

现代冶金丛书

# 金属学原理

徐祖耀 著

上海科学技术出版社

75  
496  
C.2

现代冶金丛书

# 金属学原理

徐祖耀 著

上海科学技术出版社

## 內 容 提 要

本书介绍金属学的一般原理,包括金属的结构、金属相变热力学、金属的结晶理论、合金的结构及其形成条件、合金热力学、二元合金的相图及结晶、各类三元相图、扩散、形变和再结晶、各种固态相变及相变理论。

本书可供金属学专业科学技术人员和高等学校师生参考。

现代冶金丛书

金属学原理

徐祖耀 著

---

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出093号

---

上海新华印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/25 印张 18.24/25 插页 19 排版字数 418,000

1964年1月第1版 1964年1月第1次印刷

印数 1—5,560 (其中精装本60本)

统一书号 15119·1771 定价(十二) 2.75元

00886

## 現代冶金丛书編輯委員會

主任委員：周志宏

常務委員：吳自良 徐祖耀 張文奇 鄒元熾 黃培云 靳樹梁

委 員：田庚錫 孫珍寶 孫德和 嚴東生 汪 顯 李 薰

吳自良 邵象華 陳舜揆 周自定 周行健 周志宏

周宗祥 郁國城 胡為柏 柯 俊 徐祖耀 顧翼東

許順生 傅元慶 張文奇 鄒元熾 童光煦 張沛霖

黃培云 靳樹梁 楊尙灼 葛庭燧 錢臨照 魏壽崑

(以姓氏筆劃為序)

3/20/01

## 《現代冶金丛书》序言

近世紀來，冶金科學隨着冶金工業的發展和國防、尖端科學技術的需要，正如其他學科一樣，高速度地向前邁進。過去金屬的冶煉多憑操作經驗，被認為是一種藝術。其後，應用物理化學的原理結合生產情況，通過實驗，掌握了冶金過程的反應規律，因而使冶金技術成為一種實用的科學。另一方面，由於固體物理的發展進入金屬的領域，在充分運用數學和物理的理論與方法以及先進實驗技術的基礎上來研究金屬的基本性質，尋求金屬的成分、結構、組織和性能間關係的規律，並進一步應用其理論與觀點來指導生產實踐，如應用合金理論，晶體缺陷及金屬強度理論，擴散與相變理論等都屬於這一範疇。近年來，由於有關金屬方面科學研究工作的需要，新的實驗工具與技術又得到了發展。如高溫金相，電子顯微鏡（包括金屬薄膜技術），場致發射顯微鏡，放射性同位素，電子、中子衍射，X射線衍射及散射（包括漫散射，小角度散射及顯微技術），X射線顯微光譜分析等近代實驗方法，為這方面的研究工作提供了更有利的條件。

，在生產實踐過程中，從採選、冶煉到加工、處理，同樣也創造了不少的新技术和新工藝，如在冶煉過程中廣泛應用氧氣與真空技術，不僅提高了金屬的產量，而且顯著地改善了產品的質量。其中尤以氧氣轉爐煉鋼，因為具有一系列優點，有其廣闊的發展前途。連續鑄錠起初用於有色金屬，近年來已推廣運用於鑄鋼，其應用範圍日益擴大，對增產節約金屬原料起着一定的作用。利用高溫高壓以強化冶金過程是新的途徑之一。等離子體的火焰溫度常用范

圍从  $4000^{\circ}\text{C}$  左右到  $10,000^{\circ}\text{C}$ ，最高达  $50,000^{\circ}\text{C}$ ，有可能用以进行热分解、气相氯化、气相还原等反应。此外热加工方面的連續、精密及粉末軋制，爆破成型，电渣熔焊，变形奥氏体的淬火以及真空热处理等都在原有的基础上有了不同程度的提高和新的創造。至于目前一些常规的、已应用于大规模生产的冶炼方法，也在不断地改进中。如試驗直接冶炼鋼、銅、鋁等，尽管其使用範圍有限，但不失为今后的发展方向。

从上述簡單的举例，可以看出冶金科学技术的丰富内容和一些重大的成就。显然，这些成就就是和世界冶金工作者长时期来的辛勤劳动分不开的。同时，由于国防、尖端科学技术的日益需要，对稀有金属、超純金属、高温合金、精密合金以及耐热鋼、超高强度鋼等金属材料提出愈来愈高的要求；因此可以預見，今后这方面的成就，又必然会大大地丰富冶金科学的内容。

解放后，我国冶金工业和其他工业一样，在党的正确领导下，得到迅速的发展，并已取得一定的成就。但为了进一步促进我国冶金科学技术的发展和繁荣，培养和扩大冶金工作者的队伍，使我国冶金科学技术水平能在不太长的時間內接近或赶上国际先进水平，还有賴于加强学术經驗的交流与傳播。上海科学技术出版社根据上述要求，邀請國內冶金专家和学者組成“现代冶金丛书”編輯委员会，从事丛书的計劃和編审工作。这一套由我国冶金工作者自己編写的“现代冶金丛书”，将体现党发展科学文化的百花齐放、百家爭鳴的方針，根据我国冶金科学发展的需要，有系統地反映现代冶金科学技术的成就和我国冶金工作者的研究成果，以及当前国际与國內冶金科学的学术水平。这是一項有意义而又艰巨的工作，因此，十分期望全国冶金工作者予以大力支持和协助，使本丛书能更加符合广大讀者的需要。我們深信：“现代冶金丛书”

的编写与出版,不仅有利于冶金工作者学术水平的提高,而且也有助于我国整个冶金事业的进步。

周志宏

1962年10月于上海

## 前 言

金属学原理简单介绍金属学中的一般规律,是金属学的初阶。

作者于1956年受高等教育部之約主編金相学,迟迟未敢动笔,至1959年和当时北京钢铁学院的同事们合編金相学上册(即金属学原理),初稿几近完成,但因故中綴,未能付梓。本书的系統大体仍按照金相学上册的安排,但內容上作了一些改动和补充,以符合现代冶金丛书的要求。作者希望本书既能适合初学者順序漸进地学习金属学的基本原理,又能为具有一定基础的讀者提供一些进修的途徑。至于效果如何,有待于实践的考驗。

根据目前金属学的发展,須以晶体学、热力学、动力学、統計热力学和量子力学为基础,才能将金属学原理作比較深入和一些定量的闡明;但为了适合目前条件,本书仅以物理化学为基础作概略和定性的叙述。

书中所用热力学参数的符号列在卷首。当以相同的符号表示不同参数或应用特殊的符号时,就在引用时加以說明。所引用的参考文献不一一附列,但大多数文献出处均可在每章末所附总结性参考資料內找到。书中所用名詞采取本专业的习惯詞目。

由于作者学識淺薄,本书內所論及或引述的观点难免有偏頗或錯誤之处,全书的科学性和邏輯性均存在不少問題,希有关专家及讀者多加指正。

在編写本书过程中,承周志宏教授及有关方面的关注和鼓励,本书初稿承吳自良、許順生和陈炳兆三位教授审阅并提出珍貴意見,編写出版工作承李文聚同志协助,作者謹表示深切的感謝。



## 热力学参数符号

名 称	符 号	备 注
内能	$U, u$	
熵	$S, s$	
混合熵	$S_{混}$	
热力势(Gibbs 自由能, 等压位)	$G$	简称自由能
单位原子热力势	$g$	简称自由能
单位体积热力势	$g_v$	简称自由能
自由能(Helmholtz 自由能, 等容位)	$F$	
单位原子自由能	$f$	
单位体积自由能	$f_v$	
热焓	$H$	
化学势(化学位, 偏克分子自由能)	$\mu$	
潜热	$L$	
热容量(比热)		
恒压	$C_p$	
恒容	$C_v$	
克分子浓度	$N$	
Avogadro 常数	$N$	
Plank 常数	$h$	
Boltzmann 常数	$k$	
气体常数	$R$	
活度	$a$	
等温压缩系数	$k$	
等压膨胀系数	$\alpha$	
压强	$p$	
体积	$V, v$	
温度	$T$	
相变临界点	$T_c$	

名 称	符 号	备 注
过冷度	$\Delta T$	
克原子量	$M$	
密度	$\rho$	
表面張力、表面能	$\sigma$	
面积	$A$	
界面能	$E$	
应变能	$Z$	
半徑	$r$	
主曲率半徑	$R$	
临界半徑	$r_k$ 或 $r^*$	
形核率	$\dot{N}$	
长大綫速度	$\dot{G}$	
能量漲落(均匀形核)	$\Delta G^*$	或称能量起伏
能量漲落(非均匀形核)	$\Delta G_H^*$	或称能量起伏
頻率	$\nu$	
原子激活能	$U$	
克原子激活能	$Q$	
附: 应力	$\sigma$	
应变	$\delta$	
硬化率	$a$	
泊桑比	$\nu$	
彈性模量	$G$	

# 目 录

## 前 言

## 热力学参数符号

緒 論 .....	1
第一章 金属的结构 .....	5
一、单原子金属 .....	5
1-1 金属的单原子状态 .....	5
二、固体金属的结构 .....	10
1-2 原子的結合 .....	10
1-3 金属键 .....	10
1-4 固体的空間点陣和結晶系 .....	12
1-5 金属的结构类型 .....	15
1-6 亚金属的结构类型 .....	22
1-7 原子坐标、結晶面指数和方向指数 .....	23
1-8 原子半徑 .....	27
1-9 晶体的結合能 .....	43
1-10 多晶体金属 .....	45
三、晶体的缺陷 .....	47
1-11 点缺陷 .....	47
1-12 綫缺陷 .....	50
1-13 面缺陷 .....	57
1-14 缺陷对晶体性质的影响 .....	69
四、液体金属的结构 .....	70
1-15 液体金属的结构 .....	70
1-16 液体金属的特点 .....	74
参考資料 .....	76
第二章 金属的相变, 金属的結晶 .....	77
一、单元系相变的热力学, 金属中的相变 .....	77

2-1 单元系的相平衡	77
2-2 一级相变	78
2-3 相界面热力学	81
2-4 二级相变	84
2-5 金属中的相变	87
二、金属的结晶	88
2-6 均匀形核	88
2-7 非均匀形核	93
2-8 晶体长大的二维形核理论 (Kossel-Stranski 理论)	96
2-9 晶体长大的现代理论	97
2-10 影响晶体长大速度的因素	99
2-11 结晶动力学	103
2-12 结晶后金属的晶粒大小	107
2-13 晶体的形状	109
2-14 结晶时晶体缺陷的形成	114
2-15 铸锭的结晶	116
参考资料	118
第三章 合金相的结构	119
一、固溶体	119
3-1 固溶体的类型	119
3-2 替代式固溶体的点阵常数	120
3-3 替代式固溶体的实际结构	121
3-4 固溶体内的缺陷	124
3-5 形成连续固溶体的条件	127
3-6 影响替代式固溶体溶解度的因素	128
3-7 间隙式固溶体	136
3-8 有序固溶体	138
二、中间相	145
3-9 正常价化合物	145
3-10 电子化合物	148
3-11 Laves 相	152
3-12 $\sigma$ 相	157
3-13 具有砷化镍结构的合金相	160

3-14 間隙相 .....	162
3-15 具有复杂结构的間隙化合物 .....	168
参考資料 .....	170
第四章 二元合金的相图及結晶 .....	171
一、二元系的相平衡 .....	171
4-1 固溶体的自由能 .....	171
4-2 混合相的自由能 .....	175
4-3 多元系复相平衡的条件 .....	176
4-4 平衡相的自由能曲綫 .....	178
4-5 与化合物形成平衡的自由能曲綫 .....	181
4-6 一級相变和二級相变时的相平衡 .....	182
二、平衡图的測制 .....	184
4-7 由合金的自由能曲綫測制平衡图 .....	184
4-8 由活度測定平衡图 .....	184
4-9 热分析法 .....	191
4-10 其他測定方法及相图结构的判別 .....	198
三、相图及合金的結晶 .....	202
4-11 液态合金的溶解度 .....	202
4-12 关于固态溶解度 .....	204
4-13 两组元在液态和固态都呈无限溶解的二元系 .....	208
4-14 合金鑄錠的結晶 .....	217
4-15 利用选择結晶原理将金属提純的方法 .....	224
4-16 具有共晶轉变的二元系 .....	226
4-17 具有包晶轉变的二元系 .....	237
4-18 形成化合物的二元系 .....	240
4-19 两组元在液态和固态都呈有限溶解的二元系 .....	243
4-20 具有固态轉变的二元相图 .....	247
4-21 合金中的偏析 .....	256
4-22 相图与合金性质間的关系 .....	259
参考資料 .....	262
第五章 三元系 .....	264
一、三元系概述 .....	264
5-1 三元相图的合金成分表示法 .....	264

5-2 杠杆定則和重心規則的应用 .....	268
5-3 三組元在液态和在固态都呈无限溶解的三元系 .....	270
5-4 具有四相共晶轉变的簡單三元系 .....	275
二、具有三相平衡的三元系 .....	282
5-5 三組元在液态完全溶解、一对組元組成共晶系、其余两 对組元在固态呈无限溶解的三元系 .....	282
5-6 三組元在液态完全溶解、两对組元組成共晶系、其他一 对組元在固态完全溶解的三元系 .....	290
5-7 三組元在液态完全溶解、两对組元組成包晶系、其他一 对組元在固态完全溶解的三元系 .....	295
5-8 三相共晶轉变及包晶轉变中平衡相濃度的变化 .....	297
5-9 一对組元具有包晶轉变、一对組元具有共晶轉变、其他 一对組元在固态互溶的三元系 .....	298
5-10 組元在液态不完全溶解、具有偏晶轉变的三元系 .....	303
三、具有四相平衡的三元系 .....	306
5-11 三元系內的四相平衡轉变 .....	306
5-12 具有三元共晶轉变的三元系 .....	308
5-13 两对組元形成包晶轉变、另一对組元形成共晶轉变的 三元系 (具有共晶-包晶轉变的三元系) .....	313
5-14 两对組元形成共晶轉变、另一对組元形成包晶轉变的 三元系 (具有共晶-包晶轉变的三元系) .....	318
5-15 三对組元都形成共晶轉变、具有共晶-包晶轉变的三元 系 .....	321
5-16 具有三元包晶轉变的三元系 .....	323
5-17 具有三元偏晶轉变的三元系 .....	327
四、形成化合物的三元系 .....	334
5-18 形成二元化合物的三元系 .....	334
5-19 形成三元化合物的三元系 .....	338
5-20 三元系相图中相区接壤規則 .....	339
五、具有固态轉变的三元系 .....	340
5-21 具有两相平衡固态轉变的三元系 .....	340
5-22 具有三相平衡固态轉变的三元系 .....	341
5-23 具有四相平衡固态轉变的三元系 .....	343

六、三元系实例 .....	348
5-24 Al-Fe-Si 系的一角 .....	348
5-25 Fe-Si-C 系的垂直截面 .....	351
参考資料 .....	352
第六章 扩 散 .....	353
一、扩散方程及其解 .....	353
6-1 Fick 第一定律 .....	353
6-2 Fick 第二定律 .....	354
6-3 非稳态的扩散方程解——无限大物体中的扩散 .....	356
6-4 非稳态的扩散方程解——半无限大物体中的扩散 .....	360
6-5 扩散系数 $D$ 是浓度的函数时非稳态扩散方程的解 (Boltzmann-Matano 解) .....	364
二、扩散的机理 .....	365
6-6 直接交换 .....	365
6-7 间隙模型 .....	366
6-8 空位迁移模型 .....	367
6-9 Kirkendall 效应 .....	367
三、影响扩散的因素 .....	369
6-10 键能的影响 .....	369
6-11 晶体结构及位向 .....	371
6-12 晶界扩散 .....	371
参考資料 .....	376
第七章 范性形变及再结晶 .....	377
一、单晶体的形变 .....	377
7-1 滑移 .....	377
7-2 多系滑移 .....	384
7-3 滑移带和滑移线 .....	385
7-4 孪生 .....	386
7-5 不对称变向 .....	390
二、多晶体的形变 .....	391
7-6 晶粒间界及相邻晶粒对形变的作用 .....	391
7-7 多晶体形变的特征 .....	392
7-8 金属的晶粒大小对力学性质的影响 .....	393

7-9 形变后組織的改变 .....	396
三、金属經形变后性质的改变 .....	397
7-10 加工硬化 .....	397
7-11 形变織构 .....	399
7-12 形变应力 .....	401
7-13 其他性质的改变 .....	402
四、合金的范性形变 .....	403
7-14 固溶体的形变 .....	403
7-15 两相混合物的形变 .....	407
五、回复和再結晶 .....	408
7-16 回复 .....	408
7-17 多边形化 .....	411
7-18 再結晶 .....	413
7-19 晶粒长大 .....	419
7-20 再結晶后金属的晶粒度 .....	421
7-21 二次再結晶 .....	423
7-22 再結晶織构 .....	423
7-23 退火孪晶 .....	424
7-24 热加工 .....	427
六、位錯理論概略 .....	428
7-25 位錯模型的提出 .....	428
7-26 位錯的运动 .....	431
7-27 位錯的增殖 .....	433
7-28 位錯的堆积及交互作用 .....	434
7-29 位錯的反应 .....	436
7-30 理論的应用示例 .....	436
参考資料 .....	440
第八章 固态相变 .....	441
一、相变分述 .....	441
8-1 固态相变的类别 .....	441
8-2 同素异构轉变 .....	442
8-3 共析轉变和包析轉变 .....	446
8-4 脫溶轉变 .....	449



8-5 馬氏体型相变 .....	455
8-6 二級相变 .....	464
二、相变理論 .....	467
8-7 相变热力学 .....	467
8-8 相变动力学 .....	473
8-9 相变結晶学 .....	480
8-10 晶体缺陷的作用 .....	484
参考資料 .....	486
附录 Gauss 誤差函数值 .....	487
索引 .....	488