

# 前言

---

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的机械设计制造类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》，供高等职业教育机械设计制造类专业教学使用。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格及技术等级要求；具有思想性、科学性，适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书针对高职高专教育是以能力为本，突出职业技能培养的特点，以满足高职高专教育目标编写而成的。

按照学科体系，《金属工艺学》包括金属材料导论、铸造、金属压力加工、焊接和金属切削加工五章。本教材以目前使用最广的、在我国仍要大力发展的钢铁材料为引子，着重讲述各种金属加工工艺方法本身的规律性及其在机械制造中的应用；金属零件的加工工艺过程和结构工艺性；常用金属材料性能对加工工艺的影响；各种工艺方法的比较等。

《金属工艺学》全面贯彻有关的最新国家标准，坚持“少而精”，贯彻“以实用为主，够用为度”的原则，突出重点，注重理论与实践的紧密结合，充实了新工艺、新技术的介绍；在内容编排上，贯彻由浅入深、循序渐进的原则，并在各章后面附有一定数量的复习题，以引导学生独立思考，培养分析问题和解决问题的能力。本书可作为高职高专院校机械类专业课程教材，也可供有关工程技术人员参考。

本书编写人员如下：刘瑛（第一、二章）、刘霞（第一章的第一节、第二章的第四节）、孙京平（第三、四章）、盛涛（第三章的第四节和第四章的第五节）、王健民（第五章）、吴立国（第五章的第二节）、杨宏（第五章的第三节）。王健民担任主编，刘瑛、孙京平担任副主编。

本书由天津大学陈金水教授和天津工程师范学院孟庆国教授主审。

由于编者水平有限，书中恐有欠妥与疏漏之处，恳请同行与广大读者指正。

编者

# 目 录

---

前言

<b>第一章 金属材料导论</b> .....	1
第一节 金属材料的力学性能.....	1
第二节 铁碳合金.....	5
第三节 钢的热处理.....	11
复习题.....	14
<b>第二章 铸造</b> .....	16
第一节 铸造工艺基础.....	16
第二节 砂型铸造.....	23
第三节 特种铸造.....	32
第四节 常用铸造合金.....	37
第五节 铸件结构设计.....	43
复习题.....	47
<b>第三章 金属压力加工</b> .....	49
第一节 金属的塑性变形.....	49
第二节 锻造.....	53
第三节 板料冲压.....	62
第四节 特种压力加工.....	66
复习题.....	67
<b>第四章 焊接</b> .....	68
第一节 焊条电弧焊.....	68
第二节 其他常用的焊接方法.....	73
第三节 常用金属材料的焊接.....	78
第四节 焊接结构设计.....	82
第五节 焊接质量检验.....	85
复习题.....	87
<b>第五章 切削加工</b> .....	88
第一节 金属切削加工的基础知识.....	88

第二节	外圆、内孔、平面加工 .....	116
第三节	螺纹和齿轮加工 .....	130
第四节	精密加工 .....	138
第五节	特种加工 .....	141
第六节	机械加工艺过程 .....	146
第七节	零件的结构工艺性 .....	155
	复习题 .....	157
	<b>参考文献</b> .....	161

## 金属材料导论

金属材料具有机械制造所需要的力学、物理和化学性能，以及工艺性能，是现代机械制造业中应用最为广泛的材料。金属有纯金属和合金两类。合金是以一种金属为基础，加入其他金属或非金属，经过熔炼或烧结制成的具有金属特性的材料。机械制造中最常用的金属材料——钢和铸铁，就是以铁为主的铁碳合金。与纯金属相比，合金的强度、硬度较高，成本较低，并能通过改变合金的成分和进行一定的热处理来获得更好的力学性能和工艺性能，因此机械制造中广泛应用的金属材料以合金为主，很少使用纯金属。

## 第一节 金属材料的力学性能

金属材料的力学性能又称机械性能，是材料在外力作用下所表现出来的性能。金属材料的力学性能是选材时的主要依据之一，它可通过各种不同的试验来测定。

## 一、静载时金属材料的力学性能

静载是指对试样缓慢加载。材料的弹性、刚度、强度和塑性是通过静拉伸试验测定的。

## (一) 弹性、刚度、强度和塑性

按 GB228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》将被测金属制成如图 1-1 所示的标准试样，图中试样直径为  $d$ ，横截面积为  $S_0$ ，长度为  $L_0$ 。在拉伸试验机上缓慢拉伸试样，使其承受轴向静拉力  $F$ ，则试样轴向伸长。随着力的逐渐增加，伸长量  $\Delta L$  逐渐增大，直到试样断裂。拉伸过程中，试验机自动记录每一瞬时的力  $F$  和伸长量  $\Delta L$ ，并绘出拉伸曲线。为能更直接地反映材料的力学性能，常用应力（单位横截面上的力）代替力  $F$ ，用伸长率（单位长度上的伸长量， $\frac{\Delta L}{L_0}$ ）代替伸长  $\Delta L$ ，绘出应力—伸长率曲线。从图 1-2 所示的低碳钢的应力—伸长率曲线可看出，通过静拉伸试验可测定静载时金属材料的力学性能，主要有刚度、强度和塑性。

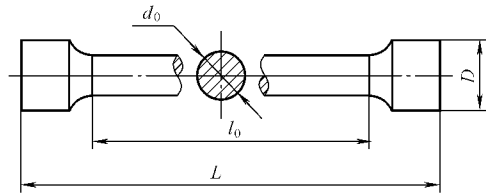


图 1-1 拉伸试样

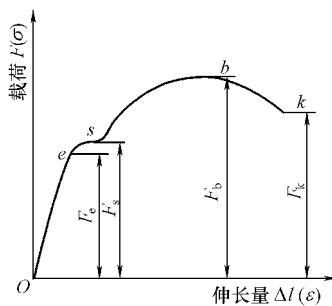


图 1-2 低碳钢的应力—伸长率曲线

## 1. 弹性和刚度

由图 1-2 中可见，在  $Oe$  阶段，应力与伸长率呈线性关系，若去除力  $F$ ，试样即可恢复原始长度，这种不产生永久变形的性能称为弹性；变形为弹性变形；金属在弹性变形范围内，不产生永久变形的最大应力，称为弹性极限。弹性极限精确测定困难，常以非比例延伸强度  $R_P$  代替，例如  $R_{P0.2}$  表示规定非比例延伸率为 0.2% 时的应力。

直线  $Oe$  的斜率  $E$  为试样材料的弹性模量，工程上叫材料的刚度，是衡量材料产生弹性变形难易程度的指标。弹性模量

取决于材料本身，是金属材料最稳定的性能之一，合金化、热处理、冷热加工对它的影响很小。

### 2. 强度

任一时刻的力除以试样原始横截面积  $S_0$  之商是应力，工程上称材料的强度，反映材料在外力的作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。

(1) 屈服强度： $es$  段应力未增加，但变形仍在进行，这种现象称为“屈服”。此时若去除力  $F$ ，将保留一部分残余的变形，试样不能恢复到原始长度，这种不能恢复的残余变形叫塑性变形。材料在外力作用下开始产生塑性变形（屈服现象）的最低应力称为材料的屈服强度，表示材料抵抗微量塑性变形的能力。GB228—2002 标准规定屈服强度分为上屈服强度  $R_{eH}$  和下屈服强度  $R_{eL}$ 。一般情况下，所谓的屈服强度指下屈服强度  $R_{eL}$ 。

应注意的是，有些金属材料没有明显的屈服现象。

(2) 抗拉强度：应力达到  $b$  点以后，试样上某部分开始变细，出现“缩颈”现象，其截面缩小，使继续变形所需应力下降；应力到达  $k$  点时，试样在缩颈处断裂。 $R_m$  是金属材料在被拉断前所能承受的最大应力，称为抗拉强度。

$R_{eL}$  和  $R_m$  是设计和选择材料的主要参数之一。零件或构件工作时通常不允许发生塑性变形，常以  $R_{eL}$  为强度设计的依据；脆性材料工作时，一般不发生塑性变形而直接断裂，应以  $R_m$  为强度设计的依据。 $R_{eL}$  与  $R_m$  的比值（即屈强比）愈小，零件或构件工作的可靠性愈高，但材料强度的有效利用率愈低。

合金化、热处理、冷热加工对  $R_{eL}$  和  $R_m$  的影响很大。

### 3. 塑性

金属材料产生塑性变形而不被破坏的能力。常用断后伸长率  $A$  和断面收缩率  $Z$  来表示塑性。

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中  $L_0$ ——试样原始长度，mm；

$L_u$ ——试样拉断后的长度，mm；

$S_0$ ——试样原始横截面积， $\text{mm}^2$ ；

$S_u$ ——试样拉断后的横截面积， $\text{mm}^2$ 。

$A$ 、 $Z$  数值越大，材料的塑性越好。良好的塑性可以保证金属材料能够顺利承受各种变形加工，同时可以提高零件使用的可靠性，万一超载，零件不至于马上断裂。值得注意的是， $A$  值与试样尺寸有关，试验时一般规定试样尺寸以便于比较。若  $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$ ，则用符号  $A$  表示；若  $L_0 = 11.3 \sqrt{S_0}$ ，则用符号  $A_{11.3}$  表示。

### (二) 硬度

材料抵抗外物压入的能力称为硬度。它直接反映材料的软硬程度，直接影响材料的耐磨性和切削加工性。

材料的硬度在硬度计上测定。工程上常使用布氏硬度法和洛氏硬度法。

### 1. 布氏硬度 (HB)

在静压力  $F$  的作用下, 将直径为  $D$  的淬火钢球或硬质合金压头压入被测材料的表面, 保持规定的时间后, 卸去载荷, 得到直径为  $d$  的压痕, 如图 1-3。测出压痕直径  $d$ , 用载荷除以压痕表面积即可得到布氏硬度 HB 值, 也可从专门的硬度表格中查出 HB 值。

用布氏硬度计测试不同材料和不同厚度的试样时, 可参照表 1-1 选择不同的压头直径、载荷及其保持时间。

布氏硬度法硬度值较稳定, 故测试数据重复性好, 准确度较高, 但因压痕较大, 不适于成品检验。布氏硬度通常用于 HB 值小于 450 的材料, 如灰铸铁、非铁合金和较软的钢材。

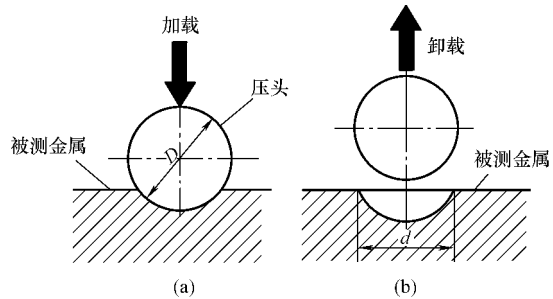


图 1-3 布氏硬度的测定

表 1-1 布氏硬度测试规范

材 料	硬度范围 (HB)	试样厚度 (mm)	钢球直径 $D$ (mm)	载荷 $P$ (kN)	载荷保持时间 (s)
黑色金属	140~450	6~3	10	30	10
		4~2	5	7.5	
		<2	2.5	1.875	
	<140	>6	10	10	10
		6~3	5	2.5	
		<3	2.5	0.625	
铜合金及镁合金	36~130	>6	10	10	30
		6~3	5	2.5	
		<3	2.5	0.625	
铝合金及轴承合金	8~35	>6	10	2.5	60
		6~3	5	0.625	
		<3	2.5	0.156	

符号 HBS 表示钢球压头测得的硬度值, 符号 HBW 表示硬质合金压头测得的硬度值。

### 2. 洛氏硬度 (HR)

如图 1-4 所示, 在规定的载荷下, 将特定的压头垂直压入被测金属表面, 卸载后根据压痕的深度  $h$ , 可直接由刻度盘的指针读出材料的洛氏硬度值。

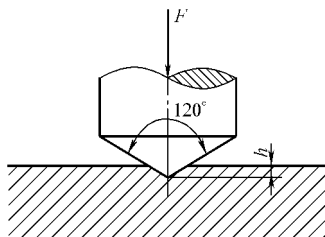


图 1-4 洛氏硬度的测定

测试不同材料的洛氏硬度时, 可参照表 1-2 选择各硬度标尺的压头、总载荷。生产中常应用 HRC 标尺。

洛氏硬度测试简单, 且压痕小, 可用于成品检验。但测得的硬度值重复性较差, 须在不同部位测量数次。

表 1-2 洛氏硬度测试规范

标尺	压头	总载荷 (kN)	适用测试材料	有效值
HRA	120°金刚石圆锥体	0.6	硬质合金、表面淬火钢	70~85
HRB	φ1.588 淬火钢球	1	退火钢、非铁合金	25~100
HRC	120°金刚石圆锥体	1.5	一般淬火钢件	20~67

## 二、动载荷时金属材料的机械性能

绝大多数机械零件都是在动载荷下工作的。作用于机械零件的动载荷主要有两种形式：一种是载荷以较高的速度作用于零件上，形成冲击，称为冲击载荷；另一种是载荷的大小或方向呈周期性或非周期性变化地作用于零件上，称为循环载荷。动载时金属材料的机械性能主要有韧性和疲劳强度。

### 1. 韧性

金属材料抵抗冲击载荷的能力称作韧性。常用金属材料断裂前所吸收的冲击功与断口横截面积的比值作为韧性的指标，称为冲击韧度。它是采用一定尺寸和形状的带缺口的标准冲击试样，在摆锤式冲击试验机上测定的。如图 1-5 所示，具有质量  $m$  (kg) 的摆锤从高度  $H_1$  (m) 处自由落下，将试样冲断后，摆锤摆至高度  $H_2$  (m) 处。则单位横截面积上所吸收的冲击功为

$$\alpha_k = \frac{A_K}{A} = \frac{mH_1 - mH_2}{A} \times 9.8$$

式中  $A_K$ ——冲断试样所消耗的冲击功，J；

9.8——重力加速度数值， $m/s^2$ ；

$A$ ——试样缺口处的截面积， $cm^2$ 。

冲击韧度的大小不仅取决于材料，还受到环境温度、试样形状、表面粗糙度、内部组织等因素的影响。

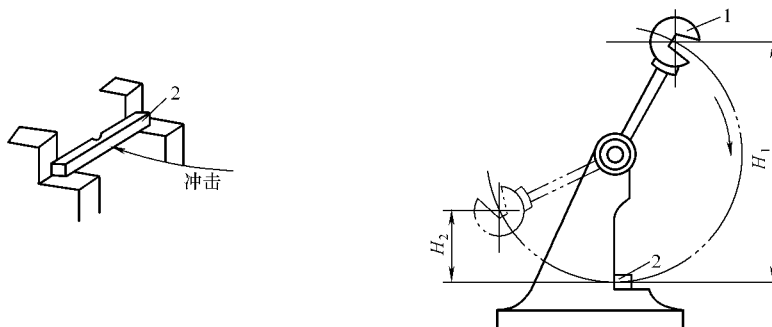


图 1-5 冲击试验示意图

1—摆锤；2—试样

### 2. 疲劳强度

齿轮、曲轴、弹簧等机械零件工作时承受循环载荷，虽然所承受的应力往往低于材料的屈服强度，但材料中含有杂质或加工过程中形成的表面划痕或局部应力集中等因素可能导致产生初始微裂纹，随着应力循环次数的增加，微裂纹逐渐扩展，零件可能发生疲劳断裂。

试验证明，金属材料所承受的最大应力与疲劳断裂前应力的循环次数的关系如图 1-6

所示。图 1-6 的疲劳曲线表明，应力越小，循环次数越大，当应力低于某一值时，材料可经无数次应力循环而不发生疲劳断裂，这个应力值称为材料的疲劳极限或疲劳强度。不同的循环载荷作用下，材料的疲劳极限用不同的符号表示，例如用  $\sigma_{-1}$  表示对称循环载荷作用下，材料的疲劳极限，而用  $\sigma_0$  表示脉动循环载荷作用下材料的疲劳极限。

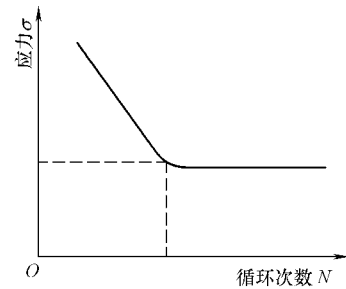


图 1-6 疲劳曲线

由于试验时不可能做到无数次应力循环，工程上常规定：当金属材料的应力循环次数达到一定值仍不发生疲劳断裂，就认为不会再发生疲劳断裂了。这个循环次数称为循环基数，即图 1-6 中疲劳曲线上水平线的起始点所对应的循环次数  $N_0$ 。钢铁材料的循环基数通常取为  $10^7$ 。

为了提高零件的疲劳强度，应采取改善其结构形状、减小应力集中、进行表面强化以及控制材料的内部质量等措施，以减少初始微裂纹的产生、减缓微裂纹的扩展。

### 三、高温下金属材料的机械性能

随着温度的升高，弹性模量、屈服强度、硬度等值将下降，塑性将增加，因此，室温下测定的性能指标不能代表金属材料在高温下的性能。高温长时间应力下工作的金属材料，即使所加应力小于该温度下的屈服强度，也会产生明显的塑性变形直至发生断裂，这种现象称为金属材料的蠕变。

需要说明的是，用于机械制造的金属材料，除了应具有以上力学性能外，还应具有一定的物理性能、较好的化学稳定性以及优良的工艺性能。金属材料的物理性能主要有密度、熔点、热膨胀性、导热性和导电性等；金属材料的化学性能主要指材料在室温或高温下抵抗各种介质侵蚀的能力，如耐酸性、耐碱性、抗氧化性等。选择金属材料时，应根据零件的具体用途，选择满足其物理性能和化学性能的金属材料。例如，飞机零件常选用密度小的铝、钛合金制造，化工和医疗设备常选用不锈钢制造。工艺性能是指金属材料是否易于冷、热加工的性能，也是金属材料的物理、化学性能和力学性能在加工过程中的综合反映。例如，灰铸铁的铸造性能优良，适于铸造，但可锻性极差，不能进行锻造。

## 第二节 铁 碳 合 金

### 一、纯铁的晶体结构及其同素异晶转变

#### (一) 纯铁的晶体结构

钢和铸铁等固态金属一般都是晶体。晶体是指原子（或离子）在空间按一定的几何形状有规律地重复排列的物体。图 1-7 (a) 所示即为简单的晶体模型。为便于分析晶体中的原子排列规律，常将晶体中的原子假想为几何结点，并用假想的直线将相邻原子中心连接起来，使之构成一个可以表示原子排列形式的空间格子，这就是晶格。晶格中各种方位的原子面称为晶面。晶格中由原子（结点）所组成的任一直线，都能代表晶体空间的一个方向，称为晶向。构成晶格的最基本的几何单元称为晶胞。晶胞中各棱边的长度称为晶格常数，以  $\text{Å}$ （埃）为单位（ $1\text{Å}=10^{-8}\text{cm}$ ）。各种金属晶体结构的晶格类型和晶格常数不同，其物理、化学以及力学性能也不相同。

纯铁的晶格类型主要有两种：

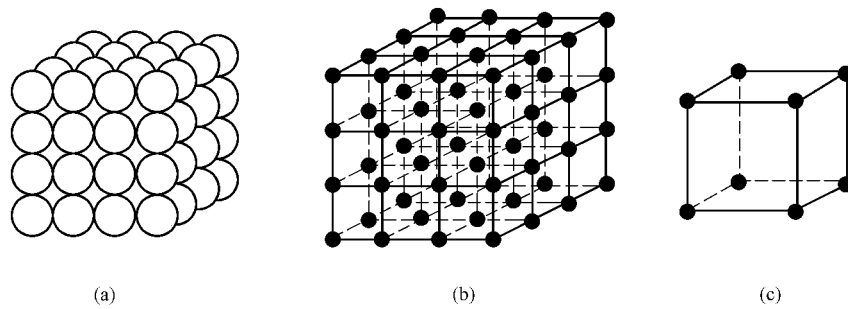


图 1-7 简单的晶体模型

(a) 原子排列模型；(b) 晶格；(c) 晶胞

## 1. 体心立方晶格

如图 1-8 (a) 所示，体心立方晶格的晶胞是一个各晶格常数相等的立方体，在立方体的八个顶角上各有一个原子，在立方体的中心还有一个原子。

## 2. 面心立方晶格

如图 1-8 (b) 所示，面心立方晶格的晶胞也是一个各晶格常数相等的立方体，在立方体的八个顶角上各有一个原子，并且在立方体六个面的中心各有一个原子。

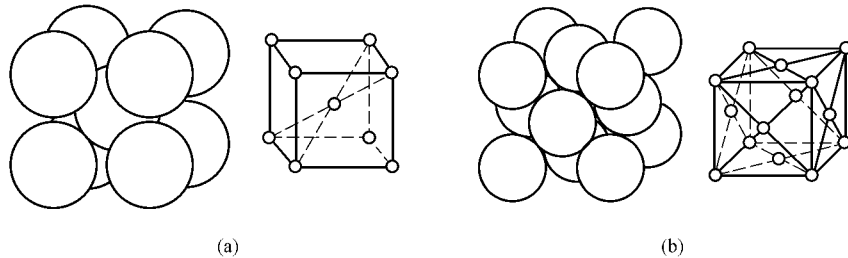


图 1-8 纯铁的晶格结构

(a) 体心立方晶胞；(b) 面心立方晶胞

## (二) 纯铁的同素异晶转变

大多数晶体的晶格类型不会改变，但诸如铁、锡、锰、钛等一些金属，在固态时，随着温度的变化，会呈现不同的晶格类型。这种固态金属的晶格类型随着温度的变化而改变的现象称为同素异晶转变。

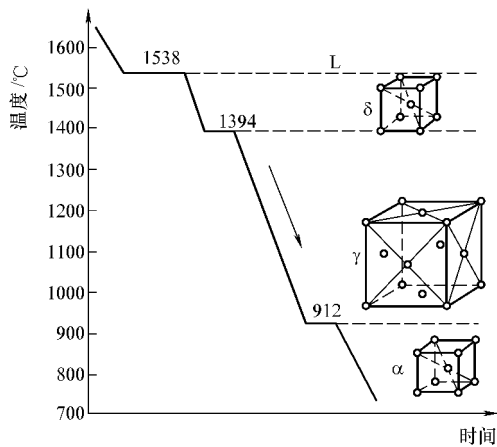
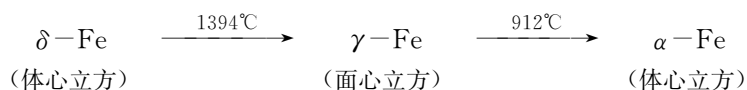


图 1-9 纯铁的冷却曲线

现象称为同素异晶转变。

图 1-9 所示为纯铁的冷却曲线及晶格结构的变化。由图可看到，当冷却到 1538℃ 时，液态纯铁转变为固态纯铁，这个过程称为结晶，结晶后的固态纯铁具有体心立方晶格结构，称为  $\delta$ -Fe。当温度继续下降到 1394℃ 时，发生同素异晶转变，晶格转变为面心立方结构，称为  $\gamma$ -Fe。当温度继续下降到 912℃ 时，再次发生同素异晶转变，又转变为体心立方晶格结构，称为  $\alpha$ -Fe。直至室温，纯铁的晶格类型不再发生转变。可见，液态纯铁冷却到室温的过程中，发生了两次同素异晶转变：



金属的同素异晶转变是固态下原子重新排列的过程，会放出潜热以平衡所散失的热量，使整个系统的温度不发生转变，因此，冷却曲线上在 1394℃和 912℃两处是水平平台，即同素异晶转变是在恒温下进行的。

## 二、铁碳合金的基本组织

碳在不同温度范围内溶入到  $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\gamma\text{-Fe}$  和  $\delta\text{-Fe}$  中，或与 Fe 结合，形成不同的组织。

### 1. 铁素体

碳溶于  $\alpha\text{-Fe}$  中形成的固溶体，称为铁素体，常用符号 F 表示。 $\alpha\text{-Fe}$  呈体心立方晶格，间隙很小，溶碳能力极小，727℃时溶碳量达到最大，为 0.0218%；600℃时溶碳量仅为 0.0057%。

因溶碳极少，其力学性能与纯铁相近，强度、硬度低，塑性、韧性好。

### 2. 奥氏体

碳溶于  $\gamma\text{-Fe}$  中形成的固溶体，称为奥氏体，常用符号 A 表示。 $\gamma\text{-Fe}$  呈面心立方晶格，溶碳能力较高，1148℃时溶碳量达到最大，为 2.11%；随着温度的降低，溶碳能力下降，727℃时溶碳量为 0.77%。

奥氏体的强度、硬度较低，塑性较高。

### 3. 渗碳体

碳与 Fe 形成的金属化合物，称为渗碳体，用  $\text{Fe}_3\text{C}$  表示。其含碳量约为 6.69%，熔点计算值为 1227℃，具有复杂的晶格结构。渗碳体的硬度高，约为 800HBW，可刻划玻璃，但塑性和韧性极低。

由于碳在  $\alpha\text{-Fe}$  中的溶解量极小，常温下，碳在铁碳合金中以渗碳体的形式存在，可呈片状、球状、网状等，对钢的性能有很大的影响。

### 4. 珠光体

奥氏体在恒温下分解而获得的机械混合物，称为珠光体，它由铁素体和渗碳体组成，用符号 P 表示。其含碳量为 0.77%，呈层片状结构。

珠光体的力学性能介于铁素体和渗碳体的性能之间，其强度、硬度中等，有一定的塑性和韧性。

### 5. 莱氏体

由奥氏体与渗碳体组成的机械混合物，称为高温莱氏体，用符号 Ld 表示，它仅存在于 727℃以上。当冷却到 727℃以下时，高温莱氏体转变为珠光体与渗碳体的机械混合物，称为低温莱氏体，用符号 Ld' 表示。

莱氏体的含碳量为 4.3%，渗碳体较多，性能硬脆。

## 三、铁碳合金状态图

铁碳合金状态图是表示在缓慢冷却条件下，铁碳合金成分、温度、组织等变化规律的简明相图。工程实际中，它是合理选择钢铁材料以及制定铸造、锻造、焊接和热处理等工艺规范的重要依据。

图 1-10 为简化的铁碳合金状态图，以温度为纵坐标，以含碳量为横坐标。由于工业实

际中使用的钢铁材料的含碳量都小于 6.69%，图中仅标示了含碳量小于 6.69% 的部分。 $\text{Fe}_3\text{C}$  是稳定的化合物，是组成合金的一个基本的、能够独立存在的物质，因此该图实际是  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  状态图。

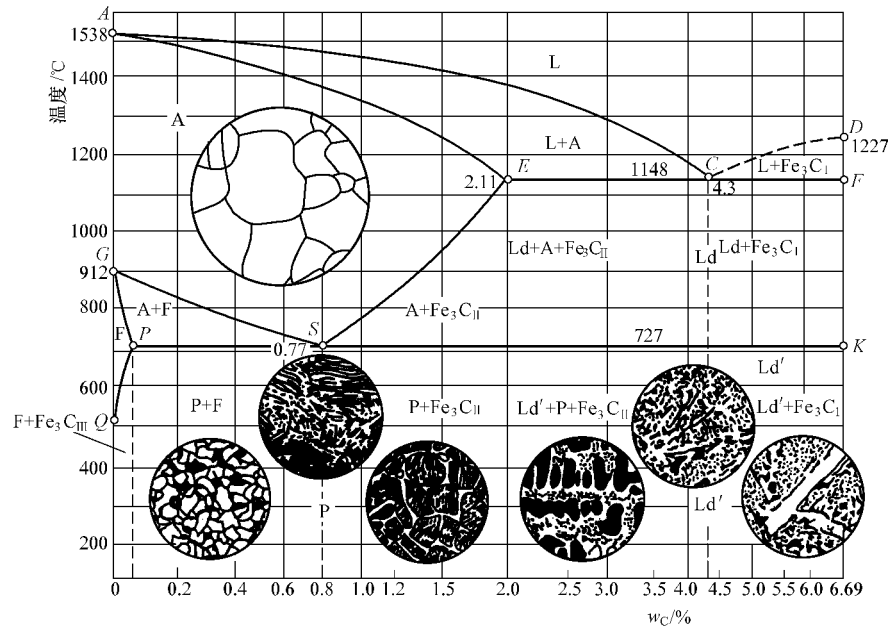


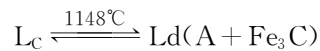
图 1-10 简化的  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  状态图

状态图中各条线都是铁碳合金组织转变的界限，常称为特性线。

$ACD$  线为液相线，也是液态合金结晶开始线。铁碳合金采用液态成形工艺获取金属制品时，浇注温度必须高于此线温度。 $A$  点 ( $1538^\circ\text{C}$ ) 为纯铁的熔点。

$AECF$  是固相线，也是液态合金结晶完成线。铁碳合金采用固态塑性变形工艺获取产品或进行改变性能的处理工艺时，加热温度不能高于该线温度，否则会出现局部熔化。

在  $ACE$  区，液态合金沿  $AC$  线结晶出奥氏体；在  $CDF$  区，液态合金沿  $CD$  线结晶出渗碳体，这种由液态合金直接析出的渗碳体称为初生渗碳体或一次渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}_I$ )。只有在  $C$  点 ( $1148^\circ\text{C}$ 、含碳量 4.3%) 处，液态合金发生共晶反应，同时结晶出奥氏体和渗碳体，即高温莱氏体。含碳量 2.11%~6.69% 的所有铁碳合金（即铸铁）经过  $ECF$  线时都将发生共晶反应，形成一定量的莱氏体，因此， $ECF$  线又称共晶线， $C$  点称共晶点。共晶反应式为

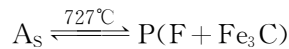


$GS$  线是冷却过程中奥氏体中析出铁素体的开始线，也是加热过程中铁素体溶入奥氏体的终了线。常以符号  $A_3$  表示。析出铁素体的过程，实质上就是面心立方晶格的  $\gamma-\text{Fe}$  向体心立方晶格的  $\alpha-\text{Fe}$  转变并有碳原子向奥氏体内集中的过程。 $G$  点 ( $912^\circ\text{C}$ ) 为纯铁的同素异晶转变点。随着温度不断降低，铁素体增多，奥氏体的含碳量不断增高。冷却到  $727^\circ\text{C}$  时，奥氏体的含碳量达到 0.77%。

$ES$  线是碳在铁素体中的溶解度曲线。常以符号  $A_{cm}$  表示。碳在  $\gamma-\text{Fe}$  中的溶解度在  $E$  点 ( $1148^\circ\text{C}$ ) 达到最大，为 2.11%。随着温度的降低，奥氏体的溶碳能力将下降，过饱和

的碳将以渗碳体的形式析出，并使奥氏体的含碳量减少，这种从奥氏体中析出的渗碳体称为二次渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ )。冷却到  $727^\circ\text{C}$  时，奥氏体的含碳量降至  $0.77\%$ 。

在 S 点 ( $727^\circ\text{C}$ 、含碳量  $0.77\%$ ) 处，合金发生共析反应，奥氏体同时析出铁素体和渗碳体，即珠光体。所有含碳量大于等于  $0.0218\%$  的铁碳合金冷却到 PSK 线温度时都将发生共析反应，形成一定量的珠光体，莱氏体中的奥氏体也同样在  $727^\circ\text{C}$  时发生共析反应，使高温莱氏体转变为低温莱氏体。因此，PSK 线又称共析线，常以符号  $A_1$  表示。S 点称为共析点。共析反应式为



PQ 线是碳在铁素体中的溶解度曲线。碳在  $\alpha\text{-Fe}$  中的溶解度在 P 点 ( $727^\circ\text{C}$ ) 达到最大，为  $0.0218\%$ 。由于铁素体的溶碳能力极低，冷却到此线时，过饱和的碳将以渗碳体的形式析出，这种由铁素体析出的渗碳体称为三次渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ )。

根据含碳量的不同，铁碳合金可分为：

- (1) 工业纯铁。含碳量  $< 0.0218\%$ ；
- (2) 钢。含碳量在  $0.0218\% \sim 2.11\%$  之间。依据室温组织的不同，可分为：
  - 亚共析钢——含碳量在  $0.0218\% \sim 0.77\%$  之间；
  - 共析钢——含碳量为  $0.77\%$ ；
  - 过共析钢——含碳量在  $0.77\% \sim 2.11\%$  之间。
- (3) 白口铸铁。含碳量在  $2.11\% \sim 6.69\%$  之间。依据室温组织的不同，可分为：
  - 亚共晶白口铸铁——含碳量在  $2.11\% \sim 4.3\%$  之间；
  - 共晶白口铸铁——含碳量为  $4.3\%$ ；
  - 过共晶白口铸铁——含碳量在  $4.3\% \sim 6.69\%$  之间。

由图 1-10 可看出，共析钢在室温下的显微组织为珠光体。由于  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$  的量极少，对钢的性能影响很小，忽略不计。

亚共析钢在室温下的显微组织由珠光体和铁素体组成，其中黑色的为珠光体，白色的为铁素体。对于亚共析钢，随着含碳量的增加，珠光体增多，铁素体减少，钢的硬度、强度将呈直线上升，而塑性、韧性将相应降低。

过共析钢在室温下的显微组织由珠光体和二次渗碳体组成，其中黑色的为珠光体，白色网状的为二次渗碳体。对于过共析钢，随着含碳量的增加，二次渗碳体发展成连续网状，当含碳量超过  $1.0\%$  时，钢变得脆且硬，强度将下降。

由于白口铸铁中出现了以渗碳体为基体的莱氏体，硬且脆，难于切削加工，在机械制造中很少使用，这里不再介绍。

#### 四、工业用钢

钢是含碳量小于  $2.11\%$  的铁碳合金，是机械制造中应用最为广泛的金属材料。按化学成分分，钢有碳素钢和合金钢两大类。

##### (一) 碳素钢

碳素钢的含碳量在  $1.5\%$  以下，并含有硅、锰、磷、硫等杂质。

碳素钢的分类方法有很多。按钢的含碳量分，有低碳钢 (含碳量  $\leq 0.25\%$ )、中碳钢 (含碳量在  $0.25\% \sim 0.6\%$  之间) 和高碳钢 (含碳量  $> 0.6\%$ )；按钢中的有害元素硫、磷含量的多少分为普通碳素钢、优质碳素钢和高级优质碳素钢三类；按用途分为碳素结构钢和碳

素工具钢两类。

### 1. 碳素结构钢

碳素结构钢的含碳量小于 0.38%，工业上以小于 0.25% 的最为常用。

碳素结构钢的牌号由代表屈服强度的字母“Q”、屈服强度数值、质量等级符号、脱氧方法符号顺序组成。质量等级分四级，用字母 A、B、C、D 表示，A 表示普通级，B、C、D 表示硫、磷含量较低的优等级别。未完全脱氧的沸腾钢在牌号尾部标以符号“F”，完全脱氧的镇静钢标以“Z”或不标。如 Q235-B 表示最低屈服强度为 235MPa 的 B 级碳素结构钢（镇静钢）；Q215-A·F 表示最低屈服强度为 215MPa 的普通等级碳素结构钢（沸腾钢）。

碳素结构钢主要用来制造各类型钢、薄板、冲压件或焊接结构以及一些力学性能要求不高的零件。

### 2. 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢中硫、磷的含量较低（小于或等于 0.035%），化学成分控制的较严格，塑性和韧性较高，主要用于制造较重要的零件。

优质碳素结构钢的牌号以钢中平均含碳量的万分数表示。如 08 钢表示平均含碳量为 0.08% 的优质碳素结构钢。若尾部加符号“F”则表示沸腾钢。

08、10、15、20、25 等牌号钢含碳量低，强度低、塑性好，可焊性好。常用于制造螺钉、螺母、垫圈以及冲压件、焊接件，也可制造需要渗碳的零件。

30、35、40、45、50、55 等牌号钢含碳量中等，强度、硬度较高，且有较好的塑性和韧性，具有优良的综合性能。其中 45 钢应用最为广泛，常用来制造齿轮、轴类、套筒等零件。

60、65、70、75 等牌号钢含碳量较高，淬火后不仅强度、硬度高，且弹性优良，常用于制造弹簧、轧棍等。

### 3. 碳素工具钢

碳素工具钢的含碳量高达 0.7%~1.35%，具有较高的强度、硬度和良好的耐磨性。

碳素工具钢的牌号以符号“T”后加数字表示，数字表示钢中平均含碳量的千分数。若为硫、磷含量更低的高级优质碳素工具钢，则在数字后加字母“A”。如 T10A 表示含碳量为 1.0% 的高级优质碳素工具钢。

T7、T8 多用于制作承受一定冲击的工具，如钳工凿子等；T9、T10、T11 常用于制作冲击较小而硬度、耐磨性较高的小丝锥、钻头；T12、T13 适于制作耐磨但不承受冲击的锉刀、刮刀等。

## （二）合金钢

为改善钢的某些性能而特意加入一种或几种合金元素所炼成的钢称为合金钢。

按用途分，合金钢可分为合金结构钢、合金工具钢和特殊性能钢。

### 1. 合金结构钢

合金结构钢的牌号采用“数字+元素符号+数字”的方法表示。牌号中头两位数字表示钢中平均含碳量的万分数，元素符号及其后的数字表示钢中所含的合金元素及其平均含量的百分数，若合金元素含量小于 1.5%，不标明含量。若为高级优质合金结构钢，则在牌号尾部加符号“A”。例如，20Cr 的平均含碳量为 0.2%、铬元素的平均含量小于 1.5%；40Mn2 的平均含碳量为 0.4%、锰元素的平均含量为 2%。

合金结构钢具有较好的力学性能，便于制造尺寸较大、形状复杂或要求淬火变形小的零件。

## 2. 合金工具钢

合金工具钢的牌号采用“数字+元素符号+数字”的方法表示。牌号中头一位数字表示钢中平均含碳量的千分数，当含碳量超过1%时，不标出。元素符号及其后的数字表示钢中所含的合金元素及其平均含量的百分数。例如，9Cr2的平均含碳量为0.9%、铬元素平均含量为2%。

合金工具钢主要用于制造刀具、模具和量具。

## 3. 特殊性能钢

特殊性能钢主要指不锈钢、耐热钢、耐磨钢、磁钢等，具有耐蚀、耐热、耐磨、抗磁等特殊性能。

## 第三节 钢的热处理

钢的热处理是采用适当的方式对固态钢进行加热、保温和冷却，使钢的内部组织改变，以获得所需性能的工艺方法。热处理的目的是改变金属材料的组织和性能，而不是改变形状和尺寸。

在机械制造中，热处理起着十分重要的作用。它不仅可以消除前道工序中所造成的缺陷，也为后续加工创造有利条件，而且能够进一步提高金属材料的性能，充分发挥材料的潜力，提高零件的使用寿命。

铁碳合金状态图是确定热处理工艺的重要依据。大多数热处理是要将钢加热到临界温度以上，将原有组织转变成均匀的奥氏体后，再通过不同的冷却方式转变成不同的组织，以获得所需的性能。

图1-10铁碳合金状态图中组织转变的临界温度曲线 $A_1$ 、 $A_3$ 、 $A_{cm}$ 是在极其缓慢的加热或冷却状态下测定的。

而实际热处理过程中加热和冷却大多不是极其缓慢的，为使组织转变充分进行，热处理过程中加热时的实际临界温度用 $A_{c1}$ 、 $A_{c3}$ 、 $A_{cm}$ 表示；冷却时的实际临界温度用 $A_{r1}$ 、 $A_{r3}$ 、 $A_{rcm}$ 表示，如图1-11所示。

### 一、整体热处理方法

#### (一) 退火

退火是将钢加热、保温，然后随炉冷却或在导热能力较差的介质中缓慢冷却，以获得接近平衡组织的热处理工艺。退火的目的是：降低硬度，以利于切削加工或其他种类加工；细化晶粒，以提高钢的塑性和韧性；消除内应力。显然，退火主要用于铸件、锻件、焊件及其他毛坯的预备热处理。

依据加热温度不同，退火的工艺方法有以下几种：

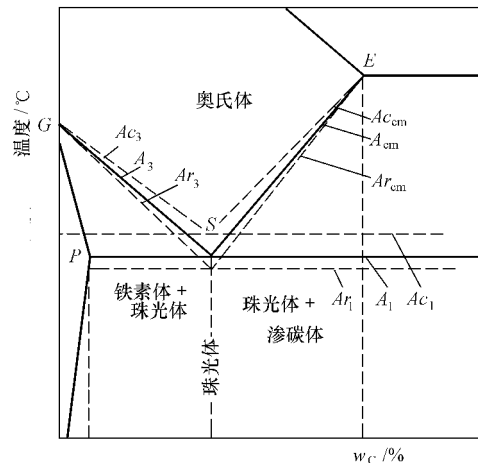


图1-11 加热和冷却时的临界温度

### 1. 完全退火

将钢加热到  $A_{c3}$  以上  $30 \sim 50^\circ\text{C}$ ，保温后缓慢冷却的热处理工艺，称为完全退火。为了提高生产率，也可在缓慢冷却到  $500^\circ\text{C}$  以下时从炉内取出，使其在空气中冷却到室温。主要用于亚共析成分的铸钢件、锻件、热轧型材和焊接件。完全退火可消除这些工件内部的粗大晶粒和不均匀组织，降低硬度，提高塑性和韧性，同时消除内应力，为后续加工做准备。

### 2. 球化退火

将钢加热到  $A_{c3}$  以上  $20 \sim 30^\circ\text{C}$ ，保温后缓慢冷却的热处理工艺，称为球化退火。主要用于过共析钢锻件。球化退火可将其内部的片状珠光体和网状二次渗碳体转变为颗粒状的球状珠光体，使硬度降低，以节省刀具，并避免淬火时产生裂纹和变形。

### 3. 低温退火

将钢加热到  $A_{c1}$  以下，保温后缓慢冷却的热处理工艺，称为低温退火。由于加热温度低于临界温度，钢未发生组织转变。

将工件加热到  $500 \sim 650^\circ\text{C}$ ，进行较长时间保温，通过原子扩散及塑性变形使内应力消除的热处理工艺称为去应力退火。去应力退火主要用于消除铸件、锻件、焊件以及切削加工中存在的残余内应力，防止工件产生变形。

将工件加热到再结晶温度以上  $150 \sim 250^\circ\text{C}$ ，即  $650 \sim 750^\circ\text{C}$ ，保温后空冷的热处理工艺称为再结晶退火。再结晶退火主要适用于冷变形塑性加工件。用以消除冷变形（冷拔、冷轧、冷冲等）所产生的加工硬化现象，获得较好的综合力学性能。

## (二) 正火

正火是将钢加热到  $A_{c3}$  以上  $30 \sim 50^\circ\text{C}$ （亚共析钢）或  $A_{cm}$  以上  $30 \sim 50^\circ\text{C}$ （过共析钢），保温后在空气中冷却的热处理工艺。

正火和完全退火的作用相似，但正火比退火的冷却速度稍快，形成的组织更细，因而材料的力学性能有所提高。

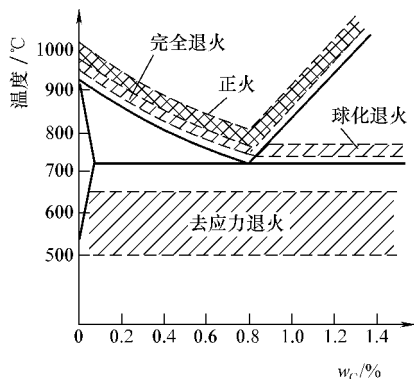


图 1-12 退火和正火的加热温度范围

对普通结构钢来说，正火的主要目的在于细化晶粒，提高其机械性能；对低碳钢和低碳合金钢，正火可取代完全退火，以减少占用设备时间，提高生产率，同时提高硬度，改善其切削加工性；对过共析钢，正火可以减少或消除网状二次渗碳体，为球化退火作准备。

图 1-12 为几种退火和正火的加热温度范围示意图。

## (三) 淬火

淬火是将钢加热到  $A_{c3}$  或  $A_{c1}$  以上  $30 \sim 50^\circ\text{C}$ ，保温后在淬火介质中快速冷却的热处理工艺。淬火是强化钢材的重要方法，其目的在于获得马氏体组织，使钢具有高硬度和高耐磨性。

淬火时工件的快速冷却是依靠淬火介质来实现的。水和油是最常用的淬火介质。水的冷却能力强，使钢易于获得马氏体，但工件的淬火内应力大，易产生裂纹和变形。油的冷却能力较水低，工件不易产生裂纹和变形，但用于碳钢件淬火时难以使马氏体转变充分。通常，碳素钢应在水中淬火；合金钢则因淬透性较好，在油中淬火。

生产中最常用的是单介质淬火法，即在一种淬火介质中连续冷却到室温。单介质淬火法操作简单，便于实现机械化和自动化生产，故应用最广。对于容易产生裂纹、变形的工件，有时采用先水后油的双介质淬火法或分级淬火等其他淬火法。

为防止淬火处理时工件产生裂纹或变形，淬火时，应注意选用适合的钢材和合理的结构，选择正确的处理手段和操作规程，严格控制淬火加热温度和时间，并合理选择淬火介质，正确选择淬火方法。

图 1-13 为淬火的加热温度范围示意图。

#### (四) 回火

回火是将淬火钢重新加热到  $A_{c1}$  以下某一温度，保温后冷却的热处理工艺。

回火的主要目的是消除淬火内应力，降低钢的脆性，防止产生裂纹，同时使钢获得所需的力学性能。

根据回火温度的不同，可将钢的回火分为如下三种：

(1) 低温回火 ( $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ )：降低淬火钢的内应力和脆性，同时保持淬火所获得的高硬度 ( $56\sim 64\text{HRC}$ ) 和高的耐磨性。低温回火主要用于工具钢的热处理，如各种刀具、模具、滚动轴承和耐磨件等。

(2) 中温回火 ( $350\sim 500^{\circ}\text{C}$ )：可以使钢获得高弹性，保持较高硬度 ( $35\sim 50\text{HRC}$ ) 和一定的韧性。中温回火主要用于各种弹簧、发条、锻模等。

(3) 高温回火 ( $500\sim 650^{\circ}\text{C}$ )：淬火后高温回火的热处理又称调质处理。调质处理的钢可获得强度及韧性都较好的综合力学性能，广泛用于承受疲劳载荷的中碳钢重要件，如连杆、曲轴、主轴、齿轮、重要螺钉等。

## 二、表面热处理方法

许多零件（如齿轮、凸轮、曲轴等）在工作中，表面层承受着比心部更高的应力并受到磨损，这就要求零件的表面层具有高强度、高硬度、耐磨和抗疲劳能力，而心部应保持较好的塑性和韧性以承受重载荷作用和传递大的转矩。表面热处理是实现这些要求的有效手段。

### (一) 表面淬火

表面淬火是通过快速加热，使钢件表面层很快达到淬火温度，在热量未传到工件心部时就立即冷却，实现局部淬火的热处理工艺。表面淬火不改变表层化学成分，但改变表层组织，其目的在于获得高硬度、高耐磨性的表层，而心部仍保持原有的良好韧性，常用于机床主轴、齿轮、发动机的曲轴等。

表面淬火的快速加热方法很多，如电感应、火焰、电接触、激光等方法。目前应用最广的是电感应加热法，其加热速度极快，通常只有几秒钟，淬硬层深度一般为  $0.5\sim 2\text{mm}$ ，主要用于要求淬硬层较薄的中、小型零件，如齿轮、轴等。

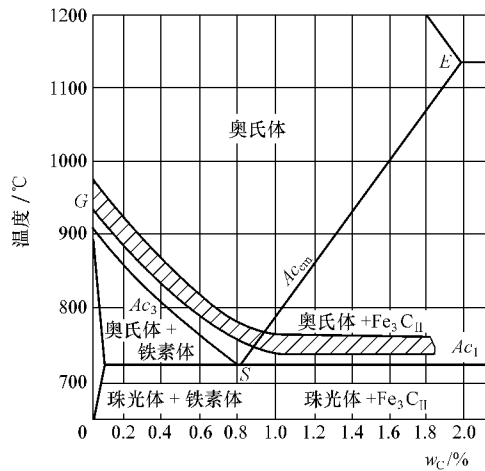


图 1-13 淬火的加热温度范围

## (二) 化学热处理

化学热处理是将工件放在一定的化学介质中加热和保温，使介质中的活性原子渗入工件表层，以改变工件表层的化学成分和组织，从而获得所需的力学性能或理化性能的热处理工艺。

化学热处理的种类很多，依照渗入元素的不同，有渗碳、渗氮、碳氮共渗等，以适用于不同的场合，其中以渗碳应用最广。

渗碳是向钢的表层渗入碳原子。渗碳时，通常是将低碳钢或低碳合金钢工件放入密闭的渗碳炉中，通入气体渗碳剂（如煤油等），加热到 900~950℃，经较长时间的保温，使工件表层含碳量增加。渗碳后，再经淬火和低温回火，表层硬度可达 56~64HRC，耐磨，而心部仍然是低碳钢，保持其良好的塑性和韧性。因此，渗碳工艺可使工件具有外硬内韧的性能。

渗碳主要用于既受强烈摩擦、又承受冲击或疲劳载荷的工件，如汽车变速箱齿轮、活塞销、凸轮、自行车和缝纫机零件等。

## 复 习 题

1. 金属材料在静载荷、动载荷和高温下的力学性能主要包括哪些？
2. 解释下列名词：晶体、晶格、晶面、晶向、晶胞、晶格常数。
3. 什么是同素异晶转变？液态纯铁在冷却至室温的过程中其晶格结构有什么变化？
4. 填表：

组织名称	代表符号	存在温度范围	含碳量 (%)	组织类型	力学性能特征
铁素体					
奥氏体					
渗碳体					
珠光体					
莱氏体					

5. 根据简化的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 状态图填全下表：

特 性 点	温 度 (°C)	含碳量 (%)	含 义
A			
C			
D			
E			
F			
G			
S			
P			
Q			

6. 根据简化的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 状态图填全下表：