

# 贝氏体三维形态及组织演化\*

方鸿生 薄祥正 王家军 徐宁

(清华大学材料科学与工程系, 北京 100084)

**摘要** 在扫描电子显微镜 (SEM) 较高分辨率条件下, 用双磨面方法研究了贝氏体亚结构的三维 (3-D) 形态. 发现上贝氏体及其亚片条的三维形态呈板条状, 下贝氏体及其亚片条的三维形态呈片状, 下贝氏体亚单元为块状. 上、下贝氏体之间在三维形态上无明确界限, 存在过渡型的中间态贝氏体, 其形态介于上、下贝氏体之间, 这说明上、下贝氏体在本质上是统一的. 用激发形核—台阶长大理论分析了上、下贝氏体组织形态演化机理, 并提出演化过程模型.

**关键词** 贝氏体, 双磨面, 形态学, 组织演化

**中图分类号** TG115.21, TG142.1

## THREE DIMENSIONAL MORPHOLOGY AND MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF BAINITE

FANG Hongsheng, BO Xiangzheng, WANG Jiajun, XU Ning

Department of Materials Science & Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

Correspondent: BO Xiangzheng, Fax:(010)62771160, Tel: (010)62782361,

E-mail: fhsdms@tsinghua.edu.cn

Manuscript received 1997-06-09, in revised form 1997-12-29

**ABSTRACT** The 3-D morphologies of bainite in steels have been studied by scanning electron microscopy (SEM) with high resolution, based on the dual-surface observation. The subplates composing upper bainite sheaf are lath-like while the whole morphology of lower bainite and its subplates are plate-shaped. The subunits in lower bainite seem to be lumpish. There is no obvious difference between upper bainite and lower bainite. Between them exists transient bainite, whose 3-D morphology proves to resemble both upper and lower bainite on some aspects. The microstructural evolution of three types of bainite has been interpreted when the sympathetic nucleation ledgewise growth mechanism is employed, and the evolution model has been proposed.

**KEY WORDS** bainite, dual-surface method, morphology, microstructural evolution

Oblak<sup>[1]</sup> 曾于 1964 年采用双磨面金相法, 确认针状下贝氏体形态为透镜状或扁片状. Srinivasan 等<sup>[2]</sup> 用光学显微镜 (LOM) 观察了 Fe-7.9Cr-1.11C 合金下贝氏体 (280 °C 等温 17 天) 双磨面, 结果显示下贝氏体二维形态 (2-D) 呈针状, 但 3-D 形态为片状或板条束状. 以往关于贝氏体形态学理论和模型, 主要基于 LOM 对双磨面样品的观察结果. 本文将介绍用 SEM 在较高分辨率下对贝氏体双磨面样品的观察结果, 并在综合考虑 LOM, SEM, TEM 及 STM<sup>[3]</sup> 观察结果基础上, 建立贝氏体三维结构模型并分析贝氏体形态演化过程.

\* 国家教委先进材料开放实验室资助课题

收到初稿日期: 1997-06-09, 收到修改稿日期: 1997-12-29

## 1 双磨面样品制备

目前广泛采用 LOM 双磨面法分析贝氏体 3-D 形态, 其样品制备过程如图 1a, 即首先按常规制备 LOM 样品, 获得抛光磨面 S1; 然后采用涂胶制备 S2. 对 S1, S2 分别浸蚀以显示组织. 在 LOM 下对 S1 和 S2 分别观察并拍照, 获得 P1, P2, 将 P1, P2 对接获得图 1b. 由于 SEM 比 LOM 景深大, 故用 SEM 可直接对双磨面 S1 和 S2 同时观察并照相, 如图 1c.

图 1d 为双磨面棱线  $CC''$  法面 ( $\triangle ABC''$ ) 与贝氏体片条宽面 ( $\triangle ABC$ , 即惯习面) 间相互关系示意图,  $AC, BC$  分别为贝氏体片与在显微磨面上的迹线. 采用 LOM 观察时, 两条迹线间夹角为  $\theta = \theta_1 + \theta_2 = \angle ACC'' + \angle BCC''$ , 而用 SEM 观察时, 迹线间夹角为  $\theta' = \theta'_1 + \theta'_2 = \angle AC''D + \angle DC''B = \angle AC''B$ . 显然双磨面分析贝氏体 3-D 形态时, 观察结果不仅与贝氏体所处空间位置 (取决于贝氏体片与棱线间夹角  $\beta = \angle DCC''$ )、贝氏体本身形态有关, 而且与双磨面夹角  $\theta_0 = \angle AC''B$ 、分析测试手段 (LOM 或 SEM) 有关, 图 1d 几何关系表明: 只有当双磨面棱线垂直于惯习面时, 跨越棱线后, 贝氏体片双磨面迹线才平直, 此时  $\theta = \theta' = 180^\circ$ , 否则同一片条的迹线发生转折, 且恒有  $\theta \geq \theta'$ , 即用 SEM 和 LOM 观察同一样品时, 所观察到的在两个磨面上贝氏体片迹线的夹角不同, SEM 观察的结果较 LOM 观察的小.

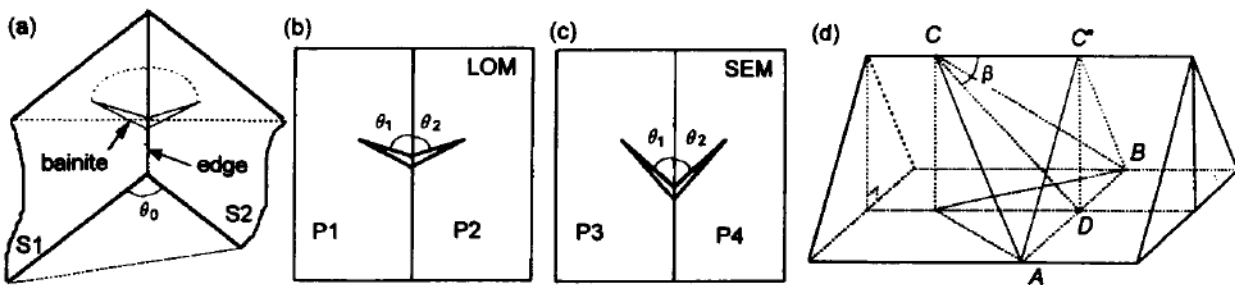


图 1 双磨面金相示意图

Fig.1 Schematics showing metallography of dual-surface specimen for 3-D morphology (a), LOM results (b), SEM dual-surface photo (c) and (d) geometrical relation

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 下贝氏体铁素体片条三维形态

图 2 为 Fe-1.08C-3.95Cr-0.24Si-0.18Mn 合金经 1200 ℃, 72 h 扩散退火、1150 ℃, 30 min 固溶及 300 ℃, 5 h 等温获得的下贝氏体组织的双磨面光学金相, 其双磨面夹角 (图 1a 中  $\theta_0$ ) 为  $90^\circ$ . 图中可观察到多个贝氏体片条在不同截面上连续、并均呈针状, 如图中箭头 1、2 等所示, 表明下贝氏体 3-D 形态为片状.

图 3 为 Fe-0.40C-2.5Mn-1.4Si 合金在 1200 ℃ 扩散退火 72 h, 900 ℃ 固溶 5 min, 然后在 280 ℃ 等温 25 min 获得下贝氏体片条的双磨面 SEM 照片. 图 3a 中箭头 1、2 处贝氏体跨越棱线后连续, 表明贝氏体的 3-D 形态为片状. 其局部放大结果如图 3b 所示.

下贝氏体通常由多层次亚结构组成<sup>[3-6]</sup>, 但以往文献<sup>[1,2]</sup>对贝氏体片条内部亚结构的 3-D

形态研究较少. 由图 3b 可看出, 图 3a 中箭头 2 所指下贝氏体片条实际上由亚片条组成, 如图 3b 中箭头 1, 2 所示, 而亚片条的 3-D 形态也为片状. 此外, 图 3b 中还可观察到亚片条由亚单元组成, 亚单元的 2-D 形态为菱方状.

图 4 为同一样品中观察到的另一贝氏体的双磨面 SEM 照片. 图中贝氏体亚片条的薄片状形态更为明显, 如箭头 1, 2, 即不仅贝氏体整体在双磨面棱线两侧连续, 而且贝氏体亚片条在棱线两侧也保持连续.

上述结果表明: 下贝氏体铁素体片条、亚片条的 3-D 形态均为片状, 下贝氏体亚单元的 3-D 形态为块状. TEM 及 STM 的观察已经证实<sup>[3,4]</sup>, 下贝氏体亚片条是由亚单元组成, 亚单元是由超亚单元组成.

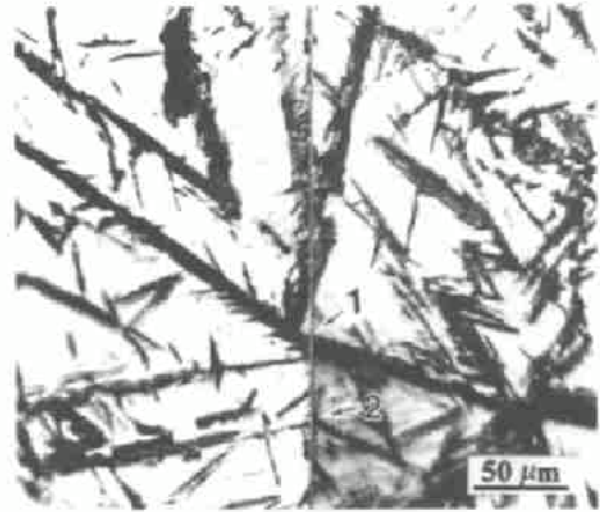


图 2 Fe-1C-4Cr 下贝氏体双磨面

Fig.2 Dual-surface LOM micrograph of lower bainite

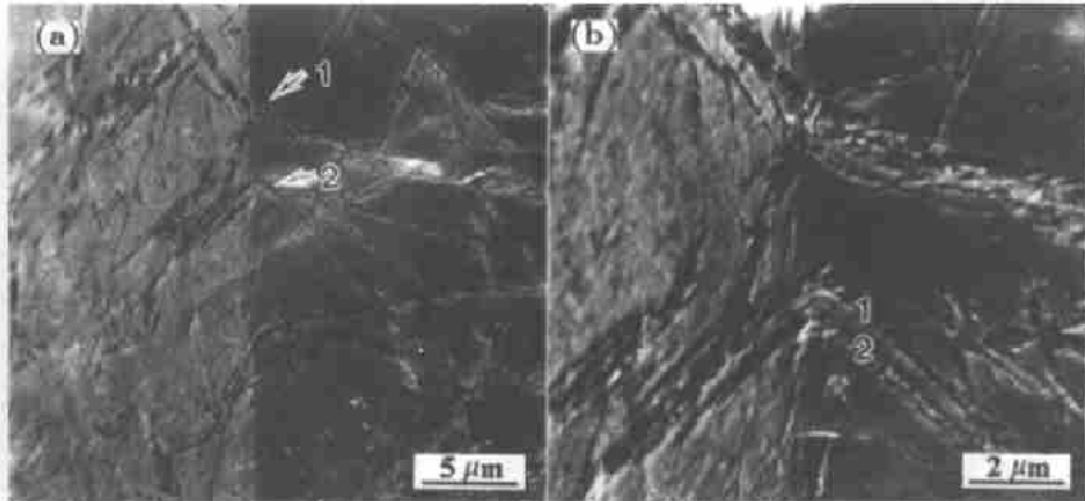


图 3 Fe-0.4C-2.5Mn-1.4Si 下贝氏体双磨面 SEM 像

Fig.3 SEM micrographs showing the 3-d morphology of lower bainite plate and subplate (a) and locally magnified image (b) in Fe-0.4C-2.5Mn-1.4Si alloy

## 2.2 上贝氏体双磨面观察

图 5 为 Fe-0.4C-2.5Mn-0.6Si 合金 350 ℃, 23 min 等温 (1200 ℃, 72 h 扩散退火, 950 ℃ 固溶 5 min) 获得的上贝氏体的 LOM 组织及 SEM 双磨面照片. 由图 5a 可观察到晶界形核、向晶内长大且呈羽毛状的典型上贝氏体组织 (见图中标注 1). 双磨面样品的 SEM 观察结果可显示上贝氏体的 3-D 形态, 如图 5b 所示. 图中箭头 1, 2 和 3 处贝氏体在双磨面一侧 (图中左侧) 呈针状, 而在另一侧 (图中右侧) 则呈矩形, 表明 3-D 空间内贝氏体呈条状. 此外, SEM 下可清晰地显示上贝氏体束可由亚片条组成, 亚片条的 3-D 形态也为条状, 如图 5b 中箭头 2 和 3 处亚片条就属于同一上贝氏体束.

## 2.3 中间态贝氏体双磨面结果

由图 5a 还发现, 尽管等温温度为 350 ℃, 但典型上贝氏体组织含量较少, 而存在大量形



态介于上、下贝氏体之间的中间态贝氏体, 如箭头 2 所示. 图 6a 双磨面棱线附近可观察到三片贝氏体, 其中片 1 的左侧近似为长方形, 右侧为针状; 片条 2 左右两侧均近似为长方状. 此种现象在图 6b 中更为明显. 值得注意的是, 图 6a 中片条 3 由两个亚片组成的, 其在棱线右侧呈短棒状, 左侧呈条状. 上述结果表明: 中间态贝氏体整体 3-D 形态介于片状(下贝氏体)和条状(上贝氏体)之间, 贝氏体亚片的 3-D 形态(图 6a 中片 3 由两个亚片组成)也介于上、下贝氏体之间.

#### 2.4 贝氏体三维形态模型

以上对上、下及中间态贝氏体 3-D 形态的分析结果综合列于表 1. 结合作者用 STM 及 AFM 观察的结果<sup>[3,4]</sup>, 系统地给出中温转变产物——贝氏体的 3-D 形态示意图(图 7).

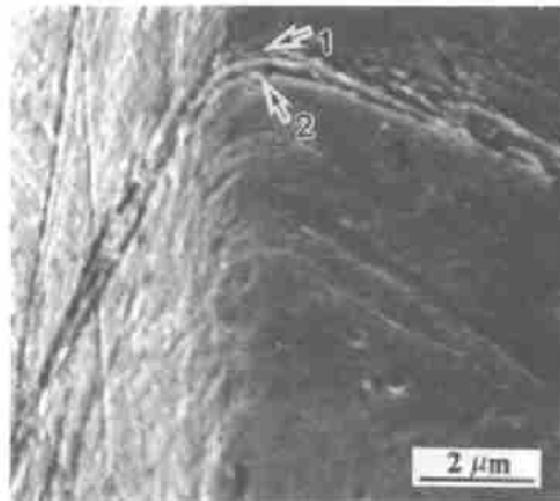


图 4 下贝氏体亚片条双磨面 SEM 照片  
Fig.4 SEM dual-surface micrograph of sub-plates in lower bainite

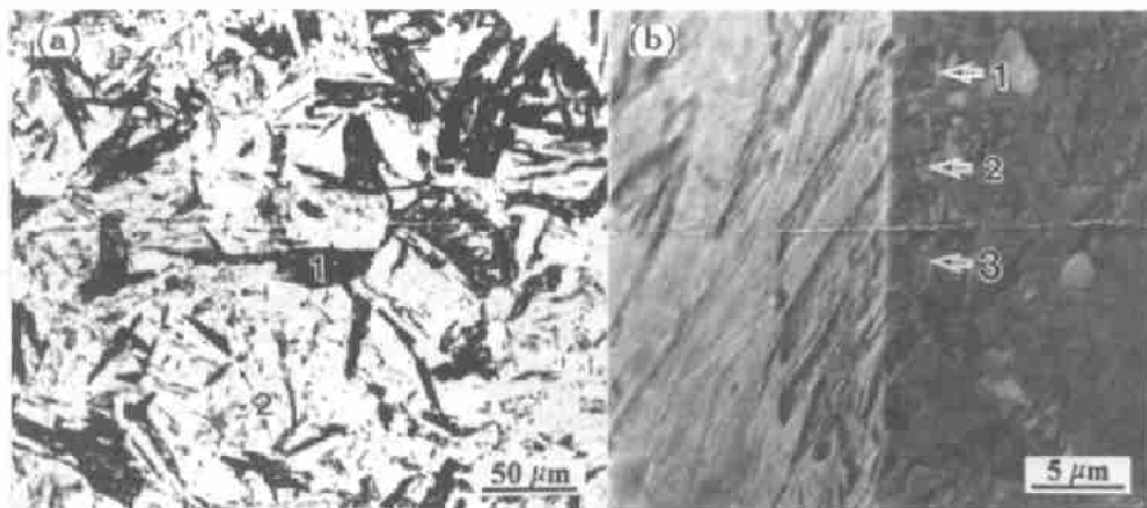


图 5 Fe-0.4C-2.5Mn-0.6Si 合金上贝氏体  
Fig.5 Upper bainite in Fe-0.4C-2.5Mn-0.6Si alloy  
(a) LOM micrograph (b) SEM dual-surface micrograph

贝氏体转变初始阶段, 铁素体首先在晶界形核并向奥氏体内部长大. 若合金中含有大量抑制碳化物析出的元素, 如 Si, Al 等, 则铁素体长大过程中不伴随碳化物析出, 从而形成图 7a 所示无碳化物贝氏体组织. 此时铁素体束截面为棒状, 如双磨面示意图 7b. 3-D 形态为板条束状. 若板条束间析出碳化物, 则形成如图 7c 所示的典型上贝氏体组织(与图 5b 对应).

若转变温度降低, 贝氏体铁素体逐渐由条状向片状形态转变, 如图 7d. 图 7e 给出图 7d 对应的双磨面 LOM 照片示意图, 表明铁素体束截面形状逐渐由板条状过渡为片状. 尽管此形态贝氏体介于上贝氏体和下贝氏体之间, 但其碳化物分布更多接近上贝氏体, 如图 7f, 碳化物在板条束间析出.

若转变温度进一步降低, 则贝氏体铁素体在奥氏体晶内形核, 其形态为片状 (图 7g). 双磨面金相示意图见图 7h, 此即下贝氏体组织, 考虑到碳化物在铁素体片条内部的分布形态后, 可给出图 7i 所示典型下贝氏体片形态.

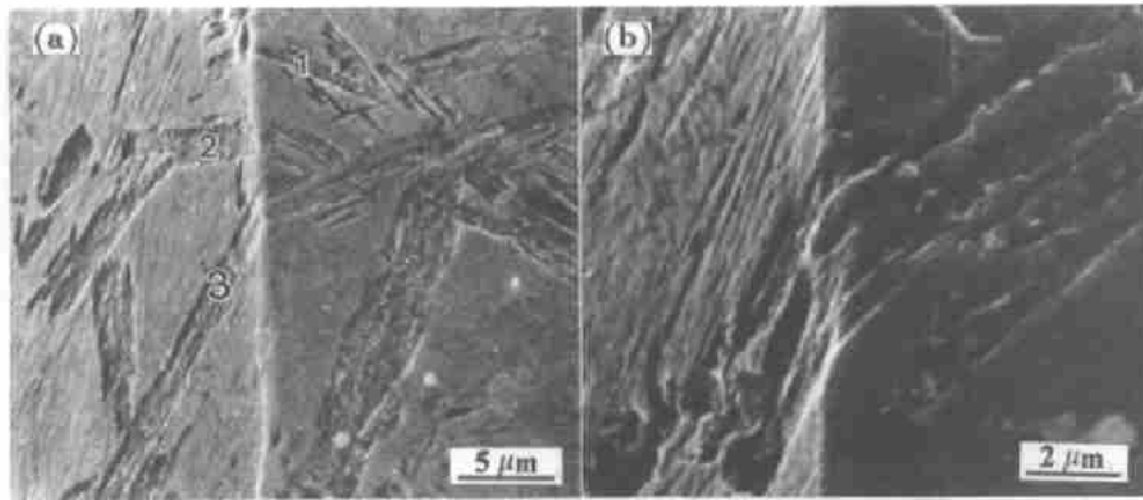


图 6 中间态贝氏体双磨面观察结果

Fig.6 Dual-surface micrographs of transient bainite, (a) and (b) having different magnifications

表 1 贝氏体双磨面实验结果总结

Table 1 Experimental results of dual-surface study on bainite morphology

Reference	Analysis method	Microstructure	Description	
			2-D	3-D
Oblak et al <sup>[1]</sup>	LOM	lower bainite plate	acicular	lens
Srinivasan et al <sup>[2]</sup>	LOM	lower bainite plate	acicular	plate or sheaf
Fig.2	LOM	lower bainite plate	acicular	plate
Fig.3	SEM	lower bainite plate	acicular	plate
Fig.3b and Fig.4	SEM	lower bainite subplate	acicular	plate
Fig. 5	SEM	upper bainite	lath	lath
Fig 5a and Fig.6	SEM	transient bainite	between upper and lower bainite	

需指出, 尽管在 LOM 下贝氏体组织呈单一片状, 如示意图 7g, SEM、TEM 及 STM 均证实, 上述贝氏体片条实际上由复杂多层次亚结构组成. 综合考虑 LOM 及 STM 研究结果, 可给出下贝氏体片的复杂多层 3-D 精细结构模型, 如图 8<sup>[5]</sup>. 图中贝氏体片整体近似为片状, 它由亚片条所组成, 亚片条由亚单元、超亚单元组成, 超亚单元由更小的超超亚单元组成. 这种多层次结构模型可用激发形核 - 台阶长大理论<sup>[6]</sup> 予以圆满解释.

## 2.5 激发形核与贝氏体形态演化

从图 8 可以看出, 下贝氏体具有四个结构层次. 事实上, 层次数目取决于合金成分、转变温度、激发形核速率、台阶长大速率、碳扩散速率等. 首先, 转变温度愈低, 则激发层次愈多, 可能出现比图 8 中最小结构单元更小的贝氏体结构单元, 反之, 随着转变温度提高, 则贝氏体结构层次减少, 此时可能形成仅由亚片条组成、甚至仅为单一片条的下贝氏体组织; 其次, 从



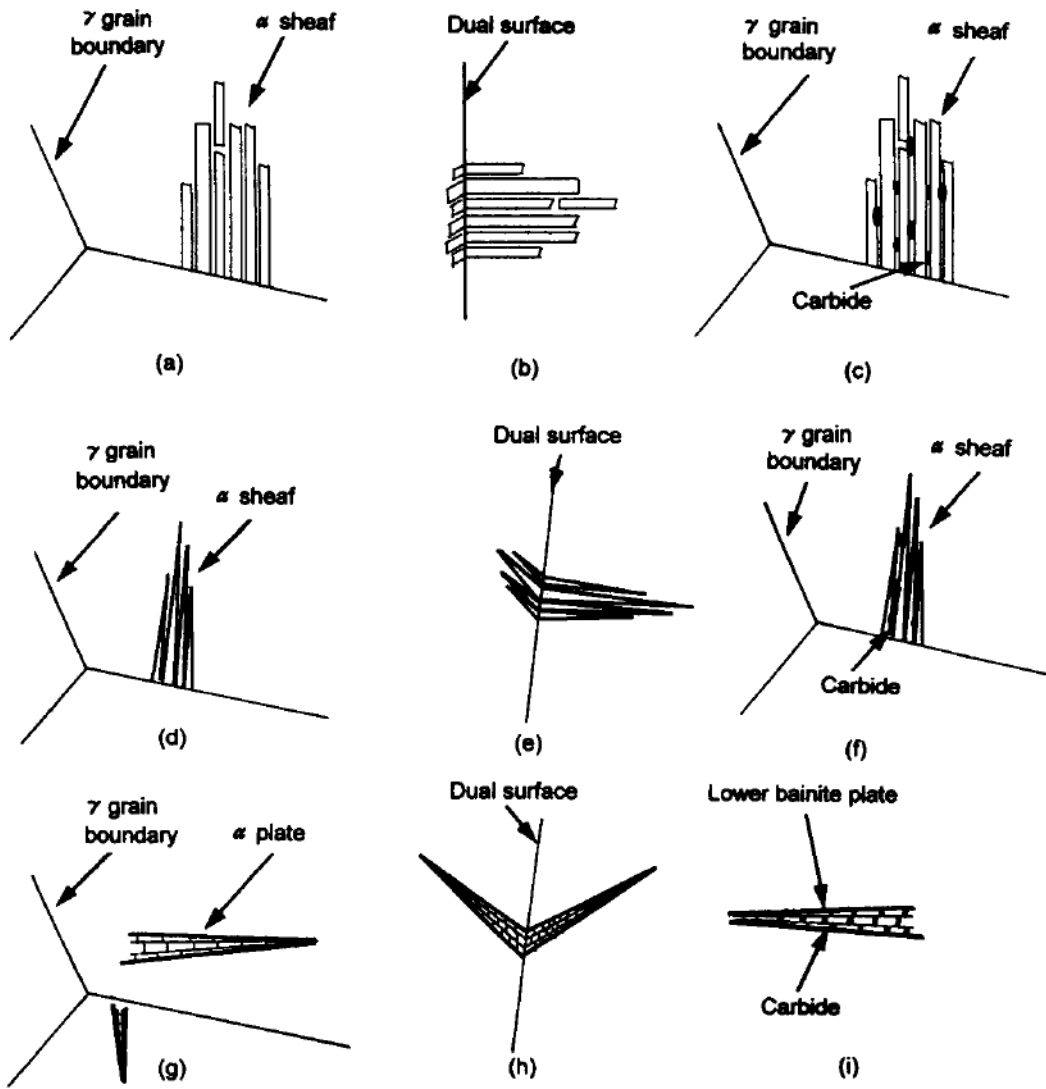


图7 贝氏体的形态演化

Fig.7 Morphology evolution of bainite

(a) — (c) upper bainite (d) — (f) transient bainite (g) — (i) lower bainite

激发形核角度考虑，激发形核速率愈高，形成的贝氏体的层次愈复杂，各层次的尺度愈小；再次，考虑碳在奥氏体中扩散系数  $D_\gamma$  的影响， $D_\gamma$  愈小， $\alpha/\gamma$  界面的扩散迁移速率愈低，在界面上发生激发形核的可能性愈大，贝氏体的结构层次将愈复杂，显然，凡影响  $D_\gamma$  的因素如，贝氏体转变温度，合金元素的成份等，均在不同程度上影响贝氏体亚结构的层次；最后，从台阶长大角度考虑，单一生长台阶的迁移速率愈大，则激发形核发生的可能性愈小，贝氏体的结构层次将受到限制。

通常与铁素体并存的、贝氏体的另外一个重要组成部分——碳化物也直接影响贝氏体形

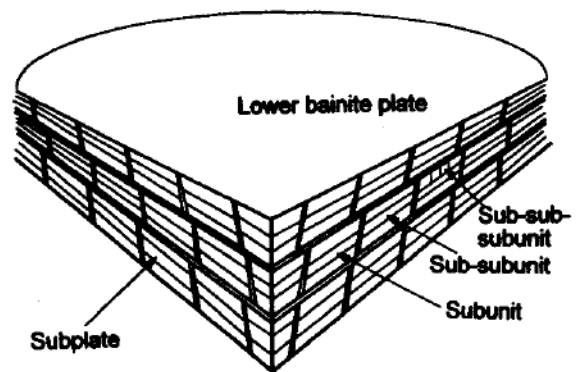


图8 下贝氏体 3-D 形态多层次结构模型  
Fig.8 Multi-layer 3-D structural model of lower bainite

态<sup>[7]</sup>。由于铁素体基本结构单元之间的奥氏体碳含量显著高于基体平均碳含量, 只要条件许可, 必然在这些区域析出碳化物, 此时, 碳化物既可与铁素体同时析出, 亦可在铁素体长大后再在亚单元之间析出。无论碳化物在哪一阶段析出, 都将对贝氏体组织形态产生影响, 其形核长大过程, 实质是碳化物与铁素体的竞相形成过程。

以上表明, 贝氏体形态与贝氏体的转变机制密切相关, 它不仅受界面的迁移方式的影响, 而且也受界面迁移速率的影响, 同时还受铁素体和碳化物的形成速度影响。但是, 任何贝氏体形态的形成与演化, 均与贝氏体转变的激发形核 - 台阶长大机制有关。

尽管本文的主要结论及实验结果均基于对钢中贝氏体组织形态的观察与分析, 但是, 若不考虑碳化物对贝氏体铁素体形态及析出过程的影响, 则上述有关分析也完全适合于对有色合金贝氏体组织的描述。

### 3 结 论

(1) 用 SEM 在较高分辨率下对钢中贝氏体的双磨面金相的观察证实了: 下贝氏体的三维形态为片状, 其亚片条的三维形态也为片状, 亚单元为块状; 上贝氏体三维形态为板条束, 其亚片条也为板条状。

(2) 在上、下贝氏体之间存在中间形态贝氏体, 其三维形态介于上、下贝氏体之间。三种贝氏体在组织形貌方面具有一定连续性, 上、下贝氏体在本质上没有区别, 是统一的。

(3) 给出了上、下及中间态贝氏体的三维形态结构模型。

(4) 用激发形核 - 台阶长大理论定性解释了贝氏体多层次结构的形成原因, 并分析了转变温度、激发形核速率、碳在  $\gamma$  中扩散系数、台阶长大速率、碳化物析出对贝氏体组织形态的影响。

### 参 考 文 献

- 1 Oblak J M, Goodenow R H, Hehemann R F. *Trans AIME*, 1964; 230: 258
- 2 Srinivasan G R, Wayman C M. *Acta Metall*, 1968; 16(6): 621
- 3 Fang H S, Wang J J, Yang Z G, Li C M, Deng X R, Zheng Y K, Yan J J, Yu H B, Li Z G, Huang G. *Prog Nat Sci*, 1994; 4(2): 182
- 4 Wang J J, Fang H S, Yang Z G, Zheng Y K. *ISIJ Int*, 1995; 35(8): 992
- 5 方鸿生, 杨志刚, 王家军, 郑燕廉. 金属学报, 1995; 31: A387  
(Fang H S, Yang Z G, Wang J J, and Zheng Y K, *Acta Metall Sin*, 1995; 31: A387)
- 6 方鸿生, 王家军. 金属学报, 1994; 30: A491  
(Fang H S, Wang J J. *Acta Metall Sin*, 1994; 30: A491)
- 7 方鸿生, 王家军, 郑燕廉, 杨志刚. 金属学报, 1993; 29: A445  
(Fang H S, Wang J J, Zheng Y K, Yang Z G. *Acta Metall Sin*, 1993; 29: A445)
- 8 方鸿生, 王家军, 杨志刚. 钢铁研究学报, 1997; 9(5): 45  
(Fang H S, Wang J J, Yang Z G. *J Iron Steel Res*, 1997; 9(5): 45)