

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.08.003

电压对铝锂合金硬质阳极氧化膜性能的影响

李倩^{1*}, 周艳丽¹, 杨鹏²

(1. 河南工业贸易职业学院 机电工程学院, 河南 郑州 451191; 2. 中国计量大学 材料与化学学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 选用2099铝锂合金作为基体进行硬质阳极氧化, 并研究电压对硬质阳极氧化膜形貌特征、成分、厚度、硬度、耐磨和耐腐蚀性能的影响。结果表明: 随着电压从50 V提高到90 V, 硬质阳极氧化膜的结构趋于致密, 然后变得疏松, 表面粗糙度先降低后增加, 厚度先增加后降低, 导致硬度、耐磨与耐腐蚀性能表现出明显的差异, 但硬质阳极氧化膜的元素组成未变。电压为70 V制备的硬质阳极氧化膜表面结构致密, 厚度达到27.3 μm , 具有高硬度(457.4 HV)、良好的耐磨和耐腐蚀性能, 平均摩擦系数和腐蚀电流密度仅为0.49和 $2.02 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 对铝锂合金的防护效率达到95.1%。由于电压提高逐步形成较致密的硬质阳极氧化膜并促使膜层增厚, 承载能力、抵抗局部塑性变形能力、阻碍腐蚀介质渗透和抵抗腐蚀能力增强, 因此硬质阳极氧化膜的性能明显提高。

关键词: 硬质阳极氧化膜; 2099铝锂合金; 电压; 硬度; 耐腐蚀性能; 耐磨性能

中图分类号: TQ153.6 **文献标识码:** A

Effect of voltage on the properties of hard anodized films on aluminum-lithium alloy

Li Qian^{1*}, Zhou Yanli¹, Yang Peng²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Industry and Trade Vocational College, Zhengzhou 451191, China; 2. Material and Chemistry College, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: 2099 aluminum-lithium alloy was treated by hard anodizing process, and the effect of voltage on the morphology, composition, thickness, hardness, wear resistance as well as the corrosion resistance of hard anodized film was studied. The results show that with the increase of voltage from 50 V to 90 V, the structure of hard anodized film tends to be dense and then becomes loose, the surface roughness first decreases and then increases, the thickness first increases and then decreases, resulting in obvious differences in the hardness, wear resistance and corrosion resistance, but the element composition of hard anodized film does not change. The hard anodized film prepared at 70 V has dense structure with a thickness of 27.3 μm , possessing high hardness (457.4 HV), excellent wear resistance and corrosion resistance. The average friction coefficient and corrosion current density are only 0.49 and $2.02 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, and the protection efficiency on Al-Li alloy reaches 95.1%. A hard anodized film with compact structure is gradually formed and the thickness is increased due to the increase of voltage, and the bearing capacity, resistance to local plastic deformation and resistance to corrosive media

收稿日期: 2023-01-16

修回日期: 2023-02-06

*通信作者: 李倩(1975—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 表面工程、机械设计及理论等, email: Eduhn_4511@126.com

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(20A120007)

penetration are enhanced, so the properties of hard anodized film is significantly improved.

Keywords: hard anodized film; 2099 aluminum-lithium alloy; voltage; hardness; corrosion resistance; wear resistance

铝锂合金以其较高强度、良好的抗疲劳性能和适宜的延展性,在航空航天和军工领域具有重要应用价值^[1-4]。然而,较差的耐腐蚀和耐磨性能制约了铝锂合金的应用领域扩展。因此,通过表面处理提高铝锂合金的耐腐蚀和耐磨性能至关重要。目前研究已经证实,阳极氧化工艺适用于铝锂合金表面处理,阳极氧化膜作为表面改性层使铝锂合金的性能明显提高^[5-8]。

硬质阳极氧化是以提高材料硬度、耐磨和耐腐蚀性能作为目标的阳极氧化工艺,与常规阳极氧化工艺的区别在于电压高且电解液温度低,因此硬质阳极氧化膜相对更厚,其综合性能明显好于常规阳极氧化膜。近年来,铝合金硬质阳极氧化已有很多报道,但有关铝锂合金硬质阳极氧化鲜见报道,开展这方面研究能为显著提高铝锂合金性能从而扩展其应用领域提供参考。本文选用2099铝锂合金作为基体进行硬质阳极氧化,通过研究电压对硬质阳极氧化膜形貌特征、成分和性能的影响,旨在确定最佳电压从而显著提高铝锂合金性能。

1 实验

1.1 材料

实验选用2099铝锂合金作为基体,其化学组成如表1所示。加工成40 mm×22 mm×3 mm的试样,并依次进行逐级打磨(800#、1600#、2000#砂纸)、除油(60℃、质量浓度为40 g/L的氢氧化钠溶液)、腐蚀活化(常温、体积分数25%的硝酸溶液)、清洗(常温去离子水)和干燥处理。

表1 2099铝锂合金的化学组成

Tab.1 Chemical composition of 2099 Al-Li alloy

元素	Mg	Li	Zn	Cu	Mn	Zr	Ti	Al
质量分数/%	0.30	1.77	0.72	2.70	0.30	0.10	0.05	余量

1.2 硬质阳极氧化膜制备

预处理后的2099铝锂合金试样作为阳极,铅板作为阴极。配制混合酸电解液,主要组成为浓硫酸120 g/L、柠檬酸75 g/L,温度控制在5℃左右。实验过程中只改变电压,分别在50、60、70、80和90 V条

件下制备硬质阳极氧化膜,氧化时间均为60 min。

1.3 硬质阳极氧化膜表征与测试

采用MERLIN Compact型扫描电镜观察铝锂合金和不同硬质阳极氧化膜的表面形貌,同时采用X-max 80型能谱仪进行面扫描,分析不同硬质阳极氧化膜的成分。

采用SJ-210型粗糙度仪测量不同硬质阳极氧化膜的表面粗糙度,每个试样测3个位置取平均值。另外,采用涡流测厚仪测量不同硬质阳极氧化膜的厚度,每个试样重复测3次取平均值。

采用HVS-1000型数显维氏硬度计测试铝锂合金和不同硬质阳极氧化膜的硬度,载荷设定0.98 N,保持10 s后均匀卸载。每个试样表面随机选取5个点,测试结果取平均值。

采用MFT-4000型往复式摩擦磨损试验机测试铝锂合金和不同硬质阳极氧化膜在无润滑条件下的摩擦系数,对磨件为直径4 mm的GCr15钢球。实验过程中法向载荷设定5 N,每个往复行程为10 mm,频率为2 Hz,摩擦过程持续450 s。根据摩擦系数评价不同硬质阳极氧化膜的耐磨性能。

室温条件下,配制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铝锂合金和不同硬质阳极氧化膜的极化曲线。选用饱和甘汞电极作为参比电极,铂片作为辅助电极,工作电极的暴露面积均为1 cm²。先将三电极体系浸在3.5%氯化钠溶液中一段时间,待开路电位稳定后开始测试极化曲线,扫描速度为1 mV/s。根据极化曲线测试数据拟合得到腐蚀电位、腐蚀电流密度和极化电阻,并根据公式(1)计算不同硬质阳极氧化膜对铝锂合金的保护效率(η),进而评价不同硬质阳极氧化膜的耐腐蚀性能。

$$\eta = \frac{J_0 - J_1}{J_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: J_0 、 J_1 分别表示铝锂合金的腐蚀电流密度、不同硬质阳极氧化膜的腐蚀电流密度,单位均为A/cm²。

为进一步评价铝锂合金和不同硬质阳极氧化膜的耐腐蚀性能,将试样悬挂着浸在3.5%氯化钠溶液

中 120 h 后取出,洗净后吹干表面水分。采用精度为 0.1 mg 的电子天平称重,试样的腐蚀速率(v_{corr})计算公式如下:

$$v_{\text{corr}} = \frac{m_0 - m}{S \cdot t} \quad (2)$$

式中: m_0 、 m 分别表示试样的初始质量、试样在 3.5% 氯化钠溶液中浸泡一段时间后的质量,单位均为 mg; S 表示试样表面积,单位为 cm^2 ; t 表示浸泡时间,单位为 h。

2 结果与讨论

2.1 电压对硬质阳极氧化膜形貌的影响

图 1 为不同电压下在铝锂合金表面制备的硬质阳极氧化膜表面形貌,图 2 为不同电压下硬质阳极氧化膜的形机理示意。对比图 1(a)~图 1(f) 可知,不同电压下制备的硬质阳极氧化膜形貌特征与铝锂合金相比存在显著差异,铝锂合金表面较平滑,而不同硬质阳极氧化膜表面都有烧蚀痕迹。这是由于高电压下产生很多焦耳热积聚在硬质阳极氧化膜与电解液界面处,难以及时散失从而对硬质阳极氧化膜表面造成烧蚀。然而,随着电压从 50 V 提高到 70 V,硬质阳极氧化膜表面烧蚀程度减轻,形成的凹坑变浅且数量减少,附着的烧蚀产物也减少,表面结构趋于致密。结合图 2(a) 分析,电压较低时硬质阳极氧化膜形成慢,而溶解烧蚀过程持续进行,造成硬质阳极氧化膜表面形成一些深浅不一的凹坑并附着一些烧蚀产物。随着电压逐渐提高到 70 V,硬质阳极氧化膜形成速度加快,新膜层持续覆盖烧蚀表面,相当于减轻硬质阳极氧化膜的溶解烧蚀程度,从而逐步形成较致密的硬质阳极氧化膜,如图 2(b) 示意。然而,当电压达到 90 V,硬质阳极氧化膜表面烧蚀很严重,结构疏松(如图 2(c) 示意),形成很多密集分布的微小孔洞,局部还形成一些大小不一的深凹坑。原因是电压过高的情况下产生更多焦耳热积聚在电解液中难以及时散失,对硬质阳极氧化膜表面造成严重烧蚀,导致溶解速度加快。另外,电压过高的情况下成膜不均匀,还可能造成硬质阳极氧化膜局部被击穿形成深凹坑,因此表面结构疏松。

图 3 为不同电压下制备的硬质阳极氧化膜表面粗糙度。由图 3 可知,随着电压从 50 V 提高到 70 V,表面粗糙度呈现降低趋势,表明硬质阳极氧化膜

表面结构趋于致密,与图 1 分析结果一致。电压为 70 V 制备的硬质阳极氧化膜具有最低的表面粗糙度 $0.650 \mu\text{m}$,其表面结构较为致密。然而,当电压达到 90 V,表面粗糙度转而增加至 $0.905 \mu\text{m}$,证实了电压过高的情况下硬质阳极氧化膜表面变得粗糙,结构疏松。

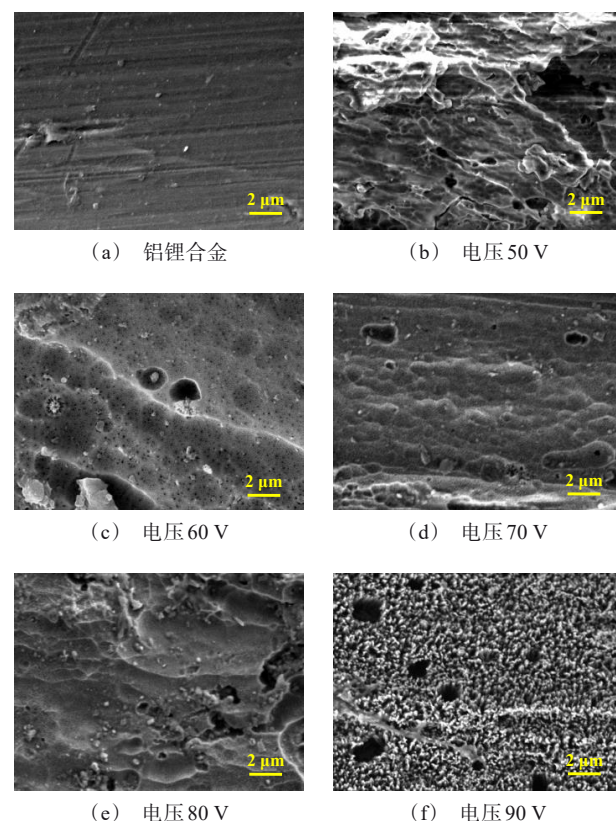


图 1 不同电压下在铝锂合金表面制备的硬质阳极氧化膜表面形貌

Fig.1 Surface morphology of hard anodized films prepared on Al-Li alloy at different voltages

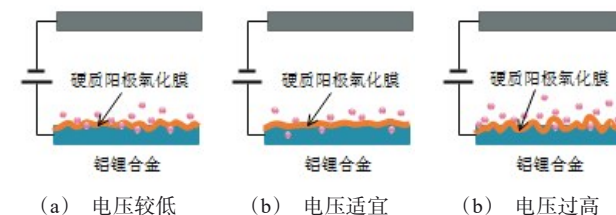


图 2 不同电压下硬质阳极氧化膜的形机理示意

Fig.2 Formation mechanism of hard anodized film at different voltages

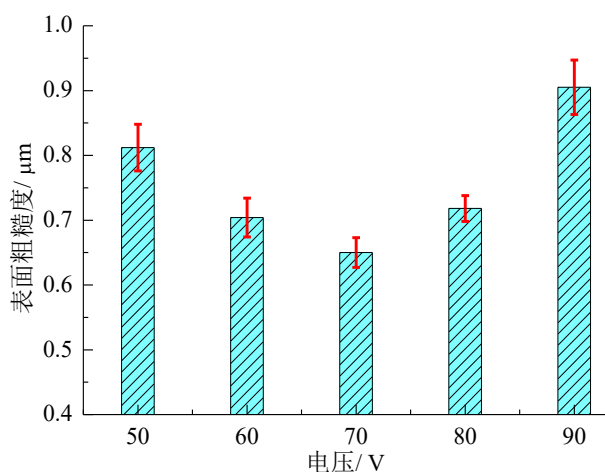


图3 不同电压下制备的硬质阳极氧化膜表面粗糙度

Fig.3 Surface roughness of hard anodized films prepared at different voltages

2.2 电压对硬质阳极氧化膜成分和厚度的影响

表2示出不同电压下制备的硬质阳极氧化膜成分。由表2可知,不同硬质阳极氧化膜都含有Al、O、S和C元素,O元素质量分数最高,其次为Al元素,少量S元素可能是电解液中的 SO_4^{2-} 参与铝的阳极反应过程,生成特殊化合物 $\text{Al}(\text{OH})_x(\text{SO}_4)_y$ 掺杂在硬质阳极氧化膜中^[9-12],而C元素是硬质阳极氧化膜表面被污染或发生吸附现象引入,不可避免。随着电压从50 V提高到70 V,硬质阳极氧化膜中Al和O元素质量分数都呈现升高趋势,伴随着C元素质量分数降低。然而,当电压超过70 V,硬质阳极氧化膜中Al和O元素质量分数都降低,C元素质量分数反而升高。原因是电压过高的情况下硬质阳极氧化膜严重烧蚀,表面变得粗糙,结构疏松,导致吸附现象显著,因此C元素质量分数明显升高。在所有元素总含量恒定的情况下,C元素质量分数明显升高且S元素质量分数变化不大,所以Al和O元素质量分数明显降低。

以电压为70 V制备的硬质阳极氧化膜为例,观察图4(a)和图4(b)发现,Al和O元素亮点密集且分布较均匀,未出现局部聚集现象,这表明在此电压下硬质阳极氧化成膜均匀。

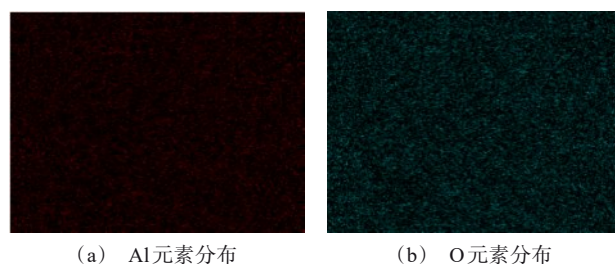
图5为不同电压下制备的硬质阳极氧化膜厚度。由图5可知,随着电压从50 V提高到90 V,硬质阳极氧化膜的厚度呈现先增加后降低趋势。原因是电压提高使硬质阳极氧化膜形成速度加快,缩短了氧化成膜周期。由于硬质阳极氧化膜形成速度快

于溶解速度,因此厚度增加。电压为70 V制备的硬质阳极氧化膜最厚,达到27.5 μm。然而,当电压超过一定限值,由于产生大量焦耳热积聚在电解液中难以及时散失,加速了硬质阳极氧化膜溶解,导致溶解速度快于成膜速度,因此厚度降低。

表2 不同电压下制备的硬质阳极氧化膜组成

Tab.2 Composition of hard anodized films prepared at different voltages

电压/V	元素质量分数/%			
	Al	O	S	C
50	38.56	42.98	5.04	13.42
60	40.22	43.51	4.48	11.79
70	42.03	44.23	4.53	9.21
80	39.35	42.18	4.79	13.68
90	33.80	34.62	5.01	26.57



(a) Al元素分布

(b) O元素分布

图4 电压为70 V制备的硬质阳极氧化膜表面元素分布

Fig.4 Distribution of elements on surface of the hard anodized film prepared at 70 V

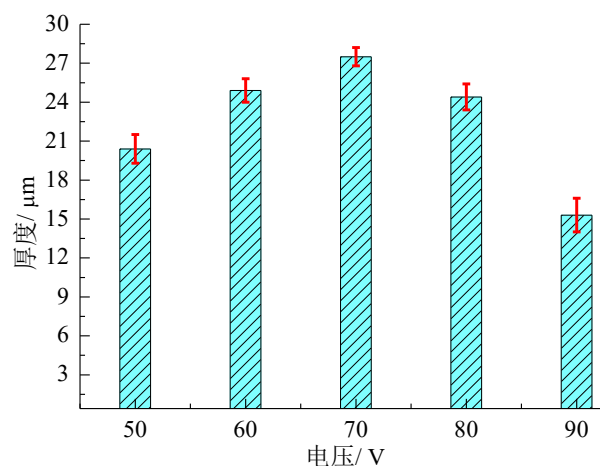


图5 不同电压下制备的硬质阳极氧化膜厚度

Fig.5 Thickness of hard anodized films prepared at different voltages

2.3 电压对硬质阳极氧化膜硬度和耐磨性的影响

图6为不同电压下制备的硬质阳极氧化膜硬

度。由图6可知,随着电压从50 V提高到70 V,硬度从340.5 HV增至457.4 HV。原因是电压提高促进形成较致密的硬质阳极氧化膜,并且硬质阳极氧化膜明显增厚,承载能力和抵抗局部塑性变形能力增强^[13-14],因此硬度增大。然而,随着电压从70 V继续提高到90 V,硬度从457.4 HV降至247.3 HV。这是由于电压超过一定限值的情况下成膜不均匀,并且硬质阳极氧化膜结构变得疏松,承载能力和抵抗局部塑性变形能力减弱,因此硬度降低。

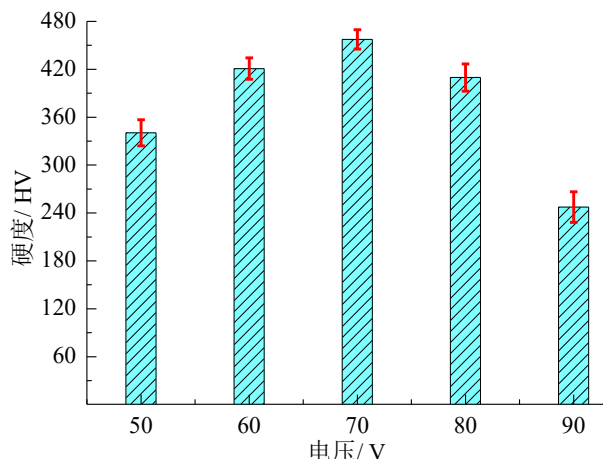


图6 不同电压下制备的硬质阳极氧化膜硬度

Fig.6 Hardness of hard anodized films prepared at different voltages

图7为不同电压下制备的硬质阳极氧化膜摩擦系数曲线。可以看出,随着摩擦时间延长,铝锂合金和不同硬质阳极氧化膜的摩擦系数都呈现波动性变化然后趋于相对稳定的态势。在整个实验周期内,铝锂合金的摩擦系数波动幅度最大,这表明铝锂合金表面磨损严重。随着电压从50 V提高到70 V,硬质阳极氧化膜的摩擦系数随着摩擦时间延长波动幅度变得平缓,并且更快趋于相对稳定态势,平均摩擦系数相应地从0.62降低到0.49。这表明电压提高有助于硬质阳极氧化膜的耐磨性能改善,原因是电压提高促进形成较致密的硬质阳极氧化膜,其厚度增加、硬度增大,抵抗局部塑性变形能力和承受对磨件挤压和往复刮磨能力增强,因此磨损程度减轻。电压为70 V制备的硬质阳极氧化膜平均摩擦系数最低(0.49),明显低于铝锂合金的平均摩擦系数(0.70),其耐磨性能良好。然而,随着电压从70 V继续提高到90 V,硬质阳极氧化膜的摩擦系数随着摩擦时间延长波动幅度明显加大,平均摩擦系数逐渐

增大到0.67。由此可知,当电压超过一定限值制备的硬质阳极氧化膜结构变得疏松,并且厚度降低、硬度减小,抵抗局部塑性变形能力和承受对磨件挤压和往复刮磨能力下降,导致磨损程度加重,表现为耐磨性能变差。

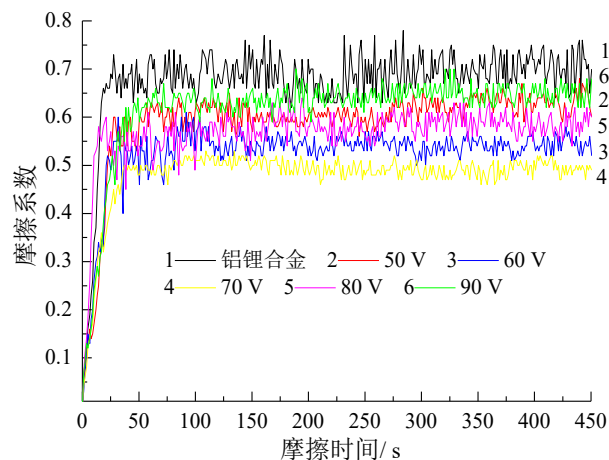


图7 不同电压下制备的硬质阳极氧化膜摩擦系数曲线

Fig.7 Friction coefficient curves of hard anodized films prepared at different voltages

2.4 电压对硬质阳极氧化膜耐腐蚀性能的影响

图8为不同电压下制备的硬质阳极氧化膜极化曲线,拟合结果如表3所示。可以看出,铝锂合金的腐蚀电位最负(-0.662 V),腐蚀电流密度最高($4.09 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$),极化电阻最低($6.74 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$),其耐腐蚀性能差。不同硬质阳极氧化膜的腐蚀电位相比于铝锂合金正移,腐蚀电流密度有不同程度降低,并且极化电阻不同程度的提高。这证实了硬质阳极氧化膜能起到腐蚀防护作用,有效的降低铝锂合金腐蚀倾向^[15-16]。

随着电压从50 V提高到70 V,硬质阳极氧化膜的腐蚀电位从-0.563 V正移约60 mV到-0.504 V,而腐蚀电流密度从 $6.64 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 降低到 $2.02 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$,极化电阻逐渐提高到 $9.25 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。这是由于随着电压提高,逐步形成较致密的硬质阳极氧化膜并促使膜层增厚,一方面减少了与腐蚀介质接触面积,相当于阻碍腐蚀介质向硬质阳极氧化膜内部扩散,使得铝锂合金基体很难与腐蚀介质接触。另一方面,硬质阳极氧化膜腐蚀抗力增大,腐蚀倾向减弱,因此耐腐蚀性能逐步提高。然而,随着电压从70 V继续提高到90 V,硬质阳极氧化膜的腐蚀电位从-0.504 V负移83 mV到-0.587 V,腐蚀电流密度

从 $2.02 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 增加到 $9.87 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 极化电阻降低到 $2.86 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。这表明当电压超过一定限值制备的硬质阳极氧化膜耐腐蚀性能变差, 原因是硬质阳极氧化膜结构变得疏松并且厚度降低, 与腐蚀介质接触面积增大导致容易发生腐蚀。另外, 腐蚀介质渗透加快导致硬质阳极氧化膜的腐蚀倾向增强, 从而表现为耐腐蚀性能变差。

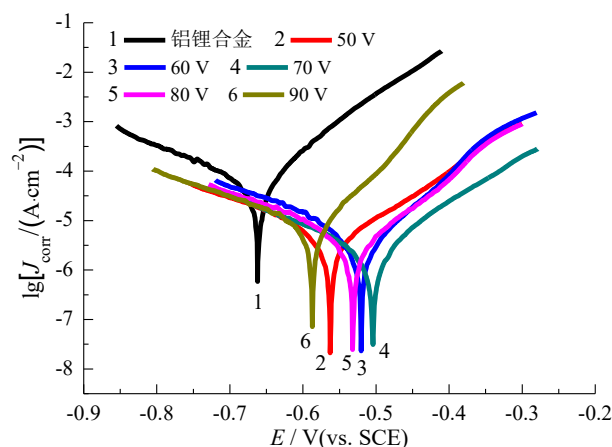


图8 不同电压下制备的硬质阳极氧化膜极化曲线

Fig.8 Polarization curves of hard anodized films prepared at different voltages

表3 极化曲线拟合结果

Tab.3 Polarization curves fitting results

试样	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
铝锂合金	-0.662	4.09×10^{-5}	6.74×10^2
50 V	-0.563	6.44×10^{-6}	4.21×10^3
60 V	-0.520	3.94×10^{-6}	6.96×10^3
70 V	-0.504	2.02×10^{-6}	9.25×10^3
80 V	-0.531	4.53×10^{-6}	5.49×10^3
90 V	-0.587	9.87×10^{-6}	2.86×10^3

图9为不同电压下制备的硬质阳极氧化膜对铝锂合金的保护效率。由图9可知, 随着电压从50 V 提高到90 V, 硬质阳极氧化膜对铝锂合金的保护效率呈现先升高后降低趋势。保护效率可以表征硬质阳极氧化膜对铝锂合金的保护作用强弱^[17-20], 硬质阳极氧化膜的耐腐蚀性能越好, 对铝锂合金的保护作用越强。电压为70 V 制备的硬质阳极氧化膜对铝锂合金的保护效率最高, 达到95.1%。由于电压提高逐步形成较致密的硬质阳极氧化膜并促使膜层增厚, 阻碍腐蚀介质渗透与扩散能力增强, 腐蚀抗力增大, 因此耐腐蚀性能逐步提高, 对铝锂合金的保护

效率升高, 有效的增强其耐腐蚀能力。然而, 电压过高导致硬质阳极氧化膜结构变得疏松并且厚度降低, 阻碍腐蚀介质扩散能力下降容易发生腐蚀, 因此对铝锂合金的保护效率降低。

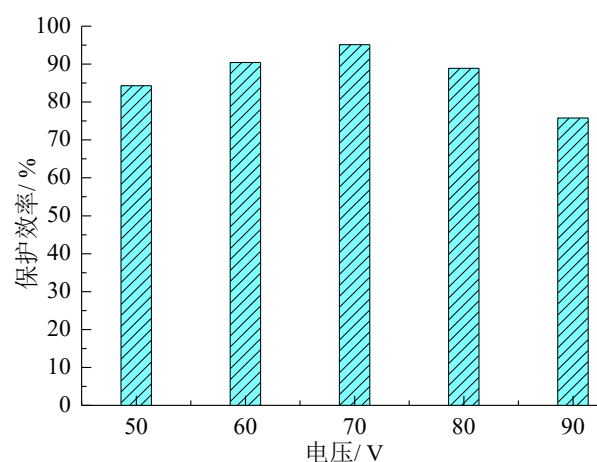


图9 不同电压下制备的硬质阳极氧化膜对铝锂合金的保护效率

Fig.9 Protection efficiency of hard anodized films prepared at different voltage on Al-Li alloy

图10为铝锂合金和不同电压下制备的硬质阳极氧化膜腐蚀速率。

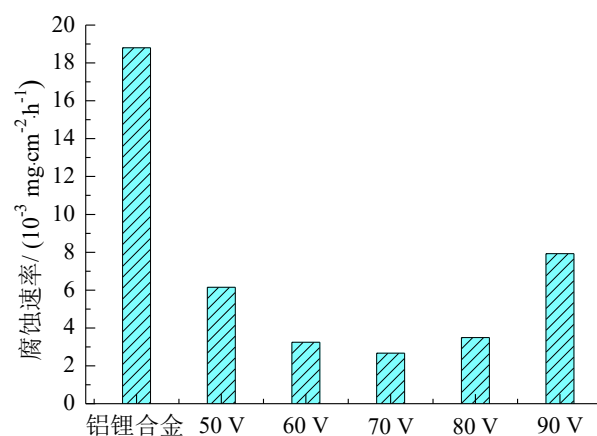


图10 铝锂合金和不同电压下制备的硬质阳极氧化膜腐蚀速率

Fig.10 Corrosion rate of Al-Li alloy and the hard anodized films prepared at different voltage

由图10可知, 随着电压从50 V 提高到90 V, 硬质阳极氧化膜的腐蚀速率呈现先降低后增加趋势, 电压为70 V 制备的硬质阳极氧化膜腐蚀速率最低, 仅为 $2.67 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$, 是铝锂合金(腐蚀速率为 $1.88 \times 10^{-2} \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$)的1/7。由于电压提高逐步形

成较致密的硬质阳极氧化膜并促使膜层增厚,阻碍腐蚀介质扩散能力增强,并且与腐蚀介质接触面积减少。因此,硬质阳极氧化膜的腐蚀程度逐步减轻,表现为腐蚀速率降低。然而,当电压超过一定限值导致硬质阳极氧化膜结构变得疏松并且厚度降低,阻碍腐蚀介质扩散能力下降并且与腐蚀介质接触面积增大,因此腐蚀程度逐步加重,腐蚀速率增加。

3 结论

(1)电压对铝锂合金表面硬质阳极氧化膜的形貌特征和厚度有较大影响,导致硬度、耐磨与耐腐蚀性能表现出明显的差异,但是对硬质阳极氧化膜成分没有显著性影响。随着电压提高逐步形成较致密的硬质阳极氧化膜并促使膜层增厚,承载能力、抵抗局部塑性变形能力和抵抗腐蚀能力增强,因此硬质阳极氧化膜的性能提高。然而,电压过高导致硬质阳极氧化膜结构变得疏松并且厚度降低,硬度、耐磨与耐腐蚀性能明显降低。

(2)电压为70 V制备的硬质阳极氧化膜表面结构致密,厚度达到27.3 μm ,具有高硬度(457.4 HV)、良好的耐磨和耐腐蚀性能,平均摩擦系数相比于铝锂合金明显降低,腐蚀电流密度相比于铝锂合金降低了超过一个数量级,腐蚀速率是铝锂合金的1/7,防护效率达到95.1%,能显著提高铝锂合金性能。

参考文献

- [1] 李劲风, 宁红, 刘丹阳, 等. Al-Cu-Li系铝锂合金的合金化与微合金化[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 258-279.
- [2] 李劲风, 陈永来, 马云龙, 等. 国内铝锂合金基础研究及应用技术开发[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(4): 37-47.
- [3] Li J, Li Y B, Huang M H, et al. Improvement of aluminum lithium alloy adhesion performance based on sand-blasting techniques[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 84: 307-316.
- [4] 王一唱, 童鑫, 游国强, 等. 铝锂合金组织、性能及成形工艺的研究现状与展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(3): 1069-1083.
- [5] Ma Y, Zhou X, Liao Y, et al. Corrosion behavior of AA2055 aluminum-lithium alloys anodized in the presence of sulfuric acid solution[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2016, 163(7): 369-379.
- [6] Samaniego-Gómez P O, Almeraya-Calderon F, Maldonado-Bandala E, et al. Corrosion behavior of AA2055 aluminum-lithium alloys anodized in the presence of sulfuric acid solution[J]. Coatings, 2021, 11(11): 1278-1288.
- [7] 苏奥, 王磊, 陈慧. 铝锂合金混合酸阳极氧化及无铬封闭研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(1): 22-28.
- [8] 刘湘伟, 李劲风, 张瑞丰, 等. 工艺参数对2195铝锂合金阳极氧化膜层腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(3): 107-111, 116.
- [9] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [10] 郭绍福, 赵春红. 植酸封孔对铝制件阳极氧化膜耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(8): 6-10.
- [11] Shibata T, Zhu Y C. The effect of film formation conditions on the structure and composition of anodic oxide films on titanium[J]. Corrosion Science, 2015, 37(2): 253-270.
- [12] 孔德军, 王进春, 刘浩. 7475铝合金阳极氧化膜表面一界面组织与特征[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(7): 1744-1751.
- [13] 曹歆昕, 李吉丹, 张晶, 等. 2A12铝合金硬质阳极氧化工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2017, 39(9): 38-41.
- [14] Adyono N, Surojo E, Triyono. Hard anodizing of 6061-T0 aluminium alloy in sulfuric acid bath at low temperature and its micro-hardness properties[J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2097(1): 030023-030029.
- [15] 颜鹏, 厉新明, 何林波, 等. 2198和5A90铝锂合金脉冲阳极氧化膜制备及耐蚀性[J]. 航空材料学报, 2017, 37(2): 13-20.
- [16] 李文, 朱彦海, 白雪飘, 等. 2060铝锂合金在3种溶液体系中所得阳极氧化膜层的性能[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(11): 492-496.
- [17] 付广艳, 陈兆苏, 姜天琪, 等. MgO纳米颗粒对镁合金阳极氧化膜耐蚀性的影响研究[J]. 材料保护, 2022, 55(8): 130-133.
- [18] 钱建才, 邹洪庆, 方敏, 等. 铝合金阳极氧化膜防护性能及失效规律研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 58-62.
- [19] 李小庆, 唐楷, 林东. 2024铝合金硫酸-柠檬酸阳极氧化及膜层组织性能研究[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(9): 46-51.
- [20] 刘佳. 3005铝合金在有机-无机混合酸体系中阳极氧化工艺及其性能探究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.