

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.04.016

## 304 不锈钢电铸镍层厚度均匀性研究

何康<sup>1</sup>, 许芳<sup>1</sup>, 周赵琪<sup>1</sup>, 刘超男<sup>1</sup>, 乔叶平<sup>2</sup>, 王振卫<sup>1\*</sup>

(1. 上海应用技术大学 化学与环境工程学院, 上海 201418;

2. 上海有色金属工业技术监测中心有限公司, 上海 201800)

**摘要:** 为解决由于电流密度分布不均导致的电铸镍片厚度不均匀性问题, 研究了电铸工艺参数和阴极挂具结构对改善镍片厚度均匀性和电铸结瘤状况的影响。结果表明, 当电流密度为  $11 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 、阳极长度为 3.5 cm、极间距为 2.5 cm、温度为 45 °C 时, 镍片厚度均匀性最好。此时厚度平均值为 0.484 mm, 极差和均方差分别为 0.157 mm 和 0.044 mm。在最佳工艺参数下, 改善挂具和设计阴极遮蔽, 解决了接触点厚度薄的问题, 结瘤缓解, 电铸时间由 10 h 缩至 4 h, 厚度极差和均方差分别降至 0.116 mm 和 0.036 mm。实验确定的最佳工艺条件不仅提高了镍片厚度均匀性, 电铸时间也缩短了 60%, 提升了阳极镍粒的利用率, 节约了电铸成本。

**关键词:** 电铸; 厚度; 均匀性; 结瘤; 挂具

**中图分类号:** TG249.5 **文献标识码:** A

## A study about the thickness uniformity of electroformed nickel sheet on 304 stainless steel

He Kang<sup>1</sup>, Xu Fang<sup>1</sup>, Zhou Zhaoqi<sup>1</sup>, Liu Chaonan<sup>1</sup>, Qiao Yeping<sup>2</sup>, Wang Zhenwei<sup>1\*</sup>

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai

201418, China; 2. Shanghai Supervision and Testing Center for Nonferrous Metals Industry

Co. Ltd., Shanghai 201800, China)

**Abstract:** To address the issue of the thickness non-uniformity of electroformed nickel plates resulted from uneven current density distribution, this study investigated the impact of electroforming process parameters and cathode fixturing structure on enhancing the uniformity of nickel plate thickness and mitigating dendritic growth. The results show the uniformity of nickel sheet is the best when the current density is set at  $11 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ , the anode length at 3.5 cm, the electrode spacing at 2.5 cm, and the temperature at 45 °C. The average thickness is 0.484 mm, and the range and standard deviation of thickness decreases are 0.157 mm and 0.044 mm, respectively. Furthermore, by optimizing the rack design and introducing cathode shielding, thickness at the contact points is enhanced and nodular can be alleviated. The electroforming time can be shorted from 10 h to 4 h. Moreover, the thickness range and the standard deviation are reduced down to 0.116 mm and 0.036 mm, respectively. The optimal conditions obtained brings about the homogeneous thickness of the nickel sheet and a 60% reduction in the electroforming time. These improvements increase utilization ratio of anode nickel shots, thereby contributing to cost savings.

收稿日期: 2023-10-26

修回日期: 2024-01-17

作者简介: 何康(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 电镀与精饰, email: 17856416854@163.com

\*通信作者: 王振卫(1976—), 副教授, 研究方向: 工业镀涂层技术领域研究, email: wangzhenwei@sit.edu.cn

**Keywords:** electroforming; thickness; uniformity; nodulation; rack

电铸技术是利用电镀原理,在芯模表面沉积一定厚度金属,从而获得具有特定功能的金属零件的增材制造技术<sup>[1-3]</sup>。此技术具有精度高、可复制性强、操作简单等优点<sup>[4-6]</sup>。镍有良好的韧性、延展性、耐腐蚀性能和高温热稳定性<sup>[7-8]</sup>,电铸镍工艺广泛应用于印制电路板制造<sup>[9]</sup>、模具<sup>[10]</sup>、火箭推力室身部制造<sup>[11-12]</sup>、药型罩<sup>[13]</sup>及微电子<sup>[14]</sup>等诸多方面。

铸层均匀性是衡量电铸层质量的重要指标,直接影响电铸器件的机械性能和使用需求<sup>[15]</sup>。在电铸镍生产过程中,电流边缘效应导致铸层中心区域厚度薄,边缘区域厚度较厚<sup>[16]</sup>。一般通过改变电化学反应因素和几何因素来改善电铸镍层厚度分布的均匀性。

随着电铸行业的不断发展,研究人员往往借助超声搅拌<sup>[17]</sup>、兆声震动<sup>[18]</sup>、添加辅助电极<sup>[19]</sup>和阴极屏蔽<sup>[20]</sup>等方法,使电流分布更加均匀从而获得厚度均匀的电铸镍层<sup>[21]</sup>。Wang 等人<sup>[22]</sup>提出了一种制备层状辅助阴极的新方法,制作的电铸镍微型齿轮厚度不均匀性降低了 101.15%。Zhao 等人<sup>[23]</sup>研究了超声搅拌对电铸镍厚度均匀性的影响,并利用微细电铸镍工艺制作的金属芯片模具进行验证,其厚度均匀性提高了 43.4%。赵斯焱等人<sup>[24]</sup>在电铸镍薄片的过程中添加仿形辅助阴极,镍薄片厚度的不均匀性由 30.3% 降至 13.6%。袁炜<sup>[25]</sup>在电铸镍印版实验中将一整块阳极镍板分成 5 个独立的小阳极板,此方案厚度均方差从 447  $\mu\text{m}$  降到了 409  $\mu\text{m}$ 。目前,很少有针对电铸挂具设计,改善结瘤问题来提高电铸均匀性的相关研究。

本研究在 304 不锈钢片上进行电铸镍实验,电铸厚度为 0.400 ~ 0.600 mm。通过单因素实验分析电流密度、阳极长度、极间距、温度的影响,确定最佳工艺条件,同时对挂具进行多次改进,缓解结瘤来提高镍铸片厚度均匀性。

## 1 实验过程

### 1.1 实验材料

电铸模具为 304 不锈钢片 (50.0 mm × 20.0 mm × 0.5 mm)。阴极挂具为钛丝,导电接触点裸露,其余部分用绝缘胶包裹。阳极钛篮 (50 mm × 20 mm ×

20 mm) 孔洞为  $\Phi 3.0 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ 。阳极材料为柱形镍粒 ( $\Phi 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ )。

### 1.2 实验装置

实验装置如图 1 所示,阴极挂钩上黑色部分用绝缘胶包裹,导电接触点处裸露,不锈钢片正面设置绝缘挡板来遮蔽部分边缘电力线。

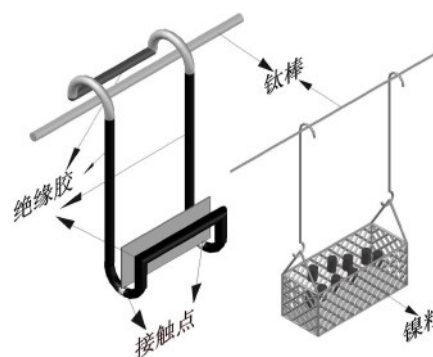


图 1 初始电铸阴极挂具和阳极钛篮示意图

Fig.1 Schematic diagram of cathodic rack and anodic titanium basket in initial stage

### 1.3 实验流程

#### 1.3.1 304 不锈钢电铸镍

电铸镍工艺流程:清洗→除油→18% HCl 活化→清洗→预镀镍→清洗→电铸镍→清洗→擦干吹干→干燥保存。

实验前将不锈钢片的一面用绝缘胶包裹,以实现单面电铸。正对阳极面称为正面,绝缘面称之为反面。随即将单面绝缘的不锈钢片依次进行清洗、除油、活化、清洗,再将其放置在图 1 中的阴极挂具上进行预镀镍、铸镍。各主要工艺操作条件如下:

除油工艺:除油剂(温州奥洋金属表面处理有限公司):去离子水 = 4:96,温度 50~60  $^{\circ}\text{C}$ ,时间 5 min。

预镀镍工艺:镀液组分为 HCl 80  $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  250  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,在 40  $^{\circ}\text{C}$  下电镀 10 min。

电铸镍工艺:电铸镍镀液配方见表 1,电流密度 8 ~ 12  $\text{A} \cdot \text{dm}^{-2}$ ,温度 35 ~ 55  $^{\circ}\text{C}$ ,阳极长度 2.5 ~ 4.5 cm,时间 10 h。

#### 1.4 铸层厚度测量与评价

不锈钢电铸镍完成后,去除镍片背面的绝缘胶和结瘤,在镍层表面取如图 2 所示的 15 个测厚点。

表 1 电铸镍镀液配方

Tab.1 Formulations for nickel electroforming plating solution

组分	浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
氨基磺酸镍	600
六水氯化镍	10
硼酸	40
十二烷基硫酸钠	0.4

用电子数显千分尺进行测厚,将实测数据减去 304 不锈钢基材厚度,得到铸镍片厚度。预镀镍层厚度为 3~5 μm,与电铸镍层厚度相比较小,忽略不计。

#### 1.4.1 测厚点

在电铸镍片上取 15 个点进行测厚,测厚点选取如图 2 所示。

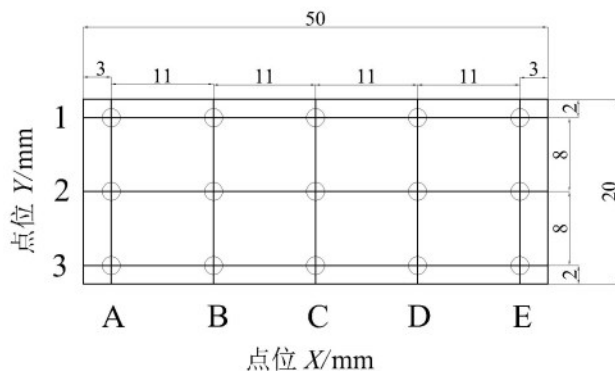


图 2 测厚点位图

Fig.2 Schematic of thickness measurement points

#### 1.4.2 测厚评价

利用极差、平均值、均方差作为铸层厚度分布情况的评定数据。

极差  $R$ :

$$R = \text{Max}(x_i) - \text{Min}(x_i) \quad (1)$$

平均值  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

均方差  $S$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3)$$

式(1)中  $\text{Max}$  为镍片测厚点厚度最大值,  $\text{Min}$  为测厚点厚度最小值; 式(2)和式(3)中  $n$  为样本数,  $x_i$  为各点厚度实测数据。极差反映了整组数据的波动性, 平均值反映了镍片的整体厚度。均方差是各数据偏离真实值的平方和的平均数, 可以直观地反映样本数据的偏离程度。均方差越大, 数据离散程度越大, 厚度分布越不均匀; 反之越小, 厚度均匀度越高。

## 2 结果与讨论

### 2.1 改善电铸工艺参数

#### 2.1.1 电流密度对均匀性的影响

分别在电流密度为 8、9、10、11、12 A·dm<sup>-2</sup> 的条件下进行电铸镍。图 3 为不同电流密度下电铸镍片厚度示意图。由图 3(a) 可知, 电流密度较小时, 沉积速度慢, 整体厚度偏低; 由于镍片底部和挂钩结瘤分担了接触点处大部分电流<sup>[26]</sup>, 导致此处镍层厚度低于 0.3 mm。随着电流密度的增大, 接触点处厚度有所增加, 但仍需进一步提高。从图 3(b) 和图 3(c) 可看出, 当电流密度为 11 A·dm<sup>-2</sup> 时, 镍片表面均匀性最好。此时均方差为最低值 0.049 mm, 极差为 0.170 mm, 厚度平均值为 0.423 mm, 电铸效果最好。当电流密度 12 A·dm<sup>-2</sup> 时, 电铸镍片整体厚度提高, 各点位均能达到 0.400 mm, 但镍片边缘处厚度最高达 0.608 mm, 且结瘤严重, 均匀性降低。

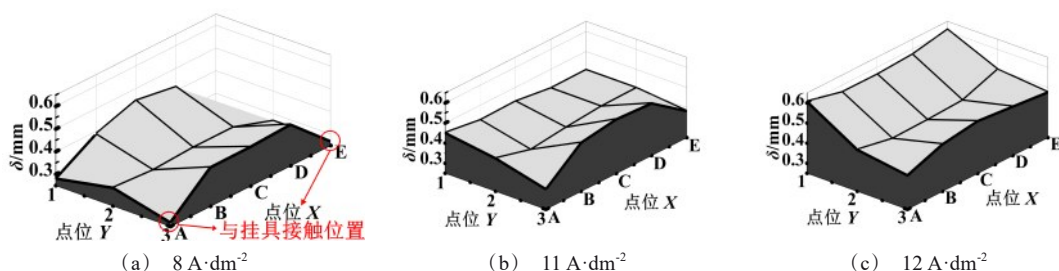


图 3 不同电流密度下电铸镍片厚度

Fig.3 Thickness of electroformed nickel sheet from different current densities

图4为不同电流密度下镍片厚度极差、平均值及均方差对比图。当电流密度为 $10\text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ 时,极差值最小,此时电力线的边缘效应较弱,但极化度较高,中间位置厚度增加,铸层均匀性提高。进一步增大电流后,电力线的边缘效应对镀层均匀性的影响成为控制镀层均匀性的主要因素<sup>[27]</sup>,边缘位置厚度增大,中间位置厚度无明显变化。在两种因素的共同作用下,镍片厚度极差增大。

### 2.1.2 极间距对均匀性的影响

电流密度为 $11\text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ 时,分别在极间距为2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 cm时进行电铸镍实验。结果见图5和图6。如图5(a)所示,当极间距为2.0 cm时,电场强度较大,电力线边缘集中更明显,导致镍片边缘厚度高于中间厚度。如图5(b)所示,当极间距增大至2.5 cm时,厚度整体均匀性提高。但2.1.1节中结瘤问题且接触点位置厚度薄的问题未得到明显改善。如图5(c)所示,当极间距增大至3.5 cm时,镍片底部厚度高于上侧部位厚度,铸层中间厚度低于 $0.400\text{ mm}$ ,镍片整体均匀性较低。这是因为随着极间距增大,电解槽中电力线分布范围随之变广,镍片下端电解液比上端电解液多,集中在镍片下端的电

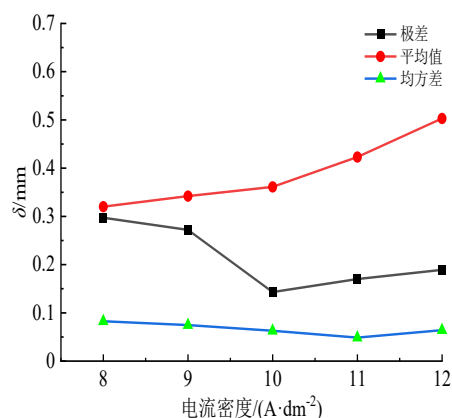


图4 不同电流密度下镍片厚度的极差、平均值及均方差

Fig.4 Range, mean value and standard deviation of thickness of nickel sheet from different current densities

力线因此更密集<sup>[28]</sup>;阴极和阳极距离增大,电阻增大,整体厚度也相应减小。不同极间距下镍片厚度极差、平均值及均方差如图6所示,当极间距为2.5 cm时,厚度极差为 $0.170\text{ mm}$ ,铸层厚度均方差为 $0.046\text{ mm}$ ,优于2.1.1节中的 $0.049\text{ mm}$ 。

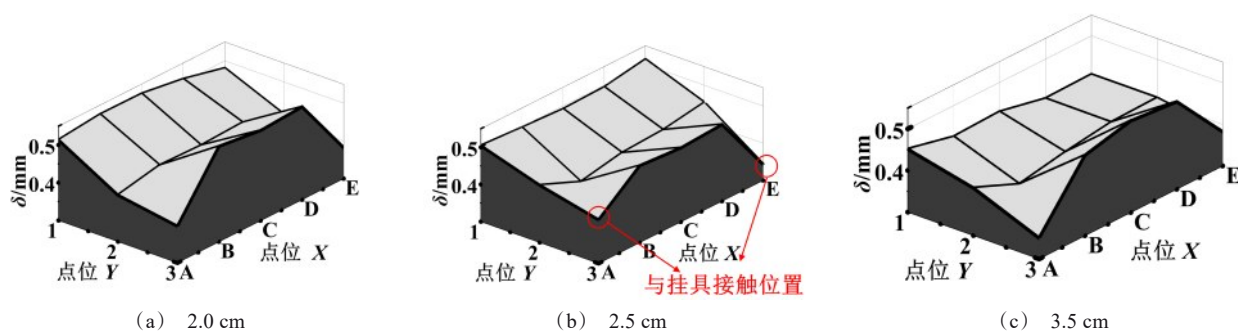


图5 不同极间距电铸镍片厚度

Fig.5 Thickness of electroformed nickel sheet from different electrode distance

### 2.1.3 阳极长度对均匀性的影响

电流密度为 $11\text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ ,极间距为2.5 cm时,分别在阳极长度为2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 cm下进行电铸镍实验。当阳极长度为2.5 cm和3.0 cm时,阳极整体面积较小,电流密度相对较高,表层镍粒产生了钝化现象,导致阳极镍粒不能正常溶解。当阳极长度为3.5 cm时,电铸镍层除接触点位置外其余各点位厚度均达到 $0.400\text{ mm}$ ,此时钝化现象消除,镍粒正

常溶解,结果如图7所示。从图8看出,此时镍片平均厚度为 $0.484\text{ mm}$ ,极差为 $0.157\text{ mm}$ ,厚度均方差最小,为 $0.044\text{ mm}$ 。若进一步增大阳极长度,消耗的镍粒数量增加,造成阳极镍浪费。综合考虑,阳极长度选用3.5 cm。

### 2.1.4 温度对均匀性的影响

电流密度为 $11\text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ ,极间距为2.5 cm,阳极长度为3.5 cm时,分别在35、40、45、50、55  $^{\circ}\text{C}$ 下进行电



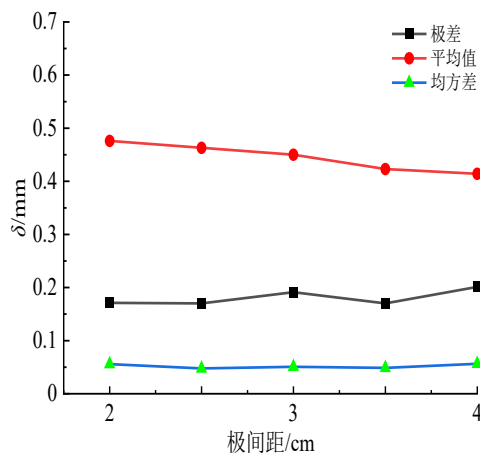


图 6 不同极间距下镍片厚度极差、平均值及均方差

Fig.6 Range, mean value, and standard deviation of thickness of nickel sheet from different electrode distance

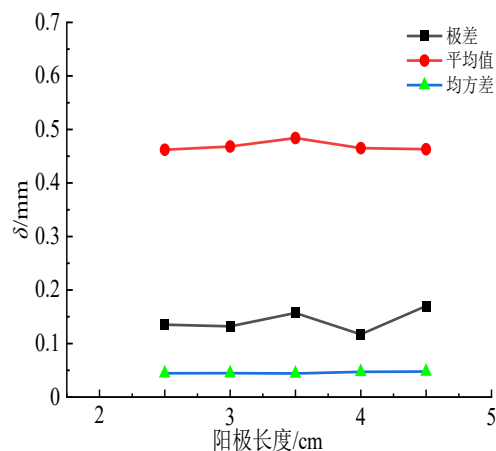


图 8 不同阳极长度下镍片厚度极差、平均值及均方差

Fig.8 Range, mean value, and standard deviation of thickness of nickel sheet from different anode basket lengths

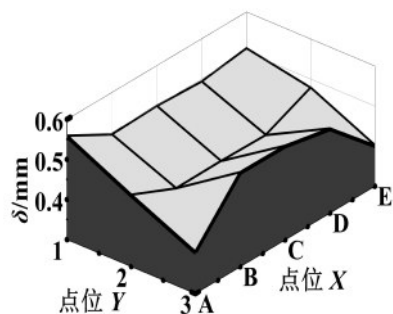


图 7 阳极长度为 3.5 cm 时电铸镍片厚度

Fig.7 Thickness of electroformed nickel sheet when the anode basket length is 3.5 cm

铸镍,结果见图 9 和图 10。从图 9(a)和图 10 看出, 35 °C 电铸时镍片中间位置厚度低于 0.400 mm, 接触点处厚度分别为 0.385 mm、0.357 mm, 镍片厚度平均值为 0.408 mm, 整体厚度偏低。从图 9(b)和图 10 看出, 当温度升高至 45 °C 时, 镍片平均厚度为 0.484 mm, 整体厚度增加。这是由于温度升高, 镍离子扩散速率增大, 电极极化降低。从图 9(c)和图 10 看出, 当温度升高至 55 °C 时, 阴极沉积速度和镍离子扩散速度进一步增大, 电力线集中现象更加明显, 导致四周结瘤加重。如图 10 可知, 在 45 °C 下, 镍片厚度极差和均方差分别为 0.157 mm、0.044 mm, 均匀性优于 35、40、50、55 °C。

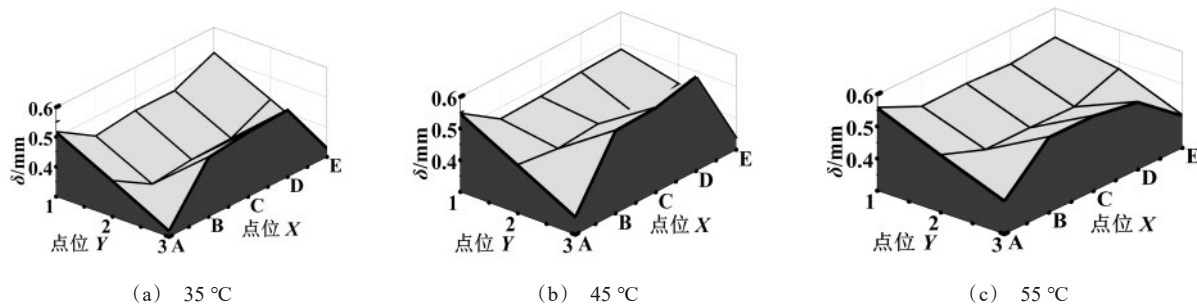


图 9 不同温度下电铸镍片厚度

Fig.9 Thickness of electroformed nickel sheet at different temperatures

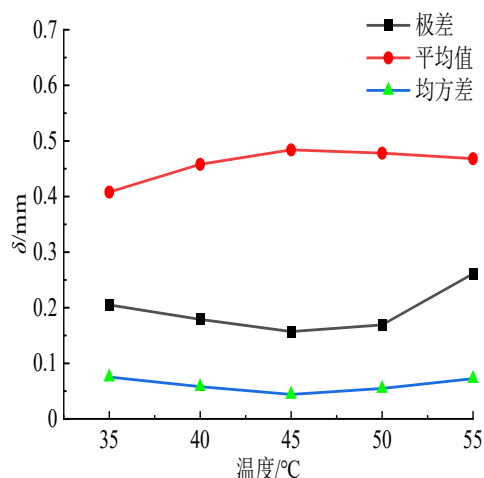


图10 不同温度下镍片厚度的极差、平均值及均方差

Fig.10 Range, mean value, and standard deviation of thickness of nickel sheet at different temperatures

## 2.2 改善电铸挂具

2.1.4 节最优条件下得到的镍片边缘厚度仍然较高,且结瘤严重。针对初始挂具的缺点,为使电力线分布更均匀,做以下改进:

方案1:将导电接触点焊接在不锈钢片反面,然后将不锈钢片反面涂覆绝缘胶,4个侧面用5 mm宽的绝缘胶片封贴,如图11(a)、11(b)所示。由于该挂具没有对不锈钢片正面四周边缘进行遮蔽,电力线仍然集中在边缘位置(图11(c)),导致电铸镍片边缘平均厚度(0.671 mm)高于中间平均厚度(0.404 mm)(图11(d))。虽然厚度分布并不均匀,但2.1节中接触点处镍层厚度薄的问题得以解决,并且镍片结瘤现象有所缓解(见图12)。这是由于除待铸面外其余面均被绝缘,结瘤生长受到限制。之前边缘结瘤所消耗的镍绝大部分转移到正面铸镍,因此电铸时间由10 h减短至4 h。

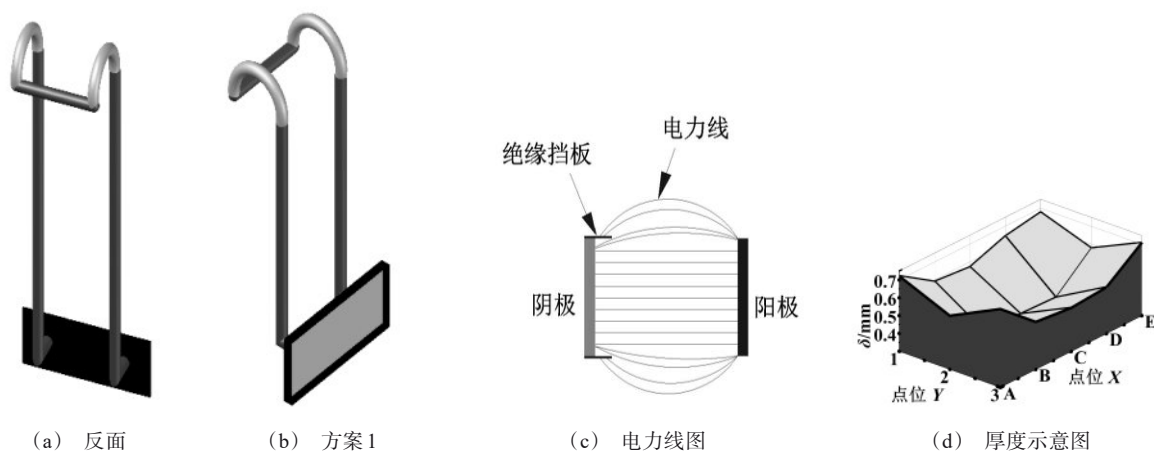


图11 方案1结构示意图、电力线分布图及镍片厚度

Fig.11 Schematic diagram of the structure of scheme 1, power line distribution diagram and thickness of nickel sheet

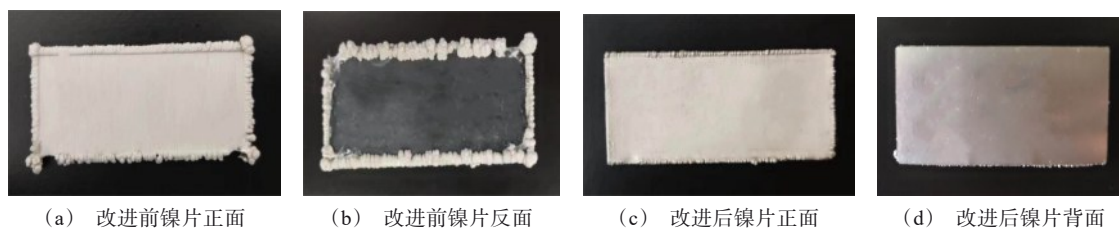


图12 方案1改进前后电铸镍片上结瘤对比

Fig.12 Comparative analysis of electroformed nickel nodule formation before and after improvement of scheme 1

方案 2: 在不锈钢正面四周前侧增加宽度为 5 mm 的绝缘胶片, 如图 13(a) 所示。绝缘胶片作为屏蔽挡板来遮蔽部分边缘电力线见图 13(b)。对不

锈钢片进行遮蔽后, 使得电流分布比较均匀, 镍片四周边缘平均厚度 (0.501 mm) 减小, 中间平均厚度 (0.481 mm) 增大 (图 13(c)), 均匀性有所提高。

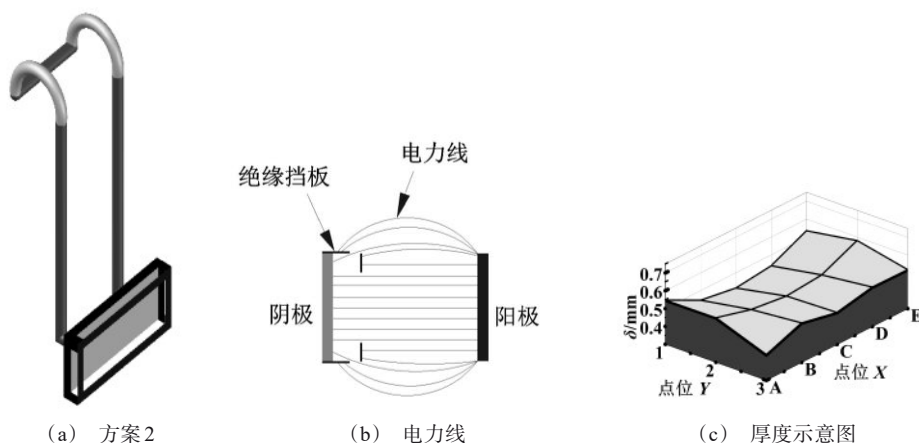


图 13 方案 2 结构示意图、电力线分布图及镍片厚度

Fig.13 Schematic diagram of the structure of scheme 2, power line distribution diagram and schematic diagram of nickel sheet thickness

方案 3: 为了进一步降低边缘位置厚度, 减小边缘与中间位置厚度差值, 对挂具进行了如图 14(a) 的改进。将不锈钢片正面四周前侧的绝缘胶片宽度增至 10 mm, 因此可减少更多电力线在边缘处的分布 (图 14(b))。结果如图 14(c) 所示, 镍片四周边缘

平均厚度 (0.495 mm), 中间平均厚度 (0.484 mm), 整体厚度均匀性进一步提高。图 15 为 3 个方案得到的镍片厚度均方差、极差、平均值对比图。从图中可看出方案 3 得到的镍片厚度均方差、极差最小, 分别为 0.036 mm、0.116 mm, 平均值为 0.487 mm。

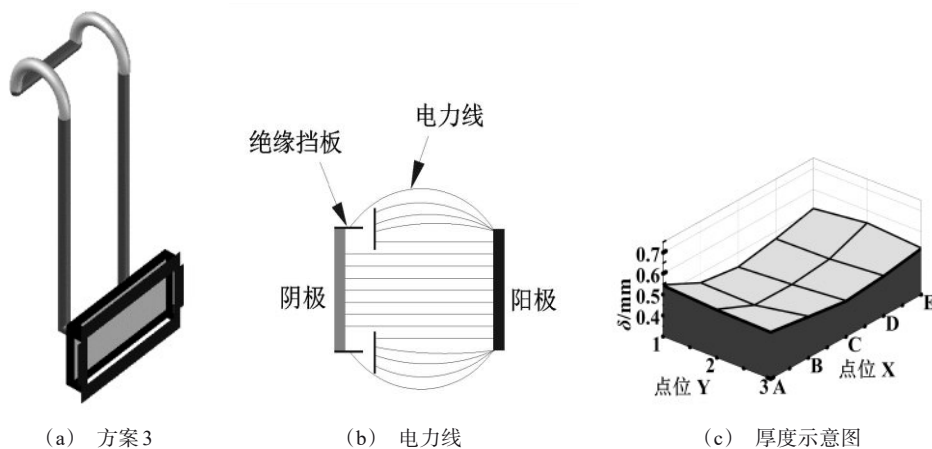


图 14 方案 3 结构示意图、电力线分布图及镍片厚度

Fig.14 Schematic diagram of the structure of scheme 3, power line distribution diagram and schematic diagram of nickel sheet thickness

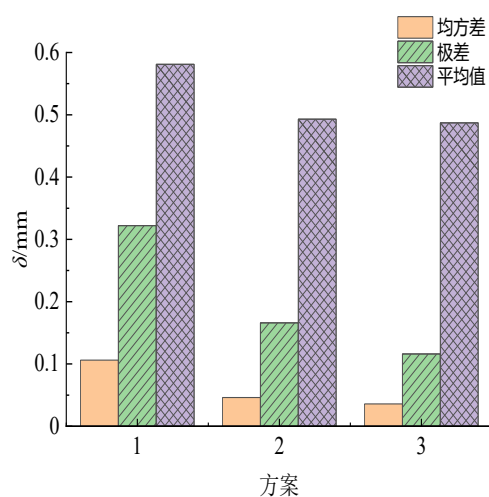


图15 挂具改善后镍片厚度极差、平均值及均方差数据图

Fig.15 Range, mean value, and standard deviation of thickness of nickel sheet after improvement of hanger

### 3 结论

(1) 优化后电铸镍工艺参数为: 电流密度  $11 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ , 极间距 2.5 cm, 阳极长度 3.5 cm, 温度  $45^\circ \text{C}$ 。此时厚度均方差为 0.044 mm、极差为 0.157 mm、平均值为 0.484 mm。

(2) 改善挂具结构缓解了结瘤问题及不锈钢片与挂钩接触点处镍层厚度薄的问题, 电铸时间从 10 h 降至 4 h, 电铸效率提高 60%, 节约了电铸成本。

(3) 镍片边缘厚度仍比中间部位厚, 并且结瘤未彻底消除, 因此需进一步研究。

### 参考文献

- [1] Zhang Y, Qian S Q, Fu X F. Experimental study on friction-assisted electroforming of Ni-Co alloys[J]. Materials Research Express, 2023, 10(2): 026508.
- [2] Green T A, Tambe C E, Roy S. Characteristics of anode materials for nickel electroforming[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(9): 092510.
- [3] 侯亚楠, 聂子超, 明平美, 等. 近阴极周向平动搅拌式平面电铸均匀性研究[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(11): 671-678.
- [4] Liu J, Hassanin H, Ni Z, et al. Production of high-precision micro metallic components by electroforming process[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2017, 32(12): 1325-1330.
- [5] Zhao Y F, Qian S Q, Zhang Y, et al. Experimental study on uniformity of copper layer with microstructure arrays by electroforming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114: 2019-2030.
- [6] Weinmann M, Jung A, Natter H. Magnetic field-assisted electroforming of complex geometries[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2013, 17: 2721-2729.
- [7] 于峰, 刘凤娟, 张绪虎, 等. 液体火箭发动机推力室身部外壁快速电铸成型技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(2): 98-103.
- [8] 杨建明, 朱荻, 王昆. 喷管的镍锰合金电铸及其开裂问题的研究[J]. 制造技术与机床, 2007, (2): 86-88.
- [9] 龚智伟, 王高坤, 林茂忠. 电镀均匀性原因分析与改善[J]. 印制电路信息, 2017, 25(6): 33-37.
- [10] Zhang H, Guan T, Zhang N, et al. Fabrication of permanent self-lubricating 2D material-reinforced nickel mould tools using electroforming[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 170: 103802.
- [11] 王昕宇, 费赟珺, 岳海金, 等. 热作用对电铸镍/铝铜组织与结合强度的影响[J]. 航天制造技术, 2022(6): 13-16, 22.
- [12] 岳海金, 邹鹤飞, 陈雪莹, 等. 电铸镍/不锈钢复杂热传导结构件的返修技术[J]. 焊接, 2019(6): 38-43, 67.
- [13] 杨峰, 田文怀. 电铸镍药型罩的微观组织及力学特性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(2): 1-5.
- [14] Wang H, Xie J, Fan T, et al. Improving the thickness uniformity of micro gear by multi-step, self-aligned lithography and electroforming[J]. Micromachines, 2023, 14(4): 775.
- [15] Zhan X F, Shen C J, Zhu Z W, et al. New precision electroforming process for the simultaneous improvement of thickness uniformity and microstructure homogeneity of wafer-scale nanotwinned copper arrays[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 187: 104006.
- [16] Yang H, Kang S W. Improvement of thickness uniformity in nickel electroforming for the LIGA process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(7): 1065-1072.
- [17] Du L Q, Tong Y, Ming Z, et al. Study on improving thickness uniformity of microfluidic chip mold in the electroforming process[J]. Micromachines, 2016, 7(1): 7.
- [18] 杜立群, 董雅坤, 郭柄江, 等. 装配式惯性开关的兆声辅助微电铸均匀性研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(13):



- 14-21.
- [19] Park C W, Park K Y. An effect of dummy cathode on thickness uniformity in electroforming process[J]. Results in Physics, 2014(4): 107-112.
- [20] Yang G, Deng D R, Zhang Y Z et al. Numerical optimization of electrodeposition thickness uniformity with respect to the layout of anode and cathode[J]. Electroanalysis, 2021, 12(5): 478-488.
- [21] 闫亮, 赵小康, 张华锦, 等. 薄壁无缝金属管电铸均匀性研究[J]. 机械工程与自动化, 2022(1): 24-26.
- [22] Wang H, Xing J P, Fan T, et al. An effect of layered auxiliary cathode on thickness uniformity in micro electroforming process[J]. Micromachines, 2023, 14(7): 1307.
- [23] Zhao M, Du L, Xu Z, et al. improving the thickness uniformity of micro electroforming layer by megasonic agitation and the application[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 239: 122331.
- [24] 赵斯焱, 朱增伟. 电铸镍薄片阵列的厚度均匀性研究[J]. 电加工与模具, 2021(3): 39-44.
- [25] 袁炜. 基于有限元方法的电铸镍印版均匀性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020. 39-41.
- [26] 刘晓东, 朱晴晴, 李宵宵, 等. 316L 不锈钢带卷镀铜厚度不均匀性研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(3): 68-74.
- [27] 李加东, 吴一辉, 张平, 等. 掩模电镀镍微结构的镀层均匀性研究[J]. 光学精密工程, 2008(3): 452-458.
- [28] 罗龚, 陈茂琳, 袁原, 等. 极间距和工作电压对阳极屏蔽电沉积铜定域性的影响[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(1): 35-41.

## 《实用滚镀技术基础》出版发行

由侯进编著的《实用滚镀技术基础》一书, 日前已由化学工业出版社出版发行。

侯进是邯郸大舜电镀设备有限公司总经理、总工程师。中国电子学会高级会员, 中国电子学会电镀专家委员会副主任委员、专家会员, 《电镀与精饰》期刊编委。从事滚镀工艺、设备技术研究、开发及生产制造逾三十年, 在国内专业期刊发表论文十余篇, 其主持研发的 CZD 型振镀机, 获国家实用新型专利。

滚镀是小零件电镀加工的主要方式, 与小零件挂镀或篮筐镀等相比, 节省劳动力, 提高生产效率, 并且滚镀的镀层表面质量好, 镀层厚度波动性小, 占地面积小, 通用性强等。但滚镀同时具有施镀时间长, 施镀难度大, 镀层均匀性差, 零件低电流密度区镀层质量差, 槽电压高等缺陷, 从而影响了滚镀生产效率和产品质量的提高。所以, 需要采取措施解决或改善滚镀的问题, 降低其不利影响或危害, 以充分发挥滚镀的优越性, 使其更好地服务于生产。

这次出版的《实用滚镀技术基础》一书, 全面介绍了滚镀技术的基础知识, 包括滚镀的概念、特征、分类、优缺点, 以及滚镀的溶液、工艺条件等; 滚镀的基础理论, 包括滚镀的电流密度、混合周期及结构缺陷等; 典型滚镀技术的应用——钹铁硼零件滚镀。该书将散乱的滚镀知识系统化, 立足滚镀技术基础, 助力滚镀知识的普及与推广。针对滚镀存在的问题, 主要从槽外控制角度等多方面采取措施, 以利于实际的滚镀生产。该书适合滚镀生产一线人员阅读, 对从事滚镀相关工作如滚镀工艺研发、推广及设备制造等人员具有参考价值, 也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

该书可通过化学工业出版社、淘宝、天猫或京东旗舰店购得, 或直接扫码购买。

