

文章编号 1004-924X(2019)09-1981-09

铝合金抗污自清洁表面的制备及性能分析

孟建兵*, 娄广军, 董小娟, 赵玉刚, 周海安, 徐汝锋
(山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:为了改善 6061-T6 铝合金的抗污和耐蚀性,利用喷丸、电化学氧化与氟硅烷修饰相结合的方法,在铝合金试件上构造出类荷叶表面所需的微/纳米双重复合结构,并进行抗污清洁表面的性能分析。通过喷丸处理在铝合金表面形成微米级凹坑结构,利用电化学氧化工艺制备出纳米级珊瑚状结构,对铝合金表面进行氟化处理,制备出具有微/纳米双重结构的抗污自清洁表面。最后,对铝合金抗污自清洁表面的表面形貌、表观接触角、表面黏着能、自清洁性和耐蚀性等主要性能进行分析。实验结果表明:喷丸和电化学氧化复合处理后,铝合金表面的最大接触角为 153° ,最小滚动角为 5° ,具有较好的抗污自清洁性能;表面硬度由原来的 90HV 提高至 392HV,动电位极化曲线显示表面电流密度相比未处理前下降了 2~3 个数量级,表面耐磨性及耐腐蚀性能得到明显改善。

关键词:铝合金;喷丸;电化学氧化;抗污自清洁

中图分类号:TG174;O646 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192709.1981

Fabrication and characterization of anti-fouling and self-cleaning surface for aluminum alloy

MENG Jian-bing*, LOU Guang-jun, DONG Xiao-juan, ZHAO Yu-gang, ZHOU hai-an, XU Ru-feng

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

* Corresponding author, E-mail: jianbingmeng@sdut.edu.cn

Abstract: A method for controllable fabrication of an anti-fouling and self-cleaning surface with micro/nano lotus-like structures on 6061-T6 aluminum alloy was developed in this paper. The facile and low-cost fabrication process consisted of shot blasting, electrochemical oxidation, and surface modification with fluoroalkylsilane. The micro-pit structure was fabricated by shot blasting the aluminum alloy surface. The nano-coral structure was prepared by electrochemical oxidation. Then, the anti-fouling and self-cleaning surface with micro/nano structures were fabricated after fluorination treatment. Lastly, the surface morphology, contact angle, surface adhesion energy, self-cleaning, and corrosion resistance of the prepared aluminum alloy substrate were analyzed. The results show that the maximum contact angle and minimum rolling angle of the aluminum alloy surface are 153° and 5° , respectively, which have good anti-fouling and self-cleaning properties, after shot blasting and electrochemical oxidation treatment. In addition, the surface hardness increases from 90HV to 392HV. The potentiodynamic polarization curve shows that the surface current density decreases by two to three orders

收稿日期:2019-05-22;修订日期:2019-07-12.

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2018MEE028);国家自然科学基金资助项目(No. 51875328)

of magnitude compared with that before treatment, and the surface wear resistance and corrosion resistance are improved significantly.

Key words: aluminum alloy; shot blasting; electrochemical oxidation; anti-fouling and self-cleaning

1 引言

以 6061-T6 为代表的含镁、硅 6XXX 系铝合金因重量轻、强度高、可成型度好、易加工等性能,已在航空航天、汽车制造、高铁等领域获得广泛应用^[1-3]。随着对表面性能和表面感官要求的不断提高,这些铝合金制件表面要具有良好的抗污性和自洁性^[4-5]。而大自然的神奇之处在于能够不断地为人类解决科学和工程问题提供创新之源,“荷叶效应”就是一个典型的抗污自清洁实例^[6]。经过深入研究,科学家发现荷叶之所以具有良好的自清洁性是表面特殊的微纳米复合结构与蜡质层(低表面能)共同作用的结果。而制备出具有可控润湿性的表面是获得理想自清洁性能(接触角大于 150° , 滚动角小于 10°)的根本。目前,制备自清洁表面的技术路线有两条^[7-8]:一是低表面能材料修饰具有合适微观结构的表面;二是在低表面能材料表面上构建合适的微观几何形貌。单纯采用降低材料表面自由能的方法对改善铝合金抗污自清洁性能的效果比较有限,所以,如何构建合适的表面微细结构即多尺度表面织构的效果成为人工制备铝合金抗污自清洁表面的关键。

近年来,抗污自清洁表面制备技术发展得越来越快,主要有激光刻蚀法、化学刻蚀法、氧化处理法、电化学/化学沉积法等^[9-18]。但目前的制备技术存在工艺复杂、成本高、效率低,使用危险化学品试剂以及表面机械稳定性和耐蚀稳定性差等问题。因此,研究出一种工艺简单、成本较低、高效稳定、环境友好的方法来制备铝合金抗污自清洁表面具有重要的现实意义。

喷丸和阳极氧化是制备疏水或超疏水表面较为常用的两种方法^[19-20],前者可以构造出微米凹坑结构,后者能够形成纳米蜂窝或珊瑚状结构。然而,这两种结构通常是一元结构。当前研究发现,单纯的一元微米结构或单纯的一元纳米结构,即使经过低能化修饰,也不能获得理想的抗污自清洁表面^[21-22]。因此,本文把喷丸和电化学氧化相结合,即在喷丸形成的凹坑微米结构上进行电

化学氧化加工,构造出珊瑚状纳米结构,最终形成微纳米二元双重结构,经氟硅烷降低表面能后,实现表面的抗污自清洁性能。

2 实验

2.1 实验材料与试剂

铝合金(合金牌号 6061-T6,化学组成:Si 0.4%~0.8%,Fe 0.7%,Mg 0.15%,Zn 0.25%,Cu 0.15%~0.4%,尺寸为 40 mm×20 mm),棕刚玉磨料(60 目),十三氟辛基三乙氧基硅烷($C_8F_{13}H_4Si(OC_2H_5)_3$,曲阜嘉业化工新材料有限公司),无水乙醇、丙酮(分析纯,国药集团试剂股份有限公司),去离子水(自制)。

2.2 实验制备

首先,分别用 1000#,1200#,1500# 的砂纸按同一方向对铝合金样品进行打磨,去除表面氧化膜及金属刺。再依次用丙酮、无水乙醇、去离子水进行超声波清洗(功率为 99 Hz、温度为 20°C 、清洗时间为 10 min),从而去除铝合金试件表面上的杂质颗粒或打磨时留下的油污等污染物。最后放到恒温干燥箱(温度为 60°C ,时间为 5 min)中进行干燥,取出后冷却至室温。用喷丸机对预处理完成后的铝合金进行喷丸处理(喷丸气压为 0.65 MPa,弹丸粒径为 120 目,喷嘴直径为 5 mm,喷丸时间为 150 s),喷丸后的样品再依次经丙酮、无水乙醇、去离子水超声波清洗,并进行干燥处理。将样品放入 NaCl 溶液中进行电化学氧化处理(溶液浓度为 6 g/L、电流密度为 200 A/m^2 、电压为 4 V、氧化时间为 2.5 h),装置如图 1 所示,氧化完成后再次对样品进行超声波清洗,最后对样品进行干燥处理。

2.3 氟硅烷修饰

按照质量比为 1 wt.% 的比例将定量的氟硅烷滴入到准备好的无水乙醇中。配制时要用胶头滴管慢慢加入,同时要用玻璃棒一直沿顺时针方向不断的搅拌。将配制好的氟硅烷溶液放在磁力搅拌器上搅拌,搅拌定子的转速为 750 r/min,搅拌时间为 1 h。搅拌完成后,将喷丸冲击和电化学氧化后

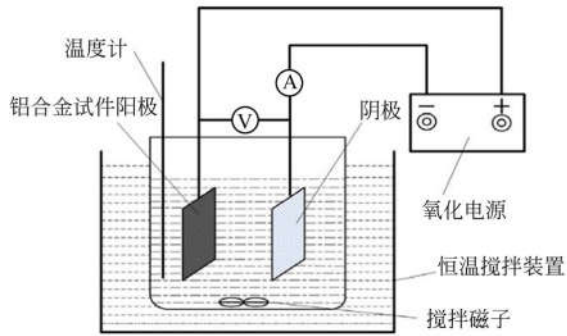


图 1 电化学氧化处理装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrochemical oxidation device

的铝合金试件放入氟硅烷溶液中浸泡 3 h, 然后放入设定温度为 80 °C 的恒温干燥箱中加热 30 min。

2.4 自清洁表面表征

使用 FM800 显微硬度仪测量铝合金表面硬度, 用 FEI Sirion 200 场发射扫描电镜观察样品

的微观形貌和表面化学成分, 用 MicroXAM-100 白光干涉仪检测微米结构表面的粗糙度, 用 OCA15EC 接触角测量仪测试表面的水滴接触角与滚动角。测量接触角的水滴体积为 5 μL, 测量结果取 6 个不同位置的平均值。此外, 将界面倾斜一定的角度直至水滴处于瞬间的滚落状态, 此时界面与水平面的夹角作为水滴的滚动角。用电化学工作站测试自清洁表面的耐腐蚀性。

3 实验结果分析

3.1 表面微观形貌分析

为了分析微/纳米双重复合结构在实现铝合金表面抗污自清洁性能方面的重要作用, 分别构造出了一元凹坑微米结构 (Micro-pit Structures, MS)、一元珊瑚状纳米结构 (Nano-coral Structures, NS) 和二元微纳米粗糙结构 (Dual composite Structures, DS), 如图 2 所示。其中, 图

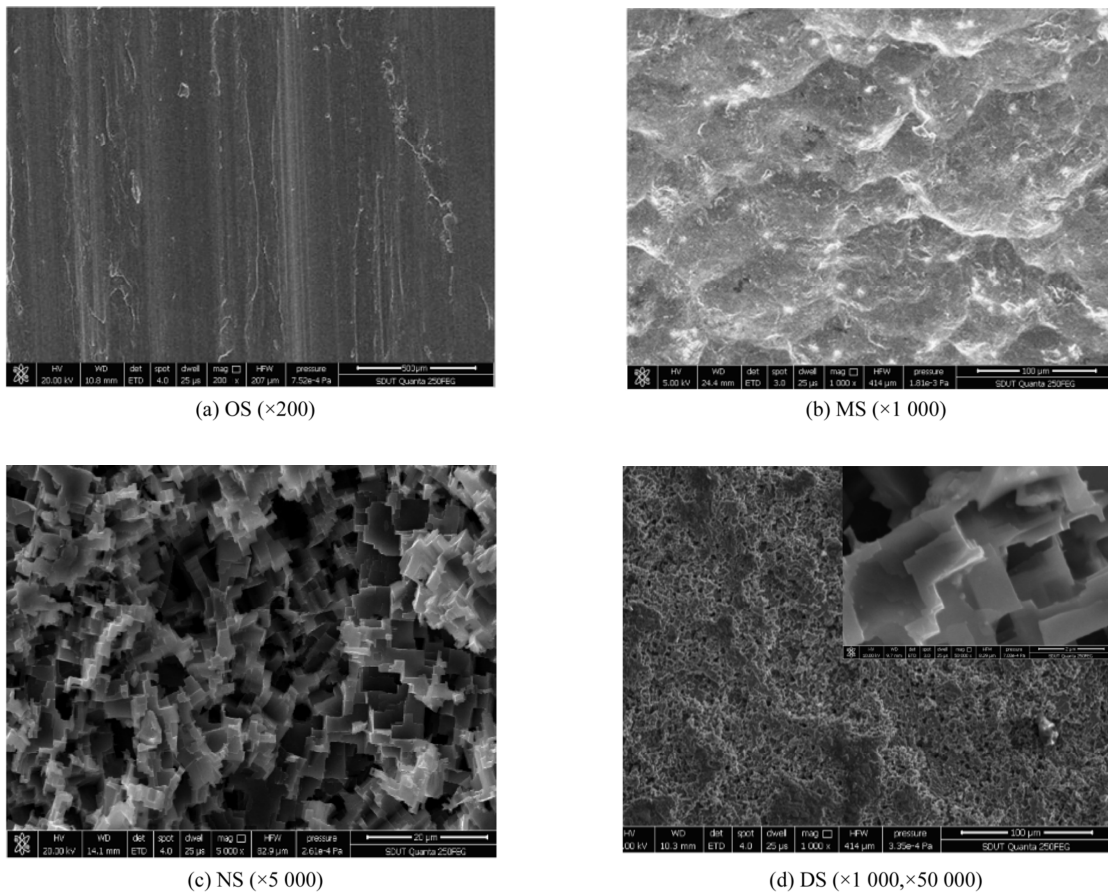


图 2 不同加工条件下铝合金试件表面微观形貌的比较

Fig. 2 Comparison of surface microstructures of aluminum alloy specimens under different processing conditions

2(a)是铝合金试件未经处理的初始表面(Original Surface, OS)的扫描电镜显微(Scanning Electron Microscopy, SEM)图片,图 2(b)是 MS 表面的 SEM 图片,图 2(c)是 NS 表面的 SEM 图片,图 2(d)是喷丸和电化学氧化处理后 DS 表面的 SEM 图片。

由图 2(a)可见,在喷丸和电化学氧化处理前的铝合金表面比较光滑,仅存在由于砂纸打磨而残留的划痕。喷丸冲击加工后,铝合金试件表面形成尺寸和分布都比较均匀的凹坑状结构,如图 2(b)所示。图 2(c)是铝合金试件仅仅被电化学氧化处理后的表面形貌,可以发现整个试件表面覆盖着一层几十到几百纳米尺寸的珊瑚网状结构。从图 2(d)中可以看出,电化学氧化处理后铝合金试件表面仍然保留着凹坑状微米结构轮廓外形,并且在凹坑微米结构上布满了直径约为几十到几百纳米的珊瑚网状结构,由此形成了微纳米双重复合结构。

3.2 表面接触角分析

图 3 为水滴在氟硅烷修饰后的 OS, MS, NS, DS 铝合金试件表面的接触角。未经处理前水滴在试件表面呈半球状,可知普通铝合金表面即使经过低能化处理后水滴接触角仅为 97° ,如图 3(a)所示。经喷丸处理、电化学氧化处理并修饰后的表面接触角分别达到 148.4° 和 163.5° ,如图 3(b)和 3(c)所示,经喷丸处理后的铝合金表面接触角

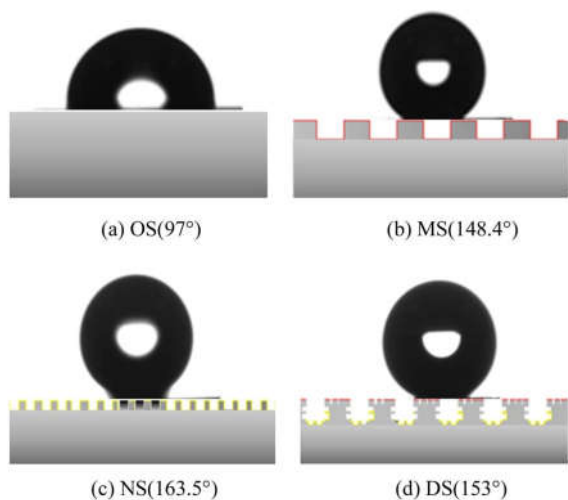


图 3 不同加工条件下铝合金试件的表面接触角
Fig. 3 Water contact angles of self-cleaning surface of aluminum alloy

低于 150° ,但可以看出水滴与表面之间的黏着性较差,意味着此状态下水滴能够轻易地从表面滚落。相比电化学氧化后的铝合金表面,水滴与表面接触处有较大的阴影区域,表明水滴的黏着性较好,即使倾斜较大角度也难以从表面滑落,尽管此时表面的接触角达到最大值。经喷丸及电化学氧化处理后,试件表面的接触角为 153° ,水滴与表面的黏着性较差。由图 3(d)分析认为,复合法构造的微纳米结构在增大表面接触角的同时,能够有效减小表面滚动角,在微纳米双重复合结构和低表面能的协同作用下,铝合金表面达到 Cassie 和 Baxter 润湿状态^[23-24]。由此证明,水滴不能渗入微观粗糙结构的缝隙中,与微观粗糙结构的接触也被空气隔开,减小固液接触面积和黏附滞后,进而增强了铝合金表面的抗污自清洁能力。同时还说明单一的喷丸工艺或电化学氧化处理并不能使铝合金表面表现出良好的抗污自清洁性。

3.3 表面憎水性分析

表面黏着能及滚动角是表征表面憎水性能的重要指标^[25-26]。由黏着能与表面力相关理论,当物体 A 的表面 a 与物体 B 的表面 b 相互黏着接触而构成界面 ab 之后,如果施加外力将该黏着界面分离,并将两物体移开相距无限远,则外力在单位面积上所做的功定义为黏着功或称为 Duprè 黏着能,以 ω 表示,即:

$$\omega = 2\varphi(G_a \cdot G_b)^{1/2}, \quad (1)$$

其中: G_a, G_b 分别为物体表面 a 和 b 的自由能; φ 为常数。由公式(1)可知,黏着能直接受表面自由能的影响,而铝合金试件表面自由能的计算公式为:

$$\cos \theta = -1 + 2 \sqrt{\frac{\gamma_S}{\gamma_L}} \exp[-\beta(\gamma_L - \gamma_S)^2], \quad (2)$$

$$\ln \gamma_S - \ln \left[\gamma_L \cos^4 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] = 2.494 \times 10^{-4} (\gamma_L - \gamma_S)^2, \quad (3)$$

其中: θ 是试件表面水滴接触角; γ_S, γ_L 分别是固体表面能和液体表面能; β 是常数^[27], 数值为 $1.274 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{mJ}$ 。由公式(3)可知,方程两边都有一个未知值,然而,这里使用的液体是去离子水^[28],表面能 γ_L 为 72.8 mJ/m^2 。将实测接触角和去离子水表面能代入上述公式中,绘制出两条曲线,而交点的横坐标便是所要计算的试件表面能。

图 4(a)为不同加工条件下铝合金试件表面能

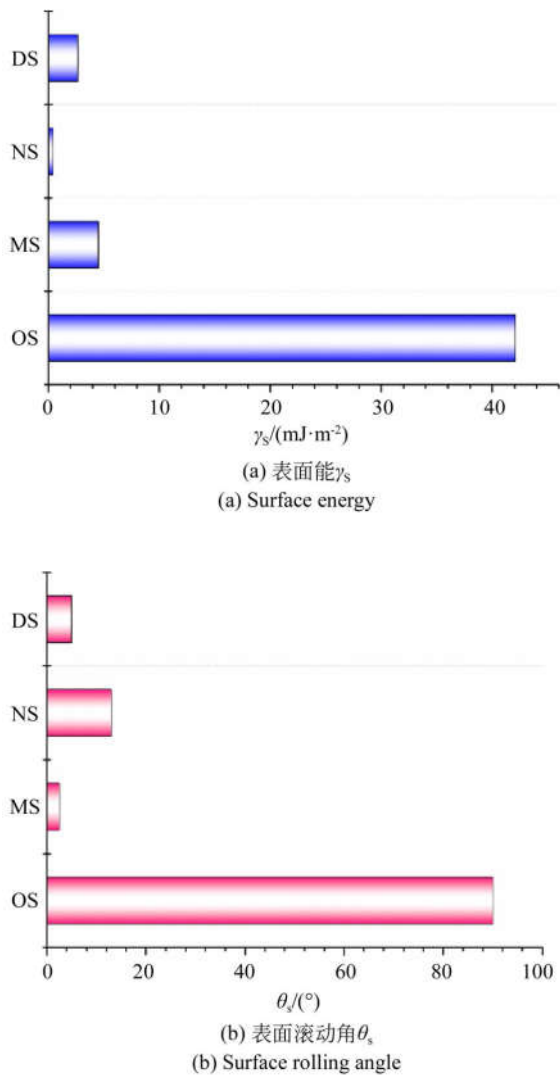


图4 不同加工条件下铝合金试件表面憎水性的比较
Fig. 4 Comparison of surface repellency of aluminum alloy specimens under different processing conditions

γ_s 的变化情况,未经喷丸和氧化处理的铝合金试件表面能 γ_s 是 42.07 mJ/m^2 。试件分别经喷丸、电化学氧化处理后的表面能 γ_s 快速降到 4.51 mJ/m^2 和 0.43 mJ/m^2 ;由喷丸和电化学氧化依次进行处理后的铝合金试件表面能 γ_s 为 2.65 mJ/m^2 。由此可见,表面能 γ_s 由小到大的顺序为: $\text{NS} < \text{DS} < \text{MS} < \text{OS}$,即微纳米双重复合结构表面的表面能 γ_s 介于一元纳米结构和一元微米结构之间。

图4(b)为不同加工条件下铝合金试件表面滚动角 θ_s 的变化情况,未经喷丸和氧化处理的铝合金试件表面滚动角 θ_s 大于 90° 。试件分别经喷丸、电化学氧化处理后的表面滚动角 θ_s 也随之下

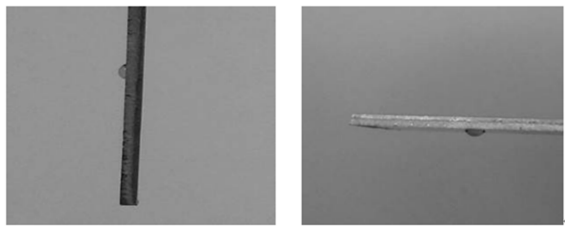
降到 2.5° 和 13° ;由喷丸和电化学氧化依次进行处理后的铝合金试件,其表面滚动角 θ_s 达到 5° 。由此可见,滚动角 θ_s 由小到大的顺序为: $\text{MS} < \text{DS} < \text{NS} < \text{OS}$ 。由图4可知,一元纳米结构表面能最小,但滚动角不仅大于一元微米结构和二元微纳米复合结构,而且还超过了 10° ,使得一元纳米结构表面虽然具有 163.5° 的水滴接触角,但并没有实现超疏水性能。与之相比,二元微纳米结构表面具有 153° 的接触角和 5° 的滚动角,满足自清洁表面对接触角和滚动角的要求。因此,经喷丸和电化学氧化的共同处理后铝合金试件由于具有微纳米双重结构,能够实现抗污自清洁的特性。

这是因为:二元复合结构中的纳米结构会进一步增大一元微米结构的本征接触角。此外,纳米结构能够减小固液接触面积分数,但是由于毛细作用力,试件表面即使具有很低的表面能,仍存在毛细黏附滞后,增大了滚动角;而二元复合结构中的微米结构能够降低固液气三相接触线的密度,有利于降低固液间的黏着力,从而得到较低的滚动角。

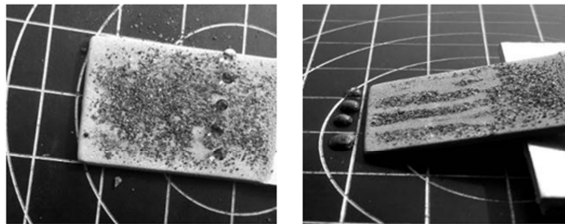
3.4 表面自清洁性分析

图5(a)是喷丸和电化学氧化处理前铝合金试件 OS 表面的水滴形态。从图中可以看出,原始铝合金表面的自清洁性极差,水滴在铝合金表面呈现半球状,分别将铝合金旋转 90° ,甚至是 180° ,滴在铝合金表面的水滴丝毫未发生变化,也没有任何滴落的痕迹。由此可见,即使降低表面能,没有粗糙微细结构的光滑表面并不具备抗污自清洁性能。

图5(b)是喷丸和电化学氧化处理后铝合金试件 DS 表面的水滴形态。从图中可以发现,水滴在试件表面几乎成圆球状,表面接触角高。如果在试件表面均匀的撒上喷丸实验用的细磨料(粒径为 120 目),当把试件倾斜 $3^\circ \sim 5^\circ$ 时,表面的水滴迅速滚落,同时还带走的磨料颗粒一并带走,滑落的痕迹中没有残留任何的颗粒杂质。这是因为:DS 表面既有凹坑微米级结构,又有珊瑚状纳米结构,而纳米结构的出现会增强二元微纳米粗糙结构捕获空气的能力,使得水滴与 DS 表面的接触被空气隔开,降低固液间的接触面,在保障足够大的接触角的同时,降低了滚动角。由此可见,氟硅烷修饰后,微纳米双重复合结构的铝合金试件表面表现出良好的抗污自清洁能力。



(a) 水滴在 OS 表面上的形态
(a) Morphology of water droplets on OS surface



(b) 水滴在 DS 表面上的形态
(b) Morphology of water droplets on DS surface

图 5 加工前后铝合金试件表面的自清洁性能
Fig. 5 Surface self-cleaning properties of aluminum alloy specimens before and after treatment

3.5 表面化学成分分析

图 6 为不同加工条件下铝合金试件表面的 EDS 能谱图。未经任何处理的铝合金 OS 表面的组成元素成分主要是 Al, Mg, 如图 6(a) 所示。喷丸和氟化处理后的 MS 表面中多了 Si, F 等元素。Si, Fe 等元素的出现是因为喷丸采用的弹丸材料为棕刚玉, 而棕刚玉的主要成分中还有 Si, Fe 等元素, 喷丸处理后, 试件表面会残留棕刚玉的部分元素, 如图 6(b) 所示。从图 6(c) 中可以发现, 阳极氧化处理后 NS 表面的 O 元素含量显著增高, 同时 Al 的含量也有所下降, 表明铝合金试件表面氧化形成了 Al_2O_3 。此外, 喷丸和电化学氧化一起处理后的 DS 表面, 如图 6(d) 所示。F 和 O 元素的含量分别为 30.81%, 8.30%, 表明试件表面形成了主要含有氧化铝和含氟交联物的功能层。正是由于氧化铝和含氟交联物的存在, 铝合金表面在具有抗污自清洁性能的同时, 具有良好的耐腐蚀能力。

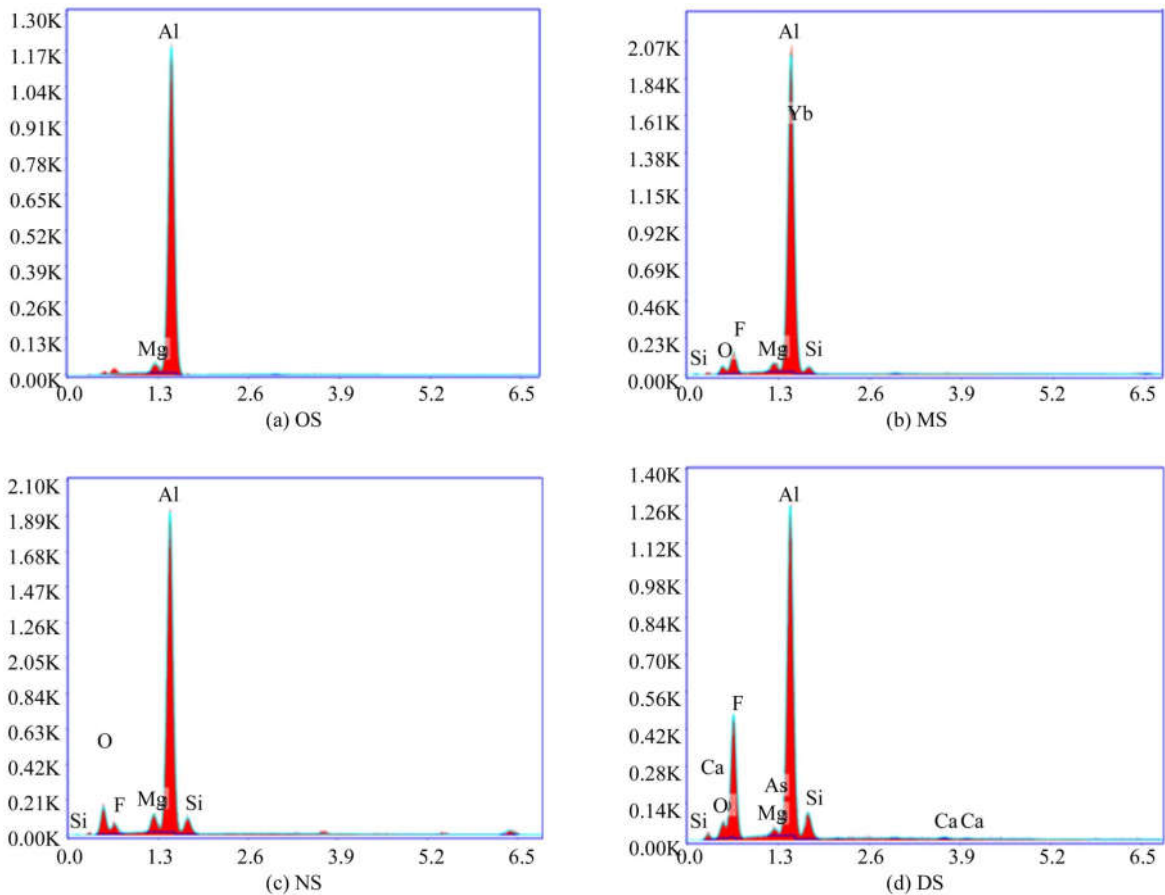
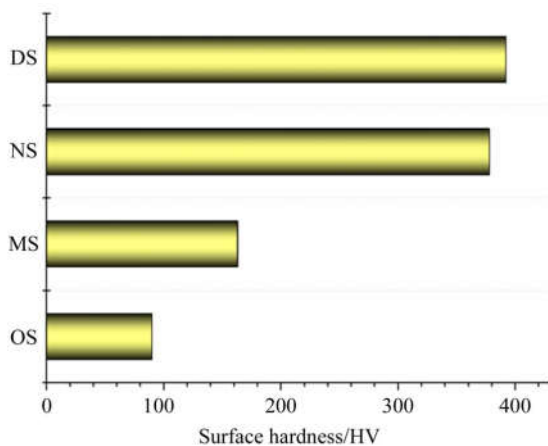
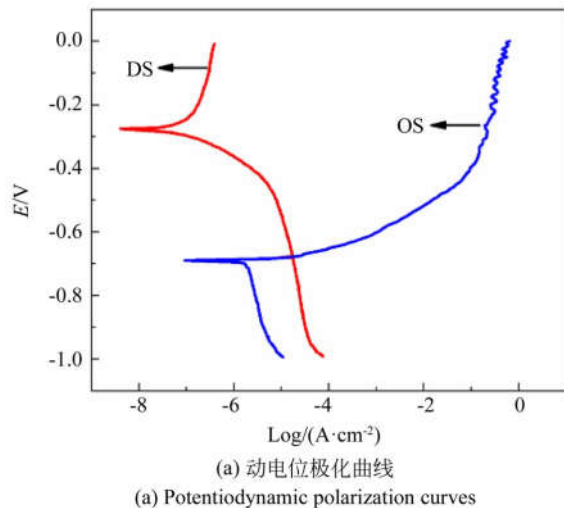


图 6 处理前后铝合金表面化学成分
Fig. 6 Surface chemical compositions of aluminum alloy before and after treatment

3.6 表面耐腐蚀性分析

图7(a)是铝合金试件在制备微纳米双重复合结构前后的表面动电位极化曲线。其中,未处理铝合金试件OS表面的腐蚀电流密度为 $1.1 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$,而处理后的DS表面腐蚀电流密度降至 $6.8 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。从图7(a)中可以看出,



(b) 不同加工条件下的表面硬度
(b) Surface hardness under different processing conditions

图7 加工前后铝合金试件的表面耐腐蚀性和表面硬度
Fig.7 Surface corrosion resistance and hardness of aluminum alloy specimens before and after treatment

参考文献:

- [1] YI J, ZHANG J M, CAO S F, *et al.*. Effect of welding sequence on residual stress and deformation of 6061-T6 aluminium alloy automobile component [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society*

加工前未经处理的铝合金试件OS表面的Tafel曲线形状和制备后的DS表面Tafel曲线形状相似,表明二者具有相似的腐蚀行为。然而,具有微纳米双重结构的铝合金试件DS表面的腐蚀电流密度较小,且比未经处理的试件OS表面的电流密度降低了3个数量级,极化电阻显著增大。因此,与处理前的试件OS面相比,具有微纳米双重结构的DS表面具有更高的耐腐蚀性能。

图7(b)为不同加工条件下铝合金试件表面硬度的变化情况,未经喷丸和氧化处理的铝合金试件表面硬度是90HV。试件分别经喷丸、电化学氧化处理后的表面硬度随之升高到163HV,378HV;由喷丸和电化学氧化依次进行处理后铝合金试件的表面硬度为392HV。表面硬度由小到大的顺序为:OS<MS<NS<DS。这是因为:DS表面是在微米级结构晶粒更加细化,在内部的残余压应力得到有效提升的基础上,在凹坑内部进行结构更加细致的珊瑚网状结构的塑造,纳米结构的排列更加紧密,孔隙率也随之降低,使得表面显微硬度得到提升。表面硬度的上升能够提高表面微观结构的力学性能,从而在一定程度上增强抗污自清洁表面的机械稳定性。

4 结 论

本文将喷丸和电化学氧化技术相结合,在6061-T6铝合金试件上构造出微纳米双重复合结构,该二元微纳米粗糙结构由凹坑状微米结构和珊瑚状纳米结构共同构成。经氟硅烷修饰后,铝合金表面具有二元微纳米复合结构,其接触角、滚动角和黏着能分别为 153° , 5° 和 2.65 mJ/m^2 ,表明制备出的铝合金表面具有良好的抗污自清洁性能;同时,表面硬度比未处理前提高了77%。此外,铝合金自清洁表面的腐蚀电流密度比未处理前降低了2~3个数量级,表明经喷丸和电化学氧化处理后的铝合金表面具有更强的耐蚀性能。

of China, 2019, 29: 287-295.

- [2] 李晓娟,刘栋,刘哲,等. 海洋环境中铝合金表面改性涂层的电化学性能[J]. *表面技术*, 2018, 47(1): 181-185.

LI X J, LIU D, LIU ZH, *et al.*. *Electrochemical*

- performance of surface modification coatings on aluminum alloy in marine environment[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(1): 181-185. (in Chinese)
- [3] 王红阳, 孙佳, 刘黎明. 6061-T6 铝合金激光-电弧复合高速焊气孔形成及控制机制[J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 186-191.
- WANG H Y, SUN J, LIU L M. Formation and controlling mechanism of pores in laser-TIG hybrid welding of 6061-T6 aluminum alloys at high speed[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 186-191. (in Chinese)
- [4] LI X W, ZHANG Q X, GUO Z, *et al.*. Fabrication of superhydrophobic surface with improved corrosion inhibition on 6061 aluminum alloy substrate[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 342: 76-83.
- [5] MOKHTARI S, KARIMZADEH F, ABBASI M H, *et al.*. Development of super-hydrophobic surface on Al 6061 by anodizing and the evaluation of its corrosion behavior[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 324: 99-105.
- [6] 江雷, 冯琳. 仿生智能纳米界面材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- JIANG L, FENG L. *Bioinspired Intelligent Nanostructured Interfacial Materials* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [7] VARSHNEY P, LOMGA J, GUPTA P K, *et al.*. Durable and regenerable superhydrophobic coatings for aluminium surfaces with excellent self-cleaning and anti-fogging properties[J]. *Tribology International*, 2018, 119: 38-44.
- [8] SAFFARI H, SOHRABI B, NOORI M R, *et al.*. Optimal condition for fabricating superhydrophobic Aluminum surfaces with controlled anodizing processes[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 435: 1322-1328.
- [9] SONG Y X, WANG C, DONG X R, *et al.*. Controllable superhydrophobic aluminum surfaces with tunable adhesion fabricated by femtosecond laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 102: 25-31.
- [10] 李晶, 赵言辉, 于化东, 等. 铝合金电刷镀与激光微加工耦合制备超疏水表面及其特性[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(1): 82-87, 92.
- LI J, ZHAO Y H, YU H D, *et al.*. Fabrication and properties of superhydrophobic surface on aluminum alloys substrates by brush plating and laser processing technology[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(1): 82-87, 92. (in Chinese)
- [11] 张传伟, 李雪伍, 石甜, 等. 5A05 铝合金表面超疏水结构的制备及耐腐蚀性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(10): 2980-2985.
- ZHANG CH W, LI X W, SHI T, *et al.*. Fabrication of superhydrophobic structure on 5A05 aluminum alloy surface and its corrosion resistance[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(10): 2980-2985. (in Chinese)
- [12] 潘瑞, 钟敏霖. 超快激光制备超疏水超亲水表面及超疏水表面机械耐久性[J]. *科学通报*, 2019, 64(12): 1268-1289.
- PAN R, ZHONG M L. Fabrication of superwetting surfaces by ultrafast lasers and mechanical durability of superhydrophobic surfaces[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(12): 1268-1289. (in Chinese)
- [13] 周明勇, 蒋炳炎, 张露, 等. 模板法注射成型纳米结构及其疏水特性[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 165-173.
- ZHOU M Y, JIANG B Y, ZHANG L, *et al.*. Injection molding nanostructures by template method and their hydrophobic properties[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 165-173. (in Chinese)
- [14] LI J, ZHAO S C, DU F, *et al.*. One-step fabrication of superhydrophobic surfaces with different adhesion via laser processing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 739: 489-498.
- [15] TANG M K, HUANG X J, GUO Z, *et al.*. Fabrication of robust and stable superhydrophobic surface by a convenient, low-cost and efficient laser marking approach[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 484: 449-456.
- [16] NGO C V, CHUN D M. Control of laser-ablated aluminum surface wettability to superhydrophobic or superhydrophilic through simple heat treatment or water boiling post-processing[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 435: 974-982.
- [17] FENG L B, YAN Z N, SHI X T, *et al.*. Anti-icing/frosting and self-cleaning performance of superhydrophobic aluminum alloys[J]. *Applied Physics A*, 2018, 124(2): 1-14.
- [18] FOROOSHANI H M, ALIOFKHAZRAEI M, ROUHAGHDAM A S. Superhydrophobic aluminum surfaces by mechanical/chemical combined method and its corrosion behavior[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*,

- 2017, 72: 220-235.
- [19] SHEN Y Z, TAO H J, CHEN S L, *et al.*. Water repellency of hierarchical superhydrophobic Ti6Al4V surfaces improved by secondary nano-structures[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 321: 469-474.
- [20] VENGATESH P, KULANDAINATHAN M A. Hierarchically ordered self-lubricating superhydrophobic anodized aluminum surfaces with enhanced corrosion resistance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(3): 1516-1526.
- [21] CHEN T C, GE S R, LIU H T, *et al.*. Fabrication of low adhesive superhydrophobic surfaces using nano Cu/Al₂O₃ Ni-Cr composited electrobrush plating [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 356: 81-90.
- [22] SALEHIKAHRIZSANGI P, RAEISSI K, KARIMZADEH F, *et al.*. Highly hydrophobic Ni-W electrodeposited film with hierarchical structure [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 344: 626-635.
- [23] LU Y, SONG J L, LIU X, *et al.*. Preparation of superoleophobic and superhydrophobic titanium surfaces via an environmentally friendly electrochemical etching method [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2012, 1(1): 102-109.
- [24] ZHANG Y L, SUNDARARAJAN S. Superhydrophobic engineering surfaces with tunable air-trapping ability[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18(3): 035024.
- [25] YAN Y D, CHIBOWSKI E, SZCZEP? A. Surface properties of Ti-6Al-4V alloy part I: Surface roughness and apparent surface free energy[J]. *Materials Science & Engineering. C, Materials for Biological Applications*, 2017, 70 (Pt 1): 207-215.
- [26] DONG X J, MENG J B, ZHOU H A, *et al.*. Fabrication of adhesive resistance surface with low wettability on Ti₆Al₄V alloys by electro-brush plating [J]. *Micromachines*, 2019, 10(1):64.
- [27] OHKUBO Y, TSUJII I, ONISHI S, *et al.*. Preparation and characterization of super-hydrophobic and oleophobic surface[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45(18): 4963-4969.
- [28] WANG C Q, HE X N. Effect of atmospheric pressure dielectric barrier discharge air plasma on electrode surface[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(2): 926-929.

作者简介:



孟建兵(1978—),男,山东济宁人,副教授,硕士生导师,2002年、2005年于山东理工大学分别获得学士和硕士学位,2009年于大连理工大学获得博士学位,现为山东理工大学先进制造研究院院长助理,主要从事先进制造、特种加工、金属表面处理等方面的研究。E-mail: jianbingmeng@sdut.edu.cn



娄广军(1993—),男,山东济南人,硕士研究生,主要从事先进制造技术与装备的研究。E-mail: louguangjun101@163.com