

TA15 钛合金中板组织与力学性能研究

张 苗¹, 孙梦奇¹, 马佳琨^{1,2}, 强刚刚¹, 王乐豪¹, 郭金榜¹, 王勤波¹

(1. 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

(2. 宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘 要: 采用一次换向 + 四火次轧制、二次换向 + 四火次轧制和一次换向 + 三火次大变形轧制 3 种工艺制备了厚度 10.0 mm 的 TA15 钛合金中板, 研究了轧制工艺对板材显微组织和力学性能的影响。结果表明: 3 种 TA15 钛合金中板显微组织均为 $\alpha+\beta$ 两相区加工组织, 但采用二次换向 + 四火次轧制的样品 B 显微组织中初生 α 相尺寸最为细小、等轴化程度最高; 3 种 TA15 钛合金板材室温和高温力学性能均符合 GJB 2505A—2008 标准要求, 但采用一次换向 + 三火次大变形轧制的样品 C 室温和 500 °C 高温抗拉强度横纵向差异最小, 500 °C 高温持久性能最佳。

关键词: TA15 钛合金; 中板; 轧制工艺; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG337.6; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)04-040-04

Study on Microstructure and Mechanical Properties of TA15 Titanium Alloy Medium Plate

Zhang Miao¹, Sun Mengqi¹, Ma Jiakun^{1,2}, Qiang Ganggang¹, Wang Lehao¹, Guo Jinbang¹, Wang Qinbo¹

(1. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China)

(2. Baoti Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: TA15 titanium alloy medium plates with thickness of 10.0 mm were prepared by three kinds of rolling processes, which were once reversing + four heat rolling, twice reversing + four heat rolling and once reversing + three heat large deformation rolling. Then the effect of rolling process on the microstructures and mechanical properties were investigated. The results show that the microstructures of three types of 10.0 mm TA15 titanium alloy medium plates are all processed in the $\alpha + \beta$ two-phase zone, while the primary α phase of sample B prepared by twice reversing + four heat rolling process is the finest and the most spheroidized. All mechanical properties at room-temperature and high-temperature of three types of TA15 titanium alloy plates meet the standard requirements of GJB 2505A—2008, and the transverse and longitudinal differences of tensile strength at room-temperature and high-temperature of the sample C prepared by once reversing + three heat large deformation rolling process are the smallest, and the stress rupture properties at 500 °C are the most excellent.

Keywords: TA15 titanium alloy; medium plate; rolling process; microstructure; mechanical properties

TA15 (Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr) 钛合金属于高 Al 当量的近 α 型钛合金, 其既有 α 型钛合金良好的热强性和可焊性, 又有接近于 $\alpha-\beta$ 型钛合金的工艺塑性, 长时间工作温度可达 500 °C, 在航空航天等领域得到了广泛应用^[1-3]。TA15 钛合金半成品主要有板材、棒材、锻件、型材、铸件等, 其中板材占有重要地位^[4-6]。

随着 TA15 钛合金在飞机结构和发动机上应用的深入, 对板材性能也提出了更为严苛的要求, 关于 TA15 钛合金板材的研究也在不断丰富^[7-10]。杨健等^[7]研究了不同轧制工艺对 TA15 钛合金薄板组织及力学性能的影响; 刘瑞民等^[8]研究了热处理参数对 TA15 钛合金薄板和厚板拉伸性能和显微组织的影响; 王蕊宁等^[9]分析了不同火次轧制过程中 TA15 钛合金板材的组织变化; 郭志军等^[10]探讨了变形参数对 TA15 钛合金厚板显微组织及

收稿日期: 2023-05-07

通信作者: 张苗 (1991—), 女, 工程师。

力学性能的影响。但目前关于 TA15 钛合金中板工业化生产中轧制工艺与组织性能关系的研究仍较为缺乏。

本研究采用 3 种不同轧制工艺制备 TA15 钛合金中板,分析不同板材间组织和性能的差异,建立工艺-组织-性能之间的关系,以期为工业化生产 TA15 钛合金中板工艺的制定与选择提供参考。

1 实 验

实验材料为采用真空自耗电弧炉经 3 次熔炼制备的 TA15 钛合金铸锭,金相法测定相变点 T_{β} 为 996 °C。铸锭开坯后,采用万吨油压机锻造加工成 240 mm 厚锻坯,其主要化学成分见表 1。

表 1 TA15 钛合金锻坯化学成分 (w%)

Table 1 Chemical composition of TA15 titanium alloy forging billet

Ti	Al	Mo	V	Zr	Fe	O	C	N	Si
Bal.	6.5	1.6	1.4	2.0	0.04	0.08	0.01	≤0.01	0.02

采用 3 种工艺在 1200 mm 四辊可逆式热轧机上轧制锻坯,得到厚度为 10.0 mm 的成品 TA15 钛合金中板。一火开坯加热温度为 $T_{\beta} - (20 \sim 50)$ °C,其他火次加热温度为 $T_{\beta} - (30 \sim 60)$ °C,各火次变形量为 40%~70%。3 种轧制工艺如下:工艺 I 为一次换向 + 四火次轧制;工艺 II 为二次换向 + 四火次轧制;工艺 III 为一次换向 + 三火次大变形轧制。通过对比工艺 I 与工艺 II,分析换向次数对 TA15 钛合金中板显微组织和力学性能的影响;

通过对比工艺 I 与工艺 III,分析变形量对 TA15 钛合金中板显微组织和力学性能的影响。

工艺 I、工艺 II 和工艺 III 轧制的 TA15 钛合金中板经 840 °C/1 h/AC 退火处理后,标记为样品 A、样品 B 和样品 C,分别切取横、纵向试样,进行显微组织观察、室温和高温力学性能检测。金相试样经腐蚀液 (5%HF + 12%HNO₃ + 83%H₂O, 体积分数) 浸蚀 5 s 后,按照 GB/T 5168—2008 标准在 AXIOVERT 200MAT 金相显微镜下进行组织观察。室温和 500 °C 高温拉伸性能分别按照 GB/T 228—2002 标准和 GB/T 228.2—2015 标准在 INSTRON 5885 电子万能材料拉伸试验机和 TSE105D-Z 高温拉伸试验机上测试,以 3 个平行试样的平均值作为测试结果。高温持久性能按照 GB/T 2039—2012 标准在 RD-50 微控电子式蠕变持久试验机上进行,测试条件分别为:①在 500 °C/470 MPa 下持续 70.5 h;②在 500 °C/440 MPa 下持续 121 h。

2 结果与分析

2.1 显微组织

3 种 TA15 钛合金中板显微组织如图 1 所示。从图 1 可以看出,3 种 TA15 钛合金中板显微组织均为 $\alpha + \beta$ 两相区加工组织,无连续平直的晶界 α 相,原始 β 晶界被充分破碎,符合 GJB 2505A—2008 《航空用钛及钛合金板材和带材规范》中对 TA15 钛合金板材显微组织的要求。相比之下,样品 B 初生 α 等轴化程度较好,样品 A 次之,样品 C 出现大量拉长的初生 α 相。可见,增加换向次数有利于提高 TA15 钛合金中板初生 α 相等轴化程

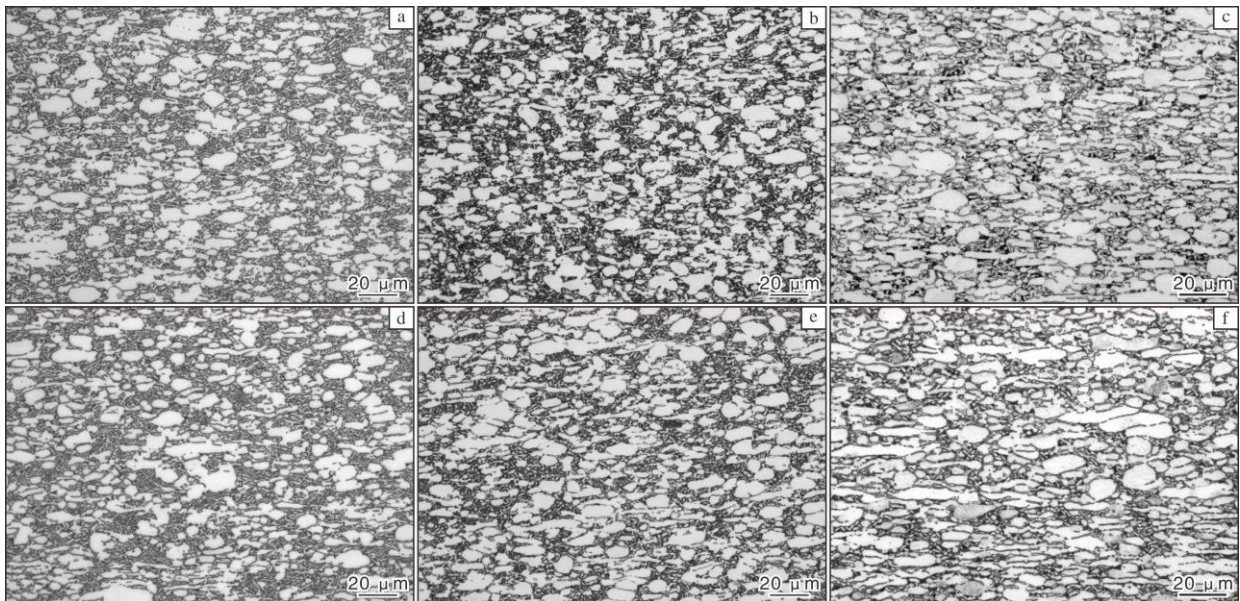


图 1 3 种 TA15 钛合金中板的显微组织

Fig.1 Microstructures of TA15 titanium alloy medium plates: (a) Sample A, transverse; (b) Sample B, transverse; (c) Sample C, transverse, (d) Sample A, longitudinal; (e) Sample B, longitudinal; (f) Sample C, longitudinal

度，而大变形轧制使得初生 α 相拉长程度加剧。

采用 Image-Pro Plus 6.0 软件对 3 种 TA15 钛合金中板初生 α 相尺寸进行测量统计，结果见表 2。从表 2 可以看出，样品 B 的初生 α 相最为细小，尺寸为 6.7 μm ；样品 C 次之，尺寸为 7.9 μm ；而样品 A 的初生 α 相最为粗大，尺寸为 9.4 μm 。这表明增加换向次数或者采用大变形轧制均有助于细化组织，且前者效果更为显著。

表 2 TA15 钛合金中板初生 α 相尺寸 (μm)

Table 2 Primary α phase size of TA15 titanium alloy medium plates

Sample	Transverse	Longitudinal
A	9.4	9.4
B	6.7	6.7
C	7.9	7.9

2.2 室温力学性能

3 种 TA15 钛合金中板的室温拉伸性能如图 2 所示。从图 2 可以看出，3 种 TA15 钛合金中板横向抗拉强度、屈服强度和延伸率均高于纵向，结果也均符合 GJB 2505A—2008 标准中对 TA15 钛合金板材抗拉强度 (930~1130 MPa)、屈服强度 (≥ 855 MPa) 和延伸率

($\geq 8\%$) 的要求，且富余量较高。其中，样品 A 和样品 B 的横纵向抗拉强度和屈服强度均相差不大，而样品 C 的横向抗拉强度和屈服强度较低，纵向抗拉强度和屈服强度明显增加。3 种 TA15 钛合金中板的横纵向延伸率差别不大。通过计算可知，样品 A、样品 B 和样品 C 的横纵向抗拉强度的差值分别为 53、72 和 7 MPa，横纵向屈服强度的差值分别为 66、77 和 19 MPa，可见样品 C 的横纵向强度差异最小。这表明换向次数对 TA15 钛合金中板室温拉伸性能影响不大，而大变形轧制可有效减小 TA15 钛合金中板横纵向室温强度差异。

研究^[11-13]认为，板材轧制后横纵向力学性能差异是由于材料在不同方向上的滑移能力不同造成的，而不同方向上的滑移能力与轧制后的织构密不可分。Gey 等^[14]对织构类型及其形成机制研究发现，当初生 α 相与 β 相保持 Burger's 取向关系时，在热轧变形后的冷却过程中， $\beta \rightarrow \alpha$ 相变将优先形成特定取向的 α 相，从而导致局部变形织构被保留；而当大变形充分破坏了初生 α 相与 β 相之间的 Burger's 取向关系时，将减少织构的形成。因此，相对于样品 A 和样品 B，采用大变形轧制的样品 C 变形更为充分，其织构强度弱，故而横纵向力学性能差异较小。

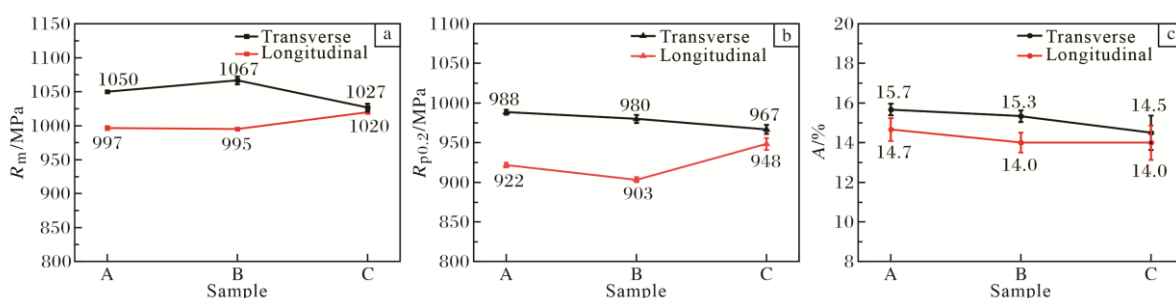


图 2 3 种 TA15 钛合金中板的室温拉伸性能

Fig.2 Room temperature tensile properties of TA15 titanium alloy medium plates: (a) tensile strength; (b) yield strength; (c) elongation

2.3 高温力学性能

2.3.1 高温拉伸性能

3 种 TA15 钛合金中板在 500 $^{\circ}\text{C}$ 高温下的抗拉强度如图 3 所示。从图 3 可以看出，3 种 TA15 钛合金中板的高温抗拉强度均符合 GJB 2505A—2008 要求 (500 $^{\circ}\text{C}$ 高温抗拉强度 ≥ 635 MPa)，且富余量较高。与室温抗拉强度变化一致，样品 A 在 500 $^{\circ}\text{C}$ 的高温横纵向抗拉强度与样品 B 相差不大，且 2 种板材横纵向抗拉强度差值均为 66 MPa。而与样品 A 和样品 B 相比，样品 C 横向高温抗拉强度降低，纵向增大，其横纵向抗拉强度差异明显较小，仅为 6 MPa。该结果同样表明，换向次数对 TA15 钛合金中板高温拉伸性能的影响不大，而大变形轧制有利于横纵向高温抗拉强度差异的减小。

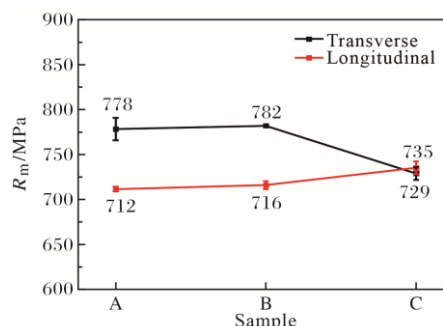


图 3 TA15 钛合金中板的 500 $^{\circ}\text{C}$ 高温抗拉强度

Fig.3 High temperature tensile strength at 500 $^{\circ}\text{C}$ of TA15 titanium alloy medium plates

2.3.2 高温持久性能

在 500 $^{\circ}\text{C}$ /470 MPa 条件下，3 种 TA15 钛合金中板

的持久性能检测结果显示, 横纵向试样均可保持 70.5 h 未发生断裂, 表现良好。

在 500 °C/440 MPa 条件下, 3 种 TA15 钛合金中板的持久性能见表 3。从表 3 可以看出, 样品 A 和样品 B 均有 1 个纵向试样提前断裂, 其余 2 个纵向试样和 3 个横向试样保持 121 h 未发生断裂; 样品 C 横纵试样均保持 121 h 未发生断裂。由此可见, 采用一次换向 + 三火次大变形轧制的样品 C 持久性能最佳。

表 3 3 种 TA15 钛合金中板在 500 °C/440 MPa 条件下的持久寿命 (h)

Table 3 Stress rupture life of TA15 titanium alloy medium plates at condition of 500 °C/440 MPa

Sample	Transverse			Longitudinal		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#
A	≥121.0	≥121.0	≥121.0	110.0	≥121.0	≥121.0
B	≥121.0	≥121.0	≥121.0	112.6	≥121.0	≥121.0
C	≥121.0	≥121.0	≥121.0	≥121.0	≥121.0	≥121.0

3 结 论

(1) 分别采用一次换向 + 四火次轧制、二次换向 + 四火次轧制和一次换向 + 三火次大变形轧制工艺制备出 10.0 mm 厚 TA15 钛合金中板, 其组织均为 $\alpha+\beta$ 两相区加工组织。采用二次换向 + 四火次轧制的样品 B 初生 α 相最为细小, 等轴化程度最高, 而采用一次换向 + 三火次大变形轧制的样品 C 初生 α 相大小次之, 但其拉长程度最为显著。

(2) 3 种 TA15 钛合金中板横纵向室温拉伸性能和 500 °C 高温拉伸性能均符合 GJB 2505A—2008 标准中对 TA15 钛合金板材的要求。采用一次换向 + 三火次大变形轧制的样品 C 室温抗拉强度、屈服强度及 500 °C 高温抗拉强度横纵向差异最小。

(3) 3 种 TA15 钛合金中板在 500 °C/470 MPa 条件下的持久性能均表现良好, 而在 500 °C/440 MPa 条件下采用一次换向 + 三火次大变形轧制的样品 C 持久性能最佳。

(4) 工业化生产中要获得初生 α 相细小、等轴化程度高的 TA15 钛合金中板时, 可优先选用二次换向 + 四火次轧制工艺; 而需要获得力学性能横纵向差异较小、持久性能更为稳定可靠的 TA15 钛合金中板时, 可优先选用一次换向 + 三火次大变形轧制工艺。

参考文献 References

- [1] 黄旭, 朱知寿, 王红红. 先进航空钛合金材料与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 26-47.
- [2] 姚彭彭, 李萍, 李成铭, 等. TA15 钛合金 β 热变形行为及显微组织[J]. 稀有金属, 2015, 39(11): 967-974.
- [3] Yin Z K, Wang C, Sun Z C, et al. Parameter matching of near- β forging + solution and aging treatment for near- α titanium alloy with tri-modal microstructure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(7): 2409-2419.
- [4] Wan Y G, Luo F, Xie L S, et al. Numerical and experimental investigations on the effect of shot peening intensity on the surface integrity of TA15 titanium alloy profiles[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(6): 1979-1985.
- [5] 张永强, 毛小南, 潘浩, 等. 细晶 TA15 钛合金板材制备工艺及其超塑性研究[J]. 钛工业进展, 2018, 35(1): 20-23.
- [6] Zhao H J, Wang B Y, Liu G, et al. Effect of vacuum annealing on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy sheets[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(6): 1881-1888.
- [7] 杨健, 党鹏, 郝亚鑫, 等. 轧制工艺对 TA15 钛合金薄板组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(11): 157-159.
- [8] 刘瑞民, 李兴无, 沙爱学. TA15 合金板材的组织 and 性能研究[J]. 材料开发与应用, 2005, 20(4): 23-26.
- [9] 王蕊宁, 李辉, 周玉川, 等. TA15 钛合金板材轧制变形中的球化行为[J]. 热加工工艺, 2015, 44(1): 120-124.
- [10] 郭志军, 王俭, 王红武. 变形参数对 TA15 合金厚板显微组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 40-42.
- [11] Bache M R, Evans W J. Impact of texture on mechanical properties in an advanced titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319-321: 409-414.
- [12] 许亚利, 吴小文, 赖敏杰, 等. 钛合金变形织构及其影响研究进展[J]. 铸造技术, 2022, 43(12): 1021-1031.
- [13] Fan J K, Huang H, Xue X Y, et al. Hot rolled Ti6321 alloy sheets with different initial microstructures: microstructure, mechanical properties, and anisotropy characteristics[J]. Frontiers in Materials, 2020, 7: 110.
- [14] Gey N, Bocher P, Uta E, et al. Texture and microtexture variations in a near- α titanium forged disk of bimodal microstructure[J]. Acta Materialia, 2012, 60(6/7): 2647-2655.