

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.12.003

## 建筑铝材表面处理及其性能研究

张境洁<sup>1\*</sup>, 李云红<sup>2</sup>

(1. 承德石油高等专科学校 建筑工程系, 河北 承德 067000; 2. 河北民族师范学院 资产与实验室管理中心, 河北 承德 067000)

**摘要:** 选用建筑铝材 6063-T6 作为基体, 分别采用硬质阳极氧化和草酸阳极氧化进行表面处理。比较了未处理及处理后试样的微观形貌、物相、显微硬度、耐磨性能和耐蚀性能, 结果表明: 硬质阳极氧化和草酸阳极氧化处理后铝材的微观形貌和表面粗糙度与未处理铝材相比有所不同, 硬质氧化膜与草酸氧化膜相比较为平整致密。未处理铝材的表面成分以 Al 元素为主, 主要物相为 Al 相, 处理后铝材的表面成分以 Al 和 O 元素为主, 主要物相为 Al 相、 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  相和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  相。硬质阳极氧化和草酸阳极氧化处理后铝材的显微硬度较未处理铝材分别提高了约 274 HV、191 HV, 摩擦系数明显减小, 耐蚀性能有较大程度提高。硬质阳极氧化是提高建筑铝材表面性能的有效措施, 在提高建筑铝材的耐蚀性能方面, 草酸阳极氧化替代硬质阳极氧化具有可行性。

**关键词:** 表面处理; 建筑铝材; 耐磨性能; 耐蚀性能; 硬质阳极氧化; 草酸阳极氧化

中图分类号: TG174

文献标识码: A

## Surface Treatment of Construction Aluminum and Its Performance

ZHANG Jingjie<sup>1</sup>, LI Yunhong<sup>2</sup>

(1. Department of Architectural Engineering, Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China;  
2. Center of Asset and Laboratory Management, Hebei Normal University for Nationalities, Chengde 067000, China)

**Abstract:** Construction aluminum 6063-T6 was selected as the matrix, and it was treated by hard anodic oxidation and oxalic acid anodic oxidation respectively. The microstructure, phase composition, microhardness, wear resistance and corrosion resistance of untreated and treated sample were investigated. The results showed that there was some differences in the microstructure and surface roughness of the aluminum treated by hard anodic oxidation and oxalic acid anodic oxidation respectively, and hard oxide film was smoother and denser than that of oxalic acid oxide film. The surface composition of untreated aluminum was mainly Al element, and the main phase was Al phase. The surface composition of treated aluminum was mainly Al and O element, and the main phase was Al,  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  phase. Compared with untreated aluminum, the microhardness of the aluminum treated by hard anodic oxidation and oxalic acid anodic oxidation was increased by about 274 HV and 191 HV respectively, the friction coefficient decreased obviously and the corrosion resistance was obviously improved. Hard anodic oxidation was an effective measure to improve the surface performance of construction aluminum. In terms of improving the corrosion resistance of construction aluminum, oxalic acid anodic oxidation was feasible to replace hard anodic oxidation.

收稿日期: 2020-11-07

修回日期: 2020-11-17

作者简介: 张境洁(1987—), 硕士, 讲师, email: chengde\_5535@126.com

基金项目: 河北省高等教育学会课题支撑计划(GJXH2017-185)

**Keywords:** surface treatment; construction aluminum; wear performance; corrosion resistance; hard anodic oxidation; oxalic acid anodic oxidation

铝材具有良好的物理化学和力学性能,在建筑、汽车、航空航天和化工等行业中应用广泛。以建筑行业为例,铝材可以用于制作扣板、浮雕等装饰件以及台架、支撑架等框架结构。无论是装饰件还是框架结构,对铝材的表面性能(如耐磨性能、耐蚀性能等)都有较高要求<sup>[1-2]</sup>。为了提高铝材的表面性能,通常采用阳极氧化工艺进行表面处理。

目前,以提高铝材的耐磨性能和耐蚀性能作为首要目标进行了很多关于阳极氧化工艺的研究<sup>[3-6]</sup>,但绝大多数是针对某一种阳极氧化工艺进行研究,最终得到最佳的工艺条件<sup>[7-8]</sup>。针对同一种铝材,采用两种乃至多种阳极氧化工艺进行表面处理,并对处理后试样的性能进行比较的报道较少。为此,笔者选用建筑铝材 6063-T6 作为基体,分别采用硬质阳极氧化和草酸阳极氧化进行表面处理,并比较了未处理及处理后试样的微观形貌、物相、显微硬度、耐磨性能和耐蚀性能,以期为提高建筑铝材的表面性能提供参考。

1 实验

1.1 基体材料和试剂

基体为建筑行业常用铝材 6063-T6,裁切成 40 mm×25 mm×2 mm 的试样,依次进行打磨、除油、酸洗、水洗和烘干处理。试剂选用分析纯氢氧化钠、碳酸钠、无水乙醇、硫酸和草酸等。

1.2 表面处理实验流程

处理后的试样分成三组,第一组不进行表面处理,以下简称 USTS。第二组浸入硫酸电解液中,采用硬质阳极氧化进行表面处理,以下简称 HATS。第三组浸入草酸电解液中,采用草酸阳极氧化进行表面处理,以下简称 OATS。表 1 为电解液成分和阳极氧化工艺条件。

1.3 表征与测试

1.3.1 微观形貌

采用扫描电子显微镜(Hitachi S-3400N)对未处理及处理后试样的微观形貌进行表征,并用便携式粗糙度仪(Mitutoyo SJ-210)测量未处理及处理后试样的表面粗糙度。每个试样选取 3 个点,测量结果

表 1 电解液成分和阳极氧化工艺条件

Tab.1 Electrolyte composition and anodic oxidation process conditions

工艺条件	电解液成分/ (g·L <sup>-1</sup> )	温度/°C	阳极电流密度/ (A·dm <sup>-2</sup> )
硬质阳极氧化	硫酸 200	5	2.5
草酸阳极氧化	草酸 50	15	1.5

取均值。

1.3.2 表面成分和物相

采用 X 射线能谱仪(AZtec X-Max50)对未处理及处理后试样的表面成分进行表征,并用 X 射线衍射仪(Bruker D8 Advance)对未处理及处理后试样的物相进行分析,测试角度为 20~90°,扫描速度设置 8 °/min。

1.3.3 显微硬度

采用维氏硬度计(MV-TEST1000)测试未处理及处理后试样的显微硬度,实验载荷为 0.49 N,保载时间 10 s。每个试样选取 3 个点,测量结果取均值。

1.3.4 耐磨性能

采用微型摩擦磨损试验机进行对磨实验,实验中不加润滑介质,载荷为 1.96 N,相对转速 100 r/min。测试未处理及处理后试样的摩擦系数,同时采用扫描电子显微镜观察磨损表面形貌。

1.3.5 耐蚀性能

采用电化学分析仪(CHI 600E)测试未处理及处理后试样的电化学阻抗谱,待开路电位达到稳定状态再进行测试,电解液为 3.5 %氯化钠溶液,外加激励信号幅值为 10 mV,测试的频率为 100 kHz~10 mHz。

2 结果与分析

2.1 微观形貌

图 1 所示为未处理及处理后试样的微观形貌。在 USTS 表面可以观察到打磨痕迹和形状不规则的剥落坑。HATS 和 OATS 表面都没有明显的磨痕,呈多孔形貌的氧化膜完全覆盖了铝基体。将图 1(b)和 1(c)进行对照,发现硬质氧化膜与草酸氧化膜的形貌特征没有显著差异。相比较而言,硬质氧化膜

较平整致密。

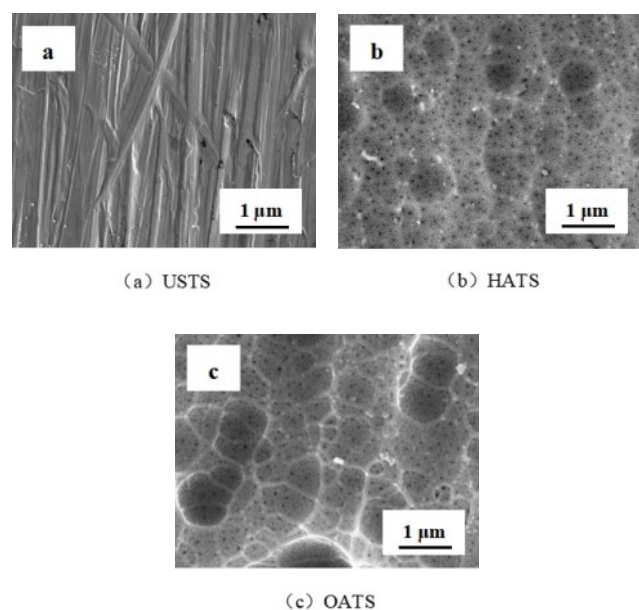


图1 未处理及处理后试样的微观形貌

Fig.1 Micromorphology of untreated and treated samples

表2所示为未处理及处理后试样的表面粗糙度测量结果。USTS和HATS、OATS的表面粗糙度分别为0.412 μm、0.378 μm、0.375 μm。与USTS相比，HATS和OATS的表面粗糙度略有降低，但降低的幅度不大。这表明采用阳极氧化进行表面处理对铝基体的微观平整度没有显著性影响。

表2 未处理及处理后试样的表面粗糙度

Tab.2 Surface roughness of untreated and treated sample

试样	表面粗糙度/μm			
	测量值			均值
USTS	0.402	0.411	0.417	0.412
HATS	0.383	0.376	0.374	0.378
OATS	0.384	0.371	0.369	0.375

## 2.2 表面成分和物相

对未处理及处理后试样的表面成分(见表3)进行分析,得知USTS的表面成分以Al元素为主,其质量分数接近88%。HATS的表面成分以Al和O元素为主,两者的质量分数在36%~41%范围内,另外还有一定的C和S元素。OATS的表面成分同样是以Al和O元素为主,也含有一定的C和S元素,分析认为,HATS和OATS中含有的S元素都源于电解液,而C元素可能是试样表面发生吸附

所致。

表3 未处理及处理后试样的表面成分

Tab.3 Surface composition of untreated and treated sample

试样	元素组成及质量分数/%			
	Al	O	C	S
USTS	87.68	4.08	8.24	—
HATS	36.17	40.92	11.86	11.05
OATS	37.42	39.25	13.59	9.74

图2所示为未处理及处理后试样的XRD图谱。可以发现USTS、HATS和OATS的XRD图谱中都有多个较为明显的衍射峰,其中Al的衍射峰强度最高。USTS的主要物相为Al相,而HATS和OATS的主要物相与USTS有所不同,除了Al相,两者都含有 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相和 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相。这是由于铝基体浸入电解液中在外加电场的作用下表面原位形成氧化膜,该氧化膜主要成分为铝的氧化物<sup>[9-10]</sup>。XRD图谱显示的结果与表面成分分析结果基本一致。

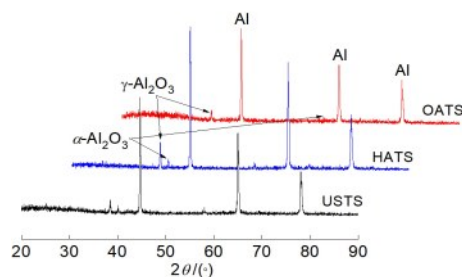


图2 未处理及处理后试样的XRD图谱

Fig.2 XRD pattern of untreated and treated sample

## 2.3 显微硬度和耐磨性能

表4所示为未处理及处理后试样的显微硬度测量结果。USTS和HATS、OATS的显微硬度分别为81.9 HV、355.6 HV、273 HV,与USTS相比,HATS的显微硬度提高了约274 HV,OATS的显微硬度提高了约191 HV。其原因在于,硬质阳极氧化是在较低的电解液温度下进行,形成的氧化膜结构发生了变化,表现为阻挡层厚度远大于多孔层厚度,单元胞孔的壁面也较厚<sup>[11]</sup>,因此具有良好的抵抗硬质物体压入其表面的能力以及在外力作用下抵抗局部变形的能力。

图3给出了未处理及处理后试样的摩擦系数与显微硬度的关系。可以发现USTS的显微硬度最

表 4 未处理及处理后试样的显微硬度

Tab.4 Microhardness of untreated and treated sample

试样	显微硬度/HV			
	测量值			均值
USTS	83.7	82.4	79.6	81.9
HATS	362.5	350.6	353.8	355.6
OATS	277.4	271.6	269.8	273

低,其摩擦系数最大。HATS 的显微硬度最,其摩擦系数最小。材料的摩擦系数与耐磨性能之间存在密切关系,一般来说,摩擦系数越小,意味着材料具有良好的耐磨性能<sup>[12-13]</sup>。而摩擦系数与材料的结构、微观平整度和显微硬度等因素有关,在微观平整度无较大差异的情况下,材料的结构和显微硬度往往是影响其摩擦系数的重要因素。HATS 特殊的结构使其具有更高的显微硬度,从而表现出良好的耐磨性能。

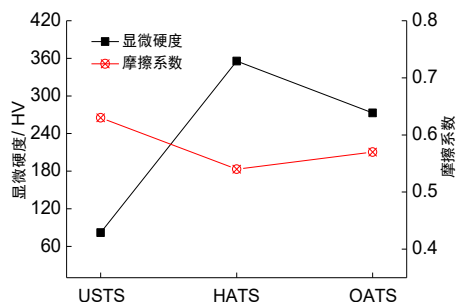


图 3 未处理及处理后试样的摩擦系数与显微硬度的关系

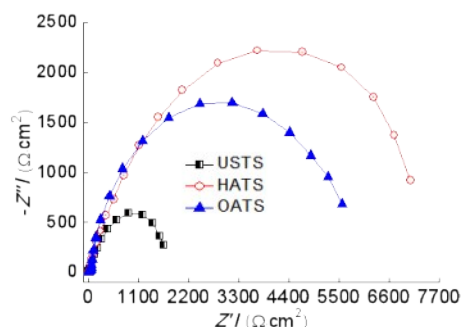
Fig.3 Relationship between the coefficient of friction and microhardness of untreated and treated sample

## 2.4 耐蚀性能

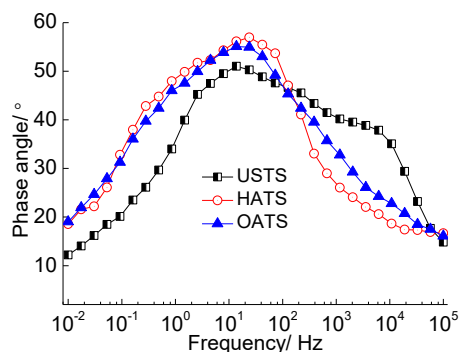
图 4 所示为未处理及处理后试样的电化学阻抗谱。Nyquist 图显示 USTS 的容抗弧半径最小, HATS 的容抗弧半径最大, OATS 的容抗弧半径介于 USTS 和 HATS 之间, 但是与 HATS 相差不大。容抗弧半径可以反映材料的耐蚀性能优劣, 一般来说, 容抗弧半径越大, 表明对电荷传输的阻碍越强, 对应的试样具有良好的耐蚀性能<sup>[14]</sup>。

Bode 图显示 USTS 的最大相位角为  $51^\circ$ , HATS 和 OATS 的最大相位角分别达到  $57^\circ$ 、 $55^\circ$ 。最大相位角同样可以反映材料的耐蚀性能<sup>[15]</sup>, 一般来说, 最大相位角越大, 意味着材料表面较为均匀, 具有良好的耐蚀性能。

综上所述, 本实验条件下 HATS 具有更好的耐



(a) Nyquist 图



(b) Bode 图

图 4 未处理及处理后试样的电化学阻抗谱

Fig.4 Electrochemical impedance spectrum of untreated and treated sample

磨性能和耐蚀性能, 较 USTS 有很大程度提高, 进一步证实了硬质阳极氧化是提高建筑铝材耐磨性能和耐蚀性能的有效措施。OATS 的耐磨性能较 USTS 也有较大程度提高, 但是与 HATS 相比存在差距。OATS 的耐蚀性能明显好于 USTS, 与 HATS 相比略有下降。在提高建筑铝材的耐磨性能方面, 草酸阳极氧化无法替代硬质阳极氧化, 但是在提高建筑铝材的耐蚀性能方面, 草酸阳极氧化替代硬质阳极氧化具有可行性。

## 3 结论

(1) 与未处理铝材相比, 硬质阳极氧化和草酸阳极氧化处理后铝材的微观形貌有所不同, 表面粗糙度略有降低, 表面成分和物相明显不同, 摩擦系数明显减小, 耐磨性能和耐蚀性能都有较大程度提高。

(2) 硬质阳极氧化是提高建筑铝材表面性能的有效措施, 硬质阳极氧化处理后铝材具有更好的耐磨性能和耐蚀性能。草酸阳极氧化处理后铝材的耐蚀性能与硬质阳极氧化处理后铝材相比略有下降,



在提高建筑铝材的耐蚀性能方面,草酸阳极氧化替代硬质阳极氧化具有可行性。

## 参考文献

- [1] 李宾,周桓竹,苏学伟,等. 铝合金建筑材料的发展现状及应用[J]. 科技视界, 2018(14):154-155.  
Li B, Zhou H Z, Su X W, et al. The development status and application of aluminum alloy building materials[J]. Science & Technology Vision, 2018(14): 154-155(in Chinese).
- [2] 豆杰, 刘纪伟. 浅谈铝合金材料及其热处理技术[J]. 中国金属通报, 2019(8): 31-32.  
Dou J, Liu J W. Brief discussion on aluminum alloy material and its heat treatment technology[J]. China Metal Bulletin, 2019(8): 31-32(in Chinese).
- [3] Wang W, Dong P, Wang H, et al. Synergistic corrosion inhibition effect of molybdate and phosphate ions for anodic oxidation film formed on 2024 aluminum alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science Edition), 2019(34): 426-432.
- [4] Leandro G R, Lorena G S, Pedro J A, et al. Assessment of the corrosion resistance of self-ordered anodic aluminum oxide (AAO) obtained in tartaric-sulfuric acid (TSA)[J]. Surface and Coatings Technology, 2020(399): 126-131.
- [5] Li J G, Wei H Y, Zhao K, et al. Effect of anodizing temperature and organic acid addition on the structure and corrosion resistance of anodic aluminum oxide films[J]. Thin Solid Films, 2020(713):138-149.
- [6] 张宇, 王军, 于贇, 等. 铝合金阳极氧化膜耐蚀性的研究[J]. 电镀与环保, 2015, 35(1):41-43.  
Zhang Y, Wang J, Yu Z, et al. Study on the corrosion resistance of aluminum alloy anodic oxidation film[J]. Electroplating & Pollution Control, 2015, 35(1): 41-43 (in Chinese).
- [7] 郝雪龙,何耀祖,樊志罡,等. 6063铝合金阳极氧化膜的耐碱腐蚀性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4):98-104.  
Hao X L, He Y Z, Fan Z G, et al. Alkali corrosion resistance of anodic oxide coating on 6063 aluminum alloy [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 98-104 (in Chinese).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] Zhang 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): 125078-125113.
- [11] 陈文举. 7050 铝合金硬质阳极氧化工艺研究[J]. 装备制造技术, 2018(11):168-170.  
Chen W J. Study on hard anodizing process of 7050 aluminum alloy[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(11):168-170 (in Chinese).
- [12] Gao P H, Chen B Y, Wang W, et al. Simultaneous increase of friction coefficient and wear resistance through HVOF sprayed WC-(nano WC-Co)[J]. Surface and Coatings Technology, 2019(363):379-389.
- [13] Wei S B, Pei X H, Shi B R, et al. Wear resistance and anti-friction of expansion cone with hard coating[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 326-331 (in Chinese).
- [14] 董海英,胡丽娟,梁婉怡,等. 稀土 Ce 对 316L 不锈钢耐腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(5): 489-495.  
Dong H Y, Hu L J, Liang W Y, et al. Effect of rare earth element Ce on corrosion resistance of 316L stainless steel [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(5):489-495 (in Chinese).
- [15] 张心华,周仲康,徐群杰,等. 富镍导电涂层在模拟海水中的耐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(2):189-194.  
Zhang X H, Zhou Z K, Xu Q J, et al. Anti-corrosion performance of nickel-rich conductive coatings in simulated seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(2):189-194 (in Chinese).