

钛合金材料制备与加工技术专题

电冲击处理对钛合金残余应力及 疲劳性能的影响

宋正杰^{1,2}, 郭 帅³, 张 剑³, 王 丰^{1,2}, 钱东升^{1,2*}, 李 阔⁴, 赵龙哲⁴

(1. 武汉理工大学高温轻合金及应用技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 3. 中浙高铁轴承有限公司, 浙江 衢州 324400; 4. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 调控金属材料残余应力, 改善应力分布是提升疲劳性能的关键。研究提出利用电冲击处理 (EST) 对 TC11 钛合金残余应力及振动疲劳性能进行调控。结果表明, 电冲击在不明显改变物相结构的前提下显著均匀化表面和梯度的宏观残余应力。XRD 和 EBSD 结果表明电冲击处理后位错密度降低 9.68%, KAM 值标准差降低 20%, 微观应变减小且应力集中区域明显减少。振动疲劳结果表明, 试样平均疲劳寿命从 4.55×10^5 次提升至 3.60×10^6 次。进一步利用 HRTEM 分析, 电冲击产生的能量可驱动应力集中区原子重排, 降低位错密度并缓解晶格畸变。总体而言, 电冲击为 TC11 钛合金应力调控与疲劳性能强化提供了高效新策略。

关键词: 电冲击处理; 宏观残余应力; 微观残余应力; 振动疲劳

中图分类号: TF823, TG146

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0001-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.001

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effects of electroshocking treatment on residual stress and fatigue properties of titanium alloys

SONG Zhengjie^{1,2}, GUO Shuai³, ZHANG Jian³, WANG Feng^{1,2},
QIAN Dongsheng^{1,2*}, LI Kuo⁴, ZHAO Longzhe⁴

(1. State Key Laboratory of Light Superalloys, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. Zhongzhe High Speed Railway Bearing Co., Ltd., Quzhou 324400, Zhejiang, China; 4. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract: Regulating residual stress and optimizing stress distribution in metallic materials is crucial for enhancing fatigue performance. This study systematically investigates the effects of electroshocking treatment (EST) on the residual stress regulation and vibration fatigue properties of TC11 titanium alloy. The results demonstrate that EST significantly homogenizes the surface and gradient macroscopic residual stress without significantly altering the phase structure. XRD and EBSD analyses reveal that after EST, the dislocation density is reduced by 9.68%, the standard deviation of the KAM value is decreased by 20%, the microstrain is effectively mitigated, and the stress concentration zones are substantially eliminated. Vibration fatigue tests confirm that the average fatigue life of the specimens is remarkably

收稿日期: 2026-02-14; 修回日期: 2026-03-05; 接受日期: 2026-03-23

基金项目: 国家重点研发计划 (2024YFB3714200); 国家自然科学基金 (52305414)。

作者简介: 宋正杰, 2001 年出生, 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要从事电冲击处理强化钛合金材料方面的研究, E-mail: songzj@whut.edu.cn; *通信作者: 钱东升, 1982 年出生, 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 主要从事环类构件高性能成形制造研究, E-mail: qians@whut.edu.cn。

improved from 4.55×10^5 cycles to 3.60×10^6 cycles. Further HRTEM analysis verifies that the energy generated by EST can drive atomic rearrangement in stress concentration regions, thereby reducing dislocation density and alleviating lattice distortion. In summary, EST provides an efficient and novel strategy for precise residual stress regulation and fatigue performance enhancement of TC11 titanium alloy.

Key words: electroshocking treatment; macroscopic residual stress; microscopic residual stress; vibration fatigue

0 引言

TC11 钛合金因综合性能优异,被广泛应用于航空航天发动机叶片及其他关键零部件的制造^[1-5]。但值得注意的是,零件制造流程中每个工艺节点都会因温度场变化、机械载荷作用或组织结构转变等复杂因素,造成材料残余应力的分布不均匀。零部件内部残余应力的分布不均会诱发疲劳裂纹扩展,影响零部件的服役寿命,甚至导致其提前失效。因此,亟需采用后处理工艺对零部件内部的残余应力进行均匀化调控,提升零部件的服役性能。

目前调控残余应力的主流方法包括有自然时效^[6-7]、热处理^[8-9]、振动时效^[10-11]、深冷处理^[12-13]以及超声喷丸^[14-15]等。例如 YU 等^[16]探究了等温退火工艺对双喷丸处理 TC17 钛合金残余应力的调控规律。研究表明,随着退火温度的升高与保温时间的延长,合金表层的残余应力及微观应变均呈现出明显的松弛衰减趋势。LIU 等^[17]研究了深冷处理对近 β 钛合金的影响,研究表明会产生显著残余应力,提升晶格畸变程度和位错密度,同时细化晶粒。尽管这些方法均能有效调控材料中的残余应力,但各自存在固有局限性,如处理周期过长、能耗与成本偏高、适用范围小以及存在潜在的材料损伤风险。因此,开发一种高效、便捷、绿色的残余应力调控方法具有重要的研究意义。

近年来,电冲击处理 (Electroshocking Treatment, EST) 作为一种高效、环保无污染的加工技术在众多领域广泛应用^[18-21]。其原理是通过向特定区域或整个部件施加交变脉冲电流,在短时间内与材料的微观结构和缺陷相互作用,从而提升材料性能。ZHANG 等^[22]研究了电冲击对亚稳态 α 钛合金螺栓疲劳性能的影响,结果表明电冲击处理后 α 晶界宽度减小, β 相晶内位错密度降低,疲劳寿命由 42.6 k 次循环提升至 50.1 k 次循环,电阻率由 $2.95 \mu\Omega \cdot m$ 降至 $2.51 \mu\Omega \cdot m$ 。XIE 等^[23]研究了电冲击处理对 TC11 钛合金织构强度的影响,结果表明经电冲击处理后, α 相的织构强度从 4.94 提升到 8.52, β 相的织构强度从 3.35 提升到 9.88。LIU 等^[24]探究了

TC11 钛合金在电冲击处理作用下的晶界演化机制,发现小角度晶界向大角度晶界转变,同时伴随大量 α 马氏体相的析出。WANG 等^[25]探究了不同电冲击处理工艺对 TC11 钛合金力学性能的影响及作用机制。结果表明,电冲击处理可显著改善合金力学性能,其断裂平均延伸率、强塑性积、断裂韧性分别提升 12.5%、16.1% 和 63.4%,断裂延伸率提升 57.1%,拉伸强度提高 30 MPa。这些研究主要聚焦于探究电冲击处理对材料微观组织以及力学性能的影响,然而针对电冲击处理对 TC11 钛合金残余应力以及疲劳性能的研究较少。

为此,笔者系统地探究了电冲击处理对 TC11 钛合金残余应力以及疲劳寿命的影响,采用多尺度表征技术与测试方法,结合宏观、微观两个维度的残余应力分析,系统研究电冲击作用下材料不同尺度残余应力的空间分布状态。同时针对叶片的服役状态,对 TC11 钛合金叶片进行振动疲劳试验,研究电冲击处理对其疲劳性能的影响。

1 试验材料与方法

研究所用材料均为退火热处理后的航空发动机叶片用 TC11 钛合金,其化学成分如表 1 所示。针对块状试样在进行电冲击处理试验之前,使用电火花线切割机从棒料上切取 $15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的块状试样,随后对其使用砂纸进行打磨以除去线切割痕迹和试样表面氧化膜,避免对试验结果产生影响。利用自主研发的电冲击装置,在室温环境下开展电冲击处理试验,其中峰值电流密度为 80 A/mm^2 ,脉冲频率为 50 Hz,加载 5 个脉冲。该处理工艺的示意图及脉冲电流波形如图 1 所示。

表 1 TC11 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC11 titanium alloy %

| Ti | Al | Mo | Zr | Si | Fe | C | N | H | O |
|------|-----|-----|-----|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Bal. | 6.4 | 3.3 | 1.4 | 0.28 | ≤ 0.25 | ≤ 0.08 | ≤ 0.08 | ≤ 0.08 | ≤ 0.08 |

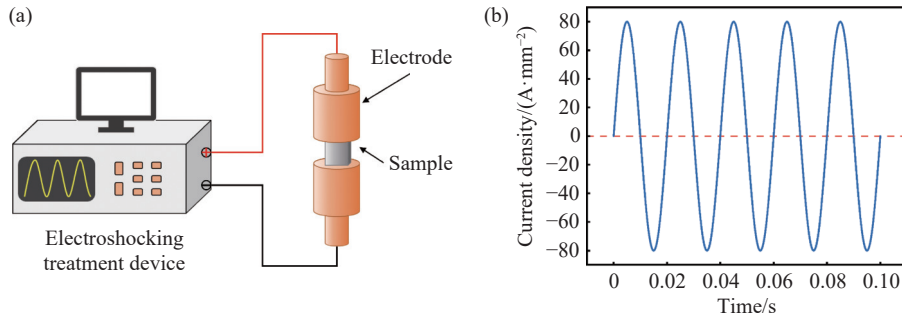
研究采用 X 射线应力分析仪 (LXRD, Proto, Canada), 基于 $\sin^2\psi$ 法对 TC11 钛合金试样表面的残余应力进行定量测试。为评估残余应力的面内分布均匀性,在试样表面选取 5 个均匀分布的测试

位点进行逐点测量以及测量试样 600 μm 内的梯度应力, 测试过程中选用 Cu-Kα 特征射线(波长 λ=0.154 183 8 nm), 设定管电压 30 kV、管电流 25 mA, 通过采集 α 相的(213)晶面衍射峰, 计算得到试样表面的残余应力数值。同时借助 Empyrean 型 X 射线衍射仪分析试样的位错密度变化规律。XRD 测试采用连续扫描模式, 设定扫描速率 2°/min, 获取全谱

衍射数据后, 基于衍射峰的半高宽(FWHM)结合相关理论模型进行位错密度计算^[26], 位错密度 ρ 可分解为两个影响变量^[27], 其计算如式(1)所示。

$$\rho = (\rho_D \times \rho_s)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中 ρ_D = 3/D² 是晶格贡献, D 为微晶尺寸, ρ_s = kε²/b² 是微应变贡献, k = 4 为常数, ε 为微观应变, b 为伯氏矢量。



(a) 电冲击设备; (b) 脉冲电流波形

图 1 电冲击设备和脉冲电流波形示意

Fig. 1 Schematic diagram of EST device and pulsed current waveform

采用配备电子背散射衍射(EBSD)系统的场发射扫描电子显微镜(JSM-IT800)开展准原位 EBSD 表征, 分析电冲击处理前后试样的残余应力变化规律。进行 EBSD 测试前, 先对试样进行机械抛光, 随后采用体积分数为 10% 的高氯酸和 90% 的冰醋酸混合电解液进行电解抛光, 电解参数设定为电压 25 V、时间 50 s。利用高分辨透射电子显微镜(HRTEM)分析晶格畸变, 其中先将试样进行机械减薄, 再通过电解双喷减薄仪对试样进行减薄处理, 所用电解抛光液为体积分数 5% 的高氯酸、35% 的正丁醇、60% 的甲醇混合液, 抛光电压为 20 V。

通过振动疲劳试验机对 TC11 钛合金叶片进行了振动疲劳测试研究。根据标准《HB 5277-1984》从棒料上切取叶片试样, 其尺寸如图 2 所示。设置了 500 MPa 应力水平下的疲劳寿命测试, 对比叶片在相同应力条件下的振动循环次数, 每组十个试样并求取其平均值, 分析电冲击对 TC11 钛合金叶片疲劳寿命的影响。

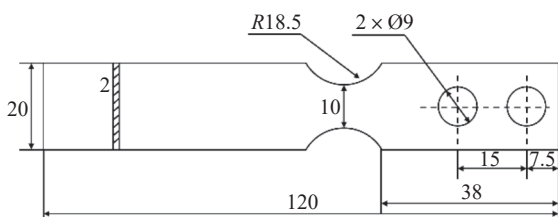


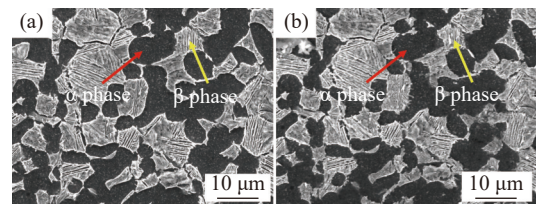
图 2 振动疲劳叶片尺寸示意(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of vibration fatigue blade dimensions

2 试验数据处理及结果

2.1 宏观残余应力

图 3(a)(b) 展示了试验在电冲击处理前后的准原位 SEM 组织形貌, 可以看出试样在经过电冲击处理后其 α、β 相的体积分数、形貌特征未出现明显差异。这表明电冲击处理不会明显改变 TC11 钛合金的物相结构。



(a) 原始试样; (b) 电冲击处理试样

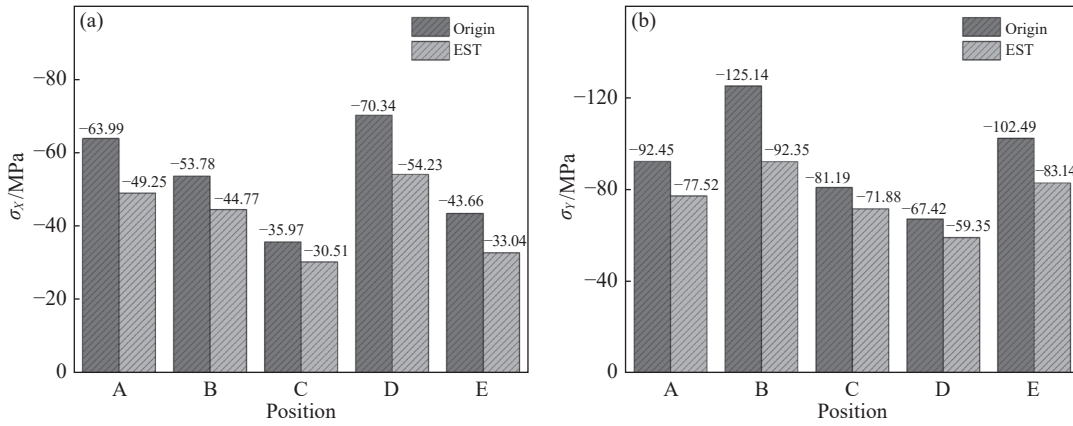
图 3 试样组织形貌

Fig. 3 Microstructure morphology of the sample

图 4 为试样表面在电冲击处理前后的准原位残余应力分布测试, 由图 4(a) 可见, 电冲击处理前, X 方向残余应力呈现非均匀分布特征, 点 A 与点 D 的残余应力处于较高水平, 点 C 的残余应力相对较低, 试样表面 X 方向平均残余应力为 53.54 MPa, 标准差为 14.12 MPa。经电冲击处理后, 各测试点 X 方向残余应力均实现不同程度降低, 平均残余应力降至 42.36 MPa, 且残余应力初始值越高的点位应力降幅越明显, 表明电冲击能量对高应力集中区域的调控效果更为突出。从图 4(b) 可知, 电冲击处理前,

Y方向残余应力整体高于X方向,平均残余应力为93.73 MPa,最高值达125.14 MPa,这一差异源于垂直锻造方向易产生不均匀塑性变形,进而诱导更高的残余应力。经电冲击处理后,Y方向残余应力普遍降低,其中点B降幅更明显,达26.2%,点D降幅

为11.9%,同样呈现高应力点位降幅更明显的规律,与X方向残余应力调控特征一致。综合分析可知,电冲击处理对TC11钛合金试样表面残余应力的调控具有靶向性,对于初始残余应力越高的应力集中区域应力降幅越大。



(a)X方向残余应力;(b)Y方向残余应力

图4 试样电冲击前后的残余应力分布

Fig. 4 Residual stress distribution of samples before and after EST

将X射线应力测定法与电解抛光技术相结合,对试样从表面至内部600 μm深度范围内的残余应力进行分层表征,测试间隔设定为150 μm,最终获得电冲击处理前后试样梯度残余应力的分布特征,结果如图5所示。由图5可知,电冲击处理前,试样在150~600 μm深度区间内的梯度残余应力分布呈现显著不均匀性,不同深度处的应力降低趋势存在明显差异,反映出试样内部沿深度方向存在显著的应力集中现象。而经电冲击处理后,试样在相同深度区间内的残余应力降低趋势趋于一致,梯度应力分布的均匀性得到提升。上述结果表明,电冲击处理能够改善TC11钛合金沿深度方向的梯度应力分布状态。

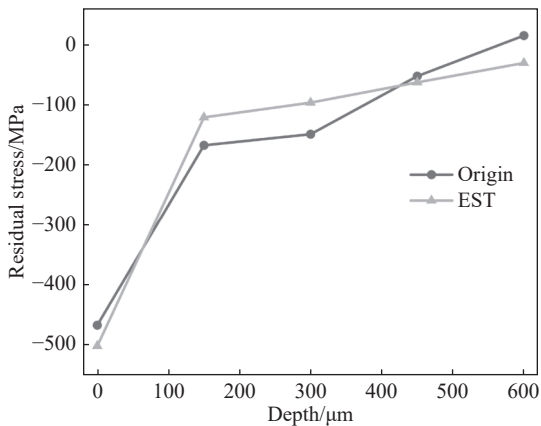


图5 试样电冲击前后的梯度应力分布

Fig. 5 Gradient stress distribution of samples before and after EST

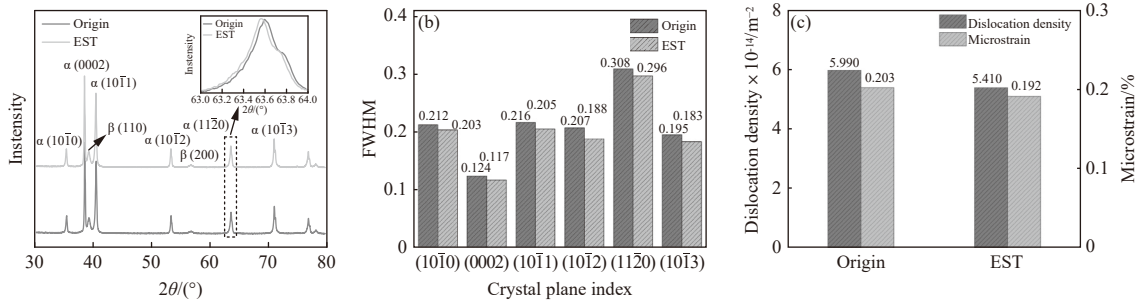
2.2 微观残余应力

图6(a)为试样的XRD图谱及其内部(10 $\bar{1}2$)晶面衍射峰的局部放大图,可见电冲击处理后所有衍射峰均向低角度方向偏移。这一现象表明,原始试样表面存在残余压应力,而电冲击处理通过调控晶格应力状态有效降低了这种残余压应力。从图6(b)的半高峰宽(FWHM)对比结果可见,原始样品各衍射峰的FWHM均大于电冲击处理后的试样,说明原始试样内部因应力积累存在晶格畸变,而电冲击处理能够通过促进原子重排与应力释放减轻晶格畸变程度。此外,基于XRD数据进一步量化分析样品的微观缺陷特征,图6(c)展示了根据FWHM计算得到的位错密度,以及采用Williamson-Hall方法分析获得的微观应变结果^[28-29]。结果表明,经电冲击处理后,试样的位错密度降低了9.68%,同时微观应变降低了5.42%。上述结果从晶体结构与微观缺陷层面共同表明,电冲击处理可通过促进位错湮灭及晶格畸变的松弛,实现对样品内部应力状态的调控。

图7为试样电冲击处理前后的KAM图,由图7(a)(b)KAM分布云图对比可见,在电冲击处理作用下,试样的整体KAM值有所下降,局部高KAM值应力集中区域的强度降低,范围有所缩减,直观表明试样内部微观残余应力实现了有效均化,应力集中现象得到明显缓解。进一步通过KAM统计数据(图7(c)(d))量化分析可知,电冲击处理后试

样的 KAM 平均值降低了 16.1%, 标准差降幅为 20%。由此可得, 相较于未处理的试样, 电冲击处理

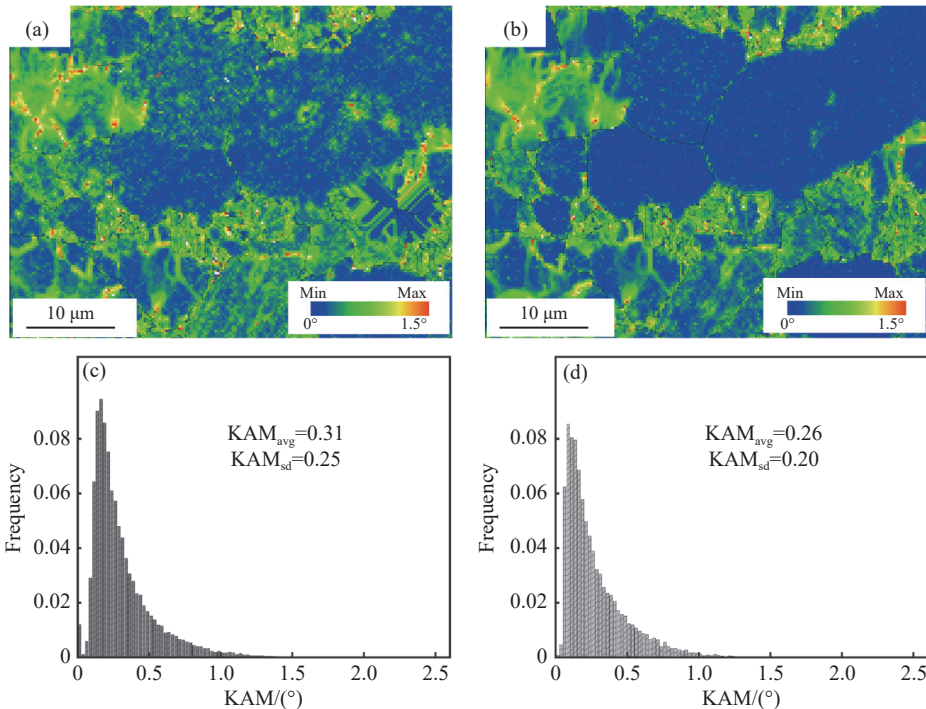
对 TC11 钛合金的微观残余应力具有均匀化调控作用, 其应力集中程度与应力分布均匀性有所改善。



(a)XRD 图谱及局部放大;(b) 各衍射峰对应的 FWHM;(c) 位错密度和微观应变

图 6 试样电冲击前后的 XRD 图谱、FWHM、位错密度和微观应变

Fig. 6 XRD patterns, FWHM, dislocation density and microstrain of samples before and after EST



(a)(c) 原始试样 KAM 云图和频率分布;(b)(d) 电冲击处理试样 KAM 云图和频率分布

图 7 试样电冲击前后的 KAM 云图和频率分布

Fig. 7 KAM contours and frequency distribution of samples before and after EST

2.3 振动疲劳性能

图 8 为电冲击处理前后 TC11 钛合金叶片的振动疲劳寿命, 由图 8 中可以得出, 在电冲击处理前试样的平均疲劳寿命为 4.55×10^5 次, 而经过电冲击处理后试样的平均疲劳寿命提升至 3.60×10^6 次。试样的疲劳性能得到了显著提升, 这是因为电冲击处理后, 试样内部的残余应力分布更加均匀, 应力集中程度较低, 而较低的应力集中会延缓疲劳裂纹的萌生和扩展, 进而提高试验在高应力下的循环振动次数, 提升疲劳性能。

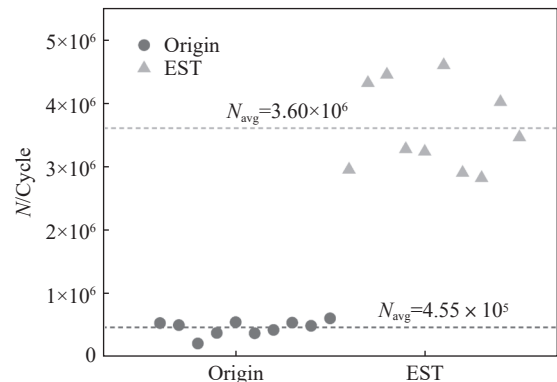


图 8 试样电冲击前后的疲劳性能

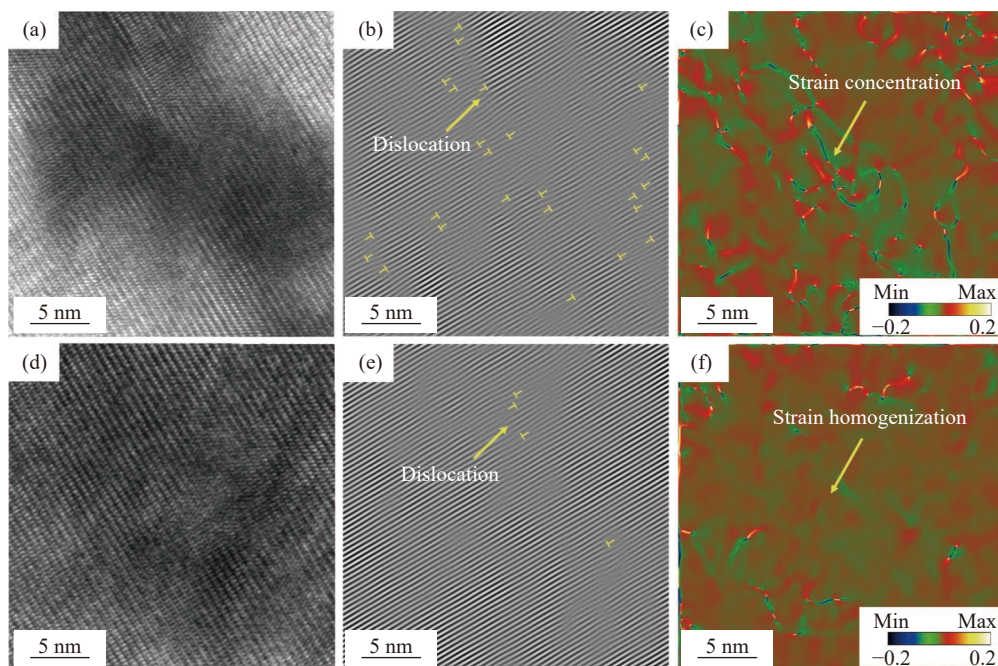
Fig. 8 Fatigue properties of samples before and after EST

3 分析讨论

3.1 HRTEM 分析

为进一步分析试样在电冲击处理前后应力的调控机制,图9采用高分辨透射电子显微镜(HRTEM)分析试样原子尺度下的应力变化。图9(a)(d)分别为电冲击前与电冲击后试样的HRTEM图像,图9(b)(e)分别对应其逆快速傅里叶变化(IFFT)图谱,通过对比观察可知,电冲击前试样存在大量位错

且在不同的区域集中,而经过电冲击处理后的试样位错显著减少。同时利用几何相位分析(GPA)技术分析晶格畸变程度,该技术基于电子衍射的相位信息,通过选取HRTEM图像两个非线性相关的衍射点来定义实际空间中的二维高分辨率图像,随后利用该图像来测量试验HRTEM图像中的晶格畸变。结果表明,原始试样存在显著的应变集中,且压应力分布不均,而电冲击处理后试样的应变集中明显缓解,最大应力值也低于原始试样。



(a)~(c) 原始试样; (d)~(e) 电冲击处理试样; (a)(d) HRTEM; (b)(e) IFFT; (c)(f) GPA

图9 电冲击前后试样的HRTEM, IFFT和GPA图

Fig. 9 HRTEM, IFFT, and GPA images of the sample before and after electrical shock

3.2 电冲击作用机制

通过对TC11钛合金宏微观残余应力分析可知,电冲击调控残余应力的内在机制可归因于高密度缺陷区域的热力学特性,即此类区域因晶格畸变、原子排列无序等通常处于高能不稳定状态,其原子动力学活性更高,对外部能量输入响应更为敏感。电冲击处理作为一种外加能场作用方式,对缺陷区域内的原子施加额外的驱动力,该驱动力的核心表现形式为热压应力。具体而言,电冲击作用过程中,材料内部会产生瞬时强电流,由于缺陷集中区域的电阻率显著高于基体有序区域,焦耳热会优先在这些区域快速积聚,引发极短时间内的剧烈温升。在此瞬态加热过程中,缺陷集中区域的温度上升速率远超过其热膨胀响应速率,形成热膨胀滞后效应。这种滞后效应导致高温区域的自由膨胀受到周围相对低温、低膨胀区域的约束,进而驱动应力场从高能

高温区向低能低温区迁移、传递,最终在缺陷集中区域形成热压应力。基于上述物理过程,可对最大热压应力进行定量估算。假设缺陷集中区域在电冲击作用下无足够时间发生热膨胀,且该区域的瞬时温升为 ΔT ,则最大热压应力 σ_{\max} 可通过公式(2)计算^[30-31]。

$$\sigma_{\max} = E\alpha\Delta T \quad (2)$$

其中 E 为杨氏模量, α 为热膨胀系数,通过电冲击处理的热压应力作用,缺陷原子能够被引导形成有序排列,从而降低残余应力,并使应力分布更加均匀。

4 结论

1) 经电冲击处理后,TC11钛合金的物相结构不会发生明显变化,试样表面的宏观残余应力以及梯度残余应力分布更均匀,并且残余应力值较高的

区域应力降低更明显, 表明电冲击处理对残余应力的调控具有靶向性, 能够有效改善 TC11 钛合金的应力分布状态。

2) XRD 图谱结果显示, 电冲击处理后试样位错密度降低了 9.68%, 同时微观应变减小; 准原位 EBSD 结果表明, 试样在经过电冲击处理后, KAM 平均值从 0.31 降低到 0.26, 其标准差从 0.25 降低到 0.20, 标准差降幅为 20%, 其应力集中的区域减少。

3) TC11 钛合金的振动疲劳结果表明, 在电冲击处理前, 试样的平均疲劳寿命为 4.55×10^5 次, 而经过电冲击处理后, 试样的振动疲劳寿命提升至

3.60×10^6 次。表明电冲击对试样残余应力的均化作用能够延缓微裂纹的萌生, 进而提升试样的疲劳性能。

4) 综上所述, 电冲击处理的能场作用能够促进应力集中区域原子的有序排列, 从而降低残余应力, 并使应力分布更加均匀。HRTEM 结果表明电冲击处理可调控 TC11 钛合金原子尺度应力状态。经电冲击处理后位错数量减少, 应变集中现象明显缓解, 最大应力值降低, 证实电冲击处理可通过改善微观结构实现应力的调控。

参考文献

- [1] FU X, WANG X D, ZHAO B, *et al.* Atomic-scale observation of non-classical nucleation-mediated phase transformation in a titanium alloy[J]. *Nature Materials*, 2022, 21(3): 290-296.
- [2] HAFEEZ N, LIU S, LU E, *et al.* Mechanical behavior and phase transformation of β -type Ti-35Nb-2Ta-3Zr alloy fabricated by 3D-Printing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 790: 117-126.
- [3] ZHANG L C, CHEN L Y. A review on biomedical titanium alloys: Recent progress and prospect[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(4): 1801215.
- [4] ZHANG Z F, WANG Z G. Dependence of intergranular fatigue cracking on the interactions of persistent slip bands with grain boundaries[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(2): 347-364.
- [5] ZHAO H Y, CHU S J, ZHANG Q F, *et al.* Effect of forging process on microstructure evolution and mechanical properties of titanium alloy for aerospace applications[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2024, 31(11): 13-32.
(赵海燕, 储双杰, 张启飞, 等. 锻造工艺对航空用钛合金微观组织演变及力学性能的影响[J]. *塑性工程学报*, 2024, 31(11): 13-32.)
- [6] JIANG L, ZHOU T W T, ZHANG X B, *et al.* Effect of natural aging on the artificial aging behavior of a new Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. *Acta Metall Sin*, 2026, 62(2): 383-396.
(姜磊, 周泰文韬, 张鑫彪, 等. 自然时效对新型 Al-Zn-Mg-Cu 合金人工时效行为的影响[J]. *金属学报*, 2026, 62(2): 383-396.)
- [7] PENG X, XIAO Y, WANG S B, *et al.* Development of V-N alloyed hot rolled ribbed bar HRB400E[J]. *China Metallurgy*, 2019, 29(1): 25-29.
(彭雄, 肖亚, 王绍斌, 等. 钒氮合金化热轧抗震钢筋 HRB400E 产品开发[J]. *中国冶金*, 2019, 29(1): 25-29.)
- [8] NAZARI F, HONARPISHEH M, ZHAO H. Effect of stress relief annealing on microstructure, mechanical properties, and residual stress of a copper sheet in the constrained groove pressing process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102(9-12): 4361-4370.
- [9] YIN Y C. Influence of pre-strain and heat treatment on subsequent deformation behavior of Ti6321 titanium alloy[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2025, 46(3): 45-52.
(尹艳超. 预应变和热处理对 Ti6321 合金变形行为的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2025, 46(3): 45-52.)
- [10] TU X X, XIAO L R, CAI Z Y, *et al.* Effects of vibration aging on residual stress and performance of instrument-grade TiC reinforced steel matrix composite[J]. *Materials Letters*, 2022, 325: 132829.
- [11] SHEN J, ZHU S G, GU W S. Effect of excitation force during vibration aging on fatigue life of white cast iron parts[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2005(2): 72-74.
(沈剑, 朱世根, 顾伟生. 振动时效激振力对白口铸铁工件疲劳寿命的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2005(2): 72-74.)
- [12] SHEN J, HE H, LI C, *et al.* Experimental study on the influence of cryogenic treatment process on machining-induced residual stress and distortion of aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 38: 2231-2249.
- [13] CAO Y F, ZHANG X, LIU H W, *et al.* Nanoscale carbide precipitates and residual stress evolution in cryogenically treated

- M50 aeroengine bearing steel investigated using advanced neutron methods[J]. *Acta Metallurgica Sinica*: 2026, 62(3): 467-476.
(曹艳飞, 张潇, 刘宏伟, 等. 深冷处理 M50 航发轴承钢中纳米碳化物析出与残余应力演化的中子散射研究[J]. *金属学报*, 2026, 62(3): 467-476.)
- [14] XIONG Y, YANG M M, DU N, *et al.* Effect of gradient nanostructures induced by supersonic fine particle bombardment on microstructure and properties of Ni-W-Co-Ta medium-heavy alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2025, 35(6): 1875-1889.
- [15] SONG Y G, LUO X K, WANG X, *et al.* Effect of ultrasonic shot peening on the microstructure and fatigue properties of FHG99 alloy[J]. *Materials Protection*, 2025, 58(11): 117-123.
(宋颖刚, 罗学昆, 王欣, 等. 超声喷丸对 FGH99 合金组织和疲劳性能的影响[J]. *材料保护*, 2025, 58(11): 117-123.)
- [16] YU W, ZHU W, YIN A, *et al.* Investigation of thermal stability of residual stresses and microstructure of dual shot peened TC17 titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010: 178075.
- [17] LIU Z, LIU H, DENG T, *et al.* Effect of deep cryogenic treatment temperature on the microstructure and properties of near-beta titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1039: 183154.
- [18] HUA L, LIU Y, QIAN D, *et al.* Mechanism of void healing in cold rolled aeroengine M50 bearing steel under electroshocking treatment: A combined experimental and simulation study[J]. *Materials Characterization*, 2022, 185: 111736.
- [19] QIAN D, LIU W, WANG F, *et al.* Homogenization of residual stress in the raceway of cold rolled M50 bearing ring via electromagnetic shocking treatment[J]. *Materials Research Express*, 2023, 10(3): 036509.
- [20] SONG X, WANG F, QIAN D, *et al.* Tailoring the residual stress and mechanical properties by electroshocking treatment in cold rolled M50 steel[J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2020, 780: 139171.
- [21] ZHANG Z, WANG F, YIN F, *et al.* Microstructure evolution and deformation behaviors of pulse electro-assisted deformation in M50 bearing steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology-Jmr& T*, 2023, 23: 4909-4921.
- [22] ZHANG D, SHI D, WANG F, *et al.* Electromagnetic shocking induced fatigue improvement via tailoring the α -grain boundary in metastable β titanium alloy bolts[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 966: 171536.
- [23] XIE L, LIU C, SONG Y, *et al.* Evaluation of microstructure variation of TC11 alloy after electroshocking treatment[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(2): 2455-2466.
- [24] LIU C, YIN F, XIE L, *et al.* Evolution of grain boundary and texture in TC11 titanium alloy under electroshock treatment[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 904: 163969.
- [25] WANG Z, LU J, SONG Y, *et al.* Mechanical properties improvement of titanium alloy and its grain boundary dislocation evolution mechanism by novel electroshock treatment[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 1437-1448.
- [26] KIM M J, LEE K, OH K H, *et al.* Electric current-induced annealing during uniaxial tension of aluminum alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2014, 75: 58-61.
- [27] WILLIAMSON G, SMALLMAN R. III. Dislocation densities in some annealed and cold-worked metals from measurements on the X-ray debye-scherrer spectrum[J]. *Philosophical magazine*, 1956, 1(1): 34-46.
- [28] DE KEIJSER T H, LANGFORD J, MITTEMEIJER E J, *et al.* Use of the Voigt function in a single-line method for the analysis of X-ray diffraction line broadening[J]. *Applied Crystallography*, 1982, 15(3): 308-314.
- [29] WILLIAMSON G, HALL W. X-ray line broadening from fided aluminium and wolfram[J]. *Acta metallurgica*, 1953, 1(1): 22-31.
- [30] OKAZAKI K, KAGAWA M, CONRAD H. An evaluation of the contributions of skin, pinch and heating effects to the electroplastic effect in titanium[J]. *Materials Science and Engineering*, 1980, 45(2): 109-116.
- [31] TANG D W, ZHOU B L, CAO H, *et al.* Thermal stress relaxation behavior in thin films under transient laser - pulse heating[J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 73(8): 3749-3752.