

75
171.1
02

高等学校教学用书



金属学

北京钢铁学院金相及热处理教研组编

312428/10

中国工业出版社

本书包括总論、鉄碳合金和有色金屬及其合金三个部分。总論部分占全书的三分之二。其中論述了金屬学的基本原理：金屬和合金的結構、結晶、相图、扩散、变形和再結晶、固态轉变、組織和性质的关系等。鉄碳合金部分討論了Fe—C相图、碳鋼和鑄鉄。有色金屬和合金部分 闡述了鋁、銅及其它有色金屬和合金的組織和性质。

本书由冶金工业部教育司推荐为高等冶金 院校金屬学与 热处理专业的 教学用书，也可供有关生产和研究工作人員参考。

金 属 学

北京鋼鐵学院金相及热处理教研組編

中国工业出版社出版（北京佟麟閣路丙10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行，各地新华书店經售

开本787×1092¹/₁₆·印张23³/₄·字数538,000

1961年10月北京第一版·1961年10月北京第一次印刷

印数0001—3,343·定价：10—6）2.75元

統一书号：15165·599（冶金—174）

目 录

序言	7
緒論	8
第一部分 总論	
第一章 純金屬的結構	11
§ 1-1 金屬	11
§ 1-2 金屬原子結構的特点, 金屬結合	12
§ 1-3 固态金屬的晶体性	13
§ 1-4 結晶学的基本知識	17
§ 1-5 金屬的晶体結構	23
§ 1-6 实际金屬晶体結構的特点	28
第二章 金屬的結晶	37
§ 2-1 純金屬相图	38
§ 2-2 液态金屬的結構	39
§ 2-3 金屬結晶过程的現象	41
§ 2-4 結晶过程的热力学条件	42
§ 2-5 結晶过程中晶核的形成	43
§ 2-6 晶核的长大	51
§ 2-7 結晶过程的动力学	56
§ 2-8 連續冷却时金屬的結晶	58
§ 2-9 晶粒大小	59
§ 2-10 金屬的大体积結晶——金屬鑄錠的結晶	60
第三章 固态合金中相的結構	63
§ 3-1 第二元素对金屬結構和組織的影响	64
§ 3-2 固溶体的特点和类型	65
§ 3-3 代位固溶体的結構和性質	67
§ 3-4 形成代位固溶体的控制因素	71
§ 3-5 間隙固溶体	74
§ 3-6 金屬化合物的特点和类型	76
§ 3-7 具有正常价的化合物	77
§ 3-8 电子化合物	78
§ 3-9 間隙式金屬化合物	80
§ 3-10 具有砷化鎳結構的相	82
§ 3-11 Laves 相	83
§ 3-12 σ 相	84
§ 3-13 有序固溶体	84
第四章 二元合金相图及二元合金的結晶	85

§4-1	相平衡的热力学概念	86
§4-2	相图的建立	90
§4-3	相律及其应用	93
§4-4	液态合金	94
§4-5	二元相图基本类型概述	95
§4-6	液态及固态皆无限溶解的二元相图及此类合金的结晶	95
§4-7	液态完全溶解固态部分溶解且具有共晶转变的二元系相图及此类合金的结晶	100
§4-8	具有包晶转变的二元相图及此类合金的结晶	110
§4-9	在液态全溶, 固态时不溶或部分溶解但形成化合物或中间相的二元相图及此类合金的结晶	113
§4-10	液态有限溶解的二元相图及此类合金的结晶	116
§4-11	具有固态转变的二元相图	118
§4-12	合金铸锭的结晶及区域偏析的形成	120
第五章	三元系	122
§5-1	三元合金成份的表示法	123
§5-2	三元系中的杠杆定律和重心法则	125
§5-3	具有三相共晶的三元系	127
§5-4	状态空间的接触法则	134
§5-5	一对组元形成稳定的二元化合物的三元系	134
§5-6	形成三元化合物的三元系	136
§5-7	形成几个化合物的三元系	136
§5-8	组元在固态和液态时均有无限溶解性的三元系	138
§5-9	固态时一对组元有有限溶解性而其余两对组元有无限溶解性的三元系	140
§5-10	固态时两对组元有有限溶解性而其余一对有无限溶解性的三元系	143
§5-11	固态时三对组元均具有有限溶解性并形成共晶的三元系	146
§5-12	固态时两对组元有有限溶解性并具有包晶转变而其余一对组元有无限溶解性的三元系	148
§5-13	具有从包晶转变过渡到共晶转变的三元系	150
§5-14	液态时一对组元有有限溶解性的三元系	151
第六章	固态金属及合金中的扩散	153
§6-1	扩散的统计性质及扩散定律	154
§6-2	影响扩散的因素	160
§6-3	扩散过程中的原子运动	162
§6-4	扩散在工业中的应用	163
第七章	金属和合金的形变、回复及再结晶	166
§7-1	形变的基本类型	166
§7-2	金属及合金的弹性形变	167
§7-3	金属及合金范性形变的特征	169
§7-4	单晶体的滑移	169
§7-5	滑移所需的切应力	173
§7-6	晶体在滑移时的转动	175
§7-7	单晶体的孪生	177

§7-8 其它形变方式	179
§7-9 多晶体的范性形变	179
§7-10 范性形变所引起的金属及合金组织及性质的变化	183
§7-11 范性形变的位错理论	188
§7-12 金属的断裂	193
§7-13 金属材料冷加工后的退火	195
§7-14 回复	195
§7-15 再结晶	197
§7-16 再结晶温度	197
§7-17 再结晶核心的形成	198
§7-18 再结晶时核心的长大	199
§7-19 再结晶速度	200
§7-20 再结晶后的晶粒长大	201
§7-21 再结晶退火后的金属组织	202
§7-22 热加工后金属组织的变化	205
§7-23 热加工的优缺点	206
第八章 金属及合金的固态转变	207
§8-1 金属的多形性转变	207
§8-2 固溶体的多形性转变	215
§8-3 过饱和固溶体的分解	221
§8-4 固溶体的共析转变	228
§8-5 包析转变与单析转变	233
§8-6 马氏体型相变	235
§8-7 应力与范性形变对相变的作用	238
§8-8 合金的有序化及磁性转变	239
第九章 合金的物理性能及工艺性能以及如何为一定的用途选择合金	241
§9-1 由均匀固溶体组成的合金	242
§9-2 由两种晶体的混合物组成的合金	245
§9-3 含有化合物的合金	249
§9-4 对于制具有给定性能之合金的途径的评价	252
第二部分 铁碳合金	
第十章 铁碳合金状态图	256
§10-1 纯铁和渗碳体的性能	258
§10-2 铁碳合金状态图的分析	261
§10-3 合金的结晶过程及组织	263
第十一章 碳素钢	265
§11-1 铸钢的宏观组织	269
§11-2 铸钢显微组织及性能	274
§11-3 变形钢的组织及性能	281
§11-4 钢经热处理后的组织和性能	287
§11-5 工业用钢的分类和表示方法	291
第十二章 铸铁	293

§ 12-1 鑄鐵的組織.....	294
§ 12-2 鑄鐵的性能.....	299
§ 12-3 鑄鐵的石墨化.....	303
§ 12-4 影响鑄鐵組織的因素.....	309
§ 12-5 各种鑄鐵的牌号.....	312

第三部分 有色金屬及其合金

第十三章 鋁及其合金.....	315
§ 13-1 工业純鋁.....	315
§ 13-2 鋁合金.....	318
第十四章 鎂及其合金.....	322
第十五章 銅及其合金.....	335
§ 15-1 純銅以及杂质对銅的影响.....	336
§ 15-2 含鋅銅合金——(黃銅).....	339
§ 15-3 含錫銅合金——(錫青銅).....	343
§ 15-4 特种青銅.....	346
第十六章 鎳及其合金.....	350
§ 16-1 鎳.....	350
§ 16-2 鎳合金.....	351
第十七章 鈦及其合金.....	355
第十八章 鋅及其合金.....	359
第十九章 錫、鉛及其合金.....	362
§ 19-1 鉛及錫的易熔合金.....	363
§ 19-2 軸承合金.....	364
第二十章 鋅及其合金.....	369
第二十一章 貴金屬及其合金.....	372
参考书目.....	374

序 言

本书系根据1959年教育部审訂的高等学校金属学及热处理专业金属学課程指导性教学大綱的要求編写而成。內容分三个部分 共二十一章。第一部分是金属学的基本原理，其中比較全面而概括地闡述了金属和合金的结构、結晶、相图、扩散、变形和再結晶、固态轉变以及組織和性质的关系。在这一部分內容中，除三元系一章系借自 С.С. Штенберг 著“金属学”（中譯本）、組織和性质的关系一章系借自 А.А. Бочвар 著“金属学”外，其余各章都是新編写的。第二部分是鉄碳合金，其中討論了 Fe—C 相图、碳鋼和鑄鉄。除 Fe—C 相图一章系选自北京工业学院金相教研組所編“金属学簡明教程”外，其余两章是新編写的。第三部分是有色金属及其合金，全部借自 А.А. Бочвар 著“金属学”（1958年，中譯本）。本书不包括实验部分，这部分內容見另編实验指导书。

本书系由北京鋼鉄学院金相及热处理教研組金属学編写小組編写的。参加具体編写工作的有宋維錫、刘国勛、余永宁、李景慧、宋沂生等同志。

对所借选的各章的原作者、譯者深致謝意。对在編写过程中給予我們帮助和支持的同志們表示感謝。

限于編者的思想和业务水平，在自編的各章中不免有欠妥之处，敬希批評和指正。

緒 論

§ 0—1 金属学的研究对象和目的

金属学是关于金属和合金的科学，它研究金属和合金的成份、組織和性质之间的关系及其变化的規律。

研究的目的在于利用这些規律来合理地选择金属材料，正确地拟定各种加工工艺过程以及按照給定的性能要求創制新的合金。

如所周知，金属及合金在工业上有着广泛的应用。根据不同的使用目的，不同的工作条件，对金属材料在性能上提出不同的要求。

金属材料在使用条件下所表現的性能称为使用性能，它包括力学性能，如强度、硬度、韌性、弹性模量、疲劳强度、蠕变强度等；物理性能，如电阻率、电阻温度系数、磁矫顽力、导磁率、热膨胀系数等；化学性能如抗氧化性、抗腐蚀性等；以及其它使用性能如耐磨性、消震性、耐辐照性等等。

强度对于結構材料來說具有重要的意义。材料强度的提高，不仅可以节约大量金属，而且，由于构件体积的减小和重量的減輕，能够大大提高设备的工作效率、减少动力的消耗、延长设备的使用寿命，甚至还可能引起結構設計以及动力設計上的一系列的重大变化。在要求强度的同时，通常还要求材料具有其它方面的优良性能如高的冲击韌性等。对于工具材料來說，硬度及其在較高温度下的稳定性具有特别重要的意义。而各种物理的或化学的性能則是据以評定各种特殊材料（如电阻合金、軟磁和硬磁材料、耐蝕不銹材料）的使用价值的重要标志。

材料不仅应当具有优良的使用性能，而且还应当具有好的工艺性能，后者包括鑄造性、压力加工性、切削加工性、焊接性等等。在不少情况下，工艺性能会成为决定某种材料的工业价值的关键性因素。

材料的各种性能，或者說它在加工和使用条件下的行为，取决于一系列的外因（温度、应力状态、加力的速度、介质的物理化学性能等）和內因（成份、組織）。但是外因終究要通过內因才能起作用。

化学成分和組織是决定材料性能的两大內部因素。材料的化学成分不同，其性能也就不同；但是，即使是同一种化学成分的材料，在經過不同的加工处理、使其組織发生改变后，材料的性能也将互異。后一种情况表明，成份和組織两者之間有其相对的独立性。在合金成份所提供的可能性的范围之内，通过不同的处理过程，能够显著地使合金的組織和性质发生变化。

金属学的任务就在于建立成份、組織和性能之間的对应关系，找出关于何种成份、何种組織便具备何种性能的客观規律；同时，要建立組織的形成和变化与处理条件之間的对应关系，找出关于何种成份的材料，經過什么样的加工和处理后便具有什么样的組織的規律。在这些規律的基础上，通过改变和控制合金成份，选用各种适当的工艺手段来提高合金的性能或創制具有新性能的材料，以滿足国民經济各部門对金属材料的日益增长的要求，从而加速我国的社会主义建設。

§ 0—2 金属学的研究方法

金属学的研究方法有实验的方法和理论的方法两个方面。

实验的方法是各种物理化学分析方法，包括对合金成分、组织和性能进行实验测定的各种方法。

研究合金组织的最简便的方法是肉眼观察。这种方法称为宏观分析。它能分辨出金属和合金的粗型组织——材料在宏观范围内的化学的和物理的不均匀性如铸件的偏析、气孔、疏松、裂纹、晶带、压力加工所造成的流线、经化学热处理后的渗透层、断口的形式（韧断或脆断）等等。宏观分析作为一种检查产品或半成品质量的方法广泛地在工厂中应用。

为了观察金属的细微的组织，可以借助于光学显微镜。在光学显微镜下所观察到的组织称为显微组织。光学显微镜的放大倍数一般可达1000至1500倍；光学显微镜的分辨能力约为 1.5×10^{-4} 厘米。由于受到可见光波长的限制，比 10^{-4} 厘米更精细的组织，必须借助于电子显微镜才能观察得到。电子显微镜的分辨能力达 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 厘米。

利用X-射线衍射方法可以测定金属的晶体结构，其精细程度的数量级为 10^{-8} 厘米。

借助于机械的、电学的、热学的、热电的、磁学的和化学的实验方法来测定金属和合金的各种性能。由于性能的变化是组织变化的反映，因此，也能利用这些方法来间接地推测出组织的变化。

在实际的研究工作中，通常是各种方法结合起来使用，采用多种方法，可以取长补短，互为补充。

金属学理论的研究方法包括热力学分析的方法和分子动力学分析的方法。热力学分析的方法用于研究合金系统中相的形成及其平衡条件以及在外界条件变化时合金的相和组织变化的方向和限度。分子动力学分析的方法则帮助我们建立起关于合金中所发生的各种物理化学过程的原子运动景象，解决过程机理和速度问题。金属学中的各种原理是热力学和分子动力学原理在金属和合金中的具体化。是利用这些原理对由实验观察所揭露出的各种现象进行具体分析所得到的结果。

§ 0—3 金属学发展的一般过程

像其它学科一样，金属学是在社会生产实践的基础上发展起来的一门科学。

早在古代人类应用金属的初期，就开始了关于金属和合金的性能，合金的配制和处理方法的知识的积累。在这方面，我国古代劳动人民曾取得了伟大的成就，作出了不少贡献。然而由于几千年的封建统治加之近百年来帝国主义的入侵和国民党反动派的反动统治，造成了我国的近代工业和科学技术长期处于落后的状态。金属学也不例外。

在十九世纪中叶，随着工业和交通运输业（修筑铁路）的发展，对金属材料的需求量大大增加，在这个时期，许多新的炼钢方法投入了工业生产，生产的规模和钢铁材料的应用范围日益扩大。为了提高金属材料的质量，人们开始使用显微镜来研究金属，从此，金属学作为冶金学的一个组成部分，由于生产的需要并且直接在工厂中产生并发展起来。1868年，俄国的工程师契尔诺夫曾发现，钢在加热时有重结晶的现象，这一现象被利用来改善钢的组织以及用来使钢具有高的力学性能。契尔诺夫同时指出钢的临界点

的存在及其和鋼的含炭量的关系。随后許多学者致力于合金相图的研究。在十九世紀末，在热分析的和其它方面的实验資料的基础上，利用了相律，使Fe—C相图得以建立并随后日趋完善。

本世紀初期，汽車制造、化工、动力和航空工业得到了发展，对材料提出了更高的要求，金属材料的品种大大增加，与此同时，各种更完善的物理化学分析的方法，特别是X-綫結構分析的方法先后应用于金属学中，研究的范围，从普通的碳素鋼扩展到合金鋼，从黑色金属扩展到有色合金，研究的内容也逐步由相变的靜力学的研究轉入相变动力学的研究。

随着工业生产和科学技术的进一步发展，特别是各种尖端技术的出現，对金属材料的性能提出了許多新的要求，如高的强度，耐高溫 and 耐低溫的性能，抗振强度，弹性模量不随溫度而改变的性能，具有特殊的物理性能（耐輻照、各种电的、磁的和热膨胀的性能）等等。为了滿足这些要求，合金的成分进一步复杂化，使用了許多新的添加元素，并且采用了以前沒有用过的元素作为合金的基体。与此同时，实验物理和理論物理的某些与金属学有关的領域也有了进一步的发展，使物理概念和物理研究方法进一步运用到金属学中。

我国在解放后十多年来，特别是近几年来，工农业生产和科学技术有了飞跃的发展。在金属学这一学术領域內也取得了很大的成績。随着我国社会主义經濟建設事业的发展，金属学正肩負着越来越重大的任务。

第一章 純金屬的結構

§1-1 金 屬

在化学中，所謂金属，广义地讲，是指这样一类元素，它們与非金属元素发生化学反应时，能将其最外层的电子，即所謂的价电子让与后者。狭义地讲，所謂金属系指其氧化物和氢氧化物具有碱性，与酸結合能形成盐类的元素。金属元素占全部化学元素的3/4，在門德雷耶夫元素周期表中，由硼到鉍划一根折綫（表1-1），位于这根折綫左方的元素全部是金属元素，右方的为非金属元素。

表1-1 元素周期表

周期	IA	IIA	III	IVA	VA	VI	VII	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Mn	Uu	Uub	

在工程技术中，所謂金属是指具有一定金属性能的物质。这种物质富有金属光泽，可鍛，具有良好的导电性和导热性。不仅純元素如鉄、銅、鋁等具有这些性能，而且由許多元素組成的較為复杂的物质（其成分中既包含金属元素，有时也包含大量非金属元素）也具有这些性能，这类物质称为合金；广义地讲，也可以將它們称为金属，因為它們也具有金属的特性。

由以上所述可知，將金属当作一种化学元素和把它們当作一种物质看待，其概念之間是有某些区别的。

可以指出，当把金属作为一种化学元素看待并根据这种元素在化学反应中的行为来給金属下定义时，系着眼于元素的单个原子的性质，因为，化学反应是借着单个原子之間的化合或分解来进行的。而把金属作为一种物质看待并根据这种物质的宏观特性給

金属下定义时，是用大量原子的集合体的行为来作为定义出发点的。

虽然，在原子集合体的行为和单个原子的行为之间，这也就是说，在上述两种金属概念之间，有所区别；但是两者之间有着密切的联系。关于这种联系在以后的叙述中可以了解到。

现在，需要进一步指出，如何更确切地根据物质的宏观特性来定义金属。因为，当试图用金属光泽，可锻性，良好的导电性和导热性来划分金属和非金属时，将会遭遇到一系列的困难。首先，有不少例外情况存在：譬如，铈，铈(Ce)，镨(Pr)都是金属，但是铈并不可锻，铈和镨的导电性也并不比某些非金属好。其次，很难找出一个非人为的，关于上述金属特性的定量的界限来作为划分金属和非金属的标准。最后，还必须考虑温度对上述性能的影响，温度因素影响的强度是因元素而不同的，那么，究竟选择在什么温度下来进行上述性能的比较，也是一个难于处理的问题。由此可见，就严格的科学意义来讲，拿上述的金属特性来给金属下定义是有缺陷的。

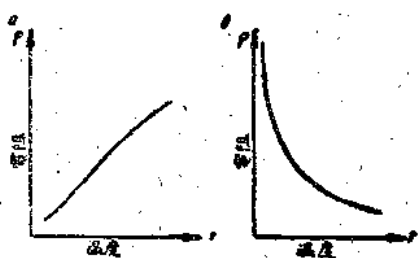


图 1-1 金属 (a) 与非金属 (b) 的电阻与温度关系的示意图

不过恰好也就在导电性和温度的关系上找到了问题的出路。原来，金属和非金属两者的电阻和温度的关系有根本的区别。对所有金属来说，其电阻随温度的升高而增大，或者说，金属具有正的电阻温度系数，而对于非金属来说其电阻随温度升高而减小，其电阻温度系数具有负值（图1-1）。

基于此，可以这样来下定义：金属是具有正的电阻温度系数的物质。

由此可见，如果我们不限于一般地根据金属光泽，可塑性，良好的导电性和导热性，而且还根据电阻温度系数来区别金属和非金属，那么，问题的解决就要严格和确切得多。

不过，必需指出，金属和非金属的分类并不是绝对的，而是相对的，有条件的。究其实，它不过是一种对问题的简化。首先，在自然界中实际上存在着许多介于金属和非金属之间的物质，有些不是上述定义所能圆满概括的，譬如，锗(Ge)，它的许多物理的和化学的性能说明它是一种金属元素，但是锗和其他半导体物质一样，其电阻温度系数具有负值。其次，还有这样一种情况，随条件的不同，有些元素可以是金属也可以是非金属，譬如，金属元素在气态时是非金属，磷在高压下却具有金属的特性。可见不能把分类绝对化。看来，更确切地是应当把金属理解为在一定条件下处于某种状态的物质，而不是一成不变地去指某种物质。

以上讨论了如何从宏观的性能出发给金属下定义的问题。

在工程技术上，广泛使用的金属元素有铁、铝、铜、铅、锌、锡、镍、铬、锰等等，其中有些以纯金属的状态使用，但是更大一部分系用于制造合金。

不论金属还是合金，它们的性能取决于其结构，即取决于其中原子之间的结合和原子在空间上的相互配置情况，我们将从纯金属的结构讲起，它是以后讨论更为复杂的问题的基础。

§ 1-2 金属原子结构的特点，金属结合。

金属的结构，在相当程度上依赖于组成原子本身的结构。金属原子结构的特点在于其最外层的电子数很少——一个至二个，一般不超过四个；金属原子外层的电子与核的结合力较弱，它很容易丢失其外层电子并使自己成为正离子。金属原子的这个特点决定于它在化学反应中的行为，同时也决定了金属原子之间互相化学作用的性质和金属原子集合体的性能特点。

根据近代物理的观点，处于聚积状态的金属，其全部或大部分原子，将它们的外层电子贡献出来为所有原子所共有；共有化了的电子在金属中自由运动；丢失电子后原子的剩余部分是一个正离子；这些共有化了的电子和正离子之间的互相作用，使金属原子结合起来，这种性质的结合称为金属结合。与离子结合和共价结合不同，在金属结合中电子不被束缚在个别原子上。图1—2给出了金属结合的示意性的模型。它被描绘为许多正离子浸溺在共有化电子的气氛里。

基于这种关于金属结合的概念，可以定性地理解金属所具有的一些特性。譬如第一，金属的良好导电性即系源于自由电子在一定的电位差下所作的定向运动。具有共价键和离子键的非金属物质无此特性，因为，在那里没有自由电子。此外在金属中，正离子（或原子）围绕着一固定位置振动，振动的振幅随温度升高而加大；在一定的电位下加速运动着的电子与正离子相撞并把能量传给后者使后者的振幅加大，这就意味着电流的通过引起了温度的升高。反过来，正离子对自由电子通过的阻碍就成了金属具有电阻的原因。温度升高，正离子的振幅加大，电子通过的阻碍加大，由此说明了电阻随温度升高而增加。第二，物质对热能的传递是靠原子的振动或电子的运动来完成的，原子的振动为所有固体物质所共有，而自由电子的运动则是金属物质所独有，由此说明了金属的良好导热性。第三，当金属在原子层间作相对位移时，正离子仍和自由电子保持着结合，因此金属具有塑性。最后，自由电子吸收可见光的能量，使金属具有不透明性，因吸收能量而激发的电子，当回到原有的低能级时发生辐射，这就使金属具有光泽。这是用金属中的自由电子来粗略地解释金属的性质。这些概念和解释都只是初步的，实际情况要更为复杂，因为，在金属中电子的运动服从着量子力学的定律，自由电子是依能带分布着的。

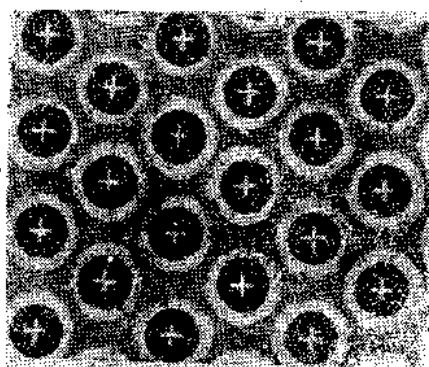


图 1—2 金属结合的示意模型

§1—3 固态金属的晶体性

原子之间的结合是关于固态金属结构的一个重要方面。另外一个方面是原子在空间上的配置情况。

原来，固体物质的性能不仅和原子之间的结合而且和原子在空间上的配置情况有着密切的关系。譬如，晶体和非晶体在性能上就有很大的区别，再如，在皆为晶体的情况下，原子的排列方式不同，金属的性能也互异，这一点还特别明显地表现在当金属的原子排列方式改变时（即当金属发生固态相变时）所发生的许多物理的和力学的性能的突

然变化上。最后，在原子排列的方式相同的情况下，结构上的某些变化也可能给金属某些性能以重大的影响。

不过，应当指出，并不是任何性能都和原子的排列有关，比方说，不同元素所放射出的 x -线的振动频率（其频率的平方根值与元素的原子序数有简单的直线关系）它与原子的内电子层结构有关，这些性能就很少因原子的排列而变化，再如，熔点，线膨胀系数，弹性模量等，主要决定于原子的外电子层结构（外层电子依原子序数而周期性地变化，所以这些性质是原子序数和原子量的周期性函数），这些性能对结构的依赖性也较小。但是，许多在工程上特别重要的某些性能，如强度、塑性、韧性、导电性、磁矫顽力、导磁率等等，它们对原子在空间上的配置方式是特别敏感的，正是这些性能与原子在空间上的配置有着十分密切的关系。研究金属中原子的空间配置情况的目的，也正在于发现和确立性质和结构之间的具体联系。

当考虑金属中的原子在空间上的配置情况时，应当首先指出：一切金属包括合金在内，都是结晶物质，不是非晶质，这就是说，在金属中，原子呈规则的排列。

固态金属中原子的规则排列，或者说固态金属的晶体性，已经为 x -线的实验所证实，同时，远不限于证实其晶体性，而是已经具体地、定量地测定了绝大多数金属的原子排列方式，金属的晶体性是不容置疑的。

可是，对初学者来说，常常对金属的晶体性认识不足。他们对这样一件事表示惊异：在日常生活中早已熟知的各种金属，它们的制品，如门锁和钥匙，交通车上的构件等竟和在博物馆中所陈列的宝石一起同属于结晶物质！而且，很自然地提出了这样一个问题：能否通过 x -线以外的其他方法来判明金属的晶体性。

如所周知，晶体和非晶体不同，前者具有下列的一些特征：（一）一定的熔点，（二）规则的几何外形，（三）各向异性。让我们就根据这些特征来确认金属的晶体性。

首先，金属具有一定的熔点，这是大家都知道的。

其次，关于晶体的规则几何外形。这里举出在镁蒸气的缓慢沉积过程中所生长出的固态镁（图1—3）作为一例。可以看出，镁像石英或某种矿物那样，显示出规则的几何



图 1—3 镁晶体的几何外形（原始放大5倍）

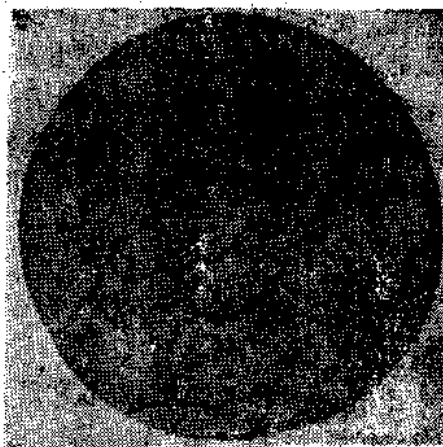


图 1—4 纯镁的显微组织 $\times 160$

形状。不过，如所周知，在大多数情况下，金属本身却无规则的几何外形。这里当然不

考虑金属制品的形状，因为它是纯粹人为的。我们关心的是金属所固有的形状，比方说其中的各个组成颗粒——晶粒的形状。我们知道，当金属经过磨光和腐蚀后，在显微镜下现出很多黑色的细线条，这些线条把显微镜的视野分割成很多小的区域，每个区域就相当于一个晶粒。普通的金属块即系由晶粒组成。纯铁的晶粒如图1—4所示。其他金属的显微组织与此图大体相同，可以看出，金属的晶粒形状并不是规则的。那么，能不能因此就怀疑金属的晶体性呢？回答是否定的。可以指出，固然，规则的外形是晶体的重要特征，但是结晶物体并非永远具有规则的外形。我们清楚地知道，在一定的条件下，当晶体的规则生长遭到困难时，虽明知该物质是品质，它的晶体形状也会变得不规则。观察某种透明品质，例如樟脑的结晶过程就能使我们相信这个论点。为此，熔化少量的这种物质，放在两块薄的玻璃片之间，置于显微镜的载物台上观察它的冷凝过程，可以看到，当冷却了一段时间之后，在显微镜的视野内，出现一颗颗的小晶体（图1—5），只要这些小晶体是在自由地生长，其几何形状便是规则的，晶体彼此间只是在空间的位置或位向上有差别而已。当两个生长着的晶体彼此接触以后，规则的外形便开始遭到破坏。这时，在那些晶体已经彼此接触的地方晶体停止了生长，但在尚未接触的地方，

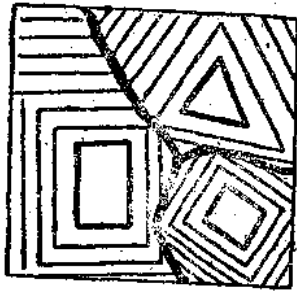


图 1—5 结晶示意图

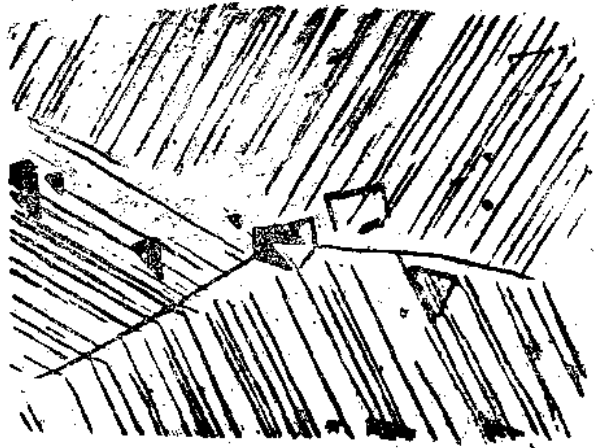


图 1—6 铝的滑移带和腐蚀穴×750

仍继续生长。这时，原先的规则形状消失了。结果，虽然此物质有着与规则的外形相对应的规则的内部结构，但是却获得了偶然的，与晶体的位向和位置有关的外形。金属是不透明的，所以不能直接观察某一金属块内部的晶粒产生和成长的情况，然而从樟脑和其他透明的结晶物质的结晶过程类推，可以推测出金属内部的一个个颗粒，虽然外形不规则，但也是晶体。

这一推测可由下列的现象加以证实：

（一）当用某种方法来处理金属时，晶粒结构的规则性便呈现出来。譬如用化学腐蚀方法将金属的磨光表面浸蚀后，出现腐蚀穴（图1—6），这些腐蚀穴显示出规则的几何外形。附带指出在同一个晶粒内的腐蚀穴，其形状和位向相同。腐蚀穴的位向是晶粒位向的反映，基于此，甚至创造了一种方法能够通过测定腐蚀穴的位向来确定晶粒位向。再如，当用某一物体（如钢球）压入金属内的个别的大晶粒时，所得到压痕形状常常不符合压入物体的外形而符合于该物质结晶点阵的对称关系和形状。图1—7示出以钢球压入铝的大晶粒所得到的压痕（放大10倍）可以看出压痕几乎是规则的六边形。用钢球

压入到铁、铜和铝的晶粒内，所获得的压痕是方形或三角形的。再如，当金属晶粒受到拉伸时，晶粒内部都出现许多平行线——滑移带（图1-8），这也是晶体的特征，非晶体无此特征。

（二）虽然不能直接看到金属的不透明晶粒长大过程，但是，如果使用含有某一金属的合金来代替金属，使此合金在凝固时由其中首先析出金属晶体并生长到相邻晶体接触以前就停止长大。那么，研究这种合金的组织就能观察到金属晶体在生长到某个阶段时的形状。例如，为了观察锡晶粒的成长，可以取含20% Sb和80% Pb的合金。这一合金中的锡的晶粒可以自由地生长，直到在锡的晶粒之间凝固出锡和铅的混合物的时候为止，这时锡的晶粒尚未接触。这一合



图 1-7 用钢球压入锡的大晶粒所得的压痕
(据Л.И. Димарчев) $\times 10$



图 1-8 铜-锡合金晶粒内的滑移带
(原始放大500倍)

金的显微组织（图1-9）使我们清楚地看出锡晶粒的晶体性。与此类似，在一系列的合金里可以显示出优先析出物的晶体性。

最后，谈一谈金属的各向异性。在实验室中人们能够培养出相当大的晶体，它相当

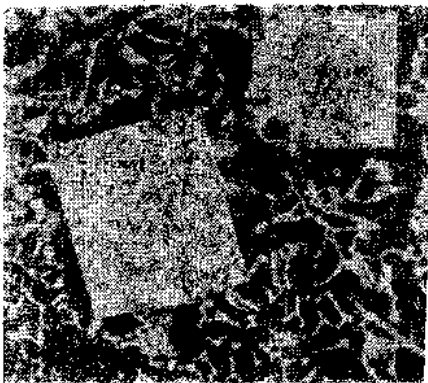


图1-9 含20% Sb的Pb-Sb合金的组织 $\times 160$

于只有一个晶粒，称它为单晶体。普通的金属材料都是多晶体。实验表明，金属单晶体的一系列性质如弹性模量，强度极限，塑性等和测量性能的方向有关，例如铁单晶体的弹性模量，由于方向不同，在29,000~13,500公斤/毫米²范围内改变。再如铜的单晶体的强度极限在14~35公斤/毫米²，伸长率在10~50%范围内改变。但是在多晶体金属中，一般说来，则不显示各向异性，这是因为在多晶体中各个

晶粒的位向是不规则的。多晶体的各向同性称为伪无向性。在某种条件下，多晶体也能显示出方向性来。这在以后再来研究。

从以上所述可知，由于某种原因，金属的晶体特征常被或多或少地掩盖，但是在许多场合下，这些特征仍相当明显。对金属的晶体特征的研究和揭露，丰富和加深了我们关于金属晶体性的认识。不过，应当强调指出 x-射线为我们提供的关于金属晶体性的证明是最有权威的证明。因为它进一步揭露了金属内部的原子排列。晶体的本质也就在于其原子的规则排列。

§ 1—4. 結晶学的基本知識

为了說明原子在金属中的排列，必需掌握結晶学的基本知識。

一、空間点陣

在結晶物质中，其质点（原子、离子或分子）作有規則的排列，即相同的质点在空間周期性地重复出現。

为了发掘质点排列的規律性，作出某种抽象：先在晶体結構中，任意找出一點，这一点可以是某一原子的中心，也可以不是原子中心而是空間上的任一其它几何点，然后在結構中找出所有与原始的几何点相当的各点；而所謂相当，系指在这些几何点的周圍，相对于几何点的某个相同的方向和相同距离处要有一个相同的质点（原子、离子或分子）；現在，設想把全部的质点（原子、离子或分子）拿走，剩下来一个几何点的空間陣列，它体现着质点重复的規律性；这个点的陣列就称为空間点陣。

为了研究晶体內部結構中质点重复的規律不受晶体大小的限制，設想相当点在空間作无限的排列，因而空間点陣是无限的。

把这些点用直綫联起来，形成一个三維的格架，如图 1—10 所示，称空間格子。实际上，它也就是空間点陣。

具有点陣結構的物质称为晶质，晶质在空間上的有限部分就是晶体。

点陣中的各点称作結点，結点并不代表任何质点，它仅具有几何学的意义。

点陣的重要特性是其中的每一个結点都具有相同的周圍环境，也就是說，空間点陣中任意一个結点与其相鄰結点的关系与另一結点的完全相同。基于这样的特性，Bravais 用数学方法求出空間点陣共有十四种。

二、单胞、晶系、晶軸

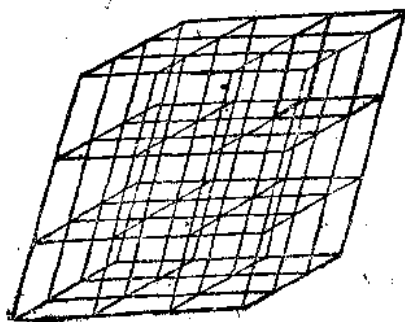


图 1—10 空間点陣

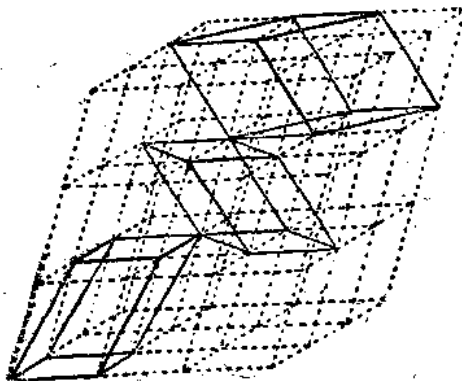


图 1—11 单胞的不同取法 (据 W. L. Bragg)

为了說明結点在空間上排列的特点，可以在点陣中取出一个基本单元（通常是六面体），在这个单元里点的排列代表了全部空間点陣的特征。这个单元称为单位点陣。或称单胞。整个点陣可看作是由大小、形状和位向相同的单胞所組成。

同一空間点陣可以任意取不同的单胞如图 1—11 所示。Bravais 規定了由空間点陣选取单胞的原则：

（一）所选取的平行六面体应将整个空間点陣的对称性包括进去；