

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4150

AT61-Ce 合金铸态组织和腐蚀行为研究

王乐闻¹,李思琪¹,姚 远¹,李 美¹,贾 征¹,付 丽^{1,2}

(1. 沈阳大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110044; 2. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110919)

摘 要: 镁合金由于耐蚀性较差,限制了其大规模应用。Ce 是一种最常见的稀土元素,具有储量大、密度低和经济效益好等特点,对于镁合金耐蚀性的提升有显著作用。以 AT61 合金为基础,通过添加 1%(质量分数)Ce 研究其对合金铸态组织和腐蚀行为的影响。根据 XRD 和 SEM/EDS 结果分析可知,添加 1%Ce 后 AT61 合金中 $Mg_{17}Al_{12}$ 相由沿晶界连续分布转变为棒状或块状的不连续分布,且数量显著下降。AT61-Ce 合金中除 $Mg_{17}Al_{12}$ 和 Mg_2Sn 相外,还存在新的针状 Al_4Ce 相。根据析氢实验和电化学性能测试,添加 1%Ce 后 AT61 合金的耐腐蚀性能显著提高。AT61-Ce 合金的自腐蚀电流密度和极化电阻分别为 $14.223 \mu A/cm^2$ 和 $2\ 279.951 \Omega/cm^2$ 。AT61-Ce 合金良好的耐蚀性能归因于 $Mg_{17}Al_{12}$ 相体积分数下降,微电偶腐蚀减弱及 Al_4Ce 相沿晶界连续分布阻碍腐蚀扩展。

关键词: 镁合金; Ce; 微观结构; 腐蚀性能; 第二相

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)12-1154-06

Study on the As-cast Microstructure and Corrosion
Behavior of AT61-Ce AlloyWANG Lewen¹, LI Siqi¹, YAO Yuan¹, LI Mei¹, JIA Zheng¹, FU Li^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2. Key Lab of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110919, China)

Abstract: Large-scale applications of magnesium alloys are limited because of their poor corrosion resistance. Ce is the most common rare earth element and has the advantages of large reserves, low density, and good economic benefits, playing a significant role in improving the corrosion resistance of magnesium alloys. The effect of adding 1 wt.% Ce to the as-cast microstructure and corrosion behavior of the AT61 alloy was investigated. According to the XRD and SEM/EDS results, the $Mg_{17}Al_{12}$ phase in the AT61 alloy transforms from a continuous distribution along the grain boundaries to a discontinuous distribution with a rod-like or block shape after the addition of 1 wt.% Ce, and the quantity significantly decreases. In addition to the $Mg_{17}Al_{12}$ and Mg_2Sn phases, new needle-like Al_4Ce phases are present in the AT61-Ce alloy. According to hydrogen evolution tests and electrochemical performance tests, the corrosion resistance of the AT61 alloy is significantly improved. The self-corrosion current density and polarization resistance of the AT61-Ce alloy are $14.223 \mu A/cm^2$ and $2\ 279.951 \Omega/cm^2$, respectively. The excellent corrosion resistance of the AT61-Ce alloy is attributed to the decrease in the volume fraction of the $Mg_{17}Al_{12}$ phase, the weakening of galvanic corrosion, and the continuous distribution of the Al_4Ce phase along the grain boundaries hindering corrosion propagation.

Key words: magnesium alloy; Ce; microstructure; corrosion resistance; second phase

镁合金是目前最轻的金属结构材料,具有阻尼减震性能好,电磁屏蔽能力佳等特点。在航空航天、汽车与生物医疗等领域已经应用多年^[1-3]。然而由于镁合金较差的耐蚀性^[4-5],导致其应用量仍远远落后

于钢铁及铝合金。近年来,随着能源和环保问题日益突出,镁合金作为轻质的可回收材料备受重视^[6]。为了解决这一问题,研究人员提出了表面涂层^[7-8]和合金化^[9-10]等方式。然而与涂层技术复杂的工艺流程带

收稿日期: 2024-08-12

基金项目: 东北大学 EPM 实验室开放课题(NEU-EPM-018); 辽宁省研究生教育改革研究项目(LNYJG2024326); 教育部学位与研究
生教育主题案例项目(ZT-231103515)

作者简介: 王乐闻,1997 年生,硕士生。研究方向为先进材料成型技术及应用。Email: WLWWX@outlook.com

通讯作者: 付 丽,1988 年生,博士生,副教授。研究方向为镁合金强韧化与表面化学工程。Email: fuli@syu.edu.cn

引用格式: 王乐闻,李思琪,姚远,李美,贾征,付丽. AT61-Ce 合金铸态组织和腐蚀行为研究[J]. 铸造技术,2024,45(12): 1154-1159.

WANG L W, LI S Q, YAO Y, LI M, JIA Z, FU L. Study on the as-cast microstructure and corrosion behavior of AT61-Ce alloy[J].

Foundry Technology, 2024, 45(12): 1154-1159.

来的环境问题及额外的成本相比,合金化是一种更为直接和有效的方法。

合金化通常采用 Al、Zn、Mn 和稀土等元素来改善镁合金的组织,提高其耐蚀性^[11-12]。其中含有稀土元素的镁合金通常具有更高的耐蚀性,特别是在常规的商用 Mg-Al 系合金中,作为最常见的轻稀土元素 Ce 具有储量丰富、密度低等特点。关于 Ce 对镁合金耐蚀性的影响已经有了大量研究,Li 等^[13]发现 Ce 的加入提高了 Mg-0.6Al-0.5Mn-0.25Ca 合金的耐腐蚀性能,这是由于加入 Ce 净化熔体,减少了杂质从而抑制了微电偶腐蚀。Mert 等^[14]的研究同样发现在 AM50 合金中添加 Ce 后,合金中的杂质会嵌入 Al-Ce 相中,腐蚀产物形成的钝化膜稳定性提高从而使合金耐蚀性提高。Zhang 等^[15]在研究中发现,随着 Mg-Al-0.3Mn 合金中 Ce 含量的提高,Mg₁₇Al₁₂ 相逐渐被 Al-Ce 相取代,同时新出现的针状 Al-Ce 相对腐蚀的扩展有良好的阻碍作用。Liu 等^[9]的研究发现,Ce 的添加可以明显提高 AM60 合金的耐蚀性,其主要原因是 Ce 的加入可以显著降低 Mg₁₇Al₁₂ 相的比例,减弱电偶腐蚀。上述研究多集中于 AM 系或 AZ 系合金,且提升镁合金耐蚀性 Ce 的最优添加量在 1% 左右。

尽管研究者们对 Ce 元素在提升镁合金耐蚀性方面的机制进行了广泛而深入的研究,并取得了显著成果,但在特定合金体系如 AT61 合金中,Ce 的具体作用和影响机制仍然不够明确。因此,本研究通过在 AT61 合金中添加 1% 的 Ce,进一步明确了 Ce 对 AT61 合金组织及腐蚀行为的影响,研究结果对于后续开发高性能 AT61 合金有一定借鉴作用。

1 实验材料与方法

1.1 实验合金的制备

实验合金由 99.9% Mg、99.9% Al、99.9% Sn 和 Mg-30%Ce 中间合金(质量分数),以及无水 MnCl₂ 颗粒在感应熔炼炉中制备而成。首先在坩埚中放入 99.9% Mg,并将炉体升温至 730 °C,待其熔化后加入 99.9% Al 和 99.9% Sn,保温 10 min。然后加入 Mg-30%Ce 中间合金并保温 15 min,随后加入无水 MnCl₂ 颗粒立即搅拌,同时加入 5 号溶剂进行 1 min 精炼,保温 10 min。当熔体温度降到 710 °C 时进行扒渣。随后在混合气体(99% CO₂ 和 1% SF₆,体积分数)保护下将熔体浇注到预热至 200 °C 的模具中(φ52 mm×160 mm)获得镁合金铸锭。使用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES,XRF-1800CCDE)对实验合金进行成分分析。合金化学成分如表 1 所示。

表1 实验合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of the investigated alloy (mass fraction/%)

Alloy	Al	Sn	Ce	Mg
AT61	6.01	1.04	-	Bal.
AT61-Ce	5.91	1.12	1.14	Bal.

1.2 微观组织表征

使用 X 射线衍射分析仪(PANalytical PW3040/60)对合金进行物相分析。XRD 分析所使用的试样尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm,试样测试前经 SiC 砂纸研磨至表面光亮,扫描速度 4(°)/min,扫描范围 10°~90°。使用光学显微镜(OLYMPUS 8G44018)初步分析合金的微观结构,金相试样经 SiC 砂纸打磨抛光至表面呈镜面。使用硝酸酒精溶液(4 mL 硝酸+96 mL 无水乙醇)腐蚀,利用场发射扫描电子显微镜(Hitachi-S4800)和其中配备的 X 射线能谱分析仪(Bruker Quantax)对合金中第二相特征进行观察。

1.3 析氢实验

通过析氢实验测试合金的腐蚀性能,将 10 mm×10 mm×10 mm 的试样室温浸泡在 3.5%NaCl(质量分数)溶液中 24 h,利用上方试管来收集氢气^[16]。试样经 SiC 砂纸打磨至表面光亮无明显划痕,用无水乙醇冲洗后,冷风吹干,随后开始实验。

1.4 电化学实验

电化学测试实验的准备工作与析氢实验相同。试样反应面积为 10 mm×10 mm。利用辰华 CHI660E 电化学工作站室温测试,采用三电极体系,试样为工作电极(WE)、铂片电极为辅助电极(CE)、饱和甘汞电极(SCE)为参比电极(RE)。测试开始时,将样品浸入 3.5%NaCl 溶液中 3 600 s,以获得稳定的开路电位(OCP)。然后测试动电位扫描极化曲线,极化曲线以平衡电位为基准,扫描区间为 -0.5~0.5 V,扫描速率为 1 mV/s。

2 实验结果及讨论

2.1 实验合金组织分析

实验合金的金相组织照片如图 1 所示。在 AT61 合金中,沿晶界连续分布大量粗大的第二相。添加稀土 Ce 后,合金中出现了大量沿晶界分布的针状相,粗大第二相分布变得不连续且数量下降。

实验合金的 SEM 照片如图 2a~d 所示,EDS 结果于表 2 中列出。如图 2a 所示,AT61 合金为典型的枝晶组织,大量粗大的灰白色第二相沿晶界分布,其内部含有少量亮白色的颗粒状第二相。EDS 分析结果显示,A 点灰白色第二相 Mg:Al 的原子比接近 17:12,结合 XRD 分析结果(图 2e),该相被确定为

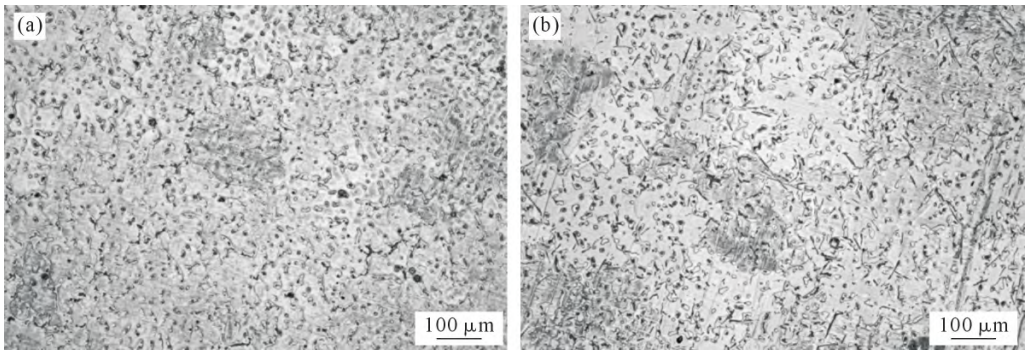


图1 实验合金金相组织:(a) AT61; (b) AT61-Ce
Fig.1 Metallographic structure of the investigated alloys: (a) AT61; (b) AT61-Ce

表2 图2中典型析出相EDS结果
Tab.2 EDS results of the typical precipitate phases in Fig. 2
(atomic fraction/%)

Points	Element			
	Mg	Al	Sn	Ce
A	69.70	28.70	1.60	-
B	71.66	4.92	3.43	-
C	71.82	21.87	0.32	-
D	57.37	34.44	-	8.19

Mg₁₇Al₁₂相;B点亮白色颗粒状第二相含有大量Mg,以及少量的Al和Sn,结合XRD结果(图2e),该相被识别为Mg₂Sn相。其中Mg₂Sn相与Mg₁₇Al₁₂相伴生析出,导致EDS结果中Mg和Al元素含量升高,这与Wang等^[17]的研究结果一致。

AT61-Ce合金的SEM照片如图2c和d所示。稀土Ce的添加改变了第二相的形貌和分布,合金中的Mg₁₇Al₁₂相变为长条状或块状,并且数量显著减少,且有新出现沿晶界聚集分布的亮白色针状相。对其进行EDS分析,结果显示,B点针状相的Al:Ce原子比接近4:1,可被确定为Al₄Ce相。Li等^[18]的研究中也同样发现了Al₄Ce。

2.2 实验合金的腐蚀行为研究

析氢实验结果如图3所示。在实验过程中AT61合金的析氢曲线显示其析氢速率随时间递增,而AT61-Ce合金的析氢腐蚀速率则基本保持稳定。AT61和AT61-Ce合金24 h的平均析氢量分别为7.01、0.94 mL/cm²,说明添加Ce可显著降低AT61

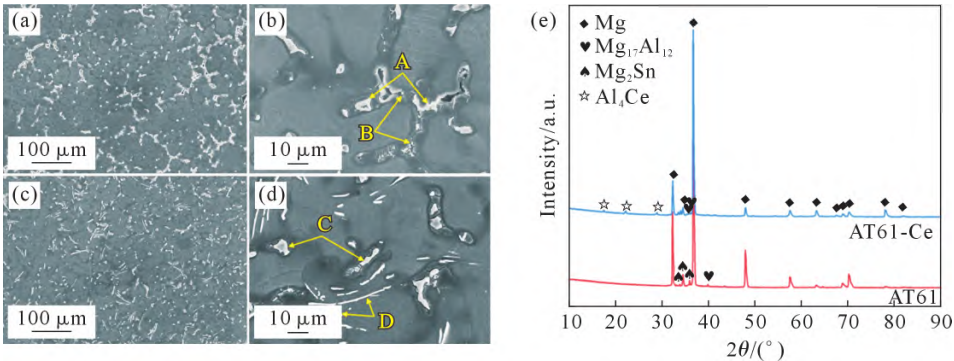


图2 实验合金 SEM 照片和 XRD 图谱:(a, b) AT61;(c, d) AT61-Ce;(e) XRD 图谱
Fig.2 SEM images and XRD patterns of the investigated alloys: (a, b) AT61; (c, d) AT61-Ce; (e) XRD patterns

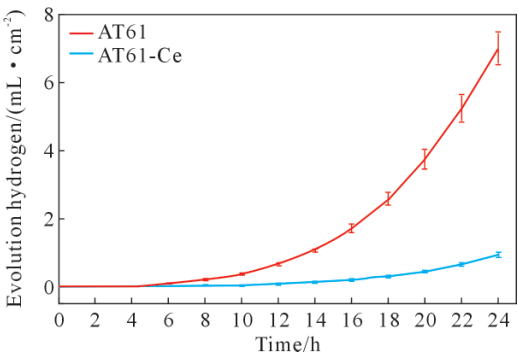


图3 实验合金析氢实验结果
Fig.3 Experimental results of the hydrogen evolution of the investigated alloys

合金腐蚀速率。

2.3 电化学测试

图4是实验合金的极化曲线测试结果,对应的拟合数据见表3。AT61和AT61-Ce合金的自腐蚀电位分别为-1.482和-1.471 VSCE。而自腐蚀电位是热力学数据,仅代表腐蚀发生的倾向性,不能作为判

表3 极化曲线拟合数据
Tab.3 Fitting data for the polarization curves

Alloys	E_{corr} /V _{SCE}	I_{corr} /(μ A·cm ²)	β_a /(mV·dec ⁻¹)	β_c /(mV·dec ⁻¹)	R_p /(Ω ·cm ²)
AT61	-1.482	21.380	65.1	177.15	968.106
AT61-Ce	-1.471	14.223	134.17	167.94	2 279.951

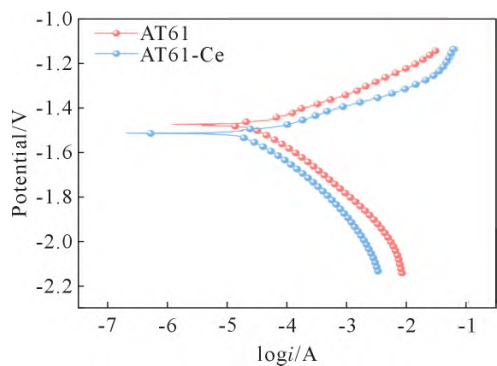


图 4 实验合金极化曲线
Fig.4 Polarization curves of the investigated alloys

断合金耐蚀性的依据^[19]。合金的耐蚀性主要取决于自腐蚀电流密度和极化电阻^[20],AT61 和 AT61-Ce 合金的自腐蚀电流密度为 21.380 和 14.223 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$,极化电阻分别为 968.106 和 2 279.951 Ω/cm^2 ,这与析氢实验的结论一致。

图 5 是实验合金的奈奎斯特图、波特图和等效电路图,表 4 为拟合得到的电化学参数。从图 5 a 可见,合金的阻抗谱均由 1 个高频容抗环、1 个中频容抗环和 1 个低频感抗环组成。容抗回路通常与镁合金表面产物膜的性质及腐蚀期间 Mg 失去电子变为

Mg^{2+} 的电荷转移电阻有关,感抗回路代表合金表面发生点蚀^[21]。EIS 拟合的等效电路如图 5d 所示。其中, R_s 代表溶液电阻, R_f 和 CPE_1 分别代表 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 膜电阻和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 膜电容, R_{ct} 代表电荷转移电阻, CPE_2 代表双层电容,与电极/电解质界面处发生的双电层和电荷转移过程有关, R_L 和 L 代表合金表面局部腐蚀产物膜击穿的电阻和电感^[22-23]。一般来说, R_{ct} 和 R_f 与耐蚀性成正比,即随着 R_{ct} 和 R_f 值的增加,合金的耐蚀性提高^[24]。

从图 5b 可见,相位角接近 -90° ,表明实验合金表面生成了稳定的腐蚀产物层^[25]。此外,还可见在高频区和中频区有两个明显的波峰,在低频区有一个不明显的波峰,与奈奎斯特图的结果一致。图 5c 模值-频率曲线中,AT61-Ce 合金的阻抗模值 $|Z|$ 明显大于 AT61 合金,表明其耐蚀性更优^[26]。

AT61-Ce 合金具有良好耐蚀性的原因是合金的微观组织在加入 Ce 后发生了改变。在 AT61 合金中粗大且数量众多的 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相与 Mg 基体构成强电偶,加剧作为阳极的镁基体的溶解。此外与 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相伴生的颗粒状 Mg_2Sn 相则可以促进腐蚀向晶内扩展的进程,进一步加快 AT61 的腐蚀过程。而在

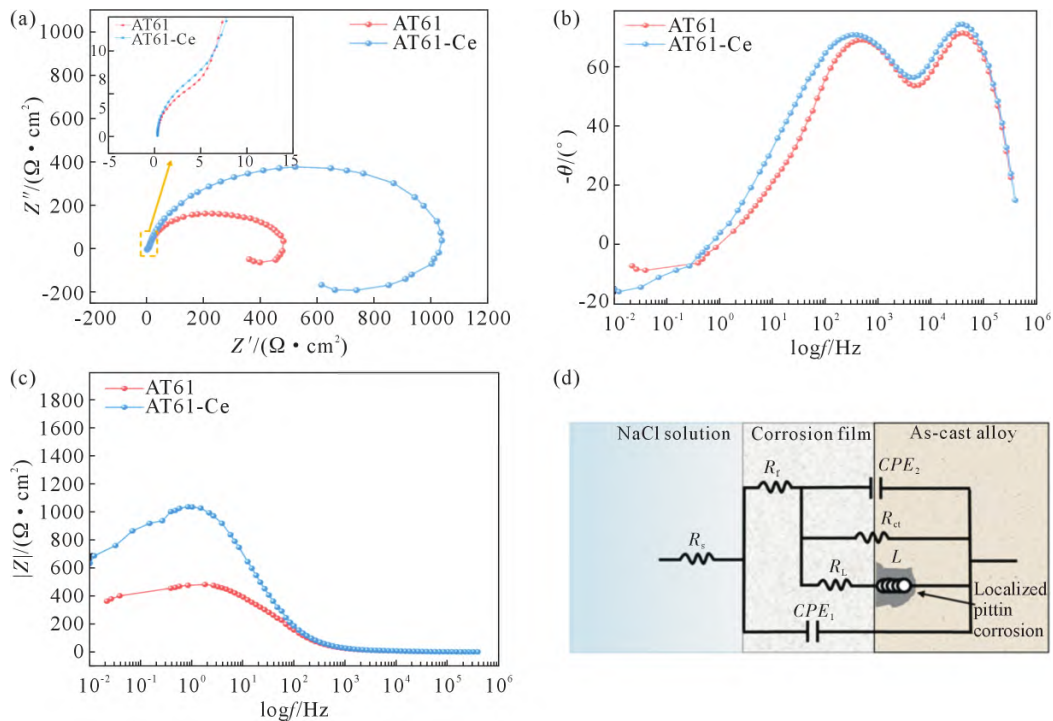


图 5 实验合金 EIS 结果和等效电路:(a) 奈奎斯特图;(b) 相位角-频率曲线;(c) 模值-频率曲线;(d) 等效电路图
Fig.5 EIS results and equivalent circuit diagram of the investigated alloys: (a) Nyquist diagram; (b) phase-angle-frequency curve; (c) mode-value-frequency curve; (d) equivalent circuit diagram

表 4 实验合金 EIS 拟合结果
Tab.4 EIS fitting results of the investigated alloys

Alloy	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$CPE_1/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	n_1	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$CPE_2/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	n_2	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_L/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$L/(\text{H} \cdot \text{cm}^2)$
AT61	0.400 98	$5.134 2 \times 10^{-7}$	0.942 45	7.243	$2.435 2 \times 10^{-5}$	0.841 86	456.1	1 157	1 514
AT61-Ce	0.390 05	$4.885 0 \times 10^{-7}$	0.957 28	8.693	$2.382 8 \times 10^{-5}$	0.827 11	1 014	5 063	7 852

AT61-Ce 合金中的 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相数量明显下降,且由网状连续分布变为块状或长条状。 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相体积分数下降让合金整体的微电偶腐蚀明显减弱。由 XRD 和 SEM 结果可知,伴生的 Mg_2Sn 相数量同样显著下降。同时沿晶界出现交错聚集分布的 Al_4Ce 相(图 2c 和 d),其与基体结合较紧密,不易脱落,可有效限制腐蚀在平面上的扩展,使腐蚀主要在晶内进行,从而提高了合金的耐蚀性。

3 结论

(1)AT61 合金的第二相为网状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相和微量的 Mg_2Sn 相。与 AT61 合金相比,AT61-Ce 合金中沿晶界交错分布着新的针状 Al_4Ce 相, $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的形貌也发生显著变化,表现为不连续的棒状或者块状分布,其数量也显著下降。

(2)AT61-Ce 合金的析氢速率为 0.94 mL/cm^2 , 相较 AT61 合金下降了 86.6%,其自腐蚀电流密度和极化电阻分别为 $14.223 \mu\text{A/cm}^2$ 和 $2\,279.951 \Omega/\text{cm}^2$,表明添加 Ce 后合金耐蚀性得到明显提升。

(3)AT61-Ce 合金良好的耐蚀性归因于沿晶界聚集分布的 Al_4Ce 相对腐蚀扩展的抑制, $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相体积分数的大幅下降减弱了微电偶腐蚀。

参考文献:

- [1] KIM N J. Critical assessment 6: Magnesium sheet alloys: Viable alternatives to steels[J]. *Materials Science and Technology*, 2014, 30(15): 1925-1928.
- [2] CHEN X R, LIU X, LE Q C, ZHANG M X, LIU M, ATRENS A. A comprehensive review of the development of magnesium anodes for primary batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(21): 12367-12399.
- [3] TAN J, RAMAKRISHNA S. Applications of magnesium and its alloys: A review[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(15): 6861.
- [4] GUSIEVA K, DAVIES C H J, SCULLY J R, BIRBILIS N. Corrosion of magnesium alloys: The role of alloying[J]. *International Materials Reviews*, 2015, 60(3): 169-194.
- [5] LIU W J, CAO F, CHANG L R, ZHANG Z, ZHANG J Q. Effect of rare earth element Ce and La on corrosion behavior of AM60 magnesium alloy[J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(6): 1334-1343.
- [6] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [7] ZHANG D D, PENG F, LIU X Y. Protection of magnesium alloys: From physical barrier coating to smart self-healing coating[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 853: 157010.
- [8] YIN Z Z, QI W C, ZENG R C, CHEN X B, GU C D, GUAN S K, ZHENG Y F. Advances in coatings on biodegradable magnesium alloys[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(1): 42-65.
- [9] LI Z J, REN Q H, WANG X X, KUANG Q, JI D B, YUAN R X, JIN X Y. Effect of phosphate additive on the morphology and anti-corrosion performance of plasma electrolytic oxidation coatings on magnesium-lithium alloy[J]. *Corrosion Science*, 2019, 157: 295-304.
- [10] XI G Q, ZHAO X H, MA Y L, MOU Y, XIONG J, MA K, WANG J F. Comparative study on corrosion behavior and mechanism of as-cast Mg-Zn-Y and Mg-Zn-Gd alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2023, 36: 310-322.
- [11] LI C Q, DENG B B, DONG L J, SHI B Q, DONG Y, PENG F, ZHANG Z R. Effect of Zn addition on the corrosion behaviors of as-cast BCC Mg-11Li based alloys in NaCl solution[J]. *Materials & Design*, 2022, 221: 111019.
- [12] BAHMANI A, ARTHANARI S, SEON S K. Corrosion behavior of Mg-Mn-Ca alloy: Influences of Al, Sn and Zn[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, 7(1): 38-46.
- [13] LI M X, WANG C, LI Y J, WANG D W, ZHA M, GAO Y P, WANG H Y. Tailoring the microstructure and enhancing the corrosion resistance of extruded dilute Mg-0.6Al-0.5Mn-0.25Ca alloy by adding trace Ce[J]. *Corrosion Science*, 2022, 207: 110605.
- [14] MERT F, BLAWERT C, KAINER K U, HROT N. Influence of cerium additions on the corrosion behaviour of high pressure die cast AM50 alloy[J]. *Corrosion Science*, 2012, 65: 145-151.
- [15] ZHANG J H, LENG Z, ZHANG M L, MENG J, WU R Z. Effect of Ce on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of high-pressure die-cast Mg-4Al-based alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(3): 1069-1078.
- [16] SONG G L, ATRENS A, STJOHN D. An hydrogen evolution method for the estimation of the corrosion rate of magnesium alloys [M]//MATHAUDHU S N, LUO A A, NEELAMEGGHAM N R, NYBERG E A, SILLEKENS W H. *Essential Readings in Magnesium Technology*. Cham: Springer, 2016: 565-572.
- [17] WANG X G, LYU X, LIU T, GAO Y Y, JIANG B, DENG K K, LI W L. Corrosion behavior and discharge properties of Al-doped Mg-Sn alloys for high performance Mg-air batteries[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 303: 127757.
- [18] LI Q, XIONG W, YU M H, LI J, LIU L, ZHU G, WANG L Y, WANG J, YU S R, LIU E Y. Effect of Ce content on performance of AZ31 magnesium alloy anode in air battery[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 891: 161914.
- [19] ZHANG C L, ZHANG F, SONG L, ZENG R C, LI S Q, HAN E H. Corrosion resistance of a superhydrophobic surface on micro-arc oxidation coated Mg-Li-Ca alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 728: 815-826.
- [20] WANG N G, WANG R C, PENG C Q, FENG Y, CHEN B. Effect of hot rolling and subsequent annealing on electrochemical discharge behavior of AP65 magnesium alloy as anode for seawater activated battery[J]. *Corrosion Science*, 2012, 64: 17-27.
- [21] HE M F, LIU L, WU Y T, TANG Z X, HU W B. Corrosion properties of surface-modified AZ91D magnesium alloy[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(12): 3267-3273.
- [22] LI J R, WAN K, JIANG Q T, SUN H Y, LI Y T, HOU B R, ZHU L W, LIU M. Corrosion and discharge behaviors of Mg-Al-Zn and Mg-Al-Zn-In alloys as anode materials[J]. *Metals*, 2016, 6(3): 65.
- [23] FENG Y, LEI G, HE Y Q, WANG R C, WANG X F. Discharge performance of Mg-Al-Pb-La anode for Mg-air battery[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(11): 2274-

- 2286.
- [24] LIU X, LIU S Z, XUE J L. Discharge performance of the magnesium anodes with different phase constitutions for Mg-air batteries[J]. Journal of Power Sources, 2018, 396: 667-674.
- [25] WANG Z B, HU H X, LIU C B, ZHENG Y G. The effect of fluoride ions on the corrosion behavior of pure titanium in 0.05M sulfuric acid[J]. Electrochimica Acta, 2014, 135: 526-535.
- [26] CHENG X R, ZOU Q, LE Q C, NING S C, HU C L, LI X Q, AYRENS A. Two distinct roles of Al_2Sm and $Al_{11}Sm_3$ phases on the corrosion behavior of the magnesium alloy Mg-5Sm-xAl [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2021, 31(4): 599-608.