

贝氏体相变的过渡性

刘宗昌

(包头钢铁学院材料系, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:应用系统科学理论分析讨论了贝氏体相变的过渡性。认为,中温区的贝氏体相变带有珠光体分解和马氏体相变的双重特征,具有过渡性。上贝氏体转变与珠光体分解有着本质上的区别,但又有密切的联系;而下贝氏体转变与马氏体相变有密切的联系。从整体上看,上贝氏体具有某些珠光体分解的特征;而下贝氏体则具有马氏体相变的特征。贝氏体在转变机理上、动力学上、组织形貌上都存在明显的过渡性。

关键词:贝氏体相变; 自组织; 过渡性

中图分类号: TG111.5; TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-6264(2003)02-0036-05



半个多世纪以来,贝氏体相变的研究十分活跃,不断丰富和发展了贝氏体相变的学说。但是,由于中贝氏体相变发生在中温区,它与高温区的珠光体分解以及低温区的马氏体相变都有复杂的联系,因而贝氏体相变更具复杂性,认识贝氏体整合系统更具艰巨性。因此,贝氏体相变机理和贝氏体的物理本质尚未真正搞清。20世纪70年代以来切变学派的 R. F. Hehemann 和扩散学派的 H. I. Aaronson 为代表的两方进行了论争,至今没有得到统一的认识。

本文应用科学技术哲学的理论和系统整合方法分析研究了贝氏体相变的过渡性,对于贝氏体相变的某些论争的焦点问题提出了一些新看法,试图促进贝氏体相变理论研究的发展。

1 上贝氏体转变和珠光体分解的联系与区别

自然界的各种物质形态都是一个系统^[1]。过冷奥氏体作为一个整合系统,整体上看,从高温区的珠光体共析分解到低温区的马氏体无扩散型相变是一个逐级演化的过程。全过程可以分为三个相变阶段:即高温区的珠光体共析分解→中温区的贝氏体转变→低温区的马氏体相变。作为一个整合系统,三个相变阶段有联系又有区别,而中温转变是这个系统的中间过渡环节。

就相变机制而言,贝氏体相变同珠光体转变同样具有扩散性质,首先是碳原子的扩散,故有人称其为“半扩散型相变”^[2]。其次,Fe 和合金元素的原子在中温区的扩散能力并不相同,各合金元素在 α 相中开始显著扩散的温度为:硅高于 300℃,锰高于 350℃,铬高于 400~500℃,钼高于 500℃,钨和钒在 500~550℃^[2]。可见,在中温区,这些元素尚有一定的扩散能力。也即在贝氏体相变温度区间不仅碳原子能够扩散,不同合金元素原子在不同的温度下,也有某种程度的扩散,当然,温度愈低,扩散愈慢。

众所周知,珠光体分解是在奥氏体晶界上形核,而上贝氏体的形核,即贝氏体铁素体晶核也是在奥氏体晶界上形成的^[3],两者的形核地点相同。贝氏体转变具有台阶长大机制^[4]。近年来研究指出,珠光体分解也具有台阶机制^[5]。

但是上贝氏体与珠光体在转变机制上也有区别,珠光体共析分解是铁素体+碳化物两相共析共生的过程。而上贝氏体则是在晶界首先析出贝氏体铁素体片条,至于渗碳体何时析出?以什么形态析出?要视具体条件而定。也可能完全不析出,而形成无碳化物贝氏体^[3]。

从文献[6]中的许多钢的 TTT 图中可以看到,珠光体分解与上贝氏体转变在一定温度范围内等温时可以重叠。例如,35Cr 钢在 500~600℃之间等温时,珠光体分解和上贝氏体转变 C 曲线重叠,各有独立的 C 曲线(图 1)。65 钢在 500~550℃之间等温时,珠光体分解和上贝氏体转变 C 曲线重叠。45Mn2 钢在 400~500℃之间等温时,先形成上贝氏体,等温 3min 后开始形成珠光体^[6],等。说明珠光体分解与上贝氏

收稿日期: 2003-01-03; 修订日期: 2003-05-06

作者简介: 刘宗昌(1940—),男,包头钢铁学院材料系教授,从事材料及相变研究,发表论文 130 余篇。

体转变有不同,又有密切的联系,具有交叉性、重叠性和过渡性质。

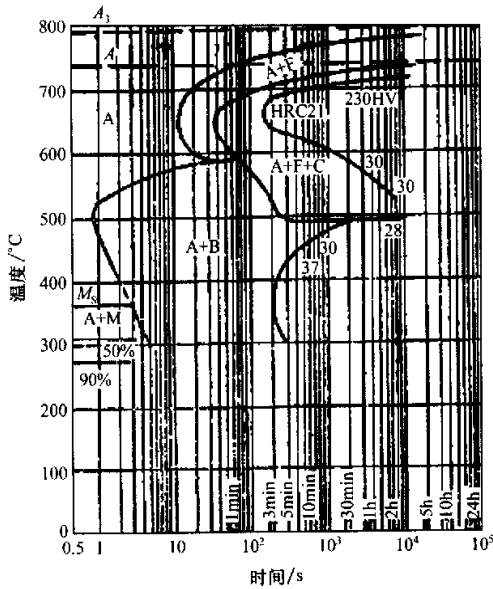


图 1 35Cr 钢的 TTT 图
Fig.1 TTT diagram of 35Cr steel

从大量的 TTT 图可见,在珠光体分解 C 曲线的“鼻温”以下,随着温度的降低,扩散越发困难,孕育期愈来愈长。共析分解愈来愈困难,直至难以再进行珠

光体共析分解,铁素体和渗碳体共析共生的过程则逐渐停止。也即平衡转变或准平衡转变将终止。而非平衡的上贝氏体转变也随着温度的降低逐渐开始,这是系统自组织功能的作用。

在大量的合金结构钢中,贝氏体的 C 曲线的开始线在珠光体的左方。已在文献[6]中查出 110 多种钢具有这类 C 曲线。这里只举一例,如图 2a, 20Cr2Ni2Mo 钢在 650℃ 等温转变时,珠光体的孕育期约 100s;在 400℃ 贝氏体的孕育期 6s^[6]。显然贝氏体铁素体的析出比珠光体分解要快,这表明贝氏体转变不同于珠光体分解。扩散学派认为贝氏体转变是珠光体转变的延续,是合金元素“类拖曳”的结果,此论不妥。

有时贝氏体铁素体的形成比珠光体转变还要慢,也即贝氏体转变 C 曲线右移。如图 2b^[6],同样是 20Cr2Ni2Mo 钢,经过渗碳后,贝氏体相变延迟了,在 400℃ 贝氏体的孕育期变为 200s。这是由于碳含量的增加,奥氏体晶界等缺陷处吸附的碳原子浓度也增加,不利于 α 相形核及长大的缘故^[2]。

与珠光体共析分解不同,贝氏体转变 C 曲线无论左移还是右移,θ 渗碳体是不再与铁素体共析共生了,而是延缓析出,或在适当条件下析出。如果在铁素体片条间析出,则得到羽毛状上贝氏体。如果碳化物不再析出,而以残留奥氏体保留到室温时,这就得到了无碳化物贝氏体。如果在贝氏体铁素体基体上

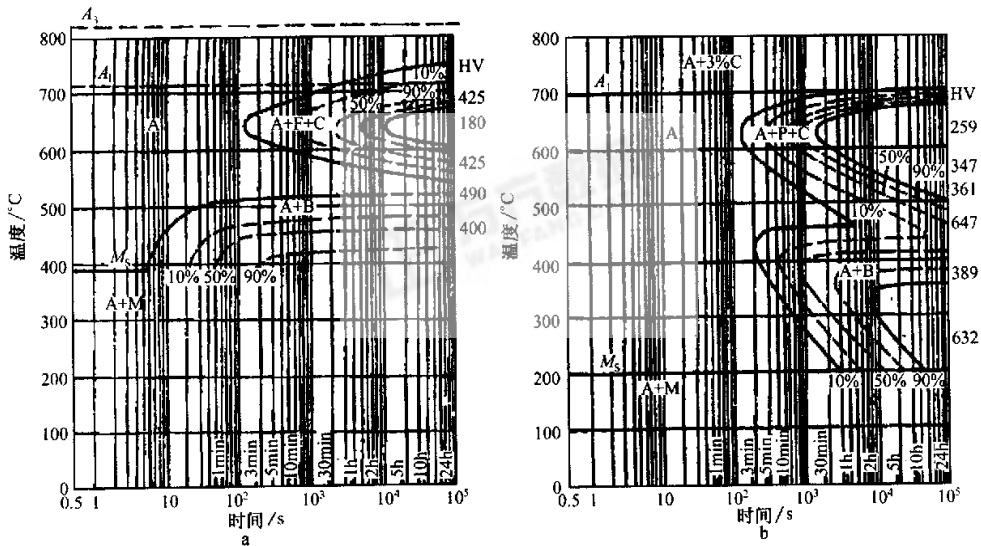


图 2 20Cr2Ni2Mo 钢的 TTT 图
Fig.2 TTT diagram of 20Cr2Ni2Mo steel

分布着的颗粒状的所谓“M/A岛”，则得到粒状贝氏体。可见，上贝氏体转变不属于共析分解。它与珠光体分解有着本质上的区别。从大量科学事实中可以总结出7点不同：

1) 珠光体由铁素体 + 碳化物两相组成。贝氏体可以由贝氏体铁素体 + 碳化物组成，或贝氏体铁素体 + 残留奥氏体组成或贝氏体铁素体 + M/A岛组成等，贝氏体铁素体有时写成 α 相。

2) 珠光体晶核是两相，即(F + 碳化物)；而贝氏体的晶核是单相，即贝氏体铁素体(BF)。

3) 珠光体共析分解反应式为： $A \rightarrow F + Fe_3C$ ；而贝氏体相变不能写成此式。

4) 珠光体分解在晶界形核；而贝氏体相变的形核可在晶界也可在晶内。

5) 珠光体是过冷奥氏体在高温区的平衡分解产物或接近平衡的分解产物；而贝氏体是中温区的非平衡相变产物。

6) 珠光体中的铁素体可以是片状的(片状珠光体)，或等轴状的(粒状珠光体)，其中的位错密度低；而贝氏体铁素体由亚单元构成，甚至是超细亚单元组成^[4]，位错密度较高，甚至发现存在精细孪晶^[7,8]。

7) 珠光体中的铁素体、渗碳体两相存在着比例关系，共析碳素钢的珠光体中，渗碳体占13%^[9]；而贝氏体中的各相没有固定的比例关系，碳化物析出量不定，还会夹杂着残留奥氏体等相。

可见，扩散学派把贝氏体相变说成是共析分解的延续，是混淆了珠光体分解和贝氏体相变的界限。

系统自组织功能使奥氏体在难以共析分解时及时改变相变机制。自组织的必要条件之一是涨落^[1,6]。通过随机涨落形成贫碳区和富碳区，在贫碳区首先析出贝氏体铁素体片条，而在富碳区断断续续地析出 θ 渗碳体。但是，此温度下的富碳区，常常难以析出碳化物，这样在奥氏体中则不断富集碳，只在适当的时候析出碳化物，或在冷却时转变为马氏体，或干脆残留下来，而成为残留奥氏体。因而形成形形色色的上贝氏体组织形貌。

扩散学派不承认贫碳区的存在。其实，碳原子在奥氏体中的分布是不均匀的。在奥氏体中本来就存在贫碳区和富碳区，例如用统计理论进行计算的结果表明，在含0.85% C的奥氏体中可能存在大量的比平均碳浓度高8倍的微区，这相当于渗碳体的含碳量了^[13]。当以50℃/s到230℃/s的加热速度对40钢进行奥氏体化时，奥氏体中存在高达1.4%~1.7% C的

富碳区^[14]，相对地也必然存在贫碳区。

按照自组织理论^[1,10,11]，钢中的相变是自组织的^[12]，系统远离平衡态，将出现随机涨落。奥氏体在一定过冷度下，出现随机涨落，通过涨落形成贫碳区和富碳区。加上随机出现的结构涨落、能量涨落，在贫碳区则可以形成贝氏体铁素体晶核，开始贝氏体转变。因此，贫碳区的存在是不容否定的。

2 下贝氏体转变和马氏体相变的联系与区别

当过冷奥氏体冷却到低于贝氏体转变图的“鼻温”时，即温度降低到下贝氏体转变区时，碳的扩散越发困难。在晶界和晶内的缺陷等处通过成分涨落也能形成贫碳区。但是难以像上贝氏体那样，在晶界处形成贝氏体铁素体的晶核。但这种贫碳的奥氏体具有较高的马氏体点^[5]，按照切变学说，在晶内的位错、层错等缺陷处产生结构涨落、能量涨落的条件配合下，则以切变方式转变为下贝氏体。

大量的热力学计算得知，贝氏体相变驱动力较小^[3]，贝氏体以切变方式进行较为困难。但驱动力不足也可以切变，系统的自组织功能可以通过形成贝氏体铁素体亚单元、精细孪晶的方式逐个进行，逐渐积累成为一个下贝氏体片条。好像千斤顶那样，每动作一次，升高一点，最终举起巨大的重物。已有不少研究表明，贝氏体铁素体由许多细小的亚片条、亚单元、精细孪晶组成。如贝氏体铁素体片条由5~30nm细小孪晶组成，贝氏体铁素体亚片条就是细小的孪晶，亚片条之间存在孪晶关系，如图3所示^[7,8]。可以推测，亚单元的产生过程，可能就是以滑移、孪生切变方式逐个形成许多亚单元，最后积累形成一片贝氏体铁素体，从而以较小的驱动力逐级地形成了贝氏体铁素体条片。

下贝氏体的组织形貌具有针状或片状特征，这与马氏体形貌有相似之处。在同一种钢中，淬火后可以同时得到下贝氏体和马氏体。在许多钢的TTT图中发现，马氏体点稍下的温度区域往往与下贝氏体转变区重叠，如图1，在 M_s 点以下至300℃范围内，马氏体相变和下贝氏体相变重叠。可见，在 M_s 点稍下等温，开始时奥氏体先形成一定量的马氏体，等温一段时间后，开始了下贝氏体转变，即余下的奥氏体转变为下贝氏体。这样，在同样等温温度下得到了马氏体 + 下贝氏体的混合组织。这说明下贝氏体转变与马

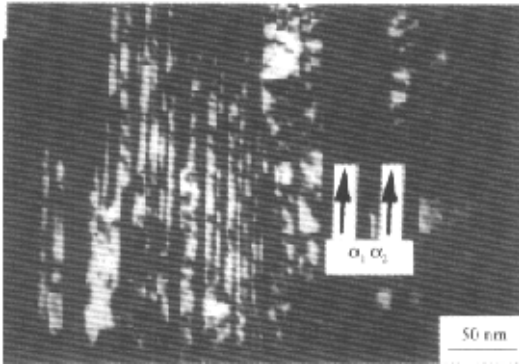


图 3 贝氏体铁素体中的精细孪晶 TEM

Fig. 3 TEM micrograph of bainitic ferrite

氏体相变过渡性、交叉性、重叠性。

鉴于在下贝氏体相变温度下碳原子尚有一定的扩散能力,故可以在下贝氏体中析出 ϵ 碳化物。但是由于下贝氏体相变驱动力不足, ϵ 碳化物析出困难,故残留较多的奥氏体。众所周知,马氏体相变也往往有残留奥氏体。由此可见,下贝氏体转变打上了马氏体相变的“烙印”。

3 贝氏体组织形貌的过渡性

贝氏体的组成相十分复杂,不同于珠光体,珠光体只有两相(铁素体 + 碳化物)。也不同于单相的马氏体。贝氏体组织中除了贝氏体铁素体(BF)外,往往还存在其他一些相,如 θ 渗碳体、 ϵ 碳化物,以及夹杂着残留奥氏体、马氏体或所谓 M/A 岛等。上贝氏体的组成相有时与珠光体相同,即只含有铁素体和渗碳体两相。因此,上贝氏体组织打上了珠光体组织的“烙印”。贝氏体组织中存在着马氏体、残留奥氏体等相,说明它打上了马氏体组织的“烙印”。从上贝氏体组织过渡到下贝氏体组织,表现了从珠光体到马氏体的过渡性和复杂的交叉性。正因为如此,贝氏体的组织形貌十分复杂,形形色色,科学工作者给它们赋予了不少名称,如羽毛状贝氏体,粒状贝氏体,柱状贝氏体,球状贝氏体等,还有准上贝氏体,无碳贝氏体,特殊下贝氏体,反向贝氏体等。

下贝氏体在奥氏体晶内核长大,呈现条片状或针状特征。条片状的下贝氏体与板条状马氏体相似。图 4 是 35Cr2Mo(P20)钢的同一淬火试样上观察到的组织,图 4a 是板条状马氏体,图 4b 是下贝氏体组织,可见均呈条片状,但是其内部的亚结构不同。高碳的

竹叶状的下贝氏体形貌与透镜片状马氏体也相似。可见,贝氏体形貌表现为明显的过渡型、交叉性。

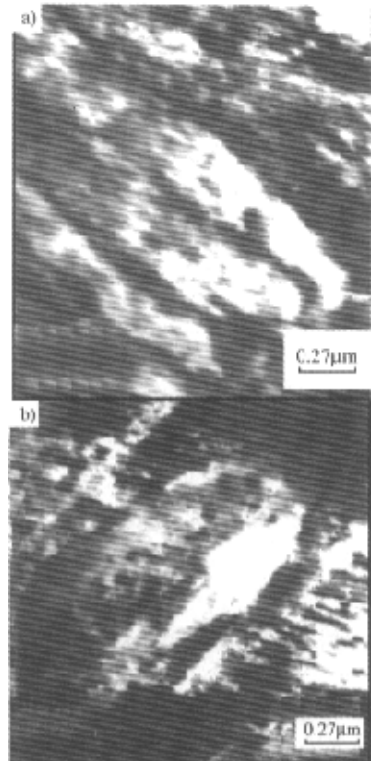


图 4 TEM 35Cr2Mo 钢的淬火组织

a)板条状马氏体,b)下贝氏体

Fig. 4 TEM micrographs of 35Cr2Mo steel after quenching

a)lath martensite,b)lower bainite

4 结束语

系统的自组织功能使贝氏体转变在孕育期内,通过系统中的随机涨落形成贫碳区和富碳区,在贫碳区首先形成贝氏体铁素体晶核。不承认贫碳区形成的观点是不符合自然法则的。上贝氏体转变与珠光体分解有着本质上的区别,但又有密切的联系。下贝氏体转变具有马氏体相变的某些特征,与马氏体相变有一些“亲缘”关系。上贝氏体、下贝氏体均有形形色色的形貌,其形貌也具有明显的过渡性。从珠光体→贝氏体→马氏体是一个逐渐演化的过程。

贝氏体相变带有珠光体分解和马氏体相变的双重特征,具有过渡性,交叉性。因此,可以预言:贝氏体转变机制不会是单纯的扩散机制,也不会是单纯的切变机制,而可能是扩散-切变整合机制。

参 考 文 献

- 1 肖海涛,张法瑞.自然辩证法简编[M].北京:北京航空航天大学出版社,1996,55-156.
- 2 章守华.合金钢[M].北京:冶金工业出版社,1981,30-45.
- 3 徐祖耀,刘世楷.贝氏体相变与贝氏体[M].北京:科学出版社,1991,32-180.
- 4 方鸿生,王家军,杨志刚,李春明,薄祥正,郑燕康.贝氏体相变[M].北京:科学出版社,1999,63-72.
- 5 陈景榕,李承基.金属与合金中的固态相变[M].北京:冶金工业出版社,1997,50-150.
- 6 林慧国,傅代直.钢的奥氏体转变曲线[M].北京:机械工业出版社,1988,400-701.
- 7 敖青,秦超,孟凡妍,等.贝氏体铁素体精细结构孪晶及纳米结构[J].材料热处理学报,2002,23(3):20-23.
- 8 李凤照,敖青,孟凡妍,等.贝氏体中的贝氏体铁素体精细孪晶[J].材料热处理学报,2001,22(2):5-8.
- 9 宋维锡.金属学[M].北京:冶金工业出版社,1980,280-282.
- 10 陈昌曦.自然辩证法概论新编[M].沈阳:东北大学出版社,2001.7. 50-100.
- 11 刘宗昌.钢的整合系统及其复杂性[J].钢铁研究学报,2002,14(5):35-41.
- 12 刘宗昌.钢中相变的自组织[J].金属热处理,2003,28(2):13-18.
- 13 赵连城.金属热处理原理[M].黑龙江:哈尔滨工业大学出版社,1987,22-30.
- 14 戚正风.金属热处理原理[M].北京:机械工业出版社,1986,14-20.

新 书 介 绍

《钢的亚温处理》——临界区双相组织超细化强韧理论及工艺

本书主要为从事热处理工作的科技人员提供有关钢的亚温处理强韧化和复合强韧化理论及工艺方面的知识。系统地阐述了亚温处理的分类、钢在临界区的加热转变和冷却转变、临界区加热后钢的淬透性、亚温处理所得各种典型双相复合组织等。介绍了亚温处理在各方面改善和提高钢材性能的内容,包括提高钢的强韧性、抑制钢的可逆回火脆性、改善钢材冷脆行为、减小钢的淬火变形和开裂等。并介绍了亚温淬火在化学热处理(渗碳和渗氮)中的应用效果、渗扩氮亚温淬火的复合强韧化作用等。分析了亚温处理的强韧化和复合强韧化机制以及亚温处理后钢的断裂过程。最后还列举了许多单位采用亚温处理解决生产难题或延长工件使用寿命的具体实例。

本书亦可作为高等院校有关专业本科生和研究生的教学参考书或供从事金属材料、热加工和其它相关学科的科技工作者参考。

全书共24万字,为王传雅教授专著,已由中国铁道出版社于2003年5月出版,每册18元,欲购者请与中国铁道出版社联系。

地址:北京市宣武区右安门西街8号 中国铁道出版社 100054 联系人:李平
电话:市电(010)63545969,路电(021)73169、73170、73171