

高等专科学校试用教材

金属材料与热处理

王运炎 主编

机械工业出版社

GAOZHUANJIAOCAI

高等专科学校试用教材

金属材料与热处理

王运炎 主编



机械工业出版社

金属材料与热处理

王运炎 主编

(重排本)

*

责任编辑：张蒿玲

版式设计：冉晓华

封面设计：刘代

责任校对：熊天荣

责任印制：卢子祥

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

河北省涿水县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张18³/₄·字数 454 千字
1984年6月北京第一版·1990年5月河北第七次印刷

印数191,301—213,600·定价, 3.75元

*

ISBN 7-111-00274-1/TG·92(课)

前 言

本书是高等专科学校机械制造类专业的试用教材，是根据机械工业部教育局初步审定的招收高中毕业生、学制为三年的教学大纲编写的。

本书内容主要包括：金属学基础；热处理基本原理和常用方法；常用金属材料；金属材料的机械性能及其测定等。本书可作为高等专科学校机械类专业（教学时数为70~100学时）的教材，适用于职工大学、业余大学。中等专业学校也可选用，并可供有关的工人和技术人员参考之用。

本书在内容处理上主要有如下几点说明：（1）本书是在读者已学过物理、化学、材料力学、机械制造基础等课程，并经过了冷、热加工的基本操作实践的基础上编写的。（2）全书在简述金属学基本知识的基础上，以成分-组织-性能间关系的规律为主线处理有关章节的内容，并在第九章“机械零件的选材及其工艺路线分析”中综合应用，起归纳、总结、巩固、提高的作用。（3）对主要内容都有一定的说理分析，避免只讲现象与结论。并注意到前后内容的呼应与衔接。（4）尽量采用了当前我国通用的有关标准、资料。本书的计量单位统一采用国际单位制，如强度指标的单位一律用 MN/m^2 （兆牛/米²）表示，它同以往采用的单位 kgf/mm^2 （公斤力/毫米²）的关系为 $1 \text{MN}/\text{m}^2 \approx 0.1 \text{kgf}/\text{mm}^2$ ；冲击韧性值 a_k 的单位用 J/cm^2 （焦/厘米²）表示，它同以往采用的单位 $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ （公斤力·米/厘米²）的关系为： $1 \text{J}/\text{cm}^2 \approx 0.1 \text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 。（5）在每章后面都有一定量的习题与思考题。这些习题与思考题都是要求学生经过独立思考后才能完成的。它能使进一步搞清一些基本概念、巩固所学的知识，培养分析、解决实际问题的能力。教师可结合具体情况选择一些布置给学生练习。（6）为了使本书的适用面更广，在附录中增加了“金属材料的机械性能”一章；第六章、第八章、第九章内容也比大纲要求的略有增加，教师可结合专业具体要求，选讲有关部分。

参加本书编写的还有俞伟民同志。本书由郭涤策同志主审。

参加本书审稿会议的有：张鲁阳、卢鼎恒、翁其金、罗黎峰、康云武、苏家麟、屠信康、易周才、邵永洪等同志。天津大学、上海交通大学以及杨国英、吴凯令同志为本书提供了部分金相照片，在此一并表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，经验不多，缺点与错误在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

目 录

绪论	1	第三章 合金的结构与二元合金	39
第一章 金属的晶体结构与结晶	4	§ 3-1 合金的结构	39
§ 1-1 金属的晶体结构	4	一、合金的基本概念	39
一、晶体与非晶体	4	二、合金的相结构	39
二、金属的特性和金属键	4	§ 3-2 二元合金相图的建立	43
三、金属晶体结构的基本类型	5	一、相图的表示方法	44
四、晶格的致密度	7	二、二元合金相图的测定方法	44
五、晶面、晶向和晶体的各向异性	8	§ 3-3 二元匀晶相图	45
§ 1-2 实际金属的晶体结构	9	一、相图分析	45
一、多晶体结构和亚结构	9	二、合金结晶过程分析	46
二、晶体的缺陷	10	三、杠杆定律的应用	47
§ 1-3 纯金属的结晶和铸锭	13	四、枝晶偏析	48
一、纯金属的冷却曲线和过冷现象	13	§ 3-4 二元共晶相图	48
二、结晶过程	14	一、相图分析	49
三、金属结晶后的晶粒大小	16	二、合金的结晶过程分析	50
四、金属铸锭的组织与性能	17	三、比重偏析	55
§ 1-4 金属的同素异晶转变	18	§ 3-5 合金的性能与相图间的关系	56
习题与思考题	19	一、形成单相固溶体的合金	56
第二章 金属的塑性变形与再结晶	21	二、形成两相混合物的合金	56
§ 2-1 金属的塑性变形	21	习题与思考题	58
一、单晶体的塑性变形	21	第四章 铁-渗碳体相图	60
二、多晶体的塑性变形	26	§ 4-1 铁碳合金的基本相	61
§ 2-2 冷塑性变形加工对金属的 性能与组织的影响	26	一、铁素体	61
一、冷塑性变形对金属性能的影响	27	二、奥氏体	61
二、冷塑性变形对金属组织结构的影响	27	三、渗碳体	62
三、产生残余应力	29	§ 4-2 铁-渗碳体相图分析	62
§ 2-3 回复与再结晶	31	一、上半部分图形——由液态变为固态 的一次结晶	62
一、回复	31	二、下半部分图形——固态下的相变	64
二、再结晶	31	三、铁-渗碳体相图中各点、线含义的 小结	65
三、晶粒长大	32	§ 4-3 典型铁碳合金结晶过程及其组织	66
四、影响再结晶后晶粒大小的因素	33	一、共析钢(0.77% C)的结晶过程分析	67
五、冷塑性变形金属的热处理	34	二、亚共析钢(0.0218~0.77% C)的 结晶过程分析	67
§ 2-4 金属的热塑性变形加工	35	三、过共析钢(0.77~2.11% C)的 结晶过程分析	69
一、热加工与冷加工的区别	35	四、共晶白口铸铁(4.3% C)的结	
二、热加工对金属组织与性能的影响	35		
习题与思考题	37		

晶过程分析.....69	四、淬透性与机械性能的关系119
五、亚共晶白口铸铁(2.11~4.3% C)的 结晶过程分析.....70	§ 5-8 钢的表面淬火.....119
六、过共晶白口铸铁(4.3~6.69% C)的 结晶过程分析.....70	一、感应加热表面淬火120
§ 4-4 含碳量与铁碳合金的组织、性能 间的关系71	二、火焰加热表面淬火123
一、含碳量与平衡组织间的关系.....71	§ 5-9 钢的化学热处理.....123
二、含碳量与机械性能间的关系.....71	一、概述123
§ 4-5 铁-渗碳体相图的应用.....72	二、钢的渗碳124
一、在选材方面的应用.....72	三、钢的氮化128
二、在制定热加工工艺方面的应用.....72	四、钢的软氮化和离子氮化130
习题与思考题.....73	五、钢的气体碳氮共渗133
第五章 钢的热处理75	习题与思考题134
§ 5-1 概述75	第六章 碳素钢与合金钢.....138
§ 5-2 钢在加热时的转变76	一、按用途分类138
一、共析碳钢的奥氏体化过程.....76	二、按化学成分分类138
二、影响奥氏体化的因素.....77	三、按质量分类138
三、奥氏体晶粒的长大.....78	§ 6-1 常存杂质对钢性能的影响.....139
四、亚共析碳钢和过共析碳钢加热时的 转变.....80	§ 6-2 合金元素在钢中的作用.....140
§ 5-3 钢在冷却时的转变81	一、合金元素对钢中基本相的影响140
一、过冷奥氏体的等温转变.....81	二、合金元素对铁-渗碳体相图的影响.....141
二、过冷奥氏体的连续冷却转变.....90	三、合金元素对钢热处理的影响143
三、马氏体转变.....92	§ 6-3 结构钢.....146
§ 5-4 钢的退火与正火96	一、普通结构钢146
一、退火.....96	二、优质结构钢150
二、正火.....99	三、其他结构钢163
§ 5-5 钢的淬火.....101	§ 6-4 工具钢.....166
一、淬火工艺101	一、刃具钢167
二、淬火方法105	二、模具钢174
三、淬火缺陷及防止方法107	三、量具钢178
§ 5-6 钢的回火.....111	§ 6-5 特殊性能钢.....179
一、回火目的111	一、不锈钢.....179
二、淬火钢的回火转变111	二、耐热钢182
三、回火转变产物的组织与性能112	三、耐磨钢184
四、回火的种类及应用115	习题与思考题185
五、回火脆性115	第七章 铸铁.....187
§ 5-7 钢的淬透性.....116	§ 7-1 铸铁的石墨化.....188
一、淬透性的意义116	一、铁-碳双重相图.....188
二、影响淬透性的因素117	二、石墨化过程189
三、淬透性的测定与表示方法118	三、影响石墨化的因素189
	§ 7-2 灰口铸铁.....190
	一、灰口铸铁的化学成分、组织和性能190
	二、灰口铸铁的牌号和应用193
	三、灰口铸铁的孕育处理193

§ 7-3 可锻铸铁.....194	§ 9-4 热处理工序位置的安排.....251
一、可锻铸铁的生产方法194	一、预先热处理的工序位置251
二、可锻铸铁的牌号、组织、性能及用途196	二、最终热处理的工序位置251
§ 7-4 球墨铸铁.....196	§ 9-5 典型零件的选材、热处理及工序位置分析.....256
一、球墨铸铁的生产方法197	一、齿轮类零件256
二、球墨铸铁的化学成分、组织和性能197	二、机床主轴256
三、球墨铸铁的牌号和用途199	三、机床精密丝杠（一般指5、6、7级丝杠）258
§ 7-5 合金铸铁.....200	四、手用丝锥259
一、耐磨铸铁201	五、冷作模具260
二、耐热铸铁201	习题与思考题263
三、耐蚀铸铁202	附录 金属材料的机械性能.....266
§ 7-6 铸铁的热处理.....203	§ 附-1 强度、塑性及其测定.....266
一、铸铁热处理的特点203	一、拉力试样266
二、灰口铸铁的热处理204	二、拉伸图与应力-应变图.....267
三、球墨铸铁的热处理205	三、拉力试验测定的各项指标与其意义268
习题与思考题207	§ 附-2 硬度及其测定270
第八章 有色金属及粉末冶金材料.....209	一、布氏硬度271
§ 8-1 铝及其合金.....209	二、洛氏硬度272
一、工业纯铝209	三、维氏硬度和显微硬度273
二、铝合金分类及热处理209	§ 附-3 疲劳275
三、形变铝合金212	一、疲劳的概念275
四、铸造铝合金214	二、疲劳抗力指标276
五、铝合金的选用216	三、提高疲劳抗力的途径276
§ 8-2 铜及其合金.....217	§ 附-4 冲击韧性及其测定276
一、工业纯铜217	一、冲击试验原理277
二、黄铜218	二、冲击试样277
三、青铜221	三、温度对冲击韧性值的影响278
四、铜合金的选用223	§ 附-5 多次冲击抗力278
§ 8-3 滑动轴承合金.....224	一、多次冲击抗力概念278
一、对轴承合金性能的要求224	二、多次冲击试验原理279
二、轴承合金的组织225	三、多次冲击抗力的分析与应用279
三、常用的轴承合金225	习题与思考题280
§ 8-4 粉末冶金材料.....228	附表281
一、粉末冶金法及其应用228	附表 1 淬火钢回火温度与硬度的关系281
二、机械制造中常用的粉末冶金材料228	附表 2 机械零件常用钢材及热处理方法282
习题与思考题232	附表 3 布氏硬度换算表284
第九章 机械零件选材及其工艺路线分析.....234	附表 4 维氏硬度换算表286
§ 9-1 机械零件选材的原则.....234	附表 5 黑色金属硬度及强度换算表288
一、零件使用性能与选材的关系234	附表 6 肖氏与洛氏硬度换算表291
二、材料工艺性与选材的关系239	
三、经济性与选材的关系245	
§ 9-2 热处理技术条件的标注.....246	
§ 9-3 热处理零件的结构工艺性.....248	

绪 论

金属材料是现代工业、农业、国防和科学技术等部门使用最广泛的材料，人们日常生活用品中也离不开金属材料。据统计，目前各种机器设备、车辆、轮船、飞机、水利电力设备、仪器仪表及国防武器等所用的材料中，金属材料约占90%以上。

金属材料之所以能获得广泛的应用，不仅是由于它的来源丰富，而且还由于它具有优良的使用性能与工艺性能。使用性能包括机械性能和物理、化学性能。优良的使用性能可满足生产和生活上的各种需要。优良的工艺性能则可使金属材料易于采用各种加工方法制成各种形状、尺寸的零件和工具。金属材料还可通过不同的成分配制、不同加工和热处理来改变其组织与性能，从而进一步扩大其使用范围。

金属材料品种繁多，性能各不相同，特别是通过热处理（以不同的加热和冷却方式，改变金属性能的工艺），可使金属材料的性能显著提高。为了合理地使用金属材料，必须研究热处理改变金属材料组织与性能的规律。在机械制造业中，正确运用热处理方法，能充分发挥金属材料的潜力，提高产品质量、减轻重量、便于加工、降低成本、延长寿命。因此，热处理技术在工业生产，特别是在机械制造业中具有重要的意义。

机械制造业中绝大部分产品都是用金属材料制成的，因此，作为机械工程技术人员，不论从事机械设计制造，还是使用维修，都会遇到金属材料的选用和热处理问题。实践表明，生产中往往存在着选材不当或热处理不妥的现象：一种表现为不重视质量，设计和制造的机械零件的使用性能达不到规定的技术要求，导致在使用中发生早期失效（如产生变形、磨损或断裂等），给生产造成很大损失；另一种表现为不结合实际情况、盲目套用现成资料，使金属材料在使用上造成“大材小用”，给国家造成浪费。因此，如何合理地选用金属材料与热处理方法，使之既能满足机械零件使用性能的要求，又能提高零件生产过程的经济效益，这是一个细致复杂而又必须解决的问题。不仅需要为零、部件的工作条件、受力情况、结构形状、加工方法以及生产成本等有全面的、综合的分析，而且还必须掌握各种常用金属材料的组织、性能及其变化规律，并能够运用客观规律，去解决具体生产实际问题。为此，就要求具有比较全面和系统的金属材料与热处理的知识。

我国是世界上最早使用金属材料和热处理技术的国家之一，从各地陆续出土的古代文物表明，我国古代在使用金属材料及热处理技术方面取得了辉煌成就，创造和积累了丰富的经验。早在四千年前，我们的祖先已开始使用天然存在的红铜。到公元前一千多年的殷商时代，我国的青铜冶铸技术已达到很高的水平，从出土的大量青铜礼器、生活用具、武器、工具，特别是重达875公斤的司母戊大鼎，都说明了当时已具有高超的冶铸技术和艺术造诣。到春秋时期，我国已能对青铜冶铸技术作出规律性的总结，如《周礼·考工》对青铜的成分和用途关系有如下的记载：“金有六齐[⊖]，六分其金而锡居一，谓之钟鼎之齐；五分其金而锡居一，谓之斧斤之齐；四分其金而锡居一，谓之戈戟之齐；三分其金而锡居一，谓之大刃之齐；五分其金而锡居二，谓之削杀矢之齐；金、锡半，谓之鉴燧之齐[⊗]。”这“六齐”规律是世界上最早的金属材料的成分、性能和用途间关系的总结。钢铁是目前应用最广的金属材料，我国早在二千五百年前的周代就已开始了冶铁，这比欧洲最早使用生铁的时间约早二千年。我

⊖ 六齐即青铜各组成元素的六种配比。

⊗ 鉴燧之齐是指制造铜镜和划打火石取火的青铜各组成元素的配比。

国不仅具有悠久的使用钢铁历史，而且当时的技术也很发达，如河北武安出土的战国期间的铁铤，经金相检验证明，该材料就是现今的可锻铸铁。图1为该铁铤的显微组织。

在热处理技术方面，根据许多历史记载与出土文物，证明我国古代人民也作出了很大的贡献。远在西汉时司马迁所著的《史记·天官书》中就有“水与火合为焠^①”，东汉班固所著的《汉书·王褒传》中有“……巧冶铸干将之朴、清水焠其锋”等有关热处理技术方面的记载。从辽阳三道壕出土的西汉钢剑，经金相检验，发现其内部组织完全符合现在淬火马氏体组织，图2为该钢剑的显微组织。从河北满城出土的西汉佩剑及书刀，检验结果发现其中心为低碳钢，表层为明显的高碳层。这些都证明早在二千年以前，我国已采用了淬火工艺和渗碳工艺，热处理技术已具有相当高的水平。到1637年明代科学家宋应星整理总结了我国古代的许多科学技术成就，写出《天工开物》一书，其中有许多热处理技术方面的记载。例如，在有关针制造过程的论述中，写有“凡针。先锤铁为细条。用铁尺一根。锥成线眼。抽过条铁成线。逐寸剪断为针。先锉其末成颖。用小槌敲扁其本。钢锥穿鼻。复锉其外。然后入釜。慢火炒熬^②。炒后以土末入松木，火矢、豆豉三物^③ 罨盖。下用火蒸。留针二三口。插于其外。以试火候^④。其外针入手捻成粉样。则其下针火候皆足。然后开封入水健之^⑤。凡引线成衣与刺绣者。其质皆刚。惟马尾刺工为冠者。则用柳条软针。分别之妙。在于水火健法^⑥云。”这证实当时已普遍使用了固体渗碳方法，而且已掌握固体渗碳过程中的检验方法，特别对用途不同的针，也已发现可采用不同的热处理方法，来满足其使用性能的不同要求。古代制针过程示意图如图3所示。

综上所述，早在欧洲工业革命之前，我国在金属材料的生产与热处理技术方面，就已取得了很高的成就。但由于封建社会制度阻碍了劳动人民的智慧和创造性的发挥，特别是近百年来帝国主义的侵略和压迫，以及半封建、半殖民地的反动统治，使解放以前我国的工业与

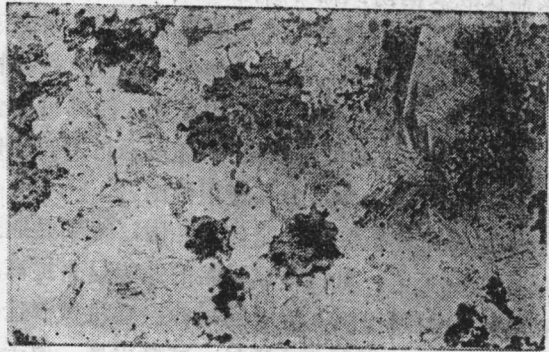


图1 战国时代铁铤的显微组织

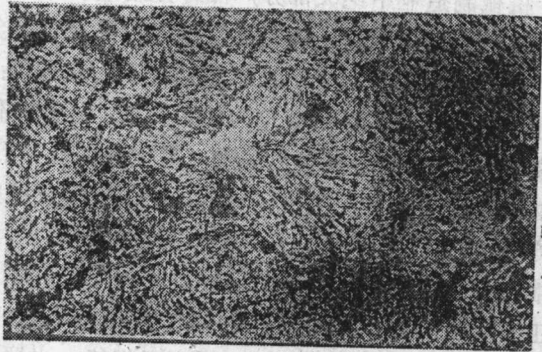


图2 西汉时代钢剑的显微组织

① “焠”与“淬”其实为同一字。《史记·天官书》与《汉书·王褒传》都用“焠”字，但《汉书·天文志》用“淬”字，现在都用“淬”字。

② 慢火炒熬即现代的退火，以消除在制针过程中由于冷变形加工所产生的内应力。

③ 松木、火矢、豆豉三物实为固体渗碳剂。

④ 以试火候是指检验渗碳过程。

⑤ 入水健之即现代的入水淬火。

⑥ 水火健法即热处理方法。

科学技术处于极为落后的状态。

解放后，在共产党的领导下，全国人民积极努力地工作，在各个战线上都取得了辉煌的成就，结束了我国科学技术长期停滞不前的局面。金属材料生产与热处理技术在建国以来，已获得了巨大的进展。在金属材料生产方面，已建立了符合我国资源的合金钢系统，普通低合金结构钢的生产和应用日益扩大。研制出具有世界先进水平的稀土镁球墨铸铁，用以代替锻钢的范围相当广泛。各种有色金属材料以及具有特殊性能的合金，如高温合金、电磁合金等等，已经在质量品种上逐步满足了国防和科学技术的需要。我国已能用自己生产的钢铁和各种金属材料，建成了长江大桥，制造了远洋巨轮、内燃机车、原子弹、氢弹、人造地球卫星和洲际火箭等。在热处理技术方面，许多新技术、新工艺、新设备正不断地被应用于生产中。如可控气氛热处理、真空热处理、感应加热、形变热处理、多元共渗、辉光离子氮化、软氮化以及新淬火剂等正在全国大力推广使用；机械化程度很高的热处理作业炉和热处理流水线、自动线也已在不少工厂

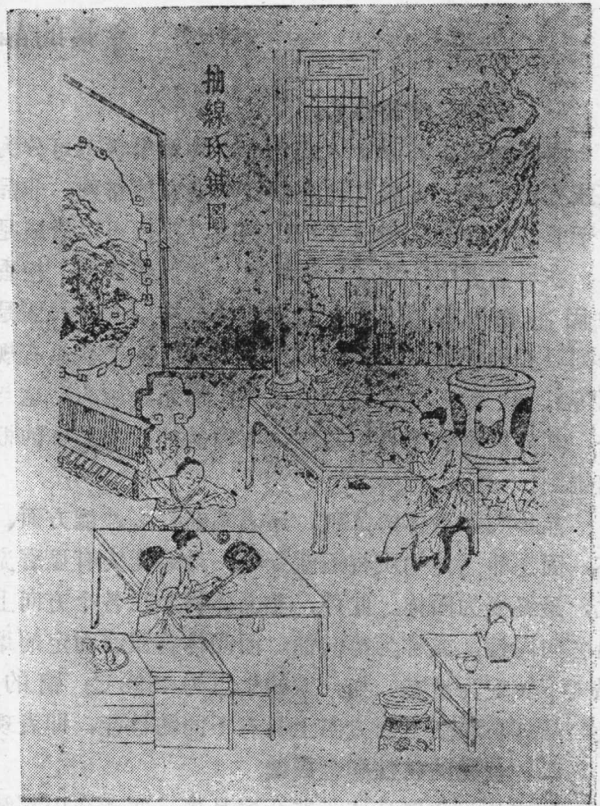


图3 古代制针过程示意图

建立起来，使热处理产品质量和生产率都有很大提高。随着材料科学的不断发展，近年来，在我国的金属材料研究部门，已广泛使用许多现代化研究手段，如透射电子显微镜、扫描电子显微镜、电子探针等。可以预料，这将会促进金属材料以及热处理科学的飞速发展。

但必须指出，当今世界各国的科学技术都在迅速发展。与先进国家相比，我国在金属材料以及热处理科学方面仍有一定差距。因此，我们必须努力学习、积极工作，赶超世界先进水平。

金属材料与热处理是机械制造专业的一门技术基础课程。它包括金属学基础、热处理基本原理和常用方法以及碳钢、合金钢、铸铁、有色金属和粉末冶金材料等常用金属材料的成分、组织、热处理方法、性能和用途。并着重阐述金属材料的成分、组织与性能间关系的基本规律，以及提高金属材料的性能，充分发挥材料潜力的途径。读者在掌握了上述基本理论的基础上，应初步具有合理选用常用金属材料 and 正确选定一般机械零件热处理方法的能力，并掌握一般机械零件在生产过程中安排热处理工序位置的基本原则。

《金属材料与热处理》课程以物理、化学、材料力学、机械制造基础等课程为基础。同时，《金属材料与热处理》又是学习后续有关课程的基础。故在学习过程中，不仅要在有关课程的基础上注意系统的理论学习，而且还要注意密切联系生产实际，重视实验环节，培养分析问题、解决问题的独立工作能力。

第一章 金属的晶体结构与结晶

§ 1-1 金属的晶体结构

一、晶体与非晶体

固态物质按其原子（或分子）的聚集状态可分为晶体和非晶体两大类。在晶体中，原子（或分子）按一定的几何规律作周期性地排列。非晶体中这些质点是无规则的堆积在一起。由于非晶体的结构与液体结构相同，所以可以看成是被冻结的液体。

在自然界中，除了少数物质（如普通玻璃、松香、石蜡等）是属于非晶体外，绝大多数的固态物质都是晶体。金属和合金在固态时一般是晶体。由于晶体内部的原子（或分子）排列具有规律性，所以自然界中许多晶体往往具有规则的外形（如结晶盐、水晶、天然金刚石等）。但是，晶体的外形不一定是规则的，这与晶体的形成条件有关，如果条件不具备，其外形也就变得不规则，所以晶体与非晶体的根本区别，还在于其内部的原子排列是否有规则。

晶体与非晶体的区别，还表现在许多性能方面。非晶体物质没有固定的熔点，随温度升高，固态非晶体物质将逐渐变软，最终变为有显著流动性的液体。当冷却时，液体逐渐稠化，最终变为固体。此外，非晶体物质在各个方向上的原子聚集密度大致相同，因此就表现出各向同性，或称为等向性。而晶体物质有固定的熔点，当温度升高时，固态晶体将在一定温度下转变为液态。如：铁的熔点为 1538°C ；铜的熔点为 1083°C ；铝的熔点为 660°C 。此外，晶体物质在不同方向上具有不同的性能，即表现出晶体的各向异性特征。

二、金属的特性和金属键

晶体分为金属晶体与非金属晶体，两者在内部结构与性能上除有着上述晶体所共有的特征外，金属晶体还具有它独特的性能，如具有金属光泽以及良好的导电性、导热性和塑性。但金属与非金属的根本区别是金属的电阻随温度的升高而增大，即金属具有正的温度系数，而非金属的电阻却随温度的升高而降低，即具有负的温度系数，如图 1-1 所示。

金属为什么具有上述这些特性呢？这主要是与金属原子的内部结构以及原子间的结合方式有关。

金属元素原子构造的共同特点，就是它的最外层电子（价电子）的数目少（一般仅有 1~2 个），而且它们与原子核的结合力弱，很容易摆脱原子核的束缚而变成自由电子。当大量的金属原子聚合在一起构成金属晶体时，绝大部分金属原子都将失去其价电子而变成正离子。正离子又按一定几何形式规则地排列起来，并在固定的位置上作高频率的热振动。而脱离了原子束缚的那些价电子都以自由电子的形式，在各离子间自由地运动，它们为整个金属所共有，形成所谓“电子气”。

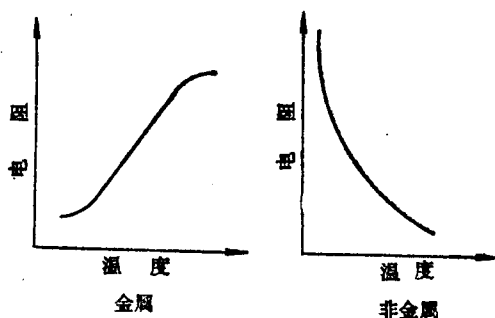


图 1-1 金属和非金属的电阻与温度关系示意图

金属晶体就是依靠各正离子与公有的自由电子间的相互引力而结合起来的，而离子与离子间及电子与电子间的斥力则与这种引力相平衡，使金属处于稳定的晶体状态。金属原子的这种结合方式称为“金属键”。图 1-2 为金属键的示意图。除铍、锑、锆、镓等类金属为共价结合外，其余的金属主要是金属键结合。

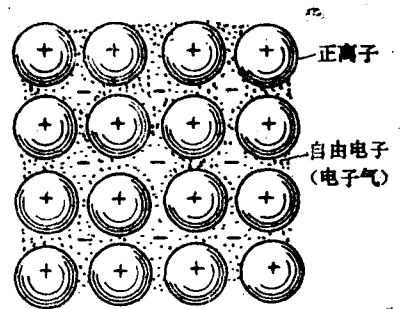


图 1-2 金属键示意图

由于金属晶体是金属键结合，因而使金属具有上述一系列的金属特性。譬如：金属中的自由电子在外电场作用下会沿着电场方向作定向运动，形成电流，从而显示出良好的导电性。而靠离子键或共价键结合的非金属晶体，由于没有自由电子存在，故无这种特性。又如：因金属中正离子是以某一固定位置为中心作热振动的，对自由电子的流通就有阻碍作用，这就是金属具有电阻的原因。随着温度的升高，正离子振动的振幅要加大，对自由电子通过的阻碍作用也加大，因而金属的电阻是随温度的升高而增大的，即具有正的电阻温度系数。此外，由于自由电子的运动和正离子的振动可以传递热能，因而使金属具有较好的导热性。当金属发生塑性变形（即晶体中原子发生了相对位移）后，正离子与自由电子间仍能保持金属键的结合，使金属显示出良好的塑性。因为金属晶体中的自由电子能吸收可见光的能量，故使金属具有不透明性。吸收能量而跳到较高能级的电子，当它重新跳回到原来低能级时，就把所吸收的可见光的能量以电磁波的形式辐射出来，在宏观上就表现为金属的光泽。

三、金属晶体结构的基本类型

固态金属一般是晶体，其原子（正离子）是按一定的几何规律作周期性排列的。为了分析问题方便起见，现把金属中的原子近似地看成是刚性小球，而不再细分为正离子与自由电子。这样，金属晶体就可看成是由刚性小球按一定几何规则紧密堆积而成的，如图 1-3 所示。

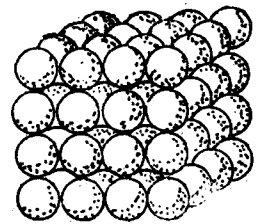


图 1-3 金属晶体中原子的排列形式示意图

为了便于理解和描述晶体中原子排列的情况，可用一些假想的几何线条将晶体中各原子的中心连接起来，使之构成一个空间格架，各原子的中心就处在格架的各个结点上，这种抽象的、用于描述原子在晶体中排列形式的几何空间格架，称为结晶格子，简称晶格。如图 1-4 所示。

由于晶体中原子有规则排列且具有周期性的特点，为便于讨论，通常只从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的、最小的几何单元来分析晶体中原子排列的规律，这个最小的几何单元称为晶胞，如图 1-4 中黑线所示。整个晶格就是由许多大小、形状和位向相同的晶胞在空间重复堆积而形成的。

晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 及棱面夹角 α 、 β 、 γ 来表示，如图 1-5 所示。晶胞的棱边长度，称为晶格常数，常以埃 (\AA) 为单位来表示 ($1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{cm}$)。图 1-5 所示为立方晶格的晶胞，三个棱边相等 (即 $a = b = c$)，三个棱边夹角也相等 (即 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$)。由于金属是金属键的结合，这种结合力使原子尽可能地趋于紧密排列，致使金属的晶格十分简单，在金属元素中，约有百分之九十以上的金属晶体是属于以下三种基本晶格类型。

(一) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞如图 1-6 所示。其晶胞是一个立方体，所以通常只用一个晶格常数 a 表示即可。在体心立方晶胞的每个角上和晶胞中心都排列一个原子（见图 1-6 a）。由图 1-6 b 可见，体心立方晶胞每个角上的原子为相邻的八个晶胞所共有，每个晶胞实际上只占有 $1/8$ 个原子。而中心的原子却为该晶胞所独有。所以，体心立方晶胞中原子数为 $8 \times 1/8 + 1 = 2$ （个）。

具有体心立方晶格的金属有 α -Fe、W、Mo、V、 β -Ti 等。

(二) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞如图 1-7 所示。其晶胞也是一个立方体，所以也只用一个晶格常数 a 表示即可。在面心立方晶胞的每个角上和晶胞的六个面的中心都排列一个原子（见图 1-7 a）。由图 1-7 b 可见，面心立方晶胞每个角上的原子为相邻的八个晶胞所共有，而每个面中心的原子却为两个晶胞共有。所以，面心立方晶胞中原子数为 $8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$ （个）。

具有面心立方晶格的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ag、Au、Pb、Ni、 β -Co 等。

(三) 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞如图 1-8 所示。其晶胞是一个六方柱体，它是由六个呈长方形的侧面和两个呈六边形的底面所组成。因此要用两个晶格常数表示，一个是柱体的高度 c ，另一个是六边形的边长 a 。在密排六方晶胞的每个角上和上、下底面的中心都排列一个原子，另外在晶胞中间还有三个原子（见图 1-8 a）。由图 1-8 b 可见，密排六方晶胞每个角上的原子为相邻的六个晶胞所共有，上、下面中心的原子为两个晶胞所共有，晶胞中内部三个原子为该晶胞独有。所以，密排六方晶胞中原子数为 $12 \times 1/6 + 2 \times 1/2 + 3 = 6$ （个）。

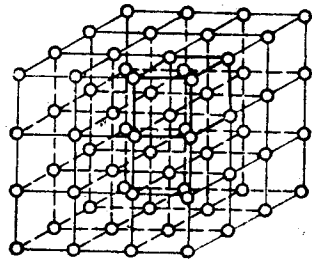


图1-4 金属的晶格

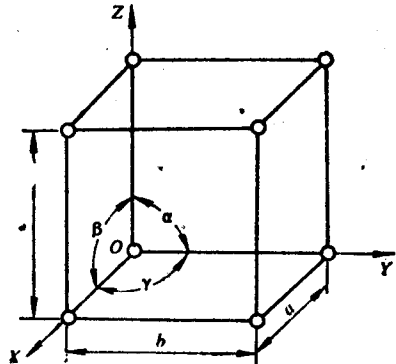


图1-5 晶胞的表示方法

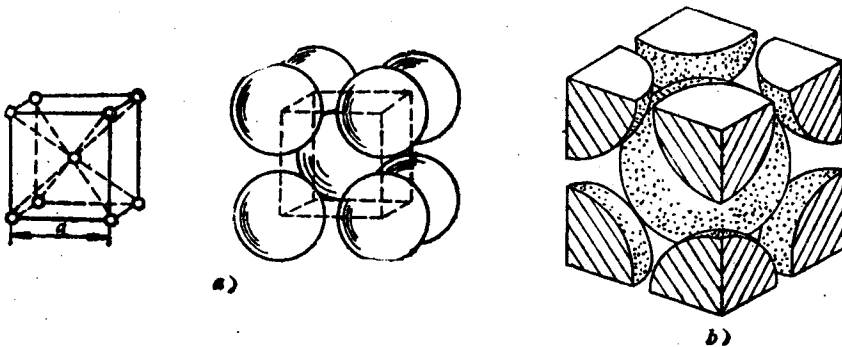


图1-6 体心立方晶胞

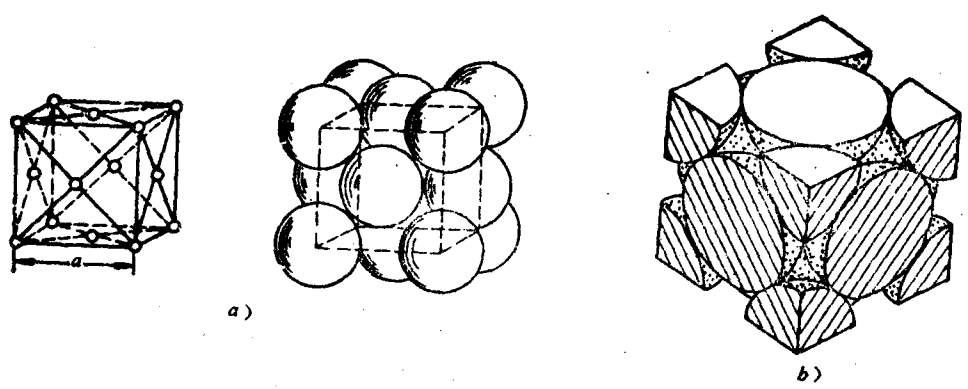


图1-7 面心立方晶胞

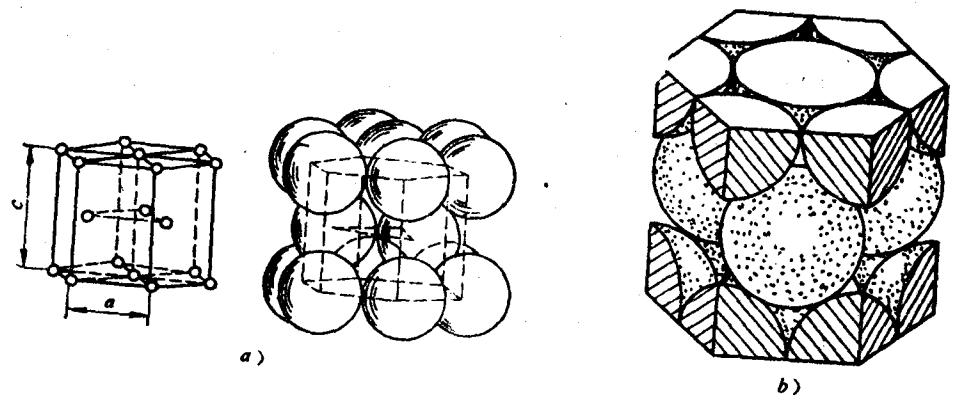


图1-8 密排六方晶胞

具有密排六方晶格的金属有：Mg、Zn、Be、Cd、 α -Ti、 α -Co等。

四、晶格的致密度

由于把晶格中原子看成是刚性小球，所以，即使是一个紧挨一个地排列着，原子之间仍会有空隙存在。晶格中原子排列的紧密程度常用晶格的致密度表示。致密度是指晶胞中原子所占体积与该晶胞体积之比。

在体心立方晶格中每个晶胞含有2个原子。这2个原子共占体积为 $2 \times (4/3 \pi r^3)$ ，式中 r 为原子半径。由图 1-9 可见，原子半径 r 与晶格常数 a 的关系为 $r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$ ，晶胞体积为 a^3 ，故体心立方晶格的致密度为：

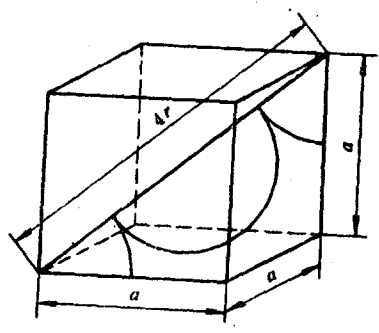


图1-9 体心立方晶胞中原子半径的计算示意图

$$\frac{\text{2个原子体积}}{\text{晶胞体积}} = \frac{2 \times 4/3 \pi r^3}{a^3} = \frac{2 \times 4/3 \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a\right)^3}{a^3} = \frac{\sqrt{3}}{8} \pi = 0.68$$

这表明在体心立方晶格中有 68% 的体积被原子所占据，其余为空隙。同理亦可求出面

心立方及密排六方晶格的致密度均为 0.74。显然，晶格的致密度数值越大，则其原子排列越紧密。

五、晶面、晶向和晶体的各向异性

在金属晶体中，通过一系列原子所构成的平面，称为晶面。通过两个以上原子中心的直线，表示了晶格空间的各种方向，称为晶向。图 1-10 是同一类型的晶体在几种不同方位的晶面示意图。

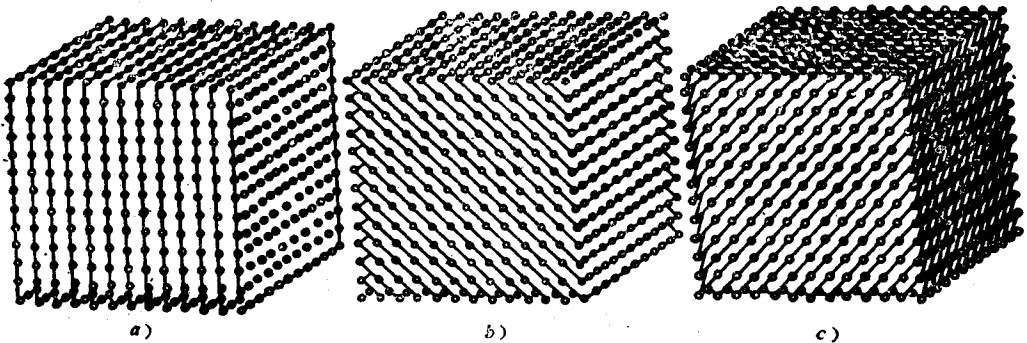


图1-10 几种不同方位的晶面示意图

为便于研究，晶格中任何一个晶面或晶向都用一定的符号来表示。表示晶面的符号称为晶面指数，表示晶向的符号称为晶向指数。

(一) 晶面指数

现以图 1-11 中影线所示的晶面为例，说明确定晶面指数的方法。

1. 设坐标：在晶格中，沿晶胞的互相垂直的三条棱边设主参考坐标轴 X 、 Y 、 Z ，坐标轴的原点 O 应位于该特定晶面的外面，以免出现零截距。

2. 求截距：以晶胞的棱边长度（即晶格常数）为度量单位，确定晶面在各坐标轴上的截距。如图 1-11 中影线所示的晶面在 X 、 Y 、 Z 轴上的截距分别为 1、2、 ∞ 。

3. 取倒数：将各截距值取倒数。上列所得的截距的倒数应为 $\frac{1}{1}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{\infty}$ ，即 1、 $\frac{1}{2}$ 、0。

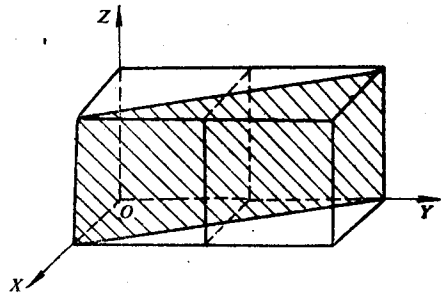


图1-11 晶面指数的确定方法

取倒数的目的是为了晶面指数出现 ∞ 。

4. 化整数：将上述三个倒数按比例化为最小的简单整数。上例即为 2、1、0。

5. 列括号：将上述所得的各整数依次列入圆括号（ ）内，便得晶面指数。故 (210) 即为图 1-11 中影线所示晶面的晶面指数。

图 1-12 为立方晶格中某些常用的晶面及晶面指数，即 (100)、(110) 及 (111) 三种晶面。

(二) 晶向指数

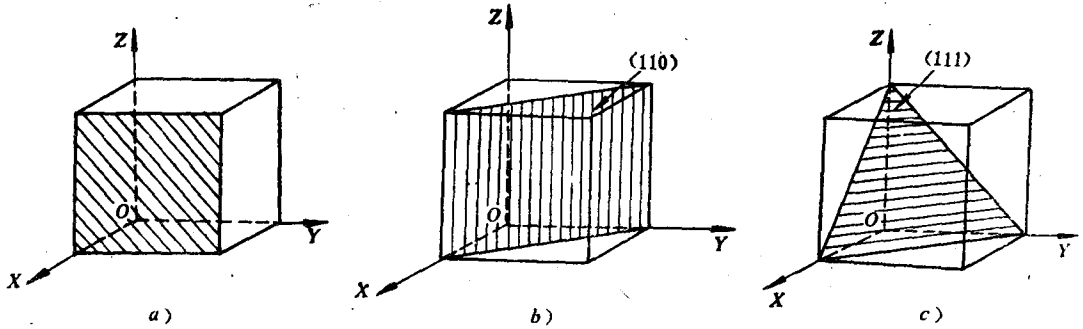


图1-12 立方晶格中某些晶面及晶面指数

确定晶向指数的方法如下：

1. 设坐标：在晶格中设坐标轴 X 、 Y 、 Z ，但坐标轴的原点 O 应位于特定晶向的直线上。
2. 求坐标值：以晶格常数为度量单位，在特定的晶向直线上任选一点，并求出该点在 X 、 Y 、 Z 轴上的坐标值。
3. 化整数：将上述三个坐标值按比例化为最小的简单整数。
4. 列括号：将上述所得的各整数依次列入方括号 $[]$ 内，即得晶向指数。

图 1-13 为立方晶格中某些晶向及晶向指数，即 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 、 $[110]$ 、 $[111]$ 及 $[201]$ 等六种晶向。

(三) 晶体的各向异性

由于在相同晶格中不同的晶面和晶向上原子排列的疏密程度是不同的，因此在晶体中不同晶面和晶向上原子结合力也就不同，从而在不同晶面和晶向上显示出不同的性能，这就是晶体具有各向异性的原因。例如，具有体心立方晶格的铁的弹性模量 E 按不同方向测出的数值不同，按图 1-13 所示 $[100]$ 方向， $E = 135000 \text{ MN/m}^2$ ， $[111]$ 方向的 $E = 290000 \text{ MN/m}^2$ 。晶体的各向异性在其化学性能、物理性能和机械性能等方面都同样会表现出来。

但必须指出，在工业金属材料中，通常见不到它们具有这种各向异性的特征。例如，上述铁的弹性模量，不论从何种位向取样，试验所得的数据均是 $E = 210000 \text{ MN/m}^2$ 左右，一般没有各向异性的特征。这是因为上面所讨论的金属晶体都是理想状态的晶体结构，而实际上的金属晶体结构与理想晶体相差很远。为此，还必须进一步讨论实际金属的晶体结构。

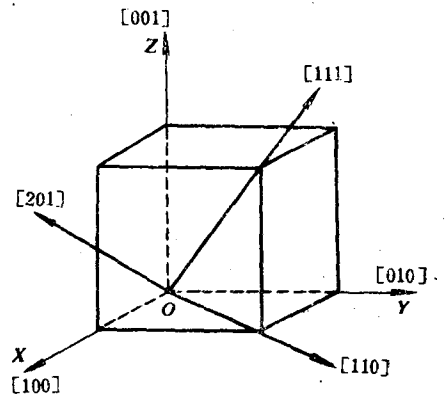


图1-13 立方晶格中几个晶向及晶向指数

§ 1-2 实际金属的晶体结构

一、多晶体结构和亚结构

在上节研究金属的晶体结构时，是把晶体看成由原子按一定几何规律作周期性排列而

成，即晶体内部的晶格位向是完全一致的（晶格位向一致指晶体中具有相同晶向指数的晶向相互平行），这种晶体称为单晶体。在工业生产中，只有经过特殊制作才能获得单晶体。

实际使用的工业金属材料，即使体积很小，其内部仍包含了许许多多颗粒状的小晶体，每个小晶体内部的晶格位向是一致的，而各个小晶体彼此间位向都不同，如图 1-14 所示。这种外形不规则的小晶体通常称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。这种实际上由许多晶粒组成的晶体结构称为多晶体结构。一般金属材料都是多晶体。

晶粒尺寸是很小的，如钢铁材料的晶粒一般在 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mm 左右，故只有在金相显微镜下才能观察到。图 1-15 就是在金相显微镜下所观察到的纯铁的晶粒和晶界。这种在金相显微镜下所观察到的金属组织，称为显微组织或金相组织。

由于金属是多晶体结构，故通常测出的是各个位向不同的晶粒的平均性能，结果使金属就显示出各向同性，这也就是上面所说的，不论从何种位向取样，铁的弹性模量 E 都是 210000 MN/m^2 的原因。

实践证明：在实际金属晶体的一个晶粒的内部，其晶格位向也并不是象理想晶体那样完全一致，而是存在着许多尺寸更小、位向差也很小（一般是几十分到 $1 \sim 2^\circ$ ）的小晶块，它们相互嵌镶成一颗晶粒，这些小晶块称为亚结构（或称亚晶粒、嵌镶块）。在亚结构内部，晶格的位向是一致的。两相邻亚结构间的边界称为亚晶界。图 1-16 为金-镍合金中的亚结构组织。

二、晶体的缺陷

实际金属是多晶体结构，晶粒内存在着亚结构，同时，由于种种原因，在晶体内部某些局部区域原子的规则排列往往受到干扰而被破坏，不象理想晶体那样规则和完整。通常把这种区域称为晶体缺陷。这种局部存在的晶体缺陷，对金属的性能影响很大，例如：对理想、完整的金属晶体进行理论计算求得的屈服强度，要比对实际晶体进行测量所得的数值高出千倍左右，这就是由于晶体缺陷对金属的塑性变形起了决定性的作用。

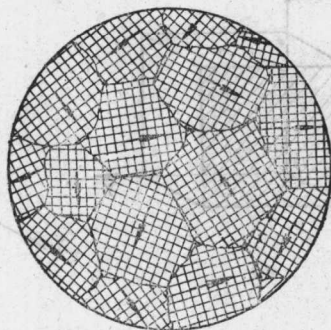


图1-14 多晶体结构示意图

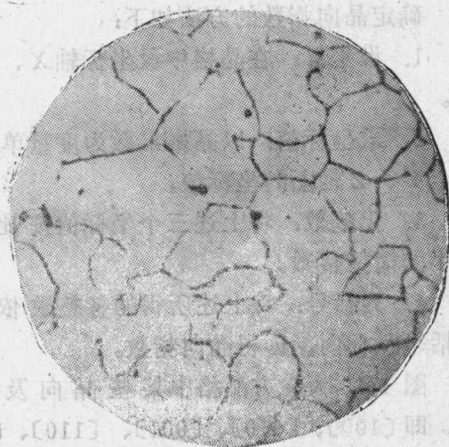


图1-15 纯铁的显微组织 (300×)

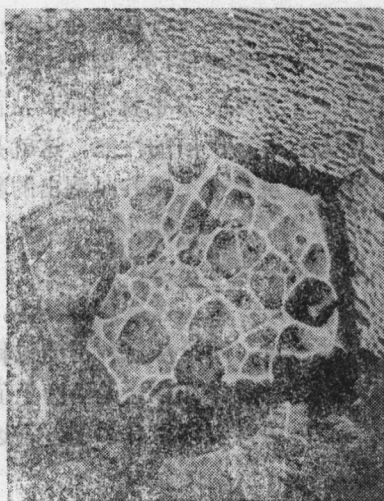


图1-16 金-镍合金中的亚结构