

热处理对 β 锻造 Ti-22Al-25Nb 合金组织和性能的影响

梁晓波，程云君，张建伟，李世琼

(钢铁研究总院，北京 100081)

摘要：研究了 β 锻造的 Ti-22Al-25Nb 合金在固溶 + 时效热处理过程中微观组织的转变规律，并对不同固溶温度 + 800 $^{\circ}\text{C}$ 时效处理合金的室温和 650 $^{\circ}\text{C}$ 拉伸性能进行了测试和分析。结果表明：合金经 β 锻造后的组织由少量 α_2 颗粒、大量 O 相板条和 B2 相基体组成。在固溶处理过程中，组织中的 O 相板条发生溶解，数量减少，形状变短、变粗。在 980 $^{\circ}\text{C}$ 以上固溶处理时，基体 B2 相发生明显的再结晶。固溶 + 时效处理后，细小的二次 O 相板条再次从 B2 基体中析出，并最终形成一种具有短棒状或颗粒状的初生 α_2/O 相 + 细小的二次 O 相板条 + B2 相基体组成的组织。随着微观组织中初生 α_2/O 相数量的减少、二次 O 相板条数量增加，合金室温和 650 $^{\circ}\text{C}$ 抗拉强度升高，伸长率降低。

关键词：Ti₂AlNb；金属间化合物；热处理；拉伸性能

中图分类号 : TG 146

文献标志码 : A

Effects of heat treatment on microstructure and properties of β -forged Ti-22Al-25Nb alloy

LIANG Xiao-bo, CHENG Yun-jun, ZHANG Jian-wei, LI Shi-qiong

(Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Microstructure evolution of the β -forged Ti-22Al-25Nb alloy during subsequent solution plus aging heat treatment was investigated. The tensile properties of the alloy with different heat treatments at room temperature and 650 $^{\circ}\text{C}$ were tested. It is found that after β -forging the microstructure is composed of a large number of O phase laths, a few α_2 particles and B2 matrix. During solution treatment, the O phase lamellae in the microstructure solves, the volume fraction of O lamellae decreases, and the shape becomes short and coarse. The recrystallization of B2 matrix grains happens when the solution temperature is above 980 $^{\circ}\text{C}$. During aging treatment, the fine O phase lamellae precipitates from B2 matrix and the microstructure with the primary α_2/O particles or short bar, the secondary fine O phase and the B2 matrix forms. The test results of the tensile properties exhibit that when the volume fraction of the primary α_2/O particles decreases and that of the secondary fine O phase lamellae increases, the tensile strength of the alloys at RT and 650 $^{\circ}\text{C}$ rises and the RT ductility drops.

Key words: Ti₂AlNb; intermetallic compounds; heat treatment; tensile properties

Ti₂AlNb 基合金是 20 世纪 90 年代初研发的一类新型轻质高温结构材料，具有密度低、弹性模量高、高温强度高、断裂韧性高、蠕变抗力高、热膨胀系数低、无磁性和阻燃性能好等优点，在未来的航空航天领域具有广阔的应用前景^[1-2]。Ti-22Al-25Nb 合金是钢铁研究总院在“十五”期间研制的一种 Ti₂AlNb 基合

金，具有更好的热塑性成型性能。利用传统的钛合金冶炼设备^[3-4]，已制备出吨级 Ti-22Al-25Nb 合金锭，并且能够制备该合金的棒材、板材、饼材、环形件等型材。Ti₂AlNb 基合金的热变形及后续热处理是改善合金力学性能的主要手段^[5-7]，因此，研究合金及后续热处理过程中的微观组织演化规律，对于这种合金的

应用是非常必要的。本文作者研究了 β 锻造后的固溶+时效热处理对Ti-22Al-25Nb合金组织和性能的影响。

1 实验

实验材料取自Ti-22Al-25Nb合金吨级铸锭，合金的化学成分见表1。合金锭首先在1150~1250℃进行开坯锻造，然后进行改锻。改锻的始锻温度在 β 转变点以上10~20℃，终锻温度控制在 β 转变点以下。为了使锻后组织更加均匀，采用多次拔长+镦粗工艺，每次变形量大于20%。

表1 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of alloy (molar fraction, %)

Ti	Al	Nb	O	N	H
Bal.	22.1	25.2	6.3×10^{-4}	4.2×10^{-5}	9×10^{-6}

从锻件上切取11 mm×11 mm×15 mm的金相试样，采用不同的固溶+时效制度进行热处理，用光学金相(OM)和扫描电镜(SEM)进行微观组织分析；切取d 11 mm×70 mm的试棒采用不同的固溶+时效热处理制度处理，然后加工成试样进行拉伸性能测试。

2 结果与讨论

2.1 β 锻后组织

图1所示是 β 锻后合金的显微组织。从图1(a)中可以看到：锻后的合金组织中B2晶粒平均直径约为150 μm。合金组织中分布着大量的O相板条，与晶内相比，晶界处O相板条略显粗大，在原始B2晶界处有少量细小的 α_2 相颗粒存在。

2.2 热处理

在($\alpha_2 + B2$)两相区和($\alpha_2 + B2 + O$)三相区内选用不同的固溶处理温度，研究固溶温度对基体B2晶粒尺寸及初生 α_2/O 相形貌、含量和尺寸的影响。并在($O + B2$)两相区内选择800℃为时效处理温度，观察时效处理后合金组织的变化。采用的热处理制度如表2所示。

2.3 合金热处理后的组织变化

图2所示为合金在960℃(T1)、980℃(T2)、1000

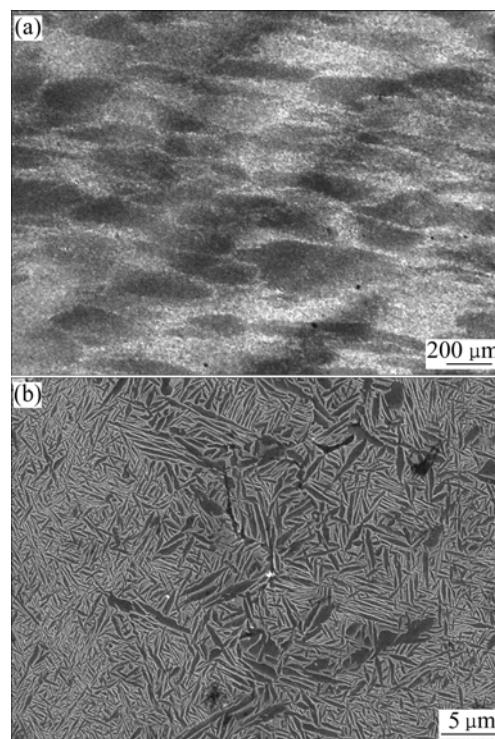


图1 Ti-22Al-25Nb合金 β 锻造后的微观组织

Fig.1 Microstructures of β -forged Ti-22Al-25Nb alloy: (a) OM image; (b) SEM image

表2 β 锻造后Ti-22Al-25Nb合金的热处理制度

Table 2 Heat treatment procedure of β -forged Ti-22Al-25Nb alloy

Code	Heat treatment procedure
T1	960℃, 30 min, OC
T11	(960℃, 30 min, OC) + (800℃, 24 h, AC)
T2	980℃, 30 min, OC
T21	(980℃, 30 min, OC) + (800℃, 24 h, AC)
T3	1000℃, 30 min, OC
T31	(1000℃, 30 min, OC) + (800℃, 24 h, AC)
T4	1020℃, 30 min, OC
T41	(1020℃, 30 min, OC) + (800℃, 24 h, AC)

(T3)和1020℃(T4)下固溶处理30 min后的微观组织形貌。从图2中可以看出：随着固溶温度的升高，合金中的O相板条逐渐减少，板条逐渐变短、变粗。当固溶温度为960℃时，板条状第二相的体积含量大约为15%~20%，板条宽度小于1 μm，长度大部分在4~10 μm。当固溶温度升到980℃时，板条状第二相的体积分数降低到10%~15%，同时，板条的宽度增加，长度减小，长宽比变小。温度进一步升高到1000℃时，第二相的数量减少到10%以下，第二相基本变成

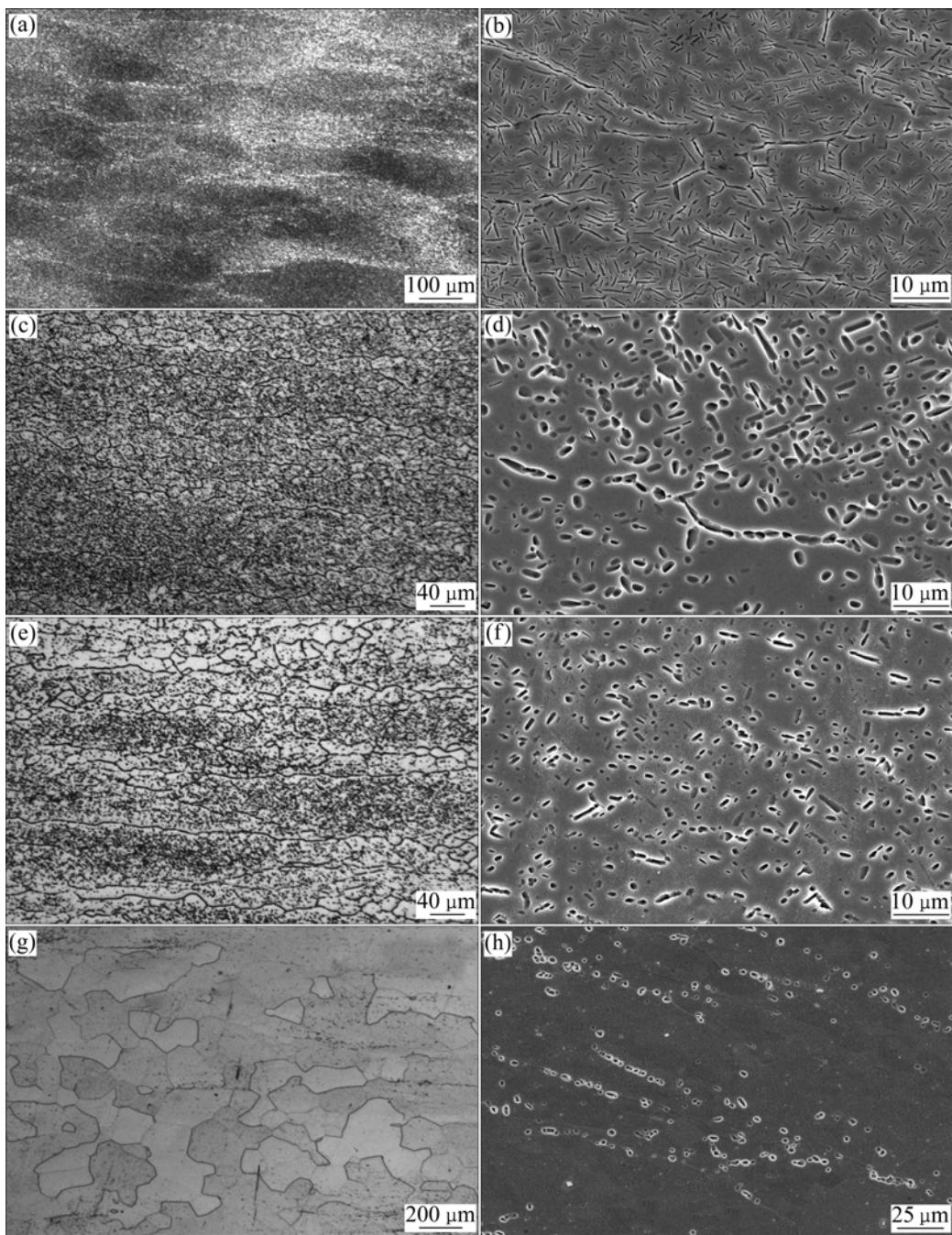


图 2 Ti-22Al-25Nb 合金 β 锻造后在不同温度固溶 30 min 后的微观组织

Fig.2 Microstructures of β -forged Ti-22Al-25Nb alloy solution treated at different temperatures for 30 min: (a) 960 (OM); (b) 960 (SEM); (c) 980 (OM); (d) 980 (SEM); (e) 1 000 (OM); (f) 1 000 (SEM); (g) 1 020 (OM); (h) 1 020 (SEM)

了长宽接近的板条，在 1 020 固溶时第二相体积分数减少到 <3%，第二相基本变成球形。随着固溶温度的升高，合金中的基体 B2 晶粒发生了明显的静态再结晶，再结晶晶粒尺寸随固溶温度的升高而变大。960 固溶处理时，基体 B2 相未发生再结晶。固溶温度升到 980 时，基体 B2 相发生明显再结晶，再结晶 B2 相晶粒尺寸小于 20 μm 。固溶温度升高到 1 000

，再结晶晶粒尺寸变到 20~40 μm ，在 1 020 固溶 30 min，B2 相基体再结晶晶粒已经明显长大，晶粒尺寸为 100 μm ，晶界也变得光滑平直。

再结晶晶粒尺寸变到 20~40 μm ，在 1 020 固溶 30 min，B2 相基体再结晶晶粒已经明显长大，晶粒尺寸为 100 μm ，晶界也变得光滑平直。

图 3 所示是合金在不同温度固溶后，在 800 保温 24 h 空冷后的微观组织。从图 3(a)中可以观察到：经 960 固溶 + 800 时效处理后，合金的微观组织是 $O + B2$ 全板条，其中基体相为 $B2$ 相，组织中的 O

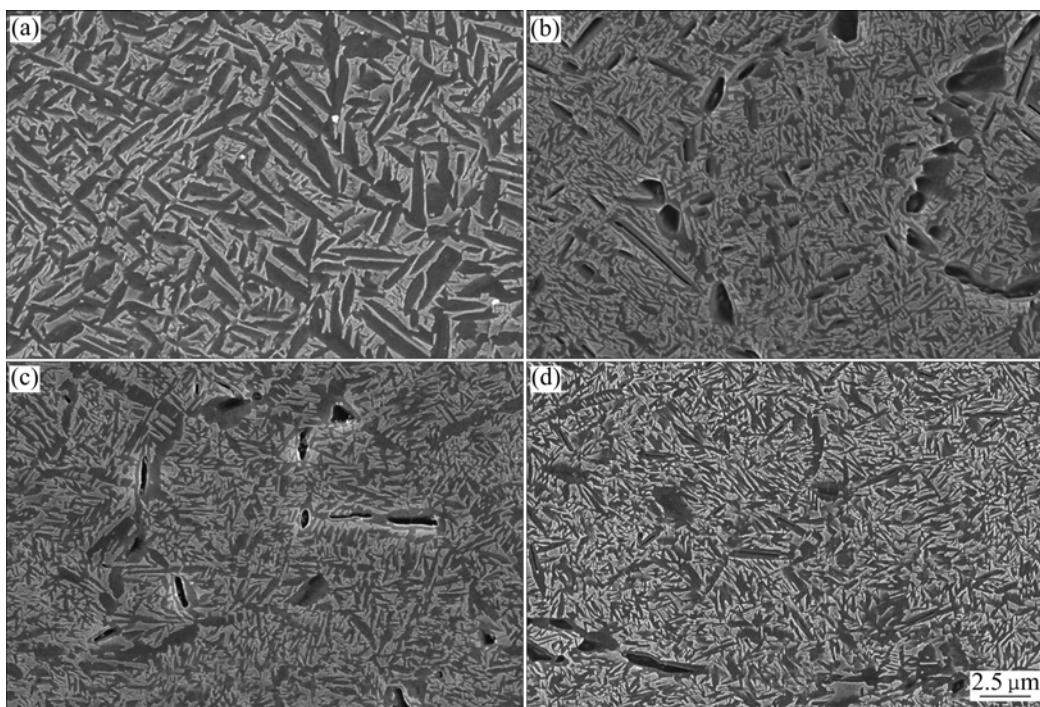


图3 Ti-22Al-25Nb合金 β 锻造后不同温度固溶+800 $^{\circ}\text{C}$, 24 h时效后的微观组织形貌

Fig.3 Microstructures of β -forged Ti-22Al-25Nb alloy after different solution procedures plus 800 $^{\circ}\text{C}$, 24 h aging treatment: (a) 960 $^{\circ}\text{C}$, 30 min; (b) 980 $^{\circ}\text{C}$, 30 min; (c) 1 000 $^{\circ}\text{C}$, 30 min; (d) 1 020 $^{\circ}\text{C}$, 10 min

相板条有两种尺寸，其中粗大的板条是在固溶时形成的，板条宽度在1 μm 左右，长度为3~5 μm ，板条的体积分数约为50%。与固溶状态相比，这些板条的尺寸和体积分数明显增加，这说明板条在固溶时有长大的现象发生；较细小的O相板条是在时效过程中从B2基体中析出的，板条宽度<0.2 μm ，长度在1 μm 以下，体积分数为20%左右，分布在粗大的O相板条之间的基体上，大、小O相板条分布均没有明显的方向性。980、1 000、1 020 $^{\circ}\text{C}$ 固溶处理800 $^{\circ}\text{C}$ 时效后的组织(图3(b), (c), (d))中也有两种尺寸的第二相，其中尺寸较大的第二相同样是在固溶过程中形成的，其形状大多为短棒状，少量为颗粒状，这种短棒状或颗粒状的第二相中颜色呈灰色的为O相，颜色呈黑色的为 α_2 相，黑色的 α_2 相一般都镶嵌在灰色的O相中，随着固溶温度的升高，这种固溶过程中产生的第二相的体积百分含量逐渐减少。时效后的微观组织中尺寸较小的板条，都是在时效过程中析出的，排列混乱。随着固溶温度的升高，O相板条的尺寸略微增加，但与960 $^{\circ}\text{C}$ 固溶状态的相比，变化不明显；O相板条的形状也略有变化，随着固溶温度的升高，O相板条长宽比变得更大，更加细长。经固溶和时效处理后合金微观组织中的总的第二相的体积分数基本相同，占60%~70%，随着固溶温度的升高，大尺寸第二相的数

量减少，而时效过程中析出的细小O相板条的数量增多。

2.4 合金固溶+时效处理后的拉伸性能

表3列出了Ti-22Al-25Nb合金 β 锻造后分别在960(T11)、980(T21)、1 000(T31)和1 020(T41)固溶+时效后的室温和650 $^{\circ}\text{C}$ 拉伸试验结果。可以看出：随着固溶温度的升高，合金的抗拉强度和屈

表3 Ti-22Al-25Nb合金在不同固溶温度+800 $^{\circ}\text{C}$, 24 h时效处理的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of Ti-22Al-25Nb alloy with different solution temperature plus 800 $^{\circ}\text{C}$, 24 h aging

Heat treatment	Testing temperature	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	$\varphi/\%$
T11	RT	1 060	905	15.0	19.5
	650	825	715	16.0	30.0
T21	RT	1 110	975	9.0	10.5
	650	920	815	11.0	24.5
T31	RT	1 220	1 090	8.0	8.5
	650	980	875	10.0	22.0
T41	RT	1 240	1 110	6.5	7.0
	650	1050	955	8.0	16.5

服强度逐渐增加, 而室温伸长率和断面收缩率逐渐降低。合金在 650℃ 拉伸时, 随着固溶温度的升高, 拉伸强度和屈服强度升高, 而伸长率和断面收缩率降低。固溶温度为 1 020℃ 时, 合金的屈服强度最高, 可达到 955 MPa。

固溶温度对合金拉伸性能的影响主要是对组织中初生 α_2/O 相短棒或颗粒作用的结果。WARD^[8]对 Ti₃Al 基合金的研究表明: 当二次板条同样细小时, 随着初生 α_2 相颗粒体积分数的增加, 细小板条的强化作用将下降, Ti₃Al 合金的抗拉强度和屈服强度降低。随着固溶温度的升高, 经 β 锻造后的 Ti-22Al-25Nb 合金组织中初生 α_2/O 相短棒或颗粒的体积分数下降, 同样导致了细小 O 相板条的强化作用下降, 因此, 合金的抗拉强度和屈服强度下降。

3 结论

- 1) Ti-22Al-25Nb 合金经 β 锻造后的组织由少量 α_2 颗粒、大量 O 相板条和 B2 相基体组成。
- 2) 固溶处理过程中, O 相板条发生溶解, 数量减少、形状变短、变粗。980℃ 以上固溶处理时, 基体 B2 相发生明显的再结晶, 温度越高, 再结晶晶粒尺寸越大。
- 3) 固溶 + 时效处理后, 细小的二次 O 相板条再次从 B2 基体中析出, 并最终形成一种具有短棒状或颗粒状的初生 α_2/O 相 + 细小的二次 O 相板条 + B2 相基体组成的组织。
- 4) 不同固溶温度 + 时效处理组织的室温和 650℃ 拉伸性能测试结果表明: 随着微观组织中初生 α_2/O 相数量的减少、二次 O 相板条数量的增加, 合金的室温和 650℃ 抗拉强度升高, 伸长率降低。

REFERENCES

- [1] 陈国良, 林均品. 有序金属间化合物结构材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [2] CHEN Guo-liang, LIN Jun-pin. Ordered intermetallic structure materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.
- [3] HAGIWARA M, EMURA S, ARAOKA A. Property enhancement of orthorhombic Ti₂AlNb-based intermetallic alloys [J]. Materials Science Forum, 2003, 426/432: 1715–1720.
- [4] 李世琼, 张建伟, 程云君, 梁晓波. Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 基金属间化合物结构材料研发现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(Supp1.3): 104–109.
- [5] LI Shi-qiong, ZHANG Jian-wei, CHENG Yun-jun, LIANG Xiao-bo. Current status on development of Ti₃Al and Ti₂AlNb intermetallic structural materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(Supp1.3): 104–109.
- [6] LI Shi-qiong, CHENG Yun-jun, LIANG Xiao-bo, ZHANG Jian-wei. Recent work on alloy and process development of Ti₂AlNb based alloys [J]. Materials Science Forum, 2004, 475/479: 795–800.
- [7] BOEHLERT C J, MAJUMDAR B S, SEETHARAMAN V, MIRACLE D B. The microstructural evolution in Ti-Al-Nb O + BCC orthorhombic alloys (Part I) [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30(9): 2305–2323.
- [8] BOEHLERT C J. The tensile behavior of Ti-Al-Nb O + BCC orthorhombic alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32: 1977–1988.
- [9] BOEHLERT C J. The effects of forging and rolling on microstructure in O + BCC alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 279: 118–129.
- [10] WARD C H. Microstructure evolution and its effect on tensile and fracture behavior of Ti-Al-Nb α_2 intermetallics [J]. International Material Reviews, 1993, 38: 79–101.

(编辑 杨 兵)