

# 钛合金 $\beta$ 相向 $\omega$ 相转变产生的漫散射条纹特征

张金民<sup>1</sup>, 李 慧<sup>1</sup>, 高一龙<sup>2</sup>, 许庆合<sup>1</sup>, 魏保恒<sup>1</sup>

(1. 洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳 471039; 2. 洛阳拖拉机研究所, 河南 洛阳 471004)

**摘 要:** 利用透射电子显微镜研究了钛合金  $\beta$  相的选区电子衍射花样中漫散射条纹特征。花样中的漫散射条纹互相交叉形成网格, 对于大多晶带轴, 几段条纹互相平行, 但不在一条直线上。漫散射条纹位于  $\{112\}_{\beta}$  面上, 在晶带轴为  $[uvw]_{\beta}$  时, 条纹方向为  $[uvw]_{\beta} \times \{112\}_{\beta}$ 。解释了漫散射条纹不在一条直线上的原因。漫散射条纹的出现与  $\{112\}_{\beta}$  面上的声子模软化有关。

**关键词:** 钛合金; 漫散射条纹;  $\omega$  相; 软模

**中图分类号:** TG111.5 **文献标识码:** A

在单晶选区电子衍射花样中, 除明锐的衍射斑点外, 有时存在漫散射条纹。在 TiNi 合金中, 具有 CsCl 结构的  $B_2$  相选区电子衍射花样中存在强烈的漫散射条纹, 并且用倒易壁<sup>[1]</sup>和软模<sup>[2]</sup>理论解释了漫散射条纹产生的原因。在近  $\beta$  型钛合金 Ti-5Mo-2Cr-3Al 中出现  $\omega$  相变<sup>[3]</sup>, 认为是原子的移动沿垂直于  $(111)_{\beta}$  面的  $[111]_{\beta}$  方向的周期性压缩构成的。研究漫散射条纹特征, 对于揭示材料的预相变具有重要意义。本文对  $\beta$  相向  $\omega$  相转变的漫散射条纹特征进行研究。

## 1 试验材料和方法

试验材料为低合金钛合金。从成品上线切割 0.5 mm 薄片, 用砂纸磨到 50  $\mu\text{m}$ , 再用 5% (质量浓度) 高氯酸酒精电解液双喷电解抛光, 制得 TEM 样品。样品分析在 CM200 透射电子显微镜上进行。

## 2 结果与分析

$\beta$  相存在于  $\alpha$  相之间,  $\beta$  相内有条纹, 互相穿插形成网格, 如图 1a)。图 1b) 为图 1a)  $[111]_{\beta}$  衍射花样。 $\omega$  相的衍射斑点很弱, 所以其斑点不明显。由于是低合金系, 本文中  $\omega$  相取密排六方结

构, 其晶格常数  $a=0.46 \text{ nm}$ ,  $c=0.282 \text{ nm}$ <sup>[4]</sup>。

从图 1b)、图 2a)、图 2b)、图 3a) 中的衍射花样中, 可看出在  $\beta$  相向  $\omega$  相转变中, 衍射花样中均存在漫散射条纹。这种条纹具有如下几何特征: (1) 条纹通常具有几个不同的方向, 互相交叉形成网格; (2) 一根条纹通常由几段条纹组成, 只有在  $[111]_{\beta}$  花样中, 几段条纹严格位于一条直线上, 且 3 个方向的条纹分别位于  $[10\bar{1}]$ 、 $[01\bar{1}]$  和  $[1\bar{1}0]$  方向上, 并且分别位于  $(\bar{1}2\bar{1})$ 、 $(\bar{2}11)$ 、 $(11\bar{2})$  面上。在其它花样中, 几段条纹互相平行, 但通常并不位于一条直线上, 相互间错开一小段距离, 形成大小不同的两种尺寸条纹网格; (3)  $[111]_{\beta}$  晶带轴条纹穿过  $\beta$  相衍射斑点, 但是不穿过中心斑点, 有些晶带轴条纹并没有穿过  $\beta$  相衍射斑点。

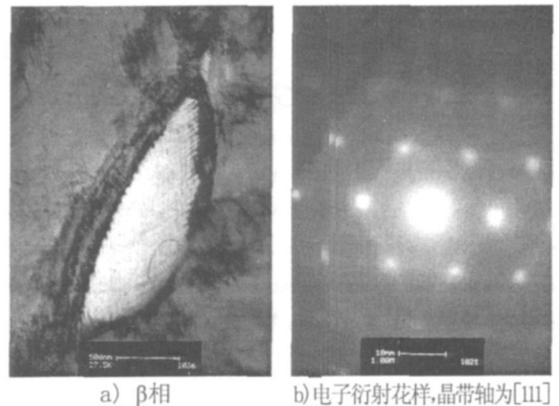


图 1 钛合金  $\alpha$  相之间的  $\beta$  相

文献[2]认为, 在基体的电子衍射花样中,  $\omega$  相的斑点在  $\frac{1}{3} [112]_{\beta}$  位置, 文献[5]中的衍射斑点标定也符合  $\frac{1}{3} [112]_{\beta}$  位置。本文中,  $\omega$  相的斑点并不严格在  $\frac{1}{3} [112]_{\beta}$  位置, 而是有一定的偏差, 见图 2a), 偏差较小, 大约为  $3^{\circ}$ , 说明  $\omega$  相的预相变即将完成。图 2b) 偏差较大, 大约为  $9^{\circ}$ , 说明正处在  $\omega$  相的预相变过程中。图 2c) 是按照  $\omega$

相的斑点在  $\frac{1}{3} [112]_{\beta}$  位置所作的衍射示意图。文献[2]中的分析, 是按照  $\omega$  相与基体  $\beta$  相严格符合  $[001]_{\omega} // [111]_{\beta}$ 、 $(110)_{\omega} // (\bar{1}\bar{1}0)_{\beta}$  取向关系而计算的。本文中,  $\beta$  相向  $\omega$  相转变过程中, 是  $\omega$  相的预相变, 还没有完全转变成  $\omega$  相, 因此存在一定的偏差。并且, 把衍射斑点作为原点形成了二次衍射现象。

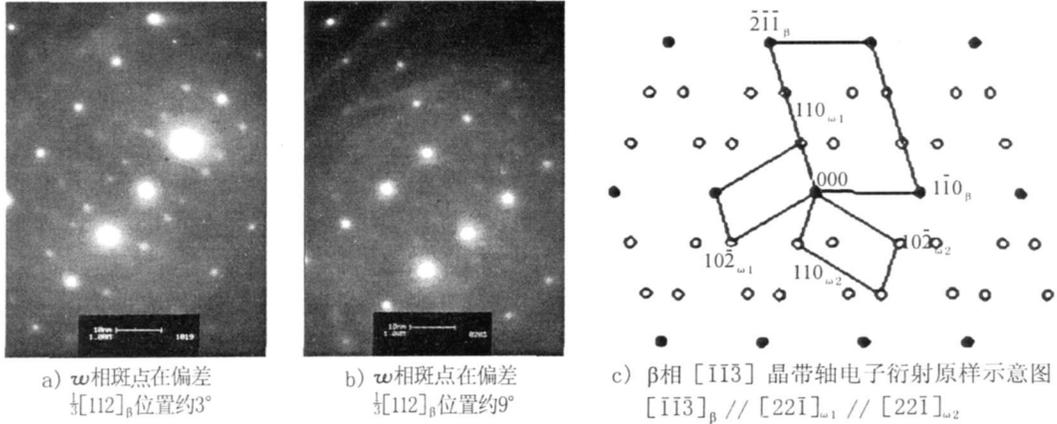


图 2  $\beta$  相和  $\omega$  相电子衍射花样及其示意图

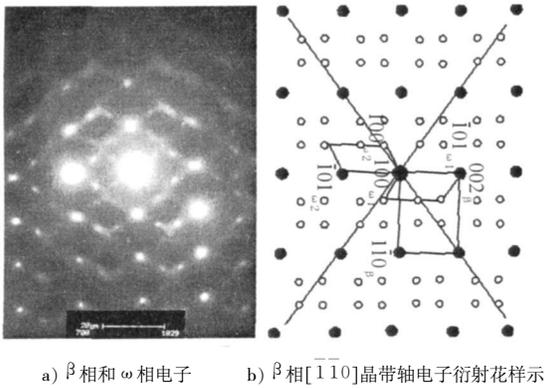


图 3  $\beta$  相和  $\omega$  相电子衍射花样及其示意图

以上条纹可以用软模理论来解释。固体物理中晶格震动的能量是量子化的, 把晶格震动的量子称为声子<sup>[6]</sup>, 把震动频率的平方在接近相变温度时趋近于零的振动模称为软模<sup>[7]</sup>。本文出现了点阵中的横向声学声子波对电子的散射。声子散射形成的振幅为<sup>[1]</sup>:

$$(\phi_g)^2 \propto \frac{(F_g)^2 \cdot [(g+k) \cdot u]^2}{v^2}$$

其中,  $F_g$  为结构因子,  $g$  为衍射矢量,  $k$  为波矢,  $u$  为单位偏振矢量,  $v$  为波的频率。声子波独

立的波矢满足:

$$-\pi/d < k < \pi/d$$

$d$  为沿波矢  $k$  方向上的晶格点阵间距。

因此, 由于电子束与声子交互作用, 在声子波矢  $k$  方向上形成了连续强度分布, 即倒易杆。当在晶体的一个平面中的不同方向上均存在这种声子波时, 就形成了强度呈片状分布的倒易壁。因此用波矢位于  $\{112\}_{\beta}$  上的横向声学声子波对电子的散射就解释了上面的  $\{112\}_{\beta}$  上的倒易壁的形成。这种横向声学声子波的存在, 使晶体中  $(112)_{\beta}$  面崩溃, 沿垂直于  $(112)_{\beta}$  面的  $[112]_{\beta}$  方向出现位移矢量导致漫散射条纹的出现。

对于  $\beta$  相, 在晶带轴为  $[uvw]$  时, 条纹方向为  $[uvw] \times \{112\}$ 。因此, 条纹不在一条直线上。图 2 中条纹方向为  $[110] \times (\bar{1}\bar{1}2) = [\bar{1}\bar{1}1]$ ,  $[110] \times (\bar{1}\bar{1}\bar{2}) = [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ ,  $[110] \times (\bar{1}\bar{1}2) = [\bar{1}\bar{1}1]$ ,  $[110] \times (\bar{1}\bar{1}\bar{2}) = [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ , 4 个  $\langle 741 \rangle$  方向的相互作用, 使条纹不在一条直线上。图 3 中的条纹方向为  $[113] \times (\bar{1}21) = [\bar{7}4\bar{1}]$ ,  $[113] \times (3\bar{1}1) = [471]$ ,  $[113] \times (2\bar{1}\bar{1}) = [\bar{4}7\bar{1}]$ ,  $[113] \times (12\bar{1}) = [\bar{7}41]$ , 4

(下转第 16 页)

## Structure and Properties of Alloy HSn<sup>70-1</sup> with Element Ce

DING Shun-de

(Chinalco Luoyang Copper Co., Ltd., Luoyang 471039, China)

**Abstract:** The characteristics of alloy HSn<sup>70-1</sup> is analysed. Through a series of tests including optimizing Ni and Mn ratio, process tests after adding the rare earth element and corrosion resistance tests of condensing tubing, the range of the alloy elements is determined to meet production and processing requirements and guarantee comprehensive properties of products. The study also covers the relationship of mechanical properties and annealing temperature of HSn<sup>70-1</sup> with rare earth. Proper percentage of composition elements and process for HSn<sup>70-1</sup> condensing tubing are determined.

**Keywords:** Rare earth ce; HSn<sup>70-1</sup> Alloy; Structure; Properties

(上接第9页)

个 $\langle 111 \rangle$ 方向的相互作用,使条纹不在一条直线上。

### 3 结论

(1) 钛合金 $\beta$ 相向 $\omega$ 相转变产生漫散射条纹,通常并不位于一条直线上,相互间错开一小段距离,形成大小不同的两种尺寸条纹网格。

(2) 漫散射条纹位于 $(112)_{\beta}$ 面上,在晶带轴为 $[uvw]_{\beta}$ 时,条纹方向为 $[uvw]_{\beta} \times \{112\}_{\beta}$ 。

(3)  $\omega$ 相的斑点并不严格在 $\frac{1}{3}[112]_{\beta}$ 位置,而是有一定的偏差。

(4) 漫散射条纹是由于横向声学声子波对电子的散射形成的。

### 参考文献:

- [1] 张启海. TiNi 合金 B2 相选区电子衍射花样中的漫散射条纹[J]. 稀有金属材料与工程, 1993, 22(6): 13~20.
- [2] 吴杏芳, 陈清, 柯俊. TiNi 合金相变的原位观察[J]. 电子显微学报, 1997, 16(3): 277~283.
- [3] 陈玉安, 何泽福, 刘安生, 等. 近 $\beta$ 型钛合金 Ti-5Mo-2Cr-3Al 的相变研究[J]. 重庆大学学报, 13(6): 71~78.
- [4] 张廷杰. 钛合金相变的电子显微镜研究(IV) — 钛合金中的 $\omega$ 相变[J]. 稀有金属材料与工程, 1989, 5: 77~82.
- [5] 张少卿, 陶春虎. 近 $\beta$ 型钛合金 Ti-10V-2Fe-3Al 的时效相变研究[J]. 金属学报, 1989, 25(1): 18~24.
- [6] 谢希德, 方俊鑫. 固体物理学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1961: 100~103.
- [7] 徐祖耀. 相变原理[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 501.

## Features of Diffuse Scattered Streak in $\beta$ Phase of Ti Alloy

ZHANG Jin-min<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, GAO Yi-long<sup>2</sup>, XU Qing-he<sup>1</sup>, WEI Bao-heng<sup>1</sup>

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China; 2. Luoyang Tractor Institute, Luoyang 471004, China)

**Abstract:** The features of diffuse scattered streak in SADPs of  $\beta$  phase in Ti alloy were analyzed under transmission electron microscopy (TEM). These SADPs show that the diffuse scattered streaks in SADPs form a network. For more zone axes, each streak consists of several sections. The sections are parallel each other, but do not lie in a line. The diffuse scattered streaks lie in  $\{112\}_{\beta}$ . The direction are  $[uvw]_{\beta} \times \{112\}_{\beta}$  when the zone axis is  $[uvw]_{\beta}$ . The cause that the streaks do not lie in a line was explained. It has been identified that the diffuse scattered streak arose from the softening of  $\{112\}_{\beta}$  phonon mode.

**Keywords:** Ti alloy; Diffuse scattered streak;  $\omega$  Phase; Soft mode