

文章编号: 1004 - 0609(2004)02 - 0216 - 07

## Ti-42. 85Al-12. 3Nb-2Cr 合金相组成对 高温抗氧化性能的影响<sup>①</sup>

丁晓非<sup>1</sup>, 沈 勇<sup>2</sup>, 谭 毅<sup>3</sup>, 王富岗<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 材料工程系, 大连 116024; 2. 沈阳材料国家(联合)实验室, 沈阳 110016;

3. Department of Materials Science and Engineering, University of California,  
Los Angeles, CA 90095 - 1595, USA)

**摘 要:** 通过热处理获得了合金 Ti-42. 85Al-12. 3Nb-2Cr 铸态 (As-cast)、炉冷 (FC) 和水淬 (WQ) 3 种含不同组成相和微观组织的合金, 研究了这 3 种合金在 1 000 °C 静止空气中的断续氧化行为, 采用 XRD、SEM 和 EPMA 分析了氧化膜的结构和组成。研究表明, Nb 的加入能够显著提高合金的抗氧化性, 但是高含量 Nb 的加入导致高温亚稳  $\beta$  相在室温组织中残留,  $\beta$  相使外层氧化膜的粘附性变差, 促使氧化膜整体剥落。通过热处理消除  $\beta$  相后, 获得的以  $\gamma + \alpha_2$  为主相的炉冷合金中形成了有效的保护性氧化膜。

**关键词:** Ti-Al-Nb 合金; 金属间化合物; 断续氧化; 抗氧化性

中图分类号: TG 146

文献标识码: A

## Effect of phase composition on oxidation resistance of Ti-42. 85Al-12. 3Nb-2Cr alloy

DING Xiao-fei<sup>1</sup>, SHEN Yong<sup>2</sup>, TAN Yi<sup>3</sup>, WANG Fu-gang<sup>1</sup>

(1. Department of Materials Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Shenyang 110016, China;

3. Department of Materials Science and Engineering, University of California,  
Los Angeles, CA 90095 - 1595, USA)

**Abstract:** Three types of Ti-42. 85Al-12. 3Nb-2Cr alloys (as-cast, furnace cooled (FC) and water quenched (WQ)) with different phase compositions and microstructures were prepared. Interrupted oxidation behaviors of these alloys at 1 000 °C in static air were studied using oxidation mass gain analysis. The structure and component of the oxide scales were analyzed by XRD, SEM and EPMA. Results indicate that Nb addition enhances oxidation resistance of the alloy, nevertheless high content of Nb results in the metastable  $\beta$  phase existing in the room-temperature structure. The existence of  $\beta$  phase makes the adhesion of the oxide become worse and accelerate the spalling of the oxide. In the FC alloy with main phase of  $\gamma + \alpha_2$ , a protective oxide scale forms after eliminating  $\beta$  phase in the alloy by heat treatment.

**Key words:** Ti-Al-Nb alloy; intermetallics; interrupted oxidation; oxidation resistance

TiAl 基金属间化合物具有密度小、比刚度和高温比强度高以及阻燃性好等方面的优势, 被认为是最有应用潜力的新一代高温结构材料<sup>[1, 2]</sup>。TiAl 基合金要在航天发动机部件上应用, 除了应具有良好的综合力学性能之外, 还需要具有良好的抗高温腐

蚀能力。但是 TiAl 基合金抗高温氧化性能不足, 限制了其使用范围。为了提高 TiAl 二元合金的高温抗氧化性能, 一方面可以通过表面涂层或化学热处理等表面改性技术<sup>[3-7]</sup>, 另一方面可以在合金中添

① 收稿日期: 2003 - 05 - 18; 修订日期: 2003 - 09 - 19 作者简介: 丁晓非(1966 -), 女, 博士研究生。  
通讯作者: 丁晓非, 博士; 电话: 0411 - 4708439; E-mail: echo8848@263.net

加 Nb, W, Cr, Si 等合金化元素<sup>[8, 9]</sup>。在这些多元合金中, 高铌 TiAl 基合金代表着高温高性能 TiAl 合金的最新发展方向, 也是最具有实际应用前景的合金<sup>[1, 10]</sup>。已知在 TiAl 基合金中添加高熔点元素 Nb, 通过提高合金熔点、降低扩散和层错能, 能够有效提高合金的热稳定性和使用温度<sup>[1, 2]</sup>; 同时添加 Cr 能够有效提高合金的塑性和热加工能力<sup>[2]</sup>。为了开发可以在更高温度(1 000~ 1 200 °C)下使用的合金, 作者在对 Ti-Al-Nb 系合金进行了组织和抗高温氧化性方面的系统研究之后, 重点开发了 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金, 本文中作者通过对其使用不同的热处理制度获得不同的组成相, 研究该合金在 1 000 °C 空气中的氧化行为。

## 1 实验

实验材料在合金设计上保持 Ti 和 Al 元素的摩尔比为 1: 1, 以及高的铌含量和添加少量的 Cr 元素。分别采用纯度为 99.9% 的 Ti, Al, Nb 和 Cr 为原料, 在钨电极电弧炉中反复熔炼数次, 所炼合金为钮扣状, 质量为 11 g。对铸态合金进行 1 280 °C, 2 h 均匀化退火后再分别进行 1 200 °C 保温 6 h 后炉冷、水淬 2 种热处理, 分别得到铸态(A $\sigma$ -cast)、炉冷(FC)和水淬(WQ) 3 种状态的合金。将这 3 种合金线切割成尺寸为 8.0 mm × 4.0 mm × 2.0 mm 的氧化试样供高温氧化实验使用, 试样的表面都使用 600# 水砂纸进行机械研磨处理。

氧化实验采用间断式氧化方法在箱式高温电阻炉中进行, 实验介质为静止空气, 实验温度为 1 000 °C。为了保证试样的 6 个面都能与空气充分接触, 将试样斜置于石英坩埚内, 每 10 h 将坩埚连同试样一起取出, 在光电分析天平(精度为 0.1 mg)上测量质量, 累积氧化时间为 100 h。每种状态的合金采用 3 个试样, 氧化数据取其平均值。采用 XRD-600 型 X 射线谱仪(XRD)分析合金组织和氧化后表面相组成, 在配有能谱仪(EDS ISIS-300 型)的扫描电镜(SEM JSM-5600LV 型)上对试样进行氧化试样表面的形貌观察和成分分析, 用 EPMA-1600 型电子探针进行氧化试样剖面分析。

## 2 结果

### 2.1 合金显微组织及相组成

图 1 所示为 3 种热处理状态下 Ti-42.85Al-

12.3Nb-2Cr 合金的光学显微组织。可见, 铸态合金为粗大的层片组织, 水淬合金层片间距明显减小, 炉冷合金的层片发生断裂, 局部呈短杆状。图 2 所示为 3 种热处理状态下 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金的 X 射线衍射谱, 结果表明铸态合金为  $\gamma$ -TiAl +  $\beta$  两相组织, 水淬合金的相组成为  $\gamma$ -TiAl +  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al +  $\beta$ , 炉冷合金的衍射谱中没有观察到  $\beta$  相的衍射峰, 其相组成为  $\gamma$ -TiAl +  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al 两相组织。参考 Ti-Al-Nb 高温下的三元相图<sup>[11-13]</sup>, 分析认为高温下残留的亚稳  $\beta$  相在炉冷平衡冷却条件下发生

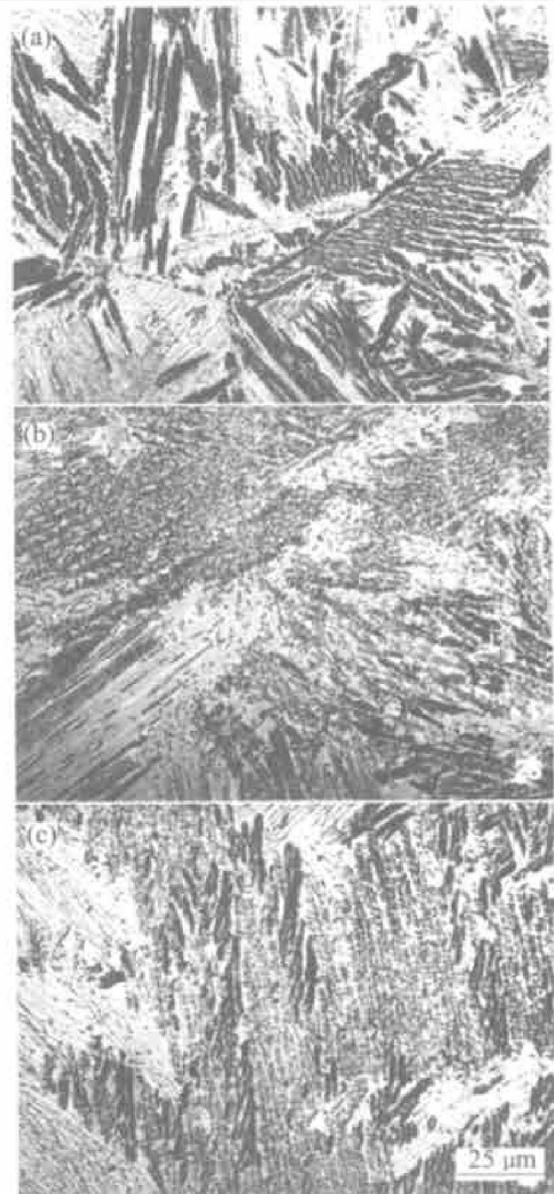


图 1 不同状态 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金的光学显微组织

**Fig. 1** Optical microstructure of Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr alloy under different heat treatment conditions

(a) —A $\sigma$ -cast alloy; (b) —FC alloy;

(c) —WQ alloy

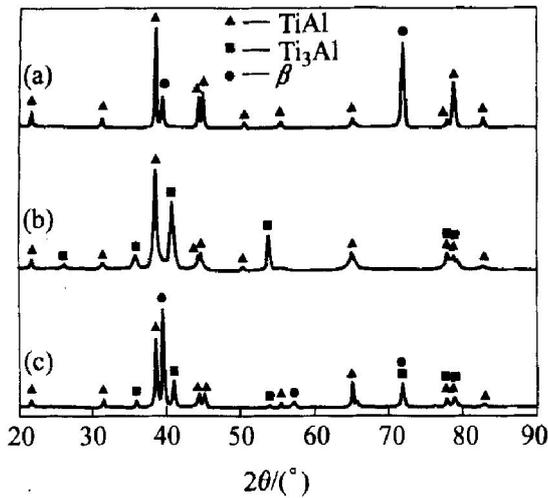


图2 不同状态 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金的 X 射线衍射谱

Fig. 2 XRD patterns of Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr under different heat treatment conditions (a) —As cast alloy; (b) —FC alloy; (c) —WQ alloy

分解；而在快速水冷条件下大部分 β 相得以保留。

### 2.2 氧化动力学

图3所示是经过3种不同热处理后的 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金在 1000 °C 时的氧化动力学曲线。3种状态的合金在 1000 °C, 100 h 高温氧化后的质量增加都大大低于二元 TiAl 合金的。在这3种合金中，炉冷合金的氧化质量增加最小，仅为 1.65 mg/cm<sup>2</sup>，与二元 TiAl 合金在 800 °C 时的

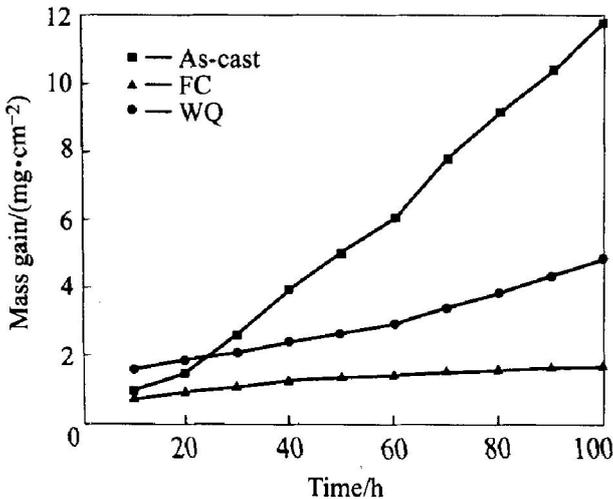


图3 1000 °C 时不同状态 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金的氧化动力学曲线

Fig. 3 Oxidation kinetic curves of Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr with different heat treat conditions at 1000 °C

质量增加相当<sup>[14]</sup>。铸态合金和水淬合金的氧化动力学曲线近似呈线性，氧化 50 h 后有明显的氧化加剧趋势。炉冷合金的氧化动力学曲线呈抛物线型，氧化质量增加缓慢，这表明合金形成了具有保护性的氧化膜。

### 2.3 氧化表面分析

3种不同热处理状态合金在 1000 °C 的氧化过程中合金表面表现出不同的外观变化，主要体现在氧化膜的外观形态和剥落时间上。铸态合金的氧化膜发生局部剥落的时间最早(30 h)，水淬合金次之(50 h)，这两种合金在氧化后期均表现出外层氧化膜整体剥落的现象。从氧化膜剥落的量上讲，铸态合金的最多，石英管底部有大量的土黄色剥落氧化物，XRD 分析表明为 TiO<sub>2</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的混合物。炉冷合金在 100 h 的氧化中没有发生任何剥落现象，显示了极好的抗氧化性能。另外根据试样表面的 XRD 结果得知，3种合金表面组成相均为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 TiO<sub>2</sub>，没有形成 Nb 和 Cr 的氧化物。

图4所示是3种不同热处理状态合金经 1000 °C, 100 h 氧化后表面的 SEM 形貌。铸态合金氧化膜的最外层(白区)由部分细晶和部分粗晶组成，EDS 分析表明白区富 Nb，结合 XRD 分析，其由 TiO<sub>2</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成，里层(黑区)为弥散细小的氧化物颗粒，EDS 结合 XRD 分析表明主相为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。炉冷合金的氧化膜中氧化物颗粒比较细小，EDS 分析表明是以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主相的混合氧化物。图4(c)所示为水淬合金表面局部尚未剥落的氧化膜，EDS 分析表明全为 TiO<sub>2</sub>。图4(d)所示为水淬合金剥落后的黑褐色氧化膜，对应的 EDS 分析表明其为以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主相的混合氧化物。

### 2.4 剖面分析

图5所示是 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 铸态和水淬合金氧化膜剖面 EPMA 电子像。两种合金在 1000 °C 氧化 100 h 后，形成的氧化膜较为类似。铸态试样的氧化膜分为3层：树脂、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ TiO<sub>2</sub> 混合氧化膜、基体；水冷合金的氧化膜由基体、以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主相的混合氧化膜和树脂组成。电子探针线分析结果表明，这两种合金的氧化膜中没有看到元素 Nb 和 Cr 的分布。

图6所示为炉冷氧化合金剖面的氧化膜及基体元素面扫描图，远离氧化膜的基体相组成为 γ-TiAl，而靠近氧化膜处的基体富 Ti 贫 Al，相组成为 Ti<sub>3</sub>Al。氧化膜厚约为 30 μm，电子探针线分析结合

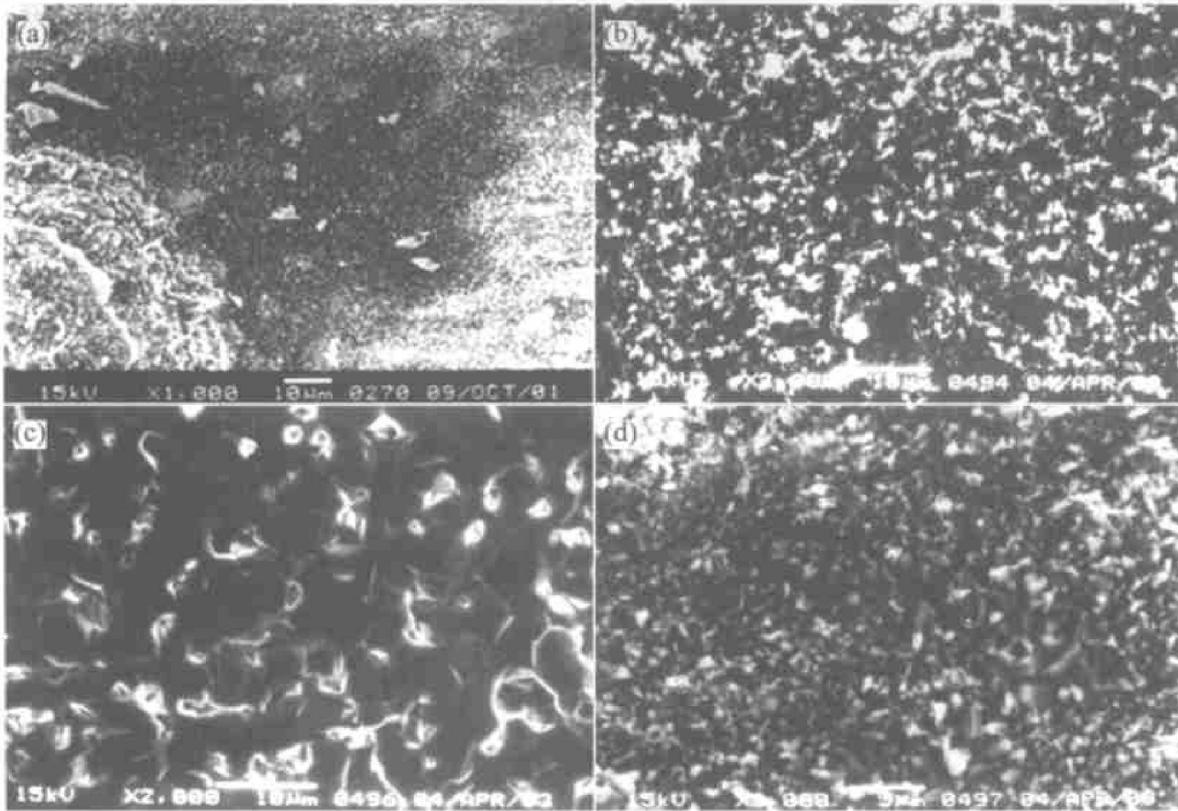


图 4 不同热处理状态 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金在 1 000 °C 氧化 100 h 后的表面 SEM 形貌

Fig. 4 SEM morphologies of surfaces of Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr in three different heat treatment conditions oxidated at 1 000 °C for 100 h

(a) —As-cast alloy; (b) —FC alloy; (c) and (d) —WQ alloy

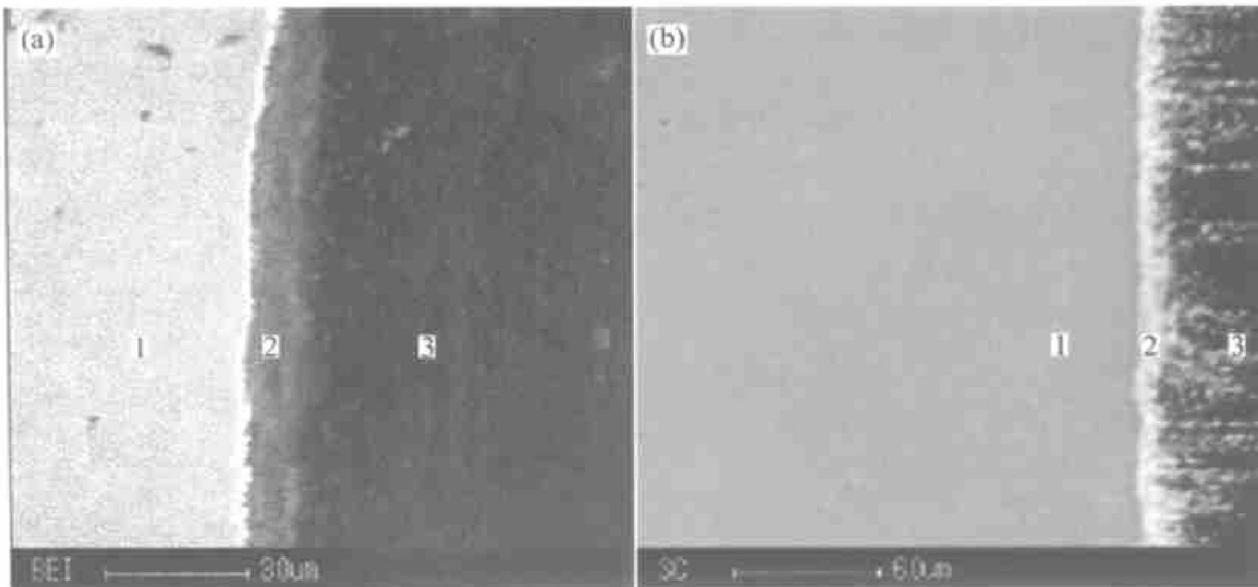


图 5 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 铸态和水淬试样氧化膜剖面 EPMA 电子像

Fig. 5 EPMA images of cross-section of as-cast and WQ Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr alloys after 1 000 °C, 100 h oxidation

(1—Matrix; 2—Mixed oxidation film; 3—Resin)  
(a) —As-cast alloy; (b) —WQ alloy

波谱定点半定量分析表明, 氧化膜主要是  $Al_2O_3$  和  $TiO_2$  的混合物, 且  $Al_2O_3$  不连续点状弥散分布在混

合氧化膜中, 氧化膜的最外层富  $Al_2O_3$ , 同时可以看到靠近基体的氧化膜处有  $Al_2O_3$  插入基体中。

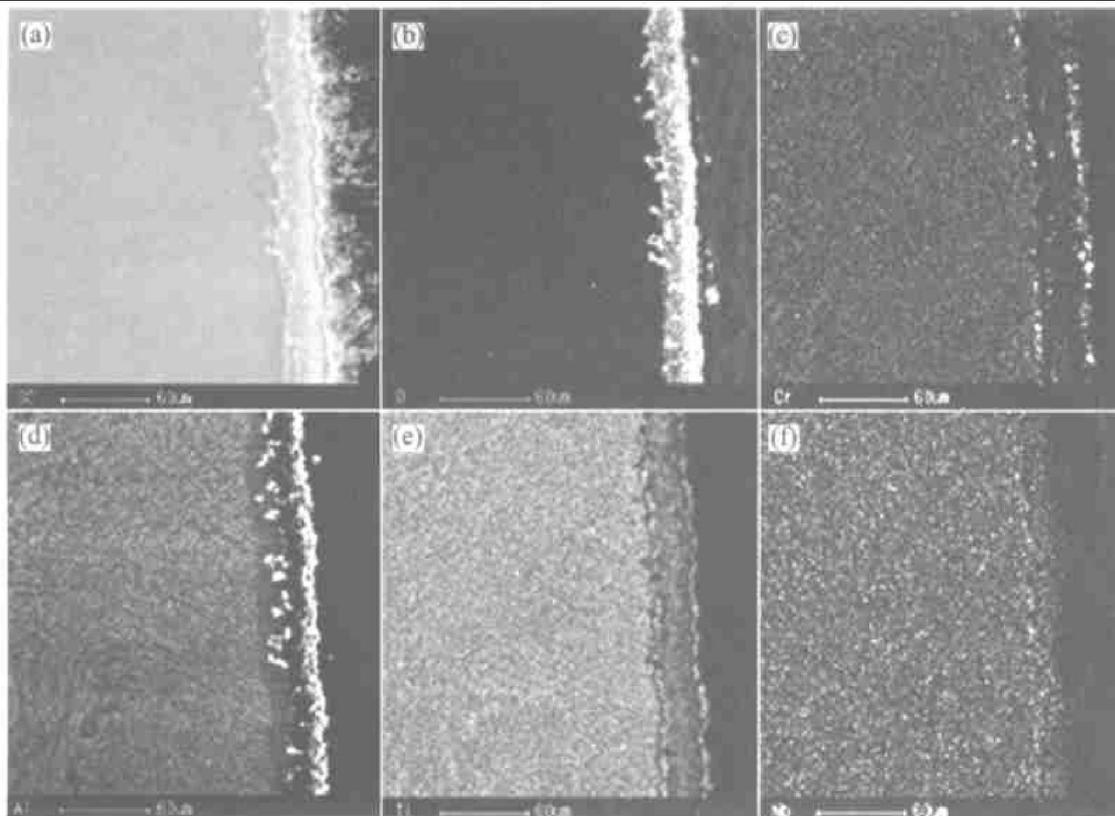


图 6 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 炉冷试样氧化膜剖面 EPMA 吸收电子像及其元素面扫描图

Fig. 6 EPMA absorb-electron spectra and surface scanning of elements in FC alloy after 100 °C, 100 h oxidation

(a) —Morphology; (b) —O element; (c) —Cr element; (d) —Al element;  
(e) —Ti element; (f) —Nb element

### 3 讨论

高温下二元  $\gamma$ -TiAl 合金由于 Ti 氧化物和 Al 的氧化物的生成自由能极其接近, 且 Al 的活度为负偏差, 因而难以发生 Al 的选择性氧化生成具有保护性的  $Al_2O_3$  保护膜, 而是容易生成  $TiO_2$  和  $Al_2O_3$  的混合氧化物层。由于  $TiO_2/Al_2O_3$  混合氧化膜的结构疏松, 同时  $TiO_2$  生长速度远远高于  $Al_2O_3$  的, 且高温下  $TiO_2$  可以充当氧(氮)进入基体的通道, 因此这种混合氧化膜的保护作用比  $Al_2O_3$  层差许多。已有研究表明, 在二元 TiAl 合金中添加元素 Nb 能够提高合金的抗氧化性。一般认为, Nb 的作用主要体现在两个方面, 一是有助于促进富 Al 氧化膜的形成, 二是提高氧化膜的粘附性<sup>[6, 8]</sup>。此外, 由于  $TiO_2$  是 N 型氧化物,  $Nb^{5+}$  离子的掺杂可能有助于降低  $TiO_2$  中的缺陷浓度, 从而使  $TiO_2$  的生长速度降低。程晓英等<sup>[15]</sup>研究了 Ti-45Al-10Nb 合金在 800~960 °C 空气中的氧化行为, 认为氧化膜中的 TiN 相是降低合金氧化速率的主要原因, 并且认为 Nb 有利于氧化层中的 TiN 相的稳定, 因而提高

了合金在空气中的抗氧化性能。本文中 3 种状态 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金表面氧化膜均没有发现 TiN 相, 同时 XRD 分析结合氧化剖面 EPMA 分析表明, Nb 没有以自身的氧化物存在, 分析认为 Nb 复合存在于  $TiO_2$  中的可能性大于存在于  $Al_2O_3$  中的, Nb 以  $Nb^{5+}$  替代  $TiO_2$  中的  $Ti^{4+}$ , 降低了阴离子的空位浓度, 抑制混合氧化膜中  $TiO_2$  的生长, 促进  $Al_2O_3$  的生成, 从而改善了氧化膜的保护性能。Nb 提高 TiAl 基合金高温氧化膜稳定性体现在动力学上, 而不是热力学方面的因素。

在 Ti-Al-Nb 三元系合金中, 添加 W, Nb, Cr 等  $\beta$  相稳定元素促进  $\beta$  相在室温组织中残留。Nb 在  $\gamma$ -TiAl 相中有较大的溶解度, 但是大量 Nb 的加入促使合金中  $\beta$  相增多。参考 Ti-Al-Nb 三元系 1200 °C 平衡相图<sup>[13]</sup>, 此时合金处于  $\gamma + \alpha$  双相区,  $\beta$  相为残留的高温亚稳相。炉冷基体 XRD 衍射谱表明, 在炉冷平衡冷却条件下,  $\beta$  相得以大部分消除; 在水冷快速冷却条件下, 高温残留  $\beta$  相来不及分解, 得以在基体中保留。本文的研究结果表明,  $\beta$  相的存在对合金的高温抗氧化性能不利。对比 3 种状态 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金的氧化结

果, 含  $\beta$  相最多的铸态合金的抗氧化性能最差, 氧化膜反复剥落, 与基体的结合力最弱, 形成的氧化膜不具有保护性。水淬合金的抗氧化性能好于铸态合金的, 分析其原因, 一是铸态合金经过高温保温后,  $\beta$  相减少, 减弱了  $\beta$  相的有害作用; 二是高温冷却时基体中析出  $\alpha_2$  相,  $\alpha_2$  相的存在有助于氧化膜中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的生成, 从而提高合金的抗氧化性。

在这 3 种热处理状态的合金中, 炉冷合金的氧化质量增加最小, 在 1 000 °C, 100 h 的间断氧化中没有发生任何局部剥落现象, 表现出最优的抗高温氧化性能。氧化表面 XRD 分析结合剖面 EPMA 分析结果表明合金形成了有效的氧化膜。这主要是因为炉冷合金在平衡冷却条件下  $\beta$  相得以消除, 合金形成了  $\gamma\text{-TiAl} + \alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$  双相组织, 基体中  $\alpha_2$  相的存在促进  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的生成, 提高了合金的抗氧化性。从氧化膜的结构上讲, 炉冷合金氧化膜呈层状分布, 外层形成的是以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主相的连续致密氧化膜, 内层为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  呈点状弥散分布的  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$  混合氧化膜, 在氧化膜与基体结合部位局部  $\text{Al}_2\text{O}_3$  插入基体中。炉冷合金虽然没有形成理想中的连续单一致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护膜, 但仍可以认为这种结构的氧化膜具有较好的保护性。

元素 Cr 对合金氧化性能的影响较为复杂。已有研究表明, 在二元 TiAl 合金中添加 1% ~ 3% (摩尔分数) 的 Cr 对提高合金的抗氧化性不利, > 8% (摩尔分数) Cr 的添加才能通过形成第二相改善合金的抗氧化能力<sup>[1]</sup>。对 3 种相组成 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金氧化膜的分析表明, Cr 没有形成其自身氧化物, 面分析结果表明, 在铸态和水淬合金的氧化膜中也都没有观察到 Cr 元素的分布。炉冷合金的氧化膜中元素 Cr 的面分布(图 6)表明, Cr 在氧化膜中的含量明显比在基体中的少, 但是在氧化膜的最外层和与基体结合部位富集, 分析表明, Cr 与 Nb 类似, 复合存在于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中, 通过降低阴离子的空位浓度, 抑制  $\text{TiO}_2$  的生长。另外 Cr 是  $\beta$  相稳定元素, 能够促进亚稳  $\beta$  相的残留, 通过热处理消除  $\beta$  相后, 合金中元素 Cr 发生重新分布。

## 4 结论

1) 合金 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 铸态下残留的高温亚稳  $\beta$  相在炉冷平衡冷却条件下发生分解, 在水冷快速冷却下大部分得以保留。

2) 3 种相组成 Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 合金间

断氧化结果表明, 高温残留的亚稳  $\beta$  相的存在对合金抗氧化性不利, 它能削弱氧化膜与基体的粘附性, 促进氧化膜的剥落。

3) Ti-42.85Al-12.3Nb-2Cr 炉冷合金氧化动力学曲线呈抛物线型, 表明形成了具有保护性的氧化膜。外层为连续均一的以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主相的氧化膜, 内层为混合氧化膜, 其中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  呈点状不连续分布, 阻止了  $\text{TiO}_2$  生长; 与基体结合部位局部  $\text{Al}_2\text{O}_3$  插入基体中, 极大地提高了氧化膜和基体的粘附性。

## REFERENCES

- [1] 张永刚, 韩雅芳, 陈国良, 等. 金属间化合物结构材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 693 - 726.  
ZHANG Yong-gang, HAN Ya-fang, CHEN Guo-liang, et al. Intermetallic Structure Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 693 - 726.
- [2] 彭超群, 黄伯云, 贺跃辉. TiAl 基合金的工艺-显微组织-力学性能关系[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 527 - 540.  
PENG Chao-qun, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui. Relationships among technologies, microstructures and mechanical properties of TiAl based alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 527 - 540.
- [3] ZHOU Chun-gen, YANG Ying, GONG Sheng-kai, et al. Effect of TiAl-Cr coatings on the high temperature oxidation behavior of TiAl alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 307: 182 - 187.
- [4] Zhang Y G, Li X Y, Chen C Q, et al. The influence of Nb implantation upon oxidation behavior and hardness of a Ti-48% Al alloy [J]. Surface and Coating Technology, 1998, 100 - 101: 214 - 218.
- [5] Li X Y, Taniguchi S, Zhu Y C, et al. Effects of C, Nb and C+ Nb combined ion implantation on the oxidation resistance of  $\gamma\text{-TiAl}$  based alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 316: 224 - 230.
- [6] 王 薇, 史晶宇, 张永刚, 等. Nb 离子注入  $\gamma\text{-TiAl}$  的高温循环氧化行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(2): 125 - 128.  
WANG Wei, SHI Jing-yu, ZHANG Yong-gang, et al. Cycling oxidation behavior of Nb ion implanted  $\gamma\text{-TiAl}$  [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(2): 125 - 128.
- [7] 贺跃辉, 黄伯云, 曲选辉, 等. 渗碳处理提高 TiAl 基合金高温抗氧化性[J]. 材料研究学报, 1996, 10(6): 603 - 607.  
HE Yue-hui, HUANG Bai-yun, QU Xuan-hui, et al.

- Improvement of oxidation resistance of TiAl based alloy at elevated temperature by carburization[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1996, 10(6): 603 - 607.
- [8] Shida Y, Anada H. Role of W, Mo, Nb and Si on oxidation of TiAl in air at high temperature[J]. Mater Trans JIM, 1994, 35: 623.
- [9] Maki K, Shioda M, Sayashi M. Effect of silicon and niobium on oxidation resistance of TiAl intermetallics[J]. Materials Science and Engineering, 1992, A153: 591 - 596.
- [10] 闫蕴琪, 王文生, 周 廉, 等. 一种高性能 TiAl 金属间化合物[J]. 金属热处理学报, 2000, 21(3): 1 - 4. YAN Yunqi, WANG Wen-shen, ZHOU Lian, et al. A kind of high property TiAl intermetallics[J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 2000, 21(3): 1 - 4.
- [11] DING Jir-Jun, HAO Shir-ming. Reply to the comment on investigation on the 1 000, 1 150 and 1 400 °C isothermal section of the TiAlNb system—part II: modification of 1 000 and 1 150 °C isothermal sections of the TiAlNb system[J]. Intermetallics, 1998, 6: 329 - 334.
- [12] 王西涛, 陈国良, 倪克铨, 等. TiAlNb 三元系 1 400 °C等温截面图[J]. 金属学报, 1995, 31: S550 - 554. WANG Xi-tao, CHEN Guo-liang, NI Ke-quan, et al. 1 400 °C isothermal section of TiAlNb system[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31: S550 - 554.
- [13] Perpezko J H, Chang Y A, Seitzman L E, et al. High Temperature Aluminides and Intermetallics[M]. Warrendale OH: TMS, 1990. 9.
- [14] 曲恒磊, 周 廉, 魏海荣. TiAl 循环氧化行为研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2000, 21(4): 404 - 407. QU Heng-lei, ZHOU Lian, WEI Hai-rong. Oxidation behavior of TiAl alloys during thermal cycling[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2001, 21(4): 404 - 407.
- [15] 程晓英, 万晓景, 沈嘉年. 合金元素 Nb 在 TiAl 高温氧化行为中的作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(2): 69 - 71. CHENG Xiao-ying, WAN Xiao-jing, SHEN Jia-nian. The effect of Nb on the oxidation behavior of TiAl alloy at high temperature[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2002, 22(2): 69 - 71.

(编辑 杨 兵)