

板带轧制 工艺学

〔美〕 V.B.金兹伯格 著

马东清 陈荣清 赵晓林 姜正义 姜正连 译

王国栋 刘相华 熊尚武 校

冶金工业出版社

板带轧制工艺学

[美] V.B. 金兹伯格 著
马东清 陈荣清 赵晓林 译
姜正义 姜正连
王国栋 刘相华 熊尚武 校

北 尔
冶金工业出版社
1998

Steel-Rolling Technology: Theory and Practice

Vladimir B. Ginzburg

International Rolling Mill Consultants, Inc.

Pittsburgh, Pennsylvania

© 1989 by MARCEL DEKKER, INC.

MDI, 270 Madison Avenue, New York, New York 10016

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-96-1440 号

图书在版编目 (CIP) 数据

板带轧制工艺学 / [美] 金兹伯格 (Ginzburg, V. B.)

著; 马东清等译. —北京: 冶金工业出版社, 1998. 7

书名原文: Steel-Rolling Technology: Theory and Practice

ISBN 7-5024-2157-2

I. 板… I. ①金… ②马… III. ①钢板轧制-生产工艺
②带材轧制-生产工艺 IV. TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 03026 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑: 李培禄 美术编辑: 李至云 责任校对: 朱 翔

北京新兴胶印厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1998 年 7 月第 1 版, 1998 年 7 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 35.5 印张; 860 千字; 559 页; 1-1500 册

60.00 元

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

译校者的话

美国著名轧制技术专家 V.B. 金兹伯格 (GINZBURG) 博士所著《板带轧制工艺学》(《STEEL-ROLLING TECHNOLOGY: THEORY AND PRACTICE》) 在系统介绍轧制技术的力学、冶金学、传热学原理的基础上, 全面地叙述了板带钢轧制工艺、设备、自动化技术的发展历史和现状, 反映了轧制技术的最新进展, 是近年来关于轧制技术的不可多得的优秀书籍。

原书作者 V.B. 金兹伯格博士是美国宾夕法尼亚州匹兹堡国际轧钢咨询公司的总裁。该公司对美国匹兹堡的联合工程公司的轧机部提供独家咨询。金兹伯格博士是美国钢铁工程师协会的会员, 他在许多会议和杂志上独立或与人合作发表过大量文章, 拥有 27 项美国和其他国家的涉及轧制技术的专利。1961 年金兹伯格获得苏联莫斯科全苏机械工程学院机械工程硕士学位, 1968 年获得苏联铁道运输学院技术科学博士学位。

译者们在美国购得此书之后, 先在好友中传阅。开始时, 大家为书中的精辟论述和透彻分析所吸引, 随后大家萌发了一个共同的想法, 那就是将它译成中文, 推荐给更多的中国同行。

金兹伯格博士和马塞尔·德克尔出版公司 (MARCEL DECKER, Inc.) 愉快地接受了我们的建议, 并在技术方面给予我们多方的支持和合作。因此, 本书中文版的问世是原作者、译校者等各方面共同努力的结果。

本书第 1~11 章由马东清译, 第 12~18 章由姜正义译, 第 19~24 章由姜正连译, 第 25~30 章由陈荣清译, 第 31~40 章由赵晓林译。全书由王国栋、刘相华、熊尚武校。

我们希望, 本书中文版的出版对于我国板带轧制技术的发展, 对于中美之间的技术交流起到推动作用。

译校者
1997. 10. 1

前 言

钢铁工业已经有了很长的发展历史，尽管岁月流逝，但它仍然显示出极强的生命力，新的思想仍然像一百年前一样，继续变革着今日的钢铁生产过程。最近的一系列进步，例如纯净钢的冶炼、薄板坯和带钢的连铸过程、在轧机上采用构思巧妙的带钢断面和平直度控制技术等，仅仅是说明钢铁工业蕴藏进一步革新和发现的巨大潜力的少数几个例子。毫无疑问，不同国家的工程师和科学家们发现，钢铁工业依然是发挥他们创造力的令人激动的领域。

钢铁工业的新发展有三个主要的途径。第一个途径是由钢铁工业的多阶段特征所确定的（炼钢、铸造、轧制等），开发过程是集中在每一个阶段内进行的。第二个途径反映出描述钢铁工业科学的多学科特性（物理、冶金、计算机科学等），当然，这每一个学科都在独立地发展着。第三个发展途径已经引起越来越多的注意，它是沿着钢铁生产过程的不同阶段和与钢铁工业相关的各个学科分支之间的界面来进行的。

今天，工作在热轧带钢领域的质量控制工程师已经认识到，他们要想有目的地确定某些钢材缺陷的起因，必须通晓炼钢和连铸技术。冶金学家感到，为了在希望的带钢温度偏差和更为复杂的过程控制之间获得某些可以接受的妥协，需要了解关于保持带钢温度恒定的计算机控制的基本概念。

这些想法可以用系统方法来实现普遍化，此时，问题的解决是基于对不同学科界面上产生的问题的智能化分析。

使用系统方法的专家的创造并不是一个容易的任务，只有少数几个学校里设置系统方法教程。然而作者坚信，这个专业领域将吸引许多天才的工程师和科学家。作者还希望，这本书能对他们的令人激动的努力有所裨益。

V. B. 金兹伯格

目 录

第一篇 钢及合金钢的主要性能和分类	1
1 金属的晶体结构	1
2 金属的物理性能.....	10
3 钢及合金钢的分类.....	31
第二篇 钢的冶金设计原理	50
4 钢中的相转变.....	50
5 钢中的合金元素和杂质.....	62
6 控制钢的性能的冶金学因素.....	78
7 钢的热处理.....	91
第三篇 板材用钢的冶炼和铸造	98
8 主要的炼钢方法.....	98
9 二次炼钢过程	108
10 用于板材生产的钢的铸造.....	119
11 钢锭和板坯中的缺陷.....	136
第四篇 塑性变形理论	144
12 微观塑性原理.....	144
13 宏观塑性原理.....	151
14 塑性变形单元体分析.....	163
15 塑性变形上界解析.....	178
16 塑性变形滑移线场解析.....	183
第五篇 轧制参数计算	191
17 热轧变形抗力.....	191
18 热轧时的轧制力、力矩和功率.....	213
19 冷轧时的轧制力、力矩和功率.....	232

第六篇 轧制过程中的摩擦学	244
20 摩擦的基本概念.....	244
21 润滑和磨损的基本原理.....	252
22 轧制过程中的摩擦、润滑及磨损.....	262
第七篇 轧机中的热传递	283
23 热轧的钢材加热.....	283
24 轧制过程中的热传递.....	299
第八篇 轧制过程的冶金特性	312
25 钢热轧时的组织变化.....	312
26 和轧制相结合的形变热处理.....	324
27 在热轧带钢轧机中钢的氧化.....	345
第九篇 板带轧机	365
28 轧机的分类.....	365
29 大压下轧机.....	381
30 热带钢轧机的优化和现代化.....	397
第十篇 板带产品的几何形状	412
31 板带产品的几何特征.....	412
32 板带产品几何参数的测量.....	423
第十一篇 厚度和宽度控制	443
33 厚度控制原理.....	443
34 HAGC 的动态特性模型.....	468
35 宽度和平面形状控制原理.....	484
36 粗轧机上宽度变化和控制.....	495
第十二篇 带材断面形状和平直度控制	512
37 带材断面形状和平直度调节执行机构.....	512
38 轧辊变形模型.....	526
39 轧辊辊型和带材平直度模型.....	540
40 带材断面形状和平直度调节机构的选择.....	550

第一篇 钢及合金钢的主要性能和分类

1 金属的晶体结构

1.1 空间格子

一切物质都既可以非晶状态存在，又可以结晶状态存在。在非晶状态下，物质的原子是杂乱无章排列的，它们的相互位置不是固定的。在结晶状态下，物质是由那些按照某种严格的几何模型排列的原子，更严格地说是离子组成的。物质不同，这种模型就会变化。

自然界中所有的金属都是结晶体。金属的结晶发生在凝固过程中，此时液态金属的原子按照有序的排列自身聚集，形成确定的空间模型。这种模型即是所谓的“空间格子”。

金属凝固时其原子本身能够排列出几种格子形式，其中最有共性的3种形式表示在图1-1中，并且已知它们是体心立方 (b.c.c)、面心立方 (f.c.c) 和密集六方 (c.p.h) 晶格^[1]。

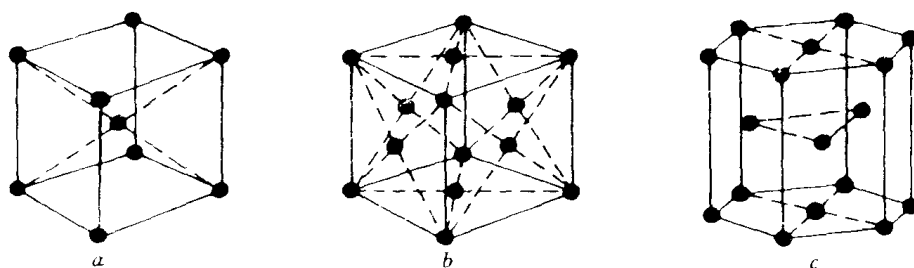


图 1-1 晶格的 3 种主要形式

a—体心立方；b—面心立方；c—密集六方

1.2 晶格常数

把基本立方体或六方体的边的长度做为晶格的常数（图 1-2）。这些长度一般是以埃（ $\text{\AA}$ ）为单位的， $1\text{\AA} = 0.1\text{nm}$ 。在金属中，立方晶格的棱长在 $2.878\text{\AA}$ （铬）至 $4.941\text{\AA}$ （铅）之间变化^[2]。

1.3 金属键

“金属键”这一术语用于解释结晶组织之间控制离子的力。在金属凝固过程中原子释放它们的外层（价）电子。结果，原子转变为携带正电荷的离子并彼此排斥。然而，原子释放的价电子形成与周围原子所共有的负电荷云——“电子云”（图 1-3）。因此，当带正电荷的离子彼此排斥时，它们由于受到带负电荷电子云的吸引而保持在平衡的位置上。

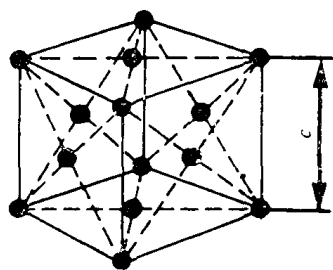


图 1-2 晶格常数
c—晶格常数

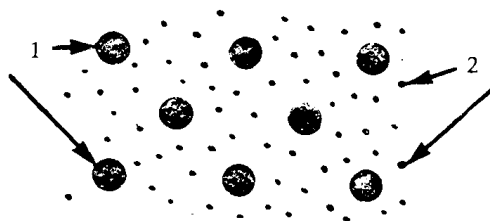


图 1-3 金属键的示意图
1—正离子；2—电子云

1.4 同素异晶转变

当一种金属处于从一种结晶格子向另一种结晶格子转变的时候，这种晶格转变就是同素异晶转变。铁的同素异晶形式取决于表 1-1 所列的温度。在从体心立方晶格同素异晶转变的情况下，金属所具有的特征和性质也会随之发生明显的改变。铁的密度随着同素异晶转变而发生的变化如图 1-4 所示^[1,3]。

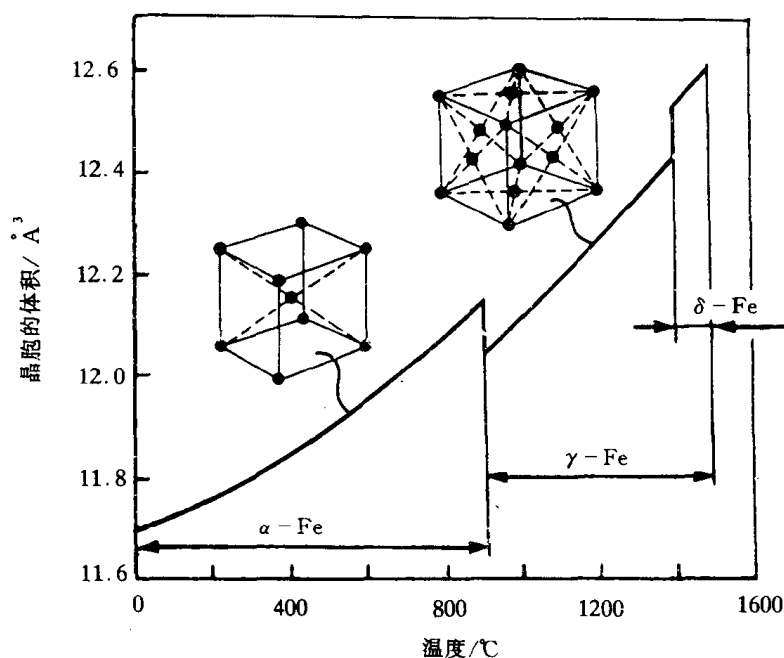


图 1-4 铁的密度在同素异晶转变中的变化

表 1-1 铁的同素异晶形式

同素异晶形式	结晶学的形式	温度范围/℃
α	体心立方 (b. c. c.)	≤ 910
γ	面心立方 (f. c. c.)	910~1403
δ	体心立方 (b. c. c.)	1403~1535

1.5 原子面

通过一个晶体可能描绘出几组平行的面，且可使组成晶体的所有原子处于任一组原子面内。这些平面就是原子面。

图 1-5 表示由 8 个原子组成的立方体晶胞内的原子面，每一个角上有一个原子。原子面用三位数字描述，每一个数字对应于相应结晶学轴 x 、 y 和 z 的一个单位坐标。例如，以 (001) 符号描述的一组平面应该既不与 x 轴相交也不与 y 轴相交^[2]。

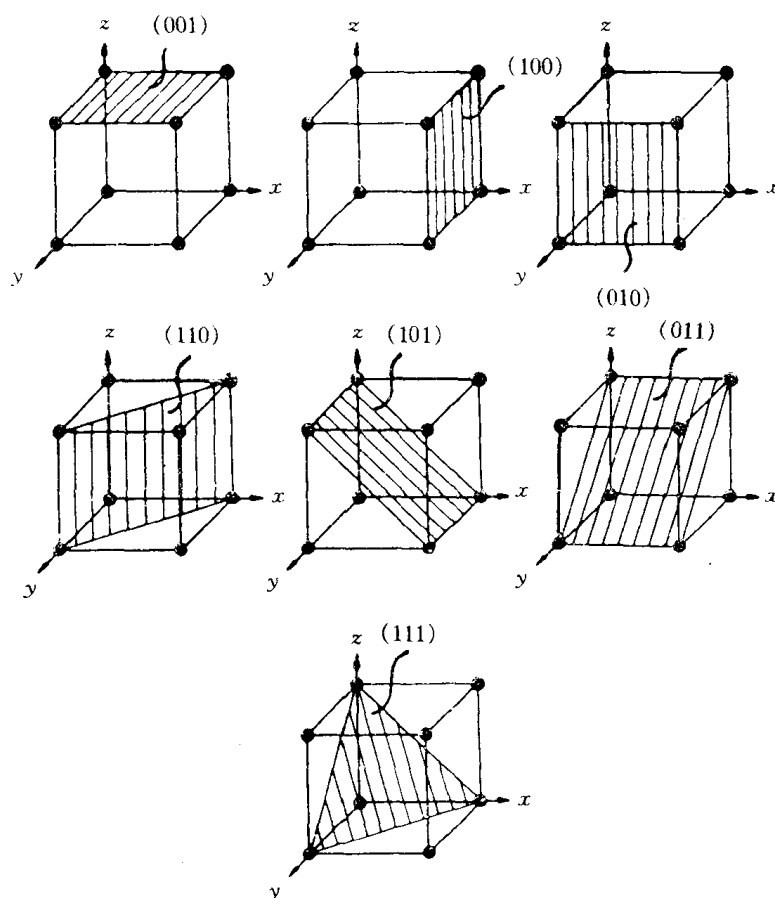


图 1-5 立方晶胞中的原子面

1.6 结晶学的各向异性

晶体的物理性质取决于相对于它们的晶轴所进行测量的方向。在铁的体心立方结晶结构中，最大的强度位于(111)面，而最低的强度位于(100)面，如图1-6a所示。

由于金属材料中的许多晶体并非完全无规则地取向，因此导致材料力学性质的各向异性^[4]。

这同样能够解释关于某些合金，例如硅钢、磁性质的各向异性的特点。硅钢晶体的导磁率沿着(100)原子面测量是最大的，而沿着(111)原子面测量是最小的，如图1-6b所示。^[5]

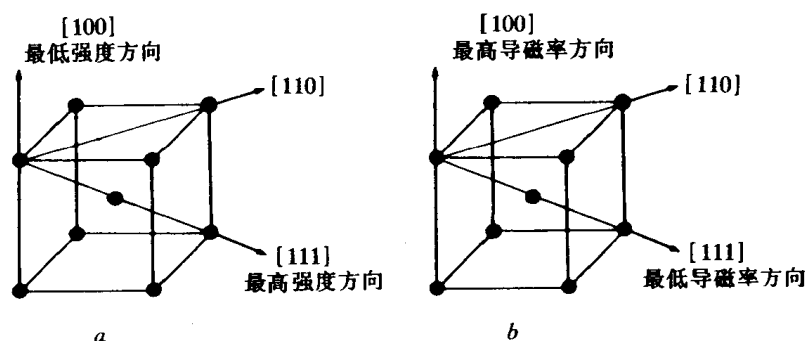


图 1-6 立方晶体内物理性质的各向异性
a—力学性质；b—导磁性

1.7 冷却曲线

一种纯的液体金属在称为凝固点的确定温度下凝固成结晶的固体（图1-7）。这是由于材料在结晶过程中释放的潜热与散失的热量相等之故。后来，人们称这种在结晶过程中释放的潜热为凝固潜热^[1]。

1.8 金属的枝晶

纯金属凝固时，每一个晶体都从其晶核或“结晶核心”独立地开始长大。晶体依靠原子按照如图1-8所示的所谓“枝晶”的格子模型增加而成长。金属的晶体在某些沿热量散失最快的方向成长，因而温度将以最快的速率下降，并导致形成相当长的枝状晶体^[1]。

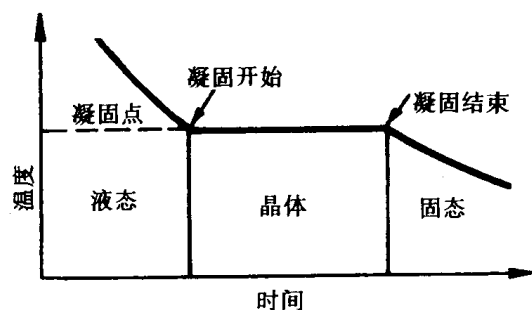


图 1-7 纯金属的典型冷却曲线

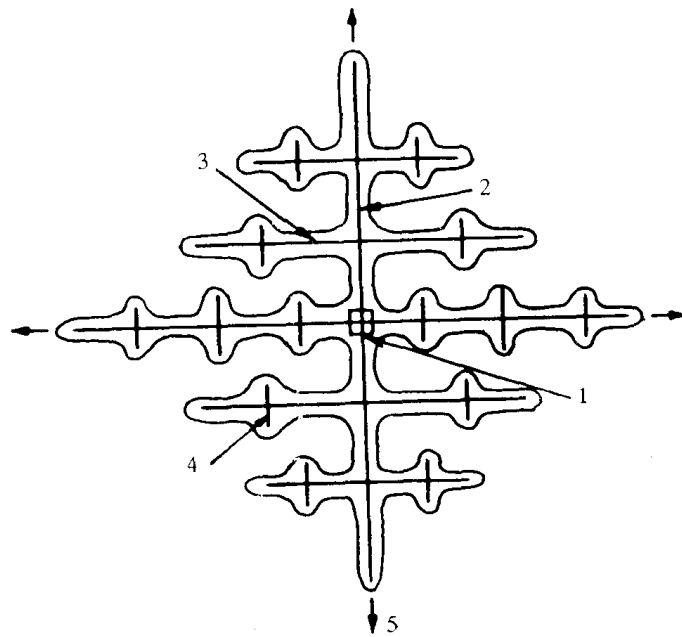


图 1-8 金属枝晶成长的初期阶段

1—晶核；2—主轴；3—二次轴；4—三次轴；5—热量散失和晶体长大

1.9 枝晶的长大

枝晶的枝不断地长大和加厚（图 1-9a、b），直到它们之间的空间最终完全凝固。同时，外部的枝开始与那些相邻的枝晶接触（图 1-9c）。此时枝晶的长大停止并且凝固即将完成。剩余的液体用于加厚已有的枝晶的枝，最终形成规则的晶体整体形状（图 1-9d）。不纯的金属（图 1-9e）在枝晶的枝之间携带杂质，因而能够显示出初始的骨架。

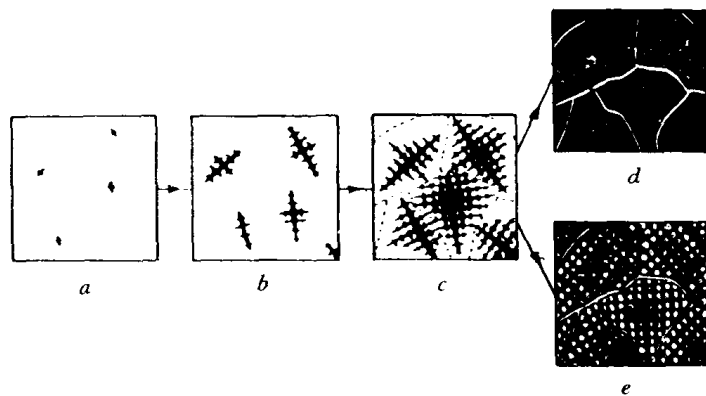


图 1-9 金属从液态结晶时的枝晶长大

1.10 晶体的边界

固态金属由许多形状规则的晶体组成,但是晶体彼此间的联结有点像三维拼装玩具。现已广泛地认同了,在晶体的边界存在着等于3个原子厚度的金属膜,在这层膜内原子不依任何模型排列,如图1-10所示^[1,6]。

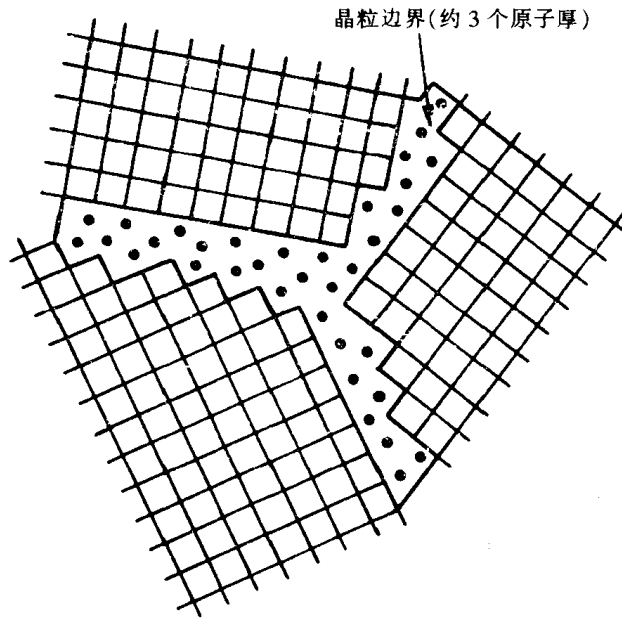


图 1-10 晶粒边界示意图

1.11 晶粒的形状和尺寸

晶体的形状和尺寸取决于达到凝固的熔融金属的冷却速度。缓慢的温度降形成少量的晶核,因此晶体较大。快速的冷却激发形成大量的晶核而产生大量的小晶体或晶粒(本书中术语“晶体”和“晶粒”是同义词)。

在大的铸锭中从外表面到中心,晶粒的尺寸可以有相当大的变化,如图1-11所示,这是由于在铸锭凝固过程中热量从金属向锭模传递时温度梯度变化造成的。人们可以把晶粒划分为3种形式:(1)位于铸锭表面部位的激冷细晶粒;(2)位于中间部位的柱状晶粒和(3)位于铸锭中心的等轴大晶粒^[1]。

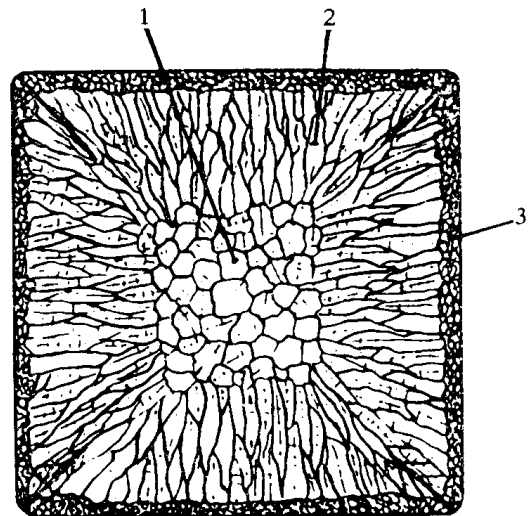


图 1-11 铸锭断面上的晶粒组织
1—等轴晶粒; 2—柱状晶粒; 3—激冷细晶粒

1.12 美国试验与材料学会 (ASTM) 规定的晶粒尺寸

晶粒尺寸在 ASTM 中一般是给出晶粒数, 这是一个任意指数 (n), 它是指在放大 100 倍时每平方英寸的平均晶粒数 (N), 并可按下面的方程^[2,7]计算 (如图 1-12 所示):

$$N = 2^{n-1} \quad (1-1)$$

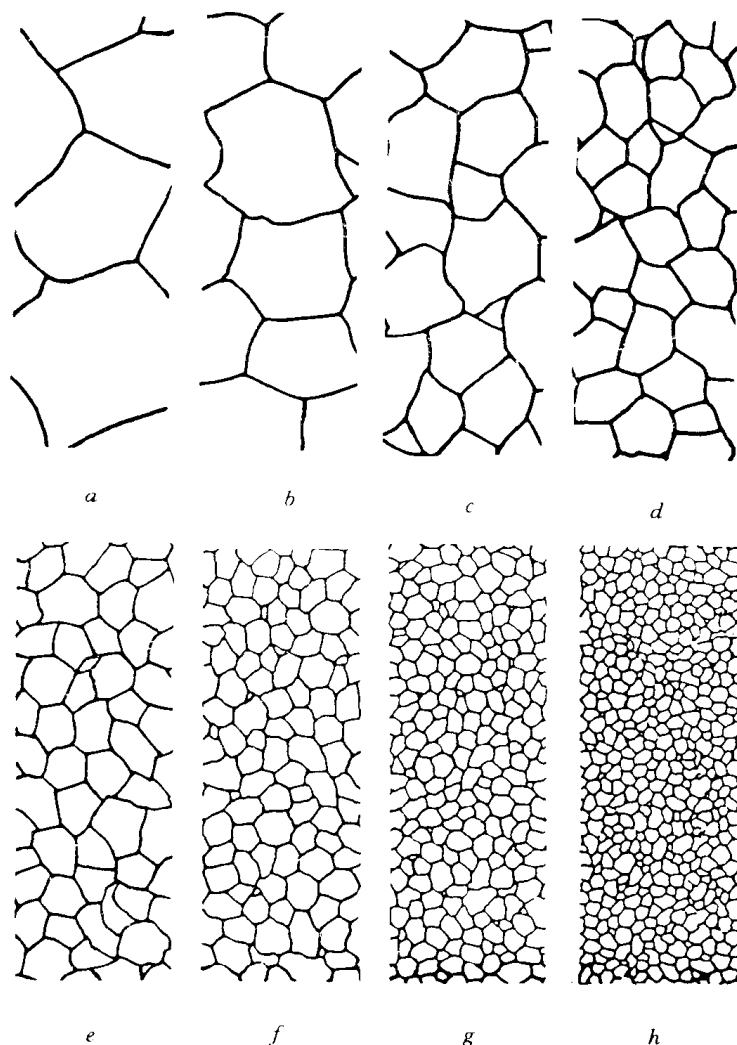


图 1-12 ASTM 标准的晶粒尺寸图

a —少于 1.5 个晶粒; b —1.5~3 个晶粒; c —3~6 个晶粒; d —6~12 个晶粒;
 e —12~24 个晶粒; f —24~48 个晶粒; g —48~96 个晶粒; h —多于 96 个晶粒

1.13 金属中的相

相是合金中物理、化学或结晶学方面明显相似的部分。只研究 3 种相, 即纯金属、金属间化合物和固溶体。当一种合金含有不止上述 3 种相中的一种时, 一般把该合金看做是混合物^[2]。

1.14 金属间化合物

金属与非金属之间的化合物即是金属间化合物。已知的大部分金属间化合物含有下面几种非金属之一：碳、磷、硅、硫、砷或金属铝。

在铁和碳合金中重要的化合物是碳化物 Fe_3C ，或称渗碳体。它是正交的空间格子。

1.15 固溶体

人们把含有纯金属和金属间化合物两种相的固体叫固溶体。可以有两种金属的固溶体：金属与金属间化合物或者两种化合物的固溶体。

当金属 A 与另一种具有不同晶格的金属 B 形成固溶体时，该固溶体的晶格可能与两种金属中的某一金属晶格相同，也可能与它们的晶格都不相同。在固溶体的晶格与某一金属 A 相同的情况下，金属 A 就被认为是溶剂，而金属 B 则被认为是溶质。如果固溶体的晶格与两种金属的晶格都不相同，那么可以认为比例大的金属是溶剂。

固溶体有下面两种类型^[2]：

(1) 置换式固溶体。这是指溶质的原子置换了某些晶格中的溶剂原子形成的固体合金，如图 1-13a 所示。

(2) 间隙式固溶体。这是溶质的原子随机地存在于晶格的阵点以外的地方而形成的合金，如图 1-13b 所示。

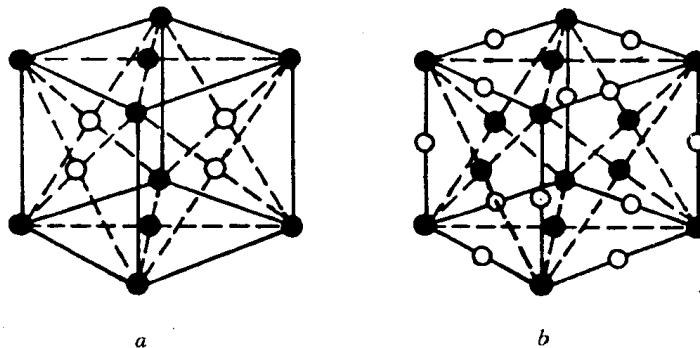


图 1-13 置换式固溶体 (a) 和间隙固溶体 (b) 的晶格

●—溶剂原子位置；○—溶质原子位置

参 考 文 献

1. R.A. Higgins, Engineering Metallurgy, Part 1, Applied Physical Metallurgy, Robert E. Krieger Publishing Company, Melbourne, Florida, pp. 1-77 (1983).
2. A. Sauveur, The Metallography and Heat Treatment of Iron and Steel, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company Inc., New York and London, pp. 1-11 (1935).
3. The Making, Shaping and Treating of Steel, 10th Edition, eds. W.T. Lankford, Jr., et al, Association of Iron and Steel Engineers, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 1231-1240 (1985).
4. W.L. Roberts, Cold Rolling of Steel, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, p. 736 (1978).

5. R.M. Bozorth, Ferromagnetism, D. Van Nostrand Company, Inc., Toronto, New York and London, pp. 90-91 (1951).
6. Z. Wusatowski, Fundamentals of Rolling, Pergamon Press, Oxford, pp. 4-8 (1969).
7. C.G. Johnson and W.R. Weeks, Metallurgy, Fifth Edition, American Technical Society, Chicago, p.164 (1977).

2 金属的物理性能

2.1 三种应力

当物体受到外力作用时,金属的内部就会产生反作用力,而且反作用力与外力相等。单位面积的内力被称之为应力^[1]。

不管怎样产生的,只有三种形式的应力:

(1) 拉应力。这是在受到拉力 P 作用下物体中出现的应力 (图 2-1a)。

(2) 压应力。这是在受到压力 P 作用下物体中出现的应力 (图 2-1b)。

(3) 剪应力。这是在物体中受到导致物体的一部分相对于邻近部分滑动的剪力 P_s 的作用而产生的应力 (图 2-1c)。

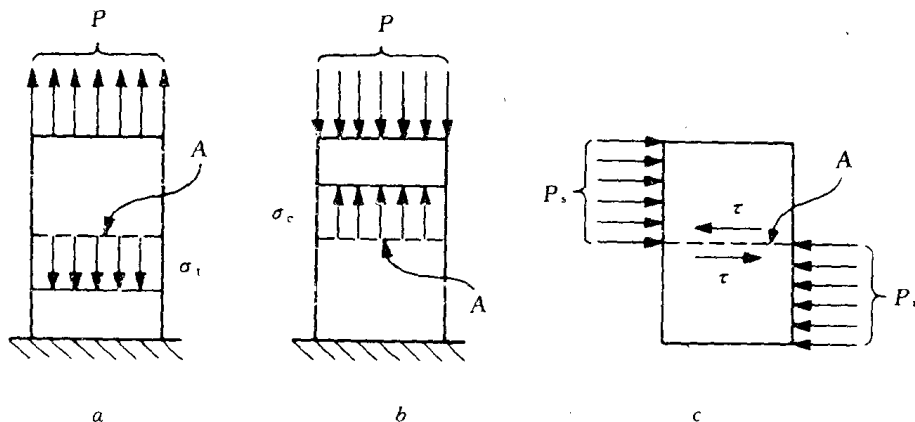


图 2-1 三种应力形式
a—拉应力; b—压应力; c—剪应力

2.2 工程应力和真实应力

工程应力或者正应力是用作用力 P 与原始的横断面面积 A_0 之比来确定的^[2]。在用于拉伸或压缩的情况下,它等于:

$$\sigma = P/A_0 \quad (2-1)$$

在用于剪切的情况下,它等于:

$$\tau = P_s/A_0 \quad (2-2)$$

真实应力是用作用力 P 与瞬时的受力面积 A_i 之比来确定的。用于拉伸或压缩时,它等于:

$$\sigma = P/A_i \quad (2-3)$$

在用于剪切时,它等于:

$$\tau = P_s/A_i \quad (2-4)$$