

文章编号: 1004-0609(2004)08-1410-05

热锻开坯对高铌 TiAl 合金微观组织的影响^①

苏喜孔¹, 李树索¹, 韩雅芳¹, 李臻熙², 徐向俊³, 徐丽华³, 林均品³, 陈国良³

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095;
3. 北京科技大学 新金属国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 采用热等静压技术处理了高铌 TiAl 合金铸锭, 对直径为 115 mm 的高铌 TiAl 合金铸锭在 1 150~1 300 °C 进行了热锻开坯。结果表明: 热等静压处理后的高铌 TiAl 合金由大量粗大的 α_2/γ 片层晶粒和少量的 γ 等轴晶、 B_2 相等组成, 晶粒度约为 80~150 μm ; 通过变形量为 75% 的 2 次锻造成形后锻饼表面和内部质量较为完好, 没有出现裂纹和太多的氧化现象; 铸态粗大片层组织在变形后基本破碎, 晶粒得到明显细化。

关键词: 高铌 TiAl 合金; 热锻开坯; 微观组织

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Effect of hot forging on microstructure of TiAl alloy containing high Nb

SU Xikong¹, LI Shusuo¹, HAN Yafang¹, LI Zhenxi²,
XU Xiangjun³, XU Lihua³, LIN Junpin³, CHEN Guoliang³

(1. Research Institute of Advanced Materials,
Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China;
2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;
3. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The ingot of as-cast TiAl alloy containing high Nb was dealt with HIP(hot isostatic pressing). The hot forging for large ingot with 115 mm in diameter of the TiAl based alloy containing high Nb was carried out in the temperature range of 1 150~1 300 °C. The results show that TiAl alloy containing high Nb is composed of small amount of γ and B_2 phase and large of coarse α_2/γ lamellar structure with colony size of about 80~150 μm after HIP. After twice forging with total deformation degree of 75%, the quality of the surface and inside of the pancake is good, and there is no cracks and evident oxidation. The as-cast lamellar structure is basically broken down and the grain gets fined obviously.

Key words: TiAl alloy containing high Nb; hot forging; microstructure

TiAl 金属间化合物具有密度低、良好的高温强度和抗氧化性能, 是一种有良好应用前景的航空航天用高温结构材料^[1, 2]。但由于该合金室温塑性低且难以加工^[3-5], 一直困扰着它的工程化应用。近些年来, 人们对 TiAl 合金进行了大量的研究, 通过

合金制备、显微组织控制、变形工艺等方面来提高合金的室温塑性, 并且取得了一些重大的进展^[6-8]。

北京科技大学新金属国家重点实验室自主开发的高铌 TiAl 合金, 不但具有高温强度和良好的抗

① 收稿日期: 2003-11-04; 修订日期: 2004-04-19

作者简介: 苏喜孔(1976-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 李树索, 博士; 电话: 010-82314488; E-mail: lishs@buaa.edu.cn

氧化和抗蠕变性能, 而且其使用温度比普通 TiAl 合金提高近 $60\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[9, 10], 成为替代一些用在航空发动机等热端部件高温合金最有希望的材料。过去一些研究结果表明, TiAl 合金的铸态组织十分粗大, 显微组织是影响 TiAl 合金室温脆性的首要因素^[11]。TiAl 合金热变形激活能很高, 因此热锻开坯是一种理想的用来细化 TiAl 合金铸态组织的热加工技术。本文作者通过热锻变形破碎铸态高铌 TiAl 合金粗大的片层组织, 来提高合金的室温塑性, 为该合金的工程化应用奠定良好的基础。

1 实验

实验所用合金为 Ti-45Al-8.0~10.0Nb-W-B-Y, 采用 2 次熔炼的方法制备合金, 首先采用真空自耗电弧炉熔炼, 然后进行真空凝壳电弧熔炼。2 次熔炼后的铸锭尺寸为 $120\text{ mm}\times(320\sim 420)\text{ mm}$ 。为了减少铸锭的一些缩孔和疏松, 在 $1\ 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 140 MPa , 4 h 的工艺条件下进行了热等静压处理。通过机加工去除表面氧化物和脏污, 对处理后的铸锭进行超声波探伤, 截取锻造所用的锭料。铸锭的热锻开坯在 THP32-3000 压力机上进行, 为了防止降温过快和太多的表面氧化, 在铸锭外面采用包套进行保护, 所采用的包套材料是 304 不锈钢和硅酸铝保温棉。开锻温度 $1\ 150\sim 1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压头下降速率小于 $1\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$, 通过对每个铸锭进行 2 次锻造成形, 使其总变形量达到 75% 以上。

从铸锭和锻饼的多个部位切取试样, 打磨抛光后首先在日立 S-3500N SEM 上进行未腐蚀的背散射能谱分析, 然后采用 $3\%\text{ HF}+17\%\text{ HNO}_3+\text{H}_2\text{O}$ 试剂对试样腐蚀后进行微观组织分析, 金相组织分析是在 Neophot2 卧式金相显微镜上进行。

2 结果与讨论

从图 1 中可以看出, 铸态高铌 TiAl 合金经过热等静压后的组织除了大量粗大的 α_2/γ 层片状晶粒外, 还有一些 γ 等轴晶, 在一些片层晶界处还存在着一些 B_2 相。以往的研究表明添加铌和钨可稳定 B_2 相, 在 α_2 相中含有少量的 B_2 相可以提高合金的塑性, 还可以延迟 α_2 相的解理裂纹形核^[12], 但是在 γ -TiAl 中 B_2 相往往却是一些断口的开裂地点^[13], 过多的 B_2 相对材料的使用性能极为不利。在合金中加入钇是为了改善合金的抗氧化性能, 通常以 Y_2O_3 的形式存在于晶界处。从心部(图 1(a))和边缘(图 1(b))的金相组织对比可以发现: 经过热等静压处理后的铸锭, 各处的铸态组织形貌、晶粒度大小都比较均匀, 热等静压处理后的晶粒度约为 $80\sim 150\text{ }\mu\text{m}$ 。

将热等静压处理后的铸锭加热到预定温度后, 在 $2.94\times 10^7\text{ N}$ 压力机上对其进行了总变形量达 75% 的 2 次锻造开坯。从图 2 所示的一次变形后(2(a))和二次(2(b))变形后的锻饼形貌中可以清楚地看到, 2 次锻造后锻饼的表面都比较光滑, 没有发生开裂。在包套的保护作用下, 加热变形后的表面也没有发生太多的氧化现象。在高温变形时, 上面的钢板由于屈服强度比较低, 首先发生变形, 中间部位形成向保温棉一方的鼓肚, 随着上下板面的降温和加工硬化, 很快达到了 TiAl 合金的屈服强度, 这时 TiAl 合金铸锭也开始变形, 由于钢板鼓肚的原因在一次锻造后的锻饼表面形成比较大的凹陷。二次锻造的变形量比较大, 变形后的锻饼高度仅有 30 mm , 在变形过程中发现所需的变形力也比较大, 这样在后来的变形过程中钢板的鼓肚被减小,

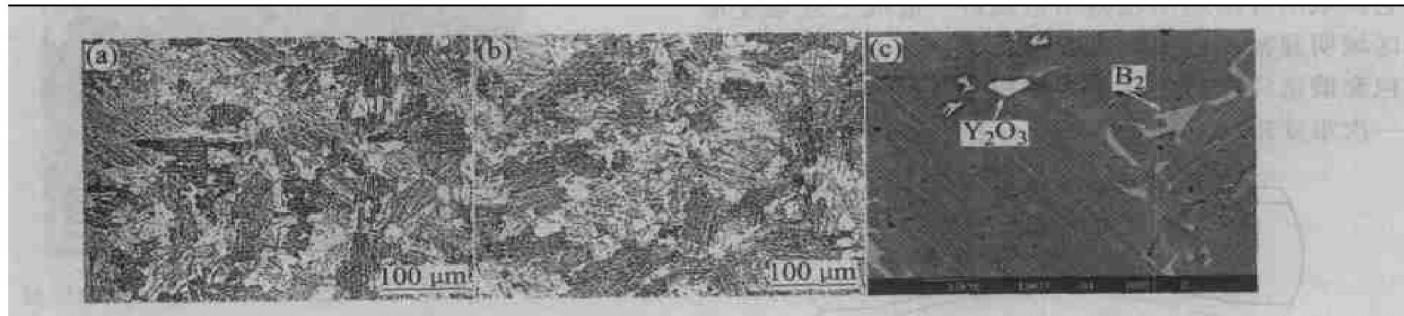


图 1 铸态高铌 TiAl 合金热等静压后的微观组织

Fig. 1 Microstructures of as-cast TiAl alloy containing high Nb after HIP

(a) —Core; (b) —Edge; (c) —BSEI

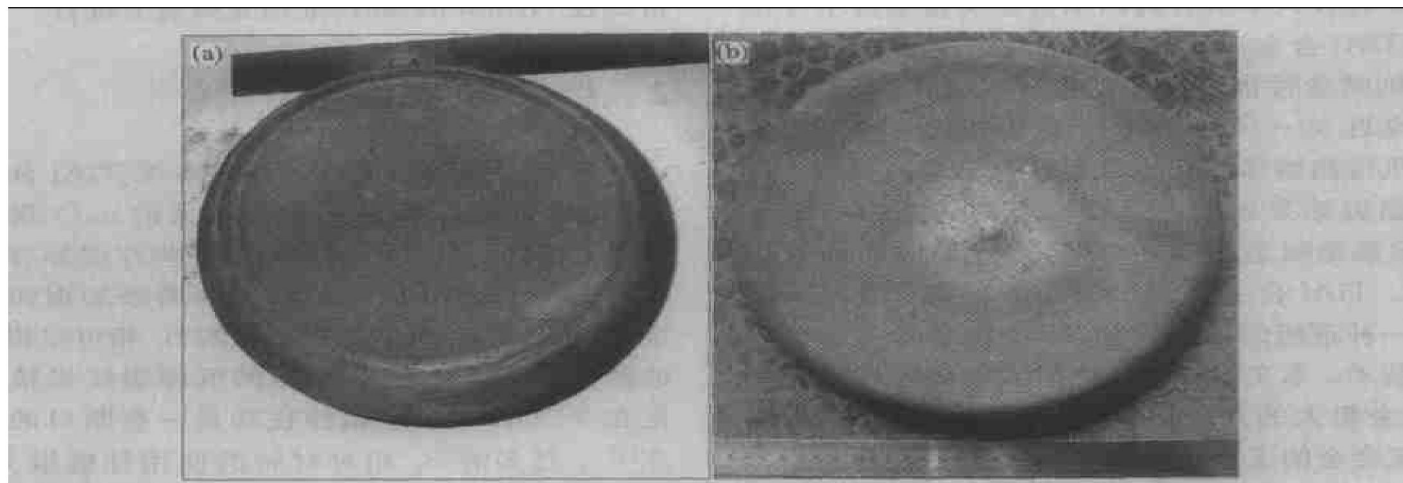


图 2 高铌 TiAl 合金热变形后的形貌

Fig. 2 Forging pancakes for TiAl alloy containing high Nb
(a) —One step; (b) —Two step

二次变形后的锻饼表面比较平整。

从二次锻造后锻饼的 3 个变形区域(图 3)切取试样,对不同区域微观组织进行分析。结果表明,大变形区(Ⅱ区)和小变形区(Ⅲ区)原来大的片层组织已全部破碎(4(a)和 4(b)),由于变形是在加热到 $\alpha + \gamma$ 两相区进行的,这样在变形后的冷却过程中 α 相会再次转变成细小的 α_2/γ 片层团。高铌 TiAl 合金在热加工过程中,晶界处有很高的应力集中和很高的位错密度,晶界附近储存有比较高的能量,因此再结晶驱动力最大,从而在一些晶界处发生再结晶^[14],生成一些再结晶组织晶粒。从锻造后的背散射像中发现,原来大的块状 B_2 相也被破碎,破碎后的 B_2 相沿变形过程中合金的流动方向分散开,形成一些带状分布区。在对从 I 区所取的试样进行微观组织分析中发现,只有中央上表面很小区域还存在没有破碎的大的片层组织(4(c)),一些大的片层组织在受力后只发生了少许的弯曲变形,Ⅰ区其它区域的片层组织也基本被破碎。造成上述难变形区域明显减小的原因有 2 个:首先是由于在第一次包套锻造完毕后进行了表面机加工处理,把处于第一次难变形区的合金大部分车削掉,使未发生受力

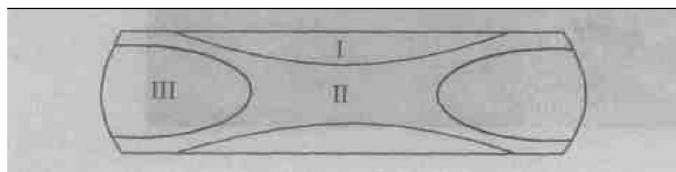
图 3 锻造的 3 个变形区^[15]

Fig. 3 Schematic representation of deformation zones of conventional forging^[15]

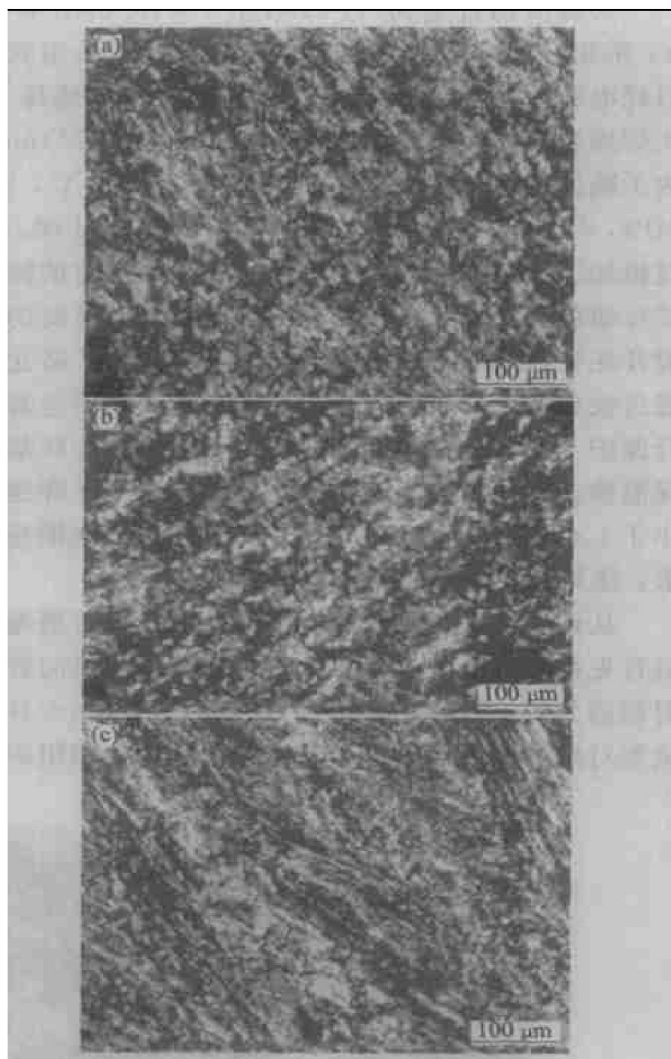


图 4 高铌 TiAl 变形后不同区域的组织形貌

Fig. 4 Microstructures of TiAl alloy containing high Nb in different deformation zones after twice forgings
(a) —Zone II; (b) —Zone III; (c) —Zone I

变形的区域明显减少; 其次是 2 次总的变形量比较大, 所以总的难变形区域大大减小。从图 5 所示的二次锻造的背散射像中可以看到, 变形后破碎的片层组织由于没有充分的再结晶, 没有形成完整的晶界。但从部分新生成的片层团体和一些再结晶晶粒来看, 其晶粒度明显减小。总的说来, 经过 2 次锻造开坯后, 原始粗大的片层组织得到充分破碎, 晶粒得到明显细化。

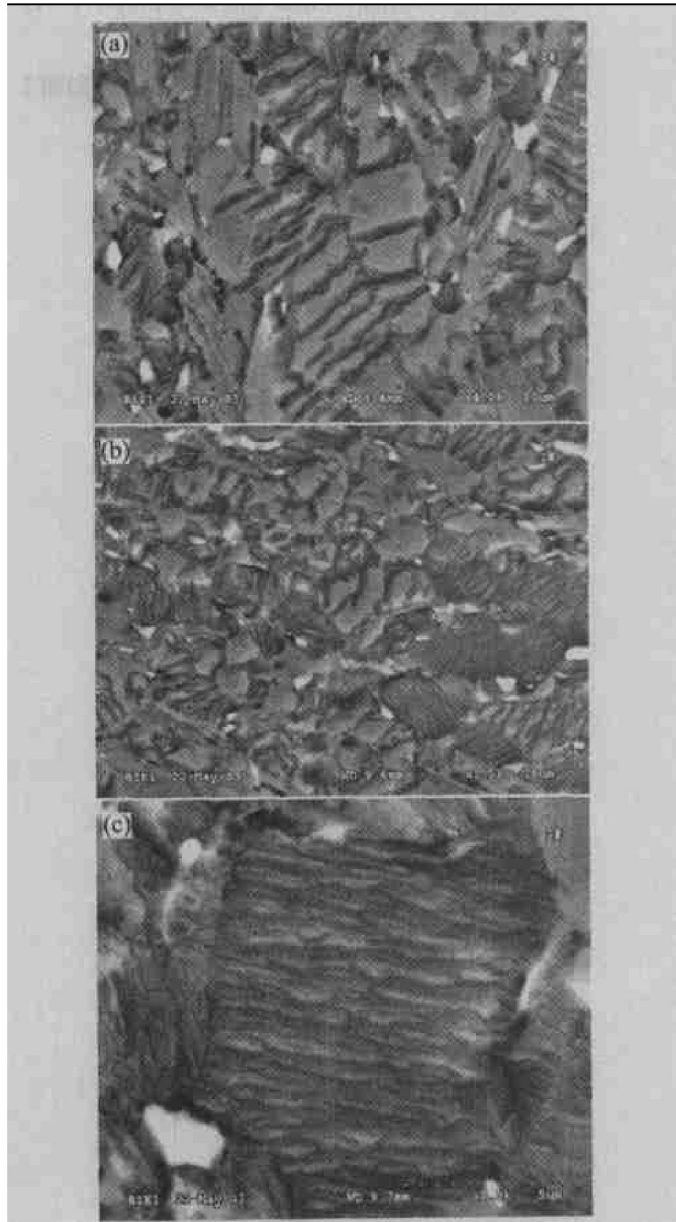


图 5 高铌 TiAl 合金锻造后的微观组织(BSEI)

Fig. 5 Microstructures of TiAl alloy containing high Nb after forging(BSEI)

3 结论

1) 经过热等静压处理后的高铌 TiAl 合金的铸态组织主要由粗大的 α_2/γ 片层组织和少量 γ 等轴晶组成, 在晶界处还有一些 B_2 相和少量的 Y_2O_3 相

存在。

2) 高铌 TiAl 合金经过 2 次锻造开坯后, 锻饼心部和表面质量完好, 没有出现裂纹和明显的氧化现象, 证明该合金的热锻开坯工艺是合理可行的。

3) 高铌 TiAl 合金在经过同一方向高达 75% 的高温锻造变形后其铸态组织得到了明显的细化, 除了上下表面的难变形区有少许粗大的片层组织外, 其它区域的铸态粗大片层组织基本破碎。

REFERENCES

- [1] Ward C M, Froes F H. Developments in the synthesis of light metals[J]. JOM, 1994, 46(1): 28-31.
- [2] Henriques V A R, Sandim H R Z, Coelho G C, et al. Microstructural evolution during hot pressing of the blended elemental Ti-6% Al-7% Nb alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2003, A347(1-2): 315-324.
- [3] Viswanathan G B, Vasudevan V K. Processing, microstructures and tensile properties of a Ti-48% Al alloy[J]. Scripta Metall Mater, 1995, 32: 1705-1711.
- [4] 刘咏, 黄伯云, 周科朝, 等. TiAl 基合金包套锻造工艺[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(S1): 6-9.
LIU Yong, HUANG Ba-yun, ZHOU Ke-chao, et al. Canned-forging process of TiAl bases alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(S1): 6-9.
- [5] Zhang W J, Evangelista E, Francesconi L, et al. Deformation microstructure of Nb-modified TiAl intermetallics Ti₅₄Al₁₆Nb at ambient temperature[J]. Mater Sci Eng A, 1996, A207(2): 202-207.
- [6] Naka S, Thomas M, Khan T. Potential and prospects of some intermetallic compounds for structural applications[J]. TMS, Warrendale, PA, 1992: 291-294.
- [7] Kimura M, Hashimoto K, Morikawa H. Study on phase stable in Ti-Al-X systems at high temperatures[J]. Mater Sci Eng A, 1992, A152: 54-59.
- [8] Kim Y W. Intermetallic alloys based on gamma titanium aluminides[J]. JOM, 1989, 41(7): 24-26.
- [9] WANG Jir-guo, CHEN Guo-liang, SUN Zu-qing, et al. Structure of a new ordered ternary intermetallic compound in TiAl+ Nb system[J]. Acta Metall Sinica, 1994, 30(11): A525-530.
- [10] Liu Z C, Lin J P, Li S J, et al. Effects of Nb and Al on the microstructures and mechanical properties of high Nb containing TiAl base alloys[J]. Intermetallics, 2002, 10(7): 653-659.
- [11] Koeppe C, Bartels A, Seeger J, et al. General aspects of the thermal-mechanical treatment of two phase intermetallic TiAl compounds[J]. Metall Mater Trans A,

- 1993, 24A: 1795 - 1802.
- [12] 张永刚, 韩雅芳, 陈国良. 金属间化合物结构材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 701 - 703.
ZHANG Yong-gang, HAN Ya-fang, CHEN Guo-liang. Structural Intermetallics [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2001. 701 - 703.
- [13] 张永刚, 韩雅芳, 陈国良. 金属间化合物结构材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 778 - 780.
ZHANG Yong-gang, HAN Ya-fang, CHEN Guo-liang. Structural Intermetallics [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2001. 778 - 780.
- [14] 李书江. 高铌 TiAl 合金微合金化及蠕变性能的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2001.
LI Shu-jiang. Study on Micro-alloying and Creep Property of High-Nb Containing TiAl Alloy [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2001.
- [15] 吕 炎. 锻压成形理论与工艺 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 128.
Lü Yan. Theory and Processing of Forging and Pressing [M]. Beijing: China Machine Press, 1991. 128.
- (编辑 李向群)