

航空材料学

(上册)

中国人民解放军空字六二一部队

一九七五年一月

技术科

技

目 录

第一章 金属的基本知识.....	1
第一节 金属的性质.....	1
第二节 金属的结构.....	11
第三节 外力、温度对金属机械性质的影响.....	21
第四节 金属组织的分析方法.....	28
第二章 航空上常用金属材料.....	32
第一节 碳钢及生铁.....	32
第二节 钢的热处理原理.....	47
第三节 钢的热处理方法.....	60
第四节 合金钢.....	80
第五节 铝及铝合金.....	95
第六节 镁及镁合金.....	109
第七节 耐热钢及耐热合金.....	113
附表1 各种硬度与强度换算表.....	126
附表2 常用金属材料新(现用)、旧(曾用)牌号对照表.....	129

飞机、发动机上绝大部分零件，是用金属材料制成的。例如：飞机蒙皮和隔框是用铝合金制成的；起落架是用合金钢制成的；火焰筒和涡轮叶片是用耐热合金制成的等等。在外场维护使用过程中，这些金属材料经常会出现变形、断裂、磨损和腐蚀现象，这样就会造成飞机、发动机的性能故障，严重时，甚至会影响飞行安全。例如：歼5飞机曾出现左机翼主梁断裂，歼7飞机出现过左起落架折断等。因此机务维护人员必须经常做好预防和修复工作。

飞机、发动机零件为什么要采用不同的金属材料？在外场维护使用过程中，为什么会出现变形、断裂、磨损和腐蚀现象？机务维护人员如何进行预防和修复呢？这些问题都是机务人员必须了解的。掌握这些理论知识，是做好机务维护工作的必要条件。

为了解决上述问题，我们首先介绍金属的一些基本知识。

第一章 金属的基本知识

毛主席教导我们：“不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事情的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事”。要正确使用和维修各种航空金属材料，就必须懂得它们的性质和内部结构的情形，以及它们的结构、性质在不同的外界因素作用下发生变化的规律。

本章主要介绍金属的性质、金属的内部结构以及金属在外力和温度作用下其组织和性质的变化规律，为学习航空上常用金属材料、金属的断裂和金属的腐蚀及保护打下基础。

第一节 金属的性质

金属按其成分不同，可分为纯金属和合金两大类。

纯金属是由单一的金属元素组成的。如纯铁、纯铜、纯铝等。而合金则是由两种以上的元素所组成的金属。其中有的合金全部是由金属元素组成的，例如黄铜，是铜和锌两种金属元素组成的。有的合金是由金属和非金属元素组成的，例如碳钢，就是由金属元素铁和非金属元素碳组成的合金。

金属的成分不同，其性质也不同。

金属的性质通常包括物理性质、化学性质、机械性质和工艺性质。这里仅介绍金属的机械性质和工艺性质。

一、金属的机械性质

金属的机械性质通常是指金属在载荷作用下的抵抗能力和变形能力。由于金属零件使用中都会受到载荷的作用，因此，金属的机械性质是它的质量好坏的重要标志。

为了便于理解金属的机械性质，先介绍关于载荷的种类及金属变形的知识。

（一）载荷的种类和金属的变形

1. 载荷的种类

载荷通常是指机件上所受的外力。按其性质可分为静载荷与动载荷两类。

(1) 静载荷 静载荷是慢慢地加于物体上的载荷。例如飞机停放时，起落架支柱上受到的载荷就是静载荷。

(2) 动载荷 主要有冲击载荷和重复载荷两种。

冲击载荷 冲击载荷是以很大速度作用在物体上的载荷。例如飞机起落架在着陆时，就承受着巨大的冲击载荷。

重复载荷 重复载荷是大小反复变化的载荷或者大小与方向都反复变化的载荷。例如飞机上的单向活门中的弹簧就受到大小反复变化的重复载荷；前起落架的减摆器轴，就受到大小与方向均反复变化的重复载荷。

2. 金属的变形

金属受力后都会变形，即发生形状和尺寸的改变。当受力较小时，它的变形在外力去掉后会消失。这种在外力去掉后能够消失的变形称为弹性变形。当受力增大到一定程度，外力去掉后，它的变形有一部分不能消失。这部分在外力去掉后不能消失的变形称为塑性变形。如果外力继续增大，最后金属将会断裂。



图1-1 拉力试件



图1-1 压力试件

图 1-1 拉力试件

(二) 金属的机械性质

金属的机械性质主要包括强度、塑性、硬度和韧性。

1. 强 度

金属在载荷作用下，抵抗变形和断裂的能力，称为强度。它通常用金属在拉力试验时的强度极限来表示。

在拉力试验中，可以求出试件的弹性极限、屈服极限和强度极限。拉力试件如图1-1。

(1) 弹性极限 弹性极限是试件能保持弹性变形时的最大应力。通常用符号 σ_e 表示。常用单位为公斤/毫米²。

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad (\text{公斤/毫米}^2)$$

式中： P_e ——试件开始产生塑性变形时所受的拉力；

F_0 ——试验前试件的横截面积。

金属受力如超过弹性极限，就开始产生塑性变形。

制作弹簧用的材料，就应具有高的弹性极限。金属的弹性极限不是一成不变的，例如：一般在高温时，金属的弹性极限会降低；冷加工后，金属的弹性极限会升高；金属在不同的热处理后，弹性极限会有不同程度的变化等。

(2) 屈服极限 屈服极限是试件在拉伸时产生微量塑性变形（通常为0.2%）时的应力。通常用符号 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ 表示。常用单位为公斤/毫米²。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \quad (\text{公斤/毫米}^2)$$

式中：Ps——试件产生微量塑性变形时所受的拉力；

F_0 ——试验前试件的横截面积。

屈服极限反映了金属对微量塑性变形的抗力，由于绝大多数的零件在使用中不允许有微小的塑性变形出现，因此屈服极限又是设计与选用金属材料的依据。

(3) 强度极限

在拉断试件的过程中，试件所受的最大拉伸应力，称为强度极限。当应力达到强度极限时，金属就开始断裂。强度极限用符号 σ_b 表示。常用单位为公斤/毫米²。

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \quad (\text{公斤/毫米}^2)$$

式中：Pb——试件在拉力试验中所受的最大拉力；

F_0 ——试验前试件的横截面积。

各种金属的强度不同。例如合金钢的强度极限一般为90~160公斤/毫米²，铝合金的强度极限一般为25~60公斤/毫米²。强度大的合金，在受力时不易变形，也不易断裂。飞机上受力大的零件，要使用强度大的合金来制造。例如，机身大梁、机翼大梁、隔框等承力构件，就用强度大的合金钢、铝合金来制造。

2. 塑 性

金属在载荷作用下产生塑性变形而不破裂的能力，称为塑性。塑性通常用试件在拉力试验时的延伸率和断面收缩率表示。

(1) 延伸率

试件拉断后的伸长量与其原长的百分比，称为延伸率。用符号 δ 表示。

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

式中： Δl ——试件拉断后的伸长量（见图1-2）；

l_0 ——试件的原长；

l_1 ——试件拉断后的长度。

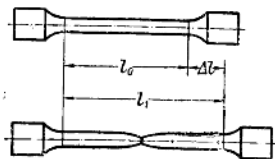


图 1-2 试件在拉力试验前后的长度



图 1-3 试件在拉力试验前后的横截面积

(2) 断面收缩率

试件拉断后，断裂处横截面积的减小量与试件原来横截面积的百分比，称为断面收缩率。用符号 ψ 表示。

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

式中: ΔF ——试件拉断后断裂处横截面积的减小量;

F_0 ——试件原来的横截面积 (见图1-3);

F_1 ——试件拉断后断裂处的横截面积 (见图1-3)。

金属的延伸率和断面收缩率愈大, 表明金属的塑性愈好。塑性好的金属, 适于用压力加工的方法制成零件。塑性小的金属, 脆性就大, 在变形时容易破裂。

3. 硬 度

金属抵抗比它更硬的物体压入表面的能力, 称为硬度。

了解各种金属的硬度具有重要的实际意义。金属的硬度小时, 它就被划伤、碰伤和磨损, 因此, 在维修工作中对硬度小的材料, 不应使它受到更硬物体的刻划、碰撞和摩擦。在切削加工时, 如果工具的硬度愈大, 切削能力一般也愈高, 但如果被切削零件的硬度很大时, 则将使切削发生困难。

金属的硬度是用专门仪器测定的, 测定的方法很多, 其中应用最广泛的是布氏硬度及洛氏硬度。

(1) 布氏硬度

布氏硬度是用专门的试验机测定的。测定时, 将一定直径的很硬的钢球用一定的压力, 压入试件表面 (图1-4), 然后取出试件, 量出压坑的直径, 算出压坑面积, 代入下式中, 即可求出金属的布氏硬度。布氏硬度通常用符号HB表示, 常用单位为公斤/毫米²。

$$HB = \frac{P}{F} \quad (\text{公斤/毫米}^2)$$

式中: P ——压力;

F ——压坑面积。

压坑面积 $F = \frac{1}{2} \pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})$, 式中 D 及 d 分别为钢球及压坑的直径。

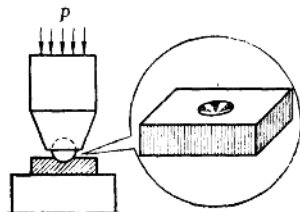


图 1-4 布氏硬度试验示意图

当钢球直径与所加压力均为一定时, 金属愈软, 钢球压入就愈深, 压坑面积也愈大, 得出的硬度值将愈小。反之, 如果金属愈硬, 则得出的硬度值将愈大。所以, 布氏硬度值的大小可以将金属的硬度直接反映出来。

各种金属的硬度通常是不同的, 例如, 低碳钢的布氏硬度 $HB = 80 \sim 160$, 铝硅合金的布氏硬度 $HB = 50 \sim 70$ 。在测定不同材料、不同厚度的试件的硬度时, 应根据表1-1确定钢球的直径及压力的大小。

由上可以看出, 布氏硬度的大小, 实际上反映了局部地区的金属在静载荷作用下抵抗塑性变形的能力。正是这样, 金属的布氏硬度与它的强度极限之间存在着密切关系。强度极限大的金属, 它的硬度一般也较大。许多金属的强度极限与它的硬度之间还存在着近似的正比

关系，例如，未经淬火的碳钢 $\sigma_s \approx 0.36 \text{ HB}$ ；硬铝 $\sigma_s \approx 0.37 \text{ HB}$ ；退火铜 $\sigma_s \approx 0.48 \text{ HB}$ ；调质合金钢 $\sigma_s \approx 0.34 \text{ HB}$ 。

布氏硬度的优点是：压坑面积较大，因此测量组织不均匀的合金时，硬度值比较准确；且与强度极限存在着近似的正比例关系，便于换算。

表 1—1 布氏硬度试验范围

材 料	硬 度 范 围	试件厚度 (毫米)	压力P与 球径D间的 关系	球 径 (毫米)	载 荷 (公斤)	载荷保 持时间 (秒)
黑 色 金 属	140~450	大于 6	$P = 30D^2$	10	3000	10
		6 至 3		5	750	
		小于 3		2.5	187.5	
黑 色 金 属	140以下	大于 6	$P = 30D^2$	10	3000	30
		6 至 3		5	750	
		小于 3		2.5	187.5	
有 色 金 属 (铜及铜合金、 镁合金等)	31.8~130	大于 6	$P = 10D^2$	10	1000	30
		6 至 3		5	250	
		小于 3		2.5	62.5	
有 色 金 属 (铝及铝合金、 轴承合金等)	8~35	大于 6	$P = 2.5D^2$	10	250	60
		6 至 3		5	62.5	
		小于 3		2.5	15.6	

布氏硬度的缺点是：压坑面积较大，不宜用来检验成品；也不能用来测定太硬的材料的硬度 ($\text{HB} > 450$)，否则钢球本身会变形而影响准确度。

(2) 洛氏硬度

洛氏硬度是将很硬的钢球或金刚石圆锥，用一定的压力压入试件的表面，根据压入的深度来确定材料的硬度。

洛氏硬度试验机由指示器、压印器、砝码、杠杆、工作台等部分组成。

砝码通过杠杆将载荷传给压印器，使压印器压入放置在工作台上的试件的表面，试件的硬度可以直接从指示器上得出。砝码有若干种，选择不同的砝码，可以得到60公斤、100公斤、150公斤等不同的载荷。

压印器上装有钢球或金刚石圆锥两种压头。钢球的直径有许多种，最常见的是1.59毫米 ($1/16$ 吋)，钢球用来压印较软的材料；金刚石圆锥的顶角为 120° ，用来压印较硬的材料。

指示器通常为一圆形的刻度盘，用来指示材料的硬度及压印的深度。指示器上标有100个刻度，每一刻度表示一个洛氏硬度单位或压印的深度为0.002毫米。

如图1-5，开始试验时，指针处于零点（即刻度100处），试验后测出硬度值为75，这时，

指针实际上只向着刻度顺序相反的方向转动了25格,压入试件深度为 25×0.002 毫米 $= 0.05$ 毫米。如果材料愈硬,压入深度愈浅,指针反转就愈小,洛氏硬度值就愈高。反之,材料愈软,洛氏硬度值就愈低。

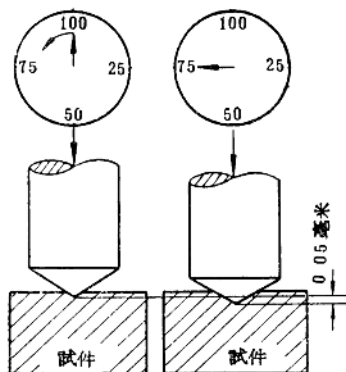


图 1-5 洛氏硬度的指示情况

根据测定洛氏硬度时所用压印器压头的种类和所加载荷的大小,洛氏硬度又可分为许多种,常用的有三种:

第一种:压头为金刚石圆锥,总载荷为150公斤,刻度范围为0~100,硬度值用符号HRC(或RC)表示。

这种方法用来测定硬度在HRC = 20~67之间的经过热处理的较硬的钢材。

若试验的金属硬度小于HRC20时,则金刚石圆锥压入试件过深,由于金刚石圆锥底部形状误差增大,所测得的结果就不够准确。若金属硬度大于HRC67时,则金刚石圆锥尖部产生很大压力,会使金刚石圆锥尖部损坏。

第二种:压头为钢球(直径 $= 1.59$ 毫米),总载荷为100公斤,刻度范围为0~130,硬度值用符号HRB(或RB)表示。

这种方法用来测定硬度在HRB = 25~100之间的金属材料。

若测定的金属硬度小于HRB25时,会使变形延续的时间很长,甚至使固定钢球的套管与试件接触,因而所测得的结果就不准确。当测定的金属硬度大于HRB100时,则钢球又易于变形,同时由于钢球压入金属较浅,测定出的硬度值也不准确。

第三种:压头为金刚石圆锥,总载荷为60公斤,刻度范围为0~100,硬度值用符号HRA(或RA)表示。

这种方法可以用来测定硬质合金薄板、渗碳层及表面淬火层的硬度。

此法载荷较小,可以避免金刚石圆锥尖部因受力过大而损伤。

用以上各种方法测定出的洛氏硬度值,都是在一定压头与一定载荷的条件下测出的,各种洛氏硬度值,都表示不同的含义,即使三种洛氏硬度的数值相同时(如HRC = 60, HRB

= 60, HRA = 60), 但硬度并不相等, 并且三者没有换算关系式。每种方法只适用于一定的条件, 在操作时应根据材料的性质来选择最合适的方法 (参考表1-2)。

表 1-2

压头与载荷的选择

试件的大约布氏硬度值(HB)	压头类型	总载荷(公斤)	洛氏硬度符号	洛氏硬度的容许界限
60~230	钢球 (d = 1.59毫米)	100	HRB	25~100
230~700	金钢石圆锥	150	HRC	20~67
大于700	金钢石圆锥	60	HRA	大于70

试验时, 当选定好压印器的压头和载荷后, 将试件置于试验机的工作台上, 然后按下述步骤试验。

第一步: 加上10公斤的予加载荷;

目的是为了减小由于试件表面不平整而引起的误差。方法是将工作台升起, 使试件顶紧压印器, 当头的力量达到10公斤时 (指示器上有专门的标志表示), 停止转动工作台, 再转动指示器上的刻度盘, 使指针对准零位 (即刻度为100或130的位置)。

第二步: 加上主载荷;

对HRC主载荷为140公斤, 对HRB主载荷为90公斤, 对HRA主载荷为50公斤。加上主载荷后, 压头压入试件表面, 指示器上的指针从零位按刻度顺序的相反方向转动。

第三步: 卸除主载荷;

待指针停稳后, 卸除主载荷, 这时指针回转 (这是由于被压陷部分的弹性变形消失而引起的), 并指向某一刻度, 此刻度即为所测材料的洛氏硬度值。

第四步: 卸除予加载荷, 取下试件。

试验时应注意以下几点:

① 脆性的零件, 表面上有硬壳及杂质或者零件的曲半径太小 (小于5毫米) 时, 都不宜进行试验, 因为这些因素都对试验结果有影响, 同时还可能损坏金钢石圆锥压印器。

② 加予加载荷时, 如果超过10公斤, 则必须在试件上另选一点重做试验。否则会影响试验的结果。

③ 由于压印器的压头很小, 因此, 试验时, 一般应选择三处进行试验。然后取其平均值, 以减少由于金属组织不一致所引起的偏差。

洛氏硬度与布氏硬度比较, 有许多优点, 主要表现在:

① 试验方法比较简单, 可以直接读出硬度值, 因此试验效率较高。

② 压印器的压头小, 对零件的损伤小, 因此, 可以用来检验制成品的质量。

③ 测量硬度的范围比较大, 可用来测定最硬的金属与合金的硬度, 也可以测量较软的材料。

所以, 目前部队修理厂装备的硬度试验机, 大多数为这种类型。但洛氏硬度试验也有不

足之处，主要表现在：

① 正是由于压印器的压头小，因此，测量组织不均匀的合金，特别是晶粒粗大的合金时，产生的误差较大。

② 各种洛氏硬度值之间无法直接比较。例如，很难直接看出 HRC 为 30 的材料与 HRB 为 100 的材料谁较硬。

4. 韧 性

金属在冲击载荷作用下，抵抗断裂的能力，称为韧性。韧性通常是在冲击试验机上测定的（图1-6）。

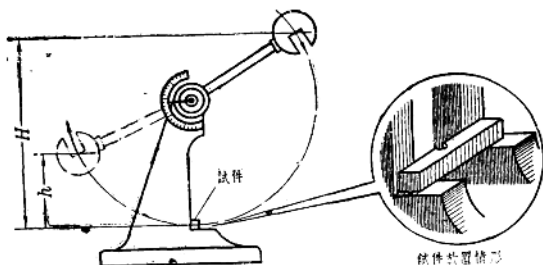


图 1-6 冲击试验机

进行冲击试验时，将摆锤举到一定高度 H ，然后让其自由下落，将试件冲断。由于摆锤冲断试件时消耗了一部分能量，所以升起时只能达到高度 h 。金属的韧性值就是冲断试件所消耗的能量与试件断裂处横截面积的比值。用符号 a_k 表示。常用单位为公斤·米/厘米²。

$$a_k = \frac{1}{F} \cdot \frac{GH - Gh}{F} = \frac{G(H - h)}{F} \quad (\text{公斤} \cdot \text{米} / \text{厘米}^2)$$

式中： A ——冲断试件所消耗的能量；

G ——摆锤重量；

H ——试验前摆锤举起的高度；

h ——冲断试件后摆锤升起的高度；

F ——试件缺口处的横截面积。

韧性大的金属，在冲击载荷作用下不易损坏。飞机上受冲击力很大的机件，如起落架等就使用了强度大、韧性好的铬锰硅钢来制造的，这种钢的韧性值约为 5 公斤·米/厘米²（铸铁的韧性值只有 0.2~1.5 公斤·米/厘米²）。

二、金属的工艺性质

在制造金属零件时，采用了不同的工艺方法，如铸造、锻造、焊接等。金属接受工艺方法加工的能力，称为金属的工艺性质。金属的工艺性质主要有铸造性、锻造性、焊接性、切削性等。

（一）铸造性

将熔化的金属浇铸到铸型（图1-7）中制造金属零件的方法称为铸造。

铸造的种类很多，常见的是砂型铸造（又称翻砂）。砂型铸造的铸型是用砂和粘土制成的。

在航空上，有些金属零件（如铝合金零件）

往往采用金属铸型并在加压条件下进行铸造。

这样可以使零件尺寸精确，并且具有较好的机械性质。

还有些零件，如喷气式发动机中的涡轮导向器叶片，则是用精密铸造法铸造出来的，这样可以得到尺寸更加精确的铸件，同时，还可简化机械加工过程。

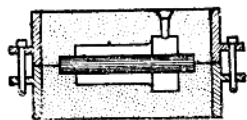


图 1-7 铸 型

金属的铸造性是指金属是否适合铸造的性质。通常流动性好，而且收缩性小的金属，其铸造性就好。这是因为流动性好的金属浇铸时能很好的充满铸型，收缩性小的金属在凝固和冷却时体积变化很小的缘故。

常用的金属中，铸铁、青铜等具有优良的铸造性。

铸件通常易产生的缺陷是：缩孔、疏松、气孔、夹渣和偏析等。

铸件在冷凝时，由于收缩而产生的不规则的空洞叫缩孔，微小而不连续的缩孔集团叫疏松。缩孔、疏松的形成，是由于液体金属过渡到固体状态时，体积缩小，而未获得足够的液体金属来补充所造成。

铸件因气泡而产生的空洞叫气孔。气孔的形成是由于液体金属能吸收气体，在凝固期间，气体如不能完全排除，它就会以气孔的形式留在铸件内部。

夹渣是在铸件的内部填充有熔渣。这种渣孔可能是单个的或蜂窝状。渣孔呈不规则形状，表面粗糙。夹渣的形成主要是熔剂用量太少、太多或熔剂不合格，使熔渣太粘、太薄，不易清除；或金属熔液温度过低，流动性差，熔渣不易浮起；或浇铸前没有扒渣，使熔渣进入型腔中造成的。

铸件在凝固时，由于先后结晶出来的合金成分差别较大，这种现象，称为铸件的偏析。

缩孔、疏松、气孔、夹渣和偏析等缺陷的存在都会降低铸件的机械性质。

（二）锻造性

使金属在外力作用下产生塑性变形而得到所需要的形状和尺寸的工艺方法，称为压力加工。压力加工的种类很多，例如辗压（图1-8a）、拉丝、自由锻（图1-8b）和模锻等。

利用压力加工可以将金属制成各种型材，如棒材、管材、板材、丝材等。

金属的锻造性是指金属是否适于压力加工的性质。塑性较好的金属，其锻造性就好。

常用金属中，低碳钢、纯铜等的锻造性较好，而铸铁则不适合锻造。

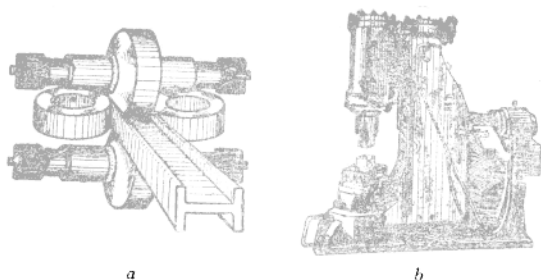


图 1-8 机械和油泵

(三) 焊接性

在两块金属的结合处加热，并使之联结起来成为一个整体，这种方法称为焊接，常用的焊接方法有气焊和电焊。

1. 气焊 气焊是利用气体燃烧时发出的热量来加热金属，使其结合处熔化而进行焊接的一种方法。

常用作燃烧气体的是乙炔（俗称电石气）和氧气组成的混合气。这种混合气燃烧时可产生3000℃左右的高温。

2. 电焊 应用最普通的是电弧焊。电弧焊时，在焊条和被焊零件之间有电弧产生，同时放出大量的热。电弧焊的温度比气焊的温度还高，电弧中心的温度可达6000℃。

金属的焊接性是指金属是否易于焊接的性质。焊接性好的金属，不但易于焊接在一起，而且接合处的机械性质与原材料的机械性质相差不多。常用金属中低碳钢就有良好的焊接性。

必须指出，金属在焊接后，其接合处的机械性质通常要比原材料差一些。因此在维护工作中应加强对焊件接合处的检查。

(四) 切削性

金属的切削性是指金属材料容易用刀具（车刀、刨刀、铣刀、钻头、铰刀等）进行切削的性质。绝大多数的铸件和锻件毛坯都需要经过切削加工，才能符合各种尺寸和表面光洁度等要求。金属材料被切削时能用高的切削速度、较低的切削能力（或刀具磨损少）而得到的零件表面光洁度高，则切削性好。

金属的切削性与材料硬度有关，纯铝、纯铜及未经淬火硬化的铝合金等材料，硬度低，切削加工时，被切削处变形大，切屑也易粘住刀尖（通称刀瘤），因而切削后零件表面光洁度不高，切削性不好；不锈钢切屑也易粘住刀尖，切削性也差。经过淬硬的铝合金、铜合金及经过软化处理（退火或正火）的钢和铸铁，切削性都好。淬火后硬度太大的钢件，则不易切削，多用砂轮磨削。

第二节 金属的结构

在外界条件（如温度）的影响下，不同金属机械性质的变化有所不同。如合钢的强度随温度升高下降较快，而耐热钢和耐热合金的强度下降较慢。毛主席说：“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”各种金属具有不同的性质以及它们性质变化的根本原因，也在于金属的内部，即与金属的成分和结构有关。当金属的成分一定时，其性质的变化，都是由于结构变化而引起的。因此，要了解金属的性质及其变化规律，就必须具备金属结构的知识。

一、金属的晶体结构

有些金属的断口用肉眼观察时，可以看到许多闪烁发亮的小颗粒，这种小颗粒，称为金属的结晶颗粒，简称晶粒。通常金属就是由很多的晶粒结合起来的。晶粒与晶粒之间，还存在着晶界。

金属的晶粒和晶界，经显微镜放大后，可以看得很清楚。图1-9中的网状黑线就是晶界，晶界围绕着的部分就是晶粒。

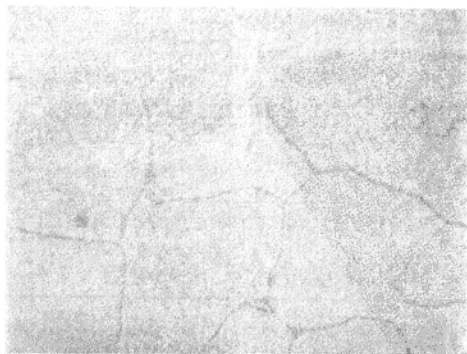


图 1-9 金属的显微组织

金属的晶体结构，就是指其晶粒和晶界的结构。

（一）金属晶粒的结构

金属晶粒内的原子排列情况，目前使用的显微镜还不能直接观察到。但是，可以用X—射线探测，间接的分析出来。

金属晶粒内原子的排列是有规则的。这种排列情况通常用结晶格子来表示，金属的结晶

格子简称晶格。图1-10即为金属晶格的示意图。

金属的晶格有许多种，为了掌握每种晶格的特点，可以从晶格中取出一个能够代表整个晶格结构特点的单位晶格来研究，这个单位晶格又称晶胞（如图1-11）。

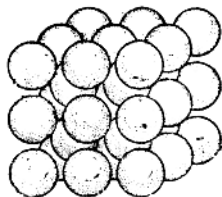


图 1-10 金属晶格示意图

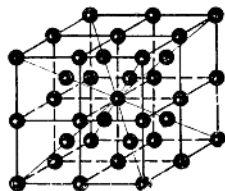


图 1-11 晶胞示意图

金属的晶格有许多种。常用金属的晶格主要有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格三种。它们的原子排列模型和结构特点见表1-3。

表 1-3

常用金属的晶格类型

晶格类型	原子排列模型	单位晶格(晶胞)	结 构 特 点	具有该种晶格的金属
体心立方晶格			立方体每个顶角各有一个原子，中心有一原子	铬、钨、钼、铁（910℃以下）等
面心立方晶格			立方体每个顶角及每个面的中心各有一个原子	镍、铜、铝、铁（910℃以上）等
密排六方晶格			六方柱体的每个顶角及上下两个面的中心各有一原子，柱体中间有三个原子	镁、锌等

金属的晶胞都是极小的。例如，在1微米³（1微米=1/1000毫米）的铁内，晶胞的数目就超过了一百亿个。为了量度晶胞的大小，常以埃（Å）作为量度的单位，1 Å = 10⁻⁸厘米。晶胞的大小用晶胞棱长来表示，称为晶格常数。例如常温时铁的体心立方晶胞的晶格常数为2.86 Å。

具有同一类型晶格的各种金属，它们的晶格常数是不同的，例如铝和铜都具有面心立方晶格，但常温时铝的晶格常数为4.04 Å，铜的晶格常数为3.6 Å。

还必须指出，有些金属在不同的条件下可以具有不同的晶格类型。这种晶格的转变，称为同素异晶转变。

各种金属晶体结构的主要区别就在于晶格类型不同，或者晶格类型相同时晶胞的大小不同。

在晶格中原子排列所形成的平面称为晶面，图1-12为立方晶格中的晶面。

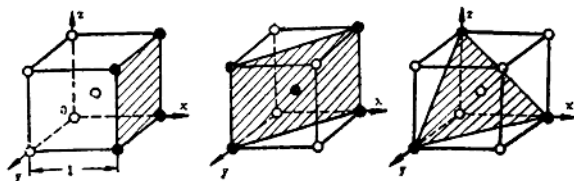


图 1-12 立方晶格中的晶面

晶格中原子排列的方向称为晶向，图1-13为立方晶格的晶向。

应该指出的是，在不同的晶面与晶向上，所包含的原子数目是不相同的，即原子的密度不同；这会导致金属在各种方向上性能的差异。例如金属受力产生的塑性变形，将首先沿着原子排列最密的晶面和晶向进行（将在第三节叙述）。

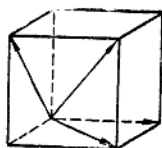


图 1-13 立方晶格的晶向

（二）金属晶界的结构

金属的晶粒与晶粒交界的区域称为晶界。

研究的结果证明：在金属晶界处，原子的排列较紊乱，晶界处的晶格不象晶粒内部那样规则，往往呈现歪扭状态（图1-14）。

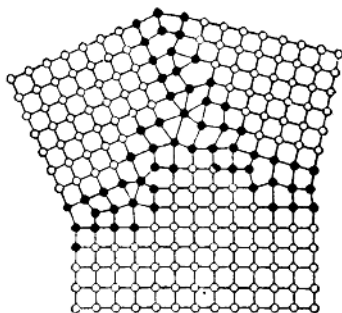


图 1-14 金属晶界结构示意图

金属的晶粒和晶界是有密切关系的。体积相同的金属，晶粒愈小晶界愈多；反之，则晶界愈少。

金属的晶格类型及晶界的多少，对它的性质，特别是机械性质影响较大。

(三) 金属原子间的结合

在金属晶体中，规则排列着的原子，互相之间是怎样结合起来的呢？这与金属原子的结构特点有关。

任何物质的原子都是由带正电的原子核和带负电的电子组成的。电子在原子核的吸引下，围绕原子核高速旋转。就象地球围绕太阳旋转一样。

不同元素的原子有着不同的结构。结构最简单的是氢原子，它只有一个电子围绕原子核旋转（图1-15）。铝原子则有13个电子，分三层围绕原子核旋转（图1-16）。铜原子有29个电子，分四层围绕原子核旋转（图1-17）。



图 1-15 氢原子结构示意图



图 1-16 铝原子结构示意图



图 1-17 铜原子结构示意图

各种元素的原子在每层上所容纳电子的数目，根据近代原子结构理论，有以下规律：

1. 若电子层数为 n ，每层中的电子数目最多是 $2n^2$ 个。第一层最多只能容纳 2 个电子 ($2 \times 1^2 = 2$)，第二层最多是 8 个电子 ($2 \times 2^2 = 8$)，第三层最多是 18 个电子 ($2 \times 3^2 = 18$) 等等。
2. 最外电子层电子数目不超过 8；
3. 次外电子层电子数不超过 18；
4. 在各层中，根据各电子运动轨道的能量高低不同，每层尚可分成若干次层，各以以下的符号表示： S^2, P^6, d^{10}, f^{14} 。

符号右上角的数字表示各该次层中所能容纳的最大电子数。

在原子核外各电子层上所包含的电子数目，如果没有达到它可以容纳的最多数，那么这一电子层就是不稳定层。

不同原子的原子核所带的正电量互不相同，核外电子的数目也不一样。但是，在正常状态下，无论那种原子，它的原子核所带的正电量，总是等于它的核外全部电子所带的负电量。这样，正、负电的作用互相抵消，整个原子显不出带电现象。

如果原子由于某种原因失去了一些电子，它所带的正电量就会多于负电量，原子就显出带正电的现象。相反，如果获得了一些电子，原子就显出带负电的现象。通常称失去电子的原子为**正离子**，获得电子的原子为**负离子**。

金属原子最外层轨道上的电子都较少，它们与原子核之间的引力很微弱，故金属原子易失去其最外层电子而变成正离子。

当金属原子互相结合时，每个原子均交出最外层电子而变成正离子，而这些电子并不再固定属于某一个原子，而为所有的原子公有，它们时而围绕这一个原子旋转，时而又围绕另一个原子旋转，在晶格内作无规则的运动，这种电子称为**自由电子**。所以，在金属晶格中规则

排列着的，实际上是金属的正离子，自由电子则在晶格内无规则的运动（如图1-18）。由于自由电子与正离子之间存在着引力，因而将金属原子牢固地结合起来成为固体。金属原子间的这种结合情况，决定了金属的许多性质。例如金属的导电性、导热性、塑性以及金属遇到水分后产生腐蚀等都与这一特点有关。

金属具有好的导电性，是由于金属两端有电位差时，金属中的自由电子易于沿一定方向流动而形成电流的缘故。

金属的导热性较非金属好的原因，也是由于有自由电子的运动来传递热量的结果。

金属有良好的塑性，是由于金属产生塑性变形时，离子间虽然产生了位移，但正离子与自由电子间的引力仍然存在，使金属不易断裂。金属遇水后产生腐蚀的原因，将在第四章中阐述。

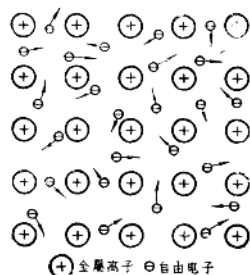


图 1-18 金属原子结合示意图

二、金属的结晶过程

金属的结晶过程是由液态转变为固态，原子由不规则到有规则排列的过程。这个过程是经过形成晶核和晶核不断长大两个步骤来完成的

(一) 晶核的形成和长大

1. 晶核的形成

在液态金属中，原子不断的运动，没有一定的次序，当温度降低至凝固点时，金属便开始结晶。列宁指出：“发展过程是不平衡的”。在结晶时，也总有部分活动能力较弱的原子首先吸引在一起，形成规则排列的晶格，这些晶格又吸引其它原子，按照自己在空间的方向，以一定方式排列起来，于是，它们在结晶过程中，起了核心作用，称为结晶核心，简称晶核，如图1-19中的 2、3、4、5 所示。

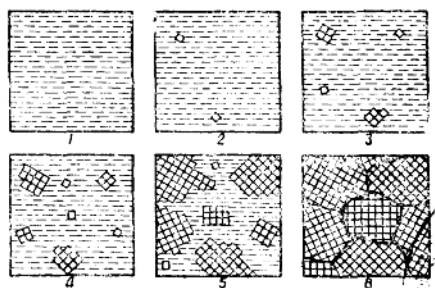


图 1-19 金属结晶过程示意图