

Fe-Mn-Si 系形状记忆合金中热诱发 ϵ_M 的单元结构 及生长特性研究 *

刘庆锁

温春生 林成新 谷南驹

(天津理工学院材料科学与工程系, 天津 300191) (河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300130)

摘 要 用透射电子显微镜观察了 Fe-17Mn-10Cr-5Si-4Ni 合金中热诱发 ϵ 马氏体 (ϵ_M) 的组成结构, 探讨了 ϵ_M 生长特性. 实验表明, 合金中较大尺寸的热诱发 ϵ_M 具有由生长取向大致相同的单元以首尾相接方式组成的结构特点. 层错带平行分布的体系中 ϵ_M 具有促发形核、接续长大的生长特性.

关键词 Fe-Mn-Si 系形状记忆合金, 热诱发 ϵ_M , 单元, 生长特征

中图分类号 TG139.6

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2003)06-0605-03

UNIT STRUCTURE AND GROWING CHARACTER OF THERMO-INDUCED ϵ_M IN Fe-Mn-Si BASE SHAPE MEMORY ALLOY

LIU Qingsuo

Department of Materials Science and Engineering, Tianjin Institute of Technology, Tianjin 300191

WEN Chunsheng, LIN Chengxin, GU Nanju

School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130

Correspondent: LIU Qingsuo, associate professor, Tel: (022)23679343, E-mail: QingsuoLiu@eyou.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.59801005)

Manuscript received 2002-06-07, in revised form 2002-09-23

ABSTRACT The structure of thermo-induced ϵ martensite (ϵ_M) in an Fe-17Mn-10Cr-5Si-4Ni alloy has been observed by TEM, and its growing character has also been described. The observation shows that the long thermo-induced ϵ_M plate in the testing alloy is made of the units which are in almost the same growing orientation and joined together in the head and the tail. The thermo-induced ϵ_M is of a character of inducing nucleation and continuing growth in the system composed of the parallelly distributed stacking fault bands.

KEY WORDS Fe-Mn-Si base shape memory alloy, thermo-induced ϵ_M , unit, growing character

在具有低层错能的 Fe-Mn-Si 系合金中发生的 fcc(γ) \rightarrow hcp (ϵ) 马氏体相变较为特殊, 其 γ/ϵ 界面能够可逆迁动, 但热滞高达 100 K, 应归属半热弹性马氏体相变^[1]. 诸多研究结果揭示^[2-5], 低层错能的合金中 ϵ 马氏体 (ϵ_M) 可由层错直接形核. Jiang 等^[6] 经实验测得, 对 Fe-Mn-Si 系合金存在: $M_s=372-0.113/P_{sf}$. 其中 P_{sf} 为层错几率, 从热力学角度揭示了 ϵ_M 相变对层错量的依赖关系. 然而层错分布状态对 ϵ_M 相变, 尤其是形核的影响尚不清楚.

已经证实 Fe-Mn-Si 系合金的热诱发 ϵ_M 一般呈自协作方式生长^[7,8]. 但至今尚缺乏母相层错分布状态对热诱发 ϵ_M 生长方式影响的研究.

本文借助研究 ϵ_M 的组成形态, 以探讨母相层错分布状态对 ϵ_M 相变的影响.

1 实验方法

将中频真空感应炉冶炼的钢锭去掉外皮, 并在温度为 1200 $^{\circ}\text{C}$ 下均匀退火 24 h, 之后热锻成方坯. 合金的化学成分 (质量分数, %) 为: Mn 16.86, Cr 10.30, Si 4.50, Ni 5.29, Fe 余量. 用线切割机沿方坯纵向加工出试样. 为克服由于线切割加工对试样表面的成分及应力状态造成的影响而对试样采取如下处理: 表面进行机械打磨, 再将其封入石英管中于 1000 $^{\circ}\text{C}$ 固溶处理, 试样最终

* 国家自然科学基金项目 59801005 资助

收到初稿日期: 2002-06-07, 收到修改稿日期: 2002-09-23

作者简介: 刘庆锁, 男, 1962 年生, 副教授, 博士

冷至 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. 综合膨胀法、电阻法, 测得固溶态合金的相变点: M_s 约为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, A_s 为 $129\text{ }^{\circ}\text{C}$.

试样的显微组织观察在 H-800 型透射电子显微镜上进行, 加速电压为 200 kV. 电镜观察用样品先经化学减薄, 再双喷电解减薄而成. 化学减薄液为体积比 3 : 5 : 5 的 $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HF} + \text{HCl}$ 溶液. 双喷电解液为 30% (体积比) 高氯酸乙醇溶液. 化学减薄在室温下进行, 而双喷电解减薄在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右进行.

2 实验结果与讨论

图 1 为合金冷却到 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的显微组织照片. 图 1a 中显示出 3 条相互平行的带状物, 且每一带状物沿长度方向隐约存在着间断区. 经电子衍射分析证实 (见图 1b), 带状物均为 ϵ_M . 由图 1c 显示的 ϵ_M 的暗场像可看出, ϵ_M

条明显是分成段落的, 即 ϵ_M 条沿长度方向分成了若干个相对独立的结构单元.

图 2a 显示了在试样另一观察区域发现的同一奥氏体晶粒中存在数个 ϵ_M 小条的照片. 经旋转试样可确定, 照片背景为母相层错带, 如图 2b 所示. 可以看出, 层错带非常宽大, 层错带间的取向不相互交叉, 而呈平行分布状态. 更为重要的是层错带与 ϵ_M 小条之间取向相交, ϵ_M 小条恰被层错带相隔开, 层错带或是 ϵ_M 小条的形成始端, 或是其生长终止处. 虽然照片中的 ϵ_M 小条呈现相对独立的分布状态, 但可依据 ϵ_M 小条间取向大体一致、在空间上有合并成一 ϵ_M 大条的趋势. 将 ϵ_M 小条分成 3 组 (图 2a 中 A, B 和 C). 从表面上看, 每组中的 ϵ_M 小条好像是由一个 ϵ_M 大条被层错带截开的小段, 然而 ϵ_M 与层错带之间不存在截切关系. 首先从两者形成先后次序来看, ϵ_M 是借助层错带重迭带而形成的; 其次, ϵ_M 本身很难变形^[9], 层错带不能将 ϵ_M 条截成数段. 因此可以判定图 2a 和 b 所显示的 ϵ_M 小条均为独立形核长大的产物, 即 ϵ_M 的相变单元. 由图 2 还可看出, 同一组中相邻两 ϵ_M 单元分立于同一条层错带两侧, 它们相对的端部位置很邻近, 且两者生长取向也平行. 这明显表示了 ϵ_M 单元之间具有因果形成关系, 而层错带是产生这一关系的纽带. 仔细观

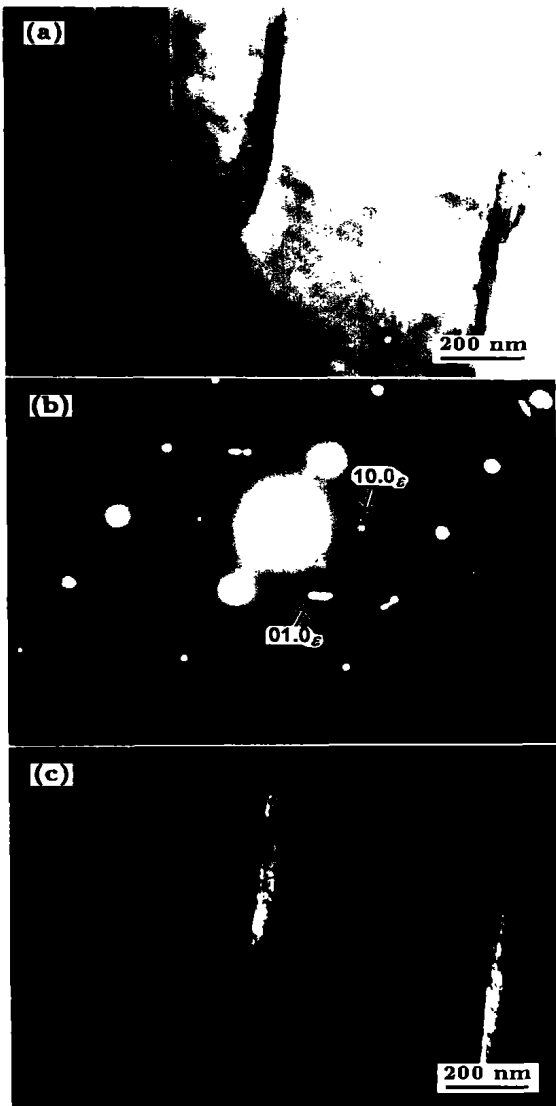


图 1 热诱发 ϵ_M 的形态像

Fig.1 Morphologies of thermo-induced ϵ martensite (ϵ_M) (a) bright field image (b) diffraction pattern (c) dark field image taken from 10.0ϵ

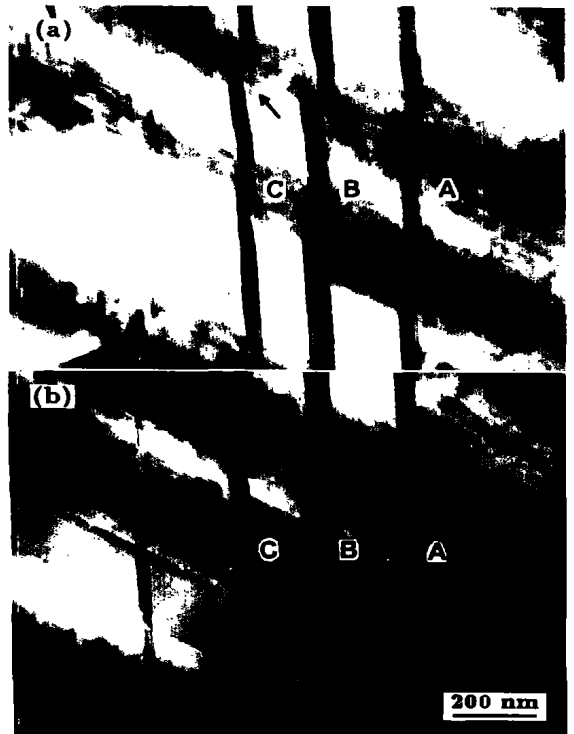


图 2 热诱发 ϵ_M 的单元结构像

Fig.2 The unit structure of thermo-induced ϵ_M (arrows indicating the ends of the ϵ_M units, letters A, B and C indicating three plates, consisted of the units) (a) morphology of the ϵ_M (b) morphology of the ϵ_M after tilting from Fig.2a

察 ϵ_M 端部形貌发现, 在单元体的端部或单元体与层错带相交处存在明显的应变场衬度 (见图 2a 的箭头指示处). 这说明当单元体生长到与层错带相交时可产生较大的交互作用, ϵ_M 单元的生长因而被终止. 然而交互作用却为新单元的形成贡献能量, 促进新单元在层错带上形核. 合金在 $-196\text{ }^\circ\text{C}$ 下层错有着充分的扩展和重迭^[10], 宽大层错带的存在正好有利于 ϵ_M 新单元的形核. 由此, 新单元被促发形成. 同时, 新单元的形成一方面消耗相交作用能, 以降低体系能量; 另一方面, ϵ_M 得以接续生长. 而平行分布的层错带体系也使得单元间的生长取向保持平行.

图 3 显示了一条较宽大 ϵ_M 的形貌像. 其形态特征如

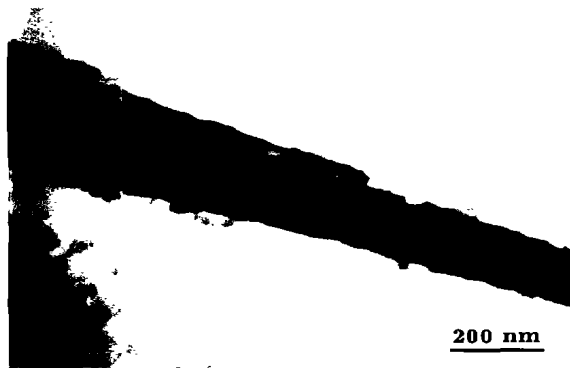


图 3 含有结构单元的长条 ϵ_M 的 TEM 像

Fig. 3 TEM morphology of a lath-like ϵ_M with the structural units

下: ϵ_M 条两侧边迹线不平直、且不连续; 沿 ϵ_M 的长度方向明暗相间的界面衬度条纹线走向也不连续. 这些特征明确反映了较长 ϵ_M 条由单元构成的事实. 可以认为, 由于各 ϵ_M 单元独立形核长大, 且在空间的生长方向不是绝对重合的, 所以由它们构成的 ϵ_M 大条侧边界必然不平齐, 且结构不连续.

3 结论

较长 ϵ_M 条由生长取向大致相同的单元体以首尾相接方式构成的事实说明, 在母相层错充分扩展和重迭、且层错带平行分布的状态下, 热诱发 ϵ_M 具有促发形核、接续长大的生长特性.

参考文献

- [1] Hsu T Y. *Sci Chin*, 1997; 27E: 289
(徐祖耀. 中国科学, 1997; 27E: 289)
- [2] Li J, Wayman C M. *Scr Metall Mater*, 1992; 27: 279
- [3] Kikuchi T, Kajiwara S, Yomota Y. *Mater Trans JIM*, 1995; 36: 719
- [4] Jiang B, Tadaki T, Mori H, Hsu T Y. *Mater Trans JIM*, 1997; 38: 1072
- [5] Guo Z, Rong Y, Chen S, Hsu T Y. *Mater Trans JIM*, 1999; 40: 325
- [6] Jiang B, Qi X, Yang S, Zhou W, Hsu T Y. *Acta Mater*, 1998; 46: 501
- [7] Yang J H, Wayman C M. *Mater Charact*, 1992; 28: 27
- [8] Yang J H, Wayman C M. *Mater Charact*, 1992; 28: 38
- [9] Sato A, Soma K, Mori T. *Acta Metall*, 1982; 30: 1901
- [10] Liu Q S, Ma Z H, Gu N J. *Metall Trans*, 1998; 29A: 1579