

基于 3D 打印的液态金属柔性电路的性能研究



陆霆晖, 张修庆*, 李一鸣, 苏小琴, 宋元旭, 杜琳

华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237

摘要: 为实现快速高效的制造可靠的柔性电路, 本文针对 Galinstan 液态金属与传统电子元件引脚的浸润性进行了分析, 并提出了一种基于 DLP 技术的 3D 打印直接成型法的柔性电路制造方案。对通过该种方法制作的拉伸电阻以及模拟开关电路进行了基于拉伸, 扭转的测试。结果表明: 对于暴露在空气中, 表面包裹了氧化膜的液态金属, 难以浸润电子元件引脚。通过采用 NaOH 溶液包裹 Galinstan 的方式可以实现对电子元件引脚的快速浸润, 2 秒即可完成浸润; 浸润后的接触角由原来的 131.5° 提升至 19.7° , 且可以被重复润湿, 确认了 Galinstan 是一种可以兼容传统电子元件的柔性电路导体材料。此外, 采用本文所提出方法制作的柔性电路的拉伸曲线可以与一次函数进行拟合; 在 1000 次拉伸释放循环后仍然具有稳定的电阻值; 模拟开关电路在 50% 拉伸、 180° 扭转下仍能正常运行。表明该种电路具有良好的线性度、稳定性和可重复性, 可以有效制成柔性传感元件以及柔性电路, 为小批量生产个性化电子电路提供了新的思路。

关键词: 液态金属; 柔性电路; 3D 打印; 浸润性; 柔性树脂

DOI: [10.57237/j.mater.2023.02.001](https://doi.org/10.57237/j.mater.2023.02.001)

Performance Research of Liquid Metal Flexible Circuits Based on 3D Printing

Tinghui Lu, Xiuqing Zhang*, Yiming Li, Xiaoqin Su, Yuanxu Song, Lin Du

School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: To achieve rapid and efficient manufacturing of reliable flexible circuits, this paper analyzes the wettability of Galinstan liquid metal with traditional electronic component pins and proposes a flexible circuit fabrication scheme based on a direct molding method using 3D printing with DLP technology. Stretch resistors and analog switch circuits fabricated by this method were tested under stretching and twisting conditions. The results show that for liquid metals exposed to air and wrapped with an oxide film, it is difficult to wet the pins of electronic components. By using a NaOH solution to encapsulate Galinstan, the rapid wettability of the pins of electronic components can be achieved, which can be completed in 2 seconds; The contact angle after infiltration has been increased from 131.5° to 19.7° and can be repeatedly wetted, confirming that Galinstan is a flexible circuit conductor material compatible with traditional electronic components. Additionally, the stretching curve of the flexible circuits made using the method proposed in this paper can be with a first-order function; It still has a stable resistance value, after 1000 stretching release cycles; The analog switch circuit can still work under 50% tension and 180° torsion. This indicates that the circuits good linearity,

*通信作者: 张修庆, zhangxq@ecust.edu.cn

stability, and repeatability, effectively enabling the fabrication of flexible sensing elements and circuits, and providing a new approach for small-scale production of personalized electronic circuits.

Keywords: Liquid Metal, Flexible Circuits, 3D Printing, Wettability, Flexible Resin

1 引言

随着电子电路技术的发展,诸如可穿戴设备、柔性屏幕和智能织物等概念的兴起为传统电子技术带来了新挑战,柔性电子技术因此应运而生。作为一种新兴技术,柔性电子具有良好的可延展性、轻量化、便携性和生物相容性等优势。当前,常用于制作柔性电路基底的材料是二甲基硅氧烷(PDMS),其卓越性能使其广泛应用于各领域。然而,作为制作柔性电路的材料,PDMS的制作流程相对复杂,成本较高,因此有必要寻求一种新的柔性电路成型方法。目前可以用于柔性电路制造的方案有镂空版印刷法[1]、光刻模具法[2]、相变转印法[3]等。

为了确保柔性电路在形变和恢复过程中仍具有良好的导电性和完整性,其导体需要进行合理的选择。目前,作为柔性电路导体的材料多种多样,例如通过导电银粉/炭黑涂覆织物[4, 5],将具有金属导电特性的材料与纤维、纱线相结合,制造具有导线或应变特性的织物[6]。然而,这些材料的制备过程仍相对复杂,且大多属于固体,因此在长时间使用和多次拉伸恢复过程中容易产生疲劳,表面导电涂料最终可能出现不可逆的裂纹、剥落和丧失导电性能,导致导电率改变、信号传输错误,甚至无法继续使用[7]。与传统涂覆柔性导线相比,镓及其合金作为一种室温状态下呈液态的金属材料,无需经过处理即具备良好的导电性。自然界中存在的室温液态纯金属包括汞、铯、钫和镓,其熔点分别为-38.87℃、28.65℃、27℃和29.8℃[8]。在这些液态金属中,汞具有较大的挥发性和一定毒性,铯和钫性质活泼,且钫具有一定放射性。相较之下,镓金属不仅具备传统金属材料的高导电性和良好变形性,还具有一定的自修复性和极低的毒性[9, 10],是柔性电路材料的理想选择[11, 12]。本研究所采用的液态金属是被为 Galinstan 的镓铟锡合金,这是一种由 68.5% 的镓、21.5% 的铟和 10% 的锡组成的无毒液态金属,由德国的 Geratherm Medical AG 和美国的 RG Medical Diagnostics 推出,主要用于替代温度计中的汞。Galinstan 基本保留了汞的所有物理性质[13],其熔点为

-19℃,电导率为 $3.4 \times 10^6 \text{ S/m}$,具有良好的导电性能。

本研究提出采用基于 DLP 技术的 3D 打印方法,使用柔性光敏树脂作为电路基底,采用 Galinstan 液态金属作为导电材料制作柔性电路并研究其制成的电路在拉伸、扭转变形下的性能。该方法相较于过去的模板制造法,具有制造流程简单,可重复性高的特点,为柔性电子电路的制造提供了新的方案。

2 实验内容

2.1 实验原料

柔性光敏树脂 LITLIQ FX60, 东莞市神说科技有限公司; 液态金属 Galinstan, 东莞市鼎冠金属科技有限公司; NaOH, 实验中溶液配制均使用去离子水。DLP 光固化 3D 打印机 HALOT-LITE, 深圳市创想三维科技股份有限公司; CCD 相机, 广州新伦科技有限公司; LCR 数字电桥 TH2810B+, 常州同惠电子股份有限公司。

2.2 柔性电路制作方法

基于 DLP 光固化技术的直接成型电路基底制作方案,制作柔性电路的流程如下:首先,需要对电路基底进行详细设计和建模,包括线路布局、微流管道尺寸等。设计完成后,采用 DLP 型 3D 打印技术,将设计好的电路基底打印成具有微流管道的完整实体。在打印过程中,为了确保电子元件的安装顺利,需要对所需用到的电子元件进行预处理操作。将 NaOH 溶液包裹在 Galinstan 表面,对元件引脚进行湿润。打印完成后,从打印机平台上取下基底电路,然后放入 95% 的酒精池中清洗,以去除表面多余的光敏树脂。在酒精挥发完全之后,仔细检查表面成型情况,确保没有瑕疵或异常。接下来,将酒精注入微流管道中,清洗管道内部残留的光敏树脂。完成清洗后,将基底放入干燥箱进行干燥处理。当管道内部的酒精完全挥发后,

再次检查管道内是否有未清洗干净的树脂残留。如有需要，可以重复清洗和烘干操作，直至确认管道完全干净。接下来，使用注射器将液态金属注入管道中，以形成电路连接。然后将预处理过的电子元件放入相应设计好的电子元件槽位中，确保它们与液态金属导线正确对接。全部安装完成后，在注射口处使用排针插入进行封装，以防止液态金属泄露。如果表面存在预先设计好的注射孔，可以使用相同的光敏树脂材料进行覆盖，并同时对电子元件表面进行保护性覆盖。覆盖完成后，将基底送入固化器进行二次固化处理。此过程不仅可以固化覆盖层上未固化的树脂，还可以对打印完成的基底进行二次强化，以提高其结构稳定性。固化完成后，便可获得完整的电路。

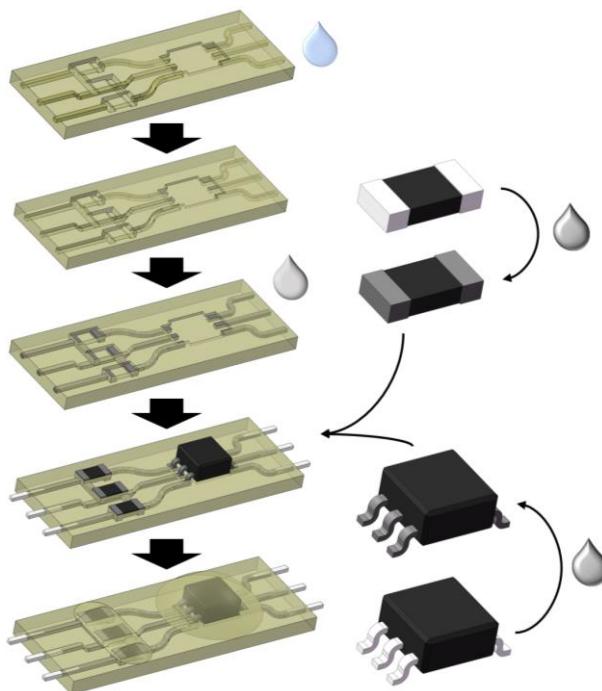


图 1 DLP 打印直接成型法制作流程

2.3 Galinstan 与元件引脚浸润性优化

在电路制作工艺的设计中，电子元件的可焊接性是一个至关重要的因素。为确保焊接过程的顺利进行，焊锡与元件引脚之间的浸润性必须良好。与此同时，由于当前的柔性电子电路源于传统印制线路板的改进，仍采用传统线路板的电子元件，因此必须关注导线与元件连接的可靠性。在本实验提出的制作方案中，采用的是以液态金属作为导线的连接方式，需要关注液态金属与电子元件引脚之间的浸润程度，以确保电路间连接的可靠性。

2.3.1 电子元件引脚成分分析

为深入研究市场上电子元件引脚镀层所采用的材料以及表面形貌对液态金属浸润性的影响，我们对工程应用中的典型元件进行了能量散射谱(EDS)分析和扫描电子显微镜(SEM)观察。本研究选取了以下测试元件：国巨公司生产的 0805 封装 51pF 电容器，厚声公司生产的 1206 封装 1kΩ 电阻器，以及英飞凌(Infineon)公司生产的 IRF9Z24NPBF 型 PMOS 场效应管。

通过 EDS 及 SEM 图像分析，可以观察到目前市面上的电子元件往往采用纯锡镀层引脚，这种镀层被称为暗锡镀层，亦称为雾锡镀层，这种镀层具有良好的焊接性能，经过焊接熔融后，焊点的抗污染能力得到显著提升[14]。经过雾锡处理的引脚表面由许多微小的锡晶粒组成，形成类似雾状的晶粒结构。在 PMOS 管的图像中，可以清晰地看到完整的晶粒分布结构。然而，在电阻器和电容器的图像中，会发现晶粒结构并不完整，存在部分缺失。这种现象的出现主要是由于电阻器和电容器引脚较小，在生产及运输过程中容易发生碰撞，导致引脚表面的锡晶粒被磨损，形成不完整的晶粒结构。

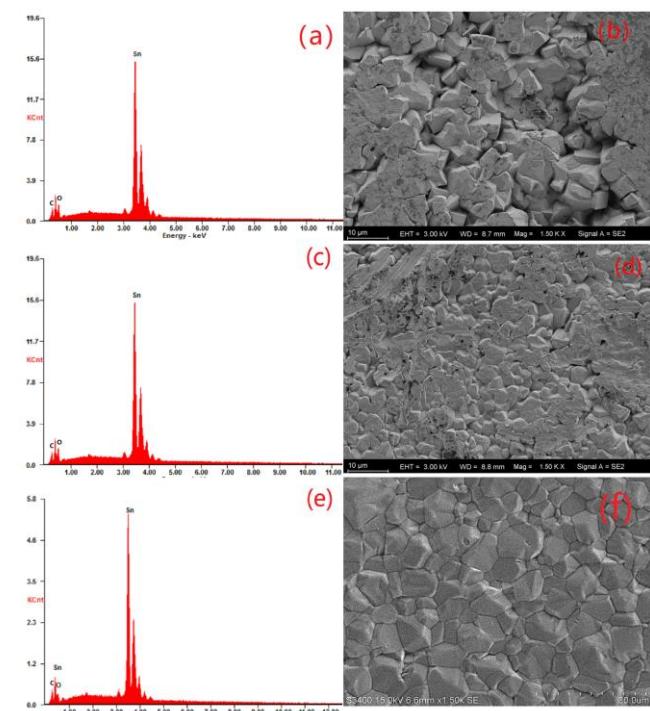


图 2 电容、电阻、MOS 管的 EDS 与 SEM 图像：(a) 电容 EDS 能谱；(b) 电容 1500 倍 SEM；(c) 电阻 EDS 能谱；(d) 电阻 1500 倍 SEM；(e) PMOS 管 EDS 能谱；(f) PMOS 管 1500 倍 SEM

2.3.2 未处理的 Galinstan 与元件引脚浸润性

为了评估液态金属与电子元件之间的浸润程度, 是否可以产生可靠连接, 在 PMOS 的雾锡焊盘上直接从针头挤出 Galinstan, 使其在表面氧化状态下与雾锡焊盘接触。为了更接近实际使用情况, 测试条件设定为不对固体表面进行任何清洁处理。柔性基底和雾锡引脚都处于实际制作过程中与液态金属接触前的状态。这样的实验设计有助于更准确地评估液态金属在实际应用场景下的浸润性能。

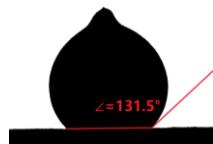


图 3 含有氧化层的 Galinstan 与雾锡焊盘接触角

测试结果显示, 液态金属在雾锡焊盘表面的接触角为 131.5° 。表明表面带有氧化膜的 Galinstan 与雾锡焊盘的浸润性能较差, 属于对 Galinstan 疏液的材料。这意味着在电路制作过程中, 这种现象可能会产生不良影响。

2.3.3 元件引脚浸润性优化

Kramer 等人发现 Galinstan 与锡之间存在选择性润湿的情况[15], 阻碍液态金属选择性浸润锡引脚的原因在于, 暴露在空气中的 Galinstan 表面产生了氧化膜, 隔绝了液态金属与锡的直接接触。因此, Kadiri 选择在印刷电路完成后, 将电子元件放置在液态金属制成的焊盘上进行安装。安装完成后, 通入 HCl 蒸汽, 以去除液态金属表面的氧化物, 实现液态金属的快速选择性浸润, 被浸润的连接处可以产生非常平滑的过渡, 其过程与传统电路制作中的焊接过程非常相似, 可以在液态金属与电子元件之间创建可靠的电气连接[16]。使用这种方法还可以达到修复损伤电路的效果[10]。

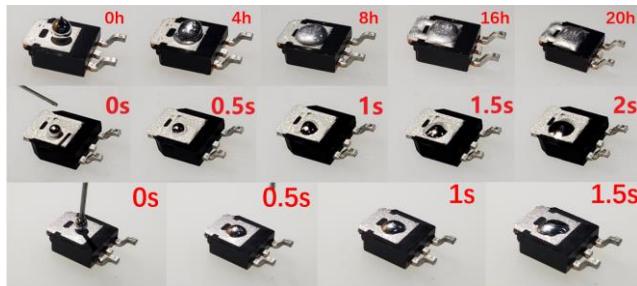


图 4 三种条件下液态金属浸润雾锡焊盘速度对比, (上) 氧化膜包裹 Galinstan; (中) NaOH 溶液包裹 Galinstan 初次浸润; (下) NaOH 溶液包裹 Galinstan 重新浸润

然而选择加热 HCl 产生蒸汽的方式具有一定的危险性, 对人体有一定损伤, 为了达到同一目的, 本文采用质量分数为 8% 的 NaOH 溶液包裹在 Galinstan 表面, 将其滴至 MOS 管焊盘进行润湿测试。

实验结果表明, 包裹着 NaOH 溶液的液滴扩散速度极快, 几乎在瞬间完成了选择性浸润。对浸润完成的焊盘进行接触角测试, 发现液态金属与雾锡焊盘的接触角从初始的 131.5° 减少至 19.7° 。



图 5 NaOH 溶液包裹 Galinstan 浸润雾锡焊盘的接触角

因此, 在柔性电路制作过程中, 可以引入预处理流程来替代先前在电子元件安装完成后通入 HCl 蒸汽的步骤。具体而言, 通过使用 NaOH 溶液包裹 Galinstan 对电子元件进行预先浸润处理, 可以实现电子元件引脚与液态金属的完全润湿包裹。这样一来, 在后续的安装过程中, 电子元件引脚与导线之间更容易形成紧密结合。

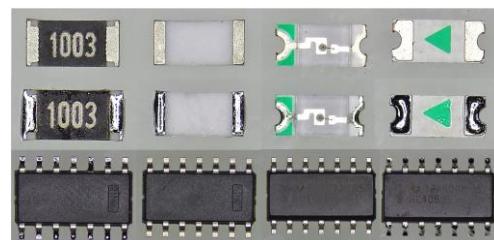


图 6 元件预处理前后对比

通过对比预处理前后的照片, 可以发现显著的差异。与未经处理的元件相比, 经过选择性浸润处理后的电阻、LED 以及 IC 的引脚被液态金属完全包裹, 扩散至焊盘的每个角落, 同时在没有锡引脚存在的外壳上没有液态金属残留。

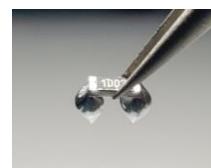


图 7 被完全浸润的电阻提起两端 Galinstan

处理后, 引脚与液态金属之间的结合力显著提升, 甚至在使用镊子提起电阻时, 电阻两端的液态金属也被一同提起。以上观察结果表明, 电子元件可以通过与未氧化液态金属接触的方式获得选择性浸润, 从而提高元件与液态金属之间的结合力。

2.4 柔性电路性能测试

2.4.1 拉伸电阻传感器

1) 线性拉伸测试

实验设计了一种传统的拉伸电阻传感器，用于测试该种制造方法处于不同形变状态下对于电阻的影响，设计了具有300μm、400μm、500μm和600μm线径，厚度为400μm的微流管道模型。同时，该模型采用半径为2mm的圆弧进行180°转向，共转向3次，总长度为415mm。



图8 拉伸电阻传感器

对于电阻稳定性的测试，通常使用电阻变化率来评价，定义为：

$$\delta = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (1)$$

其中 R 是导体处于拉伸压缩等状态下的实际电阻值大小， R_0 是导体的初始电阻值。将电阻变化率 δ 作为图像的纵坐标，柔性导体的拉伸程度 ϵ 作为横坐标，其对应曲线的线性程度即是被测柔性导体的线性度。

以0.1mm/s的拉伸速度，对400μm、500μm、600μm导线粗细的拉伸电阻进行线性测试后，结果如图9所示。观察可发现，对于拉伸电阻而言，电阻变化率 δ 与拉伸变化率 ϵ 呈线性正相关关系。此外，在相同的变量条件下，三种不同粗细导线的拉伸电阻阻值几乎相同。这一结果验证了Florian的观点[17]，即该类拉伸电阻器的电阻变化率与其横截面积无关。

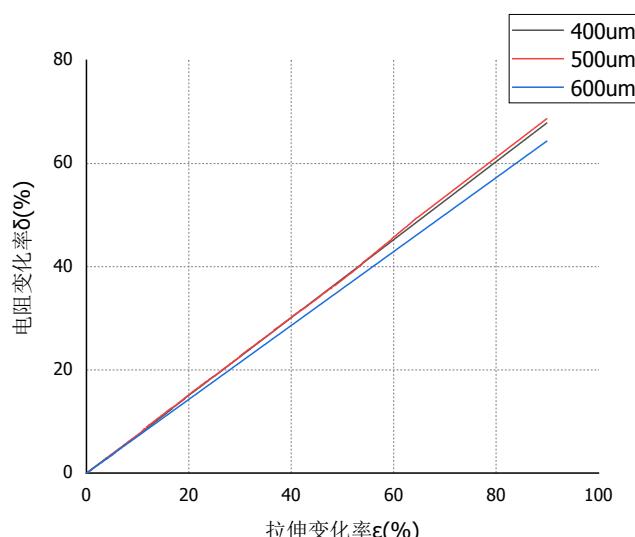


图9 不同粗细导线的拉伸电阻的线性拉伸曲线

可以用应变系数 GF 来表示拉伸电阻的灵敏度，可以表示为：

$$GF = \frac{R - R_0}{\epsilon * R_0} \quad (2)$$

即拟合曲线的斜率。对三条曲线取平均值后，再绘制一条平均曲线，并对该曲线进行拟合，可以发现该曲线可以与 $y = 0.7447\epsilon$ 进行拟合，所以该种形状的拉伸电阻值的应变系数 GF 为0.7447。

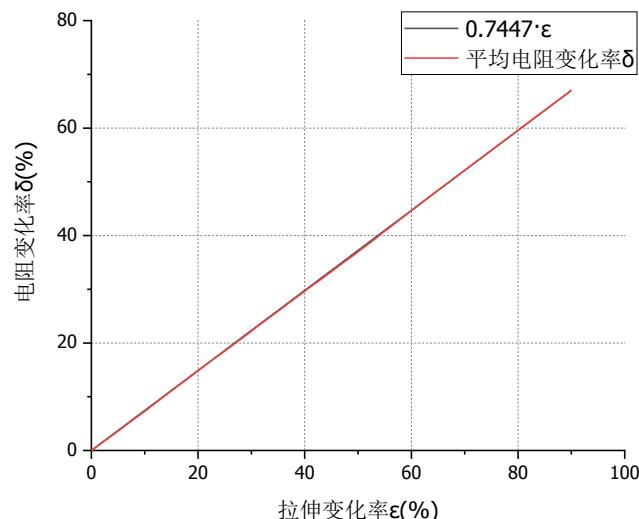


图10 平均曲线与一次函数拟合

2) 迟滞性测试

由于使用的时弹性材料，所以柔性电阻在被拉伸压缩的时候，也会存在迟滞性，在拉升和恢复的过程中无法保证内部结构及时完全变化至理想状态，在图像上会表现为一个类似扁环形的图案，并非线性系统的直线形态，即拉升与恢复的过程中，电阻值的变化无法完全同步，迟滞的大小可以被认为是柔性电阻的误差大小。

本研究对拉伸电阻在四组不同拉伸速度下进行了测试，分别采用0.1mm/s、0.5mm/s、2mm/s及4mm/s的拉伸速度，针对12.5%、25%、37.5%和50%的拉伸变化率进行实验，测试结果如图11所示。

根据测试结果，在0.1mm/s至2mm/s的拉伸速度范围内，较小拉伸幅度下的拉伸电阻具有良好的滞后性，且随着拉伸幅度的增加呈递增趋势。在50%的拉伸幅度下，恢复至初始状态的拉伸电阻依然会有2%~3%的电阻变化率残留。此外，图像显示，随着拉伸恢复速度的提升，拉伸电阻无法及时恢复形变。在4mm/s的拉伸测试中，当拉伸电阻恢复原状时，两种拉伸距离分别残留了7.2%及9.9%的电阻变化率。因此，

可以得出结论: 由该种材料制成的拉伸电阻的滞后性

会随着拉伸幅度的增加以及拉伸速度的增加而增加。

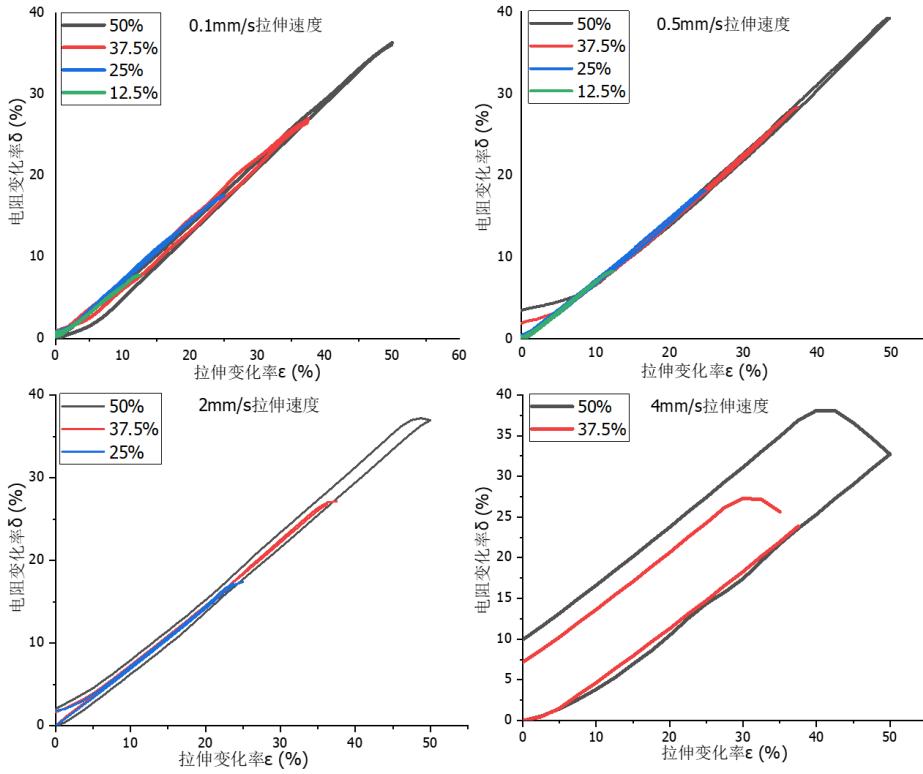


图 11 四种速度下拉伸电阻的拉伸迟滞回线

3)、扭转测试

对拉伸电阻传感器进行了以每秒 1.8 °的速度进行的扭转测试。扭转后的结果如图所示, 可以将该图像划分为三个部分: 第一部分是 0 至 252 °的加速上升区, 第二部分是 252 °至 309 °的平缓上升区, 最后是 309 °至最终的线性变形区。

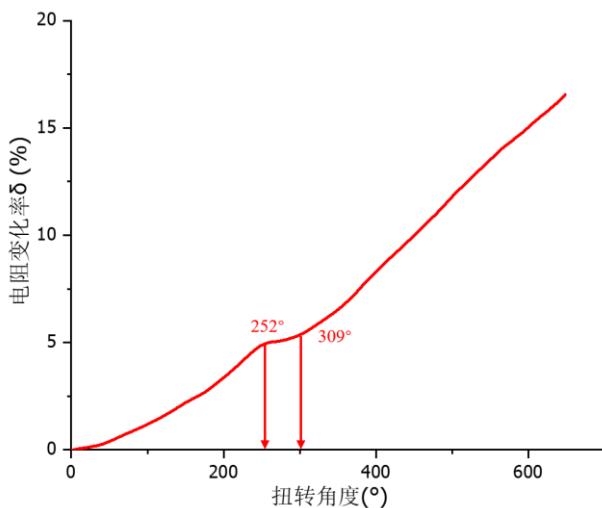


图 12 拉伸电阻传感器的扭转电阻变化曲线

对于获得的曲线, 三个阶段可以被解释为: 在扭转过程开始阶段, 电阻器处于拉伸与扭转的叠加状态。这种状态可以被理解为单独扭转作用与拉伸作用的叠加, 在图像上表现为加速上升的曲线。当电阻器仅以扭转形式发生形变时, 其整体表现为 DNA 式双螺旋模型, 越靠近外侧区域的部分, 在旋转的切向方向上转过的弧长越长; 随着扭转的进一步增加, 柔性导线会逐渐从这一状态转变为以拉伸为主的单螺旋状扭转模式。因此, 在图像上呈现的是与拉伸实验结果相似的线性关系; 中间较为平缓的部分代表了两种状态之间的转变过程。在扭转状态下, 由于柔性电阻的拉伸是不均匀的, 靠近外侧受到的应力较大。当柔性电阻内部无法平衡由扭转引起的内部应力变化时, 会发生向单螺旋拉伸的转变。



图 13 拉伸电阻传感器 DNA 双螺旋扭转状态 (左) 及单螺旋扭转 (右)

4)、应变稳定性测试

柔性导体在工作过程中，并非处于时刻拉伸压缩变化状态，理想的导体在处于长时间的应变状态下依旧可以保持性能的稳定，所以对于导体处于长时间应变状态下，信号稳定性的评估是非常有必要的。为了防止过快的拉伸速度对测试结果产生误差，在初始状态静置 15min 后，选择采用 0.5mm/s 的拉伸速度将测试导体拉伸至 45% 的伸长率进行大应变的测试，保持 30min 后，以相同的速度使其恢复原位，保持 15min 后查看结果，判断其处于大变形状态下是否稳定。

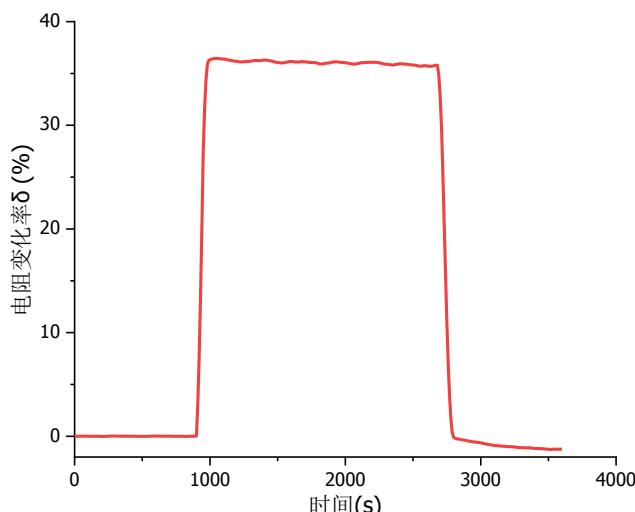


图 14 大应变拉伸保持图像

测试图像结果表明，在初始状态下的拉伸电阻被拉伸后，其阻值能够线性地达到对应的应变阻值，这与陈的研究一致[18]。在长时间拉伸状态下，拉伸电阻的阻值会随着时间的变化略有降低。这种现象的产生原因在于聚合物发生形变后会产生固有的应力松弛[19]。在拉伸导体完成拉伸后，仍存在向初始状态恢复的趋势，进而导致电阻略微下降。这是聚合物材料无法避免的一种缺陷。实际测量结果表明，在 30 分钟的拉伸后，阻值下降的实际大小约为拉伸刚刚完成时电阻值的千分之三。这一衰减在大部分电路使用中并不会造成实质性的影响。

5)、疲劳测试

拉伸电阻在多次拉伸-释放循环中的电阻值变化是评估传感器产品长期稳定性和可靠性的关键指标，而传感器的疲劳性损伤可能导致严重的损失[20]。因此，了解传感器在长期重复工作环境下的可靠性能至关重要，以确保传感器在运行期间不会失效。为了评估所制应变传感器的疲劳强度，本研究进行了如下测试：

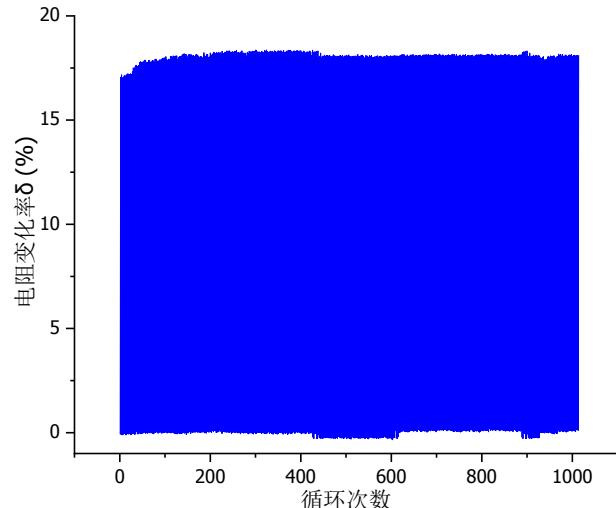


图 15 拉伸电阻传感器 1000 次拉伸释放循环

设置拉伸机以 $v=10$ mm/s 的速度对传感器进行行程 $S=20$ mm 的反复拉伸测试，并在行程终点处保持 1s，循环次数为 1000 次。从图中可以看出，在初始阶段，经过多次拉伸循环后，拉伸电阻值略有上升；但随后整体趋于稳定，拉伸与释放过程中电阻值无明显变化，表现出较好的稳定性。整体来看，在长时间的重复工作中，电阻信号输出稳定，没有出现信号漂移现象，说明该种制造方法制造的电路在长期使用过程中拥有良好的稳定性。

2.4.2 模拟开关电路

基于前文的实验，已经对该种制造方法制造的柔性电路性能有了初步的了解，为了验证真正用于制造电路进行封装后是否可以正常运行，主要采用定性的分析，而非定量分析，设计了一个简单的电路用来测试其性能，其原理图如图 16 所示。

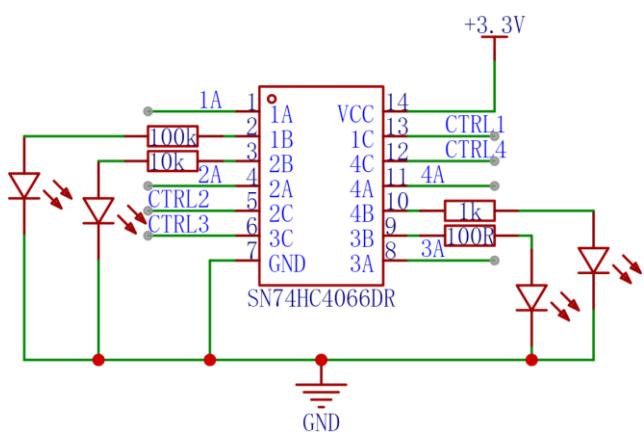


图 16 模拟开关电路原理图

该电路采用了 TI 公司生产的 SN74HC4066DR 模拟开关芯片, 拥有四路模拟开关, 其功能是在 C 引脚处于高电平时, 相应的 AB 两个通道导通。为了测试各通道的导通效果, 实验中将 100Ω 、 $1k\Omega$ 、 $10k\Omega$ 和 $100k\Omega$ 四个不同阻值的电阻分别串联在不同通道的 B 端, 并将 LED 与地相连。同时, 四个通道的 A 端和四个通道的 C 端都连接到 3.3V 电源, 这意味着所有通道都处于导通状态, 并且对各通道施加相同大小的高电压。通过观察四个 LED 的亮度, 理论上, 较低阻值的电阻会使得 LED 亮度较高, 而较高阻值的电阻会导致 LED 亮度较低。通过观察 LED 亮暗的情况即可判断该电路是否运行正常, 若任何一条线路发生断路, 都会导致 LED 的熄灭, 若任何一条线路发生短路, 则会导致 LED 高亮或熄灭。通过这种方式可以直观的看出电路中是否出现问题。



图 17 电子元件与 Galinstan 导线结合细节

在日常的使用中最常见形变是拉伸与扭转的叠加, 于是对其进行了简单的拉伸及扭转状态的测试, 可以观察到图示中的实验结果, 该结果显示在 50% 的拉伸、90°扭转、180°扭转的情况下, 电路仍能够正常工作。这一结果强有力地证明了这种电路的制作方法能够成功制造出完整的电路, 即使在受到拉伸扭转应变的情况下仍能够稳定运行。这一实验结果对于电子工程师和电路制造商来说具有重要的实际意义, 可为他们的设计和制造提供指导和借鉴。

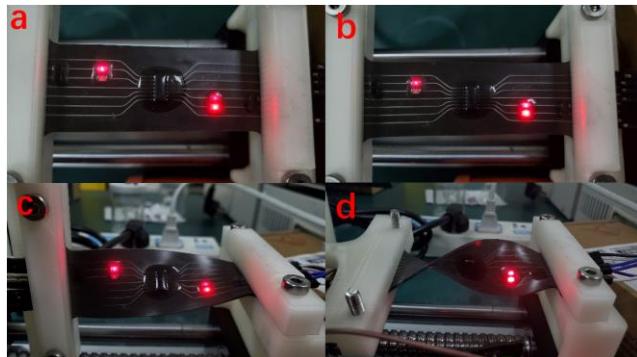


图 18 模拟开关电路的拉伸、扭转测试: (a) 初始状态; (b) 拉伸 50% 状态; (c) 扭转 90° 状态; (d) 扭转 180° 状态

3 结论

本研究验证了在 NaOH 溶液包裹下的 Galinstan 液

态金属能够有效地浸润电子元件的引脚, 确认其可作为与传统电子元件兼容的柔性电路导体材料, 并提出在液态金属柔性电路的制造过程中, 在电子元件的安装之前, 应加入预处理的过程来提升电子元件与液态金属导线的结合能力。

此外, 实验结果证实了基于 DLP 技术的 3D 打印直接成型法制造液态金属柔性电路方法具有优越性, 不仅可以制作传感器类电子元件, 还能实现可靠的柔性电路, 具备良好的线性度和稳定性。由于采用的是通用型柔性光敏树脂而非专用于柔性电路的树脂, 因此, 其性能可以通过定制优化进一步提升。在未来研究中, 可通过改进树脂性能来探讨如何优化该工艺。

参考文献

- [1] JEONG S H, HAGMAN A, HJORT K, et al. Liquid alloy printing of microfluidic stretchable electronics [J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12 (22): 4657-4664.
- [2] 杨锦斌. 基于液态金属的柔性电极电路的设计、制造及应用 [D]. 深圳大学, 2018.
- [3] Wang Q, Yu Y, Yang J, et al. Fast fabrication of flexible functional circuits based on liquid metal dual-trans printing [J]. *Adv Mater*, 2015, 27 (44): 7109~7116.
- [4] 穆世鹏. 银/聚苯胺/涤纶复合材料的制备及其性能研究. [D], 东华大学, 2016.
- [5] 李兰倩. 基于炭黑和碳纳米管导电棉织物的制备与表征 [D], 西南大学, 2018.
- [6] 王瑾, 缪旭红. 基于织物的柔性电路制备方法及应用研究进展 [J]. 研究与技术, 2021 (03), 031107.
- [7] 温泽明, 代国亮, 陈剑英等液态金属涂覆的弹性导电纱线的制备及性能 [J]. 北京服装学院学报 (自然科学版) 2020, 40 (3): 9-14.
- [8] 王磊, 刘静. 液态金属印刷电子墨水研究进展 [J]. 影像科学与光化学, 2014, 32 (4): 382~392.
- [9] Guangyong Li, Xuan Wu, Dong-Weon Lee. Selectively plated stretchable liquid metal wires for transparent electronics [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 221 (2015) 1114-1119.
- [10] Pedro Alhais Lopes, Bruno C. Santos, Anibal T. de Almeida, et al. Reversible Polymer-Gel Transition for Ultra-Stretchable Chip-Integrated Circuits Through Self-Soldering and Self-Coating and Self-Healing [J]. *Nature Communications*, 2021, 12 (1): 4666.

- [11] Kim D-H, Ahn J-H, Choi W M, et al. Stretchable and Foldable Silicon Integrated Circuits [J]. *Science*, 2008, 320 (5875): 507-511.
- [12] Rogers J A, Someya T, Huang Y. Materials and Mechanics for Stretchable Electronics [J]. *Science*, 2010, 327 (5973): 1603-1607.
- [13] Tingyi Liu, Prosenjit Sen, and Chang-Jin. Characterization of Nontoxic Liquid-Metal Alloy Galinstan for Applications in Microdevices. *Journal of microelectromechanical systems*, 2012. 21 (2). 443-450.
- [14] 于志强 元器件引脚镀层与焊料对焊点质量影响分析 [C]. 第十一届中国高端 SMT 学术会议论文集 2017.11.
- [15] Rebecca K. Kramer, Carmel Majidi, and Robert J. Wood. Masked Deposition of Gallium-Indium Alloys for Liquid-Embedded Elastomer Conductors [J]. *Adv. Funct. Mater.* 2013, 23, 5292–5296.
- [16] Kadri Bugra Oztemiz, James Wissman, Osman Burak Ozdoganlar, et al. EGaIn–Metal Interfacing for Liquid Metal Circuitry and Microelectronics Integration [J]. *Adv. Mater. Interfaces* 2018, 1701596.
- [17] Pineda F, Bottausci F, Icard B, et al. Using electrofluidic devices as hyper-elastic strain sensors: experimental and theoretical analysis [J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 144: 27-31.
- [18] 陈杨钟. 基于液态金属图案化的柔性电路及传感器研制 [D]. 广东工业大学. 2021.
- [19] Park Y, Chen B, Wood R J. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12 (8): 2711-2718.
- [20] Suin Kim. Consistent and Reproducible direct ink writing of eutectic Gallium - Indium for high-quality soft sensors [J]. 2018, 5 (5): 601-612.