

热处理对 Ti₃Al 基合金板材微观组织和力学性能的影响

郭佳林¹, 魏寿庸¹, 杨 奇¹, 王 新¹, 曹京霞²

(1. 宝鸡钛业股份有限公司, 宝鸡 721014;

2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 研究热处理工艺对 Ti₃Al 基合金热轧板材(1.9 mm×900 mm×3 000 mm)组织和性能的影响。结果表明: 当板材在 900~1 050 °C 退火时, 退火温度对微观组织和室温塑性(δ_5)影响较为明显, 对室温强度的影响则较小; 时效时间对板材的室温和高温性能影响不明显, 同时固溶时效后的板材具有较好的超塑性, 在条件为温度 1 020 °C、变形速率 $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时, 其伸长率达到 617%。

关键词: Ti₃Al 基合金板材; 微观组织; 力学性能; 超塑性

中图分类号: TG113.1; TG113.25

文献标志码: A

Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of Ti₃Al based alloy sheet

GUO Jia-lin¹, WEI Shou-yong¹, YANG Qi¹, WANG Xin¹, CAO Jing-xia²

(1. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China;

2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of Ti₃Al based hot-rolling alloy sheet (1.9 mm×900 mm×3 000 mm) was studied. The results show that microstructures and plasticity at the room temperature will change obviously while annealing temperature is between 900 and 1 050 °C. No significant differences of the room and elevated temperature properties are observed after long time aging treatment, but the treated sheet has excellent superplasticity. The elongation rate reaches 617% under the condition of 1 200 °C temperature and $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformation rate.

Key words: Ti₃Al based alloy sheet; microstructures; mechanical properties; superplasticity

Ti₃Al 基合金具有低密度、高比强度及优异的高温性能, 是航空、航天飞行器理想的轻质高温结构材料, 具有广泛的应用前景。其作为结构材料可在 650~700 °C 长期使用, 短时使用温度可达 700~900 °C, 至今所发展的基于 Ti-(22~25)Al-(8~27)Nb 成分 Ti₃Al 基合金已具有工程意义, 材料的性能大多随 Nb 质量分数的提高而得到改善^[1-5]。

目前, 国外 Ti₃Al 基合金的研究已从实验室发展到工业化生产规模, 在国内也已逐步进入工业化试制阶段, 大型铸锭、环件等的制备工艺已经比较成熟, 但在大规格板材制备方面比较欠缺, 特别是宽幅薄板

与国外还有较大的差距。热轧 Ti₃Al 基合金板材做进一步成型或冷轧之前, 必须经过热处理, 降低板材强度, 提高板材塑性。国内相关 Ti₃Al 基合金板材热处理工艺的报道较少。张建伟等^[6]研究 Ti-23Al-17Nb 合金板材 α_2 +B2 两相区固溶处理以及 α_2 +B2 两相区固溶和 O+B2 两相区时效处理后的组织性能。曹京霞等^[7]研究 Ti-24Al-15Nb-1.5Mo 合金板材 O 相单相区、O+B2 两相区、 α_2 +O+B2 三相区退火后的组织和室温力学性能等。Ti₃Al 基合金具有良好的超塑性性能, 合金板材结构件成型也可采用超塑性成型工艺, 有关 Ti₃Al 基合金超塑性性能尚未见报道。本研究选用我国自主研

制的 Ti-24Al-15Nb-1Mo 钛铝基合金制备宽幅薄板, 研究热处理工艺对板材性能的影响和板材的超塑性性能。研究结果将对这类合金板材轧制变形后的热处理工艺和材料的应用提供一定的参考。

1 实验

研究采用的 Ti₃Al 基合金成分为 Ti-24Al-15Nb-1Mo, 铸锭采用 3 次真空自耗炉熔炼, 在 B2 相区开坯并锻制板坯, α_2 +B2 两相区和 α_2 +B2+O 三相区轧制得到 1.9 mm×900 mm×3 000 mm 宽幅薄板。Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金板材成品轧制加工时, 坯料的加热温度在 α_2 +B2+O 三相区^[8], 在该温度下为 α_2 +B2+O 三相组织。轧制变形后, 板材直接冷却形成初生 α_2 相和转变 B2 相组成的双态组织。初生 α_2 相在轧制方向上为断续(等轴)、拉长(长条)的形貌, 次生 α_2 /O 相片状集束(细板条), 并有一部分 B2 相保留下来, 分布于集束周围。板材的组织如图 1 所示,

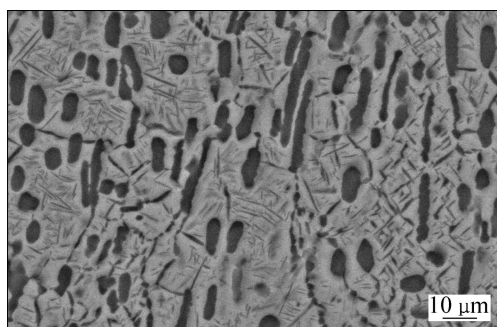


图 1 热轧态板材的微观组织

Fig. 1 Microstructure of hot-rolling alloy sheet

按照以下的方案进行热处理实验:

步骤① 在 900、950、1 000、1 050 °C 对薄板进行退火, 保温 30 min, 空冷。热处理后, 测试板材试样的室温拉伸性能, 并观察相应的显微组织。

步骤② 板材经 990 °C、30 min 固溶处理后, 对其进行 815 °C、30 min 的多次时效。热处理后, 测试试样的室温和高温拉伸性能。

步骤③ 板材经 990 °C 固溶处理+(815 °C、30 min) 时效后, 测试其在 2×10^{-2} 、 2×10^{-3} 、 2×10^{-4} s⁻¹ 等 3 种应变速率下的超塑性性能。

板材的显微组织采用 JSM 5600 和 Philips Quanta 600 扫描电镜进行观察。

2 结果与讨论

2.1 退火温度对板材室温力学性能和微观组织的影响

不同退火温度下板材室温力学性能如图 2 所示。

从图 2 中可见: 900~950 °C 退火时, 随着退火温度的升高, 抗拉强度和屈服强度降低, 同时塑性得到明显提高。950~1 050 °C 退火, 随着退火温度的升高, 抗拉强度和屈服强度略有提高。在 1 000 °C 左右, 塑性最好(伸长率达到 21.4%), 塑性和强度匹配良好, 退火温度继续提高(1 000~1 050 °C), 塑性剧烈降低。

综合分析图 2 可知: 退火温度对板材的屈服强度影响较大, 抗拉强度(σ)影响不大, 在 4 种退火温度下, 抗拉强度的波动幅度仅几十 MPa。塑性指标(δ_5)受退火温度影响则极为显著。

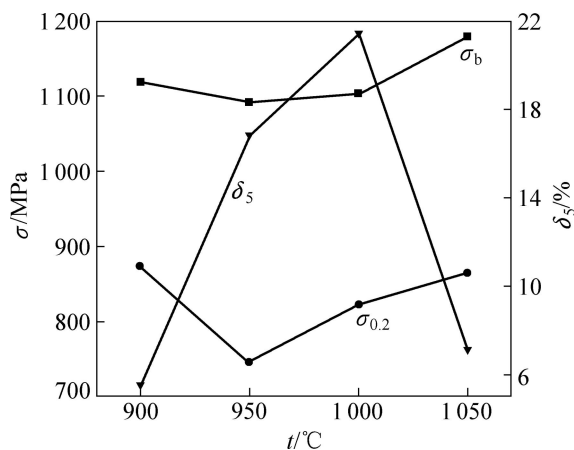


图 2 退火温度对板材室温力学性能的影响

Fig. 2 Effect of annealing temperature on room-temperature mechanical properties of alloy sheet

图 3 所示为不同温度退火后板材的微观组织。900~950 °C 退火都处于 α_2 +B2+O 三相区, 无相转变, 随着退火温度的提高, 次生 α_2 /O 相片状集束粗化。1 000 °C 退火处于 α_2 +B2 两相区, 发生 $\alpha_2 \rightarrow \text{B2}$ 相、O $\rightarrow$ B2 相的转变, 快速冷却后, 最终形成初生 α_2 +B2/O 片状集束混合组织(板材较薄, 冷速快, α_2 +B2+O 相区温度范围很窄, 次生 α_2 来不及析出), 微观组织中 B2 相体积分数显著增加, O 相体积分数降低。1 050 °C 退火也处于 α_2 +B2 两相区, 初生 α_2 +B2/O 片状集束混合组织(魏氏组织)中的 B2 相体积分数进一步增加, O 相体积分数大幅降低, 几乎消失殆尽。

图 4 所示为 1 050 °C 退火时板材微观组织(魏氏组

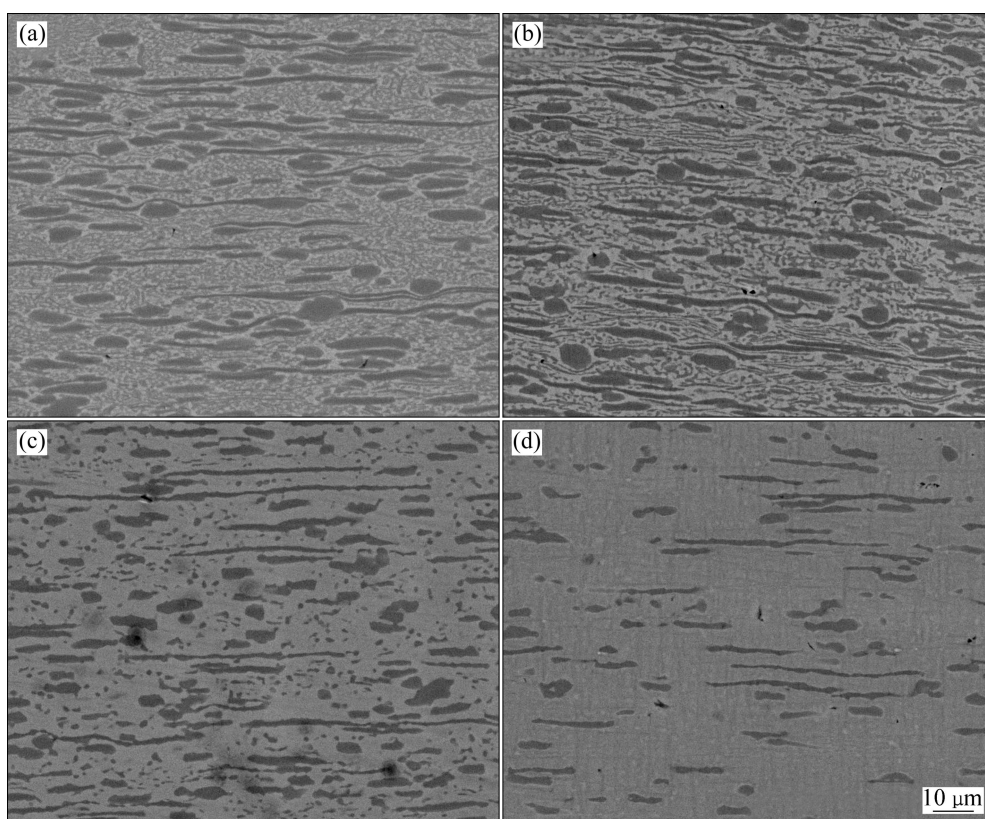


图 3 1.9 mm 板材不同温度退火后的微观组织

Fig. 3 Microstructures of 1.9 mm thick sheet after annealing at different temperatures: (a) 900 °C; (b) 950 °C; (c) 1 000 °C; (d) 1 050 °C

织)2 000 倍放大照片, 在该图中可以清晰地看见原始 B2 晶界, α_2 相分布在晶界处。张建伟等^[9]研究认为: 随着退火温度的升高, α_2 相的体积分数逐渐减少, 残留的 α_2 相颗粒大多分布于 B2 相晶界上, 对 B2 相晶粒的长大具有阻碍作用。

综上所述: 在 900~950 °C 退火时, 随着退火温度的提高, 抗拉强度和屈服强度降低, 是因为次生 α_2 /O 相片状集束粗化。另外, 塑性的提高也是因 α_2 /O 相片

状集束粗化, 集束粗化后, α_2 /B2、O/B2、 α_2 /O 相界面表面积增大, 更好地抑制了裂纹的扩展。

在 1 000 °C 退火时, 塑性指标达最高值, 是因为 B2 相体积分数增加, B2 相的增加可以显著提高材料的塑性。在 1 050 °C 退火时, 塑性剧烈下降是因退火温度在 α_2 +B2 两相区上部区域, 得到魏氏组织。

2.2 时效时间对板材组织和力学性能的影响

板材经 1 000 °C 左右退火时, 塑性和强度指标能得到良好的匹配, 故选择在 990 °C 对 1.9 mm 板材进行固溶处理。固溶处理完成后在 815 °C 进行不同时间时效。

图 5 所示为时效时间对板材室温和高温力学性能的影响。从图 5 中可见: 无论是室温还是高温, 随时效时间的增加, 拉伸强度(σ_b)略有降低, 塑性略有提高, 但都不显著。

从图 6 可见: 不同时效时间板材的微观组织的差别很小。因此, 可以认为时效时间对部件的组织 and 性能影响不大, 长时间时效的效果并不明显。

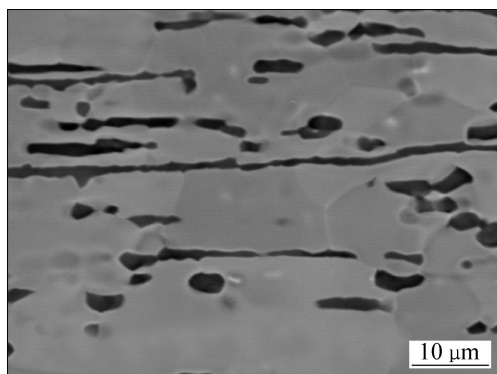


图 4 1 050 °C 退火时板材微观组织放大照片

Fig. 4 Enlarged view of sheet annealing at 1 050 °C

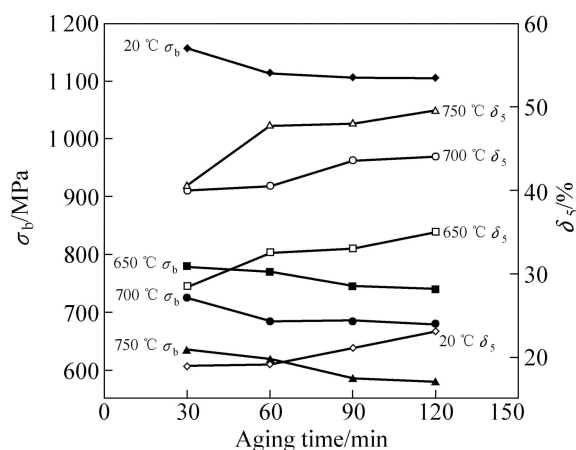


图 5 时效时间对板材室温和高温力学性能的影响

Fig. 5 Effect of aging time on mechanical properties of alloy sheet at room and elevated temperatures

2.3 板材的超塑性性能

板材经 990 °C 固溶处理+(815 °C、30 min)时效后, 其超塑性性能如图 7 所示。

从图 7 可见: 该合金板材的伸长率随着拉伸温度的提高和拉伸速率的降低而提高。当拉伸温度 940~

1 020 °C, 拉伸速率 $2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 板材具有超塑性(伸长率大于 100%)。在 1 020 °C 在 $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的拉伸速率下, 1.9 mm 合金板材的伸长率可达 617%。该合金超塑性变形的有关机理有待进一步研究。

4 结论

1) 退火温度对板材的屈服强度影响较大, 对抗拉强度影响较小, 在 4 种退火温度下, 抗拉强度的波动幅度仅几十 MPa。塑性指标受退火温度影响则极为显著。

2) 900~950 °C 退火获得初生 α_2 相、次生 α_2/O 相集束、保留 B2 相组成的混合组织, 随退火温度提高, 次生 α_2/O 相集束粗化, 板材强度降低, 塑性快速提高。1 000 °C 退火获得初生 $\alpha_2 + \text{B2}/\text{O}$ 片状集束混合组织, 板材塑性最好, 伸长率达到 21.4%。1 050 °C 退火获得魏氏组织, 板材塑性急剧降低。

3) 随时效时间的增加, 板材的室温和高温拉伸强度略有降低, 塑性略有提高。该合金板材具有较好的超塑性性能, 在 1 020 °C 在 $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率下,

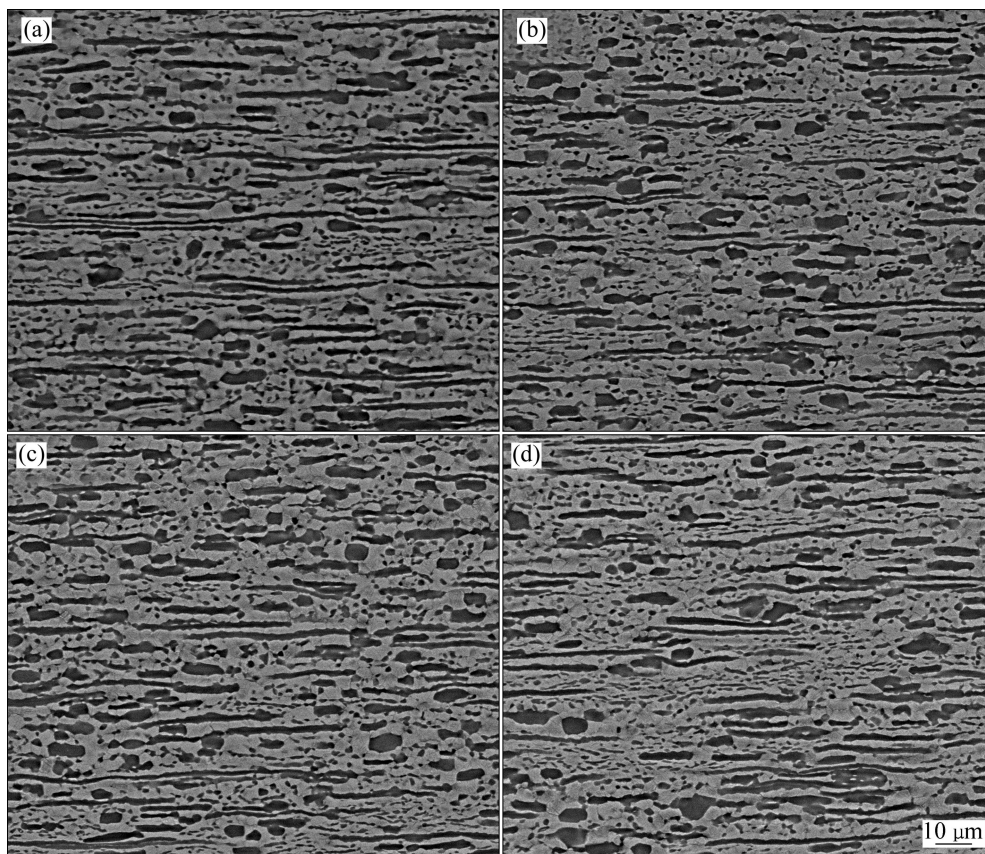


图 6 不同时效时间下 1.9 mm 板材的微观组织

Fig. 6 Microstructures of 1.9 mm sheet at different aging time: (a) 30 min; (b) 60 min; (c) 90 min; (d) 120 min

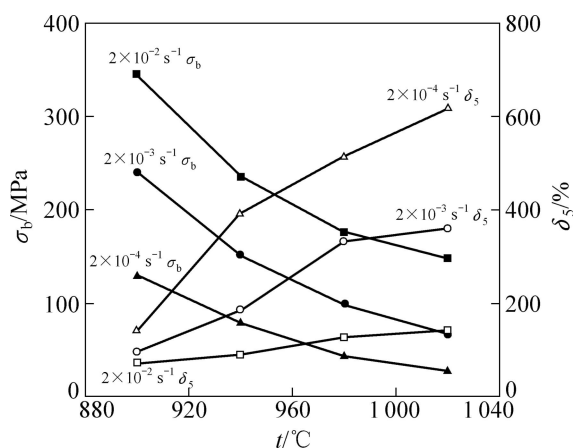


图7 不同应变速率下板材的超塑性性能

Fig. 7 Superplasticity of sheet at different strain rates

1.9 mm 合金板材的伸长率可以达到 617%。

REFERENCES

- [1] BANERJEE D, GOGIA A K, NANDY T K. A new phase in Ti₃Al based alloy with high content of niobium[J]. Acta Metall Mater, 1988, 36: 871-882.
- [2] WU Y T, YANG C T, KOO C H, SINGH A K G. A study of texture and temperature dependence of mechanical properties in hot rolled Ti-25Al-xNb alloys[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 80: 339-347.
- [3] SUWAS S, RAY R K. Stability of roiling texture during heat treatment in a two-phase Ti3Al base intermetallic alloy[J]. Acta Materialia, 1999, 47(18): 4599-4614.
- [4] WILLIAMS J C, STARKE E A. Progress in structural materials for aerospace systems[J]. Acta Materialia, 2003, 51: 5775-5799.
- [5] ROWE R G. Tri-titanium aluminide alloys containing at least eighteen atom percent niobium: US 5032357[P]. 1991.
- [6] 张建伟, 程云君, 梁晓波, 李世琼. (α_2 +O+B2)三相区温度变形的 Ti₃Al 合金板材组织和性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊): 561-564.
ZHANG Jian-wei, CHENG Yun-jun, LIANG Xiao-bo, LI Shi-qiong. Study of the microstructure and properties of hot rolling sheets of Ti₃Al based alloy processed in (α_2 +B2+O)phase field[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, (Supple 3): 561-564.
- [7] 曹京霞, 段 锐, 李臻熙. 退火温度对 Ti₃Al 合金热轧板材微观组织和室温拉伸性能的影响[J]. 稀有金属, 2009, 33(5): 746-749.
CAO Jing-xia, DUAN Rui, LI Zhen-xi. Effect of annealing temperature on microstructure and tensile properties of Ti₃Al alloy hot-rolled sheets[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(5): 746-749.
- [8] GOGIA A K, BALIGIDAD R G, BANERJEE D. Toughening and creep in multiphase intermetallics through microstructural control[J]. Sadhana, 2003, 28(3/4): 677-693.
- [9] 张建伟, 李世琼, 程云君, 梁晓波. Ti₃Al 合金热轧板材组织与织构在退火中的演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(增刊 3): 93-96.
ZHANG Jian-wei, LI Shi-qiong, CHENG Yun-jun, LIANG Xiao-bo. The evolutions of microstructure and texture of Ti₃Al base alloy sheet during annealing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(Supple 3): 93-96.

(编辑 邓履翔)