

电磁耦合处理对 Ti_2AlNb 合金电子束焊缝疲劳寿命的影响

王潇桐^{1,2}, 赵桐³, 王渊^{1,2}, 黄坤兰^{1,2}, 张骞文^{1,2}

(1. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065)

(2. 宜宾四川大学产业技术研究院, 四川 宜宾 644005)

(3. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘要: 在航空发动机机匣的焊接过程中, 焊缝作为薄弱部位, 将直接影响整个机匣的疲劳性能及服役寿命。通常采用焊后热处理消除焊接热应力, 均匀焊缝组织, 提高焊缝性能, 但对于疲劳寿命的改善效果不明显。本研究创新性地提出电磁耦合处理技术, 对热处理后的 Ti_2AlNb 合金电子束焊缝进行调控, 提升焊接接头的疲劳寿命, 同时研究了在电磁耦合作用下焊缝区材料组织演变规律。结果表明, 焊缝疲劳极限由 134.2 MPa 增至 159.4 MPa, 提升 18.8%。经电磁耦合处理后, 焊缝区域的残余压应力最高提升 128.7%。同时, 在不改变材料组织和相成分的情况下, 在材料内部生成位错墙与位错纠缠, 疲劳裂纹源由表层移至次表层, 疲劳裂纹扩展速度降低, 使得疲劳性能提升。焦耳热效应、电子风力效应与磁致塑性效应的耦合作用促进了位错运动, 同时增强了疲劳裂纹扩展障碍。本研究为提升焊缝疲劳寿命提供了一种新方法, 并为电磁耦合处理提升焊缝疲劳性能提供了可行性依据。

关键词: 电磁耦合处理; Ti_2AlNb ; 电子束焊接; 疲劳性能; 残余应力

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)05-1683-12

对于航空发动机的机匣等高温结构部件, 疲劳性能是其重要指标^[1-3]。航空零部件受到质量限制, 关键位置的连接以焊接为主。但是, 焊接作为一种快速加热和凝固的非平衡过程, 在急冷急热中会引入残余应力, 带来偏析、夹杂等缺陷, 导致接头区域组织与性能的不均匀性, 对疲劳寿命产生显著影响^[1, 4-5]。采用焊后热处理进行应力释放与组织均匀化, 已成为改善焊接质量的必要手段, 得到了广泛应用。但航空工业的发展对焊接接头的疲劳性能提出了更高要求, 单独的热处理方法难以实现, 因此, 需要寻求进一步优化方案^[6-7]。

外场条件包括电场, 磁场, 超声波等, 基于外场条件的调控技术是近年来新发展的调控材料残余应力, 改善材料机械性能的研究热点^[8-9]。宋^[10-11]等对有预制裂纹的钛合金板施加高密度脉冲电流后, 发现板材的塑性变形有恢复现象, 微裂纹的尖端产生闭合效应。他认为是电场能将位错缠结, 促进位错运动和原子扩散; 电场的焦耳热效应在微裂纹区域发生绕流, 从而实现局部再结晶, 修复微裂纹。类似的现象在文献^[12-13]中也有报道。脉冲电流作用于正在变形

的金属时, 使得变形阻力大幅降低, 塑性显著增加, 这种影响称为电致塑性效应, 而电子与位错的相互作用被称为电子风力效应。Shu 等^[14]发现脉冲电场使 Sn 的硬度提升 27.3%, 分析认为是脉冲电场导致了位错运动, 从而促进硬度提升。Zhang 等^[15]的研究表明, 在电塑压缩过程中, 电子风力效应促进位错的滑动, 从而使 Al-Zn-Mg 合金的 $\{110\}\langle\bar{1}11\rangle$ 织构得到增强。现有的研究成果表明, 电流可以作用于晶体缺陷, 并实现对材料的改性。

脉冲磁场也被发现可以引起材料内部位错运动, 从而改变残余应力与力学性能, 其作用机制主要为磁致振动效应与磁致塑性效应。Lu 等^[16]发现脉冲磁场可以降低低碳钢焊接件的残余应力。Cai 等^[17-18]进行了更深入的研究, 发现脉冲磁场通过磁致塑性效应引起了中碳钢晶体内的位错迁移, 导致了晶粒的塑性变形以及残余应力的释放。Cai 认为由脉冲磁场导致的塑性变形具有选择性, 与热处理中的塑性变形有本质不同。Shao 等^[19]与 Wang 等^[20]在各自的研究中也报道了相似的现象。磁致塑性是在磁场作用下, 晶体材

收稿日期: 2022-09-28

基金项目: 航空科学基金 (ASFC-20200054025001); 国家自然科学基金青年基金 (51705348)

作者简介: 王潇桐, 男, 1998 年生, 硕士生, 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610065, E-mail: saotong0415@163.com

料中的应力场发生变化，导致电子自旋能态改变、点缺陷移动及位错的运动、增殖与湮灭^[21]。对于脉冲磁场作用下的非铁基材料，磁致塑性被认为是位错运动的主要原因。许等^[22]对 TC4 板材施加脉冲磁场，发现其位错分布更加均匀，整体位错密度上升，并以磁致塑性效应作为解释。Zhong 等^[23]研究了脉冲磁场与电磁耦合处理对 P10 硬质合金刀具的影响，发现位错密度均发生显著变化，并使用 COMSOL Multiphysics 建立了瞬态三维模型，计算了变形位移和方向、内应力和体积应变，定量证实了脉冲磁场与电磁耦合处理产生的内应力都能迫使位错移动。

针对 Ti₂AlNb 合金电子束焊缝疲劳性能亟待改善的问题，在常规的焊缝热处理之后，创新型地引入电磁耦合处理技术，通过促进材料内部位错的滑移和增殖，增加疲劳裂纹扩展障碍，在不改变材料组织和相成分的情况下，实现 Ti₂AlNb 合金电子束焊缝疲劳寿命提升，为改善材料疲劳寿命提供了新的解决思路。

1 实验

实验材料为由中国航空制造工程研究院提供，经电子束焊接及焊后热处理的 Ti₂AlNb 合金，名义成分为 Ti-22Al-24Nb-0.5Mo，其力学性能如表 1 所示。将合金板进行电子束焊接及焊后热处理，采用线切割加工出标准疲劳试样若干，使焊缝位于试样中部，试样尺寸如图 1 所示。

使用自制电磁耦合处理装置对试样进行电磁耦合处理^[24]。将待处理试样置于电磁处理装置的励磁线圈工作腔内，两侧分别用圆柱铜极固定，铜极接入脉冲电场电路；利用电磁处理装置向零件同时施加同方向的脉冲电流和脉冲磁场，形成相互耦合的脉冲电磁场对试样进行强化处理，处理参数如表 2 所示，工作原理如图 2 所示。

表 1 Ti₂AlNb 合金力学性能

Table 1 Static mechanical properties of Ti₂AlNb

Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa
940	1096	121

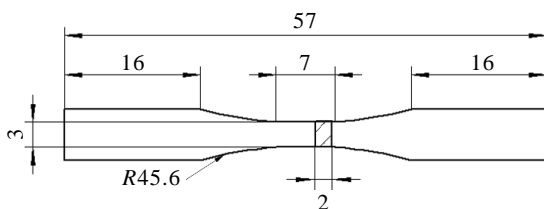


图 1 疲劳试样尺寸

Fig.1 Dimensions of the fatigue specimen

使用 WDW-RD100 万能试验机对电磁耦合处理前后的试样进行室温等幅拉压循环疲劳试验。所有的疲劳试样表面都被抛光到镜面状态 ($R_a=0.2$) 以消除表面粗糙度对疲劳性能的影响。载荷加载频率为 15 Hz，应力比 $R=-1$ 。应力载荷范围为 300 至 600 MPa，应力区间为 100 MPa。使用 XL-640 型 X 射线衍射系统测量焊接接头处横向残余应力分布，如图 3 所示。X 射线源为 CuK α ，光束直径为 2 mm。衍射面为 {213}，衍射角为 142°。实验测试 4 个试样，每个试样从焊缝中心开始，间隔 1.5 mm 选取一个测试点位，一直延伸到母材区域。每个点位重复测量 3 次取平均值。每个试样都经过化学腐蚀以去除加工应力层，腐蚀液配比为 HF:HNO₃:H₂O₂:H₂O=1:2:35:50 (体积比)。

表 2 电磁耦合处理参数

Table 2 Parameters of electromagnetic coupling treatment (EMCT)

Group	Electric field/V	Frequency /Hz	Number	Magnetic field/T	Interval /s	Number
UT	-	-	-	-	-	-
EMCT	0.6	75	150	1.2	10	20

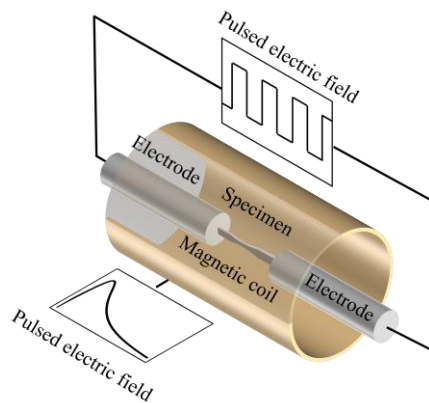


图 2 电磁耦合处理工作原理

Fig.2 Schematic of the working principle of EMCT



图 3 残余应力测量点位置

Fig.3 Locations of residual stress measurement

使用 Olympus CX22 光学显微镜 (OM) 观察焊接接头的宏观形貌。使用 FEI Quanta 650F 扫描电子显微镜 (SEM) 观察电磁耦合处理前后焊缝熔合区和热影响区的微观结构变化。使用 Talos F200X 透射电子显微镜 (TEM) 观察电磁耦合处理前后焊缝的熔合区和热影响区的位错运动和变形。TEM 样品通过 Gatan 695 FIB 仪器的聚焦离子束 (FIB) 方法制备。离子枪的分辨率为 2.5 nm, 工作电压为 500 V~30 kV, 光束为 1 pA~50 nA。场发射电子枪的加速电压为 30 kV, 工作距离为 9 mm。样品制备时参数: 离子束能量为 5 keV, 离子枪角度为 ±8°, 向孔内减薄; 4 keV ±4° 减薄 5 min; 4 keV ±4° 减薄 5 min; 3 keV ±3° 减薄 5 min。

2 实验结果

电磁耦合处理前后 Ti₂AlNb 电子束焊接接头疲劳

寿命如表 3 所示, 将疲劳寿命绘制 S-N 曲线, 结果如图 4 所示。根据 Basquin's Equation 对 S-N 曲线进行线性拟合, 得到焊接接头的疲劳极限。

$$S = \sigma'_f (2N_f)^b \tag{1}$$

其中, S 是应力幅值, N_f 是失效周期数, σ'_f 是疲劳强度系数, b 是 Basquin 指数。可以看到, 样品经电磁耦合处理后的拟合 S-N 曲线高于未处理样品曲线, 表明电磁耦合处理对接头的疲劳寿命有提升效果。在本研究中, 当 N_f 达到 10⁷ 时, 即认为试样达到无限疲劳寿命, 通过获得 σ'_f 和 b 的值, 可以计算出试样的疲劳极限 σ_{-1,10⁷} (R=-1, N_f=10⁷ 时的疲劳极限)。结果显示, 未处理试样的疲劳极限为 134.2 MPa, 而经过电磁耦合处理试样的疲劳极限增至 159.4 MPa, 提升 18.8%。这说明电磁耦合处理对 Ti₂AlNb 电子束焊接接头的疲劳性能有显著的提升作用。

表 3 电磁耦合处理前后 Ti₂AlNb 电子束焊缝疲劳实验结果

Table 3 Fatigue results of Ti₂AlNb EBW joint before and after EMCT

Group	Load/kN	Stress amplitude/MPa	Number	N _f
UT	3.6	600	UT-1	10 733
			UT-2	12 583
	3.0	500	UT-3	23 985
			UT-4	33 476
			UT-5	88 609
	2.4	400	UT-6	136 953
			UT-7	92 586
			UT-8	257 313
EMCT	3.6	600	EMCT-1	11 722
			EMCT-2	15 363
	3.0	500	EMCT-3	20 601
			EMCT-4	38 463
			EMCT-5	164 290
	2.4	400	EMCT-6	128 220
			EMCT-7	106 409
			EMCT-8	365 844

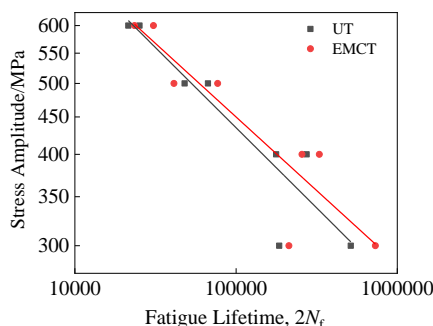


图 4 电磁耦合处理前后 Ti₂AlNb 电子束焊缝疲劳寿命 S-N 拟合曲线

Fig.4 S-N curves of Ti₂AlNb EBW joint before and after EMCT

3 分析与讨论

3.1 电磁耦合处理前后残余应力分布变化

电磁耦合处理前后 Ti₂AlNb 电子束焊接接头的残余应力变化如图 5 所示。可以看到, 在电磁耦合处理前, 焊接接头的残余应力状态均为压应力, 范围在 50~130 MPa 之间。经电磁耦合处理后, 所有试样的残余压应力均得到增强, 在焊缝中心区域增强效果最为显著, 平均残余压应力从 64.1 MPa 增至 146.6 MPa, 增幅达到 128.7%。从图 5e 看出, 随着位置从焊缝中心到母材区域的延伸, 残余应力的变化幅度也略有降低, 这可能是因为试样沿着测试点方向横截面积变化导致处理过程中电流密度降低, 使得电磁耦合处理对残余应力的调控效果减弱。

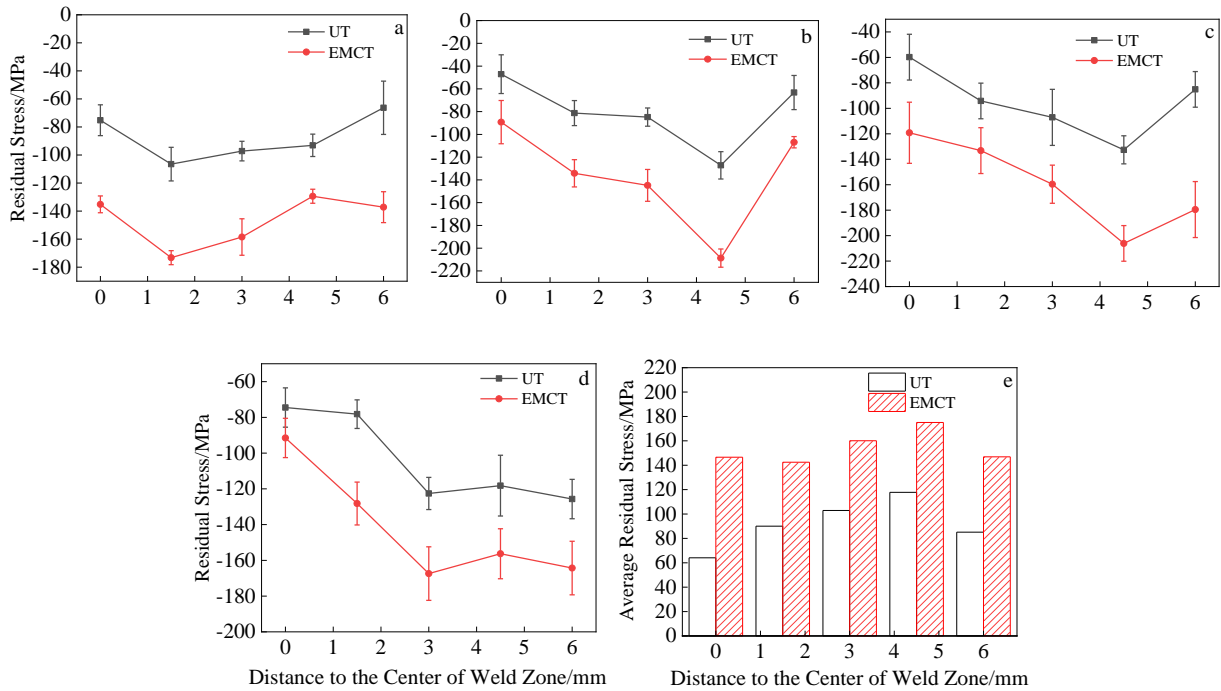


图 5 电磁耦合处理前后 Ti₂AlNb 电子束焊缝残余应力分布变化及平均残余应力变化

Fig.5 Residual stress distribution of sample 1-sample 4 (a-d), change of average residual stress (e) in weld zone before and after EMCT

残余压应力主要来自于电磁耦合处理过程中产生的焦耳热效应和位错的运动。焦耳热效应带来的温升可由下述公式计算^[25]：

$$\Delta T = \frac{\rho \int I^2 dt}{C_p d} \quad (2)$$

其中： ΔT 是温度变化； C_p 是材料的恒压比热，为 0.612 kJ/kg； d 是材料的密度，为 5.5×10^3 kg/m³； ρ 是材料的电阻率，为 1.686×10^{-6} Ω·m； I 是通过材料的有效电流密度，为 12.33 A/cm²。前期研究表明，脉冲电流是一种高速加热的手段，当材料温度增加的速度远超热膨胀的速度时，将在高速加热的过程中产生热应力。热应力由下述公式计算：

$$\sigma = E\alpha\Delta T \quad (3)$$

其中， σ 为热应力； E 为材料的弹性模量，为 121 GPa； α 是材料的热膨胀系数，为 8.9×10^{-6} °C⁻¹； ΔT 是温度变化。

材料中的残余应力对疲劳寿命有着很大的影响，主要体现在疲劳裂纹的萌生和扩展的早期阶段^[26]。在循环应力的作用下，材料表面微裂纹出现所需的应力水平低于材料内部，导致多数疲劳裂纹起源于材料的表面或表层。因此，在表面引入残余压应力可以减小

或抵消循环载荷的影响，抑制裂纹在表面萌生，从而改善疲劳性能。同时，残余压应力能够显著降低引起裂纹扩展的有效应力幅，从而延缓裂纹扩展。实验结果显示，经过电磁耦合处理之后的试样残余压应力均得到了增强，这可以作为疲劳寿命提升的合理解释。

值得注意的是，现有研究认为电磁耦合强化不仅作用于材料表面，而是整体，脉冲电流与磁场对金属材料内部的位错运动具有促进作用。因此，采用 SEM 与 TEM 等观察 Ti₂AlNb 电子束焊接接头的微观组织变化和位错的运动，进一步探究电磁耦合处理提升焊接接头疲劳性能的机理。

3.2 基于 OM 与 SEM 的组织结构变化

首先在光学显微镜 (OM) 下观察焊接接头的宏观组织形貌，结果如图 6 所示。Ti₂AlNb 电子束焊接接头沿焊缝熔合线呈对称分布，从中间向两侧分别为熔合区 (fusion zone, FZ)，热影响区 (heat affected zone, HAZ)。其中熔合区的单侧宽度约 1.5 mm，热影响区宽度约 1 mm。熔合线部位由等轴晶组成，随着热量的扩散，熔合区主要由粗大的柱状晶组成，尺寸可达 100 μm。到了热影响区，热量梯度逐渐减小，形貌也逐渐由柱状晶转变为等轴晶，随着热量的继续扩散，组织的变化也越来越小，直至与母材区相同。

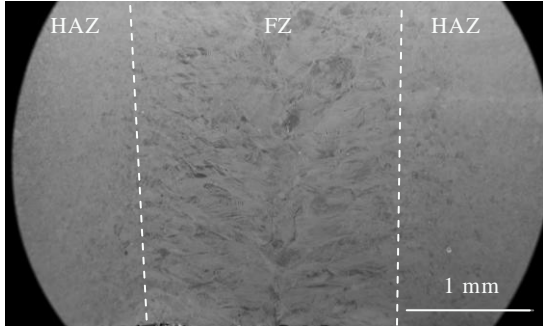


图 6 Ti₂AlNb 电子束焊缝 OM 照片
Fig.6 OM image of Ti₂AlNb EBW joint

图 7 显示了电磁耦合处理前后焊缝熔合区的微观组织形貌。其中明度低的为 O 相，明度高的为 B2 相，从 7a 和 7c 中可以看到，焊缝熔合区 B2 相基体析出了大量弥散分布的 O 相针状马氏体^[27]，尺寸十分细小，为 1~2 μm。观察图 7b 和 7d 可以发现，2 种状态下的样品均是在 B2 相中弥散分布了形态相近的平行马氏体集束。

采用 Image Pro Plus 6.0 图像处理软件的 Count Size 模块统计焊缝 SEM 照片中 O 相与 B2 相的面积比，以此表征 O 相与 B2 相的体积分数。此手段的可靠性已得到充分证实^[28]。分析电磁耦合处理前后 O 相与 B2 相体积分数变化结果如表 4 所示。可以发现

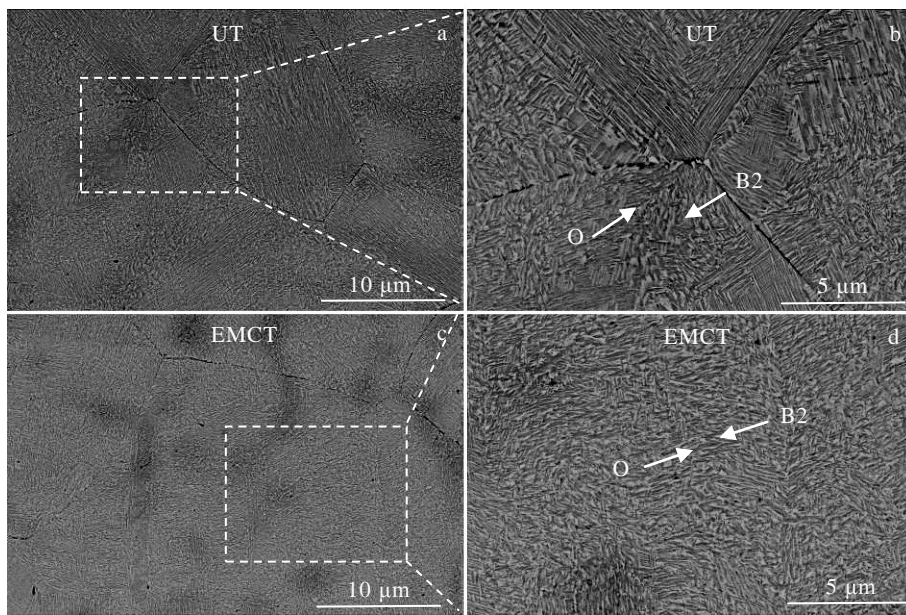


图 7 电磁耦合处理前后 Ti₂AlNb 电子束焊缝熔合区 SEM 照片
Fig.7 SEM images of FZ with and without EMCT: (a, b) UT sample, and (c, d) EMCT sample

表 4 电磁耦合处理前后熔合区不同相体积分数

Table 4 Different contents of phase in FZ of EBW joint before and after EMCT (vol%)

Group	O phase	B2 phase
UT	41.7	58.3
EMCT	42.5	57.5

经过电磁耦合处理之后 O 相含量由 41.7% 升至 42.5%，仅提高 0.8%，组织含量变化微小。

图 8 显示了电磁耦合处理前后焊缝热影响区的微观组织形貌。从图 8a 和 8c 中可以看到，焊缝热影响区主要由等轴晶组成，其尺寸在 20 μm 左右。其中亮度由高至低分别为 B2 相，O 相和 α₂ 相。从图 8b, 8d 中看出，等轴晶内基体仍以 B2 相为主，保留

了少部分原生 O 相板条的同时析出了大量细小的 O 相次生板条，其尺寸不到 1 μm。α₂ 相是焊接高温冷却过程中从 B 相析出，主要沿着等轴晶晶界分布，在 α₂ 相周围有少量 O 相析出。可见 2 种状态下样品的微观组织结构未见明显差异。O 相的生成主要是通过 B2 相的(111) [110] 方向的位移波产生切变形变来形成转化为中间过渡相 B19，B19 中的 Ti、Al、Nb 原子经过有序化生成 O 相^[29]。

有研究指出：脉冲电流会引起材料内部离子的迁移，即电迁移效应^[30]：

$$\Phi_i = \frac{N_i D_i}{kT} \left(kT \frac{\partial \ln N_i}{\partial x} - \Omega \frac{\partial \sigma}{\partial x} + Z^* e \rho J \right) \quad (4)$$

其中，Φ_i 为原子迁移通量，N_i 为溶质原子浓度，D_i 为

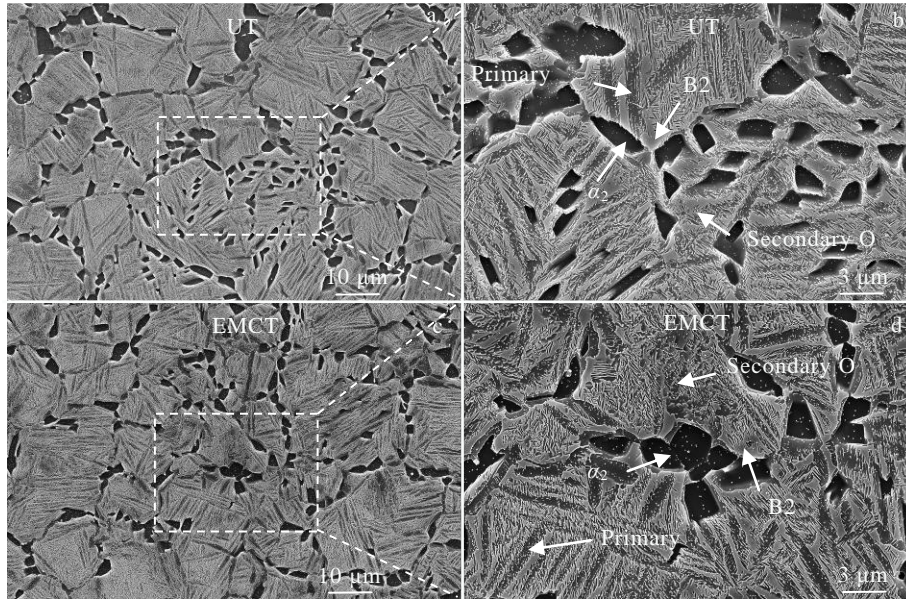


图 8 电磁耦合处理前后 Ti₂AlNb 电子束焊缝热影响区 SEM 照片

Fig.8 SEM images of HAZ with and without EMCT: (a, b) UT sample and (c, d) EMCT sample

扩散系数, k 为 Boltzmann 常数, T 为温度, Ω 为原子体积, $-\partial\sigma/\partial x$ 为应力梯度, Z^* 为有效原子价, e 为电子电荷, ρ 为电阻率, J 为电流密度。由式 (4) 可以看出, 脉冲电流的电迁移效应可以使金属材料中的原子运动, 促进 B2 相向 O 相的转变。同时, 作为顺磁性材料, Ti₂AlNb 合金可以从磁场中获取磁化能量, 对于上述相变有促进作用。然而, 实际发现焊接接头中组织成分的变化并不明显, 原因是在 Ti₂AlNb 焊缝中, 温度导致的相变仍然占据主导地位, 而电磁耦合处理带来的温升未能达到 Ti₂AlNb 合金的相变点^[29]。换言之, 尽管电迁移效应和焦耳热效应都有促进焊接接头相变的趋势, 但是驱动力极小, 不足以带来明显的组织结构与相成分变化, 因此, 可以认为电磁耦合处理不会使材料发生相变。

3.3 基于 EBSD 的位错密度, 晶界角度变化以及再结晶变化

3.3.1 基于 KAM 的位错密度变化

Kernal average misorientation (KAM) 图是一种描述局部平均取向偏差的方法, 它经常被用来反映材料中的局部位错密度大小, KAM 值越大, 说明局部位错密度越高^[31]。图 9a、9b 分别显示了电磁耦合处理前后焊接接头中的 KAM 分布。从图中可以看出在 EMCT 之后, 焊接接头内的 KAM 分布在整体上更加均匀, 表明处理过程使材料内位错密度均匀化。

另外, 在未处理样品中靠近晶界的位置, 如箭头所指, 出现了 KAM 高亮区域, 这说明位错主要集中于晶界附近。而在 EMCT 之后, 晶粒内部的 KAM 值也有部分提升。分析认为, 电磁处理过程给位错提供了能量, 当能量积累到某一阈值时, 位错在晶界上发生分解; 分解后的位错部分滑移到晶粒内部, 从而实现位错分布的均匀化。这可以通过大小角度晶界的变化来佐证。

3.3.2 晶界角度变化

位错在晶界处的生成与塞积, 会在该区域带来应力集中。当位错累积到一定程度时, 晶界处的弹性应力场将迫使位错向晶内运动, 从而导致晶界角度的变化。图 10a、10b 展示了电磁耦合处理前后焊接接头大小角度晶界的含量变化, 其中红色边界代表小角度晶界 (LAGB, low angle grain boundaries, 晶界角度小于 10°), 而黑色则代表大角度晶界 (HAGB, high angle grain boundaries, 晶界角度大于 15°)。在电磁耦合处理后, 小角度晶界含量由 65.3% 增至 76.2%, 大角度晶界含量从 34.7% 降至 23.8%。位错理论表示, 小角度晶界的变化与位错运动密切相关, 晶体中的小角度晶界是由一系列位错排列而成。由此可知, 小角度晶界含量的增加反映了位错的增殖, 这与 KAM 观察结果一致。晶界处位错发生分解并向晶内运动, 导致了晶内大量亚结构与子晶粒的生成, 进而表现为小角度晶界含量的提升。

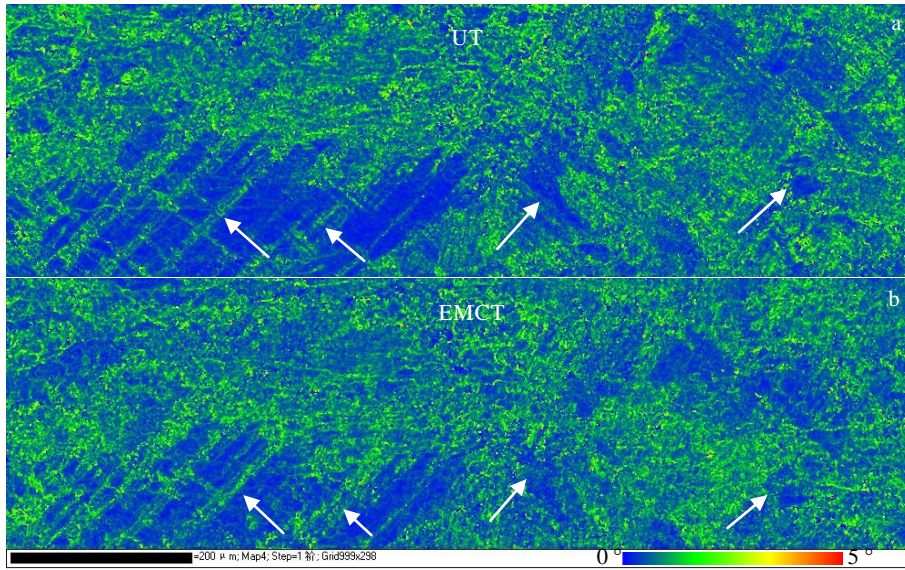


图 9 电磁耦合处理前后 Ti₂AlNb 焊接接头 KAM 图

Fig.9 KAM maps of Ti₂AlNb EBW joint before and after EMCT: (a) UT sample and (b) EMCT sample

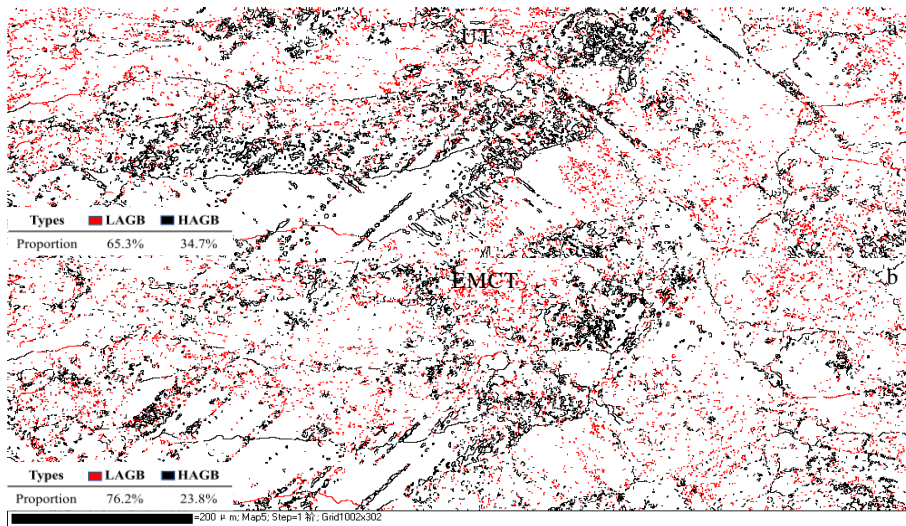


图 10 电磁耦合处理前后 Ti₂AlNb 焊接接头大小角度晶界分布

Fig.10 GB distribution of Ti₂AlNb EBW joint before and after EMCT: (a) UT sample and (b) EMCT sample

3.3.3 再结晶变化

图 11a, 11b 显示了电磁耦合处理前后焊接接头的再结晶情况统计。由图 11a 可知，处理前接头中主要是变形晶粒和亚结构晶粒，分别占 31.8% 和 53.9%，而再结晶只有 14.3%。经过电磁耦合处理后，变形晶粒含量减少至 20.5%，亚结构晶粒含量增至 55.5%，而再结晶晶粒含量则增至 24.0%。电磁耦合处理产生的热应力促使位错运动和增殖，由于缠结的位错胞加速了更多亚结构的产生，导致亚结构晶粒含量增加。晶界的位错在滑移过程中被子晶粒的晶界吸收，从而使材料的变形能降低^[32]。另一方面，受到电子风力

和磁致塑性效应的驱动，位错的流动性增强，加速了移动和增殖。由此产生的高密度位错将导致生成更多的子晶粒，通过吸收位错来加速动态再结晶。由于动态再结晶优先沿着晶界发生^[33]，所以此处的位错将首先被吸收消耗，反映在晶界角度图中即为大角度晶界的湮灭。

3.4 基于 TEM 的位错结构变化

采用 TEM 以更直观地观察位错的形貌及移动和增殖的结果。图 12 显示了电磁耦合处理前后熔合区的 TEM 明场像。如图 12a 显示，O 相板条内存在明显的位错纠缠与位错胞结构，而 B2 相内位错则很

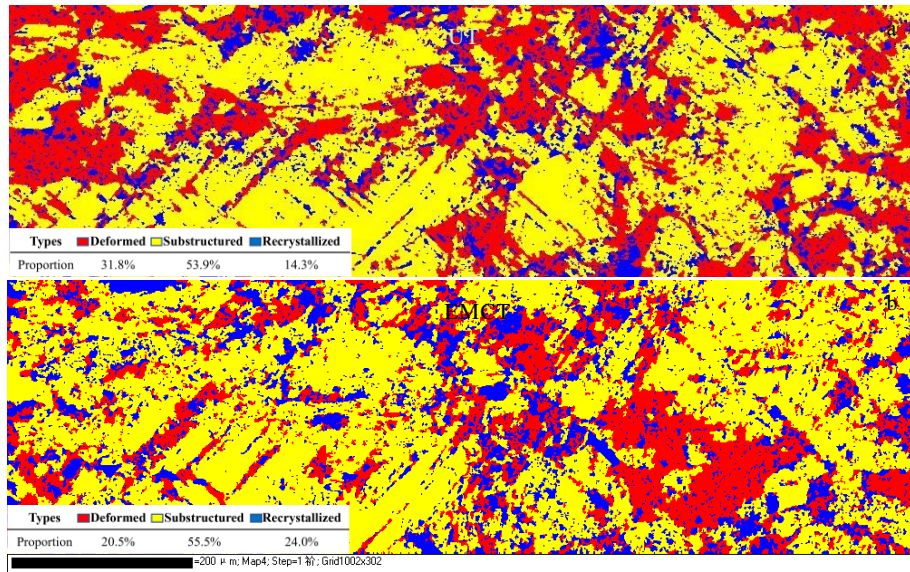


图 11 电磁耦合处理前后 Ti₂AlNb 焊接接头再结晶统计图

Fig.11 Recrystallization distribution of Ti₂AlNb EBW joint before and after EMCT: (a) UT sample and (b) EMCT sample

少。在板条相的边界存在少量的位错堆积，晶界的宽度也较窄。如图 12b、12c 所示。经过电磁耦合处理后，如图 12d，试样 O 相板条内部位错含量降低，弧状位错线表明出现过位错的滑移与湮灭。图 12d、12e 中看出，位错出现了阶梯状增值，在晶界处大量堆积纠缠，形成位错墙等复杂的位错结构。由此可知，在电磁耦合处理过程中，样品内位错的增殖，滑移与湮灭同时进行，综合体现为位错密度的提升。

图 13 显示了电磁耦合处理前后热影响区的 TEM 明场像。从 13a~13c 中可以看出，与熔合区相似，热影响区的 O 相板条内存在较高的位错密度，而 B2 相未见明显位错，整体位错密度并不高。与熔合区类似，经电磁耦合处理的样品，热影响区内出现了大量复杂位错结构，如 13d 中的位错墙，13e 中的位错纠缠以及 13f 中的阶梯状增值，高位错密度的 O 相板条宽度也略有增加。

由于电子束焊接时的真空环境导致焊接接头内杂质原子含量较低，故位错运动需要克服的障碍主要是点缺陷、位错间的弹性作用力以及晶格阻力（佩-纳力）。如果位错滑移的驱动力不足以克服这些障碍，位错运动就会停止，最终形成塞积。电磁耦合处理促进焊接接头内熔合区和热影响区位错的增殖和运动，这主要是焦耳热效应，电子风效应以及磁致塑性效应综合作用的结果。脉冲电流产生的焦耳热效应产生热应力，引起内部晶粒轻微塑性变形。根据位错增殖理论，当晶界处出现较大的应力时，Frank-Read 位错源将会优先在晶界处产生，导致晶界处出现较高的位

错密度^[34]，这与 KAM 观察结果一致。也就是说，在电磁耦合处理的作用下，塑性变形使得大量位错在晶界产生并累积。脉冲电流的电子风力效应促进位错运动，即电子的定向移动提供了位错在该方向滑移的驱动力，使位错由晶界处连续发射，以平行排列的方式出现，如图 12e、12f 中观察到的阶梯状位错。电流和位错之间的相互作用可以用以下公式表示^[15]：

$$\frac{f_{ew}}{l} = \frac{bC_{ed}J}{\bar{M}} \quad (5)$$

其中， f_{ew}/l 是作用在单位长度位错上的作用力， b 是单位伯格向量， C_{ed} 是作用系数， J 是电流密度， \bar{M} 是泰勒因子。由此可以推断，电子风力是位错运动的主要动力，而焦耳热效应则为提供额外驱动力。

Ti₂AlNb 作为一种非铁磁性材料，脉冲磁场对位错运动的贡献主要通过磁致塑性效应降低位错运动面临的阻力，使位错更容易在材料内部原有应力场的作用之下产生运动。研究^[22]中认为磁致塑性的理论主要是改变了位错钉扎处的共价键，使得形成共价键的电子对自旋能态发生改变，使其更大概率由原有的单线态（S 态，电子对反向自旋）激发为三线态（T 态，电子对同向自旋），这会有利于三线态弱结合能的产生，促进了位错的退钉^[22]。总的来说，脉冲电流通过焦耳热效应和电子风力产生新的位错源，并为位错运动提供驱动力，而脉冲磁场则通过磁致塑性效应降低位错运动的阻力，电流与磁场耦合作用，显著提升材料内的位错密度。

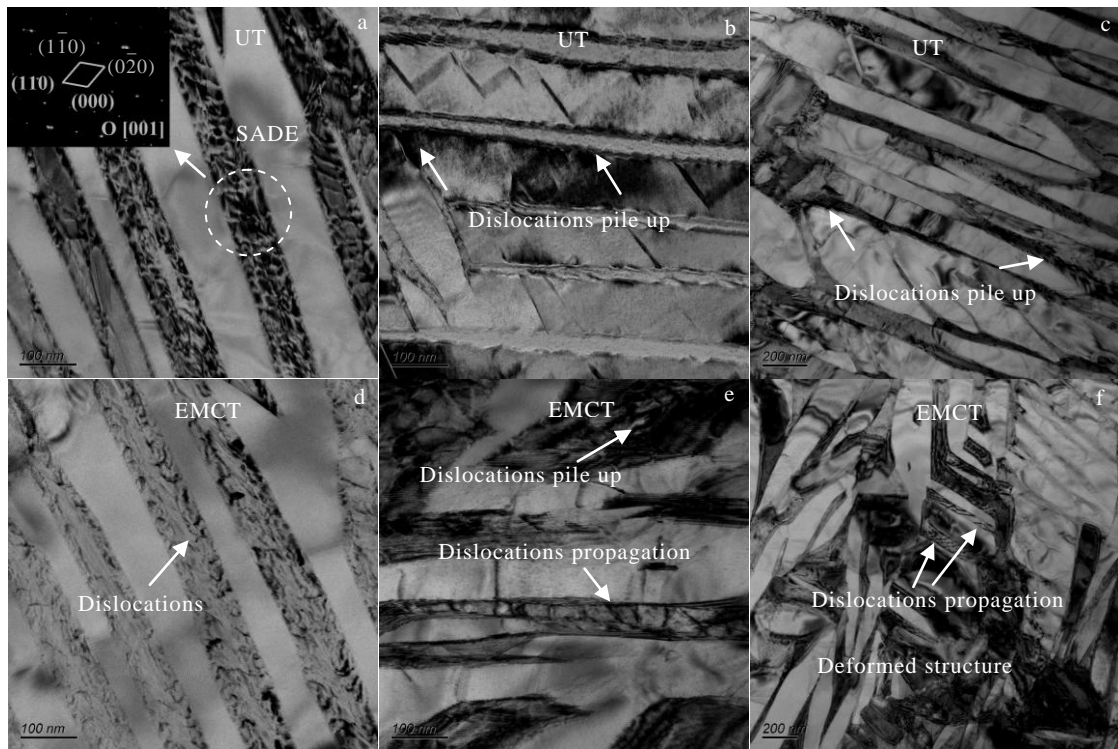


图 12 电磁耦合处理前后熔合区 TEM 明场像

Fig.12 Bright field TEM images in FZ of UT and EMCT Ti₂AlNb EBW joint: (a-c) typical microstructure in UT sample and (d-f) typical microstructure in EMCT sample

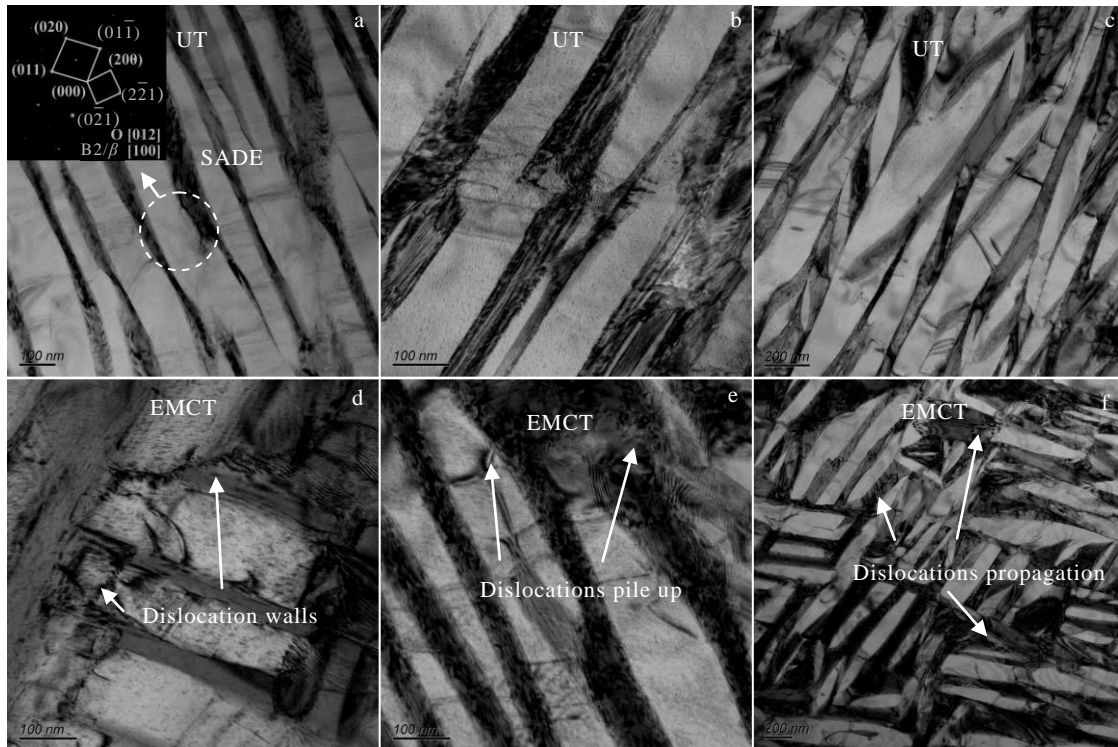


图 13 电磁耦合处理前后热影响区 TEM 明场像

Fig.13 Bright field TEM images in HAZ of UT and EMCT Ti₂AlNb EBW joint: (a-c) typical microstructure in UT sample and (d-f) typical microstructure in EMCT sample

3.5 疲劳断口分析

图 14 显示了电磁耦合处理前后试样的疲劳断口形态。由 14a 和 14b 可见，未处理试样的疲劳裂纹从表层开始萌生与扩展。经电磁耦合处理后，样品表面残余压应力增大，一方面可以抵消疲劳实验中部分循环载荷，使应力幅值和应力比 R 降低，减缓疲劳裂纹在表层的萌生；另一方面，残余压应力存在对微观裂纹的闭合效应^[13]，迫使疲劳裂纹从压缩残余应力相对更低的次表层萌生，最终

实现裂纹源向内部转移，如图 14c 所示。对比 14b 和 14d 可以发现，经电磁耦合处理后，疲劳辉纹的密度提高，说明电磁耦合处理有效地降低了疲劳裂纹的增长速度。这是因为疲劳裂纹扩展时，受到的阻碍（位错墙）增加，导致裂纹扩展路径更加曲折，从而降低裂纹生长速度、增加疲劳辉纹密度。此外还注意到，在电磁耦合处理试样的裂纹扩展区域形成了许多裂纹台阶，这是复杂应力状态下试样的典型断裂特征。

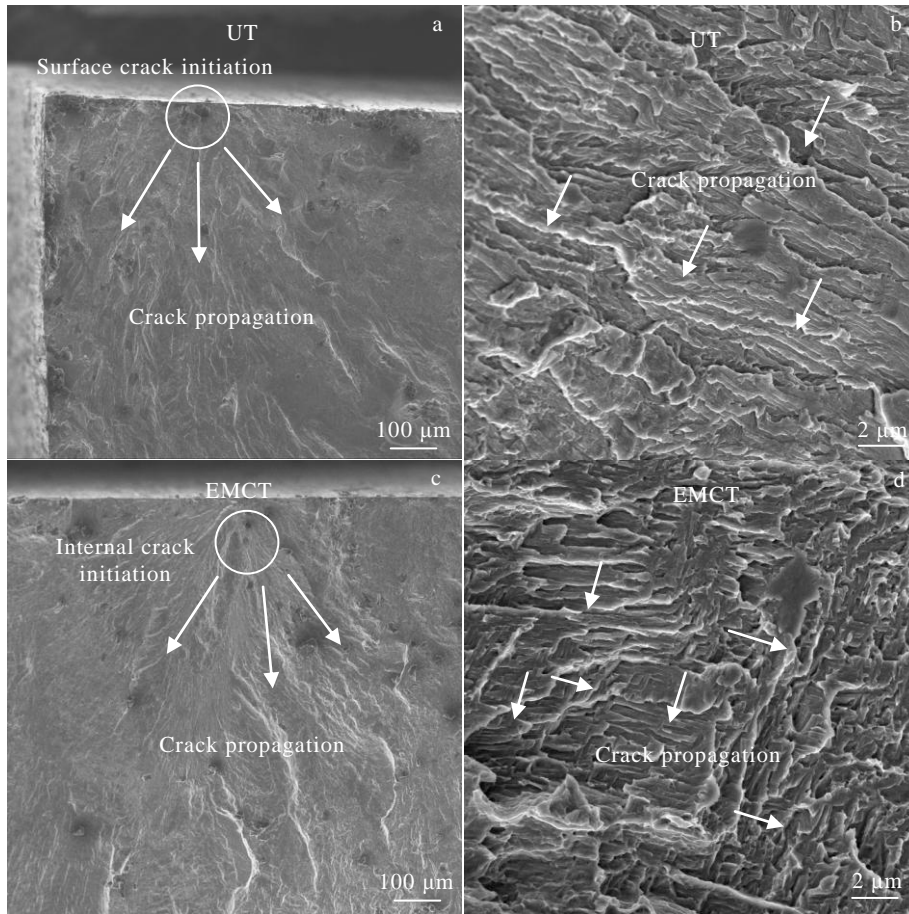


图 14 电磁耦合处理前后试样疲劳断口形貌

Fig.14 Fracture morphologies of the sample with and without EMCT: (a, b) UT-6 ($\sigma_a=400$ MPa, $N_f=136953$) and (c, d) EMCT-5 ($\sigma_a=400$ MPa, $N_f=164\ 290$)

4 结 论

1) 电磁耦合处理有效提升了 Ti_2AlNb 电子束焊接接头的疲劳寿命，疲劳极限从 134.2 MPa 增至 159.4 MPa，提升 18.8%。

2) 经过电磁耦合处理的试样，表面残余压应力显著提升，最大增幅达到 128.7%。电磁耦合处理后焊接接头的组织成分无明显变化，但材料内发生位错

的增殖，运动和湮灭现象，具体表现为位错在 O 相内的湮灭以及在晶界处的产生，并形成位错墙，位错纠缠等复杂位错结构。

3) 未经处理的试样疲劳裂纹萌生于试样表层，而经电磁耦合处理后，试样疲劳裂纹萌生于次表层，且裂纹扩展速率更低。

4) 电磁耦合处理通过焦耳热效应增加样品表面的残余压应力，抑制疲劳裂纹萌生；通过电子风

力效应与磁致塑性效应生成复杂位错结构抑制疲劳裂纹的扩展, 从而提升 Ti₂AlNb 电子束焊接接头疲劳寿命。

参考文献 References

- [1] Chen W, Chen Z Y, Wu C C *et al.* *Intermetallics*[J], 2016, 75: 8
- [2] Tan Changsheng, Sun Qiaoyan, Xiao Lin *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 711: 212
- [3] Zhang Lan, Zhong Huilong, Li Shengci *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2020, 135: 105 556
- [4] Li Yanjun, Wu Aiping, Li Quan *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2019, 29(9): 1873
- [5] Liu Xiaohua(刘晓华), Ma Yingjie(马英杰), Li Jinwei(李晋炜) *et al.* *Journal of Aeronautical Materials(航空材料学报)*[J], 2013, 33(3): 53
- [6] Li Yanjun, Wu Aiping, Li Quan *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2019, 29(1): 67
- [7] Hu Rui(胡锐), Wang Xuyang(王旭阳), Yang Jieren(杨劫人) *et al.* *Aeronautical Manufacturing Technology(航空制造技术)*[J], 2017(Z2): 30
- [8] Wang Lin(王琳), Liu Jian(刘剑), Yang Yi(杨屹) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2018, 28(5): 931
- [9] Yang Jing, Liu Daoxin, Zhang Xiaohua *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2020, 133: 105 373
- [10] Song Hui, Wang Zhongjin. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 490(1-2): 1
- [11] Song Hui(宋辉). *Study on the Effects of Electropulsing on Microstructures and Properties of Titanium Alloys Sheet(脉冲电流处理对钛合金板材组织和性能影响的研究)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009
- [12] Hosoi A, Nagahama T, Ju Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 533: 38
- [13] Lesiuk G, Zimniak Z, Wiśniewski W *et al.* *Procedia Structural Integrity*[J], 2017, 5: 928
- [14] Shu C, Liang C, Lin K. *Materials Science and Engineering A*[J], 2020, 772: 138 689
- [15] Zhang Hexiong, Zhang Xinfang. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2020, 36: 149
- [16] Lu A L, Tang F, Luo X J *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1998, 74(1): 259
- [17] Cai Zhipeng, Zhao Haiyan, Lin Jian *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 458(1-2): 262
- [18] Cai Zhipeng, Huang Xinquan. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(19-20): 6287
- [19] Shao Quan, Kang Jiajie, Xing Zhiguo *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2019, 476: 218
- [20] Wang Yan, Xing Zhiguo, Huang Yanfei *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2021, 538: 168 248
- [21] Alshits V I, Darinskaya E V, Kazakova O L *et al.* *Magnetoplastic Effect in Nonmagnetic Crystals*[C]. Amsterdam: Elsevier, 1997
- [22] Xu Qingdong(许擎栋), Li Kejian(李克俭), Cai Zhipeng(蔡志鹏) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2019, 55(4): 489
- [23] Zhong Fu, Wang Jie, Zhang Q *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2022, 121: 4757
- [24] Wang Li, Yuan Min, Huang Kunlan *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2020, 49(12): 4016
- [25] Zhou Yizhou, Xiao Suhong, Guo Jingdong. *Materials Letters*[J], 2004, 58(12-13): 1948
- [26] Gao Yukui(高玉魁). *Theory and Application of Residual Stresses(残余应力基础理论及应用)*[M]. Shanghai: Shanghai Scientifics & Technical Publishers, 2019: 19
- [27] Chen Wei(陈玮), Chen Zhiyong(陈志勇), Zhao Tong(赵桐) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(S1): 31
- [28] Zhou Yi(周毅), Cao Jingxia(曹京霞), Sui Nan(隋楠) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2020, 49(3): 907
- [29] Liu Shishuang(刘石双), Cao Jingxia(曹京霞), Zhou Yi(周毅) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2021, 31(11): 3106
- [30] Conrad H. *Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 287(2): 227
- [31] Liu Fulin, Chen Yao, He Chao *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2021, 152: 106 446
- [32] Sakai T, Belyakov A, Kaibyshev R *et al.* *Progress in Materials Science*[J], 2014, 60: 130
- [33] Feng Xiaotai, Pan Xinlei, He Weifeng *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2021, 149: 106 270
- [34] Cottrell A H. *Progress in Metal Physics*[J], 1949, 1: 77

Effect of Electromagnetic Coupling Treatment on Fatigue Lifetime of Ti₂AlNb Electron Beam Welding Joint

Wang Xiaotong^{1,2}, Zhao Tong³, Wang Yuan^{1,2}, Huang Kunlan^{1,2}, Zhang Qianwen^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2. Yibin Institute, Sichuan University, Yibin 644005, China)

(3. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: During the welding process of the aero-engine magazine, the weld will directly affect the fatigue performance and service life of the whole magazine as a weak part. The post-weld heat treatment is normally used to eliminate the welding thermal stress, uniform the structure of weld joint and improve the performance; however the improvement effect on fatigue life is insufficient. This research innovatively proposes the electromagnetic coupling treatment technology to regulate the heat treated Ti₂AlNb electron beam welds to improve the fatigue life of welded joints and at the same time investigates the evolution of the material structure in the weld joints after electromagnetic coupling treatment. The results show that the fatigue limit of the weld joint is increased from 134.2 MPa to 159.4 MPa, an improvement of 18.8%. After the electromagnetic coupling treatment, the residual compressive stress is increased by up to 128.7%. Meanwhile, without changing the material structure and phase composition, dislocation walls and dislocation entanglement are generated within the material without changing the microstructure and phase composition, and the fatigue crack source is moved from the surface to the subsurface, thus reducing fatigue crack expansion rate, resulting in the improvement of fatigue performance. The coupling effect of Joule heat effect, electron wind effect and magnetoplastic effect promotes the dislocation movement and enhances the fatigue crack expansion. This study provides a new method to enhance the fatigue life of welds and provides a feasibility basis for electromagnetic coupling treatment to enhance the fatigue performance of welds.

Key words: electromagnetic coupling treatment; Ti₂AlNb; electron beam welding; fatigue; residual stress

Corresponding author: Huang Kunlan, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China, E-mail: huangkunlan@scu.edu.cn