

含铈半固态 ZL105 合金组织及耐腐蚀性能研究

马路路, 张莉, 张南洋

(江苏安全技术职业学院 机械工程学院, 江苏徐州 221000)

摘要: 通过光学显微镜、扫描电子显微镜、能谱分析仪、显微硬度测试、盐溶液浸泡腐蚀及电化学工作站等分析测试方法研究了不同稀土铈添加量对半固态ZL105合金微观组织形貌及耐腐蚀性能的影响。研究表明: 随着稀土铈含量的不断提高, ZL105合金组织内的初生 α -Al相的尺寸逐渐缩小; 当铈的含量为0.6%时, 合金中初生 α -Al相晶粒尺寸为65.77 μm , 晶粒平均形状因子为0.74, 与不添加稀土铈的ZL105合金相比 α -Al相晶粒尺寸(115.37 μm)降低了42.99%, 晶粒平均形状因子(0.42)提高了76.19%。与不含稀土铈的ZL105合金相比, 添加了0.6%稀土铈的合金维氏硬度提高了31.64%。稀土铈的添加也大幅提高了合金的耐腐蚀性能, 铈的含量为0.6%时合金的失重腐蚀速率为10.85 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 相比于不含稀土铈的合金降低了50.93%, 合金的腐蚀电位有所增大并且腐蚀电流密度有所减小。通过腐蚀表面形貌观察可知添加稀土铈的合金的腐蚀凹坑及腐蚀裂纹明显减少, 腐蚀表面逐渐变得平整且光滑, 腐蚀形貌得到了极好的改善。

关键词: 稀土铈; 半固态ZL105合金; 微观组织; 显微硬度; 耐腐蚀性能

作者简介:

马路路(1985-), 女, 本科, 讲师, 研究方向为机械设计制造及其自动化。
电话: 15852094974, E-mail: 15852094974@163.com

中图分类号: TG146.2;
TG113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)07-0955-07

收稿日期:

2023-06-02 收到初稿,
2023-08-26 收到修订稿。

Al-Si系列铝合金具有良好的铸造流动性、密度小、气密性好、热膨胀系数低及焊接性能优良等特性, 在航空航天、军事装备及汽车制造等领域得到广泛应用^[1-3]。但是铸造态Al-Si合金组织内存在较多粗大的 α (Al)晶粒及针片状共晶Si相, 由于这些针片状的Si相脆性大, 容易在尖端和棱角处引起应力集中, 对合金基体产生割裂作用, 显著降低了合金的力学性能。通过半固态金属成形技术来改善Si相的形貌和提高合金的性能是一种有效的方式, 半固态金属成形是指利用金属在半固态温度区间具有良好的流变特性进行金属成形的方式^[4-5]。与传统铸造工艺相比较, 半固态成形工艺具有诸多方面优势: 合金基体组织由树枝状枝晶转变为圆球状晶粒, 凝固收缩减小, 凝固潜热小, 所制备得到的铸件尺寸完整, 还可以延长模具的使用寿命; 半固态浆料在模具内充型主要以层流方式流动为主, 可以有效避免卷气并显著减少疏松的问题^[6-7]。

稀土元素因其具有独特的电子层结构及物理化学性能, 对合金具有良好的除气除杂效应, 并且在我国稀土元素储量丰富, 因此, 越来越多的科研人员将稀土元素运用于金属及非金属材料性能的研究中^[8-10]。李晓燕^[11]等人通过添加稀土Er改善A356铝合金的微观组织及力学性能, 研究表明: 采用稀土Er可有效细化基体组织中的 α -Al相及共晶Si相, 对合金的变质效果显著。当Er的质量分数为0.4%时, 合金的组织形貌和力学性能均达到最佳状态, 抗拉强度和伸长率分别比未变质处理的合金提高了15.1%和29.8%。刘春海^[12]等人发现在A356铝合金内添加微量的稀土Ce元素能够有效改善合金的显微组织形貌并提高其力学性能; 稀土Ce的加入不仅细化了 α -Al晶粒形貌, 还使得共晶Si相尺寸变小, 与不含稀土Ce的A356合金相比, 稀土Ce含量为0.04%的A356变质合金的抗拉强度、屈服强度及伸长率分别提高了7.89%、24.48%和108.09%。宋劲松等人研究了稀土Ce对ZL101铝合金组织及性能的影响; 结果表

明：稀土Ce的添加使得树枝状 α -Al相变成块状、粒状，针状共晶Si相变成短杆状或蠕点状，力学性能也得到了显著提升，显微硬度达到HV 297.6，冲击韧性达到7.26 J/cm²[13]。目前，国内外大量研究主要集中于稀土Ce元素对铸造Al-Si合金组织及力学性能的影响，而关于稀土Ce元素对半固态Al-Si合金微观组织及腐蚀性能影响的研究很少。因此，本研究以Al-10Ce中间合金作为变质剂，利用半固态金属成形工艺制备了钕含量不同的ZL105半固态浆料，主要探究了稀土钕含量对半固态铝合金微观组织及耐腐蚀性能的影响，为制备出高性能的Al-Si合金提供有益的指导。

1 试验材料及方案

试验材料为ZL105铝合金，利用Magix (PW2424) X荧光光谱测定其实际化学成分，结果见表1。变质剂为Al-10Ce中间合金，精炼剂为C₂Cl₆。

表1 ZL105铝合金的实际化学成分
Table 1 Actual chemical composition of ZL105 aluminum alloy $w_B/\%$

Al	Si	Mg	Cu	Fe	Zn	Mn
余量	5.45	0.56	1.12	0.85	0.28	0.31

采用SG2-3-10型坩埚电阻炉熔炼ZL105合金，先将刚玉坩埚置于电阻炉内预热处理，然后放入ZL105合金进行熔炼，熔炼温度为760℃，保温15 min，确保合金全部熔化；加入C₂Cl₆精炼剂精炼处理，5 min后去除铝液表面浮渣；随后用钟罩将Al-10Ce中间合金压入铝液底部，并对铝液充分搅拌，其中钕的加入量分别为0.3%、0.6%和0.9%；然后随炉降温到605℃，并且保温20 min，最后浇注到金属模具内，用冷水淬火处理。

根据ASTM-G31标准执行浸泡腐蚀试验，浸泡腐蚀试样尺寸为15 mm×15 mm×3 mm的方块体，利用400#~2 000#的金相砂纸对方块体试样进行打磨，抛光并在酒精溶液中超声清洗10 min。将试样浸泡于装有质量分数为3.5%的NaCl水溶液烧杯中，再将烧杯搁置于恒温水浴锅内，浸泡腐蚀持续15天，浸泡温度控制在25℃。利用精度为0.1 mg的分析天平称量浸泡腐蚀前后试样的重量，通过质量损失来计算试样的失重腐蚀速率，由此判断试样的耐腐蚀性能，具体计算过程如公式(1)所示[14]：

$$V = (m_1 - m_2) / (S \cdot t) \quad (1)$$

式中：V为腐蚀速率，g·cm⁻²·d⁻¹；m₁为试样在腐蚀试验前质量，mg；m₂为试样在腐蚀试验后质量，mg；S为试样与NaCl溶液接触的面积，cm²；t为浸泡腐蚀的时间，d。

利用PARSTAT 4000电化学工作站对合金进行电化学分析，其中介质为3.5%NaCl溶液，试验温度为25℃，扫描速率为2 mV/s，扫描范围为-0.3~0.3 V。采用Olympus-DSX500型光学显微镜观察半固态试样的金相显微组织，利用Image-Pro Plus6.0图像分析软件对显微组织进行量化分析，通过平均形状因子对晶粒大小进行表征[15]：

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{4\pi A_i}{P_i^2}}{N} \quad (2)$$

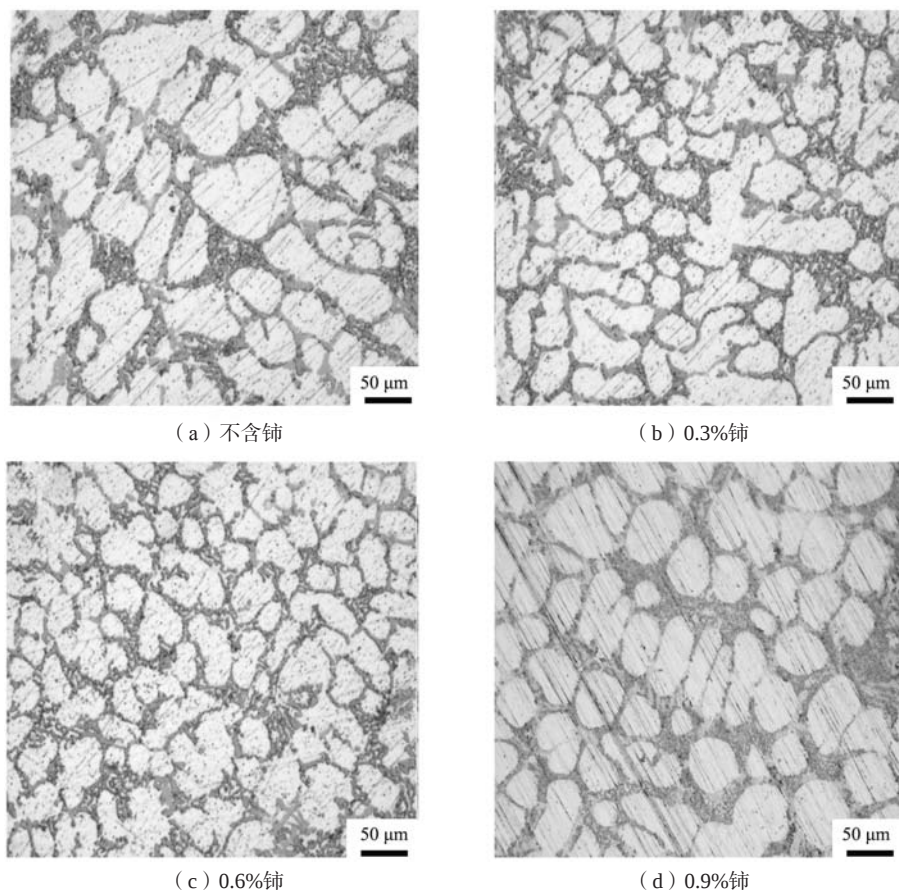
式中：A_i表示合金组织中第i个 α -Al晶粒的面积；P_i表示合金组织中第i个 α -Al晶粒的周长；N表示 α -Al晶粒的个数；晶粒平均形状因子表示平面粒子形状不规则（或规则）程度。

利用自带能谱分析仪的Tescan-Vega3扫描电镜对半固态试样稀土相进行成分分析及腐蚀形貌的观察。利用DHV-1000AV型显微硬度计测定半固态试样的硬度值，每个试样取5个测试点，计算平均值作为试样的维氏硬度。

2 结果分析与讨论

2.1 稀土钕含量对半固态ZL105合金微观组织的影响

图1为不同稀土钕含量的ZL105合金半固态金相组织形貌。由图1a可知，不含稀土钕的ZL105合金金相组织形貌粗大，其中初生 α -Al相主要是由巨型树枝晶所组成，取向无明显规律，且 α -Al相晶粒尺寸粗大，晶粒大小不一，分布杂乱无章，共晶Si相在晶界处存在明显的偏聚现象。当加入0.3%的稀土钕后（图1b）合金的金相显微组织有了些许改善，初生 α -Al相尺寸有明显减小，逐渐向椭圆状转变，且共晶Si相的分布也逐渐变得均匀。添加稀土钕的含量达到0.6%后（图1c）合金的半固态组织形貌达到最佳状态，初生 α -Al相的尺寸大幅度减小，且呈现出尺寸较为细小且均匀的圆球状等轴晶形态，晶界轮廓清晰，单位体积内的晶粒和枝晶数目，随着稀土钕含量提高而逐渐增多，并且共晶Si相分布非常均匀。由此可知，添加0.6%的稀土钕对ZL105合金的组织具有极好的细化效果。究其原因主要是稀土钕在Al中的固溶度较小，但熔体为液态时钕与Al会发生共晶反应生成稀土相，这些稀土相可以作为异质形核核心，不仅可以提高合金的形核率，还可以减小晶粒的生长速率，从而达到细化合金晶粒尺寸的目的[16]。继续增加稀土钕的含量达到0.9%时（图1d），合金组织有了粗化的趋势，局部 α -Al相开始长大、粗化，晶粒圆整度减弱，整体组织形貌向无规则状态转变。由此可知，添加了0.9%的稀土钕后合金



(a) 不含铈

(b) 0.3%铈

(c) 0.6%铈

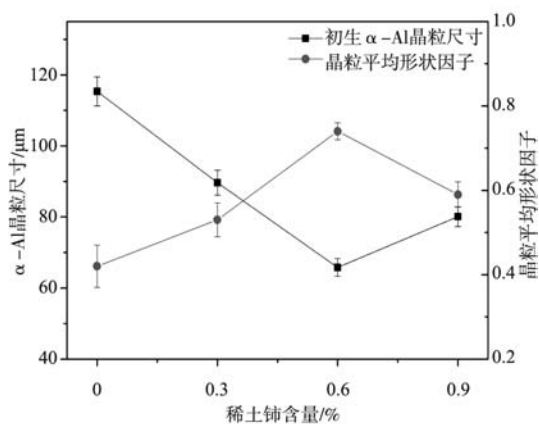
(d) 0.9%铈

图1 不同稀土铈含量的ZL105合金半固态微观组织

Fig. 1 Semi-solid microstructure of ZL105 alloy with different rare earth Ce content

的组织形貌已经偏离了最佳状态,添加过量的稀土铈后,稀土会与Al元素发生共晶反应生成大量的稀土化合物及稀土夹杂,这些化合物及稀土夹杂容易粘连合并,进而使合金晶粒尺寸变大,极大地降低了稀土的变质效果^[17]。

图2为稀土铈含量对ZL105合金初生 α -Al相晶粒尺寸及形状因子的影响。由图2可知,随着稀土铈添加量的逐渐增多,半固态ZL105合金的初生 α -Al相晶粒尺寸逐渐减小,而晶粒平均形状因子逐渐增大。由此可以看出,稀土铈对半固态ZL105合金组织有着明显的细化强化效果。当稀土铈的含量为0.6%时,半固态合金的 α -Al相晶粒尺寸达到最小,为65.77 μm ,晶粒平均形状因子达到最大,为0.74,与不添加稀土铈的ZL105合金相比 α -Al相晶粒尺寸(115.37 μm)降低了42.99%,晶粒平均形状因子(0.42)提高了76.19%。合金的晶粒尺寸越细小,说明稀土铈对合金的细化效果越好,晶粒平均形状因子越接近于1,则说明合金的晶粒越圆整,越接近于近球晶。稀土铈对半固态合金具有良好的细化效果主要是因为铈与合金中的铝元素发生共晶反应,共晶反应生成的第二相可作为异质形核

图2 稀土铈含量对ZL105合金初生 α -Al相晶粒尺寸及形状因子的影响Fig. 2 Effects of rare earth cerium contents on primary α -Al phase grain sizes and shape factors of ZL105 alloys

核心,提高了合金的形核率,而且减小了晶粒的生长速度,从而对 α -Al晶粒具有极好的细化作用。但是继续增大稀土铈的含量达到0.9%时,合金的晶粒尺寸有明显增大,晶粒平均形状因子有所减小,合金组织存在明显的粗化现象。

图3为稀土铈含量为0.6%的ZL105合金的扫描电镜图,并对合金晶界处做了EDS成分分析。从扫描电镜图片中可以观察到半固态合金的晶粒圆整,晶粒与晶粒之间的界面清晰。由过往的研究^[18-19]可知在铝合金内添加稀土元素极易在晶界处生成金属间化合物,于是对晶界处进行了EDS成分分析,见图3b。根据EDS能谱分析可知在晶界处存在富含铈元素的金属间化合物,

其中Al、Ce、Cu、Si等元素的原子计量比分别为71.87%, 3.11%, 3.69%及21.33% (原子分数)。因为ZL105合金组织内就富含Cu及Si等元素,再根据罗浩林^[20]等人的研究表明在Al-Si合金熔体内添加铈元素极易生成 $Al_{11}Ce_3$ 等金属化合物,由此可知稀土铈的加入会在合金组织内部生成 $Al_{11}Ce_3$ 金属间化合物。

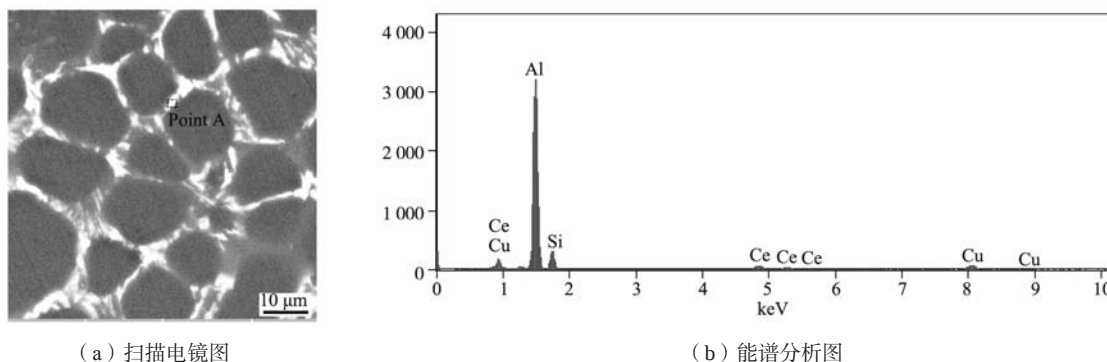


图3 稀土铈含量为0.6%的ZL105合金扫描电镜图及能谱分析图

Fig. 3 Scanning electron microscopy and energy spectrum analysis of ZL105 alloy with 0.6% Ce content

2.2 稀土铈含量对半固态 ZL105 合金维氏硬度的影响

图4为稀土铈含量对ZL105合金维氏硬度的影响。由图可知,随着稀土铈含量的不断增加,ZL105合金的维氏硬度逐渐增高至峰值而后有所降低;不含稀土铈的ZL105合金的维氏硬度为HV72.25,合金表现出较低的表面硬度。这与合金自身粗大的树枝晶组织及严重偏析的共晶Si相有关,根据Hall-Petch理论^[21]可知:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (3)$$

式中: σ_y 代表屈服强度,也可以用来表现维氏硬度^[22]; σ_0 表示移动单个位错的晶格摩擦应力; k_y 表示霍尔佩奇

常数; d 表示平均晶粒尺寸大小。

材料的晶粒尺寸越小,则其维氏硬度越高。由图1可知,不含稀土铈的ZL105合金 α -Al相晶粒尺寸粗大且不规则,极大的影响了合金的性能;与此同时,在晶界处局部偏析严重的共晶Si相也会大大降低合金的硬度。当稀土铈的含量为0.3%和0.6%时,ZL105合金的硬度分别为HV 80.69和HV 95.11,分别比不含稀土铈的合金提高了11.68%和31.64%。铈的加入极大的细化了合金的晶粒尺寸,提高了合金的圆整度,使合金晶粒排布规整,并且减少了共晶Si相的偏析,提高了第二相的分散性,因此才使合金的硬度得到大幅度提升。而铈的添加量过多达到0.9%后合金的硬度有明显降低,这是由于过变质使合金组织粗化,晶粒长大导致合金硬度降低。

2.3 稀土铈含量对半固态 ZL105 合金耐腐蚀性能的影响

图5为不同稀土铈含量的ZL105合金腐蚀SEM形貌。图5a是不含稀土铈的ZL105合金腐蚀表面,从图中可以清楚的看出在腐蚀表面存在较多的深浅不一、大小不一的腐蚀坑洞。由此可知,腐蚀通道不仅在合金表面扩展和延伸,还进一步深入到合金内部,导致剥落腐蚀的发生,这不利于合金的耐腐蚀性能,因此,不含稀土铈的ZL105合金腐蚀程度较为严重,抗腐蚀性性能较差。随着稀土铈的逐渐加入,合金的腐蚀表面形貌逐渐得到改善。如图5b所示,稀土铈含量为

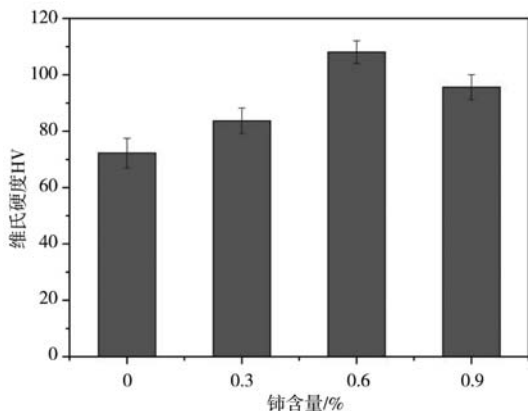


图4 稀土铈含量对ZL105合金维氏硬度的影响

Fig. 4 Effects of rare earth cerium contents on Vickers hardnesses of ZL105 alloys

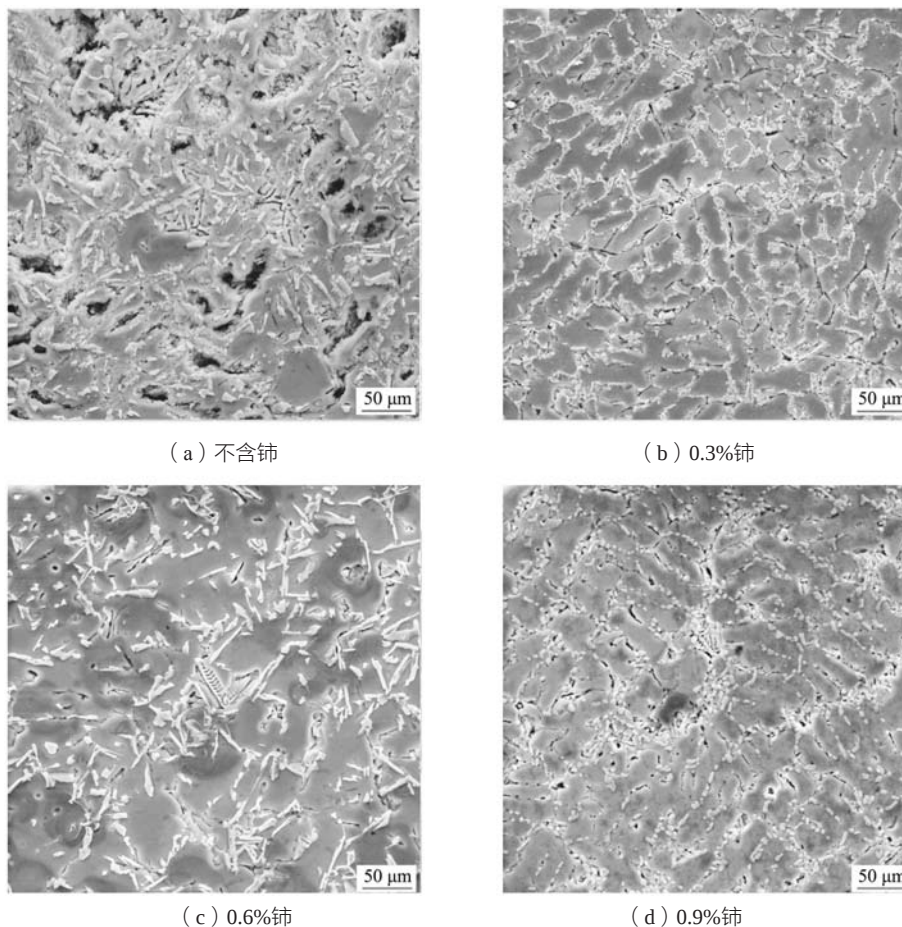


图5 不同稀土铈含量的ZL105合金腐蚀SEM形貌

Fig. 5 Corrosion SEM morphologies of ZL105 alloys with different rare earth Ce contents

0.3%时, 合金的腐蚀表面只存在大量的腐蚀裂纹, 并未发现明显的腐蚀坑洞; 由此可知, 盐溶液没有深层次的腐蚀合金内部, 腐蚀只是发生在合金表面。图5c为稀土铈含量为0.6%的合金腐蚀表面, 腐蚀表面较为光滑且平坦, 腐蚀裂纹的数量也大幅度减少, 腐蚀形貌得到了较大幅度的改善。图5d是添加了0.9%稀土铈的合金腐蚀形貌, 大量的晶间腐蚀裂纹又出现在腐蚀表面, 由此可知, 并不是稀土铈的添加量越多合金的抗腐蚀性能越好。

图6为稀土铈含量对ZL105合金平均腐蚀速率的影响。从图中可以观察到随着稀土铈添加量的不断提高, 铝合金的失重腐蚀速率逐渐降低至波谷而后出现明显升高的趋势。不含稀土铈的ZL105合金的失重腐蚀速率为 $22.11 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 在3.5%NaCl溶液(质量分数)的浸泡腐蚀作用下铝合金自身被腐蚀较严重, 腐蚀后的质量损失较多, 由此可知合金的抗腐蚀性能较低。而添加了0.3%与0.6%的稀土铈的ZL105合金的失重腐蚀速率明显降低, 分别为 $18.29 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $10.85 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 相比于不含稀土铈的合金分别降

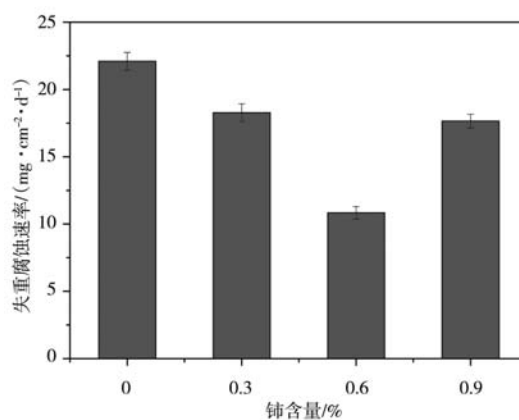


图6 稀土铈含量对ZL105合金平均腐蚀速率的影响

Fig. 6 Effects of rare earth cerium contents on average corrosion rates of ZL105 alloys

低了17.28%和50.93%, 由此可知稀土铈的添加极大的提高了合金的耐腐蚀性能。因为稀土铈的活性很高, 极易进入到合金表层氧化膜中形成Al-Ce复合保护膜, 进而极大的增加了保护膜的致密性和均匀性, 有效的阻碍了NaCl溶液中Cl⁻对合金的进一步腐蚀; 与此同

时稀土铈可以有效的细化合金的晶粒组织形貌,减少二次相的偏聚,大大的减少了因组织粗大和不均匀而形成的腐蚀电池的情况,从而很大程度上提高了合金的抗腐蚀性能^[23]。但是铈的添加量为0.9%时合金的失重腐蚀速率有明显升高的趋势,这应该是过量稀土的添加使得合金组织粗化,并且在合金组织内生成了尺寸粗大的金属间化合物,这些金属间化合物与Al基体之间存在明显的电位差异,会与Al基体形成微电池腐蚀,进而加速了合金的腐蚀速率,降低了合金的抗腐蚀性能^[24]。

图7为稀土铈含量对ZL105合金腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(i_{corr})的影响,从图中可以看出随着稀土铈的含量不断增加,铝合金的腐蚀电位呈现出先正移后又向负移的现象,腐蚀电流密度呈现出先减小后

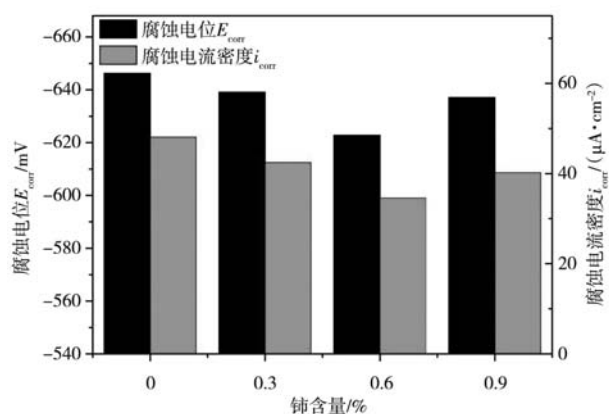


图7 稀土铈含量对ZL105合金腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(i_{corr})的影响

Fig. 7 Effects of rare earth cerium contents on corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current density (i_{corr}) of ZL105 alloys

增大的趋势。不含稀土铈的ZL105合金的腐蚀电位和腐蚀电流密度为-646.3 mV和48.1 $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$; 添加了不同含量的稀土铈后合金的腐蚀电位和腐蚀电流密度发生了不同程度的变化。其中铈含量为0.6%时的ZL105合金的腐蚀电位最高,为-622.8 mV,腐蚀电流密度最小,为34.6 $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$; 与不含稀土铈的合金相比腐蚀电位增大了3.64%,腐蚀电流密度降低了28.07%。一般而言,合金的腐蚀电位越正以及腐蚀电流密度越小,合金的抗腐蚀性能就越强。

3 结论

(1) 在半固态ZL105合金内添加稀土铈有效细化了合金的组织形貌,随着稀土铈含量的增多,合金中初生 α -Al相的尺寸逐渐缩小,当铈的含量为0.6%时,合金中初生 α -Al相晶粒尺寸达到最小,为65.77 μm ,晶粒平均形状因子达到最大,为0.74,与不添加稀土铈的ZL105合金相比 α -Al相晶粒尺寸(115.37 μm)降低了42.99%,晶粒平均形状因子(0.42)提高了76.19%,并且组织内的共晶Si相分布也变得更加均匀。

(2) 稀土铈含量为0.6%时半固态ZL105合金的维氏硬度达到峰值,为HV 95.11,比不含稀土铈的合金提高了31.64%。

(3) 在半固态ZL105合金内添加适量的稀土铈能够极大的增强合金的抗腐蚀性能。当稀土铈添加量为0.6%时,半固态ZL105合金的失重腐蚀速率为10.85 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,相比于不含稀土铈的合金降低了50.93%,并且由腐蚀形貌表面观察可知合金的腐蚀凹坑及腐蚀裂纹明显减少,腐蚀表面平整且光滑,腐蚀形貌得到了极好的改善。

参考文献:

- [1] 李文树, 宋东福, 周海涛, 等. 细化变质处理对A356.1合金组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30 (7): 1491-1501.
- [2] 姜峰, 索忠源, 刘祥玲, 等. 热处理对不同Sr含量变质A356合金组织及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (1): 29-33.
- [3] 陈隆波, 顾吉仁, 郭纪林. T6热处理对铸造铝硅合金组织与硬度的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (9): 1038-1042.
- [4] SALLEH M S, OMAR M Z. Influence of Cu content on microstructure and mechanical properties of thixoformed Al-Si-Cu-Mg alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (11): 3523-3538.
- [5] 张钧铭, 于沪平, 乔云, 等. 超声振动对半固态ZL101合金成形微凸台微观组织的影响 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (8): 44-51.
- [6] 罗惠馨, 郝建飞, 孔昭阳, 等. 固溶处理对半固态成形过共晶Al-Si-Cu-Mg合金组织与性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (4): 386-390.
- [7] 杜康. 半固态铸造Al-Si-Cu-Mg合金热处理工艺及强化机理研究 [D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2017.
- [8] ZHANG Y J, DU J H, JI Q X, et al. Effect of Sr and Y addition on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy and its mechanism [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (10): 3588-3595.
- [9] 杜阳, 索忠源, 姜峰, 等. Nd变质对Al-Mg₂Si合金组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (11): 1265-1269.
- [10] 林灿鑫, 程永奇, 潘育彤, 等. 稀土Y对Sr+B复合变质A356合金组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2023, 72 (3): 257-262.
- [11] 李晓燕, 卢雅琳, 王健, 等. 稀土Er对A356铝合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 材料工程, 2018, 46 (1): 67-73.

- [12] 刘春海, 谭青, 刘华, 等. 稀土Ce对A356铝合金力学性能及显微组织的影响 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2017, 45 (3): 45-49.
- [13] 宋劲松, 贾志宁, 马瑞, 等. 稀土变质剂Ce对ZL101铝合金组织及性能的影响研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (7): 62-66.
- [14] 张立杰, 闫洪. 超声振动功率对2024铝合金显微组织、显微硬度及耐腐蚀性能的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 138-144.
- [15] 何毅. Al-Ce中间合金的制备及其对A356合金作用效果研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [16] 刘政, 湛庆春, 许鹤君, 等. 多元稀土细化半固态A356铝合金初生 α 相的研究 [J]. 轻金属, 2015 (1): 49-53.
- [17] 程昌学, 杨湘杰, 何毅, 等. Ce对A356合金的影响及细化机制的研究 [J]. 稀有金属, 2018, 42 (11): 1127-1133.
- [18] 刘闪光, 李国爱, 罗传彪, 等. Sc元素对ZL205A合金组织和力学性能的影响 [J]. 材料工程, 2020, 48 (1): 84-91.
- [19] 张云翔, 赵海东, 朱霖, 等. Zr含量对铸造AlSiMg0.4合金力学性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2021, 35 (3): 209-220.
- [20] 罗浩林. 电磁搅拌和Ce含量对半固态A356合金组织与成分影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (5): 614-619.
- [21] JI Q X, DU J H, ZHANG Y J, et al. Effect of Yb and Zr addition on microstructure and mechanical properties of Al7Si0.3Mg alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (10): 3580-3587.
- [22] TIRYAKIOGLU M. On the relationship between Vickers hardness and yield load in Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. Materials Science Engineering A, 2015, 633: 17-19.
- [23] 杨治刚, 李凯丽, 绳天庆, 等. 铈元素对铝合金微观组织与性能的影响研究现状 [J/OL]. 中国稀土学报 (2023-02-28). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2365.tg.20230227.1137.002.html>.
- [24] 徐道芬, 陈康华, 胡桂云, 等. 微量稀土Ce对Al-Zn-Mg铝合金组织和腐蚀性能的影响 [J]. 材料导报, 2020, 34 (4): 8100-8105.

Study on the Microstructure and Corrosion Resistance of Semi-Solid ZL105 Alloy Containing Ce

MA Lu-lu, ZHANG Li, ZHANG Nan-yang

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract:

The effects of different amounts of rare earth cerium on the microstructure and corrosion resistance of semi-solid ZL105 alloy were investigated by optical microscope, scanning electron microscope, energy spectrum analyzer, microhardness test, salt solution immersion corrosion and electrochemical workstation. The results showed that: with the increasing of the content of rare earth and cerium, the sizes of the primary α -Al phases in ZL105 alloy decreased gradually. When the content of cerium was 0.6%, the grain size of the primary α -Al phase in ZL105 alloy was 65.77 μm and the average grain shape factor was 0.74. Compared with ZL105 alloy without Ce, the grain size (115.37 μm) of the α -Al phase decreased by 42.99%, and the average grain shape factor increased by 76.19%(0.42). Compared with ZL105 alloy without cerium, the hardness of ZL105 alloy with 0.6% cerium increased by 31.64%. The addition of rare earth cerium also greatly improved the corrosion resistance of the alloy. When the content of cerium was 0.6%, the corrosion rate of the alloy was 10.85 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, which was 50.93% lower than that of the alloy without rare earth cerium. The corrosion potential of the alloy was increased and the corrosion current density was decreased. According to the observation of the corrosion surface morphology, the corrosion pits and cracks of the alloy added with rare earth cerium were obviously reduced, and the corrosion surface gradually became flat and smooth, and the corrosion morphology was greatly improved.

Key words:

rare earth cerium; semi-solid ZL105 alloy; microstructure; microhardness; corrosion resistance