

高等学校教学用书

金 属 学

北京钢铁学院 宋维锡 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

金 属 学

北京钢铁学院 宋维锡 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 30 3/4 字数 738 千字

1980年5月第一版 1980年5月第一次印刷

印数00,001~30,000册

统一书号: 15062·3542 定价3.40元

前 言

本书是根据冶金类各专业《金属学教学大纲》的要求，在北京钢铁学院金相及热处理教研室近年来所编写的讲义《金属材料学原理》的基础上改编而成的。为使本书一方面能够适应高等院校冶金类不同专业的教学要求，并考虑到可供有关工程技术人员参考，在编写过程中，我们对原讲义的内容作了较大的修改、调整和补充。

本书共分三篇：金属学基本原理；碳钢、铸铁及钢的热处理；合金钢。

基于教学大纲的要求以及受篇幅的限制，有色金属和合金未列专门篇章论述，为了弥补这一不足，所以在基本原理部分的例证中尽量选用有色金属及其合金方面的材料。

金属学对冶金类各专业来说，兼有一般基础课和专业基础课的双重性质，它包括的内容很广，涉及的问题很多，同时又是一门在迅速发展中的学科，企图用一本篇幅有限的教科书来满足各专业的要求是相当困难的。因此在编写过程中，无论在体系的安排上、内容的取舍上或深度的处理上都是颇费周折的。为了兼顾各专业的不同要求，所以全书都作了一定的扩充，其中有部分内容或附加*号，或列入附录。加*号者表示可以根据不同专业进行取舍；列入附录者，仅供参考或选修，可视具体条件灵活掌握。

金属学应在学完材料力学和物理化学后再进行讲授，本书的编写系统主要以此为依据。对于不学物化课的专业，则某些章节的讲授系统应作适当地调整，内容也应作相应地删减。例如，各章有关热力学的部分可大力精简；相图部分可从其建立方法及其基本类型等基本概念着手，而后再概括到一般规律。

本书由北京钢铁学院与西安冶金建筑学院合编。其中热处理一章（第十二章）由西安冶金建筑学院编写；其余部分由北京钢铁学院编写，具体参加编写工作的同志及其分工如下：

宋维锡：主编兼写第一章至第八章；

宋沂生：编写第九章至第十一章；

王明胜：编写第十二章；

田 琮：编写第十三章至第十九章。

由于编者水平所限，时间仓促，书中不足和错误之处在所难免，殷切希望同志们批评指正。

对在各方面直接、间接热情帮助和大力支持过本书编写工作的同志们，在此一并致谢。

编 者

1979年2月

目 录

前 言

第一篇 基 本 原 理

第一章 概论	1
第一节 金属材料及金属学的发展梗概	1
第二节 金属材料的一般特性	3
第三节 决定金属材料性能的基本因素	4
第四节 冶金生产与质量控制	7
第五节 金属学的研究对象、方法和目的	8
第二章 金属和合金的固态结构	9
第一节 金属与合金	10
第二节 金属和合金的典型结构模型	11
第三节 晶体学简介	14
第四节 金属和合金中原子间的结合	21
第五节 金属和合金的晶体结构类型	26
第六节 固溶体	34
第七节 结构缺陷	41
附 录 晶面及晶向的投影表示法	55
第三章 金属及合金的相图	60
第一节 关于相平衡和相图的基本概念	60
第二节 二元合金相图	66
第三节 三元合金相图	73
第四章 金属及合金的结晶与组织	84
第一节 结晶概论	85
第二节 固溶体合金的结晶及组织	99
第三节 共晶系合金的结晶及组织	110
第四节 其它合金系的结晶与组织	117
第五节 铸锭的结晶及组织	120
第六节 改善铸造金属材料组织的方法和途径	128
第七节 定向结晶的应用	129
第五章 金属及合金的形变	132
第一节 应力与应变	132
第二节 弹性形变	134
第三节 范性形变的表象	136
第四节 单晶体的滑移	138
第五节 孪生及扭折	150
第六节 多晶体的范性形变	154
第七节 范性形变后金属的结构、组织和性能	161

第八节 金属的断裂	165
第六章 金属及合金中的扩散	177
第一节 扩散定律	177
第二节 原子运动与扩散	184
第三节 影响扩散的因素	190
第四节 反应扩散	194
第七章 金属及合金的回复与再结晶	195
第一节 形变金属或合金退火过程中的一般变化	196
第二节 回复	198
第三节 再结晶	203
第四节 再结晶后的晶粒长大	214
第五节 再结晶退火后的组织	222
第六节 热加工	224
第八章 金属及合金中的固态转变	230
第一节 固态转变的基本类型	231
第二节 固态相变的一般特点	233
第三节 固溶体的脱溶	239
第四节 共析转变	253
第五节 马氏体型转变	260
第二篇 碳钢、铸铁及热处理	
第九章 铁碳相图和铁碳合金缓冷后的组织	271
第一节 纯铁	271
第二节 铁的碳化物	272
第三节 铁碳相图	274
第四节 铁碳合金的结晶	277
第五节 合金在缓冷过程中的固态转变和室温组织	279
第十章 碳钢	286
第一节 钢的宏观组织	287
第二节 碳和杂质元素对碳钢显微组织和性能的影响	299
第三节 钢中的非金属夹杂物	307
第四节 热形变钢的组织 and 性能	312
第五节 钢的冷形变	326
第六节 碳钢的分类和用途	336
第十一章 铸铁	338
第一节 概述	338
第二节 灰口铸铁	339
第三节 可锻铸铁	350
第四节 球墨铸铁	353
第十二章 钢的热处理原理和工艺	356
第一节 概述	356
第二节 钢加热时的组织转变	357
第三节 过冷奥氏体的转变	362
第四节 回火转变及性能	375

第五节 钢的退火	380
第六节 钢的正火	386
第七节 钢的淬火	387
第八节 钢的回火	393
第九节 钢的热机械处理	394
第十节 钢的表面淬火	397
第十一节 钢的化学热处理	399
第三篇 合金钢	
第十三章 合金钢总论	402
第一节 钢中的合金相	402
第二节 合金元素在钢中的作用	405
第三节 合金钢的分类及编号	414
第十四章 结构钢	415
第一节 机器结构钢	415
第二节 超强韧钢	422
第三节 工程结构钢	427
第十五章 轴承钢	432
第一节 对轴承钢的要求及轴承钢的合金化	432
第二节 轴承钢中的非金属夹杂物	433
第三节 轴承钢的碳化物	435
第四节 轴承钢的成品热处理	439
第十六章 工具钢	440
第一节 工作条件对工具钢的要求	440
第二节 刃具钢与量具钢	440
第三节 模具钢及轧制工具钢	446
第四节 高锰钢	449
第十七章 耐蚀钢与耐蚀合金	452
第一节 金属材料的耐蚀性	452
第二节 不锈钢耐酸钢	460
第三节 耐蚀合金简介	467
第十八章 耐热钢及耐热合金	468
第一节 工作条件对耐热材料的要求	468
第二节 耐热钢及耐热合金的类型	471
第三节 耐热钢和耐热合金的冶炼及热加工特点	474
第十九章 电工硅钢	476
第一节 电工硅钢的主要用途和要求	476
第二节 硅钢片	477
附 录	483
附录 I. 合金钢中有关的国家标准及冶金部颁标准索引	483
附录 II. 强度指标换算表	483
附录 III. 冲击韧性指标换算表	484

第一篇 基本原理

第一章 概 论

第一节 金属材料及金属学的发展梗概

在所有应用材料中，凡由金属元素或以金属元素为主而形成的，并具有一般金属特性的材料通称之为金属材料，它是材料的一大类，是人类社会发展的极为重要的物质基础之一。金属学是关于金属材料方面的一门学科，它与金属材料的创造、发明和发展是密切相关的，两者是相互促进相辅相成的，都是千百年来，广大劳动人民和科学工作者密切合作，经过生产实践和科学实验，反复总结提高而逐步发展和完善起来的，都是人类生产活动的产物，是劳动的结晶。

人类和自然斗争的历史大致可分为两大时代：石器时代和金属时代，而金属时代又分为铜器时代和铁器时代。它标志着人类生产大发展的三个飞跃阶段，也是记载着人类文化进展的三个里程碑。

人类由石器时代进入金属时代是以青铜的创造和应用作为重要标志的；由铜器时代进入铁器时代是以铸铁（或生铁）的熔炼和应用而开始的；而由铸铁到炼钢，则又是一个较大的飞跃。青铜曾对古代文明起过非常重要的作用，而钢铁又在近代文明中占据着特殊重要的位置。历史事实表明，自从钢铁的冶炼和应用兴起以后，人类社会生产和科学技术的发展便日益紧密地和钢铁逐步联系在一起，并以前所未有的增长速度迅猛向前发展。进入二十世纪以后，这种关系表现得更为突出。钢铁的发展促进了科学技术的发展，而科学技术的发展，反过来又促进了钢铁和其它有色金属材料的发展。五十年代以后，尽管有人认为已开始进入原子或电子时代，各种尖端技术相继涌现，各个生产领域不断革新，但是金属材料的发展不是慢了，而是更迅速地又进入了一个大发展的新阶段，各种新型金属材料也随之大量出现。到目前为止，全世界金属材料的总年产量（包括钢、铸铁和有色金属材料）已高达十亿吨以上，质量和品种的发展也相当快。由此可见，一个国家或一个历史时期，金属材料产量的多少、发展速度的大小以及质量的高低已经成了衡量其生产水平和科学技术发达程度的重要标志之一。

我国金属材料的发展，据考证早在商朝（公元前1652～前1066年）初期即已出现高度的青铜文化，可见铜器时代至少应在夏朝就已开始了。春秋（公元前722～前481年）时已能熔炼铸铁，到战国（公元前403～前221年）时，铸铁的生产和应用已显著扩大，所谓白口铁、展性铸铁、麻口铁相继出现，随后发展到由铸铁而炼钢，并相继开始采用各种热处理方法：退火、淬火、正火和渗碳等来改善钢和铸铁的性能。西汉时，钢和铸铁的冶炼技术已大大提高，产量、质量和应用得到空前的发展。后经近一千五、六百年，直到明朝（1368～1661年），特别是中间又经过所谓盛唐时代的大发展后，钢铁生产一直在世界遥遥领先。与此同时，铜合金也由青铜而发展到黄铜和白铜，并以此而闻名于世，其它金属材料也有了相应的发展。由此可见，我国古代劳动人民，无论在早期金属材料的启蒙时

代，或在钢铁发展的初期和中期，都曾有过辉煌的成就，对人类做出了巨大的贡献。只是到了十八世纪，特别是十九世纪以后，由于腐朽的封建统治，加之帝国主义的侵略和剥削，才使我国在金属材料方面逐步落在他国之后，以至到解放前，我国钢铁的年产量，即使按历史最高水平计也仅几十万吨。全国解放后，生产大发展，钢和其它金属材料也随之而发展起来。

金属学在欧美大多称物理冶金，是由早期的金相学与物理化学以及材料力学等科学相结合而发展起来的一门独立科学，它是二十世纪的科学产物。事实上，早在人类创制和应用金属材料的初期，就已开始积累有关金属材料的性能、成分、加工处理和质量检验等方面的知识，并逐步探索其相互间的联系和规律。例如，关于质量检验方面，最早人们是通过辨别声响，观察擦划条痕，表面色泽和断口状况等简单方法来判别金属材料的性能和质量，以后进而采用腐蚀的方法以观察表面或断面所出现的纹理，并逐渐将它和金属材料的制造、加工及热处理等方法联系起来，探索其中规律，用以改进生产工艺。这些实验和鉴别金属材料的方法虽较原始，但对金属材料的发展曾起过重要的作用，而且其中有的至今仍不失为金属学的基本内容之一。后来进而又将显微镜应用到金属材料的检验和研究上，并结合物理化学分析法才逐步揭开了金属材料内部的一些秘密，开始迈向了现代金属学的新领域，形成了金相学，但这已是十九世纪后期的事了。进入二十世纪，特别是三十年代后，相继发明和应用了X射线术，电子显微镜；近年来又发展和应用了场离子显微镜，以及电子探针和电子扫描等新技术，空前扩大了有关金属材料方面的研究领域，使金属材料由宏观到微观直至原子组态方面，甚至电子结构方面的秘密及其和性能方面的关系和规律几乎都初步直接揭示出来，其中不少已达到定量的程度，金属学也就因而更趋完善了。

我国古代劳动人民和科学工作者在有关金属学早期知识的积累方面有很大的贡献，这从现已发现的大量古代金属遗物中即可以看到。例如，精致的冶炼、铸造、锻造和焊接技术，以及惊人的热处理和化学热处理——渗碳工艺等，它表明当时已相当准确地掌握了金属材料的许多工艺性能和使用性能，并应用于生产实践中。另一方面从现存的许多古籍中还可以找到有力的文字证据，除了零星记载外，还有不少系统的文献，其中最著名的有先秦时代的《考工记》（作者难考）、宋代沈括的《梦溪笔谈》以及明代宋应星的《天工开物》等。它们都属于举世公认的，世界上最早或较早的有系统的科学技术著作。其中也记载着关于金属材料的冶炼、铸造、焊接、热处理等工艺方面，以及成分、性能和用途方面的珍贵资料，即使今天读起来，也令中外人士惊叹不已。例如，两千多年前的《考工记》中关于六种铜合金——青铜的成分配比、性能和用途方面的论述，与现代青铜几近完全一致；五百多年前的《天工开物》中关于锉刀的制造、翻修和热处理工艺方面的论述也和今日相差无几。事实上，热处理的应用要早得多，据《中国冶金史》（科学出版社，1978）考证，早在商朝即开始采用退火方法来处理金箔，到战国时，已多方面应用各种热处理方法于钢铁了。铸铁的柔化热处理技术比之西方要早约二千三百年。所有这些，生动地说明了我国古代劳动人民和科学工作者的巨大成就和智慧。但是不幸，由于前面所讲到的同样理由，我们在现代金属学的发展上落后了。解放后，随着金属材料和其它科学技术的发展，金属学也得到了发展，近三十年来，无论是在教育或科学研究方面，也无论是在理论或实际应用方面，都已取得了巨大的成绩。相信在党的正确领导下，在向四个现代化进军的新长征途中，金属学和金属材料一样，一定会得到更快的发展，赶上世界的先进水平。

第二节 金属材料的一般特性

金属材料,尤其是钢铁,之所以能够对人类文明发挥那样重要的作用,一方面是由于它本身具有比其它材料远为优越的综合性能,诸如物理性能、化学性能、力学性能、工艺性能,因而能够适应科学技术方面和人民生活方面所提出的各种不同的要求;另一方面,是由于它那始终蕴藏着的在性能方面以及数量和质量方面的巨大潜在能力,可供随时挖掘,因而能够随着日益增长着的名目繁多的要求,而不断地更新和发展。

现代科学技术和农工业生产以及人民日常生活对金属材料性能方面所提出的要求,尽管名目繁多,但是归纳起来大致可分为两大类:一类是工艺性能,另一类是使用性能。使用性能在于保证能不能应用的问题,而工艺性能则在于能不能保证生产和制做的问题,也就是说解决怎么样去应用的问题。

金属材料从冶炼到作为成件使用以前,需要经过铸造、压力加工、机械加工、热处理以及铆焊等一系列的工艺过程,它能否适应这些工艺过程中的要求,以及适应的程度如何,是决定它能否进行生产,或如何进行生产的重要因素。金属材料所具有的那种能够适应实际生产工艺要求的能力统称工艺性能,例如铸造性、锻造性、深冲性、弯曲性、切削性、焊接性、淬透性等等。这类性能虽然是金属材料本身所固有的,但是如何测试和表达它呢?它的物理实质又是什么呢?这是个相当复杂的问题,因为这类性能往往是由几种参变量(包括物理的、化学的、力学的)综合作用所决定的。例如,所谓铸造性能既与金属的熔点、粘度以及液态和固态的膨胀系数有关,又和液态与其周围介质的化学作用以及由此而产生的化合产物的物理性质相联系,企求用单一的物理参量来表示是相当困难的,也是十分繁杂的。于是工程上用特定的所谓流动性、填充性、凝固收缩性、热裂性等综合起来表示铸造性能。其它工艺性能,也作类似的处理。为了进行预测或比较,并为了方便起见,工程上多采用模拟实验的方法,即模拟实际生产条件而设计出一套实验装置,测出所规定的一套数值指标,用来作为判别工艺性能的规定标准。通常所说的工艺性能,即指这些数值指标。严格说,它只能在一定程度上或近似地反映材料本身在具体生产流程中所表现的实际工艺性能,但由于具有实用价值,而且测试比较方便,所以被广泛采用。

金属材料制作成工件后,在使用过程中,则要求它能适应或抵抗作用到它上面的各种外界作用。随构件和使用条件的不同,这些外界作用是相当复杂的,既有质的区别,又有量的不同。它包括诸如各种力学、化学、辐射、电磁场以及冷热——温度的作用等等。这些作用有强有弱,有大有小,有单一的,也有复合的。例如,作为结构材料,当然一般都首先要求能够分别或同时承受各种动力学或静力学的作用,但随使用条件不同,又会附加对抵抗其它作用的要求,例如:大气下要求抗大气腐蚀;航海中要求抗海水腐蚀;化工上要求抗各种化学介质的腐蚀;电机上要求抵抗或顺应电磁场的作用;原子能工业则要求抗辐射作用;空间技术则要求耐高温或耐低温的性能……等。金属材料满足这些要求的能力,合起来统称使用性能,分别称力学性能、抗腐蚀性能(或化学性能)、电磁性能、耐热性能……等等。这些性能大部分可以和材料的一些基本物理量直接地联系起来,但工业上为了实用的方便,也大多是采用模拟实验指标来表示。例如由拉伸试验测出的所谓屈服强度、抗拉强度、延伸率、面缩率;由冲击试验测得的所谓韧性值;新近发展的由裂口试样测得的所谓断裂韧性等即属于此,这意味着这些指标和实际有一定距离,因此,改进现有的测试技术

和创造新的测试技术，以更方便更准确地由实验室的小试样反映金属材料的各种构件在使用过程中的实际性能，也是发挥材料潜力的另一个重要领域。

工艺性能和使用性能是既有联系又不相同的两类性能，尽管它们都是金属材料本身蕴藏着的，但由于目的不同，这两类性能上的好与坏或高与低，有时是一致的，有时却是互相矛盾的。例如，一些要求高强度或高硬度或耐高温的材料常常会给压力加工，机械加工、铸造等工艺带来不少困难，有时甚至会达到否定某些材料的程度。因此一方面需要改进加工工具和加工制做方法同时提高材料的工艺性能，另一方面使材料性能方面能具有多变性或多重性以提高其使用性能。大部分钢铁和一部分有色金属材料已在一定程度上具有这方面的许多特点，这也是金属材料的可贵之处。由此可见工艺性能和使用性能之间的这对矛盾的解决过程，也是一个促进金属材料发展的过程。

工艺性能和使用性能的不断改善和创新，是金属材料发展进程中的显著特征，也是将来发展的重要内容。它的潜在能力仍然是很大的，有待于我们进一步去挖掘和发挥。例如，近年来已经发现苗头，利用完整的金属晶体或金属玻璃（非晶态金属）有可能使金属材料的强度提高几倍，甚至几十、几百或几千倍以上。

第三节 决定金属材料性能的基本因素

金属材料在性能方面所表现出的多样性、多变性和特殊性，使它具有远比其它材料较为优越的性能，这种优越性是其固有的内在因素在一定外在条件下的综合反映。这内在因素首先应从原子结构的特点以及原子间的相互作用来探讨起；其次要探讨金属材料内部原子总体的组合状态——即内部原子总体的运动状态。这个问题所涉及的范围是很广的，有的已超出了本书范围，有的是后续章节将要讨论的，这里先粗略介绍一些基本概念。

组成金属材料的主要元素是金属元素，正如化学上所讲过的，金属作为元素的一大类来说，它的原子结构具有区别于其它元素的一些共性（外层电子较少），这个共性决定了金属原子间结合键的特点，而结合键的特点，又在一定程度上决定了内部原子集合体的结构特征。金属材料内部原子间的结合主要依靠金属键，它几乎贯穿在所有金属材料之中，这就是金属材料有别于其它材料的根本原因。不同金属材料之间的差别只是量上的不同，而不是质上的差别，否则它就不属于金属材料了。所以金属材料之间性能上的相对差别，归根到底是这量上的差异所引起的。而这个量上的差异，若在给定外界条件下，主要是受材料的化学成分制约的，例如，铝、铜、铁之间性质迥然不同，钢和铸铁之间性能差别也很大。但是，同一化学成分，甚至同一结构的材料，它的某些性能仍然可以在一个相当大的范围内发生显著变化。例如，同一化学成分的某种钢的不同制件，其硬度之差可以达到这样的程度，以致一个可以切削掉另一个，而这是受我们称之为“组织”和“结构”的因素所控制的，它实质上也是原子集合体内部运动状态不同的另一种表现。由此可见，化学成分，原子集合体的结构以及内部组织是决定金属材料性能的内在基本因素，金属材料性能方面的多变性，也正是通过这三个内在因素的多变性而表现出来的。

在金属学中，组织这个概念是指用肉眼或借助于各种不同放大倍数的显微镜所观察到的金属材料内部的情景。习惯上用放大几十倍的放大镜或用肉眼所观察到的组织，称为低倍组织或宏观组织；用放大100~2000倍的显微镜所观察到的组织，称为高倍组织或显微组织；用放大几千倍到几十万倍电子显微镜（以下简称电镜）所观察到的组织，称为电镜

显微组织或精细组织。为了初步建立组织概念，先观察几张组织照片。图1-1是同一金属材料两种不同铸锭的低倍组织照片。显然两者是有区别的，它也反映到加工工艺性能的差异，即（*b*）较（*a*）的锻造性差。图1-2是含碳量为0.35%的钢（*a*）和含碳量很低的纯铁（*b*）在相似外界条件下的组织照片，它们在力学性能上的反映，是（*a*）较（*b*）的范性和韧性较差，而强度和硬度较高。图1-3是同一种铸铁由于条件不同而表现在组织上的差别，反映在性能上的差异是（*b*）较（*a*）耐冲击，强度也高。图1-4是一块耐热合金的同一试样，分别在光镜（*a*）、（*b*）和电镜（*c*）不同放大倍数（ $\times 100$ ， $\times 1000$ 及 $\times 10000$ ）下的组织，显然，放大倍数越高，观察到的组织越精细。以后将会知道，仅仅在精细组织中才能发现到的差异有时却可以使宏观性能发生很显著的变化。

很久以来组织就是金相学的主要研究对象，金相学发展为金属学后，组织仍然是金属学的重要组成部分。组织形态是多种多样的，非常复杂的，这从上面照片中也可以初步看出来。但如果仔细观察分析，便可以从复杂现象中发现，组织具有一个共同的较普遍的特征，即它是由许多好像生物学上的细胞似的小单元所组成的。组织形态的复杂性是由于这些小单元的形状、大小、相对数量和相对分布不同而产生的。以后将会知道，这些小单元的成分和结构也可以不相同。金属学中称这些小单元为晶粒，它是组织的基本组成单位，各晶粒之间通过其界面相互紧密结合在一起，这些界面叫晶界（其中有的或称相界）。简单的组织是由单一的、形状较规则的晶粒所组成的，图1-2（*b*）是这种组织的典型照片。总之，组织一词的含义包括着晶粒的大小、形状、种类以及各种晶粒之间的相对数量和相对分布。

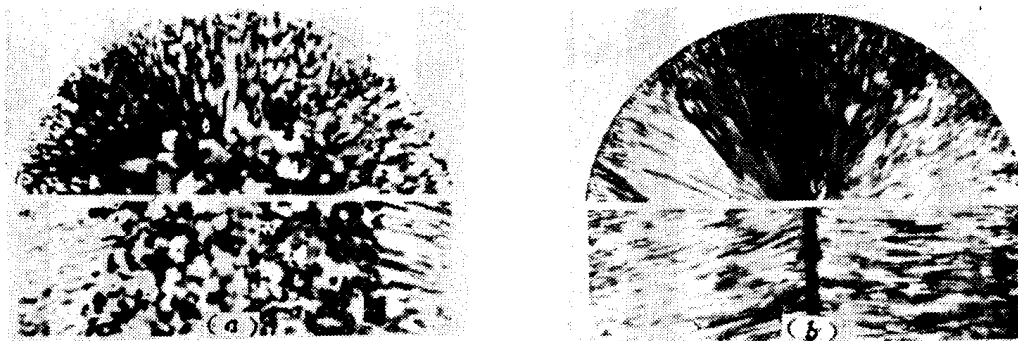


图 1-1 具有等轴晶区（*a*）和没有等轴晶区（*b*）的铸锭低倍组织， $\times 0.3$

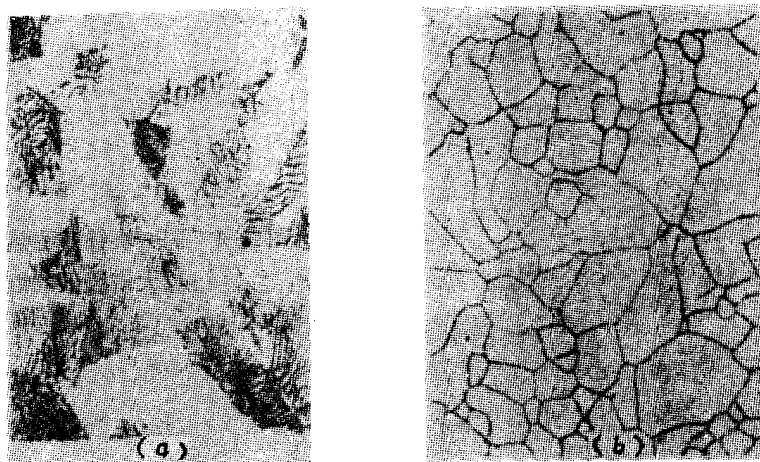


图 1-2 含碳量为0.35%的钢（*a*）， $\times 450$ 和纯铁（*b*）， $\times 250$ 的显微组织

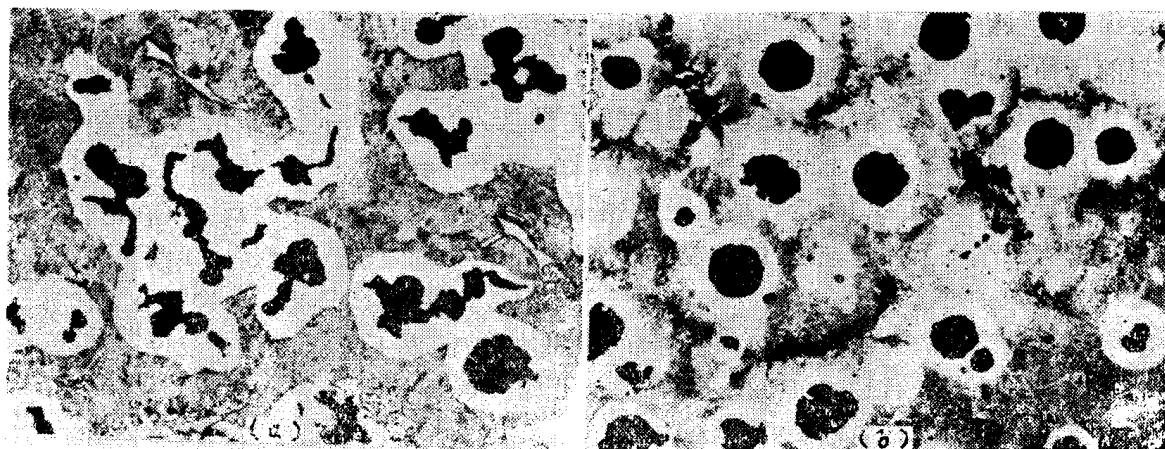


图 1-3 铸铁的两种不同组织， $\times 250$

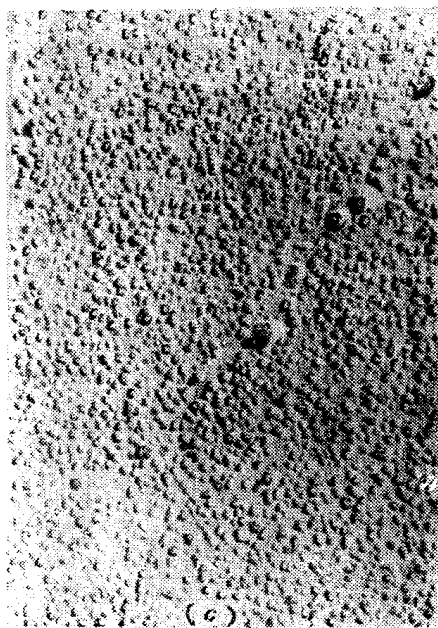
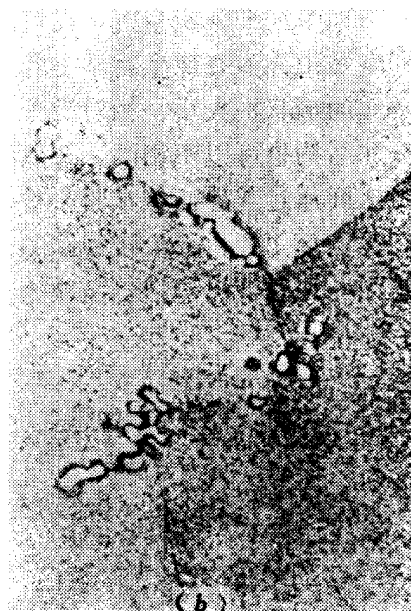


图 1-4 同一块镍基耐热合金在不同放大倍数下的组织
(a) $\times 100$ ，(b) $\times 1000$ ，(c) $\times 10000$

进一步分析表明，每个晶粒内部，事实上也不是单一的，即使最简单的组织也往往如此，它是由更细小的单元所组成的(参看图9-10)，人们称这些更细小的单元为“亚晶粒”或“亚晶”，其含意是晶粒中的晶粒。亚晶之间有亚晶界；亚晶的形状、大小和相对分布也随条件的不同而变化，人们将这些内容归于“亚组织”一词中，意即组织中的组织。

X线分析表明，一个完整的晶粒或亚晶内部(事实上，它们大多含有各种缺陷)是由同类的原子，或不同比例的异类原子，按一定规律结合在一起的，并可用严格的几何图案来表达出来。随成分或其它条件的不同，代表原子组成规律的这种几何图案可以是多种多样的，关于它的形式、分类和组成等问题是晶体学所研究的主要内容，所以金属学中用“晶体结构”这个词来概括它，简称“结构”。严格说，“结构”是指原子集合体中各原子的具体组合状态。

成分、结构和组织三者既相互区别，又相互渗透，并分别在不同程度上相互制约着，它们的综合作用决定了金属材料的性能。当各种外界条件(如温度、压力和其它物理化学作用等)影响到内在因素时，才会对金属材料产生实质性的效应，即才会影响或改变金属材料的性能。各种性能受内在三因素的控制作用，其程度或大小是不同的。不言而喻，化学成分应是基础，只有在这个基础上，才能谈到结构和组织的作用。

当化学成分给定时，金属材料的某些性能主要是由结构类型所控制的。有些性能对结构的变化，特别是组织的变化很不敏感，以致从应用角度来看，几乎可以忽略不计。我们将这类性能列为对结构组织不敏感(或弱敏感)的性能。金属材料的密度、弹性模量、热膨胀、熔点、热传导、比热、电阻(金属)、电化学位、热电性、顺磁和逆磁性、光反射、抗辐射性等即属于这一类。其中有的对成分的变化也不大敏感，例如，一般工业用钢，无论碳钢或低合金钢，其弹性模量大致稳定在 215745兆牛/米^2 (22000公斤/毫米^2)左右；普通黄铜，即使合金元素锌由零增至40%，它的弹性模量的变化也仅5~6%而已。

金属材料的另一类性能，对结构组织的变化反映很敏感，我们称它为对结构组织敏感的性能，属于这一类性能的有屈服强度、抗拉强度、断裂强度、硬度、韧性、延伸率、面缩率、滞弹性、蠕变、铁磁性(包括导磁系数、残余磁感、矫顽力)等。正是在这些性能上，组织和结构才能显示出作用来。正因为如此，结构组织才受到高度重视，而成为金属材料学的重要内容。

上述分法，当然只是相对的，因为有时外界条件还会对某些性能起相当大的作用，例如，随着温度的降低，电阻对结构组织的敏感性会越来越显著。在低温下，特别是对一些半导体材料来说，电阻对结构组织是很敏感的。

第四节 冶金生产与质量控制

现代科学技术的发展，已为金属材料的生产、制造和应用展现出一个更广阔的新天地，它除了使产量迅猛发展外，也使质量提高到前所未有的高水平。数量与质量应是辩证的统一体，没有数量当然谈不到质量，但没有质量的数量却往往是空的。因此，在产量大发展的时代，质量问题必须放在突出地位。一吨高质量的钢制品有可能抵两吨或更多些的普通钢制品使用；反之，低质量的一吨钢，也许还抵不上半吨用。问题就是这样尖锐地明摆着，对质量必须给予足够的重视。

质量问题包括的项目是多方面的，但概括起来一句话，是如何发挥现有金属材料潜力

的问题。这里不谈尺寸规格等，单从金属学的角度来看，是如何根据要求充分保证成分、结构和组织，从而保证和提高性能的问题，最终归结到材料制品的使用寿命问题。

在金属材料由冶炼、铸造、加工、热处理到制作成工件，并使用乃至报废的整个历程中，每个环节的各种外界条件，大多都在或大或小、或多或少地影响着那些决定其性能的内在基本因素。

化学成分（包括所谓杂质和夹杂物等）主要是由冶炼和铸造，特别是由冶炼来保证的，冶炼和铸造条件的任何变化都会影响到成分的改变。现代一些新的冶炼和浇注技术，如真空熔炼、真空浇注、氩气保护、电渣重熔以及各种自动化装置和设备的应用，其目的都在于（或主要在于）首先保证材料的规定成分和纯洁度，而后再在这个前提下提高产量和生产率。成分的保证还不只限于此，除冶炼和浇注外，在某些情况下，后步工序如各种加工和处理条件，有时也会或多或少地改变表层成分。如前所述，成分是基本因素，对某一具体应用材料来说，成分保证时，它的一些对结构组织不敏感的性能也就保证了。但是，成分给定时，组织结构仍然可以随条件而变化，所以成分并不能确保材料的实际结构和实际组织，因而也就不能确定它的那些对结构组织敏感的性能。

结构组织除了受成分制约外，还要由铸造条件、压力加工条件、特别是热处理条件来确定。其它条件，如机械加工、焊接等也有影响，有时影响也不小，但只限于工件的表层或局部。此外，在使用过程中，结构组织也会变化，机械零件或其它构件的破坏不少是由因此而发生的。由此可见，上述各个环节的工艺参变量或条件，对结构敏感性能来说是非常重要的。在这里质量控制问题就在于，在完成各工艺直接目的的同时，如何确保材料内部所预期的结构和组织。这必须首先掌握结构组织的形成和变化规律，才能合理地制定工艺。现代化的各种铸造、加工和热处理等新工艺，以及为适应这些新工艺的各种现代化的新设备和装置，已经有可能把保证或改善结构组织、提高质量推进到一个崭新的水平上。例如：连续轧制新技术的应用，由于温度、时间、压下量和轧制方向等工艺参数能够按要求进行严格地自动化控制，结构组织也就可以得到充分的保证，尺寸规格的精确度也提高了，这便将高质量和高速度紧密结合起来了；连续浇注技术产量大，工作条件好，并有可能改善铸锭组织和提高钢的纯洁度；合精炼与浇注于一体的电渣重熔新技术，使成分和组织结构同时都大为改善，其它如离心浇注，悬浮浇注等也都对组织结构的改进取得了较好的效果。

总之，现代化的冶金生产技术必须使高速度与高质量相结合，忽视高质量的高速度造成的损失将更大，这是不能允许的；当然，也不能走到另一极端，而不顾产量。多、快、好、省才是正确方向，控制或提高质量，必须从内在因素去着眼，它是决定材料性能和使用寿命的根本。

第五节 金属学的研究对象、方法和目的

金属学是关于金属材料——金属和合金的科学，它的中心内容应是研究金属和合金的成分、结构、组织和性能，以及它们之间的相互关系和变化规律。目的在于利用这些关系和规律来指导科学研究和生产实践，以便更充分有效地发挥现有金属材料的潜力，并进而创制新的金属材料。金属学基本上是一门应用科学，也是一门偏重于实验的科学。

金属学的研究方法可分为实验和理论两个方面。

分析成分，测定结构，观察和鉴别组织，测试性能以及从动力学方面分析结构和组

组织的形成和变化，应是金属学的基本实验内容，X线分析法，光学显微镜（以下简称光镜）分析法，电镜和电子探针等技术以及各种测试力学、电磁学、热学和化学性能的实验技术等等，则是进行金属学试验的重要方法和手段。

研究组织的最简单的方法是肉眼观察，这种方法称为宏观分析法，它能分辨出金属和合金的低倍组织——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碳层、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，现在仍然广泛地应用于生产上。

观察细微组织可借助于光学显微镜。在光镜下所观察到的组织，一般称为显微组织。光镜由于受到光波长的限制，分辨能力约为 1.5×10^{-4} 厘米，有效放大率为1000~1500倍。更细致的组织，必须借助电子显微镜。电镜的分辨能力可达 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 厘米。在电镜下所观察到的组织称电镜组织，此外，场离子显微镜的应用，可将分辨能力进一步提高，而达到近于原子大小的尺度。

利用X线衍射方法可以测定金属和合金内部各种相的晶体结构，电子探针（微区X线谱分析）则可用于分析组织中显微区域内的化学成分。

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可以测定金属和合金的各种有关性能。同时，由于性能的变化是结构组织变化的反映，所以也可以利用这些方法来间接地研究结构组织的形成和变化过程。

金属学理论方面的研究主要包括热力学、分子动力学以及电子理论在金属学中的应用。热力学分析法用于研究合金系中相的形成和相平衡的条件以及条件变化时相变的方向、限度和驱动力。分子动力学分析法则用于研究金属和合金中各种转变过程中的速度和机理方面的问题。电子理论可使有关结构和性能方面的研究更深化一步。

在实际的研究工作中，通常是将各种实验方法结合起来，取长补短，相互补充，取得可靠的资料或数据，再进行理论的综合，找出规律性的东西，金属学已有的基本原理是由此而取得的，进一步的理论也得靠此来探索和补充。

本书作为普通金属学教科书，着重阐述基本概念、基本理论及其在碳钢、铸铁和合金钢等实际材料中的应用。为学习其它专业课奠定基础。

第二章 金属和合金的固态结构

在第一章已指出过，结构是决定金属材料性能的内在基本因素之一，因而它是理解许多有关材料问题的一个重要关键，是金属学的重要内容之一。

物质的结构是物质在一定外界条件下，其内部数以亿万计的原子或分子运动的综合表现，而原子的尺寸又很小，以埃(Å)计，属于亚显微领域，所以描述结构时，一方面要有运动观点，另一方面又必须抽象化，用模型来比拟，这就要学习如何正确地去对待抽象与具体的关系。

本章所讨论的问题仅限于金属和合金组织中各种晶粒内部及其内外界面上的原子集合

体的组合状态，而不牵涉到组织问题。组织中的每一个晶粒本身各有它自己的特性，它会显著影响金属和合金的性能，特别是组织敏感的性能，所以联系到性能时，也应注意到这一点。

第一节 金属与合金

自古至今，人类创制和应用的金属材料，其中绝大部分是由两种或多种元素所组成的。例如：各种碳钢和铸铁至少都含有Fe、C、Si、Mn等元素；普通黄铜，起码也是由Cu、Zn两种元素所组成的，由于其中作为主体的是金属元素，又大多是通过冶炼或熔合而成的，并在宏观上都具有一般金属元素所具有的共同特征，所以在金属学中，把这一类材料或物质通称合金。组成合金的元素，称合金组元。合金或单以其主要组元来命名，例如，铜合金、铝合金、铁合金等；或以其组元合称来命名，例如铜镍合金、铝铜合金、铁碳合金等；或另起专名，例如钢、铸铁、硬铝、青铜、黄铜等。

金属材料的发展史，实际上是一部合金研制和应用的历史。纯金属只是在现代科学技术的基础上，才有可能进行较大量的生产和使用。而且所谓纯也只有相对意义，绝对的纯是没有的。通常将那些基本上是由一种金属元素组成的材料或物质叫做纯金属，并随其纯度的不同而分为工业纯金属和化学纯金属（或超纯金属）两类，每类又按纯度规格而分为若干种。实际上，通常进行工业生产和使用的纯金属大多属于前一类；后一类需要特殊方法和设备才能制造出来，产量有限，多用于科学研究，尖端技术或某些特殊生产领域。现代科学技术已能制造出纯度达到99.999%以上的纯金属，一些半导体材料的纯度甚至可达到 $(1-10^{-10})$ 。然而，无论纯度如何高，总或多或少的含有微量其它元素，通常将这微量元素叫做杂质。

事实上，很难在这些含有杂质的所谓纯金属与合金之间划出一条严格的分界线。凡是有益的，有意识的加入或存留在某一金属材料中一定数量的元素，称合金元素；那些无益的、偶而混入的或难于净除而存留下来的元素，称之为杂质。因此，不仅所谓纯金属会含有杂质，而且合金中也会含有杂质。的确有不少合金和金属，正是由于某些所谓杂质的作用，而使其规定的性能恶化，从而影响其具体应用，甚至报废。冶炼正是通过去除杂质和保证规定化学成分这两方面而表现其技术高低和方法优劣的。但是，必须指出，同一种元素对某一材料来说可以是合金元素；而对另一种材料来说却可能是杂质。甚至同一种材料中的同一元素，对某一要求来说可能是有利的，因而它是合金元素；但对另一要求来说可能是有害的，因而它是杂质。例如，钨铬钒钢中的Si和Mn，是作为杂质元素来看待的，但在硅锰合金钢中，则成为主要合金元素；硫在一般钢中，都把它看做很有害的杂质，需要严格控制其含量，但在易削钢中却成了受欢迎的合金元素。总之，在我们学习金属学时，必须正确地看待金属与合金、纯与不纯以及杂质与合金元素之间的辩证关系。

在以纯金属为基础讨论结构问题时，无论是所谓杂质或合金元素，我们都把它们当做异类原子来对待。对某一具体材料来说，所谓杂质和合金元素对结构和性能的作用很可能是有显著区别的，但从材料总体来看，它们在结构中所起的作用是无法区分的

总之，无论从理论上或从实用上来考虑，很难将纯金属和合金截然分开。在学科名词上也如此，广义的“金属”是包括合金在内的。但通常为了叙述的方便，大多分开来处理。

第二节 金属和合金的典型结构模型

电镜和场离子显微镜等新技术的相继发明和应用,虽然已能将人的感觉器官的功能延伸到超微观领域里,直接观察到原子或分子组合状态,但目前来说,结构的确定仍然大量依靠X射线衍射技术来进行。根据X射线探测结果,除非特殊处理,在固态下的金属和合金都属于结晶体类的物质。所谓结晶体(或简称晶体),在过去是指具有天然的、几何外形规则的物体,事实上,规则外形只是内部结构的特殊反映形式之一,并不能完全代表其实质,实质是其内部原子或分子的组合态是否可用规则的立体几何图案来表达。前章已经指出过,金属和合金的组织单元是晶粒,一个完整的理想晶粒,它内部的原子或分子是按严格的规则几何图案相互组合起来的。这种组合图案的形式,随晶粒化学成分或其它条件的不同,虽可以是各种各样的,但归纳起来,可以用下节将要讨论的七大晶系中的14种空间图案来描绘。为了初学的方便,这里先形象地讨论三种结构,它们在金属和合金中具有普遍性和典型性,特别是其中的两种,也是讨论其它结构的基础。

一、纯金属的典型结构模型

为了便于理解,可以把金属原子的集合体看作是由同样大小的刚球以最密集或次密集的形式堆砌起来的。

1. 面心立方和密集六方结构模型

晶体的密集刚球模型可看作是由无数多的刚球密集平面依次一层层地堆砌起来的,每个球代表一个原子。容易想象,在一个平面上,如果用同一尺寸的刚球以最密集的形式单层堆砌起来,则只能得到如图2-1(a)所示的唯一形式:每个球周围都有六个球与其相切,并在其周围形成六个三角间隙,即每三个原子之间有一空隙。这就代表着晶体中一个密集的原子平面,简称晶面。在这个晶面上,如果用A表示原子中心位置,并任选一原子中心作为参考点,把它周围的六个三角间隙相间地各取其三而分为两组,各以B和C来表示其中心位置,那么,在这个晶面上边再密砌同样的第二层时,其位置可由相似的两套位置B和C中任选一套,也只能选一套,即第二层原子只能对准B或C。也就是说,第二层和第一层间的相对位移向量只能是AB或AC。但无论选哪一套,结果并无多大差异。今设第二层的位置相应于B,即第一、二层间的相对位移向量为AB,如图2-1(b)所示。当在第二层上边再密砌第三层时,虽然也可由相似的两套位置中任选一套,但由于这时要考虑三层相互间的相对位置,第三层选择的位置不同,所得结果也就迥然不同:

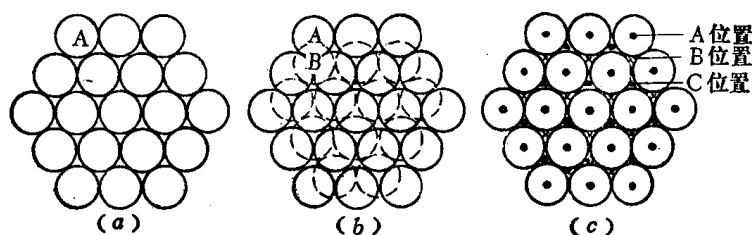


图 2-1 密集晶体中的原子堆集模型

一种选择是,第三层取相当于第一层C的位置,即第三层相对于第二层的位移向量仍为AB,或者说,三层间都是相互错开的。它们的堆砌顺序可用ABC来表示。若以下一直