

国家机械工业委员会统编

# 金相组织基础知识

《机械工人技术理论培训教材》

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

机械工人技术理论培训教材

---

# 金相组织基础知识

(中级物理金相实验工适用)

国家机械工业委员会统编



 机械工业出版社

本书共 10 章。内容包括黑色金属、有色金属、粉末冶金、硬质合金、高温合金、铸铁, 以及焊接接头和化学热处理的金相显微组织形态和特征。为了能形象逼真地说明问题, 全书附图 200 多幅, 其中 2/3 为金相照片, 对实际工作有很大的参考和指导作用。

本书是中级物理金相实验工培训教材, 也可供大中专院校师生及有关工程技术人员参考。

本书由国家机械工业委员会上海材料研究所舒文芬、强明道、陈金宝、陈善珠, 上海工具厂方成水, 上海重型机器厂张启达, 上海市机械制造工艺研究所高汉文, 上海汽车拖拉机公司施友方, 中国船舶工业总公司第十一研究所唐翠宝编写。由国家机械工业委员会上海材料研究所李炯辉、陈永昌, 上海合金球铁厂闻锡炎审稿。

## 金相组织基础知识

(中级物理金相实验工适用)

国家机械工业委员会统编

\*

责任编辑: 崔世荣 版式设计: 罗文莉  
封面设计: 林胜利 方 芬 责任校对: 李广孚

\*

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)

机械工业出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·新华书店经销

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张 10<sup>1</sup>/<sub>4</sub>·字数 225 千字

1988 年 12 月北京第一版·1988 年 12 月北京第一次印刷

印数 00,001—12,600·定价 4.00 元

\*

ISBN 7-111-01113-9/TG

1R

金相组织基础

## 前 言

1981年,原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》,确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此,组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲(试行)》,编写了相应的教材,有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作,初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况,取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准(通用部分)》进行了全面修订,原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求,而且缺少高级部分;编写的教材,由于时间仓促、经验不足,在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此,原机械工业部根据新《标准》,重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》(初、中、高级),于1987年3月由国家机械工业委员会颁发,并根据培训计划、大纲的要求,编写了配套教材149种。

这套新教材的编写,体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神,坚持了文化课为技术基础课服务,技术基础课为专业课服务,专业课为提高操作技能和分析解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上,力求以

---

基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本知识，注重能力培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者，以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易；教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会  
技工培训教材编审组

1987年11月

# 目 录

## 前言

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第一章 金属学基础知识 .....             | 1  |
| 第一节 纯金属的结构与结晶 .....           | 1  |
| 第二节 合金的结构与结晶 .....            | 16 |
| 第三节 铁-碳平衡图 .....              | 26 |
| 复习题 .....                     | 30 |
| 第二章 结构钢的金相组织 .....            | 31 |
| 第一节 钢中非金属夹杂物的金相检验 .....       | 31 |
| 第二节 结构钢的基本显微组织 .....          | 44 |
| 第三节 结构钢冷、热加工后的显微组织 .....      | 47 |
| 第四节 结构钢的金相检验 .....            | 53 |
| 复习题 .....                     | 59 |
| 第三章 工具钢和轴承钢的金相组织 .....        | 60 |
| 第一节 碳素工具钢的金相检验 .....          | 60 |
| 第二节 合金工具钢的金相检验 .....          | 65 |
| 第三节 高速工具钢的金相检验 .....          | 72 |
| 第四节 铬轴承钢的金相检验 .....           | 80 |
| 复习题 .....                     | 89 |
| 第四章 不锈钢和耐热钢的金相组织 .....        | 90 |
| 第一节 金属腐蚀的基本概念 .....           | 90 |
| 第二节 合金元素的作用 .....             | 91 |
| 第三节 不锈钢及耐热钢的分类和组成相的金相检验 ..... | 96 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第四节 不锈钢和耐热钢的显微组织侵蚀 ..... | 114 |
| 复习题 .....                | 118 |
| 第五章 铸铁的金相组织 .....        | 119 |
| 第一节 铁-碳合金双重相图 .....      | 119 |
| 第二节 铸铁的石墨化 .....         | 123 |
| 第三节 铸铁的结晶 .....          | 127 |
| 第四节 灰铸铁的金相检验 .....       | 129 |
| 第五节 可锻铸铁的金相检验 .....      | 137 |
| 第六节 球墨铸铁的金相检验 .....      | 141 |
| 第七节 蠕墨铸铁的金相检验 .....      | 145 |
| 复习题 .....                | 147 |
| 第六章 铜、铝及其合金的金相组织 .....   | 148 |
| 第一节 铜及其合金的金相检验 .....     | 148 |
| 第二节 铝及其合金的金相检验 .....     | 171 |
| 第三节 失效分析实例 .....         | 186 |
| 复习题 .....                | 191 |
| 第七章 高温合金的金相组织 .....      | 192 |
| 第一节 高温合金的分类和热处理 .....    | 192 |
| 第二节 高温合金中相的分类与显微组织 ..... | 203 |
| 第三节 高温合金冶金质量的金相检验 .....  | 214 |
| 第四节 高温合金相的鉴定 .....       | 217 |
| 复习题 .....                | 226 |
| 第八章 粉末冶金的金相组织 .....      | 227 |
| 第一节 铁基粉末冶金的金相检验 .....    | 227 |
| 第二节 铜基粉末冶金的金相检验 .....    | 240 |
| 第三节 硬质合金的金相检验 .....      | 242 |
| 复习题 .....                | 251 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第九章 钢的表面渗层金相组织 .....     | 253 |
| 第一节 渗碳处理后的金相检验 .....     | 253 |
| 第二节 碳氮共渗处理后的金相检验 .....   | 269 |
| 第三节 渗氮处理后的金相检验 .....     | 275 |
| 第四节 渗硼处理后的金相检验 .....     | 288 |
| 第五节 渗硫及渗其他金属后的金相检验 ..... | 290 |
| 复习题 .....                | 294 |
| 第十章 焊接接头的金相组织 .....      | 295 |
| 第一节 焊接过程的特点 .....        | 295 |
| 第二节 焊接热影响区的组织 .....      | 297 |
| 第三节 焊缝区的金相组织 .....       | 306 |
| 第四节 常见焊接接头的缺陷 .....      | 315 |
| 复习题 .....                | 319 |

# 第一章 金属学基础知识

金属学是研究金属和合金的成分、组织、性能及其变化规律的一门科学。学习金属学基础知识，重点在于掌握组织、组织的形成及其变化规律等方面的基本概念和基本原理，因为这是物理金相实验工借以了解各种金属材料的成分、热处理、组织与性能之间关系的基础。

本章的主要内容是：金属及合金的结构和结晶方面的基础知识；合金的基本组织及状态图；有关铁-碳平衡图的一些基本知识。

## 第一节 纯金属的结构与结晶

### 一、纯金属的晶体结构

金属晶体是由原子在空间严格按照一定的规则周期性重复排列所构成的，这是把晶格中的原子排列看成是绝对完整的。其实这是一种完全理想化的晶体结构，因此被称为理想晶体。但在实际金属晶体中，原子的排列不可能这样规则和完整。在晶体内部，由于种种原因，在局部区域或局部地带内原子的规则排列往往受到干扰和破坏，形成了各种形式的晶体缺陷。因此，实际晶体是以结构的规则排列为主，兼有不规则排列，这就是实际金属晶体结构的特点。

金属晶体中缺陷的种类较多，根据晶体缺陷的几何形态特征，可以将它们分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

点缺陷：是指长、宽、高的尺寸都很小（相当于原子的尺寸）的缺陷，包括空位、间隙原子、杂质或溶质原子以及由

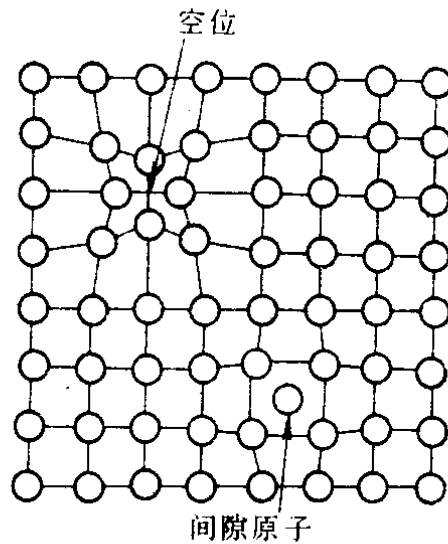
---

它们组合而成的复合点缺陷。

**线缺陷:**是在两个方向上(晶体的某一个平面上)的尺寸很小, 第三个方向上的尺寸相对很大的缺陷, 是指各类位错。其中较简单的有刃型位错和螺型位错。

**面缺陷:**是在两个方向上尺寸很大, 而第三个方向上尺寸很小的缺陷。有晶界、亚结构、相界、孪晶界和堆垛层错等。

1. 空位和间隙原子 金属晶体中的原子应处在晶格的结点上。但在实际金属晶体结构



中, 并非每个结点都 图 1-1 金属晶体中的空位和间隙原子有原子占据, 而在某些应该占据原子而实际空缺的结点位置称为空位, 见图 1-1。

晶格内部除了原子占有绝大部分体积外, 还有空隙存在, 其中某些尺寸较大的空隙有可能被原子挤入, 这种占据晶格空隙的原子称为间隙原子, 见图 1-1。

在空位和间隙原子的附近, 由于原子间作用力的平衡被破坏, 使其周围的其他原子发生靠拢(如空位附近的原子)或撑开(如间隙原子附近的原子)的现象, 这种变化称为晶格畸变, 见图 1-2。

2. 位错 位错是指在晶体中某处一系列, 或若干列原子, 发生了有规律的错排现象。它是一种“线型”的不完整结构。位错的形式很多, 比较简单的两种是刃型位错和螺型位错。

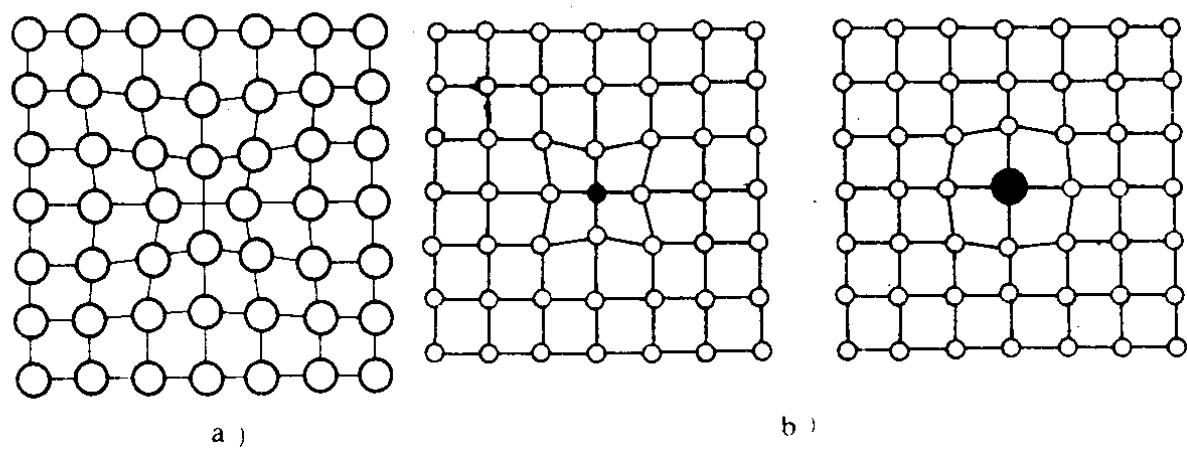


图 1-2 点缺陷附近的晶格畸变

a)空位附近的畸变 b)间隙原子附近的畸变

(1)刃型位错 见图 1-3，在一个完整晶体的某一晶面(图中为 ABC 面)以上，多出了一个原子面，这个多余的原子面象刀刃一样，沿 EF 线垂直插入，使晶体中位于 ABC 面上下两部分的晶体之间产生了错排现象，因而称为刃型位

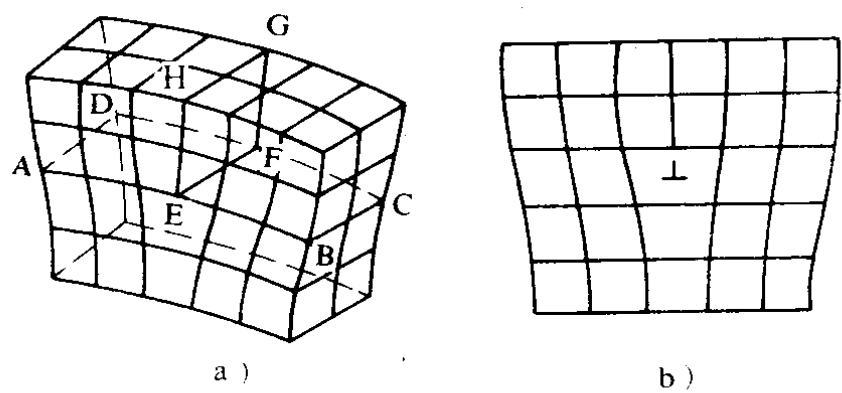


图 1-3 刃型位错示意图

a)立体模型 b)平面图

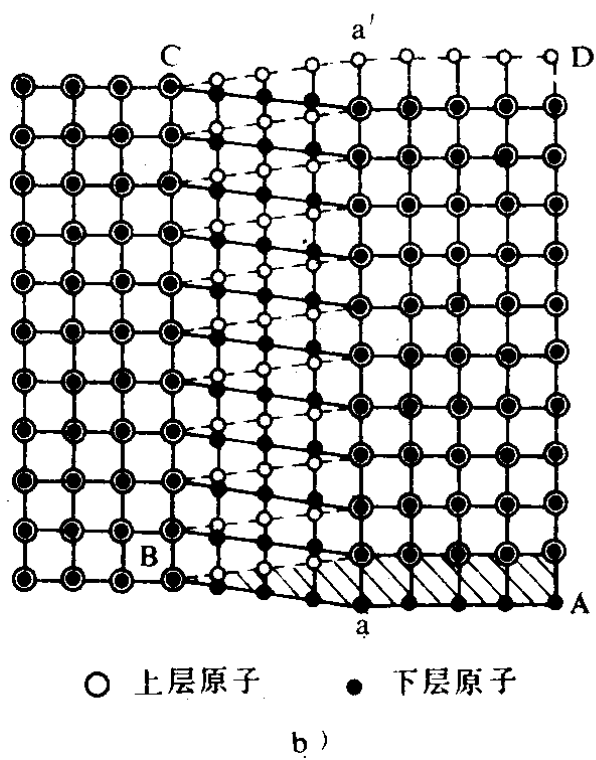
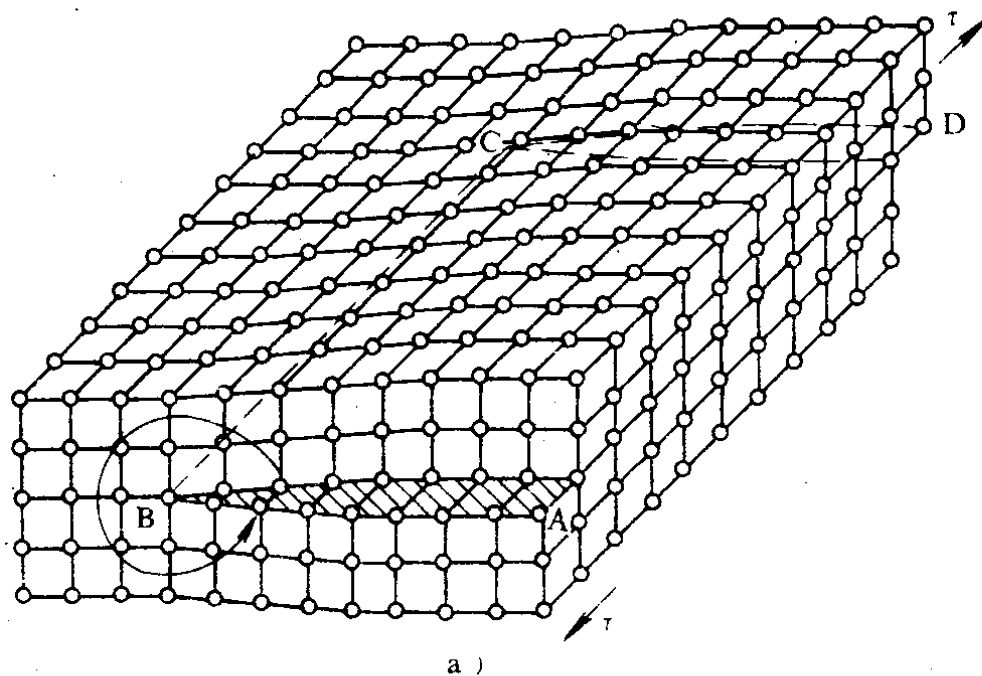


图 1-4 螺型位错示意图

a)立体图   b)俯视图

错。刃型位错又被分成正刃型位错和负刃型位错两种。即在晶体上半部分出现多余原子面的刃型位错，称为正刃型位错，符号为“ $\perp$ ”；多余的原子面处于晶体下半部的位错，称为负刃型位错，符号为“ $\neg$ ”。

产生位错的边缘线 EF 称为位错线。在位错线附近，由于错排使晶格畸变，造成了一个应力集中区。

(2)螺型位错 见图 1-4a，如果将晶体沿 ABCD 面局部地切开，并使这上下两部分晶体相对地移动(即“撕开”)一个原子的距离，然后上下接合起来，见图 1-4b。由图中可进一步看出 aa' 右边晶体的上层原子与下层原子相对移动了一个原子间距，而在 BC 和 aa' 之间形成了一个上下原子不相吻合的过渡区域，这里的原子平面被扭成螺旋面，这种过渡地带即螺型位错。螺型位错的中心线(BC 线)称为位错线(有时用符号“S”表示)，在原子面上每绕位错线一周就推进了一个晶面间距。

根据螺旋面旋转的方向，螺型位错分为右螺旋位错(图 1-4)和左螺旋位错两种。

在螺型位错附近，晶格发生了严重畸变，因此，位错附近是应力集中区。

3. 晶粒 由许多晶轴取向相同的晶胞所组成，有边界将它们之间

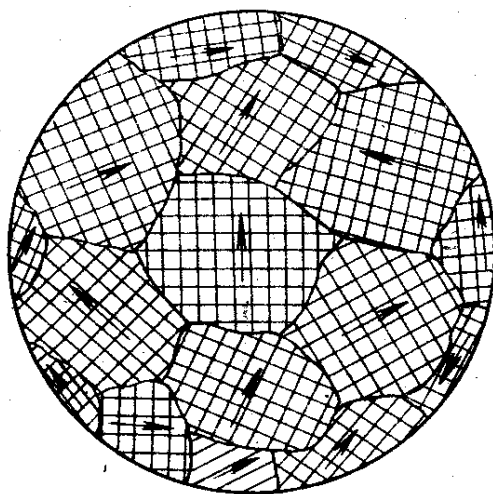


图 1-5 多晶体中各晶粒的位向示意图  
相分开的小块单晶体称为晶粒。晶粒在光学金相显微镜下，

往往呈具有边界的不规则几何外形的颗粒状晶体。

4. 晶界 工业上使用的金属材料，绝大部分是多晶体，多晶体是许多晶粒的集合体。多晶体中不同晶粒之间的交界面称为晶界。由于各晶粒的位向不同(即各晶粒的晶轴在空间的位向是不同的)，见图 1-5。因此，其原子排列的规律性在相互交界处(即晶界)就无法统一，只能从一个位向逐步过渡到另一个位向，见图 1-6a。可见，晶界实际上是不同位向晶粒之间的过渡层。晶界上的原子处于两种不同位向晶格的折衷位置，见图 1-7。

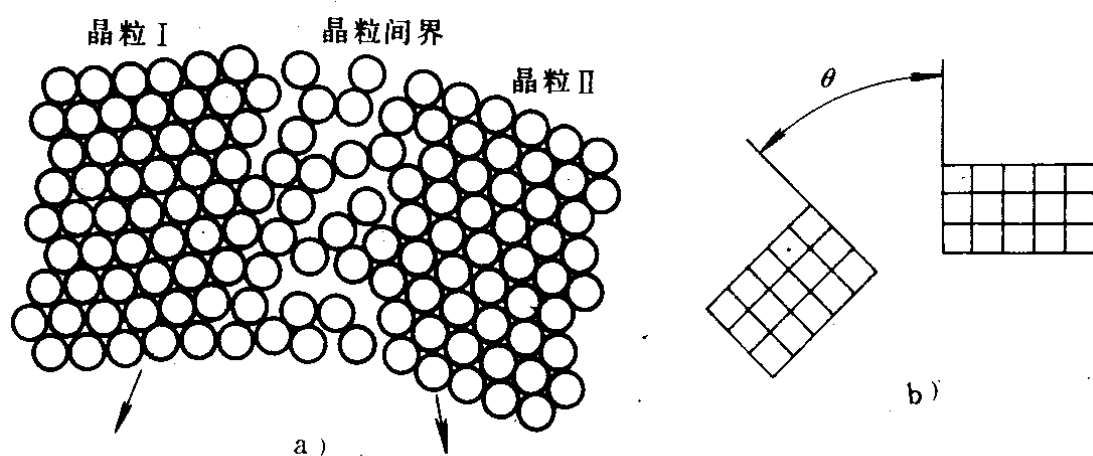


图 1-6 晶界的过渡结构示意图

晶界的宽度，取决于相临晶粒之间的位向差以及金属的纯度。位向差越小，纯度越高，晶界就越薄。纯金属的晶界宽度一般只有几个原子厚，当金属中含有杂质时，由于杂质常富集于晶界处，因此晶界将加宽。

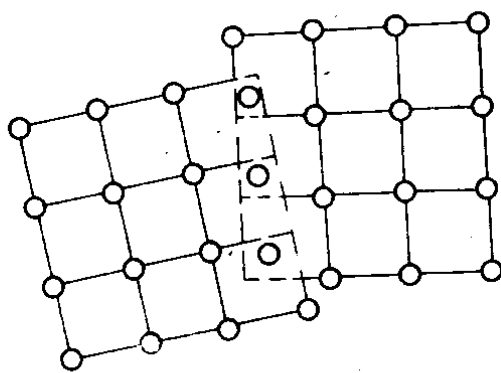


图 1-7 晶界层内原子排列的折衷位置

相邻晶粒之间位向差的大小用  $\theta$  角表示，见图 1-6b。实际使用的金属材料，相邻晶粒间的位向差一般都大于  $10^\circ$ 。这种晶界，被称为大角度晶界；另一种位向差较小 ( $\theta < 10^\circ$ ) 的晶界，称为小角度晶界。金属多晶体的晶界一般都属于大角度晶界，各晶粒的位向差大多在  $30^\circ \sim 40^\circ$ 。

由于晶界是具有畸变大和有较大晶界能的特殊结构，因此，金属的晶界都具有以下几方面的特性：

(1)晶界的能量较高，原子处于不稳定状态，使金属在腐蚀环境中，晶界的腐蚀速度往往比晶粒内部的腐蚀速度要快。利用这一特性，在金相分析中，常用化学试剂侵蚀(不锈钢可用电解侵蚀)试样的抛光表面，使晶界首先被腐蚀成凹槽，从而在显微镜下观察到黑色的晶界，显露出金属组织形貌特征。但是另一方面，由于晶界容易腐蚀，因此在进行失效分析时，应对金属零件可能由于受到晶界腐蚀而造成开裂的情况予以足够的重视。

(2)较高的晶界能有自发地向低能状态转化的趋势，而晶粒长大和晶界的平直都能减小晶界的总面积，从而降低晶界的总能量。由于温度升高，原子动能增大，就会促使晶粒长大。这就是钢在热处理时，奥氏体的晶粒会随着温度的升高而长大的原因。此外，温度越高，原子的动能越大，就越有利于晶粒的长大和晶界的平直化，所以在测定钢的本质晶粒度时，所选择的试验温度规定在  $930^\circ\text{C}$  以上。

(3)晶界处的原子偏离了正常的平衡位置，它具有较高的动能，使得晶界的熔点较低。因此，金属总是从晶界上先开始熔化。

(4)晶界处原子排列不规则，并且有较多空位存在，因

此, 原子沿晶界的扩散速度要比晶粒内部快。

(5) 晶界具有较高的能量, 所以在发生相变时, 新相往往首先在母相的晶界上形核。原始晶粒越细, 晶界越多, 新相的晶核也越多。为了获得细晶组织, 热处理的加热温度不宜太高。

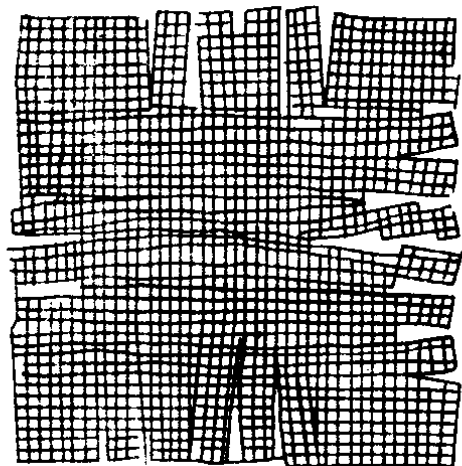


图 1-8 亚结构示意图

(6) 晶界处的原子处于畸变状态, 在常温下, 对金属的塑性变形有阻碍作用, 因此晶界比晶粒内的强度和硬度高。可见晶粒越细, 畸变区域越大, 金属的强度、硬度越高。

(7) 晶界处原子排列不规则, 晶界的电阻高于晶内。

5. 亚结构和亚晶界 实际金属晶粒内部, 存在着许多尺寸很小、位向差也很小(一般是几十分到  $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ ) 的小晶块, 相互嵌镶而成一颗晶粒。这些小晶块称为亚结构或亚晶、嵌镶块, 见图 1-8。在亚结构内部, 原子的排列位向是一致的。

相邻亚结构间的边界称为亚晶界, 它是由一系列刃型位错组成的小角度晶界。亚晶界附近的原子排列不规则, 存在晶格畸变和较高的能量。

## 二、纯金属的结晶

金属材料通常都需要经过冶炼和铸造, 因此要经历由液态变为固态的凝固(结晶)过程。了解金属结晶的过程及规律, 对于控制铸件的内部组织和性能, 是十分重要的。同

时，金属的结晶过程也是一种重要的相变过程。

1. 纯金属的结晶 固态金属是通过熔融的金属液体结晶而得到的。当液态金属冷却到该金属的凝固温度以下时，液体中就开始结晶。首先，在液体中形成晶核，然后晶核再逐渐长大成为晶粒。液态金属结晶就是通过形核及长大这两个基本过程进行的。这两个过程不断地在液体中不同的地方同时并进，直至液体全部结晶为固体。

(1)过冷是金属结晶的条件 纯金属结晶是在一个恒定温度下进行的，这个温度就是该金属的凝固温度，也是该金属的熔化温度。每种纯金属都有自己的结晶温度，即其理论结晶温度。但是，液态金属冷却到理论结晶温度时并不发生结晶，必须继续冷却到某一个温度时才开始结晶，这种现象称为结晶过程的过冷。实际结晶温度与理论结晶温度之差称为过冷度。过冷度的大小与冷却速度、金属的性质以及纯度等因素有关。对于某一种金属而言，冷却速度越大，过冷度也越大。因此，过冷是结晶的动力。过冷是金属结晶的必要条件。

(2)晶核的形成 在液态金属的内部，存在着许多体积微小的有规则排列的原子团。这种原子团时聚时散，是不稳定的，它们就是液态金属中可能形成结晶核心的胚芽，称为晶胚。晶胚的存在，为液态金属结晶的形核创造了结构条件。在过冷的条件下，液态金属的晶胚得到了结晶的动力，从而逐渐长大，形成晶核。

晶核的形成过程简称为形核。形核有两种方式。第一种形核方式，是在匀一的纯金属液体内部，由许多体积微小的原子团直接萌生出晶核，这种形核方式称为自发形核，又称为匀质形核。第二种形核方式，是由于某种原因造成金属液体