

文章编号: 1004 - 0609(2003) 01 - 0153 - 04

全层状 TiAl 合金层片生长及其影响因素^①

刘文胜, 黄伯云, 唐建成, 周科朝, 贺跃辉, 刘 咏

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 利用光学显微镜(OM)和 TEM, 研究了全层状 TiAl 合金的层片间距的影响因素及与各因素的关系。实验结果表明, 全层状 TiAl 合金的层片间距与冷却速度和合金中铝含量有关, 层片间距与冷却速度呈反比关系, 并随着合金中铝含量的增加而增加。同时, 以层片生长的台阶机制为基础, 推导出了全层状 TiAl 合金在连续冷却过程中层片间距的数学表达式, 推导结果与实验结果相符。

关键词: TiAl 合金; 层片间距; 冷却速度; Al 含量

中图分类号: TG 146; TG 132.32

文献标识码: A

TiAl 合金具有优良的高温性能和较低的密度, 因而成为世界上目前研究得最为热门的高温结构材料之一^[1]。TiAl 合金的性能与显微组织密切相关, 双态组织具有优良的室温延性, 但其断裂韧性和抗高温蠕变性能差, 而粗大的全层状组织具有优良的断裂韧性和抗高温蠕变性能, 但其室温延性差^[2]。通过合金化和复合热机械处理可获得具有随机取向的细小全层状 TiAl 合金, 其综合力学性能优良, 是 TiAl 合金发展的最终显微组织^[3]。全层状 TiAl 合金的力学性能与其晶团尺寸和层片间距密切相关, 细化其晶团尺寸和层片间距能有效地改善力学性能^[4, 5]。目前, 对全层状 TiAl 合金的晶团尺寸的影响因素和其晶粒长大的动力学已有了深入的研究^[6~8], 但对层片间距的影响因素还缺乏深入的研究。Kim 等^[9]发现层片间距与冷却速度有关, 并随冷却速度的加快而变细, 但对层片间距与冷却速度的定量关系和其它因素对层片间距的影响尚缺乏系统研究。针对这些问题, 本文作者从实验和理论上对全层状 TiAl 合金的层片生长及影响因素进行了系统的研究。

1 实验

所研究的 TiAl 合金(摩尔分数, %)为 Ti-42Al、Ti-44Al、Ti-46Al 和 Ti-48Al, 由自耗电弧炉经 2 次重熔而成。由金相法确定 α 相转变温度 T_α

分别为 1 454、1 512、1 546 和 1 589 K。铸锭经均匀化处理和热等静压(HIP)后, 采用文献[10]中所报道的二次包套复合热机械处理进行锻造, 使总变形量为 80%。将变形后的 TiAl 合金在 T_α 以上热处理, 采用控制冷却方式冷却至室温, 冷却速度为 0.1、0.2、0.5 和 1 K/s。利用 Neophot-II 型光学显微镜和 H-800 型透射电子显微镜进行显微组织分析。采用截割线法和数点法等半定量的方法测定层片间距。

2 结果

TiAl 合金经二次包套复合热机械处理后, 可以获得均匀的变形组织。

当变形组织在 T_α 以上保温 1 h 后采用控制冷却方式冷却到室温, 可以获得全层状组织, 如图 1 所示。图 1 所示为 Ti-48Al 在 1 599 K 保温 1 h 后, 以 1 K/s 的冷却速度冷却到室温的显微组织, 图 1(a)所示为金相组织, 图 1(b)所示为透射电镜下的显微组织。全层状 TiAl 合金的晶团尺寸与合金成分、热处理温度和保温时间有关, 冷却速度对晶团尺寸没有明显的影响。本文作者在文献[7]中对全层状 TiAl 合金的晶团尺寸的影响因素和其晶粒长大的动力学已有了深入的研究。

全层状 TiAl 合金的层片间距与合金成分和冷却速度有关, 而热处理温度和保温时间对其没有明

① 基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(59895150); 国家 863 计划资助项目(715 - 005 - 0040)。

收稿日期: 2002 - 05 - 24; 修订日期: 2002 - 09 - 11 作者简介: 刘文胜(1967 -), 男, 博士

通讯联系人: 刘文胜, 博士, 电话: 0731-8876144, E-mail: liuwensheng@hotmail.com

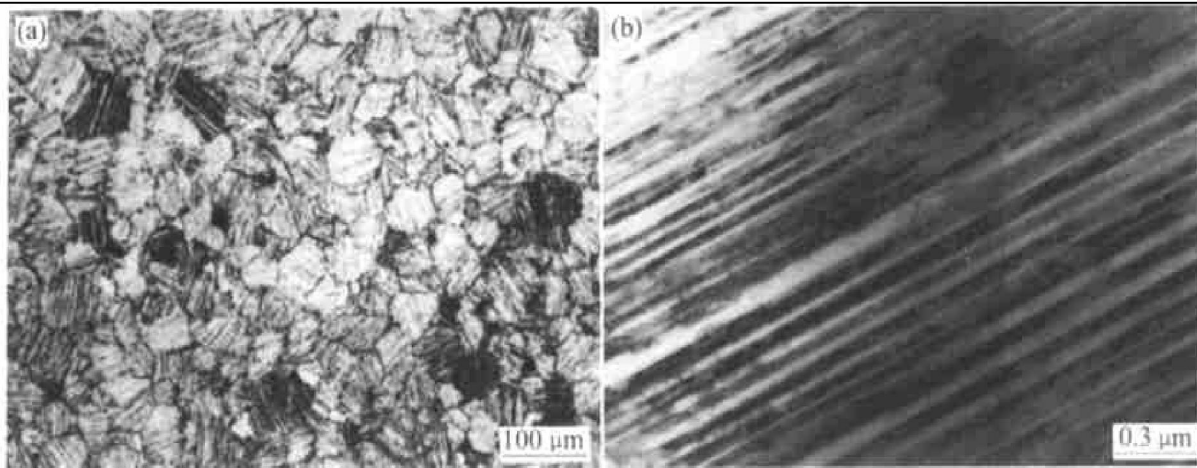


图1 Ti-48Al 经过 1 599 K 保温 1 h 后, 以 1 K/s 的冷却速度冷却到室温的显微组织

Fig. 1 Microstructures of Ti-48Al after heat treatment at 1 599 K

for 1 h followed by cooling at rate of 1 K/s

(a) —OM micrograph; (b) —TEM micrograph

显的影响。全层状 TiAl 合金的层片间距与冷却速度和 Al 含量的关系如图 2 所示。由图 2 可以看出, 当试样以相同的速度冷却时, 层片间距随合金中 Al 含量的增加而增加。当 TiAl 合金的 Al 含量相同时, 层片间距随冷却速度的增加而减小。

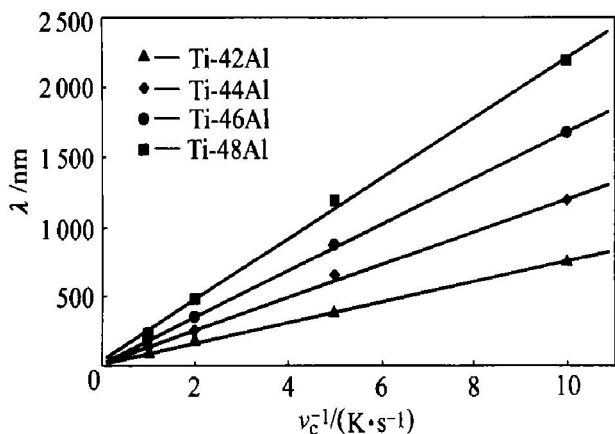


图2 层片间距与冷却速度和 Al 含量的关系

Fig. 2 Dependence of lamellar spacing on cooling rate and Al content

对图 2 进行回归分析可以得出, 层片间距 λ 与冷却速度 v_c 的关系为

$$\lambda_{\text{Ti-42Al}} = 12.7 + 73.4 / v_c \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{Ti-44Al}} = 6.7 + 116.8 / v_c \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{Ti-46Al}} = -7.2 + 164.3 / v_c \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{Ti-48Al}} = 8.6 + 216.8 / v_c \quad (4)$$

式(1)、(2)、(3)和(4)的相关系数分别为 0.993、0.991、0.987 和 0.997。在给定显著水平为 5% 时, 相关系数的临界值为 0.983^[11]。式(1)、(2)、(3)和(4)的相关系数大于相关系数的临界值, 因此, λ 与 $1/v_c$ 线性相关。式(1)、(2)、(3)和(4)可以表述为

$$\lambda = A + B / v_c \quad (5)$$

式中 A 相对较小, 并接近 0, 因此, 可以忽略 A 对 λ 的影响。 B 与 Al 含量有关, 随 Al 含量的增加而增加。式(5)可简化为

$$\lambda = B / v_c \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 层片间距 λ 与合金的 Al 含量和冷却速度有关。当冷却速度一定时, 层片间距随合金中的 Al 含量的增加而增加。当合金中的 Al 含量一定时, 层片间距与冷却速度 v_c 成反比关系。

3 讨论

Denquin 等^[12, 13] 提出, TiAl 合金的全层状组织通过 γ 相从 α 相中的析出形成, 其形成过程首先是通过 Shockley 分位错的运动在 α 基体中形成局部上的面心立方结构。在平行于 α 相的(0001)面方向, γ 相与 α 相为非共格界面, 因此 γ 相的伸长速率很快。但在垂直于 α 相的(0001)面方向, γ 相与 α 相为共格界面, 因界面的迁移速率很低, 被迫以台阶机制移动。文献[14] 表明, 以共格界面析出所形成的层片状沉淀物是以台阶机制方式增厚的。假设一个层片析出物以间距为 l , 高度为 h 的线性台阶的侧向运动来增厚, 如图 3 所示, 则其增厚速度为

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{D(x_0 - x_\alpha)}{kl(x_\gamma - x_\alpha)} \quad (7)$$

式中 D 为互扩散系数; k 为常数; l 为台阶间距, 与合金本质有关, 可看成常数; x_γ 和 x_α 为 γ 相和 α 相中 Al 的摩尔分数; x_0 为合金中 Al 的摩尔分数; λ 为层片间距; t 为时间。其中互扩散系数 D 为

$$D = D_0 \exp \left[- \frac{Q}{RT} \right] \quad (8)$$

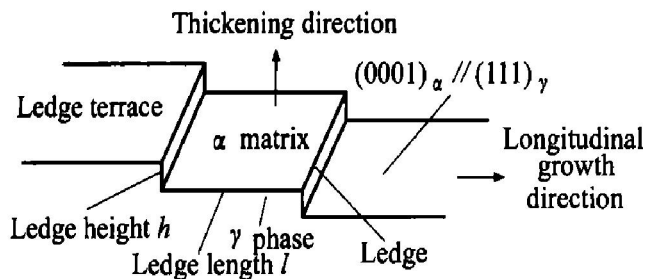


图 3 γ 板条增厚的台阶机制示意图

Fig. 3 Schematic drawing of ledge mechanism

for γ lamellae growing in α matrix

式中 R 为气体常数; Q 为扩散热激活能; D_0 为扩散常数。

借助 Kattner 等^[15]所计算出的 TiAl 相图(见图 4)来分析式(7)。为简化分析过程,将曲线 AE 和 FH 视为直线进行分析,并将式(8)代入式(7),式(7)变为

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{D_0}{kl} \frac{\frac{|BE|}{|AB|} \cdot v_c \cdot t}{|BG| + \frac{|BE| - |FG|}{|AB|} \cdot v_c \cdot t} \cdot \exp\left[-\frac{Q}{R(T_\alpha \cdot v_c \cdot t)}\right] \quad (9)$$

式中 v_c 为冷却速度。Denquin 等^[12]发现,当温度低于共析温度 T_e 时,γ 层片的增厚速率很低。

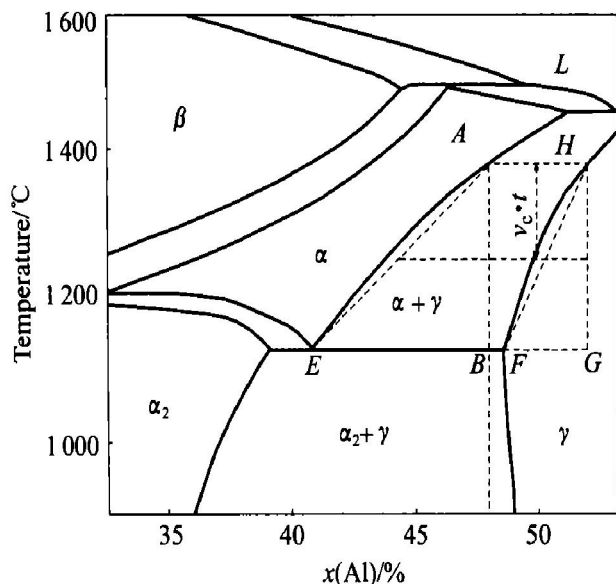


图 4 TiAl 合金相图的一部分

Fig. 4 A part of TiAl phase diagram

Jones^[16]发现,当从 α 相区连续冷却时,层片结构的形成是在 α+γ 双相区进行,式(9)不能直接积分,因此,可取 $t = |AB|/v_c$ 和 0 分别为上限和下限,对式(9)的幂级数展开式积分可得

$$\lambda = \frac{D_0}{2kl} \cdot \frac{|BE| \cdot |AB|}{|BG|} \cdot \exp\left[-\frac{Q}{RT_\alpha}\right] \cdot \frac{1}{v_c} \quad (10)$$

由式(10)可以看出,全层状 TiAl 合金在连续冷却

过程中形成的层片间距与冷却速度和合金中铝含量有关。层片间距 λ 与冷却速度 v_c 成反比关系。在冷却速度相同的情况下,合金中铝含量增加时, $|AB|$ 、 $|BE|$ 和 T_α 均增大,而 $|BG|$ 减小,从而 λ 增大。对比式(6)和式(10),可以发现实验结果与理论推导相符。

4 结论

1) 在连续冷却时,全层状 TiAl 合金的层片间距与冷却速度和合金中铝含量有关,层片间距与冷却速度呈反比关系,并随着合金中铝含量的增加而增加。

2) 理论推导表明,全层状 TiAl 合金的层片间距的数学表达式为

$$\lambda = \frac{D_0}{2kl} \cdot \frac{|BE| \cdot |AB|}{|BG|} \cdot \exp\left[-\frac{Q}{RT_\alpha}\right] \cdot \frac{1}{v_c}$$

理论推导与实验结果相符。

REFERENCES

- [1] Ward C M, Froes F H. Developments in the synthesis of light metals [J]. JOM, 1994, 46(1): 28-31.
- [2] Viswanathan G B, Vasudevan V K. Processing, microstructures and tensile properties of a Ti-48at.% Al alloy [J]. Scripta Metall Mater, 1995, 32: 1705-1711.
- [3] Deve H E, Evas A G, Shih D S. A high-toughness γ-TiAl [J]. Acta Metall Mater, 1992, 40: 1259-1265.
- [4] Huang S C, Hall E L. Plastic deformation and fracture of binary TiAl-base alloys [J]. Metall Trans, 1991, 22(A): 427-435.
- [5] TANG Jian-cheng, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui, et al. Effect of nitrogen addition on microstructures and mechanical properties of TiAl based alloys [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(4): 692-695.
- [6] Morris M A, Leboeuf M. Kinetics of grain growth in a γ based TiAl alloy [J]. Scripta Mater, 1998, 38: 369-374.
- [7] TANG Jian-cheng, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui, et al. Grain growth of a forged TiAl during heat treatment [J]. Trans Nonferrous Met Met Soc China, 2000, 10(1): 183-186.
- [8] Andersen I, Grong O. Analytical modeling of grain growth in metals and alloys in the presence of growing and dissolving precipitates [J]. Acta Metall Mater, 1995, 43(7): 2673-2688.
- [9] Kim Y W. Microstructural evolution and mechanical

- properties of a forged γ -TiAl [J]. *Acta Metall Mater*, 1992, 40: 1121 - 1134.
- [10] 陈伶俐, 黄伯云, 曲选辉, 等. TiAl 基合金的复合热机械处理[J]. *中国有色金属学报*, 1996, 6(1): 120 - 126.
- CHEN Ling-hui, HUANG Bai-yun, QU Xuan-hui. The study of a multi-thermal-mechanical process for TiAl-based alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1996, 6(1): 120 - 126.
- [11] 钟继贵. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. 140 - 142.
- ZHONG Ji-gui. *Error Theory and Data Processing*[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Engineering Press. 1993. 140 - 142.
- [12] Denquin A, Naka S. Phase transformation mechanism involved in two phase TiAl- β : lamellar structure formation [J]. *Acta Metall*, 1995, 43: 343 - 349.
- [13] Zheng Y. Microstructure evolution during heat treatment of TiAl+ Ti_3Al alloy [J]. *Scripta Metall*, 1992, 26: 27 - 28.
- [14] 潘金生, 仝健民, 田民波. 材料科学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. 576.
- PAN Jin-sheng, TONG Jian-min, TIAN Min-bo. *Foundation of Material Science*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. 576.
- [15] Kattner U R, Lin J C, Chang Y A. Thermodynamic assessment and calculation of Ti-Al system [J]. *Metall Trans*, 1992, 23A: 2081 - 2090.
- [16] Jones S A. Phase equilibria and transformation in TiAl [J]. *Acta Metall Mater*, 1993, 41: 387 - 398.

Lamellae growth in fully lamellar TiAl alloys and its factors

LIU Wen-sheng, HUANG Bai-yun, TANG Jian-cheng, ZHOU Ke-chao, HE Yue-hui, Liu Yong
(State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: It is important to control the lamellar spacing of fully lamellar TiAl alloy for improving its mechanical properties. The factors affecting the lamellar spacing of fully lamellar TiAl alloy and the dependence of the lamellar spacing on the factors were investigated by means of OM and TEM. The results show that the lamellar spacing depends on cooling rate and Al content. The lamellar spacing is inversely proportional to cooling rate and increases with the increase of Al content. At the same time, a theoretical expression of the lamellar spacing of fully lamellar TiAl alloy during continuous cooling has been derived on the basis of the ledge mechanism of lamellae growth. The theoretical results are in agreement with the experimental findings.

Key words: TiAl; lamellar spacing; cooling rate; Al content

(编辑 何学锋)