

Mg-Li合金表面微弧氧化Ca-P生物涂层的制备及降解性能

王 林¹ 于丽平² 王冠辉³

(1. 乌海职业技术学院, 乌海 016000; 2. 呼和浩特市生态环境监控中心, 呼和浩特 010030; 3. 内蒙古自治区特种设备检验研究院乌海分院, 乌海 016000)

摘 要 先熔炼制备Mg-Li合金,再利用微弧氧化工艺在其表面制备Ca-P涂层。经AFM和XPS表征分析发现,涂层表面具有多孔结构且粗糙度分布均匀,轮廓均方根偏差值为287 nm,轮廓算术平均偏差值为213 nm。元素Ca的2p轨道所形成的峰为 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 中元素Ca所形成的峰,元素P的2p轨道所形成的峰为 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 中元素P所形成的峰。电流密度与涂层平均显微硬度成正比关系,电流密度为6 A/dm²时,平均显微硬度(HV_{0.2})为796。试验配制模拟体液,用于测试Ca-P涂层的降解性。结果显示,Ca-P涂层pH值先增大后下降至约8.2保持稳定。腐蚀率先增大,后急剧下降至约0.15 mg/(cm²·d)后趋于稳定。电化学腐蚀发现,Ca-P涂层含量为30%时,自腐蚀电位为 (-1.71 ± 0.09) V,自腐蚀电流密度为 $(1.93 \pm 0.90) \times 10^{-4}$ A/cm²。

关键词 Mg-Li合金;Ca-P涂层;微弧氧化;可降解性

中图分类号 TG146.22

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240052

Preparation and Degradation of Ca-P Bio Coating on Mg-Li Alloy by Micro Arc Oxidation

WANG Lin¹, YU Liping², WANG Guanhui³

(1. Wuhai Vocational and Technology College, Wuhai 016000; 2. Hohhot Environmental Monitoring Centre, Hohhot 010030; 3. Inner Mongolia Special Equipment Inspection and Research Institute, Wuhai 016000)

Abstract: Mg-Li alloy was prepared by melting, and then Ca-P coating was prepared on the surface of Mg-Li alloy by micro arc oxidation. AFM and XPS analysis reveals that the coating surface presents porous structure with uniform roughness distribution. The root mean square deviation of profile is 287 nm, and the arithmetic average deviation of contour is 213 nm. The peak formed by 2p orbital of Ca is $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, and that of P is $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. The average microhardness is 796 HV_{0.2} when the current density is 6 A/dm². Simulated body fluid was prepared to test the degradation of Ca-P coating. The results indicate that the initial pH of Ca-P coating is increased at first and then decreased to 8.2 and remains stable. The corrosion rate is increased firstly and then decreased sharply to 0.15 mg/(cm²·d) and remains stable. Electrochemical corrosion results reveal that the self corrosion potential is (-1.71 ± 0.09) V with the content of Ca-P coating of 30%, and the self corrosion current density is $(1.93 \pm 0.90) \times 10^{-4}$ A/cm².

Key Words: Mg-Li Alloy, Ca-P Coating, Micro Arc Oxidation, Degradability

收稿日期:2024-02-23;修订日期:2024-08-26

基金项目:内蒙古自治区规划课题资助项目(NZJGH2019018)

第一作者简介:王林,女,1982年出生,讲师,E-mail:wanglinwhvtc@163.com

引用格式:王林,于丽平,王冠辉. Mg-Li合金表面微弧氧化Ca-P生物涂层的制备及降解性能[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(6):857-861.

WANG L, YU L P, WANG G H. Preparation and degradation of Ca-P bio coating on Mg-Li alloy by micro arc oxidation[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 857-861.

- [107] 周永权, 赵洋, 王璞. 表面强化技术的研究及其应用[J]. 机械管理开发, 2010, 25(5): 104-105.
- [108] 余江. 基于冲击层数的铝合金紧固孔激光冲击强化抗疲劳研究[D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2016.
- [109] 黄浩, 牛金涛, 尹建国, 等. 2A97Al-Li合金喷丸表面完整性及耐蚀性能分析[J]. 表面技术, 2024, 53(15): 184-193.
- [110] 李茂林, 宇文惠鑫. 表面机械研磨1420Al-Li合金的微观组织研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(4): 147-149.
- [111] WANG J, YANG K, BAI Z H, et al. Microstructural evolution and mechanical behaviors of Al-Cu-Li alloy processed by laser shock peening[J]. Materials Characterization, 2022, 191: 112-125.
- [112] YANG Y, LIAN X L, ZHOU K, et al. Effects of laser shock peening

on microstructures and properties of 2195 Al-Li alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781: 330-336.

- [113] 胡维娜. 激光冲击强化2060Al-Li合金微观组织和性能的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.
- [114] 卢柯. 梯度纳米结构材料[J]. 金属学报, 2015, 51(1): 1-10.
- [115] 鲁金忠, 罗开玉, 冯爱新, 等. 激光单次冲击LY2铝合金微弧强化机制研究[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2 662-2 666.
- [116] LU J Z, LUO K Y, ZHANG Y K, et al. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts[J]. Acta Materialia, 2010, 58(11): 3 984-3 994.

(编辑: 栗万仲)

Mg-Li合金作为一种超轻金属材料,其密度仅约为 1.5 g/cm^3 ,比一般的工业用镁合金密度小20%左右。Mg-Li合金的比刚度和比强度较高,减振性和机械加工性良好,广泛应用于航空航天、工业仪器等领域^[1-2]。冯效琰等^[3]利用两道次挤压工艺制备Mg-Li-Al合金板材,发现该板材在常温下即可变形,并对该板材的组织结构和力学性能进行了测试。苏俊飞^[4]采用对掺法在双相Mg-Li合金的基础上,制备Mg-6.5Li-xY-yZn合金,并对该合金进行了微观组织表征与分析,研究力学性能影响因素及规律,探讨挤压变形对性能的具体影响,分析试验合金的腐蚀行为。

镁合金由于其良好的生物相容性可与人体骨组织匹配,利于生物降解的特性还可在临床医学方面得到应用^[5]。作为生物材料多见于骨骼支撑、生物体亲和性材料填充等应用方面。然而,Mg-Li合金抗腐蚀性较差的特点限制了直接临床使用的可能性,如在体液作用下易被腐蚀释放氢气,而利用微弧氧化表面处理技术在Mg-Li合金表面制备耐腐蚀膜层的方法具有一定的可行性。微弧氧化技术多见于制备合金材料的耐磨涂层和防护性涂层,工业应用范围较广,而在医疗生物材料的生产和研发中并不多见。此外,Ca-P复合物涂层能够明显提升镁合金材质的耐腐蚀性、生物相容性及成骨作用,因此将微弧氧化技术应用于制备Mg-Li合金表面的钙磷复合物涂层引起研究者的关注^[6]。

本研究先熔炼制备Mg-Li合金,再利用微弧氧化工艺在Mg-Li合金表面制备Ca-P涂层,基于AFM和XPS对其表面结构和元素进行表征分析,并配制模拟体液用于测试Ca-P涂层的降解性,考察Ca-P涂层对于Mg-Li合金在应用于阶段性生物骨架支撑材料方面的可行性,旨在为相关研究提供参考。

1 试验材料与设备

1.1 试验原材料及板材制备

试验所用原料为氮化硼离型剂(JD-3028, $\geq 98.0\%$ 质量分数,下同),金属镁($\geq 99.0\%$),金属锂($\geq 99.0\%$),丙酮($\geq 99.5\%$), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($\geq 95.0\%$), $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ($\geq 96.0\%$), Na_3PO_4 、 K_3PO_4 、 P_2O_5 (均 $\geq 98.0\%$)。

在金属型内均匀喷涂氮化硼离型剂,预先清除原材料表面的氧化层^[7]。将原材料放入金属型中进行抽真空处理,在氮气保护气氛下洗炉。初始熔炼温度为 $400\text{ }^\circ\text{C}$,升温速率为 $30\text{ }^\circ\text{C/min}$,待炉内温度达到 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时保温15 min,继续升温至 $650\text{ }^\circ\text{C}$,确保炉内材料完全熔化后开始自然冷却得到Mg-15Li合金板材。

1.2 Mg-Li合金表面的微弧氧化

将Mg-Li合金板材加工为 $80\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的薄板,经SiC砂纸表面打磨后,利用丙酮溶液清洗表面并干燥。微弧氧化用电解液由 12 g/L 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + 8 g/L 的 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ + 5 g/L 的 Na_3PO_4 + 5 g/L 的 K_3PO_4 + 6 g/L 的 P_2O_5 组成。根据Mg-Li合金板材质量,分别制备10%、30%、50%的Ca-P涂层(按Mg-Li合金板材质量分数计)的试样。微弧氧化工艺采用恒电流模式,电流密度为 6 A/dm^2 ,频率为 750 Hz ,占空比为55%,微弧氧化15 min。反应过程经循环水冷却保持电解液温度不超过 $40\text{ }^\circ\text{C}$,微弧氧化完毕后在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中先干燥再用去离子水冲洗涂层表面^[8]。

1.3 测试与表征

采用HVS-1000T数显显微硬度计测试合金硬度,将涂层表面网格划分为16个区域,在每个区域涂层上选取中间点作为测量点,取16个数值的平均值,载荷为 0.2 N 。采用Bruker MultiMode8原子力显微镜,按照文献^[9]来测定涂层粗糙度。取景区域尺寸为 $25\text{ }\mu\text{m}\times 25\text{ }\mu\text{m}$,利用设备自带软件解析测量轮廓均方根偏差值和轮廓算术平均偏差值。动电位极化测试,先制备电化学试样,用切割机制备尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的待测试样。试样边缘处抛光处理后,封固于环氧树脂中固定。砂纸打磨待测涂层面光滑后,用无水乙醇清洗表面,静置晾干后备用。CS350电化学工作站极化扫描速率为 1 mV/s ,扫描范围为 $-2.0\sim -1.0\text{ V}_{\text{SCE}}$ 。于伯浩^[10]采用Tafel外推法计算出自腐蚀电流密度。配制模拟体液见表1,将待测试样置于模拟体液中,每隔3 h记录一次溶液pH值,共记录30 h,绘制pH变化曲线。同时记录试样质量变化,每隔3 h取出用钢刷小心处理腐蚀面和沉积物,并用无水乙醇清洗,依据质量差绘制涂层腐蚀率变化曲线。采用ULVAC-PHZ X射线光电子能谱仪对涂层中Ca、P元素及其价态进行分析。测试前用氩气刻蚀处理涂层表面30 s,Al-K α 辐射源,测得的结合能数据需经 $\text{Cl s}=284.8\text{ eV}$ 校准。膜层与基体的结合强度采用标准ASTM C-633测试,将试样两侧用胶带粘到一起,固化后放到CTS-E500/1600

表1 模拟体液各组分含量

Tab.1 Content of the simulated body fluid

含量/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)				
NaCl	KCl	CaCl_2	$\text{MgCl}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	NaHCO_3
8.122	0.248	0.307	0.316	0.350
含量/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)				
$\text{K}_2\text{HPO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Na_2SO_4	Tris	1.0M-HCl	
0.235	0.067	6.106	3.0 mL	

型万能拉伸机上,保持0.5 mm/min的速率进行拉伸,直到基体和试样粘合处发生断裂,记下此时的最大加载力,根据结合强度=最大加载力/试样面积,即可求得膜层的结合强度。

2 试验结果与讨论

2.1 涂层的微观形貌分析

膜层的表面及截面微观形貌见图1。可以看出,Ca-P涂层在Mg-Li合金板材上的分布较为均匀,部分区域有轻微的电弧烧蚀聚集现象,表面没有明显的结构缺陷和Ca-P涂层剥落点。截面形貌的分析则可以得知膜层厚度约为230 μm ,涂层与基体的结合边缘处有一定程度的空隙存在,边缘处以内的部分结合良好。

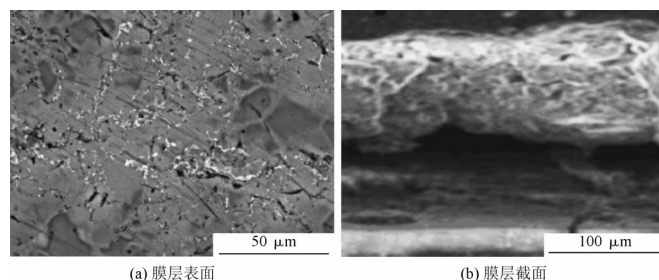


图1 膜层的表面和截面的微观形貌

Fig.1 Surficial and sectional morphologies of film layer

2.2 涂层的三维形貌分析

借助AFM(原子力显微镜)对涂层的三维微观形貌拍照分析,并测量其表面粗糙度值。Ca-P涂层的AFM扫描图片见图2。可以看出,涂层具有典型的多孔结构,表面粗糙度分布较为均匀,微观结构中存在深度1 μm 左右的沟壑。涂层表面的轮廓均方根偏差值为287 nm,轮廓算术平均偏差值为213 nm。粗糙度适中的涂层表面具有较高的比表面积和表面能,有利于Ca-P涂层与骨质矿化形核及成骨细胞的附着^[11-12],方便Mg-Li合金作为生物学支架材料在临床方面的应用。

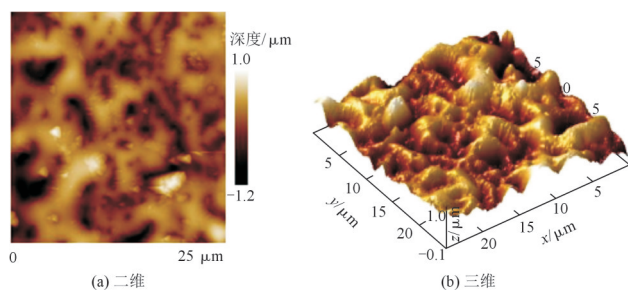


图2 Ca-P涂层的三维形貌显微图

Fig.2 3D morphologies of Ca-P coating

2.3 涂层的XPS谱图分析

图3为Ca-P涂层表面Ca 2p和P 2p的XPS高分辨率谱图,对应标识的峰值结合能可以用于判断和确定各元素的化学态。从图3a可见,Ca 2p的谱图中存在一个明显的分裂峰位,峰值结合能为348 eV(Ca 2p_{3/2},能量峰),对应为Ca₃(PO₄)₂中元素Ca所形成的峰。P 2p的谱图中则可以看出分出两个副峰,分别位于132 eV和134 eV处,推断分别为Mg₃(PO₄)₂和Ca₃(PO₄)₂中元素P所形成的峰。综上所述,Ca-P涂层中的主要成分应为部分表面金属Mg在微弧氧化过程中所形成的MgO,以及XPS窄谱图所显示出的Mg₃(PO₄)₂和Ca₃(PO₄)₂,基本与试验预期结果一致。

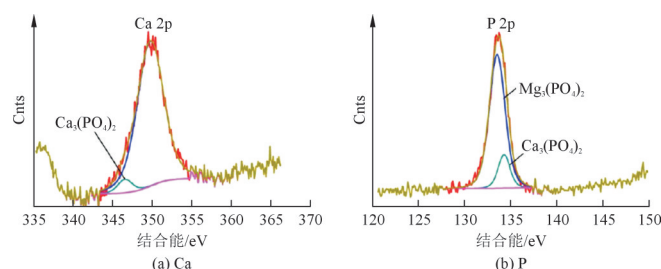


图3 Ca-P涂层的XPS窄谱图

Fig.3 XPS spectrum of Ca-P coating

2.4 涂层的XRD分析

图4为不同微弧氧化时间下的Ca-P涂层XRD分析图谱。可以看出,5 min时对应的衍射峰为Ca₃(PO₄)₂,10 min时对应衍射峰为Ca₃(PO₄)₂、MgO和Mg₃(PO₄)₂,15 min时对应衍射峰为Li₂O、Ca₃(PO₄)₂、MgO、CaO和Mg₃(PO₄)₂。MgO是由高温条件下Mg与基体表面的O快速反应并在遇冷后,凝结在合金表面形成,Mg₃(PO₄)₂则是基体中的Mg²⁺与溶液中的PO₄³⁻反应生成。随着微弧氧化时间的延长,Mg-Li合金成分与Ca-P涂层相结合程度逐渐增加,涂层成分中2 θ =15.2°、24.7°处出现Li₂O衍射峰,且MgO与Mg₃(PO₄)₂的衍射强度逐渐增大,表明适当延长微弧氧化时间有

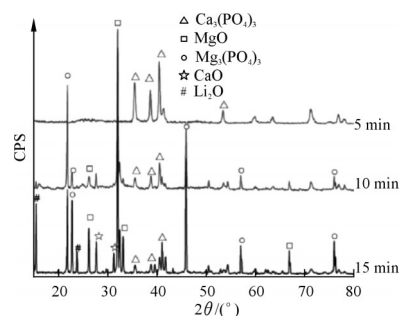


图4 不同微弧氧化时间下Ca-P涂层的XRD谱图

Fig.4 XRD patterns of Ca-P coatings with different micro-arc oxidized durations

利于二者结合紧密度的提升。

2.5 膜层结合强度分析

图5为不同质量分数Ca-P膜层与基体的结合强度测试曲线。可以看出,不同质量分数的Ca-P膜层与基体结合强度不同。随着质量分数的增加膜层结合强度而增大,但是增幅逐渐变缓。这是因为随着Ca-P质量分数的增加,膜层的厚度增加,使膜层与基体结合处的空隙比下降,因此对应结合强度也随之增加。

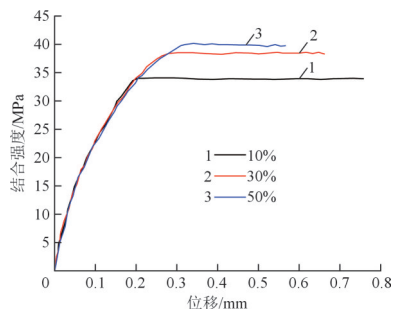


图5 不同质量分数Ca-P膜层与基体的结合强度

Fig.5 Bonding strength of Ca-P film with different contents and substrate

2.6 电流密度对涂层显微硬度的影响

涂层能吸收在Mg-Li合金服役过程中受到冲击时产生的能量,从而避免了涂层产生裂纹和脱落,而显微硬度测试则是用于评价涂层这一性能的指标,测试结果见图6。涂层上不同测试点的显微硬度反映出显微硬度的分布较为不均匀,这与采用微弧氧化技术制备涂层时微观表面的凹凸不平相关。可以看出,随着电流密度增大,涂层平均显微硬度亦随之上升。电流密度为6 A/dm²时,平均显微硬度(HV_{0.2})为796,电流密度增大至12 A/dm²时,平均显微硬度(HV_{0.2})为893。

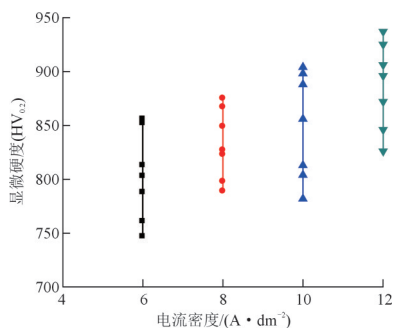


图6 电流密度与涂层显微硬度的影响关系

Fig.6 Relationship of current intensity with microhardness of Ca-P coating

2.7 涂层在模拟体液中的pH及腐蚀率变化

(1)pH值的变化。试验测试了Mg-Li合金表面Ca-P生物涂层浸泡于模拟体液中的pH值变化,见图

7。可以看出,在刚开始的7天内,Ca-P涂层的pH值迅速增大,第9天达到峰值,随后pH值逐渐下降,至约24天时pH值稳定于8.2左右。

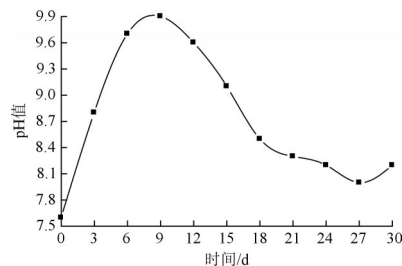


图7 涂层pH值与时间的关系曲线

Fig.7 Relationship of pH value of the coating with time

(2)腐蚀率的变化。图8为浸泡时间与涂层腐蚀率的关系曲线。图9为涂层在模拟体液中腐蚀后的形貌。可以看出,随着浸泡时间延长,腐蚀速率先增大后逐渐减小至趋于稳定。在弱碱性的溶液环境中,Ca、P元素均可与OH⁻生成沉淀物,当沉淀物的含量接近饱和点时,Ca、P元素脱离涂层以离子态进入溶液体系的速率会降低,结合生成相对物的难度加大,因而涂层腐蚀速率有所减缓,腐蚀程度逐渐趋于平稳。与单纯Mg-Li合金板材浸于模拟体液14 d的腐蚀速率2.83 mg/(cm²·d)相比,Ca-P涂层表现出优异的抗腐蚀性能。

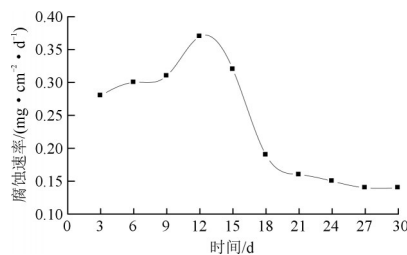


图8 涂层腐蚀速率与时间的关系曲线

Fig.8 Relationship of corrosion rate of the coating with time

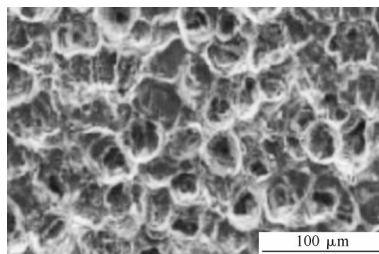


图9 试样模拟体液腐蚀试验后的涂层微观形貌

Fig.9 Microstructure of coating after corrosion test in simulated body fluid

2.8 涂层的电化学腐蚀分析

通过试样的动电位极化分析来表征电化学腐蚀速率,根据Tafel外推法得到的自腐蚀电位、自腐蚀电流密度见表2,动电位极化曲线见图10。根据表2可知,Ca-P涂层比金属Mg和Mg-Li合金的自腐蚀电流密度明

表2 试样的电化学腐蚀相关测定结果
Tab.2 Electrochemical corrosion results of specimens

试样	自腐蚀电位 E/V	自腐蚀电流密度 J/ ($\times 10^{-4} \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
Mg	-1.46 ± 0.08	6.96 ± 1.70
Mg-Li	-1.41 ± 0.10	8.17 ± 1.50
Ca-P涂层(10%)	-1.83 ± 0.06	2.41 ± 1.20
Ca-P涂层(30%)	-1.71 ± 0.09	1.93 ± 0.90
Ca-P涂层(50%)	-1.64 ± 0.08	1.98 ± 0.80

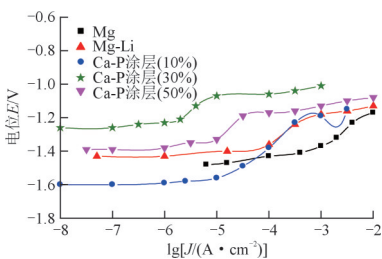


图10 试样的动电位极化曲线

Fig.10 Dynamic polarization curves of specimens

显要低,当Ca-P涂层含量为30%时,自腐蚀电流密度最低,达到 $(1.93 \pm 0.90) \times 10^{-4} \text{A}/\text{cm}^2$ 。Ca-P对Mg-Li合金电化学腐蚀的保护效率可参考文献[13]计算为99.7%,意味着Ca-P涂层对Mg-Li合金而言拥有着十分优异的抗电化学腐蚀性。

Mg-Li合金的电化学反应活性较高,因而在阳极极化初始阶段电腐蚀速率较大。电腐蚀速率由阴极的析氢反应程度所决定,而在Mg-Li合金表面涂覆Ca-P涂层以后,由图10可知,随腐蚀电流密度迅速下降,Ca-P涂层的存在使得Mg-Li合金的自腐蚀电位降低。在阳极极化过程中,阳极的腐蚀电流密度会不断增大,最终与Mg-Li合金的腐蚀电流密度相持平,在此过程中Ca-P涂层在电极化动力学上起到保护Mg-Li合金的作用。并且随着Ca-P涂层含量上升,这种电极化动力学保护作用更强。当Ca-P涂层含量达到50%时,阳极极化进程被钝化,显著抑制了腐蚀反应的进行。

3 结 论

(1)Ca-P涂层的三维形貌呈现多孔结构,存在深度为1 μm左右的沟壑。涂层表面的轮廓均方根偏差值为287 nm,轮廓算术平均偏差值为213 nm。

(2)涂层的主要组成成分为MgO、Mg₃(PO₄)₂和Ca₃(PO₄)₂。微弧氧化工艺中电流密度的大小会影响Ca-P涂层的显微硬度分布,电流密度为6 A/dm²时,涂层平均显微硬度(HV_{0.2})为876。

(3)Ca-P涂层在模拟体液中的pH变化为0~8天,pH迅速增大,从第9天开始pH一直下降至约8.2稳定;腐蚀率方面,0~12天腐蚀率较大,从第13天开始腐

率明显下降至约0.15 mg/(cm²·d)不再明显变化。

(4)Ca-P涂层含量为30%时,自腐蚀电流密度最低为 $(1.93 \pm 0.90) \times 10^{-4} \text{A}/\text{cm}^2$,对应的自腐蚀电位为 $(-1.71 \pm 0.09) \text{V}$ 。

参 考 文 献

[1] 王昌,赵曦,艾迪,等. Mg-Li合金结构与性能的研究进展[J]. 广东化工, 2017, 358(44): 132-133.

[2] 张菊梅,王凯,段鑫,等. LA103Z镁锂合金微弧氧化膜层微观组织及腐蚀行为[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(5): 474-480.

[3] 冯效琰,李瑞红,张晓梅,等. 两道次挤压Mg-5Li-Al镁锂合金的力学性能及成形性[J]. 内蒙古科技大学学报, 2020, 39(2): 47-52.

[4] 苏俊飞. Mg-Li-Y-Zn合金的制备及其组织性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.

[5] 刘宣勇,彭峰. 医用可降解镁合金表面改性研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(10): 1 421-1 431.

[6] 殷毅,张强,傅仰木,等. 可降解镁金属材料表面钙磷复合物涂层处理的研究进展[J]. 中国继续医学教育, 2017, 9(7): 159-161.

[7] 郭晶. 新型Mg-Li-Al合金的微观组织及性能研究[D]. 济南:山东大学, 2019.

[8] 梁思琰,任巍巍,林文鑫,等. 镁合金微弧氧化涂层表面原位制备MgCr-LDH纳米层及其耐蚀机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(8): 2 830-2 838.

[9] 陈美云. 可降解镁表面羟基乙叉膦酸超薄涂层的腐蚀降解性和生物相容性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.

[10] 于伯浩. MnO₂与CNTs增强PbO₂复合阳极的电沉积制备与电化学特性[D]. 昆明:昆明理工大学, 2019.

[11] 王龙. 高熵合金涂层的微结构与耐腐蚀性能研究[D]. 四川自贡:四川理工学院, 2015.

[12] 康明阳. 骨科用生物可降解镁合金材料研制及骨科相关生物学功能研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.

[13] 王珂. 电弧喷涂Al-Zn-Si合金涂层的制备及耐海洋腐蚀性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.

(编辑:张正贺)

2025年多主元合金专题征稿

专题学术主编:华中科技大学 郭 威 副教授
华中科技大学 龚 攀 副教授
河南工业大学 徐 琴 副教授

征稿范围:

- 1.多主元合金的成分设计与优化。
- 2.多主元合金的微观结构调控。
- 3.多主元合金的制备工艺。
- 4.多主元合金的性能研究。
- 5.多主元合金的应用案例。

专题文章收录满之后将享有优先发表机会,欢迎踊跃投稿。

投稿网址:www.special-cast.com

收稿截止日期:2025年6月