

14-19

③

第18卷 第2期  
1997年 6月金属热处理学报  
TRANSACTIONS OF METAL HEAT TREATMENTVol. 18 No. 2  
June 1997

## 钢中贝氏体长大方式的 TEM 研究

武晓雷 陈光南 康沫狂<sup>✓</sup>  
(中国科学院力学研究所) (西北工业大学)

TG142.15

**摘 要** 利用 TEM 考察了钢中贝氏体铁素体/奥氏体相界面台阶结构及奥氏体精细结构。用 TEM 温台发现在贝氏体增厚过程中新形成的贝氏体中存在奥氏体预存孪晶;在贝氏体铁素体/奥氏体相界面存在台阶结构,但台阶阶面对应于母相奥氏体中孪晶面或层错面,表明台阶的阶面为共格的滑移界面。因而贝氏体铁素体/奥氏体相界面可通过界面台阶沿面缺陷进行保守滑移,贝氏体长大具有滑移切变特征。根据实验结果提出了贝氏体二次层错切变模型及组织形貌示意图。

**关键词** 贝氏体 精细结构 台阶 切变

钢, 台阶长大 TEM

文献[1,2]提出贝氏体台阶长大机制,认为贝氏体铁素体(BF)宽面存在结构台阶及错配位错,错配位错的柏氏矢量平行于宽面,因此贝氏体通过台阶的无序阶面沿不动的宽面侧向迁移而生长。台阶机制得到界面巨型台阶形貌<sup>[3]</sup>及台阶增厚动力学实验<sup>[4]</sup>的间接支持。文献[5,6]提出贝氏体铁素体/奥氏体(A)的半共格滑移相界面模型,认为在相界面亦可存在仅为原子尺度的生长台阶,但台阶具有相变位错的特征,即台阶宽面可沿界面法线方向进行保守滑移。TEM 温台原位观察<sup>[7]</sup>发现铜基合金贝氏体增厚时台阶的阶面并无侧向迁移,贝氏体是沿层错面滑移实现增厚。因此,针对贝氏体铁素体/奥氏体相界面运动机制,仅仅是台阶的存在已失去判据意义,而台阶阶面的侧向迁移或滑移成为澄清贝氏体长大机制的重要方面之一,但迄今相应的实验研究极少。

贝氏体通过相界面从新相到母相的不断推移而长大,无论贝氏体还是母相,精细结构均对台阶特性及其运动方式有重要影响。利用 TEM 考察钢中贝氏体、奥氏体精细结构及相界面台阶特性,为贝氏体长大模式提供实验依据,理应被视为一项亟待进行的工作。

## 1 实验方法

实验材料为 8Mn8SiMo 及 40CrMnSiMoVA 钢,主要化学成分(% ,质量分数)分别为:Fe-0.79C-8.3Mn-0.87Si-0.50Mo 及 Fe-0.40C-1.37Cr-1.03Mn-1.21Si-0.50Mo-0.10V。所有试样均经 1473K×72h 均匀化退火。8Mn8SiMo 经 1473K×10min 固溶处理后水冷,室温组织为单相奥氏体,其  $M_s$  温度为 -60℃,经 623K×60h 等温处理得到贝氏体组织;40CrMnSiMoVA

本文收到日期:1996年10月29日初稿,1996年12月17日修改稿

本文联系人:武晓雷,男,1965年8月生,博士,北京市(100080)中关村路15号中国科学院力学研究所材料工程中心

钢经 1193K×10min 奥氏体化后分别采用 693K×2.5min 及 583K×3min 等温处理得到准上及准下贝氏体,等温结束后水冷。薄膜样品制备采取化学减薄、室温双喷减薄及离子减薄,利用 H-800 及 Philips EM400 型透射电镜双倾转台及单倾热台进行观察。

## 2 实验结果

图 1a)为 8Mn8SiMo 钢贝氏体铁素体明场像,在贝氏体铁素体/奥氏体相界面存在台阶衬度(↑),台阶的宽面为贝氏体片条的宽面,但台阶的阶面对应于母相奥氏体中孪晶面,因而在贝氏体增厚过程中这种台阶的阶面很难实现台阶机制所要求的沿宽面侧向迁移。图 1b)为经一定角度倾转的孪晶暗场像,台阶仍在原位,表明台阶具有三维特征。

图 2a)为将已得到少量贝氏体的 8Mn8SiMo 样品重新在电镜温台中继续等温 10min 时得到的贝氏体加厚的情况。在继续等温过程中贝氏体进一步长大,新增厚的与原有的贝氏体在 TEM 明场下存在明显衬度差别,分别为明亮衬度及浅黑衬度,并具有较清晰的分界线,这种衬度变化与在 TEM 温台中动态观察 Cu-Zn 合金贝氏体增厚<sup>[7]</sup>时的衬度变化一致。这是由于贝氏体长大时碳原子扩散使新增厚的与原有的贝氏体碳含量不同<sup>[8]</sup>,改变了晶面间距及微区衍射条件,从而导致结构因子不同引起的明显衬度差别<sup>[9]</sup>。与 Sandvik<sup>[10]</sup>的观察结果相似,在贝氏体铁素体中存在母相奥氏体预存孪晶,然而值得注意的是在新增厚的贝氏体内部仍存留孪晶亚结构,说明贝氏体长大过程中基体原子扩散的可能性较小。

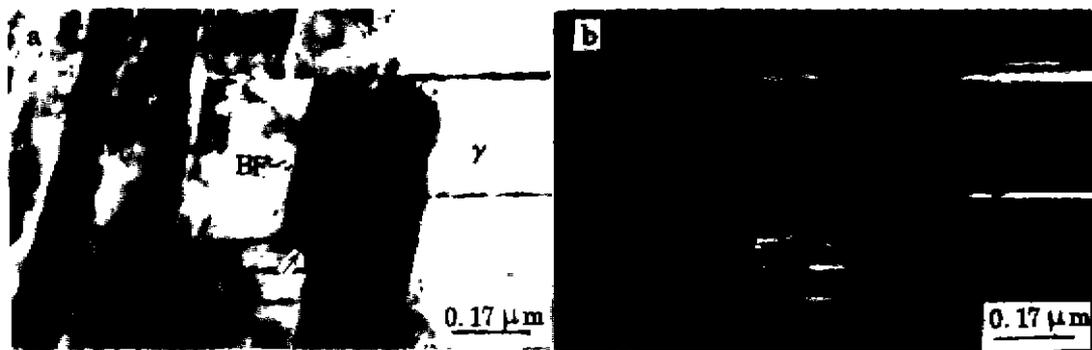


图 1 BF/A 相界面台阶形貌

Fig.1 Ledge Morphology at BF/A interface  
a)ledge morphology, b)dark-field image of twins

图 3a)为 40CrMnSiMoVA 钢准上贝氏体( $B_{ms}$ )残余奥氏体( $A_R$ )的暗场像,图 3b)为对应于 a)的  $A_R$  的高倍明场像,可看出  $A_R$  中存在相互平行的层错条纹衬度,图 3c)及 d)分别为  $A_R$  的高倍暗场像,可看出在贝氏体铁素体/奥氏体相界面存在台阶衬度(↑),均属大于原子尺度的巨型台阶。台阶的宽面即为贝氏体的宽面,台阶的阶面衬度与层错的条纹衬度有很好的对应关系。

图 4a)为 40CrMnSiMoVA 钢准下贝氏体( $B_{ml}$ )残余奥氏体的暗场像。 $A_{R1}$  及  $A_{R2}$  中同样存在相互平行的层错条纹衬度,表明位向不同的  $A_{R1}$  及  $A_{R2}$  中存在位向相同的层错面。图 4b)及 c)为贝氏体相变单元/奥氏体相界面的高倍明场像,亦存在界面台阶阶面与层错条纹衬度相对应的明显特征(↑)。

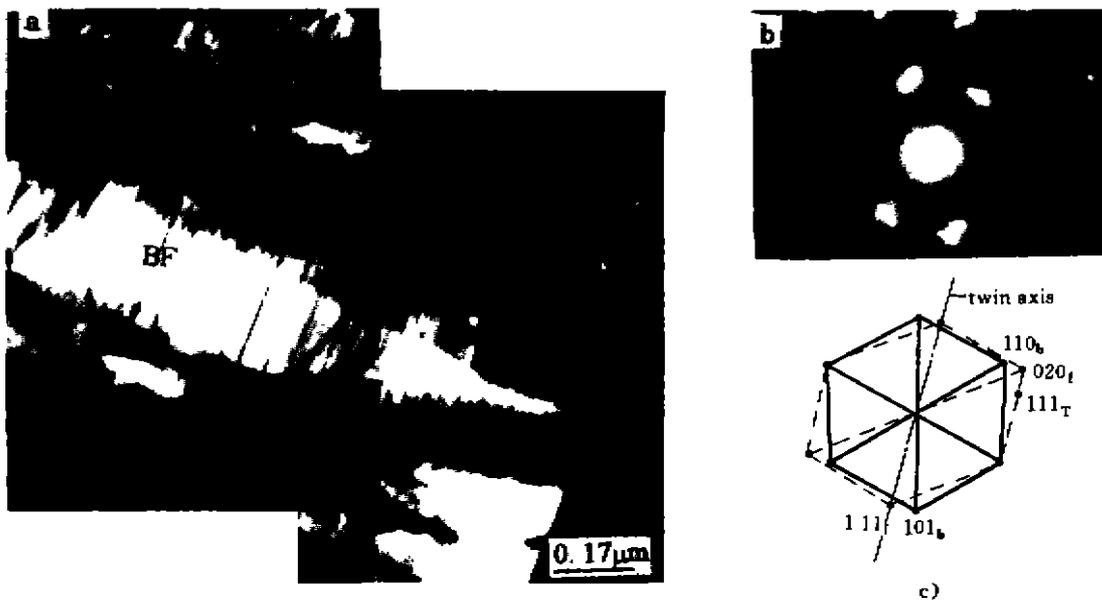


图2 BF增厚的TEM形貌

Fig.2 TEM observation of BF thickening

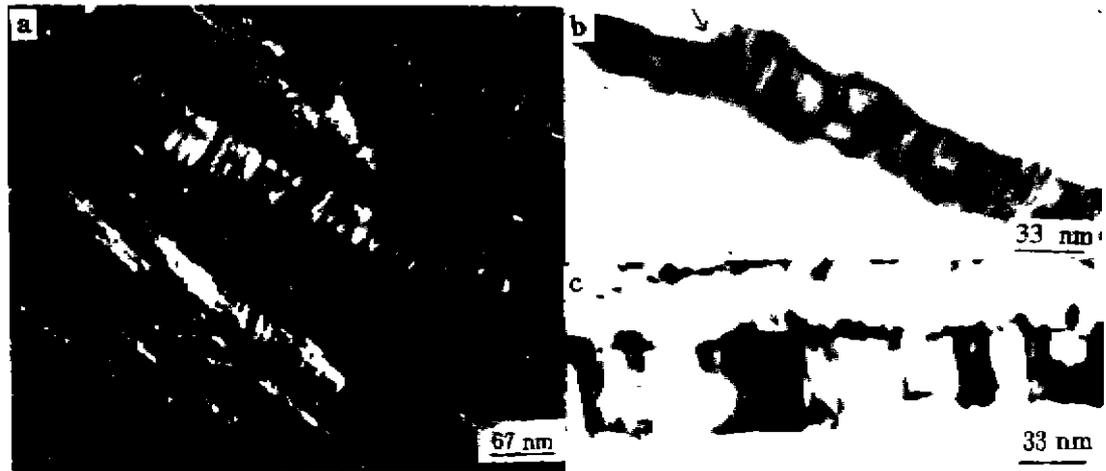
a) bright-field image of BF, b) diffraction pattern, c) index



图3  $B_{mn}/A_R$  相界面台阶与  $A_R$  精细结构

Fig.3  $B_{mn}/A_R$  interface ledge and fine structures of austenites

a) dark-field image of  $A_R$ , b) stacking fault of  $A_R$ , c) and d) ledges

图 4  $B_{m1}/A_R$  相界面台阶与  $A_R$  精细结构Fig. 4  $B_{m1}/A_R$  interface ledge and fine structures of austenitesa) dark-field image of  $A_{R1}$  and  $A_{R2}$ , b) ledges at  $B/A_{R2}$  interface, c) ledges at  $B/A_{R1}$  interface

### 3 分析与讨论

贝氏体铁素体形核时需在母相奥氏体中形成贫碳区及富碳区,贝氏体长大时仍需形成新的贫化氛围,使富碳区含碳量进一步升高,因而贝氏体长大时富碳奥氏体区的屈服强度逐渐增加,临界滑移分切应力升高为孪生变形创造了条件,由于奥氏体层错能较低,因而奥氏体在塑性协调变形时易通过位错的局部反应形成层错亚结构。文献[8,11]进一步指出贝氏体相变时奥氏体塑性协调亚结构的形成伴随贝氏体长大过程。

贝氏体残余奥氏体中层错的形成伴随贝氏体长大过程,必然对贝氏体铁素体/奥氏体相界面推移方式,即贝氏体长大方式产生重要影响。界面台阶的阶面为孪晶面或层错面,层错面为母相奥氏体的 $(111)_{fcc}$ 滑移面,其边界为孪晶面,证实台阶的阶面是共格及可滑移的相界面,贝氏体/奥氏体相界面台阶可沿其阶面,即孪晶面或层错面滑移切变。

文献[12]考察了 40CrMnSiMoVA 钢准下贝氏体铁素体宽面的位错性质,发现其错配位错的柏氏矢量为  $b = a/2[111]_{bcc}$ ,  $b$  与位错线真实方向的夹角为  $30^\circ$ ,因而错配位错为混合型位错,证实贝氏体的宽面为半共格的、可滑移界面。文献[13]的进一步分析尤为有意义,指出文献[12]中上贝氏体的界面错配位错也具有螺型性质,与扩散型相变的外延相界理论预示不符。因此,台阶的宽面可通过位错的螺型分量沿界面法线方向进行保守滑移,其运动特性与阶面的滑移相吻合。

文献[13~15]最近指出 bcc/fcc 的切变转变和扩散转变均可利用相界面台阶进行,换句话说,在贝氏体铁素体/奥氏体相界面存在台阶结构时贝氏体亦能以切变方式长大,但台阶的位移式长大与传统的台阶机制体扩散长大之间存在重要的区别。台阶是由阶面和宽面组成,因而台阶阶面的共格特征及相应的迁移方式是澄清界面长大机制的重要方面之一,阶面可滑移扩展意味着台阶切变长大,阶面侧向迁移则表明台阶扩散长大。扩散长大机制<sup>[1,2,14]</sup>认为台

阶非共格的阶面或阶面上小台阶、小扭折的无序阶面可沿宽面以体扩散方式侧向迁移,宽面为不可动的非共格界面,然而具有无序阶面的巨型台阶的存在受到质疑<sup>[16]</sup>。文献[13]进一步指出具有无序阶面的生长台阶仅表现出拓扑学特征,不具备固定的应变场矢量,亦不存在产生IPS均匀应变的基础,而要求扭折的巨型台阶的扩散推移论证尚止于定性、静态的。

依据实验结果,至少在含硅钢初期的贝氏体长大过程中,此类台阶的阶面很难实现由基体原子扩散控制的沿宽面侧向迁移。贝氏体/奥氏体界面台阶的阶面往往对应层错面,贝氏体可通过阶面沿奥氏体层错面保守滑移扩散而长大,因而贝氏体初期长大具有切变特征。

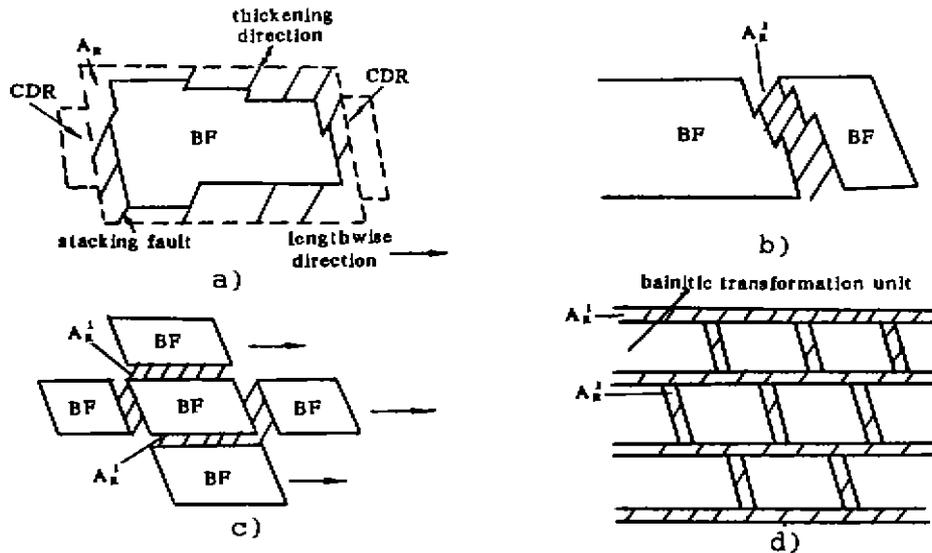


图5 准下贝氏体组织形成示意图

Fig.5 Formation of meta-lower bainite

文献[17]由贝氏体的类马氏体切变相变基元特征提出贝氏体组织形成模式,文献[18]由贝氏体转变时的应变场形态及分布特征亦给出类似的图像。本文依据实验结果,由贝氏体奥氏体精细结构及界面台阶的微观特征,提出准贝氏体组织形成模式。准下贝氏体转变时,第一片亚单元邻近的奥氏体富碳区中形成位向一致的层错,贝氏体沿层错面切变增厚并在相界面形成台阶结构(图5a);在伸长及增厚方向连续地诱发形成贫碳区及形核长大(图5b、c)),最终形成准下贝氏体组织(图5d)),增厚方向的唯一性使  $A_{R1}$  及  $A_{R2}$  中存在位向相同的层错面。

## 4 结论

- 1) 贝氏体铁素体/奥氏体相界面存在台阶结构,台阶阶面对应于孪晶面或层错面,因而具有较高的共格程度;
- 2) 贝氏体可通过台阶沿面缺陷滑移实现增厚,因而贝氏体长大具有切变性质。

## 参 考 文 献

- 1 Aaronson H I. Decomposition by Diffusion. NY Inter Publ, 1962, 387.
- 2 Rigsbee J M, Aaronson H I. A Computer modeling study of partially coherent F. C. C. - B. C. C. Boundaries. Acta Metall,

- 1979, 27:365.
- 3 俞学节, 徐祖耀. 高速钢中贝氏体转变的 TEM 观察. 材料科学进展, 1988, 2(3):51.
  - 4 Aaronson H I, Reynolds W T, Shiflet G J et al. Bainite viewed three different ways. Metall Trans A, 1990, 21A:1343.
  - 5 Christian J W. Crystallographic theories, interface structures, and transformation mechanisms. Metall Mater Trans A, 1994, 25A:1821.
  - 6 Bhadeshia H K D H. Bainite in Steel, London, 1991.
  - 7 Meng X K, Kang M K et al. The formation mechanism of plate in beta Cu-Zn and Cu-Zn-Al alloys. Metall Mater Trans A, 1994, 25:2601.
  - 8 Wu X L, Zhang X Y, Kang M K et al. Formation of carbon-poor regions during pre-bainitic transformation. Mater Letters, 1995, 22:141.
  - 9 黄孝瑛. 透射电子显微学. 上海:上海科学技术出版社, 1987.
  - 10 Sandvik B P J. The bainite reaction in Fe-Si-C alloys: the primary stage. Metall Trans A, 1982, 13:777.
  - 11 Bhadeshia H K D H, Edmonds D V. Metall Trans A, 1979, 10A:895
  - 12 张喜燕. 硅钢中贝氏体转变机制的 TEM 研究. [博士学位论文], 西安:西北工业大学, 1994.
  - 13 俞德刚. 贝氏体相变理论进展近况. 金属热处理学报, 1996, 17(增刊):47.
  - 14 Aaronson H I, Hall M G. A history of the controversy over the roles of shear and diffusion in plate formation above  $M_d$  and a comparison of atomic mechanisms of these processes. Metall Mater Trans A, 1994, 25:1797.
  - 15 康沫狂, 杨延清, 张喜燕等. 硅钢中的贝氏体及其转变模型. 金属学报, 1996, 32:897.
  - 16 Christian J W and Edmonds D V. The Bainite Transformation. Int Conf Phase Transformation in Ferrous Alloys, Marder A R and Goldstein J I eds. ASM, Cleveland, OH, 1984:293.
  - 17 俞德刚等. Fe-C 合金贝氏体铁素体的相变基元与类马氏体形貌贝氏体的形成. 金属学报, 1994, 30:A385.
  - 18 刘庆锁, 龚方岳, 陈玉如等. 上贝氏体精细结构. 金属热处理学报, 1994, 15(4):11.

## TEM Study of Growth Mechanism at the Initial Stage of Bainitic Reaction in Steels

Wu Xiaolei, Chen Guangnan

Kang Mokuang

(Institute of Mechanics, Academia Sinica) (Northwestern Polytechnical University

**ABSTRACT** The fine structures of residual austenite and the bainitic-ferrite austenite interfacial structure are studied at the initial stage of bainitic reaction in Si-containing steels by TEM double-tilt and hot holder as well. The experimental results show that the retained austenite substructures may consist of twins, stacking faults and dislocations, the plastic accommodation effect of austenite occurs during bainitic growth. It is firstly observed by high temperature TEM that the freshly-formed bainitic ferrite may inherit twin of parent austenite, which strongly implies that the growth of bainitic-ferrite is of shear nature. And, the ledge structures, usually larger than the atomic scale, exist at bainite/austenite interface. However, it is worth to note that the ledges usually correspond to twin or fault planes, which shows that the ledges are ordered and coherent to a high degree. Therefore, the bainitic-ferrite/austenite interface can glide conservatively through the ledge slipping along the defect plane, *ie*, the glide plane of austenite. The results give a strong prediction that the bainitic growth has the character of shear.

**KEY WORDS** bainite, substructure, ledge, shear