

锻造温度对 TA11 钛合金棒材初生 α 相含量及性能的影响

杨 涛, 郑念庆, 王志杰, 董卫选, 杨清相, 韩飞孝, 王 涛

(西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

摘 要: 研究了锻造温度(950~1035 °C)对 TA11 钛合金棒材初生 α 相含量及性能的影响。结果表明, 随着锻造温度的升高, TA11 钛合金棒材的初生 α 相含量呈下降趋势, 室温拉伸强度呈现先升高后降低的峰值型特征。分析表明, 由适当比例的初生 α 相与片层状次生 α 相组成的双态组织能够获得良好的强度指标; 而 β 转变组织中析出的粗大片层状次生 α 相会导致强化效果减弱。降低初生 α 相含量有利于提升疲劳性能, 当初生 α 相含量降至 55% 时, 合金的疲劳寿命最高可达到 10^7 次。断口分析表明, 较高的初生 α 相含量导致疲劳裂纹呈现多源萌生、扩展路径平直的特征; 较低的初生 α 相含量对应的片层组织使疲劳裂纹呈现单源萌生、扩展路径曲折的特征, 从而具有更高的裂纹萌生门槛值。

关键词: TA11 钛合金; 锻造温度; 初生 α 相; 疲劳性能; 微观组织

中图分类号: TG146.23; TG316

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)04-014-05

Effect of Forging Temperature on Primary α Phase Content and Properties of TA11 Titanium Alloy Bar

Yang Tao, Zheng Nianqing, Wang Zhijie, Dong Weixuan, Yang Qingxiang, Han Feixiao, Wang Tao

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

Abstract: The effects of forging temperatures (950–1035 °C) on the primary α phase content and properties of TA11 titanium alloy bar were investigated. The results show that the content of primary α phase in the TA11 titanium alloy bar decreases with the increase of forging temperature, while the room-temperature tensile strength of the alloy exhibits a peak-type characteristic, initially increasing and then decreasing. Microstructural analysis indicates that a bimodal microstructure with appropriate proportions of equiaxed primary α phase and lamellar secondary α phase can achieve excellent strength. In contrast, the coarse lamellar secondary α phase precipitated in the β -transformed microstructure weakens the strengthening effect. A reduction in primary α phase content helps improve the fatigue performance. When the primary α phase content decreases to 55%, the fatigue life of the alloy can reach up to 10^7 cycles. Fracture analysis reveals that a high primary α phase content leads to multi-site fatigue crack initiation and straight crack propagation. In comparison, the lamellar microstructure associated with a low primary α phase content results in single-source crack initiation and a tortuous crack propagation path, which raises the crack initiation threshold.

Keywords: TA11 titanium alloy; forging temperature; primary α phase; fatigue property; microstructure

TA11 钛合金(Ti-8Al-1Mo-1V)是一种典型的近 α 型钛合金, 因其具有密度低、比强度高、焊接性能优异、抗腐蚀性能好以及良好的室温和高温力学性能, 被广泛应用于航空发动机压气机叶片、盘件等关键转动部件。航空发动机叶片在服役过程中承受复杂的循

环载荷, 疲劳失效是其最主要的失效模式之一。因此, 深入研究 TA11 钛合金的疲劳性能及其影响因素具有重要的工程意义。

目前, 已有学者针对不同钛合金组织对其疲劳性能的影响开展了相关研究。王学云等^[1]探究了初生 α 相含量与应力比对 TA11 钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响, 完善了该合金疲劳性能基础数据。王聪等^[2]研究了热处理对钛合金材料疲劳性能的影响, 通过不同

收稿日期: 2026-06-23

基金项目: 陕西省重点研发计划工业领域项目(2021GY-020)

通信作者: 杨涛(1993—), 男, 工程师。

热处理制度调控显微组织, 改善了钛合金整体疲劳性能。Yang 等^[3]采用超声疲劳试验方法, 系统研究了 TA11 钛合金中初生 α 相含量对高周和超高周疲劳行为的影响。结果表明, 在 $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ 相变温度以下进行二次退火处理, 通过增加集束组织含量或减少初生 α 相含量, 可以获得更高的疲劳性能。

然而, 上述研究多集中于通过热处理调控合金的初生 α 相含量和组织形态, 而关于热加工温度如何直接调控 TA11 钛合金初生 α 相含量并进而影响其疲劳性能的系统研究仍较为有限。为此, 以 $\phi 85$ mm TA11 钛合金轧制棒坯为原料, 在 950~1035 °C 范围内进行不同温度的径向锻造, 获得具有不同初生 α 相含量的棒材, 并系统研究了加热温度对初生 α 相含量、室温拉伸性能、高温拉伸性能及疲劳性能的影响, 并结合断口形貌分析, 揭示了初生 α 相含量影响疲劳性能的

微观机理。该研究成果旨在为 TA11 钛合金热加工工艺优化提供科学依据, 以满足航空发动机叶片对高可靠性和长寿命的应用需求。

1 实 验

1.1 实验材料

实验材料为经三次真空自耗电弧熔炼获得的 TA11 钛合金铸锭, 其名义成分为 Ti-8Al-1Mo-1V。铸锭经 β 相区开坯锻造后, 再经多次 $\alpha+\beta$ 两相区锻造和轧制, 加工成直径为 85 mm 的棒坯。金相法测得棒坯的 β 转变温度约为 1045 °C, 其化学成分见表 1, 微观组织如图 1 所示。由图 1 可以看出, 原始棒坯的组织由初生 α 相和少量 β 转变组织组成。初生 α 相呈板条状或等轴状, 尺寸细小, 约为 10~20 μm 。采用金相法统计, 初生 α 相含量约为 90% (体积分数, 下同)。

表 1 TA11 钛合金棒坯的化学成分(w%)

Table 1 Chemical composition of TA11 titanium alloy bar billet

Ti	Al	Mo	V	Fe	C	N	O	Y	H
Bal.	7.92	0.96	0.99	0.011	0.006	<0.003	0.093	<0.001	<0.001



图 1 TA11 钛合金棒坯的显微组织

Fig.1 Microstructure of TA11 titanium alloy bar billet

1.2 实验方法

采用 RF-40 型径向锻机对 TA11 钛合金棒坯进行锻造。锻造前, 坯料在电阻炉中加热至目标温度并保温 60 min, 以确保温度均匀。锻造温度分别设定为 950、970、1000、1020、1025、1035 °C, 锻造完成后空冷至室温。总变形量为 75.5%, 单道次变形量为 15%~20%, 成品棒材直径均为 40 mm。

采用线切割机在不同温度锻造的 $\phi 40$ mm TA11 钛合金棒材上分别切取拉伸、疲劳和金相试样。按照 GB/T 228.1—2021 标准要求, 采用 MTS 万能材料试验机进行室温拉伸试验, 拉伸速率为 1 mm/min。每个测

试条件下进行 3 次平行拉伸试验, 结果取平均值。采用 QBG-100 型高频疲劳试验机进行疲劳性能测试, 轴向加载, 应力比 $R = 0.1$, 频率为 20 Hz, 波形为正弦波, 最大应力($\sigma_{\max}$)为 500 MPa。疲劳试样为等截面光滑圆柱试样, 标距段直径为 5 mm, 每个条件测试 2~3 个试样。

金相试样经打磨、抛光后, 用 Kroll 试剂(HF、HNO₃、H₂O 体积比为 1:3:7)浸蚀 10~15 s。采用 OLYMPUS M3 型光学显微镜(OM)观察显微组织, 并利用金相截线法统计初生 α 相含量。观察时放大倍数为 200 倍, 取 3 组平行试样, 每组随机选取不少于 3 个视场。通过计算每组试样初生 α 相含量的平均值, 确定不同锻造温度下的典型初生 α 相含量。采用 JSM-6390A 型扫描电子显微镜(SEM)观察疲劳试样断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 微观组织

图 2 为不同温度锻造 TA11 钛合金棒材的微观组织。锻造温度为 950 °C 时(图 2a), 组织主要由等轴或短棒状的初生 α 相(白色)和少量 β 转变组织(暗色)组成。初生 α 相均匀分布, 晶界清晰, 尺寸为 10~20 μm 。 β 转变组织中包含细小的次生 α 相片层, 但由于冷却

速度较慢,片层特征不明显。锻造温度升高至 970 °C 时(图 2b),初生 α 相含量略有减少,但整体仍以等轴 α 相为主。锻造温度升至 1000 °C(图 2c)和 1020 °C(图 2d)时,初生 α 相含量明显减少, β 转变组织比例增加;组织中开始出现明显的片层状次生 α 相,这些次生 α 相从 β 晶界向晶内生长,形成魏氏组织特征;初生 α 相仍保持等轴形态,但含量显著降低。锻造温度进一步升高到 1025 °C 时(图 2e),组织发生较大转变,初生 α

相含量已降低至 55%,呈孤岛状残留在 β 晶粒之间; β 转变组织成为主体,次生 α 相呈典型片层状且粗化,片层间距增大。锻造温度达到 1035 °C 时(图 2f),初生 α 相仅少量残余(平均含量为 20%),组织以粗大的次生 α 片层和 β 基体为主;次生 α 片层相互平行或呈网篮状,长度达几十微米。由于锻造温度接近相变点(1045 °C),初生 α 相向 β 相的转变充分进行,冷却过程中次生 α 相具备充足的生长时间和空间,因此片层粗大。

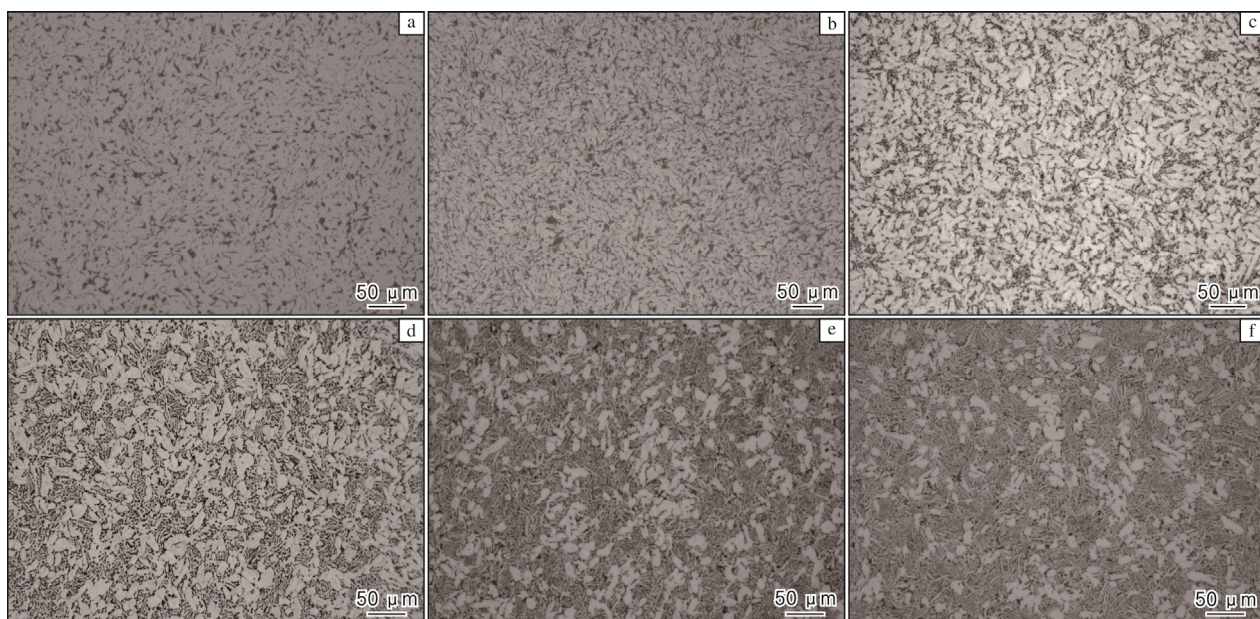


图 2 不同温度锻造 TA11 钛合金棒材的微观组织

Fig.2 Microstructures of TA11 titanium alloy bar forged at different temperatures: (a) 950 °C; (b) 970 °C; (c) 1000 °C; (d) 1020 °C; (e) 1025 °C; (f) 1035 °C

不同温度锻造 TA11 钛合金棒材的初生 α 相含量如图 3 所示。当锻造温度为 950 °C 时,初生 α 相含量为 88%,并随着锻造温度的升高呈明显下降趋势,当锻造温度升至 1035 °C 时,初生 α 相含量降至 20%。在

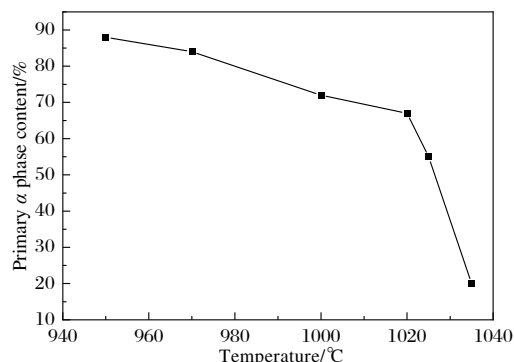


图 3 不同温度锻造 TA11 钛合金棒材的初生 α 相含量

Fig.3 Primary α phase content of TA11 titanium alloy bar forged at different temperatures

950~1020 °C 区间,初生 α 相含量由 88% 缓慢降至 67%,平均每升温 10 °C,初生 α 相含量下降约 3%;当温度超过 1020 °C 后,初生 α 相含量急剧下降,在 1020~1035 °C 的 15 °C 温差内,初生 α 相含量从 67% 骤降至 20%,平均每升温 10 °C,初生 α 相含量下降约 31%。这种非线性变化反映了钛合金在 $\alpha+\beta$ 两相区中高温段相变动力学加速的物理本质:随着温度升高,Al、Mo、V 等合金元素的扩散系数增大, $\alpha \rightarrow \beta$ 的相转变速率呈指数增长;尤其在接近相变点时, β 相的平衡含量迅速增加,驱动初生 α 相快速溶解^[3-4]。

2.2 力学性能

2.2.1 拉伸性能

图 4 为不同初生 α 相含量 TA11 钛合金棒材的室温拉伸强度。由图 4 可知,强度与初生 α 相含量之间并非单调线性关系,而是呈现先升高后降低的峰值型特征。当初生 α 相含量从 20% 增加至 67% 时,抗拉强度由 983 MPa 逐渐提高至 1067.5 MPa,屈服强度由

906.5 MPa 提高至 977 MPa, 初生 α 相含量为 67% 时强度达到峰值; 继续增加初生 α 相含量, 强度反而下降, 初生 α 相含量为 84% 时, 抗拉强度降至 963 MPa。综上知, 适当比例的初生 α 相与片层状次生 α 相组成的双态组织能够实现最佳的复合强化效果, 而过高的片层状次生 α 相含量会导致 β 转变组织粗化, 强化效果减弱, 过高的初生 α 相含量则因界面强化不足而使强度回落^[4]。

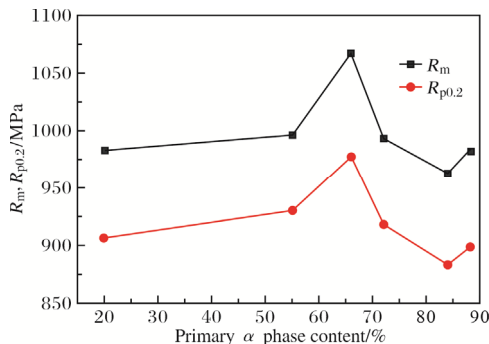


图4 不同初生 α 相含量 TA11 钛合金棒材的室温拉伸强度
Fig.4 Room-temperature tensile strength of TA11 titanium alloy bar with different primary α phase contents

2.2.2 疲劳性能

对不同温度锻造 TA11 钛合金棒材进行高周疲劳性能测试, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 锻造温度为 950~1000 $^{\circ}\text{C}$ 时, 合金的初生 α 相含量较高, 疲劳寿命略有下降。锻造温度为 1020 $^{\circ}\text{C}$ 时, 合金的初生 α 相含量降至 67%, 疲劳寿命提升至 3.9×10^6 次, 进入典型的高周疲劳寿命范围。锻造温度超过 1020 $^{\circ}\text{C}$ 后, 随着锻造温度的升高, 疲劳寿命整体呈上升趋势。锻造温度为 1025 $^{\circ}\text{C}$ 时, 合金的初生 α 相含量进一步降至 55%, 疲劳寿命最高可达到 10^7 次, 表现出优异的疲

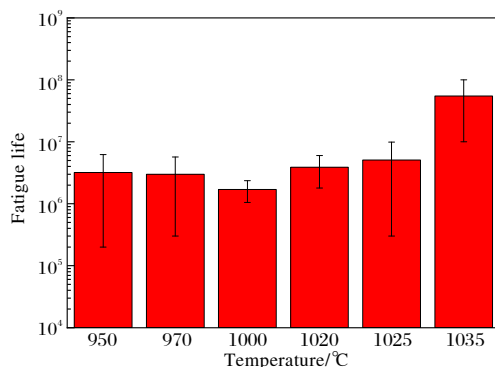


图5 不同温度锻造 TA11 钛合金棒材的疲劳性能
Fig.5 Fatigue properties of TA11 titanium alloy bar forged at different temperatures

劳性能。这表明 TA11 钛合金棒材的初生 α 相含量降低有利于疲劳性能的提升。

2.3 断口形貌

图 6 为 950 $^{\circ}\text{C}$ 锻造试样(初生 α 相含量为 88%, 疲劳寿命 $N_f = 3.2 \times 10^6$ 次)和 1035 $^{\circ}\text{C}$ 锻造试样(初生 α 相含量为 20%, 疲劳寿命 $N_f = 5.5 \times 10^7$ 次)的疲劳断口形貌。由图 6a 可以看出, 锻造温度为 950 $^{\circ}\text{C}$ 时, 裂纹萌生于试样边缘的较大区域内(箭头所示), 起始区粗糙不平, 呈现典型的多源起裂特征; 多条裂纹从不同萌生点扩展并相互交汇, 形成明显的台阶状断裂面; 扩展区可见较宽的疲劳条带, 条带间距约 0.5~1 μm , 表明裂纹扩展速率较快; 瞬断区面积较大, 约占断口总面积的 40%, 呈现韧窝与解理台阶共存的混合断裂形貌, 表明材料在最后断裂时仍具备一定的塑性变形能力。由图 6b 可以看出, 裂纹萌生区附近存在大量滑移带和微孔洞。由于等轴 α 相晶粒尺寸较大(10~20 μm), 且 α/β 界面平直, 循环载荷下位错容易在 α 相晶内滑移并塞积于界面处。当滑移带发展到一定程度, 便在晶内或沿界面形成微裂纹。多个微裂纹汇合形成主裂纹, 导致较早的裂纹萌生和较快的扩展^[5-6]。由图 6c 可以看出, 疲劳裂纹扩展区呈现尺寸不一的凹坑形貌, 并伴有无明显韧窝的光滑平面, 裂纹扩展路径较为平直。这些特征表明该区域属于局部准解理断裂区, 裂纹易扩展延伸。因此, 初生 α 相含量高的等轴组织虽然塑性较好, 但疲劳抗力较低。

由图 6d 可以看出, 锻造温度为 1035 $^{\circ}\text{C}$ 时, 疲劳断口整体非常平整, 裂纹萌生区局限于边部极小区域(约 50 μm 范围), 呈单源起裂特征; 扩展区疲劳条带非常细密, 条带间距仅约 0.1~0.2 μm , 表明裂纹扩展速率极慢; 瞬断区呈韧窝形貌, 且面积占比较小。由图 6e 可以看出, 裂纹多萌生于 α/β 界面或 α 相内部某个有利取向的晶粒内, 但片层组织($\alpha+\beta$)对裂纹扩展有强烈的阻碍作用。当裂纹遇到次生 α 片层时, 受片层与裂纹扩展方向的位向关系影响, 裂纹被迫发生偏转、分叉或沿界面扩展, 形成曲折的扩展路径。由图 6f 可以看出, 裂纹扩展区整体以韧窝型韧性断裂为主, 并伴随塑性撕裂特征的纤维状形貌。此外, 该区域裂纹扩展路径较为曲折, 表明裂纹在扩展过程中受到了较大的阻力。因此, 低初生 α 相含量的片层组织表现出极高的疲劳裂纹萌生门槛值和极低的扩展速率, 这是其获得超高周疲劳寿命的根本原因。上述断口观察结果与 Yang 等^[3]在 TA11 钛合金棒材超高周疲劳研究中观察到的“纳米标记小平面”特征一致, 也与其他关于钛合金片层组织具有更高疲劳裂纹扩展抗力的报道^[7-9]相符。

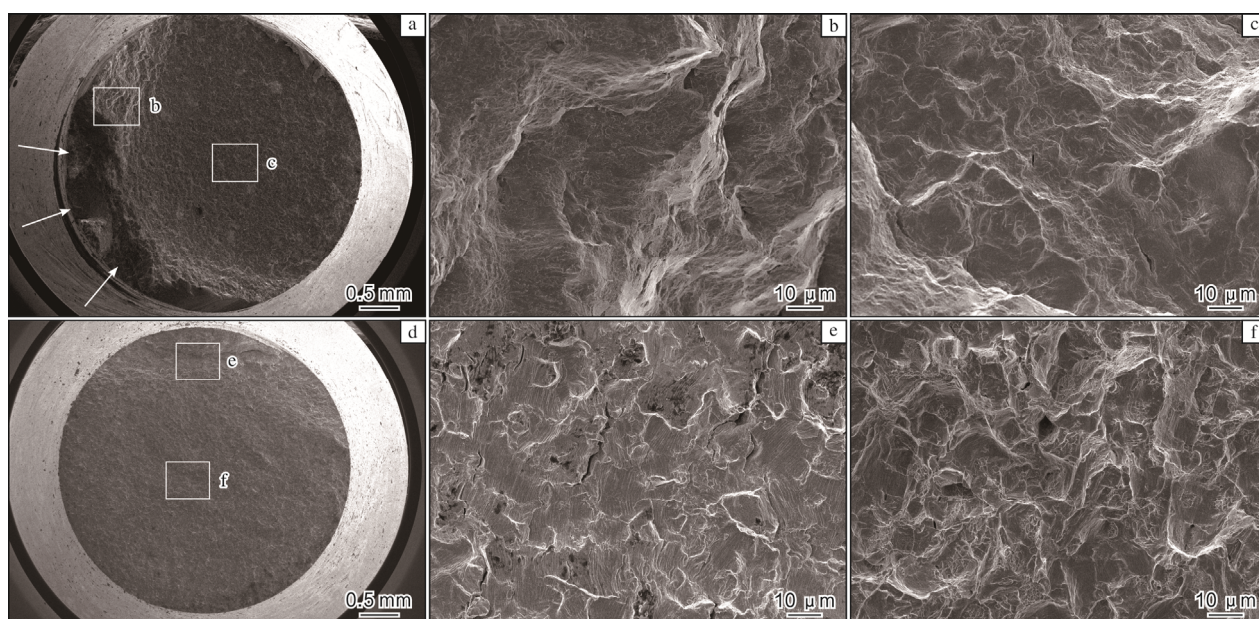


图 6 不同温度锻造 TA11 钛合金棒材的疲劳断口形貌

Fig.6 Macroscopic (a, d) and microscopic (b, c, e, f) morphologies of fatigue fracture surfaces of TA11 titanium alloy bar forged at different temperatures: (a-c) 950 °C; (d-f) 1035 °C

3 结 论

(1) 随着锻造温度的升高, TA11 钛合金棒材的初生 α 相含量呈下降趋势: 在 950~1020 °C 区间, 初生 α 相含量由 88% 缓慢降至 67%; 当锻造温度超过 1020 °C 后, 初生 α 相含量急剧下降, 1025 °C 时降至 55%, 1035 °C 时降至 20%。

(2) 随着初生 α 相含量的降低, TA11 钛合金棒材的室温拉伸强度呈现先升高后降低的峰值型特征。分析表明, 由适当比例的初生 α 相与片层状次生 α 相组成的双态组织能够实现最佳的复合强化效果; 过高的片层状次生 α 相含量会导致 β 转变组织粗化, 使强化效果减弱; 而过高的初生 α 相含量则因界面强化不足导致强度回落。

(3) 降低初生 α 相含量有利于提升合金的疲劳性能。当初生 α 相含量降至 55% 时, 合金的疲劳寿命最高可达 10^7 次。较高的初生 α 相含量易导致疲劳裂纹多源萌生, 且扩展路径较为平直; 相反, 较低的初生 α 相含量对应的片层组织则使疲劳裂纹呈现单源萌生且扩展路径曲折, 从而具有更高的裂纹萌生门槛值。

参考文献 References

[1] 王学云, 李志农, 刘新灵. 初生 α 相含量与应力比对 TA11

钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 金属热处理, 2026, 51(5): 78-84.

[2] 王聪, 严珺, 张智浩. 热处理对钛合金材料疲劳性能的提升作用研究[J]. 信息记录材料, 2025, 26(9): 7-9.

[3] Yang K, Huang Q, Zhong B, et al. Influence of the volume content of $\alpha+\beta$ colonies on the very high cycle fatigue behavior of a titanium alloy[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(10): 2643-2658.

[4] 王清瑞, 沙爱学, 黄利军, 等. 显微组织类型对 TC4 钛合金丝材性能的影响[J]. 钛工业进展, 2022, 39(4): 12-15.

[5] 陈永辉, 郭云珊, 潘凯, 等. 加载频率对 TC17 超高周疲劳性能影响研究[J]. 应用力学学报, 2025, 42(3): 519-526.

[6] 赵鹏程, 李凯尚, 苏庆, 等. 基于机器学习模型的 TC4 钛合金疲劳寿命预测[J]. 钛工业进展, 2025, 42(2): 1-8.

[7] 商国强, 张晓泳, 王新南, 等. 显微组织对 TB17 钛合金高周疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(2): 529-536.

[8] Liu C H, Xu X, Sun T Z, et al. Microstructural effects on fatigue crack initiation mechanisms in a near-alpha titanium alloy[J]. Acta Materialia, 2023, 253: 118957.

[9] 李典, 陈静, 谭华, 等. 热处理对选区激光熔化 Ti-6Al-4V 合金低周疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(9): 2503-2512.