

材料科学丛书

钢中贝氏体

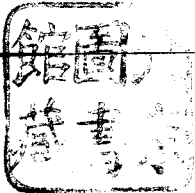
康沫狂 杨思品 管敦惠 著 上海科学技术出版社

材料科学丛书

钢中贝氏体

康沫狂 杨思品 管敦惠 著

上海科学技术出版社



B713595

内 容 提 要

本书主要论述钢中贝氏体转变的动力学、形态学、热力学、晶体学及其转变机制等方面的理论问题;并介绍了贝氏体组织的强度、韧性和疲劳性能等力学行为及其在生产中的应用。

本书主要供高等院校、科研和生产单位从事金属材料专业的教师、学生和科研人员、工程技术人员阅读参考。

材料科学丛书

钢 中 贝 氏 体

康沫狂 杨思品 [管敦惠] 著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 14 字数 367,000

1990 年 6 月第 1 版 1990 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—1,300

ISBN 7-5323-1405-7/TG·48

定价: 7.40 元

《材料科学丛书》编辑委员会

金属材料方面 无机非金属材料方面 高分子材料方面

主任委员 周志宏 主任委员 严东生 主任委员 钱宝钧

马龙翔 王之玺
王启东 田庚锡
师昌绪 许顺生
汪 显 李恒德
吴自良 沈华生
陈新民 杜鹤桂
张文奇 张沛霖
周行健 周惠久
周宗祥 邵象华
林栋梁 郁国城
胡为柏 柯 俊
徐采栋 钱临照
郭可信 徐祖耀
顾翼东 黄培云
葛庭燧 傅元庆
魏寿昆 童光照
谭庆麟

丁子上
干福熹
江作昭
苏 锵
吴中伟
袁润章
盛绪敏
黄蕴元
程继健

于 翹
王孟钟
方柏容
孙书棋
吴入洁
吴祥龙
李世璠
范 棠
张承琦
姚锡福
徐 僊
钱人元
郭钟福

《材料科学丛书》序

无论在发展农业、工业、国防和科学技术方面，还是在人民生活方面，材料都是不可缺少的物质基础。材料的品种、数量和质量无疑是国家现代化程度的标志之一。随着材料的广泛生产和研究工作的不断深入，以及与材料有关的基础学科的日益发展，对材料的内在规律有了进一步了解，对各类材料的共性初步得到了科学的抽象，从而诞生了“材料科学”这个新的学科领域。

材料科学主要研究材料的组分、结构与性能之间的相互关系和变化规律，它是介于基础科学与应用科学之间的一门应用基础科学，与物理、化学、化工、电子、冶金、陶瓷等学科相互交叉、彼此渗透。热力学、动力学、固体物理、固体化学、化学物理等基础学科为材料科学提供理论基础，而材料科学又为应用科学提供发展新材料、新工艺和新技术的途径。

从当前来看，材料科学的发展大致有下列几方面的趋势：

(1) 高分子材料原料丰富、性能优良，在结构材料中所占的位置日益重要。塑料、合成橡胶和合成纤维比其他传统材料将有更大的发展。

(2) 功能材料显示广阔的发展前景。半导体的广泛应用，集成电路的发展，红外、激光和超导材料的发现和应用，使功能材料犹如异军突起，建立奇功。

(3) 在新能源材料方面，随着太阳能的利用，磁流体发电等的进展，出现了各种换能和储能材料，并已普遍受到重视。

(4) 对结构材料和耐磨、耐蚀等材料提出更高的要求，包括严酷的使用条件、更长的使用寿命等。

(5) 复合材料、定向结晶材料、钢化陶瓷、定向石墨以及各种类型的表面处理与涂层的利用，使材料的效能进一步得到发挥。

(6) 探索材料在极端条件下的性能,例如玻璃态金属、超低温下的金属及金属氢都具有优越的性能。

(7) 改进制备工艺,提高质量,改进设计,更有效地使用材料。

(8) 对材料科学的基础研究趋向于更加深入和细致。尤其在表面,非晶态,原子象,固态中的杂质与缺陷,一维与二维结构,非平衡态,相变的微观机制,变形、断裂和磨损等的宏观规律和微观过程以及点阵结构的稳定性等领域,探索性研究正日益活跃。

人们期望,对材料基本规律的掌握将有助于按预定性能设计材料的原子或分子组成以及结构形态等。

我国在1978~1985年科学技术发展规划中把材料科学列为重点之一。我们必须十分重视和大力发展材料科学。

为了及时传播材料科学的基础理论,总结研究成果并扩大其工程应用,以有助于更快、更广泛地提高我国材料科学技术的水平,我们成立了《材料科学丛书》编辑委员会,由上海科学技术出版社出版这套丛书。

本丛书分为金属材料、无机非金属材料和高分子材料三个方面,选题包括材料科学的基础理论,研究方法和测试技术,研究成果,以及实际应用等方面。热忱地期望我国广大科学工作者,共同策进本丛书的编辑、出版工作,努力为我国早日实现四个现代化贡献力量。

《材料科学丛书》编辑委员会

一九七九年十二月

前 言

自本世纪30年代Bain和Davenport发现钢中存在贝氏体以来,已引起了许多学者们的极大兴趣。特别是近20年来,人们对贝氏体转变的研究又有了很大进展。具有贝氏体组织钢制零件在生产中的应用也愈来愈多,并已收到了较好的效果。尤其是粒状贝氏体、针状和块状铁素体的出现,更引起了人们的广泛注意,很多资料报道了这方面的研究情况。近年来,各种先进测试仪器在材料科学研究上的应用,使得对贝氏体转变机制方面的认识也前进了一大步。但由于贝氏体转变的复杂性、其形貌的多样性以及性能上的差异,致使对这类转变的本质问题仍存在着严重分歧。从而又使这类组织的应用范围受到了一定限制。本书根据国内外研究资料以及我们自己的工作,试图对贝氏体转变的基本过程、性能变化以及应用情况作一综合的概括和分析。我们希望通过这种初步的概括和阶段性总结与分析能为进一步开展贝氏体研究工作提供某些线索,或者为贝氏体组织在生产中的应用提供一些参考资料。

提起贝氏体,研究者们研究对象主要是针对低、中碳合金钢中的贝氏体,这方面资料也较多,当然在一定程度上也涉及到高碳钢中的贝氏体,因此,我们把书名定为“钢中贝氏体”。

全书共分十一章,前七章讨论了贝氏体转变的形态、动力学、热力学、晶体学、转变机制及其组织组成物等理论问题;后四章讨论了贝氏体的各种机械性能变化以及应用情况。当然这两部分是有机联系的,对它们进行分别研究所取得的成果,都能为更深入地认识贝氏体提供有益的信息。

限于作者水平,错误和理解片面之处在所难免,敬希读者批评指正,不胜感激。

康沫狂 杨思品 1987.11

目 录

第一章 与贝氏体转变有关的基本知识	1
§ 1-1 钢中固态转变分类	1
§ 1-2 钢中的扩散	3
1-2-1 扩散系数和温度的关系	3
1-2-2 钢中碳的扩散及合金元素对它的影响	4
1-2-3 钢中合金元素的扩散	6
1-2-4 钢中铁的自扩散	7
1-2-5 钢中的上坡扩散	8
§ 1-3 固态相变的热力学基本知识	8
1-3-1 固态相变的热力学条件	8
1-3-2 相变时所需要的附加能量	9
1-3-3 钢中相变的热力学示意图	11
§ 1-4 固态相变中有关晶体组织和结构方面的知识	12
1-4-1 形核	12
1-4-2 相界面结构	13
1-4-3 应变能与晶体形状	15
1-4-4 位向关系和惯析面	16
1-4-5 晶粒、亚晶粒和晶界	17
§ 1-5 固态相变动力学的基本知识	18
1-5-1 相变动力学的一般原理	18
1-5-2 钢中过冷奥氏体转变图	20
第二章 奥氏体的中温转变图	24
§ 2-1 奥氏体(中温区)等温转变图	24
2-1-1 奥氏体等温转变图的建立	24
2-1-2 等温转变动力学曲线的整理	28

§ 2-2 中温转变图的分析——区别转变产物类型的一些判据	30
2-2-1 激活能计算及其在中温转变区的应用	30
2-2-2 Avrami 方程和不同类型转变产物	42
§ 2-3 中温转变区等温转变图形貌特点	44
2-3-1 贝氏体和珠光体转变曲线间的关系	45
2-3-2 上、下贝氏体转变图的分离	50
2-3-3 贝氏体转变图延伸到马氏体点以下	55
2-3-4 关于粒状组织转变动力学特征	58
2-3-5 低、中合金钢中的等温马氏体	60
2-3-6 关于中温区等温转变图的讨论	62
§ 2-4 奥氏体连续冷却转变图	64
2-4-1 奥氏体连续冷却转变图的建立	64
2-4-2 冷却曲线(或速度)的表示方法	69
2-4-3 中温转变区连续冷却转变图形貌特点	70

第三章 贝氏体组织形态

§ 3-1 无碳贝氏体	73
§ 3-2 上贝氏体	76
§ 3-3 下贝氏体	82
§ 3-4 贝氏体转变的表面浮凸效应	96
§ 3-5 粒状贝氏体和粒状组织	100
§ 3-6 柱状贝氏体和反常(逆)贝氏体	107
3-6-1 柱状贝氏体	108
3-6-2 反常(逆)贝氏体	110
§ 3-7 主要贝氏体形态分类	112

第四章 贝氏体转变的热力学和晶体学

§ 4-1 贝氏体转变热力学综述	117
4-1-1 $r/\alpha/\text{Fe}_3\text{C}$ 介稳状态图	118
4-1-2 奥氏体分解或转变自由能差	118

§ 4-2 贝氏体转变时奥氏体和铁素体碳含量	125
4-2-1 奥氏体中碳含量的再分配	125
4-2-2 中温转变产物中的铁素体	130
§ 4-3 贝氏体转变热力学探讨	134
4-3-1 贝氏体转变热力学模型	134
4-3-2 贝氏体铁素体中的碳含量和原奥氏体关系	134
4-3-3 贝氏体转变的开始温度 B_s	136
4-3-4 贝氏体转变的临界驱动力计算	138
§ 4-4 贝氏体端向生长动力学	140
§ 4-5 贝氏体转变的晶体学	143
4-5-1 奥氏体/贝氏体铁素体间的晶体学关系	143
4-5-2 贝氏体铁素体/碳化物间的晶体学关系	144
4-5-3 贝氏体转变的表象学理论分析	152
第五章 贝氏体转变机制	154
§ 5-1 贝氏体铁素体长大机制简介	154
5-1-1 共格切变长大机制	154
5-1-2 台阶长大机制	159
§ 5-2 贝氏体碳化物	163
5-2-1 上贝氏体的碳化物	163
5-2-2 下贝氏体的碳化物	166
§ 5-3 贝氏体转变机制讨论	170
5-3-1 贝氏体转变有关问题的评述	170
5-3-2 贝氏体转变机制讨论	172
§ 5-4 中温转变区的块状转变	177
5-4-1 块状转变	177
5-4-2 铁及其合金中的块状转变	178
5-4-3 钢中的块状转变	180
第六章 中温转变组织及其影响因素	183
§ 6-1 中温区等温转变组织的形成规律	183
6-1-1 中温转变组织	183

6-1-2	未转变奥氏体量与等温温度的关系	185
6-1-3	未转变奥氏体在冷却过程中的行为	187
6-1-4	岛状物的本质和形成规律	188
6-1-5	室温残余奥氏体量与等温温度、时间的关系	191
6-1-6	等温转变产物的相对含量	192
6-1-7	残余奥氏体量和奥氏体稳定化的关系	194
§ 6-2	影响等温转变产物及其含量的因素	199
6-2-1	碳和合金元素的影响	199
6-2-2	奥氏体化温度的影响	206
6-2-3	等温后冷却速度的影响	208
6-2-4	在各个不同温度停留的影响	208
6-2-5	应力和形变的影响	211
§ 6-3	连续冷却转变过程	213
6-3-1	不同冷速下的转变产物	213
6-3-2	不同转变产物的临界冷速	213
6-3-3	连续冷却转变图的发展	219

第七章 贝氏体及其共存组织的回火转变223

§ 7-1	贝氏体组织回火时的变化	223
7-1-1	贝氏体铁素体回火时的变化	223
7-1-2	贝氏体碳化物回火时的变化	226
§ 7-2	M/A 或残余奥氏体(膜)回火时的变化	232
7-2-1	马氏体和残余奥氏体回火加热时的分解	232
7-2-2	回火保温时残余奥氏体的转变	236
7-2-3	残余奥氏体回火转变的不完全性和二次淬火	243
7-2-4	残余奥氏体稳定性与回火温度的关系	248

第八章 贝氏体组织的强度和韧性259

§ 8-1	贝氏体的强度、韧性与转变温度及等温时间 的关系	259
8-1-1	强度与转变温度的关系	260
8-1-2	冲击韧性与转变温度的关系	262

8-1-3 强度、韧性与等温时间的关系	262
§ 8-2 贝氏体的强度	265
8-2-1 贝氏体的强化机制	265
8-2-2 贝氏体的强度	270
§ 8-3 贝氏体的冲击韧性	272
8-3-1 上、下贝氏体的冲击韧性	272
8-3-2 影响冲击韧性的因素	273
8-3-3 贝氏体和马氏体回火组织在等强(硬)度条件下的 韧性	278
§ 8-4 贝氏体和马氏体混合组织的强度和韧性	283
8-4-1 混合组织的强度和韧性	283
8-4-2 在等强度条件下混合组织同马氏体回火组织的韧 性比较	286
§ 8-5 贝氏体组织的断裂韧性	288

第九章 贝氏体回火后的强度和韧性

§ 9-1 贝氏体回火后强度和韧性变化的一般规律	295
9-1-1 贝氏体回火后强度的变化	295
9-1-2 贝氏体回火后韧性的变化	300
§ 9-2 贝氏体组织回火抗力和二次硬化	309
9-2-1 贝氏体组织的回火抗力	309
9-2-2 回火贝氏体组织的二次硬化现象	310
§ 9-3 回火贝氏体脆性	314
9-3-1 回火贝氏体脆性的性质	314
9-3-2 关于回火贝氏体脆性机制的讨论	317
§ 9-4 等强(硬)度下贝氏体和马氏体回火后冲击韧 性的比较	323
§ 9-5 贝氏体和马氏体混合组织回火后的强度和韧 性	326
9-5-1 贝氏体和马氏体混合组织回火后的强度	326
9-5-2 贝氏体和马氏体混合组织回火后的韧性	334

第十章 贝氏体组织的疲劳性能	339
§ 10-1 高周疲劳性能	339
10-1-1 旋转弯曲疲劳强度	340
10-1-2 拉伸疲劳寿命以及裂纹扩展速率	342
§ 10-2 低周疲劳性能	349
10-2-1 低周疲劳寿命	349
10-2-2 贝氏体组织的低周疲劳寿命	351
§ 10-3 冲击疲劳性能	357
10-3-1 冲击疲劳概念	357
10-3-2 贝氏体组织的冲击疲劳性能	358
§ 10-4 贝氏体组织的疲劳断裂过程	364
10-4-1 贝氏体组织的疲劳断裂过程的金相观察	365
10-4-2 贝氏体组织疲劳特性讨论	372
 第十一章 贝氏体组织的应用	 381
§ 11-1 等温淬火中的贝氏体	381
11-1-1 等温淬火的作用	381
11-1-2 等温淬火工艺问题	386
§ 11-2 贝氏体钢及其应用	391
11-2-1 贝氏体钢的合金化	392
11-2-2 贝氏体钢种介绍	403
11-2-3 贝氏体钢性能的控制	409
§ 11-3 调质钢中的贝氏体——零件失效因素之一	414
11-3-1 因淬透性不足而在组织中出现的贝氏体	414
11-3-2 因钢材成分偏析和有带状组织而出现贝氏体	416
 参考文献	 419

第一章 与贝氏体转变有关的基本知识

钢之所以能进行各种热处理是因为它可以在固态下进行多种形式的转变。通过这些转变会形成各种各样的组织，从而满足所需要的使用性能。贝氏体转变就是其中的一种。虽然贝氏体的转变过程在有些方面有别于其他类型的转变，但就其转变的基本规律来说，彼此却是相似的，即都是在一定的热力学条件下经历了形核和长大的过程。因此，金属学中所论述的相变一般规律同样适用于贝氏体转变。

为便于理解，在具体讨论贝氏体转变以前，先就与贝氏体转变有关的基本知识简述如下。

§ 1-1 钢中固态转变分类

固态转变和液体凝固一样都要经历一个形核和长大的过程，但二者之间却有着一定的差别。这主要是参与固态转变的新旧两相都是晶体，这样，新相的产生就具有较大的界面能和因比容不同而导致的应变能。为了减少形核功，新相的晶核往往容易在旧相的晶界、位错或层错界面处产生。如果新旧两相晶体结构近似，便可能沿一定结晶面形核和长大并与旧相保持共格关系；如果新旧两相晶体结构相差较大、转变温度又较低时，有可能首先形成亚稳定相(过渡相)，而后再转变为稳定相。

根据转变过程中原子迁移运动的特点，固态转变可分为：扩散型、无扩散型和混合型三种。

一、扩散型转变^[1-1,1-2]

其特点是转变时原子作长距离的扩散，原子是以漫乱的方式跳越相界面而进入新相的，故又可称为“平民式”的转变^[1-3]。例

如共析钢分解时，渗碳体或铁素体均可首先形核^[1-4]。若从奥氏体中首先形成渗碳体晶核，奥氏体中的碳原子又不断地通过渗碳体/奥氏体界面扩散而趋向渗碳体，并促使其长大。与此同时，渗碳体两侧的奥氏体则因贫碳并通过自扩散而转变为铁素体。这样奥氏体便分解为渗碳体和铁素体的层状共析体组织。可见，这种转变是受原子扩散所控制。

二、无扩散型转变(或切变型转变)^[1-1,1-2]

在这类转变过程中，新相晶体的长大是通过切变而进行的。其转变产物的核心，常常是在旧相中一些合适的晶面上形成。其长大方式是相界面附近的旧相原子有秩序地、协调一致地发生迁移运动，从而改变其点阵类型，成为新相，并且新旧相间保持着共格关系。转变前后各原子间的相邻位置是不变的，故又称为“军队式”转变^[1-3]。假如这类转变是在合金中进行的话，那么，新旧相间的化学成分也是相同的。钢中高碳奥氏体向马氏体转变就属于这类。

三、混合型转变

这是介于上述两类之间的一种转变。如块状转变^[1-5]，它和扩散型转变有相似之处，即转变时新旧相界面的移动是通过原子作一定程度的扩散进行点阵改建而实现的。这种扩散只局限于原子横跨界面作短距离的跳跃。但块状转变时新旧两相的化学成分却是相同的，故又具有无扩散型转变的某些特点。根据有些资料^[1-6]认为，钢中贝氏体转变也可归属于混合型转变。贝氏体转变一般是先后形成铁素体和碳化物两相，其中铁素体在形核和长大时，一方面有碳原子的扩散，另一方面铁原子借有秩序的迁移运动而改建其点阵类型，并同旧相奥氏体保持一定的共格联系，使之具有无扩散转变的性质^[1-4]。至于碳化物，则是通过碳在奥氏体或铁素体中的扩散而形成的。可见，贝氏体转变兼有扩散和无扩散型转变的特点。也有资料把这类转变称之为扩散型^[1-2]。最近研究表明^[1-7,1-8]，低碳马氏体转变亦具有切变和碳扩散的混合性质。

§ 1-2 钢中的扩散

由上述可知, 钢中相变往往是与原子扩散相关的。所谓扩散指的是固态金属中原子漫乱的迁移运动。

钢中扩散包括有: 碳原子在奥氏体或铁素体中进行的间隙异扩散; 其他合金元素原子在奥氏体或铁素体中进行的置换异扩散以及铁原子本身的自扩散等。

固态金属中原子扩散的途径有^[1-1.1-2.1-9], 晶内扩散、晶界扩散、表面扩散和位错扩散等。后三种扩散速度较快, 特别是刃型位错, 常被认为是扩散的通道。实际上, 这四种扩散往往是同时进行的。

1-2-1 扩散系数和温度的关系

从扩散定律可知, 在一定条件下, 扩散速度的快慢主要取决于扩散系数^[1-1.1-9]。增大扩散系数可以使扩散加速。而扩散系数又与温度、扩散激活能等因素有关。一般可以用下式表示^[1-1]:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1-1)$$

式中: D ——扩散系数(cm^2/s); D_0 ——扩散常数; R ——气体常数 8.3192 J/K (1.987 cal/deg)*; Q ——扩散激活能 (J/mol); T ——绝对温度(K)。

扩散激活能 Q 表示原子扩散时由一个平衡位置迁移到另一个平衡位置克服势垒所需要的能量。激活能大, 则原子迁移困难; 反之则原子迁移容易。对于给定的合金来说, 可将它视为常数。在影响扩散系数的因素中, 温度是最主要的因素。图 1-1 所示为碳在钢中的 (异) 扩散系数随温度和碳量变化的情况^[1-10]。资料 [1-11] 给出相似的结果。

从图中可以看出, 温度愈高、碳含量愈多, 则碳原子的扩散系

* $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$.

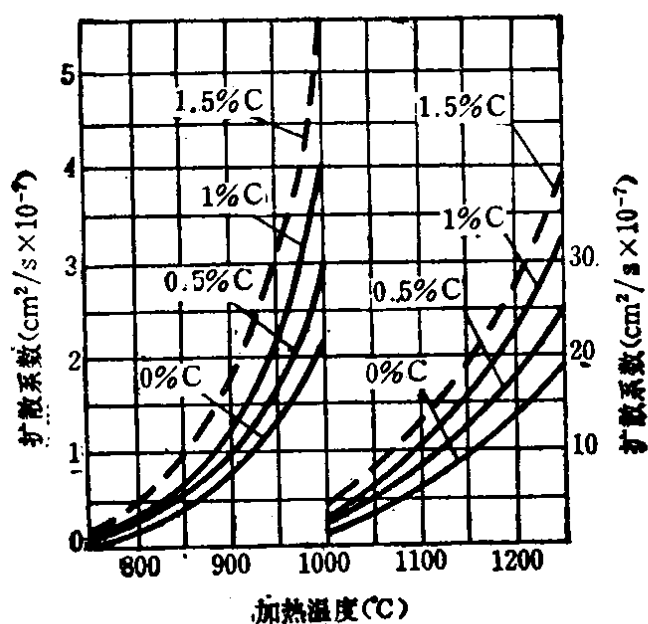


图 1-1 碳在钢中的(异)扩散系数(左边的标度温度 $<1000^{\circ}\text{C}$;
右边的标度温度 $>1000^{\circ}\text{C}$)

数愈大, 迁移运动愈易发生。

1-2-2 钢中碳的扩散及合金元素对它的影响 (碳的异扩散)

Mehl 和 Wells^[1-12] 给出了确定奥氏体中碳扩散系数的表达式:

$$D_{\text{C}}^{\gamma\text{-Fe}} = (0.06 + 0.07 \% \text{C}) \exp\left(-\frac{32000}{RT}\right) \quad (1-2)$$

Блантер^[1-1] 提出了一个与上式相似的表达式:

$$D_{\text{O}}^{\gamma\text{-Fe}} = (0.04 + 0.08 \% \text{C}) \exp\left(-\frac{31350}{RT}\right) \quad (1-3)$$

而碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的扩散系数表达式为^[1-13, 1-14],

$$D_{\text{C}}^{\alpha\text{-Fe}} = 6.2 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{19200}{RT}\right) \quad (1-4)$$

$$D_{\text{C}}^{\alpha\text{-Fe}} = 0.02 \exp\left(-\frac{20100}{RT}\right) \quad (1-5)$$

从以上式中可以看出, 碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的扩散激活能约为 133.978 KJ/mol (32 Kcal/mol), 而碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的扩散激活能约为 83.736 KJ/mol (20 Kcal/mol)。倘使温度相同, $D_{\text{O}}^{\alpha\text{-Fe}}$ 远小于 $D_{\text{O}}^{\gamma\text{-Fe}}$ 。通常认为, 造成这种差别的原因是: 由于体心立方点阵