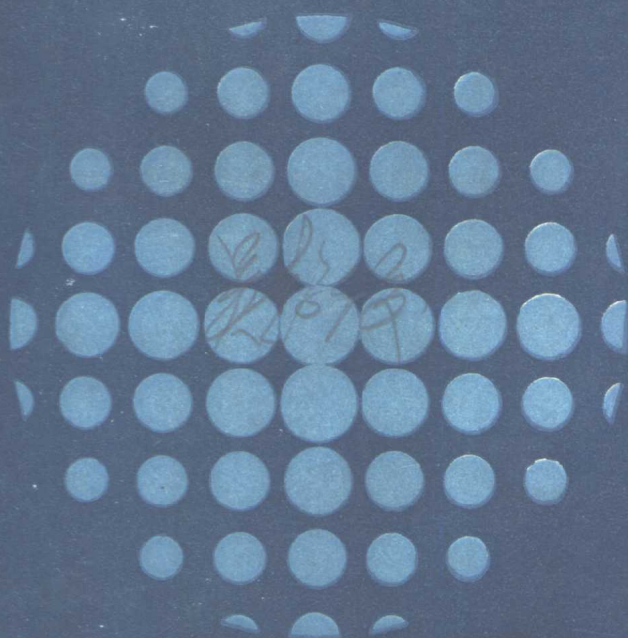


李之光 刘曼青 高广安 编著

锅炉材料及强度与焊接



GUOLUCAILIAOJIQIANGDUYUHANJIE

劳动人事出版社

锅炉材料及强度与焊接

李之光 刘曼青 高广安

编 著

劳 动 人 事 出 版 社

1 9 8 3 年

内 容 提 要

本书包括四部分内容。第一部分概括介绍与本书内容直接有关的金属学与材料力学基础知识。第二部分阐述锅炉钢材强度特性及锅炉用钢。第三部分分析锅炉受压元件强度特点并介绍水管锅炉、锅壳式（火管）锅炉强度计算原理与方法。第四部分阐述锅炉焊接与胀接问题。

本书主要作为锅炉安全监察工程技术人员教材，亦可作为大专院校师生参考用书，对于锅炉设计、制造、运行方面的工程技术人员也有参考价值。

锅 炉 材 料 及 强 度 与 焊 接

李之光 刘曼青 高广安 编著

劳动人事出版社出版

（北京市和平里中街12号）

新华书店北京发行所发行

北京市新村印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 26.75 印张 680,000字

1983年7月第1版 1984年9月第2次印刷

印数：12,001—32,001

书号：15238·0044 定价：4.10元

说 明

自 1979 年以来，我局举办了多期锅炉压力容器安全监察干部培训班、无损探伤人员培训班和技术报告会，并根据培训班和报告会的需要，组织有关同志编写了一些教材和参考资料。现在选编一部分，并加以补充修订，交劳动人事出版社陆续出版（其中《无损探伤》一书已出）。

这套书，可以作为各地锅炉压力容器安全监察部门培训技术干部的教材和参考资料，也可以作为锅炉压力容器安全监察干部的自学材料。

这些书中有些探讨性意见与我国现行的锅炉压力容器安全监察规程、标准不尽一致，仅供研究参考。在处理实际问题时均应以现行规程、标准的规定为准。内容中的缺点和错误，请读者批评指正，以便再版时改正。

劳动人事部锅炉压力容器安全监察局

一九八三年二月二十一日

前 言

锅炉是一种有爆炸危险的受压容器。保证锅炉安全、防止事故，与材料的选择、强度的计算、锅炉的结构、制造安装检修工艺的质量、运行的方式等等因素密切相关。因此，设计、制造、安装、运行、检修、安全监察等有关人员都需要掌握必要的金属材料、元件强度、制造工艺、锅炉结构与运行等方面的专业知识。我们在1980年为原国家劳动总局在杭州举办的全国锅炉安全监察干部培训班所编写的教材《锅炉安全基础》，基本上包括了以上各方面内容。现在，我们在广泛征求各方面的意见的基础上，进行了较大的修改和增补，分为两册出版。本册包括材料、强度与工艺三方面内容。

本书二至九章由哈尔滨工业大学李之光同志编写；一、十一、十二、十四章由哈尔滨工业大学刘曼青同志编写；十、十三及十五章由哈尔滨工业大学高广安同志编写；十六章由刘曼青、李之光二同志合写。全书由李之光同志担任主编，刘曼青同志担任整理与校核工作。

李毅、佟振芳、王有先、张守道、刘清方、陈隆、吴光前、毕加耕等同志对本书提出了许多宝贵的建议，在此深表谢意。

由于编写者水平所限，本书可能有很多不足之处，希望读者批评指正。

本书涉及到的现行规程、标准，以后如有修改，应以新的规程、标准为准。

编 著 者

一九八三年

目 录

前 言

第一章 金属学基础.....	1
§1-1 金属的结构与结晶.....	1
§1-2 合金的相结构.....	7
§1-3 铁碳合金.....	10
§1-4 钢的热处理.....	17
§1-5 钢的合金化基础.....	25
第二章 材料力学基础.....	28
§2-1 基本概念与定义 拉伸与压缩.....	28
§2-2 复杂受力状态.....	35
§2-3 剪切与扭转.....	39
§2-4 弯曲.....	42
§2-5 失稳(屈曲).....	50
第三章 锅炉钢材强度性能特点.....	54
§3-1 温度对钢材机械性能的影响.....	54
§3-2 钢材的蠕变现象.....	56
§3-3 蠕变限与持久强度.....	59
§3-4 持久塑性.....	62
§3-5 影响高温强度的因素.....	63
§3-6 应力松弛.....	66
§3-7 钢材金相组织与成分的变化.....	70
§3-8 高温氧化与腐蚀.....	77
§3-9 锅炉材料的脆性.....	84
§3-10 锅炉元件材料的损坏原因及判别.....	91
第四章 锅炉钢材.....	98
§4-1 化学元素对钢材性能的影响.....	98
§4-2 锅炉钢材的分类及牌号的表示方法.....	101
§4-3 锅炉用钢.....	108
第五章 锅炉元件受力失效形式与应力控制原则.....	124
§5-1 锅炉元件受力的失效形式.....	124
§5-2 以断裂力学来考虑裂纹影响的设计原则.....	125
§5-3 低周疲劳及考虑疲劳的设计原则.....	132
§5-4 锅炉元件中的热应力.....	138
§5-5 锅炉受压元件中应力的分类与限制.....	146

第六章	锅炉受压元件强度计算规定	150
§6-1	强度计算标准	150
§6-2	安全系数与许用应力	152
§6-3	计算壁温	158
§6-4	计算压力(设计压力)与最高允许工作压力	163
第七章	受拉伸(压缩)作用为主的元件的强度	166
§7-1	承受内压力作用的圆筒形元件的强度	166
§7-2	承受外压力作用的圆筒形元件的强度	199
§7-3	凸形封头、炉胆顶和半球形炉胆的强度	206
第八章	受弯曲作用为主的元件的强度	219
§8-1	平端盖、平堵头和人孔(手孔)盖的强度	219
§8-2	拉撑平板、烟管管板和拉撑曲面板的强度	226
§8-3	矩形集箱的强度	250
§8-4	下脚圈的强度	253
第九章	锅炉受压元件强度设计与校验	257
§9-1	锅炉受压元件强度设计	257
§9-2	锅炉受压元件强度校验	267
第十章	锅炉制造业应用的焊接方法	287
§10-1	焊接过程的实质	287
§10-2	手工电弧焊	288
§10-3	埋弧自动焊	293
§10-4	氩弧焊	301
§10-5	电渣焊	306
§10-6	气焊与气割	310
§10-7	等离子弧焊接与切割	313
§10-8	接触焊对焊	316
§10-9	摩擦焊	319
第十一章	锅炉用焊接材料	322
§11-1	焊接冶金过程对焊接材料的要求	322
§11-2	手工电弧焊焊条	328
§11-3	自动焊及电渣焊焊剂	335
第十二章	锅炉构件的焊接接头	338
§12-1	焊接接头特点	338
§12-2	焊接接头的基本型式	339
§12-3	焊接接头强度计算	343
§12-4	焊缝强度分析	344
§12-5	锅炉构件焊缝校核	349
第十三章	焊接应力与变形	354
§13-1	焊接应力与变形产生的原因	354
§13-2	焊接残余应力的分布及其影响	355

§13-3 减少和消除焊接应力的措施与方法.....	358
§13-4 焊接变形的形式与影响因素.....	362
§13-5 减少和矫正焊接变形的措施与方法.....	365
第十四章 锅炉钢材的焊接.....	370
§14-1 焊接热影响区及其对接头性能的影响.....	370
§14-2 金属材料的可焊性.....	377
§14-3 锅炉焊接构件的热处理.....	380
§14-4 常用锅炉钢材的焊接特点.....	384
第十五章 焊接缺陷与焊接检验.....	393
§15-1 锅炉焊接中常见的缺陷及其分析.....	393
§15-2 焊接检验的步骤与方法.....	398
§15-3 焊接缺陷的返修.....	407
第十六章 胀接.....	409
§16-1 胀接的特点.....	409
§16-2 影响胀接质量的因素.....	412
附 录 锅炉钢材物理性能.....	418
主要参考文献.....	419

第一章 金属学基础

在本章里，主要介绍与锅炉钢材有关的金属学问题。

§1-1 金属的结构与结晶

一、金属的概念

在全部化学元素中，约有四分之三是属于金属元素。金属与非金属的主要区别是：金属具有良好的导电性与导热性，并具有良好的塑性和金属光泽。此外，金属还有相当高的强度及一系列良好的工艺性能（如铸造性、锻压性、切削性和焊接性等），所以金属能在工业上得到广泛的应用。

金属所以具有上述特性，是与金属内部原子结构及原子间的结合方式有关的。

金属与非金属都是由为数众多的原子所组成。而每个原子又是由带负电的电子、带正电的质子和中性的中子构成。质子和中子集中在原子核内，电子按一定规律分布在原子核外的各电子层上，并围绕原子核作高速旋转运动。金属原子结构与非金属原子结构的主要不同在于金属原子最外层电子数目很少，一般只有1~2个，少数是3~4个，而非金属原子最外层电子数目都是5~8个。

对于金属原子来说，由于外层电子很少，它们与原子核的结合力较弱，很容易脱离轨道，在金属内自由运动，构成由自由电子组成的所谓“电子气”。自由电子不属于某个原子，而是整个金属所共有。原子失去电子后，电荷失去平衡而形成“正离子”。固态金属就是依靠自由电子与正离子之间的吸引力而结合在一起的（如图1-1）。金属原子的这种结合方式，能够说明金属的物理特性。例如，金属的导电性是由于自由电子在很小的电位差影响下就能作定向移动，形成电子流。金属的导热性是借助于自由电子，将金属某一部分受热所获得的能量，迅速传到邻近的正离子，以致整个金属。此外，在金属中，自由电子的运动能使相对移动后的正离子层仍然与自由电子联系在一起，因此金属具有塑性，可以压轧成形。最后，当金属中的自由电子吸收可见光的能量而受到激发后，被激发的电子回到它原来的低能级时，就会发生辐射，而使金属具有光泽。

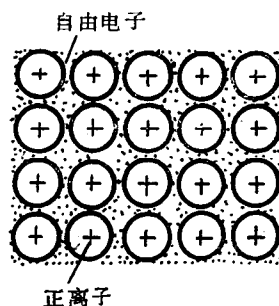


图1-1 金属原子结合示意图

二、金属的晶体结构

金属的上述物理特性，主要表现在固态金属上。在工业上使用的金属，大多数都是固体状态，而一切金属在固态下都是晶体。

所谓“晶体”，就是指其原子（更确切些说是离子）具有规则排列特性的物体。这是晶体与非晶体的根本区别，而非晶体内部的原子是无规则排列的。

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结起来，使之构成一个空间格子，如图 1-2 所示，各联结的交点称为“结点”，结点上的黑点表示各原子中心的位置。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”。晶体或晶格可以认为是由层层晶面堆砌而成的。晶格中各种方向上的原子列叫“晶向”。

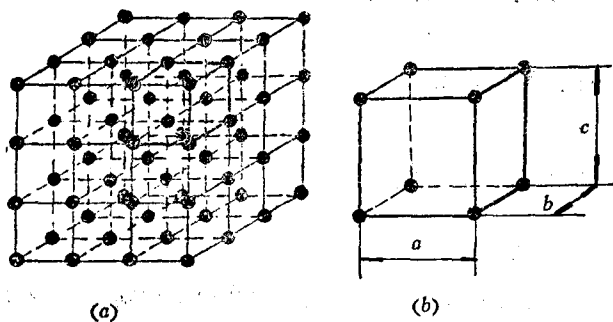


图1-2 简单立方晶格示意图
(a)—晶格 (b)—晶胞

为了简便地说明晶体中原子排列的规律性，可以从其晶格中取一个最基本的几何单元来表达其排列形式的特征，这种最基本的单元称为“晶胞”，如图 1-2(b) 所示。晶胞的各边尺寸 a 、 b 、 c 称为“晶格常数”，其大小常以埃 ($\text{\AA}$) 来度量 ($1 \text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米)。

各种晶体物质因晶格形式及晶格常数不同，所以表现出不同的物理、

化学和机械性能。

在金属中，晶体结构的类型很多，但约有 90% 以上的金属都属于以下三种晶格型式：

1. 体心立方晶格——它的晶胞特征是由八个原子构成一立方体，而在立方体中心尚有一个原子，如图 1-3(a) 所示。属于这种晶体结构的金属有： α 铁、铬、钼、钨、钒等。
2. 面心立方晶格——它的晶胞特征是由八个原子构成一立方体，并且在立方体的六个面的中心处各有一个原子，如图 1-3(b) 所示。属于这类晶格的金属有 γ 铁、铝、铜、镍等。
3. 密排六方晶格——它的晶胞特征是由十二个原子构成一个六方柱体，除在上下两个面中心各有一个原子外，在六方体的中间还有三个原子，如图 1-3(c) 所示。属于这类晶格的金属有铍、镁、锌等。

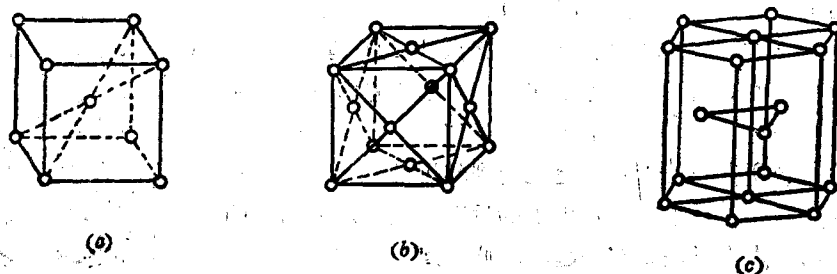


图1-3 典型的金属晶体结构
(a)—体心立方晶格 (b)—面心立方晶格 (c)—密排六方晶格

由以上各种晶格类型可以看出，晶体中不同晶面和晶向上的原子密度是不同的，因而会造成它在不同方向上性能的差异。但在工业金属材料中，通常却见不到它们具有这种各向异性的特征，这是因为以上所述的是理想化的晶体结构，与晶体的实际情况有很大差异。

三、实际金属的晶体结构

如果一块晶体，与上述理想情况一样，其内部的晶格方位排列完全一致，如图 1-4(a)

所示，我们称这块晶体为“单晶体”。但实际的固态金属，除非专门制作，晶体结构都不是单晶体，而是由许多方位不同的小晶体构成，如图 1-4(b) 所示，称为“多晶体”。多晶体中，每个小晶体的外形多为不规则的颗粒状，通常称它们为“晶粒”。晶粒与晶粒间的界面，称为“晶界”。多晶体内存在许多晶格缺陷，这些缺陷，对金属的物理、化学和机械性能都有明显的影响。

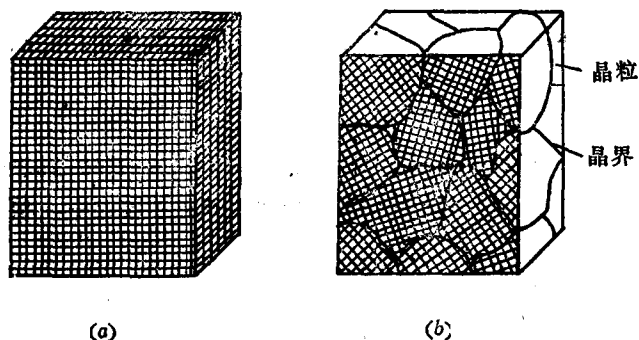


图1-4 单晶体与多晶体的结构示意图
(a)—单晶体 (b)—多晶体

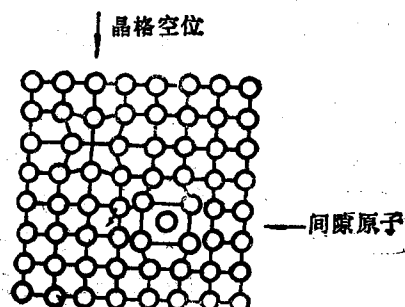


图1-5 点缺陷示意图

实际金属常见的晶格缺陷主要有以下几种形式：

1. 点缺陷

最常见的点缺陷是“晶格空位”和“间隙原子”，如图 1-5 所示。当晶格中某些原子由于某种原因（如热振动的偶然偏差等）脱离其晶格结点而转移到晶格间隙时，便会造成这些点缺陷。由于点缺陷的存在，会使其周围的晶格发生畸变。

2. 线缺陷

线缺陷即晶格中的位错线，或简称“位错”。所谓“位错”可视为晶格中一部分晶体相对于另一部分晶体的局部滑移而造成的结果。晶体滑移部分与未滑移部分的交界线即为位错线。由于晶体中局部滑移的方式不同，可有不同形式的位错。其中比较简单的一种称为“刃形位错”，如图 1-6 所示。沿位错线周围，晶格也产生畸变。

3. 面缺陷

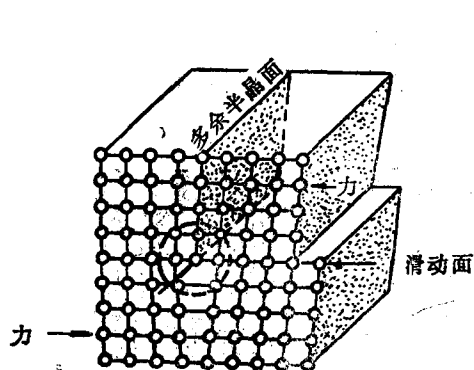


图1-6 刃形位错的示意图

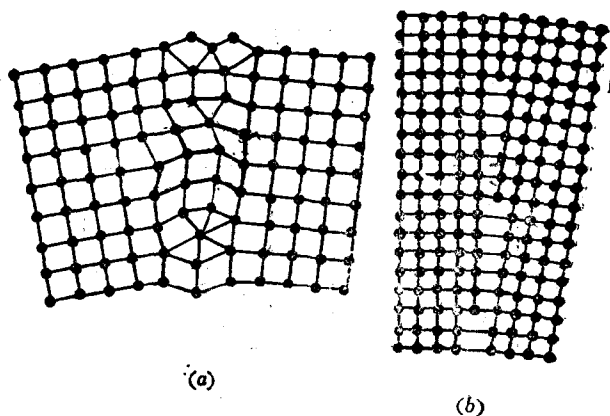


图1-7 晶界(a)及亚晶界(b)示意图

多晶体金属晶粒与晶粒之间，由于结晶方位不同而形成的晶界即属于面缺陷。晶界处原子排列是不规则的。在每个晶粒内部，晶格方位也可能存在微小差别，称为“亚晶界”。亚晶界也是面缺陷。晶界与亚晶界处，由于晶格畸变使变形抗力增加，所以晶界愈多时（即晶粒愈细），金属的强度愈高。图 1-7 为晶界与亚晶界示意图。

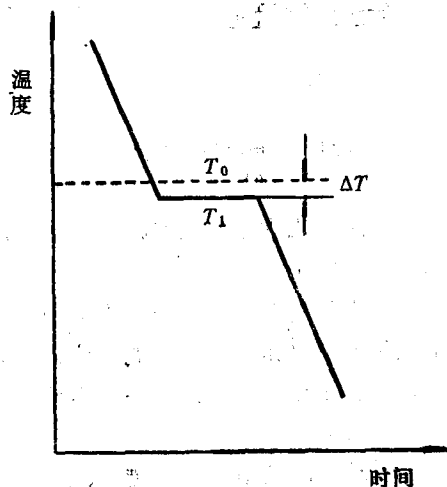
四、金属的结晶

由上述可知，实际金属一般为多晶体结构，并存在各种晶格缺陷。多晶体结构与晶格缺陷的形成与金属凝固时的结晶过程有关。

（一）冷却曲线

金属由液体转变为固体是在一定温度下进行的，这个转变温度称为金属的“结晶温度”。金属的结晶温度可以通过热分析法测定出来。即当金属从液体到固体的冷却过程中，根据温度变化所测得的冷却曲线来确定金属的结晶温度。

金属的冷却曲线如图 1-8 所示。它是表明金属冷却时温度随时间发生变化的关系曲线。曲线上的水平台阶所对应的温度 T_1 即为实际结晶温度， T_0 为金属的理论结晶温度。 $(T_0 - T_1)$ 的差值 ΔT 称为“过冷度”。在实际情况下，必须具有一定的过冷度，金属的结晶过程才能进行。液态金属过冷度的大小，一方面取决于液态金属的本性和纯度，另一方面取决于液态金属的冷却速度。冷却速度越大，则过冷度越大，实际结晶温度越低。



（二）结晶过程

液体金属的结晶是由两个基本过程组成：生出微小的晶体核心（简称晶核）和晶核长大。

图 1-9 示意地说明了金属的结晶过程：开始在液体中某些部位的原子集团先后按晶格类型排列成微细的晶核，如图 1-9(a)；然后各晶核向着不同方向按树枝长大方式结晶成长，如图 1-9(b)；当成长的枝晶与相邻的枝晶接触并彼此阻碍成长时，晶体就向着尚未凝固的部位长去，直到全部凝固为止，如图 1-9(c)；最后形成由很多晶粒组成的多晶体，如图 1-9(d)。

由上述结晶过程可以看到：金属中每颗晶粒是由一个晶核成长形成的。一般结晶过程中，都存在很多晶核，因此，实际金属都是多晶体结构。此外，在结晶过程中，晶核一般只

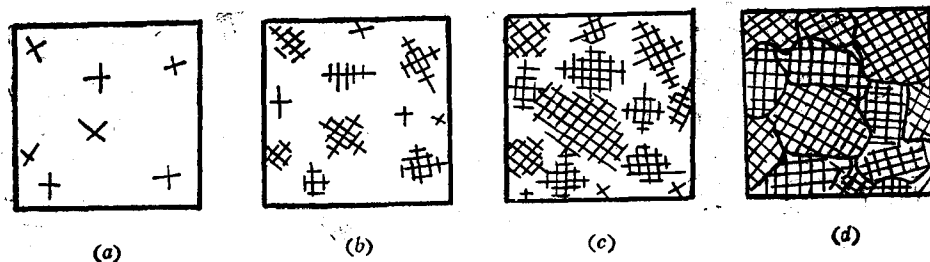


图1-9 液体金属结晶过程示意图

是在最初成长时才有规则的外形，在随后继续生长时，因为受到散热条件、金属中杂质及相邻枝晶相互阻碍等各方面影响，所以最终将形成各种晶格缺陷。

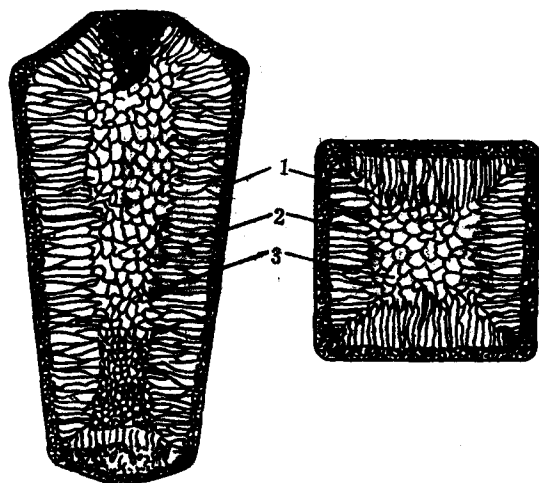


图1-10 铸锭组织示意图

1—等轴细晶区 2—柱状晶区 3—等轴粗晶区

柱状晶区的形成，主要是因为垂直模壁定向散热、模壁温度升高和钢锭冷却速度下降的影响。垂直于模壁的晶粒，不仅向模壁传热较有利，而且它们在此方向的成长相互不受限制，因此，这些晶粒得到优先成长而形成柱状晶区。

3. 等轴粗晶区

柱状晶发展到一定程度，在钢锭中部的液体定向散热作用已不明显，而且心部冷却速度较慢，最后形成较粗大的等轴晶区。

除上述组织不均匀外，钢锭还经常存在各种缺陷：如缩孔、疏松、气孔及成分偏析等。这些缺陷在随后将钢锭轧制成各种钢材时，将直接影响材料性能。锅炉钢材（钢板、钢管等）都是由钢锭轧制而成的，因此，钢锭的组织结构与钢材质量有密切关系。

五、金属的塑性变形与再结晶

如上所述，铸态金属中往往具有晶粒粗细不均、组织疏松等一些缺陷。压力加工可以压合铸造组织内部缺陷并细化晶粒，因此提高了金属的机械性能，所以，工业上的金属材料除一部分直接铸造成型外，大多数要在浇铸成锭后经过压力加工（轧制、锻造等）成各种型材或直接加工成零件。在压力加工过程中，金属将产生塑性变形，金属因塑性变形而引起外形的改变，必然是内部组织结构发生变化的反映。与此同时，将引起金属性能的变化。

（一）金属的塑性变形

金属在外力作用下产生永久变形的过程称为“塑性变形”。金属塑性变形的的基本方式有两种，即“滑移”与“孪生”。孪生不如滑移变形普遍，因此，下面主要通过滑移方式介绍金属的塑性变形及其对组织性能的影响。

所谓“滑移”即晶体的一部分相对于另一部分沿一定晶面发生相对的滑动。图1-11为单晶体塑性变形示意图。图中(a)为晶体未受到外力的原始状态，当晶体受到外力作用时，晶格将发生弹性歪曲，如图1-11(b)所示。此时若将外力去除，则晶体将回复到原始状态，此为弹性变形阶段；若将外力继续增加，使晶格的歪扭程度超过弹性变形阶段，则晶体

（三）金属 锭结构

在实际生产时，金属是在锭模中结晶的，虽然结晶规律与上述情况相同，但由于锭模壁散热条件的变化，使金属锭形成不均匀的组织。图1-10为钢锭的组织示意图。从其剖面的宏观组织中，即可观察到其组织是由三层不同外形的晶粒组成。

1. 等轴细晶区

等轴细晶区的形成，主要是因为钢水刚浇入锭模时，模壁温度较低，表层金属遭到剧烈冷却所造成的。此外，粗糙模壁所起的晶核作用也是这层晶粒细化的原因之一。

2. 柱状晶区

一部分将会相对另一部分发生滑动，如图1-11(c)所示；晶体发生滑动以后，除去外力，晶体的变形不能全部恢复，即产生了塑性变形，如图1-11(d)。必须指出，单晶体金属的晶格在受到正应力作用时，仅发生弹性变形，随后直接过渡到脆性断裂。只有受到切应力作用时才会发生塑性变形，即滑移只能在切应力作用下产生。

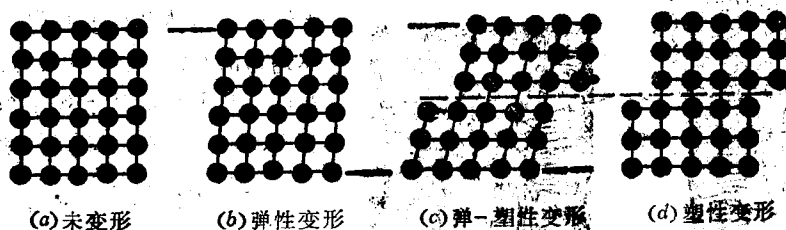


图1-11 单晶体塑性变形过程示意图

大量理论研究证明，上述滑移过程并不是晶体的一部分相对另一部分的刚性滑动，而是由于滑移面上的位错运动而造成的。图1-12所示即为在切应力作用下刃形位错在滑移面上的运动过程。通过一根位错线从滑移面的一侧到另一侧的运动，便造成一个原子间距的滑移。

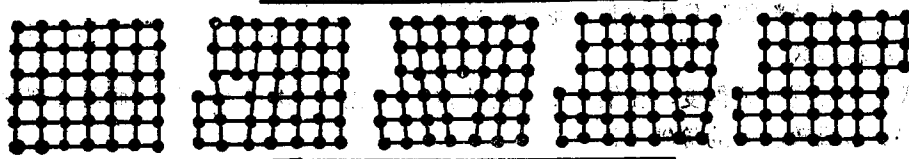


图1-12 通过位错运动而造成滑移的示意图

多晶体金属的实际塑性变形与上述单晶体比较，并没有本质的差别，但由于晶界的存在和每个晶粒中晶格的位向的不同，所以多晶体塑性变形过程要复杂得多。

图1-13为两个晶粒所组成的试样在拉伸时的变形情况。其变形特点是晶界处变形较小。晶界处之所以具有较高的塑性变形抗力，主要是由于此处晶格排列紊乱，杂质原子也往往较多，增大了晶格畸变，使此处滑移时的位错运动阻力较大，因此难以变形。此外，多晶体中各晶粒晶格方位不同也会增大滑移抗力，因任一晶粒的滑移都将受到周围不同晶格位向晶粒的约束。因此，多晶体金属的塑性变形抗力总是高于单晶体，而且金属的晶粒愈细，其晶界总面积也愈大，塑性变形抗力也愈大，即强度与硬度愈高。另外，细晶粒的塑性和韧性也较高，因为晶粒愈细，金属单位体积内的晶粒数愈多，变形时同样的变形量可以分散在更多的晶粒中，所以不致因局部应力集中而过早产生断裂。

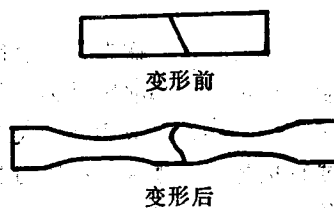


图1-13 两个晶粒的试样在拉伸时的变形

(二) 金属的回复与再结晶

随着变形的发生，金属不仅外形产生变化，其内部晶粒形状也发生改变，晶粒将被拉长（拉伸时）或压扁（压缩时），同时晶粒之间还将发生相对转动。在晶粒内产生一定程度的

滑移区域时,晶粒将破碎成为细碎的亚晶粒,并使晶格产生严重畸变。因此,随着变形量增加,金属的塑性变形抗力将迅速增加,强度、硬度增高,塑性、韧性下降,并产生很大内应力,即形成所谓“加工硬化”现象。加工硬化现象改变了金属的性能,并给进一步加工带来困难。所以,金属经过冷加工产生塑性变形之后,经常都需要退火。即对金属进行一定温度的加热,以消除加工硬化现象。随着加热温度不同,大致可分为回复与再结晶两个阶段。

1. 回复

当加热温度不高时,金属原子的扩散能力较低,不能引起显微组织变化,但晶格畸变大大减小,从而使内应力明显下降,金属的物理、化学及机械性能有一定程度的恢复,这一过程称为“回复”,如图1-14(b)所示。

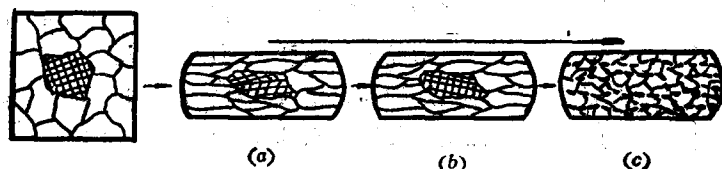


图1-14 金属回复与再结晶示意图

(a)—变形 (b)—回复 (c)—再结晶

2. 再结晶

经过冷加工产生加工硬化的金属,当加热温度继续升高时,由于原子活动能力增大,金属的显微组织将发生变化,由破碎的、拉长的或压扁的晶粒变成均匀细小的等轴晶粒,如图1-14(c)所示。这一过程称为“再结晶”。经过再结晶后,金属的强度、硬度显著下降,而塑性、韧性显著升高,所有机械、物理性能都恢复到变形前的数值。

再结晶时,如果温度过高或加热时间过长,金属再结晶后的晶粒就会继续长大,这时不仅金属的强度下降,而且塑性和韧性也降低。因此必须注意控制再结晶温度。

对于工业用金属,开始再结晶温度主要与金属的熔点有关,其大致关系如下:

$$T_{\text{再结晶}} = (0.35 \sim 0.4) T_{\text{熔化}}$$

式中: $T_{\text{熔化}}$ ——金属的熔化温度, K 。

§ 1-2 合金的相结构

纯金属虽然具有较高的导电、导热等性能,但是它们的强度和硬度一般都较低,而且价格较高,因此,在工业上大量使用的都是合金。

所谓“合金”是指两种或两种以上的金属或金属与非金属熔合在一起,并具有金属特性的物质。组成合金所必需的并能独立存在的物质称为“组元”。在合金系统中,某一晶体结构相同、化学成分均匀、并有明显界面与其它部分区分开来的部分称为“相”。

一、合金的相结构

合金的结构一般比纯金属复杂,其组织结构(相结构)可分为以下三类:

(一) 固溶体

两种或两种以上的化学元素,在液态时互相溶解,在固态时也互相溶解构成单一的均匀

物质称为“固溶体”。其中含量较多的元素称为“溶剂”，含量较少的元素称为“溶质”。固溶体的晶格与溶剂元素的晶格相同。

按照溶质原子在溶剂原子中不同的配置情况，可将固溶体分为以下两类：

1. 置换固溶体——当溶质原子代替一部分溶剂原子占据着溶剂晶格中的某些结点位置时，所形成的固溶体称为“置换固溶体”。在溶剂与溶质原子直径差别较小时，易于形成置换固溶体。

2. 间隙固溶体——当溶质原子在溶剂晶格中并不占据晶格结点的位置，而是嵌入结点之间的空隙时，所形成的固溶体称为“间隙固溶体”。在溶质元素的原子直径比溶剂元素的原子直径小得多时，易于形成间隙固溶体。

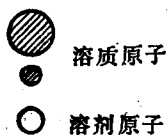
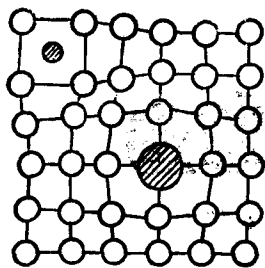


图1-15 固溶强化示意图

当溶质含量极少时，固溶体的性能与溶剂金属基本相同。随着溶质含量的升高，固溶体的性能将明显发生变化。一般情况是：强度、硬度逐渐增高，而塑性、韧性有所下降。这种通过溶入某种溶质元素形成固溶体，而使金属的强度、硬度升高的现象称为“固溶强化”。产生固溶强化的原因是由于溶质原子与溶剂原子直径有差别，因此在溶质原子附近产生晶格畸变的结果（如图1-15）。固溶强化是提高金属材料室温强度和高温蠕变抗力的重要途径之一。

(二) 金属化合物

合金中的元素按一定的原子比数结合，并形成具有一定程度的金属性质的新物质称为“金属化合物”（在合金中，由于原料或熔炼过程残留的没有金属性质的化合物，如 FeS、MnS 等，称为非金属夹杂）。

金属化合物一般具有与组成元素完全不同的、复杂的晶格结构，熔点高、硬而脆，所以，当合金中出现金属化合物时，通常能提高合金的强度、硬度和耐磨性，但会降低塑性和韧性。金属化合物也是各种金属材料的重要强化相。

(三) 机械混合物

组成合金的各组元，在固态下不能相互溶解，又不能形成化合物时，可以以混合方式形成机械混合物。在机械混合物中，各组元保持它们原来的晶体结构和性能。机械混合物既可以是纯金属、固溶体或化合物各自的混合物，也可以是它们之间的混合物。

合金在结晶后，既可以形成单相的固溶体组织，也可以得到单相的化合物组织，但更为常见的是得到多相组织。固态合金晶体相的组成（合金的显微组织），可以通过金相显微镜观察到，通常称为“金相组织”。

二、二元合金相图的建立

不同成分的合金，其组织结构不同，因此性能也不同。为了研究不同成分的合金在不同温度下的组织形成及其规律，一般运用合金相图来进行分析。

相图又称“平衡图”或“状态图”。它是以温度为纵坐标，以成分为横坐标，表明合金系中各个合金的组织与温度、成分之间关系的图解。

相图是通过实验方法得到的，最常使用的方法是热分析法。现以 Fe—Fe₃C 合金为例介绍建立相图的具体步骤。为简单起见，仅配制极少数合金建立 Fe—Fe₃C 状态图的左下方一

部分图形。

1. 配制由铁和碳组成的含碳量小于 1.6% 的五种成分铁碳合金：

合金①	0 %C	100 %Fe
合金②	0.4 %C	99.6 %Fe
合金③	0.8 %C	99.2 %Fe
合金④	1.2 %C	98.8 %Fe
合金⑤	1.6 %C	98.4 %Fe

2. 作出每个合金的冷却曲线（为了简便，只作 1100℃ 以下的冷却曲线），然后找出各冷却曲线上的临界点（即停歇点和转折点），如表 1-1 所示。

表 1-1 各成分铁碳合金的临界点

合 金 编 号	成 分	上临界点 (°C)	下临界点 (°C)
①	0 %C 100 % Fe	910	—
②	0.4 %C 99.6 % Fe	780	723
③	0.8 %C 99.2 % Fe	—	723
④	1.2 %C 98.8 % Fe	870	723
⑤	1.6 %C 98.4 % Fe	1000	723

3. 作一个以温度为纵坐标，成分为横坐标的直角坐标系统，将每个合金冷却曲线上的临界点分别标在各合金的成分垂线上。

4. 将各成分垂线上具有相同意义的点连接成线，即得所需要的相图，如图 1-16 所示。

配制的合金数目愈多，测温愈精确，冷却速度愈缓慢，则所测绘的相图愈精确。

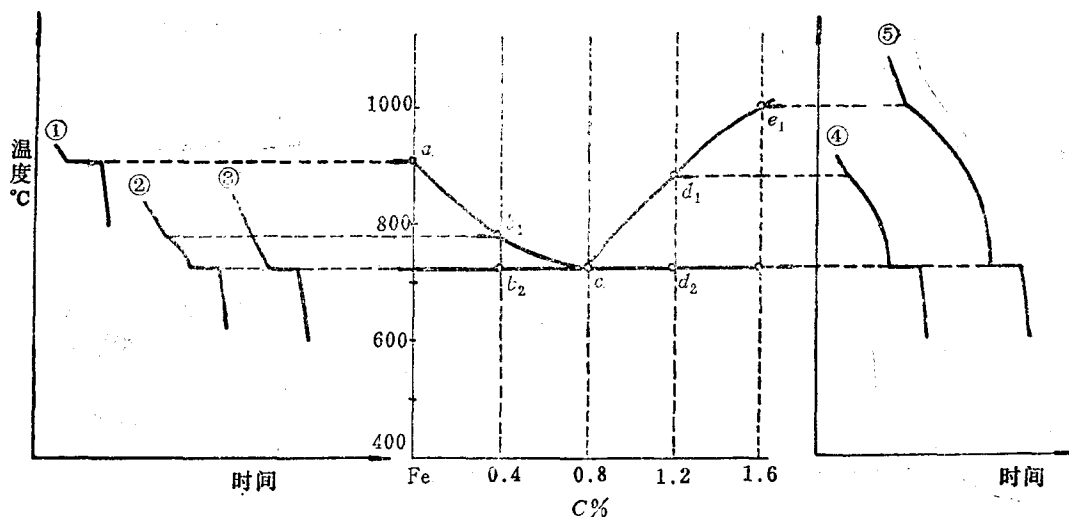


图 1-16 部分 Fe—Fe₃C 相图建立示意图