

21世纪高等院校工科通用教材

黄如林 主编 朱欣庆 主审

# 金工实习教程



上海交通大学出版社

21 世纪高等院校工科通用教材

# 金工实习教程

主 编 黄如林  
副主编 刘新佳  
主 审 朱欣庆

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

《金工实习教程》遵循实用、精练的原则,吸收了近几年金工实习教改的成果,根据工科类学生应掌握的机械制造过程的基本知识和扩大学生知识面的需要,以机械制造基本工艺为主线,阐述了成形加工与机械加工工艺的基本原理、方法和适用场合。全书共分8章,分别介绍金属热处理、铸造、锻造、焊接、机械加工质量与检测、机械加工、钳工、数控加工与特种加工等。

为便于学生掌握和巩固已学知识,本书附有《金工实习报告》一册。全书按工种分为金属热处理、铸造、锻造、焊接、车工、铣工、刨工、磨工、齿轮加工、钳工、检测、数控加工与特种加工12章,设计了填空、判断、单项选择、多项选择、简答、实验、工艺设计等题型。

《金工实习教程》、《金工实习报告》为普通高等院校工科类学生金工实习教学用书,也可供高等工业专科学校、职业技术学院、职工大学、电视大学、成人高校的工科类专业选用。

### 图书在版编目(CIP)数据

金工实习教程/金工实习报告/黄如林主编. —上海:  
上海交通大学出版社, 2003(2004重印)  
ISBN 7-313-03292-7

I. 金… II. 黄… III. 金属加工 - 实习 - 高等学校 - 教材 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 008218 号

金工实习教程

金工实习报告

黄如林 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市华通印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:19 字数:464千字

2003年3月第1版 2004年1月第2次印刷

印数:4551~6600

ISBN 7-313-03292-7/TH·100 定价:26.00元

版权所有 侵权必究

# 前 言

《金工实习教程》是高等院校工科专业学生学习机械制造的基本工艺方法和技术,完成工程基本训练的重要必修课。为适应 21 世纪对培养高级技术人才的需要,各工科院校都把加强金工实习作为培养学生实践动手能力和创新精神、提高学生素质的重要措施之一。在金工实习期间进行金工实验,利用实验室的设备,由金工教研室的老师和实验人员参加,增加金属热处理、机械加工质量与检测和特种加工等实习内容,可以充分利用教学资源,丰富实习内容,弥补教学计划调整所带来的某些不足,提高同学的时间利用率,节省消耗费用,进一步增强教研室和实习工厂、实习教学和课堂教学的联系收到了很好的效果。为了满足这种教学的需要,所以我们编写了这本教材。

本书内容包括金属热处理、铸造、锻造、焊接、机械加工(车削、刨削、铣削、磨削、齿轮加工等)、机械加工质量与检测、钳工、数控加工与特种加工。铸造、锻造、焊接、机械加工和钳工是根据 1987 年国家教委颁布的课程基本要求编写的。我们根据高等教育具体情况作了适当的调整,其中以铸造、车削、钳工为重点,其他工种作了适当删减。钳工中删减了整削、刮削等内容,增加了装配的篇幅。金属热处理和机械加工质量与检测是根据实际教学需要编写的。数控加工与特种加工以演示教学和电视教学作为过渡。编写时力求简明扼要,切合实际,尤其是切削加工,只讲操作方法,至于为什么这样做,则留给同学思考或向指导老师请教。

同时,为保证金工实习的教学质量,正确指导学生学习和考查工艺理论知识并考查工艺技能训练的效果,我们编写了《金工实习报告》。本书按工种分为金属热处理、铸造、锻造、焊接、车工、刨工、铣工、磨工、齿轮加工、钳工、检测、数控加工与特种加工 12 章。其中在题前加“\*”的内容对非机械类专业学生可不作要求。本书在内容的选择上主要考虑了以下几点:一是本着实用、精练的原则,以目前大多数工科院校金工实习教学的基本条件以及工科类学生应掌握的机械制造过程的基本知识和扩大学生知识面的需要为选择依据,对一些目前大多数院校尚不具备实习条件或者并不普遍开展的实习内容如冲压、非金属材料成形等暂未纳入;二是力图体现 1997 年全国专业调整会议后工科各专业课程设置的较大幅度的调整,并吸收近几年金工实习教改成果,加入了机械加工质量与检测方面的内容,同时加重了金属热处理的分量;三是为适应高速发展的现代制造技术对工程技术人员的要求,适当加入了体现机械制造发展方向的新技术、新工艺,如数控加工与特种加工等。

本书在题型上除设计了填空、判断、单项选择、多项选择等标准题型外,还设计了简答、工艺设计等,以培养学生分析问题和解决问题的能力,促进理论与实践的有机结合;同时设计了部分金工实验题,以发挥实践性教学直接与形象的优势,加深学生对实验内容的理解。

本书为工科院校金工实习教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

本书由黄如林任主编,负责全书统稿。刘新佳任副主编。参加编写的还有汪群、许菊若、章军、张琦、张念龙。

本书承朱欣庆教授担任主审,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

本书编写过程中,我们参考并引用了许多同类教材的文字和图片。谨向这些教材的编者

致以衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

**编 者**

2002年8月

# 金工实习教程

## 绪 论

几乎社会生活的每个方面都离不开机械设备。作为工科院校的学生,毕业后无论是从事机械设计与制造工作,还是从事机械设备的使用与维护工作,只要与机械设备打交道都需要具备机械方面的基础知识与基本技能。“金工实习”是机械制造各主要工种基础性、综合性的工程实践课程,是工科各专业学生的必修课。

任何机器或设备,如车床和计算机,都是由相应的零件装配而成的。只有制造出符合要求的零件,才可能装配出合格的机器设备。有的零件可以直接用铸造、锻造、冲压、焊接等方法制成。大多数零件则是用上述方法制成毛坯,然后用机械加工(车、铣、刨、磨、钳、齿轮加工等)或特种加工的方法,添加或去除部分材料,才能使之具有符合要求的尺寸、形状、相对位置和表面质量。为了便于切削加工或满足使用性能,有的零件还需要在毛坯制造和机械加工过程中穿插不同的热处理工序。所有零件在加工过程中,都需要经过一次或多次检测,以便剔除不合格的零件。

铸造是金属的液态成形,锻压是金属的塑性成形,焊接是金属的连接成形,热处理是金属的整体改性或表面增强,这些成形方法统称为金属的热加工;机械加工及钳工是金属的去除成形,称为金属的冷加工。各种加工方法之间有机联系在一起,并且互相竞争。一种加工方法的出现、改进和提高,必然影响其他加工方法的应用,影响整个加工过程。

金工实习使学生初步接触生产实际,对机械制造过程有一个较为完整的感性认识,为学习有关的后续课程和将来从事相关的技术工作,打下一定的实践基础。例如:《工程图学》要求零件尺寸的标注要完整、准确、合理,“完整”、“准确”容易理解,而“合理”就难懂了,但通过金工实习,同学们就能从加工的实际操作中体会到何谓“合理”;再如:金工实习中,要仔细观察车床的传动系统,了解带传动、齿轮传动、齿轮齿条传动、丝杠螺母传动、蜗轮蜗杆传动,这对学习《机械设计基础》很有帮助;还要认识机械加工工艺文件,了解机械加工工艺流程,观察机床夹具使用情况,可以为学习《工程材料》、《机械制造基础》及机械类专业课程打下基础。对非机械类专业的工程技术人员而言,更新工艺流程,改变生产工艺,革新生产设备等都需要机械方面的基本知识,需要与机械类工程技术人员进行交流与合作;发明创造需要物化,才能推出具体的产品,才能产生经济效益和社会效益;在汽缸镗床生产出来之前的1984年,并没有真正产生由于瓦特发明蒸汽机所带来的第一次工业革命。对机械类学生而言,金工实习就更重要了。如所周知,工科院校培养的工程技术人员,都应该接受工程师的基本技能训练。教育部机械基础指导委员会副主任兼工程材料及机械制造基础课程指导小组组长、清华大学傅水根教授提出:作为21世纪的工程技术人员,应起码具备十个方面的基本工程意识:市场意识、质量意识、安全意识、群体意识、环境意识、社会意识、经济意识、管理意识、创新意识、法律意识。而金工实习不但让学生学到了知识和技能,还在工程素质的诸方面(如质量、安全、群体、经济、管理等)赋予学生以感性认识的学习平台。作为学生,每学完一门课程,都要进行考试或考查,满60分即视为合格(及格)。而在实际生产中,满100分才能视为合格。一个零件的所有尺寸中,哪怕只有一个尺寸不合格,也不能判它为合格件。整台机器设备中,哪怕有一个零件不合格,都可能

影响它的工作。所有零件都合格,哪怕是装配过程中有一个微小的疏漏,也可能影响整台机器的正常工作。20世纪末,我国有一次发射澳星遭到失败;2001年美国航天飞机因螺钉落入走线槽而推迟发射;2002年俄罗斯的联盟-Y火箭因异物进入蒸汽-燃气总管而爆炸,这些都是典型的例子。

通过金工实习,要达到如下要求:

- (1) 了解常用金属材料的分类、牌号、性能及选用原则,建立金属热处理的概念;
- (2) 了解金属材料的主要加工方法(它们的特点、适用场合、所能获得的加工质量等),了解各主要生产车间的划分、所用设备和工具(它们的结构、原理、操作方法等),并具有初步操作技能;
- (3) 获得机械加工质量的概念,初步掌握机械加工质量的常用检测方法;
- (4) 遵守工艺纪律和安全操作规程,遵守劳动纪律,爱护机器设备。

金工实习期间的注意事项:

- (1) 在遵守《大学生日常行为规范》的同时,还要遵守工厂的规章制度,如进车间要穿工作服(紧袖口、紧下摆),不穿裙子和拖鞋,女同学要戴工作帽,不得擅自动用工厂的机械设备及干私活等;
  - (2) 严格遵守各工种的安全操作规程(进了车间之后,各位指导老师都会分别详细介绍),确保人身安全和设备安全;
  - (3) 尊敬师长,虚心学习,听从指导老师的安排,勤于思考,刻苦钻研;
  - (4) 每次实习都要带好教材、笔记本等,及时做好记录,按时完成金工实习报告;
  - (5) 要不怕脏,不怕累,善始善终。
- “金工实习教程”对工科院校学生掌握实际技能与今后的成长,将终生受益。



## 目 录

<b>1 金属热处理</b> .....	1
1.1 金属力学性能 .....	1
1.2 金属的晶体结构与结晶 .....	3
1.3 铁碳合金相图 .....	6
1.4 钢的热处理 .....	8
1.5 常用金属材料 .....	15
<b>2 铸造</b> .....	23
2.1 铸造工艺基础 .....	23
2.2 铸造方法 .....	28
<b>3 锻造</b> .....	41
3.1 锻造工艺基础 .....	41
3.2 锻造方法 .....	43
<b>4 焊接</b> .....	52
4.1 焊接工艺基础 .....	52
4.2 焊接方法 .....	58
<b>5 机械加工质量与检测</b> .....	68
5.1 互换性与公差 .....	68
5.2 长度尺寸的检测 .....	77
5.3 形状和位置公差及其检测 .....	83
5.4 表面粗糙度及其检测 .....	92
<b>6 机械加工</b> .....	103
6.1 车削加工 .....	103
6.2 铣削 .....	131
6.3 刨削 .....	137
6.4 磨削 .....	145
6.5 齿轮加工 .....	154

---

<b>7 钳工</b> .....	157
7.1 钳工概述 .....	157
7.2 划线 .....	157
7.3 锯削 .....	160
7.4 锉削 .....	162
7.5 孔及螺纹的加工 .....	166
7.6 机械的装配和拆卸 .....	173
7.7 典型零件的钳工加工 .....	179
<b>8 数控加工与特种加工</b> .....	183
8.1 数控加工 .....	183
8.2 特种加工 .....	201
<b>参考文献</b> .....	212

# 1 金属热处理

## 1.1 金属力学性能

金属材料是工程上使用最为广泛的一类材料。它被广泛使用的原因是由于其具有良好的力学性能。金属在外力(载荷)作用下表现出来的行为称为金属力学性能。常用的金属力学性能指标有强度与塑性、硬度、冲击初度、弹性模量、疲劳强度、断裂韧性等。

### 1.1.1 强度与塑性

强度是指金属材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。常用的金属材料强度指标有弹性极限、屈服强度和抗拉强度等。

塑性是指金属材料在外力作用下能够产生永久变形而不被破坏的能力。常用的塑性指标有伸长率和断面收缩率等。

金属材料常用的强度和塑性指标是通过拉伸试验测定的。其过程为:将被测金属材料制成标准拉伸试样,如图 1.1 所示,在拉伸试验机上夹紧试样两端,缓慢地对试样施加轴向拉伸力,使试样被逐渐拉长,最后被拉断。通过试验可以得到拉伸力  $F$  与试样伸长量  $\Delta L$  之间的关系曲线(拉伸曲线)。为消除试样几何尺寸对试验结果的影响,将拉伸试验过程中试样所受的拉伸力转化为试样单位截面积上所受的力(应力),用  $\sigma$  表示,即  $\sigma = F/S_0$  (MPa);试样伸长量转化为试样单位长度上的伸长量(应变),用  $\epsilon$  表示,即  $\epsilon = \Delta L/L_0$ ,从而得到  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线,如图 1.1 所示,其形状与  $F$ - $\Delta L$  曲线完全一致。

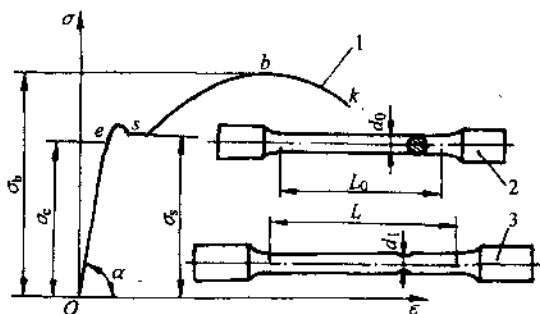


图 1.1 拉伸试样与拉伸曲线

1-低碳钢拉伸曲线;2-拉伸试样;3-拉断后的试样

拉伸曲线中,  $Oe$  段为直线,即在应力不超过  $\sigma_e$  时,应力与应变成正比关系,此时,将外力去除后,试样将恢复到原来的长度,这种能够完全恢复的变形称为弹性变形;当应力超过  $\sigma_e$  后,试样的变形不能完全恢复而产生永久变形,这种永久变形称为塑性变形;当应力增大至点  $s$  后,曲线呈近似水平直线状,即应力不增大而试样伸长量在增加,这种现象称为屈服;屈服后

试样产生均匀的塑性变形,应力增大到点  $b$  后,试样产生不均匀的塑性变形,即试样发生局部直径变细的“颈缩”现象。至点  $k$  时,试样在颈缩处被拉断。

通过对拉伸曲线的分析,可以直接在曲线上读出一系列强度指标,并可根据试验结果计算出塑性指标值。通过拉伸试验得到的常用的强度和塑性指标,如表 1.1 所示。

表 1.1 通过拉伸试验得到的金属材料的强度和塑性指标

名称	含义	计算公式	单位	符号含义	工程意义	
强度	弹性极限	材料能保持弹性变形的最大应力	$\sigma_e = F_e / S_0$	MPa	$F_e$ —试样保持弹性变形时所能承受的最大拉力(N); $F_s$ —试样产生屈服现象时所能承受的拉力(N); $F_{0.2}$ —试样产生 0.2% 塑性变形时的拉力(N); $F_b$ —试样所受的最大拉力(N); $F_0$ —试样的原始截面积 ( $\text{mm}^2$ )。	弹性元件选材的依据
	屈服点	材料产生屈服现象时的应力	$\sigma_s = F_s / S_0$			大部分塑性材料选材的主要依据
	屈服强度	材料产生 0.2% 塑性变形时的应力	$\sigma_{0.2} = F_{0.2} / S_0$			脆性材料选材的主要依据
	抗拉强度	材料能承受的最大应力	$\sigma_b = F_b / S_0$			
塑性	伸长率	材料在外力作用下产生塑性变形而不破坏的能力	$\delta = (L - L_0) / L_0 \times 100\%$		$L_0$ —试样的原始标距长度 (mm); $L_1$ —试样拉断后的标距长度 (mm); $S_1$ —试样断口处的截面积 ( $\text{mm}^2$ ); $S_0$ —试样的原始截面积 ( $\text{mm}^2$ )。	塑性成形件选材的主要依据
	断面收缩率		$\psi = (S_0 - S_1) / S_0 \times 100\%$			

### 1.1.2 硬度

硬度是指材料抵抗比它更硬的物体压入其表面的能力。金属材料常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

#### A. 布氏硬度

布氏硬度试验是以一定的载荷  $F$  将直径为  $D$  的淬火钢球或硬质合金球压入试样表面,保持规定时间后卸载,以压痕的单位面积上所受的力作为布氏硬度值,如图 1.2 所示。压头为淬火钢球时,用 HBS 表示,如 240~280 HBS,适用于布氏硬度值小于 450 的材料;压头为硬质合金球时用 HBW 表示,适用于布氏硬度值在 450~650 的材料。由于  $F$  和  $D$  的值都是确定的,试验时测出压痕直径  $d$  后,查表即可确定布氏硬度值。

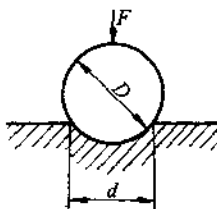


图 1.2 布氏硬度试验

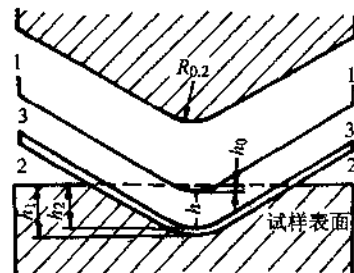


图 1.3 洛氏硬度试验

## B. 洛氏硬度

洛氏硬度是以一定的载荷将压头(钢球或金刚石圆锥)压入试样表面,以压痕深度表示洛氏硬度值,其值可以从硬度计上直接读出。采用不同的压头和载荷的配合可以得到 HRA, HRB, HRC 等不同的标尺,其中最常用的是 HRC。压头为顶角  $120^\circ$  的金刚石圆锥体,如图 1.3 所示,试验载荷为 1471 N,适用于硬度较高的金属材料。

### 1.1.3 冲击韧度

冲击韧度是指材料在冲击载荷作用下抵抗断裂的能力。常用摆锤冲击试验方法来测定,以试样受冲击断裂时,断裂面的单位面积上所受的冲击吸收功表示,即

$$\alpha_k = A_k / S (\text{J/cm}^2)$$

式中: $\alpha_k$  为冲击韧度; $A_k$  为试样受冲击断裂时所吸收的功; $S$  为试样断裂面面积。

## 1.2 金属的晶体结构与结晶

### 1.2.1 金属的晶体结构

原子呈规则排列的固体称为晶体。在正常凝固条件下得到的固态金属都是晶体。

为便于研究金属内部原子排列的规律性,可以把原子看为一个刚性的小球,如图 1.4(a) 所示,用一些假想线把原子中心连起来得到的能够反映晶体中原子排列规律的空间格子称为晶格,如图 1.4(b) 所示,从晶格中取出的能够代表晶格结构的最小几何单元称为晶胞,如图 1.4(c) 所示。晶格可以看作由晶胞堆砌而成,所以可以通过晶胞中原子排列的情况来描述晶体结构。

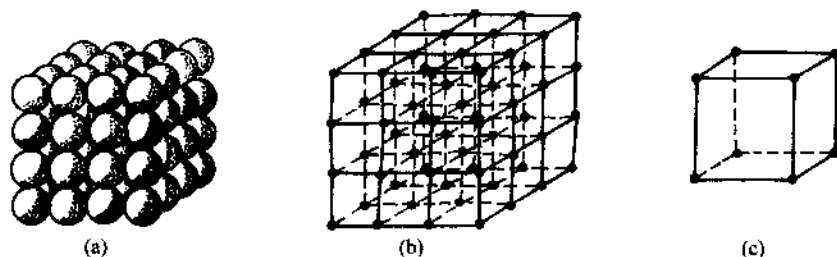


图 1.4 晶体中原子的排列

(a) 晶体中原子排列的模型;(b) 晶格;(c) 晶胞

金属晶体中常见的晶体结构有以下 3 种类型。

### A. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞为一个立方体。在立方体的 8 个角上各有一个原子,在立方体的中心还有一个原子,如图 1.5(a) 所示。具有这种晶体结构的金属一般具有较高的强度和较好的塑性,Cr,Mo,W,V 和  $\alpha$ -Fe 等 30 余种金属元素具有这种晶体结构。

## B. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞同样是一个立方体。在立方体的 8 个角上和 6 个面的中心各有一个原子,如图 1.5(b)所示。具有这种晶体结构的金属一般具有很好的塑性, $\gamma$ -Fe, Au, Ag, Cu, Al 和 Ni 等 20 余种金属元素具有这种结构。

## C. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞为一个正八面体。在八面体的 12 个角上和上、下底面各有一个原子,在上、下底面之间还有 3 个原子,如图 1.5(c)所示。具有这种晶体结构的金属一般塑性较差而强度较高,Zn, Mg 等 10 余种金属元素具有这种结构。

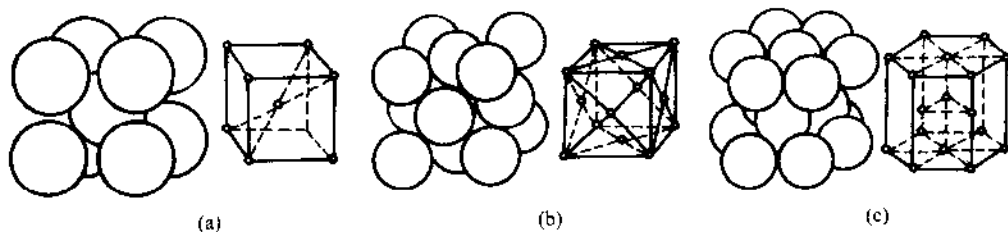


图 1.5 常见金属晶格类型

(a) 体心立方晶格; (b) 面心立方晶格; (c) 密排六方晶格

### 1.2.2 金属的结晶

金属由液态转变成固体晶态的过程称为结晶。广义地讲,结晶就是由原子从一种排列状态(规则或不规则)转变为另一种规则排列状态的过程。实验结果表明,金属的结晶是由晶核形成(形核)和晶核长大的过程,如图 1.6 所示。当温度下降到一定程度后,在液态金属中形成晶核,晶核形成以后,不断吸附周围液态金属中的原子到它的表面,并使原子按一定的规律排列起来,使晶核以这种方式不断地长大;与此同时,在液态金属中又有新的晶核形成并不断长大,直到液态金属完全消失而得到由很多多边形小晶体组成的金属晶体,其中的小晶体称为晶粒。晶粒之间的交界面称为晶界。这种由许多小的晶粒组成的金属晶体称为多晶体。除非特别制造,正常结晶条件下得到的金属晶体都是多晶体。

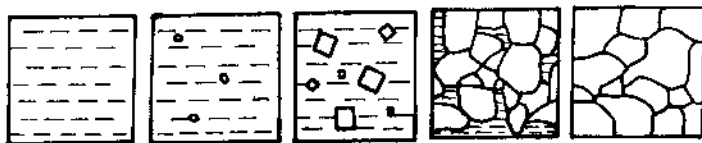
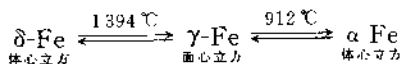


图 1.6 金属的结晶过程

在铸造实习时,利用体息时间观察 NaCl 的结晶过程。

多数金属在结晶后,晶格类型都保持不变。有些金属则在外界条件(温度、压力)改变后晶体结构还会发生变化。这种随外界条件的变化而发生晶体结构变化的现象称为同素异构转变。纯铁具有典型的同素异构转变现象:



铁的这种同素异构转变具有重要的工程意义,它是钢热处理的基础。

### 1.2.3 合金的结构

合金是由两种或两种以上的金属元素或金属元素和非金属元素通过熔炼、烧结或其他方法结合而成的具有金属特性的新物质。常用的钢即是由铁和碳构成的合金,黄铜是由铜和锌构成的合金。合金材料由于可以通过改变组成元素的种类或比例,使其力学性能可以在很大范围内变化,故具有比纯金属更广泛的用途。

组成合金的最基本单元称为组元,简称元。多数情况下,组元为元素,如黄铜中的铜和锌,但在所研究的范围内能稳定存在的化合物也可以看成组元。合金按组元的多少分为二元合金、三元合金等。

合金内部具有相同的化学成分、相同的晶体结构并与其他部分以界面分开的均匀组成部分称为相。例如:纯金属在液态或固态下为均匀的液体或固体,即呈单相状态;而在结晶过程中,则液、固相共存,呈两相状态。由于组元之间的相互作用,合金可以呈单相状态,也可能呈多相状态。

根据合金各组元相互作用的不同,合金的相结构有以下两种:

#### A. 固溶体

组成合金的组元之间相互作用形成的、在一个组元的晶格中包含有另一个组元原子的新相称为固溶体。固溶体中,晶体结构保持不变的组元称为溶剂,另一组元称为溶质。

根据溶质元素的原子在溶剂中分布的不同,固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体两类。形成置换固溶体时,溶剂晶格结点上的部分原子的位置被溶质原子占据,如图 1.7(a),(b)所示;形成间隙固溶体时,溶质元素的原子不占据溶剂晶格结点的位置而分布在晶格间隙中,如图 1.7(c)所示。溶质在固溶体中所占的质量分数或原子分数称为溶解度,根据溶解度的不同,固溶体又可分为有限固溶体和无限固溶体两类。多数固溶体的溶解度都是有限的。

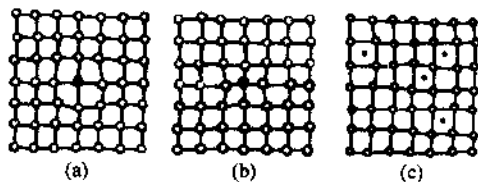


图 1.7 固溶体结构及其晶格畸变  
(a),(b) 置换固溶体;(c) 间隙固溶体

当合金的组元之间形成固溶体时,随着溶质元素原子的溶入,溶剂晶格会发生畸变(晶格的撑开或收拢),使固溶体的强度和硬度升高,这种现象称为固溶强化。固溶强化是强化金属材料(尤其是有色金属)的重要途径之一。但由于固溶强化的效果有限,固溶体一般作为合金的基体存在。

#### B. 金属化合物

合金的组元之间相互作用而形成的与各组元晶体结构均不相同的而具有金属特性的新相称为金属化合物。金属化合物一般具有复杂的晶体结构、高的熔点、高的硬度和很大的脆性。金属化合物一般以强化相的形式分布在固溶体基体上而存在于合金中。

### 1.3 铁碳合金相图

以铁、碳为基本组元构成的二元合金称为铁碳合金，常用的碳钢和铸铁即属此类。

#### 1.3.1 铁碳合金中的基本组织

铁碳合金中基本组织的定义、特性，如表 1.2 所示。

表 1.2 铁碳合金中的基本组织

名称	符号	定义	$\omega_c/\%$ (室温)	性能
铁素体	F	碳在 $\alpha$ -Fe 中的间隙固溶体	$\leq 0.0218$	高的塑性和韧性
奥氏体	A	碳在 $\gamma$ Fe 中的间隙固溶体	$\leq 2.11$	高塑性、低硬度和强度
渗碳体	$Fe_3C$	具有正交点阵的铁与碳的间隙化合物	6.69	硬而脆
珠光体	P	共析反应形成的铁素体和渗碳体的机械混合物	0.77	较高的强度和硬度，塑性较差
莱氏体	高温莱氏体	Ld	4.3	硬而脆
	低温莱氏体	Ld'		

#### 1.3.2 铁碳合金相图分析

铁碳合金相图是表示在缓慢冷却条件下，合金成分、温度和所存在的相、组织或状态之间关系的图形。由于  $\omega_c > 6.69\%$  的铁碳合金的脆性极大，没有实用价值，所以我们只对  $\omega_c \leq 6.69\%$  的 Fe- $Fe_3C$  部分进行研究。为研究方便起见，对相图上一些不影响相图应用价值的部分进行简化，如图 1.8 所示，相图上的各主要特性点和特性线的含义，分别如表 1.3 和表 1.4 所示。

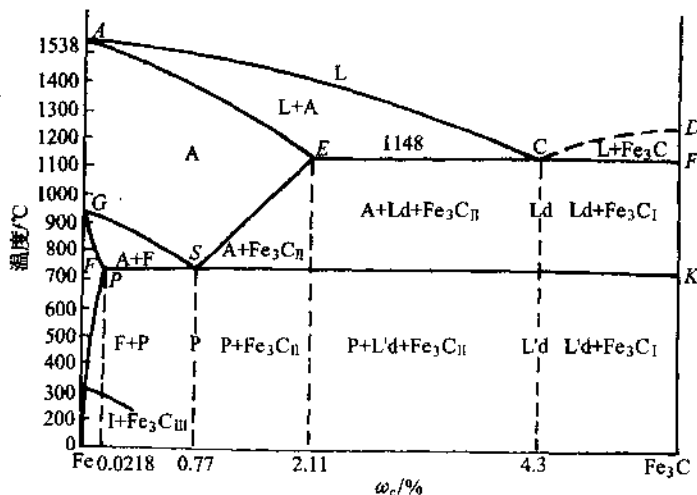


图 1.8 简化后的 Fe- $Fe_3C$  相图



表 1.3 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中各特性点的温度、含碳量及含义

点的符号	温度/°C	$w_c / \%$	说 明
A	1538	0	纯铁熔点
C	1148	4.30	共晶点, $L_C \rightarrow A_E + Fe_3C$
D	1227	6.69	渗碳体熔点
E	1148	2.11	碳在 $\gamma$ -Fe 中的最大溶解度
F	1148	6.69	渗碳体成分点
G	912	0	$\alpha$ -Fe $\rightarrow$ $\gamma$ -Fe 同素异构转变点 ( $A_3$ )
K	727	6.69	渗碳体成分点
P	727	0.0218	碳在 $\alpha$ -Fe 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点, $A_S \rightarrow F_P + Fe_3C$

表 1.4 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的主要特性线

特性线	名 称	含 义
ACD	液相线	液态合金冷却到此线时开始结晶
AECF	固相线	合金冷却到此线时结晶完毕
ECF	共晶线	合金冷却到此线时发生共晶反应形成莱氏体
PSK	共析线	合金冷却到此线时发生共析反应形成珠光体
ES	碳在奥氏体中的溶解度线	合金冷却到此线时从奥氏体中析出二次渗碳体
GS	同素异构转变线	合金冷却到此线时从奥氏体中析出铁素体

### 1.3.3 典型合金的结晶过程分析

Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图上的所有合金按其  $w_c$  和组织的不同可以分为以下 3 类:

- ① 工业纯铁 ( $w_c \leq 0.0218\%$ ).
- ② 钢 ( $0.0218\% < w_c \leq 2.11\%$ )
  - 亚共析钢 ( $0.0218\% < w_c < 0.77\%$ ),
  - 共析钢 ( $w_c = 0.77\%$ ),
  - 过共析钢 ( $0.77\% < w_c \leq 2.11\%$ ).
- ③ 白口铸铁 ( $2.11\% < w_c < 6.69\%$ )
  - 亚共晶白口铸铁 ( $2.11\% < w_c < 4.3\%$ ),
  - 共晶白口铸铁 ( $w_c = 4.3\%$ ),
  - 过共晶白口铸铁 ( $4.3\% < w_c < 6.69\%$ ).

典型合金结晶过程分析简述如下。

#### A. 共析钢

共析钢的结晶过程为:合金首先结晶成奥氏体,当奥氏体冷却到 727°C 时,在恒温下发生共析反应:  $A_S \rightarrow F_P + Fe_3C$ , 反应产物为珠光体。共析钢的室温组织为珠光体 P ( $F + Fe_3C$ ), 如图 1.9(a) 所示。

#### B. 亚共析钢

亚共析钢(以  $w_c$  为 0.40% 的铁碳合金为例)的结晶过程为:合金首先结晶成奥氏体,继续