

高等学校规划教材

金属工艺学实习

JINSHU GONGYIXUE SHIXI

■ 王宏 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等学校规划教材

金属工艺学实习

主 编 王 宏
副主编 吴明亮 陈秀娟
参 编 余淑荣 曹立宏



机械工业出版社

本书是根据国家教委有关金属工艺学实习最新基本要求,并结合高等工科院校金属工艺学实习实际编写而成的。

全书共分 13 章,主要内容有:金属材料及钢的热处理、铸造、锻压、焊接、车、铣、刨、磨、钳工加工、非金属材料及成型方法、数控机床及表面处理技术等。书中名词术语及技术标准均采用最新国家标准或有关部门标准。

本书适合作为高等工科院校本科各专业的金属工艺学实习教材,亦可供电视大学、职工大学有关专业学生选用,也可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

金属工艺学实习/王宏主编. —北京:机械工业出版社, 2005.8

ISBN 7-111-17020-2

I. 金… II. 王… III. 金属加工-工艺学 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 081689 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:曲彩云 责任印制:侯新民

廊坊市长虹印刷有限公司·新华书店北京发行所发行

2005 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·19.25 印张·458 千字

定价:28.00 元

前 言

制造业是国民经济的基础工业，而机械制造又是制造业的基础。机械制造业水平成了衡量一个国家发达水平的标志。在科学技术高度发展的今天，任何科学技术革命，也都离不开材料和装备方面的突破。而材料制备和装备水平方面的突破，本身就是以机械制造业为基础的技术革命。

金属工艺学是一门研究金属材料的性能，以及研究如何把金属材料制造成所需机械零件、机械装备的基础学科。金属工艺学是一门实践性很强的学科。离开了实践环节，就无法进入理论部分的学习。金属工艺学实习是整个金属工艺学课程的重要组成部分。是课堂教学的必要前提；同时，也为学生学习后续课程以及为其后从事机械制造和机械设计方面的工作，打下必要的实践基础。为此，本书着重介绍金属的主要成形方法和加工方法；有关的典型设备和工具的工作原理、结构和使用方法；毛坯制造和零件加工的一般过程及其有关的安全操作技术。在叙述和表达上力求直观形象、深入浅出，但不作理论上的系统阐述，以免脱离实习要求，或与讲课教材重复。

本书可供学生在实习期间预习和复习用。各章节均附有复习思考题，体现各部分的基本要求，可供教师和教学技工检查实习效果时参考，也可帮助学生掌握实习的要求和重点。

目 录

前言

第一章 机械工程材料基本知识 1

第一节 金属材料的性能 1

一、金属材料的力学性能 1

二、金属材料的物理性能和化学性能 4

三、金属材料的工艺性能 5

第二节 金属晶体的结构 5

一、金属晶体的结构 5

二、金属的结晶 6

三、金属晶体的同素异构转变 7

四、合金的晶体结构 7

五、二元合金相图的概念 8

第三节 铁碳合金 9

一、铁碳合金的基本组织 9

二、Fe-Fe₃C 状态图 10

三、典型铁碳合金的组织转变 11

四、含碳量对碳素钢性能的影响 13

五、Fe-Fe₃C 状态图的应用 14

第四节 常用金属材料 14

一、钢 15

二、铸铁 17

三、铸钢 18

四、铜合金及铝合金 18

第五节 钢的常用热处理 20

一、热处理基本概念 20

二、钢的热处理工艺 20

三、常用热处理设备 31

四、钢的热处理新技术简介 32

第六节 钢铁材料的现场鉴别 34

一、火花鉴别法 34

二、色标鉴别法 36

三、断口宏观鉴别法 36

四、音色鉴别法 36

第七节 常用非金属材料 36

一、高分子材料 36

二、陶瓷材料 39

三、复合材料 41

复习思考题 42

第二章 铸造 44

第一节 铸造生产过程 45

一、砂型铸造的生产过程 45

二、砂型及其组成 45

三、模样与芯盒 46

第二节 型(芯)砂 46

一、型(芯)砂的组成 46

二、型(芯)砂应具备的性能 47

三、型(芯)砂的制备与检验 47

第三节 造型造芯方法 48

一、手工造型 48

二、机器造型 51

三、造型芯 53

四、合型(合箱) 55

第四节 砂型铸造工艺设计 55

一、分型面和浇注位置 56

二、浇注系统和冒口 56

三、铸造工艺参数 59

四、铸造工艺图 59

第五节 合金的熔炼、浇注及铸件的清理 60

一、合金的熔炼 60

二、合金的浇注 63

三、铸件的落砂清理 63

四、铸件的清理 63

第六节 特种铸造 64

一、熔模铸造 64

二、金属型铸造 64

三、压力铸造 65

四、离心铸造 67

第七节 铸件质量分析 67

一、常见铸件缺陷及分析 67

二、铸件缺陷的检验 68

三、铸件质量控制 68

第八节 铸造新技术简介 69

一、陶瓷型铸造 69

二、挤压铸造	70	四、压焊	117
三、实型铸造	70	五、钎焊	119
四、磁型铸造	71	第四节 焊接质量分析	120
五、连续铸造	72	一、焊接变形	120
复习思考题	72	二、常见焊接缺陷及分析	121
第三章 锻压	74	三、焊接检验	121
第一节 锻坯的加热与锻件冷却	76	复习思考题	122
一、锻坯的加热与锻造温度范围	76	第五章 切削加工的基础知识	123
二、加热缺陷及其防止	76	第一节 切削加工的概念	123
三、加热设备	77	一、切削运动	123
四、锻件的冷却	78	二、切削三要素	124
五、锻件的热处理	79	第二节 零件的加工质量	125
第二节 自由锻造	79	一、尺寸精度	125
一、自由锻设备及工具	79	二、形状精度	125
二、自由锻基本工序	83	三、位置精度	125
三、典型自由锻件工艺示例	89	四、表面粗糙度	126
第三节 模型锻造	90	第三节 常用刀具材料	127
一、模锻设备	91	一、对刀具材料的基本要求	127
二、锻模结构及工作过程	91	二、常用刀具材料及应用	127
三、胎模锻	92	第四节 金属切削机床的分类与编号	128
第四节 板料冲压	93	一、机床型号的表示方法	128
一、冲压设备	93	二、机床的类别及其代号	129
二、板料冲压基本工序	94	三、机床的特性及其代号	129
三、冲模结构	96	四、机床的组别和系别	129
四、典型冲压件工艺示例	97	五、主参数及其表示	130
第五节 锻压件质量分析	98	第五节 常用量具及其使用	131
一、锻件质量分析	98	一、钢直尺	131
二、冲压件质量分析	99	二、卡钳	131
复习思考题	99	三、游标卡尺	131
第四章 焊接	101	四、千分尺	133
第一节 焊条电弧焊	102	五、百分表	135
一、焊条电弧焊焊接过程	102	六、塞规和卡规	135
二、焊条电弧焊设备	103	七、块规	136
三、电焊条	104	八、塞尺	136
四、焊条电弧焊基本操作	106	九、刀口形直尺	137
五、焊条电弧焊工艺	107	十、90°角尺	137
第二节 气焊与气割	109	十一、万能角度尺	137
一、气焊	109	十二、量具的保养	138
二、气割	114	复习思考题	138
第三节 其他焊接方法	115	第六章 钳工	139
一、埋弧焊	115	第一节 概述	139
二、气体保护电弧焊	116	第二节 钳工工作台和台虎钳	139
三、电渣焊	117	一、钳工工作台	139

二、台虎钳	139	第二节 车刀及其安装	171
三、使用台虎钳注意事项	139	一、车刀的种类及应用	171
第三节 划线	140	二、车刀的结构	171
一、划线工具及使用方法	141	三、车刀的刃磨	173
二、划线基准	145	四、车刀的安装	173
三、划线步骤	145	第三节 工件的安装	175
第四节 铰削	147	一、用三爪自定心卡盘安装工件	175
一、铰削工具	147	二、用四爪单动卡盘安装工件	176
二、铰削方法	147	三、用顶尖安装工件	176
三、铰削应用	148	四、用一夹一顶方式安装工件	177
四、铰削操作应注意的事项	149	五、用花盘、弯板安装工件	178
第五节 锯削	150	六、用心轴安装	178
一、手锯的构造	150	七、中心架和跟刀架	179
二、锯切操作	151	第四节 车床操作要点	180
三、锯切应用	152	一、粗车和精车	180
第六节 锉削	153	二、刀架极限位置检查	181
一、锉刀	153	三、刻度盘及其正确使用	181
二、锉削的操作	154	四、对刀和试切、试量	182
三、锉削应用	154	第五节 基本车削方法	182
四、锉削时注意事项	154	一、车外圆	183
第七节 刮削与研磨	156	二、车端面 and 台阶	183
一、刮削	156	三、切槽和切断	184
二、研磨	158	四、钻孔、镗孔	185
第八节 攻螺纹和套螺纹	159	五、车锥面	187
一、攻螺纹	159	六、车成形面	188
二、套螺纹	160	七、车螺纹	189
三、攻螺纹和套螺纹时可能出现的问题及其原因	161	八、滚花	192
第九节 装配	161	第六节 典型零件车削工艺	193
一、装配的概念	161	一、制定零件加工工艺的内容、步骤和本原则	193
二、产品装配的步骤	162	二、轴类零件的加工工艺	194
三、传动轴组件装配示例	162	三、盘套类零件的加工工序	195
四、紧固件的装配	162	第七节 车削安全技术	197
五、轴承的装配	164	复习思考题	197
六、对拆卸工作的要求	164	第八章 钻削和镗削	199
复习思考题	165	第一节 钻削概述	199
第七章 车削	167	一、钻削运动	199
第一节 车削基本知识	167	二、钻削加工范围	199
一、概述	167	第二节 钻床	200
二、卧式车床的编号	167	一、台式钻床的组成和应用	200
三、普通车床主要部分的名称和用途	167	二、立式钻床的组成及应用	200
四、普通车床的传动系统	169	三、摇臂钻床的组成及应用	201
五、空车练习注意事项	171	第三节 钻床上用的刀具	201

一、麻花钻头	201	第三节 刨刀	226
二、扩孔钻	202	一、刨刀特点	227
三、铰刀	202	二、刨刀的种类及其应用	227
第四节 钻孔、扩孔、铰孔	203	第四节 工件的装夹	227
一、刀具的安装	203	一、平口钳装夹	227
二、工件的装夹	204	二、压板螺栓装夹	228
三、钻孔	205	三、用弯板装夹工件	229
四、扩孔	205	四、专用夹具装夹	229
五、铰孔	205	第五节 刨削方法	229
第五节 镗削	206	一、刨平面	229
一、镗床	206	二、刨垂直面	230
二、镗刀	207	三、刨斜面	230
复习思考题	208	四、刨直角沟槽	230
第九章 铣削	209	五、刨燕尾槽	231
第一节 概述	209	六、刨 V 形槽	232
一、铣削加工的范围	209	七、刨 T 形槽	232
二、铣削的加工精度	209	八、刨成形面	233
三、常用铣床	209	九、长方形刨削练习实例	233
第二节 铣削基础知识	212	第六节 其他刨削类机床	235
一、铣削运动	212	一、龙门刨床	235
二、铣削方式	212	二、插床	236
三、铣刀	212	第七节 拉削加工简介	237
第三节 铣床的主要附件	214	一、拉床及拉削特点	237
一、回转工作台	214	二、拉刀	237
二、万能铣头	214	三、在拉床上完成的工作	238
三、分度头	215	复习思考题	238
第四节 铣削	216	第十一章 磨削	239
一、铣平面	216	第一节 概述	239
二、铣斜面	217	第二节 磨床	240
三、铣沟槽	218	一、外圆磨床	240
四、铣成形面和曲面	218	二、内圆磨床	241
五、镗床镗孔	219	三、平面磨床	242
第五节 齿形加工	219	第三节 砂轮	243
一、成型法	219	一、砂轮的种类	243
二、展成法(又称范成法)	220	二、砂轮的检查、安装、平衡和修整	243
复习思考题	222	第四节 磨削的加工方法	244
第十章 刨削	223	一、外圆磨削	244
第一节 概述	223	二、内圆磨削	246
第二节 牛头刨床	224	三、圆锥面的磨削	246
一、牛头刨床的编号	224	四、平面磨削	246
二、牛头刨床的组成部分	224	复习思考题	247
三、牛头刨床的主要传动系统	225	第十二章 数控加工	248
四、牛头刨床的调整	226	第一节 基本概念	248

一、数控加工发展史·····	248	一、电火花加工原理·····	279
二、数控机床的基本结构·····	248	二、电火花加工的特点及应用·····	279
三、数控机分类·····	249	三、电火花成型机床的组成·····	280
四、数控加工的特点与应用·····	250	四、电火花成型加工特点·····	280
第二节 数控系统与伺服系统的结构与 工作原理·····	251	五、电极材料的选用·····	281
一、数控系统 (CNC) ·····	251	六、工作液种类及要求·····	281
二、伺服系统·····	252	七、电火花成型加工的一般工艺规律·····	281
第三节 数控机床机械系统的结构特点与 性能特点·····	253	八、数控电火花成型机床简介·····	282
一、机械传动系统结构较简单·····	253	九、电火花成型典型加工实例·····	282
二、每一个坐标方向的运动,都单独采用 一台电动机或伺服电动机进行驱动·····	253	第二节 电解加工·····	283
三、数控机床的进给系统多采用滚珠丝 杠—螺母传动副将伺服电动机的转动 换成工作台的平动·····	254	一、加工原理·····	283
第四节 数控编程基础·····	254	二、电解加工机床简介·····	284
一、几个最基本的机床数控原理·····	254	三、电解加工的特点及应用·····	284
二、编制数控程序的基本步骤·····	256	第三节 激光加工·····	285
三、编程坐标系·····	258	一、激光的特性及激光加工的原理、分类和 特点·····	285
四、程序段格式·····	260	二、激光加工机和加工用激光器·····	286
五、绝对值方式编程与增量方式编程·····	263	三、激光加工工艺及其应用·····	287
第五节 数控车削加工编程·····	264	第四节 超声波加工·····	290
一、设置编程坐标系原点与坐标值·····	264	一、超声波加工的特点·····	290
二、G 功能与 M 功能 ·····	265	二、超声波加工装置·····	291
三、数控车床常用编程语句示例·····	265	三、超声波加工的应用·····	291
四、数控车削典型零件编程实例·····	268	第五节 快速原型/零件制造技术 ·····	292
第六节 数控铣削加工编程·····	272	一、光固化法 (Stereolithography, SL) ···	292
一、数控铣床的坐标系·····	272	二、叠层制造法 (Laminated Object Manufacturing, LOM) ·····	292
二、数控铣削常用的功能代码·····	272	三、选区激光烧结法 (Selective Laser Sintering, SLS) ·····	293
三、编程实例·····	274	四、熔积造型法 (Fused Deposition Modeling, FDM) ·····	293
复习思考题·····	277	五、三维打印法 (Three - Dimensional Printing, 3DP) ·····	293
第十三章 特种加工 ·····	278	复习思考题·····	294
第一节 电火花成形技术·····	279	参考文献 ·····	295

第一章 机械工程材料基本知识

基 本 要 求

1. 了解金属材料常用的力学性能指标;
2. 了解金属材料晶体结构及性能特点;
3. 了解相图概念、熟悉铁碳合金相图;
4. 了解常用钢铁材料的牌号、性能及用途;
5. 了解钢的热处理工艺过程;
6. 认识钢的退火、正火、淬火和回火等常用热处理工艺及表面淬火和化学热处理技术;
7. 了解钢铁材料的鉴别方法及常用碳钢和铸铁的火花特征;
8. 了解工程非金属材料的种类、性能和用途。

工程材料是现代工业、农业、国防和科学技术赖以存在和发展的物质基础。工程材料分金属材料和非金属材料两大类。常用的工程材料有钢铁材料、非铁金属、高分子材料、陶瓷材料和复合材料等。目前,金属材料仍然是机械行业应用最为广泛的工程材料,这是因为金属材料具有良好的使用性能和工艺性能。为了合理地选用材料,必须研究材料的结构、组织与性能之间的关系,以充分发挥材料的潜力,改善和提高材料的性能。

第一节 金属材料的性能

金属材料的性能主要是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表现出来的性能,包括力学性能、物理性能和化学性能等。工艺性能是指金属材料对各种加工工艺的适应能力,包括铸造、锻造、焊接、切削加工和热处理工艺性能等。只有了解和掌握金属材料的各种性能,才能正确选择和使用金属材料。

一、金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指金属材料在外力作用下所表现出来的性能,是机械设计及制造过程中选择材料的主要依据。其主要指标有强度、硬度、塑性、冲击韧性、疲劳强度等。金属材料在加工和使用过程中所受到的外力称为载荷。载荷根据作用性质的不同,可分为静载荷、冲击载荷及交变载荷。

(一) 强度

金属材料在外力作用下抵抗永久变形(塑性变形)和断裂的能力称为强度。根据载荷作用性质不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗扭强度和抗剪强度等。工程上常以屈服强度和抗拉强度作为材料强度指标。

强度指标一般通过金属的拉伸实验来测定。把材料的标准拉伸试样装夹在万能试验机上,使其在拉伸载荷作用下逐渐伸长,在拉伸同时连续测量载荷与相应的伸长量,直到拉断

为止, 根据测得数据绘制力 - 伸长曲线, 即可得到相关的力学性能指标。

1. 低碳钢的力 - 伸长曲线

退火低碳钢的力 - 伸长曲线如图 1-1 所示。图中纵坐标表示力 F (N), 横坐标表示试样伸长量 Δl (mm)。由图可见, 低碳钢试样在拉伸过程中, 有以下几个变形阶段:

(1) OE - 弹性变形阶段: 此时载荷 $F < F_e$, 伸长量 Δl 与拉力 F 成正比, 试样只产生弹性变形, 当外力去除后, 试样完全恢复到原来的长度。 F_e 为材料能恢复原状的最大拉力。

(2) ES - 屈服阶段: 当 $F > F_e$ 时, 试样除产生弹性变形外, 还产生部分塑性变形, 此时若卸载, 试样则不能恢复原来的长度。当外力达到 F_s 时, 力 - 伸长曲线上会出现一段水平或锯齿形线段, 表示当 F_s 不变或略有变化时, 试样变形在继续。这种现象称为屈服, F_s 称为材料的屈服载荷。

(3) SB - 强化阶段: 当 $F > F_s$ 后, 试样伸长量 Δl 与拉力呈曲线关系上升。表明当载荷超过 F_s 值后, 试样开始产生大量的塑性变形。图中 F_b 为拉伸试验时的最大载荷。

(4) BK - 缩颈阶段: 当载荷达到 F_b 时, 试样的局部截面突然缩小, 这种现象称为“缩颈”。当达到 K 点时, 试样被拉断。

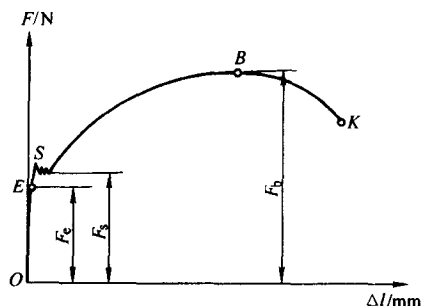


图 1-1 低碳钢的力 - 伸长曲线

2. 强度指标

工程上常用的强度指标为屈服强度和抗拉强度。

(1) 屈服强度: 材料产生屈服时的最小应力值称为屈服点, 用符号 σ_s 表示。其计算公式为

$$\sigma_s = F_s / S_0$$

式中 σ_s —— 屈服强度 (MPa);

F_s —— 试样产生屈服时的最小载荷 (N);

S_0 —— 试样原始横截面积 (mm^2)。

(2) 抗拉强度: 材料在断裂前所承受的最大拉应力称为抗拉强度, 用符号 σ_b 表示。其计算公式为

$$\sigma_b = F_b / S_0$$

式中 σ_b —— 抗拉强度 (MPa);

F_b —— 试样断裂前所承受的最大载荷 (N);

S_0 —— 试样原始横截面积 (mm^2)。

σ_b 越大, 说明材料抵抗破坏的能力越强。因此, σ_b 是一个重要的强度指标。

(二) 塑性

塑性是指材料在外加载荷作用下, 产生永久变形而不断裂的能力。一般用伸长率和断面收缩率来表征材料的塑性。

1. 伸长率

伸长率是指试样拉断后的伸长量与试样原始长度的百分比，用 δ 表示。其计算公式为

$$\delta = (l_1 - l_0) \times 100\% / l_0$$

式中 l_1 —— 试样拉断后的长度 (mm);

l_0 —— 试样的原始长度 (mm); 当 $l_0 = 10d_0$ 时, 伸长率用 δ_{10} 表示; 当 $l_0 = 5d_0$ 时, 伸长率用 δ_5 表示, 其中 d_0 为试样原始截面直径。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断后缩颈处横截面积的缩减量与试样原始横截面积的百分比, 用 ψ 表示。其计算公式为

$$\psi = (S_0 - S_1) \times 100\% / S_0$$

式中 S_0 —— 试样的原始横截面积 (mm^2);

S_1 —— 试样拉断处的最小横截面积 (mm^2)。

(三) 硬度

材料表面抵抗硬物压入的能力称为材料的硬度。它是指材料抵抗局部变形, 特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。硬度越高, 材料的耐磨性能越好。

硬度的测试方法很多, 有压入法、划痕法、回跳硬度试验法、超声波试验法等。在压入试验法中, 常用的有布氏硬度试验法和洛氏硬度试验方法。

1. 布氏硬度

如图 1-2a, 用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球作为压头, 在静载荷 P 的作用下压入被测试金属表面, 保持一定时间后卸载, 测量金属表面形成的压痕直径 d , 以压痕单位面积所承受的压力作为被测金属的布氏硬度值。

根据采用压头材料的不同, 布氏硬度有 HBS 和 HBW 两种指标, 前者所用压头为淬火钢球, 适用于布氏硬度值低于 450 的金属材料, 如退火钢、正火钢、调质钢及铸铁、非铁金属等; 后者压头为硬质合金, 适用于布氏硬度值为 450~650 的金属材料, 如淬火钢等。

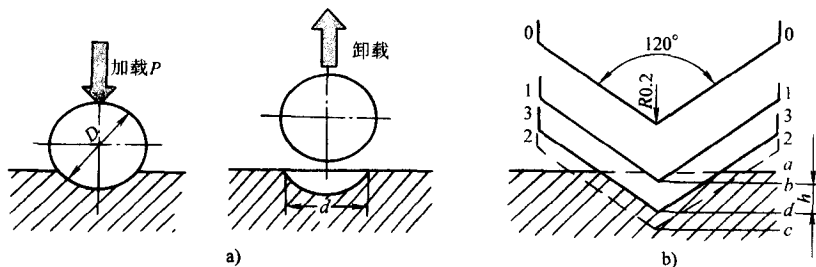


图 1-2 硬度测试原理示意图

采用布氏硬度测试时, 因压痕较大, 故不宜测试成品件或薄片金属的硬度, 以免对产品造成损害。

2. 洛氏硬度

如图 1-2b, 用锥顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 $\phi 1.588\text{mm}$ ($1/16\text{in}$) 的淬火钢球为压头, 以一定的载荷压入被测金属材料表面, 根据压痕深度计算材料硬度值。洛氏硬度计是一种压入法硬度试验的设备, 金刚石圆锥体压头多用来测定淬火钢等较硬的金属材料; 淬

硬钢球多用来测定退火钢等较软的金属材料。

试验时用金刚石圆锥压头或钢球，在规定的预载荷和总载荷作用下，将其压入被测材料的表面，卸载后，在预载荷下测定压入深度增量 h 。 h 值愈大，则硬度愈低，反之则硬度愈高。由于压头不同和施加载荷不同，洛氏硬度有几种标尺，分别为 HRA、HRB 和 HRC。

采用压头为 120° 金刚石圆锥体，施加 600N 静压力时，用 HRA 表示。其测量范围为 60 ~ 85，适于测量硬质合金、表面硬化钢及较薄零件。

采用压头为 $\phi 1.588\text{mm}$ 淬火钢球、施加压力为 1000N 时，用 HRB 表示，其测量硬度值范围为 25 ~ 100，适于测量非铁金属、退火钢、正火钢及可锻铸铁等。

采用压头为 120° 金刚石圆锥体、施加压力为 1500N 时，用 HRC 表示，其测量硬度值范围为 20 ~ 67，适于测量淬火钢、调质钢等。

洛氏硬度测试法操作迅速、简便，压痕小，不损伤工件表面，适合于成品检验。

硬度是材料的重要力学性能指标。一般来讲，材料的硬度越高，其耐磨性越好；材料的强度越高，塑性变形抗力越大，硬度值也越高。

（四）冲击韧度

许多机器零件在实际工作中往往要受到冲击载荷的作用，相同时间内冲击载荷引起的应力和变形要比静载荷大得多，此时材料的性能指标不能单纯用静载荷作用下的指标来衡量，必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。

冲击韧度是指材料抵抗冲击载荷作用而不破坏的能力。一般通过冲击试验来测定金属材料的冲击韧度。

（五）疲劳强度

金属材料的疲劳（又称疲劳断裂）是指金属材料在交变载荷作用下产生裂纹或突然发生断裂的现象。据统计，金属零件断裂的原因 80% 是由于疲劳造成的。

疲劳强度是指材料经无数次交变载荷作用而不发生断裂的最大应力，通过疲劳试验可得到材料的疲劳强度指标。

二、金属材料的物理性能和化学性能

1. 金属材料的物理性能

金属材料的物理性能主要包括密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性和磁性等。

（1）密度：单位体积金属的质量。材料不同，其密度也各不相同。

（2）熔点：金属材料由固态向液态转变时的温度。熔点表征金属材料的耐热性能，熔点的高低由金属材料的成分决定。

（3）导热性：金属材料的热传导能力。热导率是衡量金属材料导热性的主要指标。热导率越大导热性就越好，其散热性也越好。

（4）导电性：金属材料传导电流的能力。电导率是衡量金属材料导电性的主要指标。

（5）热膨胀性：随着温度的变化金属体积发生膨胀或收缩的特性。

（6）磁性：金属材料在磁场中被磁化的能力。

2. 金属材料的化学性能

金属材料的化学性能主要包括耐腐蚀性、抗氧化性和化学稳定性等。

（1）耐腐蚀性：金属材料抵抗腐蚀破坏的能力。提高金属的耐腐蚀性，对于节约材料、延长零件使用寿命具有十分重要的意义。

(2) 抗氧化性：金属材料在高温下抵抗氧化作用的能力，氧化性一般随温度升高而加速。为避免金属材料被氧化，常在金属材料周围造成一种保护气氛。

(3) 化学稳定性：化学稳定性是金属材料的耐腐蚀性和抗氧化性的总称。

三、金属材料的工艺性能

金属材料的工艺性能是指金属材料经过加工获得优质产品的难易程度，是金属材料力学性能、物理性能、化学性能的综合体现。包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能等。材料工艺性能的好坏直接影响零件加工质量和生产成本，因此是选择零件材料和制定零件加工工艺必须考虑的因素之一。

第二节 金属的晶体结构

不同的金属材料具有不同的力学性能和物理化学性能。同一种金属材料在不同组织和不同状态下其性能也会有很大差异。

自然界中的固体物质按原子内部排列的有序程度不同可分为晶体和非晶体两大类。固态下原子按一定规律排列的物质称为晶体，食盐、金刚石、石墨、多数金属及合金都是晶体。晶体中原子排列情况的模型如图 1-3 所示。原子杂乱无序、作无规则排列的物质则称为非晶体，如普通玻璃、松香和塑料等。

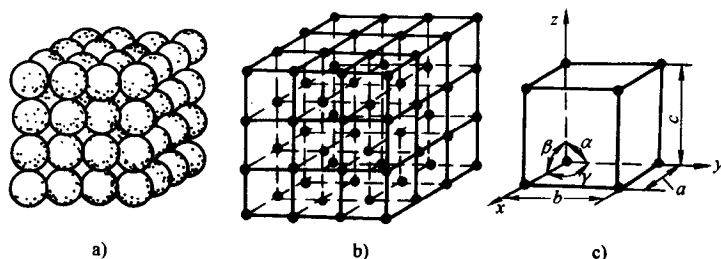


图 1-3 简单立方晶体结构示意图

a) 原子排列模型 b) 晶格 c) 晶胞

一、金属晶体的结构

1. 晶格和晶胞

(1) 晶格：为了形象地表示晶体中原子排列规律，可将原子看成是一个几何质点，用假想的线将这些点连接起来，就构成了一个具有一定几何形式的空间格子。这种表示原子在晶体中排列规律的空间格子称为晶格，如图 1-3b 所示。

(2) 晶胞：人们把晶格中能代表原子排列规则的最小几何单元称为晶胞。晶胞的各棱边长度为 a 、 b 、 c ，称为晶格常数，各棱边所夹的角分别为 α 、 β 、 γ ，如图 1-3c 所示。当 $a = b = c$ 时 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，这种晶胞称为简单立方晶胞。

2. 金属晶格的类型

金属晶格的类型很多，但大部分金属属于下列三种晶格类型：

(1) 体心立方晶格：晶胞是一个立方体，立方体的八个顶角和中心各有一个原子，如图 1-4a 所示。属于该晶格类型的金属有铬 (Cr)、钒 (V)、钨 (W)、铂 (Mo)、 α -铁 (α -

Fe) 等。

(2) 面心立方晶格：其晶胞也是一个立方体，原子位于立方体的八个顶角及六个面的中心，如图 1-4b 所示。属于该晶格类型的金属有铝 (Al)、铜 (Cu)、铅 (Pb)、镍 (Ni) 及 γ -铁 (γ -Fe) 等。

(3) 密排六方晶格：晶胞是一个正六棱柱体，柱体的每个顶角和上、下底面的中心各排有一个原子，柱体内部排有三个原子，如图 1-4c 所示。属于该晶格类型的金属有镁 (Mg)、锌 (Zn)、铍 (Be)、镉 (Cd)、 α -钛 (α -Ti) 等。

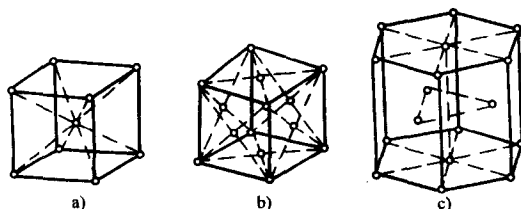


图 1-4 常见金属晶格类型

a) 体心立方晶格 b) 面心立方晶格 c) 密排六方晶格

二、金属的结晶

1. 金属的结晶

液态金属冷却凝固后转变为晶体状态的过程称为结晶。

2. 纯金属的冷却曲线

纯金属的结晶过程可以用热分析法来研究。当液态金属在保温坩埚内缓慢冷却时，记录其温度随时间而变化情况，并将数据描绘在温度-时间坐标系上，得到如图 1-5 所示的纯金属的冷却曲线。从冷却曲线可看出，液态金属冷却到一定温度时，出现一个水平线段，这是由于液态金属结晶时释放出大量结晶潜热，补偿了金属液冷却时向周围散失的热量，使温度保持不变。

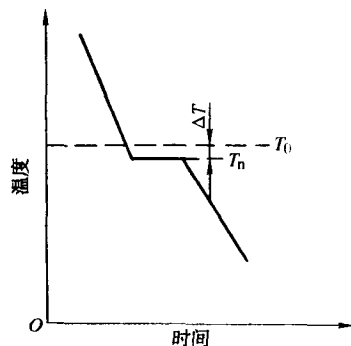


图 1-5 纯金属冷却曲线

3. 过冷现象

从图 1-5 可以看出，纯金属在极为缓慢的冷却速度下结晶时，其结晶温度称为理论结晶温度 (T_0)。在实际生产条件下，液态金属结晶时冷却速度较大，金属液都是冷却到理论结晶温度 T_0 以下某个温度 T_n 时才开始结晶，这种现象称为过冷。理论结晶温度与实际结晶温度之差则称为过冷度，用 ΔT 表示， $\Delta T = T_0 - T_n$ 。

4. 纯金属的结晶过程

金属的结晶过程包括晶核的形成和晶核的长大两个过程。纯金属的结晶过程如图 1-6 所示。金属液冷却到结晶温度时，在液态金属内部首先有一些原子自发地聚集在一起，并按一定规则排列起来，成为结晶核心，称为晶核。此时晶核周围的原子不断地向晶核聚集，并按规则排列，使晶核长大，形成许多小晶体。在小晶体长大的同时，新的晶核又不断产生。当金属液耗尽时结晶过程结束。金属结晶后，形成许多外形不一、大小不等、排列方向不同的小颗粒晶体，称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。固态金属就是由许多小晶粒组成的多晶体，如图 1-7 所示。

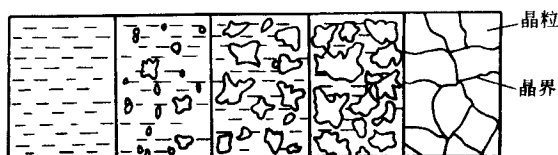


图 1-6 纯金属的结晶过程

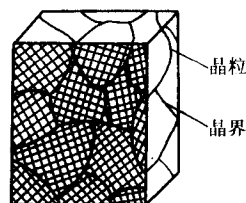


图 1-7 金属多晶体示意图

金属结晶后晶粒的大小对金属的力学性能有重大影响，晶粒越细，金属的强度和硬度越高，塑性、韧性越好。工业上为了提高金属的力学性能，常用增加过冷度及变质处理、搅拌振动等方法来细化晶粒。

三、金属晶体的同素异构转变

大多数金属在固态下的晶格都保持不变。但是，有些金属在固态下随温度不同存在两种或两种以上的晶格类型，如铁（Fe）、钛（Ti）、铬（Cr）等。金属在固态下因温度的改变，由一种晶格转变为另一种晶格的现象，称为金属的同素异构转变。由同素异构转变所得到的不同晶格类型的晶体称为同素异构体。

铁是最典型的具有同素异构转变特性的金属，其冷却曲线如图 1-8 所示。由图可知，当液态纯铁冷却到 1538℃ 时成为具有体心立方晶格的 δ -Fe，继续冷却到 1394℃ 时发生同素异构转变，由体心立方晶格的 δ -Fe 转变成为面心立方晶格的 γ -Fe；再继续冷却到 912℃ 时再次发生同素异构转变，由面心立方晶格的 γ -Fe 转变成为具有体心立方晶格的 α -Fe。继续冷却时，晶格的类型不再改变。

同素异构转变不仅存在于纯铁中，而且还存在于以铁为基体的钢铁材料中，并能通过各种热处理工艺进一步改善其组织与性能。金属的同素异构转变与液态金属的结晶过程有许多相似之处：有一定的转变温度，转变时有过冷现象，放出和吸收热量，转变过程也有一个晶核形成和晶核长大的过程。通过控制冷却速度，可以改变晶粒大小，从而改变其性能。但同素异构转变属于固态相变。

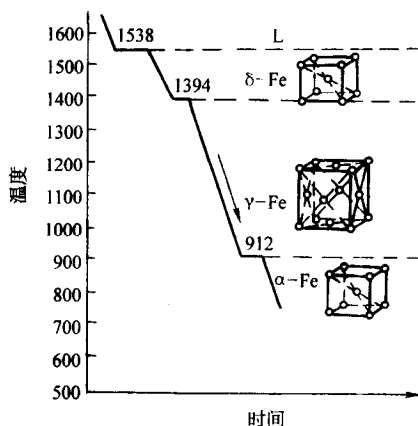


图 1-8 纯铁的冷却曲线

四、合金的晶体结构

1. 合金的基本概念

(1) 合金：由两种或两种以上的金属元素或金属与非金属元素，经熔炼、烧结或其他方法结合而成具有金属特性的物质。合金的力学性能优于纯金属。工程中广泛使用的金属材料多数是合金。

(2) 组元：组成合金最基本的、最独立的元素称为组元，简称元。根据合金组元数的多少，合金可分为二元、三元和多元合金。

(3) 合金系：由两个或两个以上组元按不同的比例配制一系列不同成分的合金，称为合金系。例如，碳素钢、铸铁就是由铁和碳为主组成的合金系；黄铜是由铜和锌组成的二元合金系。

(4) 相：合金中具有相同成分、同一聚集状态、同一结构和性质的均匀组成部分称为相。

2. 合金的组织结构

大多数合金的组元在液态下都能够相互溶解而形成单一均匀的液相。在结晶时，根据各个组元之间相互作用的不同，固态合金组织可分为固溶体、金属化合物和机械混合物三种类型。

(1) 固溶体：金属或非金属合金原子进入基体晶格间隙或代替基体晶格原子而形成的一种晶体。基体金属称为溶剂，溶入的组元称为溶质。按原子在溶剂晶格中所占的位置不同，固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体两种类型。溶剂结点上的部分原子被溶质原子所替代而形成的固溶体称为置换固溶体；溶质原子进入溶剂晶格的间隙而形成的固溶体，称为间隙固溶体。

(2) 金属化合物：两种或两种以上合金或化合物构成的具有金属性能的物质称为金属化合物，其晶格类型和性能完全不同于任一组元。金属化合物具有熔点高、硬度高及脆性大等特点。

(3) 机械混合物：两个或两个以上的相按照一定比例混合而成的物质称为机械混合物。机械混合物中各相仍保持自己原有的晶格类型和性能，其性能主要取决于各组成相性能以及相的数量、形状、大小和分布状态等。

五、二元合金相图的概念

合金相图是在相平衡的条件下，用来表征合金的组织与成分、温度之间关系的一种图形，又称为合金平衡状态图。利用相图可以分析不同成分的合金在不同温度下相的组成情况，不但为合金材料的分析和研究提供了理论基础，而且还是制定铸造、锻压、焊接、热处理工艺的重要理论依据。

1. 二元合金相图的建立

二元合金相图是通过试验的方法建立起来的。目前相图最常用的测绘方法是热分析法。下面以 Cu - Ni 合金为例来说明二元合金相图的建立方法和步骤。

- (1) 首先配制一系列不同成分的 Cu - Ni 合金。
- (2) 用分析法测出所配各种合金的冷却曲线，如图 1 - 9a 所示。
- (3) 找出各冷却曲线上的相变点。
- (4) 将找出的相变点分别标注在温度 - 成分坐标图中相应的成分曲线上。
- (5) 用平滑的曲线将相同意义的相变点连接起来，所得到的曲线称为 Cu - Ni 合金相图，如图 1 - 9b 所示。

2. 二元合金相图的分析

(1) 典型二元合金相图分析：两组元在液态与固态下均能无限互溶所构成的合金相图，称为二元匀晶相图，如 Cu - Ni、Fe - Cr、Au - Ag 等合金的相图均属该类相图。下面以 Cu - Ni 合金为例，对二元合金结晶过程进行分析。

Cu - Ni 合金相图如图 1 - 10a 所示，图中的 A 点 (1083℃) 是纯铜的熔点，B 点 (1452℃) 是纯镍的熔点，图中 $Aa_3a_2a_1B$ 线是合金开始结晶的温度线，称为液相线；图中 $Ab_3b_2b_1B$ 线是合金结晶终止的温度线，称为相固线。液相线和固相线把整个相图分为 3 个不同相区：液相线以上是单相的液相区，以 “L” 表示；固相线以下是单相的固相区，为 Cu