

TiAl 基两相合金热形变诱导形成 T(Q) 型孪晶与 α_2 薄片的 TEM 研究^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固体原子象开放实验室, 沈阳 110015)

摘 要 利用常规和高分辨电镜(HREM), 研究了热形变诱导的 Ti-45Al-8Nb-2.5Mn-0.05B 合金中偏离严格取向关系的 α_2/γ 片层界面结构, 以及横过片层的 T(Q) 型 γ 孪晶与 $\alpha_2(Q)$ 薄片优先在这些偏离严格取向关系的 α_2/γ 片层界面上形成的机理。由于其片层界面上较大的应力集中, 通过界面上的复杂位错核心反应将导致这些 T(Q) 型 γ 孪晶与 $\alpha_2(Q)$ 薄层的产生。

关键词 TiAl 合金 α_2/γ 相界面 热形变诱导

γ -TiAl 基两相合金具有比单相 γ 合金更好的力学性能^[1]。两相合金中存在许多片层组织, 在片层组织中具有 α_2/γ , γ/γ_T 界面, γ 相中存在伪孪晶界、旋转畴界等, 这些界面可以起协调形变的作用^[2]。

最近的研究又指出热机械处理过程(TMT, TMP 等)可以进一步改善 TiAl 合金的综合性能^[3], 热机械处理过程中在上述各种界面上通过位错的吸收和发射, 不仅可以形成特殊的界面结构, 而且可以产生横过 γ 片层的位错发射与形变孪晶^[4, 5]。近期 Appel^[4] 与 Yang^[5] 等研究了此横过 γ 片层的 Q 型孪晶与 α_2/γ 界面的结构关系, 但这些孪晶的形成机理尚未完全弄清。

Chen, Wang 等^[6-7] 从更微观的尺度上研究了热机械处理引起的结构变化, 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, 在此基础上 Chen, Wang^[6] 等还讨论了

热形变过程中这些偏离片层及其界面的形成机理。

本文将报道热形变 TiAl+ Nb 系两相合金中存在的偏离严格取向关系的 α_2/γ 界面以及横过 γ 片层的形变孪晶与 α_2 薄片(以下称 T(Q) 型 γ 孪晶及 $\alpha_2(Q)$ 薄片)在这些界面上的形成, 并进一步讨论热形变过程中这些形变孪晶与 α_2 薄层的形成机理。

1 实验方法

合金化学成分为 Ti-45Al-8Nb-2.5 Mn-0.05B(摩尔分数, %), 采用非自耗电弧熔炼, 将合金铸锭进行近等温锻造处理(1200 °C保温 0.5 h, 锤温为 1050 °C, 变形量大于 80%), 锻造后缓冷至室温。切取电镜样品时其膜面与锻压时的压轴方向平行, 电镜样品的制备采用标准双喷法, 双喷液成分为: 300 ml 甲醇, 175 ml 正丁醇, 30 ml HClO₄, 然后用离子减薄。在 JEX-200CX 或 Philips-400T 电镜上进行常规电镜观察, 在 JEOL-2000EX(II) 电镜上进行高分

辩电镜观察。

2 实验结果及分析

由图 1 可见此热变形合金组织为含有许多非平衡的片层结构(图 1A 区)与少量 γ 等轴晶粒(图 1B 区)的近片层组织,在图 1 的非平衡片层组织中存在两种类型的形变孪晶薄层,一种为平行于原 γ 片层的形变孪晶,另一种为在一个 γ 片层内部形成的并与之成一定角度的形变孪晶,在此分别称之为 T(P) 型和 T(Q) 型孪晶薄层。由图 1 可见, T(Q) 型孪晶薄层集中分布在两个 γ 片层内部,其他 γ 片层内却无 T(Q) 型孪晶薄层。图 2(a) 为此合金片层组织中 T(Q) 型孪晶薄层的典型衍衬象,图 2(b) 为片层组织中 $\gamma_A/\alpha_2/\gamma_C$ (含 T(Q)) 的合成电子衍射谱,图 2(c) 为此合成电子衍射谱的标定,其中图 2(b) 及 2(c) 显示 γ_A 与 α_2 保持严格的最佳取向关系: $(111)_{\gamma_A} \parallel (0001)_{\alpha_2}$, $[\bar{1}10]_{\gamma_A} \parallel [\bar{1}1\bar{2}0]_{\alpha_2}$, 而 γ_C 与 α_2 之间则偏离了严格的晶体学取向关系,即 $(111)_{\gamma_C}$ 与 $(0001)_{\alpha_2}$ 沿 $[01\bar{1}]$ 方向有约 $3\sim 4^\circ$ 的角差。图 2(a) 另一重要特征是在 γ_C 片层中形成很多横过此片层的 T(Q) 型薄片,从图 2(c) 衍射谱标定中可知这是 γ_C

片层中另一孪生类型,即 $\{\bar{1}11\}[\bar{1}1\bar{2}]$ T(Q) 型形变孪晶,在图 2(a) 中与 α_2 片层保持一定取向关系的 γ_A 片层则没有 Q 型孪晶的生成,TEM 观察在同一片层组织中显示的这个特征说明 T(Q) 型孪晶可以优先在偏离严格取向关系的、具有较高界面应变能的 α_2/γ_C 片层界面上形成。从图 2(a) 还可见 γ_A/α_2 片层界面上很平直, α_2/γ_C 片层界面却是弯曲的,这可能是由于片层组织中这两类片层界面结构不同所致。

图 3 展示这种偏离严格取向关系, $(111)_{\gamma_C}$ 与 $(0001)_{\alpha_2}$ 面间偏离角度为 6° 的 α_2/γ_C 片层界面以及 γ_C 片层中 T(Q) 型孪晶的 HREM 像,由于 α_2/γ_C 界面存在大量位错引起的高应力使界面 HREM 像很不清晰。为了进一步研究这种偏离严格取向关系的 α_2/γ 片层的位错结构,我们可以分析偏离角差较小的 α_2/γ 片层的 HREM 像,如图 4 所示, $(111)_{\gamma_D}$ 与 $(0001)_{\alpha_2}$ 沿 $[01\bar{1}]_{\gamma_D}$ 方向有约 $2\sim 3^\circ$ 的角差,箭头所示一个界面台阶的存在(“C”位置),在每一个台阶处都存在 $1/3[111]_{\gamma}$ 型 Frank 位错,即在 γ_D 一侧具有明显的多余原子面特征。正是由于这些完全相同的 Frank 位错在界面上的规则排列使 α_2/γ 界面失去共格性,改变了通常的最佳取向关系,详细分析见文献[6]。随着 α_2/γ 界面 $1/3[111]_{\gamma}$ 型 Frank 位错的增多, α_2/γ 片层偏离严格取向关系的角度将会增大, α_2/γ 片层界面也会由共格向半共格,甚至向非共格界面转变^[6]。

研究^[6-7]指出在形变条件下,特别在高温形变条件下, α_2/γ , γ/γ_T 片层界面结构会通过各种界面位错反应产生很大变化,可以形成各种非平衡态界面,包括非对称的界面、倾斜型界面等界面结构,并出现多台阶界面结构,有些台阶处位错结构存在 $1/3[111]_{\gamma}$ 型 Frank 位错。Zhao 等^[2,8,9]对 α_2/γ 两相合金中的相界面结构研究表明, α_2/γ 界面上存在协调两相点阵失配度的内禀界面位错(IIDs)和来自 α_2 或 γ 片层的外禀界面位错(EIDs),这些 F

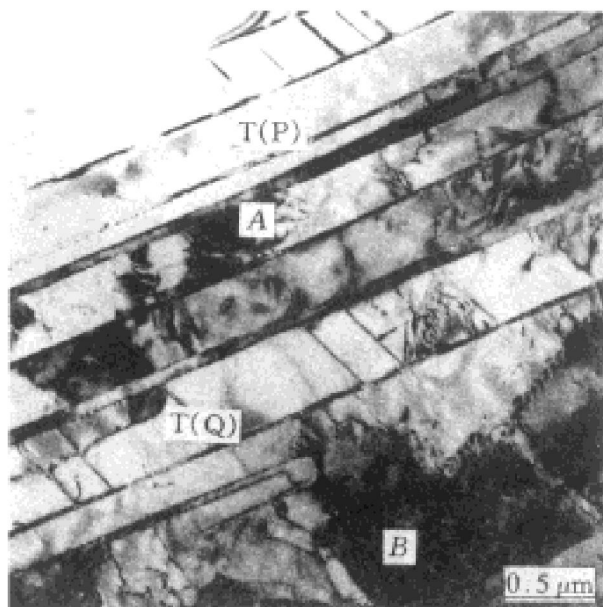


图 1 近等温锻态片层组织中的形变孪晶

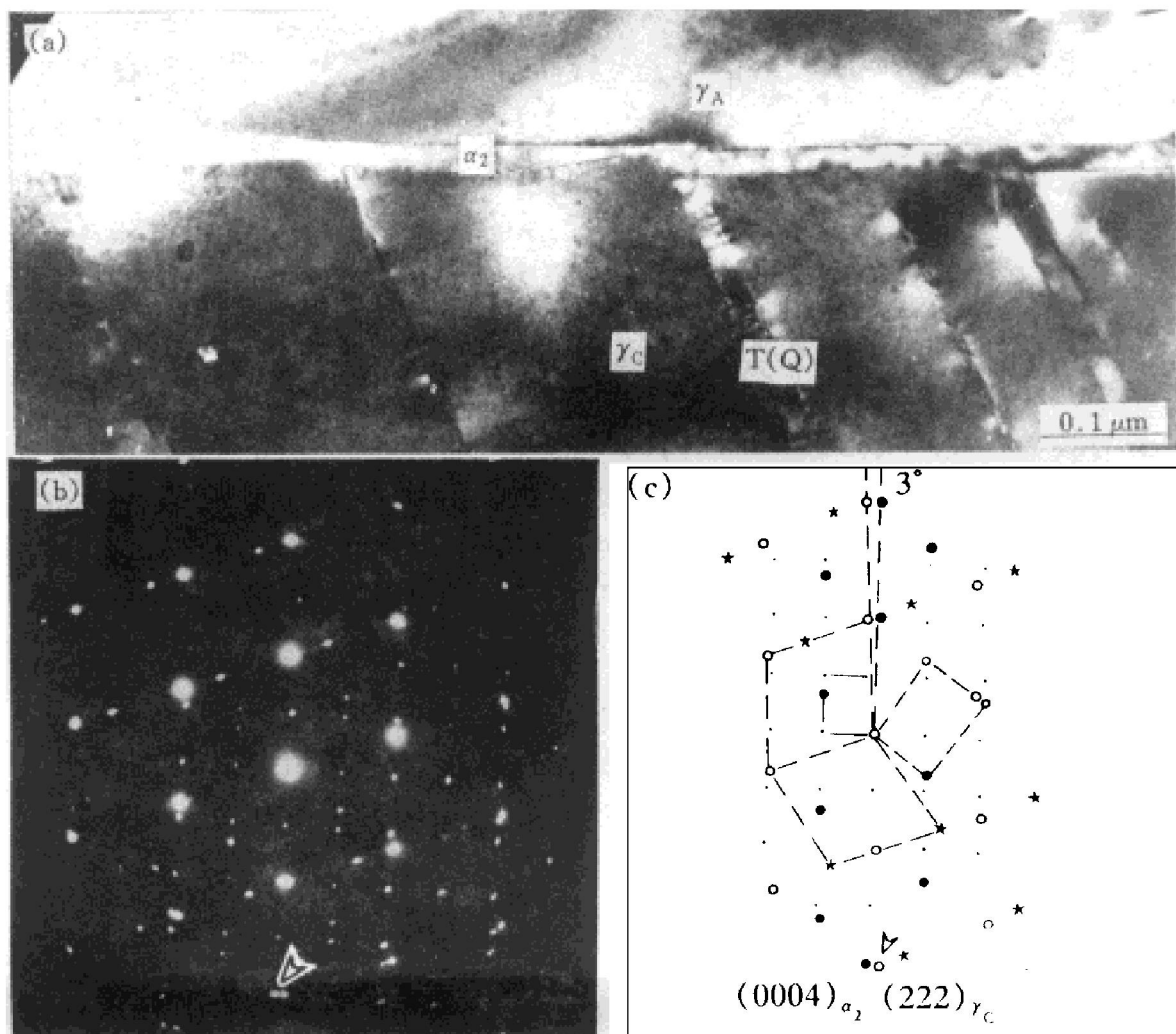


图 2 热形变合金衍射谱及其标定

- (a) 一近等温锻态片层组织中 T(Q) 型孪晶薄片典型的衍衬像;
 (b) 一片层组织中 $\gamma_A/\alpha_2/\gamma_C(T(Q))$ 的合成电子衍射图, (c) 一相应图 2(b) 的标定
 ●— γ_A ; ○— γ_C ; •— α_2 ; ★—T(Q)

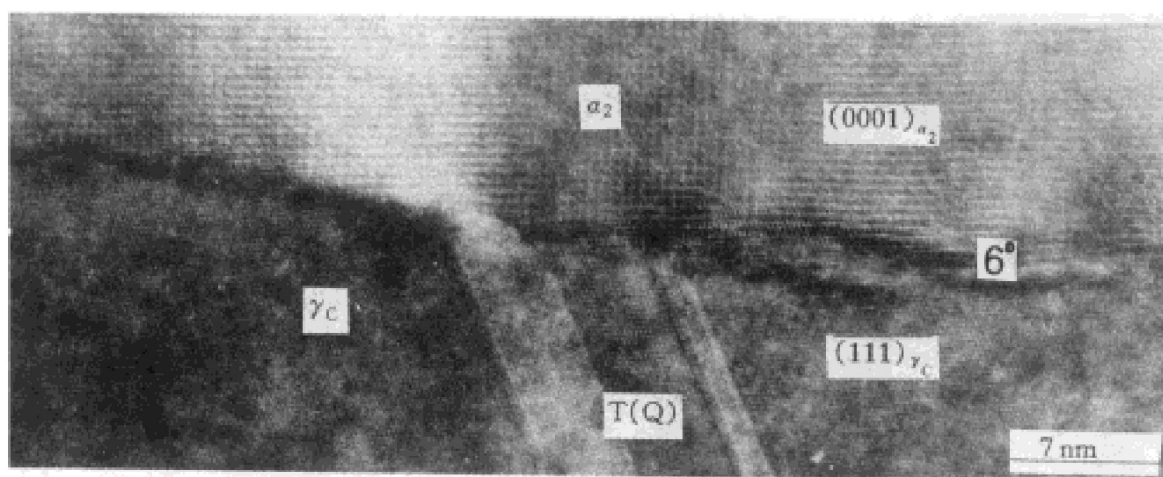


图 3 T(Q) 型孪晶在 $(111)_{\gamma_C}$ 与 $(0001)_{\alpha_2}$ 面间偏离角度为 6° 的 α_2/γ_C 片层界面上形成的 HRTEM 像

IDs 位错室温时主要是 $1/6\langle 11\bar{2} \rangle$ 型位错, 它们可以与 EIDs 位错相互反应而形成界面上的

位错网络, 合金在不同温度形变时会发生不同的界面位错及其界面反应。上述 $1/3[111]_{\gamma}$ 型 Frank 位错的形成应是下述位错反应的结果:

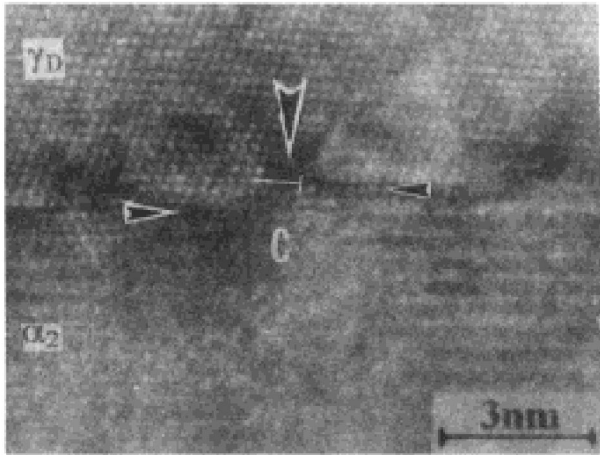
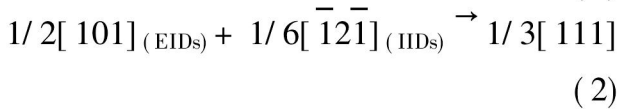
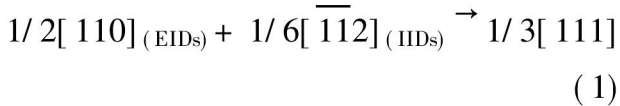


图4 $(111)_{\gamma_D}$ 与 $(0001)_{\alpha_2}$ 面间偏离角度为 $2\sim 3^\circ$ 的 α_2/γ_D 片层界面 HREM 像

上述提及的这种偏离严格取向关系的 α_2/γ_C 片层界面上含有许多 $1/3[111]_{\gamma}$ 型 Frank 位错, 会引起此 α_2/γ 界面成为片层组织中应力集中的区域。从图 3 与下述图 5 的 HREM 像可以看到由于较大的应力场而使 α_2/γ 片层界面附近的原子面发生弯曲。一方面, α_2/γ 片层界面的弯曲部分是由于 T(Q) 型孪晶薄层与

α_2/γ 界面撞击造成的; 另一方面, 外应力又将优先在应力场较大的 α_2/γ 界面上通过位错核心的复杂反应激活形成 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$ 孪晶, 即形成 T(Q) 型孪晶薄层。高温形变中界面位错核心复杂的位错反应过程有待于进一步研究。

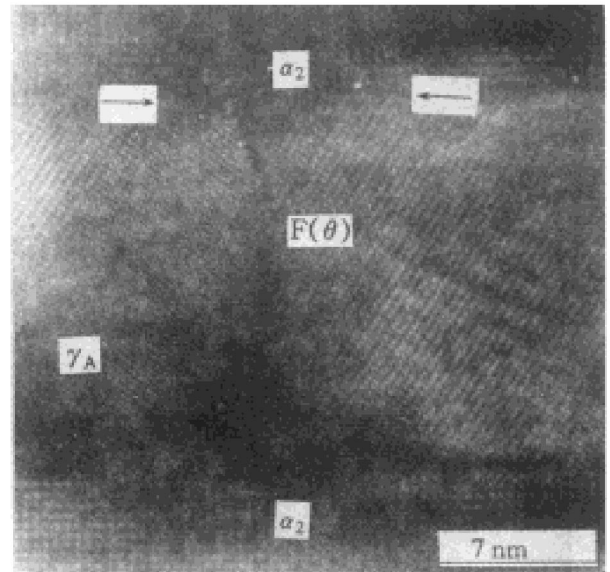


图5 F(Q) 型层错在保持严格取向关系的 α_2/γ_A 片层界面台阶上形成的 HREM 像

图 6 显示保持严格取向关系的 $\alpha_2/\gamma_A/\alpha_2$ 片层界面台阶上产生 F(Q) 型 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 层错, 此 F(Q) 型层错的形成应与界面台阶上位错反应相关, Yang 等^[5] 提出了一种与 α_2/γ 界面台阶相关的 F(Q) 型层错形成机理, 即通过 α_2/γ 片层界面上两个连续的 $(111)_{\gamma}$ 原子面的 $1/6[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]_{\gamma}$ 与 $1/6[\bar{1}\bar{2}\bar{1}]_{\gamma}$ 位错相互作用形成 $1/2[011]_{\gamma}$ 台

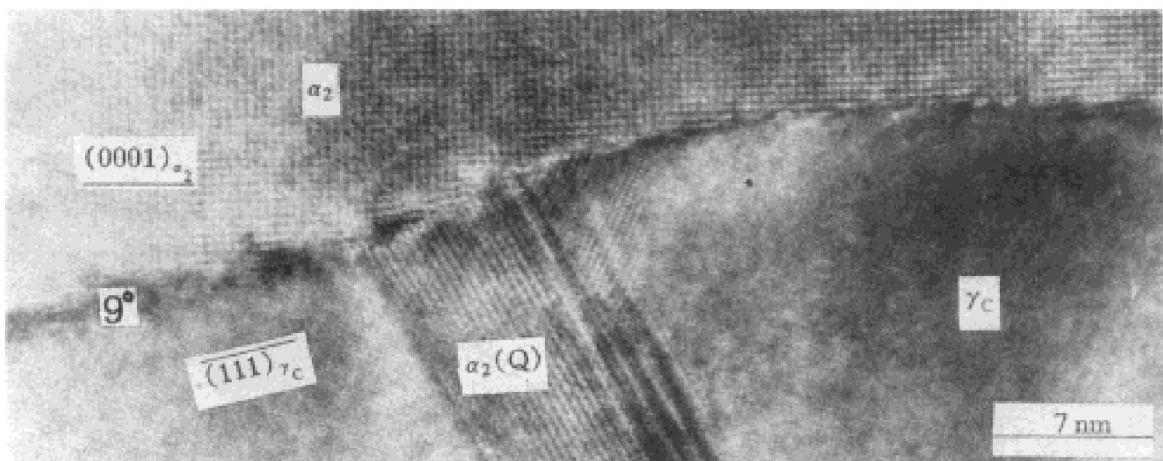
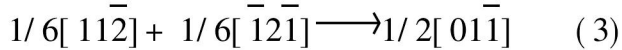


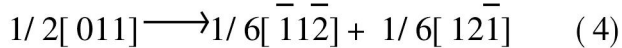
图6 $\alpha_2(Q)$ 型薄片在 $(111)_{\alpha_C}$ 与 $(0001)_{\alpha_2}$ 面间偏离角度为 9° 的 α_2/γ_C 片层界面上形成的 HREM 像

阶位错, 此台阶位错进一步分解成 $1/6[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]_{\gamma}$ 不全位错, 引起 $(\bar{1}11)_{\gamma}$ 原子面上沿 $[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]_{\gamma}$ 方向的原子错排, 从而引起 $F(Q)$ $(\bar{1}11)$ 层错的形成。此机理的主要反应式为

在 (111) 原子面上:



在 $(\bar{1}11)$ 原子面上:



TEM 观察表明在此严格取向关系的 α_2/γ 片层中 $F(Q)$ 型层错难以进一步变厚而成为 $T(Q)$ 型孪晶薄片。而在上述的偏离严格取向关系的 α_2/γ 片层内部却存在许多 $T(Q)$ 型孪晶薄片。除与偏离严格取向关系的 α_2/γ 片层界面较大的应力场有关外, 还可能与这种片层界面上具有的 $1/3[111]_{\gamma}$ 型 Frank 位错有关, 这些 Frank 位错可以在界面上引起 $1/6<\bar{1}\bar{1}\bar{2}>$ 孪生位错在连续的原子面上增生, 此机制类似于 Hug 与 Veyssiere 提出的 $\gamma(TiAl)$ 中孪生极轴机制^[10]。 $T(Q)$ 型孪晶的形成可能分 3 个阶段: (1) 这些 $1/6<\bar{1}\bar{1}\bar{2}>$ 型位错在相续 $(111)_{\gamma}$ 原子面上的位错反应可以形成 $(\bar{1}11)_{\gamma}$ 面上 $F(Q)$ 型层错; (2) 通过上述极轴机制进行 $(111)_{\gamma}$ 原子面上 $1/6<\bar{1}\bar{1}\bar{2}>$ 型位错的增生过程; (3) 然后通过上述 (3)、(4) 过程而使 $(\bar{1}11)_{\gamma}$ 面 $F(Q)$ 型薄片厚化成为 $(\bar{1}11)_{\gamma}$ 面 $T(Q)$ 型孪晶。

图 6 展示偏离严格取向关系, $(111)_{\gamma_c}$ 与 $(0001)_{\alpha_2}$ 面间偏离角度为 9° 的 α_2/γ_c 片层界面上形变诱导横过 γ_c 片层的薄片— $\alpha_2(Q)$ 型薄片生成的 HREM 像, 但在 γ_c 片层中这种 $\alpha_2(Q)$ 型薄片相对于 $T(Q)$ 型 γ 孪晶薄片较为少见。这说明在这种高应力区域的 α_2/γ_c 界面通过某些复杂的位错核心反应可以导致 $(\bar{1}11)_{\gamma}$ 面上 $1/6[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$ 孪生位错, 即 Q 型孪生位错的生成, 当 $1/6[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$ 孪生位错在每一层 $(\bar{1}11)_{\alpha_c}$ 原子面滑过时不仅可形成 $T(Q)$ 型 γ 孪晶薄片, 而且当 $1/6[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$ 孪生位错在每隔一层 $(\bar{1}11)_{\alpha_c}$ 原子面滑过时也可形成 $\alpha_2(Q)$ 型薄片。

即通过 Shockley 不全位错滑移与化学成分扩散两个过程, $\alpha_2(Q)$ 型薄片也可以在 γ 片层的层错上形成^[11]。Feng 等^[11] 在 XDTM 工艺的 TiAl 合金中也观察到类似 $\alpha_2(Q)$ 型薄片的形成。

3 结论

(1) 热锻 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。

(2) 由于 α_2/γ 片层界面上较大的应力集中, 因而形变将通过界面上的复杂位错核心反应优先诱导在这些 α_2/γ 片层内部形成横过片层的 $T(Q)$ 型 γ 孪晶与 $\alpha_2(Q)$ 薄片。

(3) $T(Q)$ 型 γ 孪晶与 $\alpha_2(Q)$ 薄片的形成可能与此片层界面上许多 $1/3[111]$ 型 Frank 位错有关, 这些 Frank 位错参与界面台阶上的位错反应而使 $F(Q)$ 型层错厚化成为 $T(Q)$ 型孪晶与 α_2 薄片。

参考文献

- 1 Sastry S M L, Lipsitt H A. Metall Trans, 1977, A8: 299.
- 2 Zhao L, Tangri K. Philos Mag, 1992, A65: 1065.
- 3 Kim Y W. Mater Sci Eng, 1995, A192/193: 519.
- 4 Appel F, Beaven P A, Wagner R. Acta metall Mater, 1993, 41: 1721.
- 5 Yang Y S, Wu S K. Philos Mag, 1993, A67: 463.
- 6 Chen G L, Wang J G, Zhang L C *et al.* Acta Metallurgica Sinica, 1995, 8(4-6): 273.
- 7 王金国. 博士学位论文. 北京科技大学, 1994.
- 8 Zhao L, Tangri K. Philos Mag, 1991, A64: 361.
- 9 Zhao L, Tangri K. Acta Metall Mater, 1991, 39: 2209.
- 10 Hug G, Veyssiere P. In: Messerschmidt U, Appel A, Heydenreich J and Schmidt U eds. in Electron Microscopy in Plasticity and Fracture Research of Materials. Berlin: Akademie, 1989: 451.
- 11 Feng C R, Michel D J, Crowe C R. Scr Metall Mater, 1989, 23: 241.

HOT-DEFORMATION-INDUCED T(Q) TWIN AND α_2 (Q) LATHS IN α -TiAl-BASED TWO-PHASE 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

*Laboratory of Atomic Imaging of Solids, Institute of Metal Research,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015*

ABSTRACT The interfacial structure of α_2/γ lamellae deviating the strict orientation relationship in a hot-forged Ti-45Al-10Nb-2.5Mn-0.05B (mole fraction, %) alloy and the preferential formation mechanism of T(Q)-type twin and α_2 (Q) laths at these interlamellar interfaces have been investigated by the conventional and high-resolution electron microscopy. The lath formation process involves complex transformations of the interfacial dislocation core and can be activated preferentially under concentrated stress fields at these interlamellar interfaces.

Key words TiAl alloy α_2/γ interface hot-deformation-induced

(编辑 黄劲松)