

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.09.009

不同阳极氧化工艺对铝合金支架表面氧化膜性能的影响

樊伟^{1*}, 李小平²

(1. 重庆工贸职业技术学院 智能制造学院, 重庆 408000; 2. 四川大学锦城学院 智能制造学院, 四川 成都 611731)

摘要: 本文分别采用硫酸、草酸以及酒石酸阳极氧化工艺对铝合金支架进行阳极氧化处理, 比较了采用不同工艺阳极氧化处理后支架的外观, 表征了不同氧化膜的相结构, 并测试了不同氧化膜的耐腐蚀性能、硬度和耐磨性能。结果表明, 采用不同工艺阳极氧化处理后支架的外观与裸支架基本相同, 都具有银白色光泽。不同氧化膜的物相都以Al相为主, 还有 α - Al_2O_3 相和 γ - Al_2O_3 相, 且都能提高铝合金基体的耐腐蚀性能、硬度和耐磨性能。与硫酸氧化膜相比, 草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的性能相对较好, 主要归因于草酸和酒石酸对氧化膜的溶解性较弱, 制备的氧化膜致密程度较高。酒石酸氧化膜具有良好的致密度, 其硬度最高, 达到357 HV, 耐腐蚀性能和耐磨性能都最好, 因此酒石酸阳极氧化工艺更适用于铝合金支架阳极氧化处理, 能较大幅度提高铝合金支架的性能。

关键词: 铝合金支架; 硫酸阳极氧化工艺; 草酸阳极氧化工艺; 酒石酸阳极氧化工艺

中图分类号: TG174

文献标识码: A

Effect of Different Anodizing Process on Properties of Oxidation Films on Surface of Aluminum Alloy Support

FAN Wei^{1*}, LI Xiaoping²

(1. Intelligent Manufacturing College, Chongqing Industry and Trade Polytechnic, Chongqing 408000, China; 2. Institute of Intelligent Manufacturing, Jincheng College of Sichuan University, Chengdu 611731, China)

Abstract: The aluminum alloy support was anodized by sulfuric acid anodizing process, oxalic acid anodizing process and tartaric acid anodizing process respectively. The appearance of support anodized by different process was compared, the phase structure, corrosion resistance, hardness and wear resistance of different oxidation films were tested. The results show that the appearance of the support anodized with different processes are basically the same as that of the bare ones, and they all have silver white luster. Al phase is the main phase in different oxide films, and α - Al_2O_3 phase and γ - Al_2O_3 phase are also included in the oxide films, which can improve the corrosion resistance, hardness and wear resistance of aluminum alloy matrix. Compared with sulphuric acid oxidation film, oxalic acid oxidation film and tartaric acid oxidation film have relatively better performance, which is mainly attributed to the weak solubility of oxalic acid and tartaric acid to the film, and thus the prepared oxidation film has high density. Tartaric acid oxidation film has higher density, the highest hardness of 357 HV, the best corrosion resistance and wear resistance, so tartaric acid anodizing process is more suitable for the anodic oxidation treatment of aluminum alloy support, which can greatly improve its performance.

收稿日期: 2021-01-06

修回日期: 2021-01-27

作者简介: 樊伟(1983—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 机械工程、表面工程等, email: fan_education126@163.com。

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201903603)

Keywords: aluminum alloy support; sulfuric acid anodizing process; oxalic acid anodizing process; tartaric acid anodizing process

铝及其合金具有密度低、塑性好且易强化等优点,是制造支架、挡板等轻质结构件的理想材料。但这类材料的耐腐蚀性能和耐磨性能不太理想,为了更好地满足使用要求,需要进行表面处理。阳极氧化工艺非常适合铝及其合金表面处理。根据电解液类型、使用目的和电流形式不同,阳极氧化工艺分成多种类型^[1-4]。例如,按电解液类型不同分成硫酸阳极氧化工艺、草酸阳极氧化工艺、铬酸阳极氧化工艺、磷酸阳极氧化工艺和混合酸阳极氧化工艺。其中,混合酸阳极氧化工艺采用以硫酸为基础添加有机酸(如草酸、酒石酸等)配成的混合酸电解液,与单一硫酸电解液相比,混合酸电解液对氧化膜的溶解性较弱,故易于形成致密度较高、性能良好的氧化膜。正因如此,混合酸阳极氧化工艺受到越来越多科研工作者的关注^[5-8]。

目前单独研究硫酸阳极氧化工艺、草酸阳极氧化工艺和酒石酸阳极氧化工艺已有较多报道^[9-12],但是从提高铝合金及其制品性能的角度对这不同工艺进行比较,目前很少见报道。笔者分别采用硫酸阳极氧化工艺、草酸阳极氧化工艺、酒石酸阳极氧化工艺对铝合金支架进行阳极氧化处理,通过比较不同氧化膜的显微形貌、相结构、耐腐蚀性能和耐磨性能,筛选出最佳阳极氧化工艺,以期较大幅度提高铝合金支架的性能。

1 实验

1.1 材料

试验材料为 2024 铝合金支架,其化学成分(质量分数)见表 1。

表 1 2024 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 2024 aluminum alloy

组分	Mg	Cr	Mn	Si	Cu	Zn	Fe	Al
含量/(wt.%)	2.20~2.80	0.15~0.35	0.10	0.25	0.10	0.10	0.40	Bal.

1.2 支架预处理

支架依次进行打磨、碱洗、酸洗和烘干处理。打磨分别采用 800#、1500#、2000# 金相砂纸,直到支架表面平滑,无明显的划痕。碱洗采用质量浓度为 50 g/L 的氢氧化钠溶液,温度为 60℃。酸洗采用体积分数 25% 的稀硝酸。每道工序结束后紧接着水洗,最后用吹风机烘干备用。

1.3 阳极氧化

表 2 为不同阳极氧化工艺采用的电解液及工艺条件,通过调节阳极氧化时间,使不同氧化膜的厚度相近。为了便于描述,将采用不同阳极氧化工艺处理后的支架依次称为硫酸氧化支架、草酸氧化支架和酒石酸阳极氧化支架,相对应的氧化膜称为硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜。

表 2 不同阳极氧化工艺采用的电解液及工艺条件

Tab.2 Electrolyte and process conditions for different anodizing process

工艺类型	电解液组成 及浓度/(g·L ⁻¹)		工艺条件	
硫酸 阳极氧化	硫酸	180	温度/℃	20
			电流密度/(A·dm ⁻²)	2
草酸 阳极氧化	硫酸	120	温度/℃	20
	草酸	35	电流密度/(A·dm ⁻²)	2
酒石酸 阳极氧化	硫酸	35	温度/℃	37
	酒石酸	80	电流密度/(A·dm ⁻²)	2

1.4 形貌表征与性能检测

在自然光照条件下,观察裸支架及阳极氧化处

理后支架的外观,同时采用 S-4800 型扫描电镜观察不同氧化膜的显微形貌,采用 TT230 型涡流测厚仪

测量不同氧化膜的厚度,取 3 次测量结果的平均值。

采用 X'Pert PRO DY-3365 型 X 射线衍射仪表征不同氧化膜的相结构,扫描角度为 $20^\circ \sim 90^\circ$,以 $8^\circ/\text{min}$ 恒定速度扫描,采用 Jade 软件对 XRD 图谱进行分析。

在中性氯化钠溶液中,采用标准三电极体系测定不同氧化膜的阻抗谱。参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极。施加振幅为 10 mV 的正弦波激励信号,测定的频率为 $10^5 \sim 10^2$ Hz。采用 ZsimpWin 软件对阻抗谱进行拟合,所得数据作为评价不同氧化膜耐腐蚀性能的依据。

采用 HVS-1000B 型维氏硬度计测定不同氧化膜的硬度,法向载荷为 0.49 N,保持 10 s 后卸载。所有支架均测 3 个点,取平均值。

采用 WTM-2E 型摩擦磨损试验仪在无润滑条件下进行摩擦实验,测定不同氧化膜的磨损率,作为评价耐磨性能的依据。摩擦实验结束后采用扫描电镜观察不同氧化膜的磨痕形貌,同时采用 Oxford 型能谱仪分析磨屑成分。

2 结果与分析

2.1 阳极氧化处理后支架的外观

从图 1 看出,硫酸氧化支架、草酸氧化支架和酒石酸氧化支架都具有银白色光泽,其外观与裸支架基本相同。单从外观上很难区分裸支架和阳极氧化处理后支架,因此有必要进一步分析不同氧化膜的显微形貌。

2.2 不同氧化膜的显微形貌、厚度和相结构

图 2 为不同氧化膜的显微形貌。从图 2(a)可以看出,硫酸氧化膜表面分布着一些形状较规则的坑洞,直径在 $200 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ 范围内,呈现凹凸不平的形态。孔洞的形成是由于硫酸对氧化膜具有很强的溶解性,并且在氧化膜溶解过程中伴随着部分杂质相的脱落。从图 2(b)和图 2(c)看出,草酸氧化膜和酒石酸氧化膜表面也有形状较规则的坑洞,但坑洞直径较小,数量也较少。原因是草酸和酒石酸吸附在氧化膜表面会形成一层缓存层,能抑制氧化膜附近氢离子的浓度过快变化,从而使氧化膜的溶解速度降低,溶解程度减轻^[13-14]。与硫酸氧化膜相比,草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的致密度相对较好,尤其是酒石酸氧化膜,具有良好的致密度。

图 3 为不同氧化膜的孔隙率。孔隙率是氧化膜

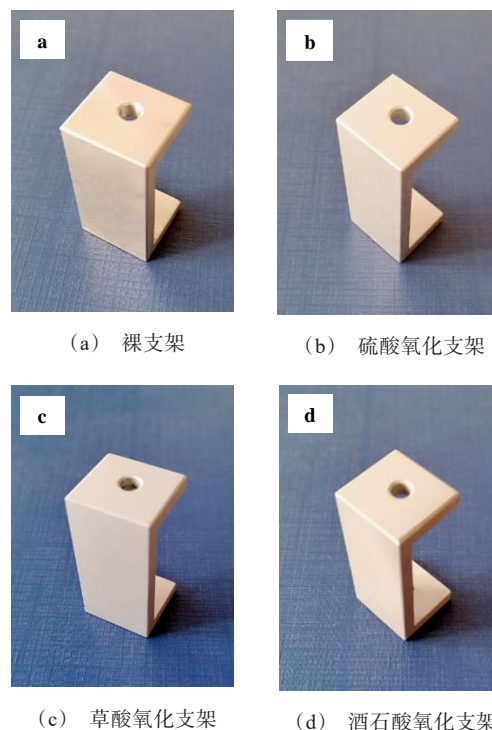


图 1 裸支架及阳极氧化处理后支架的外观

Fig.1 Appearance of bare support and anodized support

单位面积内坑洞所占的面积百分比,孔隙率越低,说明单位面积内坑洞所占的面积越小,即氧化膜的致密度较好。从图 3 可以看出,硫酸氧化膜的孔隙率最高,接近于 20%,草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的孔隙率分别为 15.2% 和 11.8%,明显低于硫酸氧化膜,并且酒石酸氧化膜的孔隙率最低。这进一步证实硫酸氧化膜的致密度较差,而酒石酸氧化膜具有良好的致密度。

表 3 为不同氧化膜的厚度测量结果。由表 3 可知硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的平均厚度分别为 18.3、18.6 和 18.4 μm ,差别不大,这说明厚度不是影响氧化膜性能的主要因素。

图 4 为不同氧化膜的 XRD 图谱。硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的 XRD 图谱具有相似的特征,各个衍射峰位置大致相同。铝合金基体的物相以 Al 相为主,其衍射峰强度很高。硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的物相也以 Al 相为主,另外还有 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相的衍射峰强度较低。

阳极氧化是在铝合金基体上生成一层氧化膜的过程,伴随着新氧化膜的生成和已生成氧化膜的溶

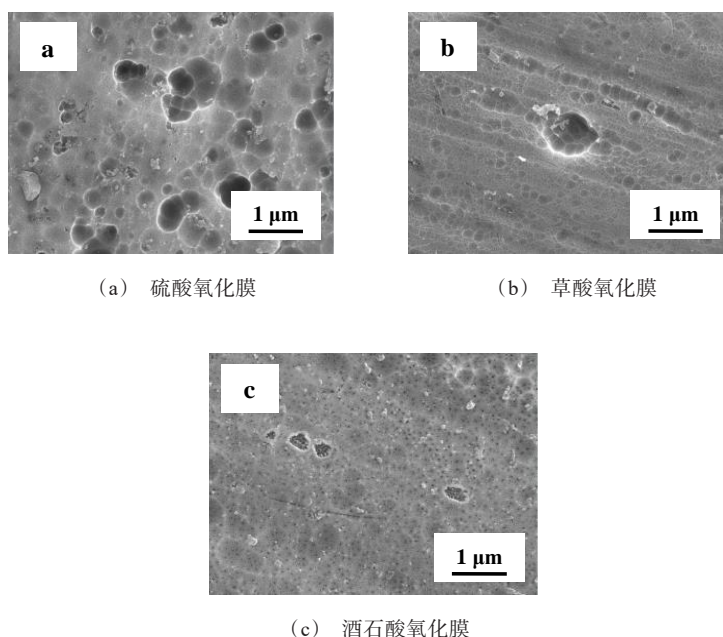


图2 不同氧化膜的显微形貌

Fig.2 Microstructure of different oxidation films

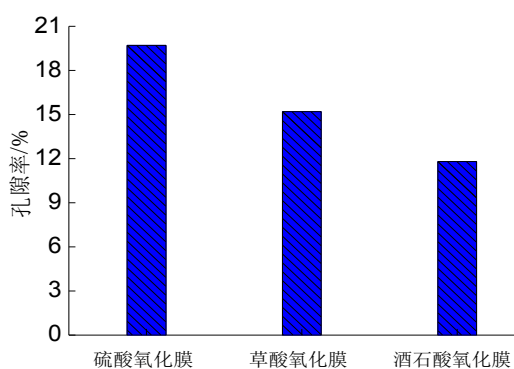


图3 不同氧化膜的孔隙率

Fig.3 Porosity of different oxidation films

表3 不同氧化膜的厚度测量结果

Tab.3 Measurement results of thickness of different oxidation films

试样	测量值/ μm			平均值/ μm
硫酸氧化膜	18.1	18.6	18.3	18.3
草酸氧化膜	18.5	18.8	18.4	18.6
酒石酸氧化膜	18.2	18.5	18.4	18.4

解。研究表明, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相都是阳极氧化过程中生成的铝氧化物,前者属于稳定相,后者属于过渡型亚稳相^[15-16]。物相的变化可能导致氧化膜的耐腐蚀性能和耐磨性能不同于铝合金基体。

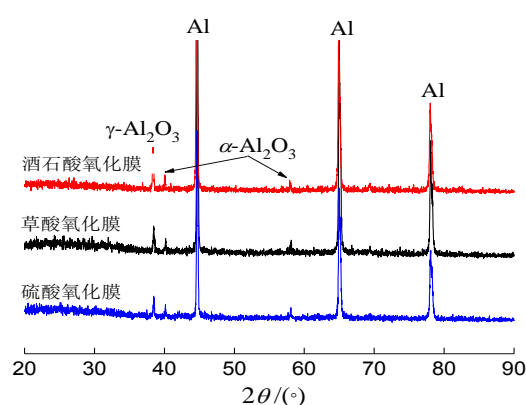


图4 不同氧化膜的XRD图谱

Fig.4 XRD patterns of different oxidation films

2.3 不同氧化膜的耐腐蚀性能

图5为铝合金基体和不同氧化膜的Nyquist图谱,图6为Nyquist图谱拟合采用的等效电路,表4为Nyquist图谱拟合结果。图6中 R_s 、 R_f 和 R_{ct} 分别表示溶液电阻、氧化膜电阻和电荷转移电阻, Q_f 和 Q_{dl} 分别表示氧化膜电容和腐蚀产物扩散产生的双电层电容。由图5可以看出,与铝合金基体相比,硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的容抗弧半径明显增大,对应的电荷转移电阻随之提高。这说明不同氧化膜都能提高铝合金基体的耐腐蚀性能。进一步比较发现,硫酸氧化膜的容抗弧半径最小,对应的电

荷转移电阻仅为 $1178 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 其耐腐蚀性能较差。酒石酸氧化膜的容抗弧半径最大, 对应的电荷转移电阻达到 $2015 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 其耐腐蚀性能最好, 优于硫酸氧化膜和草酸氧化膜, 原因是酒石酸氧化膜具有良好的致密度, 腐蚀接触面积少。

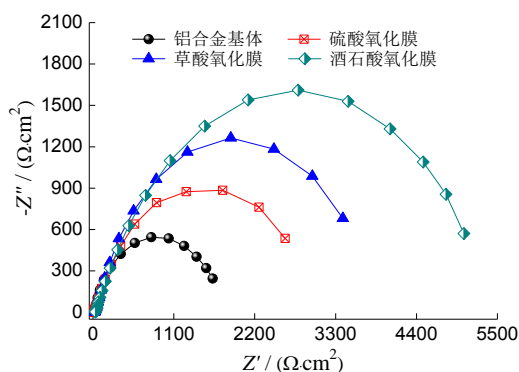


图 5 铝合金基体和不同氧化膜的 Nyquist 图谱

Fig.5 Nyquist diagram of aluminium alloy substrate and different oxidation films

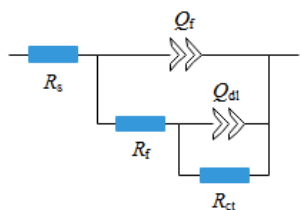


图 6 Nyquist 图谱拟合采用的等效电路

Fig.6 The equivalent circuit used for fitting of Nyquist diagram

表 4 Nyquist 图谱拟合结果

Tab.4 Fitting results of Nyquist diagram

试样	电荷转移电阻/ $(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
铝合金基体	623
硫酸氧化膜	1178
草酸氧化膜	1664
酒石酸氧化膜	2015

图 7 为铝合金基体和不同氧化膜的频率—阻抗图谱。铝合金基体、硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的阻抗都随着频率的提高逐渐减小并趋于稳定。但相同频率下, 铝合金基体、硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的阻抗有所不同。以低频 10^{-2} Hz 为例, 铝合金基体的低频阻抗最小, 仅为 $945 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的低频阻抗依次增大, 分别达到 $2126 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $3822 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $4593 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。研究表明, 低频阻抗同样可

以表征膜层的耐腐蚀性能。低频阻抗越大, 意味着膜层的耐腐蚀性能越好。因此, 酒石酸氧化膜的耐腐蚀性能最好, 其次为草酸氧化膜、硫酸氧化膜, 铝合金基体的耐腐蚀性能最差, 这与 Nyquist 图谱分析结果相吻合。

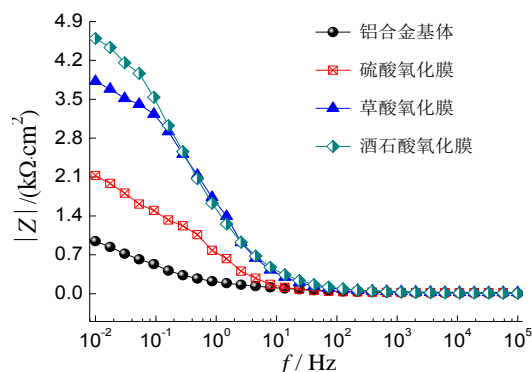


图 7 铝合金基体和不同氧化膜的频率-阻抗图谱

Fig.7 Frequency-impedance spectra of aluminium alloy substrate and different oxidation films

2.4 不同氧化膜的硬度

图 8 为铝合金基体和不同氧化膜的硬度。铝合金基体的硬度最小, 仅为 102.7 HV 。与铝合金基体相比, 硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的硬度分别提高了约 173 、 237 和 255 HV 。这是由于硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的物相发生变化, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相都较致密且硬度较高, 因此不同氧化膜的硬度明显高于铝合金基体。其中酒石酸氧化膜的硬度最高, 原因是酒石酸氧化膜具有良好的致密度, 因此表现出较强的抵抗弹性变形和塑性变形能力。

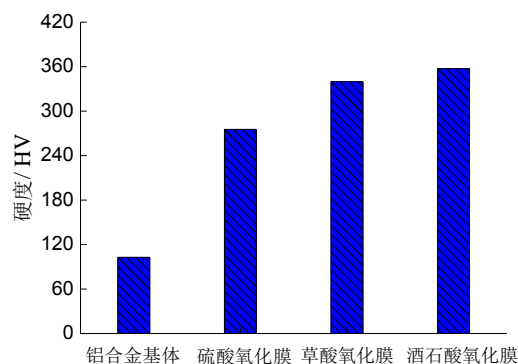


图 8 铝合金基体和不同氧化膜的硬度

Fig.8 Hardness of aluminium alloy substrate and different oxidation films

2.5 不同氧化膜的耐磨性能

图9为铝合金基体和不同氧化膜的磨损率。与铝合金基体相比,硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的磨损率明显降低,分别降低了67.8%、75.9%和80.8%。原因是硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的硬度高于铝合金基体,具有较强的抵抗弹性变形和塑性变形能力。根据 Archard 理论^[17-18],在相同的法向载荷作用下,膜层的硬度越高,越能抵抗摩擦对偶件对膜层表面的破坏,通过减少接触面积,使磨损程度减轻。其中酒石酸氧化膜的磨损率最低,主要归因于该氧化膜具有良好的致密度且硬度最高。

图10为铝合金基体和不同氧化膜的磨痕形貌,表5为铝合金基体和不同氧化膜的磨屑成分。由表5可知,铝合金基体和不同氧化膜的磨屑中都含有较高质量分数的O元素,对于铝合金基体,在摩擦过程中会伴随着氧化反应,导致摩擦界面被氧化。另外,由于铝合金基体的硬度较低,氧化形成氧化铝会被剪切分布在摩擦界面上,引起黏着现象。而对于硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜,在摩擦过程中也会导致摩擦界面发生不同程度的氧化,另外氧化膜本身含有较多的O元素,但是硫酸氧化膜、草

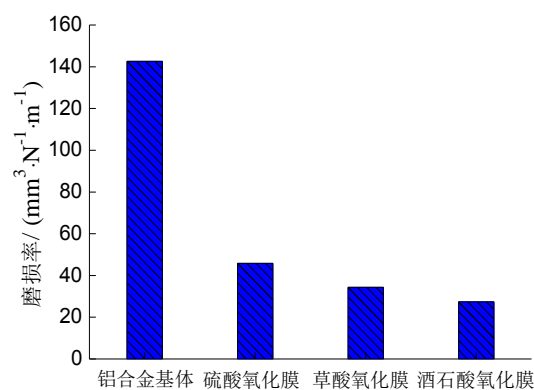
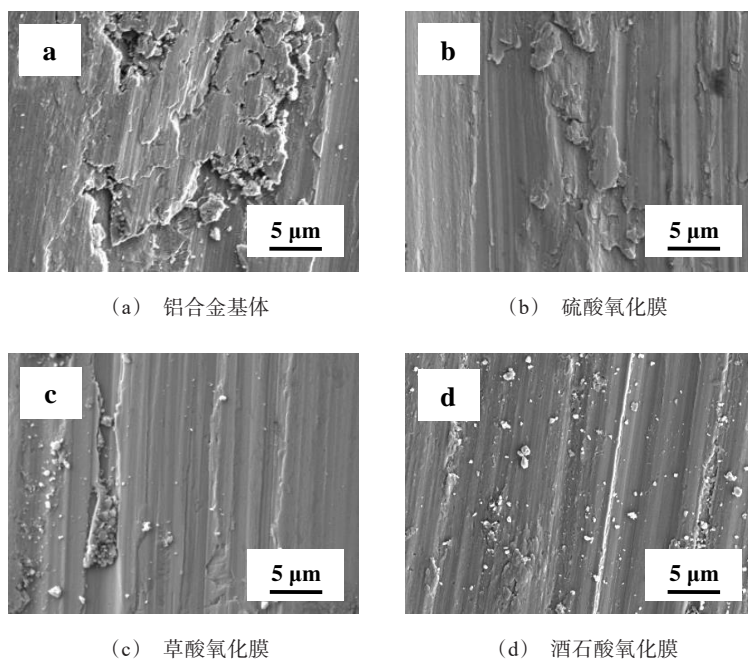


图9 铝合金基体和不同氧化膜的磨损率

Fig.9 Wear rate of aluminium alloy substrate and different oxidation films

酸氧化膜和酒石酸氧化膜的硬度明显高于铝合金基体,因此黏着现象较轻。

从图10(a)看出,铝合金基体发生了严重磨粒磨损和黏着磨损,表面有明显的犁沟痕迹,并伴有剥落痕迹,形成不规则的剥落坑。从图10(b)、图10(c)和图10(d)看出,硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜表面也都存在犁削和剥落痕迹,犁沟深浅不一,且在磨损面分布着细小的磨屑,表明硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜同样发生了磨粒



(a) 铝合金基体

(b) 硫酸氧化膜

(c) 草酸氧化膜

(d) 酒石酸氧化膜

图10 铝合金基体和不同氧化膜的磨痕形貌

Fig.10 Wear morphology of aluminium alloy substrate and different oxidation films

磨损和黏着磨损。但是与铝合金基体相比,氧化膜的磨损程度较轻。其中酒石酸氧化膜的磨损程度最轻,表现出良好的耐磨性能,这与图 9 分析结果相吻合。

表 5 铝合金基体和不同氧化膜的磨屑成分

Tab.5 Components of abrasive dust of aluminium alloy substrate and different oxidation films

试样	质量分数/(wt.%)			
	Al	O	S	C
铝合金基体	68.22	25.06	—	6.72
硫酸氧化膜	41.26	46.27	7.58	4.89
草酸氧化膜	40.92	45.21	8.23	5.64
酒石酸氧化膜	42.14	45.09	8.41	4.36

3 结论

(1)阳极氧化处理后支架的外观与裸支架基本相同,但是不同氧化膜的显微形貌存在差异,导致耐腐蚀性能、硬度和耐磨性能明显不同。硫酸氧化膜、草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的耐腐蚀性能、硬度和耐磨性能较铝合金基体都有较大幅度提高,低频阻抗分别达到 2126、3822 和 4593 $\Omega \cdot \text{cm}^2$,硬度分别提高了约 173、237 和 255 HV,磨损率分别降低了 67.8%、75.9% 和 80.8%。

(2)草酸和酒石酸吸附在氧化膜表面会形成一层缓存层,能降低氧化膜的溶解程度,因此草酸氧化膜和酒石酸氧化膜的性能相对较好,且酒石酸氧化膜具有良好的致密度,耐腐蚀性能和耐磨性能都最好。与硫酸阳极氧化工艺和草酸阳极氧化工艺相比,酒石酸阳极氧化工艺更适用于铝合金支架阳极氧化处理,能较大幅度提高铝合金支架的性能。

参考文献

- [1] 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.
Qian J C, Zou H Q, Fang M, et al. Protective performance and failure behavior on anodized aluminum alloy [J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 58-62 (in Chinese).
- [2] Khunphet A, Janudom S, Mahathaninwong N. Investigation on properties of anodized 7075 slurry cast aluminum after sealing[J]. Materials Science Forum, 2018(936): 187-191.
- [3] 刘祥玲, 李廷取, 索忠源, 等. 6061 铝合金板材阳极氧

化及着色工艺的试验研究[J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(6): 49-52.

Liu X L, Li T Q, Suo Z Y, et al. Study on anodic oxidation and coloring process of 6061 aluminum alloy sheet [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2019, 47(6): 49-52 (in Chinese).

- [4] Li S M, Li Y D, Zhang Y, et al. Effect of intermetallic phases on the anodic oxidation and corrosion of 5A06 aluminum alloy[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2015(22): 167-174.
- [5] 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.
Zhu P Z, Ma Y L, Jiang L Y, et al. Effect of electrolyte composition on the structure and property of the anodic film formed on 7075 aluminum alloy in tartaric-sulfuric acid[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2020, 34(1): 148-155 (in Chinese).
- [6] 任玉宝, 刘昌明, 赵怀鹏, 等. 铝合金硫酸及硫酸基混酸阳极氧化性能研究[J]. 热处理技术与装备, 2020, 41(2): 34-36.
Ren Y B, Liu C M, Zhao H P, et al. Study on anodizing performance of aluminum alloy with sulfuric acid and sulfuric acid based mixed acid[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2020, 41(2): 34-36 (in Chinese).
- [7] Leandro G R, Lorena G S, Pedro J A, et al. Assessment of the corrosion resistance of self-ordered anodic aluminum oxidation (AAO) obtained in tartaric-sulfuric acid (TSA)[J]. Surface and Coatings Technology, 2020(399): 126131.
- [8] 徐方强, 邹松华, 孙靖, 等. 硫酸-酒石酸钾钠宽温阳极化工艺对铝合金焊接质量的影响[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(11): 14-17.
Xu F Q, Zou S H, Sun J, et al. Influence of sulfuric acid-potassium sodium tartrate wide temperature anodizing on welding quality of aluminium alloy[J]. Plating and Finishing, 2019, 41(11): 14-17 (in Chinese).
- [9] 张丽, 付国燕, 陆江银, 等. 3003 铝合金低温硫酸硬质阳极氧化[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(3): 113-121.
Zhang L, Fu G Y, Lu J Y, et al. Hard anodization of 3003 aluminum alloy in sulfuric acid at low temperature[J]. Electroplating & Finishing, 2018, 37(3): 113-121 (in Chinese).
- [10] Machado T V, Dick P A, Knrnschild G H. The effect of different carboxylic acids on the sulfuric acid anodizing of AA2024[J]. Surface and Coatings Technology, 2020

- (383): 125283.
- [11] Leontiev A P, Roslyakov I V, Napolskii K S. Complex influence of temperature on oxalic acid anodizing of aluminium[J]. *Electrochimica Acta*, 2019(319): 88-94.
- [12] 丁小理, 邓汝荣, 高森田, 等. 6082 铝合金硬质阳极氧化零件耐腐蚀性探讨[J]. *轻合金加工技术*, 2019, 47(6): 53-57.
- Ding X L, Deng R R, Gao S T, et al. Discussion on corrosion resistance of hard-anodized parts of 6082 aluminum alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2019, 47(6): 53-57 (in Chinese).
- [13] 周雅, 周佳, 江溢民. 2024-T3 铝合金硫酸、草酸和酒石酸常温硬质氧化工艺[J]. *材料保护*, 2012, 45(2): 45-48.
- Zhou Y, Zhou J, Jiang Y M. Technology for room-temperature hard anodizing of aluminum alloy in mixed electrolyte consisting of sulfuric acid-oxalic acid-tartaric acid[J]. *Journal of Materials Protection*, 2012, 45(2): 45-48 (in Chinese).
- [14] 周漠银. 铝合金常温硬质阳极氧化工艺 II——有机添加剂的作用及槽液维护[J]. *电镀与环保*, 2002, 22(3): 28-30.
- Zhou M Y. Normal-temperature hard anodization of Al alloy(II)—effect of organic additive and bath maintenance[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2002, 22(3): 28-30 (in Chinese).
- [15] 孔德军, 王进春, 刘浩. 7475 铝合金阳极氧化膜表面-界面组织与特征[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(7): 1744-1751.
- Kong D J, Wang J C, Liu H. Surface-interface structures and characteristics of anodic oxidation film on 7475 aluminium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(7): 1744-1751 (in Chinese).
- [16] 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.
- Peng R, Yang W L, Fu L C, et al. Preparation of anodic alumina films with low porosity and high insulation property[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(5): 964-970 (in Chinese).
- [17] Liu Y M, Han R Q, Liu F, et al. Sputtering gas pressure and target power dependence on the microstructure and properties of DC-TOgnatron sputtered AlB₂-type WB₂ films[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 703(6): 188-197.
- [18] Geng D S, Li H X, Zhang Q, et al. Effect of incorporating oxygen on microstructure and mechanical properties of AlCrSiON coatings deposited by arc ion plating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017(310): 223-230.

新书讯

由我国电镀领域著名专家刘仁志教授主编的《量子电化学与电镀技术》一书将于2021年6月由中国建材工业出版社出版,新华书店发行。中国建材工业出版社网站和各网售平台均可购买。

本书是首次将量子电化学理论与电化学工艺结合起来讨论的作品。以量子电化学为主线,在介绍量子电化学理论的前提下,结合电镀原理和工艺,以新视角解读电镀技术,将电极过程动力学、表面新功能、电极过程等以量子观串联起来,展开了新的学科视野。重点介绍了镀前处理、晶圆电镀、特殊材料上电镀、电铸等电沉积技术和实验方法。本书可作为高校教材、研究生读物,也是从事现代电化学及工艺研究与开发的重要参考资料。对与电化学应用有关的各个专业领域也具有重要参考价值。敬请读者关注。

