

双温循环热处理 对铸态 TiAl 基合金显微组织的影响^①

彭超群 黄伯云 贺跃辉

(中南工业大学粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

孟力平

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

摘 要 用 Gleeble-1500 热模拟机研究了双温循环热处理对铸态 TiAl 基合金显微组织的影响。结果表明, 用双温循环热处理可显著细化铸态合金的晶粒尺寸, 最小平均晶粒尺寸可达 10 μm 左右, 且晶粒大小均匀; 新晶粒主要在晶界形核, 并逐步向晶内扩展。经循环热处理后的样品, 比铸态硬度提高 300~900 MPa。

关键词 TiAl 基合金 循环热处理 显微组织 晶界形核

中图法分类号 TG146.2 TG151.1

钛铝基金属间化合物合金以密度、刚度、高温强度和阻燃性等方面的特有优势而被认为是最有应用潜力的新一代结构材料^[1-5], 改善其室温脆性已成为材料科学领域的研究热点之一。铸造工艺因其可净成型性和经济性, 将是钛铝合金首先取得工业应用的技术途径^[4]。但 TiAl 合金铸态组织通常是粗大片团的层片结构, 其室温延性几乎为零, 只有经过合金化、形变热处理或特殊热处理等方法细化显微组织, 才能将铸态合金用作高温结构材料。采用合金化^[6-15]、热处理^[16-19]及形变热处理技术^[20, 21]已发展出多种钛铝合金组织, 典型的包括全层片(FL)、近全层片(NL)、双态(DM)和近 γ (NG)组织。大量研究表明, 细小的全层片组织或双态组织最有可能在应用上获得成功。本文在 $L_{16}(4^5)$ 正交试验^[22]的基础上对铸造 TiAl 基合金进行双温循环热处理, 获得了细小的显微组织并探讨了形核机制。

1 实验材料及方法

实验合金的名义成分为 Ti-33% Al-3% Cr

(质量分数, 下同), 用自耗电弧熔炼炉熔炼而成, 为了减轻成分偏析, 采取了二次重熔技术。双温循环热处理工艺参数见表1。所有热处理实验均在 Gleeble-1500 热模拟机上完成, 样品尺寸为 $d=10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。金相观察采用 NEOPHOT-2 型金相显微镜, 腐蚀剂为 1% HF + 2% HNO_3 + 1.5% HCl + H_2O ; 硬度测试采用 HV-10A 型轻负荷维氏硬度计。

2 结果与讨论

2.1 铸态样品的显微组织

铸态 TiAl 基合金的显微组织为粗大的全层片组织, 见图1。X 射线衍射表明, 该组织为 α_2/γ 双相组织。

2.2 循环热处理样品的显微组织及显微硬度

29[#] ~ 31[#] 样品的显微组织见图2, 显微硬度 HV₅ 见表1。由图2可见, 经快速加热双温循环热处理后, 3 个样品均获得了较细小的显微组织, 但只有经过 5 次循环热处理的样品, 其显微组织不但细小(约 10 μm), 而且尺寸比

① 国家自然科学基金资助项目 59634120 及国家“八六三”高技术基金资助项目 715-005-0040 收稿日期: 1998-10-15
彭超群, 男, 32 岁, 博士研究生

表 1 双温循环热处理工艺参数表及硬度测试结果

Table 1 Technological parameters of double-temperature cyclic heat treatments and HV₅ values

Test No.	$v_h/(K \cdot s^{-1})$	T/K	t/min	$v_c/(K \cdot s^{-1})$	T'/K	t'/min	$v'_c/(K \cdot s^{-1})$	n	HV ₅ /MPa
29 [#]	800	1 603	2	80	1 523	6	50~ 80	1	3 600
30 [#]	800	1 603	2	80	1 523	6	50~ 80	3	3 060
31 [#]	800	1 603	2	80	1 523	6	50~ 80	5	3 150

v_h —Heating rate, T, T' —Holding temperatures, t, t' —Holding times, v_c, v'_c —Cooling rates, n —Cycling times.

较均匀。因此用该工艺可以获得均匀、细小的显微组织，从而有促于改进 TiAl 基合金的室温延性。

铸态合金的显微硬度为 2 700 MPa，经热处理后，硬度分别提高 900，306 和 315 MPa。可见用快速加热循环热处理可不同程度地提高显微硬度值，且最大幅度达 30% 以上。29[#] 样品的硬度值远高于铸态样品，可能是由于快速加热一方面细化了显微组织，另一方面产生了较大的热应力，但随着循环次数增加，后一次的热处理可消除前一次加热引起的热应力，从而使经过 3 次和 5 次循环热处理的样品的显微硬度值基本相当。

2.3 形核机理

本研究中采用的快速加热循环热处理能获

得均匀、细小的组织，主要是因为充分利用了快速加热和循环处理两方面的作用：快速加热

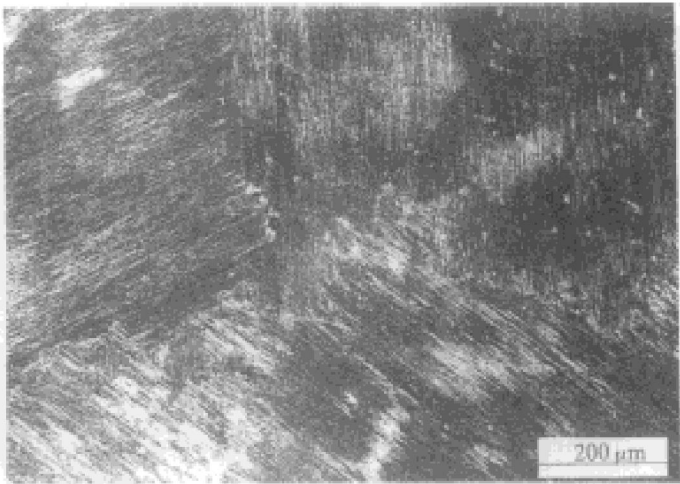


图 1 铸态样品的显微组织

Fig. 1 Microstructure of as-cast sample No. 0

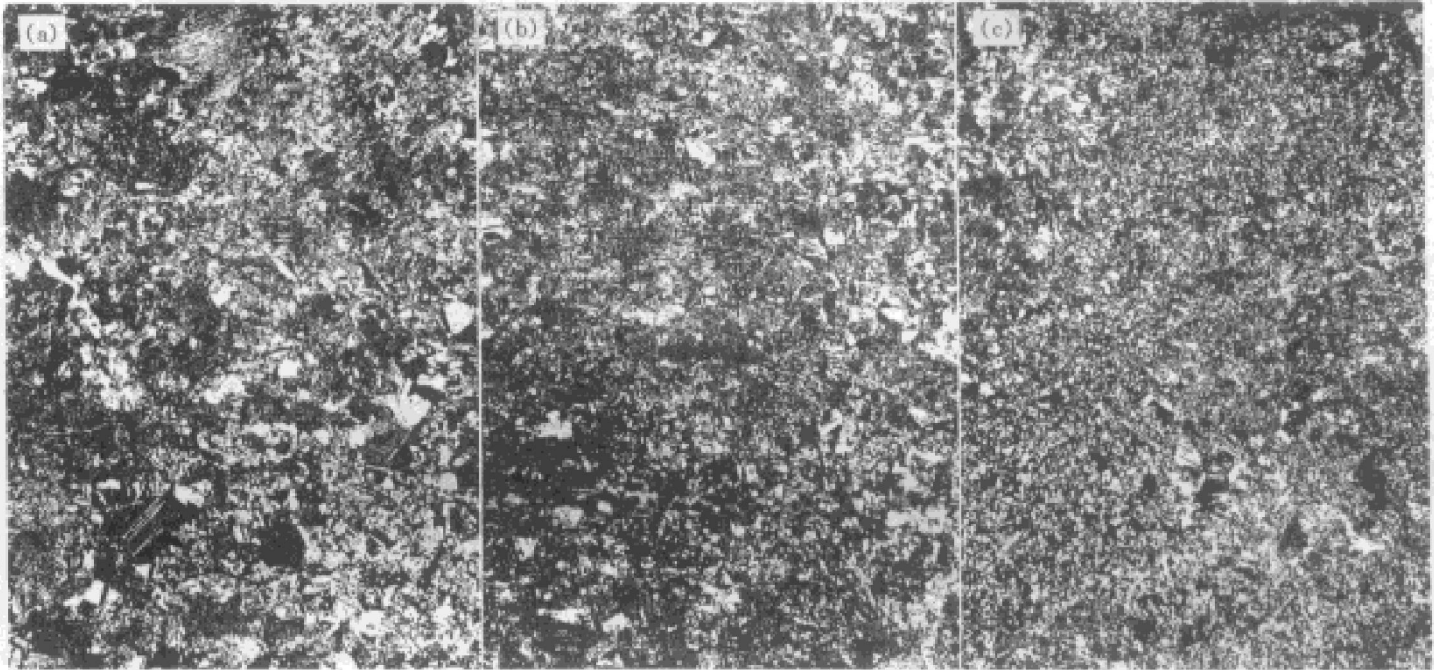


图 2 循环热处理样品的显微组织

Fig. 2 Microstructures of as-cast samples after cyclic heat treatments

(a) —29[#] ; (b) —30[#] ; (c) —31[#]

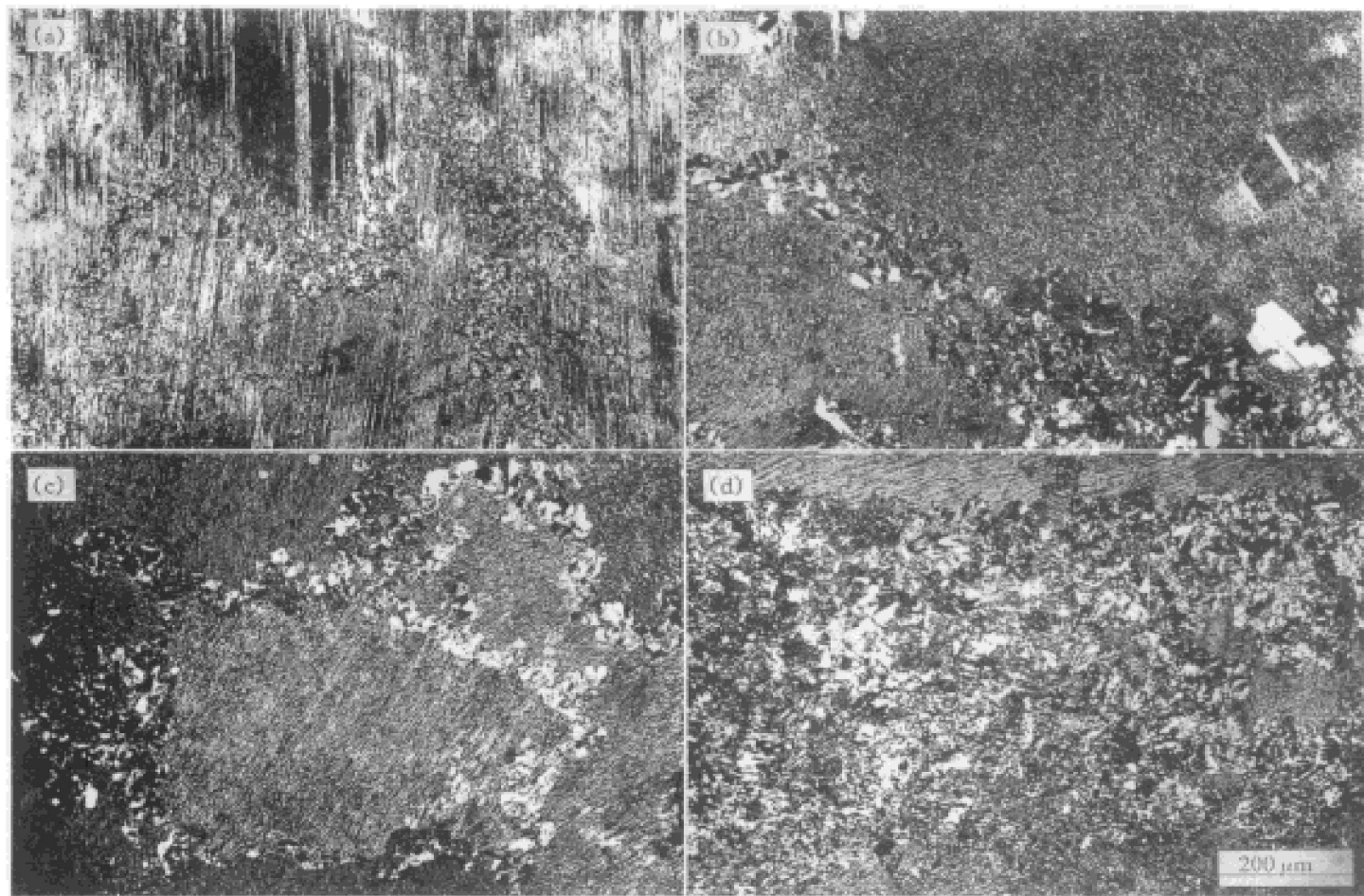


图3 晶界形核金相照片

Fig. 3 Metallographs showing grain boundary nucleations

可急剧地大量形核, 从而获得细小的 α 晶粒, 多次循环一方面促进前次加热未形核的部位形核, 另一方面则使已形核的晶粒进一步细化。新相晶核常常在母相中的不连续处优先形核, 且遵循以下优先顺序: 晶界形核、位错形核、空位形核、层错形核、夹杂处形核及显微不连续处形核^[23]。对铸态 TiAl 基合金来说, 晶界缺陷最多, 且容易符合重新形核所需的 3 个条件: 能量起伏、成分起伏及结构起伏, 因此最易形核。图 3 是实验观察到的晶界形核情况。可见, 新晶粒的形核是在晶界开始的, 并逐步向晶内推进, 从而最后覆盖整个样品。

REFERENCES

- Kim Y-W. JOM, 1989, July: 24- 30.
- Kim Y-W and Dimiduk D M. JOM, 1991, August: 40- 47.
- Kim Y-W. JOM, 1994, July: 30- 39.
- Bartolotta P, Barrett J, Kelly T *et al.* JOM, 1997, May: 48- 50.
- Keller M M, Jones P E, Porter W J III *et al.* JOM, 1997, May: 42- 44.
- Gao Ying(高颖), Zhu Jing(朱静) and Cai Qigong(蔡其巩). Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1992, 28(2): A62- A66.
- Qu Xuanhui(曲选辉), Huang Baiyun(黄伯云), Lu Haibo(吕海波) *et al.* J Cent-South Inst Min Metall(中南矿冶学院学报), 1992, 23(3): 296- 301.
- Qu Xuanhui(曲选辉), Huang Baiyun(黄伯云), Lei Changming(雷长明) *et al.* Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1993, 29(5): B236- B239.
- Lei Changming(雷长明), Qu Xuanhui(曲选辉), Huang Baiyun(黄伯云) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1993, 3(3): 58- 61.
- Xie Yingxiu(谢英秀), Cao Mingzhou(曹名洲) and Xu Zengji(徐曾基). Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1993, 29(4): A159- A164.
- He Yuehui(贺跃辉), Qu Xunahui(曲选辉), Huang Baiyun(黄伯云) *et al.* J Cent-South Inst Min Met-

- all(中南矿冶学院学报), 1993, 24(6): 788– 793.
- 12 Chen Shiqi(陈仕奇), Qu Xuanhui(曲选辉), Lei Changming(雷长明) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 1994, 30(1): A20– A24.
 - 13 Zheng Yunrong(郑运荣) and Zhao Linruo(赵林若). *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 1994, 30(3): A97– A103.
 - 14 Zheng Yunrong(郑运荣), Wang Xiaoping(汪小平), Ruan Zhongci(阮中慈) *et al.* *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报), 1995, 15(4): 8– 14.
 - 15 Cao Peng(曹 鹏), He Yuehui(贺跃辉) and Huang Baiyun(黄伯云). *J Cent South Univ Technol*(中南工业大学学报), 1996, 27(6): 703– 706.
 - 16 Soboyejo W O, Schwartz D S and Sastry S M L. *Metallurgical Transactions A*, 1992, 23A: 1992– 2039.
 - 17 He Yuehui(贺跃辉), Huang Baiyun(黄伯云), Qu Xuanhui(曲选辉) *et al.* *J Cent South Univ Technol* (中南工业大学学报), 1996, 27(3): 298– 302.
 - 18 Zhang Ji(张 继), Ma Wanqing(马万清), Zou Dunxu(邹敦叙) *et al.* *Transactions of Metal Heat Treatment*(金属热处理学报), 1996, 17(3): 16– 21.
 - 19 Zhang Ji(张 继), Zhang Jianwei(张建伟), Zou Dunxu(邹敦叙) *et al.* *Transactions of Metal Heat Treatment*(金属热处理学报), 1996, 17(4): 12– 16.
 - 20 Huang Baiyun(黄伯云), He Yuehui(贺跃辉), Qu Xuanhui(曲选辉) *et al.* *J Cent South Univ Technol* (中南工业大学学报), 1995, 26(5): 632– 636.
 - 21 Chen Linghui(陈伶俐), Huang Baiyun(黄伯云), Qu Xuanhui(曲选辉) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报), 1996, 6(1): 120– 126.
 - 22 Peng Chaoqun(彭超群), Huang Baiyun(黄伯云), He Yuehui(贺跃辉) *et al.* *J Cent South Univ Technol*(中南工业大学学报), 1999, 30(1):
 - 23 Tian Rongzhang(田荣璋) ed. *Metal Heat Treatment*(金属热处理). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 63– 66

EFFECT OF DOUBLE-TEMPERATURE CYCLIC HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE OF TiAl-BASED ALLOY

Peng Chaoqun, Huang Baiyun, He Yuehui and Meng Liping*

The State Key Lab of Powder Metallurgy,

* *Department of Materials Science and Engineering,*

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

ABSTRACT The effect of double-temperature cyclic heat treatment on microstructure of a TiAl-based alloy (Ti-33Al-3Cr, mass fraction, %) was studied by means of Gleeble 1500 thermal stimulator. The results showed that the grain size of the as-cast alloy samples can be obviously refined and the smallest average grain size reaches about 10 μm , that the nucleations mainly occur at the grain boundaries and propagate into the grains, and that after cyclic heat treatment the HV₅ hardness values are raised by 300~ 900 MPa

Key words TiAl-based alloy cyclic heat treatment microstructure grain boundary nucleation

(编辑 吴家泉)