

热矫平温度对 STA 态 Ti-6Al-4V 合金板材显微组织与力学性能的影响

王 田, 张鼎祖, 赵小龙, 赵亚琢, 同晓乐

(新疆湘润新材料科技有限公司, 新疆 哈密 839000)

摘 要: 研究了 5 种热矫平温度对固溶时效(STA)态 Ti-6Al-4V 合金板材组织与力学性能的影响。结果表明: 在固溶与时效处理之间增加热矫平工序时, 随着热矫平温度(700~860 °C)升高, 初生 α 相的平均晶粒尺寸和含量较 STA 态基本保持不变; 次生 α 相的片层厚度和长度显著增加, 组织形貌由混乱交织的细小片层状逐渐转变为网篮状。随着热矫平温度升高, 板材强度持续降低, 温度每升高 40 °C, 抗拉强度和屈服强度降幅约为 3%; 断后伸长率在快速提升后趋于平稳。依据 AMS 4904C 标准, 为实现板形矫平并确保板材室温拉伸性能满足产品标准, 热矫平温度应不高于 780 °C; 当热矫平温度高于 780 °C 时, 板材室温抗拉强度和屈服强度均低于产品性能指标。

关键词: Ti-6Al-4V 合金; 热矫平温度; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)04-019-05

Influence of Hot Flattening Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of STA Ti-6Al-4V Alloy Plate

Wang Tian, Zhang Dingzu, Zhao Xiaolong, Zhao Yazhuo, Tong Xiaole

(Xinjiang Xiangrun New Material Technology Co., Ltd., Hami 839000, China)

Abstract: The effect of five hot flattening temperatures on the microstructure and mechanical properties of solution treatment and aging (STA) Ti-6Al-4V alloy plates was investigated. The hot flattening process was performed at 700–860 °C between solution treatment and aging. The results indicate that as the hot flattening temperature increases, the average grain size and content of primary α phase remain essentially unchanged compared to those in the STA condition. However, both the thickness and length of secondary α lamellae increase significantly, and the microstructure evolves from a fine interwoven lamellar structure to a basket-weave morphology. Concurrently, with increasing hot flattening temperature, the tensile strength and yield strength decrease continuously, with an approximate 3% reduction per 40 °C increase, while the elongation after fracture increases rapidly initially and then levels off. According to AMS 4904C, the hot flattening temperature should not exceed 780 °C to ensure that both flatness and room-temperature tensile properties meet the product standard requirements. When the hot flattening temperature exceeds 780 °C, the room-temperature tensile strength and yield strength of the plate fall below the specified requirements.

Key words: Ti-6Al-4V alloy; hot flattening temperature; microstructure; mechanical properties

钛及钛合金具有密度小、比强度高、无磁性、加工成形性好、耐腐蚀性能优异等特点, 在航空航天、

海洋装备、石油化工等领域广泛应用^[1-2]。在众多钛合金中, Ti-6Al-4V 合金的用量最大, 占全部钛合金用量的 60%以上^[3-5]。

Ti-6Al-4V 合金板材通常以普通退火态使用, 固溶+时效热处理板材因强度和硬度较高、后续机械加工难度大而应用较少。随着新型航空器、无人航空装备

收稿日期: 2026-04-28

基金项目: 新疆人才发展基金资助项目(XJRC-2025-GX-PY-GCS-074)

通信作者: 王田(1983—), 男, 正高级工程师。

及高超音速飞行器等的快速发展,对钛合金材料的强韧性提出了更高要求。例如,美国 AMS 4904C 标准规定 Ti-6Al-4V 合金板材须以固溶时效(STA)态交付,极大促进了 STA 态高强韧 Ti-6Al-4V 合金板材的规模化生产和应用。为充分挖掘材料性能潜力,研究人员在 Ti-6Al-4V 合金加工材固溶+时效热处理技术方面开展了大量研究^[6-14],主要集中于固溶温度、固溶时间、固溶后冷却方式、时效温度及时效时间等参数对组织和性能的影响,为工业化生产 STA 态高强韧 Ti-6Al-4V 合金板材提供了依据。目前,工业化生产中常用的热处理制度为:(920~960) °C固溶水淬+(500~600) °C时效空冷。然而,在板材生产过程中,固溶后快速水冷易导致板材变形;由于后续时效温度较低且时效后强度高,无法通过时效工序矫平板材。因此,需在固溶水淬后增加热矫平工序,待板形矫平后再进行时效处理,以满足成品板材的平直度要求。

因此,在固溶与时效处理之间增加了热矫平工序,研究了热矫平温度对 STA 态 Ti-6Al-4V 合金板材组织

和力学性能的影响,并依据 AMS 4904C 标准对板材力学性能进行评价,以期为该板材批量化生产提供工艺依据。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为经 3 次真空自耗电弧炉熔炼制备的 Ti-6Al-4V 合金铸锭,其直径为 720 mm,化学成分(质量分数)为:Al 6.4%~6.5%, V 4.3%~4.4%, Fe 0.16%~0.18%, O 0.16%~0.18%, C 0.006%~0.007%, N 0.003%~0.005%, H <0.001%, 余量为 Ti。铸锭在 β 单相区开坯锻造,随后在 $\alpha + \beta$ 两相区进行镦拔变形,制成板坯;板坯在 $\alpha + \beta$ 两相区经两火次轧制成厚度为 18 mm 的板材。板材轧制态(R 态)显微组织主要由受压变形的长条状 α 相和等轴 α 相、热塑性变形过程中因动态再结晶产生的少量细小颗粒状 α 相以及基体 β 相组成,初生 α 相含量约为 75%(体积分数,下同),如图 1 所示。依据 EN 3684 标准,采用金相法测得该合金 β 转变温度为 992 °C。

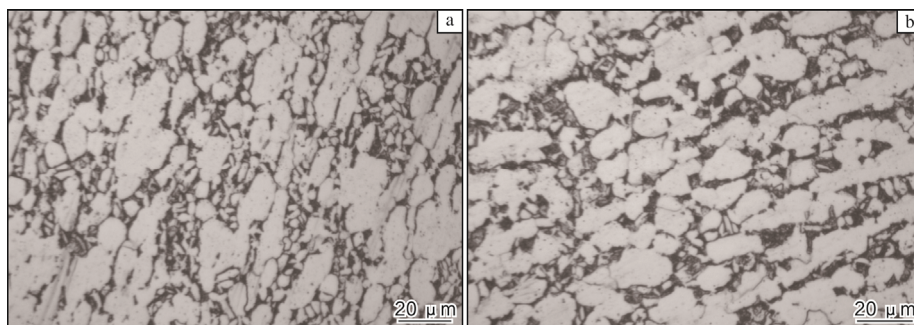


图 1 Ti-6Al-4V 合金板材 R 态显微组织

Fig.1 Microstructures of hot-rolled Ti-6Al-4V alloy plate: (a) transverse; (b) longitudinal

1.2 试样热处理

在制备的 R 态 Ti-6Al-4V 合金板材上切取试样坯。采用炉温均匀性达 ± 5 °C 的高精度箱式电阻热处理炉,模拟生产过程中的“固溶+时效”与“固溶+热矫平+时效”两种热处理工艺路线。其中,热矫平工序的加热温度分别设定为 700、740、780、820、860 °C。为保证试验准确性,热处理前按照 AMS 2750H 标准对热处理炉进行炉温均匀性和系统精度测试与标定。具体热处理工艺如表 1 所示。

1.3 组织与性能检测

从热处理后的试样坯上截取横向(T)和纵向(L)试样,按照 ASTM E112 标准加工成尺寸为 18 mm×25 mm×25 mm 的金相试样,按照 ASTM E8/E8M 标准加工成 $\phi 12.5$ mm 的标准圆柱形室温拉伸试样。金相试样经

机械研磨抛光后,用 HF + HNO₃ + H₂O 腐蚀液(体积比为 5 : 10 : 85)浸蚀。采用 OLYMPUS BX53M 型光学显微镜(OM)观察显微组织。采用 INSTRON 电子万能试验机测试室温拉伸性能。

2 结果与分析

2.1 显微组织

Ti-6Al-4V 合金板材经固溶+时效热处理后的显微组织如图 2 所示。从图 2 可以看出,经固溶+时效处理后, Ti-6Al-4V 合金板材组织类型由 R 态的等轴组织转变为双态组织,初生 α 相完成再结晶后发生球化,形成均匀的等轴状初生 α 相,其含量由 R 态的约 75% 大幅降至约 30%。在固溶水淬过程中,亚稳 β 相发生马氏体转变形成细小的针状 α' 马氏体;在随后的时效

表 1 Ti-6Al-4V 合金板材热处理工艺

Table 1 Heat treatment processes of Ti-6Al-4V alloy plate

No.	Heat treatment process	Type
STA	950 °C/1 h/WQ + 550 °C/4 h/AC	Solution + aging
HT1	950 °C/1 h/WQ + 700 °C/15 min/AC + 550 °C/4 h/AC	
HT2	950 °C/1 h/WQ + 740 °C/15 min/AC + 550 °C/4 h/AC	
HT3	950 °C/1 h/WQ + 780 °C/15 min/AC + 550 °C/4 h/AC	Solution + hot flattening + aging
HT4	950 °C/1 h/WQ + 820 °C/15 min/AC + 550 °C/4 h/AC	
HT5	950 °C/1 h/WQ + 860 °C/15 min/AC + 550 °C/4 h/AC	

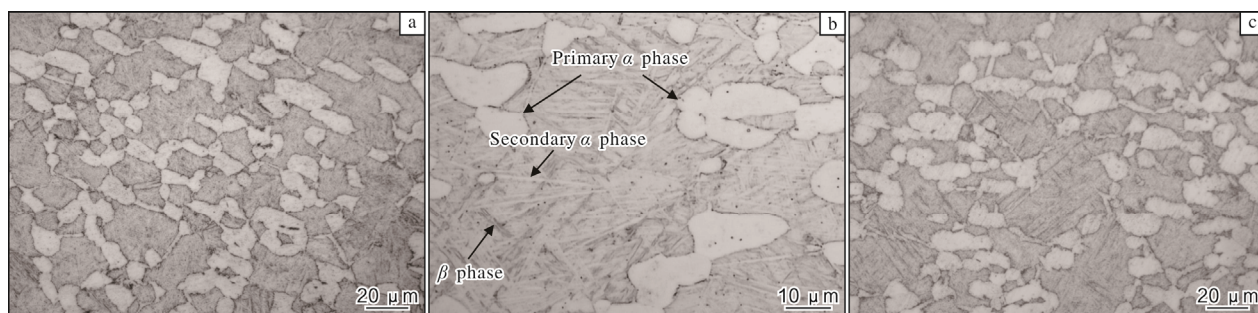


图 2 Ti-6Al-4V 合金板材经固溶+时效处理后的显微组织

Fig.2 Microstructures of Ti-6Al-4V alloy plate after solution + aging treatment: (a, b) transverse; (c) longitudinal

过程中 α' 相分解, 最终形成极其细小的次生 α 相和 β 相交替排列的片层结构集束。这种多方向交叉生长的特征主要是由于固溶水冷后产生了高密度位错, 且位错滑移带存在多组滑移系, 在时效过程中不同位错应力场诱导多种 α 变体同时形核, 针状 α 相相互垂直或交叉生长, 从而呈现出编织网状形态^[15-17]。

Ti-6Al-4V 合金板材经固溶+热矫平+时效处理后的显微组织如图 3 所示。与经固溶+时效处理的 Ti-6Al-4V 合金板材(图 2)相比, 经固溶+热矫平+时效处理后, 显微组织中的相组成、相比例及相形态均发生了明显变化。由图 3 可知, 随着热矫平温度的升高, 初生 α 相的平均晶粒尺寸和含量基本保持不变, 而次生 α 相的片层厚度和长度显著增加, 其形貌由混乱交织的细小片层状逐渐转变为规整分布的网篮状。对比图 3e、3f 可以看出, Ti-6Al-4V 合金板材横向与纵向组织表现出高度的一致性。

2.2 室温拉伸性能

Ti-6Al-4V 合金板材的室温拉伸性能如图 4 所示。从图 4 可以看出, Ti-6Al-4V 合金板材经 950 °C/1 h/WQ + 550 °C/4 h/AC 热处理后, 室温抗拉强度达到 1200 MPa 以上, 而断后伸长率相对较低。这是由于 Ti-6Al-4V 合金在两相区温度快速水冷时发生马氏体相变, 形成亚稳定过饱和固溶体 α' 马氏体; 在随后的时效过程中,

α' 马氏体分解, 在晶粒内部以及相界面处析出尺寸细小且长宽比较大的片层相间的次生 α 相与 β 相。这使得相界面增多, 位错在运动过程中遇到相界面受阻而塞积, 相邻晶粒被迫发生滑移, 引起宏观塑性变形, 从而提高合金的强度^[18]。

Ti-6Al-4V 合金板材经 950 °C/1 h/WQ + (700~860) °C/15 min/AC + 550 °C/4 h/AC 处理后, 随着热矫平温度的升高, 抗拉强度和屈服强度均持续降低, 且热矫平温度每升高 40 °C, 抗拉强度和屈服强度约降低 3%; 断后伸长率则先快速升高后趋于平稳。这是由于随着热矫平温度升高, α' 马氏体分解, 析出的 β 相合并长大并向马氏体板条界面处聚集, 导致次生 α 片层间距增大, 析出强化效果减弱, 从而使强度降低、塑性提高^[19]。

当热矫平温度提升至 780 °C 时, Ti-6Al-4V 合金板材的室温抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 1107 MPa、1024 MPa 和 13.5%, 此时板材室温强度已接近 AMS 4904C 标准规定的最小允许值(抗拉强度 ≥ 1103 MPa、屈服强度 ≥ 1000 MPa、断后伸长率 $\geq 8\%$)。当热矫平温度继续升高时, 板材室温拉伸性能低于 AMS 4904C 标准要求; 当温度升至本次试验最高值 860 °C 时, 板材室温抗拉强度降至最低。因此, 依据 AMS 4904C 标准, 对 Ti-6Al-4V 合金板材在固溶

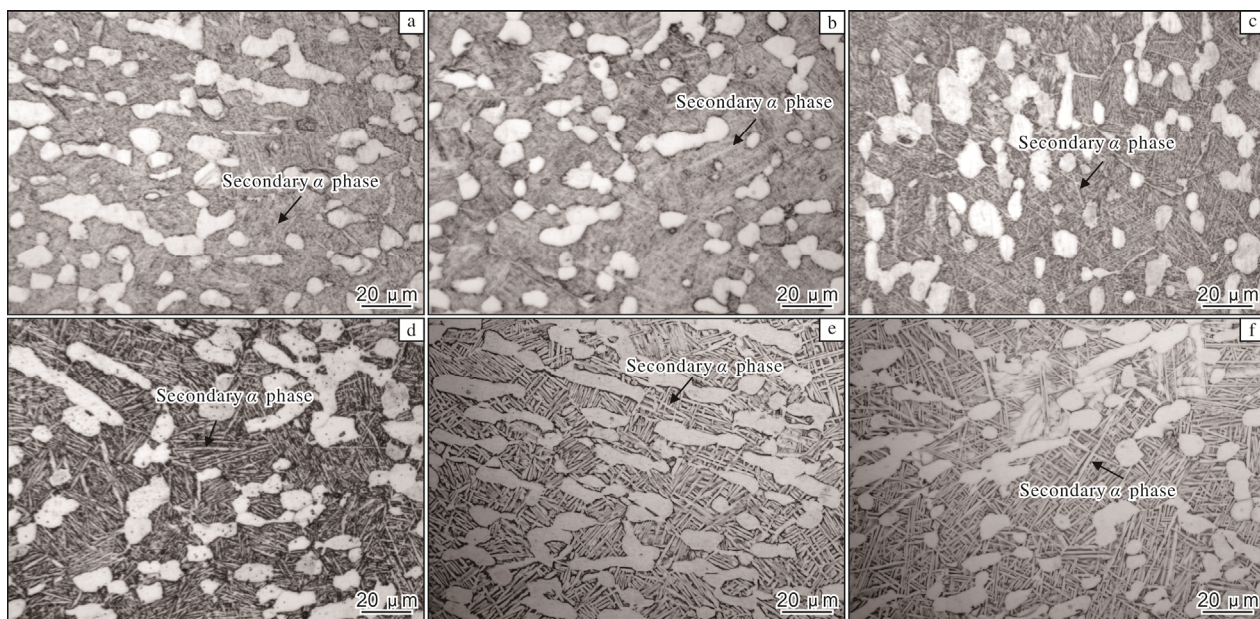


图3 Ti-6Al-4V 合金板材经固溶+热矫平+时效处理后的显微组织

Fig.3 Microstructures of Ti-6Al-4V alloy plate after solution + hot flattening + aging treatment: (a) HT1, transverse; (b) HT2, transverse; (c) HT3, transverse; (d) HT4, transverse; (e) HT5, transverse; (f) HT5, longitudinal

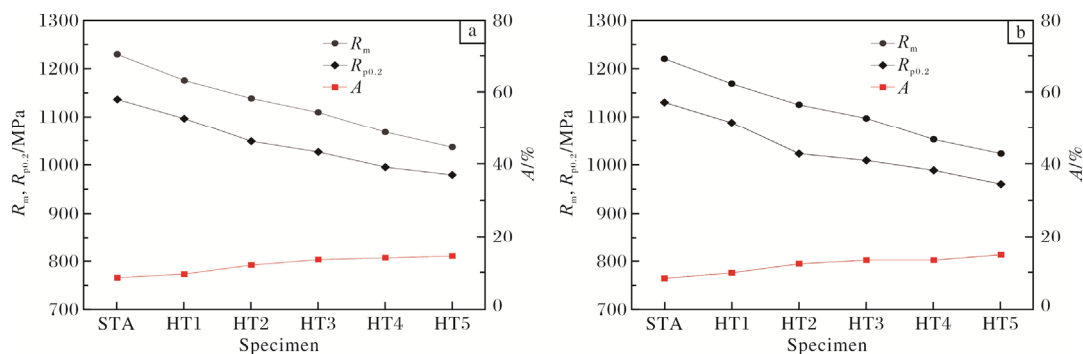


图4 Ti-6Al-4V 合金板材的室温拉伸性能

Fig.4 Room temperature tensile properties of Ti-6Al-4V alloy plate: (a) transverse; (b) longitudinal

与时效热处理之间进行热矫平时，加热温度不高于 780 °C，方可在保证板形矫平的同时使室温拉伸性能满足产品标准；当热矫平温度高于 780 °C 时，板材室温抗拉强度和屈服强度均无法满足产品性能要求。

3 结 论

(1) Ti-6Al-4V 合金板材在固溶与时效热处理之间增加 700~860 °C 热矫平工序时，随着热矫平温度的升高，初生 α 相的平均晶粒尺寸和含量较固溶时效态基本保持不变；次生 α 相的片层厚度和长度显著增加，其形貌由混乱交织的细小片层状逐渐转变为规整有序的网篮状。

(2) 随着热矫平温度的升高，Ti-6Al-4V 合金板材

的抗拉强度和屈服强度均持续降低，且温度每升高 40 °C，抗拉强度和屈服强度约降低 3%；断后伸长率则先快速增加后趋于平稳。

(3) 依据 AMS 4904C 标准，Ti-6Al-4V 合金板材在固溶与时效热处理之间增加热矫平时，热矫平温度不高于 780 °C，方可保证矫平板形的同时使其室温拉伸性能满足产品标准要求；当热矫平温度高于 780 °C 时，板材室温抗拉强度和屈服强度均无法满足产品性能要求。

参考文献 References

- [1] 王桂生, 田荣璋. 钛的应用技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 21-28.
- [2] 殷亚运, 徐希军, 雷小伟, 等. 小孔 TIG 焊技术在中大厚度

- TC4 板上的应用研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(11): 10-14.
- [3] 王磊, 王尧, 李晓峰, 等. 我国钛及钛合金塑性加工技术研究进展与应用现状[J]. 钛工业进展, 2025, 42(5): 43-48.
- [4] 李梁, 孙健科, 孟祥军. 钛合金的应用现状及发展前景[J]. 钛工业进展, 2004, 21(5): 19-24.
- [5] 申超英. TC4 在不同温度下固态渗碳化硼研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(16): 149-151.
- [6] 顾晓辉, 刘俊, 石继红. 淬火、时效温度对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(2): 29-32.
- [7] 张豪胤, 王文焱, 祝要民, 等. 固溶、时效对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(6): 659-661.
- [8] 李欣, 刘鸿羽, 谢嘉琪, 等. TC4 钛合金热处理工艺对其性能影响的研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(Z2): 440-443.
- [9] 景然. 固溶时效对 TC4 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(8): 152-155.
- [10] 任驰强, 丁一明, 李佳佳, 等. 固溶-时效对 TC4 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 湖南有色金属, 2022, 38(2): 44-46.
- [11] 张钧, 杨培智, 杨海欧. 热处理对锻造-增材混合制造 TC4 钛合金结合区组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(10): 2563-2574.
- [12] 刘涛, 柏威, 吴乔国, 等. 热处理对 TC4 钛合金动态力学性能和微观组织的影响[J]. 应用力学学报, 2023, 40(4): 805-813.
- [13] 姚碧波, 彭钰洋, 黎振华, 等. 热处理对选区激光熔化成形大层厚 Ti-6Al-4V 钛合金的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(5): 1235-1244.
- [14] 冉兴, 陈义斯, 文迪, 等. 燃气轮机大型复杂厚壁钛合金铸件整体精铸成形工艺优化[J]. 稀有金属材料与工程, 2026, 55(7): 1701-1708.
- [15] 李钢, 贾蔚菊, 毛新平, 等. 固溶处理冷却方式对近 α 型高温钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(9): 98-106.
- [16] 赵子博, 王国强, 杨晓龙, 等. Ti-6246 中 α 相转变组织的形成机制[J]. 材料研究学报, 2017, 31(10): 796-800.
- [17] 肖树龙, 陈兆琦, 荆科, 等. 热处理对亚稳 β 钛合金显微组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1655-1664.
- [18] 龙玮, 夏麒帆, 张松, 等. 双重退火对形变 TC4 钛合金组织与性能的影响[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2019, 36(5): 50-54.
- [19] 邹海贝. TC4 钛合金热处理强化工艺及相变行为研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.

行业动态

VSMPO-AVISMA 公司推出新型医用钛合金 VST-5

据俄罗斯 VSMPO-AVISMA 公司官网消息, 该公司在全俄钛合金医学应用专题会议上首次公开披露自研医用钛合金 VST-5, 该合金可用于人工关节、骨固定系统、脊柱植入物、心血管构件及牙科种植体等植入医疗器械。

传统医用钛合金长期面临性能取舍难题: Ti-6Al-4V 合金以高强度见长, Ti-6Al-4V ELI 合金则以高塑性和抗裂纹扩展能力为优势, 二者合计约占全球医用钛材消费量的三分之二。VST-5 钛合金则实现了强度与塑性的协同提升, 打破了传统材料中二者难以兼顾的性能权衡。该合金可加工成棒材、板材、锻件、丝材及 3D 打印粉末, 部分产品已完成技术条件注册, 目前正在申请俄罗斯专利。VSMPO-AVISMA 公司已通过 ISO 13485 医疗器械质量管理体系认证, 并具有 VST-5 钛合金生产资质。

VST-5 钛合金的成功研制, 标志着俄罗斯在高端医用钛合金领域实现了从原料出口向高附加值产品自主供应的战略跨越, 将有效缓解西方供应商撤出后俄罗斯对进口医用钛半成品的依赖, 对于保障本土供应链安全、推动本土医疗器械产业升级具有重要意义。

(罗莹、刘凡摘译自 VSMPO-AVISMA 公司官网)