



高新技术丛书

贝氏体相变理论

李承基 著

机械工业出版社

(京)新登字 054 号

DW26/04

本书论述著者在研究贝氏体相变的一些结果。第1章是对贝氏体相变理论的发展及两大学派形成的概述,并展望了两大学派理论溶合的前景;第2章评述了切变学派的康氏形核理论,并提出了 $\text{fcc} \rightarrow \text{bcc}$ 的原子二次切变位移的晶体学模型;第3章评述了扩散学派的台阶长大机制,并提出了 γ/α 相界面位错的攀移(扩散)-滑移(切变)的复合机制;第4章讨论了块型转变与贝氏体相变的亲缘关系,提出了钢中贝氏体相变可能是纯铁中块型转变受碳原子影响的变种新论点;第5章从方法论角度出发,概括性地论述了固态相变机制从扩散型到无扩散切变型转化的连续性及阶段性问题。本书可供冶金及材料科学与工程领域的大学生、研究生,以及科学研究和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

贝氏体相变理论/李承基著.-北京:机械工业出版社,1995
(高新技术丛书)

ISBN 7-111-04374-2

I. 贝... II. 李... III. 贝氏体变化-理论 N. TG111.5

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第0301号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)
责任编辑:韩会民 版式设计:冉晓华 责任校对:樊中英
封面设计:方芬 责任印制:尹子祥

北京市密云县印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

1995年1月第1版·1995年1月第1次印刷

787mm×1092mm^{1/32}·3.75印张·77千字

001—800册

定价:6.50元

序 言

自 1930 年 E. S. Davenport 与 E. C. Bain 发表钢中奥氏体在临界点以下温度恒温转变的重要论文以来已历时 60 余年。在此期间钢中奥氏体的恒温转变规律已经成为钢铁的研究、开发和应用所必备的知识。当时他们发现的钢在临界点下中部温度范围内恒温转变的产物，引起人们的极大兴趣，广为研究，并被命名为贝氏体。钢中贝氏体逐渐地象奥氏体的其它转变产物：铁素体、珠光体、马氏体等一样，在机械零件或工模具制造中获得了广泛的应用。由于贝氏体的被应用，人们在钢铁的合金设计、制订加工工艺和控制综合性能方面，有了更加宽广的优化领域。开发了不少以贝氏体组织为基础的新的钢铁材料品种和热处理工艺。

在研究钢中奥氏体恒温转变规律的早期，人们就发现其中温转变产物的金相组织特征随转变温度的变化而变化。在中温偏上温度形成的羽毛状组织被称为上贝氏体，在中温靠下温度形成的针状组织被称为下贝氏体；另外还有针状铁素体、粒状组织及粒状贝氏体等等金相组织名称。虽然它们都是基本上由铁素体与碳化物所组成，但是组织形态的复杂性与多样性预示着其形成机制的复杂性。

早在 1939 年，R. F. Mehl 教授提出上贝氏体是由铁素体形核的铁素体-渗碳体的集合体，而下贝氏体则是依靠晶体点阵的切变过程形成的。

关于贝氏体的形成机制,目前有两种针锋相对的观点,即无扩散-切变与扩散-台阶机制。前者是 50 年代初柯俊教授根据贝氏体形成时产生与马氏体形成相似的表面浮凸现象提出的;而后者是 60 年代 H. I. Aaronson 教授根据贝氏体形成时出现与先共析铁素体形成时相似的台阶长大现象提出的。虽然由于显微分析技术的发展,人们对贝氏体组织的基本特征有了较深层次的认识,然而在贝氏体的形成机制上形成了两大学派。这个学术问题成为材料科学中的热点之一。

李承基教授于 1982~1985 年在加拿大 McMaster 大学访问进修时与 G. R. Purdy 教授合作研究贝氏体相变。进一步充实和发展了首先由 G. R. Purdy 教授与瑞典皇家工程学院 M. Hillert 教授共同提出的贝氏体形成机制转化的连续性新观点。著者在本书中阐述并论证了这种机制转化的可能性和合理性,并提供了有意义的实验证据。著者根据自然界发展的普遍规律,新事物孕育于旧事物中、事物的变化是由量变到质变的过程,提出了相变机制转化的连续性及阶段性论点。贝氏体相变作为中温转变阶段必然会包含高温阶段的铁素体-珠光体形成与低温阶段马氏体形成机制中的某些要素,扬弃另外一些要素。而中温转变本身包含有块型转变、上贝氏体转变及下贝氏体转变,在转变机制的转化上同样也有其连续性及其阶段性。著者以固态相变形核与长大的经典理论为基础,以中温转变产物的微观结构为根据,吸收贝氏体相变机制的两大派观点的要素,提出了扩散-切变复合的长大机制。可以认为,本书所论述的相变机制转化在温度、时间、空间的连续性及其阶段性的新观点,在方法论上是辩证的、合乎逻辑的。相信随着显微分析技术的继续发展,奥氏体中温转变产物的本质会更深入地被揭示,对贝氏体形成机制的认识终将

会达到新的统一。

章守华

1994年5月4日于北京科技大学

前 言

贝氏体相变,之所以成为相变理论研究者的热门课题,就在于它的复杂性。由于这种复杂性,各个研究者在一定条件下观察到的具体结果,就必然会有差别。有差别就会有争论,有争论才会有发展。贝氏体相变理论发展的深度和广度名列固态相变理论的前茅,其原因就是有不同学派的争论。西方有位著名的现代科学、哲学家卡尔·波珀,他曾写道“一个没有论战的人类社会将是一个没有朋友只有碌碌众生的社会”(科技日报,1993-08-02,第4版)。我国的“百花齐放,百家争鸣”方针。是发展学术的唯一正确方针。本书不是一本系统的有关贝氏体相变的理论著作,仅仅是百家中的一家之说,还是百花园中鲜为人知的一枝小花。1982~1985年,作者与加拿大 McMaster 大学冶金与材料科学系主任 Purdy 教授合作研究贝氏体相变,在继承贝氏体相变理论两大传统学派(以 Aaronson 和徐祖耀为代表的扩散学派和以柯俊为代表的切变学派)理论精华的基础上,提出了简称为 HPL (Hillert—Purdy—Li) 的贝氏体相变理论。这个理论的核心是采用归纳和分析相结合的方法,从方法论角度阐明从扩散型相变机制到无扩散型相变机制之间,一定存在着可变的过渡型的相变机制;相变机制的转化在温度、时间及空间上是由量变到质变的发展过程,具有连续性及阶段性特点。

切变学派的创始人柯俊教授和我国扩散学派的主要代表徐祖耀教授,都是作者的直接授业老师,对于能够在继承和发展他们的贝氏体相变理论方面作出新的成绩,感到自然和自豪。在此,特向两位老师,以及长期指导作者从事科学研

究工作的章守华教授等老一辈材料科学家，致以衷心的感谢和崇敬。

在加拿大 McMaster 大学从事贝氏体相变理论研究的近 3 年内，始终得到作者的导师和朋友 Purdy 教授的热情帮助和鼓励，关于相变机制转化的连续性的观点，就是他和 Hillert 首先提出的。在此，再次表示作者的衷心感谢。

本书的核心内容，曾于 1992 年获得国家教委科技进步三等奖，在此特向评审组全体委员及有关领导表示衷心的感谢。

本书在内容上，为了与康沫狂教授在 1990 年由上海科技出版社出版的《钢中贝氏体》及徐祖耀教授在 1991 年由科学出版社出版的《贝氏体相变与贝氏体》这两本全面而系统的优秀著作相衔接，本书仅突出与两大学派争论有关及作者所研究的内容。因此，第 1 章简要回顾了贝氏体相变理论的发展及两大学派的形成。然后以研究相变发展过程的“过程学”系统，从形核和长大两大阶段进行讨论。在第 2 章讨论贝氏体的形核理论，在第 3 章讨论长大理论。由于纯铁中的块型转变和钢中的贝氏体相变同在中温转变范围，作者认为它们有密切的亲缘关系，因此在第 4 章中讨论了贝氏体与块型转变的关系。第 5 章是本书的基本思路，论证了固态相变机制从扩散型到无扩散切变型的转化，具有连续性及阶段性的论点。

本书不是完善的理论著作，只是在方法论方面应用性的一种理论思路。希望对进一步的研究及两大学派在理论上的接近有微薄的帮助，对大学生和研究生在学习固态相变课程时有一定的参考价值。对本书的任何批评和对缺点错误的指正，都是深受作者欢迎的。

作 者

目 录

序言

前言

第1章 贝氏体相变理论的发展及学派的形成	1
1.1 概述	1
1.2 争论焦点	2
1.2.1 关于贝氏体的定义问题	3
1.2.2 关于贝氏体相变动力学特点本质问题	4
1.2.3 关于贝氏体相变的机制问题	5
1.3 争论统一的前景	7
参考文献	10
第2章 贝氏体相变的形核理论	13
2.1 固态相变经典形核理论概述	13
2.1.1 均匀形核理论	13
2.1.2 非均匀形核理论	16
2.2 贝氏体相变的形核理论	18
2.2.1 康氏非均匀切变形核理论	19
2.2.2 李氏切变-扩散形核模型	27
参考文献	31
第3章 贝氏体相变的长大理论	33
3.1 相界面的结构	33
3.1.1 完全共格相界面	33
3.1.2 半共格相界面	34
3.1.3 非共格相界面	36
3.1.4 复杂的半共格相界面	37

3.2	相界面共格性的丧失	40
3.3	相界面的迁移	43
3.3.1	界面的滑动及可滑动界面	43
3.3.2	扩散控制迁移及新相的扩散控制长大	45
3.3.3	界面控制迁移与新相的界面控制长大	47
3.3.4	界面台阶及其横向迁移	48
3.4	贝氏体铁素体的长大理论	49
3.4.1	扩散学派的台阶长大机制	49
3.4.2	界面位错的攀移-滑移长大模型	52
3.4.3	攀移-滑移长大模型的实验验证	57
3.4.4	第二类共格切变长大机制	64
3.5	小结	66
	参考文献	66
第4章	贝氏体相变与块型转变	68
4.1	纯金属中的块型转变	68
4.2	二元合金置换式固溶体中的块型转变	70
4.2.1	Fe-Ni 合金的块型转变	70
4.2.2	Fe-Cr 合金的块型转变	72
4.2.3	Fe-Mn 合金的块型转变	72
4.2.4	Cu-Zn 合金的块型转变	74
4.2.5	Cu-Al 合金的块型转变	76
4.3	钢中的块型转变	76
4.3.1	Fe-C 合金的块型转变	76
4.3.2	Fe-Ni-C 合金的块型转变	77
4.3.3	Fe-Si-C 合金的块型转变	79
4.3.4	其它钢中的块型转变和粒状组织	83
4.4	块型转变的形核	83
4.5	块型转变的晶体学	88
4.6	块型转变的长大机制	88

4.7 块型转变与贝氏体转变的亲缘关系	89
4.8 小结	93
参考文献	93
第5章 固态相变机制转化的连续性和阶段性	95
5.1 引言	95
5.2 相变机制转化的连续性和阶段性的概念	96
5.2.1 相变机制转化的连续性概念	96
5.2.2 相变机制转化的阶段性概念	96
5.3 变温相变系列机制转化的连续性和阶段性	97
5.3.1 块型转变	98
5.3.2 广义上贝氏体	98
5.3.3 广义下贝氏体	100
5.3.4 板条马氏体	101
5.3.5 孪晶马氏体	102
5.3.6 机制转化的连续性和阶段性在冷却曲线上的反映	102
5.4 等温相变系列机制转化的连续性和阶段性	104
5.4.1 新相核心的形成阶段	104
5.4.2 新相核心的长大阶段	105
5.4.3 相变达到最终热力学平衡阶段	105
5.4.4 实验证据	105
5.5 相变机制转化连续性的能量学	107
5.5.1 从扩散控制到界面控制的连续性及阶段性	107
5.5.2 从共格到非共格的连续性及阶段性	108
5.5.3 界面位错从刃型到螺型的连续性及阶段性	108
5.6 小结	109
参考文献	109

第 1 章 贝氏体相变理论 的发展及学派的形成

1.1 概述

贝氏体 (Bainite), 是以第一个测出钢的奥氏体等温转变动力学曲线 (TTT), 从而使钢的热处理工艺上升了一个理论台阶的奠基人, 当时任美国钢铁公司理论研究室研究员的 Bain E. C 博士的姓氏命名的奥氏体中温转变的非片层状组织。Bain 博士和他的合作者 Davenport D. S, 在 1931 年首次发表了这种组织的光学金相组织形态及转变动力学曲线^[1]。到 1939 年, Mehl^[2]在他的《Hardenability of Alloy steels》一书中, 把贝氏体分为“上贝氏体”和“下贝氏体”, 但当时对于贝氏体的本质和转变机制尚未深入研究。直到 1952 年, 当时在英国伯明翰大学任教的中国学者柯俊 (Ko. T) 博士及其合作者 Cottrell S. A 首次研究了钢中贝氏体的转变机制, 用光学金相法发现经预先抛光的样品表面, 在贝氏体转变时有类似于马氏体转变时的表面浮凸效应。以此实验现象为依据, 提出了类似于马氏体相变的切变机制^[3,4]。在当时的条件下, 表面浮凸效应被公认为是切变型转变机制的有力证据。认为溶剂原子 (铁) 和置换溶质原子 (如硅、锰) 是无扩散的切变, 间隙溶质原子 (如碳、氮) 则是有扩散的。因此, 贝氏体相变在本质上属于伴有间隙溶质原子扩散的马氏体型切变的产物。这种观点后来为 Энтин^[5]、Hehemann^[6]、Bhadeshia^[7]、Sandvik^[8,9]、康沫狂^[10]、俞德刚^[11]等人所继承、深化和发展,

本书统称为“切变学派”和“切变理论”。它在 20 世纪 50~60 年代,几乎是贝氏体相变的主导理论。柯俊作为这一理论的创始者,于 1956 年荣获中国“国家自然科学三等奖”,以表彰他在贝氏体相变理论研究方面的贡献。

到 20 世纪 60 年代末,切变理论受到了美国卡乃基-梅隆大学教授、以合金热力学及扩散型相变研究著称的 Aaronson H. I 及其合作者 Kinsman K. R 的挑战^[12~14]。他们从合金热力学的研究结果认为,在贝氏体转变温度区间,相变驱动力不能满足切变所需要的能量水平,因而从能量学上就否定了贝氏体相变的切变可能性。他们认为,贝氏体相变在本质上可归类于特殊的共析转变之列。这种理论后来传入中国,为中国以研究马氏体相变及合金热力学著称的金属学家徐祖耀^[15~17]及刘世楷^[18]、徐启昆^[19]等人继承、深化和发展,在本书中统称为“扩散学派”。

如果说贝氏体组织的实际应用是贝氏体相变理论发展的原始动力的话,那么可以说扩散学派与切变学派则是推动贝氏体相变理论发展的直接动力。在固态相变领域,贝氏体相变是处于扩散型相变和无扩散型相变之间的过渡型相变。相变过程的复杂性和相变机制的中间过渡性,更容易引起理论上的争论。贝氏体相变理论两大学派的争论及其理论发展,是发展学术的“百家争鸣”方针正确性的又一证明。

1.2 争论焦点

20 世纪 70 年代初,两个学派的争论形成了第一次高潮。以切变学派的 Hehemann 为一方,以扩散学派的 Aaronson 和 Kinsman 为另一方,进行了一轮针锋相对的辩论,并将辩论所涉及的主要问题,共同署名于 1972 年在《Metallurgical Trans-

action》上发表了“关于贝氏体相变的学术争论”一文^[13]。争论的焦点是贝氏体相变的本质，是属于珠光体那样的扩散型相变还是属于马氏体那样的无扩散切变型的相变，争论的主要方面包括：

1.2.1 关于贝氏体的定义问题

由于贝氏体相变处于扩散型相变和无扩散型相变温度区之间的过渡型相变，过渡性的特点使贝氏体相变产物组织形态的多样化，致使对贝氏体相变本质的认识复杂化。因此，贝氏体尚无一个公认的明确定义，即应以什么样的特征标准来对贝氏体给出一个严格的定义。但是，在传统的教科书中，人们对贝氏体的概念是由三个特征标准组成的：第一，针状的显微组织形貌（如上、下贝氏体）；第二，抛光表面的浮凸效应；第三，有独立于珠光体转变的相变动力学曲线（TTT）及贝氏体的开始转变的最高温度 B_s 点。实际上，这三条代表了切变学派对贝氏体的定义。切变学派较强调贝氏体的针状显微组织特征，Hehemann 认为：“贝氏体一词，就是指在中温转变时形成的针状分解产物”。

但是，扩散学派反驳说，上述三条定义之间存在着矛盾^[12,13]。他们认为，对于显微组织定义，应该改为“共析分解的非片层状产物”，应把针状特征的限制条件删除。因为他们认为贝氏体在本质上属于珠光体型相变，是先共析和共析分解在较低温度进行的特殊产物。他们也不承认动力学定义，认为动力学定义中的贝氏体开始转变最高温度 B_s ，以及在某些合金钢中出现双 TTT 曲线（珠光体和贝氏体的 TTT 曲线完全分离）等现象，并不能证明贝氏体相具有本身独立的动力学曲线，而是合金元素对先共析铁素体析出动力学或共析分解动力学的一种影响，是合金元素在母相/新相界面对相

界面推移产生的一种“拖曳”作用的结果。因此，扩散学派排除浮凸效应及Bs点的动力学定义，只承认“共析分解的非片层状产物”的显微组织定义。

1.2.2 关于贝氏体相变动力学特点本质问题

主要涉及到贝氏体相变有无独立的TTT曲线，Bs点是否有本质意义，贝氏体转变不完全现象等方面的争论。

切变学派认为^[13,20]，与马氏体相变Ms点类似，贝氏体相变也存在一个Bs点。贝氏体相变有独立于珠光体相变的TTT曲线。对于碳素共析钢，贝氏体的TTT曲线与珠光体的TTT曲线基本重合，因此，呈现为单一的TTT曲线，但这种情况是特例。当某些合金元素存在时，将使贝氏体转变温度降低，导致珠光体转变TTT曲线和贝氏体转变TTT曲线在不同程度上的分离。在两类转变曲线之间就会出现一个过冷奥氏体相对稳定的温度区，扩散学派称之为海湾温度（Bay temperature），Bs点就会显现出来。当某些合金元素含量足够高时，可能使两类TTT曲线完全分离。

但是，扩散学派则认为^[12,13]，所谓Bs点是没有实质性意义的。贝氏体相变并没有独立的TTT曲线，单一的TTT曲线是正常情况。某些合金钢的TTT曲线出现海湾温度区，仅仅是由于这些合金元素，如Cr、Mn、Mo等，在新相和母相界面的偏聚行为所造成的一种“类拖曳”作用的结果。Aaronson认为^[12]：Cr、Mn、Mo等元素不仅偏聚在奥氏体晶界，而且降低界面能，从而减少晶界形核，延缓奥氏体的分解，而且偏聚在新相和母相的相界面，降低界面前沿奥氏体中碳的活度，使界面的扩散迁移速度降低。这就是扩散学派认为的TTT曲线上出现海湾现象的本质。在海湾温度上、下所形成的产物，虽然在形态上会有差异，但在本质上并没有不同，均

属共析分解的产物。

与上述问题密切相关的是所谓贝氏体转变的不完全现象,即海湾的深度发展到使珠光体和贝氏体的C曲线完全分离的状况。切变学派 Hehemann^[20]对贝氏体相变的不完全现象作了如下描述:在某些合金钢中,出现珠光体C曲线和贝氏体C曲线完全分开的双C形的TTT曲线形态。在两条C曲线分开的温度区间等温,过冷奥氏体完全不发生转变,定义为100%的转变不完全度,转变量等于零。在这个温度区的下限最高温度,定义为Bs温度。在Bs温度以下的一定温度范围,存在着一个贝氏体转变不完全区。等温转变到一定程度后,转变停止。贝氏体相变的不完全度,随着等温温度的降低而减小。这个现象类似于变温马氏体的动力学特点。因此,被切变学派作为推论贝氏体相变属于马氏体切变型转变的重要动力学特征。与此相反,扩散学派则认为,所谓转变不完全,仅仅是等温时间不够长而没有观察到转变的完成,是转变的暂时阻滞,而不是终止,扩散学派徐启昆等从Fe-C-Mo合金的中温转变动力学的研究结果为此提供了实验证据^[19,21]:合金在Bs点以下温度等温6~72h范围内,贝氏体铁素体相的生长受到阻滞,转变几乎停止,继续等温转变又继续进行,直到完成。初期的碳化物为Mo₂C,而转变阻滞后又重新进行的粒状共析体的碳化物则为含Mo的合金渗碳体。因为是在Bs点以下等温,扩散学派认为没有理由把这种粒状共析产物排除在贝氏体家族之外。

1.2.3 关于贝氏体相变的机制问题

关于相变的机制,所要回答的问题,就是相变过程是以何种具体方式发生、发展,直到完成的?原子是如何从母相的晶体点阵改组成新相的晶体点阵的?是如何形成新相胚芽、

新相核心的？新相核心又是如何长大的？总体来说，就是在晶体点阵的改组过程中，原子是需要扩散性的位移（扩散型相变）？还是仅需要不改变相邻原子毗邻关系的切变位移（无扩散切变型相变）？为了说明相变全过程的发展进程和具体方式，人们需要从合金热力学方面研究相变发生能量条件；从动力学方面研究相变的速率；从晶体学方面研究母相和新相的晶体学上是否有特定的联系；从体视学方面研究新相的形貌特征等等。只有在上述各个方面积累了相当的实验资料，以及对资料进行去粗取精、去伪存真的分析，才可能提出一个比较接近客观实际的相变机制模型，并且还要经受新的实验结果的检验而不断修正、发展，直到一个相对完善的阶段。

固态相变机制，可分为两大基本类型，即：

(1) 扩散型相变。晶体点阵的改组是通过单个原子的长程扩散或短程扩散的位移方式实现的，被称为“平民式”(Civilian)相变，例如：过饱和固溶体的分解、共析分解、多晶型转变、块形转变、有序/无序转变等。

(2) 无扩散型相变。晶体点阵的改组是通过整组原子的滑移切变或孪生切变的集体位移方式进行，故称为“军队式”(Military)相变。马氏体相变就是一个典型例子。

贝氏体相变理论两大学派的争论焦点，简单的说，就是贝氏体相变在本质上是属于哪一种机制的相变。切变学派的主要根据是：

- ①在形貌学上与马氏体相似；
- ②在预先抛光自由表面的针状浮凸现象与马氏体相似；
- ③与母相的晶体学关系上与马氏体相近；

④在动力学上近似于等温马氏体；在动力学Bs点以下有类似于变温马氏体在Ms点以下的所谓“转变不完全现象”；

⑤在热力学上,如果在贝氏体预转变期形成富碳和贫碳区^[23~25],则贝氏体相变的驱动力可以处理为近似于板条马氏体的驱动力。

扩散学派的主要根据是:

①用改进了的 Kaufman-Radcliffe-Cohen (KRC) 模型对 Fe-C、Fe-X-C、Cu-Zn 合金贝氏体相变驱动力计算结果表明,在热力学上判断,贝氏体不可能以切变机制形成(注:此模型假设奥氏体的成分是均匀的,不承认有切变学派所说的贫碳区和富碳区的存在)^[16,26,27];

②与母相的晶体学关系上,很多合金的贝氏体惯习面与同一合金中马氏体的惯习面不同^[16,28]。

③在贝氏体宽面(惯习面)上存在巨型台阶,以及贝氏体长大界面为非共格弯曲面的事实,说明贝氏体很可能按扩散台阶机制长大^[16,29];

④由于 Ms 与奥氏体在该温度时的屈服强度成线性关系是切变型相变的一个特征,但是动力学 Bs 点与奥氏体在该温度时的屈服强度并不成线性关系;而 Bs 点却与碳和 Fe 在奥氏体中的扩散系数成线性关系。因此,至少在 Bs 与鼻部温度之间,贝氏体相变的开始受 Fe 原子扩散的控制^[16,17]。

⑤贝氏体的表面浮凸现象不同于马氏体的表面浮凸现象,只是一种体积变化效应,不具备切变所要求的不变平面应变的性质。扩散台阶机制也可以有表面浮凸现象^[13,14]。

1.3 争论统一的前景

扩散学派和切变学派的争论仍在继续,各自用新的实验证据来反驳对方的论点,充实自身的论点。在两大学派争论的推动下,近些年来正在形成一种可能统一两个对立学派理