

温度对铝合金全氟辛基三乙氧基硅烷自组装膜耐腐蚀性能影响

曹一军 龙贤豪 黄健华 周胜军 卢德柱 陈天凤 廖 群 温玉清
(桂林理工大学广西电磁化学功能物质重点实验室)

摘 要 为研究温度对全氟辛基三乙氧基硅烷自组装膜耐腐蚀性能的影响,在铝合金表面制备不同温度的自组装膜(SAMs),并采用扫描电镜(SEM)、能量色散光谱仪(EDS)、水接触角(WCA)、电化学阻抗谱(EIS)、塔菲尔极化曲线(Tafel)和中性盐雾试验,以确定SAMs的形貌、结构和化学成分,并进行耐腐蚀性分析和讨论。结果表明,自组装薄膜的接触角和耐腐蚀性能随着温度的升高先增大后减小。其中40℃制备的SAMs接触角达到153°,表现出超疏水性能。电化学性能测试结果表明,40℃制备的SAMs的交流阻抗值和腐蚀电流密度分别达到 $1.998\times10^{10}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 $9.737\times10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$ 。这表明在该温度下制备的SAMs具有更优异的耐腐蚀性,中性盐雾试验结果也证实了这一点。这可能是由于在40℃时铝合金表面形成了蜂窝状的微观规则结构,有利于超疏水性的形成,从而提高了薄膜的耐腐蚀性能。

关键词 铝合金;阳极氧化;耐腐蚀性能

中图分类号 TG174.45;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Temperature on Corrosion Resistance of Perfluorooctyltriethoxysilane Self-assembled Films on Aluminum Alloys

Cao Yijun, Long Xianhao, Huang Jianhua, Zhou Shengjun, Lu Dezhu, Chen Tianfeng, Liao Qun, Wen Yuqing
(Guangxi Key Laboratory of Electrochemical and Magnetochemical Function Materials, Guilin University of Technology)

Abstract: In order to analyze the effect of temperature on the corrosion resistance of perfluorooctyltriethoxysilane self-assembled films(SAMs), SAMs at different temperatures were fabricated on the surface of aluminum alloys. The morphology, structure, and chemical composition of SAMs were determined and corrosion resistance was analyzed by scanning electron microscopy(SEM), energy dispersive spectrometer(EDS), static water contact angle(WCA), electrochemical impedance spectroscopy(EIS), Tafel polarization curve(Tafel), and neutral salt spray test. The results indicate that the contact angle and corrosion resistance of SAMs are increased firstly and then decreased with the increase in temperature, where SAMs prepared at 40℃ reach a contact angle of 153°, presenting superhydrophobic properties. The electrochemical performance test results reveal that the AC impedance value and corrosion current density of SAMs prepared at 40℃ reach $1.998\times10^{10}\Omega\cdot\text{cm}^2$ and $9.737\times10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$, respectively, indicating excellent corrosion resistance, which is confirmed by the neutral salt spray test results. The consequence is attributed to the formation of a honeycomb-like microscopic regular structure on the surface of aluminum alloy at 40℃, which is beneficial to the formation of superhydrophobicity, thereby improving the corrosion resistance of the film.

Key Words: Al Alloy, Anodic Oxidization, Corrosion Resistance

铝合金具有密度小、传热及易导电、充型能力强、加工性能好等特点,在许多领域得到了广泛的应用^[1-3]。

收稿日期:2022-07-07;修改稿收到日期:2022-07-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51665010);广西自然科学基金资助项目(2021GXNSFAA220107)
第一作者简介:曹一军,男,1997年出生,硕士研究生,广西桂林(541000),E-mail:626356528@qq.com
通信作者:温玉清,男,1976年出生,教授,广西桂林(541000),E-mail:2006027@glut.edu.cn
引用格式:曹一军,龙贤豪,黄健华,等. 温度对铝合金全氟辛基三乙氧基硅烷自组装膜耐腐蚀性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):647-655.
CAO Y J, LONG X H, HUANG J H, et al. Effects of temperature on corrosion resistance of perfluorooctyltriethoxysilane self-assembled films on aluminum alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):647-655.

然而,铝合金性质较为活泼,其表面容易发生腐蚀,从而造成巨大的经济损失和危险隐患^[4-5]。目前,铝合金表面化学镀镍^[6-7]、溶胶-凝胶^[8-9]和铬酸盐转化膜^[10-11]等方法已经被应用于腐蚀防护研究^[12-14]。以上方法虽然可以起到腐蚀防护作用,但在可持续发展绿色化学的新形势下,环境友好、操作简单和耐腐蚀性良好的自组装膜方法得到研究者的重视^[15-16]。

自组装膜(SAMs)是最有潜力的金属表面处理方法之一,由这些结构单元(分子、纳米材料、微米或更大规模的物质)自发形成有序结构的一种技术。在自组装膜中,基本结构单元在基于非共价键的相互作用下自发地组织或聚集成具有规则几何形貌的稳定结构,从而起到防腐的作用^[14,17-19]。自组装技术操作简单、实用性广且耐腐蚀性强,逐渐受到研究者的重视。ARSLAN E等^[20]在铜表面制备了酰亚胺(AMPN)自组装层,腐蚀抑制效率达到了98.7%。YANG W J等^[21]在铜表面制备了苯丙三氮唑(BTA)自组装膜层,电荷转移电阻最高达到 $5.0 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。目前研究主要集中在对成膜有机分子进行研究,并取得了一些较好的结果,然而有关自组装温度对自组装膜微观结构的影响研究较少^[22-24]。为了探索自组装温度对于SAMs的超疏水和耐腐蚀性能的影响,本研究通过阳极氧化构造粗糙结构,再结合自组装技术在铝合金表面制备5种温度下的自组装膜,研究其表面形貌和化学成分,并研究自组装膜微观结构对自组装膜腐蚀防护性能的影响,为进一步扩大铝合金的耐腐蚀应用范围提供参考。

1 试验方法与材料

1.1 试验材料

试验材料采用无水乙醇、 $\text{NaSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaPO}_4 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 、 NaCl 、全氟辛基三乙氧基硅烷(POTS)、 H_2SO_4 。6061铝合金成分(质量分数,下同):0.15%~0.4%的Cu、0.15%的Mn、0.04%~0.35%的Cr、0.8%~1.2%的Mg、0.25%的Zn、0.15%的Ti、0.4%~0.87%的Si和少量Fe,余量为Al。6061铝合金试样尺寸为 $15 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,并进行打磨处理。

1.2 自组装膜层制备

试样依次用180、600、1000、1200和1500号砂纸打磨至光滑后,放入80℃的除油液(10 g/L的 $\text{NaSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和40 g/L的 $\text{NaPO}_4 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)中1 min,然后分别放入乙醇和去离子水中10 min,随后取出干燥。

配制体积分数为8%的硫酸溶液,铂电极为对电极,试样为工作电极,对铝合金基体进行阳极氧化30

min,其中电流强度为 0.3 A/cm^2 ,电压为20 V,阳极氧化完成后水浴20 min,再次干燥。

配制体积分数为4%的乙醇POTS自组装溶液,在40℃下磁力搅拌水解1 h。将处理后的试样放置在POTS溶液中进行自组装,时间为2 h,温度分别设置为20、30、40、50和60℃。最后,用蒸馏水冲洗以除去多余的有机分子,将其放入100℃的烘箱中固化1 h,取出后分别做好标记待测试。制备流程见图1。

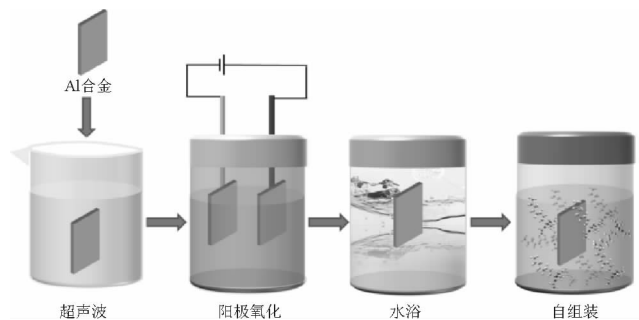


图1 试样制备流程图

Fig.1 Flow chart of specimen preparation

1.3 表征分析

采用加速电压为200 kV的SU5000场发射扫描电镜,配备X射线能谱仪(XFlash5030T)对试样的微观形貌进行表征。水接触角的测量采用接触角仪(WCA, XG-CAMA),试样的水滴体积为 $2 \mu\text{L}$,在每个试样上测量3个不同的点,取其平均值。采用涂层测厚仪(TT260)测试薄膜厚度,测试5次取其平均值。

采用CHI-760E电化学工作站对制备的涂层在3.5%的NaCl溶液中进行室温电化学行为研究。腐蚀试验采用传统的三电极体系,试样为工作电极、铂电极为对电极、标准饱和甘汞电极为参比电极。涂层的耐腐蚀性能采用极化曲线来评价,测试区域为 1 cm^2 ,电位扫描范围为 $-1 \sim 0.6 \text{ V}$,扫描速率为 5 mV/s 。采用Tafel外推法,利用化学分析软件得到腐蚀电位和腐蚀电流密度。同时,在10 mV交流信号的开路电位下,获得涂层的阻抗值,频率范围为 $10^5 \sim 10^{-2} \text{ Hz}$ 。在正常情况下,涂层的阻抗以0.01 Hz频率对应的阻抗模量值表征。此外,通过拟合合适的等效电路来解释阻抗图。

在常温下使用中性盐雾试验箱(AC-60B),在质量分数为5%的NaCl溶液中进行盐雾试验,以评估接触角对涂层的影响,然后观察表面腐蚀状态,并在CHI-760E电化学工作站进行EIS测试。

2 试验结果和讨论

2.1 SEM形貌、厚度和接触角分析

不同温度下SAMs的表面形貌见图2。可以看出,

在 20 ℃ 下,膜层表面有明显的沟壑,平均宽度约为 1 μm,十分粗糙,表面还有一些微小的碎片颗粒,许多不均匀的孔状结构相互连接(见图 2a 和图 2f);在 30 ℃ 下,膜层表面沟壑变浅,平均宽度约为 0.25 μm,沟壑也变得更加密集,形成了紧密叠加的块状,多层的絮状物进行相互叠加(见图 2b 和图 2g);而在 40 ℃ 下,表面沟

壑变得十分的狭窄,扁平块和沟纹分布错开,形成了具有规则的蜂窝状结构,表面整体趋于平整(见图 2c 和图 2h);在 50 ℃ 下,膜层形貌又十分粗糙,凹坑消失,取而代之的是高低不平的突起,颗粒状的絮状物堆积沉淀在表面(见图 2d 和图 2i);60 ℃ 时,膜层形貌呈高低起伏的层状,表面粗糙,有大量颗粒状的凸起与凹坑(见图 2e 和图 2j)。

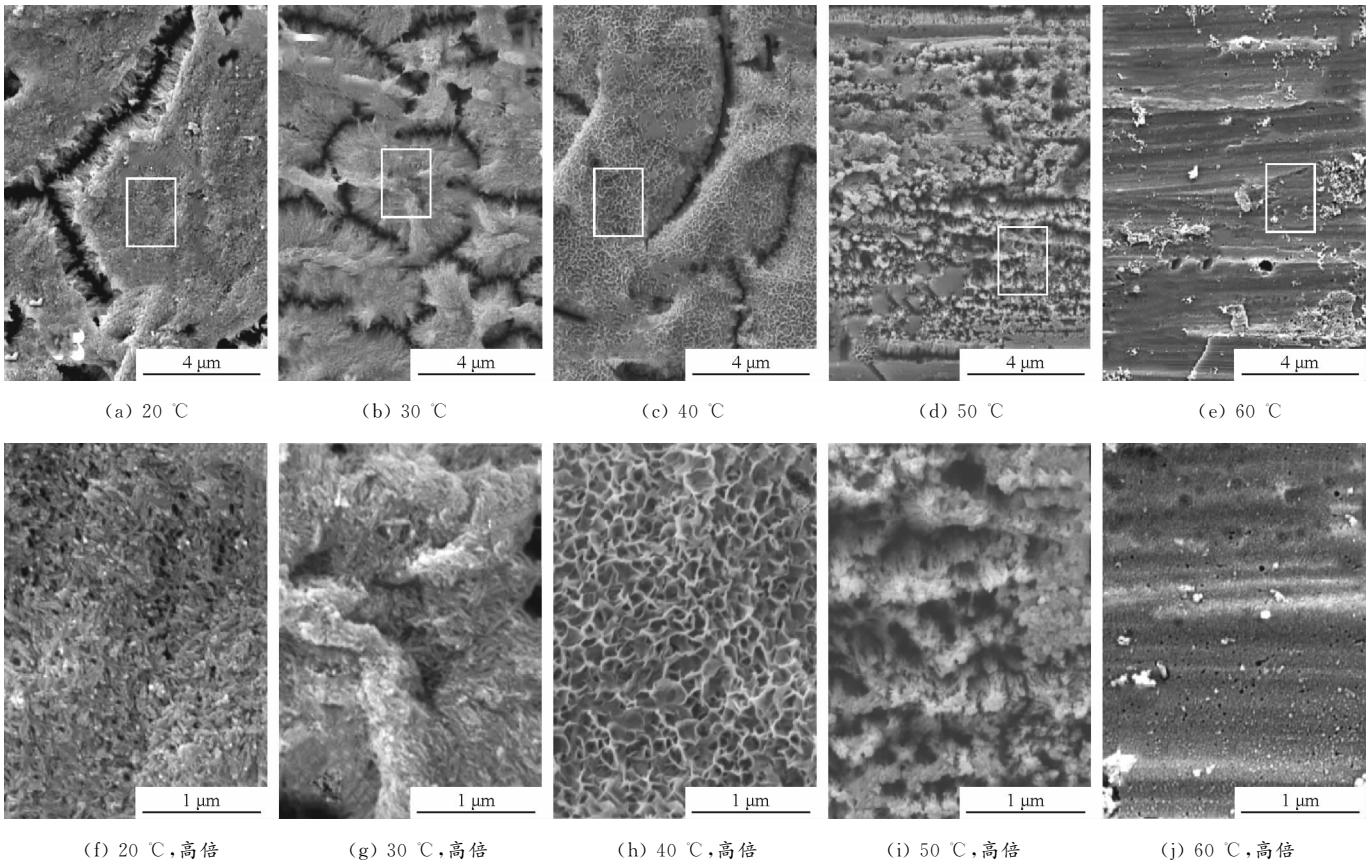


图 2 不同温度试样的 SEM 形貌

Fig.2 SEM images of specimens at different temperatures

和图 2j)。

疏水性有助于减少铝合金表面与水分子的接触从而提高耐腐蚀能力。不同温度下试样的接触角和厚度见图 3。从图 3a 可知,随着自组装温度从 20 ℃ 逐渐增大到 60 ℃,SAMs 的接触角呈现先增大后减小的趋势,

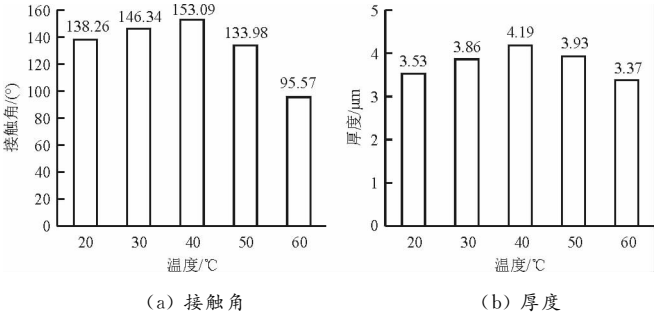


图 3 不同温度下试样的接触角和厚度

Fig.3 Contact angle and thickness of specimens at different temperatures

当温度为 40 ℃ 时,SAMs 的接触角达到最大值 153.09°,形成超疏水表面。随着自组装温度超过 50 ℃ 后,接触角逐渐减小,说明自组装膜的表面微观结构受自组装温度的影响较大,且自组装温度在 40 ℃ 时形成的 SAMs 具有超疏水性能。

结合图 2 可以看出,在 40 ℃ 时,该 SAMs 表面有机自组装分子呈规则的蜂窝状形貌,构成了具有一定规则的微观粗糙结构。该结构尺寸更易于捕获空气,在微观粗糙表面形成薄空气层,进而可有效防止溶液渗透到自组装膜的孔隙中,从而达到提升铝合金表面超疏水性能的目的。

从图 3b 可以看出,随着自组装温度升高,SAMs 的厚度也呈现先增大后减小的趋势,当温度为 40 ℃ 时,自组装膜层厚度达到最大值。这也为提高铝合金表面耐腐蚀性起到了一定的作用。

2.2 EDS 成分分析

图 4 和图 5 分别为不同温度下自组装膜层面扫描

和 EDS 图谱。F 和 Si 是 POTS 的两个特征元素,根据成分分析谱图均有对应的元素峰出现,在图 4 中可以观

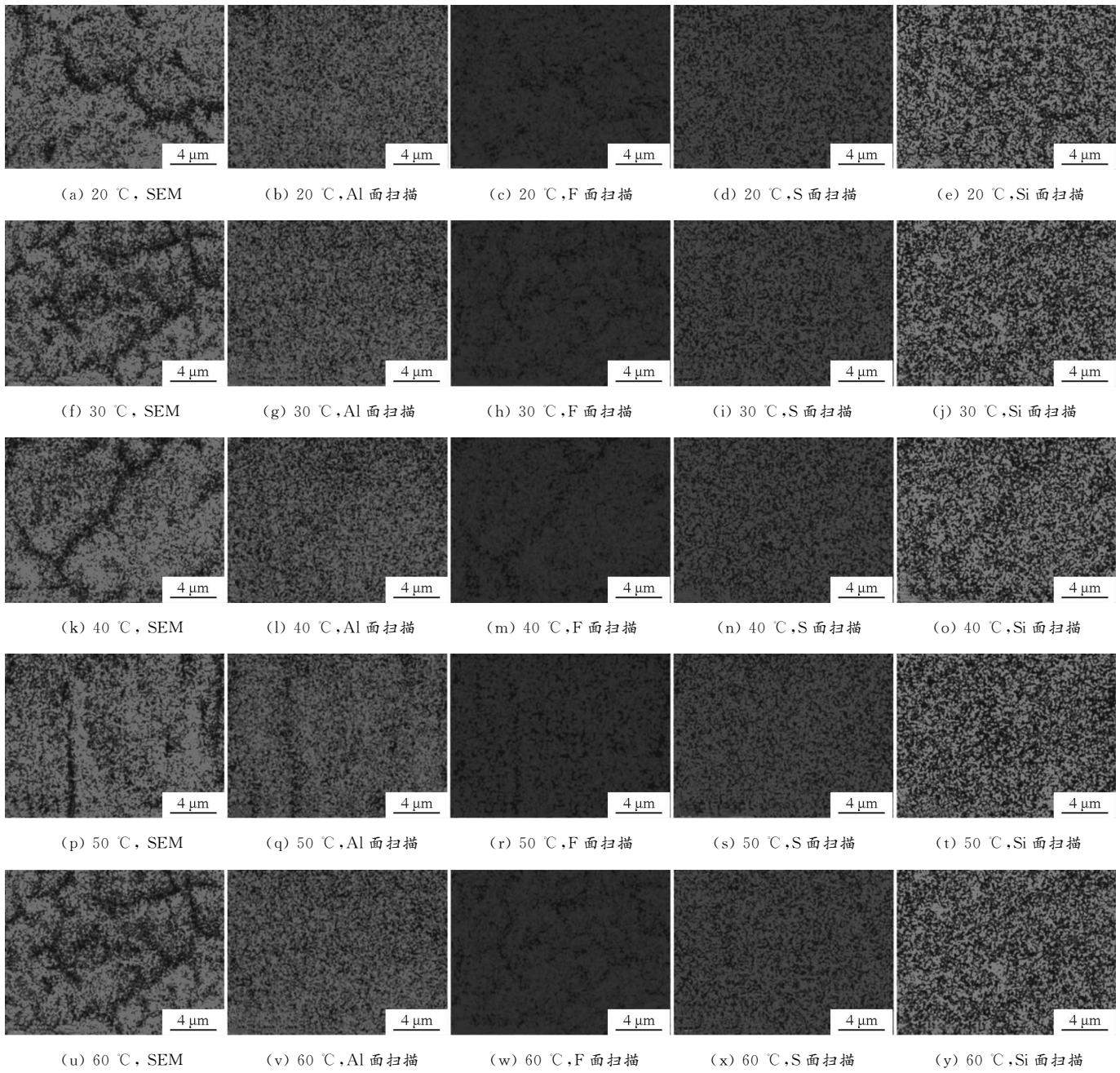


图 4 不同温度下自组装膜层面扫描分析

Fig.4 Surface scanning results of SAMs under different temperatures

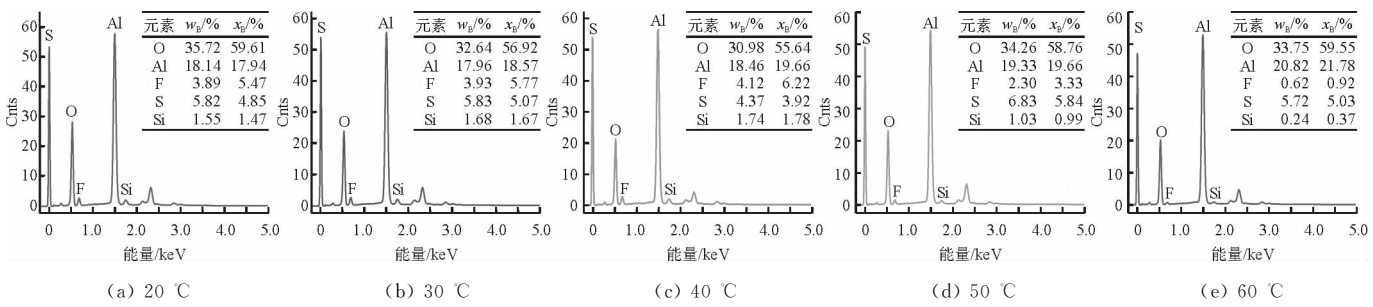


图 5 不同膜层的 EDS 成分分析

Fig.5 EDS composition analysis of different layers

察到元素分布均匀,没有明显的堆积和缺陷,由此可以证明在铝合金表面成功制备了POTS膜层。Al、O和S等3种元素的含量基本一致,说明温度对阳极氧化膜层的影响不大。为了更好地分析成膜过程,膜层的特征元素F和Si的归一化质量见图6。可以看出,20~40℃的成膜过程中,F和Si含量持续增加,这表明随着温度升高,自组装分子的化学反应活度提升,自发反应速度加快,SAMs逐渐致密完善。在40℃下,F和Si的含量最高,铝合金表面的含氟交联物中元素含量最丰富,正是因为含氟交联物中F元素的存在,使铝合金表面具有超疏水性,同时提升了其耐腐蚀的能力。继续提高自组装温度,40~60℃的成膜过程中,POTS中的F和Si含量持续降低,这可能是由于过高的温度使得长链的POTS分子发生分解,逐渐自发分解为短链分子,使铝合金表面难以形成较完善的膜层。

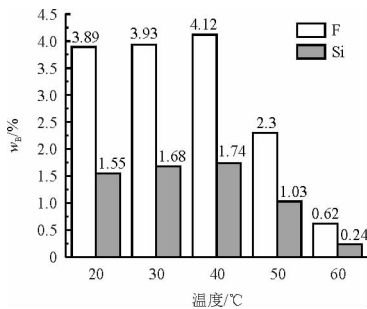


图6 不同膜层F、Si元素含量

Fig.6 F and Si content in different films

2.3 动电位极化曲线分析

图7为不同温度下制备的自组装薄膜的动电位极化曲线,采用Tafel外推法处理后的结果见表1。 E_{corr} 、 J_{corr} 、 b_c 和 b_a 分别为腐蚀电位、腐蚀电流密度、阴极和阳极斜率。根据图7和表1可以得到,铝合金基体的 E_{corr} 和 J_{corr} 值分别为-0.745 V和 1.051×10^{-5} A/cm²。当在铝合金基板上构建阳极氧化膜之后,铝合金表面的耐腐蚀性有所提高, J_{corr} 值降低了一个数量级,达到了 6.205×10^{-6} A/cm²。然后在铝合金阳极氧化后的表面

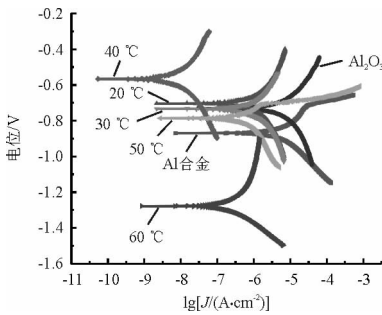


图7 不同温度试样的极化曲线图

Fig.7 Polarization curves of specimens at different temperatures

表1 不同温度下试样的极化曲线参数

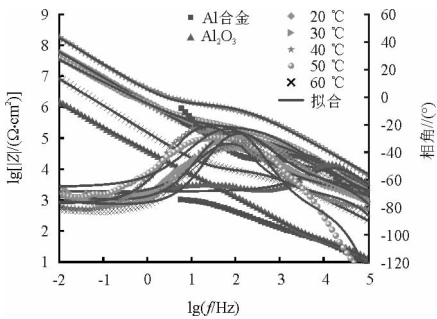
Tab.1 Polarization curve parameters of specimens at different temperatures

试样	E_{corr}/V	b_c	b_a	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
Al 基体	-0.745	4.943	5.405	1.051×10^{-5}
Al ₂ O ₃	-0.731	4.661	5.647	6.205×10^{-6}
20 °C	-0.705	4.672	4.563	1.151×10^{-6}
30 °C	-0.711	2.458	22.909	7.128×10^{-8}
40 °C	-0.568	5.139	4.895	9.737×10^{-9}
50 °C	-0.788	4.115	37.956	1.930×10^{-7}
60 °C	-1.107	5.833	4.539	1.618×10^{-7}

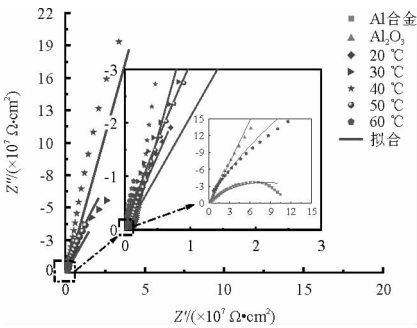
进行自组装后,5种不同膜层之间的 J_{corr} 均出现不同程度的减小。可以看出,20~60℃SAMs的 J_{corr} 呈现先减小后增大的趋势,当40℃SAMs的 J_{corr} 值降低到了最小值,为 9.737×10^{-9} A/cm²,比铝合金基体降低了4个数量级。 E_{corr} 也随着自组装温度的变化先升高再降低,在40℃时达到最大值,说明该温度下制备的自组装膜具有较优的耐腐蚀性能。结合图2的微观形貌可以推断,当自组装温度为40℃时,自组装膜层在铝合金表面形成了具有一定厚度的规则蜂窝状致密超疏水微观结构,该结构有助于抵御腐蚀性离子对铝合金基体表面的侵蚀,使自组装膜层耐腐蚀性得到了增强。

2.4 电化学阻抗谱分析

图8为试样在3.5%的NaCl溶液中的交流阻抗(EIS)图谱。采用Zview软件对交流阻抗谱数据进行



(a) 波特图



(b) 能奎斯特图

图8 不同试样的EIS图

Fig.8 EIS plots of different specimens

等效电路拟合(见图 9),相关数据结果见表 2。拟合结果显示,拟合数据在整体频率范围内均与试验数据相符。其中有两个是时间的常数,第一个处于中高频阶段,这与膜层对铝合金基体上的保护行为有关^[25]。另一个处于低频阶段,这主要是与铝合金基体上电化学腐蚀产生的电荷转移反应有关^[26]。

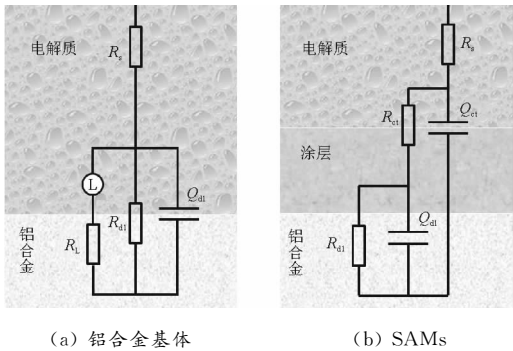


图 9 等效电路图
Fig.9 Equivalent circuit diagrams

表 2 电化学阻抗拟合结果

Tab.2 Fitting results of electrochemical impedance								
试样	$R_s/$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$Q_{ct}/$ ($\times 10^{-8}$ $\text{F} \cdot \text{cm}^2$)	n_1	$R_{ct}/$ ($\times 10^5$ $\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$Q_{dl}/$ ($\times 10^{-8}$ $\text{F} \cdot \text{cm}^2$)	n_2	$R_{dl}/$ ($\times 10^5$ $\Omega \cdot \text{cm}^2$)	
Al	31.22	—	—	—	5 733	0.539 44	0.015 38	
Al ₂ O ₃	1 987	234.1	0.760 24	0.057 63	405.9	0.760 55	15.52	
20 ℃	72 917	3.379	0.926 16	2.353	12.39	0.797 76	2 780	
30 ℃	82 482	3.552	0.966 35	1.493	12.75	0.847 01	3 117	
40 ℃	115 100	3.741	0.917 99	36.67	2.667	0.868 42	199 800	
50 ℃	21 751	7.408	0.847 87	0.659 20	19.74	0.842 65	5 663	
60 ℃	5 563	45.18	0.923 95	0.183 11	89.02	0.900 76	912.7	

从图 8a 可以得知,低频时 20、30、50 和 60 ℃的阻抗均在 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的范围内,其中 60 ℃的阻抗只有 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。在相同的频率范围内,40 ℃ SAMs 的阻抗增加到 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的范围,提高了一个数量级。结果表明,40 ℃下 SAMs 的密度高于其他的,对 Cl^- 起到更好的阻挡效果,其耐腐蚀性能最强。

不同试样的阻抗均呈现圆弧状(见图 8b)。对于基体,只呈现一个电容半圆,这是因为基体表面被砂纸打磨,金属表面没有形成薄膜,曲线是溶液/铝界面的电荷转移过程,因此,腐蚀参数可由图 8a 拟合。与 SAMs 相比,基体和阳极氧化膜的阻抗圆弧很小,插图显示的分别为铝合金和阳极氧化膜的 EIS 放大图。

伯德图和奈奎斯特图拟合等效电路模型见图 8。在等效电路中, R_s 为工作电极与参考电极之间电解质

的溶液电阻, R_{ct} 和 Q_{ct} 分别为腐蚀离子通过被动层或腐蚀层时产生的电阻和电容, R_{dl} 和 Q_{dl} 分别为计算涂层与基体界面处的电荷转移电阻和电容, L 为电感, n 的存在取决于分布的表面反应性、表面均匀性、粗糙度或分形几何、电极孔隙率和电流,以及与电极几何有关的电位分布。根据拟合数据,可以计算出薄膜的电容和双层电容:

$$C_x = \frac{(R_x \cdot C_{PE})^{\frac{1}{n}}}{R_x} \tag{1}$$

式中, R 为电阻; C 为理想电容; n 为弥散系数; C_{PE} 为非理想电容。通过用电阻值来评估膜层的耐腐蚀性能。 R_{ct} 与膜层对于腐蚀性离子的抵御能力相关。40 ℃ SAMs 的 R_{ct} 值最大,即载流子在 SAMs 上的渗透作用最弱。基体的 R_{dl} 仅为 $1\,538 \Omega \cdot \text{cm}^2$,而阳极氧化膜的 R_{dl} 比铝合金基体提高了 3 个数量级。不同温度下的 SAMs 的 R_{dl} 均比基体的 R_{dl} 要大得多,这表明在不同温度下的 SAMs 均可以用来保护铝合金基体,防止腐蚀离子扩散和迁移,从而提高铝合金耐腐蚀性能。通过对比不同膜层的 R_{dl} ,40 ℃时 SAMs 具有最大值,比其他膜层大了 2~3 个数量级。因此,40 ℃的 SAMs 具有最低的腐蚀速率,可以有效提升铝合金的耐腐蚀能力。

2.5 中性盐雾试验

图 10 为不同 SAMs 的中盐雾腐蚀在不同时间的表面形貌。可以看出,盐雾腐蚀 7 d 后,膜层表面均平整,没有出现被腐蚀现象。这主要是由于铝合金表面存在的 SAMs 对其进行腐蚀离子的隔离和防护,从而有效地保护了铝合金基体不被腐蚀离子侵蚀。14 d 后,20 ℃和 60 ℃的 SAMs 出现轻微腐蚀点,且有进一步加重的趋势。21 d 后,20 ℃和 60 ℃的 SAMs 腐蚀现象加重,出现的腐蚀点不断增多,且 30 ℃和 50 ℃的 SAMs 也出现了腐蚀现象。40 ℃的 SAMs 在 28 d 后才显示出较小的腐蚀点。

为了进一步评估 SAMs 的耐腐蚀性能,对盐雾试验后的膜层进行了 EIS 测试,见图 11。可以看出,随着盐雾试验的继续,不同 SAMs 的腐蚀程度增加,电荷转移电阻不断降低,但 40 ℃ SAMs 仍具有最大阻抗值。腐蚀 28 d 后,40 ℃的 SAMs 仅降低一个数量级,说明膜层已被腐蚀离子轻微腐蚀,但仍表现出良好的耐腐蚀性能。这可能是由于 SAMs 在铝合金表面形成了规则的微观蜂窝状结构,具有了超疏水性能,使得腐蚀离子不容易与其发生腐蚀反应,从而可以起到机械隔离腐蚀介质的作用,达到增强铝合金抗腐蚀性能的目的。

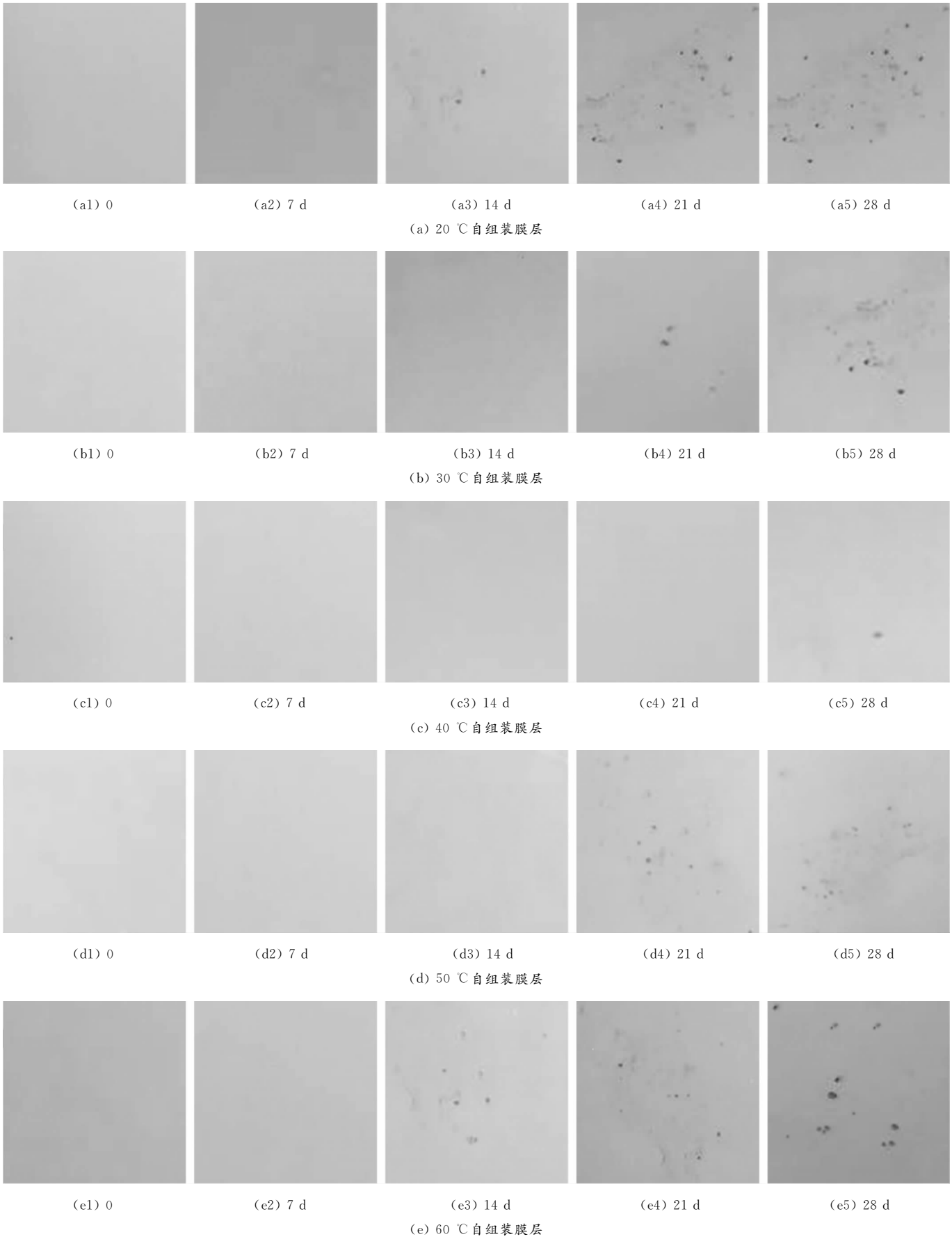


图 10 不同 SAMs 的中性盐雾试验结果

Fig.10 Neutral salt spray test results of different SAMs

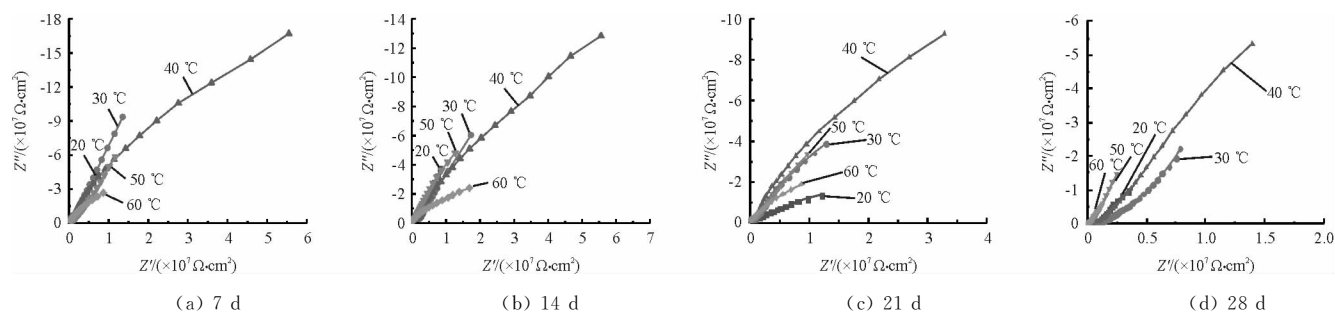


图 11 不同 SAMs 在中性盐雾后的 EIS

Fig.11 EIS of different SAMs after neutral salt spray

3 结 论

(1)不同温度下制备的 SAMs 分析结果表明,40 °C 的 SAMs 在铝合金表面呈蜂窝状分布,膜层分布均匀且致密,比其他温度的膜层具有更好的微观形貌,并且此时的 SAMs 达到了超疏水状态,说明超疏水性能有助于进一步提高膜层的耐蚀性。

(2)电化学性能测试和盐雾试验表明不同条件的 SAMs 均具有一定的耐蚀性能。自组装温度为 40 °C 的试样膜层较厚且孔隙率较低,合金耐腐蚀性能最好,腐蚀电流密度为 $9.737 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$,阻抗模值 $|Z|$ 为 $1.998 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

(3)通过对铝合金表面不同温度下制备的 SAMs 进行分析,微观形貌可以影响膜层的耐蚀性能。致密且均匀的膜层能够保护基体免受腐蚀性离子的侵蚀,进一步提高铝合金的耐蚀性能。

参 考 文 献

- [1] LU Z, WANG P, ZHANG D. Super-hydrophobic film fabricated on aluminium surface as a barrier to atmospheric corrosion in a marine environment[J]. Corrosion Science, 2015, 91: 287-296.
- [2] SUN R Y, ZHAO J, LI Z, et al. Preparation of mechanically durable superhydrophobic aluminum surface by sandblasting and chemical modification[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 133: 77-84.
- [3] ZHU G Y, CUI X K, ZHANG Y, et al. Poly (vinyl butyral)/graphene oxide/poly(methylhydrosiloxane) nanocomposite coating for improved aluminum alloy anticorrosion[J]. Polymer, 2019, 172: 415-422.
- [4] ZHANG X, ZHAO J, MO J L, et al. Fabrication of superhydrophobic aluminum surface by droplet etching and chemical modification[J]. Colloids and Surfaces, 2019, A567: 205-212.
- [5] LIU Y, LIU J D, LI S Y, et al. Biomimetic superhydrophobic surface of high adhesion fabricated with micronano binary structure on aluminum alloy[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2013, 5(18): 8 907-8 914.
- [6] SHOEIB M, SOROR T Y, MAAMOUN M A, et al. Aluminum metal-ceramic matrix composites reinforced by using electroless nickel plating on ceramic particles and fibers[J]. Materials Research Innovations, 2016, 9(2): 51-52.
- [7] QIN W F. Microstructure and corrosion behavior of electroless Ni-P coatings on 6061 aluminum alloys[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2010, 8(1): 135-139.

- [8] YU M, DONG H, SHI H B, et al. Effects of graphene oxide-filled sol-gel sealing on the corrosion resistance and paint adhesion of anodized aluminum[J]. Applied Surface Science, 2019, 479: 105-113.
- [9] THAI T T, DRUART M E, PAINT Y, et al. Influence of the sol gel mesoporosity on the corrosion protection given by an epoxy primer applied on aluminum alloy 2024-T3[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 121: 53-63.
- [10] KUZENKOV Y A, OLEINIK S V, ZIMINA A S, et al. Submicron free-chromate chemical conversion coatings on AMg-3 aluminum alloy[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2017, 52(7): 1 175-1 180.
- [11] BECKER M. Chromate-free chemical conversion coatings for aluminum alloys[J]. Corrosion Reviews, 2019, 37(4): 321-342.
- [12] SUN J, WANG C, SONG J L, et al. Multi-functional application of oil-infused slippery Al surface: From anti-icing to corrosion resistance[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(23): 16 099-16 109.
- [13] XU L H, WANG R D, GEN M J, et al. Preparation and properties of graphene/nickel composite coating based on textured surface of aluminum alloy[J]. Materials (Basel), 2019, 12(19): 3 240.
- [14] YIN B, FANG L, TANG A Q, et al. Novel strategy in increasing stability and corrosion resistance for super-hydrophobic coating on aluminum alloy surfaces[J]. Applied Surface Science, 2011, 258(1): 580-585.
- [15] ZANG J, YU S R, ZHU G, et al. Fabrication of superhydrophobic surface on aluminum alloy 6061 by a facile and effective anodic oxidation method[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 380: 125 078.
- [16] WEN Y Q, KONG D, SHANG W, et al. Corrosion resistance performance of the self-assembled reduction of graphene/silane composite films[J]. Colloids and Surfaces, 2019, A562: 247-254.
- [17] LU J Q, WEI G Y, YU Y D, et al. Aluminum alloy AA2024 anodized from the mixed acid system with enhanced mechanical properties[J]. Surfaces and Interfaces, 2018, 13: 46-50.
- [18] XIA D H, PAN C C, QIN Z B, et al. Covalent surface modification of LY12 aluminum alloy surface by self-assembly dodecyl phosphate film towards corrosion protection[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 143: 105 638.
- [19] KONG D J, WANG J C. Salt spray corrosion and electrochemical corrosion properties of anodic oxide film on 7475 aluminum alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 632: 286-290.
- [20] ARSLAN E, GÜRTEN A A, GÖK H Z, et al. Electrochemical study of self-assembled aminothiols substituted phthalonitrile layers for corrosion protection of copper[J]. Chemistry Select, 2017, 2(27): 8 256-8 261.
- [21] YANG W J, LI T Q, ZHOU H H, et al. Electrochemical and anti-corrosion properties of octadecanethiol and benzotriazole binary self-assembled monolayers on copper [J]. Electrochimica Acta, 2016, 220: 245-251.

镍基单晶高温合金薄壁试样的一次枝晶间距统计方法对比

姜祖岗¹ 叶新玥² 张 剑² 郭媛媛² 张 迈² 李 远² 卢广先² 胡松松³

(1.中国航发商用航空发动机有限责任公司;2.北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室;
3.湘潭大学材料科学与工程学院)

摘 要 分别采用面积测量法、三角形测量法和最小生成树法,对不同壁厚的镍基单晶高温合金试样的一次枝晶间距进行了统计。结果表明,面积测量法和三角形测量法对块状试样平均一次枝晶间距的统计结果基本相当,大于采用最小生成树法获得的数值。随试样壁厚降低,三角形测量法和最小生成树法统计的平均一次枝晶间距差距基本固定,一次枝晶间距的容许范围随着试样壁厚降低而缩小,而面积测量法在统计薄壁试样的平均一次枝晶间距时显示出明显的不稳定性。最后,讨论了3种方法统计镍基单晶高温合金薄壁试样一次枝晶间距时的特点和适用性。

关键词 镍基高温合金;薄壁件;一次枝晶间距;最小生成树

中图分类号 TG113.1 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparison of Statistical Methods for Primary Dendrite Spacing of Thin-wall Ni-based Single Crystal Superalloy Specimens

Jiang Zugang¹, Ye Xinyue², Zhang Jian², Guo Yuanyuan², Zhang Mai², Li Yuan²,
Lu Guangxian², Hu Songsong³

(1.Air China Commercial Aero Engine Co., Ltd.; 2.Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials;
3.School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University)

Abstract: The primary dendrite spacing of Ni-based single crystal superalloy specimens with different wall thickness was calculated by area measurement method, triangle measurement method and minimum spanning tree method, respectively. The results indicate that the statistics results of area measurement method and the triangle measurement method are basically similar, which are both larger than that of minimum spanning tree method. With the decrease of thickness, the deviation of primary dendrite spacing between triangle measurement method and minimum spanning tree method is basically fixed with decreasing in allowable range, while the statistical results of the area measurement method display obvious instable. Finally, the characteristics and applicability of each method on primary dendrite spacing of thin wall specimens were discussed.

Key Words: Ni-based Superalloy, Thin-wall Component, Primary Dendrite Spacing, Minimum Spanning Tree

收稿日期:2023-01-13;修改稿收到日期:2023-03-11

基金项目:湖南省自然科学基金项目资助(2022JJ40439);湖南省科技创新计划资助项目(2021RC2088)

第一作者简介:姜祖岗,男,1986年出生,高级工程师,上海(200241),E-mail:jiang-zugang@163.com

通信作者:胡松松,男,1990年出生,副教授,湖南湘潭(411105),E-mail:songhu@xtu.edu.cn

引用格式:姜祖岗,叶新玥,张剑,等.镍基单晶高温合金薄壁试样的一次枝晶间距统计方法对比[J].特种铸造及有色合金,2023,43(5):655-659.

JIANG Z G, YE X Y, ZHANG J, et al. Comparison of statistical methods for primary dendrite spacing of thin-wall Ni-based single crystal superalloy specimens[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):655-659.

[22] ZHU H Z, YUE L F, ZHUANG C, et al. Fabrication and characterization of self-assembled graphene oxide/silane coatings for corrosion resistance[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 304: 76-84.

[23] WINKLER D A, BREEDON M, WHITE P, et al. Using high throughput experimental data and in silico models to discover alternatives to toxic chromate corrosion inhibitors[J]. Corrosion Science, 2016, 106: 229-235.

[24] WEN Y Q, MA M M, SHANG W. Corrosion resistance and adsorption behavior of bis-(γ -triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide self-assembled membrane on 6061 aluminum alloy[J]. RSC Advances, 2015, 98(5): 80 129-80 135.

[25] SUN W, WANG L D, YANG Z Q, et al. Fabrication of polydimethylsiloxane-derived superhydrophobic surface on aluminium via chemical vapour deposition technique for corrosion protection[J]. Corrosion Science, 2017, 128: 176-185.

[26] ABBASI S, NOURI M, SABOUR ROUHAGHDAM A. A novel combined method for fabrication of stable corrosion resistance superhydrophobic surface on Al alloy[J]. Corrosion Science, 2019, 159: 108 144.

[27] 李姣姣,刘燕红,李家平,等.自组装膜层微观结构对铝合金表面耐腐蚀性能的影响[J].中国表面工程, 2020, 33(5): 30-39.

(编辑:栗万仲)