

第 4 章 材料的结构与性能

正如绪论中所述，工程材料按其结合键性质分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料四大类。工程材料由于其不同的结构类型，性能有很大差异。本章从这四类不同材料的结构入手，重点介绍其表现出来的力学性能差异。

1.1 金属材料的结构、组织与性能

在自然界中，所有的固态物质，就其原子（离子或分子）排列的规则性来分类，可分为晶体和非晶体两大类。固态物质内部的原子（离子或分子）呈周期性规则排列的物质称为晶体，如天然金刚石、水晶、氯化钠等；原子（离子或分子）在空间无规则排列的物质则称为非晶体，如松香、石蜡、玻璃等。晶体具有固定熔点、各向异性（指单晶）的特征；而非晶体无固定熔点，并在一个温度范围内熔化，各方向上原子聚集密度大致相同，所以表现为各向同性。晶体与非晶体在一定条件下可以相互转化。由于金属由金属键结合，其内部的金属离子在空间有规则地排列，因此，固态金属一般情况下均是晶体。

1.1.1 纯金属的晶体结构

在自然界中，人类已经发现的化学元素中有 81 种属于纯金属。其中，素有“五金”之称的金（Au）、银（Ag）、铜（Cu）、铁（Fe）、锡（Sn）是人类历史上应用最早的纯金属。

在晶体中，原子（离子或分子）规则排列的方式称为晶体结构。为了便于研究，假设通过金属原子（离子）的中心画出许多空间直线，这些直线形成空间格架，称为晶格（见图 1-1）。晶格的节点为金属原子（或离子）平衡中心的位置。能反映该晶格特征的最小组成单元称为晶胞，晶胞在三维空间重复排列构成晶格。晶胞的基本特性即反映该晶体结构（晶格）的特点。

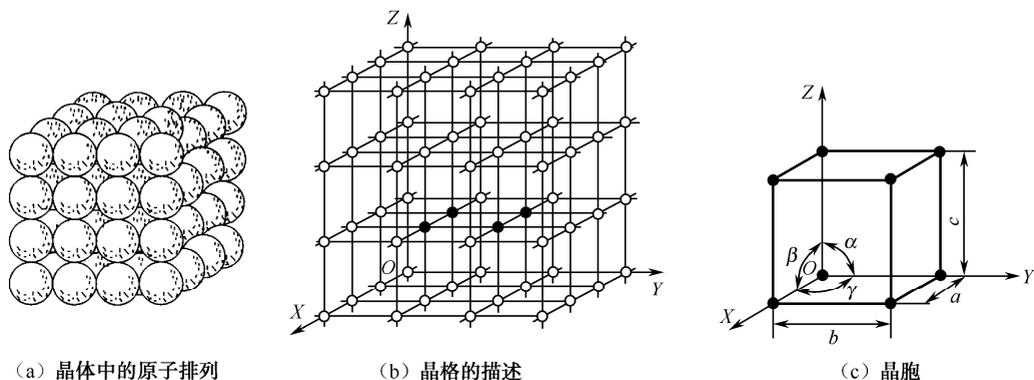


图 1-1 晶体、晶格和晶胞示意图

晶胞的几何特征可以用晶胞的三条棱边长 a 、 b 、 c 和三条棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 这 6 个

参数来描述。其中 a 、 b 、 c 为晶格常数，金属的晶格常数一般为 $0.1\sim 0.7\text{nm}$ 。不同元素组成的金属晶体因晶格形式和晶格常数不同，表现出不同的物理、化学和力学性能。金属晶体的晶格类型很多，但元素周期表中有 90% 以上的金属元素的晶体都属于以下三种原子紧密排列的晶格形式。

1. 三种常见的金属晶体结构

(1) 体心立方晶格 (bcc 晶格)

体心立方晶格的晶胞中 (见图 1-2)，8 个原子分别处于立方体的 8 个角上，一个原子处于立方体的中心，角上 8 个原子与中心原子紧靠。具有体心立方晶格的金属有铁 ($\alpha\text{-Fe}$)、铬 (Cr)、钼 (Mo)、钨 (W)、钒 (V) 等，其大多具有较高的熔点、硬度及强度，而塑性、韧性较低，并具有冷脆性。

体心立方晶格具有下列特征：

① 晶格常数： $a = b = c$ ； $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。

② 晶胞原子数：体心立方晶胞中，每个角上的原子在晶格中同时属于 8 个相邻的晶胞，因此每个角上的原子仅有 $1/8$ 属于一个晶胞，而中心的一个原子则完全属于这个晶胞。所以，一个体心立方晶胞中所含的原子数为 $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ ，即两个原子。

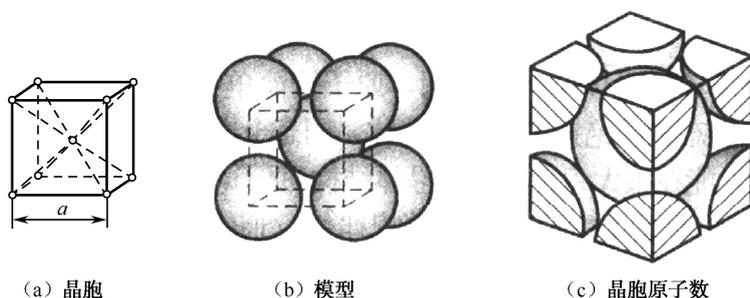


图 1-2 体心立方结构晶胞示意图

③ 原子半径：晶胞中相距最近的两个原子之间距离的 $1/2$ 称为原子半径 $r_{\text{原子}}$ 。体心立方晶胞中原子相距最近的方向是体对角线，所以，原子半径与晶格常数 a 之间的关系为 $r_{\text{原子}} = \frac{\sqrt{3}}{4} a$ 。

④ 致密度：晶胞中所包含的原子占有的体积与该晶胞体积之比称为致密度，通常用于表示原子排列的紧密程度。体心立方晶胞的致密度为 0.68，即体心立方晶胞中有 68% 的体积被原子所占据，其余为空隙。

⑤ 空隙半径：若在晶胞空隙中放入刚性球，则能放入球的最大半径为空隙半径。体心立方晶胞中有两种空隙：一种为四面体空隙，其半径为 $r_{\text{四}} = 0.29r_{\text{原子}}$ ；另一种为八面体空隙，其半径为 $r_{\text{八}} = 0.15r_{\text{原子}}$ 。

⑥ 配位数：晶格中与任一个原子相距且距离相等的原子的数目称为配位数。这是另一种表示原子紧密程度的方法。体心立方晶胞的配位数为 8。

(2) 面心立方晶格 (fcc 晶格)

面心立方晶格的晶胞中 (见图 1-3)，8 个原子分别处于立方体的 8 个角上，同时还有 6 个原子分别位于立方体的 6 个面的中心。具有面心立方晶格的金属有铁 ($\gamma\text{-Fe}$)、铝 (Al)、铜 (Cu)、

镍（Ni）、铅（Pb）、金（Au）、银（Ag）等，这类金属不具有冷脆性。

面心立方晶格具有下列特征：

① 晶格常数： $a=b=c$ ； $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

② 晶胞原子数： $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ ，即4个原子。

③ 原子半径： $r_{\text{原子}} = \frac{\sqrt{2}}{4} a$ 。

④ 致密度：0.74。

⑤ 空隙半径：四面体空隙，其半径为 $r_{\text{四}}=0.225r_{\text{原子}}$ ；八面体空隙，其半径为 $r_{\text{八}}=0.414r_{\text{原子}}$ 。

⑥ 配位数：12。

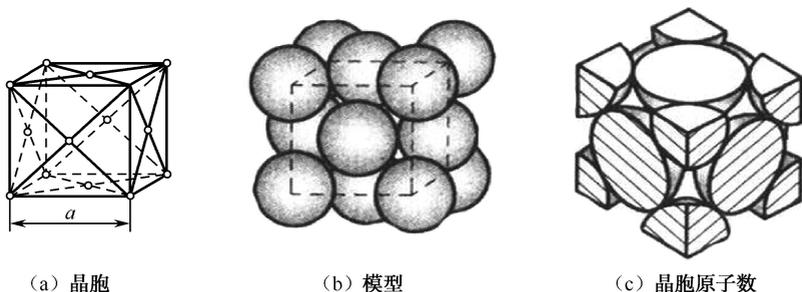


图 1-3 面心立方结构晶胞示意图

(3) 密排六方晶格（hcp 晶格）

密排六方晶格的晶胞中（见图 1-4），12 个原子分别占据简单六方体的 12 个顶点位置，简单六方体的上、下正六边形面的中心位置各占据一个原子位置，而且，此六方体的中间还有 3 个原子。具有密排六方晶格的金属有镁（Mg）、锌（Zn）、镉（Cd）、铍（Be）等，石墨也是密排六方晶格结构。这类金属大多数不具有冷脆性，但力学性能不突出，很少单独用于结构材料。

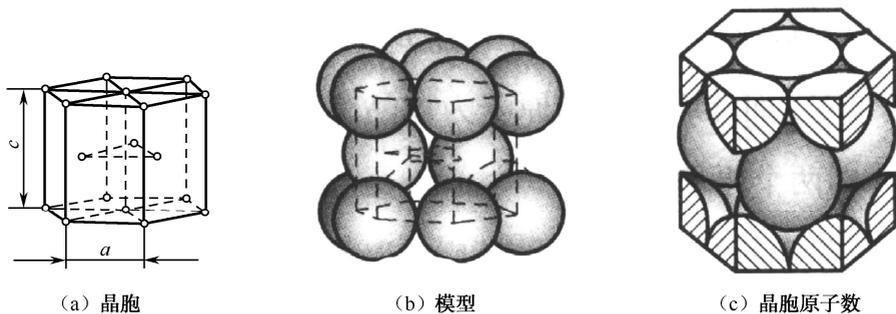


图 1-4 密排六方结构晶胞示意图

密排六方晶格具有下列特征：

① 晶格常数：用底面正六边形的边长 a 和两底面之间的距离 c 来表示，两相邻侧面之间的夹角为 120° ，侧面与底面之间的夹角为 90° 。

② 晶胞原子数： $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ ，即6个原子。

③ 原子半径： $r_{\text{原子}} = \frac{1}{2} a$ 。

④ 致密度：0.74。

⑤ 空隙半径：四面体空隙，其半径为 $r_{\text{四}} = 0.225r_{\text{原子}}$ ；八面体空隙，其半径为 $r_{\text{八}} = 0.414r_{\text{原子}}$ 。

⑥ 配位数：12。

2. 金属晶体的各向异性

在晶体学中，通过晶体中原子中心的平面称为晶面；通过原子中心的直线称为原子列，其所代表的方向称为晶向。晶面和晶向可分别用晶面指数和晶向指数来表达。

在晶体中，不同晶面和晶向上原子排列的密度不同，它们之间的结合力大小也不一样，使得金属晶体在不同方向上的性能不同，这种性质称为晶体的各向异性。非晶体中由于原子排列杂乱无章，其在各个方向上的性能完全相同。

3. 实际金属中的晶体缺陷

实际金属晶体内部的原子排列并不像理想晶体那样规则和完整，总是存在一些原子偏离理想规则排列的区域，称为晶体缺陷。这些缺陷造成了实际晶体的不完整性，并对金属和陶瓷材料的许多性能产生极其重要的影响。按照晶体缺陷的几何特征，可将其分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

(1) 点缺陷

点缺陷是指在三维尺寸上都很小的、不超过几个原子直径的缺陷，主要是指空位、间隙原子和置换原子，如图 1-5 所示。

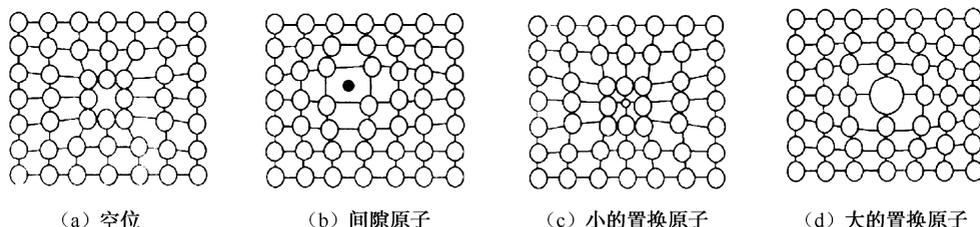


图 1-5 晶体中的点缺陷

空位是指未被原子占据的晶格节点。这种缺陷可能是晶体在结晶过程中由于堆积不完善所造成的，也可能是已形成的晶体在高温或外力作用下而引起的，温度的作用尤为明显。晶体中的原子并不是静止不动的，而是在平衡位置中心做热振动，并受周围原子的约束，处于平衡状态。由于各原子的能量并不完全相等，当温度升高后，原子振动的能量加大，当能量达到足以克服周围原子的约束时，该原子就可能脱离原子振动中心，跑到金属表面或晶格的间隙中，形成空位。而跑到晶格间隙中的原子称为间隙原子，若间隙原子是外来的异类原子，则称为置换原子。

晶体中出现空位和间隙原子后，破坏了原子间的平衡，使它们偏离平衡位置，造成了晶格局部的弹性变形，称为晶格畸变。因此，空位和间隙原子的出现破坏了原子排列的规律性，其结果导致金属的强度和电阻等增加、塑性下降，这是金属固溶强化的主要原因。

(2) 线缺陷

晶体中的线缺陷就是位错，是指晶体中的原子发生了有规律的错排现象。根据位错的形态可分为刃型位错和螺型位错两种常见位错（见图 1-6）。

刃型位错可以描述为晶体内多余半原子面的刃口，好像一片刀刃切入晶体，中止于内部。沿着半原子面的刃边 EF 线附近，晶格发生很大的畸变，这就是一条刃型位错，晶格畸变中心的

连线 EF 就是刃型位错线。位错线并不是一个原子列，而是一个晶格畸变的“管道”。不难看出，位错线附近的上半部原子在一定的范围内将受到垂直于位错线两侧的原子压力。相反，在位错线附近的下半部原子在一定范围内则受到两侧的原子拉应力。因此，沿着位错线其晶格能量总是增加的。

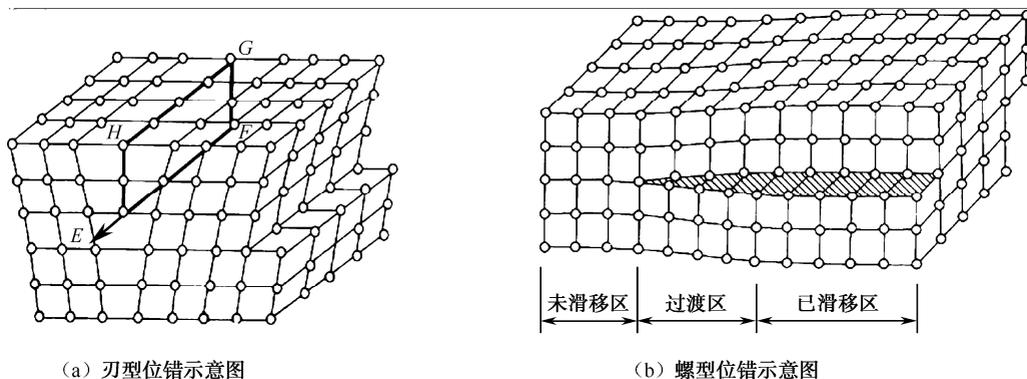


图 1-6 位错模型

螺型位错是指晶体右边上部的点相对于下部的点向后错动一个原子间距，若将错动区的原子用线连接起来，则具有螺旋形特征。

晶体中的位错可在由液体转变为固体的过程中产生，而在固态经塑性变形时位错更易产生。它在温度和外力作用下还能够不断地运动。因此，晶体中的位错数量在外界条件（温度、外力）作用下会发生变化。为了评定金属中位错数量的多少，常用位错密度（ ρ ）来衡量。

位错密度是指单位体积中所包含位错线的总长度。位错密度的单位为 cm/cm^3 (cm^{-2})。金属中的位错密度一般为 $10^8 \sim 10^{13} \text{cm}^{-2}$ ，高密度的位错是导致加工硬化的主要原因之一。

(3) 面缺陷

面缺陷包括晶界和亚晶界两种。如果一块晶体内部的晶格位向完全一致，该晶体就是单晶体。实际使用的金属多是由无数个晶格位向不同的单晶体组成的多晶体，此时的单晶体又称为晶粒，如图 1-7 所示。金属通常都是多晶体，由于各晶体的位向不同，使其原子排列的规律性在相互交界处得不到统一，必须从一种排列取向过渡到另一种排列取向。晶界就是不同取向晶粒之间的过渡层，如图 1-8 (a) 所示，其宽度约为几个原子，其原子排列得比较不规则。晶界处还存在许多缺陷，如杂质原子、空位及位错等。此外，在一个晶粒内部也存在一些位向稍有差别的小晶块，称为亚结构或亚晶，它们之间的界面称为亚晶界，如图 1-8 (b) 所示。晶界与亚晶界都是具有缺陷的界面，故称为面缺陷。

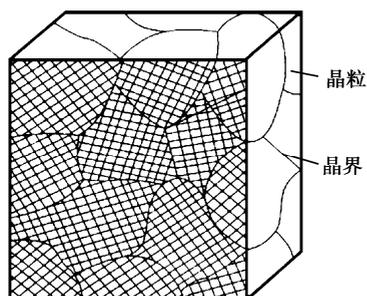


图 1-7 多晶体结构示意图

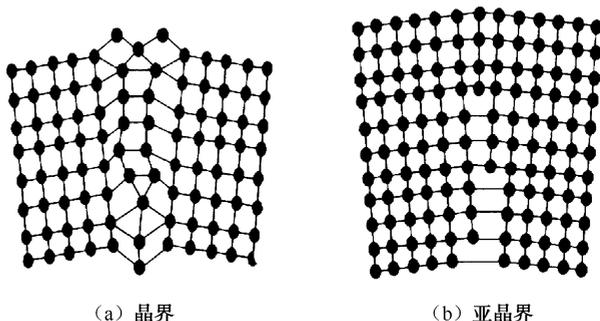


图 1-8 面缺陷示意图

晶界处因能量较高、稳定性较差,使晶界处熔点较低、易受腐蚀。但常温下晶界对位错的移动有阻碍作用,而晶体的塑性变形主要是靠无数位错的滑移来进行的。显然,同样的金属材料在相同的变形条件下,晶粒越细(相当于晶粒细化),晶界数量就越多,晶界对塑性变形的抗力越大,同时,晶粒的变形也越均匀,致使强度、硬度越高,塑性、韧性越好。因此,在常温下使用的金属材料,通常晶粒越细越好。但因晶界在高温下的稳定性差,则晶粒越细,其高温性能就越差。

相对于位错密度增加、亚结构细化是加工硬化的主要原因,面缺陷的增加是细晶强化的主要原因。

总之,晶体缺陷的存在破坏了晶体的完整性,使晶格产生畸变,晶格能量增加。因此,晶体缺陷相对于完整晶体来说,处于一种不稳定形态,它们在外界条件(温度、外力等)变化时,首先会发生运动,从而引起金属某些性能的变化。

晶体缺陷尽管微观尺寸很小,但它对金属性能的影响是相当大的。例如,对室温下金属强度的影响,如图1-9所示。不难看出,当金属晶体无缺陷时,通过理论计算具有极高的强度,称为理论强度。随着晶体中的缺陷增加,金属的强度迅速下降,当缺陷增加到一定的数值后,金属的强度又随晶体缺陷的增加而增加。这一规律的发现告诉人们,要想提高金属的强度可采用减少晶体缺陷或者增加晶体缺陷两种方法。但在工程上要想获得晶体缺陷少,而且尺寸比较大的零件是很难办到的。因此,工程上常采用增加晶体缺陷的办法来提高金属的强度。

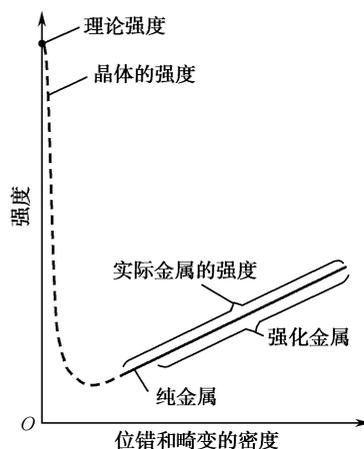


图 1-9 金属强度与晶体缺陷的关系

1.1.2 合金的晶体结构

一种金属元素同另一种或几种其他元素,通过熔化或其他方法结合在一起所形成的具有金属特性的物质称为合金。组成合金的最基本的独立物质称为组元,可以是金属、非金属元素或稳定化合物。一般来说,组元就是组成合金的元素,铁碳合金的组元是铁和碳。由两个组元组成的合金称为二元合金,由三个以上组元组成的合金称为多元合金。合金的强度、硬度、耐磨性等力学性能比纯金属高很多,因此,合金的应用比纯金属广泛得多。采用合金元素来改变金属性能的方法称为合金化。

在金属或合金中,具有同一化学成分、同一晶体结构或同一聚集状态,并有界面分隔的各均匀组成部分称为相。液态物质为液相,固态物质为固相。纯铁结晶时,若固态与液态同时存在,则是两个相;而固态合金则可能由单相或多相组成。由于结构特点不同,固态合金中有固溶体和金属化合物两种基本相。

1. 固溶体

固溶体是溶质原子溶入固态溶剂中形成的一种成分和性能均匀,且结构与溶剂组元结构相同的固相。根据溶质原子在溶剂晶格中的分布形式,固溶体可分为置换固溶体和间隙固溶体。

(1) 置换固溶体

溶质原子置换了溶剂晶格中的一些溶剂原子就形成置换固溶体。当两组元在固态呈无限溶

解时，所形成的固溶体称为有限固溶体或无限固溶体（此时量多者为溶剂）；当两组元在固态呈有限溶解时，只能形成有限固溶体，如图 1-10（a）所示。

（2）间隙固溶体

溶质原子处于溶剂晶格的间隙位置形成间隙固溶体。某些原子半径很小的非金属元素，如 H（0.46 Å）、B（0.97 Å）、C（0.77 Å）、N（0.71 Å）和 O（0.61 Å）等（1 Å=10⁻¹⁰m），溶入过渡族金属晶格间隙内，便形成间隙固溶体，如图 1-10（b）所示。此外，当以化合物为溶剂时，也能形成间隙固溶体，例如，Ni 溶入 NiSb 中便属于这种情况。

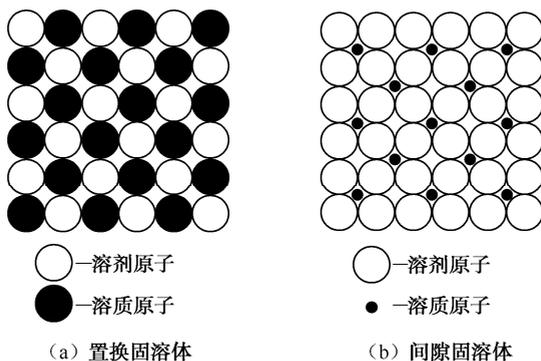


图 1-10 两种类型的固溶体示意图

影响固溶体类型和溶解度的主要因素有组元的原子半径、电化学特性和晶格类型等。原子半径、电化学特性接近，晶格类型相同的组元，容易形成置换固溶体，并有可能形成无限固溶体。当组元原子半径相差较大时，容易形成间隙固溶体。间隙固溶体都是有限固溶体，并且一定是无序的。无限固溶体和有序固溶体一定是置换固溶体。

在有限固溶体中，溶质元素在固溶体中的极限浓度称为固溶度（饱和浓度）。在高温下达到饱和的固溶体，随着温度降低，溶质原子将从固溶体中析出而形成新相。

虽然固溶体的晶体结构和溶剂相同，但因溶质原子的溶入引起晶格常数改变，并导致晶格畸变，使位错移动阻力增加，合金的强度、硬度、电阻增高，塑性、耐蚀性降低。这种通过加入溶质元素形成固溶体，使合金强度和硬度升高的现象称为固溶强化。适当控制溶质元素的数量，可以在显著提高合金强度的同时，保持较高的塑性和韧性。固溶强化是金属强化的一种重要形式，因此，对综合力学性能要求较高的零件材料，都是采用以固溶体为基体的合金。

2. 金属化合物

金属化合物是金属与金属元素之间或金属与类金属（以及部分非金属）元素之间的化合物。这些化合物的晶体结构与其组元的晶体结构完全不同。一部分金属化合物的成分还可在某个范围内变化，从而使其兼有固溶体的特征。从后面将要叙述的二元相图来看，它们所处的位置总是在两个固溶体区域之间的中间部位，因此也称中间相。金属化合物中除有离子键或共价键外，还有部分金属键，使其具有一定程度的金属特性，如导电性，因此称为金属化合物。

金属化合物的类型很多，一般分为正常价化合物（如 M_2Si 、 MnS 、 Mg_2Sn 等）、电子化合物（如 $CuZn$ 、 Cu_3Al 等）和间隙化合物（如 Fe_4N 、 VC 、 WC 、 TiN 、 Fe_3C 等）三大类。它们的晶体结构除有上述的三种晶格外，还有一些是复杂晶体结构。铁碳合金中的渗碳体是一种具有复杂结构的间隙化合物，是一种由铁元素和碳元素组成的金属化合物。

金属化合物一般具有很高的熔点、高的硬度和较大的脆性。合金中出现金属（间）化合物时，可提高材料的强度、硬度和耐磨性，但是塑性降低。适当数量与分布的金属化合物可作为强化相。

在固溶体基体上弥散分布适当的金属化合物是导致材料产生弥散强化（或沉淀强化）的原因。

由两种以上互不相溶的组元、固溶体或金属化合物混合在一起而形成的多相固体组织称为机械混合物，其性能取决于各组元的种类、数量、形态、大小和分布状况。

1.1.3 金属材料的组织

1. 组织的概念

金属材料的组织有宏观组织和微观组织两种。

宏观组织是指30倍以下的放大镜或人的眼睛直接能观察到的金属材料内部所具有的各组成物的直观形貌。例如，观察金属材料的断口组织、渗碳层的厚度，以及经酸浸后的低倍组织等，一般分辨率是0.15mm。

显微组织一般指在光学金相显微镜下能够观察到的金属材料内部各组成物的微观形貌，也称直观形貌，一般极限分辨率为0.2 μm 。组织与相是两个不同的概念，组织由数量、形态、大小和分布方式不同的各种相构成。经抛光的金属材料试样在显微镜下检查，只能看到非金属夹杂物的组织；经不同酸侵蚀后的试样在显微镜下观察，则可看到各种形态的相。根据包含相的多少来分，有单相组织、两相组织和多相组织。四种不同含碳量的铁碳合金的室温平衡组织如图1-11所示，其中图1-11(a)所示为纯铁的室温平衡组织，由颗粒状单相铁素体相组成；图1-11(c)所示为碳质量分数为0.77%的铁碳合金的室温平衡组织，又称珠光体组织，它由粗片状铁素体相和细片状的 Fe_3C 相所组成。另外，在电子显微镜下观察到的组织称为电子显微组织（见图1-12）。

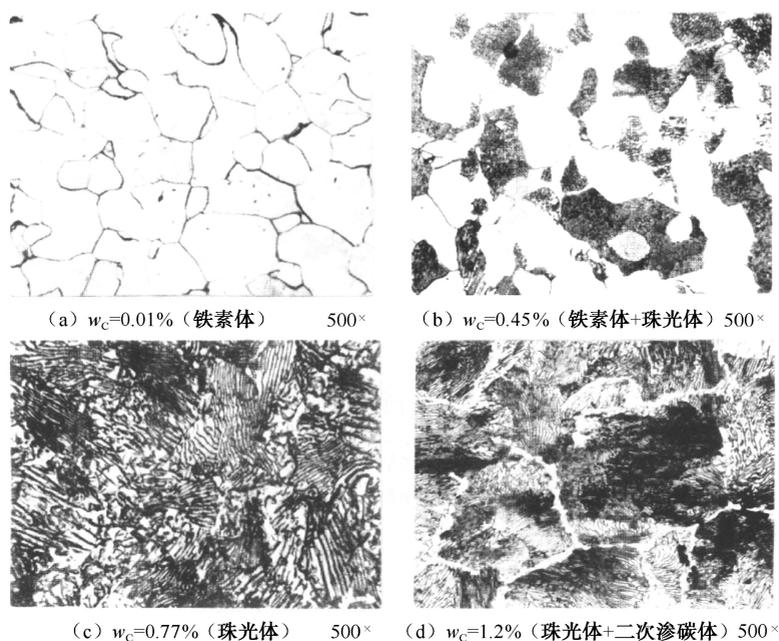


图 1-11 四种不同含碳量的铁碳合金的室温平衡组织

2. 组织的决定因素

金属材料的组织取决于其化学成分和制造工艺。不同含碳量的铁碳合金在平衡结晶后获得

的室温组织不一样（见图 1-11）。

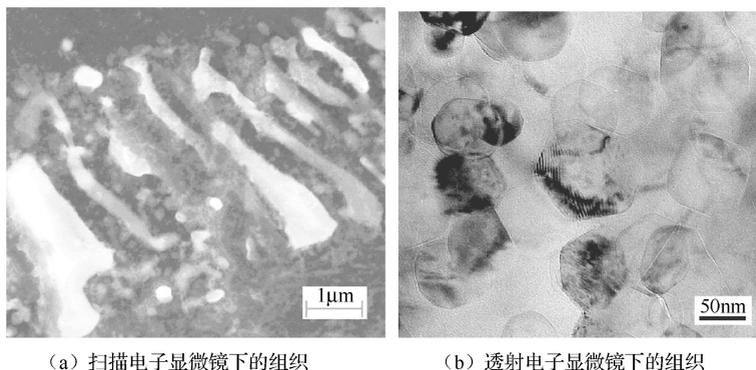


图 1-12 经过时效处理的 AZ91D 镁合金在电子显微镜下的组织 ($Mg_{17}Al_{12}$ 沉淀相+基体相)

金属材料的化学成分一定时，工艺过程则是其组织的最重要的影响因素。纯铁经冷拔后，其组织由原来的等轴形状的铁素体晶粒变成拉长了的铁素体晶粒。碳质量分数为 0.77% 的铁碳合金经球化退火后，得到的组织为球状珠光体（见图 1-13），与室温平衡组织片状珠光体的形态完全不一样。

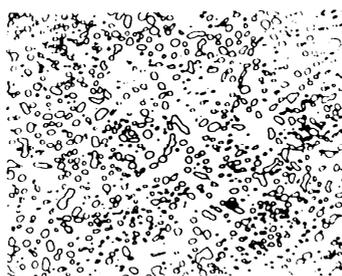


图 1-13 球状珠光体

另外，从图 1-11 还可以看出，同为平衡组织，即金属的冷却条件一样，但由于化学成分（含碳量）不同，其室温组织也不一样。

3. 性能的关系

金属研究表明，组织是性能的依据，性能是组织的反映。金属材料的性能取决于其内部的组织结构。图 1-14 所示为三种不同组织的铸铁。图 1-14 (a) 所示灰铸铁的组织为铁素体和片状石墨，图 1-14 (b) 所示可锻铸铁的组织为铁素体和团絮状石墨，图 1-14 (c) 所示球墨铸铁的组织为铁素体和球状石墨。它们的基体都是铁素体，但由于其石墨形态不同，其性能相差很大。图 1-14 (a) ~ (c) 所示的三种铸铁的抗拉强度分别为 150MPa、350MPa 和 420MPa。

纯铁经冷拔后，晶粒被拉长变形，同时其内部位错密度等晶体缺陷增多，其强度与硬度均比未变形前要高得多。纯铁经变形度为 80% 的冷拔变形后，其抗拉强度可由冷拔前的 180MPa 提高到 500MPa。

总之，金属材料的成分、工艺方法、组织结构和性能之间有着密切的关系。了解它们之间的关系，掌握材料中各种组织的形成及各种因素的影响规律，对于合理使用金属材料具有十分重要的指导意义。

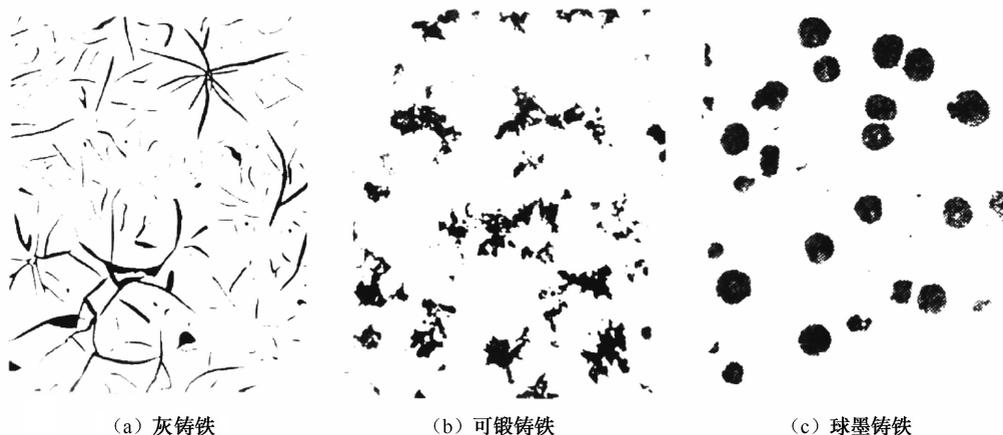


图 1-14 三种不同组织的铸铁

1.1.4 金属材料的主要性能

金属材料具有许多良好的性能，因此广泛地应用于制造各种构件、机械零件、工具和日常生活用具。金属材料的性能包含工艺性能和使用性能两方面。工艺性能是指制造工艺过程中材料适应加工的性能；使用性能是指金属材料在使用条件下所表现出来的性能，包括力学性能、物理性能和化学性能。

1. 工艺性能

工艺性能是材料物理性能、化学性能和力学性能的综合。按工艺方法不同，可分为铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。

在设计零件和选择工艺方法时，需要考虑金属材料的工艺性能。例如，灰铸铁的铸造性能很好，切削加工性也较好，所以广泛用来制造铸件，但其可锻性极差，不能进行锻造，可焊性也较差。低碳钢的可锻性和可焊性都很好，而高碳钢则较差，切削加工性也不好。

各种工艺性能将在有关章节分别介绍。

2. 力学性能

(1) 强度

强度是金属材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。按照作用力的性质不同，可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪切强度、扭转强度和疲劳强度等。在工程中常用来表示金属材料强度的指标是屈服强度和抗拉强度。

抗拉强度通过拉伸试验测定。将一截面为圆形的低碳钢拉伸试样（见图 1-15）在材料试验机上进行拉伸，测得应力—应变（ $\sigma-\varepsilon$ ）曲线，如图 1-16（a）所示。其中， σ 为应力， ε 为应变，有

$$\sigma = P/A_0 \text{ (MPa)}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中， P 为所加载荷； A_0 为试样原始截面积（ mm^2 ）； l_0 为试样的原始长度（ mm ）； l_1 为试样变形后的长度（ mm ）； Δl 为伸长量。

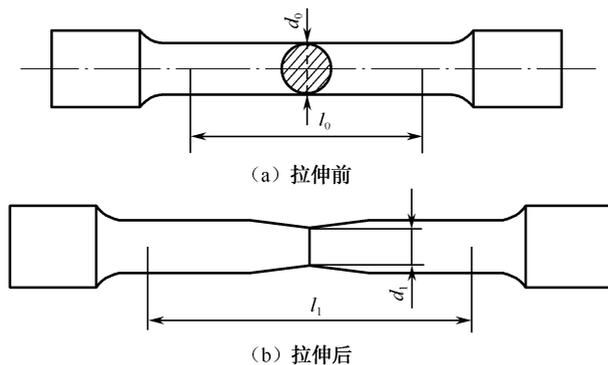
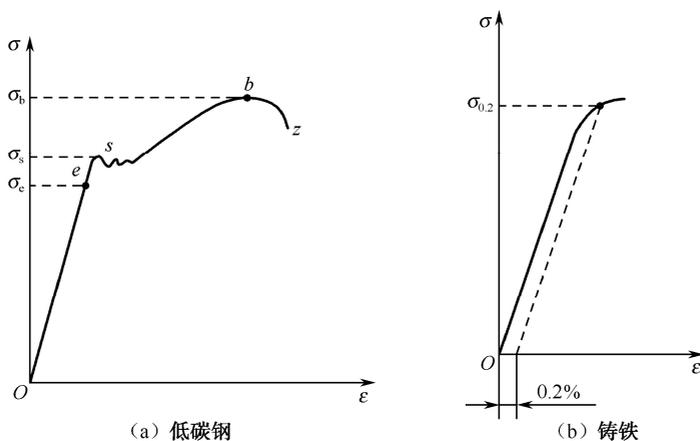


图 1-15 圆形低碳钢拉伸试样

图 1-16 低碳钢和铸铁的 σ - ϵ 曲线

根据其变形特点，金属材料的强度指标如下：

① 弹性极限 σ_e ：表示材料保持弹性变形，不产生永久变形的最大应力，是弹性零件的设计依据。

② 屈服极限（屈服强度） σ_s ：表示金属开始发生明显塑性变形时的抗力，有些材料（如铸铁）没有明显的屈服现象，如图 1-16（b）所示，则用条件屈服极限来表示。产生 0.2% 残余应变时的应力值用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

③ 强度极限（抗拉强度） σ_b ：表示金属受拉时所能承受的最大应力。

σ_e 、 σ_s 及 σ_b 是机械零件及构件设计和选材的主要依据。金属材料不能在超过其 σ_s 的条件下工作，否则会引起机件的塑性变形；金属材料也不能在超过其 σ_b 的条件下工作，否则会导致机件的破坏。

（2）弹性和塑性

金属材料在外力作用下都会或多或少地产生变形。在使用金属材料时，除了变形的程度外，更值得注意的是当外力去掉后，变形能否恢复原状和恢复原状的程度，这两者反映了金属材料的弹性和塑性。

金属材料受外力作用时产生变形，当外力去掉后能恢复其原来形状的能力称为弹性。这种随着外力消失而消失的变形，称为弹性变形，其大小与外力成正比。

金属材料在外力作用下，产生永久变形而不致引起破坏的能力称为塑性。在外力消失后留下来的这部分不可恢复的变形，称为塑性变形，其大小与外力不成正比。

金属材料的塑性常用延伸率 δ 来表示, 即

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

式中, l_0 为试样的原始长度 (mm); l 为试样受拉伸断裂后的长度 (mm)。

金属材料的塑性也可用断面收缩率 ψ 来表示, 即

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

式中, F_0 和 F 分别为试样原始截面积和断裂后的截面积。

δ 或 ψ 越大, 则塑性越好。良好的塑性是金属材料进行塑性加工的必要条件。

(3) 刚度

金属材料在受力时抵抗弹性变形的能力称为刚度。在弹性范围内, 应力与应变的比值称为弹性模量, 它相当于引起单位变形时所需要的应力。因此, 金属材料的刚度常用弹性模量来衡量。弹性模量越大, 表示在一定力作用下能发生的弹性变形越小, 也就是刚度越大。

弹性模量的大小主要取决于金属材料本身, 因此, 同一材料中弹性模量的差别不大, 例如, 钢和铸铁的弹性模量值为 204 000~214 200MPa, 基本一样。钢可通过热处理来改变其组织, 使强度和硬度发生很大变化, 但是弹性模量不会发生明显变化。所以, 弹性模量被认为是金属材料最稳定的性质之一。

必须指出, 相同材料的两个不同零件, 弹性模量虽然相同, 但截面尺寸大的不易发生弹性变形, 而截面尺寸小的则容易发生弹性变形。因此, 考虑一个零件的刚度问题, 不仅要注意材料的弹性模量, 还要注意零件的形状和尺寸大小。

(4) 硬度

硬度是指材料在表面上的局部体积内抵抗变形或者破断的能力, 是表征材料性能的一个综合参量。硬度测定的方法很多, 一般分为刻画法和压入法两大类, 生产中以压入法较常用, 有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度和显微硬度之分。此时, 硬度的物理意义是指材料表面抵抗比它更硬的物体局部压入时所引起的塑性变形能力。

硬度试验所用设备简单, 操作方便快捷, 一般仅在材料表面局部区域内造成很小的压痕, 可视为无损检测, 故可对大多数机件成品直接进行检验, 无须专门加工试样, 是进行工件质量检验和材料研究最常用的试验方法。

① 布氏硬度。

布氏硬度的测试是用一直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球, 在规定载荷 P 的作用下压入被测试金属的表面, 停留一定时间后, 卸除载荷, 测量被测试金属表面上所形成的压痕直径 d , 如图 1-17 所示。由此计算压痕的球缺面积 S , 然后再求出压痕的单位面积所承受的平均压力 (P/S), 以此作为被测试金属的布氏硬度值 (HB)。其计算式为

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中, 载荷 P 的单位为 N 或 kgf (1kgf=9.8N); 球体直径 D 与压痕直径 d 的单位为 mm, 故 HB 的单位为 N/mm², 但习惯上不标出单位, 只写出硬度的数值。

采用不同材料的压头测定的布氏硬度值, 用不同的符号表示。当压头为淬火钢球时, 硬度

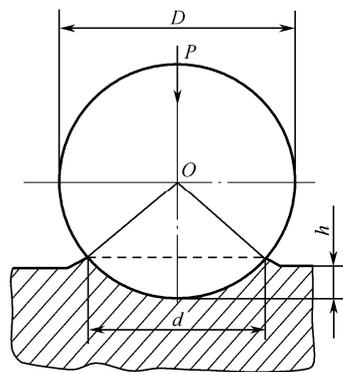


图 1-17 布氏硬度测试示意图

符号为 HBS, 适用于布氏硬度值低于 450 的材料; 当压头为硬质合金球时, 硬度符号为 HBW, 适用于布氏硬度值为 450~650 的材料。例如, 150HBS10/1000/30 表示用直径为 10mm 的淬火钢球在 9.8kN (1000kgf) 载荷作用下保持 30s 测得的布氏硬度值为 150。当载荷保持时间为 10~15s 时, 不加标注。例如, 500HBW5/750 表示用直径为 5mm 的硬质合金球在 7.35kN (750kgf) 载荷作用下保持 10~15s 测得的布氏硬度值为 500。

布氏硬度试验的优点是压痕面积大、测量结果误差小, 且与强度之间有良好的对应关系, 故有代表性和重复性。但同时也因压痕面积大而不适宜于成品零件及薄而小的零件。此外, 因需要测量压痕直径, 被测处要求平稳, 测试过程也比较费事, 故也不适用于大批量生产的零件检验。

② 洛氏硬度。

洛氏硬度的测试虽然也是用一定形状的硬质压头以一定大小的载荷压入试样表面, 但所使用的压头及载荷与布氏硬度所使用的不同, 它是根据压坑的深度来计算硬度值的。材料硬, 压坑深度浅, 则硬度值高; 材料软, 压坑深度大, 则硬度值低。洛氏硬度计上带有显示器, 试验时在显示器上可直接读出被测材料或零件的硬度值。

为了适应不同材料的硬度测试, 在同一硬度仪上采用了不同的压头与载荷组合, 并用几种不同的洛氏硬度标尺予以表示。每一种标尺用一个字母在洛氏硬度符号 HR 后注明, 如 HRC、HRA、HRB 等, 其测试要求及应用范围见表 1-1。

表 1-1 洛氏硬度测试要求及应用范围

洛氏硬度	压头	总载荷/N (kgf)	测量范围	应用范围
HRC	120° 金刚石圆锥体	1470 (150)	20~67HRC	淬火钢等硬零件
HRA	120° 金刚石圆锥体	588 (60)	>70HRA	零件的表面硬化层、硬质合金等
HRB	φ1.588mm 淬火钢球	980 (100)	25~100HRB	软钢和铜合金

洛氏硬度测试方法的优点是操作简便、迅速, 硬度值可在显示器上直接读出; 压痕小, 可测量成品件; 采用不同标尺可测量各种软硬不同和厚薄不同的材料。该测试方法的不足之处是, 因压痕小, 受材料组织不均等缺陷影响大, 所测硬度值重复性差, 对同一试样一般需测三次后取平均值。

③ 维氏硬度和显微硬度。

洛氏硬度测试法虽可采用不同的标尺来测定软硬不同金属材料的硬度, 但不同标尺的硬度值间没有简单的换算关系, 使用很不方便。维氏硬度测试法能在同一种硬度标尺上测定软硬不同金属材料的硬度。它是用一相对面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体压头, 在规定载荷 P 作用下压入被测试材料表面, 保持一定时间后卸除载荷, 然后再测量压痕投影的两对角线的平均长度 d , 如图 1-18 所示, 并计算出压痕的表面积 S , 最后求出压痕表面积上的平均压力 (P/S), 以此作为被测试金属的维氏硬度值 (HV)。其计算式为

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

式中, 载荷 P 的单位为 N (kgf); 两对角线的平均长度 d 的单位为 mm。

与布氏硬度值一样, 习惯上也只写出其硬度数值而不标出单位。在硬度符号 HV 之前的数值为硬度值, HV 后面的数值依次表示载荷和载荷保持时间 (保持时间为 10~15s 时不标注)。例如, 640HV30 表示在 294N (30kgf) 载荷作用下保持 10~15s 测得的维氏硬度值为 640, 而

640HV30/20 表示在 294N (30kgf) 载荷作用下保持 20s 测得的维氏硬度值也为 640。

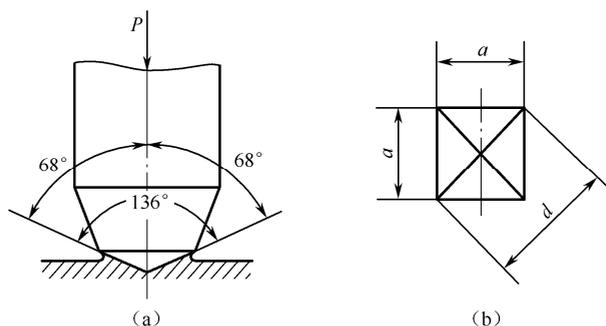


图 1-18 维氏硬度测试示意图

测定维氏硬度常用的载荷有 49N、98N、196N、294N、490N、980N 等几种。试验时，载荷 P 应根据试样的硬度与厚度来选择。一般在试样厚度允许的情况下尽可能选用较大载荷，以获得较大压痕，提高测量精度。在实际测试时，一般是用装在机体上的测量显微镜，测出压痕两对角线的平均长度 d ，然后根据 d 查 GB 4340—84 的规定来求得所测的硬度值。维氏硬度适用于各种金属材料，尤其是表面硬化层的硬度测量，如化学热处理渗层、电镀层。此法压痕清晰，又是在显微镜下测量对角线的长度，从而保证了试验的精确性。但因该法要求被测表面粗糙度低，故测试表面的准备工作较为麻烦。

维氏硬度试验既具有前两种硬度试验的优点又不存在它们的缺点，载荷大小可任意选择，测定范围宽，适合各种软硬不同的材料，特别适用于薄工件或薄表面硬化层的硬度测试。唯一缺点是硬度值需通过测量对角线后才能计算（或查表）得到，生产效率低于洛氏硬度测试。

显微硬度试验实质上就是小载荷维氏硬度试验，是试验载荷在 9.8N 以下、压痕对角线长度以微米计时得到的维氏硬度值，同样用符号 HV 表示，用于材料微区硬度（如单个晶粒、夹杂物、某种组成相等）的测试。

(5) 冲击韧度

不少零件在工作中常常会受到高速作用的载荷冲击，如冲床的冲头、锻压机的锤杆、汽车的齿轮、飞机的起落架及火车的启动与制动部件等。瞬时冲击所引起的应力和应变要比静载荷引起的应力和应变大得多，因而选用制造这类构件的材料时，必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。材料在冲击载荷作用下抵抗变形和断裂的能力称为冲击韧度，用 a_k 表示。 a_k 值常采用一次冲击弯曲试验法测量。由于在冲击载荷下加载速度大，材料的塑性变形得不到充分发展，为了能灵敏地反映出材料的冲击韧度，通常采用带缺口的试样进行测试，图 1-19 所示为国家标准规定的一次冲击弯曲试样的尺寸及加工要求。在冲击试验机上，使处于一定高度的摆锤自由落下，将试样冲断，测得冲击吸收功，再用该吸收功除以试样缺口处截面积，即得到材料的冲击韧度 a_k 。

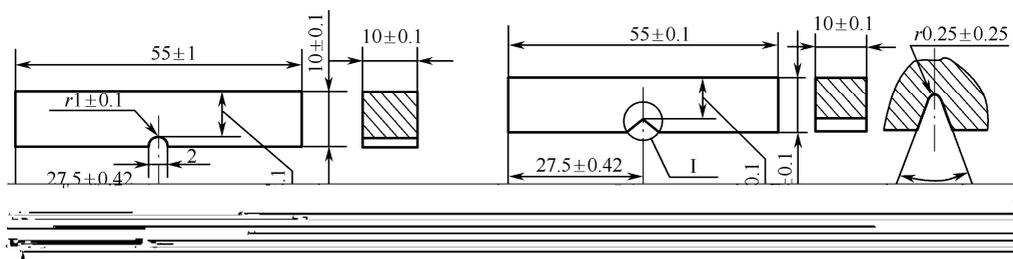


图 1-19 一次冲击弯曲试样

如果说冲击韧度描述的是材料抵抗在高应力作用下发生断裂的能力，那么，在低应力作用下材料抵抗裂纹失稳扩展的能力则由断裂韧度（ K_{IC} ）来描述（详见《材料力学》）。

（6）耐磨性

一个零件相对另一个零件摩擦，摩擦表面有微小颗粒分离出来，接触面尺寸变化、有质量损失，这种现象称为磨损。材料对磨损的抵抗能力称为材料的耐磨性，可用磨损量表示。在一定条件下的磨损量越小，则耐磨性越高；反之亦然。一般用在一定条件下试样表面的磨损厚度或试样体积（或质量）的减小来表示磨损量的大小。

磨损的种类包括氧化磨损、咬合磨损、热磨损、磨粒磨损、表面疲劳磨损等。一般来说，降低材料的摩擦系数或提高材料的硬度都有助于增加材料的耐磨性。

3. 物理性能和化学性能

（1）物理性能

金属材料的主要物理性能有密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性及磁性能及光性能等。由于机器零件的用途不同，对于其物理性能的要求也有所不同。例如，飞机零件一般要选用密度小的铝合金来制造；在设计电机、电器的零件时，通常要考虑金属材料的导电性等。

金属材料的一些物理性能对于热加工工艺还有一定的影响。例如，高速钢的导热性较差，为防止裂纹产生，在锻造时就应该用较低的速度来进行加热；又如，锡基轴承合金、铸铁和铸钢的熔点不同，在铸造时三者的熔炼工艺也有很大的不同。

（2）化学性能

化学性能是金属材料在室温或高温时抵抗各种化学作用的能力，主要指抵抗活泼介质的化学侵蚀能力，如耐酸性、耐碱性、抗氧化性等。

在腐蚀介质中或在高温下工作的零件，比在空气中或室温下工作的零件腐蚀更为强烈。在设计这类零件时，应特别注意金属材料的化学性能，并采用化学稳定性良好的合金。例如，化工设备、医疗机械等可采用不锈钢制造。

1.2 高分子材料的结构与性能

高分子材料又称高分子化合物或高分子聚合物（简称高聚物），是以有机高分子化合物为主要组分的材料。高分子化合物是相对分子质量很大（一般在5000以上，有的高达几百万）的化合物。高分子化合物是由一种或多种低分子化合物通过聚合反应获得的。构成高分子化合物的低分子化合物称为单体，如聚乙烯由乙烯单体聚合而成。

高分子化合物是由大量的大分子链构成的，而大分子链又由许多结构相同的基本单元（称为链节）重复连接而成，同一种高分子化合物的分子链所含的链节数并不相同，所以，高分子化合物实质上是由许多链节结构相同而链节数（聚合度）不同的化合物所组成的混合物，其相对分子质量与聚合度都是平均值。

高分子化合物的物理和力学性能与其组成、相对分子质量、分子结构和聚集状态有关。

1.2.1 高分子材料的结构

高分子化合物的结构包括大分子链结构和聚集态结构。链结构是指单个大分子的化学组成、

键连接方式、立体构型、分子的大小和形态。聚集态结构是高分子化合物中大分子之间的结构形式，包括非晶态结构、晶态结构、取向态结构和液晶态结构等。

1. 大分子链结构

根据组成元素的不同，大分子链可分为碳链大分子、杂链大分子和元素链大分子三类。

大分子链中原子间及链节间均为共价键结合。不同的化学组成，其键长与键能不同，这种结合力称为高分子化合物的主价力。其大小对高分子化合物的性能，特别是熔点、强度等有重要影响。

大分子链的结构（或形态）有线形、支化形和体形（网形或交联形）三类（见图 1-20）。

(1) 线形分子链

各链节以共价键连接成线形长链分子，其直径小于 1nm，而长度可达几百纳米甚至几千纳米，像一根长线（见图 1-20 (a)），也可呈卷曲状或线团状。

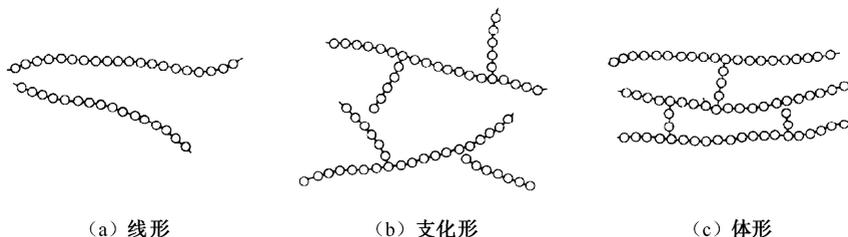


图 1-20 大分子链的结构

(2) 支化形分子链

在主链的两侧以共价键连接相当数量的支链，其形状如树枝形，如图 1-20 (b) 所示。由于存在支链，分子链之间不易形成规则排列，难以完全结晶为晶体，同时支链可形成缠结，使塑性变形难以进行，因而影响高分子材料的性能。

(3) 体形（网形或交联形）分子链

在线形或支化形分子链之间，沿横向通过链节以共价键连接起来，形成三维网状大分子，如图 1-20 (c) 所示。由于网状分子链的形成，使聚合物分子之间不易相互滑动，因此，提高了聚合物的强度、耐热性及化学稳定性。

分子链的形态对聚合物性能有显著影响。线形和支化形分子链构成的聚合物具有高弹性和热塑性，即可以通过加热和冷却的方法使其重复地软化（或熔化）和硬化（或固化），故称热塑性聚合物。体形分子链构成的聚合物具有较高的强度和热固性，即加热加压成型固化后，不能再加热熔化或软化，称为热固性聚合物，如酚醛塑料、环氧树脂、硫化橡胶等。

聚合物大分子链在不停地运动，这种运动是由单键内旋转引起的。以单键连接的原子在保持键角、键长不变的情况下旋转，称为内旋转。图 1-21 所示为碳链大分子链的单键内旋转示意图。这种由于单键内旋转所产生的大分子链的空间形象称为大分子链的构象。正是这种极高频率的单键内旋转随时改变着大分子链的构象，使线形大分子链在空间很容易呈卷曲状或线团状。在拉力作用下，呈卷曲状或线团状的线形大分子链可以伸展拉直，外力去除后，又缩回到原来的卷曲状和线团状。这种能拉伸、回缩的性能

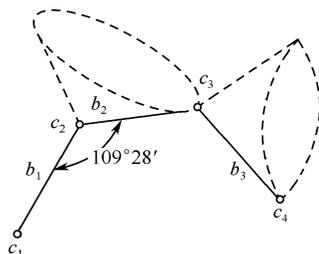


图 1-21 碳链大分子链的单键内旋转示意图

称为分子链的柔性，这是聚合物具有弹性的原因。

柔性分子链聚合物的强度、硬度和熔点较低，但弹性和韧性较好。刚性分子链聚合物则相反。

2. 大分子的聚集态结构

根据大分子链空间几何排列的特点，固态高聚物的结构主要有非晶态和晶态两类。

(1) 非晶态高聚物的结构

线形大分子因其分子链很长，凝固时黏度很大，很难进行有规则的排列，因此，多为混乱无序的排列，形成无规线团的非晶态结构（见图 1-22），如聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯（有机玻璃）等都是非晶态结构。体形大分子的高聚物，因其链间有大量的交联，难以实现分子的有序排列，也多呈无序排列的非晶态结构。

(2) 晶态高聚物的结构

线形、支化形和交联少的体形高聚物在一定条件下，可以固化为晶态结构，大分子链排列规则、紧密。但是由于分子链的运动较困难，不可能完全晶化。在实际生产中获得完全晶态的聚合物是很困难的，通常用聚合物中结晶区域所占的百分数即结晶度来表示聚合物的结晶程度。典型的晶态高聚物，如聚乙烯、聚四氟乙烯、聚偏二氯乙烯等，一般只有 50%~80% 的结晶度，而有相当一部分处于非晶态，所以，晶态高聚物实际为晶态和非晶态的集合结构，如图 1-23 所示。

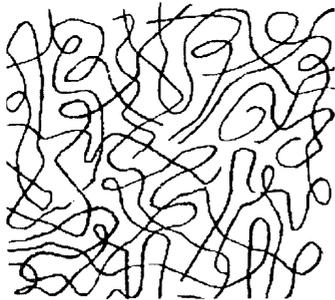


图 1-22 非晶态高聚物结构示意图

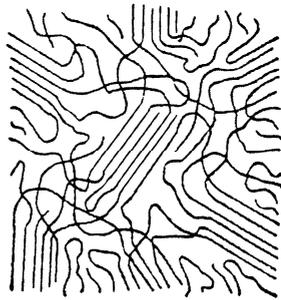


图 1-23 晶态高聚物结构示意图

聚合物的性能与其聚集态有密切的联系。晶态聚合物由于分子链规则排列而紧密，分子间吸力大，分子链运动困难，故其熔点、相对密度、强度、刚度、耐热性和抗熔性等性能好；非晶态聚合物，由于分子链无规则排列，分子链的活动能力大，故其弹性、延伸率和韧性等性能好；部分晶态聚合物性能介于上述二者之间，且随结晶度增加，熔点、相对密度、强度、刚度、耐热性和抗熔性均提高，而弹性、延伸率和韧性则降低。

1.2.2 高分子材料的性能

1. 高分子材料的工艺性能

高分子材料由于其成型温度比较低，其加工性能很好，在加温加压下很容易成型，也可通过铸造、冲压、焊接、黏结和机械加工等方法制成各种制品。

高分子材料的成型方法很多，常见的有挤出成型、注射和反应注射成型、吹塑成型等。

2. 高分子材料的力学性能

与金属材料相比, 高分子材料的力学性能具有下述特点。

(1) 强度低

高聚物的强度平均为 100MPa, 比金属低得多, 但由于其质量小、密度小 (一般为 $1.0 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$), 许多高聚物的比强度还是很高的, 某些工程塑料的比强度高于钢铁材料。

(2) 弹性高、弹性模量低

高聚物具有远高于金属材料的高弹性。高聚物的弹性变形量可达到 100%~1000%, 而一般金属材料只有 0.1%~1.0%。高聚物的弹性模量低, 一般为 2~20MPa, 而一般金属材料的弹性模量为 $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5 \text{MPa}$ 。

(3) 黏弹性好

大多数高聚物的高弹性基本上是“平衡弹性”, 即应变与应力即时达到平衡。但还有一些高聚物 (如橡胶) 的高弹性表现出强烈的时间依赖性。应变相对于应力有所滞后, 即当施加一定应力后, 不能马上产生相应的应变, 这就是黏弹性, 它是高聚物的又一重要特性。黏弹性的主要表现有蠕变、应力松弛和内耗等。

蠕变是在应力保持恒定的情况下, 应变随着时间的增长而增加的现象。

应力松弛是高聚物受力变形后所产生的应力随时间而逐渐衰减的现象。

高聚物受周期载荷时, 产生伸一缩的循环应变。由于应变对应力的滞后, 在重复加载时, 就会出现上一次变形还未来得及回复时又施加了下一次载荷的情况, 于是造成分子间的内摩擦, 产生内耗, 弹性储能转变为热能。但内耗能吸收振动波, 这也是高聚物具有良好减振性能的原因。

(4) 塑性好

高聚物由许多很长的大分子链组成, 加热时分子链的一部分受热, 其他部分不受热或少受热, 因此, 材料不会立即熔化, 而先有一个软化过程, 所以塑性很好。

(5) 韧性好

在非金属材料中, 高聚物的韧性是比较好的。例如, 热塑性塑料的冲击韧度一般为 $2 \sim 15 \text{kJ/m}^2$; 热固性塑料的冲击韧度较低, 为 $0.5 \sim 5 \text{kJ/m}^2$ 。但是, 与金属相比, 高聚物的冲击韧度仍然过小, 仅为金属的 1% 数量级。由于冲击韧度与拉断强度和断裂延伸率有直接关系, 所以, 通过提高高聚物的强度可以提高其韧性。

(6) 减摩、耐磨性好

许多塑料有较好的减摩性能, 除了摩擦系数低以外, 自润滑性能好、磨损率低。例如, 聚四氟乙烯对聚四氟乙烯的摩擦系数只有 0.04, 几乎是所有固体中最低的。在无润滑或少润滑的摩擦条件下, 其耐磨、减摩性能是金属材料无法比拟的。

3. 高分子材料的物理和化学性能

同金属材料相比, 高分子材料的物理、化学性能有如下特点。

(1) 良好的绝缘性和隔热、隔声性能

高聚物分子的化学键为共价键, 没有自由电子和可移动的离子, 因此是良好的绝缘体, 绝缘性能与陶瓷相当。另外, 由于高聚物的分子细长、卷曲, 在受热、受声之后不易产生振动, 所以对热、声也有良好的隔离性能, 例如, 塑料的导热性只有金属的 1%。

(2) 耐热性较差

与金属材料相比, 高分子材料的耐热性较差, 这是高分子材料的一大缺点。常用热塑性塑料

如聚乙烯、聚氯乙烯等长期使用温度一般不超过 100℃；热固性塑料如酚醛塑料长期使用温度为 130~150℃；耐高温塑料如有机硅塑料等也只能在 200~300℃下使用。

(3) 良好的耐蚀性

高分子材料的化学稳定性很好，因而其耐酸、碱的腐蚀性好。尤其是被誉为“塑料王”的聚四氟乙烯，其在沸腾的王水中也很稳定。

(4) 容易老化

由于高分子材料固有的化学结构、分子链和聚集态结构特点，在热、光、辐射等因素作用下，其性能随时间会不断恶化，逐渐丧失使用性能。

1.3 陶瓷材料的结构与性能

1.3.1 陶瓷材料的结构

陶瓷是由金属元素和非金属元素的化合物组成的。它们的主要成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 等。一般是以天然硅酸盐（如黏土、长石和石英等）或人工合成化合物（如氧化物、氮化物、碳化物、硅化物、硼化物等）为原料，经粉碎—配制—制坯—成型—烧结而制成。陶瓷的晶体结构比金属复杂得多，陶瓷材料的典型组织由晶体相、玻璃相和气相组成。各组成相的结构、数量、大小、形状和分布形态对陶瓷材料的性能有显著影响。

1. 晶体相

晶体相是陶瓷的主要组成相，其结构、数量、形态和分布决定陶瓷的主要性能和应用。它可以是以离子键为主的离子晶体，也可以是以共价键为主的共价键晶体。陶瓷材料中的晶体相主要有硅酸盐、氧化物和非氧化物三种。

硅酸盐是普通陶瓷的主要原料，同时也是陶瓷组织中的重要组成相。硅酸盐的结合键为离子键与共价键的混合键。构成硅酸盐的基本单元是硅氧四面体 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 。其特点是不论何种硅酸盐，硅总是存在于四个氧离子组成的四面体的中心，如图 1-24 所示。按照硅氧四面体在结构中的连接方式不同，所形成的硅酸盐具体结构也不同，如有岛状、链状、层状和网状结构等。

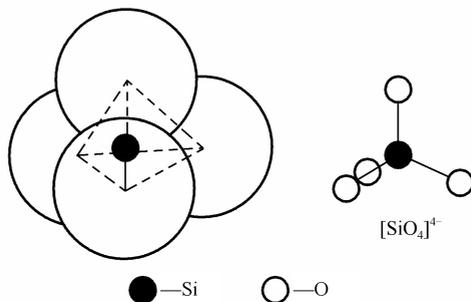


图 1-24 硅酸盐结构

氧化物大多数是陶瓷特别是特种陶瓷的主要组成和晶体相。结合键类型主要是离子键和共价键，晶格结构主要有面心立方、密排立方和密排六方结构。

非氧化物是指不含氧的金属碳化物、氮化物和硅化物等，是特种陶瓷特别是金属陶瓷的主要组成和晶体相，主要由强大的共价键结合，也有一定成分的金属键和离子键。非氧化物的晶体结构主要有密排立方、密排六方和复杂的晶体结构。

陶瓷的性能（特别是力学性能）主要取决于晶体相的结构及其分布形态。

2. 玻璃相

玻璃相是陶瓷原料中的 SiO_2 在烧结处于熔化状态后冷却时原子无规则形成的非晶态相，能成为玻璃相的无机物还有 Se、S 元素和 B_2O_3 、 GeO_2 等氧化物、硫化物、硒化物和卤化物等。玻璃相是陶瓷材料中不可缺少的组成相，其作用如下：

- ① 将晶体相黏结起来，填充晶体相之间的空隙，提高材料的致密度；
- ② 降低烧成温度，加快烧结过程；
- ③ 阻止晶体转变，抑制晶体长大；
- ④ 获得一定程度的玻璃特性，如透光性等。

玻璃相对陶瓷的机械强度、介电性能、耐热与耐火性能等是不利的，所以，不能成为陶瓷的主导相，一般含量为 20%~40%。

3. 气相

气相是陶瓷孔隙中的气体所形成的气孔，常以孤立状态分布在玻璃相中，或以细小气孔分布在晶界和晶内。它在陶瓷生产工艺过程中不可避免地形成而被保留下来。气相容易产生应力集中或者形成裂纹源，使陶瓷强度降低，电击穿能力下降，绝缘性能降低。因此，结构陶瓷中一般希望尽量降低陶瓷中的气孔率，通常普通陶瓷的气孔率为 5%~10%，特种陶瓷的气孔率在 5% 以下，并力求气孔呈球形，而且分布均匀。

1.3.2 陶瓷材料的性能

1. 陶瓷材料的工艺性能

陶瓷材料的工艺路线并不复杂，依次是选料→混配→成型→烧结→修整→成品等。其中，成型是陶瓷制品的主要工序。成型工艺主要包括粉浆成型、压制成型、挤压成型和可塑成型等。

2. 陶瓷材料的力学性能

陶瓷材料的力学性能可归纳为“硬且脆”。

陶瓷材料的硬度是各类材料中最高的，这也是陶瓷材料的最大特点。其硬度多为 1000~5000HV，而淬火钢也仅为 500~500HV。

陶瓷材料的刚度（用弹性模量来衡量）也是各类材料中最高的，如氧化铝的弹性模量为 $4.0 \times 10^5 \text{MPa}$ ，而钢的弹性模量则约为 $2.07 \times 10^5 \text{MPa}$ 。

陶瓷材料属于脆性材料，室温下几乎没有塑性，其冲击韧度和断裂韧度都很低，其断裂韧度约为金属的 1/100~1/60。

按理论计算，陶瓷材料的强度应该很高，但实际上由于其组织中气孔等缺陷较多，且多存在于晶界上，容易产生裂纹，因此，其实际强度较低。