

锰对 Ti-45Al-10Nb 合金的组织 和性能的影响^①

陈国良 王沿东* 朱丹青*

(新金属材料国家实验室, 北京 100083; * 北京科技大学材料系, 北京 100083)

摘 要 研究了 Mn 对 Ti-45Al-10Nb(原子分数)合金铸态组织和 1 100℃再结晶组织的影响以及 Mn 对于 Ti-45Al-10Nb 合金力学性能的影响。结果表明, Mn 能促进 Ti-45Al-10Nb 合金的再结晶过程, 并改善合金的力学性能。

关键词 Ti-Al 合金 金属间化合物 力学性能

Ti-45Al-10Nb 合金是一种有发展潜力的金属间化合物, 1 100℃下的压缩屈服强度高, 达 300~350 MPa, 而合金的密度只有 4.3 g/cm³, 约为 Ni 基高温合金的 55%, 因此有很高的比强度^[1], 其抗氧化性比 Ti₃Al 和 TiAl 合金要低 2 个数量级^[2]; 但是其室温塑性较差, 为此, 提高合金的塑性和韧性成为重要的研究课题。本文的目的是研究合金元素 Mn 对 Ti-45Al-10Nb 合金的组织与性能的影响。

1 试验方法与合金制备

合金成分设计是在 Ti-45Al-10Nb(A0)基础上分别添加 1%, 2%, 3%(原子分数)的 Mn(如表 1 中 A21, A22, A23 的成分)。

为了得到高纯度的合金, 用真空电子束炉提纯的 Nb 和 Ti 及 99.99% 高纯 Al 为原材料, 用真空非自耗电弧炉熔炼成 60 g 铸锭。为避免成分不均匀, 每一个铸锭反复熔炼 4 次, 对合金成分测试, 宏观成分偏析小于 1%(原子分数), 合金成分见表 1。

室温及高温压缩性能测试是在 Gleeble-1500 热模拟试验机上, 用行程控制进行的。应

变速率为 10⁻² s⁻¹, 试样尺寸为 $d \times 10$ mm。室温弯曲性能在 Instron 1185 试验机上进行, 试验方法及各种指标的计算方法与文献[3]相同。由于合金的室温塑性较小, 为准确测量其塑性变形, 在弯曲试样底面(受拉应力面)贴电阻应变片, 通过电阻应变仪直接读出拉伸应变值, 由此得到断裂时的最大拉伸应变值。

用光学及扫描电镜研究合金的显微组织形貌, 用能谱分析(EDX)测量微区成分。金相试样经粗磨、抛光后, 用 HF 水溶液(HF: H₂O = 1: 4)腐蚀。

2 实验结果

2.1 Mn 对铸造合金组织的影响

图 1 为含 Mn 和不含 Mn 的 Ti-45Al-10Nb 合金的典型铸态组织, 均为 α 及 γ 两相组织, 呈片状分布; 一种是条状组织, 另一种是基体; Mn 没有引起明显的组织变化。含 Mn 合金微区成分分析(表 2)指出, 与条状相比较, 基体含 Al 较高而含 Ti 较低, 由此判断高温下条状相为 γ 相, 基体为 α 相; 低温下 α 基体相共析分解为 $\alpha + \gamma$ 相, γ 相也会析出 α 相。

① 国家自然科学基金资助项目 收稿日期: 1995-04-07; 修回日期: 1995-10-16 陈国良, 男, 60 岁, 教授

法测得载荷-应变曲线(图 3)。可见, 不含 Mn 的合金呈脆断, 而添加 Mn 的 A22 合金具有 0.16% 的最大拉伸塑性变形。

图 4 为典型的断口照片。虽然都是解理断裂, 但不含 Mn 的合金的断口更加平整。含

图 1 Mn 对 Ti-45Al-10Nb 合金铸态组织的影响(二次电子像)
(a) — 不含 Mn; (b) — 含 Mn

表 1 合金成分(质量分数/%)

序号	Nb	Ti	Al	Mn	合金状态
A21	19.8	50.5	28.2	1.3	铸态
A22	19.7	49.4	28.1	2.6	铸态
A23	19.7	48.1	28.1	3.8	铸态
A0	20.0	51.7	28.3	—	铸态, 形变态
W1	19.6	48.8	28.4	3.2	形变态

表 2 A22 合金的微区成分分析(原子分数/%)

相	Nb	Ti	Al	Mn
平均成分	11.2	41.6	44.6	2.7
条状相	10.9	39.5	47.5	2.1
基体相	10.1	44.3	42.7	2.8

图 2 Mn 对 Ti-45Al-10Nb 合金室温性能的影响

(a) — 对弯曲塑性及形变功的影响;
(b) — 对缺口断裂韧性的影响

Nb 和 Mn 在两种相间分配呈弱的相反趋势。

2.2 Mn 对室温塑性与韧性的影响

图 2(a) 给出 Mn 对 Ti-45Al-10Nb 合金弯曲塑性及断裂形变功 W 的影响。随含 Mn 量提高, 弯曲试验最大挠度 f_{max} 从 0.102 mm 增加到 0.205 mm, 断裂形变功 W 从 0.06 J 增加到 0.38 J。与此对应, 缺口断裂韧性 K_{IC}^R 从 $12.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 增加到 $17.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (图 2(b))。利用在弯曲试样底面贴电阻应变片的方

图 3 载荷-应变曲线

Mn 合金的断口有较多的台阶及二次裂纹。

2.3 Mn 对高温强度及脆-韧转变温度的影响

图 5 为 Mn 对不同温度下的压缩屈服强度的影响。随含 Mn 量增加, 无论室温或高温屈服强度均有所下降, 但 1100℃ 压缩屈服强度仍可保持在 300 MPa 左右。图 6 为不同含 Mn 合金的压缩率与温度的关系。可以看出, 加入 Mn 使脆韧转变温度降低, 而且这个温度与屈服强度急剧下降的温度相对应(与图 5 对比)。

图 6 不同含 Mn 量下合金压缩率与温度的关系

3 讨论

试验结果证明, Mn 能提高 Ti-45Al-10Nb 两相合金的室温塑性和缺口断裂韧性。图 3 表明, 不含 Mn 的合金有很大的脆性, 过早产生脆断。而含 Mn 合金则有一定的形变协调能力, 可避免过早发生脆断, 表现出室温屈服强度与塑性同时得到提高; 但 Mn 量过高反使室温屈服强度降低。本文进行的高温压缩试验还表明, Mn 明显降低脆-韧转变温度, 而且这个脆-韧转变温度与屈服强度明显降低的温度相一致。这些试验结果与 Mn 在 Ti-48Al 中的作用一致^[4-9]。Hashimoto 等^[4]报导 Ti-48.4Al-1Mn 合金可以得到的室温最大延伸率为 2%。本合金由于屈服强度远高于 Ti-48Al 合金, 故最大延伸率要低一些。

Mn 提高室温塑性的作用与降低脆-韧转变温度的作用有某种一致性。为了进一步研究 Mn 的作用, 专门进行了变形合金的再结晶试验, 即对含 Mn 和不含 Mn 的试验合金进行亚等温锻造试验: 先把合金加热到 1250℃, 保温 0.5 h, 然后在锻造温度 1050℃ 的等温锻造机上进行热变形, 形变速率约为 $5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, 变形量大于 40%。对等温锻造以后的试样进行 1100℃ 真空再结晶处理, 保温时间为 2 h 和 5 h, 保温后空冷。图 7、图 8 为两种合金在形变及再结晶处理后的金相组织, 可清楚看出 Mn

图 4 Mn 对合金断口形貌的影响

(a) — 不含 Mn; (b) — 含 Mn

图 5 Mn 对不同温度下的压缩屈服强度的影响

图 7 Ti-45Al-10Nb 形变合金 1 100℃ 再结晶组织
(a) — 形变态; (b) — 1 100℃, 2 h, AC;
(c) — 1 100℃, 5 h, AC

促进了形变合金的再结晶过程, 这说明 Mn 促进热激活, 帮助位错克服障碍及攀移, 使得再结晶容易进行。

Yumraguchi 等^[12]指出, TiAl PST 合金在倾斜外力作用下, 室温延伸率可达到 12.8%, 而且都是 {111} $\langle 11\bar{2} \rangle$ 真孪晶开动, 需要 $1/2 \langle 110 \rangle$ 位错沿 $\langle 110 \rangle$ 方向滑移互补。Farenc 等^[11]的在线 TEM 观察证明, TiAl 合金中 $1/2 \langle 110 \rangle$ 普通位错与 $a \langle 101 \rangle$ 超位错在室温下

图 8 Ti-45Al-10Nb+ Mn 形变合金 1 100℃ 再结晶组织
(a) — 形变态; (b) — 1 100℃, 2 h, AC;
(c) — 1 100℃, 5 h, AC

运动具有断续的性质; 在位错线上某些部分的初钉扎, 是由于位错核的非平面性质造成的。Yoo 等^[13]从理论上分析了位错核的非平面性, 并认为 $1/2 [110]$ 位错及 $1/6 \langle 11\bar{2} \rangle$ 真孪晶与 $1/3 [11\bar{2}]$ 及 $1/3 [\bar{1}12]$ 互补孪晶可能是决定 TiAl 室温塑性及脆-韧转变温度的基本因素。而 Hanamura 等^[5, 6]指出, Mn 降低 TiAl 层错能, 增加孪晶的稳定性及孪晶位错的可动性, 从而

改善塑性。本实验的结果进一步证明, TiAl 合金的这些研究结果以及 Mn 的改善作用不仅对 Ti-48Al 合金有效, 对含有 10Nb 的合金也是有效的。同时还进一步指出, Mn 的这种改善作用同时还表现为降低再结晶温度。这表明, Mn 不仅改善 1/2[110] 位错及孪晶位错的可动性, 而且能促进位错克服障碍及攀移过程。然而 Yamaguchi 等^[14] 最近指出, 含 Mn 的 TiAl PST 合金在真空中的塑性比不含 Mn 的 TiAl PST 合金塑性低, 由此推断 Mn 的改善塑性作用很大程度上与抑制环境脆性有关。从本实验的结果来看, 虽然这种抑制环境脆化的作用是可能的, 但却不是唯一的, Mn 对形变及再结晶过程存在明显的影响。另外, 本文试验结果还指出, 含 Mn 合金中提高 Mn 量降低室温的屈服强度, 这一现象也有利于承认 Mn 合金化合金有较小的位错及孪晶运动阻力, 以及促进克服位错塞积的能力。另一方面, 组织因素无论对含 Mn 和不含 Mn 的合金都有重要影响。

4 结论

(1) Mn 提高 Ti-45Al-10Nb 合金的室温弯曲拉伸塑性、断裂形变功及缺口断裂韧性, 降低脆-韧转变温度, 促进再结晶过程。高 Mn 合金的屈服强度低于低 Mn 合金。

(2) Mn 的上述有利作用可能与它降低层错能和有利于位错及孪晶运动可动性有关, 同

时也与 Mn 促进克服位错塞积的能力有关。

参考文献

- 1 Zhang W J, Chen G L, Sun Z Q. Scripta Metall, 1993, 128: 563.
- 2 Zhang W J, Chen G L, Sun Z Q. Scripta Metall, 1993, 128: 1113.
- 3 王沿东, 杨王玥, 陈国良, 朱世杰. 金属学报. 1993, 29 (1): A44.
- 4 Tsujimoto T, Hashimoto K. High Temperature Ordered Intermetallic Alloys(III), 1989, 133: 373.
- 5 Hanamura T, Ueonori R, Tanino M. J Mater Res, 1988, 3: 656.
- 6 Hanamura T, Tanino M. J Mater Sci Lett, 1989, 8: 24.
- 7 Huang S C, Hall E L. High Temperature Ordered Inter-metallic Alloys(III), 1989, 133: 373.
- 8 Hashimoto K, Doi H, Kasahara K, Tsujimoto T, Suzuki T. J Jpn Inst Met, 1990, 54: 539.
- 9 Hashimoto K, Nobuki M, Tsujimoto T, Suzuki T. ISIJ International, 1990, (10): 1154.
- 10 Kawabata T, Kanai T, Izumi O. Acta Metall, 1985, 33: 1355.
- 11 Farenc S, Couret A. High Temperature Ordered Inter-metallic Alloys(IV), 1991, 213: 569.
- 12 Inui It, Nadamura A, Yamaguchi M. High Temperture Ordered Intermetallic Alloys(IV), 1991, 213: 569.
- 13 Yoo M H, Fu C L, Lee J K. High Temperature Ordered Intermetallic Alloys(IV), 1991, 213: 545.
- 14 Oh M H, Inur H, Misaki M, Kobayashi M, Yamaguchi M. High Tem, Ordered/Omter, et/Alloys(V), 1993: 1001.

EFFECT OF Mn ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ti-45Al-10Nb ALLOY

Chen Guoliang, Wang Yandong*, Zhu Danqing*

National Key Laboratory of New Metallic Materials, Beijing 100083

* University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

ABSTRACT The effects of Mn on the microstructures and the mechanical properties of Ti-45Al-10Nb alloy have been studied. The results indicated that the addition of Mn can accelerate the process of recrystallization of the reformed Ti-45Al-10Nb alloy and improve some mechanical properties.

Key words Ti-Al alloy intermetallic compound mechanical properties

(编辑 彭超群)