

# $\gamma$ -TiAl/TC4 复合板材的制备及组织性能研究

孔凡涛, 陈玉勇

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 提出了制备  $\gamma$ -TiAl/Ti 合金复合板材的技术思想。采用包套轧制技术在 1150 °C 轧制出厚度为 3 mm 的 Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V 复合板材, 其中 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金层的厚度约为 2.3 mm, Ti-6Al-4V 合金层的厚度约为 0.7 mm。复合板材的总变形量为 80%。包套轧制后板材外形完整、无应力开裂。分析表明, 复合板材的界面相主要由  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al 构成。拉伸性能测试结果表明, 随着 Ti-6Al-4V 合金层厚度的增加, 复合板材室温下的抗拉强度、延伸率都得到了显著的提高。当 Ti-6Al-4V 合金层厚度达到 0.7 mm 时 (板材总厚 2 mm), 室温强度和延伸率分别超过 800 MPa 和 4%, 700 °C 条件下延伸率超过 25%。

**关键词:** TiAl 合金; 复合板材; 轧制; 性能

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>3; TG335.81

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2009)08-1484-03

由于  $\gamma$ -TiAl 金属间化合物具有许多突出特点, 例如: 密度低, 具有高的比强度和比弹性模量, 在高温时仍可以保持足够高的强度和刚度, 同时它还具有良好的抗蠕变及抗氧化能力等等, 这使其成为航天、航空及汽车用发动机耐热结构件极具竞争力的材料。因此, TiAl 合金的发展一直受到世界各国研究者的关注和重视<sup>[1~4]</sup>。

近年来, TiAl 金属间化合物板材制备技术引起了研究者的注意, TiAl 金属间化合物板材的轧制对研制新型超音速飞行器具有重要意义<sup>[5~8]</sup>。但是由于 TiAl 金属间化合物较脆, 采用直接轧制 (比如等温轧制、包套热轧等) 的方法很难得到没有缺陷的板材, 并且得到的板材也很难进行进一步二次热加工。

本研究针对 TiAl 金属间化合物较脆和热加工性差的缺点, 在国内外率先全新地提出了通过制备 TiAl 金属间化合物-钛合金复合板材 (可以是两层或多层复合板材), 达到改善 TiAl 金属间化合物板材力学性能 (包括室温及高温) 和热加工性能的目的。

## 1 实验

实验用原料为海绵钛 (纯度 >99.7%), 高纯铝 (纯度 >99.99%), 其他添加元素均为添加金属与铝的中间合金。合金名义成分为 (at%): Ti-43Al-9V-0.3Y。按照设计的成分配制后, 在水冷铜坩埚真空感应熔炼炉 (induction skull melting, ISM) 中熔炼成合金材料,

并切割成实验用试样。将试样进行均匀化退火处理 (900 °C, 48 h) 和热等静压处理 (HIP)。热等静压处理采用氩气作为保护气氛, 边升温边充氩气直至 170 MPa, 然后在 1250 °C 保温 4 h 后随炉缓冷。HIP 后对材料进行热机械处理: 先将材料在应变速率约为 0.5 s<sup>-1</sup>、总变形量为 70%、变形起始温度为 1150 °C 条件下进行包套锻造, 然后在 900 °C 条件下退火 20 h。

将热机械处理后的 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金试样, 与 Ti-6Al-4V 合金试样进行包套, 然后高温轧制成 Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V 复合板材。Ti-43Al-9V-0.3Y 合金及 Ti-6Al-4V 合金试样在包套前要用砂纸抛光。包套轧制主要工艺参数如下: 开轧温度: 1150 °C; 轧制速度: <0.5 m/s; 道次变形量: 10%; 总变形量: 80%; 轧制后复合板材的厚度: 3 mm。其中 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金层厚度约 2.3 mm, Ti-6Al-4V 合金层厚度约 0.7 mm。

## 2 结果与分析

### 2.1 TiAl/Ti-6Al-4V 复合板材的宏观形貌

图 1 为 Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V 复合板材包套热轧后的宏观形貌。由图 1 可以看出, Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V 复合板材经 80% 变形量包套轧制后板材外形完整、无应力开裂等缺陷。

板材轧制时, 中心部位承受压应力, 而板材的两侧承受拉应力。这样, 对于热加工性能较差的 TiAl

收到初稿日期: 2008-07-26; 收到修改稿日期: 2009-05-07

作者简介: 孔凡涛, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001, 电话: 0451-86418802, E-mail: kft@hit.edu.cn

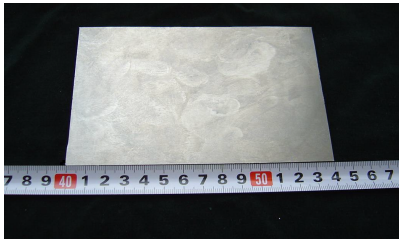


图 1 复合板材轧制后的宏观形貌

Fig.1 Macrographs of the composite sheet after clad rolling

合金材料来说, 会容易产生裂纹。本实验采用 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金与 Ti-6Al-4V 合金复合包套轧制方法, 可以有效地避免板材制备过程中裂纹的产生。

### 2.2 TiAl/Ti-6Al-4V 复合板材显微组织与相分析

图 2 为 Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V 复合板材截面的扫描电镜照片。其中左侧为典型的 ( $\alpha+\beta$ ) 型 Ti-6Al-4V 合金的魏氏组织, 右侧为含有 ( $\alpha+\gamma+B_2$ ) 3 相的 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金的显微组织。从图中可以发现, 在 Ti-6Al-4V 合金与 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金的结合处, 没有缝隙, 界面结合较好, 并且整个界面形成了一条宽约 40  $\mu\text{m}$  的界面带。结合元素线分布分析 (见图 3) 与能谱分析的结果, 可以发现界面带中由左至右, Ti 元素含量逐渐降低, Al 元素和 V 元素含量逐渐升高。说明在 Ti-6Al-4V 合金与 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金的结合处 Ti、Al、V 元素发生了扩散, 形成了与 Ti-6Al-4V 合金及 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金成分不同的显微组织。

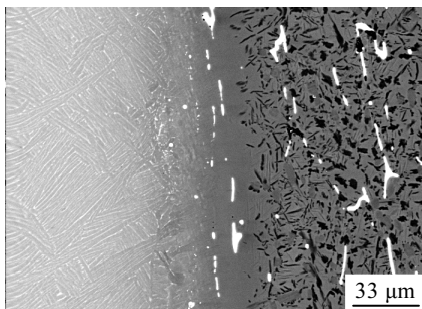


图 2 复合板材的扫描电镜照片

Fig.2 SEM microstructure of the composite sheet

图 4 为 Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V 复合板材截面的 X 射线衍射图谱。由图 4 可以发现, 虽然在两种板材界面处形成了界面带, 但并没有新相生成, 因此, 界面带仍然由 Ti-43Al-9V-0.3Y 和 Ti-6Al-4V 两种合金的各相构成。

从能谱结果可知, 界面带中从左至右, Al 含量从

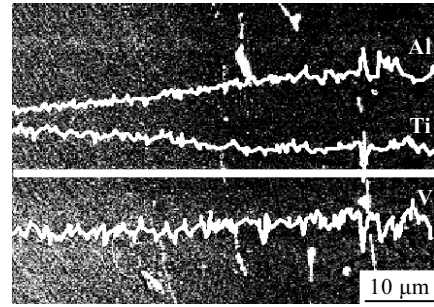


图 3 复合板材的元素线分布

Fig.3 Line distribution of alloy elements of the composite sheet

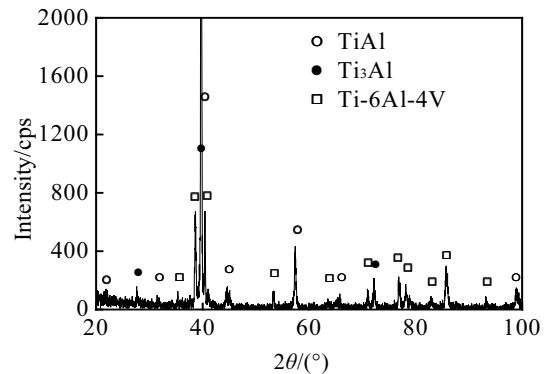


图 4 复合板材的 X 射线衍射图谱

Fig.4 X-ray diffraction spectrum of composite sheet

22at%左右升高至 37at%左右。根据 Ti-Al 相图可以发现, Al 含量在 22at%至 37at%的范围内, 材料主要由  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al 相构成, 因此, 可以认为界面带应该主要为  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al 相。

### 2.3 TiAl/Ti-6Al-4V 复合板材的力学性能

采用已经制备的 3 mm 厚 Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V 复合板材, 通过机械加工的方法来控制 Ti-43Al-9V-0.3Y 层的厚度和 Ti-6Al-4V 层的厚度, 从而测试并分析两种材料不同厚度时的性能规律。本实验主要测试了沿轧制方向复合板材的室温及高温拉伸性能。试样中, 复合板材的总厚度为 2 mm, 其中 Ti-43Al-9V-0.3Y 层的厚度分别为 1.3、1.5、1.7 和 2 mm, 相对应的 Ti-6Al-4V 层的厚度分别为 0.7、0.5、0.3 和 0 mm。图 5 为不同层厚的复合板材在室温下的拉伸试验结果。从图中可以看出, Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V 复合板材的抗拉强度及屈服强度均要高于 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金, 并且随着 Ti-6Al-4V 层厚度的增加, 复合板材的强度、延伸率都得到提高。当 Ti-6Al-4V 合金层厚度达到 0.7 mm 时 (板材总厚 2 mm), 室温强度和延伸率分别超过 800 MPa 和 4%。从实验结果来看, 阻碍 TiAl 合金应用的室温塑性随着 Ti-6Al-4V

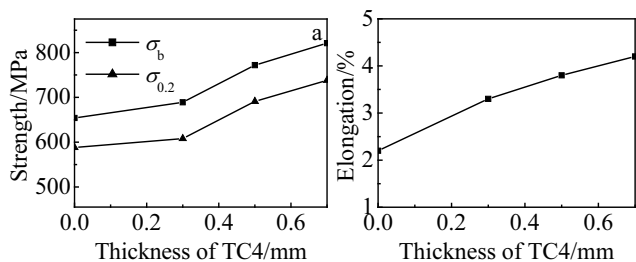


图 5 复合板材室温下的拉伸性能

Fig.5 Tensile properties of the composite sheet at RT: (a) tensile strength and (b) elongation

层厚度的增加有较大的提高。这是由于两方面原因引起的：一方面，相对于 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金来说，复合板材中 Ti-6Al-4V 合金层轧制变形后，室温抗拉强度、延伸率都较高，使得整体复合板材性能提高；另一方面，形成复合板材后，Ti-43Al-9V-0.3Y 合金拉伸过程中，变形更加均匀，使得室温延伸率得到改善。

本实验还测试了 Ti-6Al-4V 层厚为 0.7 mm（总厚度为 2 mm）的 Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V 复合板材在 700 °C 高温下的拉伸性能，在强度接近 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金的情况下，延伸率超过了 25%。可见，复合板材具有优异的高温塑性。

### 3 结 论

1) 采用包套轧制技术在 1150 °C 轧制出厚度为 3 mm 的 Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V 复合板材。复合板

材的总变形量为 80%，包套轧制后板材外形完整、无应力开裂。

2) 在复合板材 Ti-6Al-4V 合金与 Ti-43Al-9V-0.3Y 合金的结合处，由于 Ti、Al 元素发生了扩散，形成了一条宽约 40  $\mu\text{m}$  的界面带。界面带主要由  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al 相构成。

3) 随着 Ti-6Al-4V 合金层厚度的增加，复合板材的室温抗拉强度、延伸率都得到了显著的提高。

### 参考文献 References

- [1] Edward A Loria. *Intermetallics*[J], 2000, 8: 1339
- [2] Kong Fantao(孔凡涛), Chen Ziyong(陈子勇), Tian Jing(田 竟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(2): 81
- [3] Chen Yuyong, Kong Fantao, Tian Jing *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2002, 12(4): 605
- [4] Ramanujan R V. *International Materials Reviews*[J], 2000, 45(6): 217
- [5] Arno Bartels, Heinrich Kestler, Helmut Clemens. *Materials Science and Engineering*[J], 2002, A329/331: 153
- [6] Yu T H, Koo C H. *Scripta Materialia*[J], 1998, 39(7): 915
- [7] Koeppel C, Bartels A, Clemens H *et al. Materials Science and Engineering*[J], 1995, A201: 182
- [8] Inkson B J, Clemens H, Marien J. *Scripta Materialia*[J], 1998, 38(9): 1377

## Preparation of $\gamma$ -TiAl/TC4 Composite Sheet and Its Microstructure and Properties

Kong Fantao, Chen Yuyong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A new technique idea of  $\gamma$ -TiAl/Ti alloy composite sheet preparation was presented. Ti-43Al-9V-0.3Y/Ti-6Al-4V composite thin sheet with 3 mm thickness was produced by clad rolling technology at 1150 °C with 80 % total deformation amount. The thickness of Ti-43Al-9V-0.3Y alloy and Ti-6Al-4V alloy is about 2.3 mm and 0.7 mm in the composite sheet, respectively. The composite sheet after clad rolling has intact shape without stress cracking. Analyses show that the interface phases of the composite sheet are mainly composed of  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al. Tensile test reveals that, with increase of Ti-6Al-4V thickness, both the tensile strength and elongation are obviously increased at room temperature. When the thickness of the Ti-6Al-4V layer reaches up to 0.7 mm (the total thickness is 2 mm), the tensile strength and elongation of the composite sheet exceed 800 MPa and 4% at room temperature, respectively. And elongation of the composite sheet exceeds 25% at 700 °C.

**Key words:** TiAl alloy; composite sheet; rolling; properties

Biography: Kong Fantao, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86418802, E-mail: kft@hit.edu.cn