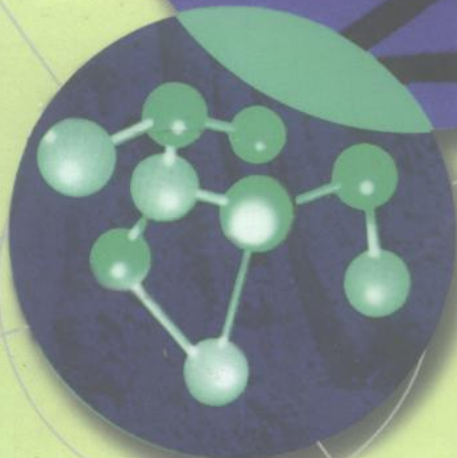


国家“九五”重点图书

贝氏体 相变理论

俞德刚 王世道 著



上海交通大学出版社

The image is a high-magnification micrograph showing a material with prominent vertical features. These features appear as dark, elongated, and somewhat irregular columns or striations that run from the top to the bottom of the frame. The background is a lighter, more granular or textured surface. The overall color palette is in shades of brown, tan, and grey, giving it a scientific or technical appearance. The text '贝氏体相变理论' is superimposed over the middle of the image.

贝氏体相变理论

贝氏体相变理论
俞德刚 王世道 著

上海交通大学出版社出版发行
上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030
电话 64281208 传真 64683798

全国新华书店经销

常熟市印刷二厂·印刷

开本:850×1168(mm) 1/32 印张:14 字数:358 千字

版次:1998 年 6 月 第 1 版

印次:1998 年 7 月 第 1 次 印数:1-1000

ISBN 7-313-01988-2/TH·065

定价:25.00 元

本书任何部分之文字及图片,如未获得本社之书面同意,
不得用任何方式抄袭、节录或翻印。

(本书如有缺页、破损或装订错误,请寄回本社更换。)

内 容 提 要

本书主要论述并分析贝氏体相变理论的研究和发展,对铁碳和铜基合金贝氏体相变过程进行了系统的较定量的组织形态、相界结构、表面倾动、晶体学、动力学和热力学等方面分析讨论,构成统一的理论。在这其中,贯穿论述了经典切变学说,台阶扩散长大机制和类平衡切变长大模型(切变—扩散耦合机制),试图寻求贝氏体相变理论不同研究的共同点。所论述内容反映了贝氏体相变理论的新近和专门研究成就。

本书包含了著者近年来在这个领域的理论研究工作或能折射贝氏体相变理论进展的一个方面。

本书可供从事材料热处理和固态相变以及材料科学与工程教学人员、研究者和技术工作者参考。

DW 25/25

贝氏体相变理论

俞德刚 王世道著

The Theory of Bainite Transformation

Yu Degang Wang Shidao

前 言

固态相变是物理冶金近年来发展成材料科学的中心课题。贝氏体相变在材料固态相变中占有重要地位,它的研究具有重大理论意义,亦为贝氏体组织的优异强韧性配合力学性能开发利用以及贝氏体钢种拓新和新材料的设计奠定基础。贝氏体相变在现象上兼有“平民式”扩散和“军队式”切变两种相变模式的某些特性;其转变过程层次繁杂,转变产物形态多样;在铁碳合金的相变过程中,轻巧活泼的间隙原子在新旧相间的配分顺序和配分量难以精确肯定,以致这个相变过程的各个细节尚未能完全把握;尤为有关转变机制本质的理解依然各相抵牾,分歧明显;在当今诸多相变类型中,惟有贝氏体形成机制性质尚待最终确定,这不能不影响到有关研究成果向生产力的及时转化。多年来贝氏体相变理论引起众多研究者的深切关注和浓厚的探索兴趣,业已取得重要进展。其中贝氏体切变—扩散耦合相变模型的提出为其相变理论研究开辟新的途径。

本书试图系统并较定量地分析和论述近年来、特别是近 10 年来贝氏体相变理论研究工作,这些研究主要探

索在新旧相点阵结构嬗变中溶剂和溶质原子运动方式,追求相变机制性质的澄清。全书分10章,在1~8章中主要分析铁碳合金贝氏体相变中反映原子运动方式所出现的组织形态,表面浮雕效应,两相间原子、原子位和晶面对应性,相变位错和其运动,点阵原子穿越相界过程,共格、半共格相界与其保守和非保守推移运动,以及间隙原子再配分和偏聚运动等;最后两章分别讨论铜基合金贝氏体相变和低中碳钢中温块状铁素体的短程扩散形成。应该说,本书是在当今国内外学者们研究的基础上,对贝氏体相变中具体的原子运动过程细节进行系统并较定量的热力学、晶体学、第一和次一级相的相变机制和本质、动力学以及组织形态学等分析,它不是现有研究工作的拼凑,而是凭藉这些研究工作,其中也包含著者在这方面的理论研究和理解,构成较定量的统一理论。部分内容如铁碳间隙固溶体和三元多元合金规则溶液亚格模型,类平衡切变长大动力学和相界动力学耗能的定量理论计算,相变表面浮雕晶体学、上贝氏体相界位错结构本质,以及合金元素的相变动力学作用的分析等多项是著者首次面世的工作成果。贝氏体铁素体的点阵重建性质的认识,以及在这方面不同观点剧烈争论的症结所在,分歧统一的可能等是本著所要注意和着重阐明的问题;其中主要论述贝氏体经典切变学说、台阶扩散长大机制和类平衡切变长大模型——切变/扩散耦合机制模型。这后一个模型实际上是个寻求切变和扩散两种对立观点之间共同点的尝试。为有助于相变理论的继续研究,本书在辨识各

种学说的论点时,都尽可能的依据已有实验结果,进行较定量的分析,提出明确的或是或否的客观判定,而非模棱两可。贝氏体相变毕竟是个复杂的相变,且尚在研究中,在分析或评论各个学说的观点时,难免理解不逮,论断偏颇,祈请指正,至为感谢。

俞德刚 王世道

1997 年 10 月

目 录

第一章 贝氏体组织形态学	1
1.1 引言	1
1.2 Fe-C 合金贝氏体组织形态传统认识	1
1.3 扩散学说的贝氏体组织形态分类	5
1.4 Fe-C 合金的典型贝氏体组织	8
1.4.1 上贝氏体	8
1.4.2 下贝氏体	10
1.4.3 上、下贝氏体的转换	11
1.5 类马氏体形貌贝氏体	15
1.6 贝氏体铁素体的位错密度	17
1.7 贝氏体铁素体的亚单元与相变基元	20
1.7.1 贝氏体铁素体亚单元	20
1.7.2 上、下贝氏体铁素体相变基元	23
1.7.3 扩散学说的下贝氏体铁素体次一级结构	27
1.8 基元活动行为与交叉型贝氏体	27
1.9 应力的相变作用与贝氏体相变变体选择	31
1.9.1 B_s 温度与力学驱动力	32
1.9.2 应力的相变诱发作用	34
1.9.3 水静压力的相变抑制作用	36
1.10 贝氏体定义的概括与辩论	37
参考文献	42
第二章 贝氏体相变理论早期研究及当今三个主要学说	46
2.1 引言	46
2.2 贝氏体相变理论的早期研究	48

2.3 当今贝氏体相变理论的三个学说·····	54
2.3.1 经典切变学说·····	56
2.3.2 60年代崛起的台阶扩散长大机制·····	60
2.3.3 类平衡切变长大模型·····	67
参考文献·····	72
第三章 贝氏体相变的表面浮雕效应 ·····	77
3.1 引言·····	77
3.2 贝氏体相变表面倾动与不变平面切变应变·····	79
3.3 魏氏铁素体侧片台阶扩散长大的相变表面倾动效应 与外延相界推移行为·····	84
3.3.1 台阶扩散长大魏氏铁素体侧片的相变表面倾动 与外延相界的推移行为·····	84
3.3.2 贝氏体铁素体和魏氏铁素体侧片相变表面倾动 晶体学·····	89
3.4 相变表面倾动形成机制的辩论·····	94
3.5 原子对应性和原子位(点阵位)对应性与相变表面倾 动效应·····	95
3.6 有关相变双面表面倾动形成的其他说明·····	97
参考文献·····	100
第四章 条状和片状 fcc/bcc 铁素体的相界结构 ·····	103
4.1 引言·····	103
4.2 相界面结构与相变机制关系·····	105
4.2.1 相变位错表达式·····	106
4.2.2 在相变中错配位错、结构台阶和生长台阶的作用 ·····	107
4.2.3 在相变中各类台阶作用的认识进展·····	110
4.2.4 关于外延相界面推移的保守性和非保守性·····	114
4.2.5 相界面位错列结构的转化行为·····	117
4.3 fcc : bcc 相界结构与上贝氏体相界结构·····	119

4.3.1 关于板条和片状马氏体的相界结构	120
4.3.2 fcc : bcc 相界结构和上贝氏体相界结构模型及其 滑移性质的判定	127
参考文献.....	133
第五章 贝氏体相变晶体学.....	136
5.1 引言	136
5.2 魏氏铁素体与贝氏体铁素体的相变晶体学	141
5.2.1 魏氏铁素体析出晶体学	141
5.2.2 上贝氏体铁素体相变晶体学	143
5.2.3 下贝氏体铁素体相变晶体学	146
5.3 马氏体晶体学表象理论应用及其分析	151
5.3.1 关于马氏体晶体学表象理论	151
5.3.2 对魏氏铁素体析出机制理论分析的分析	156
5.3.3 贝氏体铁素体形成机制的表象理论分析	157
参考文献.....	163
第六章 贝氏体碳化物及其形成.....	166
6.1 引言	166
6.2 贝氏体铁素体初始固溶碳量	167
6.3 上贝氏体碳化物的形成	170
6.4 下贝氏体碳化物的形成	174
6.4.1 下贝氏体碳化物	174
6.4.2 下贝氏体碳化物晶体学	176
6.4.3 贝氏体碳化物的合金元素成分	183
6.4.4 下贝氏体铁素体片内碳化物析出反应	183
6.4.5 下贝氏体碳化物来源的实验检定	185
6.4.6 片内单一取向分布碳化物来源讨论	187
6.5 碳化物析出动力学	191
6.5.1 碳的配分	191
6.5.2 残余奥氏体碳化物析出动力学	193

6.5.3 贝氏体铁素体片内碳化物脱溶动力学	194
6.6 相界面沉淀的碳化物	196
参考文献	199
第七章 贝氏体相变动力学	202
7.1 引言	202
7.2 预相变与奥氏体中贫碳区的建立	203
7.2.1 B _s 点与海湾温区	203
7.2.2 贝氏体预相变物理本质	205
7.3 贝氏体铁素体亚条和亚条束的伸长速率	208
7.3.1 贝氏体铁素体形核率	208
7.3.2 亚条和束伸长速率	209
7.3.3 单个亚条的伸长速率实测	211
7.4 魏氏铁素体侧片台阶扩散长大动力学	212
7.4.1 台阶形核率	212
7.4.2 魏氏铁素体侧片台阶扩散长大速率	213
7.5 贝氏体位移—扩散耦合相变动力学	216
7.5.1 位移/扩散耦合模型与贝氏体长大速率	217
7.5.2 魏氏铁素体和贝氏体铁素体伸长动力学的新近 处理	221
7.5.2.1 铁素体片伸长动力学处理观点的分歧	221
7.5.2.2 局域平衡扩散长大动力学	224
7.5.2.3 混合扩散长大动力学	227
7.5.2.4 类平衡切变长大动力学	232
7.5.2.5 低碳钢魏氏铁素体析出和块状(massive) 长大(块状转变)机制之间的转换与动力 学竞争	234
7.6 合金元素对贝氏体相变动力学作用	237
7.7 贝氏体反应的不完全性及其产生机制	253
7.7.1 贝氏体反应不完全性与相变应变	253

7.7.2 扩散学说的反应不完全性观点与溶质类拖曳效应	258
7.7.3 反应不完全性与相变热力学	264
7.8 过饱和固溶贝氏体铁素体的碳配分时间	266
参考文献	269
第八章 贝氏体相变热力学	274
8.1 引言	274
8.2 Fe-C 间隙合金准化学热力学模型和规则溶液亚格模型	278
8.2.1 将 Fe、C 视为一般组元的规则溶液模型	278
8.2.2 碳原子近邻间隙排斥占据 KRC 模型	279
8.2.3 准化学近似的 KRC、FG 和 MD 统计热力学模型	280
8.2.4 Fe-C 间隙固溶体的规则溶液亚格模型	284
8.2.5 磁性对 α -Fe 热力学函数的作用	285
8.3 Fe-M-C 三元及多元合金的热力学性质确定	288
8.3.1 一般规则溶液模型及其热力学参数确定	289
8.3.2 规则溶液亚格模型和磁性自由能分离的结合	292
8.4 贝氏体相变热力学研究	294
8.4.1 B_s 和 T_0 对比及相变驱动力	294
8.4.2 魏氏铁素体和贝氏体铁素体扩散长大热力学	300
8.4.3 贝氏体类平衡切变长大的热力学分析	309
8.4.4 贝氏体类平衡切变长大中的溶质拘陷	314
8.4.5 贝氏体形核热力学分析	320
8.4.5.1 经典形核理论	320
8.4.5.2 贝氏体相变切变形核机制	322
参考文献	328
第九章 铜基合金贝氏体相变	333
9.1 引言	333

9.2 Cu-Zn 和 Cu-Zn-Al 合金贝氏体的形态学、内部结构与晶体学	335
9.2.1 Cu-Zn 合金贝氏体的形态学、内部结构与晶体学	335
9.2.2 Cu-Zn-Al 合金贝氏体的形态学、内部结构与晶体学	340
9.2.2.1 α_1 片贝氏体的形态学与内部结构	340
9.2.2.2 α_1 片贝氏体晶体学	342
9.2.3 CsCl-9R 的点阵转换	346
9.3 Cu-Zn 和 Cu-Zn-Al 合金 α_1 片贝氏体相变研究进展	349
9.3.1 溶质贫化区的建立	349
9.3.2 初生贝氏体的内部结构	353
9.3.3 α_1 片形成过程中溶质元素成分变异	356
9.3.4 α_1 片结构的长程有序性	361
9.3.5 α_1 片相界面结构与台阶	367
9.3.5.1 相界面结构	367
9.3.5.2 相界面台阶	370
9.3.6 相变应力场的证实及其表征意义	372
9.3.7 α_1 片相变动力学	373
9.3.8 全饱和 α_1 片相变热力学	381
9.4 铜基合金贝氏体相变机制的理解	386
9.4.1 α_1 片贝氏体相变的基本特点	386
9.4.2 α_1 片贝氏体切变—扩散耦合相变机制	387
9.4.3 α_1 片台阶扩散长大机制	391
参考文献	392
第十章 低中碳钢中温块状铁素体与短程扩散相变	397
10.1 引言	397
10.2 低中碳钢中温块状铁素体组织形态及其形成机制	

.....	398
10.2.1 中温块状铁素体.....	398
10.2.2 岛状组成相.....	404
10.2.3 中温块状铁素体析出机制.....	405
10.3 粒状贝氏体.....	407
10.4 低中碳钢中温块状铁素体组织的强韧性.....	410
10.4.1 中温块状铁素体组织的强韧性.....	410
10.4.2 ($\alpha_m + M$)和($B_u + M$)混合组织强韧性改变	412
10.5 Fe-C 合金过冷奥氏体中温分解的相变谱	418
参考文献.....	427

第一章 贝氏体组织形态学

1.1 引言

通常 Fe-C 合金贝氏体是由特定形态和分布方式的铁素体与碳化物所组成的,它是过冷奥氏体的中温区分解产物。近年来贝氏体研究逐渐深入,对其组织形态的认识也有进展。众所周知,在珠光体相变中,铁原子是按个体、随机行走方式运动的,而在马氏体相变中,它的位移是集体、协调有序的。Fe-C 合金贝氏体相变温度区域介于这两个相变温度区域之间,这就给贝氏体带来复杂的相变性质和多样的组织形态。影响贝氏体组织形态的外在因素除开相变温度这个主要条件以外,还有相变持续时间和外加压力;内在因素则有诸如钢的化学成分和母相组织结构等。组织形态的分类受到相变机制观点的制约。当前贝氏体相变学说已发展为不同学派,贝氏体组织范畴有不同的划分,组织类型有不同的分类。贝氏体组织形态学的研究是个重要课题,它的组织外貌考察能启迪人们对其相变内涵的追究,思考有关钢材的力学性能,特别是承担外加载荷的使用性能和成型加工性能的改善,乃至合理设计拓新钢种的组织和成分^[77],加以贝氏体组织形态的多姿,对它的认识能引人入胜。

1.2 Fe-C 合金贝氏体组织形态传统认识

在本世纪 30 年代前后 Robertson^[1]和 Davenport-Bain^[2]以及 Wever^[70]研究 Fe-C 合金奥氏体在马氏体转变区域以上的等温转

变,发现易于锈蚀的针状组织,相信它过饱和固溶碳,当时称为“马氏体—屈氏体”,这个组织类似于马氏体,1934年命名为“贝氏体”,是个独立组织,这为以后贝氏体组织分类奠定了基础。

传统观念认为,Fe-C合金贝氏体(B)相变有一个转变起始温度 B_s 点和一个转变终结温度 B_f 点;后者的存在尚待探讨。实际上贝氏体终止转变后,有些钢种尚残留着不同量的奥氏体,但无论如何贝氏体相变出现于一个有限的温度区间;这个相变温度区间的位置介于珠光体和马氏体的相变温度(M_s)区域之间,有时其上部可与珠光体相变温度区部分相重叠,其下部则可与马氏体相变温度区相衔接或部分相重叠。对比理论计算与实测 B_s 点,在0.4~1.0C(wt%)的中、高碳钢(以下合金成分除开另行注明外,均以重量百分数wt%计)很相符合。高碳钢实测 B_s 点较高可能与逆贝氏体的发生有关,而低碳钢实测 B_s 点高的原委可能与相界成分因基体碳分低而达不到类平衡有关,但尚待查明。比较碳和合金元素对 B_s 点和 M_s 点的影响,不难看出,碳对 B_s 点的作用相对的较缓和,而合金元素的作用则较强烈,于是在低碳合金钢中,其中温转变区变狭,C曲线沿温度轴压扁。

早期的贝氏体组织形态分类是依据光学显微镜观察的结果。60年代以来,电子显微镜(TEM)在金属相变研究上得到了充分应用,贝氏体组织结构的细节逐步被揭露,它的分类愈见精细与严格,但争议亦愈多,以致至今有些组织的归属问题未得完全确定。近来在 β 合金和陶瓷中也发现贝氏体相变和贝氏体。

首先是Mehl^[3]于1942年将高温区和低温贝氏体变体分别称为“上贝氏体”和“下贝氏体”,这是沿用至今并为不同学派所接受的贝氏体组织分类。

俞一石^[4]系统地研究了简单碳素钢的碳浓度对贝氏体组织形态的影响,并提出贝氏体组织分布区域图(图1-1)。在此以前,Warlimont^[5]提出过这类图,但在那个图中没有注明不同贝氏体组织的分布位置。文献[4]研究结果表明,在简单的Fe-C合金中, B_s

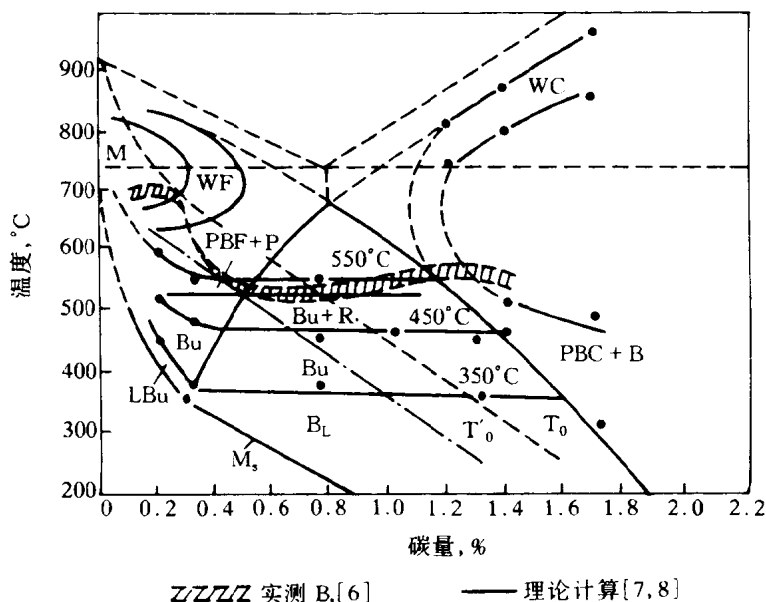


图 1-1 Fe-C 合金等温转变贝氏体组织分布区域[4, 6]

M—块状铁素体, WF—魏氏铁素体, WC—魏氏渗碳体;
——理论计算 B_s [6] 实测 B_s [7, 8]

点因碳浓度而改变,它的走向趋势也为后来的理论计算^[6]和实验^[7, 8]所证实;当碳量逼近零时, B_s 趋近 M_s ; 上、下贝氏体分界温度约在 350°C ^[12, 13]。钢中碳含量低于 0.35%, 其 B_i 点高于 350°C , 这便有可能在低碳钢中伴随着形成温度的降低出现 Hultgren 所称的先贝氏体铁素体(PBF)+珠光体(P), 上贝氏体(B_u)或低温上贝氏体(LB_u)的组织; 在中、高碳钢中, 则相应的可出现上贝氏体(B_u)+珠光体(P)的混合组织, 上贝氏体(B_u)或下贝氏体(B_L); 在高碳钢中(例如 1.3%C 以上)可观察到优先分布于界面上的雪花状组织, 它相应的为密集的上贝氏体组织构成晶界上贝氏体, 以及晶内下贝氏体组织; 当钢中碳量高于 $\gamma/(\alpha+\gamma)$ 延线所对应的碳量时, 相应地出现先贝氏体渗碳体(PBK), 它呈片状, 并具多向的魏