

面向 21 世纪高职高专系列教材

机 械 制 造 基 础

苏建修 主编

孙希羚 审



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据高职高专机电专业教材编委会审定的《机械制造基础》课程的教学基本要求编写的。

全书共分 11 章, 内容包括: 机械工程材料、金属毛坯的成形、测量技术基础、金属切削原理、金属切削机床与刀具、机械加工质量、机械加工工艺规程制订、机床夹具与典型零件的加工工艺分析、机械产品装配工艺与现代制造技术简介等。

本书为高职高专机电专业教材, 也可作为有关学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.

—北京: 机械工业出版社, 2001.5

面向 21 世纪高职高专系列教材

ISBN 7-111-08293-1

I. 机... II. 苏... III. 金属加工—工艺—高等学校: 技术学校—教材 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 028014 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: 王 琳

责任印制: 付方敏

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·12.375 印张·566 千字

0001—5000 册

定价: 34.00 元

凡购本图书, 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) 68993821、68326677—2527

面向 21 世纪高职高专

机电专业系列教材编委会成员名单

顾问	王文斌 陈瑞藻 李 奇 冯炳尧
主任委员	吴家礼
副主任委员	朱家健 任建伟 孙希羚 梁 栋 张 华 帕尔哈提 朱建风
委员	刘靖华 韩满林 丛晓霞 朱旭平 陈永专 吕 汀 刘靖岩 刘桂荣 杨新友 陈剑鹤 张 伟 何彦廷 陶若冰 陈志刚
秘书长	胡毓坚
副秘书长	郝秀凯

出版说明

积极发展高职高专教育，完善职业教育体系，是我国职业教育改革和发展的一项重要任务。为了深化职业教育的改革，推进高职高专教育的发展，培养 21 世纪与我国现代化建设要求相适应的，并在生产、管理、服务第一线从事技术应用、经营管理、高新技术设备运作的高级职业技术应用型人才，尽快组织一批适应高职高专教学特色的教材，已成为各高职高专院校的迫切要求。为此，机械工业出版社与高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会联合组织了全国 40 多所院校的骨干教师，共同研究开发了一批计算机专业、电子技术专业和机电专业的高职高专系列教材。

各编委会确立了“根据高职高专学生的培养目标，强化实践能力和创新意识的培养，反映现代职业教育思想、教育方法和教育手段，造就技术实用型人才为立足点”的编写原则。力求使教材体现“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。

本套系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业、机电专业教材编委会分别会同各院校第一线专业教师针对高职高专计算机、电子技术和机电各专业的教学现状和教材存在的问题开展研讨，尤其针对目前高职高专教学改革的新情况，分别拟定各专业的课程设置计划和教材选题计划。在教材的编制中，将教学改革力度比较大、内容新颖、有创新精神、比较适合教学、需要修编的教材以及院校急需、适合社会经济发展的新选题优先列入选题规划。在广泛征集意见及充分讨论的基础上，由各编委会确定每个选题的编写大纲和编审人员，实行主编负责制，编委会通过责任编委和主审对教材进行质量监控。

担任本套教材编写的老师们都是来自各高职高专院校教育第一线的教师，他们以高度的责任感和使命感，经过近一年的努力，终于将本套教材呈现在广大读者面前。由于高职高专教育还处于起步阶段，加上我们的水平和经验有限，在教材的选题和编审中可能出现这样那样的问题，希望使用这套教材的教师和学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的繁荣而共同努力。

高职高专系列教材编委会
机械工业出版社

前 言

本书是根据高职高专机电专业教材编委会审定的《机械制造基础》课程的教学基本要求编写的,本教材由苏建修主编,孙希羚审。

本教材编写过程中,我们着重注意了下列几个问题:

(1)在保证基本内容的基础上,删除了一些过时的内容,尽量多用图、表来表达叙述性的内容。

(2)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。

(3)在编写过程中理论联系实际,注重多用典型实例分析,以培养学生的综合实践能力。

(4)每章后均附有习题与思考题,以加强、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,其主要内容有机制造过程中常用的金属材料和非金属材料、金属毛坯的成形方法、机械零件尺寸和形位误差的测量技术知识、金属切削原理与刀具、金属切削机床及加工工艺、典型零件的加工工艺分析、机械制造工艺规程的制订、工件的定位与夹紧、机床夹具、机械加工表面质量、装配方法与装配工艺规程制订、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简介。

参加本书编写的有苏建修(编写绪论、第 9 章、第 10 章、第 11 章)、李璐(编写第 1 章)、钱同仁(编写第 2 章)、夏丽英(编写第 3 章)、张学良(编写第 4 章)、盛定高(编写第 5 章)、梁沙岩(编写第 6 章)、刘靖岩(编写第 7 章)、阿不都外力·阿不力米提(编写第 8 章)。孙希羚担任本书的主审,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间短促,书中难免存在一些缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明		1.5.3 合金结构钢	28
前言		1.5.4 合金工具钢	29
绪论	1	1.5.5 特殊钢	31
第 1 章 机械工程材料	3	1.6 铸铁	32
1.1 金属的晶体结构与结晶	3	1.6.1 铸铁的石墨化	32
1.1.1 金属的晶体结构	3	1.6.2 灰铸铁	33
1.1.2 金属的结晶	5	1.6.3 球墨铸铁	34
1.1.3 晶体缺陷	6	1.6.4 可锻铸铁简介	36
1.2 铁碳合金平衡图	7	1.7 有色金属	36
1.2.1 合金的相结构	7	1.7.1 铝及铝合金	37
1.2.2 合金的组织	8	1.7.2 铜及铜合金	39
1.2.3 铁碳合金的基本组织	8	1.8 硬质合金和超硬刀具	
1.2.4 Fe-Fe ₃ C 平衡图	10	材料	40
1.2.5 钢的成分、组织、性能之间		1.8.1 硬质合金	40
的关系	13	1.8.2 超硬刀具材料	42
1.3 碳素钢	14	1.9 非金属材料	42
1.3.1 杂质元素的影响	14	1.9.1 高分子材料	43
1.3.2 碳素钢的分类	14	1.9.2 陶瓷	44
1.3.3 碳素钢的牌号、性能和		1.9.3 复合材料	44
用途	14	1.10 习题	45
1.4 钢的热处理	17	第 2 章 金属毛坯的成形	48
1.4.1 钢在加热时的组织		2.1 铸造	48
转变	18	2.1.1 砂型铸造	48
1.4.2 钢在冷却时的组织		2.1.2 金属的铸造性能	52
转变	18	2.1.3 铸造工艺设计基础	53
1.4.3 钢的退火与正火	21	2.1.4 铸件结构工艺性	56
1.4.4 钢的淬火与回火	22	2.1.5 特种铸造	58
1.4.5 钢的表面淬火和化学		2.2 锻压加工	61
热处理	24	2.2.1 金属的塑性变形	62
1.5 合金钢	26	2.2.2 锻造	64
1.5.1 合金元素在钢中的		2.2.3 冲压	68
作用	26	2.3 焊接	71
1.5.2 合金钢的分类和牌号		2.3.1 手工电弧焊	72
表示方法	27	2.3.2 其它焊接方法	77

2.3.3 金属的焊接性	81	4.2 金属切削过程的物理现象	127
2.4 习题	82	4.2.1 切削层的变形	127
第3章 测量技术基础	84	4.2.2 切削力	129
3.1 测量技术基础知识	84	4.2.3 切削热与切削温度	131
3.1.1 概述	84	4.3 刀具磨损与刀具耐用度	133
3.1.2 测量与检验	84	4.3.1 刀具的磨损形式	133
3.1.3 长度基准和量值传递	84	4.3.2 刀具磨损的原因	134
3.1.4 量块	85	4.3.3 刀具的磨损过程及磨钝标准	134
3.2 测量误差	87	4.3.4 刀具耐用度	135
3.2.1 测量误差的来源	87	4.4 工件材料的切削加工性	135
3.2.2 测量误差的分类	88	4.4.1 材料切削加工性的评定	135
3.2.3 测量不确定度	88	4.4.2 影响材料切削加工性的主要因素	136
3.3 孔、轴尺寸公差检测	88	4.4.3 常用金属材料的切削加工性	137
3.3.1 普通计量器具测量孔、轴尺寸	89	4.4.4 改善材料切削加工性的途径	137
3.3.2 光滑极限量规检验孔、轴尺寸	92	4.5 金属切削条件的合理选择	138
3.4 形状和位置误差的检测	95	4.5.1 刀具材料的选择	138
3.4.1 形状和位置误差的检测原则	95	4.5.2 刀具几何参数的选择	138
3.4.2 形状和位置误差的评定	96	4.5.3 刀具耐用度的选择	143
3.4.3 形状误差的检测	97	4.5.4 切削用量的选择	143
3.4.4 位置误差的检测	100	4.5.5 切削液的选择	146
3.5 圆柱齿轮误差检测	108	4.6 习题	147
3.5.1 齿轮、齿轮副公差与极限偏差项目	108	第5章 金属切削加工	148
3.5.2 圆柱齿轮误差检测	109	5.1 金属切削机床的基本知识	148
3.6 螺纹的检测	117	5.1.1 金属切削机床的分类	148
3.6.1 综合检验	117	5.1.2 金属切削机床型号的编制方法	148
3.6.2 用量针测量螺纹中径	118	5.1.3 金属切削机床的运动	150
3.7 习题	119	5.1.4 金属切削机床的技术性能	151
第4章 金属切削原理	121	5.2 车削加工	151
4.1 基本定义	121	5.2.1 概述	151
4.1.1 切削运动	121		
4.1.2 工件上的加工表面	121		
4.1.3 切削用量	122		
4.1.4 刀具的几何参数	122		
4.1.5 切削层参数	126		

5.2.2	CA6140 型卧式车床·····	152	6.2	影响机械加工精度的因素·····	215
5.2.3	其它车床简介·····	159	6.2.1	工艺系统的几何误差对加工精度的影响·····	215
5.2.4	车刀·····	161	6.2.2	工艺系统力效应对加工精度的影响·····	219
5.3	铣削加工·····	162	6.2.3	工艺系统热变形对加工精度的影响·····	222
5.3.1	概述·····	162	6.3	机械加工精度的综合分析·····	224
5.3.2	铣床·····	163	6.3.1	加工误差的性质·····	224
5.3.3	铣刀·····	166	6.3.2	加工误差的统计分析·····	224
5.3.4	万能分度头·····	168	6.4	影响机械加工表面质量的因素·····	231
5.4	磨削加工·····	171	6.4.1	影响零件表面粗糙度的因素·····	231
5.4.1	概述·····	171	6.4.2	影响零件表面层物理力学性能的因素·····	232
5.4.2	M1432A 型万能外圆磨床·····	171	6.5	提高机械加工质量的途径与方法·····	234
5.4.3	其它磨床简介·····	175	6.5.1	提高机械加工精度的途径·····	234
5.4.4	砂轮·····	179	6.5.2	提高机械加工表面质量的方法·····	235
5.4.5	磨削加工的特点及砂轮的修整·····	181	6.6	习题·····	238
5.5	齿轮加工·····	182	第 7 章	机械加工工艺规程制订·····	241
5.5.1	概述·····	182	7.1	概述·····	241
5.5.2	滚齿机·····	184	7.1.1	生产过程与机械加工工艺过程·····	241
5.5.3	其它齿轮加工机床·····	190	7.1.2	机械加工工艺过程的组成·····	241
5.5.4	齿轮刀具·····	193	7.1.3	生产类型与工艺特征·····	243
5.6	其它切削加工简介·····	196	7.1.4	机械加工工艺规程·····	244
5.6.1	钻床及钻削用刀具·····	196	7.1.5	制定机械加工工艺规程的原则和步骤·····	248
5.6.2	镗床及镗刀·····	199	7.2	机械加工工艺规程编制的准备工作·····	248
5.6.3	刨床、拉床及拉刀·····	203	7.2.1	原始资料准备及产品工艺	
5.7	特种加工简介·····	206			
5.7.1	电火花加工·····	206			
5.7.2	电解加工·····	207			
5.7.3	电化学机械加工·····	208			
5.7.4	激光加工·····	209			
5.7.5	电子束加工·····	209			
5.7.6	离子束加工·····	210			
5.7.7	超声波加工·····	210			
5.8	习题·····	211			
第 6 章	机械加工质量·····	212			
6.1	概述·····	212			
6.1.1	机械加工精度·····	212			
6.1.2	机械加工表面质量·····	213			

性分析	248	8.2.3 常见定位方式及其所用	
7.2.2 零件的结构工艺性	249	定位元件	285
7.2.3 毛坯的选择	251	8.3 定位误差	294
7.3 机械加工工艺路线的		8.3.1 产生定位误差的原因	294
拟定	252	8.3.2 定位误差的计算	295
7.3.1 基准及其分类	252	8.4 工件在夹具中的夹紧	300
7.3.2 定位基准的选择	254	8.4.1 夹紧装置的组成及基本	
7.3.3 表面加工方法的确定	256	要求	300
7.3.4 加工顺序的安排	259	8.4.2 夹紧力的确定	301
7.4 工序设计	262	8.4.3 典型夹紧机构	304
7.4.1 加工余量的确定	262	8.4.4 夹紧动力源装置	310
7.4.2 工序尺寸及其公差的		8.5 各类机床夹具简介	312
确定	264	8.5.1 车床夹具	312
7.4.3 工艺尺寸链的计算	265	8.5.2 铣床夹具	313
7.4.4 机床及工艺装备的		8.5.3 钻床夹具	313
选择	272	8.5.4 镗床夹具	315
7.4.5 切削用量的确定	272	8.5.5 其它机床夹具	316
7.4.6 时间定额的确定	272	8.6 习题	316
7.5 工艺方案的技术经济		第9章 典型零件加工工艺	319
分析	273	9.1 轴类零件加工	319
7.5.1 工艺成本的组成	273	9.1.1 概述	319
7.5.2 工艺方案的比较	274	9.1.2 轴类零件加工的主要	
7.6 提高机械加工生产率的		工艺问题	320
工艺措施	276	9.1.3 CA6140 型卧式车床主轴	
7.6.1 缩短基本时间	276	加工工艺	325
7.6.2 缩短辅助时间	277	9.1.4 轴类零件的检验	329
7.6.3 缩短布置工作地时间	277	9.2 套筒类零件的加工	331
7.6.4 缩短准备和终结时间	277	9.2.1 概述	331
7.6.5 高效及自动化加工	278	9.2.2 套筒类零件加工工艺	
7.7 习题	278	分析	332
第8章 机床夹具	280	9.2.3 深孔加工	336
8.1 概述	280	9.3 箱体类零件的加工	337
8.1.1 机床夹具的分类	280	9.3.1 概述	337
8.1.2 机床夹具的组成	280	9.3.2 箱体类零件加工的主要	
8.1.3 机床夹具的作用	282	工艺问题	339
8.2 工件在夹具中的定位	282	9.3.3 圆柱齿轮减速器箱体	
8.2.1 工件的装夹方法	282	加工工艺	342
8.2.2 工件定位的基本原理	283	9.3.4 箱体类零件的检验	344

9.4 圆柱齿轮加工	346	11.1.3 CAD/CAM集成系统 ...	374
9.4.1 概述	346	11.2 计算机辅助工艺规程	
9.4.2 圆柱齿轮加工的主要		设计(CAPP)	374
工艺问题	348	11.2.1 计算机辅助工艺规程设计	
9.4.3 圆柱齿轮加工工艺	350	的基本原理	374
9.4.4 圆柱齿轮的检验	353	11.2.2 各种类型计算机辅助工艺	
9.5 习题	353	规程设计系统的	
第 10 章 装配工艺	354	适用范围	376
10.1 概述	354	11.3 柔性制造系统(FMS)	
10.2 装配方法	355	概述	376
10.2.1 装配精度	355	11.3.1 柔性制造系统的产生	
10.2.2 装配尺寸链的建立	355	和发展	376
10.2.3 保证装配精度的		11.3.2 柔性制造系统的	
方法	356	分类	377
10.3 装配工艺规程的制订	367	11.3.3 柔性制造系统的	
10.3.1 装配工艺规程的制订原则		构成	377
和所需的原始资料	367	11.3.4 柔性制造系统的	
10.3.2 所需原始资料	367	效益	379
10.3.3 装配工艺规程制订		11.4 计算机集成制造	
的步骤	368	系统(CIMS)	380
10.4 习题	370	11.4.1 计算机集成制造系统	
第 11 章 现代制造技术简介	371	的含义	380
11.1 计算机辅助设计与制造		11.4.2 计算机集成制造系统	
(CAD/CAM)	371	的组成	380
11.1.1 计算机辅助设计(CAD)		11.4.3 计算机集成制造系统	
概述	371	的效益	380
11.1.2 计算机辅助制造(CAM)		11.5 习题	382
概述	372	参考文献	383

绪 论

机械制造业是国民经济的基础,是向其它各行业提供工具、仪器和各种机械设备的技术装备的部门。据西方工业国家统计,制造业创造了 60% 的社会财富;45% 的国民经济收入是由制造业完成的。如果没有机械制造业提供质量优良、技术先进的技术装备,那么信息技术、新材料技术、海洋工程技术、生物工程技术以及空间技术等新技术群的发展将会受到严重的制约。可以说,机械制造业的发展水平是衡量一个国家经济实力和科学技术水平的重要标志之一。

机械制造业是一个古老的产业,它自 18 世纪初工业革命形成以来,经历了一个漫长的发展过程。然而,随着现代科学技术的进步,特别是微电子技术和计算机技术的发展,使机械制造这个传统工业焕发了新的活力,增加了新的内涵。如计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、成组技术(GT)、计算机数字控制(CNC)、计算机直接控制和分布式控制(DNC)、柔性制造系统(FMS)、工业机器人(ROBOT)、计算机集成制造系统(CIMS)等新技术已广泛地被人们了解、熟悉和应用。这些新技术的引进和使用,使机械制造业无论在加工自动化方面,还是在生产组织、制造精度、制造工艺方法方面都发生了令人瞩目的变化。其特点如下:

(1) 伴随着机械制造自动化程度的提高,制造装备和测试手段的改善,机械制造精度也得到了极大的提高。从工业革命初期到现在,机械制造精度提高了几个数量级。在 18 世纪初蒸汽机发明时代,机械制造精度仅为 1mm;19 世纪初机械制造精度也仅为 0.1mm;19 世纪末达到 0.05mm;到了 20 世纪 60 年代,加工精度很快提高到 $0.1\mu\text{m}$ 。目前由于测试技术水平的提高和市场的需要,人们正积极从事超精密加工和超微细加工的研究,其精度可达 $0.005\sim 0.01\mu\text{m}$,如德国阿亨工业大学已研制出 $0.01\sim 0.02\mu\text{m}$ 精度级的驱动系统。不少的工业国家已开始向纳米级($1\text{nm}=0.001\mu\text{m}$)加工精度冲刺,可望在不久的将来机械制造业将能实现分子级或原子级的加工精度。

(2) 随着刀具材料的发展和变革,在近一个世纪时期内,切削加工速度提高了 100 多倍。20 世纪前,以碳素钢作为刀具材料,由于其耐热温度低于 200°C ,所允许的切削速度不超过 $10\text{m}/\text{min}$ 。20 世纪初出现了高速钢,耐热温度为 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$,可允许的切削速度为 $30\sim 40\text{m}/\text{min}$ 。到了 20 世纪 30 年代,硬质合金开始使用,其耐热温度达到 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$,切削速度很快提高到每分钟一百至数百米。随后,相继使用了陶瓷刀具、金刚石、立方氮化硼刀具,其耐热温度都在 1000°C 以上,切削速度可高达每分钟 1000 多米。可见,现代机械制造业正沿着高速切削轨道发展。

(3) 随着科技的发展,新的工程材料不断出现。有些工程材料切削加工性能超出了常规机械加工范围,如果仍然依靠传统的切削加工方法是很难完成加工过程的。这就迫使人们去探索、研究新的加工方法和先进制造技术。自 20 世纪 50 年代以来人们研制出一系列的特种加工方法,如电火花加工、电解加工、超声波加工、电子束加工、离子束加工、激光加工、高速水射流切割加工等。近年来,人们还对精密成形技术和快速成形技术进行了研究和探索,并成功研制出精密成形和快速成形系统及其工艺,并投入了实际使用。这

些新的加工方法和成形技术的出现,突破了几百年来所沿用的传统金属切削加工局限,使机械制造业增添了新的加工方法和手段。

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,我国的机械制造业发展十分迅速,已经成为一个规模宏大、门类齐全和具有一定技术基础的产业部门,为我国的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。特别是相对其它产业来说,对机械制造工业的作用认识不够,甚至有相当一段时间不够重视。近些年来,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,对机械制造工业的重要性和作用有了进一步的认识。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。我国机械制造工业今后的发展,除了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。

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与热加工、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、现代制造技术与特种加工等。本课程的特点是:实践性强、内容多、灵活性大等。因此,学生在学习过程中应该注意掌握基本概念及其在实际中的运用,不要只注重于计算和公式推导,而要着重注意实践知识的学习和积累。

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,例如两块碳的质量分数均为 0.8% 的碳钢,其中一块是从冶金厂出厂的,硬度为 HRC20;而另一块加工成刀具并经过热处理,硬度可达 HRC60 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。晶体的原子是长程有规则地、按一定几何形状排列的,称为晶体结构,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。晶体结构如图 1-1a 所示。

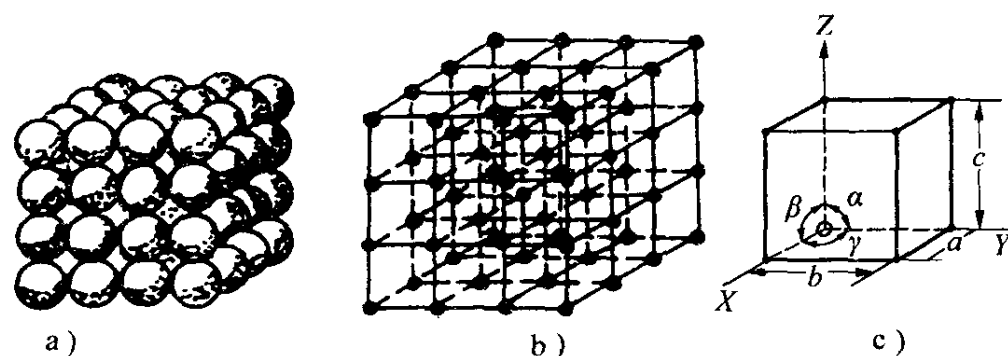


图 1-1 金属晶体结构示意图

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,人为地将原子看作一个点,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;不同方向上的原子列称为晶向。

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。具有这种类型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,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。

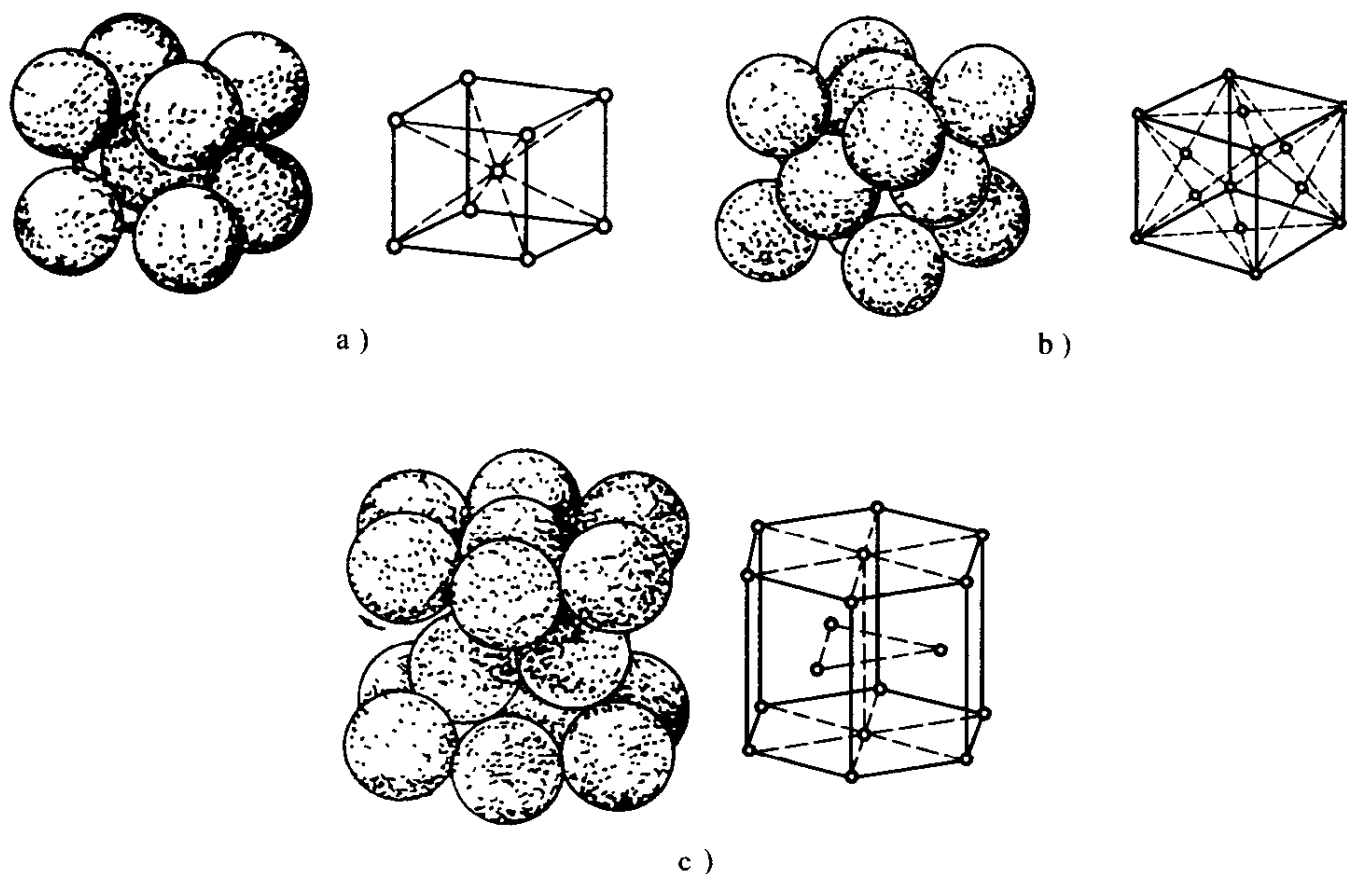


图 1-2 常见的金属晶格类型

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,其内部晶格位向(晶体结晶的方位)完全一致,这个晶体是“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。

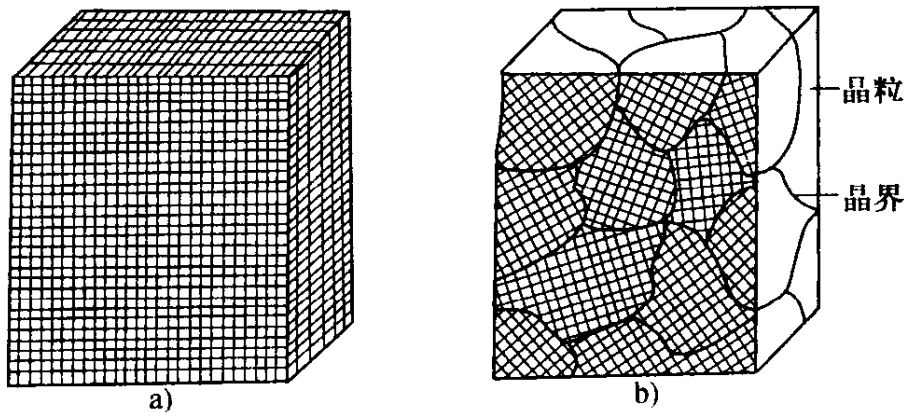


图 1-3 单晶体与多晶体示意图
a) 单晶体 b) 多晶体

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。

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。

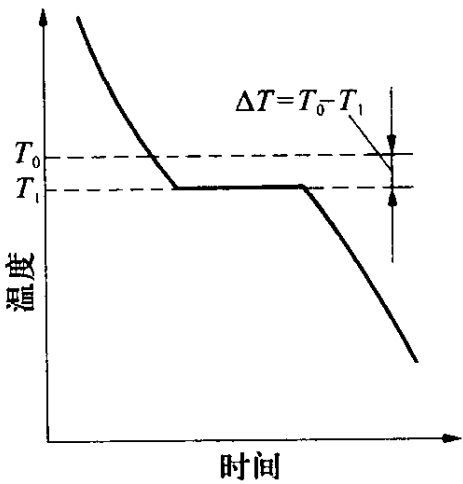


图 1-4 金属的冷却曲线

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。

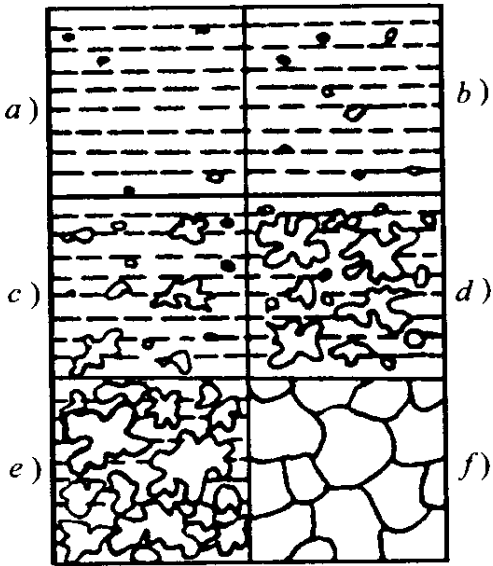


图 1-5 金属结晶过程示意图

(2)细化晶粒的措施。多晶粒是由许多不同的晶核长成的晶粒所组成的。晶粒的大小会对金属力学性能产

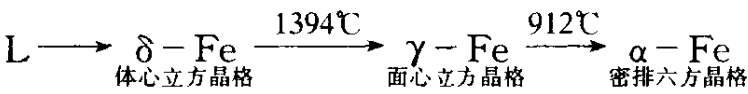
生很大的影响。一般情况下,金属晶粒越细,金属的强度越高,塑性、韧性越好。从金属结晶的过程可知,每一个晶粒是由一个晶核成长形成的,那么在一定体积内所形成的晶核数目愈多,则结晶后的晶粒就愈细小。生产上常采用以下措施来细化晶粒。

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微粒,这些难熔的微粒,起着增加结晶核心的作用,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过程:



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。

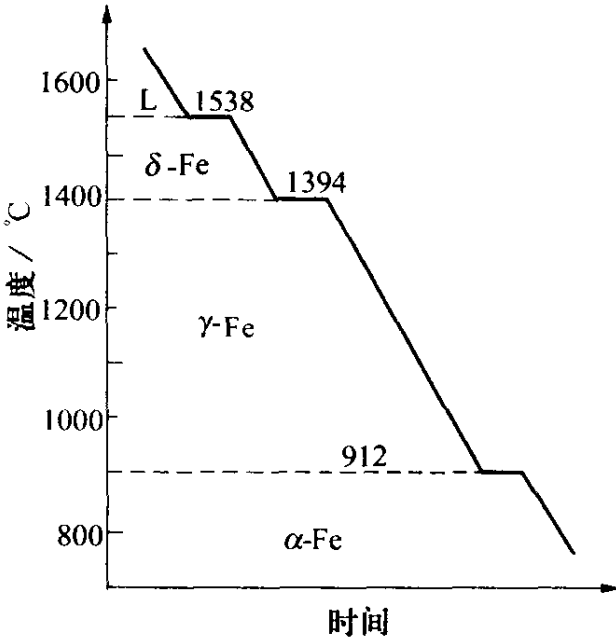


图 1-6 纯铁的同素异构转变

1.1.3 晶体缺陷

在实际的金属晶体中,由于结晶和其它加工等条件的影响,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。

(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位向显著不同,而晶界处实际上是原子逐渐从一种位向过渡到另一种位向的过渡层,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形抗力增大,导致金属材料强度和硬度提高。

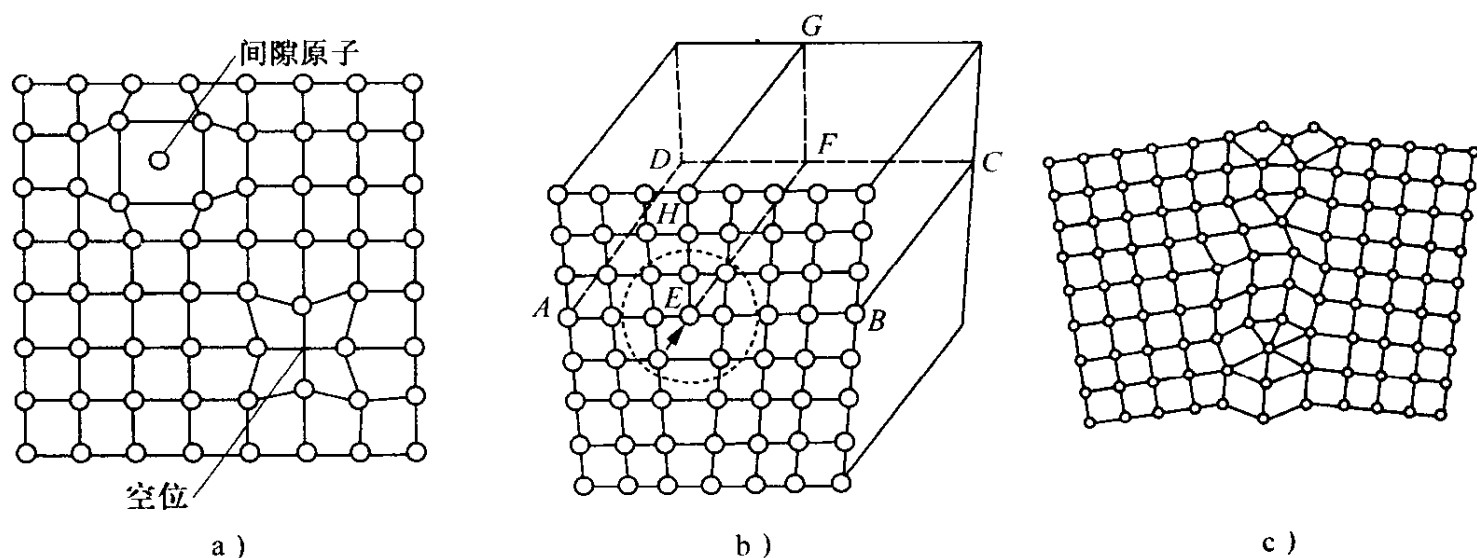


图 1-7 晶体缺陷

a) 点缺陷示意图 b) 刃型位错示意图 c) 晶界缺陷示意图

1.2 铁碳合金平衡图

铁碳合金是以铁和碳为主要组成元素的合金,是现代工业中应用最广泛的金属材料。不同成分的铁碳合金在不同温度下具有不同的组织,因而表现出不同的性能。

1.2.1 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,并与该系统其它部分有界面分开的物质部分,称为相。例如,钢液在液态时为一个相,称为液相;钢液在结晶过程中,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