

热处理对 Ti-62A 合金厚板组织及性能的影响

孙 明, 叶文君, 惠松晓, 于 洋

(北京有色金属研究总院 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088)

摘 要: 研究固溶+时效工艺对一种新型高强高韧损伤容限型钛合金 Ti-62A 的组织与拉伸性能的影响。结果表明: 该合金在两相区固溶+时效处理后, 合金的基本组织类型为典型的网篮状组织, 即层片状的 α 相和 β 转变组织; 经过热机械处理以后, 合金的综合力学性能良好, 抗拉强度达到 1 185 MPa, 屈服强度达到 1 100 MPa, 且兼具有良好的塑性匹配。

关键词: 钛合金; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effects of heat treatment on microstructures and tensile properties of Ti-62A alloy plate

SUN Ming, YE Wen-jun, HUI Song-xiao, YU Yang

(State Key Laboratory for Fabrication and Processing of Nonferrous Metals,
General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: Effects of solution and aging processing on microstructure and tensile properties of a new type of high strength and high toughness titanium alloy for damage tolerance (Ti-62A) were discussed. The experimental results show that typical microstructure of the alloy in α/β solution and aging is basket-like microstructure (the strip of α phase and β changes structure). After the thermal mechanical processing, the comprehensive mechanical properties of the alloy are excellent. The tensile strength of alloy is 1 185 MPa, and the yield strength is 1 100 MPa with a good plasticity.

Key words: titanium alloy; heat treatment; microstructure; mechanical property

钛合金具有比强度高、耐腐蚀、高温力学性能好等特点, 在航空航天方面得到广泛应用。随着对飞机性能和使用寿命要求的不断提高, 加上一些惨重事故的发生, 促使着飞机结构的设计思想不断发生演变, 由古老的单纯静强度设计准则转变到安全 - 寿命设计准则、破损 - 安全设计准则, 直到现代的损伤容限设计准则^[1]。钛合金作为航空飞机的关键结构材料, 人们对其性能的要求随着飞机结构设计思想的改变而改变。为了适应飞机损伤容限设计准则的要求, 国内外十分重视发展具有高断裂韧性和低裂纹扩展速率的中强或高强钛合金, 即损伤容限型钛合金^[2]。目前, 属

于损伤容限型的钛合金有 TC4ELI, Ti-6-22-22S 和 TC11DT 等。其中: TC4ELI 的屈服强度为 900 MPa, 属于中强损伤容限型钛合金; 其余 2 种的屈服强度均为 1 000 MPa, 属于高强损伤容限型钛合金。TC4ELI 和 Ti-6-22-22S 合金已大量应用于美国第 4 代战斗机 F-22, TC11DT 合金则早已成功应用于歼七 飞机^[3]。

本文作者所研究的 Ti-62A 合金是一种 $\alpha+\beta$ 型钛合金, 属于 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si-X 系合金。该合金是在 Ti-62222S 合金基础上, 通过合理的成分设计, 研究开发的一种高强高韧损伤容限型钛合金, 可制成板材、棒材和各种模锻件, 运用于飞机结构件及其他对合金

损伤容限性能要求高的领域,具有广阔的应用前景^[4]。本文作者对不同热处理工艺对该合金的组织 and 性能的影响进行研究,以期能为该合金的加工工艺优化和显微组织控制提供参考。

1 实验

1.1 材料

选用的钛合金,通过 3 次真空自耗熔炼制得合金铸锭,采用金相法测得 $\alpha+\beta\rightarrow\beta$ 相转变点温度为 955 左右。铸锭经 β 相区开坯锻造成厚度为 240 mm 的板坯,此后分三火轧制:第一火和第二火在单相区(990)进行,轧制成 60 mm 的厚板;最后一火在两相区(920)完成,终轧温度为 880 左右,最终轧制成厚度为 32 mm 的板材。

1.2 方法

沿板材的横向(TD)和轧向(RD)分别截取拉伸试样,取样方式见图 1,随后,采用固溶+时效热处理工艺处理。分别选取 2 种热处理制度:(920 , 0.5 h, AC)+(500 , 8 h, AC)(HT-1)和(920 , 0.5 h, AC)+(540 , 8 h)(HT-2)。对于轧向试样分别进行 HT-1 和 HT-2 2 种热处理,横向试样则仅进行 HT-2 热处理,各取 3 个平行试样。经热处理后,测试 3 组试样的室温拉伸性能,并通过 Axiovert 200-MAT 光学显微镜和 FEI QUANTA 400 扫描电镜观察合金的轧态、热处理态的显微组织以及拉伸断口的形貌。

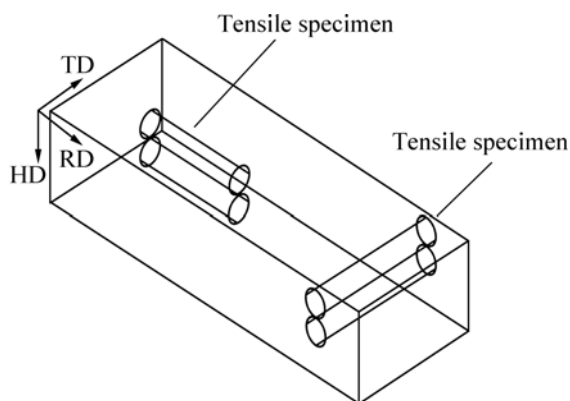


图 1 板材拉伸试样的取样方法

Fig.1 Schematic diagram of sampling position for tensile specimen

2 结果与讨论

2.1 原始组织

图 2 所示为合金轧态原始组织的三维形貌。由于板材是分三火次轧制的,前两火次轧制温度在单相区,最后一火次在两相区完成,而两相区的变形量较小,因此,获得的是网篮状组织(层片状的初生 α 相及 β 转变组织),层片状 α 相平均宽度约 2.5 μm ,长度为 40~65 μm 。原始 β 晶界破碎,局部存在不规则且尺寸较粗大的初生 α 相。

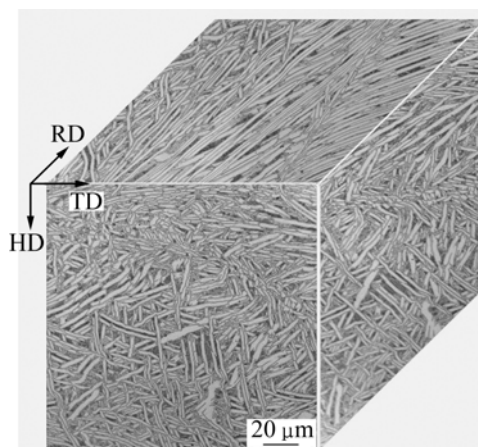


图 2 轧态原始形貌组织

Fig.2 Microstructure of Ti-62A alloy plate as rolled

2.2 热处理后金相组织

图 3 所示为合金板材在不同热处理状态下的显微组织照片。从图 3 可以看出:经相变点以下 920 , 0.5 h, AC 固溶处理后,合金的基本组织类型未发生改变(层片状的初生 α 相及 β 转变组织),部分 α 相分解,层片状 α 相长宽比减小(见图 3(a))。

轧向试样截面的原始组织对应于图 2 中的 TD-HD 截面。在经 HT-1 和 HT-2 2 种热处理工艺处理后,层片状 α 集束明显粗化,数量增多,分布均匀,每个集束有固定的取向,形成典型的网篮状组织,且随着时效温度的升高,这种趋势愈加明显(见图 3(b)和(c))。

横向试样截面的原始组织对应于图 2 中的 RD-HD 截面。经 HT-2 工艺处理后,发现其网篮编织没有轧向试样的编织严谨,局部有短棒状的 α 相,层片状 α 相长短不一,且无明显取向^[5]。

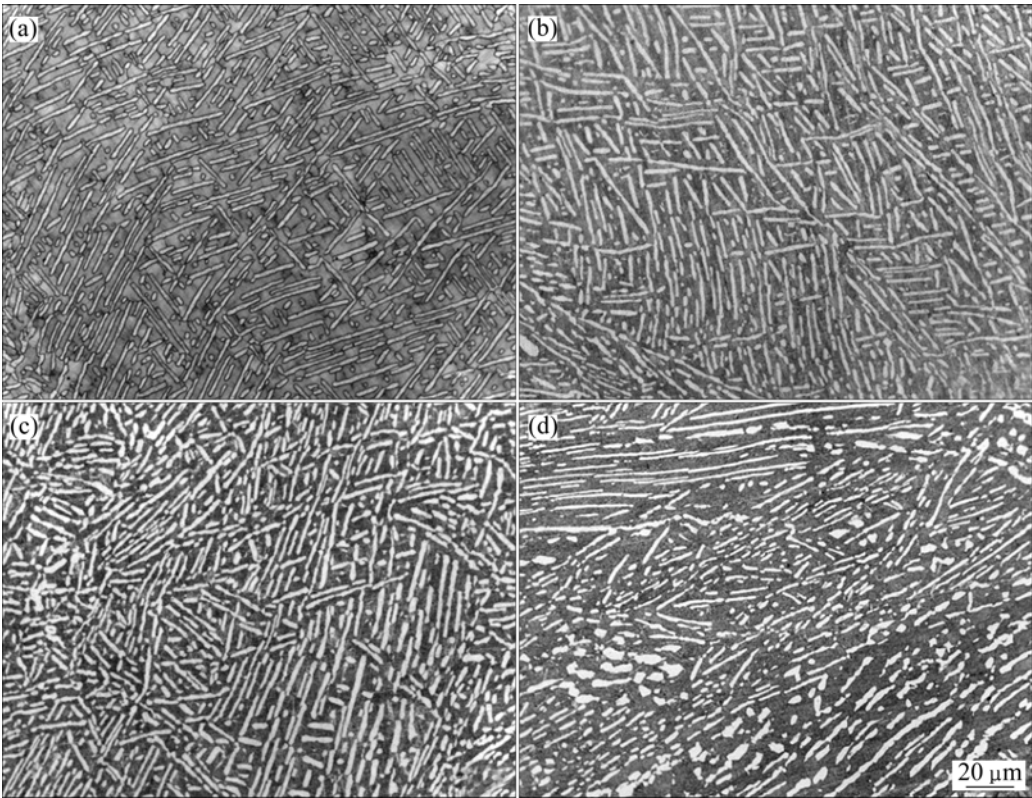


图 3 合金不同状态下的显微组织

Fig.3 Microstructures of Ti-62A alloy plates under different heat-treatment conditions: (a) 920 °C, 0.5 h/AC (RD); (b) HT-1 (RD); (c) HT-2 (RD); (d) HT-2 (TD)

2.3 热处理制度对合金性能的影响

不同热处理状态下合金的拉伸性能见表 1 所列。从表 1 可以看出：经过热处理后，合金的抗拉强度达到 1 185 MPa 以上，屈服强度达到 1 100 MPa 以上，且兼具有良好的塑性匹配。说明在经过本文所采用的热机械处理以后，合金的综合性能良好。

表 1 不同热处理状态下合金的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of alloys after different heat-treatments

Direction	Heat treatment process	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
RD	HT-1	1 235	1 125	9.0	24.5
	HT-2	1 185	1 110	10.0	26.0
TD	HT-3	1 315	1 210	8.5	18.5

注：表中数据为 3 个平行试样的平均值； R_m 为抗拉强度； $R_{p0.2}$ 为屈服强度； A 为伸长率； Z 为断面收缩率。

轧向试样在经 920 °C, 0.5 h, AC 固溶处理后，540 °C, 8 h, AC 时效和 500 °C, 8 h, AC 时效相比，合金的

强度降低而塑性升高。一般来说，两相钛合金的性能在很大程度上取决于其中 α 相的存在形式(包括含量和形貌)。经 540 °C, 8 h, AC 时效处理后， α 集束较 500 °C, 8 h, AC 时效的集束粗化，且数量增多，而正是这种适当的粗化和数量增多被认为是降低合金强度和塑性提高的主要原因^[6]。

合金板材具有明显各向异性，横向性能较轧向性能强度高而塑性低，尤其是断面收缩率降低明显。

2.4 拉伸断口分析

图 4 所示为不同热处理条件下、不同方向的试样室温拉伸断口形貌图。从图 4 可以看出：三者都为韧窝型断口。图 4(b)所示的轧向试样 HT-2 处理后的拉伸试样断口韧窝近似圆形，表面光滑、平整，韧窝最深，说明该制度处理后试样塑性较好；图 4(a)所示的轧向试样 HT-1 处理后的拉伸试样断口表面粗糙、起伏，韧窝较浅，经过该制度处理后试样塑性次之；图 4(c)所示的横向试样 HT-2 处理后的拉伸试样断口断口粗糙程度介于前两者之间，韧窝尺寸大而深度浅，经这种工艺处理后试样的塑性较差^[7]。

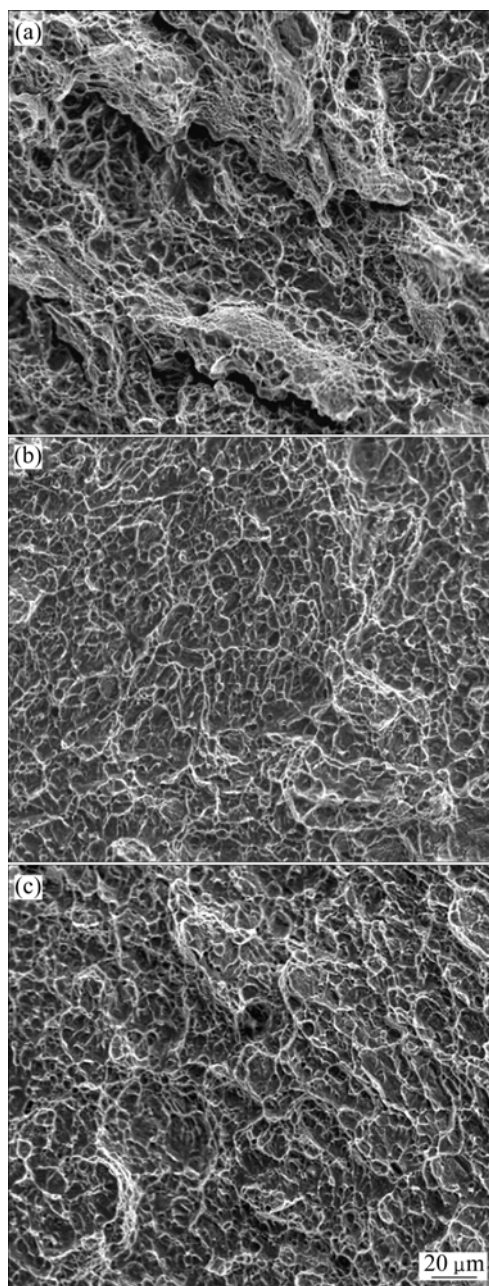


图4 合金的拉伸断口 SEM 像

Fig.4 SEM images of tensile fracture of alloys after different heat-treatments: (a) HT-1(RD); (b) HT-2(RD); (c) HT-2(TD)

3 结论

1) Ti-62A 合金经过单相区和两相区的大变形轧制, 及两相区的固溶+时效热处理后, 层片状 α 集束粗化, 数量增多, 每个集束有固定的取向, 整体范围内 α 集束取向任意, 形成典型的网篮状组织。

2) 在研究的热处理实验条件下, Ti-62A 合金的综合力学性能良好, 抗拉强度达到 1 185 MPa, 屈服强度达到 1 100 MPa, 同时还具备良好的塑性匹配。在相同的热处理条件下, 板材横向强度高于轧向, 塑性水平相当。

REFERENCES

- [1] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展[J]. 金属学报, 2002, 38(Suppl): 4-11.
CAO Chun-xiao. Change of material selection criterion and development of high damage-tolerant titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(Suppl): 4-11.
- [2] 付艳艳, 宋月清, 惠松晓, 米绪军. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 850-855.
FU Yan-yan, SONG Yue-qing, HUI Song-xiao, MI Xu-jun. Research and application of typical aerospace titanium alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(6): 850-855.
- [3] 曲恒磊, 周 廉, 周义刚, 赵永庆, 曾卫东. 高强韧钛合金评述[J]. 稀有金属快报, 2004(23): 5-9.
QU Heng-lei, ZHOU Lian, ZHOU Yi-gang, ZHAO Yong-qing, ZENG Wei-dong. Review of high-strength and high-toughness titanium alloys[J]. Rare Metals Letters, 2004(23): 5-9.
- [4] 于 洋, 惠松晓, 叶文君, 王希哲, 张 翥. 热处理对 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si-X 系合金性能的影响[J]. 金属热处理, 2005, 30(12): 68-71.
YU Yang, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, WANG Xi-zhe, ZHANG Zhu. Effect of heat treatment process on the mechanical properties of Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si-X series alloys[J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(12): 68-71.
- [5] YU Yang, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, XIONG Bai-qing. Mechanical properties and microstructure of an $\alpha+\beta$ titanium alloy with high strength and fracture toughness[J]. Rare Metals, 2009, 28(4): 346-349.
- [6] 惠松晓, 王希哲, 张 翥, 李宗科, 高 博. 热机械处理对 Ti-6-22-22S 合金组织与性能的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(Suppl): 84-86.
HUI Song-xiao, WANG Xi-zhe, ZHANG Zhu, LI Zong-ke, GAO Bo. Effect of thermomechanical processing on the microstructure and mechanical properties of Ti-6-22-22S alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(Suppl): 84-86.
- [7] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
CUI Yue-xian, WANG Chang-li. Metal macroscopic fractography[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998.

(编辑 陈灿华)