

ZK60-1Nd 镁合金的组织结构及腐蚀行为

褚旭, 王忠军, 张涛, 王冬晓, 王洪斌

(辽宁科技大学, 辽宁鞍山 114051)

摘要: 通过扫描电镜 (SEM), X 射线衍射仪 (XRD), 电化学工作站和盐水浸泡失重法研究了 ZK60-1Nd 镁合金的组织结构及在 3.5% (质量分数) NaCl 水溶液中的腐蚀行为。结果表明: ZK60-1Nd 镁合金主要由基体 α -Mg 相, 沿晶界分布的含有稀土元素 Nd 的粗大网状 MgZn₂ 相组成。ZK60-1Nd 镁合金在 3.5% 的 NaCl 水溶液中的腐蚀速率为 0.2 mg·cm⁻²·h⁻¹; 经过 400 °C 保温 96 h 后, 部分共晶相熔断成尺寸约为 0.5 μ m 的颗粒, 腐蚀速率降低到 0.1 mg·cm⁻²·h⁻¹; 经过 500 °C 保温 8.0 h, 网状共晶相熔化成分散块状, 基体中细小棒状 MgZn₂ 相溶解消失, Nd, Zn 和 Zr 元素在基体中含量增加且分布均匀, 腐蚀速率达到最低, 为 0.03 mg·cm⁻²·h⁻¹。其耐蚀性能改善的主要原因为 α -Mg 基体中固溶态 Nd 元素含量的增加导致合金自腐蚀电位提高以及基体 α -Mg 中腐蚀微电偶数目的减少。

关键词: ZK60-1Nd; 镁合金; 均匀化; 组织; 腐蚀

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)05-1429-08

镁合金由于密度小, 比强度高, 导热率高, 减震性能好, 易于机械加工和回收利用等优点引起了工业界和学术界的广泛研究兴趣^[1-3]。因此, 镁合金被誉为“21 世纪最有前途的绿色工程金属材料”^[4]。ZK60 镁合金具有较高的 Zn 含量, 可热处理强化, 是 Mg-Zn-Zr 系合金中强度最高的变形镁合金。然而, ZK60 镁合金中的 Zn 含量较高, 易于发生显微偏析和疏松, 因此, ZK60 镁合金必须采取长时间均匀化热处理和随后的热变形才能投入商业应用, 且其与其它商业牌号镁合金(例如 AZ 系列的 Mg-Al-Zn-Mn 系变形镁合金)相比较, 表现出焊接性能和耐蚀性能差等缺点, 使得其在现代工业中的规模化应用受到严重制约^[5-7]。文献表明^[8-12]: 在 ZK60 镁合金中加入稀土元素 Gd、Y、Ce、Er、Yb、Dy 等可以改善该种镁合金的焊接性能、耐蚀性能以及力学性能。

侯志丹^[13]研究了 Nd 对 ZK60 腐蚀性能的影响, 表明当 Nd 的添加量为 1.0% 时可明显提高 ZK60 合金在 NaCl 水溶液中的耐蚀性能, 其腐蚀速率最低可达到 ZK60 镁合金的 1/3。许春香等人^[14]在 Mg-5.5Zn-0.6Zr 合金中混合添加稀土 Yb 和 Nd, 发现有新相 γ (Mg, Nd) Zn₂ 相或者 γ (Mg, Yb) Zn₂ 相生成, 并且合金的热稳定性能得到提高。然而, 国内外对不同退火处理状态下的 ZK60-1Nd 镁合金的组织结构和腐蚀行为尚缺乏系统的研究。因此, 本课题针

对不同退火处理状态下的 ZK60-1Nd 镁合金组织结构变化以及在 3.5% NaCl 水溶液的腐蚀行为做系统的研究, 为该种镁合金的实际应用提供理论依据。

1 实验

实验所用材料为本课题组自制的 ZK60-1Nd 镁合金铸锭, 直径为 Φ 50 mm, 试验合金名义化学成分见表 1。

将合金铸锭采用线切割切成 10 mm×10 mm×10 mm 块状试样。分别在 300, 400, 500 °C 下进行退火处理, 处理时间为 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 h。同时, 为了研究合金在极限条件下的组织结构与性能的变化情况, 又将试样在 400 °C 下继续保温了 16, 24, 48, 72, 96 h 和在 500 °C 下继续保温了 10, 16, 24 h。试样采用箱式电阻炉进行加热, 将试样用锡纸包裹严实放入坩埚内, 并覆盖上细沙来隔绝氧气。试样经 240#~3000# 水砂纸逐级打磨和抛光机抛光, 并采用 5.0 g 苦味酸+5.0 g 乙酸+100 mL 无水乙醇+10 mL 蒸馏水腐蚀, 腐蚀时间在 10 s 左右。用附带能谱(EDS)的扫描电子显微镜 (SEM) 对试样进行显微组织观察

表 1 ZK60-1Nd 合金的名义化学成分

Table 1 Chemical composition of ZK60-1Nd alloy (ω /%)

Zn	Zr	Nd	Mg
6.0	0.5	1.0	Balance

收稿日期: 2017-07-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51374128)

作者简介: 褚旭, 男, 1992 年生, 硕士生, 辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁鞍山 114051, 电话: 0412-5929535, E-mail: 775364314@qq.com

和成分分析。将试样悬挂在测试溶液中，对试样进行极化曲线测试（扫描范围-2.0~-1.0 V，扫描速度为 1.0 mV·s⁻¹），试样有效暴露面积均为 1.0 cm²。每一次替换样品时，溶液都替换新的溶液，以确保极化曲线测试的精准性。实验用电化学工作站采用天津艾达恒晟科技发展有限公司生产的 CHI660D 型电化学分析仪。使用电极体系：辅助电极为铂电极；参比电极为饱和甘汞电极；工作电极为 ZK60-1Nd 合金试样。测试所用溶液为 NaCl 溶液，浓度为 0.3 mol/L。失重腐蚀试验采用中性 NaCl 水溶液作为腐蚀介质，浓度为 3.5%，酸碱度控制在 pH=7，试验温度为(25±2) °C。将同一状态的试样分别悬挂在腐蚀介质中，浸泡时间分别为 10, 20, 30, 40, 50 h，腐蚀溶液的体积为 250 mL。用丙酮、无水乙醇清洗以清除试样表面的腐蚀产物，随后将试样吹干放在电子天平上称取试样腐蚀前后的质量。

2 结果与分析

2.1 ZK60-1Nd 合金组织

ZK60-1Nd 镁合金的 SEM 照片及 XRD 图谱如图 1 所示。由图 1a 可以看出，ZK60-1Nd 镁合金的铸态组织主要由基体 α-Mg 相和沿晶界分布的粗大网状共晶组织组成。图 1b 为图 1a 箭头 1 区域的局部放大。由图 1b 可以看出该合金基体 α-Mg 中弥散分布着大量的细小棒状物，其最大尺寸为 50 nm。对该相进行 EDS 能谱分析，得出 Mg, Zn, Nd, Zr 4 种元素的原子分数分别为：97.14%，1.32%，0.61%，0.93%，由于扫描电镜电子束斑直径大于被分析的颗粒，因此 EDS 结果中含有的 Nd 和 Zr 元素可能来自于基体 α-Mg 中，结合参考文献[15]，推断该细小棒状物为 MgZn₂ 相。图 1c 为 ZK60-1Nd 镁合金的 XRD 分析结果，图中箭头 1 所指的是未经退火处理的合金 XRD 图谱。经标定，该合金中主要相组成为 α-Mg 相和粗大网状 MgZn₂

相，该合金中含有的稀土元素 Nd 以固溶态的形式固溶到 MgZn₂ 相中，不能在 XRD 谱中以衍射峰的形式表现出来。同时合金中仅存在微量的 Zr 元素且亦未发现明显的衍射峰。箭头 2 所指为该合金经 500 °C 保温 24 h 后的 XRD 图谱。图中 MgZn₂ 相衍射峰全部消失，且出现了未知相的衍射峰，该未知相衍射峰的位置与单质 Nd 衍射峰的位置十分接近，该衍射峰可能为尚未溶解的稀土元素 Nd 导致。

图 2 为 ZK60-1Nd 镁合金 SEM 照片及合金元素分布的线扫描结果。由图 2a 可以看出，该合金中的粗大网状共晶相沿晶界连续分布，晶粒尺寸在 30~100 μm。图 2b 为沿图 2a 直线段的 Mg, Zn, Nd, Zr 4 种元素的 EDS 线扫描结果。由图 2b 可以看出，基体 α-Mg 中位于晶界附近的 Zn 和 Nd 元素的含量高于位于心部位置的含量，说明基体 α-Mg 中 Zn 和 Nd 元素的分布不均匀，合金元素存在显微偏析。这种合金元素分布不均匀的现象可能导致该合金的耐蚀性能下降^[15]。另外，通过 Zr 元素的线扫描结果可以看出，晶内 Zr 元素分布均匀，少量的 Zr 元素也存在于网状共晶相中，说明 Zr 元素也存在一定程度的偏析。

图 3a~3f 为均匀化热处理后的 ZK60-1Nd 镁合金 SEM 照片。由图 3a 可以看出，合金经 300 °C 保温 8.0 h 后，由于均匀化温度低，合金的组织结构与均匀化前相比较并没有发生变化。图 3b 为该合金经 400 °C 保温 4.0 h 后的组织。在图 3b 中发现很多深色的区域（箭头 2 所指椭圆形区域），这些区域为原来共晶相的位置，说明在此条件下该合金中粗大网状共晶相开始熔断。合金经 400 °C 保温 48 h 后（见图 3c），其共晶相进一步溶解。当均匀化时间达到 96 h 时（见图 3d），该合金晶界附近网状共晶相减少，共晶相由原来的连续分布转变为断续分布，熔断共晶相位置（箭头 3 所指圆圈区域）为暗色，在该位置处存在大量较细小的颗粒，其尺寸在 0.5 μm 左右。图 4 所示为这些颗粒

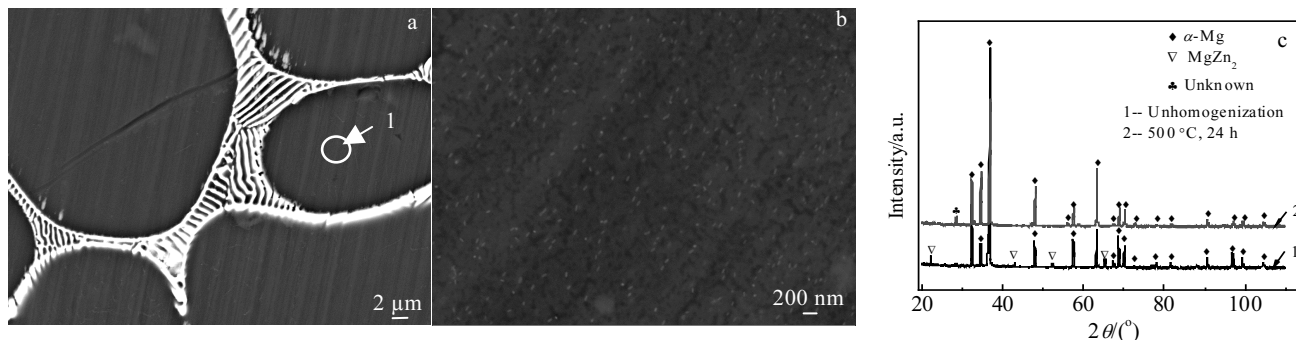


图 1 ZK60-1Nd 镁合金的 SEM 照片和 XRD 图谱

Fig.1 SEM images (a, b) and XRD patterns (c) of ZK60-1Nd magnesium alloy

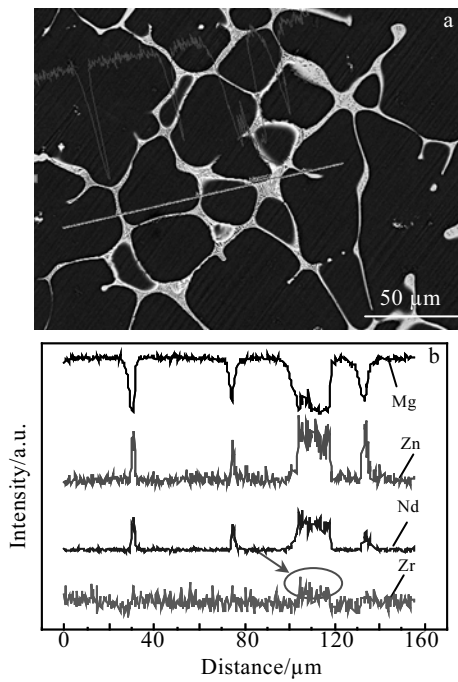


图2 均匀化前 ZK60-1Nd 镁合金的 SEM 形貌和各元素的线扫描结果

Fig.2 SEM image (a) and element line scanning (b) of ZK60-1Nd magnesium alloy before homogenization

的放大形貌及其箭头 5 所指圆圈处颗粒的 EDS 能谱分析结果的平均值。这些颗粒中 Zn 和 Nd 元素含量的比例与网状共晶相中 Zn 和 Nd 元素含量比例接近, 说明这些颗粒为尚未完全溶解而残留的共晶相颗粒, 这些颗粒的存在有可能提高该种合金基体的腐蚀速率^[16]。图 3e 为该合金经 500 °C 保温 8.0 h 后的 SEM 照片, 该合金中网状共晶相的形貌由原来的鱼骨状转变为互不相连的块状, 分布由连续分布转变为断续分布且在其基体 α -Mg 中没有发现弥散分布的颗粒, 说明图 3d 中残留的共晶相颗粒已经完全溶解。图 3f 为合金经 500 °C 保温 24 h 后的 SEM 照片, 此时该合金处于过烧状态, 该合金中只有基体 α -Mg 相和烧损残留的少量稀土元素 Nd(箭头 4 所指圆圈位置所示)。图 5 为该合金经 500 °C 保温 8.0 h 后的 Mg, Zn, Nd, Zr 4 种合金元素跨越原来共晶相位置(箭头 6 所指椭圆形暗色区域)的线扫描结果, 由图 5 可以看出, 在基体 α -Mg 中合金元素在原来共晶相存在的位置处呈现均匀分布, 这种合金元素的均匀分布有利于改善该合金的腐蚀性能。

图 6 为合金经过不同温度保温 8.0 h 后的基体内部 Nd, Zn, Zr 元素质量分数的平均值。随着均匀化温度

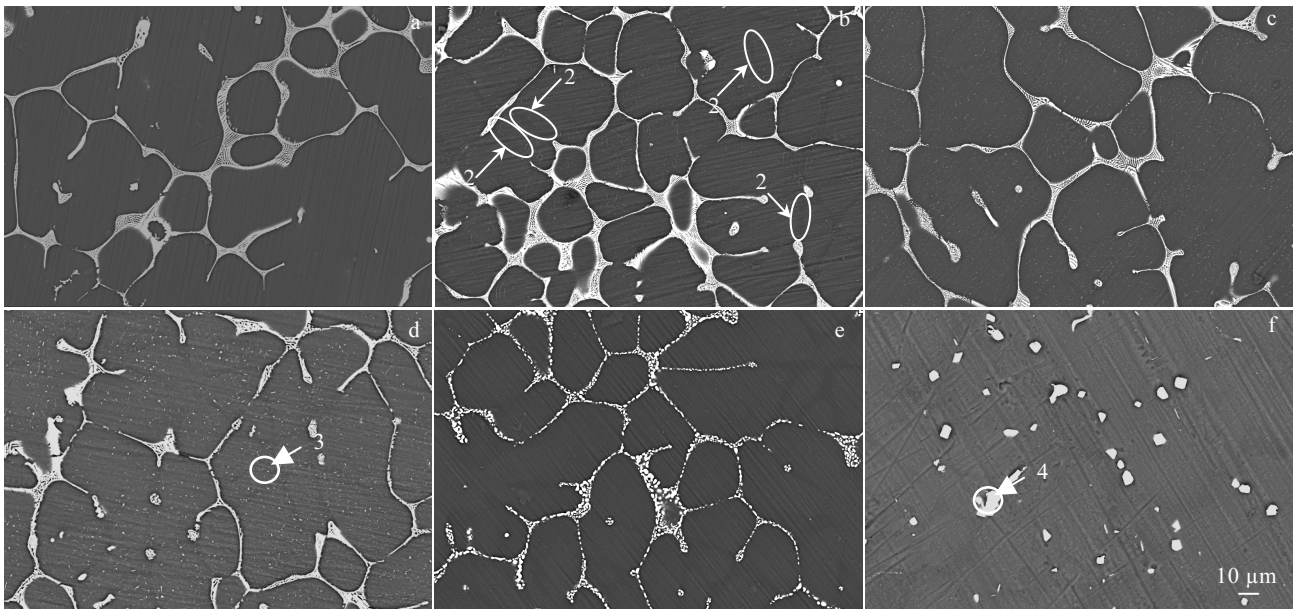


图 3 均匀化后 ZK60-1Nd 镁合金 SEM 照片

Fig.3 SEM images of ZK60-1Nd magnesium alloys after homogenization: (a) 300 °C, 8.0 h; (b) 400 °C, 6.0 h; (c) 400 °C, 48 h; (d) 400 °C, 96 h; (e) 500 °C, 8 h; (f) 500 °C, 24 h

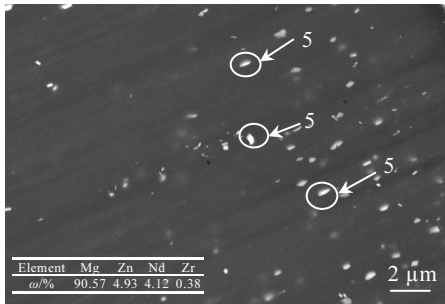


图 4 合金经 400 °C 保温 8.0 h 后的 α -Mg 基体中颗粒的 SEM 照片和能谱分析

Fig.4 SEM image of eutectic and its EDS analysis of ZK60-1Nd after homogenization at 400 °C for 8.0 h

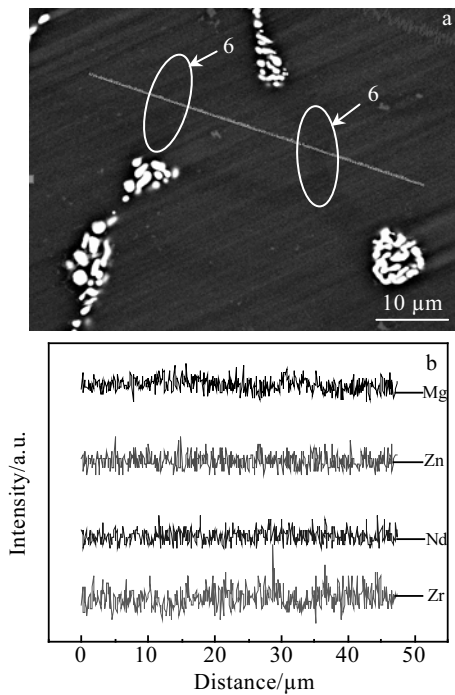


图 5 均匀化后 ZK60-1Nd 镁合金元素线扫描结果

Fig.5 Element line scanning position (a) and results (b) of ZK60-1Nd magnesium alloy after homogenization

的升高，基体内部 Zn 和 Nd 元素含量逐渐增加。根据文献[17,18]，温度是影响元素扩散的最主要的因素，所以随着温度的升高共晶相开始溶解，合金元素原子向基体扩散。镁合金基体中 Zn 含量增加会导致基体电极电位的下降；然而基体中 Nd 含量的增加会提高基体的电极电位^[19]。稀土 Nd 为表面活性元素，如果该合金基体中 Nd 含量增加有可能导致该合金腐蚀性

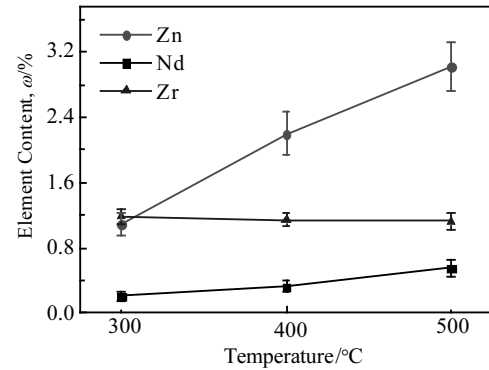


图 6 合金经不同温度保温 8 h 后 α -Mg 基体中 Zn, Nd, Zr 元素含量

Fig.6 Average content of Zn, Nd and Zr in α -Mg matrix of the alloy held at different temperatures for 8 h

能的改善。同时，Zr 元素的含量随着温度的升高没发生明显变化，其原因可能是 Zr 元素含量少，EDS 结果没有检测到其在基体内部的明显变化，因此该合金中元素 Zr 对该合金的腐蚀性能不会有明显影响。

2.2 腐蚀行为分析

Mg 合金电化学腐蚀的本质就是金属 Mg 在电解质溶液环境中构成了一个热力学不稳定的系统，腐蚀反应的发生会向着自由能减少的方向进行。在 Mg 合金中当部分合金化元素的 ΔG 比 Mg 的吉布斯自由能还要负时，那么这些金属就会被优先腐蚀，Mg 基体就会得到保护，反之亦然。本课题组利用 HSC 热分析软件计算的部分金属元素在不同温度下形成离子反应的吉布斯自由能^[20]见图 7。由图 7 可以看出， $\Delta G(\text{Zn}^{2+}) > \Delta G(\text{Mg}^{2+})$ ，说明 Mg 与 Zn 相比较，Mg 会被优先腐蚀，Zn 并没有对 α -Mg 基体起到保护作用。相反，溶解在基体中的 Nd 和 Zr 元素会对基体 α -Mg 起到保护作用，即提高基体的电极电位，有利于改善合金的耐蚀性。

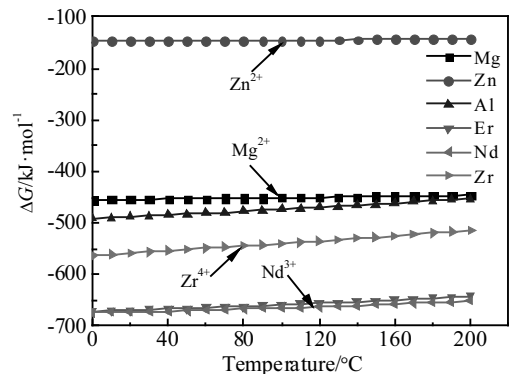


图 7 部分金属腐蚀反应的吉布斯自由能 Gibbs free energy changes of some metal in electrochemical corrosion process

图 8a-8c 分别为合金经过不同温度 (300, 400, 500 °C) 均匀化不同时间后在 3.5% NaCl 水溶液中的腐蚀速率曲线。随着浸泡时间的延长, 合金的腐蚀速率逐渐增大。由于试样在腐蚀过程中受两方面因素的影响^[21,22], 一方面是表面膜的形成和增厚, 另一方面是活性阴离子 Cl⁻的存在而形成的点蚀。在腐蚀初期, Cl⁻的渗透吸附需要一定的过程和时间, 合金表面膜的形成和增厚占主导地位, 所以试样会出现增重的情况。因此, 在腐蚀时间为 10 h 时, 部分试样的腐蚀速率出现了负值。然而, 一旦 Cl⁻的吸附和渗透超过了表面膜的保护作用, 合金就会向表面内部进一步发生点蚀, 腐蚀速率开始上升。当腐蚀时间超过 40 h 后, 合金腐蚀速率的增加变得缓慢, 部分试样的腐蚀速率开始维持恒定。

均匀化前的 ZK60-1Nd 镁合金晶内 Zn 和 Nd 元素的不均匀分布, 导致 α -Mg 基体出现电位差构成微电池而引起腐蚀。同时, 由于基体中粗大网状共晶相比基体 α -Mg 耐腐蚀, 在 NaCl 水溶液中会形成无数以 α -Mg 基体为阳极, 网状共晶相为阴极的腐蚀微电偶, 使得该合金基体发生严重的电偶腐蚀。这些因素导致该合金耐蚀性能较差。均匀化热处理前合金在 3.5% 的 NaCl 水溶液中浸泡 50 h 后的腐蚀速率为 0.2 mg·cm⁻²·h⁻¹。合金经 300°C 保温 8.0 h 后 (图 8a), 晶内显微偏析得到改善, 合金内部电偶腐蚀程度减轻, 且合金表面生成的 MgO 薄膜更加的连续, 这在一定程度上阻止了 Cl⁻的侵蚀, 合金的耐蚀性能得到改善。

ZK60-1Nd 镁合金的耐蚀性能受其自身两种因素的影响^[14], 一方面是 Zn 元素向基体中的扩散, 另一方面是稀土 Nd 元素向基体中的扩散。据文献报道^[13], 当合金中 Zn 含量大于 2.5% 时对合金的防

腐性能有较强的负面影响, 其主要原因为 Zn 元素使镁合金的表面膜变得酥松而且容易脱落, 从而减弱了镁合金的耐蚀性能。因此, 对 ZK60-1Nd 镁合金而言, 6.0% 的 Zn 含量提高了该合金的腐蚀速率。然而, 稀土 Nd 元素会增加合金基体的电极电位, 且 Nd 与氧的亲合力较大会优先在合金表面与氧生成化学活性较低的氧化物, 该氧化物对 NaCl 腐蚀介质不敏感, 可以起到钝化膜的作用, 在外层的 Mg(OH)₂ 溶解后对合金表面有较强的保护作用。另外, Nd 属于表面活性元素, 部分 Nd 元素也会扩散到表面膜中以氧化物的形式存在, 同样可以提高合金的耐腐蚀性能^[23,24]。

图 8b 为合金经 400 °C 均匀化不同时间后在 3.5% 的 NaCl 水溶液中的腐蚀速率曲线。由图 8b 可以看出, 随着均匀化时间的延长, 该合金的耐腐蚀性能逐渐提高。保温 4.0 h 后, 该合金的粗大网状共晶相开始溶解, 元素 Nd 向基体中扩散, 对基体 α -Mg 起到保护作用并提高了基体电极电位。然而, 尚未完全溶解的颗粒状共晶相分布在基体 α -Mg 中, 增加了基体腐蚀微电偶的数量, 使得该合金的电偶腐蚀加重。同时, Zn 元素向基体中的扩散, 使得基体 α -Mg 优先被腐蚀。该合金在后两种因素的影响下, 其耐蚀性能仅有小幅度的提升。延长保温时间至 96 h 时, 该合金的共晶相的进一步溶解, 使得该合金的电偶腐蚀程度减轻。同时, Nd 和 Zn 元素继续向基体 α -Mg 中扩散, 对该合金的耐蚀性能依然起到相互对立的影响。此时, 该合金的腐蚀速率为 0.1 mg·cm⁻²·h⁻¹。

图 8c 为该合金经 500 °C 均匀化不同时间后的腐蚀速率曲线。由图 8c 可以看出, 当均匀化时间达到 8.0 h 时, 该合金的网状共晶相熔化成分散块状, 基体 α -Mg 中 Nd 元素含量增加, 提高了基体的电极电位,

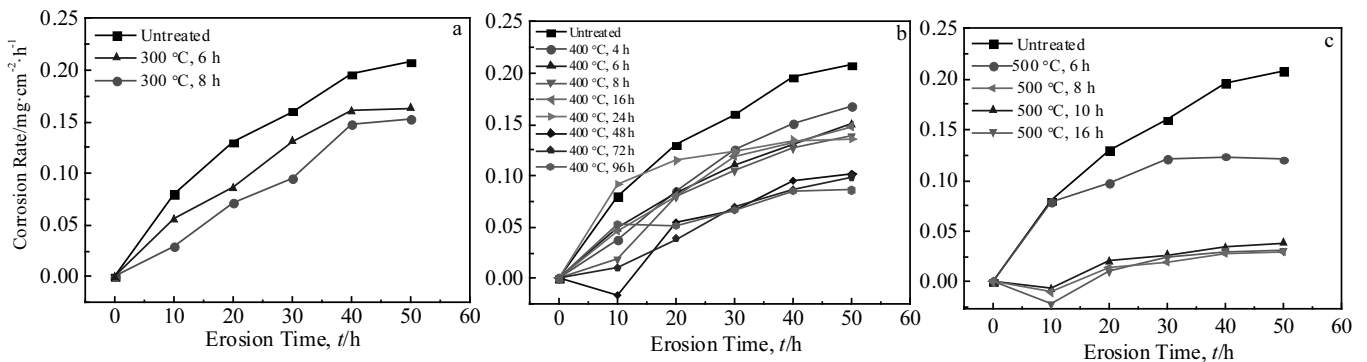
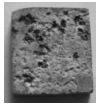
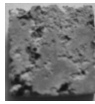
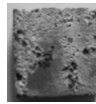
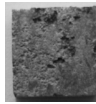
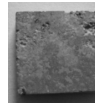
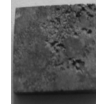


图 8 ZK60-1Nd 镁合金经不同温度均匀化后在 3.5% NaCl 水溶液中的腐蚀速率

Fig.8 Corrosion rates of ZK60-1Nd magnesium alloys in 3.5% NaCl solution after homogenization at different temperatures: (a) 300 °C, (b) 400 °C, and (c) 500 °C

表 2 ZK60-1Nd 镁合金经 3.5% NaCl 溶液腐蚀后的宏观形貌

Table 2 Morphologies of ZK60-1Nd magnesium alloys after the corrosion in 3.5% NaCl solution

Time	Untreated	2.0 h	4.0 h	6.0 h	8.0 h	16 h
ZK60-1Nd						

部分 Nd 扩散到钝化膜中增加了钝化膜的致密性，合金耐蚀性能提高，对合金耐蚀性能的影响占主导地位。同时，该合金基体 α -Mg 中的合金元素分布已经均匀，合金耐蚀性能提高。该合金在 3.5% 的 NaCl 水溶液中的腐蚀速率为 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。当保温时间超过 8.0 h 时，Zn 元素对合金耐蚀性能的影响强于 Nd 元素，Zn 元素使得基体 α -Mg 没有得到保护，基体 α -Mg 优先被腐蚀，该合金的耐蚀性能开始下降。表 2 为合金经 500 °C 保温不同时间后在 3.5% 的 NaCl 水溶液中浸泡 50 h 后的宏观腐蚀形貌。可以看出，合金主要的腐蚀行为是点蚀，逐渐延长均匀化时间到 8.0 h 时，试样表面的腐蚀坑范围越来越小，说明合金的耐蚀性能逐渐在提高。保温到 16 h 时，试样表面的腐蚀坑范围又开始变大，合金的耐蚀性能下降。说明合金经 500 °C 保温 8.0 h 均匀化后，合金腐蚀速率降到最低。

图 9a~9c 为 ZK60-1Nd 镁合金经 300, 400, 500 °C 均匀化不同时间后在 0.3 mol/L 的 NaCl 水溶液中的极化曲线。阳极极化曲线出现了明显的钝化区，这是由于 NaCl 水溶液中存在 OH^- ，合金中的 Mg^{2+} 与 OH^- 结合会在合金表面生成一层 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 保护膜。在阳极极化区域，由于保护膜的存在，随着电

位向正方向移动，电流密度随之缓慢增加，同时溶液中的 Cl^- 逐渐富集在合金表面，当电势正到某一数值时， Cl^- 聚集到达一定数量后， Cl^- 会快速将 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 保护膜击穿，进而腐蚀合金基体，电流密度迅速上升。由于合金存在电阻，因此电流上升到一定数值后又开始维持平缓状态。

通过图 9a 可以看出，均匀化前 ZK60-1Nd 镁合金的自腐蚀电位为 -1686 mV，电流密度为 $4.147\times 10^{-5} \text{ A}/\text{cm}^2$ 。合金经 300 °C 均匀化后，自腐蚀电位向正向移动，耐蚀性能好转。保温时间延长至 8.0 h 时，合金自腐蚀电位为 -1670 mV，比均匀化前合金的自腐蚀电位提高了 16 mV。合金经 400 °C 均匀化处理不同时间后在 NaCl 水溶液中的极化曲线如图 9b 所示，随着保温时间的延长，合金自腐蚀电位逐渐正移。保温时间达到 96 h 时，合金自腐蚀电位为 -1567 mV，比均匀化处理前 ZK60-1Nd 镁合金的自腐蚀电位提高了 133 mV，电流密度为 $3.578\times 10^{-5} \text{ A}/\text{cm}^2$ 。图 9c 为合金经 500 °C 保温 8.0 h 后的极化曲线，合金的自腐蚀电位最大，为 -1553 mV，电流密度为 $2.904\times 10^{-5} \text{ A}/\text{cm}^2$ ，合金耐蚀性能最佳，这与合金在 3.5% 的 NaCl 水溶液中的腐蚀速率曲线分析结果保持一致。

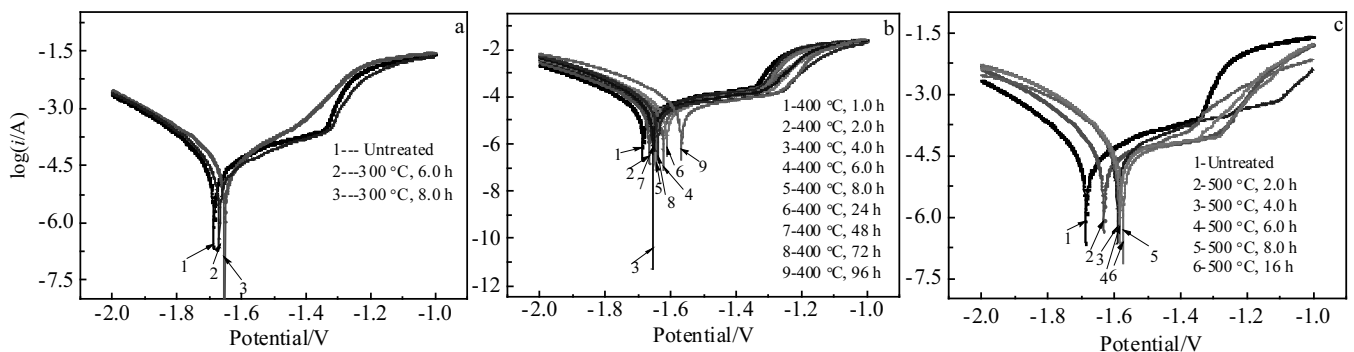


图 9 ZK60-1Nd 镁合金经不同温度均匀化后在 3.5% NaCl 水溶液中的极化曲线

Fig.9 Polarization curves of ZK60-1Nd magnesium alloys in 3.5% NaCl solution after homogenization at different temperatures: (a) 300 °C, (b) 400 °C, and (c) 500 °C

3 结 论

1) ZK60-1Nd 镁合金主要由基体 α -Mg 相、沿着晶界附近分布的含有稀土元素 Nd 的粗大网状共晶相 MgZn_2 相组成。

2) ZK60-1Nd 镁合金在 400 °C 保温 4.0 h 后, 共晶相开始溶解, 且由连续网状分布转变为断续分布, 部分未溶解的共晶相颗粒分布在原来共晶相位置; 合金在 500 °C 保温 8.0 h 均匀化后, 共晶相呈球形沿着晶界分布, 基体 α -Mg 中 Nd, Zn 元素含量增加且分布均匀。

3) ZK60-1Nd 镁合金经过 300, 400 °C 均匀化处理后, 耐蚀性能均能得到改善。合金在 500 °C 保温 8.0 h 后耐蚀性能达到最佳, 在 3.5% NaCl 水溶液中的腐蚀速率为 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。合金在温度为 500 °C 条件下均匀化后腐蚀速率较低的主要原因为: α -Mg 基体中固溶态 Nd 含量的增加导致的合金自腐蚀电位正向移动和 α -Mg 基体中腐蚀微电偶数量的减少。

参考文献 References

- [1] Cui Xiaoming(崔晓明), Bai Pucun(白朴存), Liu Fei(刘飞) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(3): 728
- [2] Li Xin, Jiang Jinghua, Zhao Yonghao et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(12): 3909
- [3] Zheng Xiaobing, Liu Ke, Wang Zhaohui et al. *Rare Metals*[J], 2016, 35(7): 526
- [4] Wang Wenli(王文礼), Zhang Wei(张薇), Lei Ningning(雷宁宁) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(6): 1473
- [5] Wang Guixiang(王桂香), Cao Nana(曹娜娜), Qiao Yingjie(乔英杰) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(6): 1480
- [6] Chen Junxiu, Tan Lili, Yang Ke. *Bioactive Materials*[J], 2017, 1(2): 19
- [7] Li Zhenming, Luo A A, Wang Qigui et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2017, 5 (1): 1
- [8] Liu Huaqiang(刘华强), Tang Di(唐荻), Hu Shuiping(胡水平) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(7): 1372
- [9] Ren Xiaodong(任晓东), Li Xuesong(李雪松), Yang Yue(杨悦) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(1): 45
- [10] Abdel S H, Darryl P B. *Electrochimica Acta*[J], 2013, 108: 852
- [11] Hu Lin(胡林), Wang Bin(王斌), Zhou lingling(周玲玲) et al. *Nonferrous Metals Design*(有色金属设计)[J], 2015, 42(2): 25
- [12] Ning Z L, Wang H, Liu H H et al. *Materials and Design*[J], 2010, 31(9): 4438
- [13] Hou Zhidan(侯志丹). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2009
- [14] Xu Chunxiang(许春香), Wang Xing(王星), Zhang Jinshan(张金山) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(8): 1809
- [15] Wang Ping(王萍), Li Jianping(李建平), Ma Qun(马群). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(6): 1056
- [16] Wang Yong(王勇), Zhou Hong(周红), Qiao Yingli(乔丽英) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2013, 41(6): 87, 98
- [17] He Yunbin(何运斌), Pan Qinglin(潘清林), Liu Xiaoyan(刘晓艳) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2011, 31(3): 14
- [18] Peng Jian(彭建), Zhang Dingfei(张丁非), Yang Chunmei(杨椿楣) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2004, 32(8): 32, 53
- [19] Luo Shuang(罗双), Ma Zhengqing(马正青). *Materials Protection*(材料保护)[J], 2016, 49(8): 12, 19, 16
- [20] Liu Yue(刘悦). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2016
- [21] Naosumi K, Gasidit P, Erina Y et al. *Surface and Coatings Technology*[J], 2016, 286: 172
- [22] Zhang Ziyang(张子阳), Wang Shanlin(王善林), Zhang Hengyu(章恒瑜) et al. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*(中国腐蚀与防护学报)[J], 2017, 37(2): 117
- [23] Zhao Dingzang(赵丁藏), Zhang Dingfei(张丁非), Liu Yuping(刘渝萍) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(2): 289
- [24] Zhou Weiguang(周伟光), Jia Ruiling(贾瑞灵), Zhang Guilong(张贵龙) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(7): 1893

Microstructure and Corrosion Behavior of ZK60-1Nd Magnesium Alloy

Chu Xu, Wang Zhongjun, Zhang Tao, Wang Dongxiao, Wang Hongbin

(University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Microstructure and corrosion behavior of ZK60-1Nd magnesium alloy in 3.5 wt% NaCl aqueous solution were studied by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD), electrochemical workstation and a brine weight loss method. The results indicate that the as-cast microstructure of the ZK60-1Nd alloy is mainly composed of matrix α -Mg, and a coarse network eutectic MgZn₂ phase containing rare earth Nd distributed along the grain boundaries. The corrosion rate of the alloy in 3.5 wt% NaCl aqueous solution is 0.2 mg·cm⁻²·h⁻¹. After annealing at 400 °C for 96 h, part of the eutectic phase is fused to particles with a maximum size of 0.5 μ m and the corrosion rate is reduced to 0.1 mg·cm⁻²·h⁻¹. After annealing at 500 °C for 8.0 h, fishbone eutectic phase is fused to patchy, the MgZn₂ phase is dissolved into the matrix, the contents of Nd, Zn and Zr are increased with uniform distribution in the matrix, and the corrosion rate reaches a minimum of 0.03 mg·cm⁻²·h⁻¹. The improvement of corrosion resistance is attributed to the increase of the solid solution Nd content in matrix α -Mg, which increases the corrosion potential and decreases micro galvanic corrosion in number.

Key words: ZK60-1Nd; magnesium alloy; homogenization; microstructure; corrosion resistance

Corresponding author: Wang Zhongjun, Ph. D., Professor, School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, P. R. China, Tel: 0086-412-5929535, E-mail: zhongjunwang@126.com