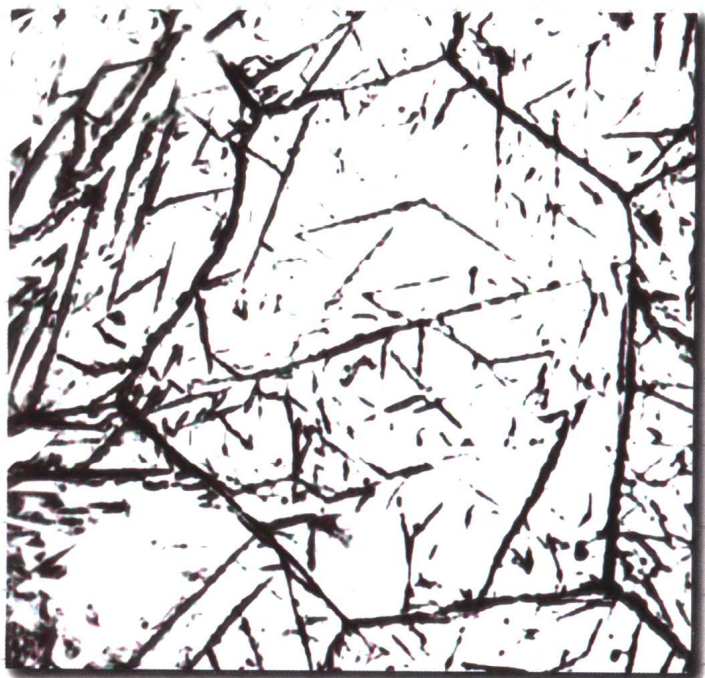


高等学校教学用书

# 金属固态相变教程

刘宗昌 任慧平 宋义全 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com>

高等学校教学用书

# 金属固态相变教程

刘宗昌 任慧平 宋义全 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2003

### 图书在版编目 (CIP) 数据

金属固态相变教程/刘宗昌等编著. —北京: 冶金工业出版社, 2003.9

ISBN 7-5024-3330-9

I. 金… II. 刘… III. 金属—固体—相变—教材  
IV. TG111.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 067047 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)  
责任编辑 张卫 (010-64027930, E-mail: bull2820@sina.com)  
王雪涛 美术编辑 李心  
责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 牛晓波  
北京鑫正大印刷有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销  
2003 年 9 月第 1 版, 2003 年 9 月第 1 次印刷  
787mm×1092mm 1/16; 15 印张; 377 千字; 222 页; 1—4000 册  
**28.00 元**  
冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893  
冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081  
(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

**与时俱进，开拓创新，不断更新教  
学内容，为培养 21 世纪材料科学与  
工程人才而努力！**

CH 1/1

# 前 言

本书与以往的金属热处理原理教材的内容体系基本相同。涉及的问题包括：固态相变的热力学、动力学、晶体学、组织学、性能学等，重点是固态相变的物理实质和相变机理，它是进行金属材料科学研究及工程的理论依据。20世纪末的教学改革，专业名称缩减，“金属材料工程”专业覆盖了原来的金属热处理、铸造、焊接、锻压、轧钢、金属腐蚀等专业。因此，本课程不能再称为“金属热处理原理”。有的院校设“材料科学基础”课程，把“金属热处理原理”作为其中的部分章节，本书则定名为“金属固态相变教程”。

金属固态相变理论是金属材料工程专业的必修内容，极为重要，是从事金属材料工程的科技人员手中的一把钥匙。如果说“不懂金属固态相变，就等于不懂金属材料”，这并不算过分。因此，金属固态相变理论课是金属材料工程专业的主干课，是核心课程之一。

本书是作者在多年来讲授金属热处理课程的基础上编著的。本书继承与创新相结合，讲述了比较成熟的理论，增加了近年来国内外研究、发展的一些新理论，也包含了我们多年来的科研成果，许多内容曾在刊物上发表及获奖。对于马氏体、贝氏体等相变机制方面的假说和学术论争只做了概要叙述，因为假说有假定性，易变性，可能被科学实践证实，也可能被证伪，不宜给本科生讲得过多。本书注意理论与实际相结合，注重理论向技术的转化，推动技术创新。最后一章具有总结性质，运用科学技术哲学的观点，论述了金属及合金的整合系统和复杂性以及钢中相变的自组织规律。

本书的主要特点有三：

- (1) 与时俱进，较之20世纪90年代前出版的教材，内容有一定更新；
- (2) 应用自然辩证法（科学技术哲学）的理论更正了一些陈旧的概念，淘汰了某些过时的知识，建立了新概念，阐述了新理论；
- (3) 继承创新，增加了相变研究的新成果、新理论、新学说，有利于培养学生的创新意识。

全书共9章，讲授约需40学时。使用电子教案授课，增加了课时信息量，可以少用学时。本书可以作为金属材料工程专业学生的教科书、参考书，也可以作为冶金、铸造、锻压、焊接、热处理、压力加工以及材料研究等行业的科研人员、技术人员的参考资料。

本书第1、2、3、4、5、9章由刘宗昌教授编著，第7章由任慧平教授编著，宋义全教授参加编写第6、8两章。李文学教授、任慧平教授参加了全书的审核。最后由刘宗昌教授负责全书的总成。

在编著本书过程中，参考并引用了一些书刊、文献、资料的有关内容，谨此致谢。由于作者水平有限，书中存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作者 刘宗昌  
2003年5月18日

## 本书常用参数、物理量名称、符号、国际单位对照表

符号	参数、物理量名称	单位符号	符号	参数、物理量名称	单位符号
A	奥氏体		L	液态相	
$a$	点阵常数	nm	Mf	马氏体转变终止点	
$A_{c1}$	加热时的下临界点	℃	Ms	马氏体转变开始点	
$A_{c3}$	亚共析钢加热时的上临界点	℃	P	珠光体	
$A_{cm}$	过共析钢加热时的上临界点	℃	R	半径	mm, cm
$A_{r1}$	冷却时的下临界点	℃	$r$	半径	mm, cm
$A_{r3}$	亚共析钢冷却时的上临界点	℃	RE	稀土元素	
$A_{r_{cm}}$	过共析钢冷却时的上临界点	℃	S	面积	mm <sup>2</sup> , cm <sup>2</sup>
$A_K$	冲击功	J ( $\approx 0.1\text{kgf}\cdot\text{m}$ )	S	索氏体	
$a_K$	冲击值	J/cm <sup>2</sup>	T	托氏体	
B	贝氏体		T	温度	K, ℃
$B_{\text{上}}$	上贝氏体		$t$	时间	h, min, s
$B_{\text{下}}$	下贝氏体		V	1. 体积	mm <sup>3</sup> , cm <sup>3</sup>
			$v$	2. 速度	m/s
			$v$	3. 加热速度	℃/h, ℃/s
$B_s$	贝氏体转变开始点	℃	$w$	质量分数	%
$B_f$	贝氏体转变结束点	℃	$\alpha$	$\alpha$ 相	
C	碳化物		$\beta$	$\beta$ 相	
$c_p$	等压热容	J/(kg·K)	$\gamma$	$\gamma$ 相	
$c_v$	等容热容	J/(kg·K)	$\delta$	$\delta$ 相	
D	1. 扩散系数 2. 直径	m <sup>2</sup> /s mm, cm	$\delta$	伸长率	%
E	弹性模量	MPa ( $\approx 0.1\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	$\epsilon$	$\epsilon$ 相	
F	铁素体		$\epsilon$	应变	mm/mm
F	驱动力	N	$\theta$	$\theta$ 相, $\theta\text{-Fe}_3\text{C}$	
G	切变弹性模量	MPa ( $\approx 0.1\text{kgf}/\text{mm}^2$ )	$\rho$	密度	kg/m <sup>3</sup>
C	石墨、碳		$\sigma$	$\sigma$ 相	
$h$	高度	mm, cm	$\sigma$	应力	MPa
HB	布氏硬度		$\sigma_b$	抗拉强度	MPa
HRA	洛氏 A 标度硬度		$\sigma_s$	屈服强度	MPa
HRB	洛氏 B 标度硬度		$\sigma_1$	疲劳极限	MPa
HRC	洛氏 C 标度硬度		$\tau$	1. 切应力	MPa
				2. 时间	h, min, s
HV	维氏硬度		$\psi$	断面收缩率	%

# 重要概念说明

## 1 固态相变中的几个重要概念的修改

概念是理论的细胞。本书就固态相变理论中的几个重要的概念，根据其物理实质作了重要修改。

(1) 奥氏体：钢中的奥氏体是碳及各种化学元素溶入  $\gamma$ -Fe 中所形成的固溶体。

(2) 珠光体：钢中的珠光体是共析分解的铁素体和碳化物的有机结合体，是整合组织，不是机械混合物。

(3) 马氏体：马氏体是原子经无需扩散切变位移的不变平面应变的晶格改组过程得到的具有严格晶体学关系和惯习面的，形成相中伴生极高密度位错、层错或精细孪晶等晶体缺陷的整合组织，称为马氏体。

(4) 马氏体相变：原子经无需扩散的切变位移，进行不变平面应变的晶格改组的相变，称为马氏体相变。

(5) 贝氏体：是过冷奥氏体的中温转变产物，它以贝氏体铁素体为基体，同时可能存在  $\theta$ -渗碳体或  $\epsilon$ -碳化物、残留奥氏体等相构成的整合组织。贝氏体铁素体的形貌多呈条片状，内部有规则排列的亚单元及较高密度的位错等亚结构。

(6) 回火马氏体：钢中的马氏体经低温回火得到的  $\alpha$  相 +  $\eta$ -Fe<sub>2</sub>C (或  $\epsilon$ ) 等相组成的整合组织，称为回火马氏体。

(7) 回火托氏体：钢中的马氏体经中温回火得到的尚保留着马氏体形貌特征的铁素体和片状 (或细小颗粒) 碳化物的整合组织，称为回火托氏体。以往文献中称其为回火屈氏体。如果贝氏体回火时也得到这些相并且具有同样的形貌特征，也称为回火托氏体。

(8) 回火索氏体：钢中的马氏体经高温回火得到的等轴状铁素体 + 较大颗粒状 (或球状) 的碳化物的整合组织，称为回火索氏体。

## 2 本书中涉及的几个科学技术哲学的概念

(1) 自然辩证法 (即科学技术哲学)：是人们认识自然、改造自然的根本观点和思维方式，是关于自然界和科学技术发展的一般规律以及人们认识自然和改造自然的一般方法的科学。

(2) 系统：是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合的具有特定功能的有机整体。自然界的各种物质形态不是系统就是某个系统的组织部分，都在系统形式中存在着运动着。

(3) 系统整合方法：是指人们在处理复杂问题时始终要从整体出发，从部分之间的相互整合入手，去揭示或构建整体大于部分之总和的机制的一种思维原则和方法。

(4) 自组织：如果系统获得的空间结构、时间结构的过程中没有特定的外界干预，而是一个自发的组织化、有序化和系统化的过程，就是自组织。自然界的系统演化，自然事物的结构形成或有序化都是系统自组织的过程。

(5) 整合：以系统的整体性为基础和前提的有机结合、有序配合或组织化匹配，称为整合。整合系统不同于混合系统。



# 目 录

<b>1 金属固态相变的基本规律</b> .....	( 1 )
1.1 金属固态相变的分类.....	( 1 )
1.1.1 相变按平衡状态分类.....	( 1 )
1.1.2 按原子迁移特征分类.....	( 3 )
1.1.3 按热力学分类.....	( 4 )
1.2 金属的多型性是固态相变的根源.....	( 5 )
1.2.1 金属的多型性.....	( 5 )
1.2.2 铁的多型性转变.....	( 6 )
1.3 相变的驱动力和阻力.....	( 8 )
1.3.1 相变驱动力.....	( 8 )
1.3.2 相变阻力.....	( 9 )
1.4 形核.....	( 12 )
1.4.1 均匀形核.....	( 12 )
1.4.2 非均匀形核.....	( 14 )
1.5 新相的长大规律.....	( 18 )
1.5.1 成分不变协同型转变长大.....	( 19 )
1.5.2 成分不变非协同型转变长大.....	( 19 )
1.5.3 成分改变的非协同型转变的长大.....	( 20 )
1.5.4 应用举例——钢中奥氏体的晶核长大.....	( 23 )
1.6 相变动力学.....	( 24 )
1.6.1 形核率.....	( 24 )
1.6.2 Johnson-Mehl 方程.....	( 26 )
1.6.3 Avrami 方程.....	( 26 )
1.6.4 动力学曲线和等温转变图.....	( 26 )
1.7 析出相的聚集和组织的粗化.....	( 27 )
1.7.1 弥散析出相的聚集长大.....	( 27 )
1.7.2 条片状组织的粗化.....	( 28 )
1.7.3 片状珠光体的粗化——球化.....	( 28 )
1.7.4 晶粒粗化及防止粗化措施.....	( 29 )
1.7.5 粗化应用实例——退火软化机理.....	( 31 )
复习思考题.....	( 34 )
参考文献.....	( 35 )

<b>2 钢中的奥氏体</b> .....	(36)
2.1 奥氏体的组织结构和性能.....	(36)
2.1.1 奥氏体组织.....	(36)
2.1.2 奥氏体的晶体结构.....	(36)
2.1.3 奥氏体的性能.....	(38)
2.2 奥氏体形成机理.....	(38)
2.2.1 奥氏体形成的热力学条件.....	(38)
2.2.2 奥氏体晶核的形成.....	(39)
2.2.3 奥氏体晶核的长大.....	(40)
2.3 奥氏体等温形成动力学.....	(41)
2.3.1 共析碳素钢奥氏体等温形成动力学.....	(41)
2.3.2 亚共析碳素钢的等温 TTA 曲线.....	(42)
2.3.3 连续加热时奥氏体形成的 TTA 曲线.....	(42)
2.3.4 奥氏体的形核率和长大速度.....	(43)
2.3.5 影响奥氏体形成速度的因素.....	(44)
2.4 连续加热时奥氏体的形成特征.....	(46)
2.4.1 相变是在一个温度范围内完成的.....	(46)
2.4.2 奥氏体成分不均匀性随加热速度增大而增大.....	(46)
2.4.3 奥氏体起始晶粒随着加热速度增大而细化.....	(47)
2.5 奥氏体晶粒长大及控制.....	(47)
2.5.1 奥氏体晶粒长大现象.....	(47)
2.5.2 奥氏体晶粒长大机理.....	(48)
2.5.3 硬相微粒对奥氏体晶界的钉扎作用.....	(49)
2.5.4 影响奥氏体晶粒长大的因素.....	(50)
2.6 非平衡组织加热时奥氏体的形成.....	(51)
2.6.1 针形奥氏体的形成.....	(51)
2.6.2 球形奥氏体的形成.....	(52)
2.6.3 影响非平衡组织加热转变的因素.....	(52)
2.6.4 粗大奥氏体晶粒的遗传性及防止措施.....	(52)
复习思考题.....	(54)
参考文献.....	(55)
<b>3 珠光体共析分解</b> .....	(56)
3.1 珠光体的物理本质及其组织形态.....	(56)
3.1.1 珠光体的物理本质.....	(56)
3.1.2 珠光体的组织形态.....	(57)
3.2 钢中珠光体的共析分解机理.....	(59)
3.2.1 珠光体形成的热力学.....	(59)

3.2.2 珠光体分解机理·····	(59)
3.2.3 位向关系·····	(62)
3.2.4 珠光体晶核的长大·····	(62)
3.3 钢中粒状珠光体的形成·····	(64)
3.3.1 特定条件下过冷奥氏体的分解·····	(65)
3.3.2 片状珠光体的低温退火·····	(65)
3.3.3 高温回火·····	(66)
3.4 动力学图·····	(67)
3.4.1 珠光体形核率及长大速度·····	(67)
3.4.2 过冷奥氏体等温转变 C 曲线 ·····	(67)
3.4.3 退火用 TTT 图 ·····	(70)
3.4.4 连续冷却转变动力学图——CCT 图 ·····	(72)
3.4.5 退火用 TTT 图、CCT 图在退火软化中的作用 ·····	(74)
3.5 影响共析分解的内在机制·····	(74)
3.5.1 奥氏体固溶碳量的影响·····	(74)
3.5.2 奥氏体状态的影响·····	(74)
3.5.3 合金元素的影响·····	(75)
3.5.4 系统整合的作用·····	(77)
3.6 钢中的相间沉淀·····	(79)
3.6.1 相间沉淀产物的形态·····	(79)
3.6.2 相间沉淀机理·····	(79)
复习思考题 ·····	(81)
参考文献 ·····	(82)
4 马氏体相变·····	(83)
4.1 绪言·····	(83)
4.2 马氏体相变的特征、判据及定义·····	(84)
4.2.1 马氏体相变的基本特征·····	(84)
4.2.2 马氏体相变的判据·····	(86)
4.2.3 马氏体相变及马氏体的定义·····	(86)
4.3 马氏体相变的分类·····	(87)
4.3.1 按相变驱动力分类·····	(87)
4.3.2 按马氏体相变动力学特征分类·····	(87)
4.4 马氏体相变热力学·····	(92)
4.4.1 Fe-C 合金马氏体相变热力学条件 ·····	(93)
4.4.2 相变驱动力和相变阻力的热力学运算·····	(94)
4.4.3 求纯铁的马氏体点 $M_s$ ·····	(95)
4.4.4 钢的马氏体点 $M_s$ ·····	(96)
4.5 马氏体的组织形态及物理本质·····	(97)

4.5.1	钢中马氏体物理本质	(97)
4.5.2	低碳体心立方马氏体 (小于 0.2%C)	(97)
4.5.3	体心正方马氏体 (大于 0.2%~1.9%C)	(98)
4.5.4	Fe-M 系合金马氏体	(101)
4.5.5	有色合金马氏体	(103)
4.6	马氏体的形核	(106)
4.6.1	位错圈相界面模型	(107)
4.6.2	应变核胚模型	(107)
4.6.3	层错形核及长大模型	(107)
4.7	马氏体相变晶体学的经典模型	(108)
4.7.1	马氏体相变的 K-S 切变模型	(108)
4.7.2	马氏体相变的 G-T 模型, 均匀切变和非均匀切变	(112)
	复习思考题	(113)
	参考文献	(114)
<b>5</b>	<b>贝氏体转变</b>	<b>(115)</b>
5.1	贝氏体相变理论研究进展和学术论争	(115)
5.1.1	对贝氏体相变基本特征的共识	(115)
5.1.2	贝氏体相变争论的焦点	(116)
5.1.3	争论将会统一在“切变-扩散整合机制”这一整体认识上	(119)
5.2	钢中贝氏体的形貌及亚结构	(119)
5.2.1	上贝氏体形貌	(120)
5.2.2	下贝氏体形貌	(121)
5.2.3	工业用钢中的贝氏体组织	(122)
5.2.4	贝氏体形貌的多样性	(123)
5.2.5	贝氏体组织中的精细亚结构	(123)
5.2.6	粒状组织	(125)
5.2.7	魏氏组织	(125)
5.3	贝氏体相变热力学和动力学简介	(126)
5.3.1	贝氏体相变热力学	(126)
5.3.2	贝氏体相变动力学	(128)
5.4	关于贝氏体相变机制	(131)
5.4.1	孕育期的预相变	(131)
5.4.2	钢中贝氏体相变时碳的扩散	(132)
5.4.3	贝氏体相变的形核	(133)
5.4.4	贝氏体长大机制	(133)
5.5	有色合金中的贝氏体	(135)
5.5.1	Cu-Zn 系合金中的贝氏体	(136)
5.5.2	Ag-Cd 合金中的贝氏体	(136)

5.5.3 U-Cr 合金中的贝氏体 .....	(136)
5.6 贝氏体相变的过渡性 .....	(137)
5.6.1 中温转变是过冷奥氏体转变的中间过渡环节 .....	(137)
5.6.2 上贝氏体转变和珠光体分解的联系与区别 .....	(138)
5.6.3 下贝氏体转变和马氏体相变的联系与区别 .....	(140)
5.6.4 贝氏体组织形貌的过渡性 .....	(141)
复习思考题 .....	(142)
参考文献 .....	(142)
<b>6 马氏体的回火转变 .....</b>	<b>(144)</b>
6.1 Fe-C 马氏体的回火 .....	(145)
6.1.1 新鲜马氏体在低温回火时性能的变化 .....	(145)
6.1.2 碳原子偏聚 .....	(147)
6.1.3 $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C 的过渡相 .....	(148)
6.1.4 平衡的 $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C .....	(151)
6.2 合金马氏体的回火 .....	(152)
6.2.1 Fe-M-C 马氏体脱溶时的平衡相 .....	(152)
6.2.2 Fe-M-C 马氏体脱溶时的 (温度、时间) 贯序 .....	(153)
6.3 回火时 $\alpha$ 相的变化 .....	(155)
6.3.1 马氏体的分解 .....	(155)
6.3.2 $\alpha$ 相物理状态的变化 .....	(156)
6.4 合金钢马氏体的回火二次硬化 .....	(159)
6.4.1 回火二次硬化现象 .....	(159)
6.4.2 二次硬化机理 .....	(160)
复习思考题 .....	(162)
参考文献 .....	(162)
<b>7 脱溶及时效 .....</b>	<b>(164)</b>
7.1 概述 .....	(164)
7.1.1 固溶和脱溶 .....	(164)
7.1.2 脱溶的分类 .....	(165)
7.2 脱溶热力学 .....	(166)
7.3 有色合金中的脱溶过程 .....	(167)
7.3.1 Al-Cu 合金的脱溶 .....	(167)
7.3.2 晶体缺陷对脱溶的影响 .....	(172)
7.4 合金脱溶 (时效) 时性能的变化 .....	(174)
7.5 低碳钢的脱溶 .....	(175)
7.5.1 概述 .....	(175)
7.5.2 Fe-N 系过饱和 $\alpha$ 固溶体的脱溶 .....	(176)

7.5.3 低碳钢的时效动力学 .....	(177)
7.5.4 含铜低碳钢的脱溶 .....	(178)
复习思考题 .....	(180)
参考文献 .....	(181)
<b>8 钢中相变产物的力学性能 .....</b>	<b>(182)</b>
8.1 珠光体的力学性能 .....	(183)
8.1.1 珠光体的力学性能 .....	(183)
8.1.2 铁素体加珠光体的力学性能 .....	(184)
8.2 马氏体的力学性能 .....	(185)
8.2.1 马氏体的强度和硬度 .....	(185)
8.2.2 马氏体的韧性 .....	(186)
8.2.3 马氏体相变超塑性 .....	(187)
8.3 钢中贝氏体的力学性能 .....	(188)
8.3.1 贝氏体的强度和硬度 .....	(188)
8.3.2 贝氏体的塑性和韧性 .....	(189)
8.3.3 粒状贝氏体的力学性能 .....	(189)
8.4 淬火钢回火时力学性能的变化 .....	(190)
8.4.1 回火工艺对力学性能的影响 .....	(191)
8.4.2 回火转变产物的性能特点 .....	(192)
8.4.3 回火脆性 .....	(193)
复习思考题 .....	(194)
参考文献 .....	(194)
<b>9 金属系统及相变的复杂性 .....</b>	<b>(195)</b>
9.1 金属及合金是复杂系统 .....	(195)
9.1.1 金属及合金系统 .....	(195)
9.1.2 系统的特征 .....	(196)
9.2 金属及合金是整合系统 .....	(196)
9.2.1 金属及合金是整合系统不是混合系统 .....	(197)
9.2.2 整体大于部分之总和 .....	(197)
9.2.3 相变动力学问题 .....	(197)
9.3 非线性相互作用 .....	(198)
9.3.1 相变临界点的非线性问题 .....	(199)
9.3.2 珠光体片间距与过冷度呈非线性关系 .....	(200)
9.3.3 合金元素对珠光体长大速度的影响是非线性的 .....	(201)
9.3.4 力学性能的非线性问题 .....	(201)
9.4 科学概念的复杂性 .....	(201)
9.4.1 奥氏体 .....	(202)

---

9.4.2 马氏体 .....	(202)
9.4.3 贝氏体 .....	(202)
9.4.4 珠光体 .....	(203)
9.4.5 马氏体的回火组织 .....	(203)
9.5 相变的复杂性和性能多样性 .....	(203)
9.5.1 固态相变的复杂性 .....	(203)
9.5.2 金属及合金的性能多样性 .....	(204)
9.6 钢中相变的自组织 .....	(204)
9.6.1 固态相变自组织的条件 .....	(204)
9.6.2 钢中的相变过程是自组织的 .....	(205)
9.6.3 珠光体分解的自组织 .....	(206)
9.6.4 无扩散型马氏体相变的自组织 .....	(206)
9.6.5 贝氏体转变的自组织 .....	(207)
复习思考题 .....	(209)
参考文献 .....	(209)
附录 .....	(211)
附录 1 化学元素名称英汉对照表 (按英文字母顺序排列) .....	(211)
附录 2 化学元素名称英汉对照表 (按原子序数顺序排列) .....	(214)
附录 3 希腊字母表 .....	(216)
附录 4 罗马数字与阿拉伯数字对照表 .....	(217)
附录 5 构成十进倍数和分数单位的国际单位制 SI 词头 .....	(218)
专业术语 (汉英对照) 索引 .....	(219)

# 1 金属固态相变的基本规律

(Basic Rule of Metallic Solid-state Phase Transformation)

**本章导读：**学习本章应当掌握下列基本内容：金属及合金固态相变的类型和基本概念；固态相变的一般特征；金属及合金固态相变的形核及其长大的一般规律；析出相的聚集和组织粗化的规律等；了解金属及合金的固态相变驱动力，相变热力学和动力学等知识。

## 1.1 金属固态相变的分类

金属中的固态相变的种类很多，难以归类，分类方法不一。分类是根据研究对象的共同点和差异点，将对象划分为不同的种属的方法。相变按平衡状态可以分为平衡相变和非平衡相变；按热力学分类，可以分为一级相变和二级相变；按原子的迁移特征分类，可以分为扩散型相变和无扩散型相变。

### 1.1.1 相变按平衡状态分类

#### 1.1.1.1 平衡转变

定义：在极为缓慢的加热或冷却的条件下形成符合状态图的平衡组织的相的转变，属于平衡转变。平衡转变有以下七种。

##### A 纯金属的同素异构转变

定义：纯金属在温度、压力改变时，由一种晶体结构转变为另一种晶体结构的过程，称为同素异构转变。如，锰在不同温度下，具有 $\alpha$ -Mn、 $\beta$ -Mn、 $\gamma$ -Mn、 $\delta$ -Mn等晶体结构；铁在不同温度下，具有 $\alpha$ -Fe、 $\gamma$ -Fe、 $\delta$ -Fe等晶体结构<sup>[1]</sup>。钛、钴、锡等金属也都具有同素异构转变。

##### B 多形性转变

定义：固溶体的同素异构转变称为多形性转变。

纯金属中溶入溶质元素形成固溶体时，也发生同素异构转变。如奥氏体是碳及合金元素溶入 $\gamma$ -Fe的固溶体。奥氏体能转变为 $\alpha$ -铁素体、 $\delta$ -铁素体。同素异构转变和多形性转变是固态相变的主要类型，是固态相变的根源之一。

##### C 共析转变

定义：冷却时，固溶体同时析出分解为两个不同成分和结构的相的固态相变称为共析转变。可以用反应式 $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$ 表示。共析分解生成的两个相的结构和成分都与反应相不同。如钢中的珠光体分解： $A \rightarrow F + Fe_3C$ ，是两相共析、共生、共长的过程。

##### D 包析转变



定义：冷却时由两个固相合并转变为一个固相的固态相变过程称为包析转变。用  $\alpha + \beta \rightarrow \gamma$  表示。在 Fe-B 系中，于 910°C 发生  $\gamma + \text{Fe}_2\text{B} \rightarrow \alpha$  的包析反应<sup>[1]</sup>。此外，在 Mg-Zn 系、Cu-Zn 系合金中也有包析转变<sup>[2]</sup>。

#### E 平衡脱溶

在高温相中固溶了一定量合金元素，当温度降低时溶解度下降，在缓慢冷却的条件下，过饱和固溶体将析出新相，此过程称为平衡脱溶。在这个转变过程中，母相不消失，但随着新相的析出，母相的成分和体积分数不断变化。新相的成分、结构与母相不同。例如，奥氏体中析出二次渗碳体，铁素体中析出三次渗碳体，就属于这种转变。

#### F 调幅分解

定义：某些合金在高温时形成单相的均匀的固溶体，缓慢冷却到某一温度范围内时，通过上坡扩散，分解为两相，其结构与原固溶体相同，但成分不同，是成分不均匀的固溶体，这种转变称为调幅分解。用反应式  $\alpha \rightarrow \alpha_1 + \alpha_2$  表示。

#### G 有序化转变

定义：在平衡条件下，固溶体中各组元原子的相对位置由无序到有序的转变过程称为有序化转变。Fe-Al 合金、Au-Cu 合金、Cu-Zn 合金等合金系中都可以发生有序化转变。如，在 Fe-Al 系平衡图中，铝含量（质量分数）为 0~36% 的 Fe-Al 合金存在有序-无序转变。铝含量（质量分数）为 13.9%~20% Fe-Al 合金，从 700°C 以上的无序  $\alpha$ -相缓冷下来时，发生  $\alpha \rightarrow \beta_1$  ( $\text{Fe}_3\text{Al}$ )， $\text{Fe}_3\text{Al}$  为有序固溶体<sup>[1]</sup>，具有体心立方结构。

#### 1.1.1.2 非平衡转变

在非平衡加热或冷却条件下，平衡转变受到抑制，将发生平衡图上不能反映的转变类型，获得不平衡组织或亚稳状态的组织。钢中及有色合金中都能发生不平衡转变。如钢中 can 发生伪共析转变、马氏体相变、贝氏体相变、块状转变等。

#### A 伪共析转变

定义：某些成分的钢，当奥氏体以较快的速度冷却时，奥氏体被过冷到 ES 线和 GS 线的延长线以下时，如图 1-1 所示的阴影区，这时奥氏体同时满足析出铁素体和渗碳体的条件，将同时析出铁素体和渗碳体。这一过程称为伪共析转变。

这种珠光体中的铁素体和渗碳体的比例与平衡共析转变得到的珠光体不同，若是亚共析钢冷却得到伪珠光体，其中的铁素体含量较多；若是过共析钢，则其伪珠光体中的渗碳体量较多。

含 V、Ti 的低碳合金钢空冷时发生的相间沉淀是一种特殊的伪共析转变。

#### B 钢中的马氏体相变

将奥氏体以较大的冷却速度过冷到低温区，替代原子难以扩散，则奥氏体以无扩散方式发生转变，即在 Ms 点以下进行马氏体转变，得到板条状马氏体、片状马氏体、凸透镜状马氏体、蝶状马氏体等组织形态。马氏体相变是替换原子经无扩散切变位移产生形状改变和表面浮突、呈不变平面应变特征

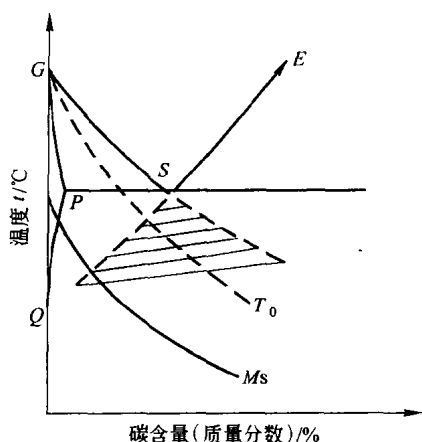


图 1-1 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图的左下角