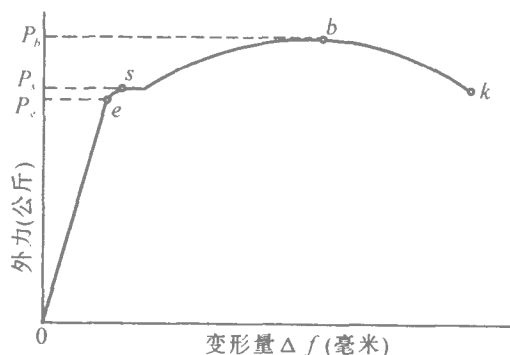


图 2-2 低碳钢拉伸曲线

变形量为 2% 时的应力作为屈服强度，记作  $\sigma_{0.2}$ 。

##### 3. 抗拉强度 $\sigma_b$

试样在屈服时，由于塑性变形产生加工硬化，所以载荷又继续上升，直至拉伸曲线上的最大载荷  $P_b$ 。当载荷达到  $P_b$  后，试样的薄弱部分会形成“颈缩”，此时载荷不增加，试样也会发生断裂。相应的应力即为材料的抗拉强度  $\sigma_b$ 。

机械构件都在弹性状态工作，甚至不允许产生微小的塑性变形。所以设计

时一般以  $\sigma_s$  或  $\sigma_{0.2}$  为依据 以  $\sigma_b$  为依据时则应考虑采用较大的安全系数。

#### 4. 弹性模量 ( $E$ )

材料在弹性范围内的应力与应变的比值称为弹性模量  $E$ , 即  $E = \sigma/\epsilon$ 。  $\epsilon$  为应变 ( $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ )。

弹性模量  $E$  是衡量材料刚度的指标。弹性模量越大, 材料的刚度就越大, 即不易产生弹性变形。

### 2.1.2 塑性指标

#### 1. 延伸率 ( $\delta$ )

材料的延伸率  $\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$  ( $l_0$  为试样原始标距长度;  $l_1$  为试样拉断后的标距长度。) 材料手册中有  $\delta_5$  或  $\delta_{10}$  两种。它们分别表示用  $l_0 = 5d$  或  $l_0 = 10d$  ( $d$  为试样直径) 两种长短不同的试样测定的延伸率。

#### 2. 断面收缩率 ( $\Psi$ )

断面收缩率  $\Psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$  ( $F_0$  为试样原始截面积;  $F_1$  为试样拉断后细颈处的截面积)。

材料的塑性指标具有重要的实际意义。塑性良好的材料, 冷压成型好。飞机和发动机上许多薄壁零件, 如蒙皮、翼肋、燃烧室零件等都是冷压成型的, 使用的材料都应具有良好的塑性。另外, 具有一定塑性的零件, 在使用过程中万一超载或局部形成应力集中, 它可产生少量塑性变形, 由加工硬化效应而使它的强度提高, 不致突然断裂。如果塑性不够, 而产生脆性的突然断裂, 这在工程上是很危险的。

## 2.2 硬度

硬度是金属机械性能的一个重要指标。硬度高, 材料的耐磨性就好。硬度与强度之间有一定的内在联系, 但测硬度比较简便迅速; 测量硬度可在零件上直接测量, 不会损坏零件。

测量硬度广泛采用压入法, 即用硬质材料制成压头, 在一定载荷作用下, 将压头压入零件或材料表层使它产生一个压坑。然后, 以压坑单位面积上承受的载荷或压坑深度来确定被测件的硬度。硬度可反映材料表层抵抗局部塑性变形的能力。

生产中, 测量硬度的常用方法是布氏硬度法和洛氏硬度法。

### 2.2.1 布氏硬度 (HB)

布氏硬度测量的示意图如图 2-3 所示。用直径  $D$  毫米的淬硬钢球 以  $P$  公斤载荷将钢球压入试件表面, 经一段时间后卸除载荷, 试件表面就形成一个压坑。用刻度放大镜测出压坑的直径  $d$  用  $d$  计算出压坑的面积  $F$ , 以压坑单位面积上承受的载荷来表示布氏硬度值  $HB = P/F (\text{kg/mm}^2)$ 。在图纸上标注布氏硬度值时, 可以标出  $HB$  值的范围 也可以标出压坑直径  $d$  的范围。如标注  $d \frac{10}{3000} = 3.6 \sim 3.3$  时, 表示用直径 10mm 的钢球, 载荷为

3000kg 允许压坑直径为 3.6~3.3mm。

硬度与强度之间有一定的关系。实验测得：碳钢与一般合金结构钢，当  $HB < 175$  时， $\sigma_b \approx 0.36HB$ ；当  $HB > 175$  时， $\sigma_b \approx 0.35HB$ 。

布氏硬度的测量虽然误差较小，但压坑较大，故不适用于成品零件或小件、薄件的检验。

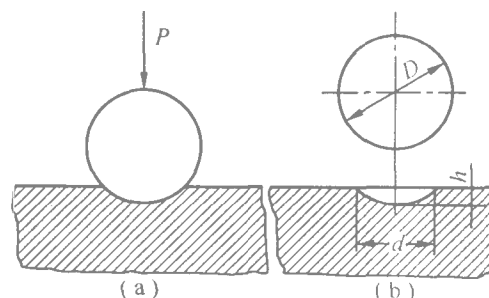


图 2-3 布氏硬度测量示意图

### 2.2.2 洛氏硬度 (HR)

洛氏硬度的测量原理与布氏法相同，都是压入法。它们之间的差别，除了所用载荷与压头不同外，主要的差别是洛氏法依据压坑的深度来计量硬度，即压坑越深，硬度越低。硬度计上有一个表头，测量时表头上可直接读出被测件的硬度值。故比布氏法方便，而且压痕很小，可测量成品件。

洛氏法根据测量时选用载荷与压头的不同，分为 A、B、C、F 几个级别。并将级别标注在 HR 的右边。如 HRC、HRA、HRB、HRF 等。这里需注意，不同级别的硬度值不能直接相互比较。

## 2.3 冲击韧性

上面我们研究的机械性能指标，都是在缓慢加载即静载的条件下测得的。但构件往往会受到冲击载荷，例如飞机起落架在起飞和降落时会受到很大的冲击载荷，发动机轴在发动机启动或变速时也会受到冲击载荷。所以研究材料在受到冲击载荷时的性能是十分重要的。

测定材料冲击性能的方法，普遍采用弯曲冲击试验。在图 2-4 所示的摆锤式冲击试验机上进行。试验时，将试件放在试验机的支架上，落下摆锤从试件缺口背面打断试件，在刻度盘上读出摆锤打断试件时消耗的能量，以  $A_k$  表示，材料的冲击韧性值  $\alpha_k$  以试件缺口处单位截面面积的能量表示之，即以  $\alpha_k = \frac{A_k}{F}$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ ) 的公式计算。式中  $F$  为试件缺口处截面面积。

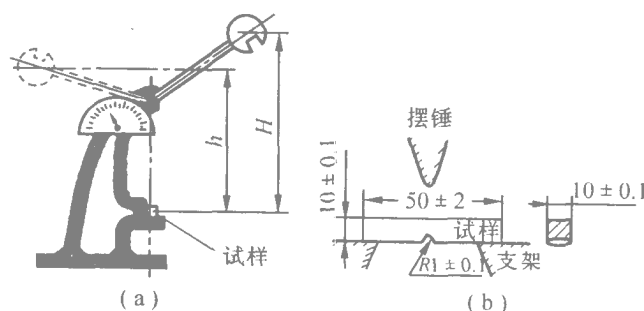


图 2-4 冲击试验示意图

材料  $\alpha_k$  的值不仅与材料的成分和组织有关, 而且与试件形状、尺寸及试验温度等因素密切相关。所以不同试验条件下测得的值无法进行比较。

因为受冲击载荷的零件往往不是受一次冲击就被破坏的, 而是承受多次冲击后才遭破坏。为此就提出以小能量多次冲击试验来测定材料的性能, 即测定材料的冲击破断次数  $N$  与冲击能量  $A$  之间的关系曲线, 把它作为选用材料的依据。

## 2.4 疲劳强度

### 2.4.1 疲劳特征

许多零件如直升飞机的旋翼、发动机的轴和叶片、各种齿轮、弹簧等, 在工作中受到反复改变大小或同时改变大小和方向的“交变载荷”。零件在交变载荷作用下, 虽然其应力比材料的抗拉强度小, 甚至比屈服强度还小, 但是在长期使用的某一时刻也会发生突然断裂, 这种现象称为疲劳。

零件在交变载荷作用下, 疲劳破坏的过程是: 首先在它的薄弱环节如应力集中或缺陷(划伤、夹渣、显微裂纹等)处产生微细的裂纹。这种微细裂纹称为疲劳源。随着载荷循环次数的增加, 裂纹逐步扩展, 即形成疲劳扩展区。当扩展区达到一定的临界尺寸时, 零件会发生突然的脆性断裂。最后脆断的区域称为瞬间破断处。如图 2-5 所示。

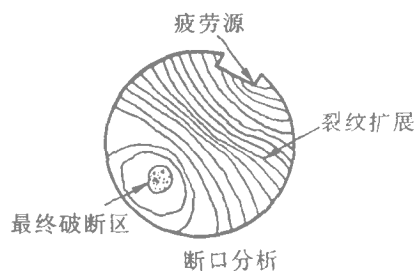


图 2-5 疲劳断口的宏观形貌

### 2.4.2 疲劳强度

材料的疲劳强度是由疲劳试验测定的。试验时要用较多的试样, 在不同交变载荷的作用下, 测定其发生断裂时的循环次数  $N$  最后将试验结果绘成如图 2-6 所示的应力与循环次数的关系曲线。称它为疲劳曲线。从疲劳曲线上可知, 试验应力降低, 循环次数  $N$  增加, 当应力降至某一值时, 曲线变成水平直线, 即表示材料可经受无限次循环载荷仍不发生疲劳断裂。我们把试样承受无限次应力循环或达到规定的很大的循环次数而仍不断裂时的最大应力作为材料的疲劳强度。从图中可看到, 当钢铁材料的试验循环次数达  $10^7$  次时, 疲劳曲线上出现水平直线, 所以把试验循环次数达  $10^7$  次时的最大应力作为它的疲劳强度。有色金属及其合金的疲劳曲线不出现水平直线, 工程上常以循环次数达  $10^8$  次时的最大应力作为它的疲劳强度。

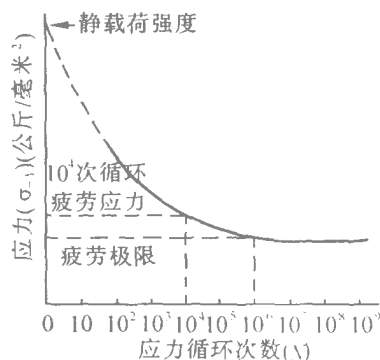


图 2-6 疲劳曲线示意图

影响零件疲劳寿命的因素很多, 除材料成分和组织等因素外, 因疲劳源一般产生在零件表面, 所以零件表面状态也有重要影响。零件表面的应力集中或划痕、损伤、腐蚀斑点等都

使零件的疲劳寿命大大降低。为了提高零件的疲劳寿命，零件转角处应避免锐角连接，以减少应力集中，并提高零件的表面光洁度等。

## 2.5 断裂韧性

“脆断”是一种最危险的断裂 因为在断裂前几乎不产生明显的塑性变形 很难预先发现征兆而加以预防，而酿成重大事故。如 1943 年 1 月，美国一艘油轮在码头交付使用时，竟发生突然断裂成两截的惨祸。而据计算，断裂时船体承受的应力仅为  $7\text{kg/mm}^2$  而船体钢材的屈服强度约为  $25\text{kg/mm}^2$ 。这种低应力脆断的现象很难用经典力学来解释。

经长期研究，人们认识到，过去我们把材料看做毫无缺陷的连续均匀介质是不对的。材料内部在冶炼、轧制、热处理等各种制造过程中会不可避免地产生某种微裂纹，而且在无损检验时又没有被发现。那么，在使用过程中，由于应力集中、疲劳、腐蚀等原因，裂纹会进一步扩展，当裂纹尺寸达到临界尺寸时，就会发生低应力脆断的事故。

为了研究裂纹对材料断裂强度的影响，把刻有不同深度的试件进行拉伸试验，画出如图 2-7 所示的裂纹深度  $a$  与实际断裂强度的关系曲线。

且有公式  $K = \sigma_c \sqrt{a}$  成立。对某种材料来说， $K$  是一个常数，它也是材料机械性能的指标，称为断裂韧性。

在裂纹扩展的过程中，扩展型式可分为三类：第一类为张开型 如图 2-8(a) 所示，裂纹面位移方向垂直于裂纹面。第二类为滑开型，如图 2-8(b) 所示，裂纹面位移方向垂直于裂纹线。第三类为撕开型 如图 2-8(c) 所示 裂纹面位移方向平行于裂纹线。

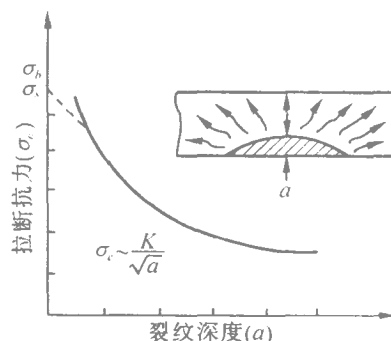


图 2-7 断裂强度与裂纹深度的关系曲线（示意图）

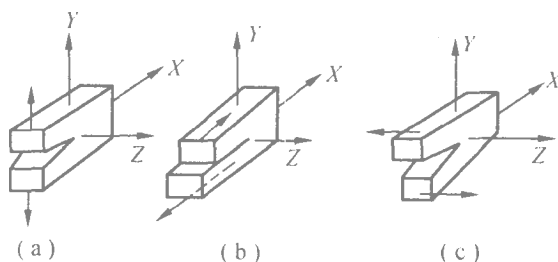


图 2-8 裂纹表面三种位移型式  
(a) 张开型 ; (b) 滑开型 ; (c) 撕开型

### 3 金属的塑性变形与再结晶

#### 3.1 金属的塑性变形

金属的变形可分为弹性变形和塑性变形。能够恢复的变形叫做弹性变形。在弹性变形阶段,随着外力的增加,变形量也成比例地增加。但外力增加到超过某一限度后,变形量不再与外力成比例关系,并在外力除去后,不能完全恢复到它原来的形状,即有残留的永久变形,我们把它称为塑性变形。研究金属塑性变形的实质及其对金属性能的影响是有重要意义的。

##### 3.1.1 单晶体的塑性变形

滑移是金属单晶体塑性变形的最主要和最基本的方式。是晶体中某一部分沿着滑移面相对于另一部分发生了滑移,把这种塑性变形称为滑移变形。

那么,晶体受外力作用后,它是怎样产生和进行滑移的呢?作用在晶体上的外力,可以分解为垂直于晶面的正应力( $\sigma_N$ )和平行于晶面的切应力( $\tau$ )如图 3-1。

作用在晶体上的分解正应力( $\sigma_N$ )它使晶体的晶格沿正应力方向被拉长 应力不大时 只产生弹性变形 当外力继续增加 正应力大于原子结合力时,晶体就发生断裂,所以分解正应力只引起晶体的弹性变形或断裂。如图 3-2 所示。

当分解切应力较小时,晶体发生弹性的剪切变形。

当分解切应力增大到一定值后 晶体的一部分相对于另一部分沿着滑移面发生相对滑移。当外力除去后晶体中的原子不能回复到它原来的位置,即产生了滑移的塑性变形。如图 3-3 所示。当然,如果分解切应力很大,在产生一定程度的塑性变形后,晶体也将被切断破坏。

综上所述,在外力作用下,晶体的滑移是由分解切应力造成的,而分解切应力和分解正应力都能使晶体发生弹性变形或断裂。

金属晶体沿滑移面和滑移方向开始滑移的最小切应力称为临

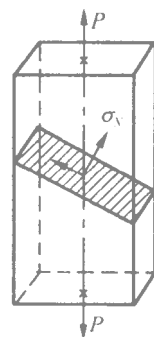


图 3-1 应力分解图

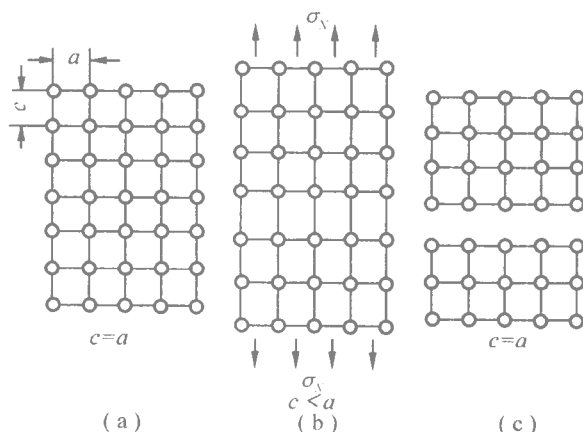


图 3-2 晶体受正应力作用时的变形情况示意图

(a) 变形前;(b) 弹性变形;(c) 断裂

界切应力以  $\tau_k$  表示。晶体在外力作用下, 只有当在滑移面和滑移方向上的分解切应力大于或等于它的临界切应力时, 晶体才能发生滑移。

### 3.1.2 多晶体的塑性变形

多晶体是由许多形状、大小和晶格位向不同的晶粒组成的, 虽然它们的塑性变形主要还是滑移等形式, 但应考虑晶界和晶粒位向等对变形的影响。

#### 1. 晶界的作用

用由两个晶粒组成的试样在室温下做拉伸试验, 其结构如图 3-4 所示。

远离晶界的地方发生了较大的塑性变形, 被拉长变细了, 而在

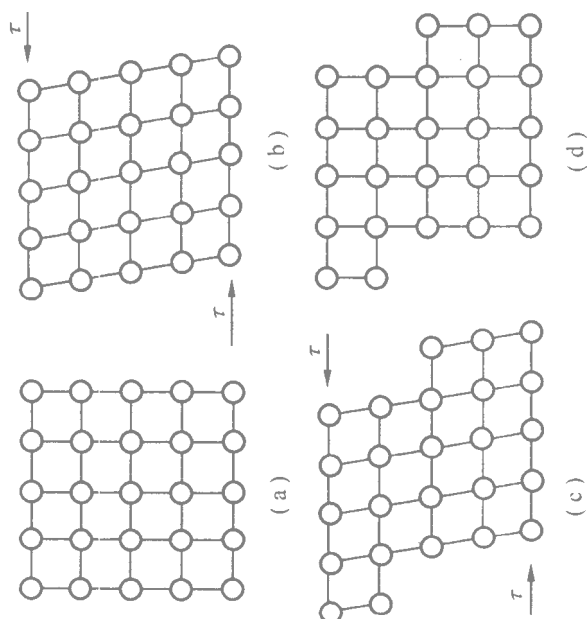


图 3-3 晶体在切应力作用下的变形  
(a) 变形前;(b) 弹性变形;(c) 弹塑性变形;(d) 变形后



图 3-4 两个晶粒的试样在拉伸时的变形

晶界及其附近则变形很小。试样两端为夹头支持处, 所以变形也很小。所以拉伸后产生如图所示的“竹节”现象。产生这种现象的原因是晶界上原子排列不规则, 杂质原子也常集中在晶界上, 使晶界处于较高的能量状态。它对滑移变形起阻碍作用, 表现为具有较强的抗变形能力。晶粒越细, 晶界总面积越大, 对变形的抗力就越大。

#### 2. 晶粒位向的作用

多晶体金属中各个晶粒的位向不同。当它受外力作用时, 有的晶粒处在有利于滑移的位向, 有的晶粒则处在不利于滑移的位向。当位向有利于滑移的晶粒发生滑移时, 势必要受到与其相邻的但位向不利于滑移的晶粒的阻碍。所以晶粒还必须克服相邻晶粒的阻力后才能进行滑移, 使滑移的阻力增加了。

晶粒越细, 晶界总面积越大, 每个晶粒周围具有的不同晶粒位向的数目也越多, 所以其强度越高, 而且塑性和韧性也较好。

### 3.1.3 塑性变形对金属组织和性能的影响

#### 1. 性能的变化

金属经塑性变形后, 其机械性能会产生变化。随着变形程度的增加, 金属的强度和硬度