

贝氏体与贝氏体相变

Bainite and Bainite Transformation

刘宗昌 任慧平 等著

B



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

贝氏体与贝氏体相变

Bainite and Bainite Transformation

刘宗昌 任慧平 等著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

内 容 提 要

本书是作者近年来科研成果的总结,同时参考了国内外相关学术论文,阐述了贝氏体与贝氏体相变的最新理论。本书共分 11 章,介绍了过冷奥氏体转变的复杂性、贝氏体组织形貌和亚结构、块状相变、贝氏体相变热力学、贝氏体相变动力学、各类相变的联系和区别、贝氏体相变的特征及定义、中温区原子位移方式与相变的关系、贝氏体相变机制、过冷奥氏体转变产物的表面浮凸、各类工业用钢的贝氏体组织及形成等内容。

本书可供从事冶金、材料科学与工程研究的科研人员、技术人员阅读,也可供高校金属材料工程专业的学生、教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

贝氏体与贝氏体相变 / 刘宗昌,任慧平等著. —北京:冶金工业出版社,2009. 5

ISBN 978-7-5024-4877-6

I. 贝… II. ①刘… ②任… III. 贝氏体转变 IV. TG151.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 057635 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 postmaster@cnmip.com.cn

策划编辑 张 卫 责任编辑 王雪涛 美术编辑 张媛媛

版式设计 张 青 孙跃红 责任校对 白 迅 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4877-6

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 5 月第 1 版, 2009 年 5 月第 1 次印刷

169 mm × 239 mm; 20.75 印张; 402 千字; 301 页; 1-2000 册

59.00 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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

传承文明,开拓创新。

Bain 及其合作者于 1930 年在美国第一次发表了放大 1000 倍的贝氏体显微照片。20 世纪 40 年代为了纪念 Bain 的功绩,人们将过冷奥氏体在中温区转变的组织命名为贝氏体(Bainite)。后来 R. F. Mehl 将钢中的贝氏体分为上贝氏体和下贝氏体。50 年代初,柯俊及其合作者 S. A. Cottrell 第一次对贝氏体相变进行开拓性研究,创建了贝氏体相变理论和切变学说,是相变研究方面具有里程碑意义的成就。

钢中的贝氏体相变是发生在共析分解和马氏体相变温度范围之间的中温转变。它既不是珠光体那样的扩散型相变,也不是马氏体那样的无扩散型相变,而是复杂的过渡性相变。贝氏体相变过程中,只有碳原子能够长程扩散,铁原子及替换合金元素的原子已经难以扩散。由于贝氏体相变具有过渡性,它既具备共析分解的某些特征,又有马氏体相变的一些特点,因此是一个相当复杂的相变。

贝氏体组织的发现使等温淬火和贝氏体钢得以问世。中高碳合金钢下贝氏体组织具有较高的强度和韧性。近年来,轴承钢采用等温淬火得到下贝氏体组织改善了钢的性能;具有高强度、高韧性、优良焊接性的超低碳贝氏体钢得到了广泛的开发和工业应用。

贝氏体钢的应用需要了解贝氏体组织形态与性能的关系,以及贝氏体相变的热力学、动力学以及相变机制等基本知识。半个多世纪以来,人们对于贝氏体相变的研究进行了大量的工作,取得了显著的成绩。在 20 世纪中期,由于当时条件的限制,贝氏体和贝氏体相变的本质尚不能彻底搞清,由此出现不同的学术观点和学派是可以理解的。

20 世纪末,康沫狂、杨思品著有《钢中贝氏体》(1990 年),徐祖耀、刘世楷著有《贝氏体相变和贝氏体》(1991 年),李承基著有《贝氏体相变理论》(1995 年),俞德刚、王世道著有《贝氏体相变理论》

(1997 年),方鸿生、王家军、杨志刚等著有《贝氏体相变》(1999 年)。这些著作总结了 20 世纪中贝氏体相变的研究成果,阐明了切变理论和扩散理论两种学术观点,对于贝氏体的研究和实际应用起到了积极作用。

长期马拉松式的学术论争表明贝氏体相变理论研究需要整合(integrate in a systematic way)。所谓整合,是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。整合不是混合、耦合,也非复合。整合能使贝氏体相变理论更快的发展。2007 年刘宗昌著《过冷奥氏体扩散型相变》阐述了贝氏体相变的整合机制。

近 10 多年来,由于检测仪器的升级和多样化,对贝氏体的观察更加全面、深入、细致,促进了贝氏体理论的更新。本书《贝氏体和贝氏体相变》是 21 世纪以来系统论述贝氏体相变理论的新书。其试验结果新,内容新,观点新,概念新,阐述了贝氏体相变新机制。作者撰写本书的思路是首先从科学技术哲学视角阐述钢的整合系统,强调过冷奥氏体转变是一个整合系统,从系统科学的角度进行分析研究。接着重点描述贝氏体的成分、组织形貌和精细亚结构,从本质上搞清贝氏体的组织结构。在此基础上阐述贝氏体热力学问题,分析贝氏体相变动力学,总结了贝氏体相变的过渡性特征,明确贝氏体相变不同于共析分解。在此基础上给贝氏体和贝氏体相变做出了科学的定义。

在继承两种理论成熟的学术成就的基础上,本书深入探讨贝氏体相变的新机制。相变是晶格改组过程,原子的位移方式是最基本的动作;在阐明相变中原子的位移方式后,集中阐述了贝氏体相变机理,提出了新机制,指出贝氏体相变过程中碳原子长程扩散,而铁原子和替换原子以非协同的界面热激活跃迁方式位移,实现晶格改组。

建立和谐的创新性的学术交流氛围,是发展科学理论的需要,是时代的需要。将贝氏体相变研究的新发现、新观点,新理论,经过密切交流和切磋,贝氏体相变理论必将得到蓬勃发展。

本书第 1 章和第 3~10 章由刘宗昌撰写,第 2 章由任慧平撰写,第 11 章由李文学、赵莉萍、王海燕、赵勇桃、计云萍等合作撰写,刘宗昌负

责全书的总成。

参加本书内容科学研究工作的课题组成员有刘宗昌、任慧平、李文学、赵莉萍、王海燕、计云萍、王玉峰、龚志华、段宝玉等教师以及众多的本科生、研究生,其研究成果是本书内容的重要源泉。此外,对内蒙古自治区教育厅的资助表示衷心的感谢。

在撰写本书的过程中,参考了许多学者和专家的相关著作和论文,在此表示衷心的感谢。

内蒙古科技大学 刘宗昌 任慧平

2009 年春节于包头

E-mail: Lzchang75@163. com

Prologue

Inheriting civilization, exploring innovation.

Bainitic transformation in steel occurred at the intermediate temperature between eutectoid decomposition and martensitic transformation. It has no diffusion and shear transformation character as pearlite or martensite, but a complicated transitional transformation. The carbon atom can transit by long-range diffusion while the iron and alloy atom are difficult to diffuse during Bainitic transformation. The bainite transformation has transitional character, which has character of eutectoid transformation and martensitic transformation as well. Therefore it is very complicated.

As the TTT diagram of upper Bainite transformation overlap with that of the eutectoid decomposition in carbon steel, it can't be found the clear beginning temperature of the bainite transformation, i. e. B_s point. While in many alloy steels, bainite transformation has its own C-curve, but there exist bay and B_s in many alloy steels. What's more, bainite transformation can extend to the temperature under M_s in some steels. Therefore, although the steel was isothermally at the temperature of martensite formation, bainite transformation can occurred.

Austempering and bainite steel hasn't been known until bainite was found. In Mid-20th Century, bainite structure that has high strength and toughness was obtained in B-bearing and Mo-bearing steel by air cooling after rolling, which give a new way of developing bainite steel. Recently, ultra-low carbon bainite-steel is widely developed and applied.

In the Early 1950s, Jun Ke and his co-worker, S. A. Cottrell, made some pioneering research on bainite transformation, and created theory of bainite transformation and shear doctrine for the first time. It is a milestone for the phase transformation. However, the essence of bainite and bainite transformation haven't been understood well due to the limits of condition. In the late 1960s, H. I. Aaronson and his partners, the American metallurgist, deny the shear mechanism of bainite transformation. Thus two schools of thought were formed, and the academic debates have kept for 30 years from then on.

In the late 1990s, many book were published in China, such as *Bainite in Steels*

(Kang Mokuang, 1990), *Bainite transformation and bainite* (Xu Zuyao, 1991), *Bainite Transformation Theory* (Li Chenji, 1995), *Bainite Transformation Theory* (Yu Gangde, 1997), and *Bainite transformation* (Fang Hongsheng, 1999). These works summarized the research results of bainite transformation after the mid-time of 20th century and elucidated their views, which played an active role in the research and practical application of bainite.

As above mentioned, Bainitic transformation theorys need to integrate in a systematic way because of the debate more than 30 years to make organic combination, ordered cooperation or systematization matching on the base of overall system. In this situation, Zongchang Liu edited the book *Diffusion Phase Transformation of super cooled Austenite* expounded integration mechanism of shear-diffuse for the first time. It points out that carbon migration is long range diffusion, while Fe atom and replacement atom migrate by non-cooperate thermal activation transition to achieve lattice restructure.

In the recent decade, the research is more comprehensive, further and particular due to the upgrade and diversification of detecting instrument, which accelerate the update of the bainite transformation theory. This book, *Bainitic and bainite transformation*, summarized new theory about bainite transformation since the 21th Century. It expatiates the new mechanism of bainite transformation, which is new in test results, contents, viewpoints and concepts. The thought of this book is as follows: Firstly, it summarized the integration system of steel by science technic philosophy and emphasized that super-cooling austenite transformation is integration system by the view of system science. Secondly, it described the composition characterister, microstructure and morphology, fine structure of the bainite to clarify the microstructure and crystal structure of the bainite. On this basis, we make a scientific definition for bainite, describe the problem of the thermodynamics and the characteristics of transformation kinetics, summarize the transition feature of the bainite transformation, cleare bainite transformation different from eutectoid decomposition, propose the nucleation and growth mechanisms of bainite ferrite and bainitic Carbide in this book.

To communicate in academic atmosphere with innovative and harmonious, it is necessary to develop the scientific theory and to meet the needs of times development. If close exchange and harmonious discussion on new research results and new ideas of bainitic transformation are reinforced, the bainitic transformation theory will be Vigorously developed.

As this book refers to a number of relevant books and papers from scholars and experts during the writing, the authors would like to thank them for providing the support to enable this work to be carried out. And any valuable suggestion will be welcome.

Inner Mongolia University of Science and Technology

Bao Tou, China

Liu Zongchang Ren Huiping

Spring Festival 2009

Corresponding author: Lzchang75@163.com

目 录

1 过冷奥氏体转变的复杂性	1
1.1 过冷奥氏体转变	1
1.1.1 非线性相互作用	3
1.1.2 相变的复杂性	6
1.1.3 组织、性能的多样性	7
1.2 过冷奥氏体转变的自组织及转变类型	8
1.2.1 相变自组织的条件	8
1.2.2 过冷奥氏体转变的自组织功能	9
1.2.3 过冷奥氏体转变的类型	11
1.3 过冷奥氏体转变贯序	13
1.3.1 高温区到中温区的过渡	13
1.3.2 两相共析形核向单相形核的演化	14
1.3.3 组织形貌和亚结构的演化	15
参考文献	18
2 贝氏体组织形貌和亚结构	19
2.1 概述	19
2.1.1 贝氏体组织的分类	19
2.1.2 贝氏体组织的基本特征	20
2.2 铁基贝氏体的组织形貌	21
2.2.1 超低碳贝氏体的组织形貌	21
2.2.2 上贝氏体组织形貌	24
2.2.3 下贝氏体组织形貌	28
2.2.4 贝氏体组织的复杂性和多样性	32
2.2.5 魏氏组织	35
2.3 贝氏体铁素体的亚结构	37
2.3.1 贝氏体组织中的精细亚结构	37
2.3.2 贝氏体铁素体中的位错和孪晶	42

2.3.3 贝氏体中的中脊·····	44
2.4 贝氏体碳化物的形貌·····	46
2.4.1 上贝氏体中的碳化物形貌·····	47
2.4.2 下贝氏体中的碳化物形貌·····	49
2.5 贝氏体中的位向关系·····	51
2.5.1 贝氏体铁素体的位向关系·····	52
2.5.2 贝氏体中碳化物的位向关系·····	53
2.5.3 贝氏体铁素体惯习面·····	55
2.6 有色合金中的贝氏体·····	55
2.6.1 Cu-Zn 系合金中的贝氏体·····	56
2.6.2 Ag-Cd 合金中的贝氏体·····	58
2.6.3 U-Cr 合金中的贝氏体·····	58
2.6.4 Ag-Zn 合金中的贝氏体·····	59
参考文献·····	60
3 块状相变·····	61
3.1 金属的块状相变·····	61
3.1.1 块状相变的定义·····	61
3.1.2 纯金属及合金中的块状相变·····	62
3.1.3 替换式固溶体中的块状相变·····	65
3.2 块状相变的形核长大·····	67
3.2.1 块状相变的形核·····	67
3.2.2 块状相变的长大·····	68
3.2.3 块状相变机制·····	68
3.3 块状相变与贝氏体相变的关系·····	70
3.3.1 块状相变与贝氏体相变的亲缘关系·····	70
3.3.2 成分不变的非协同型转变·····	71
参考文献·····	71
4 贝氏体相变热力学·····	73
4.1 贝氏体相变热力学条件·····	74
4.1.1 相图与自由焓变化·····	74
4.1.2 贫碳区和贝氏体铁素体中的碳含量·····	74
4.2 贝氏体相变热力学计算·····	76

4.2.1	相变驱动力的计算模型	76
4.2.2	相变驱动力的计算结果及分析	78
4.2.3	按切变机制计算相变驱动力	81
4.2.4	$\gamma \rightarrow \alpha_B + \gamma_I \rightarrow BF + \gamma_I$ 计算模型和分析	82
4.3	相变热力学与相变机制的关系	85
4.3.1	原子位移方式与相变机制	86
4.3.2	原子非协同热激活跃迁无扩散型转变	86
	参考文献	87
5	贝氏体相变动力学	89
5.1	贝氏体相变动力学图特征	89
5.1.1	珠光体到贝氏体相变的演化	90
5.1.2	贝氏体相变速度比共析分解快的动力学图	92
5.1.3	贝氏体相变动力学具有变温性和等温性的双重特征	94
5.1.4	贝氏体相变速度较共析分解慢的 TTT 图	95
5.1.5	上、下贝氏体具有独立的相变动力学曲线	97
5.1.6	具有宽广“海湾区”的 TTT 图	99
5.2	贝氏体相变动力学图类型	100
5.2.1	共析分解和贝氏体相变 C 曲线相互重叠(类型一)	101
5.2.2	珠光体 C 曲线与贝氏体 C 曲线逐渐分离形成 “海湾区”(类型二)	102
5.2.3	合金结构钢的贝氏体 C 曲线普遍在珠光体 C 曲线的 左方(类型三)	104
5.2.4	渗碳后贝氏体 TTT 曲线右移(类型四)	105
5.2.5	贝氏体 C 曲线严重右移直至消失(类型五)	108
5.3	影响贝氏体转变动力学的因素	109
5.3.1	奥氏体化温度的影响	109
5.3.2	合金元素对 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变的影响	110
5.3.3	偏聚现象对贝氏体相变动力学的影响	111
	参考文献	113
6	各类相变的联系和区别	115
6.1	过冷奥氏体的共析分解	115
6.1.1	珠光体的组织形貌和定义	115

6.1.2 珠光体的晶体学关系	120
6.1.3 共析分解机理	121
6.2 贝氏体相变与共析分解的区别	131
6.2.1 珠光体和贝氏体的相组成物	131
6.2.2 两种相变的晶核	132
6.2.3 两种相变产物的形貌	133
6.2.4 珠光体和贝氏体的亚结构	133
6.2.5 两种相变产物的位向关系	135
6.2.6 其他	136
6.3 马氏体相变	136
6.3.1 马氏体相变的特征	136
6.3.2 马氏体相变的判据	140
6.3.3 马氏体相变与马氏体的定义	140
6.3.4 马氏体相变与贝氏体相变的区别	141
参考文献	141
7 贝氏体相变的特征及定义	143
7.1 贝氏体相变的过渡性	143
7.1.1 过冷奥氏体转变的中间过渡环节——贝氏体相变	143
7.1.2 上贝氏体转变和珠光体分解的联系与区别	144
7.1.3 下贝氏体转变和马氏体相变的联系与区别	146
7.1.4 贝氏体的组成相和形貌的过渡性	147
7.1.5 变温转变和等温转变的动力学特征	149
7.1.6 亚结构的过渡性	151
7.2 贝氏体相变的其他特征	152
7.2.1 表面浮凸现象	152
7.2.2 贝氏体相变的不彻底性	152
7.2.3 贝氏体相变具有 B_s 、 B_f 点	153
7.2.4 贝氏体碳化物(Bc)的特点	153
7.2.5 贝氏体铁素体亚结构特征	153
7.2.6 贝氏体相变的晶体学特征	155
7.2.7 相变机制、原子位移方式的特征	156
7.3 贝氏体和贝氏体相变的定义	156
7.3.1 以往的贝氏体定义	157

7.3.2 贝氏体和贝氏体相变的新定义	158
参考文献	159
8 中温区原子位移方式与相变的关系	161
8.1 扩散的定义和基本规律	161
8.1.1 扩散的本质和定义	161
8.1.2 扩散定律	162
8.1.3 扩散系数	163
8.1.4 扩散机理	165
8.2 原子位移的热力学分析	169
8.2.1 扩散的驱动力	169
8.2.2 各种化学势梯度下原子的位移	170
8.3 原子非协同热激活跃迁位移	170
8.4 原子的位移方式与相变机制	173
8.4.1 温度对原子位移方式的影响	174
8.4.2 奥氏体形成阶段原子的扩散	175
8.4.3 过冷奥氏体共析分解反应阶段的扩散	175
8.4.4 贝氏体相变阶段原子的位移	176
8.4.5 马氏体相变阶段	177
8.4.6 碳原子的长程扩散	178
8.4.7 体扩散和晶界扩散	178
8.4.8 合金元素对碳原子扩散的影响	180
8.4.9 合金元素的扩散	181
8.4.10 铁原子的自扩散	181
8.4.11 原子的位移与相变机制的关系	182
参考文献	183
9 贝氏体相变机制	185
9.1 概述	185
9.1.1 贝氏体相变的切变学说	185
9.1.2 贝氏体相变的台阶-扩散学说	186
9.1.3 扩散-切变复合观点	186
9.1.4 切变扩散整合机制——非协同热激活跃迁机制	186
9.2 超低碳钢的贝氏体相变	187

9.2.1 超低碳贝氏体的制备	187
9.2.2 块状相变的组织形貌	188
9.2.3 超低碳贝氏体的组织形貌和亚结构	189
9.2.4 超低碳贝氏体组织形成机理	191
9.2.5 转变温度对超低碳贝氏体形貌的影响	194
9.3 过冷奥氏体中的贫碳区	195
9.3.1 奥氏体化学成分的不均匀性	195
9.3.2 贫碳区	197
9.3.3 钢中贝氏体相变	198
9.4 贝氏体铁素体的形核	199
9.4.1 贝氏体铁素体的形核地点	200
9.4.2 贝氏体铁素体晶核尺度的推测	202
9.4.3 贫碳区的形成	204
9.4.4 贝氏体铁素体(BF)晶核的形成机理	205
9.5 贝氏体铁素体晶核的长大	207
9.5.1 贝氏体长大的各种机制	207
9.5.2 贝氏体铁素体(BF)长大的试验观察	210
9.5.3 上贝氏体铁素体长大速度和长大机制	213
9.5.4 贝氏体形核长大过程	216
9.6 贝氏体碳化物形成机理	218
9.6.1 贝氏体碳化物类型	219
9.6.2 贝氏体碳化物的来源	220
9.6.3 贝氏体碳化物的形核	224
9.6.4 贝氏体碳化物的长大	225
9.6.5 贝氏体碳化物形核长大时原子的位移	227
9.7 碳含量对贝氏体组织形貌的影响	228
9.7.1 不同碳含量钢的中温转变组织形貌	228
9.7.2 贝氏体形貌随碳含量增加而演化	234
9.7.3 碳含量对贝氏体形貌的影响机制	234
9.8 非协同热激活跃迁机制要点	237
9.8.1 涨落	237
9.8.2 贫碳区及碳原子扩散控制	237
9.8.3 贝氏体铁素体形成的相变阻力和驱动力	238
9.8.4 贝氏体铁素体的形核长大	238

9.8.5 贝氏体碳化物的形核长大	239
9.8.6 贝氏体组织形成过程	239
参考文献	240
10 过冷奥氏体转变产物的表面浮凸	243
10.1 珠光体表面浮凸	243
10.1.1 扫描电子显微镜观察	244
10.1.2 扫描隧道显微镜观察	244
10.1.3 金相显微镜观察	246
10.1.4 珠光体组织浮凸的尺寸	247
10.2 魏氏组织表面浮凸	248
10.3 贝氏体表面浮凸	249
10.3.1 贝氏体表面浮凸的扫描电子显微镜观察	249
10.3.2 扫描隧道显微镜观察	250
10.4 马氏体表面浮凸	253
10.4.1 片状马氏体表面浮凸	253
10.4.2 板条状马氏体的表面浮凸	255
10.5 表面浮凸形成机理	256
10.5.1 产生浮凸的根本原因	256
10.5.2 表面浮凸与相变机制	259
参考文献	260
11 工业用钢的贝氏体组织及形成	261
11.1 60Si2CrV 钢的贝氏体组织及形成	261
11.1.1 60Si2CrV 钢的贝氏体组织结构	261
11.1.2 60Si2CrV 钢的贝氏体形成过程	264
11.2 34CrNi3MoV 钢贝氏体组织及形成	266
11.2.1 34CrNi3MoV 钢	266
11.2.2 34CrNi3MoV 钢的贝氏体组织及形成	268
11.3 12CrMoV 钢的贝氏体组织及形成	270
11.3.1 12CrMoV 钢的等温淬火组织	270
11.3.2 贝氏体铁素体的形成	272
11.4 20CrMo 钢的贝氏体组织及形成	273
11.4.1 20CrMo 钢物理参数	273

11.4.2 20CrMo 钢的等温淬火组织	275
11.5 35CrMo 钢贝氏体组织及形成	277
11.5.1 35CrMo 钢的物理参数	277
11.5.2 35CrMo 钢的贝氏体相变	278
11.6 S7 钢的贝氏体组织及形成	283
11.6.1 S7 钢的 TTT 图	283
11.6.2 S7 钢的贝氏体组织形貌	285
11.6.3 S7 钢贝氏体组织形成	286
11.7 GCr18Mo、GCr15 轴承钢贝氏体组织及形成	287
11.7.1 GCr18Mo 及 GCr15 钢的化学成分及物理参数	287
11.7.2 GCr18Mo 钢的贝氏体组织与硬度	288
11.7.3 GCr15 钢的贝氏体组织	292
参考文献	295
名词术语	296