

固溶温度对大规格 Ti6246 合金棒材组织及性能的影响

南 榕¹, 蔡建华¹, 孙花梅¹, 洪 权¹, 赵小花², 黄龙超², 李 钢³, 毛新平³

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

(3. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: 对大规格 Ti6246 合金棒材进行不同温度固溶及相同工艺时效 (593 °C/8 h/AC) 处理, 系统研究固溶温度对合金室温、高温拉伸性能以及蠕变性能的影响。结果表明: 固溶温度由 830 °C 升高到 910 °C, Ti6246 合金固溶+时效处理后呈现典型的双态组织, 初生 α 相 (α_p) 体积分数明显下降, 次生 α 相 (α_s) 体积分数增加; 室温强度随着固溶温度的升高而增大, 固溶温度升至 870 °C 后, 室温强度增加趋势减缓, 900 °C 达到峰值, 随后开始下降, 室温塑性略有下降; 高温屈服强度和高温抗拉强度呈升高趋势, 断后伸长率则较为稳定; 蠕变性能随着固溶温度的升高得到明显改善。Ti6246 合金的最佳热处理工艺为 900 °C/1 h/FAC+593 °C/8 h/AC, 在此条件下合金具有较好的强塑性匹配以及良好的高温蠕变性能 (455 °C/550 MPa/32 h)。其中, 蠕变总应变为 0.677%, 残余应变为 0.076%, 稳态蠕变速率为 $1.2928 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

关键词: Ti6246 合金; 大规格棒材; 固溶温度; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)06-006-06

Effect of Solution Temperature on Microstructure and Properties of Large-sized Ti6246 Alloy Bars

Nan Rong¹, Cai Jianhua¹, Sun Huamei¹, Hong Quan¹, Zhao Xiaohua², Huang Longchao², Li Gang³, Mao Xinping³

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

(2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

(3. AVIC Hunan Institute of Power Machinery Research, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: Large-sized Ti6246 alloy bars were solution-treated at different temperatures, and then subjected to an identical aging process (593 °C/8 h/AC). A systematic study was conducted to explore the impact of solution temperature on the alloy's room-temperature and high-temperature tensile properties, as well as its creep properties. The findings reveal that as the solution temperature is elevated from 830 °C to 910 °C, the Ti6246 alloy develops a characteristic duplex microstructure after solution and aging treatment. Specifically, there is a marked reduction in the volume fraction of the primary α phase (α_p), accompanied by an increase in the volume fraction of the secondary α phase (α_s). Regarding mechanical properties, the room-temperature strength of the alloy exhibits a continuous upward trend with increasing solution temperature. Notably, after the solution temperature reaches 870 °C, the rate of increase in room-temperature strength slows down, peaking at 900 °C before subsequently declining, while the plasticity of the alloy experiences a slight decrease. At high-temperatures, both the yield strength and tensile strength of the alloy demonstrate significant enhancements, with plasticity remaining relatively stable. The creep properties of the alloy are significantly improved with the increase of the solution temperature. The optimal heat treatment for Ti6246 alloy is 900 °C/1 h/FAC+593 °C/8 h/AC. Under this treatment, the alloy exhibits an outstanding balance of strength and plasticity, coupled with superior high-temperature creep properties (at 455 °C/550 MPa/32 h): total strain of 0.677%, residual strain of 0.076%, and steady-state creep rate of $1.2928 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

收稿日期: 2025-09-26

通信作者: 南榕 (1992—), 男, 工程师。

Keywords: Ti6246 alloy; large-size bar; solution temperature; microstructure; mechanical property

钛合金凭借其优异的比强度、卓越的耐腐蚀性以及极为出色的高温稳定性, 在航空航天、能源动力与高端装备制造等尖端领域中, 占据着不可替代的关键地位^[1]。其中, $\alpha+\beta$ 型两相高温钛合金 Ti6246 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo) 通过独特的合金化设计策略, 即利用高 Mo 含量显著强化 β 相, 同时引入 Al、Sn、Zr 等元素有效稳定 α 相, 从而在高温环境下展现出优异的蠕变抗力和热强性, 成为航空发动机压气机盘、叶片等核心部件的首选材料之一^[2]。然而, 随着现代航空发动机向高推重比、长寿命的方向发展, Ti6246 合金需在更高服役温度和复杂交变应力条件下长期稳定运行, 这对材料的组织稳定性、疲劳性能及断裂韧性等关键指标提出了更为严苛的要求。

目前, 研究人员已针对 Ti6246 合金的加工工艺进行了大量研究, 围绕合金的强化机制开展了广泛探讨, 并对其热处理工艺进行了优化研究^[3-5]。然而, 聚焦于高推重比发动机所应用的大规格 Ti6246 合金棒材的工艺优化研究, 目前尚缺乏坚实的研究基础, 相关理论体系与技术支撑仍亟待完善。鉴于此, 本研究选取直径为 230 mm 的大规格 Ti6246 合金棒材作为研究对象, 通过设计多组具有针对性的热处理实验方案, 并综合运用显微组织表征技术以及室温与高温条件下的力学性能测试方法, 系统揭示并阐明热处理制度与显微组织、力学性能之间的内在关联、影响规律与作用机制, 以期为大规格 Ti6246 合金棒材在航空发动机关键构件中的稳定应用提供实验依据与理论支撑。

1 实验

实验材料为两相区锻造加工制成的直径为 230 mm 的大规格 Ti6246 合金棒材, 其锻态组织见图 1, T_β 相变点为 (960 ± 10) °C。



图 1 Ti6246 合金棒材锻态显微组织

Fig.1 Microstructure of as-forged Ti6246 alloy bar

为确保热处理实验能够高度契合工业生产实际工况, 直接从棒材上截取 $\phi 230\text{ mm}\times26\text{ mm}$ 的饼状试

样, 并对其进行不同工艺参数的固溶+时效热处理。其中, 固溶温度严格遵循 AMS 4981 标准, 选取具有代表性的 830、850、870、890、900、910 °C, 时效温度则综合参考相关文献报道^[2-5]及实际生产经验, 固定为 593 °C。具体热处理实验方案见表 1。其中, FAC 代表风冷。

表 1 Ti6246 合金棒材热处理制度

Table 1 Heat treatment processes of Ti6246 alloy bars

No.	Heat treatment process
EP-1	830 °C/1 h/FAC+593 °C/8 h/AC
EP-2	850 °C/1 h/FAC+593 °C/8 h/AC
EP-3	870 °C/1 h/FAC+593 °C/8 h/AC
EP-4	890 °C/1 h/FAC+593 °C/8 h/AC
EP-5	900 °C/1 h/FAC+593 °C/8 h/AC
EP-6	910 °C/1 h/FAC+593 °C/8 h/AC

从钛饼 $R/2$ 处沿纵向取金相试样, 加工成 $\phi 10\text{ mm}\times15\text{ mm}$ 的棒状样, 观察面为横截面。金相试样所用腐蚀试剂由 HF、 HNO_3 和 H_2O 按体积比 1:3:7 混合而成, 采用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜进行微观组织观察。从热处理后钛饼的 $R/2$ 位置处沿弦向取样 (如图 2 所示), 制备室温、高温拉伸试样以及蠕变试样。室温及高温拉伸试验参照 GB/T 228.1—2021 与 GB/T 228.2—2021 标准, 采用编号为 R7 的短标距试样, 蠕变试样参照 GB/T 2039—2024 标准取样加工。

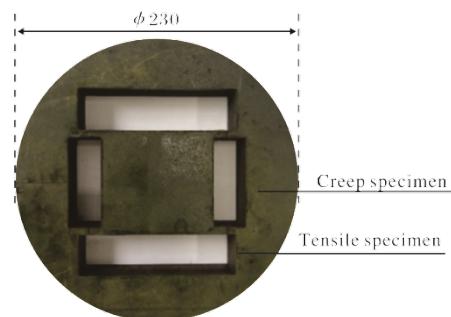


图 2 取样位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling locations

室温拉伸性能采用 HTZC-32135 微机控制电子万能试验机进行测试, 高温拉伸性能采用 HTZC-32148 微机控制电子万能试验机进行测试, 蠕变性能采用 HTZC-22066 轴向拉伸蠕变试验机进行测试。为确保试验数据的准确性与可重复性, 每组室温拉伸、高温拉伸和蠕变试验均重复进行 2 次, 取平均值作为最终结果。采用 JSM-6460 扫描电子显微镜 (SEM) 观察室温拉伸断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

Ti6246 合金经不同温度固溶+时效处理后的金相照片如图 3 所示。从图 3 可以看出, Ti6246 合金经不同温度固溶+时效处理后, 均呈现典型的双态组织, 由大量均匀分布的初生 α 相 (α_p) 和 β 转变组织 (β_{trans}) 组成, α_p 相形貌以短棒状为主, 另有少量呈等轴状。采用 Image-Pro Plus 软件对 Ti6246 合金金相组织进行定量分析, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 随着固溶温度从 830 °C 升高到 910 °C, α_p 相的平均尺寸没有明显变化, 但体积分数从 35.69% 下降到 29.94%。随着固溶温度升高, 组织中 α_p 相等轴化程度提高, 这

是因为固溶处理过程中部分 α_p 相溶解于 β 相中形成了过饱和固溶体, 其行为遵循扩散控制型相变动力学。固溶温度越高, 原子热激活能越大, 使 α/β 相界面处的原子扩散速率呈指数级增加, 将直接导致体积较小、厚度较薄的 α_p 相优先溶解, 同时粗大的 α_p 相边界因存在晶格畸变和高能量缺陷, 成为原子扩散的快速通道。当温度升高时, 边界处原子会快速迁移至 β 相, 导致边界逐渐圆整化, 形成等轴状形貌。另一方面, 由图 3 可以观察到, 随着固溶温度的升高, Ti6246 合金中次生 α 相 (α_s) 的体积分数明显增多。这是因为固溶温度越高, 组织中形成的过饱和固溶体以及亚稳定相越多, 在时效过程中会析出更多弥散分布的 α_s 相。

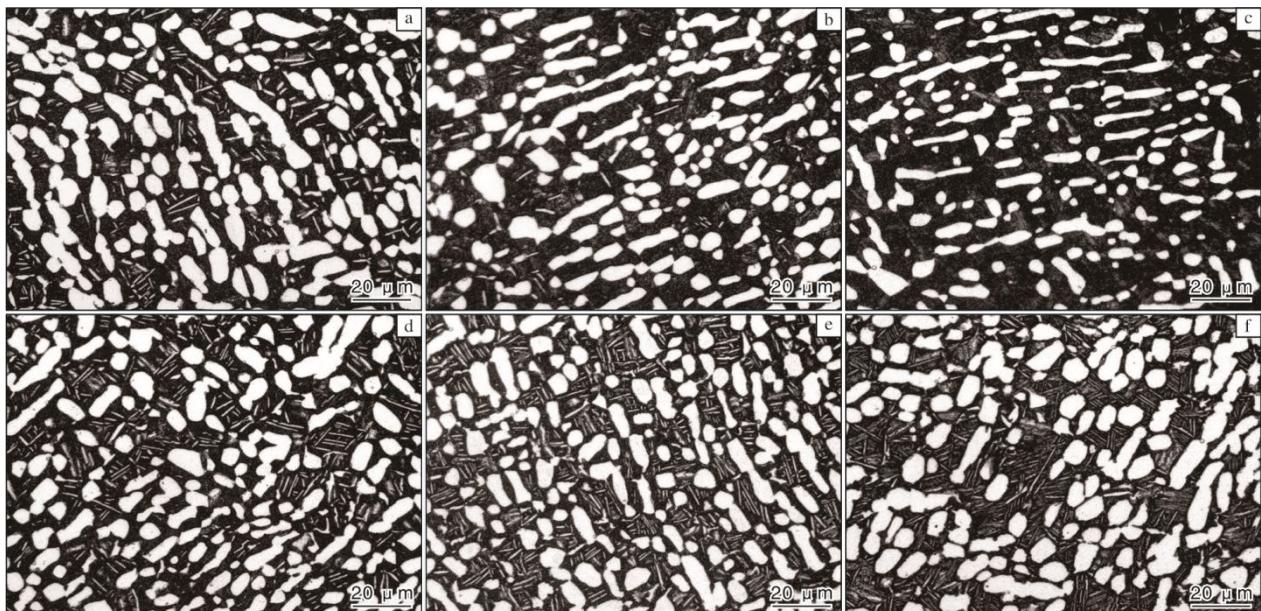


图 3 不同热处理工艺下 Ti6246 合金的金相照片

Fig.3 Optical microstructures of Ti6246 alloy under different heat treatments:

(a) EP-1; (b) EP-2; (c) EP-3; (d) EP-4; (e) EP-5; (f) EP-6

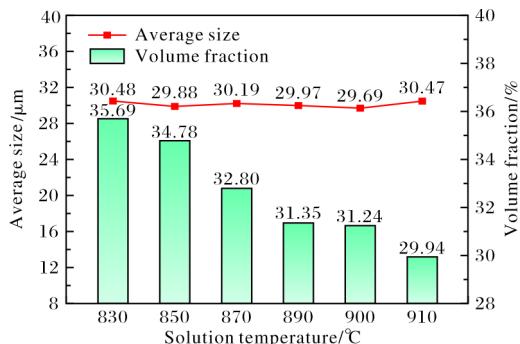


图 4 不同固溶温度下 Ti6246 合金 α_p 相平均尺寸及体积分数

Fig.4 Average size and volume fraction of α_p phase in Ti6246 alloy at different solution temperatures

2.2 室温力学性能

图 5 为 Ti6246 合金经不同温度固溶+时效处理后的室温拉伸性能。从图 5 可以发现, Ti6246 合金室温强度初期随固溶温度升高而增大, 固溶温度升至 870 °C 后, 室温强度增加趋势减缓, 900 °C 达到峰值, 随后开始下降。在固溶温度 900 °C 下, Ti6246 合金的屈服强度为 1134.5 MPa, 抗拉强度为 1240.5 MPa, 断后伸长率为 13.5%, 断面收缩率为 35.5%, 相比其他温度处理后的合金具有更好的强塑性匹配。Ti6246 合金的塑性与强度则呈现相反的变化趋势, 这是因为合金的微观组织结构对拉伸性能有着显著影响。 α_p 相为密排六方 (HCP) 晶体结构, 其体积分数增加可以激

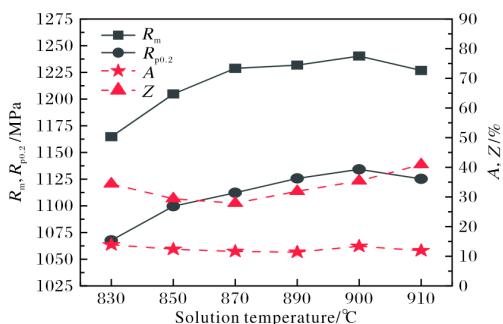


图 5 不同固溶温度下 Ti6246 合金的室温拉伸性能

Fig.5 Room-temperature tensile properties of Ti6246 alloy at different solution temperatures

活更多的独立滑移系, 受到外力时可通过多滑移系进行协调变形, 避免局部应力集中, 从而延缓裂纹萌

生^[6-8]。随着固溶温度的升高, α_p 相体积分数减少, α_s 相体积分数增加, 交错排列的 α_s 相增加了位错运动的阻力, 最终导致合金的塑性降低, 强度提高^[9-10]。但是, 当固溶温度超过 900 °C 时, α_p 相持续溶解, 其体积分数减少过多, α_p 相与 β_{trans} 相的界面减少, 削弱了其对位错的钉扎效应, 降低了位错滑移的阻力, 同时减弱了 α_s 相的强化效应, 造成材料强度降低^[2]。

图 6 为 Ti6246 合金经不同温度固溶+时效处理后的室温拉伸断口形貌。从图 6 可以看出, Ti6246 合金拉伸断口主要由不同解理面之间的台阶相互汇合而形成河流花样, 并存在明显的光滑解理台阶, 表明为脆性断裂, 断裂机制以解理断裂为主。当固溶温度较低时, 断口部分区域存在大量韧窝, 其数量多但深度较浅。随着固溶温度的升高, 韧窝数量呈下降趋势。

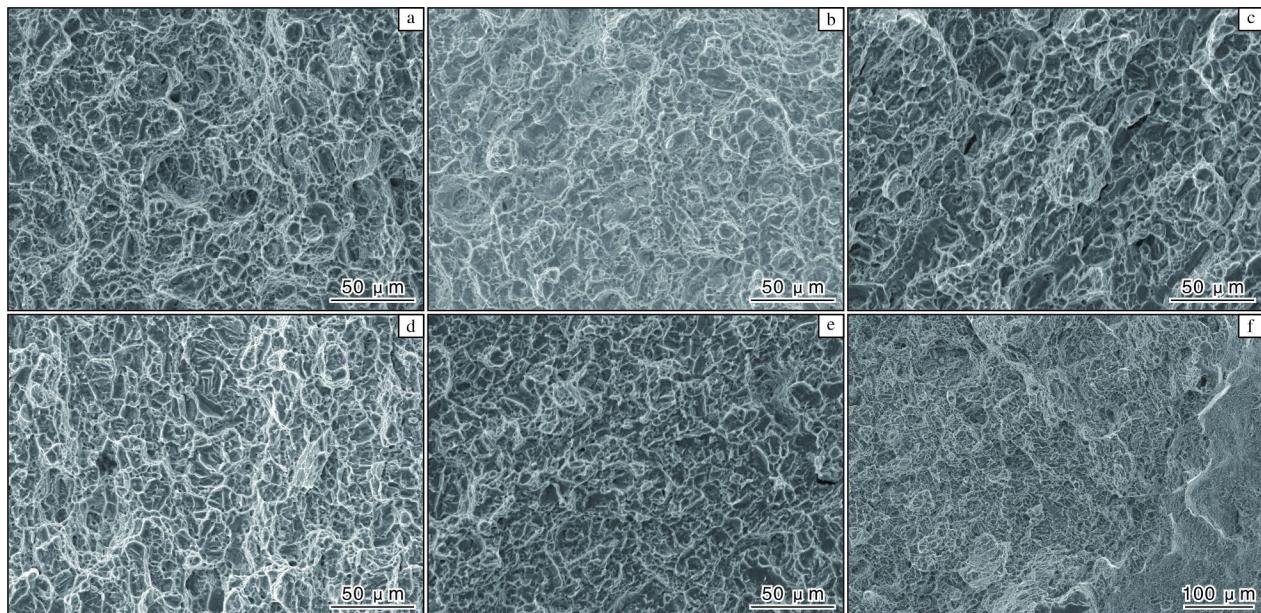


图 6 不同热处理工艺下 Ti6246 合金的室温拉伸断口形貌

Fig.6 Room-temperature fracture surface morphologies of Ti6246 alloy under different heat treatments:

(a) EP-1; (b) EP-2; (c) EP-3; (d) EP-4; (e) EP-5; (f) EP-6

2.3 高温力学性能

图 7 为 Ti6246 合金经不同温度固溶+时效处理后的高温拉伸性能。从图 7 可知, 经不同热处理后, Ti6246 合金的高温抗拉强度和拉伸塑性均较高, 表明该合金具有良好的热强性。相较于室温性能, Ti6246 合金在 425 °C 下的屈服强度和抗拉强度下降, 但断后伸长率和断面收缩率明显增加。这是因为合金在高温条件下, 其原子活动性增强, 位错滑移、孪晶等变形机制更容易启动和进行^[7]。此外, 在高温条件下, 合金也容易发生动态回复和动态再结晶, 在这些因素的综合作用下, 材料内部的位错密度降低, 合金得以软

化, 进而导致塑性增加、强度降低^[8]。随着固溶温度的升高, Ti6246 合金的高温屈服强度和拉伸强度总体呈现升高趋势, 断后伸长率则较为稳定。综合来看, 当固溶温度为 900 °C 时, Ti6246 合金的高温抗拉强度为 982 MPa, 屈服强度为 803 MPa, 断后伸长率为 14.75%, 断面收缩率为 50.5%, 强度和塑性达到最佳匹配。

表 2 为 Ti6246 合金经不同温度固溶+时效处理后, 在 455 °C/550 MPa/32 h 条件下的蠕变性能。从表 2 可以看出, 固溶温度为 830 °C 时, 试样在蠕变 9.7 h 后发生断裂; 随着固溶温度的升高, 合金的蠕变总应变大

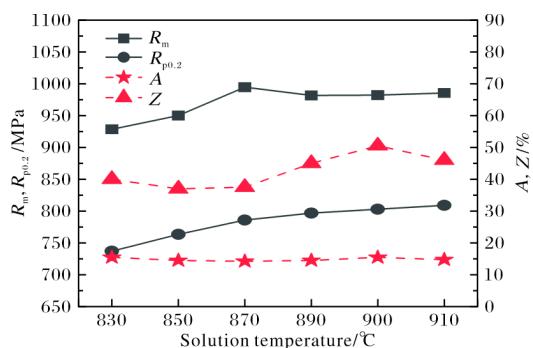


图 7 不同固溶温度下 Ti6246 合金的高温拉伸性能

Fig.7 High-temperature tensile properties of Ti6246 alloy at different solution temperatures

表 2 经不同热处理后 Ti6246 合金的高温蠕变性能

Table 2 High-temperature creep properties of Ti6246 alloy under different heat treatments

No.	Sample	Total strain/%	Residual strain/%	Steady-state creep rate/ s^{-1}
EP-1	1 [#]	0.706	0.128	2.4025×10^{-5}
	2 [#]	Broken(9.7 h)	Broken(9.7 h)	
	Mean	—	—	
EP-2	1 [#]	0.712	0.114	2.2238×10^{-5}
	2 [#]	0.710	0.116	
	Mean	0.711	0.115	
EP-3	1 [#]	0.661	0.100	2.2261×10^{-5}
	2 [#]	0.673	0.102	
	Mean	0.667	0.102	
EP-4	1 [#]	0.687	0.093	2.0619×10^{-5}
	2 [#]	0.699	0.083	
	Mean	0.693	0.088	
EP-5	1 [#]	0.685	0.076	1.2928×10^{-5}
	2 [#]	0.669	0.076	
	Mean	0.677	0.076	
EP-6	1 [#]	0.621	0.056	1.0546×10^{-5}
	2 [#]	0.626	0.076	
	Mean	0.624	0.066	

致呈下降趋势，残余应变降低趋势更为明显，并且稳态蠕变速率整体也呈现一定的下降趋势。当固溶温度为 910 °C 时，稳态蠕变速率下降至 $1.0546 \times 10^{-5} s^{-1}$ ，残余应变下降至 0.066%，充分说明材料的蠕变性能得到了显著改善。从微观机制层面分析，钛合金不同的显微组织会表现出各异的蠕变性能。在金属的高温蠕变变形过程中，晶内位错滑移是核心机制之一。此外，

位错攀移也能够促进蠕变空洞的形核，进而对蠕变过程产生影响。同时，在高温条件下，晶界易于发生滑动，导致晶粒间产生相对位移，这也是影响蠕变性能的重要因素。Ti6246 合金具有典型的双态组织特征， β 转变组织围绕着等轴 α 相，等轴 α 相作为软相在蠕变初期优先发生位错滑移，导致塑性变形，为蠕变变形提供初始路径，但随着应变的增加，滑移逐渐扩展至 β 转变组织，将有利于沿晶界扩散和晶界滑动^[11]。随着固溶温度的升高，合金中 α_p 相含量明显减少， β 转变组织中的 α_s 相和残余 β 相逐渐变得粗大，使得晶界滑动对于蠕变变形的贡献减少。

图 8 为不同固溶温度下 Ti6246 合金的拉伸蠕变应变-时间曲线。从图 8 可以观察到，蠕变试验过程仅包括两个阶段。第一阶段为减速蠕变阶段，该阶段初期，蠕变速率处于较高水平，并且随着蠕变时间的持续推进，呈现逐渐减小的趋势。这一现象表明，在减速蠕变阶段，合金内部的微观结构在应力作用下不断发生调整，位错运动等变形机制逐渐受到阻碍，从而导致蠕变速率随时间递减。第二阶段为稳态蠕变阶段，此阶段中，蠕变速率保持相对恒定，蠕变应变-时间曲线呈现出近似线段的特征。对于大多数钛合金的蠕变过程而言，稳态蠕变阶段占据主导地位，持续时间较长^[12]。这是因为在稳态蠕变阶段，合金内部的变形机制达到动态平衡，位错的产生与湮灭速率基本相等，使得蠕变速率保持稳定。此外，蠕变过程中通常还存在第三阶段，即加速蠕变阶段。该阶段的显著特征是蠕变速率急剧增大，直至材料发生失稳断裂。由于本次蠕变试验设定的时间为 32 h，在试验结束时，蠕变过程尚处于稳态蠕变阶段，因此未能观察到加速蠕变阶段的特征。

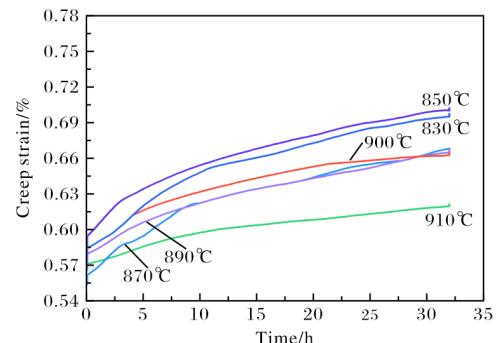


图 8 不同固溶温度下 Ti6246 合金的拉伸蠕变应变-时间曲线

Fig.8 Tensile creep strain-time curves of Ti6246 alloy at different solution temperatures

综合分析 Ti6246 合金在不同热处理工艺下室温性能和高温性能的变化趋势，发现该合金的热加工区

间较宽, 对热处理参数的变化具有良好的适应性, 这为材料的质量控制和工艺优化提供了更大的空间, 显示出良好的工程应用潜力。同时, Ti6246 合金热处理工艺的可控性和重复性较好, 对于工业生产中的批量处理和质量控制非常有利。在工业生产中, 可根据产品对于强度和塑性的具体需求, 通过调整热处理工艺参数进一步有针对性地发挥材料的优势, 有助于降低生产成本, 提高材料的可靠性。

3 结 论

(1) 固溶温度由 830 °C 升高至 910 °C, Ti6246 合金时效处理后呈现出典型的双态组织, α_p 相体积分数明显下降, α_s 相体积分数增加。

(2) Ti6246 合金室温强度随固溶温度升高不断增大, 当固溶温度升至 870 °C 后, 室温强度增加趋势减缓, 900 °C 达到峰值, 随后开始下降。

(3) 随着固溶温度的升高, Ti6246 合金的高温屈服强度和抗拉强度总体呈升高趋势, 断后伸长率则较为稳定。同时, Ti6246 合金的蠕变总应变和残余应变都存在下降趋势, 稳态蠕变速率也有下降的趋势。

(4) Ti6246 合金的最佳热处理工艺为 900 °C/1 h/FAC + 593 °C/8 h/AC, 在此工艺下合金具有较好的强塑性匹配以及良好的高温蠕变性能 (455 °C/550 MPa/32 h): 蠕变总应变为 0.677%, 残余应变为 0.076%, 稳态蠕变速率为 $1.2928 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

参考文献 References

- [1] 南榕, 李思兰. 钛合金微动磨损的研究进展[J]. 钛工业进展, 2022, 39(5): 33-38.
- [2] 刘知多, 张浩宇, 周舸, 等. 两种不同热处理工艺下亚稳 β 钛合金 Ti-6Mo-5V-3Al-2Fe-2Zr 的低周疲劳行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(2): 658-666.
- [3] 齐敏, 王倩, 马英杰, 等. Ti6246 钛合金 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变中晶界 α 相生长行为及其对微组织的影响[J]. 金属学报, 2025, 61(2): 265-277.
- [4] 陈文浩, 张明玉, 解炜. 固溶时效热处理对 Ti6246 钛合金微观组织与拉伸性能的影响[J]. 有色金属加工, 2025, 54(3): 27-31.
- [5] 田鹏飞, 顾忠明, 张起, 等. 退火温度对 Ti6246 钛合金组织与拉伸性能的影响[J]. 四川冶金, 2022, 44(5): 14-16.
- [6] Zhang S, Zhang Y Q, Qi J S, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of additive manufactured Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V alloy[J]. Materials, 2023, 16(1): 160.
- [7] 张万鹏, 张明玉, 胡雅歌. 固溶时效处理对 TC19 钛合金组织与高温拉伸性能的影响[J]. 有色金属加工, 2025, 54(1): 28-31.
- [8] 王冠军, 张明玉, 梁飞龙, 等. 固溶时效态 TC11 钛合金微观组织与高温拉伸性能的研究[J]. 四川冶金, 2024, 46(5): 17-20.
- [9] 侯红苗, 王晓, 杨海瑛, 等. 热处理工艺对 Ti650 合金板材组织演变及性能的影响研究[J]. 钛工业进展, 2024, 41(2): 6-10.
- [10] 王艳晶, 袁晨航, 徐再东, 等. 冷轧及热处理对一种亚稳 β 型钛合金组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(1): 238-244.
- [11] 戚延龄. TC11 钛合金的热稳定性及高温蠕变行为的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [12] Yang J K, Liang Z Q, Xiao S L, et al. Effect of heat treatment on microstructure and creep behavior of Ti-3.5Al-5Mo-6V-3Cr-2Sn-0.5Fe high-strength β titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35(7): 2259-2272.

行业动态

2024 年 10—12 月日本海绵钛产销数据统计

时间	海绵钛产量/t	国内出货量/t	国外出货量/t	出货量合计/t
2024 年 10 月	4848	1242	3625	4867
2024 年 11 月	4587	1288	3244	4532
2024 年 12 月	4786	1335	3159	4494
合计	14 221	3865	10 028	13 893

王运峰摘自《チタン》