

基于纸基微流控芯片的防伪无废弃包装

杨晨, 雷文财*

(湖北京华彩印有限公司, 湖北 孝感 432800)

摘要: **目的** 在当今环保意识不断增强的背景下, 纸基微流控技术以其低成本、可降解的特点, 逐渐成为包装行业的研究热点。本研究旨在设计一种基于纸基微流控芯片的多功能包装, 通过碳点的特异性荧光响应实现防伪功能, 并结合导电油墨器件添加趣味教学功能, 以满足现代环境的无废弃包装要求。**方法** 通过丝网印刷的方法, 构建荧光传感与导电油墨器件一体化的纸基微流控芯片, 粘贴在传统纸质包装的内表面制备具有防伪功能的无废弃包装。**结果** 经测试, 该包装可以通过碳点材料的荧光与猝灭鉴别产品真伪, 并在滴入导电油墨后通过发光器件起到趣味教学的作用。**结论** 将纸基微流控芯片与纸质包装相结合, 为产品防伪与包装可持续应用提供了一种可行的方法。

关键词: 纸基微流控芯片; 纸包装; 防伪; 无废弃包装

中图分类号: TB484 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)13-0098-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.012

Anti-counterfeit and Waste-free Packaging Based on Paper-based Microfluidic Chip

YANG Chen¹, LEI Wencai^{1*}

(Hubei Jinghua Colour Printing Company Limited, Hubei Xiaogan 432800, China)

ABSTRACT: In the context of the growing awareness of environmental protection today, paper-based microfluidic technology, characterized by low cost and biodegradability, has gradually become a hot topic of research in the packaging industry. The work aims to design multifunctional packaging utilizing paper-based microfluidic chip technology, which utilizes the unique fluorescent response of carbon dots for anti-counterfeiting purposes and integrates a teaching component through the use of conductive ink devices to meet the contemporary environmental standards for waste-free packaging materials. Through the utilization of silk screen printing technique, a paper-based microfluidic chip integrating fluorescent sensing and conductive ink components was fabricated, adhered onto the inner surface of conventional paper packaging to create waste-free anti-counterfeit packaging. This integration allowed for product authenticity verification under UV light irradiation and offered an educational dimension through luminescence demonstration post-application of conductive ink. The fusion of paper-based microfluidic chips with paper packaging presents a viable approach for enhancing product security and promoting sustainable packaging practices.

KEY WORDS: paper-based microfluidic chip; paper packaging; anti-counterfeit; waste-free packaging

近年来,随着环境保护意识的增强和消费者对消费品质要求的提高,包装行业也在不断追求创新。传统的包装方式存在着资源浪费、环境污染等问题^[1],现有的防伪技术,如激光全息标签、射频识别技术、数据隐写技术等,虽然在一定程度上有效,但仍面临

成本高、易被仿制和环保性能不足等挑战^[2-6]。因此,寻求一种具有防伪功能且兼具环保性与趣味性的包装方式变得尤为重要。微流控技术由于其具有可在微米尺度上对液体流动进行精确操控的特性,受到了越来越多的关注,在生物医学、食品安全等领域广泛应

用。纸基微流控芯片作为一种低成本、易制备、便携式的微流控平台在防伪领域同样备受关注^[7-13]。

为了防止假冒伪劣产品对经济发展与人类生活带来的危害, 印刷防伪包装技术被广泛应用于食品、药品和信息安全等行业^[14-17]。在纸基微流控芯片上印刷碳点材料, 通过碳点的光致发光特性与特异性荧光响应可以实现防伪功能^[18-21]。同时, 在纸基微流控芯片两端接上发光器件和电源, 中间滴入导电油墨, 通过调节导电油墨的浓度与流速来控制灯泡的亮度, 让消费者能够直观地感受到电流大小与灯泡亮度之间的关系, 从而理解电路的基本原理^[22]。这种装置不仅具有教育功能, 同时还能够增加产品的趣味性 with 购买后的循环使用次数, 起到无废弃包装的效果。

本研究旨在以纸基微流控芯片技术为载体, 复合碳点材料与导电油墨器件, 将芯片复合在纸包装内表面, 设计一款具有一定教学功能的防伪无废弃包装, 拓展微流控技术在包装领域的应用。

1 纸基微流控芯片概述

早在 2007 年, Martinez 等^[23]就首次将微流体技术与纸基材料的多孔特性相结合, 并提出了纸基微流控的概念。这种纸基芯片具有成本低廉、环保、操作简便等特点, 并且具备微型化、集成化和便携性等优势。在缺乏检测试剂、玻璃器皿等各类精密分析仪器的应用场景中, 该技术已成为分析传感实验的重要工具。此外, 纸基微流控技术也逐渐在环境保护、食品安全和临床诊断等领域得到广泛应用^[24-27]。相较于其他常见的基底材料(如塑料、硅板、玻璃等), 纸基具有独特的优势。首先, 由于纸基纤维含量丰富, 具备毛细管作用, 使得液体能够无须外部动力快速传输。其次, 纸基具有良好的柔软性和成熟的加工工艺, 同时还具有可回收性, 使用后处理简便且成本低廉。然而, 纸张本身的多孔结构会导致液体扩散, 其流动方向性差, 容易造成样品损耗。为了解决这些问题, 人们开始在纸基上沉积疏水材料, 制备具有良好疏水

功能的纸基微流控芯片, 以满足实际需求。

制造纸基微流控芯片通常采用设计切割或多层折叠的方法, 以实现功能化的亲疏水区域^[28-29]。这些区域通过物理方法(浸润或涂蜡)将憎水性试剂沉积在纸基纤维表面, 填充纸张纤维间的空隙^[30]。纸基的多孔性质使得芯片能够在亲水孔隙基质中良好地吸收和输送液体, 而图案化的疏水性壁垒将检测液限制在预先设计的通道内, 有序高效地引导其沿着亲水通道流动, 避免外部渗透或浪费。检测试剂随着构建的亲水通道流动至预先设计的检测位置, 以供后续分析使用, 从而构建了基于纸张的检测和分析平台。

2 防伪无废弃纸基微流控芯片的设计与测试

2.1 纸基微流控芯片的设计

主要材料: 水性丙烯酸树脂(Joncryl HPD 196), 德国巴斯夫股份公司; 分散剂(190WB), 武汉鸥易光电科技有限公司; 消泡剂, 武汉欣申试化工有限公司; 无水乙醇, 国药集团化学试剂有限公司; 罗丹明 B, 上海迈瑞尔化学技术有限公司; 中速滤纸, 抚顺市民政滤纸厂; 碳点材料, 实验室自制; 无水三氯化铁, 阿拉丁试剂有限公司; 去离子水, 实验室自制; 导电油墨, 武汉世帝牧文化科技有限公司; 发光灯珠, 杭州虹谱光电科技有限公司; 带引脚电池, 深圳市芯乐购电子科技有限公司。

将 0.5 g 三氯化铁固体溶于 30 mL 去离子水中配置氯化铁溶液。分别取 1、5、10、15、20 和 25 g 水性丙烯酸树脂、0.8 g 分散剂和 0.02 g 消泡剂, 将其超声分散于 3 mL 无水乙醇溶液中, 配制出不同浓度的疏水溶液。为排除纸基自身制造过程中荧光因素的影响, 同时也为了较好的引流效果, 选用无荧光的滤纸。通过丝网印刷将疏水溶液印刷在滤纸上, 50 °C 条件下加热固化 10 min, 得到如图 1a 所示的纸基微流控芯片。在此基础上, 再次印刷 1 次微流控通道, 以满足



图 1 纸基微流控芯片及包装设计

Fig.1 Design of paper-based microfluidic chip and packaging

后续无废弃包装中发光灯珠与电池构成通路所需要的 2 条导电油墨线路。印刷结果如图 1b 所示, 基于微流控芯片的防伪无废弃包装设计展示如图 1c 所示。

2.2 纸基微流控芯片的加工与测试

目前, 纸基微流控芯片的制作技术, 如光刻、等离子体处理和激光处理等, 往往难以满足实际应用中可规模化生产和成本控制的需求。为了解决这一问题, 人们开始探索利用丝网印刷技术开发纸基微流控芯片, 这种方法操作简便、成本低廉、便携性强、分辨率高, 并且对环境友好, 易于降解。这样的纸基微流控芯片可以实现可视化检测, 具有广阔的应用前景。

为了探究不同浓度丙烯酸树脂溶液对芯片疏水效果的影响, 配置不同浓度的树脂溶液, 在丝网印刷 1 次后 100 °C 条件下固化 15 min, 通过测量纯水液滴在疏水纸基表面的接触角来评估树脂浓度对纸基疏水性能的影响。如图 2 所示, 随着树脂浓度的增加, 纸基基底的疏水程度不断提高, 这可能是由于更高浓度的树脂能在纸基表面形成更致密和均匀的疏水层。当添加量为 15 g 后, 疏水增加程度逐渐变缓, 接触角达到 100.5°。这是因为丙烯酸树脂添加量达到 15 g 时, 纸基上单位面积的成膜物质趋于饱和, 此时疏水区域效果已较好, 继续提高树脂浓度无法进一步改善薄膜的疏水性能。

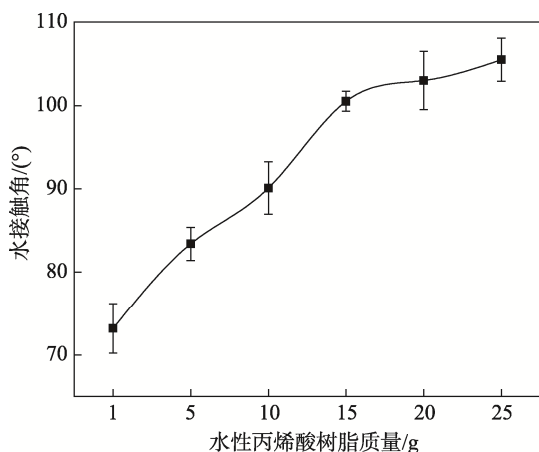


图 2 树脂添加量对纸张表面润湿性的影响

Fig.2 Effect of resin concentration on paper surface wettability

接触角是表面张力、胶体张力和气体张力相互平衡之后的结果。当水滴在材料表面的正负接触角均大于 90°, 则表面张力大于胶体张力, 说明水滴与材料表面的吸引力较弱, 材料具有良好的疏水效果。合适的固化温度和时间将会导致树脂在纸基表面成膜更加致密, 并沉积渗透到滤纸的内部, 提高纸基疏水效果。因此, 如表 1 所示, 设定印刷后芯片固化温度分别为 60、80、100 °C, 选择添加量 10、15、20、25 g

的树脂溶液, 设计并进行如下正交实验, 实验结果如表 1 所示。根据结果可以发现, 丝网印刷 1 次时, 添加量为 20 g 的树脂溶液, 在 100 °C 条件下固化 3 min 即可达到良好疏水效果。

表 1 正交实验分析结果

Tab.1 Analysis results of orthogonal experiments

树脂添加量/g	固化温度/°C	固化时间	达到疏水效果条件
10	50	1~30 min	50 °C、30 min
	75		75 °C、25 min
	100		100 °C、10 min
15	50		50 °C、25 min
	75		75 °C、15 min
	100		100 °C、10 min
20	50		50 °C、15 min
	75		75 °C、10 min
	100		100 °C、3 min
25	50		50 °C、15 min
	75		75 °C、5 min
	100		100 °C、2 min

纸张的毛细管在传输液体的过程中会受到亲水通道宽度的影响。当亲水通道过窄时, 传输效率会减慢; 而当通道过宽时, 会导致液体的渗透浪费, 进而减少液体流动到目标区域的有效量, 并显著增加微流控芯片的响应时间。因此, 为了确保亲水通道的有效传输, 本文预设了 10 个宽度介于 1~3 mm 的平行亲水通道, 通道之间用 0.8 mm 的疏水边界隔开, 并在每个通道的入口处滴加了 12 μ L 的罗丹明 B 水溶液, 比较各个通道中液体在相同时间内的流动距离。如图 3 所示, 当通道宽度小于 1.4 mm 时, 指示剂水溶液基本不流动, 这可能是因为液体的表面张力与狭窄通道产生的阻力相抗衡, 致使毛细管作用不足以驱动液体前进。而当亲水通道宽度为 2 mm 时液体能够完全流通, 液体流动距离最长达 3.5 cm, 这说明通道宽度与毛细管传输效率存在一个最优范围。此时, 亲水通道能够被指示剂溶液充分润湿, 纸基微流控芯片具有良好的防渗透性能和扩散性能, 同时功能性疏水屏障和亲水通道具有较高的精度和分辨率。

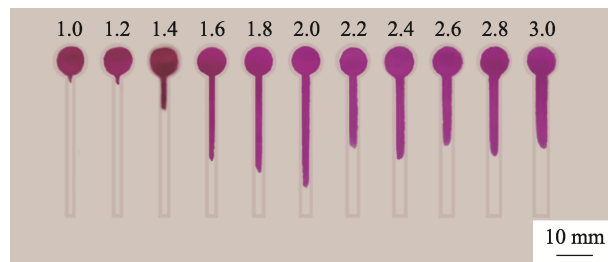


图 3 不同宽度的亲水通道

Fig.3 Hydrophilic pathways of different widths
基于所制备碳点与 Fe^{3+} 之间的特异性猝灭, 首先

将碳点印刷在微流控芯片通道的末端,随后在通道入口处滴加氯化铁溶液,观察其颜色与荧光变化。如图 4 所示,印刷有碳点的微流控芯片在日光与紫外光的照射下分别显示出不同的颜色。在微流控芯片液体入口处滴加少量 FeCl_3 溶液,液体会迅速沿着通道上升,与碳点印刷区域接触后会使该区域发生显色反应,颜色变为深褐色,同时引起荧光猝灭;当 FeCl_3 溶液完全覆盖碳点印刷区域后,碳点的荧光大部分被猝灭,肉眼可见纸基荧光消失(图 5)。将这种芯片加载在包装内表面后,可以实现方便快捷地识别假冒伪劣产品,识别速度快、效果直观。同时,针对不同的商品,可以通过更换碳点与相应溶液的方式对芯片进行更新与替换。

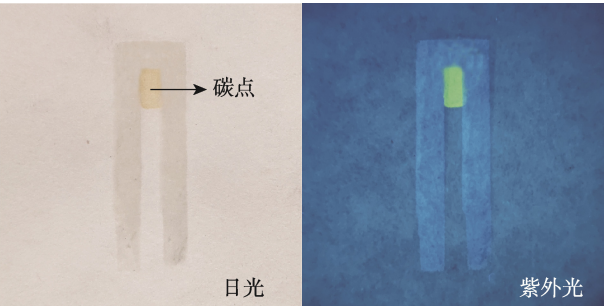


图 4 印有碳点的微流控芯片
Fig.4 Microfluidic chip printed with carbon dots

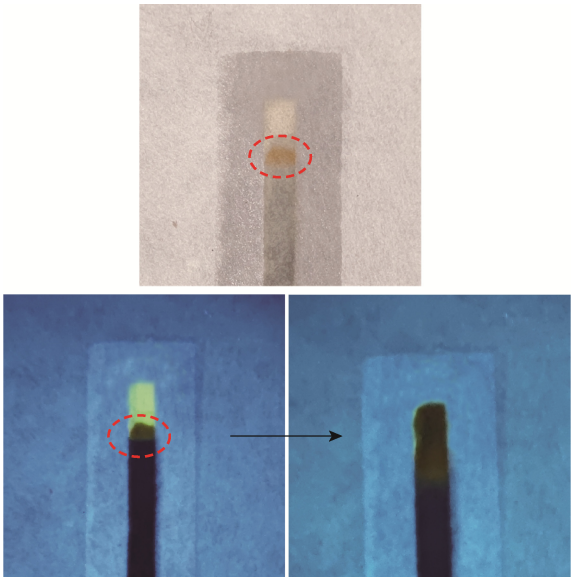


图 5 防伪包装微流控芯片猝灭的过程
Fig.5 Fluorescence quenching of microfluidic chip for anti-counterfeiting packaging

在微流控芯片的液体入口处滴加导电油墨以制备无废弃包装,在 40 °C 的条件下干燥 10~15 min,并将发光灯珠与电池分别放置在芯片的上下两端,如图 6 所示。在电池引脚接触导电油墨的瞬间,微流控芯片回路连通,灯珠亮起;同时任意更改灯珠与电池的

相对位置,灯珠的发光强度会因为导电回路电阻的改变而发生变化。儿童在放置时,需要正确对其部件的正负极进行判断,有一定的教育意义,也拓宽了包装本身的功能。

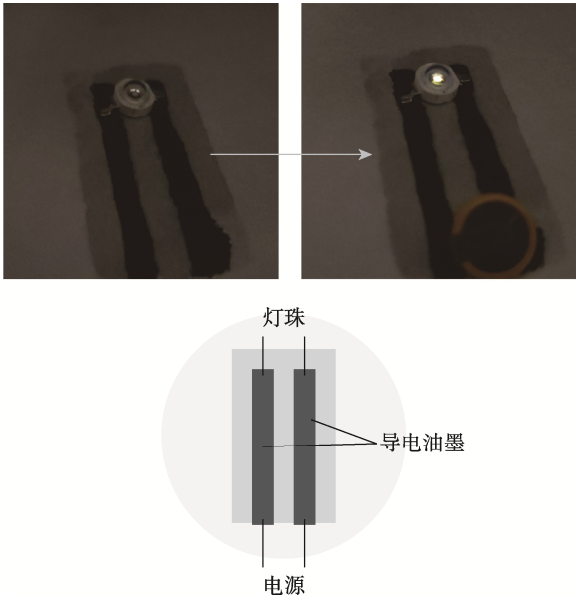


图 6 无废弃包装微流控芯片导电的过程
Fig.6 Conductive processes of microfluidic chip for waste-free packaging

3 结语

本文将水性树脂材料丝网印刷在滤纸表面,然后通过胶水黏接在包装内表面,制备了一种可用于防伪与无废弃包装上的纸基微流控芯片,并对该芯片的防伪功能与教育功能进行了试验与论证。该方法简单易行,适用于各种不同的包装。通过对芯片内印刷物与润湿液体的改变与配合可以进一步扩展该芯片的应用,具有极大的发展前景与大批量生产的条件。

参考文献:

[1] 袁晓宝,刘雅婷,陈妮,等. 绿色包装材料研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 87-94.
YUAN X B, LIU Y T, CHEN N, et al. Research Progress on Green Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 87-94.

[2] 吴文波,吴昌钱. 物联网环境下的激光全息 RFID 多标签防碰撞方法[J]. 激光杂志, 2023, 44(12): 231-234.
WU W B, WU C Q. Laser Holographic RFID Multi Tag Anti Collision Method in the Environment of Internet of Things[J]. Laser Journal, 2023, 44(12): 231-234.

[3] 李晓丹. RFID 标签在包装防伪中的应用分析[J]. 绿色包装, 2023(6): 20-23.

- LI X D. Analysis on the Application of RFID Labels in Packaging Anti-Counterfeiting[J]. Green Packaging, 2023(6): 20-23.
- [4] 官俊, 丁医华, 葛青涛, 等. 基于多材料 3D 打印技术的 RFID 天线快速制造[J]. 工程设计学报, 2023, 30(3): 288-296.
- GUAN J, DING Y H, GE Q T, et al. Rapid Manufacturing of RFID Antennas Based on Multi-Material 3D Printing Technology[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023, 30(3): 288-296.
- [5] 徐君涛, 刘茜, 楼焕, 等. 防伪技术的多技术融合发展及应用[J]. 丝网印刷, 2023(13): 43-45.
- XU J T, LIU Q, LOU H, et al. Multi-Technology Integration and Applications in Anti-Counterfeiting Technology Development[J]. Screen Printing, 2023(13): 43-45.
- [6] 许俊清. 印刷防伪包装中的数据隐写技术研究与应用[J]. 中华纸业, 2023, 44(17): 77-79.
- XU J Q. Research and Application of Data Steganography Technology in Printing Anti-Counterfeiting Packaging[J]. China Pulp & Paper Industry, 2023, 44(17): 77-79.
- [7] BUSA L S A, MOHAMMADI S, MAEKI M, et al. Advances in Microfluidic Paper-Based Analytical Devices for Food and Water Analysis[J]. Micromachines, 2016, 7(5): 86.
- [8] CARDOSO T M G, GARCIA P T, COLTRO W K T. Colorimetric Determination of Nitrite in Clinical, Food and Environmental Samples Using Microfluidic Devices Stamped in Paper Platforms[J]. Analytical Methods, 2015, 7(17): 7311-7317.
- [9] PHAN D T, ALI MOUSAVI SHAEGH S, YANG C, et al. Sample Concentration in a Microfluidic Paper-Based Analytical Device Using Ion Concentration Polarization[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 222: 735-740.
- [10] YAMADA K, SHIBATA H, SUZUKI K, et al. Toward Practical Application of Paper-Based Microfluidics for Medical Diagnostics: State-of-the-Art and Challenges[J]. Lab on a Chip, 2017, 17(7): 1206-1249.
- [11] SANTOS H A. Opinion Paper: Microfluidics Technique to Revolutionize the Drug Delivery Field: Current Developments and Applications[J]. Current Drug Delivery, 2015, 12(6): 642-644.
- [12] LIN Y H, CHANG C H. Glass Capillary Assembled Microfluidic Three-Dimensional Hydrodynamic Focusing Device for Fluorescent Particle Detection[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2021, 25(5): 42.
- [13] MESQUITA C R S, CHARELLI L E, BAPTISTA L S, et al. Continuous-Mode Encapsulation of Human Stem Cell Spheroids Using Droplet-Based Glass-Capillary Microfluidic Device for 3D Bioprinting Technology[J]. Biochemical Engineering Journal, 2021, 174: 108122.
- [14] 段冰玉, 赵璐. 色彩信息在药品包装中的应用安全[J]. 设计, 2022, 35(4): 152-154.
- DUAN B Y, ZHAO L. Application Safety of Color Information in Drug Packaging[J]. Design, 2022, 35(4): 152-154.
- [15] LONG Z W, WEN Y G, ZHOU J H, et al. No - Interference Reading for Optical Information Storage and Ultra-Multiple Anti-Counterfeiting Applications by Designing Targeted Recombination in Charge Carrier Trapping Phosphors[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(10): 1900006.
- [16] 李亚男. 食品包装材料安全问题探究[J]. 绿色包装, 2022(9): 36-39.
- LI Y N. Research on the Safety of Food Packaging Materials in China[J]. Green Packaging, 2022(9): 36-39.
- [17] CHENG H, CHEN L, MCCLEMENTS D J, et al. Recent Advances in the Application of Nanotechnology to Create Antioxidant Active Food Packaging Materials[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2024, 64(10): 2890-2905.
- [18] 魏建斐, 马国聪, 张安莹, 等. 明胶基碳点的热解法制备及其阻燃与防伪应用[J]. 纺织学报, 2023, 44(12): 106-114.
- WEI J F, MA G C, ZHANG A Y, et al. Preparation of Gelatin-based Carbon Dots by Pyrolysis and Their Application in Flame Retardancy and Anti-counterfeiting[J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(12): 106-114.
- [19] 申佳露, 林炜, 张金伟, 等. 木质磺酸钠基荧光碳量子点构筑皮革防伪层[J]. 皮革科学与工程, 2023, 33(6): 17-23.
- SHEN J L, LIN W, ZHANG J W, et al. Construction of Leather Anti-Counterfeiting Layer by Fluorescent Carbon Quantum Dots Prepared from Sodium Lignosulfonate[J]. Leather Science and Engineering, 2023, 33(6): 17-23.
- [20] 马子航, 张培培, 孔得贤, 等. 木质素碳量子点在防伪包装中的应用研究[J]. 包装工程, 2024, 45(3): 45-54.
- MA Z H, ZHANG P P, KONG D X, et al. Application of Lignin Carbon Quantum Dots in Anti-Counterfeiting Packaging[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(3): 45-54.
- [21] 汪杨. 变色室温磷光碳点的可控制备及其防伪应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.

- WANG Y. Controlled Preparation of Room-Temperature Phosphorescent Carbon Dots and Their Application in Anti-Counterfeiting[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [22] 陈云阳, 杨景智, 高智勇. 分散剂和树脂对导电油墨导电性能的影响[J]. 包装工程, 2022, 43(17): 36-41.
- CHEN Y Y, YANG J Z, GAO Z Y. Effect of Dispersant/Resin on Conductivity of Conductive Ink[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(17): 36-41.
- [23] MARTINEZ A W, PHILLIPS S T, BUTTE M J, et al. Patterned Paper as a Platform for Inexpensive, Low-Volume, Portable Bioassays[J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2007, 46(8): 1318-1320.
- [24] KLASNER S A, PRICE A K, HOEMAN K W, et al. Paper-Based Microfluidic Devices for Analysis of Clinically Relevant Analytes Present in Urine and Saliva[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2010, 397(5): 1821-1829.
- [25] AKSORN J, TEEPOO S. Development of the Simultaneous Colorimetric Enzymatic Detection of Sucrose, Fructose and Glucose Using a Microfluidic Paper-Based Analytical Device[J]. Talanta, 2020, 207: 120302.
- [26] JOKERST J C, ADKINS J A, BISHA B, et al. Development of a Paper-Based Analytical Device for Colorimetric Detection of Select Foodborne Pathogens[J]. Analytical Chemistry, 2012, 84(6): 2900-2907.
- [27] TAVARES M C, ALMEIDA OLIVEIRA K, DE FÁTIMA Â, et al. Paper-Based Analytical Device with Colorimetric Detection for Urease Activity Determination in Soils and Evaluation of Potential Inhibitors[J]. Talanta, 2021, 230: 122301.
- [28] 杨铖, 毛罕平, 李立治, 等. 多层纸基微流控芯片的设计及其对农药的可视化检测[J]. 农机化研究, 2020, 42(11): 58-64.
- YANG C, MAO H P, LI L Z, et al. Design of Multilayer Paper-Based Microfluidic Chip and Its Visual Detection of Pesticides[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(11): 58-64.
- [29] YU J H, JEONG S G, LEE C S, et al. Fabrication of a Paper-Based Analytical Device for Multiple Colorimetric Analysis via Inkjet-Printing and Paper-Cutting[J]. BioChip Journal, 2015, 9(2): 139-143.
- [30] KHAMCHAROEN W, KAEWJUA K, YOMTHIANGTHAE P, et al. Recent Developments in Microfluidic Paper-Based Analytical Devices for Pharmaceutical Analysis[J]. Current Topics in Medicinal Chemistry, 2022, 22: 2241-2260.