

# Yb含量对 ZL101 合金微观组织及耐腐蚀性能的影响<sup>①</sup>

樊巧芳<sup>1</sup>, 林浩<sup>2</sup>

(1.江苏安全技术职业学院, 江苏 徐州 221011; 2.中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:** 在机械搅拌铸造工艺下加入质量分数 0~0.9% 的稀土 Yb 对 ZL101 合金进行变质处理, 研究 Yb 加入量对 ZL101 合金微观组织及耐腐蚀性能的影响。结果表明, Yb 质量分数 0.6% 时, ZL101 合金  $\alpha$ -Al 相由未变质处理的粗大树枝晶状结构转变成尺寸细小、形态规则的球状枝晶, 且合金共晶 Si 相由粗大的长条状和片状转变成颗粒状和短棒状。Yb 与 Al 基体反应生成  $Al_3Yb$  稀土相, 呈现长条状结构。添加 0.6% Yb 的 ZL101 合金腐蚀速率为  $13.25 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ , 比未添加 Yb 的合金腐蚀速率降低了 37.23%。观察腐蚀表面形貌可知, 随着 Yb 加入量增多, 合金腐蚀表面腐蚀产物及腐蚀凹坑数量逐渐减少。

**关键词:** 变质处理; 稀土; 镱(Yb); 掺杂; ZL101 合金; 微观组织; 腐蚀性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.027

文章编号: 0253-6099(2025)01-0143-05

## Effect of Yb Content on Microstructure and Corrosion Resistance of ZL101 Alloy

FAN Qiaofang<sup>1</sup>, LIN Hao<sup>2</sup>

(1. Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou 221011, Jiangsu, China; 2. Institute of Metals Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110000, Liaoning, China)

**Abstract:** ZL101 alloy was modified by using mechanical stir casting process with an addition of rare-earth Yb at the mass fraction of 0–0.9%, for investigating the effect of Yb content on the microstructure and corrosion resistance of ZL101 alloy. The results show that with the addition of rare-earth Yb at a mass fraction of 0.6%, ZL101 alloy has its  $\alpha$ -Al phase changed from coarse dendritic structure without modification to spheroidal dendrite with fine size, regular shape and regular arrangement, also the eutectic Si phase changed from the coarse long strip and needle sheet to the granular and short rod. It is shown that Yb reacts with Al substrate to form  $Al_3Yb$  rare-earth phase with long strip structure. With the addition of Yb at 0.6%, ZL101 alloy has its corrosion rate at  $13.25 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ , 37.23% lower than that before the addition of Yb. It can be seen from the corrosion surface observation that increasing Yb content leads to gradual decrease in the number of corrosion products and pits on the corrosion surface of the alloy.

**Key words:** modification; rare earth; Yb; addition; ZL101 alloy; microstructure; corrosion performance

铝合金具有比强度高、比刚度高、质量轻、易加工、可焊性好等优点, 在汽车零部件、航空航天、高铁动车等领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。ZL101 铝合金属于 Al-Si 系列铝合金, 该系列铝合金具有良好的铸造性能和较高的气密性<sup>[3]</sup>。但如果合金化学成分和铸造条件控制不当, 极易导致铸件表面耐腐蚀性能降低<sup>[4]</sup>。有科研人员通过添加稀土改善铝合金的微观结构, 并提高其耐腐蚀性能<sup>[5-8]</sup>。尽管国内外已有较多关于稀土变质改性处理铝合金的研究, 但有关稀土 Yb 改性处理 ZL101

合金提高其耐腐蚀性能的研究缺乏详尽报道。本文制备了不同稀土 Yb 含量的 ZL101 合金, 在 3.5% NaCl 溶液中进行浸泡腐蚀, 探究 Yb 含量对 ZL101 合金耐腐蚀性能的影响, 旨在扩大 Al-Si 合金在工业中的应用领域。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试样制备

将商用 ZL101 合金及 Al-10Yb 中间合金放入 180 °C 烘箱内去除表面水分; 启动熔炼炉升温至 780 °C, 将装

① 收稿日期: 2024-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(51975277); 江苏省高职院校工程技术研究开发中心(安全应急装备)(苏教科函[2023]11号)

作者简介: 樊巧芳(1981—), 女, 山西运城人, 硕士, 副教授, 研究方向为金属材料性能、表面改性及焊接技术应用。E-mail: stone-0230@163.com

有 ZL101 合金的坩埚放入熔炼炉保温 30 min 使合金充分熔化,再将 Al-10Yb 中间合金加入熔体中,以搅拌速率 200 r/min 搅拌 10 min,待 Al-10Yb 中间合金全部加完后,将熔体降温至 720 °C 并静置 10 min,立即浇铸至 180 °C 钢制模具内,制备得到 ZL101-xYb 铸态合金 ( $x=0,0.3\%,0.6\%$  和  $0.9\%$ ,质量分数)。

利用 Plasma 2000 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测试实验合金化学成分,结果如表 1 所示。由表 1 可知,实际测定成分与设计成分基本一致。

表 1 实验合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of tested alloys %

合金编号	Si	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	Yb	Al
1	7.2	0.31	0.2	0.25	0.70	0.26	0	余量
2	7.4	0.25	0.19	0.27	0.68	0.28	0.31	余量
3	7.5	0.30	0.2	0.30	0.67	0.31	0.58	余量
4	7.1	0.28	0.2	0.28	0.71	0.26	0.88	余量

## 1.2 试样腐蚀性能测试

采用线切割法从铸件上截取 15 mm×15 mm×2 mm 的长方体试样,将试样放入烧杯并加入质量分数 3.5% 的 NaCl 溶液,将烧杯置于 20 °C 恒温水浴锅内,浸泡测试 15 d。利用精度 0.1 mg 的分析天平称量浸泡测试前、后试样的质量,通过质量差值计算试样的腐蚀速率<sup>[9]</sup>:

$$V = \frac{m_1 - m_0}{St} \quad (1)$$

式中:  $V$  为试样腐蚀速率;  $m_1$ 、 $m_0$  分别为浸泡腐蚀前、后试样的质量,mg;  $S$  为试样与 3.5% NaCl 腐蚀溶液的接触面积,cm<sup>2</sup>;  $t$  为浸泡腐蚀时间,d。

利用 PARSTAT 4000 电化学工作站对试样进行电化学分析,介质为 3.5% NaCl 溶液,溶液温度 20 °C,扫描速率 0.5 mV/s,扫描范围 -0.25~0.25 V。

## 1.3 试样的组织及性能测试

对合金试样进行镶嵌、打磨和抛光,用 0.5% HF 刻蚀合金试样表面 8~10 s。采用 Nikon Eclipse MA200 型光学显微镜(OM)拍摄合金金相组织、FEI Quanta 200F 型扫描电子显微镜(SEM)及 JSM-6701F 型能谱分析仪(EDS)分析合金微观组织及腐蚀表面形貌。采用多功能 X 射线衍射仪(XRD)分析 ZL101 铝合金物相组成。通过 Image-Pro Plus 图像模拟软件定量分析试样金相组织中初生  $\alpha$ -Al 相二次枝晶臂间距、共晶 Si 相平均面积和长径比。

# 2 实验结果与分析

## 2.1 合金物相分析

图 1 为不同 Yb 加入量 ZL101 合金的 XRD 图谱。

由图 1 可知,ZL101 合金主要由  $\alpha$ -Al 基体及共晶 Si 相组成。添加 0.3% Yb 时,合金组织内仍然由  $\alpha$ -Al 基体及共晶 Si 相组成,未出现其他第二相组织的衍射峰;添加 0.6% Yb 及 0.9% Yb 后,ZL101 合金中除了  $\alpha$ -Al 基体及共晶 Si 相,还出现了 Al<sub>3</sub>Yb 第二相衍射峰,这应该是 Yb 与 Al 发生共晶反应,在合金组织内生成了富含 Yb 的稀土相。

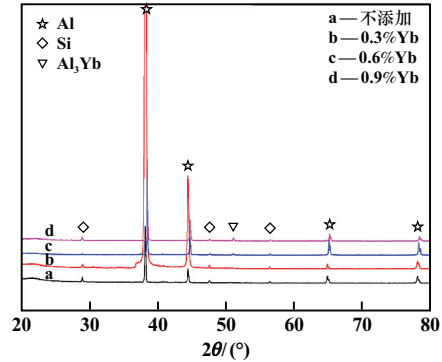
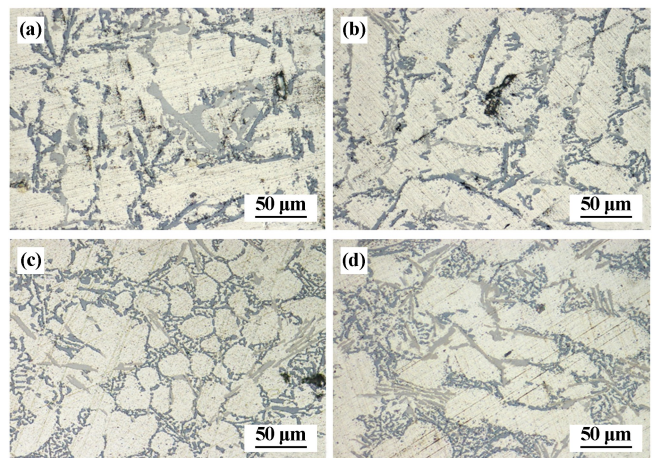


图 1 不同 Yb 加入量 ZL101 合金 XRD 图谱

Fig. 1 XRD spectra of ZL101 alloy with different Yb addition

## 2.2 合金显微组织分析

图 2 为不同 Yb 加入量 ZL101 合金显微组织。由图 2 可知:ZL101 合金组织主要由大面积白色区域的  $\alpha$ -Al 相、深灰色的共晶 Si 相及浅灰色的 Fe 相构成,其中  $\alpha$ -Al 相晶粒轮廓不清晰且分布不规则,共晶 Si 相分布不均匀,呈现长条状或针片状,尖端锋利的共晶 Si 相会割裂合金基体并降低合金强度及塑性,Fe 相呈现粗大板块状或长条状,且分布杂乱无章;添加 0.3% Yb 后,ZL101 合金组织形貌得到一定改善,大量共晶 Si 相及 Fe 相沿着粗大的  $\alpha$ -Al 相枝晶边界聚集分布,并且 Si 相和 Fe 相得到了一定程度细化,形状尺寸



(a) 不添加; (b) 0.3% Yb; (c) 0.6% Yb; (d) 0.9% Yb

图 2 不同 Yb 加入量 ZL101 合金显微组织

Fig. 2 Microstructure of ZL101 alloy with different Yb addition

明显减小;添加 0.6% Yb 时,ZL101 合金组织形貌发生很大变化, $\alpha$ -Al 相轮廓清晰,晶界明显,呈现圆球形且圆整度较高,分布较均匀,共晶 Si 相转变为细颗粒状或短棒状,表面光滑且分布较为均匀,Fe 相形貌也有所细化,呈现条状结构,合金变质效果较好;添加 0.9% Yb 时,ZL101 合金微观组织开始出现粗化, $\alpha$ -Al 相开始向尺寸粗大且分布无规则的树枝晶形态转变, Si 相微观形貌没有太大变化, Fe 相尺寸形态逐渐变大, Yb 对合金的细化效果正在减弱。

图 3 为不同 Yb 加入量 ZL101 合金初生  $\alpha$ -Al 相二次枝晶臂间距。随着 Yb 加入量增加,ZL101 合金初生  $\alpha$ -Al 相二次枝晶臂间距呈现先逐渐减小再增大的变化趋势。不添加 Yb 的 ZL101 合金  $\alpha$ -Al 相二次枝晶臂间距为 38.17  $\mu\text{m}$ ;添加 0.6% Yb 后 ZL101 合金  $\alpha$ -Al 相二次枝晶臂间距缩小至 24.77  $\mu\text{m}$ ,比不添加 Yb 的合金降低了 35.11%;Yb 加入量增加至 0.9%时,ZL101 合金初生  $\alpha$ -Al 相二次枝晶臂间距有所增大,为 30.11  $\mu\text{m}$ 。

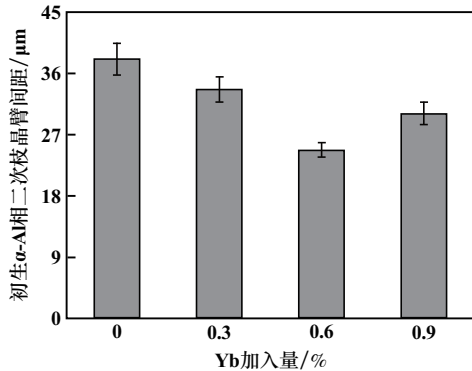


图 3 Yb 加入量对 ZL101 合金初生  $\alpha$ -Al 相二次枝晶臂间距的影响  
Fig. 3 Effect of Yb addition on secondary dendrite arm spacing of primary  $\alpha$ -Al phase of ZL101 alloy

图 4 为 Yb 加入量对 ZL101 合金共晶 Si 相平均面积及长径比的影响。随着 Yb 加入量逐渐增大,合金中共晶 Si 相平均面积及长径比均逐渐减小然后再增大。不含 Yb 的 ZL101 合金中共晶 Si 相平均面积及长径比分别为 121  $\mu\text{m}^2$  和 6.7;添加 0.6% Yb 的 ZL101 合金 Si 相平均面积及长径比分别缩小至 61  $\mu\text{m}^2$  和 3.8,比不含 Yb 的合金分别降低了 49.59% 和 43.28%。经过 Yb 变质处理后,合金组织内 Si 相发生熔断和纤维化, Si 相粒径大幅度降低,圆整度大幅度提高,组织形貌得到了极大改善。进一步提高 Yb 加入量,合金内 Si 相平均面积及长径比有所增大,组织开始长大、粗化,这是过度变质处理带来的负面影响。

图 5 为不同 Yb 加入量时 ZL101 合金的 SEM 图及 EDS 能谱。未加入 Yb 的 ZL101 合金基体主要是粗大的板块状 Fe 相及长条状 Si 相。添加了 0.3% Yb 及 0.6% Yb

后,合金组织内生成了新的第二相组织(一种长条状的亮色相),由点 A 的 EDS 分析结果可知,点 A 主要富含 Al 及 Yb 元素,原子分数分别为 78.23% 及 21.77%,结合图 1 与相关研究<sup>[10]</sup>可知,点 A 为  $\text{Al}_3\text{Yb}$  稀土相。点 B 主要成分为 Al、Si 及 Fe 等元素,为组织内的 Si 及 Fe 相。添加了 0.3% Yb 后,在合金组织内生成了稀土相,可能因为稀土相含量偏低,XRD 图谱中未显示。添加 0.9% Yb 后,在合金组织内生成了较多的稀土相,数量和尺寸均有所增加。

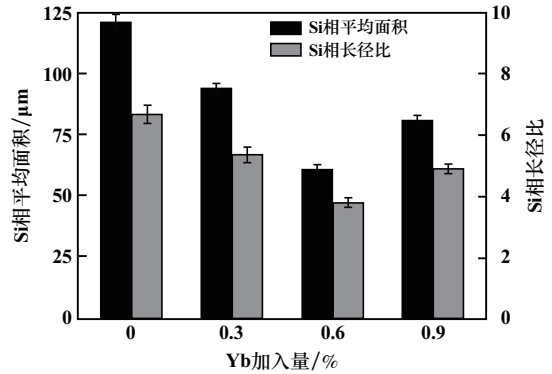
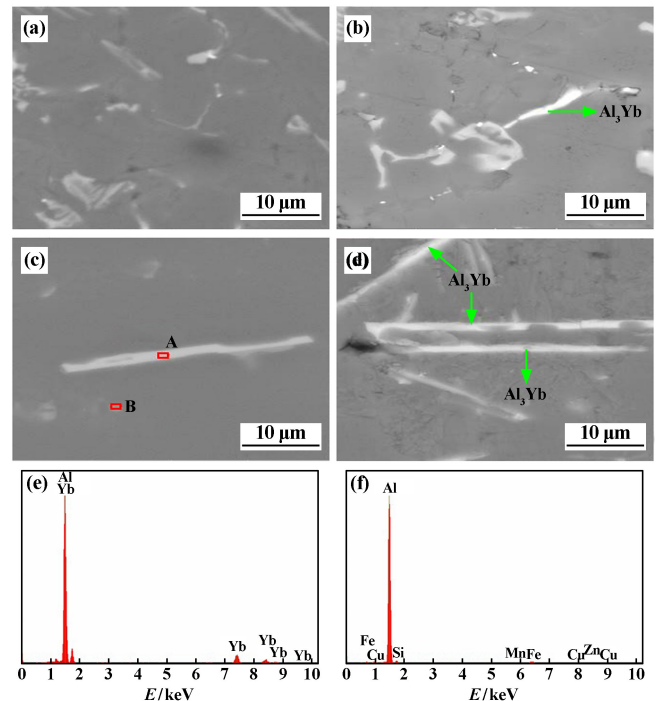


图 4 Yb 加入量对 ZL101 合金共晶 Si 相平均面积及长径比的影响

Fig. 4 Effect of Yb addition on average area and aspect ratio of eutectic Si phase of ZL101 alloy

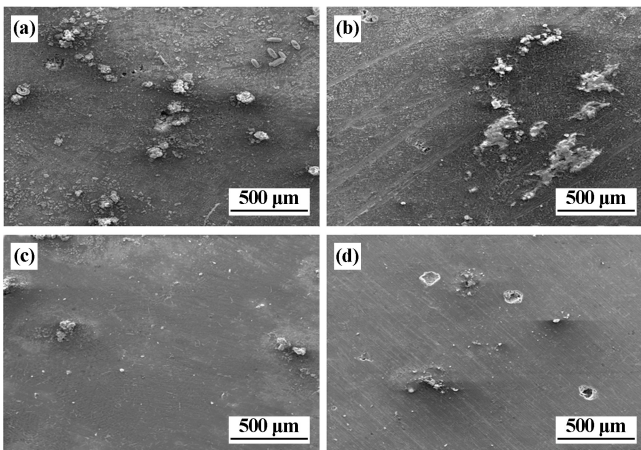


(a) 不添加; (b) 0.3% Yb; (c) 0.6% Yb; (d) 0.9% Yb;  
(e) 点 A 的 EDS 能谱; (f) 点 B 的 EDS 能谱

图 5 不同 Yb 加入量时 ZL101 合金 SEM 图及 EDS 能谱  
Fig. 5 SEM image and EDS spectra of ZL101 alloy with different Yb addition

### 2.3 腐蚀性能

图6为不同Yb加入量ZL101合金腐蚀表面SEM形貌。未添加Yb的ZL101合金腐蚀表面堆积了大量且厚重的腐蚀产物,还有非常明显的腐蚀坑洞及腐蚀裂纹。合金的腐蚀主要发生在 $\alpha$ -Al晶界处,因为ZL101合金中主要为 $\alpha$ -Al相及共晶Si相,共晶Si相作为主阴极会与周围的阳极 $\alpha$ -Al相组成微小的原电池,导致阳极发生腐蚀溶解,溶解到一定程度后,在 $\alpha$ -Al相周围形成明显的腐蚀坑洞及腐蚀裂纹。添加0.3%Yb后,合金表面腐蚀产物变得少且稀薄,腐蚀坑洞面积有所减小。Yb加入量进一步增加到0.6%时,合金表面腐蚀形貌变得非常平坦且光滑,只有极少的腐蚀产物,看不到明显的腐蚀凹槽,说明添加0.6%Yb有助于降低ZL101合金的晶间腐蚀敏感性,进而提高合金的耐腐蚀性能。但Yb加入量达到0.9%时,合金腐蚀表面又出现了明显的腐蚀坑洞,这是由于添加较多Yb时,Yb与Al基体发生共晶反应生成大量稀土相,稀土相发生聚集,并且这些稀土相与 $\alpha$ -Al相存在明显的电位差,可以作为阴极相,促进了合金的腐蚀。



(a) 不添加; (b) 0.3%Yb; (c) 0.6%Yb; (d) 0.9%Yb

图6 不同Yb加入量ZL101合金腐蚀表面SEM形貌

Fig.6 SEM morphologies of corrosion surface of ZL101 alloy with different Yb addition

合金耐腐蚀性能的提高主要与第二相得到极大细化有关,许多研究人员均认为第二相的形成容易诱发局部腐蚀,降低合金的耐腐蚀性能<sup>[11]</sup>。本研究中,随着Yb加入量逐渐增加,共晶Si相及 $\alpha$ -Al相的形貌尺寸逐渐减小, $\alpha$ -Al相晶粒尺寸与合金腐蚀速率的关系<sup>[12]</sup>为:

$$\lg V = A + B \lg \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

式中: $\lg V$ 为腐蚀速率; $A$ 与 $B$ 均为常数; $d$ 为晶粒直径。

由此可知,合金晶粒尺寸越细小,合金腐蚀速率越低。

图7为Yb加入量对ZL101合金腐蚀电位及腐蚀电流密度的影响。自腐蚀电位和腐蚀电流密度与合金热力学和动力学倾向相关,两者共同反映合金抗腐蚀性能的优劣。自腐蚀电位的绝对值越大,腐蚀电流密度越大,合金发生腐蚀的倾向越大。从图7可以看出,随着Yb加入量逐渐增大,铝合金腐蚀电位和腐蚀电流密度均逐渐减小而后增大。未添加Yb的ZL101合金腐蚀电位和腐蚀电流密度最高,分别为 $-620.7$  mV和 $58.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;添加0.6%Yb合金腐蚀电位及腐蚀电流密度最小,分别为 $-601.1$  mV和 $45.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,与不添加稀土合金相比,腐蚀电位增加了3.16%,腐蚀电流密度降低了22.24%。

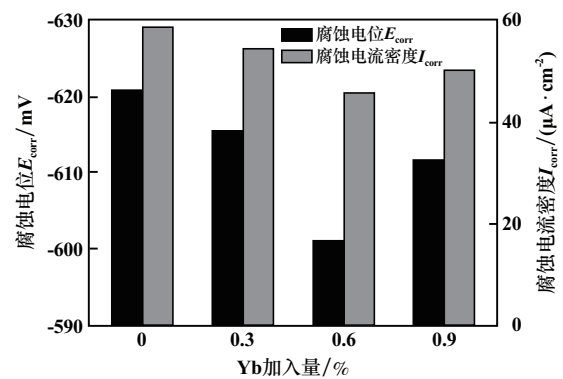


图7 Yb加入量对ZL101合金腐蚀电位及腐蚀电流密度的影响

Fig.7 Effect of Yb addition on corrosion potential and corrosion current density of ZL101 alloy

图8为Yb加入量对ZL101合金平均腐蚀速率的影响。从图8可以看出,Yb加入量对ZL101合金腐蚀速率具有较大的影响,Yb加入量由0.3%提高至0.9%,铝合金腐蚀速率呈现出先减小而后增大的变化趋势。加入0.6%Yb后,ZL101合金腐蚀速率为 $13.25 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ,比未添加Yb合金降低了37.23%;Yb加入量增大到

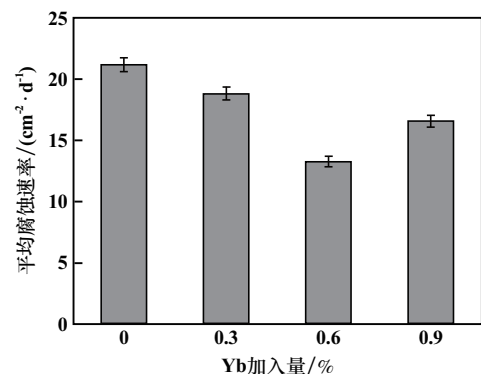


图8 Yb加入量对ZL101合金平均腐蚀速率的影响

Fig.8 Effect of Yb addition on average corrosion rate of ZL101 alloy

0.9%时,铝合金腐蚀速率为  $16.54 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ,比0.6%Yb合金腐蚀速率有所增大,但比未添加Yb合金腐蚀速率仍然降低不少。

添加Yb可有效增强合金抗腐蚀性能,主要源于两点:一是稀土元素的化学活性高,极易进入铝合金表面的氧化膜中与Al基体生成一层复合产物膜,有效提高合金膜层的致密性和均匀性,从而阻碍溶液中 $\text{Cl}^-$ 对合金表面的侵蚀;二是稀土元素可细化合金晶粒尺寸,稀土相与基体之间的电位差明显减小,两者之间的电偶腐蚀倾向减弱<sup>[1]</sup>。但稀土元素加入量过高时,合金晶界处容易生成稀土结晶相,稀土相与基体之间的电负性差异较大,容易诱导铝合金发生局部腐蚀,从而降低合金抗腐蚀性能<sup>[13]</sup>。

### 3 结论

1) 稀土Yb可以有效细化ZL101合金的微观组织, $\alpha$ -Al相、共晶Si相和Fe相均得到细化。添加0.6%Yb的ZL101合金 $\alpha$ -Al相二次枝晶臂间距为  $24.77 \mu\text{m}$ ,比不添加Yb合金降低了35.11%;添加0.6%Yb的ZL101合金Si相平均面积及长径比分别为  $61 \mu\text{m}$  和3.8,与未添加Yb的ZL101合金相比分别降低了49.59%和43.28%。

2) 随着稀土Yb加入量增加,合金抗腐蚀性能总体上增强。加入0.6%Yb后,ZL101合金腐蚀速率为  $13.25 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ,比未添加Yb合金降低了37.23%;添加0.6%Yb的合金腐蚀电位及腐蚀电流密度分别为  $-601.1 \text{ mV}$  和  $45.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,与未添加Yb的合金相比,腐蚀电位增加了3.16%,腐蚀电流密度降低了22.24%。

#### 参考文献(References):

- [1] 孙巍,张宇,佟伟平,等. 稀土镧对Al-0.6Mg-0.7Si-0.2Mn汽车型材机械及耐腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021,50(12): 4493-4501.  
SUN Wei, ZHANG Yu, TONG Weiping, et al. Effect of rare earth lanthanum on mechanical and corrosion properties of Al-0.6Mg-0.7Si-0.2Mn automotive profiles[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(12): 4493-4501.
- [2] 杨春洋,孙有平,何江美,等. 轧制温度对大应变轧制Al-4.5Cu-1.5Mg-0.1Sc合金组织与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2022,42(2): 132-135.  
YANG Chunyang, SUN Youping, HE Jiangmei, et al. Effect of temperature on microstructure and properties of large-strain rolled Al-4.5Cu-1.5Mg-0.1Sc alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(2): 132-135.
- [3] 石博,崔晓明,王伟,等. Sc含量对ZL101合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021,41(6): 726-730.  
SHI Bo, CUI Xiaoming, WANG Wei, et al. Effects of Sc content on microstructure and mechanical properties of ZL101 alloy[J]. Special

- Casting & Nonferrous Alloys, 2021,41(6): 726-730.
- [4] SLATTERY B E, PERRY T, EDRISY A. Microstructural evolution of a eutectic Al-Si engine subjected to severe running conditions[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009,512(1/2): 76-81.
- [5] 谢浩宇,刘志义,赵娟刚,等. 稀土Er对Al-Cu-Mg-Ag合金微观组织和力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2022,42(1): 140-143.  
XIE Haoyu, LIU Zhiyi, ZHAO Juangang, et al. Effect of Er addition on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(1): 140-143.
- [6] 于小健,沈坚,周文军,等. Y对A356合金除气效果和耐腐蚀性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017,37(12): 1389-1392.  
YU Xiaojian, SHEN Jian, ZHOU Wenjun, et al. Effects of rare earth yttrium on degassing efficiency and corrosion resistance of the A356 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(12): 1389-1392.
- [7] 李天景,王森. 富La,Ce混合稀土和Mg协同作用对Al-9.5Si合金组织演变的影响[J]. 矿冶工程, 2022,42(1): 117-121.  
LI Tianjing, WANG Miao. Influence of synergistic effect of La-Ce-rich mixed rare earth and Mg on microstructure evolution of Al-9.5Si alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(1): 117-121.
- [8] 吴立凡,李涛,赵慧颖,等. 稀土元素Ce对2A12铝合金在苛刻环境中腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属, 2019,43(12): 1269-1274.  
WU Lifan, LI Tao, ZHAO Huiying, et al. Influence of Ce on corrosion resistance of 2A12 aluminum alloy in harsh marine atmospheric[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43(12): 1269-1274.
- [9] ZHANG L J, YAN H, ZOU Y C, et al. Effect of adding rare-earth cerium on the microstructure and acid rain corrosion resistance of the ADC12 alloy[J]. International Journal of Materials Research, 2021, 112(3): 241-249.
- [10] HE J J, YAN H, ZOU Y C, et al. Microstructure and corrosion behavior of as-cast ADC12 alloy with rare earth Yb addition and hot extrusion[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(6): 1654-1665.
- [11] ZHENG Q J, WU J, JIANG H X, et al. Effect of micro-alloying element La on corrosion behavior of Al-Mg-Si alloys[J]. Corrosion Science, 2021, 179: 109113.
- [12] ARGAGE G R, PANIGRAHI S K, MISHARA R S. Effects of grain size on the corrosion resistance of wrought magnesium alloys containing neodymium[J]. Corrosion Science, 2012, 58(5): 145-151.
- [13] 张美丽,张磊军,刘壮壮,等. 混合稀土(La,Ce)对7A04铝合金耐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022,43(5): 40-48.  
ZHANG Meili, ZHANG Leijun, LIU Zhuangzhuang, et al. Effect of mixed rare earth (La, Ce) on corrosion resistance of 7A04 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(5): 40-48.
- 引用本文:樊巧芳,林浩. Yb含量对ZL101合金微观组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(1): 143-147.  
FAN Qiaofang, LIN Hao. Effect of Yb content on microstructure and corrosion resistance of ZL101 alloy [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(1): 143-147.