

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.05.014

## 碱洗时间对铝合金基体和镀银层耐腐蚀性能的影响

张红军<sup>1,2,3\*</sup>, 马迎春<sup>1,2,3</sup>, 李晓征<sup>1,2,3</sup>, 李帅帅<sup>1,2,3</sup>,王 婷<sup>1,2,3</sup>, 李润清<sup>1,2,3</sup>, 刘永超<sup>1,2,3</sup>

(1. 平高集团 表面处理及金属防腐实验室, 河南 平顶山 467001; 2. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001; 3. 平高集团 路亚娟创新工作室, 河南 平顶山 467001)

**摘要:** 通过碱洗时间对铝合金基体表面状态、镀银层孔隙率和电化学行为进行实验, 研究了碱洗时间对镀银层耐腐蚀性能的影响。实验采用 50 mm×50 mm×10 mm 的 6063 材质铝试块。碱洗工艺为: 65 °C 下分别浸蚀 2 min、4 min、8 min。镀银工艺参数中, 温度 20~35 °C, 时间 20 min, 电流密度 1 A/dm<sup>2</sup>。结果表明随着碱洗时间增加, 基体和镀银层孔隙率增大, 自腐蚀电位变小, 耐腐蚀性能降低。

**关键词:** 铝合金; 镀银层; 孔隙率; 耐腐蚀性

中图分类号: TQ153.2

文献标识码: A

## The effect of alkaline washing time on corrosion resistance of aluminum alloy matrix and silver coating

Zhang Hongjun<sup>1,2,3\*</sup>, Ma Yingchun<sup>1,2,3</sup>, Li Xiaozheng<sup>1,2,3</sup>, Li Shuaishuai<sup>1,2,3</sup>, Wang Ting<sup>1,2,3</sup>, Li Runqing<sup>1,2,3</sup>, Liu Yongchao<sup>1,2,3</sup>

(1. Lab of Surface Treatment and Metal Anti-corrosion, Pinggao Group, Pingdingshan 467001, China; 2. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China; 3. Lu Yajuan Innovation Studio, Pinggao Group, Pingdingshan 467001, China )

**Abstract:** Experimental study was conducted to investigate the influence of alkaline washing time on the surface condition of aluminum alloy substrate, the porosity of silver-plated layer, and the electrochemical behavior. A 6063 aluminum test block with dimensions of 50 mm×50 mm×10 mm was employed in the experiment. The alkaline washing process consisted of immersion at 65 °C for 2 minutes, 4 minutes, and 8 minutes, respectively. The silver-plating process involved a temperature range of 20-35 °C, a plating time of 20 minutes, and a current density of 1 A/dm<sup>2</sup>. The results indicate that with the increase in alkaline washing time, the porosity of the substrate and the silver plating layer increases, the self-corrosion potential decreases, and the corrosion resistance performance deteriorates.

**Keywords:** aluminum alloy; silver plating layer; porosity; corrosion resistance

收稿日期: 2024-01-30

修回日期: 2024-06-13

通信作者: 张红军(1975—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为高压电器零部件表面处理, email: 3351095067@qq.com

引用信息: 张红军, 马迎春, 李晓征, 等. 碱洗时间对铝合金基体和镀银层耐腐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(5): 95-100.

Zhang Hongjun, Ma Yingchun, Li Xiaozheng, et al. The effect of alkaline washing time on corrosion resistance of aluminum alloy matrix and silver coating[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(5): 95-100.

中国电力输送具有地域广、距离远、容量大等特点。高压开关已向超高压、特高压方向发展,对高压开关的产品性能和寿命要求也越来越高<sup>[1-3]</sup>。在高压开关产品的主要导电回路中,为降低零件动、静接触部位的接触电阻,提高零件表面的导电性,同时降低生产成本,需要在导电接触部位进行电镀处理<sup>[4-5]</sup>。银的可锻可塑性强,镀银层具有优良的导热性、导电性、焊接性。在铝合金基体表面镀覆银层,可使高压开关核心零部件具有银良好的导电、导热性能<sup>[6]</sup>。

高压开关多在户外运行,长期受外部环境和气候的影响,镀银层与空气中的氯化物和硫化物接触时,容易发生腐蚀变色<sup>[7]</sup>。接触部位出现腐蚀、氧化、镀层脱落等情况会造成开关触头接触电阻过大、温升过高,影响高压开关的正常运行,从而影响到电网的安全稳定运行。因此,对电接触部位镀银层的耐蚀、耐磨、防变色等综合性能的要求也越来越高<sup>[8-9]</sup>。实际生产中,铝合金镀银前的表面处理工艺为碱洗,可去除零件表面油污和氧化皮,活化表面。为避免在镀银前碱洗过程中发生过腐蚀现象,提高镀银层耐腐蚀性能,本文对铝合金镀银工艺过程中,碱洗时间对基体和镀银层耐腐蚀性能的影响进行了研究,探讨了铝合金碱洗的最佳时间,为实际生产应用提供理论依据。

## 1 实验

### 1.1 样品及施镀工艺

实验采用6063材质的铝合金试样,镀层为银,电镀用阳极银板的纯度大于99.999%。试样为50 mm×50 mm×10 mm的薄板,并用1000#、1500#、2000#的SiC砂纸对其表面进行打磨,在不同碱洗时间条件下进行镀银,每组实验4个样块。

镀银工艺流程为碱洗(2 min、4 min、8 min; 65 °C; 碱蚀剂40 g/L)→酸漂洗(1 min; HNO<sub>3</sub> 65%, 体积分数500 mL/L)→一次浸锌(1 min; 23 °C; 浸锌液原液400 mL/L)→退锌(1 min; HNO<sub>3</sub> 65%, 体积分数500 mL/L)→二次浸锌(1 min; 23 °C; 浸锌液原液400 mL/L)→镀铜(10 min; 45 °C; 1 A/dm<sup>2</sup>; CuCN 60 g/L; NaCN 79 g/L; Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 20 g/L)→预镀银(10 s; 25 °C; 1 A/dm<sup>2</sup>; KAg(CN)<sub>2</sub> 4 g/L; KCN 140 g/L)→镀银(20 min; 20~35 °C; 1 A/dm<sup>2</sup>; KAg(CN)<sub>2</sub> 65 g/L; KCN 130 g/L; K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 20 g/L)→热水洗(85 °C; 5 min)。

### 1.2 表征方法

对不同碱洗时间下实验样块的镀银层性能进

行了检测。采用X射线测厚仪和金相显微镜分别检测镀层厚度和观察表面形貌。使用加热法对镀银层的结合力进行检测。将试样放入烘箱中,以5 °C/min升温至190 °C并保温2 h,随后将试样在空气中冷却至室温,观察镀银层是否有起泡、起皮等现象。根据QJ 480—90《金属镀覆层孔隙率实验方法》中的贴滤纸法,对镀银层孔隙率进行检测,并采用ArcGIS软件对镀银层孔隙率进行矢量化分析。

采用辰华CHI660E电化学工作站对试样进行Tafel曲线和电化学阻抗谱分析。电化学实验采用三电极体系,铂片电极为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,工作电极为镀银层试样,电极面积为1 cm<sup>2</sup>,电解液为0.1 mol/L的K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液。待试样在溶液中的开路电位稳定后,设定阻抗谱(EIS)的测量振幅为5 mV,测量频率为10<sup>-2</sup>~10<sup>5</sup> Hz,在溶液中测得镀银层的交流阻抗图。以5 mV/s扫描速率,测定镀银层在该介质中的Tafel曲线,判断镀银层的腐蚀特性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 镀银层厚度与结合力

对镀银后试样的厚度进行测量,其厚度平均在5.1~8.1 μm。镀银后试样经加热法检测结合力,结果如表1所示。经检测,不同碱洗时间下镀银层结合力良好,均无起泡、起皮、银层脱落等现象。

表1 不同碱洗时间镀层的结合力

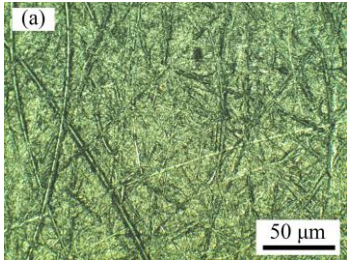
Tab.1 Adhesion of coatings at different alkaline washing time

碱洗时间/min	结果
2	无起泡现象
4	无起泡现象
8	无起泡现象

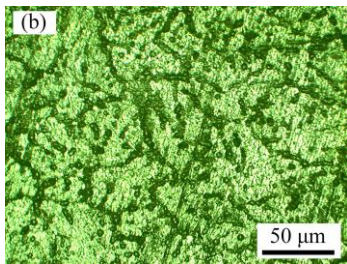
### 2.2 表面形貌

图1~3是不同碱洗时间下试样的表面形貌。从图中可以看出,在100倍放大倍数下,原试样致密性较好,微孔数量较少;经碱洗后,试样表面微孔数量增加,随着碱洗时间的增加,试样表面微孔数量增加且孔径变大;酸洗后试样表面较为平整光滑,但受碱洗影响,酸洗后试样微孔数量进一步增加,且孔径有变大趋势;试样镀银后,镀层较为致密,与基体结合紧密,受镀覆层影响,试样微孔数量降低,但仍有孔径较大的微孔存在。综上所述,试样

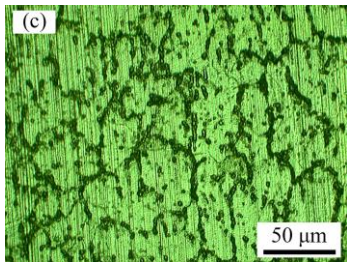
碱洗时间增加，酸洗及镀银后试样表面微孔数量增加，孔径增大。碱洗时间为8 min的试样表面出现过腐蚀现象，镀银后微孔直径也相应增大。



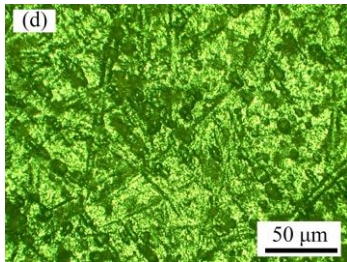
(a) 原试样



(b) 碱洗 2 min



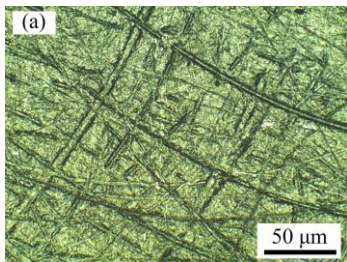
(c) 酸洗后



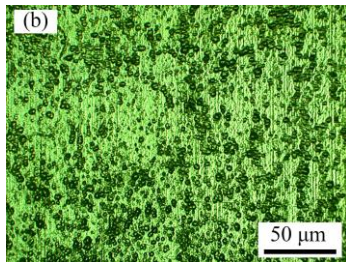
(d) 镀银后

图 1 碱洗 2 min 时不同工艺下试样表面形貌

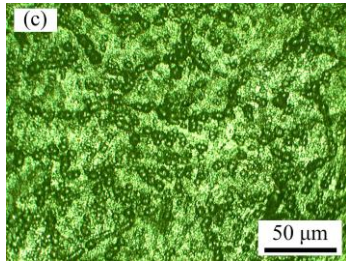
Fig.1 Surface morphology of samples under different processes with alkaline washing time of 2 minutes



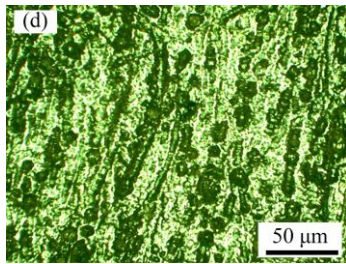
(a) 原试样



(b) 碱洗 4 min



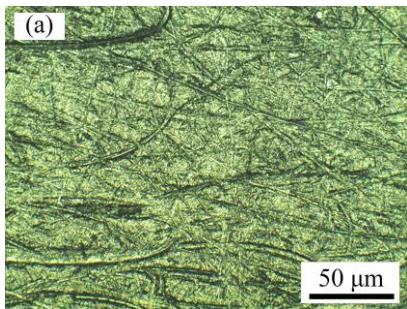
(c) 酸洗后



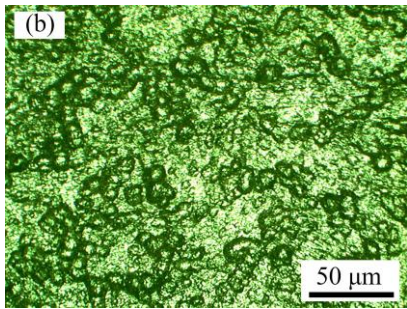
(d) 镀银后

图 2 碱洗 4 min 时不同工艺下试样表面形貌

Fig.2 Surface morphology of samples under different processes with alkaline washing time of 4 minutes

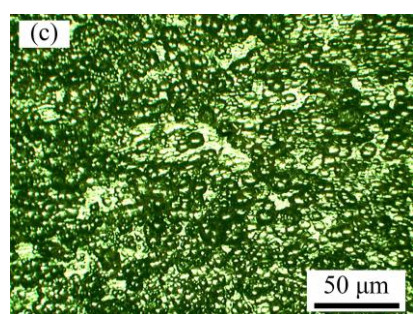


(a) 原试样

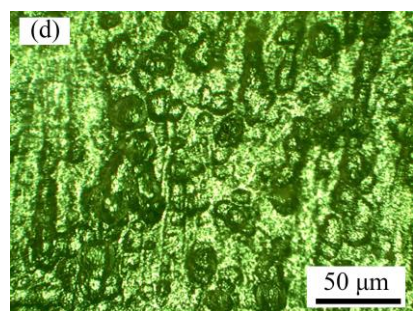


(b) 碱洗 8 min





(c) 酸洗后



(d) 镀银后

图3 碱洗 8 min 时不同工艺下试样表面形貌

Fig.3 Surface morphology of samples under different processes with alkaline washing time of 8 minutes

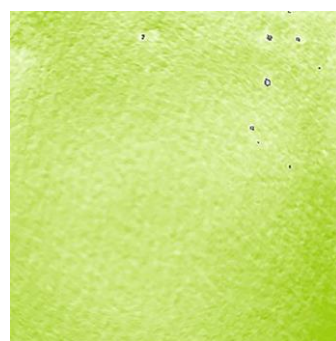
### 2.3 镀层孔隙率

对于基体铝来说, 镀银层是阴极性镀层, 银层孔隙率是衡量镀层耐蚀性的关键性指标<sup>[10]</sup>。当镀层存在较大孔隙与基体形成通路, 腐蚀性介质会直接穿过镀层并与基体发生化学反应, 加速表面腐蚀。本文选用传统的贴滤纸法测量镀层孔隙率, 滤纸上显色斑点面积与暴露在腐蚀剂的镀层面积之比即为孔隙率; 并使用ArcGIS软件, 对镀层孔隙率测试的图形进行矢量化分析, 以降低人工统计所造成的误差<sup>[11]</sup>。

图4~6为ArcGIS软件分析镀银试样的孔隙率图形过程。从图中可以看出, 经图形处理后可以较清晰地看到镀银层的孔隙。表2为不同碱洗时间孔隙率结果统计。可以看出, 碱洗2 min后, 镀银层孔隙最大直径为5.1 μm, 孔隙率较低, 仅为0.103%; 碱洗时间为4 min时, 镀银层孔隙最大直径为9 μm, 孔隙率为碱洗时间为2 min的6.1倍; 碱洗时间为8 min时, 镀银层孔隙最大直径为9.8 μm, 孔隙率为碱洗时间为4 min的11.3倍。随着碱洗时间增加, 试样微孔直径增大, 但趋势不明显, 孔径范围为5.1~9.8 μm。孔隙直径总和随碱洗时间的增加成数倍增加, 直径总和范围为24.6~1 629.6 μm。



(a) 贴滤纸法试样孔隙率



(b) ArcGIS 分析结果

图4 碱洗 2 min 后镀银试样孔隙率 ArcGIS 分析

Fig.4 ArcGIS analysis of the porosity of the silver coated sample after alkaline washing time of 2 minutes



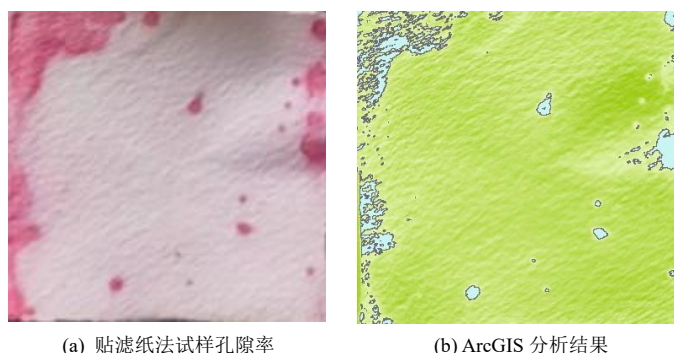
(a) 贴滤纸法试样孔隙率



(b) ArcGIS 分析结果

图5 碱洗 4 min 后镀银试样孔隙率 ArcGIS 分析

Fig.5 ArcGIS analysis of the porosity of the silver coated sample after alkaline washing time of 4 minutes



(a) 贴滤纸法试样孔隙率

(b) ArcGIS 分析结果

图 6 碱洗 8 min 后镀银试样孔隙率 ArcGIS 分析

Fig.6 ArcGIS analysis of the porosity of the silver coated sample after alkaline washing time of 8 minutes

表 2 不同碱洗时间孔隙率统计结果

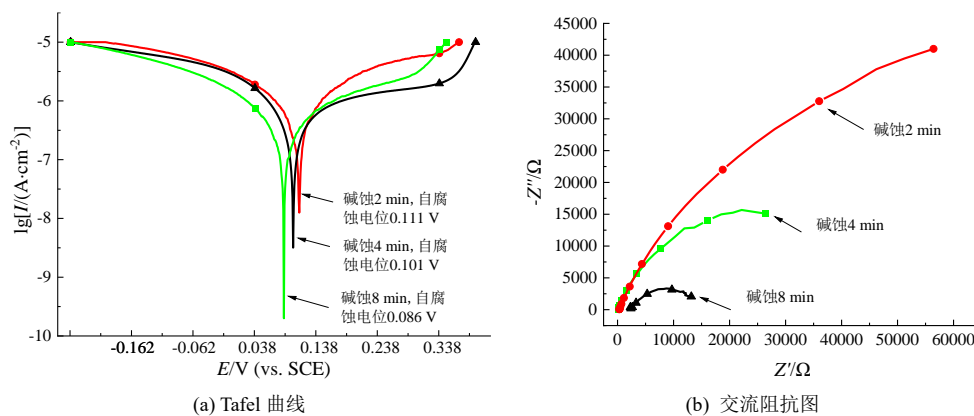
Tab.2 Statistical results of porosity for different alkaline washing times

碱洗时间/min	计数/个	最小值/ $\mu\text{m}$	最大值/ $\mu\text{m}$	总和/ $\mu\text{m}$	孔隙率/%
2	28	0	5.1	24.6	0.103
4	297	0	9.0	133.5	0.630
8	639	1	9.8	1 629.6	7.120

采用ArcGIS软件统计不同碱洗时间下镀银层的孔隙率。结果表明,随着碱洗时间的增加,镀银层孔隙率、孔隙数量和孔径均呈增加趋势,与2.2中实验结果相一致。

## 2.4 耐蚀性测试

使用电化学工作站测定不同碱洗时间下,各镀银层在0.1 mol/L  $\text{K}_2\text{SO}_4$ 体系中的Tafel曲线及交流阻抗,如图7所示。



(a) Tafel 曲线

(b) 交流阻抗图

图 7 不同碱洗时间 Tafel 曲线和交流阻抗图

Fig.7 Tafel curves and EIS at different alkaline washing time

在Tafel曲线中, $E_{\text{corr}}$ (自腐蚀电位)反映了材料热力学腐蚀倾向。当镀层存在孔隙时,系统的腐蚀电位为镀银层和基体的混合电位。当孔隙率降低,腐蚀电位向镀银层方向移动,该数值越大,表明镀银层的腐蚀倾向越小。 $I_{\text{corr}}$ (自腐蚀电流)反映了材料的均匀腐蚀速率。当孔隙率降低时,镀银层和基体之间形成腐蚀电池的机会较小,该数值越小,表明材料的腐蚀速率越慢<sup>[12]</sup>。从图7(a)可以看出,随着碱

洗时间的增加,镀银层的自腐蚀电位由0.111 V降低到0.086 V,自腐蚀电位逐渐降低。碱洗时间8 min与碱洗时间2 min相比,自腐蚀电位降低了22.5%。碱洗时间越小,镀层的自腐蚀电位越正,自腐蚀门槛更高,即碱洗2 min后得到的镀银层,其自发腐蚀的门槛更高。从图7(b)可以看出,碱洗2 min后得到的镀银层,其阻抗圆弧半径和电荷转移阻抗更大,腐蚀更不容易发生,与Tafel曲线表征结果一致。

### 3 结论

对铝合金镀银层表面的形貌进行了观察,采用图形软件分析镀银层的孔隙率并测试镀银层的Tafel曲线和交流阻抗图,研究了碱洗时间对铝合金镀银层耐腐蚀性能的影响。结果表明:随着碱洗时间的增加,铝合金基体和镀银层的孔隙率增加;自腐蚀电位降低,交流阻抗图半径减小,其耐腐蚀能力降低;碱洗时间选择2 min为宜。

### 参考文献

- [1] 徐曦,陈阳,邓乐萍.薄层镀硬银工艺在气体绝缘金属封闭开关设备上的应用性研[J].电气技术,2020,21(2):134-137.
- [2] 崔同贵.高压隔离开关电触头性能改善分析与探讨[J].科技传播,2013,5(14):38-40.
- [3] 曾领才,文伟,李德.纳米粉体复合镀银合金在高压开关电接触部位上的应用[J].电镀与涂饰,2009,28(5):20-22.
- [4] 郑克勤,吕旺燕,聂铭,等.户外高压隔离开关触头材

料的腐蚀与防护分析[J].广东电力,2019,32(7):124-133.

- [5] 李玲.开关设备主回路导电部件镀层要求的差异及探讨[J].电工电气,2023,(7):66-70.
- [6] 韩力,李明键,杨晓冬,等.无氰镀银新工艺在新东北电气集团的应用[J].电镀与精饰,2021,43(8):26-29.
- [7] 李孝坤,杜凌楠,朱幸福.镀银层在氯化钠和硫化钠溶液中的耐蚀性研究[J].电镀与环保,2020,40(3):66-68.
- [8] 凌颖,赵莉华,林显,等.高压隔离开关电触头性能改善探讨[J].高压电器,2010,46(8):101-105.
- [9] 岳永刚,白志强,赵墨林,等.采用导电滚动触头的隔离开关过热故障分析[J].高压电器,2008,44(6):592-595.
- [10] 何家林,张衡.酸洗时间对镀层孔隙率的影响[J].金属制品,2016,42(5):27-30.
- [11] Deshpande S, Kulkarni A, Sampath S, et al. Application of image analysis for characterization of porosity in thermal spray coatings and correlation with small angle neutron scattering[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 187(1):6-16.
- [12] 徐扬,邹勇,栾涛.化学镀镀层孔隙率对电化学行为的影响及其量化评价[J].功能材料,2013,44(6):902-905.

\*\*\*\*\*

### \*上接 65 页\*

- 熔凝组织和性能研究[J].热加工工艺,2018,47(2):182-184.
- [14] 葛亚琼,郭谡,王鑫,等.低能量密度气体激光熔凝 AZ31B 镁合金的微观组织与磨损性能[J].应用激光,2012,32(6):474-478.
  - [15] 王文先,陈建华,张红霞,等.极端冷却条件下 AZ31B 镁合金激光熔凝层的组织与性能[J].中国激光,2011,38(7):113-118.
  - [16] 肖罡,杨伟成,朱必武,等.预变形对 AZ31 镁合金高应变速率热轧组织及力学性能的影响[J].塑性工程学报,2021,28(11):11-17.

- [17] 韦永毅,谢红梅,苟庆霜,等.铸态和挤压态 AZ31 镁合金摩擦学特性对比研究[J].轻金属,2023(7):45-49.
- [18] 陈新健,隋荣娟,王燕飞,等.超声表面滚压工艺对 304 不锈钢耐腐蚀性的影响[J].金属热处理,2024,49(9):268-274.
- [19] 赵明欣,赵旭,郎小尘.钛合金表面超疏水膜的制备及其耐蚀性与机械稳定性[J].电镀与精饰,2024,46(2):44-51.
- [20] 袁鸽成,吴红辉,梁春朗,等.搅拌摩擦加工对 AZ31 镁合金耐腐蚀性能的影响[J].材料保护,2014,47(2):27-29.

\*\*\*\*\*

### \*上接 85 页\*

- 36(1):223-228.
- [43] 杜建华,金永丽,伍永福,等.热浸镀锌锌锅中锌液流动的数值模拟[J].钢铁研究,2012,40(1):26-29.
  - [44] Shawki S, Hamid Z A. Effect of aluminium content on the coating structure and dross formation in the hot-dip

galvanizing process[J]. Surface and Interface Analysis, 2003, 35(12):943-947.

- [45] Liu L, Pan X, Lu L, et al. Phase equilibria of 600 °C isothermal section of Zn-Al-Fe-Si quaternary system[J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2016, 37(6):1-9.