

真空钎焊对 3003 铝合金焊缝组织及腐蚀的影响

申园园^{1,2}, 陈朝轶^{1,2}, 李军旗^{1,2}, 兰苑培^{1,2}, 杨帆^{1,2}

(1. 贵州大学 材料与冶金学院, 贵阳 550025;

2. 贵州省冶金工程与过程节能重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: **目的** 研究钎焊温度与保温时间对 3003 铝合金焊缝组织及腐蚀行为的影响, 通过模型预测 3003 铝合金焊缝的腐蚀寿命。**方法** 在模拟海洋大气环境下, 采用盐雾腐蚀的方法, 结合 SEM 和 EDS 观察焊缝微观形貌和元素分布情况, 根据腐蚀质量损失和最大腐蚀深度分析焊缝的抗腐蚀性能, 建立腐蚀动力学模型, 参照户外暴露腐蚀数据计算得出腐蚀当量系数, 预测腐蚀寿命。**结果** 真空度 3×10^{-3} Pa 时, 随钎焊温度升高和保温时间延长, 焊缝区域 Si 的偏析减少, 焊缝的抗腐蚀性能增强。在钎焊温度 610℃ 保温 75 min, 焊缝组织最均匀, 以 Al、Si 元素为主, 含有少量的 Mn 和 Mg, 合金相主要为 Al-Mn、 Mg_2Si 和 Al_3Mg_2 。腐蚀质量损失和腐蚀深度动力学方程分别为 $y_1 = 0.0642t^{0.897}$ 和 $y_2 = 0.03t^{1.63}$, 以 LY12 铝合金在海南琼海户外暴露腐蚀 10 年的数据为参照, 得出焊缝腐蚀当量系数 $k = 13.39$, 大气腐蚀 10 年的当量腐蚀深度为 87.9 μm 。**结论** 焊缝区域 Si 的偏析对腐蚀性能产生重要影响。较佳钎焊工艺为: 真空度 3×10^{-3} Pa, 钎焊温度 610℃, 保温时间 75 min。此时, 大气腐蚀 10 年后的当量腐蚀深度占焊缝厚度 100 μm 的 87.9%, 能够满足 10 年腐蚀寿命的要求。继续升高钎焊温度和延长保温时间, 基体与焊缝界面发生熔蚀现象, 抗腐蚀性能减弱。

关键词: 3003 铝合金; 真空钎焊; 盐雾腐蚀; 腐蚀动力学; 腐蚀寿命

中图分类号: TG454; TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0149-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.020

Effects of Vacuum Brazing on Microstructure and Corrosion of 3003 Aluminum Alloy Welding Seam

SHEN Yuan-yuan^{1,2}, CHEN Chao-yi^{1,2}, LI Jun-qi^{1,2}, LAN Yuan-pei^{1,2}, YANG Fan^{1,2}

(1. College of Material and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Metallurgical Engineering and Energy Saving Process of Key Laboratory in Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

ABSTRACT: The paper aims to study influences of brazing temperature and heat preservation time on the weld microstructure and corrosion behavior of 3003 aluminum alloy, and predict weld corrosion life of 3003 aluminum alloy through model. In the simulated marine atmosphere, salt spray corrosion method was used to observe micro-morphology and element distribution of weld seam in combination with SEM and EDS. According to the corrosion weight loss and maximum pitting depth, the corrosion resistance of weld was analyzed. A corrosion dynamic model was established. The micro-morphology and element distribution of weld seam was calculated in reference of outdoor exposure corrosion data to predict the corrosion life. The results

收稿日期: 2018-05-26; 修订日期: 2018-08-05

Received: 2018-05-26; **Revised:** 2018-08-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51574095, 51664005, 517741022, 51474079); 黔教合 KY 字 (2015) 334 号; 黔科合人才团队 (2015) 4005 号; 黔教合平台人才 (2016) 5626 号

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51574095, 51664005, 517741022, 51474079); Education Department of Guizhou KY word (2015) 334; The Cooperation Talent Group of Guizhou Department (2015) 4005; The Cooperation Talent Group of Guizhou Department (2016) 5626

作者简介: 申园园 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电化学腐蚀。

Biography: SHEN Yuan-yuan (1991—), Male, Master, Research focus: electrochemical corrosion.

通讯作者: 陈朝轶 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事金属材料及电化学腐蚀研究工作。

Corresponding author: CHEN Chao-yi (1977—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: metal materials and electrochemical corrosion.

showed that when the vacuum degree was 3×10^{-3} Pa, with the increase of brazing temperature and prolonging of holding time, the segregation of Si in weld zone was reduced, and the corrosion resistance of the weld was enhanced. When the brazing temperature was kept at 610°C for 75 min, the weld microstructure was the most uniform, mainly composed of Al and Si element, and contained a small amount Mn and Mg element. And the weld also contained Al-Mn, Mg_2Si and Al_3Mg_2 alloy phases. The dynamic equations of the corrosion weight loss and the maximum pitting depth of the weld were $y_1=0.0642t^{0.897}$ and $y_2=0.03t^{1.63}$, respectively. Compared with the corrosion kinetics equation of LY12 aluminum alloy in Qionghai for exposure of 10 years, the corrosion equivalent coefficient was 13.39. The maximum corrosion equivalent depth was $87.9\text{ }\mu\text{m}$ in Qionghai for exposure of 10 years. The Si segregation in weld zone has important influences on the corrosion performance. The best brazing condition is that the brazing temperature is 610°C , and the holding time is 75 min. At this time, the corrosion equivalent depth of weld accounts for 87.9 percent of weld thickness $100\text{ }\mu\text{m}$ after 100 years of atmospheric corrosion, which could meet the requirement of 10 years of corrosion life. When brazing temperature is increased and holding time is prolonged, corrosion occurs to the interface between the substrate and weld, and the corrosion resistance is weakened.

KEY WORDS: 3003 aluminum alloy; vacuum brazing; salt spray corrosion; corrosion kinetics; corrosion life

3003 铝合金具有耐蚀性能好、比强度高、焊接性能优良等特征, 广泛应用于风电系统散热器^[1-2]。风电系统常位于海边, 空气中的海盐粒子会对散热器产生严重的腐蚀。学者对海洋大气环境中铝合金的腐蚀行为做了大量研究, 认为 Cl⁻会促使铝合金自腐蚀电位负移, 加速铝合金的腐蚀速率^[3-8]。风电系统散热器成形与加工需要经过真空钎焊过程, 真空钎焊对焊缝组织性能会产生明显的影响^[9-11], 钎焊会使焊缝组织更容易发生点蚀和晶间腐蚀, 抗腐蚀性能降低^[12-14]。大多数文献主要研究了铝合金搅拌摩擦焊焊缝的腐蚀行为, 而对真空钎焊焊缝的腐蚀行为研究较少。为研究 3003 铝合金散热器在海洋大气环境中的使用寿命, 笔者课题组前期研究了 3003 铝合金在模拟海洋大气环境中的抗腐蚀寿命, 满足用户 10 年以上使用

寿命的要求^[15]。基于风电系统散热器多采用真空钎焊加工成形, 且 3003 铝合金真空钎焊焊缝的腐蚀寿命更能代表散热器的使用寿命, 文中研究真空钎焊条件对焊缝组织及腐蚀行为的影响, 对比琼海地区 LY12 铝合金户外暴露腐蚀结果, 预测 3003 铝制散热器的腐蚀寿命。

1 实验

1.1 实验材料

翅片式散热器装机结构与散热器截面如图 1 所示, 翅片为 3003 铝合金 (固相线温度是 643°C), 钎料为 4004 铝合金 (液相线温度是 591°C), 元素含量见表 1。

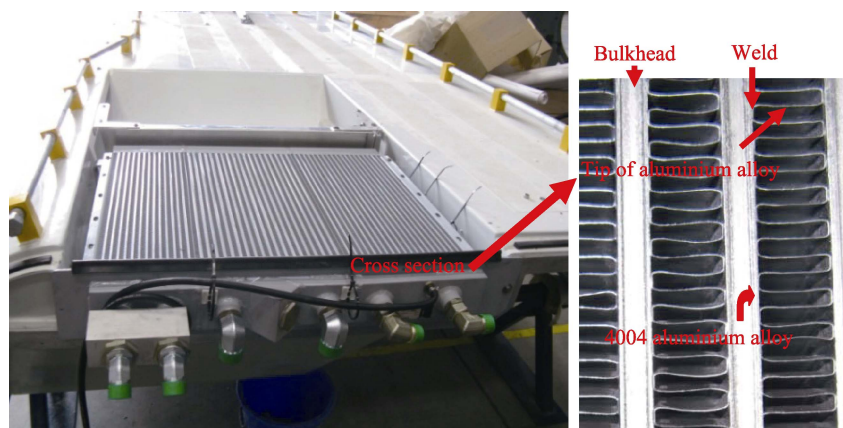


图 1 翅片式散热器装机结构与截面

Fig.1 Installation structure and sectional view of sectional radiator

表 1 3003 铝合金和 4004 铝合金的元素含量

Tab.1 Element content of 3003 and 4004 aluminum alloy

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
3003	0.6	0.7	0.05~0.2	1.0~1.5	—	—	Bal.
4004	9.0~10.5	0.8	0.25	0.1	1.0~2.0	0.2	Bal.

wt%

1.2 实验方法

取 30 mm×20 mm×0.25 mm 的 3003 铝合金试样，除去表面油污和氧化膜，以 4004 铝合金为钎料。钎焊接头间隙为 0.05~0.07 mm，在真空度为 3×10^{-3} Pa 的条件下，利用 VOG-223 型真空炉进行钎焊。钎焊制度：10 °C/s 升温至 540 °C，保温 30 min，然后以 2 °C/s 升温至钎焊温度后保温（此过程去除了焊缝的残余应力）。钎焊后对焊缝进行抛光、清洗，干燥后称量 m_1 （精确到 0.1 mg）。利用 YWX/Q-150(B) 型腐蚀箱，采用挂件、连续喷雾方式进行盐雾实验，温度为 50 °C，腐蚀液为 5%NaCl+0.26 g/L $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的混合溶液，用冰乙酸和 NaOH 调节溶液 pH=3.0。盐雾腐蚀后，根据 GB/T16545—1996《金属和合金的腐蚀腐蚀试样上腐蚀产物的清除》，用 50 mL H_3PO_4 +20 g CrO_3 +1 L H_2O 混合溶液去除腐蚀产物，浓 HNO_3 浸洗 5 min，蒸馏水清洗，干燥后称量 m_2 。腐蚀质量损失计算公式为：

$$\delta = \frac{m_1 - m_2}{A} \quad (1)$$

式中： δ 为腐蚀质量损失，g/m²；A 为试样表面积，m²。

利用日本电子 JSM-6700F 型扫描电镜对焊缝进行 SEM 和 EDS 分析，采用 OLYMPUSBX41M 型光学显微镜对焊缝截面腐蚀坑深度进行测试。

2 结果与讨论

2.1 保温时间的影响

真空度为 3×10^{-3} Pa、610 °C 钎焊保温不同时间后焊缝的 SEM 形貌如图 2 所示。可以看出，随保温时间的延长，钎焊区偏聚组织逐渐减少。当保温 75 min 时，钎焊区域均匀，条状偏聚组织消失；当保温 90 min 时，焊缝边缘出现少量球状偏聚组织，基体发生了熔蚀缺陷。分析认为，钎料中 Si 的质量分数为 9.0%~10.5%，钎焊保温时间较短，钎料中的 Si 向钎料/基体铝合金结合处扩散量较少。焊缝凝固时，钎料中的 Al 优先依附于两侧基体铝合金析出，导致焊缝中间 Si 的浓度超过 Al-12.6%Si 共晶溶度，Si 在 Al/Si 共晶的晶界析出，形成 Si 偏聚组织。随钎焊保温时间的延长，钎料中的 Si 向钎料/基体结合处的扩散量增多，由 Al-Si 二元相图可知，Si 浓度增加，铝合金液相线温度降低。当钎料/基体结合处的 Si 浓度达到 610 °C 时的极限固溶浓度后，基体与钎料开始熔合形成熔合区。继续延长保温时间，Si 浓度进一步增加，使焊缝熔合区 Si 的浓度超出 Al-12.6%Si 共晶溶度，凝固时熔合区形成 Si 偏聚。刘灿威等^[16]认为上述现象是由于钎料对基体的溶解机制导致基体产生熔蚀。

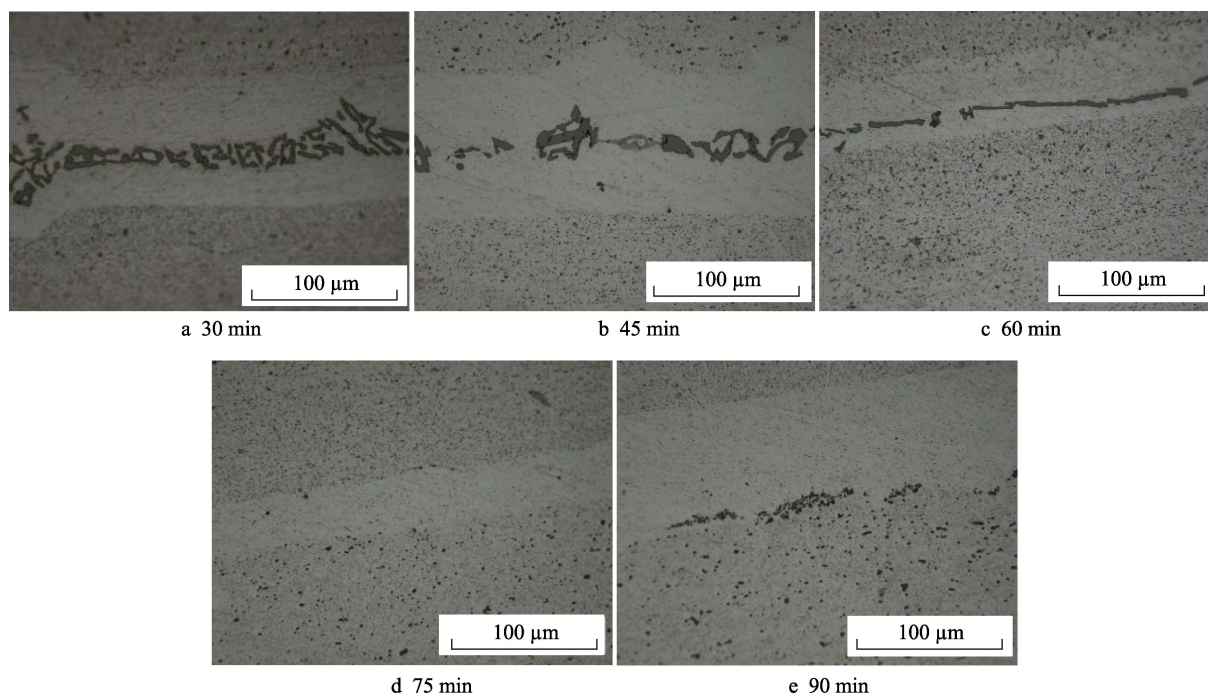


图 2 钎焊温度 610 °C 保温不同时间后焊缝的 SEM 形貌

Fig.2 SEM micrograph of brazing seam at 610 °C with different heat preservation time

真空度为 3×10^{-3} Pa、610 °C 钎焊保温不同时间后，焊缝腐蚀 48 h，腐蚀质量损失-保温时间变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知，随保温时间的延长，钎

焊试样的腐蚀质量损失逐渐减小。当保温 75 min 时，腐蚀质量损失出现明显的拐点，达到最小值；延长保温时间至 90 min，腐蚀质量损失增加。对比图 2 可知，

随 Si 偏聚组织的减少, 腐蚀质量损失降低。Al³⁺/Al 的标准电极电位为-1.662 V, Si⁴⁺/Si 的标准电极电位为-0.843 V, 如式(2)和(3)所示。发生 Si 偏聚时, Si 首先析出于晶界处, Si 偏聚量越大, 晶界处析出 Si 的量越多。在电解质中, Al 相和 Si 相形成微电池,

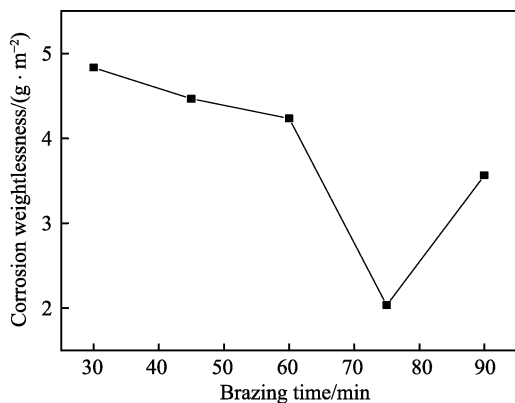
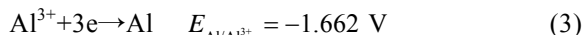
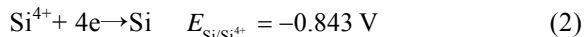


图3 610 °C 钎焊保温不同时间的钎焊试样腐蚀 48 h 的质量损失曲线

Fig.3 Weight loss curve of brazing sample at corrosion of 48 h at 610 °C with different heat preservation time

Al 发生阳极溶解。董鹏等^[17]认为 Si 首先在晶界处析出, 晶界析出相 Si 与 Al 间的电化学腐蚀主要沿 Si/Al 晶界展开。因此, Si 偏聚越多, 晶界处析出 Si 越多, 且第二相 Si 颗粒越大, Si/Al 两相间电化学腐蚀和 Si/Al 晶界间电化学腐蚀速率越快, 钎焊试样的腐蚀失重越大。



真空度为 3×10^{-3} Pa、610 °C 钎焊保温不同时间后, 焊缝腐蚀 48 h, 钎焊区最大腐蚀坑截面如图 4 所示。由图 4 可知, 随保温时间的延长, 截面最大腐蚀深度减小。保温时间由 30 min 延长至 75 min, 焊缝腐蚀深度由 26.99 μm 降至 14.96 μm; 继续延长保温时间至 90 min, 腐蚀深度增至 18.22 μm。李艳霞等^[18]研究发现, 随保温时间的延长, 半固态重熔组织中初生硅晶粒直径先降低后增大。分析认为, Si 的偏聚量越大, 晶界处析出 Si 越多, Si 晶粒尺寸越大, 嵌入基体深度越大, Si/Al 相界面电化学腐蚀速率和 Si/Al 晶界电化学腐蚀速率越快, 钎焊区腐蚀坑的深度越深。

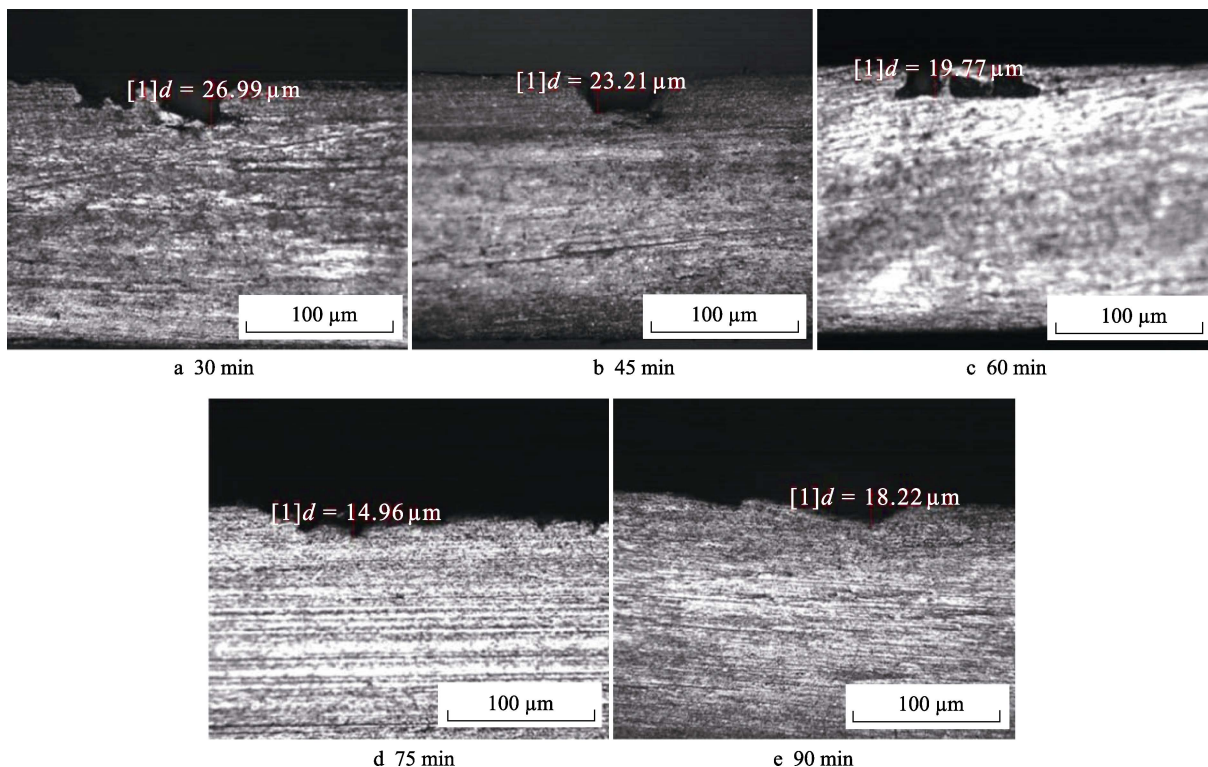


图4 610 °C 钎焊保温不同时间的钎焊试样腐蚀 48 h 的钎焊区截面最大点蚀深度

Fig.4 Maximum corrosion depth of brazing zone at corrosion of 48 h at 610 °C with different heat preservation time

2.2 钎焊温度的影响

真空度为 3×10^{-3} Pa、不同钎焊温度保温 75 min 后, 焊缝的 SEM 形貌如图 5 所示。由图 5 可知, 随钎焊温度的升高, 偏聚组织逐渐减少。610 °C 钎焊时, 钎焊区无明显 Si 偏聚; 钎焊温度增至 615 °C, 基体

产生熔蚀。分析认为, 随钎焊温度的升高, 钎料中的 Si 扩散速率增加。保温时间相同, 钎焊温度越高, Si 扩散至钎料/基体结合处的量越多, 焊缝中间区域 Si 含量越低。610 °C 时, 焊缝中间区域和钎料/基体结合处的 Si 的含量处于较佳浓度, 凝固时未有明显 Si

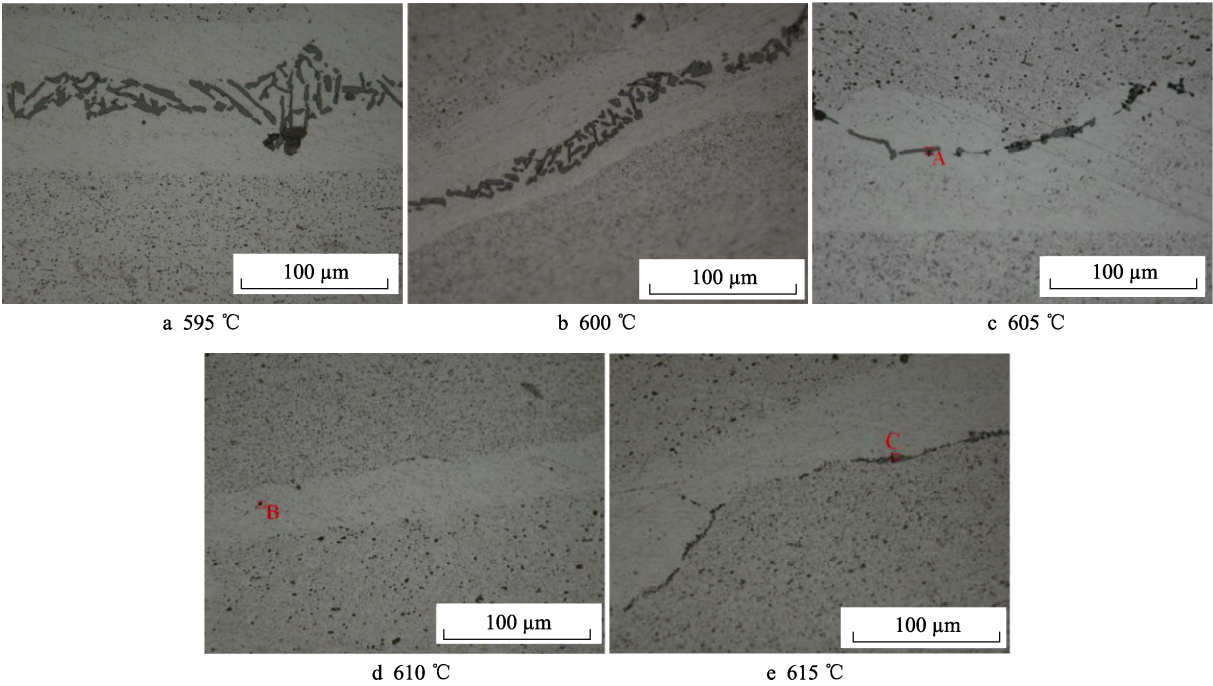


图 5 不同钎焊温度保温 75 min 的钎焊试样焊缝的 SEM 形貌
Fig.5 SEM micrograph of brazing seam at different brazing temperature with heat preservation of 75 min

偏聚；钎焊温度升至 615 °C，钎料/基体结合处 Si 的浓度超出 Al-12.6%Si 共晶溶度，凝固时形成 Si 偏聚，且基体产生熔蚀。对比图 2 和图 5 可知，钎焊温度和保温时间对钎焊区组织中 Si 偏聚的影响规律相似。

图 5 中 A、B 和 C 点对应的 EDS 元素含量见表 2，Mg-Si、Al-Mn 和 Al-Mg 二元相图如图 6 所示。由表 2 可知，随偏聚组织的减少，Si 元素含量降低，Al、Mn 和 Mg 元素含量增加。钎焊温度为 610 °C 时，钎焊区组织最均匀，Si 含量最低，此时 Mn 和 Mg 含量较高。分析认为，Al 和 Si 在 Al-12.6%Si 时凝固存在共晶。610 °C 钎焊 75 min 时，Si 的质量分数大于 12.6%，Si 处于过饱和状态，因此，钎焊区存在 Al-Si 存在共晶，且 Si 在晶界处析出形成 Si 偏聚。因 Si 过饱和，钎焊区会存在 Mg_2Si 合金相（图 6a），钎焊区 Al 和 Mn 的摩尔比为 13.52 : 1，因此钎焊区一

定存在 Al-Mn 合金相（图 6b）。Al 和 Mg 摩尔比为 13.38:1，Mg 浓度较低时，钎焊区会存在 Al_3Mg_2 合金相（图 6c）。马涛等^[19]对 LT-3 铝合金（芯层为 3003 铝合金，皮层为 4004 铝合金）真空钎焊的焊缝组织进行了 XRD 分析，确定存在 $MnAl_6$ 和 Al_3Mg_2 金属间化合物。

表 2 偏聚组织的元素含量
Tab.2 Element content of partial poly group wt%

Temperature/°C	Chemical compositions			
	Al	Si	Mn	Mg
605	32.73	67.27	—	—
610	62.09	24.9	9.35	4.17
615	35.28	61.69	2.95	0.08

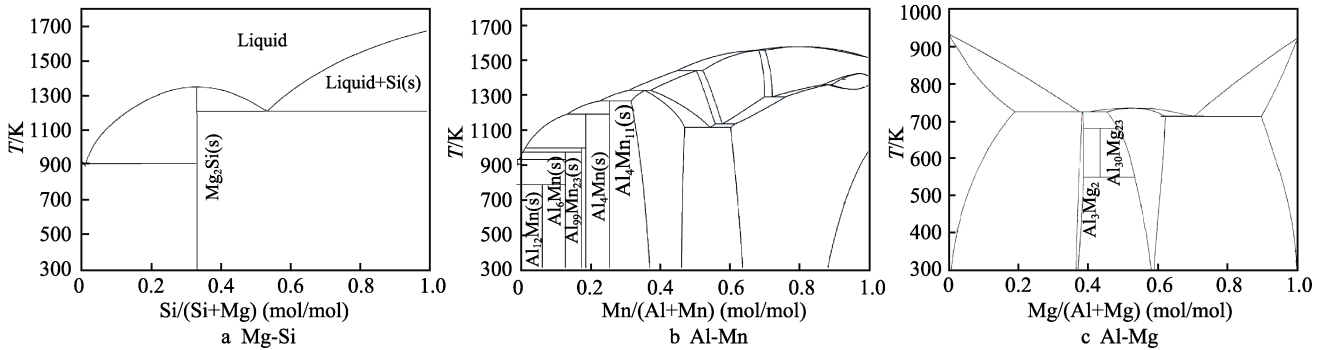


图 6 二元相图
Fig.6 Binary phase diagram

真空度为 3×10^{-3} Pa、不同钎焊温度保温 75 min 的试样腐蚀 48 h 后, 腐蚀质量损失-钎焊温度变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知, 随钎焊温度的升高, 钎焊试样的腐蚀质量损失逐渐减小。610 °C 钎焊时, 腐

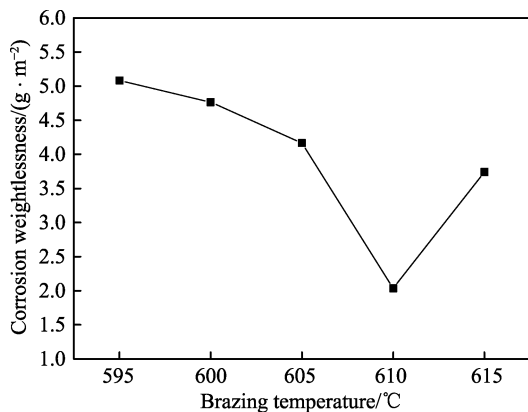


图 7 不同钎焊温度保温 75 min 的钎焊试样腐蚀 48 h 的腐蚀质量损失变化曲线

Fig.7 Corrosion weight loss curve of brazing sample at corrosion of 48 h at different brazing temperature with heat preservation of 75 min

蚀质量损失出现拐点, 达到最小值; 钎焊温度升至 615 °C 时, 腐蚀质量损失增加。分析认为, 610 °C 钎焊保温 75 min 时, 钎焊区无明显 Si 偏聚, 降低了 Al/Si 的两相间腐蚀和 Al/Si 晶界腐蚀, 且钎焊区存在的 Al-Mn、Mg₂Si 和 Al₃Mg₂ 合金相, 增加了焊缝的抗腐蚀性能。张吉阜等^[20]发现, Al-Mn 合金的阳极氧化膜绝缘性更强, 对基体有较好保护性。曾锋利等^[21]认为, Mg₂Si 合金的出现减缓了 Al/Si 的晶间腐蚀。王月等^[22]发现细小点状 β 相 (即 Mg-Al 合金相) 弥散的存在有助于提高铝合金的抗腐蚀性能。

真空度为 3×10^{-3} Pa、不同钎焊温度保温 75 min 的试样腐蚀 48 h 后, 钎焊区最大腐蚀坑截面如图 8 所示。由图 8 可知, 随钎焊温度的升高, 钎焊区截面最大腐蚀深度减小。钎焊温度由 595 °C 升至 610 °C, 焊缝腐蚀深度由 30.60 μm 降至 14.96 μm; 温度继续升至 615 °C, 腐蚀深度又增至 19.08 μm。钎焊保温 610 °C 时, 钎焊区最均匀, 且存在的 Al-Mn、Mg₂Si 和 Al₃Mg₂ 合金相, 减缓了 Si/Al 的晶界腐蚀和 Si/Al 的两相间腐蚀, 增强了钎焊区的抗腐蚀性能。因此, 610 °C 钎焊保温 75 min 时, 焊缝的抗腐蚀性能增强。

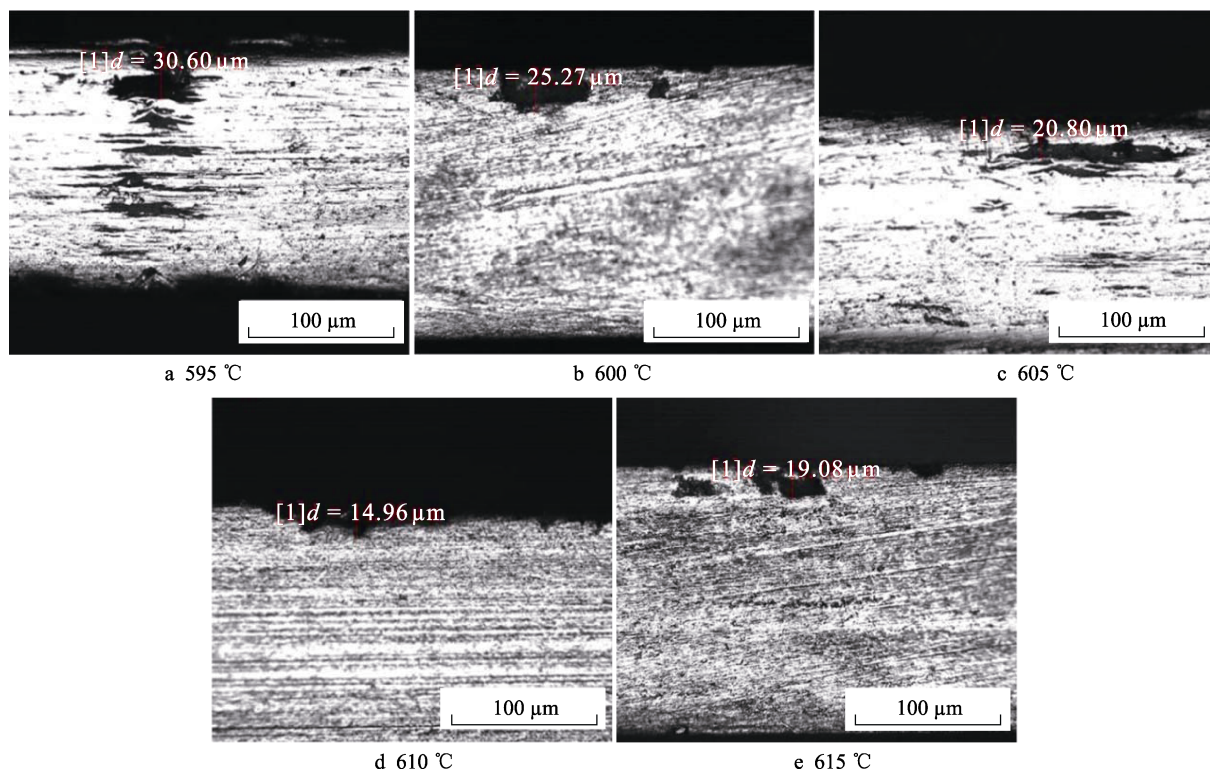


图 8 不同钎焊温度保温 75 min 的钎焊试样腐蚀 48 h 焊缝区截面最大点蚀深度

Fig.8 Maximum corrosion depth of brazing zone at corrosion of 48 h at different brazing temperature with preservation of 75 min

2.3 钎焊区截面最大点蚀深度动力学

腐蚀动力学常用幂函数 $y = a \cdot t^b$ 拟合^[11,23]。610 °C 钎焊保温 75 min 的试样腐蚀不同时间, 腐蚀质量损失-腐蚀时间和截面最大腐蚀深度-腐蚀时间的动力学

曲线如图 9 所示。由图 9 可知, 腐蚀质量损失和最大腐蚀深度动力学方程分别满足 $y_1 = 0.0642t^{0.897}$ 和 $y_2 = 0.03t^{1.63}$, 其中 $R_1^2 = 0.990$ 、 $R_2^2 = 0.985$, 腐蚀时间在 8~96 h 范围内, 拟合效果较好。

孙霜青等^[24]研究 LY12 铝合金琼海暴晒腐蚀, 得

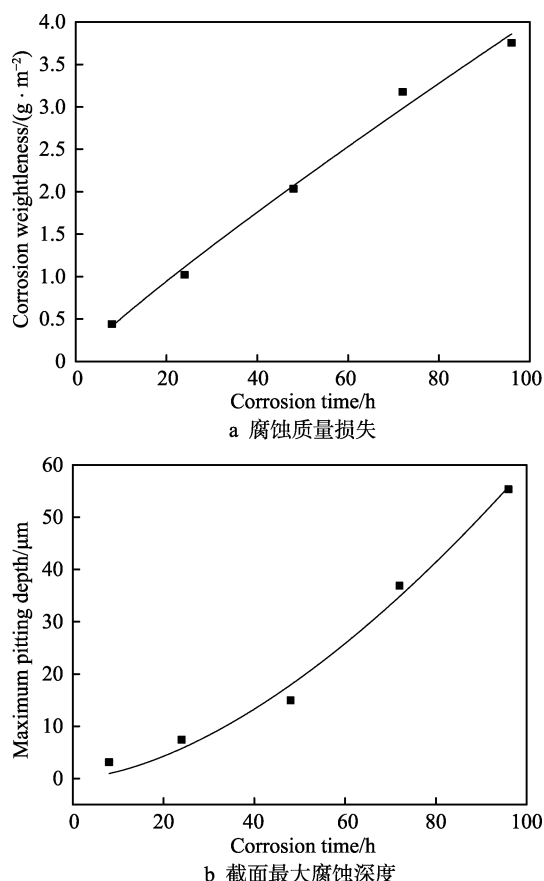


图 9 610 °C 钎焊保温 75 min 的钎焊试样腐蚀不同时间下的腐蚀质量损失和截面最大腐蚀深度拟合曲线

Fig.9 Corrosion weight loss and maximum corrosion depth fitting curve of brazing sample with different corrosion time at 610 °C of brazing heat preservation for 75 min: a) Corrosion weight loss; b) Maximum corrosion depth of cross section

出质量损失动力学方程为 $Y=1.06T^{0.69}$; 3003 铝合金的腐蚀质量损失动力学方程为 $y_1=0.0642t^{0.897}$, 相对于 LY12 铝合金琼海大气曝晒 10 年的腐蚀当量 $k=13.39$, 计算方程如式(4)所示。即 LY12 铝合金在琼海大气环境暴晒腐蚀 1 年, 需 3003 铝合金盐雾加速腐蚀 13.39 h。因此, LY12 铝合金琼海大气曝晒 10 年, 需 3003 铝合金加速腐蚀 133.9 h。此时, 3003 铝合金焊缝截面最大当量腐蚀深度为 87.9 μm, 占焊缝厚度的 87.9%, 焊缝未腐蚀穿透。

$$k = \frac{t}{T} = 13.39 \quad (4)$$

3 结论

1) 真空度为 3×10^{-3} Pa 时, 610 °C 钎焊保温 75 min 能获得均匀的焊缝组织, 未发现明显的 Si 偏聚。钎焊温度过低、保温时间较短, 钎焊区中间出现明显 Si 偏聚组织; 钎焊温度过高、保温时间过长, 基体发生熔蚀。

2) 随 Si 偏聚组织的增加, 腐蚀质量损失增加、腐蚀深度加深, 焊缝的抗腐蚀性降低。钎焊温度为

610 °C、保温 75 min 时, 钎焊区无明显 Si 偏聚, Al/Si 晶间腐蚀和 Al/Si 相界面电化学腐蚀减弱, 且钎焊区 Al-Mn、Mg₂Si 和 Al₃Mg₂ 合金相的存在, 也提高焊缝抗腐蚀性能。

3) 钎焊温度为 610 °C、保温 75 min 试样焊缝组织的腐蚀质量损失动力学方程为 $y_1=0.0642t^{0.897}$, 腐蚀深度动力学方程为 $y_2=0.03t^{1.63}$, 相对于 LY12 铝合金琼海大气暴晒腐蚀当量 $k=13.39$ 。3003 铝合金焊缝在琼海大气条件下腐蚀 10 年后, 焊缝截面最大当量腐蚀深度为 87.9 μm, 占焊缝厚度 100 μm 的 87.9%。

参考文献:

- [1] MARTINS J P, CARVALHO A L M, PADILHA A F. Microstructure and texture assessment of Al-Mn-Fe-Si (3003) aluminum alloy produced by continuous and semi continuous casting processes[J]. Journal of materials science, 2009, 44(2): 966-967.
- [2] 朱兆华. 铝锰系防锈铝合金的深化应用及其研究[J]. 矿冶工程, 2002, 22(3): 118-119.
ZHU Zhao-hua. The application research of Al-Mn alloy[J]. Metallurgical engineering, 2002, 22(3): 118-119.
- [3] 王彬彬, 王振尧, 曹公望, 等. 2024 铝合金在中国西部盐湖大气环境中的局部腐蚀行为[J]. 金属学报, 2014, 50(1): 49-56.
WANG Bin-bin, WANG Zhen-yao, CAO Gong-wang, et al. Local corrosion behavior of 2024 aluminum alloy in the atmospheric environment at saline lake in western China[J]. Acta metallurgica sinica, 2014, 50(1): 49-56.
- [4] 董超芳, 肖葵, 徐琳, 等. 含氯离子大气环境中 7A04 铝合金腐蚀及电化学行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 275-279.
DONG Chao-fang, XIAO Kui, XU Lin, et al. Corrosion and electrochemical behavior of 7A04 aluminum alloy in atmospheric environment containing chloride ion[J]. Rare metal materials and engineering, 2011, 40(S2): 275-279.
- [5] 刘艳洁, 王振尧, 柯伟. 2024-T3 铝合金在模拟海洋大气环境中的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1208-1216.
LIU Yan-jie, WANG Zhen-yao, KE wei. Corrosion behavior of 2024-T3 aluminum alloy in simulated marine atmospheric environment[J]. Chinese journal of nonferrous metals, 2013, 23(5): 1208-1216.
- [6] CUI Z, LI X, ZHANG H, et al. Atmospheric corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy in a tropical marine environment[J]. Advances in materials science & engineering, 2015, 19(4): 591-598.
- [7] CUI Z Y, LI X G, XIAO K, et al. Atmospheric corrosion behavior of pure Al 1060 in tropical marine environment[J]. Corrosion engineering science & technology, 2015, 50(6): 438-448.
- [8] 陈鑫, 田文明, 李松梅, 等. 氯离子和温度对铝合金在冷却液中腐蚀的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(10): 2243-2249.

- CHEN Xin, TIAN Wen-ming, LI Song-mei, et al. Chloride ions and temperature on influence of aluminum alloy corrosion in cooling fluid[J]. Journal of Beijing University of astronautics, 2016, 42(10): 2243-2249.
- [9] 张丽霞, 孟德强, 亓钧雷, 等. 5005 铝合金与 4J34 可伐合金的真空钎焊工艺[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1435-1440.
- ZHANG Li-xia, MENG De-qiang, QI Jun-lei, et al. The vacuum of brazing process of 5005 aluminum alloy and 4J34 aluminum alloy[J]. Journal of China nonferrous metals, 2015, 25(6): 1435-1440.
- [10] 梁宁, 沈以赴. 活性元素镁对铝合金真空钎焊接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(7): 61-64.
- LING Ning, SHEN Yi-fu. Effect of active element magnesium on the performance of aluminum alloy vacuum brazing head[J]. Journal of welding, 2007, 28(7): 61-64.
- [11] FENG Tao, WU Lu-hai, LOU Song-nian, et al. DSC analysis of LT-3 aluminum alloy vacuum brazing[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2005, 10(2): 182-185.
- [12] 李奇, 赵军军, 马琳, 等. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊缝的电化学局部腐蚀行为[J]. 中国表面工程, 2010, 23(5): 78-81.
- LI Qi, ZHAO Jun-jun, MA Lin, et al. The electrochemical local corrosion behavior of 7A52 aluminum alloy friction stir welding seam[J]. China surface engineering, 2010, 23(5): 78-81.
- [13] HAN B, CHEN Y, TAO W, et al. Microstructural evolution and interfacial crack corrosion behavior of double-sided laser beam welded 2060/2099 Al-Li alloys T-joints[J]. Materials & design, 2017, 135: 353-365.
- [14] MA S, ZHAO Y, ZOU J, et al. The effect of laser surface melting on microstructure and corrosion behavior of friction stir welded aluminum alloy 2219[J]. Optics & laser technology, 2017, 96: 299-306.
- [15] 陈朝轶, 李玲, 王家伟, 等. 3003 铝合金盐雾加速腐蚀行为[J]. 轻金属, 2014(2): 54-58.
- CHEN Chao-yi, LI Ling, WANG Jia-wei, et al. Salt spray accelerated corrosion behavior of 3003 aluminum alloy[J]. Light metals, 2014(2): 54-58.
- [16] 刘灿威, 李龙, 周德敬. 热交换器用铝合金在钎焊过程中的熔蚀现象[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(4): 47-55.
- LIU Can-wei, LI Long, ZHOU De-jing. The corrosion phenomenon of aluminum alloy used heat exchanger in brazing process[J]. Light alloy processing technology, 2017, 45(4): 47-55.
- [17] 董鹏, 孙大千, 李洪梅, 等. 6005A 铝合金搅拌摩擦焊接头的晶间腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 105-108.
- DONG Peng, SUN Da-qian, LI Hong-mei, et al. Intergranular corrosion behavior of 6005A aluminum alloy stirring friction welding head[J]. Journal of welding, 2014, 35(5): 105-108.
- [18] 李艳霞, 刘俊友, 张巨成, 等. 高硅含量过共晶铝硅合金半固态重熔组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(9): 2287-2294.
- LI Yan-xia, LIU Jun-you, ZHANG Ju-cheng, et al. The semi-solid remelting microstructure evolution of high silicon content hypereutectic Al-Si alloy[J]. Journal of China nonferrous metals, 2014, 24(9): 2287-2294.
- [19] 冯涛, 楼松年, 李亚江. LT-3 铝合金真空钎焊钎缝微观组织分析[J]. 机械工程材料, 2005, 29(6): 44-47.
- FENG Tao, LOU Song-nian, LI Ya-jiang. The microstructure analysis of LT-3 aluminum alloy weld in vacuum brazing process[J]. Mechanical engineering materials, 2005, 29(6): 44-47.
- [20] 张吉阜, 严川伟, 王福会, 等. 电镀 Al-Mn 合金及后续阳极氧化对镁合金防护性能的影响[J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 62-67.
- ZHANG Ji-fu, YAN Chuan-wei, WANG Fu-hui, et al. Effect of anodizing of Al-Mn alloy on protective properties of magnesium alloy[J]. China surface engineering, 2012, 25(4): 62-67.
- [21] 曾锋利, 卫中领, 李劲风, 等. Al-Mg-Si 合金中 Mg_2Si 和 Si 粒子在晶间腐蚀过程中的作用机理[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2011, 21(12): 2559-2567.
- ZENG Feng-li, WEI Zhong-ling, LI Jin-feng, et al. Corrosion mechanism associated with Mg_2Si and Si particles in Al-Mg-Si alloys[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2011, 21(12): 2559-2567.
- [22] 王月, 刘国元. 船用 5A01 铝合金厚板的耐腐蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(7): 525-527.
- WANG Yue, LIU Guo-yuan. Corrosion resistance of 5A01 aluminum alloy plate used in manufacturing ships[J]. Corrosion and protection, 2011, 32(7): 525-527.
- [23] NATESAN M, VENKATACHARI G, PALANISWAMY N. Kinetics of atmospheric corrosion of mild steel, zinc, galvanized iron and aluminum at 10 exposure stations in India[J]. Corrosion science, 2006, 48(11): 3584-3608.
- [24] 孙霜青, 郑弃非, 李德富, 等. LY12 铝合金的长期大气腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(6): 442-446.
- SUN Shuang-qing, ZHENG Qi-fei, LI De-fu, et al. Long-term atmospheric corrosion behavior of LY12 aluminum alloy[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2009, 29(6): 442-446.