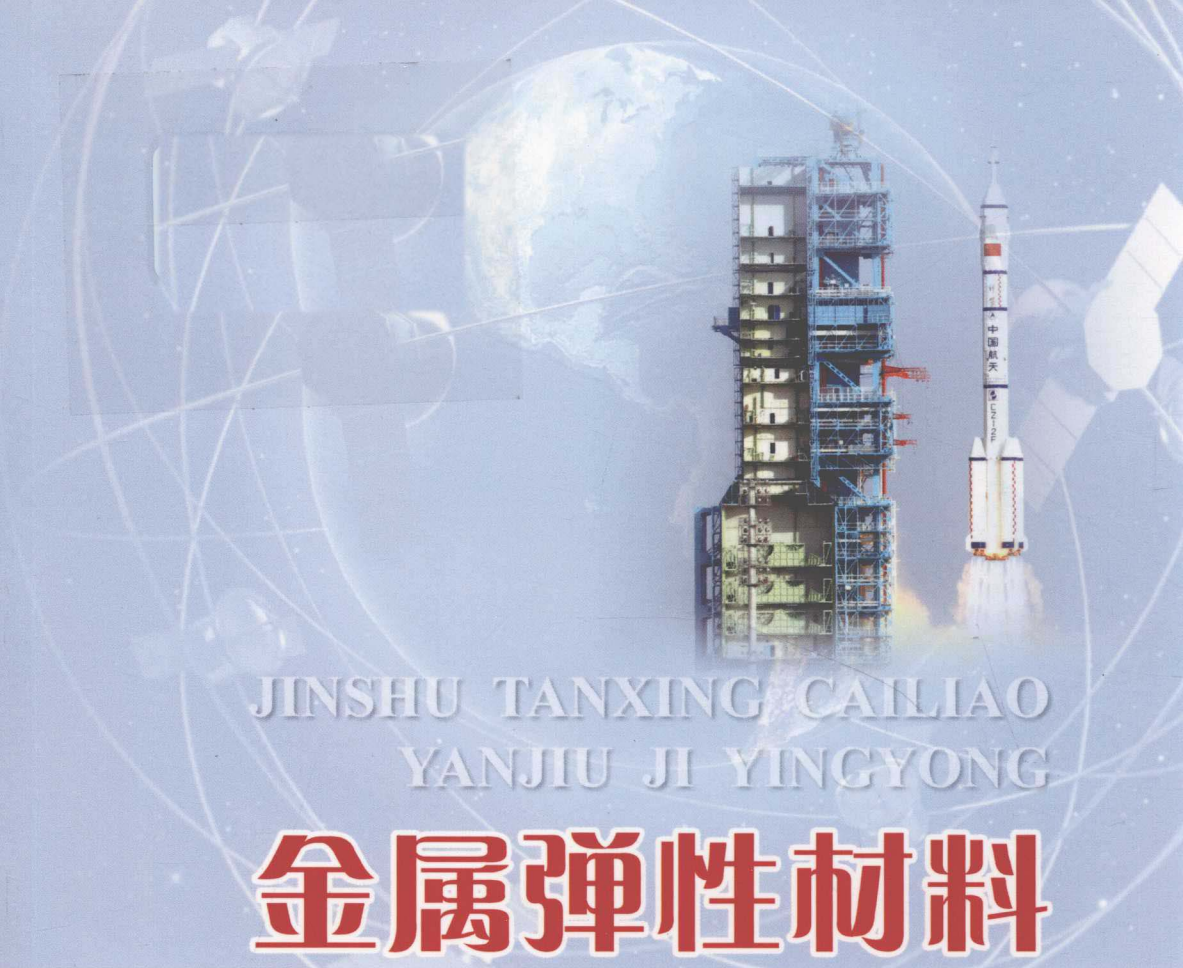




JINSHU TANXING CAILIAO
YANJIU JI YINGYONG

金属弹性材料 研究及应用

吴淑媛 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

金属弹性材料研究及应用

吴淑媛 编著

北 京
冶金工业出版社
2018

内 容 简 介

本书共 13 章。前 9 章主要从基本物理概念出发,介绍与弹性材料有关的基础理论知识,通过阐述弹性、塑性变形机理和应力应变的关系,对 150 多个牌号的组织、性能、用途做了介绍;后 4 章主要阐明弹性材料的分类、化学组成、组织结构、性质、特点和用途。

本书可供从事金属材料研发、生产、工艺技术研究工作的科技人员、工程技术人员参考,也可供大专院校相关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

金属弹性材料研究及应用/吴淑媛编著. —北京:
冶金工业出版社, 2018. 10

ISBN 978-7-5024-7866-7

I. ①金… II. ①吴… III. ①金属材料—弹性材料
—研究 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 216563 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 李培禄 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹蕊

责任校对 石静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7866-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京建宏印刷有限公司印刷

2018 年 10 月第 1 版, 2018 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 13 印张; 253 千字; 197 页

55.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

弹性材料是精密合金的组成部分，是精密仪器仪表及精密制造工业中不可缺少的材料。中华人民共和国成立以来，为了适应国防和工业建设的需要，我国建立了研究和生产精密合金的基地。至1964年，弹性合金的生产、研究已初具规模，品种、质量及数量与日俱增。作者从到全国各地访问用户、了解弹性材料的使用情况和对材料的具体要求开始，自始至终都参加了原冶金部组织的弹性材料标准的实验和制订工作。这些工作不仅加深了人们对弹性材料的认识，而且对我国“四化”建设起到了积极作用。本书以标准中所列牌号为准，给出的性能、数据、曲线和图表主要为笔者多年来在科研、试制和生产中积累的实测数据，为求得数据的准确，相继得到中国科学院物理研究所、中国金属研究所（沈阳）、鞍山钢铁厂中心实验室的协助测试，余者便是引自国内外的有关资料。实践得知，弹性材料研究是一门介于软磁合金、膨胀合金、电阻合金和高温合金之间的边缘科学，它始于弹性和滞弹性，并为科学家所继续。因此本书具有以下四方面特点：

（1）把材料研究与应用以及彼此间微妙的相互渗透的关系紧密地结合起来。

（2）从实践中汲取事实，并以新概念丰富这种实践。

（3）为方便读者材料按用途分类。

（4）本书对150多个牌号的性能、用途作了介绍，具有手册性的特点。

鉴于本书涉及的知识面广，且尚处于不断发展阶段，所以力求编著的内容在有一定广度的基础上，突出那些比较成熟、比较实用的材料。为此对3J1、3J21、3J53、3J40等合金的性质、用途、成分、主要工艺参数及组织结构做了比较系统的介绍，从而也可作为入门性的

读物。

在我所经手的弹性材料中，加工难度最大的是 3J40 合金，虽然它的耐磨性和抗蚀性都优于其他合金，尤其是钴基合金，可现在世界各国都无一例外地使用钴基合金材料做轴尖。我认为这是个误区，这是根据我亲力亲为二十多年工作实践得出的结论。而得到 $\phi 0.003\text{mm}$ 的微细丝则更是难上加难，可以说是前无古人所为。我认为有责任把它传承下去，这也是我写这本书的目的。

吴淑媛

2018 年 5 月

书用主要的物理量符号

σ_b ——破断强度, MPa	D ——流体静压力压缩模量, MPa
σ_s ——屈服极限, MPa	f_c ——扭转振动频率, Hz
σ_e ——弹性极限, MPa	f_L ——垂直振动频率, Hz
σ_{-b} ——压缩强度极限, MPa	θ^{-1} ——内耗
δ ——伸长率, %	H ——激活能
ε ——变形程度, %	T_c ——居里温度, $^{\circ}\text{C}$
ψ ——面缩率、变形量、减面率, %	λ_s ——饱和磁致伸缩系数 ($\times 10^{-6}$), $^{\circ}\text{C}^{-1}$
ϕ ——直径, mm	H_c ——磁矫顽力
μ ——泊松比或横向变形系数	k_{α} ——磁各向异性常数
γ ——剪切的相对变形, rad	k_{π} ——矩形系数
e ——弹簧刚度系数	β_g ——剪切模量温度系数 ($\times 10^{-6}$), $^{\circ}\text{C}^{-1}$
$\sigma_{0.2}$ ——条件屈服极限, MPa	β_{tg} ——剪切频率温度系数 ($\times 10^{-6}$), $^{\circ}\text{C}^{-1}$
$\sigma_{0.002}$ ——弹性极限, MPa	α ——线膨胀系数 ($\times 10^{-6}$), $^{\circ}\text{C}^{-1}$
σ_k ——断裂强度, MPa	ρ ——电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}/\text{m}$
HB——布氏硬度	M_n ——扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$
HRC——洛氏硬度	J_p ——极惯性矩, cm^4
HV——维氏硬度, MPa	W_p ——抗扭截面模量, cm^3
a_K ——冲击韧性, MPa	W_z ——抗弯截面模量, cm^3
τ ——剪应力, MPa	β ——弹性模量温度系数 ($\times 10^{-6}$), $^{\circ}\text{C}^{-1}$
ε_e ——弹性应变	Q ——机械品质因数
E ——弹性模量, MPa	
G ——剪切模量 (切变弹性模量), MPa	

目 录

1 弹性材料的基本物理概念	1
1.1 晶体的构造与结晶	1
1.2 金属与合金的结构	4
1.2.1 金属的结构	4
1.2.2 合金的结构	5
1.3 弹塑性变形和强度	7
1.3.1 弹塑性变形的基本概念	7
1.3.2 材料弹塑性变形的基本类型	8
1.4 金属的塑性与超塑性变形	19
1.4.1 金属的塑性变形	19
1.4.2 超塑性	21
2 应力应变及其理论	25
2.1 金属材料的力学性能和组织的关系	25
2.1.1 屈服应力与组织的关系	25
2.1.2 强度与组织的关系	26
2.1.3 硬度与组织的关系	26
2.1.4 金属的塑性指标以及塑性与硬度和强度的关系	26
2.1.5 塑性和韧性与金属材料内部组织的关系	27
2.2 主应力的概念及应力状态的形式	27
2.2.1 主应力的概念	27
2.2.2 广义虎克定律与体积变形	30
2.2.3 复杂应力状态下的弹性变形能	32
2.3 应力应变的测定	33
2.3.1 电阻片	33
2.3.2 应变仪	34
2.3.3 基本变形时应力应变的测定	35
3 残余应力	37

3.1 残余应力的分类	37
3.1.1 宏观残余应力	37
3.1.2 微观残余应力	38
3.2 热处理过程产生残余应力的机理	38
3.2.1 由热应力产生的残余应力	38
3.2.2 由热应力和相变应力产生的残余应力	39
3.2.3 残余应力产生的过程	40
3.2.4 冷压力加工过程产生的残余应力	41
3.2.5 铸造残余应力的产生	43
3.3 残余应力产生的后果	44
3.3.1 残余应力对硬度的影响	44
3.3.2 残余应力对结构件静稳定性的影响	45
3.3.3 残余应力对疲劳的影响	45
3.3.4 残余应力对脆性破坏的影响	46
3.3.5 残余应力对腐蚀开裂的影响	46
3.4 残余应力的消除和调整	47
3.4.1 用加热的方法消除和调整残余应力	47
3.4.2 用机械方法消除和调整残余应力	48
4 线弹性脆性断裂	50
4.1 合金的滞后断裂	50
4.1.1 应变时效型氢脆和氢化物型氢脆	50
4.1.2 氢在金属中的扩散及氢与位错的交互作用	51
4.2 应力强度因子 K	52
4.2.1 裂纹区的应力分析	52
4.2.2 应力强度因子 K 的概念	53
4.3 能量原理	53
5 金属的弹性	54
5.1 表征弹性的基本量	55
5.2 影响弹性模量的因素	56
5.3 铁磁材料的弹性	58
6 金属的滞弹性	60
6.1 内耗与弛豫谱	60

6.1.1 金属的内耗	62
6.1.2 合金的内耗	63
6.1.3 不同因素对内耗的影响	63
6.2 弹性后效	64
6.2.1 弹性后效的基本概念	64
6.2.2 弹性后效的物理意义	65
6.2.3 影响弹性后效的因素	65
7 金属及弹性合金的塑性	67
7.1 合金的化学成分和组织状态对塑性的影响	68
7.1.1 弹性合金中各金属元素的作用	68
7.1.2 金属或合金组织结构对塑性的影响	76
7.2 变形时的温度和速度对塑性的影响	76
8 弹性的铁磁性反常现象	78
8.1 铁磁与非铁磁的区别	78
8.2 影响铁磁性的因素	78
8.3 铁磁性多相合金的性质	79
8.4 磁致伸缩系数的测量	79
8.5 磁化过程	80
8.6 弹性的铁磁性反常	82
9 弹性模量的反常	84
9.1 弹性合金的因瓦和艾林瓦效应	84
9.2 铁磁合金的磁致伸缩特性	88
10 弹性合金性能的测量	90
11 弹性合金概述	92
12 高弹性合金	94
12.1 高弹性合金的特性	94
12.2 高弹性合金的分类	95
12.2.1 高温高弹性合金	95
12.2.2 高比例极限高弹性合金	125

12.2.3	导磁高弹性合金	127
12.2.4	耐磨高弹性合金	128
12.2.5	低热膨胀高弹性合金	136
12.2.6	超低温高弹性合金	137
13	恒弹性合金	138
13.1	频率元件用恒弹性合金	138
13.1.1	频率元件用恒弹性合金的性能	138
13.1.2	频率元件用恒弹性合金的实验	143
13.2	弹性敏感元件用恒弹性合金	166
13.2.1	3J53 合金的组织结构	167
13.2.2	3J53 合金的物理及力学性能	168
13.3	仪表游丝用恒弹性合金	179
13.3.1	仪表用游丝的概况	179
13.3.2	对仪表游丝的性能要求	179
13.3.3	手表游丝用恒弹性合金	184
附录		192
参考文献		196

1 弹性材料的基本物理概念

1.1 晶体的构造与结晶

弹性合金同一切固体物质一样，分为晶体和非晶体两大类（也称为晶态和非晶态）。

晶体是由原子或离子、分子等按一定的周期排列而成的，如 3J1、3J21、3J53 等合金。非晶体，内部原子的排列则没有明确的周期性，例如 $\text{Fe}_{73}\text{Si}_{10}\text{B}_{12}$ 、 $\text{Fe}_{67}\text{Cr}_4\text{Mo}_{1-6}\text{B}_{28}$ 、 $(\text{Fe}_{65}, \text{Ni}_{50}, \text{Co}_{50})\text{Mo}_{25-40}\text{B}_{10}$ 、 $\text{F}_{56}\text{Cr}_{26}\text{C}_{18}$ 、 $\text{Fe}_{46}\text{Cr}_{16}\text{Mo}_{20}\text{C}_{18}$ 、 $\text{Mo}_{60}\text{Fe}_{20}\text{B}_{20}$ 、 $\text{Ti}_{50}\text{Be}_{40}\text{Zr}_{10}$ 等合金。目前弹性材料所研究的领域主要是晶态（体），故在以后的叙述过程中，如无特别指明都是指晶态（体）。

由于非晶体的内部原子排列没有一定的周期性，故非晶体没有一定的几何形状，当受外力敲击成碎片时，所得碎片形状是各不相同的，而各种晶体则各有一定的几何形状。每个晶体的表面由若干对称平面所组成，晶体受外力打击成小块，是沿着某一平面裂开的（这个平面叫做解理面）。裂开后变成多个小晶体，并保持原有晶体的形状。

晶体的最大特点是它具有各向异性的性质，即晶体的各种物理性质常常随着不同的方向而变。无论硬度、弹性模量、强度等力的性质，线膨胀系数、导热系数等热的性质，折射率等光的性质以及电阻系数、电极化强度等电的性质都是如此。非晶体与此相反，它们的物理特性是各向同性的，即不随方向而变。

晶体溶解时有一定的温度。如果加热某一晶体，当温度升到一定数值时，它才开始溶解。在溶解时，晶体虽吸收热量，从固态过渡到液态，但温度恒定不变。只有当晶体全部溶解后，温度才继续上升。溶解后的晶体因放热而凝固时，情形也与上述相同，而且在相同压强下，凝固温度等于溶解温度。可见晶体的固、液两态界限分得很明确，溶解或凝固温度十分确定。非晶体与此完全不同。当温度升高时，非晶体逐渐软化，软化程度随温度升高而增大，最后完全过渡到液态。溶解后的非晶体因冷却而过渡到固态时也是逐渐的。所以非晶体没有明确的溶解或凝固温度，它的固、液两态没有明确的界限，因此非晶体可认为是黏滞性很大的液体。

按晶体结构不同，晶体又可分为单晶体和多晶体。有些物质的晶体（如石

英、方解石等)，在它的全部体积中，含有完全一样的晶体结构，这类晶体叫做单晶体。而弹性合金是由许多晶体结构相同但是任意排列而且大小不等的小晶体所组成，这类晶体叫做多晶体。多晶体的物理性质几乎是各向同性的。多晶体裂开时没有一定的解理面。但多晶体仍然有明确的溶解和凝固温度。

晶体外形的对称性、各向异性等性质，与构成晶体的粒子（原子、分子、离子）的对称排列有着密切的联系。这种对称排列叫做晶体点阵或晶体格子（简称晶格）。晶体点阵是一切晶体所特有的，因此晶体可定义为：凡固体的粒子在空间按一定点阵排列者，这个固体就称为晶体。

晶体点阵按照微粒的性质，可分为离子、原子及分子三种类型。

离子晶体点阵是由正负离子交替排列而成的，例如岩盐的点阵是由带正电的钠离子和带负电的氯离子所组成，每一个离子都占据一个立方体的角。

原子晶体点阵完全由中性原子所组成，碳化硅、金刚石是这类晶体的代表。这类晶体的特点是具有很小的电子和离子导电性、很高的硬度和不显见的解理性。

金属晶体点阵由金属元素正离子所组成。从原子中分离出来的电子（原子中的价电子），可以在点阵中自由运动，好像容器中气体分子的运动一样。这些自由电子参加热运动，并起导电作用。所以金属的特点是具有良好的导电性和导热性。金属也具有高强度和塑性。

分子晶体点阵由坚固的分子所组成。多原子化合物的晶体例如 P_2O_5 、 SO_2 属于这一类。这种晶体的特点是具有低熔点和低沸点。

按着晶体点阵的形式，还可以把晶体分成若干晶系。晶体中最小的单位称为晶胞。沿着晶胞交于一个顶点的三条边做三条轴线，则如图 1-1 所示，晶胞的三个边长 a 、 b 、 c 和轴线的三个夹角 α 、 β 、 γ 这六个数称为晶胞参数或晶格参数。这些参数表示出晶胞的大小和形状，将晶胞沿着三条轴线叠加起来，就成为整个晶体。

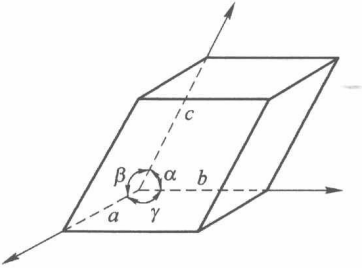
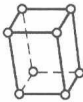


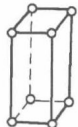
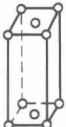
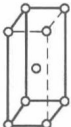
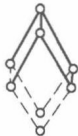
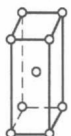
图 1-1 晶胞参数

按晶胞参数可将晶体分为 7 种主要晶系，它们的名称和形状见表 1-1。

表 1-1 主要晶系的名称和形状

晶系	原始点阵	底心点阵	体心点阵	面心点阵	晶胞参数
三斜					$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

续表 1-1

晶系	原始点阵	底心点阵	体心点阵	面心点阵	晶胞参数
单斜					$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$
斜方					$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
三方					$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
四方					$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
六方					$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$
立方					$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

其中三斜晶系具有最大的普遍性（因为 6 个参数都不相同），立方晶系因边长相等而且轴线互成直角故形状整齐，其他晶系则介于这两者之间。

原子在晶胞中占据各种不同的位置。在表 1-1 中列出了四种最简单的位置。在原始点阵中，每一个角上有一个原子。在底心点阵中，除每个角上有原子外，在上下底面的中心也有原子。在面心点阵中，除每个角上有原子外，在每个面的中心还有一个原子。

上面简单介绍了晶体的结构。必须指出，这里所说的晶体点阵是理想化的。在实际晶体上，总存在着一些缺陷，如空位或混有杂质等。另外，晶体中的原子也在平衡位置附近作热振动。

结晶：溶解后的晶体冷却时所发生的凝固过程称为结晶过程，凝固温度称为结晶温度。

仔细观察溶液的结晶过程发现，溶液开始结晶时的温度往往低于溶解曲线上对应于某一压强的温度。如果我们很小心地将纯粹的液体放在干净的容器内，使它毫无振动地冷却，就可使液体温度降到平衡结晶温度以下若干度，液体仍不结晶。这种低于平衡结晶温度的液体称为过冷液体。结晶温度与物质纯度及外界影响（振动）有密切关系。

结晶过程是这样的：首先在液体中生成晶核（结晶中心），然后由晶核长大成晶体。晶核的产生与液体的过冷程度、内部的能量起伏以及杂质含量等有密切的关系。由于能量起伏，液体中各处的温度不是完全一样的，有的高于平均温度，有的低于平均温度，晶核最容易在温度最低的地方产生。液体中总存在着少量的杂质，各种杂质又不可能完全被溶解。这样，没有被溶解的杂质微粒就最容易成为液体的结晶中心。

如果整个晶体是由一个晶核长大而成的，显然这种晶体是单晶体。但对于弹性合金或各种金属来说，结晶开始后，晶核的数目是不断增加的，晶核的长大与晶核的产生是同时进行的。当由晶核长成的小晶体分散各处尚未接触以前，每个小晶体都被液体所包围，因而这些小晶体的形状是有规则的。但当小晶体继续长大受到相邻小晶体的限制时，小晶体的形状就变为不规则的。这样我们就不难理解为什么金属或合金是由许多大小不一、形状不同的小晶体所组成的多晶体。

1.2 金属与合金的结构

1.2.1 金属的结构

金属又可分为简单金属和过渡金属两类。凡是内电子壳层完全被填满或完全空着的那些元素均属于简单金属，而内电子壳层未完全填满的元素则属于过渡金属。

简单金属元素形成晶体时，是以交出外层价电子的方式而进行相互结合的。可以根据元素最外层的价电子数决定原子价。但是在过渡族元素中，除去最外层的价电子以外，还有其他未填满的电子层，所以它们的结合可能是比较复杂的，原子价可以变化。

由于金属键没有明确的方向性与饱和性，因此可以近似地将金属的原子看成是相互吸引的钢球，结合成晶体时，它们要尽可能地靠近而形成所谓的密集结构。因此典型的金属晶格结构有下列三种：体心立方结构，配位数为 8；面心立方结构，配位数为 12；密集六方结构，配位数为 12。

面心立方结构中原子间的最短距离为 $\sqrt{2}a/2$ ， a 为单位立方体的边长。若把

原子所占的体积与这些原子所组成的格子的总体积之比称为紧密系数，则对面心结构来说，这个系数是 0.74。

体心立方结构是不够紧密的，其紧密系数为 0.68。其中每个原子有 8 个与它相距为 $\sqrt{3}a/2$ 的临近原子，故这种结构的配位数为 8。也有人认为在 8 个原子之外还有 6 个与它相距为 a 的次邻近原子。这个次邻近原子与该原子间的距离只比邻近原子与该原子间的距离远 15%，因此配位数是 8+6。

密集六方结构的紧密系数也等于 0.74。其中每个原子都有 6 个与它相距为 a 的邻近原子（在同层上），以及在上下邻近层上还有 6 个邻近原子（上下层各 3

个)。设 a 为底边之长, c 为垂边之长, 若轴比 $\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1.633$, 则 12 个邻近原

子正好分布在相等的距离 a 上，配位数正好为 12。一般六方结构金属中 $\frac{c}{a}$ 的比值在 1.57~1.64 的范围内变动。

属于体心立方结构的金属有：锂、钠、钾、铷、铯、钡、钛、锆、钒、铌、钽、铬、钼、钨、铁等。

属于面心立方结构的金属有：钙、锶、铝、铜、银、金、铂、铀、铯、钡、铅、钴、镍、铁、铈、钍等。

属于密集六方结构的金属有：铍、镁、钙、钪、钇、镧、铈、镨、钕、铀、钼、钛、锆、 hafnium、铟、锡、铅、汞等。

有些金属的晶体结构可以有几种存在形式，如 Fe 有体心立方结构也有面心立方结构。这种情形称为多型性转变。

从金属晶体的晶胞参数，可以求出两个邻近金属原子间的距离，此距离的一半就称为金属的原子半径。金属原子半径随配位数的不同而稍有变化。如配位数为 12 的面心立方结构与密集立方结构的金属原子半径为 1.00，则配位数为 8 的体心立方结构的金属原子半径为 0.97。

1.2.2 合金的结构

把几种金属元素熔合成一体所得到的物质称为合金。合金的种类很多，其物理性能与合金的结构有密切的关系。组成合金的元素可以互相溶解而形成所谓的固溶体，或者进行化合作用而形成化合物，另外尚能形成以上两者都不能包括的相，称为中间相。下面对这三种合金的结构特点分别加以说明。

1.2.2.1 固溶体

固溶体是固态的溶液，其中一种元素可以认为是溶剂，另一种较少量的金属元素或非金属元素可以认为是溶解在溶剂中的溶质。组成合金的元素称为组元。

固溶体可以分成填隙式与替代式两种类型。如以二元合金为例,若 B 原子无规则地溶解在金属晶体 A 的间隙位置中,则称它为间隙式固溶体。晶体的间隙位置一般只能容纳较小的原子,如氢、硼、碳、氮、氧等,才可以占据间隙位置形成填隙式固溶体。

若 B 原子无规则地在金属 A 的晶格中替代了 A 原子,则称这样形成的固溶体为替代式固溶体。替代式固溶体又根据溶质元素的溶解度是有限还是无限,而分成两大类。

若两种组元在各种成分下都可以互相溶解时,则称为无限固溶体。经验证明,若形成无限固溶体,两种组元金属必须具有相同的晶体结构类型,它们的原子半径之差要小于 15%,并且它们在周期表中处于相邻的位置,即它们的价数相近。若不符合上述条件,则一般溶质原子在固溶体中的溶解度就是有限的,而形成所谓的有限固溶体。通常,高价金属溶于低价金属比后者溶于前者的量要多。即溶质的价越高,最大溶解度就越低。

有限固溶体或无限固溶体都可能存在有序化状态。在替代式固溶体中,若溶质原子无规则地占据溶剂晶格上的格点,则称为无限固溶体。但是许多实验证明,当温度较低时,溶质原子的无序排列过渡到有序排列,而形成有序固溶体。这种过程称为有序化。实验得知,固溶体从有序到无序的转变,是一个突变过程,存在着一个转变温度 T_c ,常称为合金的“居里点”。在绝对零度下,合金处于完全有序状态。当温度由低于 T_c 升高到高于 T_c 时,合金的无序程度将突然增加,变到完全无序状态,并且在转变温度的附近,合金的许多物理性能,如比热容、电阻率、弹性模量、温度系数、线膨胀系数等也都要发生突变。

1.2.2.2 化合物

若合金是由组成元素通过化学作用形成的,且其成分是固定的,并可用简单的原子浓度比表示,则我们称这类合金为金属化合物。

1.2.2.3 中间相

上面所说的化合物,有一定的原子比,可用单一的化学式来表示,故又称为正常价化合物。但另外尚有很多金属化合物,仍属于金属键的类型,成分往往可以在一个范围内变动,不能用单一的化学式来表示。这是一种不能包括在固溶体和正常化合物中的相,称为中间相。其中主要有电子化合物和间隙相。

电子化合物是由两种金属组成的,其中一种为一价的金属 (Cu、Ag、Au、Li 及 Na) 或过渡族金属 (Mn、Fe、Co、Ni、Rh、Pd、Pt、La 及 Pr),而另一种称为普通 2~5 价的金属 (Be、Mg、Zn、Cd、Hg、Al、Ga、In、Si、Ge、Sn、As 及 Sb)。这种化合物的特点是,价电子数目与原子数目之间具有一定的比例,即

3 : 2、21 : 13、7 : 4 等。每一比值均对应于一定的晶格结构。

如果某一合金相，它们的晶体结构相同，都是体心立方结构（或都是面心或六方结构），虽然它们的原子百分数很不相同，但价电子总数与原子总数之比值（称为电子浓度）相同，可见这类化合物的结构决定于电子浓度，故称为电子化合物。经验表明，当电子浓度为 3 : 2 时，化合物具有体心立方晶格结构（称为 β 相）；当电子浓度为 21 : 13 时化合物具有复杂的立方晶格结构，单位晶格含有 52 个原子（称为 γ 相），如 α -Mn 所具有的晶格就属于这种结构；当电子浓度为 7 : 4 时，具有密集六方晶格结构。总之在同一种合金系中，随着成分的变化，可以出现不同的电子浓度，从而反应出 2~3 个相。由以上这些特点，我们可把电子化合物认为是介于正常价化合物与固溶体之间的中间相，如 Cu_3Al 。

间隙相是由过渡族金属元素与原子半径较小的非金属元素（氢的 $r_{\text{H}} = 0.045\text{nm}$ ，氮的 $r_{\text{N}} = 0.071\text{nm}$ ，碳的 $r_{\text{C}} = 0.077\text{nm}$ ，硼的 $r_{\text{B}} = 0.097\text{nm}$ ）化合而成的。只有当非金属的原子半径（ r_{X} ）与金属原子半径（ r_{M} ）之比小于 0.59 时，金属原子才能形成普通简单的晶格结构，在晶格的间隙中填入非金属原子。适合这种比值的结构，才称为间隙相。

间隙相与有限固溶体不同，它的特点在于几乎所有的间隙相都具有与形成它的母体金属不同的晶格结构。

间隙相具有高熔点及高硬度。

1.3 弹塑性变形和强度

1.3.1 弹塑性变形的基本概念

把一根长为 L 、截面面积为 S 的棒，一端固定，一端悬挂重物 P ，逐渐增大 P ，同时测定棒的伸长 ΔL ，直到将棒拉断为止。这就是在拉伸试验机上做的拉伸实验。以应变 $\frac{\Delta L}{L}$ 为横坐标，应力 $\frac{F}{S}$ 为纵坐标，就可以画出一条曲线，如图 1-2 中 $OABC$ 所示， C 是断点。曲线 OA 段表示，当应变不太大时应变与应力呈直线关系，即遵从虎克定律。这时如果移去重量，棒仍可恢复至原来长度。这种变形称为弹性变形， OA 段称为弹性范围， A 点称为弹性极限。曲线 ABC 段表示，超过弹性极限后，应变与应力不再呈直线关系。这时，如将重量移去，棒不再恢复原来长度。例如在 B 点撤去重量，棒将保持剩余应变 AB 。这种变形称为塑性变形， AC 段称为塑性范围， C 点是断点，对应于 C 点的应力称为强度极限。

根据这种弹性范围和塑性范围的大小，物质常被分为下述三类：弹性范围比较大的物质称为弹性物质，金属及合金即属于这类；塑性范围很小的物质称为脆性物质，这种物质只能产生很小的剩余应变，同时弹性范围也比较小，铸铁、合