

# 转子刷镀铜工艺技术分析

权琳琳, 樊少忠

(西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘要** 针对转子轴承配合面尺寸超差影响轴承装配问题, 结合零件内腔注蜡、产品工序复杂、加工周期长等特点, 拟采用刷镀工艺对轴承配合面尺寸进行修复。通过对刷镀工艺的可行性、可靠性及刷镀工艺参数等技术重点和难点分析, 设计及优化了匹配该转子刷镀的工艺参数及工装。经过对转子轴承配合面室温刷镀, 满足转子轴承配合面铜镀层厚度要求, 修复后的转子轴承配合面尺寸不仅满足要求, 同时转子在皮带转速试验中镀层状态表现良好, 现已通过水试考核验证了工艺技术的可行性。

**关键词** 转子; 尺寸修复; 刷镀; 镀铜

**中图分类号** V434 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)01-0103-06

## Analysis on copper plating technology of rotor brush plating

QUAN Linlin, FAN Shaozhong

(Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

**Abstract** In view of the problem that the size of rotor bearing's mating surface exceeds the tolerance and affects the bearing assembly, combined with the characteristics of wax injection in the inner cavity of the parts, complicated product process and long processing period, it is proposed to use the brush plating technology to repair the size of bearing's mating surface. Based on the analysis of the feasibility, reliability and technical key points and difficulties of the brush plating process parameters, the process parameters and tooling of this type of rotor are designed and optimized. After brush plating of the rotor bearing matching surface at room temperature, the copper coating thickness of the rotor bearing matching surface is satisfied. In addition, the coating state of the rotor is good in the belt speed test, and the feasibility of the process technology is verified by water test.

**Key words** rotor; dimension repair; brush plating; copper plating

## 0 引言

产品在机械加工或使用过程中, 经常遇到一些轴、套、盘、壳体等零件或一些部件的孔、面、沟、槽

等被磨损, 因材料特殊、修复难度大, 不能再使用而报废<sup>[1]</sup>。针对这种情况, 采用再制造技术对公差要求较高的配合面进行尺寸修复, 即可满足产品的使用要求<sup>[2-5]</sup>。在再制造工艺技术中, 电镀技术有着

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-02-23

基金项目: 军工基础性科研院所稳定支持项目(2019KGW. YY4007Tm, 2020KGW. YY4312Tm)

作者简介: 权琳琳(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机表面处理。

难以取代的优势<sup>[6-8]</sup>,因为电镀技术是在零件表面得到不同镀层的技术,可以方便、快捷地实现尺寸的修复<sup>[9-15]</sup>。无论是零件外观、尺寸的改变还是磨损都发生在产品的表面,其基体都是完好的<sup>[16-18]</sup>。有些机械零件经过长期时效,虽然外观改变,但其基材比新制造零件更实用,对这些零件进行表面处理即可使其获得新生<sup>[19-23]</sup>。在修复性镀层工艺中,常见的有镀铬、镀镍、镀铜等,通过控制时间、电流密度等工艺参数,可以达到所需要的镀层厚度,再经过精磨达到零件指定的尺寸<sup>[24]</sup>。

某型号转子因轴承配合面尺寸超差而影响轴承装配,因此决定对轴承配合面尺寸进行修复。由于转子内腔灌注有石蜡(熔点 47 ~ 64 ℃)且前期做过相应的动平衡试验,包套转子若采用常规液相电镀,转子内腔的石蜡会熔化,影响转子后续水试试验,同时常规液相电镀极易损坏已经完成装配的转子,造成零件报废,任务延期。为挽救产品,结合转子特点,拟通过研究适宜转子的刷镀工艺参数对转子轴承配合面尺寸进行修复。

## 1 刷镀原理及研究思路

### 1.1 刷镀原理

刷镀是修复机械零部件的一种特殊工艺技术,主要具有设备简单、镀层沉积速度快、镀层脆性小、镀层孔隙率低等特点。与传统湿法电镀相比,刷镀不用镀槽,而是使用特配的溶液和带有不溶性阳极的镀笔。刷镀与电镀的基本原理一样,零件接电源的负极,刷镀笔接电源的正极,依靠浸满溶液的刷镀笔在零件表面上反复擦拭而获得镀层,其工作原理如图 1 所示。

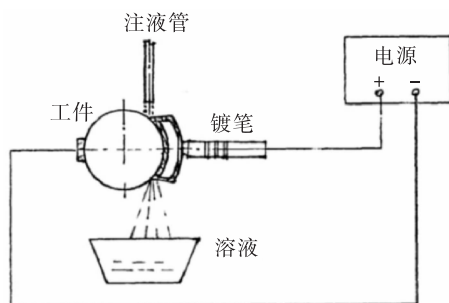


图 1 刷镀原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of brush plating principle

零件刷镀层的形成和零件浸在槽液中电镀层形成相同,都是溶液中的金属阳离子在零件上放电和结晶的过程。但不同之处在于,刷镀过程中镀笔和零件之间存在相对运动,因而被镀零件表面不是整体同时发生金属阳离子还原和结晶,而是零件表面各点在镀笔与其接触时发生瞬时放电结晶。此外,正是由于刷镀笔和零件之间的相对运动,使得刷镀可以采用比常规电镀大几倍到几十倍的电流密度,且同样可以获得均匀、致密、结合力良好的镀层,沉积速度也比镀槽电镀沉积速率快 5 倍至 50 倍。

### 1.2 研究思路

转子示意图如图 2 所示。

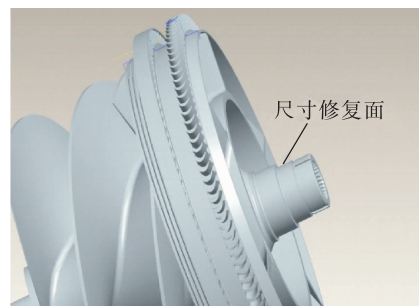


图 2 转子尺寸修复面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rotor dimension repair surface

试验按以下流程进行:有机溶剂除油→热水洗→冷水洗→活化→冷水洗→刷预镀镍→刷镀铜→尺寸测量→检验交付。转子轴承配合面补镀铜技术研究思路如图 3 所示。

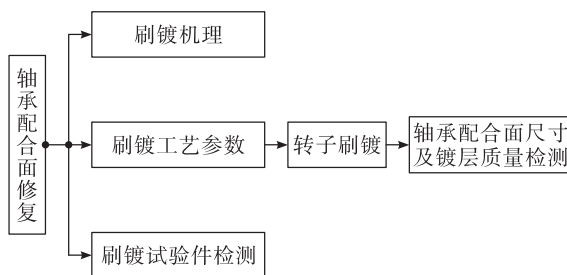


图 3 转子刷镀技术研究思路

Fig. 3 Research flow of brush plating technology for rotor

### 1.3 设备仪器

本实验所使用到的设备仪器有:10 A/12 V 直流电源用于刷镀铜制备,拉伸试验机(LZW-100G)

用于试件拉伸试验,X射线荧光测厚仪(XRF2020)用于刷镀铜层厚度检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 刷镀铜电结晶机理

刷镀铜和电镀铜虽然都可以获得铜镀层,但相关机理尤其是电结晶方面还有着一定的区别。为了研究刷镀铜工艺与电镀铜工艺的电结晶机理区别,制备刷镀铜层试验件和电镀铜层试验件。刷镀铜电压6~8 V,线速度18 m/min,刷镀25 min,试片铜层厚度为23~25  $\mu\text{m}$ ;电镀铜电流密度2.2 A/dm<sup>2</sup>,电镀覆时间65 min,试片铜层厚度为23~25  $\mu\text{m}$ 。对试片在同样放大倍数的情况下进行金相观察,如图4所示。

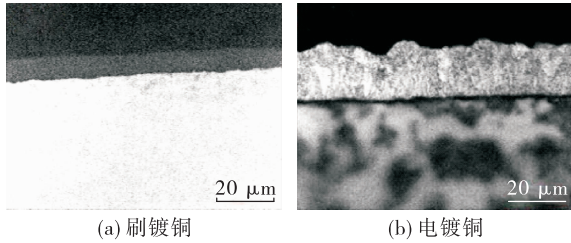


图4 不同镀层的组织形貌

Fig.4 Microstructure and morphology of different coatings

经能谱分析,刷镀铜和电镀铜试片表面铜镀层均为纯净的铜,均未见杂质元素存在。经金相分析,刷镀铜层组织为细小的等轴晶[见图4(a)];电镀铜镀层组织为垂直于生长面的相对粗大的柱状晶[见图4(b)]。在金相学中,对于一个晶粒在一个方向上特别长的是柱状晶,对于一个晶粒均匀细小且各个方向尺寸都相差不大的是等轴晶。

电沉积过程是一个相当复杂的过程,它包括金属与溶液界面间发生的各种过程和电极上的电结晶过程。金属的电结晶是金属形成晶核和晶核成长的过程。与一般盐类自溶液中结晶的过程相似,形成晶核都是一个形成新相的过程。在金属结晶过程中,整个体系的自由能变化关系为

$$RT \ln \frac{C}{C_s} = \frac{2\sigma V}{r_k} \quad (1)$$

式中: $C$ 为过饱和溶液的浓度; $C_s$ 为饱和溶液的浓度; $\sigma$ 为在 $T$ 温度时溶液与晶粒间的界面张力; $V$ 为晶体的摩尔体积; $r_k$ 为晶核的临界半径尺寸。

由式(1)可知,溶液的过饱和度( $C/C_s$ )越大,晶核的临界半径尺寸就越小,从而形成的晶粒尺寸就更小。

在金属电沉积过程中,阴极的平衡状态为溶液的饱和状态,而阴极的过电位则相当于溶液的过饱和度。在电结晶时,阴极的过电位越大,形成的晶粒也越细。在刷镀过程中有着较大的电流密度,该电流密度为常规槽体电镀的10~20倍,因此在较高的电流密度下,阴极极化程度也较高,镀层形成的晶粒也更为细致。

在电化学反应过程中,整个电极过程中电子的转移速度由于存在一定困难而表现出来的极化就是电化学极化。在电极电位离开平衡电位的不同程度或方向,也就产生了阴极极化和阳极极化。电化学反应过程中阴极极化的程度对金属电结晶的过程有着重要影响。在电镀过程中,远、近阴极和阳极之间的电压是相同的,均由两部分组成,即阳、阴极电位差和阴、阳极之间镀液内部的电压,由此可得

$$V_{\text{远阴极}} = V_{\text{近阴极}} = V = (\Phi_{\text{阳极}} - \Phi_{\text{阴极}}) + V_{\text{内}} \quad (2)$$

$$V_{\text{内}} = IR = \rho IL \quad (3)$$

式中 $\rho$ 为比电阻,为固定常数。

以图5的阴、阳极位置模型计算,假设近阴极电位为 $\Phi_1$ ,远阴极电位为 $\Phi_2$ ,阳极电位为 $\Phi_A$ , $L_1$ 、 $L_2$ 分别为近阴极、远阴极与阳极的距离<sup>[25]</sup>,因此将式(3)代入(2)中可得

$$(\Phi_A - \Phi_1) + \rho I_1 L_1 = (\Phi_A - \Phi_2) + \rho I_2 L_2 \quad (4)$$

可进一步简化为

$$-\Phi_1 + \rho I_1 L_1 = -\Phi_2 + \rho I_2 L_2 \quad (5)$$

$$\Phi_1 = \Phi_2 + (\Phi_1 - \Phi_2) = \Phi_2 + \Delta\Phi =$$

$$\Phi_2 + \Delta I \frac{\Delta\Phi}{\Delta I} = \Phi_2 + (I_1 - I_2) \frac{\Delta\Phi}{\Delta I} \quad (6)$$

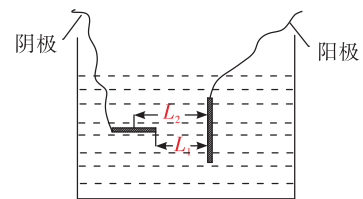


图5 电镀过程阴、阳极位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of the position of cathode and anode in electroplating process

又由  $L_2 = (L_2 - L_1) + L_1 = \Delta L + L_1$ , 结合式(5)、式(6)可得

$$(I_1 - I_2) \frac{\Delta\Phi}{\Delta I} + \rho I_1 L_1 = \rho I_2 (\Delta L + L_1) \quad (7)$$

即

$$\frac{I_1}{I_2} = 1 + \Delta L / \left( \frac{1}{\rho} \frac{\Delta\Phi}{\Delta I} + L_1 \right) \quad (8)$$

对于刷镀过程而言,阴、阳极处于均匀的面接触,因此在整个过程中,阴极各点处的电流是相同的,即  $\frac{I_1}{I_2} = 1$ ,继续简化可得

$$\Delta L / \left( \frac{1}{\rho} \frac{\Delta\Phi}{\Delta I} + L_1 \right) = 0 \quad (9)$$

由式(9)可知,在阴极不同部位距阳极距离一定(即  $L_1$  一定)时,可看出  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta I}$  趋近于无穷大,即阴极极化程度相当大。

由此可知,在刷镀过程中较大的阴极极化程度促使镀层晶体生长更为细致的等轴晶,镀层结晶也更为细致。镀液的阴极极化曲线如图6所示。

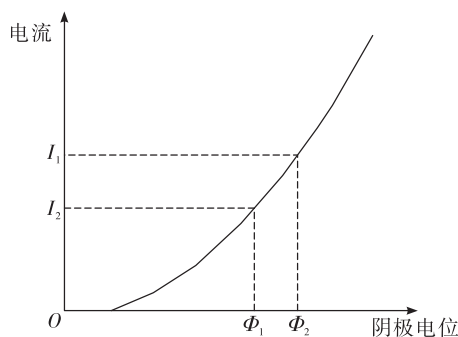


图6 镀液的阴极极化曲线示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cathodic polarization curve of plating solution

## 2.2 刷镀工艺参数

与电镀不同,刷镀过程中的电流值不是一个可调节的独立工艺参数,与刷镀溶液种类、镀液温度、刷镀笔的润湿程度、刷镀笔与工件的接触面积、刷镀笔电阻和工件电压等有着直接的关系。因此,在刷镀过程中电压处于恒定状态,根据零件状态确定最佳的电压值。工作电压作为刷镀过程中的一项主要参数,需要根据镀液种类、零件状态等确定电

压值。当工作电压较低时,刷镀层颜色暗淡;当工作电压较高时,刷镀层容易出现镀层粗糙甚至镀层烧焦等现象。

结合日常生产所获得的试验数据及刷镀铜溶液的本身性质,为了获得最佳的刷镀铜电压工艺参数,将电压控制在3~10 V范围内进行调节,对试验件进行刷镀30 min,得出刷镀电压与镀层状态的具体关系,如表1所示。

表1 电压与镀层的关系

Tab. 1 Relationship between voltage and coating

试验序号	刷镀电压/V	铜镀层外观
1	3~5	镀层边区暗红
2	6~8	镀层正常
3	9~10	镀层粗糙、烧焦

在刷镀过程中,阳极与零件的相对运动速度(线速度)是一个极其重要的工艺参数。每一种刷镀溶液在刷镀时阳极与零件均应保持一定的相对运动速度。当相对运动速度太低时,在同样刷镀电流下,镀层容易出现烧焦现象;相对运动速度太高时,会使刷镀过程中的电流效率降低,导致镀层沉积速率较低,甚至出现无镀层的现象。刷镀线速度与镀层沉积速率的关系如图7所示。

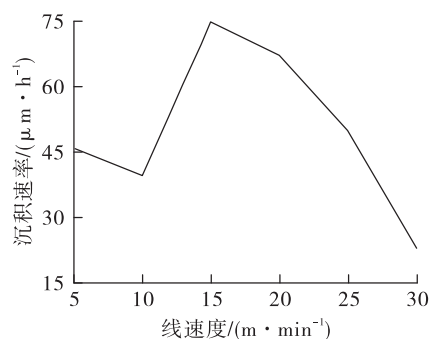


图7 刷镀线速度与镀层沉积速率关系

Fig. 7 Relationship between brush plating wire speed and deposition rate of coating

从图7中可以看出,随着阳极与零件相对运动速度的增加,刷镀层的沉积速率整体呈现出先增加而后降低的趋势。在5 m/min较低速度刷镀时,虽然有着较高的镀层沉积速率,但在该速度下镀层容

易变暗或烧焦;在 30 m/min 高速刷镀时,由于刷镀速度较高,不仅镀笔包裹的镀液容易甩出,而且会使刷镀部位的有效电结晶时间较短,电流效率较低,从而镀层沉积速率较低。因此,根据刷镀速度对镀层沉积速率影响的试验结果,阳极与零件之间的相对运动速度控制在 15 ~ 20 m/min 时有着较高的镀层沉积速率。

### 2.3 刷镀层结合强度

根据航天产品镀覆层结合强度的检验和验收,电镀完成后按照 QJ 479—90 标准中划格法进行金属镀覆层结合强度试验。划格法进行金属镀覆层结合强度试验时,划格器用足够的力将镀层划破至基体金属,划线形成 1 mm × 1 mm 的方格,用 3M 胶带黏住所划方格处后揭掉,目视检查交叉点或线上有无镀层剥落、片落或起皮。

从图 8 的试验结果可以看出,经划格法试验后,刷镀铜镀层与基体结合力良好,镀层无起皮、脱落现象,符合标准要求。



图 8 划格法试验后试片外观

Fig. 8 Appearance of test piece after drawing test

转子的轴承修复面不仅在后续的氧预压泵装配过程中需要一定的力度挤压轴承配合面(过盈配合),同时在后续试验中需经皮带转速试验(转速大于 1 000 r/min)进行考核。因此,转子轴承配合面镀层需有较高的结合强度。为了进一步量化测试刷镀铜层的结合强度(抗拉强度),采用 GB 8642—2002 标准进行镀层结合强度的拉伸试验测试,拉伸试验件如图 9 所示。

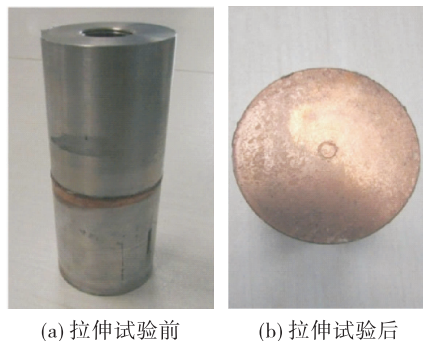


图 9 拉伸试验件

Fig. 9 Tensile test piece

拉伸试验件由基体和加载块组成[见图 9(a)],在基体块的端面刷镀铜层后,采用黏结剂将加载块与基体块黏结,并经一定时间完全固化后进行拉力试验机加载拉伸。在拉力试验机加载拉伸过程中,以恒速平稳地进行加载,加载速度为 400 N/s,直到基体块与加载块发生断裂。经过持续的加载拉伸,当载荷加大至 17.184 kN 时,抗拉强度(抗拉强度等于载荷与断裂面横截面积之比)为 36 MPa,基体块与加载块发生断裂。从图 9(b)中可以看出,基体块与加载块发生断裂后,基体块端面的铜镀层完整,未发生起皮、脱落等现象,基体块与加载块发生断裂的原因为黏结剂的强度不够。因此,经过拉伸试验可以得出,刷镀铜层的抗拉强度大于 36 MPa。

转子轴承配合面刷镀铜层后,镀层结晶细致、光亮,没有出现镀层崩边、起皮、鼓包等结合力不良现象[见图 10(a)];同时,转子经水试后轴承配合面的铜镀层依旧完整,也未出现镀层崩边、剥落等现象[见图 10(b)],满足了设计需求与试车考核要求。

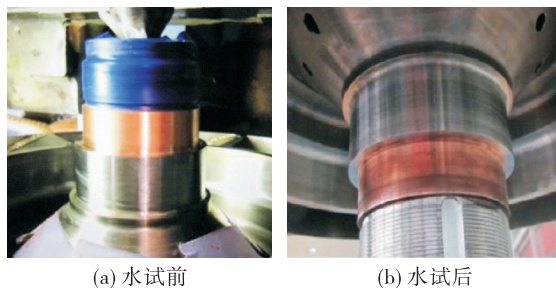


图 10 转子镀层状态

Fig. 10 Rotor coating state

### 3 结论

通过开展转子轴承配合面刷镀镀铜技术的研究,制备出了满足设计要求的产品,同时获得以下结论。

1) 获得了刷镀电沉积机理,刷镀过程中阴极极化程度的增加可促使电结晶过程中晶粒生长为更细致、均匀的等轴晶。

2) 基于产品结构、刷镀加工流程对转子轴承配合面修复的影响,获得刷镀铜最佳工艺参数:电压 6~8 V,线速度 15~20 m/min。

3) 修复后的转子轴承配合面尺寸不仅满足设计要求,同时转子在皮带转速试验(转速大于 1 000 r/min)中镀层状态表现良好,现已通过水试考核验证了工艺技术的可行性。

#### 参考文献

- [1] 黄立德. 发动机制造技术[M]. 北京:宇航出版,1990.
- [2] 张允诚,胡如南,向荣. 电镀手册[M]. 4 版. 北京:国防工业出版社,2011.
- [3] 崔重印,丁辉,杜汉文,等. 电刷镀技术在活塞杆修复中的研究及应用[J]. 设备管理与维修,2018(9):42-43.
- [4] 冯春晓,王东峰,陈勇,等. 车床导轨划伤面原位刷镀修复工艺[J]. 新技术新工艺,2010(1):70-71.
- [5] 晏初宏. 机械设备修理工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,2018.
- [6] 宋楠楠. 电刷镀工艺及在修理中的应用[J]. 农机使用与维修,2016(9):58-59.
- [7] 黄远提,唐有根,罗玉良. 酸性镀铜整平剂的合成及其性能研究[J]. 电镀与环保,2014,34(5):19-23.
- [8] 金亦辉,潘维浩,周瑜阳,等. 超疏水不锈钢网双面复合电刷镀制备法及其油水分离应用[J]. 表面技术,2022,51(5):363-373.
- [9] 王旭,张胜涛,陈世金,等. 印制电路板通孔电镀铜添加剂的优化[J]. 电镀与涂饰,2019,38(15):780-786.
- [10] 朱圣钦,陈世金,陈斐健,等. 改变镀液酸铜比和电流密度提高 PCB 深镀能力[J]. 印制电路信息,2018,26(5):24-28.
- [11] 刘仁志. 再制造中的电镀技术[J]. 表面工程与再制造,2018,18(1):19-22.
- [12] 牛飞. 化学镀与电刷镀技术在鍍金铜器修复中的应用研究[J]. 文物保护与考古科学,2022,34(1):42-48.
- [13] 唐义号,熊丽芳,熊哲,等. 电刷镀再制造技术快速修复缺陷零件应用研究[J]. 直升机技术,2011(2):49-51.
- [14] 曾勇. 电刷镀 Ni/石墨复合镀层的工艺及性能研究[J]. 煤矿机械,2017,38(7):69-71.
- [15] 王宗雄,鲍新华,任吉华. 电刷镀的设备、镀液配方及应用[J]. 电镀与涂饰,2017,36(12):632-642.
- [16] 刘守法,王晋鹏,吴松林,等. 基于镀铜 SiC-Cu 颗粒制备石墨烯片/SiC-Cu 和碳纳米管/SiC-Cu 增强体[J]. 复合材料学报,2017,34(11):2544-2549.
- [17] 权琳琳,翟绘丰,叶晖. 喷注器钎焊镍镀层均匀性控制[J]. 火箭推进,2020,46(5):94-101.  
QUAN L L, ZHAI H F, YE H. Study on uniformity control of nickel coating for injector brazing[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(5):94-101.
- [18] 许晨阳,高芳,陈浩,等. 氧化石墨烯/羟基磷灰石涂层对镁合金耐腐蚀性的影响[J]. 电镀与涂饰,2014,33(18):800-805.
- [19] 方蕾,吴畏,石金生. 一种新型遮蔽蜡在电镀中的应用[J]. 电镀与精饰,2015,37(10):35-38.
- [20] 王洪奎. 用于局部电镀的可剥过氯乙烯保护胶[J]. 电镀与精饰,2011,33(4):32-34.
- [21] 秦佩,陈长生. PCB 微盲孔电镀铜填平影响因素研究[J]. 电子工艺技术,2012,33(5):277-280.
- [22] 丁辛城,彭代明,陈梓侠,等. 新型整平剂 TS-L 对铜电沉积的影响[J]. 电镀与涂饰,2016,35(11):556-559.
- [23] 索帅,李文,杜宝帅,等. 无氰电刷镀银镀层性能研究[J]. 电镀与精饰,2022,44(2):7-11.
- [24] 黎科,陈世荣,何湘柱,等. 添加剂对高电流密度下通孔电镀铜的影响[J]. 电镀与涂饰,2018,37(9):369-374.
- [25] 荆学东. 基于虚拟仪器的纳米颗粒复合电刷镀工艺过程自动研究[D]. 上海:上海交通大学,2005.