

脉冲磁场处理对TC4钛合金激光焊接件耐蚀性能的影响

伍彪¹, 朱子瑜¹, 钟一震², 陈喆¹, 张琳¹, 吴明霞¹, 刘剑¹

(1. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065)

(2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要: TC4钛合金激光焊接接头因焊接热效应导致的微观组织不均匀及残余应力, 会显著地降低其耐蚀性能。本研究采用脉冲磁场处理技术, 研究了磁场强度(0.5、1、1.5和2 T)对焊接接头耐蚀性能的影响规律。结果表明: 经磁场处理后, 试样的耐蚀性能均有提升。其中, 1.5 T最为显著。相较于未处理试样, 1.5 T试样的极化电阻(R_p)提升了13倍, 自腐蚀电流密度(I_{corr})降低了30.3%, 维钝电流密度(I_p)降低了40.5%, 盐酸浸泡20与40 d的失重率分别降低了1.7%和10.3%。同时, 残余应力分布 D 值的降幅随磁场增强呈先升后降趋势, 1.5 T时 x 方向 D 值降幅达27.92%, 此时磁致塑性效应与位错运动形成最优能量匹配; 而磁场强度超过1.5 T后, 磁致塑性饱和引发晶格畸变与位错塞积, 导致应力重分布效率降低。磁场通过诱导位错迁移与湮灭, 降低局部应变(KAM_{ave} 降幅5.8%~6.9%)和残余应力(拉应力降幅72.0%), 减少应力集中与小角度晶界比例, 有效释放第二类内应力, 降低了腐蚀敏感性, 为钛合金焊接结构的低成本、绿色化后处理提供了新思路。

关键词: 脉冲磁场处理; TC4钛合金; 激光焊接; 耐蚀性能; 残余应力

中图分类号: TG146.23; TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)09-2370-09

1 引言

钛合金因具有比强度高、良好的生物相容性、优异的耐蚀性的特点, 而被广泛应用于医疗器械、航空航天等领域, 具有重要的战略意义, 而Ti-6Al-4V(TC4)合金被认为是业内应用率最高的钛合金, 约占总产量的一半^[1-3]。随着TC4钛合金材料的广泛应用, 其焊接工艺面临着更为严苛的要求。相较于传统的熔焊工艺, 激光焊接凭借其高能量密度与较小的热影响区, 已成为TC4钛合金焊接方式中的常用方式^[4]。然而, 激光焊接过程中所带来的显著非平衡相变以及热应力分布的不均衡性, 会促使焊接接头各部位的组织结构与耐腐蚀性呈现出差异性, 进而对TC4制构件的服役寿命与结构安全性造成直接影响^[5]。因此, 研究TC4钛合金焊接接头的改性优化, 提高生产生活中钛合金焊接接头的耐蚀性能是十分必要的。

钛合金焊接接头的耐蚀性及力学性能与其微观组织特征(如晶粒尺寸、相分布、晶界特性等)紧密相关, 其微观结构除了受焊接工艺的影响, 还能通过焊后热处理进一步调控进而优化性能^[6]。Li等人^[3]研究了激光焊接下接头各个区域的组织特点、硬度变化及耐蚀性差异, 得出焊缝具有最高的硬度与最优的耐蚀性。Xu等人^[7]发现随着

焊接速度的增加, TC4激光焊接接头整体硬度不均匀程度增加, 并归因于 α 与 α' 相的含量变化。Su等人^[8]对激光-电弧混合焊接接头进行三阶段热处理后, 二次 α 相细化且分布均匀, 相边界含量增加, 显著提升了强韧性; Zhou等人^[9]通过三阶段热处理同时提高了激光熔覆Ti-6Al-4V钛合金的屈服强度(YS)、极限抗拉强度(UTS)和伸长率(EL); Santos等人^[10]则发现热处理能改善疲劳裂纹扩展阻力; Xu等人^[11]证实热处理可诱导TC4马氏体分解为超细层状 $\alpha+\beta$ 结构, Nicoletto等人^[12]还报道了在表面状态相同的情况下, 选区激光熔化(SLM)钛合金在中高温区域热处理后的疲劳性能恢复到轧制材料的水平。综上, 钛合金焊接接头的性能依赖于焊接参数优化与后处理技术对缺陷的修复, 二者结合是实现高耐蚀性及优异力学性能的关键途径。

然而, 传统后处理技术存在加工周期长、能源消耗高等问题, 导致生产成本显著增加。相比之下, 脉冲磁场处理作为一种新兴的材料后处理手段, 具有处理时间极短、能耗低、绿色环保、不产生剧烈热效应及热变形的优点。研究发现脉冲磁场主要是通过磁致塑性效应与洛伦兹力来引起材料内部位错运动, 进而改变材料的微观形貌和宏观性能。Cai等人^[13]发现脉冲磁场处理后, 碳钢晶体中

收稿日期: 2025-09-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52205490); 四川省自然科学基金面上项目(2025ZNSFSC0390)

作者简介: 伍彪, 男, 1998年生, 硕士, 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610065, E-mail: 2023331570@qq.com

的位错发生了迁移,导致晶粒发生了塑性变形及残余应力的释放,并且磁致塑性力的变化与应力的变化密切相关,磁致塑性幅与应力幅度的乘积几乎是一个常数。许擎栋等人^[14]利用脉冲磁场对TC4钛合金进行后处理,发现处理后位错分布更加均匀,并将其归因于磁致塑性效应。他们的研究虽证实磁场诱导位错迁移,但未进一步探究位错迁移对材料耐蚀性的影响。

针对亟待提升TC4钛合金激光焊接件耐蚀性能的问题,本研究引入了脉冲磁场处理技术,通过促进材料内部位错的迁移以及残余应力的释放,实现TC4钛合金激光焊接件腐蚀寿命的提升,为提升材料的腐蚀寿命提供新思路。

2 实验

实验材料为商用TC4钛合金,其名义化学成分如表1所示。将厚度2 mm合金板进行激光焊接,采用线切割加工出尺寸为10 mm×40 mm×2 mm腐蚀试样若干,使焊缝位于试样中部,试样尺寸如图1所示。

应用自主研发的脉冲磁场处理设备分别在0.5、1、1.5和2 T 4种磁场强度下对TC4钛合金激光焊接接头进行单正向处理,除磁场强度变化外,其余参数均保持一致:磁脉冲间隔时间为15 s,处理次数为30次。设置无磁场处理的对照组,命名为UT。采用砂纸打磨试样使其平整,用粒度0.02 μm的SiO₂抛光液抛光至镜面,在无水乙醇中超声清洗30 min,干燥后用于电化学测试。电解抛光去除表面应力,用于微观检测。

使用科斯特电化学工作站在3.5wt% NaCl溶液中进行电化学测试。试验温度为(25±1)℃,铂片电极和饱和氯化银(AgCl)分别作为辅助电极和参比电极。开路电位(OCP)稳定后,在振幅为10 mV、频率范围为10⁻²~10⁵ Hz的正弦波作用下进行交流阻抗谱(EIS)测试。动电位极化曲线的扫描范围为-1.5~1.5 V(相对于开路电位),扫描速率为10 mV/s。使用20wt%浓度的盐酸在温度为(25±1)℃下对磁处理试样与UT分别浸泡20和40 d以后

对接头的耐腐蚀性能进行测试;采用扫描电子显微镜(SEM)观察试样的腐蚀形貌。利用Proto LXRD微区应力仪检测焊接接头经脉冲磁场处理前后的残余应力,检测位点如图2所示。使用装配有背散射电子衍射(EBSD)探头的Tescan Mira3 LHM高分辨扫描电镜采集焊接接头的表面晶体学特征,分析其位错密度与晶界角度的差异,阐明微观组织变化对TC4钛合金焊接接头耐腐蚀性能的影响。

3 结果与讨论

3.1 电化学测试结果

电化学测试能够综合表征电极反应动力学、界面电荷转移过程、材料表面状态及腐蚀行为。图3所示为焊接接头的开路电位图,随着浸泡时间的增加,焊接接头的电位趋于稳定。开路电位能反应材料的热力学稳定性,电位越负,热力学稳定性越差^[15]。稳定后,经脉冲磁场处理的焊接接头的开路电位(open circuit potential, OCP)均大于UT,且OCP_{1.5T}>OCP_{1T}>OCP_{0.5T}>OCP_{2T}>OCP_{UT},表明脉冲磁场处理提升了焊接接头的热力学稳定性。

图4为焊接接头的Nyquist图,各焊接接头均为单个容抗弧。一般来说,容抗弧的半径大小可表示合金材料腐蚀速率的快慢,容抗弧的半径越大,表明合金表面转移电阻越大,腐蚀速率越小,耐腐蚀性能越好,也可以表明在相同的腐蚀介质条件下形成的钝化膜越致密。由图4可知,经脉冲磁场处理后的焊接接头的容抗弧半径均大于UT。采用如图4所示的R_s(Q_{dl}R_p)等效电路拟合实验结果,其中R_s为溶液电阻,R_p为极化电阻,Q_{dl}为常相位角元件(CPE)。拟合结果如表2所示,由表可得,磁处理

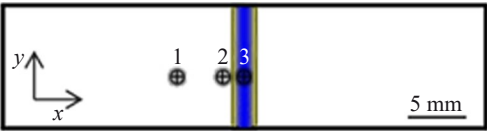


图2 残余应力测量点位置
Fig.2 Locations of residual stress measurement points

表1 TC4钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy (wt%)				
Al	V	Fe	C	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	0.3	0.01	Bal.

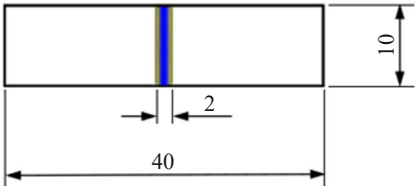


图1 腐蚀试样尺寸
Fig.1 Dimension of the corrosion specimen

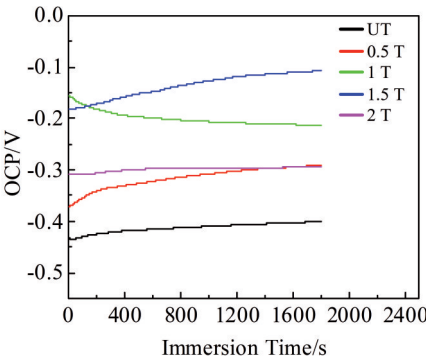


图3 不同磁场强度下焊接接头随浸泡时间的增加OCP值的变化
Fig.3 Evolution of OCP of welded joints as a function of immersion time under varying magnetic field intensities

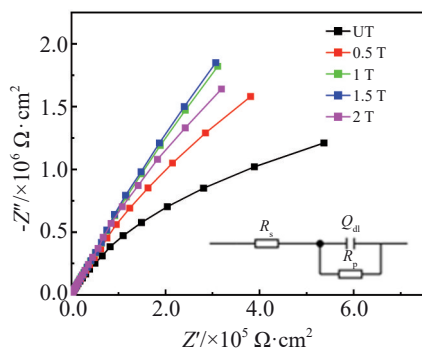


图4 不同磁场强度处理下焊接接头的Nyquist图

Fig.4 Nyquist plot of welded joints treated with different magnetic field intensities

后,试样的 R_p 均增大。磁场强度为1.5 T时,焊接接头具有最大的 R_p 值,为UT的13倍。

焊接接头的极化曲线如图5所示,所有试样在反应过程中均出现了钝化现象。具有钝化特性的金属极化曲线通常可分为五个区域:活化区、过渡区、稳定钝化区、过钝化区和析氢区。其中,稳定钝化区的特征是随着电压的增加,电流密度几乎保持不变。稳定钝化区的电流密度通常称为维钝电流密度(I_p),它反映了金属溶解和腐蚀产物沉积时的体系电流密度, I_p 越小,其耐蚀性越好^[16]。

通过对极化曲线的塔菲尔斜率倒推拟合得到经过磁处理以及UT在3.5wt% NaCl溶液中的极化曲线数据,结果见表3。经磁处理后的试样表现出较小的 I_p 值,且磁场强度为1.5 T时,试样的 I_p 最小,相较于UT降低了40.5%,表明其更容易发生钝化,因此其耐蚀性更优。

极化曲线数据中自腐蚀电位(E_{corr})表征材料的耐腐

表2 不同磁场强度处理下焊接接头EIS的拟合结果

Table 2 EIS fitting results of welded joints treated with different magnetic field intensities

Parameter	$R_s/\Omega \cdot \text{cm}^2$	Q_{dl}		$R_p/\times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$
		CPE-T/ $\times 10^{-6} \text{ F} \cdot \text{cm}^2$	CPE-P/ $\times 10^{-1}$	
UT	59.327	8.778	9.232	0.4328
0.5 T	58.962	7.561	9.174	1.387
1 T	58.222	6.806	9.148	4.697
1.5 T	59.625	6.645	9.418	5.296
2 T	59.220	7.518	9.187	2.402

表3 不同磁场强度处理下焊接接头动电位极化曲线的拟合结果

Table 3 Fitting results of potentiodynamic polarization curves of welded joints treated with different magnetic field intensities

Parameter	UT	0.5 T	1 T	1.5 T	2 T
$I_p/\times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.907	1.187	1.672	1.134	1.616
E_{corr}/V	-1.298	-1.142	-1.181	-0.886	-1.038
$I_{\text{corr}}/\times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.118	1.315	1.724	0.7787	1.799

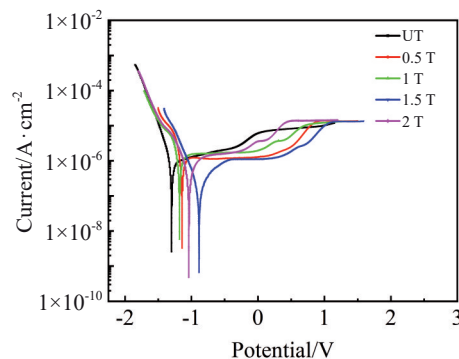


图5 不同磁场强度处理下焊接接头的动电位极化曲线

Fig.5 Potentiodynamic polarization curves of welded joints treated with different magnetic field intensities

蚀性能,其值越大越耐腐蚀;自腐蚀电流密度(I_{corr})表征材料的腐蚀速率,其值越小,表明材料的腐蚀速率越小,越耐腐蚀。由拟合后的数据可得,磁处理后所有试样 E_{corr} 均增大,其中1.5 T最优,增大了约31.8%; I_{corr} 在1.5 T有明显降低,降低了30.3%,其他参数下的 I_{corr} 与未处理试样大致处于同一水平。

3.2 盐酸浸泡实验结果

盐酸浸泡实验中,选取电化学实验中耐蚀性最优的、磁场强度为1.5 T处理的试样与UT分别在20wt%浓度盐酸中常温浸泡20与40 d。浸泡后的宏观形貌如图6a与6b所示。由宏观形貌可以发现,UT表面发生了严重腐蚀,焊接接头的原貌被腐蚀殆尽且焊缝区被充分暴露,而1.5 T试样表现出较好的耐蚀性,焊缝原貌仍清晰可见。表4记录了各试样的失重质量与浸泡时长关系,未处理试样浸泡20与40 d的失重率分别为5.0%、15.8%,1.5 T试样的失重率分别为3.3%、5.5%,磁场处理的试样失重率明显小于UT,且浸泡时间20与40 d的失重率分别降低了1.7%、10.3%。

图7为UT与1.5 T试样在20%浓度盐酸中常温浸泡20与40 d后,通过扫描电镜获得基材、热影响区及焊缝的腐蚀形貌。显然,UT的三个区域在实验中均遭受了严重的腐蚀并呈现出不同的腐蚀形貌。对于UT,基材被腐蚀后表面出现均匀的、呈蜂窝状分布的腐蚀坑,由图7a₁、7a₂可得,随着浸泡时间的增加,蜂窝数量减少,蜂窝尺寸增大,这是因为随着腐蚀的进行,相邻的腐蚀坑扩展发生相互融合;图7b₁、7b₂和7c₁、7c₂可看出热影响区及焊缝

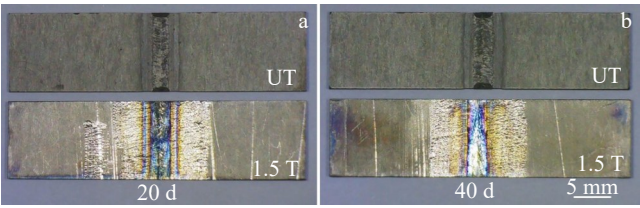


图6 UT与1.5 T试样腐蚀20和40 d后的宏观形貌
Fig.6 Macroscopic corrosion morphologies of UT and 1.5 T-treated specimens after corrosion for 20 d (a) and 40 d (b)

呈现出纵横交错的沟壑状腐蚀形貌,并且随着浸泡时间的增加,前述沟壑的深度及宽度均增大。UT试样的基材、热影响区和焊缝区在腐蚀实验中呈现出不同的腐蚀形貌,主要归因于各区域显微组织类型、形态和尺寸的差异。基材区域为典型的 $\alpha+\beta$ 双相结构, α 相富含Al元素, β 相富含V元素,两相之间的电偶腐蚀效应导致 α 相作为阳极优先溶解,形成均匀分布的蜂窝状腐蚀坑^[17]。热影响区和焊缝区由于焊接热输入的影响,显微组织发生显著变化:热影响区和焊缝区在焊接过程中经历了快速加热和冷却,非平衡相变形成了细小的 α' 马氏体和部分晶界富集区域,导致腐蚀初期速率较快,并伴随晶界腐蚀,从而形成纵横交错的沟壑状形貌^[3]。

对1.5 T试样,如图7d₁、7d₂所示,其基材部分呈现出与UT基材一样的由腐蚀坑扩展融合后的蜂窝状,且也表现出随着浸泡时间的增加,蜂窝数量减少,尺寸增大的规律;由图中的7e₁、7e₂和7f₁、7f₂可知,1.5 T试样热影响区与焊缝区表面稀疏分布着微小的腐蚀坑,即发生了点蚀,且被腐蚀程度较轻。1.5 T试样的腐蚀形貌表明,其点蚀坑的扩展受到抑制,腐蚀坑的尺寸小且分布稀疏,尤其是在热影响区和焊缝区,腐蚀程度明显减轻,这说明脉冲磁场处理有效延缓了腐蚀进程,降低了材料的腐蚀速率,从而提升了整体耐蚀性能。

3.3 残余应力

残余应力会显著削弱材料的耐蚀性能,在腐蚀环境中,高残余应力(尤其是拉应力)会加速应力腐蚀开裂(SCC),促使裂纹沿晶界或缺陷扩展;同时,应力集中区域因晶格畸变和位错密度升高形成微电池效应,加剧局部阳极溶解(如点蚀、晶间腐蚀),并破坏材料表面钝化膜的完整性,使新鲜金属暴露于腐蚀介质^[18]。

研究采用了X射线衍射法原位测量了脉冲磁场处

理前后钛合金激光焊接接头的残余应力,测量结果如表5、表6所示。 σ_x 与 σ'_x 分别表示施加磁场前后在x方向测得的残余应力; σ_y 与 σ'_y 分别表示施加磁场前后在y方向测得的残余应力。负应力值表示压应力状态,正应力值表示拉应力状态。在第4列中, $\Delta\sigma$ 为计算值(残余应力绝对值的变化,即 $\Delta\sigma=|\sigma'| - |\sigma|$),负值表示处理后的点从高应力水平变为低应力水平。在第5列中,绝对值的变化率反映了应力值的变化($\Delta\sigma/|\sigma|$),负值表示残余应力减小,否则增大。应力幅度的变化趋势由第6列中的箭头表示。

如表5与表6数据所示,焊接接头不同测试点的初始残余应力呈现显著差异,表现为拉/压应力状态共存及应力幅值分布不均。经脉冲磁场处理后,绝大多数测试点应力绝对值变化率为负值,表明应力水平普遍降低。典型如1.5 T磁场处理下,位点1的x向拉应力降幅达72.0%,位点3的x向压应力绝对值减少14.7%;同时位点1的y向应力亦下降22.7%。残余应力的系统性降低可有效缓解局部应力集中,抑制微裂纹形核倾向,从而延缓腐蚀沿应力梯度方向的扩展进程。

为进一步探究脉冲磁场对焊接接头残余应力分布的影响,引入样品标准差(deviation, D),其计算公式如式(1)所示:

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - 0)^2}$$

(1)

其中, n 为测试点数, i 为第*i*个测试点, σ_i 为对应点的应力值。公式中 D 表示整体数据相对于应力值0的离散度, D 值越小,表示数据离散度越小,即应力分布越均匀。由图8可得,在经脉冲磁场处理(MT)后,试样在x与y方向的 D 值均降低。随着磁场强度的增加,在x方向上,残余应力分布的 D 值的降幅呈现出先升高再降低的趋势。在1.5 T时对残余应力分布的改善最为明显,使 D 值降低了27.92%;在y方向上也呈现出大致的趋势。这是因为当磁场强度小于1.5 T时,磁致塑性效应随磁场强度增加而增强,通过晶格应变释放局部应力并降低位错滑移阻力,同时磁场输入能为位错运动提供有效能量源;而当磁场强度超过1.5 T时,磁致塑性效应趋于饱和,过剩能量引发非协调性晶格畸变,导致位错源激活率过高,形成位错塞积群^[19]。这种动态失衡使得位错湮灭速率下降,残余应力重分布效率降低,表现为 D 值降幅趋缓。因此,1.5 T磁场强度下实现了磁致塑性效应与位错滑移动能

表4 UT与1.5 T试样在盐酸浸泡20与40 d前后的质量变化
Table 4 Mass loss of UT and 1.5 T-treated specimens before (M_B) and after (M_A) HCl immersion for 20 and 40 d

Parameter	20 d			40 d		
	M_B /g	M_A /g	Mass loss ratio/%	M_B /g	M_A /g	Mass loss ratio/%
UT	3.329	3.162	5.0	3.318	2.794	15.8
1.5 T	3.090	2.989	3.3	3.515	3.322	5.5

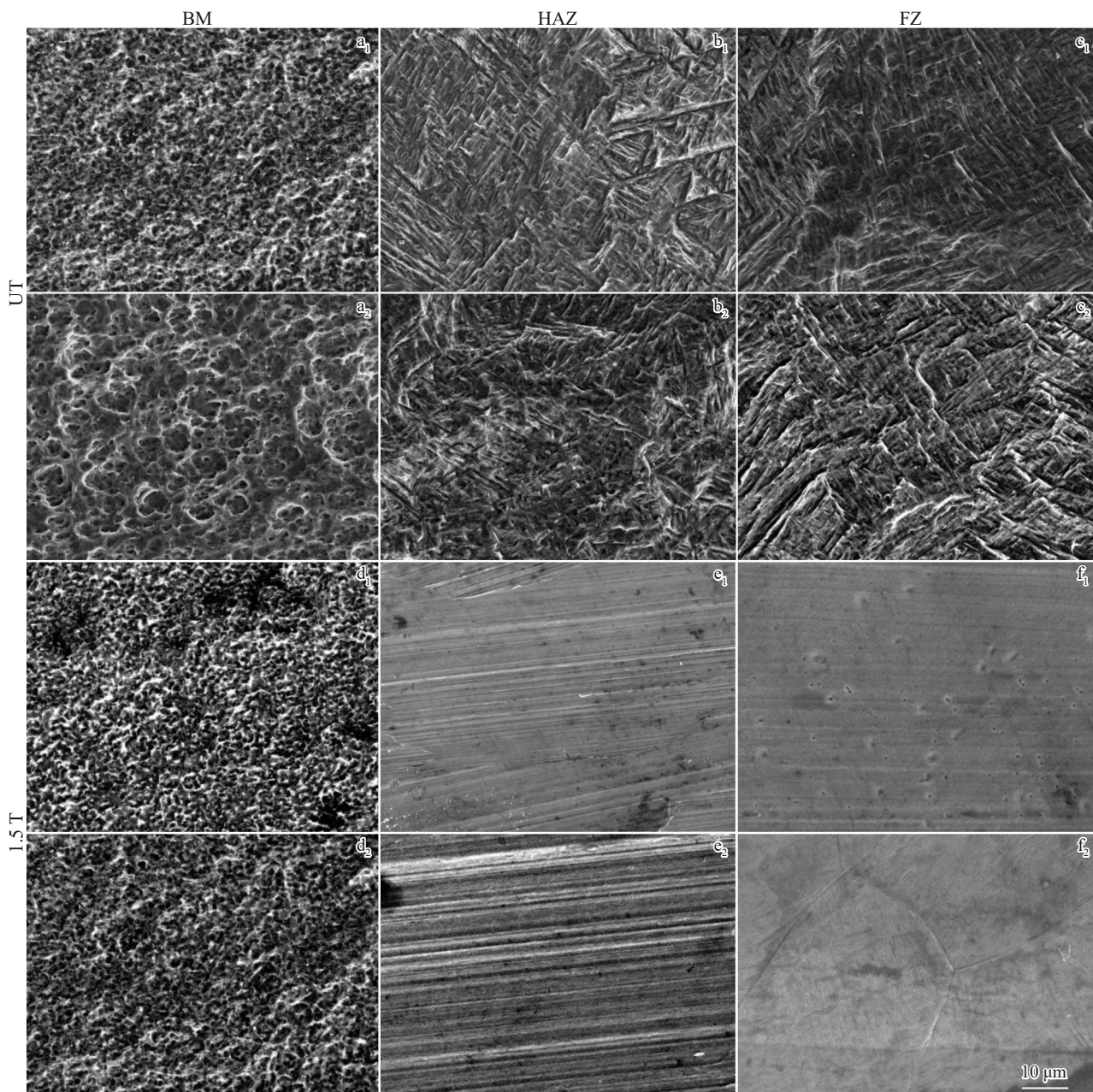


图7 UT与1.5 T试样不同区域浸泡20与40 d的腐蚀形貌的SEM照片

Fig.7 SEM images of corrosion morphologies of different regions in UT (a_1 – c_1 , a_2 – c_2) and 1.5 T-treated (d_1 – f_1 , d_2 – f_2) specimens after immersion in 20% HCl for 20 d (a_1 – f_1) and 40 d (a_2 – f_2) (BM: base metal; HAZ: heat affected zone; FZ: fusion zone)

的最优协同。

3.4 脉冲磁场处理对TC4钛合金激光焊接件耐蚀性能的影响机理

根据章节3.1~3.3的性能表征可知,脉冲磁场处理能够减少应力集中、降低应力水平、延缓腐蚀扩展、进而提升TC4钛合金激光焊接件的腐蚀寿命。为了阐明脉冲磁场处理对TC4钛合金激光焊接件腐蚀寿命的影响机理,采用EBSD测试,准原位采集焊接接头块体表面晶体学特征,分析脉冲磁处理前后位错密度与晶界角度的差异。

位错是晶体中的线缺陷,位错核心周围的原子排列较为混乱,容易成为腐蚀的活性区域。位错密度高时,活性区域增多,导致材料表面更容易发生局部腐蚀^[20]。局部平均取向差(KAM)能反映材料中局部区域的应变分布特征,同时,KAM还能间接表征该区域的位错密度水平,二者呈正相关关系,即KAM值越高,表明局部位错密度越大^[21]。图9为焊接接头的3个区域在脉冲磁场处理前后的KAM图。基材、热影响区和焊缝中(图9 a_1 ~ $9c_1$),在箭头所指处,有KAM突出区域,且集中出现在晶界上。这是因为基材在成形过程中,塑性变形引发的位错

表5 脉冲磁场处理前后x方向残余应力试验结果

Table 5 Residual stress in the x-direction before and after pulsed magnetic field treatment

Parameter	Point	σ_x /MPa	σ'_x /MPa	Absolute value change/MPa	Ratio of absolute value change/%	Stress amplitude change
0.5 T	1	-110	-80	-30	-27.3	↓
	2	-24	-61	37	-154.2	↓
	3	-63	-51	-12	-19.0	↓
1 T	1	17	9	-8	-47.1	↓
	2	19	18	-1	-5.3	↓
	3	-74	-57	-17	-23.0	↓
1.5 T	1	100	28	-72	-72.0	↓
	2	-49	-67	18	36.7	↑
	3	-75	-64	-11	-14.7	↓
2 T	1	-21	9	-12	-57.1	↓
	2	-76	-32	-44	-57.9	↓
	3	-107	-109	2	1.9	↑

表6 脉冲磁场处理前后y方向残余应力试验结果

Table 6 Residual stress in the y-direction before and after pulsed magnetic field treatment

Parameter	Point	σ_y /MPa	σ'_y /MPa	Absolute value change/MPa	Ratio of absolute value change/%	Stress amplitude change
0.5 T	1	57	46	-11	-19.3	↓
	2	149	135	-14	-9.4	↓
	3	-5	38	33	660.0	↑
1 T	1	69	58	-11	-15.9	↓
	2	187	178	-9	-4.8	↓
	3	-33	-39	6	-18.2	↓
1.5 T	1	75	58	-17	-22.7	↓
	2	112	112	0	0	-
	3	-18	-17	-1	-5.6	↓
2 T	1	-20	12	-8	-40.0	↓
	2	139	124	-15	-10.8	↓
	3	-36	-56	20	-55.6	↓

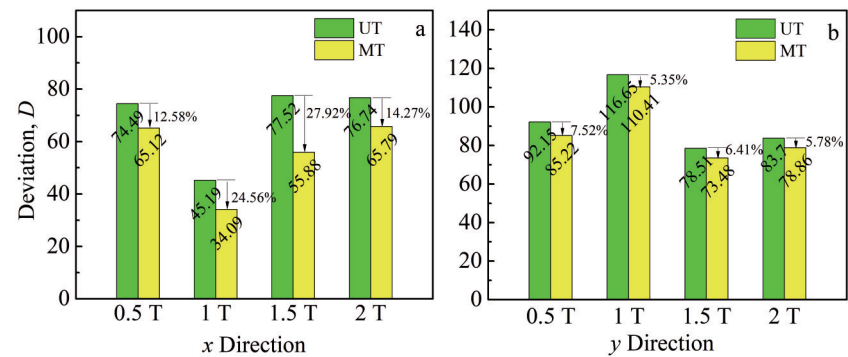


图8 脉冲磁场处理前后焊接接头残余应力标准差变化

Fig.8 Variation of standard deviation of residual stress in welded joints along x (a) and y (b) directions before and after pulsed magnetic treatment

运动倾向于向晶界处迁移并发生塞积,导致晶界附近形成显著的位错富集区(如位错缠结或位错墙);而焊接过程中的非平衡相变以及快速冷却导致的热应力会导致热影响区与焊缝在晶界上产生大量位错及应变。由图9a₂~9c₂可知,经磁处理后,KAM图中存在部分区域由绿色向

蓝色转变,且KAM分布在整个视野中更加均匀,这表明经过脉冲磁场处理后,材料中的局部应变积累减少,位错密度均质化。

KAM_{ave}为整个测试区域中所有测量点的KAM值的平均,可以作为一个整体的指标,反映材料整体的局部应

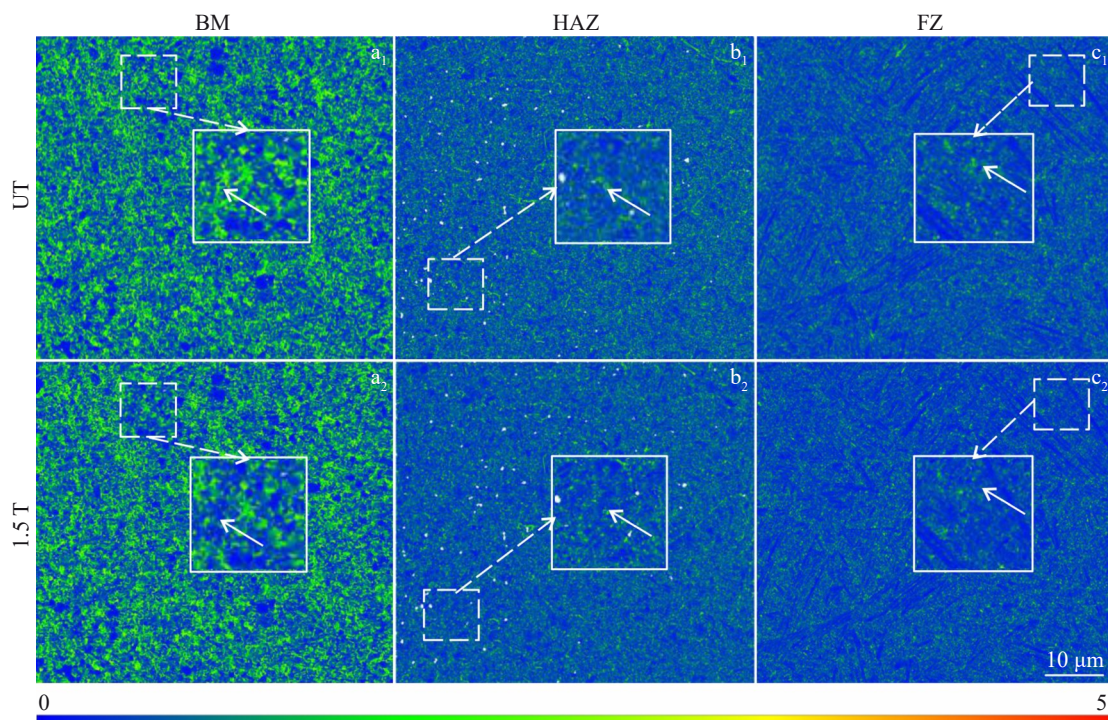


图9 脉冲磁场处理前后TC4焊接接头不同区域的KAM图

Fig.9 KAM maps of different regions in TC4 welded joints before and after different pulsed magnetic field treatments: (a₁–c₁) UT; (a₂–c₂) 1.5 T

变或位错密度的情况,其计算公式如式(2)所示:

$$KAM_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N KAM_i \quad (2)$$

其中, N 表示该区域内的测试点数, KAM_i 为测试点 i 处的局部 KAM 值。图 10 为磁处理前后焊接接头各区的 KAM_{ave} , 由图可发现, 经磁场处理后, 焊接接头各区域的 KAM_{ave} 均减小了, 基材、热影响区、焊缝分别降低了 5.8%、6.9%、6.0%, 即位错密度也降低了。如图 11, 在脉冲磁场处理试样过程中, 磁场会促使原子内部电子由基态转变为激发态, 而激发状态会使得体系能量较高, 稳定性降低。当位错钉扎处的电子对保持在激发态, 位错会更易脱钉而移动, 即磁致塑性效应。磁致塑性效应改变材料内部的局部应力场, 降低钉扎点对位错的束缚能垒, 从而在原有应力场驱动下位错更易突破钉扎作用产生脱

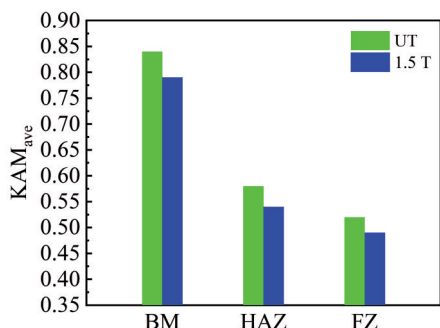
图10 脉冲磁场处理前后焊接接头 KAM_{ave} 图

Fig.10 KAM_{ave} maps of welded joints before and after pulsed magnetic field treatment

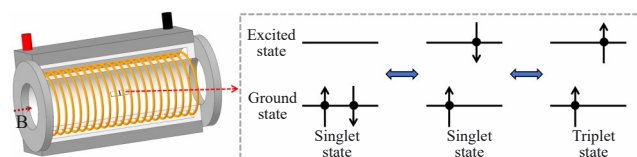


图11 脉冲磁场下原子核外电子自旋转换示意图

Fig.11 Schematic diagram of extranuclear electron spin transitions under pulsed magnetic field

钉发生迁移; 在这一过程中, 大量的位错湮灭, 局部应变积累减少, 最终实现耐蚀性能的提升^[22]。晶界处位错塞积引发局部应力集中, 当位错密度达到临界值时, 弹性应力场驱动位错向晶内迁移, 进而诱发晶界取向调整。

图 12 为焊接接头的 3 个区域在脉冲磁场处理前后的同一样品的晶界分布变化。小角度晶界 ($<15^\circ$) 用红色表示, 大角晶界 ($>15^\circ$) 用蓝色表示。

由图 12 可知, 脉冲磁场处理后, 焊接接头的基材、热影响区、焊缝中小角度晶界的含量分别减少了 6.4%、6.3%、7.3%。位错理论表明, 小角度晶界是位错的排列组成的, 储存了大量的第二类内应力。如图 13 中蓝色区域所示, 第二类应力的存在容易使晶界在腐蚀环境中成为腐蚀源, 这是因为应力超过晶界结合强度时, 产生微裂纹, 为腐蚀介质 (如 Cl^- 、 H^+) 提供扩散通道^[23], 加快了腐蚀的进程。小角度晶界的减小反映了位错湮灭或位错密度的减小, 这与 KAM_{ave} 的计算结果一致。同时, 小角度晶界的减少伴随着内应力的释放, 有效降低了材料的潜在腐蚀源, 提高了材料的耐蚀性能。

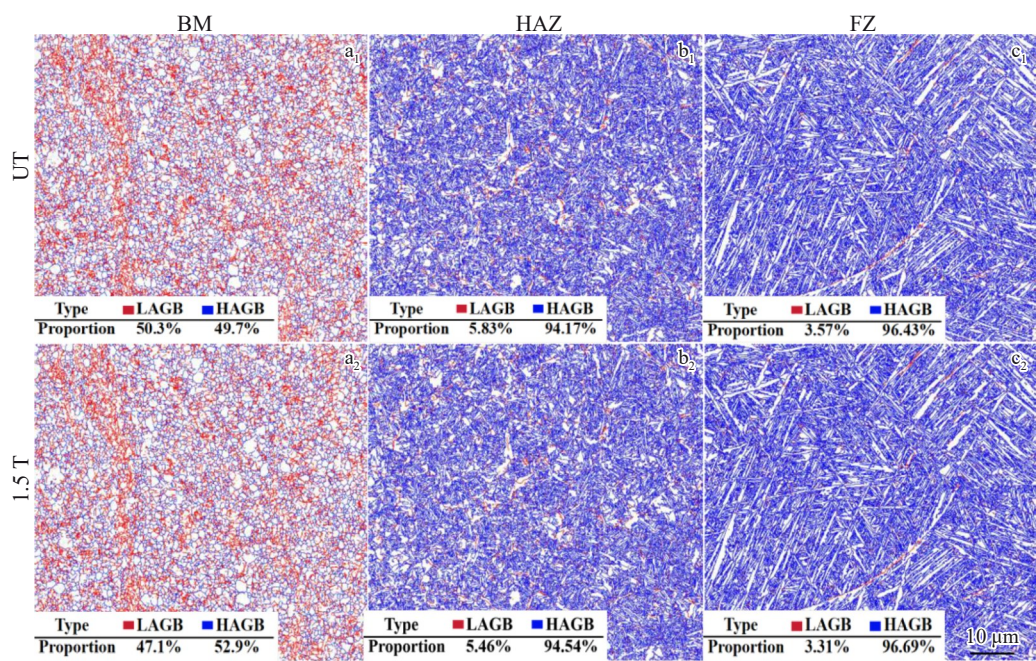


图 12 脉冲磁场处理前后 TC4 焊接接头大小角度晶界分布

Fig.12 Distribution of low-angle grain boundaries (LAGBs) and high-angle grain boundaries (HAGBs) in TC4 welded joints before (a_1-c_1) and after (a_2-c_2) pulsed magnetic field treatment

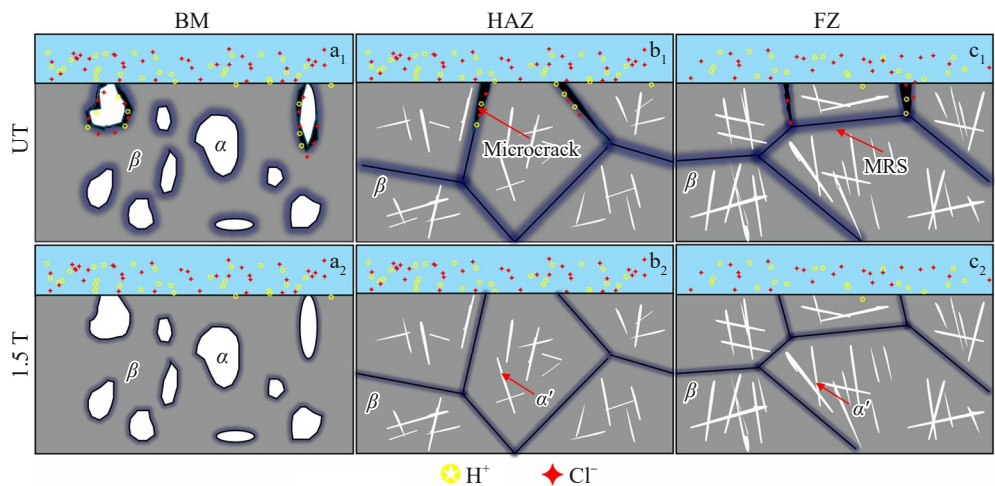


图 13 脉冲磁场处理前后 TC4 焊接接头晶界处腐蚀示意图

Fig.13 Schematic diagrams of grain boundary corrosion in TC4 welded joints before (a_1-c_1) and after (a_2-c_2) pulsed magnetic field treatment (blue-colored regions indicate the presence of microscopic residual stress (MRS) and the black area indicates microcracks)

4 结 论

1)脉冲磁场处理可显著提升TC4钛合金激光焊接件的耐蚀性能。本实验梯度设计的0.5、1、1.5、2 T磁处理后试样的耐蚀性能均有提升,其中1.5 T最为显著。相较于未处理试样,1.5 T试样的极化电阻(R_p)提升了13倍,自腐蚀电流密度(I_{corr})降低了30.3%,维钝电流密度(I_p)降低了40.5%,盐酸浸泡实验中20与40 d其失重率分别降低了1.7%、10.3%。

2)随着磁场强度的增加,残余应力分布的D值都降

低,且降幅呈现出先升高再降低的趋势。磁场输入能为位错运动提供有效能量源;而当磁场强度超过1.5 T时,磁致塑性效应趋于饱和,过剩能量引发非协调性晶格畸变,导致位错源激活率过高,形成位错塞积群,这种动态失衡使得位错湮灭速率下降,残余应力重分布效率降低。

3)脉冲磁场通过磁致塑性效应降低位错钉扎阻力,促使位错脱钉迁移并湮灭,使局部平均取向差(KAM_{ave})在基材、热影响区及焊缝分别降低5.8%、6.9%和6.0%;小角度晶界含量分别减少了6.4%、6.3%、7.3%。这过程中第二类内应力得以释放并均匀分布,有效减少了材料晶界处

应力集中与潜在晶间腐蚀源,提高了材料的耐蚀性能。

参考文献 References

- [1] Gou J, Shen J Q, Hu S S *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 42: 41
- [2] Wei G J, Tan M Y, Attarilar S *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 24: 5896
- [3] Li Z, Zhao W, Xiao G C *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 24: 4300
- [4] Fomin F, Horstmann M, Huber N *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2018, 116: 22
- [5] Atapour M, Pilchak A L, Frankel G S *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2010, 41: 2318
- [6] Li C S, Du J H, Wang L *et al. Materials Today Communications*[J], 2025, 46: 112755
- [7] Xu Z Z, Dong Z Q, Yu Z H *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2020, 30(5): 1277
- [8] Su R, Li H Z, Wang D R *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 30: 6753
- [9] Zhou Y, Wang K, Sun Z G *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2022, 306: 117607
- [10] Santos L M S, Borrego L P, Ferreira J M A *et al. Theoretical and Applied Fracture Mechanics*[J], 2019, 102: 10
- [11] Xu W, Sun S, Elambasseril J *et al. JOM*[J], 2015, 67: 668
- [12] Nicoletto G, Maisano S, Antolotti M *et al. Procedia Structural Integrity*[J], 2017, 7: 133
- [13] Cai Z P, Huang X Q. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(19–20): 6287
- [14] 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
- [15] Luo S J, Yan P, Liu M *et al. International Journal of Electrochemical Science*[J], 2021, 16(9): 225
- [16] Gong X J, Cui Y J, Wei D X *et al. Corrosion Science*[J], 2017, 127: 101
- [17] Chen J R, Tsai W T. *Electrochimica Acta*[J], 2011, 56(4): 1746
- [18] Shi R J, Tu Y Q, Gao K W *et al. Corrosion Communications*[J], 2022, 5: 14
- [19] Chen Zhe(陈喆), Xu Yangyang(胥杨洋), Yan Qiaosong(闫乔松) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2025, 54(3): 697
- [20] Murr L E. *Handbook of Materials Structures, Properties, Processing and Performance*[M]. Cham: Springer, 2015
- [21] Liu F L, Chen Y, He C *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 811: 141049
- [22] Yan M, Wang C, Luo T J *et al. Acta Metallurgica Sinica-English Letters*[J], 2021, 34: 45
- [23] Zeng B, Xie Z Q, Li Q *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(12): 4055

Effect of Pulsed Magnetic Field Treatment on Corrosion Resistance of TC4 Titanium Alloy Laser-Welded Joints

Wu Biao¹, Zhu Ziyu¹, Zhong Yizhen², Chen Zhe¹, Zhang Lin¹, Wu Mingxia¹, Liu Jian¹

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

(2. AVIC Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd, Chengdu 610000, China)

Abstract: The thermal effects of TC4 titanium alloy during laser welding induce microstructural heterogeneity and residual stress in the weld joint, significantly compromising its corrosion resistance. This study investigated the influence of pulsed magnetic field treatment with varying intensities (0.5, 1, 1.5, and 2 T) on the corrosion behavior of welded joints. Results show that magnetic field treatment effectively enhances corrosion resistance, with optimal performance achieved at 1.5 T. Compared to untreated specimen, the 1.5 T-treated specimen exhibits remarkable improvements: polarization resistance (R_p) increases by 13 times, corrosion current density (I_{corr}) decreases by 30.3%, passivation current density (I_p) reduces by 40.5%, while mass loss rates after HCl immersion for 20 and 40 d decrease by 1.7% and 10.3%, respectively. The decrease in homogeneity index (D -value) of residual stress distribution show a trend of initial increase followed by decrease with ascending magnetic intensity. At 1.5 T, the D -value reduction in x -direction reaches 27.92%, corresponding to optimal energy matching between magnetostrictive effects and dislocation motion. Beyond 1.5 T, magnetostriction saturation induces lattice distortion and dislocation pile-ups, diminishing stress redistribution efficiency. Magnetic treatment facilitates dislocation migration and annihilation, reducing local strain (5.8%–6.9% decrease in KAM_{ave}) and residual tensile stress (72.0% reduction). This process alleviates stress concentration and decreases the proportion of low-angle grain boundary, effectively releasing type II internal stresses and decreasing corrosion susceptibility. This research proposes an innovative, cost-effective, and eco-friendly post-processing strategy for titanium alloy welded structures.

Key words: pulsed magnetic field treatment; TC4 titanium alloy; laser welding; corrosion resistance; residual stress