

机械工程材料与热处理



类目：机械类

书名：机械工程材料与热处理

主编：朱婧 李静 赵静

出版社：电子科技大学出版社

开本：大16开

书号：978-7-5770-1958-1

使用层次：通用

出版时间：2025年9月

定价：48.00元

印刷方式：双色

是否有资源：有

机械类创新教材
教育改革新理念教材



机械类创新教材
教育改革新理念教材

机械工程材料与热处理

机械工程材料与热处理

主编 朱婧 李静 赵静

机械工程材料与热处理

主编 朱婧 李静 赵静

策划编辑: 万晓桐
责任编辑: 万晓桐
封面设计: 旗语书装



12099772-7-12720-1953-1
定价: 48.00元

电子科技大学出版社

电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press



机械类创新教材
教育改革创新理念教材



机械工程材料与热处理

主 编 ◎ 朱 婧 李 静 赵 静

副主编 ◎ 王蓬莱 周 洋 张 伟

陈春龙 龚 琴 孙海杰

孙照龙 王鳌杰



电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料与热处理 / 朱婧, 李静, 赵静主编.
成都: 成都电子科大出版社, 2025.9. — ISBN 978-7-
5770-1958-1

I. TH14; TG15

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025YV0014 号

机械工程材料与热处理

JIXIE GONGCHENG CAILIAO YU RECHULI

朱 婧 李 静 赵 静 主 编

策划编辑 万晓桐

责任编辑 万晓桐

责任校对 罗 雅

责任印制 梁 硕

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 三河市祥达印刷包装有限公司

成品尺寸 210 mm×285 mm

印 张 11.5

字 数 313 千字

版 次 2025 年 9 月第 1 版

印 次 2025 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5770-1958-1

定 价 48.00 元

版权所有，侵权必究

前言

随着我国经济的快速发展，装备制造、汽车、冶金矿、铁路基建等行业保持较快的增长，促进了工程材料行业的技术进步和各行业机械设备的不断更新，相应的，需要更多懂得材料专业知识的技能型人才。为满足社会不断增长的人才需求，许多高等院校在多个专业均开设机械工程材料课程，掌握本课程的知识与技能有利于顺利上岗就业。基于培养面向生产建设、服务和管理第一线需要的高技能应用型人才的培养目标，笔者结合多年的教学及企业工作经验编写了本书。

在编写过程中，笔者在参照国家最新标准和相关标准的基础上，认真总结并充分吸取了各高校近年来的教学改革经验与成果，力求体现“基础理论以必需、够用为度”的原则，以掌握基本概念、强化应用为教学重点的原则，做到深入浅出、通俗易懂，使教材层次清晰、形象直观，利于教师讲授、学生学习。

本书共分 10 章，主要内容有金属材料的力学性能、金属的结构与结晶、铁碳合金及碳钢、钢的热处理、金属的塑性变形与再结晶、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、非金属材料及复合材料、金属材料的失效与选材等，以金属材料的力学性能与化学成分、加工工艺之间关系为主线，培养学生认识金属材料、会合理选用金属材料。

本书在编写过程中，笔者参阅优秀同行的相关论著及图片，如涉及版权问题，请及时联系我们。由于笔者水平有限，不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2025 年 3 月

目 录

第一章 金属材料的力学性能 1

第一节 强度与塑性	2
第二节 硬度	6
第三节 冲击韧度	10
第四节 疲劳极限	11
巩固练习	13

第二章 金属的结构与结晶 15

第一节 金属的晶体结构	16
第二节 金属的实际结构和晶体缺陷	18
第三节 纯金属的结晶	21
巩固练习	24

第三章 铁碳合金及碳钢 26

第一节 铁碳合金的基本相	27
第二节 铁碳合金相图	30
第三节 碳钢	37
巩固练习	44

第四章 钢的热处理 46

第一节 热处理概述	47
第二节 钢在加热时的组织转变	48
第三节 钢在冷却时的组织转变	50
第四节 钢的退火和正火	57

第五节 钢的淬火	59
第六节 钢的回火	63
第七节 表面热处理	65
第八节 化学热处理	68
巩固练习	70

第五章 金属的塑性变形与再结晶..... 71

第一节 金属的塑性变形	72
第二节 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	76
第三节 冷塑性变形金属在加热时的变化	79
第四节 金属的热变形加工	82
巩固练习	84

第六章 合金钢 86

第一节 合金元素对钢性能的影响	87
第二节 合金钢的分类及牌号表示方法	88
第三节 合金结构钢	89
第四节 合金工具钢	95
第五节 特殊性能钢	100
巩固练习	104

第七章 铸铁 105

第一节 铸铁概述	106
第二节 铸铁的石墨化	107
第三节 灰口铸铁	109
第四节 可锻铸铁	111
第五节 球墨铸铁	113
第六节 合金铸铁	115
巩固练习	116

第八章 有色金属及其合金 117

第一节 铝及其合金	118
第二节 铜及铜合金	122
第三节 轴承合金	125
巩固练习	129

第九章 非金属材料及复合材料 130

第一节 塑料	131
第二节 橡胶	135
第三节 陶瓷	137
第四节 复合材料	141
巩固练习	144

第十章 金属材料的失效与选材 145

第一节 金属材料的失效	146
第二节 金属材料的合理选用	149
第三节 典型零构件的选材	153
巩固练习	158

参考文献 159**附 录** 160

附录 1 碳钢、合金钢的硬度换算表	161
附录 2 铜、铝的硬度换算表	164
附录 3 常用材料的疲劳强度	167
附录 4 常用材料的屈服强度	168
附录 5 常用材料六国牌号对照表	169

01

第一章 金属材料的力学性能

知识要点

1. 金属材料的力学性能指标——强度、硬度、塑性、韧性和疲劳极限。
2. 金属材料的力学性能是指在承受各种外加载荷(拉伸、压缩、弯曲、扭转、冲击、交变应力等)时,对变形与断裂的抵抗能力及发生变形的能力。
3. 常用的力学性能有强度、刚度、弹性、塑性、硬度、冲击韧性及疲劳极限等。

第一节

强度与塑性

强度是指金属材料在静载荷作用下，抵抗塑性变形和断裂的能力。塑性是指金属材料在静载荷作用下产生塑性变形而不致引起破坏的能力。金属材料的强度和塑性的判据可通过拉伸试验测定。

一、拉伸试验与拉伸曲线

1. 拉伸试验

拉伸试验是指在静拉伸力作用下，对试样进行轴向拉伸，直到拉断的试验。根据拉伸试验绘制出的应力-应变曲线，即可计算出强度和塑性的性能指标。

在拉伸试验前，将材料制作成一定尺寸和形状的标准拉伸试样(GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法)，如图 1-1 所示为常用的圆形拉伸试样。将拉伸试样装夹在拉伸试验机上，对试样施加拉力，在拉力不断增加的过程中，观察试样的变化，直至把试样拉断，如图 1-2 所示。

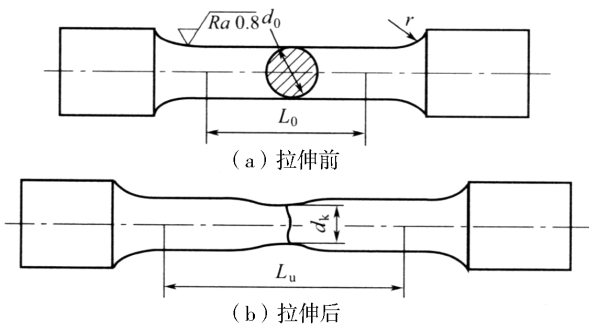


图 1-1 常用的圆形拉伸试样



图 1-2 拉伸试验

2. 拉伸曲线

在进行拉伸试验时，拉伸试验机可自动绘制出反映拉伸过程中载荷(F)与试样的伸长量(ΔL)之间关系的拉伸曲线，如图 1-3(a)所示为低碳钢的力-伸长曲线。用试样原始截面积 S_0 去除拉力 F 得到应力 σ ，用试样原始标距 L_0 去除伸长量 ΔL 就得到应变 ϵ ，则力-伸长曲线就成了应力-应变曲线，如图 1-3(b)所示。

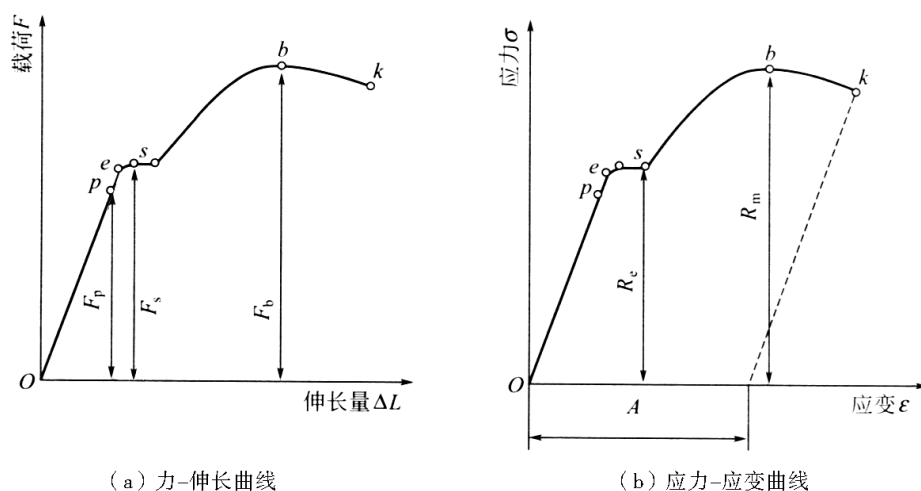


图 1-3 拉伸曲线

拉伸过程可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

在曲线的 Op 段，试样的伸长量与载荷呈直线关系，完全符合胡克定律，试样处于弹性变形阶段。在曲线的 pe 段，伸长量与载荷不再成正比关系，拉伸曲线不成直线，试样仍处于弹性变形阶段。

在曲线的 es 段 (e 点后的平台或锯齿)，外力不增加或变化不大，试样仍继续伸长，出现明显的塑性变形，这种现象称为屈服。

在曲线的 sb 段，载荷增加，伸长沿整个试样长度均匀进行，称为均匀塑性变形阶段；同时，随着塑性变形不断增加，试样的变形抗力也逐渐增加，产生加工硬化，这个阶段是材料的强化阶段。

在曲线的最高点 (b 点)，载荷达到最大，试样局部面积减小，伸长增加，形成了“缩颈”，如图 1-1(b) 所示。随着缩颈处截面不断减小 (非均匀塑性变形阶段)，承载能力不断下降，到 k 点时，试样发生断裂。

不同材料的拉伸曲线形状有很大差别，并不是都有明显的上述几个阶段。如灰铸铁、淬火高碳钢等脆性材料，在断裂前塑性变形量很小，甚至弹性变形后马上发生断裂，在拉伸曲线上没有屈服阶段或强化阶段，如图 1-4 所示为铸铁的拉伸曲线。

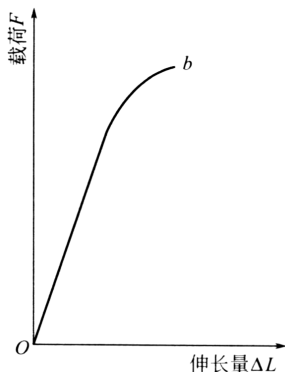


图 1-4 铸铁的拉伸曲线

二、刚度

刚度是指材料具有抵抗弹性变形的能力，刚度的大小一般用弹性模量 E 表示。在拉伸曲线上，弹性模量是直线(Op)段的斜率。对于材料而言，弹性模量 E 越大，其刚度越大。

弹性模量 E 主要取决于各种金属材料的本性，是一个对组织不敏感的力学性能指标。对钢进行热处理、微量合金化及塑性变形等，其弹性模量变化很小。常用材料的弹性模量见表 1-1 所列。

表 1-1 常用材料的弹性模量

材料	陶瓷	钢	硬铝	铜	钛	铍青铜	聚酯塑料	玻璃	木材	混凝土	碳纤维强化复合材料
E/GPa	400	210	69	110	117	120	1~5	69	12	47	270

结构的刚度除取决于组成材料的弹性模量外，还与其几何形状、截面尺寸等因素，以及外力的作用形式有关，在弹性模量 E 一定时，零件或构件的截面尺寸越大，其刚度越高。

对于一些须严格限制变形的结构(如机翼、高精度的装配件等)，需通过刚度分析来控制变形。许多结构(如建筑物、船体结构等)也要通过控制刚度以防止发生振动、颤振或失稳。

三、强度

工程上常用的强度指标有屈服强度、规定残余延伸强度、抗拉强度等。

1. 屈服强度和规定残余延伸强度

屈服强度是指材料开始产生明显塑性变形的最小应力值。当金属材料呈现屈服现象时，在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点，应区分上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} 。上屈服强度是试样发生屈服而力首次下降前的最高应力；下屈服强度为屈服期间内，不计初始瞬时效应时的最低应力，如图 1-5 所示。

屈服强度 R_e 可用下式计算：

$$R_e = \frac{F_s}{S_0} (\text{MPa})$$

式中， F_s ——试样发生屈服现象时的载荷，单位为 N；

S_0 ——试样的原始横截面积，单位为 mm^2 。

对于高碳淬火钢、铸铁等材料，在拉伸试验中没有明显的屈服现象，无法确定其屈服强度。一般规定，以试样达到一定残余伸长率对应的应力作为材料的屈服强度，称为规定残余延伸强度，通常记作 R_r 。例如， $R_{r0.2}$ 表示残余伸长率为 0.2% 时的应力。

工程上各种构件或机械零件工作时均不允许发生过量塑性变形，因此屈服强度 R_e 和规定残余延伸强度 R_r 既是工程技术上重要的力学性能指标之一，也是大多数机械零件选材和设计的依据。

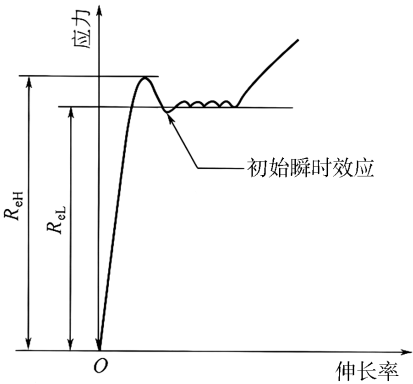


图 1-5 屈服强度的定义

2. 抗拉强度

抗拉强度是指材料在断裂前所承受的最大应力值，故又称“强度极限”，用 R_m 表示，即

$$R_m = \frac{F_s}{S_0} (\text{MPa})$$

式中， F_b ——试样拉断前承受的最大载荷，单位为 N；

S_0 ——试样的原始横截面积，单位为 mm^2 。

抗拉强度 R_m 是指塑性材料具有抵抗大量均匀塑性变形的能力。铸铁等脆性材料拉伸过程中一般不会出现缩颈现象，抗拉强度就是材料的断裂强度。

断裂是零件最严重的失效形式，所以抗拉强度也是机械工程设计和选材的主要指标，特别是对于脆性材料来讲。

3. 强度的意义

强度是指金属材料具有抵抗塑性变形和断裂的能力，一般钢材的屈服强度在 $200 \sim 1\,000 \text{ MPa}$ 。强度越高，表明材料在工作时越可以承受较高的载荷。当载荷一定时，选用高强度的材料，可以减小构件或零件的尺寸，从而减小其自重。因此，提高材料的强度是材料科学中的重要课题，称为材料的强化。

四、塑性

金属的塑性常用断后伸长率和断面收缩率表示。

1. 断后伸长率

断后伸长率是指试样拉断后标距的伸长量 ($L_u - L_0$) 与原始标距 L_0 的比值，用 A 表示，即

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

式中， L_u ——试样拉断后标距的长度，单位为 mm；

L_0 ——试样的原始标距，单位为 mm。

同一材料的试样长短不同，测得的断后伸长率略有不同。用短试样 ($L_0 = 5d_0$) 测得的断后伸长率 A 略大于用长试样 ($L_0 = 10d_0$) 测得的断后伸长率 $A_{11.3}$ 。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断处横截面积的减小量 ($S_0 - S_u$) 与原始横截面积 S_0 的比值，用 Z 表示，即

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

式中， S_u ——试样拉断后断裂处的最小横截面积，单位为 mm^2 ；

S_0 ——试样的原始横截面积，单位为 mm^2 。

断面收缩率 Z 的大小与试样尺寸无关，只取决于材料的性质。很显然，断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 越大，说明材料在断裂前发生的塑性变形量越大，也就是材料的塑性越好。

3. 塑性的意义

任何零件都要求材料具有一定的塑性。塑性好的金属材料可以发生大量塑性变形而不被破

坏，便于通过各种压力加工方法（锻造、轧制、冷冲压等）获得形状复杂的零件或构件。例如，低碳钢的断后伸长率可达 30%，断面收缩率可达 60%，可以将其拉成细丝，轧成薄板，进行深冲成形。而铸铁由于塑性很差，不能进行塑性加工。此外，工程构件或机械零件在使用过程中虽然不允许发生塑性变形，但在偶然过载时，塑性好的材料发生一定的塑性变形也不致突然断裂。再者，材料塑性变形可以减弱应力集中、消减应力峰值，零件在使用时更显安全。

第二节 硬 度

硬度是衡量金属材料软硬的指标，是指金属材料在静载荷作用下具有抵抗表面局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕等表面局部变形的能力。

硬度试验设备简单，操作迅速方便，可直接在工件上测量而不伤工件，更为重要的是通过硬度测量可以估计出金属材料的其他力学性能指标，如强度、塑性等。因此，硬度是力学性能中最常用的性能之一，硬度试验在科研和生产中得到了广泛应用。

硬度的测定方法一般分为压入法、刻划法、回跳法三类。生产中常用的是压入法，它是将一定形状的压头，在一定的载荷下，压入被测的金属材料表面，根据压入程度来测定其硬度值。在同样的实验条件下（压头相同、载荷相同），若压入的程度越大，则材料的硬度越低；反之，材料的硬度越高。生产中应用广泛的压入硬度测试方法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。

一、布氏硬度

布氏硬度试验法的原理是首先在一定的载荷 F 作用下，将一定直径 D 的硬质合金球压入被测材料的表面，保持规定时间后将载荷卸掉，测量被测材料表面留下压痕的直径 d ；然后根据 d 计算出压痕球缺的面积 S ；最后求出压痕单位面积上承受的平均压力，以此作为被测金属材料的布氏硬度值，如图 1-6 所示。

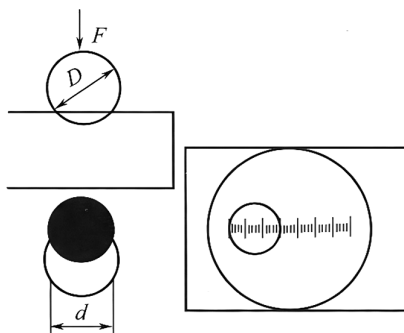


图 1-6 布氏硬度试验原理

布氏硬度值(HBW)的计算公式为

$$HBW=\frac{F}{S}=0.102\frac{2F}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})}$$

式中，F——载荷大小，单位为 N；

D——压头的直径，单位为 mm；

d——压痕表面的直径，单位为 mm；

S——压痕的面积，单位为 mm²。

布氏硬度值的单位为 kgf/mm² 或者 N/mm²，但习惯上布氏硬度是不标单位的。

布氏硬度实际测试时，硬度值是不用计算的，利用刻度放大镜测出压痕直径 d，根据 d 值查平面布氏硬度表即可查出硬度值。

布氏硬度的表示方法如下：硬度值+硬度符号+试验条件。如 200HBW10/1 000/30 表示用 10 mm 直径的硬质合金球压头，在 1 000 kgf(9.807 kN)作用下，保持 30 s(持续时间 10~15 s 时，可以不标注)，测得的布氏硬度值为 200。

在进行布氏硬度试验时，试验力 F 与压头直径(mm)的平方的比值(0.102F/D²)就应为 30、15、10、5、2.5、1 中的一个。根据金属材料的种类、试样厚度及试样的硬度范围，按照表 1-2 的规范选择合适的试验条件。

布氏硬度的优点是：试验时试样上压痕面积较大，能较好地反映材料的平均硬度；数据较稳定，重复性好。其缺点是：测试麻烦，压痕较大，不适合测量成品及薄件材料。目前，布氏硬度主要用于铸铁、有色金属(如滑动轴承合金等)及经过退火、正火和调质处理的钢材。

表 1-2 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度值范围	球直径 d /mm	$0.102F/D^2$	试验力 F /N 或 kgf	保持时间 /s	备注
钢、铸铁	≥ 140	10	30	29 420(2 000)	10	压痕中心距试样边缘距离不应小于压痕平均直径的 2.5 倍 相邻压痕中心距离不应小于压痕平均直径的 4 倍 试样厚度至少应为压痕深度的 10 倍。 试验后，试样支承面应无明显变形痕迹
		5		7 355(750)		
		2.5		1 839(187.5)		
	< 140	10	10	9 807(1 000)	10~15	
		5		2 452(250)		
		2.5		613(62.5)		
有色 金属材料	≥ 130	10	30	29 420(3 000)	30	
		5		7 355(750)		
		2.5		1 839(187.5)		
	55~130	10	10	9 807(1 000)	30	
		5		2 452(250)		
		2.5		613(62.5)		
	< 35	10	2.5	2 452(250)	60	
		5		613(62.5)		
		2.5		153(15.5)		

二、洛氏硬度

洛氏硬度的试验原理是用顶角为 120°金刚石圆锥体或者用直径为 1.588 mm 的淬火钢球作

为压头，先加初载荷为 98.07 N(10 kgf)，再加规定的主载荷，将压头压入金属材料的表面，卸去主载荷后，根据压头压入的深度最终确定其硬度值，如图 1-7 所示。

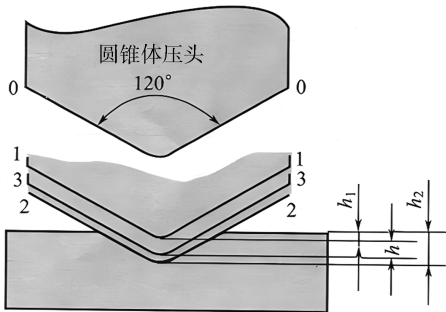


图 1-7 洛氏硬度试验原理

在图 1-7 中，0—0 位置为金刚石压头还没有与试样接触时的位置。当加初载荷后，压头与试样表面之间产生良好接触，此时压头位置为 1—1，压入深度为 h_1 ，并以此作为测量的基准；再施加主载荷，试样压到最深处，此时压头位置为 2—2，压入深度为 h_2 ；卸去主载荷后，被测试样的弹性变形恢复，压头略微抬高，此时压头位置为 3—3，测得的深度就是基准与压头顶点最后位置之间的距离 h 。 h 越大，被测金属的硬度越低，为了与习惯(数值越大，硬度越高)相符，用常数 k 减 h 来表示硬度大小，用 0.002 mm 表示一个硬度单位，洛氏硬度值(HR)的计算公式为

$$HR = \frac{k - h}{0.002}$$

式中， k ——常数，用金刚石圆锥体压头时， $k=0.2$ mm，用淬火钢球作为压头时， $k=0.26$ mm；
 h ——卸去主载荷后测得的压痕深度。

洛氏硬度没有单位，是一个无量纲的力学性能指标。为了能用同一硬度计测定从软到硬的材料硬度，就需要用不同的压头和载荷组成不同的洛氏硬度标尺，最常用的是 A、B、C 三种标尺，分别记作 HRA、HRB、HRC，其中洛氏硬度 C 标尺应用得最广泛。

表 1-3 给出了常用的三种标尺的试验条件及应用范围。

表 1-3 常用的三种标尺的试验条件及应用范围

标尺	硬度符号	压头类型	总载荷 /N 或 kgf	测量范围	应用范围
A	HRA	金刚石圆锥体	588.4(60)	20~88	硬质合金、表面硬化层、淬火工具钢等
B	HRB	φ1.588 mm 钢球	980.7(100)	20~100	低碳钢、铜合金、铝合金、铁素体可锻铸铁
C	HRC	金刚石圆锥体	1 471(150)	20~70	淬火钢、调质钢、高硬度铸铁

在实际测量时，洛氏硬度是在硬度计上直接读出硬度值的。洛氏硬度的表示方法：硬度值+硬度符号。例如，60HRC 表示用 C 标尺测得的洛氏硬度值为 60。

洛氏硬度试验法是目前应用得最广泛的硬度测试方法。它的优点是：测量迅速简便，压痕

较小，可用于测量成品零件；其缺点：是压痕较小，测得的硬度值不够准确，数据重复性差。因此，在测试金属的洛氏硬度时，需要先选取三个不同的位置测出硬度值，再计算三点硬度的平均值作为被测材料的洛氏硬度值。

三、维氏硬度

维氏硬度试验法原理与布氏硬度基本相似，如图 1-8 中所示，用一个相对面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体压头，在规定载荷的作用下压入被测金属的表面，保持一定时间后卸除载荷，用压痕单位面积上承受的载荷 (F/S) 来表示硬度值，维氏硬度的符号为 HV，计算式如下：

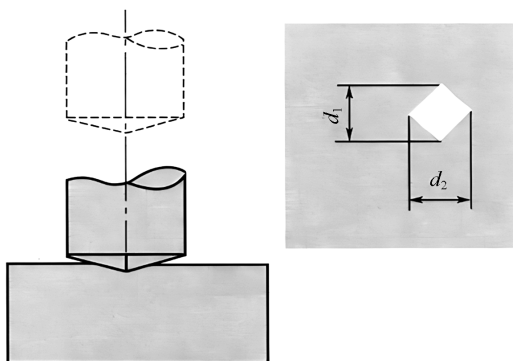


图 1-8 维氏硬度试验原理

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{d^2}{2 \sin 68^\circ}} = 0.1871 \frac{F}{d^2}$$

式中， F ——试验所加载荷，单位为 N；

S ——压痕的面积，单位为 mm^2 ；

d ——两对角线的平均长度，单位为 mm。

维氏硬度在实际测试时，硬度值也是不用计算的，利用刻度放大镜测出压痕对角线长度 d ，通过查表即可查出维氏硬度值。

维氏硬度的测量范围为 $5 \sim 1\,000$ ，表达方法：硬度值 + 硬度符号 + 测试条件。例如，620HV30/20 表示在 30 kgf (249.3 N) 载荷作用下，保持 20 s 测得的维氏硬度值为 620，如果保荷时间为 10~15 s，则可以不标注，如 620HV30。

维氏硬度的优点是：试验载荷小，压痕较浅，适用范围宽，可以测量极软到极硬的材料，尤其适合测定零件表面淬硬层及化学热处理的表面层等。由于维氏硬度只用一种标尺，材料的硬度可以直接通过维氏硬度值比较大小。维氏硬度的缺点是：对试样表面要求高，压痕对角线长度 d 的测定较麻烦，工作效率不如洛氏硬度高。

由于各种硬度试验的条件不同，所以相互之间没有理论换算关系。但根据试验数据分析，得到粗略换算公式：当硬度在 $200 \sim 600\text{HBW}$ 时， $\text{HRC} \approx 1/10\text{HBW}$ ；当硬度小于 450HBW 时， $\text{HBW} = \text{HV}$ 。

第三节 冲击 韧 度

许多零件或构件在工作过程中，往往受到冲击载荷的作用，如冲床的冲头、风动工具、锤子等，它们是利用冲击载荷工作的；而在其他很多情况下，零件要尽量避免受到冲击载荷的作用，因为冲击载荷由于时间短、速度快、应力集中，对材料破坏作用比静载荷大得多，所以这些零件和工具在设计 and 制造时，不能只考虑静载荷强度指标，必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。

金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力称为韧性，是金属材料力学性能的重要指标。常用韧度来衡量金属材料的韧性好坏，但习惯上，韧性和韧度不加严格区分。

材料冲击韧性通常用一次冲击试验来测定，用冲击吸收功表示冲击韧性的大小。

一、摆锤式一次冲击试验

摆锤式一次冲击试验原理如图 1-9 所示，试验时，将标准试样放在试验机的支座上，把质量为 m 的摆锤抬升到一定高度 H_1 ，然后释放摆锤、冲断试样，摆锤依靠惯性运动到高度 H_2 。冲击过程中，如果忽略各种能量损失(空气阻力及摩擦等)，摆锤的位能损失 $mgH_1 - mgH_2 = mg(H_1 - H_2)$ 就是冲断试样所需要的能量，即是试样变形和断裂所消耗的功，也称为“冲击吸收功” A_k ，即

$$A_k = mg(H_1 - H_2)$$

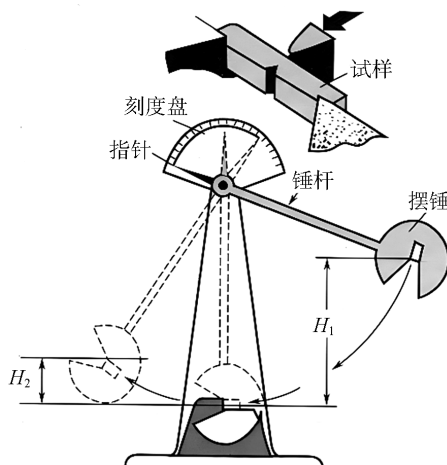


图 1-9 摆锤式一次冲击试验原理

按照国标 GB/T 229—2020 规定，冲击标准试样有夏比 U 形缺口试样和夏比 V 形缺口试样两种类型。U 形缺口试样和 V 形缺口试样分别表示为 A_{kU} 和 A_{kV} ，其单位是焦耳(J)。冲击吸收功的大小由试验机的刻度盘上直接读出。冲击吸收功 A_k 越大，反映出材料的韧性越高；反

之，材料的韧性则越低。

一般把冲击吸收功低的材料称为脆性材料，冲击吸收功高的材料称为韧性材料。脆性材料在断裂前没有明显的塑性变形，断口较平直，呈晶状或瓷状，有金属光泽；而韧性材料在断裂前有明显的塑性变形，断口呈纤维状，无光泽。

金属材料冲击吸收功 A_k 是一个由强度和塑性共同决定的综合性力学性能指标，零件在设计时，虽不能直接用于计算，但它是一个重要参考。

二、低温脆性

有些金属材料，如工程上用的中低强度钢，当温度降低到某一程度时，会出现冲击吸收功明显下降的现象，这种现象称为冷脆现象。历史上曾经发生过多起低温冷脆造成的船舶、桥梁等大型结构脆断的事故，造成了巨大的经济损失。

通过测定材料在不同温度下的冲击吸收功，就可测出某种材料冲击吸收功与温度的关系曲线，如图 1-10 所示。冲击吸收功随温度降低而减小，在某个温度区间冲击吸收功发生急剧下降，试样断口由韧性断口过渡为脆性断口，这个温度区间就称为韧脆转变温度范围。

韧脆转变温度越低，材料的低温冲击性能就越好。在严寒地区使用的金属材料必须有较低的韧脆转变温度，才能保证正常工作。例如，高纬度地区使用的输油管道、极地考察船等建造用钢的韧脆转变温度应在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。

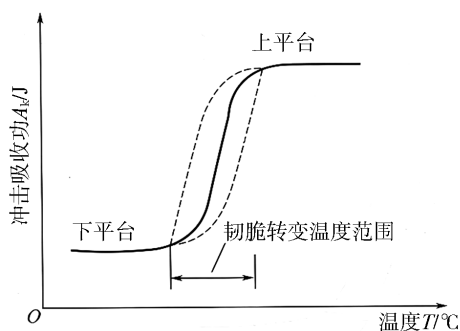


图 1-10 某种材料的冲击吸收功与温度的关系曲线

第四节 疲劳极限

一、疲劳现象

有许多零件在工作时受到的载荷是不断变化的，如弹簧、齿轮、曲轴等。有时载荷的大小和方向都在不断地变化，这样的应力称为交变应力，如图 1-11 所示。有时载荷只有大小在变化

而方向不变，这样的应力称为重复应力。

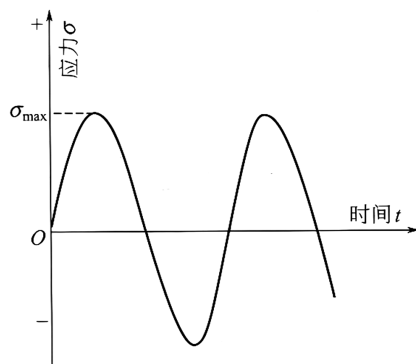
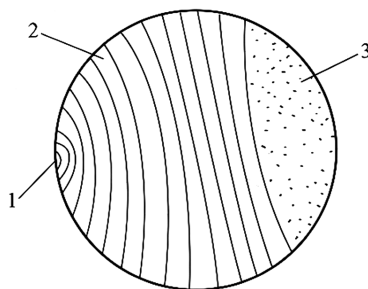


图 1-11 交变应力示意图

零件在受到交变应力或重复应力时，往往在工作应力远小于抗拉强度(甚至屈服强度)的情况下突然断裂，这种现象称为疲劳断裂。因为疲劳断裂是突然发生的，事先无明显征兆，所以危险性极大。一般来说，在各类断裂失效中，80%是由于各种不同类型的疲劳破坏所造成的。

疲劳断裂发生的过程是这样的：首先在零件应力集中的部位或材料本身强度较低的部位产生疲劳裂纹，接着裂纹不断扩展，当裂纹扩展到一定程度时零件就会发生突然断裂，如图 1-12 所示，一般将疲劳断口上的裂纹扩展线称为海滩线或贝壳线。



1—疲劳源；2—扩展区；3—瞬时断裂区。

图 1-12 疲劳断口示意图

二、疲劳极限概述

金属的疲劳极限可以用疲劳试验来测定。实验表明，材料所受的交变应力的最大值 $\sigma_{\max}$ 越大，则疲劳断裂前所经历的应力循环周次数 N 越低；反之，则疲劳断裂前所经历的应力循环次数 N 越高。根据交变应力 $\sigma_{\max}$ 和应力循环次数 N 建立起来的曲线，称为疲劳曲线，或称“S-N 曲线”，如图 1-13 所示。

疲劳极限是指材料经受无限次循环应力也不发生断裂的最大应力值，记作 σ_r ，就是疲劳曲线中的平台位置对应的应力。一般来说，材料的疲劳极限是在对称弯曲条件下测定的，对称弯曲疲劳极限记作 σ_{-1} 。在一般情况下，钢的疲劳极限为其抗拉强度的 $1/2 \sim 1/3$ 。

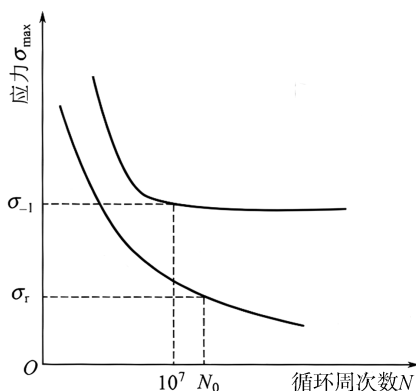


图 1-13 疲劳曲线(S-N 曲线)示意图

实践表明,如果在 10^7 应力循环周次数下,仍不发生疲劳断裂,则在经过相当多次的应力循环后一般也不会造成疲劳断裂。对于一般钢铁材料来讲,当循环次数达到 10^7 次时,材料所能承受的最大循环应力称为疲劳极限。而对于有色金属、高强度钢和腐蚀介质作用下的钢铁材料的疲劳曲线没有平台,这类材料的疲劳极限定义为在规定循环周次 N_0 不发生疲劳断裂的最大循环应力值,称为条件疲劳极限。一般规定,有色金属 N_0 取 10^8 次,腐蚀介质作用下的 N_0 取 10^6 次,如图 1-13 所示。

三、提高疲劳极限的途径

金属材料的疲劳极限受到很多因素的影响,如材料本质、材料的表面质量、工作条件、零件的形状、尺寸及表面残余压应力等。因此,提高金属材料疲劳极限有以下几种途径。

1. 零件设计时,形状、尺寸合理

尽量避免尖角、缺口和截面突变,这些地方容易引起应力集中从而导致疲劳裂纹;另外,伴随着尺寸的增加,材料的疲劳极限降低,强度越高,疲劳极限下降越明显。

2. 降低零件表面粗糙度,提高表面加工质量

因为疲劳源多数位于零件的表面,应尽量减少表面缺陷(氧化、脱碳、裂纹、夹杂等)和表面加工损伤(刀痕、磨痕、擦伤等)。

3. 采用各种表面强化处理

如渗碳、渗氮、表面淬火、喷丸和滚压等都可以有效地提高疲劳极限。这是因为表面强化处理不仅提高了表面疲劳极限,而且还在材料表面形成了一定深度的残余压应力;在工作时,这部分压应力可以抵消部分拉应力,使零件实际承受的拉应力降低,从而提高了疲劳极限。



巩固 练习

1. 拉伸试样的原标距长度为 50 mm,直径为 10 mm。试验后,将已断裂的试样对接起来测量,标距长度为 73 mm,颈缩区的最小直径为 5.1 mm,试求该材料的伸长率和断面收缩率的值。

2. 材料的弹性模量 E 的工程含义是什么? 它和零件的刚度有何关系?
3. 将 6 500 N 的力施加于直径为 10 mm、屈服强度为 520 MPa 的钢棒上, 试计算并说明钢棒是否会产生塑性变形。
4. 指出下列硬度值表示方法上的错误。
12~15HRC、800HBW、550N/mm² HBW、70~75HRC
5. 下列几种工件的硬度适宜用哪种硬度法测量?
淬硬的钢件、灰铸铁毛坯件、硬质合金刀片、渗氮处理后的钢件表面渗氮层的硬度。
6. 塑性指标在工程上有哪些实际意义?
7. 金属材料的冲击韧性与温度有什么关系? 在选材时如何注意?

02

第二章 金属的结构与结晶

知识要点

1. 晶体与非晶体的区别，金属常见的晶格类型。
2. 晶体具有各向异性的原因。
3. 纯金属的冷却曲线及过冷度，纯金属的结晶过程，金属晶体结构的缺陷。

工程材料的性能，特别是力学性能，主要由内部的成分及构造决定。

第一节 金属的晶体结构

一、晶体与非晶体

依照内部原子聚集状态的不同，工程材料分为晶体和非晶体两大类。晶体是指内部原子在空间呈规则排列的固体物。晶体材料的共同点是都有一定熔点、规则的几何外形，以及各方向上不同的力学性能(各向异性)。相对来说，非晶体则是指内部原子作杂乱堆积的固体物，不具备上述三个特点。在一般情况下，固态金属的内部原子在空间是作规则排列的，并具备上述三个特点，因此固态金属是晶体。金属材料外形不显规则几何外形是由别的原因造成的，这不排除它有能力形成规则的几何外形。

二、晶体结构的基本概念

所谓“晶体”是指其原子(更确切些说是离子)呈规则排列的物体。如图 2-1(a)所示为一个最简单的晶体结构示例。晶体之所以具有这种规则的原子排列，主要是由于各原子之间相互吸引力和排斥力平衡的结果。

为了便于分析各种晶体中的原子排列规律或形式，常以通过各原子中心的一些假想连线把它们在三维空间里的几何排列形式描绘出来，如图 2-1(b)所示，各连线的交点称为“节点”。在节点上的小圆圈(或黑点)表示各原子中心的位置，把这种表示晶体中原子排列形式的空间格子叫作“晶格”(或点阵)。显然，由于晶体中原子重复排列的规律性，可从其晶格中确定一个最基本的几何单元来表达其排列形式的特征，如图 2-1(c)所示。组成晶格的这种最基本的几何单元叫作“晶胞”。晶胞的各边尺寸 a 、 b 、 c 叫作“晶格常数”，其大小常以 $\text{\AA}$ (埃)为计量单位($1 \text{\AA} = 1 \times 10^{-8} \text{ cm}$)；晶胞各边之间的相互夹角常分别以 α 、 β 及 γ 表示。如图 2-1(c)所示的晶胞，其晶格常数 $a = b = c$ ，而 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，这种晶胞叫作简单立方晶胞。具有简单立方晶胞的晶格叫作简单立方晶格。简单立方晶格只存在于非金属晶体中，在金属中则看不到。

各种晶体物质，或其晶格形式不同，或其晶格常数不同，主要与其原子构造、原子间的结合力(或称“结合键”)的性质有关。因晶格形式及晶格常数的不同，所以不同晶体便表现出不同的物理、化学和机械性能。

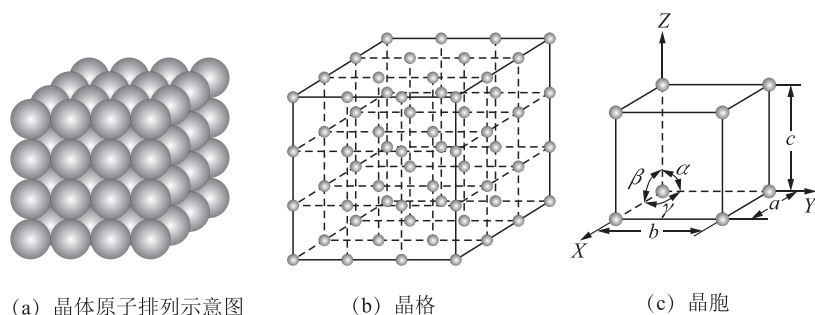


图 2-1 简单立方晶体

三、三种常见的金属晶格

在已知的 80 多种金属元素中,除少数具有复杂的晶体结构外,大多数都具有简单的晶体结构。这是由于金属键没有方向性和饱和性,结合对象的选择性不强,所以金属原子结合在一起总是趋于结合得更紧凑和更密集。具有这种密集的排列方式主要是面心立方和密排六方晶格,其次为体心立方晶格。

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞(图 2-2)是由 8 个原子构成的立方体,并在其立方体的体积中心中还有一个原子,因其晶格常数 $a=b=c$,故通常只用一个常数 a 即可表示。由图 2-2 可知,这种晶胞在其立方体对角线方向上的原子是彼此紧密相接触排列着的,故由该对角线长度 $\sqrt{3}a$ 上所分布的原子数目(共 2 个),可计算出其原子半径的尺寸为 $r=\sqrt{3}a/4$ 。在这种晶胞中,因每个顶点上的原子同时被周围 8 个晶胞所共有,故实际上在每个体心立方晶胞中仅包含有 $1/8 \times 8 + 1 = 2$ 个原子。属于这种晶格的金属有铁(α -Fe)、铬(Cr)、钼(Mo)、钨(W)、钒(V)等。

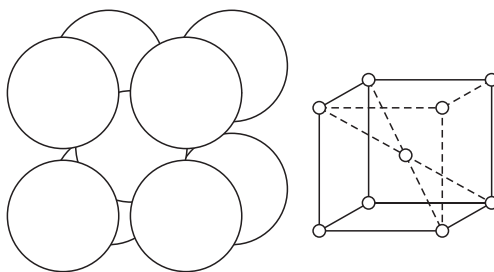


图 2-2 体心立方晶格的晶胞

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞(图 2-3)也是由 8 个原子构成的立方体,但在立方体的每一面的中心还各有一个原子。显然,在这种晶胞中,是在每个面的对角线上各原子彼此相互接触,因而其原子半径的尺寸应为 $\sqrt{2}a/4$ 。又因每一面心位置上的原子同时被两个晶胞所共有,故每个面心立方晶格中包含有 $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ 个原子。属于这种晶格的金属有铝(Al)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)等。

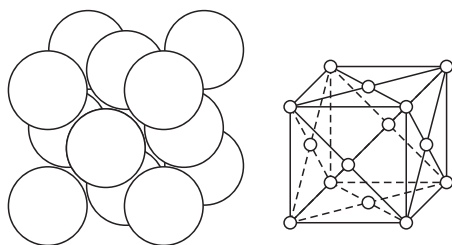


图 2-3 面心立方晶格的晶胞

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞(图 2-4)与简单六方晶胞不同,它不仅在由 12 个原子所构成的简单六方体的上下两个六方面的中心各有 1 个原子,而且在两个六方面之间还有 3 个原子。密排六方晶格的晶格常数比值 $c/a = 1.633$ 。属于这种晶格的金属有铍(Bo)、镁(Mg)、锌(Zn)、镉(Cd)等。

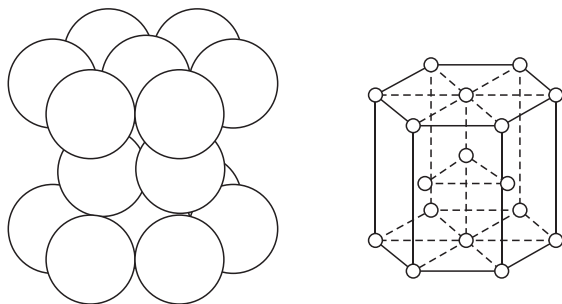


图 2-4 密排六方晶格的晶胞

除以上三种晶格以外,少数金属还具有其他类型的晶格,但一般很少遇到。

第二节 金属的实际结构和晶体缺陷

一、多晶体结构

如果一块晶体内部的晶格位向完全一致时,称这块晶体为单晶体,以上的讨论指的都是这种单晶体中的情况。但在工业金属材料中,除非专门制作,一般来说,即使是在一块很小的金属中也包含着许许多多的小晶体,在每个小晶体的内部,晶格位向都是均匀一致的,而各个小晶体之间,彼此的位向都不相同。如图 2-5 所示,由于其中每个小晶体的外形多为不规则的颗粒状,故通常都把它们叫作晶粒。晶粒与晶粒之间的界面叫作晶粒间界或简称“晶界”。显然,为了适应两晶粒之间不同晶格位向的过渡,该处的原子排列总是不规则的。这种实际上由多晶

粒组成的晶体结构叫作多晶体。

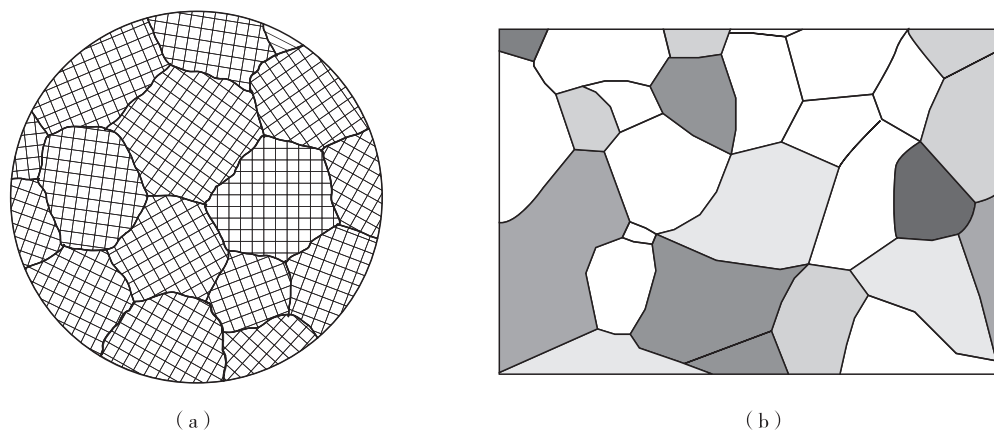


图 2-5 金属多晶体结构的示意图

在钢铁材料中，晶粒的尺寸，一般在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ mm，故必须在显微镜下才能看见。在显微镜下所观察到的金属中各种晶粒的大小、形态和分布叫作显微组织，如图 2-5(b) 所示即为纯铁的显微组织。有色金属，如铜、铝、锡、铅、锌等的晶粒度一般都比钢铁的大些，有时甚至不用显微镜就能直接看见，如镀锌钢板表面的锌晶粒，其尺寸通常达数毫米至十几毫米。

在每个晶粒的内部，实际上也不是那么理想，即每个晶粒内部的晶格位向在不同区域上还有微小的差别，这些在晶格位向上彼此有微小差别的晶内小区域叫作亚晶或嵌镶块，如图 2-6 所示。因其尺寸较小，故常需在高倍显微镜或电子显微镜下才能观察得到。

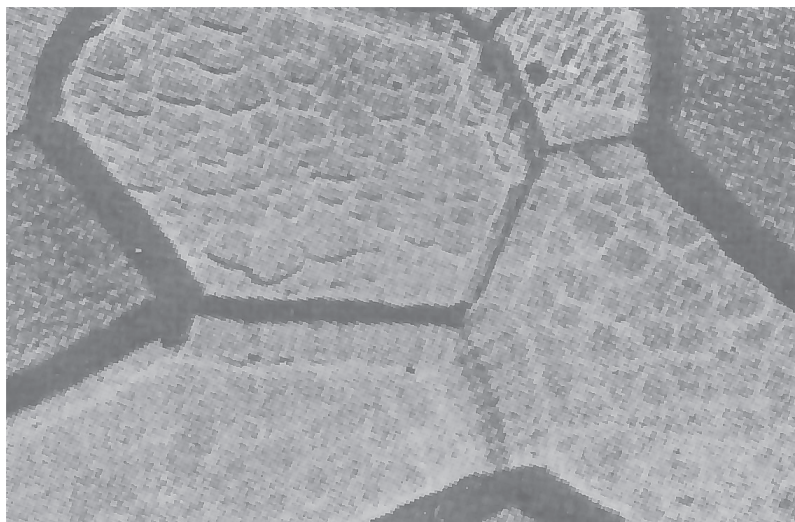


图 2-6 金属中的亚晶组织

二、晶格缺陷

实际上用的金属，其内部结构的原子排列并非完全完整无缺的，而是在每个晶体的某些部位，由于铸造、变形等一系列原因使原子排列受到破坏，从而存在着各种各样的缺陷。实际的金属晶体的结构如图 2-7 所示，存在空位、间隙原子、位错、晶界等缺陷。

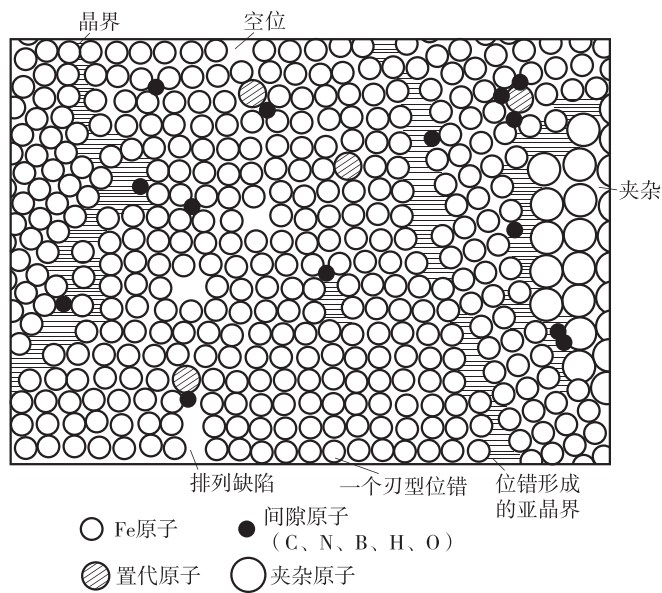


图 2-7 实际金属晶体的结构

1. 点缺陷

最常见的点缺陷是晶格空位和间隙原子，如图 2-8 所示。当晶格中某些原子由于某种原因（如热振动的偶然偏差等）脱离其晶格节点而转移到晶格间隙时，便会造成这些点缺陷。由于这些点缺陷的存在，会使其周围的晶格发生畸变。

2. 线缺陷

线缺陷即晶格中的位错线，或简称“位错”。位错可视为晶格中一部分晶体相对于另一部分晶体的局部滑移而造成的结果，晶体滑移部分与未滑移部分的交界线即为位错线。由于晶体中局部滑移的方式不同，可形成不同类型的位错。如图 2-9 所示为因该晶体的右上部分相对于右下部分的局部滑移所造成的最简单的一种位错，由于右上部分的局部滑移，结果在晶格的上半部中挤出了一层多余的原子面，好像在晶格中额外插入了半层原子面一样，该多余半原子面的边缘便为位错线，这种位错线叫作刃型位错。沿位错线的周围，晶格发生了畸变。

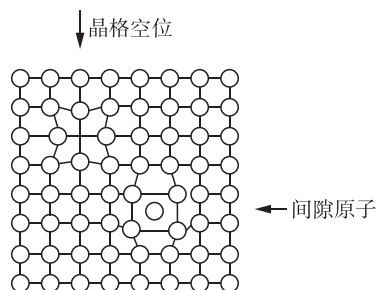


图 2-8 晶格空位和间隙原子的示意图

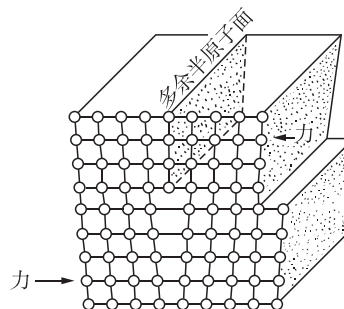


图 2-9 刃型位错线的晶格结构示意图

金属晶体中的位错线往往大量存在，相互连接呈如图 2-10 所示的网状分布。位错线的密度通常在 $10^4 \sim 10^{12} \text{ cm/cm}^3$ 。

3. 面缺陷

面缺陷即晶界和亚晶界(图 2-11)。这两种晶格缺陷都是因晶体中不同区域之间的晶格位向过渡所造成的；但在小角度位向差的亚晶界情况下，如图 2-11(b)所示，则可把它看成是一种位错线的堆积，或称为“位错壁”。

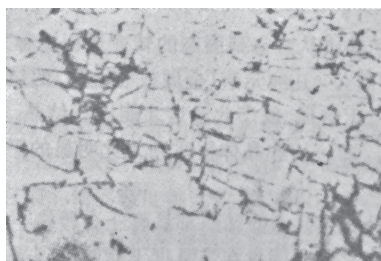


图 2-10 在投射电镜下观察到的铁中的位错网

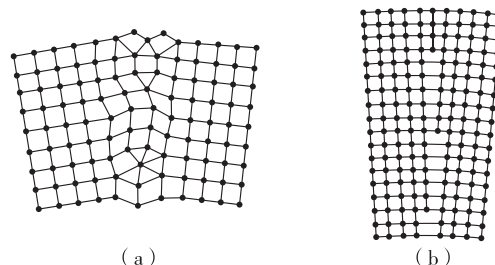


图 2-11 面缺陷(晶界和亚晶界)

通过上述讨论可见，凡晶格缺陷处及其附近，均产生明显的晶格畸变，因而会引起晶格能量的提高，并使金属的物理、化学和机械性能发生显著的变化。例如，晶界和亚晶界愈多，位错密度愈大，金属的强度便愈高。而金属中的多晶结构和晶格缺陷是怎样形成的？为此就必须从金属凝固时的结晶过程谈起。

第三节 纯金属的结晶

除粉末冶金产品外，金属制品一般都要经过熔化、浇铸的工序。前面讨论的晶体内部结构都是关于固态的。工业上所用的机件，相当一部分是直接利用铸件，所以铸件的生产过程会直接影响它的质量。金属结晶时形成的铸态组织也影响锻、轧件的各种性能。此外，使金属材料组织发生变化的加工过程仍与其铸造组织有联系。因此，了解金属从液态结晶为固体的规律是十分必要的。

一、金属结晶的基本规律

1. 过冷现象

结晶就是原子由不规则排列状态(液态)过渡到规则排列状态(固态)的过程。

对每一种金属都存在一个平衡温度，用 T_0 表示。当液态金属冷却到低于这一温度时，即开始结晶。在平衡温度 T_0 下，液态金属与其晶体处于平衡状态，这时液体中的原子结晶为晶体的速度，与晶体上的原子溶入液体中的速度相等。从宏观上看，这时既不结晶也不熔化，晶体与液体处于平衡状态，只有冷却到低于 T_0 温度才能有效地进行结晶。金属结晶时的这种现象称为过冷(图 2-12)，二者温度之差称为过冷度，以 ΔT 表示，即 $\Delta T = T_0 - T_n$ 。式中， T_n 为实际结晶温度。过冷度的大小与冷却速度有关，冷却速度越快，过冷度越大。

结晶温度通常用热分析法测量，即先将金属熔化，并使温度均匀；然后以极慢的速度冷却，记录下如图 2-12 所示的温度随时间变化的曲线，称为冷却曲线。当金属开始结晶时，实际结晶温度与平衡温度趋于一致，即 T_0 与 T_n 几乎相等。当冷却加快时，实际结晶温度下降，过冷度增大。可见，过冷是金属结晶的必要条件。

为什么金属液体必须过冷才能结晶呢？这是由热力学条件决定的。液态结晶，以及在以后讲的热处理的相变过程，是从一种状态转变为另一种状态，可用自由能 E 这个状态函数来表示。自由能的物理意义是指在物质转变过程中用来对外界做功的那部分能量。

在等温、等压条件下，一切自发转变过程都是朝着自由能减小的方向进行的（即新态与旧态自由能的差值 $\Delta E < 0$ ），就是说，在这种转变过程中不需外界对其做功；相反，如果转变的结果是自由能增加（ $\Delta E > 0$ ），则不能自发进行。

液态金属转变为固态金属的过程伴随着自由能的减小（图 2-13），这是转变过程的推动力。

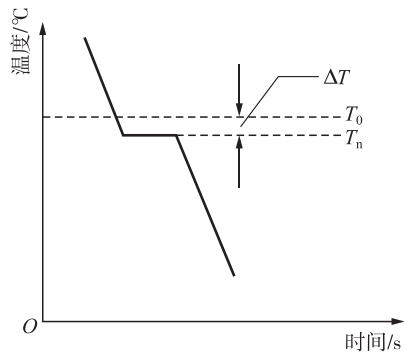


图 2-12 纯金属的冷却曲线

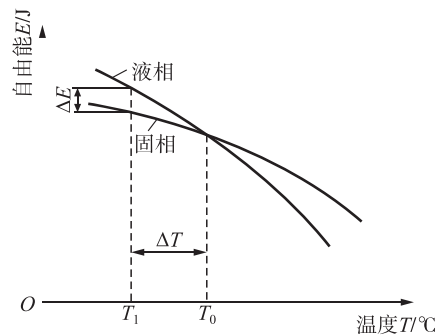


图 2-13 液体与晶体在不同温度下自由能的变化

在 T_0 温度下，液态和固态处于平衡状态，没有自由能变化，即没有推动力，因而不能进行结晶，只有在过冷的条件下才能满足这一热力学条件，因此结晶必须在过冷的条件下进行。过冷度 ΔT 越大，液态金属和固态金属的自由能差就越大，结晶的推动力越大，即晶体的生长速度越快。

过冷是结晶的必要条件，但不是充分条件。要进行结晶，还要满足动力学条件，如原子移动和扩散等。

2. 结晶的一般过程

实验证明，结晶过程总是从形成一些极小的晶体开始，这些细小晶体被称为晶核，如图 2-14(a)~(f) 所示。此后，液体中的原子不断向晶核聚集，使晶核长大；同时，液体中会不断有新的晶核形成并长大，直到每个晶粒长大到相互接触、液体消失为止。结晶的这种形核与长大过程是一切物质（包括非金属物质）进行结晶的普遍规律。

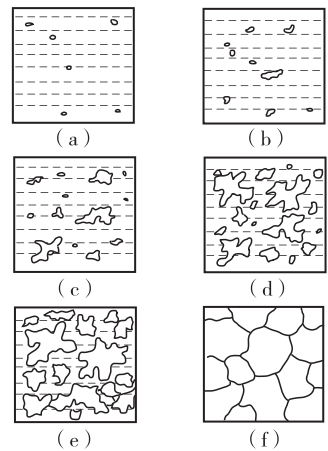


图 2-14 金属结晶过程示意图

二、晶核的形成与长大

金属最基本的结晶规律与非金属的一样，其结晶都是一个晶核的形成与长大的过程。液体从高温冷却到结晶温度的过程中，其结构就已经开始向晶体状态发生逐渐的过渡，即随时都在不断地产生许多类似晶体中原子排列的小集团，不仅尺寸较小、大小不一，而且极不稳定、时聚时散。这种不稳定的原子排列小集团便是随后产生晶核的来源，称它为晶胚。当液体被过冷至结晶温度以下时，这些因具有较大尺寸而比较稳定的晶胚便有了条件进一步成长，这些真正能够得到成长的晶胚便叫作晶核。

在晶核开始成长的初期，因其内部原子规则排列的特点，其外形也大多是比较规则的。但随着晶核的成长、晶体棱角的形成，棱角处的散热条件优于其他部位，如图 2-15 所示，因而得到优先成长，如树枝一样先长出枝干，再长出分枝，最后把晶间填满。这种成长方式叫作枝晶成长。冷却速度愈大，过冷度愈大，枝晶成长的特点便愈明显。

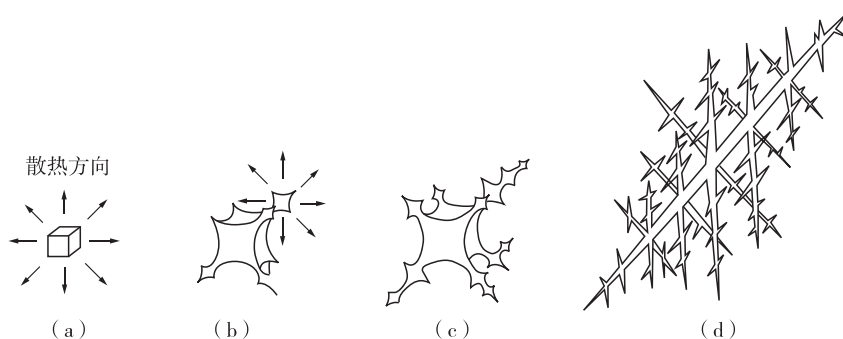


图 2-15 晶体成长的示意图

三、金属凝固后晶粒大小及控制

晶粒大小对材料性能影响很大，在机械制造业中，怎样获得细小的晶粒是普遍关注的问题。这里限于讨论如何从铸造角度获得细小晶粒。

从上面讨论结晶过程及晶核生成长大的分析看出，晶粒大小直接取决于结晶过程中的晶核数目以及长大的速度。单位时间、单位体积内生成晶核数量的多少叫作形核率，用 N 表示。长大速度用 v 表示。如果 $N/v > 1$ ，则意味着形核率超过长大速度居主导地位，便可能得到细小晶粒；如果 $N/v < 1$ ，则意味着形核率低于长大速度，此时长大速度居主导地位，可能得到粗大晶粒。研究发现，过冷度在一定范围内可以使 $N/v > 1$ 成立，从而获得细小晶粒组织，如图 2-16 所示。

在生产中，一般从三种途径去获得细小的铸态晶粒组织。

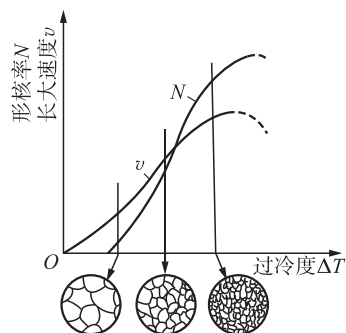


图 2-16 形核率 N 与长大速度 v 和过冷度 ΔT 的关系

1. 加大冷却速度以增加过冷度

常用办法是采用散热条件更好的金属铸模代替砂型铸模。但这种办法加大冷却速度的能力有限，一是因为金属模在空气中的传热能力有限，二是因为液体中部的散热问题尚未解决。故此办法只适合零件截面尺寸小的场合或生产率不高的地方。连续铸钢采取了改进的方法。这就是先将钢液注入类似铸模的结晶器中，而结晶器是置于循环水中的，这样靠近结晶器的钢液迅速凝固，形成一层坯壳，紧接着将坯壳拉出，进入二次冷却区直接喷水，使坯壳内的钢液也迅速凝固。这种办法可获得较大冷却速度，从而提高过冷度，组织因此更细小，生产率也因此大大提高。

值得注意的是，现代的科学已经可以使液体金属以每秒 100 万摄氏度的冷却速度降温，从而获得极大过冷度。但在极大过冷条件下，得到的是非晶体状态金属，即金属玻璃。

2. 进行变质处理

在液态金属结晶前，人为地将一定重量的其他金属或非金属粉块加入，增加非自发形核的数量从而细化晶粒，这种方法叫作变质处理，又称“孕育处理”。在铸铁中加入硅、钙，在铸造铝硅合金中加入钠或钠盐，都属孕育处理，都是为了达到细化晶粒的目的。

3. 附加振动

结晶过程中采用机械的方法或物理的方法（如电磁、超声波等）使液体中的枝晶受到振动，使枝晶断为许多小晶核，以增加形核率，这种方法称为附加振动。



巩固 练习

1. 解释下列名词：
结晶、晶格、晶胞、晶体、晶粒、过冷度。
2. 区别体心立方晶格和面心立方晶格、单晶体与多晶体、晶面与晶向、晶界与亚晶界的关系。
3. 画出体心立方晶体和面心立方晶体中原子最密的晶面和晶向。
4. 试确定在图 2-17 中箭头方向的晶向指数和影线面的晶面指数。

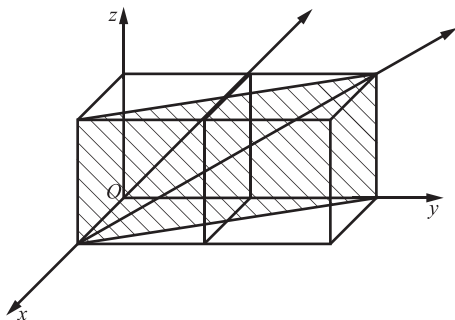


图 2-17 题 4 图

5. 实际的晶体构造上存在哪些缺陷？它们对材料的物理、化学性能有什么影响？
6. 什么是晶粒？从结晶过程以及长大方式说明晶粒形成的原因。
7. 金属结晶包括哪两个过程？结晶的必要条件是什么？
8. 用结晶过程的基本观点分析铸锭等轴晶和柱状晶形成的条件；比较柱状晶和等轴晶的质量，指出它们应用的特点。
9. 为何单晶体具有各向异性，而多晶体在一般情况下不显示出各向异性？
10. 如果其他条件相同，试比较在下列铸造条件下：
 - (1) 高温浇注与低温浇注；
 - (2) 金属模浇注与砂模浇注；
 - (3) 浇注时采用振动与不采用振动；
 - (4) 铸件晶粒的大小。

03

第三章 铁碳合金及碳钢

知识要点

1. 铁碳合金相图的结构和分析方法，铁碳合金平衡结晶过程。
2. 室温下的平衡组织，铁碳合金成分、组织、性能之间的关系。
3. 碳钢的种类、化学成分特点、牌号、性能和应用。

钢铁材料在现代工业中成为应用得最广泛的重要的金属材料，它是以铁和碳作为基本元素的合金。普通碳钢和铸铁均属铁碳合金范畴，合金钢和合金铸铁实际上是有意加入合金元素的铁碳合金。为了熟悉钢铁材料的组织和性能，以便在生产中合理使用，必须先研究铁碳合金的相图。

铁碳合金相图是人类经过长期生产实践和大量科学实验总结出来的，是研究在平衡条件下（极其缓慢冷却）铁碳合金的成分、温度、组织和性能之间的关系及其变化规律，因此成为研究钢铁材料、制定热加工工艺设计的重要理论依据和工具。

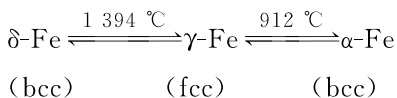
铁和碳可以形成 Fe_3C 、 Fe_2C 、 FeC 等一系列稳定的化合物，因此整个铁碳合金相图可以看成是由 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_3\text{C-Fe}_2\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{C-FeC}$ 等各部分相图所组成的。实际应用的铁碳合金含碳量不超过 5%，因为含碳量超过 5% 的铁碳合金性能很脆，没有实用价值，所以铁碳合金相图中只研究 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 相图部分。

第一节 铁碳合金的基本相

一、纯铁

工业纯铁一般含有 0.1%~0.2% 的杂质。工业纯铁的力学性能因其纯度和晶粒大小的不同而有差别。其力学性能大致为 $\sigma_b=180\sim230\text{ MPa}$ ； $\sigma_{0.2}=100\sim170\text{ MPa}$ ； $\delta=30\%\sim50\%$ ； $\psi=70\%\sim80\%$ ； $A_k=128\sim160\text{ J}$ ；硬度为 50~80HBW。

纯铁的熔点为 1 538 °C。纯铁的冷却曲线如图 3-1 所示。纯铁从液态结晶为固态后，继续冷却到 1 394 °C 和 912 °C 时，先后发生两次晶格形式的转变。金属在固态下由于温度的改变而发生晶格类型转变的现象，称为同素异构转变。同素异构转变有热效应产生，故在冷却曲线上，可看到在 1 394 °C 和 912 °C 处出现平台。纯铁的同素异构转变如下：



在 912 °C 以下，铁具有体心立方晶格(bcc)，称为 $\alpha\text{-Fe}$ ；在 912~1 394 °C 具有面心立方晶格(fcc)，称为 $\gamma\text{-Fe}$ ；在 1 394~1 538 °C 又具有体心立方晶格，称为 $\delta\text{-Fe}$ 。

纯铁在 770 °C 时发生磁性转变。在 770 °C 以下时， $\alpha\text{-Fe}$ 呈铁磁性；在 770 °C 以上时， $\alpha\text{-Fe}$

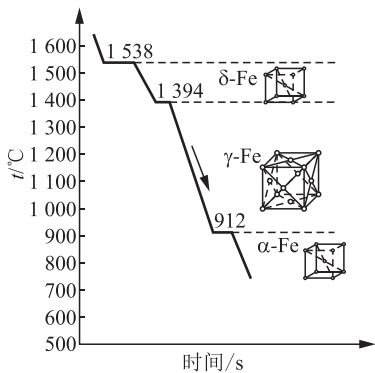


图 3-1 纯铁的冷却曲线及晶体结构变化

的磁性消失。770 °C 称为居里点，用 A_2 表示。

工业纯铁的显微组织如图 3-2 所示。工业纯铁虽然塑性好，但强度低，所以很少用它制造机械零件。在工业上应用得最广的是铁碳合金。

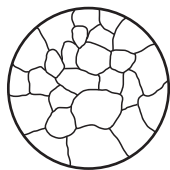


图 3-2 工业纯铁的显微组织示意图

二、铁碳合金的基本组织

在液态下，铁和碳可以完全互溶，成为均匀的液体。在固态下，碳可有限地溶入铁的同素异构体中，形成三种间隙式固溶体—— δ 铁素体、奥氏体和 α 铁素体。当含碳量超过其相应温度固态下的溶解度时，则会析出复杂晶体结构的间隙化合物——渗碳体。现将它们的结构及主要性能介绍如下。

1. 液相

铁碳合金在熔化温度以上形成的铁碳均匀熔体叫液相，常用 L 来表示。

2. 铁素体

碳溶于体心立方晶格的 α -Fe 中形成的间隙固溶体称为铁素体，其常用 F 或 α 来表示。铁素体的晶体结构和显微组织如图 3-3 所示。

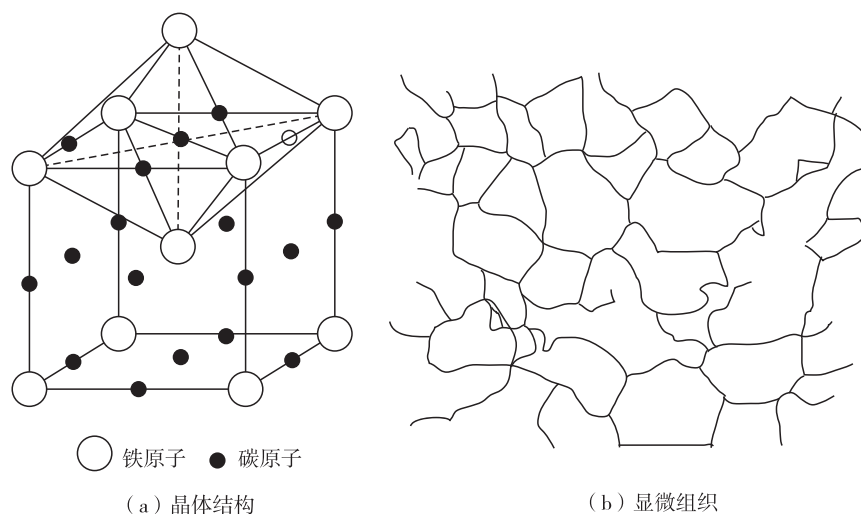


图 3-3 铁素体的晶体结构和显微组织

铁的溶碳能力决定于晶格中原子间隙的形状和大小。只有当晶格中原子间隙的半径大于或接近碳原子半径时，碳原子才能溶到晶格的间隙中去。 α -Fe 中可以溶解微量的碳。在 727 °C 时，碳在 α -Fe 中溶解度最大，也只有 0.021 8%；在 600 °C 时，仅为 0.005 7%；在室温下，几乎为零(0.000 8%)，这是因为在 α -Fe 中存在着晶体缺陷，晶体结构中的位错、空位和晶界附

近都是碳原子可能存在的地方，随着温度的升高，晶体缺陷的增多，溶碳量也逐渐增加。

由于铁素体的溶碳量很小，可把其看成为纯铁，其力学性能与纯铁极为相近，强度和硬度低，而塑性和韧性好。铁素体在 770 °C 以下时，具有铁磁性；在 770 °C 以上时，铁磁性消失。

3. 奥氏体

碳溶于面心立方晶格的 γ -Fe 中所形成的间隙固溶体称为奥氏体，用“A”表示。其晶体结构和显微组织如图 3-4 所示。

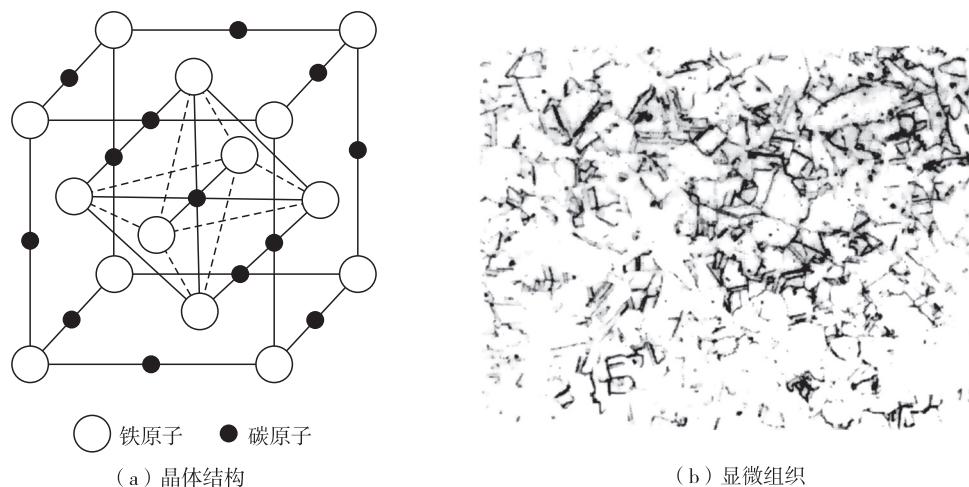


图 3-4 奥氏体的晶体结构和显微组织

由于面心立方晶格的最大间隙半径略小于碳原子半径，所以它的溶碳能力比 α -Fe 大。碳在 γ -Fe 中只能是有限的溶解，在 1 148 °C 时，溶解度最大，为 2.11%。随着温度的下降，溶解度也逐渐下降，在 727 °C 时，溶碳量为 0.77%。在铁碳合金中，奥氏体是在 727 °C 以上存在的高温相。

在高温下，奥氏体固溶体相比于铁素体有较多的碳，故其力学性能的特点是具有有一定的强度和硬度、良好的韧性、低的塑性变形抗力，易于锻造变形。

4. 渗碳体

碳与铁以一定的比例形成的具有复杂晶格的间隙化合物 Fe_3C 称为渗碳体，用 Fe_3C 表示。渗碳体的含碳量为 6.69%，是一个高碳相，铁与碳原子数之比为 3:1，具有复杂的晶体结构。由于碳在 α -Fe 中的溶解度小，所以在常温下，碳在铁碳合金中主要是以渗碳体形式存在的。由于铁碳合金含碳量和工艺条件的不同，渗碳体的组织形态不同，常呈片状、球状、网状或长条状。

渗碳体是碳钢中的主要强化相，它的数量、形状、大小及分布对钢的性能有很大的影响。

渗碳体的力学性能特点是硬度高、脆性大，而塑性、冲击韧度几乎等于零。

在铁碳合金相图中， Fe_3C 是基本相，它可以和其他相共同组成多种类型组织。 Fe_3C 是亚稳定化合物，在一定条件下可以分解而形成石墨状态的自由碳。



5. 珠光体

铁素体和渗碳体两相组成的机械混合物称为珠光体，用符号“P”表示。在金相显微镜下，

当放大倍数较高时，能清楚地看到珠光体中渗碳体呈片状分布于铁素体基体之上。在放大倍数较低时，珠光体呈现层片状特征。

珠光体的含碳量为 0.77%，其性能介于铁素体和渗碳体之间，具有较高的强度和足够的韧性， $\sigma_b=750\text{ MPa}$ ， $\delta=20\%\sim 25\%$ 。

第二节 铁碳合金相图

铁碳合金相图是长期生产实践和科学试验的结晶，是研究铁碳合金的基础。因试验条件和方法的不同以及杂质的影响，常使相图中各主要点的温度和含碳量略有不同。分析 Fe-Fe₃C 相图时，除了理解其组元和组成相的结构、基本性质外，还要熟悉相图中各个重要的点、线、相图及其物理意义。

一、相图分析

如图 3-5 所示为简化了的 Fe-Fe₃C 合金相图，它略去了 1 394 °C 以上的高温组织变化。

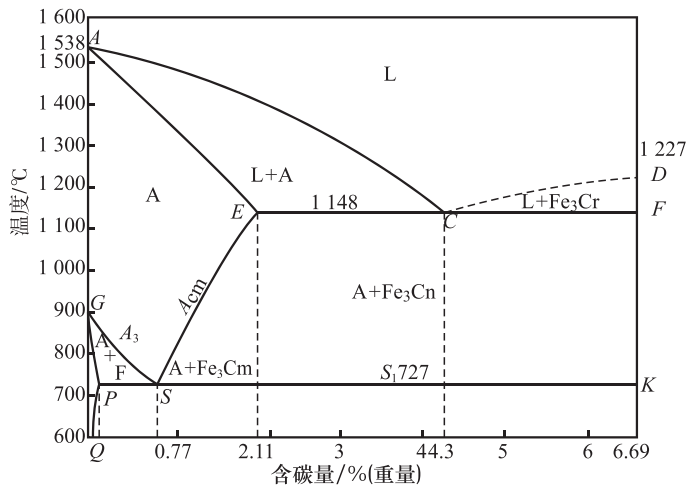


图 3-5 简化了的 Fe-Fe₃C 合金相图

在图 3-5 中的各条线是由一系列不同成分的铁碳合金状态变化的温度(即临界点)连接而成的。许多线条所分割的部分代表状态相同的区域。例如，ACD 线以上为液体，就表示各种含碳量的铁碳合金，只要加热到这条线以上就呈完全熔化状态。AESG 区域为奥氏体区，表示各种含碳量的钢只要加热到这个区域都要变成奥氏体。

下面就 Fe-Fe₃C 相图中的主要特性点和特性线加以分析。

1. 特性点

在 Fe-Fe₃C 相图中各特性点的符号、温度、含碳量及物理意义列于表 3-1 中。

表 3-1 简化的 Fe-Fe₃C 相图各主要点的物理意义

点的符号	温度/℃	含碳量/%	物理意义
A	1 538	0	纯铁熔点
C	1 148	4. 30	共晶点, $L_c \rightleftharpoons A_E + Fe_3C$
D	1 227	6. 69	渗碳体熔点(计算值)
E	1 148	2. 11	碳在 γ -Fe 中的最大溶解度
F	1 148	6. 69	共晶渗透碳体的成分点
G	912	0	α -Fe $\rightleftharpoons$ γ -Fe 同素异构转变点
K	727	6. 69	共析渗碳体的成分点
P	727	0. 02	碳在 α -Fe 中的最大溶解度
S	727	0. 77	共析点, $A_s \rightleftharpoons F_p + Fe_3C$
Q	室温	0. 000 8	碳在 α -Fe 中的溶解度

注：因试验条件和方法的不同以及杂质的影响，常使相图中各主要点的温度和含碳量数据略有出入。

2. 特性线

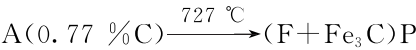
(1)ACD 线即液相线，在此线以上是液相区。液相用符号“L”表示。合金冷却到此线开始结晶。

(2)AE CF 线即固相线，所有合金在此线以下均是固体状态。

(3)GS 线(称为 A₃ 线)表示含碳量低于 0. 77% 的钢加热时，铁素体转变为奥氏体的最终温度；反之，则表示缓慢冷却时，由奥氏体中开始析出铁素体的温度。

(4)ES 线(称为 A_{cm} 线)表示碳在奥氏体中溶解度曲线。在 1 148 ℃ 时，碳在奥氏体的溶解度最大(2. 11%)。随温度的下降，含碳量逐渐减少，温度下降到 727 ℃ 时，降到 0. 77%。含碳量大于 0. 77% 的钢冷却到 ES 线所代表的温度时，开始把溶解不了的碳析出，形成渗碳体。它常常在奥氏体的晶界上呈网状分布，称为网状渗碳体。

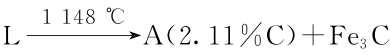
GS 线与 ES 线的交点 S 称为共析点。它表示含碳量为 0. 77% 的钢冷却至 727 ℃ 时，奥氏体同时析出铁素体与渗碳体的机械混合物。这种转变叫作共析转变，因抛光试样浸蚀后发珠宝光，故称为珠光体，用符号“P”表示，即



通常把含碳量为 0. 77 % 的钢称为共析钢。

(5)水平线 PSK (称为 A₁ 线)相当于 727 ℃，它表示所有碳钢在缓慢加热时开始转变为奥氏体的温度，或者缓慢冷却时，奥氏体完全转变为常温组织的温度。因为在这条线上发生共析转变，故又称为“共析线”。

(6)水平线 ECF 相当于 $1\,148\,^{\circ}\text{C}$ ，称为共晶线。在此线上发生共晶反应，即



也就是从含碳 4.3% 的液体中同时结晶出含碳 2.11% 的奥氏体与含碳 6.69% 的渗碳体，共晶反应的产物叫莱氏体。

二、典型铁碳合金结晶过程

根据铁碳合金中的含碳量，可把铁碳合金分为钢和铸铁。含碳量小于 2.11% 的铁碳合金称为钢；含碳量大于 2.11% 的铁碳合金称为铸铁。根据组织特点又把钢分成三类：含碳量为 0.77% 的钢，称为共析钢；含碳量小于 0.77% 的钢，称为亚共析钢；含碳量大于 0.77% 的钢，称为过共析钢。

铸铁也可分为三类：含碳量等于 4.3% 的铸铁，称为共晶铸铁；含碳量小于 4.3% 的铸铁，称为亚共晶铸铁；含碳量大于 4.3% 的铸铁，称为过共晶铸铁。铸铁实际含碳量最高不超过 5% ，否则性能很脆，没有实用价值。

1. 共析钢

共析钢的含碳为 0.77% ，如图 3-6 所示的合金①。当温度高于点“1”时，合金①处于液态，当冷却到和液相线 AC 相交时(点 1)，液体 L 开始结晶，析出奥氏体(A)，此时奥氏体的相对量少，奥氏体中含碳量低(具体数值可用杠杆定律求出)。随着温度下降，液体中不断析出奥氏体晶体，奥氏体的成分不断沿 AE 线变化，而液相的成分不断沿 AC 线变化。当温度下降到点“2”时，奥氏体的液体结晶，过程结束，其组织全部由均匀的奥氏体晶粒构成。继续冷却到点“3”即 S 点，发生共析反应： $A \xrightarrow{727\,^{\circ}\text{C}} (F + \text{Fe}_3\text{C})P$ ，得到珠光体。温度继续下降到室温仍为珠光体。合金①在冷却过程中的组织变化如图 3-7 所示。含 $0.77\%\text{C}$ 钢的金相显微组织如图 3-8 所示。

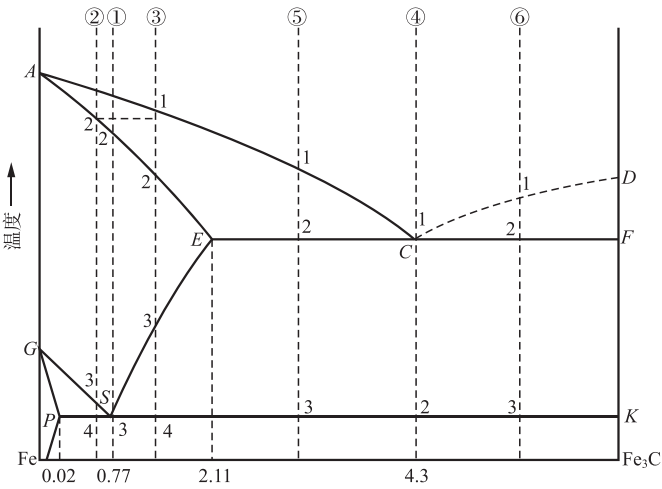


图 3-6 6 种典型的铁碳合金冷却结晶过程分析