

含硅钢下贝氏体生长方式 ——下贝氏体切变增厚

张喜燕

(西南交通大学 材料工程系 成都 610031)

武小雷

(中国科学院力学研究所 材料研究中心 北京 100081)

康沫狂

(西北工业大学 材料学院 西安 710072)

摘要 首先对贝氏体扩散控制台阶长大机制进行简要评述。认为台阶的存在并不能证明扩散控制台阶长大机制,提出了贝氏体相变过程中新相沿母相奥氏体层错面切变增厚的观点。在这种模型中,由于贝氏体铁素体片增厚借助于界面位错圈在奥氏体层错面上的扩展来完成,台阶的运动只能沿母相层错面切变滑移,而不会作侧向迁移,同时台阶侧面也不应是无序的非共格界面,切变运动的结果导致下贝氏体发生台阶与奥氏体层错条纹具有对应关系的实验现象。

关键词 贝氏体;固态相变;界面;层错;马氏体;奥氏体;透射电镜;含硅钢

分类号 TG11.5

本文中首先简要评述贝氏体扩散控制台阶长大机制,然后根据贝氏体/奥氏体界面及贝氏体生长台阶研究实验结果提出下贝氏体切变增厚模式。

1 贝氏体扩散控制台阶长大机制评述

Aaronson^[1~3]等根据气-固、液-固相变的台阶长大理论所提出的贝氏体扩散控制台阶长大机制认为,当新相从母相中形成时,在新/旧界面上存在一系列可长大的台阶,称之为生长台阶,每个台阶由宽面和侧面组成,其中宽面是半共格的,侧面是非共格的,台阶高度约为12个原子间距。由于台阶侧面原子面是不连续的,如这个侧面发生迁移,将以扩散方式进行,即为铁原子的热激活迁移。扩散机制认为,尽管这个台阶侧面面积仅占整个新/旧界面面积的很少部分,但在台阶长大过程中极为重要,是必不可少的组成部分,因为新相(贝氏体片)生长是借助于其台阶侧面的侧面迁移实现的(同时也包括形成新台阶)。因此,贝氏体片的长大动力学受台阶长大动力学和台阶形成动力学的控制,即取决于台阶的侧向迁移速率和新台阶的形成速率两个因素。

扩散控制台阶长大机制提出已久,持此观点者也进行了许多研究,试图予以证实,但至今为止,其理论中的一个最基本的问题仍未能解决,即这种贝氏体组织中的台阶到底是怎样运动的。因为尽管有些试验结果,如 Kinsman 等^[2~4]测定的 Fe-Cr-C 以及其它合金贝氏体的长大动

力学曲线; Simonen 等^[5]对三种 Fe-C 合金贝氏体伸长速率的测定结果等被认为符合台阶长大机制,但大量的实验结果^[2,6,7]却与台阶机制相矛盾。按照这些实验结果,贝氏体片的伸长速率要比按控制台阶长大机制计算的至少大 1~2 个数量级,因此,贝氏体片的长大实际上与马氏体类似,速度非常快(但慢于马氏体)。

另外,台阶的侧面是否如扩散机制所认为的那样为非共格界面很值得怀疑。康沫狂^[8]最近指出,贝氏体铁素体长大时若是受碳扩散控制的话,则与扩散控制台阶长大机制有不同意义,后者理应是基体(Fe)原子扩散控制台阶无序侧面生长,而不是碳原子扩散控制,并进一步指出,碳在奥氏体中扩散为贝氏体铁素体长大提供条件,故碳的扩散控制贝氏体/奥氏体界面的迁移速率。Waston 等^[9]认为,贝氏体相变如伴有形状改变,则长大穿越界面任何部分都应维持点阵对应关系,从这个意义上说,台阶的侧面不能视为无序的。Bhadeshia 和 Edmonds^[10]也认为台阶长大机制模型不能解释贝氏体相变过程特点,如形状改变等。Hillert^[11]采用 Zener-Hillert 模型和 Trivedi 模型分别计算了碳扩散控制下的界面迁移速率,结果表明,按 Trivedi 方程计算的贝氏体侧面发生速率与试验数据基本吻合,由于计算中没有考虑贝氏体/奥氏体界面结构,说明贝氏体生长速率与基体铁原子扩散或界面类型关系不大,仅受碳的扩散控制。

在电镜观察方面,徐祖耀等^[12]在 1981 年发现钢中贝氏体宽面上存在巨型台阶,后来方鸿生等^[13~15]也曾报导在钢及有色合金中存在尺寸从几个纳米到几十个纳米的巨型台阶,并在最近又发现了三维巨型台阶结构^[18],被认为是支持贝氏体扩散控制台阶长大机制的有力证据。

应指出,台阶的存在并不能证明扩散控制台阶长大机制,因为一个孤立的台阶不能预示台阶的运动方式。当贝氏体是以切变增厚时,同样可形成台阶形貌。最近康沫狂等^[16~18]利用透射电镜温台技术对 Cu-Zn 合金贝氏体相变各阶段的生长动力学过程进行了全面的原位动态观察,发现贝氏体长大过程中的加厚具有明显的层错面间扩展或层错切变特征,贝氏体片宽面虽然呈现巨型台阶形貌,但台阶并无侧向运动。贝氏体的加厚动力学可与 Zener-Frank 体扩散模型较好吻合,但是扩散仅是提供新的溶质原子贫化区,为贝氏体的进一步切变长大创造条件。这些实验结果说明,贝氏体生长加厚不符合扩散控制台阶长大机制。

另一方面,由于贝氏体长大是新相向母相推移的过程,台阶的运动方式不仅与台阶本身及与母相间界面性质有关,也应与母相奥氏体中精细结构有关,但这方面的细节并不清楚。龚方岳、刘文西等^[19]曾在 9CrSi 钢贝氏体铁素体生长前端发现有应变场分布,应变场的形态与贝氏体铁素体的生长趋势大致相同,因此贝氏体的进一步长大是通过应变场的发展而进行,应变能密度的提高导致区域奥氏体转变为新相的驱动力提高。Sandvik^[20],孙加林^[21]均曾发现贝氏体中母相奥氏体残余孪晶,并以此估计形状应变。张喜燕等^[22]已经发现,下贝氏体残余奥氏体中具有大量层错亚结构,且层错条纹与贝氏体/奥氏体界面处台阶有对应关系,从而显示出台阶可能沿奥氏体层错面切变增厚的迹象。因此,应详细研究残余奥氏体精细结构及与台阶的关系,以便进一步了解台阶本质及其运动方式并为相变机制提供信息。

2 实验基础

2.1 含硅钢下贝氏体/奥氏体界面结构及界面可动性

本文第一部分^[23]已通过实验证明含硅钢下贝氏体界面错配位错具有沿界面法向滑动的

条件,并提出了界面位错圈模型,指出随着位错圈的扩展,其螺型部分导致下贝氏体铁素体的增厚,刃型部分导致贝氏体伸长,由于刃型位错滑动速度快于螺型位错滑动速度,伸长快于增厚,贝氏体呈片状。通过对含硅钢下贝氏体/奥氏体界面及残余奥氏体精细结构的观察^[24],发现无论下贝氏体板条间的残余奥氏体,还是亚板条间的残余奥氏体,均存在有大量的层错,这些层错条纹与下贝氏体/奥氏体界面处的台阶具有对应关系,这种对应关系与 Cu-Zn 合金贝氏体片切增厚的实验结果^[6~18]有很强的相似性,显示出下贝氏体长大过程中贝氏体/母相界面上的台阶宽面可以沿着母相奥氏体层错面直接切变移动,实现贝氏体片的增厚,而不一定依赖于台阶侧面迁移来增厚。

2.2 其它实验

电子衍射分析表明^[27],含硅钢下贝氏体转变初期存在碳原子的调幅分解,因而其贝氏体铁素体基体是含碳过饱和的,下贝氏体具有切变特征,同时也说明界面具有切变转变所要求的沿界面法向移动的条件。另外,下贝氏体形貌学的研究观察表明^[24],下贝氏体中的确有交叉分布的碳化物析出,其下贝氏体碳化物形态与回火马氏体中碳化物形态具有本质上的相似之处^[26,27]。含硅钢下贝氏体碳化物析出过程的透射电镜温台原位观察结果显示^[27],下贝氏体铁素体基体中可以析出化合物,因而是碳化物析出源之一。这些结果均显示出下贝氏体相变的切变特征。

3 下贝氏体铁素体的切变增厚

在下贝氏体相变过程中,贝氏体铁素体与母相奥氏体之间具有一定的晶体学位向关系,且存在较大的应力应变场^[19],因此,贝氏体片的长大或切变方向应是一定的(沿耗能最小的方向)。根据奥氏体层错条纹对应于贝氏体长大台阶的实验事实^[22]和界面位错圈模型^[23],可以设想在下贝氏体相变过程中,环绕贝氏体铁素体的界面位错圈对应于母相奥氏体的层错面,如图 1 所示(为清楚起见,将 BF 片画得稍小些, L_m, L_i, L_n 为依次形成的位错圈)。因此,位错圈

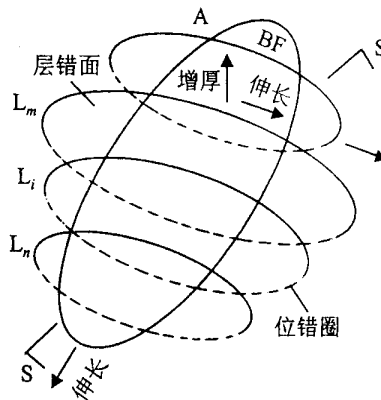


图 1 下贝氏体铁素体(BF)/奥氏体(A)界面位错圈(L)扩展实现 BF 沿母相 A 层错面切变增厚的扩展是在奥氏体层错面上进行,刃形部分的扩展使片的尖端触发形成新的位错圈(例如 L_i 或 L_n 等),此位错圈仍对应于母相奥氏体的层错面,其在层错面上的扩展同样导致贝氏体的伸长和增厚,并使尖端形成新的位错圈。由于贝氏体铁素体的长大受碳的扩散控制,因此当因

长大而耗尽的母相奥氏体区贫碳后,进一步的长大必须等碳从相邻奥氏体区继续扩散以形成新的贫碳区,使 M_s 点升高,为贝氏体继续切变长大提供条件^[28]。另外,由图 1 及前述可知,贝氏体片增厚时沿母相奥氏体各层错面的切变是有时间次序的(例如图 1 中的次序是 $L_m \dots L_i \dots L_n$),这时位错圈扩展时刃型位错部分移动,结果在片尖端形成新的位错圈。这种次序上的差别显然将影响贝氏体片各部分增厚的不一致性,最终的结果是在片的截面上出现一系列的台阶,如图 2 所示,其中,图 2 (a)是沿图 1 S-S 截面画出;图 2 (b)是一般情况下贝氏体铁素体形态(中心厚度和边缘厚度无大区别),其中箭头指向贝氏体铁素体生长台阶沿奥氏体层错面切变增厚方向。

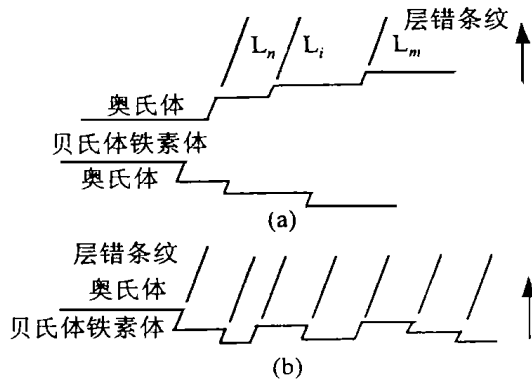


图 2 下贝氏体铁素体生长台阶与母相奥氏体层错条纹对应关系(对应于图 1)

值得注意的是,尽管在贝氏体铁素体长大过程中,先形成的部分(如图 1,2 中的 L_m 可能更宽(厚)一些,但情况也不尽如此,当由于某种障碍因素导致切变速度减慢或停止时,贝氏体片中心(或先形成的部分)就不一定比边缘(或后形成部分)增厚太多,最普遍的情况将如图 2 (b)所示。

在上述的切变长大增厚模式中,可以预测,台阶在沿母相奥氏体层错面切变增厚时,台阶不能作侧向移动,这也和 Cu-Zn 合金贝氏体长大电镜温台原位观察实验结果^[17]相吻合:对贝氏体片台阶运动的直接观察表明,台阶在增厚过程中始终无侧向移动。

4 结 论

(1) 下贝氏体片长大是借助界面位错圈在母相奥氏体层错面上扩展来完成的,奥氏体层错可由自奥氏体化温度激冷导致的热应力和贝氏体铁素体片尖端的应力应变场产生。

(2) 当位错圈扩展时螺型部分导致贝氏体铁素体片增厚,刃型部分移动导致伸长并在片的端部触发形成新的位错圈,该位错圈继续在层错面上扩展,由于这种时间上的次序关系以及某些障碍因素使部分区域增厚受到阻碍,导致各部分增厚的不一致,从而出现所谓的巨型台阶形貌,并且台阶都与母相奥氏体的层错条纹相对应。

(3) 台阶的运动是沿母相奥氏体层错面切变滑移,而不会作侧向运动,更不会如扩散台阶长大机制所说台阶由贝氏体铁素体自母相析出时形成,并且台阶侧面无序,侧向迁移导致增厚,这样不可能出现台阶与母相层错条纹的对应关系。

参 考 文 献

- 1 Aaronson H I. The mechanism of phase transformation in crystalline solid. *Ins. Metal.* ,London ,1969 :270
- 2 Emann R F, Kinsman K R , Aaronson H I. A debate on the bainite reaction. *Metall Trans.* ,1972 ;3A :1077
- 3 Kinsman K R, Eichen E, Aaronson H I. Thickening kinetice of proeutectoid ferrite plates in Fe-C alloys. *Metall Trans.* ,1975 ;64A :303
- 4 波特著,李长海译. 金属和合金中的相变. 北京:冶金工业出版社,1988 :291
- 5 Simonen E P, Aaronson H I, Trivedi R. Lengthening kinetics of Ferrite and bainite Side plates. *Metall Trans.* ,1973 ;4A :1239
- 6 Honbagon E, Warlimon H. DIE bainitesche um wand lung DES -messings. *Acta Metall* ,1967 ;15 :943
- 7 Kdstic M M, Hawbolt E, Brown L C. Growth kinetics of bainite plates and widmanstatten Needles in the γ phase of a Ag-45 At. Pct Cd alloy. *Metall Trans.* ,1976 ;7A :1643
- 8 康沫狂. 钢中贝氏体转变研究进展. *西北工业大学学报* ,1990 ;(增刊) :10 ~ 15
- 9 Waston J D, Mcdougall P G. The crystallography of widmanstatten ferrite. *Acta Metall* ,1973 ;21 :961
- 10 Bhadeshia H K D H, Edmonds D V. The mechanism of bainite formation in steels. *Acta Metall* ,1980 ;28 :1265
- 11 Hillert M. Diffusion and interface control of reactions in alloys. *Metall Trans.* ,1975 ;6A :5
- 12 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体. 北京:科学出版社,1985 :200
- 13 金强,方鸿生,曹建军等. 下贝氏体铁素体宽面上的台阶结构. *金属学报* ,1990 ;26 :391
- 14 方鸿生,李春明,王家军. Cu-Zn-Al 合金贝氏体的初生态及三维台阶. *金属学报* ,1993 ;29 :383
- 15 方鸿生,王家军,李春明等. 200Cr12 钢下贝氏体碳化物来源及形成机制. *金属学报* ,1993 ;29 :445
- 16 Yan Y Q, Liu P H, Meng X K. Growth kinetics and high-temp. TEM in situ obser. of bainite in Cu-Zn alloy. *Metall Trans.* ,1994 ;25A
- 17 孟祥康,康沫狂,赵小宁等. Cu-Zn 合金贝氏体转变机制. *电子显微学报* ,1993 ;12 :50
- 18 Yang Y Q, Liu D H, Kang M K, *et al.* Stress and electromigration in Al-lines of integrated circuits. *Acta Metall* ,1992 ;30 :309
- 19 龚方岳,刘文西. 9CrSi 钢贝氏体生长机制的透射电镜研究. 第二届全国贝氏体相变讨论会论文集,峨眉,1990 :77
- 20 Sanduik B P J. The bainite reaction in Fe-Si-C alloys. The primary stage. *Metall Trans.* ,1982 ;13A :784
- 21 孙加林. 含硅钢下贝氏体转变机制研究. 博士论文. 西安:西北工业大学,1991
- 22 张喜燕,康沫狂,陈大明等. 含硅钢下贝氏体中台阶及残余奥氏体层错的透射电镜观察. *金属学报* ,1994 ;30 :109
- 23 张喜燕,武小雷,康沫狂. 含硅钢下贝氏体长大方式—65Si2MnWA 下氏体界面位错. *西南交通大学学报* ,1998 ;33(3) :257 ~ 262
- 24 张喜燕,武小雷,康沫狂. 含硅钢下贝氏体转变初期碳原子的调幅分布. *金属学报* ,1994 ;30 :327
- 25 张喜燕,武小雷,康沫狂等. 65Si2MnWA 钢中下贝氏体多重变态碳化物的 TEM 观察. *科学通报* ,1994 ;39(18) :765
- 26 张喜燕,武小雷,康沫狂等. 钢中回火马氏体碳化物析出形态. *钢铁* ,1994 ;29 :127
- 27 张喜燕. 含硅钢下贝氏体精细结构研究. 博士论文. 西安:西北工业大学,1994
- 28 武小雷,张喜燕,康沫狂等. 贝氏体相变研究新进展. *西北工业大学学报* ,1995 ;13(2) :205

The Growth Mode of Lower Bainite in Silicon Containing Steel —The Shear Thickening of Lower Bainite

Zhang Xiyan

(Dept. of Materials Eng. , Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China)

Wu Xiaolei

(Center of Materials , Institute of mechanics , Chinese Academy of Science , Beijing 100081 , China)

Kang Mokuang

(Dept. of Materials Eng. , Northwest Polytechnic University , Xi'an 710072 , China)

Abstract The diffusion controlled ledge growth mechanism of bainite (DCL GMB) is reviewed briefly in this paper. It is argued that the existence of the ledge can not prove the existence of DCL GMB. A growth mode of lower bainite by shearing on the stacking fault face of austenite is proposed. In this mode , the thickening of lower bainite depends on the interfacial misfit dislocation loop (IMDL) , which expands on the stacking fault faces of austenite. Ledges move only along the stacking fault faces but not along the side direction, and the side faces of ledges are not incoherent boundary. The observed experimental phenomenon of the austenitic stacking fault fringes corresponding to the lower bainitic growth ledges can be explained by the shear thickening mode.

Key words bainite ; solid transformation ; interfaces ; fault ; martensite ; austenite ; TEM ; silicon containing steel