

不同基材上混合纳米导电油墨在干湿条件下电压与电阻的关系

黄展池

通化师范学院计算机学院, 通化 134002, 吉林, 中国

摘要: 石墨烯纳米片 / 银 (GNP/Ag/SA) 混合导电油墨在柔性电子中的应用日益广泛, 但对于基材类型、溶剂配比与湿气暴露如何共同决定其在金属与聚合物基材上的电性能, 人们的认识仍很有限。本文旨在阐明萜品醇含量 (5T、10T、15T) 以及铜 (Cu)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 与热塑性聚氨酯 (TPU) 基材的性质, 如何影响丝网印刷 GNP/Ag/SA 线路在干态与浸水后湿态下的电压、电阻与电阻率。本文在固定丁醇用量、改变萜品醇含量的条件下配制 GNP/Ag/SA 油墨, 分别印刷于 Cu、PET 与 TPU 基材上, 并通过电学测量、附着力评价与微观结构观察, 把电阻率变化趋势与形貌、表面能及吸湿行为相联系。结果表明, Cu 基材性能最佳: Cu 10T 取得约 $1.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ 的最低干态电阻率, Cu 15T 取得约 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ 的最低湿态电阻率, 这得益于致密且附着良好的微观结构。PET 基材的电阻率较高, 最高约达 $10^{-3} \Omega \cdot m$, 浸水后出现明显劣化; TPU 基材在湿态下电阻率极高甚至无法测量, 原因是油墨严重脱落与基材吸湿溶胀。上述结果凸显出, 基材表面能与湿气响应对 GNP/Ag/SA 油墨在潮湿或涉水环境中的可靠性起着重要作用。

关键词: 柔性基材; 石墨烯纳米片混合油墨; 湿致劣化; 电阻率与附着力; 乙酸银导电油墨

Relationship between Voltage and Resistance in Hybrid Nano-conductive Ink on Different Substrates in Wet and Dry Conditions

ZhanChi Huang

School of Computer Science, Tonghua Normal University, Tonghua 134002, Jilin, China

Abstract: Hybrid graphene nanoplatelet/silver (GNP/Ag/SA) conductive inks are increasingly used in flexible electronics, yet there is limited understanding of how substrate type, solvent composition, and moisture exposure jointly control the electrical performance on metal and polymer substrates. This work aims to clarify how terpinol content (5T, 10T, 15T) and substrate properties of copper (Cu), polyethylene terephthalate (PET), and thermoplastic polyurethane (TPU) influence voltage, resistance, and resistivity of screen-printed GNP/Ag/SA tracks under dry and post-immersion wet conditions. GNP/Ag/SA inks were formulated with fixed butanol and varied terpinol contents, printed on Cu, PET, and TPU, and characterized using electrical measurements, adhesion evaluation, and microstructural observations to relate resistivity trends to morphology, surface energy, and hygroscopic behavior. The Cu substrate showed the best performance, with Cu 10T achieving the lowest dry resistivity of approximately $1.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ and Cu 15T the lowest wet resistivity of approximately $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$, supported by dense, well-adhered microstructures. PET exhibited higher

resistivity values up to about $10^{-3} \Omega \cdot m$ and clear degradation after water immersion, while TPU showed very high or unmeasurable resistivity in wet conditions caused by severe ink loss and hygroscopic swelling, highlighting the important role of substrate surface energy and moisture response in determining the reliability of GNP/Ag/SA inks for applications in humid or wet environments.

Keywords: Flexible substrates; Graphene nanoplatelet hybrid ink; Moisture-induced degradation; Resistivity and adhesion; Silver acetate conductive ink

一、引言

导电油墨通常是把石墨、银片或纳米颗粒等导电材料掺入液态载体的传统油墨而制成,可在多种基材上实现印刷电路与元件,无需常规布线 [1]。碳基油墨——尤其是使用石墨烯纳米片 (GNP) 的油墨——因兼具良好导电性、柔韧性、化学稳定性与潜在的成本优势,被视为常规金属基油墨的有力替代方案而备受关注 [2]。自 2004 年 GEIM 与 NOVOSELOV 分离出石墨烯以来,GNP 及氧化石墨烯、还原氧化石墨烯与少层石墨烯等石墨烯 family 材料,因本征电导率高、比表面积大、力学性能优异,已在印刷与柔性电子中得到广泛探索 [3]。尽管 GNP 优点突出,NAGHDI 等指出,实现填料的均匀分散是最具挑战性的环节,涉及熔融共混、溶液混合、原位聚合与乳液共混等方法;VASHIST 等也报告称 GNP 还存在稳定性、水中分散性与退火温度等问题。

因此,把 GNP 与银 (Ag) 等高导电金属杂化,成为在保留石墨烯部分力学强度与柔韧性的同时提升电性能的有效策略 [4]。乙酸银 (SA) 在此类混合体系中是颇具吸引力的添加剂:它作为金属前驱体在固化过程中分解生成新鲜的 Ag,促进 Ag 颗粒之间的烧结与颈部生长,填补 GNP/Ag 网络中的空隙,并改善颗粒—颗粒以及油墨—基材之间的接触;这使得在相对较低的固化温度下即可调控微观结构与连通性,而这对耐热性有限的柔性聚合物基材尤为重要 [5]。在 GNP/Ag/SA 混合油墨中,1-丁醇与萘品醇是常用有机溶剂:它们可溶解银化合物、助力 GNP 与 Ag 片的分散,并调节丝网或膏体印刷所需的黏度与干燥行为。丁醇在配比适当时倾向于促进更均匀的颗粒分散并降低电阻率;萘品醇黏度更高、挥发行为不同,可改善可印刷性并起黏结介质作用,但用量过多会阻碍分散并加剧团聚 [6]。

ISMAIL 等与 NOOR 等的近期工作表明,GNP/Ag 与 GNP/Ag/SA 混合体系的电导率可显著高于纯 GNP 油墨,但其电阻在循环扭转与弯曲下仍会上升,说明力学完整性与界面结合仍是关键的设计约束。ISMAIL 等还报告,在铜 (Cu) 上丝网印刷、经 250 °C 固化 1 小时的 GNP/Ag 油墨,在反复扭转应力下电阻上升;NOOR 等则把循环弯曲过程中电阻与电阻率的上升,归因于 GNP 基网络内部的微结构损伤与结合失效。GNP 混合油墨通常是由 GNP、Ag 与丁醇、萘品醇等有机溶剂构成的多组分体系,优化其组分对改善附着力与电导率十分重要。例如,HUSSIN 等报告,采用较小粒径的 Ag 颗粒 (5 μm) 相较较大颗粒 (25 μm) 可显著降低电阻率。在干态条件下,GNP/Ag 混合油墨的电性能通常较为稳定,但在循环机械载荷下电导率最终会因微结构变化而劣化。此外,NOOR 等指出湿度会影响导电通路的结构完整性与附着力,导致电阻上升。然而,关于 GNP/Ag/SA 混合体系在不同基材、湿态条件下的细致研究仍然稀少 [7]。

既有文献主要关注干态条件下的电导率改善;把 SA 辅助杂化与不同类型基材 (金属、低表面能聚合物与吸湿性聚合物) 在湿气暴露下的附着力、形貌与稳定性联系起来的系统研究仍然缺乏。特别是,基材表面能与吸湿行为 (尤其是 TPU)、基材热稳定性所施加的固化约束,以及溶剂配比 (丁醇 / 萘品醇比) 三者共同对 GNP/Ag/SA 混合油墨干湿电性能的影响,尚未得到全面研究。

本文针对以下研究空白展开:基材类型 (Cu、聚对苯二甲酸乙二醇酯 PET、热塑性聚氨酯 TPU)、表面能、固化条件、湿气暴露与萘品醇含量 (5T、10T、15T) 如何共同影响 GNP/Ag 混合导电油墨的形貌、附着力与电

学稳定性，在湿态条件下尤为如此。其实际问题在于：印刷导电路径在湿气暴露后常发生劣化，在 PET、TPU 这类低表面能与吸湿性聚合物上尤其明显，导致附着力差、网络不连续、电阻率不稳定甚至无法测量以及电压降增大，而可供材料与工艺选型参考的指导十分有限。本研究通过测量不同萆品醇含量的 GNP/Ag 混合油墨在 Cu、PET 与 TPU 上干湿两态的电压、电阻与电阻率，评估其附着力与形貌，并把这些结果与表面能、固化行为及吸湿效应相联系，以期在湿气与基材受限的应用场合筛选出合适的基材—油墨组合。

二、方法

(一) 导电油墨制备

首先需把导电油墨制成粉体，然后再按萆品醇与 1-丁醇的三种配比进行调配。粉体制备工艺旨在实现导电材料的均匀分散，同时保持适合印刷的最佳粒径分布。GNP/Ag 混合粉体与导电油墨依照 JORI 等的既有研究制备，所用材料见表 1。

Table 1 Materials Used in Formulation of GNP/Ag Hybrid Powder and Conductive Ink

表 1 GNP/Ag 混合粉体与导电油墨配制所用材料

材料	规格
石墨烯纳米片 (GNP)	粒径 25 μm ，比表面积 50—110 m^2/g
银 (Ag)	粒径 10 μm ，痕量金属基 99.9%，20 $^\circ\text{C}$ 电阻率 1.59 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
乙酸银 (SA)	粒径 <10 μm ，痕量金属基 99.99%酸性银盐，电阻率 4.2—51 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
乙醇	变性乙醇 99%，摩尔质量 46.07 g/mol
1-丁醇	丁醇 99.9%，摩尔质量 74.12 g/mol
萆品醇	松油，含 65% α 、10% β 、20% γ ，摩尔质量 154.25 g/mol

首先，称取 0.010 g GNP 与 10 ml 乙醇在洁净烧杯中混合，并以铝箔覆盖以防挥发，混合物经超声混合 10 分钟。随后加入 0.8584 g 银片 (SF)，超声处理 1 小时以实现均匀分布。接着加入 0.084 g SA，在 200 r/min、70 $^\circ\text{C}$ 下再超声处理 1 小时。干燥后，混合物在 250 $^\circ\text{C}$ 下固化 1 小时，冷却后在研钵中研磨以获得质地细腻的粉体。称量精制粉体并记录容器质量，随后按精确用量加入萆品醇与丁醇。配方在行星式离心搅拌机中以 2000 r/min 搅拌 3 分钟，得到均匀膏体。最后为容器贴标并密封，以防油墨挥发。

如表 2 所示，本文设计了三种配方以研究萆品醇 / 丁醇比对油墨性能的电学影响。基准样品为 10T/10B，本实验中丁醇用量固定为 10 滴。在关于溶剂对印刷于 Cu 基材上 GNP/Ag 导电油墨影响的对比研究中，JORI 等报告：将萆品醇用量由 5 滴变化至 15 滴，相较等量改变丁醇可使电阻率显著下降；其中 5 滴萆品醇的配方电阻率最低，说明电导率更佳。萆品醇基油墨在黏度、流动性、分辨率与表面形貌方面表现出明显优势 [8]。

Table 2 The Formulation of GNP/Ag Hybrid Conductive Inks

表 2 GNP/Ag 混合导电油墨的配方

配方	萆品醇 (T)	丁醇 (B)	预期效果
5T/10B	5 滴 $\approx$ 0.325 ml	10 滴 $\approx$ 0.65 ml	黏度较低，适于精细图案印刷
10T/10B	10 滴 $\approx$ 0.65 ml	10 滴 $\approx$ 0.65 ml	黏度均衡，作为基准样品
15T/10B	15 滴 $\approx$ 0.975 ml	10 滴 $\approx$ 0.65 ml	黏度较高，改善基材附着

（二）样品制备

采用 60 μm 网版的丝网印刷方法，把三种 GNP 混合导电油墨配方印刷于三种不同基材上。Cu、PET 与 TPU 基材裁切为 12 cm×1 cm，并用异丙醇清洗。将导电油墨涂覆其上，以恒定压力刮压，在基材上形成厚度为 60 μm 的方形图案。固化前需小心揭除网版，以防油墨不必要地扩散。

印刷完成后按表 3 编号标记，并执行固化：Cu 基材在 260 °C 下固化 3 小时——依据 NOOR 等的研究，GNP/Ag/SA 油墨在 240—260 °C 下固化 4—6 小时可获得良好的固化效果与电导率，但更高温度下附着强度可能下降，表明电导率与附着力之间存在权衡；PET 与 TPU 基材则在 100 °C 下固化 1 小时，以防基材变形，较短的时间也可减小热应力。

Table 3 Run Matrix of GNP/Ag Hybrid Conductive Ink Formulations and Substrates
表 3 GNP/Ag 混合导电油墨配方与基材的试验编号矩阵

配方 / 基材	Cu	PET	TPU
5T/10B	试验 1	试验 4	试验 7
10T/10B	试验 2	试验 5	试验 8
15T/10B	试验 3	试验 6	试验 9

（三）表征方法

1. 电压降测量

在电气与电子电路中，施加电源后有电流流过并以热的形式耗散能量，由于元件或导体存在电阻或阻抗，便产生电压降，PRIYADARSINI 等与 OLABI 等对此作了说明。本测量所需设备包括分辨率不低于 0.1 mV 的两点探针、0—30 V 可调直流电源与数据记录表。样品固化后需冷却再行测量，并在干、湿两种条件下分别测量。在基材两端接入 1 V 至 9 V 电源，用分辨率不低于 0.1 mV 的数字万用表逐点测量各样品。

干态测量完成后，样品按 ASTM D870 标准在自来水中浸泡 5 分钟，再干燥 5 分钟；随后在 1 V 至 9 V 电源下用数字万用表重复电压测量。该流程可保证不同条件下结果的一致性，并使样品导电性的比较更为准确。

2. 电阻测量

如 CULTRERA 等所述，测量 GNP 油墨电阻最常用的方法是两点探针法。测量同样涉及干、湿两种条件。干态下的电阻测量步骤：把两支探针置于两个测点并接至处于欧姆挡的数字万用表，在五个测点采集读数并记入数据表。湿态下，全部样品先在自来水中浸泡 5 分钟，再干燥 5 分钟，然后重复上述测量，所得数据用于计算电阻率。

3. 电阻率计算

如 GHORBANI 与 TAHERIAN 所述，电阻率（以符号 ρ 表示）是描述材料阻碍电流流动能力的基本属性。类似地，ISMAIL 等研究了 GNP/Ag 杂化导电油墨在弯曲应力下的电阻率，也为附着力与电阻率之间的关系提供了参考。该属性与电导率成反比。材料的电阻率受其几何尺寸影响，可由下式表示：

$$\rho = R \cdot A / l \tag{1}$$

式中，R 为电阻，A 为横截面积，l 为材料长度。

三、结果与讨论

（一）测量结果平均值

表 4 给出了各基材在干、湿条件下电压、电阻与电阻率的平均数据。这些信息对于评估各种材料在实际应用中的表现十分重要，因为湿气会对其电性能产生深刻影响。所列结果反映了各基材与配方在电学行为上的变化趋势，有助于按具体应用需求筛选合适材料。

Table 4 Average Voltage, Resistance and Resistivity for Different Substrates in Dry and Wet Conditions

表 4 不同基材在干湿条件下的平均电压、电阻与电阻率

试验	干态电压	湿态电压	干态电阻	湿态电阻	干态电阻率	湿态电阻率
5T Cu	0.0020	0.0031	0.2200	0.6000	1.32×10^{-5}	3.60×10^{-5}
10T Cu	0.0022	0.0036	0.2000	0.4000	1.20×10^{-5}	2.40×10^{-5}
15T Cu	0.0024	0.0033	0.2600	0.3400	1.56×10^{-5}	2.04×10^{-5}
5T PET	0.0021	0.0029	1.4600	4.4000	8.76×10^{-5}	2.64×10^{-4}
10T PET	0.0017	0.0015	4.1400	5.2500	2.48×10^{-4}	3.15×10^{-4}
15T PET	0.0030	0.0025	1.9600	0.9000	1.18×10^{-4}	5.40×10^{-5}
5T TPU	0.0024	0.0030	12.6000	0.7500	7.56×10^{-4}	4.50×10^{-5}
10T TPU	0.0017	0.0023	116.6400	无法测量	7.00×10^{-3}	无法测量
15T TPU	0.0016	0.0021	无法测量	无法测量	无法测量	无法测量

（二）5T、10T、15T 配方下基材对导电性能影响的分析

各基材的电压降与电阻率均呈现由干态到湿态的上升趋势，其中 Cu 表现最佳，为 1.32×10^{-5} 至 $3.60 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ 。10T 配方在两种条件下的电性能：Cu 基材保持良好导电性，电阻率介于 1.20×10^{-5} 至 $2.40 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ ；PET 基材电阻率尚可接受，介于 2.48×10^{-4} 至 $3.15 \times 10^{-4} \Omega \cdot m$ ；TPU 基材部分样品电阻率不稳定，浸水后更是无法测量。Cu 基材仍表现最佳，电阻率介于 1.56×10^{-5} 至 $2.04 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ ；PET 基材的电阻率则高于其 5T 与 10T 对应样品。

Cu 的表面能通常较高，有利于导电油墨在其表面良好润湿并形成牢固的界面附着，从而形成连续、结合良好且电阻率低的金属线路，适用于印刷与柔性电子。基材表面能对 GNP/Ag 导电油墨界面接触面积与附着行为的影响：Cu 基材促进油墨的强润湿与附着，可形成连续且力学稳固的导电网络。这种紧密的界面接触降低了界面接触电阻，从而降低整体电阻率并减小印刷线路上的电压降。

附着质量不仅取决于基材表面能，也取决于固化温度与时长，二者共同决定导电网络的形成与稳定性。固化条件对附着力影响显著，因为溶剂挥发、颗粒烧结与黏结剂交联均在热处理过程中发生：固化不当会残留溶剂、产生微裂纹或形成结合薄弱的界面，而适当固化则促进 GNP/Ag 网络致密化与更强的界面结合。Cu 具有良好的热稳定性，可在 260 °C 下固化 3 小时而不损伤基材，并促进 GNP/Ag 油墨与 Cu 表面之间更强的界面结合；由此形成的强附着有助于在浸水后仍维持油墨厚度，扫描电子显微镜（SEM）观察对此提供了证据。

然而，PET 属于低表面能基材，TPU 的表面能更低，导致界面接触面积更小，油墨—基材附着力下降，电阻率高于 Cu。此外，二者的热敏感性把固化条件限制在 100 °C、1 小时左右，进一步制约了界面结合与良好连通导电网络的形成。上述因素共同导致各配方的油墨性能下降，表现为浸水后部分或全部样品出现劣化。尽管 WANG 等在未涂覆 PET 薄膜中识别出湿气吸附的不同阶段，认为其在湿气暴露下较为稳定，但 WATANABE 等指出水会起导体作用，提高 PET 的电导率；水还可能提高 PET 的介电常数并改变其表面导电层的电学行为，从而可能引起电压波动。不过，由于 PET 吸水率约为 0.5%，该效应通常很小。

（三）干湿条件下的附着力评估

GNP 导电油墨的性能依赖若干附着机制来保证油墨与基材之间的牢固结合，从而在各种条件下维持油墨的电性能。良好的附着可在导电油墨与基材之间建立稳定的导电通路，从而维持低电阻与油墨层上稳定的电压。如 SAAD 等所述，GNP 中的导电通路符合逾渗理论：导电颗粒须达到逾渗阈值才能形成供电子流动的连续通路并降低电阻。良好附着还可保护油墨免受湿度变化影响；若油墨附着力弱，水会破坏导电通路，从而导致电压降与电阻上升。

导电油墨（尤其是基于 GNP 的油墨）的最佳性能高度依赖溶剂。NOOR 等指出，萘品醇是一种有效溶剂，可促进 Ag 颗粒等导电材料的溶解与分散；该溶剂提高了油墨的流动性，便于在多种基材上沉积；此外，萘品醇还能稳定油墨，且毒性低于其他溶剂。就油墨黏度而言，JORI 等的研究表明萘品醇浓度越高油墨黏度越大，这对某些印刷方式有利，却可能给另一些方式带来困难。因此，必须优化萘品醇与丁醇的平衡，以兼顾可印刷性、基材附着与整体导电性。SANCHEZ-DUENAS 等强调，油墨配方中各组分的相容性是维持所需性能的关键。

对 Cu 基材而言，10T 配方最为均匀，颗粒紧密接触，既无明显团聚也无大的空隙，与 5T 与 15T 形成对比。与这些截面观察一致，5T 配方的电阻率高于 15T；5T 样品颗粒分布更为疏松不均，导电通路中空隙更大；而 15T 网络虽团聚更多但更为致密，为电子输运提供了更连续的逾渗通路。这说明较高的萘品醇含量（10T 与 15T）能形成更好的 GNP、Ag 与 SA 构造，从而实现连续的导电通路与更好的电性能。

在 PET 上，由于基材表面能低且固化受限于 100 °C、1 小时，各萘品醇含量的附着力均不足。5T 油墨形成薄而高度不连续的层，空隙很大，说明润湿性差、界面结合弱；10T 配方仅呈稀疏的岛状覆盖，说明润湿更差、接触面积极为有限；的 15T 虽形成更厚、面覆盖更好的层，但结构高度多孔且粗糙、空洞众多，导电网络仍不连续。这些形貌加之附着力弱，解释了全部 PET 样品电阻率较高且浸水后明显劣化的原因。

在 TPU 上，由于其表面能极低且固化温度仅为 100 °C、1 小时，三种萘品醇配方表现均差，但方式略有不同。5T 油墨浸水后仅在 TPU 表面残留少量颗粒，逾渗通路薄弱易断、电阻不稳定；10T 中 GNP/Ag 层几乎被完全去除，TPU 表面裸露，因而无法完成电学测量；15T 形成了比其他配方更厚的分散层，但结构仍然多孔、局部剥离且不规整，界面结合弱、导电网络不连续，同样无法进行电阻率测量。

上述观察表明，提高萘品醇含量虽可增加 GNP/Ag/SA 油墨在 TPU 上的初始厚度与覆盖率，却无法克服 TPU 极低表面能与吸湿溶胀所带来的根本限制，因此各萘品醇水平下附着力与电学稳定性均较差。ALLAMI 等证明水分侵入 TPU 会引起溶胀并改变其内部结构，进而影响电学与力学性能；ZWEIRI 等进一步报告，浸水会显著改变 TPU 性能，水分子破坏聚合物链间的分子间相互作用，使杨氏模量与抗拉强度下降。这些基材层面的变化会加剧湿气对施加于 TPU 上导电油墨的影响：TPU 软化溶胀后尺寸稳定性下降，可能在油墨—基材界面处引发开裂或剥离，破坏导电通路，从而增大印刷层上的电压降与电阻率。

在相应的 SEM 图像中，油墨下方观察到的粗糙不规整层应归因于溶胀受损的 TPU 基材本身，而非油墨。TPU 因表面能极低而附着不良；进一步显示，受 TPU 吸湿性影响，湿气暴露后附着力进一步减弱。综合来看，仅改变萘品醇含量无法弥补 TPU 低表面能与热性能上的限制。

四、结论

本研究结果凸显出 GNP - Ag 混合导电油墨性能对基材的依赖性。在所考察的基材中，铜的电性能最佳：Cu 10T 配方取得约 $1.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ 的最低干态电阻率，Cu 15T 取得约 $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ 的最低湿态电阻率。这归因于形成了致密且附着良好的微观结构，使 Cu 10T 与 Cu 15T 成为涉水应用最合适的候选方案。相比之下，PET 基材电阻率更高，最高约达 $10^{-4} \Omega \cdot m$ ，并在浸水后出现明显性能劣化，原因在于表面能低、固化受限

于 100 °C / 1 小时, 以及形成了多孔而不连续的导电网络。TPU 基材在浸水后电阻率极高甚至无法测量, 这与油墨严重脱落及基材吸湿溶胀相一致。

尽管提高萜品醇含量改善了初始膜厚与覆盖率 (15T 配方尤为明显), 但同时也增加了孔隙率, 仍不足以克服 PET 与 TPU 上润湿不良与湿致变形的问题。上述观察阐明了萜品醇在形貌与附着力两方面的双重作用。此外, 本研究的局限包括: PET 与 TPU 基材可用的低温固化窗口受限、仅使用了单一 SA 粒径, 以及仅考察了一种浸水条件。

总体而言, 本文系统研究了含 5T、10T 与 15T 萜品醇的 GNP/Ag/SA 混合油墨在 Cu、PET 与 TPU 基材上的表现, 比较了干湿条件下的电压、电阻与电阻率, 并把这些结果与表面能、固化行为及吸湿效应相联系。未来工作应探索 PET 与 TPU 的表面处理、更广泛的溶剂配比与 SA 含量及粒径优化, 以及长期循环湿度、温度与力学测试, 以确立适用于实际涉水环境的稳健基材—油墨组合。

参考文献

- [1] 刘嘉铭, 王琪, 高智勇. 复合碳纳米导电油墨在压触式印刷电子器件中的应用. 包装工程, 2024, 45(19): 153-163.
- [2] de Oliveira-Cândido T C, Pereira A C, da Silva D N. Development and characterization of conductive ink composed of graphite and carbon black for application in printed electrodes. *Analytica*, 2023, 4(4): 513-526.
- [3] 王望, 郭彦峰, 孙振锋. 碳系导电油墨填料的研究进展. 化工进展, 2015, 34(12): 4259-4264, 4279.
- [4] 刘嘉铭, 王琪, 高智勇. 复合碳纳米导电油墨在压触式印刷电子器件中的应用. 包装工程, 2024, 45(19): 153-163.
- [5] Qin Y, Ouyang X, Lv Y, et al. A review of carbon-based conductive inks and their printing technologies for integrated circuits. *Coatings*, 2023, 13(10): 1769.
- [6] 高云逸. 石墨烯导电油墨技术综述. 科技创业月刊, 2025(S2): 186-188.
- [7] Priyadarsini S, Mohanty S, Mukherjee S, et al. Graphene and graphene oxide as nanomaterials for medicine and biology application. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 2018, 8(2): 123-137.
- [8] 杜志坡, 马艺展, 王存阳, 等. 石墨烯及其衍生物在骨修复中的应用及展望. 中国修复重建外科杂志, 2025, 39(1): 106-117.