

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202504038



活性添加剂分散调控对 镀铜线精细化的影响

乐其河, 江开勇

(华侨大学 福建省特种能场制造重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对柔性阴极电解加工中镀铜线条边缘精细化问题, 研究添加剂颗粒粒度及分散性对镀铜质量的影响。调整添加剂颗粒的研磨时间与浆料搅拌方式, 并结合激光活化及化学镀铜工艺, 制备导电线路并分析其形貌。结果表明: 添加剂颗粒的研磨时间对其粒度有显著影响, 经 48 h 研磨的颗粒粒度稳定在 $1.445\ \mu\text{m}$, 分散性提升, 团聚减少; 采用高速分散机搅拌 5 min 后聚氨酯中的颗粒面积分数较传统搅拌降低了 11.9%; 添加剂颗粒细化与均匀分散改善了激光活化催化中心的均匀性, 当研磨时间达 48 h、搅拌时间为 5 min 时, 镀铜线条边缘整齐清晰, 线条分布均匀, 线宽约为 $85.1\ \mu\text{m}$ 。

关键词: 电解加工; 激光活化; 化学镀铜; 线条精细化; 颗粒分散性

中图分类号: TQ 153.14

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)04-0379-07

Influence of Dispersion Control of Active Additives on Refinement of Copper Plated Wire

LE Qihe, JIANG Kaiyong

(Fujian Key Laboratory of Special Energy Manufacturing, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To address the issue of edge refinement of copper plated wires in flexible cathode electrochemical machining, the influence of additive particle size and dispersion on copper plating quality was studied. The grinding time of additive particles and the slurry stirring method were adjusted, and laser activation was combined with electroless copper plating processes to prepare conductive wires and their morphology was analyzed. The results demonstrated that grinding time significantly influenced the particle size, which stabilized at $1.445\ \mu\text{m}$ after 48 hours of grinding, with improved dispersibility and reduced agglomeration. After stirring for 5 minutes using a high-speed disperser, the particle area fraction in polyurethane decreased by 11.9% compared to traditional stirring. The refinement and uniformly dispersed additive particles improved the uniformity of laser activated catalytic centers. Under the optimal conditions (48 hours grinding and 5 minutes high-speed stirring), the copper plated wires exhibited sharp and well-defined edges, uniform distribution, and a consistent wire width of approximately $85.1\ \mu\text{m}$.

Keywords: electrochemical machining; laser activation; electroless plating copper; refinement; particle dispersibility

柔性阴极电解加工(FC-ECM)作为一种融合激光诱导化学镀(LDS)的创新性微纳制造工艺, 近年

收稿日期: 2025-04-22

通信作者: 乐其河(1991—), 男, 实验师, 主要从事特种加工的研究。E-mail: leqihe@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475174)

来在柔性电子器件、三维模塑互连器件(3D-MID)及高精度传感器等领域展现出广阔的应用前景^[1-4]。其核心工艺是通过激光扫描柔性基材表面,选择性活化催化中心,并通过化学镀铜形成高精度导电路径。该技术突破了传统光刻工艺对复杂三维结构的限制,为轻量化、集成化电子器件的制造提供了新途径^[5]。然而,随着器件微型化需求的提升,镀铜线条边缘的精细化程度成为制约其电学性能与可靠性的关键因素。研究表明,线路边缘的毛刺、线宽波动等问题主要源于活性添加剂颗粒的分散不均及尺寸分布差异^[5-8]。因此,优化添加剂分散性以提升镀层质量已成为当前 FC-ECM 技术研究的重点方向之一。

当前研究主要集中在激光参数优化和镀液配方改进方面。王攀等^[9]通过调整激光功率和扫描速度,显著提升了聚酰亚胺基材的镀铜精度。Xu 等^[10]开发了新型激光敏化剂,它可以很好地与 1 064 nm 近红外激光和 355 nm 紫外激光配合使用,在近红外激光诱导下可实现线宽 106 μm 的铜线沉积,而采用紫外激光时线宽显著缩减至 37 μm 。然而,目前关于活性添加剂颗粒分散性对镀铜线条精细化影响的系统性研究仍较为缺乏。传统方法中,添加剂颗粒易因表面能高而发生团聚,导致基材中催化中心分布不均,进而引发镀层边缘毛刺、线宽波动等问题^[11-14]。尽管部分学者已尝试采用超声辅助分散或表面改性等方法改善颗粒分散性^[15-17],但关于研磨工艺与搅拌方式对颗粒细化及分散效果的协同影响仍缺乏深入研究。

基于此,本文以铜基金属化合物为活性添加剂,探究了添加剂颗粒的研磨时长、浆料搅拌方式及搅拌时间对颗粒分散效果的影响,进一步分析添加剂颗粒细化程度与镀铜线条边缘质量之间的内在联系。

1 实验部分

1.1 原材料

MU-609K 型聚氨酯树脂(PU,浙江永信化工有限公司);铜基金属化合物(沙特基础工业公司)。

1.2 仪器设备

TYM120 型研钵式研磨机(常州中实三水机械科技有限公司);Mastersizer 2000 型激光粒度仪(英国马尔文仪器有限公司);Phenom ProX 型内置能谱仪台式扫描电镜(荷兰 Phenom-World 公司);激光打标机(SPI 脉冲光纤激光器,深圳市泛友科技有限公司);IRM VDM50 型真空干燥机(爱安姆科技(北京)有限公司);IKA T18 型高速分散机(转速最高可达 20 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,德国艾卡公司);JB200-D 型传统机械搅拌机(上海沪析实业有限公司)。

1.3 添加剂颗粒的研磨

将铜基金属化合物添加剂置于真空干燥箱中干燥 2 h 后,于研钵式研磨机中分别进行不同时间(0、12、24、36、48、60、72 h)的研磨,充分研磨后得到不同粒度的添加剂颗粒,重新置于真空干燥箱中保存。

1.4 柔性聚氨酯基材的制备

将真空干燥箱中研磨过的添加剂颗粒与聚氨酯按照质量比 3 : 7 进行混合,分别采用手动搅拌、传统机械搅拌及高速分散机搅拌,将搅拌后的改性聚氨酯浆料平铺于洁净的玻璃面板上,通过可调式涂覆器控制浆料铺平厚度。

1.5 激光活化

采用波长为 1 064 nm 的光纤激光打标机对改性聚氨酯表面进行激光敏化处理。采用的激光扫描工艺参数为激光功率 7 W,脉冲重复频率 65 kHz,扫描速度 3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,光斑模式 TEM₀₀。

1.6 化学镀铜

将激光活化的改性聚氨酯置于质量分数为 10% 的氢氧化钠溶液中超声清洗除油并用去离子水清洗干净后,置于 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干待用。称取 1.6 g 硫酸铜和 1.4 g 氢氧化钠分别溶于去离子水中,先将硫酸铜溶液与 1.4 g 络合剂充分搅拌混合;然后缓慢倒入 NaOH 溶液;最后加入稳定剂、还原剂及去离子水,配置 100 mL 的镀铜液。将清洗除油且干燥后的改性聚氨酯放入配置好的镀液中,并用保鲜膜密封,置于 80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中保温 2 h 后取出,清洗。

1.7 表征

采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪对添加剂颗粒粒度分布进行表征。采用 Phenom ProX 型内置能谱仪台式扫描电镜观察聚氨酯表面颗粒分布情况。

2 实验结果与讨论

2.1 研磨时间对添加剂粒度的影响

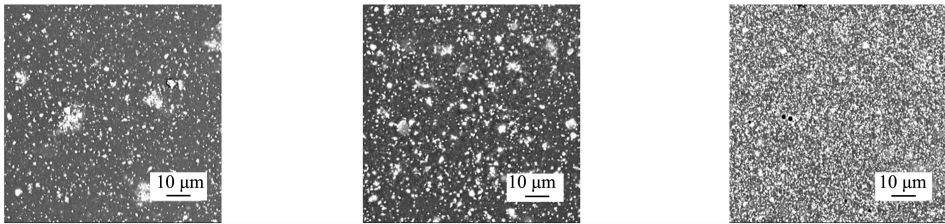
由于微细添加剂颗粒表面能很高,加上研钵机的研钵与研钵头的挤压破碎作用,容易使添加剂颗粒团聚成块,从而使添加剂颗粒分散效果较差,因此,在进行粒度测试实验过程中均开启超声频率为 10 Hz 的超声辅助。超声辅助能使添加剂颗粒分散效果更好、更均匀,能减小因添加剂颗粒团聚而造成的影响。不同研磨时间下添加剂粒度的变化,如图 1 所示。图 1 中: φ 为体积分数; D 为添加剂粒度。

由图 1 可知:随着研磨时间的增加,添加剂粒度也逐渐变小,未经研磨的原始添加剂颗粒粒度主要集中在 $1.905\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间,颗粒大且尺寸较为分散;当添加剂经过 24 h 研磨之后,粒度的分布明显集中在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$,表明长时间机械研磨能够破碎团聚体、细化颗粒,提升颗粒均匀性;但当研磨 48 h 后,添加剂粒度在 $1.445\ \mu\text{m}$ 的体积分数为 29.79%,且颗粒粒度在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围内的体积分数也在逐渐缩小;当研磨 72 h 后,添加剂颗粒粒度在 $1.259\ \mu\text{m}$ 的体积分数为 31.68%,说明机械研磨只能在一定程度上对团聚体进行有效破碎。

2.2 搅拌方式与时间对分散性的影响

由于添加剂颗粒在聚氨酯中的分散情况对化学镀铜边缘整齐度有较大影响,因此分别采用手动搅拌、传统机械搅拌及高速分散机搅拌 3 种搅拌方式制备柔性聚氨酯,考察搅拌方式对分散性的影响。

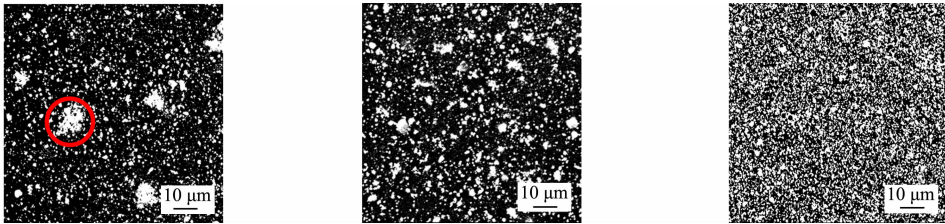
首先,对聚氨酯微观组织形貌的 SEM 图像进行图像平滑、滤波与灰度拉伸等预处理,并对预处理后的图像进行阈值分割(该步骤是为了获取添加剂颗粒);然后,对分割后的图像进行去除毛刺及空洞的填补;最后,获得微观组织结构 SEM 图像的二值化图像。不同搅拌方式下制备的改性聚氨酯表面的 SEM 图像,如图 2 所示。对聚氨酯表面微观组织形貌进行阈值分割后得到的二值化图像,如图 3 所示。



(a) 手动搅拌 (b) 传统机械搅拌 (c) 高速分散机搅拌

图 2 改性聚氨酯表面的 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of modified polyurethane surface



(a) 手动搅拌 (b) 传统机械搅拌 (c) 高速分散机搅拌

图 3 改性聚氨酯表面的二值化图像

Fig. 3 Binary images of modified polyurethane surface

由图 2、3 可知:手动搅拌方式制备得到的聚氨酯中添加剂颗粒的分散效果最差,且所含的添加剂颗粒数量最少;传统机械搅拌方式制备得到的聚氨酯中添加剂颗粒的分散效果一般;相比之下,高速分散机搅拌方式制备得到的聚氨酯中所含的颗粒数量最多,且分散效果最佳。

对于不同搅拌方式表现出不同的颗粒分散效果可能存在以下 3 点原因。

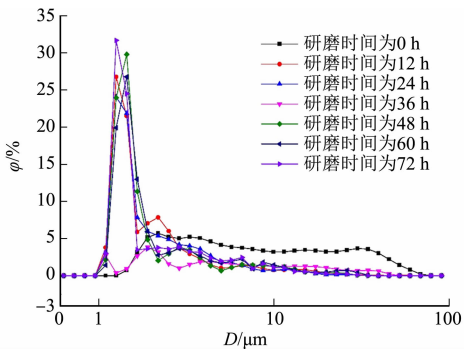


图 1 不同研磨时间下添加剂粒度的变化

Fig. 1 Changes in additive particle size under different grinding times

1) 采用手动搅拌方式进行聚氨酯和添加剂颗粒的混合过程中,由于搅拌力不足、产生的能量小,且操作人员搅拌速度不均匀(材料制备受人员因素影响较大),不能有效地分散添加剂的硬团聚甚至是软团聚,颗粒的团聚和搅拌力不足引起的颗粒沉积使聚氨酯中添加剂颗粒数量偏少。

2) 采用传统机械搅拌方式受设备因素影响,转速较低(小于 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),产生的能量也相对较小,不能有效地解决添加剂颗粒团聚问题。

3) 当采用高速分散机混合浆料时,浆料在搅拌头定子和转子间隙之间经过强烈的撞击、破碎、强力剪切后从间隙射出,在多种不同方向力的作用下,产生强大的紊流,在高能量作用下,经过一段时间反复剪切、循环解聚,使添加剂颗粒在聚氨酯中均匀分散。

另外,可以通过颗粒面积分数法来定量说明颗粒的团聚情况。该方法是通过计算基材表面每个颗粒的平均面积(颗粒所占像素点)定量评判颗粒的分散效果,其数值越小,说明颗粒的分散效果越好^[18]。颗粒面积分数(S_{mean})的计算公式为

$$S_{\text{mean}}=\frac{\sum S_i}{S_{\text{总}}\times N_{\text{总}}}。$$

上式中: $\sum S_i$ 表示所测区域内颗粒的总面积; $S_{\text{总}}$ 表示所测区域面积; $N_{\text{总}}$ 表示所测区域颗粒总数。

通过计算可得,分别采用手动搅拌、传统机械搅拌、高速分散机搅拌后,聚氨酯表面的 S_{mean} 分别为 $0.144\,75\times10^{-4}$ 、 $0.144\,42\times10^{-4}$ 、 $0.127\,30\times10^{-4}$ 。由计算结果可知:手动搅拌的 S_{mean} 最大,说明聚氨酯表面上每个颗粒的平均面积最大,颗粒的分散效果最差;高速分散机搅拌因高剪切力(转速 $>20\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),其分散效果显著优于传统机械搅拌(S_{mean} 降低 11.9%),说明其内部颗粒的分散程度最好。

不同搅拌时间(t)下聚氨酯的微观形貌,如图 4 所示。搅拌时间与颗粒面积分数的关系,如图 5 所示。由图 4、5 可知:当搅拌时间为 3 min 时,添加剂颗粒在聚氨酯中的 S_{mean} 值最大,说明其在聚氨酯中的分散效果最差;随着搅拌时间的增长,颗粒的分散效果明显改善,当搅拌时间为 5 min 时,添加剂颗粒在聚氨酯中的 S_{mean} 值最小;当搅拌时间大于 7 min 后,添加剂颗粒的分散效果没有很大的改变。

不同搅拌时间下浆料温度(θ)和黏度(η)的变化曲线,如图 6 所示。由图 6 可知:在初始温度为 $25.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,浆料黏度为 $588\text{ mPa}\cdot\text{s}$;随着搅拌时间的增加,浆料温度上升,黏度呈下降趋势;搅拌 5 min 后,浆料黏度的下降趋势变化小,但当温度达到 $44.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,温度继续升高对颗粒分散效果的影响程度不大。

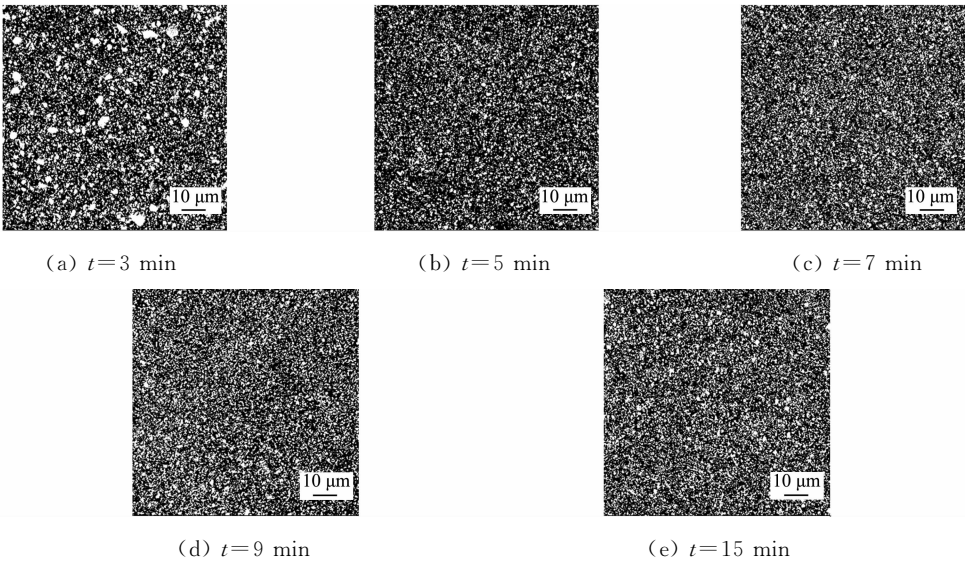


图 4 不同搅拌时间下聚氨酯的微观形貌

Fig. 4 Microscopic morphology of polyurethane under different stirring times

出现上述结果的原因有 2 个方面:1) 随着搅拌时间的增长,在多种不同方向力的作用下,聚氨酯浆料在搅拌头定、转子间隙之间产生较高的能量,长时间反复地剪切和解聚使固化得到的聚氨酯中添加剂颗粒的分散效果更佳;2) 浆料温度随着搅拌时间的增加而升高,进而使其黏度下降,从而使添加剂颗粒的分散效果更好。

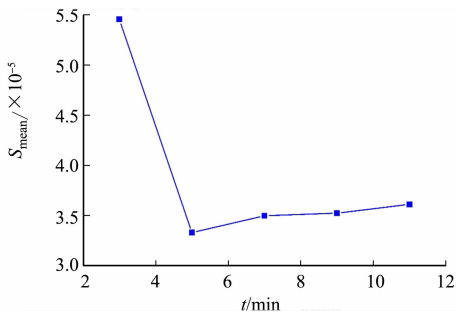


图 5 搅拌时间与颗粒面积分数的关系
Fig. 5 Relationship between stirring time and particle area fraction

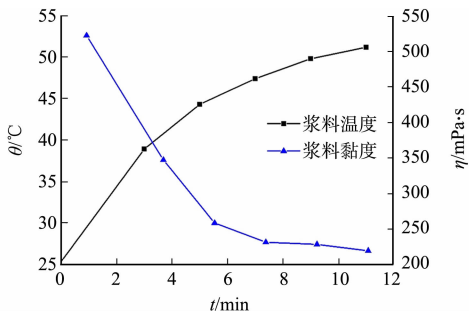


图 6 不同搅拌时间下浆料温度和黏度的变化曲线
Fig. 6 Variation curves of slurry temperature and viscosity under different stirring times

2.3 颗粒细化对镀铜边缘质量的调控机制

在聚氨酯树脂中分别添加质量分数为 30%、不同研磨时间(0、12、24、36、48、60、72 h)的添加剂，采用高速分散机搅拌 5 min，并在光洁玻璃板上湿固化 24 h 后，得到改性聚氨酯。不同研磨时间下改性聚氨酯的微观形貌，如图 7 所示。研磨时间与颗粒面积分数的关系曲线，如图 8 所示。

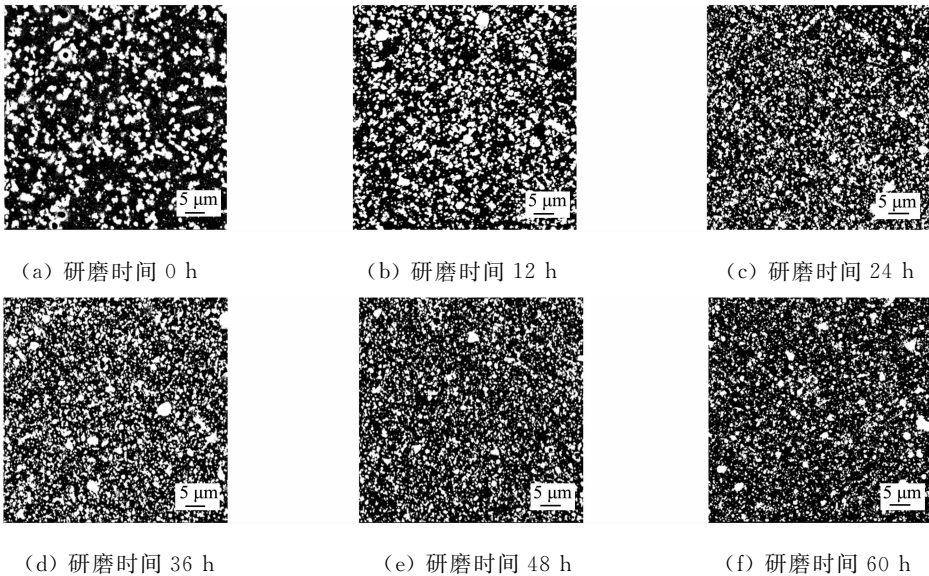


图 7 不同研磨时间下改性聚氨酯的微观形貌

Fig. 7 Microscopic morphology of modified polyurethane under different grinding times

由图 8 可知：未研磨粉末的 S_{mean} 值最大，说明未研磨添加剂颗粒在聚氨酯中的分散性最差；随着研磨时间的增加，添加剂颗粒在聚氨酯中的分散程度也越来越高；当研磨时间达到 48 h 以后，添加剂颗粒在聚氨酯中的分散效果没有显著的区别。原因是没有经过研磨的添加剂颗粒尺寸较大，颗粒之间的团聚明显、分散性差，因此在聚氨酯表面微观形貌中表现出颗粒团聚，颗粒尺寸较大的情况；随着研磨时间的增加，添加剂颗粒粒度下降的同时，其团聚程度也相对减小，从而使添加剂颗粒在聚氨酯中的分散效果更好。

经过激光活化和化学镀铜工艺后在改性聚氨酯表面选择性地镀上铜线条。不同研磨时间下改性聚氨酯表面化学镀铜线条的微观形貌，如图 9 所示。由图 9 可知：添加未研磨的添加剂颗粒，聚氨酯表面化学镀铜后线条的边缘不整齐，效果较差；随着添加剂颗粒研磨时间的增加，镀铜线条边缘越来越整齐。

分析以上结果的原因有以下两方面。

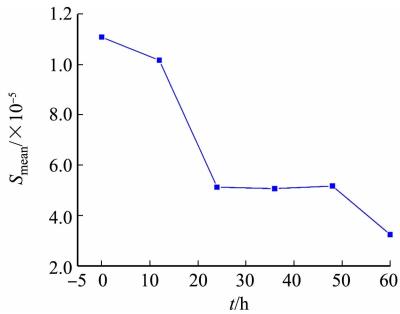


图 8 研磨时间与颗粒面积分数的关系曲线
Fig. 8 Relationship curve between grinding time and particle area fraction

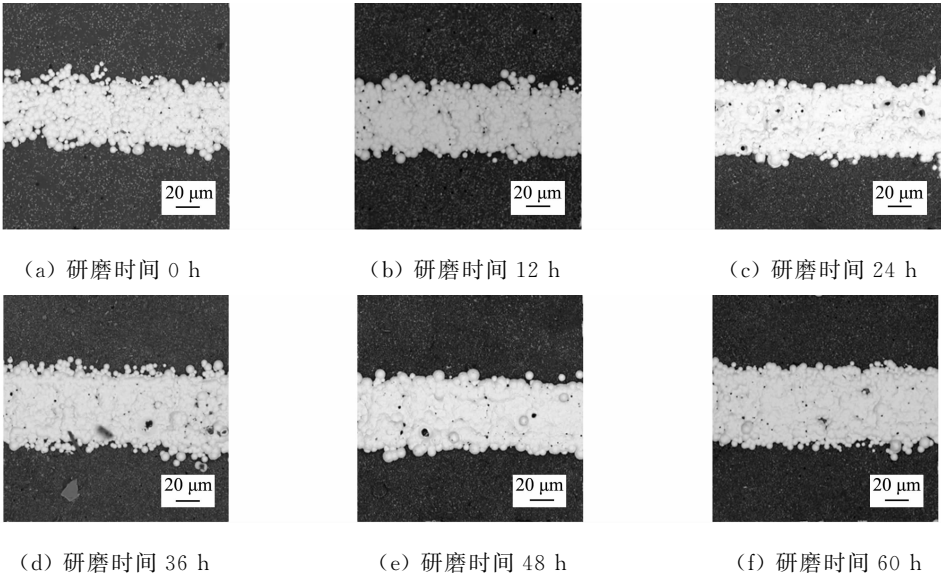


图 9 不同研磨时间下改性聚氨酯表面化学镀铜线条的微观形貌
Fig. 9 Microscopic morphology of copper plated wires on modified polyurethane surface under different grinding times

1) 从研磨时间来看,随着研磨时间的增长,团聚成大颗粒的情况减少,颗粒之间的分散程度越来越好;颗粒与聚氨酯经高速分散机剪切混合后,原本分散良好的颗粒在聚氨酯中的分散更为充分和均匀。

2) 从激光活化来看,高能量的激光束照射到聚氨酯材料表面,打开了铜原子与聚氨酯分子之间形成的共价键,添加剂中铜元素就以亚铜离子的形式出现在聚氨酯表面的活化区。后续化学镀铜过程是以亚铜离子为催化核心进行铜颗粒的沉积。因此,由越细小颗粒制备的聚氨酯材料在经过激光活化后,暴露出尺寸越细小、分布越均匀的催化中心,这样化学镀铜得到的线条精细化程度也会越来越高。

添加了研磨 48 h 添加剂制备得到的聚氨酯材料化学镀铜线条,如图 10 所示。其激光参数为功率 7 W,脉冲频率 65 kHz,扫描速度 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,光斑模式 TEM_{00} 。由图 10 可知:线条分布均匀,一致性较好,测出线条宽度约为 $85.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

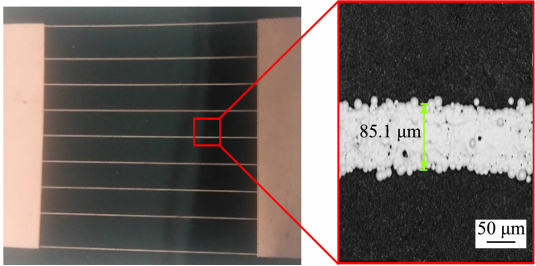


图 10 添加剂研磨 48 h 后制得的化学镀铜线条
Fig. 10 Chemical copper plated wires prepared after 48 hours griding of additives

3 结论

探究了活性添加剂分散调控对柔性阴极电解加工中镀铜线条精细化的影响,明确了关键工艺参数对添加剂颗粒分散性及镀铜边缘质量的影响。通过实验分析,可以得出以下 3 点主要结论。

- 1) 研磨时间对活性添加剂颗粒细化有显著效果,随着研磨时间的增加(0~48 h),颗粒尺寸越来越小,且分散区间显著缩小;当研磨时间大于 48 h,颗粒细化与分散性趋于平稳,添加剂颗粒在聚氨酯中的分散性最佳,能为后续激光活化提供高密度、均匀化的催化中心。
 - 2) 搅拌方式与搅拌时间直接影响添加剂颗粒在聚氨酯的分散效果。采用高速分散机(转速 $> 20\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)搅拌 5 min,可显著提升颗粒分散性(S_{mean} 降低至 $0.127\,30\times 10^{-4}$),优于手动搅拌与低速机械搅拌。当搅拌时间超过 7 min 后,分散效果改善趋于平缓,综合考虑制备效率与分散质量,5 min 为最优搅拌时长。
 - 3) 添加剂颗粒细化与分散均匀性对镀铜线条边缘质量具有关键作用。经 48 h 研磨、高速分散机 5 min 搅拌制备的柔性聚氨酯,经过激光活化(功率 7 W,脉冲频率 65 kHz,扫描速度 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)后,化学镀铜(80 ℃水浴 2 h)所得线条边缘整齐清晰,线宽波动范围最小(约 $85.1\text{ }\mu\text{m}$)。
- 通过优化活性添加剂颗粒的分散工艺,实现了镀铜线条的精细化控制,为柔性阴极电解加工中高精

度镀铜线路的制备提供理论与实验依据。

参考文献:

- [1] 佚名. LPKF 在中国天津建立激光直接成型三维模塑互连器件应用中心[J]. 印制电路信息, 2008(9):38.
- [2] 刘新民. MID 工艺制程塑模电子互联部件图案金属化工艺[C]// 第十届全国转化膜及表面精饰学术年会论文集. 南宁:中国表面工程协会转化膜专业委员会, 2014:144-148.
- [3] 刘述梅,陈红,赵建青,等. 热致液晶高分子膜的表面处理及化学镀铜[J]. 塑料工业, 2024, 52(2):60-65. DOI:10.3969/i. issn. 1005-5770. 2024. 02. 009.
- [4] PAN Chengfeng, KUMAR K, LI Jianzhao, *et al.* Visually imperceptible liquid-metal circuits for transparent, stretchable electronics with direct laser writing [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30: 1706937. DOI: 10. 1002/adma. 201706937.
- [5] 代竟雄. 基于激光诱导的 3D 电子线路成型工艺研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2018.
- [6] 叶玉梅,江开勇,张际亮. 改性塑料表面亚铜化合物的表征及催化化学镀铜作用[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(5): 124-128. DOI:10. 11951/j. issn. 1005-0299. 20140522.
- [7] 平玉清,江开勇. 脉冲激光改性聚氨酯表面无钯化学镀铜的实验研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(3):54-59. DOI: 10. 3969/i. issn. 1001-3539. 2015. 03. 011.
- [8] MATSUHISA N, CHEN Xiaodong, BAO Zhenan, *et al.* Materials and structural designs of stretchable conductors [J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48:2946-2966. DOI:10. 1039/C8CS00814K.
- [9] 王攀,崔开放,钟良. 聚酰亚胺塑料表面激光诱导活化化学镀铜[J]. 电镀与环保, 2020, 40(3):30-33. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-4742. 2020. 03. 009.
- [10] XU Haoran, FENG Jin, YU Feifan, *et al.* Laser-induced selective metallization on polymers for both NIR and UV lasers: Preparing 2D and 3D circuits[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(1):395-404. DOI: 10. 1021/acs. iecr. 2c03367.
- [11] LU Yinxian. Improvement of copper plating adhesion on silane modified PET film by ultrasonic-assisted electroless deposition[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(11):3554-3558. DOI:10. 1016/j. apsusc. 2009. 12. 153.
- [12] SON J, HONG Y, YAVUZ C T, *et al.* Thiourea-based extraction and deposition of gold for electroless nickel immersion gold process[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(16):8086-8092. DOI:10. 1021/acs. iecr. 0c00493.
- [13] JONES T D A, RYSPAYEVA A, ESFAHANI M N, *et al.* Direct metallisation of polyetherimide substrates by activation with different metals[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 360:285-296. DOI: 10. 1016/j. surfcoat. 2019. 01. 023.
- [14] GU Xin, WANG Zhoucheng, LIN Changjian. An electrochemical study of the effects of chelating agents and additives on electroless copper plating[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2004, 11(1):49-55. DOI:10. 61558/2993-074X. 1539.
- [15] 续振林,郭琦龙,沈艺程,等. 陶瓷表面无敏化活化法微细化学镀铜[J]. 电化学, 2005, 11(2):193-198. DOI:10. 13208/j. electrochem. 2005. 02. 016.
- [16] 宋轩. 电解加工表面织构用柔性阴极制备及其加工实验研究[D]. 厦门:华侨大学, 2020.
- [17] 王广阔,杨英贤. 不同超声频率与温度对纳米 ZnO 颗粒分散性能的影响[J]. 纺织科技进展, 2005(2):3. DOI:10. 3969/j. issn. 1673-0356. 2005. 02. 009.
- [18] 何飞,黄振亚,刘靖,等. 复合材料内高含量固体的分散性评价方法[J]. 火炸药学报, 2013, 36(6):4. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-7812. 2013. 06. 016.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴跃勤)