



形状记忆材料

主译 张春才 苏佳灿 Shape Memory Materials

主审 褚幼义 杨大智



第二军医大学出版社

形状记忆材料

主 译 张春才 苏佳灿
副主译 许硕贵 吴建国

第二军医大学出版社

PUBLISHED BY THE PRESS SYNDICATE OF THE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE
The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom

© Cambridge University Press 1998

This book is in copyright. Subject to statutory exception
and to the provisions of relevant collective licensing agreements,
no reproduction of any part may take place without
the written permission of Cambridge University Press

图书在版编目(CIP)数据

形状记忆材料/张春才,苏佳灿主译. —上海:第二军医大学出版社,2003.9

ISBN 7-81060-327-2

I.形... II.①张...②苏... III.形状记忆合金 IV.TG139

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 062833 号

形 状 记 忆 材 料

主 译 张春才 苏佳灿

副 主 译 许硕贵 吴建国

第二军医大学出版社出版发行

(上海翔殷路 818 号 邮政编码:200433)

全国各地新华书店经销

江苏句容排印厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:328 千字

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

印数:1~2 000 册

ISBN 7-81060-327-2/T·009

定价:30.00 元

译者序

日新月异的高科技、新材料的问世是当今社会发展的一个重要特征。形状记忆材料,就是材料学中少有的瑰宝之一。

镍钛形状记忆合金以其著名的耐磨、耐腐和独特的力学行为而夺材料群雄之冠。她的神奇功能,业已在当代航天、汽车、电子、医学等领域,日益发挥着越来越重要的作用。

笔者与同仁,职为骨科医生,近 20 年来,好奇、兴趣于镍钛形状记忆合金对医学发展所带来的应用潜力。新材料与骨科难题的交叉,所迸发出的火花,为我们解决了不少临床疑难杂症。例如:聚醚器能将粉碎的髌骨记忆愈合于解剖位,避免了部分或全髌切除所致的残疾。三维骨盆和髌臼内固定系统,不仅能使粉碎的骨折回复解剖位,而且临床疗效卓著,亦使年轻人免受全髌置换术之苦。天鹅型系列接骨器,其三维记忆接骨的无骨痂、无萎缩、无应力遮挡效应的板状骨愈合现象,是当代骨科领域内 AO/BO 理论所无法解释的。这预示着:随着新材料的出现和合理设计的诞生,为我们探索骨折愈合之迷,另辟出了一条新的途径。我们将这种新的现象,称之为记忆成骨(memory osteosynthesis, MO)。

为了揭示 MO 的本质,在材料与力学方面,我们学习和聆听了我国著名冶金材料学家柯俊、褚幼义、杨大智、赵连成、吴杏芳、许家龙、丁祖泉、郭锦芳、周守理、秦桂英、郑定中、张巽奇等教授的悉心教诲。在医学方面,我们于扬弃 AO/BO 的同时,得到了我国著名医学家王澍寰、郭世绂、胥少汀、刘植珊、王亦璁、卢世璧、薛森、徐莘香、赵定麟、雍宜民、李起鸿、王正国、邱贵兴、吕厚山、贾连顺、张铁良、王继芳、侯树勋、蔡锦芳、赵炬才、顾湘杰、陈峥嵘、杨庆铭、周之德、王家让等教授的亲切指导。同时,得到了我国著名的年轻骨科专家侯铁胜、吴岳嵩、王岩、王爱民、吕德成、荆安民、梁雨田、沈惠良、刘一、蔡郑东、李明、赵杰等教授的大力支持。

至此,坦诚了我们翻译本书的动力和目的。

本书是国外第二部关于形状记忆材料的英文专著,详细介绍了形状记忆效应的基础理论和各种形状记忆材料特性以及形状记忆材料在相关领域的应用。

在本书翻译过程中,我国著名的形状记忆材料学专家褚幼义教授、杨大智教授给予了热情的鼓励并不辞辛劳为译著进行了细心的审校。

本书的翻译,得到了第二军医大学黄伟灿副校长、长海医院李静院长、方国恩副院长、连斌主任的大力支持和关心,特此鸣谢。

由于译者们的专业差异和翻译能力所限,特别是在繁重的医疗、教学和科研工作之余完成,肯定存在许多不妥之处。我们衷心希望读者给予批评指正,不胜感谢。

译者诚望本书能为我国的医学、材料学更进一步的交叉与发展,带来启迪与火花,造福于人类的健康事业。

第二军医大学长海医院骨科

张春才

2003年6月8日

序

形状记忆合金是一种具有形状记忆效应和超弹性特性的神奇材料,这是普通金属和合金所不具有的。这种独特的特性是1951年首先在Au-47.5% Cd合金中发现的,并于1963年在Ti-Ni合金的研究报告中公开发表。在合金材料的许多研究和发展之后,形状记忆合金现在被作为一种新型功能性合金应用于管道连接、蜂窝电话天线和电子产品的各种驱动器,等等。此外,它们获得进一步的关注是由于这是一种可供选择的“智能”材料。它们作为传感器与驱动器的功能一样优良。在这些环境下,许多国际会议和座谈会都以此作为主题,也因此而出版了许多会议录。但是除此而外,关于此类课题的系统书籍仍然很少,尤其是英文著作。这也是作者计划出版这本专著的主要动力。本书的主要目的在于详细介绍从基础到应用的各种形状记忆合金各方面问题。

由于形状记忆效应和超弹性都是基于称为马氏体相变的非扩散相变、形变的基本概念和特性,以及形状记忆效应和超弹性机制都在前两章进行描述。在重点讲述了最重要的形状记忆合金即Ti-Ni合金之后,再介绍了许多不同的形状记忆合金。在应用章节,从作用机制出发,如构造技术和合金特性方面详细介绍形状记忆合金的设计原理。

作为本书的另一特点,专设了形状记忆陶瓷和聚合物章节的介绍。前者的形状记忆效应为类电相到亚铁相,或反铁电相到亚铁电相的相变,并与其他合金具有较小的形状记忆应变。但是,前者的反应快于后者,这是由于前者是电子驱动的。在某些聚合物中形状记忆效应归因于玻璃体相变。虽然聚合物在高温状态下强度不够,但他们是非电子传导的。这样,虽然他们的起源和特异有很大差异,但在实际应用方面却常常被作为形状记忆合金的补充。

在本书写作和编辑过程中,我们尽可能做到精益求精,使之精确、清晰和信息多元化。我们希望本书对基础或实用领域的研究者,以及

材料科学和机械工程学的学生有所帮助,而且有助于主要领域研究的进一步深入。

最后,我们向剑桥大学出版社,Simon Capelin 博士,表达我们诚挚的感谢,由于他的兴趣、鼓励和耐心,才会有本书的出版。

K Otsuka
CM Wayman

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 形状记忆效应和马氏体形变的概念	2
1.2 马氏体相变晶体学	5
1.3 马氏体相变热力学	15
第 2 章 形状记忆效应和超弹性机制	19
2.1 应力诱发马氏体相变和超弹性	19
2.2 形状记忆效应	26
2.3 类橡皮行为	31
2.4 术语	31
第 3 章 Ti-Ni 形状记忆合金	36
3.1 结构与相变	36
3.2 Ti-Ni 合金的力学行为	41
3.3 三元合金	51
3.4 马氏体自适应	56
3.5 全程形状记忆效应(双程形状记忆效应)	58
3.6 辐照对形状记忆行为的影响	61
3.7 Ti-Ni 合金溅射沉积薄膜	62
3.8 甩带法制备 Ti-Ni 合金带	64
第 4 章 铜基形状记忆合金	69
4.1 典型 Cu 基形状记忆合金相图	69
4.2 机械行为	72
4.3 形状记忆合金的时效效应	75
4.4 热循环效应	77
4.5 形状记忆合金的改进	78
第 5 章 铁基形状记忆合金	82
5.1 铁马氏体的形态与亚结构	82
5.2 呈现形状记忆效应的铁基合金	83
5.3 α' 薄层状马氏体的形状记忆效应	85
5.4 Fe-Mn-Si 合金中与 ϵ 马氏体有关的形状记忆效应	88
第 6 章 形状记忆合金的制备	94
6.1 Ti-Ni 基合金的制造	95
6.2 Cu-Zn-Al 基合金制备	100

6.3 粉末冶金学和各种方法	101
第7章 形状记忆合金的特性	104
7.1 功能特性梗概	105
7.2 形状记忆行为的热力学概术	106
7.3 双向记忆行为	110
7.4 约束回复——回复应力的产生	111
7.5 高阻尼形状记忆合金	113
7.6 形状记忆合金的循环影响、疲劳和衰减	114
7.7 特性评价	117
第8章 形状记忆陶瓷	128
8.1 新原理驱动器的发展趋势	128
8.2 形状记忆陶瓷	128
8.3 样品准备及实验	132
8.4 电场引起的相变的基本特征	132
8.5 跟形状记忆合金的对比	138
8.6 形状记忆陶瓷的应用	139
8.7 结论	141
第9章 形状记忆聚合物	142
9.1 聚合物材料的形状记忆功能	142
9.2 热响应形状记忆功能	144
9.3 光响应形状记忆功能	149
9.4 化学响应形状记忆功能	152
第10章 形状记忆合金及其智能材料的应用	155
10.1 简介	155
10.2 SMA 的应用历史	155
10.3 SMA 管接头	156
10.4 电接头	159
10.5 纽扣型元件的应用	161
10.6 SMA 超弹性材料的应用史	163
10.7 SMA 应用的选择标准	165
10.8 智能材料	166
第11章 形状记忆合金驱动器的设计及应用	169
11.1 形状记忆合金驱动器的特性	169
11.2 形状记忆合金弹簧的设计	171
11.3 双程驱动器的设计	175
11.4 形状记忆合金驱动器的应用	179
第12章 形状记忆合金的医学及牙科应用	189
12.1 引言	189
12.2 应用实例	189

12.3	耐腐蚀性能·····	195
12.4	洗脱试验·····	196
12.5	生物相容性·····	197

第 1 章 绪 论

K Otsuka CM Wayman

第 1、2 章中符号

A_f 逆相变终止温度	m_1^s 形状应变的切变分量
A_s 逆相变开始温度	M_f 马氏体相变终止温度
B 点阵相变矩阵	M_s 马氏体相变开始温度
d_1 形状应变方向(单位列向量)	p 水静压力
F_d 对角矩阵	p_1' 不变平面法向(惯析面法向)(p_1' 为单位行向量)
F_s 对称矩阵	p_1 形状应变矩阵
g^m 单位体积马氏体的化学自由能	p_2 不变点阵切变矩阵
g^p 单位体积母相的化学自由能	R 菱方晶系(Ramsdel-拉姆斯德尔表示法)
$\Delta g_c = g^m - g^p$ 单位体积马氏体相变化自由能的变化	R 旋转矩阵
G^m 马氏体的吉布期(Gibbs)自由能	s 孪生切变
G^p 母相的吉布期(Gibbs)自由能	ΔS 相变熵
$\Delta G^{p-m} = \Delta G^m - G^p$	T 温度
ΔG^s 外加应力引起自由能的变化	T_0 母相与马氏体的平衡温度
$\Delta G_c = \Delta G^{p-m}$ 马氏体相变的化学自由能变化	V 母相体积
ΔG_e 马氏体相变的应变能	ΔV 马氏体相变的体积变化
$\Delta G_{nc} = \Delta G_s + G_c$ 马氏体相变自由能变化中的非化学项	ϵ 与马氏体相变有关的应变
ΔG_s 马氏体相变引起的表面能	ϵ_c 计算的相变应变
H 六方晶系(Ramsdel-拉姆斯德尔表示法)	η_1 孪生切变方向
ΔH^* 相变焓	η_2 切变平面与 K_2 平面的交线
I 单位矩阵	λ 形状应变的切变分量与拉伸轴的夹角
K_1 孪生面	σ 外加应力
K_2 无畸变面	σ_n 外加应力在惯析面法向上的正应力分量
m_1 形状应变变量	τ 外加应力在形状应变切变分量上的切应力分量
m_1^s 形状应变的膨胀分量($\Delta V/V$)	χ 惯析面与拉伸轴的夹角

1.1 形状记忆效应和马氏体相变的概念

形状记忆效应(shape memory effect, SME)是发生马氏体相变的某些合金的独特性质。图 1-1 给出了一个典型的例子。尽管该合金在低温相的状态下变了形,但是把它加热到某一临界温度(称为逆相变温度),就会通过逆相变而回复到原始形状。这个现象首先由 Chang 和 Read^[1]在 Au47.5%Cd 合金中发现。在 Buehler 等^[2]发现 Ti-Ni 合金后,该效应广泛被人们认识。在此期间和以后发现了许多其他合金,如 In-Tl^[3,4], Cu-Zn^[5]和 Cu-Al-Ni^[6]等(其历史发展见参考文献[7])。这些合金在较高温度下还有另外一种特性,称为“超弹性”(superelasticity, SE),即在加载和卸载过程中可以发生较大(几个到 18%)非线性的可回复应变。由于这些合金具有记忆原始形状的特性、驱动功能以及超弹性,因此当前得到了广泛应用。例如导管

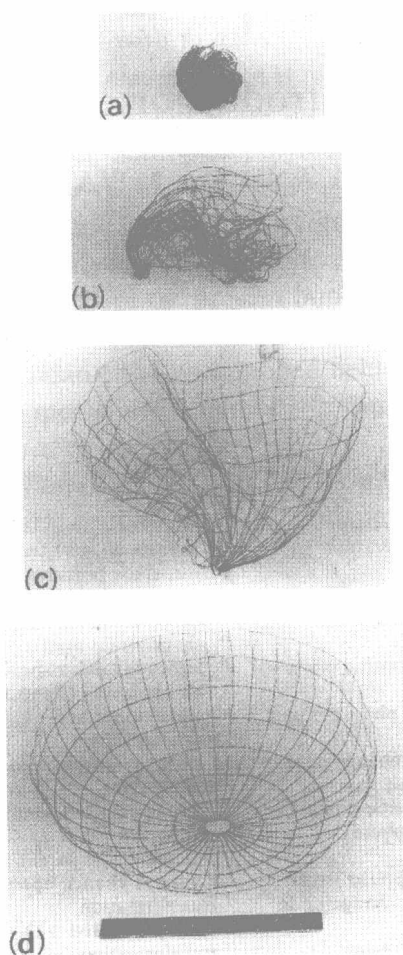


图 1-1 Ti-Ni 金属丝制成的航天器天线的形状记忆效应演示

(a) 天线在马氏体状态下变形; (b)~(d) 由于太阳能的加热使之回复原状的过程(承蒙 Goodyear 航天公司许可)

接头、各种电器驱动器、汽车零件、手机天线以及医用植入物和导线等。此外,它们除了具有驱动功能外,还兼有传感功能,因此有望用于袖珍驱动器,如微型马达、微型机器或机器人等。这些将在后面章节详细讨论。

由于形状记忆效应和超弹性与马氏体相变(martensite transformation, MT)密切相关,因此首先简略地给出马氏体相变的基本概念。在下一节中将作更确切的介绍。马氏体相变是一种固体中的无扩散相变,原子往往以类切变的机制协同移动。通常母相(高温相)是立方晶系,马氏体(低温相)的对称性较低。相变示意地在图 1-2 上给出。如图中所示,当温度降低到某一临界温度以下,马氏体相变以类切变的机制开始发生。在(a)和(b)两个区域中的马氏体结构相同,但取向不同,称为马氏体的对应变体。由于马氏体的对称性较低,在相同的母相中可以形成多个变体。在温度升高的情况下,马氏体不再稳定而发生逆相变(reverse transformation, RT)。倘若在晶体学上是可逆的,则马氏体逆变为初始取向的母相。这就是形状记忆效应的起因,后面将有更详细的介绍。以上例子清楚地表明,马氏体相变的特征是原子的协同运动,因而有时称之为位移相变或军团式相变。这样,即使原子的相对位移很小(相当于原子之间的距离),马氏体相变都会造成宏观上的形状变化,如图 1-2 所示。正是这个原因,马氏体相变与形状记忆效应和超弹性密切相关。

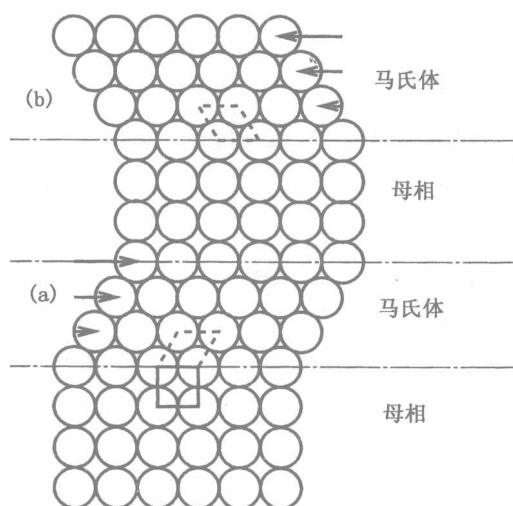


图 1-2 马氏体相变的简化模型(详见正文内容)

图 1-3 是 Cu-Al-Ni 合金中典型马氏体的光学显微照片。光亮对照的平面区域是母相。通过有面浮突效应可以观察到片状形态的马氏体变体。在每个马氏体变体上的薄对照带显示的是孪晶,这将在后面讨论。相似地,当在试样表面上标记一条直线,如图 1-4(c)所示,由于马氏体相变,该直线的方向发生了变化。这些实验清楚地表明与马氏体相变相应的形状变化是线性的,该相变可分别使某一直线和某一平面分别变成另外一条直线和另外一个平面。这意味着,与马氏体相变相应的形状变化,可以用矩阵作为一个算符来加以描述。

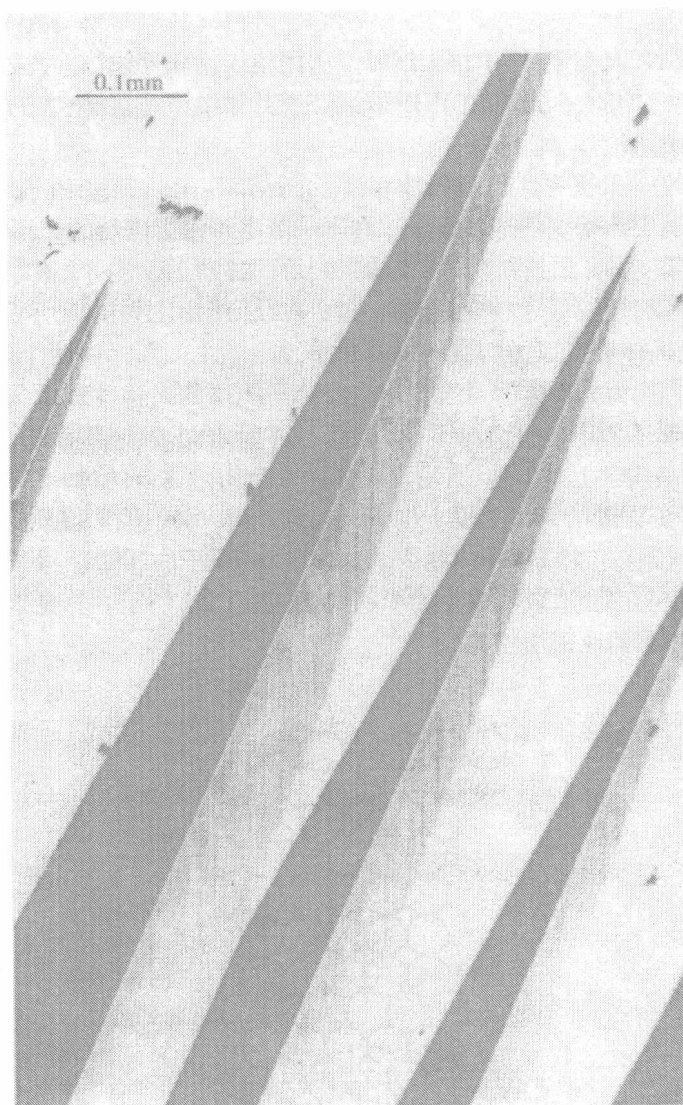


图 1-3 Cu-14.2%、Al-4.2%Ni 合金中的矛状 r_1' 马氏体的光学显微镜照片

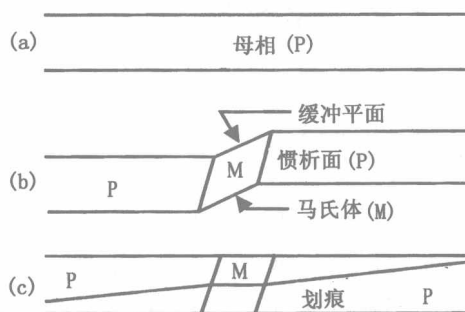


图 1-4 马氏体相变引起的形状变化示意图

(a) 初始母相单晶体; (b) 相变引起的表面浮突; (c) 预先划痕的直线由于马氏体相变而改变方向

(张春才 苏佳灿 译 褚幼义 校)

1.2 马氏体相变晶体学

1.2.1 线性代数描述相变(数学预备知识)

当相变是线性时,可用下述公式来描述相变:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

简化形式,可写为:

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{A} \mathbf{r}_1 \quad (1.2)$$

式中 $\mathbf{A}$ 代表矩阵 a_{ij} 等,即任何矢量 $\mathbf{r}_1$ 可以用矩阵 $\mathbf{A}$ 作为算符变换为 $\mathbf{r}_2$ 。

后面章节中将给出 $\mathbf{A}$ 的一些例子。因为涉及到母相和马氏体,两者有不同的结构,所以在应用线性代数时,还要用到坐标变换。坐标变换中的许多重要公式,适用于任何晶系。假设有两个坐标系,分别具有基矢量 $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ (称为老坐标系)和 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ (称为新坐标系)。这样就可以立即写出方程式(1.3)。用作为方程式(1.3)的函数 $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ 作为 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 的函数可得到方程式(1.4)。这些方程式表示的是在正空间中新老坐标系之间的关系。可以证明在倒易空间中也可得到相似的方程式(1.5)和(1.6),其中 $\mathbf{a}^*, \mathbf{b}^*, \mathbf{c}^*$ 是与 $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ 相对应的倒易空间中的基矢量, $\mathbf{A}^*, \mathbf{B}^*, \mathbf{C}^*$ 则与 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 相对应^[8]。

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= s_{11}\mathbf{a} + s_{12}\mathbf{b} + s_{13}\mathbf{c} \\ \mathbf{B} &= s_{21}\mathbf{a} + s_{22}\mathbf{b} + s_{23}\mathbf{c} \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= s_{31}\mathbf{a} + s_{32}\mathbf{b} + s_{33}\mathbf{c} \\ \mathbf{a} &= t_{11}\mathbf{A} + t_{12}\mathbf{B} + t_{13}\mathbf{C} \\ \mathbf{b} &= t_{21}\mathbf{A} + t_{22}\mathbf{B} + t_{23}\mathbf{C} \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{c} &= t_{31}\mathbf{A} + t_{32}\mathbf{B} + t_{33}\mathbf{C} \\ \mathbf{A}^* &= t_{11}\mathbf{a}^* + t_{21}\mathbf{b}^* + t_{31}\mathbf{c}^* \\ \mathbf{B}^* &= t_{12}\mathbf{a}^* + t_{22}\mathbf{b}^* + t_{32}\mathbf{c}^* \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^* &= t_{13}\mathbf{a}^* + t_{23}\mathbf{b}^* + t_{33}\mathbf{c}^* \\ \mathbf{a}^* &= s_{11}\mathbf{A}^* + s_{21}\mathbf{B}^* + s_{31}\mathbf{C}^* \\ \mathbf{b}^* &= s_{12}\mathbf{A}^* + s_{22}\mathbf{B}^* + s_{32}\mathbf{C}^* \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\mathbf{c}^* = s_{13}\mathbf{A}^* + s_{23}\mathbf{B}^* + s_{33}\mathbf{C}^*$$

此外,还有在正空间和倒易空间中对于任意矢量分量的一些重要公式,给出如下:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{21} & s_{31} \\ s_{12} & s_{22} & s_{32} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

$$\begin{array}{ccc} \text{老} & \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{C} & \text{新} \\ \begin{pmatrix} H \\ K \\ L \end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix} s_{11} & s_{21} & s_{31} \\ s_{12} & s_{22} & s_{32} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix} \\ \text{新} & & & \text{老} \end{array} \quad (1.8)$$

式中, xyz 和 XYZ 属于正点阵(即方向), hkl 和 HKL 属于倒易点阵(即平面)。

当对一个矢量或一个平面进行坐标变换时,也可以按下述的相似变换对某一算符进行变换(证明较简单,参阅文献[9])。

$$\bar{A} = R^{-1}AR \text{ 或 } A = R\bar{A}R^{-1} \quad (1.9)$$

$$\bar{A} = R^TAR \text{ 或 } A = R\bar{A}R^T \text{ (当 } R \text{ 是正交系时)} \quad (1.10)$$

式中: A 是在老坐标系中的算符, $\bar{A}$ 是在新坐标系中的算符, R 是旋转矩阵, R^{-1} 是 R 的逆矩阵, R^T 是 R 的变换矩阵。在马氏体晶体学计算中,因为所用的算符往往属于母相,所以经常要使用上述的相似变换。

1.2.2 无扩散的结构变化:点阵对应关系,对应关系变体和点阵相变

以下讨论马氏体晶体是如何以无扩散的方式从母相中产生出来的。作为一个典型的例子,我们用熟知的钢的面心立方(face-centered cubic, FCC)到体心正方(body-centered tetragonal, BCT)的转变来加以描述。图 1-5(a)显示出两个 FCC 单胞,其中标出一个 BCT 单胞,其轴比 $c/a = \sqrt{2}$ 。倘若图中的 X 和 Y 轴伸长,而 Z 轴缩短,则 c/a 变成马氏体的数值(即数值接近于 1),这样就产生了如图 1-5(b)所示的 BCT 马氏体。这就是原先贝恩(Bain)^[10]提出的机制。尽管不同合金的机制不同,但是通过沿某些方向的伸长、缩短和切变,从母相产生出马氏体总是可能的。设 FCC 的点阵常数为 a_0 , BCT 的点阵常数为 a 和 c ,则对应于 XYZ 坐标的相变矩阵可写为:

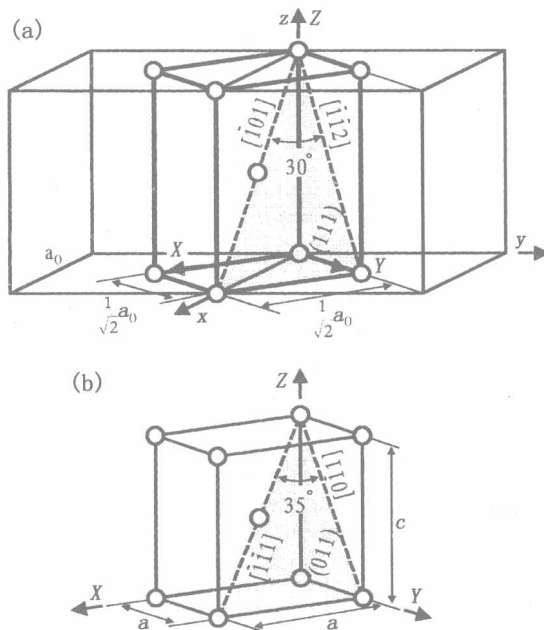


图 1-5 贝恩提出的 FCC-BCT(或 BCC)的相变机制

xyz 是母相 FCC 点阵的晶轴; XYZ 是马氏体 BCT 点阵的晶轴(详见正文内容)

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}a/a_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2}a/a_0 & 0 \\ 0 & 0 & c/a_0 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

通过相似变换,相对于母相点阵(即图 1-5(a)中的 xyz 坐标)的相变矩阵给出如下:

$$\mathbf{B} = \mathbf{R}\mathbf{B}\mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{2}a/a & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2}a/a_0 & 0 \\ 0 & 0 & c/a_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

另外一个重要概念是点阵的对应关系,它与点阵相变相关联。由于马氏体相变是无扩散的,因而在母相和马氏体的方向和平面之间,存在一一对应的关系。显然, $[1/2 \ 1/20]_p$ 和 $[1/2 \ 1/20]_p$ 对应于 $[100]_m$ 和 $[010]_m$, 这里下标 p 和 m 分别指母相和马氏体。那么,这里的主要问题是母相中任意一个 $[xyz]_p$ 和 $[hkl]_p$ 对应于马氏体中哪一个 $[XYZ]_m$ 和 $[HKL]_m$ 。这实际上是坐标变换问题。在图 1-5(a)中很容易写出 xyz 系与 XYZ 系之间的坐标变换。由于点阵相变,点阵发生了变化,从(a)中的 $X \ YZ$ 系变换到(b)中的 $X \ YZ$ 系,但在这个变换中密勒指数(Miller indices)不变。这样上述所得到的坐标变换公式仍旧成立,如下式所示:

$$\begin{array}{ccc} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 \\ -1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} H \\ K \\ L \end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix} 1/2 & -1/2 & 0 \\ -1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix} \\ \text{老} & & \text{新} & \text{新} & & \text{老} \end{array} \quad (1.13)$$

从这些公式中很容易得到点阵的对应关系, $[\bar{1}01]_p$ 对应 $[\bar{1} \ \bar{1}1]_m$, $[\bar{1} \ \bar{1}2]_p$ 对应 $[0\bar{1}1]$ 以及 $(111)_p$ 对应 $(011)_m$ 。

与点阵关系有关的另一个重要的概念是对应关系变体(correspondence variant, CV)。在图 1-5 中,选用 z 轴作为马氏体的 c 轴;同样也可以选 x 或 y 作为马氏体的 c 轴。这样在 FCC-BCT 相变中可能有三种对应关系变体。

在众多马氏体相变的结构变化中, β -相合金中的马氏体相变是重要的,下面作简要描述。Au-Cd、Ag-Cd、Cu-Al-(Ni)、Cu-Zn-(Al)等都是 β -相合金,其特征是电子原子数值比 $e/a \approx 1.5$ 。由于布里渊(Brillouin)区界面的嵌套,体心立方(body-centered cubic, BCC)结构或有序的体心立方结构是稳定的。有序的体心立方结构通常是 B2 型或 $D0_3$ 型。随着温度降低,由于在吉布斯自由能中的熵项在低温下可以忽略不计,内能的减少变得更为重要,因而这些有序的体心立方结构以马氏体相变的方式转变成密堆结构。它们称为具有两维密排面(基面)的“长周期有序堆垛结构”。按照 Nishiyama 和 Kajiwar, 用图 1-6 来描述 B2 型母相的结构变化^[11]。而 $D0_3$ 型母相的结构变化与此相似。B2 型母相结构如(a)所示。这种结构可以看作是 $(110)_{B2}$ 面以 $A_1B_1A_1B_1 \dots$ 的次序堆垛而成,如(b)所示。发生马氏体相变时,如(c)所示,通过沿 $[001]_{B2}$ 方向的收缩和沿 $[\bar{1}10]_{B2}$ 方向上的伸长, $(110)_{B2}$ 面变成较密排的面 $(001)_m$ 。这样,图上指出的角度由 $70^\circ 32'$ 变到接近 60° 。当这个平面变成如(c)所示的密排面时,就出现示于图(c)中的三个堆垛位置 A, B, C。这样,就产生出各种堆垛次序的结构。理论上,可以产生出无数种长周期有序堆垛结构。但是实际上,前三种(d~f)是最常见的,第四种(g)是新发现的。有两种表示法描述这类长周期有序堆垛结构,即拉姆斯德尔(Ramsdel)表示法和斯丹诺夫(Zdanov)符