

# 2198 铝锂合金激光填丝焊接接头腐蚀行为

殷士焜 吕俊霞 肖荣诗

北京工业大学激光工程研究院高功率及超快激光先进制造实验室, 北京 100124

**摘要** 2198 铝锂合金具有密度低、力学性能好、比强度高、耐高温、可塑性强等优点,是航空航天领域理想的结构材料。针对 2198 铝锂合金填充 ER4047 Al-Si 焊丝激光焊接接头的显微组织及在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的腐蚀行为进行研究。利用光学显微镜、扫描电镜及透射电镜对焊接接头微观组织形貌、析出相的种类及分布研究的基础上,室温下采用浸泡实验法和电化学腐蚀法对母材和焊缝腐蚀行为进行了系统的研究。结果表明,2198 铝锂合金母材组织较粗大,晶粒沿轧制方向生长,在粗大的组织中随机分布着尺寸在几百纳米左右的颗粒状和针状的 T1 相,而填充 ER4047 Al-Si 焊丝激光焊接后,热影响区极窄,焊缝组织细小、成分均匀、析出相的种类多样,呈等轴细晶状组织,靠近熔合线处组织呈垂直于熔合线生长的柱状晶。室温下在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中,焊缝和热影响区为均匀腐蚀,腐蚀斑点面积小、蚀点浅。母材为点蚀,随着浸泡时间增加,腐蚀斑点面积变大、蚀点加深。焊缝的开路电位、自腐蚀电位和极化电阻均高于母材,腐蚀电流密度则小于母材。

**关键词** 激光技术; 2198 铝锂合金; Al-Si 焊丝; 激光焊接; 微观组织; 腐蚀

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0403007

## Corrosion Behavior of Laser Beam Welded Joint of 2198 Aluminium-Lithium Alloy with Filler Wire

Yin Shikun Lü Junxia Xiao Rongshi

*High-Power & Ultrafast Laser Manufacturing Laboratory, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

**Abstract** 2198 aluminium-lithium alloy is extensively used in the field of aerospace due to the favorable properties, such as low density, good mechanical property, high specific strength, good thermostability and plasticity. 2198 aluminium-lithium alloy is welded by fiber laser using the filler of ER4047 Al-Si. The microstructure and corrosion behavior of joint in NaCl solution with 3.5% mass fraction is studied. The micromorphologies, precipitate species and their distribution have been examined using the optical micrograph, scanning electron microscope and transmission electron microscope. The corrosion behavior of weld and base metal has been compared by the methods of immersion test and electrochemical corrosion test at room temperature. The results indicate that the microstructure of 2198 aluminium-lithium alloy base metal, compared to the weld, is coarser and grows along to the rolling direction. Plenty of T1 precipitates with the diameter of hundreds of nanometers distributed randomly in the base metal. After laser welded with the filler ER4047 Al-Si, the heat affected zone is narrow, the microstructure is tiny, the component is uniform, the kind of precipitate is various, and the fine grain is equiaxed, the columnar crystal is vertical growth close to fusion line. At room temperature in NaCl solution with 3.5% mass fraction, the weld and heat affected zone show the uniform corrosion behavior, the small corrosion spot area, the shallow corrosion spot. By comparison, the parent metal shows the pitting corrosion. With the immersion time

收稿日期: 2015-10-10; 收到修改稿日期: 2015-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(51175008)、北京市教育委员会科技计划面上资助项目(KM201310005017)

作者简介: 殷士焜(1990—),女,硕士研究生,主要从事铝合金激光焊接接头腐蚀性能方面的研究。

E-mail: yinshikunemails@gmail.com

导师简介: 吕俊霞(1976—),女,博士,助理研究员,主要从事激光加工材料冶金和腐蚀方面的研究。

E-mail: junxialv@bjut.edu.cn(通信联系人)

increasing, the pitting area is enlarged and the depth is deeper. The open circuit potential, self-corrosion potential and polarization resistance of weld are all higher than those of the parent metal, but the corrosion current density is less than that of the parent metal.

**Key words** laser technique; 2198 aluminum-lithium alloy; Al-Si filler; laser welding; microstructure; corrosion  
**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390; 350.3850

## 1 引言

2198 铝锂合金较常规铝合金具有密度低、力学性能好、比强度高、耐高温、可塑性强等优点,是理想的轻质高强结构材料,目前广泛应用于航空航天等领域<sup>[1-2]</sup>。其焊接性能直接决定 2198 铝锂合金在我国航空航天领域的应用前景。与其他焊接方式,如电弧焊、搅拌摩擦焊等相比,激光焊接具有热影响区小,焊接变形小等优点<sup>[3-5]</sup>。在激光焊接过程中,2198 铝锂合金表面固有的一层极薄的包铝层不可避免会遭到破坏,裸露的 2198 母材接触到腐蚀介质,易引起腐蚀发生<sup>[6-7]</sup>。其次,添加焊丝的焊缝与母材化学成分和组织结构会有显著差别,二者存在电极电位差,接触到腐蚀介质也会引起严重的电化学腐蚀。因此,研究 2198 铝锂合金填充铝硅焊丝激光焊接接头的腐蚀行为具有重要的现实意义。

2198 铝锂合金是在 2195 铝锂合金的基础上,将 Cu 质量分数由 4% 降到 3% 左右, Li 质量分数维持在 1% 左右,并且加入少量 Ag、Mn、Zr 等合金化学元素演化而来的,是新型的第三代轻质高强铝锂合金。商业 2198 铝锂合金是典型的时效硬化合金,预先经过冷拔、挤压,引入大量位错以提供低能成核位置,然后人工时效析出  $\theta'$ (Al<sub>2</sub>Cu),  $\delta'$ (Al<sub>3</sub>Li), T1(Al<sub>2</sub>CuLi) 和 S(Al<sub>2</sub>CuMg) 等少量的金属间化合物,分布于晶界和亚晶界,起到对合金的强化效果<sup>[8]</sup>。目前国内外研究普遍认为,这些金属间化合物的存在及分布是引起母材或焊缝发生腐蚀的主要原因。如对 7075-T6<sup>[9-10]</sup> 铝合金和 2024-T3<sup>[11-12]</sup> 铝合金的腐蚀行为研究发现,在腐蚀液中引起的点蚀主要归咎于合金基体和析出物间的连续反应,析出物中含有电极电位较低的合金元素,如 Li、Mg 等易先被腐蚀,引起阳极溶解。魏修宇等<sup>[13]</sup>对 2195 铝锂合金在不同时效状态下的腐蚀行为研究发现,由于 T1 相的存在,在腐蚀介质中会形成晶间腐蚀和剥落腐蚀。Li 等<sup>[14]</sup>对 2195 铝合金在 3.0% (质量分数,下同) NaCl 溶液中的阻抗研究表明,腐蚀过程中合金表面钝化膜不断有孔核形成和修复的过程,随着腐蚀时间的延长,极化电阻先增大后减小,自腐蚀电流逐渐增大,合金表面破坏逐渐加剧。但是,目前国内外针对 2198 新型铝锂合金填充铝硅焊丝激光焊接接头的腐蚀行为还未见相关报道。

本文针对 2198 铝锂合金填充 ER4047Al-Si 焊丝激光焊接接头的微观组织和在 3.5% 的 NaCl 水溶液中的腐蚀行为进行了研究。通过浸泡法、动电位极化曲线法和阻抗谱分析法系统研究焊接接头各个区域成分和组织对腐蚀行为的影响规律,为 2198 铝锂合金焊接件的广泛应用提供实验参考依据。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验材料

本实验所用材料为 2198 铝锂合金,板材厚度为 2 mm,其化学成分如表 1 所示。

表 1 实验材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of test materials (mass fraction, %)

Alloys	Cu	Li	Mg	Mn	Zr	Ti	Fe	Si	Zn	Ag	Ni	Al
AA2198	3.24	0.99	0.33	<1	0.11	0.03	0.04	0.03	0.01	0.29	<1	Bal.
ER4047	0.3		0.10	0.15			0.8	12.3	0.2			Bal.

### 2.2 实验方法

本实验采用掺镱光纤激光器(YLS-6000)配六轴联动机械手(KUKA)对 2198 铝锂合金进行激光对接填充焊接,焊接方向与母材轧制方向一致,实验过程中填充焊丝从熔池前方送入,激光功率为 4 kW,焊接速度为 4 m/min,送丝速度为 4 m/min,主、背保护气均为氩气,流量为 10 L/min,具体的焊接细节在文献[15]中已有详细描述。焊后选用成形良好且无宏观裂纹缺陷的焊接接头,对接头表面进行金相打磨抛光,金相观察腐蚀试液选用 Keller 试剂(0.5% HF, 1.5% HCl, 2.5% HNO<sub>3</sub>, 95% H<sub>2</sub>O, 体积分数),然后对接头宏观形貌及微观组织

采用金相显微镜(OM, OLYMPUS GX51)和扫描电镜(SEM, 日立 S3400N)配置能谱(EDS, Bruker 5010)进行观察。焊缝和母材物相分析采用X射线衍射仪(XRD), Cu靶, 电压40 kV, 电流100 mA, 扫描速度15 °/min, 扫描范围20°~80°。析出相的分布和大小采用透射电镜(TEM, JEOL-2010)分析, 样品要先机械减薄到80 μm以下, 冲孔得到直径为3 mm圆片, 然后采用硝酸甲醇溶液(30%硝酸:70%甲醇, 体积分数)进行电解抛光, 温度控制在-30 °C~20 °C, 电压20 V, 电流50~70 mA。

焊缝和母材的腐蚀测试采用室温浸泡法和电化学腐蚀法两种方法进行, 腐蚀液用3.5% NaCl溶液, 实验之前要先对样品表面进行打磨抛光, 浸泡试样表面积大小约为20 mm×20 mm。电化学腐蚀采用电化学分析测试系统(法国Biologic公司的VMP3)进行, 其中参比电极为饱和甘汞电极(SCE), 对电极为Pt电极。实验之前, 要先对样品准确封装, 将样品用不导电的聚乙烯严密包裹, 暴露的测试表面约为400 mm<sup>2</sup>, 待包裹试样充分干燥后对裸露表面进行金相打磨、金刚石抛光膏抛光, 接着分别用丙酮和酒精超声波震荡清洗, 放置于空气中干燥24 h以上备用。开路电位测量时间为2 h, 每0.5 s记录一次电位测量值。动电位阳极极化曲线测试范围为-250~2000 mV 参比SCE, 扫描速率为50 mV/min。极化测试前, 工作电极在3.5% NaCl溶液中浸泡20 min以上, 保证开路电位达到稳定。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 焊接接头显微组织

图1所示为2198铝锂合金填充ER4047 Al-Si焊丝激光焊接接头光学显微组织分布, 其中图1(a)为焊接接头宏观OM形貌, 从图中可以看出焊缝成形较好, 没有较大的宏观气孔、裂纹等缺陷, 其中右上角为部分焊接接头EDS元素面分布图, 结果表明添加Al-Si焊丝后焊缝内合金元素分布均匀, 主要合金元素为Al、Cu、Mg、Fe、Zn、Si, 大范围内无宏观偏析现象。图1(b)、(c)和(d)分别为母材(BM)、热影响区(HAZ)及焊缝(WM)局部放大的显微组织, 可以看出这三者区域处组织存在明显差异。母材[图1(b)]主要由 $\alpha$ -Al组成, 显微组织呈沿轧制方向拉长的粗大组织, 其取向与合金轧制方向一致, 在 $\alpha$ -Al组织及基底处不均匀地分布着大量颜色较深的细小的析出相。P Cavaliere等<sup>[5]</sup>研究认为, 2198铝锂合金内的强化相主要是细片状的T1相。图1(c)显示了热影响区的显微组织, 其中沿熔合线(FL)靠近焊缝一侧晶粒呈柱状细晶组织, 柱状晶生长方向垂直于熔合线, 根据传热理论, 从熔化线向焊缝中心, 成分过冷 $G/R$ (其中 $G$ 为温度梯度,  $R$ 为冷却速度)逐渐减小, 因而容易在焊缝的两边出现包状晶或柱状枝晶, 因此在焊缝靠近熔合线区域处会出现柱状晶, 同时在高倍下可以看到靠近熔合线处有一宽度约10~15 μm的细晶区, 这是由于激光焊接凝固过程中, 熔合线附近温度梯度较大造成的。从图中也可以看出激光焊接接头热影响区较窄; 跟母材相比较, 焊缝中心[图1(d)]区域组织晶粒较细小, 呈等轴细晶状分布, 平均尺寸约为10 μm, 单纯从均匀凝固理论来看, 焊缝中心区域散热相对较慢, 温度梯度较小, 晶粒易形成等轴晶, 这与激光焊接熔池的流动行为有关<sup>[16]</sup>。另外, 由于激光焊接过程中填充Al-Si焊丝, 熔化过程中焊丝完全进入熔池, 随后的凝固会造成局部偏析现象, 易形成富铝硅共晶相, 同时Si

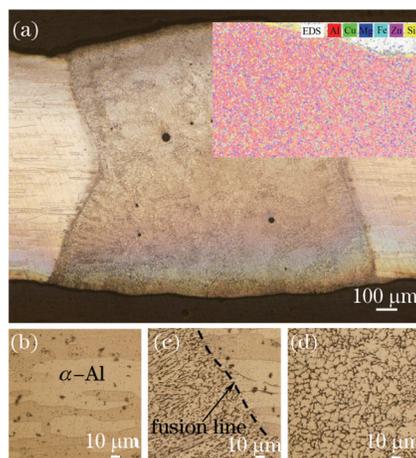


图1 焊接接头显微组织。(a) 接头宏观形貌; (b) 母材; (c) 热影响区; (d) 焊缝

Fig.1 Microstructural of laser welding joint. (a) Macrostructure of laser welding joint; (b) BM; (c) HAZ; (d) WM

元素有显著细化晶粒的作用,因而明显改善晶粒尺寸<sup>[17]</sup>。

### 3.2 母材和焊缝 TEM 分析

图 2 为 2198 铝锂合金激光焊接填充 ER4047Al-Si 焊丝焊接接头 TEM 图。其中图 2(a)为母材区域 TEM 明场像,从图中可以看到在母材区域存在非常细小的颗粒状和针状的析出相,这些析出相随机分布,颜色相对基体较深,尺寸在几百纳米左右。针对这些析出相进行了选区分析,图 2(a)红色方框中局部放大的图为图 2(b),图 2(c)为图 2(b)箭头所示区域的选区电子衍射(SAED),通过 SAED 的标定和分析可知,衍射花样为[011]方向铝合金基体,主衍射斑点周围微弱的卫星斑点显示的为互相垂直的针棒状析出相,这种针状相为六方结构,晶格常数( $a=4.97 \times 10^{-10}$  m,  $c=9.35 \times 10^{-10}$  m)与 T1( $Al_2CuLi$ )相的晶格结构和晶体常数匹配。普遍认为铝锂合金中 Cu 元素的添加有利于促进 T1 相及  $\theta'$  相的析出,它们作为铝锂合金中重要的力学性能强化相存在<sup>[18-19]</sup>,同时也是容易引起腐蚀的金属间化合物。图 2(d)为焊缝区域 TEM 图,对图 2(d)红色圆圈的 e 区域[图 2(d)中焊缝区域晶粒内部]进行 SAED 分析,结果显示此区域为面心立方结构,晶格常数( $a=4.0496 \times 10^{-10}$  m)与  $\alpha$ -Al 基体相匹配,为典型的[001]<sub>Al</sub>晶型的  $\alpha$ -Al 基体。而图 2(d)红色圆圈的 f 区域[图 2(d)中焊缝区域靠近晶界处]的 SAED 花样中卫星斑点显示存在析出相,分析表明此区域为[001]晶型 Al 基体及其包含大量析出相的固溶体。TEM 微观明场图像和 SAED 分析显示,焊缝区域相对母材区域析出相的形式更多样,结合焊缝区域 XRD 分析,焊缝区域确实存在 AlLi、 $Al_2Cu(\theta')$ 、 $Al_6CuLi_3$ 、 $Al_7Cu_2Fe_7$ ,这些金属间化合物,如图 3 所示,部分析出相由于在铝合金基体中分布较少或尺寸较小,在局部的 TEM 图像中没有观察到,但这些析出相的分布和大小直接影响焊缝区域的腐蚀性能。

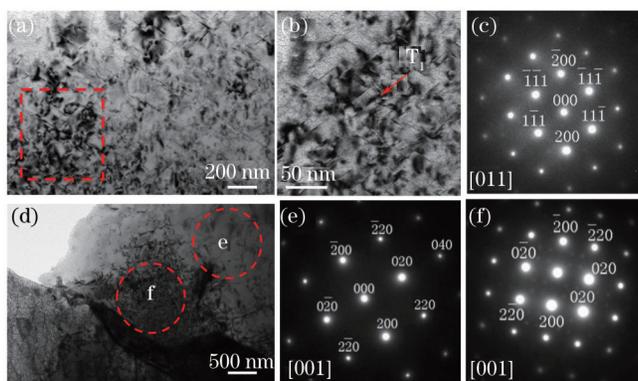


图 2 母材和焊缝 TEM 明场像及其对应的 SAED 斑点图。(a) 母材; (b) 图(a)中红色区域; (c) 为相应衍射斑点; (d) 焊缝; (e) 图(d)中的 e 区的衍射斑点; (f) 图(d)中的 f 区的衍射斑点

Fig.2 TEM bright filed images and SAED patterns of base matal and weld. (a) BM; (b) red zone in Fig.(a); (c) corresponding electron diffraction pattern; (d) WM; (e) electron diffraction patterns of e zone in (d); (f) electron diffraction patterns of f zone in Fig.(d)

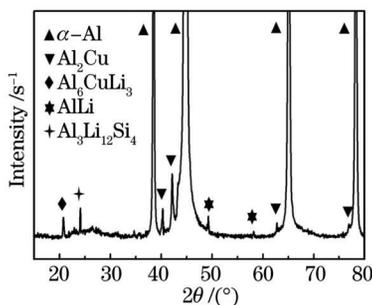


图 3 2198 铝锂合金激光焊接接头焊缝区域 XRD 分析

Fig.3 XRD patterns of weld metal of laser welding joints of 2198 Al-Li alloy

### 3.3 浸泡腐蚀研究

图 4 为焊接接头在 3.5%NaCl 溶液中浸泡后的微观腐蚀 SEM 形貌。可以看出随着浸泡时间从 4 h 增加到 8 天,母材腐蚀以点蚀为主,焊缝和热影响区均呈均匀腐蚀。腐蚀测试发现,当最初浸泡 4 h,母材表面会出现随机分布的小蚀点,随着浸泡时间增加到 8 h,母材表面蚀点面积增大,并出现破裂现象,这些蚀点的形成

与析出相的不均匀分布以及高电位的金属富集有关,研究发现 Cu、Fe 相的富集会引起点蚀的形成,导致周边低电位 Al、Mg 相阳极溶解<sup>[20-23]</sup>。当浸泡时间继续增长,蚀点处出现表面脱皮现象,并且腐蚀斑点开始向四周扩散,李劲风等<sup>[24]</sup>人将 2195 铝锂合金浸泡在腐蚀溶液中,在 35 ℃ 下发现了晶间腐蚀和剥蚀行为,他们认为这主要是由于晶界处 T1 相或(和)晶界无沉淀带的腐蚀造成的。2198 铝锂合金长时间在 NaCl 溶液中浸泡后,Cl<sup>-</sup>穿透破裂的腐蚀膜造成母材内部金属继续被侵蚀,腐蚀产物大量堆积在表面,腐蚀膜脱落附着在坑点表面。腐蚀 8 天后,蚀点开始向纵向发展,形成大而深的腐蚀坑。这些现象表明,2198 铝锂合金中富含 Cu 的 T1 相和θ'相的不均匀分布,是造成母材点蚀的主要原因。进一步对热影响区和焊缝的浸泡发现腐蚀速度相对母材较缓慢,腐蚀斑点均较小、深度较浅,并且均匀地附着在金属表面,没有出现大而深的点蚀坑或破裂现象。当长时间浸泡达到 8 天时,热影响区和焊缝表面均沉积大量的腐蚀产物,但未见有较深的蚀坑形成。这些现象表明焊缝区域细小的等轴状组织对提高焊缝的腐蚀性能有明显的作,经激光焊接后,尽管焊缝内存在着大量的析出物,但经浸泡 8 天后,发现这些析出物的存在对焊缝腐蚀性能影响不是很明显。值得注意的是,从腐蚀结果显示,细晶区与焊缝区域的腐蚀形貌相似,但由于细晶区的晶粒尺寸较小导致腐蚀斑点密集。根据以上观察推测,2198 铝锂合金添加 Al-Si 焊丝在中性盐溶液中长期腐蚀细晶区一定是接头的薄弱环节。这与前期对接头力学性能测试结果<sup>[15]</sup>相似,此区域硬度低,为易拉伸断裂处,是接头的薄弱环节。

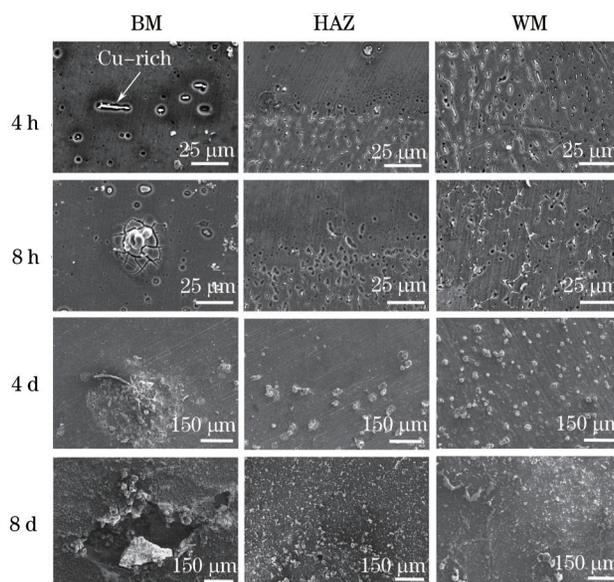


图 4 2198 铝锂合金激光焊接接头各区域浸泡在 3.5%NaCl 溶液中 SEM 形貌

Fig.4 SEM micrographs of laser welding joints of 2198 Al-Li alloy in 3.5% NaCl solution

为了进一步研究母材和焊缝区域在 3.5% NaCl 溶液中经腐蚀后表面的腐蚀产物,图 5(a)和(b)分别为母材和焊缝在溶液中浸泡腐蚀初期的 EDS 图。从图 5(a)中可以看出,经腐蚀后,母材表面明亮的蚀点主要富集铜 (Cu-rich),蚀点及蚀点周围贫铝,这主要由于 Cu (价电位为+0.34 V)相对于 Al、Mg、Fe、Li 等金属元素的价电位较高,富铜的 T1 相和θ'相与周围铝基体在腐蚀液中形成了原电池,其中 T1 相和θ'相分别作为阴极,周围铝基体作为阳极,结果造成铝基体腐蚀,因而导致了周围的贫铝区。

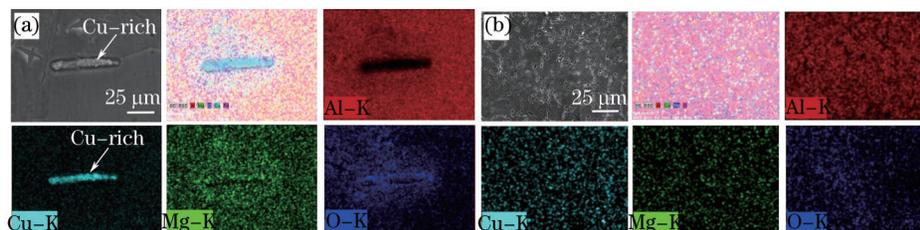


图 5 母材和焊缝 EDS 图。(a) 母材; (b) 焊缝

Fig.5 EDS analysis pictures of BM and WM. (a) BM; (b) WM

相比之下,焊缝区域浸泡腐蚀后的EDS[图5(b)]结果显示Al、Cu、Mg元素均匀分布,经长时间浸泡后未见有大的腐蚀斑点形成。这主要由于激光焊接后焊接区域组织较细小,成分较均匀,且在焊接过程中添加Al-Si焊丝,Si元素的添加也会造成Cu元素的分散,使高价金属Cu的富集现象消失,因而腐蚀过程中不易形成原电池,呈均匀腐蚀状态。

### 3.4 电化学腐蚀研究

为了进一步研究2198铝锂合金添加ER4047Al-Si焊丝激光焊接接头在3.5% NaCl溶液中的腐蚀行为,图6为电化学腐蚀测量结果。其中图6(a)为母材和焊缝在3.5% NaCl溶液中的开路电位,结果发现母材的开路电位位于-0.68~-0.66 V参比SCE,焊缝的开路电位位于-0.63~-0.61 V参比SCE,这说明在3.5% NaCl溶液中,焊缝金属的电极电位略高于母材金属的电极电位,焊缝的耐蚀性能要略好于母材,这与浸泡实验结果相吻合。

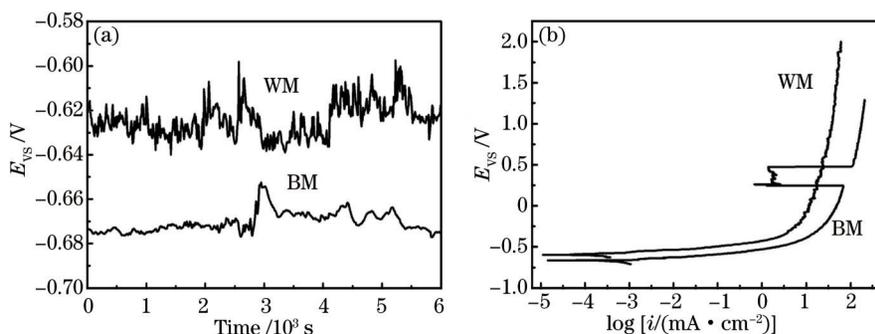


图6 母材和焊缝在3.5% NaCl溶液中电化学腐蚀结果。(a) 开路电位; (b) 阳极极化曲线

Fig.6 Electrochemical corrosion results of base metal and weld in 3.5% NaCl solution. (a) Open circuit potentials; (b) anode polarization curves

图6(b)为母材和焊缝在3.5% NaCl溶液中的阳极极化曲线(APC)。从图可知,焊缝的腐蚀电位略高于母材,与开路电位的测量结果一致,这是由焊缝显微组织比母材的细小均匀所致。母材的腐蚀电流密度高于焊缝腐蚀电流密度,由于母材中富含Cu的T1相和 $\theta'$ 相不均匀分布,这些粗大的组织在侵略性的 $Cl^-$ 作用下,极易跟周围的铝基体形成原电池,导致周围低电位的铝基底发生溶解,造成铝基体腐蚀,引起腐蚀速度加快。值得注意的是,母材阳极极化曲线经过多次测试均会发现,当电位增加到约0.25 V时,腐蚀速率突然降低,然后随着电位的增加,腐蚀速率又突然增大,这可能是蚀点表面短暂地形成了保护性的钝化膜,这层膜具有较好的耐腐蚀性能,从而阻碍 $Cl^-$ 穿透,但是膜本身的稳定性较差,随着电压的增加又被 $Cl^-$ 穿透,导致腐蚀速率迅速增大。

图7(a)为母材和焊缝在3.5% NaCl溶液中的电化学交流阻抗谱(EIS),图7(b)和图7(c)为交流阻抗等效电路(奈奎斯特图)。EIS可以动态反应合金表面的电化学腐蚀过程,EIS测量时,腐蚀仍在进行,实验测得的阻抗响应呈半圆是由腐蚀反应中电荷传递电阻 $R_t$ 以及电极-溶液的双电层引起的,表明电荷传递控制腐蚀反应的进行<sup>[25]</sup>。从图中可以看出焊缝存在低频容抗弧和低频容抗弧,母材则存在高频容抗弧和低频电感弧。这说明在腐蚀过程中,焊缝EIS由低频容抗到高频容抗组成,电荷传递电阻 $R_t$ 逐渐增大,极化电阻 $R_p$ 增大。 $R_p$ 的增大与焊缝表面腐蚀产物膜的沉积有关,这种腐蚀膜对内部的焊缝金属起到保护作用,导致腐蚀电流减小,焊缝表面腐蚀反应越来越不易进行。而母材在反应初期高频容抗弧半径较大,则极化电阻 $R_p$ 较大,因而反应不易进行,随着腐蚀时间加长,出现低频感抗效应,这与溶液中 $Cl^-$ 吸附有关<sup>[26]</sup>。 $Cl^-$ 具有强氧化性,大量吸附在母材基体,增大母材点蚀的可能性,电感效应导致母材极化电阻减小,腐蚀电流波动增大,腐蚀速率逐渐增加,这与母材的点蚀有很大关系。根据母材和焊缝各自的等效电路图7(b)和(c),测量得它们的极化电阻分别为 $254 \Omega \cdot cm^{-2}$ 和 $414 \Omega \cdot cm^{-2}$ ,表明焊缝区极化电阻较大,腐蚀反应不容易发生,而母材的极化电阻较小,相对焊缝腐蚀容易发生,张青来等<sup>[27]</sup>对Mg合金在NaCl水溶液中电化学腐蚀的研究表明,材料本身阻抗值越大,腐蚀电流越小,腐蚀越不易进行,这与本实验极化曲线实验分析结果是一致的。

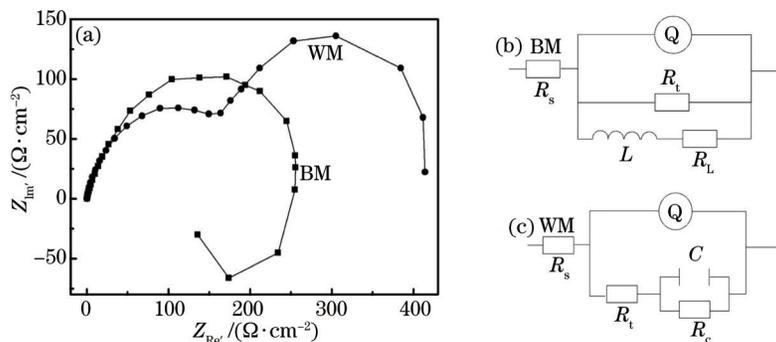


图7 (a) 母材和焊缝交流阻抗谱; (b) 母材等效电路; (c) 焊缝等效电路

Fig.7 (a) Electrochemical impedance spectroscopy of BM and WM; (b) equivalent circuit of BM; (c) equivalent circuit of weld

## 4 结 论

对2198铝锂合金激光焊接填充ER4047Al-Si合金焊丝焊接接头表面的腐蚀行为进行了研究。结论如下:

1) 母材组织较粗大,沿轧制方向呈拉长的粗大状;热影响区极窄,沿熔合线靠近焊缝一侧有一宽度约10~15 mm的细晶区;细晶区向焊缝内部延伸呈柱状晶组织,生长方向垂直于熔合线,焊缝中心晶粒细小,呈等轴细晶状,平均尺寸约10 μm。

2) 母材区域随机分布着尺寸在几百纳米左右的颗粒状和针状的T1相,焊缝区域析出相的形式更多样,尺寸更细小,主要有δ'、θ'、Al<sub>6</sub>CuLi<sub>3</sub>、Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe<sub>7</sub>金属间化合物。

3) 在3.5% NaCl溶液中腐蚀后,母材由于富铜的析出相与周围铝基体形成原电池,易形成点蚀,蚀点深、面积大;热影响区和焊缝由于组织细小,成分较均匀,在腐蚀液中以均匀腐蚀为主,蚀点浅、腐蚀斑点面积小,靠近熔合线处的极窄的细晶区是接头长期腐蚀最容易断裂的薄弱区域。此外,焊缝的开路电位、自腐蚀电位和阻抗值均高于母材,腐蚀电流密度则小于母材。

## 参 考 文 献

- 1 R K Gupta, N Nayan, G Nagasireesha, *et al.*. Development and characterization of Al - Li alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 420(1-2): 228-234.
- 2 K H Rendings. Aluminium structures used in aerospace-status and prospects[C]. Materials Science Forum, 1997, 242: 11-24.
- 3 Zuo Tiechuan. Laser materials processing of high strength aluminium alloys[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002, 1-4: 87-89.
- 左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002, 1-4: 87-89.
- 4 M S Han, S J LEE, J C PARK, *et al.*. Optimum condition by mechanical characteristic evaluation in friction stir welding for 5083-O Al alloy[J]. Transactions of Nonferrous Met Soc China, 2009, 19(10): s17-s22.
- 5 P Cavaliere, M Cabibbo F Panella, A Squillace. 2198 Al-Li plates joined by friction stir welding: mechanical and microstructural behavior [J]. Materials & Design, 2009, 30(9): 3622-3631.
- 6 A Balbo, A Frignani, V Grassi, *et al.*. Corrosion inhibition by anionic surfactants of AA2198 Li-containing aluminium alloy in chloride solutions[J]. Corrosion Science, 2013, 73(13): 80-88.
- 7 M Guerin, E Andrieu, G Odemer, *et al.*. Effect of varying conditions of exposure to an aggressive medium on the corrosion behavior of the 2050 Al-Cu-Li alloy[J]. Corrosion Science, 2014, 85(1): 455-470.
- 8 A Deschamps, F Livet, Y Brechet. Influence of predeformation on ageing in an Al-Zn-Mg alloy-I: microstructure evolution and mechanical properties[J]. Acta Materialia, 1998, 47(1): 281-292.
- 9 O Hatamleh, P M Singh, H Garmestani. Corrosion susceptibility of peened friction stir welded 7075 aluminum alloy joints[J]. Corrosion Science, 2009, 51(1): 135-143.
- 10 R Karunanithi, S Bera, K S Ghosh. Electrochemical behaviour of TiO<sub>2</sub> reinforced Al 7075 composite[J]. Materials Science and Engineering B, 2014, 190: 133-143.
- 11 J Kang, R D Fu, G H Luan, *et al.*. In-situ investigation on the pitting corrosion behavior of friction stir welded joint of AA2024-T3 aluminium alloy[J]. Corrosion Science, 2010, 52(2): 620-626.

- 12 M Schema, T Schmidta, J Gerwana, *et al.*. CeO<sub>2</sub>-filled sol-gel coatings for corrosion protection of AA2024-T3 aluminium alloy[J]. Corrosion Science, 2009, 51(10): 2304-2315.
- 13 Wei Xiuyu, Tan Chengyu, Zheng Ziqiao, *et al.*. Influence of aging on corrosion behavior of 2195 Al-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(7): 1195-1200.  
魏修宇, 谭澄宇, 郑子樵, 等. 时效对2195铝锂合金腐蚀行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(7): 1195-1200.
- 14 J F Li, Z Zhang, Y L Cheng, *et al.*. Electrochemical features of the corrosion of an aluminum-lithium alloy in 3.0% NaCl solution[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(7): 760-764.
- 15 Lin Kaili, Yang Wuxiong, Lü Junxia, *et al.*. Laser beam welding study of 2198-T851 aluminum-lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103007.  
林凯莉, 杨武雄, 吕俊霞, 等. 2198-T851铝锂合金激光焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103007.
- 16 An Na, Zhang Xinyi, Wang Qiming, *et al.*. Fible laser welding of 2060 aluminum-lithium alloy with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003009.  
安 娜, 张心怡, 王启明, 等. 2060铝锂合金光纤激光填丝焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003009.
- 17 Zhang Fan, Li Fang, Hua Xueming, *et al.*. Research of effects with Al-Si coating on distribution and performance of tailored laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0503005.  
张 帆, 李 芳, 华学明, 等. Al-Si镀层在激光拼焊板焊缝中分布及性能影响研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503005.
- 18 Y Ma, X Zhou, G E Thompson, *et al.*. Distribution of intermetallics in an AA 2099-T8 aluminium alloy extrusion[J]. Mater Chem & Phys, 2011, 126(1-2): 46-53.
- 19 H G Li, J Ling, Y W Xu, *et al.*. Effect of aging treatment on precipitation behavior and mechanical properties of a novel aluminum - lithium alloy[J]. Acta Metall Sin(Engl Lett), 2015, 28(6): 671-677.
- 20 A Balbo, A Frignani, Grassi V, *et al.*. Corrosion inhibition by anionic surfactants of AA2198 Li-containing aluminium alloy in chloride solutions[J]. Corrosion Science, 2013, 73(13): 80-88.
- 21 V Guillaumin, G Mankowski. Localized corrosion of 2024 T351 aluminium alloy in chloride media[J]. Corrosion Science, 1999, 41(98): 421-438.
- 22 J I Barraza-Fierro, M A Espinosa-Medina, M Hernandez, *et al.*. Effect of Li and Cu addition on corrosion of Fe-40 at.%Al intermetallics in molten LiCl-KCl eutectic salt[J]. Corrosion Science, 2012, 59(3): 119-126.
- 23 J F Li, Z Q Zheng, N Jiang, *et al.*. Localized corrosion mechanism of 2xxx-series Al alloy containing S(Al<sub>2</sub>CuMg) and θ' (Al<sub>2</sub>Cu) precipitates in 4.0% NaCl solution at pH 6.1[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 91(2-3): 325-329.
- 24 Li Jinfng, Zheng Ziqiao, Li Shichen, *et al.*. Study on intergranular corrosion and exfoliation corrosion behaviors of 2195 Al<sub>2</sub>Li alloy[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2004, 22(5): 640-643.  
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.
- 25 G W Watler. Review of impedance plot methods used for corrosion perform and analysis of painted metal[J]. Corrosion Science, 2009, 26(9): 681-703.
- 26 A Conde, J D Damborenea. Evaluation of exfoliation susceptibility by means of the electrochemical impedance spectroscopy[J]. Corrosion Science, 2000, 42(8): 1363-1377.
- 27 Zhang Qinglai, Qian Yang, An Zhibin, *et al.*. Study on electrochemical corrosion of magnesium alloys by laser shock processing in NaCl solution[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903002.  
张青来, 钱 阳, 安志斌, 等. 基于激光冲击的镁合金在NaCl溶液中电化学腐蚀的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903002.

栏目编辑: 宋梅梅