

直写打印参数及烧结条件对打印纳米银浆的影响

荆德科¹, 安春旭², 母全祎^{2*}

(1. 宁夏大学 数学统计学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学 物理学院, 宁夏银川 750021)

摘要:研究了直写(direct ink writing, DIW)打印纳米银浆过程中, 挤出气压、针头孔径及烧结温度与时间对银线烧结行为的影响, 分析了上述参数对烧结过程中归一化质量、归一化电阻及烧结后银线横截面积、电阻率的影响规律与内在机理。结果表明:较高的挤出气压与较大的针头孔径虽然会导致烧结后银线中残留添加剂较多, 但因银线横截面积较大, 相同长度下银线电阻反而较低;而较低的挤出气压与较小的针头孔径下, DIW 银线中溶剂和添加剂移除更快, 从而缩短烧结时间。因此, 若以低电阻为主要目标, 可采用较高挤出气压配合大孔径针头;若追求快速烧结, 则可选择较低挤出气压与小孔径针头的组合。烧结温度方面, 120, 140 °C条件下, 归一化质量与归一化电阻约 30 min 达到稳定状态;而在 160, 180 °C条件下, 仅需 10 min 即可达到稳定状态。实际应用中可根据基底耐热特性, 选择较低温度、较长烧结时间或较高温度、较短烧结时间, 以达到烧结目的。

关键词:直写打印; 针头孔径; 挤出气压; 烧结; 纳米银浆

中图分类号: TN41 **文献标志码:** A

导电纳米颗粒墨水由纳米颗粒、液体介质、分散剂及其他添加剂组成, 其沉积后的初始图案不具导电性, 须经固化烧结等后处理工序将墨水中的液体介质及各种添加剂移除, 使纳米颗粒致密堆积形成连续的薄膜或导线后方可导电^[1-2]。常见的纳米墨水打印方式包括喷墨打印、丝网印刷、气溶胶喷射、直写(direct ink writing, DIW)打印等。其中, 直写打印因设备成本低、操作过程简单、原材料种类多样化、打印浆料固含量高、可打印性好及工艺兼容性良好等特点而得到广泛应用^[3-4]。

已有研究表明, DIW 参数(如挤出气压)对打印效果和导电性能均有影响^[5]。具体而言, 喷嘴距基板高度、打印层高及喷嘴沉积移动速度等工艺参数会直接影响 DIW 硅线的线宽和形态^[6]。陈志刚等^[7]基于正交试验方法, 采用不同挤出压强 DIW 碳化硅/碳纤维复合材料, 并优化其性能。DIW 纳米银墨水已被广泛用于印刷柔性电子器件的制备^[8-9]。目前针对 DIW 纳米银浆的研究多聚焦在以下方面: 材料开发及其稳定性和导电性能研究, 如石墨

烯-银纳米粒子复合墨水、改性前驱体型银墨水的制备等^[10-11]; DIW 银线力电性能优化用于柔性器件打印^[12]; DIW 图案设计、印刷层数及每层油墨体积等关键参数优化以实现良好导电性^[13]。然而, 关于关键打印参数及烧结条件对 DIW 银线导电性能影响的研究仍较为缺乏。

本文在固定打印速度条件下, 研究了挤出气压和针头孔径等关键打印参数及烧结温度与时间对 DIW 银线归一化质量、归一化电阻、横截面积和电阻率的影响规律, 并揭示了相关的作用机理。最后, 针对不同应用需求给出了相应的打印参数与烧结条件的优化策略。本研究旨在为 DIW 纳米银浆制备导电银线的打印参数及烧结工艺参数选择提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料与打印工艺

图 1 为直写打印纳米银线的装置示意图, 注射器可在 x 轴及 y 轴方向上移动, 放置试样件的打印

收稿日期: 2025-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(12202218); 宁夏自然科学基金项目(2024AAC05003)

作者简介: 荆德科(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事 3D 打印纳米墨水烧结性能研究(dk_yan@163.com)。

* 通信作者: 母全祎(1984—), 女, 副教授, 博士, 主要从事聚合物基复合材料力学研究(qmu@nxu.edu.cn)。

引用格式: 荆德科, 安春旭, 母全祎. 直写打印参数及烧结条件对打印纳米银浆的影响[J]. 西北工程技术学报(中英文), 2026, 25(1): 63-69.

平台可在 z 轴方向上移动,通过计算机控制打印平台和注射器的运动可实现 3D 打印。图 2 为 DIW 打印平台及银线形貌。在注射器中装入纳米银浆(购自深圳市鑫威电子材料有限公司),将其固定在改装的 3D 打印机(YC-200,深圳市优创三维智能科技有限公司)上,并与高精度半自动点胶机(982,深圳市益川隆电子有限公司)通过塑料软管连接,点胶机与空气压缩机也通过塑料软管连接(图 2a)。本研究选用内径为 0.6, 0.8, 1.0 mm 的三种注射器针头(图 2b),通过调节挤出气压直写出表面形貌良好的纳米银浆导线(即 DIW 银线,图 2c),选择 469, 586, 689 kPa(对应 68, 85, 100 psi)三种气压工况。通过试验发现,针头孔径、挤出气压及打印速度为影响 DIW 性能的关键参数,本研究中打印速度固定为 20 mm/s。

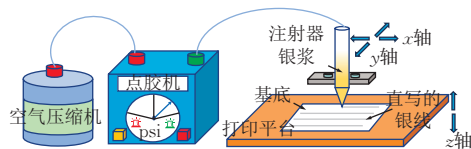
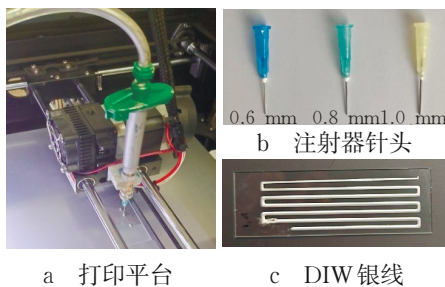


图1 直写打印纳米银线的装置示意图

Fig. 1 Schematic of DIW apparatus for printing silver nanowires



a 打印平台 c DIW银线

图2 DIW打印平台及银线形貌

Fig. 2 DIW printing platform and silver wire morphology

1.2 样品制备

为避免烧结过程中因基底材料质量损失导致测量误差,本实验选用 75 mm×25 mm 标准载玻片作为基底。将载玻片烘干后,采用十万分之一电子天平(MS105DU,梅特勒-托利多)精确称量其初始质量,随后将载玻片水平固定于打印平台,并确保其与注射器针头垂直。利用开源软件 Repetier-Host 建立打印模型,设定打印位置与速度参数,在载玻片上直写纳米银浆。迅速将直写银浆后的载玻片转移至电子天平称量总质量,总质量减去烘干的载玻片质量即得 DIW 银线的初始质量 M_0 ,所得样品用于后续烧结实验。

1.3 烧结方法

将直写了银浆的载玻片快速置于烘箱中进行烧

结,温度分别设置为 120, 140, 160, 180 °C。烧结过程中每隔 10 min 取出样品,采用两点法通过数字源表(Keithley 2450,吉时利)测量电阻值,并同步记录质量变化。为研究打印参数对烧结行为的影响,本研究设计了两类烧结实验:①固定针头孔径 1.0 mm,挤出气压分别为 469, 586, 689 kPa;②固定挤出气压为 586 kPa,针头孔径分别取 0.6, 0.8, 1.0 mm。

1.4 测试表征

1.4.1 横截面积测量 计算 DIW 银线的电阻率需要其横截面面积的值。因此,将固化烧结后的银线用刀片小心刮下后切断,采用显微镜获取其横截面照片,然后用 ImageJ 软件测量并计算横截面面积,如图 3 所示。

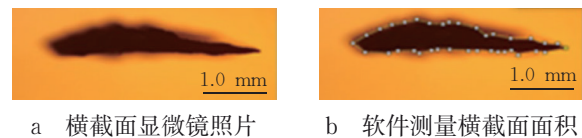


图3 银线横截面积的测量

Fig.3 Measurement of silver wire cross-sectional area

1.4.2 电阻率计算 电阻率(ρ)的计算公式为

$$\rho = RA/l. \quad (1)$$

式中: R 为测量的电阻值, Ω ; A 为烧结之后银线的横截面积, mm^2 ; l 为 DIW 银线的长度, mm 。

1.4.3 热重分析 采用热重分析仪(TGA2,梅特勒-托利多)表征纳米银浆加热过程中的溶剂挥发及添加剂分解行为,使用 N_2 气氛。表征不同升温速率下的质量变化时,分别以 5, 10, 50, 100 °C/min 四种速率,从室温加热至 600 °C后恒温 10 min;表征恒温烧结下的质量变化时,则固定升温速率 100 °C/min,分别加热至 100, 200, 300, 400, 500, 600 °C后恒温 30 min。

1.4.4 扫描电子显微镜 采用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS Sigma 300, 德国)表征不同温度、不同烧结时间下 DIW 银线的微观形貌,加速电压设置为 3 kV。

1.4.5 孔隙率测量 采用 ImageJ 软件对 DIW 银线烧结后表面的 SEM 图像进行处理,计算孔隙率。

2 结果与分析

2.1 纳米银浆的热重分析

首先对纳米银浆进行热重分析。图 4a 为不同升温速率下的热重曲线,可以看出银浆中物质移除存在两个明显阶段:温度低于 200 °C时,质量下降 37%~42%,归因于溶剂挥发及低分解温度有机添

添加剂的分解;温度高于 380 °C 后,质量进一步下降 11%~13%,源于有机添加剂的热分解^[12,14]。随着升温速率的增加,剩余质量曲线略向高温方向偏移,这与初始热解温度及最大减重速率峰值温度向高温迁移的规律一致^[15],表明溶剂挥发与有机物分解需要一定的时间才能完成。图 4b 为不同恒定温度加热 30 min 的热重曲线。由图 4b 可知:100 °C 恒温烧结 30 min 后质量剩余 81.1%,200 °C 恒温烧结 30 min 后质量剩余 59.6%,表明 100~200 °C 移除的主要是溶剂及部分添加剂;300~600 °C 恒温烧结 30 min 后质量均稳定在 44.6%,说明有机添加剂已被彻底移除。具体而言,300 °C 恒温烧结时,345 s 后质量趋于恒定,而 400~600 °C 恒温烧结时仅需 225 s 即可实现对有机添加剂的完全移除,表面升高温度或者延长烧结时间均有利于有机物去除。综上,烧结条件对银浆中溶剂及添加剂的移除速度与程度具有显著影响,可通过调节烧结温度与结时间达到烧结目的。

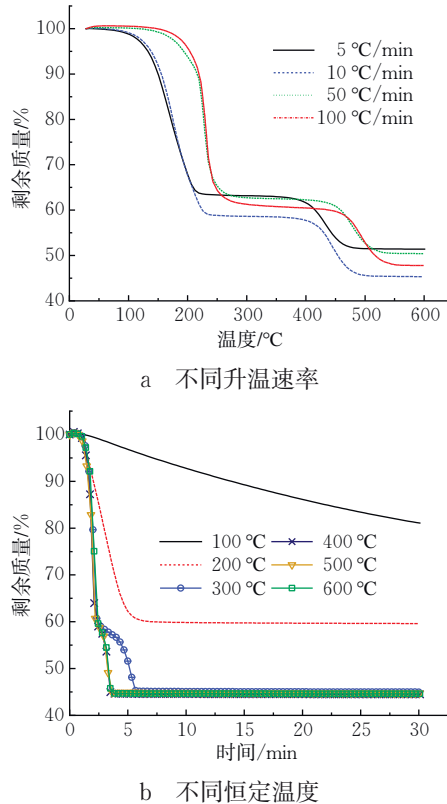


图4 不同加热条件下纳米银浆的热重曲线

Fig.4 Thermogravimetric curves of nano silver paste under different heating conditions

2.2 挤出气压及烧结条件对DIW银线的影响

由图 4 可知,100~200 °C 烧结时可移除溶剂及大部分添加剂。鉴于实际应用中基底材料耐温性能的限制,烧结温度通常不超过 200 °C^[16-17],故本研究

选取 120,140,160,180 °C 四个温度水平进行烘箱烧结。选用孔径为 1.0 mm 的针头,分别在 469,586,689 kPa 三种气压下直写银线,研究挤出气压对烧结过程中归一化质量、归一化电阻及最终横截面积的影响。

2.2.1 烧结过程中归一化质量的变化 沉积的纳米墨水须经烧结方可获得导电性能^[1]。为消除试样间的差异,以烧结前 DIW 银线初始质量 M_0 为基准,对烧结过程中不同时间测得的银线剩余质量 M_t 进行归一化处理,得到归一化质量 M_t/M_0 。图 5 展示了针头孔径为 1.0 mm、挤出气压分别为 469,586,689 kPa 条件下,DIW 银线归一化质量随着烧结时间的变化。由图 5 可知:烧结前 10 min 内,银线归一化质量快速下降,这是由高温下银浆中的溶剂挥发所致;10 min 后归一化质量减小变缓,最终趋于稳定,该阶段主要为高沸点溶剂挥发及部分低分解温度有机添加剂的分解,与热重分析结果一致。此外,相同挤出气压下,烧结温度越高,相同时间及烧结结束时的归一化质量越低,表明物质移除速率越快、烧结结束后残留添加剂越少。以挤出气压 586 kPa 为例:120 °C 烧结 30 min 后归一化质量为 73.5%,180 °C 烧结 30 min 后归一化质量降至 60.2%;烧结结束即 60 min 时,120,180 °C 的归一化质量分别为 71.8% 和 58.3%。相同烧结温度下,挤出气压越大,烧结结束时归一化质量越高,如 160 °C 烧结结束,469,586,689 kPa 挤出气压下的归一化质量分别为 59.8%,60.8%,63.5%,表明银线中残留添加剂随着气压增加而增加。

图 6 对比了相同挤出气压和针头孔径条件下,120,180 °C 烧结 30 min 后 DIW 银线上表面的 SEM 图像。低倍率图像(图 6a-I 和 6b-I)显示,两类银线表面均存在微小的孔隙,应为溶剂及添加剂分解物的逸出通道;添加剂的移除促使纳米银颗粒互相融合形成烧结颈,孔隙率逐渐降低,最终实现致密堆积^[17-18]。采用 ImageJ 测算得图 6a-I 和图 6b-I 的孔隙率分别为 45.8% 和 32.7%。进一步放大的图像(图 6a-II 和 6b-II)显示,180 °C 烧结银线表面较 120 °C 烧结银线表面更加平整。高倍率图像(图 6a-III,图 6b-III)聚焦于纳米银颗粒相对致密堆积区域,可见纳米银颗粒成片堆积,测得该区域的孔隙率分别为 23.7% 和 12.7%。综上,烧结温度越高,纳米银颗粒堆积越致密,成片连接的区域面积越大,表明高温烧结有机物去除更彻底,预示更优的导电性能。

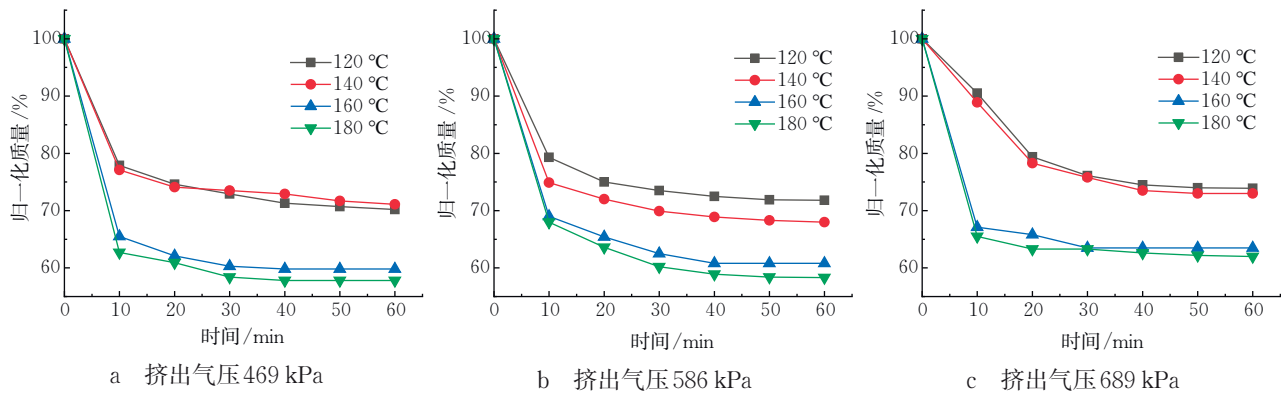


图 5 不同挤出气压 DIW 银线烧结过程中归一化质量变化

Fig. 5 Normalized mass change of DIW silver wire during sintering with different extrusion pressure

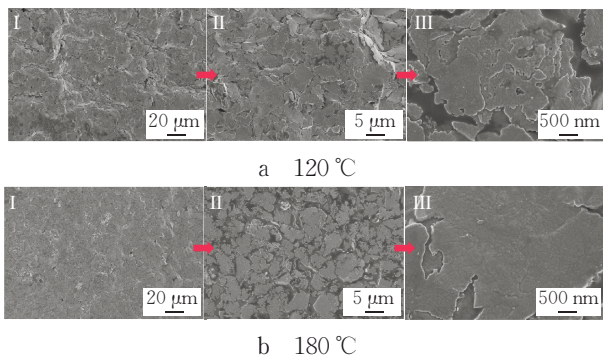


图 6 120, 180 °C 烧结 30 min 后 DIW 银线上表面的 SEM 图像

Fig.6 SEM images of the upper surface of DIW silver wire after sintered at 120 and 180 °C for 30 minutes

2.2.2 烧结过程中导电性能的变化 未烧结 DIW 银线不导电,故以各温度下烧结结束(60 min)时的电阻值为基准,对各时间点测得的电阻值 R_t 进行归

一化处理,得到归一化电阻 R_t/R_{60} ,以消除试样间差异。图 7 为不同挤出气压下 DIW 银线烧结过程中归一化电阻的变化曲线。由图 7 可知,在相同挤出气压下,烧结温度越高,初始阶段归一化电阻下降越快。例如挤出气压为 469 kPa 时,120 °C 烧结 10 min 归一化电阻为 1.6(即此时电阻为烧结结束时的 1.6 倍),而 180 °C 烧结 10 min 归一化电阻仅为烧结结束时的 1.1 倍。结合图 5 的归一化质量变化曲线可知,高温下烧结初期溶剂及添加剂移除速率更快。在较低烧结温度(120, 140 °C)条件下,归一化电阻于 30 min 后趋于稳定;而高温(160, 180 °C)条件下仅需 10 min 便可趋于稳定。对比图 6a 和图 6c 可知,挤出气压为 689 kPa 时,归一化电阻下降速率快于 469 kPa,但挤出气压为 689 kPa 时归一化质量变化慢于 469 kPa(图 5a 和图 5c),这种差异源于烧结银线横截面积对电阻值的影响。

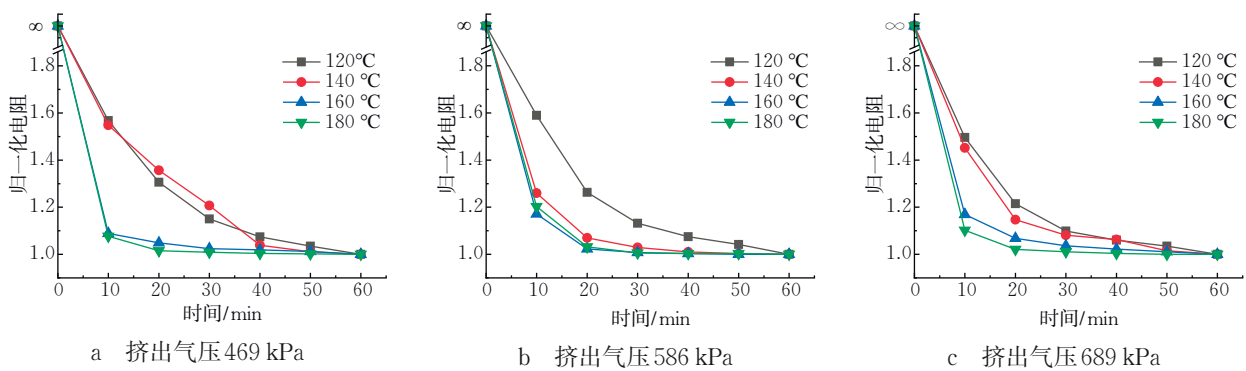


图 7 不同挤出气压 DIW 银线烧结过程中归一化电阻变化

Fig. 7 Normalized resistance changes during the sintering of DIW silver wire with different extrusion pressures

2.2.3 烧结银线横截面积的变化 表 1 展示了针头孔径为 1.0 mm,挤出气压分别为 469,586,689 kPa 条件下 DIW 银线烧结结束时的横截面积。由表 1 可知,相同挤出气压下,烧结温度越低,银线横截面积越大,归因于低温烧结残留溶剂及添加剂较多,且纳米银颗粒堆积致密化程度较低。其他参数相同,

当挤出气压增大时,烧结后银线横截面积增大,这是由于银浆随着挤出气压的增大而变粗,经烧结移除溶剂及有机添加剂后所得银线横截面积相应增大。

2.3 针头孔径及烧结温度对 DIW 银线的影响

除挤出气压外,针头孔径亦是影响 DIW 银线性能的关键因素。固定挤出气压为 586 kPa,选用

表 1 不同挤出气压 DIW 银线烧结后的横截面积 (mm^2)Tab. 1 Cross-sectional area of sintered silver wire DIW under different extrusion pressure (mm^2)

挤出气压/kPa	烧结温度/ $^{\circ}\text{C}$			
	120	140	160	180
469	0.521	0.478	0.474	0.456
586	0.675	0.652	0.632	0.645
689	0.689	0.694	0.652	0.675

内径分别为 1.0, 0.8, 0.6 mm 的三种针头, 研究针头孔径及烧结温度对 DIW 银线的横截面积、归一化质量及电阻率的影响。

2.3.1 对银线横截面积的影响 烧结结束(60 min)后 DIW 银线的横截面积如图 8 所示。由图 8 可知, 针头孔径越大, 烧结后银线横截面积亦越大, 如 0.6 mm 孔径针头 DIW 银线的横截面积远小于 0.8, 1.0 mm 孔径。值得注意的是, 实验中若选用小于 0.6 mm 的针头可能会导致银线不连续。相同针头孔径下, 烧结温度越高, 横截面积略小, 这与高温下添加剂移除更彻底及银颗粒堆积致密化程度更高有关。

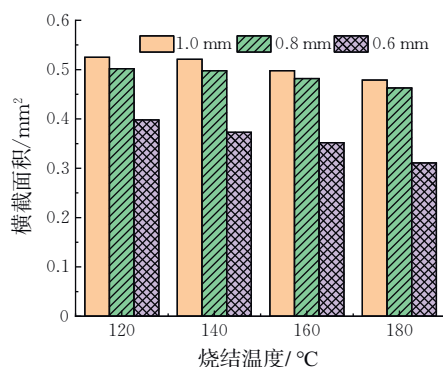


图 8 不同孔径针头 DIW 银线烧结后的横截面积

Fig. 8 Cross-sectional area of sintered silver wire DIW printed using needles with different inner diameters

2.3.2 对归一化质量的影响 图 9 对比了挤出气压为 586 kPa 时, 不同针头孔径 (0.6, 0.8, 1.0 mm) DIW 银线烧结结束(60 min)后的归一化质量。对于各孔径银线, 归一化质量均随着烧结温度的升高而逐渐降低。在相同温度下, 1.0 mm 孔径的银线的归一化质量最高, 0.6 mm 孔径的归一化质量最低, 0.8 mm 孔径的归一化质量介于两者之间。以 120 $^{\circ}\text{C}$ 烧结 60 min 为例, 1.0, 0.8, 0.6 mm 孔径银线的归一化质量分别为 71.8%, 62.8%, 60.7%。这一现象源于针头孔径增大使得银线横截面积增加(图 8), 而烧结过程中银浆表面的溶剂挥发及添加剂分

解较底部更快, 且横截面积越大(银线越厚), 这种不均匀物质移除现象越明显^[19], 最终导致大孔径针头银线的归一化质量更高。

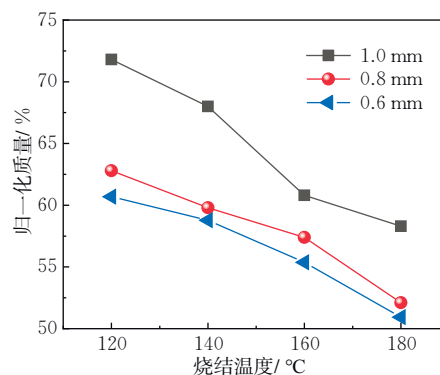


图 9 不同孔径针头 DIW 银线烧结后的归一化质量

Fig. 9 Normalized mass of sintered silver wire DIW printed using needles with different inner diameters

2.3.3 对电阻率的影响 图 10 对比了针头孔径及烧结温度对 DIW 银线电阻率的影响。180 $^{\circ}\text{C}$ 烧结 60 min 后电阻率最低 (82.7 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$), 是块银 (1.59 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$) 的 52 倍; 120 $^{\circ}\text{C}$ 烧结 60 min 后电阻率最高 (89.2 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$), 是块银的 56 倍。相较于同类研究, 本实验 DIW 银线电阻率属于合理范围^[20]。

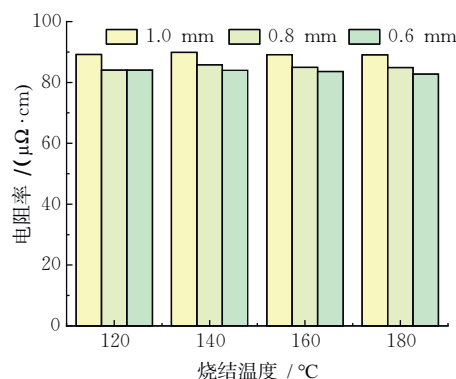


图 10 不同孔径针头 DIW 银线烧结后的电阻率

Fig. 10 Electrical resistivity of sintered silver wire DIW printed using needles with different inner diameters

相同挤出气压下, 针头孔径较大的 DIW 银线的电阻率较高, 如 140 $^{\circ}\text{C}$ 烧结 60 min 后, 1.0, 0.8 mm 孔径银线的电阻率较 0.6 mm 孔径分别高 7%, 2%。然而, 1.0, 0.8 mm 孔径银线的横截面积分别较 0.6 mm 孔径高 45% 和 36% (图 8), 故大孔径银线的电阻值反而更低。材料电阻率与孔隙率通常呈正相关^[21], 但对含有多种添加剂的纳米墨水烧结后, 导电性能对孔隙率的依赖性较弱, 主要原因为烧结后添加剂的去除并不完全^[22]。这些添加剂分子覆盖在纳米颗粒表面, 阻碍了颗粒直接接触, 此时电

阻计算需结合隧道效应理论^[23]。DIW 纳米银线电阻率与孔隙率、添加剂去除程度的定量关系可作为后续研究方向。

3 结论

(1)增大挤出气压或针头孔径会导致烧结后添加剂残留增多,DIW 银线电阻率略有上升;但在此条件下银线横截面积也显著增加,抵消了电阻率上升的影响,使得相同长度银线的整体电阻反而降低。

(2)挤出气压与针头孔径较小时,溶剂及添加剂在烧结过程中移除更快、残留更少,所需的烧结时间也更短。

(3)若以低电阻为主要目标,推荐工程参数为:挤出气压 689 kPa(100 psi)、针头孔径 0.8~1.0 mm、烧结温度 180 °C;若追求快速烧结,则可选用:挤出气压 469 kPa(68 psi)、针头孔径 0.6 mm、烧结温度区间为 160~180 °C。

(4)在 120,140 °C 较低温度烧结时,归一化质量与电阻约需 30 min 趋于稳定;而在 160,180 °C 较高温烧结时,仅需 10 min 即可稳定。实际应用中可根据基底的耐温特性,灵活采用“低温-长时”或“高温-短时”工艺。

参考文献:

- [1] Tan H W, An J, Chua C K, et al. Metallic nanoparticle inks for 3D printing of electronics [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2019, 5(5): 1800831.
- [2] 丁泽宇, 罗书轩, 何瑞博, 等. 纳米银导电墨水的制备及其在高精度柔性电路打印中的应用[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(10): 3530-3538.
- [3] 黎茂扬, 于培师, 朱指南, 等. 直书写 3D 打印传感器的设计、制造与应用探索[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(21): 88-103.
- [4] 张静, 周婧, 段国林. 基于直写成型技术的多材料打印研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(8): 220-227.
- [5] 陆晗婧, 陈志刚, 罗斌, 等. CNT/PDMS 复合材料的直写打印技术及性能测试[J]. *功能材料*, 2024, 55(6): 6230-6236.
- [6] 陈怡霖, 韩蕊遥, 李振龙, 等. 基于直写式硅胶 3D 打印柔性材料工艺参数研究[J]. *中国铸造装备与技术*, 2023, 58(2): 78-83.
- [7] 陈志刚, 李雅芳, 王辉, 等. 碳纤维/碳化硅直写式 3D 打印参数优化研究[J]. *装备制造技术*, 2023(12): 31-35.
- [8] Blanco-Angulo C, Martínez-Lozano A, Arias-Rodríguez J, et al. Low-cost direct-writing of silver-based ink for planar microwave circuits up to 10 GHz [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 4010-4022.
- [9] Kim J H, Le Quang H, Sim H H, et al. Direct-ink-writing of highly deformable, multi-layered electrical devices using elastomer-based dual inks [J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2025, 20: e2509611.
- [10] 张薛安, 马颖, 安博星, 等. 石墨烯-银纳米粒子复合墨水的制备及直写打印研究[J]. *山东化工*, 2024, 53(15): 46-49.
- [11] Yang W D, Zhang X Y, Ma C, et al. Tailored silver precursor ink via amine ligand engineering for high-performance flexible wireless devices [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 726: 137977.
- [12] Mu Q Y, Dunn C K, Wang L, et al. Thermal cure effects on electromechanical properties of conductive wires by direct ink write for 4D printing and soft machines [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(4): 045008.
- [13] Patil N, Venkatesh S, Swaminathan P, et al. Design evaluation and performance analysis of silver nanoparticle ink-based printed heaters [J]. *Flexible and Printed Electronics*, 2025, 10(1): 015001.
- [14] Zhang H Q, Bai H L, Jia Q, et al. High electrical and thermal conductivity of nano-Ag paste for power electronic applications [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(11): 1543-1555.
- [15] Wang H W, Du W Z, Xi Y, et al. Non-isothermal thermogravimetric analysis study on the pyrolysis reaction kinetics of bituminous coal [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2022, 45(6): 1048-1057.
- [16] 李路海, 刘媛琪, 韩璐, 等. 纳米银印刷电路低温烧结研究进展[J]. *印刷与数字媒体技术研究*, 2023(2): 10-21.
- [17] 陈澄, 尹红波, 王成, 等. 钼铜载体与铝合金外壳的无压纳米银胶低温烧结强度[J]. *半导体技术*, 2025, 50(1): 95-100.
- [18] 曹彤, 黄进, 茅德旺. 基于 3D 打印微带贴片天线的近红外烧结研究[J]. *火控雷达技术*, 2023, 52(2): 105-110.
- [19] Moon Y J, Kang H, Kang K, et al. Effect of thickness on surface morphology of silver nanoparticle layer during furnace sintering [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(4): 1192-1199.
- [20] 李超, 林枝城, 张义超, 等. 基于压电喷墨技术 3D 打印纳米银墨水的固化工艺研究[J]. *电子元件与材料*, 2024, 43(7): 853-859.
- [21] Liu P S, Li T F, Fu C. Relationship between electrical resistivity and porosity for porous metals [J]. *Mate-*

- rials Science and Engineering: A, 1999, 268 (1/2): 208-215.
- [22] Chandel G R, Sun J Y, Etha S A, et al. Direct visualization of nanoparticle morphology in thermally sintered nanoparticle ink traces and the relationship among nanoparticle morphology, incomplete polymer removal, and trace conductivity [J]. Nanotechnology, 2023, 34(36): 365705.
- [23] Mu Q Y, Wang J K, Kuang X. Modeling the resistive viscoelasticity of conductive polymer composites for sensor usage [J]. Soft Matter, 2023, 19 (5): 1025-1033.

Effects of Direct Ink Writing Printing Parameters and Sintering Conditions on Printed Nano Silver Paste

YAN Deke¹, AN Chunxu², MU Quanyi^{2*}

(1.School of Mathematics and Statistics, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. School of Physics, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: This study investigates the effects of extrusion pressure, needle inner diameter, sintering temperature, and sintering time on the sintering behavior of silver wires during the direct ink writing (DIW) process of nano silver paste. The relationship between these parameters and normalized mass, normalized resistance, cross-sectional area and resistivity of the sintered silver wires was analyzed. The results indicate that higher extrusion pressures and larger needle inner diameters lead to an increased presence of residual additives in the sintered silver wires; however, the larger cross-sectional area results in lower resistance for silver wires of the same length. Conversely, lower extrusion pressures and smaller needle inner diameters facilitate faster removal of solvents and additives, thus shortening the sintering time. Therefore, to achieve low resistance, a combination of higher extrusion pressure and larger needle inner diameter is recommended; for rapid sintering, a combination of lower extrusion pressure and smaller needle inner diameter is more suitable. At sintering temperatures of 120 and 140 °C, the normalized mass and normalized resistance stabilize after approximately 30 minutes, whereas at 160 and 180 °C, stabilization is achieved in only 10 minutes. In practical applications, depending on the substrate's thermal resistance, one may choose between lower temperatures with longer sintering times or higher temperatures with shorter sintering times to attain effective sintering.

Keywords: direct ink writing printing; needle inner diameter; extrusion pressure; sintering; nano silver paste

(责任编辑 王德平)