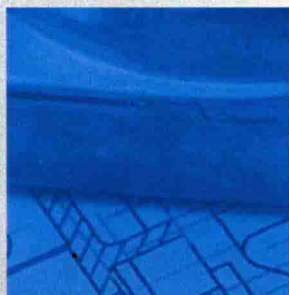


金属工艺学

主 编 邱常明

副主编 张好强 孙红婵



科学出版社

金属工艺学

主 编 邱常明
副主编 张好强 孙红婵
参 编 郭春丽 骆建华 李晨辉
王鑫阁 琚立颖 王彦凤
主 审 李世杰

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在传统的金属工艺学教材基础上,按照课程改革的新形势和实践理论教学要求,认真总结多年教学改革经验编写而成的。本书共分10章。除第1章简要介绍与金属工艺有关的部分材料基本知识外,其余9章分别针对基本金属工艺中的铸造、锻压、焊接、车削加工、刨削加工、铣削加工、磨削加工、数控加工及特种加工等进行了介绍。每章后面还附有一定数量的思考题。全书的内容编排有利于学生根据实习工种进行针对性的理论学习。

本书可作为普通高等教育本科、高职高专、成人教育、广播电视大学、技工等院校的机械类、近机类工科专业学生“金工实习”和“专业技术训练”的实训理论指导书,也可作为企业管理人员、工程技术人员、技术工人的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

金属工艺学/邱常明主编. —北京:科学出版社, 2016.8

ISBN 978-7-03-049033-9

I. ①金… II. ①邱… III. ①金属加工—工艺学 IV. ①TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 141775 号

责任编辑:毛莹 朱晓颖/责任校对:桂伟利

责任印制:霍兵/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年8月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:448 000

POD定价:85.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,我国的工程实践教学取得了一系列重大进展,为进一步适应课程改革的新形势和实践理论教学要求,编者在认真总结多年教学改革经验的基础上编写了本书。

在编写时,编者从高等学校金属工艺实训的理论与实践相结合出发,确定了编写的指导思想和教材特色。侧重于应用理论和应用技术,强调理论联系实际,加强综合、归纳、运用和培养能力的结合,增加了插图、表格,力求便于自学,注意了各种加工的经济性分析,以培养学生的经济观点、适应市场经济。本书最大限度地采用了法定计量单位及最新的国家标准。

本书内容包括材料基础知识、铸造、锻压、焊接、车削加工、铣削加工、刨削加工、磨削加工、钳工加工、数控加工技术和特种加工等。内容丰富,文字简明通顺,插图清晰生动,易为读者接受和掌握。

本书由华北理工大学邱常明任主编,张好强和孙红婵任副主编,全书由邱常明统稿及定稿。参加编写的人员有:孙红婵(第1章、第2章部分、第3章部分),郭春丽(第2章部分),骆建华(第3章部分),琚立颖(第4章),张好强(第5、6章),邱常明(第7章),王彦凤(第8章),李晨辉(第9章、第10章部分),王鑫阁(第10章部分)。

河北工业大学李世杰教授主审本书,在审阅中提出了很多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,许多实训指导教师给出了诚恳指导和帮助,在此一并表示感谢。

在编写过程中,参考了大量的相关教材和资料,所有参考文献均已在书后列出,在此对文献作者表示由衷的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不足或疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2016年3月

目 录

前言	
第1章 工程材料基本知识	1
1.1 常用金属材料、牌号和用途	1
1.1.1 碳素钢	1
1.1.2 合金钢	2
1.1.3 铸铁	3
1.2 金属材料的机械性能	4
1.3 金属材料的晶体结构	8
1.3.1 纯金属的晶体结构	8
1.3.2 晶格的类型	9
1.3.3 纯金属的实际结构	9
1.4 金属的结晶	11
1.4.1 纯金属结晶	11
1.4.2 影响生核和长大的因素	12
1.4.3 合金结晶	12
1.4.4 固溶体	12
1.4.5 金属化合物	13
1.5 铁碳合金相图	14
1.5.1 纯铁	14
1.5.2 铁碳合金	14
1.5.3 铁碳合金相图	15
1.5.4 碳对铁碳合金平衡组织的影响	22
1.6 热处理	23
1.7 材料的选用	25
1.7.1 选材的原则	25
1.7.2 零件的失效	26
思考题	27
第2章 铸造	28
2.1 铸造基础知识	28
2.1.1 铸型的组成和造型工具	28
2.1.2 造型方法	28
2.1.3 浇冒口系统	35
2.1.4 合金的浇注	36
2.1.5 铸件缺陷分析	37
2.2 铸造性能	38
2.3 铸造工艺设计	44
2.3.1 零件结构的铸造工艺性	44
2.3.2 浇注位置的确定	47
2.3.3 分型面位置的确定	48
2.3.4 铸造工艺设计参数	49
2.4 铸造工艺图	51
2.5 特种铸造	54
2.5.1 金属型铸造	54
2.5.2 压力铸造	55
2.5.3 低压铸造	56
2.5.4 离心铸造	57
2.5.5 熔模铸造	57
思考题	59
第3章 锻造	61
3.1 锻造过程	61
3.2 自由锻	64
3.2.1 自由锻设备	64
3.2.2 自由锻常用工具	64
3.2.3 自由锻工序	65
3.2.4 自由锻工艺规程的制订	70
3.2.5 自由锻件的结构工艺性	74
3.3 模锻	75
3.3.1 模锻设备	76
3.3.2 锤上模锻特点	77
3.3.3 锤上模锻工艺规程的制订	79
3.3.4 锤上模锻件的结构工艺性	84
3.4 其他模锻方法	85
3.4.1 压力机模锻	85
3.4.2 胎模锻	85
3.5 板料冲压	86
3.5.1 板料冲压的特点	86
3.5.2 冲压设备	87

3.5.3 冲压工序及冲压件结构 工艺性	87	5.4.4 切削热和切削温度	139
3.5.4 冷冲压模具	94	5.4.5 刀具磨损和刀具耐用度	140
思考题	96	5.4.6 切削液的选用	143
第4章 焊接	97	5.5 工件材料的切削加工性能	145
4.1 焊接基础	97	5.6 零件加工质量和生产率的概念	146
4.2 熔焊	97	思考题	149
4.2.1 焊条电弧焊	97	第6章 车削加工	150
4.2.2 电弧焊焊接	103	6.1 车削加工概述	150
4.2.3 其他焊接方法	111	6.1.1 车削加工定义及加工范围	150
4.3 压焊	113	6.1.2 车削加工的特点	151
4.3.1 电阻焊	113	6.2 车床	151
4.3.2 摩擦焊	115	6.2.1 普通卧式车床	151
4.4 钎焊	116	6.2.2 其他车床简介	154
4.4.1 钎料和钎剂	117	6.3 车削加工基本工艺	156
4.4.2 钎焊加热方法	117	6.3.1 车刀及工件的安装	156
4.4.3 钎焊接头	117	6.3.2 车削加工	162
4.5 常用焊接方法的选择	118	思考题	173
4.6 常用金属材料的焊接	119	第7章 刨削、铣削、磨削加工	174
4.6.1 金属材料的焊接性能	119	7.1 刨削加工基础	174
4.6.2 碳素钢和低合金结构钢的 焊接	119	7.2 铣削加工基础	182
4.7 焊接件的结构工艺性	121	7.3 磨削加工基础	193
思考题	125	思考题	199
第5章 切削加工基础	126	第8章 钳工加工	201
5.1 金属切削加工概述	126	8.1 划线	201
5.2 切削运动与切削用量	126	8.2 锯削	204
5.2.1 工件上的加工表面	126	8.3 锉削	206
5.2.2 切削运动	127	8.4 钻孔、扩孔和铰孔	208
5.2.3 切削用量	127	8.5 攻螺纹和套螺纹	211
5.3 切削刀具的几何结构及刀具 材料	129	8.6 刮削	213
5.3.1 刀具角度	129	8.7 装配	213
5.3.2 常用刀具材料	132	思考题	214
5.4 金属切削过程	135	第9章 数控加工技术	215
5.4.1 切屑形成过程及切屑种类	135	9.1 数控加工基础知识	215
5.4.2 积屑瘤	136	9.1.1 概述	215
5.4.3 切削力和切削功率	138	9.1.2 机床坐标系及工件坐标系 介绍	217
		9.1.3 数控系统硬件组成	218

9.1.4 数控加工程序格式与组成	218	10.2 电火花线切割加工	256
9.1.5 数控程序的数学处理	220	10.2.1 线切割机床的基本组成	256
9.2 数控车床	221	10.2.2 线切割机床的加工原理	258
9.2.1 数控车床结构	221	10.2.3 线切割机床的加工特点	258
9.2.2 数控车床刀具	226	10.2.4 线切割加工工艺与编程	258
9.2.3 数控车床加工工艺一(快速定位 G00 与直线插补 G01)	227	10.3 电火花成型加工技术	262
9.2.4 数控车床加工工艺二(圆弧插补 G02、G03)	231	10.3.1 加工原理	262
9.2.5 数控车床加工工艺三(单一固定循环 G90、G94)	233	10.3.2 电火花加工条件	262
9.2.6 数控车床加工工艺四(内外径粗车复合循环 G71)	238	10.3.3 电火花设备结构组成	263
9.3 数控铣床与加工中心	241	10.3.4 电火花加工特点	264
9.3.1 数控铣床结构与原理	241	10.4 激光切割技术	264
9.3.2 数控铣床常用刀具	246	10.4.1 激光切割发展与概述	264
9.3.3 数控铣床加工工艺一(平面铣削)	247	10.4.2 激光切割基本原理	265
9.3.4 数控铣床加工工艺二(内、外轮廓铣削)	250	10.4.3 激光切割设备组成	265
思考题	253	10.4.4 激光切割加工特点	266
第 10 章 特种加工	255	10.5 3D 打印技术	266
10.1 特种加工技术概述	255	10.5.1 3D 打印技术概述	266
10.1.1 特种加工技术概述与发展	255	10.5.2 技术原理	267
10.1.2 特种加工技术的特点	255	10.5.3 3D 打印技术特点	268
		10.6 电化学加工技术	268
		10.6.1 电化学加工技术概述	268
		10.6.2 电化学加工原理	268
		10.6.3 电化学加工设备组成	269
		10.6.4 电化学加工技术特点	270
		思考题	271
		参考文献	272

第1章 工程材料基本知识

1.1 常用金属材料、牌号和用途

用于机械制造的各种材料统称为机械工程材料。现代社会中材料、能源、信息以及生物技术已成为一个国家经济建设的支柱产业，其中材料占有十分突出的地位。金属材料是机械制造过程中使用最广泛的工程材料，主要包括钢、合金钢、铸铁、铜、铝、铜合金、铝合金等。

1.1.1 碳素钢

碳素钢(碳钢)是含碳量质量百分比(w_C)在 0.02%~2.11%、以铁和碳为主要组成元素的铁碳合金的统称，常含硅(Si)、锰(Mn)、硫(S)、磷(P)等杂质。碳素钢的性能主要取决于含碳量，含碳量增加，钢的强度、硬度升高，但塑性、韧性和可焊性降低。与其他钢类相比，碳素钢使用最早、成本低、性能范围宽、用量最大。

1. 碳素钢的分类

碳钢分类方法很多，比较常用的有三种，即按钢的含碳量、质量和用途分类。

1) 按含碳量分类

低碳钢：含碳量小于或等于 0.25% 的钢， $w_C \leq 0.25\%$ 。

中碳钢：含碳量为 0.25%~0.60% 的钢， $0.25\% < w_C \leq 0.60\%$ 。

高碳钢：含碳量大于 0.6% 的钢， $w_C > 0.60\%$ 。

2) 按质量分类

即按含有杂质元素 S、P 的多少分类。

普通碳素钢： $w_S \leq 0.055\%$ ， $w_P \leq 0.045\%$ 。包括甲类钢(A类钢，保证力学性能)、乙类钢(B类钢，保证化学成分)和特类钢(C类钢，保证力学性能和化学成分)，如 Q235A、Q235B、Q235C、SS400 等。

优质碳素钢： w_S 、 $w_P \leq 0.035\% \sim 0.040\%$ 。

高级优质碳素钢： $w_S \leq 0.020\% \sim 0.030\%$ ， $w_P \leq 0.030\% \sim 0.035\%$ ，如 45、S50C、S45C、P20 等。

3) 按用途分类

碳素结构钢：用于制造各种工程构件(如桥梁、船舶、建筑构件等)及机器零件(如齿轮、轴、连杆、螺钉、螺母等)。

碳素工具钢：用于制造各种刀具、量具、模具等，一般为高碳钢，在质量上都是优质钢或高级优质钢。

2. 碳素钢的牌号和用途

(1) 普通碳素结构钢: “Q+数字+(A/B/C/D)+(F/b/Z/TZ)”。

主要保证力学性能, 牌号体现力学性能。Q 为屈服点, “屈”汉语拼音; 数字表示屈服强度数值, 单位 MPa; 若牌号后面标注字母 A、B、C、D, 则表示钢材质量等级不同, 即 S、P 含量不同, A、B、C、D 质量依次提高; F 表示沸腾钢, b 为半镇静钢, 不标 F 和 b 的为镇静钢, Z 为镇静钢, TZ 为特殊镇静钢。

如 Q235-A·F 表示屈服强度为 235MPa 的 A 级沸腾钢, Q235-C 表示屈服强度为 235MPa 的 C 级镇静钢。

碳素结构钢按照它们的屈服强度分为 5 个牌号: Q195、Q215、Q235、Q255、Q275。每个牌号由于质量不同可分为 A、B、C、D 四个等级(最多的有四种, 有的只有一种)。

普通碳素结构钢一般情况下都不经热处理, 而是在供应状态下直接使用。

(2) 优质碳素结构钢: “两位数字”。

“两位数字”表示钢中平均含碳量的万分之几。如 45 钢表示钢中平均含碳量为 0.45%, 08 钢表示钢中平均含碳量为 0.08%。若钢中含锰量较高, 需将锰元素标出, 如 0.45%C、0.70%~1.00% Mn 的钢, 牌号即为 45Mn。

优质碳素结构钢能够同时保证钢的化学成分和力学性能, 主要用于制造机械零件, 一般都要经过热处理以提高力学性能。

(3) 碳素工具钢: “碳或 T+ 数字”。

“数字”表示钢中平均含碳量的千分之几; T8、T10 分别表示钢中平均含碳量为 0.80% 和 1.0% 的碳素工具钢, 若为高级优质碳素工具钢, 则在钢号最后附以“A”字。如 T12A。

碳素工具钢用于制造各种量具、刀具、模具等。经热处理(淬火+低温回火)后具有高硬度, 用于制造尺寸较小要求耐磨性的量具、刀具、模具等。

1.1.2 合金钢

合金钢是在碳素钢的基础上加入不同的合金元素, 如锰(Mn)、镍(Ni)、钒(V)、稀土元素(RE)等, 使其具有特殊的性能。添加不同的元素, 并采取适当的加工工艺, 可获得具有高强度、高韧性、耐磨、耐腐蚀、耐低温、耐高温、无磁性等特殊性能的合金钢。

1. 合金钢的分类

合金钢的种类繁多, 分类方法也较多, 常用的分类方法有以下两种。

1) 按特性和用途

(1) 合金结构钢。用于制造重要的机器零件和工程结构, 可分为普通低合金钢和优质结构钢。

普通低合金钢是在含碳量小于 0.2% 普通钢的基础上加入少量合金元素(<3%) 所制得的钢。由于合金元素的强化作用, 具有较好的塑性、韧性、焊接性和耐蚀性, 主要用于各种工程结构, 如桥梁、建筑、船舶、车辆、高压容器等。采用普通低合金钢的目的是减轻结构重量, 保证使用可靠性, 节约钢材, 例如, 用 16Mn 代替 Q235 可节约钢材 15%~20%。

优质结构钢是机械制造用钢, 是在优质钢和高级优质钢的基础上加上合金元素所制得

的，按其用途和热处理特点又可分为如下几种：渗碳钢、调质钢、弹簧钢、滚动轴承钢、易切钢和超高强度钢等。

(2) 合金工具钢、量具钢。是含碳量较高、合金元素含量较低的钢，具有高的硬度和耐磨性，机加工性能好，稳定性好，用于制造重要的工具、模具等。

(3) 特殊性能钢。具有某种特殊物理、化学性能，如不锈钢、耐热钢等。

- 2) 按合金元素含量
- (1) 低合金钢。合金元素总量小于 5%。

(2) 中合金钢。合金元素总量 5%~10%。

(3) 高合金钢。合金元素总量大于 10%。

2. 合金钢牌号的表示方法

合金钢的表示采用“数字+元素符号+数字”的方法。

- (1) 结构钢：“两位数字+元素符号+数字”。
- “两位数字”表示钢中平均含碳量的万分之几。如 45 钢表示钢中平均含碳量为 0.45%，08 钢表示钢中平均含碳量为 0.08%。若钢中含锰量较高，需将锰元素标出，如 0.45%C、0.70%~1.00% Mn 的钢，牌号即为 45Mn。

- (2) 工具钢：“一位数字+元素符号+数字”。
- “一位数字”表示平均含碳量的千分之几，如 9SiCr，含义是平均含碳量 0.9%，Si、Cr 含量均小于 1.5%。当含碳量大于 1%时，则不再标出含碳量，如 Cr12MoV，表示此工具钢含碳量大于 1%，Cr 含量为 12%，Mo、V 含量均小于 1.5%。

此外，为了表示钢的用途，有些钢种在牌号前加一字母，如滚动轴承钢的牌号为 GCr9，其含铬量为 0.9%；再如，易切钢在牌号前加字母“Y”，如 Y12、Y15 等。

- (3) 特殊性能钢：其编号方法同合金工具钢，如不锈钢 1Cr18Ni9Ti，其含义为 $w_C=0.1\%$ ， $w_{Cr}=18\%$ ， $w_{Ni}=9\%$ ， $w_{Ti}<1.5\%$ 。

1.1.3 铸铁

铸铁是含碳量大于 2.11% 的铁碳合金，与钢相比，其碳、硅含量较高(大致成分为 2.5%~4.0%C、1.0%~3.0%Si)。铸铁的抗拉强度、塑性和韧性不如钢，其力学性能比钢差，不能锻造。但铸铁具有优良的铸造性、减振性、耐磨性和切削加工性等特点，加之成本低廉，生产设备和工艺简单，在机械制造中应用较广。

根据铸铁中碳的存在形态不同，分为灰口铸铁和白口铸铁。其中，灰口铸铁中碳以石墨的形式存在，应用广泛。按石墨形式的不同灰口铸铁又分为灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁等(表 1-1)。

表 1-1 铸铁牌号、应用及说明

名称	牌号	应用	说明
灰 铸 铁	HT150	用于承受中等负荷的零件，如机座、支架、轴承座、阀体等	“HT”表示灰铸铁，后面的三个数字表示直径 30mm 试棒的最低抗拉强度值(MPa) 和最低延伸率(%)
	HT200	用于承受较大负载的零件，如汽缸、齿轮、机座、飞轮、床身、汽缸体、汽缸套、活塞、齿轮箱等	
	HT250		

续表

名称	牌号	应用	说明
可 锻 铸 铁	KTH300-06	用于承受冲击、震动及扭转负荷的零件，如汽车、拖拉机的后桥壳，转向机构壳体，弹簧钢板支座、低压阀门和各种管接头等	“KT”表示可锻铸铁； “KTH”“KTZ”分别表示黑心和白心可锻铸铁；后面的三个数字表示最低抗拉强度值(MPa)
	KTH330-08		
	KTZ450-06	用于负荷较高和耐磨损的零件，如曲轴、连杆、齿轮、凸轮轴等	
球 墨 铸 铁	QT400-18	用于承受冲击、震动的零件，如汽车、拖拉机底盘零件、中低压阀门、管道	“QT”为球墨铸铁的代号，后面的数字分别代表最低抗拉强度(MPa)和最低延伸率(%)
	QT450-10		
	QT500-7	用于负荷大、受力复杂的零件，如曲轴、齿轮、凸轮轴、连杆、轧钢机轧辊	
	QT800-2		

1.2 金属材料的机械性能

金属材料的种类繁多，性能各异，为了正确合理地选用，并且尽量发挥材料的潜能，通过一系列指标来衡量比较它们的性能。材料性能包括使用性能和加工性能(工艺性能)。其中，使用性能包括机械性能、物理性能和化学性能等，加工性能包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性和热处理工艺性，在以后章节中将做进一步的详细介绍。

机械性能也称为力学性能，指材料抵抗外力的能力。常用的机械性能指标有强度、塑性、硬度、韧性等。

1. 强度

金属材料在静载荷的作用下，抵抗变形和断裂的能力。所谓静载荷，是指对材料缓慢地加载。抵抗能力越大，则材料的强度越高。由于材料所受外力的形式不同，因此强度也分为弹性极限（即材料不产生永久变形的最大应力）屈服强度（即材料发生塑性变形的最小应力）抗拉强度（即材料在断裂前所承受的最大拉力）以及抗压强度、抗弯强度、抗扭

强度、抗剪强度等，使用最广泛的是抗拉强度。

抗拉强度的测定是在专门的拉伸试验机上进行的，其测定步骤如下。

(1) 按规定将测试材料制成拉伸试样，如图 1-1 所示。

(2) 将其装在拉伸试验机上缓慢加载，直至拉断，同时记录载荷与变形量的数值，如图 1-2 所示。

(3) 获得拉伸曲线，如图 1-3 所示。

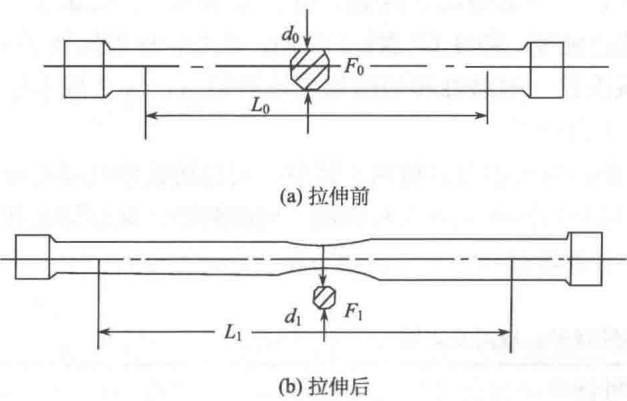


图 1-1 拉伸试样试验前和拉伸后示意图

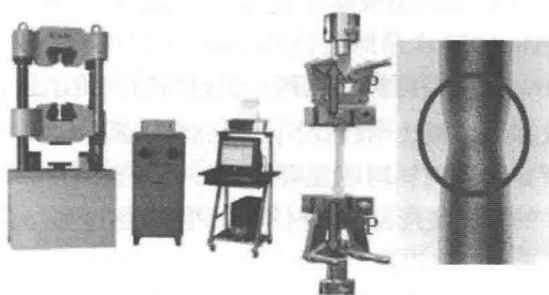


图 1-2 拉伸试验机及过程示意图

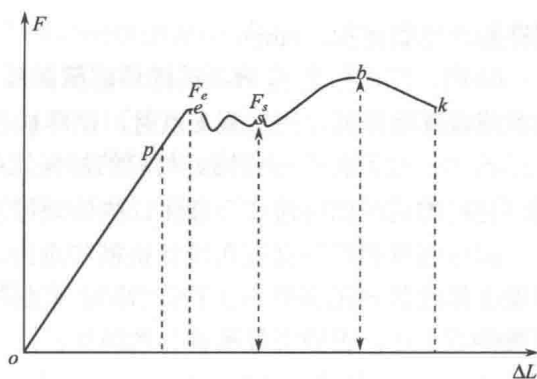


图 1-3 拉伸实验曲线

将力与变形量转化为单位面积和单位长度上的指标，即应力(σ)和应变(ε)。应力是单位面积上所承受的载荷，单位兆帕(MPa)；应变是单位长度上发生的变形量。

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

拉伸试验的力-变形量曲线即转变为应力-应变曲线，可分为以下几个阶段。

op 段：即弹性变形阶段。形变量与载荷成正比，去除载荷变形消失，试样恢复原状，这种变形称为弹性变形。 F_e 是材料保持仅发生弹性变形的最大载荷，称为弹性极限，材料不产生永久变形的最大应力 σ_e 。

op 段斜率为材料试样的弹性模量，即 $E = \sigma / \varepsilon$ 。

工程上也将弹性模量称为材料的刚度，来表示材料弹性变形抗力的大小。弹性模量 E 主要决定材料本身，是金属材料最稳定的性能之一，加工处理对它的影响不大。

pe 段：即微量塑性变形阶段。应力超出 σ_e 之后，材料进一步变形，但若此时去除载荷，绝大多数变形消失，但仍有微量变形不能消失而保留下来，这种变形叫塑性变形。

es 段：即屈服阶段。应力增大到 σ_s 时，保持载荷不变而试样的塑性变形却继续增加，这种现象称为屈服现象。屈服强度是指在外力作用下开始产生明显塑性变形的最小应力。用 σ_s 表示。

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

式中， F_s 为试样产生明显塑性变形时所受最小载荷，即拉伸曲线中 s 点所对应外力，N； A_0 为试样的原始截面积， mm^2 。

有些材料的拉伸曲线上没有明显的屈服点，故规定试样产生0.2%的残余应变时的应力作为该材料的条件屈服强度，以 $\sigma_{0.2}$ 表示。

sb 段：随载荷的增加，材料开始发生大量塑性变形，试样均匀伸长，直到 b 点。 F_b 是材料所能承受的最大载荷。故其所对应的应力称为材料的强度极限，又叫做材料的抗拉强度，常用 σ_b 来表示。

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

式中， F_b 指试样被拉断前所承受的最大外力，即拉伸曲线上 b 点所对应的外力，N； A_0 指

试样的原始截面积, mm^2 。

bk 段: 载荷达到 F_b 后, 试样局部截面缩小, 即产生颈缩现象, 如图 1-2 所示。所承受的载荷也逐渐降低, 当达到 k 点时, 试样被拉断。

σ_s / σ_b 比值称为屈强比。材料的屈强比越小, 构件的可靠性越高, 但材料的利用率越低, 材料的屈强比可通过合金化、热处理等手段加以调整(一般情况下选 0.85 左右)。

屈服强度和抗拉强度在设计机械和选择、评定金属材料时有重要意义, 因为金属材料不能在超过其 σ_s 的条件下工作, 否则会引起机件的塑性变形; 金属材料也不能在超过其 σ_b 的条件下工作, 否则会导致机件的破坏。

2. 塑性

材料在外力的作用下, 发生不能恢复原状的变形叫做塑性变形。材料在断裂前发生塑性变形的能力称为塑性。良好的塑性是金属材料进行塑性加工的必要条件, 衡量指标是伸长率(δ)和断面收缩率(ψ), δ 和 ψ 越大, 材料的塑性越好, 断面收缩率与试样尺寸无关。

伸长率:

$$\delta = \frac{(L_1 - L_0)}{L_0} \times 100\%$$

式中, L_0 为试样原标距的长度, mm ; L_1 为试样拉断后的标距长度, mm 。

材料伸长率的大小不仅取决于材料本身, 还受到试样标距 L_0 影响, 故短试样伸长率记为 δ_5 , 长试样的伸长率记为 δ_{10} , 对于同一种材料 $\delta_5 > \delta_{10}$ 。

断面收缩率:

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

式中, A_0 为试样的原始截面积, mm^2 ; A_1 为试样断面处的最小截面积, mm^2 。

3. 硬度

硬度是金属材料表面抵抗硬物压入的能力, 即材料对局部塑性变形的抵抗能力。根据使用条件的不同, 所用的硬度指标有多种, 如布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HR)、维氏硬度(HV)和肖氏硬度(HS)等, 其中前两种最常用。

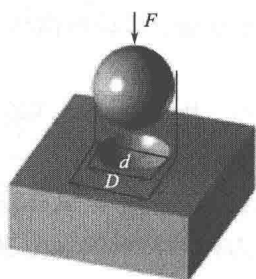
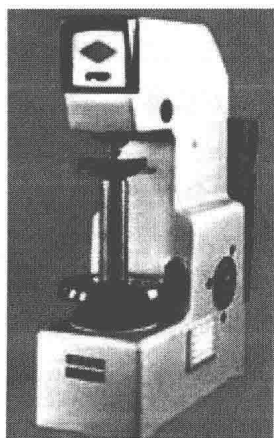


图 1-4 布氏硬度仪及工作原理

各种硬度间的粗略换算关系如下:

$$\text{HB} \approx \text{HV} \approx 10\text{HRC}, \text{HB} \approx 6\text{HS}.$$

(1) 布氏硬度。用一定直径 D 的淬火钢球(或硬质合金球)在规定载荷 F 的作用下, 压入被测材料的表面, 并保持一定时间, 然后测量压痕面积, 计算硬度值, 如图 1-4 所示。压痕面积越小则材料越硬。在硬度低时用淬火钢球作为压头, 布氏硬度值用 HBS 表示, 其最大有效测量值是 450HBS; 在硬度较高时用硬质合金球作为压头, 布氏硬度值用 HBW 表示, 其最大有效测量值是 650HBW。

布氏硬度测量准确,但测量范围有限,太薄、太硬(>650HBW)的材料不宜采用布氏硬度。

(2) 洛氏硬度。有多种测量指标,最常用的是 HRC。其测量方法是用 $150\text{kg} \cdot \text{f}$ ($1\text{kg} \cdot \text{f}=9.80665\text{N}$) 的载荷把顶角为 120° 的金刚石圆锥压头压入被测材料的表面,如图 1-5 所示,然后测量压痕的深度,换算成洛氏硬度值,其有效值范围是 $20\sim 67\text{HRC}$,低于此值的用 HRB 测量,高于此值的用 HRA 测量。洛氏硬度测量简单迅速,但不够准确。其和布氏硬度的换算关系大约是 $1\text{HRC}=10\text{HB}$ 。

(3) 维氏硬度。采用相对面夹角为 136° 的四棱锥金刚石压头,配以适当的试验力,压入被测材料的表面,通过测量压痕面积,计算出所测的硬度值,如图 1-6 所示。优点是测量范围可从最软到最硬,数值连续,且压痕较小,对工件的损坏不大。维氏硬度的符号记为 HV。

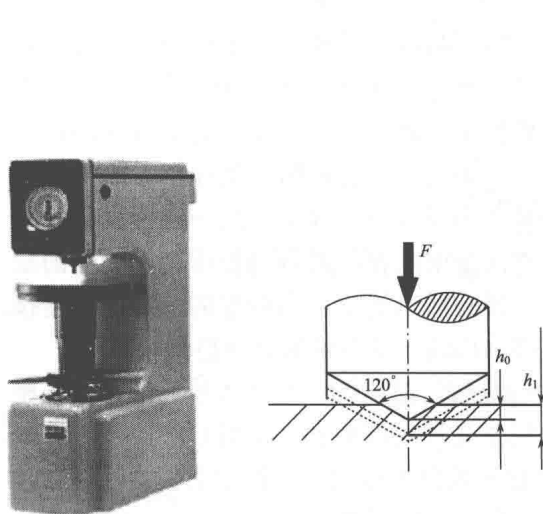


图 1-5 洛氏硬度仪及工作原理

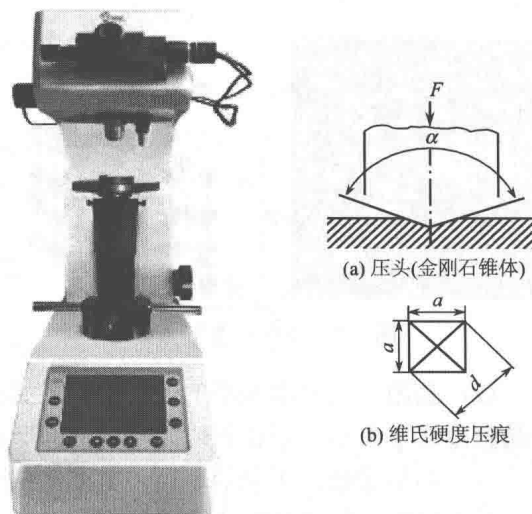


图 1-6 维氏硬度仪和原理图

4. 冲击韧性

在工程上,冲击载荷是一类重要的动载形式,材料受冲击而不破坏的能力,称为冲击韧性。冲击韧性的大小除取决于材料本身性能外,还受环境温度、试样大小、缺口形状等因素影响,一般不做零件设计的依据。

5. 疲劳强度

疲劳强度是机械零件失效的主要原因之一,对于轴、齿轮、轴承、叶片、弹簧等承受交变载荷的零件要选择疲劳强度较好的材料。许多机械零件工作时承受交变载荷的作用,即使交变应力往往低于屈服强度,但经一定循环次数后,材料仍会断裂。但当应力低于某一值时,材料可经无限次循环而不断裂,这一应力称为疲劳强度或疲劳极限。

6. 断裂韧性

工程中使用的材料,常存有一定的缺陷,如材料中存在一些微小的裂纹,其尖端易造成应力集中。当应力加大时,应力强度因子也随之加大(微裂纹扩展),当其加大到一定值时,材料发生断裂。断裂韧性是安全设计的一个重要的力学性能指标。

1.3 金属材料的晶体结构

工程材料的性能与其内部的晶体结构有密切关系,通过热处理或其他手段改变其结构,以获得更好的力学性能为目的,满足工件的使用要求。在自然界中,固体物质按其内部结构可分为晶体和非晶体两大类。除了少数物质属于非晶体外,固体金属基本上都是晶体。

(1) 晶体。原子在空间做有规则的排列。

(2) 非晶体。原子的排列是不规则的。

1.3.1 纯金属的晶体结构

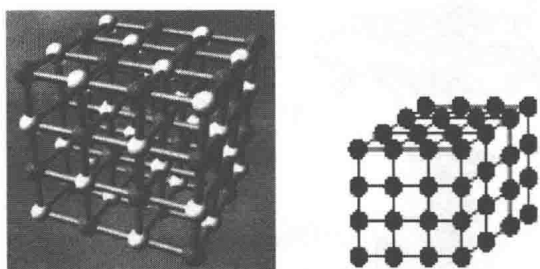


图 1-7 晶格示意图

(1) 晶格。晶体中原子排列的格式。如图 1-7 所示,为了分析问题的简便,对原子排列做了近似的简化处理。将实际晶体结构视为完整无缺理想晶体;把原子看成是不动的等径刚球质点,并简化成一点;原子在三维空间紧密堆积;没有局部排列不规则的缺陷;所有质点的中心用假想的平行直线连接起来,构成一个三维的几何格架。

(2) 晶胞。通常取晶格的一个基本单元来进行分析,晶格的一个基本单元叫晶胞。整个晶胞由许多大小、形状和位向相同的晶胞在空间重复堆积而形成。如图 1-8 所示。

(3) 晶格参数。不同的金属,其晶胞的大小和形状也不尽相同,描述它们的几何参数称为晶格参数,包括晶胞的三个棱边长度 a 、 b 、 c 和三个棱边的夹角 α 、 β 、 γ ,如图 1-9 所示。其中决定晶胞大小的三个棱长又叫做晶格常数,单位:埃($\text{\AA}$), $1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$ 。常见金属的晶格常数在 $2.5\sim 5.0\text{\AA}$ 。

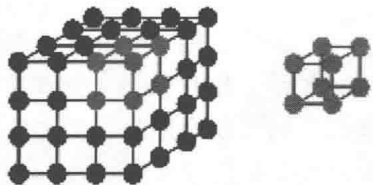


图 1-8 晶胞示意图

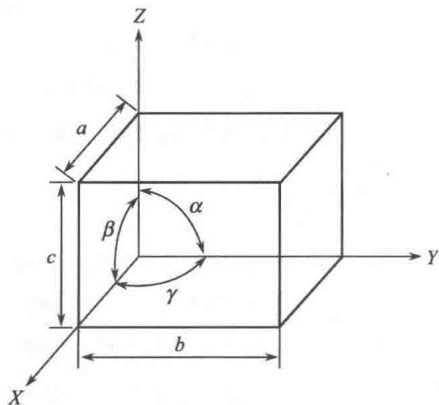


图 1-9 晶格常数

1.3.2 晶格的类型

不同的金属除了晶格常数不同外,晶格中原子的排列也不相同,最常见晶格有以下几种。

(1) 体心立方晶格。如图 1-10(a) 所示,晶胞是一个立方体,晶格参数 $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, 原子排列于立方体的各个结点和立方体的中心。属于这类晶格的金属有: Cr、Mo、W、V、 α -Fe(912℃以下的纯铁)。

(2) 面心立方晶格。如图 1-10(b) 所示,其晶胞是一个立方体,原子除了分布于立方体的 8 个顶点外,在每个面的中心也分布着一个原子。属于这类晶格的金属有: Cu、Al、Ni、Au、Ag、 γ -Fe(912~1394℃的纯铁)等。

(3) 密排六方晶格。如图 1-10(c) 所示,晶胞是一个六方柱体,晶格参数 $a=b \neq c$, $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$ 。属于这类晶格的金属有: Be、Mg、Zn、Ca 等。

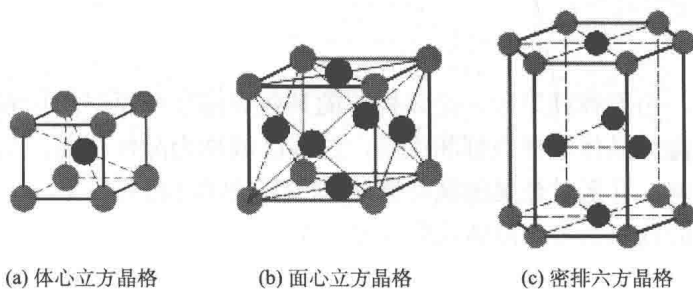


图 1-10 晶格类型示意图

在晶体中,由于各晶面和各晶向上的原子排列密度不同,因而在同一晶体的不同晶面和晶向上的各种性能不同,这种现象称为“各向异性”。单晶体具有各向异性的特征,而多晶体一般不具有各向异性。

1.3.3 纯金属的实际结构

如上介绍的是理想单晶体的结构,单晶体材料只有经过特殊制作才能获得,例如,半导体工业中的单晶硅。但在实际金属材料中,其晶体结构和理想晶体相差甚远。

1. 多晶体结构和亚结构

机器制造业中使用的金属都是多晶体,材料内部包含了许许多多的小晶体,其中的每一个小的晶体都称为一个晶粒,相邻的晶粒间晶格的位向有明显的差别,晶粒之间原子排列不规律的区域(晶粒之间分界面)称为晶界,由许多晶粒所组成的结构称为多晶体结构,如图 1-11 所示。

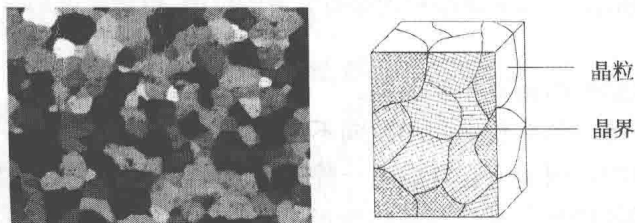


图 1-11 多晶体显微组织照片和微观示意图

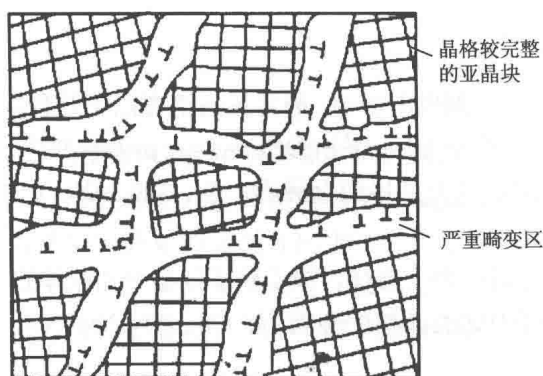


图 1-12 亚结构示意图

这种结构称为亚结构，亦称为亚晶粒或嵌镶块。两相邻亚结构的边界称为亚晶界。

2. 晶体的缺陷

在实际金属中，由于种种原因，晶体内部的某些局部区域原子的规则排列往往受到干扰而被破坏，不像理想晶体那样规则和完整，这些区域称为晶体缺陷。晶体缺陷对金属的性能有着很大的影响，甚至对金属的某些性能(如锻造性能)起着决定性的作用。

根据晶体缺陷的几何形态，晶体缺陷分成三类。

1) 点缺陷

(1) 空位。晶格的某些结点未被原子所占有，空着的位置称为空位。

(2) 间隙原子。晶格空隙处出现的多余原子。

(3) 置换原子。结点上的原子被异类原子所置换。

晶格点缺陷的出现，促使周围的原子发生靠拢或撑开，破坏了原来规则的晶格，改变晶格常数，造成了晶格的畸变，其内部产生应力，硬度、强度增加，发生固溶强化。如图 1-13 所示。

2) 线缺陷

线缺陷是晶体中呈线状分布的缺陷，其具体形式是各种类型的位错。所谓位错，是晶格中局部地区有一列或若干列原子发生有规则的错排现象，位错的基本类型有两种：刃位错和螺位错。

(1) 刃型位错。如图 1-14 所示，位错像刀刃一样切入晶体，使晶格多出一个原子面，造成晶格的畸变，在位错线附近的区域里产生应力。

(2) 螺型位错。晶格沿某一平面上下两部分发生错动，原子平面被扭成了螺旋面，晶格严重畸变，如图 1-15 所示。实际金属晶粒内存有大量的位错，位错密度通常在 $10^6 \sim 10^8 \text{ cm/cm}^3$ 。

3) 面缺陷

面缺陷主要指金属中的晶界和亚晶界。

工业金属是多晶体，各晶粒之间的位向不尽相同，故晶界处存在一个过渡层，过渡层的原子排列是不规则的，因而把它看成是一种缺陷。同理，亚晶界也是一种面缺陷。如图 1-16 所示。在晶格的缺陷处，都伴有晶格变形，产生应力，阻碍金属的进一步变形，故而表现出金属的强度、硬度提高。

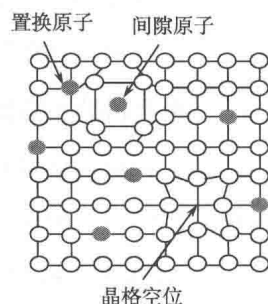


图 1-13 点缺陷示意图