

液态金属基油墨的印刷适性调控与可拉伸电子应用

于卉¹, 裴祥然², 高亚东², 杨操^{2*}

(1.河南省新闻出版学校, 郑州 450044; 2.郑州大学 材料科学与工程学院, 郑州 455001)

摘要: **目的** 调整液态金属基油墨的印刷适性, 用于可拉伸电极的印刷法构建。**方法** 通过超声破碎法减小液态金属微粒直径, 降低其表面张力; 探究聚氨酯种类和含量对液态金属微粒的分散性、油墨流变性、电极的印刷适性和可拉伸性的影响。**结果** 引入 PU1185 制备的液态金属油墨, 丝印电极分辨率达 58 μm ; 印制电极展现了良好的导电性和可拉伸性, 预拉伸稳定后的电极在 100% 的应变下拉伸 1 000 次, 电阻变化不超 2 倍。**结论** 液态金属基油墨能够用于高分辨电路的加工, 在可拉伸电子领域具有可预见的应用前景。

关键词: 可拉伸电子技术; 丝网印刷; 油墨; 液态金属

中图分类号: TB484.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)19-0129-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.017

Printing Suitability Control and Stretchable Electronic Applications of Liquid Metal Based Inks

YU Hui¹, PEI Xiang-ran², GAO Ya-dong², YANG Cao^{2*}

(1. Henan Press and Publishing School, Zhengzhou 450044, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 455001, China)

ABSTRACT: The work aims to adjust the printability of liquid metal based inks and apply it to develop the printing method of stretchable electrodes. The diameter and surface tension of liquid metal particles were reduced by ultrasonic crushing. The effects of different types and contents of polyurethane on the dispersibility of liquid metal particles, ink rheology, and the printability and stretchability of printed electrodes were investigated. The liquid metal ink prepared by introducing PU1185 could achieve an electrode resolution of 58 μm through screen printing. The printed electrode exhibited good conductivity and stretchability. After pre-stretching and stabilizing, the electrode could be stretched 1 000 times under 100% strain, and its resistance change did not exceed 2 times. Liquid metal-based inks can be used for high-resolution circuit processing, which also indicates that liquid metal-based inks have foreseeable broad application prospects in stretchable electronics.

KEY WORDS: stretchable electronics; screen printing; ink; liquid metal

随着科技的发展, 可穿戴电子设备、人机交互电子以及软体机器人等能够为人类的生活提供便捷的技术, 成为热点研究领域^[1]。传统电子器件往往以硬质基板为基底, 所用电子材料多为刚性, 不能弯折, 限制了其在可穿戴等场景中的应用。柔性电子是将有机/无机材料电子器件制作在柔性/可延性

基板上的新兴电子技术, 因其独特的柔性/延展性以及高效、低成本的特点, 在信息、能源、医疗、国防等领域具有广泛应用前景^[2-5]。与传统柔性电子器件相比, 可拉伸电子对电子材料和器件的要求更为严苛。除了能满足弯曲、折叠等机械应变外, 可拉伸电子要求电子器件在拉伸应变下也能够正常工

作^[6],因而能够适应更复杂的工作环境,拓展微电子器件的应用范围^[7]。目前,制备可拉伸电子主要有以下 2 种策略:结构上的可拉伸和本征可拉伸^[8-9]。结构上的可拉伸是把具有优异导电性、介电性的电子材料通过结构设计赋予其可拉伸性^[8],比如褶皱结构^[10]、岛桥结构^[11]、金属纳米线的网格结构等。本征可拉伸是利用本征具有可拉伸性的材料来制备可拉伸电子器件^[9]。

液态金属是一类在室温下呈现液体状态的金属材料,兼具金属的导电性和液体的流动性^[12],是制备本征可拉伸电子的理想材料。液态金属包含 4 种金属元素:铟 (Fr)、铯 (Cs)、汞 (Hg) 和镓 (Ga)。相较于其他金属元素,金属 Ga 有巨大的优势。例如,比 Hg 的挥发性和毒性低,比 Fr 的放射性低,比 Cs 安全,不易爆。镓基液态金属主要包括纯镓、镓铟二元合金 (EGaIn)、镓铟锡三元合金 (GaInSn)^[13]。基于液态金属的流动性和导电性,目前已被用于可拉伸电极的制作,进而用于制备高度可拉伸的可穿戴电子产品^[14]。丝网印刷法印刷精度较高,可扩展性强,通过该方法可以在不同种类和不同表面粗糙度的基底上印刷复杂的电路图案^[15-16]。然而,液态金属由于其自身较大的表面张力,难以在衬底表面浸润、铺展和黏附^[17-18],该特性也使得基于液态金属的高分辨电路印刷法加工十分困难,限制了其在高分辨电子电路中的应用。

针对上述问题和难点,采用超声破碎法将液态金属分散为微纳尺度小球,降低液态金属的表面张力,增加其在溶剂中的分散性。同时向液态金属里添加少量聚氨酯 (PU),提高其分散稳定性和印刷适性,制备可打印的液态金属油墨。打印后,对样品施加定向拉伸可使液态金属小球破裂,恢复导电通路,得到高导电、高分辨率的电极。进一步对液态金属基油墨的流变学、可打印性和相关打印结构的微观结构、导电性和可拉伸性等进行了详细探究,建立起相互之间的联系。研究不同实验条件下液态金属基油墨的印刷质量、导电特性及其可拉伸性,在此基础上,优化其最佳组成和配比。

1 实验

1.1 材料

主要材料:液态金属;N,N-二甲基甲酰胺,分析纯,上海阿拉丁生化科技有限公司;异丙醇,分析纯,成都市科隆化学品有限公司;热塑性聚氨酯弹性体,分析纯,烟台万华聚氨酯股份有限公司;无水乙醇,分析纯,天津市化学试剂三厂。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备:PZ-800L 超声波处理器,方需

科技(上海)有限公司;SMT 1 丝网印刷网版,东莞市翔鹏丝印器材有限公司;MTS450 电动平移台,北京赛凡光电有限公司;Keithley 2000 数字源表,Keithley;TTR-III X-射线衍射仪,Rigaku;JSM-6800F 扫描电子显微镜,JEOL;DM750 M 光学显微镜,Leica;DHR-2 流变仪,TA。

1.3 方法

1.3.1 液态金属的分散与后处理

称取 6 g 液态金属与 100 mL 异丙醇溶液倒入塑料烧杯,用探头超声机超声,使液态金属分散均匀。再将分散液离心 (3 500 r/min、15 min),之后加入异丙醇溶液,再次超声离心,将上清液倒掉,底部即为得到的液态金属沉淀。

1.3.2 PU 溶液制备

将装有 2 g DMF 的 5 mL 玻璃瓶放入 60 °C 水浴锅中,调整转速为 400 ~ 450 r/min。称量 0.4 g PU,逐粒加入玻璃瓶内,加热 1.5 h 左右至搅拌均匀,即可得到 PU 溶液 (质量分数为 20%)。

1.3.3 液态金属油墨制备

取 1 g 液态金属沉淀放入 3 mL 玻璃瓶中,再分别取 10、20、30、40 mg 质量分数为 20% 的聚氨酯溶液 (型号 PU 365 和 PU 1185) 和 100 μ L 的 DMF 溶液。将所配溶液震荡,搅拌均匀,即可得液态金属油墨。

1.3.4 丝网印刷

所用不锈钢网版的网孔开口尺寸从左往右分别为 50、100、150、200、250 μ m。将 PU 基底放于网版下面,把一定量的油墨涂抹于网版的表层,并且调整刮刀和网版之间的夹角至 30°,匀速移动刮刀完成印刷。

1.3.5 拉伸电阻监测

将丝网印刷所得的 200 μ m 电极两端分别连接万用表的正负两极,通过电移动平台对应软件控制电极的拉伸应变,同时万用表实时监测电极的电阻变化,并将数据传输到对应软件上,以输出电阻变化的曲线。

1.3.6 表征手段与测试方法

使用 X 射线衍射仪 (XRD) 研究纯聚氨酯和少量聚氨酯混合液态金属制备的油墨的物理化学结构。使用扫描电子显微镜 (SEM) 研究已经被分散的样本的表面特性。使用流变仪对液态金属油墨进行稳态扫描流动测试、触变性测试,以及采用震荡应力扫描测试对油墨的黏度、流体类型和流变行为进行表征。监测丝印电极的拉伸电阻和拉伸循环电阻,对丝印电极的导电性和循环性进行表征。

2 结果与分析

2.1 油墨的表征与分析

图 1a、图 1b 是聚氨酯薄膜和液态金属分别与质量分数为 20% 的聚氨酯溶液混合后制成的油墨的 XRD 图。分析两图可知,聚氨酯薄膜和液态金属与聚氨酯溶液制备成的油墨均无结晶现象,但聚氨酯薄膜有非晶峰,而液态金属与聚氨酯溶液制备成的油墨无非晶峰,其物理结构不相同。说明液态金属扰乱了聚氨酯的结构,制备的油墨形成了新的结构,这也说明液态金属与聚氨酯溶液混合充分,制备的油墨体系分散性较好,较为均匀。

图 1c、图 1d 是液态金属分散到异丙醇中不同倍数的 SEM 图片。从图 1c 中可以观察到,液态金属在异丙醇溶液中经超声后可均匀分散为液滴状。通过对分散后的液滴直径进行标注测量,可以观察到除了部分直径较大的金属颗粒,液滴直径总体小于 $2\ \mu\text{m}$ 。从更大倍率的 SEM 图中(图 1d)可以更加清晰地观察到液态金属液滴的形貌。均匀分散的液态金属液滴提升

了浸润性和分散性,使其能够用于印刷油墨的制备。

为探究液态金属表面张力的变化,对不同液态金属基油墨与载玻片的接触角进行了测量。图 2a 是超声前的液态液滴与载玻片的接触角,角度为 120° 。图 2b 为液态金属在异丙醇中的分散液与载玻片的接触角,角度为 22.6° 。图 2c 为添加了 10 mg PU1185 后的液态金属油墨与载玻片的接触角,角度为 36.9° 。接触角从大角度转变为小角度,证明液态金属在经过探头超声之后,表面张力大大降低,有利于在印刷衬底上的浸润和铺展。添加了 10 mg PU1185 后,液态金属油墨依然保持了良好的浸润性。

2.2 油墨的流变学表征与分析

图 3a 是液态金属不加 PU 与加入 PU 搅拌后制成的油墨的黏度特性测试的结果。LM-10 mg PU1185 油墨黏度特性测试表明,随着剪切速率从 $0.01\ \text{s}^{-1}$ 增加到 $100\ \text{s}^{-1}$,其黏度从 $2000\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ 快速下降到 $0.2\ \text{Pa}\cdot\text{s}$,表明油墨具有良好的剪切稀释性^[19]。该油墨的黏度和优异的流变性,使其适合于丝网印刷。不加 PU 的液态金属油墨的黏度相对较低。

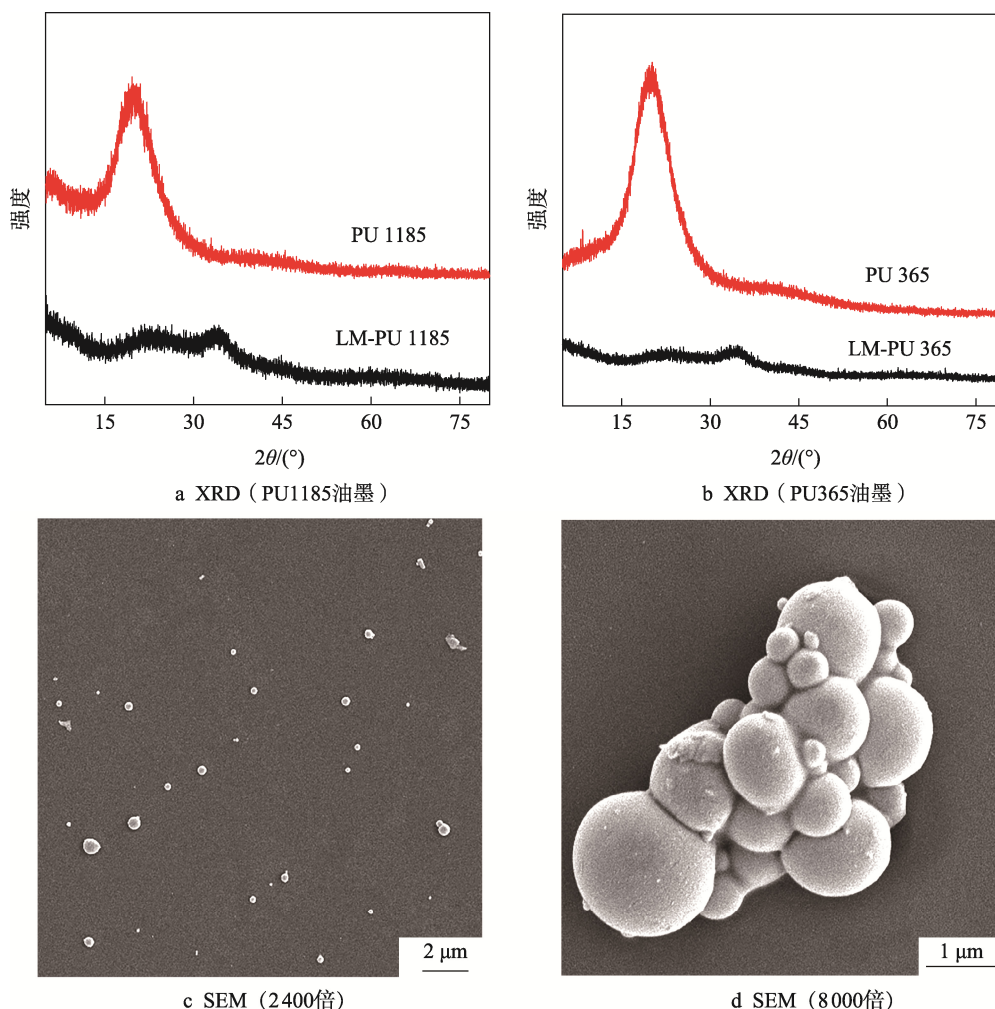


图1 不同油墨对应的 XRD 谱图与液态金属丙酮分散液的 SEM 图
Fig.1 XRD spectra corresponding to different inks and SEM images of liquid metal acetone dispersion

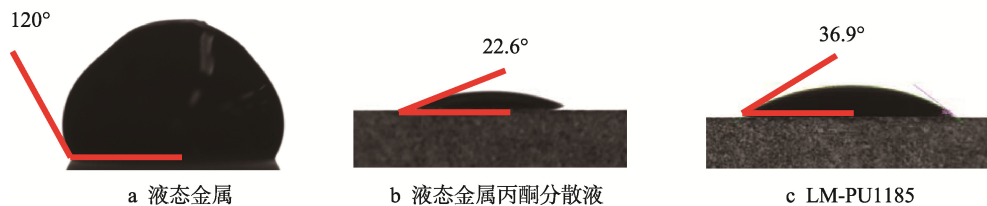


图 2 不同状态的液态金属与载玻片的接触角

Fig.2 Contact angle between liquid metals in different states and glass slides

通过采用不同剪切速率 (0.01 s^{-1} 与 100 s^{-1}) 的交替作用来模拟印刷过程中刮刀的剪切变化,更好地探索油墨的流动特征。图 3b 通过触变性测试,发现油墨的黏度会随着剪切外力的作用而快速减小,并且随着外力的减弱,黏度会瞬间回升。当剪切速率为 0.01 s^{-1} 时, LM-10 mg PU1185 油墨的黏度维持在 $1600 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。然而,随着剪切速率变为 100 s^{-1} ,它的黏度会迅速降低,最终达到 $0.43 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,此时液体金属基油墨变得较为稀薄,它可以通过网版渗透进基底表面。保持 30 s 之后,剪切速率急剧降低为 0.01 s^{-1} ,油墨黏度快速回升到 $1700 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 左右。这表明液态金属基油墨体系在高速剪切下结构被破坏,待剪切速率恢复,其内部结构也可以快速恢复。不添加 PU 的油墨,黏度曲线不平稳,油墨稳定性和流变性均不如前者。

图 3c 是液态金属油墨震荡应力扫描测试的动态应力扫描曲线,显示了油墨的储存模量 (G') 和损耗模量 (G'') 与振荡剪切应力的关系。可以据此了解丝网印

刷过程中油墨发生的结构变化。如图 3c 所示,随着振荡应力的增加, LM-10 mg PU1185 油墨体系的存储和损耗模量都逐渐下降,油墨网络结构逐渐弱化、破裂。在振荡应力的影响下,油墨的行为会发生显著的改变。当弹性模量大于损耗模量,即 $G' > G''$,这意味着油墨呈现出类似固态的行为;当弹性模量等于损耗模量时,即 $G' = G''$,这意味着油墨会由弹性体逐渐演化成黏性体;而继续增加剪切应变,当弹性模量小于损耗模量时,即 $G' < G''$,这意味着储能模量的下降幅度大于损耗模量的,此时油墨的流动特征更加明显,呈现出一种类似于液态的特征^[20]。在使用刮刀在网版上印刷时,为了使油墨能够透过网版印到基底上,要求油墨呈现出类似于液态的特征。当停止印刷时,剪切力变小,油墨须迅速恢复其类固态结构,这样才能使印刷图案的几何形状得到保持,这又要求油墨具有良好的黏性特征^[20]。上述测量结果证明了 LM-10 mg PU1185 油墨有适当的黏度、模量和触变性,适用于丝网印刷。

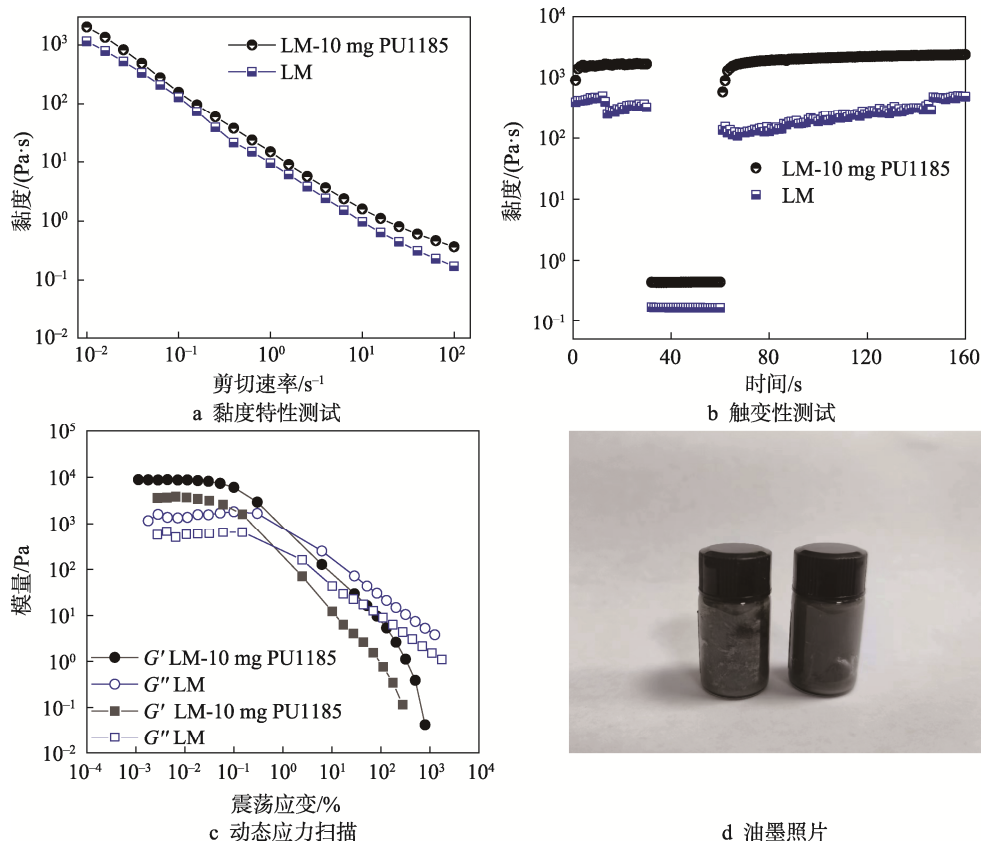


图 3 液态金属油墨的流变性能测试与照片

Fig.3 Rheological property testing and photos of liquid metal ink

2.3 油墨的印刷适性与分析

本节进一步探索了液态金属油墨的印刷适性。将制备的 LM-10 mg PU1185 油墨在 A4 纸和可拉伸的 PU 衬底上印刷得到的照片和显微镜图片见图 4a。如图 4a 所示, 在 A4 纸上印刷得到的图案较为完整, 方框和细线均边缘整齐。从印刷电极的显微镜图可以看到, 印刷后的线条边缘锐利、齐整, 显示了液态金属油墨良好的印刷适性。印刷得到的电极宽度分别为 55、108、153、189、221 μm , 在孔径为 200、250 μm 时, 印刷得到的电极相对于网孔显示出一定的收缩性, 这是由液态金属油墨的大比表面张力所致。将 LM-10 mg PU1185 油墨在可拉伸的 PU 衬底上印刷得到的照片和显微镜图片如图 4b 所示。印刷后的线条边缘锐利、齐整, 显示了 LM-10 mg PU1185 油墨在 PU 衬底上良好的印刷适性。PU 的引入, 使得液态金属油墨在可拉伸衬底上也能够实现高精度印刷。印刷得到的电极宽度分别为 58、109、150、241、273 μm , 呈现出一定的扩散, 是由印刷后油墨的流动所致。

图 5a 是不加 PU 的液态金属油墨丝网在 A4 纸基底上印刷的 250 μm 细线的光学照片和显微镜照片。从照片中可以看出, 丝印细线的轮廓并不整齐, 并且两侧的正方形图案上有明显的液态金属液滴。从光学显微镜照片也可看出丝印细线的宽度为 268 μm , 说明在印刷过程中该油墨发生了明显扩散。图 5b 是不加 PU 的液态金属油墨丝网在 PU 基底上印刷的 250 μm 细线的光学照片和显微镜照片, 可看出电极呈现严重的不均匀现象, 丝印细线的宽度为 283 μm ,

外部轮廓扩散到 500 μm 。与 A4 纸基底类似, 该油墨在 PU 基底上也发生了明显扩散。同上文中的流变测试性能相联系, 不加 PU 的液态金属油墨的黏度较低, 更容易发生扩散, 不适用于高精度丝网印刷, 因此后续丝网印刷电极的拉伸电阻测试不再对该油墨展开研究。

2.4 油墨的导电性能表征与分析

2.4.1 拉伸电阻

接着进一步探究了 2 种不同种类和不同含量的 PU 对印刷电极初始导电性和拉伸后的导电性的影响。将液态金属分别加入 10、20、30、40 和 50 mg PU 1185 形成的油墨, 以及液态金属分别加入 10、20、30、40 和 50 mg PU 365 形成的油墨, 分别印刷在薄膜 PU 1185 和薄膜 PU 365 上。样品为长度 200 mm、宽度 3 mm 的长方形样条状。将这 10 种样条分别放到拉伸台上进行拉伸, 起始拉伸长度为 1 cm, 并利用数字原表记录拉伸时的电阻。对比图 6a 和图 6b 可以发现, 样条在拉伸后, 电阻值均有所下降。一方面是因为液态金属的液滴表面易形成脆性氧化物, 通过拉伸, 表面的氧化层破裂, 液态金属流出形成导电通路, 所以电阻降低。另一方面是因为拉伸后, 液态金属液滴沿受力方向变形, 相邻液滴沿受力方向发生融合, 形成通路, 所以电阻值下降。同时对比图 6a、图 6b 也可以发现, 随着拉伸应变慢慢增加, 电阻值由减小变为增大。这是由于拉伸应变过大时, 油墨内部产生裂纹, 并且随着拉伸应变增加, 裂纹数量增多、宽度变大, 使得电极电阻值增大。

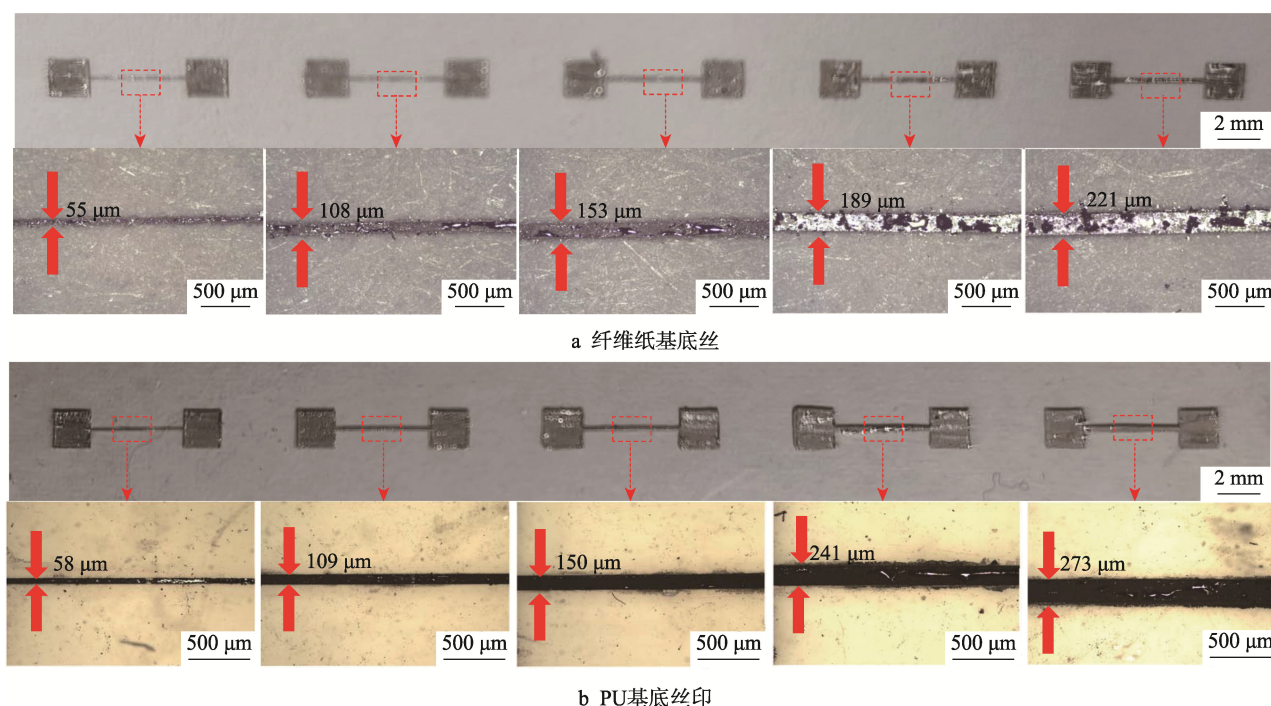


图 4 LM-10 mg PU1185 油墨丝印在不同基底上的光学照片与显微镜照片

Fig.4 Optical and microscopic photos of LM-10mg PU1185 ink screen printing on different substrates

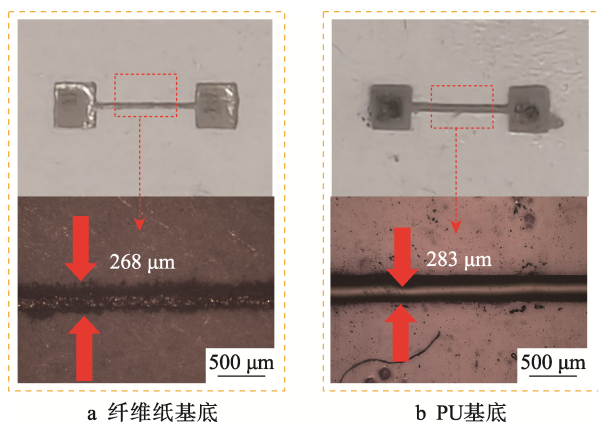


图 5 不加 PU 的液态金属油墨丝印在不同基底上的光学照片与显微镜照片
Fig.5 Optical and microscopic photos of PU-free liquid metal ink screen printing on different substrates

此外,还可以看出,随着 PU 含量的增加,丝印电极预拉伸后的初始电阻会先增大后减小,然后再增大。由于 PU 含量会影响液态金属油墨的印刷适性,少量的 PU 会使油墨印刷性能有所提升,同时也不会对液态金属本身良好的导电性造成较大影响;而 PU 含量过多时,由于 PU 本身的绝缘性,其在油墨中的比例增加则会导致电极整体的导电性变差,从而使电阻值增大。此外,油墨中 PU 的含量越高,所印刷电

极与 PU 基底的适应性就越好,在图 6a、和图 6b 中表现为随着 PU 含量的增加,电极的可拉伸范围增大。

图 6a 与图 6b 相比,图 6b 中电极的可拉伸应变最大能达到 950%,但是其电阻较大,且变化并不稳定,而图 6a 中电极的可拉伸应变普遍可达到 500%,其电阻值与图 6b 相比相对较小,且电阻值变化较为稳定。通过分析发现,液态金属加入 10 mg PU 1185 中制成的油墨与 PU 基底有较好的印刷适性,经丝印制备出的电极可拉伸性较好,电极初始电阻较低,且从开始拉伸到拉伸结束时,电阻稳定保持在十几欧姆,因此 1 g : 10 mg 是液态金属与聚氨酯 PU1185 的最佳比例。

2.4.2 电极拉伸前后的微观形貌表征

从图 7a 可以看出,初始未拉伸的液态金属基油墨表面的液态金属直径较大,且裂纹较少、较小。此时液态金属多以颗粒状存在,相互之间接触电阻较大,因此初始电阻较大。图 7b 是将液态金属基印制电极在 100%应变下拉伸循环 1 000 次后的显微镜照片,可以观察到,拉伸循环后,液态金属颗粒明显减少,拉伸后液态金属发生了明显的融合,电阻值下降。图 7c 是将电极拉伸至电阻无穷大时的显微镜照片,此时,电极呈现出许多裂纹,且裂纹较大,导致导电通路发生了破坏。

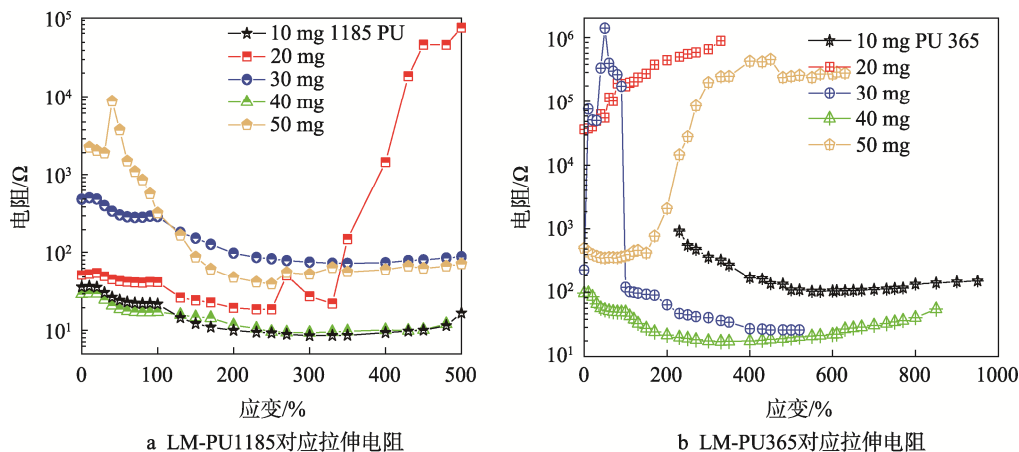


图 6 不同比例的 2 种油墨对应电极的电阻变化
Fig.6 Change in resistance of electrodes corresponding to two types of ink in different proportions

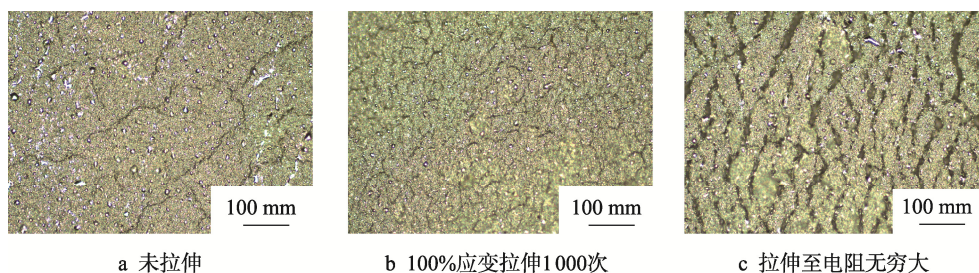
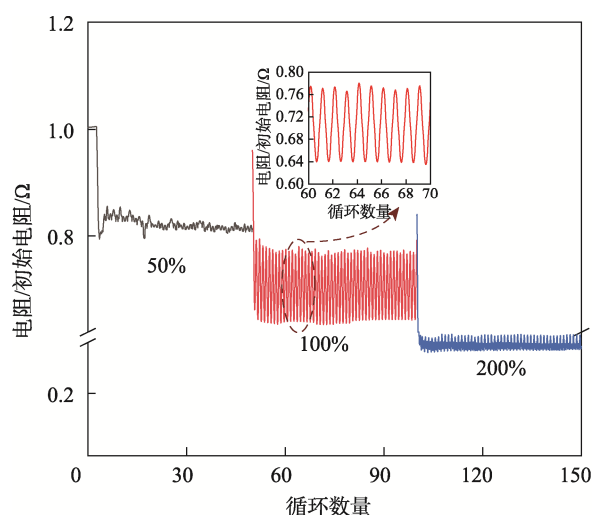


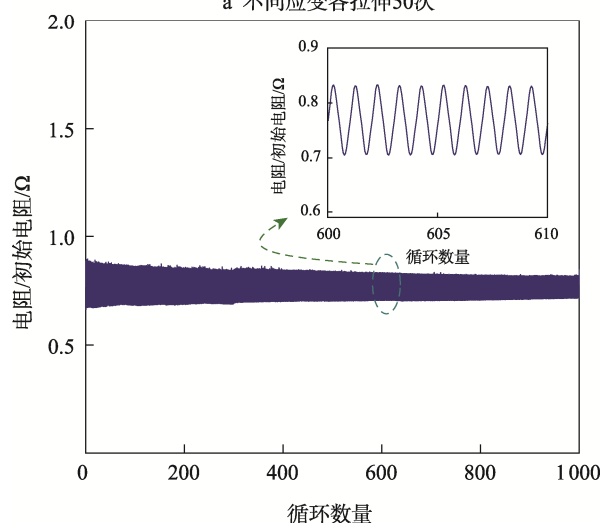
图 7 电极在不同拉伸应变下的显微镜照片
Fig.7 Microscopic photos of electrodes under different tensile strains

2.4.3 循环性能

可拉伸电路需要在长期动态的环境下使用, 因此液态金属基油墨在循环拉伸下的电性能的稳定性对电路的实际应用有重要意义。图 8a 为用 LM-10 mg PU1185 油墨印制的电极在不同循环应变 (50%、100%、200%) 下的相对电阻变化。可以看出, 在不同应变 (50%、100%、200%) 下分别循环 50 次, 印制电极的电阻呈现出减小趋势, 这是由于初期循环拉伸时, 液态金属小球破裂、融合形成新的导电通路所导致的。预拉伸稳定后, 图 8b 是预拉伸后的液态金属基电极在 100% 的应变下循环 1 000 次电阻值的相对变化。观察图 8b 中的局部放大曲线可知, 拉伸过程中每次循环的变化曲线基本一致, 100% 的应变下电阻值变化较小且稳定。在经过 1 000 次循环拉伸-恢复后, 液态金属基油墨的电阻值几乎没有变化。这表明液态金属微粒形成的导电网络在循环拉伸中也能保持重复形变, 所制备的液态金属基油墨具有十分优异的循环使用稳定性。



a 不同应变各拉伸50次



b 100%应变拉伸1000次

图 8 LM-PU 1185 油墨对应电极的循环性能
Fig.8 Cyclic performance of LM-PU 1185 ink corresponding to electrodes

2.5 印刷电极应用

液态金属油墨在 PU 衬底上丝网印刷的图案具有优异的导电性。为了进一步探索液态金属油墨在可拉伸电子中的应用, 将印刷出的电极连接电路, 点亮 LED 灯珠, 并在拉伸台上进行拉伸, 如图 9 所示。拉伸后的液态金属电极的电阻变小, 因此随着应变的增加, 灯泡逐渐变亮。LED 灯珠在电极拉伸到 200% 时依然可以点亮, 证明由液态金属油墨制备的电路具有优异的可拉伸性。

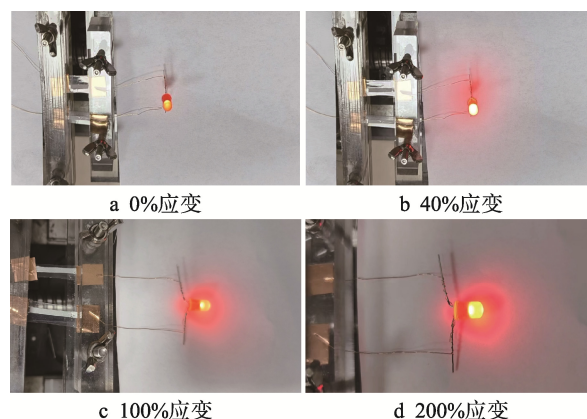


图 9 不同拉伸应变下灯泡的亮度
Fig.9 Luminance of bulbs under different tensile strains

3 结语

本文通过在液态金属油墨中引入聚氨酯来稳定、分散液态金属颗粒, 降低其表面张力, 从而制备了适用于丝网印刷的液态金属基油墨。通过对液态金属基油墨微观结构、流变学表征, 探究了油墨流变性与其印刷适性之间的联系。研究了不同 PU 种类和含量对液态金属基油墨的流变特性及其印刷质量的影响, 得到了其最佳组成和配比。将最佳配比的液态金属油墨通过丝网印刷制备出电极, 其分辨率可达 $58\ \mu\text{m}$ 。印刷后的电极展现出了良好的导电性和可拉伸性, 预拉伸稳定后的电极在 100% 的应变下拉伸 1 000 次, 其电阻变化不超 2 倍。最后, 通过电路设计, 进一步探索了液态金属基油墨在可拉伸电子领域的应用。印制的液态金属基电极在拉伸到 200% 时依然可以点亮 LED 灯珠, 证明了制备的液态金属油墨在可拉伸电子领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] WIBOWO A F, HAN J W, KIM J H, et al. Universal Stretchable Conductive Cellulose/PEDOT:PSS Hybrid Films for Low Hysteresis Multifunctional Stretchable Electronics[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2023,

- 15(14): 18134-18143.
- [2] GUO D, LI Y, ZHAO Q, et al. Stiffness Modulation-Driven Transfer Printing and Strain Isolation in Stretchable Electronics[J]. *Materials & Design*, 2022, 217: 110602.
 - [3] LIU X, LI D, CHEN X, et al. Highly Transparent and Flexible All-Solid-State Supercapacitors Based on Ultralong Silver Nanowire Conductive Networks[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(38): 32536-32542.
 - [4] CHEN X, XU G, ZENG G, et al. Realizing Ultrahigh Mechanical Flexibility and >15% Efficiency of Flexible Organic Solar Cells Via a "Welding" Flexible Transparent Electrode[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(14): 1908478.
 - [5] 邓中山. 蓬勃发展的液态金属新工业[J]. *科学*, 2022, 74(2): 31-34.
DENG Zhong-shan. Liquid Metal: A Booming New Industry[J]. *Science*, 2022, 74(2): 31-34.
 - [6] 王阳洋. 基于银纳米线的高稳定性可拉伸透明电极研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022: 3-27.
WANG Yang-yang. Highly Stable Stretchable Transparent Electrodes Based on Silver Nanowires[D]. Beijing: University of Science & Technology Beijing, 2022: 3-27.
 - [7] BODA U, STRANDBERG J, ERIKSSON J, et al. Screen-Printed Corrosion-Resistant and Long-Term Stable Stretchable Electronics Based on AgAu Microflake Conductors[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(9): 12372-12382.
 - [8] WU S, PENG S, YU Y, et al. Strategies for Designing Stretchable Strain Sensors and Conductors[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(2): 1900908.
 - [9] TAN Y, GODABA H, CHEN G, et al. A Transparent, Self-Healing and High- κ Dielectric for Low-Field-Emission Stretchable Optoelectronics[J]. *Nature Materials*, 2020, 19(2): 182-188.
 - [10] 刘中胜, 胡晓宇, 刘遵峰. 多层褶皱结构在可拉伸导线和天线领域的应用[C]// 中国化学会 2017 全国高分子学术论文报告会, 成都, 2017: 16.
SUN Zhong-sheng, HU Xiao-yu, LIU Zun-feng. The Application of Multilayer Fold Structure in the Field of Stretchable Wires and Antennas[C]// 2017 National Polymer Academic Paper Report Conference of the Chinese Chemical Society, Chengdu, 2017: 16.
 - [11] 薛金祥, 孙中元, 焦志强, 等. 基于岛-桥结构的拉伸 AMOLED 显示技术[J]. *中国科学: 化学*, 2022, 52(11): 2092-2103.
XUE Jin-xiang, SUN Zhong-yuan, JIAO Zhi-qiang, et al. The Stretched AMOLED Display Technology Based on Island-Bridge Structure[J]. *Scientia Sinica(Chimica)*, 2022, 52(11): 2092-2103.
 - [12] YANG Z, YANG D, ZHAO X, et al. From Liquid Metal to Stretchable Electronics: Overcoming the Surface Tension[J]. *Science China(Materials)*, 2022, 65(8): 2072-2088.
 - [13] 高国强, 彭伟, 马亚光, 等. 镓基液态金属在电热力学领域的研究进展与展望[J/OL]. *西南交通大学学报*: 1-18[2023-09-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230301.1829.008.html>.
GAO Guo-qiang, PENG Wei, MA Ya-guang, et al. Research Progress and Prospect of Gallium-based Liquid Metals in the Field of Electrical-thermal-mechanics Field[J/OL]. *Journal of Southwest Jiaotong University*: 1-18[2023-09-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230301.1829.008.html>.
 - [14] 李安敏, 杨树靖, 惠佳琪, 等. 液态金属的多功能化[J]. *材料导报*, 2023, 37(1): 13-150.
LI An-min, YANG Shu-jing, HUI Jia-qi, et al. Multifunctionalization of Liquid Metals[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(1): 139-150.
 - [15] 梁青飞. 同轴打印高强度明胶基复合水凝胶小口径类血管结构支架的研究[D]. 深圳: 中国科学院大学, 2020: 1-28.
LIANG Qing-fei. Study on Coaxial Scale-up Printing of High Strength GelMA-based Biohybrid Hydrogel Microtubes[D]. Shenzhen: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 1-28.
 - [16] 尹富强, 李赵春. 镓基液态金属图案化方法的研究进展[J]. *现代化工*, 2023, 43(6): 53-56.
YIN Fu-qiang, LI Zhao-chun. Research Progress on Gallium-Based Liquid Metal Patterning Methods[J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(6): 53-56.
 - [17] WANG Q, JI X, LIU X, et al. Viscoelastic Metal-in-Water Emulsion Gel via Host-Guest Bridging for Printed and Strain-Activated Stretchable Electrodes[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(8): 12677-12685.
 - [18] 陈斌, 张莹莹. 液态金属的新型应用: 可拉伸电子封装材料[J]. *科学通报*, 2023, 68(10): 1144-1146.
CHEN Bin, ZHANG Ying-ying. A Novel Application of Liquid Metal: Stretchable Encapsulating Material[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(10): 1144-1146.
 - [19] 杨初. 导电油墨的组分设计及流变性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012: 51-76.
YANG Chu. Component Design and Rheological Properties Study of Conductive Ink[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 51-76.
 - [20] 杨寅, 许文才, 孙家跃, 等. 胶印油墨的流变学参数与印刷适性研究[J]. *包装工程*, 2010, 31(17): 138-141.
YANG Yin, XU Wen-cai, SUN Jia-yue, et al. Study on the Rheological Parameters and Printability of Offset Printing Ink[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(17): 138-141.