

## 绪 论

对机器制造厂的技术工人来说,《金属材料与热处理》是一门必读的技术基础课程。

现代机械工业中,各种加工设备和加工工件,使用的刀、量、刃具和工、夹、模具,几乎都是用金属材料制成的。在工作中经常会遇到:有些刀具使用寿命较长;而有些刀具则不耐用,往往会崩裂,或者很易磨损;有些金属材料制成的工件加工性能较好,表面粗糙度也细;而有些则不然,同样条件下加工,表面粗糙度很粗,加工费劲,刀具损耗也大;有时工件或刀具加工好以后尺寸还会变化;即使同样材料制成的工件,有时也会发生很大的差异。加工好的工件装配在机器上以后,在使用过程中有的耐用,有的不耐用,发生过早磨损,甚至断裂……。为什么会产生这些现象的呢?从事机械制造的技术工人都很想了解产生这些现象的原因,以便更好地使用工具和维护机器,提高生产效率。这就需要对金属材料的内部构造和性能有一个比较清楚的了解。

为了合理地使用和充分发挥金属材料性能的潜力,做到材尽其用,热处理方面的知识是必不可少的。所以凡是机械工业中各技术工种的技术等级标准里,都把这方面的知识列入“应知”内容。

《金属材料与热处理》是专门介绍金属材料方面的知识以及热处理对材料性能的影响的一门课程。本教材根据实际需要,着重介绍机械类冷、热加工各工种初、中级技术工人“应知”要求中必须掌握的有关内容。而对为了阐明这些内容所必须了解的基础知识只作概要叙述。希望通过学习本课程后,能掌握金属材料 and 热处理方面的基础知识以及它与各工序之间的相互关系;能初步分析日常生活中经常遇到的有关金属材料方面的问题;认识到冷、热加工各工序之间的良好配合是保证质量的关键之一,有助于技术水平的提高。

本书包括如下三部分内容:

(1) 金属学基础知识 概要介绍金属材料各种性能的实用意义,金属和合金的内部结构,合金成分与组织和性能之间的关系。从而了解金属材料所以具有不同性能的原因,懂得金属材料的性能与组织和成分有关,因此不同用途的工件必须选用不同的材料。

(2) 热处理基本概念 热处理的主要目的是改善金属材料的性能。这部分介绍正火、退火、淬火、回火……等各种热处理操作的作用、目的和方法。同一牌号的钢材,经过不同的热处理后,可以获得不同的组织,使其性能产生很大的差别。除了概要介绍钢在加热和冷却时转变的基础知识外,着重介绍热处理后得到的不同组织对性能的影响。对热处理的质量控制及其与各工序之间的相互关系和影响也作了简要叙述。

(3) 金属材料的性能和用途 介绍机械工业中常用的金属材料。碳素钢、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、硬质合金的基本性能与用途以及与切削加工有关的基础知识。

我国是一个文明古国,也是最早使用金属材料的国家之一。早在四千年以前就已掌握了炼铜技术,在出土文物中发现的商代大型青铜铸件,饰纹精细,造型优美,令人叹为观止。生铁的冶炼和使用,我国比欧洲早了一千七百年左右。距今二千四百余年前的春秋战国时代,已经采用热处理技术来提高兵器的质量。最近从河南省巩县出土的西汉时期的铁?,经金相

鉴定石墨形态是球状的。说明当时劳动人民已经懂得用改变内部组织以提高金属性能的规律。这些事实足以证明我国人民在金属材料和热处理领域中很早以前就有过卓越的贡献。但是，在旧中国由于封建制度的束缚与统治阶级的腐朽和愚昧，阻碍了这些成果的进一步发展，在很长一段时期内，停滞不前。

解放后，我国工业生产有了很大的发展，建成了比较完整的工业体系，建立了适合我国资源情况的合金钢系统。但与四个现代化的要求以及和国外先进水平比较，还存在着差距，有许多机械产品的性能指标落后于国外同类型的产品；使用寿命较短也是一个明显的不足。

“落后”的教训唤醒了中国人民，往者已矣，来者可追，勤劳而智慧的中国人民正在奋发图强，共同努力，为四化建设开创新的局面。

《金属材料与热处理》涉及的面很广。各工种要求掌握的内容不尽相同。本教材根据工人技术等级标准中机械类冷、热加工各工种初、中级技术工人“应知”内容中有关金属材料与热处理方面的要求进行编写。教课时应视专业的不同和等级的高低作适当删节。学员学习时，不同于学校中的学生，都已具有一定的实践经验和感性知识，重点要加强基本理论方面的学习，并联系生产实践中遇到的问题，结合所学的内容，在实践中消化，在学习中提高。利用工厂有利条件，组织现场参观，结合必要的实验（金相，机械性能），做到边工作、边学习、边提高。

# 第一章 金属材料的性能

现代工业中所使用的金属材料种类很多而性能各异。如此众多的材料是为了满足各种不同的需要。制造零件时，材料选用是否恰当，将直接影响到使用效果和经济效益；同一零件由于选材不同，可能使用效果有明显差异，而且制造成本也可能相差很大。要恰如其分地正确选材，既要做到材尽其用，又要充分保证零件的质量，满足它的使用性能，至少应对金属材料的性能有个初步认识。

## 第一节 金属的物理性能和化学性能

金属的物理性能，主要包括密度、比容、熔点、导热性、导电性、热膨胀性和磁性等。化学性能主要是耐腐蚀性和热安定性。

### 一、密度

物体的质量与它体积的比值称为密度。 $(\rho = M/V)$ ，它的单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 二、比热容（比热）

金属的比热容是单位质量的金属每升高 1 开尔文温度所需要的热量，用符号  $c$  表示。

### 三、熔点

金属或合金的熔化温度称为熔点。凡是纯金属都有固定的熔点。例如：铝的熔点是  $660^\circ\text{C}$ ，铁是  $1538^\circ\text{C}$ ，铜是  $1083^\circ\text{C}$ 。制造保险丝和焊锡采用熔点低的合金；制造耐高温的机械零件应用熔点高的合金。

### 四、导热性

金属传导热量的能力称为导热性，用导热系数  $\lambda$  表示导热性能的好坏。单位是  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 。其值愈大，导热性愈好。

金属中银和铜的导热性最好，纯金属的导热性比合金好。导热性好的金属散热性必定也好。散热器、热交换器等要求散热快的零件常选用导热系数高的材料。工作时易发热的零件，如内燃机中的活塞，也应选用导热性好的材料。

### 五、导电性

金属传导电流的性能称导电性。常用电阻率  $\rho$  来衡量导电性的好坏，其值愈小，导电性愈好。银的导电性最好，铜和铝次之，工业上常用铜或铝做导电线；而  $\text{Ni-Cr}$  合金、 $\text{Fe-Cr-Al}$  合金的电阻率大，可用作电阻丝。

### 六、热膨胀性

金属和合金的体积与温度有关，受热时膨胀，冷却时收缩，这种性能称为热膨胀性，用线膨胀系数  $\alpha$  表示。其计算公式：

$$\alpha = \frac{l_1 - l_0}{l_0 t} \quad (\text{K}^{-1})$$

式中  $l_0$ ——膨胀前的长度 (m)；

- $l_1$ ——膨胀后的长度 (m);
- $t$ ——膨胀前后的温度差 (K);
- $\alpha$ ——线膨胀系数 ( $K^{-1}$ )。

金属在不同温度区段内的线膨胀系数不完全相同，不同材料的线膨胀系数也不同。

在实际工作中，许多情况下要考虑热膨胀的影响。例如：精密量具在温度变化时会影响测量精度，故量具的鉴定必须在恒温室内进行。又如：切削加工精密零件时，工件的温度会升高，加工尺寸的控制必须考虑到由于工件温度升高而引起的膨胀和温度降低而引起的收缩；制造铸造模型和锻模时，都要考虑到铸、锻件热胀冷缩的因素，制造精密零件应选用膨胀系数小的金属材料，以免在温度变动时引起尺寸变化。配合间隙极小的部件，例如柴油机燃油系统的喷油嘴偶件，选材时，两种材料的线膨胀系数要尽量接近，否则，由于热膨胀的量不同而不能保证配合间隙。

### 七、磁性

金属能导磁的性能称为磁性。凡是能导磁的金属都能被磁铁吸引。铁具有最大的磁性，钴、镍次之，故称为磁性金属。磁性金属加热到某一温度时，磁性会消失，铁在  $769^{\circ}C$ （居里点）以上磁性便消失。金属的磁性对电机、变压器和电器元件至关重要。

### 八、耐腐蚀性

金属材料在常温下对周围介质（大气、水蒸气、各种电解液）侵蚀的抵抗能力称为耐腐蚀性。在腐蚀性介质中工作的零件，必须选用耐腐蚀性好的材料。全世界因腐蚀而失效的钢铁约占全年产量的 30% 左右，因此防腐蚀是节约金属材料的重要措施。

### 九、热安定性

金属材料在高温下抗氧化的能力称为热安定性。高温下工作的零件必须具有良好的热安定性。

## 第二节 金属的机械性能

机器零件在使用过程中都要受到外力（载荷）的作用，在外力作用下，金属会发生变形，当外力过大时，便会断裂。金属在外力作用下所表现的行为称为机械性能（或称力学性能）。因此机械性能是选择材料的主要依据。

常用的机械性能指标有弹性、塑性、强度、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。

### 一、强度

金属材料在外力作用下抵抗塑性变形和破断的能力称为强度。测定强度的一种最常用的方法是拉伸试验。它是将被测材料加工成拉伸试样，如图 1-1 a 所示。试样被夹紧在拉伸试验机上，按规定缓慢加载 随着载荷增加 试样产生伸长变形 经历了不同的变形阶段后断裂。断裂后的试样如图 1-1 b 所示。

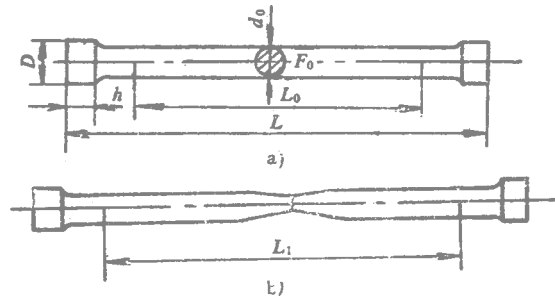


图1-1 钢的标准拉伸试样

a) 钢的拉伸试样 b) 拉断后的试样示意图

根据拉力与变形量之间的关系绘出的

曲线，称为拉伸曲线图，如图 1-2 所示。

在拉伸曲线图上  $a$  点以前，变形与外力成直线（即正比）关系，外力去除后，试样恢复原状，故  $oa$  段内的变形称为弹性变形。继续增加外力至  $b$  点时， $ab$  段内的变形量与外力不成直线关系，稍有弯曲，但是仍属弹性变形范围，因为此时如果去除外力，变形还会立即消失。

当外力超过  $b$  点时，试样开始产生塑性变形，此时如果去除外力，试样已不能完全恢复原状。

外力达到  $c$  点后，拉伸曲线图上出现  $cd$  水平平台，说明试样在不增加外力的情况下，变形量仍会继续增加，这种现象称为“屈服”。

出现屈服现象后，材料因内部结构发生了某些变化，使它抗塑性变形的能力增大，因此，必须继续增加外力才能再产生变形。直到  $B$  点，此时塑性材料在试样的局部区段内开始出现截面缩小的现象，这种现象称为“缩颈”。之后，试样在“缩颈”处断裂。

以上是塑性材料的拉伸试样在拉伸过程中经历的三个不同的变形阶段。由此可以求出材料的强度与塑性指标。

强度指标最重要的有强度极限和屈服极限。

1. 强度极限（又称抗拉强度）是材料抵抗外加拉力时不致断裂的最大应力，用  $\sigma_b$  表示。计算公式：

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0}$$

式中  $P_b$ ——试样拉断前的最大拉力；

$F_0$ ——拉伸前试样的截面积。

2. 屈服极限（又称屈服强度）是材料产生屈服现象时的最小应力，用  $\sigma_s$  表示。计算公式：

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$$

式中  $P_s$ ——屈服时的外力；

$F_0$ ——拉伸前试样的截面积。

屈服极限是设计零件时的重要依据。机械零件不允许在服役过程中产生永久变形，所以零件设计时允许承受的最大应力必须小于屈服极限。

有些金属材料在拉伸过程中不出现明显的屈服现象，此时，规定当试样产生 0.2% 塑性变形时的应力作为屈服极限，称为条件屈服极限，用  $\sigma_{0.2}$  表示。

$\sigma_s/\sigma_b$  的比值叫屈强比。其值愈高，材料强度的有效利用率也高，但可靠性小，因为从出现屈服到断裂的过程短。灰口铸铁是一种脆性材料，拉伸时，不产生明显的塑性变形，屈服极限接近于强度极限，断裂前也没有明显的缩颈。

## 二、弹性

材料的弹性是指材料在外力去除后，恢复原状的能力。一般用弹性极限来衡量，弹性极

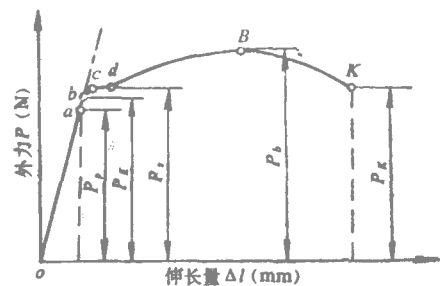


图 1-2 塑性材料的拉伸曲线图

限高，材料的弹性好。

比例极限是指外力与变形量成正比关系时的最大应力，用  $\sigma_p$  表示。计算公式：

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}$$

式中  $P_p$ ——外力与变形量成正比关系时的最大载荷；

$F_0$ ——拉伸试样的截面积。

弹性极限较比例极限略高一些，但相差极小，所以国家标准中只规定比例极限，而没有弹性极限。

### 三、塑性

材料在受力时能产生塑性变形而不破坏的能力称为塑性。材料在断裂前产生塑性变形量越大，表明其塑性越好。塑性指标可用拉伸试验时的延伸率和断面收缩率表示。

1. 延伸率 拉伸试样拉断后标距长度范围内的伸长量与原标距长度之比值的百分率。用  $\delta$  表示。即：

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中  $l_1$ ——试样拉断后的标距长度；

$l_0$ ——试样拉伸前的标距长度。

延伸率的大小与试样尺寸有关。为便于比较，规定试样的标距长度为其直径的 5 倍和 10 倍两种，分别用  $\delta_5$  和  $\delta_{10}$  表示。

2. 断面收缩率 拉伸试样拉断后断口截面积的减少量与原截面面积之比值的百分率。用  $\psi$  表示。即：

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中  $F_0$ ——试样拉伸前的原截面积；

$F_1$ ——试样拉断后断口的截面积。

塑性指标在工程上很有实用意义。冷冲、冷拔、冷镦、锻压等成型工艺必须选用塑性好的材料，否则在加工时易产生裂纹。另外，零件使用过程中，万一超负荷，塑性好的材料由于塑性变形可以避免突然断裂，而脆性材料几乎不产生明显的塑性变形就突然断裂了。所以，一般的零件都要求有较高的塑性指标。

造船、锅炉、汽车等制造厂，许多零件都要用弯曲、冷冲压等工艺。塑性差的材料，加工过程中会出现大量废品。用于这方面的材料，除了拉伸试验测定塑性指标是否

合格外，还需增加冷弯试验来衡量材料的塑性。冷弯试验的条件按照材料及试样的厚度不同而不同。图 1-3 是钢板的 180° 冷弯试验。根据试样弯曲后表面有无裂纹、折断等情况来评定材料的质量。弯心直径愈大，冷塑性变形的能力愈差；弯心直径愈小，塑性愈好。同一牌

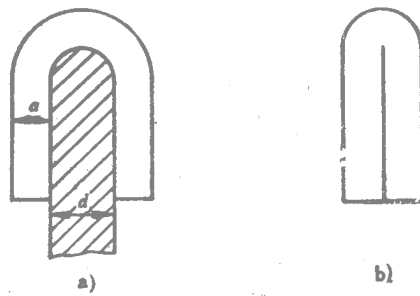


图1-3 180°冷弯试验

a)  $d = 1.5a$  b)  $d \rightarrow 0$

号的钢板，由于冶金和表面质量等因素，经冷弯试验后差异很大。因此许多工厂都把冷弯试验作为钢板入厂的验收条件。

#### 四、韧性

材料抵抗冲击力的作用而不致破坏的能力叫韧性。

1. 冲击韧性试验 不少零件在使用过程中受到冲击载荷（以很大速度作用于机件上的载荷），如内燃机中的活塞销、冲模和冲头、锻锤的锤杆、锻模等，用静载荷下的性能指标不足以衡量该材料是否适宜，历来的习惯都用冲击韧性作为指标。所谓冲击韧性是在冲击载荷作用下，冲断试样时试样单位面积上所消耗的冲击功。冲击韧性是在冲击试验机上测定，以往采用的标准试样如图 1-4 所示，a 为梅氏 U 型缺口冲击试样。

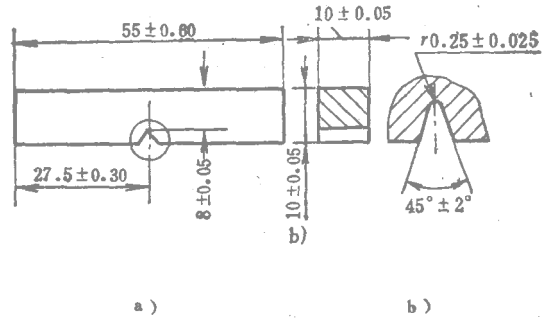


图1-4 夏氏冲击试样

用梅氏试样测定的冲击韧性，用  $a_K$  表示。即：

$$a_K = \frac{A_K}{F_0} \quad (\text{J/cm}^2)$$

式中  $A_K$ ——冲击功 (J)；

$F_0$ ——试样缺口处的截面积 ( $\text{cm}^2$ )。

$a_K$  值愈大，说明该材料抵抗冲击载荷的能力愈大，韧性愈好。但须指出，这种方法虽然习惯上已经长时期来用作衡量金属材料的韧性指标，其实是欠妥的。往往还会造成错觉，似乎冲断试样的功是消耗在缺口处的横断面上，其实不然，消耗的功并不是用于破断，而是用于破断前在缺口附近体积内的变形。因此有些国家的标准已改为直接用冲击功  $A_K$  值表示材料的抗冲击能力。

夏氏 V 型试样的缺口比较尖锐（见图 1-4），应力集中大，参与塑性变形的体积较小，对材料脆性转化反应灵敏，其冲击韧性值用  $a_{KV}$  表示。今后将逐步取代  $a_K$ 。

冲击韧性与试验温度有关。在低温下，钢的冲击韧性显著降低，这种现象称为钢的冷脆。冷脆对低温下工作的零件有实用意义。

图 1-5 是冲击韧性与温度变化的关系曲线。 $a_K$  值由高变低的这个温度区段称脆性转变温度范围。工程上希望材料的脆性转变温度愈低愈好。脆性转变温度也是衡量金属材料质量的指标之一。

机器零件在实际工作中所承受的冲击载荷不同于一次摆锤冲击，所以用  $a_K$  值来衡量并不恰当。因此，当材料的其它性能指标都能满足技术要求，仅仅由于  $a_K$  值稍低而改用更好的材料，不能认为是合理的。

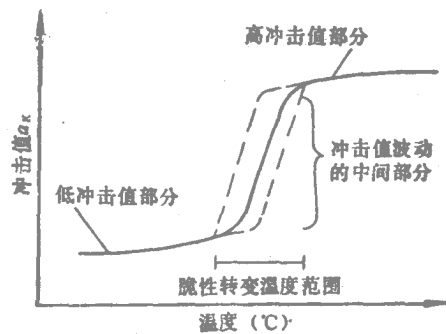


图1-5 冲击值—温度曲线示意图

2. 小能量多次冲击试验许多零件在工作过程中承受的冲击载荷往往是小能量多次冲击负荷，也就是零件在服役时经过千百万次能量不大的冲击载荷作用后，因损伤而产生的裂

缝逐步发展以致断裂。例如：一些本来不受冲击载荷的齿轮和轴类零件，由于严重磨损后造成的冲击就属于这一类。所以不能用一次大能量冲击的  $a_K$  值来衡量，而必须采用小能量多次冲击抗力指标。

根据近代研究和生产实践证明，小能量多次冲击抗力主要取决于强度；而大能量一次冲击抗力主要取决于材料的塑性。为了片面追求过高的  $a_K$  值而牺牲强度，提高塑性，恰恰降低了比较符合于实际工况的小能量多次冲击抗力，使效果适得其反。例如：某厂的锻锤锤杆过去片面追求  $a_K$  值而降低强度，结果仍经常断裂，改用提高强度降低  $a_K$  值的办法，使多次冲击抗力提高，锤杆的使用寿命显著增加。球墨铸铁曲轴的  $a_K$  值仅为锻钢曲轴的 10~20% 左右，实践证明，很多情况下能够成功地取代锻钢制造曲轴，也是这个道理。因此，有必要指出，设计时单纯追求过高的  $a_K$  值是没有必要的。在某些情况下，为了追求较高的  $a_K$  值而降低强度，并非善策。

### 五、硬度

硬度的含义是材料表面抵抗另一硬物刻入的能力。是衡量金属材料软硬的一个指标。

由于测定硬度的方法比较简单，可以在工件上直接测定，不必加工试样。也不会破坏工件，适用于成批检验零件的质量；而且硬度值也是衡量材料抗塑性变形能力的指标，它与强度存在一定的关系。因此在生产中被广泛采用，并作为设计图纸中主要技术条件之一。

但应指出：硬度与强度之间虽然存在一定的关系，但不是绝对的。不同的钢材在相同的硬度时，其强度并不一定相等；同一种钢采用不同的热处理方法得到相同的硬度值时，其强度也可能不同，性能和使用效果也不一定相同，有时相差还很大。

常用的硬度测定法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度三种。

1. 布氏硬度 布氏硬度试验法是加一定的载荷于一定直径的小钢球上，压入被测金属材料的表面，停留一定时间，然后卸除载荷，使其表面留下一个压痕，如图 1-6 所示。根据所用载荷的大小和所得压痕的面积来计算压痕球面积上所受的平均压力，即为布氏硬度值。用符号 HB 表示。

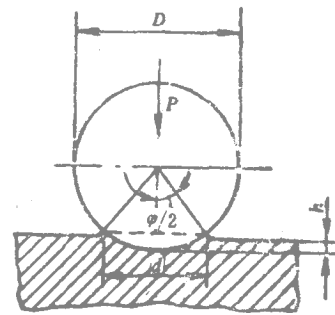


图 1-6 计算布氏硬度压痕面积示意图

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{kgf/mm}^2)$$

式中  $F$ ——压痕球面积；  
 $P$ ——所加载荷；  
 $D$ ——钢球直径；  
 $d$ ——压痕直径。

布氏硬度 HB 的单位是  $\text{kgf/mm}^2$ ，但在实际应用上只写明硬度的数值，而不标出单位。例如  $HB = 240 \text{kgf/mm}^2$ ，一般只写 HB240。在实际测试时，硬度值并不需要用上述公式计算，一般都用刻度放大镜测出压痕直径  $d$  以后，可以直接从硬度表中查到 HB 的硬度值。

布氏硬度的压头是淬火钢球，因此只适用于硬度较低的金属材料，如铸铁、有色金属以及硬度在 HB400 以下的钢。对薄壁零件和金属薄板也不适用。

为了使试验结果精确，按国标 GB231—63 规定，压痕中心距试样边缘的距离应不小于压痕直径的 2.5 倍；相邻两压痕的中心距离应不小于压痕直径的 4 倍；被测试表面要制成尽可能光洁的平面；压痕直径  $d$  的大小应在  $0.25D < d < 0.6D$  范围内。

布氏硬度的特点是压痕较大，代表着金属在较大体积内的平均性能。对铸铁和其它轴承合金等，是其它硬度试验法所不能代替的。对于碳钢和一般低合金结构钢，布氏硬度与强度之间有如下的近似关系（但不能看作很准确的）：

$$\sigma_b = 0.34 \sim 0.36 \text{ HB}$$

布氏硬度试验法的缺点：测量压痕比较麻烦，操作也慢；并且在被测工件的表面留有较大的压痕，故不宜测试成品。

生产中的大型工件需要测定布氏硬度时，常用可携带的锤击式布氏硬度计。它的特点是试验方法简单 操作方便 但精确度较低（误差范围 7~10%），故仅仅用在难于搬运的大型工件。

2. 洛氏硬度 洛氏硬度试验法是目前工厂中应用最广泛的试验方法。它的测量原理和布氏硬度基本相似，不同的是洛氏硬度不是测量压痕的面积，而是测量压痕的深度，压痕愈浅硬度值愈高。硬度值可以在测定时直接读出，使用上比布氏硬度方便。

洛氏硬度常用的一种标准是用  $120^\circ$  角圆锥形金刚石压头，如图 1-7 所示。图中 0-0 为圆锥压头的初始位置；1-1 为初载荷（10kgf）作用下的压头压入深度为  $h_1$  时的位置，加初载荷的目的是使压头与被测工件的表面紧密接触，避免由于工件表面不平整而影响测定结果的精确性；2-2 为总载荷（初载荷 + 主载荷）作用下压头压入深度为  $h_2$  时的位置；3-3 为卸除主载荷后，由于被测试金属弹性变形恢复，而使压头略为提高时的位置。这时，压头实际压入的深度为  $h_3$ 。故由于主载荷所引起的塑性变形而使压头压入深度  $h = h_3 - h_1$ ，并以此来衡量硬度。显然， $h$  愈大则硬度愈低，反之则硬度愈高。考虑到习惯上都是数值愈大，硬度愈高，因此采用一个常数  $K$  减去  $h$  来表示硬度大小，并用每 0.002mm 的压痕深度为一个硬度单位，由此获得的硬度值称为洛氏硬度值，用符号 HR 表示。因此

$$\text{HR} = \frac{K - h}{0.002}$$

式中的  $K$  为常数，用金刚石圆锥体作压头时  $K = 0.2\text{mm}$ ；用淬火钢球作压头时  $K = 0.26\text{mm}$ 。由此获得的洛氏硬度值 HR 为一无名数，所得的硬度值由硬度计的指示器上直接读出。

为了能用同一硬度计测定从软到硬的各种金属材料的硬度，洛氏硬度采用了不同的压头和载荷，组成多种不同的洛氏硬度标尺，其中最常用的是 HRA、HRB、HRC 三种，这三种标尺所用的压头、载荷及硬度许用范围见表 1-1。

由上可知，洛氏硬度的测定范围可以从较软的有色金属到极硬的硬质合金和淬火钢，压痕极小，在成品上也可以测量，并能直接读出硬度值，操作迅速简便，因此在生产中被广泛

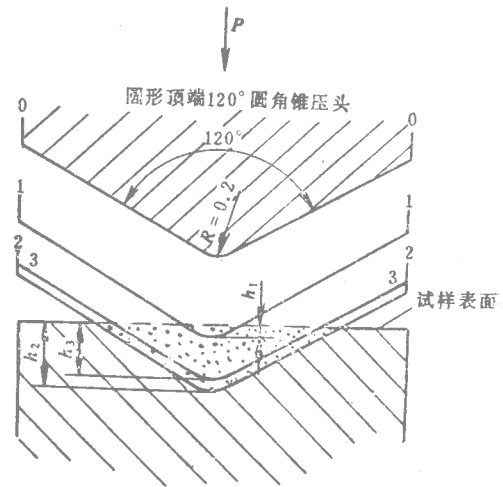


图 1-7 洛氏硬度试验原理示意图

表1-1 常用洛氏硬度标尺的试验条件

标尺符号	所用压头	载荷 (kgf)		测量范围	应用举例
		初载荷	主载荷		
HRA	顶角为120°的圆锥型金刚石	10	50	HRA70~85	硬质合金、淬火工具钢、浅层表面硬化钢
HRB	φ1.5875mm(1/16")淬火钢球	10	90	HRB25~100	软钢、铜合金、铝合金
HRC	顶角为120°的圆锥型金刚石	10	140	HRC20~67	淬火钢、调质钢、深层表面硬化钢

应用。由于它的压痕小，被测部位硬度的代表性也小，测定时同一工件上必须在相邻部位测定多次，取平均值。对组织不很均匀的材料，洛氏硬度值不够精确，如轴承合金和铸铁就不宜采用。

还须指出，洛氏硬度试验法应在平面上进行，如果在曲率半径较小的柱面或球面上测定硬度时，应在测得的硬度值上再加上一定的修正值。修正值的大小可查阅有关手册。

3. 维氏硬度 维氏硬度的试验原理与布氏硬度相同。图 1-8 是维氏硬度试验原理示意图，它是用一个相对面间夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体的压头，在 200gf~120kgf 的范围内根据测定层厚度和试样性质选择载荷，在一定的载荷作用下压入试样表面，保持一定时间后卸除载荷，留下方形压痕。然后测量压痕投影的两对角线的平均长度  $d$ ，计算出压痕表面积  $F$ ，最后求出压痕表面积上平均压力  $\left(\frac{P}{F}\right)$ ，以此作为被测试部位的硬度值，称为维氏硬度，用符号 HV 表示。因此，

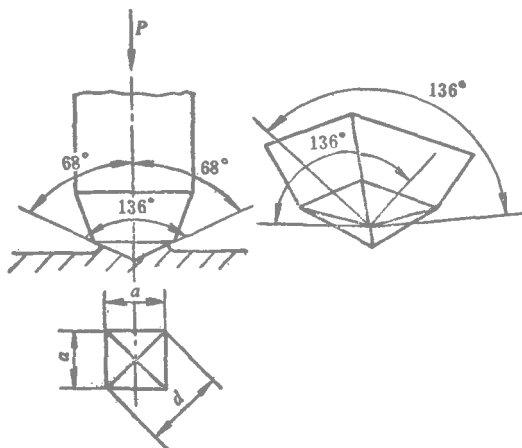


图 1-8 维氏硬度试验原理示意图

最后求出压痕表面积上平均压力  $\left(\frac{P}{F}\right)$ ，以此作为被测试部位的硬度值，称为维氏硬度，用符号 HV 表示。因此，

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{P}{\frac{d^2}{2 \sin 68}} = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

式中  $P$ ——载荷 (kgf);

$d$ ——两对角线平均长度 (mm)。

故维氏硬度值的单位应该是  $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ，但习惯上只写硬度值而不标出单位。在实际测试时，维氏硬度值并不需要用上述公式计算，一般都是根据  $d$  的大小，查表可得。

维氏硬度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。

各种硬度值之间的换算，可查表 1-2。

## 六、疲劳

前面已经讨论过的强度、塑性、硬度都是金属材料在静载荷作用下的机械性能指标。实际上，有些机器零件在运转过程中受到方向、大小周期性变化的交变载荷，如柴油机曲轴、机车车轴、机床主轴等。轴在旋转时，它的截面上，一面受拉应力，另一面受压应力；转了

表1-2 各种硬度换算对照表

HRC	HRA	HV	HB (30D <sup>2</sup> )	HRC	HRA	HV	HB (30D <sup>2</sup> )	HRC	HRA	HV	HB (30D <sup>2</sup> )
70	8f.6	1037		50	75.8	509	488				
69	86.1	997		49	75.3	493	474				
68	85.5	959		48	74.7	478	461				
67	85.0	923		47	74.2	463	449				
66	84.4	889		46	73.7	449	436				
65	83.9	856		45	73.2	436	424				
64	83.3	825		44	72.6	423	413	30		289	283
63	82.8	795		43	72.1	411	401	29		281	276
62	82.2	766		42	71.6	399	391	28		274	269
61	81.7	739		41	71.1	388	380	27		268	263
60	81.2	713		40	70.5	377	370	26		261	257
59	80.6	688		39	70.0	367	360	25		255	251
58	80.1	664		38		357	350	24		249	245
57	79.5	642		37		347	341	23		243	240
56	79.0	620		36		338	332	22		237	234
55	78.5	599		35		329	323	21		231	229
54	77.9	579		34		320	314	20		226	225
53	77.4	561		33		312	306	19		221	220
52	76.9	543		32		304	298	18		218	218
51	76.3	525	501	31		296	291	17		211	211

半圈以后，原来受拉应力的一面变为受压应力，而原来受压应力的变为受拉应力；就轴表面上的每个点来说，它的应力也由小变大，然后又由大变小；不断旋转时，它承受交变载荷的作用。

承受交变载荷的零件，在服役过程中，往往在工作应力低于屈服极限的情况下，仍然会发生断裂，这种现象称为疲劳断裂。疲劳断裂与在静载荷作用下的断裂不同，不管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的预兆，事先很难觉察到，所以危险性很大。

金属材料在交变载荷作用下，经过无数次的循环而不致破裂的最大应力称为疲劳极限，或称疲劳强度。实际上不可能作无数次的交变载荷试验，因而有一个规定次数，对钢是  $10^7$ 次；铸铁是  $5 \times 10^6$ 次；有色金属是  $5 \times 10^7$ 次。经上述周次的循环不产生破裂的最大应力称为疲劳极限。对称循环的弯曲疲劳极限用  $\sigma_{-1}$  表示。

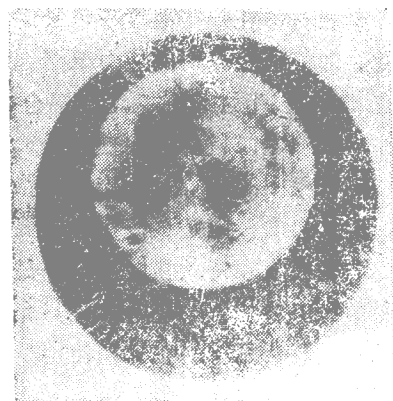


图1-9 疲劳断口

图1-9是典型的疲劳断口，选自锻锤活塞杆的疲劳断口截面上。断口上可以看出两个明显不同的区域，图中白亮区的中心是疲劳源，在交变载荷作用下，不断的反复拉、压，因而逐渐扩大，二个已经分离的局部表面在一张一合的过程中互相摩擦，逐渐磨光，形成了白亮区，称为疲劳扩展区。由于裂纹不断扩大，使周围连接部分的截面相应缩小，直到该截面上单位面积的应力超过 $\sigma_s$ 时，于是突然断裂，该区称为瞬时破断

区，即图上四周围的粗糙区域。

材料内部缺陷、微裂纹、表面划痕、擦伤以及机械加工的刀痕、磨痕和锐边、毛刺、清角等都可能致疲劳断裂。图 1-10 是由于刀痕过深而导致疲劳断裂的实物照片。因此，生产中不可忽视机械加工后遗留在工件表面上的个别刀痕，往往由此而带来很大的危害。

金属材料的疲劳极限与强度极限有近似的比例关系，一般钢材的弯曲疲劳极限值  $\sigma_{-1}$  通常只有抗拉强度  $\sigma_b$  的一半。必须指出，这是光滑试样上测定的数值。实际上，工件不可能像光滑试样那样，往往都有键槽、油孔和截面急剧变化，这些都是显著降低疲劳极限的因素。所以，用带有缺口的疲劳试样测定的结果更接近于实际情况。缺口试样的疲劳极限用  $\sigma_{-1R}$  表示。一般钢材的  $\sigma_{-1R}$  远低于  $\sigma_{-1}$ 。

人们经过长期的探索，找到了不少提高疲劳强度的有效措施。除了对零件表面精细加工，降低表面粗糙度外；避免截面形状的急剧变化，尽量减少应力集中等办法外；对零件进行表面淬火、化学热处理、喷丸强化、滚压强化等措施，对提高疲劳强度都有明显效果。这些强化措施现已日益广泛地应用于实际生产上。

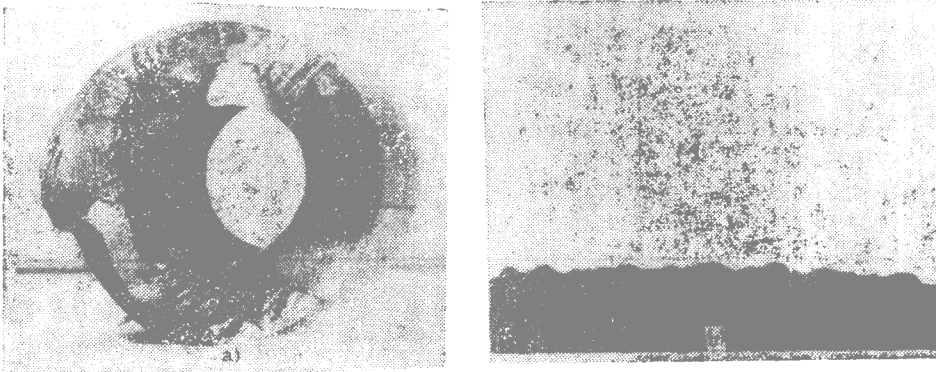


图1-10 由于刀痕过深而引起疲劳断裂的实物照  
a) 断口全貌 b) 内孔表面刀痕过深部位局部放大(未浸蚀)

### 七、蠕变极限与持久强度极限

金属材料在一定温度下，长时期承受恒定载荷，缓慢地连续地产生塑性变形的现象称为蠕变。即使恒定载荷的应力低于弹性极限，蠕变仍会发生。发生蠕变的温度，随材料而不同。钢在  $350^{\circ}\text{C}$  以上才发生蠕变，铝合金在  $100\sim 200^{\circ}\text{C}$  时就发生蠕变。在这种温度条件下工作的零件，必须考虑材料的蠕变极限。

蠕变极限的一种表示方法是指被测试样在给定温度下产生规定蠕变速度的应力值。

持久强度极限是试样在一定温度和规定的持续时间内，引起断裂的最大应力值。

蠕变极限和持久强度极限都是反映材料高温性能的主要指标。不同的是：蠕变极限以考虑变形为主，如汽轮机的叶片只允许产生一定的变形量，设计时必须考虑蠕变极限。持久强度极限主要考虑材料在长期使用下的破坏抗力，如锅炉管道，为了保证使用时不破坏，设计时应考虑持久强度极限。

## 第三节 金属的工艺性能

制造零件时，金属材料必需采用各种工艺方法进行加工，如铸造、锻造、焊接、切削加

工等。各种金属材料的加工难易程度不同，有些材料虽然其它性能都很好，但是工艺性能差，应用上受到限制，尤其在大量生产时，必须考虑材料的工艺性能。

#### 一、铸造性

铸造性主要是指金属液态时的流动性和凝固过程中的收缩率和偏析倾向。流动性好容易充满铸型，如灰口铸铁的流动性比钢好，可以浇铸较薄的或形状比较复杂的铸件；收缩率小则铸件中的缩孔、缩松、变形等都可以小些；偏析小，铸件各部分的成分比较均匀。

#### 二、可锻性

金属材料是否可以用锻造方法制成合格锻件的性能称为可锻性。可锻性与塑性和变形抗力有关，材料的塑性好和锻压抗力小则可锻性好。

#### 三、可焊性

金属材料是否可以用常用的焊接方法焊成合格接头的性能称为可焊性。可焊性好的材料可以用一般的焊接方法施焊，就能获得满意的焊缝。

#### 四、切削加工性

切削加工性是指金属是否容易被切削的性能。切削加工性好的材料对刀具磨损小，刀具寿命长，切削抗力小，切屑容易折断脱落，切削加工后表面粗糙度降低。不同材料的切削加工性不同，但是同一牌号材料的切削加工性也可能有较大差异。一般情况下，硬度愈高，切削加工愈困难，刀具损耗大。可是单纯以硬度高低来判别切削加工性好坏是不够全面的。当硬度值相差无几而金相组织不同时，切削性能可能相差很大，例如，高碳钢经退火处理后硬度虽低，但切削加工性并非都很好。有关这方面的内容，在以后有关章节中详细讨论。

## 复 习 题

1. 金属的物理性能有哪几种？物理性能与金属材料的使用有何关系？为什么？
2. 哪些情况下要考虑金属的化学性能？
3.  $\sigma_b$ 、 $\sigma_s$ 、 $\delta$ 、 $\psi$ 、 $\sigma_s/\sigma_b$ 的含义是什么？
4. 洛氏硬度、布氏硬度、维氏硬度有哪些区别？分别适用于哪些工件上？为什么？
5. 什么叫冲击韧性？
6. 疲劳的定义是什么？ $\sigma_{-1}$ 和 $\sigma_{-1R}$ 有何区别？哪些因素会降低疲劳强度？哪些措施可提高疲劳强度？
7. 金属的工艺性包括哪些内容？
8. 单纯以硬度高低来判别切削性能好坏是不全面的，为什么？

## 第二章 金属的结晶和固态金属的结构

影响金属材料性能的重要因素是金属的内部构造。所以要掌握金属材料的性能，就必须了解它的内部构造。

### 第一节 纯金属的构造和结晶

#### 一、晶体构造的基本知识

1. 晶体的特征 自然界中一切物质都由原子组成。固体状态下，根据原子在物质内部聚集状态的不同，可以分为晶体与非晶体两大类。所谓晶体，是指其内部的原子按照一定的几何规律作周期性的排列。而非晶体则不同。其内部原子是没有规则杂乱无章地堆积着，如松香、玻璃、赛璐璐、沥青等。金属和合金在固态下都是晶体。

纯金属都有一定的熔点，如铁的熔点为  $1538^{\circ}\text{C}$ ，铜是  $1083^{\circ}\text{C}$ ，铝是  $660^{\circ}\text{C}$ 。晶体是按照一定的几何规则排列的，从不同的方向看它的几何规律都不会完全相同，所以各个不同方向上的性能也不会完全相同，故称晶体的各向异性。而非晶体则不然，它没有固定的熔点，在各个方向上所表现的性能都相同，具有各向同性的特征。

为了便于理解和描述晶体中原子排列的情况，可将金属中的原子近似地看成小球，小球按照一定的几何规律紧密堆积，如图 2-1 a 所示。各原子之间用假想的线条将各原子的中心连接起来，构成了一个空间格架，各原子的中心是在这个格架的各个结点上，这种用来描述原子在晶体中排列形式的抽象的空间格架称为晶格，如图 2-1 b 所示。

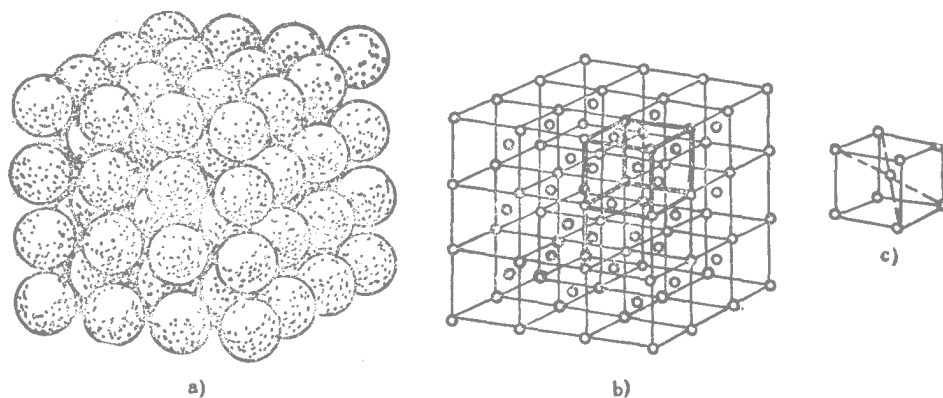


图 2-1 晶体及晶格的示意图

a) 晶体中原子的排列 b) 晶格 c) 晶胞

原子在晶格结点上并非静止不动，而是以晶格结点为中心，以很高的频率作上下、前后、左右的振动。振动的频率和振动幅度随温度升高而增大，温度愈高，振幅和振动频率愈大。

由于晶体中的原子是有规则的排列，因此，可以从晶格中选取一个能够完全代表晶格特

征的最小的几何单元——晶胞来分析原子的规则排列情况，如图 2-1 b 中的粗线部分和图 2-1 c 所示。整个晶格是由无数相同的晶胞在空间重复堆积而成的。

晶胞的棱边长度称为晶格常数，因为尺寸极小，所以用埃 ( $\text{\AA}$ ) 来度量 ( $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$ )。

2. 金属中常见的晶格类型 金属的晶格类型很多，常见的有体心立方、面心立方和密排六方晶格三种类型。

(一) 体心立方晶格 体心立方晶格的晶胞如图 2-2 所示。晶胞是一个立方体，在立方体的八个角上和晶胞的中心都有一个原子。室温下的铁 ( $\alpha\text{-Fe}$ )、铬、钨、钼、钒、铌等金属的晶格都属于这种类型。

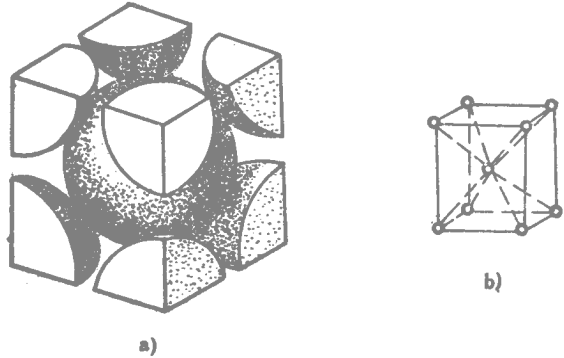


图 2-2 体心立方晶格

(二) 面心立方晶格 面心立方晶格的晶胞如图 2-3 所示。在立方体的八个角上都有一个原子，同时在立方体的各个面中心还有一个原子。 $\gamma\text{-Fe}$ 、铝、铜、镍、银等金属的晶格都属于这种类型。

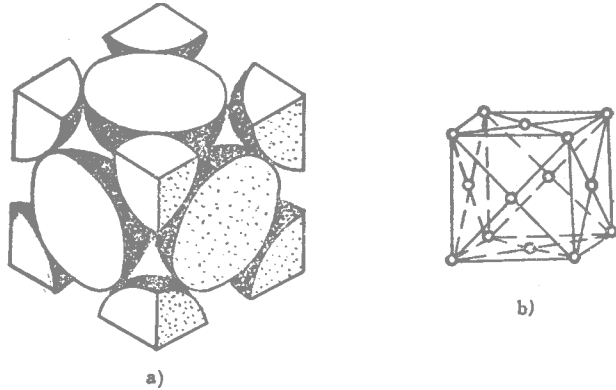


图 2-3 面心立方晶格

(三) 密排六方晶格 密排六方晶格的晶胞是一个六棱柱体，十二个顶角上各有一个原子，在上、下底面的中心各有一个原子，在六棱柱体上下两底面之间的中心还有三个原子排列，如图 2-4 所示。具有这种晶格类型的金属有镁、锌、铍、镉以及常温下的钛等。

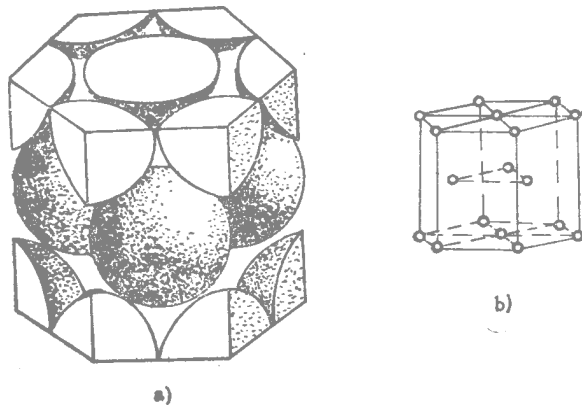


图 2-4 密排六方晶格

有些金属如铁、锰、钛、钴等在不同的温度范围内可以呈现不同的晶格类型，这一现象叫做同素异构转变。金属发生同素异构转变时，它的性能也随着发生变化。

从上面三种常见晶格类型可以看出，在不同的方向上，原子排列的密度不同，所以晶体在不同方向上所表现的性能会有差异，这就是晶体具有各向异性的原因。

### 3. 实际金属的晶体结构以上

是为了说明晶体结构，把晶体中原子有规则的排列当作是完整无缺的，晶格中每个应该被占据的结点上全部由原子占据着。实际上并非完全如此，晶体中往往存在着各种缺陷，下面

简单介绍几种晶体缺陷。

(一) 晶格空位和间隙原子 在晶体结构中,原子是以晶格结点为中心作上下、左右、前后的振动,振动是随着温度的升高而加剧。个别原子可能因此而离开了原来的位置,使晶格中某些应该有原子占据的结点上出现了空位,这种缺陷称为晶格空位。有些外来原子有可能钻到晶格中原子与原子之间的间隙内,这种缺陷称为间隙原子,见图 2-5。形成空位以后,周围的原子会靠拢,而间隙原子周围的原子发生撑开现象,使晶格发生扭曲,这现象称为晶格畸变。

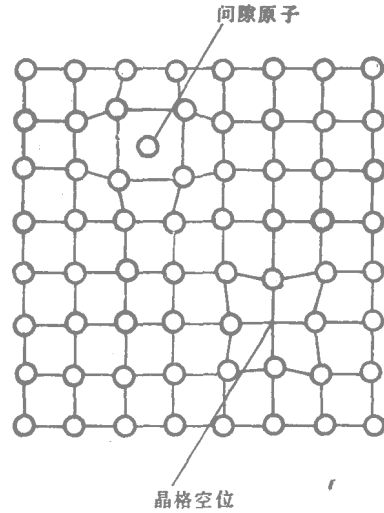


图 2-5 晶格中的晶格空位和间隙原子

(二) 晶粒内的镶嵌结构 用电子显微镜来观察晶粒,可以看到每个晶粒内部还分成许多小晶块。这些小晶块内部的原子排列是同一位向,每一个小晶块的位向和它周围的小晶块的位向相差一定的角度,但角度很小,仅仅几十分到  $1\sim 2^\circ$ , 这些小晶块称为镶嵌块或称亚晶粒。

以上是对真实晶体结构的一些初步认识,便于理解以后章节中的某些现象。

## 二、纯金属的结晶

金属由液态转变为固态的过程称为凝固。液态金属中原子是无规则的排列,在固态时是晶体,金属原子从无规则排列的液体状态过渡到原子作有规则排列的固体状态的过程称为结晶。

除了粉末冶金产品外,绝大多数金属制件,都要经过结晶过程。结晶时形成的内部组织称为铸态组织,又称原始组织,它不仅直接关系到铸件的性能,而且也影响到经过压力加工和热处理后的性能。所以了解金属结晶的基本规律是十分必要的。

1. 冷却曲线 纯金属的结晶过程是在恒定温度下进行的,这个温度称为结晶温度。每种金属都有一定的平衡结晶温度,或称理论结晶温度,用  $T_0$  表示。只有冷却到低于理论结晶温度才能有效地进行结晶。所以金属的实际结晶温度 ( $T_n$ ) 低于理论结晶温度 ( $T_0$ ), 这种现象称为过冷现象。理论结晶温度与实际结晶温度之差 ( $T_0 - T_n$ ) 称为过冷度。过冷度与冷却速度有关,冷速愈大,过冷度愈大,即结晶时的冷速愈快,金属的实际结晶温度愈低;当冷却速度极其缓慢时,过冷度接近于零,则实际结晶温度,与理论结晶温度几乎趋于一致。

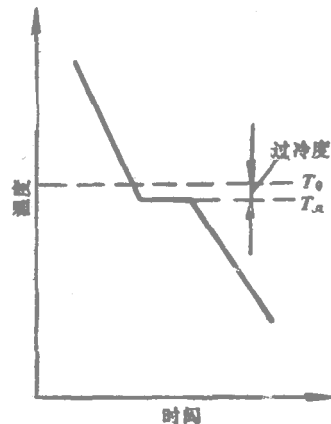


图 2-6 纯金属结晶时的冷却曲线

金属的结晶温度可以通过液态金属缓慢冷却过程中温度的变化来测得,此法称为热分析法。方法是:当熔化的金属缓慢冷却时,每隔一定时间测量一次温度,记录下来,然后将测得的数据绘制在温度—时间坐标上,所得的曲线便是该金属的冷却曲线,如图 2-6 所示。

从冷却曲线上可以看出:开始阶段,液态金属因热量向外散失,温度不断下降,当冷却

到某一温度时，时间延长而温度并不下降，此乃金属结晶时放出的结晶潜热补偿了向外散失的热量。所以在一段时间内温度不下降，曲线上出现一段水平线段。当结晶完成后，此时已没有结晶潜热可以补偿金属向四周散失的热，故温度又重新下降。冷却曲线上水平线段所对应的温度即该金属的结晶温度。

2. 结晶过程 当液体状态的金属冷却到凝固温度时，其中某些部位开始产生极微小的晶体，也就是液体金属中的某些部分有少数原子出现有规则的排列，这便是结晶的核心，称为晶核。接着在其周围的液态金属的原子依附于晶核继续作有规则的堆积，使已经形成的晶核不断长大；与此同时，又有新的晶核自液态金属中不断产生，晶核形成后又继续长大。这一过程发展的结果，使液态金属全部凝固成为固体。图 2-7 示意地说明金属的结晶过程。

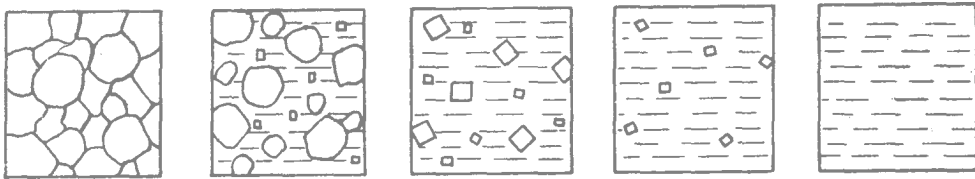


图2-7 金属结晶过程示意图

每个晶核长大后就成为一晶粒。凝固后的金属是由许多外形不规则的晶粒所组成。仅一个晶粒的晶体称为单晶体，它在各个方向的性能不一致，具有“各向异性”；由许多晶粒组成的晶体称为多晶体。固体金属都是多晶体，多晶体中各晶粒的结晶方向（又称位向）各不相同，因此，多晶体中各向异性就不明显，故称为等向性。

晶核在成长过程中，各个方向上的长大速度并不相同，散热最快的方向冷速最大，晶核沿散热最快方向生长，常形成像树枝状的晶体，如图 2-8 所示。在长大过程中，正在长大的枝晶与周围晶体的枝晶相互接触，彼此阻碍成长时，在接触的部位结晶停止，晶体向没有阻碍的部位继续成长，最终枝晶间的空隙被最后凝固的金属填满，使每一个枝晶成长为一个晶粒。图 2-9 是 Cu-Ni 合金结晶后的树枝状晶体的显微组织。

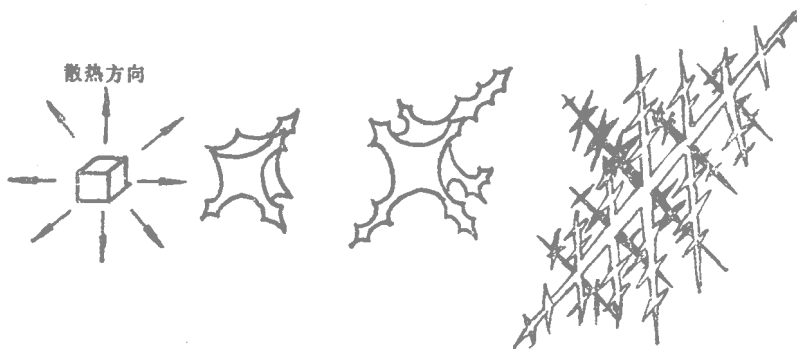


图2-8 树枝状晶生长示意图

由上可知，金属的结晶是包括晶核的产生和长大两个基本过程，两个过程是同时进行的。实践证明，成核和长大的过程是金属结晶时的普遍规律，一切结晶过程都不例外。

由晶核长成的结果，形成外形不规则的晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间的交界面称为晶界。在同一个晶粒内部的原子排列位向是一致的。晶界的原子受相邻两个晶粒中原子排列位