

文章编号:1008-1402(2004)04-0494-05

# 贝氏体耐磨钢的应用研究

金宝士, 黄志求, 宋春梅

(佳木斯大学材料科学与工程学院 黑龙江 佳木斯 154007)

**摘要:** 贝氏体组织具有高的强韧性和耐磨性,是一种很好的抗磨材料组织结构<sup>[1]</sup>.本文综述了贝氏体相变的最新研究进展.随着先进技术和先进仪器出现,人们对贝氏体相变与贝氏体组织基础理论的研究也不断深入,表现在对贝氏体微观超精细结构的认识<sup>[2]</sup>,即在黑金属和有色金属合金的下贝氏体组织中发现了超亚单元.以往贝氏体钢中添加 Mo, Ni 等贵重合合金元素以及等温淬火工艺,才使贝氏体钢用作抗磨材料成为可能,基于贝氏体相变机理研究的长足进步,先后开发出奥氏体-贝氏体双相钢、马氏体-贝氏体双相钢、共晶体增强奥氏体-贝氏体钢(ABEG 钢)等新型贝氏体抗磨钢.

**关键词:** 贝氏体相变; 贝氏体组织; 等温淬火; 耐磨材料

**中图分类号:** TG142.72      **文献标识:** A

## 0 前言

关于贝氏体相变时铁原子的运动方式,最初由柯俊教授等人在 50 年代开展了研究<sup>[2,3,4]</sup>.认为铁原子是以阵列式切变位移方式(与马氏体相似)转变成新的原子排列的,而溶解的碳原子则发生了超过原子间距的长程扩散进入尚未转变的残留相或在新结构中析出碳化物.上述切变位移机制已被欧洲、日本和美国这一领域的主要学者所接受,形成了“切变学派”.但是这个观点,从 60 年代起受到了美国卡内基-梅隆大学学派的挑战,后者认为贝氏体是依靠铁原子扩散和常见的表面台阶移动方式生成的.在过去的 30 年中,由于实验研究手段的限制,问题一直未能解决,两个学派陷于相持不下的局面.鉴于贝氏体转变机制是目前国际上两大学派的争论焦点,澄清这一争论不仅对贝氏体转变及相变理论将是一次重大突破,对贝氏体钢及合金的应用也将起到重要的指导作用.为此,从事相变基础研究的国内外科学家们,开展了贝氏体相变及贝氏体钢的应用基础研究<sup>[2,4,5,6,7,8,9,10]</sup>.从 1983 年到 1989 年,我们国家清华大学方鸿生、西南交通大学刘世楷、上海交通大学俞德刚、天津大学刘文西、西北工业大学康沫狂和北京科技大学柯俊等教授组织起来,成立重点项目“低合金钢贝氏体转变机制及其影响因素研究”(受助于国家自然科学基金),在四年内召开了两次全国贝氏体相变讨论会,开展了不同学术观点与学派之间的自由讨论与争论,从而推动了全国贝氏体研究的进展.

## 1 贝氏体相变研究现状

### 1.1 贝氏体相变的研究进展

我国学者对贝氏体转变的热力学、动力学、晶体学、形貌学到预贝氏体转变,进行了全面系统的实验和理论研究<sup>[2,8,9,10]</sup>.已取得重大进展,主要有:

(1)动态观察证明:含硅钢的下贝氏体首先生成过饱和固溶体,然后在其内部析出碳化物,正如碳化物在上贝氏体外析出一样,属于次生结构,从而统一了上、下贝氏体基体的生长方式,是钢中贝氏体相变研究的一项重大突破.

① 收稿日期:2004-07-09  
作者简介:金宝士(1960-),男,黑龙江佳木斯人,佳木斯大学材料科学与工程学院教授,硕士研究生导师.

(2)钢中贝氏体和马氏体相似,具有中脊,其两侧的碳化物没有连续性.在贝氏体形核和初期生长研究方面的另一项突破是:发现了初生中脊片端部的层片状应变场和横向扩展台阶以及贝氏体相互交截时的扭折现象.以证明贝氏体转变的早期具有切变特征.

(3)观察到钢中存在蝶状贝氏体,其外貌与蝶状马氏体相同,见图 1.仅前者有碳化物沉淀.蝶状马氏体的形成和母相中时效产生的不均匀性有关,这和蝶状贝氏体的生成相似,实验证明钢中蝶状马氏体的核系由位错组成的.

(4)对铜合金与钛合金贝氏体组织形态的研究表明它们和同一合金的马氏体有相似性.铜合金贝氏体交叉生长时发生扭转的现象,是迄今为止说明贝氏体由切变机制形成的最有说服力的实验观察.

(5)在贝氏体相变产物观察到:下贝氏体  $\alpha$ -Fe 宽面上存在三维形态的巨型台阶和生长台阶以及台阶前沿碳化物的析出与分布特征,提出了两种关于下贝氏体台阶生长模型.

(6)许多钢的转变动力学曲线存在一个贝氏体转变停滞的温度区间.实验证明在贝氏体界面附近有合金元素如锰的偏析,而硅加剧了锰的偏析,这表明了动力学转变曲线的形状与锰、硅或其它元素及其不均匀分布密切相关.

(7)对非理想晶体的数学模拟表明:贝氏体预转变期奥氏体中存在碳偏聚的可能性和奥氏体贫碳区以中脊形式成为核胚,发生贝氏体切变形核的可能性.

(8)在贝氏体相变微观机制的精细结构研究中,发现贝氏体亚条中存在更小的亚基元(重庆大学)或相变基元块,并由此分析了贝氏体相变过程,提出了“基元块类平衡切变”的生长模型;但对此还有待进一步的研究.

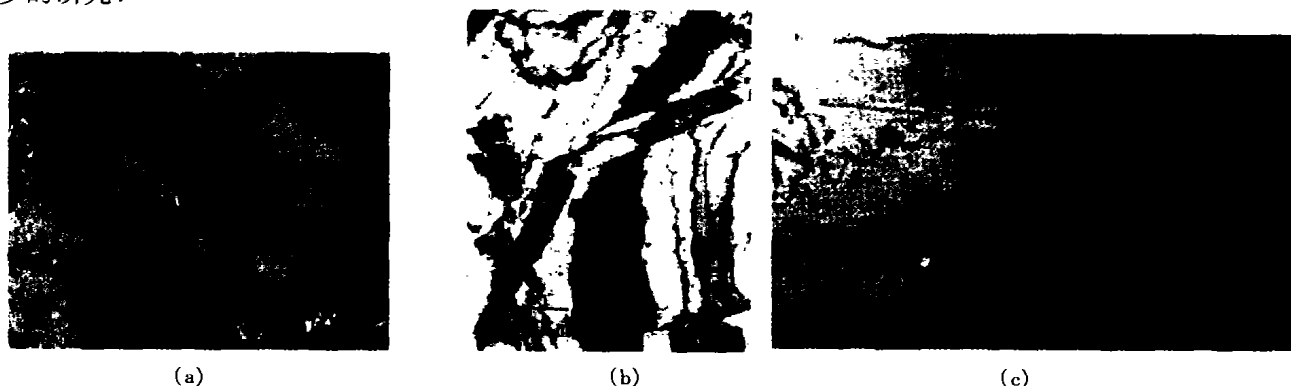


图 1 (a)在光学显微镜下观察到的类马氏体形貌的贝氏体 (b)Fe-Ni-V-C 合金蝶状马氏体  
(c)FeNiCrWMnSiC 合金蝶状马氏体

## 1.2 有待继续研究的问题

浮凸现象、贝氏体碳化物形貌变化、贝氏体板条内亚结构产生原因、用动态热力学研究贝氏体切变相变的可能性、Cu 基合金贝氏体转变热力学.

## 2 贝氏体耐磨钢试验与应用研究

上述结果,在国际上是相变研究的前沿工作,不仅对贝氏体相变机制的世界性研究起到促进作用,而且有力的推动了贝氏体钢的创制、应用与发展.西北工业大学提出了新的合金化设计方程,在此基础上研制出新型 Si-Mn-Mo(或 B)系的高强度高韧空冷贝氏体钢,并已得到广泛的工程应用.清华大学创制的 Mn-B 系新型空冷贝氏体钢系列,目前已在我国多家企业应用并开始进入国际市场,前景十分广阔,成为国家重点推广项目.天津大学还开发了贝氏体、马氏体复合组织工具钢,发明了 Cu-Zn-Al 合金逆记忆形变幅度的新方法,已在工程中获得应用,并申报了专利.北京科技大学与有关现代化钢厂正在进行研制低碳或超低碳贝氏体型低合金高强度高韧性钢<sup>[11]</sup>.

## 2.1 奥氏体 - 贝氏体双相钢

奥氏体 - 贝氏体钢是受高硅钢中无碳化物贝氏体的出现以及奥氏体 - 贝氏体球墨铸铁的发明与工业应用的启发而开发出的,奥氏体 - 贝氏体组织集中了贝氏体的高强度与奥氏体的优异韧性与应变强化能力,具有高的屈服强度、韧性和优异的耐磨性.荣守范,金宝士等人设计了中碳低合金贝氏体钢<sup>[12]</sup>:经过等温淬火处理后获得下贝氏体组织,通过大量试验得出试样经  $290^{\circ}\text{C} \times 90\text{min}$  和  $310^{\circ}\text{C} \times 60\text{min}$  等温淬火处理后获得  $\text{HRC} = 46$ ,  $a_k = 129\text{J}/\text{cm}^2$  的耐磨铸钢,有文献指出若要满足高应力冲击磨粒磨损的工况,材料  $\text{HRC} \geq 40$ ,但同时  $a_k$  值需尽可能大<sup>[13,14,15]</sup>.实际装机试验也证明,由  $a_k = 129\text{J}/\text{cm}^2$ ,同时  $\text{HRC} = 42$  的贝氏体钢制成的履带板、鄂板在较高冲击应力作用下具有优良的耐磨性能<sup>[12]</sup>.

李星逸,孟祥才通过对现有贝氏体钢进行深入分析的基础上,以低价的硅锰为主,配合适量的碳(0.4 - 0.6% C, 1.0 - 2.5% Si, 1.5 - 3.5% Mn),进行优化设计,研制出 Si - Mn 奥氏体/贝氏体耐磨钢,其在铸造及空热处理条件下直接得到贝氏体组织或贝氏体/马氏体组织(见图 2),它具有较高的强度韧度和耐磨性<sup>[16]</sup>.



图 2 透射电子显微镜下贝氏体的型态

## 2.2 马氏体 - 贝氏体双相钢<sup>[17,18,19,20]</sup>

贝氏体(B/M)双相钢是通过连续冷却方式获得,当钢在连续冷却过程中通过贝氏体转变温度区时,过冷奥氏体分解为贝氏体,先析出的贝氏体将奥氏体晶粒进行分割、细化,当冷却到  $M_s$  温度时,在贝氏体板条间隙中剩余过冷奥氏体全部转变为马氏体. B/M 双相组织与直接淬火的单相马氏体组织相比,双相组织中的马氏体板条尺寸随着先析出的贝氏体量的增加而减小,孪晶马氏体减少,具有优于单一马氏体的组织结构.文献[21]研究中碳 B/M 组织强韧性时,发现空冷 B/M 组织的冲击断裂韧性比同强度的回火马氏体高,也高于等温 B/M 组织.采用 Mo, Mn, B 合金化,利用铸造余热进行正火,直接对铸造后的中碳硅锰钢锤头进行热处理,从而得到 B/M 复合组织的耐磨钢锤头,具有良好的强韧性和耐磨性,具体见表 1 所示<sup>[22]</sup>.但是,由于 Mo 元素的价格较高,因此限制了该锤头的生产和应用.

表 1 中碳硅锰钢锤头性能

种 类	硬 度	冲击韧性
普通灰铸铁锤头	180 - 240(HB)	0.8
马氏体球墨铸铁锤头	58(HRC)	1.8
ZG45SiMnMo 耐磨铸钢锤头	53(HRC)	20.5

## 2.3 共晶体增强奥氏体 - 贝氏体钢

贝氏体钢和马氏体 - 贝氏体钢仅靠单一基体来抵抗磨损,没有增强相或增强相较少,因此提高耐磨性是有限的.许振明等<sup>[23,24,25,26]</sup>利用元素微观偏析和变质处理控制凝固组织,在凝固过程中形成团球状共晶体;由于共晶体的析出及元素偏析,使奥氏体中 C, Mn 含量发生变化,同时利用 C, Mn 稳定奥氏体、Si 在贝

氏体转变中强烈抑制碳化物析出的特点,通过正火处理,获得高碳奥氏体和含碳过饱和的板条状铁素体(贝氏体)基体组织.从不同材质、不同冲击功下磨损实验结果<sup>[23]</sup>,可以看出无论冲击功大小,共晶体增强奥氏体-贝氏体钢的耐磨性均比奥氏体中锰钢、变质铸态中锰钢、奥氏体-贝氏体钢优异,特别是冲击功在 10~20J 范围内要好于其它试验钢.因此,共晶体增强奥氏体-贝氏体钢适合于中、低冲击功工况下工作.在共晶体增强奥氏体-贝氏体钢中,增强相(团球共晶体)是从金属基体中原位形核、长大的热力学稳定相,避免了与基体相容性不良的问题,因此与一般颗粒增强复合材料相比,具有更优异的性能与应用潜力.目前,对金属基自生复合材料的研究主要侧重在 Al 基和 Cu 基,对 Fe 基自生复合材料的研究较少<sup>[24,25]</sup>.因此,有必要开发出更多类型的 Fe 基自生复合材料,在铸态或通过热处理工艺获得珠光体、马氏体、马氏体-奥氏体、马氏体-贝氏体等不同基体组织的共晶体增强复合材料,以满足实际生产中不同磨损工况的需要.

### 3 贝氏体耐磨钢研究前景展望

随着现代工业化的飞速发展,各个领域里对材料特殊性能的需求已非他日而语了.就材料的耐磨损来讲,世界各国每年要为此耗费约 2500 万美元.特别是材料在高应力冲击磨粒磨损下,材料的损失更是惊人<sup>[26]</sup>.

(1)碳含量对金属材料的耐磨性有突出的贡献,碳含量的提高又使金属材料的冲击韧性,强度下降,这是一对互相制约的矛盾.文献[27]指出在低碳贝氏体钢开发基础上,充分利用了贝氏体组织形态在相同硬度下具有最佳耐磨性这一规律.其原因是贝氏体组织中板条间膜状奥氏体是保证该钢有强韧性配合的原因.人们充分的研究了无碳贝氏体(即准贝氏体组织<sup>[28]</sup>)组织及形成机理,开发出了新型系列准贝氏体钢,为贝氏体钢研究开辟了新的途径<sup>[29]</sup>,某些合金元素 Si、Al 的加入,抑制了碳化物析出可获得准贝氏体组织,它是贝氏体转变的先期产物,如何控制适量的合金元素加入、加入合金元素的种类及贝氏体转变的停留时间将是获得准贝氏体之关键,况且碳在准贝氏体奥氏体薄膜中分布、存在的形态、晶体学位相关系还有待于探索.

(2)共晶体的大小、形态和分布直接影响该材料的综合性能.因此,必须深入探究增强相共晶体的团球化机理,以便控制共晶体增强奥氏体-贝氏体钢的组织,提高其机械性能和耐磨性.对于材料中增强相共晶体的团球化机理,文献[30,31,32,33,34]中利用砂型铸造得到的凝固组织进行了分析.定向凝固技术在研究界面稳定性和枝晶生长特点方面具有极大的优势,因此,有必要利用先进的定向凝固技术从更深层次上研究变质元素对共晶体结晶方式和生长过程的影响规律,进一步揭示抗磨钢中共晶体团球化机理,提高自生抗磨复合材料的性能.试验证明这种钢充分发挥团球状共晶体、奥氏体-贝氏体组织的优异性能,并且具有工艺简单、成本低廉的特点,该材料还处于试验阶段,但具有广阔的应用前景.

#### 参考文献:

- [1] 孙德勤,等.贝氏体钢的研究开发现状与发展前景探讨[J].机械工程材料 2003.6.
- [2] 方鸿生,等.贝氏体相变机制的研究进展 金属热处理[J].2002 年第 27 卷第 11 期.
- [3] 康沫狂.贝氏体相变理论研究工作的主要回顾[J].金属热处理学报 2000.6.
- [4] 刘宗昌.钢中贝氏体相变的论争及前景[J].包头钢铁学院学报 2003.3.
- [5] 刘晓.贝氏体相变理论-两个一级相变耦合的模型[J].金属学报 1999.11.
- [6] H. K. D. H. Bhadeshia The bainite transformation: unresolved issues[J]. Materials Science and Engineering A273-275(1999)58-66.
- [7] H. S. Fang J. B. Yang Z. G. Yang The mechanism of bainite transformation in steel Scripta Materialia 47 (2002) 157-162.
- [8] D. Quidort Y. Brechet The role of carbon on the kinetics of bainite Scripta Materialia 47 (2002) 151-156.
- [9] Y. OHMORI, Y. - C. JUNG, K. NAKAI and H. SHIOIRI BAINITE TRANSFORMATION AND THE DIFFUSIONAL MIGRATION OF BAINITE/AUSTENITE BROAD INTERFACES IN Fe-9%Ni-C ALLOYSActa mater. 49 (2001) 3149-3162.
- [10] Zhi-Gang Yang, Chi Zhang, Bing-Zhe Bai, Hong-Sheng Fang Observation of bainite surface reliefs in Fe-C alloy by atomic force microscopy Materials Letters 48 2001 292-298.

- [11] 周桂峰 贺信莱. 多用途超低碳贝氏体钢 ULCB600[J]. 材料开发与应用, 第 14 卷第 3 期.
- [12] 荣守范, 金宝士, 等. 淬火工艺对含碳、硅量对 B 钢的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2000.6 1007-2683(2000)03-01108-03.
- [13] 李建明. 磨损金属学[M]. 冶金工业出版社 1986.1.
- [14] 金属磨损和金属耐磨材料手册[S].
- [15] 张镜清, 等. 冶金矿山大型球磨机用贝氏体钢衬板的研究[M]. 水利电力机械 1999.5.
- [16] 李星逸, 孟祥才. 新型 Si-Mn 贝氏体钢的组织结构和性能[J]. 2000.3.
- [17] 蒋兴华, 等. 控制冷却获得贝氏体/马氏体耐磨钢[J]. 铸造 1998 (1):22.
- [18] 俞得刚. 钢的强韧化理论与设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社 1990.
- [19] 符光寒, 等. 多元低合金空冷马氏体/贝氏体铸钢的应用与研究[C] 第七届耐磨材料学术会议论文集.《水利电力机械》编辑部 1994. 32-36.
- [20] 谢敬佩, 等. 铸造复合中锰奥氏体钢的耐磨性[J]. 洛阳工学院学报, 1999.3.
- [21] 方鸿生, 等. 中碳贝氏体/马氏体复相组织强韧性的研究[J]. 金属热处理学报 1986,7(1):10.
- [22] 王国顺, 等. 用中碳硅锰双相耐磨钢铸造锤式破碎机锤头[J]. 铸造, 2000.49(11):823.
- [23] Xu Zm, ect. Steel Matrix wear resistant composite reinforced by insitu granular eutectics. Acta metal Sin., 2001,14(2):79.
- [24] 严有为, 等. 金属基原位复合材料的研究现状及发展趋势(上)[J]. 特种铸造及有色金属, 1998(1):47.
- [25] 严有为, 等. 金属基原位复合材料的研究现状及发展趋势(下)[J]. 特种铸造及有色金属, 1998(2):48.
- [26] 许振明, 等. 冲击磨损下团球状共晶体奥-贝钢磨损表面层组织的变化[J]. 摩擦学学报, 1999,19(1):39.
- [27] 周贤良 陈跃建, 等. 新型耐磨贝氏体钢的研制及应用[J]. 江西冶金, 1999.2.
- [28] 杨延清, 等. 准贝氏体组织及新型系列准贝氏体钢[J]. 特殊钢, 1999.8.
- [29] 国家科委. “九五”国家科技成果重点推广计划项目指南(二)[S], 1996:13.
- [30] 许振明, 等. 耐磨钢中共晶体的球化[J]. 金属学报, 1995.31(11):B518.
- [31] 许振明, 等. 奥氏体贝氏体钢中共晶体的团球化[J]. 材料研究学报, 1998.12(4):390.
- [32] Xu zhen ming. CeO<sub>2</sub> and La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as Heterogeneous Nuclei of Intergrowth Eutectic in Wear Resistant Austenite - Bainite steel[J]. Mater. Sci. Lett. 1998.17.:5.
- [33] Xu zhen ming. Influence of Ce and Al on Nodularization of Eutectic in Austenite - Bainite steel[J]. Mater. res. bull., 2000.35:1261.
- [34] Jiang Q C, ect. Bionics Growth Mechanism of Nodular Eutectic in As - cast Manganese Steel[J]. Sci. Technol. Adv. Mater., 2001.

## APPLICATION RESEARCH ON BAINITIC WEAR - RESISTANT STEELS

JIN Bao - Shi, HUANG Zhi - Qiu, SONG Chun - mei  
(College of Material Engineering, Jiamusi university, Jiamusi154007, China)

**ABSTRACT:** Bainite microstructure possesses higher strength - toughness and wear resistance, which is a kind of very good wear resistant material microstructure<sup>[1]</sup>. This paper Overviewed recent research of bainite transformation. People had deeper acknowledges on bainite transformation and bainitic microstructure basic theories with advanced technologies and equipments, showing on acknowledges on Ultra - fine structure of bainite<sup>[2]</sup>, namely found ultra fine unite in the bainitic microstructures of metals and non - metallic alloys. Formerly, only Mo, Ni ect were added into steel. These costly alloy elements to bainitic steels and isothermal quenching processing made bainitic steels as wear resistant materials possible. Because of the considerable progress in the research of bainite transformation mechanism, people developed some new kinds of wear resistant bainitic steels continually such as austenitic - bainitic steels, martenitic - bainitic steels and austenitic - bainitic steels with eutectic enhancement body, and so on.

**KEY WORDS:** bainite transformation; bainite; isothermal quenching; wear resistant materials