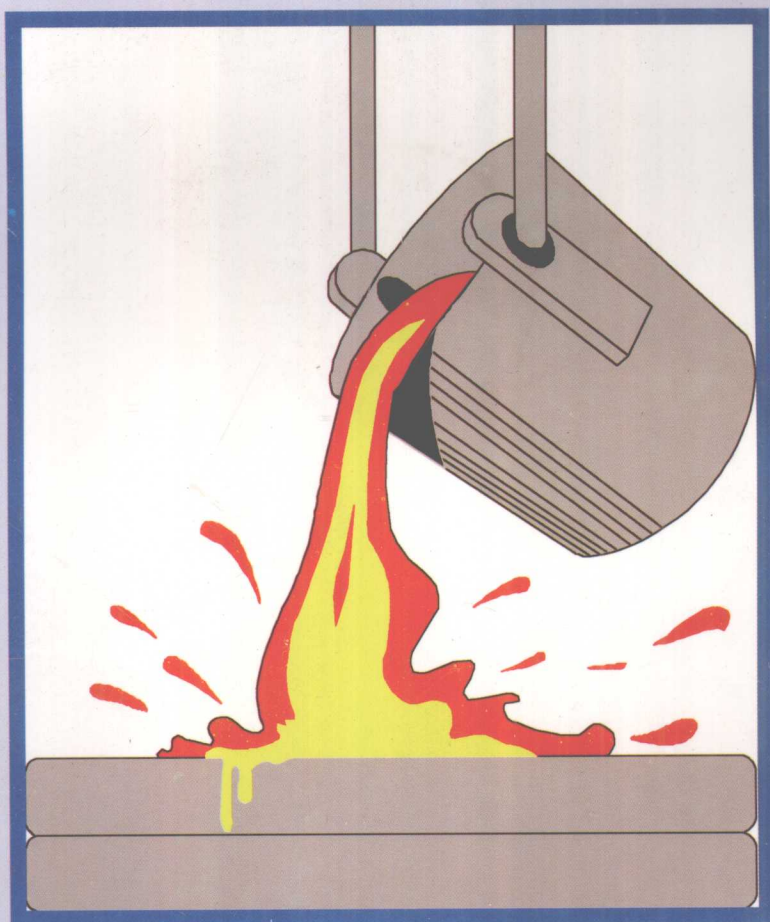


高等学校教材

机械制造基础

(热加工)

主 编 周玉生



机械工业出版社

本书是根据原机械部高教司印发的工程材料及机械制造基础课程教学基本要求编写的机械制造基础系列教材之一。

本书由六章组成,第一至第四章系统地介绍了金属材料及热处理、铸造、锻造、焊接等四种热加工方法;第五章介绍了常用的毛坯选择及工业无损检测技术;第六章简要介绍了非金属材料的成形方法。

本书除作为高等工科院校机械类专业教材外,也可供从事机械制造、热加工等行业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础热加工/周玉生编著. - 北京:机械工业出版社, 1999.7
高等学校教材
ISBN 7-111-07022-4

I. 机… II. 周… III. ①机械制造-高等学校-教材②热加工-高等学校-教材 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 07495 号

出 版 人: 马九荣(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 韩会民 版式设计: 冉晓华 责任校对: 贾立萍
封面设计: 陈 伟 责任印制: 侯新民
北京市昌平振南印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1999 年 4 月第 1 版·1999 年 4 月第 1 次印刷
787mm×1092mm $1/16$ ·12.875 印张·312 千字
0 001—3 000 册
定价: 21.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

根据原国家教委《工程材料及机械制造基础》课程教学指导小组制订的教学基本要求,朝着面向 21 世纪的教育改革,参考国内外课程改革的有益经验,针对过去教材中的问题,聘请多年从事机械制造生产和教学的主力教师,我们编写了机械制造基础系列教材。这套系列教材包括王昕(山东工业大学)主编的《机械制造基础(工艺实习)》、周玉生(哈尔滨工业大学)主编的《机械制造基础(热加工)》、李振明(烟台大学)主编的《机械制造基础(冷加工)》共三册。

本书是机械制造基础系列教材之一。适用于高等工科院校机械类专业。

本书由六章组成,考虑到全书的系统性和便于不同教学单位使用,前四章系统地介绍了金属材料及热处理、铸造、锻造、焊接等四种热加工方法。来自企业的经验证实,从事机械加工、机械制造的工程技术人员若能掌握毛坯的选择及工业无损检测技术,不但有利于提高产品质量还可大大降低产品成本。为此本书第五章介绍了常用的毛坯选择及工业无损检测技术,随着工业的发展,非金属材料(如陶瓷、高分子材料、复合材料)在机械制造业中的应用日益广泛,由于非金属材料的某些优异性能,甚至在某些场合非金属材料已取代了金属材料,因此现代机械类专业人员仅掌握金属材料的成形方法已不能满足时代要求。为此本书第六章简要介绍了一些常用非金属材料的成形方法。

本教材由哈尔滨工业大学汽车工程学院周玉生主编,山东工业大学张景德副主编,山东省金工研究会理事长孙康宁主审。参加编写人员有:哈尔滨工业大学汽车工程学院于周晓、李志成、张文丛、张鸿、赵兴科,华东船舶工程学院周方明,山东工业大学谭训彦、龚红宇。

编写过程中,参考了高等院校同类教材和教学参考书及其它有关文献,并广泛征求了企业界人士的意见,在此向上述有关人员一并表示谢意。

由于编者水平所限,本书一定存在不当之处,诚请各位读者提出宝贵意见。

编者
1999 年 2 月

目 录

前言

第一章 金属材料及热处理	1
第一节 金属的力学性能	1
一、强度	1
二、塑性	2
三、硬度	3
四、其它力学性能	5
第二节 金属的结构和结晶	6
一、金属的晶体结构	6
二、多晶体结构及晶体缺陷	8
三、纯金属的结晶过程	10
四、金属的同素异构转变	11
第三节 合金的结构与相图	11
一、合金的相结构	11
二、二元合金相图	12
三、铁碳合金相图	15
第四节 钢的热处理	19
一、钢在加热和冷却时的组织转变	19
二、钢的退火与正火	22
三、钢的淬火与回火	23
四、钢的其它热处理	25
第五节 常用金属材料	27
一、碳素钢	27
二、合金钢	29
三、铸铁	32
四、有色金属材料	35
思考题	40
参考文献	40
第二章 铸造	41
第一节 合金的铸造性能	41
一、液态金属的充型能力	41
二、合金的凝固特性	42
三、合金的收缩性	44
四、合金的吸气性	46
五、常用铸造合金的铸造性能特点	47
第二节 砂型铸造	48
一、砂型铸造工艺过程	49

二、造型方法的选择	49
三、工艺方案的确定	51
四、砂型铸造常见缺陷	59
第三节 铸件结构工艺性	60
一、铸件结构应利于简化铸造工艺	60
二、铸铁结构应利于避免产生铸件缺陷	62
三、铸件结构要便于后续加工	63
第四节 特种铸造	64
一、熔模铸造	64
二、金属型铸造	65
三、压力铸造	65
四、低压铸造	66
五、离心铸造	66
六、铸造方法的选择	67
思考题	67
参考文献	68
第三章 锻压	69
第一节 金属的塑性变形	69
一、金属塑性变形的实质	69
二、塑性变形对金属组织和性能的影响	71
三、金属的锻造性能及影响因素	73
四、金属的加热与冷却	74
第二节 自由锻	77
一、自由锻设备	77
二、自由锻基本工序	79
三、自由锻工艺规程的制定	82
四、典型零件工艺实例	85
五、自由锻零件的结构工艺性	87
第三节 模锻	88
一、锤上模锻	89
二、胎模锻	96
三、压力机上模锻	97
第四节 板料冲压	102
一、板料冲压的基本工序	103
二、冲压设备和冲模	106
三、典型零件冲压工艺	108
四、冲压件的结构工艺性	109

第五节 其它锻压加工方法	111	二、焊接变形	150
一、轧制与辗锻	111	第八节 常用金属材料的焊接	153
二、挤压	112	一、金属材料的焊接性	153
三、精密模锻	114	二、碳素钢的焊接	154
四、精密冲裁	115	三、合金结构钢的焊接	154
五、锻压方法的比较	116	四、不锈钢的焊接	155
思考题	117	五、铸铁的焊补	156
参考文献	118	六、铝及其合金的焊接	156
第四章 焊接	119	第九节 切割	157
第一节 焊条电弧焊	119	一、气割	157
一、焊条电弧焊的基本原理、特点 和应用	119	二、等离子弧切割	158
二、焊接电弧及其电特性	120	思考题	159
三、焊条电弧焊设备	120	参考文献	160
四、电焊条	122	第五章 毛坯选择及工业无损检测	161
第二节 埋弧焊	124	第一节 毛坯选择	161
一、埋弧焊的基本原理、特点和应用	124	一、不同毛坯的特点	161
二、埋弧自动焊设备	125	二、影响毛坯成本与质量的因素	163
三、埋弧自动焊工艺	127	第二节 工业无损检测	167
四、埋弧焊焊接材料	131	一、致密性检验	167
第三节 气体保护焊	132	二、磁性探伤	168
一、钨极氩弧焊	132	三、渗透探伤	171
二、熔化极氩弧焊	134	四、超声波探伤	173
三、CO ₂ 气体保护焊	136	五、X 光及其它探伤方法	175
四、等离子弧焊接	139	思考题	181
第四节 电阻焊	142	参考文献	182
一、对焊	143	第六章 非金属材料的成形方法	183
二、点焊	143	第一节 陶瓷材料的成形方法	183
三、缝焊	144	一、注浆成形	183
第五节 钎焊	144	二、可塑成形	186
一、钎料和钎剂	144	三、压制成形	187
二、钎焊方法	145	四、带式成形	189
三、钎焊生产	145	第二节 高分子材料的成形方法	190
第六节 其它焊接方法	146	一、热塑性聚合物的成形方法	190
一、电渣焊	146	二、热固性聚合物的成形方法	194
二、摩擦焊	146	第三节 复合材料的成形方法	194
三、电子束焊	147	一、复合材料成形概述	194
四、激光焊	147	二、手糊成形	195
五、超声波焊	148	三、模压成形	195
第七节 焊接结构	148	四、缠绕成形	197
一、焊接残余应力	148	思考题	198
		参考文献	198

第一章 金属材料及热处理

金属材料在现代工农业生产中占有极其重要的地位。不仅在机械制造、交通运输、国防与科学技术等各个部门使用大量的金属材料，而且在人们日常生活用品中也离不开金属材料。金属材料的品种繁多，工程上常用的金属材料有钢铁、有色金属及其合金、粉末冶金材料等。各种材料的成分不同，性能各异，而且通过加工，特别是热处理以后，性能变化很大。合理选用金属材料，适当地确定热处理工艺，妥善安排工艺路线对充分发挥金属材料本身的性能潜力，提高产品质量，节省金属材料，降低生产成本等方面均有着重大的影响。实践表明，由于选材或热处理不当，往往造成机械零件的性能达不到规定的技术要求，从而导致材料早期失效，影响机械设备寿命。因此，掌握金属材料及热处理知识对机械制造工作者来说是十分必要的。

本章通过介绍金属学、热处理及金属材料的基本知识，使学生了解金属材料的成分、组织、热处理工艺之间的关系，并具备合理选用金属材料，正确选定热处理工艺等方面的初步能力。

第一节 金属的力学性能

在机械零件的设计制造和选材时，除考虑金属材料的物理性能（如导电性）、化学性能（如耐腐蚀性）、工艺性能（铸造性能、焊接性能）之外，力学性能是主要的设计、制造依据。

金属材料在外力作用下表现出来的性能称为金属材料的力学性能。根据工件受力情况的不同，可用相应的力学性能指标来衡量，静载荷作用下的力学性能指标有强度、硬度、塑性等；在动载荷作用下的力学性能指标有冲击韧性；在交变载荷作用下的力学性能指标有疲劳强度。

一、强度

金属材料抵抗由外力载荷所引起的应变或断裂的能力称为强度。按外力的性质不同，强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。工程中常用的强度指标是抗拉强度，它是用标准试样在拉伸试验机上通过拉伸试验测出来的。

图 1-1 为拉伸试样的形状和尺寸示意图。标距为 L_0 ，试样的横截面积为 A_0 ，在拉伸试验中，将试样装夹在拉伸试验机上，在试样的两端缓慢地施加载荷，试样的受力方向与其轴向平行。这样，试样就在载荷不断增加的同时被逐渐地拉长，直至断裂。在拉伸过程中，试验机自动记录每一瞬间的载荷 P 及相应的试样伸长量 ΔL ，并绘出拉伸曲线。

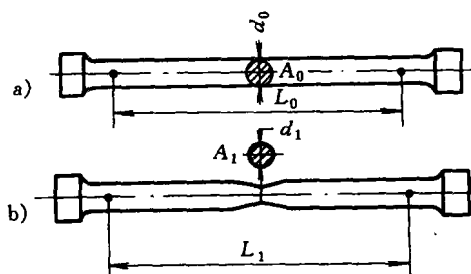


图 1-1 拉伸试样示意图
a) 拉伸前 b) 拉伸后

图 1-2 为低碳钢的拉伸曲线。由图可以看出，当载荷较小时，试样的伸长量 ΔL 与载荷成比例增加，拉伸曲线在 OE 段保持直线。在这个过程中卸载，试样将迅速恢复到初始状态，这种变形称为弹性变形。当载荷超过 P_e ，曲线处于 E 点以后，卸载后试样不能完全恢复到初始状态而是产生了永久性变形，即塑性变形。塑性变形后继续增加载荷达到 P_s 时，拉伸曲线将出现锯齿型平台，即载荷在基本保持不变情况下试样却继续产生塑性伸长，这种现象叫做屈服。拉伸曲线上的平台也称为屈服平台， S 点为屈服点。

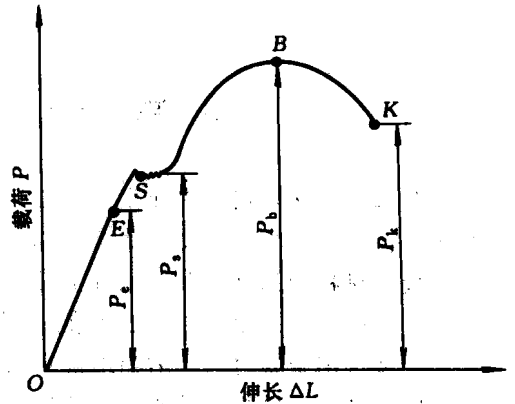


图 1-2 低碳钢的拉伸曲线示意图

产生屈服后，若继续增加载荷，试样继续伸长，当载荷增加到 P_b 时，试样标距内的某局部截面将开始缩小（称为缩颈），此时的载荷是试样所能承受的最大载荷。衡量材料单位面积承受载荷的最大能力，用抗拉强度表示，即是金属材料在拉伸过程中所能承受的最大拉应力，用符号 σ_b 表示，其计算方法为

$$\sigma_b = P_b / A_0 \quad (1-1)$$

式中 P_b ——试样拉伸时的最大拉力 (N)；

A_0 ——试样的原始截面积 (m^2)。

随着缩颈部位截面积逐渐减小，达到抗拉强度继续变形所需的载荷下降，载荷达到 P_k 时，试样在缩颈处 (K 点) 断裂。

屈服强度，是金属材料在外力作用下开始产生屈服时的应力。用 σ_s 来表示，则

$$\sigma_s = P_s / A_0 \quad (1-2)$$

式中 P_s ——试样产生屈服现象时的载荷 (N)。

弹性极限是材料在外力作用下，能保持弹性变形的最大应力，用 σ_e 表示。

$$\sigma_e = P_e / A_0 \quad (1-3)$$

式中 P_e ——试样产生弹性变形的最大拉力 (N)。

以上讨论了低碳钢的拉伸曲线。对于高强钢、奥氏体钢和其它金属材料（如某些有色金属、铸铁等脆性材料），它们的拉伸曲线不出现明显的屈服平台，如图 1-3 所示。对于这种拉伸曲线类型的金属材料，通常规定以产生 0.2% 塑性变形时的应力作为名义屈服强度，以 $\sigma_{0.2}$ 表示。

机械零件在工作中若承受应力超过屈服强度则产生塑性变形；超过抗拉强度则导致零件断裂。因此，屈服强度是衡量金属材料是否破坏的最主要的力学性能指标之一，是零件设计时的重要依据。

二、塑性

金属的塑性是指金属在外力作用下产生塑性变

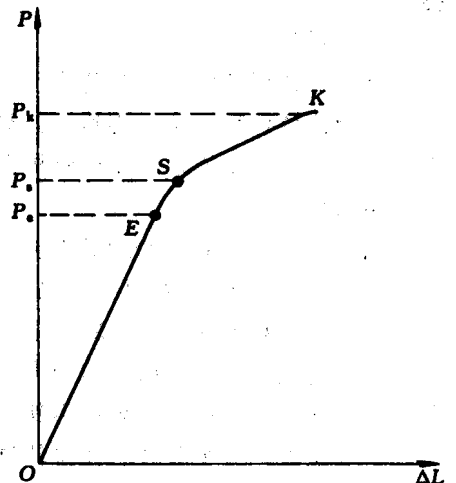


图 1-3 高强钢的拉伸曲线示意图

形而不被破坏的能力。常用伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 来表示（参考图 1-1）。

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 L_0 ——试样标距的原始长度；
 L_1 ——试样拉断瞬间标距的实际长度；
 A_0 ——试样原始截面积；
 A_1 ——试样断口处的截面积。

δ 与 ψ 数值越大，表明金属材料的塑性越好。良好的塑性是金属材料进行锻造、轧制、冲压、焊接等工艺的必要条件。

三、硬度

硬度是指当外来物体作用于固体上时，固体抵抗形变特别是塑性形变、压入或搔痕的能力。硬度也是金属材料的重要力学性能指标之一，它直接影响到材料的切削加工性和零件的耐磨性。硬度愈高，零件的耐磨性愈好，但硬度过高的毛坯或坯料又给切削加工带来困难。

硬度的测试方法既简单易行，又不损坏工件，所以在工矿企业及科研单位应用很广。实际工作中常用的硬度测试方法有布氏硬度法、洛氏硬度法和维氏硬度法三种。

1. 布氏硬度

布氏硬度测试原理：它是用载荷为 P 的力把直径为 D 的钢球（或硬质合金球）压入金属表面（如图 1-4），并保持一定的时间，然后卸载，测出钢球在金属表面上所压出的圆形凹痕的直径 d 。由此计算出压痕球面面积 A_B ，求出单位面积所受的力，即为金属的硬度值。这就是布氏硬度值，以符号 HBS（或 HBW）表示。计算公式为

$$HBS(HBW) = \frac{P}{A_B} = \frac{P}{\pi D h} = \frac{P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-6)$$

式中 P ——载荷（N）；
 D ——钢球直径（mm）；
 d ——压痕直径（mm）。

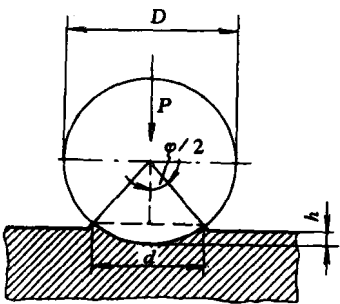


图 1-4 布氏硬度试验原理示意图

实际应用中并不需要直接计算 HBS（或 HBW），可以根据测量的 d 值直接在相应的表中查出布氏硬度值。

布氏硬度试验规范见表 1-1。

表 1-1 布氏硬度试验规范

材 料	HBS /(N·mm ⁻²)	试样厚度 /mm	$\frac{P}{D^2}$	钢球直径 D/mm	载荷 P /N	载荷保持时间 /s
钢的退火、正火、调质状态	1400~4500	6~3	30	10	30000	10
		4~2	30	5	7500	10
		<2	30	2.5	1870	10
黑色金属	<1400	>6	10	10	10000	10
		6~3	10	5	2500	10
		<3	10	2.5	620	10

(续)

材 料	HBS /(N·mm ⁻²)	试样厚度 /mm	$\frac{P}{D^2}$	钢球直径 D/mm	载荷 P /N	载荷保持时间 /s
有色金属及其合金 (铜及其合金、镁合金)	360~1300	>6	10	10	10000	30
		6~3	10	5	2500	30
		<3	10	2.5	620	30
铝及其合金、轴承合金	80~350	>6	2.5	10	2500	60
		6~3	2.5	5	620	60
		<3	2.5	2.5	150	60

2. 洛氏硬度

洛氏硬度的试验原理：用一个锥顶角为 120° 的金刚石圆锥或一定直径的钢球为压头，在规定载荷作用下压入被测金属表面，由压头在金属表面所形成的压痕深度来确定其硬度值，如图 1-5 所示。

洛氏硬度试验的压头分硬质和软质两种。硬质压头的顶角为 120° 的金刚石圆锥体，软质压头由直径为 1.588mm 钢球制成。常用的三种测试规范见表 1-2。这三种洛氏硬度在表盘指示器上刻度的颜色有所规定，其中 HRA 和 HRC 为黑色刻度，而 HRB 为红色刻度。

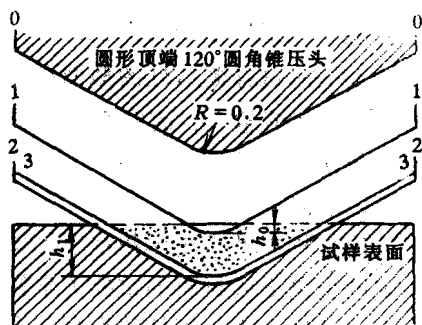


图 1-5 洛氏硬度试验原理示意图
0—0 未加载时位置 1—1 初实验力位置
2—2 总实验力时的位置
3—3 卸除主实验力时的位置

表 1-2 常用的三种洛氏硬度测试规范

符 号	压 头	载荷 P/N	硬度值有效范围	使 用 范 围
HRA	金刚石圆锥	600	> 70	测量硬质合金、陶瓷、表面淬硬层或渗碳层材料
HRB	钢球	1000	25~100	测量有色金属、退火、正火钢
HRC	金刚石圆锥	1500	20~67	调质钢、淬火钢

3. 维氏硬度

维氏硬度的试验原理基本上与布氏硬度相同，也是根据压痕凹陷单位面积上的力作为硬度值，所不同的是维氏硬度试验压头采用锥面夹角为 136° 的金刚石四方角锥体（图 1-6）。试验时，在载荷 P 的作用下，在试样表面压出一个正方形的压痕，测量压痕两对角线的平均长度为 d ，借以计算压痕的面积 A_v 。用 HV 表示维氏硬度，则

$$HV = \frac{P}{A_v} = 1.8544P/d^2 \quad (1-7)$$

式中 P ——载荷 (N)；

A_v ——压痕面积 (mm²)。

载荷 P 的大小可根据试样厚度和其它条件的不同予以选用，一般选用范围为 50~1000N。

三种测试方法均有其优缺点。布氏硬度法压痕较大，能反映被测工件较大范围内的平均硬度，测试结果较精确，但会损伤工件表面，而且对于不同材料或厚度的工件需更换压头、选择载荷大小和保持时间，效率较低。洛氏硬度法操作简便，压

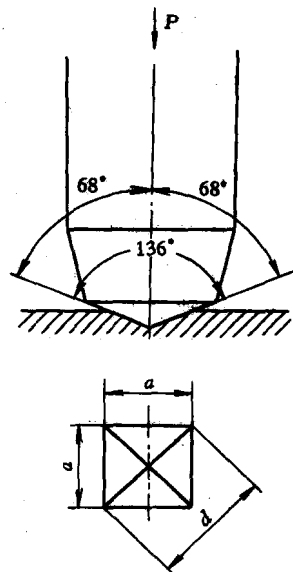


图 1-6 维氏硬度试验原理及压痕示意图

痕小，不损坏工件，但测试结果分散度较大、精确度小。维氏硬度有一个连续一致的标度，载荷可任意选择而不影响测试结果，对薄件或表面热处理层硬度的测试结果比其它两种测试方法更精确，但其操作较麻烦，故生产中直接使用较少，适合于实验室或科研工作中。

四、其它力学性能

1. 冲击韧度

以上介绍的强度、硬度和塑性都是金属材料在静载荷作用下表现出来的力学性能，而许多构件和工具是在冲击载荷下工作的。实践证明，冲击载荷比静载荷对金属零件的破坏程度更严重，所以设计在冲击载荷条件下工作的零件时就必须考虑材料的冲击韧度。

冲击韧度是金属材料的缺口冲击试件在一次冲击弯曲试验时被冲断所吸收的能量除以原试件缺口处的最小横截面积所得的商，用符号 a_K (单位为 J/m^2) 表示。工程上常用摆锤冲击试验来测定冲击韧度，图 1-7 为试验示意图。

试验时，将冲击试样放在试验机的支座上，然后将摆锤自一定高度处落下，冲击试样，从刻度盘上读出 A_K ，则

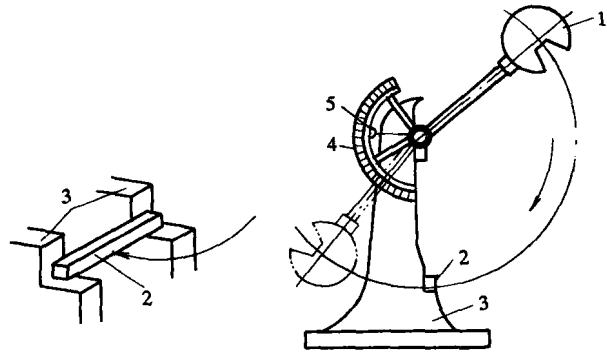


图 1-7 摆锤冲击试验示意图
1—摆锤 2—试样 3—支座 4—表盘 5—指针

$$a_K = \frac{A_K}{A_0} \quad (1-8)$$

式中 A_K ——摆锤对冲击试样所做的功 (J)；

A_0 ——试样缺口处截面积 (cm^2)。

冲击韧度主要用于衡量材料承受大能量冲击而不破坏的能力。材料承受小能量反复冲击的能力与强度有关。强度越高，耐冲击能力越强。冲击韧度的大小除与材料本身特性有关外，还受试样的尺寸、缺口形状和试验环境温度等因素影响，使用时应一并把这些因素都考虑进去。

2. 疲劳强度

在机械设备中，有些零件（如机床主轴、发动机曲轴、连杆、滚动轴承、弹簧、涡轮叶片等）是在变动载荷下工作的，这些零件在低于屈服强度的变动载荷下仍会发生损坏、断裂，这种断裂现象称为疲劳断裂。变动载荷是指载荷大小或大小和方向随时间按一定规律呈周期性变化或呈无规则随机变化的载荷。图 1-8 列出了几种变动载荷示意图。

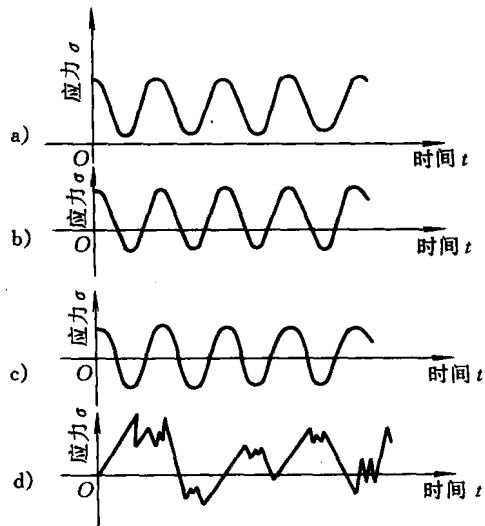


图 1-8 几种变动载荷示意图
a) 载荷大小变化 b)、c) 大小和方向均变化 d) 大小和方向无规则变化

疲劳强度是金属材料承受规定循环数（常取 $10^6 \sim 10^7$ 次）而不失效的最大应力，通常用 σ_y 表示。下标 γ 表示应力循环对称系数，由下式确定

$$\gamma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1-9)$$

式中 $\sigma_{\min}$ ——循环应力中数值最小的应力；

$\sigma_{\max}$ ——循环应力中数值最大的应力。

试验中，按照试样承受不同的应力幅 σ_a （ σ_a 为 $\frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ ）与循环断裂周次 N 之间的关系绘出 σ_a - N 曲线，也称疲劳曲线，如图 1-9。一般地，在一定的循环周次之后，疲劳曲线出现水平部分（曲线 1），此时对应的应力即为疲劳强度；但有些材料（如铝、镁合金，或在腐蚀和高温下工作的材料）的疲劳曲线上并不出现水平部分（曲线 2），则通常规定断裂循环次数为某一值（常为 $10^5 \sim 10^8$ ）时对应的应力为疲劳强度。

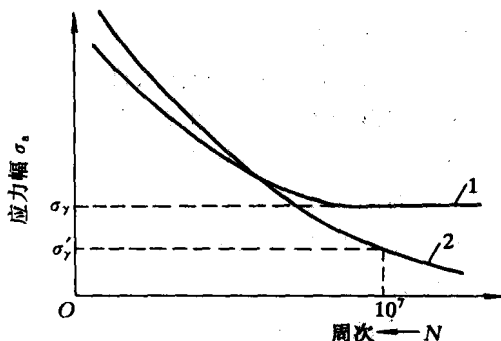


图 1-9 疲劳曲线图

材料的疲劳破坏一般是由于材料内部存在缺陷，或材料表面质量粗糙，存在截面突变等原因而引起局部应力集中，导致微裂纹的产生、扩展，最终断裂。

为提高材料的疲劳强度，除改变零件的结构形状避免应力集中外，还应降低零件表面的粗糙度值，改善材料内部组织，或进行表面强化处理。

第二节 金属的结构和结晶

金属和合金在固态下通常都是晶体。所谓晶体，是指由许多质点（原子、离子或分子）在三维空间呈周期性规则排列所构成的固体，它是固态物质的一种结构类型。固态物质的另一种结构类型是非晶体，它的质点排列呈不规则性。

金属材料的力学性能与金属的组织结构密切相关，改变组织结构则会改变金属的力学性能。金属的热处理就是通过改变组织结构达到改善性能的一种工艺方法。所以研究金属材料首先应了解金属的晶体结构。本节主要介绍一些有关金属的晶体结构及结晶的基本知识。

一、金属的晶体结构

1. 晶体点阵与晶胞

晶体是由原子（离子、或分子）按一定规则排列而成的。为了更好地了解原子排列规律，可假设理想晶体中的原子是固定不动的刚球，那么晶体就是由这些钢球堆垛而成的，如图 1-10a，这样，用许多平行的直线将这些原子刚球连接起来，构成三维的空间格架，如图 1-10b。这种用来描述晶体中原子（离子或分子）排列规则的空间格架模型称为晶体点阵。一种晶体点阵反映出一定的原子排列规律。

为了方便分析研究，通常取晶体点阵的一个基本单元——晶胞来描述晶体的构造，每个晶胞体现晶体点阵的最小周期单位。晶胞内几何特征可用晶胞的三个棱边长 a 、 b 、 c 和三

条棱边之间夹角 α 、 β 、 γ 来描述，如图 1-10c，其中 a 、 b 、 c 为点阵常数。

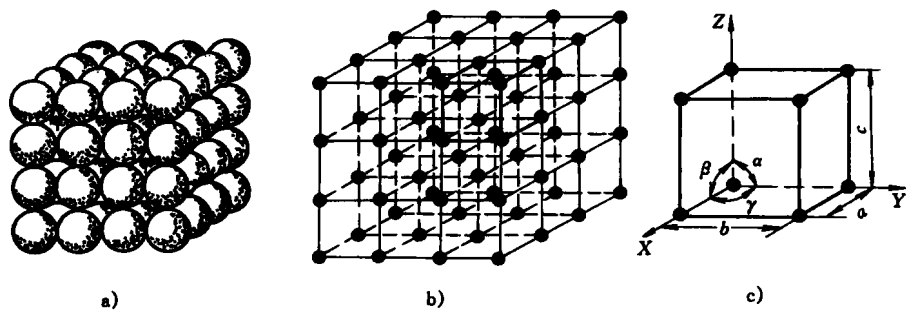


图 1-10 晶体结构示意图
a) 简单立方晶体 b) 晶体点阵 c) 晶胞

2. 三种常见的晶体结构

自然界中的晶体成千上万种，晶体结构类型也多种多样，其中最典型、最常见的金属晶体结构有三种类型，即体心立方点阵、面心立方点阵和密排六方点阵。

(1) 体心立方点阵 体心立方点阵的原子排布如图 1-11 所示，除在立方体晶胞各个顶点上各占据一个原子外，在立方体的中心也有一个原子。在体心立方点阵的晶格中，三个棱边长度相等、三个棱边夹角均为 90° ，即 $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。具有这种点阵的金属有三十多种，例如 α -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W等。

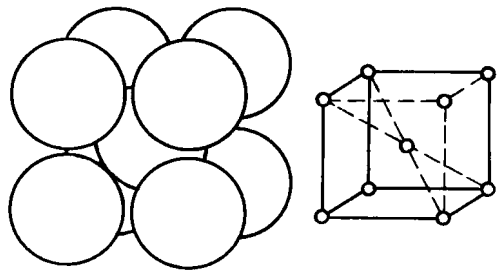


图 1-11 体心立方晶胞

(2) 面心立方点阵 面心立方点阵如图 1-12 所示，原子除分布在立方体晶胞各个顶点上外，在立方体的每个面的中心也分布着一个原子。在面心立方点阵中，晶胞的三个棱边长相等、三个棱边夹角也均为 90° ，即 $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。具有这种点阵的金属有 γ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag等二十多种。

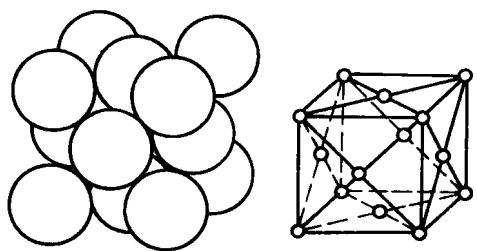


图 1-12 面心立方晶胞

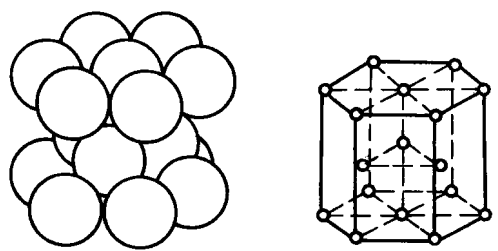


图 1-13 密排六方晶胞

(3) 密排六方点阵 图 1-13 为密排六方晶胞示意图，它是由上下底面分别为正六边形构成的六方柱体，在晶胞的十二个顶角上各占有一个原子，上、下底面中心各有一个原子，另外，两个六方面之间还有三个原子。密排六方点阵的点阵常数中 a 为正六边形边长， c 为

六方柱高，通常 $a \neq c$ 。具有这种晶体结构的金属有 Zn、Mg、Be、 α -Co 等。

3. 晶向指数和晶面指数

晶体原子是在三维空间周期性规则排列的，为了形象地描述原子在晶体中的位置，更好地确定晶体中有关的点、线和面，进一步分析晶体的各种原子列和原子面的特点，就需要定出一定的符号来表示出它们在晶体中的方向或方位，这种符号就是晶向指数和晶面指数。

晶向是晶体中任意两个原子之间连线的指向，晶向指数即是用来描述晶向的一种符号。

晶向指数按以下步骤进行确定：

- 1) 以晶胞的同一点引出三个棱边为坐标轴 X 、 Y 、 Z ，以棱边长度（即点阵常数）作为坐标轴的单位长度。
- 2) 自坐标原点引出一有向直线平行于待定的晶向。
- 3) 在所引出的有向直线上任取一点，求出该点的坐标。
- 4) 将三个坐标值按比例化为最小简单整数，依次写在“ $[\quad]$ ”方括号内，即得所求的晶向指数。

通常以 $[uvw]$ 来表示晶向指数的通式，若晶向指数坐标有负值，则在该坐标值上方加上负号，如 $[\bar{u}\bar{v}\bar{w}]$ 。图 1-14 中示出了立方点阵中几种晶向指数。

晶面是晶体中通过若干原子中心连成的平面，而用来描述晶面位置的符号即为晶面指数。

晶面指数按以下步骤进行确定：

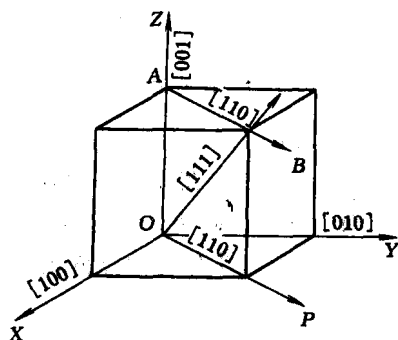


图 1-14 立方晶格中的晶向指数

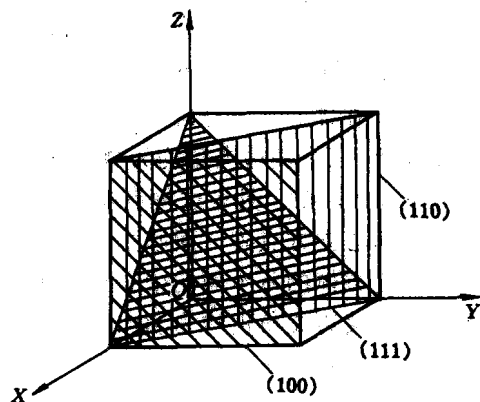


图 1-15 几种晶面指数举例

- 1) 取晶胞中某一顶点引出的三条棱边为坐标轴 X 、 Y 、 Z 。坐标原点应选在待定晶面之外，以免出现零截点。
- 2) 以晶胞的棱边长为度量单位，求出待定晶面在各轴上的截距。
- 3) 取各截距的倒数，并化为最小简单整数，放在圆括号“ $(\quad)$ ”内，即为求得晶面指数。通式为 (hkl) ，如求出截距为负值，则在相应指数上方加上负号，如 $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$ 。图 1-15 为几种晶面指数举例。

二、多晶体结构及晶体缺陷

以上介绍的金属晶体是一种纯理想的情况，是把整个金属内部的晶向（或晶面）看作是互相平行完全一致的，这种晶体为单晶体。而实际应用中的金属材料一般是由许多细小晶体组成的，如图 1-16，这种位向不同、形状各异的小晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间的交界称

为晶界。这种由多个晶粒组成的晶体结构叫做多晶体结构。

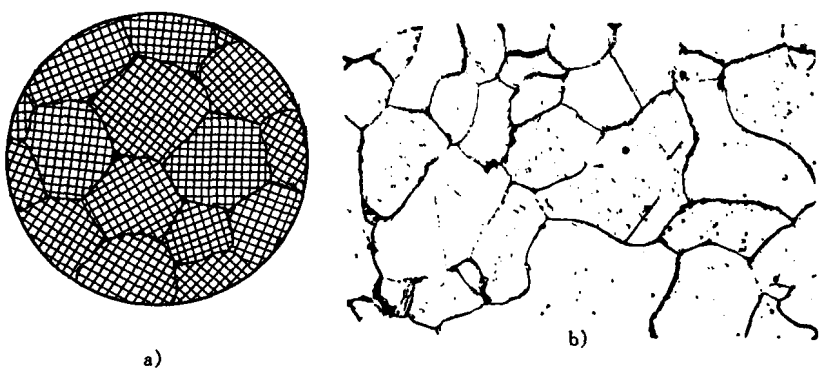


图 1-16 金属多晶体示意图及显微组织照片
a) 多晶体示意图 b) 多晶体显微组织 (500×)

此外，在实际晶体中，原子的排列也并非理想中的那么规则和完整，而是或多或少地存在各式各样的偏离规则排列的不完整区域。通常把这种原子偏离规则排列的不完整区域叫做晶体缺陷。晶体缺陷虽在金属晶体中的数量很少，但由于缺陷的存在，使实际晶体的性能（特别是对结构敏感的性能，如强度及塑性等）发生变化。

按晶体缺陷的几何形状不同，可将它们分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三种。在晶体中，这三种缺陷经常共同存在、相互联系、相互制约，从而对晶体的性能产生复杂的影响。

1. 点缺陷

它的特征是三维方向上的尺寸都很小，相当于一个原子尺寸。常见的点缺陷有三种，即空位、间隙原子和置换原子，如图 1-17 所示。其中空位是没有原子的结点，间隙原子是存在于点阵间隙位置中的原子，而置换原子是取代正常点阵原子的其它原子，这些点缺陷都使其周围邻近原子偏离平衡位置，造成了点阵畸变。

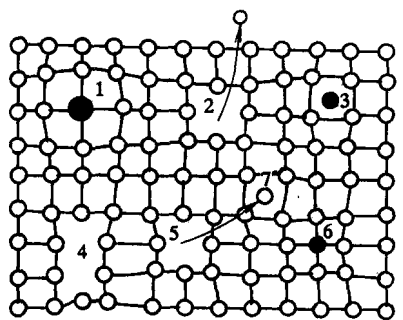


图 1-17 点缺陷示意图
1、6—置换原子 2、4、5—空位 3、7—间隙原子

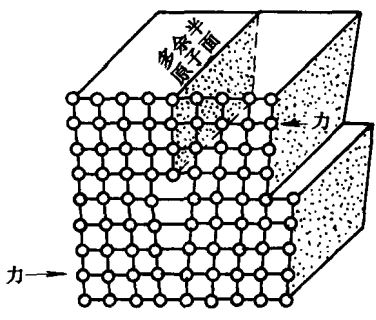


图 1-18 刃型位错示意图

2. 线缺陷

线缺陷的特征是沿着晶体结构向某一方向的尺寸很大，而三维空间的其它两个方向尺寸很小。刃型位错是一种比较简单的线缺陷，其结构特点如图 1-18 所示。为理解方便，设想有一原子平面在晶体内部中断，那么这个原子面中断处的边缘就是一个刃型位错，好似一把

刀刃插入晶体中。晶体线缺陷的产生、增殖或减少对金属的力学性能有很大影响，也是金属塑性变形的一种微观体现。

3. 面缺陷

晶体的面缺陷是指在空间点阵两个方向上的尺寸很大，而第三方向的尺寸很小的那些缺陷。晶界就是一种面缺陷，它是由于相邻两晶粒的位向不同，从一种径向晶粒向另一种径向晶粒过渡时引起的。由于晶界处原子排列不规则，晶体处于畸变状态，存在畸变能，是杂质原子聚集的场所，也是金属材料发生损坏失效的起源地。

除晶界外，还有以下几种面缺陷类型：堆垛层错、亚晶界、相界和李晶界等。

通过以上讨论可以知道，凡是有晶体缺陷的地方就有点阵畸变，就会引起金属性能的变化。为了解多晶体结构及晶体缺陷形成的原因，以下介绍金属凝固时的结晶过程。

三、纯金属的结晶过程

除粉末冶金产品外，金属通常要经过熔炼或铸造（即由液态向固态的转变过程）之后才制成各种制品。由于固态金属通常是晶体，所以把金属由液态向固态的转变过程称为结晶。从原子排列规则性看，结晶就是原子排列从无规则状态向规则状态的转变过程。

图 1-19 为纯金属的冷却曲线，它是熔融金属经缓慢冷却过程中所表现的温度随时间的变化规律，其中 T_m 为金属的理论结晶温度， T_1 为金属的实际结晶温度。由图可知，金属在结晶前，温度连续下降；当液态金属冷却到理论结晶温度时并未开始结晶，而是在 T_m 以下的 T_1 温度时才开始（ $T_1 < T_m$ ），这种理论结晶温度与实际结晶温度之差称为过冷度，用 ΔT 表示。

$$\Delta T = T_m - T_1 \quad (1-10)$$

过冷度越大，实际结晶温度降低。一般情况下，过冷度的大小与冷却速度有关，冷却速度愈大，过冷度愈大。

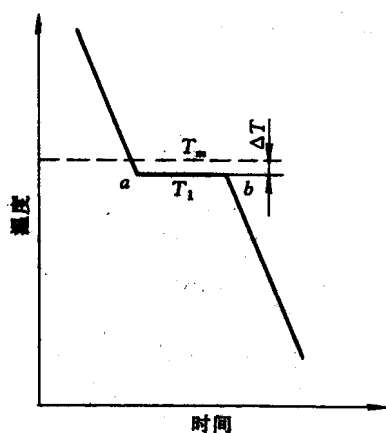


图 1-19 纯金属的结晶曲线

a 结晶开始点 b 结晶终点

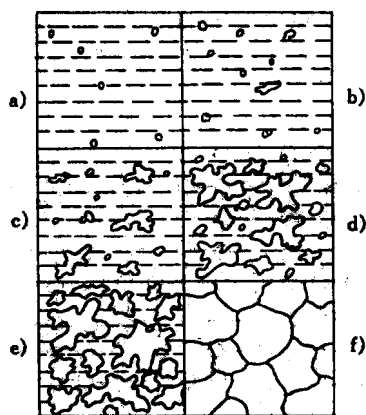


图 1-20 金属的结晶过程示意图

当液态金属的温度降至结晶温度 T_1 时，由于结晶潜热的释放补偿了散失到周围的热量，所以出现了冷却曲线中的平台现象。结晶终了后，结晶潜热也释放完毕，温度继续下降。

金属的结晶过程，实质上是晶核的形成与长大过程。结晶时，首先在液相中形成某一临界尺寸的晶核，金属原子以晶核为核心，按一定位向和几何形状在晶核上排列，使晶核不断

长大。与此同时，在液相的其它位置也产生晶核，并以同样的机制长大。这样，通过形核、长大，直到各晶核相互接触，液态耗尽，结晶过程才告结束。由此可见，固态金属往往是由多晶体构成的，由每个晶核长大成的晶体称为晶粒、晶粒间的接触面即为晶界。图 1-20 为金属的结晶过程示意图。

晶粒的大小对金属的性能有很大的影响，一般金属的强度、塑性和韧度都随晶粒的减小而增加。所以在金属结晶过程中总希望获得细小的晶粒。在实际生产中有以下几种细化晶粒的常用方法：

1) 增加冷却速度 增加冷却速度可以增加过冷度，使晶核的形成速率增大，从而达到细化晶粒的目的。但冷却速度又不能过大，否则容易引起铸件的变形及开裂。

2) 变质处理 在浇注前往液态金属中加入难熔形核剂（又称变质剂），促使形成大量的非均匀晶核。

3) 物理方法 主要有机械振动、超声波振动和电磁振动等，一方面输入能量促使形核，另一方面破坏成长中的枝晶，增加晶核数量，从而实现晶粒细化。

四、金属的同素异构转变

大多数金属在结晶后的冷却过程中，其晶格类型保持不变，但有些金属（如铁、锰、钛、锡等）在不同的温度下具有不同的晶格类型。这种同一金属元素在固态下由于温度的改变而发生晶格类型的变化的现象称为金属的同素异构转变。

图 1-21 为铁的同素异型相变冷却曲线。铁自液态结晶后，在 1538~1394℃ 的温度范围内，具有体心立方点阵，称为 δ -Fe。在 1394℃ 时发生同素异型相变，由体心立方 δ -Fe 转变为面心立方点阵的 γ -Fe。温度进一步冷却到 912℃ 时，面心立方的 γ -Fe 又转变为体心立方点阵，用 α -Fe 表示。

固态下的同素异型相变与液态结晶类似，也是晶核的形成与长大交替并存的过程，为与液态结晶区别开来，常将固态下的相变结晶过程称为重结晶。

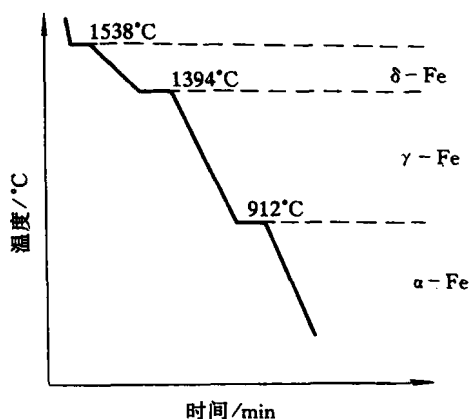


图 1-21 纯铁的冷却曲线及点阵类型变化

第三节 合金的结构与相图

一、合金的相结构

纯金属虽具有较高的导电、导热等性能，但由于它们的力学性能（如强度）较低，所以对力学性能要求较高的机械零件和工模具等，纯金属的使用受到限制，而在工业生产中广泛采用合金材料。

合金是指两种或两种以上的金属，或金属与非金属，经过熔炼、烧结，或其它的方法组合而成的具有金属特性的物质。组成合金的元素叫做组元。例如钢和铸铁都是铁和碳组成的合金，黄铜是由铜和锌组成的合金，其中铁、碳、铜、锌分别为相应合金的组元。

合金的优良特性是由它内部的组织和相结构决定的。所谓相，是指合金中结构相同、成

分和性能均一，并以界面相互分开的组成部分，而组织是合金中不同相的组合。合金中的相结构对合金的性能起决定性作用，合金组织的变化对合金性能也有很大影响。

固态合金中不同相一般具有不同的晶体结构。固态合金中的相，按其点阵结构的基本属性不同，有固溶体和金属化合物两类。

1. 固溶体

合金的组元之间以不同的比例相互混合，混合后所形成的固相晶体结构与组成合金的某一组元相同，这种相称为固溶体。体现这种晶体结构的组元称为溶剂，其它的组元则称为溶质。

按溶质原子在溶剂晶格中所处的位置，可把固溶体分为间隙固溶体和置换固溶体，其中溶质原子占据溶剂原子点阵位置的固溶体为置换固溶体，溶质原子位于溶剂原子点阵的间隙位置中的固溶体称为间隙固溶体，如图 1-22 所示。

在形成置换固溶体时，由于溶质原子与溶剂原子的原子半径存在差异，必然导致固溶体点阵结构的畸变。并且原子尺寸差别愈大，形成固溶体时的点阵畸变愈大。在间隙固溶体中，虽然一般溶质原子尺寸比溶剂原子尺寸小得多，但也同样会导致固溶体的点阵畸变。由于点阵已发生畸变，使合金塑性变形更加困难，从而增强合金的强度和硬度。所以，通常将这种由于溶质原子的引入而使固溶体强度提高的强化方法称为固溶强化。

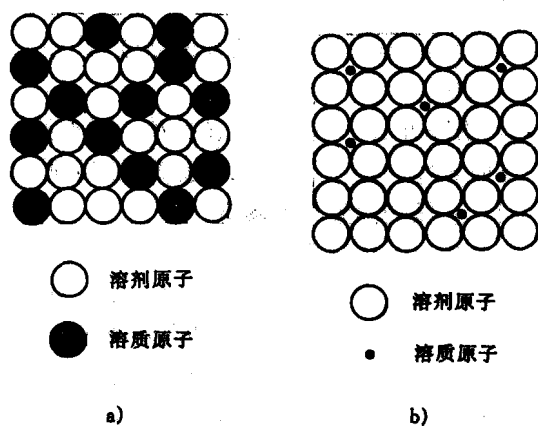


图 1-22 固溶体晶格结构示意图
a) 置换固溶体 b) 间隙固溶体

2. 金属化合物

在合金中，合金组元间发生相互作用而形成的一种新相，它的点阵类型和性能均不同于任一组元，具有金属性质，故称为金属化合物。金属化合物一般具有复杂的晶体结构，熔点高、硬而脆，适合作为合金中的强化相。它的存在和分布对合金的强度、硬度和耐磨性产生很大的影响。例如，碳钢中的渗碳体 (Fe_3C) 本身硬度高、脆性大，它的存在使钢的强度、硬度增加，而塑性、韧性下降。

二、二元合金相图

相图又称状态图、平衡图，它是用来描述合金在平衡条件下，不同成分、不同温度时相或组织的组成和变化的一种图解。利用相图可以知道不同成分的合金在各个温度下的平衡状态，或同一组成成分的合金在不同温度下所存在的相态、相成分和各相的相对含量，以及当温度变化时将发生哪种类型的相转变等等。所以，相图在金属材料的生产、研究及开发中对制定各种工艺具有指导意义。

1. 相图的建立

相图通常是用实验方法建立的，其中热分析法是最常用的方法之一。现以铜镍合金为例说明相图建立的基本步骤。

1) 配制一系列成分不同的合金，如配制含镍质量分数分别为 0%、30%、50%、70%、