

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.09.015

滚轮用 7A05 铝合金混合酸硬质阳极氧化及性能研究

冀浩非^{1*}, 刘慧玲²

(1. 晋中职业技术学院 机电工程学院, 山西 晋中 030600; 2. 晋中学院 机械系, 山西 晋中 030600)

摘要: 为提高制造滚轮常用 7A05 铝合金的表面性能从而更好的满足服役条件, 采用纯硫酸和酒石酸配制混合酸电解液对 7A05 铝合金进行硬质阳极氧化, 并研究混合酸电解液中酒石酸质量浓度变化对阳极氧化膜的形貌、物相、硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能的影响。结果表明: 酒石酸质量浓度变化对阳极氧化膜的平整度、致密性、硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能都有较大影响, 而对物相无影响。当酒石酸质量浓度为 50 g/L 时, 阳极氧化膜较平整致密, 表面粗糙度仅为 0.462 μm , 硬度较 7A05 铝合金提高近 2.4 倍, 磨损率约为 7A05 铝合金的 1/3, 腐蚀电流密度相比于 7A05 铝合金降低了近两个数量级, 表现出优良的耐磨性能和耐腐蚀性能。适当增加酒石酸质量浓度使电解液对阳极氧化膜的腐蚀溶解程度减轻, 同时能缓解高电压下释放出很多热量对阳极氧化膜造成的烧蚀程度, 促使形成较致密的阳极氧化膜, 其承载能力和抵抗塑性变形能力增强, 并且电化学腐蚀阻力明显增加, 有效的延缓腐蚀发展。

关键词: 硬质阳极氧化; 混合酸电解液; 酒石酸质量浓度; 7A05 铝合金; 耐磨性能; 耐腐蚀性能

中图分类号: TQ153.6 **文献标识码:** A

Hard Anodizing of 7A05 Aluminum Alloy Used for Manufacture of Roller in Mixed Acid Electrolyte and Its Performance

JI Hao-fei^{1*}, LIU Huiling²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinzhong Vocational and Technical College, Jinzhong 030600, China; 2. Department of Machinery, Jinzhong College, Jinzhong 030600, China)

Abstract: In order to improve the surface properties of 7A05 aluminum alloy commonly used for the manufacture of roller, hard anodizing of 7A05 aluminum alloy was conducted in a mixed acid electrolyte prepared by pure sulfuric acid and tartaric acid to ensure that 7A05 aluminum alloy can better meet the conditions of service. The influence of tartaric acid mass concentration in the mixed acid electrolyte on the morphology, phase, hardness, wear resistance and corrosion resistance of anodic oxide film was studied. The results show that the variation of tartaric acid mass concentration has obvious influence on the flatness, compactness, hardness, wear resistance and corrosion resistance of anodic oxide film, while it has no influence on the phase of anodic oxide film. When the mass concentration of tartaric acid is 50 g/L, the anodic oxide film is smooth and compact, and the surface roughness is only 0.462 μm . The hardness is nearly 2.4 times higher than that of 7A05 aluminum alloy and the wear rate is about 1/3 of that of 7A05 aluminum alloy. The corrosion current density is nearly two orders of magnitude lower than that of 7A05 aluminum alloy, and shows excellent wear resistance and corrosion resistance. Appropriately increasing the tartaric acid mass concentration can reduce the corrosion and dissolution degree of the electrolyte on the anodic oxide film, and relieve the ablation degree of the anodic oxide film

收稿日期: 2022-07-16

修回日期: 2022-07-28

*通信作者: 冀浩非(1983—), 硕士, 讲师, 主要研究方向: 机械材料、表面工程技术等, email: Vocational_jz030@163.com

基金项目: 山西省高校科技创新项目(2020L0579)

caused by the release of much heat under high voltage, thus promote the formation of a denser anodic oxide film. The bearing capacity and plastic deformation resistance of the anodic oxide film are enhanced, and the electrochemical corrosion resistance is significantly increased, which effectively delays the development of corrosion.

Keywords: hard anodizing; mixed acid electrolyte; mass concentration of tartaric acid; 7A05 aluminum alloy; wear resistance; corrosion resistance

滚轮是常用的机械部件,主要起导向与缓冲作用。非金属滚轮一般为聚氨酯、橡胶和尼龙等材质,金属滚轮常用的材质为碳钢、不锈钢、铝合金等。铝合金具有重量轻、结构强度高、焊接性能良好且容易加工等优点^[1],非常适用于制造滚轮等对结构强度、耐磨性能和耐蚀性能有较高要求的构件,在机械制造、航空航天、汽车、化工等行业中发挥着重要作用。为使铝合金更好的满足服役条件,通常采用阳极氧化工艺进行表面处理^[2-4]。常规阳极氧化工艺普遍采用纯硫酸电解液,电解液温度控制在 20℃左右。但是常规阳极氧化膜的孔隙率较高,导致其硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能不太理想^[5-7],制约铝合金构件的使用性能。虽然采用混合酸电解液(即在纯硫酸电解液中添加酒石酸、柠檬酸等有机酸)可以减轻常规阳极氧化膜的腐蚀溶解程度^[8],从而提高其综合性能,但仍然难以满足某些特殊工况条件下的使用要求。因此,有必要采取措施进一步提高常规阳极氧化膜的综合性能。

硬质阳极氧化工艺是通过升高电压同时降低电解液温度,以进一步提高阳极氧化膜的综合性能为目标的阳极氧化工艺。研究发现,采用硬质阳极氧化工艺通过降低电解液温度同时升高电压,能显著

提高阳极氧化膜的硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能。近年来,铝合金硬质阳极氧化成为研究热点,围绕着电解液成分调控、硬质阳极氧化工艺条件优化等方面,国内外相关学者开展了大量的研究工作^[9-15]。然而,采用混合酸电解液对铝合金进行硬质阳极氧化目前鲜见报道。本文采用纯硫酸和酒石酸配制混合酸电解液,以制造滚轮常用的 7A05 铝合金作基体进行硬质阳极氧化。通过研究混合酸电解液中酒石酸质量浓度变化对阳极氧化膜的形貌、物相、硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能的影响,旨在确定最佳的酒石酸质量浓度,从而获得综合性能优良的阳极氧化膜,为提高 7A05 铝合金的表面性能提供参考。

1 实 验

1.1 实验材料及预处理

实验材料为 7A05 铝合金,其化学成分如表 1 所示。通过线切割裁切多个 44 mm×25 mm×2 mm 的试片,依次使用 800#、1200#、2000#砂纸打磨,然后浸在预热至 60℃的氢氧化钠(质量浓度 40 g/L)与碳酸钠(质量浓度 15 g/L)混合溶液中除油 7 min。再使用体积分数 20%的硝酸活化 30 s 后,经去离子水彻底清洗,立即吹干浸入混合酸电解液中。

表 1 7A05 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 7A05 aluminum alloy

元素	Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si	Mn	Ti	Al
质量分数/%	5.1~6.1	2.0~3.0	1.2~2.0	0.16~0.30	0.5	0.5	0.15	0.1	余量

1.2 混合酸硬质阳极氧化

混合酸电解液的成分为:硫酸(98%)质量浓度 200 g/L、酒石酸质量浓度 0~100 g/L。

经过预处理的 7A05 铝合金试片作阳极,纯铝板作阴极。在电解液温度为 5℃、电压为 80 V 的条件下,改变混合酸电解液中酒石酸质量浓度进行硬质阳极氧化实验,氧化时间均为 50 min,获得 5 个样品。

1.3 阳极氧化膜性能测试

采用 EV018 型场发射扫描电镜观察不同阳极氧化膜的表面形貌,并用 CV-3200 型轮廓仪测量不同阳极氧化膜的表面粗糙度,为了降低误差,随机测 3 次取平均值。

采用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪结合 Jade 软件分析不同阳极氧化膜的物相。电压和电流分别设置为 40 kV 和 40 mA,扫描角度范围为 20°~100°,

以4°/min的速率步进式扫描。

采用MV-TEST1000型维氏硬度计在恒定载荷模式下测试不同阳极氧化膜的硬度,同时测试7A05铝合金的硬度作为对比。载荷为0.98 N,保持15 s后卸载。每个样品表面随机选取5个点,测试结果求平均值。

采用UMT型摩擦磨损试验机测试不同阳极氧化膜的摩擦系数和磨损率,进而衡量不同阳极氧化膜的耐磨性能优劣。测试条件为:直径5 mm的GCr15钢球作为对磨件、加载5 N、摩擦时间6 min、往复摩擦行程12 mm。摩擦方式为干摩擦,设置摩擦系数的临界值为1。实验结束后,将试样浸在无水乙醇中超声波清洗5 min,然后自然风干。采用VHK-5000型三维显微镜测量不同阳极氧化膜的磨痕面积,并根据文献[16]给出的公式(1)求得磨损率(W)。

$$W = \frac{V}{F \cdot L} \quad (1)$$

式中: W 为磨损率, $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; V 为体积磨损量, mm^3 ; F 为施加载荷,N; L 为往复摩擦行程,m。

以铂电极作为辅助电极、饱和甘汞电极作为参比电极、3.5%氯化钠溶液作为腐蚀介质,采用Parstat 2273型电化学工作站测试不同阳极氧化膜的极化曲线。扫描速率为1 mV/s,将测试数据导入PowerSuite软件中采用塔菲尔外推法拟合得到腐蚀电位和腐蚀电流密度,并根据文献[17]给出的公式(2)计算不同阳极氧化膜对7A05铝合金的保护效率(η)。结合腐蚀电位、腐蚀电流密度和保护效率,评价不同阳极氧化膜的耐腐蚀性能优劣。

$$\eta = [1 - \frac{J_{\text{corr}}^{\text{Aof}}}{J_{\text{corr}}^{\text{Sub}}}] \times 100\% \quad (2)$$

式中: η 表示不同阳极氧化膜对7A05铝合金的保护效率; $J_{\text{corr}}^{\text{Aof}}$ 和 $J_{\text{corr}}^{\text{Sub}}$ 分别表示不同阳极氧化膜和7A05铝合金的腐蚀电流密度, A/cm^2 。

2 结果与讨论

2.1 阳极氧化膜的形貌结构分析

图1所示为7A05铝合金表面不同阳极氧化膜的形貌。可以看出,在7A05铝合金表面成功制备出阳极氧化膜,且不同阳极氧化膜均存在溶解和烧蚀迹象,表面形成不规则凹坑,还附着一些块状物。这是由于电解液中硫酸的强腐蚀作用对阳极氧化膜造

成腐蚀溶解。另外,在高电压下发生放电现象释放出很多热量,积聚在电解液中使反应面周围温度升高,对阳极氧化膜造成烧蚀。然而,电解液中酒石酸质量浓度变化对阳极氧化膜的形貌具有较大影响。如图1(b)~图1(d)所示,随着电解液中酒石酸质量浓度从0 g/L增加到50 g/L,阳极氧化膜的溶解和烧蚀程度明显减轻,表面结构变得致密,附着的块状物也减少。其原因是酒石酸起到缓蚀作用^[18-19],既可以减轻电解液对阳极氧化膜的腐蚀溶解程度,同时也能缓解高电压下释放出很多热量对阳极氧化膜造成的烧蚀程度。适当增加电解液中酒石酸质量浓度,起到的缓蚀作用增强,促使形成较致密的阳极氧化膜。但当电解液中酒石酸质量浓度超过50 g/L,阳极氧化膜变得粗糙,致密性明显降低,如图1(e)~图1(f)所示。其原因是酒石酸质量浓度过高导致电解液的氧化性减弱,阳极氧化膜形成速度缓慢。加之在高电压下发生放电现象释放出很多热量对阳极氧化膜造成严重灼烧,共同导致阳极氧化膜的致密性降低。

图2所示为不同阳极氧化膜的表面粗糙度。可以看出,随着电解液中酒石酸质量浓度从0 g/L增加到50 g/L,阳极氧化膜的表面粗糙度从0.648 μm 降低到0.462 μm ,反映出阳极氧化膜表面凹凸不平程度降低,平整度趋好。但当电解液中酒石酸质量浓度超过50 g/L,阳极氧化膜的表面粗糙度呈现增加趋势,反映出表面凹凸不平程度加重,平整度变差。

图3所示为不同阳极氧化膜的XRD谱。由图3可知扣除基体物相Al,不同阳极氧化膜均由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相组成,电解液中酒石酸质量浓度变化对阳极氧化膜的物相无影响。但当电解液中酒石酸质量浓度为50 g/L时, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相对应的衍射峰强度相对较高,说明该阳极氧化膜的物相完整且结晶度较好,也反映出该阳极氧化膜较致密,与上述分析结果吻合。

2.2 阳极氧化膜的硬度分析

图4所示为7A05铝合金表面不同阳极氧化膜的硬度。可以看出,随着电解液中酒石酸质量浓度从0 g/L增加到100 g/L,阳极氧化膜的硬度呈现先增大然后大幅度减小的变化趋势。当电解液中酒石酸质量浓度为50 g/L时,阳极氧化膜的硬度达到502.6 HV,较7A05铝合金的硬度(约150 HV)提高近2.4倍。其原因是适当增加酒石酸质量浓度使电

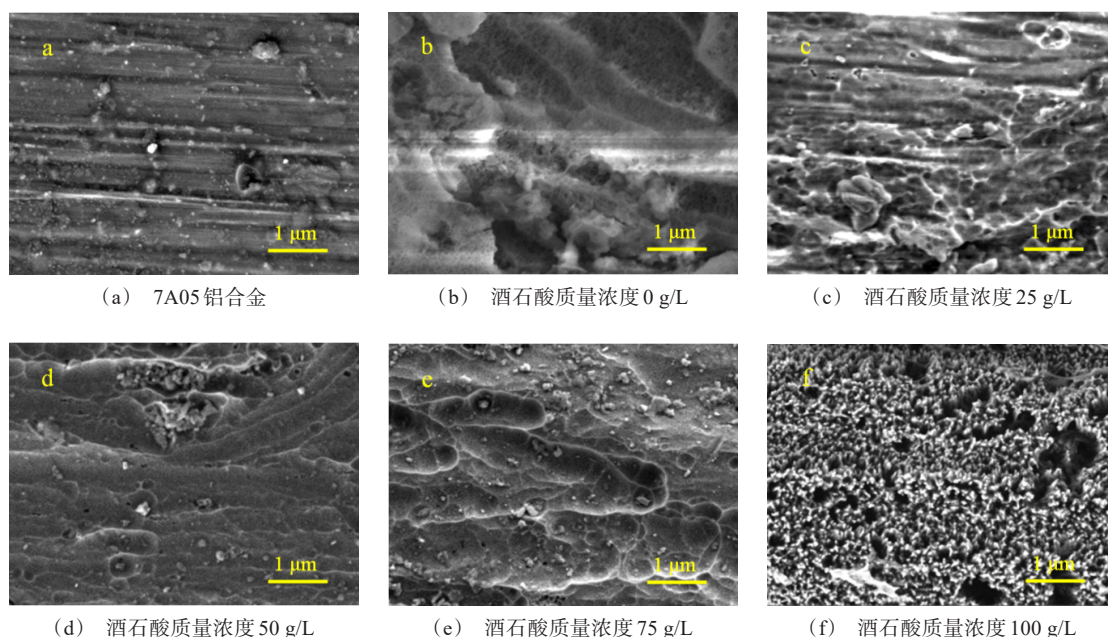


图1 7A05铝合金表面不同阳极氧化膜的形貌

Fig.1 Morphology of different anodic oxide films on 7A05 aluminum alloy

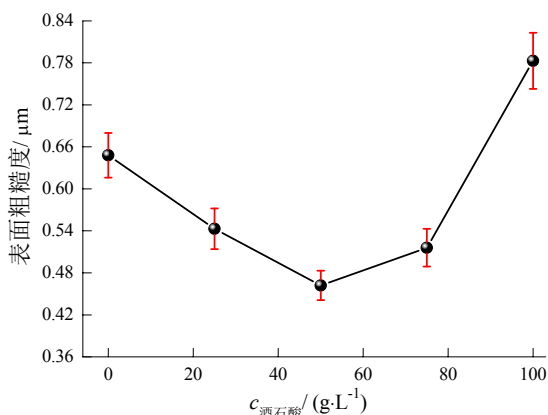


图2 不同阳极氧化膜的表面粗糙度

Fig.2 Surface roughness of different anodic oxide films

解液对阳极氧化膜的腐蚀溶解程度减轻,同时也能缓解高电压下释放出很多热量对阳极氧化膜造成的烧蚀程度,促使形成较致密的阳极氧化膜,其承载能力和抵抗塑性变形能力增强,因此表现为硬度增大。但电解液中酒石酸质量浓度较低或过高时,由于阳极氧化膜表面结构疏松、致密性不佳,其承载能力和抵抗塑性变形能力下降,表现为硬度减小。

2.3 阳极氧化膜的耐磨性能分析

图5所示为7A05铝合金表面不同阳极氧化膜的摩擦系数变化趋势。可以看出,随着摩擦时间延

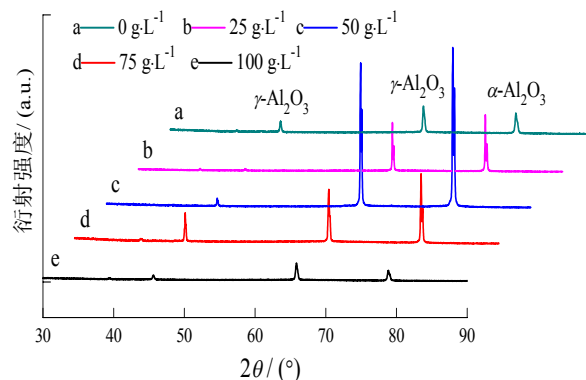


图3 不同阳极氧化膜的XRD谱图

Fig.3 XRD patterns of different anodic oxide films

长,7A05铝合金的摩擦系数呈现逐渐增大趋势,然后逐渐稳定在0.72左右。对于不同阳极氧化膜,摩擦系数同样呈现波动性增大趋势,然后趋于稳定。电解液中酒石酸质量浓度变化对阳极氧化膜稳定状态的摩擦系数具有一定影响。随着电解液中酒石酸质量浓度从0 g/L增加到50 g/L,稳定状态的摩擦系数从0.64减小到0.47,说明阳极氧化膜的耐磨性能得到明显改善。研究表明,膜层表面致密程度及硬度是影响其耐磨性能的重要因素。当电解液中酒石酸质量浓度为0 g/L时,由于阳极氧化膜的溶解和烧蚀程度较严重,表面粗糙且结构疏松,导致抵抗塑性

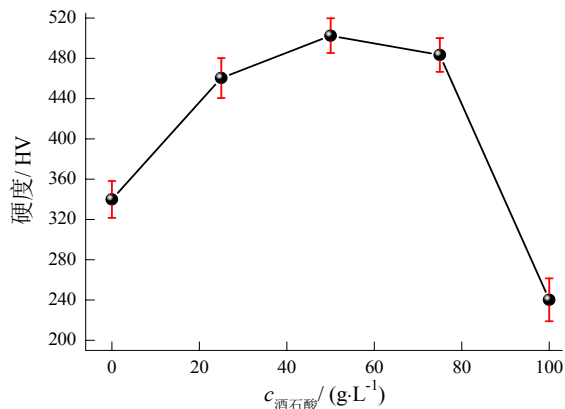


图4 7A05铝合金表面不同阳极氧化膜的硬度

Fig.4 Hardness of different anodic oxide films on 7A05 aluminum alloy

变形能力差,耐磨性能不佳。当电解液中酒石酸质量浓度达到50 g/L,由于阳极氧化膜表面较平整致密,承载能力和抵抗塑性变形能力较强,加之硬度很高,从而表现出优良的耐磨性能。但电解液中酒石酸质量浓度过高时,由于阳极氧化膜表面结构疏松,致密性不佳,硬度减小导致其承载能力和抵抗塑性变形能力下降,从而表现为稳定状态的摩擦系数增大,阳极氧化膜的耐磨性能变差。

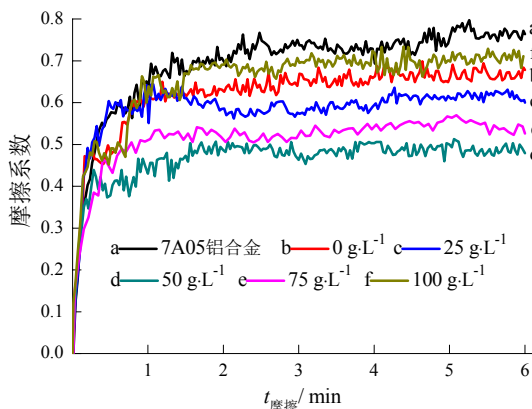


图5 7A05铝合金表面不同阳极氧化膜的摩擦系数的变化趋势

Fig.5 Variation trend of friction coefficient of different anodic oxide films on 7A05 aluminum alloy

图6所示为7A05铝合金表面不同阳极氧化膜的磨损率。由图6可知,不同阳极氧化膜的磨损率均低于7A05铝合金的磨损率($2.2 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$),但随着电解液中酒石酸质量浓度从0 g/L增加到100 g/L呈现先降低后增加的趋势。当电解液中酒石酸质量浓度为50 g/L时,阳极氧化膜的磨损率

最低,仅为 $6.8 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,约为7A05铝合金磨损率的1/3,进一步表明该阳极氧化膜的耐磨性能最好。而电解液中酒石酸质量浓度超过50 g/L时,阳极氧化膜的磨损率明显增加,表明耐磨性能变差,与上述分析结果吻合。

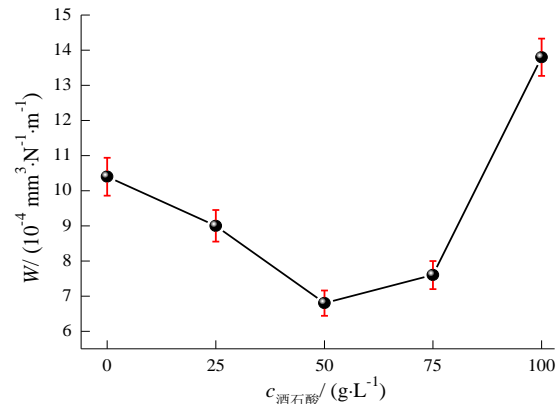


图6 7A05铝合金表面不同阳极氧化膜的磨损率

Fig.6 Wear rate of different anodic oxide films on 7A05 aluminum alloy

2.4 阳极氧化膜的耐腐蚀性能分析

图7所示为7A05铝合金表面不同阳极氧化膜的极化曲线,表2列出极化曲线拟合结果。

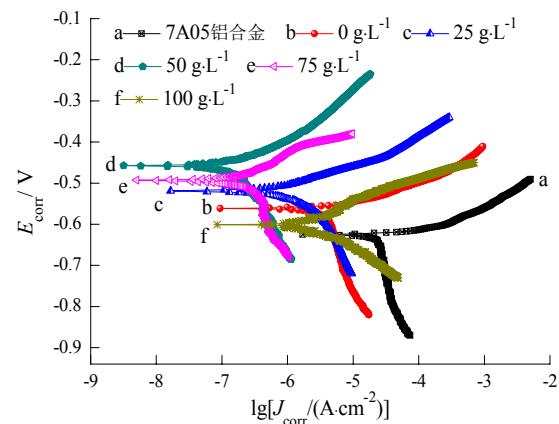


图7 7A05铝合金表面不同阳极氧化膜的极化曲线

Fig.7 Polarization curves of different anodic oxide films on 7A05 aluminum alloy

可以看出,不同阳极氧化膜的极化曲线相对于7A05铝合金的极化曲线都偏向左上方,表明腐蚀电位正移且腐蚀电流密度降低,反映出不同阳极氧化膜的耐腐蚀性能都好于7A05铝合金。由表2可知,随着电解液中酒石酸的质量浓度从0 g/L增加到50 g/L,阳极氧化膜的腐蚀电位逐步正移,腐蚀电流密

表 2 极化曲线拟合结果

Tab.2 Polarization curves fitting results

不同试样	酒石酸质量浓度/(g·L ⁻¹)	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/(A·cm ⁻²)
7A05 铝合金	—	-0.625	3.46×10^{-5}
阳极氧化膜	0	-0.562	5.02×10^{-6}
	25	-0.519	1.37×10^{-6}
	50	-0.458	4.21×10^{-7}
	75	-0.492	7.33×10^{-7}
	100	-0.601	1.40×10^{-5}

度从 5.02×10^{-6} A/cm² 降低至 4.21×10^{-7} A/cm²。这是由于电解液中酒石酸质量浓度增加起到有效的缓蚀作用,减轻阳极氧化膜的腐蚀溶解程度及烧蚀程度,使阳极氧化膜表面结构变得致密,平整度也明显改善,阻碍腐蚀性离子向阳极氧化膜深部渗透侵蚀能力增强,增大了电化学腐蚀过程阻力,从而表现为耐腐蚀性能逐步提高。当电解液中酒石酸质量浓度为 50 g/L 时,阳极氧化膜的腐蚀电流密度相比于 7A05 铝合金的腐蚀电流密度降低了近两个数量级,表现出优异的耐腐蚀性能。但随着电解液中酒石酸质量浓度从 50 g/L 继续增加到 100 g/L,阳极氧化膜的腐蚀电位转而负移,腐蚀电流密度从 4.21×10^{-7} A/cm² 增大至 1.40×10^{-5} A/cm²。由于电解液中酒石酸质量浓度过高导致阳极氧化膜生长缓慢且烧蚀程度加重,表面变得粗糙疏松,致密性逐步降低,腐蚀性离子沿着阳极氧化膜缺陷处向深部渗透侵蚀,电化学腐蚀过程阻力减弱,因此阳极氧化膜的耐腐蚀性能下降。

图 8 所示为不同阳极氧化膜对 7A05 铝合金的保护效率。一般来说,保护效率越高意味着膜层对基体起到良好的腐蚀防护作用,能有效提高基体的抗腐蚀能力^[20-22]。由图 8 可知,随着电解液中酒石酸质量浓度从 0 g/L 增加到 100 g/L,阳极氧化膜对 7A05 铝合金的保护效率呈现先升高后降低的趋势,当电解液中酒石酸质量浓度达到 50 g/L,阳极氧化膜对 7A05 铝合金的保护效率最高,达到 98.8%,进一步表明其耐腐蚀性能最好。这是由于该阳极氧化膜表面较平整致密,对腐蚀性离子向深部渗透侵蚀起到更强的抑制作用,使得电化学腐蚀过程阻力明显增加,有效的阻碍腐蚀性离子与 7A05 铝合金基体接触,从而延缓腐蚀发展,为 7A05 铝合金提供良好的腐蚀防护作用。

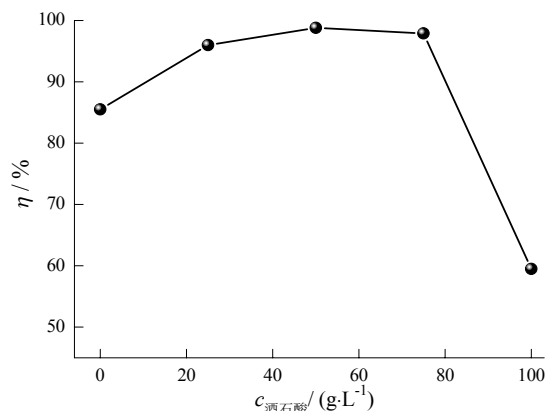


图 8 不同阳极氧化膜对 7A05 铝合金的保护效率

Fig.8 Protection efficiency of different anodic oxide films on 7A05 aluminum alloy

3 结论

(1)混合酸电解液中酒石酸质量浓度变化对阳极氧化膜的平整度、致密性、硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能都有较大影响,而对阳极氧化膜的物相无影响。适当增加酒石酸质量浓度使电解液对阳极氧化膜的腐蚀溶解程度减轻,同时能缓解高电压下释放出很多热量对阳极氧化膜造成的烧蚀程度,促使形成较致密的阳极氧化膜,从而增强阳极氧化膜的承载能力和抵抗塑性变形能力,使阳极氧化膜对腐蚀性离子渗透起到更强的抑制作用,有效的延缓腐蚀发展。

(2)当混合酸电解液中酒石酸质量浓度为 50 g/L 时,阳极氧化膜的平整度和致密性最好,主要由 α -Al₂O₃ 和 γ -Al₂O₃ 相组成,硬度达到 502.6 HV,较 7A05 铝合金提高近 2.4 倍,摩擦系数仅为 0.47,磨损率是 7A05 铝合金的 1/3,腐蚀电流密度仅为 4.21×10^{-7} A/cm²,相比于 7A05 铝合金降低了近两个数量级。该阳极氧化膜表现出优良的耐磨性能和耐腐蚀性能,能有效提高 7A05 铝合金的表面性能从而使其更好的满足服役条件。

参考文献

- [1] 陈东高,刘宏伟,谭兵,等. 中厚度 7A05 铝合金 MIG 焊接工艺研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(6): 55-57.
- [2] 周艳丽. 5052 铝合金草酸阳极氧化和铬酸阳极氧化工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(2): 34-37.

- [3] 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): 125078.
- [4] Zhang Y G, Chen Y L, Bian G X, et al. Electrochemical behavior and corrosion mechanism of anodized 7B04 aluminum alloy in acid NaCl environments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021 (886): 161231.
- [5] 高崇, 江钟宇, 赵丕植, 等. 电流密度对5252铝合金阳极氧化膜性能的影响[J]. 电镀与环保, 2020, 40(3): 63-66.
- [6] 彭蓉, 杨武霖, 符立才, 等. 低孔隙率阳极氧化铝膜的制备及其高绝缘特性[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(5): 964-970.
- [7] 赵刚, 张伟华, 赵铭涛. 氧化铈颗粒对铝合金阳极氧化膜性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(3): 14-19.
- [8] 刘君, 龚利华, 潘峰, 等. 6061铝合金酒石酸-硫酸阳极氧化工艺研究[J]. 材料保护, 2021, 54(3): 94-99.
- [9] Cheng Y L, Xie H J, Cao J H, et al. Effect of NaOH on plasma electrolytic oxidation of A356 aluminium alloy in moderately concentrated aluminate electrolyte[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(12): 3677-3690.
- [10] 安思宇, 吕威, 李雪松. 硫酸电解液中铝合金硬质阳极氧化膜的表面形貌及性能研究[J]. 电镀与环保, 2020, 40(3): 50-52.
- [11] Rueda F C G, González J T. Electrochemical polymerization of polypyrrole coatings on hard-anodized coatings of the aluminum alloy 2024-T3[J]. Electrochimica Acta, 2020, 347: 136272.
- [12] 常帅, 孙鑫, 马林, 等. 基于单因素实验法的硬质阳极氧化膜制备及性能研究[J]. 化学与粘合, 2020, 42(5): 330-333.
- [13] Santeccchia E, Cabibbo M, Hamouda A M S, et al. Dry sliding tribological properties of a hard anodized AA6082 aluminum alloy[J]. Metals, 2020, 10(2): 207.
- [14] 何潘亮, 沈士泰, 卫国英. 硫酸-有机酸混合酸体系中铝合金硬质阳极氧化膜的研究[J]. 电镀与环保, 2017, 37(6): 25-28.
- [15] 穆耀钊, 叶芳霞, 戴君, 等. 微弧氧化及硬质阳极氧化对7050铝合金表面氧化膜层的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(6): 83-87.
- [16] 唐海鹏, 卞达, 赵永武, 等. 二硫化钼改性石墨基复合减摩涂层的摩擦磨损特性[J]. 塑料工业, 2019, 47(12): 142-145.
- [17] 程昱琳, 张卿和, 程英亮, 等. 钼在磷酸盐中等离子体电解氧化涂层耐腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 32-40.
- [18] 朱彭舟, 麻彦龙, 蒋璐瑶, 等. 电解液成分对7075铝合金酒石酸-硫酸阳极氧化膜结构及性能的影响[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2020, 34(1): 148-155.
- [19] 何琼. 酒石酸阳极氧化及封闭对建筑铝合金耐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(9): 19-24.
- [20] Deyab M A, Essehli R, Bali B E, et al. Fabrication and evaluation of $\text{Rb}_2\text{Co}(\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ /waterborne polyurethane nanocomposite coating for corrosion protection aspects[J]. RSC Advances, 2017, 7(87): 55074-55080.
- [21] Mani S P, Agilan P, Kalaiarasan M, et al. Effect of multi-layer CrN/CrAlN coating on the corrosion and contact resistance behavior of 316L SS bipolar plate for high temperature proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022 (2): 134-146.
- [22] 曾纪勇, 郭兴伍, 郭嘉成, 等. 镁合金表面新型高耐蚀性植酸化学转化膜的制备[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 230-237.