

高等學校教學用書

金属学及钢铁热处理

許清昌 編

冶金工业出版社

高等学校教学用書

金属学及鋼鉄热处理

許清昌 編

冶金工业出版社

本書內容包括金屬學、熱處理及合金鋼。書中除敘述基本理論外，重點討論了形變、相變機構、砂鑄及冶金工廠產品的熱處理。

本書供作壓力加工及冶金機械設備等專業的試用教材，亦可供機械製造、及其他金屬冷熱加工等專業及工程技術人員參考。

金屬學及鋼鐵熱處理

許 清 昌 編

冶金工業出版社出版（地址：北京市燈市口甲45號）

北京市書刊出版業營業許可証出字第093號

冶金工業出版社印刷廠印 新華書店發行

—— * ——
1960年3月第一版

1960年3月北京第一次印刷

印數7,825冊

開本 $850 \times 1168 \cdot \frac{1}{32}$ • 170,000字 • 印張 $7 \frac{28}{32}$ • 插頁2

—— * ——
統一書號 15062 • 2067 定價 0.92元

高等学校教学用書

金属学及鋼鉄热处理

許清昌 編

冶金工业出版社

本書內容包括金屬學、熱處理及合金鋼。書中除敘述基本理論外，重點討論了形變、相變機構、砂鑄及冶金工廠產品的熱處理。

本書供作壓力加工及冶金機械設備等專業的試用教材，亦可供機械製造、及其他金屬冷熱加工等專業及工程技術人員參考。

金屬學及鋼鐵熱處理

許 清 昌 編

冶金工業出版社出版（地址：北京市燈市口甲45號）

北京市書刊出版業營業許可証出字第093號

冶金工業出版社印刷廠印 新華書店發行

—— * ——
1960年3月第一版

1960年3月北京第一次印刷

印數7,825冊

開本 $850 \times 1168 \cdot \frac{1}{32}$ • 170,000字 • 印張 $7 \frac{28}{32}$ • 插頁2

—— * ——
統一書號 15062 • 2067 定價 0.92元

目 录

序	6
緒論	7
第一篇 总論	9
第一章 物質金屬态、固态与液态金屬的結構	9
§ 1. 金屬在周期表中的位置, 及金屬中原子的結合	9
§ 2. 金屬元素的原子結構, 金屬中原子的鍵合, 及金屬物 理性質的现代概念	10
§ 3. 結晶学原理的一些基本概念	23
§ 4. 实际金屬晶体結構中的缺陷	23
§ 5. 多晶体結構的特点, 嵌鑲块間界及多晶体晶粒 間界的本質	31
§ 6. 液态金屬的結構	33
§ 7. 純金屬的凝固和熔化 (結晶过程的一般原理)	34
§ 8. 固态純金屬的两类变化	46
第二章 金屬的范性形变与再結晶	49
§ 1. 单晶体金屬的形变	49
§ 2. 多晶体金屬的形变	60
§ 3. 强度理論概念介紹	64
§ 4. 形变后金屬結構、組織和性質的变化	66
§ 5. 加热对冷加工后的金屬結構、組織和性能的影响—— 恢复、再結晶和晶粒长大	68
§ 6. 金屬的热范性形变	73
第二篇 二元系及三元系	74
导言	74
第三章 二元合金中相的結構(合金中相的物理本性)	76
§ 1. 固溶体	76
§ 2. 正常价化合物	79
§ 3. 中間相	79

第四章 二元合金相图的基本类型和二元合金的结晶81

- § 1. 二元相图 (二元合金平衡图)81
- § 2. 二元相图的分类 (按照组元的相互溶解度分类)82
- § 3. 相律82
- § 4. 液态、固态时组元相互完全溶解的二元相图83
- § 5. 杠杆定律85
- § 6. 液态完全溶解, 固态部分溶解的二元相图86
- § 7. 形成正常价化合物和中间相的二元相图90
- § 8. 二元合金的金属铸造组织及偏析92
- § 9. 固态合金组织的变化95
- § 10. 合金成分、结构与性能间的关系98

第五章 三元系101

- § 1. 三元合金成分的表示法 (等边三角形法)101
- § 2. 三元系中的杠杆定律和重心法则103
- § 3. 三元相图的基本类型104
- § 4. 组元在固态和液态时均为无限溶解的三元相图104
- § 5. 三相共晶的三元相图 (固态互不溶解)106

第三篇 鋼的热处理原理及合金鋼

第六章 鉄—碳合金114

- § 1. 鉄—碳 (Fe_3C) 平衡图114
- § 2. 鋼和鑄鉄126

第七章 鋼的热处理理論基础135

- § 1. 概述135
- § 2. 鋼加热时的转变136
- § 3. 奥氏体晶粒139
- § 4. 冷却时的转变142
- § 5. 奥氏体转变产物的机械性質154

第八章 热处理基本操作158

- § 1. 鋼材 (件) 实际加热时的情况158
- § 2. 热处理基本操作分类169
- § 3. 鋼的退火169

§ 4. 鋼的淬火	178
§ 5. 鋼的回火	186
§ 6. 鋼的表面淬火	194
第九章 鋼的化学热处理	198
第十章 合金鋼及热处理实例	202
§ 1. 合金鋼炼制的綜合工艺	202
§ 2. 合金元素在鋼中的作用	203
§ 3. 合金鋼的分类	209
§ 4. 合金結構鋼	210
§ 5. 合金工具鋼	215
§ 6. 特殊物理化学性能鋼	225
第十一章 鑄鉄热处理及合金鑄鉄	238
§ 1. 灰口鉄的热处理	238
§ 2. 白口鉄的热处理—可鍛鑄鉄的获得 (可鍛化)	238
§ 3. 可鍛鑄鉄及球墨鑄鉄的热处理	239
§ 4. 合金鑄鉄	240
第四篇 冶金工厂产品热处理	242
参考資料	251

序

1958年，为了适应教学需要，开始编写本书，适用对象是钢铁压力加工及冶金厂机械专业。教材的编写过程也是实践（讲授）过程。根据教学中发现的问题，本教材曾前后作了三次修改。虽然如此，仍感非常不足。本书中磁性和电子理论，是以加强学生的基础知识为出发点编入的。书中亦试图应用位错的概念介绍金属的范性与强度，以使读者对金属性能的了解更深一步。书中热处理和合金钢部分力求与生产实际相结合，列举了不少实际资料。

本书的内容及编排和其他类似书籍不同。书中是以金属的形变，基本相变的机构，碳钢及冶金厂产品为重点进行讨论的。书中对一般热处理亦进行了研究。因此，可供参考的范围较广。机械制造，冷热加工等专业都可参考。

由于编者知识所限，不免有不确切或错误之处，希读者指正。

编者于太原钢铁学院

1959.9.29

緒 論

一、金屬学及鋼鉄热处理的研究对象和内容。

在本書中将学习金屬学原理，鋼鉄热处理的理論和实际知識。并在此基础上介紹合金鋼的各种性能。

金屬学是以普通化学、物理学、結晶学及物理化学为基础的一門科学。金屬学是研究金屬及合金内部构造、成分、显微組織和性能之間相互关系的科学。所謂金屬的性能是：

1. 力学性能：强度、硬度、韌性及范性等。
2. 物理性能：磁学性能、电学性能、热学性能及其他。
3. 化学性能：抗腐蝕性、电化性等。
4. 工艺性能：液态金屬的流动性能、鍛造性能、切削加工性能及热处理性能等。

金屬科学的发展已有金屬腐蝕和保护、金屬物理等独立学科专门从事物理及化学性能的研究。因此，本書主要任务是研究金屬和合金的組織和性能之間的关系。关于金屬各种性能的物理本質只作重点討論。

热处理在現代的机械制造、国防等工业中的作用是无可估量的。热处理是以金屬学为基础的，不仅有丰碩的理論，同时还必須有大量的实际經驗才能很好的掌握。

合金鋼是研究各种特殊用途，特殊物理化学性能的鋼种的学科。不仅要了解合金鋼的冶炼，鍛軋等对鋼的性能的影响，同时更主要的是叙述鋼的各种特殊性能和鋼的成分、組織及結構的关系，以及欲达到要求的热处理工艺。

二、研究金屬及合金組織和結構的方法。

金屬和合金結構組織，定量和定性的检查研究方法有：

1. 断面检查：这是一种很古老，最簡易且应用相当广泛的方法。它是用眼睛直接观察或通过普通放大鏡观察晶粒的大小；

裂断的性质等来作研究。现在已有一些专门文献叙述这一问题。

2. 宏观分析：用酸浸已磨光的样品表面，或采用印痕法观察金属和合金的宏观（粗型）组织，达到判断金属和合金的化学成分的均匀程度，汽泡，裂纹……等。这是工厂中应用的检查方法中重要的一种。

3. 显微分析（明场，暗场）：

（1）普通光学金属显微镜。这种金属显微镜的最大倍数可达2000倍。所用试样为抛光及腐蚀后的金属样品。

（2）紫外线显微镜。用更小的波长（小于可见光 $1\frac{1}{2}$ 倍的波长），增大鉴别率1.5倍。但由于镜头的特殊要求，还没有广泛应用。

（3）金属偏光显微镜。便于检查金属及合金中含有的非金属夹杂物。

（4）高温金相显微镜。研究用于高温工作的材料如用于石油工业，航空工业，化学工业……等方面的特殊金属和合金的组织，及研究各种金属和合金由低温向高温组织变化及相反变化时的情况。

4. 超显微分析。运用电磁场透镜，其鉴别率很大（分辨 $30\sim 50\text{\AA}$ 那么小的尺度），理论放大倍数为 10^6 倍。由于其鉴别率很高，因此成为金属研究中特别有力的工具。

5. x-射线结构分析。用x-射线探求金属及合金的结构，固溶体的成分，组织……等。

6. 电子中子衍射法及其他放射性物质在金属中的应用。

7. 物理性质分析法。物理性质的变化和金属及合金的结构，组织有密切关系。常用的物理性质研究方法有热分析法，体积分分析法，磁性分析法，内耗及电性测量等。

第一篇 总 論

第一章 物質金屬态、固态与液态金屬的結構

§ 1. 金屬在周期表中的位置, 及金屬中原子的結合

1. 固体的分类。固体可分成下列五类:

- a. 金屬;
- b. 离子晶体 (異极晶体);
- c. 电价晶体 (同极晶体);
- d. 分子晶体;
- e. 半导体。

金屬原子結構的特点是外层电子少, 失去电子的傾向大。金屬的导热、导电特性都和电子在金屬中的状态有密切的关系。純金屬和合金都是金屬, 其中包括一部分純金屬和非金屬元素所形成的合金。

离子晶体是指由强正电元素和强負电元素所形成的化合物。例如, NaCl 和 MgS 等。

• 电价晶体主要是絕緣物, 例如, 鑽石、金刚砂。

碘和干冰是分子晶体的典型例子。

半导体这类物質目前已日益发展为极其重要的材料, 它的特殊导电方式, 使其导电性随着溫度的升高而增大。半导体的导电問題是近代物理中很重要的問題之一, 很多論著还没有得到統一認識。苏联科学院院士 A. Ф. Иосифович 在这方面有深入的研究和专

著。

2. 简单金属和过渡金属。纯金属可以分为简单金属和过渡金属两类。过渡金属的特点是内层电子不满。例如，第四周期的过渡金属是3d层不满；第五周期是4d, 4f层不满；第六周期是5d, 4f层不满；第七周期是6d, 5f不满等等。由此观点出发，门德列耶夫元素周期表的排列如表1所示。

§ 2. 金属元素的原子结构、金属中原子

的键合，及金属物理性质的现代概念

1. 原子结构。在化学里把这样的物质叫做金属，即凡是在化学反应里能形成强碱性化合物，氢氧化物，并与酸结合形成盐类的元素被称为金属。具有这种性质的元素占全部元素的75%，它们在周期表的左边。

化学上的金属定义是由单个原子的性质出发的，它反映了单个原子的性质，金属元素的这些化学性质与它的原子的电子结构有密切的关系。

原子是由一个中心核，和绕着核周围分布的电子所组成。核内有中子和质子，核的大小约为 10^{-12} 厘米。电子分布在距核为 10^{-8} 厘米的范围内。核外电子的数目与核内质子的数目相等，原子是电中性的。

围绕核运动的电子的能量不是任意的，也不是连续的，它们分布在一定的能级上。为了说明电子的能量状态，我们用量子数来描述它。在一个多电子的系统里，一个电子必须满足四个量子条件，它们是：

1) 电子的总能量基本上为正整数 n 的函数，即 $W_n = f(n)$ 。式中 $n = 1, 2, 3, \dots$ 。 n 被称为主量子数， n 越大，它的能级越高。

2) 电子的动量矩 $P = \sqrt{l(l+1)} \left(\frac{h}{2\pi} \right)$,

式中 $l=0, 1, 2, 3, \dots, n-1$, l 称为輔量子数。当 n 給定时, l 可取自 0 起至 $(n-1)$ 为止的各正整数。在多电子原子中, n 相同而 l 不同的电子, 其能量不同。对于同一 n 的状态来说, l 越大, 其能量亦越大。

3) 电子动量矩 P 在任一給定方向 (如外磁場方向) 上的分量 $P_z = m_l \left(\frac{h}{2\pi} \right)$, 式中 $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ 。 m_l 称为磁量子数, 当 l 給定时, m_l 可取自 $-l$ 至 $+l$ 各整数值 (包括 0 在內)。对具有同一 n 及 l 的状态, 不同的 m_l 有不同的能量, m_l 越大, 其能量越大。

4) 电子的自旋角动量矩 $P_s = \sqrt{S(S+1)} \left(\frac{h}{2\pi} \right)$, 式中 $S = \frac{1}{2}$ 。在給定方向 (外磁場方向或动量矩 P 的方向) 上的分量 $P_{\text{自}分} = m_s \left(\frac{h}{2\pi} \right)$, 式中 $m_s = \pm \frac{1}{2}$ 。 m_s 称为自旋量子数, 只能取 $\pm \frac{1}{2}$ 两个值。

这样, 核外电子的能量状态由四个量子条件来决定。当量子条件的具体数值給定时, 就改称它們为量子数。或者可以更确切認為, 核外电子的能量状态由四个量子数 n, l, m_l 及 m_s 来决定。

原子的电子結構, 最常見的是壳层模型, 在这个模型里, 具有不同的主量子数的电子, 分布在不同的壳层上。例如, $n=1, 2, 3, \dots$ 等状态, 分別称为 K、L、M、N……等壳层。同一壳层中按輔量子数 l 不同, 又分为若干次层, $l=0, 1, 2, 3, \dots$ 等的电子分布在 s、p、d、f……等不同的次壳层上。

多电子原子的核外电子的分布, 除每个电子必須滿足四个量子条件外, 还得遵守泡里不相容原理, 即由定值的一組量子数

(n, l, m_l, m_s) 所决定的能量状态, 只允许有一个电子存在, 或者说是同一原子中, 不能有两个或两个以上的电子, 具有完全相同的四个量子数。

根据量子条件和泡里不相容原理推算, 每一壳层 (给定 n 时) 上的电子数 Z_n 不能超过 $2n^2$ 个。每一次壳层上的电子数 Z_e 最多为 $2(2l+1)$ 个。同时, 又知道, 每一次壳层 $s, p, d, f, \dots$ 又可分为亚次壳层, ($s, p, d, f, \dots$ 等次壳层中分别具有 1, 3, 5, $\dots$ 个亚次壳层) 每个亚次壳层中最多不能超过 2 个电子。

2. 金属电学性质的物理本质。 有了以上的知识, 就可以开始研究金属的各种性质了。首先, 是金属的电学性质。我们所研究的金属 (包括合金在内) 是一个宏观的物体, 例如, 一根铜线, 一个铜锭等。它的性质是大量原子结合在一起表现出来的, 例如, 金属有大的导热及导电能力, 有一定力学强度和范性, 它的表面具有特殊的金属光泽等。

金属为什么会有这些性质呢? 这就必须讨论金属的结构, 这个问题解决了, 金属特性的本质亦就解决了。

在讨论金属理论的近代概念以前, 不妨先介绍一下关于金属理论的古典概念。

当金属的许多原子互相靠近时, 它们之间便有相互作用力产生。原子的价电子在它们相互的作用下, 不再隶属于原来单一的原子, 而变为大家所共有。原子失掉了价电子后的剩余部分就是一个阳离子, 共有化了的电子与阳离子之间的作用, 便形成金属的结合。

这种金属结合的概念虽然粗糙, 但是, 用它亦可以定性地解释金属所具有的一些特性。

1) 金属具有较大的范性, 即它可以承受较大的永久形变而不断裂。这与金属结合的特点有关, 因为电子充满了金属原子间的空隙, 金属的一部分相对另一部分发生位移时, 电子与离子的

結合仍然繼續存在，構成范性較大的原因。

2) 金屬的導電性能好，是由于電子的活动性大，在外加電壓的作用下，定向移動，產生了電流。溫度升高時，離子振動的距離（振幅）增加，電子與離子間的碰撞次數增多，電阻自然增大。（導熱性質用同樣的方法可以獲得解釋，電子不但是電的傳播者，同時亦是熱的傳播者）

3) 金屬光澤是共有電子在太陽光的輻射下被激發，發出可見光而引起的。

以上的解釋是定性的，同時亦是極粗糙的，金屬的許多性質，用這種理論計算的結果，與實驗值有很大偏差，說明這種理論是有缺陷的（或者說其近似性差）。例如，根據古典的，共有電子的理論認為金屬的導電，導熱的機構都是“自由”電子（共有電子），並假設“自由”電子的性質和理想氣體相似，稱為“自由”電子氣。將氣體分子運動論中導出的公式，應用於金屬中得到金屬的熱傳導系數 K 和電導率 τ 的數學表達式為：

$$K = \frac{1}{2} n h \bar{v} \lambda$$

$$\tau = \frac{n e^2}{2 m_0} \frac{\lambda}{\bar{v}}$$

式中 n —— 單位體積內“自由”電子數；

h —— 玻爾茲曼常數；

$\bar{v}$ —— 電子運動的平均速度（“自由”電子）；

λ —— “自由”電子的平均自由程；

e —— 每個電子的荷電量；

m_0 —— 電子的質量。

金屬的熱傳導系數與電導率之比 $\frac{K}{\tau}$ 以下式表示：

$$\frac{K}{\tau} = \frac{m_0 \bar{v}^2 h}{e^2}$$

設 T 為金屬的絕對溫度，根據氣體分子運動論有 $\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} R T$

的关系存在。将它代入上式則得，

$$\frac{K}{\gamma} = \frac{3h^2 T}{e^2}$$

古典金屬“自由”电子論由此式为根据，認為金屬的导热系数与电导率之比和金屬的絕對溫度成正比，与金屬的种类无关。由实验知道，不同金屬的 $\frac{K}{\gamma}$ 比值是近似的，但不完全相同。溫度越低相差越大，合金和純金屬相差更大。

古典金屬“自由”电子論由电导率 $\gamma = \frac{ne^2 \bar{v}}{2m_0 v}$ 出发，引

用气体分子运动論中 $\bar{v} \sim \sqrt{T}$ 的关系，認為电导率和絕對溫度的平方根成反比。实验証明金屬电导率和絕對溫度成反比，而不是和絕對溫度的平方根成反比。

古典金屬电子論的缺陷是由于不正确地将适用于宏观范围的牛頓力学定律引入微觀世界所产生的。

1935年以后到现在，以量子力学为基础的能带理論有了发展，能带理論可以較正确地解释了古典电子論所不能解释的許多現象。下面簡單介紹一些能带理論的知識。

金屬是由无数的金屬原子結合而成的，金屬原子的最外层是价电子，当許多金屬原子互相接近时，价电子开始“共有化”，这个过程的实际，古典电子論和能带理論对它的認識具有原則的分歧。

能带理論認為，当金屬原子互相接近时，內层能級之間的相互作用是可以不考虑的，需要考慮的仅仅是外层能級。以鋰作为例子，来考查金屬鍵的形成。在正常的鋰原子中，1S能級是完全被填滿的（有两个电子），但2S能級不滿，只有一个电子。原子互相接近时，对于2S能級來說，由于电子共有化，就象2S能級多了电子是一样的。根据泡里不相容原理，一个原子中，同一能量状态的电子不能多于两个（亦不能等于两个），于是2S能級由于电子的相互作用进行了分裂。根据理論推算，N