

# 无损检测技术 培训教材

WUSUN JIANCE JISHU  
PEIXUN JIAOCAI

湖南省特种设备管理协会 编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 无损检测技术 培训教材

WUSUN JIANCE JISHU  
PEIXUN JIAOCAI

湖南省特种设备管理协会 编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书由湖南省特种设备管理协会（简称协会）从事无损检测工作多年并有丰富培训考核工作经历的人员，参照 TSG Z8001《特种设备无损检测人员考核规则》考试大纲中关于要掌握或了解、理解的基本知识内容和知识点要求，并根据协会开展无损检测培训考核工作多年来的经验成果编写的。

全书共分六章，第 1 章金属材料基础知识，概要介绍了金属典型晶体结构、铁碳合金相结构及其特性、材料力学及金属材料性能和常用金属材料种类特点等四个方面的知识点；第 2 章金属热处理基本知识，简要介绍了钢铁热处理一般过程、碳及合金元素对钢热处理影响、钢常见组织及性能、常用热处理种类及应用和消除应力热处理目的方法等六个方面的内容；第 3 章焊接基础知识，从焊接及其优越性、焊接接头特性、焊接应力及变形、常用钢材焊接技术要点、焊接缺陷及产生原因以及其他钢制件缺陷种类及产生原因等六个方面的知识要点进行了梳理介绍；第 4 章无损检测技术介绍，分四节阐述了无损检测技术定义、发展历程，从基本原理、主要设备器材、工艺要点及应用特点等 4 个角度简明系统的介绍了射线、超声波、磁粉、渗透等 4 种常规和涡流、声发射、TOFT、相控阵、射线成像、漏磁等 6 种新发展的共计 10 种无损检测技术方法，并对无损检测目的，如何选择、应用无损检测技术以及无损检测标准体系进行了介绍。第 5、6 章，分别收录并修编了经本协会使用多年并行之有效的有关无损检测培训考核管理制度和四种常规无损检测方法实际培训考核要求和各种报告记录及评分标准。

本书与时俱进，紧跟行业新技术、新标准，注重实用性，既可作为特种设备无损检测 I 级、II 级人员培训考核教材，也可供其他行业和高职、技工学校无损检测专业师生参考使用，还是从事无损检测作业、管理以及相关质量管理人员的参考工具书。

### 图书在版编目（CIP）数据

无损检测技术培训教材 / 湖南省特种设备管理协会编. —北京：中国电力出版社，2018.1  
ISBN 978-7-5198-1602-5

I. ①无… II. ①湖… III. ①无损检验—技术培训—教材 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 321229 号

---

出版发行：中国电力出版社

地 址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）

网 址：<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：王 南（010-63412876）

责任校对：朱丽芳

装帧设计：张俊霞 左 铭

责任印制：邹树群

---

印 刷：北京大学印刷厂

版 次：2018 年 1 月第一版

印 次：2018 年 1 月北京第一次印刷

开 本：710 毫米×980 毫米 16 开本

印 张：12.75

字 数：215 千字

印 数：0001—7000 册

定 价：50.00 元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

## 编 委 会

主 任 李高强

副 主 任 胡波涛 陈红冬

主 编 陈红冬

副 主 编 熊 亮 梁恭增

编写人员 谈春华 刘荟琼 樊彬彬 陈世家

罗德辉 谭 湘 董国香 陆 轶

陈琳依 曹 艳 周志伟 尚钰洁

李建熙 彭文婷

## 前 言

随着我国国民经济和工业化的快速发展，“中国制造”已经全面走向世界。作为制造业的重要组成部分——无损检测，其应用领域广、工作量大、从业人员多。更重要的是，无损检测对把好产品质量关、监控使用安全等方面起着至关重要的作用，所以无损检测人员培训工作十分重要。

了解和掌握金属材料、焊接、热处理及无损检测方法应用等相关基础知识，明确实际操作考核要点，是无损检测人员培训考核的重要内容。这部分的内容非常丰富，培训考核教材的选用十分重要。近年来，无损检测新技术发展迅速，法规标准更新很快，目前已发行的此类型书籍存在明显滞后和缺位问题。主要表现为几个方面：一是对已经普遍应用的如 TOFD、相控阵以及射线成像等新检测方法和技术没有进行介绍；二是关于材料、焊接和无损检测知识的描述存在不少不符合新标准要求甚至概念有误；三是无损检测基础知识介绍的系统性欠缺、不简明；四是没有针对性的复习题，不便考生系统学习；五是培训考核管理制度方面的内容几乎没有涉及。

湖南省特种设备管理协会从事无损检测培训考核工作多年，对培训考核有着丰富的经验。所有培训讲课人员及学员对上述问题感受很深，一直在寻求解决的方法。在湖南省自编自用《无损检测基础知识》并多年试用的基础上，近年又组织专业人员编写出这本新的《无损检测技术培训教材》。

本书参照 TSG Z8001—2013《特种设备无损检测人员考核规则》考试大纲要求，全书共六章，按其规定的无损检测人员需要掌握的内容和知识点要求，系统编写了金属材料、热处理、焊接以及无损检测使用等基本知识，梳理介绍了四种常用和六种新发展的共计十种无损检测检测技术原理及其应用特点，并按章编写了有针对性的复习题；收录并修编了经本协会使用多年并行之有效的有关无损检

测培训考核管理制度和四种常规无损检测方法实际培训考核的要求及报告记录和评分规则。本书可作为特种设备无损检测Ⅰ级、Ⅱ级人员培训考核教材，其他行业无损检测培训考核可参考使用。

本书的编写过程中，参考和借鉴了国内外同仁的研究成果和大量书籍，得到了湖南省质量技术监督局、湖南省电力公司电力科学研究院、湖南省安淳高新技术有限公司、湖南省特种设备检验研究院、湖南省劳动人事职业学院、长沙航空职业技术学院、湖南汇丰工程检测公司、长沙明鉴技术检测有限公司等单位的大力支持和帮助，在此一并表示感谢！由于编者水平有限，书中不妥和错误之处，敬请各位读者批评指正。

编 者

2017年9月12日

# 目 录

## 前言

1	金属材料基础知识	1
1.1	晶体和晶界的概念、金属典型晶体结构种类	1
1.1.1	晶格、晶胞	2
1.1.2	金属晶体典型的晶体结构	2
1.1.3	金属的晶体缺陷	3
1.1.4	合金晶体结构	5
1.2	铁碳合金的基本相结构及其特性	6
1.2.1	纯铁的同素异构转变	6
1.2.2	铁碳合金基本相	7
1.2.3	铁碳合金相图	7
1.2.4	铁碳合金分类及亚共析钢组织转变特点	10
1.2.5	合金元素对铁临界点的影响	11
1.3	材料力学及金属材料力学性能基础知识	12
1.3.1	应力和应力集中的概念	12
1.3.2	受压元件壳体应力特点	16
1.3.3	金属力学性能基础知识	17
1.3.4	屈强比的概念	26
1.3.5	钢材的冷脆性和热脆性	26
1.3.6	氢对钢的性能的影响	29
1.3.7	应力腐蚀开裂 (SCC)	30

1.4	承压类特种设备常用材料	31
1.4.1	特种设备用材的基本要求	31
1.4.2	钢的分类和命名方法	32
1.4.3	钢中杂质元素对钢性能的影响	35
1.4.4	钢中合金元素对钢性能的影响	36
1.4.5	承压类设备用碳素钢和低合金钢	38
1.4.6	低温用钢的种类及特点	39
1.4.7	低合金耐热钢种类、特点及高温下性能劣化现象	41
1.4.8	奥氏体不锈钢种类、特点及腐蚀破坏形式	44
	复习题	46
<b>2</b>	<b>金属热处理基本知识</b>	<b>47</b>
2.1	钢热处理的一般过程	47
2.1.1	热处理概念及分类	47
2.1.2	钢热处理时的组织转变	47
2.2	钢中碳和合金元素对 C 曲线的影响	51
2.2.1	钢中碳元素对 C 曲线的影响	51
2.2.2	合金元素对 C 曲线的影响	52
2.3	钢常见金相组织和性能	52
2.3.1	奥氏体 A [Fey (C)]	52
2.3.2	铁素体 F [Fe $\alpha$ (C)]	52
2.3.3	渗碳体 [Fe <sub>3</sub> C]	53
2.3.4	珠光体 P	53
2.3.5	贝氏体 B	53
2.3.6	马氏体 M	54
2.3.7	魏氏组织	54
2.3.8	带状组织	55
2.4	特种设备常用热处理种类、工艺条件及其应用	55
2.4.1	退火	55
2.4.2	正火	56
2.4.3	淬火	56
2.4.4	回火	57



2.4.5 奥氏体不锈钢的固溶处理和稳定化处理	57
2.5 消除应力退火处理目的和方法	58
复习题	59

### 3 焊接基础知识

3.1 焊接的应用及其优越性	60
3.1.1 焊条电弧焊	61
3.1.2 埋弧焊	65
3.1.3 钨极氩弧焊 TIG	67
3.1.4 熔化极气体保护焊	68
3.1.5 等离子弧焊	70
3.1.6 电渣焊	71
3.2 焊接接头	71
3.2.1 常见的焊接接头形式、分类及特点	71
3.2.2 焊接接头组成	73
3.2.3 焊接接头薄弱部位	74
3.3 焊接应力与变形	77
3.3.1 焊接应力与变形的不利影响	78
3.3.2 焊接应力与变形的关系和处理措施	79
3.3.3 影响焊接应力与变形的因素	80
3.4 特种设备常用钢材的焊接	81
3.4.1 钢材焊接性的含义	81
3.4.2 焊接性试验的主要作用	82
3.4.3 焊接工艺评定的作用及其过程	83
3.4.4 焊前预热和后热的作用	84
3.4.5 焊接线能量	85
3.4.6 奥氏体不锈钢	86
3.5 焊接缺陷的种类及产生原因	88
3.5.1 外观缺陷种类、形成原因及危害	89
3.5.2 气孔缺陷种类、形成原因、危害及防止措施	91
3.5.3 夹渣缺陷种类、形成原因、危害及防止措施	92
3.5.4 裂纹种类、形态、发生部位、形成原因、危害及防止措施	92

3.5.5	未焊透种类、形成原因、危害及防止措施	96
3.5.6	未熔合种类、形成原因、危害及防止措施	96
3.6	其他试件中缺陷种类及产生原因	97
3.6.1	铸件中常见缺陷种类及产生原因	97
3.6.2	锻件中常见缺陷种类及产生原因	98
3.6.3	轧材中常见缺陷种类及产生原因	99
3.6.4	使用件中常见缺陷种类及产生原因	100
	复习题	101
<b>4</b>	<b>无损检测技术介绍</b>	<b>102</b>
4.1	无损检测概论	102
4.1.1	无损检测定义及技术发展三个阶段	102
4.1.2	无损检测的目的及应用特点	103
4.1.3	承压类特种设备无损检测标准	106
4.2	常用无损检测方法介绍	107
4.2.1	射线检测基础知识	107
4.2.2	超声波检测基础知识	117
4.2.3	磁粉检测基础知识	125
4.2.4	渗透检测基础知识	130
4.3	其他无损检测技术介绍	134
4.3.1	涡流检测技术及其特点	134
4.3.2	声发射检测基础知识	138
4.3.3	衍射时差法超声检测技术	141
4.3.4	超声相控阵检测技术基础知识	144
4.3.5	X射线数字成像检测基础知识	149
4.3.6	漏磁检测技术基础知识	152
4.4	无损检测方法应用选择	157
4.4.1	承压类特种设备制造过程中无损检测方法的选择	157
4.4.2	常规无损检测方法对检测对象的适应性	157
4.4.3	无损检测方法应用	158
	复习题	160

<b>5</b>	<b>实际操作考核一次性规定、记录报告及评分标准</b> ·····	161
5.1	射线检测·····	161
5.1.1	射线检测Ⅱ级人员评片考核一次性规定·····	161
5.1.2	射线检测Ⅱ级人员底片评定考核报告记录及评分标准·····	162
5.1.3	射线检测Ⅰ级人员实际操作考核报告记录及评分标准·····	165
5.2	超声波检测·····	167
5.2.1	超声波检测Ⅰ、Ⅱ级人员实际操作考核一次性规定·····	167
5.2.2	超声波检测考核报告记录格式及评分标准·····	170
5.3	磁粉检测·····	174
5.3.1	磁粉检测Ⅰ、Ⅱ级人员实际操作考核一次性规定·····	174
5.3.2	磁粉检测考核报告记录格式及评分标准·····	176
5.4	渗透检测·····	178
5.4.1	渗透检测Ⅰ、Ⅱ级人员实际操作考核一次性规定·····	178
5.4.2	渗透检测考核报告记录格式及评分标准·····	181
<b>6</b>	<b>培训考核管理制度</b> ·····	183
6.1	培训考核工作程序·····	183
6.1.1	目的·····	183
6.1.2	范围·····	183
6.1.3	职责·····	183
6.1.4	工作程序·····	183
6.2	特种设备无损检测人员培训考核程序图·····	185
6.3	培训考核班管理制度·····	186
6.3.1	作息听课等管理制度·····	186
6.3.2	闭卷考试管理制度·····	186
6.3.3	开卷考试管理制度·····	187
6.3.4	命题与阅卷及印刷保密管理制度·····	188
6.3.5	培训考试档案管理规定·····	189

# 金属材料基础知识

材料是构成设备或装置的基础，金属材料是现代工业、农业、国防各个领域应用最广泛的工程材料。无损检测人员应了解材料力学基础知识，金属性能、金属微观结构等金属学及热处理和特种设备常用材料基本知识。

传统材料学观念强调：成分决定组织，组织决定性能。20 世纪 90 年代初，随着材料科学的发展，人们进一步注重材料的制备工艺，强调制备工艺在成分、组织、性能三者之间的协同，其相互作用，相互影响，密不可分，构成一个有机的整体，构成材料科学的基础，决定材料的性能。通常所指的金属材料的性能包括使用性能和工艺性能：

**使用性能：**指材料在使用条件下表现出来的性能，如强度、硬度、塑性、韧性等力学性能，耐蚀性、耐热性等化学性能以及声、光、电、磁、热等物理性能。使用性能决定了材料的应用范围，使用安全可靠性和使用寿命。

**工艺性能：**指材料在被加工过程中表现出来的性能，如冷热加工、压力加工性能，具体如铸造、焊接、热处理、压力加工、切削加工等方面的性能。工艺性能对制造成本、生产效率、产品质量有重要影响。

## 1.1 晶体和晶界的概念、金属典型晶体结构种类

自然界固体物质是由基本质点（原子、分子、离子）构成的。根据固体物质内部基本质点的排列方式不同，可将固体物质分为晶体和非晶体两大类。凡内部基本质点呈规则排列和具有一定的熔点的固体物质称为晶体，反之称为非晶体，固态金属一般都是晶体。但是近年的科技发展，在工业生产和科学研究中采用特殊工艺和手段，已经可以制备固态的非晶态金属，如 Ni-P 合金。



### 1.1.1 晶格、晶胞

组成金属的原子都是在它自己相对固定位置上做热振动的，要表达这种状态下原子的排列和规律性是比较困难的。为了简化，将原子看成静止不动的刚性小球按一定的规律排列堆积在一起。为便于研究，将小球堆积模型进一步抽象为空间格架，即把振动中心看着结点，用线条把这些结点联结起来，这种空间格架称为晶格或点阵，如图 1-1 所示。构成晶体的平行六面体的最小的基本单元称为晶胞。整个晶体是由完全等同的晶胞无间隙堆砌而成。

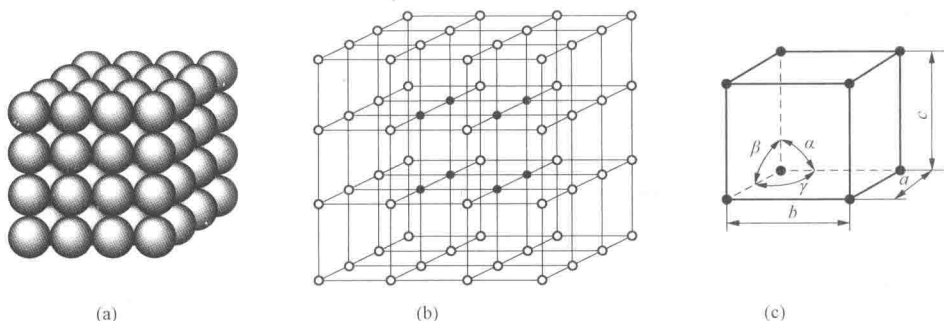


图 1-1 原子堆积、晶格、晶胞示意图

(a) 原子堆积模型；(b) 晶格；(c) 晶胞

### 1.1.2 金属晶体典型的晶体结构

#### 1. 体心立方晶格

如图 1-2 (a) 所示。其晶胞是一个立方体，八个角和中心各有一个原子，八角上原子与相邻八个晶胞所共有，而中心原子为该晶胞所独有，所以，体心立方晶胞原子数为 2 个。属于此类的金属有  $\alpha$ -Fe,  $\delta$ -Fe, Cr, V,  $\beta$ -Ti 等。

#### 2. 面心立方晶格

如图 1-2 (b) 所示。其晶胞也是一个立方体，八个角和六个面各有一个原子，八角上原子与相邻八个晶胞所共有，而每个面中心的原子为 2 个相邻晶胞共有，所以，体心立方晶胞原子数为 4 个。属于此类的金属有  $\gamma$ -Fe, Al, Cu, Ni 等。

#### 3. 密排六方晶格

如图 1-2 (c) 所示。其晶胞是一个正六方柱状体，在 12 个角和上、下底面中



心各有一个原子，另在上下底面中间之间还有 3 个原子，12 个角上原子与相邻 6 个晶胞所共有，而上下底面中心原子为 2 个相邻晶胞共有，底面中间之间的 3 个原子为该晶胞独有，故晶胞原子数为 6 个。属于此类的金属有 Mg、Zn、 $\alpha$ -Ti 等。

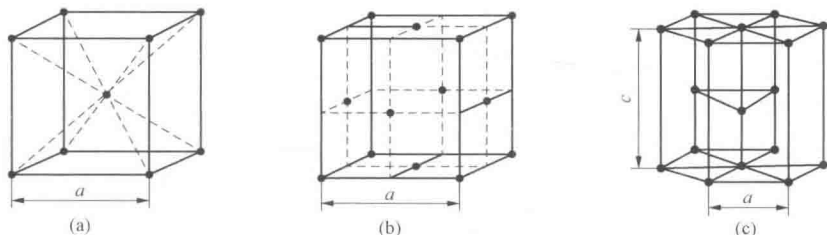


图 1-2 金属的三种典型晶胞示意图

(a) 体心立方；(b) 面心立方；(c) 密排六方

### 1.1.3 金属的晶体缺陷

工程上应用的金属材料，除了极其特殊的场合使用理想的单晶体，绝大多数使用的是多晶体。多晶体是由许多的单晶体组成的，多晶体中的单晶体称为晶粒。晶粒之间的界面称为晶界。

实际晶体的原子排列与上述理想完美的状态有许多差异，由于种种原因使晶体的许多的原子排列偏离理想晶体的排列状态的区域，即存在着许多不同类型的晶体缺陷。晶体缺陷按几何特征可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷，它们对金属的性能有极大的影响。

#### 1. 点缺陷

点缺陷的特点是三维空间几何尺寸都很小。点缺陷的主要类型有空位和间隙原子。

空位就是没有原子占据晶格的结点。高温、塑性变形和高能粒子辐射都能造成或促进空位的形成，其中温度的影响最为明显。晶格中的原子总是在做热振动，由于受到周围其他原子的约束，处于平衡状态。温度升高热能增加，晶格上的某些原子的能量增加到能脱离周围原子的约束，可能脱离原有的晶格结点，逐步跑到晶体表面或间隙中去，甚至蒸发而形成空位。如图 1-3 所示。

间隙原子就是处于晶格间隙中的原子。有些间隙原子是从晶格结点上跑到晶格间隙中的，这称为自间隙原子；有的间隙原子是金属中存在的杂质原子进入了晶格间隙形成的，这称为杂质间隙原子（如 C、B、H、N 等）。



晶体中出现点缺陷后，破坏了原来的原子排列的规律性，晶格发生局部弹性变形，造成晶格畸变。

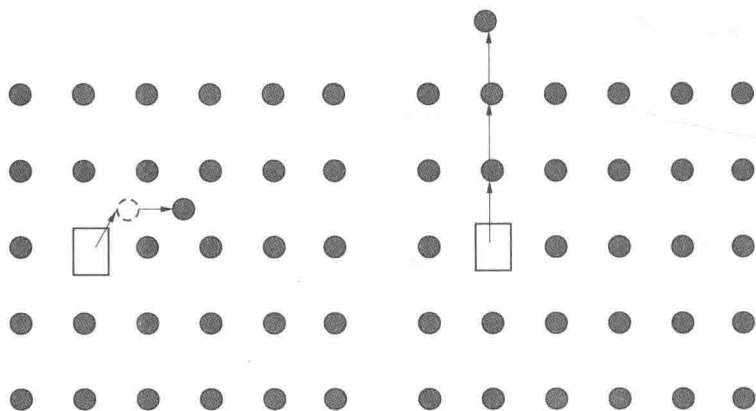


图 1-3 空位示意图

## 2. 线缺陷

晶体中线缺陷的特点是空间二维尺寸很小，第三维尺寸较大。线缺陷的主要类型有刃型位错和螺旋位错，如图 1-4 所示。

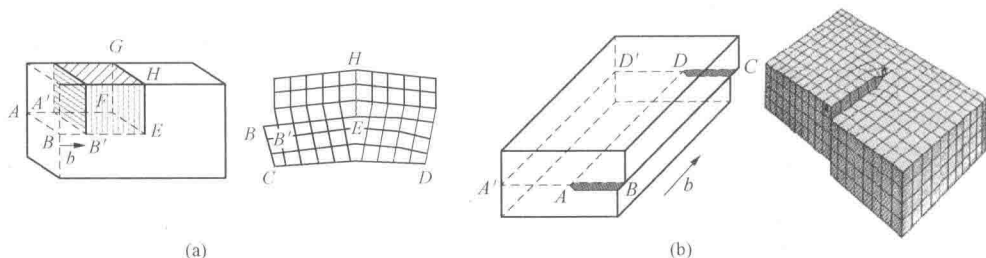


图 1-4 位错示意图

(a) 刃型位错；(b) 螺旋位错

## 3. 面缺陷

面缺陷的特征是二维尺寸很大，第三维尺寸较小。缺陷的主要类型有晶界和亚晶界。

## 4. 晶体缺陷与强化

晶体缺陷破坏了晶体的完整性，使晶格畸变、能量增加。金属的晶体性质发生偏差，对金属性能有较大影响。如晶格缺陷常常降低金属的耐蚀性，增大金属的电阻。实验证明，室温下金属的强度随晶体缺陷的增加而迅速下降，当缺陷增



加到一定数量后, 金属强度又随晶体缺陷的增加而增大。

### 1.1.4 合金晶体结构

#### 1. 基本概念

合金是指由两种或以上金属元素或金属与非金属元素组成的具有金属特性的物质。合金比纯金属具有更高的力学性能和满足特殊要求的力学和化学性能, 因此合金材料得到广泛应用。

(1) 组元。组成合金最基本、独立的单元称为组元。组元可以是组成合金的元素或稳定的化合物。

(2) 相。合金中具有同一聚集状态、同一晶体结构和性质与其他部分有界面分开的均匀、独立组成部分称为相。超过临界温度材料不同相之间可以发生相互转变, 称之为相变。

(3) 组织。合金中由若干相以一定数量、形态和尺寸组合而成并且具有独特形态的部分称为组织。

如铁碳合金材料所有组织均由铁素体、奥氏体和渗碳体三种相组成, 由于形态、数量及尺寸不同, 会形成多种可以在显微镜下观察到的形貌及性能不同的铁素体、奥氏体和渗碳体、珠光体、莱氏体、马氏体、回火马氏体、魏氏体等组织, 铁素体、奥氏体和渗碳体既是相、又是组织, 具有双重身份。

#### 2. 合金的相结构

合金在固态下一种组元的晶格内溶解了另一组元的原子而形成的晶体相, 称为固溶体。晶格类型保持不变的组元为溶剂, 其他组元为溶质。有置换固溶体和间隙固溶体两种类型。

(1) 置换固溶体。溶质原子占据溶剂晶格中的结点位置而形成的固溶体称置换固溶体。按溶解度不同, 可分为有限固溶体和无限固溶体。金属元素彼此之间一般都能形成置换固溶体, 但溶解度视不同元素而异。影响固溶体溶解度的因素有很多, 主要取决于: 晶体结构、原子尺寸、化学亲和力(电负性)、原子价因素。大多数合金只能够有限固溶, 且随温度升高而增加, 只有两组元晶格类型相同、原子直径相差不大时, 才可能无限固溶, 如铜镍二元合金, 铜、镍原子可在晶格的任意位置替代而形成无限固溶。如图 1-5 (b)、(c) 所示。

(2) 间隙固溶体。溶质原子分布于溶剂晶格间隙而形成的固溶体称间隙固溶体。间隙固溶体的溶质一般是直径很小的碳、氢等非金属元素。其形成条件是溶质原子与溶剂原子直径之比必须小于 0.59。由于间隙有限, 所有间隙固溶体只





能有限溶解。如图 1-5 (a) 所示。

异类原子的溶入将使固溶体晶格发生畸变，增加位错阻力，从而使合金强度、硬度升高，即所谓固溶强化。固溶强化是增强金属材料性能的重要途径。

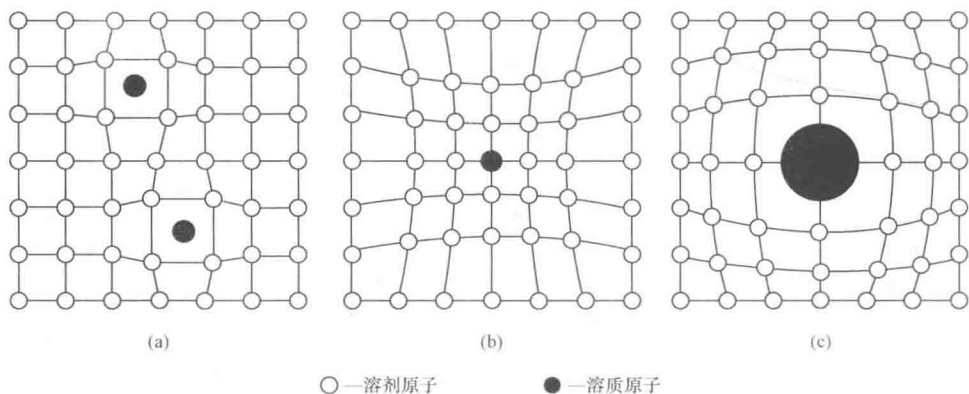


图 1-5 固溶体示意图  
(a) 间隙固溶体；(b)、(c) 置换固溶体

### 3. 金属化合物

合金组元间发生相互作用而形成的具有金属特征的合金相称之为金属化合物。金属化合物一般发生在金属和非金属元素之间，如渗碳体  $Fe_3C$ ，具有特殊复杂的晶格结构，且熔点高、硬而脆，通常能够显著提高合金的强度、硬度，但会降低材料的塑形和韧性。

## 1.2 铁碳合金的基本相结构及其特性

### 1.2.1 纯铁的同素异构转变

大多数金属结晶后晶格类型不会发生变化，但铁、锰和钴等少数金属，在结晶成固态后继续冷却过程中晶格类型会发生变化，这种现象称为同素异构转变。如图 1-6 所示，纯铁从液态结晶后继续冷却过程中，其晶格类型发生了两次转变，第一次是在  $1394^{\circ}C$  时，从液态结晶成的体心立方晶格  $\delta-Fe$  转变为面心立方晶格的  $\gamma-Fe$ ；第二次是在  $912^{\circ}C$  时，又由面心立方晶格的  $\gamma-Fe$  转变体心立方晶格  $\alpha-Fe$ 。

$\delta-Fe$  ( $1538 \sim 1394^{\circ}C$ ) ——  $1394^{\circ}C$   $\gamma-Fe$  ( $1394 \sim 912^{\circ}C$ ) ——  $912^{\circ}C$   $\alpha-Fe$  ( $912^{\circ}C \sim$  常温)