

GC18M₀轴承钢的下贝氏体组织转变

龙永强^{1,2}, 李 谦¹, 文九巴¹, 张伟民²

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471039

2. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030)

摘要: 利用光学显微镜和透射电镜观察和分析了 GC18M₀轴承钢的下贝氏体组织形貌和精细结构, 探讨了下贝氏体组织转变机理。借助于图像分析仪分析了下贝氏体转变动力学。结果表明, GC18M₀轴承钢等温淬火后生成的下贝氏体呈针状或竹叶状, 且堆聚成簇, 下贝氏体中的铁素体为条状, 空间呈双透镜状, 由许多更小的铁素体亚条平行排列构成; GC18M₀轴承钢的下贝氏体转变机理符合类平衡切变长大模型, 其形成过程是孕育成核和快速长大的过程, 它的转变动力学方程为 $Y=1-\exp(2.2 \times 10^{-12} t^{22})$ 。

关键词: GC18M₀轴承钢; 下贝氏体; 组织转变; 动力学方程

中图分类号: TG142.45 文献标识码: A 文章编号: 0254-6051(2006)06-0031-04

Lower Bainite Transformation of GC18M₀ Bearing Steel

LONG Yong-qiang², LI Qian¹, WEN Jiuba¹, ZHANG Weimin²

(1. School of Materials Science and Engineering He'nan University of Science and Technology

Luoyang He'nan 471039, China; 2. School of Materials Science and Engineering Shanghai Jiao Tong

University Shanghai 200030, China)

Abstract Morphologies and fine structure of lower bainite of GC18M₀ bearing steel were analyzed using optical microscope (OM) and transmission electron microscope (TEM), and transformation mechanism of lower bainite was discussed. The transformation kinetics of lower bainite was investigated with an image analyzer. The results show that lower bainite is needle shaped or bamboo leaf shaped aggregating into clusters and its ferrite which is many smaller parallel ferrite sub-laths is lath-shaped and twin lenticoid in space. The transformation kinetics of lower bainite of GC18M₀ bearing steel accords with Para-equilibrium shear growth model. Its growth process is slow nucleation and rapid growth and its kinetic equation is $Y=1-\exp(2.2 \times 10^{-12} t^{22})$.

Key words GC18M₀ bearing steel; lower bainite; structural transformation; kinetic equation

工业技术的大力发展, 对轴承钢及其性能要求越来越高, 促进了高碳铬轴承钢等温淬火组织及其性能的研究发展。研究表明下贝氏体组织^[1,2]、下贝氏体与马氏体(B_s/M)复合组织^[3,5]具有良好的力学性能, 但大多局限于工艺与性能方面, 关于高碳铬轴承钢中下贝氏体组织微观形貌以及转变动力学方面的研究很少。近几十年来对贝氏体转变的研究有很大进展, 许多学者对各类贝氏体组织的微观结构及转变机理进行了分析研究和探讨^[6,9]。本文选用 GC18M₀高淬透性轴承钢进行等温处理, 获得下贝氏体组织, 利用扫描电镜、图像分析仪等设备以及数值处理软件技术对其观察处理, 探讨 GC18M₀轴承钢中下贝氏体组织形貌及

转变动力学。

1 试验材料与方法

试验用钢为 GC18M₀经分析其主要化学成分(质量分数, %)为: 0.98C, 1.7Cr, 0.20Mn, 0.28Si, 0.30Mn, 0.008P, 0.008S, 0.15Ni, 0.18Cu符合规定成分的要求。试样经锻造→球化退火→机加工→热处理→磨削工序, 加工成型, 最终尺寸为 10mm×10mm×15mm。

热处理工艺为: 将试样在 870℃下加热保温 30min后, 淬入温度为 230℃盐浴槽中, 分别等温 15、20、25、30、38、45、60、90min后, 取出试样油冷; 等温 4h的试样取出直接空冷。

微观组织的观测分析采用 LEPERA试剂腐蚀, 即由 2% Na₂S₂O₃水溶液和 4% 苦味酸(其分子式为 (NO₂)₃C₆H₂OH)酒精溶液按体积比 1:1组成的混合试剂。在金相显微镜(OLYMPUS)下观察试样的组织形态, 利用 IAS4图像分析系统对下贝氏体组织进行定量分析, 得到不同等温时间所对应的下贝氏体量, 并在 TEM下观察高倍组织形态。

作者简介: 龙永强(1965—)男, 河南洛阳人, 讲师, 博士研究生, 主要从事材料制备、组织及性能分析以及材料加工过程、组织和性能的数值模拟, 发表论文 10 篇。联系电话: 021-62932563-8000 13482282371 E-mail: yqlong@sjtu.edu.cn
基金项目: 河南省重点攻关项目“轴承钢贝氏体淬火在矿山轴承上的应用研究”的研究成果之一(001110112)

收稿日期: 2005-03-24

2 试验结果与分析

2.1 GC18M σ 钢的下贝氏体组织形态

GC18M σ 轴承钢中的 C、Mn、S 元素都缩小了 γ 区,使 B_s 点降低,推迟整个贝氏体转变,使 C 曲线向右下移,见图 1。GC18M σ 轴承钢在 230 $^{\circ}$ C 下等温时发

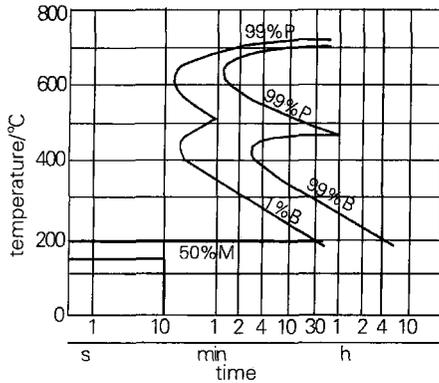


图 1 GC18M σ 轴承钢的 TTT 图

Fig 1 TTT curve of GC18Mo bearing steel

生下贝氏体转变,在油冷时发生马氏体转变。由 GC18M σ 轴承钢的 TTT 图^[3]可以看出,在 230 $^{\circ}$ C 下等温,下贝氏体的孕育期约 18 min,转变完成时间约 140 min,因此试验中没有观察到等温 15 min 试样的下贝氏体组织。

用 LEPEA 试剂对不同时间等温处理后的淬火态试样进行腐蚀,在光学显微镜下观察其金相组织,结果如图 2 所示。当等温 20 min 时,已有极少量细针状下贝氏体产生(体积分数 < 1%,如图 2 a 所示),随等温时间的增加,下贝氏体量不断增长,其形态也不断变化。开始为孤立细针状或竹叶状分布;接着在原单个下贝氏体处(晶界)生长出多个新的下贝氏体,呈分散聚集的簇状分布或草丛堆状分布(图 2 b 和 2 c);当等温时间为 90 min 下贝氏体草丛堆几乎连成一片;至 240 min 时,已经无法分清单个的贝氏体针,见图 2 e。

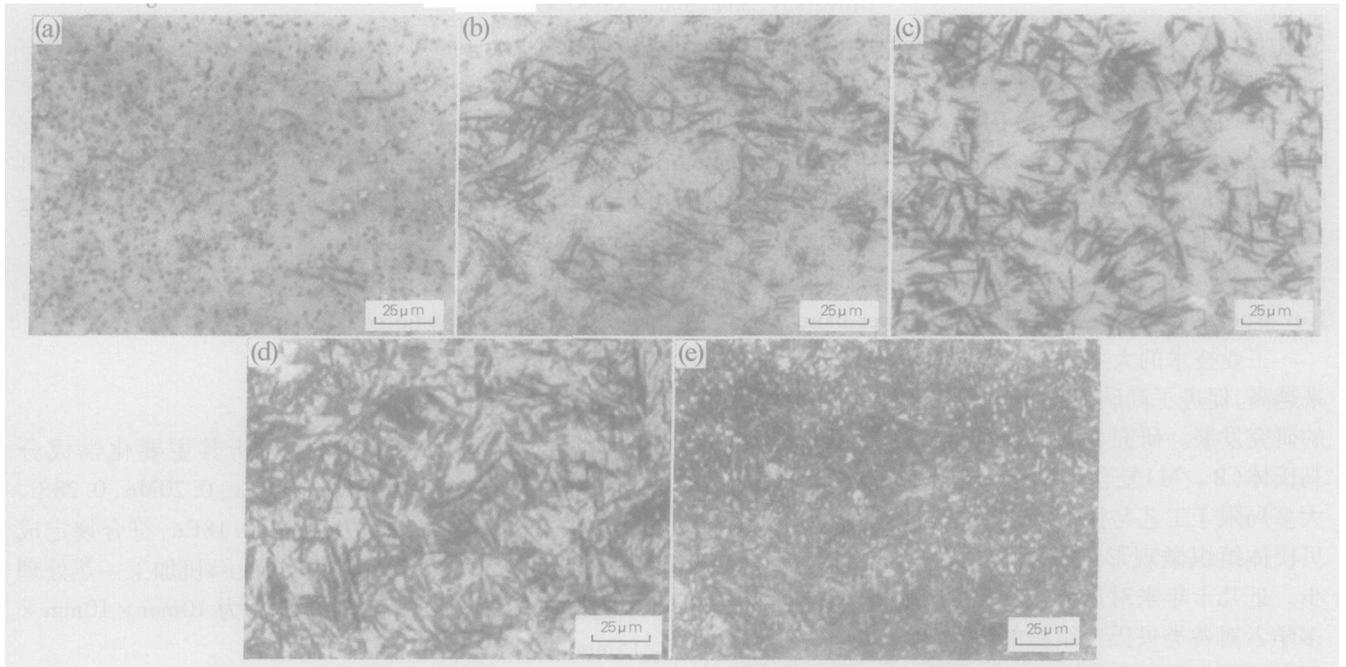


图 2 GC18M σ 钢 870 $^{\circ}$ C 加热 30 min 后在盐浴中经不同时间等温淬火后的下贝氏体组织形貌

Fig 2 Morphologies of lower bainite of GC18Mo steel by different time isothermal quenched into salt bath after austenitizing at 870 $^{\circ}$ C for 30 min

(a) 230 $^{\circ}$ C \times 20 min (b) 230 $^{\circ}$ C \times 38 min (c) 230 $^{\circ}$ C \times 60 min (d) 230 $^{\circ}$ C \times 90 min (e) 230 $^{\circ}$ C \times 240 min

图 3 为 GC18M σ 钢中下贝氏体组织的 TEM 照片。由图 3 a 所示,下贝氏体的铁素体为条状,空间呈双透镜状,由许多更小的铁素体亚条平行排列构成,在条间及条内均分布着薄片状碳化物。图 3 b 所示是下贝氏体的微观结构,由大小不同的条片状铁素体和分布于之间的碳化物组成。从图 3 a 和图 3 c 中可以观测到,下贝氏体铁素体条中,出现单向排列和双向对称排列的单元(精细孪晶组成)。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,呈现条片状或针状特征,但是其内部的亚结构不同^[7]。

根据以上下贝氏体的高倍和低倍组织观察和分析可以得出,GC18M σ 钢在 230 $^{\circ}$ C 下等温(接近于 M_s 点 220 $^{\circ}$ C)时发生的下贝氏体转变呈现明显的扩散型过渡到切变型转变特征。

2.2 GC18M σ 钢的下贝氏体转变机理

近年来,贝氏体相变理论主要有经典切变学说、台

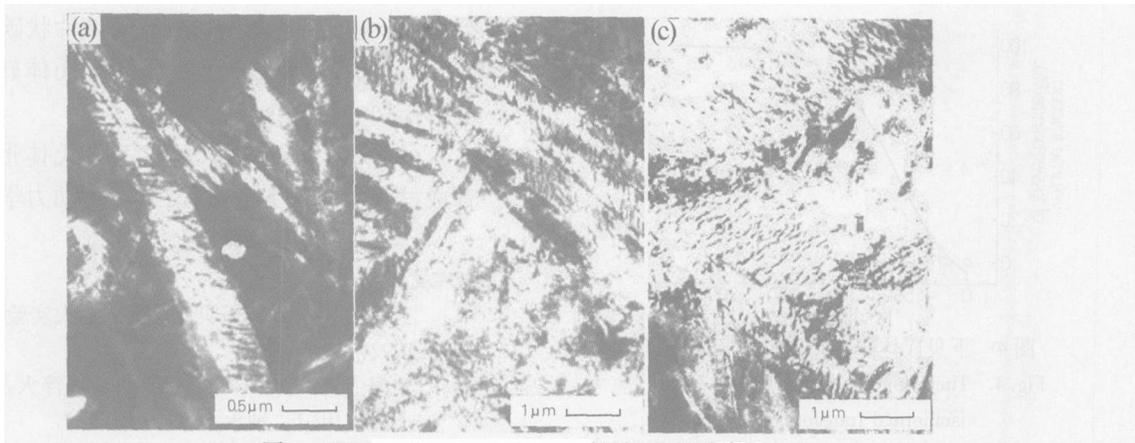


图3 GC18Mo钢的下贝氏体组织的TEM形貌

(a) 下贝氏体铁素体条及亚条 (b) 下贝氏体微观结构 (c) 下贝氏体中的精细孪晶

Fig. 3 TEM micrographs of lower bainite of GC18Mo steel

(a) bainitic ferrite laths and sub-laths (b) lower bainite microstructures (c) fine twins in lower bainite

阶扩散长大机制和类平衡切变长大模型^[10-12]。能比较合理解释贝氏体相变的模型为类平衡切变长大模型, 又称为切变扩散耦合机制, 该模型认为贝氏体相变过程是个相界切变迁移和碳扩散耦合的转变。

GC18Mo钢在 230 °C 硝盐等温处理, 等温初期, 下贝氏体经过了孕育形核、长大阶段, 属碳原子的扩散控制过程 (图 2 所示, 随等温时间的延长, 下贝氏体不断长大增多); 中、后期, 靠位错切变产生下贝氏体, 显示出下贝氏体长大中相界位移的非热力学特征, 即切变 (图 3 所示)。推测下贝氏体中铁素体亚单元的产生过程, 可能是以滑移、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。因此 GC18Mo 钢的下贝氏体转变符合类平衡切变长大模型。

2.3 下贝氏体转变动力学

下贝氏体的形成过程是一个孕育形核和快速长大的过程^[11], 铁素体在奥氏体晶界或已长大的铁素体晶

界首先形核, 继而迅速长大。其形核率和长大速率是随着时间而变化的, 随转变量的增加形核率不断减少, 根据选取的形核率与时间关系函数不同可以得出不同形式的动力学。对于非均匀形核的扩散型等温转变过程, 一般采用经典的 Avrami 经验方程:

$$y = 1 - \exp(-bt^n) \quad (1)$$

式中, y 为新相转变量, b 和 n 为系数。 b 取决于相变温度、原始相的成分和晶粒大小等因素, n 决定于相变类型和形核位置。

对式 (1) 两边同时取自然对数可得:

$$\ln(1-y) = -bt^n \quad (2)$$

再变换得:

$$\ln[-\ln(1-y)] = \ln(b) + n \times \ln(t) \quad (3)$$

利用 IAS4 图像分析系统对不同等温时间的下贝氏体量进行定量分析, 结果见表 1 中 1 和 2 行, 对其进行数据处理, 处理结果见表 1 中的 3 和 4 行。以时间 t 为横坐标、下贝氏体体积分数 y 为纵坐标作图, 其曲线形状呈 S 形, 见图 4 所示。

表 1 等温淬火时间与下贝氏体体积分数的关系

Table 1 Relationship between the volume fraction of lower bainite and isothermal quenching time

t/s	900	1200	1500	1800	2280	2700	3600	5400
y(%)	0.5	1	4.5	10.2	29.4	32.7	37.5	73.3
ln t	6.80	7.09	7.31	7.50	7.73	7.90	8.19	8.59
ln[-ln(1-y)]	-5.30	-4.60	-3.08	-2.23	-1.06	-0.93	-0.76	-0.28

根据表 1 提供的数据, 以 $\ln(t)$ 为横坐标, $\ln[-\ln(1-y)]$ 为纵坐标作图 (见图 5), 其数据点分布基本成一条直线, 通过数据处理求得截距为 -26.83163 斜率为 3.22 从而计算出系数 $b = 2.2 \times 10^{-12}$ 、 $n = 3.22$ 其结果也印证了前人关于扩散型相变的 n 值在

3~4 之间^[11] 的说法。

将求出的 b 和 n 带入式 (2), 得到 GC18Mo 轴承钢 230 °C 等温的下贝氏体组织转变的动力学方程:

$$y = 1 - \exp(2.2 \times 10^{-12} t^{2.2}) \quad (4)$$

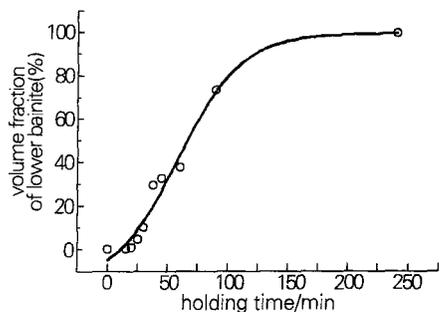


图 4 下贝氏体等温转变动力学曲线

Fig 4 The kinetic curve of lower bainite isothermal transformation

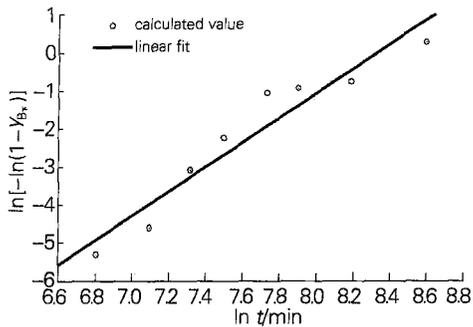


图 5 $\ln(t)$ 与 $\ln[-\ln(1-Y)]$ 的关系曲线

Fig 5 Relationship between $\ln(t)$ and $\ln[-\ln(1-Y)]$

3 结论

通过对 GC18Mn 轴承钢的下贝氏体转变研究可以得到如下结论:

(1) GC18Mn 轴承钢的 Cr、Mn 等元素推迟了下贝氏体转变,使其呈现明显的扩散型过渡到切变型转变特征。在低倍下可以观察到针状或竹叶状的下贝氏体堆聚成簇,在 TEM 下观察到下贝氏体的铁素体为条状,空间呈双透镜状,由许多更小的铁素体亚条平行排

列构成,在条间及条内均分布着薄片状碳化物。

(2) GC18Mn 轴承钢的下贝氏体转变机理符合类平衡切变长大模型。

(3) GC18Mn 轴承钢中下贝氏体形成过程是孕育成核和快速长大的过程,其转变动力学方程为:

$$Y = 1 - \exp(2.2 \times 10^{-12} t^{22})$$

参考文献:

- [1] 王福祯. GC15 钢下贝氏体等温淬火实验分析[J]. 轴承, 1992(1): 54-60
- [2] 刘耀中, 江涛. GC15 钢下贝氏体淬火及其在铁路轴承上的应用[J]. 轴承, 1994(9): 32-37.
- [3] 龙永强, 李谦, 文九巴. GC18Mn 轴承钢复相组织对强韧性影响[J]. 热加工工艺, 2004(12): 4-6
- [4] 邵学渊, 郑林, 何金祥, 等. GC15 钢贝氏体马氏体混合组织的力学性能[J]. 金属热处理, 1990 15(6): 36-38
- [5] Wang J L, Chai F T. Effect of carbide refinement on the fine structure of bainite/martensite duplex microstructure of GC15 steel [Journal of Materials Science Letters 1994 13 1506
- [6] Hsu T Y (徐祖耀). On bainite formation[J]. Metall Trans, 1990 21A 811-816
- [7] 李凤照, 敖青, 孟凡妍, 等. 贝氏体中的贝氏体铁素体精细李晶[J]. 材料热处理学报, 2001 22(2): 5-8
- [8] 刘宗昌. 贝氏体相变的过渡性[J]. 材料热处理学报, 2003 24(2): 36-40
- [9] Ohnishi H, Okaguchi S et al. Morphology and properties of low carbon bainite[J]. Metall Trans, 1990 21A 877-887.
- [10] 俞德刚, 王世道. 贝氏体相变理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1997: 67-72
- [11] 徐祖耀, 刘世楷. 贝氏体相变与贝氏体[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 32-45
- [12] 方鸿生, 王家军, 等. 贝氏体相变[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 63-72

好富顿 (上海) 高级工业介质有限公司 4 月开业

好富顿 (上海) 高级工业介质有限公司于 2006 年 4 月 24 日在上海举行了隆重的开业典礼, 这标志着好富顿公司在中国的发展又上了一个新台阶!

好富顿国际公司是专业从事金属加工工艺润滑的特种油品公司, 至今已有 140 多年历史。产品涉及热处理淬火介质、金属轧制油、抗燃液液压油、金属加工冷却液、金属成型润滑剂、铜铝线拉丝油、金属防锈剂、金属清洗剂等工艺润滑介质及相应的化学品管理服务。在全球拥有众多客户, 一直在制造业界享有盛誉!

好富顿国际公司于 1988 年在中国成立第一家全资子公司—好富顿 (深圳) 有限公司, 随着业务在中国的不断扩大, 深圳公司已不能满足市场需求。好富顿 (上海) 高级工业介质有限公司的成立显著提升了好富顿国际公司在中国的生产、研发能力和技术服务。公司位于上海市松江工业区江田东路 188 号, 总占地面积 24150 m²; 建筑面积 5000m², 其中生产车间面积 3500 m²; 绿地面积 14000 m²。上海工厂现可以生产油基和水基产品共 200 多种, 年生产量达 25 万桶, 随着好富顿在中国的良好发展势头, 年生产量都会稳步提高。好富顿 (上海) 高级工业介质有限公司将秉承好富顿国际公司的成长理念: 以技术为根, 以客户为本, 注重环保, 为制造业的发展做出应有贡献! (热处理学会报道)

