

一步水热法构筑镁合金超疏水表面及其性能研究

钱志强^{1,2} 葛飞^{1,2} 刘海宁^{1,2} 王世栋^{1,2} 叶秀深^{1,2} 宝阿敏³

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;

2. 青海省盐湖资源化学重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 青海民族大学 化学化工学院, 青海 西宁 810007)

摘要 利用一步水热法在镁合金表面构筑了超疏水表面. 通过扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶变换红外(FT-IR)、X射线光电子能谱分析(XPS)、X射线衍射(XRD)、接触角测量仪对其表面形貌、组成和润湿行为进行了研究, 采用电化学极化曲线测试对超疏水涂层的耐腐蚀性能进行了考察. 结果表明, 一步水热法构筑的镁合金超疏水涂层由微/纳米二级结构组成, 最优条件下改性表面接触角和滚动角分别为 163.3° 和 2.8° , 具有良好的耐腐蚀性能、耐酸碱性能和稳定性.

关键词 超疏水表面; 镁合金; 水热法; 耐腐蚀性能

中图分类号 O647

文献标识码 A

0 引言

镁合金作为第三大工程金属材料, 具有质轻、比强度和比刚度高、减震和电磁屏蔽性能优异、易于加工成型和回收再利用等优点, 因而镁合金在汽车工业、光学设备、电子行业、航天航空等领域得到了广泛的应用^[1-3]. 然而, 镁合金化学性质活泼, 导致其耐蚀性差. 虽然在潮湿的空气中, 镁合金表面易形成疏松的氧化膜, 但其致密系数小于1, 对合金不能起防腐蚀的作用^[4]. 一般需要对镁合金进行表面改性, 增强其耐蚀性. 通过在镁合金表面构筑超疏水表面的方法, 减少合金表面与腐蚀介质的直接接触, 已经成为有效改善其耐腐蚀性能的方法之一^[5].

在过去几十年间, 已经开发了大量的方法来构建镁合金上的超疏水表面, 包括激光刻蚀、微弧氧化、化学刻蚀、电沉积等^[6-9]. 这些方法均需通过典型的两步路线制备超疏水表面: 首先制造粗糙结构, 然后用低表面能材料进行改性. 本文通过一步水热法在AZ31B镁合金上构建了由微/纳结构组成的超疏水表面, 利用SEM、XRD、FTIR、电化学测试等对所获得的超疏水表面进行了测试, 结果表明, 超疏水表面具有优异的超疏水性和良好的耐腐蚀性, 为镁合金超疏水表面的构建提供了一种简单、快捷的方法.

2 实验部分

2.1 实验材料及试剂

所采用的基材为AZ31B镁合金(组成: 2.5 wt% Al, 1.1 wt% Zn, 0.34 wt% Mn, 0.03 wt% Si, 0.005 wt% Fe, 0.002 wt% Ni, 剩余为Mg), 采购于东莞市锋创金属材料有限公司, 试样尺寸为 $60\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 3\text{ mm}$. 三水硝酸铜($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), 阿德玛斯试剂公司; 硬脂酸($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$), 国药集团化学试剂有限公司; 实验所用乙醇、盐酸、无水碳酸钠、无水硫酸钠均为分析纯, 采购于国药集团化学试剂有限公司.

2.2 超疏水表面制备过程

(1) 镁合金的前处理. 首先, AZ31B镁合金依次用320#、800#和2000#碳化硅水磨砂纸进行逐级打磨处理, 然后依次用乙醇和去离子水反复冲洗后烘干, 之后将烘干后的镁合金在组成为 $0.25\text{ g/L Na}_2\text{SO}_3$ 、 0.25 g/L NaOH 和 $20\text{ g/L Na}_2\text{CO}_3$ 混合溶液中超声清洗15 min, 再用去离子水反复冲洗, 最后使用电吹风吹干待用.

收稿日期: 2018-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1507104); 青海省国际合作项目(2018-HZ-807); 青海省应用基础研究项目(2018-ZJ-725); 中国科学院西部之光人才项目; 青海省企业研究转化与产业化计划项目(2017-GX-C2)资助

通讯作者: 叶秀深, 男, 汉族, 博士, 副研究员, 研究方向: 无机分离技术, E-mail: yexs@isl.ac.cn.

(2) 一步水热法制备超疏水表面. 首先,配置反应溶液:将硬脂酸与三水硝酸铜溶解于无水乙醇中搅拌,形成蓝色悬浊液,其中硬脂酸和三水硝酸铜的浓度均为 0.05 mol/L. 然后,将经过前处理 AZ31B 镁合金片置于不锈钢高压釜的特氟隆内衬胆中,反应釜体积为 100 mL,再将配置好的 70 mL 反应溶液加入到反应釜中. 随后,将反应釜放入烘箱内,经过加热后,将反应釜从烘箱中取出并冷却至室温. 最后取出 AZ31B 镁合金片,用乙醇和去离子水洗涤数次,并在 80 °C 下干燥 1 h. 整个实验过程如图 1 所示.



图 1 AZ31B 镁合金超疏水表面制备过程示意图

2.3 测试与表征

采用场发射扫描电子显微镜(SU8010, Hitachi, Japan)对镁合金样品表面微观形貌进行观察. 利用 X 射线能谱仪(EDS, Oxford, UK)分析镁合金及超疏水涂层表面的元素种类及含量. 通过傅里叶变换红外光谱仪(Nexus, Thermo Nicolet, USA)分析样品表面的特征官能团. 采用 X 射线衍射仪(XRD, X-Pert PRO, Netherlands)和 X 射线光电子能谱分析(XPS, Thermo Fisher Scientific, USA)分析样品表面组成. 使用接触角测量仪(DSA25, Kruss, Germany)表征镁合金表面的接触角与滚动角,测试液滴体积为 5 μL ,通过测量 5 个不同点,取平均值作为静态接触角与滚动角. 利用电化学工作站(CHI604E, 上海辰华, 中国)测试样品的极化曲线,测试采用标准的三电极体系,其中参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为铂片,工作电极为待测样品,暴露面积为 1 cm^2 ,将测试样品浸入到 3.5 wt% NaCl 溶液中,开路状态下放置 30 min 后开始极化曲线测试,扫描速率为 1 mV/s.

3 结果与讨论

3.1 膜层表面润湿性

在水热反应制备改性表面过程中,水热反应温度和水热反应时间对镁合金表面润湿性有着明显的影响. 图 2 反映了水热温度对于膜层润湿性的影响,其中水热反应时间为 30 min. 从图 2 中可以看到,随着温度的升高,接触角先增大后趋于稳定,滚动角先下降后趋于稳定. 水热温度为 80 °C 时,接触角为 163.3°、滚动角为 2.8°. 温度进一步增加时,镁合金表面接触角变化较小,表面膜层润湿性没有进一步提升,因而选定最佳水热反应温度为 80 °C.

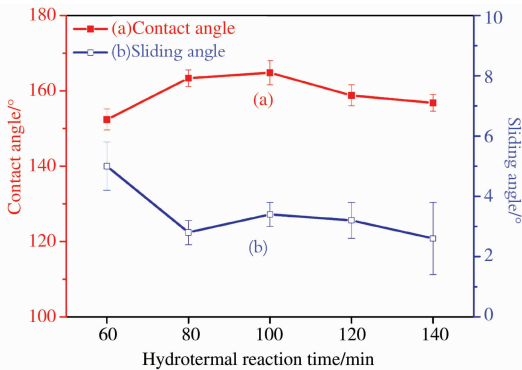


图 2 水热温度对于 AZ31B 镁合金表面润湿性的影响

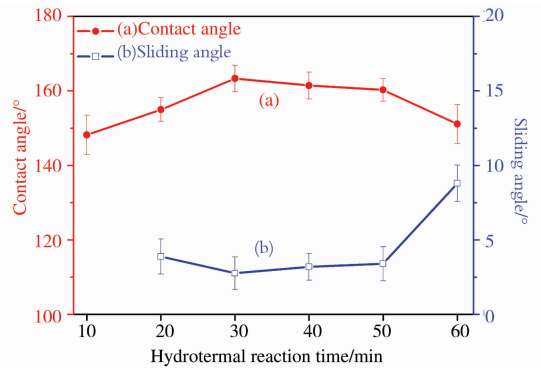


图 3 水热时间对于镁合金表面润湿性的影响

图 3 显示了水热时间与 AZ31B 镁合金表面润湿性的关系. 从图 3 可以看出,当水热时间为 10 min 时,接触角为 148.2°,液滴无法从表面滚动落下. 随着时间的增加,接触角明显增大、滚动角减小. 在水热时间为 30 min 时,接触角达到峰值(163.3°),此时滚动角下降至 2.8°. 当水热时间超过 30 min 后,表面膜层接触角有减小趋势,当水热时间为 60 min 时,表面膜层接触角下降到 151.2°,而滚动角增加到 8.8°. 因此,当水热时间为 30 min 时,膜层可以得到具有最佳微-纳米结构的粗糙表面.

3.2 表面形貌分析

图4为最佳水热温度(80℃)和水热时间(30 min)下,制备得到具有超疏水性质的镁合金表面 SEM 图.从图4(a)可以看出,纯镁合金表面只有经砂纸打磨后留下的划痕.图4(b-d)为镁合金超疏水表面的 SEM 照片,从图中可以看到超疏水表面由尺寸不一、随机分布的微米级团簇聚集而成,各个团簇间有存在较大的空隙.从单个微米级团簇的放大照片(图4(c-d))中可以看到,微米级团簇形似花朵,并且有大量径向取向的竖条形纳米片组成,这些随机填充竖条形纳米片,厚度约为30-60 nm,长度约为200-500 nm.这表明,在镁合金超疏水表面由微米级团簇和纳米级竖条形纳米片组成了微纳米分级粗糙结构,其与“荷叶”结构相似.这种分级微/纳米结构是镁合金表面形成超疏水状态的结构基础,推断滴落在该表面上的水滴的浸润状态属于 Cassie 润湿状态^[10].

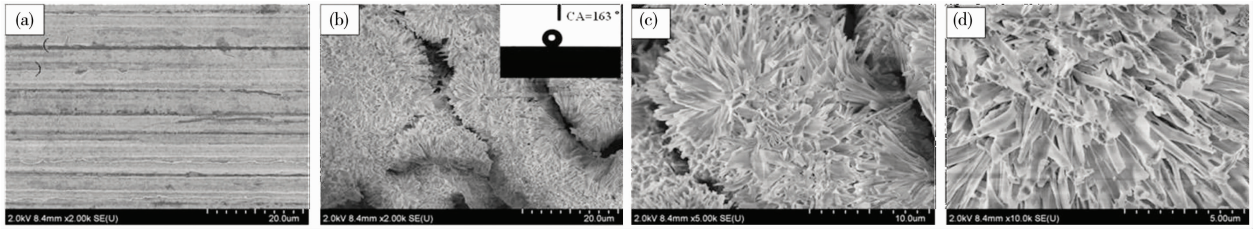


图4 镁合金超疏水 SEM 照片:(a)AZ31B 基底;(b,c,d)超疏水表面不同放大倍数:(b)2 000 倍,(c)5 000 倍和(d)10 000 倍

3.3 表面组成分析

将改性镁合金表面形成的浅蓝色膜层刮下,并研磨成粉末状进行了 XRD、FTIR 和 XPS 测试,以分析镁合金表面构筑膜层的组成. XRD、FTIR 和 XPS 分析结果分别如图5、图6和图7所示.从图5(a)中可以看出,水热反应前的镁合金中, $2\theta=32.1^\circ, 34.6^\circ, 36.6^\circ, 48.2^\circ$ 和 63.3° 处存在的晶体峰属于 α -Mg相,基底主要成分为镁.从图5(b)中可以看出,经过水热反应后,超疏水样品表面由镁(Mg)、硬脂酸镁($C_{36}H_{70}MgO_4 \cdot 2H_2O$)和碱式硝酸铜($Cu(NO_3)_2 \cdot 3Cu(OH)_2$)组成.

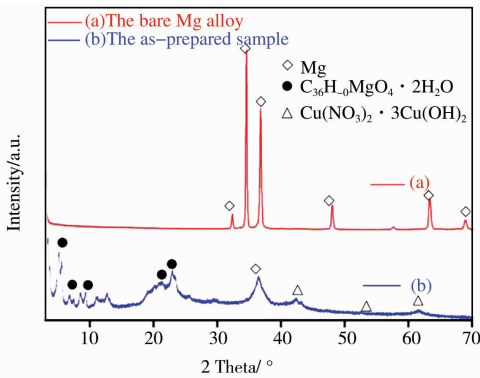


图5 X射线衍射图谱(a)为纯 AZ31B 镁合金,(b)为镁合金超疏水表面

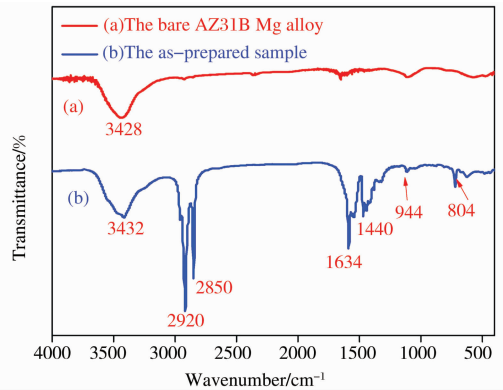


图6 镁合金表面 FT-IR 谱图(a)为纯 AZ31B 镁合金,(b)为镁合金超疏水表面

从图6可以看出,经过水热反应改性后,镁合金表面在 3432 cm^{-1} 处的吸收带归因于-OH 振动峰^[11], 2920 cm^{-1} 和 2849 cm^{-1} 处出现了吸收带,归因于-CH₂-的对称和反对称伸缩振动^[12], 1440 cm^{-1} 处的吸收带证明了-CH₃ 不对称的拉伸振动和摇摆振动^[13], 1634 cm^{-1} 处的吸收带则来说明-COO-的存在^[14]. 804 cm^{-1} 和 944 cm^{-1} 归因于-OH 的形变模式^[15].这些吸收峰的出现,表明了-CH₃ 和-CH₂-已成功接枝到改性的样品表面.-CH₃ 和-CH₂-为疏水基团,因而可以显著地降低样品的表面能,使镁合金表面处于超疏水状态^[16].

图7为超疏水样品 XPS 测试结果.从图7中可以看出,一步水热法构筑的镁合金超疏水性表面的 XPS 图谱主要有 C1s、O1s、Cu2p 等谱峰,可以由此判断此表面有碳、氧、铜等元素. XPS 测试结果与 XRD 结果吻合,由此进一步明确了超疏水表面由硬脂酸镁($C_{36}H_{70}MgO_4 \cdot 2H_2O$)和碱式硝酸铜($Cu(NO_3)_2 \cdot 3Cu(OH)_2$)组成.

为了进一步明确超疏水表面的组成,我们使用 EDS 对纯 AZ31B 镁合金及制备的超疏水样品进行了分析,结果如图8所示.从图8中可以看出,镁合金改性后,表面中出现了 Cu 元素,并且 C、O 元素含量变多,其中 C 元素含量达到了 69.5 wt%,这进一步证明经过水热反应后,表面改性成功.

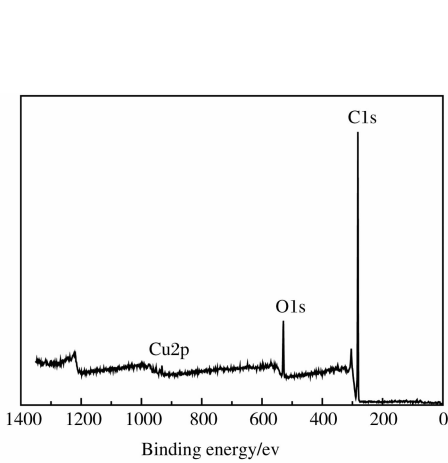


图 7 镁合金超疏水表面 XPS 谱图

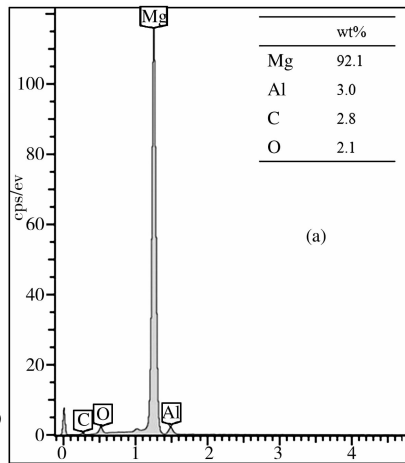
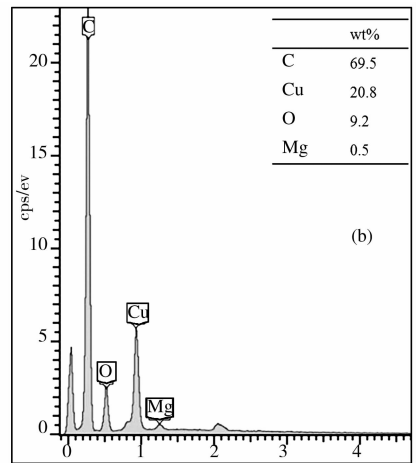


图 8 镁合金表面 EDS 谱图(a)为纯 AZ31B 镁合金,(b)为镁合金超疏水表面



3.4 电化学腐蚀性能

图 9 为纯镁合金和改性后合金样品在 3.5 wt% NaCl 溶液中的动电位极化曲线. 从图 9 可以看出, 超疏水改性样品(蓝色曲线)的腐蚀电位(E_{corr})从 -1.51 V 正偏移到 -1.43 V (红色曲线). 与纯镁合金($7.554 \times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$)相比, 超疏水表面($3.926 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$)的腐蚀电流密度(i_{corr})下降了 1 个数量级以上. 由此可见, 具有超疏水表面的镁合金具有更好的耐腐蚀性能.

根据 Tafel 外推法得到的腐蚀电位和腐蚀电流密度数据可以计算出超疏水表面具有的缓蚀率(η), 其公式^[17]为 $\eta = (i_{cor}^0 - i_{cor}) / i_{cor}^0 \times 100\%$, 其中, η 为涂层的保护效率, i_{cor}^0 和 i_{cor} 分别表示基体和涂层的腐蚀电流密度值. 通过计算可以得到超疏水镁合金表面缓蚀率为 94.8%, 说明超疏水表面具有优良的防腐蚀效果.

3.5 超疏水表面稳定性

超疏水表面的化学稳定性是决定其在工业应用中的可行性的关键因素, 图 10 为不同 pH 溶液下, 镁合金超疏水表面的接触角和滚动角. 由图 10 可见, 在 pH 为 1-14 范围内, 所制备的超疏水表面受酸碱性影响很小, 接触角维持在 154° 以上、滚动角在 10° 以下, 说明了本研究制备得到的镁合金超疏水表面在宽泛的 pH 范围内均具有良好的超疏水性.

将制备的镁合金超疏水表面暴露在空气中, 考察了超疏水表面润湿性随时间的变化, 结果如图 11 所示. 从图 11 可以看出, 接触角随着时间的延长略有下降, 将超疏水表面在空气暴露 2 个月, 依然保持在 150° 以上, 表明超疏水表面在空气中具有良好的稳定性.

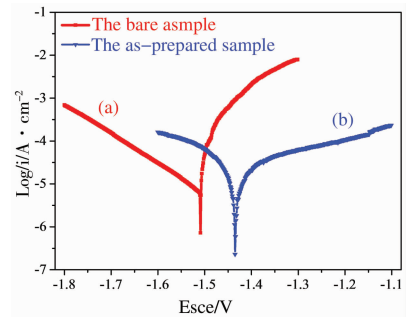


图 9 镁合金表面极化曲线图谱:
(a)仅经过预处理的镁合金;
(b)镁合金超疏水表面

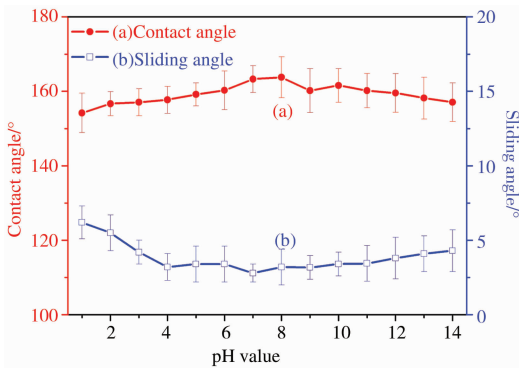


图 10 不同 pH 值的水溶液在超疏水表面的接触角

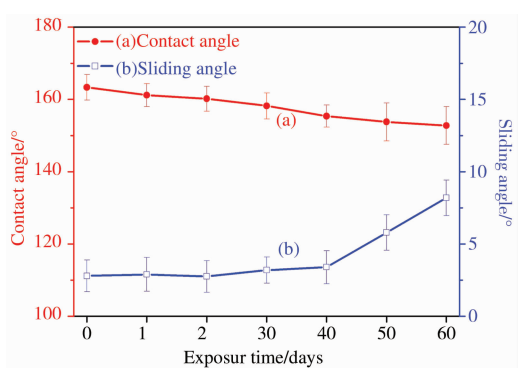
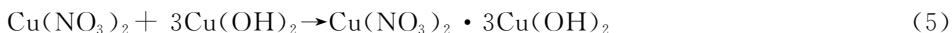
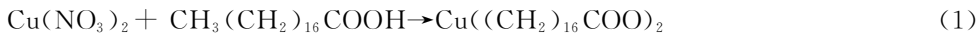


图 11 镁合金超疏水表面暴露在空气中表面润湿性的变化

3.6 超疏水表面机理分析

在镁合金表面构造超疏水膜层, 两个必不可少的条件是合适的粗糙度结构和表面能的降低. 将 AZ31B 镁合金在硝酸铜和硬脂酸的乙醇悬浊溶液中进行水热反应, 从而制备了稳定的超疏水表面. 通过 XRD、FT-IR 及 EDS 分析, 可以确定通过一步水热法制备的超疏水膜层基本组成为硬脂酸镁($\text{Mg}(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16})_2$)

COO)₂)与碱式硝酸铜(Cu(NO₃)₂ · 3Cu(OH)₂),整个反应过程如反应式(1-5)所示.将 Cu(NO₃)₂ · 3H₂O 与 CH₃(CH₂)₁₆COOH 在乙醇中混合后,生成了蓝色的 Cu((CH₂)₁₆COO)₂(反应式 1).将悬浊液与镁合金水热反应时,首先,Cu((CH₂)₁₆COO)₂与 H₂O 发生可逆的水解反应,这使得溶液呈酸性,因为 Cu²⁺ 容易在水溶液中电离并释放出(反应式 2).由于镁合金 α 相与 β 相的化学活性不同,镁合金中活性较高的 α 相易于在酸性条件下,与 H⁺ 反应生成 H₂(反应式 3),同时生成的 Mg²⁺ 与 Cu((CH₂)₁₆COO)₂ 反应生成疏水性的 Mg(CH₃(CH₂)₁₆COO)₂(反应式 4).随着反应 2 中的 H⁺ 的不断消耗,可逆水解反应被迫向右并且连续产生 Cu(OH)₂,Cu(OH)₂ 与溶液中存在的 Cu(NO₃)₂ 反应生成碱式硝酸铜(反应式 5).随着反应时间的延长,镁合金表面硬脂酸镁(Mg(CH₃(CH₂)₁₆COO)₂)与碱式硝酸铜(Cu(NO₃)₂ · 3Cu(OH)₂)不断地化学沉积,形成由微米级团簇和纳米级竖条形纳米片组成了微/纳米分级粗糙结构,并且由于生成硬脂酸镁具有疏水性,因而经过水热反应后,镁合金表面呈超疏水状态(反应过程如图 12 所示).



通过表面膜层结构的分析,可以推断出水滴在超疏水表面上的湿润状态符合 Cassie-Baxter 润湿状态.根据 Cassie-Baxter 方程^[18]

$$\cos \theta_c = f_1 (\cos \theta_e + 1) - 1, \quad (6)$$

其中 θ_c 和 θ_e 是粗糙表面上的静态接触角和相同化学组成的绝对光滑表面上的固有接触角, f_1 是表面粗糙度因子.作为参考值, θ_e

的值可以取为 109°^[19],使用 $\theta_c = 163^\circ$ 的测量值,可以计算 $f_1 = 0.07$ 的值,这意味着只有 7% 超疏水表面暴露于水中,而剩余的大部分为空气垫层与水接触.因此,当镁合金超疏水表面与腐蚀介质(3.5 wt% NaCl 溶液)接触时,超疏水表面大部分区域是由“空气垫层”所覆盖,表面截留的空气大大增加了空气/水界面,从而防止水滴渗入超疏水粗糙表面.从而可知,具有低滚动角度的超疏水性镁合金表面可以排斥腐蚀介质分子进入并与其接触,当超疏水性的 AZ31B 镁合金与 NaCl 溶液接触时,腐蚀性离子(如 Cl⁻)不能迁移渗入并到达镁合金表面.因而经过超疏水改性镁合金的腐蚀速度远小于纯镁合金,超疏水表面有效地提高镁合金的耐腐蚀性.

4 结论

(1) 通过简单的一步水热过程在 AZ31B 镁合金上制备超疏水表面,简化了超疏水表面的制备步骤,所制备的超疏水表面接触角可达 163.3°,滚动角可达 2.8°.

(2) 超疏水表面在 3.5 wt% NaCl 溶液中表现出良好的耐腐蚀性.相对于纯镁合金,超疏水镁合金的腐蚀电流密度下降 1 个数量级,腐蚀电位(E_{corr})从 -1.51 V 正偏移到 -1.43 V 所制备得到的镁合金超疏水表面在宽泛的溶液 pH 范围内具有超疏水性,在空气中具有良好的稳定性.

(3) 通过机理分析可知,水热过程中硬脂酸镁(Mg(CH₃(CH₂)₁₆COO)₂)与碱式硝酸铜(Cu(NO₃)₂ · 3Cu(OH)₂)不断地化学沉积在镁合金表面,从而形成微/纳米分级粗糙结构.超疏水表面湿润状态符合 Cassie-Baxter 模型,较低的滚动角排斥腐蚀介质分子进入并与超疏水性表面接触,腐蚀性离子(如 Cl⁻)不能迁移渗入并到达镁合金表面,因而有效提高镁合金的耐腐蚀性.

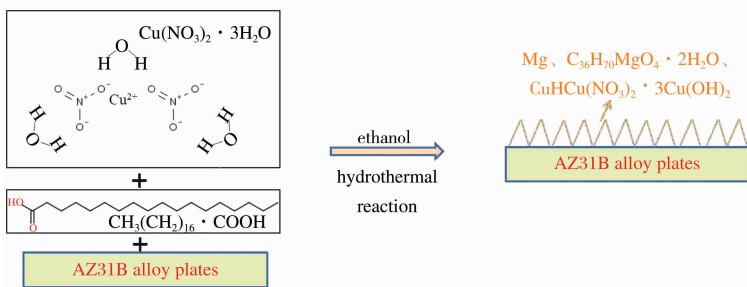


图 12 超疏水表面形成过程示意图

参 考 文 献

[1] 姜炳春,唐联耀.镁合金的应用[J].科技经济市场,2014(10):150-151.

[2] 杨媛,李加强,宋宏宝,等.镁合金的应用及其成形技术研究现状[J].热加工工艺,2013,42(08):24-27.

- [3] 白志玲. 镁合金的研究现状及应用[J]. 科技广场, 2013(06): 227-229.
- [4] 林锐, 刘朝辉, 王飞, 等. 镁合金表面改性技术现状研究[J]. 表面技术, 2016, 45(04): 124-131.
- [5] 钱志强, 吴志坚, 王世栋, 等. 镁合金超疏水表面的制备技术与应用研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(01): 102-109.
- [6] Ta V D, Dunn A, Wasley T J, et al. Laser textured superhydrophobic surfaces and their applications for homogeneous spot deposition[J]. Appl Surf Sci, 2016, 365: 153-159.
- [7] Cui X J, Lin X Z, Liu C H, et al. Fabrication and corrosion resistance of a hydrophobic micro-arc oxidation coating on AZ31 Mg alloy[J]. Corrosion Science, 2014, 90: 402-412.
- [8] Jie H, Xu Q J, Wei L, et al. Etching and heating treatment combined approach for superhydrophobic surface on brass substrates and the consequent corrosion resistance[J]. Corros Sci, 2016, 102: 251-258.
- [9] Xiang T F, Zhang M X, Li C, et al. A facile method for fabrication of superhydrophobic surface with controllable water adhesion and its applications[J]. J Alloys Compd, 2017, 704: 170-179.
- [10] Jia J, Fan J F, Xu B S, et al. Microstructure and properties of the super-hydrophobic films fabricated on magnesium alloys[J]. J Alloy Compd, 2013, 554(2): 142-146.
- [11] Çamurlu H E, Mathur S, Arslan O, et al. Modification of hexagonal boron nitride nanoparticles with fluorosilane[J]. Ceram Int, 2016, 42: 6312-6318.
- [12] Gunasekaran S, Natarajan R K, Kala A. FTIR spectra and mechanical strength analysis of some selected rubber derivatives[J]. Spectrochim Acta A, 2007, 68(2): 323-330.
- [13] Sundaraganesan N, Joshua B D. Vibrational spectra and fundamental structural assignments from HF and DFT calculations of methyl benzoate[J]. Spectrochim Acta A, 2007, 68(68): 771-776.
- [14] Zhang Y, Zhu H, Zhuang C, et al. TiO₂ coated multi-wall carbon nanotube as a corrosion inhibitor for improving the corrosion resistance of BTESPT coatings[J]. Mater Chem Physics, 2016, 179: 80-91.
- [15] Liu X D, Liu L, Meng H M, et al. Contrast analysis on infrared and raman spectra of the sinomenine powder[C]. //2016 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology, 2016.
- [16] Song J L, Xu W J, Lu Y, et al. Fabrication of superhydrophobic surfaces on Mg alloy substrates via primary cell corrosion and fluoroalkylsilane modification[J]. Mater Corros, 2013, 64(11): 979-987.
- [17] Ouyang X, Qiu X, Hongming Lou A, et al. Corrosion and scale inhibition properties of sodium lignosulfonate and its potential application in recirculating cooling water system[J]. Ind Eng Chem Res, 2006, 45(16): 5716-5721.
- [18] Cassie A B D, Baxter S. Wettability of porous surfaces[J]. Trans Faraday Soc, 1944, 40: 546-551.
- [19] Yin B, Fang L, Hu J. Preparation and properties of super-hydrophobic coating on magnesium alloy[J]. Appl Surf Sci, 2010, 257(5): 1666-1671.

One-step Solve-Thermal Process for the Fabrication of Superhydrophobic Surface on Magnesium Alloy and Its Properties

QIAN Zhi-qiang^{1,2} GE Fei^{1,2} LIU Hai-ning^{1,2} WANG Shi-dong^{1,2}
YE Xiu-Shen^{1,2} BAO A-min³

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. Key Laboratory of Salt Lake Resources Chemistry of Qinghai Province, Xining 810008, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Qinghai Nationalities University, Xining 810007, China)

Abstract A superhydrophobic surface was constructed by wone-step solve-thermal process on the magnesium alloy. Scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared (FT-IR), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), X-ray diffraction (XRD), and contact angle measurement were used to study the surface morphology, surface composition and surface wetting behavior. The chemical polarization curve test was examined the corrosion resistance of superhydrophobic coatings. The results showed that the super-hydrophobic coating consisted of micro/nano secondary structure with contact angle and rolling angle of 163. 3° and 2. 8°, respectively. In addition, the super-hydrophobic coating had good corrosion resistance, acid and alkali resistance and long-term stability.

Key words superhydrophobic surface; magnesium alloy; solve-thermal process; corrosion resistance