

无损检测

(高级教程)

译者 马铭刚 程肇琦 王怡之
何凤岐 胡汝舜 周维愚
主校 马铭刚

上海锅炉厂

上海无损探伤技术服务部

无损检测

(高级教程)

上海锅炉厂出版
上海无损探伤技术服务部

(闵行华银路 250 号)

上海教育学院印刷厂印刷
上海海联商务印刷部

787×1092 1/16 印张: 20 字数: 461千字

1986年9月第一版 1986年9月第一次印刷

印数: 0,001—4,000册

(内部资料 不准翻印)

出版说明

《无损检验高级教程》一书是1985年日本无损检验学会为国际原子能委员会(IAEA)主办的无损检测高级人员培训班而编写的参考教材(英文)。国际原子能委员会按联合国发展计划署的计划已用此教材培训无损检测高级人员。其编写目的是使国际原子能委员会成员国的无损检测高级人员的培训工作标准化,并推进无损检测高级人员的资格鉴定和考核的国际协调。

为了满足国内对无损检测高级人员进行培训和资格鉴定的需要,我上海锅炉厂、上海无损探伤技术服务部组织专业技术人员翻译出版了《无损检测高级教程》一书。

《无损检测高级教程》一书是我国无损检测高级人员培训和资格鉴定的适用教材,也是已取得射线、超声波探伤Ⅱ级证书的广大无损检测人员的进修教材,各大专院校无损检测、焊接专业班的师生亦可将此书作为教学参考用书。

原著由于编写时间较为仓促,文中笔误较多已由译者纠正。原著中有些术语未严格统一,但在文中可以辨明。磁粉探伤一章中的全部插图遗漏,译文中不便自行补入。

此书共分三大篇,由下列同志参加翻译。NDT人员资格鉴定现状:胡汝舜;金属学和焊接基础、材料力学性能、带缺陷材料的评价:周维愚;声发射:王怡之;磁粉探伤、渗透探伤:马铭刚;涡流探伤:程鋈琦;超声波探伤:何凤岐、胡汝舜;射线探伤:马铭刚。全书由无损探伤高级工程师、中国无损检测学会常务理事、上海无损检测学会理事长马铭刚同志校核,由张彩根、李益祖两同志负责编辑、校对。由于我们的水平有限,加上时间急促,错误之处在所难免,敬请读者及时提出指正。

目 录

第 一 编

1. 无损检测(NDT)人员资格认可的现状	1
1.1 对培训和认可的地区性(RCA)实施计划	1
1.2 NDT 人员资格认可体制的世界动向	1
2. 冶金学和焊接的基本原理	4
2.1 冶金学的基本原理	4
2.2 焊接	14
3. 材料的机械性能	25
3.1 应力——应变关系	25
3.2 脆性断裂	27
3.3 疲劳	30
4. 对带缺陷材料的评定	32
4.1 前言	32
4.2 断裂力学 (F. M)	32
4.3 能量释放率和断裂韧性	35
4.4 各种裂纹的应力强度因子和缺陷的当量裂纹	36
4.5 断裂力学和无损检验	37
4.6 断裂韧性的测定	38
4.7 带有缺陷的材料的强度	40
4.8 允许的裂纹尺寸	46
4.9 结论	47
5. 声发射	48
5.1 概述	48
5.2 A E装置	49
5.3 A E特性	51
5.4 应用	54
5.5 存在的问题	56
5.6 结语	57
6. 磁粉检验	58
6.1 引言	58
6.2 磁性材料	58
6.3 磁粉检验原理	63
6.4 磁粉检验规程	63
7. 渗透检验	66

7.1 什么是渗透法	66
7.2 如何进行	66
7.3 渗透检验法的类型和方法	67
7.4 渗透检验法的特点	75
8. 涡流检测概论	77
8.1 概述	77
8.2 涡流检测用线圈	80
8.3 检测电路	87
8.4 信号处理	90
8.5 标准化	91
8.6 结论	95

第 二 编

1. 超声检验概论	96
1.1 超声检验原理	96
1.2 超声检测系统和参考试块	97
1.3 直射波法的基本技术	98
1.4 斜射波法的基本技术	100
2. 超声检验基础理论(I)	104
2.1 超声检验中的变量	104
2.2 超声波束和声压	105
2.3 在材料界面的透过和反射	108
2.4 对信号幅度和伪显示有关因素的讨论	111
3. 超声检验基础理论(II)	118
3.1 信号幅度	118
3.2 传播中的能量损失	124
4. 超声检验基本理论(III)	130
4.1 反射体位置的确定及其误差	130
4.2 缺陷尺寸的估计	131
4.3 缺陷类型的估计	149
附录	155
5. 钢板、棒材、铸钢和锻件的超声波探伤	161
5.1 钢板的超声波探伤	161
5.2 钢棒的超声波探伤	169
5.3 铸钢件的超声波探伤	170
5.4 钢锻件的超声波探伤	177
6. 焊缝超声波探伤	192
6.1 焊缝中的典型缺陷和探伤方法	192

6.2 探头的选择	195
6.3 使用斜探头时的扫查型式	197
6.4 焊缝探伤中的非缺陷讯号	200
6.5 焊缝中缺陷回波的特征	201
6.6 标准	202
6.7 奥氏体不锈钢焊缝的超声波探伤	210
7. 超声波探伤系统	215
7.1 超声波探伤仪	215
7.2 探头	219
7.3 自动检验系统	229

第 三 编

1. 射线照相方法应用的现状	234
1.1 射线探伤试验研究的动向	234
1.2 无损检测的方法和人员资格认可	234
2. 射线照相法的基本原理	235
2.1 X射线的衰减	235
2.2 X射线胶片的感光特性	238
3. 射线照相法的安全控制	242
3.1 引言	242
3.2 操作前、中、后的安全控制	242
3.3 剂量极限的规定	243
3.4 辐射剂量和安全控制	244
3.5 射线探伤中的安全操作	245
3.6 辐射剂量的测量	249
4. 射线照相技术(Ⅰ)	252
4.1 射线照相成像的质量	252
4.2 获得吸收系数和散射/直射强度比的方法	256
5. 射线照相技术(Ⅱ)	259
5.1 影响射线照相成像质量的因素	259
5.2 曝光的计算	264
5.3 显影对射线照的像的质量的影响	266
6. 射线照相技术(Ⅲ)	268
6.1 管道圆周焊缝的射线照相检验	268
6.2 铸钢件的射线照相法检验	272
6.3 铝T字焊缝的射线照相检验	272
7. 射线照相技术(Ⅳ)	275
7.1 射线照相像质量的改进	275

7.2 透度计灵敏度的换算.....	281
8. 射线照相检验规范.....	286
8.1 标准的种类.....	286
8.2 具有代表性的标准(示例).....	287
8.3 关于射线照相检验标准的比较.....	289
9. 射线照相探伤的检查手册.....	299
9.1 承受水压铁管射线探伤的检查技术条件(举例).....	299
9.2 规程制订.....	300
9.3 承受水压铁管的RT规程示例.....	300
附录1.....	306
10. 探伤和检验的规划和控制.....	307
10.1 探伤和检验的意义和目的.....	307
10.2 检验人员.....	307
10.3 无损检验的规程鉴定试验.....	308
10.4 如何决定无损检验的范围.....	308
10.5 工地焊接检验.....	310
10.6 自我检验.....	313
10.7 记录的准备和保管.....	313
参考文献.....	314

表 1.1 认可体制中的技术领域

美 国	西 德	日 本	国际 NDT 会议 (ICNDT) 计划	国际标准化组织 (ISO) 计划
RT	RT	RT	RT	RT
UT	UT	UT	UT	UT
MT	MT	MT	MT	MT
PT	PT	PT	PT	PT
ET	ET	ET	ET	ET
LT			LT	
NRT				
AE		SM		

缩 写

RT: 射线探伤;
 UT: 超声波探伤;
 MT: 磁粉探伤;
 PT: 渗透探伤;
 ET: 涡流探伤;
 LT: 泄漏检验;
 NRT: 中子射线探伤;
 AE: 声发射检验;
 SM: 应力测量。

表 1.2 鉴定级别

III 级	II 级	I 级
专 家	技 术 员	技术助手 助 手 操作人员

(3) 考试

所有技术领域中的各级别都采用笔试。有时在某些级别中不包括实际考试和口试。

(4) 重新认可

很少有国家其认可是永远有效的。而 NDT 技术正在飞速发展,所以在多数情况下,要求重新认可或作更新考试以保持认可证书。

(5) 认可体制的两种类型

E类: 根据国家 NDT 学会或协会制订的建议,如 SNT-TC-IA (美国),由雇主或以

雇主名义进行的以雇主为基础的体制。

C类：由被批准的，通常处于中心位置的独立的探伤中心执行的中心认可发证体制。它由包括所有工业部门和相应学会具有代表性的委员会管理。例如：英国（CSWIP）、澳大利亚、加拿大、日本（NDIS 0601）等。

（6）使用认可体制的国家

为了发展 NDT 技术，世界无损检测会议（WCNDT）每三年举行一次（表 1.3）。从 1970 年以来至少有 48 个国家派代表参加了 WCNDT。将近一半国家已报告了他们的认可体制。

表 1.3 世界 NDT 会议

序 号	日期年月	国家	城市
1	1955.5	比利时	布鲁塞尔
2	1957.11	美国	芝加哥
3	1960.3	日本	东京与大阪
4	1963.9	英国	伦敦
5	1967.5	加拿大	蒙特利尔
6	1970.6	西德	汉诺威
7	1973.6	波兰	华沙
8	1976.9	法国	坎内
9	1979.11	澳大利亚	墨尔本
10	1982.8	苏联	莫斯科
11	1985.11	美国	兰斯维盖斯

表 1.4 泛太平洋 NDT 会议

序 号	日期年月	国家	城市
1	1976.3	日本	东京
2	1978.4	南朝鲜	汉城
3	1980.11	日本	东京
4	1983.11	澳大利亚	悉尼
5	1987.4	加拿大	温哥华

（7）国际协调

多数情况下，每个国家的认可体制都是独立开发的。但国际合作和贸易需要有这种体制的国际协调。在第七届 WCNDT 期间，ICNDT（WCNDT 的指导委员会）建立了一个资格认可体制国际协调工作组。

第九届 WCNDT 接受了拟订一个准则（NDT 人员的最低技术知识要求）的建议。作为第一步，DGZFP（西德）起草了一份超声波探伤的要求大纲，并提交给第十届 WCNDT。在第十一届 WCNDT 中继续进行讨论。不仅 UT，其它技术领域的要求大纲草案也已提出讨论。

ISO 也已开始了关于协调的讨论。IAEA（国际原子能委员会）/UNDP 正在亚太地区 and 拉美地区开展 NDT 人员教育和资格认可工作。

（8）教育

在认可考核之前，参加者必须经教育或培训。在每个国家都有许多培训班。在某些体制中，参加培训班后就必须进行考试。但在多数情况中，培训和考试是互相独立的。

2. 冶金学和焊接的基本原理

2.1 冶金学的基本原理

2.1.1 金属和合金的结构

材料的某些性质（如某些力学的、物理的、化学的、电和磁的性质）主要取决于组成这些材料的原子排列。例如，尽管金刚石和石墨两者均由碳原子组成，但前者是世界上最硬的材料而后者则极软（通常所用的铅笔，主要由石墨组成）。这种差别系由碳原子的不同排列所致。图 2.1 (a) 和 (b) 分别表示金刚石和石墨的结构透视图，前者的每个原子具有四个最邻近的原子而后者则具有三个。

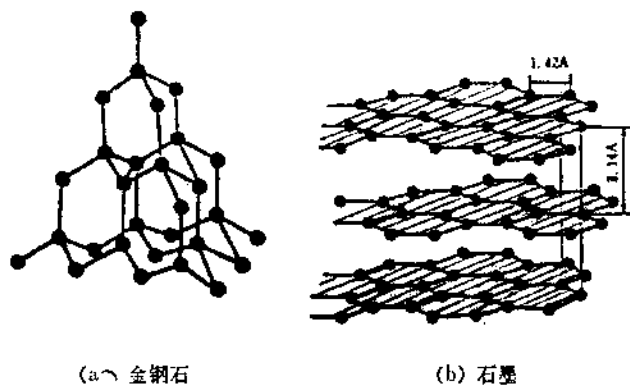


图 2.1 结构图

因此，我们必须首先了解金属和合金中原子的排列以研究其性质。

(1) 纯金属的结构

X 线衍射分析表明，金属是由在三维空间中周期性重复的有规律的晶格中排列的原子所组成，即金属是结晶体[结构单元有规律的重复与墙壁纸的花样相类似，这种墙纸是由以相同方式排列的图案的“基本单元”所组成]。

晶体中的原子排列可用图 2.2 所示的三维空间直线网格简便地加以描述，这种网格称之为“空间点阵”。

图 2.2 中的黑线表示一个“晶胞”[上述墙纸的“基本单元”与结晶中的“晶胞”相类似]。这种晶胞将空间点阵分成相同尺寸的无空洞的并列的三棱体。因此，一个晶胞应是一个平行六面体，而且空间点阵上的每一个晶胞在尺寸、形状和取向上与其它晶胞是相同的。

图 2.3 (a) 和 (b) 表示最简单的空间点阵（简单的立方点阵）。这些原子（即晶体）的有规则的排列导致各向异性，即性能随方向（排列方向）而变。这可以按下述来理解。

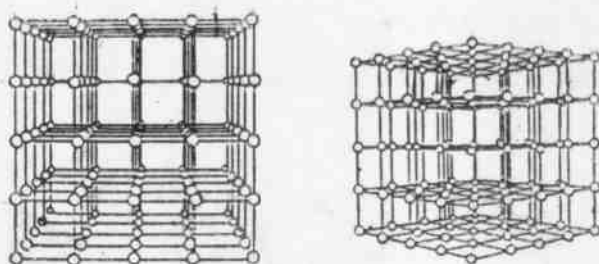


图 2.3 最简单的空间点阵 (简单的立方点阵)

例如, 考虑如图 2.4 (a) 和 (b) 所示的 (a) 规则的和 (b) 不规则的二维网络。在粗箭头和细箭头方向上抵抗变形的能力在 (a) 中是不同的, 而在 (b) 中是相同的。在 (a) 中的这种方向性 (即各向异性) 系由规则性所引起。

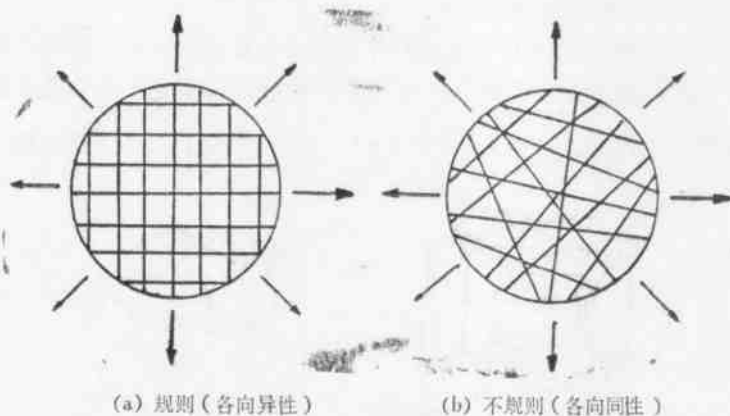


图 2.4 二维网路

尽管有 14 个空间点阵, 但多数金属 (约金属元素的 80%) 的晶体结构是 (a) 面心立方点阵 (f, c, c)、(b) 体心立方点阵 (b, c, c) 和 (c) 密排六方点阵 (h, c, p)。

(a) 面心立方点阵 (f, c, c) 图 2.5

原子位于一个晶胞的立方体的八个顶角和立方体六个面的中心。属于一个晶胞的原子数按 $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 1 + 3 = 4$ 计算, 其中 $\frac{1}{8}$ 表示一个立方体每一顶角处的一个原子同时属于毗连的八个晶胞, 而 $\frac{1}{2}$ 表示每一个立方体面的中心处的一个原子同时属于毗连的两个晶胞。

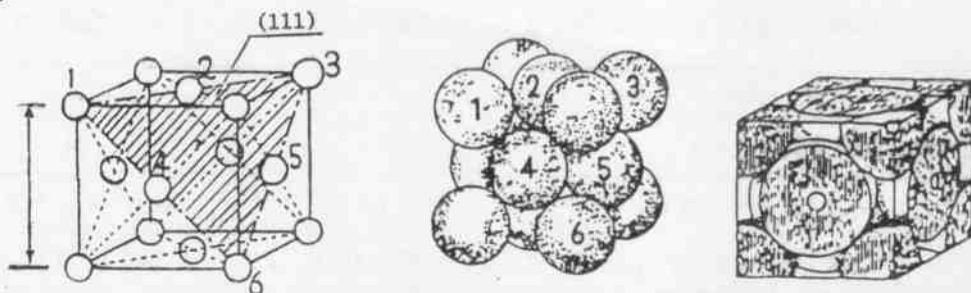


图 2.5 面心立方点阵 (f, c, c)

(b) 体心立方点阵 (b, c, c) 图 2.6

原子位于一个晶胞的立方体的八个顶角和体积的中心。 $\frac{1}{8} \times 8 + 1 \times 1 = 2$ 个原子属于一个晶胞。

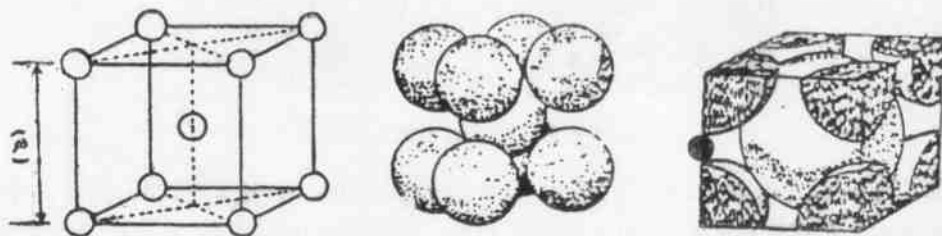


图 2.6 体心立方点阵 (b, c, c)

(c) 密排六方点阵 (h, c, p) 图 2.7

原子位于一个六角棱柱体的上下表面的各自的六个顶角和中心，而三个原子则在这两个表面之间。上下表面称为“基本平面”。这个六角棱柱体决不是一个真正的晶胞。因为晶胞如前所述应该是平行六面体。 $\frac{1}{6} \times 4 + \frac{1}{12} \times 4 + 1 \times 1 = 2$ 个原子属于一个晶胞。

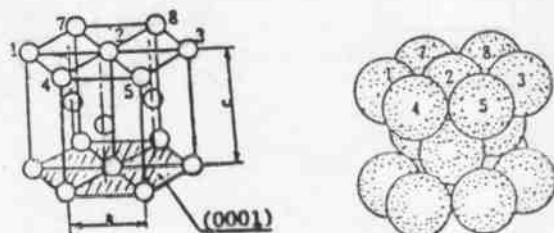


图 2.7 密排六方点阵 (h, c, p)

$b, c, c.$, $f, c, c.$ 和 $h, c, p.$ 结构的元素列于表 2.1, 同时列出了图 2.5, 2.6 和 2.7 中晶体常数——轴向长度 a 及 c 。几乎所有元素的晶体常数约为 $3 \sim 5 \text{ \AA}$ ($30 \sim 50 \text{ nm}$)。

表 2.1

(a) 面心立方点阵 (f, c, c)

	Ag	Al	Au	$\beta\text{-Co}^*$	Cu	$\gamma\text{-Fe}^*$	Ir	Ni	Pb	Pd	Pt
$a(\text{\AA})$	4.08	4.04	4.06	3.55	3.60	3.63	3.82	3.50	4.92	3.86	3.91

* $\gamma\text{-Fe}$ 1100°C ; $\gamma\text{-Co}$ 477°C

(b) 体心立方点阵 (b, c, c)

	$\alpha\text{-Cr}$	$\alpha\text{-Fe}$	$\delta\text{-Fe}^*$	Mo	Na	Ta	V	W	Nb	K	Rb
$a(\text{\AA})$	2.88	2.86	2.93	3.14	4.30	3.27	3.04	3.16	3.30	5.32	5.70

* $\delta\text{-Fe}$ 1425°C

(c) 密排六方点阵 (h, c, p)

	Be	Cd	α -Co	Mg	Os	Ti	Tl	Zn	Zr	β -Cr
$a(A)$	2.28	2.98	2.51	3.22	2.71	2.92	3.47	2.67	3.23	2.72
$c(A)$	3.61	5.63	4.11	5.23	4.32	4.67	5.52	4.97	5.14	4.42
c/a	1.58	1.89	1.63	1.62	1.59	1.60	1.59	1.86	1.59	1.62

(2) 纯金属的同素异构转变

许多元素以多种形式存在。例如，铁的低温 b, c, c 结构 (α -Fe)，在 910°C 时变为 f, c, c (γ -Fe)，而在 1390°C 时又恢复为 b, c, c (δ -Fe)。这种改变称为“同素异构转变”（简称“转变”），发生这种转变的温度称为“转变点”。图 2.8 表示铁的转变。

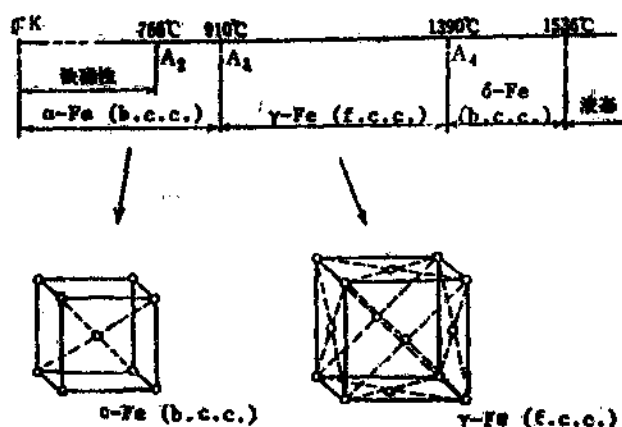


图 2.8 铁的转变

(3) 晶粒和晶界

商业上用的大多数金属材料是由许多称之为“晶粒” (Crystal grains) (或简称“grains”) 的细小的晶体结合而成，而这些晶体的边界称为“晶界”。

在冷却时，液体被冷却得愈快所形成晶核的数量愈大，并产生相同数量的晶粒，即所生成的晶粒尺寸较小。通常晶粒尺寸极小，可由放大 100 倍或 100 倍以上的显微镜辨别出来。

应该注意晶粒的尺寸愈小金属的性能愈强而韧，反之亦然。

集聚的晶粒称为“多晶体金属”。与多晶体金属相反，“单晶体”由一个晶体组成，而且没有晶界。

在多晶体金属中，晶粒无位向性排列，尽管每一个晶粒显示出各向异性，但由这些晶粒结合而成的多晶体金属并未显示出各向异性。当多晶体金属通过轧制或锻造等产生塑性变形（冷加工），或在塑性变形后退火，则每个晶粒择优取向，而多晶体金属显示出方向性。

(4) 合金的结构

商业上用的大多数金属材料不是纯金属而是合金，这些合金由两种以上元素（成分 A, B, C, ……）所组成，这些元素中的某些元素可以是非金属元素。现在，我们应当了解 A, B, C, ……原子的排列，以研究合金的性质。

合金中基本上有三种型式的原子排列。每种排列形式称为“相”，相定义为“在同种状态下任意次序组合的晶胞”。同种状态指同种元素，同种结晶结构和同一浓度（组成）等。为简便起见，我们讨论由A和B纯金属组成的二元合金。

三种型式（相）是（a）纯金属，（b）固溶体和（c）金属间化合物。

（a）纯金属 图 2.9

在A晶粒中没有B原子，而在B晶粒中没有A原子，即单纯的A晶粒和B晶粒的混合物。A金属和B金属互不溶解。这种完全不互溶性在理论上几乎是不可能的，一种成分在另一种成分中的溶解度可能极小，但很难是零。

（b）固溶体 图 2.10 (a)(b)

在A晶粒（溶剂）中存在有B原子（溶质）。

（i）置换固溶体 图 2.10 (a)

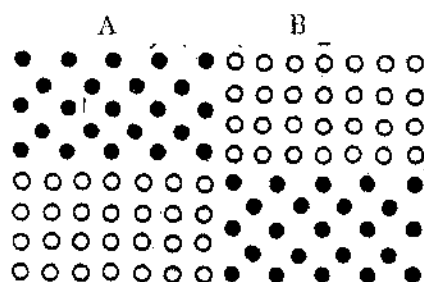


图 2.9 A和B纯金属的混合物示意图

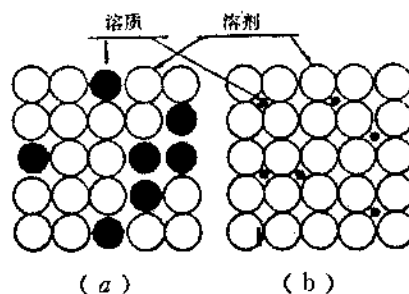


图 2.10 固溶体的示意图

A晶体的阵点处存在有B原子。

镍的点阵（A-晶胞）能够容纳铜原子（B-原子）而不致于使其 f, c, c 结构（A-晶胞的结构）松动。铜原子（B-原子）随机置换阵点上的镍原子（A-原子）是置换固溶体的一例。

在Cu-Ni系中两个元素可以任意比例置换而称为完全互溶。但是，通常B-原子置换A-原子是有限度的，即A原子和B原子是不完全互溶的。

（ii）间隙固溶体 图 2.10 (b)

A晶体点阵的间隙中存在有B原子。

A晶体的点阵间隙中可容纳B原子。具有小半径的轻原子如H，N，C和B倾向于溶解在合金的间隙位置，所有这些原子的半径小于 $10\mu\text{m}$ ，溶质原子在溶剂晶体中的溶解度总是有限度的。

在固溶体上添加B-原子可导致点阵膨胀或收缩，如图 2.11 所示，金属随着点阵畸变而

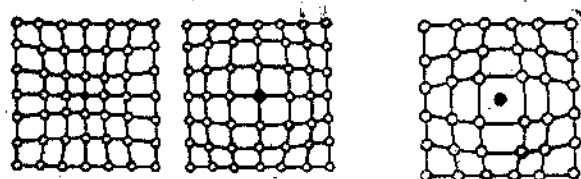


图 2.11 固溶体中的点阵畸变

被硬化（即强化）。硬化的程度取决于 B-原子的尺寸和数量以及 A 金属和 B 金属的晶体结构。图 2.12 表示纯铁的例子。这种硬化称为“固溶硬化（或固溶强化）”。

(c) 金属间化合物

元素 A 和 B 组成金属间化合物 A_mB_n 。

与固溶体相比较，A 原子和 B 原子的数量比是固定的 ($m:n$)，晶体结构完全不同于 A 和 B 金属的晶体，通常十分复杂。几乎所有的金属间化合物由于其复杂的晶体结构而十分硬和脆。

2.1.2 合金的平衡状态图（相图）

合金的平衡状态图（简称状态图）可与“合金状态地图”（“状态”在英语中亦指民族或国家）相比较。我们不能没有地图而仔细研究（研究，学习，了解或应用）“合金状态”。“状态图”和“地图”的比较见图 2.13。

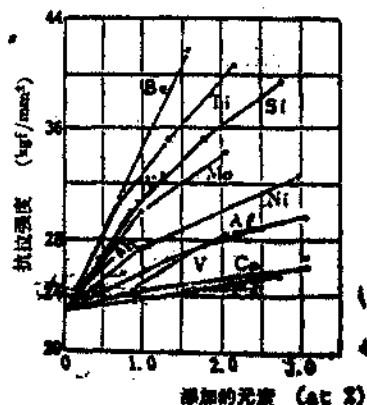


图 2.12 铁中固溶硬化示例

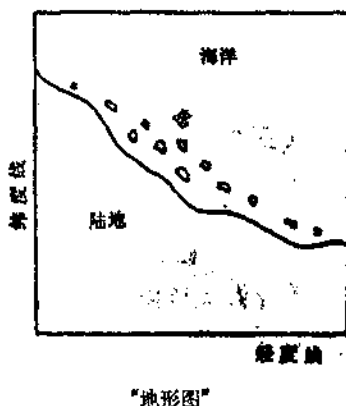
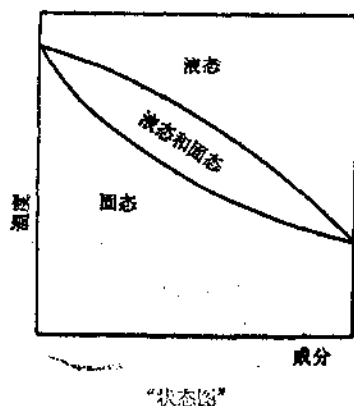


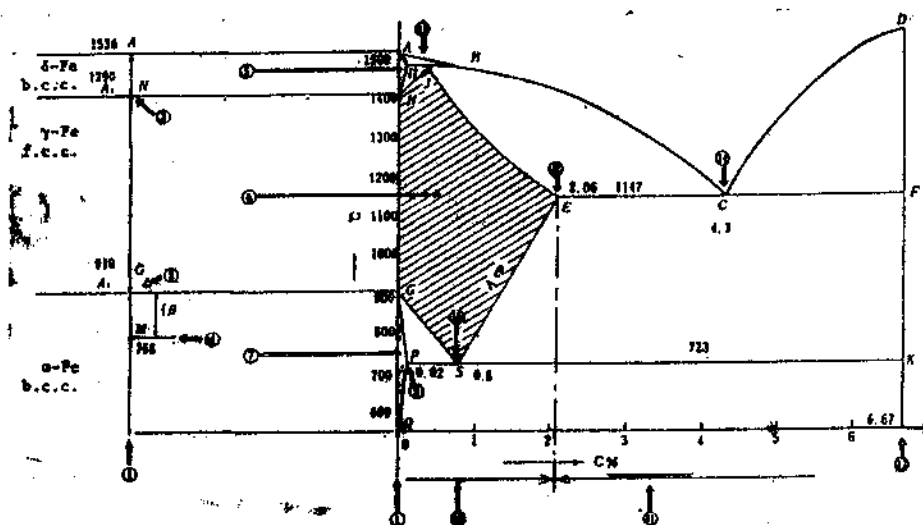
图 2.13

一张地图可根据纬度和经度告诉我们那里是 $\times\times\times$ 海洋、 $\times\times\times$ 岛和 $\times\times\times$ 陆地等。与地图相类似，状态图告诉我们那里（横座标—浓度，和纵座标—温度）是液态（熔融金属，即海洋）、液态和固态的混合物（即岛）和固态（即陆地）。此外，它还告诉我们转变点和溶解度等。

2.1.3 “Fe-C”二元系平衡状态图

碳钢由 Fe 和 C 组成，此外含有少量 Si, Mn, P 和 S 杂质。合金钢（特殊钢）由 Fe-C（碳钢）和添加的合金元素如 Ni, Cr, Mo, W, V 等所组成。因此 Fe-C 系是碳钢和合金钢的基本相图。钢的含碳量低于 2.06%（图 2.14 中点 E），而铸铁则高于 2.06%（通常约在 2.5~4.3% 之间）。

图 2.14 所示为“Fe-C”二元系合金状态图。

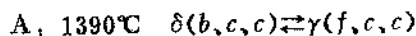
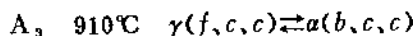


①纯铁转变； ②A₃转变($\gamma \rightarrow \alpha$)； ③A₄转变($\delta \rightarrow \gamma$)； ④A₂磁性转变；
 ⑤ δ -固溶体 (δ -铁素体)； ⑥ γ -固溶体 (奥氏体)； ⑦ α -固溶体 (铁素体)；
 ⑧在奥氏体中的最大溶解度(2.06%)； ⑨在铁素体中的最大溶解度(0.02%)；
 ⑩钢； ⑪铸铁； ⑫渗碳体Fe₃C, 6.67%； ⑬J: 包晶反应； ⑭C: 共晶反应
 1147°C, 4.3%C, L(C) = γ (E) + Fe₃C； ⑮S: 共析反应723°C, 0.8%C,
 γ (S) $\rightleftharpoons$ α (P) + Fe₃C

图 2.14 Fe-C 系

(1) 转变①

如前所述 (图 2.8)，纯铁的转变为：



(2) 固溶体⑤⑥⑦

(a) 铁素体 (α -固溶体：符号 α) ⑦

铁素体是间隙固溶体[溶质—碳原子，溶剂— α -Fe($b.c.c.$)]，最大溶解度 (在 723°C 时为 0.02%) 是很小的 (在室温时溶解度极其小)，即铁素体几乎与纯铁相同。

(b) 奥氏体 (γ -固溶体：符号 γ) ⑥

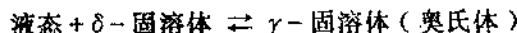
奥氏体是间隙固溶体[溶质—碳原子，溶剂— γ -Fe($f.c.c.$)]，奥氏体中的最大溶解度比铁素体大得多[在 1147°C 时为 2.06%，在 723°C (A₁ 转变点) 时为 0.8%]。奥氏体是软的且无磁性。

(3) 渗碳体 Fe₃C ⑫

Fe₃C 是由 Fe 和 C 组成的称之为“渗碳体”的化合物。含碳量为 6.67%，渗碳体的结构十分复杂，所以，如前所述 [2.1.1(4)(c)] 渗碳体是很硬和很脆的。

(4) 包晶反应⑬

Fe-C 系中的包晶反应为：



细节从略。

(5) 共晶反应 (4.7% C, 1147°C, 莱氏体) ⑭

Fe-C 系中的共晶反应为：