

热加工工艺对 TA30 棒材显微组织及力学性能的影响

倪沛彤, 韩明臣, 朱梅生, 郭金明, 郭学鹏, 朱 峰

(西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘 要: 对 TA30 钛合金采用 2 种热加工工艺锻造成 $d90\text{ mm}$ 棒材, 对不同工艺加工的棒材进行室温拉伸、 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温拉伸及热稳定性研究, 观察显微组织和断口形貌。结果表明: 不同工艺棒材均获得双态组织, 断口形貌都呈现延性断口, 室温拉伸、 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温拉伸及热稳定性良好, 达到使用要求。但采用在两相区拔长工艺, 可以简化工序, 提高生产效率并显著提高成材率。

关键词: 钛合金; 热加工; 棒材; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effect of hot work process on microstructures and mechanical properties of TA30 titanium alloy bar

NI Pei-tong, HAN Ming-chen, ZHU Mei-sheng, GUO Jin-ming, GUO Xue-peng, ZHU Feng

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: TA30 titanium alloy ingot was forged to $d90\text{ mm}$ bars by two different forging processes, the tensile properties and thermal stabilities at $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ of the bars between different processing were studied, and the microstructure and fractography were observed. The results show that two kinds of bars forged by different processes obtain bimodal structure, and the fractographies are plastic. The room temperature and high temperature tensile properties and $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ thermal stabilities of the bars can meet the specification. The stretching process under β transus can simplify the processing, raise efficiency and the ratio of product.

Key words: titanium alloy; hot-working; bars; microstructure; mechanical properties

近年来, 随着我国航天工业的蓬勃发展, 钛合金的应用领域不断扩大, TA30 钛合金棒材的需求数量显著增长。TA30 是一种近 α 型高温钛合金, 名义成分为 Ti-5.5Al-3Sn-3Zr-1Mo-1Nb-0.3Si, 在 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下具有的高温瞬时强度、良好的抗蠕变性能及热稳定性能, 主要用作飞行器发动机的压气机盘、叶片及航天结构件^[1-2]。然而, 由于 TA30 钛合金加工范围较窄, 变形抗力较大, 热加工过程易开裂, 且热处理强化效果不敏感^[3-4], 热加工对显微组织形貌及力学性能有较大影响, 因此, 要获得良好的室温及高温综合力学性能并提高成材率, 设计合理的加工工艺尤为重要。本文作

者研究了在 2 种加工工艺下, TA30 钛合金 $d90\text{ mm}$ 棒材的显微组织及力学性能变化规律, 旨在优化加工工艺, 提高产品成材率, 为其工业化生产提供技术支持。

1 实验

TA30 合金经 3 次真空自耗电弧炉熔炼成 $d440\text{ mm}$ 铸锭, 化学成分见表 1。金相法测得相变温度为 $(1010\pm10)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验用 2 种加工工艺。工艺 A: 铸锭在 β 相区开坯, 两相区拔长锻造成 $d90\text{ mm}$ 棒材; 工艺

B: 铸锭在 β 相区开坯, 两相区镦拔锻造成 $d\ 90\ \text{mm}$ 棒材。

在 2 种工艺锻造的棒材上分别切取检测试样, 按照(980 $^{\circ}\text{C}$, 60 min) $\rightarrow$ WQ+(560 $^{\circ}\text{C}$, 6 h) $\rightarrow$ AC 的热处理制度对其进行热处理。拉伸试样采用标距 25 mm、直径 5 mm 的标准试样。室温拉伸、高温拉伸分别在 Instron-1185 型、Instron-5985 型电子拉伸机上完成, 在 OLMPUS PMG 光学显微镜、JSM 6460 扫描电镜分别进行了组织结构及断口形貌观察。

表 1 TA30 钛合金铸锭的化学成分

Table 1 Chemical composition of TA30 titanium alloy ingot (mass fraction, %)

Al	Sn	Zr	Mo	Nb	Si	Ti
5.58	3.12	3.01	0.99	1.01	0.31	Bal.

2 结果与讨论

2.1 锻制工艺对 TA30 钛合金棒材显微组织的影响

经 2 种工艺锻制的 TA30 钛合金 $d\ 90\ \text{mm}$ 棒材的显微组织如图 1 所示。由图 1 可见: 经(980 $^{\circ}\text{C}$, 60 min) WQ $\rightarrow$ (560 $^{\circ}\text{C}$, 6 h) AC 热处理后, 2 种工艺锻制棒材的组织形貌基本相似, 均为由初生 α 相和条状 β 转变组织构成的双态组织^[5-6], 其中白色等轴状初生 α 相均匀分布在黑色条状 β 相基体上。采用工艺 A 即在两相区拔长棒材的初生等轴 α 相尺寸稍大, 次生的 α 相呈细长的 α 片层, 如图 1(a)所示; 采用工艺 B 即在两相区镦拔棒材中初生等轴 α 相分布均匀, 等轴化程度稍高些, 如图 1(b)所示。一般情况下, 为了达到钛合金的某些力学性能, 选择一定类型的显微组织, 进而确定加热工艺及热处理制度。本研究根据材料最终的使用要求, 为了保证宇航飞行器的使用寿命和可靠性, 选择了具有较高的强度和良好的塑性的双态组织^[7]。因此, 以上 2 种工艺均达到了设计要求。

2.2 锻制工艺对 TA30 钛合金棒材力学性能的影响

表 2 列出 TA30 钛合金 $d\ 90\ \text{mm}$ 棒材的室温及 550 $^{\circ}\text{C}$ 高温拉伸性能。从表 1 可以看出: 2 种工艺锻制棒材的室温、550 $^{\circ}\text{C}$ 高温拉伸性能相当, 都表现出良好的强度和塑性。这与棒材获得的双态组织有关, 因为双态组织具有一定量的等轴初生 α 晶粒使变形协调一致, 而且 β 转变组织基体上的析出物阻碍了滑移变形和位错运动^[8]。

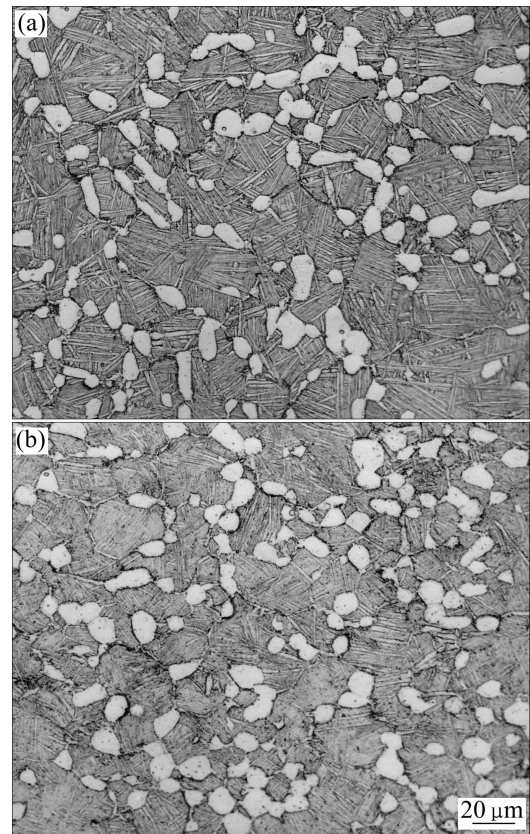


图 1 不同工艺锻制的 TA30 棒材热处理后的显微组织
Fig. 1 Microstructures of TA30 Titanium alloy bars at different forgings: (a) Process A; (b) Process B

表 2 TA30 钛合金棒材拉伸性能

Table 2 Tensile properties of TA30 bars

Temperature	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$	Condition
Room temperature	1 060	965	14.5	44.0	A
	1 070	970	13.0	35.0	B
550 $^{\circ}\text{C}$	780	620	17.0	60.5	A
	785	630	15.5	59.0	B

图 2 所示为 2 种锻造工艺下 TA30 钛合金棒材室温拉伸断口形貌。由图 2 可见: 断口都表现为明显的延性韧窝断裂, 是一种微孔聚合过程^[9]。由于这 2 种工艺下所获得是双态组织, 拉伸变形时, 在等轴 α 和转变 β 的相界面上形成空洞, α 相颗粒对空洞长大起着阻碍作用, 细小的片条状 β 转变组织使裂纹扩展路线更曲折, 从而推迟和抑制了显微裂纹的形成和发展, 提高了合金的强度和塑性。

2.3 锻制工艺对 TA30 钛合金棒材热稳定性能的影响

热稳定性是高温钛合金的一项重要力学性能指

标, 它表征了材料在高温长时间作用下保持塑性和韧性的能力, 也是衡量高温钛合金部件长期使用可靠性的重要参数。针对 TA30 钛合金的用途, 本研究对经 2 种工艺锻制的 TA30 钛合金 $d90\text{mm}$ 棒材进行 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 100 h 、AC 试样热暴露试验, 然后经室温拉伸的力学性能如表 3 所示。可以看到: 2 种工艺下的强度和塑性基本相当, 都有较好的热稳定性; 但与热暴露前的室温力学性能对比, 强度显著升高, 而伸长率和断面率均明显降低, 这可能是由于在高温 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 长达 100 h 热暴露的过程中, 析出物的强化作用使得强度升高, 而随着热暴露时间的延长, 试样表面被氧化, 还可能析出 Ti_3Al 相, 使得塑性下降^[1,10]。

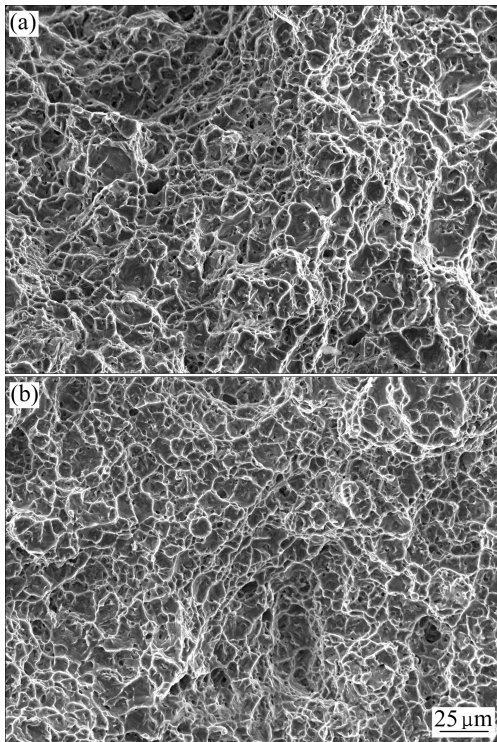


图 2 不同工艺锻制的 TA30 棒材热处理后的断口形貌
Fig. 2 Fractographies of TA30 Titanium alloy bars at different forgings: (a) Process A; (b) Process B

表 3 TA30 钛合金棒材热暴露后室温拉伸性能
Table 3 Tensile properties of TA30 bars at elevated temperature

Condition	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
A	1 150	1 070	7.0	11.5
B	1 130	1 090	6.5	11.0

通过以上试验结果对比, 采用 2 种工艺锻制的 TA30 钛合金 $d90\text{ mm}$ 棒材均获得了双态组织, 室温、

高温力学性能和 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热稳定性良好, 性能指标相当, 都达到了使用要求。但由于 TA30 合金变形抗力大, 对温度很敏感, 在锻造的过程中容易开裂, 火次修磨量大, 使得成材率降低, 而且锻造过程控制稍有偏差, 会对最终产品质量的一致性和稳定性产生影响, 因此综合考虑, 采用工艺 A 可以简化工序, 提高成材率和生产效率, 是工业化生产的有效途径。

3 结论

- 1) 对 TA30 钛合金 $d90\text{ mm}$ 棒材, 采用在两相区拔长和锻造 2 种热加工工艺均可获得双态组织, 室温、 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温力学性能及热稳定性性能良好, 达到了使用要求。
- 2) 采用在两相区拔长即工艺 A 可以简化工序, 提高成材率和生产效率, 是工业化生产的有效途径。

REFERENCES

[1] 韩传玺, 张仁岐. Ti-53311S 合金的蠕变和热稳定性的研究[J]. 钛科学与工程, 1986(Suppl.): 524-545.
HAN Chuan-xi, ZHANG Ren-qi. Creep and fractography of Ti-53311S alloy [J]. Titanium Science and Engineering, 1986(Suppl.): 524-545.

[2] 许国栋, 王凤娥. 高温钛合金的发展和应用[J]. 稀有金属, 2008, 32(6): 774-779.
XU Guo-dong, WANG Feng-e. Development and application on high-temperature Ti-based alloys [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(6): 774-779.

[3] 王金友, 葛志明. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 208-210.
WANG Jin-you, GE Zhi-ming. Titanium alloy for aerospace [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing House, 1985: 208-210.

[4] 王蕊宁, 奚正平, 赵永庆, 等. Ti53311S 合金热加工工艺及组织性能[J]. 稀有金属材料与工程. 2008, 37(增刊 3): 273-276.
WANG Rui-ning, XI Zheng-ping, ZHAO Yong-qing, et al. Hot work process, microstructure and mechanical properties of Ti53311S alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S3): 273-276.

[5] 李四清, 刘瑞民. 一种高温钛合金的显微组织和力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(3): 430-433.
LI Si-qing, LIU Rui-min. microstructure and mechanical properties of a high-temperature titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(3): 430-433.

[6] LEYENS C, PETERS M. 钛与钛合金[M]. 北京: 化学工业出

- 版社, 2005: 27–29.
- LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 27–29.
- [7] 张 翥, 王群骄, 莫 畏. 钛的金属学及热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 223–225.
- ZHANG Zhu, WANG Qun-jiao, MO Wei. Metallography and heat treatment of titanium [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2009: 223–225.
- [8] 倪沛彤, 韩明臣, 杨建朝, 等. 热处理制度对Ti53311S钛合金棒材显微组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S3): 492–494.
- NI Pei-tong, HAN Ming-cheng, YANG Jian-chao, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti53311S [J]. Rare Metal Materials and Engineering. 2008, 37(S3): 492–494.
- [9] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 力学工业出版社, 1995: 189–195.
- SU De-lin. Mechanical properties of metals [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995: 189–195.
- [10] 杨冠军, 邓 炬, 吴之乐, 等. 热处理工艺对Ti-633G合金组织及性能的影响[J]. 钛科学与工程, 1990(Suppl.): 249–250.
- YANG Guan-jun, DENG Ju, WU Zhi-le, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-633G titanium alloy [J]. Titanium Science and Engineering, 1990(Suppl.): 249–250.

(编辑 陈爱华)