

热变形 TiAl 基合金中非平衡 α_2/γ 与 γ/γ_T 片层的精细结构^①

张立春 王金国 陈国良 叶恒强[†]

(北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

([†]中国科学院金属研究所, 沈阳 110015)

摘 要 利用常规和高分辨电镜(HREM), 研究了热形变 Ti-45Al-8Nb-2.5Mn-0.05B(摩尔分数)合金中偏离严格取向关系的 α_2/γ 片层与非严格孪晶关系的 γ/γ_T 片层以及这些非平衡片层界面的精细结构, 并提出了这些非平衡片层形成的可能位错反应机制。

关键词 TiAl 合金 α_2/γ 片层 γ/γ_T 片层 高分辨电镜

早期的研究^[1]指出, 两相 TiAl 基合金具有比单相 γ 合金更好的力学性能, 近期的研究^[2]又进一步指出, 经热机械处理(TMT, TMP 等)得到的全片层组织或近全片层组织可以大幅度改善合金的综合性能。在片层组织中 α_2 与 γ 两片层间一般保持严格的取向关系: $\{111\}_\gamma \parallel \{0001\}_{\alpha_2}$, $\langle \bar{1}10 \rangle_\gamma \parallel \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2}$, 由于 γ 相的四方性, γ 片层相对 α_2 片层具有几种可能的取向变体, 因而在片层组织中存在许多不同位向关系的 α_2/γ , γ/γ_T 界面, γ 相中伪孪晶界, 旋转畴界等^[3-5]。

迄今为止的研究工作^[2, 6, 7]把性能的改善归因于晶粒大小与片层间距的细化和合适的 α_2/γ 片层比例。Chen, Wang 等^[11-13]企图从更微观的尺度上了解热机械处理引起的结构变化, 他们的工作首次报道了在热形变 Ti-45Al-10Nb 合金中出现的许多非平衡态界面结构, 包括非对称 γ/γ_T 孪晶界与 α_2/γ 相界面, 偏离严格取向关系的特殊 α_2/γ 片层界面, 甚至出现具有新取向关系的 α_2/γ 片层界面, 还出现了形变诱导相变的现象, 这些结果把过去 Zhao^[6, 8, 9]和 Singh^[7-10]对平衡态界面位错结

构的研究推进了一步。

本文将进一步研究热形变 TiAl+ Nb 系两相合金中这种偏离严格取向关系的 α_2/γ 片层和非严格孪晶关系的 γ/γ_T 片层, 并讨论其形成机理。

1 实验方法

将名义成分为 Ti-45Al-8Nb-2.5Mn-0.05B 的合金, 用非自耗电炉熔炼后铸造, 再将合金铸锭进行近等温锻造处理。

将合金铸锭封入钢制包套中, 加热至 1250℃, 保温 0.5h, 然后进行热形变。锻压头预热温度为 1050℃, 形变速率为 $5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, 铸锭的一次变形量大于 40%, 锻造后空冷至室温。

电镜样品的制备采用标准双喷法(双喷液成分为: 300mL 甲醇, 175mL 正丁醇, 30mL-HClO₄)或离子减薄法制得。

在 JEM-200CX 以及 Philips-420 电镜上进行常规电镜观察, 在 JEOL-2000EX(II) 电镜上进行高分辨电镜观察。

2 实验结果及分析

图 1 展示此热形变合金片层组织中 $\gamma_B/\alpha_2/\gamma_D$ 结构的 $[11\bar{2}0]_{\alpha_2}$ HREM 成象, 沿着 $[111]_{\gamma}$ 或 $[0001]_{\alpha_2}$ 方向可以清楚地显示, γ_B/α_2 界面基本上平直, 而且 α_2 与 γ_B 之间保持严格的取向关系, 即 $(111)_{\gamma_B} \parallel (0001)_{\alpha_2}$; 而 α_2 与 γ_D 之间偏离严格的取向关系, 即 $(111)_{\gamma_D}$ 与 $(0001)_{\alpha_2}$ 沿 $[0\bar{1}1]_{\gamma_D}$ 方向有约 8° 的角差, α_2/γ_D 界面上出现大量的界面宽化与界面台阶现象。此偏离严格取向关系的 α_2/γ_D 片层的形成是由于在热压缩变形时合金组织仍处于 α/γ 片层组织状态, 其中 γ 片层是主要的形变区, α 与 γ 片层的形变不均匀性会导致 α 与 γ 片层的转动不均匀性, 从而使 α 与 γ 片层之间偏离了平衡态下最有利的相互取向关系, 而 α 片层在随后的空冷过程中通过有序-无序转变变成 α_2 片层。在 TEM 薄样制备过程中薄样膜面与锻压时的压轴方向平行, 所以图 1 中电子束方向, 即 $[0\bar{1}1]_{\gamma_D}$ 方向 (HREM 成象时电子束也大致与薄样膜面垂直) 基本上与压轴方向垂直, 这种取向关系也在一定程度上说明此偏离的 α_2/γ_D 片层是由于片层, 主要是 γ_D 片层在外压力作用下绕 $[0\bar{1}1]_{\gamma_D}$ 方向转动所致。

由于图 1 中 α_2/γ_D 界面大量位错引起的高应力使 HREM 成象很不清晰, 为了进一步

研究这种偏离严格取向关系的 α_2/γ 片层界面的位错结构, 我们分析偏离角差较小的 α_2/γ_C 的 HREM 成象, 如图 2 所示。由图可见, $(111)_{\gamma_C}$ 与 $(0001)_{\alpha_2}$ 沿 $[0\bar{1}1]_{\gamma_C}$ 方向有约 2.5° 的角差, 箭头所示处为一个界面台阶, 在每一个台阶处都存在 $1/3[111]_{\gamma}$ 型的 Frank 位错, 即在 γ_C 一侧具有明显的多余半原子面特征。这些大量含有 $1/3[111]$ 型 Frank 位错的界面台阶, 可使 α_2/γ 界面失去共格性, 改变了通常的取向关系, 界面位错台阶之间的距离为 d , $1/3[111]$ 型位错的柏格斯矢量 b 以及 α_2/γ 间偏离取向关系的角度 θ 之间应存在 $d = b/\tan \theta$ 的关系, 这样可计算出的 d 值平均约为 5.3 nm, 与 HREM 成象的测量结果基本一致 (见图 2)。

通过常规 TEM 分析, 片层组织中的 γ 片层存在 $1/2[110]$ 普通位错、 $\langle 101 \rangle$ 超位错等。如图 3 所示, γ 片层中存在许多排列规则、具有相同的 $b = 1/2[110]$ 的螺型位错列。这些位错是较大的热变形引进的大量具有完全相同 b 的位错。合金热形变过程中 γ 相位错首先发生滑移, 并有一些异号位错彼此湮没, 留下大量相同 b 位错将进一步运动, 当它们运动到具有许多位错和台阶的 α_2/γ 界面时, 与界面上的 HDS 位错, 如 $1/6\langle \bar{1}\bar{1}2 \rangle$, $1/6[\bar{1}2\bar{1}]$ 等 Shockley 不全位错产生如下的位错反应:

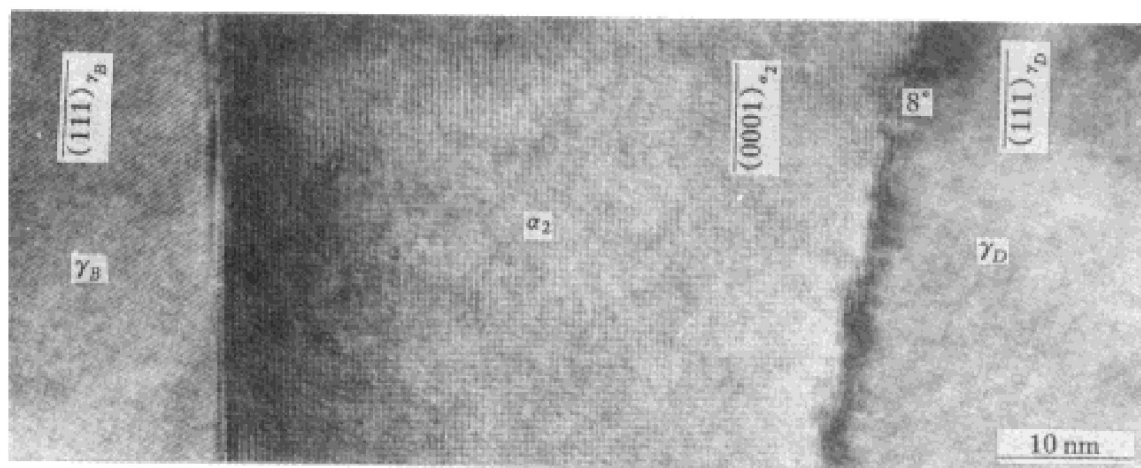
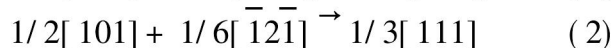
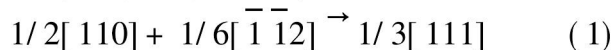


图 1 近等温锻态片层组织中 α_2/γ 界面的 HREM 像

α_2/γ 界面上位错和台阶作为 γ 片层 $1/2[110] < 101]$ 位错的“阱”，产生许多相同 $1/3[111]$ 型 Frank 界面位错，从而形成偏离严格取向关系的 α_2/γ 界面。随着 α_2/γ 界面大量 $1/3[111]$ 型位错的增多，偏离取向关系的角差将会增大。

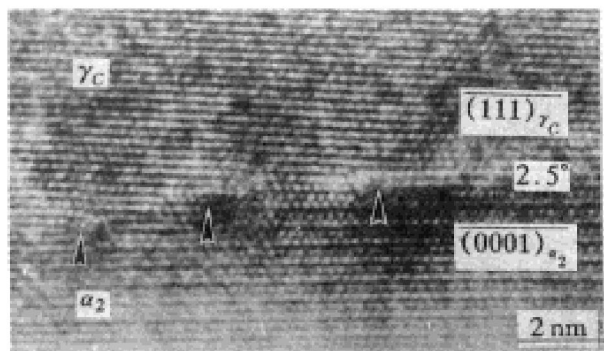


图2 $(111)_{\gamma_c}$ 与 $(0001)_{\alpha_2}$ 间偏离角度为 2.5° 的 α_2/γ_c 界面的 HREM 像

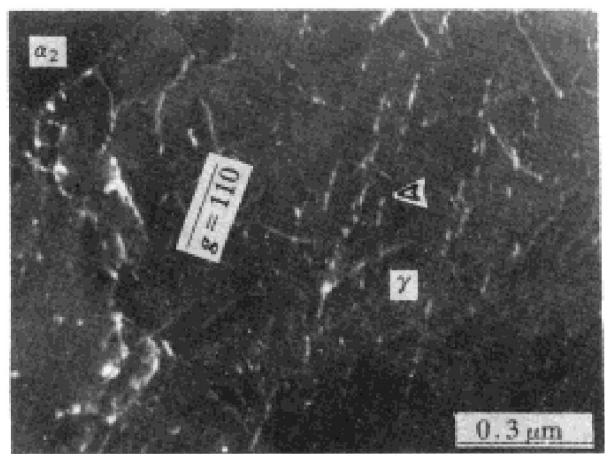


图3 γ 片层中存在的排列规则
是有相同 $b = 1/2[110]$ 的螺型位错列

图4(a)展示片层组织中非严格孪晶关系的 γ/γ_T 片层界面的 $[110]_{\gamma}$ HREM 成像，图4(b)、4(c)分别是图4(a)中 γ 、 γ_T 、 γ_T' 各变体 $[110]$ 带轴的合成电子衍射图(SEAD)及其标定，其中 γ/γ_T 、 γ/γ_T' 分别构成 $(111)[112]$ 与 $(111)[112]$ 孪晶关系。从 SEAD 及 HREM 成像可见， γ/γ_T' 保持严格的孪晶关系，而且界面十分平直，但 γ/γ_T 片层界面并不平直，具有很多界面台阶，而且 γ 、 γ_T 的 (111) 面并不

严格平行，约有 5° 的角差，这种非严格孪晶关系的 γ/γ_T 片层为一新发现。类似于上述偏离的 α_2/γ 片层，此 γ/γ_T 片层实际上也是由于 γ 与 γ_T 片层的形变不均匀性及在片层界面形成 b 均为 $1/3[111]$ 型 Frank 位错引起的。

通过大量的 TEM 观察表明，此合金片层组织中偏离严格取向关系的 α_2/γ 片层相对于非严格孪晶关系的 γ/γ_T 片层来说更为常见，而且偏离角度也较大，甚至会出现偏离很大的新取向关系的 α_2/γ 片层^[11]。其可能原因有两点：首先，这种偏离界面是由于 α_2/γ 、 γ/γ_T 片层的形变不均匀性引起片层之间的相对转动造成的， α_2/γ 片层的形变不均匀性主要是由于片层组织中 α_2 与 γ 片层不同的形变机制、 γ 片层为主要的形变区等内在因素所致，其中 α_2 薄片层可通过板条弯曲以协调应变，而 γ/γ_T 片层的形变不均匀性则主要可能是组织的不均匀性(合金组织为含有许多片层结构与少量 γ 等轴晶粒的近片层组织)、片层的不同应力状态等外部因素所致，因而 α_2/γ 片层的形变不均匀性应比 γ/γ_T 片层的形变不均匀性大得多。 α_2/γ 片层之间的偏离角度相应也大得多。其次， α_2/γ 、 γ/γ_T 片层界面结构变化对片层之间相对转动的协调能力也不相同，这是由于片层结构中 α_2/γ 界面存在许多协调 α_2 与 γ 两相间点阵失配度的 IIDs 位错，这些 IIDs 主要是 $1/2[110] \rightarrow 1/6[211] + \text{CSF} + 1/6[12\bar{1}]$ 的位错分解以及 $1/6[112]$ 型位错，它们在形变过程中可以与 α_2 或 γ 片层中的位错相互反应从而形成界面上的特殊位错网络^[6, 8, 9]；而 γ/γ_T 界面上却由于无点阵失配度不存在 IIDs 位错，只可能存在少量的多个原子面的生长台阶等^[7]，或在形变过程中 γ/γ_T 界面有可能先吸收运动位错再进行界面位错反应，这两类界面的不同性质决定 α_2/γ 界面相对于 γ/γ_T 界面而言，更有可能通过界面位错反应(1)与(2)产生更多的 $1/3[111]$ 型 Frank 位错，更易形成偏离严格取向关系角度较大的 α_2/γ 片层，从而更好地适应片层之间较大的相对转动。

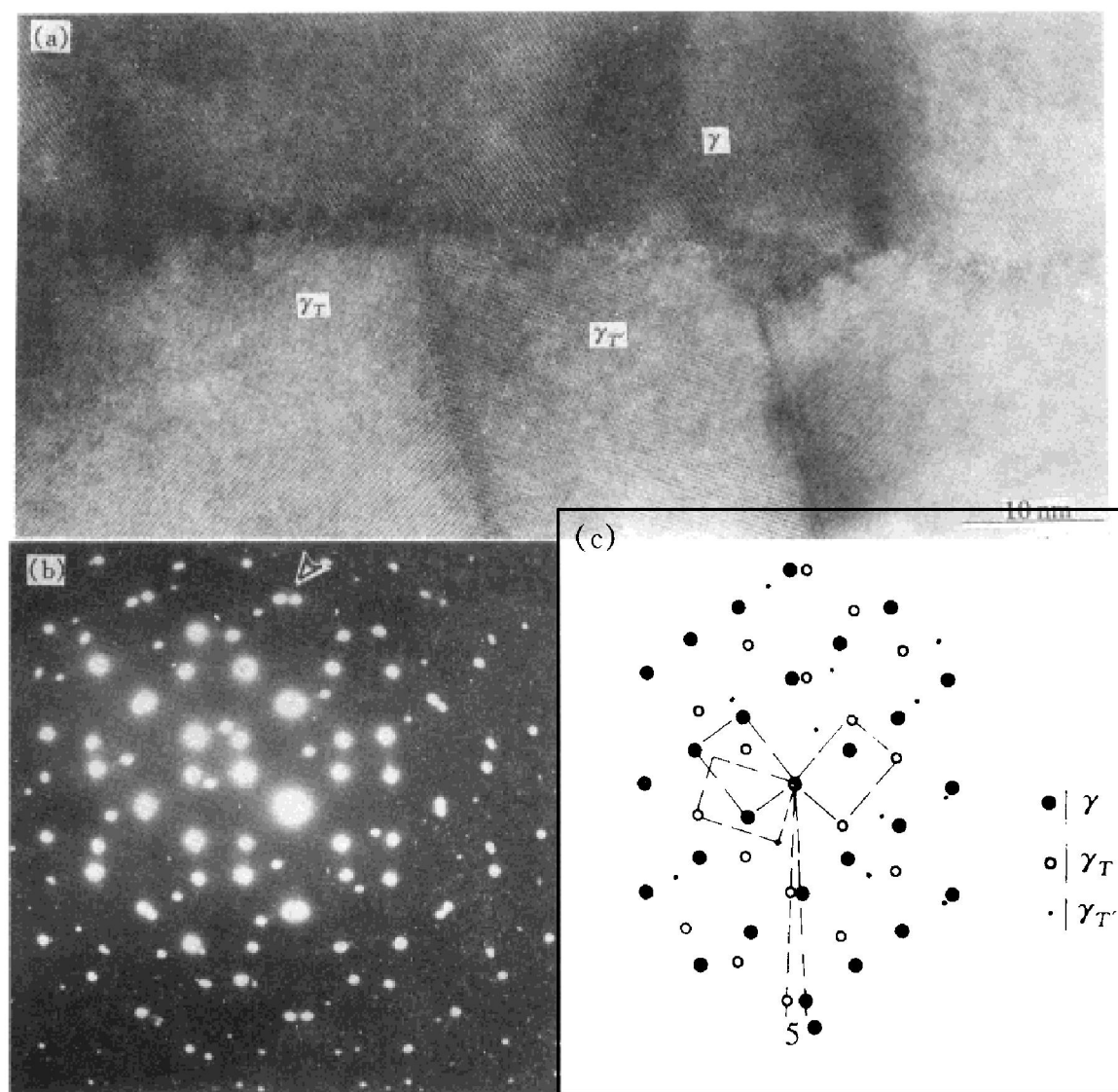


图4 近等温锻态片层组织中 γ/γ_T 界面的 HREM 象及

其中各变体的 $[1\bar{1}0]$ 轴的合成 SEAD 谱和标定示意图

(a) —HREM 象; (b) —(a) 中 γ , γ_T , γ_T' 各对应变体 $[1\bar{1}0]$ 带轴的合成电子衍射图(SEAD); (c) —SEAD 标定示意图

3 结论

(1) 热形变 Ti-45Al-8Nb-2.5Mn-0.05B 合金片层结构中存在偏离严格取向关系的 α_2/γ 片层与非严格孪晶关系的 γ/γ_T 片层。

(2) 这些非平衡态片层的界面通常含有大量的台阶, 有些台阶上具有 $1/3[111]$ 型 Frank 位错而使片层之间发生相对偏向, 正是由于这些非平衡态片层的界面上台阶以及 Frank 位错

结构的存在才使各片层间的形变不均匀性得到协调, 从而避免裂纹形成; 而界面上这些 Frank 位错应是 γ 片层中 $1/2[110]$, $\langle 101 \rangle$ 运动位错与 α_2/γ , γ/γ_T 界面上的 $1/6\langle 112 \rangle$ 型位错相互反应而形成的。

(3) 由于 α_2/γ 片层与 γ/γ_T 片层界面性质不同, α_2/γ 界面位错具有更大的应变协调能力, 因而热形变导致的非平衡 α_2/γ 片层界面的数量更多, 其片层偏离角度更大。

参考文献

- 1 Kim Y W. Mater Sci Eng, 1995, A192/193: 519.
- 2 Kim Y W. Acta Metall Mater, 1992, 40: 1121.
- 3 Feng C R, Michel D J, Crowe C R. Scr Metall, 1988, 22: 1481.
- 4 Feng C R, Michel D J, Crare C R. Scr Metall, 1989, 23: 1135.
- 5 Schwartz D S, Sastry S M L. Scr Metall, 1989, 23: 1621.
- 6 Zhao L, Tangri K. Phil Mag, 1992, A65: 1065.
- 7 Singh S R, Howe J M. Phil Mag, 1992, A65: 233.
- 8 Zhao L, Tangri K. Phil Mag, 1991, A64: 361.
- 9 Zhao L, Tangri K. Acta Metall Mater, 1991, 39: 2209.
- 10 Singh S R, Howe J M. Phil Mag, 1992, A66: 739.
- 11 Chen G L, Wang J G, Zhang L C *et al.* Acta Metallurgica Sinica, 1995, 8: 273.
- 12 王金国. 博士学位论文. 北京科技大学, 1994.
- 13 Zhang L C, Chen G L, Wang J G *et al.* Intermetallics, 1997, 5: 289.

FINE STRUCTURAL STUDY OF NONEQUILIBRIUM α_2/γ AND γ/γ_T LAMELLAR IN HOT-DEFORMED TiAl-BASED ALLOY

Zhang Lichun, Wang Jinguo, Chen Guoliang

*State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083*

Ye Hengqiang

Institute of Metals Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

ABSTRACT The α_2/γ lamellar deviating the strict orientation relationship and γ/γ_T lamellar without the strict twin relationship in a hot-deformed Ti-45Al-8Nb-2.5Mn-0.05B (mole percent) alloy were investigated by the conventional electron microscopy and high-resolution electron microscopy (HREM), as well as the fine structures on these nonequilibrium interlamellar interfaces. The possible dislocation reactions of the nonequilibrium interface formation were also supposed.

Key words TiAl-based alloy α_2/γ lamellar γ/γ_T lamellar HREM

(编辑 黄劲松)