

高等学校教学用书

金 属 学

修订第三版

古里亚耶夫著

石霖译

苏联高等教育部审定为高等机械制造学校教科书



机械工业出版社

出版者的話

本書系根据苏联国立国防工業出版社出版的古里亞耶夫著[金屬学] 1956年修訂第三版譯出。原書經苏联高等教育部审定为高等机械制造学校教科書。

本書主要是以第一、二版为基础，而刪去其中較旧的資料以及与其他課程相重复的材料，并补充一些新的理論与实践方面的材料。因此，篇幅虽大为縮減，內容則更为充实。本書不但可以作教材，而且也是工程技术人員很好的参考書。

苏联 А.П.Гуляев 著 'Металловедение (3-е переработанное издание);
(Оборонгиз 1956年 第三版)

NO.1604

1954年11月第一版

1960年8月第二版第十二次印刷

787×1092 1/18 字数862千字 印张16 2/9 57,801—76,191册

机械工业出版社(北京阜成門外百万庄)出版

外 文 印 刷 厂 印 刷

新华書店科技发行所发行

各地新华書店經售

北京市書刊出版业营业許可証出字第008号

定价(10·5)1.85元

目次

第三版序5

第二版序6

第一篇 合金理論

第一章 金屬的結晶構造7

1 金屬7

2 金屬的結晶構造9

3 金屬的晶格10

4 金屬晶体的实际構造14

5 晶体的有向性16

6 研究金屬結晶構造的方法17

第二章 結晶21

1 物質的三态21

2 結晶过程的能量条件22

3 結晶过程的机构24

4 結晶長成的形狀26

5 鑄錠的構造28

6 固态中的相变。同素异形性29

7 磁性转变31

第三章 塑性变形和再結晶32

1 彈性变形和塑性变形32

2 加热对变形金屬的構造与性能的影响

(再結晶过程)34

第四章 合金的構造 (基本概念)41

1 总論41

2 机械混合物41

3 化合物41

4 以合金的組元之一为基的固溶体43

5 以化合物为基的固溶体46

6 有序固溶体47

7 电子化合物 (尤姆-罗捷利相)48

8 間隙相49

第五章 状态圖50

1 相律50

2 状态圖的建造总論52

3 状态圖的实驗建造法53

4 第一类状态圖55

5 杠杆定理57

6 第二类状态圖60

7 第三类状态圖62

8 第四类状态圖66

9 第五类状态圖67

10 具有多相转变的合金状态圖68

11 合金結晶过程中的某些特点69

12 三元系70

13 研究多元系的簡化方法78

14 合金的性能与状态圖之間的关系80

第二篇 铁碳合金

第六章 鉄—碳状态圖82

1 历史导源82

2 鉄84

3 渗碳体87

4 状态圖87

第七章 碳鋼93

1 碳的影响99

2 常存杂质影响99

3 一般用途的碳鋼103

4 冷加工鋼104

5 冷冲压用的薄板鋼105

6 切削加工性。易削鋼105

第八章 生鉄106

1 石墨化过程107

2 生鉄的分类。石墨的形狀111

3 生鉄的組織和性能113

4 杂质的影响115

5 冷却速度的影响117

6 灰口鉄和高强度生鉄的編号117

7 变质生鉄118

8 可鍛鉄119

第三篇 热处理

第九章 热处理总論123

1 温度和时间123

2 包赤瓦尔的热处理分类法124

3 热处理与状态圖126

4 鋼热处理的基本类型127

5 鋼中的四种基本转变128

第十章 鋼的热处理理論129

1 奥氏体的形成(第一种基本转变)130

2 奥氏体晶粒的成長132

3 奥氏体的分解(第二种基本转变)135

4 馬氏体转变(第三种基本转变)144

5 回火时的转变(第四种基本转变)150

6 热处理对鋼性能的影响153

第十一章 鋼的热处理操作157

1 淬火温度的选择157

2 加热速度158

3 加热介质的化学作用159

4 淬火剂	159	5 抗热材料的分类	243
5 淬透性	161	6 在350~500°的温度范围内工作的铁素体钢与珠光体钢	244
6 内应力	166	7 在500~650°的温度范围内工作的奥氏体抗热钢	245
7 淬火法	168	8 在650~800°的温度范围内工作的镍基合金与钴基合金	247
8 钢的冷处理	170	不锈钢	248
9 淬火时产生的缺陷	171	9 钢的腐蚀抗力	248
10 退火和常化	172	10 铬不锈钢	248
第十二章 钢的表面淬火	174	11 铬镍不锈钢	249
1 总论	174	抗磨钢	251
2 高频淬火法	175	12 高锰钢	251
第十三章 钢的化学热处理	178	高电阻合金	251
1 化学热处理理论	178	13 变阻器合金与加热体合金	251
2 钢的渗碳	180	具有热膨胀特性的合金	253
3 钢的氮化	186	14 金属与合金的热膨胀规律。热膨胀值恒定的合金	253
4 钢的氰化	189	磁合金	254
5 渗入金属法	191	15 金属的主要磁性	254
第四篇 合金钢		16 作永久磁石用的钢与合金(硬磁合金)	255
第十四章 合金元素的影响	193	17 软磁合金	256
1 钢中杂质的分类	193	18 透磁合金	256
2 元素对铁多相性的影响	194	第五篇 有色金属与合金	
3 合金元素在钢中的分布	194	第十九章 铝及铝合金	258
4 合金元素对铁素体的影响	196	铝	258
5 合金钢中的碳化物相	197	1 铝的性能	258
6 合金元素对热处理的影响	200	2 铝中的常存杂质(铁与硅)	258
第十五章 合金钢的分类法与编号法	203	铝合金的热处理	260
1 合金钢的分类	203	3 铝铜合金的热处理	260
2 合金钢的编号法	205	4 铝合金的成分对于热处理过程的影响	265
第十六章 结构钢	206	工程铝合金	267
1 合金元素对机械性能的影响	206	5 铝合金的分类	267
2 结构钢的合金化	208	6 硬铝	269
3 结构钢的热处理	209	7 硅铝明及型铸用的其他铝合金	271
4 渗碳(低碳)钢	213	第二十章 铜及铜合金	274
5 调质(中碳)钢	215	1 铜	274
6 弹簧钢	218	2 铜锌合金(黄铜)	274
7 合金钢的缺陷	219	3 铜锡合金(锡青铜)	277
第十七章 工具钢	220	4 铜与铝、硅、钨及其他元素的合金	280
1 总论	220	第二十一章 轴承合金和焊料	281
2 碳工具钢	221	1 对轴承合金的要求	281
3 合金工具钢	222	2 易熔轴承合金	282
4 模具钢	224	3 焊料	284
5 高速钢	226	第二十二章 其他的有色金属及合金	284
6 硬质合金	234	1 镁及其合金	284
第十八章 具有特殊物理性能的钢与合金	236	2 钛及其合金	286
耐热钢与耐热合金	236	3 锆、铪及钨	289
1 热安定性	237		
2 抗热性	238		
3 抗热性的评定	241		
4 组织与成分对于抗热性的影响	243		

第三版序

在現在的「金屬學」教本第三版中作了很大的修改和刪減。但在总的布局和敘述的系統性方面仍和前版一樣。

所作的修改，主要是以本書第一版，尤其第二版在機器制造學院內作為金屬學教本過程中的使用經驗，以及公共科學機構、學術委員會和許多高等學校金屬學教研組對本書所作的討論為根據的。

由於工程技術的迅速發展和金屬合金的不斷改進而過時的參考材料幾乎全部予以刪除，並且把與學生按機器制造學院的教學計劃所修的其他課目相重複的材料也一併刪去，借此以減縮本書的篇幅。

合金鋼和有色金屬兩篇刪減最多（精簡了對各個牌號的鋼和合金的敘述）。

在本教本內省略去許多在其他課程內詳細討論的問題（在物理學教程內討論的原子構造問題，在化學教程中討論的金屬腐蝕問題，在材料力學內討論的金屬強度學說等）。

同時，鑒於金屬學在最近幾年內的發展，補充了一些上述問題的理論和實踐方面的知識。特別是以我國和國外科學的現代水平為基礎，增加了鈦合金一段，擴充了耐熱合金一節等。

作者向技術科學博士包格切夫（И. Н. Богачев）教授和莫斯科包曼高等工業學校的金屬學教研組的全體人員致謝，感謝他們對現在的第三版稿件所作的詳細審查和評閱。

第二版序

本教本供机器制造学院各專業之用。其中所論述的金屬与合金的知識，不論对金屬切削加工、鑄工、压力加工等專業的学生，抑或对飞机、电动机、机床、汽車以及其他机器的設計与制造各專業的学生都是必須知道的。

本書根据課程大綱的規定概括了一切金屬学中的問題，包括在評定机器制造材料的質量时極為重要的机械性能在內。但鑒于本書的篇幅有限，对于某些問題的叙述势必減縮，而有些地方只予簡略的描述。

教师在向某一專業介紹本書时，应指出对哪些章节学生可以省略不讀，而对哪些章节應該特別地注意。

作者在很多場合下，对于最新的科学数据与学說均較工程文献上占有地位的較旧的学說与数据更偏重地加以叙述，并且力求予以闡明。

与1948年的第一版相比較，本書內容有下列更动：增加了專門講解对一般机器制造有重大意义的材料（碳鋼与生鉄）兩章；并根据最新的科学数据作了一系列的补充与修正，該項数据在1948年版內尚未列入。

第一章的第一部分（原子構造）已大为縮減；而关于腐蝕一章則已略去，因为这些問題要在物理及化学教程中講授。

所有的圖表資料，包括由各种研究著作中借用者在內（在此种情況下均將研究者注于括弧內）均經過整理，以便統一及使其更为醒目。大多数的显微組織照像都是新制品（專为本版制备的）。

在本版准备过程中，承蒙包赤瓦尔（А. А. Бочвар）院士，奥金格（И. А. Одинг）通訊院士，伏罗維克（Б. Е. Воловик），伏罗諾夫（С. М. Воронов），庫德里亞夫切夫（И. В. Кудрявцев），烏曼斯基（Я. С. Уманский）以及弗利德曼（Я. Б. Фридман）各位教授对本書各个章节提出意見、批評，并为之校閱，給作者以極大之帮助。作者对上列各位致以深切及真摯的謝意。

作者对莫斯科航空学院与莫斯科机械制造業余学院金屬学教学研究組在編纂本書过程中給予协助的所有人員以及对第一版提供意見的人員均致以謝意。

第一篇 合金理論

第一章 金屬的結晶構造

1 金屬

金屬學乃是研究金屬的構造和性能，並且確立其成分、構造和性能間關係的一門科學。它使我們能正確而合理地加工及使用金屬，也使我們能查明金屬在每一具體使用情況下的最良好的性能。這門科學的實用意義即在於此。

在研究金屬學本題之前，先應回答一個問題：何謂金屬？

在化學中，所謂金屬是指位於門捷列夫化學元素週期表（表1）左方的一組元素。這類元素與非金屬元素發生化學反應時，將其最外層的电子，即所謂的價电子讓與後者。這是由於金屬元素的外層电子與原子核的結合力較弱而造成的。此外，金屬最外部的电子層中只有少量电子——一個至二個，而非金屬原子外層中的电子數較多——五個至八個。凡位於鎵、銦、鉍左方的元素皆為金屬；凡位於神、銻、鉍右方的元素皆為非金屬。

IIIB；IVB 和 VB 族中的元素不能無條件地算在金屬或非金屬類內。它們佔據着中間過渡的位置。

在工程技術中，所謂金屬是指具有一定性能的物質。這些性能是如此的顯明，以致不僅不需要任何儀器，甚至連在金屬學領域內為區別金屬和非金屬用的專門知識也不需要。一切金屬在某種程度上都具有金屬的光澤和可塑性。憑靠這些十分顯明的性能，便能準確地決定一個零件是由金屬製成，還是由非金屬，如：木材、岩石、玻璃或陶瓷製成。

由此可見，金屬乃是具有可塑性和金屬光澤的物質。羅蒙諾索夫（М. В. Ломоносов）給金屬所下的定義：「金屬為富有光澤而可鍛的物體」，直到已過了二百年後的今天仍不失其科學意義。不僅純元素，如：鋁、銅、鐵等具有這些性能，而且由許多元素組成的較為複雜的物質（其成分中既包含金屬元素，有時也包含大量非金屬元素）也具有這些性能。這類物質稱為金屬合金。廣義言之，也可將它們稱為金屬，因為上述的金屬定義對這類合金是完全合適的。

由以上所述可知，將金屬當作一種化學元素和把它當作一種物質看待，其概念之間是有某些區別的。儘管如此，在這兩種金屬概念之間存在着密切的關係。不論其中的哪種定義都是以金屬物質的內部構造的特徵為其前提，因而對於純金屬和其合金都是一樣的。

金屬物質構造的特點表現如下：一切金屬均由原子構成，其原子內最外層的电

表1 門捷列夫元素周期表

A																B																																				
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	0																																					
1 H водород 1.008																2 He гелий 4.003																																				
3 Li литий 6.940	4 Be бериллий 9.013	5 B бор 10.82																				6 C углерод 12.010	7 N азот 14.008	8 O кислород 16.000	9 F фтор 19.00	10 Ne неон 20.183																										
11 Na натрий 22.997	12 Mg магний 24.32	13 Al алюминий 26.97																				14 Si кремний 28.06	15 P фосфор 30.98	16 S сера 32.066	17 Cl хлор 35.457	18 Ar аргон 39.944																										
19 K калий 39.096	20 Ca кальций 40.08	21 Sc скандий 45.10	22 Ti титан 47.90	23 V ванадий 50.95	24 Cr хром 52.01	25 Mn марганец 54.93	26 Fe железо 55.85	27 Co кобальт 58.94	28 Ni никель 58.69	29 Cu медь 63.54	30 Zn цинк 65.38	31 Ga галлий 69.72	32 Ge германий 72.60	33 As мышьяк 74.91	34 Se селен 78.96	35 Br бром 79.916	36 Kr кrypton 83.7																																			
37 Rb рубидий 85.48	38 Sr стронций 87.63	39 Y итрий 88.92	40 Zr зирконий 91.22	41 Nb ниобий 92.91	42 Mo молибден 95.95	43 Tc технеций [99]	44 Ru рутений 101.7	45 Rh родий 102.91	46 Pd палладий 106.7	47 Ag серебро 107.880	48 Cd кадмий 112.41	49 In индий 114.76	50 Sn олово 118.70	51 Sb сурьма 121.76	52 Te теллур 127.61	53 J йод 126.92	54 Xe ксенон 131.3																																			
55 Cs цезий 132.91	56 Ba барий 137.36	57 La лантан 138.92	58 Ce церий 140.12	59 Pr приметий 140.92	60 Nd неодим 144.27	61 Pm прометий [147]	62 Sm самарий 150.43	63 Eu европий 152.0	64 Gd гадолиний 156.9	65 Tb тербий 159.2	66 Dy диспрозий 162.48	67 Ho гольмий 164.94	68 Er эрбий 167.2	69 Tm тульмий 169.4	70 Yb ytterbium 173.04	71 Lu лютеций 174.99																																				
87 Fr франций [223]	88 Ra радий 226.05	89 Ac актиний 227																																																		

лантаноиды (л.э.г.)

58 Ce церий 140.13	59 Pr приметий 140.92	60 Nd неодим 144.27	61 Pm прометий [147]	62 Sm самарий 150.43	63 Eu европий 152.0	64 Gd гадолиний 156.9	65 Tb тербий 159.2	66 Dy диспрозий 162.48	67 Ho гольмий 164.94	68 Er эрбий 167.2	69 Tm тульмий 169.4	70 Yb ytterbium 173.04	71 Lu лютеций 174.99
-----------------------------	--------------------------------	------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	------------------------------	--------------------------------	-----------------------------	---------------------------------	-------------------------------	----------------------------	------------------------------	---------------------------------	-------------------------------

лантаноиды (л.э.г.)

90 Th торий 232.12	91 Pa проактиний 231	92 U уран 238.07	93 Np нептуний [237]	94 Pu плутоний [239]	95 Am амерций [241]	96 Cm курий [242]	97 Bk беркелий [243]	98 Cf кальфорний [244]	99 Es эйзенштейний [245]	100 Fm фермий [246]	101 Md мendelevium [247]
-----------------------------	-------------------------------	---------------------------	-------------------------------	-------------------------------	------------------------------	----------------------------	-------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	------------------------------	-----------------------------------

子与核的結合力較弱。这便决定了金屬原子間相互的化学作用的性質和金屬性能。

由此可見，金屬的内部構造和其原子的構造乃是金屬特征之所在。金屬的原子是由帶正电的核和圍繞核的一定数量的电子所組成，在其最外部电子層中有若干个（一般为一至二个）与核連系很弱、極易脱离的电子。

电子帶負电。只要造成極微弱的电位差，便足以使电子向正極流动而产生电流。金屬所以是良导电体，而非金屬則否，其原因即在于此。金屬在电性上表現的另一特点是一切金屬的导电性毫無例外地随溫度的上升而下降。

在与其他元素發生作用时，金屬原子中的电子便轉移至非金屬的原子中，而形成化合物。金屬与非金屬（类金屬）所形成的化合物的性質便可由此予以說明。

于是我們看到，最外層电子与核間的微弱結合力便决定了金屬的化学和物理性能。

由于上述的特点，金屬和合金具有如下的構造：正离子位于某些固定的地点，而其最外層电子則在金屬內好似形成了一种流动通暢的液体或电子气，在各个方向上作無秩序的运动。但是在一定的条件下，例如在不大的电位差下，电子运动便將具有一定的方向，从而产生电流。

1889年斯陶列托夫（А. Г. Столетов）所作的实验最先証明了电子在金屬中所处的特殊状态。該实验証明：电子在金屬內的結合力是極微弱的。

不仅当电位差存在时，在金屬內所引起的电場力可使电子产生移动，根据我国同胞曼德石塔姆（Л. И. Мандельштам）和帕帕列克西（Н. Д. Папалекси）的卓越实验，就是机械的慣性也能促使电子發生移动^①。

这些工作已成为理論物理学的重要分支之一，即金屬状态理論的研究基础了。

金屬状态理論將金屬看作是由荷正电的离子和圍繞着它并且与它結合很微弱的电子（負电荷質点）所構成。这些电子在金屬內不断地运动着，它們不屬於某一个原子核，而屬於整塊金屬。

由此可見，金屬構造的特点在于其中有与正离子結合力很弱的电子气存在。电子在金屬內的自由运动以及电子与原子間的微弱結合力乃是使金屬具有某些金屬性能（高导电性、高导热性、金屬光澤、可塑性等）的先决条件。

2 金屬的結晶構造

一切物質均可处于三种聚集状态下——固态、液态和气态。

固态物質在重力的作用下，可保持其外形不变；而液体則發生流动，其外形依容器而定。但这种定义尚不足以表征出物質状态的性質。

譬如，固态玻璃在加热时發生軟化，逐漸地轉变为液态。其逆向的轉变也將十

① 因为斯陶列托夫、曼德石塔姆和帕帕列克西等人的实验在近代的物理学教本中有詳細的描述和講授，故此處省略。

分均匀地完成，即在逐渐降低温度时，液态玻璃将变得愈来愈稠，最后凝缩为[固]态。玻璃没有由液态转变至固态的确定温度，没有性能发生突变的温度（点）。因此，把[固态]玻璃看成是强烈凝缩的液体是十分合理的。

金属由固态转变至液态，以及由液态转变至固态（由气态转变至液态也一样）都是在确定的温度下发生的，并且还伴随着性能的突变。那末，气态、液态和固态之間的基本差别何在？

在气体內，質点（原子、分子）的位置是没有任何规律的。質点作混乱的运动，彼此相斥，因而气体总力求占有尽可能大的容积。

在固体內，原子皆规律地、有秩序地排列着，原子間的吸力与斥力相平衡，因而固体能保持其外形不变。

在液体內，質点（原子、分子）仅保持着所谓的近程序列，即在空間作规律排列的只是少数原子，而不像固体那样是整个晶体的原子。此外，近程序列是不稳定的，它忽而产生，忽而在强烈的热振动下消失。

綜上所述可知，液态頗似一个介于固态和气态之間的中間状态。液态具有气态和固态構造的一些典型特点。在相应的条件下（低压下），可由固态直接过渡至气态而不必经过中間的熔化阶段（圖1）。

如果取大量的原子，并且忽略掉液体中近程序列的存在，則可以说：固态（或結晶状态）与液态和气态的不同表现在其原子在空間有确定的、规律的排列。

很早之前便曾有过論述晶体內的質点（原子）呈现规律排列的假說（費道洛夫，1860年），但是只有当X-射线（倫琴，1895年）問世并用于研究晶体的構造（劳埃，1912年）之后，原子在晶体內的规律排列才由实验予以确立。从那时起，各国物理学家所进行的許多工作，闡明了包括金属及合金在內的各种物質之晶体內的原子排列情况。

在晶体內，原子都位于一定的地点。可以把結晶構造想像为格子狀，原子位于格子的結点上[●]（圖2）。

在下一节內，我們將对金属內的原子（离子）在空間排列的特点，即在金属中常遇到哪些晶格的問題加以討論。

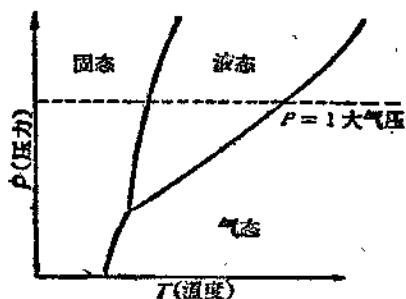


圖1 固态、液态和气态的存在区域和温度及压力的关系。

3 金属的晶格

如上所述，結晶状态的特征首先表现为原子在空間有一定而且规律的排列。

● 位于金属晶格結点上的并非原子而是正离子，在正离子之間有自由电子穿梭运动。但通常都是說原子位于晶格的結点上。

晶体內的每一原子的周圍皆有同一數量的最相鄰近的原子，而且這些相鄰原子排列在距其相等的同一距離上。但空間內只有有限數目（14）的可能排列方式來滿足這一條件^①。

金屬內原子（離子）的排列有着愈趨接近則愈趨緊密的傾向（因而，金屬較非金屬的比重高），這種傾向使晶体內金屬原子相互排列的組合數目大為減少。^②

描述晶体內原子相互排列方案的示意圖和方法很多。原子在某一平面內的相互位置如原子分布圖所示（圖2）。通過原子中心所引的想像綫構成格子，在格子的結點上有原子（正離子）排列着，此即所謂的晶面。互相平行的晶面經過多次重複之後便再形成一個空間晶格，此晶格的結點即為原子（離子）排列的地点。相鄰原子間的距離以埃（ $1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-8}$ 公分）測量之。原子在空間的相互位置和原子間的距離是用X光分析法測定的。

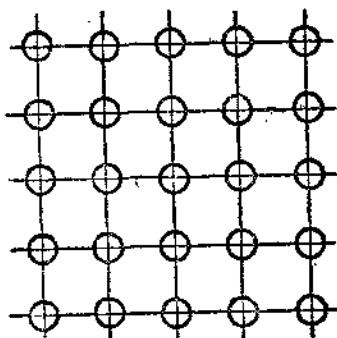


圖2 原子在晶面上的位置。

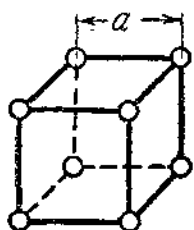


圖3 晶胞（簡單立方晶格）。

原子在晶体內的排列可以適當地畫成空間圖形，即畫成所謂的晶胞。所謂晶胞是指原子的最小組合。此種晶胞在空間經過多次重複之後便成為空間晶格。

晶胞的最簡單類型為圖3所示的簡單立方晶格。

在簡單立方晶格中，原子的排列密度是不高的。由於金屬原子具有占據彼此最相近位置的傾向，故可形成下列晶格類型之一，即體心立方晶格（圖4a）；面心立方晶格（圖4b）及密排六方晶格（圖4c）。

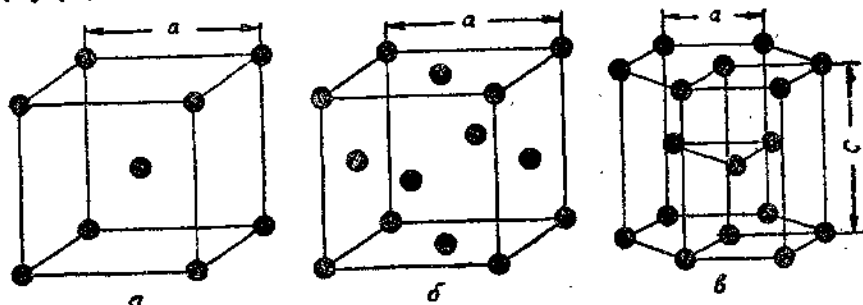


圖4 晶胞：

a—體心立方晶格；b—面心立方晶格；c—六方晶格。

代表原子的黑點位於立方體的頂角上（體心立方晶格）；或位於立方體的頂角上（面心立方晶格）；或呈六方形，於其二分之一的位置處再插入另一

① 此有限的數目僅對於一種尺寸的原子方為正確。如果有不同類型的原子存在時，則空間組合的可能數目是多得無法測量的。最近蘇布尼可夫（A. B. Шубников）對於不同尺寸的原子的可能排列方式進行了傑出的研究工作。

六方体，后一六方体上面的三个原子皆位于此六方棱形之内（六方晶格）。

圖3和圖4的晶格表示法是最慣用的一種（其他的表示法亦皆一樣）。如果像圖5所示的體心立方晶格那樣，將原子在晶格內的狀態以相切的圓球表示時可能更正確些，但是這類表示法（圖5）並不是永遠比圖4的表示法合適的。

晶格的尺寸以晶格常數表示之。立方晶格以一個常數，即立方體的棱長 a （圖4）測定之；晶格常數有着與原子尺寸的同級大小，故也用[埃]表之。

如呈體心立方構造的鉻，其晶格常數為 $2.878\text{\AA}$ ，而呈面心立方構造的鋁，其晶格常數則為 $4.041\text{\AA}$ 。

晶格常數是一個非常重要的性質，今天的X光研究方法已能將常數數值測至小數點後第四位至第五位的精確度，即達到萬分之一至十萬分之一埃。

由對晶格圖形所作的研究（圖4與圖5）可知，如果認為原子與彼此相觸的彈性球極為相似，由此即可引申出晶格常數 a 與原子直徑 d 之間的簡單幾何關係。

$$\text{在體心立方體中時} \quad d = \frac{a\sqrt{3}}{2}。$$

$$\text{在面心立方體中時} \quad d = \frac{a\sqrt{2}}{2}。$$

如將原子看成球形，則可算出：在體心立方晶格中，原子占總體積的68%；而在面心立方晶格（密排六方晶格也一樣）中，占74%，即在第二種情況下原子排的更密、更嚴。

除立方晶格外，在金屬中最普遍者為六方晶格（圖4b）。

如果原子層彼此相切，即畫于晶格內的三個原子（圖4b）與頂面及底面的原子相切時就形成所謂的密排六方晶格。

圖6a為此晶格的另一形式。密排六方晶格的尺寸以晶格常數的比值 $\frac{c}{a} = 1.633$ 表示之。當 $\frac{c}{a}$ 比值呈其他數值時即成為非密排六方晶格。

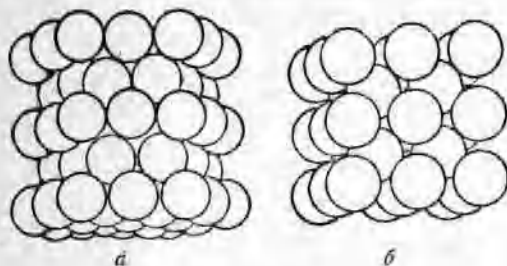


圖6 晶胞：

a—六方晶格；b—體心立方晶格。

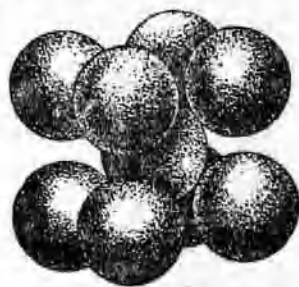


圖5 體心立方晶胞。

六方晶格（與面心立方晶格相同）為球的最致密排列方式，這可以由圖6a看出。該圖將六方晶格（圖6a）和體心立方晶格（圖6b）中呈相切球形的原子排列方式表達出來。將圖6a與6b加以比較即可證明原子在六方晶格中較在體心立方晶格中排列更密。

面心立方晶格與六方晶格都是同一直徑之球的最緊密堆積方式。

原书缺页

表2 金屬元素的晶格

3 Li K8	4 Be Γ12												
11 Na K8	12 Mg Γ12	13 Al K12											
19 K K8	20 Ca K12 (Γ12)	21 Sc	22 Ti Γ12 K8	23 V K8	24 Cr K8	25 Mn 复杂立方 复杂立方 正方	26 Fe K8 K12	27 Co Γ12 K12	28 Ni K12	29 Cu K12	30 Zn Γ6	31 Ga 正方	32 Ge 金剛石型
37 Rb K8	38 Sr K12	39 Y Γ12	40 Zr Γ12 K8	41 Nb K8	42 Mo K8	43 Tc	44 Ru Γ12	45 Rh K12	46 Pd K12	47 Ag K12	48 Cd Γ6	49 In 正方	50 Sn 金剛石型 正方
55 Cs K8	56 Ba K8	57~71 稀土族 元素 K12 Γ12	72 Hf Γ12	73 Ta K8	74 W K8	75 Re Γ12	76 Os Γ12	77 Ir Γ12	78 Pt K12	79 Au K12	80 Hg Γ6	81 Tl Γ12 K12	82 Pb K12

屬的密度和比重都比金屬小。

元素的原子半徑是由排列最靠近的原子中心間的距離決定的，它是物質的一種週期性能，此點可由表3予以說明。可以指出下面的普遍規律，即沿着某一週期由左向右移動時，元素的原子半徑即隨之而減小，第8組元素的原子半徑數值最小。沿某一組由上向下移動時，其中元素的原子半徑即隨之增加。

原子半徑也隨配位數發生改變（如果元素可形成若干種晶格時）。

K8中的原子半徑約比K12中的原子半徑小3%。

表3中所列者為配位數等於12的元素的原子半徑（根據包基）。

4 金屬晶體的實際構造

金屬晶體的尺寸一般是不大的。因此，金屬工件是由大量晶體構成的。

類此的構造稱為多晶體構造。由於以下將要講到的一系列原因（II章），在多晶體內的各個晶體不可能具有規律的形狀。在多晶體內具有不規則外形的晶體稱為晶粒或小晶體。

各個晶粒在其晶格的空間位向上是不同的（圖8）。晶格在晶粒內的位向在一般的情況下也是不定的，其任一排列位向在空間出現的機率是相等的。

但這種狀態並非是唯一的狀態。冷態機械加工（軋壓、拔絲）所造成的塑性變形可使晶粒呈擇優取向（軋壓織構）。擇優取向的程度可能不同，它可由位向呈偶

表3 金屬元素的原子半徑 (埃)
(配位數等於12)

3 Li 1.57	4 Be 1.13											
11 Na 1.92	12 Mg 1.60	13 Al 1.43										
19 K 2.36	20 Ca 1.97	21 Sc 1.65	22 Ti 1.45	23 V 1.36	24 Cr 1.28	25 Mn 1.31	26 Fe 1.27	27 Co 1.26	28 Ni 1.24	29 Cu 1.28	30 Zn 1.37	31 Ga 1.39
37 Rb 2.53	38 Sr 2.16	39 Y 1.81	40 Zr 1.60	41 Nb 1.47	42 Mo 1.40	43 Tc 1.34	44 Ru 1.32	45 Rh 1.34	46 Pd 1.37	47 Ag 1.44	48 Cd 1.52	49 In 1.57
55 Cs 2.74	56 Ba 2.25	57~71 La 1.88	72 Hf 1.59	73 Ta 1.46	74 W 1.41	75 Re 1.37	76 Os 1.33	77 Ir 1.35	78 Pt 1.38	79 Au 1.44	80 Hg 1.55	81 Tl 1.71

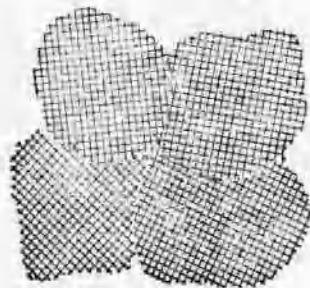


圖8 說明在多晶體內晶格
不同位向的示意圖。

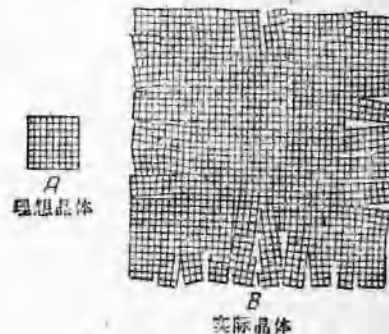


圖9 理想晶體的晶格 (A)
与实际晶體的晶粒 (B)。

然分布的狀態變至所有晶粒的位向完全一致的狀態。

此外，在結晶時採用非常緩慢的散熱方法和借助其他特殊方法，可以得到由一個晶體構成的金屬塊。此即所謂的單晶體。尺寸很大，重達數百克的單晶體均可製備以供科學研究之用。

近年來的研究證明：晶粒內部的結晶構造並不像理想那樣有規則（圖9）。古德曹夫（Н. Т. Гудцов）曾針對真實金屬晶體構造的实际不規律性發表過假說，認為有必要將其加以研究，並將其對金屬性能的影響加以考慮，而此一假說已為後來的研究所証實。

在結晶構造內可能有的缺陷中應當講到下列幾點：

a) 在晶格的個別結點上沒有原子（離子）。這些地點稱為「虛位」（圖9）。

6) 有些原子可能不在結点上, 而位于結点之間的位置上。凡位于結点上的原子, 我們認為它处于正規状态; 凡处于結点之間的位置上的原子, 則認為它处于不正規状态。后者也称为拆散原子。

б) 缺陷特別常在晶粒周界上出現。为缺陷所破坏且充滿缺陷的厚达数原子的表面層, 不論在性能上或化学成分上均与中心部分有着根本的不同。外部条件变化时, 在表面層內所引起的反应与在晶粒中心所引起者完全不同, 金屬內發生的許多变化即可由此予以解釋。

г) 晶粒由尺寸約 $1 \cdot 10^{-5} \sim 1 \cdot 10^{-3}$ 公分 (即由 0.1 至 10 公忽) 的晶塊所構成, 这些塊彼此以不大的角度, 約 $10' \sim 20'$ 互相傾斜。由此可見, 晶粒很像是特殊的嵌鑲塊。嵌鑲結構塊在不同的加工过程中發生破碎时就会引起金屬性能的改变。

遺憾的是, 無論是研究晶粒表層或研究嵌鑲結構都是十分困难的, 而今天的金屬学只能着手作晶粒內部(晶塊)及表皮結晶構造問題的理論与实际的探討。苏联的金屬物理学家阿尔哈洛夫 (В. И. Архаров), 康諾別也夫斯基 (С. Т. Конобеевский), 烏曼斯基 (Я. С. Уманский), 莫洛茲 (Л. С. Мороз) 等在这方面都进行着工作。

5 晶体的有向性

若將体心立方晶格內各种晶面加以研究时, 我們便能很容易地作出結論, 即这些晶面被原子以不同的密度所填充。

如体心立方晶格之影綫正方面(圖10a), 其頂点即为原子的中心。因为每一原子皆同时屬於四个正方面, 故每一面积为 a^2 的正方面只分到一个原子。在該晶格內的影綫長方形的面积为 $a^2\sqrt{2}$ (圖10б) 的面內共有两个原子, 而每一原子平均占有 $\frac{a^2\sqrt{2}}{2}$ 的面积, 比 a^2 为小, 即此面上的原子密度最大。

单独取出的晶体(單晶体)沿某方向的性能, 自然是依原子在該方向排列的密度而定。因試驗的方向不同而产生的性能差异称为有向性。可見所有的晶体都呈現有向性。有向性是任何晶体的特性, 也是結晶状态的特性。

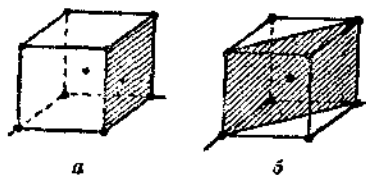


圖10 体心立方晶格中的晶面。

有向性現象可用圖11来加以說明。性能在某一方向上的絕對数值由向量的大小决定, 而模型体的表面便是由这些向量的終端形成的。研究圖11时可知, 銅晶体的强度便是一个显明的有向性能。晶体的其他性能也是有向的。

由很多位向不同的晶体所構成的实际金屬, 其中每一个晶体的尺寸都是用零点零几个公厘測量的。因此, 在一立方公分的金屬內便包含着几万个晶体。而每一晶体的位向都是任意的。这就使得在任何方向均排列着同样数量的位向不同的晶体。結果, 虽然構成該物体的每个晶体的性能都与方向有关, 但这种多晶体的性能在各方向却趋于一致了。这种现象称为伪等向性。

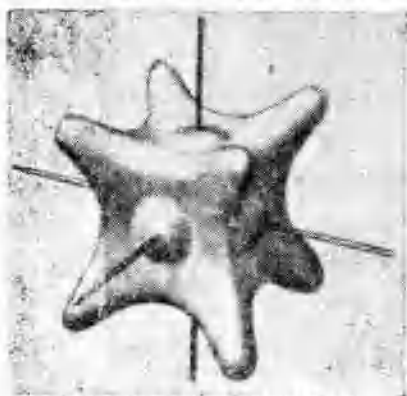


圖11 說明銅晶體的溫度極限與加力方向間關係的模型。

6 研究金屬結晶構造的方法

目前有着許多各式各样的方法：可用以研究金屬的結晶構造。這些方法可以分為兩種類型：凡用以研究晶體內部構造的方法屬於第一類內，而用以研究晶體外形的方法屬於第二類內。

晶體的內部構造，即原子在晶格內的分布是借助X-射線來研究的。

X-射線是一種波長極短（由2至0.005Å）的電磁波^①。

由於X-射線的波長很短，它並不自物質的表面反射，而能透入物質內部。在X-射線電磁場的作用下，原子中的電子發生振動。這種振動的電子便成為向四面八方傳播的所謂散射X-射線的電磁波源。可以認為，這些波是由原子中心發出的。由於原子在晶體內的規律排列，這些散射的X-射線彼此之間要發生作用，在某一些方向上互相加強，而在另一些方向上則互相削弱。如果在這類射線的方向上裝置照相底板（X-射線是看不見的，但它和可見光一樣，能引起底板上的乳膠發生化學反應），則在射線加強的方向上有黑斑或圓環出現。

在1913年吳立夫（Ю.В.Вульф，1863~1925）和較其略晚的布萊格（В.Брэгги）都指出：可以將這種干涉圖案（圖12），即X-射線相圖解釋成是X-射線自各個平行的原子平面反射後發生干涉的結果。

據此以確定原子間的距離以及原子在空間的排列特點（即晶格的型式和晶格常數）。所有的元素的晶格和許多化合物的晶格都是由X-射線結構分析法確定的。

X-射線結構分析法的日趨完善，使我們目前能確定原子的布置依溫度、壓力、成分、應力等所發生的變化。

晶體的尺寸、形狀和相互之間的布置是用金相法研究的。

因一切金屬都是不透明（對可見光而言）的物質，故晶體的形狀、大小及其相互的布置可在斷口或磨片上研究之。

金屬受沖擊時通常是沿晶粒界發生破壞的。用肉眼或在倍率不大（放大至5~10倍）的放大鏡下，或用雙筒顯微鏡（放大至50~100倍）觀察斷口時，便能判斷出金屬具有何種構造，即是粗晶粒構造



圖12 銅的X-射線相圖。

① X-射線的本質是和普通的光線相似的，只不過後者有着較長的波長（4000~7500Å）而已。X-射線是在一個特殊的儀器內，由於電子與靶子相沖受到制止而產生的。此時，電子的動能轉變為電磁波的一種變態——X-射線。X-射線的產生，它的性質和應用在物理教程內討論之。