

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.03.005

## 负向电压对LA91镁锂合金微弧氧化膜耐蚀性的影响

方云鹏<sup>1,2</sup>, 杜克勤<sup>1\*</sup>, 郭泉忠<sup>1,2</sup>, 王勇<sup>1</sup>, 潘晓春<sup>3</sup>

(1. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学技术大学 材料学院, 安徽 合肥 230026; 3. 陆军研究院特种勤务研究所, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 采用双极性脉冲电源控制变量法, 分别得到不同负向电压和负向脉冲宽度下LA91镁锂合金的微弧氧化膜。通过扫描电镜和电化学方法比较不同工艺参数下合金微弧氧化膜的耐蚀性差异。结果表明: 负向脉宽及负向电压大小均对微弧氧化膜耐蚀性影响较大, 随着负向脉宽增大, 膜层表面孔洞数量减少但孔径尺寸略有增大; 当负向脉宽为65%时, 微弧氧化陶瓷膜的质量较好, 耐蚀性最佳; 此外, 过高或过低的负向电压均不利于微弧氧化膜的生长, 负向电压为50 V时较为合适。

**关键词:** 镁锂合金; 微弧氧化; 负向电压; 脉冲宽度; 致密性

## Effect of Negative Voltage on Corrosion Resistance of Micro-arc Oxidation Ceramic Layer of LA91 Magnesium-Lithium Alloy

FANG Yunpeng<sup>1,2</sup>, DU Keqin<sup>1\*</sup>, GUO Quanzhong<sup>1,2</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>, PAN Xiaochun<sup>3</sup>

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Institute of Special Services, Army Research Institute, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The micro-arc oxide film of LA91 magnesium-lithium alloy under different negative voltage and negative pulse width was obtained by the control variable method of bipolar pulse power supply. The corrosion resistance of alloy micro-arc oxide films under different process parameters was compared by scanning electron microscope and electrochemical methods. The results showed that the negative pulse width and the negative voltage have a great influence on the corrosion resistance of the micro-arc oxide film. As the negative pulse width increased, the number of pores on the surface of the film decreased but the pore size became larger. When the negative pulse width was 65%, the quality of the micro-arc oxidation ceramic film was better and the corrosion resistance was also the best. In addition, too high or too low negative voltage was not conducive to the growth of the micro-arc oxidation film. It is more suitable when the negative voltage was 50 V.

**Keywords:** magnesium-lithium alloy; micro-arc oxidation; negative voltage; pulse width; compactness

收稿日期: 2020-04-20

修回日期: 2020-06-16

\*通信作者: 杜克勤, 男(汉), 副研究员, 博士; 研究方向: 镁合金微弧氧化; E-mail: kqdu@imr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51501202)

镁锂合金材料由于低密度、高比强度以及良好的塑性变形能力<sup>[1]</sup>,在航空航天结构件、国防交通等领域中得到广泛应用,被称为“超轻合金”<sup>[2]</sup>。但镁和锂等均为活泼性金属,其自身耐腐蚀性较差,在服役环境中极易在两相界面中发生腐蚀,因而严重限制了镁锂合金的发展应用<sup>[3,4]</sup>。表面改性是抑制镁锂合金腐蚀的良好措施,常见的表面改性有电化学沉积、喷涂、化学转化膜以及微弧氧化处理等方式<sup>[5,6]</sup>。

微弧氧化技术(MAO)也称等离子体电解氧化技术,是一类特殊的阳极氧化技术<sup>[7]</sup>。其工艺简单且污染较少。它是在普通阳极氧化基础上,利用电解液处的等离子体放电并激活阳极反应,使合金金属表面原位生成与基体紧密结合的优质陶瓷层膜<sup>[8,9]</sup>。制得的陶瓷层膜通常具有耐高温、耐腐蚀、电绝缘等特性<sup>[10]</sup>,电参数、电解液组成以及基体等诸多因素均能影响陶瓷层膜的形成和性能<sup>[11]</sup>。其中电压模式是关键的电参数因素,改变电压大小以及占空比等均对膜层影响较大<sup>[12]</sup>。本文采用双极性脉冲模式,正向电压施加大小和时间相同,但改变负向脉宽和负向电压大小,在其LA91镁锂合金表面制备不同参数下的微弧氧化膜。通过电化学阻抗、极化曲线以及扫描电镜等方法,探究不同负向电压参数对镁锂合金微弧氧化膜的致密性和耐蚀性影响,从而为镁锂合金微弧氧化技术提供相关依据。

## 1 实验材料及方法

采用LA91镁锂合金作为基体材料,用线切割方式将合金板材加工为50 mm×50 mm×2 mm板状试样,经1000#SiC砂纸打磨光滑后,用稀盐酸洗去其表面自然氧化膜,然后依次放入丙酮、乙醇、蒸馏水中超声清洗5 min,并烘干试样。微弧氧化处理采用自主研发的加工设备,主要包括自制双极性脉冲电源、搅拌系统以及冷却系统。镁锂合金试样为电解阳极,不锈钢电解槽的环形内衬作为阴极。在微弧氧化过程,通过循环水冷却和电磁搅拌系统装置,控制其电解液温度保持在30℃左右。MAO电解液成分为0.018 mol/L NaOH、0.16 mol/L Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>和0.19 mol/L NaF。电参数过程施加为双极性脉冲

方式,持续5 min,脉冲频率设置为500 Hz,正向电压大小为300 V恒定,改变负向电压周期时间,其中负向脉宽占空比分别为0.85、0.65、0.45,负向电压大小分别为30 V、50 V、100 V。所得样品参数列于表1。

表1 MAO膜处理工艺参数

Tab.1 Treatment parameters in the MAO process

样品编号	1	2	3	4	5
负向脉宽	0.85	0.65	0.65	0.65	0.45
负向电压/V	30	30	50	100	30

图1是4号样品的微弧氧化电压波形图。先施加一个300 V周期时间0.7 ms的正向电压,再施加100 V周期时间1.3 ms的负向电压。

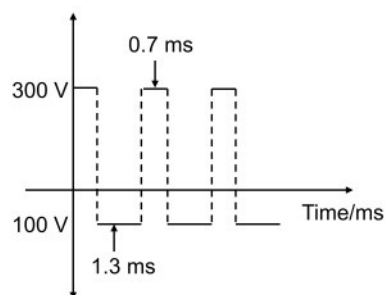


图1 脉冲电压波形图

Fig1 Diagram of pulse voltage waveform

微弧氧化后试样分别进行显微结构分析与电化学测试分析。本实验采用Philips FEG XL30型扫描电镜观察MAO膜截面、表面形貌。电化学实验采用Princeton P4000恒电位仪进行测试,测试体系采用三电极体系:参比电极采用饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为铂片,LA91镁锂合金样品作为工作电极,测试溶液为质量分数3.5% NaCl溶液。本文电化学测试包括:动电位极化曲线(PDP)测试、线性极化电阻测试与阻抗测试。所有测试前,试样在溶液中至少浸泡30 min,保证开路电位(OCP)达到稳定。极化曲线测试扫描范围为-0.5~0.5 V(vs. OCP),扫描速率为1 mV/s。线性极化电阻测试范围为-0.02~0.02 V(vs. OCP),扫描频率为0.167 mV/s。阻抗测试频率范围为10<sup>4</sup>~0.1 Hz,扰动信号振幅为10 mV,阻抗结果采用ZsimpWin软件进行解析。为防止噪

声干扰,电化学测试均在屏蔽箱内进行,且每组实验采用 4 个平行试样以保证实验结果的可靠性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 负向脉宽的影响

#### 2.1.1 极化曲线分析

不同负向脉宽下的合金样品做极化处理得到的极化曲线如图 2 所示,对其进行 Tafel 线性拟合得到各 MAO 膜在溶液中的腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )与腐蚀电流密度( $i_{\text{corr}}$ ),所得数据列于表 2。由表中数据可知,各样品在 NaCl 溶液中的腐蚀电流密度均为  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> 级别,说明所制备的 MAO 膜对 LA91 合金具有较好的保护性。对比不同负向脉宽的合金试样,可以看出,当负向电压为 30 V 时,阴极极化曲线斜率近似相同,而负向脉宽 65% 的试样腐蚀电位相对负向脉宽 45% 的正移,腐蚀电流密度较低;对比各极化曲线拟合数据,负向脉宽 65% 所拟合的极化曲线腐蚀电流密度也低于负向脉宽 85% 的电流密度。因此合理控制负向脉冲宽度是影响镁锂合金微弧氧化膜防护性能的关键因素,较高或较低的脉冲宽度均不利于陶瓷膜生长,负向脉宽 65% 时最为合适。

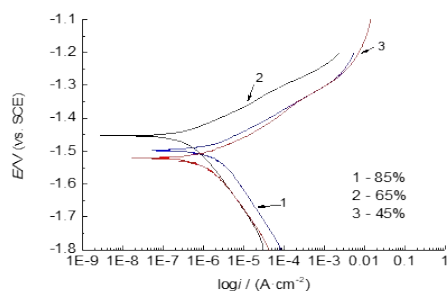


图 2 电压 30 V,不同负向脉宽下的极化曲线

Fig. 2 Polarization curves at voltages of 30 V with different negative pulse widths

表 2 各组 MAO 膜极化曲线拟合数据

Tab. 2 Fitting results of the polarization curves

样品/号	1	2	3	4	5
$E_{\text{corr}}/\text{V}$	-1.487	-1.447	-1.527	-1.506	-1.523
$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	1.613	0.912	0.865	1.245	0.971

#### 2.1.2 电化学阻抗分析

图 3 是不同负向脉宽下的阻抗结果,两组结果均表现出明显的容抗弧特征,容抗弧的半径与试样

的腐蚀速率有关。负向脉宽为 65% 时半径越大,对样品耐蚀性保护更好。采用图 4 所示的  $R_s(Q_f(R_f(Q_{dl}R_t)))$  等效电路进行拟合分析,以定量表征 MAO 膜层的致密性,拟合结果见表 3。其中, $R_s$  为溶液电阻, $Q_f$ 、 $R_f$  分别为 MAO 膜的等效电容与等效电阻, $Q_{dl}$  为双电层电容, $R_t$  为电荷转移电阻。 $Q_f$  值越小、 $R_f$  值越高,则 MAO 膜越致密,对基体金属的保护性越好。当负向电压同为 30 V 时,负向脉宽为 85% 阻抗值低,45% 次之,负向脉宽为 65% 时阻抗值最高。

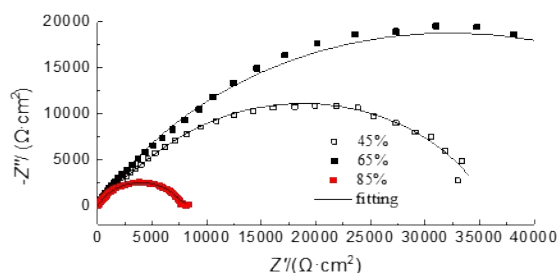


图 3 电压 30 V,不同负向脉宽下的 EIS

Fig. 3 EIS at voltages of 30 V with different negative pulse widths

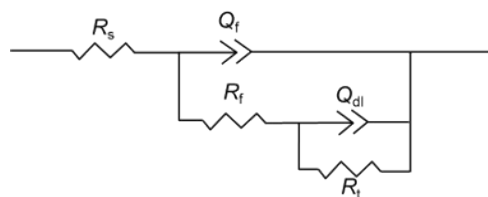


图 4 EIS 拟合等效电路

Fig. 4 EIS fitting equivalent circuit

#### 2.1.3 扫描电镜分析

LA91 镁锂合金微弧氧化膜的表面及截面如图 5 所示。可以发现,当负向电压在 30 V 时,随着负向脉宽由 45% 增大到 85%,微弧氧化膜微孔数量明显降低,负向脉宽在 65% 和 85% 的 MAO 膜的致密性均较好,表面更加平滑,但微孔孔径略微增大。但是在负向脉宽为 85% 时,陶瓷膜形成了类似圆圈的“火山喷发状”的组织形貌,微弧氧化过程中在高压作用下陶瓷膜发生熔融现象,此时表面微孔孔径降低,并且因为生成放电通道的缘故形成了很多的微孔,裂纹较大,稳定性低从而不利于镁锂合金的长久耐蚀;观察其截面形貌,负向脉宽为 85% 时,电源提

供能量过大,有烧蚀,膜层分层,并且其截面出现明显的裂纹,裂纹延伸至基体,此时微弧氧化膜完全被破坏,合金基体耐蚀性降低。负向脉宽为65%和45%时,其截面厚度相当,但负向脉宽65%的孔洞数量和大小要明显更优,这可能与正向电压的作用时间有关。可见负向脉宽对膜层的致密性影响较大,正向电压一定时,适当的负向脉宽更有利于微弧氧化膜的综合防腐性能。

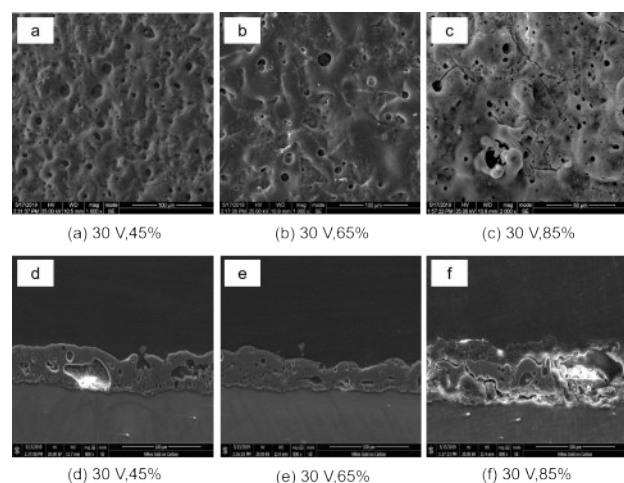


图5 电压30 V,不同负向脉宽下的SEM图

Fig. 5 Microscopic topography at different negative pulse widths at 30 V

表3 EIS拟合结果

Tab. 3 EIS fitting results

样品	$Q_f/(F \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{1-n})$	$n_f$	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}/(F \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{1-n})$	$n_{dl}$	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
85%, 30 V	$3.13 \times 10^{-6}$	0.741	$7.84 \times 10^3$	$2.00 \times 10^{-6}$	1	$3.34 \times 10^2$
65%, 30 V	$2.32 \times 10^{-6}$	0.713	$1.42 \times 10^4$	$2.61 \times 10^{-6}$	0.785	$2.42 \times 10^4$
65%, 50 V	$1.99 \times 10^{-6}$	0.756	$2.15 \times 10^4$	$1.71 \times 10^{-6}$	0.781	$2.32 \times 10^4$
65%, 100 V	$2.97 \times 10^{-6}$	0.611	$1.17 \times 10^4$	$1.09 \times 10^{-6}$	0.805	$1.33 \times 10^4$
45%, 30 V	$2.70 \times 10^{-6}$	0.673	$1.31 \times 10^4$	$5.26 \times 10^{-6}$	1	$6.90 \times 10^3$

## 2.2 负向电压的影响

### 2.2.1 极化曲线

负向脉宽65%,不同负向电压下的极化曲线如图6所示,从表2 Tafel线性拟合的腐蚀电流值可以看出负向电压在50 V时最小,虽然总体上微弧氧化膜的电流均较低,耐蚀较好,但控制负向电压也是影响MAO膜耐蚀的重要因素,负向电压较大,放电剧烈,局部烧蚀加剧,从而影响膜层质量让镁锂合金基体易受腐蚀;过低的负向电压可能能量过低,膜层生

长环境苛刻,导致膜层不足以更好的耐蚀。

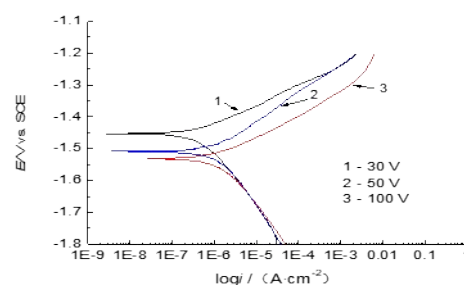


图6 不同电压下的极化曲线

Fig. 6 Polarization curves at different voltages

对该组试样进行极化电阻比较如图7,负向脉宽一致为65%时,负向电压太高或太低其极化电阻值均较低,中间值极化电阻值最高,极化电阻值越大,腐蚀电流密度值越小,合金耐腐蚀性更好,图7处理结果与极化曲线分析处理结果一致。

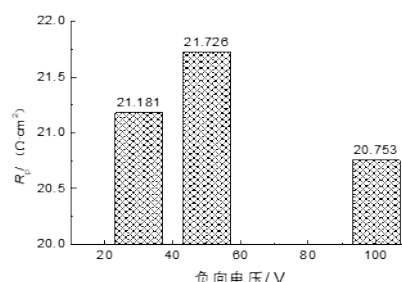


图7 负向脉宽65%不同电压下的极化电阻

Figure 7 Polarization resistance at different voltages with a negative pulse width of 65%

### 2.2.2 电化学阻抗分析

为进一步探讨不同负向电压下对MAO膜结构的影响,对各样品在NaCl溶液中的EIS结果进行分析。图8是三组施加不同负向电压的阻抗结果,可以看出,三组结果均表现出明显的容抗弧特征。负向电压为50V的镁锂合金容抗弧半径最大,电荷转移电阻越大,合金耐腐蚀性能更好。负向电压过小或过大均不利于MAO膜的保护性。由表3的拟合数据可以看出,在相同负向脉宽条件下, $R_f$ 在50 V的阻值最大,其耐蚀性最优异。且负向电压为50 V的 $n_f$ 值最大,致密性也最好。当负向电压为100 V时,试样的致密性最差,电压很高会明显降低其膜的致密性,因此过高或过低的负向电压均不利于膜的致密性和耐蚀性,这与极化曲线的实验结果一致。



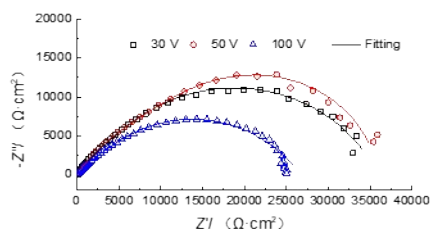


图 8 负向脉宽为 65%,不同电压下的 EIS  
Fig. 8 EIS with a negative pulse width of 65% at different voltages

### 2.2.3 扫描电镜分析

对 LA91 镁锂合金微弧氧化膜的表面及截面进行 SEM 测试,结果如图 9 所示,从 SEM 表面形貌像中可以发现,随着负向电压的升高,微弧氧化膜表面微孔数量增多,电压幅值升高会使孔隙率升高,负向电压为 100 V 的微孔数量最多,合金表面粗糙度增加,可以明显看出具有较多的显微缺陷。通常在恒定正向电压下施加负向电压,膜层上的电荷积累被中和,以及表面低温相和表面输送物质也被溶解,从而提高膜层的防腐性能。但负向电压过高,膜层局部可能被击穿,缺陷增多,从而导致防腐性能失效;从微弧氧化膜的截面可以看出,提高负向电压,一定程度上促进膜层生长,负向电压为 30 V 时膜层最薄,微孔数量也最少。负向电压为 100 V 时,膜层生长较好,厚度最大,但出现较大的疏松孔,孔径较大,截面氧化膜层出现断裂,此时耐蚀性得不到根本保证,因此控制负向电压为 50 V 时更为适合。

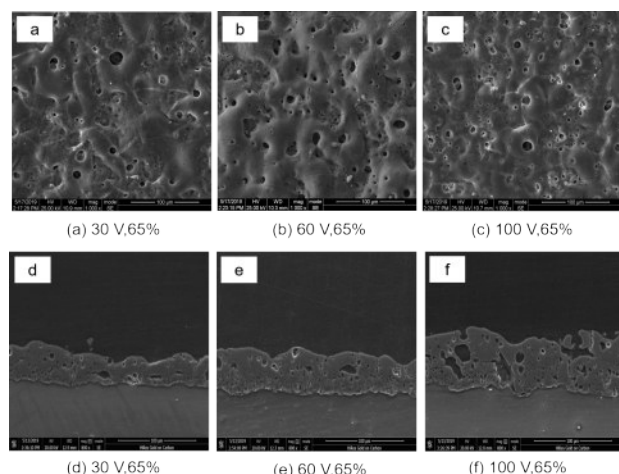


图 9 负向脉宽为 65% 下不同电压的 SEM 图  
Fig. 9 Microscopic topography of different voltages at a negative pulse width of 65%

## 3 结论

(1) 负向脉宽和负向电压大小均能影响 MAO 膜层的耐蚀性,不同负向电压条件其耐腐蚀效果存在差异,但总体上微弧氧化膜均能很好的抑制该镁锂合金的腐蚀。

(2) 随着负向脉宽增大,微孔数量下降但孔径略微增大,负向脉宽为 85% 时,膜层分层,稳定性低;负向脉宽为 65% 时,致密性较好,膜层耐蚀性最好。

(3) 总体而言,提高负向电压在一定程度上促进微弧氧化膜生长,电压越大,膜层越厚。但负向电压 100 V 时,电压过高,表面缺陷明显增多,膜层出现断裂,负向电压为 50 V 下更有利于提高镁锂合金防腐效果。

## 参考文献

- [1] Liu G, Xie W, Wei G B, et al. Dynamic recrystallization behavior and corrosion resistance of a dual-phase Mg-Li alloy[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2018, 11(3): 408-408.
- [2] Lee S J, Do T. Effects of copper additive on micro-arc oxidation coating of LZ91 magnesium-lithium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 307:781-789.
- [3] Yuan X, Yu D J, GAO L L, et al. Effect of phosphate-buffered solution corrosion on the ratcheting fatigue behavior of a duplex Mg-Li-Al alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25:1802-1810.
- [4] 王祝堂. 谈谈镁锂合金的性能[N]. 中国有色金属报, 2016-05-28(7).  
Wang Z T. Talk about the performance of magnesium-lithium alloy[N]. China Nonferrous Metals News, 2016-05-28(7)(in Chinese).
- [5] 高晓辉,李玉峰,祝晶晶,等. 镁锂合金的腐蚀机理及表面防护方法研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(9):3373-3379.  
Gao X H, Li Y F, Zhu J J, et al. Corrosion mechanism and surface protection method for magnesium-lithium alloy[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(9):3373-3379(in Chinese).
- [6] Lv S, Suo H, Wang J M, et al. Facile synthesis of nano-structured  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  on nickel foam and its electrochemical property[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2012, 396:292-298.
- [7] 邵忠财,戴诗行,张瑜,等. 铜钴镍离子对镁合金微弧氧

- 化膜的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(4):127-132.
- Shao Z C, Dai S H, Zhang Y, et al. Effects of copper, cobalt and nickel ions on micro-arc oxidation film of magnesium alloy[J]. Surface Technology, 2018, 47(4): 127-132(in Chinese).
- [8] 郭泉忠, 杜克勤, 朱秀荣, 等. 负向脉宽对Mg-Gd-Y合金微弧氧化膜致密性的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(2):89-94.
- Guo Q Z, Du K Q, Zhu X R, et al. Effect of negative pulse width on compactness of plasma electrolytic oxidation coatings on Mg-Gd-Y alloy[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(2): 89-94(in Chinese).
- [9] 师晓亭, 朱园园, 李国强, 等. AZ31B镁合金表面含钛涂层的制备及耐蚀性[J]. 航空材料学报, 2019, 39(1): 17-25.
- Shi X T, Zhu Y Y, Li G Q, et al. Preparation and corrosion resistance of titanium coating on AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(1):17-25 (in Chinese).
- [10] 薛文斌, 邓志威, 来永春等. ZM5镁合金微弧氧化膜的生长规律[J]. 金属热处理学报, 1998, 3:43-46.
- Xue W B, Deng Z W, Lai Y C, et al. Growth rule of micro arc oxidation film on ZM5 magnesium alloy[J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1998, 3:43-46(in Chinese).
- [11] Arrabal R, Matykina E, Hashimoto T, et al. Characterization of AC PEO coatings on magnesium alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(16):2207-2220.
- [12] 郭泉忠, 张伟, 杜克勤, 等. 电化学阻抗谱研究负向电压对AZ31B镁合金微弧氧化陶瓷层致密性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(6):467-472.
- Guo Q Z, Zhang W, Du K Q, et al. Study on the effect of negative voltage on the densification of AZ31B magnesium alloy micro arc oxidation ceramic layer by electrochemical impedance spectroscopy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(6): 467-472(in Chinese).
- [13] 霍慧丹. 镁合金微弧氧化复合陶瓷层的制备及其性能研究[D]. 太原:太原理工大学, 2015.

## 中国表面工程协会电镀分会教育培训基地 2021 年两期(总 83、84 期)

### 电镀技术、化验员、电镀废水治理学习班开学通知

中表协电镀分会第七次会员代表大会上为济南浩金表面技术有限公司颁发了《中国电镀教育培训基地》的资质证书,授予“‘中国电镀培训基地’济南基地”。在中表协电镀分会的直接领导下,与山东省及国内相关高校联合举办电镀技术、化验员、废水治理学习班,系统地讲解基础理论、新技术、新工艺。

#### 一、招生对象及培养目标

初中以上文化水平、具有一定生产知识的技术骨干,通过学习掌握电镀基础知识,常用工艺,电镀液及电镀废水的治理、分析方法,镀层测试技术等,提高分析解决问题的能力,可进行电镀工艺、车间、废水处理站、化验室设计,推广清洁生产技术。

#### 二、开设科目、学习方法、证书颁发及工作推荐

开设《电镀化学基础》、《电化学与电镀原理》、《电镀工艺学》、《电镀液及电镀废水化学分析》、《电镀测试技术》、《镀层质量标准及检测方法》、《电镀废水治理》等7门课程。以课堂教学为主,理论联系实际,开设30~35个实验,进行生产实习;请专家进行讲座,并组织学员赴国内先进地区参观。学习期满经考试合格者,可颁发中国电镀协会结业证书;也可再次报名,根据考试者条件技能水平,经考核合格者,由机械工业职业技能鉴定指导中心颁发初、中、高、技师、高级技师五个等级职业能力认定证书,作为工作上岗的资格证明,协助推荐工作及赴外研修。

#### 三、开学具体事项

1、学习时间:第83期2021年4月20日至5月21日,第84期2021年9月20日至10月21日,每期31天,五一节、国庆节前10天开学;(如在生产淡季或企业和个人需要,经协商,暑假6月至9月10日,寒假11月至次年4月10日,皆可举办学习班和个人培训,学习技术项目、时间、人数不限,费用等另行协商!)

2、学习费用:培训费(含实验费、资料费、参观费等)4800元(不含税),中途退学者不退。

3、食宿安排:食宿自理,由公司协助安排酒店,标准由各单位决定(食宿费一般每天120元左右,简易宿舍可洗澡每天20元)。

4、联系方式:联系人:济南市历城区唐冶中路2号楼4567号1508室(15层)

《济南浩金表面技术有限公司》石勇石磊石金生。

电话:(0531)88278889 手机:18660813836;13001715085;13006594941。

5、开学时间:第83期2021年4月20日全天报到,第84期2021年9月20日全天报到,当日晚开学并补课,次日正式上课。参加学习班者请于开学前15天电话(或微信)通知给联系人,以便安排学习资料、食宿。来校时请带1寸彩色免冠照片2张,参加国家机械工业职业技能鉴定指导中心职业资格证书考试者,发给相关文件,请在网上申请报名并带小二寸彩色免冠照片1张。

6、报到公交线路:①乘飞机 乘大巴济南长途汽车总站南站换乘69路至清联花园站下即到;②由济南火车站(长途汽车西站)乘K910或BRT1至三孔桥站下,换乘69路至清联花园站下即到;③济南长途汽车总站南站乘69路至清联花园站下即到;④由济南火车站乘4路长途汽车总站南站下,换乘69路至清联花园站下即到。

中国表面工程协会电镀分会教育培训基地  
济南浩金表面技术有限公司