

铝合金表面梯度氧化层的构筑及其耐刮擦性能研究

张中泉^{1,2}, 丁世明², 胡樱², 王宗花^{1,*}

1. 青岛大学化学化工学院, 青岛 266071
2. 浙江建业幕墙装饰有限公司, 绍兴 312030

摘要: [目的] 针对铝合金材料在运输、组装及使用过程中发生的表面刮擦现象, 通过调控阳极氧化电压, 在铝合金表面构筑了梯度阳极氧化膜层, 以提升其耐刮擦性能。[方法] 采用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、表面轮廓仪、显微硬度计、划痕仪等手段, 分析了 2024 铝合金表面氧化层的相组成、微观形貌、表面粗糙度、硬度及耐刮擦性能。[结果] 所制备的阳极氧化膜表面形貌以纳米孔洞组成的群落结构为主, 且主要由非晶氧化铝相组成。对于恒定电压制备的阳极氧化膜而言, 随着电压从 20 V 升高至 60 V, 氧化膜层表面粗糙度 R_a 逐渐由 0.65 μm 增大至 1.32 μm , 平均显微硬度由 417 HV 降至 221 HV, 耐刮擦性能逐渐下降, 膜层剥落临界载荷由 20 N 降低至 12 N 左右。采用 20 V 至 60 V 梯度电压制备的阳极氧化膜具有最佳的耐刮擦性能, 划痕最大宽度仅为 0.211 mm, 膜层剥落临界载荷为 29.5 N。[结论] 通过改变阳极氧化电压, 可以制备出具有优异耐刮擦性能的铝合金阳极氧化膜, 这为铝合金表面刮擦防护提供了新的思路。

关键词: 铝合金; 阳极氧化; 梯度电压; 耐刮擦; 微观结构; 硬度

中图分类号: TG174.451

文献标志码: A

文章编号: 1004-227X(2026)04-0083-08

Fabrication of gradient oxide layer on aluminum alloy surface and study on its scratch resistance

ZHANG Zhongquan^{1,2}, DING Shiming², HU Ying², WANG Zonghua^{1,*}

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China
2. Zhejiang Jianye Curtain Wall Decoration Co., Ltd., Shaoxing 312030, China

Abstract: [Objective] Surface scratching often emerges during the transportation, assembly, and applications of aluminum alloy materials. A gradient anodic oxide film was fabricated on aluminum alloy through the regulation of anodizing voltage to improve its scratch resistance. [Method] The phase composition, microstructure, surface roughness, hardness, and scratch resistance of the anodic oxide layer on 2024 aluminum alloy surface were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), surface profilometry, microhardness testing, and scratch testing. [Result] The surface morphology of the anodic oxide film was dominated by a clustered structure composed of nanopores, and the oxide film primarily consisted of amorphous alumina phase. For the anodic oxide films prepared at constant voltages, increasing the oxidation voltage from 20 V to 60 V led to a gradual increase in surface roughness (R_a increased from 0.65 μm to 1.32 μm), a decrease in average microhardness from 417 HV to 221 HV, and a deterioration in scratch resistance, with the critical load for delamination decreasing from approximately 20 N to 12 N. The anodic oxide film prepared with a gradient voltage from 20 V to 60 V exhibited the optimal scratch resistance, with a maximum scratch width of only 0.211 mm and a critical delamination load of 29.5 N. [Conclusion] By adjusting the anodizing voltage, an anodic oxide film with excellent scratch resistance can be prepared on aluminum alloy. This study provides a new approach for enhancing the scratch protection of aluminum alloy surfaces.

Keywords: aluminum alloy; anodic oxidation; gradient voltage; scratch resistance; microstructure; hardness

铝合金因其优异的比强度、导电/导热性、可回收性等优点, 而被广泛用于空天、汽车、船舶、建筑、电子等各个领域^[1-3]。铝合金的广泛应用使其在服役过程中面临各种各样的工况环境。为了提升铝合金适应服役环境要求的能力, 通常需要对铝合金进行表面处理, 以赋予其更高的耐腐蚀、耐磨损、热控等性能。常见的铝合金表面处理技术有阳极氧化^[4]、微弧氧化^[5]、化学转化^[6], 以及电镀^[7]、化学镀^[8]、气相沉积^[9]等表面覆盖层技术。其中, 利用电化学阳极氧化法制备的氧化铝膜不仅可以为铝合金提供耐磨、耐腐蚀等

收稿日期: 2026-01-19 **修回日期:** 2026-03-21

第一作者: 张中泉(1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为金属表面处理及摩擦磨损。

通信作者: 王宗花(1964-), 女, 博士, 教授, 研究方向为纳米复合材料。

引用格式: 张中泉, 丁世明, 胡樱, 等. 铝合金表面梯度氧化层的构筑及其耐刮擦性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45(4): 83-90.

ZHANG Z Q, DING S M, HU Y, et al. Fabrication of gradient oxide layer on aluminum alloy surface and study on its scratch resistance [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45(4): 83-90.

防护性能,而且因为阳极氧化铝膜具有独特的微/纳结构,在生物医学、电子、传感等领域也得到了越来越重要的应用^[10]。

为了提升氧化膜的机械防护性能,研究人员开发了大量成熟的硬质阳极氧化工艺,包括硫酸、草酸、混合酸等体系,并且全面研究了阳极氧化参数对硬质氧化铝膜性能的影响^[11-15]。尽管硬质阳极氧化法可以制备具有较佳耐磨性的氧化膜,但是对膜层耐刮擦性能的研究相对不足。文献[16]基于刮痕硬度,研究了铝合金阳极氧化铝膜的耐刮擦性能及其在电子封装外壳上的应用。文献[17]研究了氧化电位对阳极氧化铝膜耐刮擦性能的影响,发现随着阳极氧化电位的降低,阳极氧化铝膜层与基材的附着力有所提高,从而提升了耐刮擦性能。此外,很多研究在阳极氧化铝膜外层覆盖额外防护层,以提高其耐刮擦性能^[18]。

阳极氧化铝膜的耐刮擦性能不仅与膜层硬度有关,也与膜层的抗冲击、强度、结合力等性能具有紧密联系。近些年,在材料表面结构梯度化研究中发现,材料表面梯度结构的合理设计是突破强塑性矛盾并显著提升材料强/硬度、塑性、耐磨性等力学性能的有效手段^[19]。考虑到良好的膜基结合力及梯度化的力学性能分布有可能是提升铝合金阳极氧化铝膜良好耐刮擦性能的途径,本文通过梯度调控阳极氧化电压来制备铝合金氧化膜层,并与恒压阳极氧化铝膜进行对比,旨在探索铝合金阳极氧化铝膜耐刮擦性能提升的新方法。

1 实验

1.1 铝合金及其前处理

实验样品为 2024 铝合金,其成分(以质量分数表示)包括 4.36% Cu、1.49% Mg、0.46% Mn、0.25% Fe、0.14% Si,以及少量的 Zn 和 Ti,其余为 Al。首先,通过线切割将铝合金制成 20 mm × 50 mm × 1 mm 的试样,然后进行前处理,流程如图 1 所示。依次采用 200、1 000 和 2 000 目的砂纸对铝合金表面进行抛光处理,将抛光后的样品置于纯净水中超声振荡 30 min,然后在碱溶液(含质量分数 10% 的 NaOH)中浸泡 5 min,用纯净水冲洗后再在酸洗溶液(含质量分数 10% 的 HCl)中浸泡 30 s,之后依次用纯净水冲洗、酒精冲洗,吹干待用。前处理后的典型样品见图 1。

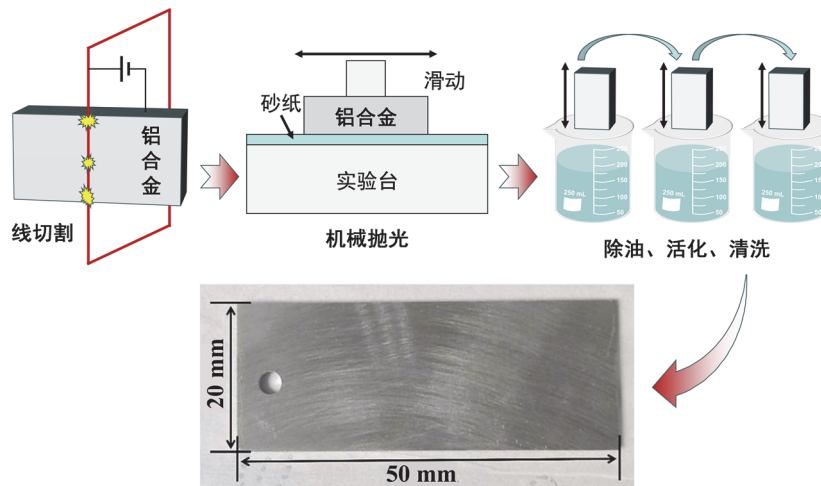


图 1 铝合金样品前处理流程及处理后的样品照片

Figure 1 Pretreatment process flow and photograph of pretreated aluminum alloy specimen

1.2 溶液组成及阳极氧化

阳极氧化液包含 50 g/L 酒石酸、20 g/L 草酸、20 g/L 硼酸和 15 g/L 柠檬酸,工作温度为 10 °C,氧化时间 100 min,阳极氧化电位分别为 20、30、40、50 和 60 V,以及在 20 ~ 60 V 梯度变化,所得到的样品分别标记为 1#、2#、3#、4#、5#及 6#。其中,6#样品的阳极氧化电压变化范围及时间为: 20 ~ 30 V, 40 min; 30 ~ 40 V, 30 min; 40 ~ 50 V, 20 min; 50 ~ 60 V, 10 min。每个电压范围内逐渐升高电压,阳极氧化电压与时间的关系如图 2 所示。

阳极氧化铝膜制备装置如图 3 所示,将阳极氧化所用溶液置于容量为 1 L 的不锈钢烧杯中。将不锈钢烧杯置于水浴温控箱内,并且以铜管围绕进行液冷,阳极氧化过程中采用机械搅拌装置进行搅拌。以不锈钢烧杯作为阴极,铝合金为阳极,使用直流稳压电源为阳极氧化过程供能。

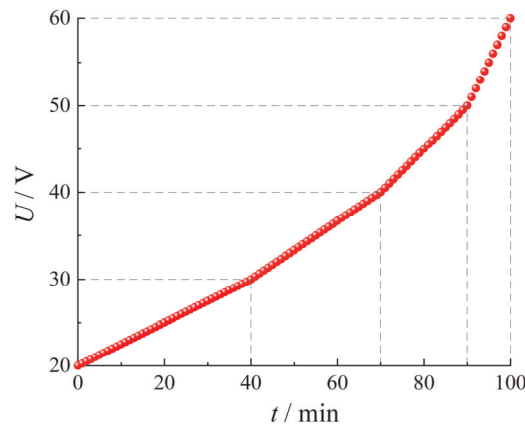


图2 6#样品阳极氧化时的电压-时间曲线

Figure 2 Variation of applied voltage with time during anodic oxidation of specimen 6#

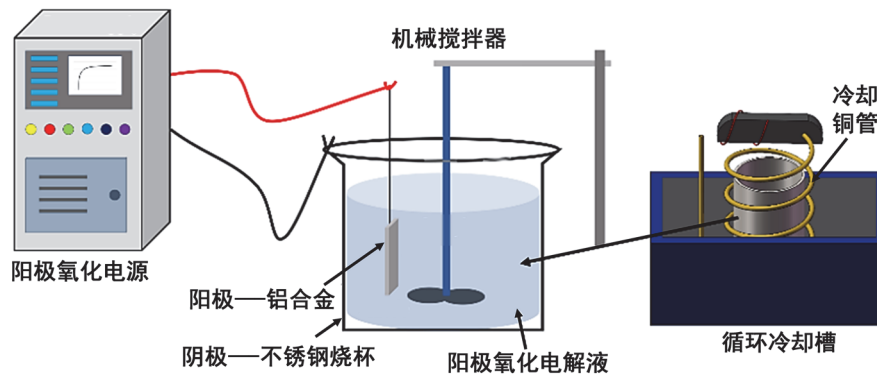


图3 铝合金表面梯度氧化层制备装置示意图

Figure 3 Schematic diagram of the device for preparation of gradient oxide layer on aluminum alloy

1.3 表面形貌及微观结构表征

采用日本理学 Ultima IV 型 X 射线衍射仪 (XRD) 表征样品的相组成及晶体结构, 铜靶, $K\alpha$ 辐射 (波长 0.141 5 nm), 2θ 范围为 $10^\circ \sim 80^\circ$, 扫描速率 $5^\circ/\text{min}$ 。采用德国蔡司 Sigma 300 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品表面的微观形貌。采用美国 KLA Tencor P-6 型表面轮廓仪测试样品的表面粗糙度 Ra 。

1.4 硬度及刮擦性能测试

采用显微维氏硬度计检测阳极氧化后样品的表面硬度, 载荷 0.98 N, 载荷保持时间为 15 s。采用兰州中科凯华科技有限公司的 WS-2005 型涂层附着力自动划痕仪来测试阳极氧化膜的耐刮擦性能。如图 4 所示, 测试前将待测试样固定在可移动滑板上, 设置加载载荷使得锥形金刚石压头压入样品表面, 沿某个方向匀速移动, 载荷逐渐增加, 从而在样品表面形成一个由浅至深的刮擦痕迹, 设备通过法向及横向应力传感器自动记录刮擦过程中的载荷及摩擦力。本实验中设置加载范围为 $0 \sim 40$ N, 对每个样品进行 3 次划痕测试。刮擦试验结束后, 在奥林巴斯 GX51 金相显微镜下对样品表面的刮擦痕迹进行分析。

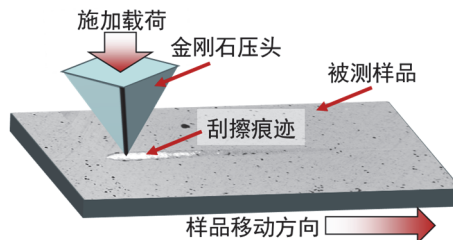


图4 耐刮擦性能测试示意图

Figure 4 Schematic diagram of scratch resistance testing

2 结果与讨论

2.1 表面形貌及结构

图 5 给出了 6 个样品表面低放大倍数下的 SEM 图像。在 20 V 氧化电压条件下, 1#铝合金样品表面仍存在机械抛光痕迹; 当电压升至 30 V 及 40 V 时, 2#与 3#样品表面的机械抛光痕迹基本消失, 表面光滑平整;

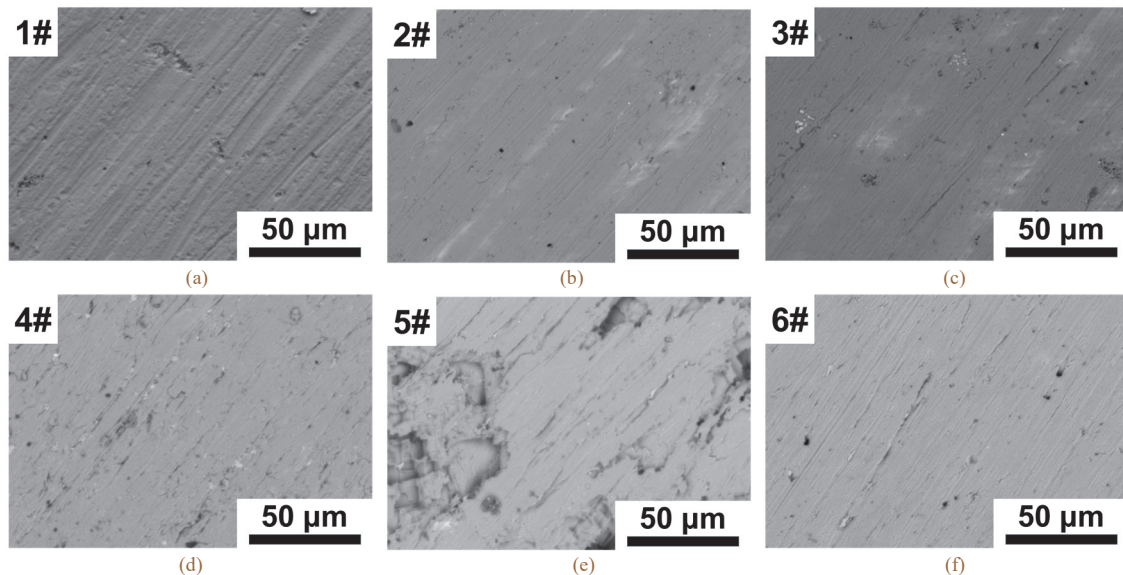


图5 阳极氧化样品表面形貌的低倍 SEM 图像

Figure 5 Low-magnification SEM images of anodic oxidation specimens

在 50 V 电压下, 4#样品表面相比 2#和 3#样品略微粗糙; 而当电压达到 60 V 时, 5#样品表面粗糙程度更大, 样品表面出现大面积的凹坑; 对于 20~60 V 梯度电压制备的 6#样品, 其表面与 2#样品类似。

图 6 给出了样品表面形貌的高倍 SEM 图像。所有样品表面均呈现出多孔结构, 且孔径在几十纳米左右。此外, 1#、2#、3#及 6#样品表面存在尺寸为几百纳米的群落结构, 群落边缘使表面呈现出网状结构(见图 6a、6b、6c 与 6f)。而当阳极氧化电压较高时, 该群落结构在 4#及 5#样品表面消失(见图 6d 与图 6e), 尤其是 5#样品, 表面变得松散, 这是由于高电压下阳极氧化反应过于剧烈, 使得表面氧化层无法形成相对有序的纳米孔隙结构, 而这种松散的表面结构将会降低样品表面的力学性能。

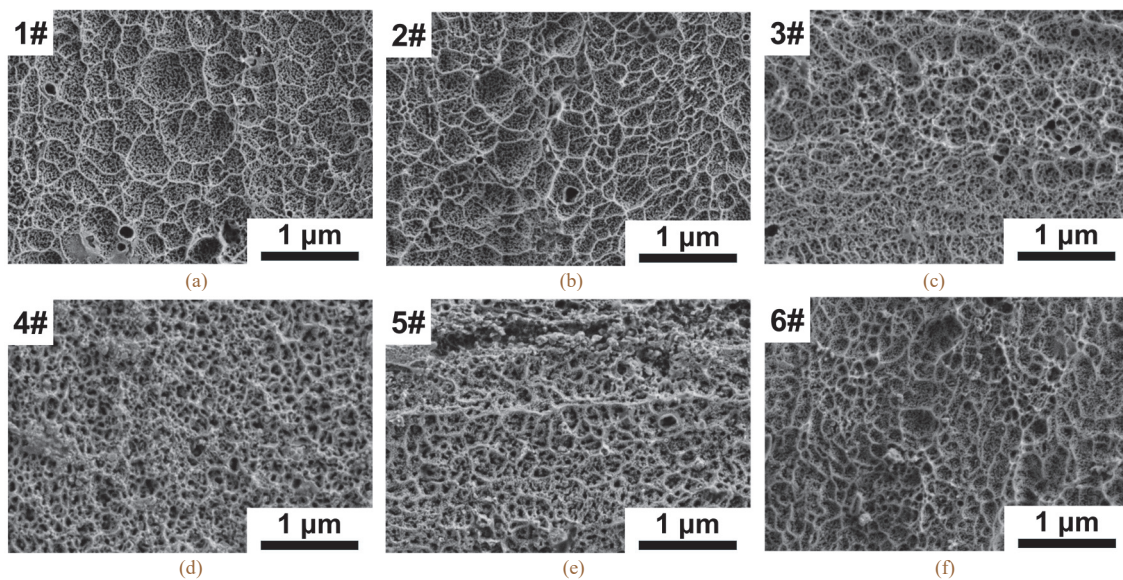


图6 阳极氧化样品表面形貌的高倍 SEM 图像

Figure 6 High-magnification SEM images of anodic oxidation specimens

阳极氧化铝合金样品的表面粗糙度(R_a)如图 7 所示。当电压为 20 V 时, 1#样品的 R_a 为 0.65 μm 。随着电压升高, 样品的表面粗糙度逐渐增大, 60 V 时所得 5#样品的表面粗糙度可达 1.32 μm , 说明阳极氧化的加剧会令表面粗糙度增大。而相比于恒电位氧化, 经梯度电位阳极氧化的 6#样品的 R_a 仅为 0.74 μm , 介于 1#样品与 2#样品之间。可见, 梯度电位阳极氧化处理后, 样品的表面粗糙度并未明显增大。

2.2 相组成

由图 8 可见, 所有样品的 XRD 谱图中都仅出现 Al 的衍射峰, 而没有氧化铝的衍射峰。这是由于在所采用的电解液体系及电压范围内制备的氧化铝膜层为非晶结构。上述结果也表明在本文的实验条件下, 铝阳极氧化膜的相结构不因电压的变化而变化。

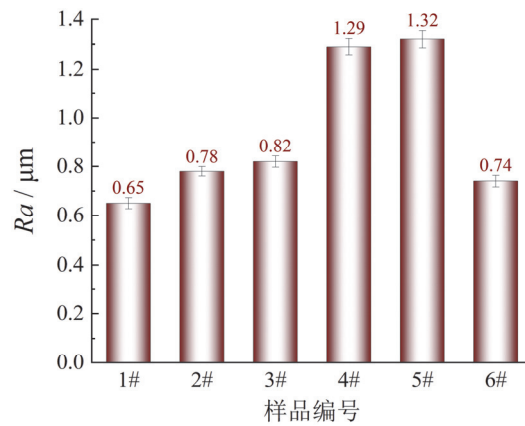


图7 阳极氧化样品的表面粗糙度

Figure 7 Surface roughness of anodic oxidation specimens

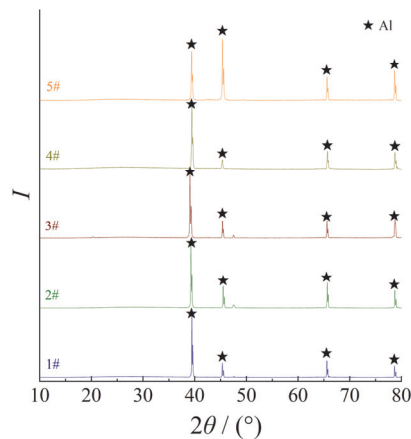


图8 阳极氧化样品的XRD表征结果

Figure 8 XRD characterization results of anodic oxidation specimens

2.3 显微硬度

不同条件制备的阳极氧化铝合金样品的显微硬度测试结果如图9所示。当阳极氧化电压由20 V升高至40 V时,样品的平均显微硬度由417 HV缓慢降至380 HV,而当氧化电压继续升高至60 V时,样品表面的平均显微硬度大幅降至221 HV。可见样品显微硬度随氧化电压的升高而不断降低。而当阳极氧化电压在20~60 V内梯度变化时,所制备的6#样品的显微硬度保持在408 HV,相比1#样品并无明显下降。

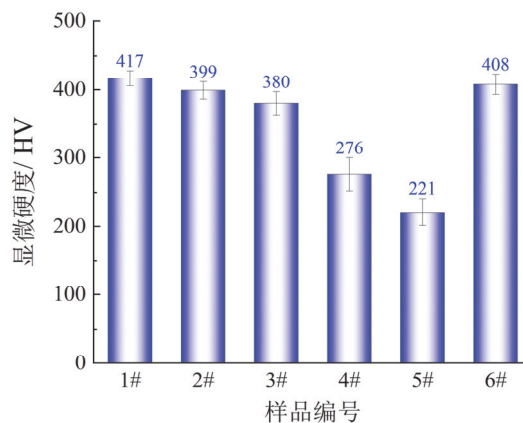


图9 阳极氧化样品的显微硬度

Figure 9 Microhardness of anodic oxidation specimens

2.4 耐刮擦性能

在刮擦试验过程中,所施加的法向载荷不断增大,当载荷达到某一临界值时,阳极氧化膜层可能发生破损甚至剥落,膜层下方的铝合金基材会暴露并被金刚石压头刮擦。由于临界载荷前后金刚石压头刮擦了不同材质的表面,横向摩擦力将会发生变化,因而可以通过设备记录的摩擦力变化来判定导致膜层破损的临界法向载荷(σ_c)。显然,临界载荷越高,说明膜层抵抗刮擦的能力越强。

图 10 给出了样品在刮擦试验过程中测得的摩擦力曲线，摩擦力突变位置用虚线圆圈标出，摩擦力突变所对应的载荷即为临界载荷。1#、2#及 3#样品的摩擦力突变位置接近，对应的临界载荷在 20 N 左右，4#及 5#样品的临界载荷则大幅下降，尤其是 5#样品，其临界载荷小于 10 N。而通过梯度电压变化所制备的 6#样品的临界载荷最大，接近 30 N。通过刮擦试验的临界载荷分析可以看到，对于恒定电压制备的阳极氧化膜层，电压的升高将会降低临界载荷，即膜层的抗刮擦能力变差。这种变化的原因与摩擦表面硬度随阳极氧化电压变化的原因类似，都是因为更高的氧化电压导致膜层孔洞结构尺寸更大。值得注意的是，尽管梯度电压制备的氧化膜层硬度并非最高，但其在刮擦试验中的临界载荷最高，即具有最佳的耐刮擦性能。

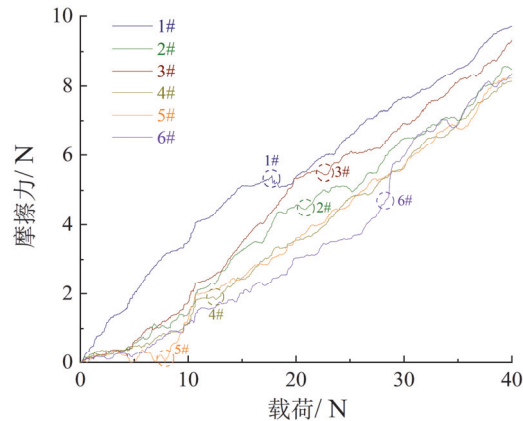


图 10 各阳极氧化样品在刮擦试验过程中所测摩擦力与载荷的关系

Figure 10 Relationship between frictional force and normal load during scratch tests of anodic oxidization specimens

根据上述刮擦试验中的摩擦力与法向载荷的关系，可以计算出刮擦试验中摩擦因数的变化规律，结果如图 11 所示。1#样品的摩擦因数较大，且随着载荷的增大而逐渐降低，当氧化膜层破损后趋于平稳，说明在低电压下制备的阳极氧化膜层的摩擦力高于铝合金基材的摩擦力。而在其他电压下所制备的样品的摩擦因数变化都呈现先降低、后升高、最后趋于平稳的过程。所有样品在刮擦试验最后阶段的摩擦因数都接近，这是由于试验最后阶段，膜层均被破坏，发生的是金刚石压头在铝合金基材上的刮擦。初始阶段摩擦因数的差异，则主要是由阳极氧化膜层之间的刮擦行为不同所致，这源于膜层的微观结构不同及硬度差异导致膜层抗刮擦破损的能力不同。

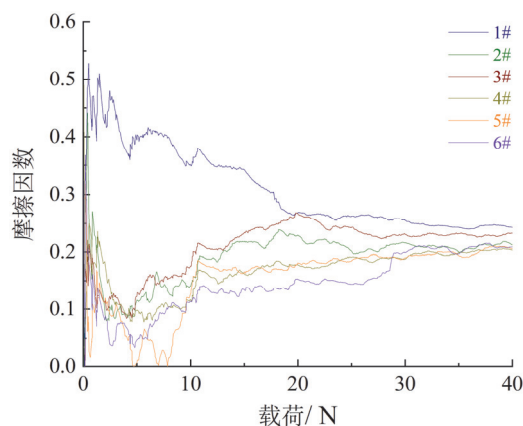


图 11 刮擦试验过程中阳极氧化样品的摩擦因数与载荷的关系

Figure 11 Relationship between friction coefficient and normal load during scratch tests of anodic oxidization specimens

2.5 刮擦痕迹微观分析

经刮擦测试后，利用金相显微镜对样品表面的刮擦痕迹进行观察，如图 12 所示。阳极氧化样品表面在金相显微镜下呈现灰色，当阳极氧化膜在刮擦试验中被剥离后，铝合金基材会裸露而显现出具有金属光泽的银白色。对比可见，当电压由 20 V 上升至 30 V 时，银白色出现的位置更靠右侧，说明样品表面膜层被剥落的时间更晚，30 V 和 40 V 电压所制备的样品表面膜层被剥落的位置相近。而当电压升至 50 V 和 60 V 时，表面氧化膜层被快速剥落。在电压由 20 V 梯度变化至 60 V 的条件下所制备的样品表面氧化膜层的剥落位置最靠右侧，说明其被剥落的时间最晚。

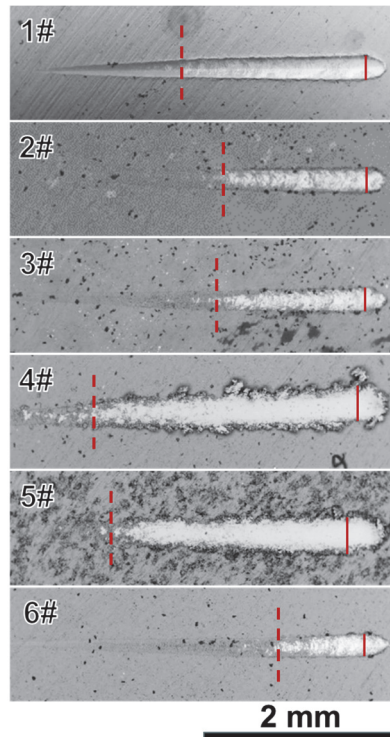


图 12 各阳极氧化样品刮擦痕迹的金相照片

Figure 12 Metallographs of scratch tracks of anodic oxidation specimens

根据样品表面刮擦痕迹，可以测得剥落起始位置及划痕最大宽度，以表征氧化膜层的耐刮擦性能。由图 13 可见，当电压为 20、30 和 40 V 时，所得到的样品的剥落起始位置为 1.80~2.30 mm，划痕最大宽度在 0.25~0.27 mm 之内，耐刮擦性能相近。而当电压升至 50 V 及 60 V 时，样品的剥落起始位置分别为 0.84 mm 和 1.08 mm，划痕最大宽度分别为 0.377 mm 和 0.396 mm，耐刮擦性能大幅度降低。对于电压梯度变化制备的样品，其膜层剥落起始位置为 2.82 mm，划痕最大宽度为 0.236 mm，表现出最佳的耐刮擦性能。

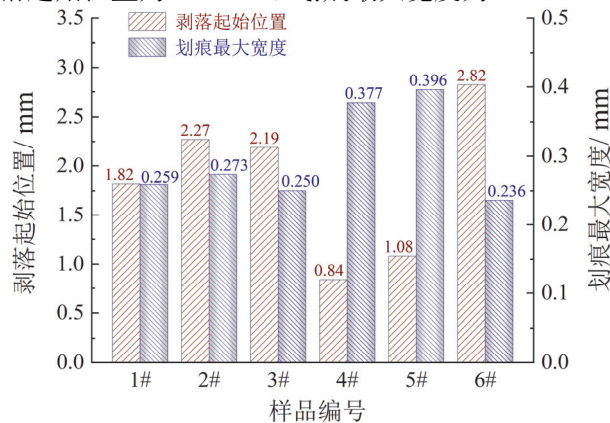


图 13 各样品表面阳极氧化膜剥落的起始位置及划痕最大宽度

Figure 13 Starting location of the exfoliation of anodic oxide films and the maximum width of scratch track for each anodic oxidation specimen

3 结论

本文采用梯度变化的阳极氧化电压，在铝合金表面构筑了梯度阳极氧化膜，提升了表面耐刮擦性能。具体研究结论包括：通过恒电压制备的阳极氧化膜，其表面形貌均由纳米孔洞组成，随着电压的升高，氧化膜层孔洞的尺寸增大，表面粗糙度也逐渐增大，氧化膜主要由非晶氧化铝相组成，其显微硬度平均值由 20 V 时的 417 HV 降至 60 V 时的 221 HV，且耐刮擦性能逐渐下降，膜层剥落载荷由 20 N 降低至 12 N 左右；而采用 20 V 至 60 V 梯度电压制备的阳极氧化膜，其表面纳米孔洞尺寸、粗糙度及显微硬度均与低恒定电压下制备的氧化膜接近，具有最佳的耐刮擦性能，划痕最大宽度仅为 0.236 mm，膜层剥落所对应的临界载荷为 29.5 N。本研究为铝合金表面耐刮擦性能调控及表面防护提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22 (5): 68-75.
GUAN R G, LOU H F, HUANG H, et al. Development of aluminum alloy materials: current status, trend, and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22 (5): 68-75.
- [2] 赵吉峰, 孙霄霄, 董恩昌. 铝合金材料发展现状及趋势展望[J]. 中国金属通报, 2024 (17): 13-15.
ZHAO J F, SUN X X, DONG E C. Current status and trend prospects of development of aluminum alloy materials [J]. China Metal Bulletin, 2024 (17): 13-15.
- [3] 程思梦, 冉红卫, 李德奇, 等. 铝合金发展现状与趋势分析[J]. 铝加工, 2025 (4): 1-4.
CHENG S M, RAN H W, LI D Q, et al. Analysis of the development status and trends of aluminium alloy [J]. Aluminium Fabrication, 2025 (4): 1-4.
- [4] LI C Y, NI Y L, GONG J J, et al. A review: research progress on the formation mechanism of porous anodic oxides [J]. Nanoscale Advances, 2022, 4 (2): 322-333.
- [5] CLYNE T W, TROUGHTON S C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals [J]. International Materials Reviews, 2019, 64 (3): 127-162.
- [6] 郭蓓, 李冬冬, 束俊杰, 等. 铝合金表面化学转化膜制备技术的研究进展[J]. 材料保护, 2021, 54 (9): 106-113.
GUO B, LI D D, SHU J J, et al. Research progress in preparation technology of chemical conversion coating on aluminum alloy surface [J]. Materials Protection, 2021, 54 (9): 106-113.
- [7] 李军. 铝及铝合金的电镀工艺综述[J]. 表面技术, 2000, 29 (4): 3-5.
LI J. A summary of the aluminum and aluminum alloy surface disposal [J]. Surface Technology, 2000, 29 (4): 3-5.
- [8] 张天顺, 张晶秋, 张琦. 铝及铝合金化学镀 Ni-P 合金工艺研究[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25 (8): 41-43.
ZHANG T S, ZHANG J Q, ZHANG Q. Study on the process of electroless Ni-P alloys plating on aluminum and aluminum alloy [J]. Electroplating & Finishing, 2006, 25 (8): 41-43.
- [9] 张际亮, 酆剑, 沃银花, 等. 铝表面化学气相沉积 SiO_x 膜层的显微结构和性能[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14 (6): 961-966.
ZHANG J L, LI J, WO Y H, et al. Microstructure and properties of SiO_x film on aluminum substrate prepared by CVD process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14 (6): 961-966.
- [10] JANI A M M, LOSIC D, VOELCKER N H. Nanoporous anodic aluminium oxide: advances in surface engineering and emerging applications [J]. Progress in Materials Science, 2013, 58 (5): 636-704.
- [11] 邓型深, 林雲松, 黄宏庆, 等. 草酸-柠檬酸中 6061 铝合金的阳极氧化[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38 (9): 417-420.
DENG X S, LIN Y S, HUANG H Q, et al. Anodization of 6061 aluminum alloy in oxalic acid-citric acid electrolyte [J]. Electroplating & Finishing, 2019, 38 (9): 417-420.
- [12] 吕弛, 张锰, 岳珊, 等. 硫酸阳极氧化对 7A65 航空铝合金疲劳性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43 (2): 18-26.
LYU C, ZHANG M, YUE S, et al. Effect of sulfuric acid anodization on fatigue property of 7A65 aluminum alloy for aviation [J]. Electroplating & Finishing, 2024, 43 (2): 18-26.
- [13] 戴一帆, 沈士泰, 卢洁琴, 等. 2024 铝合金混合酸阳极氧化[J]. 表面技术, 2018, 47 (1): 198-202.
DAI Y F, SHEN S T, LU J Q, et al. 2024 aluminum alloy anodic oxidation in mixed acid [J]. Surface Technology, 2018, 47 (1): 198-202.
- [14] 满成, 王孟斐, 颜晴, 等. DL-苹果酸对 7075 铝合金硬质阳极氧化膜结构及耐磨蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2025, 54 (18): 27-36.
MAN C, WANG M F, YAN Q, et al. Effect of DL-malic acid on hard anodic film structure and wear and corrosion resistance of 7075 aluminum alloy [J]. Surface Technology, 2025, 54 (18): 27-36.
- [15] 任玉宝, 祝哮, 王东辉, 等. 有机酸对硫酸阳极氧化膜性能影响研究[J]. 有色金属加工, 2024, 53 (4): 63-66.
REN Y B, ZHU X, WANG D H, et al. Research on effect of organic acids on performance of sulfuric acid anodized film [J]. Nonferrous Metals Processing, 2024, 53 (4): 63-66.
- [16] SUNDARARAJAN M, DEVARAJAN M, JAAFAR M. Investigation of surface and mechanical properties of Anodic Aluminium Oxide (AAO) developed on Al substrate for an electronic package enclosure [J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 401: 126273.
- [17] CHOUDHARY R K, MISHRA P, KAIN V, et al. Scratch behavior of aluminum anodized in oxalic acid: effect of anodizing potential [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 283: 135-147.
- [18] SUNDARARAJAN M, DEVARAJAN M, JAAFAR M. A novel sealing and high scratch resistant nanorod Ni-P coating on anodic aluminum oxide [J]. Materials Letters, 2021, 289: 129425.
- [19] LU K. Making strong nanomaterials ductile with gradients [J]. Science, 2014, 345 (6203): 1455-1456.

【 编辑: 温靖邦 】