

# 金属组织 性能和热处理

〔英〕

D. J. 戴维斯  
L. A. 奥尔门 著

陈行康 黄德山 译

杨承杰 译校

中国科学技术出版社

# 金属组织、性能和热处理

[英] D.J.戴维斯 著  
L.A.奥尔门

陈行康 黄德山 译

杨承杰 译校

中国科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书主要论述金属的组织结构、状态、形变强化的基本原理；金属材料包括黑色和有色金属的成分、组织结构和机械性能的关系；从理论和实践角度讨论了热处理过程；并简要介绍了金属宏观、微观检验、机械性能测试和无损检测等方面的原理和方法。本书在每章后附有练习题，以便读者巩固所学知识。全书简明扼要、重点突出，注意理论和实践的结合。可供材料科学及工程专业的师生、技术人员学习参考。

## 金属组织性能和热处理

英] D.J.戴维斯 著  
L.A.奥尔门

陈行康 黄德山 译  
杨承杰 译校

中国科学技术出版社出版(北京海淀区学院南路86号)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
北京密云县印刷厂印刷

开本：850×1168 毫米1/32 印张：7 字数：200 千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷

印数：1—2000册 定价：7.80元

ISBN 7-5046-0224-8/TF·6

## 译 者 的 话

本书译自D.J.Davies和L.A.Oelmann著的《金属组织、性能和热处理》(The Structure, Properties and Heat Treatment of Metals) 1983年版。全书主要论述金属的组织结构、状态图、形变强化的基本原理；金属材料（黑色和有色金属）的成分、组织结构和机械性能的关系；从理论和实践角度讨论了热处理过程；并简要介绍了金属宏观、微观检验、机械性能测定和无损检测等方面的原理和方法。全书简明扼要，重点突出，注意理论和实践的结合。每章后面附有练习题，以便读者巩固所学的知识。

本书对于需要了解金属本质的工程技术人员是一本较合适的入门书，可供材料科学及工程专业的师生作为教学参考用书，亦可作为冶金、铸造及机械制造专业的工程技术人员学习参考。

全书由陈行康、黄德山同志翻译，杨承杰同志译校。书中的影线图由尹其双同志绘制，在此表示衷心感谢。

由于译者水平所限，加之时间仓促，译文不免有不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

译 者

1988年冬

## 序 言

本书是在技术教育中基础知识发生重大变化的前提下写成的一本教科书。它简单而有成效地论述了金属材料的基本原理。

本书可作为从事实践的工程技术人员为适应目前工作需要了解金属材料本质或需进一步深入学习的一本入门书。特别是对于未来从事金属冶炼、铸造技术、材料科学、机械制造工程技术工作的大学生阅读本书将得益非浅。

本书主要论述黑色和有色合金的组织结构与性能的关系，并从理论和实践角度讨论了热处理过程，书中最后一章介绍了无损检测的原理，全书简明扼要、重点突出，使用的曲线、图表、照片说明力强。

作者对提供插图的许多单位表示感谢，特别要感谢协助完成本书出版的单位。作者也衷心感谢 Richar Clark, Ian Rodger 和 David Willis 制备许多试样和照片，以及 Irene Moverly 打印了大量原稿。

D.J.Davies and L.A.Oelmann

# 目 录

|                        |      |
|------------------------|------|
| <b>第一章 金属结构</b>        | (1)  |
| 1.1 金属晶性               | (1)  |
| 1.2 晶粒和晶界              | (2)  |
| 1.3 形核和枝晶长大            | (3)  |
| 1.4 凝固条件对结构和性能的影响      | (4)  |
| 1.5 铸造金属中的缺陷           | (5)  |
| <b>第二章 金属材料宏观和微观检验</b> | (9)  |
| 2.1 宏观检验               | (9)  |
| 2.2 硫印试验               | (11) |
| 2.3 微观检验               | (11) |
| 2.4 金相显微镜              | (17) |
| 2.5 显微照相               | (21) |
| <b>第三章 金属机械性能</b>      | (27) |
| 3.1 硬度和硬度试验            | (27) |
| 3.2 抗拉强度               | (34) |
| 3.3 拉伸试验               | (40) |
| 3.4 安全因子               | (45) |
| 3.5 冲击强度及其试验           | (46) |
| <b>第四章 金属其它机械性能</b>    | (53) |
| 4.1 蠕变                 | (53) |
| 4.2 疲劳                 | (57) |

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| 4.3 其它性能试验.....               | (62)        |
| <b>第五章 金属变形和退火.....</b>       | <b>(66)</b> |
| 5.1 金属在变形中的弹性和塑性行为.....       | (66)        |
| 5.2 金属结构中的缺陷.....             | (66)        |
| 5.3 塑性变形机理.....               | (67)        |
| 5.4 多晶体金属.....                | (68)        |
| 5.5 冷形变加工影响.....              | (70)        |
| 5.6 冷形变加工材料的退火.....           | (70)        |
| 5.7 热形变加工.....                | (73)        |
| <b>第六章 平衡状态图.....</b>         | <b>(76)</b> |
| 6.1 冷却曲线.....                 | (76)        |
| 6.2 平衡状态图.....                | (77)        |
| 6.3 固溶体合金.....                | (78)        |
| 6.4 具有无限固溶度的二元合金平衡状态图.....    | (80)        |
| 6.5 表示在固态时完全不溶的二元合金平衡状态图..... | (82)        |
| 6.6 固态下部分互溶的平衡状态图.....        | (85)        |
| 6.7 共析反应.....                 | (86)        |
| 6.8 中间相.....                  | (87)        |
| 6.9 包晶平衡状态图.....              | (89)        |
| 6.10 二元合金平衡状态图解释规则.....       | (91)        |
| <b>第七章 碳钢和铸铁的组织与性能.....</b>   | <b>(93)</b> |
| 7.1 铁的同素异构体.....              | (93)        |
| 7.2 铁—碳状态图.....               | (94)        |
| 7.3 不同含碳量的碳钢缓慢冷却过程.....       | (96)        |
| 7.4 碳钢.....                   | (98)        |
| 7.5 碳钢中其它化学元素的作用.....         | (100)       |
| 7.6 碳钢的分类和应用.....             | (102)       |

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| 7.7 铸铁·····              | (104)        |
| 7.8 铸铁显微组织·····          | (108)        |
| 7.9 灰口铸铁和白口铸铁的分类和应用····· | (111)        |
| 7.10 铸铁的胀大·····          | (112)        |
| 7.11 可锻铸铁的生产·····        | (113)        |
| <b>第八章 热处理·····</b>      | <b>(119)</b> |
| 8.1 概述·····              | (119)        |
| 8.2 炉子气氛·····            | (120)        |
| 8.3 热处理工艺·····           | (122)        |
| 8.4 碳钢热处理·····           | (127)        |
| 8.5 铸钢件热处理·····          | (133)        |
| 8.6 钢的表面硬化处理·····        | (135)        |
| 8.7 淬透性、质量效应和限制截面·····   | (143)        |
| 8.8 奥氏体等温转变·····         | (145)        |
| <b>第九章 热处理炉·····</b>     | <b>(152)</b> |
| 9.1 燃料·····              | (152)        |
| 9.2 燃料的选择·····           | (153)        |
| 9.3 连续式炉子·····           | (154)        |
| 9.4 周期式作业炉·····          | (156)        |
| 9.5 热处理过程控制·····         | (163)        |
| <b>第十章 有色金属及合金·····</b>  | <b>(166)</b> |
| 10.1 工业用铜·····           | (166)        |
| 10.2 铜合金概述·····          | (167)        |
| 10.3 黄铜·····             | (168)        |
| 10.4 锡青铜·····            | (173)        |
| 10.5 铝青铜(铜铝合金)·····      | (176)        |
| 10.6 铜镍合金·····           | (179)        |

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| 10.7 铜铍合金 (铍青铜) .....    | (181)        |
| 10.8 铝及其合金 .....         | (181)        |
| 10.9 镁及其合金 .....         | (188)        |
| 10.10 锌及其合金 .....        | (189)        |
| 10.11 铅及其合金 .....        | (190)        |
| 10.12 锡及其合金 .....        | (191)        |
| 10.13 镍及其合金 .....        | (193)        |
| 10.14 钛及其合金 .....        | (195)        |
| <b>第十一章 非破坏性试验</b> ..... | <b>(197)</b> |
| 11.1 概述 .....            | (197)        |
| 11.2 目视检查 .....          | (198)        |
| 11.3 渗透试验 .....          | (199)        |
| 11.4 磁粉试验 方法 .....       | (201)        |
| 11.5 超声波试验 .....         | (205)        |
| 11.6 辐射法 缺陷检测 .....      | (209)        |
| 11.7 涡流试验 .....          | (215)        |

# 第一章 金属结构

## 1.1 金属晶性

固态物质可分为晶体和非晶体两大类。在非晶体材料中，原子或分子仍然具有凝固前无规则排列。在晶体物质中，原子以一种称为空间点阵的规则三维模式存在，其中，某一结构单元不断重复乃至遍及整块材料。

金属是晶体，其原子按照一种能使充填密度尽可能紧密或者接近于紧密的特定模式排列。这种排列是由称为晶胞的简单单元体构成的，当晶胞以有规则的方式在金属中重复时，就确定了在金属中所有原子的位置。

常见金属以下述3种晶体结构中的一种进行结晶：面心立方、体心立方和密排六方，见图1-1。在做此类描述时，通常把原子表示为实心球而不考虑原子结构。

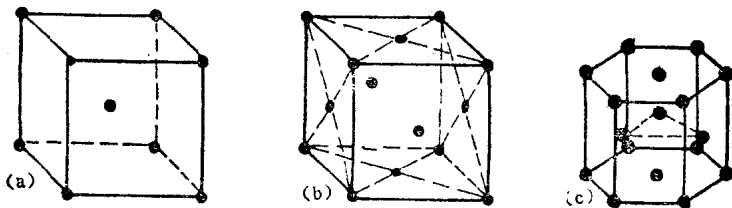


图 1-1 三种主要金属的晶体结构

(a)体心立方

立方体每个角上有一个原子加上中心有一个原子。

(b)面心立方

立方体每个角上有一个原子加上每个面的中心有一个原子。

(c)密排六方

正六方柱体每个角上有一个原子；

上、下面中心有一个原子加上六方体中心均匀分布着三个原子。

3 种主要类型的金属晶体结构的例子为:

体心立方 (b.c.c) :  $\alpha$ -Fe、W、Mo、V

面心立方 (f.c.c) :  $\gamma$ -Fe、Cu、Al、Pb、Ni

密排六方 (c.p.h) : Zn、Mg、Cd、Be

为了完全确定具体的金属结构, 需要指出晶体结构的类型和晶胞的尺寸。

## 1.2 晶粒和晶界

一块纯金属是由许多独立的晶体集合而成, 这些独立的晶体虽然形状不规则, 但象三维拼板玩具那样相互连接起来。在只有一种组成物 (即单相材料) 组成合金的情况下, “晶体”和“晶粒”这两个术语是可以互换的。然而, 当描述金属结构时, 只能采用“晶粒”这一术语。金属中的每一个晶粒都是由数以千计的晶胞构成。在每个晶粒中, 晶胞的轴都指向同一方向, 但对于不同的晶粒, 这种方向是彼此不同的, 如图1-2所示。

原子的成行排列称为原子的取向。由于每一个晶粒内的原子取向各不相同, 很显然, 晶界上的原子不会排列在规则的空间点阵上。因此, 晶界是由那些与两个相邻晶粒中任何一个模式都不相符的原子组成的 (晶界大约有 3 个原子厚), 如图1-3所示。

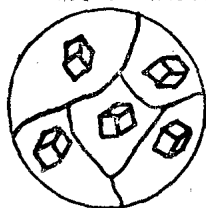


图 1-2 晶粒中原子不同取向

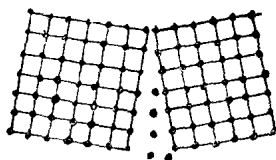


图 1-3 晶界上原子的错配

## 1.3 形核和枝晶长大

当熔融纯金属的温度下降到它的凝固点时, 便开始凝固, 这

是通过形核和生长的过程发生的（图1-4）。形核包括熔体中微小固体颗粒的形成，且该过程随着以后这些晶核的生长不断地进行。晶核可以是均质的，在这种情况下，晶核的形成可以通过纯金属的一群原子集结在一起形成胚芽进行；晶核也可以是非均质的，在这种情况下，胚芽是外来的颗粒。

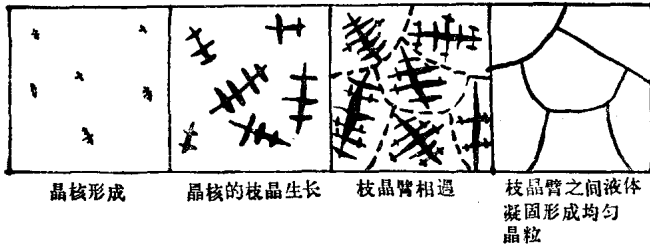


图 1-4 纯金属的枝晶凝固

例如，在具有体心立方晶格的金属的情况下，9个原子集结在一起形成一个晶胞，随着更多原子加入该晶格结构，这个晶胞就不断生长。这些原子将加入到该籽晶中，以便使得它在热量发散最快的那些方向上生长最快，这个细小的晶体很快就达到可见的尺寸并形成枝晶，二次和三次枝臂从该枝晶的主干发育起来，就象从一棵树干上发育起来的枝叉一样，只是枝晶的枝叉遵循规则的几何图形（图1-5）。枝晶的枝臂不断生长，直到它们接触到以类似方式生长的其它邻近枝晶的外臂为止。当向外生长受到此类限制时，现存的枝臂就长厚，直到枝臂间的空间被占满，或者直到剩余液体被耗尽。凝固通常伴随着体积收缩，从而使液体金属从别处吸引过来填充枝晶生长所形成的空隙。如果这个过程不可能实现，那么，小的收缩空穴就可能在枝臂之间形成。

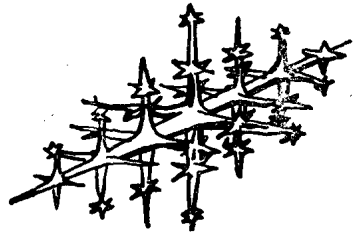


图 1-5 树枝晶

由于每一枝晶都单独形成，相邻枝晶的外臂很可能在无规则

的角度上彼此相遇，这导致最终晶粒的不规则外形。如果金属是纯的，那么，由于纯金属中的所有原子都相同，一旦凝固完成，将不存在任何的枝晶痕迹。然而，如果在熔体金属里溶有杂质，直至凝固快完成时，这些杂质也还会残留在溶液中。因此，它们会被富集在最后凝固的那部分金属中，即在枝臂之间。这样，经合适制备的试样在显微镜下观察时，它们就会揭示出枝晶的形貌。

#### 1.4 凝固条件对结构和性能的影响

当熔融金属达到其凝固点时，冷却的速度会影响所形成的晶体尺寸。温度缓慢降低导致少量晶核形成，所以晶体能无阻碍地生长成大晶体。而快速冷却导致大量晶核的形成，因此，得到的晶体尺寸将是很细小的。

当大量金属（如铸锭）凝固时，在结晶过程中，从外表面到中心部位冷却速度各异。当金属刚接触到铸模时，铸模是冷的，这对熔融金属有激冷效应，导致在铸锭表面形成很细小的晶体，称为激冷晶体。由于热量往外传递，铸模热起来，于是激冷效应不突出了。这有利于柱状的晶体向里生长。它们的伸长形状，是由于在与散热方向相反的方向上优先出现生长的结果。在心部剩余的熔融金属冷却很慢以致形成很少的晶核，因而该区域的晶体相当大。它们称为等轴晶，

意为具有“相等的轴”。因此，在一个铸锭里，一般可区别出3种不同的晶区，分别称为激冷晶区，柱状晶区和等轴晶区（图1-6）。然而，在各种铸造件中未必全部3种晶区都出现。实际得到的铸件主要取决于冷却条

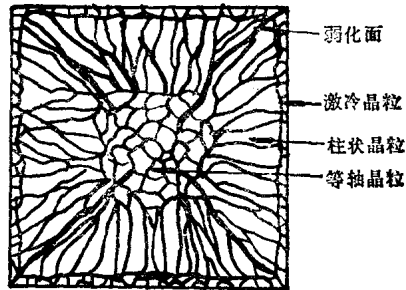


图 1-6 大铸锭横断面的晶粒结构

件。因此，铸模材料和浇注温度有一定的影响（图1-7）。

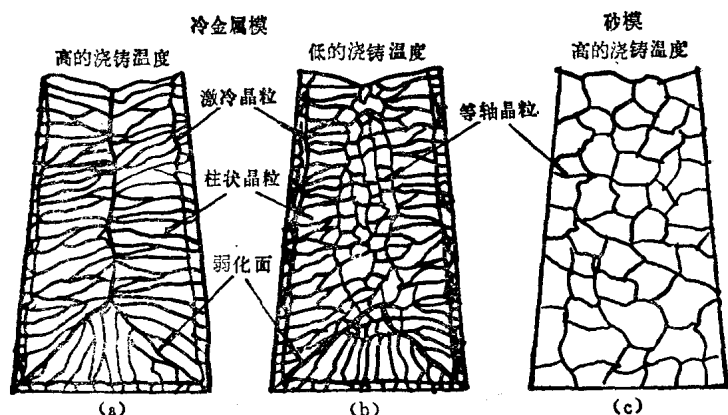


图 1-7 铸锭结构

- (a)冷金属模 高的浇铸温度  
(b)冷金属模 低的浇铸温度  
(c)砂模 高的浇铸温度

## 1.5 铸造金属中的缺陷

在铸造金属中会遇到缺陷，它包括缩孔、疏松和偏析。

### 缩 孔

大多数金属当从液态冷却成固态时，体积要收缩。这种按体积约为2~5%的收缩，是由于原子从无规则到有序排列的变化引起的。这样的收缩是造成铸锭缩孔的原因。凝固的次序是外层金属首先凝固，而中心部分将最后凝固。然而，当每次凝固时，所涉及的收缩将引起剩余液面的下降，从而，在铸锭顶部残留锥形空穴或初次缩孔（图1-8a）。如果铸锭模的底部比顶部宽即大底朝下的铸锭模，那么，在铸锭下部还可再形成一个空穴，称之为二次缩孔（图1-8b）。然而实际上，为使铸锭易于从铸模中脱出，往往采用大底朝下的铸模。

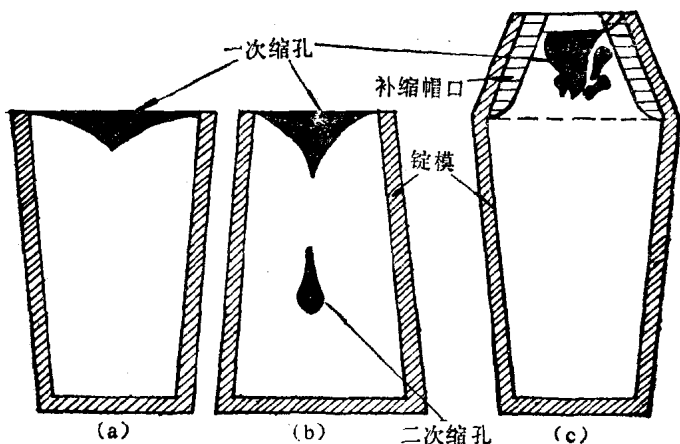


图 1-8 金属铸锭缩孔示意图

由于缩孔部分必须去除，所以采用了各种方法最大限度减少缩孔。为了减少缩孔程度，在铸锭顶部保持一定容积的熔融金属以填补该缩孔，这种所谓补缩冒口是用耐火砖或保温帽来支持的（图1-8c），同时使用发热粉剂，当它添加到熔融金属中能产生热量，从而有助于保持必要的熔融金属容积。

## 疏 松

铸造金属中的疏松能以两种方式产生。其一，在枝晶之间形成空隙且由于凝固收缩的结果，如果金属在凝固过程中很快冷却，那么熔融金属往往不能填补这些空隙。由于它们具有枝晶轮廓，所以这些空隙便以具有特征形状的疏松形式留下来（1-9a）。其二，在铸件中残留的气体也可产生疏松，气体可通过熔体本身的化学反应，锭模表面反应而产生，或可能仅是由于冷却时释放的，因为气体在金属中的溶解度随着温度下降而降低，这样形成的空穴称为气孔。它们的形状可能是不规则的，但具有圆滑的外形，且既能出现在晶界上，也能出现在晶粒内部（图1-9b）。

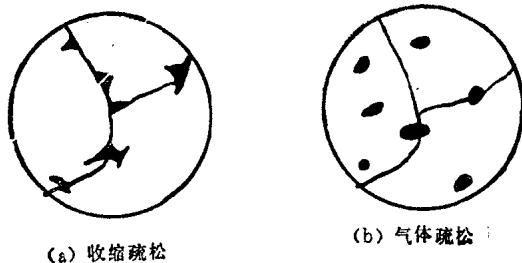


图 1-9 铸造金属中疏松

## 偏析

由于组成材料的化学元素分布不均匀，大多数铸件和铸锭的特点是成分并不完全均匀，这种成分的差异称为偏析。

当这样的差别发生于晶粒尺度的数量级范围内就称之为微观偏析。它之所以产生，是由于所存在的杂质逐渐富集于剩余液体中，因此晶界区域的杂质含量相对大于晶粒中心。然而，如果成分的差别发生于大范围内（例如从铸件的内部到外部），那么，就称之为宏观偏析。

非金属物质，例如金属氧化物、硫化物或夹渣在铸造金属中常常见到，这些夹杂物在固态金属里不溶解，其宏观偏析可出现于商用合金中。

钢中的偏析现象可通过硫印法简便地检验出来。

## 练习 1

1. a) 绘草图说明在金属的 3 种常见的晶体结构中的原子排列；

b) 对上述 3 种结构结晶的金属各举两例。

2. 借助于草图描述纯金属的凝固过程。

3. 纯金属注入 a) 金属模，b) 砂模；

说明所得到宏观结构有何差别。

4. a) 列举金属铸锭中可能出现的 3 种严重缺陷;

b) 解释这些缺陷如何产生及可 采用怎样的措施使它最大限度减少?

5. 解释金属铸锭中如何产生缩孔及如何使之减少?

若干常见纯金属的物理性质

| 金 属 | 熔 点(℃) | 相对密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 抗拉强度(N/<br>mm <sup>2</sup> )(退火态) | 延伸率(%) |
|-----|--------|------------------------------|-----------------------------------|--------|
| Al  | 660    | 2.71                         | 60                                | 60     |
| Cu  | 1083   | 8.96                         | 220                               | 60     |
| Fe  | 1535   | 7.87                         | 500                               | 10     |
| Pb  | 327    | 11.34                        | 17                                | 65     |
| Mg  | 650    | 1.74                         | 180                               | 5      |
| Ni  | 1455   | 8.86                         | 400                               | 30     |
| Sn  | 232    | 7.30                         | 11                                | 60     |
| Ti  | 1725   | 4.50                         | 230                               | 55     |
| Zn  | 420    | 7.13                         | 110                               | 25     |