

添加 Nd 元素对钛合金析出行为的影响规律

黄文君¹, 王文焱^{1, 2}, 张豪胤³, 史士钦¹, 谢敬佩^{1, 2}

(1. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 有色金属共性技术河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471003; 3. 厦门大学材料学院, 厦门 361005)

摘要: 通过粉末冶金方法(冷等静压—真空烧结)制备钛合金 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd, 经过固溶—时效热处理后, 利用光学显微镜(OM)、X射线衍射仪(XRD)和透射电镜(TEM)分析合金的微观组织、物相的组成及析出相的形核特点, 研究添加稀土元素 Nd 对析出相的影响。实验结果表明, 在添加 1% Nd(质量分数)元素后, 钛合金组织得到了明显细化; 通过合金细化成核理论分析发现, 添加稀土元素 Nd 后, 固溶时效中 Nd₂O₃ 可以作为形核的基础, 促进形核, 所以稀土 Nd 元素可以有效促进非均匀形核, 主要析出相 Nd₂O₃ 有利于晶粒的细化, 是有效的形核剂; 在高分辨透射电镜下对离子减薄后的试样进行观察, 通过对合金的形貌和析出物进行傅里叶变换(FFT)和反傅里叶变换(IFFT)分析, 得到清晰的原子排列图, 发现析出相 Nd₂O₃ 与基体 α -Ti 之间存在平行相界面, 经分析为半共格界面。

关键词: 粉末冶金; Nd 元素; 非均匀形核; 析出相; 细化晶粒; 形核剂

doi: 10.13373/j.cnki.cjrm.XY16050022

中图分类号: TG166.5 文献标识码: A 文章编号: 0258-7076(2017)03-0245-07

Precipitated Phase of Titanium Alloy with Adding Nd Elements

Huang Wenjun¹, Wang Wenyan^{1, 2}, Zhang Haoyin³, Shi Shiqin¹, Xie Jingpei^{1, 2}

(1. School of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. Collaborative Innovation Center of Nonferrous Metals Henan Province, Luoyang 471003, China; 3. College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Titanium alloy Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd prepared by powder metallurgy method (cold isostatic pressing and vacuum sintering) was researched. The microstructure, phase composition and precipitated phase nucleation process were analyzed by optical microscope (OM), X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscope (TEM) after solution and aging treatment. The effect of adding rare earth element Nd to the titanium alloy on its precipitated phase was studied. The experimental results showed that the microstructure refinement effect was obvious after adding rare earth element 1% Nd (mass fraction); based on the analysis of alloy refining nucleation theory, it was found that after adding Nd, Nd₂O₃ could serve as the basis of nucleation because of its high energy, promoting nucleation, therefore Nd could promote the heterogeneous nucleation effectively, the main precipitation phase Nd₂O₃ was beneficial to refining crystalline grains and it was effective nucleating agents. Through high resolution observation of ion thinning sample, and the morphology of the alloy precipitates were analyzed by fast Fourier transform (FFT) and inverse fast Fourier transformation (IFFT). It was found that there was parallel interface between precipitated phase Nd₂O₃ and matrix α -Ti, and it was semi-coherent interface shown by analysis.

Key words: powder metallurgy; Nd element; heterogeneous nucleation; precipitated phase; grain refinement; nucleating agents

钛合金作为新型的轻金属材料, 具高比强度、高比刚度、高韧性、耐腐蚀和可焊接等一系列优良的综合性能, 成为先进飞机和航空发动机的重要

结构材料, 在舰船、军工、民营、医学等领域的应用也十分广泛。20 世纪 50 年代, 超音速时代军用飞机的发展, 对航空发动机材料的要求越来越高,

收稿日期: 2016-05-16; 修订日期: 2016-08-01

基金项目: 河南省重大科技专项项目(102105000007)资助

作者简介: 黄文君(1990-), 女, 河南许昌人, 硕士研究生, 研究方向: 钛合金, E-mail: huangwenjun0116@163.com; 通信作者: 王文焱, 教授, 电话: 13525992122, E-mail: wangwy1963@163.com

钛合金由于在室温、中温下具有更高的比强度而被深入研究、生产和应用,在当今世界航空工业中起到举足轻重的作用^[1-4]。随着科技的进步和新一代的航空航天飞行器的高速化、大型化和结构复杂化的跨越式发展,对材料的高性能、低成本、高效率、低污染提出了极高的要求^[5-6]。钛合金的性能和组织形貌密不可分,而热处理工艺对显微组织有很大的影响,为了获得更好性能的钛合金,需要对其进行固溶-时效处理^[7]。本文通过采用冷等静压-真空烧结法制备 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金,然后进行热处理,由于稀土金属具有很低的化学负电性,其活性要高于钛金属,对氧元素更具有亲和力^[8],在烧结过程中会先把氧元素夺走,形成难溶的稀土氧化物,对热处理后的合金成分与显微组织进行分析,研究表明添加稀土元素 Nd 有利于合金组织的细化,析出相 Nd₂O₃ 作为形核核心,能促进非均质形核,为进一步探究稀土元素在钛合金中的作用机制奠定基础,提供重要的理论依据,具有深远的意义。

1 实验

1.1 合金的制备和热处理

采用冷等静压-真空烧结法制备 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 钛合金,选取的原始材料粉末为钛粉、铝粉、钒粉、铬粉、钽粉,不同粉末性能参数如表 1 所示。

由于稀土元素 Nd 容易被氧化,所以添加稀土 Nd 时要通入保护气体 Ar,按照质量比将配好的粉末装入混料瓶中,由于氩气比空气重,所以通入的氩气会沉入瓶底,最大程度地保护稀土元素 Nd 不被氧化;利用 Y 型混料机中混料 24 h,然后将粉末装入包套、密封好之后进行冷等静压成型,成型压力为 280 MPa,保压时间为 30 min;去包套,将压

表 1 原料粉末的性能参数

Table 1 Chemical composition of raw material powders

Raw powder	O content/ (%, mass fraction)	Granularity/ μm	Production method
Titanium powder	0.200	≤40	HDH
Aluminum powder	0.020	25	Atomization
Vanadium powder	0.035	35	Reduction
Chromium powder	0.150	35	Reduction
Neodymium powder	0.100	75	Hydride reduction

HDH: Hydrogenation dehydrogenation

坯在真空烧结炉中进行烧结,烧结温度为 1300 °C,保温 3 h,随炉冷却,真空度为 1×10^{-5} Pa,最终制得尺寸为 $\Phi 40$ mm \times 60 mm 的圆柱形 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金试样。

将制备好的样品利用线切割设备切割成 $\Phi 10$ mm \times 10 mm 的圆柱形试样进行热处理,热处理工艺为 920 °C \times 50 min (WQ) + 时效 460 °C \times 8 h (WQ),目的是在 920 °C 固溶处理后,得到亚稳态的过饱和固溶体,随后的时效过程是从过饱和固溶体中析出沉淀相,使其弥散分布,进一步强化基体;使用透射电子显微镜(TEM)观察之前,需要将试样加工成 10.0 mm \times 10.0 mm \times 0.3 mm 的正方形薄片,在砂纸上将试样厚度磨到 40 μm 左右,再将其冲成 $\Phi 3$ mm 的原形薄片,最后在 Guton691 离子减薄仪上对试样进行减薄。

1.2 合金的微观组织与物相检测

将热处理后的试样 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 经过初磨,细磨,然后抛光后,使用自配的 Kroll 腐蚀液(体积分数 HF:HNO₃:H₂O = 1:3:7)对试样进行腐蚀,腐蚀时间为 6~20 s;使用 XJG-05 型光学显微镜(OM)观察试样的金相组织,用 Bruax D8 型 X 射线衍射仪(XRD)试样进行物相分析,对减薄好的试样进行高分辨透射电镜(HRTEM)观察分析,拍摄选区电子衍射花样。

2 结果与讨论

2.1 显微组织分析

对比 Ti-6Al-4V-2Cr 的显微组织照片可以看出,加入稀土 Nd 元素后,钛合金组织有显著的晶粒细化作用(图 1)。

经冷等静压压制后的样品在成型的过程中,由于气体的排出,颗粒之间会发生粘结而逐渐变形,内部存在颗粒接触的变形,在烧结过程中会发生再结晶,其中晶格畸变严重的地方是易成核点,容易发生再结晶形核,Nd 的熔点为 1020 °C,在添加 Nd 元素后,会使其在烧结过程中存在少量的液相,作为表面活性物质吸收基体中的氧元素形成 Nd₂O₃,并在晶界和相界面析出、偏聚,同时可以填补晶粒表面的缺陷,Nd₂O₃ 熔点较高,烧结过程中有良好的稳定性,在晶粒的晶界表面及边缘处起到钉扎作用,阻止晶粒的持续长大,起到细化晶粒的作用^[9-10]。

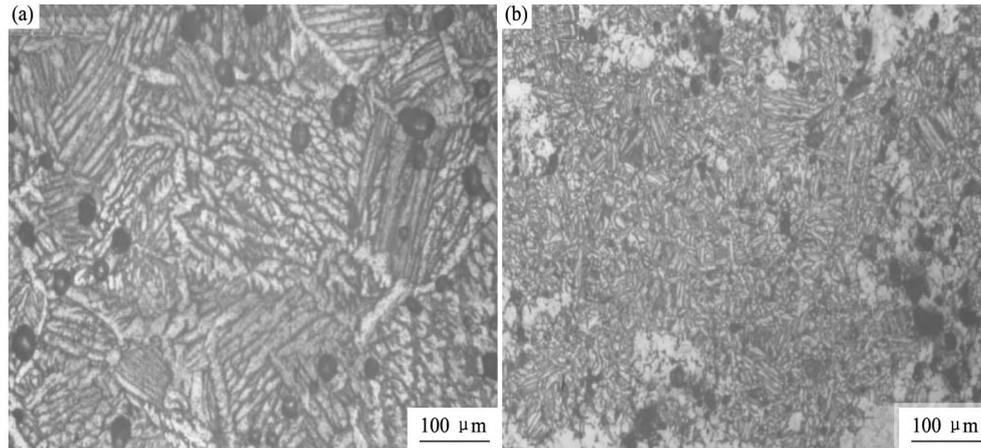


图1 Ti-6Al-4V-2Cr 与 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 的金相组织

Fig. 1 OM images of microstructure of Ti-6Al-4V-2Cr alloy (a) and Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd alloy (b)

根据形核功公式^[11]:

$$\Delta F_k = (\sigma_1 S_1 + \sigma_2 S_2) / 3 \quad (1)$$

式中, ΔF_k 为形核功; σ_1 为晶核与其他相的比表面能; σ_2 为晶核与液态相间的比表面能; S_1 为晶核与析出稀土氧化物相的接触面积; S_2 为晶核与液态相间的接触面积。

在加入稀土元素 Nd 后, 由于稀土氧化物 Nd_2O_3 的析出, 导致接触面积 S_1 和 S_2 的减少, 在随后的晶体长大时, 表面能 $\sigma_1 S_1 + \sigma_2 S_2$ 大幅下降, 所以形核功 ΔF_k 也随之降低。由于接触面积减少导致晶粒形核功的下降, 这就增加了形核率, 使晶粒得到极大细化, 不论是从理论角度, 还是由实验可知, Nd_2O_3 是对 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 极有效的形核剂, 所以稀土元素 Nd 可以有效地细化晶粒。

2.2 物相组成分析

由 Ti-Nd 相图可知, 在高温下 Nd 元素在钛中的溶解度较大, 当温度为 1300 °C 时, Nd 元素在钛中的溶解度大约为 4.8% (质量分数)。在真空烧结的过程中, 由于粉末之间有空隙, 压制成型的粉末样品中不可避免地会含有一定量氧元素, 氧元素对钛合金机械性能非常不利, 在烧结过程中, Nd 元素易向钛基扩散, 在随炉冷却的过程中会结合基体中的杂质氧元素析出 Nd_2O_3 。

图 2 为 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金的 XRD 谱图, 从图 2 中可以证实, 合金中除了有 α -Ti 和 β -Ti 外, 还有主要析出物 Nd_2O_3 和少量的 Nd 及 $Nd_2Ti_4O_{11}$ 相的衍射峰。

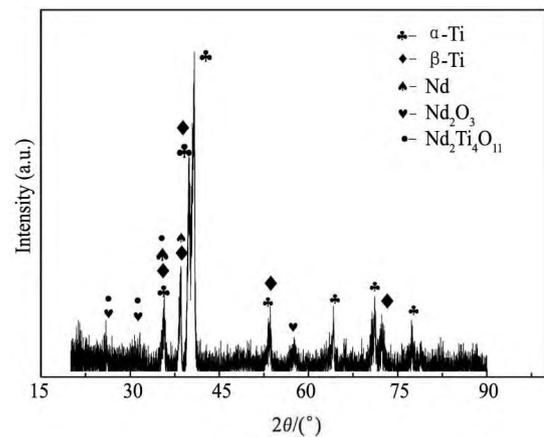


图2 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金的 XDR 谱

Fig. 2 XRD pattern of Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd alloy

2.3 合金细化成核理论的分析

在钛合金烧结过程中会有均匀成核与非均匀成核两种形核方式^[11], 对于均匀成核, 为方便计算假设: 晶胚是球形, 半径为 r , 表面积为 S , 则总自由能变化为:

$$\Delta G_{\text{均}} = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \sigma \quad (2)$$

式中, ΔG_V 为单位体积自由能之差; σ 为比表面能;

根据式(2)可知, 式(2)中第一项体积自由能使体系的自由能降低, 第二项表面能恒为正值, 使体系自由能升高, 总的自由能变化是这两项合成的结果。随着晶胚半径的增加, 前者的绝对值(即两项体积自由能之差)要比后者(即表面自由能)变化的快。晶核有一临界尺寸 r_k 。当初始时晶

胚很小即 r 小于 r_k 时,生成的晶胚使体系自由能升高,显然这种晶胚不稳定无法长大,形成后立即消失;当半径 r 超过临界晶核 r_k 时,系统总的自由能不再增加,会随着半径 r 的增加而降低,比较稳定,晶胚进一步长大。

此时 r_k 可由下式计算:

$$\text{令: } d\Delta G/dr = 0 \xrightarrow{\text{可推算出}} r_k = 2\sigma/\Delta G_b$$

但在固溶时效态的 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 中,时效过程中 Nd_2O_3 从过饱和相中析出长大,这种固态中的形核方式像液体中一样,大多数为非均匀形核,加入稀土合金元素后,通常会产层错、夹杂、空位和位错等不平衡缺陷,因其能量较高,所以有利于形核。

一般用非均匀成核模型来构造。如图 3 所示。

这种模型适用于椭球状晶核周边是稳定状态的情况,当椭球状晶核周围表面处于稳态时:

$$\Delta G_{\text{非}} = -V\Delta G_V + A_{ab}\gamma_{ab} - A_{aa}\gamma_{aa} \quad (3)$$

式中, A_{ab} , A_{aa} 分别表示两相的界面面积; γ_{ab} , γ_{aa} 分别表示两相的界面能。

$$V = \frac{1}{3}\pi h^2(3r - h) \quad (4)$$

$$= \frac{1}{3}\pi h^2(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)$$

$$A_{ab} = 2\pi r^2(1 - \cos\theta) \quad (5)$$

$$A_{aa} = \pi r^2 \sin^2\theta = \pi r^2(1 - \cos^2\theta) \quad (6)$$

式中, r 为椭球的曲率半径,通过计算,将式(4), (5)和(6)代入式(3)中可得:

$$\Delta G_{\text{非}} = \frac{1}{4}\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^3 \sigma\right)(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta) \quad (7)$$

$$\text{即: } \Delta G_{\text{非}} = \Delta G_{\text{均}} S(\theta)$$

$$\text{其中 } S(\theta) = \frac{1}{4}(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)$$

根据接触角理论分析,如式(7)所示非均匀成

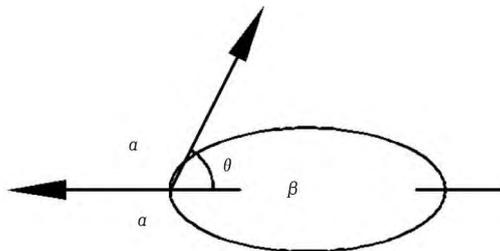


图 3 非均匀形核示意图

Fig. 3 Diagram of homogeneous nucleation

核的成核功 $\Delta G_{\text{非}}$ 与均匀成核的 $\Delta G_{\text{均}}$ 相比,其降低程度决定于基体与晶核的润湿角 θ 。 θ 只能取 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间,则 $0 \leq S(\theta) \leq 1$,取两个极端即当 $\theta = 0^\circ$ 时,则意味着非均匀成核已不需要形核功,当 $\theta = 180^\circ$ 时, $\Delta G_{\text{均}} = \Delta G_{\text{非}}$,相当于添加物对形核没有影响,实际上就是均匀成核。

可见润湿角 θ 越小,则形核所需要的功就越小,形核率就会越大,由于随炉冷却的过冷度 ΔT 接近于 0°C 时成核,所以在能量上非均匀成核比均匀成核更加有利。

稀土析出物与钛基体之间存在相关联晶面,在晶面上点阵的错配度为 δ ,当 $0.05 \leq \delta \leq 0.25$ 时,虽然难以通过晶核自身的弹性调整使其达到匹配的目的,但是可以通过在晶核中位错的适当分布来调整^[12-14],根据点阵常数相当理论, Nd_2O_3 可以作为形核的基础,来促进形核。

2.4 对析出物与基体的 HRTEM 分析

通过对减薄后的试样 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 进行高分辨观察,对选区电子衍射花样对成分进行确认,并使用计算机软件对高分辨照片进行傅里叶与反傅里叶变换,可以发现,如图 4 所示。

从图 4 中,高分辨相图 4(a) 对应的电子衍射花样如图 4(b) 所示,在衍射花样中可发现存在 3 套衍射斑点。经标定选区中分别为 $\alpha\text{-Ti}$ 与 Nd_2O_3 ,其中 $\alpha\text{-Ti}$ 为主要相,均属于 JCPDS44-1294 密排六方结构,空间群: $P63/mmc(194)$,晶格常数: $a = 0.2951\text{ nm}$, $b = 0.2951\text{ nm}$, $c = 0.4683\text{ nm}$ ($90 \times 90 \times 120$),两套衍射花样的斑点各自夹角分别为 63.9° 和 60° ,为 $\alpha\text{-Ti}$ $[\bar{1}2\bar{1}2]$ 和 $\alpha\text{-Ti}$ $[0001]$ 不同晶向的衍射斑点;析出物 Nd_2O_3 相, JCPDS65-3184 立方结构,空间群: $la-3(206)$,晶格常数: $a = b = c = 1.1072\text{ nm}$ 。

在图 4(b) 中发现存在晶面平行关系: $(240)\text{Nd}_2\text{O}_3 // (100)\alpha\text{-Ti}$, 错配度 $\delta = 7.6\%$ 为半共格界面; $(400)\text{Nd}_2\text{O}_3 // (1\bar{1}1)\alpha\text{-Ti}$, 错配度 $\delta = 23.4\%$ 为半共格界面^[15-17]。

对图 4 中区域 1 进行分析,通过计算机 VEC 软件对图像进行傅里叶变换得到图 5(b),发现图 5(b) 中的衍射花样与图 4(b) 中的 Nd_2O_3 的衍射斑点一致,证明此物质为 Nd_2O_3 ,对得到的傅里叶变换图上的衍射斑点标定后进行反傅里叶变换,去除

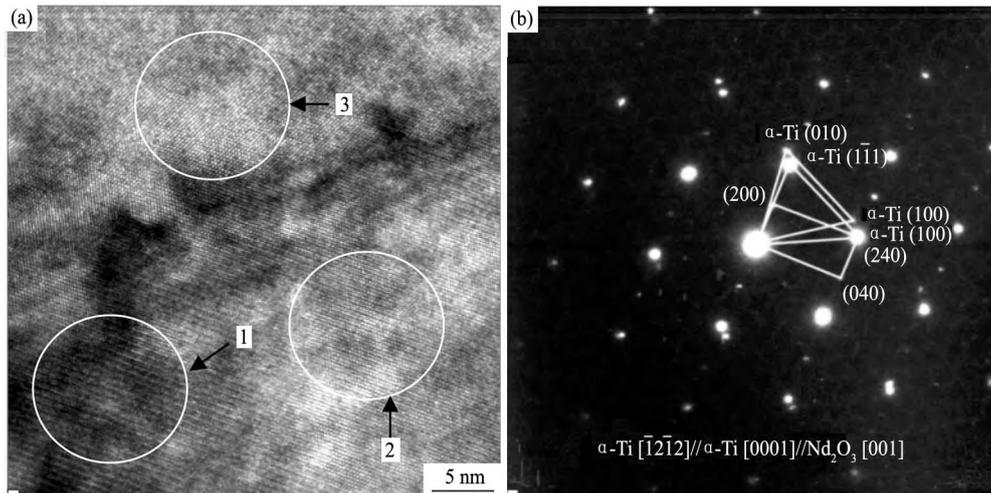


图 4 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金的高分辨相与衍射花样

Fig. 4 TEM image of high resolution phase (a) and diffraction pattern (b) of Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd alloy

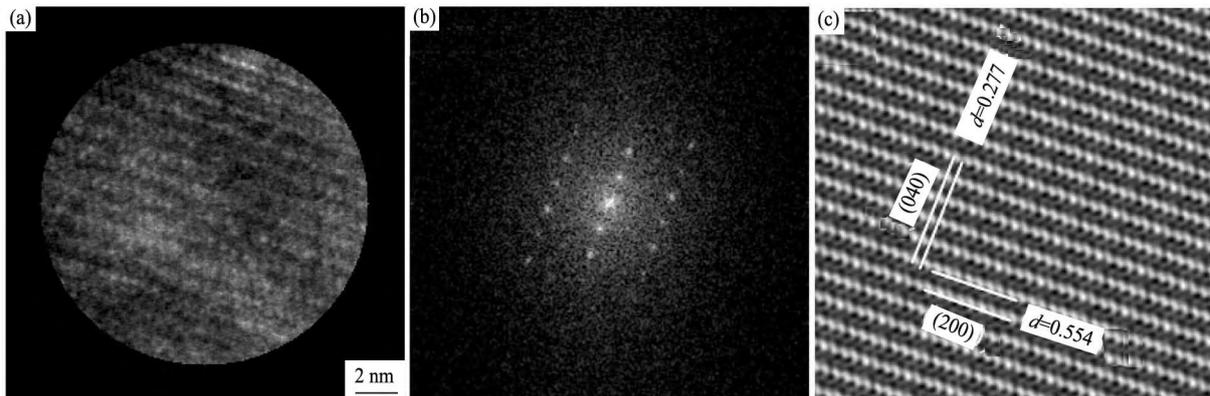


图 5 图 4(a) 中区域 1 的高分辨相与反傅里叶变换

Fig. 5 High resolution phase and inverse Fourier transformation of Area 1 in Fig. 4(a)

(a) TEM image of Area 1 in Fig. 4(a) ; (b) Diffraction spots of Nd_2O_3 in Area 1 ;

(c) Atomic arrangement structure of Nd_2O_3 in Area 1

底噪、缺陷等，得到清晰的图 5(c)，即图 4(a) 中区域 1 中的 Nd_2O_3 原子排列结构图，并在图 5(c) 中标示出(040) 和(200) 晶面间距分别为 $d=0.277\text{ nm}$ 和 $d=0.554\text{ nm}$ ，晶面夹角为 90° 与衍射斑点对应。

对图 4(a) 中区域 2, 3 进行分析，通过软件对图像进行傅里叶变换得到衍射花样为六边形的图 6(b)，(e)，与图 4(b) 中 $\alpha\text{-Ti}$ 的两套衍射斑点一致，对图 6(b) 进行反傅里叶变换，图像经过滤噪后，得到清晰原子排列图 6(c)，图 6(c) 中(100) 晶面与(010) 晶面的夹角为 60° ，晶面间距分别为 $d=0.2556\text{ nm}$ ， $d=0.2556\text{ nm}$ ，因此图 6(a) 即区域 2 中的物质为 $\alpha\text{-Ti}[0001]$ 晶向。

同样对图 6(d) 进行傅里叶变换与反傅里叶变

换分析，得到原子排列图 6(f)，图 6(f) 中(100) 与($1\bar{1}1$) 夹角为 63.9° ，两晶面间距分别为 $d=0.2556\text{ nm}$ ， $d=0.2243\text{ nm}$ ，可证明图 6(d) 即区域 3 中的物质为 $\alpha\text{-Ti}[\bar{1}2\bar{1}2]$ 晶向。

3 结 论

1. 添加 Nd 元素后，通过接触角理论分析，在能量上非均匀成核比均匀成核更加有利，表明加入 Nd 元素会促进非均匀成核的进行，显著细化组织。

2. 通过 HRTEM 分析，得到清晰的基体与 Nd 氧化物的原子排列情况，发现析出相 Nd_2O_3 与基体 $\alpha\text{-Ti}$ 存在平行相界面，分析为半共格界面。

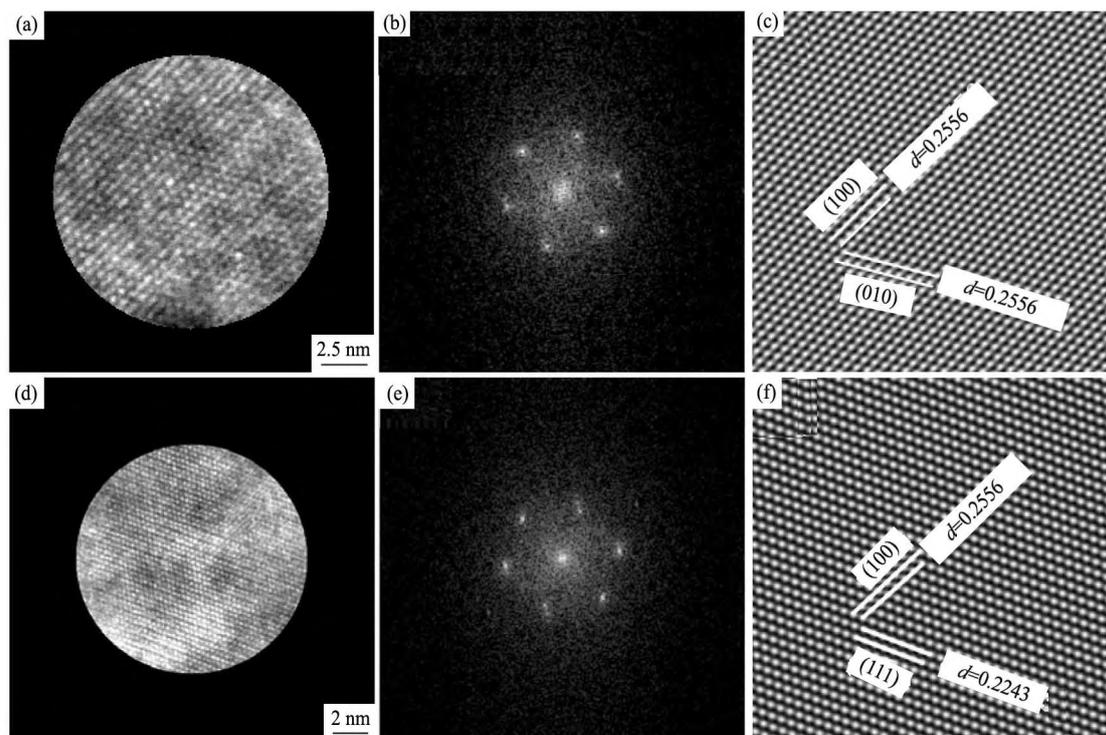


图6 图4(a)中区域2,3的高分辨相与反傅里叶变换

Fig. 6 High resolution phase and inverse Fourier transformation of Areas 2 and 3 in Fig. 4(a)

(a) TEM image of Area 2 in Fig. 4(a); (b) Diffraction spots of α -Ti in Area 2; (c) Atomic arrangement structure of α -Ti in Area 2; (d) TEM image of Area 3 in Fig. 4(a); (e) Diffraction spots of α -Ti in Area 3; (f) Atomic arrangement structure of α -Ti in Area 3

参考文献:

- [1] Vamsi K B, Julie S, Susmita B, Amit B. Microstructure, mechanical and wear properties of laser surface melted Ti6Al4V alloy [J]. Science Direct, 2014, 32: 335.
- [2] Bolzoni L, Ruiz-Navas E M, Gordo E. Feasibility study of the production of biomedical Ti-6Al-4V alloy by powder metallurgy [J]. Materials Science and Engineering C, 2015, 49: 400.
- [3] Liu Q H, Xu X Q, Ge X L. Research of laser alloying Ti-Si-C coating on TC4 titanium alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016, 40(6): 546.
(刘庆辉, 许晓静, 戈晓岚. TC4 钛合金表面激光合金化 Ti-Si-C 涂层的研究 [J]. 稀有金属, 2016, 40(6): 546.)
- [4] Liu Q X, Liu Y, Gao K. Research progress and application of titanium alloys [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011, 8(4): 45.
(刘奇先, 刘杨, 高凯. 钛合金的研究进展与应用 [J]. 航天制造技术, 2011, 8(4): 45.)
- [5] Sheinker, Chananic, Bohlen. Evaluation and application of pre-alloyed titanium P/M parts for air frame structures [J]. Int. J. Powder Metal, 1987, 23(3): 171.
- [6] Torkamany M J, Malekghaini F, Poursalehi R. Dissimilar pulsed Nd:YAG laser welding of pure niobium to Ti-6Al-4V [J]. Materials and Design, 2014, 53: 915.
- [7] Fan X P, Wang J. Processing methods and application of titanium and its alloys [J]. Materials Review, 2013, 27(22): 349.
(范兴平, 王军. 钛及钛合金的成型方法及应用 [J]. 材料导报, 2013, 27(22): 349.)
- [8] Akman E, Demir A, Canel T, Sinmazcelik T. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys [J]. Journal of materials Processing Technology, 2009, 209: 3705.
- [9] Ahmed T, Rack H J. Phase transformations during cooling in $\alpha + \beta$ titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243: 206.
- [10] Tang H P, Liu Y, Wei W F, Chen L F. Effect of rare earth element on microstructure and mechanical properties of powder metallurgy Ti alloy [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(2): 244.

- (汤惠萍, 刘 咏, 韦伟峰, 陈丽芳. 添加稀土元素对粉末冶金 Ti 合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(2): 244.)
- [11] Shi D K. Material Science Basis [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003. 233.
(石德珂. 材料科学基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 233.)
- [12] Turnbull D, Vonnegut B. Nucleation catalysis [J]. Ind. Eng. Chem., 1952, 44(6): 1292.
- [13] Gao X L, Zhang L J, Liu J, Zhang J X. Porosity and microstructure in pulsed Nd: YAG laser welded Ti6Al4V sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 1316.
- [14] Song B. Liquid steel heterogeneous nucleation accelerant lattice mismatch degree of utility theory [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 32(2): 180.
(宋 波. 钢液非均质形核触媒效用的点阵错配度理论 [J]. 北京科技大学学报, 2012, 32(2): 180.)
- [15] Pan N, Song B, Zhai Q J. Catalysis on heterogeneous nucleation of solid compounds in liquid steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(12): 1442.
(潘 宁, 宋 波, 翟启杰. 固态化合物对钢液非均质形核的触媒作用 [J]. 金属学报, 2009, 45(12): 1442.)
- [16] Bolzoni L, Ruiz-Navas E M, Gordo E. Feasibility study of the production of biomedical Ti-6Al-4V alloy by powder metallurgy [J]. Materials Science and Engineering C, 2015, 49: 400.
- [17] Bramfitt B. The effect of carbide and nitride additions on the heterogeneous nucleation behavior of liquid iron [J]. Metall. Trans., 1970, 1(7): 1987.