

新
版

21世纪

高职高专系列教材

机械制造基础

第2版

◎苏建修 主编
◎张学良 副主编
◎孙希羚 主审



提供电子教案增值服务



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高职高专系列教材

机械 制 造 基 础

第 2 版

主 编 苏建修

副主编 张学良

编 著 李 璐 钱同仁 夏丽英

盛定高 梁沙岩 刘靖岩

阿不都外力·阿不力米提

主 审 孙希玲

江苏工业学院图书馆
藏书章



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据全国高等职业技术教育机电类教材编审委员会审定的“机械制造基础”课程的教学基本要求编写的。

全书共分十四章，内容主要包括：机械工程材料、金属材料的成形、非金属材料的成形、快速成形技术、测量技术基础、金属切削原理、金属切削加工、精密加工与特种加工、机械加工质量、机械加工工艺规程的制定、机床夹具、典型零件加工工艺、机械产品装配工艺及现代制造技术简介等。

本书为高职高专机电类专业教材，也可作为有关院校相近专业的教学用书，并可供从事机械制造方面的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造基础/苏建修主编. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2006.3
ISBN 7-111-08293-1

I. 机… II. 苏… III. 机械制造 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 012118 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划: 胡毓坚 责任编辑: 赵丽欣 版式设计: 张世琴

责任校对: 李秋荣 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2006 年 7 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 24.5 印张 · 608 千字

0 001—5 000 册

定价: 34.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线: (010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专机电专业系列教材

编委会成员名单

主 任 吴家礼

副 主 任 朱家健 任建伟 戎 磊 梁 栋 张 华

帕尔哈提 朱建风

委 员 (按姓氏笔画排序)

王也仿 丛晓霞 吕 汀 朱旭平 刘桂荣

刘靖华 刘靖岩 陈永专 张 伟 陈志刚

何彦廷 陈剑鹤 杨新友 陶若冰 韩满林

秘 书 长 胡毓坚

副秘书长 郝秀凯

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

为便于教学,机械工业出版社为读者提供了电子教案,读者可在 www.cmp-book.com 上下载。

编 者

机械工业出版社 出版说明

机械工业出版社 出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国40余所院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了修订。

在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价。因此,在修订过程中,各编委会保持了第1版教材“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。同时,针对教育部提出的高等职业教育的学制将由三年逐步过渡为两年,以及强调以能力培养为主的精神,制定出了本次教材修订的原则:跟上我国信息产业飞速发展的节拍,适应信息行业相关岗位群对第一线技术应用型操作人员能力的要求,针对两年制兼顾三年制,理论以“必须、够用”为原则,增加实训的比重,并且制作了内容丰富而且实用的电子教案,实现了教材的立体化。

针对课程的不同性质,修订过程中采取了不同的处理办法。核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。此外,在修订过程中,还进行了将几门课程整合在一起的尝试。所有这些都充分地体现了修订版教材求真务实、循序渐进和勇于创新的精神。在修订现有教材的同时,为了顺应高职高专教学改革不断深入,以及新技术新工艺的不断涌现和发展,机械工业出版社及教材编委会在对高职高专院校的专业设置和课程设置进行了深入的研究后,还准备出版一批适应社会发展的急需教材。

信息技术以前所未有的速度飞快地向前发展,信息技术已经成为经济发展的关键手段,作为与之相关的教材要抓住发展的机遇,找准自身的定位,形成鲜明的特色,夯实人才培养的基础。为此,担任本系列教材修订任务的教师,将努力把最新的教学实践经验融于教材的编写之中,并以可贵的探索精神推进本系列教材的更新。由于高职高专教育正在不断的发展中,加之我们的水平和经验有限,在教材的编审中难免出现问题和错误,恳请使用这套教材的师生提出宝贵的意见和建议,以利我们今后不断改进,为我国的高职高专教育事业作出积极的贡献。

机械工业出版社

前言

本书是根据全国高等职业技术教育机电类教材编审委员会审定的“机械制造基础”课程的教学基本要求编写的。

本教材在修订编写时,着重考虑了以下几个问题:

- (1) 充分保持原教材的主体框架,在保证基础知识和基本内容的基础上,删除了一些陈旧的、不常用的内容,增加了新的、先进的基础知识,以扩大信息量,开阔读者视野;
- (2) 在内容的叙述上,尽量多用图、表来表达叙述性的内容;
- (3) 删除了一些理论性较强的计算与公式推导,使教材内容深入浅出、重点突出、层次分明;
- (4) 在编写过程中注重理论联系实际,并多用典型实例分析,以培养学生的综合实践能力;
- (5) 每章后均附有习题与思考题,以利学生加强、巩固学习内容,掌握基本内容与要点。

本教材的参考学时数为 150 学时,主要分三大部分内容:(1) 工程材料及其成形,包括常用金属材料、非金属材料、功能材料、理想材料及纳米材料,工程材料的成形与快速成形技术。(2) 普通切削加工与超精密加工原理、机床、刀具及机床夹具,包括金属切削原理,金属切削加工技术,机床、刀具及机床夹具,精密加工、超精密加工与特种加工。(3) 机械加工质量分析与控制及其基本测量技术,包括测量技术基础、机械加工质量、机械制造工艺规程制定、典型零件加工工艺及装配工艺分析。最后,本书还对现代制造技术中的计算机辅助设计与制造、柔性制造系统和计算机集成制造系统进行了简介。

参加本书编写的有苏建修(编写绪论、第 3 章、第 4 章、第 12 章、第 13 章、第 14 章)、李璐(编写第 1 章)、钱同仁(编写第 2 章)、夏丽英(编写第 5 章)、张学良(编写第 6 章、第 8 章)、盛定高(编写第 7 章)、梁沙岩(编写第 9 章)、刘靖岩(编写第 10 章)、阿不都外力·阿不力米提(编写第 11 章)。

全书由河南科技学院苏建修教授主编,孙希岭担任主审。

本书在编写过程中,参考了有关教材、手册等资料,并得到众多同志的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

为了配合本书的教学,机械工业出版社为读者提供了电子教案,读者可在 www.cmp-book.com 上下载。

编者

目 录

出版说明	1.7 有色金属	32
前言	1.7.1 铝及铝合金	33
绪论	1.7.2 铜及铜合金	34
第1章 机械工程材料	1.8 硬质合金和超硬刀具材料	36
1.1 金属的晶体结构与结晶	1.8.1 硬质合金	36
1.1.1 金属的晶体结构	1.8.2 超硬刀具材料	38
1.1.2 金属的结晶	1.9 非金属材料	39
1.1.3 晶体缺陷	1.9.1 高分子材料	39
1.1.4 合金的相结构	1.9.2 陶瓷	40
1.1.5 合金的组织	1.9.3 复合材料	41
1.2 铁碳合金	1.10 功能材料及理想材料	42
1.2.1 铁碳合金的基本组织	1.10.1 功能材料	42
1.2.2 铁碳合金相图	1.10.2 功能梯度材料及理想材料	43
1.2.3 钢的成分、组织、性能之间的关系	1.11 纳米材料	44
1.3 钢的热处理	1.12 习题	46
1.3.1 钢在加热时的组织转变	第2章 金属材料的成形	49
1.3.2 钢在冷却时的组织转变	2.1 铸造	49
1.3.3 钢的退火与正火	2.1.1 砂型铸造	49
1.3.4 钢的淬火与回火	2.1.2 金属的铸造性能	52
1.3.5 钢的表面淬火和化学热处理	2.1.3 铸造工艺设计基础	54
1.4 碳素钢	2.1.4 铸件结构工艺性	56
1.4.1 杂质元素的影响	2.1.5 特种铸造	59
1.4.2 碳素钢的分类	2.2 锻压加工	61
1.4.3 碳素钢的牌号、性能和用途	2.2.1 金属的塑性变形	61
1.5 合金钢	2.2.2 锻造	64
1.5.1 合金元素在钢中的作用	2.2.3 冲压	68
1.5.2 合金钢的分类和牌号表示方法	2.2.4 粉末冶金	70
1.5.3 合金结构钢	2.3 焊接	71
1.5.4 合金工具钢	2.3.1 焊条电弧焊	72
1.5.5 特殊钢	2.3.2 其他焊接方法	76
1.6 铸铁	2.3.3 金属的焊接性	80
1.6.1 铸铁的石墨化	2.3.4 焊接新工艺简介	81
1.6.2 灰铸铁	2.4 习题	82
1.6.3 球墨铸铁	第3章 非金属材料的成形	84
1.6.4 可锻铸铁简介	3.1 塑料的成形与加工	84
	3.1.1 塑料的成形方法	84

3.1.2 塑料的加工方法	87	5.4.3 形状误差的检测	116
3.2 橡胶的成形与加工	88	5.4.4 位置误差的检测	118
3.3 陶瓷的成形与加工	89	5.5 圆柱齿轮误差的检测	125
3.4 复合材料的成形与加工	91	5.5.1 齿轮、齿轮副公差与极限偏差 项目	125
3.4.1 复合材料的成形方法	91	5.5.2 圆柱齿轮误差的检测	127
3.4.2 复合材料的二次加工	92	5.6 习题	134
3.5 习题	93	第6章 金属切削原理	135
第4章 快速成形技术	94	6.1 基本定义	135
4.1 概述	94	6.1.1 切削运动	135
4.1.1 快速成形制造 (RP)	94	6.1.2 工件上的加工表面	135
4.1.2 快速模具制造 (RT)	95	6.1.3 切削用量	136
4.1.3 快速精铸 (QC)	95	6.1.4 刀具的几何参数	136
4.1.4 快速反求工程 (RRE)	96	6.1.5 切削层参数	140
4.2 快速成形技术的基本过程	96	6.2 金属切削过程的物理现象	141
4.2.1 RP 技术的工艺过程	96	6.2.1 切削层的变形	141
4.2.2 RP 技术的功能	97	6.2.2 切削力	143
4.3 几种常用 RP 技术的工艺原理	97	6.2.3 切削热与切削温度	145
4.3.1 立体光固化 (SLA)	97	6.3 刀具磨损与刀具耐用度	146
4.3.2 分层实体制造 (LOM)	98	6.3.1 刀具的磨损形式	146
4.3.3 选择性激光烧结 (SLS)	99	6.3.2 刀具磨损的原因	147
4.3.4 熔融沉积成形 (FDM)	99	6.3.3 刀具的磨损过程及磨钝标准	148
4.3.5 三维打印 (3D-P)	100	6.3.4 刀具耐用度	149
4.3.6 形状沉积快速成形 (SDM)	100	6.4 工件材料的切削加工性	149
4.4 RP 技术的应用领域	101	6.4.1 材料切削加工性的评定	149
4.5 习题	102	6.4.2 影响材料切削加工性的主要 因素	150
第5章 测量技术基础	103	6.4.3 常用金属材料的切削加工性	150
5.1 测量技术基础知识	103	6.4.4 改善材料切削加工性的途径	151
5.1.1 概述	103	6.5 金属切削条件的合理选择	151
5.1.2 测量与检验	103	6.5.1 刀具材料的选择	151
5.1.3 长度基准和量值传递	103	6.5.2 刀具几何参数的选择	152
5.1.4 量块	104	6.5.3 刀具耐用度的选择	156
5.2 测量误差	106	6.5.4 切削用量的选择	157
5.2.1 测量误差的来源	106	6.5.5 切削液的选择	159
5.2.2 测量误差的分类	106	6.6 习题	160
5.2.3 测量不确定度	107	第7章 金属切削加工	161
5.3 孔、轴尺寸公差的检测	107	7.1 金属切削机床的基本知识	161
5.3.1 普通计量器具测量孔、轴尺寸	107	7.1.1 金属切削机床的分类	161
5.3.2 光滑极限量规检验孔、轴尺寸	110	7.1.2 金属切削机床型号的编制方法	161
5.4 形状和位置误差的检测	114	7.1.3 金属切削机床的运动	163
5.4.1 形状和位置误差的检测原则	114	7.1.4 金属切削机床的技术性能	163
5.4.2 形状和位置误差的评定	114		

7.2 车削加工	164
7.2.1 概述	164
7.2.2 CA6140 型卧式车床	165
7.2.3 其他车床简介	171
7.2.4 车刀	173
7.3 铣削加工	174
7.3.1 概述	174
7.3.2 铣床	175
7.3.3 铣刀	178
7.3.4 万能分度头	180
7.4 磨削加工	182
7.4.1 概述	182
7.4.2 M1432A 型万能外圆磨床	182
7.4.3 其他磨床简介	186
7.4.4 砂轮	190
7.4.5 磨削加工的特点及砂轮的修整	191
7.5 齿轮的齿形加工	193
7.5.1 概述	193
7.5.2 滚齿	194
7.5.3 其他齿轮齿形加工	200
7.5.4 齿轮齿形加工刀具	204
7.6 其他切削加工简介	205
7.6.1 钻削加工	205
7.6.2 镗削加工	209
7.6.3 刨削加工及拉削加工	212
7.7 习题	216
第 8 章 精密加工与特种加工	217
8.1 精密加工和超精密加工	217
8.1.1 精密加工和超精密加工的基本概念	217
8.1.2 精密加工和超精密加工的特点	217
8.1.3 精密加工和超精密加工方法简介	218
8.2 特种加工简介	222
8.2.1 电火花加工	222
8.2.2 电解加工	223
8.2.3 激光加工	223
8.2.4 电子束加工	224
8.2.5 离子束加工	224
8.2.6 超声波加工	225
8.3 习题	225
第 9 章 机械加工质量	226

9.1 概述	226
9.1.1 机械加工精度	226
9.1.2 机械加工表面质量	227
9.2 影响机械加工精度的因素	229
9.2.1 工艺系统的几何误差对加工精度的影响	229
9.2.2 工艺系统力效应对加工精度的影响	232
9.2.3 工艺系统热变形对加工精度的影响	235
9.3 机械加工精度的综合分析	237
9.3.1 加工误差的性质	237
9.3.2 加工误差的统计分析	237
9.4 影响机械加工表面质量的因素	243
9.4.1 影响零件表面粗糙度的因素	243
9.4.2 影响零件表面层物理力学性能的因素	244
9.5 提高机械加工质量的途径与方法	246
9.5.1 提高机械加工精度的途径	246
9.5.2 提高机械加工表面质量的方法	247
9.6 习题	248
第 10 章 机械加工工艺规程制定	251
10.1 概述	251
10.1.1 生产过程与机械加工工艺过程	251
10.1.2 机械加工工艺过程的组成	251
10.1.3 生产类型与工艺特征	253
10.1.4 机械加工工艺规程	255
10.1.5 制定机械加工工艺规程的原则和步骤	259
10.2 机械加工工艺规程编制的准备工作	259
10.2.1 原始资料准备及产品工艺性分析	259
10.2.2 零件的结构工艺性	260
10.2.3 毛坯的选择	261
10.3 机械加工工艺路线的拟定	263
10.3.1 基准及其分类	263
10.3.2 定位基准的选择	264

10.3.3 表面加工方法的确定	267	12.1.1 概述	323
10.3.4 加工顺序的安排	269	12.1.2 轴类零件加工的主要工艺 问题	324
10.4 工序设计	272	12.1.3 CA6140 型卧式车床主轴加工 工艺	329
10.4.1 加工余量的确定	272	12.1.4 轴类零件的检验	332
10.4.2 工序尺寸及其公差的确 定	274	12.2 套筒类零件的加工	334
10.4.3 工艺尺寸链的计算	275	12.2.1 概述	334
10.4.4 机床及工艺装备的选择	281	12.2.2 套筒类零件加工工艺分析	335
10.4.5 切削用量的确定	281	12.2.3 深孔加工	338
10.4.6 时间定额的确定	282	12.3 箱体类零件的加工	340
10.5 工艺方案的技术经济分析	282	12.3.1 概述	340
10.5.1 工艺成本的组成	283	12.3.2 箱体类零件加工的主要工 艺 问题	341
10.5.2 工艺方案的比较	283	12.3.3 圆柱齿轮减速器箱体加 工 工艺	344
10.6 提高机械加工生产率的工 艺 措施	285	12.3.4 箱体类零件的检验	346
10.6.1 缩短基本时间	285	12.4 圆柱齿轮加工	348
10.6.2 缩短辅助时间	286	12.4.1 概述	348
10.6.3 缩短布置工作地时间	286	12.4.2 圆柱齿轮加工的主要工 艺 问题	349
10.6.4 缩短准备和终结时间	287	12.4.3 圆柱齿轮的加工工艺	350
10.6.5 高效及自动化加工	287	12.4.4 圆柱齿轮的检验	353
10.7 习题	287	12.5 习题	353
第 11 章 机床夹具	289	第 13 章 装配工艺	354
11.1 概述	289	13.1 概述	354
11.1.1 机床夹具的分类	289	13.2 装配方法	354
11.1.2 机床夹具的组成	289	13.2.1 装配精度	354
11.1.3 机床夹具的作用	291	13.2.2 装配尺寸链的建立	355
11.2 工件在夹具中的定位	291	13.2.3 保证装配精度的方法	356
11.2.1 工件的装夹方法	291	13.3 装配工艺规程的制定	366
11.2.2 工件定位的基本原理	291	13.3.1 装配工艺规程的制定原则和所需的 原始资料	366
11.2.3 常见定位方式及其所用定 位 元件	296	13.3.2 装配工艺规程制定的步骤	366
11.3 定位误差	303	13.4 习题	369
11.3.1 产生定位误差的原因	303	第 14 章 现代制造技术简介	370
11.3.2 定位误差的计算	305	14.1 计算机辅助设计与制造 (CAD/CAM)	370
11.4 工件在夹具中的夹紧	308	14.1.1 计算机辅助设计 (CAD) 概述	370
11.4.1 夹紧装置的组成及基本要 求	308	14.1.2 计算机辅助制造 (CAM)	
11.4.2 夹紧力的确定	309		
11.4.3 典型夹紧机构	312		
11.4.4 夹紧动力源装置	318		
11.5 习题	319		
第 12 章 典型零件加工工艺	323		
12.1 轴类零件加工	323		

概述	371
14.1.3 CAD/CAM 集成系统	372
14.2 计算机辅助工艺规程设计 (CAPP)	373
14.2.1 计算机辅助工艺规程设计的基本原理	373
14.2.2 各种类型计算机辅助工艺规程设计系统的适用范围	375
14.3 柔性制造系统 (FMS) 概述	375
14.3.1 柔性制造系统的产生和发展	375

14.3.2 柔性制造系统的分类	375
14.3.3 柔性制造系统的构成	376
14.3.4 柔性制造系统的效益	378
14.4 计算机集成制造系统 (CIMS)	378
14.4.1 计算机集成制造系统的含义	378
14.4.2 计算机集成制造系统的组成	379
14.4.3 计算机集成制造系统的效益	379
14.5 习题	380
参考文献	381

绪 论

机械制造基础是一门研究材料加工工艺的综合性技术学科，它是发展国民经济的重要基础学科之一。随着全球经济一体化进程的加快和中国加入 WTO，我国的工业发展在受到越来越大的竞争压力和严峻挑战的同时也得到了难得的机遇。

我国的机械制造业是在 1949 年以后才逐步建立和发展起来的，50 多年来，我国的机械制造技术和材料加工工艺等都有了很大的发展，已经建成了机械制造、冶金、交通运输、石油化工、航空航天、精密仪表等许多现代化的工业生产基地，为工业、农业、科技、国防提供了大量的机械产品和设备，为我国国民经济的发展做出了巨大的贡献。然而，由于我国的机械制造工业长期在计划经济体制下运行，与工业发达国家相比，还存在着阶段性的差距，主要表现在机械产品品种少、档次低，制造工艺落后、装备陈旧，专业生产水平低，技术开发能力不够强，科技投入少，管理水平落后等。随着世界各国都把提高产业竞争力和发展高技术、抢占未来经济制高点作为科技工作的方向，我国也明确提出要振兴机械工业，使之成为国民经济的支柱产业。我国的机械制造工业除了要不断提高常规机械生产的工艺装备和工艺水平外，还必须研究开发优质高效精密装备与工艺，为高新技术产品的生产提供新工艺、新装备；同时加强基础技术研究，消化和掌握引进技术，提高自主开发能力，形成常规制造技术与先进制造技术并进的机械制造工业结构。

现代科学技术突飞猛进，材料、能源、信息技术、生物技术等日新月异，各种功能材料、功能梯度材料、新型复合材料、超导材料、纳米材料、生物材料及理想材料等相继出现，极大地丰富了材料工业，同时也为机械制造业提供了发展的机会，各种新型的材料加工工艺及先进制造技术也随之源源不断地出现，极大地推动了科学技术和国民经济的发展。随着生产的发展和科学实验的需要，许多部门，尤其是国防工业部门要求的尖端产品向高精度、高速度、高温、高压、大功率、微型化等方向发展，零件的形状越来越复杂，精度要求越来越高，表面粗糙度要求越来越低。所有这些要求迫使人们去探索新的加工方法和测量方法，相继出现了如化学机械加工、电化学加工、超声波加工、激光加工、超精密研磨与抛光、纳米加工等特种加工、超精密加工技术及复合加工技术。同时也出现了像原子力显微镜、扫描电子显微镜等先进的测试技术。这些技术的进步大大提升了机械制造技术的能力。

修订版《机械制造基础》包括了机械制造过程中的大部分内容，主要有机械工程材料、金属材料与非金属材料的成形技术、快速成形技术、测量技术基础、金属切削原理与刀具、金属切削机床与夹具、机械制造工艺及装配工艺、机械加工质量、超精密加工与特种加工及现代制造技术简介等。本次修订增添了一些新的内容，如功能材料、理想材料及纳米材料、非金属材料及快速成形；并将精密加工与特种加工单独列出来作为一个独立的章节，经过对原有内容进行整合与改进，使内容更加丰富精练，通俗易懂。

第 1 章 机械工程材料

1.1 金属的晶体结构与结晶

化学成分不同的金属材料具有不同的性能，如低碳钢比高碳钢具有较好的塑性、韧性，而硬度却低得多。但是，即使是成分相同的金属，采用不同的加工工艺或在不同的状态下，它们的性能也可以有很大的差别。例如，两块碳钢中的碳的质量分数均为 0.8%，硬度为 20HRC，如将其中的一块加工成刀具并进行热处理，其硬度可达 60HRC 以上。产生性能差异的原因，从根本上来讲，是由于金属材料内部的组织结构不同。

1.1.1 金属的晶体结构

1. 晶体结构的基本概念

固态物质按其原子排列的特征，可分为晶体和非晶体两种。非晶体的原子在空间呈短程有序排列，如玻璃、沥青、松香等。晶体的原子则是长程有规则地、按一定几何形状排列的，如金刚石、石墨及一切固态的金属与合金。晶体具有一定的熔点，并具有各向异性的特征。晶体中原子排列如图 1-1a 所示。

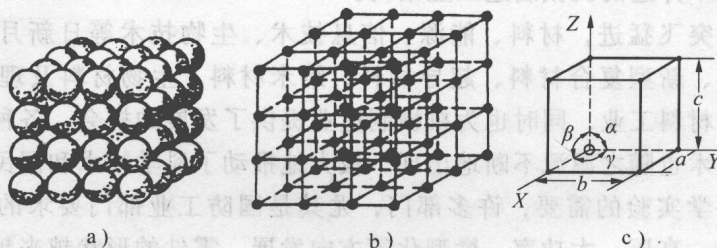


图 1-1 金属晶体结构示意图

a) 晶体中原子排列 b) 晶格 c) 晶胞

为了描述晶体中原子排列的规律，人为地将原子看做一个点，再用假想的线条把各点连结起来，可得到一个空间格子，称为晶格，如图 1-1b 所示。晶格中，各线条的交点称为结点，各种方位的原子层称为晶面。

从晶格中选取一个能完全反映晶格排列特征的最基本的几何单元，称为晶胞，如图 1-1c 所示。实际上整个晶格就是由许多相同的晶胞在空间重复堆积而成的。晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 和棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示。棱边长度称为晶格常数，其长度单位为 nm (纳米， $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$)。若 $a = b = c$ ， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，则此晶格称为简单立方晶格。

2. 常见的金属晶格类型

金属的晶体结构类型很多，但绝大多数金属的晶格属于如图 1-2 所示的三种晶格类型。

(1) 体心立方晶格。如图 1-2a 所示，它的晶胞是一个立方体，在立方晶胞的八个顶点

和中心各有一个原子、属于这种晶格的常见金属有铬、钨、钼、钒和 α -Fe 等。

(2) 面心立方晶格。如图 1-2b 所示，它的晶胞是一个立方体，在立方晶胞的八个顶点和六个面的中心各有一个原子。具有这种晶格的常见金属有铝、铜、镍、银和 γ -Fe 等。

(3) 密排六方晶格。如图 1-2c 所示，它的晶胞是六棱柱体，在棱柱体的十二个棱角上和上下两个面的中心各有一个原子，此外在柱体中间还有三个原子。具有这种晶格的常见金属有镁、锌、铍等。

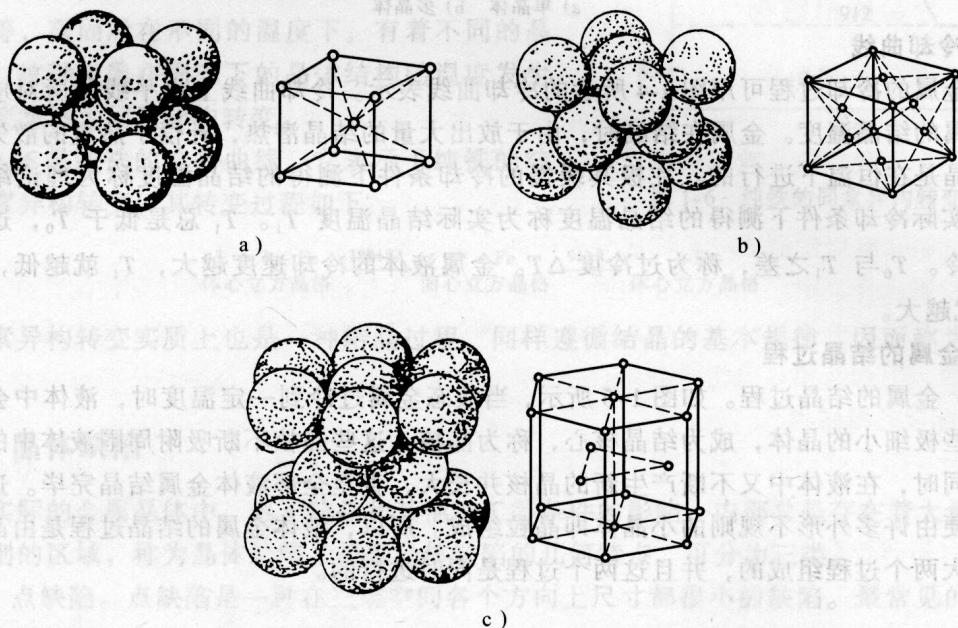


图 1-2 常见的金属晶格类型

a) 体心立方晶格 b) 面心立方晶格 c) 密排六方晶格

3. 金属的实际晶体结构

如果一块晶体，其内部晶格方位完全一致，这个晶体就是“单晶体”，如图 1-3a 所示。实际上，常用的金属材料中，除非专门制作，都不是单晶体，即使在一块很小的金属中也包含着许许多多的小晶体，每个小晶体的内部，晶格方位都是基本一致的，而各个小晶体之间，彼此的方位却不相同，如图 1-3b 所示。由于其中每个小晶体的外形多为不规则的颗粒状，故通常把它们叫做晶粒。晶粒与晶粒之间的界面叫做晶界。显然，为了适应两个晶粒之间不同晶格方位的过渡，晶界处原子的排列总是不规则的。这种由多晶粒组成的晶体结构称为多晶体。

1.1.2 金属的结晶

金属的结晶是指金属从液态转变为固态晶体的过程。

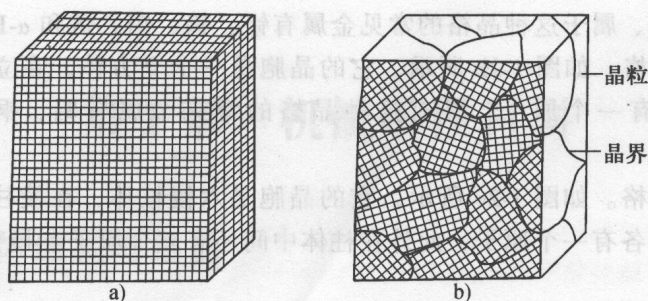


图 1-3 单晶体与多晶体示意图

a) 单晶体 b) 多晶体

1. 冷却曲线

纯金属的冷却过程可用图 1-4 所示的冷却曲线表示。冷却曲线上水平线段所对应的温度是纯金属的结晶温度。金属在结晶时，由于放出大量的结晶潜热，补偿了热量的散失，故金属的结晶是在恒温下进行的。在极其缓慢的冷却条件下测得的结晶温度称为理论结晶温度 T_0 ，在实际冷却条件下测得的结晶温度称为实际结晶温度 T_1 。 T_1 总是低于 T_0 ，这种现象称为过冷。 T_0 与 T_1 之差，称为过冷度 ΔT 。金属液体的冷却速度越大， T_1 就越低，过冷度 ΔT 也就越大。

2. 金属的结晶过程

(1) 金属的结晶过程。如图 1-5 所示，当液态金属过冷到一定温度时，液体中会自发地产生一些极细小的晶体，成为结晶核心，称为晶核。这些晶核不断吸附周围液体中的原子而长大。同时，在液体中又不断产生新的晶核并长大，直至全部液体金属结晶完毕。这时，固态金属便由许多外形不规则的小晶体即晶粒组成。所以，液体金属的结晶过程是由晶核的产生和长大两个过程组成的，并且这两个过程是同时进行的。

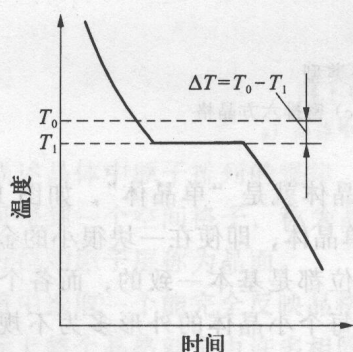


图 1-4 金属的冷却曲线

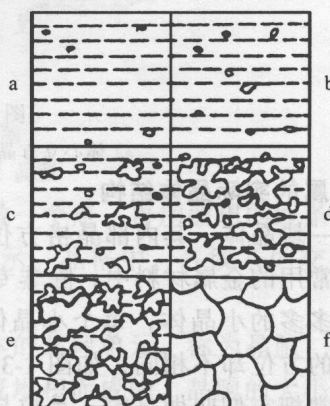


图 1-5 金属结晶过程示意图

(2) 细化晶粒的措施。由于多晶粒是由许多不同的晶核长成的晶粒所组成的，因此晶粒的大小会对金属的力学性能产生很大的影响。一般情况下，金属晶粒越细，金属的强度越高，塑性、韧性越好。从金属结晶的过程可知，每一个晶粒是由一个晶核成长形成的，那么在一定体积内所形成的晶核数目愈多，则结晶后的晶粒就愈细小。生产上常采用以下措施来

细化晶粒:

1) 增加过冷度。增加过冷度能使晶核形成速度大于长大速度, 使晶核数量相对增多。

2) 进行孕育处理。在液态金属结晶前, 加入一些难熔的固态物质, 这些难熔的微粒, 起着非自发结晶核心的作用, 从而使晶核数目增多, 晶粒变细。

(3) 金属的同素异构转变。多数金属在凝固后的晶格类型保持不变, 但某些金属, 如铁、锰、钛、锡等, 凝固后在不同的温度下, 有着不同的晶格类型。这种金属在固态下的晶体结构随温度发生变化的现象称为同素异构转变。

图 1-6 是纯铁的冷却曲线, 它表示了纯铁的结晶和同素异构转变, 其转变过程如下:

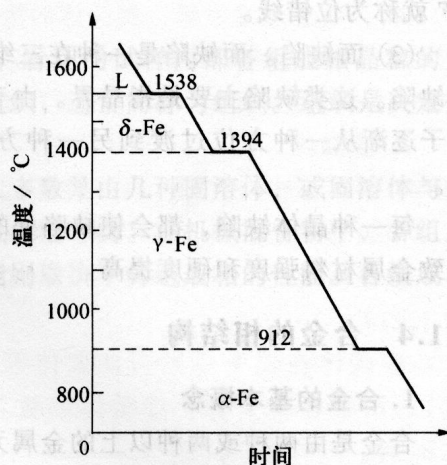
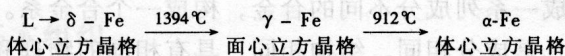


图 1-6 纯铁的同素异构转变



同素异构转变实质上也是一种结晶过程, 同样遵循结晶的基本规律, 因而称为二次结晶。

1.1.3 晶体缺陷

在实际的金属晶体中, 由于结晶和其他加工等条件的影响, 内部总是存在着大量原子排列不规则的区域, 称为晶体缺陷。根据晶体缺陷的几何特点, 可分为三类。

(1) 点缺陷。点缺陷是一种在三维空间各个方向上尺寸都很小的缺陷。最常见的是晶格空位和间隙原子, 如图 1-7a 所示。

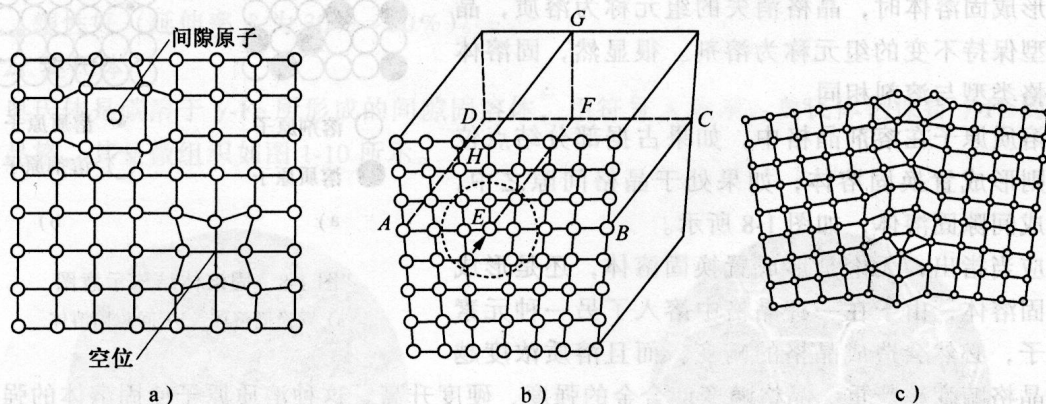


图 1-7 晶体缺陷

a) 点缺陷示意图 b) 刃型位错示意图 c) 晶界缺陷示意图

(2) 线缺陷。线缺陷是一种在三维空间的两个方向的尺寸很小而另一个方向的尺寸相对较大的缺陷。晶体中的线缺陷通常是指各种类型的位错。位错是晶体中一层或几层原子排错了位置而形成的一种缺陷。最常见的一种是刃型位错, 如图 1-7b 所示。在晶面 $ABCD$ 的上

方, 多出一个垂直方向的晶面 $EFGH$, 使晶体上下两部分沿着 EF 线产生原子错排的现象, EF 就称为位错线。

(3) 面缺陷。面缺陷是一种在三维空间的一个方向上尺寸很小而另两个方向上尺寸很大的缺陷。这类缺陷主要是指晶界。由于相邻晶粒间的晶格方位显著不同, 而晶界处实际上是原子逐渐从一种方位过渡到另一种方位的过渡层, 故该处原子排列不规则, 如图 1-7c 所示。

每一种晶体缺陷, 都会使缺陷处的晶格产生畸变。晶格畸变使晶体塑性变。抗力增大, 导致金属材料强度和硬度提高。

1.1.4 合金的相结构

1. 合金的基本概念

合金是由两种或两种以上的金属元素(或金属与非金属元素)组成的具有金属特性的物质。例如, 钢和铸铁是铁和碳组成的合金, 黄铜是铜与锌组成的合金。

组成合金的最基本的、独立的物质称为组元。由两个组元组成的合金称为二元合金。由若干给定组元可以配制成一系列成分不同的合金, 构成一个合金系。

在金属或合金中, 凡是成分相同、结构相同, 具有相同的物理和化学性能, 并与该系统其他部分有界面分开的物质部分, 称为相。例如, 钢在液态时为一个相, 称为液相; 钢在结晶过程中, 则有液相和固相两个相。

2. 合金的相结构

合金在熔化状态时, 若各组元能相互溶解成为均匀的溶液, 就只有一个相。在冷却结晶过程中, 由于各组元间作用不同, 在固态下可具有不同的相。合金的组成相可分为固溶体和金属化合物两种基本类型。

(1) 固溶体。一个组元的原子均匀地溶入另一个组元的晶格中所形成的晶体称为固溶体。

形成固溶体时, 晶格消失的组元称为溶质, 晶格类型保持不变的组元称为溶剂。很显然, 固溶体的晶格类型与溶剂相同。

溶质原子在溶剂晶格中, 如果占据部分结点位置, 则形成置换固溶体; 如果处于晶格间隙之中, 则形成间隙固溶体, 如图 1-8 所示。

应当指出, 无论是形成置换固溶体, 还是形成间隙固溶体, 由于在一种晶格中溶入了另一种元素的原子, 必然会造成晶格的畸变。而且溶质浓度越高, 晶格畸变越严重。晶格畸变使合金的强度、硬度升高。这种溶质原子使固溶体的强度和硬度升高的现象称为固溶强化。固溶强化是强化金属材料的重要途径之一。

(2) 金属化合物。金属化合物是合金组元间相互作用而形成的一种具有金属特性的新相, 其晶格类型和性能完全不同于组成它的任一组元, 一般可用分子式表示其组成。

金属化合物具有熔点高、硬度高、脆性大的特点。因此, 当合金中出现金属化合物时, 通常能提高合金的强度、硬度和耐磨性, 但会降低合金的塑性和韧性。

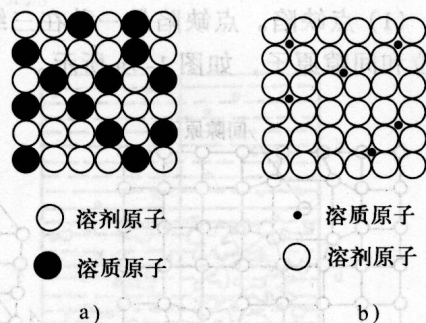


图 1-8 固溶体结构示意图

a) 置换固溶体 b) 间隙固溶体