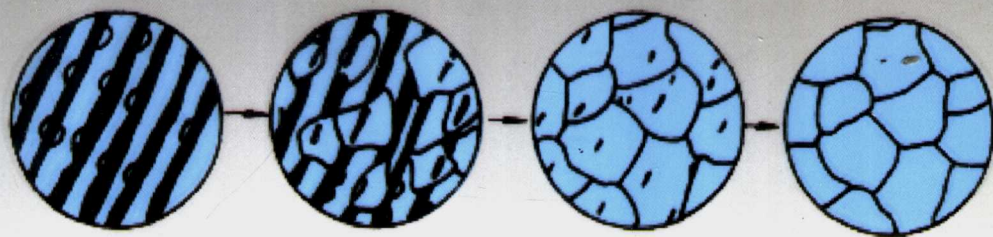


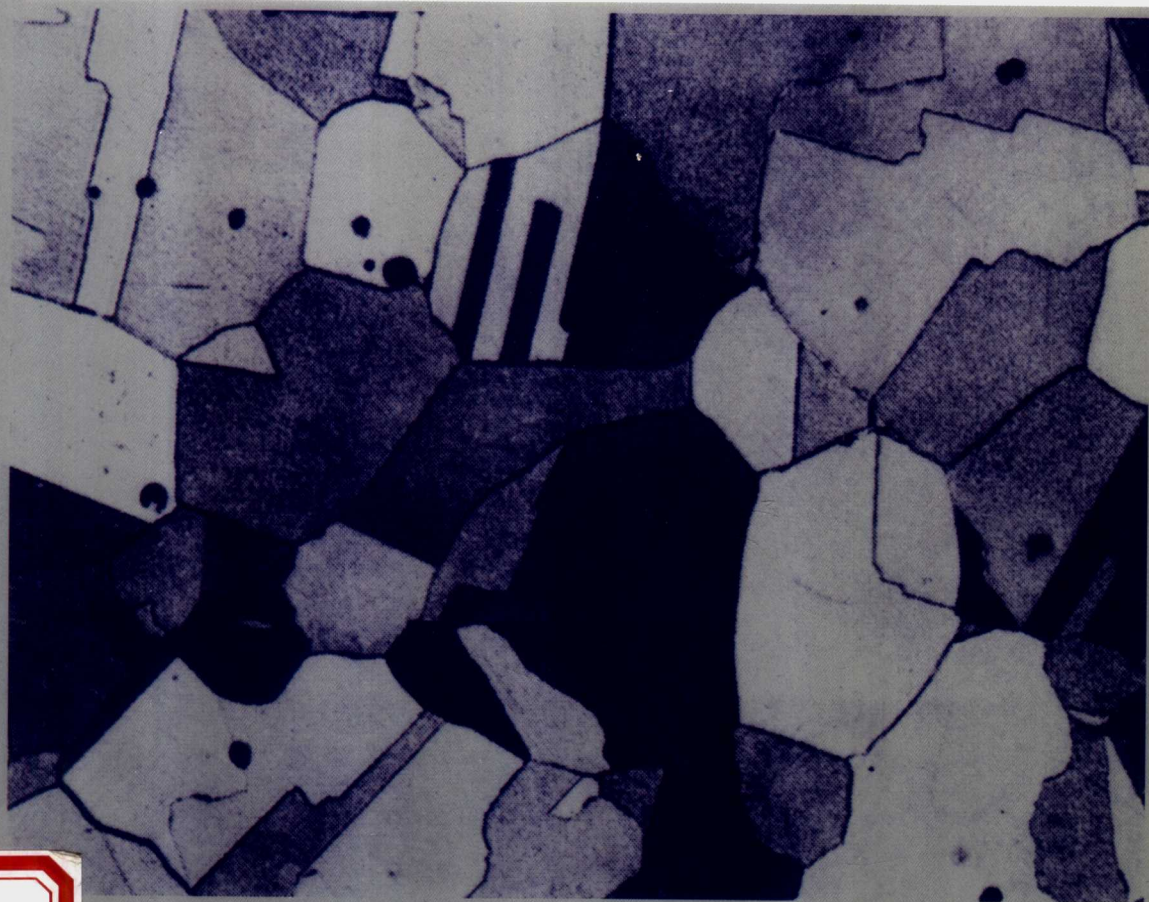
高等学校教材



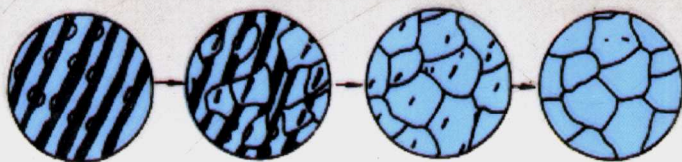
金属固态相变 及应用

JINSHU GUTAI XIANGBIAN
JI YINGYONG

康煜平 主编



化学工业出版社



金属固态相变 及应用

JINSHU GUTAI XIANGBIAN
JI YINGYONG

ISBN 978-7-122-00140-5



9 787122 001405 >

 www.cip.com.cn
读科技图书 上化工社网

销售分类建议:金属材料

定价: 28.00元

高等学校教材

金属固态相变及应用

康煜平 主编



化学工业出版社

·北京·

本书主要介绍了金属材料固态相变的基本规律和金属材料在加热和冷却过程中固态相变-组织-性能之间的具体联系,详细阐述了固态相变原理在退火、正火、淬火、回火、固溶处理和时效等基本热处理工艺中的具体应用以及热处理工艺对固态金属材料组织与性能的影响规律。

本书可作为金属材料工程、材料成形与控制工程、机械等专业的本科生教材,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属固态相变及应用/康煜平主编. —北京:化学工业出版社, 2007. 4

高等学校教材

ISBN 978-7-122-00140-5

I. 金… II. 康… III. 热处理-高等学校-教材 IV. TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第037925号

责任编辑:陶艳玲 彭喜英

装帧设计:张辉

责任校对:吴静

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张16¼ 字数405千字 2007年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

本书编写人员

主编 康煜平

参编 常 伟 任英磊 杨 林

张 松 张春华 邱克强

吴 伟 郭全英 耿 新

前 言

《金属固态相变及应用》是金属材料工程专业的专业课之一。其教学目的和任务是，使学生通过本课程的学习，掌握金属固态相变的基本原理，熟悉金属材料在加热和冷却过程中发生固态相变的基本规律及其在退火、正火、淬火、回火、固溶处理和时效中的具体应用，了解金属固态相变-组织-性能之间的具体联系，熟悉主要的热处理工艺及其对金属材料固态组织与性能的影响规律，为从事与金属固态相变有关的研究和技术工作打下专业理论基础。

第1章为固态相变概论，主要从整体上介绍金属固态相变的一般规律。第2、3、5、6、9、10章为固态相变各论，分别介绍钢中奥氏体的形成、珠光体转变、马氏体相变、贝氏体相变、回火转变和脱溶沉淀。在第3章介绍珠光体转变之后，紧接着第4章介绍与珠光体转变理论的应用密切相关的退火和正火。第7章介绍过冷奥氏体转变动力学图，实际上是对珠光体、马氏体、贝氏体相变动力学的总结。在第5~7章介绍马氏体相变、贝氏体相变和过冷奥氏体转变动力学图之后，紧接着第8章就介绍与马氏体相变和贝氏体相变理论的应用密切相关的淬火。第9章将回火转变理论及其在回火工艺中的应用一并介绍。第10章则将脱溶沉淀理论及其在固溶处理和时效工艺中的应用合在一起介绍。

在编著过程中，作者力图使本书具有标准化程度高、内容覆盖面宽、可使用范围广的特点。书中所涉及的热处理名词术语和材料牌号基本都采用了最新国家标准，以使其标准化程度高；书中内容既涉及固态相变原理也涉及固态相变的应用，既涉及钢也涉及铸铁和有色金属，以使其内容覆盖面宽；书中既注意理论知识的系统阐述，又注意工艺参数选择和操作的指导，以使其使用范围广，不但可以作为高等院校金属材料工程专业本科生的专业教材，而且也可以作为工程技术人员的专业参考书。

本书由沈阳工业大学康煜平教授主编，其中第1章由辽宁工业大学常伟副教授编写，第2、3章、第8、9章由沈阳工业大学康煜平教授编写，第4、5章由沈阳工业大学任英磊教授编写，第6章由沈阳工业大学杨林教授编写，第7章由沈阳工业大学张松教授和张春华副教授编写，第10章由沈阳工业大学邱克强教授编写。吴伟副教授为各章编写了思考题，郭全英工程师提供了部分金相照片资料，耿新工程师为全书绘制了插图。

在本书编著过程中，得到了沈阳工业大学刘正教授、陈立佳教授、刘丽荣博士和王鑫硕士的帮助；另外，书中参考并引用了一些文献和资料的有关内容，在此，谨对上述朋友、同事和援引文献的作者们一并表示衷心的感谢！

本书是根据金属材料专业教学改革后新的教学大纲编写的，讲授时可以根据需要有所取舍，有些内容可以作为学生自学阅读材料。

由于本书将原来的金属热处理原理与金属热处理工艺两门专业课合在一起介绍，实属一种新的尝试，所以在内容的取舍和前后顺序的编排上可能多有不当之处。又因作者水平有限，书中疏漏和不足在所难免，敬请读者不吝批评指正。

康煜平
2007年4月

目 录

1 金属固态相变概论	1
1.1 金属固态相变的主要类型	1
1.1.1 平衡转变	1
1.1.2 非平衡转变	2
1.1.3 固态相变的其他分类	3
1.2 金属固态相变的主要特点	3
1.2.1 相界面	3
1.2.2 弹性应变能	4
1.2.3 原子的迁移率	5
1.2.4 晶体缺陷	5
1.2.5 亚稳过渡相	5
1.2.6 位向关系	5
1.2.7 惯习面	6
1.3 固态相变时的形核	6
1.3.1 均匀形核	6
1.3.2 非均匀形核	7
1.4 固态相变时的晶核长大	8
1.4.1 新相长大机理	8
1.4.2 新相长大速度	9
1.5 金属固态相变的动力学	11
1.5.1 Johnson-Mehl 方程	11
1.5.2 Avrami 方程	11
1.5.3 扩散型相变的等温转变动力学图	12
思考题	12
2 钢中奥氏体的形成	13
2.1 奥氏体及其形成条件	13
2.1.1 奥氏体的组织结构	13
2.1.2 奥氏体的性能	14
2.1.3 奥氏体的形成条件	14
2.2 奥氏体的形成机理	15
2.2.1 共析钢平衡组织向奥氏体的转变机理	15
2.2.2 非共析钢奥氏体的形成	17
2.2.3 非平衡组织向奥氏体的转变	18
2.3 奥氏体形成动力学	18
2.3.1 共析钢奥氏体等温形成动力学	18
2.3.2 亚共析钢奥氏体等温形成动力学	21
2.3.3 奥氏体形成的影响因素	21

2.4	连续加热时奥氏体的形成	22
2.4.1	奥氏体转变的临界温度	23
2.4.2	奥氏体转变的临界温度范围	23
2.4.3	奥氏体转变的速度	23
2.4.4	奥氏体晶粒	23
2.4.5	奥氏体成分的不均匀性	24
2.5	奥氏体晶粒的长大及控制	24
2.5.1	奥氏体晶粒度的概念	24
2.5.2	奥氏体晶粒长大的特点	25
2.5.3	奥氏体晶粒长大的影响因素	25
2.5.4	细化奥氏体晶粒的措施	27
2.6	组织遗传和断口遗传	27
2.6.1	组织遗传	27
2.6.2	断口遗传	29
2.7	奥氏体转变的应用举例	30
2.7.1	奥氏体不锈钢的固溶处理	30
2.7.2	高锰钢的水韧处理	30
2.7.3	高速钢淬火加热时的奥氏体晶粒度控制	31
	思考题	32
3	珠光体转变	33
3.1	珠光体的组织结构	33
3.1.1	珠光体的组织形态	33
3.1.2	片状珠光体的晶体学	35
3.2	珠光体转变机制	35
3.2.1	珠光体转变的热力学条件	35
3.2.2	片状珠光体形成机制	36
3.2.3	粒状珠光体形成机制	38
3.3	先共析转变和伪共析转变	40
3.3.1	先共析转变	40
3.3.2	魏氏组织	42
3.3.3	伪共析转变	45
3.4	珠光体转变动力学	45
3.4.1	珠光体的形核率及长大速度	45
3.4.2	珠光体等温转变动力学曲线	46
3.4.3	珠光体等温转变动力学图	47
3.4.4	影响珠光体转变动力学的因素	47
3.5	珠光体的力学性能	50
3.5.1	片状珠光体的力学性能	50
3.5.2	粒状珠光体的力学性能	52
3.5.3	铁素体加珠光体的力学性能	52
3.5.4	形变珠光体的力学性能	53
3.6	钢中碳化物的相间沉淀	55

3.6.1	相间沉淀组织	55
3.6.2	相间沉淀机理	55
3.6.3	相间沉淀条件	57
3.6.4	相间沉淀钢的强化机制及应用	58
	思考题	60
4	退火和正火	61
4.1	退火的目的和分类	61
4.2	钢的退火	62
4.2.1	完全退火	62
4.2.2	不完全退火	64
4.2.3	等温退火	65
4.2.4	球化退火	66
4.2.5	钢的退火缺陷和应对措施	70
4.3	正火	71
4.3.1	钢的正火	72
4.3.2	铸铁的正火	73
4.4	有色金属(合金)的退火	75
4.4.1	多相化退火	75
4.4.2	重结晶退火	76
4.5	扩散退火	77
4.5.1	均匀化退火	77
4.5.2	钢的预防白点退火	80
4.5.3	钛合金的真空除氢退火	81
4.6	基于回复和再结晶的退火	81
4.6.1	再结晶退火	81
4.6.2	消除应力退火	82
	思考题	83
5	马氏体相变	84
5.1	马氏体相变的主要特征	85
5.1.1	表面浮凸效应和切变共格性	85
5.1.2	马氏体转变的无扩散性	86
5.1.3	惯习面和一定的位向关系	87
5.1.4	亚结构	88
5.1.5	转变的非恒温性和不完全性	88
5.1.6	马氏体转变的可逆性	89
5.2	马氏体的晶体结构	89
5.2.1	马氏体可能的晶体结构	89
5.2.2	一般钢中马氏体的晶体结构	89
5.2.3	马氏体的异常正方度	90
5.3	马氏体的组织形态和亚结构	91
5.3.1	钢中马氏体的组织形态和亚结构	91
5.3.2	影响马氏体形态及亚结构的因素	95

5.4 马氏体相变热力学	96
5.4.1 Fe-C合金马氏体相变的热力学条件	96
5.4.2 M_s 点的物理意义及其影响因素	97
5.5 马氏体相变动力学	100
5.5.1 降温形成马氏体的动力学	100
5.5.2 等温形成马氏体的动力学	101
5.5.3 爆发形成马氏体的动力学	103
5.5.4 热弹性马氏体转变动力学	103
5.5.5 奥氏体稳定化	104
5.6 马氏体相变机制	106
5.6.1 马氏体的形核	106
5.6.2 马氏体相变的切变模型	107
5.6.3 马氏体的长大	110
5.7 马氏体的性能	110
5.7.1 马氏体的硬度和强度	110
5.7.2 马氏体的塑性和韧性	113
5.7.3 马氏体相变诱发塑性	114
5.7.4 马氏体的物理性能	115
5.7.5 高碳马氏体的显微裂纹	116
5.8 热弹性马氏体与形状记忆效应	117
5.8.1 有色合金中的弹性马氏体	117
5.8.2 形状记忆效应	119
5.8.3 形状记忆效应的晶体学机制	120
5.8.4 伪弹性和超弹性	122
5.8.5 双程形状记忆效应的本质	123
5.8.6 形状记忆合金及应用实例	124
思考题	126
6 贝氏体相变	127
6.1 贝氏体相变的基本特征	127
6.1.1 贝氏体相变的温度范围	127
6.1.2 贝氏体相变的产物	127
6.1.3 贝氏体相变动力学	128
6.1.4 贝氏体相变的扩散性	128
6.1.5 晶体学特征	128
6.2 贝氏体的组织结构	128
6.2.1 上贝氏体	128
6.2.2 下贝氏体	129
6.2.3 无碳化物贝氏体	130
6.2.4 粒状贝氏体	131
6.2.5 其他类型贝氏体	132
6.3 贝氏体相变机制	133
6.3.1 贝氏体相变的切变机制	133

6.3.2	贝氏体的形成过程	135
6.3.3	贝氏体相变的台阶机制	137
6.4	贝氏体相变动力学	138
6.4.1	贝氏体等温转变动力学	138
6.4.2	贝氏体相变时碳的扩散	139
6.4.3	影响贝氏体相变动力学的因素	139
6.5	贝氏体的力学性能	141
6.5.1	影响贝氏体力学性能的因素	141
6.5.2	贝氏体的强度和硬度	142
6.5.3	贝氏体的韧性	142
	思考题	143
7	过冷奥氏体转变动力学图	144
7.1	过冷奥氏体等温转变动力学图	144
7.1.1	过冷奥氏体等温转变动力学图的基本形式	144
7.1.2	TTT图的测定方法	145
7.1.3	TTT图的影响因素	147
7.1.4	TTT图的基本类型	148
7.1.5	过冷奥氏体等温转变动力学图的应用	150
7.2	过冷奥氏体连续转变动力学图	151
7.2.1	过冷奥氏体连续转变动力学图的基本形式	151
7.2.2	改型 CCT图	152
7.2.3	过冷奥氏体连续转变动力学图的测定	154
7.2.4	过冷奥氏体连续转变动力学图的应用	154
	思考题	156
8	淬火	158
8.1	淬火加热	158
8.1.1	淬火加热温度的确定	158
8.1.2	加热时间的确定	160
8.1.3	加热介质的选择	161
8.2	淬火介质	162
8.2.1	在有物态变化的介质中的冷却过程	162
8.2.2	在无物态变化的介质中的冷却过程	163
8.2.3	常用的淬火介质	163
8.2.4	影响淬火介质冷却能力的因素	166
8.3	钢的淬透性	167
8.3.1	淬透性与淬硬性	167
8.3.2	淬透性的测定方法	169
8.3.3	淬透性的应用	171
8.4	淬火工艺	172
8.4.1	常用的淬火工艺	173
8.4.2	其他淬火工艺	175
8.4.3	冷处理	176

8.5	表面淬火	176
8.5.1	表面淬火的目、分类及应用	176
8.5.2	淬硬层的深度及硬度梯度	177
8.5.3	感应加热表面淬火	177
8.5.4	其他加热表面淬火	181
8.6	淬火缺陷	183
8.6.1	淬火变形	183
8.6.2	淬火裂纹	183
8.6.3	其他淬火缺陷	184
	思考题	185
9	钢的回火转变及回火	187
9.1	淬火钢回火时的组织转变	187
9.1.1	碳原子的偏聚	187
9.1.2	马氏体的分解	188
9.1.3	残余奥氏体的转变	191
9.1.4	渗碳体的形成	191
9.1.5	α 相回复再结晶和碳化物的聚集长大	192
9.2	碳钢回火后的力学性能	194
9.3	合金元素对回火转变的影响	196
9.3.1	回火抗力的提高	196
9.3.2	二次淬火	197
9.3.3	二次硬化	198
9.3.4	合金钢回火时碳化物的转变	199
9.4	回火脆性	200
9.4.1	第一类回火脆性	200
9.4.2	第二类回火脆性	203
9.5	钢的回火工艺	206
9.5.1	回火温度的确定	207
9.5.2	回火保温时间的确定	208
9.5.3	回火后的冷却	209
9.5.4	回火缺陷	209
	思考题	210
10	脱溶沉淀及时效	211
10.1	概述	211
10.1.1	固溶、脱溶及时效	211
10.1.2	脱溶沉淀的条件	212
10.1.3	脱溶的分类	212
10.2	脱溶沉淀热力学及脱溶沉淀过程	213
10.2.1	脱溶沉淀热力学	213
10.2.2	脱溶沉淀过程	215
10.2.3	脱溶相的粗化	218
10.3	脱溶沉淀后的显微组织	218

10.3.1	连续脱溶 (continuous precipitation) 的显微组织	218
10.3.2	不连续脱溶的显微组织	220
10.3.3	脱溶过程中显微组织变化序列	221
10.4	脱溶沉淀过程动力学	222
10.4.1	脱溶沉淀等温动力学图的特点	222
10.4.2	等温脱溶沉淀动力学图的影响因素	223
10.5	脱溶沉淀时性能的变化	224
10.5.1	冷时效与温时效	224
10.5.2	时效硬化机制	225
10.5.3	回归现象	227
10.6	调幅分解	228
10.6.1	调幅分解的热力学条件	228
10.6.2	调幅分解过程	229
10.6.3	调幅分解组织与性能	230
10.7	固溶处理及时效工艺	232
10.7.1	合金固溶处理后性能的变化	232
10.7.2	固溶处理和时效参数对材料性能的影响	233
10.7.3	固溶处理规程的选择	234
10.7.4	时效规程的选择	235
10.7.5	主要合金的固溶处理-时效规程	236
10.7.6	铁基合金的固热处理-时效规程	242
	思考题	243
	参考文献	244

1 金属固态相变概论

组成金属或合金最基本的、独立的物质，称为组元，简称为元。组元之间相互作用形成具有一定晶体结构和一定成分的相。相是指金属或合金中结构相同、成分和性能均一并以界面相互分开的组成部分。随着温度、压力等外界条件的变化，相与相之间可以互相转变。金属或合金中新产生的相称为新相。导致新相产生的相称为母相。母相向新相的转变，称为相变。固态金属或合金中固态相之间的转变称为固态相变。

金属发生固态相变的重要判据，是至少要伴随着下面三种基本变化之一：①晶体结构的变化；②化学成分的变化；③固溶体有序化程度的变化。有些金属固态相变只伴随其中一种变化，有些金属固态相变同时伴随两种或三种基本变化。例如，纯金属发生同素异构转变时，只有晶体结构变化；固溶体的有序-无序转变只有有序化程度的变化；调幅分解过程只有化学成分的变化；共析分解和脱溶沉淀则既有晶体结构的变化，又有化学成分的变化。

在对金属进行热处理时，金属中将发生固态相变。金属固态相变理论是金属热处理的理论基础，是制定热处理工艺的基本依据。金属固态相变理论在现代化生产中具有重要的实际应用价值。要想掌握金属热处理原理并正确制定金属热处理工艺，首先就要了解金属固态相变的主要类型、特点和规律。

1.1 金属固态相变的主要类型

按照转变条件，金属固态相变可以分为平衡相变和非平衡相变两类。

1.1.1 平衡转变

在极为缓慢的加热或冷却的条件下发生的能获得符合状态图所示平衡组织的相变，称为平衡转变。固态金属发生的平衡转变有以下 7 种。

1.1.1.1 纯金属的同素异构转变

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 α -Mn、 β -Mn、 γ -Mn、 δ -Mn 等晶体结构。铁、钛、钴、锡等金属也都具有同素异构转变。

1.1.1.2 固溶体的多形性转变

纯金属中溶入溶质元素形成固溶体。固溶体的同素异构转变称为多形性转变。比如钢在加热时铁素体向奥氏体的转变、冷却时奥氏体向铁素体的转变都属于多形性转变。

1.1.1.3 共析转变

合金在冷却时，由一种固溶体同时分解为两种不同相的转变称为共析转变。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母相不同。如钢中的珠光体转变，

就是冷却时由奥氏体同时分解为铁素体和渗碳体的共析转变。

1.1.1.4 包析转变

合金在冷却时由两个固相合并转变为一个固相的转变过程称为包析转变。用 $\alpha + \beta \rightarrow \gamma$ 表示。在 Fe-B 系合金中, 于 910°C 发生 $\gamma + \text{Fe}_2\text{B} \rightarrow \alpha$ 的转变即为包析转变。此外, 在 Mg-Zn 系、Cu-Zn 系合金中也有包析转变。

1.1.1.5 平衡脱溶沉淀

某种固溶体在高温固溶了一定量的合金元素后, 在缓慢冷却的条件下, 因为溶解度下降, 从固溶体中析出新相的过程, 称为平衡脱溶沉淀。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低, 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。

1.1.1.6 调幅分解

某些合金在高温时形成的均匀的单一固溶体, 缓慢冷却到某一温度范围内时, 分解为两种结构与原固溶体相同, 而成分却明显不同的微区的转变, 称为调幅分解。调幅分解可用反应式 $\alpha \rightarrow \alpha_1 + \alpha_2$ 表示。

1.1.1.7 有序化转变

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, 在 Cu-Au、Cu-Zn、Mn-Ni、Fe-Ni、Ti-Ni、Fe-Al 等 60 多种合金中都可发生这种转变。

1.1.2 非平衡转变

在快速加热或冷却的非平衡条件下, 平衡转变受到抑制, 将发生平衡相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。

1.1.2.1 伪共析转变

某些非共析成分的奥氏体以较快的速度被过冷到 ES 线和 GS 线的延长线以下 (如图 1.1 所示的阴影区) 时, 将不发生先共析转变, 而是直接同时转变为铁素体和渗碳体, 这一过程称为伪共析转变。

从转变过程和转变产物的组成相来看, 伪共析转变和共析转变没有本质的不同。但是, 伪共析转变产物中两种相的相对比例却不是定值。

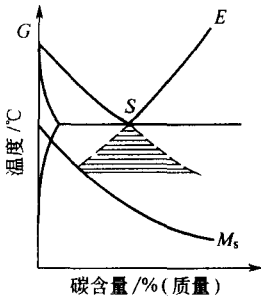


图 1.1 Fe-Fe₃C 相图的左下角

1.1.2.2 马氏体转变

进一步提高冷速, 将奥氏体过冷到 M_s (如图 1.1) 以下的低温区, 铁等置换原子和碳等间隙原子都难以扩散, 则奥氏体以无扩散方式发生马氏体转变, 其转变产物称为马氏体。马氏体的成分与母相相同, 但晶体结构与母相不同。除铁碳合金外, 在铜合金、钛合金等许多其他合金以及无机非金属材料中也能发生马氏体转变。

1.1.2.3 贝氏体转变

钢中的奥氏体过冷到珠光体转变和马氏体转变温度之间的中温区, 将发生贝氏体转变, 又称中温转变。因为发生贝氏体转变时, 铁等置换原子难于扩散, 只有碳原子可以扩散, 所以贝氏体转变既不同于伪共析转变, 也不同于马氏体转变。贝氏体转变的产物为贝氏体。贝氏体是由 α 相和碳化物或奥氏体转变产物组成的复相组织, 但其中 α 相的形态和碳含量以及碳化物的形态和分布等均不同于珠光体。

1.1.2.4 不平衡脱溶沉淀

与平衡脱溶不同,某种固溶体在高温固溶了一定量的合金元素后,在快速冷却的条件下,因为固溶体中来不及析出新相,一直冷却到较低温度下,得到过饱和固溶体。然后,在室温或加热到其溶解度曲线以下的温度,将从过饱和固溶体中析出一种新相,这种转变过程称为不平衡脱溶沉淀。析出新相的成分和结构与平衡沉淀相不同。

淬火钢在回火时,从过饱和的马氏体中析出与 Fe_3C 不同的新相,如 $\epsilon\text{-Fe}_{2.4}\text{C}$ 、 $\chi\text{-Fe}_5\text{C}_2$ 等不平衡相。这种回火转变也属于过饱和固溶体的不平衡脱溶沉淀。

1.1.2.5 块状转变

对于纯铁或低碳钢,在一定的冷速下, γ 相或奥氏体转变为与之具有相同成分而形貌呈块状的 α 相,这种转变过程是通过原子的短程扩散使新相和母相间的非共格界面推移实现的,称为块状转变。虽然转变前后的新相、旧相成分相同,但这种相变在新相的形貌上和与母相的界面结构上均与马氏体转变不同。这种转变在Cu-Zn、Cu-Ga合金中也存在。

1.1.3 固态相变的其他分类

固态相变还有许多其他的分类方法。

如果按相变时的原子迁移特征分类,固态相变可以分为扩散型相变和无扩散型相变。在固态相变后,若原有的原子相邻关系被改变,说明该固态相变是通过原子的扩散完成的,这样的固态相变则属扩散型相变;反之,在固态相变后,若原有的原子相邻关系未被改变,说明固态相变不是通过原子的扩散完成的,而是通过不超过原子间距的原子位移完成的,这样的固态相变则属无扩散型相变。马氏体相变属于无扩散型相变。上面提到的其他相变都属于扩散型相变。

如果按相变热力学分类,固态相变可以分为一级相变和二级相变。在相变温度下,新旧两相的自由能及化学位均相等,但化学位的一级偏导数不等,则称为一级相变。一级相变时,有体积的胀缩及潜热的释放或吸收。金属中大多数相变属于这种一级相变。如果相变时,化学位的一级偏导数相等,但二级偏导数不等,则称为二级相变。二级相变时,没有体积的胀缩及潜热的释放或吸收。磁性转变、有序转变等为二级相变。

如果按相变方式分类,固态相变可以分为形核-长大型相变和无核相变。形核-长大型相变通过形核及长大二个阶段进行,相变形成的新相与原有的母相之间有相界面分隔开。在界面两侧,两相的成分与结构均不一样。大部分相变均属形核-长大型相变。无核相变是在整个体系内通过饱和相内或过冷相内原始的小的起伏经连续扩展而进行的。此时,新形成的相与原有的母相之间无明显的相界面。调幅(spinodal)分解即属无核相变。

固态金属中的相变还可按其他原则划分,但都不是主要的。对金属而言,按热力学分类,以一级相变为主;按相变时原子迁移特征考虑,以扩散型相变为主;按相变方式考虑,以形核-长大型相变为主。

1.2 金属固态相变的主要特点

金属固态相变与液固相变都是相变,故有其共同性。但由于金属固态相变是在母相与新相都是固态这一特定条件下进行的,故又有其自身一系列的特点。其主要特点包括以下几个方面。

1.2.1 相界面

金属固态相变的第一个特点是根据新相和母相原子在相界面上的晶体学匹配程度,形成

具有晶体学特征的相界面。与金属凝固过程中形成的液-固相界面不同，金属固态相变时，新相与母相之间形成的界面是两种晶体之间的界面。根据界面上两相原子在晶体学上匹配程度的不同，可分为共格界面、半共格界面和非共格界面等三类，如图 1.2 所示。

1.2.1.1 共格界面

当新相和母相的晶体学匹配程度最好时才能形成共格界面。所谓共格是指界面上两相的原子所占位置恰好是两相点阵的共有结点位置，两相在界面上的原子可以一对一地相互匹配 [图 1.2(a)]。只有对称孪晶界才是理想的共格界面。

1.2.1.2 半共格界面

当新相和母相的晶体学匹配程度较好时才能形成半共格界面。界面上弹性应变能的大小取决于两相界面上原子间距的相对差值，即错配度 δ 。若以 a 表示界面其中一相的原子间距， Δa 表示两相原子间距之差，则 $\delta = \Delta a/a$ 。 δ 越大，弹性应变能就越大。当 δ 增大到一定程度时，便难以继续维持完全共格，这样就会在界面上产生一些刃型位错，以补偿原子间距差别过大的影响，使界面弹性应变能降低。在这种界面上两相原子变为部分地保持匹配，故称为半（或部分）共格界面，如图 1.2(b)、(c) 所示。

1.2.1.3 非共格界面

当新相和母相的晶体学匹配程度不好时则形成非共格界面。如果两相界面处的原子排列差异很大，即错配度很大，其原子间连半共格关系也不能维持。这种界面称为非共格界面，如图 1.2(d) 所示。这种界面与大角晶界相似，系由原子不规则排列的很薄的过渡层所构成。

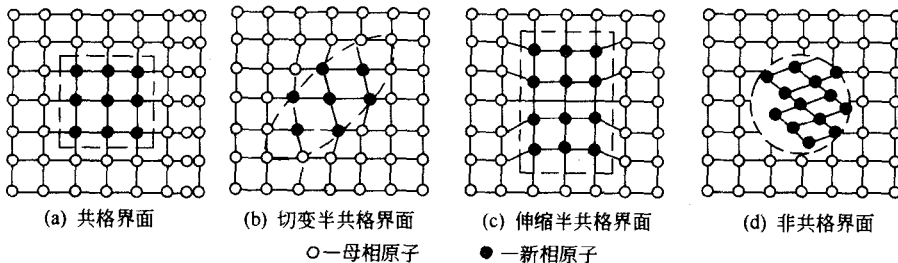


图 1.2 固态相变界面结构示意图

一般认为，错配度 δ 小于 0.05 时两相可以构成完全共格界面，错配度大于 0.25 时易形成非共格界面；错配度介于 0.05 与 0.25 之间，则形成半共格界面。

以上所介绍的几种不同结构的界面具有不同的界面能。由于界面上原子排列的不规则性会导致界面能升高，因此，非共格界面能最高，半共格界面能次之，而共格界面能最低。共格界面的界面能约为 $0.1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ，半共格界面的界面能不超过 $0.5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ，非共格界面则为 $1.0 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。但界面有吸附溶质原子的作用。当溶质原子在晶界处分布时，则会使界面应变能降低。

1.2.2 弹性应变能

金属固态相变的第二个特点是弹性应变能和界面能一起成为相变阻力，使固态相变的相变阻力增大。液-固相变的界面能是相变的阻力；而固态相变往往会产生弹性应变能，所以固态相变的阻力既包括界面能也包括弹性应变能。可见，与液态金属结晶的过程相比，固态相变的阻力是较大的。

金属固态相变的弹性应变能包括共格应变能和比体积差应变能。

所谓共格应变能，是指固态相变时新相与母相界面上的原子由于要强制性地实行匹配，