

Ti-22Al-25Nb 合金锻后热处理过程中的组织演变

姚泽坤¹, 秦春¹, 贾倩¹, 宁永权¹, 郭鸿镇¹, 梁晓波²

(1. 西北工业大学 材料与工程学院, 西安 710072;

2. 北京钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要: 调查了锻造态的 Ti-22Al-25Nb 金属间化合物合金在 930~1 010 °C 固溶、空冷, 并在 750 °C 和 870 °C 分别时效 4 h 和 24 h 后的显微组织演变特点。结果表明: 在 $\alpha_2/\beta/B2+O$ 三相区的 930 °C → 1 010 °C 不同温度下固溶处理, 锻造态的 Ti-22Al-25Nb 合金显微组织中的 O 相分别呈无规则的长透镜状(其长宽比 < 10)、短棒状和球状, α_2 相依附在 O 相边缘。当固溶处理温度较低(930 °C), 在 750 °C 时效时, 随着时效时间的延长, 析出的 O 相条变粗, 有序的 $B2$ 相转变成无序的 β 相, 且体积增加; 在 870 °C 时效时, 除有条状 O 相析出外, 还有 $O+B2$ 相混合物存在, 随着保温时间延长至 24 h, 析出的魏氏 O 相条粗化并趋向均匀, 而 $O+B2$ 相混合物消失; 当固溶处理温度较高(1 010 °C)时, 在 750 °C 时效伴随有胞状反应, O 相以块状形态从 $B2$ 晶粒中不连续析出; 在 870 °C 时效, 析出的 O 相条的长宽比减小, 且随着时间的延长, O 相变粗并逐渐球化, $B2$ 晶界处的 $B2$ 相条增厚并有部分聚集成块的趋势。

关键词: Ti₂AlNb 合金; 固溶处理; 时效处理; 显微组织; 变化特点

中图分类号: TG14.4

文献标志码: A

Microstructure evolution of as-forged Ti-22Al-25Nb alloy during heat treatment

YAO Ze-kun¹, QIN Chun¹, JIA Qian¹, NING Yong-quan¹, GUO Hong-zhen¹, LIANG Xiao-bo²

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The microstructure evolution of as-forged Ti-22Al-25Nb alloy was investigated during 930–1 010 °C for 1 h solution treatment, air cooling, followed aging at 750 °C and 870 °C for 4 h and 24 h, respectively. The results show O phases evolution from a lenticular fashion to short bar and to spheric shape as solution temperature increasing in as-forged Ti-22Al-25Nb alloy. For as-forged alloy solution-treated at lower temperature, O precipitates get coarse gradually with elongation aging time, and the volume fraction of ordered $B2$ phase transiting into disordered β phase increases during aging at 750 °C. At 870 °C aging, except O precipitates, there is $O+B2$ phase mixture. With aging time elongating to 24 h, O precipitates get coarse and tend homogeneous, $O+B2$ phase mixture vanishes simultaneously. For as-forged alloy solution-treated at higher temperature, it is accompanied by a cellular reaction at 750 °C aging. At 870 °C aging, the aspect ratio of O precipitates gets small. With the age time increasing, O phases get coarse and spheroidal. This makes $B2$ phases at $B2$ grain boundaries have trend of gathering into block.

Key words: Ti₂AlNb alloy; solution treatment; age treatment; microstructure; evolution character

正交晶系的 Ti-22Al-25Nb 合金, 由于具有相对高的塑性、比强度、断裂韧性、蠕变抗力和高温强度,

而且热膨胀系数小、阻燃性能好, 有可能部分替代可锻镍基高温合金制作大推重比航空发动机热端零件的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175431)

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-10-10

通信作者: 姚泽坤, 教授; 电话: 029-88492642; E-mail: yzekun@nwpu.edu.cn

高温高强轻质材料,因而日益受到重视^[1-3]。但这类合金的晶体结构是非常见的晶体结构,具有复杂的空间点阵,高温下有相变发生^[4-5],锻造温度窗口可跨越几个相区,而锻造温度、变形量,热处理时的固溶温度、时效温度及时效时间都会对它的组织、各组成相的尺寸、形态及体积分数产生巨大影响^[6-9]。在此,本文作者调查了锻造态的 Ti-22Al-25Nb 合金在 930~1 010 °C 固溶处理 1 h、AC(空冷),并在 730 °C 和 870 °C 分别时效 4 h 和 24 h 后的显微组织变化特点,为确定该材料热加工的最佳工艺参数,控制锻件组织奠定工艺基础。

1 实验

实验用 Ti-22Al-25Nb 合金是由北京钢铁研究院提供的 90 mm×90 mm 锻造态方料,其化学成分为(摩尔分数, %): 22Al, 25Nb, O<0.10, N<0.02, H<0.01, 钛基。

从锻造态方料上切取直径 d 15 mm×20 mm 的小试样进行热处理,试样加热采用硅碳棒电阻加热炉,炉温误差为±3 °C,固溶处理温度分别为 930、970 和 1 010 °C,保温 1 h,出炉 AC(空冷),时效温度分别为 750 °C 和 870 °C,时效保温时间分别为 4 h 和 24 h,出炉 AC。

金相试样腐蚀溶液配比为: $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O}_2):V(\text{H}_2\text{O})=1:2:7:20$ 。在 OLYMPUS PM-G3 光学显微镜上进行显微组织观察。

2 结果与讨论

依据 Ti-22Al-25Nb 合金的金相图(图 1)^[9-10]可知,在 875~1 015 °C 温度范围该合金落入 $\alpha_2+\beta/B2+O$ 三相共存区,当在 930 °C,固溶处理 1 h,出炉 AC 后, O 相呈现为透镜状,不规则地分布在 $B2$ 晶粒基体上,原 $B2$ 晶界处 O 相板条稍粗些,其长宽比约为 10,其内存在一些宽度约 20 μm 的条带。在此条带上 O 相稀疏,少量的 α_2 相依附在板条 O 相边缘(图 2(a))。经 750 °C 时效 4 h 后,由于此时温度落入 $O+\beta$ 两相区,只有厚度极薄(<1 μm)的短条状和极细小的等轴状 O 相在 $B2$ 基体上均匀析出,部分有序的 $B2$ 相转变成无序的 β 相(图 2(b)); 随着时效延长至 24 h, O 相条的厚度增加,等轴状 β 相的平均直径长大到 3 μm , 出现一定程度的粗化(图 2(c))。

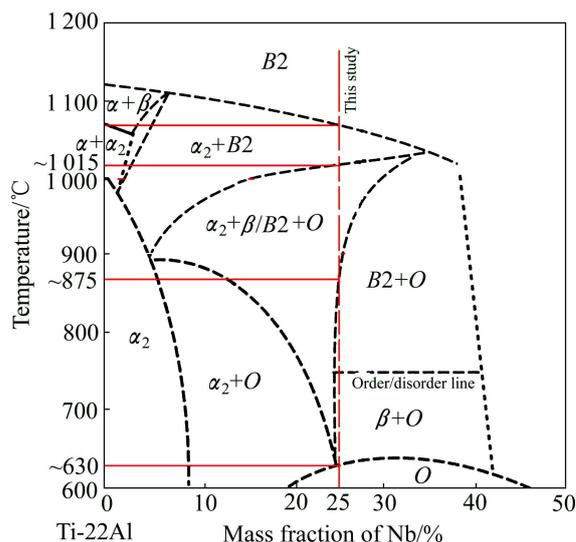


图 1 Ti-22Al-Nb 相图

Fig. 1 Ti-22Al-Nb phase diagram

当时效温度升高到 870 °C,保温 4 h, AC 后,此时合金位于 $O+B2$ 相区, O 相以条状形态在 $B2$ 基体上析出,但析出不均匀,还有部分 $O+B2$ 相混合物(图 2(d))。随着保温时间延长至 24 h,魏氏 O 相条稍有粗化,但析出相变得均匀, $O+B2$ 混合物消失,这是由于温度相对较高,有原子扩散发生,使得 O 和 $B2$ 相分布得更均匀(图 2(e))。

在 970 °C 固溶,由于温度偏于 $\alpha_2+\beta/B2+O$ 三相区上部区间,这时的组织形态与 930 °C 固溶处理后的组织形态有较大的差别, O 相已基本为等轴状,只有极少数为透镜状,原始 $B2$ 晶界虽被 O 相和 α_2 相分割,但仍断续相连,晶界处 O 相和 α_2 相比 $B2$ 晶粒内的稀疏(图 3(a))。再经 750 °C, 4 h, AC 的时效处理,有少量厚度 <1.5 μm 、长宽比约为 10 的透镜状 O 相析出,还有极少数胞状反应产物^[10],即直径不足 4 μm 的块状 β 相存在,这与时效时间较短,胞状反应欠充分有关(图 3(b)); 当时效时间延长至 24 h 时,有更多的 O 和 β 相从 $B2$ 晶粒内和 $O+B2$ 晶界上不连续析出(图 3(c))。提高时效温度到 870 °C 时,由于时效时间较短(4 h),只有少量较粗的 O 相条和数量稍多的细小的球状 $B2$ 相析出,原始 $B2$ 晶粒模糊可见(图 3(d)); 随着时效时间延长到 24 h,由于有扩散存在,更多的条状 O 相析出、长大,与 $B2$ 相交互排列,十分均匀(图 3(e))。

当固溶处理温度升高到接近 $\alpha_2+\beta/B2+O$ 三相区→ α_2+B2 两相区转变温度点的 1 010 °C 时, O 相呈等轴状,其直径 <5 μm ,但分布不均匀。 α_2 相伴生在 O 相边缘,原始 $B2$ 晶界是由边缘带有 α_2 相的连续 O 相构成(图 4(a))。经过 750 °C、4 h 时效处理,由于发生胞

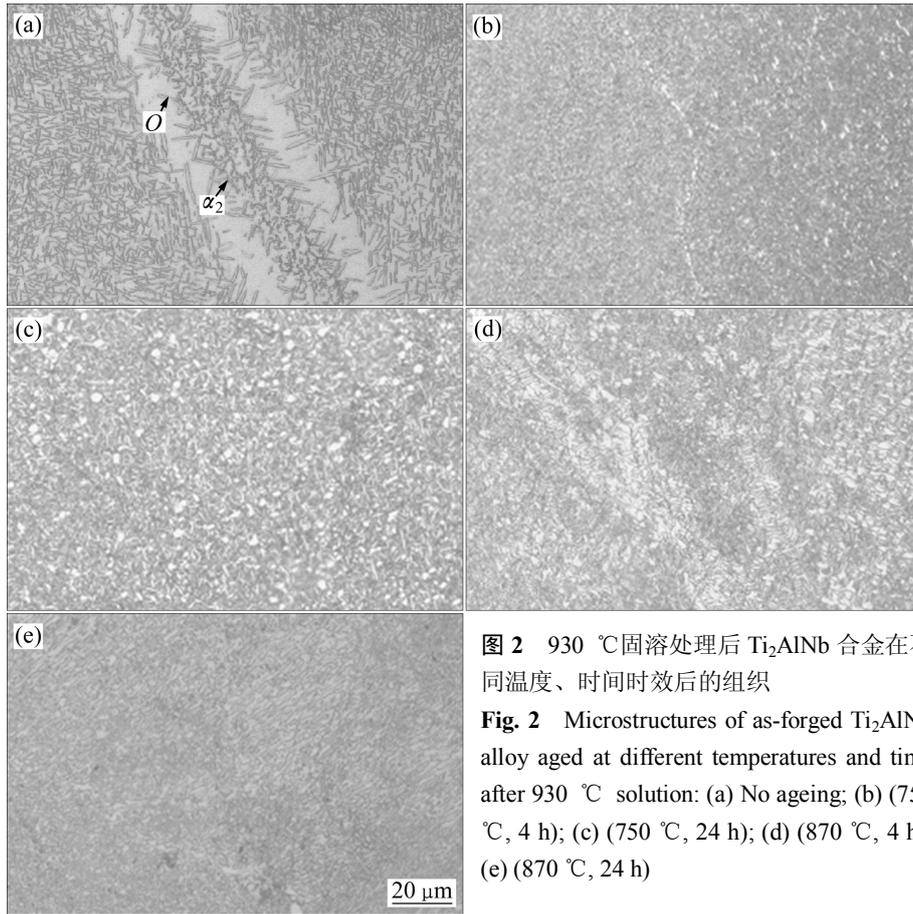


图 2 930 °C 固溶处理后 Ti₂AlNb 合金在不同温度、时间时效后的组织

Fig. 2 Microstructures of as-forged Ti₂AlNb alloy aged at different temperatures and time after 930 °C solution: (a) No ageing; (b) (750 °C, 4 h); (c) (750 °C, 24 h); (d) (870 °C, 4 h); (e) (870 °C, 24 h)

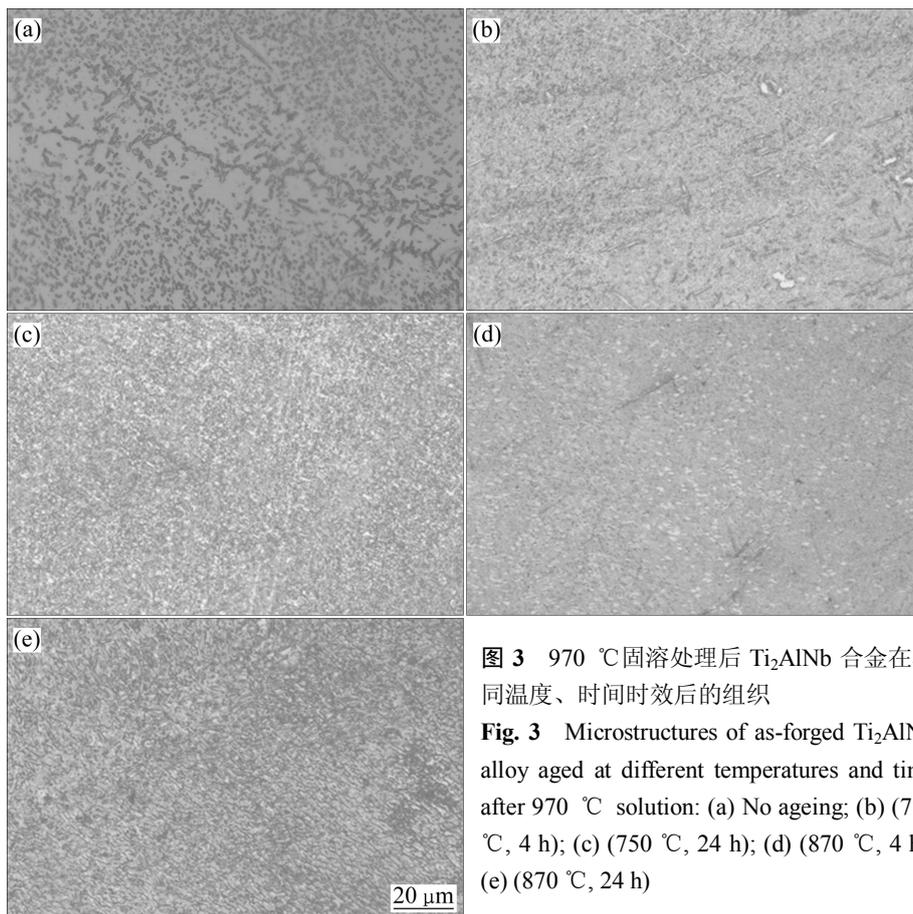


图 3 970 °C 固溶处理后 Ti₂AlNb 合金在不同温度、时间时效后的组织

Fig. 3 Microstructures of as-forged Ti₂AlNb alloy aged at different temperatures and time after 970 °C solution: (a) No ageing; (b) (750 °C, 4 h); (c) (750 °C, 24 h); (d) (870 °C, 4 h); (e) (870 °C, 24 h)

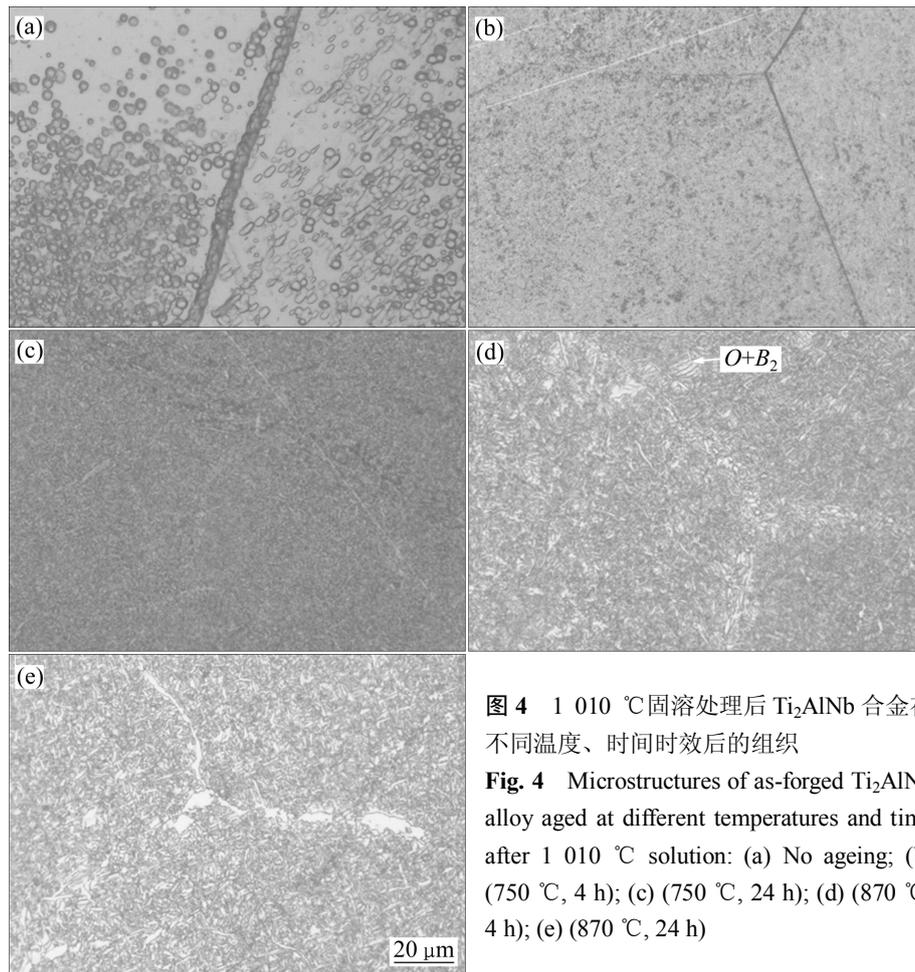


图4 1 010 °C固溶处理后Ti₂AlNb合金在不同温度、时间时效后的组织

Fig. 4 Microstructures of as-forged Ti₂AlNb alloy aged at different temperatures and time after 1 010 °C solution: (a) No ageing; (b) (750 °C, 4 h); (c) (750 °C, 24 h); (d) (870 °C, 4 h); (e) (870 °C, 24 h)

状反应, O 相以小块状形态在 B_2 晶粒内不连续析出, 形态和尺度未变的少量 α_2 相保留下来, B_2 晶界清晰、完整(图4(b)); 随着时效时间延长至24 h, O 相粗化, 并在原始 B_2 晶粒内均匀分布, 由于扩散, 原始 B_2 晶界已模糊, 但仍有少量 α_2 相保留(图4(c))。当时效温度进一步升高到870 °C, 保温4 h, AC后, O 和 B_2 相呈条状(长宽比为4~10)形态析出, 并均匀分布, 有部分 $O+B_2$ 相存在(图4(d)); 随着保温时间延长至24 h, O 相变粗并逐渐球化, B_2 晶界处的 B_2 相条增厚并部分聚集成块(图4(e)), 这主要是原始组织中的 O 相和 α_2 相分布不均匀, 说明成分分布不均匀, 在长期高温时效过程中, 由于Al和Nb元素的扩散, 部位成分倾向于向低Nb高Al区域迁移, 导致 B_2 相的体积分数增加。

3 结论

1) 在 $\alpha_2+\beta/B_2+O$ 三相区固溶时, 温度从930 °C升

高到1 010 °C, 锻造态的Ti-22Al-25Nb合金显微组织中的 O 相呈无序的长透镜状, 其长宽比 <10 , 短棒状和球状, α_2 相依附在 O 相边缘。

2) 对于固溶处理温度低的合金, 随着在750 °C时效时间的延长, 析出的 O 相条厚度增加, 有序的 B_2 相转变成无序的 β 相的体积分数增加; 在870 °C时效时, 除有条状 O 相析出外, 还有 $O+B_2$ 相混合物存在, 随着保温时间延长至24 h, 析出的魏氏 O 相条粗化并趋向均匀, 而 $O+B_2$ 相混合物消失。对于固溶处理温度高的合金, 在750 °C时效时伴随有胞状反应, O 相以块状形态从 B_2 晶粒中不连续析出; 在870 °C时效时, 析出的 O 相条长宽比减小, 随着时间的延长, O 相变粗并逐渐球化, B_2 晶界处的 B_2 相条增厚并有一部分聚集成块的趋势。

REFERENCES

- [1] 张建伟, 李世琼, 梁晓波, 陈云君. Ti₃Al和Ti₂AlNb基合金的研究与应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s336-s341.

- ZHANG Jian-wei, LI Shi-qiong, LIANG Xiao-bo, CHEN Yun-jun. Research and application of Ti_3Al and Ti_2AlNb based alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s336-s341.
- [2] 司玉峰, 孟丽华, 陈玉勇. Ti_2AlNb 基合金的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(3): 10-13.
SI Yu-feng, MENG Li-hua, CHEN Yu-yong. Research development of Ti_2AlNb -based alloy[J]. Aerospace Materials and Technology, 2006, 36(3): 10-13.
- [3] WINSTONE M R, PARTRIDGE A, BROOKS J W. The contribution of advanced high-temperature materials to future aero-engines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2001, 215(2): 63-73.
- [4] GOGIA A K, BANERJEE D, CARISEY T, STRUDEL J L, FRANCHET J M. Microstructure and mechanical properties of orthorhombic alloys in the Ti-Al-Nb system[J]. Intermetallics, 1998, 6(7/8): 741-748.
- [5] MURALEEDHARAN K, NANDY T K, BANERJEE D, LELE S. Phase stability and ordering behaviour of the O phase in Ti-Al-Nb alloys[J]. Intermetallics, 1995, 3(3): 187-199.
- [6] 梁晓波, 陈云君, 张建伟, 李世琼. 热处理对 β 锻造 Ti-22Al-25Nb 合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s611-s615.
- LIANG Xiao-bo, CHEN Yun-jun, ZHANG Jian-wei, LI Shi-qiong. Effects of heat treatment on microstructure and properties of β -forged Ti-22Al-25Nb alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s611-s615.
- [7] LIANG Xiao-bo, LI Shi-qiong, CHENG Yun-jun, ZHANG Jian-wei. Flow stress behavior and deformation characteristics of Ti-22Al-25Nb alloys at elevated temperature[J]. Materials Science Forum, 2005, 475/479: 825-828.
- [8] DEY S R, SUWAS S, FUNDENBERGER J J, RAY R K. Evolution of crystallographic texture and microstructure in the orthorhombic phase of a two-phase alloy Ti-22Al-25Nb[J]. Intermetallics, 2009, 17(8): 622-633.
- [9] DEY S R, ROY S, SUWAS S, FUNDENBERGER J J, RAY R K. Annealing response of the intermetallic alloy Ti-22Al-25Nb[J]. Intermetallics, 2010, 18(6): 1122-1131.
- [10] BOEHLERT C J, MAJUMDAR B S, SEETHARAMAN V, MIRACLE D B. Part I. The microstructural evolution in Ti-Al-Nb O +BCC orthorhombic alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30(9): 2305-2323.

(编辑 杨华)