

等温锻造 Ti-22Al-25Nb 合金的显微组织与力学性能

王 伟¹, 曾卫东¹, 杨 锦², 江 悦³, 张建伟⁴, 梁晓波⁴

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 中航工业成都发动机(集团)有限公司, 四川 成都 610503)

(3. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

(4. 钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要: 对 Ti-22Al-25Nb (at%) 合金在不同相区等温锻造与锻后热处理过程中的组织演变及其对力学性能的影响进行了研究。结果表明, 在 980 °C (B2+ α_2 +O 三相区)、1040 °C (α_2 +B2 两相区) 以及 1060 °C (B2 相区) 等温锻造并热处理之后, 合金的显微组织表现为典型的等轴组织、双态及双尺寸的板条组织, 各相的尺寸以及体积分数可以通过热处理制度来控制。合金的力学性能测试表明: 双尺寸的板条组织具有较高的室温强度但塑性最低, 而等轴组织具有较高的塑性, 强度最低。等轴组织的抗蠕变性能最低, 双态组织以及双尺寸的板条组织具有相似的抗蠕变性, 后两种组织主要以板条组织为主导, 板条组织具有比等轴组织更优异的抗蠕变性能。

关键词: Ti-22Al-25Nb 合金; 等温锻造; 显微组织; 拉伸性能; 蠕变性能

中图分类号: TG146.2*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)06-1605-04

Ti₂AlNb 合金是以航空航天发动机为主要应用目标的一类新型金属间化合物基轻质高温结构材料。近十几年来国内一些材料研究单位在该合金的研究开发方面已取得了长足的进展。其中钢铁研究总院研制的成分为 Ti-22Al-25Nb (at%) 的 Ti₂AlNb 合金, 既保持了密度低、高温强度与蠕变抗力高、抗氧化和阻燃性能好、热膨胀系数低及无磁性等特点, 又展示出好于其它同类合金的塑性、韧性及加工成形性能^[1,2]。

近年来, 国内外学者对 Ti₂AlNb 合金在热机械加工工艺—显微组织—力学性能方面展开了大量的研究工作^[3-5]。研究表明: Ti₂AlNb 合金的力学性能取决于合金的显微组织, 然而相平衡以及显微组织演变是非常复杂的。在不同的热加工工艺下, 合金的显微组织具有单相、两相或三相; 另外这些相的尺寸、体积分数以及形态对力学性能也会有较大的影响。因此, 进一步探究合金的显微组织与力学性能之间的关系是非常迫切需要的。

迄今为止, 有关 Ti₂AlNb 合金的热加工工艺主要基于传统钛合金以及 TiAl 的方法, 主要通过对铸锭挤压、锻造、轧制等操作研究合金的相平衡、显微组织演变以及力学性能^[6]。等温锻造作为一种体积成形的加工工艺, 具有提高组织的均匀性及塑性等优点, 然

而在目前研究中却鲜见报导。因此, 本研究拟采用等温锻造的方法, 研究合金显微组织与力学性能之间的关系。

本实验拟以成分为 Ti-22Al-25Nb(at%) 的 Ti₂AlNb 合金为实验材料, 探索不同相区等温锻造及锻后热处理过程中的组织转变规律及其对力学性能的影响。

1 实 验

实验采用的 Ti₂AlNb 合金化学成分见表 1。锻造后的棒材由钢铁研究总院提供, 将改锻后的棒材分别在 980 °C (B2+ α_2 +O 三相区)、1040 °C (α_2 +B2 两相区) 以及 1060 °C (B2 相区) 等温锻造。本研究对等温锻后的合金在 940 °C 固溶 1 h 水冷, 随即在 800 °C 时效 8 h 炉冷, 得到不同组织形态的显微组织进而测试其力学性能。

2 结果和讨论

表 1 本实验用 Ti₂AlNb 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti₂AlNb alloy (at%)

Ti	Al	Nb	O/ $\times 10^{-4}$	N/ $\times 10^{-4}$	H/ $\times 10^{-4}$
Bal.	22.3	25.7	430	52	9

收稿日期: 2015-06-06

基金项目: 凝固技术国家重点实验室自主研究课题 (153-ZH-2016)

作者简介: 王 伟, 男, 1985 年生, 博士生, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88460516, E-mail: gackmol@163.com

2.1 显微组织演变

2.1.1 等温锻造温度对合金显微组织的影响

等温锻造温度是获得理想显微组织的重要参数之一。图 1 为合金的棒材组织，从图中可以看出，棒材的显微组织主要是由等轴 α_2 相、细板状的 O 相以及 B2 基体组成，等轴 α_2 相不均匀地分布在 B2 基体中。为了得到均匀的显微组织，提高合金的力学性能，本研究采用不同相区等温锻造。当合金在 980 °C ($\alpha_2 + O + B2$ 三相区) 等温锻造时 (图 2a)，合金的显微组织主要包含：等轴 O 或 α_2 相，围绕 α_2 镶嵌的 O 相 (rim

却过程中形成。当合金在 1040 °C ($\alpha_2 + B2$ 两相区) 等温锻造时 (图 2b)，合金的显微组织由等轴 α_2 相，板条 O 相以及 B2 基体组成。等轴 α_2 相均匀地分布在 B2 晶粒内部以及晶界上， α_2 相的存在对控制 B2 晶粒的长大以及提高合金的力学性能具有非常重要的作用。当合金在 1060 °C (B2 相区) 等温锻造时 (图 2c) 时，合金的显微组织主要由板条状的 O 相组成。由于在此温度下没有等轴 α_2 相的钉扎作用，合金的晶粒尺寸要比 1040 °C ($\alpha_2 + B2$ 两相区) 等温锻下的晶粒尺寸大。

2.1.2 热处理温度对不同温度等温锻造合金显微组织的影响

在之前的研究中，主要研究了热处理温度对合金显微组织的影响规律^[7]，但是除了热处理温度外，等温锻造温度对合金的显微组织的影响具有非常重要的作用。图 3 是不同温度等温锻造的合金在 940 °C 固溶处理+800 °C 时效合金的显微组织。从图中可以看出，所有时效的显微组织都有细板状的 O 相析出。HT-1 (980 °C 等温锻造+940 °C 固溶处理+800 °C 时效处理) 的显微组织 (图 3a) 主要包含等轴 α_2/O 相，板条 O 相以及围绕 α_2 镶嵌的 O 相以及 B2 基体。与锻态的

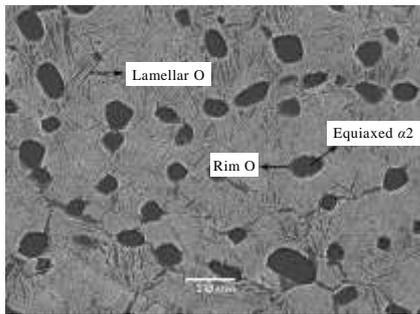


图 1 原始 Ti-22Al-25Nb 合金棒材组织

Fig.1 Microstructure of the as-forged alloy

O)，粗板条以及细板条状的 O 相。粗板条状的 O 相，相在等温锻造过程中形成，细板条状的 O 相在锻后冷

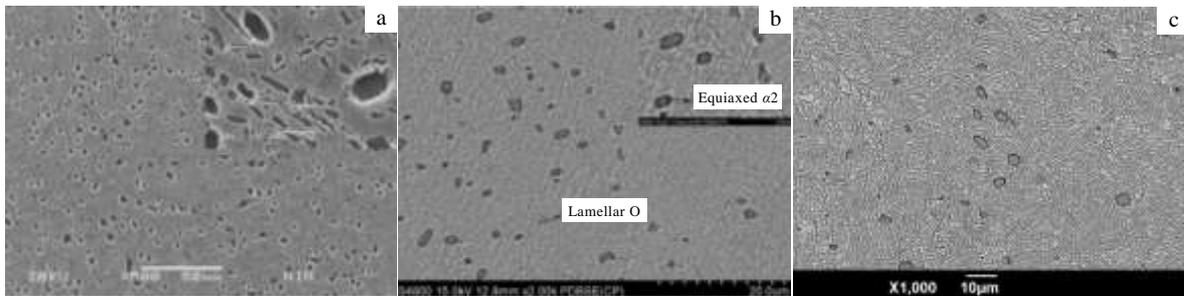


图 2 不同温度等温锻造后的合金显微组织

Fig.2 Microstructures of the isothermally forged alloy: (a) 980 °C, (b) 1040 °C, and (c) 1060 °C

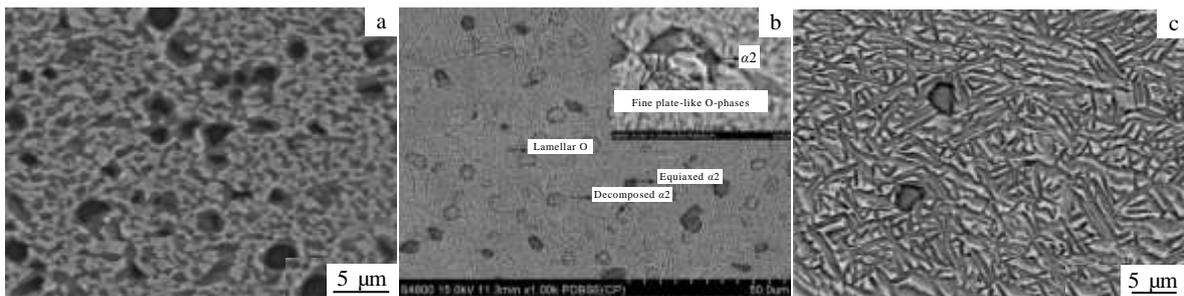


图 3 不同温度等温锻后的合金 940 °C 固溶+800 °C 时效处理后的显微组织

Fig.3 Microstructures of isothermally forged alloy at different temperature after 940 °C solution treatment followed by 800 °C aging: (a) 980 °C, (b) 1040 °C, and (c) 1060 °C

显微组织相比，更多的 O 相颗粒和较细的的板条状 O 相溶解到 B2 基体中；初生粗板条状 O 相变宽、变短，部分在热处理过程中发生球化。随着等温锻温度提高到 α_2 +B2 两相区（图 3b），HT-2（1040 °C 等温锻造+940 °C 固溶处理+800 °C 时效处理）的显微组织主要包括等轴的 α_2 相，从 α_2 相中析出细的板条 O 相，从 B2 基体中析出的粗板条和细板条的 O 相。其中粗板条状的 O 相在固溶过程中形成，细板条状的 O 相在时效过程中形成。与锻态的显微组织相比，更多的细板状 O 相从 α_2 相中析出，在热处理过程中，初生板条 O 相变宽，变短。这种显微组织不同于 HT-1 的显微组织，围绕 α_2 镶嵌的 O 相存在于 α_2 +O+B2 三相区等温锻造的组织中，而在 α_2 +B2 两相区等温锻造的组织中却是从 α_2 相中析出细的板条 O 相。当等温锻温度提高到 1060 °C 时（图 3c），HT-3（1060 °C 等温锻+940 °C 固溶处理+800 °C 时效处理）的显微组织不同于前两种，主要包含粗板条以及细板条状的 O 相和 B2 基体。和等温锻的显微组织相比，等轴 α_2 相的含量明显减少。

2.2 力学性能

对上述获得的 3 种不同显微组织的饼坯的室温、高温拉伸性能进行测试。拉伸性能的结果列于表 2。从表中可以看出，双尺寸的板条组织（HT-3）具有较高的室温强度但塑性最差，而等轴组织（HT-1）具有较高的塑性而强度却最差。双态组织（HT-2）的强度和塑性介于两者之间。

影响合金强度的主要因素有：（1）各个不同相的强度；（2） α_2 /O 以及 B2 相的体积分数；（3）B2 相的晶粒尺寸；（4）O 相的板条厚度；（5）位错密度。根据之前的研究发现，O 相合金的强化机制与传统钛合金的强化机制类似：晶界强化对强度的影响较大，并且晶粒尺寸越细小合金的强度越高，这一点符合 Hall-Petch 公式。对于本研究的 3 种不同组织合金来讲，等温锻造温度不同影响了合金的 B2 相晶粒尺寸是不同的。双尺寸的板条组织（HT-3）具有最大的 B2 相晶粒尺寸，大约 236 μm ；而等轴组织（HT-1）具有最小的 B2 晶粒尺寸，大约 87 μm 。按照 Hall-Petch 公式，等轴组织（HT-1）应该具有最高的屈服强度，但是与事实却相反。考虑到除了 B2 晶粒尺寸之外，影响合金强度的主要因素是 O 相板条的厚度。本研究的 3 种组织中，等轴组织（HT-1）具有较多的直径大约为 4.33 μm 的等轴 α_2 /O 颗粒，双尺寸的板条组织

（HT-3）几乎没有等轴颗粒，主要由宽度大约为 0.36 μm 的较粗 O 相板条和 0.13 μm 的较细 O 相板条组成。对于双尺寸的板条组织（HT-3）来说，板条 O 相和等

表 2 不同组织的合金拉伸性能

Table 2 Tensile properties of the alloy with different microstructures

Heat treatment	Testing temperature	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	Ψ /%
HT-1	RT	1050	997	11.5	15.3
	650 °C	851	778	21.5	64.5
HT-2	RT	1111	1004	9.0	12.5
	650 °C	865	793	15	53.2
HT-3	RT	1172	1065	6.5	11
	650 °C	914	861	11.5	48.0

轴的 α_2 /O 颗粒相比具有更好析出强化效果，因此强度较高。但是由于板条 O 相对 B2 相的束缚，使 B2 相滑移较为困难，因此塑性却较差。影响合金塑性的主要因素是等轴的 α_2 /O 颗粒尺寸，B2 相的体积分数以及 α_2 /O 相界面的连续性。而对于等轴组织（HT-1）来讲，合金中具有比双尺寸的板条组织（HT-3）更多的等轴颗粒，因此 HT-1 具有最大的塑性延伸率以及断面收缩率。

本实验还研究了 3 种不同显微组织的蠕变性能。图 4 是 3 种不同等温锻的合金在 150 MPa、650 °C、100 h 的蠕变曲线。从图中可以看出，等轴组织（HT-1）具有较高的初始蠕变速率，并且它的抗蠕变性要低于其他两种。双态组织（HT-2）以及双尺寸的板条组织（HT-3）具有相似的抗蠕变性，这主要与合金的显微组织有关。在这两种合金中，合金都是由板条状 O 相主导，而双尺寸的板条组织（HT-3）中几乎没有等轴颗粒以及板条尺寸较三态组织（HT-2）尺寸厚，因此双尺寸的板条组织（HT-3）具有更高的抗蠕变性。

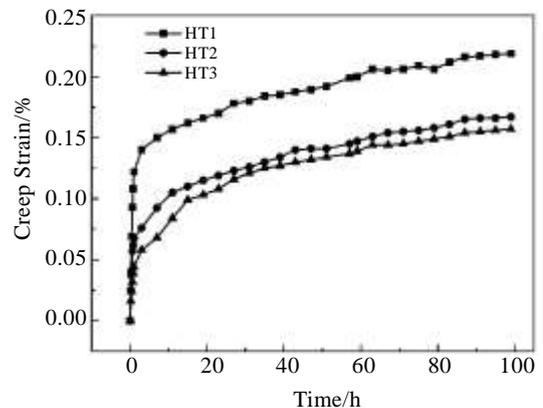


图 4 3 种热处理制度试样的蠕变性能

Fig.4 Creep curves for three heat-treated specimens at 650 °C/150 MPa

3 结 论

1) 经 1060 °C (B2 相区) 等温锻造后, 合金获得双尺寸的 O 相板条组织和 B2 基体; 经 1040 °C (近 B2 相区) 等温锻造后, 合金的显微组织由少量等轴 α_2 相以及板条状 O 相和 B2 基体组成; 经 980 °C ($\alpha_2 + O + B2$ 三相区) 等温锻造后合金的显微组织主要是等轴状的 α_2/O 颗粒以及细针状的 O 相和 B2 基体组成。

2) 双尺寸的板条组织 (HT-3) 具有较高的室温强度但塑性最低, 而等轴组织 (HT-1) 具有较高的塑性而强度却最低。

3) 等轴组织 (HT-1) 的抗蠕变性能最差, 双态组织 (HT-2) 以及双尺寸的板条组织 (HT-3) 具有相似的抗蠕变性。

- [1] Li Shiqiong(李世琼), Zhang Jianwei(张建伟), Cheng Yunjun(程云君) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(S3): 104
- [2] Zhang Jianwei(张建伟), Li Shiqiong(李世琼), Liang Xiaobo(梁晓波) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(S3): s336
- [3] Banerjee D, Gogia A K, Nandi T K *et al. Acta Mater*[J], 1988, 36(4): 871
- [4] Zhang Jianwei(张建伟), Liang Xiaobo(梁晓波), Cheng Yunjun(程云君) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(5): 1157
- [5] Hagiwara M, Emura S, Araoka A *et al. Metals and Materials International*[J], 2003, 9(3): 265
- [6] Zhou Wei(周伟), Yao Zekun(姚泽坤), Qin Chun(秦春). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(1): 209
- [7] Wang Wei, Zeng Weidong, Xue Chen *et al. Intermetallics*[J], 2014, 45: 29

参考文献 References

Microstructure and Mechanical Properties of the Isothermally Forged Ti-22Al-25Nb (at%) Alloy

Wang Wei¹, Zeng Weidong¹, Yang Jin², Gang Yue³, Zhang Jianwei⁴, Liang Xiaobo⁴

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. AVIC Chengdu Engine (Group) Co., LTD, Chengdu 610503, China)

(3. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

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

Abstract: The microstructure evolution and mechanical property of Ti-22Al-25Nb (at%) alloy by different phase region isothermal forging and heat treatment were studied. The results indicate that as the isothermally forging temperature increases from 980 °C ($\alpha_2 + O + B2$ three phase region) to 1040 °C ($\alpha_2 + B2$ two phase region) to 1060 °C (B2 phase region), the microstructures of alloys are equiaxed microstructure, duplex microstructure, and bimodal size lamellar O microstructure. The size and volume fraction of each phase can be controlled by heat-treatment schedule. The mechanical properties of alloys show that bimodal size lamellar O microstructure has the highest strength but the worst ductility; however, the equiaxed microstructure has the highest ductility but the lowest strength. The equiaxed microstructure has the worst creep resistance, while the duplex microstructure and the bimodal size lamellar O microstructure have similar creep resistance, because they are both mainly lamellar structure, which possess better creep resistance than the equiaxed microstructure.

Key words: Ti-22Al-25Nb alloy; isothermal forging; microstructure; tensile; creep

Corresponding author: Zeng Weidong, Professor, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88494298, E-mail: zengwd@nwpu.edu.cn