

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.12.010

十二烷基苯磺酸钠对化学转化膜耐蚀性的影响

王鹏, 王保杰*, 宫晓婷, 初文超, 刘子豪

(沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 为研究十二烷基苯磺酸钠(SDBS)对镁锂合金钙系磷酸盐化学转化膜耐蚀性的影响, 在成分为7 g/L H₃PO₄、10 g/L Ca(NO₃)₂·4H₂O以及4种浓度梯度SDBS的转化液中制备膜层, 并通过扫描电子显微镜(SEM)、能谱分析(EDS)、析氢实验、电化学分析和光学显微镜对比了膜层的微观结构以及在0.1 mol/L NaCl溶液中的耐蚀性。实验结果表明: 添加0.5 g/L SDBS生成的膜层耐蚀性最优; 浸泡124 h的析氢速率最小、析氢体积最少; 腐蚀电流密度为 5.73×10^{-6} A/cm², 低于其它浓度的腐蚀电流密度; 阻抗弧半径最大, 且浸泡48 h时的腐蚀坑高低差仅为46.72 μm。

关键词: 镁锂合金; 磷酸盐化学转化膜; 十二烷基苯磺酸钠; 表面活性剂

中图分类号: TG178; TQ050.9

文献标识码: A

Effects of sodium dodecyl benzene sulfonate on the corrosion resistance of chemical conversion coating

Wang Peng, Wang Baojie*, Gong Xiaoting, Chu Wenchao, Liu Zihao

(School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: To investigate the effect of sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) on the corrosion resistance of calcium based phosphate chemical conversion coatings on magnesium lithium alloys, coatings were prepared in conversion solutions with compositions of 7 g/L H₃PO₄, 10 g/L Ca(NO₃)₂·4H₂O and four different concentration gradients of SDBS. Furthermore, microstructure and corrosion resistance of the coatings in a 0.1 mol/L NaCl solution was studied by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), hydrogen evolution experiments, electrochemical analysis and optical microscopy. The experimental results show that the optimized corrosion resistance coating is prepared by adding 0.5 g/L SDBS. After being immersed for 124 h, the hydrogen evolution rate and the volume of evolved hydrogen of the coated sample are the smallest than that of other conditions and its corrosion current density is only 5.73×10^{-6} A/cm². The radius of impedance arc is the largest, and the height difference of corrosion pits after immersion for 48 hours is only 46.72 μm.

Keywords: magnesium lithium alloy; phosphate chemical conversion film; sodium dodecyl benzene sulfonate; surfactant

收稿日期: 2025-01-08

修回日期: 2025-03-05

作者简介: 王鹏(1999—), 男, 硕士研究生, email: 286961003@qq.com

通信作者: 王保杰, email: bjwang@alum.imr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(52071220)

引用信息: 王鹏, 王保杰, 宫晓婷, 等. 十二烷基苯磺酸钠对化学转化膜耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(12): 71-77.

Wang Peng, Wang Baojie, Gong Xiaoting, et al. Effects of sodium dodecyl benzene sulfonate on the corrosion resistance of chemical conversion coating[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(12): 71-77.

能源危机、资源短缺是世界发展面临的难题之一。因此,使用轻质材料进行节能减重在各个领域都具有重要意义^[1-2]。镁锂合金作为目前最轻的轻质材料之一,具有密度低、延展性好、比刚度高等特点,被广泛应用在各个领域中^[3-5]。例如:在航空航天领域,使用镁锂合金可以减轻航天器的重量,减少燃料消耗,降低飞行成本,提高飞行速度;在汽车领域中,镁锂合金板材是车门、底盘、发动机等车体零件的首选材料之一;在电子产品领域中,随着智能手机、平板电脑和笔记本等产品的普及与发展,人们对于轻量化与便捷性的需求日益增加等等。镁锂合金的微观结构与锂元素的含量有关,当锂含量介于5.7%~10.3%之间时,形成由 α -Mg相和 β -Li相共同组成的典型双相结构^[6-9]。相较于 α -Mg相, β -Li相是一种软韧相,滑移系较多,能够有效提高镁锂合金的延展性和塑性成形性^[6-7, 10-13]。然而,由于 α -Mg和 β -Li的电位值不同,容易在腐蚀溶液中发生微电偶腐蚀,加速合金腐蚀^[14-17]。Song等^[18]研究发现,双相镁锂合金的腐蚀优先发生在 α -Mg和 β -Li的相界面处,然后向着 β -Li相发生丝状腐蚀。所以,提高双相镁锂合金的耐腐蚀性能变得至关重要^[19-22]。磷酸盐化学转化法是一种以金属与转化液发生化学反应、在合金表面生成保护膜的方法,具有安全无毒、操作简便、经济有效和附着能力强等优点,被广泛应用^[23-27]。

近年来的研究表明,添加表面活性剂会对转化膜层的耐蚀性产生影响^[14, 28-30]。卢子慧^[28]发现表面活性剂可以降低TiO₂的表面能,增大其分散性,同时填充膜层空隙、细化晶粒,使膜层更完整、致密。Cui等^[14]研究了表面活性剂的种类对镁锂合金防护性能的影响,发现表面活性剂的添加提高了膜层的耐蚀性,且添加阴离子型表面活性剂所制备的膜层更致密,对镁锂合金的防护性能更好。Pragathi等^[29]通过考察阴离子表面活性剂对镀层表面行为的影响发现,表面活性剂导致化学反应过程中生成的Ni均匀沉积在镁基体表面上,从而使镀层表面更光滑,耐蚀性更高。周虎亮等^[30]发现阴离子表面活性剂可改善AZ91D镁合金的表面状态,使膜层结晶更加细密、均匀、平整,有效提高了镁合金基体的防护性能。然而,阴离子型表面活性剂浓度对镁锂合金腐蚀行为的影响研究较少。本研究通过在转化液中加入不同浓度十二烷基苯磺酸钠(SDBS),研究阴离子表面活性剂浓度对镁锂合金表面钙系磷酸盐化学转化膜腐蚀行为的影响。

1 实验

1.1 样品预处理

实验选用材料为Mg-8Li合金,样品尺寸为10 mm×10 mm×10 mm。样品预处理流程:合金→水磨砂纸(400#~2000#)打磨→乙醇超声(10 min)→碱洗(60 °C, 10 min)→酸洗(室温, 20 s)→转化(45 °C, 25min)。其中,碱洗液成分为10 g/L Na₃PO₄和50 g/L NaOH;酸洗液成分为85% H₃PO₄;转化液成分为7 g/L H₃PO₄、10 g/L Ca(NO₃)₂·4H₂O和不同浓度梯度的SDBS, SDBS的浓度依次为0、0.5、1.0和1.5 g/L, pH均为3。

1.2 析氢实验与电化学测试

将合金放入盛有0.1 mol/L NaCl溶液的烧杯底部中央,漏斗扣住合金,用洗耳球将溶液的凹液面吸到最顶端刻度线相切的位置,关闭滴管的活塞,每2 h记录一次析氢体积,析氢实验装置见文献^[16]。

电化学测试在CHI660e电化学工作站上进行。采用三电极体系进行测试,镁锂合金为工作电极,饱和甘汞电极为参比电极,铂电极为辅助电极,腐蚀介质为0.1 mol/L NaCl溶液。测试时,先进行开路电位(OCP)测试,然后在频率范围100 kHz~0.01 Hz、交流振幅为10 mV的条件下进行交流阻抗测试。动电位极化测试在相对OCP电位的-250~+250 mV区间以0.5 mV/s的扫描速率进行。

1.3 表征

采用FEIQUANTA450型扫描电子显微镜(SEM)和VHX-900F型的光学显微镜(OM)来表征微观组织和腐蚀形貌,电镜的加速电压为20 kV,并通过能谱仪(EDS)对膜层成分进行定性分析。

2 结果与讨论

2.1 转化膜微观结构表征

图1为添加不同浓度SDBS所制备的钙系磷酸盐化学转化膜的SEM图。由图可知,加入表面活性剂SDBS后,合金表面形成局部且紧凑的蝴蝶结状结构,且随着SDBS浓度的升高,该结构先逐渐均匀地包覆在合金表面,后又形成局部的花状结构。虽然添加1.0 g/L SDBS的膜层均匀性较好,但裂缝较多。添加1.5 g/L SDBS膜层的均匀性较差。

图2是添加不同浓度SDBS的磷酸盐化学转化膜的EDS结果。由图可知,添加SDBS制备的膜层主要元素基本相同,均包含C、N、O、Na、Mg、P、S和Ca元素。与未添加SDBS所得膜层对比, SDBS参

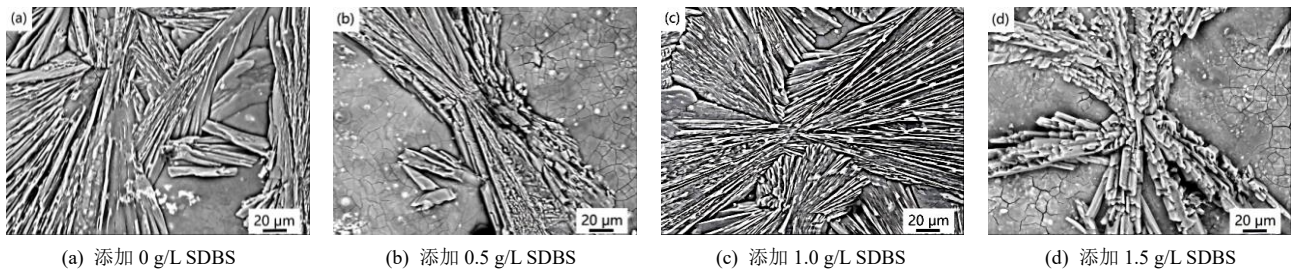
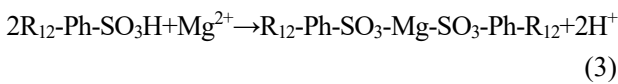
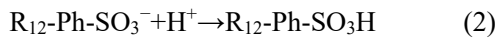


图1 添加不同浓度 SDBS 的磷酸盐化学转化膜的 SEM 照片

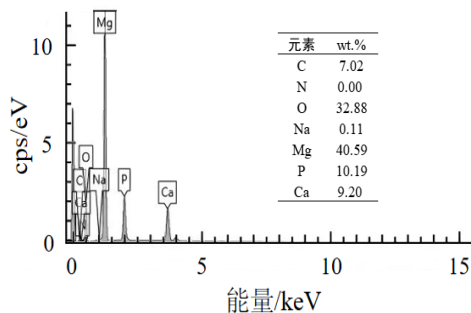
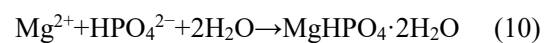
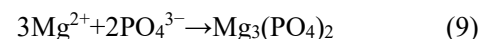
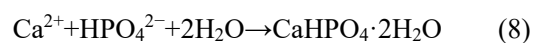
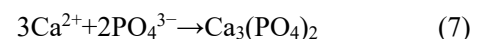
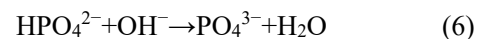
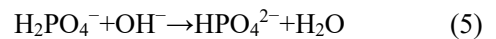
Fig.1 SEM images of phosphate chemical conversion coatings with different concentrations of SDBS added

与了膜层形成。目前,吸附理论可以较好解释SDBS对金属的耐蚀作用^[31-34]。SDBS是一种阴离子型表面活性剂,在溶液中可电离出DBS⁻阴离子,两端分别为亲水性磺酸根(含有S元素)和疏水性苯烷基。DBS⁻阴离子可吸附镁锂合金腐蚀过程中产生的Mg²⁺^[17],形成十二烷基苯磺酸镁,其反应如下^[34]:

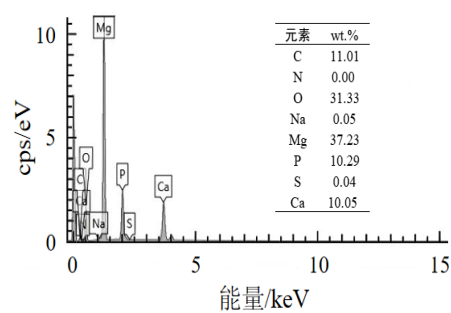


在溶液中加入SDBS后,电离出的DBS⁻阴离子还会以磺酸根朝向合金表面、疏水性的苯烷基朝向腐蚀溶液的方式发生电性吸附。当吸附过量DBS⁻后,因携带的同种电荷产生排斥力而导致吸附性变

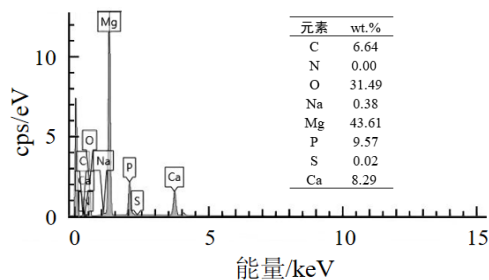
差,导致腐蚀加速。Mg元素含量较高的原因可能是膜层较薄,电子束击穿膜层到达镁锂合金表面导致的。此外,Ca、P和O含量相对较高的原因是生成了Ca₃(PO₄)₂、CaHPO₄·2H₂O、Mg₃(PO₄)₂和MgHPO₄·2H₂O等物质,其较高的稳定性可有效提高膜层的耐蚀性,反应方程式如下^[35]:



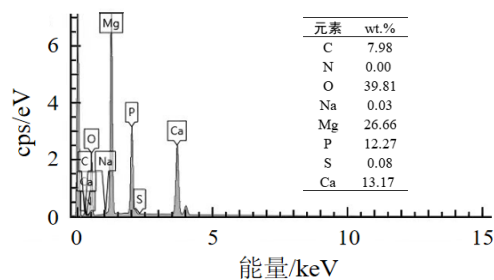
(a) 添加 0 g/L SDBS



(b) 添加 0.5 g/L SDBS



(c) 添加 1.0 g/L SDBS



(d) 添加 1.5 g/L SDBS

图2 添加不同浓度 SDBS 的磷酸盐化学转化膜的 EDS 结果

Fig.2 EDS results of phosphate chemical conversion coatings with different concentrations of SDBS added

2.2 析氢实验结果

图3是试样在0.1 mol/L NaCl溶液中浸泡124 h时，单位面积的析氢体积与时间曲线。对于相同表面积的镁锂合金，氢气析出的速率越快，镁锂合金腐蚀速率越快。由图3可知，浸泡前6 h，样品表面几乎没有氢气产生，膜层对镁锂合金具有较好的保护作用。浸泡6~36 h期间，氢气缓慢析出，膜层被破坏，试样开始被腐蚀，其腐蚀优先以点蚀的方式发生在两相界面处，然后随浸泡时间的增长，腐蚀向更活泼的β-Li相延伸，形成丝状腐蚀^[18]。浸泡36 h后，未添加SDBS和添加浓度为1.5 g/L SDBS样品的析氢速率大幅提升，而添加浓度为0.5、1.0 g/L SDBS样品的析氢速率则小幅上涨，这表明未添加SDBS和添加SDBS浓度过高均不利于样品的防护。此外，SDBS添加量为0.5 g/L样品的析氢速率和析氢量始终小于SDBS添加量为1.0 g/L样品的析氢速率和析氢量。当加入表面活性剂SDBS时，DBS⁻以苯烷基朝外的方式吸附在合金表面，形成的十二烷基苯磺酸镁是一种具有疏水性、排列紧密的单分子吸附层，可将合金与腐蚀介质分隔开，有效保护合金进而提高其耐蚀性，因此析氢速率缓慢。当加入过量的SDBS时，合金表面吸附大量DBS⁻，形成的吸附层内部可能出现库仑排斥力，从而导致吸附不均匀、疏松，无法有效包覆在合金表面，耐蚀性变差，其析氢速率变快。

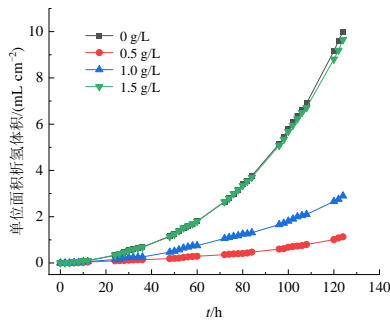


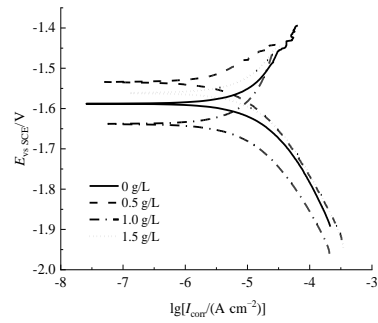
图 3 添加不同浓度 SDBS 制备的磷酸盐化学转化膜在 0.1 mol/L NaCl 溶液中的单位面积析氢体积-时间曲线

Fig.3 Hydrogen evolution volume-time curves of phosphate chemical conversion coatings prepared with different concentrations of SDBS added in 0.1 mol/L NaCl solution

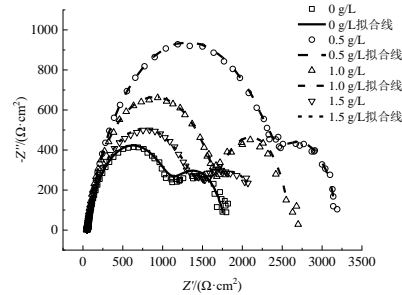
2.3 电化学实验结果

图4为添加不同浓度SDBS制备磷酸盐化学转化膜的电化学分析图。图4(a)为动电位极化曲线，表1为Tafel外推法拟合所得腐蚀电流密度表。金属的抗

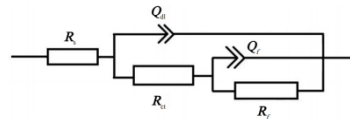
腐蚀能力与腐蚀电流密度有关，腐蚀电流密度越小，金属的抗腐蚀能力越强。由表1可知，添加0.5 g/L SDBS样品的腐蚀电流密度最小，膜层的耐蚀性最好。图4(b)和4(c)是拟合的Nyquist图及其等效电路图，容抗弧半径的大小代表了膜层耐腐蚀性能的高低，容抗弧半径越大，膜层的耐蚀性越高。



(a) 极化曲线



(b) Nyquist 图



(c) 等效电路图

图 4 添加不同浓度 SDBS 制备的磷酸盐化学转化膜在 0.1 mol/L NaCl 溶液中的电化学分析

Fig.4 Electrochemical analysis of phosphate chemical conversion coatings prepared with different concentrations of SDBS added in a 0.1 mol/L NaCl solution

表 1 添加不同浓度 SDBS 制备的磷酸盐化学转化膜在 0.1 mol/L NaCl 溶液中的腐蚀电流密度

Tab.1 Corrosion current density of phosphate chemical conversion coatings prepared with different concentrations of SDBS added in 0.1 mol/L NaCl solution

SDBS 浓度/(g·L ⁻¹)	腐蚀电流密度 $I_{corr}/(A·cm^{-2})$
0	10.10×10^{-6}
0.5	5.73×10^{-6}
1.0	7.26×10^{-6}
1.5	9.77×10^{-6}

表2是阻抗拟合参数, 其中: R_s 表示溶液电阻; R_{ct} 表示界面电荷转移电阻, 其值越大表明溶解速率越低; R_f 为膜电阻; Q_{dl} 和 Q_f 分别表示与 R_{ct} 和 R_f 并联

的电容。由图4(b)和表2可知, 添加0.5 g/L SDBS所得膜层的容抗弧半径最大, R_{ct} 值最大, 表明膜层耐蚀性最好, 与动电位极化曲线结果一致。

表 2 阻抗谱图拟合参数

Tab.2 Fitted parameters of EIS

SDBS 浓度 (g·L ⁻¹)	R_s /($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Y_{dl} /($\Omega \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n$)	n_{dl}	R_{ct} /($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Y_f /($\Omega \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n$)	n_f	R_f /($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
0	57.64	4.53×10^{-5}	0.822 1	1110	2.11×10^{-3}	0.836 1	619
0.5	62.32	3.95×10^{-5}	0.820 4	2494	4.18×10^{-3}	1.000 0	624
1.0	47.52	3.73×10^{-5}	0.845 1	1699	3.88×10^{-3}	1.000 0	830
1.5	53.25	4.88×10^{-5}	0.795 2	1388	4.13×10^{-3}	0.685 3	879

2.4 转化膜腐蚀形貌表征

图5是样品在0.1mol/L NaCl溶液中浸泡2 h的局部腐蚀形貌图。由图5可知, 当浸泡2 h时, 样品表面膜层较为完好, 腐蚀程度较轻, 表明该阶段膜层对合金具有保护作用。

图6是样品在0.1 mol/L NaCl溶液中浸泡8 h的局部腐蚀形貌图。由图6可知, 随着浸泡时间的增加, 样品膜层发生局部腐蚀, 腐蚀区域扩大, 腐蚀程度

加深, 腐蚀坑高低差升高, 表明膜层耐蚀性降低。其中, 由图6(b) 3D图像可知, 添加0.5 g/L SDBS的膜层腐蚀坑高低差为21.29 μm 。

图7是样品在0.1 mol/L NaCl溶液中浸泡48 h的局部腐蚀形貌图。由图7可知, 当浸泡时间为48 h时, 膜层几乎被完全腐蚀, 失去对合金的保护能力。由图7(b) 3D图像可知, 添加0.5 g/L SDBS的膜层腐蚀坑高低差最小, 为46.72 μm , 膜层的耐腐蚀能力最优。

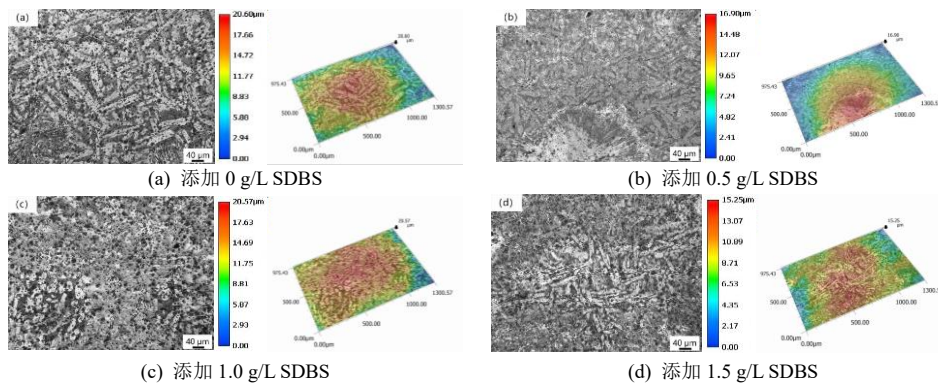


图 5 添加不同浓度 SDBS 制备磷酸盐化学转化膜浸泡 2 h 时的腐蚀形貌和局部区域 3D 图像

Fig.5 Corrosion morphology and local 3D images of phosphate chemical conversion coatings prepared with different concentrations of SDBS added after immersion for 2 h

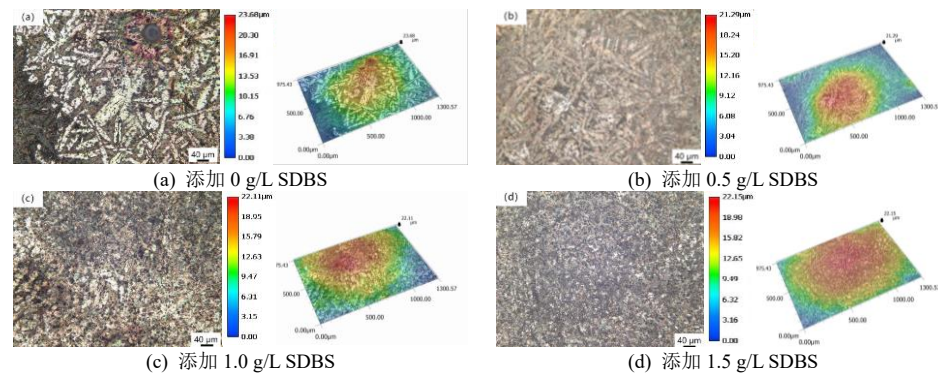


图 6 添加不同浓度 SDBS 制备磷酸盐化学转化膜浸泡 8 h 时的腐蚀形貌和局部区域 3D 图像

Fig.6 Corrosion morphology and local 3D images of phosphate chemical conversion coatings prepared with different concentrations of SDBS added after immersion for 8 h

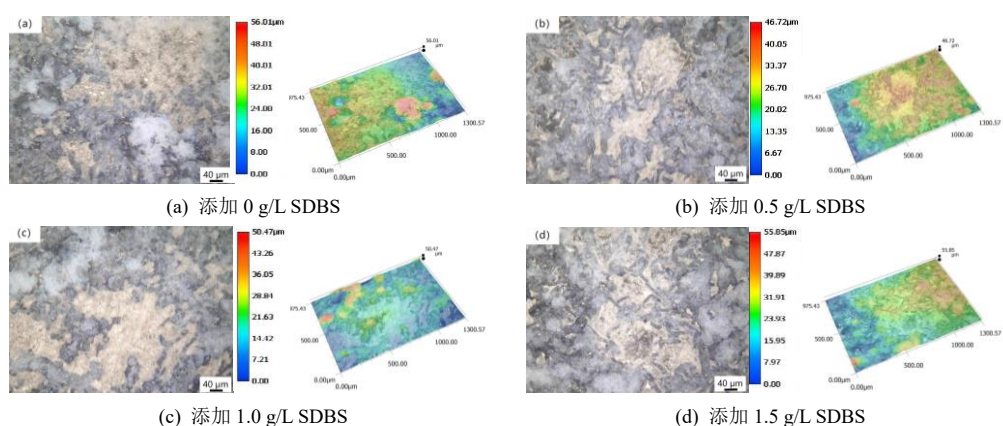


图7 添加不同浓度 SDBS 制备磷酸盐化学转化膜浸泡 48 h 时的腐蚀形貌和局部区域 3D 图像

Fig.7 Corrosion morphology and local 3D images of phosphate chemical conversion coatings prepared with different concentrations of SDBS added after immersion for 48 h

3 结论

(1) 随着SDBS浓度的增加,膜层由蝴蝶结状结构,逐渐均匀包覆在合金表面,最后又形成花状结构。膜层的构成元素主要是Mg、O、P、Ca和少量S,以磷酸钙、磷酸氢钙、磷酸镁、磷酸氢镁及少量十二烷基苯磺酸镁的形式存在。

(2) 添加0.5 g/L SDBS的膜层在0.1 mol/L NaCl溶液中的析氢速率、析氢量和腐蚀电流密度均为最小,容抗弧最大, R_{ct} 值最大,且浸泡48 h时的腐蚀坑高低差最小,表明添加0.5 g/L SDBS膜层的耐蚀性最好。

参考文献

- [1] Esmaily M, Svensson J E, Fajardo S, et al. Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion[J]. Progress in Materials Science, 2017, 89: 92-193.
- [2] Li Z J, Ren Q H, Wang X X, et al. 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.
- [3] Wang D, Liu S J, Wu R Z, et al. Synergistically improved damping, elastic modulus and mechanical properties of rolled Mg-8Li-4Y-2Er-2Zn-0.6Zr alloy with twins and long-period stacking ordered phase[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 881, 160663.
- [4] Ma X C, Jin S Y, Wu R Z, et al. Corrosion behavior of Mg-Li alloys: A review[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(11): 3228-3254.
- [5] Saran D, Kumar A, Bathula S, et al. Review on the phosphate-based conversion coatings of magnesium and its alloys[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(7): 1435-1452.
- [6] 陈小亮, 杨波, 顾亦诚, 等. 超轻体心立方(BCC)结构镁锂合金强化研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(4): 457-464.
- [7] 王硕, 许道奎, 王东亮, 等. 超轻镁锂合金强化方法的研究现状[J]. 机械工程材料, 2023, 47(5): 94-101.
- [8] 吴洪超, 唐玲玲, 赵永好. 热处理对双相 Mg-8Li-4Al-3Zn-La 合金组织与性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(2): 190-194.
- [9] 张洁. 合金元素对 Mg-8Li 系双相合金微观组织和力学性能的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [10] Wu R, Yan Y, Wang G, et al. Recent progress in magnesium-lithium alloys[J]. International Materials Reviews, 2014, 60(2): 65-100.
- [11] Liu Z, Nie J F, Zhao Y H. Effect of deformation processing on microstructure evolution and mechanical properties of Mg-Li alloys: A review[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(1): 1-25.
- [12] 王佳豪. 双相镁锂基材料制备及其电磁屏蔽和力学性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [13] 刘金学, 解海涛, 郭晓光, 等. 双相 LZ91 镁锂合金超塑性变形行为及组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(3): 713-720.
- [14] Cui L J, Wang B J, Hou J Y, et al. Influence of surfactant types on the anti-corrosion performance of phosphate chemical conversion coated Mg-8wt.%Li alloy[J]. Coatings, 2024, 14(5): 641.

- [15] Zhu Y X, Zhou M R, Geng Y X, et al. Microstructural evolution and its influence on mechanical and corrosion behaviors in a high-Al/Zn containing duplex Mg-Li alloy after friction stir processing[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 184: 245-255.
- [16] 马晓春. Mg-14Li 合金腐蚀性能和微弧氧化防护研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- [17] 田光元, 严程铭, 杨智皓, 等. 耐腐蚀 Mg-Li 合金的腐蚀与防护及其性能研究进展[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2023, 43(6): 1255-1263.
- [18] Song Y W, Shan D Y, Chen R S, et al. Corrosion characterization of Mg-8Li alloy in NaCl solution[J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(5): 1087-1094.
- [19] Yang M, Feng J W, Hu H D, et al. Microstructure and corrosion resistance of ultrahigh pressure Mg-8Li based alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 966: 171543.
- [20] Sun Y H, Zhang F, Wang R C, et al. Improving the corrosion resistance of Mg-8Li-3Al-2Zn alloy by combining Gd alloying and hot extrusion[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 964: 171205.
- [21] Tian G Y, Wang J S, Zhang C, et al. Quantifying the influence of microstructure on the corrosion of Mg-Li alloys by using X-ray CT[J]. *Corrosion Science*, 2024, 229: 111848.
- [22] Tian G Y, Wang J S, Xue C P, et al. Improving corrosion resistance of Mg-Li alloys by Sn microalloying[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 199-217.
- [23] 栾吉瑜, 王保杰, 许道奎, 等. 镁锂合金表面腐蚀防护研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(Z2): 1441-1446.
- [24] 王桂香, 王洋洋, 吴舜. 镁锂合金表面锌锰磷化膜的制备与性能表征[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(7): 1764-1768.
- [25] 江溪, 张春红, 高丽丽. 镁锂合金表面磷酸盐转化膜研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, 31(3): 391-394.
- [26] 许凯. 不同结构镁锂合金表面化学转化膜的制备及其性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022.
- [27] 黄晓梅, 刘亮, 王艳艳. 镁锂合金的锰系磷化膜[J]. *材料科学与工艺*, 2010, 18(5): 680-684.
- [28] 卢子慧. 镁锂合金表面聚苯胺复合涂层耐腐蚀性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- [29] Pandian P, Sundaram P, Sathishkumar A, et al. Effect of sodium dodecyl sulfate surfactant on the surface properties of electroless NiP-TiO₂-ZrO₂ composite coatings on magnesium AZ91D substrate[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2023, 16(9): 105028.
- [30] 周虎亮, 杜晓宇. 不同表面活性剂对镁合金表面磷化膜防护性能的影响[J]. *天津化工*, 2022, 36(5): 19-22.
- [31] 司玉军, 熊中平, 陈昌国, 等. 十二烷基苯磺酸钠对 AZ31 镁合金缓蚀作用研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(12): 2244-2247.
- [32] 李凌杰, 姚志明, 雷惊雷, 等. 十二烷基苯磺酸钠在 AZ31 镁合金表面的吸附及其缓蚀作用[J]. *物理化学学报*, 2009, 25(7): 1332-1336.
- [33] Wang A W, Zhu Q, Xing Z P. A functionalized chitosan wrinkled hollow sphere containing calcium ions: Efficient adsorption of sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS) from aqueous solutions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 555: 203-213.
- [34] 柳潇, 丁一刚, 邓伏礼, 等. 十二烷基苯磺酸钠净化湿法磷酸的工艺研究[J]. *山东化工*, 2018, 47(6): 6-7.
- [35] Maurya R, Siddiqui A R, Balani K. An environment-friendly phosphate chemical conversion coating on novel Mg-9Li-7Al-1Sn and Mg-9Li-5Al-3Sn-1Zn alloys with remarkable corrosion protection[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 443(1): 429-440.