

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.03.012

## 基于恒压控制模式镀锡工艺研究

胡 杨\*, 李柱祥, 胡水莲

(国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007)

**摘要:** 目前, 航空产品镀锡通常采用恒流控制模式生产, 此模式下, 产品出入槽需立即更改电流, 在连续生产方面存在一定局限性。为降低产品镀锡加工控制难度, 提升生产效率, 通过探究电流密度、电压、加工面积之间关联关系, 进行相关性能验证, 形成基于恒压控制模式镀锡工艺, 该工艺适用于  $27 \text{ dm}^2$  及以下加工面积零件的恒压镀锡生产。

**关键词:** 电镀; 恒压; 碱性镀锡; 电流密度

**中图分类号:** TQ153.16

**文献标识码:** A

## Research on tin plating process based on constant voltage control mode

Hu Yang\*, Li Zhuxiang, Hu Shuilian

(State-Owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China)

**Abstract:** At present, tin plating of aviation products is usually produced using constant current mode. In this mode, the current needs to be changed immediately when taking and placing products, which has certain limitations in continuous production. In order to reduce the difficulty of product tin plating process, control and improve production efficiency, a tin plating process based on constant voltage control mode was formed by exploring the correlation between current density, voltage and processing area, and then by conducting relevant performance verification. This process is suitable for constant voltage tin plating production of parts with a processing area of  $27 \text{ dm}^2$  and below.

**Keywords:** plating; constant voltage; alkaline tin plating; current density

由于镀锡层具有良好的耐蚀性、导电性和化学稳定性<sup>[1]</sup>, 广泛应用于航空修理领域, 同时也是保护电子互连和铜电路的关键耐蚀金属<sup>[2]</sup>。电流密度对镀层的成分和形貌有重要的修整作用, 对镀层的致密性和均一性亦有较大影响<sup>[3-4]</sup>, 故航空产品实际镀锡生产时, 需满足一定的电流密度要求<sup>[5]</sup>, 即按照产品面积设定电流。因此电镀前必须对所需电镀产品的加工面积进行计算。此时, 若电镀过程中取放产品, 需立即更改设定电流。由于航空产品小批量, 多品种, 形状复杂的特点, 过程中不可避免会遇到加工面积难以计算的问题, 增加了电镀加工过程的控制

难度。因此探究电流密度、电压、零件加工面积之间关联关系, 试验不同电压条件下电镀镀层沉积情况以及镀层性能情况, 研究基于恒压模式的电镀过程控制规律, 形成可实际应用的基于恒压控制模式的电镀锡工艺。

所谓恒压控制, 就是在电镀前将电源控制柜上的恒压开关(或恒压档)合上、恒流开关(或恒流档)断开<sup>[6]</sup>。按试验规律与膜厚实测的结果设定电压与时间, 这样在整个电镀处理过程中, 控制电压是恒定不变的。本研究通过大量试验, 探究不同电压数值的适用范围, 通过验证沉积情况、镀层性能情况, 形

收稿日期: 2023-07-06

修回日期: 2023-07-12

作者简介: 胡杨(1997—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事表面处理工艺研究及应用, email: 963630831@qq.com

成可实际应用的基于恒压控制模式的电镀锡工艺,供从事航空产品镀锡技术与生产的同行们参考。

## 1 实验部分

### 1.1 材料和工艺条件

本研究试样为 45A 钢试片和试棒,具体成分见表 1 所示<sup>[7]</sup>。试验使用碱性镀锡槽液,碱性镀锡液成分简单,分散能力和覆盖能力好,镀层结晶细致<sup>[8-9]</sup>。工艺条件:槽液温度 75 °C ~ 80 °C,槽液组成为 NaOH (10 g/L ~ 15 g/L)、 $\text{Na}_2\text{SnO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (50 g/L ~ 100 g/L)、 $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (12 g/L ~ 30 g/L)、 $\text{NaBO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (0.3 g/L ~ 0.5 g/L),施加的电流密度为 2 A/dm<sup>2</sup> ~ 3 A/dm<sup>2</sup>。

表 1 45A 钢材料化学成分

Tab.1 Chemical composition of 45A steel

元素	C	Mn	Si	Cr	Ni	其它
含量/wt.%	0.30~0.50	0.50~0.80	0.17~0.37	≤0.25	≤0.30	余量

### 1.2 仪器和工艺流程

工艺流程:45A 工件试样→除油→热水洗→水洗→活化→水洗→中和→水洗→镀铜→水洗→镀锡→水洗→热水洗→干燥→成品检验。

采用 TGDF 500A/12V 型高频开关电源为镀锡电源;采用 XDLM-237 型 X 射线荧光镀层测厚仪测定膜厚;按 GB5270—2005 进行结合力试验,镀层应与基体金属结合牢固,无起皮、脱落现象<sup>[10]</sup>;按 GB/T10125—2021 进行耐蚀性试验,经过 24 h 盐雾试验的试片,每 10 dm<sup>2</sup> 表面上的基体腐蚀斑不应超过 6 个,任一个腐蚀斑的直径不应超过 1.59 mm<sup>[11]</sup>;按 HB5067.1—2005 进行氢脆性试验,氢脆性应满足缺口拉伸延迟破坏试验,破断时间大于 200 h<sup>[12]</sup>;按 HB 5046—93 进行可焊性试验,锡镀层和焊料不应分离,锡镀层和基体金属不应分离<sup>[13]</sup>。

### 1.3 实验思路

使用恒压控制模式,对不同加工面积的试样进行镀锡处理,使实际电流密度  $J_k$  分别满足 (2 A/dm<sup>2</sup> ~ 3 A/dm<sup>2</sup>) 范围上下限,且数值稳定至少 3 min,记录此电压数值。通过对所有数据建立数学模型,分析得出恒压控制模式镀锡规律。其次,对不同电压下的沉积速率和镀层性能进行验证,探究其适用性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 恒压控制镀锡规律

#### 2.1.1 $J_k$ 为下限

使用恒压控制处理不同加工面积试样,电流密度为 2 A/dm<sup>2</sup> 时,电压与加工面积对应关系见表 2。

表 2 加工面积与电压关系

Tab.2 Relationship between processing area and voltage

$S/\text{dm}^2$	$U/\text{V}$	$S/\text{dm}^2$	$U/\text{V}$
1	1.0	16	5.2
2	1.3	17	5.5
3	1.6	18	5.6
4	1.8	19	5.7
5	3.4	20	5.8
6	3.5	21	6.1
7	3.7	22	6.2
8	3.7	23	6.3
9	4.0	24	6.6
10	4.0	25	6.6
11	4.0	26	6.8
12	4.4	27	7.0
13	4.6	28	7.1
14	4.8	29	7.2
15	5.0	30	7.3

对上表数据进行数学运算,使用工具进行拟合,得到电流密度、电压与加工面积之间的关联关系(见图 1)。当加工面积  $S$  大于等于 5 dm<sup>2</sup> 时,输入电压  $U$  满足图 1 模型,即  $U=0.166 S+2.474$ 。

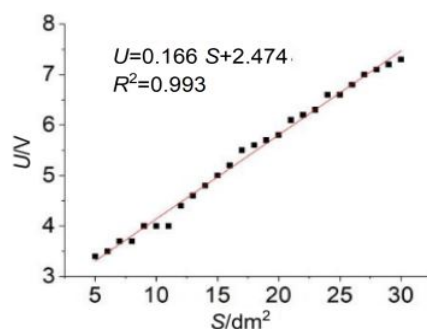


图 1  $J_k$  下限模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of  $J_k$  lower limit model

#### 2.1.2 $J_k$ 为上限

使用恒压控制模式处理不同加工面积试样,使电流密度为 3 A/dm<sup>2</sup> 时,电压与加工面积对应关系

见表3。

表3 加工面积与电压关系

Tab.3 Relationship between processing area and voltage

$S/\text{dm}^2$	$U/\text{V}$	$S/\text{dm}^2$	$U/\text{V}$
1	1.3	16	6.6
2	1.8	17	6.7
3	2.2	18	6.7
4	2.6	19	6.9
5	4.0	20	7.1
6	4.4	21	7.4
7	4.7	22	7.6
8	5.0	23	7.8
9	5.0	24	7.9
10	5.1	25	8.1
11	5.2	26	8.3
12	5.4	27	8.6
13	5.9	28	8.8
14	6.2	29	9.0
15	6.4	30	9.0

对上表数据进行数学运算,使用工具进行拟合,得到电流密度、电压与加工面积之间的关联关系。当加工面积 $S$ 大于等于 $5\text{ dm}^2$ 时,输入电压 $U$ 满足图2模型,即 $U=0.196S+3.238$ 。

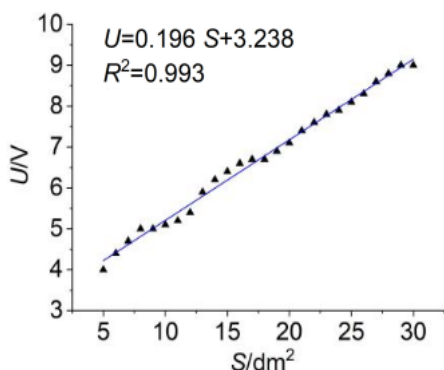


图2  $J_k$ 上限模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of  $J_k$  upper limit model

### 2.1.3 模型验证

上述两个模型中, $U$ 分别为加工某 $S$ 面积试样所设定电压的上下限。对于某一 $S$ , $U=0.166S+2.474$ 代表许用电压的最小值, $U=0.196S+3.238$ 代表许用电压的最大值,即使用恒压镀锡时,设定电压大小应在两个电压值之间。

使用45#钢试片进行规律验证,主要针对恒压

设定为4 V、5 V、6 V、7 V下的加工极限进行验证,探究其是否满足 $2\text{ A}/\text{dm}^2 \sim 3\text{ A}/\text{dm}^2$ 要求,实验结果见表4。

表4 模型规律验证表

Tab.4 Record table of model rule verification

序号	$U/\text{V}$	$S/\text{dm}^2$	$I/\text{A}$	$J_k/(\text{A}\cdot\text{dm}^{-2})$	备注
1	4	5	15.2	3.04	符合
2	4	8	16.3	2.04	符合
3	5	8	24.0	3.00	符合
4	5	14	31.8	2.27	符合
5	6	14	40.1	2.86	符合
6	6	19	42.3	2.23	符合
7	7	20	59.2	2.96	符合
8	7	27	56.1	2.08	符合

由表4试验数据可知,在各电压加工极限值下,实际电流密度 $J_k$ 符合 $2\text{ A}/\text{dm}^2 \sim 3\text{ A}/\text{dm}^2$ 要求,研究拟合的关系模型成立。

### 2.1.4 规律总结

对 $U=0.166S+2.474$ 、 $U=0.196S+3.238$ 两个模型进行整理,有如下规律:

$U=4\text{ V}$ 时,适用于 $5\text{ dm}^2 \sim 8\text{ dm}^2$ 面积零件的镀锡加工;

$U=5\text{ V}$ 时,适用于 $8\text{ dm}^2 \sim 14\text{ dm}^2$ 面积零件的镀锡加工;

$U=6\text{ V}$ 时,适用于 $14\text{ dm}^2 \sim 19\text{ dm}^2$ 面积零件的镀锡加工;

$U=7\text{ V}$ 时,适用于 $19\text{ dm}^2 \sim 27\text{ dm}^2$ 面积零件的镀锡加工;

当 $S$ 不足 $5\text{ dm}^2$ 时,可增加同槽试片,再采用恒压控制模式电镀。

### 2.2 镀层沉积情况

在实际生产中,除厚度外,金属镀层的镀层均匀性与完整性也是检验镀层质量的重要指标。如果厚度不均匀,往往其最薄的地方首先被破坏,其余部位镀层也会失去保护作用。依据法拉第定律,镀层厚度的均匀性主要反映了阴极表面上电流分布的均匀性<sup>[13]</sup>。为了评定恒压控制模式下金属或电流在阴极表面的分布情况,需要验证该模式下镀液的分散能力;同时为了评定零件深凹处沉积金属镀层的能力,需要对其覆盖能力进行验证分析。通过验证其分散能力及覆盖能力,可以分析恒压控制模式下,外形复杂零件表面镀层能否分布均匀。项目将采用对深孔

试件进行试验,看其镀层沉积情况。

试验使用异形试片、通孔试件作为研究对象,采用恒压控制模式工艺对试样进行镀锡 20 min,通过对试样上锡层分布情况进行分析,对分散及覆盖能力试验探究,镀后外观见图 3,其中,图 3(b)中数字“1”代表 1 倍直径范围区域,数字“2”代表除 1 倍直径范围外的 2 倍直径范围内区域。

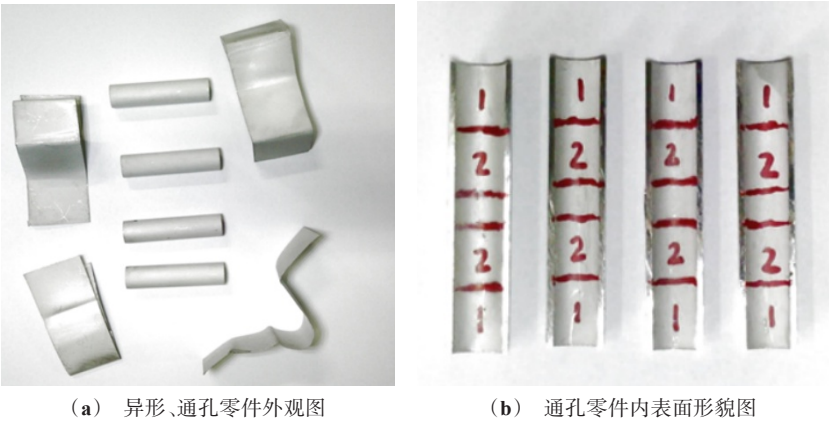


图 3 试样形貌图

Fig.3 Morphology of samples

如图 3 所示,锡镀层为银灰色至浅灰色,结晶均匀、细致。各试样凹凸处、深孔处均有较光亮的锡层。使用 X 射线荧光测厚仪对试样进行测厚,结果见表 5 和表 6。

表 5 试样外表面镀层厚度

Tab.5 Plating thickness on the outer surface of samples

序号	U/V	上部厚度/ $\mu\text{m}$	中部厚度/ $\mu\text{m}$	下部厚度/ $\mu\text{m}$	试样类型
1	4	8.11	8.07	9.46	通孔试件
2	5	8.12	10.3	8.97	通孔试件
3	6	8.42	9.11	7.85	通孔试件
4	7	10.8	9.45	12.4	通孔试件
5	4	6.61	6.78	7.03	异形试片
6	5	7.44	7.21	7.65	异形试片
7	6	7.79	8.21	8.35	异形试片
8	7	7.61	8.30	9.00	异形试片

从表 5 和表 6 数据来看,异形试片外表面厚度分布均匀,且其外凸处、深凹处亦存在良好锡层,且沉积效率较快:22  $\mu\text{m}/\text{h}$  ~ 30  $\mu\text{m}/\text{h}$ ;通孔试件外表面镀层分布均匀,且通孔试件 2 倍直径范围内均有不低于 2  $\mu\text{m}$  锡层,大于 2 倍直径范围存在锡镀层,满足 GJB 594A—2019《金属镀覆层和化学覆盖层选择原则与厚度系列》中“直径或宽度不大于 10 mm 的直通孔,其深度不小于直径或宽度的 3 倍时,允许无镀层;小于 3 倍时,镀层厚度不做要求”规定<sup>[14]</sup>。说明恒压控制模式生产的锡镀层沉积速率较好,且具有良好的分散性和覆盖性。

2.3 镀锡层性能试验

根据本文 1.2 中性能试验要求,探究了不同电压下恒压控制模式镀锡所得镀层的性能,以验证该工艺的可靠性,实验结果见表 7。

表 6 试样内表面镀层厚度

Tab.6 Plating thickness on the inner surface of samples

序号	U/V	上 1 倍直径/ $\mu\text{m}$	上 2 倍直径/ $\mu\text{m}$	下 2 倍直径/ $\mu\text{m}$	下 1 倍直径/ $\mu\text{m}$	试样类型
1	4	4.39	2.49	2.69	4.12	通孔试件
2	5	4.81	2.71	2.99	4.87	通孔试件
3	6	5.33	3.07	3.83	4.53	通孔试件
4	7	5.28	3.60	3.36	5.44	通孔试件

表7 镀层性能试验结果  
Tab.7 Results of plating performance test

性能	试验标准	4 V 镀层	5 V 镀层	6 V 镀层	7 V 镀层
结合力	GB 5270—2005	镀层未剥落	镀层未剥落	镀层未剥落	镀层未剥落
耐蚀性	GB 6458	36 dm <sup>2</sup> 区域 1 处 0.20 mm 腐蚀点	36 dm <sup>2</sup> 区域 1 处 0.35 mm 腐蚀点	36 dm <sup>2</sup> 区域内无腐蚀点	36 dm <sup>2</sup> 区域 1 处 0.15 mm 腐蚀点
氢脆性	HB5067.1—2005	破断时间≥200 h	破断时间≥200 h	破断时间≥200 h	破断时间≥200 h
可焊性	HB 5046—93	镀层/基体未分离	镀层/基体未分离	镀层/基体未分离	镀层/基体未分离

由表7数据可知,恒压控制时,不同电压下的镀层各项性能均满足标准要求,恒压控制镀锡层结合力良好,耐蚀性强,氢脆性影响低,可焊性好,可应用于实际生产。

3 结论

(1)基于恒压控制模式镀锡工艺经过各项实际验证,性能稳定,质量可靠,能够适用于航空零件电镀实际生产,生产时槽温控制在 75℃~80℃,电源设定按如下工艺进行:U=4 V 时,适用于面积 5 dm<sup>2</sup>~8 dm<sup>2</sup>零件的镀锡加工;U=5 V 时,适用于面积 8 dm<sup>2</sup>~14 dm<sup>2</sup>零件的镀锡加工;U=6 V 时,适用于面积 14 dm<sup>2</sup>~19 dm<sup>2</sup>零件的镀锡加工;U=7 V 时,适用于面积 19 dm<sup>2</sup>~27 dm<sup>2</sup>零件的镀锡加工;特殊地,当S不足 5 dm<sup>2</sup>时,可增加同槽试片,再采用恒压控制模式电镀。

(2)采用恒压控制模式镀锡时,应选用适宜的电压,生产时尽量避免某一电压加工范围上下限,以减轻不良导电可能造成的影响。

(3)采用恒压控制模式,电流随工件增减自动调整,相对恒流控制而言,电镀过程中取放产品无需重新设定电流,无需精确工件面积,最大优点是适用于电镀连续性生产,配合自动化生产线使用效果更佳。

参考文献

[1] 黄久贵, 李宁, 蒋丽敏, 等. 镀锡板耐蚀性及研究进展[J]. 电镀与环保, 2003, 23(6): 5-9.  
[2] Huang Y, Yang C, Tan X, et al. Benzaldehyde derivatives

on tin electroplating as corrosion resistance for fabricating copper circuit[J]. Nanotechnology Review, 2022, 11(1): 3125-3137.

[3] Sharma A, Ahn B. Effect of plating current density on the ball-on-disc wear of Sn-plated Ni coatings on Cu foils[J]. Coatings, 2021, 11(1): 56-56.  
[4] 黄久贵, 李宁, 周德瑞. 电流密度对锡键层结构及耐蚀性的影响[J]. 电镀与环保, 2004, 24(2): 14-15.  
[5] 侯进. 滚镀电流密度的定量控制[J]. 材料保护, 2022, 55(11): 128-132.  
[6] 黄允芳, 蔡锡昌, 等. 恒压与恒流两种铝阳极氧化控制方法的比较[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(2): 12-15.  
[7] 兴超, 郑安雄. 45A 钢电机主轴锻件无屈服现象的成因分析[J]. 湖北理工学院学报, 2022, 38(4): 34-37.  
[8] 仇启贤, 景兴斌. 镀锡板耐蚀性及研究进展[J]. 电镀与环保, 2015, 35(4): 52-53.  
[9] 黄先球. 电镀锡板的电沉积成核机理及防护技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
[10] 宋智玲, 钟立畅, 姜新华. GB/T 5270—2005 金属基体上的金属覆盖层 电沉积和化学沉积层 附着强度试验方法评述[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.  
[11] 杨朝晖, 丁国清, 等. GB/T 10125—2021 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
[12] 汤智慧, 宇波, 陆峰, 等. HB 5067—2005 镀覆工艺氢脆试验 第 1 部分:机械方法[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2005.  
[13] 冯立明, 王玥. 电镀工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
[14] 汤智慧, 詹中伟, 孙志华, 等. 金属镀覆层和化学覆盖层选择原则与厚度系列[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2019.