

## Ti-45Al-10Nb 合金 $\alpha_2+\gamma$ 层状结构中的 $\omega$ 相\*

宋海彬 孟祥敏 贺连龙 叶恒强

(中国科学院金属研究所固体原子像开放实验室, 沈阳 110016)

张卫军 陈国良

(北京科技大学新材料国家重点实验室, 北京 100080)

**摘 要** 利用高分辨电镜 (HREM) 观察了 Ti-45Al-10Nb(原子分数, %) 合金  $\alpha_2+\gamma$  层状结构中的  $\omega$  相. 发现  $\omega$  相与  $\alpha_2$  和  $\gamma$  片层存在着取向关系  $[0001]_{\omega} \parallel \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2} \parallel \langle 1\bar{1}0 \rangle_{\gamma}$ ,  $\{11\bar{2}0\}_{\omega} \parallel \{0002\}_{\alpha_2} \parallel \{111\}_{\gamma}$ . 同时, 观察到在片层中具有 B8<sub>2</sub> 结构的  $\omega$  相进一步转变为 D8<sub>8</sub> 结构的  $\omega^*$  相. 片层中可能存在着  $\alpha_2 \rightarrow \omega$  的直接转变.

**关键词** Ti-Al-Nb 合金,  $\omega$  相, 微结构, 相变

**中图分类号** TG113.12, TG146 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2001)08-0805-05

## $\omega$ -PHASE WITHIN $\alpha_2+\gamma$ LAMELLAR STRUCTURE IN Ti-45Al-10Nb ALLOY

SONG Haibin, MENG Xiangmin, HE Lianlong, YE Hengqiang

Laboratory of Atomic Imaging of Solids, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

ZHANG Weijun, CHEN Guoliang

State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100080

Correspondent: HE Lianlong, professor Tel: (024)23843531-55243, E-mail: lthe@imr.ac.cn

Manuscript received 2001-01-17, in revised form 2001-04-12

**ABSTRACT**  $\omega$ -phase in  $\alpha_2+\gamma$  lamellar structure of Ti-45Al-10Nb alloy (atomic fraction, %) was investigated by high resolution electron microscopy (HREM). The orientation relationship between  $\omega$  phase and  $\alpha_2+\gamma$  lamella was identified as  $[0001]_{\omega} \parallel \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2} \parallel \langle 1\bar{1}0 \rangle_{\gamma}$ ,  $\{11\bar{2}0\}_{\omega} \parallel \{0002\}_{\alpha_2} \parallel \{111\}_{\gamma}$ . The  $\omega$  phase with B8<sub>2</sub> structure further evolved to  $\omega^*$  phase with D8<sub>8</sub> structure in  $\alpha_2$  lamella. It is possible that  $\alpha_2 \rightarrow \omega$  direct transition occurred in lamellar structure.

**KEY WORDS** Ti-Al-Nb alloy,  $\omega$ -phase, microstructure, phase transformation

Ti-Al-Nb 合金因为具有良好的高温强度、抗蠕变和抗氧化能力等特点而有望成为在较高温度下使用的高温结构材料. 一些研究者对该合金系的相变问题进行了详细的研究, 在 Ti<sub>3</sub>Al-Nb 合金中发现了由 B2(*pm* $\bar{3}$ *m*) 到  $\omega''$ (*p* $\bar{3}$ *m*1), 最后形成具有 B8<sub>2</sub>(*p*6<sub>3</sub>/*m**m**c*) 结构的  $\omega$  相的转变. 以及 B8<sub>2</sub> 结构的  $\omega$  相到 D8<sub>8</sub>(*p*6<sub>3</sub>/*m**c**m*) 结构的  $\omega^*$  相转变<sup>[1,2]</sup>. 在 TiAl 基合金中, Nb 元素做为  $\beta$  稳定元素通常导致等轴的 B2 相和  $\omega$  相在层状结构晶粒间形成<sup>[3,4]</sup>. 由于  $\alpha_2+\gamma$  层状结构在 TiAl 基合金中的重要地位, 合金元素的加入对片层结构的影响, 特别是析出相在层状结构片层中析出, 引起了人们的广泛关注. 这些

析出相直接影响了材料的力学性能. 尤其是高温蠕变性能. 许多研究者报道了在 TiAl 基合金中由于  $\beta$  稳定元素的加入有 B2 相在  $\alpha_2$  片层中的析出<sup>[5-7]</sup>. 虽然 B2 相易于转变为  $\omega$  相, 但在 TiAl 基合金片层中形成  $\omega$  相尚未见报道. Inkson 等人<sup>[6]</sup> 认为 TiAl 基合金片层中的 B2 相是稳定的.

本文通过高分辨电子显微术 (HREM) 对 TiAl-10Nb 合金  $\alpha_2+\gamma$  层状结构的微结构进行了观察, 旨在研究层状结构中的析出相在高 Nb 含量的 TiAl 合金中的析出形态及其与合金性能的关系. 在层状结构中发现了  $\omega$  相, 并对它的取向、结构和形成机制进行了讨论.

### 1 实验方法

采用磁搅拌非自耗电弧熔炼方法制备 TiAl 高 Nb 合金. 原料为高纯 Ti(99.9%), Al(99.9%), Nb(99.9%). 铸态合金的名义成分 (原子分数, %) 为 45Ti, 45Al

\* 国家自然科学基金资助项目 59895156

收到初稿日期: 2001-01-17, 收到修改稿日期: 2001-04-12

作者简介: 宋海彬, 男, 1975 年生, 硕士生

和 10Nb. 为了得到近片层组织, 将铸锭用钢箔包裹, 经 1350 °C 保温 15 min 后炉冷, 将所得合金锭切成薄片, 机械减薄至 100 μm, 然后用双喷法制得电镜样品. 实验观察在 JEOL2010 高分辨电镜和 HF-2000FEG 透射电镜上进行. 电镜的工作电压均为 200 kV.

### 2 实验结果与讨论

Ti-45Al-10Nb 合金主要由  $\alpha_2$ ,  $Ti_3Al$  和  $\gamma$  TiAl 形成的层状组织构成, 此外有少量的块状  $\gamma$  品粒. 在层状结构晶粒间有等轴状的  $\omega$  相和 B2 相存在. 与 Nakamura 等 [3] 和 Cheng 等 [4] 的观察结果一致.  $\omega$  相的结构分析表明, 存在着由 B2  $\rightarrow \omega$  转变形成的旋转畴和平移畴结构 [1, 4].

图 1a 为  $\gamma$  片层发生粗化的  $\alpha_2 + \gamma$  层状结构, 可以看到  $\alpha_2$  片层并不是连续的, 沿着  $\alpha_2$  片层有析出物存在. 见图 1a 中两箭头间的区域. 根据选区电子衍射谱, 该析出物为  $\omega$  相, 其晶格常数为  $a=0.458$  nm,  $c=0.552$  nm [1]. 图 1b 为  $\omega$  相的  $[11\bar{2}6]$  取向的衍射谱. 由于实验样品是退火后缓慢冷却得到的, 因此,  $\omega$  相具有稳定的 B2 结构 [1, 8]. 图 2a 为  $[0001]_\omega \parallel (11\bar{2}0)_{\alpha_2} \parallel [1\bar{1}0]_\gamma$  取向

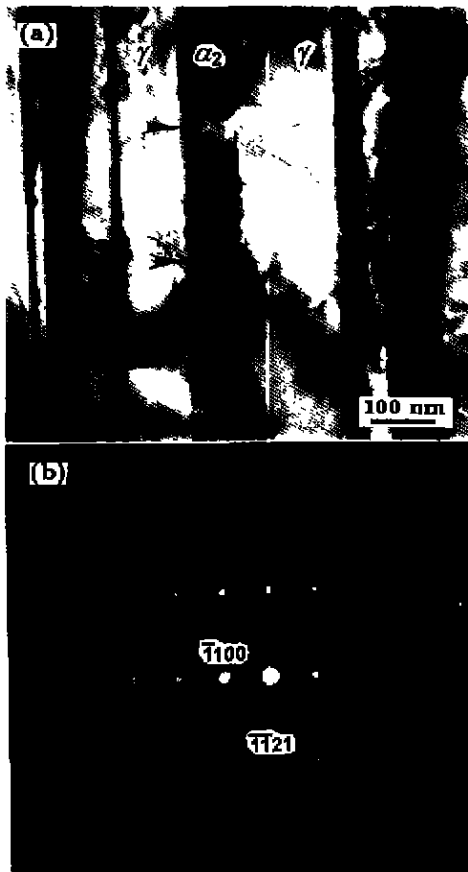


图 1  $\alpha_2 + \gamma$  层状结构中的  $\omega$  相

Fig.1 Morphology (a) and  $[11\bar{2}6]_\omega$  electron diffraction pattern (b) of  $\omega$  phase within  $\alpha_2 + \gamma$  lamella

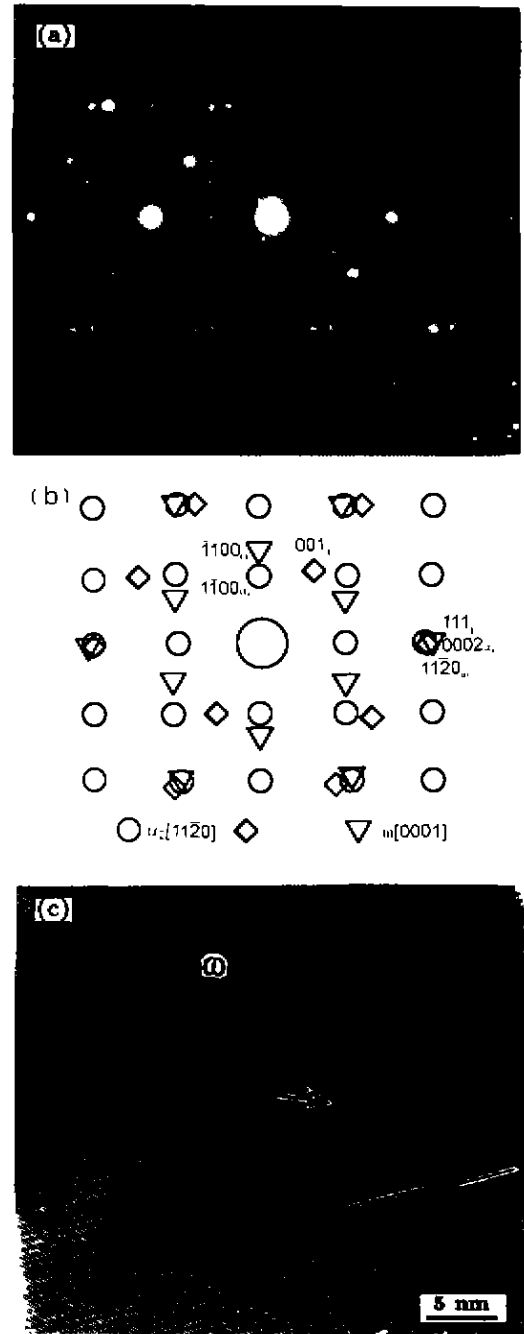


图 2  $\omega$ ,  $\alpha_2$ ,  $\gamma$  三相复合电子衍射图及  $\omega$  相的高分辨像

Fig.2 Composite EDP of  $\alpha_2$ ,  $\gamma$  and  $\omega$  phases (a), its indexing (b) showing  $(11\bar{2}0)_{\alpha_2} \parallel [1\bar{1}0]_\gamma \parallel [0001]_\omega$  orientation relationship, and  $[0001]_\omega$  HREM image of  $\omega$  phase (c)

$\omega$ 、 $\alpha_2$  和  $\gamma$  相的复合电子衍射谱, 图 2b 是相应的图示说明. 可以看出三相具有如下取向关系  $[0001]_\omega \parallel (11\bar{2}0)_{\alpha_2} \parallel [1\bar{1}0]_\gamma$ ;  $\{11\bar{2}0\}_\omega \parallel (0002)_{\alpha_2} \parallel (111)_\gamma$ . 图 2c 为对应于图 2a 取向的  $\omega$  相的高分辨像, 箭头所示是一平移畴界. 根据选区电子衍射谱和高分辨像观察, 在该析出物中没有发现其它取向的  $\omega$  相.

图 3a 中两箭头之间的区域为在另一  $\alpha_2+\gamma$  层状结构片层中的  $\omega$  析出相. 图 3b 为相应的  $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2} \parallel [1\bar{1}0]_{\gamma} \parallel [6\bar{6}05]_{\omega}$  取向  $\alpha_2$ 、 $\gamma$  和  $\omega$  相的复合衍射谱. 由此可以得出三者的取向关系为  $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2} \parallel [1\bar{1}0]_{\gamma} \parallel [6\bar{6}05]_{\omega}$ ,  $(0002)_{\alpha_2} \parallel (111)_{\gamma} \parallel (11\bar{2}0)_{\omega}$ . 这一取向关系表示的  $\alpha_2$  和  $\omega$  相的关系与图 2a 中给出的并没有不同. 这是因为  $\omega$  相的  $[0001]_{\omega}$  和  $[6\bar{6}05]_{\omega}$  之间的夹角为  $59.89^\circ$ , 均在  $(11\bar{2}0)_{\omega}$  面内, 且  $(0001)_{\alpha_2} \parallel (11\bar{2}0)_{\omega}$ . 对于  $\alpha_2$  相而言, 考虑到其对称性, 在  $(0001)_{\alpha_2}$  面上, 六个  $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2}$  是等价的, 相邻晶向间成  $60^\circ$  夹角. 因此, 在此取向关系下, 实际上是  $\omega$  相的  $[0001]_{\omega}$  平行于  $\alpha_2$  相的另一个  $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2}$ , 也就是说将该衍射谱保持  $(0002)_{\alpha_2}$ 、 $(11\bar{2}0)_{\omega}$  列衍射斑不动, 转动  $60^\circ$  到  $\omega$  相的  $[0001]_{\omega}$  取向, 同时  $\alpha_2$  相也转到了另一个  $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2}$  取向, 从而得出图 2a 中  $\alpha_2$  和  $\omega$  相的取向关系. 另外,  $\gamma$  相具有  $L1_0$  结构,  $c/a$  接近于 1, 沿  $c$  轴方向 Ti、Al 原子相间占据不同的  $(001)_{\gamma}$ , 在  $(111)_{\gamma}$  面上  $[1\bar{1}0]_{\gamma}$  与另外两个  $\langle 01\bar{1} \rangle_{\gamma}$  方向是不等价的. 因此, 在图 3b 取向关系下, 当  $\gamma$  相绕  $(111)_{\gamma}$  的法线与  $\alpha_2$ 、 $\omega$  相共同转动  $60^\circ$  时,  $\gamma$  相会转到  $(111)_{\gamma}$  面上的  $\langle 01\bar{1} \rangle_{\gamma}$  取向, 出现  $[0001]_{\omega} \parallel \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2} \parallel \langle 01\bar{1} \rangle_{\gamma}$ ,  $(11\bar{2}0)_{\omega} \parallel (0002)_{\alpha_2} \parallel (111)_{\gamma}$  的取向关系. 因此, 结合

图 2a 中的取向关系可以把  $\alpha_2$ 、 $\gamma$  和  $\omega$  三相的取向关系综合表示为  $[0001]_{\alpha} \parallel \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2} \parallel \langle 1\bar{1}0 \rangle_{\gamma}$ ,  $\{11\bar{2}0\}_{\omega} \parallel (0002)_{\alpha_2} \parallel \{111\}_{\gamma}$ . 图 3c 是在  $\omega$  相的  $[1\bar{2}1\bar{3}]_{\omega}$  取向, 用  $10\bar{1}0_{\omega}$  衍射斑拍摄的暗场像

图 3c 中可见一块小的区域为具有  $D8_8$  结构 ( $p6_3/mcm$ ) 的  $\omega^*$  相<sup>[2,9]</sup>, 见图中箭头所示析出物的一角. 由于在  $Ti_3Al-Nb$  合金中存在着  $B8_3 \rightarrow D8_8$  结构转变<sup>[2]</sup>, 该  $\omega^*$  相的存在说明了在  $\alpha_2+\gamma$  层状结构片层内部发生了具有  $B8_2$  结构的  $\omega$  相向  $D8_8$  结构的  $\omega^*$  相的转变. 图 3d 为  $\alpha_2$ 、 $\omega$  和  $\omega^*$  三相的复合衍射谱, 其中  $\omega^*$  相的晶带轴为  $[1\bar{1}2\bar{6}]_{\omega^*}$  取向,  $\omega$  相和  $\alpha_2$  相的晶带轴分别接近于  $[10\bar{1}2]_{\omega}$  与  $[14\bar{5}6]_{\alpha_2}$ . 图 4 为相应的高分辨像. 根据 Bendersky 等<sup>[2]</sup> 和 Shao 等<sup>[9]</sup> 研究结果,  $\omega$  和  $\omega^*$  相晶格常数之间满足  $a_{\omega^*} = \sqrt{3}a_{\omega}$ ,  $c_{\omega^*} = c_{\omega}$ , 取向关系为  $[0001]_{\omega} \parallel [0001]_{\omega^*}$ ,  $(10\bar{1}0)_{\omega} \parallel (11\bar{2}0)_{\omega^*}$ , 因此,  $(\bar{1}100)_{\omega}$  面平行于  $(\bar{1}2\bar{1}0)_{\omega^*}$  面, 在倒空间中,  $\bar{3}300_{\omega}$  衍射斑应该与  $\bar{1}2\bar{1}0_{\omega^*}$  衍射斑重合, 但是这并不与图 3d 中所示相符合. 图 3d 中两竖线分别指示  $24\bar{2}0_{\omega}$  与  $\bar{6}600_{\omega}$  衍射斑, 它们的间距间接反映了  $\bar{1}2\bar{1}0_{\omega^*}$ 、 $\bar{3}300_{\omega}$  衍射斑在位置上的差别. 假定  $a_{\omega^*}$  约有 3% 的收缩, 即  $a_{\omega^*} = \sqrt{3}a_{\omega} \cdot 97\%$ ,  $c_{\omega^*} = c_{\omega}$ , 解释上述差异.  $B8_2$  结构和  $D8_8$

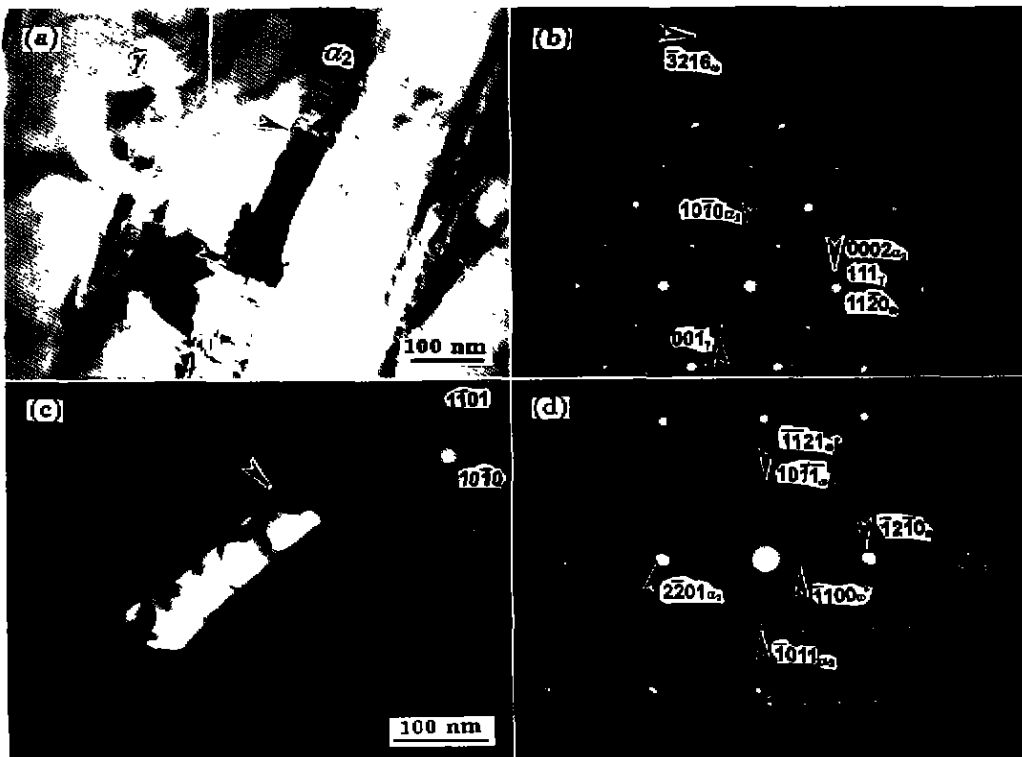


图 3  $\alpha_2+\gamma$  层状结构中的  $\omega$  及  $\omega^*$  相

Fig.3 (a) BF image of  $\omega$  phase within lamella, (b) composite EDP of  $\alpha_2$ ,  $\gamma$  and  $\omega$  phases in  $\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2} \parallel [1\bar{1}0]_{\gamma} \parallel [6\bar{6}05]_{\omega}$  orientation (c) DF image of  $\omega$  phase taken from  $10\bar{1}0_{\omega}$  in  $[1\bar{2}1\bar{3}]_{\omega}$  zone axis (see the inset and  $\omega^*$  phase indicated by arrow and (d) composite EDP of  $\alpha_2$ ,  $\omega$  and  $\omega^*$  phases in  $[1\bar{1}2\bar{6}]_{\omega^*}$  orientation, close to  $[10\bar{1}2]_{\omega}$  and  $[14\bar{5}6]_{\alpha_2}$

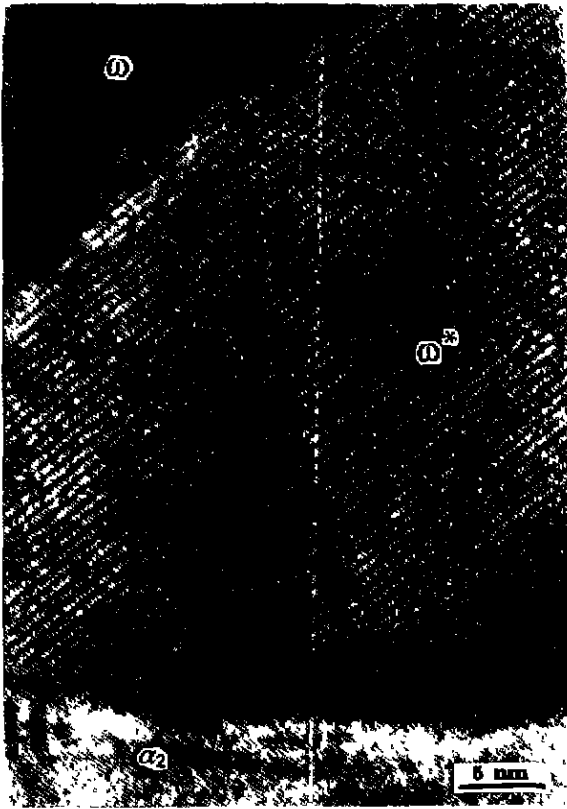


图4 对应于图3d取向的 $\omega^*$ 、 $\omega$ 和 $\alpha_2$ 相的HREM像

Fig.4 HREM image of  $\omega^*$ ,  $\omega$  and  $\alpha_2$  phases corresponding to Fig.3 d orientation

结构的主要差别在于 Wyckoff 位置 2b 是否被占据<sup>[2,10]</sup>。既然  $B2 \rightarrow D8_8$  结构转变是随温度降低向更松散的结构转变。 $\omega^*$  相 a 轴的收缩可能不仅反映了转变过程中成份的重新分布,也可能反映了电子能级的变化,使原子尺寸变小<sup>[11]</sup>。在这段析出物中, $\omega^*$  相是由  $\omega$  相转变来的,而根据  $\omega$  与  $\omega^*$  相的取向关系<sup>[2,9]</sup>和分析图 3d 复合衍射谱,可知向  $\omega^*$  相转变的  $\omega$  相应与这段析出物中未发生转变的  $\omega$  相有相同取向。 $\omega^*$  相位于  $\alpha_2$ 、 $\gamma$  及  $\omega$  三相的接合处,可能是因为较多界面空位的存在诱发了  $D8_8$  结构的  $\omega^*$  相的形成。沿着同一  $\alpha_2$  片层,另一  $\omega$  析出相被观察到,见图 5a 中无尾箭头所示。 $\alpha_2$  与  $\gamma$  片层仍保持如图 5b 中的取向, $\omega$  析出相与  $\alpha_2$ 、 $\gamma$  片层的取向关系如图 5b 衍射谱所示,可以看出  $\omega$  相  $[0001]_{\omega}$  取向六角衍射点阵有轻微扭曲,见图 5b 中两箭头所示的  $\omega$  相衍射斑列并不相互垂直,这说明可能存在有图 2a 所示取向关系的六方  $\omega$  相通过基面扭曲向正交结构转变。

TiAl 基金层状结构中析出 B2 相的形态、取向关系等已经有了较详细的研究报道<sup>[5-7]</sup>,而关于在  $\alpha_2 + \gamma$  层状结构片层中  $\omega$  相析出则未见报道。在 Ti-Al 系金中,从结构转变的角度,通常认为  $\omega$  相是 B2 相沿其某一

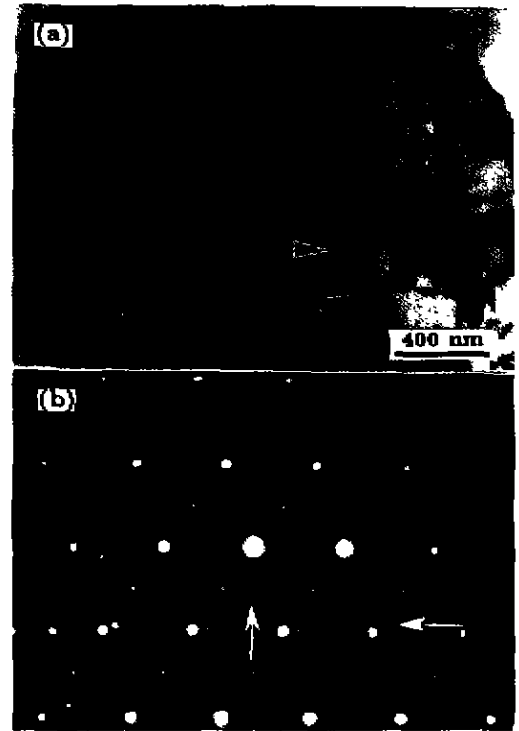


图5 同一  $\alpha_2$  片层中的另一取向  $\omega$  相(与图3对比)

Fig.5  $\omega$  phase with an orientation different from that of  $\omega$  phase showed in Fig 3 (both  $\omega$  phase being within the same  $\alpha_2$  lamella)

(a) morphology of  $\omega$  phase within lamella

(b) composite EDP of  $\alpha_2$ ,  $\gamma$  and  $\omega$  phases in  $(11\bar{2}0)_{\alpha_2} // (1\bar{1}0)_{\gamma}$  orientation (the  $[0001]_{\omega}$  EDP of  $\omega$  phase being distorted, as shown as arrows)

$[111]$  方向,部分  $(111)$  面压缩,即相邻的两个  $(111)$  面上的原子沿  $[111]$  方向压缩,而与这两个面相邻的  $(111)$  面保持不变形成的,它们之间的取向关系为  $[0001]_{\omega} // [111]_{B2}$ ,  $(11\bar{2}0)_{\omega} // (1\bar{1}0)_{B2}$ 。由于 B2 相有四个  $\langle 111 \rangle$  晶向,因此  $B2 \rightarrow \omega$  转变可以产生四种  $\omega$  相旋转畴,当其中一个旋转畴的取向为  $[0001]_{\omega}$  时,其它旋转畴的取向应为  $\langle 2\bar{2}01 \rangle_{\omega}$ ,而  $[0001]_{\omega}$  与  $\langle 2\bar{2}01 \rangle_{\omega}$  之间的夹角为  $70.5^\circ$ <sup>[1]</sup>。另一方面, $\alpha_2$  片层中的 B2 相可以通过残留的高温  $\beta$  相有序化或  $\alpha_2 \rightarrow B2$  转变而得到<sup>[5,6]</sup>。对于本实验所观察的结果,如果片层中的  $\omega$  相都是由残留的高温  $\beta$  相  $\rightarrow B2 \rightarrow \omega$  转变而形成的,在同一晶粒中的 B2 相应有相同的取向<sup>[6]</sup>,通过  $B2 \rightarrow \omega$  转变而形成的  $\omega$  相在有  $[0001]_{\omega}$  取向,其它取向的  $\omega$  相应为  $\langle 2\bar{2}01 \rangle_{\omega}$  取向,这是与实验观察不相符的。在本实验中,在同一  $\alpha_2$  片层中发现两段分别具有不同取向的析出相,图 5b 中的  $\omega$  相虽然  $[0001]_{\omega}$  基面存在扭曲,但基面的法线方向未发生变化,应与初始未扭曲的  $\omega$  相  $[0001]_{\omega}$  取向平行,而图 3b 是同一  $\alpha_2$  片层内的另一取向的  $\omega$  相,取向为  $[6\bar{6}05]_{\omega}$ ,而不是  $\langle 2\bar{2}01 \rangle_{\omega}$  取向,这说明这两段析出相不会都是由残

留的高温  $\omega$  相转变来的。在片层中存在有  $\alpha_2$  相向  $\omega$  相的转变, 相变途径可能是  $\alpha_2 \rightarrow B2 \rightarrow \omega$  转变或  $\alpha_2 \rightarrow \omega$  的直接转变。在析出物中只观察到一种旋转畴而没有观察到 B2 相和由 B2 相向  $\omega$  相转变形成的其它旋转畴, 见图 3c 暗场像所示, 可能说明在片层中发生了  $\alpha_2 \rightarrow \omega$  的直接转变, 而没有 B2 相作为中间过渡相出现。另外, 通过消耗片层中的  $\alpha_2$  相得到  $\omega$  相不能解释观察到的  $\omega$  析出相较大地偏离  $\alpha_2$  片层的情况, 如图 6 所示。综合上述分析, 可以认为片层中的  $\omega$  相是分别由  $\alpha_2$  相向  $\omega$  相转变和高温残留的  $\beta$  相向  $\omega$  相转变两种途径得到的。

$\alpha_2$  相向  $\omega$  相转变和高温  $\beta$  相的残留可能是  $\beta$  稳定元素 Nb 偏析引起的。析出相附近  $\gamma$  片层的粗化可能促进 Nb 向邻近的  $\alpha_2$  片层偏析, 有利于  $\omega$  相的形成。

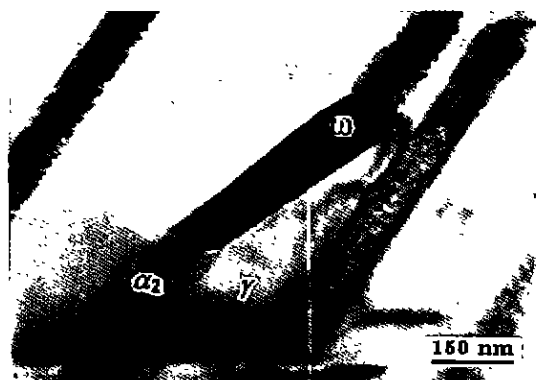


图 6 偏离  $\alpha_2$  片层生长的  $\omega$  相  
Fig.6  $\omega$  phase deviating from  $\alpha_2$  lamella

### 3 结论

(1) 在 TiAl-10Nb 合金  $\alpha_2+\gamma$  层状结构中发现有  $\omega$  相存在。片层中的  $\omega$  相与  $\alpha_2+\gamma$  片层的取向关系为:  $[0001]_{\omega} \parallel \langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha_2} \parallel \langle 1\bar{1}0 \rangle_{\gamma}, \{11\bar{2}0\}_{\omega} \parallel \{0002\}_{\alpha_2} \parallel \{111\}_{\gamma}$ 。

(2) 具有  $B2$  结构的  $\omega$  相在片层中可以进一步转变为  $D8_8$  结构的  $\omega^*$  相, 两相之间晶格常数的关系为:  $a_{\omega^*} = \sqrt{3}a_{\omega} \times 97\%, c_{\omega^*} = c_{\omega}$ 。

(3) 片层中的  $\omega$  相可分别由  $\alpha_2$  相和高温残留  $\beta$  相向  $\omega$  相转变两种转变途径形成。

### 参考文献

- [1] Bendersky L A, Boettinger W J, Burton B P, Biancianiello F S, Shoeme C B. *Acta Metall Mater*, 1990, 38: 931
- [2] Bendersky L A, Burton B P, Boettinger W J, Biancianiello F S. *Scr Metall Mater*, 1990, 24: 1541
- [3] Nakamura, Takeyama M, Yamabe Y, Kikuchi M. *Scr Metall*, 1993, 28: 997
- [4] Cheng T T, Loretto M H. *Acta Mater*, 1998, 46: 4801
- [5] Inkson B J, Clemens H, Marien J. *Scripta Mater*, 1998, 38: 1377
- [6] Inkson B J, Boothroyd C B, Humphreys J. *Acta Metall Mater*, 1993, 41: 286
- [7] Du X W, Zhu Jing, Zhang X, Cheng Z Y, Kim Y W. *Scr Mater*, 2000, 43: 597
- [8] Sadi F A, Sercant C. *Philos Mag*, 2000, A80: 639
- [9] Shao G, Tsakirooulos P. *Acta Mater*, 2000, 48: 3671
- [10] Tawari R, Mukhopadhyay P, Banerjee S, Bendersky L A. *Acta Mater*, 1999, 47: 1307
- [11] Xia Hui, Dulos Steven J, Ruoff Arthur L, Vohra Yogesh K. *Phys Rev Lett*, 1990, 64: 204