

过冷奥氏体 扩散型相变

Diffusion Phase Transformation
of Supercooled Austenite

刘宗昌 任慧平 著



科学出版社

www.sciencep.com

过冷奥氏体扩散型相变

Diffusion Phase Transformation of Supercooled Austenite

刘宗昌 任慧平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共 14 章,内容包括过冷奥氏体整合系统、固态相变中原子的位移、珠光体的组织结构、过冷奥氏体共析分解机理、珠光体转变动力学、珠光体的性能及应用、贝氏体相变理论研究的进展和评介、贝氏体相变的特征和定义、贝氏体的组织结构、贝氏体相变热力学、贝氏体相变动力学图,块状相变,贝氏体相变机制以及贝氏体的机械性能。本书在阐述经典的成熟理论的基础上,总结作者多年来的理论成果,提出了一些新定义、新概念、新理论,与读者共同探讨。

本书适合从事材料科学和工程的研究人员阅读和参考,也可供冶金、热处理、铸造、锻压、焊接、粉末冶金、金属腐蚀、轧钢等行业工程技术人员参考阅读,还可作为高等院校教师教学参考书,供本科生、研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

过冷奥氏体扩散型相变=Diffusion Phase Transformation of Supercooled Austenite/刘宗昌,任慧平著. —北京:科学出版社,2008. 1
ISBN 978-7-03-020242-0

I. 过… II. ①刘…②任… III. 奥氏体转变 IV. TG151. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 002639 号

责任编辑:牛宇锋/责任校对:陈丽珠

责任印制:刘士平/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 12 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 12 月第一次印刷 印张:20 3/4

印数:1—2 500 字数:400 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

传承文明,开拓创新,是永恒的主题。

固态相变理论是金属热处理、铸造、焊接、锻压、轧钢、冶金等金属材料工程的技术理论基础,是材料科学的重要支柱。本书内容包括过冷奥氏体的共析分解和贝氏体相变两部分,是固态相变的两个重要的分支学科。本书涉及如相变热力学、动力学、晶体学、组织学、性能学等问题,重点是两类固态相变产物的物理实质和相变机理等内容。本书在继承以往成熟理论的基础上,阐述了新概念、新观点和新理论。

科学是以范畴、定理、定律形式反映现实世界多种现象的本质和运动规律的知识体系。科学是沿着“经验事实→假说→理论”的途径而发展的。科学技术哲学(自然辩证法)指出:概念是科学理论的细胞。可见概念极为重要,但科学概念的形成往往有个过程。初期观察不充分,认识有片面性,则概念欠准确。随着科学研究的深入,通过科学抽象,搞清了事物的本质和内在规律性,则应当与时俱进,更新概念,促进理论进一步发展。本书就几个常用的重要概念,根据其物理实质和规律性作了修改。

20 世纪上半叶对珠光体转变进行了大量的研究工作,但在 60~80 年代研究不够活跃,80 年代以后,钢中共析分解的研究又引起了人们的兴趣。共析分解的某些问题尚未真正搞清,如珠光体的定义、领先相、共析分解机理等。本书作者依据对珠光体转变的研究,纠正了珠光体的定义,阐述了共析分解的新理论。

20 世纪中期,柯俊及其合作者 Cottrell 第一次对贝氏体相变的本质进行了研究,开拓性地提出了贝氏体相变机制类似于马氏体相变的切变机制。康沫狂等学者在其著作中系统地阐明了切变观点。60 年代末,美国冶金学家 Aaronson 及其合作者从能量上否定贝氏体转变的切变可能性,认为贝氏体转变是共析转变的变种。徐祖耀院士和方鸿生等学者在其著作中系统地阐明了这种观点。80 年代末,李承基等人提出了切变-扩散复合机制,认为钢中过冷奥氏体从扩散相变到无扩散型相变的转化具有连续性和阶段性。

半个世纪以来,切变学派和扩散学派的学者们不断研究和争论,使贝氏体相变理论和贝氏体钢的应用取得了辉煌的成就。但是由于贝氏体相变的复杂性、对贝氏体相变整合系统认识的艰巨性,至今,贝氏体相变的理论研究虽然成绩斐然,但仍然不够成熟,存在着学术观点的分歧。已经提出的各种学术观点和学说,缺乏统一的理论认识,需要整合,以促进贝氏体相变理论的进一步发展。

21 世纪以来,作者应用科学技术哲学的理论,对过冷奥氏体整合系统扩散型相变的研究取得了创新性的成果,对贝氏体相变提出了切变-扩散整合机制。

本书主要特点有:

(1)在阐述成熟的传统理论的同时,增加了近年来国内外研究、发展的新理论,尤其是鲜明地阐述了作者的学术观点。注意理论与实际相结合,推动技术创新。

(2)运用科学技术哲学理论,研究并提出了珠光体转变和贝氏体相变中相关的新概念,阐述了新理论。

(3)本书反映了作者多年来的固态相变的研究成果,是作者出版的专著、教材以及发表的百余篇论文的总结和提升。

本书内容属于固态相变的重要应用理论,也是从事金属材料科学与工程的技术人员手中的一把钥匙,可供从事冶金、轧钢、铸造、锻压、焊接、热处理、粉末冶金以及材料开发研究等行业的科研人员、技术人员参考,也可作为金属材料工程等专业教师的教学参考书,可供本科生、研究生等学习、阅读。

本书是作者刘宗昌、任慧平与李文学、王海燕、王玉峰、计云萍等老师以及学生们合作研究的结晶,是采用继承与创新相结合的方法,综合国内外的最新研究成果,不断补充和完善内容,为适应建设 21 世纪创新型社会、培养材料科学创新型人才而撰写的新书。

本书内容在科研、教学实践中几经修改和补充,但仍然难免有疏漏和不完善之处,敬请读者指正。在撰写时参考并引用了一些书刊、论文资料的有关内容,谨此致谢。

内蒙古科技大学

刘宗昌

2007 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 过冷奥氏体整合系统	1
1.1 钢是一个复杂系统	1
1.1.1 金属复杂系统	1
1.1.2 系统的特征	2
1.2 过冷奥氏体是整合系统	3
1.2.1 钢和合金钢是整合系统不是混合系统	3
1.2.2 整体大于部分之总和	4
1.2.3 非线性相互作用	5
1.3 相变的复杂性和转变产物组织形貌的多样性	9
1.3.1 相变的复杂性	9
1.3.2 组织、性能的多样性	10
1.4 过冷奥氏体转变的自组织	11
1.4.1 相变自组织的条件	11
1.4.2 过冷奥氏体转变过程是自组织的	12
参考文献	17
第 2 章 固态相变中原子的位移	18
2.1 金属中的扩散理论概要	18
2.1.1 扩散定律	19
2.1.2 扩散定律在固态相变中的应用举例	20
2.1.3 原子运动和扩散系数	21
2.1.4 扩散机理	23
2.2 原子迁移的热力学分析	27
2.2.1 扩散的驱动力	27
2.2.2 原子热激活跃迁	28
2.3 实际金属中的扩散	29
2.3.1 纯金属中的自扩散	29
2.3.2 稀合金中的扩散	31
2.3.3 金属晶体结构对扩散系数的影响	32
2.3.4 合金元素的影响	34

2.4	马氏体相变中原子的切变位移	34
2.4.1	马氏体相变的 K-S 切变模型	34
2.4.2	马氏体相变的 G-T 模型, 均匀切变和非均匀切变	38
2.5	过冷奥氏体相变过程中原子的迁移方式	40
2.5.1	温度对原子位移方式的影响	41
2.5.2	奥氏体形成阶段原子的扩散	42
2.5.3	过冷奥氏体共析分解反应阶段的扩散	42
2.5.4	贝氏体相变阶段原子的位移	43
2.5.5	马氏体相变阶段	44
2.5.6	碳原子的长程扩散	44
2.5.7	铁原子和替换原子位移方式的过渡性	45
2.6	珠光体转变中的扩散规律	45
2.6.1	体扩散和晶界扩散	45
2.6.2	碳原子的扩散	47
2.6.3	合金元素对碳原子扩散的影响	47
2.6.4	合金元素的扩散	48
2.6.5	铁原子的自扩散	49
	参考文献	49
第3章	珠光体的组织结构	51
3.1	珠光体的组织形貌和定义	51
3.1.1	共析分解和珠光体的定义	51
3.1.2	珠光体的组织形态	52
3.1.3	珠光体的片间距	54
3.1.4	珠光体组织形貌多样性、复杂性	56
3.2	珠光体的晶体学	57
3.2.1	珠光体与奥氏体 A1 的位向关系	58
3.2.2	珠光体团中铁素体和渗碳体之间的位向关系	58
	参考文献	59
第4章	过冷奥氏体共析分解机理	60
4.1	珠光体转变热力学	60
4.1.1	奥氏体与珠光体的自由能之差	61
4.1.2	共析分解热力学条件	61
4.1.3	共析分解驱动力的计算模型	62
4.2	过冷奥氏体共析分解机理	63
4.2.1	非均匀形核的一般规律	63

4.2.2 珠光体的形核	65
4.2.3 珠光体晶核的长大	71
4.2.4 总结	77
4.3 钢中粒状珠光体的形成机理	77
4.3.1 析出相聚集长大理论	77
4.3.2 纤维状组织的粗化	78
4.3.3 低温退火时片状珠光体的球化	79
4.3.4 特定条件下过冷奥氏体的分解	81
4.3.5 高温回火	81
4.4 共析分解的特殊形式——相间沉淀	83
4.4.1 相间沉淀的热力学条件	83
4.4.2 “相间沉淀”产物的形态	84
4.4.3 相间沉淀机制	85
4.5 先共析铁素体的析出	88
4.5.1 亚共析钢中先共析铁素体的析出	88
4.5.2 先共析铁素体的析出速度	92
4.5.3 先共析魏氏组织铁素体的形成	94
4.5.4 伪共析转变	95
4.6 先共析碳化物的析出	97
参考文献	99
第5章 珠光体转变动力学	101
5.1 珠光体形核率及长大速度	101
5.1.1 形核率	101
5.1.2 Johnson-Mehl 方程	101
5.1.3 Avrami 方程	102
5.2 过冷奥氏体转变 C-曲线	103
5.2.1 等温转变图	103
5.2.2 连续冷却转变图	106
5.3 退火用 C-曲线	108
5.3.1 典型工具钢的退火用 TTT 图	108
5.3.2 退火用 TTT 图、CCT 图的应用价值	111
5.4 钢中 TTT 图的类型	112
5.4.1 类型一:共析分解和贝氏体相变曲线重叠	112
5.4.2 类型二:珠光体 TTT 图与贝氏体 TTT 图逐渐分离,形成河湾区	113
5.4.3 类型三:合金结构钢的贝氏体 TTT 图普遍在珠光体 TTT 图的左方	114

5.4.4 类型四:渗碳后贝氏体转变 C-曲线右移	115
5.4.5 类型五:贝氏体转变 C-曲线严重右移直至消失	116
5.4.6 类型六:Cr-Ni-Mo 合金系中,珠光体的 C-曲线严重右移,直至消失 ...	118
5.5 影响过冷奥氏体共析分解的内在机制	119
5.5.1 奥氏体化状态的影响	119
5.5.2 奥氏体固溶碳量的影响	120
5.5.3 奥氏体中合金元素的影响	120
5.5.4 合金奥氏体系统的整合作用	123
参考文献	127
第6章 珠光体的性能及应用	128
6.1 铁素体-珠光体的力学性能	128
6.1.1 钢铁材料的机械性能	129
6.1.2 珠光体的机械性能	130
6.1.3 铁素体+珠光体组织的机械性能	132
6.2 铁素体-珠光体组织的应用	132
6.2.1 珠光体钢的应用	132
6.2.2 铁素体-珠光体钢的应用	133
6.3 粒状珠光体组织及退火新工艺	136
6.3.1 决定退火钢硬度的要素	136
6.3.2 典型钢种锻轧材的球化退火	140
参考文献	146
第7章 贝氏体相变理论研究的进展和评介	148
7.1 贝氏体相变的学术论争及述评	148
7.1.1 对贝氏体相变基本特征的共识	149
7.1.2 关于贝氏体的定义	150
7.1.3 关于贝氏体相变动力学	152
7.1.4 关于贝氏体相变的机制	152
7.2 贝氏体相变不是共析分解	154
7.2.1 珠光体和贝氏体的相组成物不同	154
7.2.2 两种相变的晶核不同	154
7.2.3 两种相变产物的形貌不同	156
7.2.4 珠光体和贝氏体的亚结构不同	157
7.2.5 两种相变产物的位向关系不同	158
7.2.6 其他方面的区别	159
7.3 过冷奥氏体转变贯序	159

7.3.1 从高温区过渡到中温区	160
7.3.2 从两相共析形核向单相形核的演化	160
7.3.3 动力学图的演化	161
7.3.4 组织形貌的演化	163
7.3.5 亚结构的演化	164
7.4 传承文明, 开拓创新, 实现整合	167
参考文献	168
第8章 贝氏体相变的特征和定义	170
8.1 贝氏体相变的过渡性	170
8.1.1 中温转变是过冷奥氏体转变的中间过渡环节	170
8.1.2 上贝氏体转变和珠光体分解的联系与区别	171
8.1.3 下贝氏体转变和马氏体相变的联系与区别	173
8.1.4 贝氏体的组成相和形貌的过渡性	174
8.1.5 贝氏体转变具有变温转变和等温转变特征	175
8.2 贝氏体相变的主要特点	177
8.2.1 表面浮凸特征	177
8.2.2 贝氏体相变的不彻底性特征	178
8.2.3 贝氏体相变具有 B_s 、 B_f 点	178
8.2.4 贝氏体碳化物的特点	178
8.2.5 贝氏体铁素体亚结构特征	179
8.2.6 贝氏体相变的晶体学特征	181
8.2.7 在相变机制方面的特征	181
8.3 贝氏体的定义	182
8.3.1 概念的科学抽象	182
8.3.2 以往的定义	183
8.3.3 贝氏体的新定义	183
8.3.4 贝氏体相变的定义	184
参考文献	184
第9章 贝氏体的组织结构	186
9.1 贝氏体的组织形貌	186
9.1.1 上贝氏体组织形貌	187
9.1.2 下贝氏体的组织形貌	189
9.1.3 工业用钢中的贝氏体组织的复杂性	192
9.1.4 贝氏体组织形貌的多样性	192
9.1.5 魏氏组织	193

9.2 贝氏体铁素体的亚结构	194
9.2.1 贝氏体组织中的精细亚结构	194
9.2.2 贝氏体铁素体中的位错和孪晶	197
9.2.3 贝氏体中的中脊	199
9.3 贝氏体碳化物的形貌	201
9.3.1 上贝氏体中的碳化物形貌	201
9.3.2 下贝氏体中的碳化物形貌	203
9.4 有色合金中的贝氏体	206
9.4.1 Cu-Zn 系合金中的贝氏体	206
9.4.2 Ag-Cd 合金中的贝氏体	208
9.4.3 U-Cr 合金中的贝氏体	208
9.4.4 Ag-Zn 合金中的贝氏体	209
9.5 贝氏体组织中的位向关系	209
9.5.1 贝氏体铁素体的位向关系	210
9.5.2 贝氏体中碳化物的位向关系	211
参考文献	213
第 10 章 贝氏体相变热力学	214
10.1 贝氏体相变热力学条件	215
10.1.1 自由焓变化	215
10.1.2 贫碳区及贝氏体铁素体的物理本质	216
10.2 贝氏体相变热力学计算	217
10.2.1 相变驱动力的计算模型	218
10.2.2 相变驱动力的计算	220
10.2.3 按切变机制计算相变驱动力	222
10.2.4 $\gamma \rightarrow \alpha_B + \gamma_1 \rightarrow BF + \gamma_1$ 计算模型	223
10.3 相变驱动力与相变趋势	226
10.3.1 原子位移方式与相变机制	227
10.3.2 原子热激活跃迁无扩散型转变	228
10.3.3 热力学与相变机制的关系	229
参考文献	230
第 11 章 贝氏体相变动力学图	232
11.1 贝氏体相变动力学图特征	232
11.1.1 从 TTT 图看珠光体到贝氏体相变的演化	233
11.1.2 贝氏体相变速度比析析分解快的动力学图	235
11.1.3 贝氏体相变动力学具有变温性和等温性的双重特征	237

11.1.4	贝氏体转变速度较共析分解慢的 TTT 图	238
11.1.5	上、下贝氏体具有独立的相变动力学曲线	238
11.1.6	具有宽广的河湾区的 TTT 图	241
11.2	影响贝氏体转变动力学的因素	242
11.2.1	奥氏体化温度的影响	242
11.2.2	合金元素对贝氏体时 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变的影响	242
11.2.3	偏聚现象对贝氏体相变动力学的影响	243
	参考文献	245
第 12 章	块状相变	246
12.1	金属的块状相变	246
12.1.1	块状相变的定义	246
12.1.2	块状相变的合金及相图	247
12.1.3	纯金属中的块状相变	247
12.1.4	替换式固溶体中的块状相变	251
12.2	块状相变的形核-长大	253
12.2.1	块状相变的形核	253
12.2.2	块状相变的长大	253
12.3	块状转变与贝氏体相变的联系	254
12.3.1	块状转变与贝氏体相变的亲缘关系	254
12.3.2	热激活迁移相变机制	255
	参考文献	257
第 13 章	贝氏体相变机制	258
13.1	贫碳区	259
13.1.1	奥氏体化学成分的不均匀性	259
13.1.2	贫溶质区	261
13.1.3	钢中贝氏体相变受碳原子扩散控制	261
13.1.4	贫碳区(γ)尺度的理论分析	263
13.2	贝氏体铁素体的形核	264
13.2.1	贝氏体铁素体的形核位置	264
13.2.2	从贝氏体铁素体精细亚结构推测晶核的尺度	265
13.2.3	贝氏体铁素体的热激活位移形核机制	267
13.2.4	贝氏体激发形核机制	271
13.3	贝氏体碳化物的形成机理	272
13.3.1	贝氏体碳化物类型	272
13.3.2	贝氏体碳化物的来源	273

13.3.3 贝氏体碳化物的形核	277
13.3.4 贝氏体碳化物的长大	278
13.3.5 贝氏体碳化物形核-长大时原子的位移	280
13.4 贝氏体铁素体的热激活长大	281
13.4.1 贝氏体铁素体晶核的长大	281
13.4.2 上贝氏体铁素体长大速度和长大机制	284
13.5 贝氏体相变切变-扩散整合机制	287
13.5.1 贝氏体铁素体形核-长大热激活机制	289
13.5.2 无碳化物贝氏体的形成过程	291
13.5.3 羽毛状贝氏体的形成过程	291
13.5.4 下贝氏体的形成过程	292
参考文献	292
第 14 章 贝氏体的机械性能	295
14.1 钢中贝氏体的力学性能	295
14.1.1 贝氏体的强度和硬度	295
14.1.2 贝氏体的强化机理	296
14.1.3 贝氏体的塑性和韧性	298
14.1.4 粒状贝氏体的性能	300
14.1.5 准贝氏体的性能	301
14.1.6 贝氏体的疲劳性能和耐磨性	301
14.1.7 贝氏体回火后的强度和韧性	301
14.2 贝氏体钢及其应用	303
14.2.1 贝氏体钢的合金化	303
14.2.2 贝氏体钢钢种	305
14.2.3 准贝氏体钢的应用	307
参考文献	307
附录	308
附录 1 各类钢的相变临界点	308
附录 2 相关常数	317

第1章 过冷奥氏体整合系统

按照科学技术哲学^①的理论,金属及合金是开放的复杂系统^②,其固态相变更为复杂多变。但是,在近代的物理冶金的理论研究中,由于条件的限制,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。实际上,金属、合金、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往往派不上用场,难以得出精确的结论。20世纪中叶兴起了系统科学的方法研究自然界的复杂性问题^[1]。

本章就是从科学技术哲学(自然辩证法)的高度,阐明金属及合金的复杂性。认为各种金属及合金、钢及其合金钢都是复杂的整合系统,原子、晶格、相、组织是组成其各个层次的要素,这些要素之间的非线性相互作用,使固态相变,组织形貌和性能等具有了复杂的物理实质和变化规律^[2]。

过冷奥氏体是钢中的重要组成相之一。将钢加热到临界点(A_1)以上,进行奥氏体化,得到单一奥氏体状态或奥氏体+碳化物等多相的整合状态,再以各种方式冷却到临界点以下,在不同的过冷度下,过冷奥氏体将发生复杂的固态相变。钢中的固态相变是迄今为止最为复杂的相变。这是因为过冷奥氏体是一个复杂的整合系统,从高温区到低温区的转变是一个复杂的转变体系,从铁素体-珠光体转变→贝氏体相变→马氏体相变是一个复杂的整合系统,相变是一个逐级演化的过程,相变产物的组织结构也具有密切的联系和多样性。以往的研究,不太注意珠光体转变、贝氏体相变、马氏体相变三者之间的关联性,因而理论体系不完善。应当以系统整合的方法^③考察过冷奥氏体的转变体系。

1.1 钢是一个复杂系统

1.1.1 金属复杂系统

任何金属及合金都是一个复杂系统,作为一个复杂系统是由许多子系统组成

① 科学技术哲学(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^[1]。

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^[1]。

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^[1]。

的, 现以钢、合金钢为例说明。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(稀土元素)、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。每一种固溶的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_2 。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、粒状组织、莱氏体组织、郁氏体组织、时效组织等。

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 GP 区、柯垂尔 (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, 如固溶体、碳化物等。

1.1.2 系统的特征

作为复杂系统的金属, 合金、合金钢具有如下基本特征:

1) 组成要素的多体性

金属、合金和钢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。

2) 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。如由化学元素 C、Si、Mn、Cr、Ni、V、S、P 等的原子构建成各类晶格; 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材，如结构钢、工具钢、不锈钢等。层次十分鲜明。

3) 非线性相互作用

金属、合金和钢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，将微观的起伏，如能量起伏、结构起伏、浓度起伏等相互作用并予以放大，从而引发相变，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。

4) 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、合金、合金钢等，具有不同形状的相图，从二元相图（如 Fe-C 相图）到三元相图（如 Fe-M-C 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，会发生共析分解、贝氏体转变、马氏体转变等复杂的相变。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，表现了固态相变的神奇色彩，极为复杂、多样。

1.2 过冷奥氏体是整合系统

上已叙及，金属及合金、钢、合金钢是由多元素、多相、多组织、多晶体构成。这些要素不是混合，而是有机的结合，有序的配合，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”的特性和机制。

1.2.1 钢和合金钢是整合系统不是混合系统

钢以及其他金属及合金的各种组成相、各种组织都不是混合系统，而均为整合系统。如钢中的珠光体，不少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。若各取铁素体和渗碳体按一定比例机械地混合起来就是珠光体吗？显然不是。珠光体是共析分解的铁素体和碳化物的整合^①组织，是有机结合体，它们以界面相结合，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。即使是铁素体球墨铸铁也不能视为铁素体与石墨（F+G）的机械混合物。

^① 整合 (integrate in a systematic way)：以系统的整体性为基础和前提的有机结合、有序配合或组织匹配，称为整合。整合系统不同于混合系统。

在混合系统中,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。而钢中的组织和性能是各个组成相的非线性相互作用的结果。

1.2.2 整体大于部分之总和

金属的机械性能和各种物理特性呈现为整体性的表征,具有整体大于部分之总和的特点。现举一例: X45CrNiMo4 (德国钢号) 钢,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——45Cr、60Ni4、45Mo,其分解情况见表 1.1。从表中可见,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。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的新的性质和行为。

表 1.1 X45CrNiMo4 钢“整体”与“部分”的比较

部分	相应的钢种	在珠光体“鼻温”处的孕育期/s	结论
1	45Cr ^[3]	约 10	Cr 的单独影响
2	60Ni4 ^[3]	约 2	Ni 的单独影响
3	45Mo ^[3]	约 1	Mo 的单独影响
三部分之总和		约 13	部分的简单叠加值
X45CrNiMo4(整体)		$>10^5$	C、Cr、Ni、Mo 的综合影响,使 $10^5 \gg 13$

相变动力学是研究相变的速度问题的。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。动力学曲线反映了其非线性规律。

相变动力学是相变时的形核率 N_s , 核长大速度 u , 转变时间 t 和转变量之间的关系科学。对于扩散型固态相变,在一定过冷度下的恒温转变动力学一般用 Johnson-Mehl 方程来描述其规律性。即

$$X_t = 1 - \exp\left(\frac{\pi}{3} u^3 N_s t^4\right) \quad (1.1)$$

由于固态相变时的形核率和长大速度都随时间而改变,故多采用 Avrami 方程:

$$f(t) = 1 - \exp(-Bt^k) \quad (1.2)$$

式中, B 为一常数,对三维空间 $3 \leq k \leq 4$ 。

过冷奥氏体在冷却时发生的固态相变,其形核率和长大速率与转变量之间的关系曲线都有一个极大值,通常呈 C-曲线(TTT 图、CCT 图)的形状。但是,