

# Ru 对铸造 Ti-47Al 合金显微组织的影响

郑运荣 于熙泓 马书伟 汪小平

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 研究了铸造 Ti-47Al-XRu (at%) ( $X = 0.5, 1, 3$ ) 合金的显微组织。结果表明, Ru 与 Cr 相似, 是很强的稳定元素, 促进  $\alpha_2$  相形成。 $\alpha_2$  相是含 Ru 量高达 10at% 的富 Ru 相。含 1at% Ru 的合金在 1160 ~ 1200 温度范围热处理时不断析出粒状次生  $\alpha_2$  相, 破坏了  $\alpha + \alpha_2$  片状组织, 同时形成了新的晶粒。经 1200 , 48h 处理后可得到平均晶粒尺寸小于 60  $\mu\text{m}$  的晶, 因此, Ti-47Al-1Ru 合金是可热处理细化晶粒的铸造合金。当 Ru 量增加至 3at% 时, 合金难于热处理细化晶粒, 而且合金明显脆化。

**关键词:** TiAl 基合金; 显微组织; Ru 的作用

**中图分类号:** TG146.23      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-5053(1999)01-0017-05

TiAl 基合金是航空、汽车和发电领域最重要的新型结构材料<sup>[1]</sup>, 特别由于这类合金密度低, 比强度高, 很适合制作涡轮转动件<sup>[2]</sup>。铸造 TiAl 合金可以用普通的壳模铸造技术生产出无余量或少余量的铸件, 简化了工艺流程, 降低了成本。通常认为, 铸造合金的低塑性是使用这类合金的制约因素, 但后来的研究工作证明, Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金中等厚度的铸件其塑性并不比锻件低<sup>[3]</sup>, 而且 TiAl 合金铸件的蠕变抗力和断裂韧性更高<sup>[4]</sup>。这大大鼓舞了发动机的设计者, 最终导致了美国 GE 公司于 1993 年用铸造 TiAl 合金制造低压涡轮叶片, 并在 CF6-80C2 发动机上通过 1000 个模拟飞行周期的试车<sup>[5]</sup>。这一成功经历为铸造 TiAl 合金的应用奠定了基础。在发展铸造合金的过程中, 通过添加 Cr 和热处理可有效地细化晶粒<sup>[6]</sup>, 但后来发现这类合金的抗氧化性不及高温合金<sup>[7]</sup>, 特别当温度高于 800 时氧化速率更快<sup>[8]</sup>。为了提高抗氧化性, 加进了 Mo, Nb, Si, Hf, Zr 和 W 等对抗氧化性有益的元素<sup>[7]</sup>。加入 Cr 使抗氧化性降低, 必须同时加 Nb 来抵消 Cr 对抗氧化性带来的不利影响<sup>[9]</sup>。我们试图寻找 1 个元素, 既能细化 TiAl 合金的晶粒, 又能提高合金的抗氧化性能, 经初步研究分析, Ru 可能具备这种双重功能。

## 1 试验方法

试验材料为 Ti-47Al-(0.5, 1, 3) Ru (at%) 3 炉合金。所有合金均用非自耗电弧熔炼, 为保证合金成分均匀, 铸锭经 5 次反复重熔。用线切割从铸锭上切取试样, 真空封焊至石

收稿日期: 1999-02-24

基金项目: 航空科学基金资助项目(编号 97G21001)

作者简介: 郑运荣(1941-), 男, 研究员

英管中,然后在1160~1200 温度范围加热24~100h,空冷。铸态和热处理后的试样用电子探针背射图像进行形貌观察,并对各相进行成分分析,利用X射线衍射进行相鉴定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铸态显微组织

铸态的Ti-47Al(at%)合金的显微组织由TiAl+Ti<sub>3</sub>Al的片状组织组成,加进0.5%Ru对显微组织无明显影响。加进1.0%Ru时,用电子探针测得枝晶间区有富Ru区,反映在图1a的背射电子图像上的白亮区,少数区域还形成富Ru相(图1a箭头所指)。由于铸锭凝固时冷却速度快,α<sub>2</sub>片层组织析出不明显。当合金含3%Ru时,不仅枝晶间区析出大量富Ru相,枝晶干区也析出粒状的富Ru相(图1b)。在3Ru合金中α<sub>2</sub>相呈颗粒状。

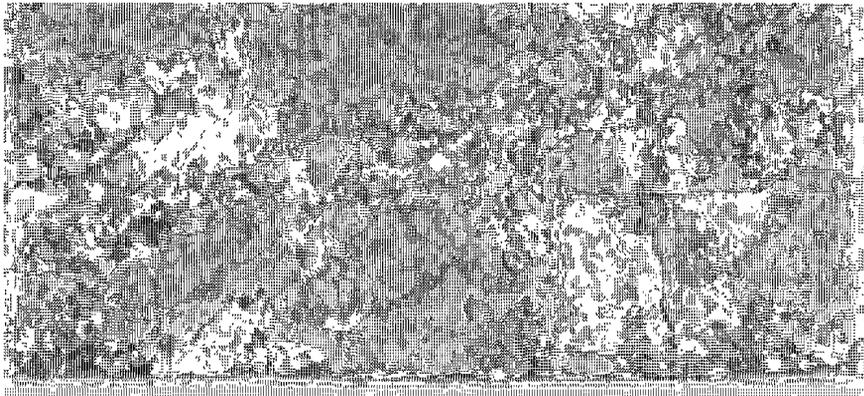


图1 含Ru合金的铸态组织

(a)Ti-47Al-1Ru合金;(b)Ti-47Al-3Ru合金

Fig. 1 As-cast microstructure of Ru-bearing alloys

(a)Ti-47Al-1Ru alloy;(b)Ti-47Al-3Ru alloy

用X射线衍射技术对Ti-47Al-3Ru合金进行了结构分析,结果示于图2,除了有α和α<sub>2</sub>相的衍射谱外,还有体心立方α<sub>2</sub>相的衍射谱线。

用电子探针针对Ti-47Al-1Ru合金的α<sub>1</sub>,α<sub>2</sub>和α<sub>3</sub>相的成分做了分析,结果示于表1中。可以看出,在合金的3个组成相中,α<sub>2</sub>相的含Ru量最高,达10.6at%,α<sub>1</sub>次之,α<sub>3</sub>相中Ru的溶解度最低。应该指出的是,在铸态组织中,由于α<sub>2</sub>片极薄,很难用电子探针准确测定其成分。表中列出的α<sub>2</sub>相的成分实际上把它周围部分α<sub>1</sub>相的成分包括进去了。因此α<sub>2</sub>相Al含量偏高而Ru量偏低。

### 2.2 热处理显微组织

Ti-47Al-1Ru合金在1160~1200 温度范围热处理时的最显著变化是析出次生α<sub>2</sub>相。用电子探针背射图像对1200 ,24h热处理试样观察时,可看到在枝晶干区析出的富Ru的α<sub>2</sub>相呈白色的小颗粒,破坏了灰色的α<sub>2</sub>片的连续性。α<sub>2</sub>的析出与长大靠消耗α<sub>1</sub>相来完成。在α<sub>2</sub>相析出较多的区域,α<sub>1</sub>量减少而α<sub>3</sub>量增加。在枝晶干区,还没有形成新生的α<sub>1</sub>晶,所以视场

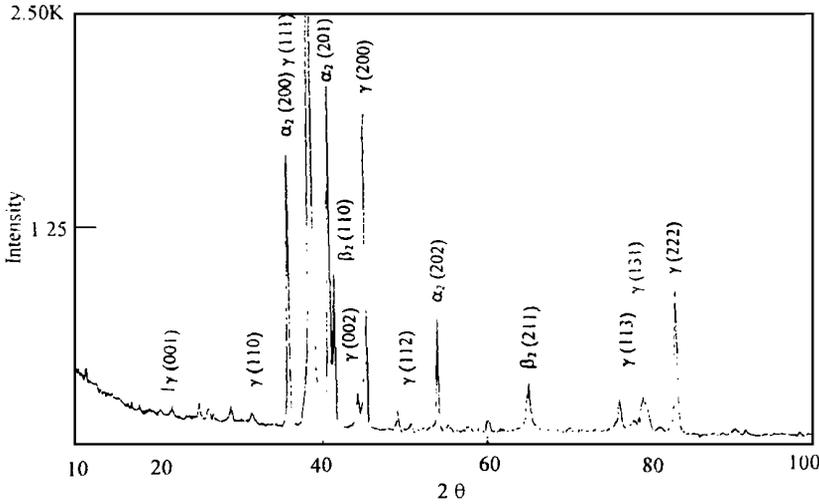


图 2 Ti-47Al-3Ru 合金中各相的 X 射线衍射图

Fig. 2 X-ray diffraction pattern of phases in Ti-47Al-3Ru alloy

表 1 Ti-47Al-1Ru 合金各相的成分, at%

Table 1 Composition of different phases in Ti-47Al-1Ru alloy, at%

Phase	Ti	Al	Ru
	53.2	45.8	0.9
₂	53.9	44.3	1.8
₂	49.5	39.9	10.6

的背景是均匀的黑色相(图 3a)。在枝晶间区,除了在铸态时由于 Al 偏析在枝晶间区析出初生晶外,在热处理时有新生的晶不断成核和长大,消耗了  $\alpha_2$  片状组织,结果在该区形成了许多细晶,在细晶的周围析出块状  $\alpha_2$  和  $\alpha_1$  相,在有的晶内还析出比原来  $\alpha_2$  片间距更大的  $\alpha_2$  片(图 3b)。上述显微组织变化与 Ti-44.3Al-3Cr(at%)合金相同<sup>[6]</sup>。

1200 °C 保温 48h 的 Ti-47Al-1Ru 合金的显微组织如图 4 所示。这时  $\alpha_2$  片状区已全部变成了平均晶粒小于 60 nm 的晶粒,在晶内可以看到由于深腐蚀显示出来的孪晶,在晶界上的块状  $\alpha_2$  相和少量  $\alpha_1$  相被腐蚀成很深的轮廓。这种显微组织和 Ti-48Al-3Cr 合金经 1200 °C, 168h 热处理后形成的孪晶晶粒很相似(图 5)。

上述结果证明,和含 Cr 的 TiAl 基合金一样,含 Ru 的 TiAl 基合金可以通过热处理方法在铸态的  $\alpha_2$  组织中形成新生晶,从而起着细化晶粒的作用,而且 Ru 的作用比 Cr 更强,加 1at% Ru 就能起到 3at% Cr 的作用。

Ti-47Al-3Ru 合金在 1200 °C 热处理时显微组织和铸态时差不多,并没有形成新生的细晶。除了保留铸态组织中大量初生  $\alpha_2$  相外,还析出大量次生  $\alpha_2$  相。过多地析出  $\alpha_2$  相使合金变脆,在切割试样时很容易开裂。显然在 TiAl 基合金中加 3at% Ru 是过量添加,对细化晶粒组织和改善力学性能不利。

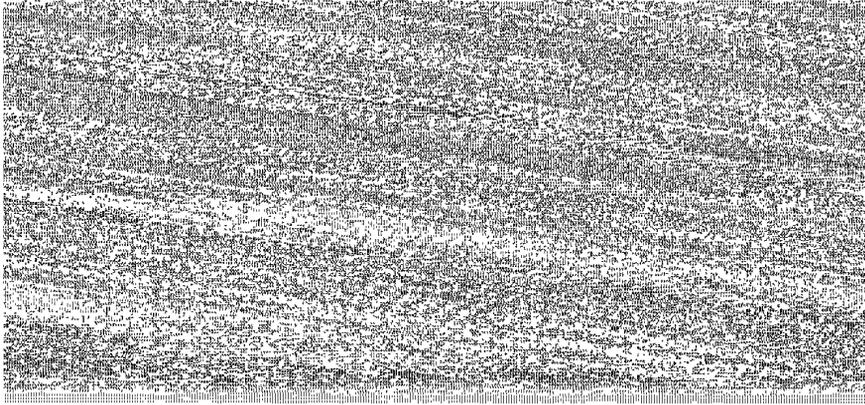


图3 Ti-47Al-1Ru 合金经 1200 °C, 24h 热处理后的显微组织(背射电子图像)  
(a) 枝晶干区; (b) 枝晶间区

Fig. 3 Microstructure of Ti-47Al-1Ru alloy after 1200 °C, 24h heat treatment (BSEI)  
(a) dendrite; (b) interdendrite

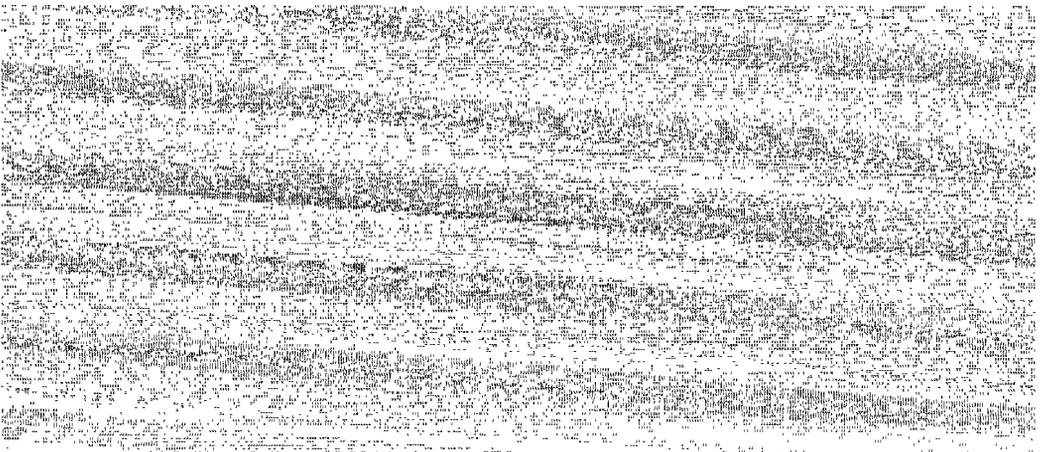


图4 Ti-47Al-1Ru 合金经 1200 °C, 48h 处理后的显微组织

Fig. 4 Microstructure of Ti-47Al-1Ru alloy after 1200 °C, 48h treatment

图5 Ti-48Al-3Cr 合金经 1200 °C, 168h 处理后的显微组织

Fig. 5 Microstructure of Ti-48Al-3Cr alloy after 1200 °C, 168h treatment

### 3 结 论

- (1) Ru 对 Ti-47Al 合金显微组织的作用与 Cr 相似, 它是  $\beta$  稳定元素, 促进  $\beta_2$  相形成。
- (2) Ru 是正偏析元素, 在 Ti-47Al-1Ru 合金中会形成少量初生  $\beta_2$  相, Ru 在该相的含量高达 10at%。
- (3) 含 1Ru 的合金在 1160 ~ 1200 °C 温度范围热处理时不断析出次生  $\beta_2$  相, 破坏了  $\beta_2$  片层组织, 同时形成新的  $\beta_2$  细晶粒。
- (4) 3Ru 的合金很难通过热处理方法细化晶粒, 而且由于大量  $\beta_2$  相析出使合金变脆。

## 参考文献:

- [1] London B, Larsen D E, Wheeler D A, et al. Investment cast gamma titanium aluminide alloys: processing, properties and promise. Structural Intermetallics. Darolia R, et al, ed. TMS, 1993, 151
- [2] Austin C M, Kelly T J. Progress in implantation of cast gamma titanium aluminide. Gamma Titanium Aluminides. Kim Y-W, et al, ed. TMS, 1995, 21
- [3] Huang S C. Titanium aluminum alloys modified by chromium and niobium and method of preparation. U. S. Patent, 4, 879, 092. 1989
- [4] Austin C M, Kelly T J. Development and implementation status of cast gamma titanium aluminide. Structural Intermetallics, Darolia R, et al, ed. TMS, 1993, 143
- [5] Austin C M, Kelly T J. Gas turbine engine implementation of gamma titanium aluminide. Superalloys 1996. Kissinger R D, et al, ed. TMS, 1996, 539
- [6] 郑运荣, 赵林若, Tangri K. Cr 对 Ti<sub>3</sub>Al+TiAl 合金显微组织的影响. 金属学报, 1994, 30(3): A97
- [7] Kawaura H, Nishino K, Saito T. New surface treatment using a fluidized bed furnace for improving oxidation resistance of TiAl-base alloys. Structural Intermetallics 1997. Nathal M V, et al, ed TMS, 1997, 377
- [8] Tomasi A, Gialanella S, Orsini P G, et al. Oxidation behaviour of intermetallic compounds based on Ti-Al system. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1995, 364: 999
- [9] Mckeel D W, Huang S C. Oxidation behavior of gamma titanium aluminide alloys under thermal cycling conditions. Corrosion Science, 1992, 33: 1899

## Effect of Ru on microstructure of cast Ti-47Al alloy

ZHENG Yun-rong    YU Xi-hong    MA Shu-wei    WANG Xiao-ping

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Microstructure of cast Ti-47Al-XRu(at%) alloy with X= 0.5, 1 or 3 has been investigated. The results showed that elements Ru and Cr have similar behavior: they are strong  $\beta$  phase stabilizer and promote the formation of  $\beta_2$  phase. This phase is a Ru-riched phase and content of Ru in  $\beta_2$  phase is more than 10at%. In the alloy containing 1at% Ru the grained secondary  $\beta_2$  phase continuously precipitated during heat treatment of 1160 ~ 1200 temperature range, therefore the  $\beta_1 + \beta_2$  lamellar structure was interrupted and the new  $\beta_2$  grains formed. The  $\beta_2$  grains with average grain size less than 60 nm obtained after treatment of 1200 for 48h. That means Ti-47Al-1Ru alloy is a finable grain cast alloy by heat treatment. As the content of Ru in alloys increases to 3at%, it is difficult to refine the grains of cast alloy by heat treatment, moreover alloy obviously becomes brittle.

**Key words:** Ti-Al base alloys; microstructure; effect of Ru