



高等学校教学用书

金属学简明教程

北京工业学院金相及热处理教研组编

机械工业出版社

75
163
C.2

高等学校教学用书



金属学简明教程

北京工业学院金相及热处理教研组编

34488/11

机械工业出版社

本书内容包括金属的结晶构造、合金理论、铁碳合金、钢的热处理与化学热处理的原理和工艺、结构钢与工具钢、特殊性能的合金钢、铸铁、有色金属及其合金。

本书是高等学校机械类非金相热处理专业的教学用书，也可供工厂技术人员参考。

金属学简明教程

北京工业学院金相及热处理教研组编

*

第一机械工业部教材编审委员会编辑（北京复兴门外三里河第一机械工业部）

机械工业出版社出版（北京苏州胡同14号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $16 \frac{1}{4}$ ·字数 397 千字

1961年6月中国工业出版社新一版，共印 52,305 册

1960年9月北京第一版·1965年3月北京第二次印刷

印数 15,538—22,538·定价(科五) 1.90 元

*

统一书号: K15033·2235(3432)

目 录

緒論	5
----------	---

第一篇 基本理論

第一章 純金屬的晶体构造及其結晶	9	IV. 金屬的热塑性变形 (热加工)	40
I. 金屬	9	第三章 合金的构造及其結晶	41
II. 金屬的晶体构造及其研究法	15	1. 合金构造的基本类型	41
III. 金屬的結晶过程及理論	20	II. 合金結晶过程的研究——合金状态图	
IV. 固态金屬中的轉变	26	的基本概念	49
第二章 金屬的变形与再結晶	28	III. 二元合金状态图	54
I. 金屬的变形	28	IV. 三元合金状态图	64
II. 塑性变形对金屬的組織和性能的影响	33	V. 合金的性能与状态图之間的关系	69
III. 經過塑性变形后的金屬在加热时的变化	35		

第二篇 黑色金屬

第四章 鉄碳合金状态图	71	IV. 鋼的氮化	135
I. 純鉄和渗碳体的性能	71	V. 扩散金屬法 (如Al, Cr, Si等)	137
II. 鉄碳合金状态图的分析	74	第八章 普通結構鋼	139
III. 合金的結晶过程及組織	76	I. 概論	139
IV. 合金元素对鉄碳合金状态图的影响	80	II. 普通碳素鋼	145
第五章 鋼的热处理原理	82	III. 冷冲压薄板鋼	146
I. 热处理的定义及分类	82	IV. 鍋爐鋼及焊接用鋼	147
II. 鋼在加热时的相变	84	V. 易削鋼	150
III. 鋼在冷却时的相变	88	VI. 低合金鋼	151
IV. 鋼在回火时的相变	97	第九章 优质結構鋼	154
V. 热处理对鋼性能的影响	100	I. 概論	154
第六章 鋼的热处理操作	103	II. 渗碳鋼	160
I. 鋼的加热	103	III. 調质鋼	164
II. 鋼的退火及正火	107	IV. 彈簧鋼	173
III. 鋼的淬火	110	V. 滾珠軸承鋼	176
IV. 鋼的冷处理	119	第十章 工具鋼	178
V. 鋼的回火	119	I. 概論	178
VI. 鋼的表面淬火法 (高频电热表面淬火) ..	120	II. 刃具鋼	178
第七章 鋼的化学热处理	123	III. 量具鋼	188
I. 化学热处理的基本概念	123	IV. 模具鋼	189
II. 鋼的渗碳	125	第十一章 特殊性能的合金鋼	192
III. 鋼的氮化	132	I. 不銹鋼	192

II. 耐热鋼及耐热合金.....	197	II. 鑄鉄的組織.....	216
III. 抗磨鋼.....	207	III. 鑄鉄的性能.....	217
IV. 磁合金.....	208	IV. 各种鑄鉄的牌号.....	218
第十二章 鑄鉄.....	213	V. 鑄鉄的热处理.....	220
I. 鑄鉄的石墨化过程.....	213		

第三篇 有色金屬及其合金

第十三章 鋁及鋁合金.....	223	IV. 特殊青銅.....	242
I. 鋁.....	223	第十五章 其它有色金屬合金.....	243
II. 鋁合金的分类及編号.....	224	I. 軸承合金.....	243
III. 鋁合金的时效热处理.....	225	II. 鎂及鎂合金.....	246
IV. 鍛造鋁合金.....	229	III. 鈦及鈦合金.....	249
V. 鑄造鋁合金.....	233	IV. 鎳及鎳合金.....	252
第十四章 銅及銅合金.....	235	V. 鋅及鋅合金.....	255
I. 銅.....	235	VI. 鈾、鈾和鉛.....	256
II. 銅鋅合金 (黃銅).....	237	VII. 粉末合金.....	258
III. 銅錫合金 (錫青銅).....	240		

緒 論

“金屬學”是研究有關金屬的知識，即研究金屬及其合金的性能同它們內部構造之間的一門科學。

金屬學與其他科學，首先是與物理、化學、材料力學等一般工程科學以及與壓力加工、切削加工、鑄造等工藝科學有着極為密切的聯繫；可以說，金屬學是以物理、化學這類科學為基礎的，而其本身則又成為其他機器製造工藝課程的基礎。

金屬學在現代工業上占有極重要的地位，對於國防工業，機器製造工業，冶金工業，鐵路運輸工業等都起着重要的作用，因為一切工業建設（以及農業，甚至在日常生活上）都必須使用金屬，而沒有金屬學的知識，是不能正確地使用金屬的。

金屬及其合金所以能夠獲得如此廣泛的應用，是因為它不但具有很高的機械強度及優良的塑性，而且尚具有優良的導電性和導熱性，以及其他一系列的物理、化學性及特殊的工藝性。加之，它在地殼中的豐富埋藏量，這就更促成它的廣泛應用。

何以說沒有金屬學的知識就不能正確地使用金屬呢？因為：

首先，不了解金屬的特性，便不能正確地選用金屬。

金屬及其合金的性能在機器製造工藝過程中會受到各種加工形式的強烈影響，不知道這些影響，便不能正確地規定和進行各種工藝過程。換言之，一個現代的工程師或工程技術人員，不懂得金屬學原理，便會犯嚴重的工藝錯誤，造成廢品及浪費，帶來重大損失。

同時，我們還可以對金屬及其合金施以不同形式的加工及處理，例如冷加工及熱處理等，使其性能發生改變以滿足我們的不同要求，而這些都需要有一定的金屬學知識。

再者，由於近代工業的飛躍發展，對於金屬及其合金的性能的要求也隨之日益複雜，為此，必須以金屬學的原理為基礎，研究和創造出更優質的新型合金。

總之，研究金屬學的目的是要了解金屬及其合金的性能，了解金屬及合金的性能與其內部構造的關係或規律，並研究這些內部構造和性能受各種工藝加工的影響，以及用熱處理等加工方法改進其性能，這樣我們就可以正確地選擇和合理地使用金屬及其合金，發揮它們的最大使用價值，或更進一步創造出具有更優越性能的新型工業金屬材料，以滿足高生產率的近代化機器的需要，加速社會主義建設。

金屬學教程是一部新穎的理論課程，但同時又是一部工藝的學科，所以它不僅包括系統的理論學習，而且也需要有實驗、作業及生產實踐的配合。課程的內容基本上包括兩部分：第一部分是論述金屬學的理論基礎，金屬的結晶構造及合金理論，金屬的塑性變形與強度學說，鐵碳合金狀態圖以及熱處理和化學熱處理。第二部分是分別敘述各種工業金屬材料的具体知識：結構鋼、工具鋼、具有特殊物理及化學性能的鋼及合金，以及有色金屬及其合金。由於鐵碳合金（鋼鐵）在現代工業上占有首要的地位，所以關於鐵碳合金方面的理論及熱處理等知識也將討論得比較詳細。

“金屬學”是在生產實踐中發展起來的一門科學，在近代獲得了飛躍的發展。人類應用金屬開始於公元前七千年左右。公元前四千年左右，人類進入了銅器時代。金屬的應用，在我國有

着悠久光輝的历史,我国古代劳动人民曾杰出地創造并积累了許多偉大的科学成就。在殷商时代(公元前1766~1722年),我国的鑄銅技术已达到很高級很純熟的程度。当时,不但已掌握了熔化温度高达1083°C的純銅的冶鑄,而且还能根据不同目的配制了銅錫、銅鉛、銅錫鉛等合金。

此外,我国古代的劳动人民在金屬加工的工艺科学方面也有着卓越的成就,除了不可諱言的鑄造工艺的成就以外,在鍛造和冷加工方面,以及近代的热处理方面也有极其偉大的貢獻。例如,关于热处理工艺方面,在明朝宋应星所著[天工开物](公元1611~1644年)这一宝貴文献中,有如下記載:

关于淬火及退火的例子:“凡鉄鏟(鏟),純鋼为之。未健(淬火)之时,鋼性亦軟,以已健鋼鑿划成纵斜文理,划时斜向入,則文方成陷(陷),划后燒紅,退微冷,入水健。久用乖平,入火退去健性(退火),再用鑿划”。引文括号中是現今述語的注解。可見,当时不仅已完全掌握了退火及淬火对鋼性能的影响規律,而且知道了利用預冷方法施行淬火。

再者关于渗碳热处理的应用,可以“針”的处理作一典型例子。原文說:“凡針,先錘鉄为細条……然后入釜慢火炒熬。炒后以土末入松木,火炙,豆豉三物罨盖,下用火蒸。留針二,三口插于其外,以試火候。其外針入手捻成粉碎,則其下針火候皆足,然后开封入水健之”。此处松木、火炙、豆豉三物即渗碳剂。將針装入渗碳剂,封盖后加热,渗碳完之后即开封淬火。

由此可知,当时的热处理技术已发展至相当高的水平。

在近百年来,由于封建主义及帝国主义的双重压迫,几乎完全抑制了我国工业科学的发展,帝国主义者还有意識地抹煞我国在科学技术上的一切成就和貢獻,以致造成我国的近代工业在解放前的十分落后状态。

自十九世紀中叶,当人們开始应用显微镜来檢驗金屬的显微組織之后,金屬学才有了一个飞跃的发展。所謂“显微組織”意即金屬内部的細微的結晶构造以及其結晶的外形。它与金屬的各种性能有着密切的关系。在1868年,俄国金屬学家Д. К. 切尔諾夫在研究火炮的制造問題时,曾指出火炮质量的好坏“均由鋼的組織所决定”。当时它发现所有优质鋼都具有細晶粒組織,而劣质鋼則都是粗晶粒的組織。

他还指出:加热可以改变金屬的組織,确定了鋼中組織发生根本变化的临界点,奠定了近代金屬学与热处理科学的基础。此外,他还进行了許多杰出的研究工作,如热处理、鋼錠組織与結晶过程間的关系和滑移綫的概念等。

我国自解放以来,在优越的社会主义制度下,在党和政府的英明領導之下,在各种工业建設和科学技术的发展上,都获得了史无前例的迅速发展。

在党的社会主义建設总路綫的指导下,我国鋼鐵工业以空前的速度向前跃进。煤、发电量、石油、机床等重工业产品的預計产量都完成了計劃。

随着各項經濟建設和科学技术的大发展大跃进,金屬学和热处理技术方面,也根本改变了解放前的旧面貌,获得了巨大的成就。几年来,經過有关工厂、研究机关和高等学校的努力,初步建立了我国自己的合金鋼系統,并于1959年6月頒布了九項合金鋼国家标准草案:合金結構鋼,低合金高强度鋼,合金工具鋼,高速工具鋼,滾珠軸承鋼,不銹鋼,耐热鋼,不起皮鋼及电热合金。新合金鋼系統的特点是:結合我国資源情况,含鏽鋼种减少,大力利用我国富产元素Si、Mn、Mo、V、W、Ti、B等;鋼种多,并有十几种我国自創的鋼种,如20MnVB、60SiMnV等。

随着冶金、机械工业的发展，几年来建立了許多巨型工厂和联合企业，其中建有世界上最先进的机械化、自动化的热处理車間和試驗室，安装有各种新型的自动化热处理装置，如連續作业的自动淬火回火联合机、高頻淬火自动机床，可处理大型鍛件的巨型设备等。在試驗室中亦装备有新型金相显微鏡、电子显微鏡、X光及磁力探伤机等，进行产品檢驗和技术研究工作。

随着技术革新技术革命运动的深入发展，可以肯定，不仅现代化的热处理車間将变成完全自动化，而且无数个中小型的热处理車間也将走向机械化自动化的生产。

在热处理工艺方面，我們取得了特別显著的成就。我們不仅已經掌握了国外生产中所广泛采用的一切工艺，而且研究和創造了許多新工艺。在一般热处理方面，已經掌握和推行了各种强化工艺过程的方法，例如：快速加热、快速回火及快速退火等；在化学热处理方面，掌握和推行了高温快速渗碳、高温气体氰化等；以及火焰表面淬火和高頻表面淬火等新工艺。

总之，在党的领导下，金属学及热处理工艺科学已有了巨大的发展，并获得了巨大的成就。毫无疑問，它将在今后的繼續跃进和技术革新技术革命运动中，迅速获得进一步的发展，并在社会主义建設中發揮出更大作用。

第一篇 基本理論

第一章 純金屬的晶体构造及其結晶

- 目的:**
1. 了解純金屬的晶体构造;
 2. 了解純金屬的結晶过程及其基本理論;
 3. 了解純金屬在固态中的同素异形轉變。

1. 金屬

在全部的化学元素中，約有四分之三是金屬元素（表 1-1 中黑綫以左的元素）。金屬元素与非金屬元素的区別是：

前者具有良好的导电性和导热性，具有良好的塑性，以及良好的反射光线的能力（金属光泽和不透明性）。

金属在物理性能方面的最主要特点是具有良好的导电性和导热性。它的导电性不仅比非金属大 $10^{20} \sim 10^{25}$ 倍（比电解液的导电性也大很多倍），而且是随着温度的降低而增加的。这一点和所有的非金属（以及半导体）恰恰相反。此外，某些金属在绝对零度时表现出[超导电性]

表1-1 元素周期表

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
1	(1H) H 氫	元素晶格代表符号															1H H 氫	2He He 氦			
2	3Li Li 鋰	□面心立方 ○大方 □体心立方 ○密排六方 ⊠金剛石立方型 □正方(四方晶体) 田复杂立方 ◇三方(菱面晶体)											4Be Be 鈹	5B B 硼	6C C 碳	7N N 氮	8O O 氧	9F F 氟	10Ne Ne 氖		
3	11Na Na 鈉	过渡族元素											12Mg Mg 鎂	13Al Al 鋁	14Si Si 硅	15P P 磷	16S S 硫	17Cl Cl 氯	18Ar Ar 氬		
4	19K K 鉀	20Ca Ca 鈣	21Sc Sc 釷	22Ti Ti 鈦	23V V 釩	24Cr Cr 鉻	25Mn Mn 錳	26Fe Fe 鐵	27Co Co 鈷	28Ni Ni 鎳	29Cu Cu 銅	30Zn Zn 鋅	31Ga Ga 鎵	32Ge Ge 鍺	33As As 砷	34Se Se 硒	35Br Br 溴	36Kr Kr 氬			
5	37Rb Rb 鉀	38Sr Sr 銣	39Y Y 釷	40Zr Zr 鋯	41Nb Nb 鈮	42Mo Mo 鉬	43Tc Tc 錳	44Ru Ru 鈳	45Rh Rh 銩	46Pd Pd 鉀	47Ag Ag 銀	48Cd Cd 鎘	49In In 銦	50Sn Sn 錫	51Sb Sb 銻	52Te Te 碲	53I I 碘	54Xe Xe 氙			
6	55Cs Cs 鉀	56Ba Ba 銻	57-71 稀土元素 (La-Lu)	72Hf Hf 鋯	73Ta Ta 鈮	74W W 鉨	75Re Re 銻	76Os Os 銻	77Ir Ir 銻	78Pt Pt 鉑	79Au Au 金	80Hg Hg 汞	81Tl Tl 鉍	82Pb Pb 鉛	83Bi Bi 鉍	84Po Po 鉍	85At At 鉍	86Rn Rn 氡			
7	87Fr Fr 鈾	88Ra Ra 鐳	89Ac Ac 錒	錒系									錒系					錒系			
	?	?	?	90Th Th 釷	91Pa Pa 釷	92U U 鈾	93Np Np 釷	94Pu Pu 鈾	95Am Am 釷	96Cm Cm 釷	97Bk Bk 釷	98Cf Cf 釷	99Es Es 釷	100Fm Fm 釷	101Md Md 釷						
	镧系元素(镧系)																				
	57La 58Ce 59Pr 60Nd 61Pm 62Sm 63Eu 64Gd 65Tb 66Dy 67Ho 68Er 69Tm 70Yb 71Lu																				

表1-2 各元素原子中的电子层分布(正常状态)

元素 序数	周期 (组)	I	II		III			IV				V				VI				VII
	(次组)	S	S	P	S	P	d	S	P	d	f	S	P	d	f	S	P	d	f	S
1	H	1																		
2	He	2																		
3	Li	2	1																	
4	Be	2	2																	
5	B	2	2	1																
6	C	2	2	2																
7	N	2	2	3																
8	O	2	2	4																
9	F	2	2	5																
10	Ne	2	2	6																
11	Na	2	2	6	1															
12	Mg	2	2	6	2															
13	Al	2	2	6	2	1														
14	Si	2	2	6	2	2														
15	P	2	2	6	2	3														
16	S	2	2	6	2	4														
17	Cl	2	2	6	2	5														
18	Ar	2	2	6	2	6														
19	K	2	2	6	2	6		1												
20	Ca	2	2	6	2	6		2												
21	Sc	2	2	6	2	6	1	2												
22	Ti	2	2	6	2	6	2	2												
23	V	2	2	6	2	6	3	2												
24	Cr	2	2	6	2	6	5	1												
25	Mn	2	2	6	2	6	5	2												
26	Fe	2	2	6	2	6	6	2												
27	Co	2	2	6	2	6	7	2												
28	Ni	2	2	6	2	6	8	2												
29	Cu	2	2	6	2	6	10	1												
30	Zn	2	2	6	2	6	10	2												
31	Ga	2	2	6	2	6	10	2	1											
32	Ge	2	2	6	2	6	10	2	2											
33	As	2	2	6	2	6	10	2	3											
34	Se	2	2	6	2	6	10	2	4											
35	Br	2	2	6	2	6	10	2	5											
36	Kr	2	2	6	2	6	10	2	6											
37	Rb	2	2	6	2	6	10	2	6			1								
38	Sr	2	2	6	2	6	10	2	6			2								
39	Y	2	2	6	2	6	10	2	6	1		2								
40	Zr	2	2	6	2	6	10	2	6	2		2								
41	Nb	2	2	6	2	6	10	2	6	4		1								
42	Mo	2	2	6	2	6	10	2	6	5		1								
43	Tc	2	2	6	2	6	10	2	6	6		1								
44	Ru	2	2	6	2	6	10	2	6	7		1								
45	Rh	2	2	6	2	6	10	2	6	8		1								

(續)

元素	周期 (組)	I	II		III			IV				V				VI				VII
序数	(次組)	S	S	P	S	P	d	S	P	d	f	S	P	d	f	S	P	d	f	S
46	Pa	2	2	6	2	6	10	2	6	10										
47	Ag	2	2	6	2	6	10	2	6	10		1								
48	Ca	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2								
49	In	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	1							
50	Sn	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	2							
51	Sb	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	3							
52	Te	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	4							
53	J	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	5							
54	Xe	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6							
55	Cs	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			1				
56	Ba	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			2				
57	La	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6	1		2				
58	Ce	2	2	6	2	6	10	2	6	10	1	2	6	1		2				
59	Pr	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	2	6	1		2				
60	Nd	2	2	6	2	6	10	2	6	10	3	2	6	1		2				
61	Pm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	4	2	6	1		2				
62	Sm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	5	2	6	1		2				
63	Eu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	6	2	6	1		2				
64	Gd	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6	1		2				
65	Tb	2	2	6	2	6	10	2	6	10	8	2	6	1		2				
66	Dy	2	2	6	2	6	10	2	6	10	9	2	6	1		2				
67	Ho	2	2	6	2	6	10	2	6	10	10	2	6	1		2				
68	Er	2	2	6	2	6	10	2	6	10	11	2	6	1		2				
69	Tu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	12	2	6	1		2				
70	Yb	2	2	6	2	6	10	2	6	10	13	2	6	1		2				
71	Lu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	1		2				
72	Hf	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	2		2				
73	Ta	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	3		2				
74	W	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	4		2				
75	Re	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	5		2				
76	Os	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	6		2				
77	Ir	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	7		2				
78	Pt	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	9		1				
79	Au	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		1				
80	Hg	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2				
81	Tl	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	1			
82	Pb	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	2			
83	Bi	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	3			
84	Po	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	4			
85	At	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	5			
86	Pn	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6			
87	Fr	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6			1
88	Ra	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6			2
89	Ac	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	1		2
90	Th	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	2		2
91	Pa	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	2	2	6	1		2

(續)

元素	周期 (組)	I			II			III			IV				V				VI				VII
序数	(次組)	S	S	P	S	P	d	S	P	d	f	S	P	d	f	S	P	d	f	S			
92	U	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	3	2	6	1		2			
93	Np	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	4	2	6	1		2			
94	Pu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	5	2	6	1		2			
95	Am	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	7	2	6			2			
96	Cm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	7	2	6	1		2			
97	Bk	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	9	2	6			2			
98	Cf	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	10	2	6			2			

——电阻在接近于绝对零度时减低至零。

金属在机械性能上的特点是，它不仅具有远较非金属为优的塑性，而且还具有相当高的强度。换言之，金属一般都具有很高的「综合机械性能」。

此外，金属尚具有可锻性、锻压性、切削性和焊接性等一系列的工艺性能。所以金属能在工业上获得广泛的应用。

金属何以能具有如上的这些特性呢？显然，这应与如下所述的金属的内部构造有关。

1. 金属原子构造的特点

由近代物理的概念知道，各种元素的原子都是由带正电荷的原子核和绕核运动的带有负电荷的一定数目的电子所构成的。电子的数目等于该元素的原子序数。原子内的电子是按电子层分布的，各电子层中的电子数目遵从 $N = 2n^2$ (n 代表层数，即所谓主量子数) 的规律，即：

在第1层内可有： $N = 2 \times 1^2 = 2$ 个电子， 在第2层内可有： $N = 2 \times 2^2 = 8$ 个电子，

在第3层内可有： $N = 2 \times 3^2 = 18$ 个电子， 在第4层内可有： $N = 2 \times 4^2 = 32$ 个电子。

在各层中，根据各电子运动轨道的能量高低不同，每层尚可分成为若干次层，各以如下的符号来表示：

$$s^2, p^6, d^{10}, f^{14},$$

符号右上角的数字表示各该次层中所能容纳的最大电子数。

由上所述，各元素原子中的电子层分布可按如下方式来描述。如铝原子中的电子层构造可表示为：

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1,$$

即在铝原子的电子层中，在其第1层中的 s 次层内有 2 个电子；在第2层中的 s 次层中有 2 个电子，在 p 次层中有 6 个电子；而在第3层中的 s 次层中有 2 个电子，在 p 次层中有 1 个电子；总共有 13 个电子。

各元素原子中的电子层分布列于表1-2。

在各元素原子构造中，最值得注意的是其最外层的价电子的数目（如铝的价电子数为 3），它决定着该元素的各主要的物理与化学性能。金属元素原子构造的特点就是它的价电子数目少（一般仅有 1、2 或 3 个），价电子与原子核的结合力很弱，极易脱离，亦即当各金属原子彼此相结合时，或当其与非金属元素相结合时，有极易于形成正离子的特征。这就使金属在形成固体时有如下所述的原子结合方式上的特点以及一系列的金屬特性。

在这里还值得提出的是，在各金属元素中，从原子序数为 21 的钪 (Sc) 到原子序数为 28 的

鎳 (Ni)，以及在周期表中 (表1-1) 所对应在它們以下的各金屬元素，在它們的原子构造中均有内部次层电子尚未填满的特征；如鉄的原子构造即如此 ($\text{Fe}—1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$)，其4s层中虽已填满2个电子，但在其3d次层中尚缺少4个电子。这是因为，4s次层的电子較3d次层的能級較低所致 (图1-1)。这些元素統称为过渡族元素，它們除了也具有一般的金屬特性以外，由于它們的d电子有时也会参与原子間結合的緣故，所以尚具有一系列的像变价性、高硬度和高熔点等的性能特征。

2. 金屬原子間結合的特点

如上所述，由于金屬的价电子与核的結合弱，因而易于脱离，所以当各金屬原子相互結合在一起成为固体时便具有如下所述的特有的結合方式：

各金屬原子都脱离掉其价电子变成正离子，正离子按照一定的几何形式規則地排列起来，在各固定的地点上作輕微的振动；而所有的价电子则都呈自由电子的形式在各离子間自由地作穿梭运动，为整个金屬所公有，形成所謂「电子气」。金屬固体即借此各正离子与自由电子間的引力而被結合在一起 (如图1-2所示)。

金屬的这种原子結合方式叫做金屬鍵，它与非金属的固体、如氯化鈉 (NaCl) 的离子鍵結合方式有根本的不同[●]，氯与鈉是借它們正、負离子 (Na^+ 与 Cl^-) 間的静电引力而結合在一起，其中并不存在公有化的自由电子 (图1-3)；而金屬則主要是由这种电子气而結合在一起。据此，金屬才表現出一系列的金屬特性。

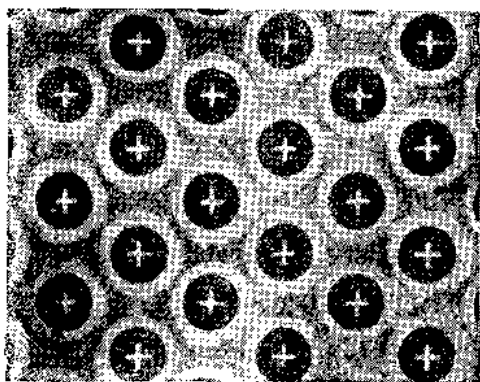


图1-2 金屬原子結合的示意图。

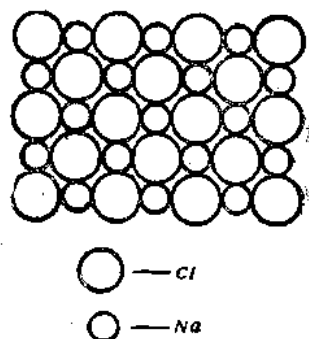


图1-3 氯化鈉离子結合的示意图。

譬如，由于金屬中有电子气的存在，只要在金屬物体的两端施加极微弱的电压时便足以使其自由电子向正极流动。这便是金屬具有良好导电性的原因。当温度升高时，金屬离子的热振动加剧，阻碍了自由电子的流动，使金屬电阻随着温度的升高而增大。

金屬的导热性是通过其离子的振动和自由电子的运动来完成的，所以金屬能具有較非金属为优的导热性。既然金屬的导热性并不像导电性那样单独地由自由电子来实现，所以它与非金属在这方面的差异也就不能像导电性那样明显。

● 非金属固体除离子鍵以外，尚有共价鍵及极性鍵的結合方式。

此外，由于金属原子间的结合是借助于各离子与整个电子气间的结合力所实现(不像NaCl仅在单独相邻的正负离子间才有结合力)，从而造成了它的坚强结合，使金属具有高的强度。不仅如此，金属的高塑性也是以金属键的存在为其前提。在后面第二章中我们将会知道，所谓晶体的塑性变形，乃是晶体在受到外力时，其晶体中的一部分与另一部分所发生的相对位移。如果在离子晶体(NaCl)中产生位移，就会使原来的正负离子间的引力发生破坏，而带来相同离子间的斥力，结果晶体便会发生破裂。在金属中则否，由于在金属晶体中各离子是借电子气所结合，不会出现这种引力的破坏和斥力的产生，所以金属便能发生变形而不破裂，具有着良好的塑性。

由此可见，金属的各主要特性——高导电性、导热性和良好的塑性与强度相结合等都是以[金属键]的特点为其先决条件。不但如此，当金属在形成固态晶体时，其晶体构造的特点也与此有关。

3. 金属晶体构造的特点

所谓[晶体]就是指原子(更恰当些应说是离子)规则排列的物体，如图1-4所示即为一晶体构造的范例。在自然界中，除了极少数的一些物质(如玻璃、松香、硬橡胶及琥珀等)以外，包括金属在内的所有的固体物质都系晶体。

为了便于分析各种晶体中原子(离子)排列的规律及形式起见，可以采用最简单的联接方法，以线条通过各原子的中心画出一空间格子的方式来描述它；如图1-4中所示的晶体可描述如图1-5 6所示的空间格子形式，此时假想各原子(离子)都是位于该空间格子的各结点上。这种描述原子在晶体中排列形式的空间格子叫做[晶格]。晶格中各种方位的原子层叫做[晶面](如图1-5 a)。组成晶格的最基本的几何单元叫做[晶胞](如图1-5 8)。

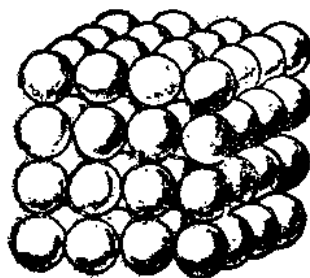


图1-4 晶体中原子规则排列的示意图。

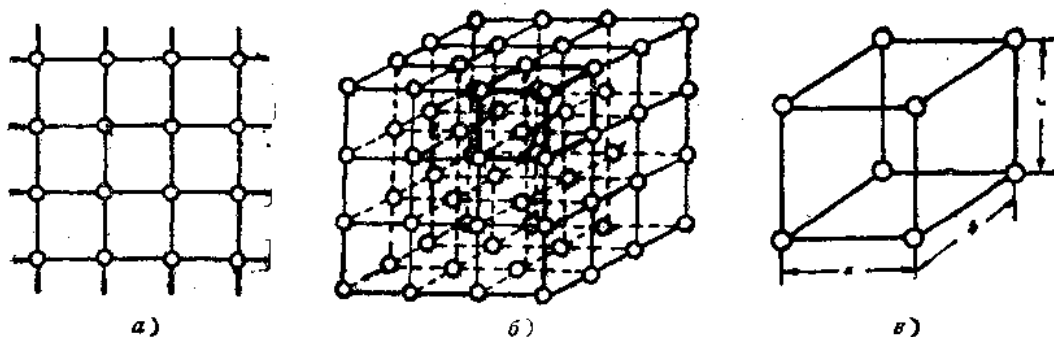


图1-5 简单立方晶格的描述：
a—晶面；b—晶格；c—晶胞。

晶胞的各边尺寸—— a ， b ， c 谓之[晶格常数]，其大小是以埃($1\text{\AA}=1\times 10^{-8}$ 厘米)来量度。各种晶体构造的主要差别就在于其晶格的形式及其晶格常数不同。

金属晶体构造的特点是：在金属的晶体中由于各原子(离子)之间具有坚强的结合，从而使它们具有趋于紧密排列的倾向，并使原子间排列组合的形式的数目大为减少。因此，各种金

屬只具有少数几种简单形式的晶格。金属晶体同具有复杂晶格形式(密排程度小和对称性较低)的非金属晶体的基本不同点即在于此。金属晶体构造的细节详述如下。

II. 金属的晶体构造及其研究法

从表1-1可以看出,大多数金属的晶体构造都是属于下列三种形式的晶格。

1. 常见的三种金属晶格

(i) 体心立方晶格——如Fe, Cr, W, Mo等金属即是(图1-6a及1-7a)。它的晶胞是由八个原子构成一立方体,而其立方体的体积中心尚有一个原子。

(ii) 面心立方晶格——如Al, Cu, Ni等金属即是(图1-6b及图1-7b)。它的晶胞是由八个原子构成一立方体,并且其立方体的每一个面的中心尚有一个原子。

(iii) 密排六方晶格——如Mg, Zn等金属即是(图1-6c及图1-7c)。它的晶胞是由七个原子构成其上下的两个六方底面,并在两六方底面的中间尚有三个原子。密排六方晶格的晶格常数数值比 $c/a=1.633$,当 c/a 之比值是呈其他数值时则为非密排的六方晶格。

在这里,我们应该注意的是在各种晶胞中实际所包含的原子数目。如在体心立方晶胞中,由于其各顶点上的每一原子都是属于在该原子周围的八个晶胞所公有,所以在每一个体心立方晶胞中实际上只不过包含着 $\frac{1}{8} \times 8 + 1$ (体心之1) = 2个原子。在每一个面心立方晶胞中实际上只包含着 $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 个原子($\frac{1}{2}$ 表示每一面心位置上的原子是属于两个晶胞所公有)。而在每一个密排六方晶胞中,则包含着 $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ 个原子($\frac{1}{6}$ 是指每个角上的原子, $\frac{1}{2}$ 是指六方底面中心的原子,而3则是指在晶胞中间的3个原子)。知道了每单位晶胞中的原子数,结合其晶格常数数值,便可以计算出各种晶格的体积原子密度。

但通常我们还可以不应用这种方法,而应用一种计算「邻位数」的方法,更简便地去找各种晶格形式的密排程度。所谓邻位数就是指在晶格中的任一原子其周围所紧邻的等近距离的原子数目。如在体心立方晶格中,任一原子(如体心的一个原子)周围所紧邻的等近距离的原子数是8,所以它的邻位数便可以表示成为K8(K表示立方之意)。面心立方晶格的邻位数是

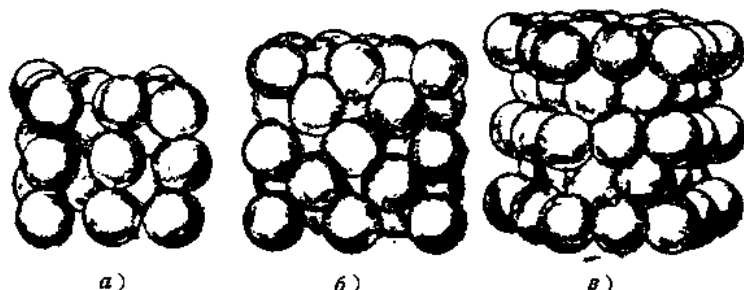


图1-6 三种金属晶格的模型:

a—体心立方晶格; b—面心立方晶格; c—密排六方晶格。

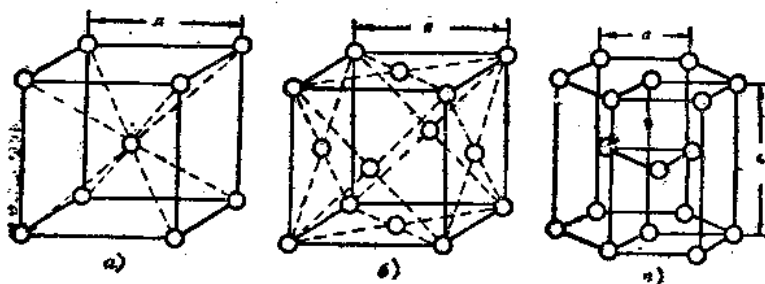


图1-7 三种金属晶格的晶胞:

a—体心立方晶胞; b—面心立方晶胞; c—密排六方晶胞。

K12; 密排六方晶格的邻位数是 $F12$ (F ——六方)。而如图 1-4 所示的简单立方晶格的邻位数则是 $K6$ 。

邻位数的值愈大, 则晶格中原子密排的程度便愈高, 故从上述四种晶格的邻位数值便可看出, 其中以面心立方 ($K12$) 及密排六方晶格 ($F12$) 的密排程度为最大, 体心立方晶格 ($K8$) 次之, 而简单立方晶格则最不密 (其他一切类型的晶格则还要差)。如此, 就完全说明了金属晶格所具有的最密排列的特点。

2. 晶格中各晶面及晶向的表示法

在研究各种金属晶格的细节及其性能时, 通常都需要去分析晶格中各种方位上的晶面以及各种方向上的原子列——[晶向]中的原子分布特点, 为此便有必要给予各种晶面及晶向以一定的符号, 以便于进行晶格的分析。晶面的符号叫做[晶面指数]; 晶向的符号叫做[晶向指数]。

晶面指数的表示法是由如下三个步骤来求出:

(i) 首先假定晶格中的某一原子作为一三度坐标的原点 O , 以晶格的三个棱作为坐标的 OX 、 OY 、 OZ 轴, 以晶格常数值 a 、 b 、 c 作为其相应的三个轴上的量度单位, 求出所需表示的晶面在三轴上的截距 (见图 1-8);

(ii) 将所得三截距之值变为其倒数;

(iii) 再将其化成为最小的整数 (保持各值比例不变), 并将其括在一圆括号之内。

例: 如图 1-8 所示的晶面, 其晶面指数的求法是: (i) 它与 OX 、 OY 、 OZ 三轴的截距是 1、2、 ∞ ; (ii) 三截距的倒数是 1、 $1/2$ 、0; (iii) 化成为最小整数后的晶面指数为 (210)。

从上例可以看出, 晶面指数所以要有三步求法的道理主要是通过第二步便可以消掉其中的 ∞ , 而通过第三步则是可以消掉一些分数值, 这样就可以得到一最小整数的符号。

在立方晶格系统中, 具有最重要意义的是 (100), (110) 和 (111) 三种晶面 (图 1-9)。

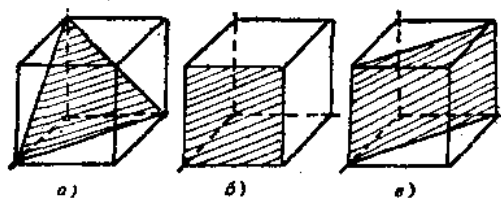


图1-9 立方晶格中的三种主要晶面:

a —(111); b —(100); c —(110)。

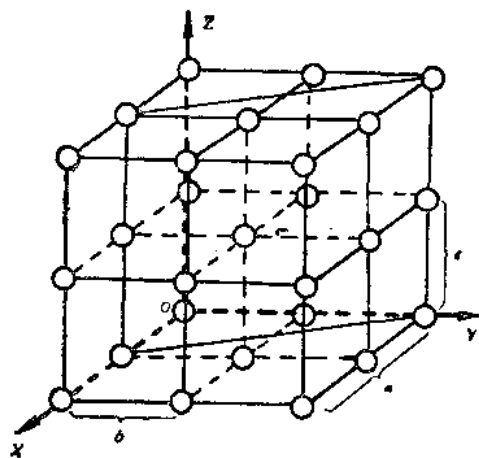


图1-8 晶面指数的求法。

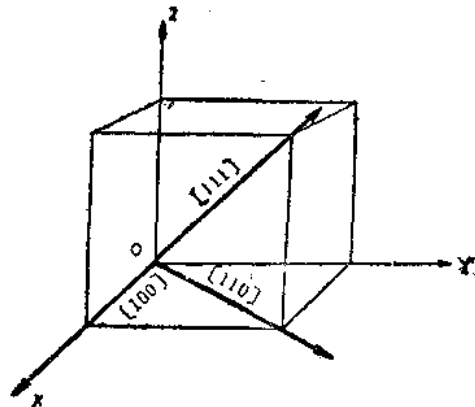


图1-10 晶向指数的表示法。