
机械工程材料学

朱荆璞 张德惠 编

机械工业出版社

本书共分十二章。一章至六章为工程材料的基础理论部分，包括：金属材料的一般特性；金属与合金的构造；金属与合金的结晶（相图）；金属的塑性变形、再结晶及位错概念；合金的性能；钢的热处理；金属的表面强化处理。七章至十一章为机械工程材料部分；包括：工业用钢；铸铁；有色金属及其合金；非金属材料（高分子材料基本知识、工程塑料、橡胶、陶瓷、复合材料）；磁性材料 and 高温、低温材料。十二章为机械零件的失效分析及材料的选用部分，包括：材料选用的一般原则；机械零件的失效；典型零件选材及工艺分析。

本书可作为高等工科院校和职工大学、电视大学机械类各专业的教学用书，也适合机械制造工程技术人员阅读参考。

机械工程材料学

朱荆璞 张德惠 编

*

责任编辑：张蔼玲

封面设计：刘代

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 ·印张16·字数390千字

1988年4月北京第一版·1988年4月北京第一次印刷

印数 0.001—7,400·定价：3.90元

*

ISBN 7-111-00443-4/TB·25

前 言

本书是参考了机械工业部机械制造类《机械工程材料和物理化学教材编审组》1984年4月修订的机械工程材料学教学大纲编写的。

本书可作为高等工科院校机械制造类冷加工专业《机械工程材料学》的教学用书。也可供电视大学、职工业余大学师生以及现场从事机械零件设计和加工工艺的人员参考。

本书的特点是：

1. 在材料科学基础方面，适当地加强了基础理论，如对位错概念、合金结构、钢的相变及材料性能等，均作了深入浅出的阐述。

2. 在材料热处理方面，在阐述基本概念后，重点介绍热处理工序在零件加工工艺流程中的作用和安排位置，使读者在制订机械零件加工工艺时能够合理地考虑热处理问题。同时，还增加了材料性能一章，介绍如何根据零件的或工模具的服役条件，合理地设计和选材。

3. 在材料方面，除介绍常用金属材料的牌号、成分、组织、性能及用途外，还增加了非金属材料(包括高分子材料、陶瓷材料和复合材料)、电磁材料、高温、低温材料等内容，以满足在不同领域工作的工程技术人员的需要。

4. 为了解当前飞速发展的各种表面处理技术、表面强化技术，增设了金属的表面强化处理一章，集中讲述化学热处理、表面淬火、表面涂覆、表面镀层及表面形变强化技术等内容。

本书共十二章，其中第一～六、十一章由沈阳工业大学朱荆璞编写，第七～十、十二章由陕西机械学院北京研究生部张德惠编写。

在编写过程中，力求深入浅出，插图清晰，数据确切。适当引用国外教科书资料，尽量反映80年代的技术水平和生产实际。如能对《机械工程材料学》课程的教学有所补益，作者将感到十分欣慰。由于水平所限，考虑不周甚至错误之处，请批评指正。

作 者

1985年10月

目 录

绪 论	1	第八章 铸铁	162
第一章 金属材料的一般特性	4	§ 8-1 铸铁的组织	162
§ 1-1 金属的特性	4	§ 8-2 铸铁的性能特点	164
§ 1-2 纯金属的结晶	11	§ 8-3 灰口铸铁	165
§ 1-3 合金的特性	17	§ 8-4 球墨铸铁	169
§ 1-4 二元合金相图	22	§ 8-5 可锻铸铁	171
第二章 铁碳合金相图	34	§ 8-6 合金铸铁	172
§ 2-1 纯铁	34	第九章 有色金属材料	175
§ 2-2 渗碳体 (Fe_3C)	36	§ 9-1 铝及其合金	175
§ 2-3 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图	36	§ 9-2 铜及其合金	180
§ 2-4 碳对铁碳合金组织和性能的影响	43	§ 9-3 钛及其合金	186
第三章 金属的塑性变形和再结晶	44	§ 9-4 轴承合金	187
§ 3-1 金属的塑性变形	44	第十章 非金属材料	190
§ 3-2 加工硬化及回复和再结晶	49	§ 10-1 高分子材料的基本知识	190
§ 3-3 金属的热加工	53	§ 10-2 工程塑料	194
第四章 金属材料的性能及其强化	56	§ 10-3 橡 胶	205
§ 4-1 金属材料的机械性能	56	§ 10-4 陶 瓷	207
§ 4-2 金属材料的物理化学性能	71	§ 10-5 复合材料	211
§ 4-3 材料的工艺性	73	第十一章 电磁材料和高、低温材料	215
第五章 钢的热处理	74	§ 11-1 导电材料	215
§ 5-1 钢在加热时的转变	74	§ 11-2 半导体材料和绝缘材料	216
§ 5-2 钢在冷却时的转变	76	§ 11-3 磁性材料	217
§ 5-3 钢的珠光体转变、退火和正火	84	§ 11-4 高温材料	219
§ 5-4 马氏体转变	88	§ 11-5 低温材料	221
§ 5-5 贝氏体转变	92	第十二章 机械零件的失效及材料选用	225
§ 5-6 钢的淬火	93	§ 12-1 材料选用的一般原则	225
§ 5-7 淬火应力、裂纹和变形	98	§ 12-2 机械零件的失效	228
§ 5-8 钢的回火	103	§ 12-3 典型零件选材及工艺分析	236
第六章 金属的表面强化处理	109	附录	245
§ 6-1 表面淬火强化技术	109	附录一、钢热处理工艺的代号与技术条件的表示方法	245
§ 6-2 化学热处理表面强化	111	附录二、洛氏硬度HRC与其他硬度及强度换算表	245
§ 6-3 表面覆层强化	116	附录三、国内外常用钢号对照表	247
§ 6-4 表面形变强化	119	参考文献	249
第七章 工业用钢	122		
§ 7-1 概论	122		
§ 7-2 结构钢	130		
§ 7-3 工具钢	146		
§ 7-4 特殊性能钢	157		

绪 论

进入20世纪以来,现代科学技术的发展突飞猛进,一日千里,推动了人类社会的不断前进。材料、能源和信息是现代科学技术的三大支柱。任何一项科学技术的进展,都需要解决相应的材料问题,材料的这种重要作用,正在日益为人们所认识。

在实现我国社会主义工业、农业、国防和科学技术现代化的过程中,机械工业担负着艰巨的任务,必须为国民经济各部门提供大量的先进装备。任何先进的机械产品或成套设备,除设计先进外,在很大程度上取决于所选用的工程材料的质量。材料质量不好,不仅产品粗笨,而更重要的是零部件使用寿命不高,其结果是整机质量难以保证。只有采用性质优良的材料,才能保证在先进的设计参数、先进的加工制造技术下,获得质量优异的机械产品和机械设备。因此,各工业发达国家,在发展先进机械产品的同时,都极其重视材料科学技术的研究和开发。

当前世界上各国已注册的材料品种,据统计有25万种之多,大致分为金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子合成材料,以及由二者结合的复合材料。其中有色金属在金属材料中的比重逐年上升;微晶和非晶态金属、特种陶瓷、高分子材料、复合材料等新材料蓬勃发展;各种新型功能材料和器件不断翻新。从追求数量转向提高质量;从传统材料转向新材料,这是现代材料发展的总趋势,无疑是反映了以计算机和信息技术为代表的新技术革命的需要,体现了能源开发、海洋工程、环境保护、尖端技术发展和提高人民生活等当代社会重大问题对材料的要求。

就机械工业来说,各种机床、汽车拖拉机、农业机械、矿山机械、冶金设备、发电设备、石油化工设备、交通运输设备以及其他各种机械设备等,都必须有良好而可靠的材料作保证,从而也对材料提出了更高的要求。

用以制造各种机械设备、机械产品的结构件和零部件,以及各种加工用工模具的材料,统称为机械工程材料。在机械工程材料中,金属材料仍占主要地位(约80%左右),但非金属材料的发展十分迅速,金属与非金属并驾齐驱,争相发展,相互渗透结合,形成了一个规模宏大的材料体系。

历史表明,材料是人类生产的物质基础。人类生活的时代可划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代。而今,正在跨进人工合成材料的新时代。

由古猿到原始人的漫长发展过程中,石器一直是主要的工具。约在六七千年前的原始社会末期,我们祖先就开始应用火烧制陶器。到东汉时期出现了瓷器,并于9世纪以后陆续传至非洲东部和阿拉伯、日本和欧洲。

我国在公元前2140~1711年就开始冶炼青铜,到殷、西周时期就已发展到较高的水平,普遍用于制造各种工具、食器、兵器等。

由青铜器过渡到铁器是生产工具的重大发展。我国从公元前770~475年间春秋战国时期,就开始大量使用铁器,推动了奴隶社会向封建社会的过渡。从西汉到明朝的一千五六百年间,我国钢铁生产的技术远远超过世界各国。

近百年来,随着近代工业和冶金技术的发展,材料获得更为飞跃的进展。从碳素钢发展到低合金钢,又发展到具有各种特殊性能的高合金钢、有色合金材料以及非金属材料。材料的生产规模日益扩大,1978年世界的钢产量即已超过了七亿吨,非金属材料在1970年世界总产量即达四千万吨以上。全世界用钢材品种规格约十万多种,钢号六千多个,非金属材料也是品种繁多。面对如此浩瀚的材料世界,如何正确地选择材料和充分发挥材料的性能特长,使之最佳化,做到既经济又合理,已成为材料科学研究的课题之一,也是从事产品和工艺设计的工程师们的一项重要任务。

近年来,由于X射线技术、电子显微技术等新技术的发展,材料科学在基础理论、加工工艺和测试技术等方面都取得了长足的进步。一批超高强度钢、耐高温、耐低温、耐腐蚀、超导电磁材料相继研究成功,以适应机械产品向高速、高效和精密、大型化、轻量化方向发展。

冶炼方法的改善,各种新型强化和表面强化工艺的应用,都明显地提高材料的性能,发挥了材料的潜力。如美国的4340超高强度钢,真空精炼后,在强度为 $\sigma_b=1860\text{MPa}$ 的条件下,比普通法冶炼的钢塑性和韧性高(断面收缩率 ψ 提高20%,延伸率 δ 提高12%,V型缺口冲击值 a_k 提高15%)。

近年来,世界各工业发达国家在发展新材料上的努力,可归结为以下途径:

1. 有害杂质的控制;
2. 新品种材料的开发;
3. 有用组分的复合;
4. 开发新型和完善改进已有的强化工艺。

作为从事机械设计和工艺技术的工程技术人员必须具备上述有关材料科学知识,例如一台设备如何能达到经久耐用、高效节能、精巧美观,是设计工作者所关心的,其中所用材料的选择和材料强化加工工艺的确定,就是至关重要的一个方面。

一、机械工程材料的分类

一般,将用于制作机械结构、机械零件和工模具等的机械工程材料分为两大类,即金属材料与非金属材料。

1. 金属材料 金属材料是最重要的机械工程材料。金属材料又分为:

黑色金属——铁和以铁为基的合金(钢、铸铁和铁合金等)。

有色金属——轻金属(Mg、Al、Be等)、易熔金属(Zn、Sn、Pb、Sb、Bi等及其合金)、难熔金属(W、Mo、V、Ti、Nb、Ta等及其合金)、贵金属(Cu、Ag、Au、Pt等及其合金)、稀土金属及碱土金属等。

应用最广泛的是黑色金属。铁基合金材料的应用量占各种金属材料应用量的90%以上(按重量百分数计),资源充足,价格便宜。

2. 非金属材料 非金属材料主要包括高分子材料、陶瓷材料和复合材料。

高分子材料有:塑料(热塑性工程塑料和热固性工程塑料两种)、橡胶(通用橡胶和特殊橡胶两种)、合成纤维等。

陶瓷材料有:普通陶瓷(主要为硅酸盐材料)、特种陶瓷(氧化物、碳化物、硅化物等的烧结材料)等。

复合材料,即两种或两种以上性质不同材料的合成材料。在强度、刚度、耐蚀性方面比

单一材料优良，是一优异的工程材料。

二、本书的特点

本书讲述机械工程材料（包括金属与非金属材料）的成分、组织和性能间的关系，进而研究改进材料的组织和性能的方法。

材料性能包括材料的机械性能、物理和化学性能，以及工艺性能（切削加工性、铸造性能、压力加工性能、焊接性能及热处理性能等）。本书重点阐述金属材料的强度、塑性、韧性等机械性能，对电、光、声、磁、热等性能不作详细讨论。

1. 材料科学基础方面、扼要介绍金属材料的一般特性、金属和合金的晶体结构和性能及其测试方法、钢的相变原理等。

2. 在改善材料组织结构和性能的工艺方法方面，着重介绍工程中常用的热处理强化和表面强化技术，以及热处理在整个工艺流程中的作用地位。

3. 在材料方面，重点介绍机械工程中广泛应用的钢铁材料、非金属材料，也介绍了有色金属材料、电磁材料、高、低温材料等，并对选材的一般原则和方法作了适当的介绍。

第一章 金属材料的一般特性

§1-1 金属的特性

一、金属

目前,自然界中已发现的元素有百余种,其中,金属元素约占四分之三,非金属元素约占四分之一。一般金属具备如下特点:

1. 常温下,金属固体为晶体;
2. 具有良好的导电性和导热性,并且随温度的升高,其电阻温度系数亦增大,即具有正的电阻温度系数;
3. 具有良好的反光能力,表现为具有金属特有的光泽;
4. 具有良好的塑性变形能力。金属之所以具备上述四点特性,是由于金属内原子的结合方式为金属键合的缘故。

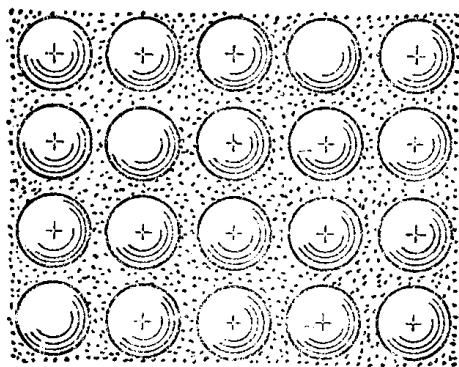


图1-1 金属键合示意图

图1-1所示为金属键合示意图。金属原子最外层价电子与其原子核的联系微弱,在相邻原子核电场作用下,极易脱离原子核的束缚,而形成在原子间自由运动的电子(称自由电子)。这些自由电子与失去价电子的原子(离子)间由于静电吸引而结合起来,即金属结合,称金属键。在外加电场作用下,金属内的自由电子便会定向流动,形成电流(电流的方向与电子流的方向相反),故金属具有导电性。金属的导热性也系因此所致,当金属一端受热时,便导致自由电子和原子热运动的增大,并通过碰撞传递到另一端,使之具有导热性。

金属具有光泽。有些矿石、金属碳化物、金属氮化物等虽也具有光泽,但很脆很硬,不具备塑性,因而不同于金属。

塑性包括展性(malleability)和延性(ductility)。所谓的展性即能轧压成薄板的性质,延性即能拉拔成细棒状的性质。

作为机械工程材料而使用的金属材料,具有良好的塑性变形能力是很重要的,而金属在固态下为晶体,所以塑性及其他各种金属性能特点都与金属的晶体结构有关。

二、金属的晶体结构

1. 金属晶体结构的基本概念 金属固体皆为晶体(crystal)。所谓晶体即其内部原子或分子按规则配布之物质。与晶体相反,在非晶体内的原子或分子之配布则无规则。

金属内部的原子虽按规则配布,但日常所见金属的外形并无规则,这是因为金属是由许多金属小颗粒组成,每个小颗粒为一个小的单晶体,其内部原子配布富有规律性,无数单晶体无规则排列形成多晶体金属。

通过X射线晶体分析方法,间接地得出金属单晶体内部原子配布(称晶体结构)情况。

为简便计,以金属中原子(阳离子)所处平衡位置中心作为结点,以假想的直线将其连接起来,表示金属内部原子之配布规律及几何方式,由此绘成的三维抽象模型,称结晶格子(简称晶格 $crystal\ lattice$)或空间点阵。简单立方晶格模型见图1-2。

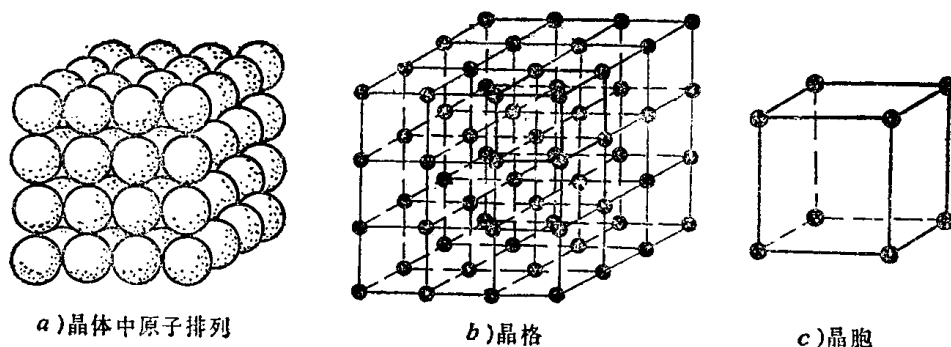


图1-2 简单立方晶格模型

所谓晶胞($unit\ cell$)即晶格中一个最基本的并能代表其结构特征的单元小平行六面体,或称单位晶格。

图1-3用以表示晶胞的大小和几何形状,晶胞的各个边长 a 、 b 、 c 称为晶格常数。

2. 常见金属的晶格类型 常见的金属,其晶格类型主要有三种,如图1-4所示。

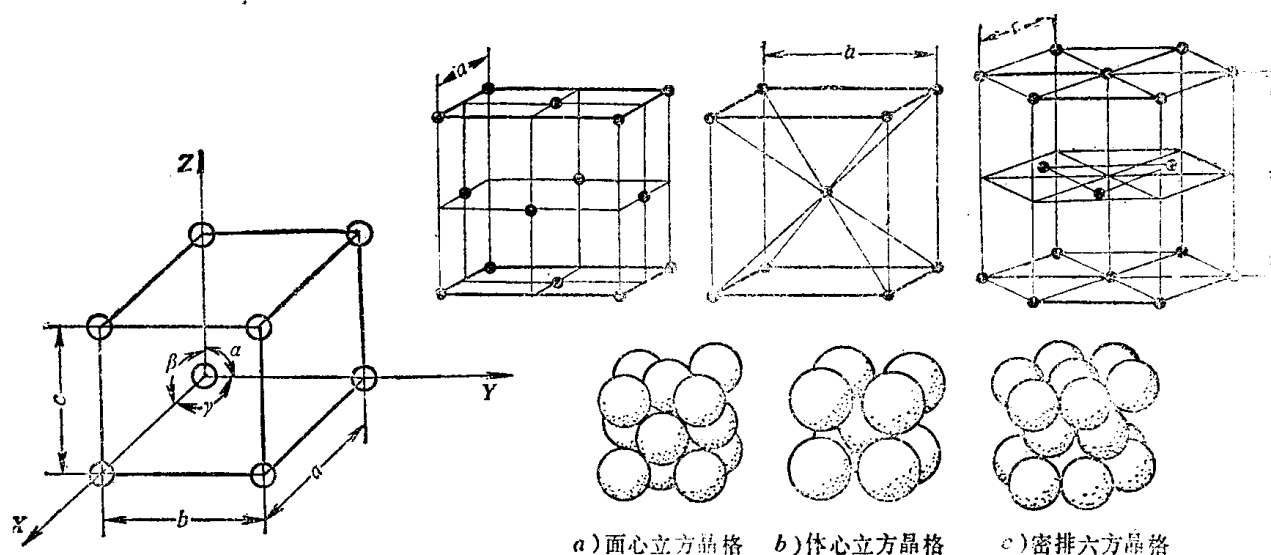


图1-3 晶格常数

图1-4 常见的金属晶格

(1) 体心立方晶格($body\ centered\ cubic\ lattice$, b, c, c)。属于体心立方晶格的金属有Na、K、Cr、Mo、W、V、Ta、Nb、 α -Fe、 β -Ti等。

(2) 面心立方晶格($face\ centered\ cubic\ lattice$, f, c, c)。属于面心立方晶格的金属有Au、Ag、Cu、Al、Ni、Pt、 γ -Fe、 β -Co等。

(3) 密排六方晶格($close-packed\ hexagonal\ lattice$, c, p, h)。属于密排六方晶格的金属有Mg、Zn、Cd、Be、 α -Co、 α -Ti等。

常见金属的晶格类型及其晶格常数列于表1-1。

同一金属在不同的温度下以不同的晶格形式存在者,称为同素异晶体。如Fe在室温至 912°C 温度范围为 α -Fe体心立方晶格,在 $912\sim 1394^{\circ}\text{C}$ 温度间为 γ -Fe面心立方晶格。

表1-1 常见金属的晶格及晶格常数(室温)

面心立方晶格		体心立方晶格		密排六方晶格		
金 属	晶 格 常 数 $a/\text{\AA}^{\textcircled{1}}$	金 属	晶 格 常 数 $a/\text{\AA}$	金 属	晶 格 常 数 $a/\text{\AA}$	晶 格 常 数 $c/\text{\AA}$
Al	4.0496	Cr	2.8846	Mg	3.2094	5.2105
γ -Fe $^{\textcircled{2}}$	3.6468	α -Fe	2.8664	α -Ti	2.9506	4.6788
Ni	3.5236	Mo	3.1468	Zn	2.6649	4.9468
Cu	3.6147	W	3.1650	Cd	2.9788	5.6167
Ag	4.0857					
Pt	3.9239					
Au	4.0788					
Pb	4.9502					

$\textcircled{1}$ $1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$;

$\textcircled{2}$ γ -Fe 是 916°C 下测得的。

3. 晶胞中的原子数 N 晶胞中的原子数可以按如下方法计算。立方晶胞中顶角处的原子为八个晶胞所共有，六方晶胞中顶角处的原子为六个晶胞共有，晶胞面上的原子属于两个晶胞共有，只有在晶胞体积内的原子才单独为一个晶胞所有。故：

$$\text{面心立方晶格} \quad N = 8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$$

$$\text{体心立方晶格} \quad N = 8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$$

$$\text{密排六方晶格} \quad N = 12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$$

4. 晶格的致密度 从图 1-4 可以看出,不同晶格类型内原子排列密度不同,通常用致密度表示。致密度是晶胞中原子所占的体积与该晶胞的体积之比,常见三种晶格类型的致密度数 (K) 如表1-2。

表1-2 常见金属的三种晶格类型的致密度

晶 格 类 型	计算方法 $K = \frac{NV_a}{V_c}$	致 密 度 K
体心立方晶格 (b, c, c)	$K = 2 \times \frac{4}{3} \pi R^3 / \left(\sqrt{\frac{4}{3}} R\right)^3$	0.68
面心立方晶格 (f, c, c)	$K = 4 \times \frac{4}{3} \pi R^3 / \left(\sqrt{\frac{4}{2}} R\right)^3$	0.74
密排六方晶格 (c, p, h)	$K = 6 \times \frac{4}{3} \pi R^3 / 3a^2 \cdot c \cdot \sin 60^\circ$	0.74

N ——晶胞中的原子数;

V_a ——原子的体积;

V_c ——晶胞体积;

R ——原子半径, $R = \frac{a}{2}$;

a, c ——晶格常数, $c/a = \sqrt{\frac{8}{3}}$ 。

各种不同晶格类型,由于原子排列的致密度不同,而具有不同的比容(单位重量物质所占有的容积)。在后面章节将要讲到同种金属材料在不同条件下,具有不同晶格类型,从而造成比容上的差别,引起一些其他变化。

5. 晶面与晶向 晶体中任何一系列原子所组成的原子平面,称为晶面。表示该晶面的

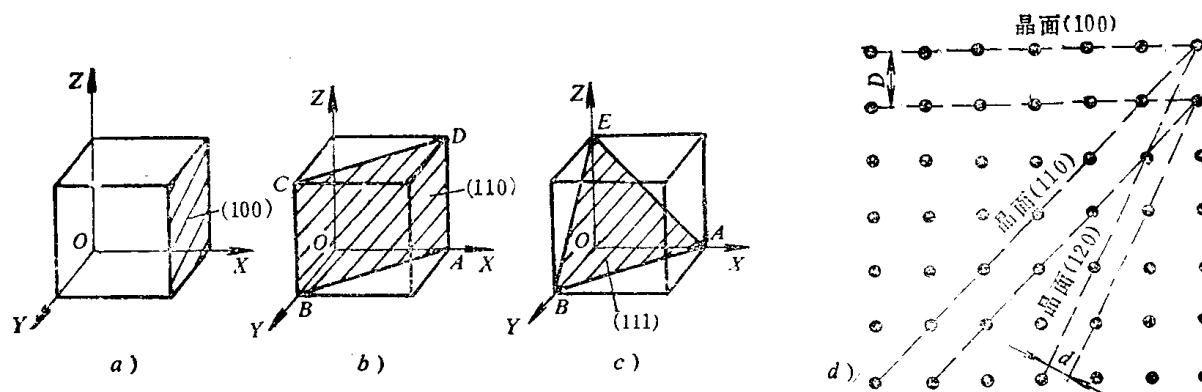


图1-5 立方晶格的晶面

表1-3 晶面指数的求法

图号 坐标	图 1-5 a)			图 1-5 b)			图 1-5 c)		
	OX	OY	OZ	OX	OY	OZ	OX	OY	OZ
坐标截距	1	∞	∞	1	1	∞	1	1	1
截距倒数	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{\infty}$	$\frac{1}{\infty}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{\infty}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$
最简整数	1	0	0	1	1	0	1	1	1
晶面指数	(100)			(110)			(111)		
晶面形状	正方形			矩形			等边三角形		
原子密度	中			小			大		

符号，称晶面指数或密勒(Miller)晶面指数，其表示方法如图1-5，按表1-3所示步骤求得。

晶向即晶体中的某些方向。表示晶向的符号，称晶向指数。其求得方法是将欲定晶向的直线结点放于坐标原点，在OX、OY、OZ三个轴上求出该直线上任一点的坐标值，分别化简为最简单的整数，并将其用一方括号括起来，即为晶向指数。

晶向指数所指之方向，正好与相同数值的晶面指数所表示之晶面相垂直。如图1-6中OF和OG的晶向指数为[110]和[111]，分别与(110)和(111)晶面相垂直。

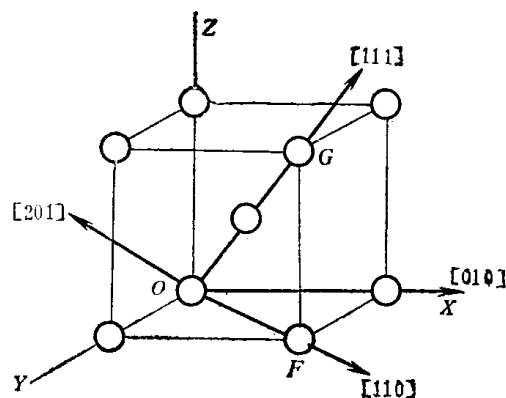


图1-6 体心立方晶格的几个晶向

可以看出，晶体中的不同晶面（或不同晶向）上的原子分布密度不同，如图1-5d所示。不同晶面(100)与(110)、(120)的面间距亦异($D > d$)。原子分布密度大的晶面，其面间距大，反之则小。故在不同方向上，显现出不同的物理、化学和机械性能，此特性称各向异性。这种晶体性能上的方向性，在以后研究金属塑性变形及其理论时，将是一个重要理论基础。

三、实际金属的晶体结构

1. 单晶体与多晶体 单晶体内部的原子排列属于同一位向，而多晶体则是由许多位向

互不相同的单晶体组成如图 1-7 所示, 故单晶体具有各向异性, 多晶体则由于各晶粒的位向不同, 使其各向异性受到了抵消, 造成各向性能接近相同的现象。

例如, 单晶体 α -Fe 的弹性模数为: $E_{[111]}=290000\text{MPa}$, $E_{[010]}=135000\text{MPa}$; 而为多晶体的工业纯铁, 在任何方向上其 $E\approx 210000\text{MPa}$ 。

金属中各晶粒间的交界, 称为晶界。晶粒的大小与金属的制造及加工处理有关, 大者用肉眼即可辨别, 小者用光学显微镜亦难分辨。晶粒的直径, 一般在 $1\sim 0.001\text{mm}$ 之间。

2. 实际金属的晶体构造 工程上实际金属均为多晶体, 与前述的单晶体不同, 一般不表现出各向同性, 而且其强度也比理论强度低几十倍至几百倍。如纯铁发生塑性变形的理论切断强度即临界切应力 $\tau_c=G/2\pi$ (G 为临界切变模数), 约等于 2300MPa , 而实际的切断强度仅为 290MPa 。这是因为前述的原子配布完全规整的单晶体是一理想状态, 或称理想晶体。而实际上, 金属晶体内存在许多缺陷, 从而对金属的物理、化学和机械性能有显著的影响。金属晶体内之缺陷分三种, 即点缺陷、线缺陷和面缺陷。

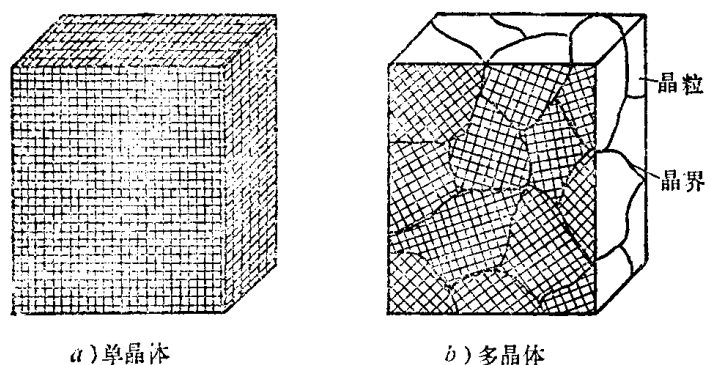


图 1-7 单晶体与多晶体的结构示意图

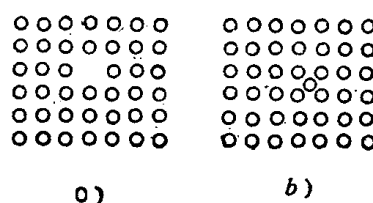


图 1-8 原子空位 a) 和间隙原子 b)

(1) 点缺陷中主要是原子空位与间隙原子两种, 如图 1-8 所示。因为晶体中, 位于晶格结点上的原子并非静止不动, 而是以其平衡位置 (即晶格结点) 为中心, 不断地作热振动, 其振动能量和振幅的大小, 与温度有关, 温度高则大, 反之则小。在温度一定时, 原子的热振动能量的平均值也一定, 但各个原子的热振动能量并不完全相等, 有的原子其热振动能量可能高于或低于其平均能量, 呈现能量起伏 (不均匀) 现象。这样, 就会造成个别原子的能量大到足以克服周围原子对它的束缚作用, 此时即可能跳离其原来所占据的平衡位置, 使原来的位置形成一个“空位”。脱离平衡位置的原子, 有可能跳到晶体表面上的正常位置, 也可能跳到晶体中原子之间的间隙位置, 后者称间隙原子。热力学温度为零时, 没有原子空位。随着温度的升高, 空位急剧增多。间隙原子的浓度也随温度的升高而增大。

原子空位和间隙原子的运动, 是金属晶体中原子扩散的主要方式之一, 它直接影响着金属的性能和在金属中发生的某些物理化学过程。

(2) 线缺陷是指晶体内存在的位错。所谓位错 (dislocation), 就是晶体中某处有一列或若干列原子发生了有规律的位置错动。位错有两种:

① 刃型位错 如图 1-9a 所示, 在一完整晶体中, 某晶面内 (图中 $ABCD$ 面) 在 EF 处的上方多插入了一个原子平面。由于这个原子平面象刀刃一样的插入, 从而使晶体沿 EF 线产生了上下层原子位置的错动, 故称刃型位错。 EF 线称刃型位错线。晶体从上部多插入一排原子者为正刃型位错, 以符号 “ $\perp$ ” 表示之; 晶体从下部多插入一排原子者为负刃型位错, 用

“T”符号表示，如图1-9b所示。

离刃型位错线 EF 越近，原子排列的错动越大，约达半个原子间距；离刃型位错线 EF 越远，其原子排列的错动越小，直至恢复到正常位置。所以，刃型位错线 EF 周围晶格畸变，是一个应力集中区。“ $\perp$ ”，上部受压应力，下部受拉应力。“T”，上部受拉应力，下部受压应力。

在外加切应力作用下，刃型位错线 EF 可以移动，其移动方向与晶体上下两部分的相对滑移方向平行，如图1-10所示。在同一晶面上，当“ $\perp$ ”与“T”在滑移过程中相遇时，二者可以互相抵消。

② 螺型位错 图1-11所示为晶体中的一个晶面($ABCD$ 面)，在 BC 处的右方，晶体上下两部分的原子排列发生了相对错动。离 BC 线近者，错动较小，远离 BC 线者错动较大。至 aa'

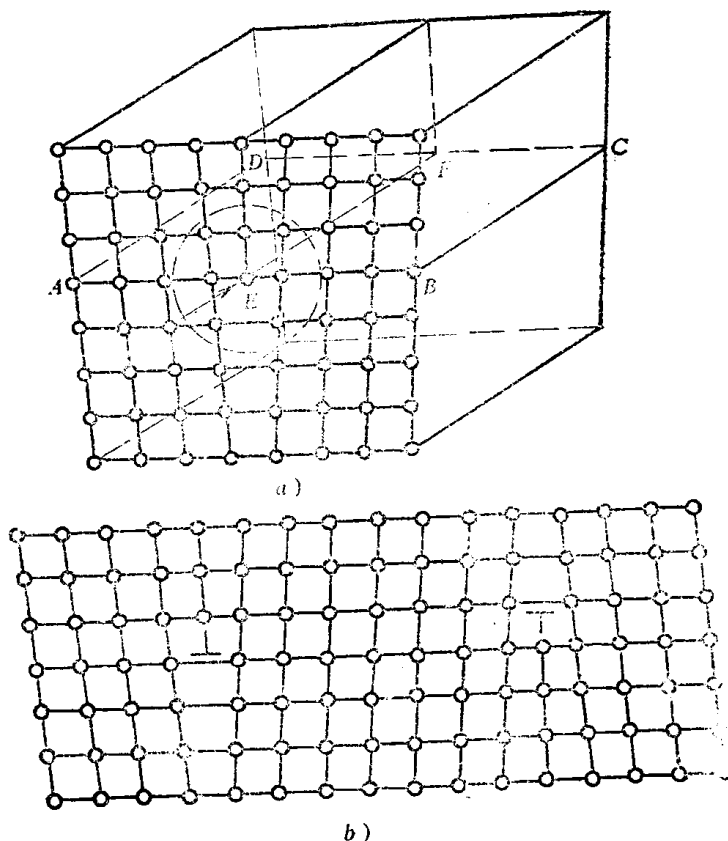


图1-9 刃型位错示意图

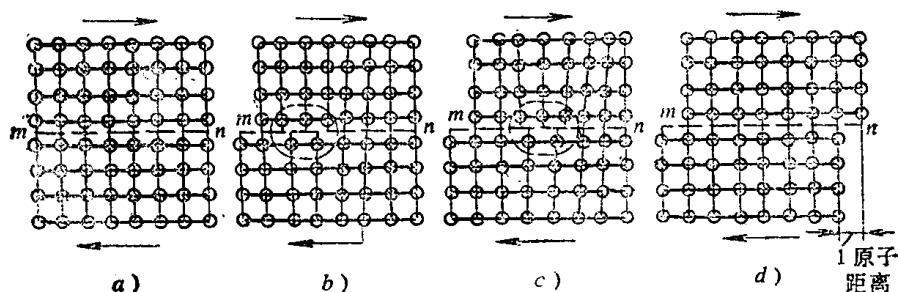


图1-10 刃型位错的滑移

线时，错动距离最大，恰等于一个原子间距，在 aa' 线右部的上下层原子位置复又对准，晶格又处于正常状态。在 $BC-aa'$ 之间，形成了上下层原子分布位置的错动。由于上下层原子是按 $a \rightarrow B \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$ 这样一条螺旋线错动的，故此称为“螺型位错”。 BC 线称为“螺型位错线”。晶体上下两部分的错动出现在螺型位错线 BC 之右方者，称为右螺型位错；出现在其左方者为左螺型位错。

应当指出，位错的存在对金属的机械性能起着决定性的作用。如工业纯铁：位错密度约为 $(10^6 \sim 10^8)/\text{cm}^2$ ，其 $\sigma_b = 280\text{MPa}$ 。特制的单晶铁晶须，位错密度约 $(10 \sim 10^3)/\text{cm}^2$ ，其 $\sigma_b = 13400\text{MPa}$ （试验数据）。无位错的单晶铁：位错密度假定等于零，其 $\sigma_b = 56000\text{MPa}$ （理论数据）。

相反，当位错密度增高达到足够高时，如 $>(10^{10} \sim 10^{12})/\text{cm}^2$ ，则会造成晶格畸变度的增大，原子排列混乱，也能使金属的强度提高。

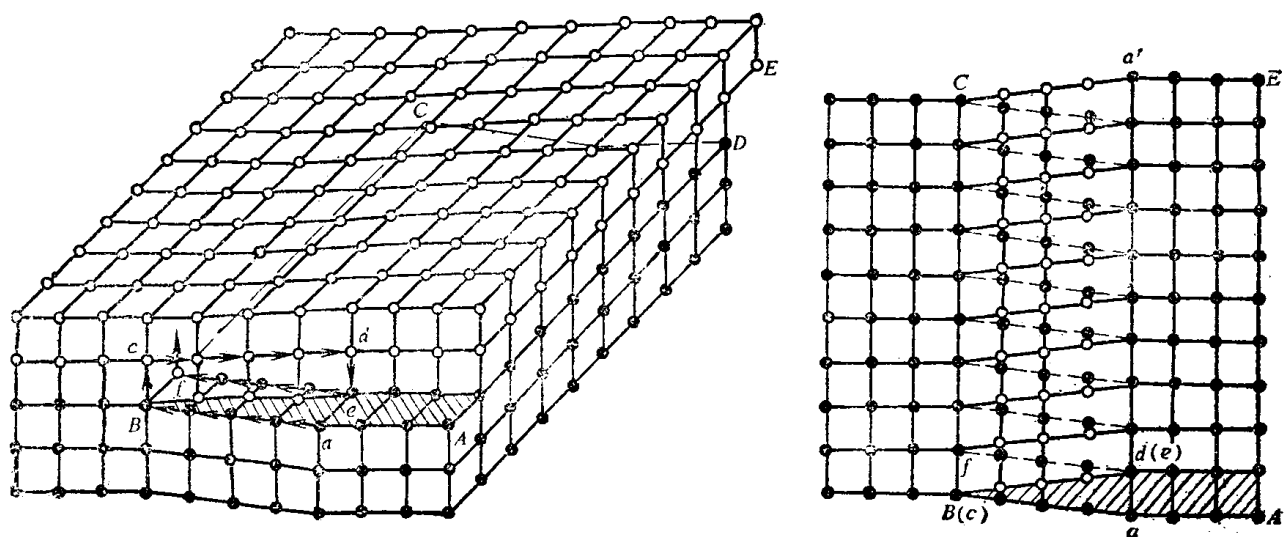


图1-11 螺型位错示意图

(3) 面缺陷主要指的是晶界和亚晶界。

① 晶界 在多晶体中,不同晶粒间的交界面称为晶界。由于各晶粒的位向不同,故其原子排列的规律性在相互交界处就不能一致,而是一种原子排列很不规整的结构,实际上就是不同位向晶粒之间的过渡层(图1-12)。晶界处原子排列混乱,晶格畸变度较大,与晶粒内部原子相比,具有较高的平均能量,此部分高出的能量称为晶界能。因此,晶界有下述特性:

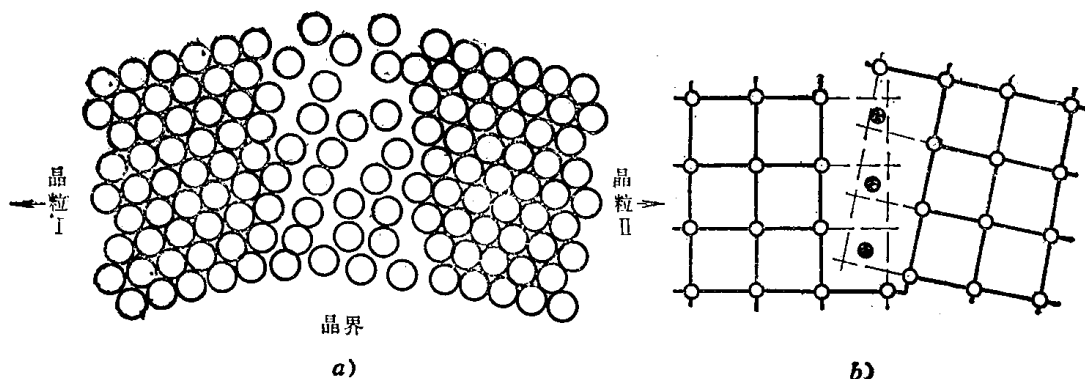


图1-12 晶界的过渡结构模型

a)大角度晶界过渡结构 b)晶界内原子排列的折衷位置

②在机械性能方面,由于晶界原子排列较乱,位错移动较难,塑变抗力较大,所以晶粒越细,强度越高。③在物理性能上,由于晶界能量较高,而具有自发地向低能状态转化的趋势,加热时会引起晶粒长大和晶界的平直化,从而减小晶界面积,降低晶界能量。这就是热处理加热过程中晶粒长大的根本原因。④化学性能上,由于晶界的电极电位较晶内为低,故在电化腐蚀过程中,晶界将成为“微电池”的阳极而被腐蚀,晶粒将成为“微电池”的阴极而受到保护。故金相试片上,晶界呈黑色,晶粒呈白色(在硝酸酒精溶液腐蚀条件下)。

又因晶界处原子空位较多如图1-13,所以原子扩散较快,外来原子也容易渗入,往往成为杂质集中的场所。

② 亚晶界 在多晶体的每一个晶粒内,其晶格位向也并非完全一致,而是存在着许多尺

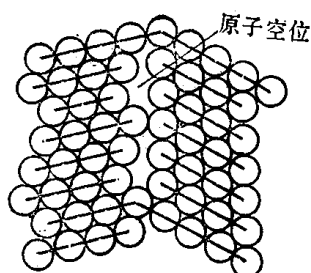


图1-13 晶界处之原子空位

寸很小、位向差也很小(一般小于 $1^\circ \sim 2^\circ$)的小晶块,互相嵌镶而成晶粒。这些小晶块称为亚晶粒(或亚结构、嵌镶块)。在亚晶粒内部的原子排列位向一致,亚晶粒之

交界为亚晶界,是由一系列刃型位错所组成的,如图1-14所示。显然,亚晶界有和晶界同样的特性,只是没有那么明显罢了。

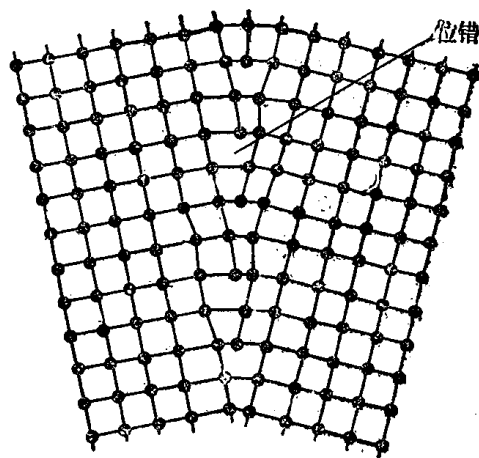


图1-14 亚晶界结构示意图(由位错组成的小角度晶界)

§ 1-2 纯金属的结晶

一、纯金属的熔化

物质具有气体、液体、固体的三种状态,分别称为气相、液相、固相。对于金属,随温度之变化而发生三态之变化,也可以说是相的变化。

例如,Fe在 1538°C 以下为固相,在 $1538 \sim 2738^\circ\text{C}$ 范围内为液相,高于 2738°C 时为气相。

常温下为固体(晶体),是金属的特性之一,但当温度升高到熔点温度时,固相将熔化成为液相。对于纯金属来说,固相向液相的变化过程,虽然在不断地加热,但其温度并不上升。所赋予热量为固相向液相的状态变化所吸收耗费,此热量称之为熔解热(latent heat)。

熔化温度称为熔点(melting point)。不同的金属,其熔点不同。

从微观的金属结晶构造来说,固相时,金属原子按规整的晶格规则分布,加热时使原子热运动能量增加,即热振动振幅增大。当加热到熔点温度时,则原子的热振动能量进一步增大,而冲破了周围原子间吸引力的束缚,金属在外力作用下可任意地改变其形状,呈现液相状态。这时所加的热量,全部转化为原子运动能量,一直到完全转变成液相为止,温度并不升高。

二、纯金属的结晶条件

一般将熔化的金属材料称为溶液,从液体状态转变为晶体状态的过程称为结晶。纯金属液体冷却时,原子的运动能量将逐渐降低,流动性也减小,冷却到达某一温度时就开始结成结晶格子,于是液相就开始转变成固相了。在转变过程中,由于放出结晶潜热,补偿了向外界逸散的热量,故其温度并不下降,一直到结晶终了为止。进行结晶的温度称为凝固点。

1. 热分析实验 现将少量纯金属溶液置于坩埚中自然冷却,随着时间的增长,逐渐放热而冷却,每隔一定时间,测其温度之变化,制成曲线如图1-15所示。

图中ab线区间所示为液态冷却,bc区间为结晶过程。金属由液体冷凝成固体时要放出凝

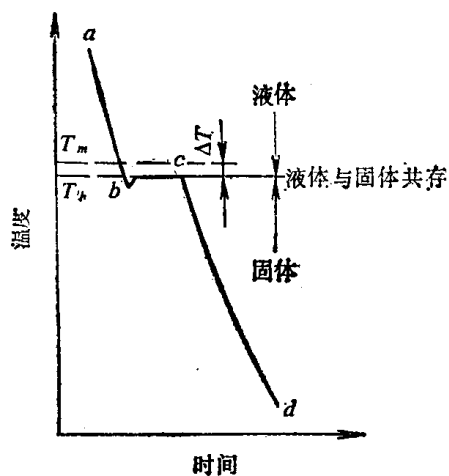


图1-15 纯金属的冷却曲线

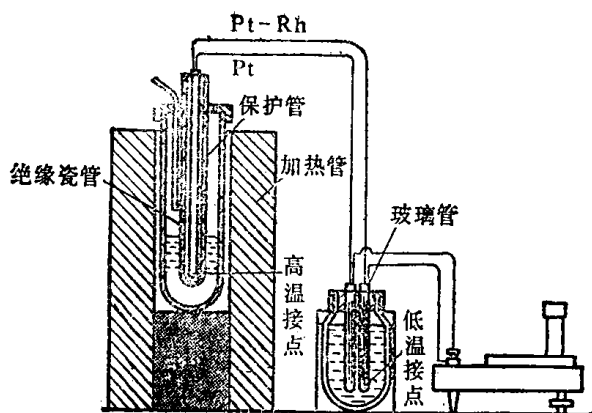


图1-16 热分析装置

固潜热，如果这一部分热量恰好能够补偿系统向环境散失的热量，凝固结晶过程将保持温度不变，表现为曲线中的平台。平台所指示的温度就是纯金属的实际凝固温度。到 c 点时，全部结晶终了，完全转变为固体， cd 线段是随时间增长，温度逐渐下降到室温的过程。

图中的 T_m 为金属的熔点(或理论结晶温度)， T_n 为实际结晶温度。图1-15之温度-时间曲线，是用热分析实验测得的，称冷却曲线(cooling curve)。

热分析实验装置如图1-16所示。在实验所测得的冷却曲线上不仅能表示出金属的熔点，而且对金属固态晶体结构形式变化、磁性的变化等，都能通过曲线的折点和水平台阶显示出来。因此，热分析方法被广泛应用。

2. 金属结晶条件

(1) 能量条件 大量自然现象表明，一切物质都能自发地由高能状态向低能状态转变。诸如，热量总是从高温物体传向低温物体；水流总是从高水位流向低水位；重物则是由高处落向低处，这是因为能量低的状态是更稳定的状态。热力学第二定律指出，在等温等压条件下，一切自发过程都是朝着使系统自由能降低的方向进行。

自由能是表示系统能量的一个状态函数，可用下式表示：

$$F = U - TS$$

式中 F ——系统自由能；

U ——系统内能，即系统中各种能量的总和；

T ——热力学温度；

S ——熵，系统中表征原子排列混乱程度的参数。

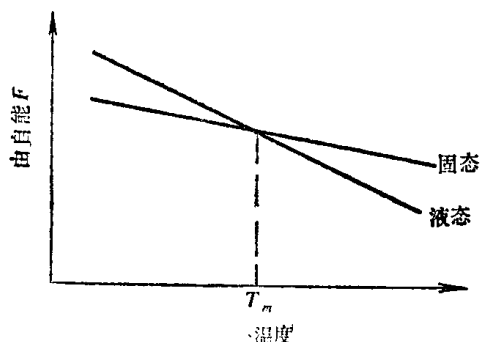


图1-17 固、液态金属的自由能与温度的关系

对于固态金属， $F_{\text{固}} = U_{\text{固}} - TS_{\text{固}}$ ；

对于液态金属， $F_{\text{液}} = U_{\text{液}} - TS_{\text{液}}$ 。

由上两式可以分别计算出液态和固态金属的自由能和温度的关系。图1-17表明，它们的自由能均随温度的升高而降低。两条曲线有一交点，在交点处所对应的温度为 T_m 。在 T_m 温

度下, $F_{\text{固}}=F_{\text{液}}$, 即液态金属与固态金属处于平衡状态, 由液态转变为固态和由固态转变为液态的可能性相同 $\left(S \xrightleftharpoons[\text{结晶}]{\text{熔化}} L\right)$, 从宏观看, 既不结晶, 也不熔化。因此, T_m 是两态共存温度, 可称为理论结晶温度或平衡结晶温度(也可以说是金属的熔点或凝固点)。

当 $T > T_m$ 时, $F_{\text{液}} < F_{\text{固}}$, 固态晶体将熔化成为液态。

当 $T < T_m$ 时, $F_{\text{液}} > F_{\text{固}}$, 则液态转变为固态, 即结晶成晶体。

由此可知, 欲使液态金属结晶成固体, 必须冷却到理论结晶温度 T_m 以下的某一温度, 才能进行, 或者说才具备结晶时所需要的能量条件, 这就是固态金属结晶时必须过冷的根本原因。金属结晶实际进行的温度称为“实际结晶温度”。

结晶过程中, T_n 总是低于 T_m 的现象称过冷现象, T_m 与 T_n 的差值 ΔT 称过冷度。

$$\Delta T = T_m - T_n$$

从自由能角度看, 过冷是金属结晶的必要条件。只有过冷, 才具备 $F_{\text{固}} < F_{\text{液}}$ 的能量条件, 才能有液态金属自发结晶成为固态金属的推动力。过冷度越大, $F_{\text{液}} > F_{\text{固}}$ 差越大, 即结晶推动力越大, 故结晶的倾向也越大。

(2) 结构条件 金属晶体内部原子呈规则排列, 称为“远程有序”, 如图 1-18a 所示。液态金属内部的原子排列呈不规则现象, 在接近熔点时, 液态金属内部将存在极小范围内瞬时呈现规则排列的原子集团, 其结构与固态金属相似, 这种结构称“近程有序”, 如图 1-18b 所示。其特点是极不稳定, 时而形成, 时而瓦解。这种时聚时散的现象称为“结构起伏”。

结晶的实质, 就是使具有“近程有序”的液态金属转变为具有“远程有序”的固态金属。近程有序的原子集团粒子本质上已是晶体, 在一定条件下, 结晶过程中有可能成为结晶的核心。因此, 液态金属内的这种结构起伏, 就成为结晶时的结构条件:

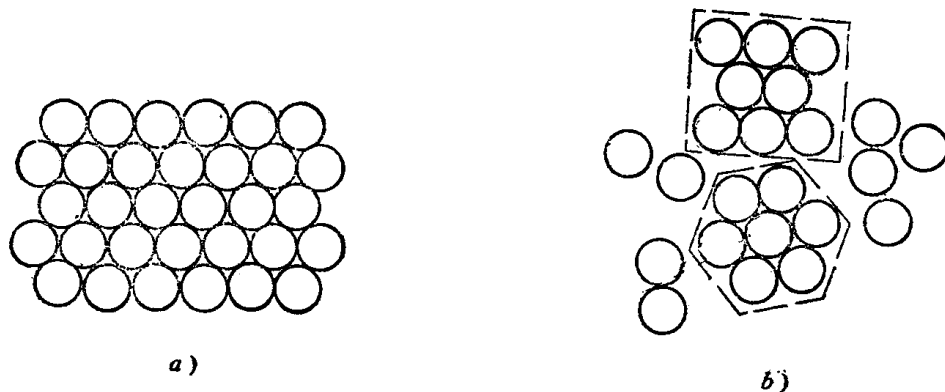


图 1-18 远程有序与近程有序结构示意图

三、纯金属的结晶过程

1. 冷却速度和过冷度的关系 如前所述, 液态金属冷至熔点时便开始凝固结晶, 直至结晶終了。在结晶过程中, 由于放出凝固潜热而保持温度不变, 结晶終了后随时间的增长, 逐渐冷却至常温。如图 1-17 所示, 在理论熔点上, 不能满足 $F_{\text{固}} < F_{\text{液}}$ 的能量条件, 而且实际冷却速度也不可能达到理想的接近平衡状态的缓慢冷却速度。因而, 实际金属结晶时必有过冷现象。过冷度 $\Delta T = T_m - T_n$ 之大小与金属的类别和冷却速度有关。对于同种金属, 冷却速度愈大, 则在结晶时引起的过冷度也愈大, 如图 1-19 所示。

2. 结晶过程 结晶过程按如下两个步骤进行。