

部 定 大 學 用 書

金屬物理學

國立編譯館大學用書編審委員會主編

陸 志 鴻 編 著

國 立 編 譯 館 出 版
正 中 書 局 印 行

部 定 大 學 用 書
金 屬 物 理 學

國立編譯館大學用書編審委員會主編

陸 志 鴻 編 著

江苏工业学院图书馆
藏 书 章

國 立 編 譯 館 出 版
正 中 書 局 印 行



版權所有

翻印必究

中華民國五十年七月臺初版
中華民國六十五年十一月臺五版

部定大
學用書

金屬物理學

全一冊 基本定價 平三元三角
精四元四角

(外埠酌加運費滙費)

主編者 國立編譯館大學用書編審委員會
編著者 陸志鴻
出版者 國立編譯館
發行人 黎元譽
發行印刷 正中書局

(臺灣臺北市衡陽路二十號)

海外總經銷 集成圖書公司
(香港九龍油麻地北海街七號)

海風書店
(日本東京都千代田區神田神保町一丁目五六番地)

東海書店
(日本京都市左京區田中門前町九八番地)

新聞局出版事業登記證 局版臺業字第〇一九九號(4645)協
(500)

序 言

金屬物理學乃研究有關於金屬之物理性質與機械性質之一切理論與實用上諸問題之學問。詳言之，即由理論方面解釋金屬材料之種種性質與現象，並研究其在工業應用上種種技術問題之改進與發展。以近代物理、固態物理、物理化學等學問為基礎，以金屬顯微鏡、電子顯微鏡、X線繞射法等實驗方法為工具。其歷史甚短，肇始於前世紀末、最近三、四十年來發展迅速。今後仍在繼續發展途中。此學問德國名之為Metallkunde；英美名之為physical metallurgy, metal physics等，各國似尚無統一名稱。吾國有物理冶金學一譯名，因此學問不包括冶煉方面之問題，故本書不採用此名。此學問為金屬材料之使用者及新材料之研究者所必需習知之一種基本學問。本書內容盡量避免過於高深之理論，以適用為冶金、機械等學系之教本。惟對於今日所知關於金屬性質之一般理論則盡量網羅之。本書共分十二章：第一章至第四章述金屬及合金之基本知識；第五章述差排理論。今日說明金屬之塑性性質時多用差排理論，故本書內敘述較詳；第六章解釋金屬之物理性質；第七章解釋金屬之機械性質，說明降伏理論，疲勞理論及潛變機構；第八章述金屬及合金內之擴散；第九章述放射線損傷；第十章述金屬之內耗；第十一章述麻田散鐵變態及析出硬化等熱處理理論；第十二章述金屬之腐蝕與防蝕。本書內插圖由宋一鳴君描繪，特此誌謝。

金屬物理學

目 次

序 言

第一章 原 子

1.1	Bohr 氏原子模型	1
1.2	量子力學上之表示	3
1.3	原子構造與元素週期律	6
1.4	激勵與電離	12
1.5	原子之結合	13
1.6	原子間距離	19
1.7	能 帶	22
1.8	自由電子	24
1.9	Brillouin 區	28
1.10	金屬、半導體、絕緣體	30
1.11	導體內電子能之分佈	32
1.12	導電與導熱	34
1.13	Hall 效應	37
1.14	原子核反應	38

第二章 金屬之結晶構造

2.1	結晶格子	43
2.2	結晶構造之求法	48
2.3	X 線繞射法	48

2.4	電子線繞射.....	55
2.5	中子線繞射.....	57
2.6	重要之格子面及格子直線.....	58
2.7	相 律.....	59
2.8	結晶粒.....	62
2.9	氣孔、罅隙及夾雜物.....	66

第三章 合金之平衡狀態圖

3.1	固溶體.....	68
3.2	規律格子.....	72
3.3	中間相.....	76
3.4	合金之平衡圖.....	78
3.5	基本二成分系合金之平衡圖.....	80
3.6	合金內相之自由能.....	89
3.7	三成分系合金平衡圖.....	93
3.8	數種重要合金平衡圖.....	95

第四章 金屬組織實驗

4.1	金屬用顯微鏡.....	120
4.2	電子顯微鏡.....	123
4.3	特種顯微鏡.....	124
4.4	溫度測定法.....	126
4.5	熱分析法.....	131
4.6	熱膨脹測定法.....	133

第五章 差 排

5.1	結晶內之滑動.....	135
5.2	結晶內之缺陷.....	137

5.3	差 排·····	138
5.4	Burgers 向量·····	143
5.5	差排近傍之應變與應力·····	146
5.6	差排之應變能·····	147
5.7	差排間相互作用之力·····	149
5.8	差排之運動·····	151
5.9	差排與原子空孔或格子間原子·····	154
5.10	差排運動時所必需之臨界剪應力·····	156
5.11	結晶內之差排·····	158
5.12	差排之繁殖 Frank-Read 源·····	162
5.13	結晶生長與差排·····	164
5.14	結晶溶解與差排·····	166
5.15	結晶境界與差排·····	167
5.16	部分差排·····	170

第六章 金屬之物理性質

A 導電性質

6.1	電 阻·····	177
6.2	半導體·····	180
6.3	金屬之導電·····	182
6.4	熱電效果·····	185

B 磁 性

6.5	原子之磁性·····	186
6.6	磁 區·····	192
6.7	磁 化·····	196
6.8	磁歪與內部應力·····	198

目 次

6.9	高導磁率材料	200
6.10	耐久磁石材料	202
6.11	磁性氧化物	204

C 關於熱之性質

6.12	焔	208
6.13	比 熱	214
6.14	活性化能	218
6.15	同素異態	219

第七章 金屬之機械性質

7.1	塑性變形時應力與應變之關係	221
7.2	單結晶內之滑動	226
7.3	雙晶變形	230
7.4	金屬之降伏點	235
7.5	降伏理論	237
7.6	析出硬化時之降伏強度	238
7.7	固溶體合金之降伏強度	242
7.8	加工硬化	244
7.9	破 壞	246
7.10	低溫加工與退火	251
7.11	疲 勞	262
7.12	疲勞理論	264
7.13	影響於疲勞強度諸因素	267
7.14	潛 變	268
7.15	潛變時之永留變形機構	271
7.16	抵抗潛變之金屬	273

目 次

第八章 金屬及合金內之擴散

8.1	Fick 氏定律	276
8.2	擴散係數與溫度之關係	281
8.3	擴散係數與濃度之關係	283
8.4	Kirkendall 效果	286
8.5	擴散機構	287
8.6	自己擴散	289
8.7	合金內之擴散	290
8.8	短路擴散	291
8.9	擴散係數之測定	292
8.10	氧化物層之生長	296
8.11	鋼之滲碳	297

第九章 放射線損傷

9.1	概 說	299
9.2	放射線損傷之形成	303

第十章 內 耗

10.1	概 說	307
10.2	擬彈性	309
10.3	熱彈性	313
10.4	原子之擴散	315
10.5	由於界面粘性之內耗	319
10.6	由於差排之內耗	320
10.7	特種內耗	323

第十一章 熱處理理論

第一節 變 態

目 次

11.1	鎔解與凝固.....	326
11.2	純金屬之變態.....	328
11.3	共析變態.....	329
11.4	鋼之恆溫變態.....	330
第二節 麻田散變態及回火時之碳化物反應		
11.5	麻田散變態之特徵.....	335
11.6	麻田散變態與差排.....	340
11.7	麻田散變態之熱力學上觀念.....	341
11.8	合金鋼回火時之碳化物反應.....	343
第三節 析出與時效		
11.9	概 說.....	350
11.10	析出之熱力學觀念.....	352
11.11	時效現象.....	355
11.12	G-P層.....	357
11.13	過渡格子.....	362
11.14	差排等格子缺陷對於析出之影響.....	363
11.15	析出時性質之變化.....	365
第十二章 腐 蝕		
12.1	腐蝕理論.....	368
12.2	金屬之腐蝕性.....	374
12.3	高溫腐蝕.....	377
12.4	特種腐蝕.....	380
12.5	腐蝕試驗法.....	382
12.6	防蝕法.....	383

附錄	第1表	肉眼觀察所用金屬浸蝕液.....	389
	第2表	顯微鏡觀察所用金屬浸蝕液.....	389
	第3表	加熱蝕法.....	392
	第4表	電解研磨液.....	393
	第5表	電解浸蝕液.....	396
	第6表	溫度改算表.....	399
參考讀物			400

金屬物理學

第一章 原子

1.1 Bohr氏 原子模型 純金屬或合金在固態時皆由多數結晶粒集合構成。各結晶粒由多數相同方位之微晶構成，相異結晶粒各異其方位。各微晶內含多數原子，成有規則排列。原子構造與金屬性質有密切關係。

原子直徑約 10^{-8} cm (即 Å) 程度。原子質量約 10^{-24} 至 10^{-22} g。電子之靜止質量 m 為 9.1085×10^{-28} g，為質子 (proton 即氫原子核) 或中子 (neutron) 質量之 $\frac{1}{1840}$ 倍。電子電荷之絕對值 e 為 1.601×10^{-19} coulomb, 即等於質子之電荷。原子核之正電荷為 $+Ze$, Z 為原子序數，乃正整數。 Z 為核外電子數，核外電子之總電荷為 $-Ze$ ，故原子為電的中性。原子核內有 N 個中子與 Z 個質子， N 亦為正整數。 $N+Z$ 與原子量數甚接近。氫原子之 $Z=1$ ，即有一個核外電子。其原子量為 1.0078，其原子核內有 1 個質子。天然氫中含原子量為 1 之氫 (${}_1H^1$) 與原子量為 2 之重氫 (${}_1H^2$)。重氫與氧之化合物為重水。氫與重氫為同位元素 (isotope)。多種元素各有數種同位元素。

原子模型為 1913 年 Niels Bohr 教授所創說。彼假設下列三種推論為立論之依據。此種推論乃以實驗結果為根據。

(i) 電子與核間有 coulomb 力之作用，此力與電子環繞於軌道上之離心力相平衡。因電子質量極微，故其重力與上二力相較可以略去。

(ii) 一座標上電子運動量之一週期間積分值為 Plank 常數 h 之正整數 n 倍。 n 為主量子數。 $h = 6.624 \times 10^{-34}$ joule sec.。

(iii) 電子自一軌道跳至他軌道時有能量變化。自大能量軌道移至小能量軌道時，剩餘能量 ΔE 成爲單色光（一般爲電磁波）或 X 射線而放出。反之則吸收。波之頻率 ν 與 ΔE 間有下之關係：

$$h\nu = \Delta E$$

例如氫原子之核外電子軌道皆爲圓，則由(i)知

$$mrv\omega^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \dots\dots\dots (1.1)$$

式中 m 爲電子質量， r 爲軌道半徑， ω 爲電子運動於軌道上之角速度。上式中 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ farad, $m^{-1} = \frac{10^7}{4\pi c^2}$ 乃用 MKS 單位時之改算係數。式中 c 爲光速即爲 2.998×10^8 m/sec。

由 (ii) 得

$$\oint p dq = nh \dots\dots\dots (1.2)$$

式中 p 爲電子之運動量， q 爲某座標， n 爲正整數， $n=1, 2, 3, \dots$ 。電子位置以極坐標表示時，

$$\oint p dq = \int_0^{2\pi} mr^2 \omega d\theta = 2\pi mr^2 \omega = nh$$

$$\text{即} \quad mr^2 \omega = n \cdot \frac{h}{2\pi} \dots\dots\dots (1.3)$$

由 (1.1) 式與 (1.3) 式得

$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \dots\dots\dots (1.4)$$

因之電子軌道半徑由主量子數 n 而定，其中間軌道不存在。此半徑如下：

$$r_1 = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \times 1^2 = 0.53 \text{ \AA}$$

$$r_2 = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \times 2^2 = 4r_1$$

$$r_3 = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \times 3^2 = 9r_1$$

.....

核外電子所有之能 E_n 爲電子之動能與位能之和。 $r \rightarrow \infty$ 時靜止電子之位能取爲零，因電子之電荷爲負，故其位能取爲負值。

$$E_n = \frac{1}{2} m (r\omega)^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

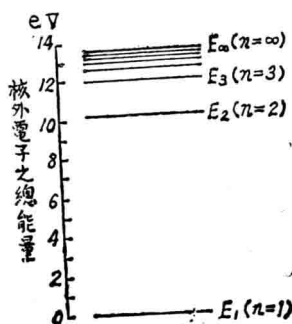
將 (1.1) 式與 (1.4) 式代入之得

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -13.6 \times \frac{1}{n^2} \text{ ev} \dots\dots\dots (1.5)$$

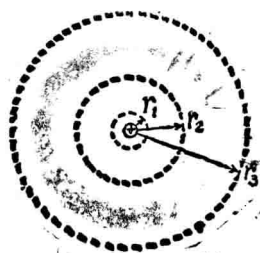
n 增大時能量亦增高，而相鄰 n 值間之能量差隨 n 之增大而漸狹小。
 $n \rightarrow \infty$ 時 $E_\infty = 0$ 而電子軌道半徑則隨 n 之增加而速增， $n \rightarrow \infty$ 時 $r \rightarrow \infty$ 。

$$E_\infty - E_1 = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}$$

第 1.1 圖爲能準位 (energy level) 圖，第 1.2 圖爲電子軌道半徑圖。
 電子能量以 ev (electron volt) 爲單位。 1 ev 者電子由 1 v 電位差自靜止狀態加速時所得之動能。 $1 \text{ ev} = (1 \text{ volt}) \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ coulomb}) = 1.6 \times 10^{-19} \text{ joule}$ 。



第 1.1 圖



第 1.2 圖

氫原子之核外電子在於最低能準位 ($n=1$)，即核外電子在於最內側軌道。能量最低狀態最爲安定。通常狀態之氫其核外電子軌道半徑爲 $0.53 \text{ \AA}$ 。

1.2 量子力學上之表示 Bohr 原子模型雖能說明原子構造，然

須賴量子力學以補充之。此理論由 De Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Bohr 等氏所完成。Schrödinger 氏波動方程式 (wave equation) 如下：

$$-\frac{h^2}{8\pi^2m}\nabla^2\psi + (E - V)\psi = 0 \dots\dots\dots (1.6)$$

$$\nabla^2\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}$$

式中 h 為 Planck 常數， ψ 為座標 x, y, z 之函數。 $|\psi(x, y, z)|^2$ 為電子在 (x, y, z) 位置時之或然率密度，即電子在 (x, y, z) 位置處之單位體積內之或然率。 E 為電子之總能量， V 為電子之位能。上述之微分方程式在 $r \rightarrow 0$ 至 $r \rightarrow \infty$ 時 $\psi(x, y, z)$ 不為無限大之條件下， E 為特定值時可有其解。此式應用於氫原子時，將 $V = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ 代入而求 E 之特定值，得

$$E = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (n \text{ 為正整數}) \dots\dots\dots (1.7)$$

此式與 (1.5) 式完全一致。即電子可視為有質量而帶負電荷之粒子，同時亦有電磁波動之性質。電子流在結晶內可與 X 射線依同一物理定律而起繞射。

電子在原子內同時有二種運動：一為自轉；一為繞原子核周圍之公轉。電子有電荷，流動電荷可生磁場。

由 Schrödinger 及 Dirac 等氏之波動理論則核外電子之定常態由 n, l, m_l, m_s 四個量子數所決定。能量之近似值由 n 決定， n 為主量子數 (principal quantum number) 或徑向量子數。 l 為副量子數 (secondary quantum number) 或角運動量量子數，或方位量子數 (azimuthal quantum number)。 m_l 為磁量子數， m_s 為自轉量子數。

$$n = 1, 2, 3, 4, \dots\dots\dots$$

n 值一定時, $l=0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$ 共 n 個值
 每個 l 值, $m_l = -l, -l+1, \dots, 0, \dots, l-1, l$ 共 $2l+1$ 個值
 每個 m_l 值, $m_s = \pm \frac{1}{2}$ 共 2 個值

要之 n, l, m_l, m_s 狀態(state) 之電子能量略由主量子數 n 所決定。 $n=1$ 者為 K 層 (K shell), $n=2, 3, 4, 5, \dots$ 者各為 $L, M, N, O, \dots$ 層。 $l=0$ 者為 s 準位, $l=1$ 者為 p 準位, $l=2$ 者為 d 準位, $l=3$ 者為 f 準位, $l=4$ 者為 g 準位, $l=5$ 者為 h 準位, $l=6$ 者為 i 準位。 n 與 l 一定時, m_l 與 m_s 取相異值之準位數 (或席位數) 可求之如下。一般 m_l 一定時 m_s 有 2 個, 又 l 已知時 m_l 值有 $2l+1$ 個。故屬於一個 l 之準位數有 $2(2l+1)=4l+2$ 個。例如 $n=3$ 時其他量子數之可能值 (即準位數或席位數) 如次:

n	3								
l	0		1		2				
m_l	0	-1	0	1	-2	-1	0	1	2
m_s	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$

各元素之原子內所有核外電子之可能佔有諸能準位依能量由大而小之順序, 自上至下, 列表如次(1):

電子層名稱	n	l	能準位名稱	各能準位內可容納之最大電子數
Q	6	2	6d	10
	7	1	7p	6
	7	0	7s	2
P	4	3	4f	14
	5	2	5d	10
	6	1	6p	6
	6	0	6s	2

(1) M.C. Smith, Principles of Physical Metallurgy, 1956. p.8.

<i>O</i>	4 5 5	2 1 0	4 <i>d</i> 5 <i>p</i> 5 <i>s</i>	10 6 2
<i>N</i>	3 4 4	2 1 0	3 <i>d</i> 4 <i>p</i> 4 <i>s</i>	10 6 2
<i>M</i>	3 3	1 0	3 <i>p</i> 3 <i>s</i>	6 2
<i>L</i>	2 2	1 0	2 <i>p</i> 2 <i>s</i>	6 2
<i>K</i>	1	0	1 <i>s</i>	2

各層中 *s* 能準位之電子軌道為球形。由 Pauli 氏排他律 (exclusion principle) 則此一個球形軌道上最多有二個電子。*p* 能準位之電子軌道為橢圓形，此橢圓形軌道可有三個，其長軸通過原子核，互成一定角度。各橢圓形軌道上至多有二個電子。故 *p* 準位處之電子至多有 6 個。同樣 *d* 準位有五個軌道，至多有 10 個電子，*f* 準位處有七個軌道至多有 14 個電子。

1.3 原子構造與元素週期律 週期律表中元素排列順序為原子序數 *Z*，此 *Z* 亦即各元素原子內核外電子個數。核外電子相互間作用較核外電子與原子核間之作用甚小。若略去核外電子間相互作用，則不問核外電子有多少，應皆入於能量最低之 *K* 層內。然由 Pauli 排他律則此為不可能。排他律如下：

某一個電子軌道上不能同時含有二個以上之電子。此二個電子之自轉方向必須相反。換言之某原子內僅有一個核外電子可入於 *n*, *l*, *m_l*, *m_s* 所決定之一狀態（或席位），宛似空間內同一位置不可能為二物體同時佔有之。

氫有一個電子在於 1*s* 之能準位處。氦有二個電子，1*s* 處為滿