

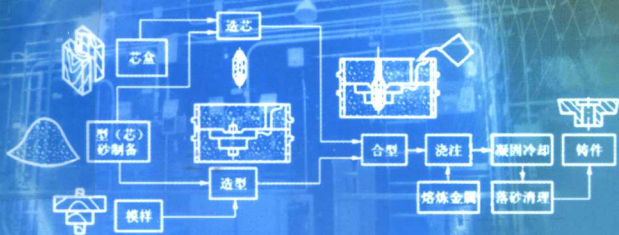


面向21世纪全国高职高专机电类规划教材

金属工艺学

JINSHU GONGYI XUE

孙朝阳 刘仲礼 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

面向 21 世纪全国高职高专机电类规划教材

金属工艺学

孙朝阳 刘仲礼 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本教材是根据教育部有关高职高专教材编写精神而编写的。

本书内容包括金属材料的基本知识、铸造、塑性成形、焊接、毛坯选择、金属切削加工基础知识、车钻镗加工、铣刨插拉加工、磨削及光整加工、典型表面的加工、零件结构工艺性及特种加工等。本书系统地叙述了有关金属工艺学的基本知识,并有最先进的工艺介绍,内容较全面;同时结合大量的图表,使叙述通俗易懂,各章还有配套的习题和思考题,供学生思考和复习。

本书是高等职业专科学校机械类专业的基本教材,也可供近机类、管理类的职工大学、电视大学、成人教育院校的相关专业选用。

图书在版编目(CIP)数据

金属工艺学/孙朝阳,刘仲礼编著. —北京:北京大学出版社, 2006.1

(面向 21 世纪全国高职高专机电类规划教材)

ISBN 7-301-09135-4

I. 金… II. ①孙… ②刘… III. 金属加工—工艺学—高等学校:技术学校—教材 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 069427 号

书 名: 金属工艺学

著作责任者: 孙朝阳 刘仲礼 编著

责任编辑: 黄庆生 刘 标

标准书号: ISBN 7-301-09135-4/TH·0027

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765013

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>

电子信箱: xxjs@pup.pku.edu.cn

印 刷 者: 河北涿县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×980 毫米 16 开本 12.5 印张 260 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 19.00 元

前 言

金属工艺学是一门研究有关制造金属机件的工艺方法的综合性技术科学的课程，是高职高专机械类各专业所开设的一门必修技术基础课。

本书的目的是使学生懂得有关金属材料和其他工程材料的基本知识，了解常用金属材料的成分、组织、性能及热处理工艺之间的关系。了解铸造、金属塑性加工、焊接、切削加工等工艺基础知识，为学习其他课程和从事生产技术工作打好必要的基础。在内容安排上，打破传统的内容体系，将各种工艺方法中基础、共性的知识综合在一起，放在前面首先介绍，为后续内容奠定基础。在介绍传统工艺方法的同时，更加注重了新方法、新技术及其发展趋势的介绍。同时，本书还配有大量的插图给学生以直观的学习和体验，各章后附有习题与思考题供学生复习和思考。

本书力求简洁明了、重点突出。对传统内容作了较大的压缩和调整，并尽量避免与金工实习的内容重复，使之更适应于学科调整后的学时安排。

本教材由刘仲礼编写第1、2、4、9、10、11、12章，孙朝阳编写3、5、6、7、8章，孙朝阳统编全稿。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2005年4月

目 录

第 1 章 金属材料的基本知识.....	1
1.1 金属材料的主要性能.....	1
1.1.1 金属材料的使用性能.....	1
1.1.2 金属材料的工艺性能.....	5
1.2 金属的晶体结构.....	6
1.2.1 晶体结构的基本概念.....	6
1.2.2 常见的金属晶体结构.....	7
1.2.3 金属实际晶体结构.....	8
1.2.4 合金的晶体结构.....	8
1.3 纯金属的结晶.....	9
1.3.1 结晶的概念.....	9
1.3.2 结晶的基本过程.....	10
1.4 铁碳合金.....	10
1.4.1 纯铁的同素异构转变.....	10
1.4.2 铁碳合金的基本组织.....	11
1.4.3 铁碳合金状态图.....	11
1.5 钢的热处理.....	14
1.5.1 钢的热处理的基本原理.....	15
1.5.2 钢的退火与正火.....	16
1.5.3 钢的淬火与回火.....	17
1.5.4 表面淬火.....	18
1.5.5 化学热处理.....	19
1.6 常用的金属材料.....	19
1.6.1 碳钢.....	19
1.6.2 合金钢.....	22
1.6.3 铸铁.....	25
1.7 习题与思考题.....	26
第 2 章 铸造.....	27
2.1 合金的铸造性能.....	27

2.2 砂型铸造	28
2.2.1 模样与芯盒	28
2.2.2 造型材料	29
2.2.3 造型与制芯	30
2.2.4 浇注系统	33
2.3 铸件结构的工艺性	34
2.3.1 铸造工艺对铸件结构的要求	34
2.3.2 金属的铸造性能对铸件结构的要求	37
2.4 特种铸造	40
2.4.1 熔模铸造	40
2.4.2 金属型铸造	41
2.4.3 压力铸造	43
2.4.4 离心铸造	44
2.5 习题与思考题	45
第3章 金属塑性成形	46
3.1 自由锻	46
3.1.1 自由锻的特点和应用	46
3.1.2 自由锻设备	47
3.1.3 自由锻工序	48
3.2 模锻	49
3.2.1 模锻的特点和应用	49
3.2.2 锤上模锻	50
3.2.3 压力机上模锻	52
3.2.4 胎模锻	55
3.3 板料冲压	56
3.3.1 板料冲压的特点和应用	56
3.3.2 冲压设备	56
3.3.3 冲压工序	57
3.3.4 模具的种类和构造	62
3.4 其他塑性加工方法	64
3.4.1 精密模锻	64
3.4.2 高速锤锻造	64
3.4.3 轧制	64
3.4.4 挤压	66
3.4.5 拉拔	67

3.5	塑性加工新技术.....	67
3.5.1	超塑性成形.....	67
3.5.2	旋压成形.....	68
3.5.3	液态模锻.....	70
3.5.4	高能率成形.....	70
3.6	习题与思考题.....	71
第4章	焊接.....	73
4.1	熔焊.....	73
4.1.1	熔焊基本原理.....	73
4.1.2	熔焊方法、特点及应用.....	74
4.2	压焊.....	81
4.2.1	电阻焊.....	81
4.2.2	其他压焊方法.....	82
4.3	钎焊.....	83
4.4	常用金属材料的焊接.....	84
4.4.1	金属材料的焊接性.....	84
4.4.2	钢的焊接.....	84
4.4.3	铸铁的焊补.....	85
4.4.4	有色金属及合金的焊接.....	86
4.5	焊接结构工艺性.....	87
4.6	习题与思考题.....	89
第5章	毛坯选用.....	91
5.1	机械零件毛坯选择的原则.....	91
5.2	常用机械零件的毛坯种类和选择.....	92
5.2.1	毛坯的种类.....	92
5.2.2	毛坯选择应考虑的因素.....	92
5.2.3	典型机械零件与结构件毛坯的选择.....	93
5.3	习题与思考题.....	94
第6章	金属切削加工的基础知识.....	95
6.1	金属切削的基本概念.....	95
6.1.1	切削运动.....	95
6.1.2	切削要素.....	96
6.2	金属切削刀具.....	98
6.2.1	金属切削刀具的几何参数.....	98
6.2.2	切削刀具材料.....	101

6.3	金属切削过程的基本规律.....	103
6.3.1	金属切削过程及其实质.....	103
6.3.2	切削力和切削功率.....	105
6.3.3	切削热与切削温度.....	106
6.3.4	刀具磨损与耐用度.....	107
6.4	材料切削加工性和切削用量的选择.....	109
6.4.1	工件材料的切削加工性.....	109
6.4.2	切削用量的合理选择.....	111
6.5	习题与思考题.....	113
第7章	车、钻、镗加工.....	115
7.1	车削加工.....	115
7.1.1	车削加工的工艺特点.....	115
7.1.2	车床.....	115
7.1.3	车刀.....	116
7.1.4	车削加工方法.....	117
7.2	钻削加工.....	123
7.2.1	钻削加工的工艺特点.....	124
7.2.2	钻床和钻刀.....	124
7.2.3	钻削加工方法.....	126
7.3	镗削加工.....	128
7.3.1	镗削加工的工艺特点.....	129
7.3.2	镗床和镗刀.....	129
7.3.3	镗削加工方法.....	131
7.4	习题与思考题.....	133
第8章	铣、刨、插、拉加工.....	134
8.1	铣削加工.....	134
8.1.1	铣削加工的工艺特点.....	134
8.1.2	铣床.....	134
8.1.3	铣刀.....	135
8.1.4	铣削加工方法.....	136
8.2	刨削、插削加工.....	138
8.2.1	刨削加工的工艺特点.....	138
8.2.2	刨床与插床.....	139
8.2.3	刨刀.....	141
8.2.4	刨削加工方法.....	142

8.2.5 插削加工方法.....	143
8.3 拉削加工	143
8.3.1 拉削加工的工艺特点.....	143
8.3.2 拉床和拉刀.....	144
8.3.3 拉削加工方法.....	145
8.4 习题与思考题.....	146
第9章 磨削及光整加工.....	147
9.1 磨削加工	147
9.1.1 磨床和砂轮.....	147
9.1.2 磨削加工方法.....	148
9.2 光整加工	151
9.2.1 研磨.....	151
9.2.2 珩磨.....	152
9.2.3 超级光磨.....	153
9.2.4 抛光.....	154
9.3 习题与思考题.....	155
第10章 典型表面的加工.....	156
10.1 外圆面的加工.....	156
10.1.1 外圆面的技术要求.....	157
10.1.2 外圆面加工方案及选择.....	157
10.2 孔的加工	158
10.2.1 孔的技术要求.....	158
10.2.2 孔加工方法及选择.....	158
10.3 平面加工	159
10.3.1 平面的技术要求.....	160
10.3.2 平面加工方案的分析.....	160
10.4 成形面的加工.....	160
10.4.1 成形面的技术要求.....	160
10.4.2 成形面加工方案及选择.....	161
10.5 螺纹加工	162
10.5.1 螺纹的技术要求.....	162
10.5.2 螺纹加工方案及选择.....	162
10.6 齿轮齿形的加工.....	165
10.6.1 齿轮的技术要求.....	165
10.6.2 齿轮齿形加工方法及选择.....	165

10.7 习题与思考题.....	169
第 11 章 零件结构的工艺性.....	170
11.1 概述.....	170
11.2 零件结构工艺性的设计原则及实例分析.....	170
11.2.1 便于在机床或夹具上安装.....	171
11.2.2 便于加工和测量.....	172
11.2.3 设计时要注意提高生产效率.....	173
11.2.4 提高标准化程度.....	177
11.2.5 应注意的其他问题.....	178
11.3 习题与思考题.....	179
第 12 章 特种加工.....	180
12.1 电火花加工.....	180
12.2 电解加工.....	181
12.3 超声波加工.....	183
12.4 激光加工.....	184
12.5 习题与思考题.....	186
参考文献.....	187

第 1 章 金属材料的基本知识

1.1 金属材料的主要性能

金属材料的性能是金属应用的重要依据,包括使用性能和工艺性能。使用性能是金属材料在使用过程中所表现出来的性能,包括力学性能、物理性能(电导性、热导性等)、化学性能(耐蚀性、抗氧化性等);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、热处理性能和切削加工性能等。

1.1.1 金属材料的使用性能

金属材料的使用性能主要表现为力学性能或机械性能,是指金属材料在外力(或载荷)作用下所表现出的抵抗变形和破坏的能力。常用的力学性能有强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。

1. 强度

强度是指在外力作用下金属材料抵抗变形和断裂的能力。工程上常用屈服点、抗拉强度作为强度判据。测定方法通常采用拉伸试验。

图 1.1 为拉伸用标准试样,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。试验时,将拉伸试样装夹在拉伸机上,缓慢增大拉伸力,随着拉伸力不断地增大,试样伸长量也不断增加,直至试样被拉断。在整个拉伸过程中,试验机的自动记录装置可将拉伸力与变形(伸长)量描绘在坐标图上,即得到拉伸力和伸长量的关系曲线,见图 1.2。图 1.2 是退火低碳钢的拉伸曲线,由图可见, oe 段为一斜直线,表示伸长量与拉伸力成正比,在此范围内卸除载荷,试验能完全恢复到原来的尺寸和形状,即试样处于弹性变形阶段。当载荷超过 F_e 时,试样除产生弹性变形外,还开始出现塑性变形(或称永久变形),即卸除拉伸力,试样不能完全恢复到原来的形状和尺寸。当载荷增加到 F_s 时,在曲线上开始出现水平(或锯齿形)线段,即表示载荷不增加,试样却继续伸长,这种现象称为屈服。载荷超过 F_s 后,试样的伸长又随载荷的增加而增大,此时试样已产生大量的塑性变形。当载荷继续增加到某一最大值 F_b 时,试样开始产生局部截面变小,出现“缩颈”。此时载荷逐渐减小,到达 k 点时试样被拉断。

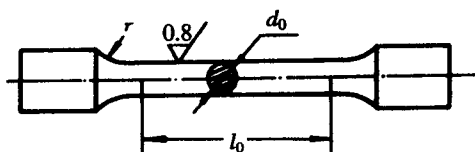


图 1.1 标准拉伸试样

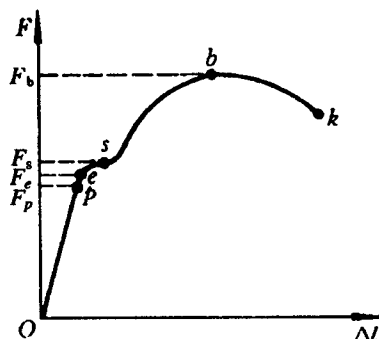


图 1.2 退火低碳钢的力-伸长曲线

金属材料受到载荷作用后，其内部产生一个与载荷相平衡的抵抗力（即内力），单位横截面积上的内力称为内应力，用 σ 表示。金属材料的强度是用应力来度量的。常用的强度指标有弹性极限、屈服点和抗拉强度。

(1) 弹性极限

材料产生完全弹性变形时所能承受的最大应力值，用符号 σ_e 表示。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0}, \text{ MPa}$$

式中： F_e ——试样产生完全弹性变形时的最大载荷，N；

S_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

(2) 屈服点

材料产生屈服现象时的最小应力值，用符号 σ_n 表示。

$$\sigma_n = \frac{F_n}{S_0}, \text{ MPa}$$

式中： F_n ——屈服时的最小载荷，N。

有些金属材料（如铸铁、高碳钢等）在拉伸试验中没有明显的屈服现象，因此测定 σ_n 很困难。国标中规定，此种试样的塑性变形量为试样标距长度的 0.2% 时的应力为屈服点，用符号 $\sigma_{0.2}$ 表示。

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0}, \text{ MPa}$$

式中： $F_{0.2}$ ——试样塑性变形且变形量为标距长度的 0.2% 时的载荷，N。

(3) 抗拉强度

材料被拉断前所能承受的最大应力值，用符号 σ_b 表示。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}, \text{ MPa}$$

式中： F_b ——试样断裂前所承受的最大载荷，N。

机械零件在工作中一般不允许产生塑性变形，所以屈服点是设计零件时的主要依据。抗拉强度是表示材料抵抗均匀塑性变形的最大能力，它也是设计零件和选材时的主要依据。

应当指出：有些零件在选材时，还应考虑材料的弹性模量。所谓弹性模量是指金属材料在弹性变形阶段应力与应变的比值，用符号 E 表示，即

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ MPa}$$

工程上常称弹性模量为刚度，用它来衡量金属材料抵抗弹性变形的难易程度。弹性模量值愈大，则材料的刚度愈大，材料抵抗弹性变形的能力就愈强。由于绝大多数机械零件都是在弹性状态下工作的，所以对其刚度都有一定的要求。

2. 塑性

塑性是指断裂前材料发生的不可逆永久变形的能力。常用的塑性指标是断后伸长率 δ 和端面收缩率 ψ ，一般通过拉伸试验来测定。

断后伸长率 δ 又称延伸率，是试样被拉断时，标距长度的伸长量 Δl 与原始标距 l_0 的百分比，即：

$$\delta = (\Delta l / l_0) \times 100\%$$

测试时注意，只有用相同标准试样测定的数值才有意义。

端面收缩率为试样拉断时，缩颈处横截面的最大缩减量 ΔS 与原始横截面面积的百分比，即：

$$\psi = (\Delta S / S_0) \times 100\%$$

断面收缩率不受试样尺寸的影响，可以较可靠地反映材料的塑性。

断后伸长率和断面收缩率的数值大表示金属材料的塑性变形能力大、塑性好。工程上一般把 $\delta > 5\%$ 的材料称为塑性材料，如低碳钢； $\delta < 5\%$ 的材料为脆性材料，如灰铸铁。

3. 硬度

材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力称为硬度。硬度值的物理意义随试验方法的不同而不同。工程上常用的有布氏硬度和洛氏硬度。

(1) 布氏硬度

布氏硬度试验是用载荷 F ，将直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球，在一定压力作用下，压入被测材料的表面（见图 1.3），保持一定的时间后卸去载荷，以载荷与压痕表面积的值作为布氏硬度值，用 HBS 或 HBW 表示，其单位为 kgf/mm^2 ，但一般都不标出。由于 F 和 D 都是定值，所以一般是先测得压痕直径 d ，根据 d 值查表确定材料的布氏硬度值，布氏硬度值越大，材料越硬。

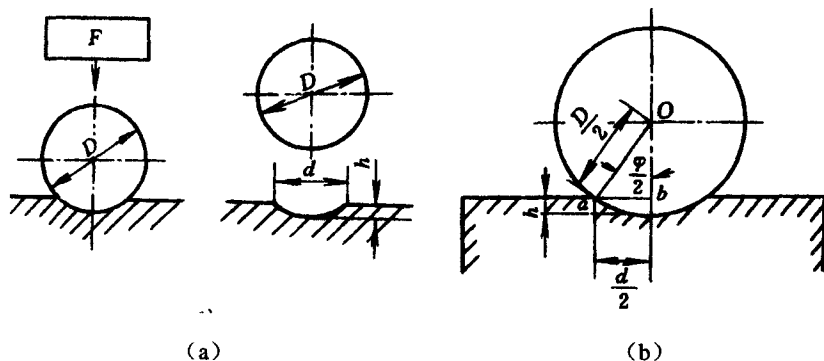


图 1.3 布氏硬度试验原理图

用布氏硬度试验测材料的硬度值，其测试数据比较准确，但不能测太薄的试样和硬度较高的材料。

(2) 洛氏硬度

洛氏硬度试验是用一定的载荷将顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588 mm 的淬火钢球压入被测试样表面，根据压痕的深度确定它的硬度值。洛氏硬度值可以从洛氏硬度计的刻度盘上直接读出。

用洛氏硬度计可以测量从软到硬的各种不同材料，这是因为它采用了不同的压头和载荷，组成各种不同的洛氏硬度标尺，如 HRA、HRB、HRC 等。一般生产中以 HRC（用 120° 金刚石圆锥体作压头，载荷为 1500 N ）用得最多，硬度值的表示方法与布氏硬度的相同，硬度值的有效范围为 $20\sim 70\text{ HRC}$ 。

洛氏硬度的优点：测量简单、迅速，并可测薄的试样和硬的材料，但不如用布氏硬度法准确。当 $\text{HBS} > 220$ 时， $\text{HRC}/\text{HBS} \approx 1/10$ 。

硬度也是材料重要的力学性能指标，硬度和强度一样，都反映了材料对塑性变形的抗力。硬度试验方法较简单，又不损坏零件，故在生产实践中往往通过测定材料的硬度来估算其强度指标。硬度还影响到材料的耐磨性，在一般情况下，硬度高时其耐磨性能也较好。

4. 冲击韧性

金属材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力称为冲击韧性。

不少机器零件，如冲床的连杆、锻锤的锤头、火车挂钩、冲模等，在工作时要承受冲击载荷，如果仍用静载荷作用下的指标来进行设计计算，就不能保证这些零件在工作时的安全性，故此必须同时考虑材料的韧性。目前工程上通常采用摆锤冲击试验来测量材料的冲击韧性，其原理如图 1.4 所示。

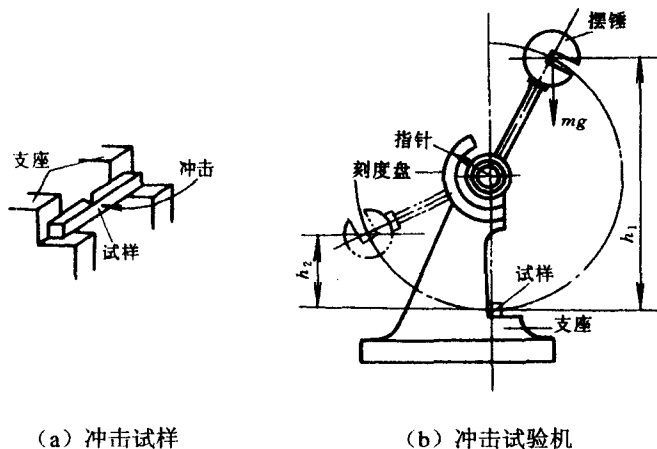


图 1.4 摆锤冲击试验示意图

先将被测材料制成一定形状和尺寸的试样，安放在冲击试验机上，把具有一定重量的摆锤提到 h_1 高度，此时摆锤的位能为 gh_1 ，然后让其自由下落，冲断试样，冲断试样后摆锤的剩余能量为 gh_2 ，摆锤冲断试样所消耗的位能称为冲击吸收功，用符号 A_{KV} 表示，单位为 J，即 $A_{KV} = g(h_2 - h_1)$ 。

A_{KV} 值越大，材料的韧性越好，但影响 A_{KV} 值的因素很多，因此 A_{KV} 只作为设计选材时的参考。

5. 疲劳强度

疲劳强度是指金属材料在多次交变载荷作用下而不致引起断裂的最大应力。交变载荷或重复应力使金属材料在远低于其屈服点时即发生断裂，因此具有很大的危险性，常造成严重事故。零件失效形式中，约有 80%~90% 是由于疲劳断裂而造成的。为了防止疲劳断裂的产生，必须设法提高零件的疲劳强度。疲劳强度除与选用材料的本性有关外，还可以通过以下三种方法提高零件的疲劳强度。

(1) 在零件结构设计方面尽量避免尖角、缺口和截面突变，以免应力集中及由此引起的疲劳裂纹。

(2) 降低零件的表面粗糙度，提高表面加工质量。

(3) 采用各种表面强化处理等。

1.1.2 金属材料的工艺性能

工艺性能是指金属材料适应加工工艺要求的能力。按照工艺方法的不同，有铸造性能、

锻压性能、焊接性能、切削性能等。它们往往是由材料的物理性能、化学性能、力学性能综合决定的。例如灰铸铁具有良好的铸造性能和切削加工性能，但其塑性较差，不能进行锻压，焊接性能也较差，因而常用来铸造形状复杂的铸件。

1.2 金属的晶体结构

不同的材料具有不同的性能，即使是同一种材料，在不同的结晶条件和热处理条件下也会具有不同的力学性能，这主要是因为其内部的晶体结构不同。因此要了解金属材料的性能与应用，就要了解这方面的知识。

1.2.1 晶体结构的基本概念

1. 晶体和非晶体

根据原子排列的特征，固态物质可分为晶体和非晶体两类。内部原子做无规则排列的物质称为非晶体，如普通玻璃、松香、塑料等。内部原子按一定几何形式有规则排列的物质称为晶体，如金刚石、石墨等。绝大多数固态金属及合金都是晶体。

2. 晶格和晶胞

为了研究原子的排列规律，可以把晶体中的每个原子假想为近似静态的刚性小球。这样，晶体就可看成是由许多刚性小球按一定几何规则排列起来的。如图 1.5a 所示。为了清楚地表明原子在空间排列的规律性，常常将构成晶体的实际质点（原子、离子或分子）忽略，而将它们抽象为纯粹的几何点，称之为阵点或结点。这些阵点可以是原子或分子的中心，也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心，各个阵点的周围环境都相同。为了观察方便，做许多平行的直线将这些阵点连接起来，构成一个三维的空间格架，如图 1.5b 所示，这种描述晶体中原子（离子或分子）排列规律的空间格架称为空间点阵，简称为点阵或晶格。

由于晶格中原子的排列具有周期性的特点，因此，为了简便起见，可以从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的最小几何单元，来分析晶体中原子的排列规律性，这个最小的几何单元称为晶胞（见图 1.5c）。晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度（称为晶格常数） a 、 b 、 c ，来表示晶胞的大小。

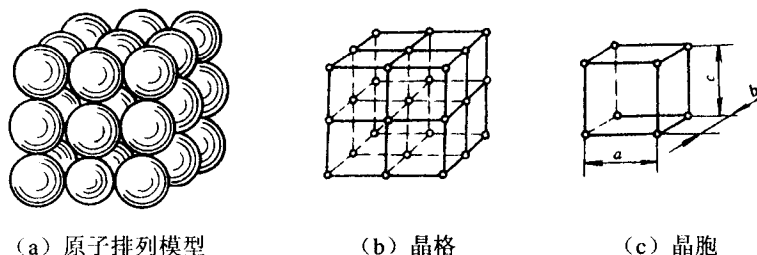


图 1.5 简单立方晶体结构示意图

1.2.2 常见的金属晶体结构

常见的晶体立方结构有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格三种类型。

(1) 体心立方晶格。体心立方晶格的晶胞是一个正立方体，其晶格常数 $a=b=c$ ，在立方体的八个顶角和立方体的中心各排列一个原子，如图 1.6 所示。具有这类晶格形式的金属有 α -Fe、钒、铬、钼、钨等。

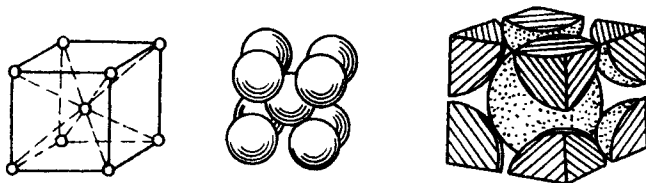


图 1.6 体心立方晶格晶胞示意图

(2) 面心立方晶格。面心立方晶格的晶胞也是一个正立方体，其晶格常数 $a=b=c$ ，在立方体的八个顶角和立方体的六个面的中心各有一个金属原子，如图 1.7 所示。具有这类晶格形式的金属有 γ -Fe、铝、镍、铜、铅等。

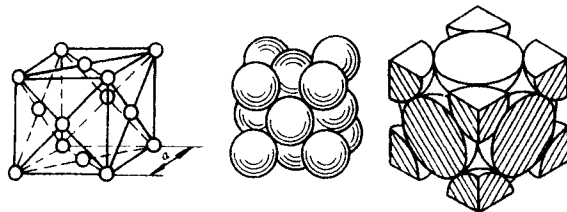


图 1.7 面心立方晶格晶胞示意图

(3) 密排六方晶格。密排六方晶格的晶胞是一个正六方柱体，其晶格常数常用正六边形底面边长 a 和上下两底面间距离 c 来表示，如图 1.8 所示。具有这类晶格形式的金属有铍、镁、钛、锌等。