

船舶与海洋工程材料

CHUANBO YU HAIYANG GONGCHENG CAILIAO

■ 姜锡瑞 编著



哈尔滨工程大学出版社

船舶与海洋工程材料

姜锡瑞 编著
刘瑞堂 主审

哈尔滨工程大学出版社

船舶与海洋工程材料

姜锡瑞 编著

责任编辑 罗东明

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号哈工程大学11号楼
发行部电话 (0451) 2519328 邮编: 150001
新华书店经销
东北农业大学印刷厂印刷

*

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 11.625 字数 270 千字

2000年4月第1版 2000年4月第1次印刷

印数: 1~1000册

ISBN 7-81073-033-9

U·3 定价: 15.00元

前 言

《船舶与海洋工程材料》是为满足教学和生产发展需要，受中国船舶工业总公司教材编审委员会委托编写的。本书为中国船舶工业总公司推荐出版教材。

全书共八章，包括金属学、钢的热处理、特殊钢、船舶与海洋工程用钢、有色金属、金属的腐蚀与保护、非金属材料和复合材料等内容。

为了系统掌握材料知识，本书内容包括材料的化学成分、组织结构和性能的关系及改变条件对材料组织、性能影响的基本原理；船舶与海洋工程材料的选择、使用等，以满足船舶与海洋工程专业设计、选材、使用、防护的需要。

本书由姜锡瑞主编。姜锡瑞编写了 2、3、4、8 章，郭万俊编写了 5、7 章，柳扬编写了 1、6 章；全书由姜锡瑞统稿。

本书由刘瑞堂教授主审。

本书编写中，还有一些其它人员做了大量工作，在此谨表谢意。

由于编者水平所限，错误不足之处在所难免，敬请有关专家学者予以指正。

编 者

1999 年 8 月于哈尔滨

目 录

绪论	1
1 金属的晶体结构	3
1.1 金属晶体	3
1.2 金属的实际结构	6
1.3 金属的结晶	8
1.4 金属的变形与再结晶	11
2 合金的结构与结晶	17
2.1 合金的结构	17
2.2 合金的结晶	20
2.3 合金性能与相图的关系	26
3 铁碳合金相图及钢的热处理	28
3.1 铁碳合金相图	28
3.2 钢与白口铁的结晶分析	32
3.3 钢的热处理原理	37
3.4 钢的热处理工艺	47
3.5 钢的表面处理	52
4 钢 材	56
4.1 钢材的分类与编号	56
4.2 合金元素的影响	58
4.3 特 殊 钢	63
4.4 船舶与海洋工程用钢	76
5 有色金属及其合金	107
5.1 铝 合 金	107
5.2 铜 合 金	115
5.3 钛 合 金	118
5.4 滑动轴承合金	124
6 金属的腐蚀与保护	128
6.1 船舶与海洋工程结构的常见腐蚀	128
6.2 金属的腐蚀原理	131
6.3 腐蚀的试验方法和对腐蚀程度的评定	141
6.4 金属的电化学保护	146

7 非金属材料	153
7.1 非金属材料的结构特点	153
7.2 高分子材料	155
7.3 船用涂料	159
7.4 硅酸盐材料	166
8 复合材料	172
8.1 材料复合的基本原理	172
8.2 玻 璃 钢	174
8.3 木材和其它复合材料	176
参考文献.....	179

绪 论

材料是人类从事生产和生活的物质基础，它的发展标志了人类社会的文明程度，材料发展的动力是人类生产和生活的需求。

船舶、海洋开发是综合性的工业，需要的材料品种多，数量大。据粗略统计，建造一艘万吨轮需要 1 000 多种材料和 5 000 多吨钢材。

就本质而言，船舶与海洋工程用材料可分成金属材料和非金属材料两大类。

一、金属材料

随着造船、海洋开发业的发展和冶金技术的进步，船舶与海洋工程建造使用的金属材料越来越多，但就其本质、物理和化学性能可分为黑色金属和有色金属两类。

(一) 黑色金属

黑色金属包括铁及其全部合金。纯铁在工程中很少使用，而船舶与海洋工程中根本不用。船舶与海洋工程中使用的黑色金属有结构钢、铸钢、锻钢和铸铁。

(二) 有色金属

除黑色金属外的所有金属均称作有色金属。工程中采用的有色金属通常可分为三类。

1. 比重大、熔点高的金属——铜、镍及以铜、镍为基的合金。
2. 比重大、熔点低的金属——锌、锡及以锌、锡为基的合金。
3. 比重小、熔点中等的金属——铝、镁、锡及以铝、镁为基的合金。

这三类合金中，以铝、铜合金在船舶与海洋工程中应用最广。此外，还有一种钛及其合金，它具有许多优点和良好的综合性能，是很有发展前途的金属材料。

为了满足工作要求，滑动轴承合金是在硬质基上镶嵌着软质点的一类特殊合金。

二、非金属材料

随着对材料需求的不断提出和人造材料的不断出现。目前非金属材料可分成高分子材料、无机非金属材料 and 复合材料三类。

1. 高分子材料

高分子材料是由一种或几种简单化合物聚合成大分子量（通常分子量大于 10 000）的物质。

2. 无机非金属材料主要以硅酸盐、铝硅酸盐组成或以氧化物、碳化物、硅物物、氮化物等组成。

3. 复合材料

是两种或两种以上的不同物质（可以是金属也可以是非金属，具有不同物理和化学性质）的材料组合而成的一种多相固体材料。复合材料可随组成材料的变化而改变其性能。

三、材料的性能、组织与结构

在人类研究材料的发展过程中，发现材料的性能与它的组织结构有密切关系。因此要研究材料，就必须首先了解材料的性能、组织与结构。

(一) 材料的性能

船舶与海洋工程材料的性能主要有使用性能、工艺性能和经济性。

1. 使用性能

使用性能是指在服役条件下，保证安全可靠工作所应具备的性能。它包括材料应具备的机械性能和物理性能，以保证船舶与海洋工程结构具有足够的强度、塑性和韧性；船舶与海洋工程结构对材料磁性的要求和材料在外界介质的作用下，具有足够的耐腐蚀性能。

2. 工艺性能

是指材料具有的铸造、锻造、焊接、冷热成形加工和切削加工等工艺性能。

3. 经济性

对于船舶与海洋工程使用的材料不但要质量好、重量轻，而且还要成本低、供应充足。

(二) 材料的组织与结构

1. 组织

材料的组织是指借助显微镜观察到材料微观组织和形貌。

2. 结构

材料的结构是指构成材料的基本质点（原子、离子或分子等）如何结合与排列，它表明了材料的结构方式。

研究表明：材料的性能与其组织和结构间存在着因果关系，即材料的性能是由它的组织和结构所决定的。因此，要想改变材料的性能，必须改变它的组织和结构（可通过改变其化学成分或加工工艺过程来实现）。

四、材料的验收

任何材料的制造过程中不可避免地要与最适宜的制造工艺条件有些偏差，因此在使用之前要按其用途作所谓验收，以确定它们的性能是否符合要求。根据船舶和海洋平台建造规范对材料验收的有关规定，对金属材料的验收包括以下项目：

1. 外观检查

2. 化学成分分析

3. 机械性能试验

4. 工艺性能试验

五、内容组成

船舶与海洋工程材料课程由以下内容组成：

1. 金属材料的组织和结构

2. 金属材料的热处理原理和热处理工艺

3. 金属材料的选用与验收

4. 金属材料的腐蚀原理及防腐方法

5. 非金属材料的组织结构

6. 船舶与海洋工程建造中采用的最重要的非金属材料的特性和用途

船舶与海洋工程材料的中心问题是叙述各种钢材的组织与结构；在不同的工艺条件下对其组织变化的影响；钢材在不同的外界环境下的腐蚀及防腐。因为钢材是船舶与海洋工程的主要建造材料。

1 金属的晶体结构

由物理、化学知道固体可分为晶体和非晶体。晶体有一定特点：

1. 组成晶体的基本质点（原子、离子）在空间有一定的排列规律，因此晶体都具有规则外形。

2. 具有一定熔点。 α -Fe-1 534℃，Cu-1 083℃，Al-666℃。

3. 各向异性。对 α -Fe， $E_{111}=2.84 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ， $E_{100}=1.32 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

金属在固态时均为晶体。金属原子最外层电子较少，一般为 1~3 个。核外价电子与原子核结合力弱，很容易与原子核脱离使原子成为正离子。当金属原子结合在一起时，金属原子都呈正离子状态，按一定的几何形状规则地排列起来，在各自的位置上作轻微振动。而电子则脱离了原来的原子，以自由电子形式在各离子间运动，并为整个金属所共有。金属的这种结合称作金属键。由于金属键结合使金属表现出一系列金属特性：导电性、导热性、具有高塑性和强度等。金属与非金属的结合靠离子键结合，即靠正负离子间的静电引力结合在一起。

1.1 金属晶体

通常研究金属的晶体结构是用简单方法表示原子排列规则。以通过原子中心的假想联线把它们在三维空间中的几何排列形式描绘出来，交点为原子中心，我们把这种表示晶体原子排列式的格子叫做晶格或点阵。

由图 1-1 可以看出，同一直线上的晶格隔一相等距离重复出现；位于同一平面的原子构成了晶格的二维平面，将晶格平面沿一定方向平移一定距离，晶格亦具有重复性。由于空间晶格的重复性、周期性，可从晶格中选出一个基本几何单元（通常选取一个最小的平行六面体）来表达晶格排列形式的特性。

组成晶格的基本几何单元称作晶胞。由图 1-2 可见，同一空间晶格可因选取的方式不同而得到不同的晶胞，为此要求在选取晶胞时应尽量反映出该晶格的对称性，通常选取在每个角上都有一个晶点的最小平行六面体作为晶胞。

通过晶胞角上某一个晶点（通常左下角后面一点）沿其三个棱边作坐标轴 X 、 Y 、 Z （称作晶轴），则晶胞就可由三个棱边长 a 、 b 、 c （称作晶格常数）及晶轴之间夹角 α 、 β 、 γ 这六个参数完全表示出来，见图 1-3。事实上，采用三个晶格矢量来描述晶胞更方便。

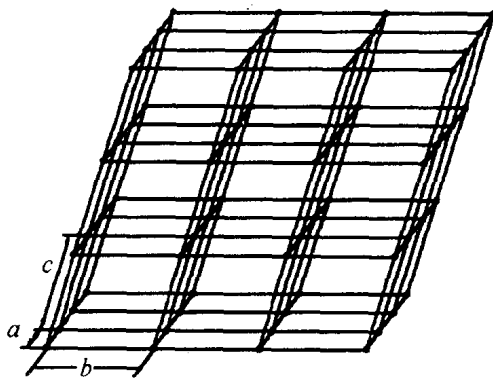


图 1-1 金属原子空间晶格一部分

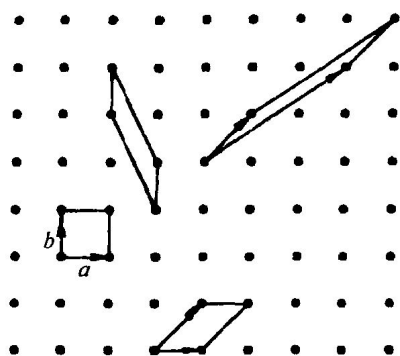


图 1-2 在晶格中选取晶胞

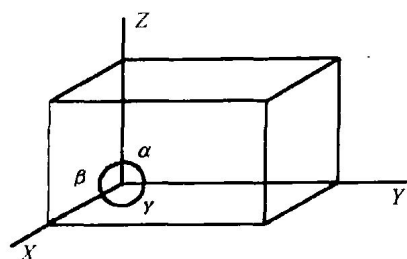
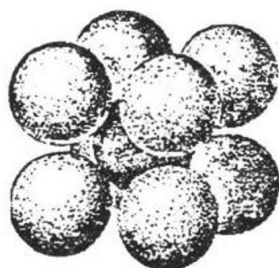


图 1-3 晶胞、晶轴和晶格矢量

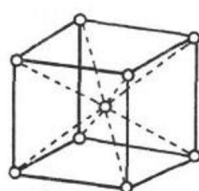
一、三种常见的金属晶格

在金属晶体中，金属键使原子尽可能紧密地排列，同时构成高度对称的晶体结构。最常见的金属晶体结构有三种。

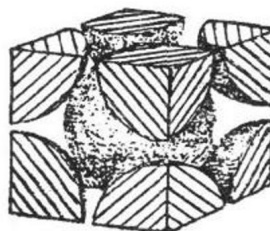
1. 体心立方晶格



(a) 刚球模型



(b) 质点模型



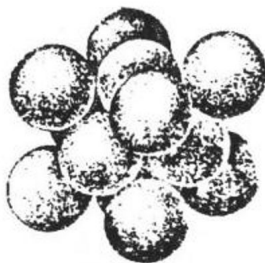
(c) 晶胞原子数示意图

图 1-4 体心立方结构

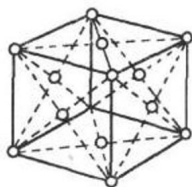
体心立方结构的晶胞见图 1-4。在立方晶胞的 8 个结点上和立方体的中心各有一个原子。因此，体心立方晶胞的原子数为： $1/8 \times 8 + 1 = 2$ 。如图 1-4 (c) 所示。具有体心立方结构的金属有： α -Fe、Cr、Mo、W、V、Nb 等 30 几种，约占金属元素的一半。

2. 面心立方晶格

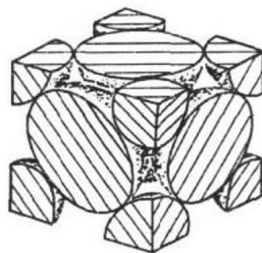
面心立方结构的晶胞见图 1-5。在立方晶胞的 8 个结点上和立方体上的 6 个晶面中心各有一个原子。因此，面心立方晶胞的原子数为： $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ ，如图 1-5 (c) 所示。具有面心立方结构的金属有： γ -Fe、Al、Ni、Cu、Ag、Pt、Au。



(a) 刚球模型



(b) 质点模型



(c) 晶胞中原子数示意图

图 1-5 面心立方结构

3. 密排六方晶格

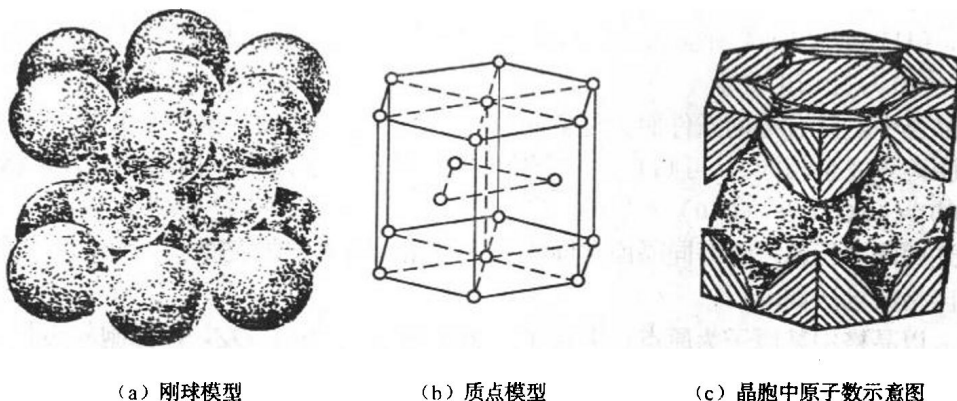


图 1-6 密排立方结构

密排六方结构的晶胞见图 1-6。密排六方结构的晶胞是以上、下底面六边形组成的柱体。上、下底的 12 个结点和两底面中心各有一个原子，并且在柱体中间还有三个原子。因此，密排六方晶胞的原子数为 $1/6 \times 12 + 1/2 \times 2 + 3 = 6$ ，如图 1-7 (c) 所示。密排六方晶格常数的比值 $c/a = 1.633$ 。具有密排六方结构的金属有：Be、Mg、Zn、Cd 等。

二、三种常见金属晶格的密度与晶面方向

1. 金属晶格的密度

金属晶格中原子排列的紧密程度以致密度和配位数表示。

(1) 致密度——晶胞中所占的体积与晶胞的体积之比。计算公式如下：

$$k = \frac{nu}{v}$$

式中： n —— 晶胞中的原子数；

u —— 一个原子刚球的体积；

v —— 晶胞的体积。

(2) 配位数——晶体中任一个原子周围所紧邻的并且距离相等的原子数。

表 1-1 三种常见的金属晶格数据

晶格类型	晶胞中原子数	原子半径	配位数	致密度
体心立方	2	$\sqrt{3}/4a$	8	0.68
面心立方	4	$\sqrt{2}/4a$	12	0.74
密排六方	6	$1/2a$	12	0.74

2. 晶面及晶向指数

晶体中各方位上的原子面称作晶面，各方向上的原子列称作晶向。

晶面指数求法如下：

(1) 以晶格中某原子为原点，平行于三条棱作 OX 、 OY 、 OZ ，以晶胞的边长 a 、 b 、 c 分别作为晶轴上的长度单位。

(2) 求出待定晶面在三个晶轴上的截距（如晶面与某轴平行，则截距为 ∞ ）。例如，1、1、 ∞ ；1、1、1 等。

(3) 取这些截距的倒数。例如, $(\bar{1}10)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 等。

(4) 将上述倒数化为最小的简单整数, 并加上圆括号, 一般记作 (hkl) 。例如, (110) 、 (112) 、 (111) 等。如果所求晶面在晶轴上的截距为负数, 则在相应的指数上方加一负号, 例如: $(\bar{1}10)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 等。

在晶体中, 具有等同条件而只是空间位向不同的各组晶面 (这些晶面的原子排列情况和面间距离等完全相同), 可归并为一个晶面族, 用 $\{hkl\}$ 来表示。例如在立方系晶体中。

$$\{100\} = (100) + (010) + (001) + (\bar{1}00) + (0\bar{1}0) + (00\bar{1})$$

上述两两平行的六个等同晶面共同构成立方晶胞的立方体表面。

晶向指数求法如下:

(1) 以晶格中某原子为原点, 平行于三条棱作 OX 、 OY 、 OZ , 以晶胞的边长 a 、 b 、 c 分别作为轴上的长度单位。

(2) 过座标原点引入一直线, 使其平行于所求晶向。

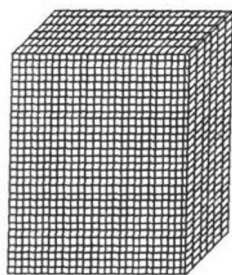
(3) 求出该直线上一晶点的三个座标值。

(4) 将三个座标值按比例化为最小整数。加方括号。例如, $[110]$ 、 $[111]$ 等。

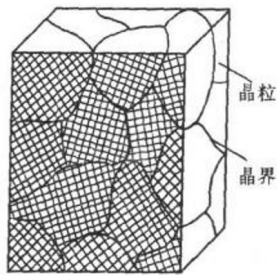
1.2 金属的实际结构

一、多晶体结构

一块晶体如果其内部晶格方向完全一致, 则称这块晶体为单晶体, 前面所讨论的晶体都是指这种晶体。在工业中, 除专门制造的晶体外, 都不是这样, 即使在很小一块金属中也包含着许多小晶体, 每个小晶体内部的方位一致, 而小晶体间的方位各不相同, 称多晶体。金属中这种不规则的颗粒状结晶称作晶粒, 各晶粒间相互接触的界面称作晶界。



(a) 单晶体



(b) 多晶体

图 1-7 单晶体与多晶体的结构示意图

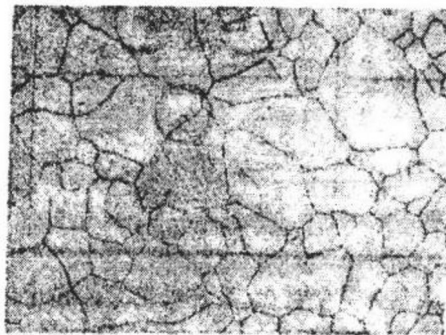


图 1-8 金属结构的显微组织照片

钢铁材料中晶粒大小一般为 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{mm}$, 必须是显微镜下才能看到。在显微镜下观察到的晶粒大小、形状和分布称作显微组织。金属结构的显微组织见图 1-8。有色金属材料中的晶粒一般较大, 一般几毫米至几十毫米。

每个晶粒内部的晶格方向在不同区域内有微小差别, 一般为 $10' \sim 20'$, 最大差别 $1^\circ \sim 2^\circ$ 。这些内部彼此晶格方位上微小差别的小区域称作晶粒中的亚晶粒。

二、晶格缺陷

金属晶体原子的实际排列并不像理想情况那样规则的排列，而在某些部位或某些区域的排列往往存在各种缺陷。

1. 点缺陷

常见的点缺陷是晶格空位或间隙原子，见图 1-9。这种缺陷是由于晶格中的某些原子由于受热、振动等原因脱离了在晶格中其原有位置，转移到晶格间隙而形成的缺陷。

这时，脱离了原来位置的原子处于高能不稳定状态。

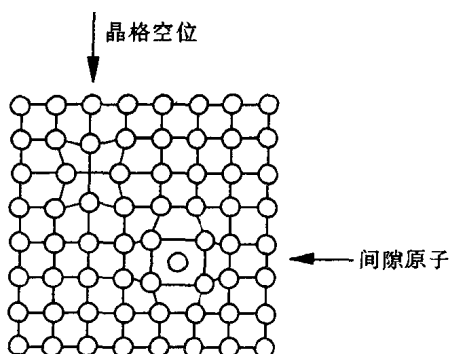


图 1-9 点缺陷示意图

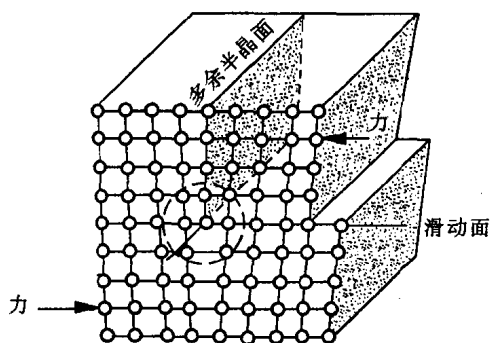


图 1-10 刃型位错的示意图

2. 线缺陷

线缺陷就是晶格中的位错线，见图 1-10。是由于晶格中一部分插入一原子面致使晶格中各处原子列不相等。位错线可以看成一部分晶体相对于另一部分晶体进行局部滑移而造成的结果。

3. 面缺陷

面缺陷就是晶界和亚晶界。这种缺陷是由于晶格中不同区域的晶格方位过渡所造成的，见图 1-11、图 1-12。

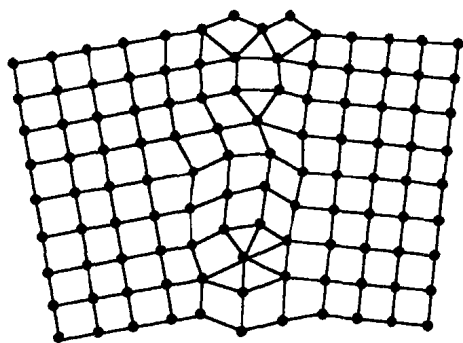


图 1-11 晶界示意图

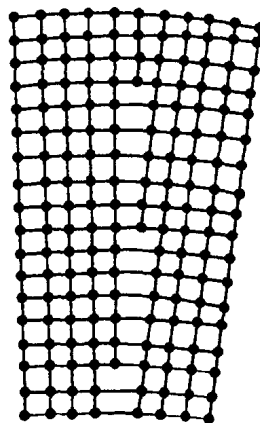


图 1-12 亚晶界示意图

由于晶界处的原子排列发生变形和扭曲，原子处于高能不稳定状态，晶界处与晶粒内部在发生物理、化学变化时将有不同。晶界具有以下特点：

- (1) 在腐蚀介质中，晶界处较晶内易被腐蚀。
- (2) 晶界面上的原子扩散速度较晶内的原子扩散速度快。
- (3) 晶界附近硬度较高，晶界对金属的塑性变形起阻碍作用。
- (4) 当金属内部发生相变时，晶界处是首先形核的地方。

1.3 金属的结晶

一、结晶概念

物质由液态转变为固态的过程称作凝固，通常凝固形成晶体结构称作结晶。凡金属都具有一个温度——平衡结晶温度，高于此温度金属发生熔化，低于此温度金属进行结晶。在平衡温度液态金属与晶体两相共存。这是由于金属在液态、固态时的自由能 (F) 变化不一样，在一定的温度下会出现一个平衡点，即理论结晶温度。低于理论结晶温度 $F_{\text{液}} > F_{\text{固}}$ ，高于理论结晶温度 $F_{\text{液}} < F_{\text{固}}$ ，当 $\Delta F = F_{\text{液}} - F_{\text{固}} > 0$ 时，金属结晶自发进行。实际上，实际结晶温度 T_1 与理论结晶温度 T_0 间有一差值 $\Delta T = T_0 - T_1$ ，此差值称作过冷度，过冷度 ΔT 越大，结晶倾向越大。但金属结晶时要发生两方面变化。

1. 因结晶而引起体系自由能的降低
2. 因结晶增加新晶面而引起体系自由能的升高

因此，要使液态真正结晶不仅要有过冷度造成液态与固态的自由能差，而且还要有足够的过冷度使液态结晶时自由能的降低超过表面能的升高。

由于晶体在结晶时总伴有一定能量释放，即释放出结晶潜能。由于有结晶潜能释放，改变了晶体结晶时的冷却速度，见图 1-14 所示。这样就可以判断出在冷却速度发生变化的停歇点、转折点处发生了状态变化。这种研究晶体加热、冷却的变化方法称作热分析法。

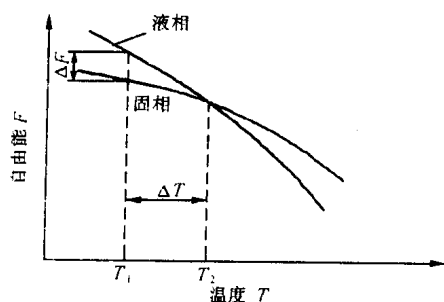


图 1-13 液态与晶体在不同温度下自由能的变化

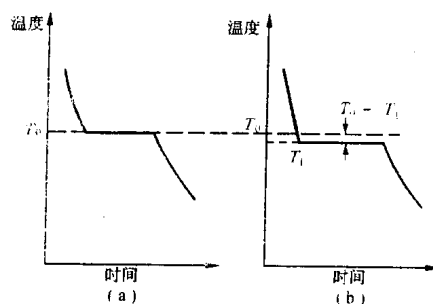


图 1-14 纯金属凝固时的冷却曲线

二、结晶过程

从液态变为固态的过程称作结晶，结晶过程包括形核、长大。

1. 形核

液态由高温冷却到结晶温度的过程中，随着温度降低开始向晶体状态发生逐渐过渡，即随时都在不断地产生许多类似晶体中原子排列的小块，见图 1-15。其特点是这些小块尺寸较小，大小不一，时聚时散。温度越低，形成类似晶体小块的尺寸越大，晶体小块存在的时间也越长。这种不稳定的原子排列小块称作晶胚，在继续冷却过程中形成晶核。

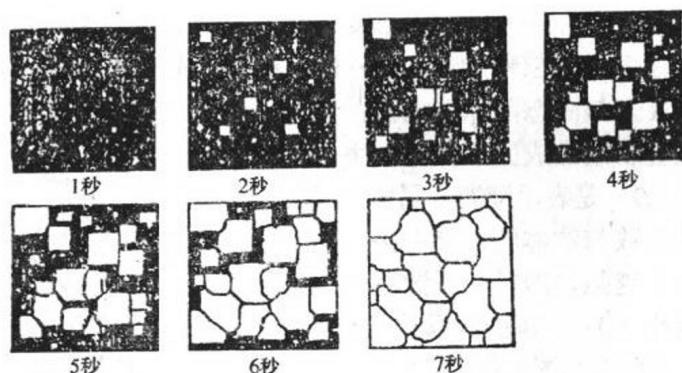


图 1-15 金属结晶过程示意图

2. 成长

晶核形成以后，继续冷却过程中晶核将逐渐长大。开始时，晶核内部的原子排列，晶核外形大小都较规则，随着晶核的成长形成了晶体棱角。由于棱角部分散热条件优于其它部位，在继续冷却过程中将会沿着散热最有利的方向成长。晶体的这种长大像树枝一样，先长树干、再长树枝，然后把晶间填满。晶体的这种成长方式称作枝晶成长。见图 1-16 所示。冷却度越大，晶体的枝晶成长越明显。

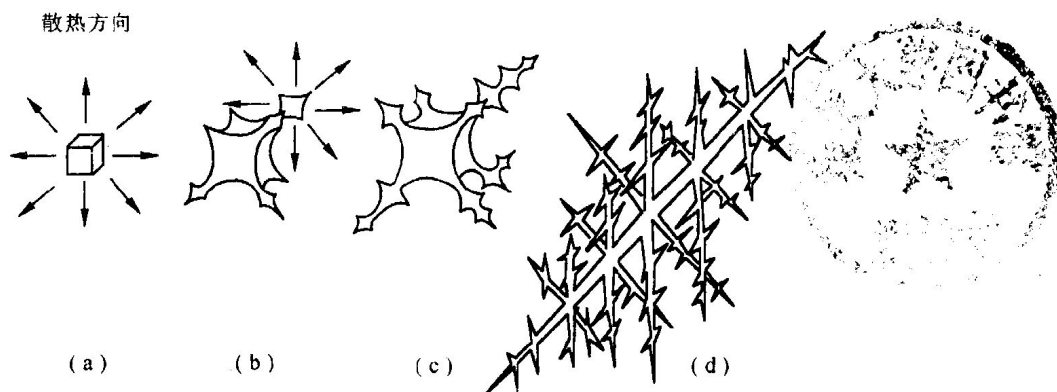


图 1-16 晶体枝晶成长示意图

三、影响晶核成长速度的因素

前面我们已经讨论了金属的结晶过程，即形核、成长。如果金属能在较短的时间内形成较多的结晶核心，并且晶核长大速度慢，就会得到细小晶体，这样的金属晶体的性能优于晶粒较大的金属晶体的性能。对金属结晶时影响晶粒成长的有两方面因素：

1. 过冷度的影响

液态金属在冷却结晶时，冷却速度无限缓慢将会出现一平衡结晶温度，冷却速

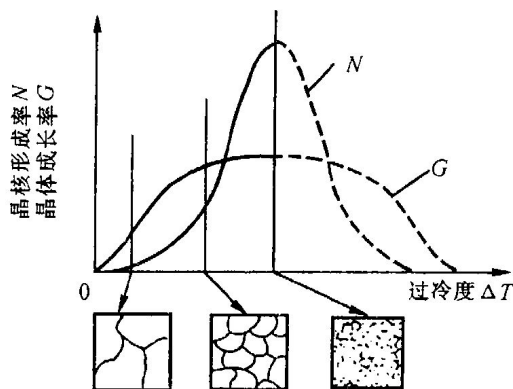


图 1-17 晶核的形成率和成长率与过冷度的关系

度较快将会出现过冷度，见图 1-14。金属结晶时，冷却速度越快过冷度越大。不同过冷度 ΔT 对晶核的形成率 N (晶核形成数目/ $S \cdot \text{mm}^3$) 和晶核成长率 G (mm/S) 的影响，见图 1-17。

过冷度表示了液态与固态晶体自由能的差值，它表征了液态金属结晶成固态晶体动力的大小。而扩散系数 (D) 是表示液态金属中原子迁移的能力；扩散系数与物体的内能有关，内能越大原子扩散能力越强，即扩散系数越大。液体与晶体自由能差 (ΔF) 和扩散系数 (D) 与过冷度 (ΔT) 的关系，见图 1-18。

2. 不熔杂质的影响

金属中所含的杂质有的可以与金属一起溶化，有的则不能。不熔杂质当其结构在某种程度上与金属晶体的晶格相近时，可显著加速金属晶核的形成，使金属晶粒细化。

金属晶粒的大小对金属的性能有很大影响，金属的晶粒越小，金属的强度越高，金属的塑性和韧性越好。因此，在金属结晶时，有时故意向金属中加入某些难熔杂质以使金属晶粒细化，达到改善金属性能的目的。这种细化金属晶粒的方法称作变质处理，所加入的杂质称作变质剂。

四、金属铸锭和焊缝的组织

金属的结晶除与冷却速度及不溶杂质有关外，还与散热的方向有关。

1. 金属铸锭的组织

金属锭在冷却结晶过程中，由于所受的冷却条件不同和金属与杂质的熔点不同，使其冷却结晶后包括下面组织，见图 1-19 所示。

(1) 表面细晶粒层

当钢水浇入锭模时，由于模壁温度较低，表面的液态金属受到快速冷却，造成较大的过冷度形成的。

(2) 柱状晶粒层

因为铸锭冷却时，其散热方向与模壁相垂直，而金属的晶粒将沿着散热的相反方向成长。在表面细晶粒形成后，模壁的温度升高，铸锭的冷却速度降低，此时，晶核的形成率减小，相反晶核的成长率增大。因此，各晶粒长大较快，晶粒将沿枝晶轴向模壁传热的反方向成长，形成柱形晶粒。

(3) 心部等轴晶粒

随着柱状晶粒成长到一定程度，通过柱状结晶层向模壁外散热的速度越来越小，锭模中剩余的金属的温差越来越小，此时散热方向不明显，趋于均匀冷却状态。与此同时一些未熔杂质的颗粒和枝晶颗粒由于金属的流动被带到中部，这些晶粒都成为剩余液体的结晶

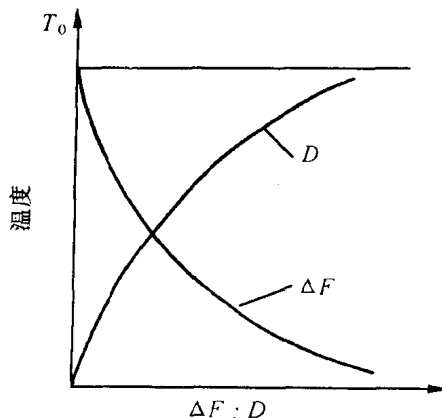


图 1-18 液体与晶体自由能差和扩散系数与过冷度的关系

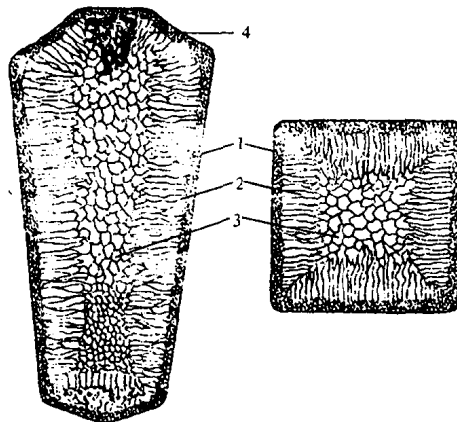


图 1-19 钢锭组织示意图

- (1) 表面细晶粒层 (2) 柱状晶粒层
(3) 心部等轴晶粒区 (4) 低熔点杂质

中心。此时，晶核在不同方向的成长速度相同，形成了粗大的等轴晶粒区。

(4) 低熔点杂质区

铸锭凝固到后期，低熔点杂质会浮到铸锭上面最后结晶，这样就形成了低熔点杂质区。

2. 焊缝的组织

焊缝中熔合金属冷却速度快，传热方向不同，其冷却结晶的组织与铸锭的结晶组织不同。焊缝金属冷却结晶后，包括下述组织。

(1) 柱状晶粒区

由于焊缝金属在焊接时被局部加热，使焊缝熔合金属冷却时散热很快，金属晶粒来不及向旁边长大，形成了柱状晶粒。

(2) 低熔点杂质区

对于成型系数 (B/H) 小的焊缝，散热方向基本与母材金属相平行 (散热方向实际与焊缝金属熔合线相垂直)，故焊缝熔合金属的晶粒与母材平行成长，最后结晶的低熔点杂质处于焊缝中心处，这样会减弱焊接接头的强度。对成型系数较大的焊缝，由于散热方向不同，焊缝金属的晶柱成长方向与水平方向有倾斜，见图 1-20 (b)。低熔点杂质最后结晶，处于焊缝上部，这样可以改善由于低熔点杂质最后结晶对焊接接头性能的影响。

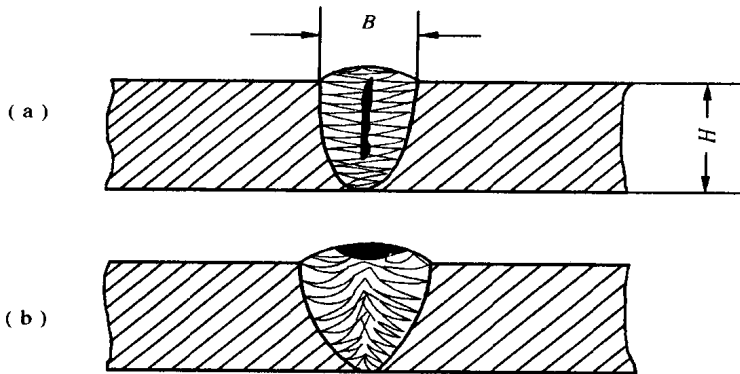


图 1-20 不同成型系数 B/H 对焊缝结晶的影响

1.4 金属的变形与再结晶

一、金属的变形与断裂

金属在外力的作用下，随着力的增加将发生弹性变形、塑性变形、断裂。在应力 (σ) $<$ 弹性极限 (σ_e) 时，发生弹性变形，变形遵守虎克定律 $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ，此时当应力取消后，变形可以完全恢复，当 $\sigma > \sigma_e$ 时，金属不但发生弹性变形还会发生塑性变形，塑性变形在应力取消后不能恢复，将成为永久变形。屈服强度 (σ_s) 是在应力不增加或开始有所降低，金属仍能继续发生变形的应力。金属的塑性变形能力是以伸长率 ($\delta\%$) 和断面收缩率 ($\psi\%$) 表示。

随着应力的增加，金属的塑性变形逐渐增大，当应力达到极限强度 (σ_b) 时，开始发生不均匀塑性变形 (颈缩现象)，变形迅速增大，至 K 点处发生断裂。金属的断裂有两种：