

机械工人职业技能培训教材

高级

热处理工技术

机械工业职业技能鉴定指导中心 编

理论技能尽在其中



机械工业出版社

机械工人职业技能培训教材

高级热处理工技术

机械工业职业技能鉴定指导中心 编



机械工业出版社

本书是根据原劳动部、机械工业部颁发的《职业技能鉴定规范(考核大纲)高级热处理工》编写的。内容包括:金属学基础知识;钢的组织转变;淬火变形与开裂;热处理质量检验及缺陷的补救方法;热处理设备、工艺参数的调试及故障的排除;典型零件的热处理实例;铝合金和铜合金的热处理;特殊钢及热处理。全书共分八章。

本书特点是理论结合实际,着重能力的培养和提高,在内容方面力求精炼、实用,针对性、通用性强。

本书可供高级热处理工、本专业技术人员以及从事机械工人职业技能培训的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高级热处理工技术/机械工业职业技能鉴定指导中心
编. —北京:机械工业出版社,1999.6(1999.12重印)
机械工人职业技能培训教材
ISBN 7-111-01939-3

Ⅰ. 高… Ⅱ. 机… Ⅲ. 热处理-技术教育-教材
IV. TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核定(1999)第 56095 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:俞逢英 版式设计:张世琴 责任校对:李汝庚
封面设计:姚毅 责任印制:何全君
北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行
2000 年 7 月第 1 版第 3 次印刷
850mm×1168mm^{1/32}·8.5 印张·219 千字
5001—8000 册
定价:14.00 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

机械工人职业技能培训教材与试题库 编审委员会名单

(按姓氏笔画排列)

主任委员	邵奇惠			
副主任委员	史丽雯	李成云	苏泽民	陈瑞藻
	谷政协	张文利	郝广发	(常务)
委	于新民	田力飞	田永康	关连英
员	刘亚琴	孙旭	李明全	李玲
	李超群	吴志清	张岚	张佩娟
	邵正元	杨国林	范申平	姜世勇
	赵惠敏	施斌	徐顺年	董无岸
技术顾问	杨溥泉			
本书主编	王英杰			
参编	王英杰	李泰吉	张世民	赵俊杰
本书主审	常建业			

前 言

这套教材及试题库是为了与原劳动部、机械工业部联合颁发的机械工业《职业技能鉴定规范》配套，为了提高广大机械工人的职业技能水平而编写的。

三百六十行，各行各业对从业人员都有自己特有的职业技能要求。从业人员必须熟练地掌握本行业、本岗位的职业技能，具备一定的包括职业技能在内的职业素质，才能胜任工作，把工作做好，为社会做出应有的贡献，实现自己的人生价值。

机械制造业是技术密集型的行业。这个行业对其职工职业素质的要求比较高。在科学技术迅速发展的今天，更是这样。机械行业职工队伍的一半以上是技术工人。他们是企业的主体，是振兴和发展我国机械工业极其重要的技术力量。技术工人队伍的素质如何，直接关系着行业、企业的生存和发展。在市场经济条件下，企业之间的竞争，归根结底是人才的竞争。优秀的技术工人是企业各类人才中重要的组成部分。企业必须有一支高素质的技术工人队伍，有一批技术过硬、技艺精湛的能工巧匠，才能保证产品质量，提高生产效率，降低物质消耗，使企业获得经济效益；才能支持企业不断推出新产品去占领市场，在激烈的市场竞争中立于不败之地。

机械行业历来高度重视技术工人的职业技能培训，重视工人培训教材等基础建设工作，并在几十年的实践中积累了丰富的经验。尤其是在“七五”和“八五”期间，先后组织编写出版了《机械工人技术理论培训教材》149种，《机械工人操作技能培训教材》85种，以及配套的习题集、试题库和各种辅助性教材共约700种，基本满足了机械行业工人职业培训的需要。上述各类

教材以其行业针对性、实用性强，职业工种覆盖面广，层次齐备和成龙配套等特点，受到全国机械行业工人培训、考核部门和广大机械工人的欢迎。

1994年以来，我国相继颁布了《劳动法》、《职业教育法》，逐步推行了职业技能鉴定和职业资格证书制度。我国的职业技能培训开始走上了法制化轨道。为适应新形势的要求，进一步提高机械行业技术工人队伍的素质，实现机械、汽车工业跨世纪的战略目标，我们在组织修改、修订《机械工人技术理论培训教材》，使其以新的面貌继续发挥在行业工人职业培训工作中的作用的同时，又组织编写了这套《机械工人职业技能培训教材》和《技能鉴定考核试题库》，共87种，以更好地满足行业和社会的需要。

《机械工人职业技能培训教材》是依据原机械工业部、劳动部联合颁发的机械工业《工人技术等级标准》和《职业技能鉴定规范》编写的，包括18个机械工业通用工种。各工种均按《职业技能鉴定规范》中初、中、高三级“知识要求”（主要是“专业知识”部分）和“技能要求”分三册编写，适合于不同等级工人职业培训、自学和参加鉴定考核使用；对多个工种有共同要求的“基本知识”如识图、制图知识等，另编写了公共教材，以利于单科培训和工人自学提高。试题库分别按工种和学科编写。

本套教材继续保持了行业针对性强和注重实用性的特点，采用了国家最新标准、法定计量单位和最新名词、术语；各工种教材则更加突出了理论和实践的结合，将“专业知识”和“操作技能”有机地融于一体，形成了本套教材的一个新的特色。

本套教材是由机械工业相对集中和发达的上海、天津、江苏、山东、四川、安徽、沈阳等地区机械行业管理部门和中国第一汽车集团公司等企业组织有关专家、工程技术人员、教师、技师和高级技师编写的。在此，谨向为编写本套教材付出艰辛劳动的全体人员表示衷心的感谢！教材中难免存在不足和错误，诚恳希望专家和广大读者批评指正。

机械工业职业技能鉴定指导中心

目 录

第一章 金属学基础知识	1
第一节 合金的相结构	1
第二节 固态金属的扩散现象	7
第三节 金属的塑性变形和再结晶	11
复习思考题	18
第二章 钢的组织转变	20
第一节 钢的奥氏体转变	20
第二节 钢的珠光体转变	26
第三节 钢的马氏体转变	34
第四节 钢的贝氏体转变	43
第五节 钢在回火时的转变	48
复习思考题	53
第三章 淬火变形与开裂	55
第一节 淬火内应力	55
第二节 淬火变形	60
第三节 淬火开裂	64
复习思考题	68
第四章 热处理质量检验及缺陷的补救方法	69
第一节 热处理质量检验的内容	69
第二节 热处理质量检验规程	92
第三节 热处理缺陷的补救方法	100
复习思考题	107
第五章 热处理设备的工艺参数调试及故障排除	109
第一节 可控气氛发生装置	109
第二节 多用箱式可控气氛热处理炉	121
第三节 连续式无罐气体渗碳炉	125
第四节 炉温控制与PID调节	135

第五节 碳势控制	140
复习思考题	155
第六章 典型零件的热处理实例	156
第一节 大型零件的热处理	156
第二节 汽车从动锥齿轮的热处理	180
第三节 离合器片的热处理	192
第四节 汽车后半轴的热处理	196
第五节 拉刀的热处理	206
第六节 螺纹滚轮的真空热处理	209
复习思考题	210
第七章 铝合金和铜合金的热处理	211
第一节 铝合金的热处理	211
第二节 铜合金的热处理	228
第三节 铝合金和铜合金的热处理操作	238
复习思考题	239
第八章 特殊钢及其热处理	241
第一节 不锈钢的热处理	241
第二节 耐热钢的热处理	249
第三节 耐磨钢的热处理	255
复习思考题	258

第一章 金属学基础知识

培训要求了解合金的相结构、金属的扩散现象及金属的塑性变形过程，掌握钢中常见金属化合物的种类和性能特点以及影响金属扩散的因素、冷变形金属加热前后的组织和性能变化。

第一节 合金的相结构

金属材料绝大多数是合金。合金除具备纯金属的基本特性外，同时有着更高的力学性能，有的还具有某些特殊的物理、化学性能。因此，在工业中获得广泛的应用。

合金的性能主要是由合金的组成相及相的相对数量、大小、形态和分布决定的。因此，有必要了解合金的相结构。合金的组成相是多种多样的，概括起来，合金的相可以分为固溶体和金属化合物两大类。

一、固溶体

固溶体是溶质原子溶入固态的溶剂中，并保持溶剂晶格类型而形成的均一结晶相。它是合金中重要的组成相。因为实际使用的金属材料大多数是单相固溶体合金，或以固溶体为基的多相合金。根据溶质原子在溶剂晶格中所占据的位置不同，可将固溶体区分为置换固溶体与间隙固溶体。

1. 置换固溶体 溶质原子位于溶剂晶格结点位置而形成的固溶体称为置换固溶体。在置换固溶体中，由于溶质原子的溶入，造成晶格畸变，如图 1-1 所示为置换固溶体中的晶格畸变。溶质原子直径大于溶剂原子，会引起固溶体晶格常数增大；反之，使晶格常数减小，并且晶格畸变的程度随溶质原子浓度的增加而增大，固溶强化的效果也越显著。工业上常见的铝、铜、铁为基的固溶体的晶格常数变化规律，如图 1-2 所示。

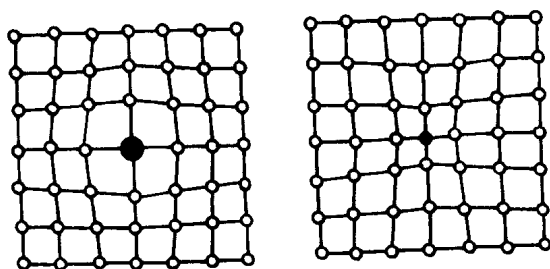
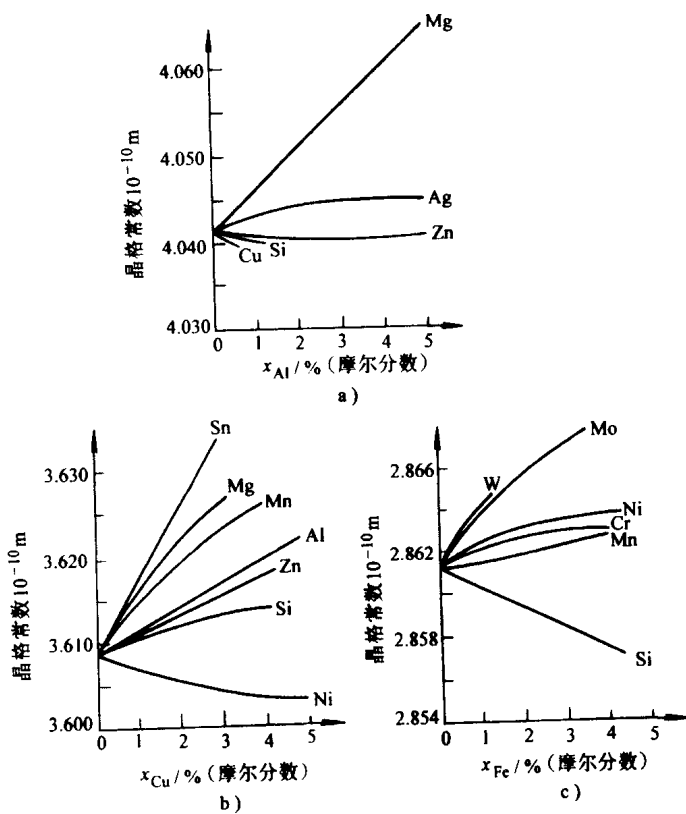


图 1-1 置换固溶体中的晶格畸变

图 1-2 各元素溶入铝、铜、铁中形成置换固溶体时的晶格常数的变化
a) Al b) Cu c) Fe

根据溶质原子在溶剂中的溶解度不同，置换固溶体又可分为组元间的原子能够无限地相互代换的无限固溶体和溶质原子有限代换的有限固溶体。

通常，置换固溶体中的溶质原子在溶剂晶格中的分布是任意的，无规律的，这种固溶体称为无序固溶体。但在某些合金中，由于缓冷或在某一温度下长时间停留，固溶体中的溶质原子将占据晶格的固定位置，溶质、溶剂原子呈有序排列，这种固溶体称为有序固溶体，如图 1-3 所示。固溶体从无序排列转变为有序排列时，其显微组织并未发生变化，但合金的硬度、脆性显著增加，塑性和电阻降低。

2. 间隙固溶体 溶质原子溶入溶剂晶格处于间隙位置中形成的固溶体称为间隙固溶体。形成间隙固溶体的溶质元素都是一些原子半径小的非金属元素，如碳、氮、硼等，而溶剂元素一般都是过渡族金属元素。溶剂晶格中的间隙是有限的，因此，当溶质原子溶入后，将使溶剂晶格常数增大，晶格发生畸变，如图 1-4 所示为间隙固溶体中的晶格畸变，使固溶体强度、硬度及电阻增高。溶入的溶质原子越多，晶格畸变越大，当畸变达一定程度后，溶剂晶格将变得不稳定。

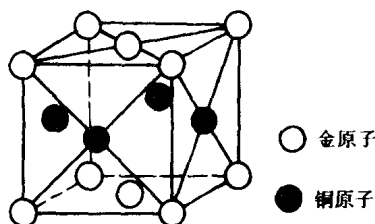


图 1-3 有序固溶体

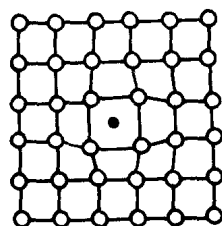


图 1-4 间隙固溶体中的晶格畸变

3. 影响固溶体类型和溶解度的因素 固溶体的类型和溶解度的大小与组元的晶格类型、原子半径大小和电化学性等因素有关。

(1) 尺寸因素（原子半径） 当溶剂与溶质的原子半径差别

较小时，易形成置换固溶体，差别越小，溶解度越大。而溶剂与溶质的原子半径差别越大时，易形成间隙固溶体。间隙固溶体的溶解度与溶剂晶格的间隙大小有关，间隙是有限的，溶解度不可能很大。

(2) 电化学因素 组元元素在周期表中位置相距越远，其负电性相差越大，它们之间的化学亲和力越强，就越倾向于形成化合物，而不利形成固溶体，所形成的固溶体的溶解度也就越小。元素间电性越接近时，溶解度便越大。

(3) 晶体结构因素 在其它条件相差不大，则在晶体结构相同的元素之间具有较大的溶解度，而在晶体结构不同的元素之间的溶解度较小。

应该指出，只有当溶剂元素与溶质元素同时满足上述条件时，才能形成无限固溶体，否则只能形成有限固溶体。

二、金属化合物

在合金中，除固溶体外，还可能形成金属化合物。金属化合物是合金组元间相互作用而形成的一种新相，又称中间相。由于这种新相位于二元相图两个固溶体中间的位置，故称中间相。金属化合物的晶格类型及性能均不同于任一个组元，一般可以用分子式来表示，如碳钢中的 Fe_3C 、黄铜中的 CuZn 等都是金属化合物。

金属化合物的性能特点是熔点高、硬度高、脆性大。在合金中起强化作用，即提高合金的强度、硬度和耐磨性，但使其塑性降低。金属化合物的种类很多，根据其形成条件有下列三种类型。

1. 正常价化合物 这类金属化合物是由负电性差别大的元素所组成，符合化合价规律，成分固定并可用化学式表示，如 ZrS 、 MnS 、 Mg_2Si 、 Mg_2Pb 等。

正常价化合物的性能是硬而脆。在合金中，当它在固溶体基体上合理分布时，将使合金强化，因而起着强化相的作用。

2. 电子化合物 它是一种可以用电子浓度来控制的化合物。

它们不遵循化合价规律，但具有一定的电子浓度，即一定的价电子数与原子数之比。

电子化合物的晶体结构与电子浓度有一定的对应关系：电子浓度为 $3/2$ 时，是体心立方晶格，如 CuZn ；电子浓度为 $21/13$ 时，是复杂立方晶格，如 Cu_5Zn_8 ；电子浓度为 $7/4$ 时，是密排六方晶格，如 CuZn_3 。合金中常见的电子化合物见表 1-1。

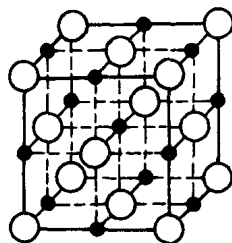
表 1-1 合金中常见的电子化合物

合金系	$\frac{3}{2} \left(\frac{21}{14} \right) \beta$ 相	$\frac{21}{13} \gamma$ 相	$\frac{7}{4} \left(\frac{21}{12} \right) \epsilon$ 相
	体心立方	复杂立方	密排六方
Cu-Zn	CuZn	Cu_5Zn_8	CuZn_3
Cu-Sn	Cu_5Sn	$\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$	Cu_3Sn
Cu-Al	Cu_3Al	Cu_6Al_4	Cu_5Al_3
Cu-Si	Cu_5Si	$\text{Cu}_{31}\text{Si}_8$	Cu_3Si

电子化合物为金属键结合，具有明显的金属特性。它的熔点和硬度都很高，但塑性较差，与固溶体适当配合，可以使合金获得较好的力学性能。

3. 间隙化合物 这类化合物是由原子半径较大的过渡族金属元素与原子半径较小的碳、氮、硼等非金属元素所组成的金属化合物。碳钢中的 Fe_3C ，合金钢中的 Cr_{23}C_6 、 Cr_7C_3 、 WC 、 Mo_2C 、 VC 等都是间隙化合物。这类化合物有简单晶格结构的间隙相和具有复杂晶格结构的间隙化合物两大类。

(1) 间隙相 当非金属原子半径与金属原子半径之比小于 0.59 时，将形成具有简单晶格的间隙化合物，称之为间隙相。图 1-5 为间隙相 VC 的晶体结构，其中钒的原子组成一个面心立方晶格，而碳原子规则地分布在晶格孔隙之内，从而形成与原晶格完全不同的新的晶体。间隙相中的组元比例一般均能满足简单的化学式 MX 、 MX_2 、 M_2X 和



○ — 钒原子
● — 碳原子

图 1-5 间隙相 VC 的晶体结构

M_4X (M 代表金属元素, X 代表非金属元素)。常见的间隙相及晶格类型见表 1-2。

表 1-2 常见间隙相及晶格类型

间隙相的化学式	钢中可能遇到的间隙相	晶格类型
M_4X	Fe_4N 、 Nb_4C 、 Mn_4C	面心立方
M_2X	Fe_2N 、 Cr_2N 、 W_2C 、 Mo_2C	密排六方
MX	TaC 、 TiC 、 ZrC 、 VC TiN 、 WC 、 ZrN 、 VN MoN 、 CrN	面心立方 体心立方 简单六方
MX_2	VC_2 、 CeC_2 、 ZrH_2 、 TiH_2 、 LaC_2	面心立方

间隙相的成分可以在一定范围内变动, 有些间隙相的晶格中的间隙未被填满, 出现缺位, 这种以缺位方式形成的固溶体称为缺位固溶体。

所有的间隙相都具有很高的硬度和高的熔点, 因此它们是硬质合金和合金工具钢的重要组成。

(2) 具有复杂晶格的间隙化合物 当非金属原子半径与金属原子半径比值大于 0.59 时, 则形成具有复杂晶格的间隙化合物。碳钢中的 Fe_3C , 合金钢中的 $Cr_{23}C_6$ 、 Fe_4W_2C 、 Cr_7C_3 、 Mn_3C 等均属于这一类化合物。

Fe_3C 是钢中一种重要的间隙化合物, 具有复杂的斜方晶格, 其晶体结构如图 1-6 所示。 Fe_3C 中的铁原子可以被 Mn、Cr、Mo、W 等金属原子所置换, 形成合金渗碳体, 如 $(FeMn)_3C$ 、 $(FeCr)_3C$ 等。其它具有复杂晶格的间隙化合物中的组元也可被别的元素所置换。

钢中常见的间隙化合物的硬度和熔点见表 1-3。

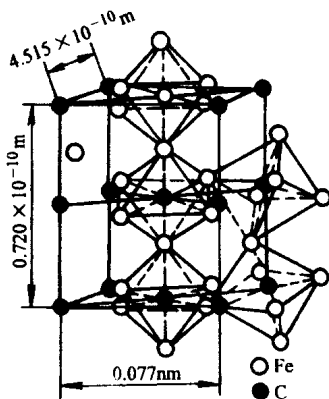


图 1-6 Fe_3C 的晶体结构

表 1-3 钢中常见间隙化合物的硬度及熔点

类 型	间 隙 相							复杂结构 间隙化合物	
	TiC	ZrC	VC	NbC	TaC	WC	MoC	Cr ₂₃ C ₆	Fe ₃ C
成 分	TiC	ZrC	VC	NbC	TaC	WC	MoC	Cr ₂₃ C ₆	Fe ₃ C
硬度 HV	2850	2840	2010	2050	1550	1730	1480	1650	~800
熔点/℃	3080	3472 ± 20	2650	3608 ± 50	3983	2785 ± 5	2527	1577	1227

第二节 固态金属的扩散现象

扩散是物质中原子或分子的迁移现象，是物质传输的一种方式。扩散是固态金属物质传输的唯一方式。金属铸件的均匀化退火，冷变形金属的再结晶，钢的化学热处理以及合金中的相变过程，都与扩散密切相关。

一、扩散原理

在金属晶体中，原子总是在一定的位置上不停地作热振动。当金属中存在着成分不均匀而有浓度梯度或化学位梯度时，原子则获得了跳离开位置的动能，它使原子从高浓度或高化学位方向作选择性迁移。原子的这种迁移过程就是扩散。如在渗碳、渗氮时，碳与氮原子从表面高浓度层向中心迁移使渗层增厚的这种物质传输过程是扩散现象的实例。固态金属中的扩散原理，就是扩散原子在晶体中的换位方式，在金属研究中有下列几种看法：

1. 间隙扩散 固溶体中的间隙型溶质原子，如 C、N 等，可由一个间隙位置跳到另一个间隙位置，图 1-7 为间隙扩散示意图。由图可见，间隙原子跳动时，必须从金属原子之间挤过去，因而这一跳动必然伴随有晶格的瞬时畸变，其畸变能便是间隙原子跳动时所必需克服的能垒，也就是跳动的阻力。

2. 空位扩散 纯金属或置换固溶体中，组元的原子直径比间隙位置要大得多，很难进行间隙扩散。这时主要是通过原子迁移到邻近的空位，即原子与空位交换位置来实现扩散。空位扩散示意图如图 1-8 所示。

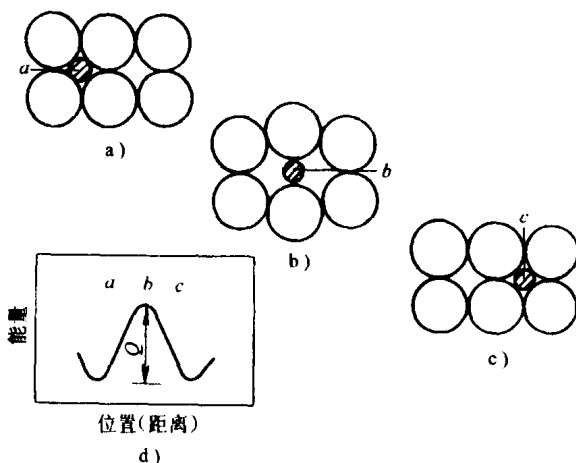


图 1-7 间隙扩散示意图

a) 固体中的间隙原子位置为 a b) 间隙原子从 a 跳到 b 时需要的能量为 Q 并伴有晶格畸变 c) 间隙原子位置为 c d) 间隙原子扩散位置与能量关系

3. 换位扩散 换位扩散是以相邻原子交换位置的原理进行的。其中，最简单的是相邻两原子直接换位，但是，这种换位会引起很大的晶格畸变，需克服很高的能垒，故很难实现。如果相邻的原子同时进行环形旋转换位，这样，所需的能垒可以大大降低。换位扩散示意图如图 1-9 所示。

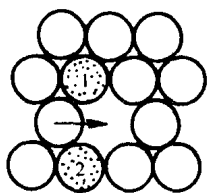


图 1-8 空位扩散示意图

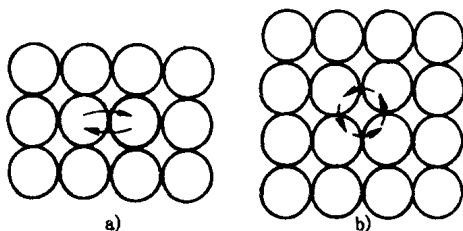


图 1-9 换位扩散示意图

a) 直接换位 b) 环形换位

二、影响扩散的因素

扩散的基本规律是非克早在 1855 年就解决了这个问题，他发现原子的扩散流量与浓度梯度成正比，即

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial X}$$

式中 J ——扩散通量（单位时间通过单位垂直截面的扩散物质质量）（ $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ）；

$\frac{\partial C}{\partial X}$ ——浓度梯度（浓度随距离的变化率）；

D ——扩散系数（ cm^2/s ）。

式中负号表示物质沿着浓度降低的方向扩散。

扩散系数和浓度梯度是决定扩散速度的两个重要参数。许多因素都会影响这些因素，从而影响扩散速度。

1. 扩散温度 扩散温度越高，则扩散系数越大，即温度升高，扩散加快。在不同温度下各种元素在铁中的扩散系数值见表 1-4。

表 1-4 在不同温度下各种元素在铁中的扩散系数数值

扩散元素	扩散温度/℃	$D \times 10^5 /$ ($\text{cm}^2/24\text{h}$)	扩散元素	扩散温度/℃	$D \times 10^5 /$ ($\text{cm}^2/24\text{h}$)
C	925	1205	Cr	1150	5.9
	1000	3100		1200	15~70
	1100	8640		1300	190~460
Al	900	33	Mo	1200	20~130
	1150	170	W	1280	3.2
Si	960	65		1330	21
	1150	125	Mn	950	2.6
Ni	1200	8.0		1400	830

2. 晶体结构 晶体结构对扩散有一定影响。一些具有同素异晶转变的金属，在晶体结构改变时，扩散系数也随之发生变化。例如，912℃时 γ -Fe 和 α -Fe 的自扩散系数就相差很多倍。又如间隙原子氮在 527℃时，在 α -Fe 中的扩散系数比在 γ -Fe 中大 4 倍以上。总的说来，在致密度较小的晶体结构中原子的扩散系数较大。表 1-5 为氮在 α -Fe、 γ -Fe、 ϵ -Fe 中的扩散系数值。