

Ti-22Al-25Nb 合金大规格棒材组织与力学性能研究

马 雄，梁晓波，张建伟，程云君

(钢铁研究总院 高温材料研究所，北京 100081)

摘 要：通过逐步降温锻造工艺制备了 Ti₂AlNb 基合金大规格 (Φ300 mm) 棒材，分析了其显微组织均匀性及热处理前后棒材不同部位显微组织的变化，并进行了力学性能测试。结果表明，采用逐步降温锻造工艺制备的 Φ300 mm 棒材靠近外表面区域变形比较充分，显微组织均匀性较好，而靠近心部区域的显微组织均匀性较差，小区域存在未完全破碎的晶界，这种差别会遗传到后续热处理态的显微组织中。通过对比棒材不同部位经热处理后的力学性能，发现不同部位性能差异不大，但心部区域的强度低于表面区域，而塑性则呈现相反的变化趋势。这可能与不同区域由于变形程度不均匀导致了 α 相尺寸及含量的差异所造成。

关键词：Ti-22Al-25Nb；组织；热处理；力学性能

中图分类号：TG146.2⁺3

文献标识码：A

文章编号：1002-185X(2017)S1-109-03

以 O 相为基的 Ti₂AlNb 基金属间化合物不仅具有良好的抗氧化性和抗高温蠕变性能，而且密度低、比强度高^[1-3]，因此该合金已经成为最具潜力的新型航空航天用轻质高温结构材料，并作为高密度镍基高温合金的替代材料被寄予了极大的期待^[4-6]。随着航空锻件整体化设计的发展，对 Ti₂AlNb 基合金棒材规格的要求不断增大。国内外对 Ti-22Al-25Nb 合金大规格棒材 (≥Φ300 mm) 棒材的研究鲜见公开报道。

Ti-22Al-25Nb 合金含有高含量的高熔点元素 Nb，大规格铸锭成分均匀性控制难度大，使得工业化生产中很难制备出成分一致化较好的铸锭，而通常显微组织状态决定了合金的力学性能^[7, 8]，因此，通过改善传统工艺实现成分的均匀化控制，成为提高合金力学性能的基础和关键。此外，Ti₂AlNb 合金的间隙元素 O、N、H 成分控制范围较窄，控制难度较大，大规格坯料锻透性差，组织均匀性难以控制。

本实验研究 Ti₂AlNb 合金大规格棒材在研制过程中出现的锻坯锻透性和棒材组织均匀性等方面存在的诸多技术问题，分析了锻态棒材的组织均匀性，以期通过调整热处理工艺获得理想的组织与力学性能，制定出合理的大规格 Ti₂AlNb 合金棒材的生产工艺。

1 实 验

热处理工艺实验与锻态微观组织分析采用逐步降温循环锻造的规格为 Φ300 mm 的大规格棒材。合金成分见表 1。棒材显微组织及力学性能取样方法如图 1

所示：锻态与热处理态金相组织试样沿大棒材半径方向，从外向里在 30, 90 和 150 mm 3 个位置取样，力学性能试样也于对应位置沿弦向取样。锻态试样热处理制度选取 980 °C/2 h, AC+800 °C/12 h, AC。金相试样经粗磨→精磨→机械抛光→化学腐蚀后，在扫描电镜上观察显微组织，并观察了棒材锻态的低倍组织。

表 1 材料合金成分

Table 1 Composition of alloy (wt%)					
Al	Nb	O	N	H	Ti
10.79	42.88	0.049	0.0052	0.0026	Balance

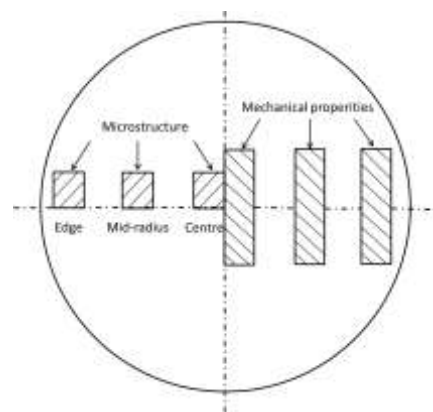


图 1 金相试样与力学性能取样图

Fig.1 Sampling location of metallographic specimens and mechanical properties

收稿日期：2016-12-08

作者简介：马 雄，男，1985 年生，博士，钢铁研究总院，北京 100081，电话：010-62181009，E-mail: mxnwpu@163.com

2 结果与分析

2.1 低倍组织

图 2 为 $\Phi 300$ mm Ti-22Al-25Nb 合金大棒材锻态低倍组织图片。从图 2 可以看出，合金棒材的低倍组织呈模糊晶，且不同位置的组织较为均匀。这说明铸态组织经过逐步降温路线的反复锻造已经充分细化和均匀化。

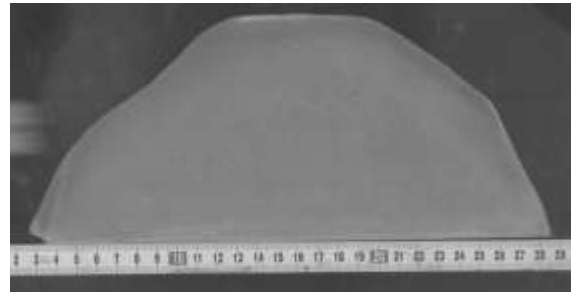


图 2 $\Phi 300$ mm Ti-22Al-25Nb 合金棒材的锻态低倍组织

Fig.2 Macrostructures of $\Phi 300$ mm Ti-22Al-25Nb alloy bar in forged condition

2.2 显微组织

图 3 为棒材不同部位（边缘、 $R/2$ 和中心）的显微组织，其相应位置经固溶加时效处理后试样的显微组织如图 4 所示。

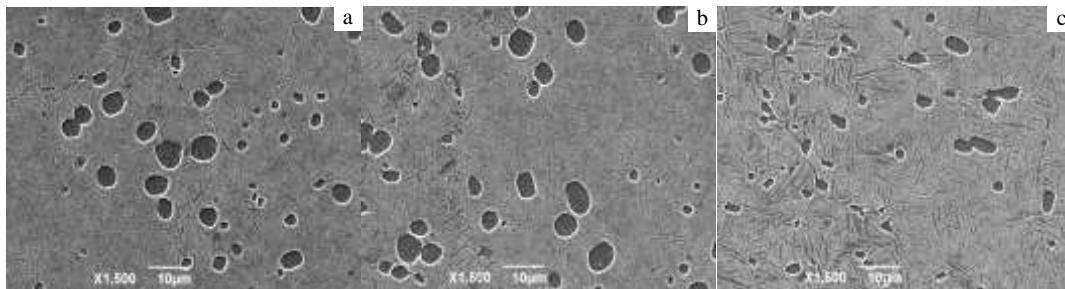


图 3 Ti-22Al-25Nb 合金的锻态显微组织

Fig.3 SEM images of forged bar of Ti-22Al-25Nb alloy: (a) marginal area, (b) $R/2$ area, and (c) central area

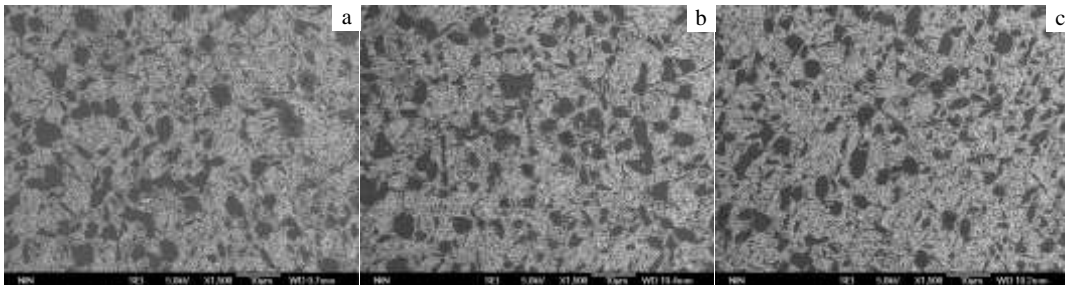


图 4 Ti-22Al-25Nb 合金的经热处理后显微组织

Fig.4 SEM images of Ti-22Al-25Nb alloy via heat treatment: (a) marginal area, (b) $R/2$ area, and (c) central area

从图 3 可以看出不同部位的锻态显微组织均为 α_2+O+B2 的三相组织，其中黑色等轴颗粒为 α_2 相、灰色板条 α_2/O 相和白色基体 B2 相。心部位置由于冷却速率较慢，使得板条组织厚度增加， α_2 相含量较低且颗粒小，极少部分区域由于心部组织变形量不充分而存在未完全破碎的晶界。

从图 4 可以看出，经过固溶加时效处理后 α_2 相的形态球化效果显著， α_2 颗粒在固溶处理过程中，部分球化的等轴颗粒相互聚集，使得具有较小尺寸的等轴颗粒合并长大。同时，在固溶阶段，原始板条部分溶解到 B2 基体中，变短变细，并且部分板条在热处理

的过程中已经发生球化，转变成等轴颗粒。而在时效过程中，从基体 B2 相中析出了更为细小的二次针状 O 相。从心部到边部， α_2 颗粒越来越小；这是由于锻态组织中 α_2 颗粒尺寸大小不同，导致热处理态组织中初生 α_2 颗粒的大小也有差异，该过程体现了材料组织在热加工过程的遗传性特征。上述结果表明，由于热成形过程各参数设计合理，可获得较为理想的锻态组织。

2.3 力学性能

表 2 与表 3 分别为 Ti₂AlNb 合金棒材经热处理后不同部位室温拉伸和 650 °C 力学性能测试结果。

从表 2 和表 3 可以看出不同部位性能相差不大，

表 2 $\Phi 300$ mm Ti₂AlNb 合金棒材室温拉伸性能Table 2 Room temperature mechanical properties of $\Phi 300$ mm Ti₂AlNb alloy bar

Location	R_m /MPa	$R_{0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
Edge	1107	959	7.0	10
Mid-radius	1098	947	6.5	9
Centre	1073	948	6	9

表 3 $\Phi 300$ mm Ti₂AlNb 合金棒材 650 °C 拉伸性能Table 3 650 °C mechanical properties of $\Phi 300$ mm Ti₂AlNb alloy bar

Location	R_m /MPa	$R_{0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
Edge	880	775	11.0	30.5
Mid-radius	860	735	15.0	33.5
Centre	845	730	16.0	33.0

这是因为棒材不同部位的组织的一致性较好, 即锻态的低倍组织较为均匀, 以及固溶加时效热处理选取相同厚度的试样块进行, 使得不同部位的冷却速率一致, 从而尽可能的避免了材料性能上较大的差别。值得注意的是, 棒材边部强度略高于心部, 塑性相反, 研究表明, 合金的强度随着 α_2 相体积分数的增加而降低, 延伸率随 α_2 相体积分数的增加而增加^[9, 10]。如图 4 所示, 棒材经热处理后边缘部位 α_2 含量明显略高于心部。因此, 上述结果与不同部位的 α_2 相含量有关。

3 结 论

Microstructures and Mechanical Properties of Ti-22Al-25Nb Alloy Large Size Bar

Ma Xiong, Liang Xiaobo, Zhang Jianwei, Cheng Yunjun

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

Abstract: The microstructures and mechanical properties of $D300$ mm large size Ti₂AlNb alloy bars which was forged at reducing temperature gradually were investigated. The results show that the near-surface region exhibits more sufficient deformation than the interior region. Accordingly, a more homogeneous microstructure is found at the near-surface region. While at the interior region, more unbroken grain boundaries are found. This phenomenon will be passed down to the corresponding heat-treated microstructure. By comparing mechanical properties after heat treatment at different positions of the bar, it can be found that the difference of tensile properties at the different locations is not apparent. Also, the strength at the interior region is lower than that at the surface region, while the plasticity is opposite. This can be attributed to the difference between the volume fraction and size of the primary α_2 phases.

Key words: Ti-22Al-25Nb; microstructure; heat treatment; mechanical property

Corresponding author: Ma Xiong, Ph. D., High Temperature Materials Research Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-62181009, E-mail: mxnwpu@163.com

1) 铸锭经过循环降温路线反复锻拔锻造制备的 $\Phi 300$ mm Ti₂AlNb 合金棒材低倍组织呈模糊晶, 不同部位显微组织结果显示, 各部位组织与成分分布均匀。

2) 经 980 °C/2 h, AC+800 °C/12 h, AC 热处理后, 不同部位力学性能相差较小。此外, 由于棒材经热处理后边缘部位 α_2 含量明显略高于心部, 使得棒材边部强度高于心部, 而塑性呈现相反的变化趋势。

参考文献 References

- [1] Kumpf J. *Adv Eng Mater*[J], 2001, 3: 851
- [2] Froes F H, Suryanarayana C, Eliezer D. *J Mater Sci*[J], 1992, 27: 5113
- [3] Gogia A K, Nandy T K, Banerjee D *et al. Intermetallics*[J], 1998, 6(7-8): 741
- [4] Boehlert C J, Miracle D B. *Metall and Mater Trans A*[J], 1999, 30 (9): 2349
- [5] Peng Jihua, Mao Yong, Li Shiqiong *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 299: 75
- [6] Banerjee D. *Progress in Materials Science*[J], 1997, 42: 135
- [7] Rowe R G. *Advanced Materials and Processes*[J], 1992, 3: 33
- [8] Peng Jihua, Mao Yong, Li Shiqiong *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 299: 75
- [9] Germann L, Banerjee D, Guedou J Y *et al. Proceedings of the 10th World Conference on Titanium*[C], Hamburg: Ti-2003, Science and Technology, 2004, 4: 2137
- [10] Flower H M. *Mater Sci Tech*[J], 1990, 6: 1082