

稀土铒、铈改性 AZ91 镁合金应力腐蚀行为研究^{*}

宋雨来^{1†}, 王震¹, 刘耀辉¹, 瞿庆祥¹, 杨淼²

(1. 吉林大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 北华大学 工程训练中心, 吉林 吉林 132021)

摘要:通过金属型浇铸方法制备稀土铒(Er)、铈(Ce)改性 AZ91 镁合金(AZErCe). 采用慢应变速率拉伸(SSRT)试验、动电位极化测试、X射线光电子谱(XPS)、扫描电镜(SEM)以及X射线衍射(XRD)等方法研究 Er、Ce 对 AZ91 镁合金显微组织以及在含 Cl⁻ 湿大气下应力腐蚀开裂(SCC)行为的影响. 结果表明, 稀土 Er、Ce 添加后, β -Mg₁₇Al₁₂ 相由不连续网状分布转变为细小的弥散岛状分布, 并生成 Al₃Er 和 Al₁₁Ce₃ 金属间化合物, 减少 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的体积分数; 通过抑制 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的阴极作用, 提高表面膜的致密性, 改善合金抗局部腐蚀性能, 阻滞裂纹的萌生、扩展以及弱化氢脆的影响, Er、Ce 极大提高了 AZ91 镁合金的抗应力腐蚀性能, 合金的应力腐蚀断口由脆性解理断裂转变为准解理断裂, 且断口边缘局部腐蚀程度大大减轻.

关键词:镁合金; 铒; 铈; 应力腐蚀开裂; 断口形貌

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Research on Stress Corrosion Behavior of AZ91 Magnesium Alloy Modified by Erbium and Cerium

SONG Yulai^{1†}, WANG Zhen¹, LIU Yaohui¹, QU Qingxiang¹, YANG Miao²

(1. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Engineering Training Center, Beihua University, Jilin 132021, China)

Abstract: AZ91 magnesium alloys modified by erbium (Er) and cerium (Ce) (AZErCe) were fabricated by casting into metal mold. The effect of Er and Ce on the microstructure and stress corrosion cracking (SCC) behavior of AZ91 in Cl⁻ containing moist atmosphere was investigated by slow strain rate tensile (SSRT) tests, potentiodynamic polarization analysis, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results showed that the β -Mg₁₇Al₁₂ phase was transformed from discontinuous network into small island distribution and dispersed homogeneously after the addition of Er and Ce, and the formation of Al₃Er and Al₁₁Ce₃ intermetallic compounds reduced the volume fraction of β -Mg₁₇Al₁₂ phase. The addition of Er and Ce greatly improved the SCC resistance, because the local corrosion resistance of AZErCe was improved by alleviating the cathodic effect of β -Mg₁₇Al₁₂ phase and improving the compactness of the surface films. As a result, the processes of initiation and expansion of cracks were suppressed and the influence of hydrogen embrittlement on SCC resistance was

^{*} 收稿日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50901035), National Natural Science Foundation of China(50901035); 吉林省自然科学基金资助项目(20140101051JC), National Natural Science Foundation of Jilin Province (20140101051JC)

作者简介: 宋雨来(1974-), 男, 吉林长春人, 吉林大学副教授, 工学博士

[†] 通讯联系人, E-mail: ylsong@jlu.edu.cn

weakened. The fractography of SCC was changed from brittle cleavage fracture into quasi-cleavage fracture, and the local corrosion at the edge of fracture surfaces was greatly alleviated.

Key words: magnesium alloy; erbium; cerium; stress corrosion cracking; fracture morphology

镁合金作为现阶段最轻的金属工程结构材料,具有密度低、比强度高、阻尼性能好以及抗电磁波干扰能力强等诸多优点,被广泛应用于航天、汽车、电子、通讯等领域^[1-2]. 其中, AZ91 合金因其良好的强度、塑性和铸造性能,可用于制造任何形式的部件。但是,镁合金的自腐蚀电位较低,化学性质较为活泼,氧化膜大多比较疏松,在外加应力和腐蚀环境下极易发生应力腐蚀开裂(SCC),尤其是含 Al 和 Zn 元素的镁合金对应力腐蚀非常敏感,严重限制了其在工业领域的应用^[2]。

近年来,研究表明稀土元素可以有效提高镁合金的抗应力腐蚀性能^[3-4]. 适量稀土元素的添加不仅可以改善镁合金的力学性能,还能通过提高镁合金表面膜的稳定性,改变第二相的形态和分布,生成稀土化合物等途径,提高镁合金的耐腐蚀性能,降低镁合金的应力腐蚀敏感性. 如 Padekar 等^[3]将含稀土的 EV31A 镁合金与不含稀土的 AZ91E 镁合金进行对比,分别在甘油、蒸馏水、0.01 M 和 0.1 M NaCl 饱和 Mg(OH)₂ 溶液中进行慢应变速率拉伸试验,发现 EV31A 镁合金的应力腐蚀敏感性明显低于 AZ91E 镁合金,实验进一步发现, EV31A 合金表面膜中稀土氧化物的存在提高了其应力腐蚀抗力。

Rosalbino 等^[5]认为铒(Er)能够与 Mg-Al-Er 合金表面膜中的 Mg(OH)₂ 晶格相结合,使表面膜更加稳定; Mert 等^[6]研究发现铈(Ce)的添加可以减少 AM50 压铸镁合金中 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的数量,并形成了 Al₁₁Ce₃ 金属间化合物,同时减少了杂质含量,提高合金的耐腐蚀性能. 而通过稀土 Er、Ce 改性 Mg-Al 合金的应力腐蚀行为研究还比较少见. 基于此,本实验采用慢应变速率拉伸(SSRT)试验的方法,研究稀土 Er、Ce 改性 AZ91 镁合金在含 Cl⁻ 湿大气下应力腐蚀开裂行为,为新型耐应力腐蚀镁合金的研发提供可行性参考。

1 试验方法

本研究在商用 AZ91 镁合金的基础上,通过添加适量稀土元素 Er(0.5%, 质量分数)、Ce(0.1%, 0.2%, 0.3%) 制备稀土改性 AZ91 合金,定义为

AZErCe. 熔炼过程中,先使电阻炉的温度逐步稳定上升到 680 °C,适当保温,待等静压石墨坩埚内的 AZ91 镁合金铸锭全部熔化后,加入适量的 Mg-Er (15% Er)、Mg-Ce(15% Ce) 中间合金,继续逐步升温至 720 °C,保温 15 min. 熔炼全程通入 CO₂ + SF₆ 混合气体进行熔体保护,防止镁合金熔体氧化燃烧. 合金熔化后,扒渣、静置,然后浇注到金属模具(200 mm × 130 mm × 20 mm)中. 采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测量合金的实际化学成分,如表 1 所示。

采用 ZEISS EVO18 型扫描电镜对合金的铸态组织形貌进行观察. 采用 D/Max 2 500 PC 型 X 射线衍射仪合金的相组成进行分析,以 Cu K α 为辐射源,扫描速度 2 °/min,扫描范围 20°~80°。

采用 VersaSTAT 3 型电化学工作站对试样进行动电位极化测试. 试样工作面积为 10 mm × 10 mm,实验溶液为 3.5% NaCl 饱和 Mg(OH)₂ 溶液. 测试前先静置 20 min,待工作电极的自腐蚀电位趋于稳定后再测量. 测量时以饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极,铂电极为辅助电极,镁合金试样为工作电极,扫描速率 0.167 mV/s。

表 1 AZ91 和 AZErCe 镁合金的化学成分(质量分数,%)
Tab. 1 Chemical compositions of AZ91 and AZErCe magnesium alloys (mass fraction, %)

Alloys	Al	Zn	Mn	Er	Ce	Fe	Mg
AZ91	8.56	0.61	0.28	—	—	0.000 8	Bal.
AZErCe1	8.45	0.59	0.26	0.53	0.12	0.000 5	Bal.
AZErCe2	8.52	0.58	0.26	0.51	0.21	0.000 5	Bal.
AZErCe3	8.53	0.63	0.25	0.51	0.33	0.000 5	Bal.

采用 ESCALAB 250 型 X 射线光电子能谱仪(XPS)对在 3.5% NaCl 饱和 Mg(OH)₂ 溶液中浸泡 48 h 的 AZErCe3 合金的腐蚀产物膜成分进行检测. 其中, AlK α 为激发源,分析点面积 500 μ m²,工作电压 15 kV,功率 150 W。

利用 RWS10 型慢拉伸应力腐蚀试验机研究合金的应力腐蚀开裂行为,应变速率 10⁻⁶/s. 应力腐蚀拉伸试样尺寸如图 1 所示. 实验开始前先用 2 000 # SiC 砂纸打磨试样工作区表面,去除表面氧化膜,再用酒精清洗,冷风干燥. 用疏松多孔的镜头纸将工

作区均匀缠绕,其余部分用特氟龙胶带密封,采用灯芯引流法将溶液引到工作区,形成均匀的薄液膜层,用来模拟湿大气.薄液膜的成分为3.5% NaCl饱和Mg(OH)₂溶液.为确保实验数据的可靠性,在空气和湿大气两种实验条件下,每种合金进行三组平行实验.实验结束后用200 g/L CrO₃ + 10 g/L AgNO₃溶液清洗断口,并采用扫描电镜对断口形貌进行观察.

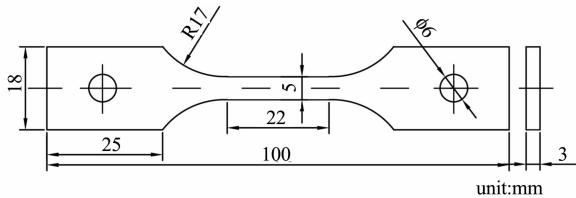


图1 AZ91和AZErCe镁合金应力腐蚀拉伸试样
Fig.1 Tensile specimen of AZ91 and AZErCe magnesium alloys used for SSRT

2 结果与讨论

2.1 显微组织

铸态AZ91以及AZErCe合金的显微组织如图2所示. AZ91合金组织主要由初生 α -Mg相,共晶 α -Mg和 β -Mg₁₇Al₁₂相组成.粗大的 β -Mg₁₇Al₁₂相主要呈不连续网状分布在初生 α -Mg晶界上(图2(a)).加入稀土Er、Ce后, β -Mg₁₇Al₁₂相呈弥散的岛状分布,且数量减少,体积变小.除此之外,合金组织中还出现少量针状化合物和白亮的粒状化合物,且随着Ce含量的增加,针状化合物的数量也明显增加(图2(b)~(d)).由XRD谱图(图3)可知,白亮的粒状化合物为Al₃Er金属间化合物,针状化合物为Al₁₁Ce₃金属间化合物,但并未发现Al-Er-Ce三元化合物的存在.

当AZ91镁合金加入稀土元素Er、Ce后,由于稀土元素能够抑制Al在晶界的偏聚,再加上稀土元素与铝的电负性差值(0.4)大于稀土与镁的电负性差值(0.1),因此稀土原子优先与铝形成稀土化合物,使得晶界处的Al含量大幅度减少,导致 β -Mg₁₇Al₁₂相数量减少^[7].同时,稀土Ce在合金液相与 β 晶粒之间形成表面活性膜,抑制 β -Mg₁₇Al₁₂相的长大,从而细化了AZErCe合金中的 β -Mg₁₇Al₁₂相.

2.2 腐蚀产物膜分析

AZErCe3合金腐蚀产物XPS分析结果如图4所示.从全谱图(图4(a))可以看出,腐蚀产物膜含有Mg、Al、Er、O、C等元素,但没有发现Ce元素的存在,可能是因其含量低,无法检测出来,C元素

的存在可能是由于样品表面污染所致.对Mg、Al、Er元素进行窄扫描(图4(b)~(d))后,发现合金的腐蚀产物主要由Mg(OH)₂、Al(OH)₃以及少量的稀土氧化物Er₂O₃组成,稀土Ce由于含量少的缘故,并未检测到,但在我们以前的研究工作^[8]中发现稀土Ce以CeO₂的形式存在于Ce改性AZ91合金的腐蚀产物膜中.而对于AZ91合金,有文献指出^[9]在3.5% NaCl溶液中其腐蚀产物主要由Mg(OH)₂和少量的Mg-Al氧化物组成.由于Er元素的P-B比大于1,稀土氧化物的存在提高了表面膜的致密性和稳定性,可以有效地机械隔离腐蚀介质,降低镁合金的溶解速度,提高合金的耐蚀性.

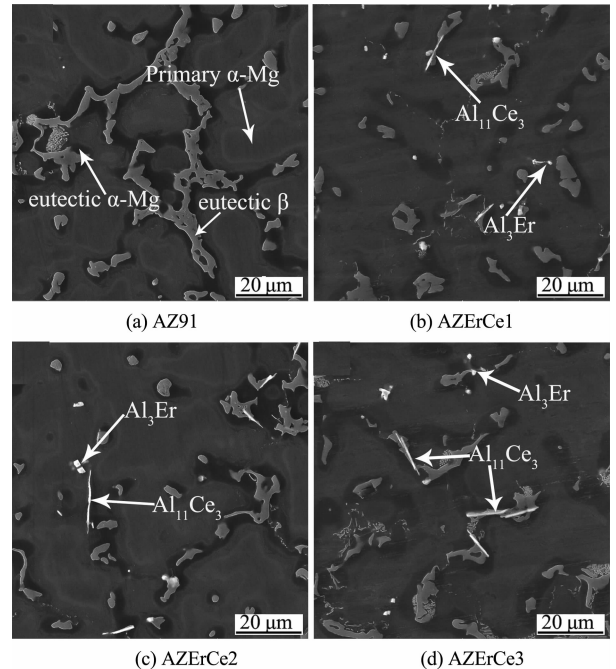


图2 合金铸态组织形貌

Fig.2 SEM micrographs of the as-cast microstructures of investigated alloys

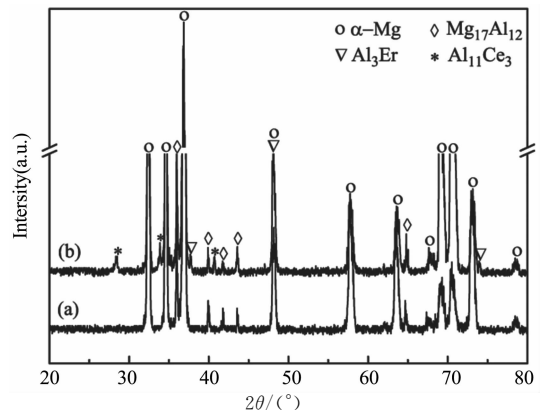


图3 铸态合金的X射线衍射谱(a) AZ91;(b) AZErCe3

Fig.3 XRD patterns from as-cast (a) AZ91;(b) AZErCe3

2.3 极化曲线

AZ91 和 AZErCe 合金在 3.5% NaCl 饱和 Mg(OH)₂ 溶液中的极化曲线如图 5 所示. 可以看出, 四种合金极化曲线的形状差别不大, 阳极支与阴极支并不对称, 阳极支电流密度对数的斜率明显大于阴极支. 另外, 与 AZ91 合金相比, AZErCe 合金

的自腐蚀电位正移, 其中, AZErCe3 合金的自腐蚀电位最高, 约为 -1.36 eV. 同时, 无论是极化曲线的阳极部分还是阴极部分, AZErCe 合金的腐蚀电流密度都相对较低. 说明 Er、Ce 能抑制 AZ91 合金的阴极过程, 降低合金的阳极溶解速度.

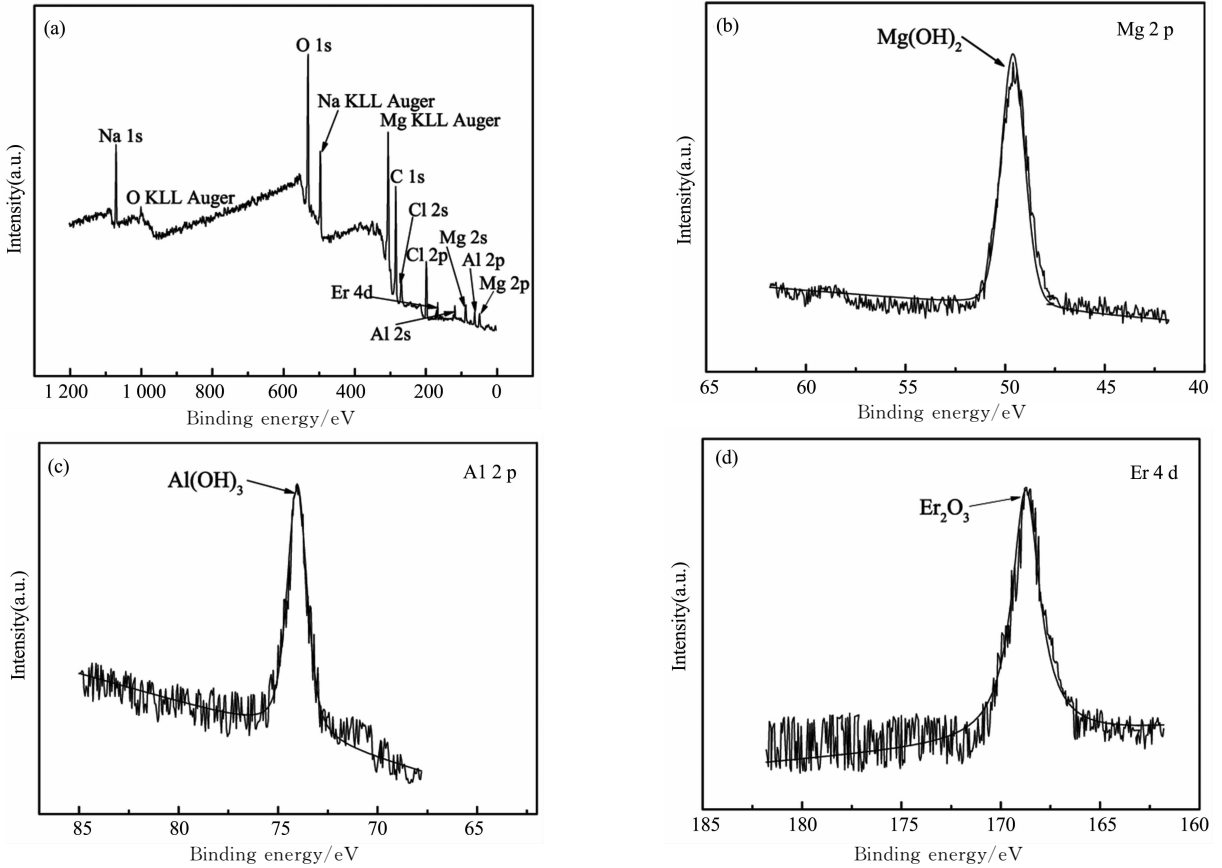


图 4 AZErCe3 合金在 3.5% NaCl 饱和 Mg(OH)₂ 溶液中形成的腐蚀产物膜 XPS 分析

Fig. 4 XPS analysis of the surface film formed on AZErCe3 alloy immersed in 3.5% NaCl solution saturated with Mg(OH)₂

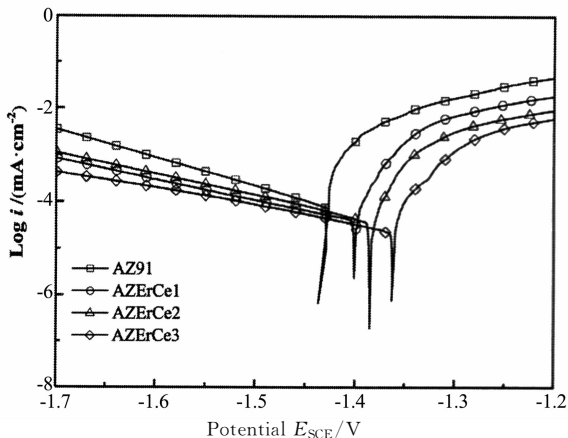


图 5 AZ91 和 AZErCe 合金在 3.5% NaCl 饱和和 Mg(OH)₂ 溶液中的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of the AZ91 and AZErCe alloys tested in 3.5% NaCl solution saturated with Mg(OH)₂

分析认为, 在 AZ91 镁合金的铸态显微组织中, 粗大的 β -Mg₁₇Al₁₂ 相不连续分布在 α -Mg 相周围, 由于 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的电极电位相对较高, 可以充当有效的阴极相, 加速基体的微电偶腐蚀. 而在 AZErCe 合金中, 稀土 Er、Ce 细化了合金组织, β -Mg₁₇Al₁₂ 相呈细小孤立的岛状均匀分布在 α -Mg 相周围, 部分 Al 原子与 Er、Ce 分别形成 Al₃Er 和 Al₁₁Ce₃ 金属间化合物, 这在一定程度上降低了 β -Mg₁₇Al₁₂ 相的体积分数, 从而降低阴阳极面积比, 弱化了 β -Mg₁₇Al₁₂ 对 α -Mg 相的微电偶腐蚀作用. 同时, 稀土氧化物的存在提高了 AZErCe 合金表面膜的稳定性和致密性. 因此, 稀土 Er、Ce 通过改变 AZ91 合金的微观组织和表面膜的成分, 可以有效提高耐腐蚀性能.

2.4 慢应变速率拉伸试验

AZ91 和 AZErCe 镁合金在空气(惰性介质)、含 Cl^- 湿大气(腐蚀介质)下发生应力腐蚀开裂过程中的最大应力(UTS),断后延伸率(ϵ_f)如表 2 所示.由此可见,在两种实验条件下,稀土 Er、Ce 添加后,合金的力学性能显著提高,且随着 Ce 含量的增加,合金的力学性能也逐渐增强,其中,AZErCe3 合金的力学性能最优.为了定量分析合金的应力腐蚀敏感性,采用应力腐蚀敏感性指数(I_{SCC})来度量应力腐蚀敏感性的大小,该数值越大,合金越容易发生应力腐蚀.定义如下^[2]:

$$I_{\text{SCC}} = \frac{\text{UTS}_{\text{air}} - \text{UTS}_{\text{SCC}}}{\text{UTS}_{\text{air}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$I_{\text{SCC}} = \frac{\epsilon_{\text{air}} - \epsilon_{\text{SCC}}}{\epsilon_{\text{air}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: UTS_{air} 、 UTS_{SCC} 分别为空气和湿大气下断裂过程中的最大应力; ϵ_{air} 、 ϵ_{SCC} 分别为空气和湿大气下的断后延伸率. AZ91 和 AZErCe 合金的应力腐蚀敏感性指数如图 6 所示.可以看出,稀土 Er、Ce 添加后,合金的应力腐蚀敏感性指数总体呈下降趋势,表明稀土 Er、Ce 可以有效降低 AZ91 镁合金的应力腐蚀敏感性.

表 2 AZ91 和 AZErCe 合金慢应变速率拉伸力学性能
Tab. 2 Summary of the mechanical properties of AZ91 and AZErCe alloys from SSRT tests

Alloys	UTS/MPa		$\epsilon_f/\%$	
	Air	MA	Air	MA
AZ91	157.1±4.7	86.7±3.1	9.1±0.3	3.5±0.2
AZErCe1	192.5±4.3	130.2±2.9	9.6±0.2	4.4±0.1
AZErCe2	196.7±2.5	136.1±4.0	10.0±0.2	4.6±0.2
AZErCe3	202.0±3.4	140.5±2.6	10.3±0.3	4.8±0.1

MA: chloride-containing moist atmosphere.

分析认为,当 AZ91 合金暴露在含 Cl^- 湿大气下时, Cl^- 可以穿过表面膜与 Mg^{2+} 相互作用,生成可溶性 MgCl_2 ,在外加应力与 Cl^- 的协同作用下,表面膜局部被破坏,裸露的金属基体和未破损的表面膜分别作为电化学反应中的阳极和阴极,形成小阳极、大阴极的腐蚀电池,加速阳极腐蚀的进行,在合金表面生成点蚀坑,形成裂纹源^[3],由于裂纹尖端存在应力集中,氧化膜不断被破坏,因此,裂尖不断发生阳极溶解,导致应力腐蚀裂纹的扩展,当裂纹扩展到临界尺寸时,最终发生机械断裂.同时,呈不连续网状分布的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相相对于 $\alpha\text{-Mg}$ 相为阴极相,可以通过微电偶腐蚀效应加速 $\alpha\text{-Mg}$ 相的腐蚀;腐蚀过程中产生的 H 吸附于裂纹尖端,降低了金属原子间结合力,当局部应力大于因氢吸附而降低的原子间结合力时,便发生氢致开裂^[10].对于 AZErCe 合金而言,稀土 Er、Ce 添加后,不仅能与熔

体中的杂质反应,净化合金液,还能减小 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的尺寸、降低其体积分,进而使镁合金微电偶腐蚀的阴极面积减小,腐蚀速度降低,裂纹源萌生数量减少,裂纹扩展速率下降,同时使得极化电流密度增大,阴极过程受到阻滞^[7],降低了 H 浓度.另一方面,稀土元素与氧在合金表面反应生成稀土氧化物,使表面膜更加稳定,可以起到钝化膜的作用.以上这些因素都将有效提高 AZErCe 合金的应力腐蚀抗力.

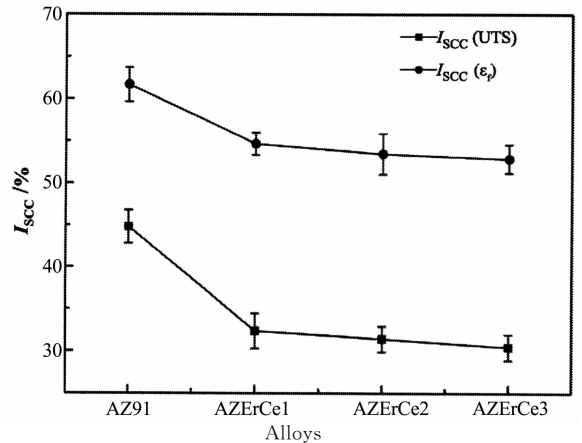


图 6 AZ91 和 AZErCe 合金应力腐蚀敏感性指数
Fig. 6 Evolution of SCC susceptibility index of AZ91 and AZErCe alloys

2.5 断口形貌

AZ91 和 AZErCe3 合金的断口形貌如图 7 所示.在空气中慢拉伸时,由于 AZ91 合金为密排六方(hcp)结构,合金塑性较差,断口由高度不同的解理小台阶、撕裂棱和一些微小的韧窝组成(图 7(a)).加入稀土 Er、Ce 后,AZErCe3 合金的断口总体上仍表现为准解理断裂(图 7(b)),但与 AZ91 合金断口相比,撕裂棱尺寸减小,韧窝数量增多.说明稀土 Er、Ce 具有细化晶粒,提高合金塑性的作用,慢应变速率拉伸试验中观察到 AZErCe 合金在空气中的延伸率高于 AZ91 合金与该分析结果相一致.

在含 Cl^- 的湿大气下进行慢拉伸时,AZ91 合金断口表现为典型的脆性解理断裂:断口显示出清晰的解理面和河流花样,断面上的二次裂纹以穿晶方式扩展(图 7(c)箭头所示).有文献指出^[11]解理面的形成与氢脆有关,镁合金晶格中固溶的 H 可导致发生解理断裂.而且断口边缘发生严重的局部腐蚀(图 7(e)矩形框所示),在拉伸过程中,腐蚀坑处产生应力集中,裂纹在该区域萌生,并以穿晶的方式扩展.稀土 Er、Ce 添加后,断口上二次裂纹的数量明显少于 AZ91 合金的断口,断口偏准解理断裂,由高低不同的解理小平面和少量韧窝组成(图 7(d)).而且,与 AZ91 合金断口相比,AZErCe3 合金断口边

缘的腐蚀程度减轻,腐蚀坑数量减少(图 7(f)矩形框所示)。

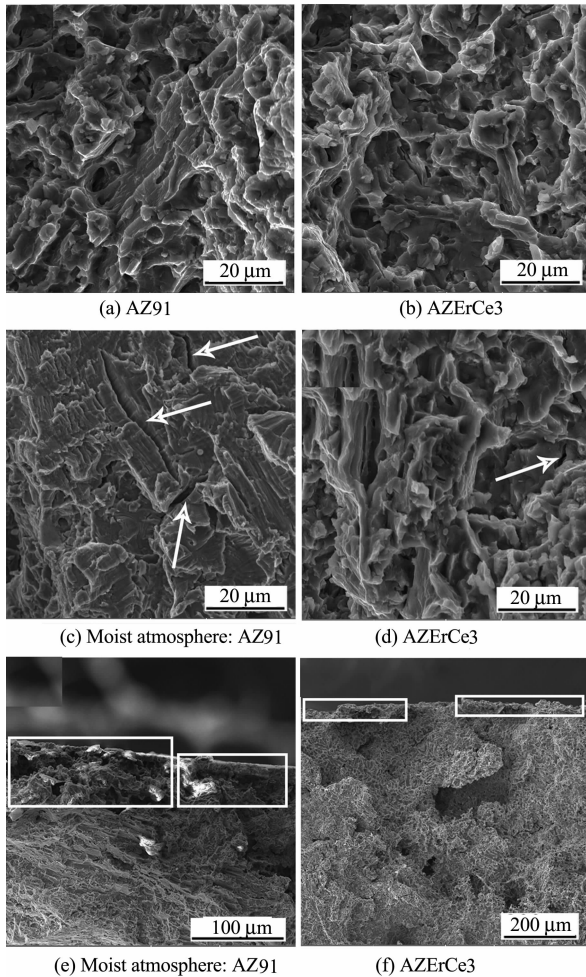


图7 AZ91和AZErCe3合金慢应变速率拉伸断口形貌
Fig. 7 Fracture morphologies of the AZ91 and AZErCe3 alloy

3 结论

1) AZ91 镁合金添加稀土 Er、Ce 后,合金的微观组织得到细化,粗大的 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相由不连续网状分布变为细小的弥散岛状分布.生成针状的 $Al_{11}Ce_3$ 和白亮颗粒状的 Al_3Er 金属间化合物,降低了 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相的体积分数。

2) 稀土 Er、Ce 提高 AZ91 合金耐蚀性的原理主要在于:腐蚀产物膜中稀土氧化物的存在提高了表面膜的稳定性与致密性;改变合金的微观组织,抑制了 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相的阴极作用,提高合金的抗腐蚀性能。

3) 在含 Cl^- 的湿大气环境下,稀土 Er、Ce 可以有效降低 AZ91 合金的应力腐蚀敏感性.主要是由于通过稀土元素改变了合金的微观组织和表面膜的成分,进而提高合金抗局部腐蚀性能,表面腐蚀坑数量减少,使

得裂纹萌生源数量减少,裂纹扩展速率均降低,提高了 AZErCe 合金的抗应力腐蚀性能.同时,稀土 Er、Ce 的加入使合金的阴极反应过程受到阻滞,降低 H 浓度,这在一定程度上弱化了氢脆的影响。

4) 稀土 Er、Ce 添加后,合金的应力腐蚀断口由脆性解理断裂转变为解理断裂,且断口边缘的腐蚀坑数量减少,局部腐蚀程度减轻。

参考文献

- [1] ATRENS A, SONG G -L, LIU M, *et al.* Review of recent development in the filed of magnesium corrosion[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(4): 400-453.
- [2] WINTER N, ATRENS A, SONG G -L, *et al.* A critical review of the stress corrosion cracking (SCC) of magnesium alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2005, 7(8): 659-693.
- [3] PADEKAR B S, SINGH RAMAN R K, RAJA V S, *et al.* Stress corrosion cracking of a recent rare-earth containing magnesium alloy, EV31A, and a common Al-containing alloy, AZ91E[J]. *Corrosion Science*, 2013, 71(6): 1-9.
- [4] BOBBY KANNAN M, DIETZEL W, BLAWERTI C, *et al.* Stress corrosion cracking of rare-earth containing magnesium alloys ZE41, QE22 and Elektron 21 (EV31A) compared with AZ80[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 480(1): 529-539.
- [5] ROSALBINO F, ANGELINI E, DE NEGRI S, *et al.* Effect of erbium addition behaviour of Mg-Al alloys[J]. *Intermetallics*, 2005, 13: 55-60.
- [6] MERT F, BLAWERT C, KAINER K U, *et al.* Influence of cerium additions on the corrosion behaviour of high pressure die cast AM50 alloy[J]. *Corrosion Science*, 2012, 65(2): 145-151.
- [7] 刘贵立. 稀土对镁合金应力腐蚀影响电子理论研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(12): 6570-6573.
LIU G L. Electronic theoretical study on the influence of rare earth on the stress corrosion in magnesium alloy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(12): 6570-6573. (In Chinese)
- [8] SONG Y L, LIU Y H, WANG S H, *et al.* Effect of cerium addition on microstructure and corrosion resistance of die cast AZ91 magnesium alloy[J]. *Materials and Corrosion*, 2007, 58(3): 189-192.
- [9] AMBAT R, AUNG N, ZHOU W. Evaluation of microstructural effects on corrosion behaviour of AZ91D magnesium alloy [J]. *Corrosion Science*, 2000, 42(8): 1433-1455.
- [10] MOODY N R, THOMPSON A W, RICKER R E, *et al.* Hydrogen effects on materials behavior and corrosion deformation interactions [M]. USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2003: 449-466.
- [11] BOBBY KANNAN M, DIETZEL W. Pitting-induced hydrogen embrittlement of magnesium-aluminum alloy[J]. *Materials and Design*, 2012, 42: 321-326.