

丝网印刷技术在纸基传感器中的应用

陈琳轶¹ 田君飞^{*2}

¹(深圳职业技术大学传播工程学院, 深圳 518055) ²(华南理工大学轻工科学与工程学院, 广州 510640)

摘 要 随着科技的进步,纸基传感器的研究进展迅速,其应用领域也在不断扩展,纸基微流控和纸基柔性电子已经成为纸基传感器的两个重要发展方向。丝网印刷技术具有成本低廉、制版快速、印刷方便和适用性强等优点,广泛应用于各种纸基传感器的制备。本文在简要概述纸基传感器发展历程的基础上,从构建疏水壁以制备纸基微流道、沉积功能性试剂、印刷纸基电极以制备纸基电化学传感器这 3 个方面重点讨论了基于丝网印刷技术制备纸基生化传感器近年来的研究进展,以及基于丝网印刷技术的纸基物理传感器的研究进展,总结了丝网印刷技术应用于纸基传感器面临的挑战,并对其未来发展前景进行了展望。

关键词 丝网印刷; 纸基传感器; 纸基芯片; 微流控; 柔性电子; 评述

纸基传感器以纸质材料为基底,通过集成传感元件,可将环境中的物理、化学或生物变化转换为分析信号输出,实现多种分析物的检测^[1]。纸基传感器凭借其低成本、易加工、操作简便、柔性、便携和环境可降解等优势,为分析检测领域提供了一种经济、高效且易获取的解决方案,在现场快速诊断、食品科学、环境保护和可穿戴设备等诸多领域具有广阔的应用前景。丝网印刷技术作为一种常见的印刷技术,主要利用网格状的丝网将浆料印刷到物体表面^[2],已成功应用于多种不同类型的材料印刷,包括纸张、塑料、金属以及玻璃等。随着丝网印刷技术用于纸基传感分析领域,越来越多的基于丝网印刷的纸基生化传感器和物理传感器被成功开发出来。研究人员利用丝网印刷技术的灵活性,在纸张上构建反应器、集成电子元件,用于检测分析及信息传输。关于丝网印刷纸基传感器的研究进展已有综述报道,但主要集中在纸基电极方面^[3-4],尚未见全面阐述丝网印刷技术在纸基传感器制备中应用的综述性报道。本文在简要介绍纸基传感器发展历程的基础上,系统总结了近年来丝网印刷技术用于纸基传感器制备的研究进展,以期为基础于丝网印刷的纸基传感器的制备研究提供参考。

1 纸基传感器的发展

纸是由纤维相互交织层叠而形成的薄片型材料。纸张基材因其亲水、多孔、柔性、易加工且可降解等特性,在传感检测领域得到越来越广泛的应用^[5-7]。一方面,在生化传感领域,纸基传感器已经成功地实现了在即时检测(Point of care testing, POCT)领域的商业化应用,如尿糖试纸和早孕试纸等^[8-9]。Whitesides 研究组^[10]于 2007 年提出纸基微流控概念,极大地丰富了纸基生化传感器的应用场景。纸基微流控芯片采用封闭纸纤维阵列中的孔隙或疏水改性纸纤维表面等方法,在亲水的纸基上制备疏水边界,在亲水区域内通过微通道控制流体传输,完成分离、反应和检测等一系列操作^[11-12]。经过十几年的发展,纸基微流控芯片的制备主要基于以下 4 类方法:印刷法、掩膜法、裁切法和手工制作^[13]。通过与比色检测^[14]、荧光检测^[15]、电化学检测^[16]、化学发光检测^[17]和表面增强拉曼检测^[18]等分析技术结合,纸基微流控芯片已被用于医学诊断、食品安全和环境监测等诸多领域^[19-20]。另一方面,在物理传感领域,随着可穿戴设备和柔性电子技术的兴起,纸基传感器越来越受到研究者的关注。近年来,各种柔性纸基电子

2024-03-03 收稿; 2024-06-06 接受

深圳职业技术大学2022年度校级科研启动项目(No. 6022312063K)、国家自然科学基金项目(No. 82072016)和广东省基础与应用基础研究基金项目(No. 2021A1515011511)资助。

* E-mail: jftian_scut@163.com

器件发展迅速,在智能可穿戴、电子皮肤以及软体机器人等领域显示出巨大的应用潜力^[21-22]。

丝网印刷是一种常见的印刷技术,属于孔版印刷,与凸版印刷、凹版印刷及平版印刷并称为四大印刷方法,可广泛应用于纸基材质上。丝网印刷采用金属丝网、聚酯丝网和聚酰胺丝网等作为版基,通过感光制版的方法制备丝网印版。丝网印刷利用印版图文部分的网孔将油墨漏印至承印物上^[23-25],印刷成本低、制版快速、操作方便且适用性广。随着科技的不断发展,丝网印刷与纸基材料在传感检测领域相结合,丝网印刷技术已经成为制备纸基传感器的重要工艺,在多个制备环节中展现出显著优势及应用效果,促进了纸基传感器的发展和应用。

2 基于丝网印刷的纸基化学/生物传感器

在纸基化学传感器和生物传感器的制备过程中,丝网印刷的应用主要包括形成亲疏水区域、沉积功能性试剂以及制备纸基电极等。

2.1 构建疏水壁

纸基微流控芯片作为传感检测领域的研究热点,已经成为纸基化学/生物传感器发展的重要趋势。丝网印刷作为一种成熟工艺,具有操作简单、成本低和易图案化等优点,与纸基微流控芯片对快速图形化纸基亲疏水区域的要求一致。2011年,Dungchai等^[26]采用基于固体蜡的丝网印刷技术制备了纸基微流道。该研究将固体蜡通过尼龙丝网摩擦印刷到滤纸基材上,再通过加热使纸基上的固体蜡熔融渗透,形成疏水屏障(图1A)。相较于光刻法,蜡丝印法制备的纸基微流道具有更低的背景信号,有利于定性和半定量的纸基比色分析。Thongkam等^[27]利用蜂蜡乳液丝网印刷形成疏水壁,将阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵加入到熔化的蜂蜡中,再均质乳化获得蜂蜡乳液;蜂蜡乳液加热后可在纸基上形成疏水屏障(图1B)。在蜡丝印技术制备纸基微流道获得广泛应用的同时,研究人员也在探索其它聚合物材料用于纸基疏水壁构建的可能性。聚二甲基硅氧烷(PDMS)^[28]、聚苯乙烯^[29]、聚甲基丙烯酸甲酯^[30]和紫外光固化树脂^[31]等已被开发用于纸基微流控芯片的丝网印刷制备。

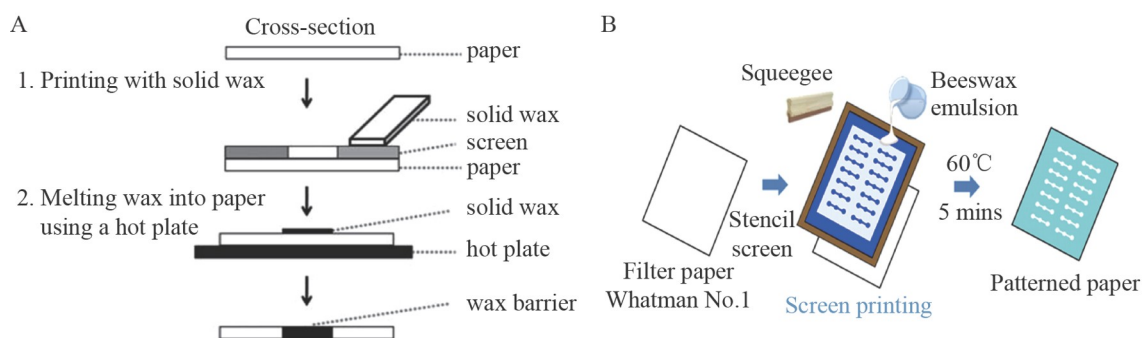


图1 (A)基于固体蜡的丝网印刷技术构建纸基疏水屏障^[26]; (B)基于蜂蜡乳液的丝网印刷技术构建纸基疏水屏障^[27]

Fig.1 (A) Constructing paper-based hydrophobic barriers using solid wax-based screen printing technology^[26]; (B) Constructing paper-based hydrophobic barriers using beeswax emulsion-based screen printing technology^[27]

上述方法通常需要热源、紫外灯或有毒溶剂。Thongkam等^[32]提出了使用环氧树脂作为疏水材料的方案,将环氧树脂及其固化剂的混合液通过丝网印刷渗透到纸基网络中,室温下直接固化形成疏水屏障。该方法制备的纸基芯片对常见的酸、碱和有机溶剂具有很好的耐受性,并成功用于土壤中磷酸盐的比色检测。此外,也有研究者使用商品化的材料进行纸基疏水壁的构建,以进一步简化丝网印刷制备纸基微流控芯片的工艺。清漆^[33]、屋顶密封剂^[33]和T恤油墨^[34]都已成功用于在纸基上构建疏水壁。Jarujamrus等^[35]在胶乳废料中获得顺-1,4-聚异戊二烯并将其作为丝印油墨,制备了用于检测水体中镁离子的条码化纸基芯片。近年来,为了进一步满足绿色环保的需求,生物可降解聚合物开始被用于纸基微流道的构筑。Teepoo等^[36]将聚乳酸(PLA)溶解在二氯甲烷中,再将其通过丝印技术印刷到滤纸上形成疏水阻挡层和亲水通道。Mettakoonpitak等^[37]使用聚己内酯(PCL)的丙酮溶液作为印刷油墨制备了纸基芯

片。相较于其它聚合物材料,生物可降解聚合物在纸基微流道的构建方面展现出显著优势。一方面,由生物可降解聚合物形成的疏水壁具有更好的生物相容性,有利于减少纸基检测过程中的干扰。另一方面,生物可降解聚合物可以根据具体需要进行调配和改性。这不仅使其能够充分满足多样化纸基微流道应用的需求,而且也赋予了纸基微流道降解性能的可控性,在保证正常使用的时候,有效降低了对环境的负面影响。

2.2 沉积功能性试剂

采用丝网印刷工艺不仅可以在纸张基材上构筑微流道,还可以用于快速大批量沉积多种功能性试剂,如酶、纳米粒子和无机材料等^[38-40]。Määttänen等^[38]提出了批量印刷纸基葡萄糖比色传感器的方法,先采用柔版印刷将PDMS油墨转移到纸基上构建亲疏水区域,然后采用无图文印版的丝网印刷将葡萄糖氧化酶墨水转移到纸基上。由于疏水区域对水基墨水的附着力低,葡萄糖氧化酶墨水只被沉积到亲水区域中,从而实现了纸基葡萄糖传感器的快速批量印刷。该纸基传感器基于碘-淀粉比色法可以检测浓度低至0.1 mg/mL的葡萄糖。Ma等^[39]使用丝网印刷机依次将氧化石墨烯(GO)和纳米银油墨印刷在纸张基材上,以大批量制备长条形表面增强拉曼散射(SERS)基底(图2)。以4-氨基苯硫酚作为探针分子的实验表明,在滤纸、硬纸板、新闻纸和A4办公用纸中,A4办公用纸最适宜作为丝网印刷的衬底,具有最佳的SERS活性。当纳米银油墨的印刷次数达到4次时,可以获得强SERS信号。通过模拟果蔬表面的农药状态残留,以银纳米粒子/GO为增强层的纸基SERS传感器实现了对福美双、噻苯咪唑和甲基对硫磷的定量检测,检出限分别为0.26、28和7.4 ng/cm²。Qu等^[41]在纸基上依次丝网印刷纳米银和纳米金油墨,构建双金属SERS活性基底;然后,通过丝网印刷绝缘油墨制备纸基微流道,二者共同组成了哑铃型纸基SERS传感器,可以对废水样品中的取代芳烃进行定量分析。Kim等^[42]利用羧甲基纤维素钠的粘性,实现了对纳米金油墨的粘稠度与流动性的调控。采用该油墨丝印制备的纸基SERS传感器在检测过程中具有更好的均匀性和再现性,在泪液的检测中实现了对腺病毒性结膜炎和单纯疱疹性结膜炎的有效分类。截至目前,通过丝网印刷工艺在纸基上沉积功能性试剂的方法主要用于SERS器件的批量化构建。为了进一步提高纸基SERS传感器的灵敏度和稳定性,仍需深入研究并优化适用于纸基的增强介质,包括半导体复合材料和碳基复合材料等。此外,还可以通过纸机抄造对纤维阵列结构进行调控,以提高SERS基底的均一性和可靠性,从而获得更好的检测性能。

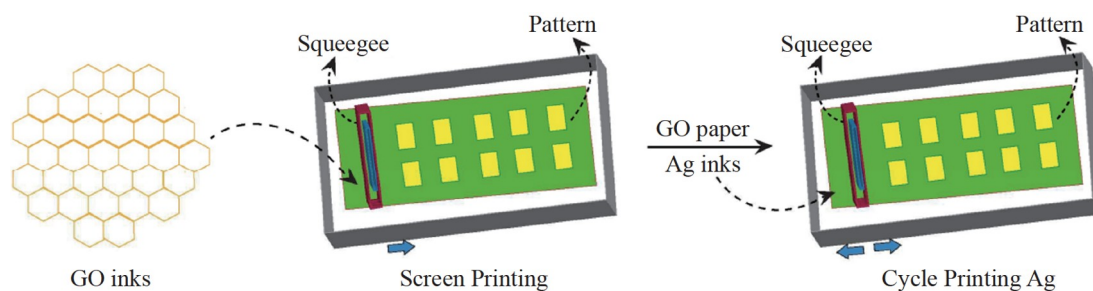


图2 基于丝网印刷技术制备以银纳米粒子/氧化石墨烯为增强层的纸基表面增强拉曼(SERS)传感器^[39]

Fig.2 Preparation of Ag nanoparticles/graphene(GO) paper-based surface enhanced Raman spectrometry (SERS) sensors by screen printing^[39]

2.3 制备纸基电极

纸基电化学传感器是纸基生化传感领域的一个重要分支,充分结合了电化学和纸基微流控的优势,具有成本低、灵敏度高、响应迅速和重复性好等优点,具有广泛的应用潜力^[43]。纸基电化学传感器通过电极实现电阻、电位和电流等信号的传输和检测,包括计时安培法、循环伏安法(Cyclic voltammetry, CV)、差分脉冲伏安法(Differential pulse voltammetry, DPV)和方波伏安法(Square wave voltammetry, SWV)等^[44-45]。丝网印刷电极是电化学分析中的一种常用电极,具有制备简单、重复性好、易于批量生产和可供一次性使用等优势,广泛用于体外诊断、环境监测和食品安全等多个领域^[46-47]。目前,丝网印刷技术

已经成为制备纸基电极的常用方法。Mazzaracchio 等^[48]设计了一种二维纸基电化学传感器用于血清中铁离子的检测。如图 3A 所示,在办公用纸上使用喷蜡打机构筑疏水屏障,获得了用于电化学检测的反应区。石墨导电油墨用于丝网印刷制备工作电极和对电极,而银/氯化银油墨用于丝网印刷制备参比电极,炭黑分散体、纳米金和全氟磺酸型聚合物溶液(Nafion)依次被用于修饰工作电极。该纸基电化学传感器可用于检测经三氟乙酸处理后的血清样品中的铁离子含量。在优化条件下,采用 SWV 法检测铁离子的检出限可低至 0.05 mg/L。为了扩大纸基电化学传感器的应用范围,研究者常将生物识别分子(酶、抗体和适配体等)固定在电极表面,利用其与待测物的特异性识别作用改变电活性物质(硫堇、亚甲基蓝和二茂铁等)的电信号,实现待测物的检测分析^[49]。如图 3B 所示,Cinti 等^[50]开发了一种用于血糖测定的纸基电化学生物传感器。首先使用喷蜡打印机对滤纸基材进行图案化疏水处理,以获得用于电化学检测的亲水反应区。然后,在半圆形亲水反应区内加入普鲁士蓝前体溶液直接生成了普鲁士蓝纳米颗粒(PBNPs)。在 PBNPs 修饰的纸基上,通过丝网印刷的方式构建了三电极体系。其中,工作电极和对电极通过丝网印刷导电碳浆油墨制备,而参比电极则通过丝网印刷银/氯化银油墨制备。在此基础上,以葡萄糖氧化酶为识别元件,利用 PBNPs 在较低电位下对过氧化氢的高效催化性,对血糖进行电化学检测。该安培型纸基传感器可检测最大浓度为 25 mmol/L 的葡萄糖。Teengam 等^[51]提出了一种基于肽核酸探针与石墨烯聚苯胺复合材料的人乳头瘤病毒(HPV)的电化学检测方法。在滤纸基材上使用喷蜡打印机构建亲水反应区,并通过丝网印刷技术在纸基上制备基于导电碳浆的工作电极和对电极,以及基于银/氯化银油墨的参比电极。将石墨烯聚苯胺复合材料和蒽醌标记的吡咯烷基肽核酸探针依次通过喷墨打印、滴涂的方式修饰在工作电极表面。当蒽醌标记的吡咯烷基肽核酸探针与靶核酸序列发生特异性互补杂交时,电化学响应信号显著降低。基于 SWV 法的电化学测定结果表明,该二维纸基电化学传感器对 HPV16 型 DNA 的检出限为 2.3 nmol/L,线性范围为 10~200 nmol/L。

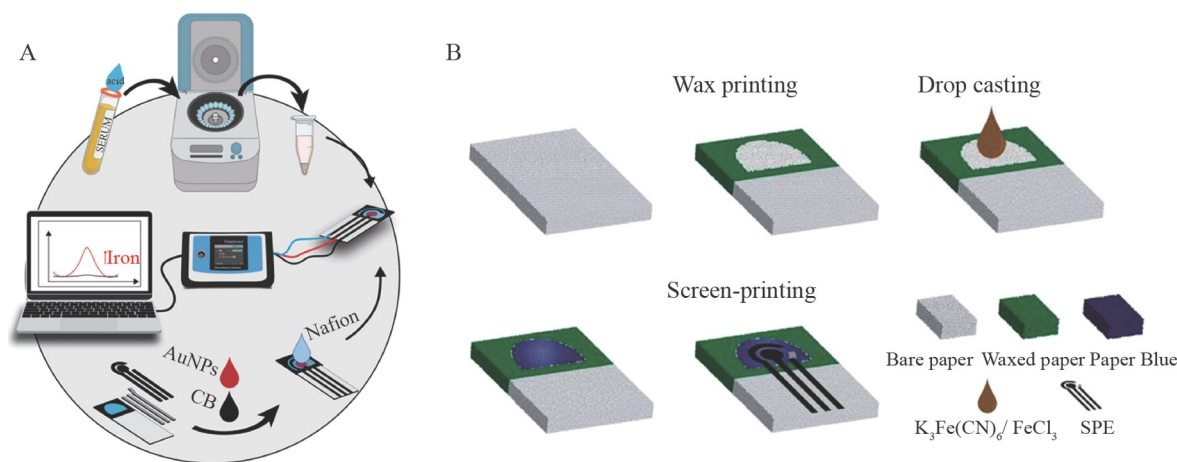


图3 基于丝网印刷电极的纸基电化学传感器用于(A)血清铁离子^[48]和(B)血糖^[50]的检测

Fig.3 Screen-printed paper-based electrochemical sensor for detection of (A) iron ion in serum^[48] and (B) blood glucose^[50]

丝网印刷技术除了用于制备简单的二维纸基电化学传感器,还被用于制备基于折纸技术或层叠技术的三维纸基电化学芯片。将电极丝印到三维纸基电化学芯片的不同层,可以起到改善电极与样品接触、减少试剂消耗等作用。Sun 等^[52]构建了多功能自驱动折纸型纸基微流控芯片,用于检测全血中 C 反应蛋白(CRP)和前白蛋白(PAB)。如图 4A 所示,通过喷蜡打印技术在滤纸基材上构建亲疏水区域;然后,以导电碳浆为丝印油墨制备两组工作电极和对电极,银/氯化银油墨用于制备参比电极。亚甲基蓝、氨基化单壁碳纳米管和纳米金颗粒三者按一定比例合成纳米复合材料,用于修饰工作电极表面以增强其电化学响应。该纸基芯片经过多次折叠,可将经血浆分离膜分离后的血液样本通过毛细作用力分别引流到两组工作电极和对电极表面,实现了基于适配体的 CRP 电化学检测和基于抗体的 PAB 电化学检测。采用

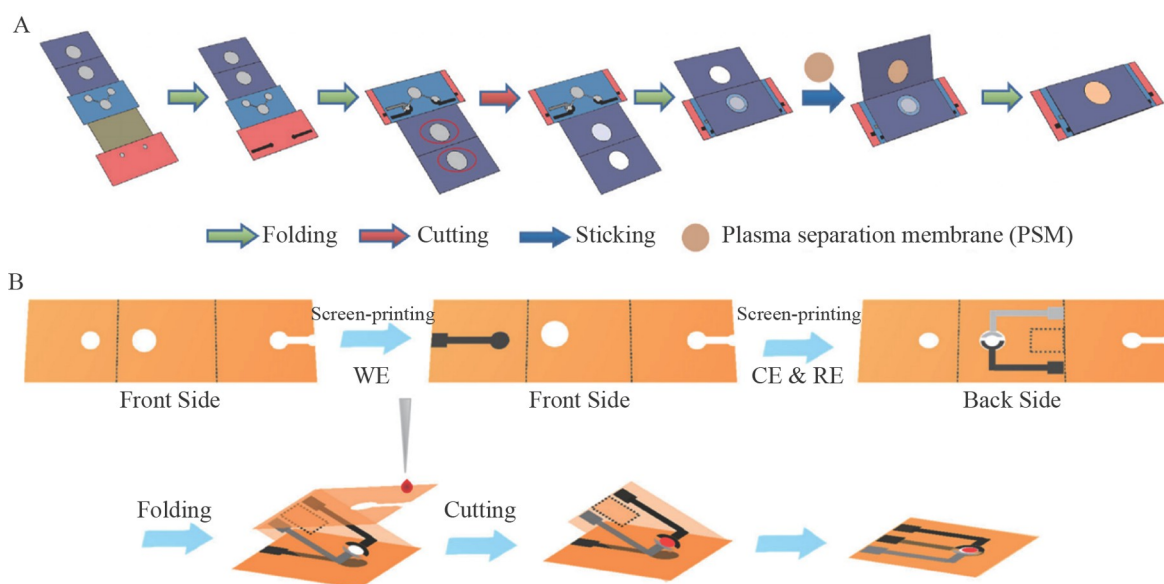


图4 基于丝网印刷电极的折纸型纸基电化学芯片用于(A)全血中C反应蛋白和前白蛋白^[52]以及(B)表皮生长因子受体^[53]的检测

Fig.4 Screen-printed origami paper-based electrochemical chip for detection of (A) C-reactive protein and prealbumin in whole blood^[52] and (B) epidermal growth factor receptor^[53]

DPV 进行测定,对CRP 和 PAB 的检出限分别为 0.005 和 0.01 ng/mL。Wang 等^[53]设计了一个基于折纸技术的纸基微流控芯片,用于检测表皮生长因子受体(EGFR)。采用喷蜡打印技术和丝网印刷技术分别在色谱纸上制备疏水限域的反应池及三电极体系(图 4B)。类似三折页的折纸设计减少了样品在流动过程的损失,并将工作电极与对电极及参比电极分隔,避免了工作电极表面修饰对其它电极造成污染。该研究采用氨基化石墨烯/硫堇/纳米金复合材料对工作电极表面进行修饰,再通过金硫键共价固定 EGFR 特异性的核酸适配体,实现了对 EGFR 的快速电化学检测。DPV 实验结果表明,对 EGFR 的线性检测范围为 0.05~200 ng/mL,检出限为 5 pg/mL。Wei 等^[54]构建了由两层纸基组成的层叠三维纸基微流控芯片,以减少对样品的消耗。该研究在一层纸基上喷蜡打印制备含进样口、流道及反应池的亲水区域,并在反应池边缘丝网印刷基于导电碳浆的对电极和基于银/氯化银油墨的参比电极;在另一层纸基上,以丝网印刷导电碳浆为工作电极,并采用还原氧化石墨烯/硫堇/纳米金复合材料修饰其表面以固定含巯基的核酸适配体。基于核酸适配体探针与前列腺特异性抗原(PSA)的高特异性结合,该纸基芯片能对 PSA 进行灵敏的 DPV 电化学测定,检出限低至 10 pg/mL。综上,丝网印刷纸基电极可以实现多样化的图案设计,并可适用多种电极复合材料,有助于制备不同样式、不同功能的电极体系,基于此可构建具有良好的特异识别性能、稳定性和灵敏度的纸基电化学传感器。目前,在纸基生化传感领域,探索新型的高性能、绿色环保的丝印电极材料,以进一步提高纸基电极的准确度、灵敏度以及稳定性,是未来的发展方向;同时,需考虑电极材料的多功能化,以拓展其应用范围,更好地满足生化检测的需求。

3 基于丝网印刷的纸基物理传感器

丝网印刷是一种重要的现代电子制造工艺,广泛用于电子产品的生产^[55]。作为一种发展迅速的微电子器件制造技术,丝网印刷不仅能在纸上印刷电极,还可在纸上形成复杂的电子元件结构,用于纸基物理传感器、可穿戴设备及柔性电子器件的制备。Qin 等^[56]提出了一种基于 LC 谐振原理的纸基无线无源传感器,用于监测食品、药品等密封包装的内部环境变化。通过丝网印刷导电银浆,在纸基上制备平面螺旋电感和叉指电容。电路仿真模型和电磁仿真模型验证了该传感器结构设计的可行性。滴水实验结果也表明,该纸基无线无源传感器能够有效地与外部读出线圈发生耦合,进行谐振点的偏移检测,从而实现密闭环境的实时监测。Sekertekin 等^[57]提出了一种纸基触觉传感器的制备方法,可兼容电容式、压阻

式及压电式 3 种类型的传感器。该研究采用分散在聚乙烯醇中的炭黑水性油墨在纸基上丝网印刷电极图案,再将两张纸电极相交 90° 叠加以构成纸基触觉传感器,并对其应变性能进行评价。程子豪等^[58]在不使用湿敏材料的情况下,在柯达相纸上丝网印刷导电银浆构建叉指电极层,获得了具有高灵敏度和快速响应/恢复速度的电容式纸基湿度传感器。

纸张基材是一种柔性基底,可以轻松弯曲和折叠,具有良好的柔软性、可塑性和生物相容性,因此多种纸基物理传感器易于被组装改造成可穿戴设备。Yang 等^[59]将近科烯(MXene)浸涂的面巾纸夹在聚酰亚胺胶带和丝网印刷有叉指电极的打印纸之间,制备了一种三明治结构的纸基可穿戴压力传感器(图 5)。该传感器具有灵敏度高和检测范围宽等优点,既可贴合人体表面以识别运动状态,也可以集成于口罩中对呼吸进行实时监测。Zhao 等^[60]以双六元环状碳酸酯、生物基脂肪族二胺和木质素为原料,合成了一种新型生物质基高分子材料木质素-聚羟基氨基甲酸酯复合材料(Lignin-containing polyhydroxyurethane, LPHU)。该制备方法采用非异氰酸酯路线,不使用溶剂及催化剂,制备过程绿色环保。该研究将导电油墨、LPHU 预聚物依次丝网印刷在纸基上,再多层热压,制备了柔性可穿戴纸基应变传感器。此外,丝网印刷技术还被应用于在纸张基材上制备柔性电子器件,如电池^[61]、RFID 天线^[62]、显示器^[63]、晶体管^[64]和超级电容器^[65]等。Guo 等^[66]在纸基上制备了平面微型超级电容器(Micro-supercapacitors, MSC),更有效地集成纸基上的传感器并为其供能。该研究在纸基上丝网印刷催化剂油墨,再结合化学镀、电镀等技术制备金属镍叉指化集流体,然后在镍电极表面电化学沉积 MnO_2 及叉指化集流体上涂覆凝胶电介质,获得了供能器件 MSC,并将其成功与气体传感器等集成到一个纸基芯片上。Zheng 等^[67]设计了一种由形状记忆合金线、可折叠纸基加热器和具有特定折纸结构的牛皮纸组成的模块化纸基致动器。该研究将银分形枝晶导电油墨丝网印刷到打印纸上制备了柔性加热器,再通过拼插实现柔性加热器和牛皮纸折纸结构的组装,形状记忆合金线以穿孔方式引入牛皮纸折纸结构中。该纸基致动器受温度刺激能产生形变,进而实现弯曲、托举和推进等运动模式。He 等^[68]采用甲壳素纳米晶(ChNCs)作为多壁碳纳米管(MWCNT)的分散剂,制备了 ChNCs/MWCNT 导电油墨。由于二者之间存在 π - π 共轭及疏水相互作用,使得 MWCNT 在油墨中表现出优异的分散性。该研究将油墨通过丝印技术印刷到纸基上,制备了纸基柔性热电发电机。在此基础上,组装的自供电可穿戴设备可用于监测人体呼吸变化及运动行为。目前,为了提高纸基柔性电子器件的稳定性和使用寿命,需要继续开发新型纸基材料以更好地满足不同器件在纸基粗糙度、功能化和亲疏水性等方面的特定要求。同时,应积极开展新型电极材料的研究,如金属纳米线和液态金属等,以提升纸基柔性电子器件的整体性能。另外,合适的层叠封装策略的设计也至关重要,不仅能有效提升纸基柔性电子器件的耐久性,而且能保证基于纸基柔性电子的可穿戴设备在使用过程中的生物安全性。

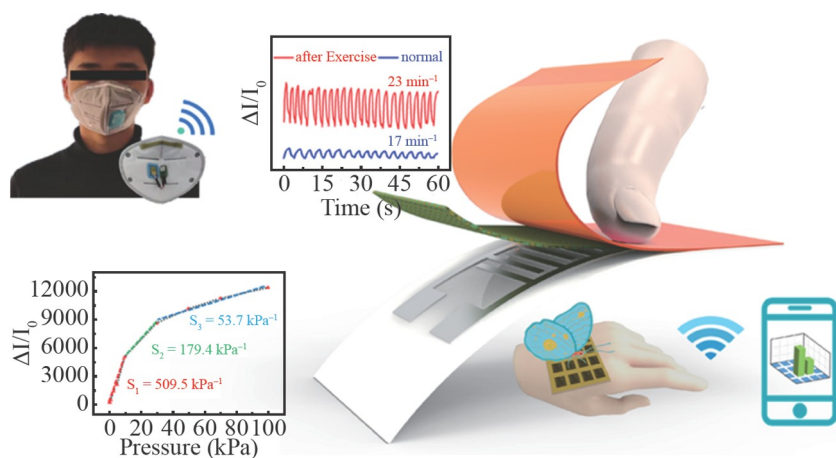


图5 基于迈科烯/面巾纸的纸基柔性压力传感器应用于无线呼吸监测^[59]

Fig.5 Flexible pressure sensor based on MXene/tissue paper for wireless respiration monitoring^[59]

4 总结与展望

纸基传感器在微流控和柔性电子领域已经展示出巨大潜力,丝网印刷技术的使用为其发展提供了低成本、高效和批量化生产的技术路径。为进一步推动丝网印刷技术在纸基传感器中的实际应用,仍需解决一系列问题和挑战。(1)需要继续优化丝网印刷工艺,对其工艺参数进行调控,确保油墨在纸基上干燥固化的均匀性和完整性,进而保证纸基传感器批次间的制备重复性。(2)需要进一步提高丝网印刷的精度和稳定性。可以采用激光辅助丝网印刷及数字丝网印刷等先进工艺,实现复杂、精细图案的高精度印刷,为制备高性能的纸基传感器提供支持。(3)还应继续开发新型复合油墨配方,扩展适用于纸基上丝网印刷的材料范围,如智能化材料和环保材料等。通过添加助剂等手段,调控油墨的流变学性能、导电性及机械耐磨性等,以提高丝网印刷的纸基传感器的检测性能并扩大其应用领域。(4)可以将丝网印刷与转移印刷、增材制造等多种制造方法相结合,制备具有复杂结构的多层纸基传感器,赋予其更好的灵活性和延展性,并为其多功能集成提供可能。

References

- [1] YAO Z, COATSWORTH P, SHI X, ZHI J, HU L, YAN R, GÜDER F, YU H D. *Sens. Diagn.*, 2022, 1(3): 312-342.
- [2] KAPUR N, ABBOTT S J, DOLDEN E D, GASKELL P H. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 2013, 3(3): 508-515.
- [3] YÁÑEZ-SEDEÑO P, CAMPUZANO S, PINGARRÓN J M. *Biosensors*, 2020, 10(7): 76.
- [4] COSTA-RAMA E, FERNÁNDEZ-ABEDUL M T. *Biosensors*, 2021, 11(2): 51.
- [5] MARTINEZ A W, PHILLIPS S T, WHITESIDES G M, CARRILHO E. *Anal. Chem.*, 2010, 82(1): 3-10.
- [6] AHMED S, BUI M P N, ABBAS A. *Biosens. Bioelectron.*, 2016, 77: 249-263.
- [7] YANG Y, NOVIANA E, NGUYEN M P, GEISS B J, DANDY D S, HENRY C S. *Anal. Chem.*, 2017, 89(1): 71-91.
- [8] COMER J P. *Anal. Chem.*, 1956, 28(11): 1748-1750.
- [9] KOCZULA K M, GALLOTTA A. *Essays Biochem.*, 2016, 60(1): 111-120.
- [10] MARTINEZ A W, PHILLIPS S T, BUTTE M J, WHITESIDES G M. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2007, 46(8): 1318-1320.
- [11] MARTINEZ A W, PHILLIPS S T, WILEY B J, GUPTA M, WHITESIDES G M. *Lab Chip*, 2008, 8(12): 2146-2150.
- [12] MAEJIMA K, TOMIKAWA S, SUZUKI K, CITTERIO D. *RSC Adv.*, 2013, 3(24): 9258-9263.
- [13] CATE D M, ADKINS J A, METTAKOONPITAK J, HENRY C S. *Anal. Chem.*, 2015, 87(1): 19-41.
- [14] SODA Y, BAKKER E. *ACS Sens.*, 2019, 4(12): 3093-3101.
- [15] LI B, ZHANG Z, QI J, ZHOU N, QIN S, CHOO J, CHEN L. *ACS Sens.*, 2017, 2(2): 243-250.
- [16] YAKOH A, CHAIYO S, SIANGPROH W, CHAILAPAKUL O. *ACS Sens.*, 2019, 4(5): 1211-1221.
- [17] LUO M, SHAO K, LONG Z, WANG L, PENG C, OUYANG J, NA N. *Sens. Actuators, B*, 2017, 240: 132-141.
- [18] XIE J, LI L, KHAN I M, WANG Z, MA X. *Spectrochim. Acta, Part A*, 2020, 231: 118104.
- [19] SHER M, ZHUANG R, DEMIRCI U, ASGHAR W. *Expert Rev. Mol. Diagn.*, 2017, 17(4): 351-366.
- [20] BUSA L, MOHAMMADI S, MAEKI M, ISHIDA A, TANI H, TOKESHI M. *Micromachines*, 2016, 7(5): 86.
- [21] LIU L, JIAO Z, ZHANG J, WANG Y, ZHANG C, MENG X, JIANG X, NIU S, HAN Z, REN L. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(1): 1967-1978.
- [22] XU Y, FEI Q, PAGE M, ZHAO G, LING Y, STOLL S B, YAN Z. *iScience*, 2021, 24(7): 102736.
- [23] RIEMER D E. *Microelectron. Int.*, 1989, 6(1): 8-17.
- [24] MACHIELS J, VERMA A, APPELTANS R, BUNTINX M, FERRARIS E, DEFERME W. *Procedia CIRP*, 2021, 96: 115-120.
- [25] TALEAT Z, KHOSHROO A, MAZLOUM-ARDAKANI M. *Microchim. Acta*, 2014, 181(9): 865-891.
- [26] DUNGCHAI W, CHAILAPAKUL O, HENRY C S. *Analyst*, 2011, 136(1): 77-82.
- [27] THONGKAM T, HEMAIVIBOOL K. *Microchem. J.*, 2020, 159: 105412.
- [28] MA S, TANG Y, LIU J, WU J. *Talanta*, 2014, 120: 135-140.
- [29] SAMEENOI Y, NONGKAI N P, NOUANHAVONG S, HENRY C S, NACAPRICHA D. *Analyst*, 2014, 139(24): 6580-6588.
- [30] JUANG Y J, LI W S, CHEN P S. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 2017, 80: 71-75.
- [31] THONGKAM T, RUNGSIRISAKUN R, HEMAIVIBOOL K. *Anal. Methods*, 2020, 12(38): 4649-4656.
- [32] THONGKAM T, HEMAIVIBOOL K. *Anal. Methods*, 2022, 14(10): 1069-1076.
- [33] SUN J Y, CHENG C M, LIAO Y C. *Anal. Sci.*, 2015, 31(3): 145-151.
- [34] SITANURAK J, FUKANA N, WONGPAKDEE T, THEPCHUAY Y, RATANAWIMARNWONG N, AMORNSAKCHAI T, NACAPRICHA D. *Talanta*, 2019, 205: 120113.

- [35] JARUJAMRUS P, MEELAPSOM R, NAKSEN P, DITCHAROEN N, ANUTRASAKDA W, SIRIPINYANOND A, AMATATONGCHAI M, SUPASORN S. *Anal. Chim. Acta*, 2019, 1082: 66-77.
- [36] TEEPOO S, ARSAWISSET S, CHANAYOTA P. *Chemosensors*, 2019, 7(3): 44.
- [37] METTAKOONPITAK J, KHONGSOUN K, WONGWAN N, KAEWBUTDEE S, SIRIPINYANOND A, KUCHARUK A, HENRY C S. *Sens. Actuators, B*, 2021, 331: 129463.
- [38] MÄÄTTÄNEN A, FORS D, WANG S, VALTAKARI D, IHALAINEN P, PELTONEN J. *Sens. Actuators, B*, 2011, 160(1): 1404-1412.
- [39] MA Y, WANG Y, LUO Y, DUAN H, LI D, XU H, FODJO E K. *Anal. Methods*, 2018, 10(38): 4655-4664.
- [40] WANG Kun, YU Jia-Wen, YAN Jia, YANG Xin-Jie, XIAO Gui-Na. *J. Shanghai Normal Univ. (Nat. Sci.)*, 2021, 50(4): 402-407.
王昆, 余嘉雯, 严佳, 杨欣婕, 肖桂娜. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 50(4): 402-407.
- [41] QU L L, SONG Q X, LI Y T, PENG M P, LI D W, CHEN L X, FOSSEY J S, LONG Y T. *Anal. Chim. Acta*, 2013, 792: 86-92.
- [42] KIM W S, SHIN J H, PARK H K, CHOI S. *Sens. Actuators, B*, 2016, 222: 1112-1118.
- [43] ADKINS J, BOEHLE K, HENRY C. *Electrophoresis*, 2015, 36(16): 1811-1824.
- [44] NOVIANA E, MCCORD C P, CLARK K M, JANG I, HENRY C S. *Lab Chip*, 2020, 20(1): 9-34.
- [45] ATAIDE V N, PRADELA-FILHO L A, AMEKE W A, NEGAHDARY M, OLIVEIRA T G, SANTOS B G, PAIXÃO T R L C, ANGNES L. *Microchim. Acta*, 2023, 190(7): 276.
- [46] PAIMARD G, GHASALI E, BAEZA M. *Chemosensors*, 2023, 11(2): 113.
- [47] CRAPNELL R D, FERRARI A G M, DEMPSEY N C, BANKS C E. *Sens. Diagn.*, 2022, 1(3): 405-428.
- [48] MAZZARACCHIO V, BAGHERI N, CHIARA F, FIORE L, MOSCONE D, ROGGERO S, ARDUINI F. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2023, 415(6): 1149-1157.
- [49] SINGH S, WANG J, CINTI S. *ECS Sens. Plus*, 2022, 1(2): 023401.
- [50] CINTI S, CUSENZA R, MOSCONE D, ARDUINI F. *Talanta*, 2018, 187: 59-64.
- [51] TEENGAM P, SIANGPROH W, TUANTRANONT A, HENRY C S, VILAIVAN T, CHAILAPAKUL O. *Anal. Chim. Acta*, 2017, 952: 32-40.
- [52] SUN S, LUO J, ZHU Y, KONG F, MAO G, MING T, XING Y, LIU J, DAI Y, YAN S, YANG Y, CAI X. *Biosens. Bioelectron.*, 2022, 208: 114225.
- [53] WANG Y, SUN S, LUO J, XIONG Y, MING T, LIU J, MA Y, YAN S, YANG Y, YANG Z, REBOUD J, YIN H, COOPER J M, CAI X. *Microsyst. Nanoeng.*, 2020, 6: 32.
- [54] WEI B, MAO K, LIU N, ZHANG M, YANG Z. *Biosens. Bioelectron.*, 2018, 121: 41-46.
- [55] ESHKEITI A, REDDY A S G, EMAMIAN S, NARAKATHU B B, JOYCE M, JOYCE M, FLEMING P D, BAZUIN B J, ATASHBAR M Z. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 2015, 5(3): 415-421.
- [56] QIN G, YANG L, FAN Z, DONG H, YU S. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2021, 63(11): 2763-2768.
- [57] SEKERTEKIN Y, BOZYEL I, GOKCEN D. *Sensors*, 2020, 20(10): 2908.
- [58] CHENG Zi-Hao, SONG Zhi, XIA Yu-Ren, XUE Yan-Bing. *Instrum. Techn. Sens.*, 2022, 6: 18-22.
程子豪, 宋智, 夏雨人, 薛严冰. *仪表技术与传感器*, 2022, 6: 18-22.
- [59] YANG L, WANG H, YUAN W, LI Y, GAO P, TIWARI N, CHEN X, WANG Z, NIU G, CHENG H. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(50): 60531-60543.
- [60] ZHAO W, LIANG Z, FENG Z, XUE B, XIONG C, DUAN C, NI Y. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(24): 28938-28948.
- [61] HILDER M, WINTHER-JENSEN B, CLARK N B. *J. Power Sources*, 2009, 194(2): 1135-1141.
- [62] LI X, SIDÉN J, ANDERSSON H, SCHÖN T. *IEEE J. Radio Freq. Identif.*, 2018, 2(3): 118-126.
- [63] FREITAG K, BROOKE R, NILSSON M, ÅHLIN J, BENI V, ERSMAN P A. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 1(2): 578-586.
- [64] PENG B, CHAN P K L. *Org. Electron.*, 2014, 15(1): 203-210.
- [65] SAY M G, BRETT C J, EDBERG J, ROTH S V, SODERBERG L D, ENGQUIST I, BERGGREN M. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(50): 55850-55863.
- [66] GUO R, CHEN J, YANG B, LIU L, SU L, SHEN B, YAN X. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(43): 1702394.
- [67] ZHENG K, GAO E, TIAN B, LIANG J, LIU Q, XUE E, SHAO Q, WU W. *Adv. Intell. Syst.*, 2022, 4(12): 2200194.
- [68] HE Y, LIN X, FENG Y, LUO B, LIU M. *Adv. Sci.*, 2022, 9(33): 2204675.

Application of Screen Printing Technology in Paper-based Sensors

CHEN Lin-Yi¹, TIAN Jun-Fei^{*2}

¹(School of Communication, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China)

²(School of Light Industry and Engineering, Guangzhou 510640, China)

Abstract With the advances of science and technology, the research on paper-based sensors has progressed rapidly and their applications continue to expand. Paper microfluidics and paper-based flexible electronics have become two important development directions for paper-based sensors. Meanwhile, screen printing technology, which has advantages such as low cost, fast screen making, easy printing, and wide applicability, has been extensively used in the fabrication of paper-based sensors. This paper provided a brief overview of the development of paper-based sensors, and discussed the research progress in recent years of fabricating paper-based chemical sensors and biosensors based on screen printing technology from three aspects: constructing hydrophobic walls to prepare paper-based microfluidic channels, depositing functional reagents, and printing paper-based electrodes to prepare paper-based electrochemical sensors. In addition, the research progress of paper-based physical sensors based on screen printing technology was described. Finally, challenges and development directions for future applications of screen printing in paper-based sensors were discussed.

Keywords Screen printing; Paper-based sensors; Paper-based chips; Microfluidics; Flexible electronics; Review

(Received 2024-03-03; accepted 2024-06-06)

Supported by the Scientific Research Fund of Shenzhen Polytechnic University for 2022 (No. 6022312063K), the National Natural Science Foundation of China (No. 82072016) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (No. 2021A1515011511).