

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.05.012

## 适用于铝镁合金建筑构件表面微弧氧化膜制备与表征

李燕飞<sup>1</sup>, 周新显<sup>2</sup>, 张宗杰<sup>3</sup>

(1. 河南建筑职业技术学院 智能建造学院, 河南 郑州 450064; 2. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045; 3. 郑州航空港经济综合实验区建设服务中心(建设工程质量安全技术站), 河南 郑州 451162)

**摘要:** 向硅酸盐电解液中添加不同浓度的高锰酸钾, 在铝镁合金表面制备出银白色、浅棕色或深棕色微弧氧化膜。研究了高锰酸钾浓度对微弧氧化膜的微观形貌、厚度和耐腐蚀性能的影响, 并通过分析表面成分探明了微弧氧化膜呈现不同色泽的根本原因。结果表明: 随着高锰酸钾浓度增加(0~3.0 g/L), 微弧氧化膜的形貌特征从粗糙多孔转变成相对平整多孔, 最终呈现局部高耸凸起、孔洞数量减少但直径增大; 其厚度呈现逐渐增加然后降低的趋势, 耐腐蚀性能先增强后变差; 高锰酸钾浓度为 1.0 g/L 时制备的微弧氧化膜呈浅棕色并且色泽较均匀, 厚度约为 16  $\mu\text{m}$ , 耐腐蚀性能明显好于不添加高锰酸钾制备的微弧氧化膜, 满足铝镁合金建筑构件对于装饰性和腐蚀防护的要求。

**关键词:** 微弧氧化膜; 铝镁合金; 建筑构件

中图分类号: TQ050.9; TG174.4

文献标志码: A

## Preparation and characterization of micro-arc oxidation films on Al-Mg alloy surface in building components

LI Yanfei<sup>1</sup>, ZHOU Xinxian<sup>2</sup>, ZHANG Zongjie<sup>3</sup>

(1. School of Intelligent Construction, Henan Technical College of Construction, Zhengzhou 450064, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 3. Zhengzhou Airport Economy Zone Construction Service Center (Construction Engineering Quality and Safety Technical Station), Zhengzhou 451162, China)

**Abstract:** Micro-arc oxidation films with silver white, light brown or dark brown color were prepared on the surface of Al-Mg alloy by adding potassium permanganate with different concentrations into the silicate electrolyte. Effects of potassium permanganate concentration on the microstructure, thickness and corrosion resistance of micro-arc oxidation films were investigated. The fundamental cause of different colors of micro-arc oxidation films were clarified by analyzing the surface composition. The results show that with increasing of potassium permanganate concentration from 0 to 3.0 g/L, the morphological transitions from a rough and porous structure to relatively smooth and porous one. Ultimately it exhibits localized protrusions with the reduced number of pores but increased pore size. The thickness of micro-arc oxidation films shows a trend of gradually increasing and then decreasing, while

收稿日期: 2025-07-31 修回日期: 2025-11-16

作者简介: 李燕飞(1986—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为建筑工程技术及材料表面改性, e-mail: Feixiang\_123zifa@126.com

通信作者: 周新显(1987—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为结构材料腐蚀与防护、结构智能监测/检测技术, e-mail: zhouxinxian5600@163.com

基金项目: 中国工程科技发展战略河南研究院 2025 年战略咨询研究重点项目(2025HENZDB03)

引用信息: 李燕飞, 周新显, 张宗杰. 适用于铝镁合金建筑构件表面微弧氧化膜制备与表征[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(5): 80-87.

LI Yanfei, ZHOU Xinxian, ZHANG Zongjie. Preparation and characterization of micro-arc oxidation films on Al-Mg alloy surface in building components[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(5): 80-87.

the corrosion resistance first improves and then deteriorates. The micro-arc oxidation film prepared at a potassium permanganate concentration of 1.0 g/L presents a light brown color with relatively uniform hue and a thickness of approximately 16  $\mu\text{m}$ . Its corrosion resistance is significantly better than that of the micro-arc oxidation film prepared without potassium permanganate, which meets the requirements of decorativeness and corrosion protection for Al-Mg alloy in building components.

**Keywords:** micro-arc oxidation film; Al-Mg alloy; building components

铝镁合金是一种以铝为主要元素并添加镁、硅、铁、铬等元素合成的金属材料,具有轻质高强度、弹性模量小、可塑性、抗压性和散热性好等优点,适合制作幕墙、门窗框、隔断等建筑构件<sup>[1-2]</sup>。然而,铝镁合金的耐腐蚀性能不理想,难以抵抗盐雾、酸碱性和工业污染物的侵蚀,导致表面容易发生点蚀甚至出现破损剥落<sup>[3-4]</sup>,不仅影响建筑构件的外观,还会削弱建筑构件的稳定性。因此,如何保证铝镁合金建筑构件的外观质量并提高其耐腐蚀性能成为亟待解决的问题。

表面改性(如化学镀、磷化、微弧氧化等)是提高铝镁合金耐腐蚀性能的有效途径<sup>[5-9]</sup>。通过化学镀、磷化制备的镀层或膜层与基体均为机械结合,由于铝镁合金容易氧化,导致镀层或膜层结合不牢固,难以显著提高铝镁合金的耐腐蚀性能。微弧氧化是一种在铝、镁、钛及其合金表面原位成膜的表面改性工艺,微弧氧化膜与基体结合牢固并且耐腐蚀性能良好,能起到较理想的腐蚀防护作用。研究发现,向电解液中添加高锰酸钾、铬酸钾、钒酸铵、焦磷酸铜和硫酸钴等着色盐可获得黄色、棕色、绿色和黑色微弧氧化膜<sup>[10-14]</sup>,既起到装饰效果,也满足腐蚀防护要求。

目前,通过添加高锰酸钾制备黄色或棕色微弧氧化膜有一些报道<sup>[15-16]</sup>,但现有研究尚未系统探讨高锰酸钾浓度对微弧氧化膜色泽与性能的影响规律,并且关于微弧氧化膜呈现不同色泽的根本原因也有待探究。本文选取铝镁合金作为实验基体,向硅酸盐电解液中添加不同浓度的高锰酸钾,制备不同色泽并且耐腐蚀性能存在差异的微弧氧化膜,通过分析微弧氧化膜的宏观形貌、微观形貌、表面成分、厚度及耐腐蚀性能,探明高锰酸钾浓度对微弧氧化膜色泽与性能的影响规律,为兼具装饰性和良好耐腐蚀性能的微弧氧化膜制备及其在铝镁合金建筑构件上的应用提供实验依据。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验选用的铝镁合金化学成分(质量分数)为:

2.2%~2.8% Mg、0.15%~0.35% Cr、0.25% Si、0.4% Fe、Al余量。通过线切割制备若干20 mm×12 mm×2 mm试样,然后对所有试样进行打磨(使用2000目砂纸)、清洗(依次使用无水乙醇、去离子水)、烘干(吹风机)处理。

### 1.2 微弧氧化膜制备

采用西安赛米特电子科技有限公司生产的脉冲微弧氧化电源。将处理好的铝镁合金试样作为阳极,连接电源正极,不锈钢板作为阴极,连接电源负极。设置电源正向电压为400 V,负向电压为10 V,脉冲频率和占空比分别为800 Hz和10%。采用硅酸盐电解液(硅酸钠12 g/L+氢氧化钠2 g/L+氟化钠1.5 g/L),并添加不同浓度的高锰酸钾(分别为0.5、1.0、2.0和3.0 g/L)进行4组微弧氧化实验,借助机械搅拌(150 r/min)保证实验过程中电解液成分均匀。此外,采用上述硅酸盐电解液在不添加高锰酸钾下进行1组对比实验。每组实验均持续40 min,在铝镁合金表面制备出5种不同色泽并且耐腐蚀性能存在差异的微弧氧化膜。

### 1.3 表征与测试

采用光学相机拍摄微弧氧化试样的宏观形貌,场发射扫描电镜(SIGMA300型)观察微弧氧化膜的微观形貌,EDS(X-Max50型)进行微区成分分析,然后用XPS(K-Alpha型)分析微弧氧化膜的表面成分。

利用涡流测厚仪(Phynix型)测量微弧氧化膜的厚度,测量误差为 $\pm 1\%$ 。在每种微弧氧化膜表面随机选5个点进行测量,取平均值。

为了模拟铝镁合金建筑构件的实际应用工况,评估微弧氧化后铝镁合金在较苛刻环境中的耐腐蚀性能,借助盐雾箱(GDJS-225型)模拟含氯盐潮湿的环境。配制5 wt.%氯化钠溶液,雾化后通过喷嘴持续喷洒,喷雾量为(1~2) mL/(80 cm<sup>2</sup>·h),盐雾箱内环境温度保持33~37  $^{\circ}\text{C}$ 。将封装后试样(只暴露测试面)放入盐雾箱中,静置72 h后取出再放入3.5 wt.%氯化钠溶液中。采用电化学工作站(Parstat 2273型)测试极化曲线,扫描速率为1 mV/s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 宏观形貌分析

图1(a)为铝镁合金基体宏观形貌，可以看出基体呈银白色，色泽较均匀。图1(b)~(f)为5种微弧氧化膜的宏观形貌。从图1(b)看出，不添加高锰酸钾的微弧氧化膜也呈银白色。而添加0.5和1.0 g/L高锰酸钾制备的微弧氧化膜呈浅棕色，且色泽较均匀，如图1(c)(d)所示。添加2.0和3.0 g/L高锰酸钾的微弧氧化膜则呈深棕色，色泽均匀，如图1(e)(f)所示。

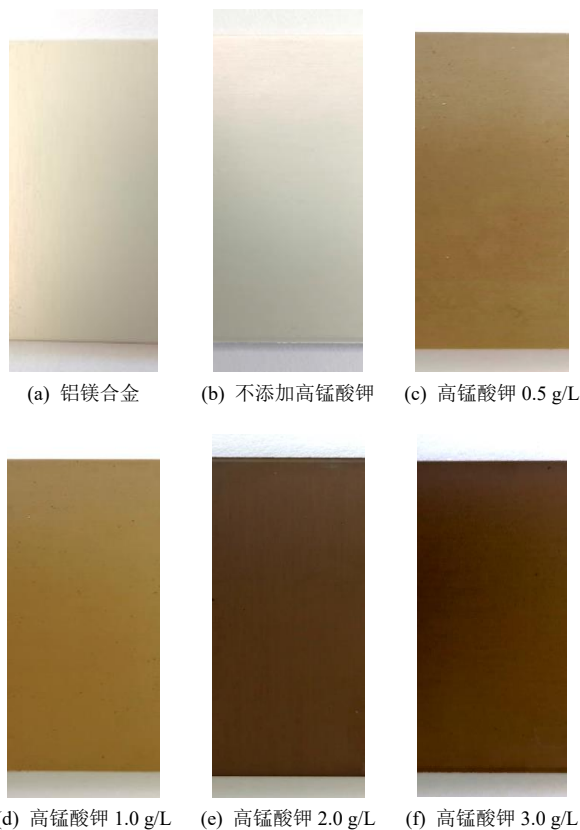


图1 铝镁合金基体和微弧氧化膜的宏观形貌

Fig.1 Macroscopic morphologies of Al-Mg alloy substrate and micro-arc oxidation films

添加到电解液中的高锰酸钾发生电离生成高锰酸根离子，经历一步或多步还原过程，可能生成不同价态的锰氧化物掺进微弧氧化膜中<sup>[17-18]</sup>。这些氧化物的光学特性不同，吸收可见光能力存在差异，使微弧氧化膜呈现不同色泽，可满足建筑构件对于装饰性的要求。

### 2.2 表面成分分析

图2为5种微弧氧化膜的EDS谱图。由图2得知，不添加高锰酸钾制备的微弧氧化膜主要含有Al、Mg、O、Si和Na这5种元素，而添加0.5、1.0、2.0和3.0 g/L高锰酸钾制备的微弧氧化膜都含有Al、Mg、O、Si、Na和Mn元素。多出Mn元素证实了高锰酸钾电离生成的高锰酸根离子参与了微弧氧化过程。随着高锰酸钾浓度增加，微弧氧化膜中Mn元素的质量分数逐渐升高，相对应从4.52%升至23.48%。

为了探明微弧氧化膜宏观上呈银白色、浅棕色或深棕色的根本原因，对不同微弧氧化膜的XPS谱图(包括全谱和精细谱)进行分析。由图3得知，不添加高锰酸钾制备的微弧氧化膜中，Al和Si元素都以氧化物形式存在，分别为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>。由于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>通常呈白色，因而微弧氧化膜呈银白色。由图4和图5得知，添加1.0和2.0 g/L高锰酸钾制备的

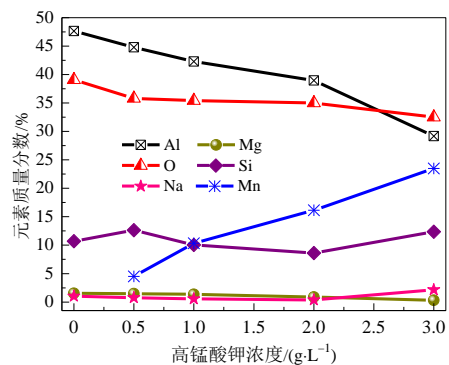


图2 微弧氧化膜的EDS谱图

Fig.2 EDS spectra of micro-arc oxidation films

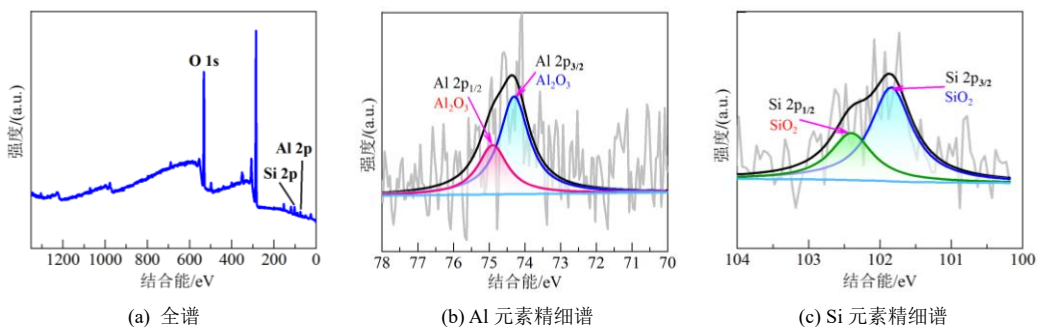


图3 不添加高锰酸钾制备的微弧氧化膜的XPS谱图

Fig.3 XPS spectra of the micro-arc oxidation film prepared without potassium permanganate

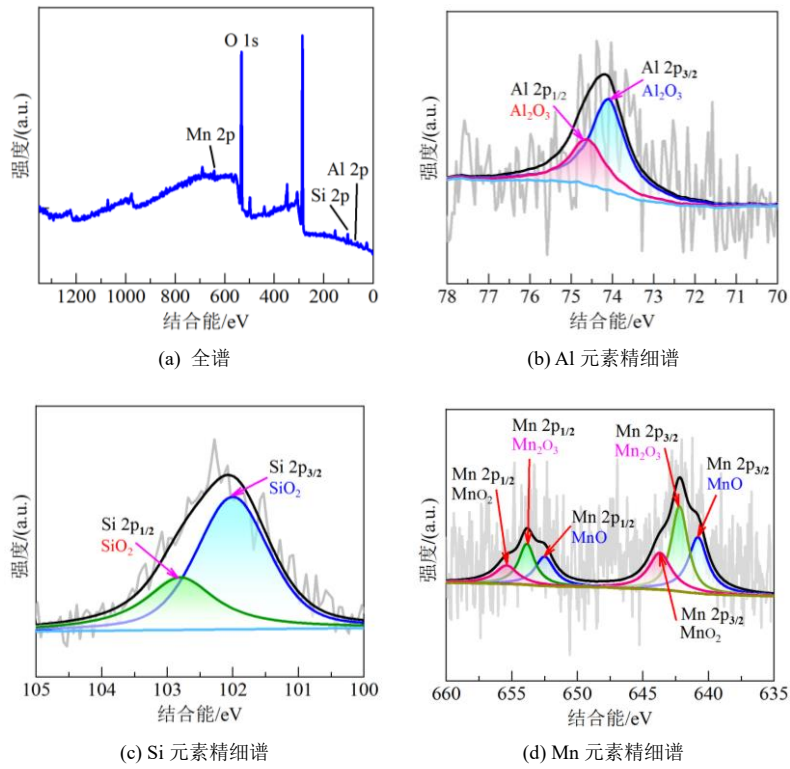


图4 添加 1.0 g/L 高锰酸钾制备的微弧氧化膜的 XPS 谱图

Fig.4 XPS spectra of the micro-arc oxidation film prepared by adding 1.0 g/L potassium permanganate

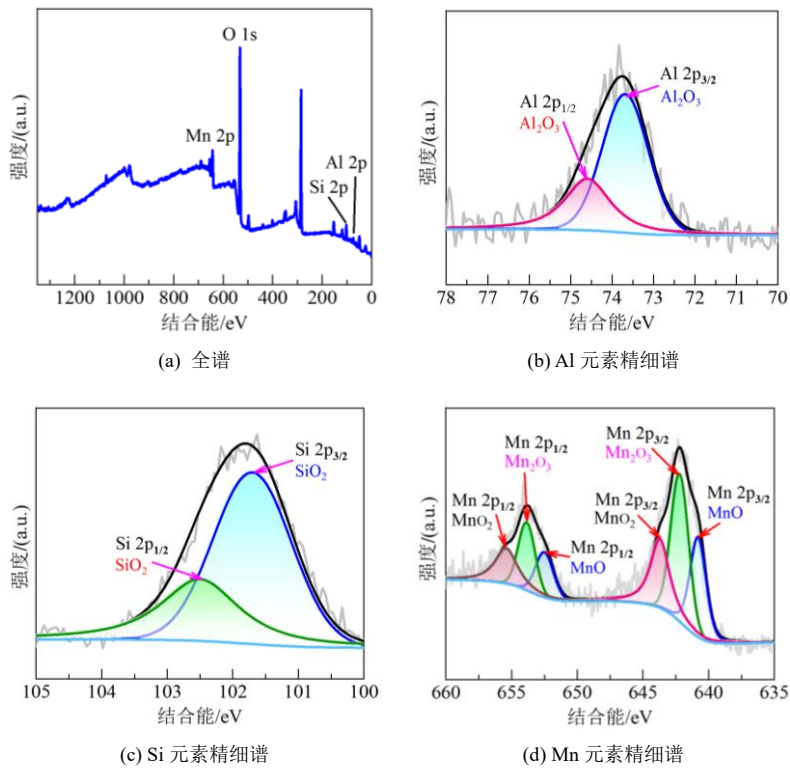


图5 添加 2.0 g/L 高锰酸钾制备的微弧氧化膜的 XPS 谱图

Fig.5 XPS spectra of the micro-arc oxidation film prepared by adding 2.0 g/L potassium permanganate

2种微弧氧化膜中, Al和Si元素同样以氧化物形式存在, 但Mn元素以3种不同价态的锰氧化物形式存在, 分别为MnO、Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和MnO<sub>2</sub>。

表1为微弧氧化膜中不同价态的锰氧化物含量。由表1得知, 添加1.0 g/L高锰酸钾制备的微弧氧化膜中Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量最高, 其次为MnO, MnO<sub>2</sub>含量最低。而添加2.0 g/L高锰酸钾制备的微弧氧化膜中MnO<sub>2</sub>含量最高, 其次为Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO含量最低。在碱性溶液中形成的Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>呈黄色或浅黄色<sup>[19]</sup>, MnO<sub>2</sub>则呈棕色或深棕色。不同价态的锰氧化物含量存在差异, 加之它们的光学特性不同, 是微弧氧化膜呈现不同色泽的根本原因。

表1 微弧氧化膜中不同价态的锰氧化物含量

Tab.1 Content of manganese oxides with different valence state in micro-arc oxidation films

高锰酸钾浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	微弧氧化膜中含量/at. %		
	MnO	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>
1.0	33.80	44.45	21.75
2.0	28.09	31.58	40.33

### 2.3 微观形貌分析

图6(a)为铝镁合金基体的微观形貌, 基体较平整。图6(b)~(f)为5种微弧氧化膜的微观形貌, 对比发现, 不添加高锰酸钾以及添加0.5 g/L高锰酸钾的2种微弧氧化膜(图6(b)(c))具有相似的形貌特征, 表面粗糙, 并且分布着较多直径不等的孔洞。

从图6(d)(e)看出, 添加1.0和2.0 g/L高锰酸钾的

2种微弧氧化膜表面相对平整, 但仍然存在较多直径不等的孔洞。然而, 添加3.0 g/L高锰酸钾的微弧氧化膜(图6(f))的形貌特征明显不同于不添加高锰酸钾以及添加0.5、1.0和2.0 g/L高锰酸钾的4种微弧氧化膜, 前者表面存在微裂纹, 并且孔洞周围形成高耸凸起, 其它区域相对平整。与前4种微弧氧化膜相比, 添加3.0 g/L高锰酸钾制备的微弧氧化膜孔洞数量减少, 但直径增大。

结合高锰酸钾的特性以及微弧氧化机理分析, 添加到电解液中的高锰酸钾发生电离生成高锰酸根离子, 具有强氧化性的高锰酸根离子会影响电解液的氧化性和微弧氧化放电行为, 还可能改变放电阶段能量分布<sup>[20]</sup>, 从而影响微弧氧化膜的形貌特征。不添加或添加少量高锰酸钾时, 电离生成的高锰酸根离子浓度低, 虽然基体会发生氧化反应, 但初始氧化膜形成缓慢并且受电解液溶解变得疏松多孔, 进而引发局部剧烈放电。剧烈放电瞬间产生的高温使氧化膜过度熔融, 形成的熔融物在电解液冷淬作用下冷却。由于冷却速度过快, 熔融物冷却不均容易形成瘤状物及其它形状不规则的凝固物, 无序堆积形成粗糙形貌。微弧氧化过程中, 剧烈放电瞬间还伴随着气泡产生, 气泡逸出后在微弧氧化膜中留下孔洞。由于气泡随机产生和逸出, 并且可能发生气泡融合现象, 导致微弧氧化膜表面分布着较多直径不等的孔洞。

添加适量高锰酸钾时, 电离生成的高锰酸根离子浓度增加使电解液的氧化性增强, 基体表面形成一层较致密的初始氧化膜。该氧化膜将基体与电解

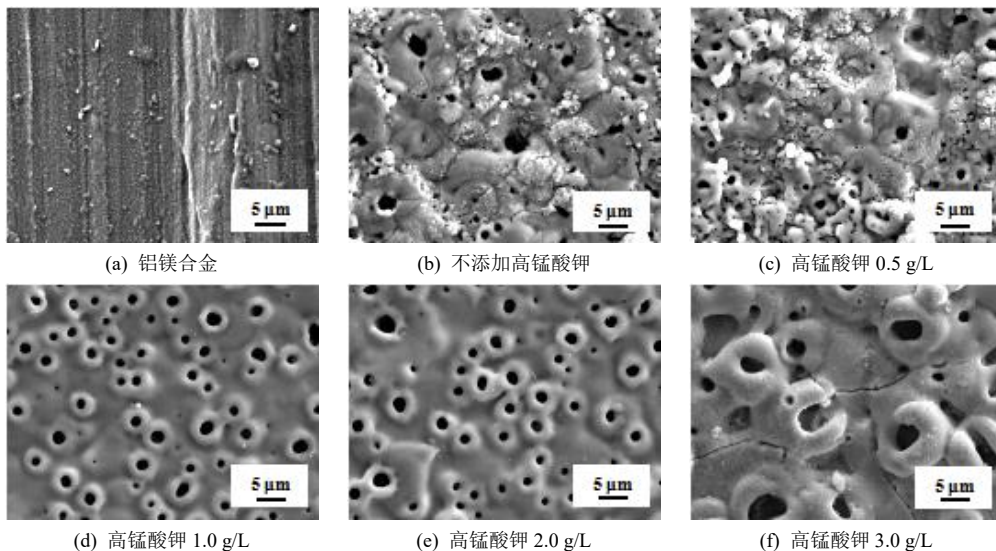


图6 铝镁合金基体和微弧氧化膜的微观形貌

Fig.6 Micromorphology of Al-Mg alloy substrate and micro-arc oxidation films

液隔离,能抑制基体过度溶解,还为后续放电过程提供了绝缘基底,避免因基体局部裸露出现集中放电和氧化膜过度熔融现象。预先形成一层较致密的初始氧化膜还有利于放电阶段能量较均匀分布,每次放电过程中氧化膜的熔融程度相对轻,熔融物凝固较均匀,逐步形成表面相对平整的微弧氧化膜。

高锰酸钾浓度过高会造成电解液的电导率异常升高,基体表面能量分布不均,导致初始氧化膜的薄弱区域成为高能放电通道引发局部剧烈放电<sup>[21]</sup>。放电瞬间产生的高温可能击穿已形成的微弧氧化膜,导致形成直径较大的孔洞。并且放电击穿过程中伴随着过度熔融,单位时间内生成的更多熔融物凝固后堆积在孔洞周围形成高耸凸起。此外,剧烈放电瞬间产生的高温与电解液形成巨大温差,导致微弧氧化膜产生的热应力无法及时释放,只能通过开裂缓解,从而引发微裂纹。

## 2.4 厚度分析

图7为5种微弧氧化膜的厚度。由图得知,不添加高锰酸钾以及添加0.5 g/L高锰酸钾的2种微弧氧化膜均较薄,厚度为14 μm左右。添加适量高锰酸钾的微弧氧化膜明显增厚,当高锰酸钾浓度为1.0 g/L的微弧氧化膜最厚,达16 μm。但高锰酸钾浓度过高时,微弧氧化膜的厚度降低。微弧氧化过程中,微弧氧化膜的厚度由生长过程与溶解过程的动态平衡决定。当生长速度快于溶解速度,微弧氧化膜持续增厚。反之,当生长速度慢于溶解速度,微弧氧化膜无法增厚,甚至会因过度溶解而变薄<sup>[22]</sup>。

不添加或添加少量高锰酸钾时,由于电解液中具有强氧化性的高锰酸根离子浓度低,基体表面形成的初始氧化膜疏松多孔,难以有效隔离电解液,致使在微弧氧化膜生长与溶解的动态平衡中,溶解过程占优势。此外,放电阶段能量分布不均,局部剧烈放电造成已形成的微弧氧化膜过度熔融,相当于生长的同时遭受破坏,因而微弧氧化膜较薄。

添加适量高锰酸钾时,一方面,电解液中高锰酸根离子浓度增加,驱使基体快速氧化形成一层较致密的初始氧化膜,溶解程度较轻。在微弧氧化膜生长与溶解动态平衡中,生长过程占优势。另一方面,添加适量高锰酸钾能调节电解液的电导率和氧化性,使放电阶段能量较均匀分布,更多电能分配给氧化反应,单位时间内生成的熔融物增多,凝固后堆积使微弧氧化膜增厚。与此同时,每次放电过程中微弧氧化膜的熔融程度相对轻,熔融物可能凝

固较均匀并与原有膜层结合,保证了生长过程连续性,因而微弧氧化膜明显增厚。但高锰酸钾浓度过高时,由于电解液的氧化性太强,导致已形成的微弧氧化膜溶解程度加大,溶解速度快于生长速度。此外,高锰酸钾浓度过高还会造成电解液的电导率异常升高,局部剧烈放电可能击穿微弧氧化膜的薄弱区域,这种破坏性放电过程造成因局部持续损耗而厚度降低。

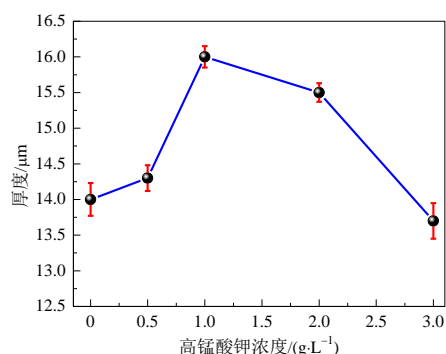


图7 微弧氧化膜的厚度

Fig.7 Thickness of micro-arc oxidation films

## 2.5 耐腐蚀性能分析

图8为铝镁合金基体和5种微弧氧化膜的极化曲线,表2为极化曲线拟合结果。由图8和表2可知,5种微弧氧化膜的腐蚀电位均高于基体,并且腐蚀电流密度与基体相比降低。5种微弧氧化膜的腐蚀电位由高到低排序为:1.0 g/L高锰酸钾>2.0 g/L高锰酸钾>0.5 g/L高锰酸钾>不添加高锰酸钾>3.0 g/L高锰酸钾>基体;5种微弧氧化膜的腐蚀电流密度由低到高排序为:1.0 g/L高锰酸钾<2.0 g/L高锰酸钾<0.5 g/L高锰酸钾<不添加高锰酸钾<3.0 g/L高锰酸钾<基体。对于同一体系,腐蚀电位越高且腐蚀电流密度越低,材料的耐腐蚀性能越好<sup>[23]</sup>。据此推知,

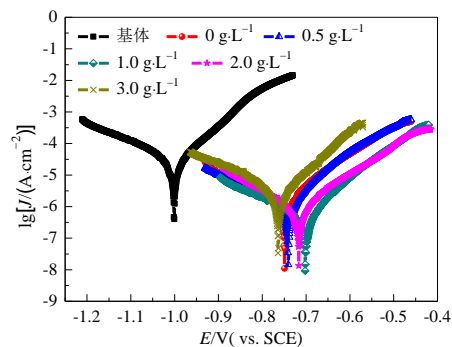


图8 铝镁合金基体和5种微弧氧化膜的极化曲线

Fig.8 Polarization curves of Al-Mg alloy substrate and five kinds of micro-arc oxidation films

表 2 极化曲线拟合结果

Tab.2 Fitting results of polarization curves

试样名称	$E_{corr}/V$	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$
基体	-1.011	$3.32 \times 10^{-5}$
微弧氧化膜(0 g/L)	-0.749	$1.81 \times 10^{-6}$
微弧氧化膜(0.5 g/L)	-0.740	$1.19 \times 10^{-6}$
微弧氧化膜(1.0 g/L)	-0.701	$5.56 \times 10^{-7}$
微弧氧化膜(2.0 g/L)	-0.716	$8.71 \times 10^{-7}$
微弧氧化膜(3.0 g/L)	-0.763	$2.69 \times 10^{-6}$

添加1.0 g/L高锰酸钾的微弧氧化膜耐腐蚀性能良好,其腐蚀电位较基体提高310 mV,腐蚀电流密度较基体降低了近2个数量级,仅为 $5.56 \times 10^{-7} A/cm^2$ 。

不添加或添加少量高锰酸钾的2种微弧氧化膜(图6(b)(c))表面粗糙,并且分布着较多直径不等的孔洞,这种形貌特征增大了与腐蚀介质的接触面积。并且可能因毛细效应加速腐蚀介质向微弧氧化膜内部渗透<sup>[24]</sup>,因而其耐腐蚀性能相对差。添加适量高锰酸钾的微弧氧化膜表面相对平整,表面应力分布趋于均匀,可缓解因粗糙形貌导致的局部应力集中,同时缩小了积存腐蚀介质区域的面积,降低了因局部氯离子富集引发点蚀的风险,因而表现出良好的耐腐蚀性能。但高锰酸钾浓度过高时的微弧氧化膜(图6(f))由于存在一些大孔洞和微裂纹,为腐蚀介质快速渗透与基体接触提供了通道,加速了电化学腐蚀,耐腐蚀性能变差。

表3为采用不同工艺制备的镀层/氧化膜的性能参数<sup>[25-27]</sup>。对比可知,本文采用微弧氧化工艺在铝镁合金表面制备的最优微弧氧化膜,厚度与Ni-P合金镀层、阳极氧化膜和Ni-SiC复合镀层相近甚至更薄,但其腐蚀电流密度显著降低,较Ni-P合金镀层和Ni-SiC复合镀层降低近2个数量级,较阳极氧化膜降低约71.6%。虽然2024铝合金、6063铝合金、ZL105

表 3 采用不同工艺制备的镀层/氧化膜的性能参数

Tab.3 Performance parameters of coating/oxide film prepared by different processes

试样名称	制备工艺	厚度/ $\mu m$	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	
Ni-P 合金镀层	化学镀	46.5	$4.8 \times 10^{-5}$	25
阳极氧化膜	阳极氧化	17.0	$1.96 \times 10^{-6}$	26
Ni-SiC 复合镀层	电沉积	15.0	$4.38 \times 10^{-5}$	27
微弧氧化膜	微弧氧化	16.0	$5.56 \times 10^{-7}$	本文

铝合金与铝镁合金分属不同的铝合金子体系,但均以Al为主要元素,且不属于微弧氧化工艺中的难处理基体。基于上述内容推断,微弧氧化工艺对铝合金(包括铝镁合金)耐腐蚀性能的提升效果优于化学镀、阳极氧化和电沉积工艺。

### 3 结论

(1) 随着高锰酸钾浓度从0增加到3.0 g/L,微弧氧化膜的色泽由银白色转变成深棕色,主要归因于高锰酸钾参与微弧氧化过程,会生成MnO、Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和MnO<sub>2</sub>等3种不同价态的锰氧化物。这些氧化物掺进微弧氧化膜中,其含量和光学特性不同导致呈现不同色泽。

(2) 随着高锰酸钾浓度从0增加到3.0 g/L,微弧氧化膜的形貌特征从粗糙多孔转变成相对平整多孔,最终呈现局部高耸凸起、孔洞数量减少但直径增大。微弧氧化膜的厚度呈现逐渐增加然后降低的趋势,耐腐蚀性先增强后变差。

(3) 高锰酸钾会影响电解液的氧化性和微弧氧化放电行为,添加适量高锰酸钾使微弧氧化膜增厚并且表面变得平整,耐腐蚀性能增强。高锰酸钾浓度为1.0 g/L时的微弧氧化膜呈浅棕色并且色泽较均匀,厚度约为16  $\mu m$ ,耐腐蚀性能明显好于不添加高锰酸钾的微弧氧化膜,满足铝镁合金建筑构件对于装饰性和腐蚀防护的要求。

### 参考文献

- [1] 李忠超. 铝镁合金板压胶复合连接强度优化及在车身结构中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [2] 王辛成. 浅谈铝镁合金的应用前景[J]. 世界有色金属, 2022(24): 151-154.
- [3] 李仕慧, 陈芙蓉. 含稀土镁铝系合金耐腐蚀性能的研究现状[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(7): 333-336.
- [4] 金铎, 任宏瑞, 刘奋照, 等. 镁铝合金件铸造工艺优化及耐腐蚀性能分析[J]. 世界有色金属, 2017(22): 223-225.
- [5] 张勇. 纳米 SiO<sub>2</sub> 对汽车用铝硅镁系合金化学镀 Ni-P 合金镀层性能的影响[J]. 电镀与环保, 2018, 38(6): 57-59.
- [6] 周荣国, 章爱生, 李良彬, 等. Mg-12Li-2Al-2Zn 合金化学镀镍工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(22): 114-117.
- [7] 曹京宜, 王臣业, 徐敏, 等. 镁铝合金表面锶磷化膜的改性及其腐蚀性能研究[J]. 材料导报, 2017, 31(2): 282-

- 285.
- [8] LI Q, SHANG J. The effects of electrolyte composition on formation and properties of micro-arc oxidation layer of 6082-T6 Al alloy[J]. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2024, 60: 743-757.
- [9] CHEN X Y, WANG H, LIU C C, et al. Influence of additives on the macroscopic color and corrosion resistance of 6061 aluminum alloy micro-arc oxidation coatings[J]. *Materials*, 2024, 17(11): 2621.
- [10] 杨丽. 镁合金微弧氧化深色膜的制备及性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2011.
- [11] 朱枝胜, 李康, 祝闻, 等. 6061 铝合金黄色微弧氧化膜层制备工艺优化及性能表征[J]. *电镀与涂饰*, 2024, 43(6): 102-109.
- [12] 王宇顺. 含氧化物及其盐的电解液对镁合金微弧氧化膜影响的对比研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [13] 金杰, 吴继文, 李欢, 等. 镁合金微弧氧化棕黑色膜的制备及性能研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2015, 43(2): 133-136.
- [14] 饶模松, 杨巍, 魏明珠, 等. 脉冲频率对镁锂合金黑色微弧氧化膜层耐磨与抗腐蚀性能的影响[J]. *表面技术*, 2024, 53(18): 116-125.
- [15] 崔作兴, 王彩丽, 邵忠财, 等. 铝合金黄色微弧氧化膜的制备及其性能[J]. *材料保护*, 2009, 42(6): 4-6.
- [16] 曹彬彬. ZK60 镁合金微弧氧化着色工艺及膜层特性研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
- [17] HWANG D Y, KIM Y M, PARK D Y, et al. Corrosion resistance of oxide layers formed on AZ91 Mg alloy in  $\text{KMnO}_4$  electrolyte by plasma electrolytic oxidation[J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 54(23): 5479-5485.
- [18] ALIRAMEZANI R, RAEISSI K, SANTAMARIA M, et al. Characterization and properties of PEO coatings on 7075 Al alloy grown in alkaline silicate electrolyte containing  $\text{KMnO}_4$  additive[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 329: 250-261.
- [19] 于红玉. 二氧化锰纳米结构的制备及其电致变色性能[D]. 上海: 上海第二工业大学, 2020.
- [20] 韩慧平.  $\text{KMnO}_4$  及基体缝隙形态对微弧氧化膜生长和耐蚀性的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- [21] KO Y G, LEE K M, SHIN K R. Effect of potassium permanganate on corrosion behavior of magnesium alloy prepared by micro-arc oxidation[J]. *Korean Journal of Metals and Materials*, 2010, 48(8): 724-729.
- [22] 陈显明, 罗承萍, 刘江文, 等. 镁合金微弧氧化膜层形成过程探讨[J]. *中国表面工程*, 2006, 19(5): 14-18.
- [23] LI C Y, QUAN G N, ZHANG Q, et al. A novel amorphous alloy coating for elevating corrosion resistance of X70 pipeline steel[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2024, 33: 1612-1629.
- [24] 妙圆圆. 金属基超疏水表面的构建及其耐腐蚀性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- [25] 宿辉, 张迎, 原小寓, 等. 2024 铝合金直接化学镀镍工艺及镀层性能[J]. *电镀与涂饰*, 2023, 42(1): 24-30.
- [26] 钟跃房, 黄世富, 黄金成, 等. 6063 铝合金阳极氧化膜厚度对其耐蚀性能的影响[J]. *装备制造技术*, 2024(4): 48-50, 64.
- [27] 吴向清, 谢发勤. 铝合金基电沉积 Ni-SiC 复合镀层的结构及耐蚀性研究[J]. *表面技术*, 2003, 32(2): 23-25.