

添加 Nd 元素对 Ti-6Al-4V-2Cr 合金组织细化的影响

王文焱^{1,2}, 黄文君¹, 邵昌³, 张豪胤⁴, 史士钦¹, 谢敬佩^{1,2}, 黄亚波¹, 刘冀尧^{1,2}

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471003;

2. 有色金属共性技术河南省协同创新中心, 洛阳 471003;

3. 新疆闽龙耐磨材料有限公司, 新疆 833200; 4. 厦门大学 材料学院, 厦门 361005)

摘要: 采用冷等静压-真空烧结法制备 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金, 然后进行固溶及时效热处理, 通过实验与最小错配度理论计算, 研究 Nd 元素对该合金组织细化的影响, 并分析细化机理。结果表明, 添加 1%(质量分数)的稀土元素 Nd 后, 析出相 Nd_2O_3 能有效促进晶粒细化。二维错配度的计算结果证明析出相 Nd_2O_3 是有效的形核剂, 可促进非均匀形核, 增加形核率, 从而使晶粒细化。通过对合金试样薄区进行高分辨率观察, 发现另一种絮状的、非常细小的、弥散分布的 $Nd_2Ti_4O_{11}$ 相, 由于其界面错配度较低, 也可作为非均匀形核的核心, 促进形核, 起到细化晶粒的作用。

关键词: Nd 元素; Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金; 错配度; 析出相; 形核剂; 细化晶粒

中图分类号: TG166.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-0224(2016)05-760-07

Effects of Nd element addition on microstructure refinement of Ti-6Al-4V-2Cr alloy

WANG Wenyan^{1,2}, HUANG Wenjun¹, SHAO Chang³, ZHANG Haoyin⁴, SHI Shiqin²,

XIE Jingpei^{1,2}, HUANG Yabo², LIU Jiyao^{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. Xinjiang, Minlong Wear-resistant Materials Co., Ltd, Xinjiang 833200, China

4. College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Titanium alloy Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd is made by the cold isostatic pressing and vacuum sintering, then the solution and aging heat treatment was carried on the prepared of titanium alloy, the effect of Nd elements on the microstructure refinement and the refinement mechanism were researched and analyzed through the experiment and theory calculation of minimum mismatch degree. The results show that the main precipitation phase Nd_2O_3 can effectively promote the grain refinement after adding rare earth element 1% Nd (mass fraction). The two-dimensional mismatch degree calculation results proved that the precipitated phase Nd_2O_3 is the effective nucleating agents that can promote the heterogeneous nucleation and increase the nucleation rate, thus promote the grain refinement. Through the high resolution observation of thin area in the sample, another precipitated phase $Nd_2Ti_4O_{11}$ is found, which is flocculent, dispersed and very small. Because of the low degree of interface mismatch, $Nd_2Ti_4O_{11}$ can also be used as the core of heterogeneous nucleation and promote nucleation, which means it can also play a role in grain refinement.

Key words: Nd element; Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd alloy; mismatch; precipitated phase; nucleating agents; fine grains

钛及钛合金具有密度小、比强度高、比刚度、耐腐蚀、耐高温等一系列优良性能, 广泛应用于航空

航天、舰船、军工、民营、医学等领域。从工业价值、资源储量和发展前景看, 钛合金被誉为继铁、铝之后

基金项目: 河南省重大科技专项(102105000007)

收稿日期: 2015-11-26; 修订日期: 2016-02-25

通信作者: 王文焱, 教授, 博士。电话: 13525992122; E-mail:wangwy1963@163.com

处于发展中的“第三金属”和“战略金属”[1-4]。随着科技的进步和航天工业的不断发展,对材料各方面性能的要求逐渐提高,性能优良的钛合金已成为首选材料[5-6],并且对其综合性能提出了更高的要求[7-9]。钛合金的性能与组织形貌有着密不可分的联系,而显微组织形貌很大程度上取决于合金的热处理工艺[10],通过对钛合金进行固溶与时效处理,可获得优异的工艺性能与使用性能。此外,稀土元素对钛合金组织与性能具有重要的影响,在钛合金中添加 La, Y 等稀土元素可以有效地细化组织,改善合金的室温性能和抗氧化性能,同时析出的稀土氧化物由于具有较高的熔点,可以提高材料的高温力学性能[11-13]。本研究采用冷等静压-真空烧结法制备含稀土 Nd 元素的 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金,然后进行固溶-时效热处理,固溶处理是为了得到亚稳态的过饱和固溶体,随后的时效处理是从过饱和固溶体中析出沉淀相,并使其弥散分布,进一步强化基体[14]。利用扫描电镜、X 射线衍射和高倍率透射电镜对热处理后的合金成分与显微组织进行观察与分析,采用最小错配度理论对组织细化进行进一步验证,对于进一步研究 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金的细化机理,以及制备性能优良的钛合金具有重要的指导意义。

1 实验

1.1 合金制备与热处理

采用冷等静压-真空烧结法制备 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 钛合金,所用原料粉末及其性能参数列于表 1。

表 1 原料粉末的性能参数
Table 1 The raw material powders

Raw powders	w(O)/%	Granularity/ μm	Production method
Ti	0.20	40	HDH
Al	0.02	25	Atomization
V	0.035	35	Reduction
Cr	0.15	35	Reduction
Nd	0.10	75	Hydride reduction

按照 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金的名义成分称量原料粉末,装入混料瓶中,由于稀土元素 Nd 易被氧化,所以添加稀土 Nd 时要通入氩气保护,氩气比空气重,倒入混料瓶中沉于瓶底,可以最大程度地保护 Nd 元素不被氧化;利用 Y 型混料机混料 24 h,然后将混合

料装入包套,密封之后进行冷等静压成形,压力为 280 MPa,保压时间为 30 min;去包套,将压坯在真空烧结炉中进行烧结,烧结温度为 1 300 ,保温 3 h,真空度为 1×10^{-5} Pa,最终得到直径为 40 mm、长度为 60 mm 的圆柱形 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金试样。用线切割将 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金切割成直径和长度均为 10 mm 的圆柱形试样,进行固溶与时效热处理,热处理工艺为 920 /50 min(WQ)固溶+ 460 /8 h(WQ)时效。

1.2 性能检测

对热处理后的 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金试样进行初磨、细磨和抛光处理,然后用自配的 Kroll 腐蚀液 ($V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:3:7$)进行腐蚀,腐蚀时间为 6~20 s,通过 XJG-05 型光学显微镜观察试样腐蚀后的金相组织。用 Bruax D8 型 X 射线衍射仪对合金进行物相分析。

将合金样品加工成 10 mm \times 10 mm \times 0.3 mm 的正方形薄片,在砂纸上磨到厚度 40 μm 左右,再冲成直径为 3 mm 的圆形薄片,然后在 Guton691 型离子减薄仪上减薄,对减薄后的试样采用 JEOL-2100 型高分辨透射电镜进行观察与分析,并拍摄选区电子衍射花样。

2 结果与分析

2.1 显微组织

图 1 所示为 Ti-6Al-4V-2Cr 与 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金的金相组织。由图可知,在 Ti-6Al-4V-2Cr 合金中加入稀土 Nd 元素具有显著细化晶粒的作用。

在冷等静压成形过程中,粉末内部的气体排出,粉末体产生颗粒粘结,然后随着烧结的进行,颗粒逐渐变形,由于粘附作用,粒子间接触界面逐渐扩大并形成具有负曲率的接触区,从而发生接触变形,在烧结过程中发生再结晶,其中晶格畸变最严重的地方,即添加元素 Nd 与基体合金之间产生固溶体的位置,是易成核点,容易发生再结晶形核。Nd 元素的熔点为 1 020 ,1 300 烧结过程中存在少量的液相,Nd 元素作为表面活性物质,吸收基体中的氧元素形成化合物 Nd_2O_3 ,在晶界和相界面析出、偏聚,同时填补晶粒表面的缺陷。由于 Nd_2O_3 熔点较高,在烧结过程中有良好的稳定性,在晶界表面及边缘处起到钉扎作用,阻止晶粒持续长大,达到细化晶粒的目的[15]。

根据形核功公式[16]:

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

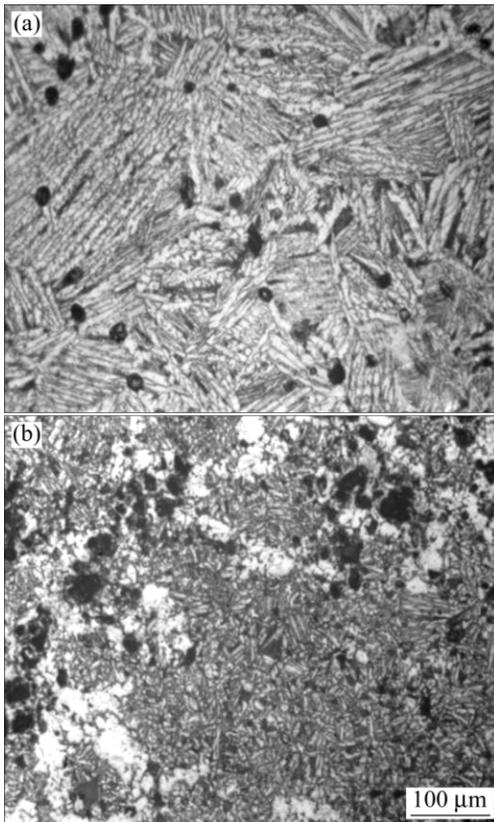


图1 Ti-6Al-4V-2Cr与Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd的金相组织
Fig.1 Metallographic structure of Ti-6Al-4V-2Cr alloy (a) and Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd alloy (b)

式中： ΔF_K 为形核功； σ_1 为晶核与其它相的界面能； σ_2 为晶核与液相间的界面能； S_1 为晶核与析出的稀土氧化物相的接触面积； S_2 为晶核与液相间的接触面积。在加入稀土元素Nd后， Nd_2O_3 的析出导致接触面积 S_1 和 S_2 减小，在随后的晶粒长大过程中，界面能 $\sigma_1 S_1 + \sigma_2 S_2$ 大幅度下降，形核功 ΔF_K 随之降低，形核率增大，导致晶粒细化。

2.2 物相组成

图2所示为Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd合金的XRD谱。合金中除了含有 α -Ti和 β -Ti以及少量Nd外，还存在析出相，包括 Nd_2O_3 相和少量 $Nd_2Ti_4O_{11}$ 相。这是由于原始材料中不可避免地含有一定量氧、碳、氮等杂质元素，Nd具有较低的化学负电势，与钛相比对氧元素更具有亲和力，因而烧结过程中Nd容易与氧元素发生反应产生 Nd_2O_3 相和少量 $Nd_2Ti_4O_{11}$ 析出相。

2.3 二维错配度的理论分析

根据BRAMFITT^[17]提出的二维错配度理论，利用二维点阵错配度 δ 表征不同类型晶格之间的匹配程

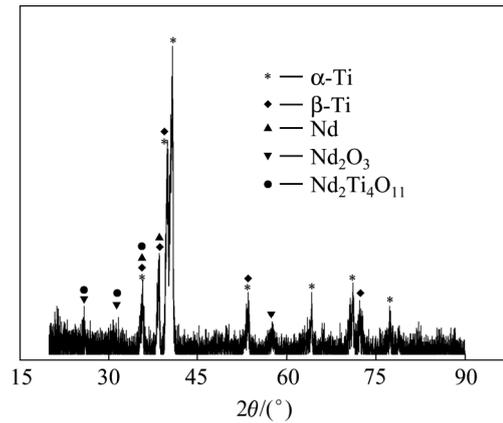


图2 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd合金的XRD谱
Fig.2 XRD pattern of Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd alloy

度。BRAMFITT二维点阵错配度计算公式^[17]如下：

$$\delta_{(hkl)_n}^{(hkl)_s} = \sum_i^3 \frac{|(d_{[uvw]_s} \cos \theta) - d_{[uvw]_n}|}{d_{[uvw]_n}} / 3 \quad (2)$$

式中： $(hkl)_n$ 为成核相的低指数晶面； $[uvw]_n$ 为 $(hkl)_n$ 晶面上的1个低指数方向； $d_{[uvw]_n}$ 为沿 $[uvw]_n$ 方向的原子间距； $(hkl)_s$ 为基底的1个低指数晶面； $[uvw]_s$ 为基底 $(hkl)_s$ 的1个低指数方向； $d_{[uvw]_s}$ 为沿 $[uvw]_s$ 方向的原子间距； θ 为 $[uvw]_n$ 与 $[uvw]_s$ 指数方向的夹角。

析出相为 Nd_2O_3 ，根据JCPDS65-3184， Nd_2O_3 是简单立方结构，晶格常数 $a=b=c=11.072$ ，基体为 α -Ti和 β -Ti， α -Ti为密排六方结构，晶格常数 $a=b=2.951$ ， $c=4.683$ ， β -Ti为体心立方结构，晶格常数 $a=b=c=3.311$ 。基体与形核相的晶格参数相差较大，分别为11.072和2.951，由此计算出的原子间距 d 必将相差较大，需做延长变换。图3和图4所示为 Nd_2O_3 和Ti的原子匹配示意图，如图3所示，将 α -Ti(001)

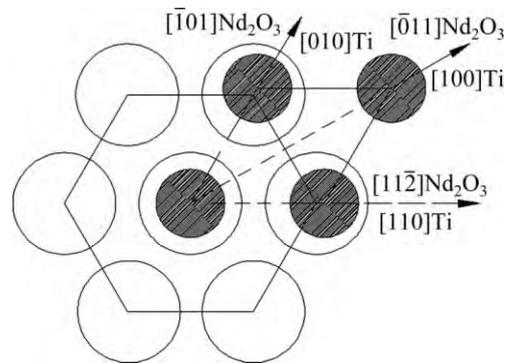


图3 (111) Nd_2O_3 (灰)//(001) α -Ti(白)原子匹配示意图
Fig.3 The atoms matching schematic diagram of (111) Nd_2O_3 (grey)//(001) α -Ti (white)

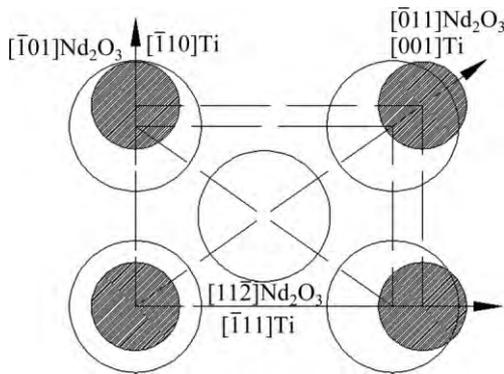


图 4 (110) Nd₂O₃(灰) // (110) β-Ti(白)原子匹配示意图

Fig.4 The atoms matching schematic diagram of (111) Nd₂O₃ (grey) // (110) β-Ti (white)

表 2 析出相 Nd₂O₃ 作为形核剂与基体的错配度

Table 2 The calculation of mismatch degree by Nd₂O₃ and matrix

	$[uvw]_s$	$[uvw]_n$	$d_{[uvw]_s}$	$d_{[uvw]_n}$	$\theta/(^\circ)$	$\delta_{(hkl)_s}^{(hkl)_n}$
(111) Nd ₂ O ₃ // (001) α-Ti	$[\bar{1}01]$	$[010]$	15.658	14.755	0	6.11%
	$[0\bar{1}1]$	$[100]$	15.658	14.755	0	
	$[11\bar{2}]$	$[110]$	22.143	20.867	0	
(110) Nd ₂ O ₃ // (110) β-Ti	$[\bar{1}01]$	$[\bar{1}10]$	15.658	14.044	0	11%
	$[0\bar{1}1]$	$[001]$	11.072	9.933	0	
	$[11\bar{2}]$	$[\bar{1}11]$	19.180	17.199	0	

晶面的边长 $a=2.951$ 扩大 5 倍, 即 $a=14.755$, 利用式 (2) 和表 2 所列参数, 计算 Nd₂O₃ 析出相与基体相 α-Ti 以及与 β-Ti 的 BRAMFITT 二维点阵错配度, 结果列于表 2。

根据二维错配度理论^[18-19], 非均匀形核触媒的判别标准为: 当错配度 $\delta < 8\%$ 时对于促进非均匀形核最有效, $8\% < \delta < 12\%$ 时中等有效, 当 $\delta > 12\%$ 时为无效。从表 2 可知 Nd₂O₃ 对钛合金的形核可起到有效的促进作用。在烧结过程中, 高熔点粒子 Nd₂O₃ 析出成为 α-Ti 与 β-Ti 的非均质形核基底, 有利于促进钛合金的非均质形核。Nd₂O₃ 对 α-Ti 的错配度为 6.11%, 属于对促进形核非常有效, 而对 β-Ti 的错配度为 11%, 属于中等有效, 所以在含稀土的钛合金中, 相比于 β 相, 析出的 Nd₂O₃ 可更有效地细化 α 相。由于析出相 Nd₂O₃ 的粒度一般较小, 分布较弥散, 在烧结时提供大量的形核位置, 明显提升形核率, 导致 Ti 晶粒数量增多, 同时 Nd₂O₃ 又具有熔点高和化学性质稳定等性质, 所以合金晶粒得到非常明显的细化。实验结果和理论计算都表明 Nd₂O₃ 是对 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 极有效的形核剂, 添加稀土元素 Nd 可有效细化合金晶粒。

2.4 HRTEM 分析

图 5 所示为 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金的高分辨透射电镜照片和衍射花样。TEM 观察发现了 1 种絮状的非常细小、弥散的相。在图 5(b) 中发现 2 套衍射斑点, 经标定分析可知, 主要相为基体 α-Ti, 伴随析出尺寸细小的转化物 Nd₂Ti₄O₃ 相。α-Ti(JCPDS44-1294) 为密排六方结构, 空间群: P63/mmc(194), 晶格常数: $a=2.951, b=2.951, c=4.683 (90 \times 90 \times 120)$; 另 1 套衍射斑点为析出物 Nd₂Ti₄O₁₁ (JCPDS48-0654), 单斜晶系, 空间群: C2/c, 晶格常数: $a=13.530, b=5.083, c=12.733 (90 \times 108 \times 90)$ 。由于纯稀土 Nd 元素的加入, 固溶过程中产生的过饱和固溶体在时效析出时, Nd 单质仍存留在 Ti 晶体内, 与 Ti 及氧元素共同反应生

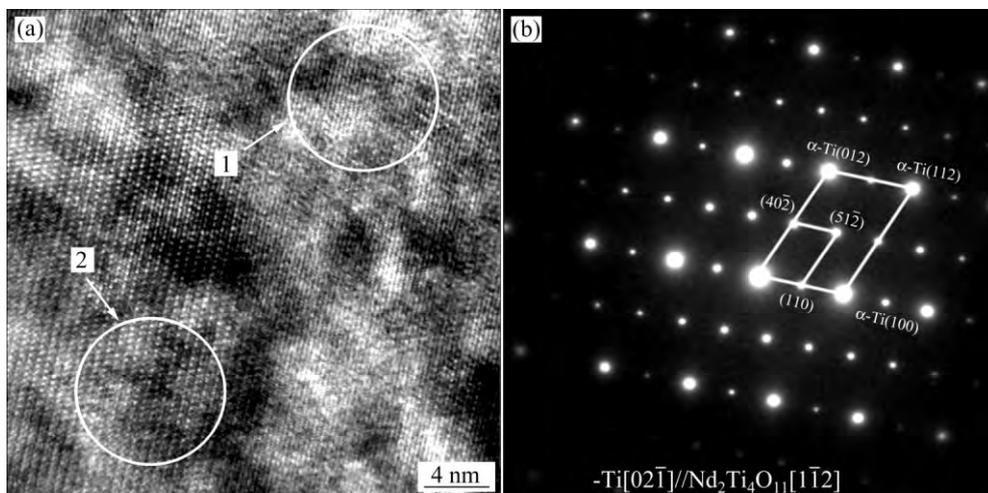


图 5 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金的高分辨相与衍射花样

Fig.5 The high resolution phase (a) and diffraction pattern (b) of Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd alloy

成细小 $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ 相, 通过式(2)计算 $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ 与基体 $\alpha\text{-Ti}$ 的相位关系, 得到以下结论:

1) $(110)\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}/(100)\alpha\text{-Ti}$, 错配度 $\delta=7.51\%$, 属于半共格晶面;

2) $(40\bar{2})\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}/(012)\alpha\text{-Ti}$, 错配度 $\delta=18.51\%$, 属于半共格晶面。

通过计算机 VEC 软件对图 5(a) 中 1 区域或 2 区域的高分辨 TEM 图像进行傅里叶变换和反傅里叶变换, 得到这 2 个区域的衍射斑点和原子排列结构图, 分别如图 6 和图 7 所示。

图 6(b) 与图 5(b) 中的 $\alpha\text{-Ti}$ 衍射斑点一致。图 6(c) 中 $\alpha\text{-Ti}(100)$ 晶面与 (012) 晶面夹角为 70.6° , 夹角与衍射斑点相对应, 在图 6(c) 中标出 $\alpha\text{-Ti}(100)$ 的晶面间距为 $d=0.255\text{ nm}$, $\alpha\text{-Ti}(012)$ 的晶面间距为 $d=0.202\text{ nm}$, 证实图 6(a) 中的白色物质为基体 $\alpha\text{-Ti}$ 。

对比图 7(a) 与图 6(a) 发现, 1 区域与 2 区域的晶格取向大致相似, 但 2 区域的晶格条纹间距明显大于 1 区域; 图 7(b) 所示的衍射花样与图 5(b) 中 $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ 的衍射花样一致; 图 7(c) 所示为 2 区域中的 $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ 原子排列情况, 原子面 (110) 与 $(40\bar{2})$ 的夹角为 70.9° ,

这 2 个原子面的面间距分别为 $d=0.472\text{ nm}$ 和 $d=0.330\text{ nm}$ 。从图 7(c) 与图 6(c) 的原子晶格图像可发现, $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ 的 (110) 与 $(40\bar{2})$ 晶面的夹角与 $\alpha\text{-Ti}$ 的 (100) 和 (012) 晶面夹角基本一致(分别为 70.9° 和 70.6°), 原子面间距基本上为 2 倍关系, 计算出错配度 δ 分别为 7.51% 和 18.51% , 可证明其为半共格界面, 在烧结过程中, Nd 与 Ti 及氧元素共同反应生成 $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ 相, 界面错配度低, 可作为非均匀形核的核心, 有效促进形核率, 从而进一步细化晶粒。

3 结论

1) 在 Ti-6Al-4V-2Cr-1Nd 合金中添加稀土 Nd 元素可有效细化晶粒, 主要析出相为 Nd_2O_3 , 有少量的 $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ 析出。

2) 析出相 Nd_2O_3 对 $\alpha\text{-Ti}$ 的错配度仅为 6.11% , 属于 Nd_2O_3 对促进 $\alpha\text{-Ti}$ 的非均匀形核非常有效, 而其对 $\beta\text{-Ti}$ 的错配度为 11% , 属于中等有效。因此, 相比于 β 相, 析出相 Nd_2O_3 可以更有效地细化 α 相。

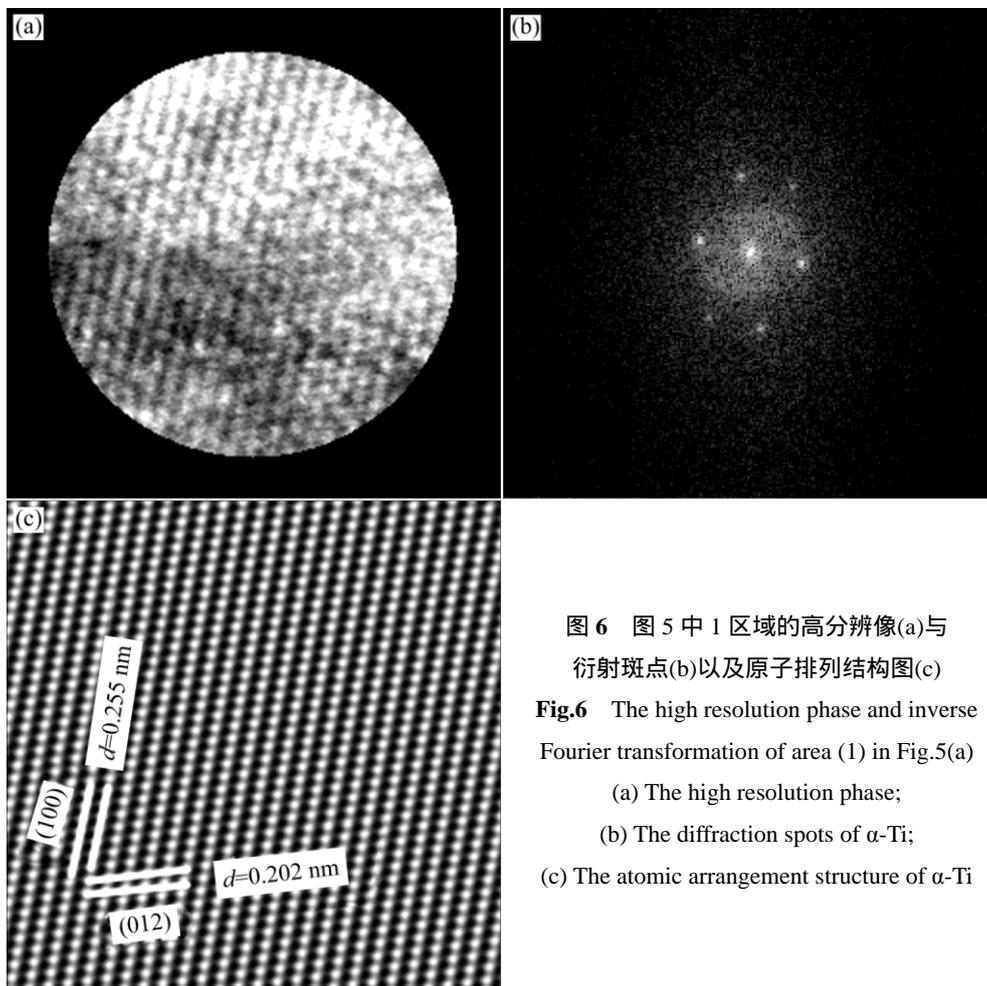


图 6 图 5 中 1 区域的高分辨像(a)与衍射斑点(b)以及原子排列结构图(c)

Fig.6 The high resolution phase and inverse Fourier transformation of area (1) in Fig.5(a)
(a) The high resolution phase;
(b) The diffraction spots of $\alpha\text{-Ti}$;
(c) The atomic arrangement structure of $\alpha\text{-Ti}$

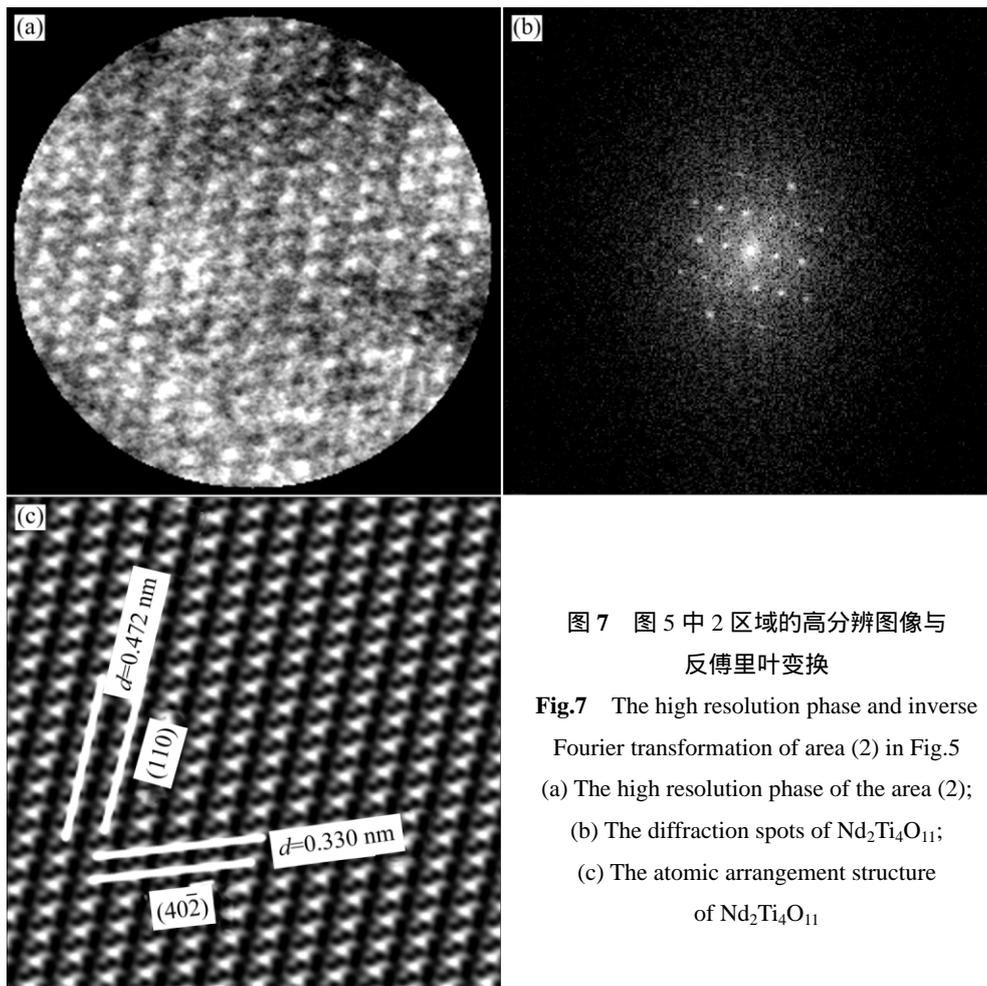


图 7 图 5 中 2 区域的高分辨图像与反傅里叶变换

Fig.7 The high resolution phase and inverse Fourier transformation of area (2) in Fig.5
(a) The high resolution phase of the area (2);
(b) The diffraction spots of $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$;
(c) The atomic arrangement structure of $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$

3) 合金样品的薄区存在另一种弥散、细小的析出物 $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$, 该析出物与 $\alpha\text{-Ti}$ 的晶格取向相似, 存在平行界面, 为与 $\alpha\text{-Ti}$ 半共格界面。 $\text{Nd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ 也可作为有效的形核中心, 促进成核, 从而细化晶粒。

REFERENCES

- [1] 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(4): 45-48.
LIU Qixian, LIU Yang, GAO Kai. Research progress and application of titanium alloys[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011, 8(4): 45-48.
- [2] 汤慧萍, 黄伯云, 刘咏, 等. 粉末冶金钛合金致密化研究的进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(9): 677-680.
TANG Huiping, HUANG Boyun, LIU Yong, et al. Progress in the densification of powder metallurgy titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(9): 677-680.
- [3] 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. 稀有金属, 2000, 24(3): 5-7.
QIAN Jiuhong. Application and development of new titanium alloys for aerospace[J]. Rare Metals, 2000, 24(3): 219-223.
- [4] 张高会, 张平则, 崔彩娥, 等. 钛合金及其表面处理的现状与展望[J]. 世界科技研究与发展, 2003, 25(4): 62-66.
ZHANG Gao-hui, ZHANG Ping-ze, CUI Cai-e, et al. Situation and prospect of surface treatment for titanium alloys[J]. World Science and Technology Research and Development, 2003, 25(4): 62-66.
- [5] 商国强, 朱知寿, 王新楠, 等. 超高强度钛合金研究进展[J]. 稀有金属, 2011, 35(2): 287-289.
SHANG Guoqiang, ZHU Zhishou, WANG Xinnan, et al. Development of ultra-high strength titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(2): 287-289.
- [6] 王辉, 汤慧萍, 刘咏, 等. 铸造 TiAl 基合金的热变形行为及加工图[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(4): 401-407.
WANG Hui, TANG Huiping, LIU Yong, et al. Hot deformation behavior and processing maps of as-cast TiAl based alloy[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2012, 17(4): 401-407.
- [7] HANSON A D, RUNKLE J C, WIDMER R, et al. Titanium near shapes from elemental powder blends[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 1990, 26(2): 157-164.

- [8] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 133.
HUANG Peiyun. Powder Metallurgy Principle[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 133.
- [9] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 2-7.
ZHAO Yongqing. Current situation and development trend of titanium alloys[J]. Materials China, 2010, 29(5): 2-7.
- [10] 马玲, 赵双群, 等. 热等静压对铍铝合金显微组织及力学性能的影响[J]. 飞航导弹, 2006(8): 57-59.
MA Ling, ZHAO Shuangqun, et al. Effect of hot isostatic pressing on microstructure and mechanical properties of beryllium alloy[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2006(8): 57-59.
- [11] 王斌, 刘咏, 刘延斌, 等. 稀土 La 对粉末冶金钛合金组织和力学性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(1): 137-142.
WANG Bin, LIU Yong, LIU Yanbin, et al. Effects of LaH₂ and LaB₂ addition on microstructure and mechanical property of powder metallurgy Ti alloy[J]. Materials Science and Engineering of Power Metallurgy, 2011, 16(1): 137-142.
- [12] 汤海芳, 洪权, 赵永庆, 等. 稀土元素 Y 对 Ti600 合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理技术, 2010, 39(24): 11-14.
TANG Haifang, HONG Quan, ZHAO Yongqing, et al. Effect of yttrium on microstructure and mechanical properties of Ti600 alloy[J]. Material & Heat Treatment, 2010, 39(24): 11-14.
- [13] 易丹青, 刘会群. 稀土元素在钛合金中的存在形式及作用机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(3): 710-713.
YI Danqing, LIU Huiqun. Research and application of rare earth elements in titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(3): 710-713.
- [14] 张豪胤, 王文焱, 祝要民, 等. 固溶、时效对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(6): 659-661.
ZHANG Haoyin, WANG Wenyan, ZHU Yaomin, et al. Effect of solution aging on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(6): 659-661.
- [15] 汤惠萍, 刘咏, 韦伟峰, 等. 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): 244-249.
TANG Huiping, LIU Yong, WEI Weifeng, et al. Effect of rare earth element on microstructure and mechanical properties of powder metallurgy Ti alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(2): 244-249.
- [16] 石德珂. 材料科学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 233-238.
SHI Deke. Material Science Basis[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003: 233-238.
- [17] BRAMFITT B. The effect of carbide and nitride additions on the heterogeneous nucleation behavior of liquidiron[J]. Metall Trans, 1970, 1(7): 1987.
- [18] 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): 180-182.
SONG Bo. Liquid steel heterogeneous nucleation accelerant lattice mismatch degree of utility theory[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 32(2): 180-182.
- [19] 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): 1442-1445.
PAN Ning, SONG Bo, ZHAI Qijie. Catalysis on heterogeneous nucleation of solid compounds in liquid steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(12): 1442-1445.

(编辑 汤金芝)