

通电热碾压对 TC17 合金堆焊修复区高周疲劳性能的影响

李想, 蒋莉莉, 于惠舒, 尤佳庆*

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘要: **目的** 对 TC17 合金整体叶盘修复关键技术问题进行研究。**方法** 采用不同参数的通电热碾压工艺对 TC17 合金堆焊修复区进行处理, 并通过 X 射线三维成像检测、组织分析和高周疲劳测试, 对使用通电热碾压工艺来消除组织缺陷以提升高周疲劳性能的方法进行了深入分析。**结果** X 射线三维成像检测结果表明, 当采用 6 000 A 和 7 000 A 的通电热碾压电流参数时, 在可分辨范围内实现了气孔等缺陷消除率 100%。SEM 检测结果表明, 在微观气孔底部可见“三叉缝”形貌, 其产生过程与挤压、扩散及再结晶相关。旋转弯曲疲劳测试结果表明, 通电热碾压后, TC17 合金堆焊修复区旋转弯曲疲劳寿命大幅提高, 其中值疲劳极限达 586 MPa, 分别达到了原堆焊修复区和 TC17 合金母材的中值疲劳极限的 178.8%和 104.8%。**结论** 通过通电热碾压工艺对 TC17 合金堆焊修复区进行处理可以消除工件内部气孔并极大提升堆焊区和 TC17 合金母材的疲劳性能, 该研究为航空发动机整体叶盘修复提供了工艺支撑以及理论基础。

关键词: 通电热碾压; 整体叶盘修复; 气孔消除率; 高周疲劳; 微观组织

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2026.01.013

中图分类号: TG455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2026)01-0140-09

Effect of Resistance Hot Rolling on HCF Properties of TC17 Titanium Alloy Repaired Zone

LI Xiang, JIANG Lili, YU Huishu, YOU Jiaqing*

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

ABSTRACT: The work aims to study the key technical issues of TC17 alloy blisk repair. The resistance hot rolling with different parameters was used to impact the TC17 titanium alloy repaired zone and the effectiveness of the resistance hot rolling process to eliminate defects and improve high cycle fatigue performance was verified with X-ray three-dimensional imaging test, microstructure analysis and high cycle fatigue test. The results of X-ray three-dimensional imaging test showed that the elimination rate of defects such as pores in the distinguishable range was 100% under 6 000 A and 7 000 A current parameters. The results of SEM showed that there was a “trigeminal stick” at the bottom of the pores, which was related to extrusion, diffusion and recrystallization. The results of rotary bending fatigue test showed that after resistance hot rolling, the rotary bending fatigue life

收稿日期: 2024-04-17

Received: 2024-04-17

基金项目: 辽宁省“兴辽人才计划”(XLYC1807163)

Fund: Liao Ning Revitalization Talents Program (XLYC1807163)

引文格式: 李想, 蒋莉莉, 于惠舒, 等. 通电热碾压对 TC17 合金堆焊修复区高周疲劳性能的影响[J]. 精密成形工程, 2026, 18(1): 140-148.

LI Xiang, JIANG Lili, YU Huishu, et al. Effect of Resistance Hot Rolling on HCF Properties of TC17 Titanium Alloy Repaired Zone[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2026, 18(1): 140-148.

*通信作者 (Corresponding author)

of the TC17 alloy repaired zone was significantly improved, with a median fatigue limit of 586 MPa, reaching 178.8% of the median fatigue limit of the original weld repaired zone and 104.8% of that of the TC17 alloy base material. Treating the TC17 alloy surfacing repair area through the resistance hot rolling process can eliminate the pores inside the workpiece and greatly improve the fatigue properties of the surfacing area and TC17 alloy base material. This study provides process support and theoretical basis for the overall blisk repair of aeroengines.

KEY WORDS: resistance hot rolling; repairing of blisks; elimination rates of pores; high cycle fatigue; microstructures

风扇整体叶盘材料为 TC17 合金, 它是一种富含 β 稳定元素的 α - β 两相钛合金, 具有强度高、断裂韧性好等优点, 能够满足损伤容限设计的需求以及高结构效益、高可靠性和低制造成本的要求^[1-2]。整体叶盘在工作中承受动、静等复杂交变载荷, 在多物理场的复合作用下, 叶盘表面获得的是一种高频动态响应及振动应力, 这种由动态应力响应引起的高频动应力容易使修复区产生高周疲劳破坏。研究表明, TC17 合金高周疲劳行为对内部微小气孔等缺陷非常敏感, 一旦早期的裂纹萌生, 疲劳扩展失效周期就会变得很短^[3-4]。因此, 提高 TC17 合金堆焊修复区的高周疲劳性能是整体叶盘修复技术的关键。通电热碾压法主要利用电阻点焊或滚焊方法, 通过特制形状电极对修复区进行通电热碾压以消除气孔缺陷, 最早在俄罗斯航空发动机的钛合金机匣的氩弧焊缝上多有应用, 并逐渐应用于我国的航空发动机制造工艺中。与其他碾压方法不同, 如随焊冲击碾压、加热碾压、旋转碾压等^[5-7], 通电热碾压除了对焊缝施加压力和加热作用以外, 还有高达数千安培的强电流作用^[8-10]。本文以整体叶盘 TC17 合金为试验对象, 研究了通电热碾压工艺对 TC17 合金堆焊修复区组织与高周疲劳性能的影响。

1 试验

试验选用经固溶时效处理的 TC17 合金 β 锻整体叶盘锻件, 屈服强度可达 1 120 MPa, 延伸率 6.5%, 其主要化学成分见表 1。热处理方式为固溶处理 (780~820 °C, 保温 4 h)、时效处理 (600~685 °C, 保温 8 h 后空冷至室温)。热处理制度及力学性能 TC17 合金 β 锻整体叶盘锻件高倍组织如图 1 所示, 可知, 其高倍组织为 β 区锻造和热处理后形成的网篮组织, 所有原始 β 晶界破碎, 无粗大、平直连续的晶界 α 相。

试验在常温下进行并按以下步骤制备堆焊、碾压试样: 首先将 TC17 合金锻件加工成 200 mm×30 mm×35 mm 的基板试样, 采用脉冲自动氩弧焊 (TIG) 工艺沿高度方向逐层堆焊, 填充材料选用自研 HSX-2 焊丝, 首层堆焊 1.5 mm, 铣削去除 0.3 mm, 再堆焊第 2 层并再次铣削后达 2.4 mm; 其次采用专用通电热碾压机构 (结构原理见图 2) 对堆焊层进行处理, 其中加载电流值分别选用 5 000、6 000、7 000 A, 电

表 1 TC17 合金化学成分、热处理制度及力学性能
Tab.1 Chemical composition, heat treatment process and mechanical properties of TC17 alloy wt.%

Ti	Al	Cr	Zr
BM	4.50-5.50	3.50-4.50	1.50-2.50
	Mo	Sn	O
	3.50-4.50	1.50-2.50	0.08-0.13

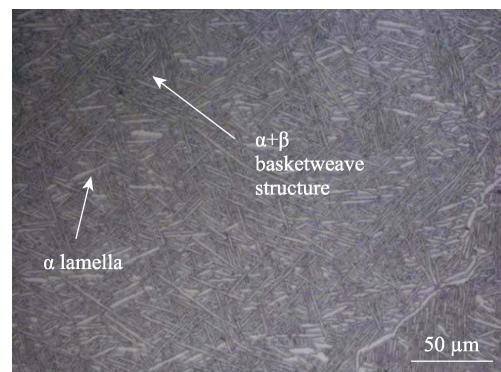


图 1 TC17 合金 β 锻整体叶盘锻件高倍组织
Fig.1 Microstructure of β forging TC17 alloy for blisks at high magnification

极直径为 8.0 mm, 电极压力为 9.0~10.0 kN, 预压时间、通电时间以及休止时间均为 0.15~0.24 s, 搭接率为 40%~60%。处理完成后将压痕铣削去除, 最终形成 2.0 mm 左右的碾压堆焊层。对于力学性能试样的制备, 需重复堆焊、铣削和碾压过程, 使之达到工艺试样的有效测试范围 (见图 3, 有效测试区高度约 12 mm), 其余非测试区直接堆焊至所需试样高度即可。在本试验中, 共制备 3 种类型试样, 第 1 种是直接堆焊试样, 第 2 种是堆焊+碾压试样, 前 2 种试样按图 4 加工进行高周疲劳对比测试。第 3 种是直接堆焊与堆焊+碾压在长度方向上各占 50%的试样, 在其直接堆焊区 (以下称未碾压区) 和堆焊+碾压区 (以下称碾压区) 沿高度方向取 ϕ 7 mm 试棒, 进行 X 射线三维成像对比检测。

2 结果与分析

2.1 气孔消除率

X 射线三维成像检测结果如图 5 所示, 可知, 未

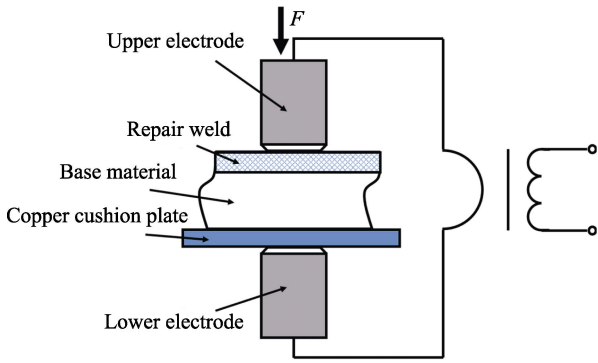


图2 通电热碾压机构原理图
Fig.2 Schematic diagram of the resistance hot rolling mechanism

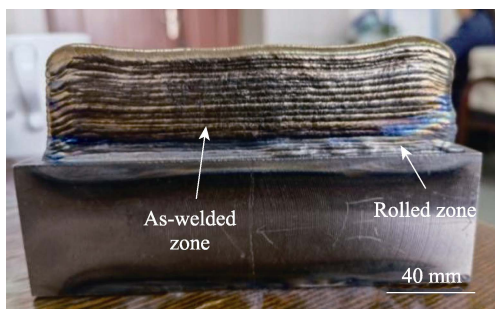


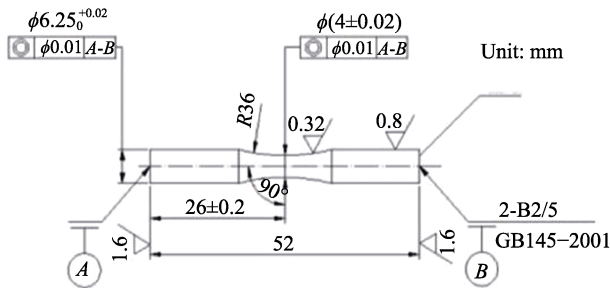
图3 TC17合金基板堆焊碾压层试样
Fig.3 Specimen of the resistance hot rolling layer for TC17 alloy

碾压区和 5 000 A 碾压区均存在不同尺寸的气孔缺陷, 缺陷主要分布在母材与堆焊的界面处。对未碾压区和碾压区进行内部缺陷统计。相对于未碾压试样, 大于 15 μm 的缺陷数量为 158, 经过 5 000 A 热碾压后, 大于 15 μm 的缺陷数量为 56, 气孔缺陷消除率为 65%。对于 6 000 A 和 7 000 A 电流参数, 大的电流可以使碾压深度进一步增加, 在可分辨范围内, 气孔等缺陷被 100%消除。尽管总体样本数较少, 但从一定程度上验证通电热碾压工艺消除气孔等缺陷的有效性。

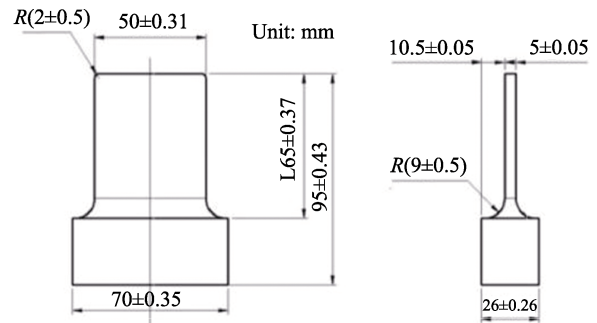
2.2 组织分析

对未碾压和碾压区进行低倍腐蚀检查, 见图 6。未碾压区与基体界面清晰, 界面处温度梯度大, 垂直于界面的枝晶较为明显, 靠近试样边缘位置由于受散热方向影响而出现等轴晶组织^[11-12]。在碾压区, 原有的堆焊层与基体的界面变得不明显, β 晶粒有变形的痕迹, 原有的外延生长特征未发生变化, 方向趋同性更为明显, β 晶粒长宽比大于 2 : 1, 未发现明显的堆焊层缺陷。

对未碾压和不同电流参数碾压区进行组织观察, 见图 7。在未碾压区组织中可见非平直连续的晶界 α 相, 在 β 晶界附近可见针状排列 α 相集束, 晶内为针状 α 相组织^[13-14]。不同电流参数的碾压对显微组织影

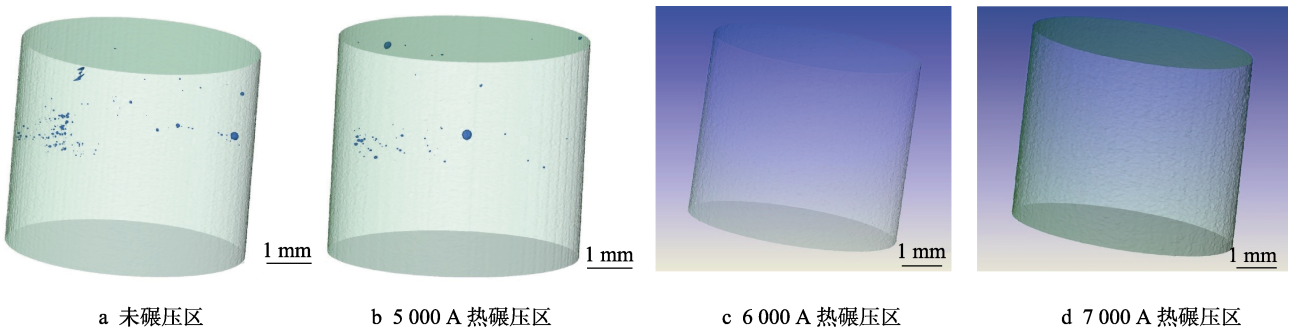


a 旋转弯曲疲劳图样



b 振动疲劳图样

图4 高周疲劳试样图纸加工图样
Fig.4 Processing draft of high cycle fatigue specimen drawing: a) draft of rotary bending fatigue specimen; b) draft of vibration fatigue specimen



a 未碾压区

b 5 000 A 热碾压区

c 6 000 A 热碾压区

d 7 000 A 热碾压区

图5 未碾压区和不同电流参数碾压区取样的检测结果

Fig.5 Test results of specimen in non-rolling area and rolling area under different current parameters: a) non-rolling area; b) hot rolling area at 5 000 A; c) hot rolling area at 6 000 A; d) hot rolling area at 7 000 A

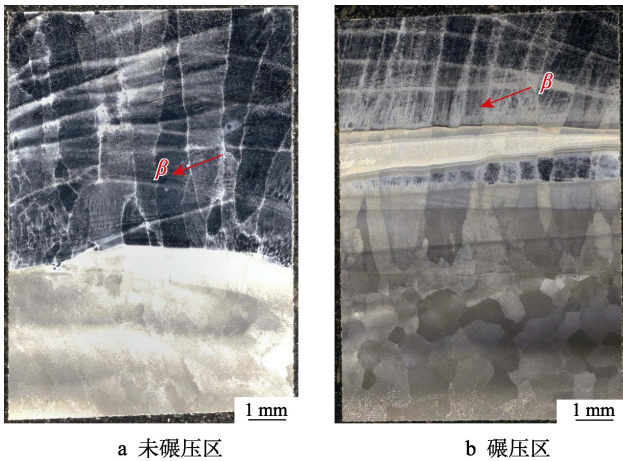


图 6 未碾压区和碾压区低倍腐蚀检查

Fig.6 Inspection for the corrosion in non-rolling area and rolling area: a) non-rolling area; b) rolling area

响均不明显, 从低倍上看, 晶界有“模糊”的迹象, 局部存在聚集的等轴 α 相, 分析认为, 这与碾压形成的再结晶及等轴化有关。在 β 晶内可见细密的针状 α 相组织, 在 β 相界可见非连续 α 相, 未见平直、连续、粗大晶界 α 相及平行羽毛状集束存在^[15-16]。

将 $\phi 7$ mm 的 X 射线三维成像检测试样沿横向(取多层堆焊的层间截面)和纵向切片, 见图 8 和图 9。未碾压试样中存在长条状缺陷, 5 000 A 碾压试样的缺陷主要分布在层间界面处, 基本呈圆形, 未见不规

则形状的缺陷。由此可见, 经过热碾压后, 不规则形状的缺陷首先被消除, 剩余缺陷均为圆形缺陷。

对 5 000 A 碾压试样纵向切片进行 SEM 观察, 见图 10。由图 10a 可见, 残留缺陷为近圆形气孔, 相邻组织均为交织排列的 α 板条, 它在 β 单相区冷却至室温过程中由 $\beta \rightarrow \alpha$ 相转变所得, 表明在碾压过程中, 该区域被加热至 β 单相区^[17-18]。由图 10b 气孔形貌可见, 其内壁光滑, 而在图 10c 中红色框内的气孔底部可见三叉缝形貌, 这是气孔被挤压变形后部分内壁贴合到一起的痕迹^[19-21]。由此可见, 在热碾压过程中, 材料被加热至 β 单相区, 变形抗力较小, 上下电极加载的作用力使缺陷周围的材料发生变形, 原有缺陷随之发生变形, 内壁贴合在一起后, 在高温扩散作用下弥合, 缺陷尺寸减小, 部分缺陷在材料变形过程中逐步变小直至消失, 部分缺陷由于变形不够充分, 在内部气体压力作用下呈球形。

上述分析结果表明, 通电热碾压处理可将不规则缺陷消除, 可有效减少修复试样中的焊接缺陷, 气孔率显著下降且对堆焊层组织无明显影响。热碾压对气孔等缺陷的弥合作用, 主要是通过大电流形成的电、热作用和加压产生的塑性变形过程得以实现的, 其作用原理应与热塑性的压实, 特别是与气孔等缺陷边界的挤压、弥合、扩散、溶解和再结晶过程相关^[22]。另外, 挤压、弥合的气孔等缺陷边界容易形成接触电阻^[23]。

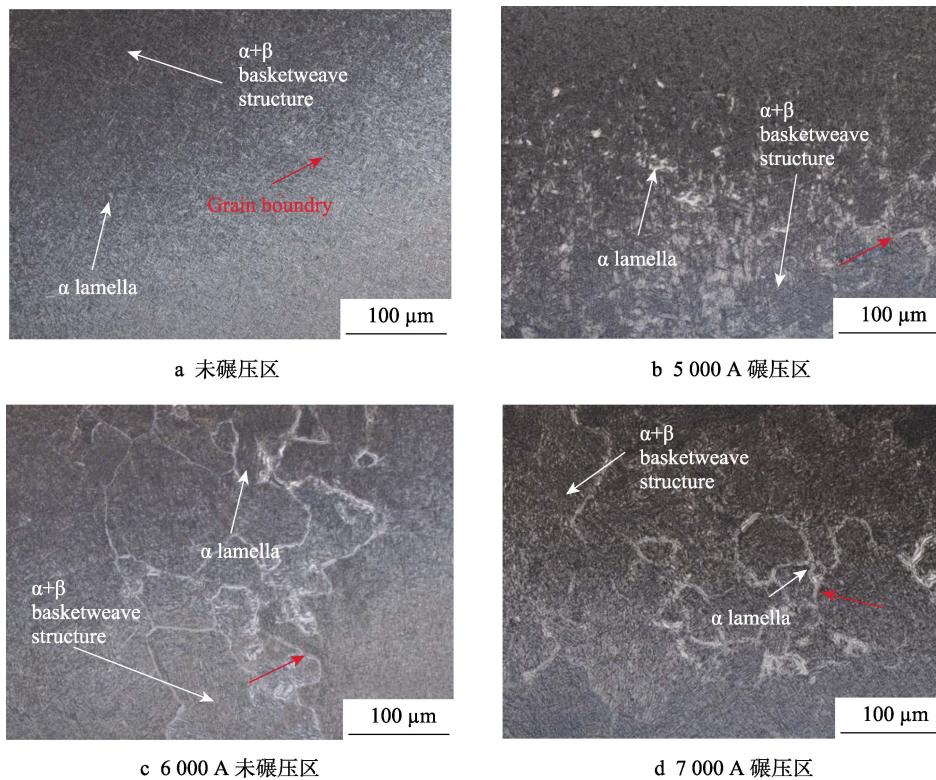


图 7 未碾压区和不同参数的碾压区低倍组织

Fig.7 Low-magnification microstructure of non-rolling area and rolling area under different current parameters: a) non-rolling area; b) rolling area at 5 000 A; c) rolling area at 6 000 A; d) rolling area at 7 000 A

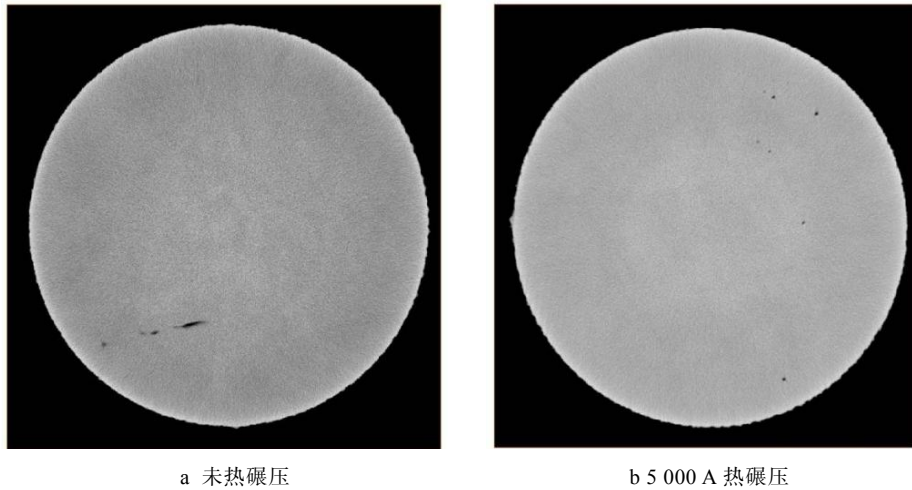


图 8 $\phi 7$ mm 的 X 射线三维成像检测试样沿横向切片

Fig.8 Section of $\phi 7$ mm specimen for X-ray three-dimensional imaging test along the transverse direction:
a) without hot rolling; b) hot rolling at 5 000 A

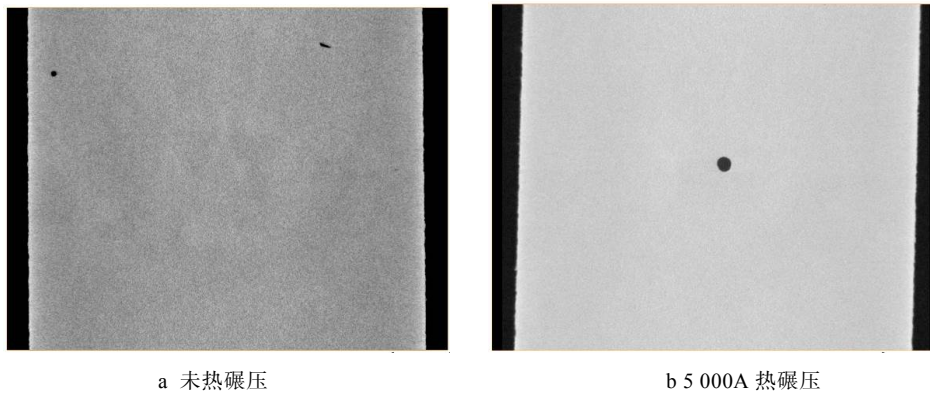


图 9 $\phi 7$ mm 的 X 射线三维成像检测试样沿纵向切片

Fig.9 Section of $\phi 7$ mm specimen for X-ray three-dimensional imaging test along the longitudinal direction:
a) without hot rolling; b) hot rolling at 5 000 A

2.3 旋转弯曲疲劳性能

未碾压处理试样的旋转弯曲疲劳性能见表 2 和图 11。测得 $P=50\%$ 时的疲劳极限为 328.18 MPa。经热碾压处理后试样的旋转弯曲疲劳性能见表 3 和图 12。测得 $P=50\%$ 时的疲劳极限为 586.67 MPa, 相比于未进行热碾压的修复试样, 旋转弯曲性能大幅提高。前期研究中对 TC17 合金锻件旋转弯曲疲劳性能进行了检测, 其中值疲劳极限为 560 MPa, 可见经过热碾压处理后, 修复试样的疲劳极限已经超过基体, 达到 TC17 锻件中值疲劳极限的 104.8%。其中, 图 11 和图 12 中红色“ \otimes ”数据点表示测试值未通过, 黑色“ \circ ”数据点表示测试值通过, 红色框选虚线表示中值疲劳所筛选数据。

未热碾压和热碾压旋转弯曲疲劳试样的典型断口形貌分别见图 13 和图 14。2 种状态的疲劳试样均从表面开始断裂, 裂纹扩展区较为平坦, 且占断口面积的大部分, 可见, 裂纹萌生后快速扩展导致试样断裂,

疲劳寿命主要集中于裂纹萌生阶段。该断裂形式与旋转弯曲试样的加载模式及工作段截面应力分布有关, 由于受力矩作用, 试样截面为拉应力和压应力梯度分布的状态, 越靠近试样表面, 应力水平越高, 一方面, 缺陷处会形成应力集中, 加速裂纹萌生, 另一方面, 裂纹萌生后, 截面尺寸减小而力矩不变, 裂纹处应力水平会进一步提高, 加速裂纹扩展^[24-26]。由此可见, 试样近表面处的缺陷会严重影响其旋转弯曲性能。

对比未热碾压和热碾压旋转弯曲疲劳试样的断口可见, 未热碾压试样断口分布的气孔缺陷数量明显多于热碾压试样, 由此可见, 热碾压处理对缺陷具有消除作用。对试样近表面位置裂纹源进行观察可见, 在未热碾压试样的裂纹源处有较大的气孔缺陷, 气孔直径约 100 μm , 距离试样表面约 50 μm , 是导致裂纹萌生的直接原因。而热碾压试样的裂纹源近表面处的气孔缺陷尺寸不足 50 μm , 且与表面距离约 500 μm , 裂纹并未在此处萌生。由此可见, 经过热碾压处理的旋转弯曲疲劳试样能在很大程度上避免缺陷处萌生裂纹。

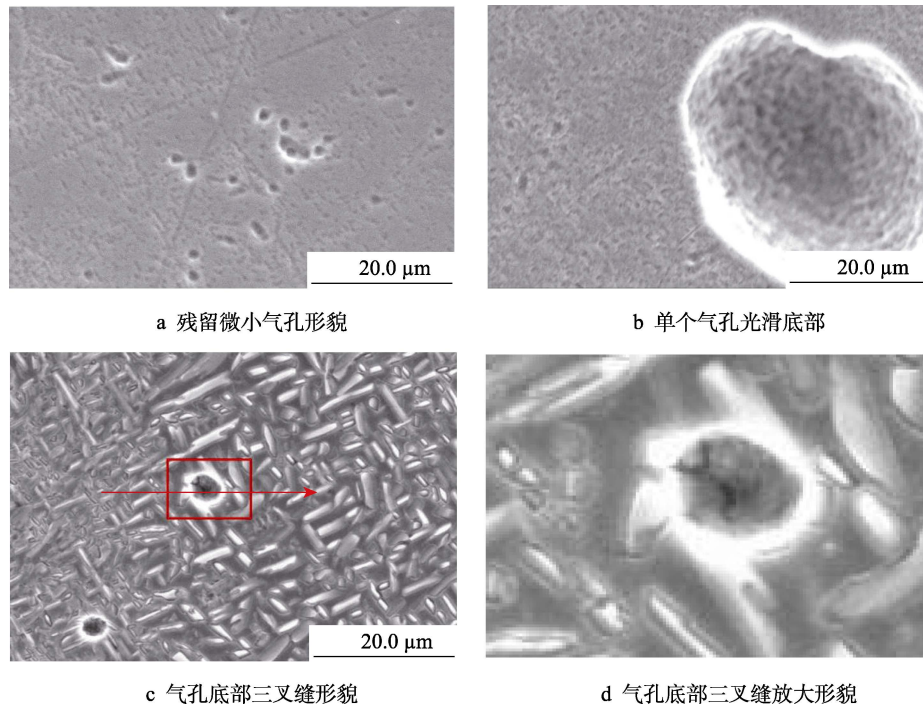


图 10 5 000 A 碾压试样纵向切片 SEM 观察结果

Fig.10 SEM observation results of longitudinal section of 5 000 A rolling test specimen: a) residual micro-pore morphology; b) smooth bottom of an individual pore; c) triple-junction features at the pore bottom; d) enlarged view of the triple-junction features at the pore bottom

表 2 未热碾压的 TC17 合金 TIG 堆焊试样旋转弯曲疲劳检测数据

Tab.2 Rotary bending fatigue test data of TC17 alloy TIG specimen without hot rolling

Number	Diame-ter/mm	Stress/MPa	Life time	Sample mor-phology	Number	Diame-ter/mm	Stress/MPa	Life time	Sample mor-phology
1	4.020	500	68 800	Broken	8	4.020	320	10 000 000	Unbroken
2	4.020	440	85 300	Broken	9	4.020	335	275 000	Broken
3	4.020	335	139 000	Broken	10	4.020	320	10 000 000	Unbroken
4	4.020	320	76 700	Broken	11	4.020	335	10 000 000	Unbroken
5	4.020	305	10 000 000	Unbroken	12	4.020	350	163 000	Broken
6	4.020	320	10 000 000	Unbroken	13	4.020	335	10 000 000	Unbroken
7	4.020	335	577 000	Broken					

表 3 热碾压的 TC17 合金 TIG 堆焊试样旋转弯曲疲劳检测数据

Tab.3 Rotary bending fatigue test data of TC17 alloy TIG specimen with hot rolling

Number	Diame-ter/mm	Stress/MPa	Life time	Sample mor-phology	Number	Diame-ter/mm	Stress/MPa	Life time	Sample mor-phology
1	3.993	560	3 461 379	Broken	9	4.002	600	10 000 000	Unbroken
2	3.994	540	10 000 000	Unbroken	10	3.985	620	1 892 460	Broken
3	3.982	560	10 000 000	Unbroken	11	3.997	600	10 000 000	Unbroken
4	3.980	580	144 222	Broken	12	3.997	620	10 000 000	Unbroken
5	4.001	560	1 703 830	Broken	13	4.006	640	627 562	Broken
6	3.980	540	10 000 000	Unbroken	14	3.986	620	354 646	Broken
7	3.980	560	10 000 000	Unbroken	15	4.000	600	10 000 000	Unbroken
8	3.997	580	10 000 000	Unbroken					

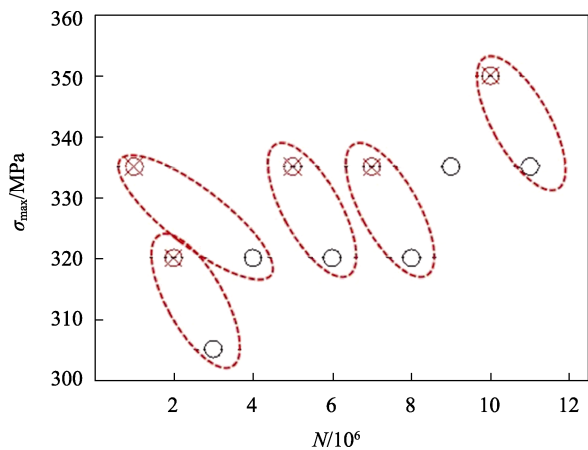


图 11 未热碾压的 TC17 合金 TIG 堆焊试样
旋转弯曲疲劳极限
Fig.11 Rotary bending fatigue limit of TC17 alloy TIG
specimen without hot rolling

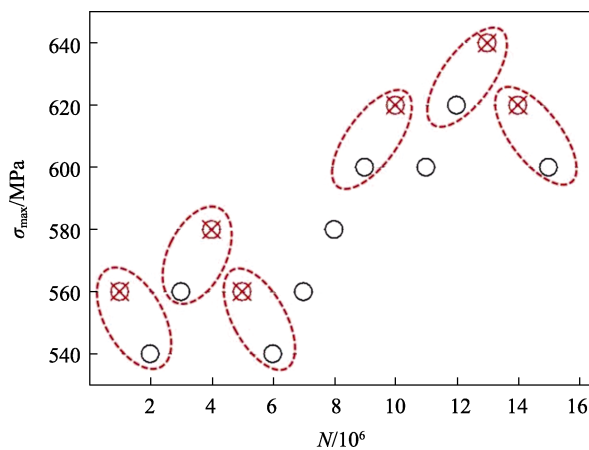
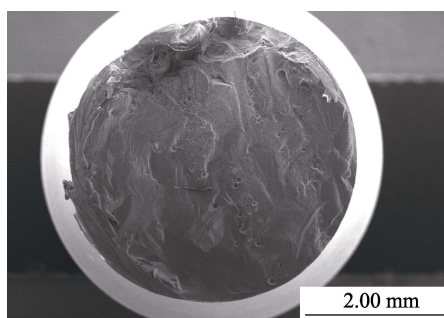
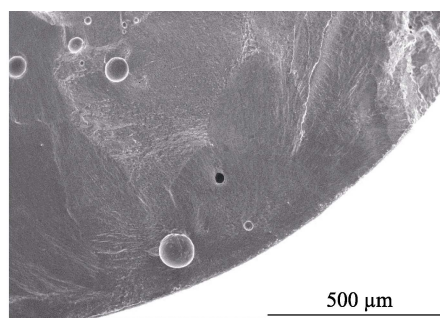


图 12 热碾压的 TC17 合金 TIG 堆焊试样
旋转弯曲疲劳极限
Fig.12 Rotary bending fatigue limit of TC17 alloy TIG
specimen with hot rolling

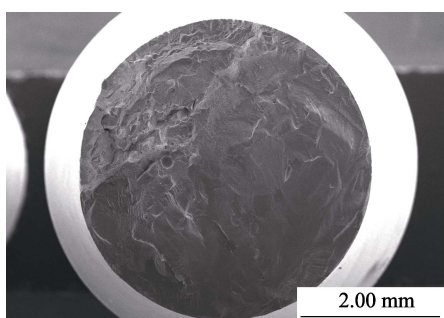


a 宏观形貌

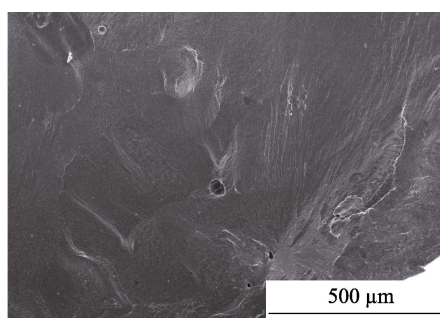


b 裂纹源处

图 13 未热碾压旋弯疲劳试样断口
Fig.13 Fracture of fatigue specimen without hot rolling: a) macroscopic appearance; b) crack initiation site



a 宏观形貌



b 裂纹源处

图 14 热碾压处理后的旋弯疲劳试样断口
Fig.14 Fracture of fatigue specimen after hot rolling: a) macroscopic appearance; b) crack initiation site

3 结论

1) X 射线三维成像检测结果表明, 通电热碾压工艺可有效减少修复试样中的气孔等缺陷, 通过调整热碾压参数, 原有不规则缺陷趋于减小和球化甚至消除, 采用电流参数 6 000 A 和 7 000 A 的热碾压试样的气孔等缺陷消除率达到可检测分辨率的 100%。

2) 低倍组织和 SEM 分析结果表明, 热碾压处理

对堆焊修复区组织影响不明显, 从低倍上看晶界有“模糊”的迹象, 其对气孔等缺陷的弥合作用与对应界面处的热塑性压实、扩散及再结晶过程有关。

3) 旋转弯曲疲劳测试结果表明, 热碾压后的 TIG 堆焊区旋转弯曲疲劳性能大幅提高, 其中值疲劳极限达 586 MPa, 超过了未碾压区及母材的中值疲劳极限。疲劳断口分析进一步证明了通电热碾压工艺及参数优化对高周疲劳性能提高的直接影响。

参考文献:

- [1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册 (第二卷)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Aviation Materials Handbook Editorial Committee of China. China Aeronautical Materials Handbook (Volume Two)[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [2] 侯廷红, 何勇, 陈海生, 等. 压气机整体叶盘叶片损伤修复技术研究[J]. 航空维修与工程, 2019(4): 37-40.
HOU T H, HE Y, CHEN H S, et al. Research on Blade Damage Repair Technology for Compressor Blisk[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2019(4): 37-40.
- [3] 张赛飞, 赵兴东, 徐强, 等. β 锻 TC17 钛合金的高周疲劳研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(19): 123-126.
ZHANG S F, ZHAO X D, XU Q, et al. Study on High Cycle Fatigue of β -Forged TC17 Titanium Alloy[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(19): 123-126.
- [4] 张赛飞, 曾卫东, 周大地, 等. TC17 合金等轴组织和网篮组织的高周疲劳断口[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(S1): 175-179.
ZHANG S F, ZENG W D, ZHOU D D, et al. High Cycle Fatigue Fracture of Equiaxed Structure and Basket Structure of TC17 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(S1): 175-179.
- [5] 初雅杰, 李晓泉, 吴申庆. 热碾压对 AZ31 镁合金焊接接头组织和性能影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(11): 2739-2743.
CHU Y J, LI X Q, WU S Q. Effect of Hot Rolling on Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joints of AZ31 Magnesium Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(11): 2739-2743.
- [6] 炊鹏飞. 基于快速多重旋转碾压的纯钛表面纳米化[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(5): 124-128.
CHUI P F. Surface Nanocrystallization of Pure Titanium Induced by Fast Multiple Rotation Rolling[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(5): 124-128.
- [7] 范成磊, 方洪渊, 田应涛, 等. 随焊冲击碾压对 YL12CZ 铝合金接头组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2004, 32(10): 24-28.
FAN C L, FANG H Y, TIAN Y T, et al. Influence on Metallographic Structure and Mechanical Properties of YL12CZ Welded Jointed with Weld with Trailing Impactive Rolling[J]. Journal of Materials Engineering, 2004, 32(10): 24-28.
- [8] LIU L, SHI R Z, ZHANG S Y, et al. Effects of Ag Shell on Electrical, Thermal and Mechanical Properties of Cu@Ag Composite Solder Preforms by Electromagnetic Compaction for Power Electronics[J]. Materials Characterization, 2023, 197: 112702.
- [9] PENTOS K, MBAH J T, PIECZARKA K, et al. Evaluation of Multiple Linear Regression and Machine Learning Approaches to Predict Soil Compaction and Shear Stress Based on Electrical Parameters[J]. Applied Sciences, 2022, 12(17): 8791.
- [10] ROODPOSHTI H R, HAFIZI M K, KERMANI M R S, et al. Electrical Resistivity Method for Water Content and Compaction Evaluation, a Laboratory Test on Construction Material[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 168: 49-58.
- [11] CHI J X, CAI Z Y, ZHANG H P, et al. Titanium Alloy Components Fabrication by Laser Depositing TA15 Powders on TC17 Forged Plate: Microstructure and Mechanical Properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 818: 141382.
- [12] LIU C, WU Y J, WANG H X, et al. Evolution of Microstructure and Hardness of TC11 Titanium Alloy under Different Electroshocking Treatment Directions[J]. Metals, 2023, 13(8): 1396.
- [13] 邓雨亭, 李四清, 王旭. β 锻 TC17 钛合金大块 α 相研究[J]. 材料工程, 2023, 51(12): 68-74.
DENG Y T, LI S Q, WANG X. Blocky α Phase in β Forging TC17 Titanium Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(12): 68-74.
- [14] 杜随更, 陈虎, 胡弘毅, 等. TC17 线性摩擦焊界面温度分析与测量[J]. 焊接, 2023(8): 1-5.
DU S G, CHEN H, HU H Y, et al. Analysis and Measurement of Interface Temperature of TC17 Linear Friction Welding[J]. Welding & Joining, 2023(8): 1-5.
- [15] 刘佳权. TC17 钛合金激光增材修复组织与性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
LIU J Q. Study on the Tissues and Properties of TC17 Titanium Alloy Laser Additive Repair[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [16] 温飞娟, 温奇飞, 龙樟, 等. TC17 钛合金热变形行为及本构模型[J]. 机械工程材料, 2023, 47(8): 86-92.
WEN F J, WEN Q F, LONG Z, et al. Hot Deformation Behavior and Constitutive Model of TC17 Titanium Alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(8): 86-92.
- [17] LAI X Q, WANG Y N, WANG D, et al. Research on Surface Integrity and Fatigue Properties in the Turning of TC17 Titanium Alloy Based on the Response Surface Method[J]. Materials, 2023, 16(22): 7180.
- [18] SHI H L, LIU D X, JIA T Y, et al. Effect of the Ultrasonic Surface Rolling Process and Plasma Electrolytic Oxidation on the Hot Salt Corrosion Fatigue Behavior of TC11 Alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 168: 107443.
- [19] LI G, SUN C Q. High-Temperature Failure Mechanism and Defect Sensitivity of TC17 Titanium Alloy in High Cycle Fatigue[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 122: 128-140.
- [20] 李晓泉, 初雅杰, 杨宗辉. AZ31B 镁合金 TIG 焊接头的热碾压力学改性实验研究[J]. 航空材料学报, 2012, 32(3): 46-50.
LI X Q, CHU Y J, YANG Z H. Experimental Research on Hot Rolling to Improve TIG Welding Joint Mechanical Properties for AZ31B Magnesium Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(3): 46-50.

- [21] 党群, 姚彦军. TC17 合金盘试验件 β 锻造工艺研究[J]. 锻造与冲压, 2022(15): 40-43.
DANG Q, YAO Y J. Research on β Forging Process by the Test Sample of TC17 Alloy Disk[J]. Forging & Metalforming, 2022(15): 40-43.
- [22] 李锦涛. PEMFC 极板用热轧钛合金板材的组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
LI J T. Study on the Tissue Properties of Hot-rolled Titanium Alloy Plates for PEMFC Plate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [23] 包建兴. TC4 钛合金电流辅助微成形电致塑性效应与工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
BAO J X. Study on Electroplasticity Effect and Process of TC4 Titanium Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [24] YOU J Q, ZHAO Y Q, DONG C L, et al. Improving the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Cu Dissimilar Joints by Ultrasonic Dynamic-Stationary Shoulder Friction Stir Welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 311: 117812.
- [25] WANG J L, PENG W J, YU J, et al. Fatigue Evaluation of TC17 Titanium Alloy Shaft with Surface Scratch Based on FEA and Fracture Mechanics[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 117: 104961.
- [26] 王益可, 李仁花, 陈玉华, 等. 电弧增材制造 TC4 微观组织调控及力学性能研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(11): 135-143.
WANG Y K, LI R H, CHEN Y H, et al. Microstructure Regulation and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy by Wire Arc Additive Manufacturing[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(11): 135-143.