

石墨烯纳米片/AZ91D 镁基复合材料腐蚀行为

张露露¹ 陈利文¹ 李利民¹ 侯 华^{1,2} 赵宇宏¹

(1.中北大学材料科学与工程学院; 2.太原科技大学材料科学与工程学院)

摘 要 研究了固溶处理后不同石墨烯纳米片(G_{nps})含量的 AZ91D 镁基复合材料在模拟体液(SBF)中的腐蚀行为。结果表明,随着 G_{nps} 含量的增加,镁基复合材料的固溶组织晶粒细化程度先增大后减小,耐腐蚀性也随着晶粒细化程度增加而增大。电化学试验结果表明,当 G_{nps} 质量分数为 0.6% 时,耐腐蚀性能最好,腐蚀电流密度(J_{corr})降低至 $1.06 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ 。研究表明, G_{nps} 做为增强体对镁合金腐蚀性能的改善具有潜在价值。

关键词 镁基复合材料; 石墨烯纳米片; 电化学腐蚀; 固溶处理

中图分类号 TB331; TG146.22

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Corrosion Behavior of Graphene Nanosheets/AZ91D Magnesium Matrix Composites

Zhang Lulu¹, Chen Liwen¹, Li Limin¹, Hou Hua^{1,2}, Zhao Yuhong¹

(1 School of Materials Science and Engineering, North University of China;

2.School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology)

Abstract: The corrosion behavior of magnesium matrix composites with different contents of graphene nanosheets (G_{nps}) after solid solution treatment was investigated in Simulated Body Fluid(SBF). The results indicate that with the increase of content of G_{nps} , the grain refining degree of the solid solution structure in magnesium matrix composites is firstly increased and then decreased, and the corrosion resistance is also increased. The electrochemical experiment results reveal that the corrosion resistance is optimal when G_{nps} content is 0.6%, and the corrosion current density (J_{corr}) is reduced to $1.06 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$, implying the potential value of G_{nps} as reinforcement for the corrosion properties of magnesium alloys.

Key Words: Magnesium Matrix Composites, Graphene Nanosheets, Electrochemical Corrosion, Solid Solution Treatment

收稿日期:2022-11-26;修改稿收到日期:2023-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074246, 22008224, 52275390, 52205429, 52201146);国防基础科研资助项目(JCKY2020408B002, WDZC2022-12);山西省重点研发计划资助项目(202102050201011)

第一作者简介:张露露,男,1995 年出生,硕士研究生,太原(030051),E-mail:1453576707@qq.com

通信作者:赵宇宏,女,1974 年出生,教授,太原(030051),E-mail:zhaoyuhong@nuc.edu.cn

引用格式:张露露,陈利文,李利民,等. 石墨烯纳米片/AZ91D 镁基复合材料腐蚀行为[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(4):463-468.

ZHANG L L, CHEN L W, LI L M, et al. Corrosion behavior of graphene nanosheets/AZ91D magnesium matrix composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):463-468.

[7] ZHAO X, LIANG J, HE Z, et al. Blowhole detection based on bi-directional enhancement and omnidirectional analysis for X-Ray inspection of castings[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 12(7): 1-16.

[8] 傅可清, 马源, 伍俊杰, 等. 铝合金压铸件 X 射线成像典型缺陷特征提取算法与实现[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(12): 1 472-1 477.

[9] 张雪荣, 向峰, 李红军, 等. 基于深度学习的钢卷端面缺陷检测系统设计[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 4(4): 1-19.

[10] 蔡彪, 沈宽, 付金磊, 等. 基于 Mask R-CNN 的铸件 X 射线 DR 图像缺陷检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 61-69.

[11] 鲍春生, 谢刚, 王银, 等. 基于深度学习的铸件缺陷检测[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 580-584.

[12] MERY D, JAEGER T, FIBERT D. A review of methods for automated recognition of casting defects [J]. Insight-wigston Then Northampton, 2002, 44(7): 428-436.

[13] WU B, ZHOU J, YANG H, et al. An ameliorated deep dense convolutional neural network for accurate recognition of casting defects in X-ray images[J]. Knowledge-Based Systems, 2021, 226(6): 96-107.

[14] LI W, LI K, HUANG Y, et al. A new trend peak algorithm with X-ray image for wheel hubs detection and recognition[A]. International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Systems[C]. Singapore, 2015.

[15] 许纪亚, 孙佳宁, 乔双. 基于多尺度二维直方图均衡化的医学图像增强方法[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2020, 52(1): 88-91.

[16] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger [A]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. Honolulu, USA, 2017.

[17] JING J F, ZHUO D, ZHANG H H, et al. Fabric defect detertion using the improved YOLOv3 model[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2020, 15(4): 1-10.

[18] 朱衍波. 基于改进 YOLOv4 算法的目标检测算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

[19] ZHANG J, KANG X, NI H, et al. Surface defect detection of steel strips based on classification priority YOLOv3-dense network[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2021, 48(5): 547-558.

[20] 刘洋帆, 王召巴, 陈友兴, 等. 基于超声检测的镁合金棒材缺陷识别及定位[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(7): 661-664.

(编辑: 栗万仲)

镁合金由于良好的生物相容性和可生物降解性,密度和弹性模量与人骨相近,在生物医疗领域备受关注。此外,镁资源丰富,是人体所需的微量元素之一,开采价格低廉而被认为是最有价值的生物材料之一。但镁的电极电位低(−2.37 V),作为植入体,镁合金基体与第二相之间因电位差易发生电偶腐蚀,α-Mg 为阳极,使得镁合金在骨愈合之前过早的丧失其结构和力学性能^[1-5]。因此,提高镁合金的耐腐蚀性能是其在医疗领域获得良好应用的前提。在镁合金中添加增强体可有效提高镁合金的综合性能。石墨烯是由一层六边形蜂窝结构的碳原子杂化构成的,同时具有出色的抗渗透性,可以在基体与腐蚀介质之间形成保护膜,从而阻止腐蚀介质与材料基体界面处的电子交换,进而提高材料的耐腐蚀性能。因此利用石墨烯突出的抗渗透性有望提高镁合金的耐蚀性^[6-7]。

近几年来很多学者研究了固溶处理及石墨烯对镁合金耐腐蚀性能的影响。聂豫晋等^[8]研究了固溶处理对 Mg-3Gd-1Zn 合金在模拟体液中腐蚀性能的影响,发现随着固溶温度升高,合金的电流密度先减小后增加,容抗弧半径先增加后减小;朱劲峰等^[9]研究了固溶处理对 NQZ310K 生物镁合金力学与腐蚀性能的影响,发现随着固溶温度的升高,NQZ310K 镁合金在模拟体液中腐蚀速率加快,腐蚀方式由均匀腐蚀转变为点蚀,这与晶粒尺寸、析出相的含量和分布共同作用有关。KAVIMANI V 等^[10]通过在镁表面制备还原氧化石墨烯和氧化钛的复合涂层,发现图层的添加提高了纯镁的耐蚀性;CHEN Y 等^[11]采用逐层组合法在 AZ31 镁合金表面制备了一种环保型氧化石墨烯和羧甲基纤维素复合膜,提高了 AZ31 镁合金的耐腐蚀性。

本研究以 AZ91D 镁合金为基体材料,石墨烯纳米片(G_{nps})作为增强体,采用半固态注射成形技术制备石墨烯/镁复合材料,并利用电化学方法测试了固溶处理后 G_{nps} 含量对复合材料的腐蚀行为的影响,以期为石墨烯/镁基复合材料在生物领域中的应用提供参考。

1 试验方法

1.1 复合材料的合成

采用半固态注射成形铸造技术制备了石墨烯/镁复合材料。以 AZ91D 镁合金为基体材料, G_{nps} 作为增强体;AZ91D 镁合金颗粒是由铸锭经过颗粒粉碎机粉碎制成,颗粒呈现不规则棒状,长 3~6 mm,长宽比约为 5:1,表 1 为 AZ91D 镁合金的化学成分^[12]。石墨烯纳米片/镁(G_{nps} /AZ91D)复合材料制备流程包括混料、填料、加热搅拌和高速注射成形等步骤。首先,将 5 kg 的

AZ91D 镁合金颗粒和相应质量的 G_{nps} (质量分数分别为 0、0.3%、0.6%、0.9%)加入 V 型混料机进行混料,混料机转速为 20 r/min,时间为 30 min。其次,将混合好的 AZ91D 镁合金颗粒与 G_{nps} 加入注射成型机的料斗中;然后混合料在料管的螺旋搅拌及料管不同区域加热下形成混合浆料;模温机对模具加热,待模具达设定温度后对其喷涂料,然后合模,合模力达到设定值后,冲头将混合浆料高速射出,充满型腔,并保压;开模取出铸件后随室温冷却^[13-15]。将不同 G_{nps} 含量的铸件放在热处理炉中进行固溶处理,加热温度为 400 ℃,保温时间为 24 h。

表 1 AZ91D 镁合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AZ91D magnesium alloy %							
ω_B							
Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
8.30	0.54	0.23	0.04	0.02	0.04	0.04	余量

1.2 电化学测试

在电化学腐蚀测试之前,用 200~2 000 目 SiC 砂纸依次对试样对工作表面打磨后抛光,再用无水乙醇清洗工作面,再将工作面以外的面用环氧树脂胶密封(工作面尺寸为 10 mm×10 mm)。电化学测试设备为 CS2350 电化学工作站,采用标准的三电极体系进行,其中 G_{nps} /AZ91D 复合材料作为工作电极,带有饱和 KCl 的甘汞电极作为参比电极,Pt 片作为辅助电极。腐蚀液为 Simulated Body Fluid(SBF)模拟体液^[16],腐蚀测试在 37 ℃恒温水浴锅中进行。将工作电极浸泡在腐蚀液中,保持在开路电位的情况下浸泡预设时间后,进行动电位扫描,扫描速率为 1 mV/s,扫描范围为相对于开路电位−(1 000~1 500) mV,以获得其极化曲线。同样保持在开路电位情况下浸泡预设时间后进行阻抗-频率扫描,频率选择在 10 kHz~100 mHz,获得电化学阻抗谱。

1.3 形貌表征

将试样表面依次用 200~2 000 目 SiC 砂纸打磨,再用无水乙醇清洗干净,在超声机中震荡洗涤 30 min,再用无水乙醇清洗干净后浸泡于 SBF 模拟体液中,30 min 后取出试样,然后用无水乙醇冲洗干净后,吹干表面。利用 Lecia-DMi8 型光学显微镜和 JSM-IT800 型扫描电镜(SEM)观察微观组织形貌,利用 SEM 配备的 Oxford 能谱仪进行成分分析。

2 试验结果与讨论

2.1 微观结构特征及腐蚀后形貌

图 1 为固溶处理后不同 G_{nps} 含量的复合材料的组

织形貌及晶粒尺寸。可以看出, G_{nps} 的添加使得复合材料的晶粒得到细化, 随着 G_{nps} 含量的增加, 细化程度先增加后减少。同时可以看出, 固溶处理后, 晶界处的第二相基本溶入基体内, 在基体内还剩余少量的点状相。图 2 为 G_{nps} 含量为 0.6% 的复合材料 SEM 形貌和面扫结果。可以看出, 基体内点状第二相为富 Al 相, 同时结合 C 面扫描能谱图可知, G_{nps} 在基体中分布较为均

匀。图 3 为固溶处理后不同 G_{nps} 含量的复合材料腐蚀 30 min 后的 SEM 形貌, 其中 G_{nps} 含量为 0.6% 的 AZ91D 复合材料中未溶入基体的点状第二相最少。图 4 为 G_{nps} 含量为 0.6% 的复合材料腐蚀后形貌和 EDS 面扫描结果。结合图 3 和图 4 可知, 裂纹处为暴露的镁基体组织, 是腐蚀发生的区域, 其他区域为氧化未腐蚀区域。初步对比可以得出腐蚀程度由低到高的 G_{nps} 含量

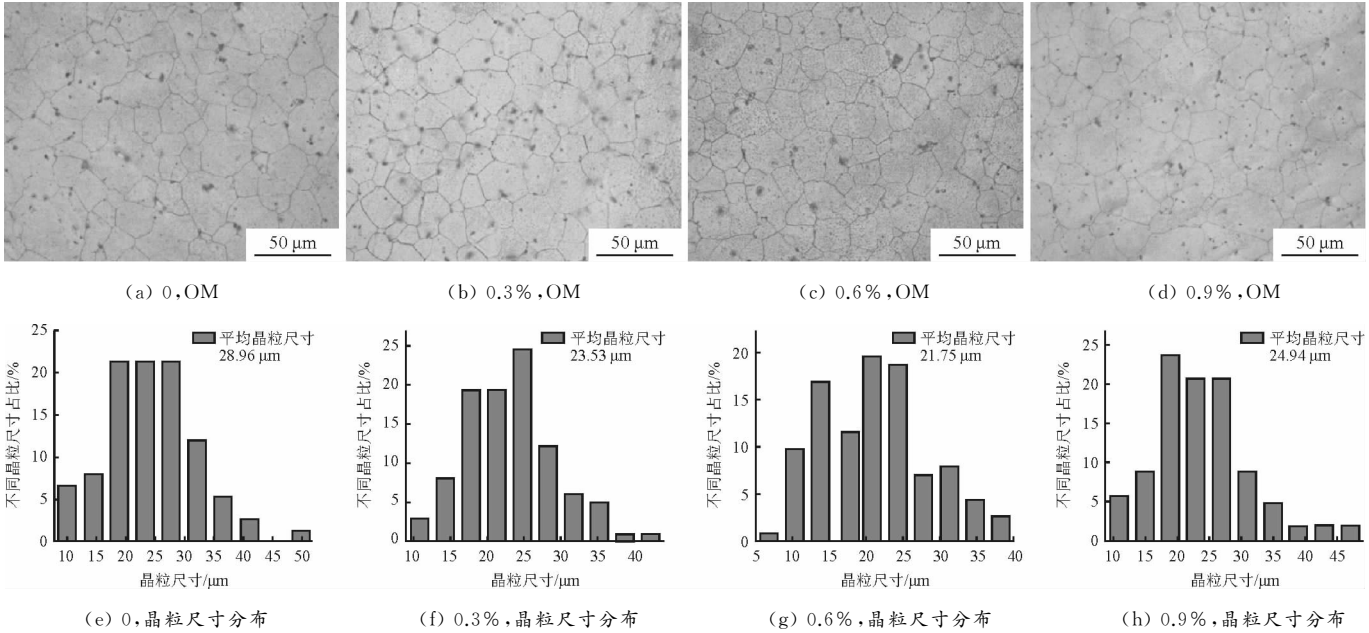


图 1 不同 G_{nps} 含量下复合材料的 OM 图和晶粒尺寸分布
Fig.1 OM images and grain size distribution of G_{nps} /AZ91D composites

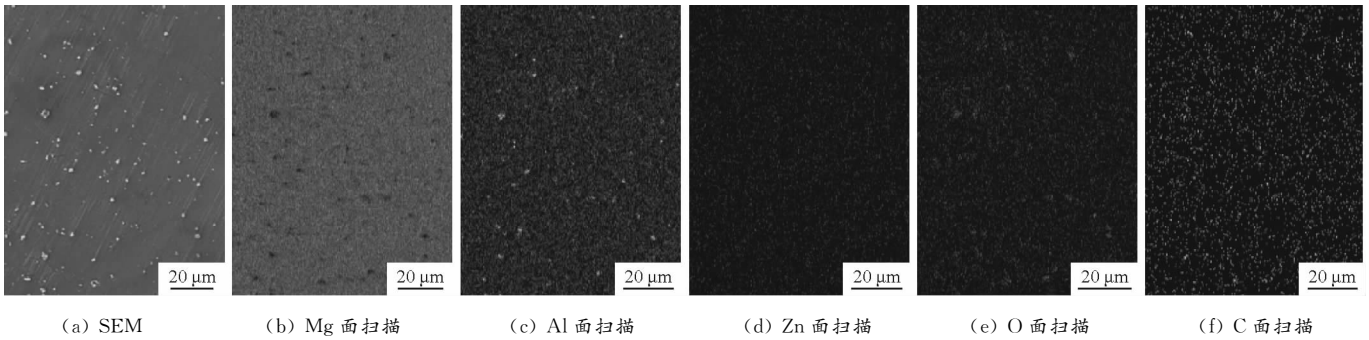


图 2 G_{nps} 含量为 0.6% 时复合材料的 SEM 形貌和 EDS 扫描
Fig.2 SEM images and EDS scanning results of 0.6% G_{nps} /AZ91D composites

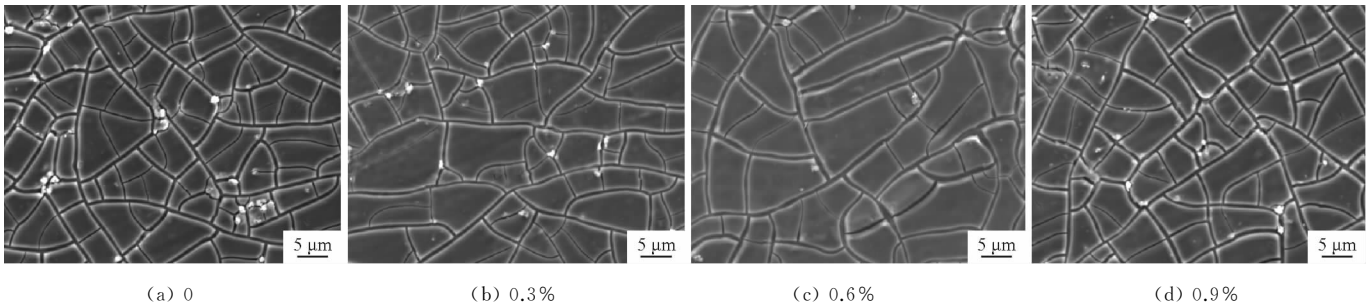


图 3 不同 G_{nps} 含量的复合材料腐蚀 30 min 后 SEM 形貌
Fig.3 SEM images of AZ91D composites with different contents of G_{nps} corroded for 30 min

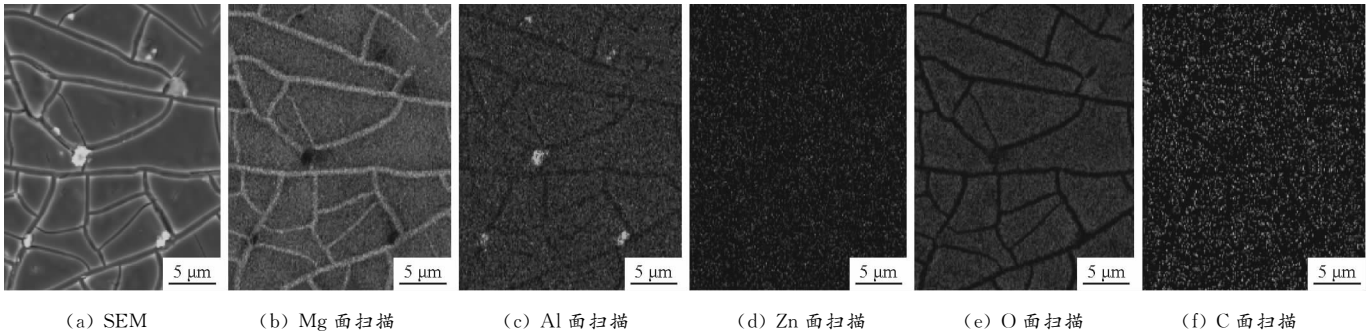


图 4 G_{nps} 含量为 0.6% 的复合材料腐蚀后 SEM 形貌和 EDS 扫描图

Fig.4 SEM images and EDS scanning results of 0.6% G_{nps} /AZ91D after corrosion

依次为:0.6%、0.3%、0.9%和 0。

2.2 电化学测试结果

图 5 为固溶处理后不同 G_{nps} 含量的 G_{nps} /AZ91D 复合材料在模拟体液中的电化学腐蚀动电位极化曲线。可见不同 G_{nps} 含量的复合材料的曲线相似,说明试样经历的腐蚀过程相似。此外,曲线中阳极极化端走势更加陡峭,说明电化学腐蚀过程中主要以阳极溶解为主^[17]。添加 G_{nps} 的复合材料的自腐蚀电位均发生正偏移,说明添加 G_{nps} 后复合材料的腐蚀倾向减弱,其中 G_{nps} 含量为 0.6% 的复合材料的正偏移程度最大,说明腐蚀倾向最弱,即耐腐蚀性能最好。

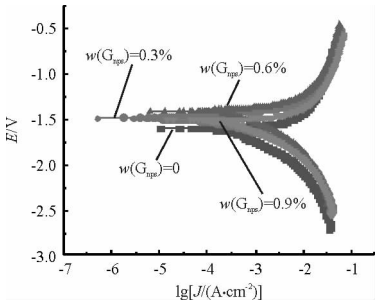


图 5 G_{nps} /AZ91D 复合材料的动电位极化曲线

Fig.5 Potentiodynamic polarization curves of G_{nps} /AZ91D composites

表 2 为固溶处理后不同 G_{nps} 含量的复合材料的电化学参数,腐蚀电位越小,腐蚀电流密度越大,材料的耐腐蚀性能越差。可以看出,随着 G_{nps} 含量的增加,腐蚀电流密度先减小后增大,极化电阻先增大后减小,当 G_{nps} 含量为 0.6% 时,腐蚀电流最小为 1.06×10^{-4} A/cm²,极化电阻最大为 572.6 $\Omega \cdot \text{cm}^2$,同时相较于铸态下 G_{nps} 含量为 0.6% 的复合材料(腐蚀电流密度和极化电阻分别为 4.94×10^{-4} A/cm² 和 367.4 $\Omega \cdot \text{cm}^2$),腐蚀性能得到较大改善。 G_{nps} 的添加提高了复合材料的耐腐蚀性能,且在 G_{nps} 含量为 0.6% 时性能最好。

图 6 为固溶处理后不同 G_{nps} 含量的复合材料在模拟体液中的阻抗谱。可以看出,不同 G_{nps} 含量的复合材

表 2 不同 G_{nps} 含量复合材料的电化学参数

Tab.2 Electrochemical parameters of G_{nps} /AZ91D composites

$w(G_{nps})/\%$	腐蚀电流密度/($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	极化电阻/($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
0	5.67×10^{-4}	162.3
0.3	3.36×10^{-4}	302.8
0.6	1.06×10^{-4}	572.6
0.9	4.28×10^{-4}	254.5

料的曲线相似,说明试样经历的腐蚀过程相似。曲线中出现较为明显的双容抗弧,高频区容抗弧半径较大,低频区容抗弧半径较小^[18]。容抗弧的半径大小体现反应阻力的大小,半径值越大,反应阻力越大,阳极溶解的越慢,合金的耐腐蚀性越好。电化学腐蚀过程中由于析氢反应的发生,产生钝化膜,但由于生成的非致密的钝化膜不能阻碍腐蚀液进一步腐蚀基体,因此在阻抗谱低频区出现小半径的容抗弧。从图 6 中可以看出, G_{nps} 的添加使得复合材料的容抗弧半径增大,即耐腐蚀性能增加,其中 G_{nps} 含量为 0.6% 的容抗弧半径最大,即耐腐蚀性能最好。阻抗谱所得出的结果与极化曲线测得的结果相符合, G_{nps} 的添加提高了腐蚀性,且 G_{nps} 含量为 0.6% 时效果较好。

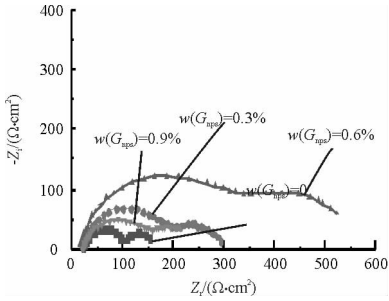


图 6 G_{nps} /AZ91D 复合材料的阻抗谱

Fig.6 Impedance spectrum of G_{nps} /AZ91D composites

2.3 微观腐蚀机理

镁合金腐蚀的机理是微电偶腐蚀。图 7 为固溶处理后 G_{nps} 含量为 0.6% 时 G_{nps} /AZ91D 复合材料在 SBF 模拟体液中腐蚀 5 min 和 10 min 后的 SEM 形貌。从图 7a 可以看出,腐蚀初期晶界依然清晰可见,在晶粒内

部出现一些微氧化区(见图 7a 圆圈)和微裂纹。图 8 为 G_{nps} 含量为 0.3% 时腐蚀 5 min 后试样表面 SEM 和 EDS 面扫描。可以看出,微裂纹存在的晶粒周围存在点状的第二相,由于第二相的腐蚀电位高于镁基体,导致形成微电偶腐蚀。由于电偶作用,在第二相周围率先产生点蚀,随着腐蚀的发生,在点蚀率先发生的地方逐渐生成微裂纹。从图 7b 可以看出,随着腐蚀的进一步发生,微裂纹在第二相周围逐渐形成裂纹,随着腐蚀的进一步发生,裂纹逐渐向基体扩展。随着第二相周围裂纹的进一步扩展,与基体内的微裂纹进一步融合,腐蚀随之逐层侵蚀基体,最终导致试样被腐蚀。

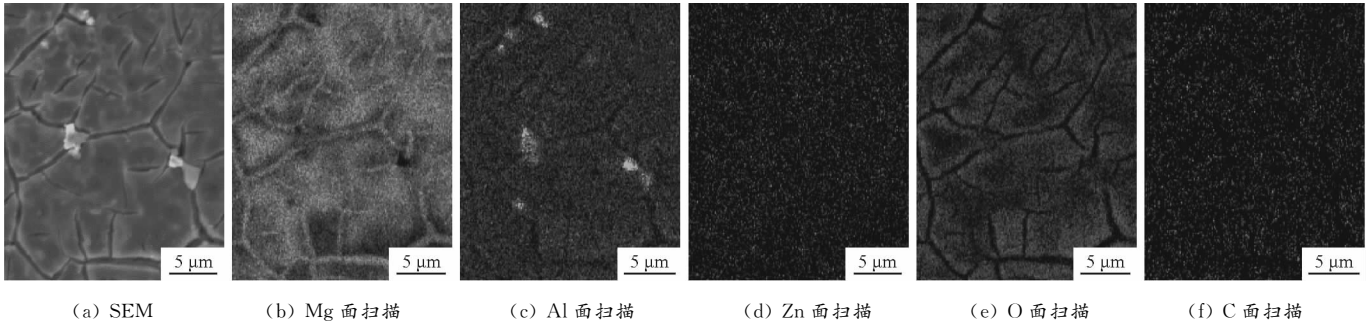


图 7 G_{nps} 含量为 0.6% 的复合材料在腐蚀不同时间后的 SEM 形貌

Fig.7 SEM images of 0.6% G_{nps} /AZ91D composites after corrosion for different durations

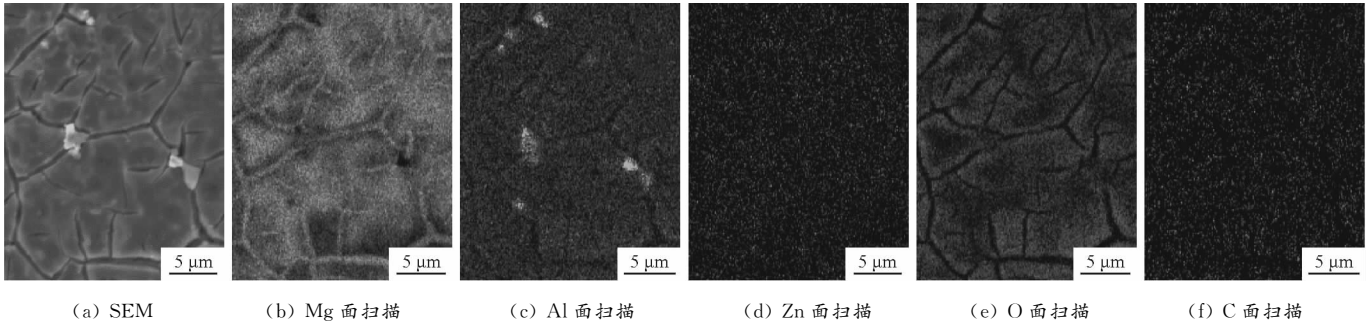


图 8 G_{nps} 含量为 0.3% 的复合材料腐蚀 5 min 的 SEM 形貌和 EDS 扫描

Fig.8 SEM images and EDS scanning results of 0.3% G_{nps} /AZ91D composites after corrosion for 5 min

2.4 第二相对腐蚀的影响

AZ91D 中的第二相为 $Mg_{17}Al_{12}$ 相,其腐蚀电位为 -1.233 V ,高于镁基体相,在溶液中易与镁基体形成微电偶,导致微电偶腐蚀的发生。从图 4 可以看出,固溶处理后在镁基体内部剩余了少量的点状第二相,这些点状第二相对腐蚀起到了促进作用。图 9 为 G_{nps} 含量为 0.3% 时复合材料在 SBF 模拟体液中腐蚀 30 min 后的 SEM 和 EDS 面扫描。可以看出,腐蚀过程中,由于点

状第二相与镁基体的微电偶腐蚀,裂纹沿着第二相向基体内侵蚀,并逐渐占据裸露的试样表面,并且可以看出第二相附近的裂纹宽度大于其他区域。从图 3 可以看出,由于第二相数量的差异,腐蚀裂纹的数量及分布也存在明显差异, G_{nps} 含量为 0.6% 时点状第二相的数量最少,对应的腐蚀裂纹也最少,顺序从小到大依次是 G_{nps} 含量为 0.6%、0.3%、0.9%、0,这也对应着耐腐蚀性能的大小,与电化学试验所得出的结论相一致。

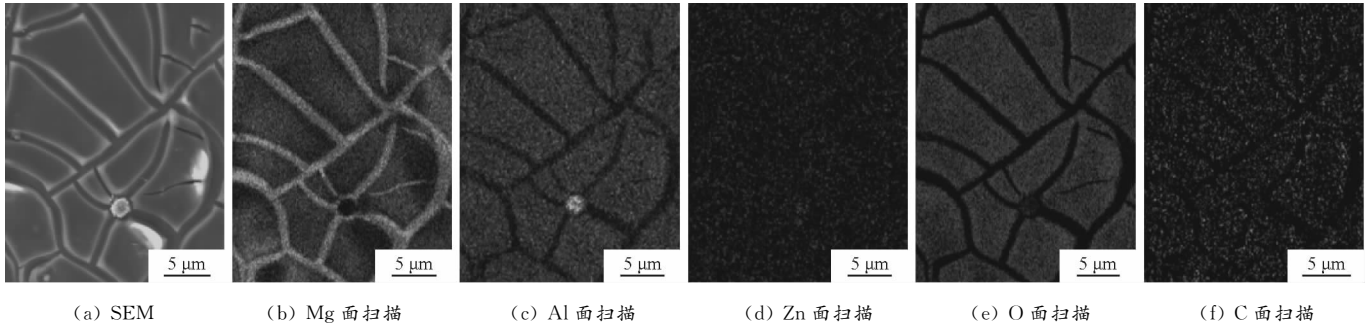


图 9 G_{nps} 含量为 0.3% 的复合材料在 SBF 模拟体液中腐蚀 30 min 后 SEM 形貌和 EDS 扫描

Fig.9 SEM images and EDS face scanning results of 0.3% G_{nps} /AZ91D composites corroded in SBF for 30 min

2.5 G_{nps} 含量对腐蚀的影响

从图 3 可以看出, G_{nps} 的添加使得试样在固溶处理后未溶入的点状第二相数量明显减少,因此腐蚀性能得到提高。图 10 是 G_{nps} 含量为 0.9% 的复合材料的 SEM 和 EDS 面扫描。可以看出,由于 G_{nps} 含量过高,在基体

内发生团聚,同时可以看出,在团聚的 G_{nps} 周围,点状的第二相在此富集,由于第二相与镁基体的电位差,导致团聚的 G_{nps} 处成为腐蚀的优先发生地,降低合金的耐腐蚀性能,又由于其他区域仍有分布较为良好的 G_{nps} ,因此耐蚀性能仍然高于不添加 G_{nps} 的试样。从图 4f 可以看出,当 G_{nps} 含量为 0.6% 时, G_{nps} 均匀分布与基体内,使

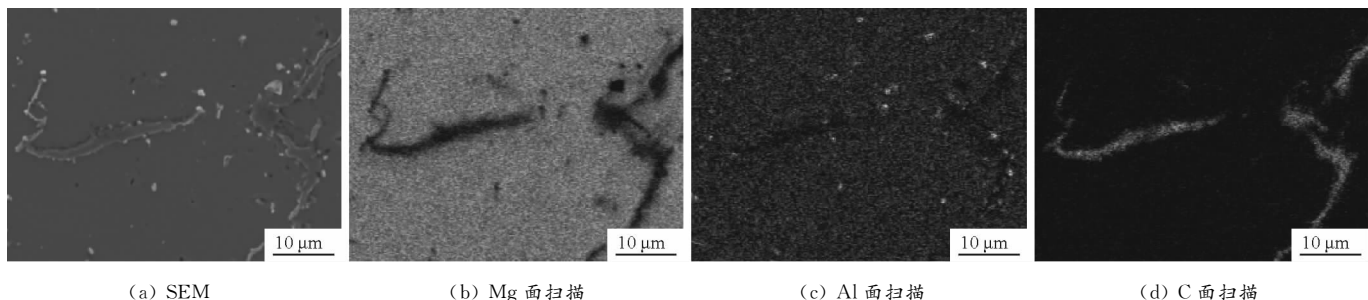


图 10 G_{nps} 含量为 0.9% 的复合材料 SEM 形貌和 EDS 扫描

Fig.10 SEM images and EDS scanning results of 0.9% G_{nps} /AZ91D composites

未溶入基体的点状第二相明显减少,腐蚀发生的倾向减弱,腐蚀性能提高。

3 结 论

(1) 固溶处理后, G_{nps} /AZ91D 复合材料中的 $Mg_{17}Al_{12}$ 相逐渐溶入基体内。 G_{nps} 的添加使得复合材料的组织得到细化,随着 G_{nps} 含量增加,晶粒细化程度先增大后减小。

(2) 在 G_{nps} /AZ91D 复合材料中, G_{nps} 均匀分布于基体内使得未溶入基体的第二相减少,降低了第二相与基体微电偶发生的几率,提高了其耐腐蚀性能。

参 考 文 献

- [1] SHUAI C, WANG B, YANG Y, et al. 3D honeycomb nanostructure-encapsulated magnesium alloys with superior corrosion resistance and mechanical properties[J]. Composites, 2019, B162(1): 611-620.
- [2] SHAHIN M, MUNIR K, WEN C, et al. Magnesium-based composites reinforced with graphenenanoplatelets as biodegradable implant materials [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, C828: 154 461.
- [3] RADHA R, SREEKANTH D. Insight of magnesium alloys and composites for orthopedic implant applications-A review[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2017, 5(3): 286-312.
- [4] 田亚强, 赵冠璋, 刘芸, 等. 生物可降解医用镁合金体内外降解行为研究进展[J]. 材料工程, 2021, 49(5): 25-37.
- [5] 许东光, 马春华, 赵亚忠, 等. 生物医用镁合金材料的应用及耐腐蚀性研究进展[J]. 材料保护, 2021, 54(2): 131-139.
- [6] 杨程, 齐乐华, 周计明, 等. 碳纤维增强镁基复合材料制备技术与新进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(7): 1 985-2 000.
- [7] 朱绒霞, 苗征, 栗银, 等. 石墨烯在镁合金表面防护技术中的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(6): 7-12.
- [8] 聂豫晋, 戴建伟, 章晓波, 等. 固溶处理对 Mg-3Gd-1Zn 合金在模拟体液中腐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 76-82.
- [9] 朱劲峰, 朱珠, 聂豫晋, 等. 固溶处理对 NQZ310K 生物镁合金力学与腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(2): 47-54.
- [10] KAVIMANI V, PRAKASH K S, GUNASHRI R, et al. Corrosion protection behaviour of r-GO/TiO₂ hybrid composite coating on magnesium substrate in 3.5% NaCl[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 125(1): 358-364.

- [11] CHEN Y, LI J, YANG W, et al. Enhanced corrosion protective performance of graphene oxide-based composite films on AZ31 magnesium alloys in 3.5% NaCl solution[J]. Applied Surface Science, 2019, C493: 1 224-1 235.
- [12] YANG Z Q, MA A B, XU B Q, et al. Corrosion behavior of AZ91 Mg alloy with a heterogeneous structure produced by ECAP[J]. Corrosion Science, 2021, 187(1): 109 517.
- [13] CHEN L W, ZHAO Y H, HOU H, et al. Development of AZ91D magnesium alloygraphenenanoplatelets composites using thixomolding process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 778: 359-374.
- [14] CHEN L W, ZHAO Y H, LI M X, et al. Reinforced AZ91D magnesium alloy with thixomolding process facilitated dispersion of graphenenanoplatelets and enhanced interfacial interactions[J]. Materials Science & Engineering, 2021, A804: 140 793.
- [15] CHEN L W, ZHAO Y H, JING J H, et al. Microstructural evolution in graphenenanoplatelets reinforced magnesium matrix composites fabricated through thixomolding process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 940: 168 824.
- [16] 郑义征, 赵明君, 程世婧, 等. 模拟人体液中镁合金的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(6): 463-468.
- [17] 姚旭东, 孙博林, 蔡振飞, 等. Zr 与固溶处理对 Mg-1.5Zn-0.5Ca-0.8Ce 合金耐腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(1): 173-180.
- [18] 李云, 吴兵, 张普礼. 固溶处理对 Mg-4Zn-1Ca 合金腐蚀性能的影响 [J]. 铸造技术, 2014, 35(7): 1 424-1 425.

(编辑: 刘卫)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |