



高职高专
机电工程类
规划教材

工程材料及加工工程

梁耀能 主 编
蒲永峰 副主编



机械工业出版社
China Machine Press



清华大学出版社
Tsinghua University Press

工程材料及加工工程



高职高专机电工程类规划教材

工程材料及加工工程

广东省教育厅 组编

主 编 梁耀能

副主编 蒲永峰

参 编 余雪梅 李 英 廖毅娟 李尚周

主 审 黄拿灿

参 审 邹日荣



机械工业出版社

本书内容包括：金属学及热处理基本原理、机械工程材料的基本知识、材料热加工技术的基本原理、工艺方法和技术特点。本教材注意内容的精选和更新，强调实践性、应用性、先进性和创新性，采用最新的国家标准，对广东地区应用较多的外国材料也做了介绍。为便于学习复习，每章均附有思考题。

本教材为高等职业教育机电类专业通用教材，也适合大专机电工程类及材料工程类专业使用，还可作为相关技术人员的参考书。本教材参考教学学时为 56 学时。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及加工工程/梁耀能主编. —北京：机械工业出版社，2001. 6

高职高专机电工程类规划教材

ISBN 7-111-08528-0

I. 工... II. 梁... III. ①工程材料—高等学校：技术学校—教材②金属材料—热处理—高等学校：技术学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 030632 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：邓海平 版式设计：霍永明 责任校对：孙志筠

封面设计：姚毅 责任印制：郭景龙

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·9.5 印张·368 千字

0 001—4 000 册

定价：24.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677 - 2527

广东省高职高专机电工程类规划教材

编 委 会 名 单

主 任	杨开乔				
副主任	谢存禧	高文龙			
委 员	杨开乔	谢存禧	高文龙	蔡 敏	邵 明
	司待忠	何友义	曾文光	蔡吕荣	卢 勇
	龚洵禹	林晓新	吴 勇	程中元	戚长政
	刘晓顺	赵小平	卢晓春	姚嘉五	吴念香
	郑建辉				
秘 书	邵 明	吴念香	郑建辉		

序

高等职业教育是我国高等教育改革和发展的新生事物，是我国高等教育不可缺少的重要组成部分。20世纪90年代以来，党中央、国务院十分重视高职高专教育，制定了一系列政策和措施，有效地推动了高职高专教育的改革和发展。中共中央、国务院《关于深化教育改革，全面推进素质教育的决定》中明确指出：“要大力发展高等职业教育，培养一大批具有必要理论知识和较强实践能力，生产、建设、管理、服务第一线和农村急需的专门人才”。为我国高等职业教育的改革和发展指明了方向。近年来，我省全面贯彻国家高职发展的“三改一补”方针，采取“三多一改”的办法（即多形式、多模式、多机制和改革）发展高等职业教育，使高职高专教育出现了生机勃勃的发展势头，到目前为止，全省有独立设置的职业技术学院13所，9所本科院校举办了二级职业技术学院，10多所普通专科学校、20多所成人高校举办了高职专业，全省高职高专在校生10多万人，初步形成了具有一定办学特色的高等职业教育体系，成为我省高等教育的重要组成部分。

由于高等职业教育成规模发展的时间较短，教学体系尚不成熟，许多问题，诸如教学计划、教学内容、实践基地建设、“双师”队伍建设、教材建设等，尚在研究、摸索阶段。尤其是高职高专的教材较少，给教学和人才培养造成了一定的困难。解决好这些问题，将有利于高等职业教育的进一步改革和发展。为此，广东省教育厅十分重视高职高专教材建设。我们采取了统筹规划，分步实施的办法，积极组织有关高职院校教师分专业、分系列开展高职高专教材的编写工作。本套高职高专机电工程类规划教材的编写出版，就是我们在高职教材建设方面的一个积极尝试。这套教材共17门，由我厅和国家机械工业局教编室、机械工业出版社联合组织编写，在编写过程中，全体编写人员、责任编辑、编委会成员倾注了大量的心血，本套教材较好地贯彻了职业性、实用性、系统性、超前性、地方性的编写原则，具有较明显的职教特色和地方特色，将有助于学生专业理论的学习和应用技能的训练和提高，适用于高等职业院校、专科学校和成人高校机电类专业使用。

这套教材的编写出版，将填补我省高职教育专业教材的空白，并对我省高等职业教育的进一步改革和发展产生积极而深远的影响。同时，我们也希望通过这套教材的出版发行，能为我国高等职业教育的改革和发展尽一份微薄之力，并为我国高职教育教材园地的建设增添一朵绚丽的小花。

广东省教育厅

2000年8月25日

前 言

本书是由广东省教育厅和国家机械工业局教编室、机械工业出版社共同组织编写的高职高专机电工程类专业规划教材。

根据规划教材编委会审定的教学大纲，本课程的任务是使学生掌握工程材料的基本知识，了解机械制造热加工技术的基本原理、工艺方法和技术特点。内容包括金属学基础、热处理原理和工艺、常用工程材料、铸造、金属压力加工、焊接、典型零件的选材和工艺路线分析。

考虑到高职的办学特点，本教材强调实践性、应用性、先进性和创新性。理论知识坚持以应用为目的，以必需、够用为度。注意内容的精选与更新，适当介绍新材料、新工艺和新技术。在介绍常用材料时，采用了最新的国家标准，对近年来广东地区应用较多的外国材料也做了介绍。

本书由华南理工大学梁耀能任主编并编写第四、五、六章；广州白云职业技术学院蒲永峰任副主编并编写第七、八、九、十三章；韶关松山职业技术学院余雪梅编写第十章；广州铁路机械学校李英编写第一、二、三章；广东工业大学廖毅娟编写第十一章；华南理工大学李尚周编写第十二章。全书由广东工业大学黄拿灿教授主审，华南理工大学邹日荣副教授参审。

由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

**编者
于广州**

目 录

序

前言

绪论	1
第一章 金属的结构与结晶	3
第一节 金属的晶体结构	3
第二节 金属的实际结构与晶体缺陷	5
第三节 金属的结晶与铸锭	9
复习思考题	13
第二章 金属的塑性变形与再结晶	14
第一节 材料的力学性能指标	14
第二节 金属的塑性变形	24
第三节 塑性变形对组织和性能的影响	27
第四节 回复与再结晶	30
第五节 金属的热加工	33
复习思考题	35
第三章 合金的相结构与二元合金相图	37
第一节 合金的相结构	37
第二节 匀晶相图	39
第三节 共晶相图	42
第四节 合金的性能与相图的关系	46
复习思考题	47
第四章 铁碳合金	49
第一节 铁碳合金的组元及基本相	49
第二节 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图分析	51
第三节 铁碳合金的平衡结晶过程及组织	54
第四节 碳对铁碳合金平衡组织和性能的影响	61
第五节 碳钢	64
复习思考题	71
第五章 钢的热处理	72
第一节 钢在加热时的组织转变	73
第二节 钢在冷却时的组织转变	76
第三节 钢的退火与正火	85

第四节 钢的淬火	88
第五节 钢的回火	92
第六节 钢的表面淬火	95
第七节 钢的化学热处理	97
第八节 热处理新技术简介	103
复习思考题	105
第六章 合金钢	107
第一节 概述	107
第二节 合金元素在钢中的作用	108
第三节 合金结构钢	111
第四节 轴承钢	120
第五节 合金工具钢	123
第六节 不锈钢和耐热钢	136
复习思考题	139
第七章 铸铁	141
第一节 概述	141
第二节 灰铸铁	143
第三节 可锻铸铁	145
第四节 球墨铸铁	146
第五节 蠕墨铸铁	149
第六节 特殊性能铸铁	150
复习思考题	150
第八章 有色金属及其合金	152
第一节 铝及铝合金	152
第二节 铜及铜合金	157
第三节 轴承合金	160
第四节 钛及钛合金	161
第五节 镁合金	162
第六节 粉末冶金	163
复习思考题	164
第九章 非金属材料	166
第一节 高分子合成材料	166
第二节 陶瓷	176
第三节 复合材料	177
复习思考题	180

第十章 铸造	181
第一节 概述	181
第二节 合金的铸造性能	182
第三节 砂型铸造	187
第四节 铸造工艺设计	192
第五节 特种铸造	207
复习思考题	216
第十一章 金属压力加工	218
第一节 概述	218
第二节 锻造加热和冷却	219
第三节 自由锻	222
第四节 模锻	229
第五节 冲压	234
第六节 其它压力加工方法	243
复习思考题	247
第十二章 焊接	248
第一节 焊接方法的本质及分类	248
第二节 气焊及气割	250
第三节 焊接电弧和弧焊电源	254
第四节 手工电弧焊	257
第五节 埋弧焊	262
第六节 气体保护电弧焊	263
第七节 电阻焊	267
第八节 钎焊	269
第九节 常用金属材料的焊接	270
第十节 焊接接头及焊接结构基础	274
复习思考题	281
第十三章 机械零件的选材及工艺路线分析	282
第一节 零件选材的一般原则	282
第二节 热处理技术条件的标注	284
第三节 典型零件的选材及工艺分析	286
复习思考题	289
附录 I 黑色金属硬度及强度换算表	290
附录 II 国内外常用钢号近似对照举例	292
参考文献	294

绪 论

材料是人类赖以生活和生产的物质基础。生产技术的进步是和新材料的应用密切相关的，历史学家往往用制造工具的原材料来作为社会发展的标志。从原始社会以来，人类经历了石器时代、青铜器时代和铁器时代。如今，我们已经跨进按照人们的需要设计材料、合成材料的新时代。

工程材料通常可按成分特点分为金属材料、无机非金属材料和高分子材料三大类。复合材料则是由两种或两种以上的基本材料组成。按性能特点，工程材料可分为结构材料和功能材料两大类。结构材料以力学性能为主，兼有一定的物理、化学性能；功能材料以特殊的物理、化学性能为主，如超导、激光、半导体、形状记忆和能量转换等材料。工程材料的研究对象主要是结构材料。在各种机械设备中，目前应用最广、最多的仍然是金属材料，约占整个材料的 80% ~ 90%，这是由于金属材料具有比其他材料远为优越的使用性能和工艺性能。无机非金属材料 and 有机高分子材料用于机械工程也越来越多，并逐步显示出广阔的发展前景。本书主要研究金属材料，并对无机非金属材料 and 有机高分子材料作简要介绍。

金属材料在工程上表现出来的力学性能，是由金属内部的组织、结构所决定的。在金属学中，组织是指用肉眼或借助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，包括晶粒的大小、形状、种类以及各种晶粒之间的相对数量和相对分布。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 倍的光学显微镜所观察到的组织，称为显微组织；用放大几千倍到几十万倍的电子显微镜观察到的组织，称为电镜组织或精细组织；而结构是指原子集合体中各原子的具体组合方式。

生产实践告诉我们，不同化学成分金属材料，性能迥然不同。例如低碳钢软而韧，高碳钢硬而脆。金相分析表明，这是由于它们的组织不同所致。相同化学成分金属材料，经过不同的加工过程，其性能也有很大差别。通过合理的加工方法来进一步提高金属材料的性能，是充分发挥金属材料潜力的重要方法之一。

机械冷加工和机械热加工是机械制造学科的两分支。机械冷加工主要是指利用切削的原理使工件成形而达到预定的设计要求的方法，这种方法能获得很高的精度和很低的粗糙度。机械热加工则是利用熔化、结晶、塑性变形、扩散、相变等各种物理化学变化使工件成形而达到预定的设计要求。从加工方法来说，热

加工可分为铸造、塑性加工、焊接、热处理、表面改性等。

铸造是指将材料(包括金属、合金以及复合材料)熔化成液体,浇注于具有一定型腔的模具内,凝固成型。

塑性加工是指将钢锭或棒材、板材在一定温度下,通过锻压机械施加压力使之成形。锻压工艺也包括在室温下使棒料或板料成形。

焊接是指将几个零件拼接成大的复杂的零件或构件,通过零件连接处的局部熔化或相互扩散,使零件紧密结合成一个整体。

热处理是指通过不同的加热和冷却方式使零件内部组织结构发生变化,从而得到所需的各种力学、物理及化学性能,它的特点是只改变或提高零件的性能而尽量避免改变零件的形状。

表面改性技术是改变零件表面的成分或组织结构,以提高机器零件的性能。包括化学热处理、物理、化学气相沉积、热喷涂等。

在本世纪机械制造工业中,高效益及市场快速反应将是一个发展趋势。热加工方法具有少、无切削的优点,容易实现快速制造,因而仍是一个正在发展的学科领域。

机械热加工与材料科学密切相关,它是建立在金属学及材料科学的基础上的。“工程材料及加工工程”课程的任务就是:学习金属学、工程材料及热加工的理论基础,掌握材料在热加工过程中的成分、组织结构、性能的变化规律,学会正确选材和合理安排冷热加工工艺路线,了解工件成形过程及方法即热加工工艺学,具有选择毛坯、零件加工方法的基本知识,了解热加工过程的生产装备及自动化。

“工程材料及加工工程”是机械类各专业的技术基础课。学习本课程前,学生应先学完材料力学,参加过金工实习,对机械工程材料的加工过程及其应用有一定的感性认识。通过本课程的学习,为从事机械设计与制造、机械产品质量控制以及后续课程的学习奠定必要的基础。

第一章 金属的结构与结晶

不同成分的金属之所以表现出不同的力学性能，是由于其内部具有不同的组织结构。即使是成分相同的金属，当其由液态转变为固态的结晶条件不同时，所得到的内部组织也不同，从而也使金属表现出不同的力学性能。因此，要了解金属材料的特性，必须从本质上了解金属的组织结构以及金属的结晶过程。

第一节 金属的晶体结构

一、晶体与非晶体

根据原子在物质内部排列方式的不同,通常可将固态物质分为晶体与非晶体两类。

晶体是指其组成微粒(原子或分子)呈规则排列的物质，它是固体物质中最的一类。固态金属通常都是晶体。晶体具有一定的熔点(如铁的熔点为 1534°C ，铜的熔点为 1038°C 等)，晶体的性能具有各向异性的特点。

非晶体是指其组成微粒(原子或分子)呈无规则堆积在一起的物质。如玻璃、松香、沥青等。非晶体没有一定的熔点，它的性能在各个方向上是相同的，即具有各向同性的特点。

二、晶体结构的基本概念

(1) 晶格 为了便于研究，可把晶体内部原子近似为刚性质点，晶体就可看作是由许多刚性质点按一定几何规律堆积成的，如图 1-1 所示。如果把组成晶体的刚性质点用假想的线条连接起来，则成为一个假想的空间格架，称为结晶格子(简称晶格)，如图 1-2 所示。

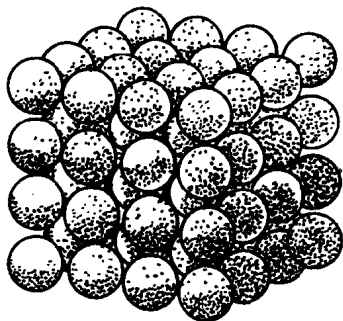


图 1-1 金属原子排列示意图

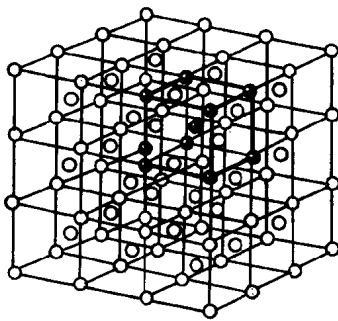


图 1-2 晶格示意图

(2) 晶胞 晶胞是指组成晶格的最小几何单元，整个晶格都是由相同晶胞周期性重复堆积而成的，如图 1-3 所示。

(3) 晶格常数 晶胞中各棱边的长度称为晶格常数。当晶格常数 $a = b = c$ ，而晶胞各边之间的相互夹角相等，即 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 时，这种晶胞称为立方晶胞，具有立方晶胞的晶格叫做立方晶格。

(4) 晶面 晶体中由一系列原子所组成的平面称为晶面。图 1-4 为立方晶格的某些晶面。

(5) 晶向 通过原子中心的直线，可代表晶格空间的一定方向，称为晶向，如图 1-5 所示。由于在同一晶格的不同晶面和晶向上，原子排列的疏密

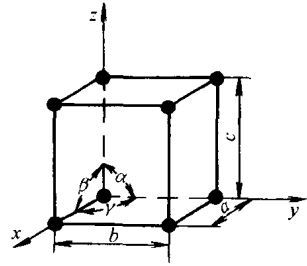


图 1-3 晶胞示意图

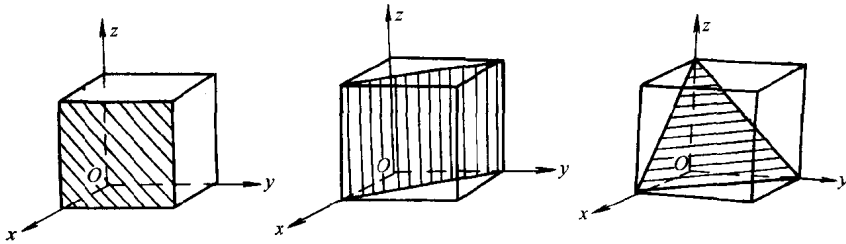


图 1-4 立方晶格中的某些晶面

程度不同，原子结合力也就不同，从而在不同的晶面和晶向上显示不同的性能，这就是晶体具有各向异性的原因。

三、常见的金属晶格类型

在自然界中，晶体结构的形式是各种各样的，但除少数金属具有复杂的晶体结构外，大多数金属具有简单的典型的晶体结构，即体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格。

(1) 体心立方晶格(图 1-6) 它的晶胞是一个立方体，在立方体的八个顶角上和立方体的中心各有一个原子。同为体心立方晶格的不同金属，由于其原子直径不同，晶格常数也不相同。属于这类晶格的金属有铬、钨、钼、钒和 α -Fe 等。

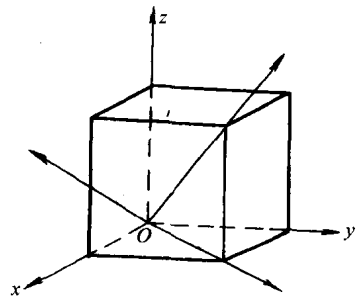


图 1-5 立方晶格中的几个晶向

(2) 面心立方晶格(图 1-7) 它的晶胞也是一个立方体，在立方体的八个顶角上和每一个面的中心都各有一个原子。金属不同，其面心立方晶格的晶格常数也不同。属于这类晶格的金属有

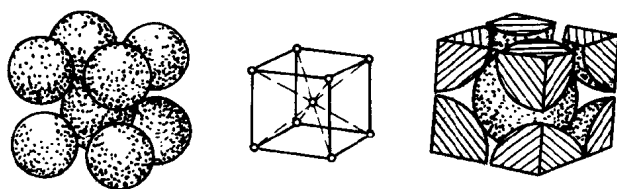


图 1-6 体心立方晶格示意图

铝、铜、银、铅、镍和 γ -Fe 等。

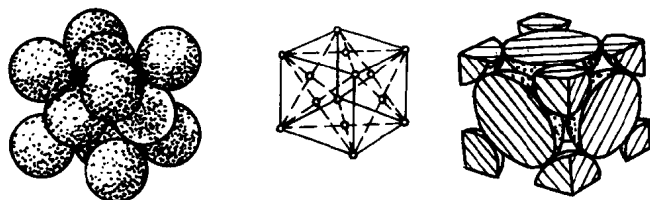


图 1-7 面心立方晶格示意图

(3) 密排六方晶格(图 1-8) 它的晶胞是一个六棱柱体, 在棱柱体的各个棱角和上下两个六方底面的中心各有一个原子, 此外在柱体中间还有三个原子。属于这类晶格的金属有镁、锌、铍、镉等。

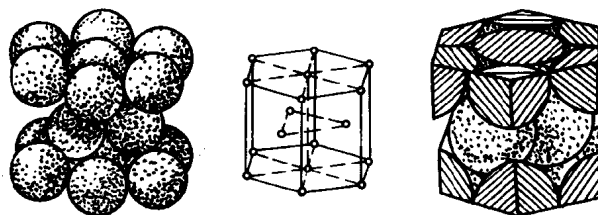


图 1-8 密排六方晶格示意图

第二节 金属的实际结构与晶体缺陷

如果一个晶体, 其内部晶格方位是一致的, 这个晶体是“单晶体”。在工业生产中只有经过特殊制作才能获得单晶体。前面所讨论的是理想单晶体的构造情况, 而一般的金属晶体大多都是多晶体, 并且存在晶体缺陷。

一、多晶体结构

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 1-9 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 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{ mm}$ 左右，故只有在金相显微镜下才能观察到。图 1-10 就是在金相显微镜下所观察到的纯铁的显微组织图像。

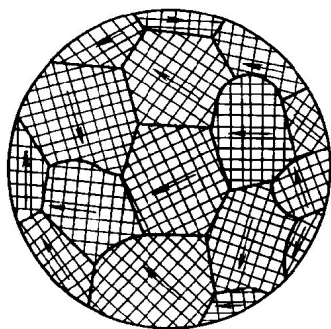


图 1-9 多晶体结构示意图

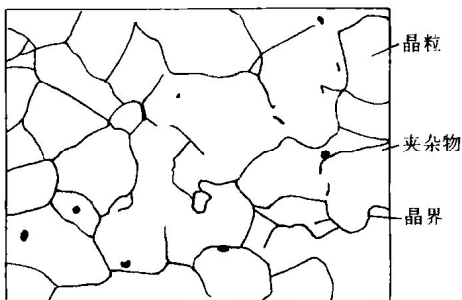


图 1-10 纯铁的显微组织

应当指出，在实际金属晶体的一个晶粒的内部，其晶格位向也并非完全一致，而是存在着许多尺寸更小、位向差也很小(一般是几十分到 $1^\circ \sim 2^\circ$)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。图 1-11 为金-镍合金中的亚结构组织。

二、晶体缺陷

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。将晶体中原子排列不规则的区域，称为晶体缺陷。常见晶体缺陷有点缺陷、线缺陷和面缺陷三种类型。

1. 点缺陷

点缺陷是晶体中呈点状的缺陷，即在空间三维方向上的尺寸都很小的晶体缺陷。常见的点缺陷有空位和间隙原子两种形式。

空位是指晶体的晶格中的某些空缺着原子的结点位置，未被原子所占有，该处便形成一个空位；间隙原子是指晶体的晶格间隙处出现的多余原子(如图 1-12 所示)。

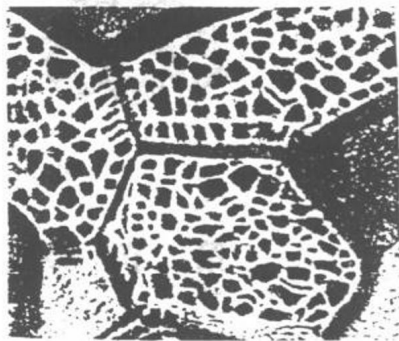


图 1-11 金-镍合金中的亚结构

由于在晶体中，原子总是在某一位置上作热振动。当温度升高时，原子平均动能增高，在全部原子中，有一些原子的动能高于或低于平均值，称“能量起伏”。个别能量特别高的原子，就有可能克服周围原子对它的束缚而脱离，使原来的位置成为没有原子的“空位”。离位的原子，特别是原子半径比较小的杂质原子，可能进入晶格间隙处成为“间隙原子”或跑到金属表面上去。这时，在空位和间隙原子的附近，由于原子间作用力的平衡被破坏，使其周围的原子离开了原来的平衡位置。晶格中原子偏离平衡位置的现象称为晶格畸变。它将影响金属的力学性能，使金属的强度提高，塑性降低。

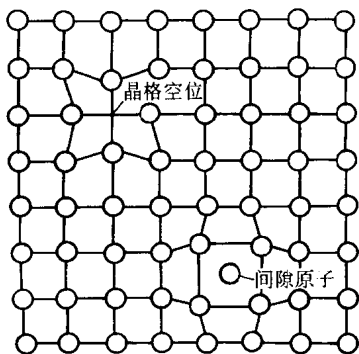


图 1-12 空间和间隙原子

2. 线缺陷

线缺陷是指在三维空间的两个方向上尺寸很小的晶体缺陷，这种缺陷的主要形式就是各种类型的位错。晶体中位错的基本类型有刃形位错和螺形位错两种。

(1) 刃形位错 如图 1-13 所示，在晶体的 ABCD 面以上，多出了一个垂直方向的原子面 EFGH，使晶体上下两部分产生错排现象。多余的原子面像刀刃一样插入晶体，在刃口 EF 附近形成缺陷，称为刃形位错。EF 线称为位错线。在位错线附近，晶格发生了畸变，形成一个应力场。在 ABCD 晶面上方，位错线附近一定范围内的原子，受到压应力。相反，在 ABCD 晶面下方，位错线附近一定范围内的原子，受到拉应力。离开 EF 线愈远，晶格畸变愈小。通常把在晶体上半部多出原子面的位错称为正刃形位错，用符号“ $\perp$ ”表示，在晶体下半部多出原子面的位错称为负刃形位错，用符号“ T ”表示。

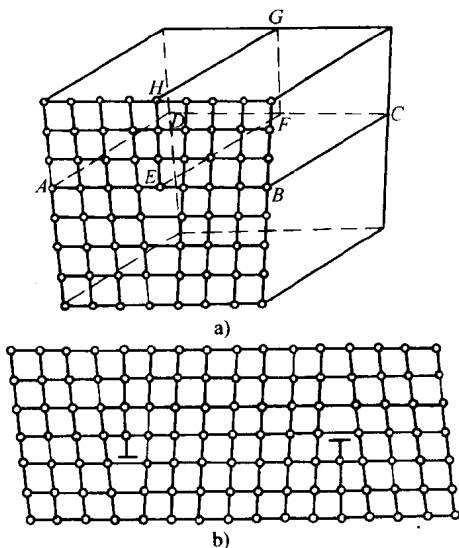


图 1-13 刃形位错示意图

a) 立体模型 b) 平面图

(2) 螺形位错 螺形位错结构如图 1-14 所示，晶体上下两部分原子排列，在某些区域相互吻合的次序发生了错动，使不吻合的过渡区域的原子排列呈螺旋形，因此称为螺形位错。显然，螺形位错附近区域的晶格也发生了严重畸变，因此也会形成一个相应的应力场。