

锅 炉 钢 材 与 制 造 工 艺 学

上 册

西安交通大学

锅炉教研室

毛主席语录

路线是个纲，纲举目张。

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

人的正确思想，只能从社会实践中来，只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来。

一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。这就是马克思主义的认识论，就是辩证唯物论的认识论。

1 11/11/3/01

毛主席语录

知识的问题是一个科学问题，来不得半点的虚伪和骄傲，决定地需要的倒是其反面——诚实和谦逊的态度。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。

前 言

无产阶级文化大革命的伟大胜利，有力地推动着我国社会主义革命和社会主义建设的蓬勃发展。为了适应教育革命发展的需要，我们遵照毛主席关于“教育要革命”、“教材要彻底改革”的教导，把锅炉专业过去有关金属材料、工艺系统的三门课程，即“金属材料学”、“锅炉钢”和“锅炉制造工艺学”，精简成为“锅炉钢材与制造工艺学”一门课，并为这门课程编写了这本教材。编写的内容也适当地考虑到学员参加工作后参考的需要。

“不破不立。破，就是批判，就是革命。破，就要讲道理，讲道理就是立，破字当头，立也就在其中了。”无产阶级文化大革命以来，在毛主席的革命路线指引下，我们参加了工厂的生产实践，并对旧教材进行了批判。旧教材存在着理论脱离实际和烦琐哲学，特别是没有密切结合我国的生产实践。

随着我国社会主义革命和建设事业的飞速发展，特别是无产阶级文化大革命以来，群众性的技术改造，技术革新运动蓬勃开展，许多新工艺、新技术逐步得到广泛采用。在锅炉制造行业中，技术改造运动也发展得很快，大量新工艺、新技术普遍应用，把我国的锅炉制造业发展到新的水平。本教材力图做到基本理论与生产实际密切结合，并尽量能充分反映我国锅炉工业的制造水平。

学习本课程的目的为了使学员能够根据在不同条件下工作的锅炉元件，合理地选用金属材料；在锅炉元件的制造过程中，对各种材料确定适当的制造工艺方法和合理的工艺规范；以及在锅炉运行过程中，按照元件金属材料的变化情况，确切地判断元件的使用寿命。本教材力图能满足上述三方面的要求，以培养学员具有分析和解决这些问题的初步能力为目标。

由于，我们对毛主席的教育思想领会得很不够，思想和业务水平不高，深入实际很不够，以及编写时间急促，教材中一定还存在着不少缺点和错误，诚恳地希望读者提出宝贵意见，以便今后改进。

在编写过程中，曾得到上海锅炉厂、哈尔滨锅炉厂、东方锅炉厂、武汉锅炉厂、北京锅炉厂、武汉低压锅炉厂、天津锅炉厂、石家庄锅炉厂、太原锅炉厂及西安锅炉厂等单位的工人师傅和技术人员的热情帮助和大力支持，特致谢意。

编 者

目 录

第一章 金属材料基本知识

第一节 金属的晶体结构	1
(一) 金属晶体构造的特点	1
(二) 几种常见的金属晶格类型	3
第二节 金属的结晶	4
(一) 结晶的基本概念	4
(二) 金属的结晶过程	5
(三) 金属的实际晶体构造	5
(四) 结晶晶粒大小的影响因素	9
第三节 金属在固态下的转变	10
第四节 金属材料的机械性能	12
(一) 拉伸试验	12
(二) 强 度	12
(三) 塑 性	13
(四) 硬 度	14
(五) 冲击值	15
(六) 真应力与真应变	17

第二章 金属材料的变形与再结晶

第一节 单晶体金属的变形	19
(一) 单晶体金属的弹性变形	20
(二) 单晶体金属的塑性变形	20
第二节 多晶体金属的变形	24
(一) 晶界的作用	24
(二) 各晶粒间位向差别的影响	25
第三节 塑性变形对金属组织和性能的影响	26
(一) 塑性变形对金属材料组织的影响	26
(二) 塑性变形对金属材料性能的影响	27

第四节 塑性变形后的金属在加热时组织和性能的变化	28
(一) 回复与再结晶	29
(二) 金属的再结晶温度	29
(三) 再结晶退火后的晶粒度	31
第五节 金属材料的热加工变形	32

第三章 铁碳合金

第一节 合金的基本结构	34
(一) 固溶体	34
(二) 金属化合物	36
(三) 机械混合物	38
第二节 二元合金状态图的基本概念	39
(一) 二元合金状态图的建立	39
(二) 杠杆定律	40
第三节 铁碳合金状态图	42
(一) 纯铁与渗碳体的性能	43
(二) 铁——渗碳体状态图的分析	44
(三) 典型合金结晶过程的分析	47
(四) 铁——渗碳体状态图的实际应用	51
(五) 碳钢的组织对性能的影响	52
第四节 碳 钢	53
(一) 常存杂质对碳钢性能的影响	53
(二) 碳钢的分类	54
(三) 碳钢的牌号及其应用	55
第五节 锅炉常用的碳钢	56
(一) 锅炉主要元件对钢材性能的要求	56
(二) 锅炉碳素钢	58

第四章 钢的热处理

第一节 钢的加热转变	63
(一) $Fe-Fe_3C$ 状态图在热处理中的运用	63
(二) 共析钢的加热转变	64
(三) 奥氏体晶粒的长大	65
(四) 影响奥氏体形成速度的因素	66
(五) 亚共析钢和过共析钢的加热转变	69
(六) 确定加热工艺的原则	70
第二节 钢在冷却时的转变	72

(一) 奥氏体等温转变曲线	72
(二) 奥氏体等温转变产物的组织及其性能	75
(三) 奥氏体等温转变曲线的意义	81
(四) 影响奥氏体等温转变曲线的因素	81
(五) 奥氏体等温转变曲线的应用	83
(六) 钢的连续冷却转变	85
第三节 钢的退火和正火	86
(一) 钢的退火	86
(二) 钢的正火	89
(三) 退火与正火的选择	89
第四节 钢的淬火和回火	90
(一) 钢的淬火	91
(二) 钢的淬透性	93
(三) 淬火时的主要缺陷及防止方法	95
(四) 钢的回火	96
第五节 钢的表面热处理	99
(一) 表面淬火	99
(二) 化学热处理	101
第六节 锅炉制造中的热处理工作	107
(一) 锅筒制造中的热处理工作	108
(二) 锅炉集箱及蒸汽导管的热处理工作	116
(三) 锅炉受热面管件的热处理工作	117

第五章 金属材料的脆性

第一节 金属材料的断裂	119
第二节 脆性破坏事故的实例及分析	121
第三节 韧——脆性转变温度	126
第四节 无塑性温度	128
第五节 金属材料产生脆性断裂的条件	131
(一) 温度	131
(二) 缺陷	131
(三) 厚度	132
(四) 加载速度	132
(五) 微观组织	132
(六) 残余应力	133
第六节 断裂韧性	133
(一) 缺口冲击试验的不足之处	133
(二) 线弹性断裂力学及断裂韧性	134

(三) 金属材料断裂韧性的测定	137
(四) 影响材料断裂韧性的因素	140
第七节 全面屈服断裂力学及裂纹张开位移	142
第八节 防止脆性断裂的方法	144
第九节 金属材料的脆性	146
(一) 冷脆性	146
(二) 兰脆性	149
(三) 热脆性	149
(四) 红脆性	151
(五) 回火脆性	151
(六) 应变时效	153
(七) 苛性脆化	155
(八) 钢的氢损坏	157

第六章 金属材料的高温机械性能

第一节 温度对金属材料静力机械性能的影响	163
第二节 蠕变现象	165
(一) 蠕变曲线	165
(二) 蠕变的机理	167
(三) 条件蠕变极限	168
第三节 钢的持久强度	169
(一) 蠕变试验及蠕变极限的不足	169
(二) 高温持久强度	170
(三) 持久强度的推测方法	170
第四节 钢的持久塑性	174
第五节 影响钢材高温强度的因素	175
(一) 化学成分	175
(二) 冶炼方法	176
(三) 金属材料的组织结构	176
(四) 热处理方法	177
(五) 温度波动对钢材高温强度的影响	178
第六节 钢的应力松弛	178

第七章 长期在高温条件下金属材料组织结构的变化

第一节 珠光体的球化	181
第二节 石墨化	184
第三节 合金元素的重新分配	187

第八章 金属的氧化与腐蚀

第一节 金属的高温氧化	188
第二节 蒸汽腐蚀	190
第三节 硫的腐蚀	191
(一) 高压锅炉水冷壁管的硫腐蚀	191
(二) 锅炉过热器管的高温硫腐蚀	192
(三) 含镍合金钢的硫腐蚀	193
(四) 硫的低温腐蚀	193
第四节 钕的腐蚀	194
第五节 应力腐蚀	195

第九章 锅炉高温元件的工作寿命

第一节 国内外简况	196
第二节 判断高温元件能否继续使用的技术指标	197
第三节 锅炉高温元件所用钢材的选择	198

第十章 合金元素在钢中的作用

第一节 合金元素在钢中的存在形式	200
第二节 合金元素对钢平衡组织的影响	202
(一) 合金元素对钢临界温度的影响	203
(二) 合金元素对钢共析点(S 点)位置的影响	203
(三) 合金元素对奥氏体相区大小的影响	204
第三节 合金元素对热处理的影响	204
(一) 合金元素对奥氏体化的影响	204
(二) 合金元素对奥氏体分解转变的影响	205
(三) 合金元素对马氏体转变的影响	206
(四) 合金元素对回火稳定性的影响	207
第四节 合金元素对机械性能的影响	208
(一) 钢的强化方法	208
(二) 合金元素对正火(或退火)状态钢机械性能的影响	208
(三) 合金元素对调质钢机械性能的影响	210
第五节 合金元素对钢的工艺性能的影响	210
(一) 合金元素对焊接性的影响	210
(二) 合金元素对切削加工的影响	212
(三) 合金元素对冷加工性能的影响	212

第六节 几种常用合金元素在钢中的作用	213
(一) 硅在钢中的作用	213
(二) 锰在钢中的作用	213
(三) 铬在钢中的作用	214
(四) 镍在钢中的作用	215
(五) 钼在钢中的作用	216
(六) 钨在钢中的作用	216
(七) 钒在钢中的作用	216
(八) 钛在钢中的作用	217
(九) 铌在钢中的作用	217
(十) 硼在钢中的作用	217
(十一) 铝在钢中的作用	218

第十一章 合金钢

第一节 合金钢的分类	219
(一) 按用途分类	219
(二) 按化学成分分类	219
(三) 按金相组织分类	220
第二节 合金钢的编号方法	220
(一) 我国合金钢的编号	220
(二) 我国与其他国家常用钢号的对照	220
第三节 合金结构钢	222
(一) 普通低合金结构钢	222
(二) 弹簧钢和滚珠轴承钢	227
第四节 合金工具钢	229
(一) 工具钢的合金化与热处理方面的特点	229
(二) 高速钢	230
(三) 硬质合金	231
第五节 热强钢及耐热钢	232
(一) 热强钢及耐热钢的合金化原则	232
(二) 锅炉上常用的热强钢	233
(三) 锅炉上常用的耐热钢	247
第六节 不锈钢	248
(一) 电化学腐蚀的基本概念	248
(二) 铬不锈钢	251
(三) 铬镍不锈钢	251

第十二章 铸 铁

第一节 概 论	255
第二节 白口铁的组织 and 性能	255
(一) 共晶白口铁	256
(二) 亚共晶白口铁	256
(三) 过共晶白口铁	257
第三节 铸铁的石墨化	259
(一) 冷却速度的影响	259
(二) 化学成分的影响	260
第四节 灰口铸铁	260
(一) 普通灰口铸铁的成分	260
(二) 灰口铸铁的组织	261
(三) 灰口铸铁的性能	262
第五节 球墨铸铁	263
(一) 球墨铸铁的生产方法	263
(二) 球墨铸铁的性能	264
(三) 球墨铸铁的热处理	265
第六节 耐热合金铸铁	266

第一章 金属材料基本知识

自然界中的化学元素可以分成两大类：金属与非金属。其中，金属元素大约占四分之三。金属元素与非金属元素的主要区别是：一切固体的金属都属于晶体物质，并具有良好的导电性和导热性，具有金属的光泽。并且，还具有可铸性、锻压性、切削性和焊接性等工艺性能。

第一节 金属的晶体结构

一切物质都是由原子构成。从原子的存在形式来看，固体物质有晶体与非晶体之分。所谓非晶体是指构成物质的原子是无规则、紊乱地堆积着的、若把这种物质打断后观察其断口是光滑、发亮的。如沥青、玻璃、松香等都是属于非晶体物质。晶体中的原子是按一定的规则和几何形状排列的，打断后其断口一般较粗糙。如冰、盐、石墨以及所有的固体金属都是属于晶体物质。

（一）金属晶体构造的特点

我们取一块纯铁，制成金相试样，放在显微镜下观察，可以清晰地看到它是由许多小晶体组成的，这些小晶体叫做晶粒。它们具有不规则的外形，如图 1-1 所示。晶粒在一般情况下均需采用显微镜来观察，个别尺寸较大的晶粒用肉眼即可看出。用人工的方法能够制出相当大的单个金属晶粒，这种具有一个晶粒的晶体，通常称为单晶体。普通的金属材料都是多晶体、由许多晶粒所组成。

金属的原子彼此之间是怎样会结合在一起的呢？我们知道，原子是由原子核和外围的电子（价电子）所组成。金属原子的构造特点是：它们最外层的价电子数目较少，而这些电子与其原子核之间的结合力也较弱，极易与原子核脱离。当金属原子相互结合在一起而成为固体时，各金属原

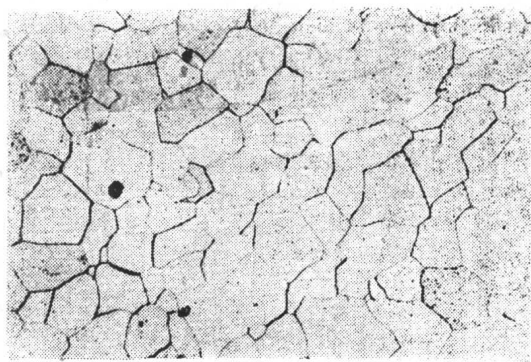


图 1-1 纯铁的显微组织

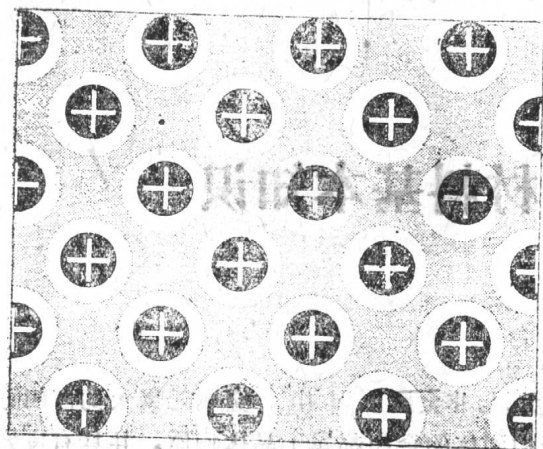


图 1-2 金属原子结构示意图

子的价电子与其原子核脱离成为自由电子，金属的原子便成为带正电的正离子，正离子按照一定的几何形式规则地排列，每个离子在固定的位置上作高频率振动；而所有的自由电子在各离子间作高速运动，它们为整个金属所共有，形成电子云（又称电子气）。在金属晶体中存在有：自由电子与正离子之间的引力，同时这种引力与离子和离子之间、电子和电子之间的相互排斥力相平衡。金属晶体的这种结合方式称为金属键。图 1-2 为金属原子结构示意图。

金属晶体正是由于它有着这种金属键的结合特点，便使它具有一系列与非金属不同的特性，例如，较高的强度，良好的塑性，高的导电性、导热性，正的电阻温度系数，以及具有金属光泽等。

金属之所以具有良好的导电性就是因为在一一定的外电势作用下，被公有化了的自由电子作定向移动的结果。金属中正离子振动的振幅随温度升高而增大，从而增加了自由电子流动的阻力，而使金属具有正的电阻温度系数，亦即随着温度的升高，金属的电阻增大。金属具有高的塑性主要是由于当金属在一定外力作用下发生塑性变形后，金属晶体中的离子与自由电子间又会恢复原来的相对关系，因而也就使它又具有了可以重新进行塑性变形的能力，所以金属一般都具有良好的塑性。

总之，金属晶体所具有的各主要特性及其结构特点都是与它们的金属键的结合方式密切相关的。

金属晶体中的原子是按照怎样的规则排列的呢？用 x 射线分析的方法进一步研究晶粒的内部结构，可了解晶粒中原子的排列形式。

为了便于分析各种晶体中原子排列的规律，可以用假想的线条将各原子的中心联接起来，使之构成一个空间格子，如图 1-3。此时各原子都位于该假想空间格子的结点上。这种用以描述原子在晶体中排列形式的空间格子叫做“晶格”。晶格中各种方位的原子平面叫做“晶面”。晶体或晶格可认为是由层层晶面堆砌而成。晶格中由原子或结点所组成的任一直线，能代表晶体空间内的一个方向，这种方向称为“晶向”。

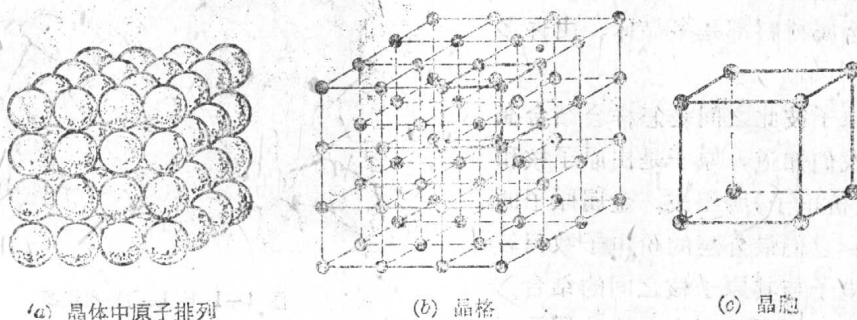


图 1-3 简单立方晶格的描述

我们为了简便地描述晶体结构，通常取晶格中一个最基本（能代表其结构特征）的单元即“晶胞”来表示之。晶胞的各边尺寸—— a 、 b 、 c 称为“晶格常数”。其大小以埃（ $\text{\AA}$ ）来量度（1埃= 10^{-8} 厘米）。各种晶体的晶格常数大致在2.5~5.5埃范围内。而原子半径一般为1.3~2.5埃。以铁为例，在常温下，铁的原子半径约为1.24 $\text{\AA}$ ，其立方晶格常数约为2.87 $\text{\AA}$ ，仅比其原子直径稍大一点。故金属原子的排列是十分紧密的。

（二）几种常见的金属晶格类型

不同金属元素有着不同的晶格类型，其中最常见有三种晶格类型：体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。参看图1-4。

1) 体心立方晶格（图1-4a）它的三个相互垂直的边长都相等，在它的八个顶角上各有一个原子，在立方体的中心还有一个原子。属于体心立方晶格的金属元素有：铬、钼、钒、钨、铌、钾、钠、 α 铁等。

2) 面心立方晶格（图1-4b）它的三个相互垂直的边长也都相等，在它的八个顶角上各有一个原子，在立方体六个平面的中心也各有一个原子。属于面心立方晶格的金属元素有：铜、镍、金、银、铝、铅、 γ 铁等。

3) 密排六方晶格（图1-4c）六方晶格是一个六方柱体。在它的十二个顶角上各有一个原子，在上下两个正六方面的中心各有一个原子，在六方柱体的中心还有三个原子。属于密排六方晶格的金属元素有：镁、锌、镉、铍等。

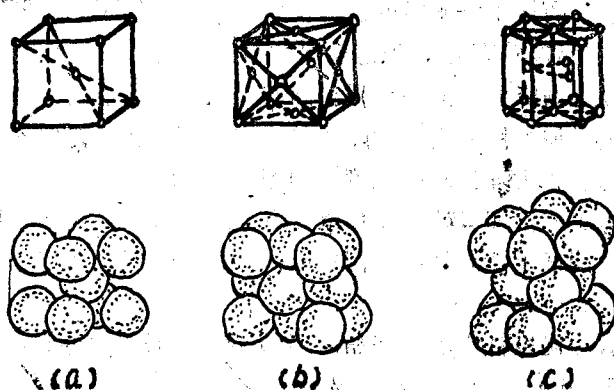


图 1-4 金属元素的晶格型式

在这里，我们应该注意的是在各种晶胞中实际所包含的原子数目。例如在体心立方晶胞中，由于其各顶角上的每一原子都是属于在该原子周围的八个晶胞所公有，所以在每个体心立方晶胞中实际上只不过包含着2个原子（ $\frac{1}{8} \times 8 + 1$ ）。在每个面心立方晶胞中实际上只包含着4个原子（ $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6$ ）。而在每个密排六方晶胞中，则包含着6个原子（ $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3$ ）。

金属的性能与它的晶格类型有很大关系。例如，一般讲来，面心立方晶格的金属比密排六方晶格的金属塑性好。对于同一类型晶格的不同金属，虽然其晶格类型相同，但它们的原子大小，以及原子间距是不同的，因而性能也不同。

第二节 金属的结晶

金属的晶粒是怎样形成的呢？为了说明这个问题，需要了解金属从液体状态冷凝成固体状态是怎样进行的，即需要了解金属的结晶过程。

(一) 结晶的基本概念

金属从高温到低温时，为什么要有结晶现象发生呢？结晶为什么要在一定的温度以下才能进行呢？

要解答这些问题，我们就必须知道，在自然界中，一切自发变化都是由于在新的条件下的新状态具有较低的能量，因而亦较为稳定这一情况所引起的，亦即一切的自发转变都是遵守着自高能量到低能量的变化规律。

在具有大量热运动质点（原子、分子）所构成的系统中，物体的能量状态的变化，是不能简单地以动能或势能等来表达，而需要用一个特殊的热力学函数，所谓“自由能”（ F ）来说明。根据热力学第二定律，一个自发过程的发生，一定是其自由能降低的过程。只要在某种条件下，新状态的自由能较旧状态的自由能低，则物质必然会自发地向低自由能的新状态转变，即自由能的变化便是物态发生变化的推动力。金属之所以在一定温度以下进行结晶其原因也正在于此。

液态金属和固态金属的自由能随温度而变化的情况，如图 1-5 所示。

由图 1-5 可知，在温度较高时，液态金属的自由能低于固态金属的自由能，因而此时金属呈液态。随着温度逐渐降低，液态金属和固态金属的自由能均增加，但液态金属的自由能比固态金属的自由能增加得快。当温度降至某一值时，两者的自由能相等，此时，固态和液态可同时存在。这个温度称为理论结晶温度（即图 1-5 中 T_0 温度）。但此时由于液态与固态之间的自由能差值等于零，即 $\Delta F = 0$ ，故液态金属并不会结晶成固态金属。随着温度继续下降，固态金属的自由能低于液态金属的自由能，此时，两者之间存在着自由能差，结晶过程才能自发地进行。

因而，实际上只有当温度低于理论结晶温度（ T_0 ），具有一定的过冷度（ ΔT ）时，才会发生结晶过程（参看图 1-6）。

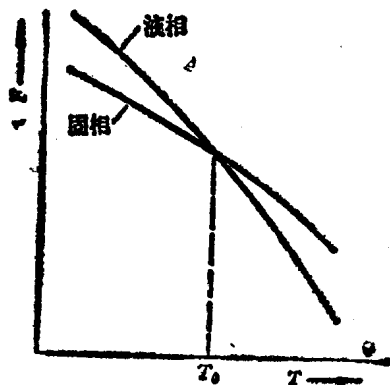


图 1-5 液态金属与固态金属自由能和温度的关系

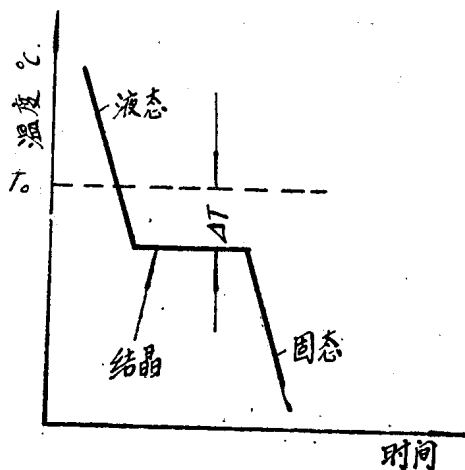


图 1-6 液态金属的冷却曲线

总之，在理论结晶温度以上，液态的自由能较低，故液态是稳定的；在理论结晶温度以下，固态的自由能较低，故固态是稳定的。

（二）金属的结晶过程

从液态金属转变为固态金属的具体结晶过程是怎样进行的呢？图 1-7 便是描述金属结晶过程的示意图。

当金属刚冶炼完成时，温度很高，金属处于液体状态，此时金属原子的活动能量较大，金属原子没有一定的排列次序，而是处在可以自由活动的情况下。随着温度逐渐降低，金属原子的活动能量也逐渐减少，原子的活动能力减弱，当冷却至金属的理论结晶温度以下，并具有一定的过冷度时，在液态金属中开始有一些原子首先排列起来，形成了晶核（结晶中心），随着温度继续降低，晶核就依靠吸附周围液体中的原子进行生长，使晶体逐渐长大，与此同时，又有许多新的晶核产生。因此，在液态金属的结晶过程中，晶核的产生与晶体的生长是同时进行的。这样不断进行下去，就把全部液态金属转变为固态金属。

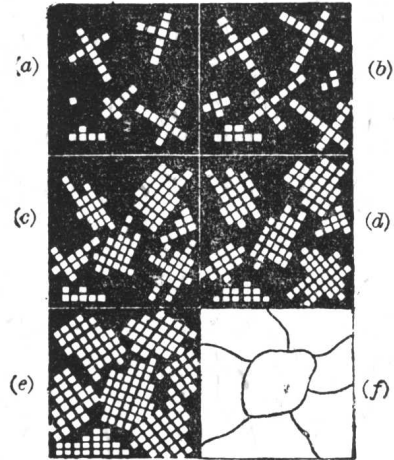


图 1-7 金属结晶过程示意图

在结晶过程中，只要晶体之间互相没有接触，在其长大过程中外形是规则的，所不同的只是各晶体的大小及排列的方位不同而已。随着结晶过程的进行，晶体逐渐长大并增多，它们之间便发生互相顶撞，在互相顶撞的部位，晶体的长大受到阻碍，只能向其他方向发展。同时，由于各晶体互相碰撞的结果，使各晶体的规则外形遭到破坏，这种外形不规则的晶体就是在显微组织上所看到的一颗颗晶粒，晶粒间的交界面称为晶界（参看图 1-7f）。

（三）金属的实际晶体构造

上面讲到的，在一个晶粒内部结晶方位都是一致的，并在每个晶格结点上都为原子所填满，这是一种理想晶体。实际上，金属由于结晶及其它加工等条件的影响，而使晶粒内部也存在着大量的缺陷，更不要说晶界了。这些缺陷的存在，对金属的性能将发生显著的影响。

根据晶体缺陷存在形式的几何特点，通常将它们分为：点缺陷、线缺陷及面缺陷三大类。

1) 点缺陷 点缺陷是指在晶体空间中，其长、宽、高尺寸都很小的一种缺陷。晶体的点缺陷的主要形式是晶格空位及间隙原子。

实验表明，在实际的晶体结构中，并不是所有结点都被原子占满，而是在某些结点处出现了空着的位置；同时在少数个别的晶格空隙处又出现了多余原子，此原子并未占有正常的晶格结点位置，而是处在晶格的空隙之间；这类形式的点缺陷，前者称为晶格空位，后者称为间隙原子（参看图 1-8）。

在一般情况下，这种缺陷的造成是由于原子热振动的结果。大家知道，原子在晶体中都是以其平衡位置为中心而进行着不停的热振动。随着温度的增高，其频率增高，能量增加，振

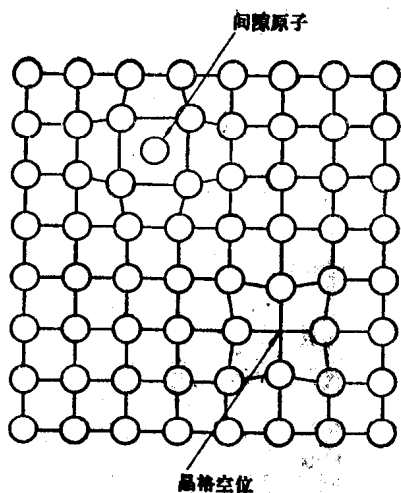
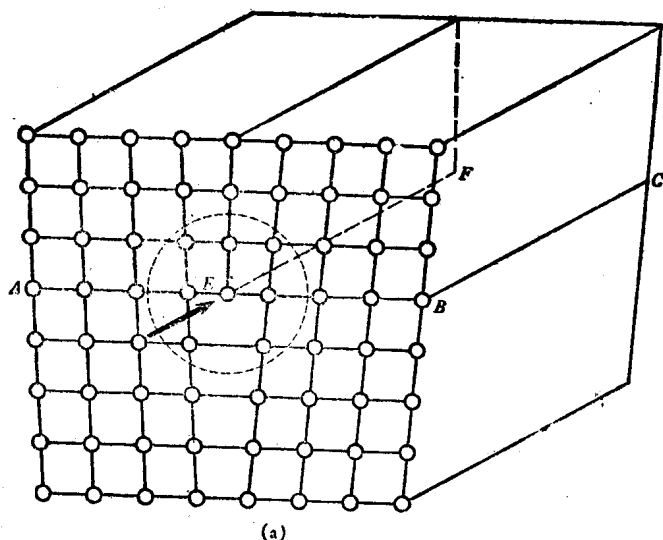


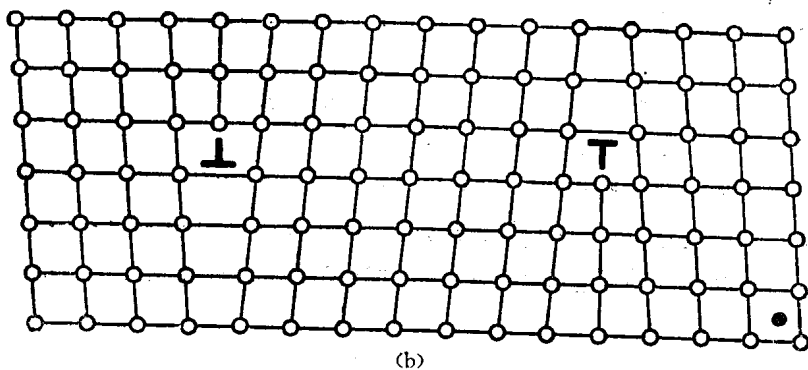
图 1-8 点缺陷示意图

实验表明，随着温度增高，空位的数目也增加。

2) 线缺陷 线缺陷是在晶体的某一平面上，沿着某一方向，伸展开来呈线状分布的一种缺陷。这类缺陷的主要形式是各种类型的位错。



(a)



(b)

图 1-9 刃型位错示意图

幅也增大。另一方面，不是所有的原子在任何时间里其振动的能量都是均等的。因此，在某一瞬间，当某一原子具有足够大的能量时其振幅增大，使它克服了周围原子对它的牵制作用，脱离其原来占据的平衡位置而“逃走”，这样就在结构中出现了空结点，即空位。离位的原子即可能逃到晶体表面上的正常位置或其他空位，也可能跳到晶格中的某些间隙位置，产生间隙原子。形成空位后，其周围的其它原子便会发生靠拢现象，而处在间隙原子周围的原子晶格则会发生撑开的现象。这种使正常晶格造成歪扭的变化通常称为晶格畸变（参看图 1-8）。