

机械零件材料 与热处理工艺选择

支道光 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TH13/77

2008

机械零件材料与热处理工艺选择

支道光 编著

机械工业出版社

材料特别是金属材料的选用及热处理工艺的合理安排是从事机械设计、制造工艺的重要内容。本书从基础知识到实际选用分 10 章作了介绍,并在附录中列有常用的一些资料。涉及的内容有金属材料基础、高分子材料基础、陶瓷材料基础、钢及其热处理基础、铸铁、非铁金属及其热处理基础、非金属材料、机械零件失效分析、材料及热处理工艺选择原则以及典型零件材料及热处理工艺选择等。

本书可供高校从事机械制造的本、专科(包括高职)师生参考,对于中专、工矿企业从事机械的设计、制造工艺施工人员以及等级技工阅读后相信会有所裨益。

图书在版编目(CIP)数据

机械零件材料与热处理工艺选择/支道光编著. —北京:机械工业出版社, 2007. 12

ISBN 978-7-111-22353-5

I. 机... II. 支... III. ①机械元件—金属材料②机械元件—热处理 IV. TH13 TG162.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 142771 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:刘彩英 版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣

封面设计:王奕文 责任印制:杨 曦

北京机工印刷厂印刷(北京双新装订有限公司装订)

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·13.625 印张·530 千字

0 001—4 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-22353-5

定价:40.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

前 言

机械工程材料是从事机械制造的物质基础。现代机械工程材料除金属材料外, 非金属材料也获得很大发展。笔者从事金属材料及热处理工艺施工几十年, 又从事机械工程材料课的教学工作十多年, 深感合理选择材料与使用材料、充分发挥材料内在潜力的重要性, 这不仅对保证产品质量, 而且对降低成本、提高生产效率也是极为重要的。可是笔者观察到, 企业里一些从事机械设计及金属切削加工的工艺施工人员, 往往缺乏对材料的了解, 不知如何合理地选择与使用材料, 也不知道如何通过热处理去发挥金属材料的内在潜力, 而加工工艺路线和热处理要求却是由他们制订的。这样, 近代金属材料的发展、金属热处理的成果, 常常因此得不到采用。也就是说, 冷、热加工脱节很严重, 以此下去, 不仅材料的潜力得不到充分的发挥, 而且一些对提高金属材料性能极为有效的先进的现代热处理技术也不能获得有效的应用。

在当前市场经济的状况下, 许多高校已将传统的专业作了重大的调整, 如金属热处理、焊接、铸造、锻压等一些传统专业, 多半已纳入材料专业的范畴, 其专业目标已不很具体, 而实际生产企业仍以专业为主进行组织生产, 这样造成许多大学或大专毕业的学生, 到企业仍需进一步进行专业的强化学习方能适应生产的需要。

此外, 笔者曾多年从事成人高校的教学工作, 一些机械制造专业学生在进行毕业设计时, 虽然已学过金属材料与热处理课程, 但仍不知如何选择材料和安排热处理工序, 甚至一些热处理的基本工序的目的均不清楚。这些现象的出现不仅与课程的时间安排有关, 更关键的是与目前的一些非热处理专业使用的金属材料与热处理的教材编写有关。许多高校使用的教材, 由于过多地偏重于理论, 而降低了对实践的要求, 因而学生虽学完了金属材料与热处理课程, 仍不知如何在实际中加以运用。

笔者编写本书的基本目的, 就是要以通俗浅近的方式, 介绍金属热处理的原理, 而将重点放在应用上, 突出从事金属机械加工设计、工艺人员所需要的材料及热处理知识, 包括近代热处理的先进工艺技术, 而热处理工艺中的具体参数则尽量减少, 使之更加实用。

本书除可供从事机械制造非热处理专业, 特别是高职专业的师生作为教

IV

学参考书外，也可供工矿企业从事机械制造的工程技术人员参考使用。考虑到市场上这类书籍多半都是专业性很强的，不太适合非材料专业人员使用，因此，本书的编写，希望能在冷、热加工之间搭建起一座桥梁，促进其间的相互沟通，如能做到这点，应是笔者的心愿。

限于笔者的水平，错误在所难免，还望广大读者批评指正。

支道光

目 录

前言

第 1 章 机械工程材料基础 1

- 1.1 金属材料基础 1
 - 1.1.1 金属材料的结构特点 1
 - 1.1.2 金属材料的结晶 4
 - 1.1.3 铁碳合金 9
 - 1.1.4 金属材料的冷、热塑性变形 13
 - 1.1.5 金属材料的常温及高温力学性能 17
- 1.2 高分子材料基础 34
 - 1.2.1 基本概念 34
 - 1.2.2 聚合反应类型 34
 - 1.2.3 高聚物的结构特点 36
 - 1.2.4 高聚物的物理状态 37
 - 1.2.5 高聚物的性能 39
- 1.3 陶瓷材料基础 40
 - 1.3.1 陶瓷的组织结构 41
 - 1.3.2 陶瓷的性能 42
- 1.4 复合材料基础 43
 - 1.4.1 基本概念 43
 - 1.4.2 复合材料的性能 43

第 2 章 钢 45

- 2.1 钢的分类 45
 - 2.1.1 按化学成分分类 45
 - 2.1.2 按冶金质量分类 46
 - 2.1.3 按用途分类 46
- 2.2 钢中常存杂质元素对钢性能的影响 46
 - 2.2.1 锰 (Mn) 46
 - 2.2.2 硅 (Si) 46
 - 2.2.3 硫 (S) 46
 - 2.2.4 磷 (P) 47

- 2.2.5 氢 (H)、氮 (N)、氧 (O) 47

- 2.3 钢中合金元素的作用 48
 - 2.3.1 合金元素在钢中存在的形式 48
 - 2.3.2 合金元素对铁碳合金相图的影响 50
 - 2.3.3 合金元素对钢中组织转变 (热处理) 的影响 50
- 2.4 结构钢 51
 - 2.4.1 普通质量结构钢 51
 - 2.4.2 优质结构钢 52
 - 2.4.3 其他结构钢 62
- 2.5 工具钢 64
 - 2.5.1 刃具钢 64
 - 2.5.2 模具钢 68
 - 2.5.3 量具钢 72
- 2.6 特殊性能钢 73
 - 2.6.1 不锈钢 73
 - 2.6.2 耐热钢 77
 - 2.6.3 耐磨钢 80
- 2.7 铸钢 81

第 3 章 钢的热处理基础 85

- 3.1 钢的热处理基本原理 85
 - 3.1.1 钢在加热时的转变 86
 - 3.1.2 钢在冷却时的转变 89
 - 3.1.3 钢在回火时组织性能变化 98
- 3.2 钢的热处理实践 101
 - 3.2.1 钢的整体热处理 101
 - 3.2.2 钢的表面热处理 119
 - 3.2.3 钢的化学热处理 130
 - 3.2.4 钢的离子化学热处理 152

3.2.5 气相沉积技术	154	第6章 粉末冶金材料	200
3.2.6 离子注入技术	156	6.1 粉末冶金材料分类	200
3.2.7 形变热处理	157	6.2 粉末冶金生产过程	201
第4章 铸铁及其热处理	159	6.3 机械制造中常用的粉末冶金材料	202
4.1 铸铁的分类、特性和用途	159	6.3.1 烧结减摩材料(即含油轴承)	202
4.1.1 工程结构用铸铁	159	6.3.2 烧结铁基粉末冶金结构材料	203
4.1.2 特殊用途铸铁	164	6.3.3 烧结摩擦材料	204
4.2 铸铁的石墨化及热处理特点	166	6.3.4 硬质合金	205
4.2.1 铸铁的石墨化	166	6.3.5 钢结硬质合金	210
4.2.2 铸铁热处理的特点	167	第7章 非金属材料	212
4.3 铸铁的热处理	167	7.1 高分子材料	212
4.3.1 灰铸铁的热处理	167	7.1.1 塑料	212
4.3.2 白口铸铁的热处理	170	7.1.2 橡胶	214
4.3.3 球墨铸铁的热处理	170	7.2 陶瓷材料	216
4.3.4 可锻铸铁的热处理	173	7.2.1 传统陶瓷	216
第5章 非铁金属材料及其热处理	175	7.2.2 特种陶瓷	217
5.1 铜和铜合金及其热处理	175	7.3 复合材料	218
5.1.1 工业纯铜	175	7.3.1 纤维增强复合材料	218
5.1.2 铜合金	176	7.3.2 粒子增强复合材料	219
5.1.3 铜和铜合金的热处理	181	第8章 机械零件的失效分析	220
5.2 铝和铝合金及其热处理	183	8.1 零件在常温静载条件下的过量弹性变形和过量塑性变形	220
5.2.1 工业纯铝	183	8.1.1 过量弹性变形	220
5.2.2 铝合金	183	8.1.2 过量塑性变形	221
5.2.3 铝及铝合金的热处理	187	8.2 零件的断裂	221
5.3 镁和镁合金及其热处理	191	8.2.1 零件在静载荷和冲击载荷下的断裂	221
5.3.1 镁和镁合金	191	8.2.2 零件在交变载荷下的疲劳断裂	224
5.3.2 镁合金的热处理	192	8.3 零件的磨损	226
5.4 钛和钛合金及其热处理	194	8.3.1 粘着磨损	226
5.4.1 钛和钛合金	194	8.3.2 磨粒磨损	226
5.4.2 钛合金的热处理	195	8.3.3 腐蚀磨损	226
5.5 铸造轴承合金	197		
5.5.1 锡基铸造轴承合金	198		
5.5.2 铅基铸造轴承合金	198		
5.5.3 铜基铸造轴承合金	198		
5.5.4 铝基铸造轴承合金	198		
5.5.5 其他轴承材料	198		

8.4 零件的腐蚀	227	10.1.3 渗碳轴承钢	272
8.4.1 腐蚀的分类	227	10.1.4 中碳轴承钢	273
8.4.2 化学腐蚀	227	10.1.5 特大、特小、特轻、精 密轴承用钢	274
8.4.3 电化学腐蚀	228	10.1.6 不锈钢轴承钢	276
8.4.4 几种典型的局部腐蚀	228	10.1.7 高温轴承钢	277
第9章 材料及热处理工艺选 择	231	10.1.8 防磁轴承用钢及合金	278
9.1 材料选择	231	10.1.9 冲压滚针轴承套圈等零 件用钢	279
9.1.1 材料选择的一般原则	231	10.1.10 保持架、铆钉、支柱 等用钢	279
9.1.2 选材的步骤	238	10.1.11 轴承零件加工工艺路 线	281
9.1.3 选材的方法	238	10.2 弹簧	281
9.2 热处理工艺选择	239	10.2.1 通用弹簧钢材及热处 理选用	281
9.2.1 热处理件的结构工艺 性	240	10.2.2 特殊用途弹簧钢材及 热处理选用	285
9.2.2 热处理方案的选择	241	10.2.3 弹簧的最终热处理	287
9.2.3 热处理技术条件的确 定	242	10.2.4 几种典型弹簧的选材 及热处理	288
9.2.4 热处理技术条件的标 注	245	10.3 齿轮	292
9.2.5 常用热处理工艺代号	253	10.3.1 机床齿轮	292
9.2.6 热处理工序位置安排	254	10.3.2 汽车、拖拉机齿轮	294
9.2.7 热处理与其他冷、热加 工工艺的合理配合	257	10.3.3 低速重载及高速齿 轮	295
9.3 几种典型零件材料及热处 理工艺选择分析	260	10.3.4 其他材料制造齿轮	296
9.3.1 齿轮	260	10.3.5 齿轮热处理	297
9.3.2 机床主轴	263	10.4 紧固件	303
9.3.3 冷作模具	264	10.4.1 螺纹紧固件	303
9.3.4 内燃机曲轴	265	10.4.2 垫圈、挡圈、销和 铆钉	307
9.3.5 汽车半轴	266	10.5 工具	308
9.3.6 机床镗杆	267	10.5.1 普通工具钢	308
9.3.7 箱体	267	10.5.2 高速工具钢	308
9.3.8 活塞销	267	10.5.3 工具用钢的质量要 求	309
第10章 典型零件材料及热处 理工艺选择	269	10.5.4 工具用钢的热处理	310
10.1 滚动轴承零件	269	10.5.5 典型工具选材与热处	
10.1.1 高碳铬轴承钢	269		
10.1.2 限制淬透性轴承钢	271		

理	313	10.11.1 机床导轨	356
10.6 模具	317	10.11.2 机床主轴	359
10.6.1 冷作模具	318	10.11.3 机床丝杠	361
10.6.2 热作模具	321	10.11.4 机床基础件	364
10.6.3 塑料模具	323	10.11.5 机床其他零件	365
10.6.4 模具表面强化处理	325	10.12 飞机零件	368
10.7 量具	325	10.12.1 飞机起落架外筒	368
10.7.1 量具用钢	325	10.12.2 飞机蒙皮	368
10.7.2 量具热处理	327	10.12.3 压气机叶片	369
10.7.3 典型量具的选材与热处理	329	10.12.4 涡轮叶片	369
10.8 液压元件的零件	330	10.12.5 涡轮盘	370
10.8.1 齿轮泵零件	330	10.12.6 涡轮轴	370
10.8.2 叶片泵零件	331	10.12.7 燃烧室	371
10.8.3 柱塞泵零件	333	10.12.8 航空齿轮	371
10.8.4 液压阀零件	334	10.13 气动工具及钻探机械零件	372
10.9 大型铸锻件	335	10.13.1 凿岩机活塞	372
10.9.1 大型锻件常用钢材	335	10.13.2 凿岩机缸体、阀、螺旋棒、棘轮、回转爪和钎套	373
10.9.2 大型锻件的锻后热处理	335	10.13.3 凿岩用钎头	374
10.9.3 大型锻件最终热处理	337	10.13.4 凿岩机钎尾及成品钎杆	375
10.9.4 热轧工作辊	337	10.13.5 其他气动工具零件	375
10.9.5 冷轧工作辊	337	10.13.6 牙轮钻机三牙轮钻头	377
10.9.6 支承辊	338	10.13.7 钻探机械钻具	378
10.9.7 大型铸件	339	10.14 农机具零件	379
10.10 汽车、拖拉机、柴油机零件	339	10.14.1 耕作机械的典型零件	379
10.10.1 活塞环	339	10.14.2 收获与采集机械典型刀片	381
10.10.2 活塞销	341	10.14.3 农产品加工机械典型零件	382
10.10.3 连杆	343	10.14.4 小农具材料	385
10.10.4 曲轴	344	10.15 发电设备零件	386
10.10.5 凸轮轴	346	10.15.1 汽轮机和发电机转子	386
10.10.6 挺杆	348	10.15.2 汽轮发电机无磁性护环	388
10.10.7 排气阀	351		
10.10.8 半轴	352		
10.10.9 喷油泵柱塞偶件和喷油嘴偶件	354		
10.10.10 履带板	356		
10.11 金属切削机床零件	356		

10.15.3	汽轮机叶轮	389	10.17.2	自行车零件	405
10.15.4	汽轮机叶片	389	10.17.3	缝纫机零件	406
10.15.5	汽轮机螺栓	390	10.17.4	纺织机械零件	408
10.15.6	锅炉构件及输汽管	391	附录 A	改善零件热处理工艺性的	
10.16	石油化工机械零件	393		结构设计要点和示例	410
10.16.1	泥浆泵零件	393	附录 B	洛氏、布氏、维氏、努氏	
10.16.2	钻机绞车零件	395		硬度换算表	415
10.16.3	钻探工具	396	附录 C	常用金属材料及热处理标	
10.16.4	钻机齿轮	399		准目录	417
10.16.5	化工机械零件	400	附录 D	经热处理的机械零件机械加	
10.17	手表、自行车、缝纫机和纺			工余量	420
	织机械零件	402	参考文献		424
10.17.1	手表零件	402			

第1章 机械工程材料基础

1.1 金属材料基础

1.1.1 金属材料的结构特点

1.1.1.1 晶体的概念

在自然界中，所有的固态物质按照它的原子（离子或分子）的聚集状态，可分为晶体和非晶体两大类。

在晶体中，原子（离子或分子）的排列是按照一定的几何规律作规则排列的，而非晶体则相反，这些质点的排列则是无规则的。

金属材料及绝大多数的固态物质都是晶体，因而其内部的原子（离子或分子）则是按照一定的规律作规则排列的。那么，金属为什么呈晶体结构呢？这与它的内部原子（离子）的结合键有关。金属材料是按照金属键方式结合的。在金属中，脱离原子的价电子无方向性地自由穿行在正离子所组成的骨架中，并相互吸引而结合，因而赋予金属所特有的性能（晶体结构、导电、导热、金属光泽、可塑性等）。

1.1.1.2 金属的晶体结构

金属中常见的晶格类型有以下三种：

1. 体心立方晶格 属于这种晶格类型的金属有 α -Fe、Cr、W、Mo、V 等，如图 1-1 所示。

2. 面心立方晶格 属于这种晶格类型的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Au、Ag、Pb、Ni 等，如图 1-2 所示。

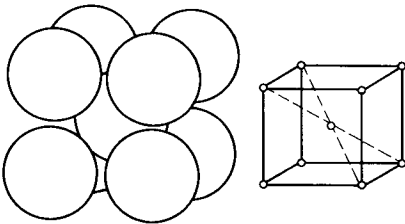


图 1-1 体心立方晶格

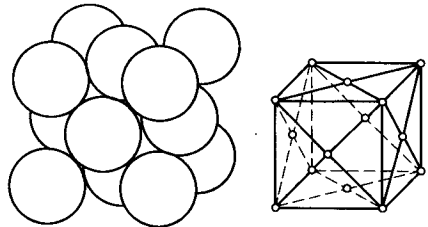


图 1-2 面心立方晶格

3. 密排六方晶格 属于这种晶格类型的金属有 Mg、Zn、Be、Cd 等，如图 1-3 所示。

由于三种晶格类型原子排列的形式不同，其紧密程度也就不同，因而存在不同程度的空隙。其中，体心立方晶格的空隙最大，如果金属由面心立方晶格转变为体心立方晶格时，将使体积胀大。

在固态下，有些金属随着温度的变化，常以不同的晶格类型存在。例如，纯铁就有两种晶格类型：体心立方晶格

及面心立方晶格。在室温下的纯铁（ α -Fe）具有体心立方晶格；而在 912 ~ 1394℃ 温度范围内存在的纯铁（ γ -Fe）则具有面心立方晶格，其间的转变称之为金属的同素异构转变。

金属或合金的同素异构转变是金属热处理的基础。转变时，由于晶体体积的变化，必将产生较大的内应力，并造成性能上的改变。

1.1.1.3 合金的晶体结构

所谓合金是由两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素通过冶炼等方法结合而成的具有金属特性的物质。例如，钢、铸铁、黄铜、青铜等都是合金材料。由于合金具有比纯金属更高的力学性能及某些特殊的物理、化学性能（例如耐高温、耐腐蚀等），因而，工业上合金材料比纯金属应用更为广泛。

在合金中，通常把具有同一化学成分且结构相同的均匀组成部分称做相，而相与相之间有明显的界面。固态合金中，相的晶体结构可分为固溶体与金属化合物两大类。

1. 固溶体 合金在固态下，其晶格类型与其中某一类元素的晶格相同，这类元素称为溶剂元素，而其他元素（称为溶质元素）则溶解在溶剂元素所组成的晶格中，而保持溶剂元素原子所组成的晶格不发生变化，这样形成的均匀固态相结构称之为固溶体。

固溶体按照溶质元素原子在溶剂元素原子组成晶格中的分布情况不同，可分为间隙固溶体与置换固溶体两类。

(1) 间隙固溶体 其中溶质元素原子处于溶剂元素原子组成的晶格空隙位置。间隙固溶体中的溶质元素原子都是一些小原子半径的非金属元素，例如 H、B、C、O、N 等。钢铁材料中的铁素体、奥氏体都属于这种类型的固溶体。

(2) 置换固溶体 其中溶质元素原子取代了溶剂元素原子组成的晶格中某些位置上的溶剂元素原子。形成置换固溶体的溶质元素原子都是些大原子半径

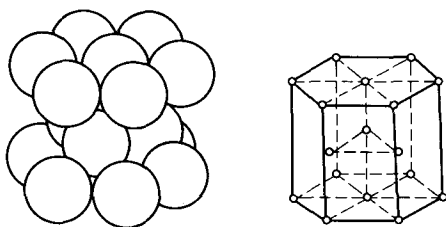


图 1-3 密排六方晶格

的金属原子,例如 Cr、Ni、Zn、Sn 等。钢铁材料中,一些合金元素例如 Cr、Ni、Mn、Si 等的加入,往往都是形成这种类型固溶体。

从力学性能看,固溶体通常具有较高的塑性、韧性和较低的强度、硬度。但是,由于溶质元素原子的溶入,使晶格发生畸变,使之塑性变形抗力增大,因而较纯金属具有更高的强度、硬度,这就是所谓的固溶强化作用。

固溶强化是提高金属材料力学性能的重要途径之一。例如,工业上广泛应用的普通低合金高强度结构钢 Q345 (16Mn),就是利用 Mn 元素(作为溶质原子)加入钢中,造成固溶强化作用,从而使它的强度较普通碳素结构钢 Q235 提高 25%~40%。

2. 金属化合物 金属材料中,由相当程度的金属键结合,并具有明显金属特性的化合物称为金属化合物。金属化合物的晶格类型与组成化合物的各组元晶格类型完全不同,一般可用化学分子式表示。其性能特点是熔点高、硬而脆。它在合金中的数量、大小、形态及分布状况对合金的性能影响很大。当它以细小颗粒均匀分布在固溶体基体上时,将使合金的强度、硬度、耐磨性明显提高,这一现象称为弥散强化。因此,金属化合物是合金中重要的强化相。

金属化合物的种类很多,常见的有正常价化合物、电子化合物以及间隙化合物等。前两种在非铁金属材料中出现,例如黄铜中的 β' 相 (CuZn)。而钢及硬质合金中,则常见到的是间隙化合物,例如碳钢中的渗碳体 (Fe_3C)、合金钢中的 Cr_7C_3 、 Cr_{23}C_6 、 $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ 等以及钢经化学热处理后在其表面形成的 Fe_2N 、 Fe_4N 、 FeB 等。此外,合金钢及硬质合金中的 VC、WC、TiC 等具有极高的硬度和熔点,常称之为间隙相(复杂晶格的间隙化合物)。近代表面工程技术中,利用气相沉积技术在材料表面沉积的 TiN、TiC 等也属于间隙相范畴。

1.1.1.4 实际金属的晶体结构

实际金属材料的晶体结构,并非如前所说的完全由原子按一定几何规律规则排列而形成的,而是由许多外形不规则的小晶体组合起来的,每个小晶体内部的晶格位向基本一致,而各个小晶体彼此间的位向却不相同,如图 1-4 所示。这种外形不规则的小晶体通常称为晶粒,晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。因此,实际金属材料的晶体结构是由许许多多晶粒组成的多晶体结构。

晶粒尺寸是很小的,例如钢铁材料的晶粒一般在 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{mm}$ 左右,必须在金相显微镜下才能观察到晶粒及晶界。

应该看到,晶界就是一种晶体缺陷,常称为面缺陷。因为它是两个不同位向晶粒之间的交界地带,因而原子排列紊乱,具有较高能量。与晶粒内部不同,

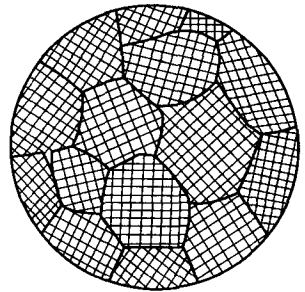


图 1-4 多晶体结构示意图

晶界有着一系列特性：常温强度、硬度较高；易被腐蚀；熔点较低；相变往往从晶界处开始等。实际上，晶粒内部往往也不象理想晶体那样完整，仍然存在着亚晶粒及亚晶界。

实际金属除存在面缺陷（晶界及亚晶界）外，还有点缺陷（空位及间隙原子）、线缺陷（位错）等。

空位是晶格的某些结点位置往往没有被原子所占据而空着的位置；间隙原子则是在个别晶格的空隙位置出现了多余的原子；而位错则是在晶体的某处出现一列或若干列原子有规律性的错排现象。

在晶体中无论出现哪种缺陷，都破坏了原子间的平衡状态，使晶格产生畸变，并导致晶体的性能发生改变，例如，促使金属的强度、硬度增加等。而且，空位和间隙原子在晶体中的运动，则是金属中原子扩散的主要方式之一，对热处理及化学热处理过程的进行是极为重要的。此外，晶体中位错密度的变化及位错的运动，也都会对金属的性能、压力加工及组织转变产生非常重要的影响。

1.1.2 金属材料的结晶

材料由液态冷却成固态的过程一般称之为凝固，但由于固态金属材料是晶体材料，因而称为结晶。

1.1.2.1 纯金属的结晶

1. 纯金属结晶的基本规律

(1) 结晶是在一个恒定的温度下进行的。在冷却曲线上出现恒温的水平线段，出现这一现象的原因是金属在结晶过程中，释放的结晶潜热抵消了向外界散失的热量，以致温度不随冷却时间的增加而下降。因此，纯金属有一个固定的结晶温度。

(2) 金属总是在一定的过冷条件下结晶的。所谓过冷是指金属的实际结晶温度低于平衡条件下的理论结晶温度，其间的差值称为过冷度 ΔT 。

自然界普遍遵循的规律是，一切物质都能自发地由高能量状态向低能量状态转变，显然，结晶时也不例外，只有在过冷条件下，其能量状态的变化才有利于液态金属结晶成固态，因此，过冷是结晶的必要条件，也是结晶时的推动力。结晶时的冷却速度越大，过冷度也越大，金属的实际结晶温度也就越低。

(3) 结晶是通过不断形成晶核及晶核不断长大进行的。

1) 形核 形核有两种方式：均质形核（自发形核）及异质形核（非自发形核）。前者是一种自发形成晶核的过程；而后者则是依附在某些杂质表面的形核。实际金属的结晶往往多是以后者的方式进行的。

2) 晶体长大 晶体的长大一般是通过类似树枝的成长方式进行。即先长成主干,再形成枝干及分枝,最后形成树枝状晶体。如果金属的纯度很高,结晶时又能不断补充结晶收缩所需的液体,则结晶后是看不到树枝状晶体痕迹的,而能看到的则是颗粒状的多边形晶粒。但是,如果金属的纯度不高,先结晶的主干必然是纯度较高部分,而杂质由于熔点较低,往往最后凝固,存在于树枝间,通过适当腐蚀就能够显现树枝状形态。若最后凝固部分得不到液态金属补充,则树枝间将留下空隙,形成所谓的显微缩松,使铸件不致密。

2. 控制结晶后晶粒大小的途径 金属结晶后形成的是由许许多多晶粒组成的多晶体结构。实践表明,晶粒大小对金属的性能,特别是力学性能影响很大。细晶粒组织不仅强度、硬度高,而且塑性、韧性也好。金属结晶后的晶粒大小与形核率和晶核的长大速率有关。形核率是指单位时间内,单位体积液态金属中所萌生的晶核数目;而长大速率则是指单位时间内,晶核向周围液态金属中长大的平均线速度。显然,凡能促进形核率,抑制长大速率的因素,均能细化晶粒;反之,则使晶粒粗化。

在工业生产中,常采取以下方法获得细晶粒的铸件。

(1) 增大过冷度 即通过加快冷却速度的方式来获得细晶粒的铸态组织。但是,对于大型或复杂形状铸件,由于不能获得整个铸件均匀的冷却而导致内应力增加,易使铸件开裂。

(2) 变质处理(或称孕育处理) 就是采用前面讲到的异质形核的方式。在液态金属结晶前,通过加入一些细小的变质剂,使结晶时的形核率增加,并降低长大速率,这种细化晶粒的方法,称为变质处理。在生产中,利用变质处理进行细化晶粒的方法多有应用,例如,在铝液中加入 Ti、Zr、V 等,铁液中加入 Si、Ca 等,铝硅合金液中加入 Na 和钠盐等变质处理方法。

(3) 附加振动 在液态金属结晶过程中,采用机械振动、超声波振动及电磁振动等措施,使液态金属在铸型中运动,促进枝晶破碎而细化,增加了形核率,从而获得细晶粒铸件。

1.1.2.2 合金的结晶及相图

合金的结晶与纯金属的结晶遵循着相同的基本规律,也是在过冷条件下形成晶核及晶核长大的过程。但是,合金至少是由两个或两个以上元素组成的,因而它的结晶过程比纯金属要复杂。例如,合金的结晶不一定是在恒温下进行,而且,在结晶过程中,在不同的温度范围内存在着不同数量的相,这些相的成分有时还可能变化。

为了更好地了解合金的结晶规律,必须应用合金相图这一重要工具。相图又称平衡图或状态图,它是在平衡状态下,合金的组成相与温度、成分之间关系的简明图解。

最简单的合金是由二个元素组成的二元合金。不同的二元合金组合，其相图图形都不一样，有些甚至十分复杂，但都是由匀晶相图、共晶相图、包晶相图等三种基本类型（见图 1-5）组合而成。

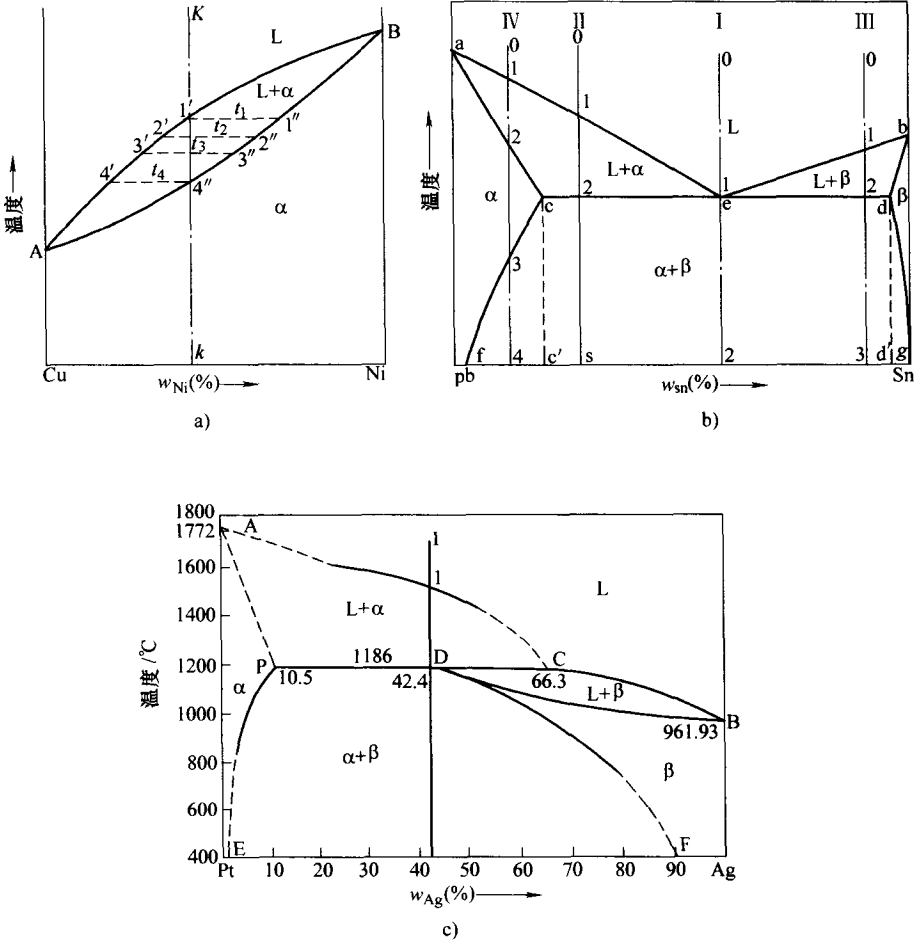


图 1-5 二元合金相图的基本类型

a) 匀晶相图 (Cu-Ni) b) 共晶相图 (Pb-Sn) c) 包晶相图 (Pt-Ag)

工业上常用的二元合金 Cu-Ni、Au-Ag、Au-Pt、Fe-Ni 等，其相图为匀晶相图；Fe-C、Al-Si、Al-Cu、Mg-Si、Mg-Al 等相图中均具有共晶转变部分；而 Al-Cu、Al-Mn、Cu-Zn、Sn-Sb 及 Fe-C 等相图中也均具有包晶转变部分。

相图中，纵坐标表示温度，横坐标表示合金成分。相图中的各点、线、区域都表示不同成分的合金在不同温度下平衡状态的组织（相）。

除上述三种基本的二元合金相图外,还有一些派生出来的相图,例如 Fe-C 合金中的共析转变相图。这是一个在固态下转变的相图,对于钢铁材料具有重要意义。

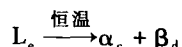
以下就工业上应用最多的匀晶相图及共晶相图作简要分析。

所谓匀晶相图(见图 1-5a)是指两组元在液态及固态下均无限溶解的相图。当 A、B 两组元(例如 Cu、Ni)组成的合金系中的某一成分合金自液相 L 冷却至液相线(图 1-5a 中上面的曲线)时,将结晶出 α 固溶体。随着温度的降低, α 固溶体不断增加而液相 L 不断减少,当冷却到固相线(图 1-5a 中下面的曲线)时,剩余液相 L 全部结晶成固相 α 固溶体,此时结晶完成。如果冷却是在极其缓慢条件下进行,最终将获得与原合金成分相同的均匀 α 固溶体。但是,在实际生产条件下,由于合金在结晶过程中,冷却速度一般都较快,而且固态下原子扩散又很困难,以致固溶体内部的原子扩散来不及充分进行,结果先结晶的固溶体含高熔点组元较多,而后结晶的固溶体则含较多的低熔点组元。这样,一个晶粒内部出现化学成分不均匀的现象,这就是所谓的晶内偏析或枝晶偏析。凡相图中液相线与固相线之间的温度间隔与成分间隔较大的合金均具有较大的枝晶偏析倾向。

枝晶偏析会降低合金的力学性能和加工工艺性能。对于高合金钢铸件,其枝晶偏析倾向往往很大,为此,常需将它加热到高温,并经长时间保温,使原子进行充分扩散,以达到成分均匀的目的,这种热处理方法称之为均匀化退火(或扩散退火)。

匀晶相图是形成单相固溶体合金的相图。固溶体合金随着溶质元素原子的溶入量的增加,除硬度、强度增加外,其电阻也增加,而电阻温度系数却降低。由于固溶体合金的电阻特性,因而是制造电阻加热元件的理想材料。但是,随着合金相图中液相线与固相线之间的温度间隔及成分间隔的加大,合金的枝晶偏析越严重,合金的流动性降低,易于产生分散缩孔,使铸件组织疏松、性能变坏,因而不适合进行铸造的。

共晶相图是指两组元在液态能完全互溶,而在固态互相有限溶解并发生共晶转变的相图(可参见图 1-5b)。所谓共晶转变是指某一成分的液态合金在一定温度恒温下,同时结晶出两种不同固相的转变,其转变可用下式表示:



$\alpha_e + \beta_d$ 的机械混合物称为共晶组织或共晶体。在 c-e-d 水平线范围内的合金均不同程度地进行共晶转变。e 成分的合金结晶后,可得到 100% 的共晶组织,而在其左侧成分的合金,则先结晶出 α 固溶体后,再完成共晶转变,称为亚共晶组织;而在 e 成分右侧的合金,则先结晶出 β 固溶体后,方能实现共晶转变,故称过共晶组织。