

# 回转件表面高强度铜的高速电铸试验研究

赵子俊,朱洪宇,薛子明,朱增伟  
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**设计了一种回转阴极表面电铸液高速冲刷与高电流密度沉积交替进行的电铸铜加工方式,以提高回转件表面电铸铜沉积效率和沉积层质量。在溶液冲刷速度为 3 m/s 左右的条件下,分别以 4、8、12、16 A/dm<sup>2</sup> 的电流密度进行电化学沉积,并对电铸铜层进行力学性能检测。检测结果显示:8 A/dm<sup>2</sup> 电流密度下获得的电铸层综合力学性能最优良,其显微硬度值为 186.1 HV、抗拉强度达 455 MPa、延伸率为 20%;在 12 A/dm<sup>2</sup> 及 16 A/dm<sup>2</sup> 电流密度下电铸层力学性能略有下降,但是抗拉强度仍高于 400 MPa。

**关键词:**电铸铜;试验研究;力学性能;沉积速度

**中图分类号:**V261.5<sup>+</sup>2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)01-0041-04

## Experimental Study on High-speed Electroforming of High-strength Copper on a Rotary Mandrel

ZHAO Zijun, ZHU Hongyu, XUE Ziming, ZHU Zengwei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** On the surface of rotary cathode surface, a copper electroforming method, by which high-speed flushing and high current density deposition operate alternately, was designed. This method was able to improve the copper depositing efficiency and quality of electroformed copper layer on the surface of the rotating mandrel. Electrochemical deposition at a current density of 4, 8, 12, 16 A/dm<sup>2</sup>. And the mechanical properties of the electroformed copper layer were carried out under the conditions of a solution with flow rate of approximate 3 m/s. The test results show that the deposition layer obtained at 8 A/dm<sup>2</sup> current density possesses the best comprehensive mechanical properties, and its microhardness value is 186.1 HV, tensile strength 455 MPa, elongation 20%, at 12 A/dm<sup>2</sup>, and 16 A/dm<sup>2</sup> current density the mechanical properties of the electroformed layer decrease slightly, but the tensile strength remains higher than 400 MPa.

**Keywords:** electroformed copper; experimental study; mechanical properties; deposition rate

## 0 引言

电铸铜由于具有优良的导电性、导热性以及延展性,被广泛应用于航空、军工产品、仪器仪表、塑料、精密机械、模具制造、电子工业及纳米材料制备等领域<sup>[1-4]</sup>。沉积层综合力学性能以及阴极沉积速率是评价一种电铸加工工艺好坏的两项重要指标。传统硫酸盐电铸铜过程中<sup>[5-6]</sup>,使用添加剂并对阴极进行空气搅拌的情况下,阴极表面可承受最大电流密度一般不超过 6 A/dm<sup>2</sup>,且电铸层抗拉强度不超过 250 MPa。多年来,研究人员提出了许多改善电铸铜层性能以及提高沉积速率的电铸工艺。赵建峰等<sup>[7]</sup>研究发现使用脉冲电源可以获得致密且均匀的电铸铜层,显著提高了电铸层质量;赵阳培等<sup>[8]</sup>提出的射流电铸工艺可实现大电流密度、高电流效率电铸且金属结晶细化、电铸层致密;任建华等<sup>[9]</sup>将空心悬浮微珠摩擦辅助及脉冲电源引入电铸铜工艺并得到了晶粒细密的电铸铜层。传统射流电铸通常将可溶性电铸阳极安装在冲液喷嘴内部,对阴极表面进行定点或者扫描式的沉积<sup>[10]</sup>,阳极部分

溶解之后其表面轮廓发生变化,阴极表面电场分布会随之改变,而且喷嘴内部的阳极无法在线修整或补充,故对于大尺寸及大厚度零件的精密电铸加工,此加工方法存在一定的局限性。

本文基于高速冲刷可减薄扩散层的原理<sup>[11]</sup>,提出一种使回转阴极表面电铸液高速冲刷与高电流密度沉积交替进行的电铸铜加工方式,可溶性阳极结构与射流喷嘴相互独立,可及时补充阳极材料且便于控制阳极轮廓。该方法适用于大型回转件的外表面电铸,预期可实现较高的阴极极限电流密度,同时细化晶粒,获得高强度的电铸铜层。

## 1 实验

### 1.1 电铸液成分及实验参数

实验所用电铸液为:五水硫酸铜 200 g/L,纯度 98% 浓硫酸 60 g/L,温度(30±1)℃;芯模转速 30 r/min。

电流密度分别为:4 A/dm<sup>2</sup>、8 A/dm<sup>2</sup>、12 A/dm<sup>2</sup> 以及 16 A/dm<sup>2</sup>,控制电铸时长以保证各电流密度下电铸层厚度

**基金项目:**南京航空航天大学开放课题项目(HTL-A-19G10)

**第一作者简介:**赵子俊(1995—),男,江西景德镇人,硕士研究生,研究方向为机械制造及工艺。

在  $240\ \mu\text{m}$  左右。

## 1.2 实验方法

采用不锈钢材质圆柱体作为阴极芯模,阳极以含磷量 0.05% 左右的磷铜球堆砌而成。高速冲液装置安装在工件正上方,电铸过程中电铸液正对芯模顶部高速冲刷,冲液装置出口溶液流速约  $3\ \text{m/s}$ ,芯模以  $20\ \text{r/min}$  的速度匀速转动(图 1)。

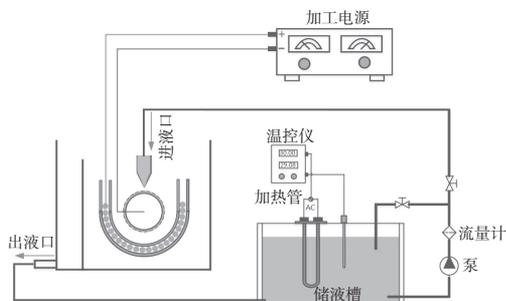


图 1 高速冲液电铸沉积单元示意图

## 1.3 电铸层性能检测

### 1) 表面形貌

观察电铸层表面宏观形貌,初步检查电铸层是否存在气孔、起皮、烧焦等重大缺陷,并使用 HITACHI-S3400N 型扫描电子显微镜观察电铸层表面微观形貌。

### 2) 显微硬度

采用 HXS-1000A 型显微硬度计测量电铸铜层的显微硬度,加载压力为  $0.5\ \text{N}$ ,保载时间为  $10\ \text{s}$ 。每个试件选择 5 个点进行测试,结果取平均值。

### 3) 抗拉强度及延伸率

采用 CSS-2202 型电子万能试验机测量电铸层的拉伸性能,包括抗拉强度与延伸率,试验速度为  $1\ \text{mm/min}$ 。在拉伸试验前,根据金属材料拉伸试验室温试验方法(GB/T228.1—2010)规定,采用电火花线切割机对电铸层切割并清洗干净,对样件的锐边角打磨、抛光,减少拉伸过程中的应力集中。检测完毕后,按照国标(GB/T228.1—2010)的计算方法,计算得到电铸铜层的抗拉强度以及延伸率。

### 4) 拉伸断面形貌

采用 HITACHI-S3400N 型扫描电镜观察拉伸试样端口的表面形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面形貌

不同电流密度下电铸铜层表面宏观照片如图 2 所示,电流密度从  $4\ \text{A/dm}^2$  提升至  $16\ \text{A/dm}^2$  过程中,电铸铜层表面始终光亮平整,无起皮、烧焦、气孔等明显缺陷。这说明试验中电铸液高速冲刷阴极表面的溶液更新方式能有效降低阴极表面浓差极化,使沉积区域可承受较高的电流密度。

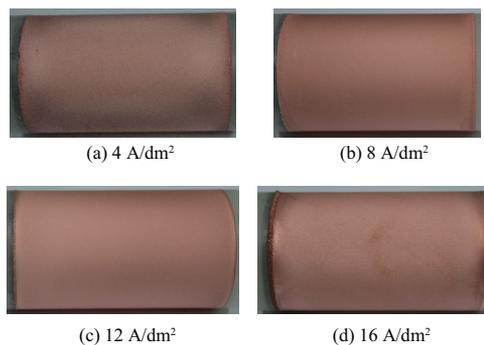


图 2 不同电流密度下电铸层表面宏观照片

从图 3 所示的电铸层微观形貌照片可以看出:在  $4\ \text{A/dm}^2$  的电流密度下,电铸层晶粒尺寸较为粗大;电流密度在  $8\sim 16\ \text{A/dm}^2$  之间时晶粒细密且差距不大。较大的电流密度可以提高阴极过电位,从而提高形核率,使晶粒细化,因此当电流密度增大时晶粒尺寸明显减小。

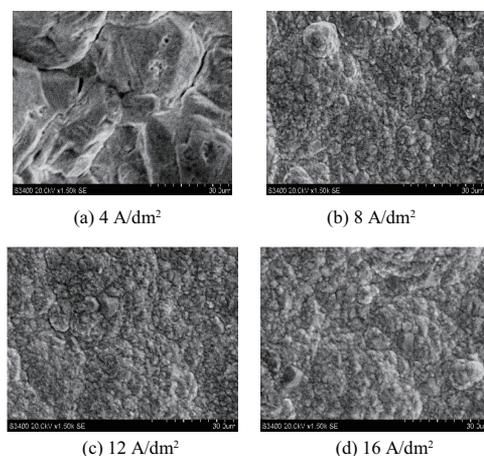


图 3 不同电流密度下电铸层表面微观形貌

### 2.2 力学性能

不同电流密度下获得的电铸层拉伸曲线大致趋势及断裂情况基本相似,现以  $8\ \text{A/dm}^2$  电流密度下电铸铜层拉伸试样断裂照片及拉伸曲线为例,对电铸层性能进行分析。由图 4 电铸铜层拉伸实验前后样件对比照片可以看出, $8\ \text{A/dm}^2$  电流密度下获得的电铸铜层拉伸试样标距明显拉长且断裂处仅出现颈缩,颈缩的出现表明电铸铜层具有一定的延展性。对应的载荷与拉伸位移关系图(图 5)显示:样件拉伸过程初始阶段载荷随位移急剧增加,弹性变形(a—b)及均匀塑性变形(b—c)持续时间较短,且两个阶段之间未出现明显的不均匀屈服塑性变形;试样的变形主要表现为不均匀集中塑性变形(c—d);之后发生断裂,当力施加至 c 点时,试验材料的应变硬化与几何形状导致的软化达到平衡;此时力不再增加,试样最薄弱的截面中心部分开始出现微小空洞,然后扩展连接成小裂纹,试样的受力状态由两向变为三向受力状态。裂纹扩展的同时,在试样的表面产生颈缩变形。

图 6 所示为  $4, 8, 12$  及  $16\ \text{A/dm}^2$  4 个电流密度下分别获得的电铸铜层显微硬度值、抗拉强度以及延伸率测量结

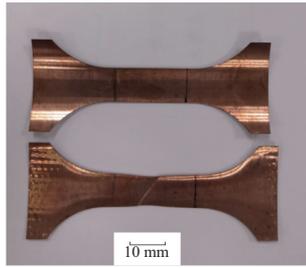


图4 8 A/dm<sup>2</sup>电铸铜层拉伸试验前后  
样件照片

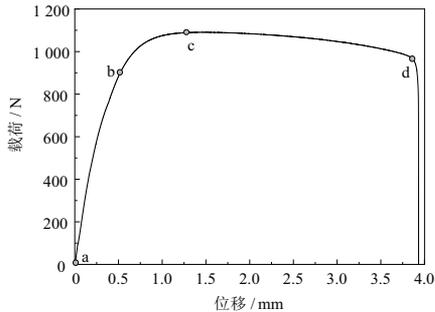
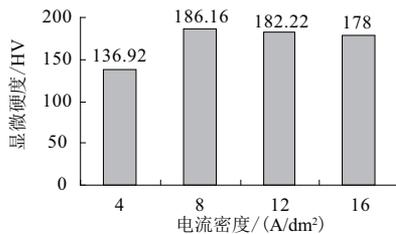
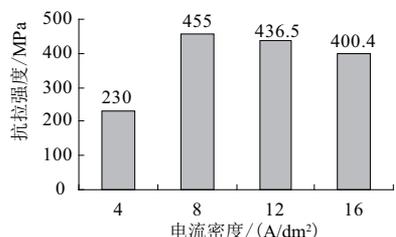


图5 8 A/dm<sup>2</sup>电铸铜层拉伸实验载荷  
随位移变化曲线

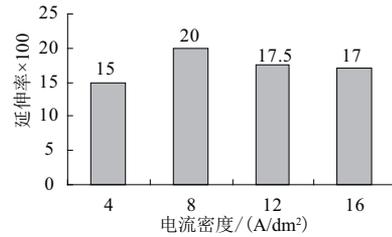
果。由图6可以看出电铸层显微硬度、抗拉强度以及延伸率随着电流密度的增大均呈先增大后减小的趋势,且电流密度由4 A/dm<sup>2</sup>增至8 A/dm<sup>2</sup>时,各项力学性能指标提升都很大,尤其是抗拉强度,其提升幅度约为98%。由电铸层表面显微照片可知,当电流密度超过4 A/dm<sup>2</sup>后,晶粒尺寸大幅下降。根据细晶强化理论可知,金属材料强度系数与晶粒尺寸成反比<sup>[12]</sup>,因此抗拉强度与显微硬度也随之大幅增加。而电流密度由8 A/dm<sup>2</sup>开始上升时相邻电流密度下电铸层各项指标波动幅度较小,均在15%以内。当电流密度过高时,离子沉积速度过快,可能导致沉积层内部出现气孔等组织缺陷,且缺陷数量会随着沉积速度的加快而增加。因此当电流密度超过8 A/dm<sup>2</sup>时电铸层综合力学性能开始下降。



(a)不同电流密度下电铸层显微硬度值



(b)不同电流密度下电铸层抗拉强度值



(c)不同电流密度下电铸层延伸率

图6 不同电流密度下电铸层力学性能测试值

### 2.3 断口形貌

图7为不同电流密度下拉伸试验断口微观形貌。由图7可以看出,拉伸试样断口形貌特征与其力学性能测试结果相匹配。在4 A/dm<sup>2</sup>电流密度下获得的电铸层拉伸试样断口的韧窝数量较少且尺寸较大,表明电铸铜层的力学性能不佳;其余3个电流密度下获得的电铸层拉伸试样断口形貌存在大量的细小均匀韧窝,细小均匀韧窝表明材料具有很强的抗变形力,因此材料的强度较高。不同电流密度下获得的电铸铜层断口形貌中,韧窝大小分布都不均匀,说明它们都不具备非常好的韧性,因此延伸率都不是很高。其中8 A/dm<sup>2</sup>电流密度下电铸层断口韧窝尺寸大小分布相对均匀些,因此具有相对高一些的延伸率。

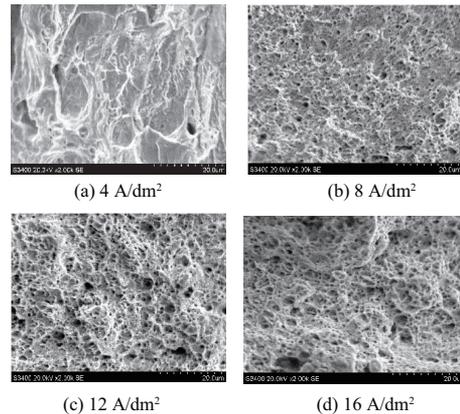


图7 不同电流密度下拉伸试样断口微观形貌

## 3 结语

在本文提出的回转阴极表面电铸液高速冲刷与高电流密度沉积交替进行电铸铜的加工方式中,阴极可以承受较高的极限电流密度,同时电铸层力学性能得到提升。在3 m/s左右的冲液速度下,阴极电流密度高达16 A/dm<sup>2</sup>时亦可获得表面光亮致密的电铸铜层,抗拉强度达400 MPa以上。8 A/dm<sup>2</sup>时电铸层力学性能最佳,其显微硬度为186.1 HV,抗拉强度达455 MPa,延伸率为20%。

#### 参考文献:

- [1] 章勇. 电铸技术的发展和综述[J]. 沙洲职业工学院学报, 2017, 20(2): 1-4.
- [2] 徐营, 朱增伟, 彭永森, 等. 摩擦辅助电铸铜的研究[J]. 电镀与环保, 2014, 34(1): 16-19.

- [3] 任建华,朱增伟,沈春健,等. 阳极偏置法摩擦辅助硫酸盐电铸铜[J]. 兵工学报, 2015, 36(9): 1736-1742.
- [4] TAJIRI K, NAKAMURA T, KABEYA Z, et al. Development of an electroformed copper lining for accelerator components [J]. *Electrochimica Acta*, 2001, 47(1/2): 143-148.
- [5] 冯辉,张勇,张林森,等. 电镀理论与工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [6] 陈亚. 现代实用电镀技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [7] 赵剑峰,朱获. 脉冲电流电铸技术的实验研究[J]. 航空工艺技术, 1996(5): 5-7.
- [8] 赵阳培,葛世荣,张君伟,等. 射流电铸快速成型纳米晶铜的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2008, 32(1): 37-39.
- [9] 任建华,朱增伟,朱获. 过程参数对悬浮微珠摩擦辅助脉冲电铸铜表面形貌的影响[J]. 电加工与模具, 2016(6): 63-66.
- [10] 何桂军. 射流电铸技术基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [11] 李获. 电化学原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- [12] 卢柯,刘学东. 纳米晶体材料的 Hall—Petch 关系[J]. 材料研究学报, 1994, 8(5): 385-391.

收稿日期:2019-12-19

### (上接第 35 页)

人控制系统。将实验件固定在工装上,并利用激光跟踪仪标定出机器人基坐标系与工件坐标系的相对位置关系,保证机器人末端可正确执行离线 NC 代码。具体实验步骤如下:

- 1) 利用激光跟踪仪采用微元法测量曲面待测点位处的法矢;
- 2) 使末端执行器运动到待测点位,执行激光非接触式垂直精度补偿程序进行垂直精度补偿。
- 3) 经激光非接触式垂直精度补偿后,测量末端执行器的主轴轴向法矢。
- 4) 执行固有理论误差补偿程序进行理论误差补偿。
- 5) 测量末端执行器上主轴轴向法矢。

分别测得理论误差补偿前后的垂直度误差,实验数据如表 1 所示。

序号	补偿前误差	补偿后误差	单位:(°)
1	0.782 3	0.368	
2	1.183 0	0.207	
3	0.711 0	0.303	
4	0.455 0	0.225	
5	1.066 0	0.349	
6	0.650 0	0.326	
平均值	0.078 83	0.296 333	

## 6 结语

现有的垂直精度补偿方法在对变曲率曲面进行垂直精度补偿时,由于以拟合平面法矢与实际曲面法矢不重合,进而无法保证制孔垂直精度。针对此问题,本文提出了一种面向变曲率曲面法向精度补偿方法。该方法通过

离线仿真环境预测出由平面代替曲面法矢而引入的固有理论误差,并针对该误差进行补偿调姿,实现了对变曲率曲面垂直精度补偿。实验结果表明:采用该方法对变曲率曲面进行垂直精度补偿时,可将垂直度误差控制在 0.4° 范围内,满足航空制造业对垂直精度的工艺要求。

### 参考文献:

- [1] 赵建国,郭洪杰,王丽秀,等. 飞机数字化柔性精准装配技术研究及应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 32-35.
- [2] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用[J]. 航空制造技术, 2005, 48(6): 50-52.
- [3] 曲巍岚,董辉跃,柯映林. 机器人辅助飞机装配制孔中位姿精度补偿技术[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1951-1960.
- [4] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术[J]. 航空制造技术, 2007, 50(1): 96-99.
- [5] 薛汉杰,张敬佩. 蒙皮类部件钻孔法向的测量和调整[J]. 航空制造技术, 2010, 53(23): 60-62, 66.
- [6] 李冬冬,王永强,许增朴,等. 激光三角法在物面倾斜时的测量误差研究[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(2): 28-29, 36.
- [7] 张为民. 基于视觉信息处理的飞行器型面法向矢量的在线测量方法[J]. 航空制造技术, 2015, 58(19): 43-46, 87.
- [8] 曲绍君,邹方. 一种新型飞机曲面壁板自动制孔法向测量方法[J]. 航空制造技术, 2015, 58(21): 134-137.
- [9] 雷斯聪,袁定新,朱忠良,等. 运载火箭蒙皮自动钻铆法向测量试验研究[J]. 航天制造技术, 2018(2): 36-39.
- [10] 段曙凯. 飞机蒙皮法矢的视觉检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [11] TIAN W, ZHOU W X, ZHOU W, et al. Auto-normalization algorithm for robotic precision drilling system in aircraft component assembly [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(2): 495-500.
- [12] 徐源,沈建新. 机翼调姿对接运动仿真技术研究[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(2): 110-113.

收稿日期:2019-11-12