

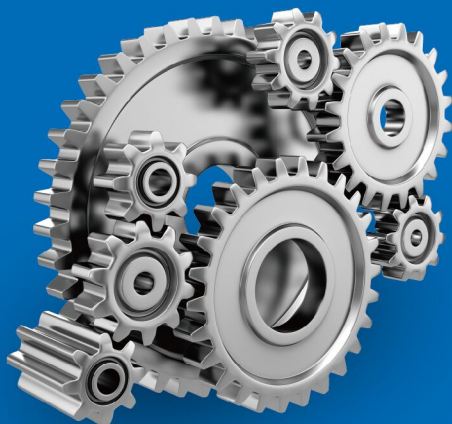
巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑 刘子嘉
责任编辑 胡思佳
封面设计 黄燕美

金属材料 与热处理

J INSHU CAILIAO
YU RECHULI



免费提供

★★★ 精品教学资料包

服务热线: 400-615-1233
www.huatengzy.com



扫描二维码
关注上海交通大学出版社
官方微信

ISBN 978-7-313-25938-7



9 787313 259387 >

定价: 32.00元

中等职业学校机械系列教材
中等职业教育新形态一体化教材

中等职业学校机械系列教材
中等职业教育新形态一体化教材

金属材料与热处理

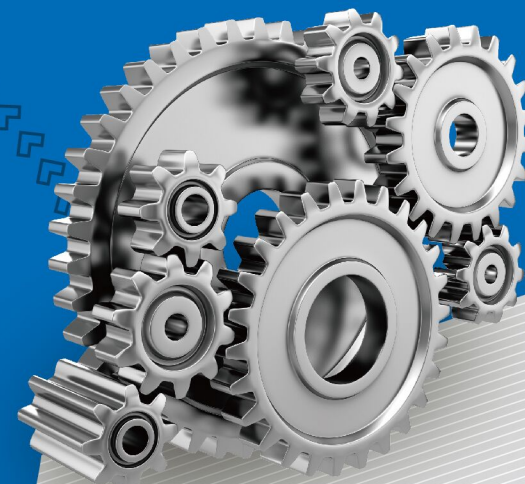
主编 童勋



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

金属材料 与热处理

主编 童勋



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

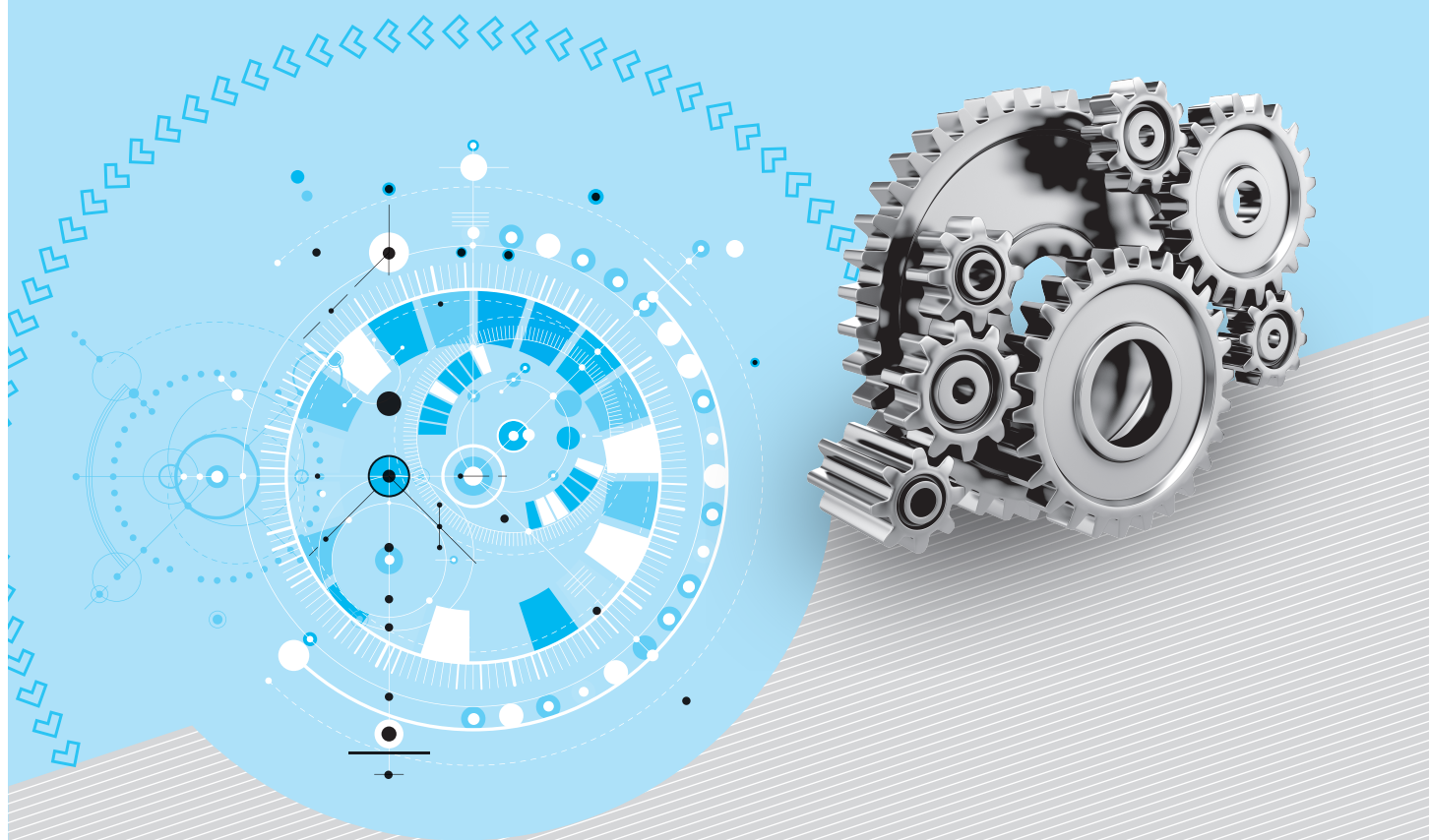


中等职业学校机械系列教材
中等职业教育新形态一体化教材

金属材料 与热处理

主 编 童 勋

副主编 韩健美 赵 钦



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书主要介绍了金属材料与热处理的相关知识,包括常用金属材料的分类、组织结构、力学性能、热处理以及应用等。全书共分7章,主要内容包括金属的结构与结晶、金属材料的性能、铁碳合金、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及硬质合金。

本书可作为中等职业学校装备制造大类各专业教材,也可供相关行业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料与热处理 / 童勋主编. — 上海:上海交通
大学出版社,2022.3(2023.1重印)

ISBN 978-7-313-25938-7

I. ①金… II. ①童… III. ①金属材料—中等专业学
校—教材 ②热处理—中等专业学校—教材 IV. ①TG14
②TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 030853 号

金属材料与热处理

JINSHU CAILIAO YU RECHULI

主 编:童 勋

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:三河市骏杰印刷有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

字 数:171 千字

版 次:2022 年 3 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-25938-7

定 价:32.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:9.75

印 次:2023 年 1 月第 2 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如您发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0316-3662258



Preface

为贯彻执行《“十四五”职业教育规划教材建设实施方案》，落实习近平新时代中国特色社会主义思想进课程教材，积极培育和践行社会主义核心价值观，推进教材、教法改革服务于人才培养，及时将产业发展的新技术、新工艺、新规范纳入教材内容，编者根据中等职业学校装备制造大类各专业人才培养方案的要求，结合长期教学改革实践，特编写了本书。

本书突显职业教育特色，从岗位培养入手，强调实用性；采用现行国家标准，注重新知识、新技术、新工艺、新方法的介绍，反映了技术发展趋势，具有一定的先进性；结构清晰，语言简洁，难度适中，由浅入深；采用大量图片和表格等形式展示知识点，能充分激发学生的学习兴趣。

本书编写思路如下：以金属的晶体结构与材料性能为切入点，结合钢的组织原理及热处理工艺，分别对合金钢、铸铁、有色金属及硬质合金等材料做系统介绍，强调其热处理及应用。纵观全书，知识结构的系统性强，且与工程实际结合紧密，有利于培养学生分析问题和解决实际问题的能力。

本书共7章，内容包括金属的结构与结晶、金属材料的性能、铁碳合金、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及硬质合金。每章设有“知识目标”“技能目标”“小提示”和“复习思考题”等版块，使学生在学中能做到有的放矢，把理论知识和实际应用更好地结合起来。



本书由江西应用工程职业学院童勋任主编,永城职业学院韩健美和邓州市职业技术学校赵钦任副主编。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者



目录 Contents

第 1 章	金属的结构与结晶	1
	1.1 金属的晶体结构	2
	1.2 纯金属的结晶	7
	1.3 金属的同素异晶转变	9
	复习思考题	11
第 2 章	金属材料的性能	12
	2.1 金属的使用性能	13
	2.2 金属的工艺性能	25
	复习思考题	26
第 3 章	铁碳合金	28
	3.1 合金中的相	29
	3.2 铁碳合金的基本组织	32
	3.3 铁碳合金相图	35
	3.4 碳素钢	44
	复习思考题	50
第 4 章	钢的热处理	52
	4.1 钢的热处理概述	53
	4.2 钢在加热时的组织转变	55
	4.3 钢在冷却时的组织转变	59
	4.4 退火与正火	67



4.5	淬火	69
4.6	回火	73
4.7	表面热处理与化学热处理	75
4.8	热处理新技术简介	79
	复习思考题	81

第 5 章

合金钢 82

5.1	合金钢概述	83
5.2	合金钢的分类及牌号	85
5.3	合金结构钢	87
5.4	合金工具钢	97
5.5	特殊性能钢	104
	复习思考题	111

第 6 章

铸铁 113

6.1	铸铁的石墨化	114
6.2	铸铁的分类及特点	115
6.3	常用铸铁	117
	复习思考题	126

第 7 章

有色金属及硬质合金 127

7.1	铝及铝合金	128
7.2	铜及铜合金	133
7.3	轴承合金	140
	复习思考题	143

附录

144

参考文献

150



第 1 章

金属的结构与结晶



知识目标

- 了解晶体结构的基本概念。
- 掌握常见金属晶体结构的种类。
- 掌握晶体缺陷对材料性能的影响。
- 掌握纯金属的结晶过程及晶粒细化的方法。
- 理解金属的同素异晶转变现象。



技能目标

- 能够从宏观和微观两个角度研究材料的不同性能。
- 掌握晶体缺陷对材料性能的影响和晶粒细化的方法。





物质是由原子组成的,根据原子排列的特征,固体物质可分为晶体与非晶体两类。晶体内部的原子按一定几何形状做有规则的周期性排列,如金刚石、石墨、固态金属与合金等。非晶体内部的原子无规则地排列在一起,如松香、沥青与玻璃等。晶体具有固定的熔点和各向异性的特征,而非晶体没有固定熔点,且为各向同性。

1.1

金属的晶体结构

1.1.1 晶体结构的基本概念

晶体结构是指晶体内部原子排列的方式及特征。为了便于了解晶体内部原子的排列规律,常将晶体内部原子假设为固定不动的刚性球体,而晶体就是由这些刚性球体堆积而成的,如图 1-1(a)所示。

1. 晶格

假设将刚性球体缩为处于球心的点,称为结点。若用许多平行的直线将这些结点连接起来,就构成三维的空间构架,如图 1-1(b)所示。这种用来描述晶体中原子排列规则的空间构架模型称为晶格。

2. 晶胞

通常取晶格的一个基本单元来描述晶体的结构,这种基本单元称为晶胞,如图 1-1(c)所示。晶胞是晶格中最小的排列周期单位。

3. 晶格常数

为了描述晶胞内的几何特征和原子空间位置,通常可用晶胞的三个棱边长 a 、 b 、 c 和三个棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 来进行描述,如图 1-1(c)所示。其中, a 、 b 、 c 又称为晶格常数。

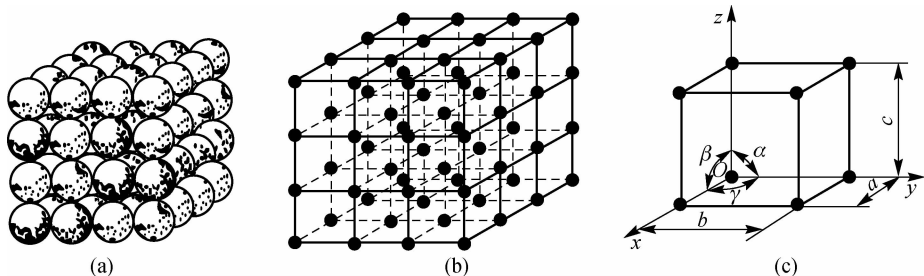


图 1-1 晶体结构示意图

(a)晶体模型;(b)晶格;(c)晶胞及晶格常数



在研究晶体结构时,通常以晶胞作为代表,用晶格常数、原子数、致密度、配位数以及原子半径等参数进行考查。

1.1.2 常见的金属晶体结构

由于金属原子之间具有很强的结合力,所以金属晶体中的原子都趋向于紧密排列。但不同的金属具有不同的晶体结构,大多数金属的晶体结构比较简单,其中常见的有以下三种。

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞是一个立方体,立方体 8 个顶角和立方体中心各有 1 个原子,如图 1-2 所示。晶胞顶角的原子,实际上被晶格中邻近的 8 个晶胞共用,只有晶胞中心的原子为该晶胞独有,所以体心立方晶格每个晶胞的实有原子数为 2 个。

属于体心立方晶格的金属有铬、钨、钼、钒和 α -Fe 等。

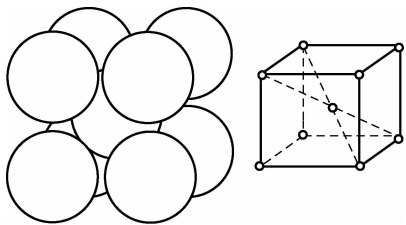


图 1-2 体心立方晶胞

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也是立方体,8 个顶角和 6 个面的中心都各有 1 个原子,如图 1-3 所示。同样,晶胞顶角原子被邻近 8 个晶胞共用,各面中心的原子被相邻 2 个晶胞共用,所以面心立方晶格晶胞的实有原子数为 4 个。

属于面心立方晶格的金属有铝、铜、镍、金、银和 γ -Fe 等。

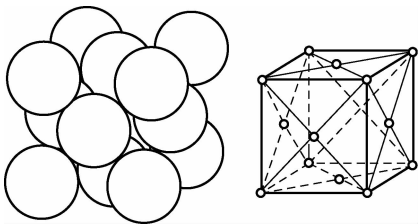


图 1-3 面心立方晶胞

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞是一个正六方柱体,12 个顶角和上、下面中心各有 1 个原



子,晶胞内部还有 3 个原子,如图 1-4 所示。密排六方晶格晶胞的实有原子数为 6 个。

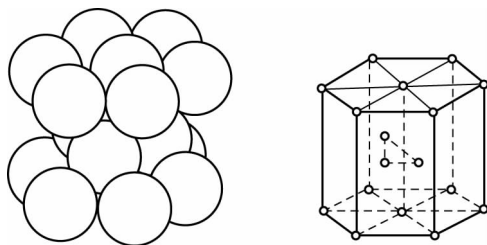


图 1-4 密排六方晶胞

属于密排六方晶格的金属有镁、锌、镉等。

金属晶体的一个显著特点是其原子趋于最紧密的排列,因而金属晶格中原子排列的紧密程度是反映金属晶体结构特征的一个重要因素。晶体中原子排列的紧密程度也常用晶格的致密度表示。晶格的致密度是指晶胞中所含原子的体积与该晶胞的体积之比。表 1-1 列出了三种常见金属晶格的结构特点。可以看出,在三种常见的晶体结构中,原子排列最致密的是面心立方晶格和密排六方晶格,而体心立方晶格要差些。

表 1-1 三种常见金属晶格的结构特点

晶格类型	晶胞中的实有原子数	原子半径(a 为晶格底面边长)	致 密 度	常见金属
体心立方	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	0.68	铬、钨、钼、钒、 α -Fe
面心立方	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	0.74	铝、铜、镍、金、银、 γ -Fe
密排六方	6	$\frac{1}{2}a$	0.74	镁、锌、镉

小提示:在不同晶格类型的晶体中,由于原子排列的紧密程度不同,因而具有不同的比容(单位质量物质所占的容积),当金属的晶格类型发生改变时,会引起金属体积的变化。若体积的变化受到约束,则会在金属内部产生内应力,从而引起工件的变形或开裂。



1.1.3 金属的实际晶体结构

如前所述,晶体具有各向异性。但是工业上实际应用的金属材料,一般不具备各向异性。因为晶体各向异性特征在理想晶体(单晶体)时可充分体现,而实际金属的晶体结构往往存在各种缺陷,同时大多并非单晶体组织,而是多晶体组织(许多位向不同的小单晶体晶粒集合组织),因而不同位向的性能差异互相综合抵消,掩盖了晶体的各向异性。

1. 单晶体和多晶体

晶格位向完全一致的晶体称为单晶体,如图 1-5(a)所示。单晶体材料具有独特的化学、光学和电学性能,因此,其在半导体、磁性材料 and 高温合金材料等方面得到了广泛的应用。

多晶体是由许多位向不同、外形不规则的小晶体构成的,如图 1-5(b)所示。这些形状各异的小晶体称为晶粒。晶粒与晶粒的交界称为晶界。这种由多个晶粒组成的晶体结构称为多晶体结构。

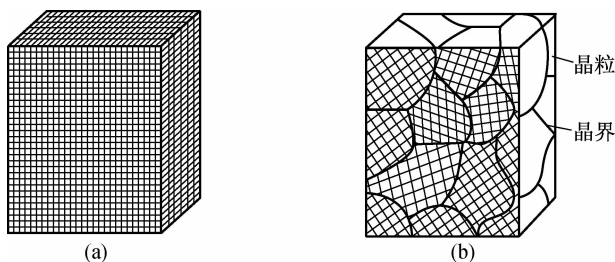


图 1-5 单晶体和多晶体的结构

(a)单晶体; (b)多晶体

2. 晶体缺陷

实际金属晶体内部的原子排列,并不像理想晶体那样完整和严守“规则”。由于各种原因,原子的规则排列遭到破坏,存在着局部或区域的晶体缺陷。晶体缺陷对金属材料的性能有很大影响。

根据晶体缺陷的几何特征,晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

1) 点缺陷

点缺陷指晶体内部空间尺寸很小的缺陷,常见的有“晶格空位”和“间隙原子”,如图 1-6(a)所示。在晶格空位和间隙原子附近,原子间距和相互作用力发生变化,形成晶格畸变,内部产生应力,从而使强度和硬度提高,塑性、韧性降低,形成强化效应。因此,晶格畸变也是金属材料的一种强化手段。



2) 线缺陷

线缺陷指晶体内部某一平面上沿某一方向呈线状分布的缺陷,常见的线缺陷是刃型位错,如图 1-6(b)所示。在位错线附近区域引起晶格畸变,从而影响金属的性能,同样使强度、硬度提高,塑性、韧性下降。

3) 面缺陷

面缺陷指晶体内部呈面状分布的缺陷,常见的有晶界和亚晶界,如图 1-6(c)所示。金属的实际结构多为多晶体结构,多晶体内相邻的不同位向晶粒之间,存在着过渡的不规则排列的原子层,这种过渡层即为晶界。晶界原子层的不规则排列,也是一种晶格畸变,造成金属强度、硬度增高而塑性变形困难。晶粒细则晶界增多,金属的强度、硬度也较高,这就是“细晶强化”的基本原理。

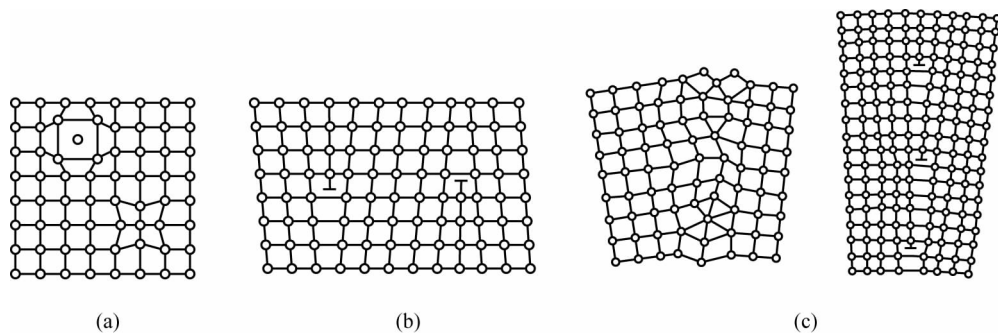


图 1-6 晶体缺陷

(a)点缺陷; (b)线缺陷; (c)面缺陷

在晶粒内部,也并非像理想的单晶体那样晶格规律、统一、完美,晶粒不同部位往往存在一定的位向差(一般只有几分,最多达 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$),形成晶粒内部的“小晶块”。相邻的有很小位向差的小晶块之间也有原子排列不太规则的过渡交界区,这种交界区称为亚晶界。亚晶界也形成晶格畸变,有强化金属的作用。

综上所述,实际金属一般是多晶体材料,且存在许多晶体缺陷。其晶体缺陷类别、主要形式及对材料性能的影响如表 1-2 所示。

表 1-2 实际金属晶体缺陷类别、主要形式及对材料性能的影响

晶体缺陷类别	主要形式	对材料性能的影响
点缺陷	空位,间隙原子,置换原子	金属扩散
线缺陷	刃型位错,螺型位错	加工硬化,固溶强化,弥散强化
面缺陷	晶界,亚晶界	易腐蚀,易扩散,熔点低,强度高,细晶强化



1.2

纯金属的结晶

金属制品一般需要经过熔炼、浇注、压力加工、切削加工等工艺过程,其中熔炼、浇注形成的铸态组织,对金属材料的性能有重大影响。生产上将金属的凝固称为结晶。

1.2.1 纯金属的冷却曲线和过冷度

金属的结晶是金属原子的聚集状态由无规则的液态转变为规则排列的固态的过程。

每种金属都有固定的熔点,也就是固定的结晶温度 T_m ,这是在极缓慢的冷却条件下用热分析法测定的,通常称为理论结晶温度。图 1-7 所示为用热分析法测定的金属的冷却曲线。

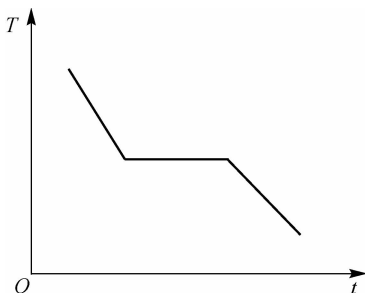


图 1-7 用热分析法测定的金属的冷却曲线

金属的结晶过程可用冷却曲线来描述。冷却曲线表示金属冷却到某一温度时,冷却时间增加而温度不再下降,出现一个水平台阶,此台阶对应的温度即结晶温度。这是因为结晶时有潜热放出,抵消了冷却散热,所以温度保持不变。结晶完成,结晶潜热不再产生,金属温度随冷却时间增加而继续下降。结晶温度实质是一个平衡温度,结晶过程是散热和结晶潜热产生的动态平衡过程。

理论结晶温度是金属液态和固态平衡共存的温度,在此温度下结晶不能自发进行。在实际生产中,冷却速度不可能无限缓慢,当以一定的冷却速度冷却结晶时,实际结晶温度 T_1 都低于理论结晶温度 T_m 。当 T_1 低于 T_m 时,结晶可自发完成,理论结晶温度与实际结晶温度之差 ΔT ,称为过冷度,即

$$\Delta T = T_m - T_1$$



过冷度是金属结晶过程自发进行的必要条件。

小提示:对于同一种液态金属,冷却速度越大,过冷度也越大,即金属的实际结晶温度越低。

1.2.2 纯金属的结晶过程

液态金属的结晶过程由晶核形成和晶核长大两个环节组成。液态金属冷却到一定温度时,液体中部分原子开始按一定规则排列,形成细小的晶胚,部分尺寸较大的晶胚形成继续结晶的核心,称为晶核。晶核在冷却过程中不断集结液体中的原子而逐渐长大,同时新的晶核也不断形成和长大,直至由晶核长大形成的晶粒彼此接近,液态金属逐渐消失而完成结晶,如图 1-8 所示。

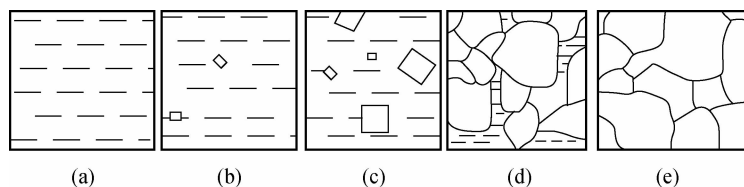


图 1-8 纯金属的结晶过程示意图

液态金属原子自发形成的晶核,称为自发晶核。实际结晶过程中,金属液体中的某些杂质,也能成为金属结晶核心而形成晶核,这种晶核称为非自发晶核。在金属的结晶过程中,通常是自发晶核和非自发晶核同时存在,而且非自发晶核对结晶的推动作用往往更为重要。因此,对非自发晶核的利用,如加入非自发晶核物质——人工晶核等,已成为调整控制结晶过程的重要手段。

晶核长大的实质是液体原子向固态晶核表面集结迁移。当过冷度较大时,特别是非自发晶核较多时,晶核常以树枝形状长大,形成树枝状晶体,简称为枝晶。枝晶继续长大,最后形成晶粒。

金属液体中晶核的形成先后不一,长大的条件也不同,因而形成的晶粒大小和位向各不相同。晶粒之间最后形成过渡的界面即为晶界,晶界把晶粒联结组成多晶体。最后结晶的晶界原子形成不太规则的过渡排列,所以,晶界对金属性能有很大的影响。

1.2.3 晶粒大小对金属性能的影响及其控制

1. 晶粒大小对金属性能的影响

金属结晶后形成多晶体,晶粒的大小对金属性能影响很大。一般情况下,晶粒

细小则金属强度、塑性、韧性好,且晶粒越细小,性能越好。

晶粒的大小通常以单位截面面积上的晶粒数或晶粒平均直径来表示。纯铁晶粒大小对其强度和塑性的影响如表 1-3 所示。

表 1-3 纯铁晶粒大小对其强度和塑性的影响

晶粒平均直径/ μm	9.7	7.0	2.5	0.2	0.16	0.1
抗拉强度/MPa	168	184	215	268	270	284
断后伸长率/%	28.8	30.6	39.5	48.8	50.7	50.0

小提示:并非任何金属材料都要求晶粒越细越好,如制造电机、变压器的硅钢片,就要求晶粒粗大。因为晶粒粗大的硅钢片磁滞损耗较小,电磁效率高,所以,对于材料晶粒大小的要求,必须根据实际需要而定。

2. 晶粒大小的控制

晶粒的大小主要取决于形核速率 N (简称为形核率) 和长大速率 G (简称长大率)。形核率 N 是指单位时间内在单位体积中产生的晶核数。长大率 G 是指单位时间内晶核长大的线速度。凡是促进形核率、抑制长大率的因素,都能细化晶粒。生产中为了细化晶粒,提高金属的力学性能,常采用以下方法:

(1) 提高冷却速度可以增大过冷度,使晶粒细化。冷却速度越大,过冷度越大,所以控制金属结晶时的冷却速度就可以控制过冷度,从而控制晶粒的大小。

(2) 变质处理(孕育处理)就是在浇注前向液体中加入某种物质(称为变质剂),促进非自发形核或抑制晶核的长大速度,从而细化晶粒的方法。

例如,在铁液中加入硅铁、硅钙合金,未熔物质的增加使石墨变细;在浇注高锰钢时加入锰铁粉;向铝液中加入 TiC 、 VC 等作为脱氧剂,其氧化物可作为非自发晶核,使形核率增大;在铝硅铸造合金中加入钠盐,钠能附着在硅的表面,降低硅的长大率,阻碍大片状硅晶体形成,使合金组织细化。

(3) 在金属液结晶过程中,也可以采用机械振动、超声波振动、电磁振动等措施,使正在长大的晶粒破碎,从而细化晶粒。

1.3

金属的同素异晶转变

一般金属冷却结晶后,晶格类型不再变化,一直保持至室温,如铝、铜等金属。



但有一些金属,如铁、钴、锰、钛、锡等,在固态因温度变化也会发生晶格类型的变化。金属这种在固态时随温度变化而晶格类型发生变化的现象,称为同素异晶转变,也称同素异构转变。

通过研究纯铁的冷却结晶过程,发现纯铁具有典型的同素异晶转变特征。图 1-9 所示为纯铁的冷却曲线,它表示纯铁的结晶和同素异晶转变的过程:纯铁熔液从高温冷却至 1 538 °C 以下,结晶成具有体心立方晶格的 δ -Fe;固态的 δ -Fe 继续冷却至 1 394 °C 以下,铁原子重新排列,由体心立方晶格的 δ -Fe 转变为具有面心立方晶格的 γ -Fe;继续冷却至 912 °C 以下,具有面心立方晶格的 γ -Fe 又转变为具有体心立方晶格的 α -Fe。继续冷却,晶格类型不再发生变化,一直保持具有体心立方晶格的 α -Fe 至室温。如果将室温的纯铁进行加热,上述转变可逆向进行。即

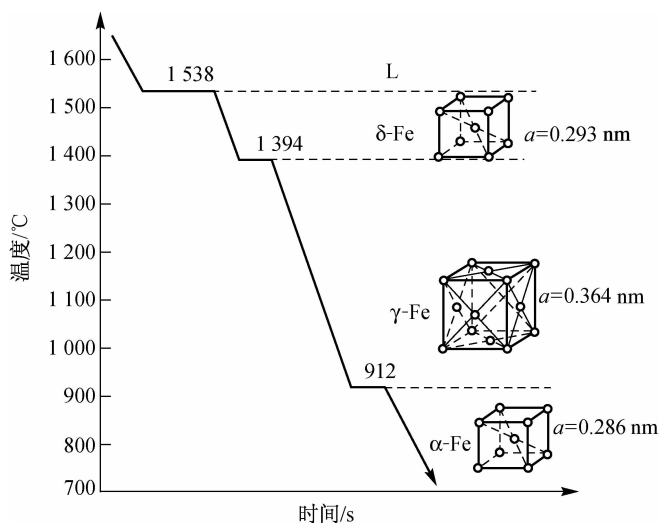
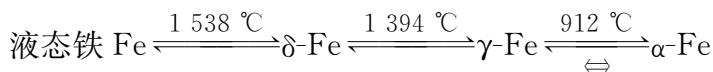


图 1-9 纯铁的冷却曲线

纯铁的同素异晶转变是钢铁热处理的主要基础,也是钢铁材料的性能可以调节改善并得到广泛应用的重要原因。

同素异晶转变是原子重新排列的一个结晶过程,遵循结晶的基本规律,但由于原子在固态下扩散迁移比在液态下困难,因此同素异晶转变要求较大的过冷度,以推动结晶过程充分完成。为了与液态金属结晶过程相区别,通常称同素异晶转变的结晶过程为重结晶。

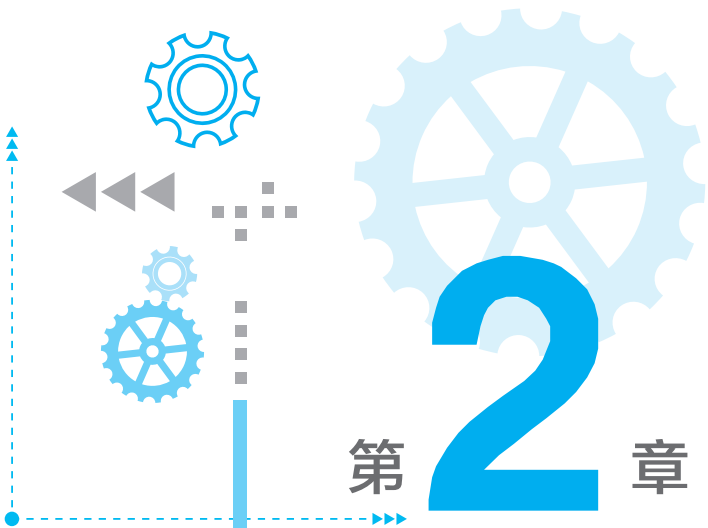
小提示:通过同素异晶转变,可使金属在固态下重组晶体,获得所需性能。也就是说,可在不改变零件尺寸、形状的情况下使其内部组织结构和性能发生变化。



复习思考题

1. 什么是晶体？试列举常见的晶体。
2. 常见的金属晶体结构有哪几种？ α -Fe、 γ -Fe、Al、Cu、Ni、Pb、Cr、V、Mg、Zn 各属何种晶体结构？
3. 实际晶体的晶体缺陷有哪几种？它们对材料的性能有哪些影响？
4. 何谓结晶？简述结晶的过程。
5. 什么是过冷度？过冷度与冷却速度有何关系？
6. 细化晶粒的方法有哪些？
7. 什么是同素异晶转变？试用纯铁为例做简要说明。





第2章



金属材料的性能



知识目标

- ④ 了解金属材料的物理性能和化学性能。
- ④ 掌握表征金属力学性能的主要指标的符号、单位、物理意义与试验方法。
- ④ 了解金属的工艺性能。



技能目标

- ④ 掌握拉伸试验方法。
 - ④ 掌握硬度试验和冲击韧性试验方法。
- 



金属材料是现代机械制造业的基本材料,被广泛地应用于制造生产和生活用品中。金属材料的性能直接关系到金属制品和金属结构的质量、使用寿命及加工成本,是产品选材和拟订加工工艺方案的重要依据。金属材料的性能可分为使用性能和工艺性能。

使用性能是指金属材料在使用过程中所表现出来的性能,包括物理性能(密度、熔点、导电性、导热性、热膨胀性等)、化学性能(耐蚀性、抗氧化性等)和力学性能(机械性能)。

工艺性能是指金属材料在各种加工过程中所表现出来的性能,包括铸造性能、锻造性能、焊接性能和切削加工性能等。

2.1

金属的使用性能

2.1.1 金属的物理性能

金属的物理性能包括电性能、热性能、磁性、密度、熔点等,是材料固有的属性。

1. 电性能

1) 导电性

导电性是金属传导电流的能力,金属导电性的优劣常用电阻率 ρ 表示,也常用电导率 σ 表示,电导率是电阻率的倒数。电阻率是单位长度、单位截面积的电阻值,其单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。电阻率越小,电导率越大,导电性能越好。金属材料的导电性随温度升高而降低。金属中银的导电性最好,铜与铝次之。通常金属的纯度越高,其导电性越好,合金的导电性比纯金属差,高分子材料和陶瓷一般是绝缘体。

根据电阻率或电导率数值的大小,可将材料分成超导体、导体、半导体和绝缘体等。其电阻率分布如下:超导体 ρ 为 0;导体 ρ 为 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$;半导体 ρ 为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^7 \Omega \cdot \text{m}$;绝缘体 ρ 为 $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^{22} \Omega \cdot \text{m}$ 。

电阻率是选用导电材料和绝缘材料的主要依据。导电器材常选用导电性良好的材料制作,以减少损耗;而加热元件、电阻丝则选用导电性差的材料制作,以提高功率。

2) 介电能力

电介质在电场内,虽然没有电荷或电流的传输,但仍对电场表现出某些相应特性,可用材料的介电性能来描述。介电性能用介电常数 K 来表示,介电常数是电介





质储存电荷的相对能力。介电常数与材料成分、温度和电场频率等因素有关。在强电场中,当电场强度超过某一临界值(称为介电强度)时,电介质就会丧失其绝缘性能,这种现象称为电击穿。

电绝缘体必须是介电体,要具有高电阻率、高介电强度和较小的介电常数。

3) 超导现象

温度下降到某一值时,导体的电阻会突然消失,这种现象叫作超导现象。电阻突然变为零时的温度称为临界温度。具有超导性的物质称为超导体。超导体在超导状态下电阻为零,可输送大电流而不发热、不损耗,具有高载流能力,并可长时间无损耗地储存大量的电能,产生极强的磁场。

目前发现的具有超导性的金属元素有钛、钒、锆、铌、钼、钽、钨、铼等,非过渡族元素有铋、铝、锡等。但由于实现超导的温度太低,获得低温所消耗的电能远远超过超导所节省的电能,因而超导技术的推广受到限制。

2. 热性能

1) 导热性

导热性是材料受热作用而反映出来的性能,用热导率 λ 表示。热导率的含义是在单位温度梯度下,单位时间内从单位垂直断面通过的热量,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 或 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。热导率越大,导热性越好。一般纯金属具有良好的导热性,合金的成分越复杂,其导热性越差。

导热性是传热设备和元件应考虑的主要性能,如散热器等传热元件应采用导热性好的材料制造;保温器材应采用导热性差的材料制造。金属的热加工工艺与导热性有密切关系,在热处理、铸造、锻造、焊接过程中,若材料的导热性差,则会使工件内外产生大的温差而出现较大的内应力,导致工件变形或开裂。常用金属的热导率如表 2-1 所示。

表 2-1 常用金属的热导率

材 料	银	铜	铝	铁	灰铸铁	碳钢
热导率 $\lambda/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	419	393	222	75	63	67(100 $^\circ\text{C}$)

2) 热膨胀性

金属随温度的升高而出现体积增大的现象称为热膨胀性,用线膨胀系数 α 或体膨胀系数 β 来表示。

线膨胀系数 α 是温度上升 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 时单位长度的伸长量,单位为 $1/^\circ\text{C}$ 。线膨胀系数



不是一个固定不变的数值,它随温度的升高而增大。体膨胀系数约为线膨胀系数的3倍。

由热膨胀系数大的材料制造的零部件或结构,在温度变化时,尺寸和形状变化较大。装配、热加工和热处理时应考虑材料热膨胀的影响。异种材料组成的复合结构还要考虑热膨胀系数的匹配问题。

3. 磁性

金属材料在磁场中被磁化并能吸引铁、钴、镍等物质的性能称为磁性。金属材料中只有三种金属(铁、钴、镍)及其合金具有显著的磁性。磁性只存在于具有一定温度的金属材料内,在高于一定温度时,其磁性就会消失,如铁在 770 °C 以上就没有磁性,这一温度称为居里点。

常用的磁性材料有如下几种。

1) 铁磁性材料

具有铁磁性的材料有铁、镍、钴及其合金,以及某些稀土元素的合金。

2) 亚铁磁性材料

亚铁磁性材料是指具有亚铁磁性的材料,如各种铁氧体。亚铁磁材料主要用于制造变压器铁心、电感器和存储器件等。

3) 永磁材料

永磁材料经磁化后,当去除外磁场后仍保留磁性,并具有高的剩磁和矫顽力。

4) 软磁材料

软磁材料是指容易磁化和退磁的材料。

4. 密度

密度是指在一定温度下单位体积金属的质量,用 ρ 表示。密度的大小在很大程度上决定了工件的质量。

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中, ρ 为金属的密度(kg/m^3); m 为金属的质量(kg); V 为金属的体积(m^3)。

在机械制造中,一般将密度小于 $5 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的金属称为轻金属;密度大于 $5 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的金属称为重金属。某些机械零件选材时,必须考虑金属的密度,如发动机活塞,根据使用要求常选用密度小的铝合金制成。

常用金属材料的密度(20 °C)如表 2-2 所示。





表 2-2 常用金属材料的密度(20 °C)

材 料	铅	铜	铁	钛	铝	锡	钨
密度/(kg·m ⁻³)	11.3× 10 ³	8.9× 10 ³	7.8× 10 ³	4.5× 10 ³	2.7× 10 ³	7.28× 10 ³	19.3× 10 ³

5. 熔点

金属等晶体材料一般具有固定的熔点。熔点是金属由固态转变为液态的温度。按熔点的高低金属分为低熔点(低于 700 °C)金属和难熔金属两大类。锡、铅、铋、锌等属于低熔点金属,钨、钼、铬、钒等属于难熔金属。

不同熔点的金属具有不同的应用场合:难熔金属可用于制造耐高温的零件,如火箭、导弹、燃气轮机的零件等;低熔点金属可用于制造熔丝、焊接钎料等。

金属的熔点是热加工的重要工艺参数。常用金属材料的熔点如表 2-3 所示。

表 2-3 常用金属材料的熔点

材 料	钨	钼	钛	铁	铜	铝	铅	铋	锡	铸铁	碳钢	铝合金
熔点/°C	3 380	2 630	1 677	1 538	1 083	660.1	327	271.3	231.9	1 148~ 1 279	1 450~ 1 500	447~ 575

2.1.2 金属的化学性能

金属材料抵抗各种化学作用的能力称为化学性能,主要包括耐蚀性和抗氧化性。

1. 耐蚀性

金属材料在常温下抵抗氧、水及其他化学物质腐蚀的能力称为耐蚀性。

金属材料的腐蚀形式主要有化学腐蚀和电化学腐蚀两种。化学腐蚀是指金属直接与周围介质发生纯化学作用。电化学腐蚀是指金属在酸、碱、盐等电介质溶液中由于原电池的作用而引起的腐蚀。金属的腐蚀既造成表面金属光泽的缺失和材料的损失,也造成一些隐蔽性和突发性的事故。金属材料中铬镍不锈钢可以抵抗含氧酸的腐蚀;耐候钢、铜及铜合金、铝及铝合金能抵抗大气的腐蚀。

提高材料耐蚀性的方法有很多,如均匀化处理、表面处理等。

2. 抗氧化性

金属在高温下抵抗氧化的能力称为抗氧化性。

在高温下金属材料易与氧结合,形成氧化皮,造成金属的损耗和浪费,因此高温



下使用的工件,要求其材料具有抗氧化性。例如,各种加热炉、锅炉等,应选用抗氧化性良好的材料。耐热钢、高温合金、钛合金等都具有好的抗氧化性。

提高抗氧化性的措施是使材料表面迅速氧化后形成一层连续而致密并与母体结合牢靠的膜,从而阻止其进一步氧化。

2.1.3 金属的力学性能

在机械制造中,金属材料的使用性能以力学性能最为重要。金属材料作为结构材料使用时,选材的依据主要为力学性能指标。力学性能又称机械性能,是指金属材料在外力(载荷)作用下所表现出的抵抗变形和破坏的能力。常用的力学性能有塑性、强度、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。

金属材料的弹性、塑性及强度可通过金属拉伸试验来测定。拉伸试验是在拉伸试验机上进行的。试验时,首先将被测金属材料制成图 2-1 所示表面粗糙度 R_a 为 0.8 的标准拉伸试样,通常分为长试样($L_0=10d_0$)和短试样($L_0=5d_0$)两种。 L_0 和 d_0 有规定的标准值,一般 L_0 为 100 mm 或 50 mm。然后在试样的两端逐渐施加方向向外的轴向载荷,直到试样被拉断为止。根据试样在拉伸过程中承受的载荷和产生的变形量之间的关系,即可绘出该金属的拉伸曲线,并由此测定该金属的弹性、塑性与强度等性能指标。

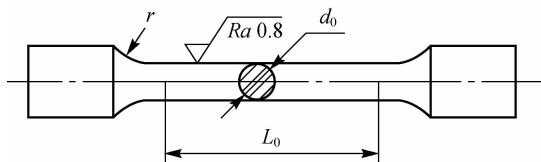


图 2-1 标准拉伸试样

1. 拉伸曲线

拉伸试验过程中随着载荷的均匀增加,试样不断地由弹性伸长过渡到塑性伸长直至断裂。一般试验机具有自动记录装置,可以把作用在试样上的力和伸长描绘成拉伸图,也叫拉伸曲线。图 2-2 所示为低碳钢的拉伸曲线,图中纵坐标表示力,单位为 N;横坐标表示伸长量,单位为 mm。图中明显地表现出下面几个变形阶段。

1) Op ——弹性变形阶段

当给材料施加载荷后,试样产生伸长变形。试样的变形完全是弹性的,如果卸载载荷,试样可恢复原状。





2) p 点后的水平或锯齿状线段——屈服阶段

当载荷超过一定数值再卸载时,试样的伸长只能部分消失,而保留一部分残余变形(即塑性变形)。当载荷增加到 F_{eH} 以后,曲线上出现水平或锯齿状线段,这种在载荷不增加的情况下试样还继续伸长的现象称为屈服现象,这时材料开始出现明显的塑性变形。上屈服载荷 F_{eH} 为试样发生屈服而载荷首次下降前的最高载荷,而下屈服载荷 F_{eL} 是指在屈服期间的恒定载荷或不计初始瞬时效应时的最低载荷。

3) 屈服后至 m 点——强化阶段

在屈服阶段以后,欲使试样继续伸长,必须不断增加载荷。随着塑性变形增大,试样变形抗力也逐渐增加,这种现象称为变形强化(或称加工硬化)。此阶段的塑性变形是均匀的。

4) mk ——缩颈阶段(局部塑性变形阶段)

当载荷达到最大值 F_m 后,试样截面发生局部收缩,称为缩颈。这时伸长主要集中于缩颈部位,当拉至 k 点时,试样被拉断。

工程上使用的金属材料,多数没有明显的屈服现象,如退火的轻金属、退火及调质的合金钢等。有些脆性材料,不仅没有屈服现象,而且不产生缩颈,如铸铁等。

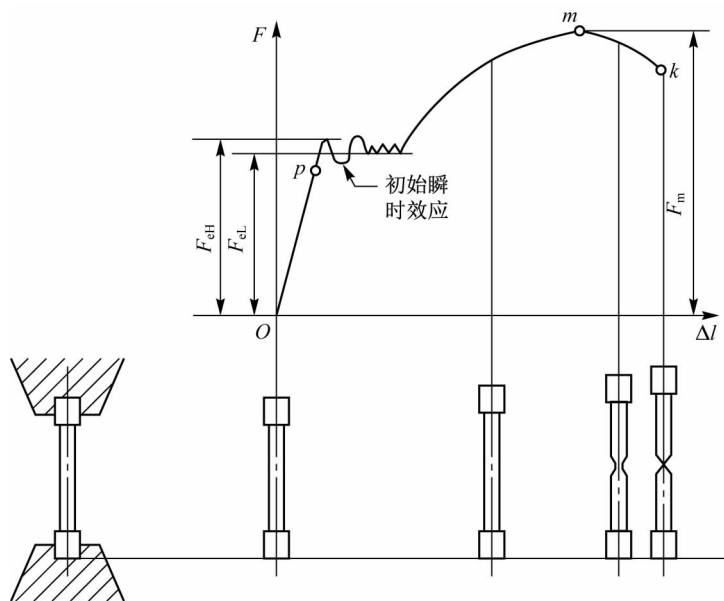


图 2-2 低碳钢的拉伸曲线

2. 塑性

塑性是指断裂前材料产生永久变形的能力。常用的塑性指标是断后伸长率和断面收缩率,也是通过拉伸试验来测定的。



断后伸长率又称延伸率,是试样被拉断时,标距的伸长量 ΔL 与原始标距 L_0 的百分比,用符号 A 表示,即

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$$

因为标准试样有长、短和定标距之分,所以同一材料用不同标准试样测定会有不同值;而不同材料进行比较时,必须是相同标准试样测定的数值才有意义。

断面收缩率为试样被拉断时,缩颈处横截面的最大缩减量 ΔS 与原始横截面积 S_0 的百分比,用符号 Z 表示,即

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100\%$$

断面收缩率不受试样尺寸影响,可以较可靠地反映材料的塑性,但必须严格控制测量和计算的误差。

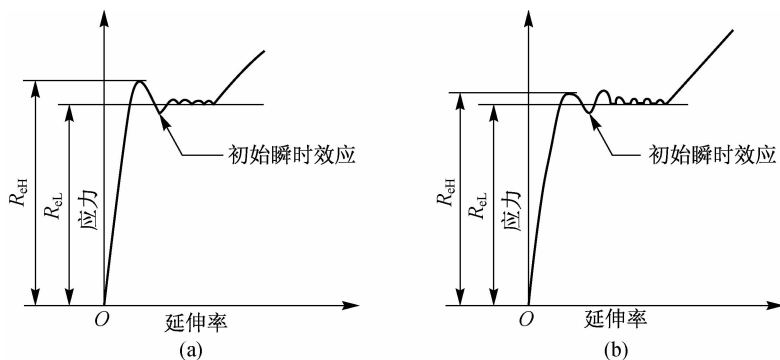
断后伸长率和断面收缩率的数值越大,表示金属材料的塑性越好。良好的塑性是材料进行压力加工的必要条件,也是保证零件工作安全,不致发生突然脆断的重要条件。铸铁、陶瓷等脆性材料,塑性极低,拉伸时几乎不产生明显的塑性变形,超载时会突然断裂。

3. 强度

金属材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力称为强度。按载荷作用方式不同,强度可分为屈服强度、抗拉强度、抗弯强度、抗压强度和抗剪切强度等。工程上常用的强度指标有屈服强度和抗拉强度。金属材料的抗拉强度,以其标准试样在万能材料试验机上进行拉伸试验测定。

1) 屈服强度

在试验过程中力不增加(保持恒定)而试样仍能继续伸长(变形)时的应力值称为屈服强度,分为上屈服强度的 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} 。图 2-3 所示为不同曲线的上屈服强度和下屈服强度。



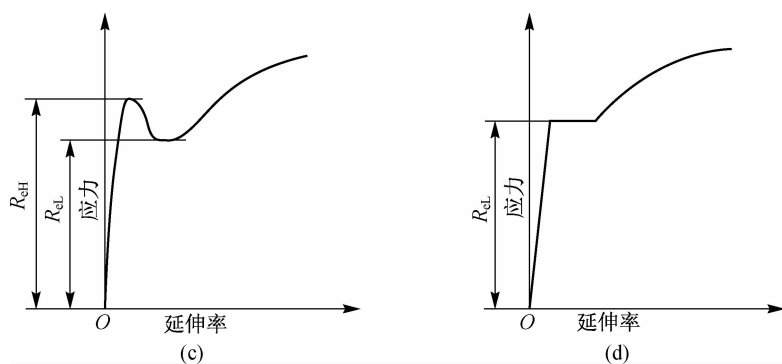


图 2-3 不同类型曲线的上屈服强度和下屈服强度

上屈服强度与下屈服强度的计算公式为

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}$$

式中, R_{eH} 为上屈服强度(MPa); R_{eL} 为下屈服强度(MPa), 下屈服强度与旧标准中的屈服点 σ_s 含义相同; F_{eH} 为试样发生屈服而力首次下降前的最高载荷(N); S_0 为原始横截面积(mm^2); F_{eL} 为在屈服期间, 不计初始瞬时效应时的最低载荷(N)。

2) 抗拉强度

试样拉断前所能承受的最大应力值称为抗拉强度, 即

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

式中, R_m 为抗拉强度(MPa); F_m 为断裂前的最大载荷(N); S_0 为原始横截面积(mm^2)。

金属零件和结构在工作中一般不允许产生塑性变形, 所以设计零件结构时, 下屈服强度 R_{eL} 是重要的设计依据。抗拉强度 R_m 表示材料抵抗塑性变形和破坏的最大能力, 测试数据较准确, 因此, 有关手册和资料提供的设计、选材的强度指标往往是抗拉强度 R_m 。

4. 硬度

硬度是指材料表面上抵抗局部变形或破坏的能力。

测定材料硬度的方法很多, 最常用的是压入法。硬度测定的设备比较简单, 操作方便, 不需要做专门的试样, 可以在工件上直接测定而不损坏工件, 是生产工作中最常应用的力学性能指标。常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。



1) 布氏硬度

布氏硬度试验原理如图 2-4 所示。压头为硬质合金球,其在布氏硬度计上以规定的试验力和时间压入被测金属表面,卸除载荷后计算金属压入单位面积承受的压力,即可确定被测金属材料的硬度值,用符号 HBW 表示,即

$$HBW = 0.102 \frac{F}{\pi D h}$$

式中, F 为总试验力(N); h 为总压入深度(mm); D 为压头直径(mm)。

压痕深度 h 不易测量,可由压痕直径 d 来换算。即

$$h = \frac{D}{2} - \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

在实际测定时,一般不进行计算,而是用放大镜测量出压痕直径后,查表直接读出 HBW 值。

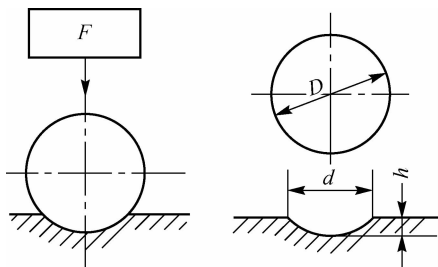


图 2-4 布氏硬度试验原理图



符号 HBW 前面为硬度值,后面的数字依次表示压头直径 D 、总试验力 F 和试验力保持时间 t (当为 10~15 s 时不标注)。例如,600HBW1/294.2/20 表示用直径为 1 mm 的硬质合金球在 294.2 N 试验力下保持了 20 s 所测得的硬度值为 600。

由于布氏硬度测定的压入面积较大,可不受金属内部组成相细微不均匀性的影响,测试结果较准确。硬度高的材料、薄壁工件和表面要求高的工件,不宜用布氏硬度测定。通常布氏硬度测定适用于有色金属、低碳钢、灰铸铁和退火、正火、调质处理的中碳结构钢。

2) 洛氏硬度

洛氏硬度也是用压入法测定的,但不是测量压入面积,而是通过测量压入深度大小来衡量材料的硬度高低。洛氏硬度试验通常采用锥顶角为 120° 的金刚石圆锥体或淬火钢球作为压头。如图 2-5 所示,在初试验力 F_0 的作用下,试样压入深度为 h_1 ,再加上主试验力 F_1 后,总试验力为 $F_0 + F_1$,压头压入深度为 h_2 ,经过一定时间