

第一篇 工程材料及金属材料成形工艺

在机械制造业中，机械工程人员遇到的首要问题是如何合理选择材料并对材料进行初步加工。本篇根据工程技术人员的实际要求，介绍常用工程材料的性能和应用、热处理、铸造、压力加工、焊接等知识，为合理选择材料和制定加工工艺打下基础。

第1章 金属材料的性能

工程材料包括金属材料和非金属材料。金属材料因其有良好的使用性能（包括力学性能、物理性能、化学性能及工艺性能），在机械制造业中得到广泛应用。因此，在设计和制造机器零件时，必须先熟悉金属的各种主要性能，才能根据零件的技术要求，合理地选用所需的金属材料。

1.1 金属的力学性能

一般机器零件常以力学性能作为设计和选材的依据，金属材料的力学性能指金属材料在载荷（外力）作用下抵抗变形或破坏的能力，主要有强度、刚度、硬度、塑性、韧性、疲劳强度等。载荷按其性质分为静载荷（拉力、压力、扭转力等）和动载荷（冲击力、交变应力等）。材料在不同的载荷作用下会呈现不同的特性，可用相应的试验法来测定材料的各项力学性能指标。

1.1.1 强度和刚度

1. 强度

强度是指材料在外力作用下，抵抗塑性变形和断裂的能力。金属材料受外力作用时，会引起其形状和尺寸的改变，称为变形。如果去掉外力后材料能恢复原来的形状和尺寸，则称为弹性变形；如果去掉外力材料不能恢复原来的形状和尺寸，则称为塑性变形。

材料受外力作用时，在其内部产生一个与外力相平衡的抵抗力，称为内力。材料单位面积上的内力称为应力，用符号“ σ ”表示，有如下关系：

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ MPa}$$

式中， F ——外加载荷，单位为 N；

A_0 ——受力截面积，单位为 mm^2 。

强度可以通过材料拉伸试验来测定。把标准拉伸试样（见图 1.1）装夹在试验机上，对试样逐渐施加拉力载荷，直至试样被拉断。根据试样在拉伸过程中所承载荷 F 和伸长量 Δl

的关系，测出该金属的拉伸曲线，见图 1.2 所示。在拉伸曲线上可确定以下性能指标：

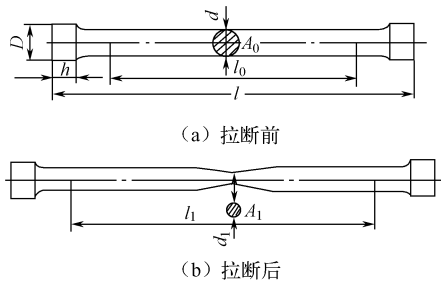


图 1.1 标准拉伸试样

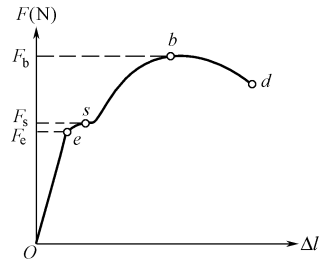


图 1.2 低碳钢的拉伸曲线

(1) 弹性极限。在图 1.2 的拉伸曲线图中， Oe 段的伸长量随载荷增加而增加，为弹性变形阶段。 e 点对应的极限值称为弹性极限，用“ σ_e ”表示：

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \text{ MPa}$$

式中， F_e ——试样 e 点所承受外力，单位为 N。

对于在工作条件下不允许产生塑性变形的零件，设计时弹性极限是选材的主要依据，如弹簧。

(2) 屈服强度与条件屈服强度。图 1.2 的拉伸曲线中，载荷达到 s 点时，材料产生屈服现象，此时的应力称屈服强度，用“ σ_s ”表示：

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \text{ MPa}$$

式中， F_s ——试样屈服时所承受的外力，单位为 N。

有不少金属拉伸时不出现明显的屈服现象，如铸铁、铜合金等。工程上规定以试样残余伸长量为 0.2% 时的应力来表示，称为条件屈服强度 ($\sigma_{0.2}$)。

屈服强度代表金属抵抗塑性变形的能力。大部分的零件和结构要求在弹性状态下工作，不允许有过量塑性变形出现，此时， σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ 是设计和选材的主要依据，如缸盖螺栓、炮筒等的选材。

(3) 抗拉强度。在图 1.2 中，载荷超过 F_s 后，试样继续变形。载荷达 F_b 后，试样在薄弱部分形成“缩颈”（注：脆性材料在拉伸时无“缩颈”现象），最后断裂。 F_b 为试样断裂前所能承受的最大载荷，对应的应力为抗拉强度，用“ σ_b ”表示：

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \text{ MPa}$$

σ_b 测定比较容易，且与硬度、疲劳强度有着一定关系，所以 σ_b 也是衡量材料强度的一个重要指标，但要求零件的最大工作应力必须低于材料的抗拉强度，否则会导致机件破坏。

2. 刚度

在工程上，材料受外力作用时，抵抗弹性变形的能力称为刚度。刚度大小可以用弹性模量来衡量。材料在弹性变形阶段内，应力与应变的比值称为弹性模量，弹性模量反映了材料弹性变形的难易程度，用“ E ”表示：

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ MPa}$$

弹性模量越大，弹性变形越不容易进行。设计机械零件时，要求刚度大的零件，应选弹性模量高的材料。

1.1.2 塑性

塑性指材料在外力作用下，产生塑性变形但不断裂的能力。塑性的衡量指标有伸长率和断面收缩率。

1. 伸长率

即拉伸试样断裂后的标距长度与原始标距长度的百分比，用“ δ ”表示：

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

式中， l_0 ——试样原始标距长度，单位为 mm；

l_1 ——试样断裂后的标距长度，单位为 mm。

必须指出， δ 的大小与试样尺寸有关。根据 GB228—87 规定，试样有 $l_0 = 5d$ 和 $l_0 = 10d$ 两种长度，分别用 δ_5 和 δ_{10} 表示。对同种材料而言，测得的 δ_5 比 δ_{10} 大一些，所以不同符号的伸长率不能进行比较。

2. 断面收缩率

即试样断裂后断口处的横截面积与原始横截面积的百分比，用“ ψ ”表示：

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中， A_0 ——试样原始横截面积，单位为 mm^2 ；

A_1 ——试样断口处的横截面积，单位为 mm^2 。

δ 和 ψ 越大，表示材料的塑性越好，良好的塑性是材料进行压力加工的必要条件。另外，万一零件超载，材料产生塑性变形并伴随形变强化，一定程度上保证了零件的安全性。

1.1.3 硬度

硬度是衡量材料性能的一个综合工程量或技术量，它是指材料表面上局部体积内抵抗塑性变形的能力。材料硬度越高，耐磨性越好，强度也比较高。

测定硬度的试验操作简便迅速，不破坏工件，设备也比较简单，而且硬度与其他的性能（如抗拉强度）之间存在着一定关系，所以硬度测试在生产中得到广泛应用。测定硬度的方法很多，目前常用的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度试验等。

1. 布氏硬度

布氏硬度的试验原理如图 1.3 所示。将直径为 D 的淬硬钢球或硬质合金球，在规定载荷 F 的作用下压入被测材料表面，经规定保压时间后，卸除压力，然后测量压痕直径 d ，压痕单位面积上所承

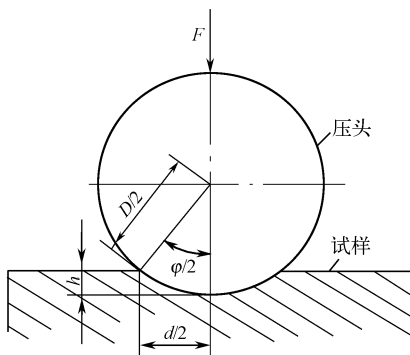


图 1.3 布氏硬度试验原理示意图

受的平均压力即为布氏硬度值，用符号“HBS（压头为钢球）”或“HBW（压头为硬质合金球）”表示。

试验时，压头直径 D 、载荷 F 及其保压时间要根据被测金属的种类和试样厚度，按 GB231—84《金属布氏硬度试验方法》选择。硬度值也不需计算，只要测出压痕直径 d ，查金属布氏硬度数值表即可得到相应的硬度值。布氏硬度由数值、硬度符号和试验条件组成，例如，120 HBS10/1000/30，表示用 10mm 直径的钢球在 1000kgf (9807N) 试验力作用下保压 30s 测得的布氏硬度值为 120。若保压时间为 10 ~ 15s，可省略标注。

布氏硬度试验测得的硬度值比较准确、稳定，目前主要用于退火、正火和调质处理的钢、铸铁和非铁金属。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验原理如图 1.4 所示。用顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm (1/16 英寸) 的淬硬钢球压头，在初载荷和主载荷的作用下压入被测材料表面，经规定保压时间，卸除主载荷，测得压痕深度来计算硬度值。洛氏硬度用每 0.002mm 压痕深度为一硬度单位，用符号“HR”表示。

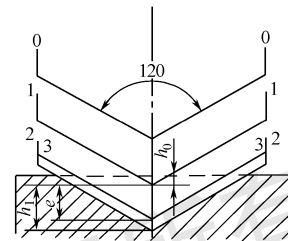


图 1.4 洛氏硬度试验原理示意图

实际测量时，洛氏硬度不必计算，可直接在洛氏试验机的刻度盘上读出硬度值。根据压头和外加载荷的不同，洛氏硬度值有三种不同标尺，分别用符号“HRA、HRB、HRC”表示，见表 1-1。

表 1-1 洛氏硬度试验规范

符 号	压 头	总载荷 (N)	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥体	588	70 ~ 85 HRA	硬质合金、氮化层、渗碳层等
HRB	φ1.588mm 钢球	980	25 ~ 100 HRB	非铁金属、退火钢、正火钢等
HRC	120°金刚石圆锥体	1470	20 ~ 67 HRC	淬火钢、调质钢等

注：表中，总载荷 = 初载荷 (98N) + 主载荷。

与布氏硬度试验相比，洛氏硬度试验简单、迅速，且压痕小，几乎不损伤工件表面，所以在工件的质量检查中应用最广。但由于压痕小，得到的硬度值重复性差一些，需在被测体的不同部位测量数点，取其平均值。

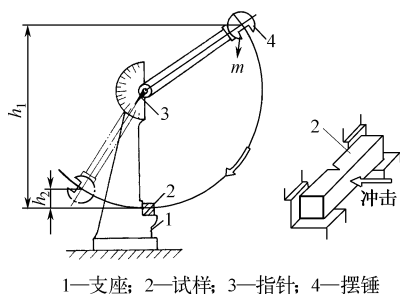
3. 维氏硬度

维氏硬度试验原理与布氏硬度试验基本相同，不同点在于维氏硬度的压头为 136° 金刚石正四棱锥体，所加载荷较小 (10 ~ 1000N)。试验时压头在被测件表面压出正方形压痕，测量压痕两对角线的平均长度 d ，即可求出硬度值，用符号“HV”表示。

维氏硬度试验测得数值较准确，测量范围广 (10 ~ 1000HV)。采用较小压力时特别适于测量热处理表面层的硬度，如渗碳层、氮化层和硬质合金层等，不过测量过程比较麻烦。

1.1.4 冲击韧性

有许多机器零件和工具在工作时会受到冲击载荷作用，如冲床的冲头、锻锤的锤杆、内燃机活塞销与连杆等。这种瞬间的冲击力引起的变形和应力比静载荷大得多，因此，在设计承受冲击载荷的零件和工具时，必须考虑材料的冲击韧性。



1—支座；2—试样；3—指针；4—摆锤

图 1.5 冲击试验原理示意图

冲击韧性指金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力。常用摆锤式一次冲击试验测定冲击韧性，如图 1.5 所示。将被测材料制成标准试样，放在试验机架上，由置于一定高度的摆锤自由落下而一次冲断。摆锤冲断试样所做的功称为冲击吸收功，试样缺口处单位面积上所消耗的冲击吸收功称为冲击韧性，用“ a_k ”表示：

$$a_k = \frac{A_k}{A} \text{ J/cm}^2$$

式中， A_k ——冲击吸收功，单位为 J；

A ——试样缺口处的原始截面积，单位为 cm^2 。

a_k 值越高，材料的韧性越好，而且相应的塑性指标也较高，但塑性好的材料，其 a_k 值不一定高。

生产实践证明，冲击韧性值受温度、试样形状、表面质量和内部组织等因素的影响，故通常不用于设计计算，但广泛用于检验材料冶炼和热加工后的质量。

必须指出，在冲击载荷作用下工作的机器零件，很少受大能量一次冲击而破坏，而是经受小能量多次重复冲击而破坏。因此，在一次冲断条件下测得的冲击韧性值，对判断材料抵抗大能量冲击能力方面有一定作用，但不适合承受小能量重复冲击的机件。研究表明，在冲击能量不大时，材料承受多次重复冲击的能力，主要取决于材料的强度和塑性的良好配合。

1.1.5 疲劳强度

弹簧、齿轮、连杆、轴承等许多机器零件，长期在交变载荷作用下工作，很多情况下零件发生断裂时的工作应力低于材料的弹性极限，这种现象称为疲劳。据统计，有 80% 的机件失效是由疲劳引起。

疲劳强度是指材料经无数次交变载荷作用而不致引起断裂的最大应力值。在弯曲循环载荷下测得的疲劳强度用符号“ σ_{-1} ”表示。材料所受交变应力 σ 与断裂前的应力循环次数 N 有关系。循环次数增加，应力降低。实际试验时不可能进行无数次应力循环，一般黑色金属的循环次数取 $N = 10^7$ ；有色金属取 $N = 10^8$ 。

材料发生破坏的原因，一般认为是由于材料内部缺陷、表面划痕和零件结构设计不当等引起应力集中，导致微裂纹产生，而且裂纹随应力循环次数的增加而逐渐扩展，致使零件不能承受所加载荷而突然破坏。为提高零件的疲劳强度，除改善其结构形状避免应力集中外，还可采取表面强化方法，如渗碳、渗氮、喷丸、表面滚压等。

1.1.6 材料的物理性能

材料的物理性能属于材料的固有属性，主要包括材料的熔点、密度、导电性、导热性、

热膨胀性、磁性等。

1. 熔点

材料在缓慢加热时由固态转变为液态时的熔化温度称为熔点。金属有固定的熔点，合金的熔点取决于成分。熔点低的金属（如 Pb 的熔点 327.4℃，Sn 的熔点 231.9℃）可以用来制造焊接用钎料、印刷用铅字及电源上的保险丝等。熔点高的金属（如 Cr 的熔点 1855℃，W 的熔点 3410℃，Mo 的熔点 2622℃，V 的熔点 1919℃）可以用来制造高温零件，如加热炉构件、喷气发动机的燃烧室、电热元件等。

非金属材料中碳、硼等有一定的熔点，塑料和玻璃等非晶态材料则只有软化点，而无熔点。

2. 密度

密度指某种材料单位体积的质量。材料的密度直接关系到制成零件或构件的重量，对要求减轻机械自重的航空和宇航工业制件，常用密度小的钛合金和铝合金等制作。在非金属材料中，陶瓷密度较大，塑料密度较小。

3. 导电性

导电性指材料传导电流的能力。纯金属中，银的导电性最好其次是铜和铝，合金的导电性比纯金属差。工程中常采用纯铜或纯铝制作导电材料，导电性差的材料制作电热元件。

4. 导热性

导热性是指材料传导热量的能力。材料导热性能的好坏用热导率衡量，热导率越大，导热性越好。合金的导热性比纯金属差，纯金属中银和铜的导热性最好，铝次之。合金钢的导热性比碳钢差，因此合金钢锻造和热处理加热时速度应慢一些，防止因内应力而产生裂纹。非金属中，碳的导热性最好。

5. 热膨胀性

热膨胀性指材料随温度变化而产生的体积膨胀或收缩的现象。常温下工作的普通机械零件可以不考虑材料的热膨胀性，但工程中许多场合必须考虑材料热膨胀性的影响，如滑动轴承材料、内燃机活塞的材料、精密仪器仪表的材料都要求热膨胀系数要小。

6. 磁性

磁性指材料在磁场中导磁或被磁化的能力。磁性材料从材质和结构上分为金属及合金磁性材料和铁氧体磁性材料两大类，电机的铁芯所用的磁性材料一般用硬磁铁氧体，磁化后不易退磁。对磁通的阻力小。

1.1.7 材料的化学性能

材料的化学性能指材料在室温或高温时抵抗周围介质侵蚀的能力，包括耐腐蚀性、抗氧化性等。

1. 耐腐蚀性

耐腐蚀性指材料在室温时抵抗其周围介质腐蚀破坏的能力。不同介质中工作的材料其耐腐蚀性要求不同，如海洋设备要耐海水和海洋大气的腐蚀，储存和运输酸类的容器和管道要有较高的耐酸性。

2. 抗氧化性

抗氧化性指材料在高温下抵抗氧化的能力。在高温下工作的锅炉、加热炉、内燃机零件等要求具有良好的抗氧化性。

1.1.8 材料的工艺性能

工艺性能指金属材料对零件制造工艺的适应性，包括铸造性、锻造性、焊接性、切削加工性和热处理等。

在设计零件和选择工艺方法时，材料的工艺性能好，则产品产生缺陷的倾向性小，产品质量容易保证。例如铸铁有很好的铸造性和切削加工性，但锻造性极差，所以只能铸造，不能锻造。各种加工方法的工艺性能，将在以后介绍。

1.2 金属的晶体结构与结晶

固态物质按其原子排列的特征分为晶体和非晶体两大类。非晶体的原子呈不规则排列，如松香、玻璃等；晶体的原子呈规则排列，如固态金属，其特点是具有一定熔点、规则的几何外形和各向异性。

1.2.1 纯金属的晶体结构

晶体结构是晶体内部原子排列的方式及特征。在金属晶体中，由于金属键的存在，使原子的排列趋于最紧密的方式，从而使大多数金属元素具有简单的晶体结构。

1. 体心立方晶格

如图 1.6 (a) 所示。在立方体的中心及八个角上各分布一个原子，属于这种晶格的金属有 α -Fe、Cr、Mo、W、V 等。

2. 面心立方晶格

如图 1.6 (b) 所示。立方体的八个角上及六个面的中心各分布一个原子，属于这种晶格的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ni、Ag 等。

3. 密排六方晶格

如图 1.6 (c) 所示。在正六方柱体的十二个角上和上、下正六边形底面中心各分布一个原子，另外柱体的中间还有三个原子，属于这种晶格的金属有 Mg、Zn、 γ -Ti、Be 等。

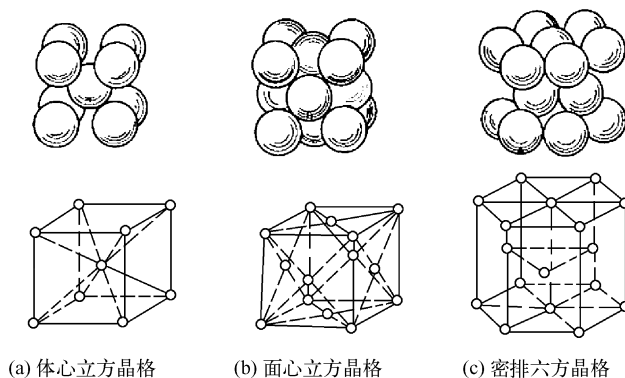


图 1.6 常见的晶格类型

1.2.2 纯金属的结晶

结晶是指原子由无序状态（液态）转变为按一定几何形状作有序排列（固态）的过程。

1. 金属的结晶过程

金属在结晶过程中，实际结晶温度 T_1 低于金属的平衡温度 T_0 ，这种现象称为过冷。二者温度之差称为过冷度，用 ΔT 表示， $\Delta T = T_0 - T_1$ 。

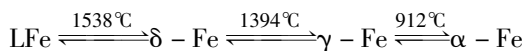
液态金属结晶时，先形成一些极小的晶体，这些小晶体称为晶核，然后液体中的原子不断向晶核聚集，晶核就不断长大。同时液体中不断有新的晶核形成并长大，直到所有的晶体相互接触，液态金属全部耗尽为止。

金属结晶后的晶粒大小对金属力学性能影响很大。一般情况下，晶粒越细，金属的强度、塑性和韧性越好，所以在生产中控制晶粒的大小已成为提高金属力学性能的重要途径之一。

2. 金属的同素异构转变

多数金属结晶后的晶体结构不再发生变化，但有些金属（如 Fe、Co、Ti、Mn 等）在结晶结束后，随晶体温度的继续下降，还会发生晶体结构的变化，这种现象称为金属的同素异构转变。

图 1.7 是纯铁的冷却曲线。液态纯铁在 1538℃ 结晶得到体心立方晶格的 δ -Fe，缓慢冷却到 1394℃ 时， δ -Fe 转变为面心立方晶格的 γ -Fe，继续冷却到 912℃ 时， γ -Fe 又转变为体心立方晶格的 α -Fe，再继续冷却至室温， α -Fe 晶格类型不再发生变化，整个转变过程可概括如下：



金属的同素异构转变与液态金属的结晶过程很相似，遵循结晶的一般规律，称为重结晶。纯铁具有同素异构转变现象，因此在生产中可以通过相变热处理来改变钢和铸铁的组织 and 性能。

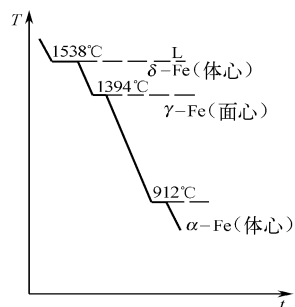


图 1.7 纯铁的冷却曲线

1.2.3 合金的相结构

合金是指将两种（或两种以上）金属或金属与非金属熔合在一起，形成的具有金属特性的新物质。组成合金的最基本的、独立的物质称为组元，组元一般指化学元素，但稳定的化合物也可看成是一个组元。按组元数目多少，合金可以分为二元合金、三元合金或多元合金，如黄铜是 Cu 和 Zn 组成的二元合金，硬铝是 Al、Cu、Mg 组成的三元合金。

相是指合金中具有相同化学成分和晶体结构，并与其他部分有明显界面分开的均匀组成部分。例如， α -Fe 和 γ -Fe 是两种不同的相。合金中的相结构指合金组织中相的晶体结构。合金的结构比纯金属复杂，根据合金中各组元在结晶时的相互作用不同，形成固溶体和金属化合物两大类合金结构。

1. 固溶体

合金中各组元在固态下具有互相溶解的能力，形成均匀的固相，称为固溶体。固溶体仍保持了溶剂的晶格类型，如铁素体就是溶质碳溶入到溶剂铁中形成的固溶体。

溶质原子溶入溶剂中时，会造成溶剂的晶格畸变，导致合金变形，阻力增加，从而使固溶体的强度、硬度提高，这种现象称为固溶强化。固溶强化是提高金属材料力学性能的重要途径之一。

2. 金属化合物

合金中各组元的原子按一定比例化合生成的一种 e 与 C 组成的金属化合物。

金属化合物一般具有复杂的新相称为金属化合物。它的晶格和性能不同于构成它的任一组元。例如，钢中渗碳体（ Fe_3C ）是由铁原子和碳原子所组成的金属化合物。其熔点高，硬而脆。当合金中存在金属化合物时，强度、硬度和耐磨性提高，塑性和韧性降低。

1.3 金属的塑性变形与再结晶

塑性是金属重要的性能之一。金属依靠其良好的塑性变形能力，可以通过压力加工成为各种形状和尺寸的零件，同时改变金属的内部组织结构及性能。

1.3.1 金属的塑性变形

塑性变形是指材料在外力作用下发生变形，去除外力后，变形不能完全恢复。属于永久性变形。

塑性变形的实质是金属在切应力作用下，金属晶体内部产生大量位错运动的宏观表现。晶体缺陷及位错相互纠缠会阻碍位错运动，产生冷变形强化。

1.3.2 加工硬化与再结晶

1. 加工硬化

金属冷态下塑性变形后，强度和硬度提高，塑性和韧性降低，即产生加工硬化。在生产

上可以利用加工硬化强化金属，例如，对一些不能用热处理强化的金属材料（奥氏体不锈钢、防锈铝合金等），可以用加工硬化来提高强度。另一方面，加工硬化的产生使压力加工设备的功率增大，材料塑性变形能力降低，变形难度增加，而恢复塑性进行的中间退火工艺，使生产率下降，成本增加。

此外，冷塑性变形后，金属的导电性、导热性、导磁性和抗蚀性都会降低，金属内部有残余应力存在。

2. 回复与再结晶

金属冷塑性变形后，产生了加工硬化和内应力，为恢复或改善金属的性能，可以对其进行加热。随加热温度的升高，变形金属将相继发生回复、再结晶和晶粒长大的过程。

(1) 回复 指加热温度不高时，原子扩散能力低，变形金属的组织不发生明显变化，其力学性能变化也不大，但电阻力和内应力显著下降。

(2) 再结晶 指加热温度较高时（纯金属的再结晶温度 $T_{再}$ 与深熔点温度 $T_{熔}$ 之间的大致关系为 $T_{再} \approx 0.4T_{熔}$ ），原子扩散能力增大，被拉长和破碎的晶粒转变为均匀细小的等轴晶粒，加工硬化消除，金属的性能基本上恢复到变形以前。生产中为消除加工硬化，继续冷变形加工，常采用再结晶退火。

冷变形金属再结晶退火后，一般会得到细小均匀的等轴晶，如果继续升高温度或延长保温时间，则晶粒又会继续长大形成粗大晶粒，使金属的强度、硬度和塑性下降。

1.3.3 冷变形与热变形的区别

金属的变形分为冷变形和热变形。在再结晶温度以下的变形称为冷变形，得到的产品保留了加工硬化，产品表面质量好。而在再结晶温度以上的变形称为热变形，热变形引起的加工硬化被随即发生的再结晶过程所消除，金属始终处于良好的塑性状态，所以大多数产品，特别是厚大或变形量大的产品，常采用热变形加工。实际生产中，为保证热变形能够充分进行，选用的热变形温度要比再结晶温度高得多。

1.4 铁碳合金

铁碳合金是钢铁材料的总称，也是工业上应用最广泛的合金。铁碳合金由铁和碳两种基本元素构成，合金中组织和成分随温度变化的规律是制定各种热加工工艺的依据。为了熟悉和正确使用钢铁材料，必须先了解铁碳合金相图。

1.4.1 铁碳合金的基本组织

铁碳合金中，碳可以溶入铁形成固溶体，超过溶解度后，铁和碳形成化合物。因此，铁碳合金形成以下五种基本组织。

1. 铁素体

碳溶入 $\alpha - Fe$ 中形成的间隙固溶体称为铁素体，用“F 或 α ”表示。铁素体在 $727^{\circ}C$ 时溶碳量最大，为 0.0218% ，其力学性能与工业纯铁大致相同，即强度、硬度低，塑性好。

2. 奥氏体

碳溶入 γ -Fe 中形成的间隙固溶体称为奥氏体，用“ A 或 γ ”表示。奥氏体在 1148℃ 时溶碳量最大，达 2.11%，727℃ 时为 0.77%。奥氏体的强度、硬度低，变形抗力小。大多数钢的热压加工都要求在奥氏体区内进行。

3. 渗碳体

铁与碳形成的稳定化合物称为渗碳体，用符号 Fe_3C 表示，含碳量为 6.69%。渗碳体硬（ $\approx 800HBW$ ）而脆，在钢中起强化作用，根据生成条件不同有条状、网状、片状、粒状等形态。

4. 珠光体

铁素体与渗碳体组成的机械混合物称为珠光体，用“ P ”表示，平均含碳量为 0.77%。珠光体是在温度降到 727℃ 时由奥氏体转变得到，它的力学性能介于两相之间。

5. 莱氏体

在 727℃ 以上，奥氏体与渗碳体组成高温莱氏体，用“ L_d ”表示；727℃ 以下的莱氏体由珠光体和渗碳体组成，称低温莱氏体（ L'_d ），它的平均含碳量为 4.30%。莱氏体的性能与渗碳体相似，硬度高（ $\approx 700HBW$ ），塑性很差。

1.4.2 Fe-Fe₃C 相图分析

工业生产中，钢铁材料的含碳量一般不超过 5%，因为碳含量超过 5% 的铁碳合金脆性很大，无实用价值，所以实际研究的铁碳合金是碳含量小于 6.69% 的 Fe-Fe₃C 部分，称为 Fe-Fe₃C 相图。简化的 Fe-Fe₃C 相图如图 1.8 所示。

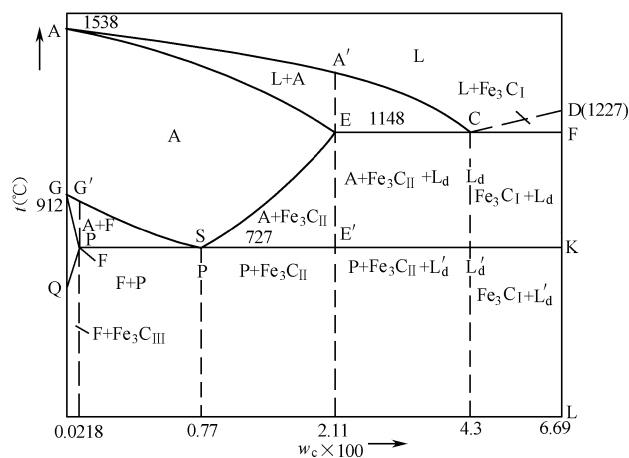


图 1.8 简化的 Fe-Fe₃C 相图（标注组织）

Fe-Fe₃C 相图中的主要特性点和特性线

Fe-Fe₃C 相图中的主要特性点和特性线的含义见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 Fe-Fe₃C 相图中的特性点

符 号	温度 (°C)	C%	含 义
A	1538	0	纯铁的熔点
C	1148	4.30	共晶点, $L_c \rightleftharpoons A_E + Fe_3C$
D	1227	6.69	Fe ₃ C 的熔点
E	1148	2.11	碳在 γ -Fe 中的最大溶解度
G	912	0	α -Fe \rightleftharpoons γ -Fe 同素异构转变点
P	727	0.0218	碳在 α -Fe 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点, $A_s \rightleftharpoons F_p + Fe_3C$

表 1-3 Fe-Fe₃C 相图中的特性线 (见图 1.8)

特 性 线	含 义
ACD	液相线。合金冷却到此线, 从液态中分别结晶出奥氏体 (AC 线) 和二次渗碳体 (CD 线)
AECF	固相线。液态合金冷却到此线全部结晶为固态
ECF	共晶线。含碳量在 2.11% ~ 6.69% 之间的碳合金在此线发生转变, 得莱氏体组织, 即 $L_{4.30} \xrightarrow{1148^\circ C} A_{2.11} + Fe_3C$
GS (A ₃)	合金冷却时, 奥氏体转变为铁素体的开始线
ES (A _{cm})	碳在奥氏体中的溶解度曲线
PSK (A ₁)	共析线。含碳量在 0.0218% ~ 6.69% 的铁碳合金在此线发生共析转变, 得珠光体组织, 即 $A_{0.77} \xrightarrow{727^\circ C} F_{0.0218} + Fe_3C$
GP	合金冷却时, 奥氏体转变为铁素体的终了线
PQ	碳在铁素体中的溶解度曲线

1.4.3 铁碳合金的组织及其对性能的影响

根据 Fe-Fe₃C 相图中含碳量的多少, 铁碳合金分为以下三大类。

1. 工业纯铁 ($w_c \leq 0.0218\%$)

室温组织为 F (忽略 Fe₃C_{III})。

2. 钢 ($0.0218\% < w_c \leq 2.11\%$)

根据室温组织不同分为: 亚共析钢 ($0.0218\% < w_c < 0.77\%$), 室温组织为 F 和 P; 共析钢 ($w_c = 0.77\%$), 室温组织为 P; 过共析钢 ($0.77\% < w_c \leq 2.11\%$), 室温组织为 P 和 Fe₃C_{II}。

3. 白口铸铁 ($2.11\% < w_c < 6.69\%$)

根据室温组织不同分为: 亚共晶白口铸铁 ($2.11\% < w_c < 4.30\%$), 室温组织为 P、L'_d 及 Fe₃C_{II}; 共晶白口铸铁 ($w_c = 4.30\%$), 室温组织为 L'_d; 过共晶白口铸铁 ($4.30\% < w_c <$

6.69%)，室温组织为 L'_d 和 Fe_3C_I 。

铁碳合金室温下的组织由 F 与 Fe_3C 两相构成，其中 Fe_3C 是合金中的强化相。随合金中含碳量的不断增加，平衡组织中 F 量不断减少，而 Fe_3C 量不断增多，合金的性能也将发生明显变化，随含碳增加， Fe_3C 量增多，硬度呈直线增大，强度也相应增大，但含碳量超过共析成分后， Fe_3C_{II} 沿晶界出现， $w_c \geq 0.90\%$ 时， Fe_3C_{II} 沿晶界形成完整的网，强度会迅速下降。碳钢的塑性、韧性由 F 量决定，随含碳量增加，F 量不断减少，则塑性、韧性连续下降。

1.4.4 Fe - Fe_3C 相图的应用

Fe - Fe_3C 相图在钢铁材料的选用和加工工艺的制定上具有重要的指导意义。

1. 在选材方面的应用

根据 Fe - Fe_3C 相图中成分—组织—性能的规律，可以为钢铁材料的选用提供依据。例如，建筑结构和各种型钢选塑性和韧性好的低碳钢，各种机械零件选用强度、塑性和韧性好的中碳钢，各种工具要用硬度高而耐磨的高碳钢等。

2. 在铸造方面的应用

由 Fe - Fe_3C 相图可以看出，纯铁和共晶白口铸铁的凝固温度区间最小，流动性好，可以获得致密铸件，所以铸铁的成分总是选在共晶点附近。另外，由相图可以确定合金的浇注温度（浇注温度一般在液相线以上 $50^\circ C \sim 100^\circ C$ ）。

3. 在锻造、热轧方面的应用

钢在奥氏体状态时，强度低，塑性较好，所以锻造、热轧等选在单相奥氏体区内进行。一般始锻（轧）温度控制在固相线以下 $100^\circ C \sim 200^\circ C$ 范围内，可以防止钢材过热和过烧；终锻（轧）温度不能过低，以免产生裂纹。

4. 在热处理方面的应用

根据 Fe - Fe_3C 相图，可以制定各种热处理的加热温度。

以上各方面的应用将在后面相关章节中详细阐述。但须注意，Fe - Fe_3C 相图反映的是铁、碳二元合金平衡条件下的相状态，实际生产中钢铁材料往往含有其他元素，合金的冷却和加热速度也较快，因此不能完全用相图来分析，必须借助其他的知识。

习 题 1

一、填空题

- 1.1 合金结晶的基本规律，即在过冷的情况下通过（ ）与（ ）来完成。
- 1.2 纯铁在 $1200^\circ C$ 时晶体结构为（ ），在 $800^\circ C$ 时晶体结构为（ ）。
- 1.3 碳溶解在（ ）中形成的（ ）称为铁素体。
- 1.4 Fe_3C 的结构属于（ ），它具有（ ）的性能。
- 1.5 加工硬化是指金属随内部组织变形程度的增加，其（ ）和（ ）上升，而（ ）和

() 下降的现象,加工硬化可通过() 加热消除。

1.6 常用金属的晶体结构有()、() 和() 三种。

二、选择题

1.7 表示金属材料屈服强度的符号是(), 疲劳强度的符号是()。

A. σ_s B. σ_b C. σ_{-1} D. σ_e

1.8 测量淬火钢硬度的方法是()。

A. HBS 法 B. HRB 法 C. HRC 法 D. HRA 法

1.9 金属结晶的必要条件是()。

A. 过冷度 B. 形核率 C. 成长率 D. 自由能差

1.10 在 Fe - Fe₃C 相图中, 钢与白口铸铁的分界点的含碳量为()。

A. 2% B. 0.77% C. 2.11% D. 4.3%

1.11 在 Fe - Fe₃C 相图中, ECF 线为()。

A. 共晶线 B. 共析线 C. A₁ 线 D. A₃ 线

1.12 () 成分的铁碳合金熔点最低, 流动性最好。

A. A 点 B. C 点 C. E 点 D. S 点

三、问答题

1.13 金属冷、热塑性变形后的组织和性能有何不同?

1.14 用冷拔钢丝缠绕的螺旋簧, 经低温回火后, 其弹力比未经回火的好, 为什么?

1.15 现有两只同材料、同尺寸的齿轮, 一只用圆钢机加工得到, 另一只用圆钢热锻后再机加工得到, 哪只齿轮的性能好? 使用寿命长? 为什么?

1.16 画出简化的 Fe - Fe₃C 相图, 指出图中 S、C、E、G 点及 GS、SE、ECF、PSK 线的含义, 并标出各相区的组织组成物。

1.17 为什么含碳 1.2% 的钢比含碳 0.8% 的钢硬度高? 强度低?

1.18 Fe - Fe₃C 相图在实际生产中有何指导意义?