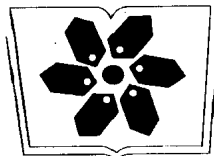


贝氏体相变

方鸿生 王家军 杨志刚 著
李春明 薄祥正 郑燕蒙

科学出版社

416086



中国科学院科学出版基金资助出版

贝氏体相变

方鸿生 王家军 杨志刚 著
李春明 薄祥正 郑燕康



00416086

科学出版社

1999

内 容 简 介

本书在作者多年从事贝氏体研究及所取得的成果的基础上撰写而成。书中主要论述了贝氏体相变的激发形核-台阶长大机制,相变产物与基体的界面结构,贝氏体超精细结构,表面浮凸效应与本质,界面局部平衡及仲平衡,扩散控制浓度影响台阶生长的模型,溶质拖曳作用及类拖曳作用理论,贝氏体碳化物形成的实验结果及模型等,并较系统归纳了半个多世纪来,国际上几代学者有关贝氏体相变研究的主要理论精髓。

本书可供从事材料科学、冶金、金属热处理、锻轧铸焊热加工、物理、航天、航空等研究的科技人员及高等院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

贝氏体相变/方鸿生等著. -北京:科学出版社, 1999.2

ISBN 7-03-006144-6

I. 贝… II. 方… III. 贝氏体转变 IV. TG151.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 14002 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 2 月第 一 版 开本: 850 × 1168 1 / 32

1999 年 2 月第一次印刷 印张: 19 插页: 1

印数: 1 - 1 400 字数: 500 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

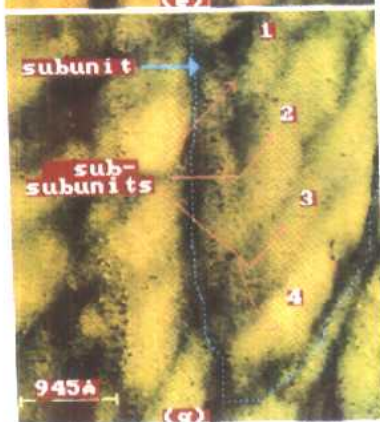
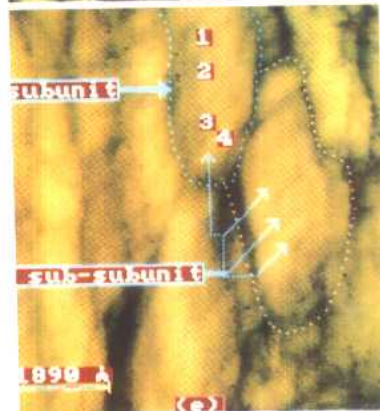
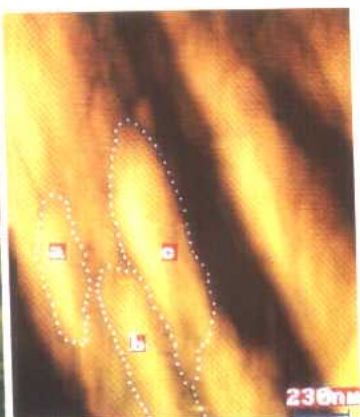
谨以此书敬献给

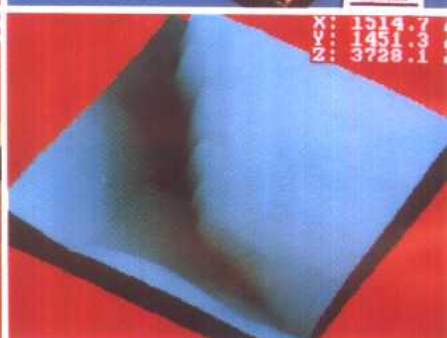
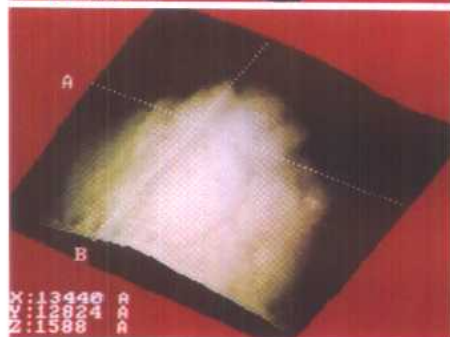
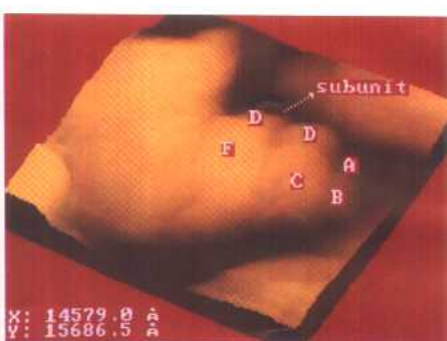
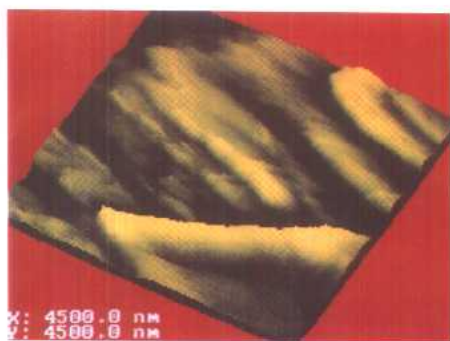
祖国的材料科学事业

DN: 2005

- (1) Fe-1.0C-4.0Cr-2.0Si 下贝氏体片条、亚片条及亚单元。
- (2) 图中虚线对应图(1)的下贝氏体亚单元及超亚单元。
- (3) 图中虚线对应图(1)、(2)中的下贝氏体亚单元及超亚单元。
- (4) Fe-0.4C-2.5Mn-0.6Si 下贝氏体亚片条、亚单元及超亚单元,与图(1)对比,由于含 Si,C 低(0.6%Si),故亚片条、亚单元形态不规整,尺寸不均匀。
- (5) Fe-0.5C-3.8Cr-1.4Si 上贝氏体亚片条、亚单元及超亚单元。
- (6) 表面浮凸:Fe-0.37C 钢中晶界仿晶形铁素体(GBA)的表面浮凸及其 A,B,C,D 的边-边激发形核。
- (7) 表面浮凸:Fe-0.37C 钢中晶界仿晶形铁素体(GBA)及在其上生长的魏氏组织铁素体,平行排列。
- (8) Fe-2.17C-12.18Cr 下贝氏体片条表面浮凸的三维形态,由浮凸群组成,实测表面起伏曲线见第 4 章。
- (9) Fe-2.17C-12.18Cr 下贝氏体中的亚片条前端,显示出亚单元、超亚单元及超超亚单元的三维形貌,其周围基体为奥氏体,实测表面起伏曲线见第 4 章。
- (10) 表面浮凸:Cu-28.26Zn-3.25Al-0.09Re 合金人字形 β' 相贝氏体表面浮凸三维形态,它由亚单元组成浮凸群。
- (11) Cu-28.26Zn-3.25Al-0.09Re 合金贝氏体亚片条、亚单元三维形态。
- (12) Fe-0.4C-2.5Mn-0.6Si 上贝氏体亚单元超精细界面上的三维台阶形貌。

(1)	(4)
(2)	(5)
(3)	(6)





前 言

本人致力于贝氏体事业始于 1969 年的清华大学绵阳分校(山区)的风雨年代。从此,后半生与贝氏体结良缘,寒冬酷暑,不尽坎坷,以祖国人民为驱动力,和同事及弟子持之以恒,长年耕耘。

贝氏体钢与贝氏体相变理论及实践相辅相成。固态相变乃材料科学支柱之一,贝氏体相变又是固态相变的重要分支学科,历来受国内外重视,原因是:

1. 代表一类片状相形成理论。

2. 涉及钢铁、有色合金及陶瓷材料等领域,有巨大实践意义及潜力。

3. 贝氏体相变介于高温扩散型相变和低温切变型相变之间,区别于珠光体相变和马氏体相变,其进展可推动整体固态相变理论的发展。

4. 贝氏体相变的复杂性。

本书特点:

1. 内容新:充分反映国内外最新进展,如贝氏体相变的激发形核-台阶长大机制,相变产物与基体的界面结构,贝氏体超精细结构,表面浮凸的最新成果,超精细结构伴随浮凸效应与本质,扫描隧道显微分析技术在相变研究中的应用,界面局部平衡以及仲平衡,扩散控制浓度影响台阶生长的模型,溶质拖曳作用及类拖曳作用理论,贝氏体碳化物形成的实验成果及模型等。

2. 系统全面,侧重现代:贝氏体相变发展 70 年,扩散

与切变学派系统争论半世纪。本书较系统地归纳国际上两大学派、几代学者的主要理论精髓,但也明确展示作者的观点。

3. 书中大量内容反映作者多年的研究成果,发表于国内外刊物及会议文集中,力求严谨求实。

作者学识及能力有限,本书难免有欠缺及不当之处,希冀同行惠赐评教,共同为相变理论和材料科学发展奉献力量。

方鸿生

1998 年于清华园

目 录

1 贝氏体分类及定义	(1)
§ 1.1 贝氏体组织分类	(1)
§ 1.1.1 上贝氏体	(4)
§ 1.1.2 下贝氏体	(5)
§ 1.1.3 无碳化物贝氏体	(8)
§ 1.1.4 粒状贝氏体与粒状组织	(10)
§ 1.1.5 柱状贝氏体	(21)
§ 1.1.6 针状铁素体	(23)
§ 1.1.7 低碳板条束贝氏体	(28)
§ 1.1.8 反常贝氏体	(29)
§ 1.1.9 其它类型的贝氏体	(32)
§ 1.1.10 钢中成分对贝氏体形态的影响	(33)
§ 1.1.11 小结	(36)
§ 1.2 贝氏体相变主要特征	(38)
§ 1.3 贝氏体定义	(46)
§ 1.3.1 早期定义	(46)
§ 1.3.2 广义显微组织定义	(49)
§ 1.3.3 整体动力学(ORK)定义	(50)
§ 1.3.4 表面浮凸定义(SRD)	(51)
§ 1.3.5 三种定义之间的相互矛盾	(51)
§ 1.3.6 本书作者对贝氏体定义的观点	(52)
参考文献	(53)
2 贝氏体相变理论	(59)
§ 2.1 贝氏体相变早期模型	(60)
§ 2.1.1 Vilella 假设	(60)

§ 2.1.2	Greninger 和 Troiano 假设	(61)
§ 2.1.3	Klier 和 Lyman 贫碳区理论	(61)
§ 2.1.4	Hultgren 模型	(63)
§ 2.2	经典扩散控制台阶长大理论	(64)
§ 2.2.1	扩散控制台阶长大理论模型	(64)
§ 2.2.2	台阶长大动力学及台阶源	(66)
§ 2.2.3	生长台阶的精细结构	(70)
§ 2.3	共析转变产物形态与台阶机制	(76)
§ 2.4	贝氏体转变动力学	(84)
§ 2.4.1	整体动力学	(84)
§ 2.4.2	河湾区转变规律	(88)
§ 2.4.3	河湾区贝氏体组织形态演化	(97)
§ 2.4.4	对贝氏体 ORK 现象的解释	(98)
§ 2.4.5	ORK 现象解释的有关例证及其它观点	(104)
§ 2.5	贝氏体相变晶体学	(107)
§ 2.5.1	贝氏体铁素体惯习面	(107)
§ 2.5.2	贝氏体铁素体与奥氏体位向关系	(110)
§ 2.6	贝氏体切变理论简介	(115)
§ 2.6.1	切变理论回顾	(115)
§ 2.6.2	切变理论主要观点	(116)
§ 2.6.3	切变基元	(118)
§ 2.6.4	切变过程	(120)
§ 2.6.5	切变与扩散	(122)
§ 2.6.6	预相变	(123)
§ 2.6.7	贝氏体中脊	(128)
§ 2.6.8	关于贝氏体相变的其它学术观点	(130)
参考文献		(131)
3	贝氏体碳化物	(138)
§ 3.1	引言	(138)
§ 3.2	贝氏体碳化物来源	(139)

§ 3.2.1 上贝氏体碳化物	(139)
§ 3.2.2 下贝氏体碳化物	(141)
§ 3.3 贝氏体相变过程中的碳扩散行为	(149)
§ 3.3.1 贝氏体铁素体初始碳含量	(149)
§ 3.3.2 碳原子扩散与再分配	(160)
§ 3.3.3 碳化物析出动力学	(162)
§ 3.4 贝氏体碳化物晶体学	(165)
§ 3.4.1 碳化物排列的理论预测	(165)
§ 3.4.2 碳化物惯习面分析	(168)
§ 3.4.3 碳化物与基体间位向关系	(170)
§ 3.4.4 三相晶体学	(172)
§ 3.4.5 贝氏体碳化物类型	(173)
§ 3.5 小结	(180)
§ 3.5.1 实验事实	(180)
§ 3.5.2 贝氏体碳化物析出机制及长大模型	(192)
§ 3.5.3 与台阶机制有关的其它几类碳化物的形成过程	(194)
参考文献	(195)
4 贝氏体超精细结构及表面浮凸	(202)
§ 4.1 片状相表面浮凸的物理本质	(202)
§ 4.1.1 马氏体相变晶体学表象理论(PTMC)	(202)
§ 4.1.2 马氏体相变的表面浮凸	(208)
§ 4.1.3 简单 fcc/hcp 界面原子尺度台阶长大与表面 浮凸	(211)
§ 4.1.4 PTMC 对 M_s 点以上片状相相变产物的描述	(213)
§ 4.1.5 扩散控制台阶长大机制与 PTMC	(215)
§ 4.2 合金元素对贝氏体组织形态及精细结构的 影响	(216)
§ 4.2.1 对贝氏体组织形态的影响	(216)
§ 4.2.2 对贝氏体精细结构的影响	(223)

§ 4.3 贝氏体铁素体超精细结构	(225)
§ 4.3.1 扫描隧道显微分析技术简介	(225)
§ 4.3.2 样品制备后的表面起伏	(227)
§ 4.3.3 上贝氏体超精细结构	(229)
§ 4.3.4 下贝氏体超精细结构	(247)
§ 4.4 贝氏体表面浮凸与浮凸群	(254)
§ 4.4.1 历史回顾	(254)
§ 4.4.2 贝氏体相变表面浮凸与台阶机制	(255)
§ 4.4.3 下贝氏体表面浮凸的超精细结构及浮凸群 ..	(258)
参考文献	(263)
5 其它类型片状相超精细结构及表面浮凸	(268)
§ 5.1 固态相变分类	(268)
§ 5.1.1 固态相变的不同分类方法	(268)
§ 5.1.2 一级相变分类	(270)
§ 5.1.3 马氏体相变分类	(272)
§ 5.2 魏氏组织铁素体	(274)
§ 5.2.1 对魏氏组织铁素体研究的重要意义	(274)
§ 5.2.2 魏氏组织铁素体的金相观察	(277)
§ 5.2.3 魏氏组织铁素体表面台阶	(278)
§ 5.2.4 魏氏组织铁素体形成机制	(280)
§ 5.2.5 魏氏铁素体精细结构特点	(284)
§ 5.2.6 魏氏组织铁素体的表面浮凸	(285)
§ 5.3 仿晶型铁素体的表面浮凸	(287)
§ 5.4 马氏体相变的主要特征	(290)
§ 5.5 片状马氏体的表面浮凸	(294)
§ 5.6 板条马氏体	(301)
§ 5.6.1 Fe-C-Cr 合金板条马氏体组织	(302)
§ 5.6.2 Fe-C-Cr 合金板条马氏体表面浮凸	(304)
§ 5.6.3 Fe-C-Cr 合金板条马氏体表面浮凸与 PTMC 理论比较	(307)

§ 5.7 其它马氏体表面浮凸	(309)
参考文献	(313)
6 贝氏体相变热力学基础	(315)
§ 6.1 铁碳合金中碳原子交互作用能、偏摩尔焓和偏 摩尔熵	(316)
§ 6.2 铁碳合金中碳和铁活度计算及相图相界成 分确定	(320)
§ 6.2.1 KRC 模型	(320)
§ 6.2.2 LFG 模型	(322)
§ 6.2.3 MD 模型	(324)
§ 6.3 铁碳二元合金贝氏体相变驱动力	(325)
§ 6.3.1 先共析型转变的驱动力: $\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha + \gamma_1}$	(325)
§ 6.3.2 类珠光体型转变的驱动力: $\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}}$	(326)
§ 6.3.3 马氏体型转变的驱动力: $\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha}$	(327)
§ 6.4 贝氏体相变驱动力计算结果与相变机制	(328)
§ 6.4.1 相变驱动力计算结果	(328)
§ 6.4.2 B_s 温度与切变形成最高温度 $T_{\max}$ 比较	(330)
参考文献	(332)
7 贝氏体相变动力学及其相关问题	(334)
§ 7.1 扩散控制贝氏体长大动力学	(335)
§ 7.1.1 扩散控制片状相长大理论	(335)
§ 7.1.2 台阶机制下的扩散控制界面长大动力学	(340)
§ 7.2 贝氏体亚单元切变形成动力学和界面位错攀 移-滑移动力学	(350)
§ 7.2.1 贝氏体亚单元切变形成动力学	(350)
§ 7.2.2 界面位错攀移-滑移动力学	(353)
§ 7.3 贝氏体不完全转变现象及开始温度 B_s 和结束 温度 B_f	(358)
§ 7.3.1 不完全转变现象	(358)

§ 7.3.2 B_s 温度的经验公式	(363)
§ 7.4 贝氏体相变整体动力学和 Avrami 方程	(367)
§ 7.4.1 形核与长大	(367)
§ 7.4.2 Avrami 方程	(371)
§ 7.5 局部平衡和仲(准)平衡	(373)
§ 7.5.1 局部平衡	(373)
§ 7.5.2 相界面平衡模型	(374)
§ 7.5.3 PLE 和 NPLE 的确定	(376)
§ 7.6 贝氏体长大过程界面平衡的实验研究	(380)
§ 7.6.1 界面碳浓度	(380)
§ 7.6.2 界面置换元素浓度	(383)
参考文献	(385)
8 有色合金贝氏体相变研究回顾	(390)
§ 8.1 具有贝氏体相变的有色合金系及其研究意义 和用途	(390)
§ 8.2 Cu 基合金的相图及相结构	(392)
§ 8.3 Cu 基合金的贝氏体相变晶体学	(397)
§ 8.3.1 贝氏体的惯习面	(397)
§ 8.3.2 贝氏体与母相及平衡相的位向关系	(400)
§ 8.4 Cu 基合金贝氏体相变的热力学	(400)
§ 8.4.1 Cu-Zn 合金贝氏体相变热力学	(401)
§ 8.4.2 Cu-Zn-Al 合金贝氏体相变热力学	(402)
§ 8.5 Cu 基合金的贝氏体相变动力学	(405)
§ 8.5.1 等温动力学	(405)
§ 8.5.2 伸长、加厚动力学	(408)
§ 8.6 关于有色合金贝氏体相变的学术论点	(411)
§ 8.6.1 贝氏体的晶体学	(411)
§ 8.6.2 Cu 基合金贝氏体相变初期的成分变化	(418)
§ 8.6.3 初生贝氏体存在层错亚结构	(422)
§ 8.6.4 应力对贝氏体相变的影响	(426)

§ 8.6.5 伸长、加厚动力学	(428)
§ 8.6.6 贝氏体的有序结构	(429)
§ 8.6.7 贝氏体的界面结构	(430)
§ 8.6.8 Cu 基合金的贝氏体相变模型	(433)
参考文献	(437)
9 Cu-Zn-Al 合金的贝氏体相变机制	(440)
§ 9.1 Cu-Zn-Al 合金贝氏体的生长过程	(440)
§ 9.1.1 贝氏体的初生态	(441)
§ 9.1.2 贝氏体的中间态	(448)
§ 9.1.3 贝氏体的退化态及其与平衡相的比较	(451)
§ 9.2 Cu-Zn-Al 合金贝氏体的台阶生长机制	(454)
§ 9.2.1 台阶存在的客观性	(454)
§ 9.2.2 台阶存在的普遍性	(456)
§ 9.2.3 台阶的可动性	(462)
§ 9.2.4 台面与阶面的互换性	(465)
§ 9.2.5 台阶-台阶及转折-台阶生长	(466)
§ 9.3 Cu-Zn-Al 合金的贝氏体精细结构——亚单元	(468)
§ 9.3.1 亚单元的扫描隧道显微分析	(468)
§ 9.3.2 亚单元的透射电镜观察	(472)
§ 9.4 Cu-Zn-Al 合金贝氏体的表面浮凸	(473)
§ 9.4.1 马氏体浮凸的 STM 观察	(473)
§ 9.4.2 贝氏体浮凸的 STM 观察	(476)
§ 9.4.3 贝氏体亚单元浮凸的形成机制	(476)
§ 9.5 Cu-Zn-Al 合金贝氏体的激发-台阶相变机制	(479)
§ 9.6 小结	(480)
参考文献	(481)

10 其它有色合金的贝氏体相变	(485)
§ 10.1 Cu-Al 及 Cu-Sn 合金的贝氏体相变	(485)
§ 10.2 Ti 合金的贝氏体相变	(490)
§ 10.2.1 相图及相结构	(490)
§ 10.2.2 α/β 的界面结构	(492)
§ 10.3 Ag 基合金的贝氏体相变	(497)
§ 10.3.1 Ag-Cd 合金的贝氏体相变	(497)
§ 10.3.2 Ag-Zn 合金的贝氏体相变	(502)
§ 10.4 U-Cr 合金的贝氏体相变	(505)
参考文献	(510)
11 贝氏体相变激发形核-台阶长大	(512)
§ 11.1 扩散控制台阶长大理论的发展	(512)
§ 11.1.1 生长台阶	(512)
§ 11.1.2 巨型台阶与台阶机制	(518)
§ 11.1.3 台阶-台阶、台阶-扭折理论	(534)
§ 11.2 激发形核-台阶长大形成机制	(536)
§ 11.2.1 激发形核的实验观察	(536)
§ 11.2.2 激发形核早期理论	(540)
§ 11.2.3 异质形核理论在激发形核方面的应用	(546)
§ 11.2.4 贝氏体激发形核-台阶长大理论及相变模型	(554)
§ 11.2.5 钢中魏氏组织与晶界仿晶型铁素体的激发形核	(563)
§ 11.2.6 置换型合金贝氏体激发形核-台阶长大机制	(565)
§ 11.2.7 关于马氏体相变的应力激发形核	(567)
§ 11.3 片状相形成的原子机制	(569)
§ 11.3.1 在 PTMC 片状相方面的应用	(569)
§ 11.3.2 原子惯习面与表观惯习面	(570)
§ 11.3.3 原子尺度台阶的扩散运动	(573)
§ 11.4 贝氏体形态学	(573)