

DOI:10.11784/tdxbz202007026

## 2195-T8 铝锂合金 TIG 焊接头的腐蚀行为

李 桓, 吴 胜, 张宇辉, 徐光霏, 杨立军

(天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 采用 TIG 焊工艺连接 5.3 mm 厚度 2195-T8 铝锂合金对接试板, 通过金相显微镜和扫描电镜对 TIG 焊接头组织进行分析. 为研究接头腐蚀行为, 进行了 TIG 焊接头晶间腐蚀试验与接头各位置电化学分析. 发现在 IGC(晶间腐蚀)溶液中, 焊缝耐蚀性最差, 最大腐蚀深度达到 163.9  $\mu\text{m}$ ; 其次是母材, 最大腐蚀深度达到 125.1  $\mu\text{m}$ ; 热影响区未出现明显的晶间腐蚀特征, 发生了均匀腐蚀, 最大深度达到 37.8  $\mu\text{m}$ . 在电化学腐蚀中, 母材的自腐蚀电流密度最小, 为 1.04  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; 其次是热影响区, 自腐蚀电流密度为 3.45  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; 焊缝自腐蚀电流密度最大, 达到 5.03  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . 焊缝的开路电位最低, 为 -0.763 5  $\text{V}_{\text{SCE}}$ ; 其次是母材, 开路电位为 -0.729 3  $\text{V}_{\text{SCE}}$ ; 热影响区开路电位最高, 为 -0.676 0  $\text{V}_{\text{SCE}}$ . 母材进行电化学腐蚀时, 腐蚀速率最低, 但在接头中浸入 IGC 溶液中时腐蚀深度大于热影响区, 认为原因有二: 一是热影响区-母材、热影响区-焊缝构成了区域腐蚀电偶, 热影响区电位最高, 作为阴极被保护, 焊缝、母材作为阳极, 被加速腐蚀; 二是母材晶界第 2 相连续, 晶界处有密集细小的 T1 相 ( $\text{Al}_2\text{CuLi}$ ), 第 2 相与周围基体构成腐蚀微电偶, 加速了晶界处 Al 基与 T1 相的溶解, 而热影响区晶界处的第 2 相呈不连续点状, 大多溶解于 Al 基中, 不利于腐蚀沿晶界向晶粒深处扩展, 同时, 第 2 相溶解导致 Al 基 Cu 元素增加, 电位升高, Al 基腐蚀倾向降低.

**关键词:** 铝锂合金; TIG 焊接头; 晶间腐蚀; 电化学

中图分类号: TG442

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2021)11-1145-06

## Corrosion Behavior of a 2195-T8 Al-Li Alloy TIG-Welded Joint

Li Huan, Wu Sheng, Zhang Yuhui, Xu Guangpei, Yang Lijun

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The butt test plate of 2195-T8 Al-Li alloy with a thickness of 5.3 mm was welded by tungsten inert gas (TIG) welding. The microstructure of the TIG-welded joint was analyzed via metallographic microscopy and scanning electron microscopy. To study the joint corrosion behavior, an intergranular corrosion test of the TIG-welded joint and an electrochemical analysis of each joint position were conducted. The results showed that the corrosion resistance of the fusion zone (FZ), with a maximum corrosion depth of 163.9  $\mu\text{m}$ , was the worst, followed by the base metal (BM), with a maximum corrosion depth of 125.1  $\mu\text{m}$ . The heat-affected zone (HAZ) did not exhibit significant intergranular corrosion characteristics and showed uniform corrosion, with a maximum depth of 37.8  $\mu\text{m}$  in the intergranular corrosion (IGC) solution. Through electrochemical corrosion tests, it was found that the BM had the lowest corrosion current density (1.04  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), followed by the HAZ (3.45  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), and the FZ had the highest (5.03  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Moreover, the FZ had the lowest open-circuit potential (-0.763 5  $\text{V}_{\text{SCE}}$ ), followed by the BM (-0.729 3  $\text{V}_{\text{SCE}}$ ), and the HAZ had the highest (-0.676 0  $\text{V}_{\text{SCE}}$ ). When the BM was subjected to electrochemical corrosion, the corrosion rate was the lowest; however, when the joint was immersed in IGC solution, the corrosion depth was greater than that of the HAZ, which is attributed to two reasons. First, the HAZ-BM and HAZ-FZ constitute the regional galvanic corrosion; HAZ acts as the cathode because of its higher open-circuit potential, while the

收稿日期: 2020-07-09; 修回日期: 2020-07-26.

作者简介: 李 桓 (1955—), 男, 博士, 教授, lihuan@tju.edu.cn.

通信作者: 杨立军, yljabc@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51675375).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51675375).

FZ and BM act as the anode and thus undergo accelerated corrosion. Second, the second phase of the grain boundary of the BM is continuous and features a dense and tiny T1 phase; the second phase and surrounding matrix form microscopic galvanic corrosion, which accelerates the dissolution of the grain boundary area; in contrast, the second phase at the HAZ boundary is discontinuous and mostly dissolves in the Al matrix; this is not conducive to the expansion of corrosion along the grain boundaries; moreover, the dissolution of the second phase results in the increase in Cu elements in the Al matrix, and the Al matrix corrosion tends to be lower due to the increase in potential.

**Keywords:** Al-Li alloy; TIG-welded joint; intergranular corrosion; electrochemistry

铝锂合金是轻质高强材料,具有高比强度、高比刚度的特性,合金中每加入 1% 的 Li,密度减小 3%,弹性模量增加 6%<sup>[1]</sup>. 铝锂合金在航天航空领域加工成本较低,是理想的航天航空结构材料<sup>[2-3]</sup>.

国内外很多学者对 2195 铝锂合金的腐蚀行为进行了研究. Corral 等<sup>[4]</sup> 将 2195 铝锂合金浸入 0.6 mol/L 的 NaCl 溶液中进行了静态浸泡测试. 浸泡 20 h 和 25 天都有明显的腐蚀副产物堆积. Wang 等<sup>[5]</sup> 发现随时效温度升高,晶界第 2 相增多,耐晶间腐蚀和剥蚀性能下降. Xu 等<sup>[6]</sup> 认为发生晶间腐蚀和剥落腐蚀的主要原因是 T1 相、θ' 分别与晶间无沉淀带形成腐蚀电偶对. 李劲风等<sup>[7]</sup> 对 2195-T6 态不同时效的铝锂合金进行了晶间腐蚀和剥蚀试验,测试了析出相 θ'、T1 和纯铝在 EXCO 溶液和晶间腐蚀介质中的开路电位,认为 2195 铝锂合金晶间腐蚀和剥蚀是由于晶界 T1 相的阳极溶解,或晶界 T1 相与晶界无沉淀带的交替溶解所造成的. 认为晶界 T1 相增加,晶界无沉淀带宽化,会增加晶间腐蚀和剥蚀敏感性. Yang 等<sup>[8]</sup> 改变焊接速度对 3 mm 厚度 2195-T8 铝锂合金进行了激光/MIG 复合焊,发现随着焊接速度增大,晶间腐蚀深度增加,开路电位下降,极化曲线极化电势更低,耐腐蚀性下降,认为是第 2 相偏聚晶界所致. 马云龙等<sup>[9]</sup> 进行了 2195-T8 态搅拌摩擦焊,发现母材区发生晶间腐蚀最严重,其次是热影响区,焊核区腐

蚀程度最轻. 罗传光等<sup>[10]</sup> 对 S2195 铝锂合金 TIG 焊工艺进行了试验,焊接接头强度系数达到了 0.67,验证了 TIG 焊工艺的可行性.

晶间腐蚀是指腐蚀沿着晶界或邻近区域延伸,晶界的腐蚀速度远大于晶粒内部的腐蚀速度<sup>[11]</sup>,其造成晶粒间结合薄弱,大大降低金属机械强度. 电化学腐蚀可以研究焊接接头各位置的开路电位和自腐蚀速率.

2195 铝锂合金腐蚀行为研究大多集中于单一的母材,近年来才开始有学者研究 FSW、激光/MIG 复合焊接头的腐蚀行为,关于 2195 铝锂合金 TIG 焊接头的腐蚀行为研究鲜有报道.

本文通过对 2195-T8 铝锂合金 TIG 焊接头的晶间腐蚀试验、各微区电化学试验来研究其焊接接头的腐蚀行为.

### 1 试验方法

母材为 2195-T8 态铝板,尺寸为 300 mm × 150 mm × 5.3 mm,焊丝为直径 1.2 mm 的 ER2319 铝铜焊丝,其化学成分见表 1. 试验使用山大奥太的 WSME-315 型逆变式交直流脉冲氩弧焊机,采用 VP-TIG 自动焊对接,坡口为 60°,钝边为 1 mm,焊接参数见表 2.

表 1 试验材料化学成分

Tab.1 Chemical compositions of test materials

%

材料	W <sub>Cu</sub>	W <sub>Li</sub>	W <sub>Mg</sub>	W <sub>Ag</sub>	W <sub>Fe</sub>	W <sub>Zr</sub>	W <sub>Ti</sub>	W <sub>Si</sub>	W <sub>Mn</sub>	W <sub>Al</sub>
2195	4.02	1.0	0.40	0.41	0.16	0.11	0.07	0.03	—	余量
ER2319	6.80	—	0.02	—	0.30	0.25	0.20	0.20	0.4	余量

表 2 焊接参数

Tab.2 Welding parameters

峰值电流 I/A	基值电流 I/A	焊接速度/(mm · min <sup>-1</sup> )	交流偏置/%	清理度/%	交流频率 f/Hz	脉冲频率 f/Hz
280	200	120	0	-15	100	3

参考标准《铝合金晶间腐蚀测定方法》(GB/T 7998—2005) 截取 3 个尺寸为 40 mm × 25 mm × 5.3 mm 的平行试样进行晶间腐蚀(IGC)试验,将试样浸泡在温度为 35 °C 的腐蚀液(1 mol/L 氯化钠溶液

1 L+密度为 1.1 g/mL 过氧化氢溶液 10 mL)中浸泡 6 h 后取出,随后参考标准《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产品的清除》(GB/T 16545—1996)去除腐蚀产物,再使用 ZEISS 超景深显微镜拍摄表面形

貌,沿平行于焊缝方向分别截取焊缝、热影响区和母材,将截取后的试样打磨抛光置于金相显微镜下观察晶间腐蚀深度。

垂直于焊缝横截面分别截取焊缝、热影响区和母材,作为电化学腐蚀试样,测试面为焊缝横截面,尺寸为  $5.0\text{ mm} \times 5.3\text{ mm}$ ,非测试面用环氧树脂包裹,再用 704 硅橡胶封住测试面与环氧树脂间隙.使用 Gamry 电化学工作站测试电化学试样的开路电位与极化曲线,辅助电极为铂电极,参比电极为饱和 KCl 溶液毛细管.电化学试验完成后使用超景深显微镜计算测试面面积,拍摄表面腐蚀形貌。

垂直于焊缝方向截取金相试样,使用凯勒试剂(keller 试剂,  $2.5\text{ mL HNO}_3 + 1.5\text{ mL HCl} + 1\text{ mL HF} + 95\text{ mL H}_2\text{O}$ )腐蚀,再置于金相显微镜以及扫描电镜下观察其组织形貌,对第 2 相及母材元素成分进行分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 显微组织分析

图 1 为 2195-T8 铝锂合金 TIG 焊的组织.焊缝由树枝晶与等轴晶混合组成,晶界与晶粒内部有大量第 2 相析出;熔合线较宽,由大量细小晶粒组成,宽

度达到  $186.8\text{ }\mu\text{m}$ ;母材沿轧制方向呈长条状,从图 1(d)观察到晶界析出连续的第 2 相,晶粒内部有少量第 2 相析出;热影响区组织为明显轧制形态,呈长条状,晶界产生点状不连续第 2 相。

图 2 为 TIG 焊接头扫描电镜组织形貌,图 2(a)-I 中第 1、2 谱图点为晶界第 2 相,第 3、4 谱图点为晶内铝基,第 5 谱图点为晶内第 2 相,其成分如表 3 所示.图 2(c)中谱点 6 为晶界第 2 相,谱点 7、8 为晶内铝基,其成分如表 3 所示.图 2(a)-II 为焊缝扫描电镜组织形貌,图 2(a)-III 到 VIII 为对应位置元素面扫描照片,其中图 2(a)-III 为 Al、Cu、Mg、Ag、O 5 种元素分布合成图,图 2(a)-IV、V、VI、VII、VIII 分别为 Al、Cu、Mg、Ag、O 单种元素分布图.结合图 2(a)以及表 3 可以看出,Cu 元素在晶界富集,同时在晶内也促进晶内第 2 相的形成,Mg 元素在晶界发生偏聚,Ag 元素均匀分布,Ag 和 Mg 相互作用,在 Al-Cu-Li 合金中起到增强时效强化的效果,促进 T1 ( $\text{Al}_2\text{CuLi}$ )相和少量  $\theta'$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ )、 $S'$  ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ )相均匀细小析出<sup>[12]</sup>,晶界富含 Al、Cu、Mg,第 2 相推测为 T1 相与  $S'$ 相,晶内第 2 相富含 Al、Cu,为 Al-Cu 或 Al-Cu-Li 相.图 2(b)为母材 SEM 形貌,母材呈长条状,晶粒十分细

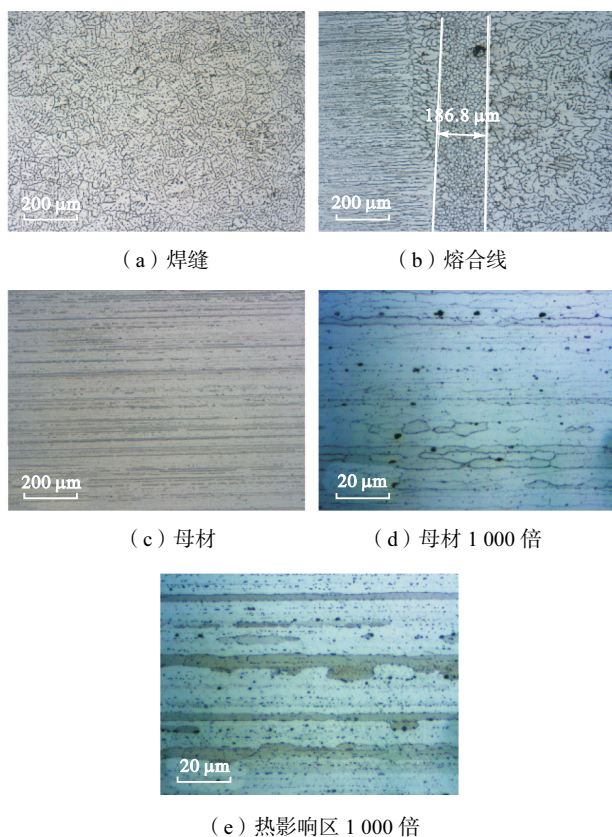


图 1 TIG 焊接头金相显微组织

Fig.1 Metallographic microstructure of the TIG-welded joint

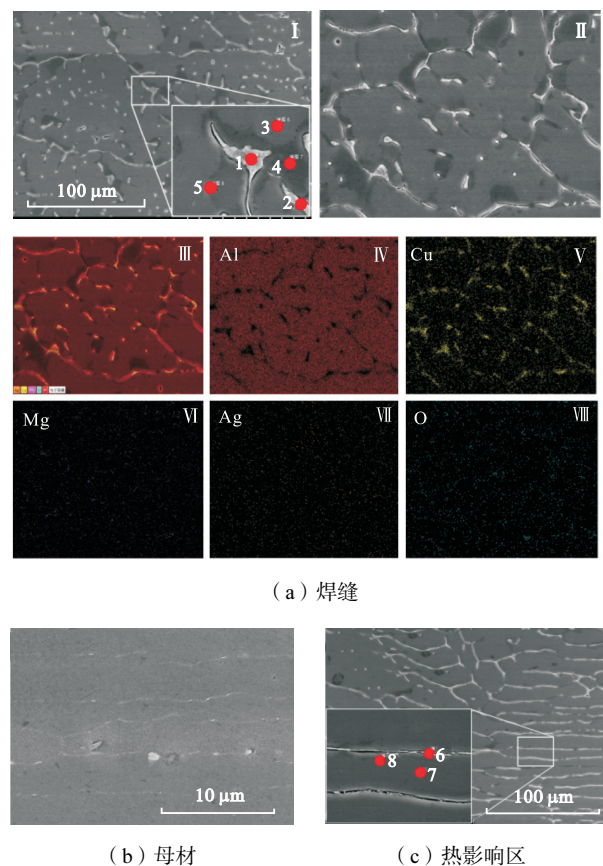


图 2 TIG 焊接头扫描电镜组织形貌

Fig.2 Microstructure of the TIG-welded joint by scanning electron microscopy

表 3 原子百分比  
Tab.3 Percentage of atoms %

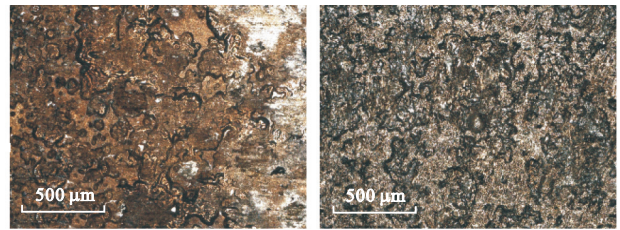
谱点	Al	Cu	Mg
1	58.26	26.97	14.77
2	72.06	18.06	9.88
3	97.82	0.61	1.57
4	96.12	0.72	1.66
5	69.17	15.62	3.30
6	86.09	11.61	2.30
7	98.66	0.61	0.73
8	97.58	1.20	1.22

长,宽度仅为 3 μm 或 4 μm. 大量文献表明,2195-T8 态铝锂合金母材的析出相主要为 T1 相和 θ' 相,在晶界上有大量密集细小的 T1 相,其尺寸远小于晶内 T1 相<sup>[9,12]</sup>. 结合图 2(c)和表 4 可以看出,热影响区晶界主要为 Al-Cu 相和 Al-Cu-Li 相,以及固溶 Al,晶界处 Cu 元素含量很低,晶内主要为 Al 基,热影响区 Cu 元素大量溶解,Mg 含量低,无明显偏聚现象.

2.2 晶间腐蚀(IGC)分析

图 3 是按照《铝合金晶间腐蚀测定方法》(GB/T 7998—2005)标准进行晶间腐蚀试验后,TIG

焊接头的表面超景深形貌,母材和焊缝表面都发生了大面积晶间腐蚀.

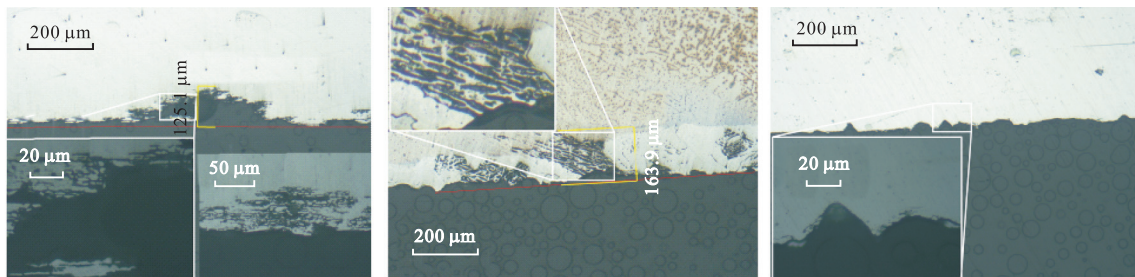


(a) 母材 (b) 焊缝

图 3 晶间腐蚀表面形貌

Fig.3 Surface morphology after intergranular corrosion

图 4 是 TIG 焊接头不同位置在 IGC 溶液中腐蚀后截面金相形貌. 如图 4(a)所示,母材发生了明显的晶间腐蚀,最大腐蚀深度为 125.1 μm,腐蚀沿晶界向母材内部生长,晶粒与晶粒之间晶界被腐蚀,间隙增大;如图 4(b)所示,焊缝发生了明显的晶间腐蚀,最大腐蚀深度为 163.9 μm;如图 4(c)所示,热影响区发生了均匀化腐蚀,未观察到晶间腐蚀特征,最大腐蚀深度为 37.8 μm.



(a) 母材 (b) 焊缝 (c) 热影响区

图 4 TIG 焊接头不同位置在 IGC 溶液中腐蚀后截面金相形貌

Fig.4 Metallographic morphology of the cross section of the TIG-welded joint after intergranular corrosion in different areas

图 5 是晶间腐蚀后试样上表面的 XRD 分析,发现腐蚀产物主要为白色非晶形疏松的 Al(OH)<sub>3</sub>.

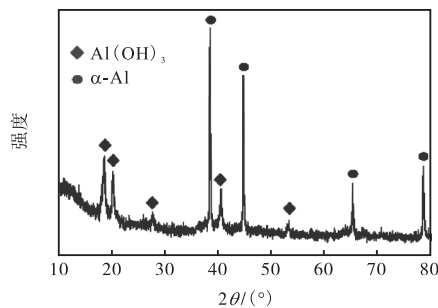


图 5 晶间腐蚀后试样 XRD 分析

Fig.5 XRD analysis of the intergranular corrosion specimens

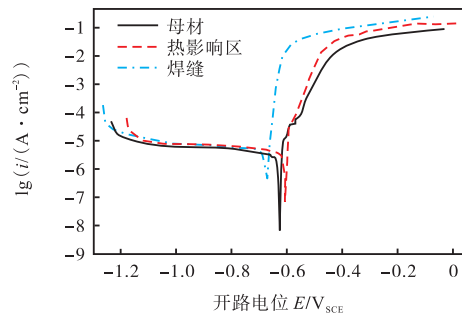
2195-T8 铝锂合金母材晶界附近有许多密集细小的 T1 (Al<sub>2</sub>CuLi) 相析出,其在 IGC 溶液中的开路电位远低于纯 Al 以及 Al<sub>2</sub>Cu 相<sup>[7]</sup>,在腐蚀发生时作为

阳极与晶界无沉淀带(作为阴极)组成腐蚀电偶发生溶解,随着 T1 相内活性 Li 溶解后,其电位升高,与 Al 基极性反转,Al 基做阳极开始溶解,腐蚀容易沿着晶界向母材内部扩展;热影响区由于受到热循环的影响,第 2 相大量溶解,晶界处第 2 相为点状不连续相,可以有效地阻断腐蚀沿晶界扩展,第 2 相的溶解也促进了 Cu 元素的固溶,增加了 Al 基的 Cu 含量,提高了开路电位,降低其腐蚀倾向;焊缝由于经历的熔化与快速凝固,在凝固过程中,会发生严重的成分偏析,Cu、Li 等元素大量偏聚于晶界,形成粗大疏松的晶界,而晶粒内部则由于含 Cu 量的减少导致电位下降,晶界第 2 相与晶界附近 Al 基构成腐蚀电偶,腐蚀容易沿晶界向焊缝内部扩展.

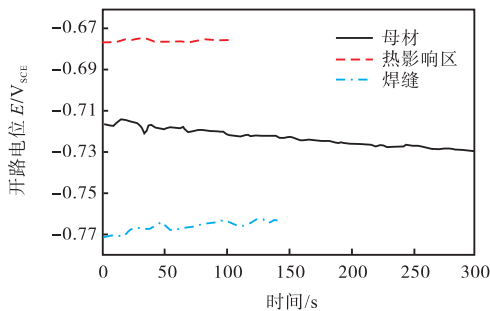
2.3 电化学分析

图 6(a)是 TIG 焊接头不同位置的极化曲线,自腐蚀电位由低到高依次是焊缝、母材、热影响区,图

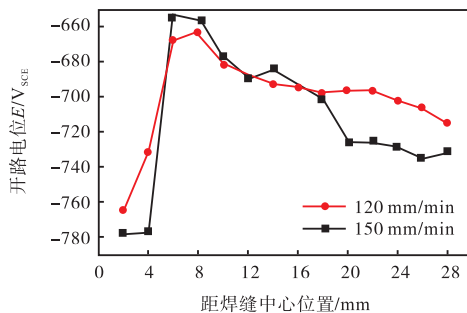
6(b)为 TIG 焊接头不同位置开路电位, 开路电位由低到高依次是焊缝、母材、热影响区, 其规律与自腐蚀电位规律一致, 在热力学上表现为焊缝腐蚀倾向最大, 其次是母材, 热影响区最小, 电位值见表 4; 拟合图 6(a)中的极化曲线分别计算出各自的自腐蚀电流密度( $i$ ), 从高到低依次是焊缝  $5.03 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、热影响区  $3.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、母材  $1.04 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; 反映了电化学反应过程中的动力学因素, 其规律与接头在 IGC 溶液中的腐蚀规律以及接头各位置自腐蚀电位、开路电位规律不一致. 热影响区和焊缝表现为连续腐蚀, 母材在阳极区出现了多次短暂的钝化, 随后腐蚀电流随电位上升而快速增加, 就 TIG 焊接头各位置电荷转移量而言, 母材金属溶解最少, 其次是热影响区, 焊缝金属溶解最多.



(a) TIG 焊接头不同位置极化曲线



(b) TIG 焊接头不同位置开路电位



(c) TIG 焊接头电位-位置曲线

图 6 TIG 焊接头不同位置极化曲线与开路电位

Fig.6 Potentiodynamic polarization curves of the TIG-welded joint and open-circuit potential in different areas

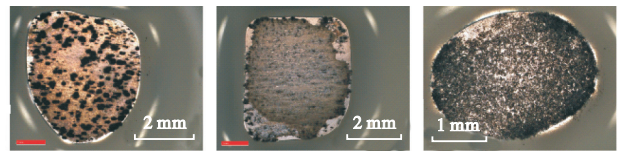
表 4 电化学参数

Tab.4 Electrochemical parameters

位置	腐蚀电位 $E/V_{SCE}$	腐蚀电流密度 $i/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	开路电位 $E/V_{SCE}$
母材	-0.624 5	1.04	-0.729 3
热影响区	-0.605 0	3.45	-0.676 0
焊缝	-0.672 8	5.03	-0.763 5

图 6(c)为 TIG 焊接头距离焊缝中心线不同距离处经 600 s 稳定后的开路电位值, 增设一组焊接速度为 150 mm/min、其他焊接参数不变的试验. 结果表明, TIG 接头焊缝电位最低, 热影响区电位最高, 峰值在靠近焊缝侧的热影响区处, 在热影响区, 开路电位随着远离焊缝下降. 随着焊接速度的增大, 焊缝处的开路电位下降, 热影响区处峰值电位升高, 但热影响区开路电位下降得更快, 热影响区范围更小.

图 7(a)表明母材在阳极区发生了严重的点蚀, 虽然溶解的金属最少, 但会造成更大的腐蚀深度, 图 7(b)表明热影响区发生了均匀腐蚀与轻微点蚀, 图 7(c)表明焊缝发生了严重的均匀腐蚀.



(a) 母材 (b) 热影响区 (c) 焊缝

图 7 不同位置电化学腐蚀后表面形貌

Fig.7 Surface morphology after electrochemical corrosion in different areas

TIG 焊接头在 IGC 溶液中浸泡腐蚀时, 母材、热影响区和焊缝相互之间紧密相连, 作为良好的导体, 由于各个位置开路电位不同, 形成了热影响区-母材腐蚀电偶和热影响区-焊缝腐蚀电偶, 其中热影响区电位较高作为阴极, 焊缝、母材电位较低作为阳极, 形成了区域腐蚀电偶. 其次, TIG 焊接头不同位置处的第 2 相与 Al 基又构成了微观腐蚀电偶, 最终在二者的共同作用下焊缝和母材发生了明显的晶间腐蚀, 腐蚀深度较大, 而热影响区则只发生了轻微的均匀腐蚀.

### 3 结 论

(1) 2195-T8 铝锂合金 TIG 焊接头的热影响区第 2 相大量溶解, 晶界由点状不连续第 2 相与  $\alpha$ -Al 组成, Cu 元素大量溶解; 焊缝由粗大的等轴晶与柱状晶组成, 晶界富含 Cu、Mg 溶质元素, 晶内第 2 相富含 Cu 元素.

(2) 焊缝晶间腐蚀深度最大, 达到  $163.9\ \mu\text{m}$ , 母材晶间腐蚀深度达到  $125.1\ \mu\text{m}$ , 热影响区发生均匀腐蚀, 未出现晶间腐蚀特征, 腐蚀深度浅, 达到  $37.8\ \mu\text{m}$ .

(3) 焊缝、热影响区、母材在电化学腐蚀时自腐蚀电流密度依次下降, 但母材发生了严重的点蚀.

(4) 焊缝电位最低, 热影响区电位最高, 峰值在靠近焊缝侧的热影响区处, 在热影响区, 开路电位随着远离焊缝下降. 随着焊接速度的增大, 焊缝处的开路电位下降, 热影响区处峰值电位升高, 但热影响区开路电位下降得更快, 热影响区范围更小.

(5) 焊缝、母材、热影响区的开路电位依次上升, 分别为  $-0.7635\ \text{V}_{\text{SCE}}$ 、 $-0.7293\ \text{V}_{\text{SCE}}$ 、 $-0.6760\ \text{V}_{\text{SCE}}$ , TIG 焊接头形成热影响区-焊缝、热影响区-母材区域腐蚀电偶, 母材和焊缝作为阳极, 腐蚀速度加快, 热影响区作为阴极受到了保护.

#### 参考文献:

- [1] Rioja R J. Fabrication methods to manufacture isotropic Al-Li alloys and products for space and aerospace application[J]. *Materials Science and Engineering*, 1998, 257(1): 100-107.
- [2] 孙中刚, 郭旋, 刘红兵, 等. 铝锂合金先进制造技术及其发展趋势[J]. *新视点*, 2012(5): 60-63.  
Sun Zhonggang, Guo Xuan, Liu Hongbing, et al. Development trend of advanced manufacturing technology for aluminum lithium alloy[J]. *New Viewpoint*, 2012(5): 60-63 (in Chinese).
- [3] 吴秀亮, 刘铭, 臧金鑫, 等. 铝锂合金研究进展和航空航天应用[J]. *航空制造技术*, 2016, 30(专辑 28): 571-578.  
Wu Xiuliang, Liu Ming, Zang Jinxin, et al. Research-progress and aerospace application of aluminum lithium alloys[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 30(Album 28): 571-578 (in Chinese).
- [4] Corral J, Trillo E A, Li Ying, et al. Corrosion of friction-stir welded aluminum alloys 2024 and 2195[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19(23): 2117-2122.
- [5] Wang Xuehui, Wang Jihui, Yue Xin, et al. Effect of aging treatment on the exfoliation corrosion and stress corrosion cracking behaviors of 2195 Al-Li alloy[J]. *Materials and Design*, 2015, 67: 596-605.
- [6] Xu Yue, Wang Xiaojing, Yan Zhaotong, et al. Corrosion properties of light-weight and high-strength 2195 Al-Li alloy[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, 24(5): 681-686.
- [7] 李劲风, 郑子樵, 李世晨, 等. 2195 铝-锂合金晶间腐蚀及剥蚀行为研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2004, 22(5): 640-643.  
Li Jinfeng, Zheng Ziqiao, Li Shichen, et al. Study on intergranular corrosion and exfoliation corrosion behaviors of 2195 Al-Li alloy[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2004, 22(5): 640-643 (in Chinese).
- [8] Yang Mei, Lu Jingxiang, Chen Jing, et al. Effect of welding speed on microstructure and corrosion resistance of Al-Li alloy weld joint[J]. *Materials and Corrosion*, 2019, 71(2): 300-308.
- [9] 马云龙, 杨子奇, 李劲风. 2195 铝锂合金摩擦搅拌焊接头组织与腐蚀行为[J]. *焊接学报*, 2019, 40(10): 142-147.  
Ma Yunlong, Yang Ziqi, Li Jinfeng. Structure and corrosion behavior of friction stir weld joint of 2195 Al-Li alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(10): 142-147 (in Chinese).
- [10] 罗传光, 李桓, 马飞, 等. 喷射成形 2195 铝锂合金封头旋压及焊接试验研究[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2020, 53(8): 803-808.  
Luo Chuanguang, Li Huan, Ma Fei, et al. Spinning and welding test investigation of shell cover of spray-formed 2195 Al-Li alloy[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2020, 53(8): 803-808 (in Chinese).
- [11] 张德芬, 宫丽杰, 陈孝文, 等. 2A12/7075 异种铝合金 FSW 接头耐腐蚀性能[J]. *有色金属工程*, 2019, 9(7): 27-32.  
Zhang Defen, Gong Lijie, Chen Xiaowen, et al. Corrosion resistance of friction stir welded joints of 2A12/7075 dissimilar aluminum alloy[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019, 9(7): 27-32 (in Chinese).
- [12] 王芝秀, 郑子樵, 李海. 铝锂合金的微合金化及其作用机理[J]. *材料导报*, 2003, 17(10): 11-15.  
Wang Zhixiu, Zheng Ziqiao, Li Hai. Microalloying of Al-Li alloys and its mechanisms[J]. *Materials Reports*, 2003, 17(10): 11-15 (in Chinese).

(责任编辑: 田军)