

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.11.005

一种低烧损风险的新型二次硬质阳极氧化技术

刘祉进*, 赵学良, 丁辰辉, 肖薇, 黄锋, 宋超

(昌河飞机工业(集团)有限责任公司, 江西 景德镇 333000)

摘要: 硬质阳极氧化技术作为一种常用的铝合金加工工艺, 因其膜层良好的硬度和耐磨性能被广泛应用。然而由于其加工过程中的高电流密度和高硫酸浓度, 极易导致零件发生烧损, 致使零件报废。在对烧损现象的原因进行分析的基础上, 采用一种预先硼酸-硫酸阳极氧化对零件进行保护, 再进行硬质阳极氧化过程的新型二次硬质阳极氧化技术, 能有效降低了零件烧损的风险。同时, 通过盐雾、耐磨、硬度性能实验和 SEM 形貌表征等手段, 分析二次硬质阳极氧化膜层的性能和膜层结构, 对于铝合金硬质阳极氧化技术的实际生产应用有着重要意义。

关键词: 二次硬质阳极氧化; 低烧损风险; 性能实验; 形貌表征

中图分类号: TG178 **文献标识码:** A

A novel secondary hard anodizing technology with low risk of burnishing loss

Liu Zhijin*, Zhao Xueliang, Ding Chenhui, Xiao Wei, Huang Feng, Song Chao
(Changhe Aircraft Industry(Group) Co., Ltd., Jingdezhen 333000, China)

Abstract: Hard anodizing technology, a commonly used aluminum alloy processing technique, is widely applied due to its excellent hardness and wear resistance properties of the film layer. However, the high current density and high sulfuric acid concentration during the processing easily lead to burnishing loss of the parts, resulting in their scrapping. Therefore, by analyzing the causes of burnishing loss, a novel secondary hard anodizing technology is adopted, which involves pre-anodizing the parts with boron sulfuric acid for protection before undergoing the hard anodizing process. This effectively reduces the risk of burnishing loss. Meanwhile, through salt spray, wear resistance, hardness performance tests, and SEW morphology characterization, the properties and structure of the secondary hard anodized film layer are tested, which is of great significance for the practical production application of hard anodizing technology for aluminum alloys.

Keywords: secondary hard anodizing; low burnishing loss risk; performance tests; morphology characterization

近年来, 硬质阳极氧化技术因其膜层高硬度、良好的耐磨和耐腐蚀能力等诸多优点, 被广泛应用于航空航天领域, 尤其是在一些高频往复运动工况

下的铝合金零组件上^[1]。然而, 硬质阳极氧化需要采用高电流密度在高浓度硫酸溶液中进行阳极氧化, 针对一些尖端薄壁零件或高铜含量的铝合金零

收稿日期: 2025-03-11 修回日期: 2025-04-08

通信作者: 刘祉进(1999—), 男, 工学学士, 助理工程师, 研究方向为表面处理, email: lzjdut@163.com

引用信息: 刘祉进, 赵学良, 丁辰辉, 等. 一种低烧损风险的新型二次硬质阳极氧化技术[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(11): 38-46, 59.

Liu Zhijin, Zhao Xueliang, Ding Chenhui, et al. A novel secondary hard anodizing technology with low risk of burnishing loss[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(11): 38-46, 59.

件, 极易发生尖端放电现象和合金相的析出, 导致局部电流集中, 零件报废风险大大增加^[2]。本文通过二次硬质阳极氧化技术对零件进行保护, 降低烧损现象发生的可能, 并且通过一系列性能实验和形貌表征, 测试二次硬质阳极氧化膜层的耐盐雾、耐磨、硬度性能和膜层结构, 能够有效应用于实际生产。

1 研究背景

1.1 硬质阳极氧化

硬质阳极氧化技术是一种通过高浓度的硫酸作为电解质溶液, 采用高电流密度在零件表面形成致密性氧化膜层的电化学表面处理工艺, 能够大幅度提升材料的硬度、耐磨性和耐腐蚀性^[3]。相较于一般的阳极氧化技术, 如硫酸阳极氧化、铬酸阳极氧化^[4], 硬质阳极氧化通过较高电流密度能够有效地提高氧化膜层的生成速率, 而高浓度的硫酸, 也会同时加快氧化膜层的溶解速率, 因此, 其膜层厚度更大, 并且膜层表面呈大量微孔, 能够吸附各种润滑剂, 提高耐磨能力^[5], 该技术也被广泛应用于航空航天领域, 如直升机主桨毂动部件和舱门滑轨。

1.2 烧损现象

烧损现象是指由于阳极氧化时局部电流密度过大造成氧化膜局部或普遍的溶解, 同时可能发生膜下金属的部分或全部溶解。这是由于阳极氧化过程中不能有效散热, 造成严重的过热状态^[6]。正是因为硬质阳极氧化采用的电流密度较高, 其加工过程中散发的焦耳热和反应热也更大, 所以硬质阳极氧化的溶液温度通常都控制在0℃以下, 并且在加工过程中往往伴随着溶液的搅拌和电流脉冲, 能够有效地将阳极氧化过程散发的热量释放^[7-8]。但尽管如此, 局部电流集中导致的烧损甚至电击穿现象依然长期广泛存在于各工厂中, 如下图1、图2所示。



图1 支架的尖端烧损

Fig.1 Burnishing loss at the tip of stent

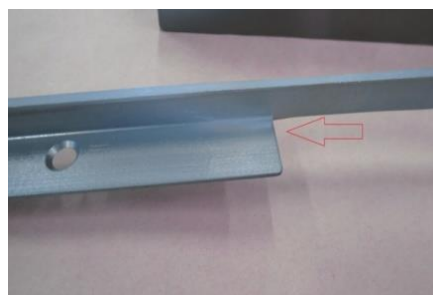


图2 滑轨的薄壁烧损

Fig.2 Burnishing loss at the thin wall of slide rail

1.3 烧损机理

经分析, 烧损发生的机理主要有以下三种:

(1) 尖端放电

对于结构含有尖端或表面毛刺未打磨干净的零件, 由于尖端部位的面电荷密度大, 尖端附近电场强度高, 所以容易由零件尖端向周围放电, 导致尖端局部电流集中, 热量上升发生烧损^[9]。

对于壁厚较薄的零件, 由于铝合金金属体的结构元大小一致, 在物体表面曲率半径不同的地方不可能均匀分布^[10], 在曲率半径小(如尖锐、细小物的顶端)的地方结构元间靠外表面处的间隙大, 电荷易在此聚集较密, 形成尖端放电^[11]。

(2) 氧气气泡影响

在进行阳极氧化的过程中, 零件作为阳极失去电子, 发生氧化反应^[12], 同时也伴随着电解水的副反应发生, 在氧化膜的生长过程中会形成大量的气泡。这些气泡在上浮的过程中会在氧化面的上方形成一连串的气泡流。这些上升的气泡会占据氧化面上方氧化液的体积。由于氧气是不导电的, 零件表面积累的氧会使膜层电阻上升。在高电压下, 膜层热量进一步增加, 达到一定程度后就会引起氧的气体放电, 出现火花, 使零件尖端电流集中处膜层首先破坏^[2], 导致零件烧损现象发生。

(3) 合金相析出

对于高含铜量的铝合金材料, 经热处理后成为不均相合金, 由于铜原子在晶界上的形成能较低, 铜原子以偏析组织聚集于晶界, 这种偏聚能的变化导致在不同铜浓度下, 铝铜二元体系中会产生许多的亚稳相和稳定的基态结构, 其中板状的 θ 析出相(Al_2Cu)是主要的强化相之一, 这些从晶粒边缘析出的强化相电化学活性大, 溶解速度快, 在氧化过程中极易成为电流集中区, 同样会引起局部过热, 从而引发烧损^[13]。

1.4 二次硬质阳极氧化

二次硬质阳极氧化是指对零件先进行普通阳

极氧化后，在所形成的氧化膜层上再进行硬质阳极氧化的工艺过程。

对于烧损现象产生的原因进行分析，氧气气泡的影响必须通过搅拌或阳极抖动的方式来降低烧损发生的风险，但尖端放电和合金相析出的影响可以通过二次硬质阳极氧化进行改善：首先，阳极氧化是由基体生成的膜层，通过普通阳极氧化能够有效地降低表面的尖锐部分，减弱尖端放电的影响；其次，普通阳极氧化所形成的氧化膜层均匀，能够有效地包裹基体铝合金，保护 θ 相等合金相析出，防止直接接触溶液，降低电流集中的可能。

1.5 研究意义及创新点

五七〇厂研究发现^[14]，铝及铝合金先进行硫酸阳极氧化，再进行硬质阳极氧化能够有效地避免电击穿现象。这一结果不仅意味着二次硬质阳极氧化工艺能够有效地降低零件发生烧损甚至报废的风险，大幅度提高了工艺稳定性，还可能因降低零件过程中的放热，达到常温硬质阳极氧化的目的，能够降低产品加工过程中的能源消耗。

吕弛等^[15]研究发现硫酸阳极氧化会在一定程

度上降低铝合金的疲劳性能；孙境尧等^[16]研究发现氧化工艺对合金钢性能同样存在一定程度的影响。考虑到硬质阳极氧化所使用的零件往往是处于高频往复运动的工况^[17]。因此，本文拟采用硼酸-硫酸阳极氧化叠加硬质阳极氧化的二次硬质阳极氧化，探究其降低烧损风险的有效性，并且通过一系列性能实验验证二次硬质阳极氧化膜层的耐腐蚀性、耐磨性和硬度。

2 实验部分

2.1 实验仪器及材料

2.1.1 实验仪器

本研究主要采用7050、2024、LC4、LY12铝合金试片进行实验，通过硼酸-硫酸阳极氧化过程叠加硬质阳极氧化过程的二次硬质阳极氧化技术和普通硬质阳极氧化进行对比实验，通过有效性实验、性能实验、SEM形貌表征和EDX成分分析进行论证。实验过程中所使用的主要仪器及设备列于表1中。

2.1.2 化工材料及标准

实验选用化工材料及标准列于表2中。

表 1 实验仪器与设备

Tab.1 Laboratory instruments and equipment

序号	仪器	型号	厂家
1	阳极氧化电源	KMF 300 A/100 V	江阴市天马电源制造有限公司
2	中性盐雾箱	SSP600	Q-PANEL LAB PRODUCTS
3	Taber 打磨机	1750	TABER INDUSTRIES
4	维氏硬度计	ZTH701	北京时代之峰科技有限公司
5	扫描电子显微镜	EVO/18	ZEISS
6	电化学工作站	DH7000C-2	江苏东华分析仪器有限公司

表 2 化工材料及标准

Tab.2 Chemical materials and standards

序号	材料名称	品级	技术标准
1	工业硫酸(H ₂ SO ₄)	一等品	GB/T 534
2	工业铬酸酐(CrO ₃)	一等品	GB/T 1610
3	化铣保护胶	HX-500	市售
4	铅板阴极	Pb1、Pb2	GB/T 1470
5	不锈钢阴极	316 或 304	市售
6	硝酸(HNO ₃)	工业级	GB337
7	氢氟酸(HF, 40%)	工业级	GB7744
8	BONDERITE C-AK 4215 NC-LT AERO	—	AMS1550
9	硼酸(H ₃ BO ₃)	工业级	GB/T538, I类, 优等品 H ₃ BO ₃ 含量≥99.8%

续表 2

序号	材料名称	品级	技术标准
10	硫酸(H ₂ SO ₄)	工业级	GB/T 534, 优等品
11	苯甲酸(C ₇ H ₆ O ₂)	—	GB1901
12	苯甲酸钠(C ₇ H ₅ O ₂ Na)	—	GB1886.184

2.2 有效性实验

2.2.1 尖边薄壁有效性实验

(1) 试片的制备

为屏蔽高铜铝合金的合金相析出对实验结果的干扰, 仅针对尖边薄壁造成的尖端电流聚集进行实验, 本实验选用7050铝合金材料。

将7050铝合金切割成25.4 mm×25.4 mm的方形试片, 为诱导烧损现象的发生, 选取1、3和6 mm不同厚度的试片进行实验, 并打磨边缘倒角半径(R)分别至0.2、0.3和0.5 mm下表, 具体按表3要求进行加工, 共得试片40片。采用400#砂纸进行打磨, 保证试片表面无腐蚀、划伤、凹坑、毛刺等缺陷。

表 3 7050 铝合金试片参数

Tab.3 Test specimen parameters of 7050 aluminum alloy

序号	标印	厚度/mm	R/mm	数量/片
1	A1~A5、B1~B5	6	0.5	20
2	A6~A10、B6~B10	3	0.3	20
3	A11~A20、B11~B20	1	0.2	20

(2) 阳极氧化

硼酸-硫酸阳极氧化过程设置电压15 V, 电压缓升速率: 3 V/min; 硬质阳极氧化采用恒电流直流叠加脉冲方式, 电流密度设置为2.5 A/dm²、叠加脉冲20%、占空比50%、频率25 Hz。设置电流缓升5 min至最终电流的1/2, 保持5 min后, 再缓升5 min至最

终电流, 而后进行直流叠加脉冲输出。

将上述7050试片按表3序号分为三组, 每组试片同槽进行前处理过程, 完成除油、碱洗、脱氧和去离子水洗后, B类试片按图3(右)进行硼酸-硫酸阳极氧化, 作实验组; 同时A类试片按图3(左)浸泡在去离子水中, 作对照组。

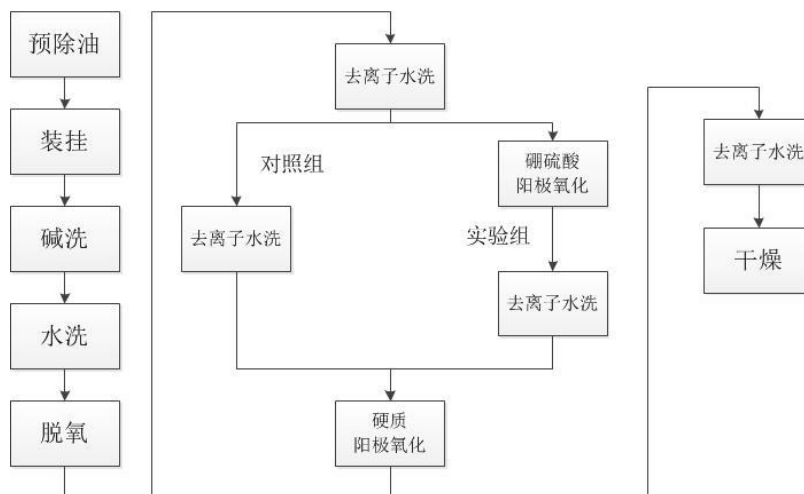


图 3 有效性实验流程图

Fig.3 Flow chart of validity experiment

而后将A、B类试片同槽浸入硬质槽中, 同槽进行硬质阳极氧化, 开始通电后, 记录试片第一次烧损发生的时间以及烧损情况。

2.2.2 高铜铝合金有效性实验

(1) 试片的制备

选用20片76.2 mm×254 mm×0.8 mm的2024裸铝

试片,平均分为C、D两组,分别编号C1~C10、D1~D10,采用400#砂纸对试片进行打磨,保证试片表面无腐蚀、划伤、凹坑、毛刺等缺陷。

(2) 阳极氧化

将上述试片同槽进行前处理过程,完成除油、碱洗、脱氧和去离子水洗后,D类试片按图3(右)进行硼酸-硫酸阳极氧化,作实验组;同时C类试片按图3(左)浸泡在去离子水中,作对照组。

硼酸-硫酸阳极氧化过程设置电压为15 V,电压缓升速率:3 V/min,升至设定电压后,进行硼酸-硫酸阳极氧化20 min,去离子水洗后观察B类试片表面

膜层,使用FMP20涡流测厚仪测量膜层厚度。

而后将A和B类试片同槽浸入硬质槽中,同槽进行硬质阳极氧化,采用恒电流直流叠加脉冲方式,电流密度设置为2.5 A/dm²、叠加脉冲20%、占空比50%、频率25 Hz。设置电流缓升5 min至最终电流的1/2,保持5 min后,再缓升5 min至最终电流。

开始通电后,记录试片第一次烧损发生的时间以及烧损情况。

2.2.3 实验槽液主要成分及工艺参数

上述两种有效性实验加工过程中主要工艺槽的槽液成分及工艺参数如下表4所示。

表4 主要工艺槽的槽液成分及工艺参数

Tab.4 Composition of bath solution and process parameters for main process tanks

序号	主要工艺槽	槽液成分	工艺参数
1	碱洗槽	BONDERITEC-AK 4215NC-LTAERO: 40~60 g/L	温度: 45 °C~65 °C 时间: 10~15 min
2	脱氧槽	铬(Cr ⁶⁺): 20~30 g/L 硝酸(HNO ₃): 75~105 g/L 单面腐蚀率: 20~30 μm/h	温度: 环境温度 时间: 1~5 min
3	硼硫酸阳极化槽	H ₂ SO ₄ : 30~35 g/L H ₃ BO ₃ : 5~6 g/L	温度: 20 °C~30 °C
4	硬质阳极化槽	H ₂ SO ₄ : 230~280 g/L	温度: -10 °C~-4 °C
5	去离子水槽	TS<0.035% TDS<0.1% 氯化物≤0.002 5% 氟化物≤0.000 2% pH: 5.0~8.0 铬(Cr ⁶⁺)≤0.001%	温度: 环境温度

2.3 性能实验与表征

2.3.1 盐雾性能实验

取2块尺寸为76.2 mm×254.0 mm×0.8 mm的2024-T3包铝试片,分别按如图3的硬质阳极氧化和二次硬质阳极氧化工艺流程对试片进行加工,干燥后得到盐雾试片。

本实验按照GB/T10125—2012《人造气氛腐蚀实验 盐雾实验》要求进行,采用温度为23 °C~27 °C时,电导率不高于20 μS/cm的去离子水溶解氯化钠,配制成浓度为45~55 g/L的氯化钠溶液,并将pH值调整至6.5~7.2之间^[18]。

将盐雾试片放置在盐雾箱中,将上述配制好的溶液连接盐雾箱,使用喷雾装置均匀沉降盐雾,并采用如下表5中所示参数进行240 h的盐雾实验。观

察除装挂痕迹或打磨标记以及距离边缘、拐角或孔1.6 mm范围内以外的区域表面腐蚀情况。

表5 中性盐雾实验参数

Tab.5 Neutral salt spray test parameters

序号	主要参数项目	数值
1	温度	23 °C~27 °C
2	80 cm ² 的水平面积的平均沉降率	1.0~2.0 mL/h
3	氯化钠溶液的浓度(收集溶液)	45~55 g/L
4	pH值(收集溶液)	6.5~7.2

2.3.2 耐磨性能实验

取2块尺寸为50 mm×100 mm×1 mm的LY12铝合金试片,分别按如图3的硬质阳极氧化和二次硬

质阳极氧化工艺流程对试片进行加工,干燥后得到耐磨试片。

使用Taber打磨机,磨削轮采用CS-17,负荷采用1 000 g,试板应在转速70 r/min下转动10 000周,然后测定试片磨损实验前、后的质量变化,其差值为磨耗损失量^[19]。

$$A - B = C \quad (1)$$

式中: A 为试片磨损实验前的质量, mg; B 为试片磨损实验后的质量, mg; C 为试片磨损实验前、后的质量差值, mg。

2.3.3 硬度性能实验

取2块尺寸为50 mm×50 mm×5 mm的LC4铝合金试片,分别按如图3的硬质阳极氧化和二次硬质阳极氧化工艺流程对试片进行加工,干燥后得到硬度试片。

采用维式硬度计进行测试,选用适当载荷对试

片膜层截面进行测试,满足压痕满足以下要求:

(a) 压痕两条对角线的长度基本相等,差值不超过5%;

(b) 压痕的四个边基本相等,差值不超过5%。

计算压痕面积,测得试片硬度。

2.3.4 电化学性能测试

电化学测试包括电化学交流阻抗测试(EIS)和Tafel极化曲线测试,均采用三电极体系:以铝合金试样为工作电极,以饱和甘汞电极为参比电极,以铂电极为辅助电极,以3.5 wt.%的氯化钠溶液为电解质溶液^[20]。

按照如图4所示装夹,其中反应槽下端有一通孔,以保证与电解质溶液接触的反应面积为1 cm²,同时为屏蔽外界干扰信号,将三电极体系装夹完成后放入屏蔽箱中进行电化学测试。



(a) 三电极放置图



(b) 三电极线路连接图

图4 三电极体系

Fig.4 Three-electrodesystem

其中EIS测试使用DH7000C-2电化学工作站,其实验参数具体如下:测试频率范围为0.01 Hz至10⁵ Hz,电压为开路电压,扰动电压为5 mV。

Tafel极化曲线测试使用DH7000C-2电化学工作站,其实验参数具体如下:设置电位范围为相对开路电位-0.25~0.5 V。

2.3.5 SEM形貌表征

对2.2节实验中A、B、C、D四类试片各取1片,使用ZEISS EVO/18型环境扫描电镜进行表征并摄像,同时进行EDS测试,对样品成分进行能谱分析。

2.4 产品工程应用验证实验

取某型机复杂环形零件,验证该工艺方法在工程应用上的可行性,将零件浸入AC850化铣胶后,用小刀刻型出硬质阳极氧化区域,内置铅棒作为辅助阴极,如图5所示,二次阳极氧化完成后,观察膜层外观。



图5 零件刻型后外观

Fig.5 Shape of part after marking

3 结果与讨论

3.1 二次硬质阳极氧化的有效性

3.1.1 对于尖边薄壁零件的有效性

(1) 厚度为6 mm,倒角半径(R)为0.5 mm零件A1~A5、B1~B5共计10片试片均未发现有明

显烧损现象，如下图6所示。

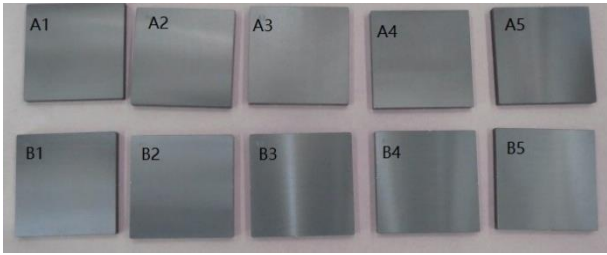


图 6 有效性实验实物图(6 mm)

Fig.6 Actual image of effectiveness experiment(6 mm)

(2) 厚度为3 mm，倒角半径(R)为0.3 mm零件

A6~A10、B6~B10共计10片试片，仅A8试片在试片边缘位置发生轻微泛白的烧损现象，如下图7及图8所示。

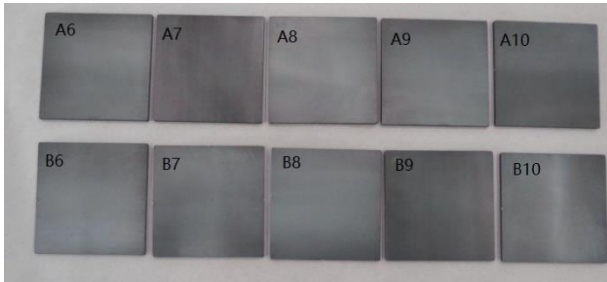


图 7 有效性实验实物图(3 mm)

Fig.7 Actual image of effectiveness experiment(3 mm)



图 8 A8 试片轻微烧损现象

Fig.8 Slight burning phenomenon of A8 test piece

(4) 厚度为1 mm，倒角半径(R)为0.2 mm零件

A11~A20中有6片试片发生尖端放电，严重烧损至试片基体被大量溶解，如下图9所示，其中A12、A17、A20试片在电流第一次缓升过程中即发生烧损，A16在第一次保持过程中发生烧损，A11在第二次缓升过程发生烧损，A18在叠加脉冲过程中发生烧损，具体如下表6所示。

B11~B20中仅有1片试片发生轻微烧损，且发生烧损时间为通电后25 min，试片表面右下角轻微泛白，硬质阳极氧化膜层被破坏，具体如下图10

所示。

表 6 试片发生烧损的时间

Tab.6 Burn time of test pieces

试片编号	通电后发生烧损的时间/min
A11	13.40
A12	1.30
A16	7.45
A17	1.60
A18	16.28
A20	3.93
B16	25.18

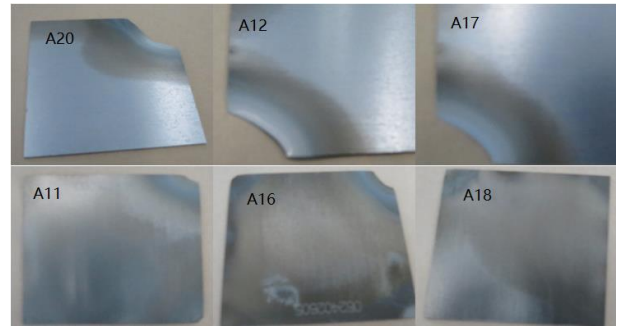


图 9 A11~A20 试片严重烧损现象

Fig.9 Severe burning phenomena of A11~A20 test pieces



图 10 B16 试片烧损现象

Fig.10 Burning phenomenon of B16 test piece

综合上述实验结果来看，不难发现进行二次硬质阳极氧化能够显著地降低尖边薄壁零件尖端放电带来的烧损风险。

3.1.2 对于高铜铝合金零件的有效性

D1~D10试片进行二次硬质阳极氧化，试片外观膜层完整、连续，没有明显缺陷；C1~C10试片中有3片出现白色纹路，如图11所示，可以判断为合金相析出造成的零件烧损，膜层溶解泛白。

故可认为二次硬质阳极氧化能够有效地降低高铜铝合金零件合金相析出带来的烧损风险。



图11 试片烧损现象

Fig.11 Burning phenomenon of test piece

3.2 二次硬质阳极氧化膜层的性能

3.2.1 盐雾性能

经过240 h的盐雾实验后,除装挂痕迹或打磨标记以及距离边缘、拐角或孔1.6 mm范围内以外的区域以外,在试片1.9 dm²的实验面积上,两种工艺过程加工的试片均未发现腐蚀点或蚀坑,可认为二次硬质阳极氧化膜层耐盐雾性能良好。

3.2.2 耐磨性能

使用Taber打磨机,磨削轮采用CS-17,负荷采用1 000 g,试板应在转速70 r/min下转动10 000周,硬质阳极氧化膜层磨损损失量 $G=35.2$ mg,二次硬质阳极氧化膜层磨损损失量 $G=34.5$ mg,可认为二次硬质阳极氧化膜层耐磨性能良好。

3.2.3 硬度性能

采用维式硬度计对LC4铝合金硬度试片进行测试,硬质阳极氧化试样膜层硬度平均值为306 HV_{0.1},二次硬质阳极氧化试样膜层硬度平均值为313 HV_{0.1},可认为二次硬质阳极氧化膜层硬度性能良好。

3.2.4 电化学性能

(1) EIS交流阻抗

EIS交流阻抗测试结果如下图12所示,在低频处硬质阳极氧化膜层和二次硬质阳极氧化膜层所显示出来的性能近似相同,阻抗模值均可达到 $5 \times$

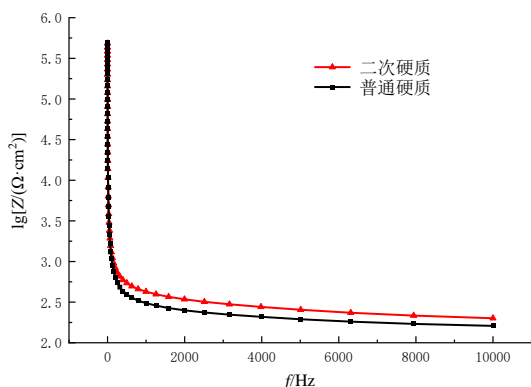


图12 交流阻抗 Bode 图

Fig.12 Bode plots of AC impedance

$10^5 \sim 6.3 \times 10^5 \Omega$,且在高频处二次硬质阳极氧化膜层的阻抗模值要略高,说明二次硬质阳极氧化膜层在一般环境下的耐腐蚀性能与普通硬质阳极氧化膜层接近,而且在高频电流环境下,其耐腐蚀能力更高。

(2) Tafel极化曲线

Tafel极化曲线测试结果如下图13所示,二次硬质阳极氧化膜层的自腐蚀电位约为-0.50 V,而普通硬质阳极氧化膜层的自腐蚀电位约为-0.56 V,表面二次硬质阳极氧化膜层的自腐蚀倾向要略低于普通硬质阳极氧化膜层,即其耐腐蚀性能更好;而自腐蚀电流二者基本相同,表面在该方面两种膜层所显示的性能相近。

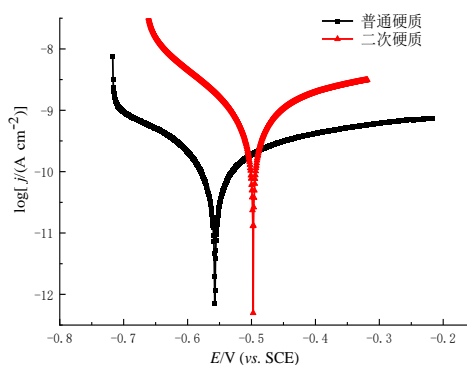


图13 Tafel极化曲线图

Fig.13 Tafel polarization plot

3.2.5 外观形貌

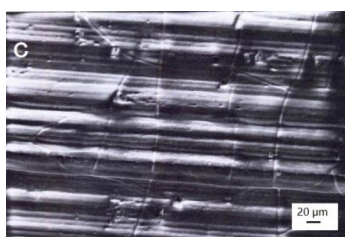
对A、B、C、D四类试片各取一片进行SEM微观形貌分析,结果发现四类试片表面膜层均呈冰裂纹形貌,A、B两类试片膜层形貌无明显差异,C、D两类试片膜层形貌也无明显差异,其具体结果如下图14(a)~14(d)所示。



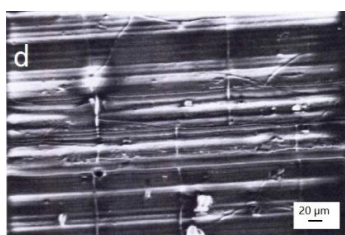
(a) 2024 硬质阳极氧化膜层



(b) 2024 二次硬质阳极氧化膜层



(c) 7050 硬质阳极氧化膜层



(d) 7050 二次硬质阳极氧化膜层

图 14 试片表面阳极氧化膜层微观形貌图

Fig.14 Microscopic topography diagram of anodizing film on test pieces

3.2.6 能谱分析

对A、B、C、D四类试片各取一片，每片取两个点进行EDS能谱分析，其具体结果如下表7所示，结果表明A、B两类试片所生成的膜层其成分种类和含量基本一致，C、D两类试片所生成的膜层其成分种类和含量基本一致，可以认为硬质阳极氧化和二次硬质阳极氧化的膜层成分种类和含量基本一致。

表 7 能谱分析结果

Tab.7 Energy spectrum analysis result

检测试样	元素含量/(wt.%)					
	C	O	Al	S	Cr	Zn
A1	6.60	57.94	30.67	4.60	0.18	—
A2	4.70	60.88	30.16	4.25	—	—
B1	4.90	60.08	30.49	4.37	0.16	—
B2	4.27	60.54	30.76	4.43	—	—
C1	7.29	61.48	28.10	2.71	—	0.43
C2	8.80	57.47	30.43	3.29	—	—
D1	3.74	62.32	29.54	4.39	—	—
D2	5.21	61.52	28.55	4.20	—	0.52

3.3 产品工程应用验证结果

硼酸-硫酸阳极氧化叠加硬质阳极氧化的二次硬质阳极氧化在产品实际应用结果良好，形成膜层连续，颜色均匀，如下图15所示，实践证明二次硬质阳极氧化技术能够较好地应用于工程实际。



图 15 二次硬质阳极氧化零件细节图

Fig.15 Detailed diagram of secondary hard anodizing part

4 结论

通过上述结果分析，得出结论如下：

(1) 硼酸-硫酸阳极氧化叠加硬质阳极氧化的二次硬质阳极氧化技术能够有效地降低硬质阳极氧化过程中发生烧损的风险。

(2) 在耐盐雾、耐磨以及硬度方面，硼酸-硫酸阳极氧化叠加硬质阳极氧化的二次硬质阳极氧化膜层表现出较好的性能。

(3) 在电化学测试方面，硼酸-硫酸阳极氧化叠加硬质阳极氧化的二次硬质阳极氧化膜层与普通硬质阳极氧化膜层性能接近，在低频处阻抗模值和自腐蚀电位方面其性能略优。

(4) 在微观结构方面，硼酸-硫酸阳极氧化叠加硬质阳极氧化的二次硬质阳极氧化膜层与普通硬质阳极氧化膜层基本相同，均为致密性多孔结构。

(5) 硼酸-硫酸阳极氧化叠加硬质阳极氧化的二次硬质阳极氧化技术能够有效应用于工程实际。

参考文献

[1] 李捷, 毕艳. 铝及铝合金硬质阳极氧化技术的发展[J]. 表面工程资讯, 2007, 7(1): 3-5.

[2] 王平, 魏晓伟. 阳极氧化中烧损行为及防止[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2006, 25(4): 41-43.

[3] 王平. 多孔型 Al₂O₃ 陶瓷膜阳极氧化制备技术研究[D]. 四川: 西华大学, 2007.

[4] 卢洁琴. 铝合金环保阳极氧化膜的制备及其力学性能研究[D]. 浙江: 中国计量大学, 2017.

[5] 盛曦霆. 铝合金表面硬质阳极氧化制备工艺及性能研究[D]. 吉林: 长春工业大学, 2022.

[6] 徐瑞东, 王军丽, 薛方勤, 等. 铝合金常温脉冲硬质阳极氧化膜性能的研究[J]. 材料保护, 2003, 36(9): 34-35, 43.

[7] 张胜宝, 师玉英, 张旭. 铝合金硬质阳极氧化工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(8): 43-46.