

高等教育“十二五”规划教材

金工实训

骆莉 陈仪先 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等教育“十二五”规划教材

金 工 实 训

主 编 骆 莉 陈仪先
副主编 常万顺 龚文邦
参 编 谈芬芳 郭毕佳 卢记军
主 审 童幸生



机械工业出版社

本书是根据教育部高等院校机械学科教学指导委员会机械基础课程教学指导分委员会工程材料及机械制造基础课程指导组修订的“机械制造实习教学基本要求”精神编写的。

全书共分：机械工程材料基础、常用机械工程材料、铸造成形、锻压成形、焊接、切削加工基础、车削加工、刨削加工、铣削加工、磨削加工、钳工、现代制造技术共12章。

本书特点：实践教学内容以传统机械制造工艺为基础，进而介绍先进的制造工艺和方法。本书注重培养学生理论联系实际意识和能力，通过进行实际制作产品或作品，强化学生的金工实训效果；充分发挥学生的潜力，激发学生的创新思维，为学生参加“创新制作”、“创业计划”等大赛及后续课程和今后工作做好相关知识和能力的贮备。

本书可作为高等院校机械类、非机械类专业学生的金工实训教材，根据需要适量删减也可供电大、职大、函大等相关专业选用，同时还可作为相关专业人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

金工实训/ 骆莉, 陈仪先主编. —北京: 机械工业出版社, 2010.6
高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-31002-0

I. ①金… II. ①骆…②陈… III. ①金属加工-实习-高等学校-教材
IV. ①TG-45

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第112461号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑: 刘小慧 责任编辑: 刘小慧 李建秀 版式设计: 霍永明
责任校对: 申春香 封面设计: 张静 责任印制: 李妍
唐山丰电印务有限公司印刷
2010年9月第1版第1次印刷
184mm×260mm·12.5印张·304千字
标准书号: ISBN 978-7-111-31002-0
定价: 24.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

金工实训（机械制造实习）是一门实践性技术基础课，是工科类机械专业、非机械专业学生必备的技能训练必修课，同时也是经管类专业学生增加工程背景、培养综合素质的重要必修课。本课程的教学目的是培养学生的制造工程意识、实践技能和创新素质。

本书是根据教育部高等院校机械学科教学指导委员会机械基础课程教学指导分委员会工程材料及机械制造基础课程指导组修订的“机械制造实习教学基本要求”精神，参考了国内众多“金工实习”、“工程实践”、“机械制造实习”等教材，并结合相关专业人才培养目标及编者多年的金工实训教学改革经验编写而成的。

本书具有如下特点：

1) 注重内容的基础性和实用性，力求文字简练、图文并茂，并采用最新国家标准，以期起到指导金工实训教学的目的。

2) 注重实践教学内容合理配置，以精选的传统机械制造工艺为基础，进而介绍先进的现代制造技术及工艺方法。

3) 注重培养学生理论联系实际意识和能力，通过实际制作产品或作品，强化学生的金工实训效果；充分发挥学生的潜力，激发学生的创新思维，培养综合素质。

本书由武汉纺织大学骆莉、武汉工业学院陈仪先任主编，海军工程大学常万顺、武汉纺织大学龚文邦任副主编。全书由骆莉负责统稿，美国俄克拉荷马大学李焯协助整理。

参加本教材编写的有骆莉（第6、7、8、10章），陈仪先（第3、12章），常万顺（第2、4章），龚文邦（第5章），武汉工业学院谈芬芳（第1章），骆莉、武汉纺织大学郭毕佳（第9章），骆莉、武汉纺织大学卢记军（第11章）。

衷心地感谢教育部高等学校机械学科教学指导委员会机械基础分委员会委员、江汉大学童幸生教授作为全书的主审，为本书的编写提出了许多宝贵的建议。

限于时间及编者水平，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请广大读者不吝指正。

编 者
2010年2月

目 录

前言

第1章 机械工程材料基础	1
1.1 材料的力学性能	1
1.2 金属学基础	4
1.3 钢的热处理	9
复习思考题	13
第2章 常用机械工程材料	15
2.1 工业用钢与铸铁	15
2.2 非铁金属(有色金属)材料	19
2.3 非金属材料	21
2.4 机械工程材料的选择	26
复习思考题	28
第3章 铸造成形	29
3.1 概述	29
3.2 砂型铸造工艺	29
3.3 特种铸造	43
3.4 铸件缺陷分析	47
3.5 铸造技术发展概况	48
复习思考题	50
第4章 锻压成形	51
4.1 概述	51
4.2 坯料加热和锻件冷却	51
4.3 自由锻	53
4.4 模锻与胎模锻	59
4.5 板料冲压	60
4.6 锻压技术发展概况	62
复习思考题	64
第5章 焊接	65
5.1 概述	65
5.2 电弧焊	65
5.3 气焊与切割	72
5.4 其他常用焊接方法	75
5.5 常见焊接缺陷及检验方法	78
复习思考题	79
第6章 切削加工基础	80
6.1 概述	80
6.2 零件的加工质量	82

6.3 常用刀具材料简介	84
6.4 量具及使用	85
复习思考题	89
第7章 车削加工	90
7.1 概述	90
7.2 卧式车床	90
7.3 车刀种类及主要角度	94
7.4 工件安装及所用附件	97
7.5 车床操作要点及基本车削工作	102
7.6 典型零件的车削加工	110
复习思考题	112
第8章 刨削加工	113
8.1 概述	113
8.2 刨床	113
8.3 刨刀及其安装	117
8.4 工件的安装与刨削加工	118
复习思考题	121
第9章 铣削加工	122
9.1 概述	122
9.2 铣床与铣刀	122
9.3 铣床附件	125
9.4 铣削加工工艺	127
9.5 铣削加工示例	129
复习思考题	130
第10章 磨削加工	131
10.1 概述	131
10.2 磨床	132
10.3 砂轮	134
10.4 磨削工件的装夹	135
10.5 磨削外圆与平面	136
10.6 磨削加工示例	137
复习思考题	138
第11章 钳工	139
11.1 概述	139
11.2 划线	139
11.3 锯割	141
11.4 锉削	143

11.5 钻削	145	12.1 数控加工	155
11.6 攻螺纹和套螺纹	148	12.2 电火花加工	180
11.7 装配	150	12.3 激光加工	188
11.8 加工实例	152	复习思考题	190
复习思考题	154	参考文献	191
第 12 章 现代制造技术	155	读者信息反馈表	

第 1 章 机械工程材料基础

1.1 材料的力学性能

用以制造各种机电产品的材料，统称为机械工程材料。机械产品正朝着大型、成套、精密、高效、高速等方向发展，因而对机械工程材料要求越来越高。掌握各种机械工程材料的性能，可合理地选用材料，正确地制订制造工艺。

材料的力学性能是材料在外力作用下所表现出来的特性，是设计零件以及选用、鉴定和验收材料的重要依据。常用的力学性能有强度、硬度、塑性和韧性等。

1.1.1 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力。强度通常以应力的形式来表示，当材料受外力作用而未被破坏时，其内部产生与外力相平衡的抵抗力（即内力），单位截面积上的内力称为应力。

常用的强度判据有屈服强度和抗拉强度，可由拉伸试验测定。首先将被测材料按国家标准 GB/T 228—2002《金属材料 室温

拉伸试验方法》制成标准拉伸试样（见图 1-1），并夹持在拉伸试验机的两个夹头中，然后逐渐增加载荷，直至试样被拉断为止，图 1-1 为拉伸试样与低碳钢的应力-应变曲线。在 Oe 范围内，当应力去除后，试样恢复原状，表明材料处于弹性变形阶段；当应力超过 R_e （曲线 e 点）时，材料除产生弹性变形外，还有塑性变形，即应力去除后试样不能恢复原来形状，尚有部分残余伸长量。当应力增大至 R_{eH} （曲线 H 点）后，曲线呈近似水平状态（曲线 L 段），表示应力虽未增加而试样继续伸长这种现象称为屈服。此后，欲使试样继续伸长又需增加外力，到当应力增加到 R_m （曲线 m 点）后试样出现局部变细的缩颈现象，这是由于试样截面缩小，继续变形所需的应力开始减小，直到 k 点试样在缩颈处断裂。

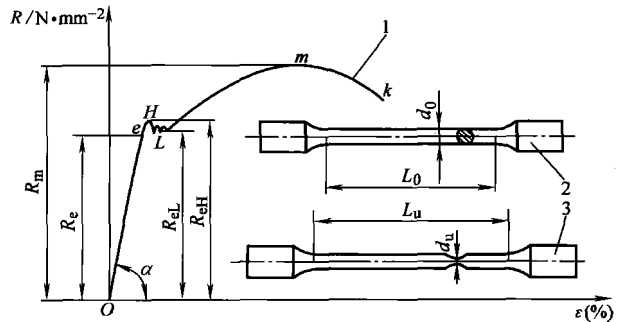


图 1-1 拉伸试样与低碳钢的应力-应变曲线

1—低碳钢应力-应变曲线 2—拉伸试样 3—就要拉断的试样

1. 屈服强度

屈服强度是指当金属材料呈现屈服现象时，在试验期间发生塑性变形而力不增加的应力值，应区分为上屈服强度和下屈服强度。上屈服强度（ R_{eH} ）是指试样发生屈服而力首次下降前的最高应力；下屈服强度（ R_{eL} ）是指在屈服期间不计初始瞬时效应时的最低应力。其数值是读取力首次下降前的最大力和不计初始瞬时效应时屈服阶段中的最小力，将其分别除

以试样原始横截面积 (S_0) 得到上屈服强度和下屈服强度 (见图 1-1)。屈服强度的单位为 MPa。

2. 抗拉强度 (R_m)

抗拉强度是材料在拉断前所能承受的最大应力值, 用 R_m 表示, 单位为 MPa。

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

式中 F_m ——拉断试样所需的最大力, 单位为 N;

S_0 ——试样的原始横截面积, 单位为 mm^2 。

R_m 和 R_{eL} 是零件设计时的主要强度依据, 也是评定金属材料强度的重要指标。材料除了承受拉伸载荷外, 还有可能受到压缩、弯曲和剪切等载荷作用, 因而分别对应有抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。

1.1.2 塑性

塑性是指断裂前材料产生不可逆永久变形的能力, 常用的塑性判据是断后伸长率 A (%) 和断面收缩率 Z (%), 也由拉伸试验测定

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中 L_u ——试样拉断后的标距长度 (mm);

L_0 ——试样原始标距长度 (mm);

S_0 ——试样原始横截面积 (mm^2);

S_u ——试样拉断后的横截面积 (mm^2)。

材料的断后伸长率 A 值和断面收缩率 Z 值越大, 则其塑性越好。良好的塑性是塑性成形 (如锻造、轧制、冲压等) 不可缺少的条件, 还可以缓和应力集中和防止突然脆断。

1.1.3 硬度

硬度是材料抵抗局部变形, 特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。硬度是衡量金属软硬的判据, 也是力学性能的一项综合指标, 同时硬度也是设计机械零件时必须考虑的技术指标和选择加工工艺的依据。硬度试验设备简单, 操作方便, 对被测零件基本无损坏, 是生产中常用的检验手段。生产中常用的硬度判据有布氏硬度和洛氏硬度等。

1. 布氏硬度

布氏硬度的试验按 GB/T 231.1—2009《金属材料 布氏硬度试验 第1部分: 试验方法》进行, 其原理 (见图 1-2) 是用一定直径 D 的硬质合金球作为压头, 以规定的压力 F 将其压入被测金属的表面, 保持一段时间后卸载, 然后测量试样表面的压痕直径 d , 并计算出压痕的表面积 S , 以压痕单位面积上承受的压力 (F/S) 作为布氏硬度值, 单位为 MPa, 但习惯上不标出。实际应用中测量试样表面的压痕直径 d 后可直接查表得出硬度值, 用符号 HBW 表示。

布氏硬度试验的特点是试验时金属材料表面压痕大, 能在较大范围内反映被测材料的平

均硬度，测得的硬度值比较准确，数据重复性强。但由于其压痕较大，对金属表面的损伤较大，不宜测定太小或太薄的试样。布氏硬度试验主要用于测定原材料的硬度，如铸铁、非铁金属（有色金属）、经退火或正火处理的钢材及其半成品。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验按 GB/T 230.1—2009《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法》进行，其原理如图 1-3 所示。将顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球压头，在一定载荷作用下压入试样表面。试验时，先加初试验力，然后加主试验力，压入试样表面之后，去除主试验力，在保留初试验力的情况下，根据试样残余压痕深度增量 e 来衡量试样的硬度大小。实际测量时，可通过试验机的表盘直接读取被测金属材料的硬度值。洛氏硬度按选用的总试验力及压头类型的不同，常用 A、B、C 三种标尺，硬度数值写在符号 HR 的前面，HR 后面写使用的标尺，如 50HRC 表示用 C 标尺测定的洛氏硬度值为 50。

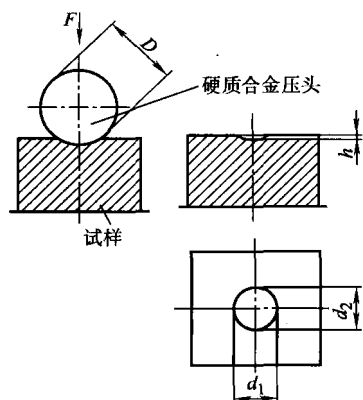


图 1-2 布氏硬度试验原理示意图

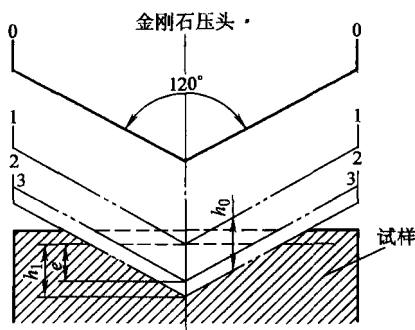


图 1-3 洛氏硬度试验原理示意图

洛氏硬度试验是生产中广泛应用的一种硬度试验方法。其特点是：硬度试验压痕小，对试样表面损伤小，常用来直接检验成品或半成品零件的硬度，尤其是经过淬火处理的零件；但由于压痕小，硬度值的准确性不如布氏硬度，数据重复性差。因此，在测试金属材料洛氏硬度时，要选取不同位置的三点测出硬度值，再计算三点硬度的平均值作为被测金属材料的洛氏硬度值。

洛氏硬度 HRC 与布氏硬度 HBW 大约为 1:10 的关系。例如 40HRC 相当于 400HBW。

1.1.4 冲击韧度

有些机械零件在使用过程中，经受较大的冲击载荷作用，从而产生比静载荷作用大得多的应力和变形。因此对于承受冲击载荷的零件不仅要有较高的强度，还必须有足够的韧度。

冲击韧度就是材料抵抗冲击载荷作用而不被破坏的能力。

冲击韧度的测定是在冲击试验机上，用一定高度的摆锤落下将试样冲断，测出冲断试样所需的冲击吸收功 A_K （单位为 J），再用试样断口处截面积 S （单位为 cm^2 ）去除，所得商值，即为冲击韧度 a_K 值（单位为 J/cm^2 ）。

1.2 金属学基础

1.2.1 金属的晶体结构

金属和合金在固态下都是晶体。金属材料的力学性能与其晶体结构有关。晶体结构指晶体内部原子规则排列的方式。为了便于描述晶体的结构，将每个原子看成一个点，把这些点用假想的线连起来，便形成一个空间的格子，称为晶格。组成晶格的最基本的单元称为晶胞（见图 1-4）。

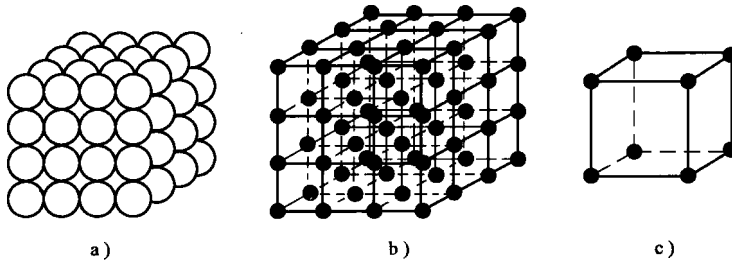


图 1-4 简单立方体的晶格与晶胞
a) 晶体中的原子排列 b) 晶格 c) 晶胞

金属常见的晶格类型有体心立方、面心立方和密排六方晶格（见图 1-5）。金属的晶格类型不同，其性能也不同。例如，同样是铁元素，面心立方的 γ 铁比体心立方的 α 铁具有更好的塑性。

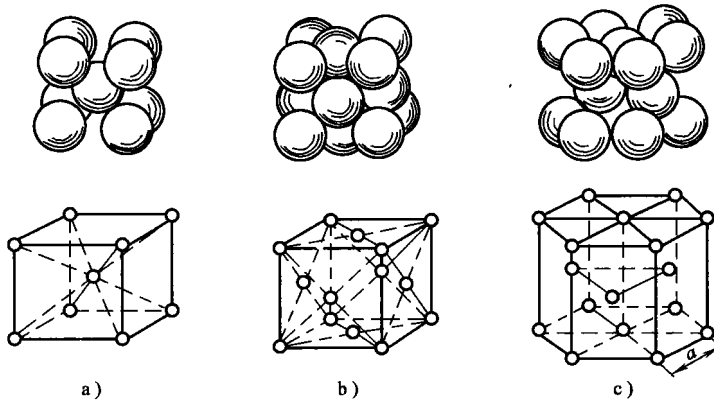


图 1-5 金属常见的晶格类型
a) 体心立方 b) 面心立方 c) 密排六方

1.2.2 金属的结晶

金属在固态下是晶体，而在液态下，金属原子的排列并不规则。因此，金属的结晶就是金属原子由无序到有序的排列过程。

纯金属的结晶是在一定的温度下进行的，通过热分析法实验，测得液态纯金属在结晶时

的温度-时间曲线（称为冷却曲线），如图 1-6 所示。液态纯金属从高温开始冷却，当温度下降到实际结晶温度 T_n 时，液态纯金属开始结晶，由于结晶时放出的结晶潜热等于冷却时散失的热量，所以在冷却曲线上出现一个水平平台，这表明纯金属是在恒温下进行结晶的。实际结晶温度 T_n 与理论结晶温度 T_0 之差就是过冷度。

金属的结晶过程可用图 1-7 来说明，液态金属冷却到结晶温度时，首先形成晶核，在继续冷却的过程中，晶核吸收周围的原子而长大，与此同时，又有新的晶核不断地形成和长大，直至相邻晶体彼此接触，液体金属完全消失，最终得到由许多形状和位向不相同的小晶粒组成的多晶体。

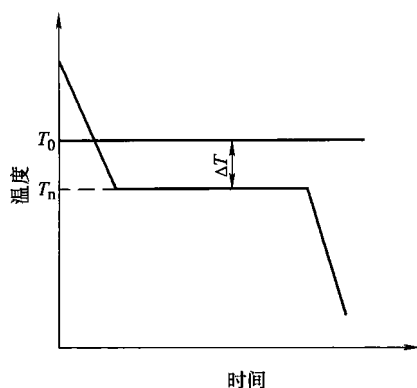


图 1-6 液态纯金属的冷却曲线

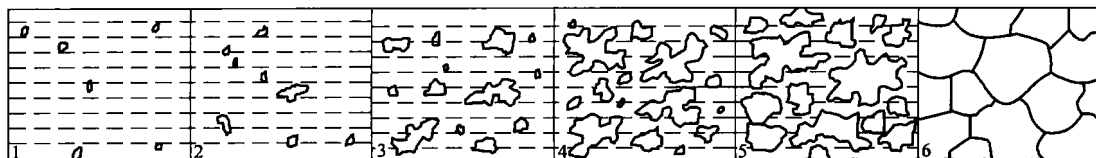


图 1-7 金属的结晶过程示意图

1.2.3 金属的同素异构转变

大多数金属在结晶之后，直至冷却到室温，其晶格类型都将保持不变，但有些金属（如锡、铁、钛、锰）的晶格类型却随着温度的变化而异。即同一固态金属在不同温度时其晶格类型是不同的。金属在固态下改变其晶格类型的过程叫做同素异构转变。

如图 1-8 所示为纯铁的冷却曲线，其上有三个水平平台。第一个水平平台（1538℃），表示纯铁由液态转变成固态的结晶阶段。结晶后铁的晶体结构为体心立方，称为 δ 铁（ δ -Fe）。当温度降到 1394℃ 时，发生同素异构转变，铁的晶体结构由体心立方转变成面心立方，称为 γ 铁（ γ -Fe）。当温度继续下降至 912℃ 时，再次发生同素异构转变，又转变成体心立方晶格，称为 α 铁（ α -Fe）。

金属的晶格类型发生转变，其性能也随之发生相应的改变。所以我们可以加热和冷却来调整和改变金属的性能。例如锻造时可以将钢加热到塑性良好的面心立方晶格状态，改善钢的锻造性能。

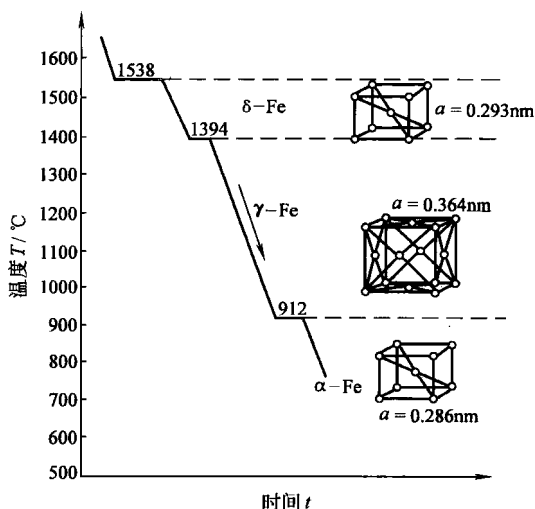


图 1-8 纯铁的冷却曲线

1.2.4 合金的晶体结构

1. 基本概念

(1) 组元 组成合金最基本的、独立的物质。如组成合金的元素或稳定的化合物。

(2) 合金系 由若干给定组元按不同比例配制而成的一系列化学成分不同的合金。

(3) 相 指在一个合金系统中具有相同的物理性能和化学性能，并与该系统的其余部分以界面分开的部分。例如，在铁碳合金中 α -Fe 为一个相， Fe_3C 为另一个相。

(4) 组织 组织是指用金相观察方法看到的由形态、尺寸不同和分布方式不同的一种或多种相构成的总体，以及各种材料缺陷和损伤。

由于合金的性能取决于组织，而组织又首先取决于合金中的晶体结构，所以，为了了解合金的组织性能，首先必须了解合金的晶体结构。

2. 合金的晶体结构

根据合金中各组元间的相互作用，合金中的晶体结构可分为固溶体、金属化合物及机械混合物三种类型。

(1) 固溶体 将糖溶于水，可以得到糖在水中的“液溶体”，其中水是溶剂，糖是溶质。如果糖水结成冰，便得到糖在固态水中的“固溶体”。合金中也有类似的现象，合金在固态下一种组元的晶格内溶解了另一组元原子而形成的晶体相，称为固溶体。

在固溶体中晶格保持不变的组元称为溶剂，因此，固溶体的晶格类型与溶剂相同，固溶体中的其他组元称为溶质。异类原子的插入都将使固溶体晶格发生畸变，增加位错运动的阻力，使固溶体的强度、硬度提高。这种通过溶入溶质原子形成固溶体，使合金强度、硬度升高的现象称为固溶强化。固溶强化是强化金属材料的重要途径之一。

(2) 金属化合物 金属化合物是指合金中各组元间原子按一定整数比形成的具有金属特性的新相，如铁碳合金中的渗碳体 (Fe_3C) 就是铁和碳所组成的化合物。金属化合物具有与其构成组元晶格截然不同的特殊晶格，具有熔点高、硬度高、脆性大等特性。

(3) 机械混合物 固溶体、金属化合物均是组成合金的基本相。由两相或两相以上组成的多相组织，称为机械混合物。在机械混合物中，各组成相仍保持其原有的晶格类型和性能，而整个机械混合物的性能介于各组成相性能之间，并与各组成相的性能以及相的数量、形状、大小和分布状况等密切相关。

1.2.5 铁碳合金基本组织与性能

铁和碳的合金称为铁碳合金，如钢和铸铁都是铁碳合金。要了解各类钢和铸铁的组织、性能以及成形加工方法等，首先要了解铁碳合金的化学成分、组织与性能之间的相互关系。铁碳合金相图就是研究铁碳合金组织、化学成分和温度之间相互关系的基本图形，了解它对于我们制定钢铁材料的铸造工艺、锻压工艺、焊接工艺、热处理工艺以及合理选材等有着重要的指导作用。

铁碳合金的基本相和基本组织见表 1-1。

1.2.6 铁碳合金相图分析

铁碳合金相图是铁碳合金在极缓慢冷却（或加热）条件下，不同化学成分的铁碳合金，

表 1-1 铁碳合金的基本相和基本组织

相或组织名称	符号	组织特征	碳的质量分数 $w(C)(\%)$	力学性能
铁素体	F	碳溶入 α -Fe 中形成的间隙固溶体	最大 0.0218	强度、硬度低,塑性、韧性好
奥氏体	A	碳溶入 γ -Fe 中形成的间隙固溶体	最大 2.11	硬度低、塑性较好
渗碳体	Fe_3C	复杂斜方晶格的 Fe 与 C 的金属化合物	6.69	硬而脆
珠光体	P	$w(C)$ 为 0.77% 的奥氏体在 727℃ 时析出 F 和 Fe_3C 的机械混合物	0.77	硬度低、塑性较好
莱氏体	Ld	$w(C)$ 为 4.3% 的铁液在 1148℃ 时结晶出 A 和 Fe_3C 的机械混合物	4.3	硬度很高、塑性很差

在不同温度下所具有的组织状态的图形。碳的质量分数 $w(C) > 5\%$ 的铁碳合金,尤其是当碳的质量分数增加到 $w(C) = 6.69\%$ 时,铁碳合金几乎全部变为金属化合物 Fe_3C 。这种化学成分的铁碳合金硬而脆,机械加工困难,在机械制造方面很少应用。所以,研究铁碳合金相图时,只需研究 $w(C) \leq 6.69\%$ 这部分。而 $w(C) = 6.69\%$ 时,铁碳合金全部为亚稳定的 Fe_3C ,因此, Fe_3C 就可看成是铁碳合金的一个组元。实际上,研究铁碳合金相图就是研究 Fe- Fe_3C 相图,如图 1-9 所示。

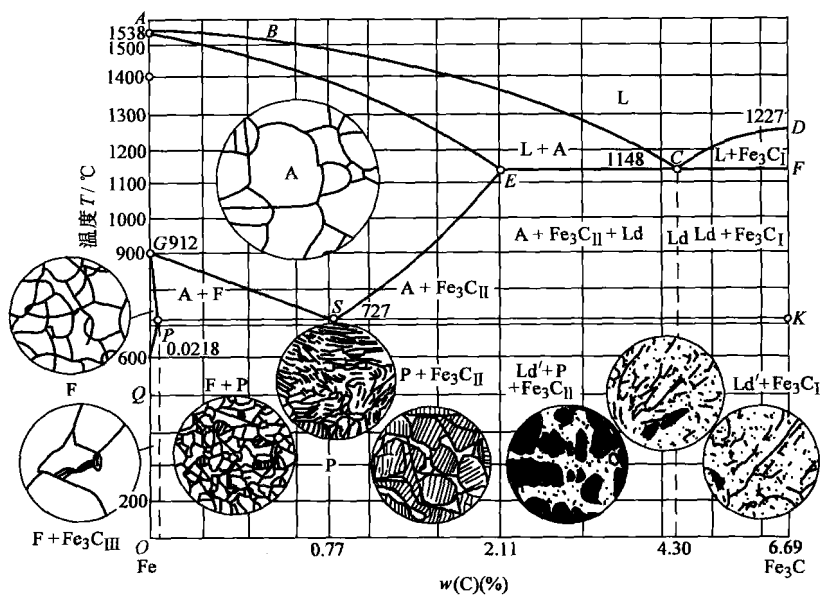


图 1-9 简化后的 Fe- Fe_3C 相图

1. 铁碳合金相图中的特点

铁碳合金相图中主要特性点的温度、碳的质量分数及其意义见表 1-2。

表 1-2 铁碳合金相图中主要特性点的温度、碳的质量分数及其意义

特性点	温度/°C	$w(C)(\%)$	特性点的意义
A	1538	0	纯铁的熔点或结晶温度
C	1148	4.3	共晶点,发生共晶转变 $L_{4.3} \rightarrow A_{2.11} + Fe_3C$

(续)

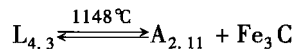
特性点	温度/℃	w(C)(%)	特性点的意义
D	1227	6.69	渗碳体的熔点
E	1148	2.11	碳在 γ -Fe 中的最大溶碳量,也是钢与生铁的化学成分分界点
F	1148	6.69	共晶渗碳体的化学成分
G	912	0	α -Fe 向 γ -Fe 的同素异构转变点
S	727	0.77	共析点,发生共析转变 $A_{0.77} \rightarrow F_{0.0218} + Fe_3C$
P	727	0.0218	碳在 α -Fe 中的最大溶碳量

2. 铁碳合金相图中的主要特性线

(1) 液相线 ACD 在液相线 ACD 以上区域,铁碳合金处于液态(L),冷却下来碳的质量分数 $w(C) \leq 4.3\%$ 的铁碳合金在 AC 线开始结晶出奥氏体(A);碳的质量分数 $w(C) \geq 4.3\%$ 的铁碳合金在 CD 线开始结晶出渗碳体,称一次渗碳体,用 Fe_3C_I 表示。

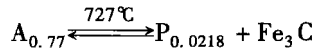
(2) 固相线 $AECF$ 在固相线 $AECF$ 以下区域,铁碳合金呈固态(S)。

(3) 共晶线 ECF ECF 线是一条水平(恒温)线,称为共晶线。在此线上液态铁碳合金将发生共晶转变,其反应式为



共晶转变形成了奥氏体与渗碳体的机械混合物,称为莱氏体(Ld)。碳的质量分数 $w(C) = 2.11\% \sim 6.69\%$ 的铁碳合金均会发生共晶转变。

(4) 共析线 PSK PSK 线也是一条水平(恒温)线,称为共析线,通常称为 A_1 线。在此线上固态奥氏体将发生共析转变,其反应式为



共析转变的产物是铁素体与渗碳体的机械混合物,称为珠光体(P)。碳的质量分数 $w(C) \geq 0.0218\%$ 的铁碳合金均会发生共析转变。

(5) GS 线 GS 线表示铁碳合金冷却时由奥氏体组织中析出铁素体组织的开始线,通常称为 A_3 线。

(6) ES 线 ES 线是碳在奥氏体中溶解度的变化曲线,通常称为 A_{cm} 线。它表示铁碳合金随着温度的降低,奥氏体中碳的质量分数沿着此线逐渐减少,多余的碳以渗碳体形式析出,称为二次渗碳体,用 Fe_3C_{II} 表示,以区别于从液态铁碳合金中直接结晶出来的 Fe_3C_I 。

(7) GP 线 GP 线为铁碳合金冷却时奥氏体组织转变为铁素体的终了线或者加热时铁素体转变为奥氏体的开始线。

(8) PQ 线 PQ 线是碳在铁素体中溶解度的变化曲线,它表示铁碳合金随着温度的降低,铁素体中碳的质量分数沿着此线逐渐减少,多余的碳以渗碳体形式析出,称为三次渗碳体,用 Fe_3C_{III} 表示。由于 Fe_3C_{III} 数量极少,在一般钢中对性能影响不大,故可忽略。

3. 铁碳合金的分类

铁碳合金相图中的各种合金,按其碳的质量分数和室温平衡组织的不同,一般分为工业纯铁、钢、白口铸铁(生铁)三类,见表1-3。

表 1-3 铁碳合金分类

合金类别	工业纯铁	钢			白口铸铁		
		亚共析钢	共析钢	过共析钢	亚共晶白口铸铁	共晶白口铸铁	过共晶白口铸铁
$w(C)(\%)$	$w(C) \leq 0.0218$	$0.0218 < w(C) \leq 2.11$			$2.11 < w(C) < 6.69$		
		< 0.77	0.77	> 0.77	< 4.3	4.3	> 4.3
室温组织	F	F + P	P	$P + Fe_3C_{II}$	$Ld + P + Fe_3C_{II}$	Ld'	$Ld + Fe_3C_I$

1.3 钢的热处理

机器零件在制造过程中要经过冷、热加工等多道工序，其间经常要穿插热处理工序。热处理在机械制造业中占有十分重要的地位，汽车、拖拉机生产中有三分之二的零件要进行热处理，工、模具几乎全部要进行热处理。

热处理是将钢在固态下，通过加热、保温和冷却，以改变钢的整体或表面组织，从而获得所需性能的工艺方法。各种热处理工艺过程都可以用温度与时间为坐标的热处理工艺曲线来表示（见图 1-10）。根据加热和冷却方式的不同，热处理可分为普通热处理和表面热处理。

热处理与切削加工、铸造、锻压和焊接等加工方法不同，他只改变材料的内部组织和性能，而不改变工件的形状和尺寸。热处理不仅可用于强化钢材，提高机械零件的使用性能，

延长使用寿命，还可以改善钢的工艺性能，使材料在切削时省力，加工效率高，减少刀具磨损，使材料在冷变形中具有良好的变形能力而不破裂，提高工件的加工质量。因此，热处理是保证产品质量、提高加工效率等不可或缺的工序。

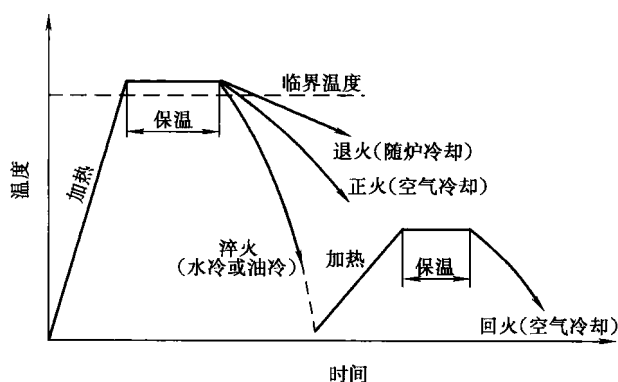


图 1-10 钢的普通热处理方法工艺曲线示意图

1.3.1 钢的热处理原理

铁碳合金状态图是确定热处理工艺的重要依据。在铁碳相图中， A_1 、 A_3 和 A_{cm} 是碳钢平衡转变温度，是平衡临界点。在实际生产中加热或冷却速度较快，钢的组织转变有滞后现象，因此，加热时各临界点用 Ac_1 、 Ac_3 、 Ac_{cm} 表示，而冷却时各临界点用 Ar_1 、 Ar_3 、 Ar_{cm} 表示。

1. 钢加热时的组织转变

当加热温度稍高于临界点时，获得晶粒细小的奥氏体，共析钢奥氏体的形成过程可以看成由奥氏体形核、晶核长大、残留渗碳体的溶解和奥氏体的均匀化四个阶段组成。继续加热或持续保温，奥氏体晶粒必将长大，奥氏体晶粒的大小对冷却后组织转变产物的性能有很大

影响。因此,钢在加热时,要得到晶粒细小而成分均匀的奥氏体,必须严格控制加热温度和保温时间。奥氏体晶粒的细化是钢强韧化的有效途径。

2. 钢冷却时的组织转变

钢经加热获得奥氏体组织后,在不同冷却条件下,得到的冷却产物和性能也不同。热处理的冷却方式有连续冷却和等温冷却,以共析钢为例了解过冷奥氏体转变产物的特点、形成条件及力学性能(见表1-4)。

表 1-4 过冷奥氏体转变产物的特点、形成条件及力学性能

类型	名称	特点	形成条件	力学性能
珠光体	珠光体	粗大片状	650 ~ 700℃	一般
	索氏体	细片状	600 ~ 650℃	比珠光体好
	托氏体	极细片状	550 ~ 600℃	比索氏体好
贝氏体	上贝氏体	羽毛状	350 ~ 550℃等温形成	脆性大,无实用价值
	下贝氏体	针状	在 350℃左右等温形成	具有较高的强度、硬度、塑性和韧性
马氏体	板条马氏体	过饱和 α 固溶体	奥氏体中 $w(C) < 0.3\%$, 马氏体开始转变温度 $> 300^\circ\text{C}$	较高的塑韧性
	片状马氏体		奥氏体中 $w(C)$ 约为 $1\% \sim 1.4\%$, 马氏体开始转变温度约为 $300 \sim 100^\circ\text{C}$	塑韧性很差,必须回火

1.3.2 钢的普通热处理工艺

钢的普通热处理有退火、正火、淬火和回火四种。常见的热处理工艺见表1-5。

表 1-5 钢的常见的热处理工艺

热处理名称	热处理方法	热处理后的组织	应用	
退火	完全退火	亚共析钢加热到 A_{c3} 以上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$, 保温后随炉冷到 600°C 以下,再空冷	F + P	用于亚共析钢的铸、锻件,细化晶粒,软化组织
	球化退火	过共析钢加热到 A_{c1} 以上 $20 \sim 30^\circ\text{C}$, 保温后随炉冷到 700°C 左右,再空冷	在 F 基体上均匀分布着球状 Fe_3C	改善高碳钢(如刀具、量具、模具等)的加工性能
	去应力退火	加热到 $500 \sim 650^\circ\text{C}$, 保温后随炉冷却	无组织变化	去除大型铸、锻件内应力
正火	加热到 A_{c3} (或 A_{cm}) 以上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$, 保温后在空气中冷却	共析钢获得索氏体,消除过共析钢的网状 Fe_3C_{II}	低、中碳钢的预备热处理,为球化退火做准备,普通结构零件的最终热处理	
淬火	亚共析钢加热到 A_{c3} 以上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$, 或将过共析钢加热到 A_{c1} 以上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$, 保温后在水、油等淬火介质中快冷	亚共析钢为细小马氏体,过共析钢为 M 和颗粒状 Fe_3C_{II}	提高钢的硬度和耐磨性,是强化钢件最经济、最有效的热处理方法	
回火	高温回火	钢件淬火后,加热到 $500 \sim 650^\circ\text{C}$, 保温后在空气中冷却。又称调质处理	回火索氏体,综合力学性能好	重要的机械零件如连杆、螺栓、齿轮及轴类等
	中温回火	钢件淬火后,加热到 $350 \sim 500^\circ\text{C}$, 保温后在空气中冷却	回火托氏体,有一定的韧性和高的弹性	主要用于处理各类弹簧
	低温回火	钢件淬火后,加热到 $150 \sim 250^\circ\text{C}$, 保温后在空气中冷却	回火马氏体,硬度 $58 \sim 62\text{HRC}$, 耐磨	各种工模具、量具及渗碳或表面淬火的工件,降低淬火内应力,提高工件的韧性

1.3.3 热处理设备

热处理常用设备有热处理加热设备、冷却设备（水槽、油槽、浴炉、缓冷坑等）、控温仪表（热电偶、温控仪表等）和质检设备（洛氏硬度试验机、金相显微镜、量具、无损检测或探伤设备等）。

热处理的加热是在专门的加热炉内进行的。常用的加热炉有电阻炉、浴炉、气体渗碳炉、高频感应加热设备等。

(1) 箱式电阻炉 箱式电阻炉根据使用温度不同，可分为高温、中温和低温箱式电阻炉。它是利用电流通过布置在炉膛内的电热元件发热，借辐射和对流作用，将热量传递给工件，使工件加热。图 1-11 是中温箱式电阻炉的结构示意图。箱式电阻炉适用于中、小型零件的整体热处理及固体渗碳处理。

(2) 井式电阻炉 井式电阻炉工作原理与箱式电阻炉相同（见图 1-12）。炉顶装有风扇，加热温度均匀；细长工件可以垂直吊挂，以减少变形；可利用起重设备进料或出料，能大大减轻劳动强度。井式电阻炉主要用于轴类零件或质量要求较高的细长工件的退火、正火、淬火的加热。

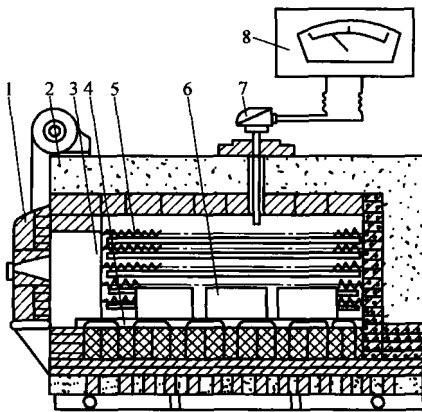


图 1-11 中温箱式电阻炉的结构示意图

1—炉门 2—炉体 3—炉膛 4—耐热钢炉底板
5—电热元件 6—工件 7—热电偶 8—控温仪表

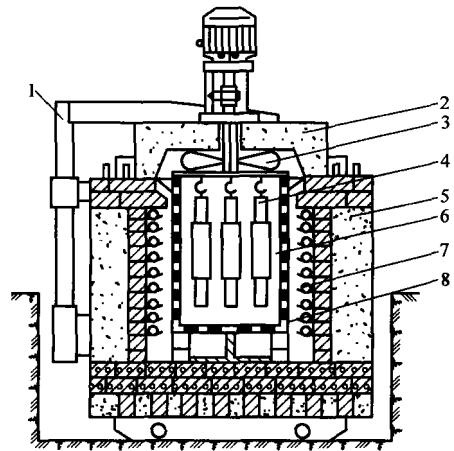


图 1-12 中温井式电阻炉结构示意图

1—炉盖升降机构 2—炉盖 3—风扇 4—工件
5—炉体 6—炉膛 7—电热元件 8—装料筐

(3) 盐浴炉 采用液态的熔盐作为加热介质的加热设备称为盐浴炉（见图 1-13）。盐浴炉结构简单，制造容易，加热速度快而均匀，工件氧化、脱碳少，便于细长工件悬挂加热或局部加热，以减少变形。多用于小型零件及工、模具的淬火、正火等的加热。

1.3.4 钢的表面热处理

某些在冲击载荷下或在摩擦条件下工作的零件，如凸轮、齿轮、曲轴等，它们要求表面具有高的硬度和耐

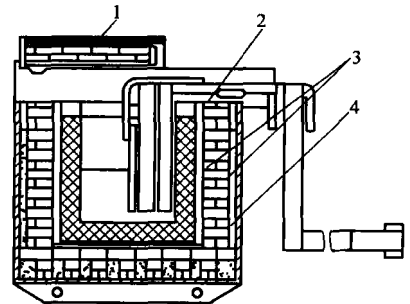


图 1-13 盐浴炉结构示意图

1—炉盖 2—电极 3—炉衬 4—炉体