



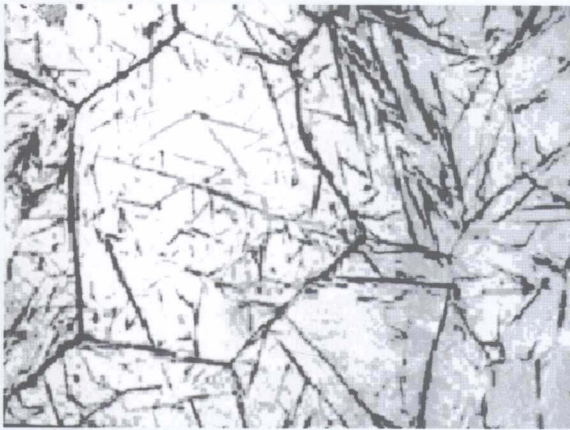
普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

# 金属固态相变教程

(第2版)

刘宗昌 任慧平 宋义全 赵莉萍 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

普通高等教育“十二五”规划教材

# 金属固态相变教程

(第2版)

刘宗昌 任慧平 宋义全 赵莉萍 编著

北京

冶金工业出版社

2011

## 内 容 提 要

本书是《金属固态相变教程》的第2版,作者根据近年来教学实践、新的教学改革培养方案以及近年来固态相变理论研究的新进展对2003年出版的第1版内容进行了修订,补充了新理论、新知识,调整了内容结构,以便更加适应教学需求。全书共8章,主要内容包括金属固态相变的一般规律、奥氏体及其形成、珠光体与共析分解、马氏体相变与马氏体、贝氏体转变与贝氏体、马氏体的回火转变、合金的脱溶、相变产物的力学性能等。

本书可作为高校金属材料工程专业、材料成型与控制工程专业本科生教材,也可作为材料科学与工程等专业硕士研究生的教学参考书。同时,固态相变理论是从事材料科学与工程的一把钥匙,因此本书作为固态相变理论的新资料,可供从事新材料研发、热处理、冶金、铸造、锻压、焊接、压力加工、粉末冶金等行业的科研人员、工程技术人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属固态相变教程/刘宗昌等编著.—2版.—北京:  
冶金工业出版社,2011.1  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5024-5426-5

I. ①金… II. ①刘… III. ①金属—固体—相变—教材  
IV. ①TG111.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第242197号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 于昕蕾 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5426-5

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2003年9月第1版,2011年1月第2版,2011年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;16.25印张;391千字;244页

30.00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(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 第2版前言

与时俱进, 开拓创新, 更新教学内容, 培养创新型人才, 是教学工作永恒的主题。

“金属固态相变”是金属材料专业的技术理论基础课, 是该专业的主干课, 也是核心课程之一, 应给以足够的重视。

2003年出版的《金属固态相变教程》被一些高校和科研院所广泛采用, 作为教材或参考资料, 适应了教学、科研的需求。经过7年的教学实践, 随着近年来金属固态相变的新发展, 有必要对内容进行修订, 出版第2版。

本教材涉及的问题包括: 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铸、锻、焊、热处理等工程技术的理论基础。

20世纪, 欧洲的一些国家和美、日等国材料科学家对于金属固态相变理论进行了大量的研究, 取得了丰硕的成果。1949年后我国科学家对其进行了引进、吸收和再研究。固态相变的主要核心机理都是由国外科学家提出和发展的。改革开放国策使我国材料科学家的科研水平和创新能力空前提高, 已经赶上世界先进水平。通过多年来的教学、科研实践, 我们认识到这些知识中有比较成熟的理论, 也存在过时的、乃至错误的观点和学说。因此去伪存真, 更新和发展固态相变理论是我们义不容辞的义务。

本书采取继承与创新相结合的方法, 阐述了比较成熟的理论, 增加了近年来国内外研究、发展的新理论, 也包含了内蒙古科技大学多年来的科研成果。近年来, 内蒙古科技大学对珠光体转变、贝氏体相变、马氏体理论的研究有了新的进展, 因此作者就这些章节内容进行了大幅度的更新。摒弃了过时的知识, 批驳了错误的观点和学说。强调理论与实践的统一, 注重理论向技术的转化, 推动理论发展和技术的创新, 培养创新型人才。

本书主要特点有三:

(1) 与时俱进, 继承与创新相结合, 阐述了固态相变新成果、新理论, 较

之以往的教材，内容大幅度更新；有利于培养学生的创新意识。

(2) 应用科学技术哲学的理论修正了错误概念和学说，淘汰了过时的知识。

(3) 本书条理清楚，章节安排更加符合教学规律，并设有导读、例题、思考题，以便更好地适应教学要求。

全书共8章，讲授约50学时，建议采用电子教案授课。本书可以作为金属材料工程专业、塑性成型及控制专业的教科书，也可供冶金、铸造、锻压、焊接、热处理、压力加工等行业以及材料开发研究的科研人员、技术人员参考。

本书由刘宗昌策划并负责全书的总成。赵莉萍参加了全书的修订。第1~5章由刘宗昌编著，第6章由宋义全、李涛编著，第7章由任慧平、李涛编著，第8章由赵莉萍编著；书稿承蒙李文学审阅。

本书在撰写过程中参考了许多论文和专著，特此向各位作者致谢。

刘宗昌  
2010年10月

# 第1版前言

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本质和相变机理，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。

刘宗昌  
2003年5月18日

# 目 录

1 金属固态相变的一般规律 .....	1
1.1 金属系统及相变的复杂性 .....	1
1.1.1 金属及合金是复杂系统 .....	2
1.1.2 金属及合金是整合系统 .....	3
1.1.3 固态相变的自组织 .....	5
1.2 固态相变的分类 .....	6
1.2.1 按平衡状态分类 .....	6
1.2.2 按原子迁移特征分类 .....	9
1.2.3 按热力学分类 .....	10
1.3 铁的多型性及临界点 .....	11
1.3.1 铁的多型性转变 .....	11
1.3.2 体心立方铁的热力学特征 .....	12
1.3.3 铁的临界点 $A_3$ 、 $A_4$ 的形成 .....	13
1.4 固态相变中原子的迁移 .....	14
1.4.1 原子迁移的热力学分析 .....	14
1.4.2 实际金属中的扩散 .....	15
1.4.3 过冷奥氏体相变过程中原子的迁移方式 .....	17
1.4.4 成分不变原子非协同热激活跃迁 .....	17
1.5 相变的驱动力和阻力 .....	18
1.5.1 相变驱动力 .....	18
1.5.2 相变阻力 .....	19
1.6 形核 .....	22
1.6.1 均匀形核 .....	22
1.6.2 非均匀形核 .....	23
1.7 新相晶核的长大规律 .....	28
1.7.1 成分不变协同型位移长大 .....	28
1.7.2 成分不变非协同型位移长大 .....	29
1.7.3 成分改变的非协同型位移长大 .....	29
1.7.4 应用举例——钢中奥氏体的晶核长大 .....	31
1.8 相变动力学和过冷奥氏体转变贯序 .....	33
1.8.1 形核率 .....	33
1.8.2 相变动力学方程 .....	34



1.8.3 动力学曲线和等温转变图 .....	36
1.8.4 过冷奥氏体转变贯序 .....	36
1.9 析出相的聚集和组织的粗化 .....	39
1.9.1 弥散析出相的聚集长大 .....	39
1.9.2 条片状组织的粗化 .....	39
1.9.3 片状珠光体的粗化——球化 .....	40
1.9.4 晶粒粗化及防止粗化的措施 .....	41
1.9.5 粗化应用实例——退火软化机理 .....	43
复习思考题 .....	45
参考文献 .....	46
<b>2 奥氏体及其形成</b> .....	<b>47</b>
2.1 奥氏体 .....	48
2.1.1 奥氏体的组织形貌 .....	48
2.1.2 奥氏体的晶体结构 .....	49
2.1.3 奥氏体中的亚结构 .....	49
2.1.4 奥氏体成分的不均匀性 .....	51
2.1.5 奥氏体的性能 .....	51
2.2 奥氏体形成机理 .....	52
2.2.1 奥氏体形成的热力学条件 .....	52
2.2.2 奥氏体的形核 .....	52
2.2.3 奥氏体晶核的长大 .....	54
2.2.4 渗碳体的溶解和奥氏体成分的相对均匀化 .....	56
2.2.5 针形奥氏体和球形奥氏体的形成 .....	57
2.2.6 亚共析钢的奥氏体化 .....	58
2.2.7 过共析钢奥氏体的形成 .....	58
2.3 奥氏体等温形成动力学 .....	59
2.3.1 共析碳素钢奥氏体等温形成动力学 .....	59
2.3.2 亚共析碳素钢的等温 TTA 曲线 .....	60
2.3.3 连续加热时奥氏体形成的 TTA 曲线 .....	61
2.3.4 奥氏体的形核率和长大速度 .....	61
2.3.5 影响奥氏体形成速度的因素 .....	63
2.4 连续加热时奥氏体的形成特征 .....	64
2.4.1 相变在一个温度范围内完成 .....	64
2.4.2 奥氏体成分不均匀性随加热速度增大而增大 .....	65
2.4.3 奥氏体起始晶粒随着加热速度增大而细化 .....	66
2.5 奥氏体晶粒长大 .....	66
2.5.1 奥氏体晶粒长大现象 .....	66
2.5.2 奥氏体晶粒长大机理 .....	68

2.5.3 硬相微粒对奥氏体晶界的钉扎作用 .....	68
2.5.4 影响奥氏体晶粒长大的因素 .....	70
2.6 粗大奥氏体晶粒的遗传性及防止措施 .....	70
2.6.1 影响钢组织遗传的因素 .....	71
2.6.2 控制粗大奥氏体晶粒遗传 .....	72
复习思考题 .....	72
参考文献 .....	73
<b>3 珠光体与共析分解 .....</b>	<b>74</b>
3.1 珠光体的定义和组织形貌 .....	74
3.1.1 珠光体的定义 .....	74
3.1.2 珠光体的组织形貌 .....	75
3.1.3 珠光体的片间距 .....	78
3.1.4 珠光体表面浮凸 .....	79
3.1.5 珠光体组织形貌的多样性与复杂性 .....	80
3.2 珠光体转变机理 .....	81
3.2.1 共析分解热力学 .....	81
3.2.2 珠光体转变机理 .....	82
3.2.3 珠光体转变中的位向关系 .....	84
3.2.4 珠光体晶核的长大 .....	85
3.3 钢中粒状珠光体的形成 .....	86
3.3.1 特定条件下过冷奥氏体的分解 .....	86
3.3.2 片状珠光体的低温退火 .....	87
3.4 珠光体转变动力学 .....	88
3.4.1 珠光体形核率及长大速度 .....	88
3.4.2 过冷奥氏体等温转变 C-曲线 .....	89
3.4.3 退火用 TTT 图 .....	90
3.4.4 连续冷却转变动力学——CCT 图 .....	92
3.4.5 退火用 TTT 图、CCT 图在退火软化中的作用 .....	93
3.5 影响过冷奥氏体共析分解的内在机制 .....	94
3.5.1 奥氏体状态 .....	94
3.5.2 奥氏体固溶碳量的影响 .....	94
3.5.3 合金元素的影响 .....	94
3.5.4 合金奥氏体系统的整合作用 .....	97
3.6 共析分解的特殊形式——“相间沉淀” .....	100
3.6.1 “相间沉淀”的热力学条件 .....	100
3.6.2 “相间沉淀”产物的形态 .....	101
3.6.3 “相间沉淀”机制 .....	102
复习思考题 .....	104

参考文献 .....	104
<b>4 马氏体相变与马氏体 .....</b>	<b>106</b>
4.1 马氏体相变的特征和定义 .....	107
4.1.1 马氏体相变的基本特征 .....	107
4.1.2 马氏体的定义 .....	110
4.2 马氏体相变的分类及动力学特征 .....	111
4.2.1 按相变驱动力分类 .....	111
4.2.2 按马氏体相变动力学特征分类 .....	111
4.3 马氏体相变热力学 .....	115
4.3.1 Fe-C 合金马氏体相变热力学条件 .....	115
4.3.2 相变驱动力的计算 .....	116
4.3.3 钢中的马氏体点 .....	117
4.4 马氏体的组织形态及物理本质 .....	119
4.4.1 钢中马氏体的物理本质 .....	119
4.4.2 低碳体心立方马氏体 (小于 0.2% C) .....	120
4.4.3 体心正方马氏体 (大于 0.2% ~ 1.9% C) .....	120
4.4.4 Fe-M 系合金马氏体 .....	123
4.4.5 有色合金马氏体 .....	125
4.4.6 表面马氏体 .....	128
4.5 马氏体表面浮凸 .....	129
4.5.1 马氏体表面浮凸的试验观察 .....	129
4.5.2 马氏体表面浮凸形成机理 .....	131
4.6 马氏体相变的形核 .....	133
4.6.1 马氏体相变的形核模型 .....	134
4.6.2 马氏体形核的试验观察 .....	135
4.6.3 关于马氏体相变的形核机制 .....	138
4.7 马氏体相变晶体学的经典模型 .....	139
4.7.1 马氏体相变的 K-S 切变模型 .....	139
4.7.2 西山切变模型 .....	142
4.7.3 马氏体相变的 G-T 模型 .....	143
4.7.4 对马氏体相变切变机制的评价 .....	144
复习思考题 .....	146
参考文献 .....	147
<b>5 贝氏体相变与贝氏体 .....</b>	<b>148</b>
5.1 贝氏体的组织形貌及亚结构 .....	148
5.1.1 超低碳贝氏体的组织形貌 .....	148
5.1.2 上贝氏体组织形貌 .....	149

5.1.3	下贝氏体组织形貌 .....	151
5.1.4	贝氏体组织的复杂性和多样性 .....	153
5.1.5	魏氏组织 .....	155
5.1.6	贝氏体铁素体的亚结构 .....	156
5.1.7	有色合金中的贝氏体 .....	160
5.2	贝氏体表面浮凸 .....	161
5.2.1	贝氏体表面浮雕形貌 .....	161
5.2.2	贝氏体表面浮凸形貌及尺度 .....	162
5.3	贝氏体相变的过渡性 .....	165
5.3.1	中温转变是过冷奥氏体转变的中间过渡环节 .....	165
5.3.2	上贝氏体转变和珠光体分解的联系与区别 .....	165
5.3.3	下贝氏体转变和马氏体相变的联系与区别 .....	167
5.3.4	贝氏体组织形貌的过渡性 .....	168
5.4	贝氏体相变热力学 .....	169
5.4.1	相变驱动力的计算模型 .....	169
5.4.2	相变驱动力的计算结果 .....	170
5.4.3	切变学派计算的相变驱动力 .....	172
5.5	贝氏体相变动力学 .....	173
5.5.1	两派的争议 .....	173
5.5.2	贝氏体长大速率 .....	174
5.5.3	贝氏体转变 TTT 图与共析分解 TTT 图的比较 .....	175
5.6	贝氏体相变理论研究进展和学术论争 .....	176
5.6.1	各派对贝氏体相变特征的共识 .....	176
5.6.2	贝氏体相变论争的焦点 .....	177
5.6.3	停止论争, 实现整合 .....	180
5.7	块状相变 .....	180
5.7.1	金属的块状相变 .....	181
5.7.2	块状相变机制 .....	182
5.7.3	块状转变与贝氏体相变的亲缘关系 .....	183
5.8	贝氏体相变机制 .....	184
5.8.1	各类贝氏体相变学说 .....	184
5.8.2	贝氏体相变的非协同热激活跃迁机制 .....	185
	复习思考题 .....	191
	参考文献 .....	192
6	马氏体的回火转变 .....	194
6.1	Fe-C 马氏体的回火 .....	195
6.1.1	新鲜马氏体在低温回火时性能的变化 .....	195
6.1.2	碳原子的偏聚 .....	197

6.1.3	$\theta$ -Fe <sub>3</sub> C 的过渡相 .....	198
6.1.4	平衡相 $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C .....	200
6.2	回火时 $\alpha$ 相和残留奥氏体的变化 .....	201
6.2.1	马氏体两相式分解的学说应当摒弃 .....	201
6.2.2	$\alpha$ 相物理状态的变化 .....	202
6.2.3	残余奥氏体的转变 .....	205
6.2.4	马氏体的回火产物 .....	206
6.3	合金马氏体的回火 .....	207
6.3.1	Fe-M-C 马氏体脱溶时的平衡相 .....	207
6.3.2	Fe-M-C 马氏体脱溶时的 (温度、时间) 贯序 .....	208
6.4	合金钢马氏体的回火二次硬化 .....	210
6.4.1	回火二次硬化现象 .....	210
6.4.2	二次硬化机理 .....	210
	复习思考题 .....	213
	参考文献 .....	214
7	合金的脱溶 .....	215
7.1	概述 .....	215
7.1.1	固溶和脱溶 .....	215
7.1.2	脱溶的分类 .....	216
7.2	有色合金中的脱溶 .....	216
7.2.1	Al-Cu 合金的脱溶 .....	217
7.2.2	晶体缺陷对时效的影响 .....	221
7.2.3	合金时效后的性能 .....	222
7.3	Fe-Cu 合金的脱溶 .....	224
7.3.1	含铜钢的时效 .....	224
7.3.2	Fe-Cu 合金的沉淀产物 .....	224
	复习思考题 .....	228
	参考文献 .....	228
8	相变产物的力学性能 .....	230
8.1	珠光体的力学性能 .....	231
8.1.1	珠光体的力学性能 .....	231
8.1.2	铁素体-珠光体的力学性能 .....	232
8.2	马氏体的力学性能 .....	233
8.2.1	马氏体的强度和硬度 .....	233
8.2.2	马氏体的韧性 .....	234
8.2.3	马氏体相变超塑性 .....	235
8.3	钢中贝氏体的力学性能 .....	236

---

8.3.1 贝氏体的强度和硬度 .....	236
8.3.2 贝氏体的塑性和韧性 .....	237
8.3.3 粒状贝氏体的力学性能 .....	238
8.3.4 超低碳贝氏体的性能 .....	238
8.4 淬火钢回火后的力学性能 .....	239
8.4.1 回火规程对力学性能的影响 .....	239
8.4.2 马氏体回火转变产物的性能特点 .....	241
8.4.3 回火脆性 .....	241
复习思考题 .....	242
参考文献 .....	243
附 录 .....	244

# 1 金属固态相变的一般规律

**本章导读：**学习本章应当首先了解金属整合系统和相变复杂性的基本知识。掌握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；熟悉固态相变的驱动力、阻力，动力学知识；了解相变过程中原子的移动规律。

金属固态相变的概念为：**固态金属及合金在温度、压力改变时，内部相结构发生相互转变的现象，称为金属的固态相变。**在相变过程中，往往发生成分、晶体结构、组织形貌和性能的变化。当不产生化学成分、晶体结构的转变，只发生组织形貌的变化时，则不属于相变，如金属的形变和再结晶。

研究金属固态相变的意义在于：**掌握金属的成分、组织结构、性能三者之间的变化规律，以控制相变过程获得预期的组织结构，从而使之赋予预期的性能。**能动地控制材料的相变过程有利于改进生产技术，发展生产，增加效益，即促进科学技术向生产力的转化，为人类社会服务。

## 1.1 金属系统及相变的复杂性

有关金属及合金的科学理论研究，金属材料及相关技术的开发和应用等，20世纪以来已经取得了辉煌的成就。但是，在近代的物理冶金的研究中，由于条件的限制，有时将金属视为简单性问题，或将其复杂性问题进行简单化处理，从而得出一定的规律性。按照科学技术哲学的观点<sup>①</sup>，金属及合金是开放的复杂系统<sup>②</sup>，实际上，金属、合金、碳素钢，尤其是合金钢、多元高合金钢，都是复杂系统，属于复杂性问题，用研究简单性问题的方法来研究复杂性问题经常不适用，难以得出精确的结论。20世纪中叶兴起了运用系统科学的方法来研究自然界的复杂性问题<sup>[1]</sup>，探索复杂性问题可以更详尽、更全面地研究对象的本来面目，揭示难以发现的规律性。复杂性研究与系统整合方法<sup>③④</sup>密切相关。

① 科学技术哲学（即自然辩证法）：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，去揭示或建构整体大于部分之总和的机制的一种思维原则和方法。

④ 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。

本节从科学技术哲学的高度,阐明金属及合金的复杂性。认为各种金属及合金都是复杂的整合系统,原子、晶格、相、组织是组成金属及其合金的各个层次的要素,各要素的非线性相互作用,固态相变的自组织<sup>①</sup>条件及功能,使金属固态相变、晶体结构、组织形貌、性能等具有了复杂的物理实质和规律性<sup>[1,2]</sup>。

### 1.1.1 金属及合金是复杂系统

#### 1.1.1.1 金属及合金系统

金属及合金作为一个复杂系统是由许多子系统组成的。现以钢为例说明,钢作为复杂系统包含的子系统如下。

(1) 溶质系统。钢中含有 Fe、C、Si、Mn、Cr、Ni、Mo、W、Ti、V、Co、Nb、Cu、Al、B、S、P、O、H、N、RE、Pb、Ca、Sb 等 20 多种化学元素,它们在钢中的溶解度不同,有无限溶解的,有限溶解的;有大量溶解的、少量溶解的和微量溶解的。钢中所含的每一种化学元素都是组成钢的一个要素。有色合金以此类推。

(2) 复相系统。任何钢实际上都是复相的,单相钢是简化后的特例。钢中存在多种相结构,常见的有铁素体、奥氏体、马氏体、渗碳体、金属化合物、合金碳化物、氮化物、硼化物、非金属夹杂物、石墨等,是具有形形色色的晶体结构的相。有时还有气体相,如 H<sub>2</sub>。每一种相都是组成此复相系统的一个要素。

(3) 组织系统。以基本相为要素组成各种组织,其中有单相组织,如:铁素体组织、奥氏体组织、马氏体组织等;有复相组织,如:珠光体组织、贝氏体组织、回火马氏体组织、魏氏组织、索氏体组织、托氏体组织、块状组织、莱氏体组织、郁氏体组织等。

(4) 晶体系统。金属是晶体,钢也是晶体,而且是多晶体,虽然有时在特殊条件下也处于非晶状态。但一般状态下由晶粒组成,晶粒是由原子排列成的晶格构成的。晶格分为体心立方晶格、面心立方晶格、体心正方晶格、密排六方晶格、斜方晶格等,还有 G、P 区、Cottrell 气团等结构。钢时常处于多种晶格的匹配状态,尤其是高碳高合金钢,无论处于什么热处理状态,都是由具有多种晶格结构的相组成的。

#### 1.1.1.2 系统的特征

作为复杂系统的金属,具有如下基本特征。

##### A 组成要素的多体性

金属及合金是由多体有机构成的整体,它们是有着各自的结构和性能的子系统。如珠光体是由体心立方晶格的铁素体和斜方晶系的渗碳体或特殊碳化物组成的。

##### B 空间结构的层次性

上述的溶质系统是复相系统的子系统,相又是组织系统的子系统。可见,复杂系统的钢具有明显的层次性。例如,由化学元素 C、Si、Mn、Cr、Ni、V、S、P 等的原子构建各类晶格;由不同成分和晶格的区域组成相;由铁素体、渗碳体、奥氏体、合金碳化物、金属间化合物等相构成各种组织,如珠光体、索氏体、马氏体、贝氏体等;由各种组织组成各种钢,如结构钢、工具钢、不锈钢等。层次十分鲜明。

---

<sup>①</sup> 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、自然事物的结构的形成或有序化都是系统自组织的过程。



### C 非线性相互作用

金属及合金是由众多要素非线性相互作用构成的不可积系统。它是系统复杂性的根源，在相变中发挥重要作用。它使金属及合金在外部条件变化时，将微观的随机起伏，如能量起伏、结构起伏、浓度起伏等予以放大，引发相变，形成新的结构。各个元素、各个相在相变中有机结合，有序配合，发生的相互作用是非线性的。线性关系仅仅是非线性关系的特例。

### D 相变规律的多样性

多种化学元素、多种相结构、多种组织构成的金属及合金，具有不同形状的相图，从二元相图到三元相图，越来越复杂，多元相图的建立极为困难。随着温度、压力的变化其相变行为表现了多样性、复杂性。如钢经过奥氏体化后，在常压下，采用不同的冷却条件，会发生过冷奥氏体共析分解为珠光体，转变为贝氏体、马氏体等一系列复杂的相变过程。各个相变具有各自的热力学条件、动力学条件、相变规律性和形形色色的相变产物，极为复杂、多样，表现了固态相变的神奇色彩。

## 1.1.2 金属及合金是整合系统

如上节所说，金属及合金是由多元素、多相、多组织、多晶体构成。这些要素不是混合，而是有机地结合，有序地配合，是一个有机的自组织的整体，是整合系统，具有“整体大于部分之总和”的特性和功能。

### 1.1.2.1 金属及合金整合系统

金属及合金的各种组成相、各种组织结构都不是混合系统，而均为整合系统。如钢中的珠光体组织，以往的文献中，将珠光体定义为“铁素体和渗碳体的机械混合物”，这是不正确的。若各取一些铁素体和渗碳体，按一定比例机械地混合起来，显然这不是珠光体。珠光体是过冷奥氏体共析分解的铁素体和碳化物的有机结合的组织。它是一种整合组织，其各相以界面相结合，以一定的比例相配合，是一个相互依赖、相互关联的整体。在研究金属及合金或各种组织的时候始终要从整体出发，从各个元素、各个相之间的相互整合入手，去揭示内在的本质及其规律性。混合系统中各要素具有相对独立性，没有固定的量的比例关系，混合系统的整体性质是各个要素性质的简单的线性叠加。而金属及合金的组织 and 性能是各个组成相的非线性相互作用的结果。

金属及合金的各种物理特性呈现为整体性的表征，整合系统具有各个组成要素在各自孤立状态下不可能具有的新质，且具有整体大于部分之总和的机制。例如，X45CrNiMo4 钢（德国钢号），奥氏体化后，在 640℃ 等温，珠光体分解的孕育期大于  $10^5$  s，若将它分成三个部分，构成 45Cr、60Ni4、45Mo 三种钢，三种钢的珠光体分解的孕育期之和才仅仅 13s。说明 X45CrNiMo4 钢奥氏体化后，奥氏体中溶有 C、Cr、Ni、Mo 等多种元素，它们相互作用，构成一个有机结合的整体，表现出新的整体性行为，具有各元素在各自单独影响时不具有的新质。

### 1.1.2.2 非线性相互作用

自然界中物质系统的相互作用实际上都是非线性的。金属及合金是由众多要素非线性相互作用构成的不可积系统。相变动力学、相变热力学、相变过程等都是非线性相互作用的结果。线性作用只是实际情况的近似<sup>[1]</sup>，仅仅是个特例。近代金属科学理论中有的探索简单性的结果，它假定各组成要素之间只具有简单的线性关系，割断联系来研究各个部