

TiAl 基合金显微组织对高温拉伸力学性能的影响^①

贺跃辉 黄伯云 周科朝 欧文沛 雷长明 陈小群
(中南工业大学粉末冶金研究所, 长沙 410083)

摘要 研究了 TiAl 基合金不同显微组织试样在 900 °C 下的拉伸力学性能。试验结果表明, 在晶粒尺寸相当的前提下, 与双态组织相比, 细小层片状组织试样表现出良好的高温综合力学性能。采用光学金相显微镜, SEM 和 TEM 等检测分析仪器, 详细地对试样拉伸前后的显微组织进行了分析研究。

关键词 TiAl 基合金 高温拉伸 动态再结晶 显微组织 孔洞

TiAl 基合金被认为是一种理想的、富有研究开发应用前景的航空航天用新型结构材料^[1]。然而, 存在的室温延性低^[2], 热加工成形性差^[3]和 850 °C 以上抗氧化能力不足^[4]等缺陷, 至今未能得到彻底解决, 所以, 抑制了这种材料的实用化。随着研究的深入, 在改善 TiAl 基合金室温脆性^[5, 6]、提高热变形性^[7, 8]和提高抗氧化能力^[9-11]等方面取得了许多新的研究成果, 推动了这种材料的实用化进程。在此基础上, 对 TiAl 基合金开展全面、深入、综合的研究工作显得刻不容缓。研究结果表明, TiAl 基合金各种力学性能对其显微组织十分敏感。双态显微组织表现出良好的室温延性^[12], 但是, 其室温断裂韧性^[13]和高温抗蠕变性^[14]则较差; 全层片状组织表现出低的室温延性^[15], 然而, 它却具有高的 K_{IC} 值^[16]和抗蠕变能力^[17]。TiAl 基合金是作为一种高温结构材料被提出的, 所以, 对其不同显微组织试样开展高温拉伸力学性能的研究也是十分必要的。

因此, 本工作中, 研究了 TiAl 基合金双态组织和细小全层片状组织试样的高温拉伸力学性能, 以及与其相关的一些行为。

1 试验过程

研究用合金材料的名义化学成份为 Ti-33Al-3Cr-0.5Mo(%)。合金采用自耗电弧炉熔炼而成。为了减轻成份偏析, 采取了二次重熔技术; 并且, 铸锭经过 1040 °C, 48 h 真空均匀化退火处理。17 kg 重铸锭经过电火花线切割加工, 得到 $d70\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 圆柱体。随后将之进行 HIP 处理, 其工艺为 1250 °C、170 MPa, 2 h。通过包套锻复合热机械处理^[18, 19], 得到各种形态的均匀、细小的显微组织。将最终处理试样加工成有效尺寸为 $d5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 高温拉伸试验用试样。高温拉伸试验在 Instron 1342 型电液伺服控制材料试验机上进行, 拉伸时控制夹头运行速度为 2 mm/min 的恒定速率, 试验气氛为大气, 试验温度为 900 °C。将试验后的试样沿轴线剖开, 并将剖面制成金相试样。金相试样制备按常规方法进行, 浸蚀剂选用 Kroll 溶液。金相分析在 Leica-Quantimet 光学金相显微镜和 X650 型扫描电子显微镜上进行。随后, 将拉伸试验试样制成 TEM 分析用薄膜状试样, 采用电解双喷技术, 电解液配

① 国家“八六三”高技术计划基金及国家自然科学基金资助项目
贺跃辉, 男, 33岁, 研究员

收稿日期: 1996-03-07; 修回日期: 1996-09-10

方为 700mL 酒精+ 120mL 甲醇+ 100mL 二丁氧基乙醇+ 80 mL 高氯酸, 操作条件为 - 40 °C/7~ 10 mA/45 V。分析观察时, 采用 H800 型透射电子显微镜, 操作电压为 200kV。

2 试验结果及分析

通过包套锻复合热机械处理新工艺技术, 在 TiAl 基合金中得到均匀、细小的双态显微组织和全层片状组织, 光学金相照片如图 1 所示。显微组织图像分析结果如表 1 所示。

拉伸试验结果如表 2 所示。

由表 2 的数据处理结果得知, 双态组织 900 °C 下进行高温拉伸试验时, 各个试验方案的力学性能值的标准误差分别为 $\sigma_s^* = 0$, $\sigma_{\sigma_b}^* = 4.0$ 和 $\sigma_{\delta} = 6.1$ 。全层片状显微组织的高温

力学性能值的标准误差分别为 $\sigma_s^* = 4.5$, $\sigma_{\sigma_b}^* = 5.0$ 和 $\sigma_{\delta} = 5.6$ 。从中可以看出, 本研究得到的均匀的显微组织, 表现出高的力学性能值的稳定性, 得到的试验值分散度很低。

由表 2 所示试验数据可以得知, 本工作得到的 TiAl 基合金材料在 900 °C 高温下, 表现出良好的高温延性。并且, 不同工艺下得到不同的显微组织, 显示出较大差别的高温强度, 特别是屈服强度。为了研究以上特征, 对试验试样的显微组织和微观结构进行了分析。图 2 示出双态组织试样拉伸试验后均匀变形部位上得到的显微组织光学金相照片。与原始组织相比较, 显微组织没有发生明显的变化。但是, 在材料中出现了一些孔洞, 它们以非连续的带状形态沿轴向分布。采用 SEM 对其显微组织进行了进一步的分析, 图 3 示出高温拉伸试样断

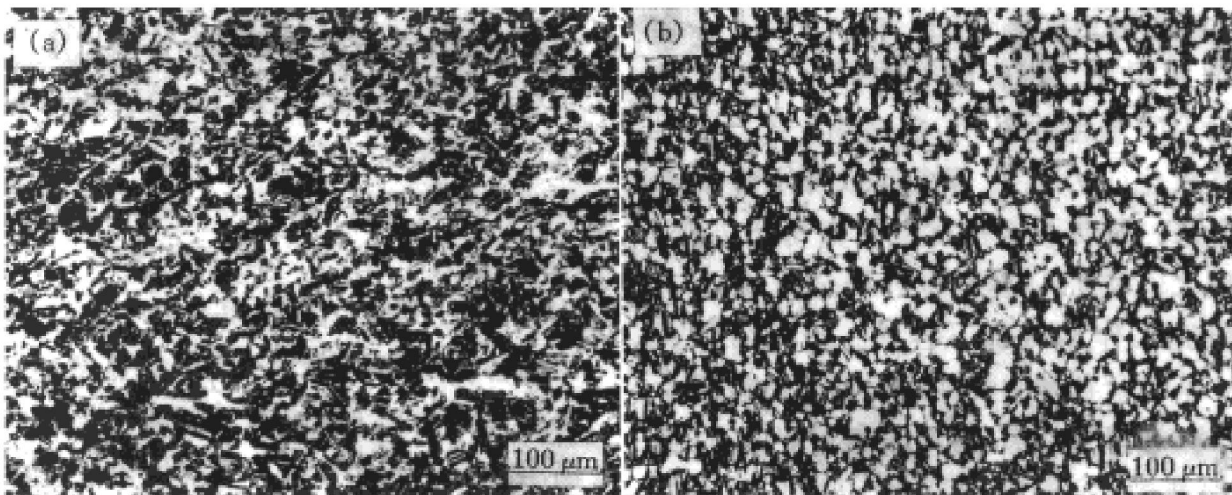


图 1 包套锻复合热机械处理在 Ti-33Al-3Cr-0.5Mo(%) 合金中得到的双态组织(a) 和全层片状组织(b)

表 1 不同显微组织图像分析结果

试样号	热机械处理工艺	组织类型	平均晶粒尺寸/ μm	$V_v / \%$	$V_{a_2} / \%$
1	1040 °C, $2 \times 10^{-1} \text{S}^{-1}$, 60% + 1250 °C, 10h+ 1100 °C, $2 \times 10^{-1} \text{S}^{-1}$, 50%	双态组织	8.6	48	52
2	+ 1250 °C, 4h A.C* + 950 °C, 10h F.C** 1040 °C, $2 \times 10^{-1} \text{S}^{-1}$, 60% + 1250 °C, 10h+ 1100 °C, $2 \times 10^{-1} \text{S}^{-1}$, 50%+ 1310 °C, 2.5h A.C+ 950 °C, 10h F.C	全层片状组织	10.7	0	100

A.C* : 空冷; F.C** : 炉冷

裂后均匀变形部位上显微组织 SEM 二次电子像照片, 可见在基体材料上分布着较多的孔洞; 这些孔洞呈线状分布, 高倍分析结果表明, 这些线状孔洞群大多数情况下是由相互分离的、呈多边形的小孔洞以线状排列聚集在一起的。孔洞往往存在于晶界, 特别是当它们大多数存在于 γ 晶粒和 α_2/γ 与 α_2/γ 层片状晶团之间的晶界组成的晶隅处, 如图 4 所示。对拉伸试样断口分析表明, 断口呈 V 字型, 如图 5 所示; 断口边界呈锯齿状, 在断口深部为一个深的齿谷。由 SEM 分析还发现, 在断口附近的材料基体上, 存在着由多个孔洞连通形成的大孔洞。

然而, 分析发现, 全层片状显微组织的试样, 经过高温拉伸之后, 其显微组织发生了动态再结晶现象, 其结果是形成了等轴状 γ 相晶粒。在 γ 相晶粒与 α_2/γ 层片状晶团之间的晶界组成的晶隅处, 可以形成 Y 型孔洞, 如图 6

表 2 高温拉伸试验结果(900 °C)

试样批号	试样号	组织类型	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%
	1- 1		278	368	122.0
1	1- 2	双态组织	278	360	107.2
	1- 3		278	359	114.8
2	2- 1	全层片状组织	375	423	113.0
	2- 2		382	415	104.0

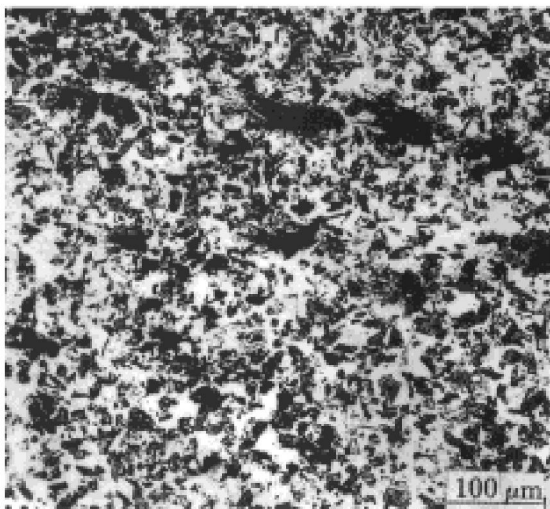


图 2 双态组织试样经过高温拉伸后显微组织光学金相照片

所示。

研究还发现, 在层片状晶团内也可以发生 γ 相晶粒再结晶。亦即, 层片状晶团能在高温条件下, 由于应力的作用促使层片发生弯曲, 大量的位错在层片界面及其附近区域上发生塞积, 如图 7 所示。

由此可见, 当 TiAl 基合金具有不同类型的显微组织时, 其高温变形机理存在差异。

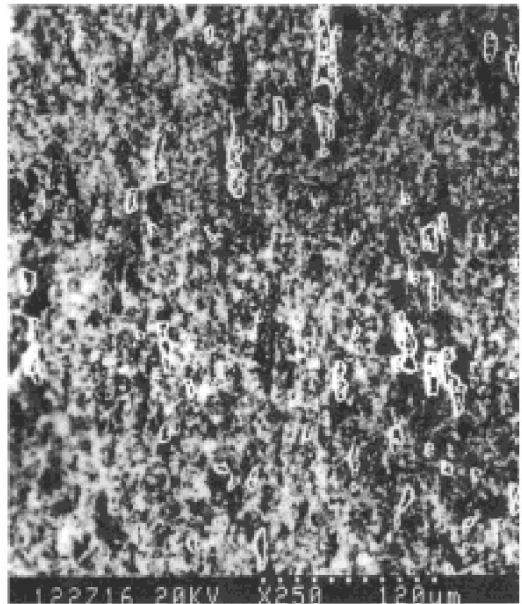


图 3 高温拉伸双态组织试样均匀变形部位上显微组织 SEM 二次电子像照片



图 4 存在于晶隅处的孔洞的 SEM 二次电子像分析结果

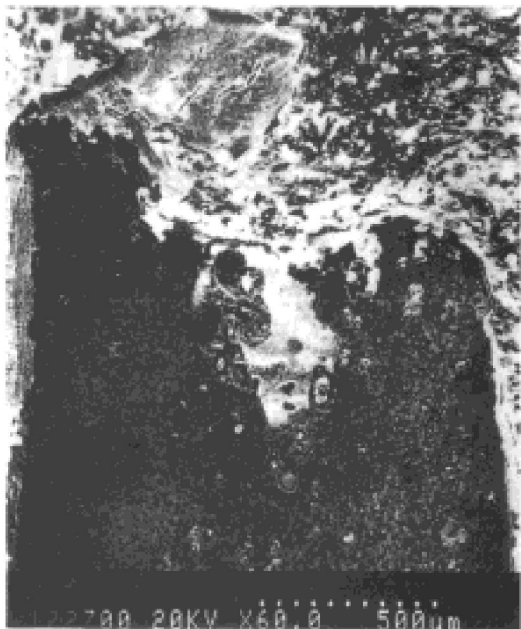


图5 双态组织试样经高温拉伸试验后纵截面断口形貌 SEM 二次电子像



图6 全层片状组织试样高温拉伸试验后显微组织形貌 SEM 二次电子像照片

3 讨论

TiAl 基合金的显微组织对其高温力学性能产生影响。与双态显微组织比较，细小、均匀的全层片状组织试样表现出较高的高温强度，如表 2 所示。同时，由于采用了包套锻复合热机械处理新工艺技术，在 TiAl 基合金中

得到了均匀、细小的双态组织和全层片状组织，所以，在显示出高的高温延性时，还表现出高的高温力学性能稳定性和重复性。由本研究工作中的试验结果及其分析可以看出，孔洞的形成及其发展，对 TiAl 基合金高温变形直至断裂的整个过程起到较大作用；而孔洞往往存在于 γ 相晶粒与两个 α_2/γ 层片状晶团之间的晶界组成的晶隅处。分析认为，这是由于此种晶隅上的相交汇的三个晶界面上在晶体结构及力学性能方面存在较大的差异，导致显著的晶界变形不协调现象。所以，双态组织呈现较低的高温强度。

但是，全层片状组织试样高温拉伸过程中，在晶粒细化对抗变形能力贡献的基础上，可以通过层片弯曲来适应应力作用，所以，它们也表现出高的高温延性。同时，对全层片状组织试样，由于 γ 相晶粒与 α_2/γ 层片状晶团之间的晶界组成的晶隅，只有发生动态再结晶产生 γ 相晶粒之后才形成，结合上述讨论可以看出，全层片状显微组织试样在高温拉伸过程中形成孔洞较双态组织试样迟缓，即有效截面尺寸较大。与此同时，层片状晶团中层片界面对变形亚结构运动有阻碍作用，可以进一步提高高温强度。所以，全层片状显微组织试样表现出高的高温强度。

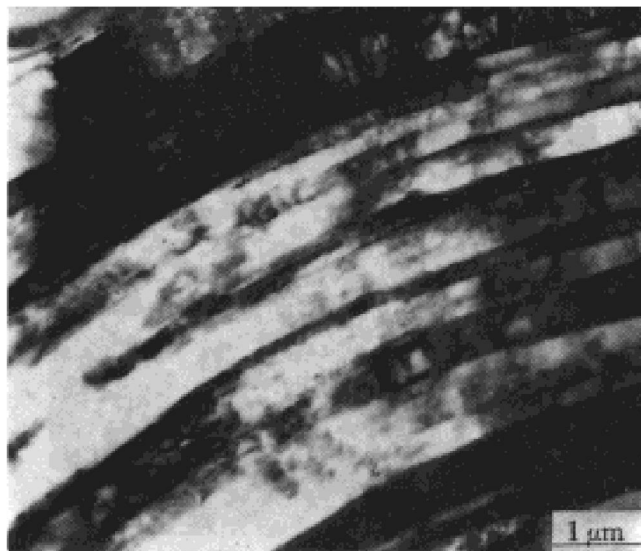


图7 高温拉伸试验后 α_2/γ 层片状晶团内显微组织 TEM 分析结果

4 结论

(1) TiAl 基合金全层片状显微组织试样与双态组织相比较, 表现出高的高温强度。

(2) 在晶粒尺寸相当的前提下, TiAl 基合金全层片状组织试样和双态组织试样具有相当高的高温延性。

(3) TiAl 基合金在 900 °C 拉伸时, 孔洞形成及其发展是此种合金失效的主要原因。

(4) 得到均匀、细小的全层片状显微组织有利于 TiAl 基合金获得良好的高温综合力学性能。

参考文献

- 1 Lipsitt H A *et al.* Metall Trans, 1975, 6A: 1991.
- 2 Shechtman D *et al.* Metall Trans, 1974, 5(6): 1373.

- 3 信木稔等. 日本金属学会志, 1986, 50(9): 840.
- 4 笠原和男等. 日本金属学会志, 1989, 53(1): 58.
- 5 Kim Y- W. Acta Metall Mater, 1992, 40(6): 1121.
- 6 贺跃辉等. 高技术通讯, 1994, 4(12): 23.
- 7 Koepee C *et al.* Metall Trans, 1993, 24A: 1795.
- 8 贺跃辉等. 热加工工艺, 1995, 5: 17.
- 9 小林郁夫等. 日本金属学会志, 1989, 53(2): 251.
- 10 贺跃辉等. 材料工程, 1995, 5: 10.
- 11 贺跃辉等. 材料科学与工艺, 1995, 1: 13.
- 12 Huang S C *et al.* Metall Trans, 1991, 24A(1): 2619.
- 13 Huang S C *et al.* Metall Trans, 1992, 23A(2): 375.
- 14 Shih D S *et al.* In: Kim Y W (eds), Microstructure/ Properties Relationships in Titanium Aluminides and Alloys, Warrendale, PA: TMS, 1990, 135.
- 15 Kim Y W *et al.* JOM, 1991, 8: 40.
- 16 Chan K S *et al.* Metall Trans, 1993, 24A: 113.
- 17 Takahashi T *et al.* Mater Sci and Eng, 1990, A128: 195.
- 18 贺跃辉等. 材料科学与工程, 1996, 1: 17.
- 19 黄伯云等. 中南工业大学学报, 1995, 26(5): 632.

INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE OF TiAl BASED ALLOY ON THE MECHANICAL PROPERTIES AT ELEVATED TEMPERATURE

He Yuehui, Huang Baiyun, Zhou Kecao, Ou Weipei, Cheng Xiaoqun
*Powder Metallurgy Research Institute of Central
South University of Technology, Changsha 410083*

ABSTRACT The refined full lamellae (C grain size being 10.7 μm) and duplex (8.6 μm) microstructures of TiAl based alloy have been obtained by multi-step thermal-mechanical treatment technique for this alloy sample canned with middle carbon steel. The effects of microstructures on the mechanical properties of Ti-33Al-3Cr-0.5Mo(%) alloy with same degree of grain size at 900 °C were investigated. The test results showed that compared with the duplex microstructure samples, the TiAl based alloy samples with fully lamellae microstructure exhibited very advanced mechanical properties at high temperature, especial the tensile elongation being over 100%. The microstructures of samples both before and after tensile test at high temperature were analyzed with optical microscope, SEM and TEM in details.

Key words TiAl based alloy tensile test at elevated temperature dynamic recrystallization microstructure hole

(编辑 朱忠国)