

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.02.012

建筑用 Mg-Al-Zn 合金超疏水表面构建及其对耐蚀性影响

夏明月¹, 张长命²

(1. 信阳职业技术学院 建筑工程学院, 河南 信阳 464000; 2. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 采用由硫酸铜、氯化钠、柠檬酸与磷酸配制的环保型溶液对建筑行业常用的 Mg-Al-Zn 合金进行化学刻蚀, 并优选刻蚀时间, 然后采用全氟辛基三乙氧基硅烷与乙醇混合溶液进行表面修饰, 再经过高温烘烤, 成功构建了 Mg-Al-Zn 合金超疏水表面。借助扫描电镜和能谱仪观察并分析了刻蚀+修饰+烘烤后 Mg-Al-Zn 合金的形貌和表面成分, 采用红外光谱仪和电化学工作站测试了红外光谱和耐蚀性。结果表明: 刻蚀时间较短或过长时, 经过表面修饰和烘烤无法使 Mg-Al-Zn 合金表面形成均匀的微纳米分级结构, 虽然处理后 Mg-Al-Zn 合金表面呈现疏水性, 但耐蚀性不太理想。经过 1 min 刻蚀+表面修饰 120 min+120 °C 烘烤 10 min, Mg-Al-Zn 合金表面形成均匀的微纳米分级结构, 呈现超疏水性, 其耐蚀性与未处理的 Mg-Al-Zn 合金相比提高。

关键词: 超疏水表面; Mg-Al-Zn 合金; 耐蚀性; 化学刻蚀; 表面修饰

中图分类号: TG174; TQ153 **文献标志码:** A

Effects of super-hydrophobic surface on Mg-Al-Zn alloy for architectural and its influence on corrosion resistance

XIA Mingyue¹, ZHANG Changming²

(1. Architectural Engineering Institute, Xinyang Vocational and Technical College, Xinyang 464000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: An environmentally friendly solution composed of copper sulfate, sodium chloride, citric acid, and phosphoric acid was used to chemically etch the commonly used Mg Al Zn alloy in the construction industry, and the etching time was optimized. Then, a mixed solution of perfluorooctyltriethoxysilane and ethanol was used for surface modification, followed by high-temperature baking to successfully construct a super-hydrophobic surface on Mg Al Zn alloy. The morphology and surface composition of the Mg-Al-Zn alloy after etching, modification and baking were observed and analyzed using scanning electron microscopy and energy-dispersive spectroscopy. Infrared spectroscopy and corrosion resistance were tested using an infrared spectrometer and electrochemical workstation. The results indicate that when the etching time is insufficient or excessive, surface modification and baking cannot form a uniform micro-nano hierarchical structure on the surface of Mg Al Zn alloy. Although the surface of Mg Al Zn alloy exhibits hydrophobicity after treatment, its corrosion resistance is not ideal. After 1 minute of etching, 120 minutes of surface modification, and 10 minutes of baking at 120 °C, a uniform micro nano hierarchical structure can be formed on the surface of Mg Al Zn alloy, exhibiting super-hydrophobicity. Its corrosion

收稿日期: 2025-05-12 修回日期: 2025-07-06

通信作者: 夏明月(1992—), 硕士, 讲师, 研究方向为建筑工程材料、表面改性, e-mail: LXLMXIA1992@163.com

基金项目: 河南省重点研发与科技推广专项(222102220005)

引用信息: 夏明月, 张长命. 建筑用 Mg-Al-Zn 合金超疏水表面构建及其对耐蚀性影响[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(2): 105-111. XIA Mingyue, ZHANG Changming. Effects of super-hydrophobic surface on Mg-Al-Zn alloy for architectural and its influence on corrosion resistance[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(2): 105-111.

resistance is improved compared to untreated Mg Al Zn alloy.

Keywords: super-hydrophobic surface; Mg-Al-Zn alloy; corrosion resistance; chemical etching; surface modification

建筑结构轻量化将成为趋势,为了契合该趋势,应当采用轻质、高强度、耐久性材料。Mg-Al-Zn合金因具有良好的力学性能和环境适应性、优异的铸造性能和加工性能,是理想的轻量化材料^[1-3],适合制造模板、檩条、墙面板、幕墙骨架等建筑构件。然而,Mg-Al-Zn合金因成分特殊容易发生点蚀和电偶腐蚀,制约其使用寿命。为了延长Mg-Al-Zn合金的使用寿命,对其进行表面处理是有效途径。但传统的表面处理技术(比如磷化、化学镀、化学转化等)多使用高浓度酸性溶液或硝酸盐、重金属离子作为添加剂,存在废液处理困难、污染环境等问题^[4-7]。

近年来研究的热点—超疏水表面制备技术^[8-10],为提高Mg-Al-Zn合金的耐蚀性提供了新思路。假设采用化学刻蚀、电化学刻蚀等方法使Mg-Al-Zn合金表面形成微纳米分级结构,然后采用有机物进行表面修饰,再经过高温烘烤构建超疏水表面,有望明显提高Mg-Al-Zn合金的耐蚀性。比较来看,化学刻蚀和电化学刻蚀方法各有优缺点,但前者操作简便、成本低廉、可控性好并且材料适用性广,在构建超疏水表面时更受青睐。现有研究普遍采用毒性强、危害大的化学刻蚀溶液^[11-12],虽然经过后续处理能成功构建超疏水表面,但是废液处理难度大,既增加了成本还会造成环境污染,无法用于工业化生产。

针对该问题,本文提出一种基于环保型溶液化学刻蚀、有机物表面修饰与高温烘烤相结合来构建Mg-Al-Zn合金超疏水表面的策略。具体是采用由硫酸铜、氯化钠、柠檬酸与磷酸配制的环保型溶液对建筑行业常用的Mg-Al-Zn合金进行化学刻蚀,然后采用全氟辛基三乙氧基硅烷与乙醇混合溶液进行表面修饰,再经过高温烘烤,以期构建Mg-Al-Zn合金超疏水表面。

1 实验

1.1 材料与试剂

实验选用的Mg-Al-Zn合金化学成分(质量分数)为:Al 9.00%、Zn 0.64%、Mn 0.33%、Mg余量,试样尺寸为50 mm×30 mm×2 mm。实验过程中使用乙醇、硫酸铜、氯化钠、柠檬酸、磷酸、全氟辛基三

乙氧基硅烷等试剂。

1.2 实验方法

第一步: Mg-Al-Zn合金试样抛光,然后放入乙醇中超声波清洗,5 min后取出烘干。

第二步: 将抛光和清洗后的Mg-Al-Zn合金试样放入由硫酸铜、氯化钠、柠檬酸与磷酸配制的预热至40 °C的溶液(硫酸铜10 g/L+氯化钠15 g/L+柠檬酸1 g/L+磷酸2 mL/L)中进行化学刻蚀,调控刻蚀时间分别为20 s、1 min、2 min和4 min。

第三步: 配制全氟辛基三乙氧基硅烷(质量分数为2%)与乙醇混合溶液,常温下对刻蚀后Mg-Al-Zn合金试样进行表面修饰,时间为120 min。

第四步: 将表面修饰后Mg-Al-Zn合金试样放入烤箱中,120 °C恒温烘烤10 min。

1.3 测试方法

借助Gemini SEM460型扫描电镜观察喷金后试样的形貌,并借助能谱仪分析试样表面成分。拍摄形貌图像时设置加速电压为10 kV,拍摄能谱图时设置面扫描模式。

借助D/Max 2500型X射线衍射仪(Cu靶、电压45 kV、电流40 mA、角度范围30°~90°)并结合Jade软件分析试样的物相。借助Nicolet iS20型红外光谱仪测试试样在400~2 400 cm⁻¹范围内的红外光谱,然后分析试样的红外光谱特征。

在试样表面随机选取位置滴3滴体积为4 μL的水滴,借助JY-82C型接触角仪测量静态接触角,然后取平均值。根据水滴的静态接触角可以评价试样表面润湿性。

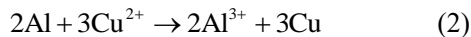
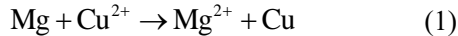
借助Parstat 2273型电化学工作站测定试样的极化曲线,采用由参比电极(饱和甘汞电极)、辅助电极(铂电极)与工作电极(待测试样)组成的三电极体系,并以3.5 wt.%氯化钠溶液作为腐蚀介质。待三电极体系浸泡在氯化钠溶液中达到稳定开路电位状态,然后开始测试,以恒定速率(1 mV/s)扫描获得极化曲线。

2 结果与讨论

2.1 形貌、表面成分、物相与结构分析

图1(a)为未处理的Mg-Al-Zn合金形貌,图1(b)~(e)为刻蚀后Mg-Al-Zn合金的形貌。观察发现,刻蚀

改变了Mg-Al-Zn合金的形貌特征,刻蚀后Mg-Al-Zn合金表面沉积大量尺寸为纳米级和微米级的颗粒,还形成微纳米级的毛绒状结构以及微米级的坑洞和沟槽。但改变刻蚀时间对Mg-Al-Zn合金的形貌特征造成显著影响。根据化学刻蚀使用的溶液成分并结合相关研究分析,Mg-Al-Zn合金在由硫酸铜、氯化钠、柠檬酸与磷酸配制的溶液中会发生复杂反应,并且可能存在协同作用。具体来说,氯化钠溶于水生成 Cl^- ,凭借强穿透能力会破坏Mg-Al-Zn合金表面自然形成的氧化膜,导致发生点蚀。硫酸铜溶于水生成 Cu^{2+} ,会与Mg、Al发生置换反应(参见式(1)和式(2)),生成单质Cu沉积在Mg-Al-Zn合金表面。但单质Cu沉积易引起电偶腐蚀,与点蚀协同作用导致Mg-Al-Zn合金表面形成微米级的坑洞和沟槽。磷酸溶于水生成一部分磷酸根,与 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 结合形成 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 AlPO_4 (参见式(3)和式(4))^[13]沉积在Mg-Al-Zn合金表面,无序沉积的磷化物与单质Cu共同形成微纳米分级结构。磷化物逐步沉积还可能形成磷酸盐膜,使Mg-Al-Zn合金表面电化学性质发生改变,腐蚀程度减轻。



如图1(b)所示,20 s刻蚀后Mg-Al-Zn合金表面仅局部区域形成微纳米分级结构,沉积的单质Cu和磷化物没有完全覆盖Mg-Al-Zn合金表面。观察图1(b)还发现,20 s刻蚀后Mg-Al-Zn合金表面腐蚀程度较轻,未形成明显的坑洞和沟槽。如图1(c)所示,1 min刻蚀后Mg-Al-Zn合金表面形成较均匀的微纳米分级结构,单质Cu和磷化物较均匀沉积并且呈交错分布,几乎完全覆盖在刻蚀过程中形成的坑洞和沟槽上。如图1(d)所示,2 min刻蚀后虽然Mg-Al-Zn合金表面沉积许多单质Cu和磷化物,但是分布不均匀。观察图1(d)还发现,2 min刻蚀后Mg-Al-Zn合金表面形成较深的坑洞和沟槽,并且在刻蚀过程中生成的单质Cu和磷化物没有完全覆盖坑洞和沟槽。如图1(e)所示,4 min刻蚀后Mg-Al-Zn合金表面沉积的单质Cu和磷化物较少,但形成更深的坑洞和沟槽。原因是在刻蚀过程中会发生析氢反应,伴随着氢气不间断逸出,随着刻蚀时间延长,Mg-Al-Zn合金表面腐蚀程度加重,从而形成很深的坑洞和沟槽。氢气不间断逸出还可能阻碍单质Cu和磷化物沉积,导致Mg-Al-Zn合金表面无法形成较均匀的微纳米分级结构。

图2(a)~2(d)为刻蚀+修饰+烘烤后Mg-Al-Zn合金的形貌。对比发现,表面修饰和烘烤不会改变Mg-Al-Zn合金刻蚀后形成的表面结构。但在表面修饰过程中,全氟辛基三乙氧基硅烷会发生水解反应生成含氟硅醇 $[\text{C}_8\text{F}_{17}\text{Si}(\text{OH})_3]$ (参见式(5))^[14]。由于Mg-Al-

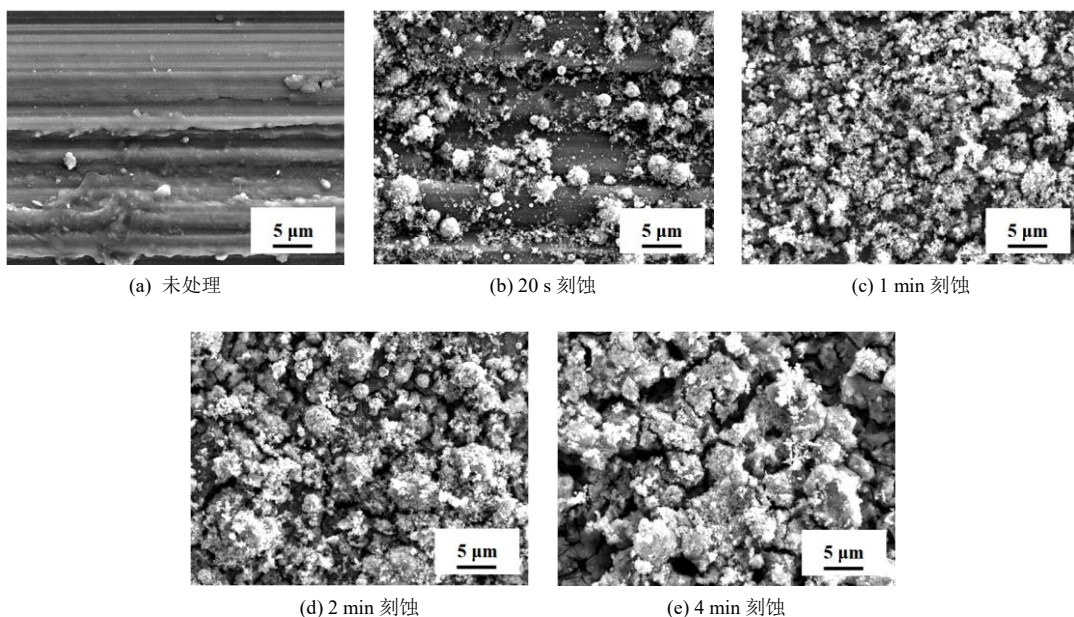


图1 未处理的Mg-Al-Zn合金以及刻蚀后Mg-Al-Zn合金的形貌

Fig.1 Morphology of untreated Mg-Al-Zn alloy and the Mg-Al-Zn alloy after etching

Zn合金表面通常存在羟基(-OH)，含氟硅醇会与羟基进一步发生脱水缩合(参见式(6))，脱去H₂O并将表面能低的碳氟链枝接到Mg-Al-Zn合金表面。因此，Mg-Al-Zn合金经过刻蚀、表面修饰和烘烤后形成超疏水表面。

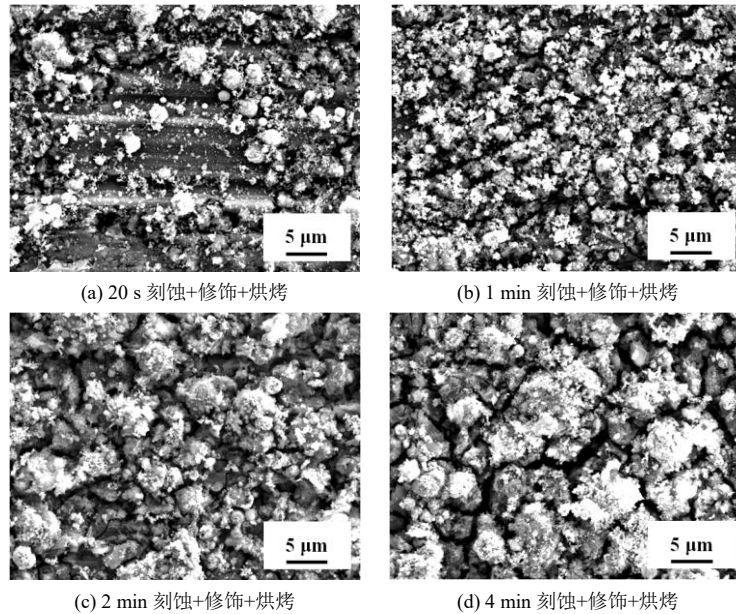
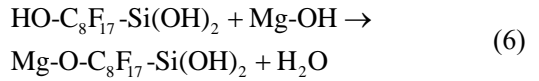
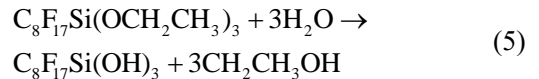


图2 刻蚀+修饰+烘烤后 Mg-Al-Zn 合金的形貌

Fig.2 Morphology of Mg-Al-Zn alloy after etching, modification and baking

图3为刻蚀后Mg-Al-Zn合金的XRD谱图。经过20 s、1 min、2 min和4 min刻蚀后，Mg-Al-Zn合金的XRD谱图上均显示Mg、Al、Cu、Mg₃(PO₄)₂和AlPO₄等物相的衍射峰。其中，Mg和Al来源于Mg-Al-Zn合金，是基体特有的物相。Cu、Mg₃(PO₄)₂和AlPO₄都是化学刻蚀过程中反应生成的物质，证实了上述反应式的正确性。

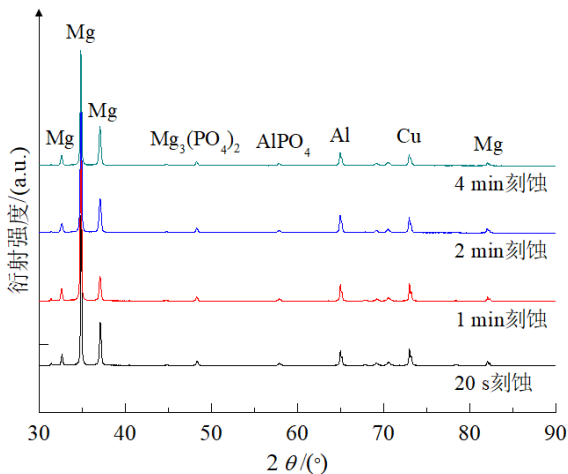


图3 刻蚀后 Mg-Al-Zn 合金的 XRD 谱图

Fig.3 XRD patterns of Mg-Al-Zn alloy after etching

图4为刻蚀+修饰+烘烤后Mg-Al-Zn合金的能谱图。图4(a)~(d)均显示Mg、Al、Cu、P、F、Si、C和O元素的特征峰，其中，Mg和Al元素来源于基体，Cu和P元素来源于刻蚀过程中形成的物质。F元素来源于全氟辛基三乙氧基硅烷的碳氟链，Si元素来源于全氟辛基三乙氧基硅烷的硅醇基团(Si-OH)。由于C和O元素易受环境和人为因素干扰，很难准确分析它们的来源。

图5为未处理的Mg-Al-Zn合金以及刻蚀+修饰+烘烤后Mg-Al-Zn合金的红外光谱。可以看出，未处理的Mg-Al-Zn合金红外光谱图只出现1个特征峰，位于534 cm⁻¹处，是Mg-Al-Zn合金表面氧化物的伸缩振动吸收峰。而刻蚀+修饰+烘烤后Mg-Al-Zn合金的红外光谱图出现多个特征峰，是由于有机物表面修饰所致。具体来说，457、776和1 043 cm⁻¹处出现3个特征峰，与Si-O键的对称和非对称伸缩振动有关。1 137 cm⁻¹处出现1个特征峰，与C-F键伸缩振动有关。1 469 cm⁻¹处也出现1个特征峰，与-CH₂基团弯曲振动有关。由此表明，采用全氟辛基三乙氧基硅烷与乙醇混合溶液成功对Mg-Al-Zn合金进行表面修饰。

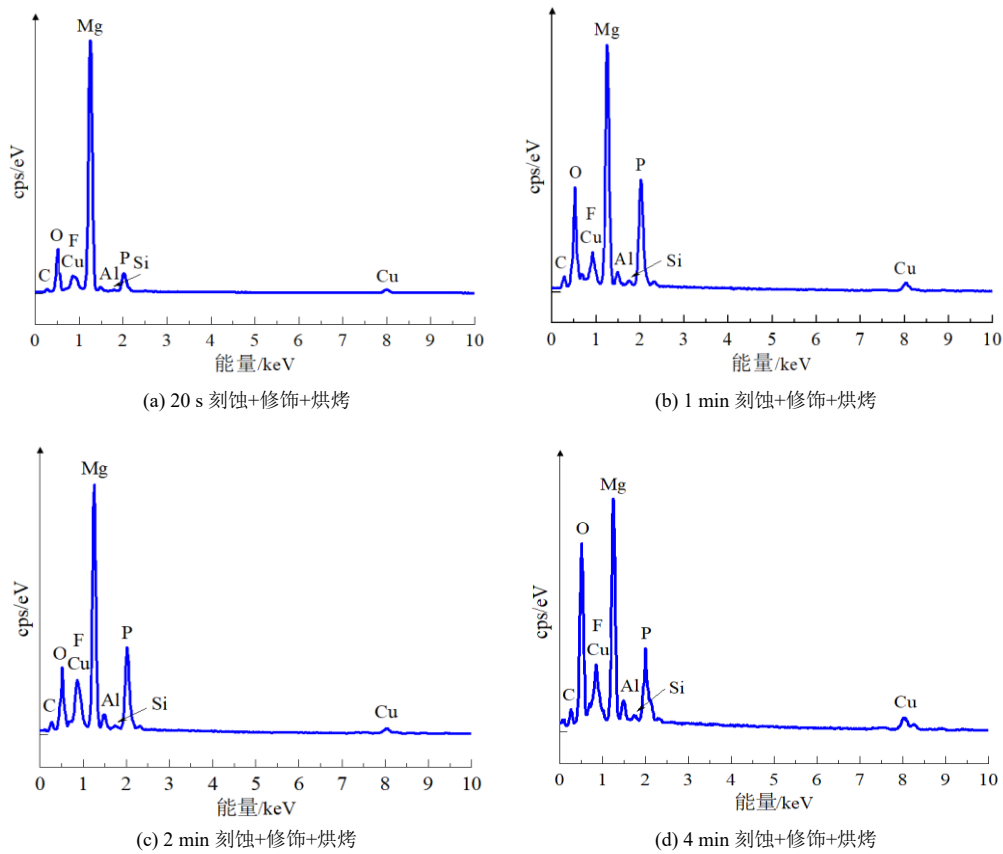


图4 刻蚀+修饰+烘烤后 Mg-Al-Zn 合金的能谱图

Fig.4 Energy spectra of the Mg-Al-Zn alloy after etching, modification and baking

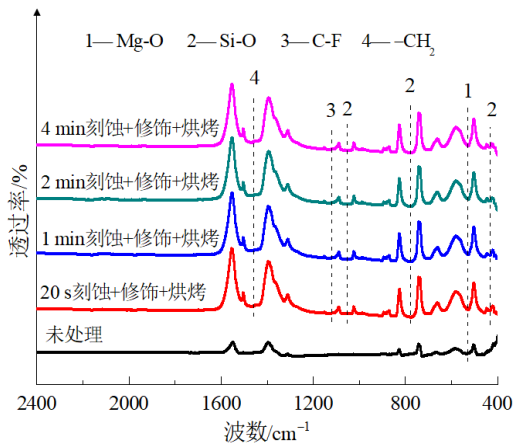


图5 未处理的 Mg-Al-Zn 合金以及刻蚀+修饰+烘烤后 Mg-Al-Zn 合金的红外光谱

Fig.5 Infrared spectra of untreated Mg-Al-Zn alloy and the Mg-Al-Zn alloy after etching, modification and baking

2.2 润湿性分析

图6为未处理的Mg-Al-Zn合金以及刻蚀+修饰+烘烤后Mg-Al-Zn合金的静态接触角。可以看出，未处理的Mg-Al-Zn合金静态接触角仅为48.7°，其表面呈现亲水性，容易被润湿。经过20 s刻蚀+修饰+烘

烤后，Mg-Al-Zn合金的静态接触角达到137.2°，表面呈现疏水性，但未达到超疏水状态。经过1 min刻蚀+修饰+烘烤后，Mg-Al-Zn合金的静态接触角进一步增大，接近160°，表面呈现超疏水性，很难被润湿。然而，经过2 min刻蚀+修饰+烘烤、4 min刻蚀+修饰+烘烤后，Mg-Al-Zn合金的静态接触角均小于150°，表面未达到超疏水状态。

由此表明，刻蚀时间较短或过长时，即使经过表面修饰和烘烤也无法构建超疏水表面。原因是刻蚀时间较短导致Mg-Al-Zn合金表面腐蚀程度轻并且腐蚀不均匀，刻蚀时间过长则造成Mg-Al-Zn合金表面过度腐蚀，均无法形成较均匀的微纳米分级结构。刻蚀时间适中的情况下，Mg-Al-Zn合金表面形成较均匀的微纳米分级结构，这种特殊结构能截留空气使Mg-Al-Zn合金表面形成气膜^[15-17]，与水滴的接触状态发生改变，接触面积小。除此之外，碳氟链枝接在具有较均匀微纳米分级结构的Mg-Al-Zn合金表面降低了表面能，致使水滴很难铺展。因此，经过1 min刻蚀+修饰+烘烤后，Mg-Al-Zn合金表面呈现超疏水性，很难被润湿。

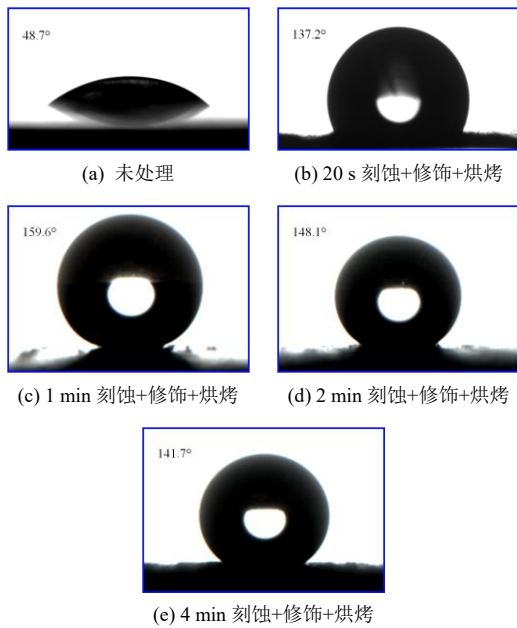


图6 未处理的 Mg-Al-Zn 合金以及刻蚀+修饰+烘烤后 Mg-Al-Zn 合金的静态接触角

Fig.6 Static contact angle of untreated Mg-Al-Zn alloy and the Mg-Al-Zn alloy after etching, modification and baking

2.3 耐蚀性分析

图7为未处理的Mg-Al-Zn合金以及刻蚀+修饰+烘烤后Mg-Al-Zn合金的极化曲线，表1为根据极化曲线拟合得到的参数，包括腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(J_{corr})。根据极化曲线拟合得到的参数，可以分析试样的耐蚀性^[18-20]。未处理的Mg-Al-Zn合金腐蚀电位最低，为-1.456 V，腐蚀电流密度处在 10^{-5} 数量级。经过刻蚀+修饰+烘烤后，Mg-Al-Zn合金的腐蚀电位提高，腐蚀电流密度降至 10^{-6} 数量级，主要归因于刻蚀+修饰+烘烤处理使Mg-Al-Zn合金表面由亲水性转变成疏水性甚至超疏水性，对腐蚀介质的阻碍作用增强，增大电化学腐蚀难度。

经过1 min刻蚀+修饰+烘烤后，Mg-Al-Zn合金的腐蚀电位提高到-1.264 V，腐蚀电流密度仅为 $1.12 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ，与未处理的Mg-Al-Zn合金相比降低了超过一个数量级。Mg-Al-Zn合金经过1 min刻蚀+修饰+烘烤后之所以展现出较好的耐蚀性，主要原因归结为两方面：①刻蚀+修饰+烘烤后Mg-Al-Zn合金表面形成较均匀的微纳米分级结构，加之枝接表面能低的碳氟链构筑起物理屏障，阻碍了腐蚀介质与Mg-Al-Zn合金接触，降低Mg-Al-Zn合金的腐蚀倾向。②在刻蚀过程中生成的磷化物能在一定程度上阻碍腐蚀介质向Mg-Al-Zn合金内部扩散，抑制过度腐蚀。另外，还可能在Mg-Al-Zn合金表面形成

磷酸盐膜，作为第二道屏障阻挡腐蚀介质，增大腐蚀反应难度，从而减缓电化学腐蚀。

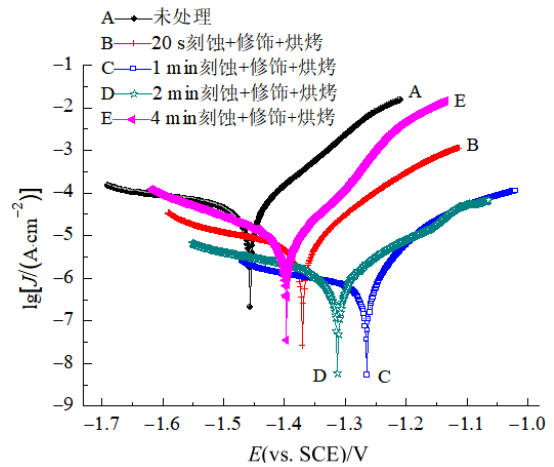


图7 未处理的 Mg-Al-Zn 合金以及刻蚀+修饰+烘烤后的 Mg-Al-Zn 合金的极化曲线

Fig.7 Polarization curves of untreated Mg-Al-Zn alloy and the Mg-Al-Zn alloy after etching, modification and baking

表1 极化曲线拟合得到的参数

Tab.1 Parameters derived from polarization curves fitting

不同类型 Mg-Al-Zn 合金试样	E_{corr}/V	$J_{corr}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
未处理	-1.456	6.27×10^{-5}
20 s 刻蚀+修饰+烘烤	-1.369	7.62×10^{-6}
1 min 刻蚀+修饰+烘烤	-1.264	1.12×10^{-6}
2 min 刻蚀+修饰+烘烤	-1.312	2.08×10^{-6}
4 min 刻蚀+修饰+烘烤	-1.397	8.83×10^{-6}

3 结论

(1) 采用由硫酸铜、氯化钠、柠檬酸与磷酸配制的环保型溶液对Mg-Al-Zn合金进行化学刻蚀1 min，然后采用全氟辛基三乙氧基硅烷与乙醇混合溶液进行表面修饰120 min，再经过120 °C烘烤10 min，成功构建Mg-Al-Zn合金超疏水表面，其静态接触角接近160°。

(2) 化学刻蚀+表面修饰+烘烤处理使Mg-Al-Zn合金由亲水性转变成超疏水性，腐蚀电流密度降低。经过1 min刻蚀+表面修饰120 min+120 °C烘烤10 min后Mg-Al-Zn合金的腐蚀电流密度仅为 $1.12 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ，与未处理的Mg-Al-Zn合金相比降低了超过一个数量级，主要归因于形成较均匀的微纳米分级结构并且枝接表面能低的碳氟链构筑起

物理屏障,加之生成的磷化物起到减缓电化学腐蚀的作用。

参考文献

- [1] 任燕娟,董强力. Ti 对建筑隔板镁合金挤压态组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(17): 107-109.
- [2] 孙伟清,陈微,王玮琪. 镁合金建筑模板的表面化学镀与耐蚀性能[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(10): 34-41.
- [3] 高峰. 铝及镁合金在建筑模板行业应用现状及展望[J]. 中国有色金属, 2022(4): 42-44.
- [4] 崔学军,白成波,朱一波,等. $Mn(NO_3)_2/Na_2MoO_4$ 对 AZ31B 镁合金表面磷化膜微观形貌及耐蚀性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(5): 477-482.
- [5] 仵海东,范培耕,曹鹏军,等. 镁合金铬磷化工艺的试验研究[J]. 材料导报, 2007, 21(z2): 361-364.
- [6] 李昆达,张建强,赵慧敏,等. AZ31B 镁合金表面镍基复合镀层的制备及耐蚀性能研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(10): 22-27.
- [7] 肖雯心,王叶,马凯,等. 镁合金表面化学转化涂层研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(12): 188-199.
- [8] XIE Z H, TENG Y H, HUANG Z F, et al. Corrosion-resistant and superhydrophobic nickel-based composite coating on magnesium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2025, 496: 131638.
- [9] QI S C, LIU X, CHENG L, et al. Superhydrophobic corrosion-resistant coating of AZ91D magnesium alloy: Preparation and performance[J]. Coatings, 2024, 14(10): 1237.
- [10] OUYANG S H, WANG F Y, SHE J, et al. Recent advancements in the design of micro/nanostructured superhydrophobic surfaces on magnesium alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2025, 13(2): 457-485.
- [11] 司伟婷,张吉昊,高荣杰. AZ31B 镁合金超双疏表面的制备及其耐蚀性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(2): 381-388.
- [12] 徐雷秋,万晓峰,董菁,等. 盐酸-激光复合刻蚀+SA 修饰制备镁合金表面超疏水结构的耐腐蚀性能[J]. 机械工程材料, 2019, 43(10): 6-11.
- [13] 孟详东. 基于低温热转化的污泥中磷的迁移转化及回用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [14] 刘恒阳,张蕾,史洪微,等. 铝合金表面氟硅烷改性纳米二氧化硅超疏水耐蚀涂层的制备和表征[J]. 表面技术, 2025, 54(2): 202-212.
- [15] 曹皓,孙宏刚,庞思洋,等. 纳米复合超疏水涂层在防腐领域的研究进展[J]. 涂层与防护, 2025(2): 55-62.
- [16] JI M C, LI F Y, LI J Y, et al. A robust and low-adhesion superhydrophobic quaternized chitosan-based film with hierarchical micro/nano structures[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 190: 108364.
- [17] TRAN N G, CHUN D M, Abd-Elrahim A G. Superhydrophobic aluminum surfaces with nano-micro hierarchical composite structures: A novel and sustainable approach to corrosion protection[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 960: 170907.
- [18] 肖浩,黄剑,汪鹏,等. 高速激光熔覆 FeCoCrNiMo 高熵合金涂层微观组织演变及耐蚀性研究[J]. 中国激光, 2025, 52(4): 0402203.
- [19] YU D L, JIANG B, QI X, et al. Effect of current density on microstructure, mechanical behavior and corrosion resistance of black MAO coating on 6063 aluminum alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2024, 326: 129800.
- [20] 贾春燕,刘海涛. 封闭处理对超声波辅助制备的锌系磷化膜耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(9): 48-55.