

# Ti与 Al反应合成 TiAl基合金的过程和机理

汪琳\* 熊翔 黄伯云

(中南工业大学, 长沙 410083)

**摘要** 采用扫描电子显微镜对反应热压 1:1 的 Ti-Al 混合粉所制备的 TiAl 基合金致密体的显微结构和微区化学成分进行了观察和分析, 根据 Al 元素的分布和各相存在的成分范围, 发现 Ti 与 Al 反应过程中, 首先在原 Ti 颗粒内部形成 TiAl<sub>3</sub>, TiAl, Ti<sub>3</sub>Al 和  $\alpha$ -Ti 四相。然后, 反应在这四个固相间继续进行。随着 Al 元素的扩散和均匀化, 已形成的 TiAl<sub>3</sub> 和  $\alpha$ -Ti 相进一步反应而消失掉, 最终, 显微组织由 TiAl 和 Ti<sub>3</sub>Al 两相构成。

**主题词** TiAl 反应热压 机理

## 1 前言

TiAl 金属间化合物由于高温强度高、密度低而成为一种颇有应用潜力的高温结构材料。除了可采用熔铸和粉末冶金(粉末烧结处理)技术制造外, TiAl 合金材料还可采用新近发展起来的自蔓延高温合成(SHS)技术制造<sup>[1-5]</sup>。普通 Ti 和 Al 反应合成技术所制造的 TiAl 基合金为多孔体, 反应热压(SHS 过程和热压的结合)能大大地减少孔隙, 使材料达到致密。

本研究通过采用扫描电子显微镜(SEM)观察和分析反应热压 TiAl 基合金的晶粒显微结构和微区化学成分, 探讨了 Ti 和 Al 反应合成 TiAl 合金的过程和机理。

## 2 实验

采用纯 Ti 粉和 Al 粉为原料, 制备成 Ti-Al 成分为 1:1 (原子比) 的母体混合粉。原料 Ti 和 Al 粉的纯度均为 99%, 粒度小于 45 $\mu$ m。将 10g 混合粉末放入直径为 15mm 的石墨模具中后, 真空封闭在不锈钢管内。然后, 在 0.6MPa 的应力载荷下, 迅速分别加热

至 800 $^{\circ}$ C (RHP1 试样)、880 $^{\circ}$ C (RHP2 试样) 和 940 $^{\circ}$ C (RHP3 试样)。在以上温度停留 5min 后, 将试样和不锈钢管一起抽出炉膛空冷。在约 650 $^{\circ}$ C 时, 反应热压压缩非常明显。

TiAl 相的相对量 (TiAl 与 Ti<sub>3</sub>Al 之比) 由两个主要 X 射线衍射峰的峰高确定。对 TiAl 相, 采用 (200) 晶面衍射峰; 对 Ti<sub>3</sub>Al 相, 采用 (201) 晶面衍射峰<sup>[2]</sup>。晶粒显微结构观察和微区化学成分分析由 X-650 型扫描电子显微镜完成。试样表面经研磨、抛光后, 用 kroll 溶液侵蚀。

## 3 结果

### 3.1 X 射线衍射分析

图 1 为 X 射线衍射结果。在 RHP3 试样中合成的 TiAl 相的相对量最多, RHP2 试样中次之, RHP1 试样中最少。这表明反应温度对 Ti 与 Al 反应合成 TiAl 有着一定的影响。反应温度高, 可促进 Ti 与 Al 间的扩散, 以及引发生成相间的进一步反应, 这些均有利于 TiAl 的合成<sup>[5]</sup>。

\* 汪琳, 工程师, 主要从事材料组织结构分析及金相质量检验工作。

收稿日期: 1995. 10. 14.

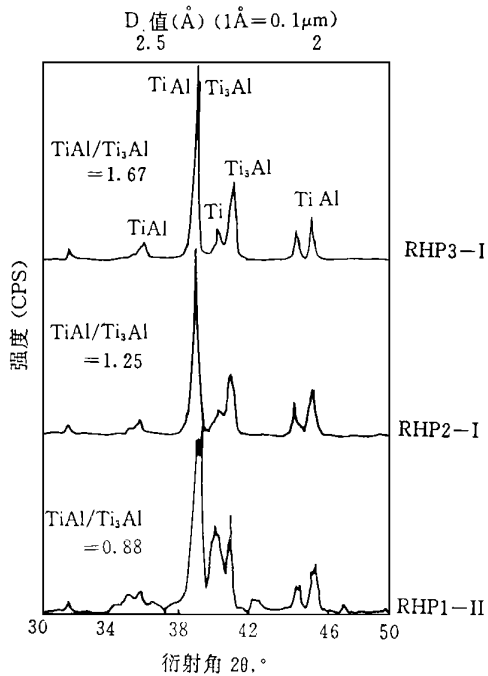


图 1 X射线衍射谱

Fig. 1 X ray diffraction spectrum

3. 2 晶粒显微结构和微区成分

图 2 为扫描电镜 (SEM)显微结构照片。显微结构观察发现, RHP1 试样的晶粒由三层亚结构构成 (图 2a), 它们的标记分别为 1 2 3 图 3 为这三层亚结构的 X 射线能量衍射谱。三个试样的晶粒微区化学成分 X 射线能量衍射定量数据示于表 1 表 1 表明, RHP1 试样晶粒的边缘薄层 (标记为 1) 为  $TiAl + Ti_3Al$  两相, 中间层 (标记为 2) 为  $Ti_3Al$  单相, 核心 (标记为 3) 为  $\alpha-Ti$  相。

RHP2 试样的晶粒仍由三层亚结构组成 (图 2b), 但与 RHP1 试样相比较, 由于 Ti 与 Al 不断反应, 其边缘层加厚且只含有  $TiAl$  单相, 核心  $\alpha-Ti$  相区域减小。当核心  $\alpha-Ti$  相与 Al 元素完全反应时, 晶粒就仅由两层亚结构构成。图 2c 为 RHP3 试样的晶粒显微结构, 该两层亚结构分别为  $TiAl$  相和  $Ti_3Al$  相。

图 4 为三个试样的 Al 元素分布图。它们明显地表示出, Al 元素分布随着合成反应的进行而逐渐趋于均匀化。

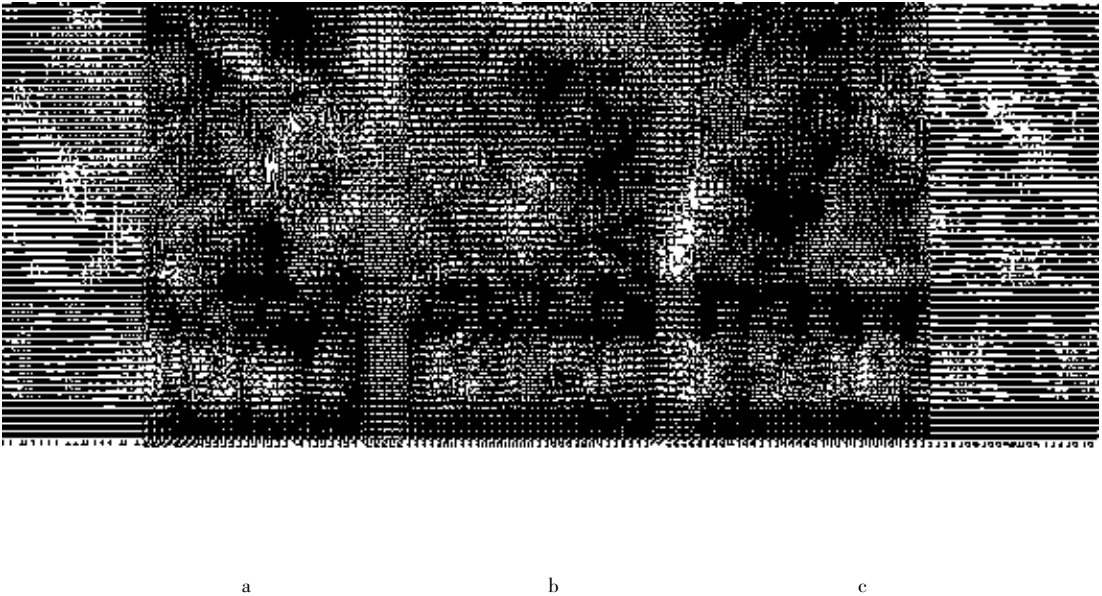


图 2 SEM显微结构照片

Fig. 2 SEM microstructural photo



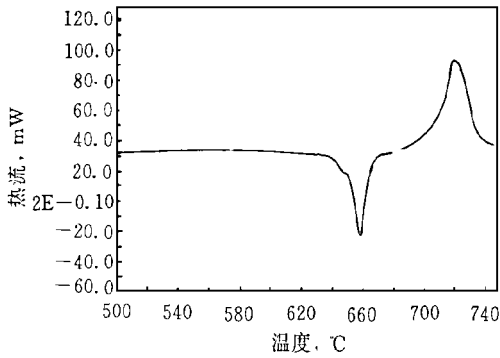


图 5 DSC曲线

Fig. 5 DSC curve

反应形成  $\text{TiAl}_3$ 、 $\text{TiAl}$ 、 $\text{Ti}_3\text{Al}$  和  $\alpha\text{-Ti}$  四个固相。在这一阶段, Al 能与 Ti 迅速反应几近完全, 因而, 三个试样的 X 射线衍射谱中都无 Al 元素的衍射峰出现 (图 1)。

在第二阶段, Ti 与 Al 的反应在已形成

的四个固相 ( $\text{TiAl}_3$  /  $\text{TiAl}$  /  $\text{Ti}_3\text{Al}$  /  $\alpha\text{-Ti}$ ) 间进行 (RHP1 试样和 RHP2 试样)。随着反应的进行及 Al 元素的均匀化, Al 含量较高和 Ti 含量较高的相 ( $\text{TiAl}_3$  和  $\alpha\text{-Ti}$ ) 易于消失, 晶粒显微结构最终由  $\text{TiAl}$  和  $\text{Ti}_3\text{Al}$  两相的亚结构构成 (RHP3 试样)。虽然 Ti 与 Al 反应最终要合成成分均匀的 TiAl 单相合金材料, 但它将完全受到晶粒内  $\text{TiAl}$  和  $\text{Ti}_3\text{Al}$  两相间 Al 元素扩散及均匀化速度的控制。

## 5 结论

根据 Al 元素的分布和各相的成分范围, Ti 与 Al 反应, 首先在原 Ti 颗粒内形成  $\text{TiAl}_3$ 、 $\text{TiAl}$ 、 $\text{Ti}_3\text{Al}$  和  $\alpha\text{-Ti}$  四相。然后, 反应在这四个固相间继续进行。随着 Al 元素的扩散及均匀化, 已形成的  $\text{TiAl}_3$  和  $\alpha\text{-Ti}$  相将进一步反应而消失。最终, 晶粒由  $\text{TiAl}$  和  $\text{Ti}_3\text{Al}$  两相构成。

## 6 参考文献

- 1 Munir Z A. The synthesis of high temperature materials by self-propagating combustion methods. 粉末冶金技术, 1988, 6(1): 1.
- 2 Rawars J G, Wraesinski W. Heat treatment of reaction-sintered hot-pressed TiAl. Scripta Metall, 1990, 10: 1985.
- 3 杨遇春. 自蔓延高温合成 (SHS) 及其应用. 稀有金属, 1991, (4): 440.
- 4 Hsu S E, Wu H D, Li C M. Mechanical behavior of Ti-Al alloy preparing by two innovative P/M processes. Proceedings of JIMS. The Japan Institute of Metals, 1991. 979.
- 5 熊翔, 黄伯云. 高温反应合成 TiAl 合金的研究. 粉末冶金技术, 1994, 12(2): 1.

# PROCESS AND MECHANISM OF TiAl BASE ALLOY MADE BY REACTIVE SYNTHESIS BETWEEN Ti AND Al

Wang Lin

Xiong Xiang

Huang Baiyun

(Central-South University of Technology, Changsha 410083)

**Abstract** The microstructure and the chemical compositions in micro-zone of densified TiAl base alloy specimen manufactured from 1:1 Ti-Al mixture by reaction hot-pressing have been reviewed and analysed by using scanning electronic microscope. According to the distribution of Al element and composition range in various phases, it has been found that during the process of reaction between Ti and Al, four phases  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{TiAl}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$  and  $\alpha\text{-Ti}$  were firstly formed in original Ti particles. Then continuous reaction among these four solid phases was carried out. With the diffusion and homogenization of Al element, the  $\text{TiAl}_3$  and  $\alpha\text{-Ti}$  phases which have been formed were eliminated. Finally, the microstructure was constituted by two phases  $\text{TiAl}$  and  $\text{Ti}_3\text{Al}$ .

**Key words** TiAl reaction hot-pressing mechanism