

柔性电子器件在智能食品包装中的应用

莫开宇 丁 静

(河池学院美术与设计学院, 广西 河池 546300)

摘要:近年来,柔性电子器件如RFID标签、柔性传感器等被应用于智能食品包装领域。文章阐述了国内外有关柔性电子器件在食品质量检测及食品包装中的应用研究进展,如食品中药物残留检测、微生物检测、新鲜度检测、贮藏环境监测、智能显窃启包装设计及物流跟踪等,并对柔性电子器件在智能包装领域的发展进行了展望。

关键词:智能包装;RFID标签;柔性传感器;柔性印刷电子技术;食品检测

Application of flexible electronic devices in intelligent food packaging

MO Kaiyu DING Jing

(School of Fine Arts and Design, Hechi University, Hechi, Guangxi 546300, China)

Abstract: In recent years, flexible electronic devices such as radio frequency identification (RFID) tags and flexible sensors have been applied in the field of intelligent food packaging. The research progress of the application of flexible electronic devices in food quality inspection and food packaging in China and abroad was clarified, such as drug residue detection, microbiological detection, freshness detection, storage environment monitoring, tamper-evident packaging design, and logistics tracking. The development of flexible electronic devices in the field of intelligent packaging was also prospected.

Keywords: intelligent packaging; RFID tag; flexible sensor; flexible and printed electronic technology; food quality detection

在现代科技迅猛发展的背景下,智能包装正引领包装产业迈向新的高度。智能包装的功能逐渐超越传统包装,不再局限于保护商品,而是通过集成多学科技术实现信息交互、环境监测和安全保障等多种功能。智能包装利用多学科以及人工智能等技术能自动检测并记录产品在运输和流通过程中的环境变化,大幅提升供应链的透明度和效率。特别是在食品供应链中,智能包装的应用极大地提升了食品安全和质量监控的效率。传统检测方法的局限性,如周期长、成本高和设备复杂,促使智能包装成为解决方案的最佳选择。随着柔性传感器和RFID标签等技术的发展,智能包装实现了从简单保护到综合监控的飞跃,确保了食品在整个供应链中的安全和品质。智能包装不仅是包装技术的一次革新,更是提升生活品质、保障食品安全的有力手段。文章拟阐述国内外有关柔性电子器件在食品质量检测及食品包装中的应用研究进展,并对柔性电子器件在智能包装领域的发展进行展望,以期对未来包装产业的发展提供依据。

1 智能食品包装

1.1 智能包装成为包装产业发展的新方向

传统包装的主要功能是保护与包裹商品。除了在保护商品免受外界环境影响方面发挥作用外,包装还能作为商品的一种营销工具,为消费者提供便利。5G时代已经到来,人们的生活水平不断提高,对食品、健康、物流等领域的需求日益增加,智能包装因此成为提高人们生活品质的工具之一。《中国包装工业“十三五”发展规划》^[1]和《关于加快我国包装产业转型升级的指导意见》^[2]中明确提出要推进智能包装一体化发展,智能包装领域进入快速发展阶段。

智能包装(intelligent packaging)是一项运用化学、物理、生物、材料科学、人工智能和电子信息等多个学科领域知识的新技术,旨在实现产品在运输和流通过程中内外环境变化的自动检测、传感与记录^[3]。智能包装突破了传统包装的功能与应用局限性,增加了成分检测、环境监测、防伪和防盗、物流跟踪等许多新的功能,具有响应各

基金项目:广西教育科学“十四五”规划高校创新创业教育专项课题(编号:2023ZJY1489)

通信作者:丁静(1976—),女,河池学院副教授,硕士。E-mail: ninhaoding@126.com

收稿日期:2024-05-08 **改回日期:**2024-11-23

种刺激和环境变化的能力。通过智能包装消费者也可获取更为翔实的商品信息。

1.2 智能食品包装的重要性

一个完整的食品供应链包括生产、加工、包装、贮藏、运输和分销等环节。供应链上的食品安全是制造商和消费者共同关注的焦点,其中包括食品品质和包装完整性等。传统实验室仪器用于食品品质检测的方法虽然准确,但检测周期长、成本高且设备复杂。此外,运输过程中的意外损坏和销售时的盗窃问题普遍存在,这些可能严重影响生产者的利润并降低食品供应的效率。传统的溯源手段主要是简单的商品识别技术,无法支持数据存储,难以实现对供应链中食品的有效监控^[4]。这些都促使人们迫切需要开发覆盖食品供应链全过程的监测系统,以控制和预防食源性疾病,以及其他各种对食品品质可能带来的损害,如环境条件的剧烈变化,包装的破损,外来物质的污染等,以确保消费者的健康和安全。因此,开发具有多种相应功能性的智能食品包装是解决上述问题的最佳策略之一。

2 柔性电子器件及柔性印刷电子技术

2.1 柔性电子器件可应用于智能食品包装

随着材料科学、计算机技术与人工智能等相关技术的飞速发展,智能包装作为集多种创新技术于一体的载体,其智能性与可靠性不断提升。通常来说,通过指示器、数据载体或传感器可实现智能包装系统。其中,数据载体的应用方向包括分发、储存、管理与产品追溯等,常用的数据载体有条形码和无线射频识别(radio frequency identification, RFID)标签^[5]。RFID 可通过固定频段的无线通信来识别物体,已经成为一种普及技术。传感器则利用识别元件感知检测信号,并按照一定规律通过转换元件将其转换成其他可用信号。传感器是一种可检测、定位或量化物理与化学等变化的电子器件,从而可以快速、无损地检测包装中的物质^[6-7]。

传统的电子器件价格较为昂贵,制备工艺(如电镀和蚀刻)耗时,且柔韧性较差,不能够很好地适应食品包装的不规则表面,因此无法大批量地应用于食品包装中^[8]。柔性印刷电子技术可以很好地解决上述问题,实现低成本生产电子器件,同时解决外力对电子器件造成物理损伤的问题^[9]。在基于柔性印刷电子技术开发的产品中,柔性传感器和 RFID 标签常被应用于智能食品包装中^[10-11]。

柔性电子器件不仅具有体积小、灵敏度高、响应快、识别准确等优点,还可将监测的化学信号转换为电信号,通过信息技术实现对响应指标的数字化监测^[12]。目前,越来越多的柔性传感器被应用于食品质量检测 and 储存环境监测,如食品中的药物残留、微生物、重金属离子含量等的检测,以及食品腐败和食品储存环境的温度、湿度、

气体的监测。RFID 标签已被应用至智能食品包装中,消费者只需使用手机或智能食品包装上的 RFID 读取器,即可轻松访问和输入有关产品的各种信息。这种创新使消费者与产品之间能够实时互动,而条形码或 QR 码无法实现这一点。可见,借助柔性传感器食品包装能够从传统的保护功能性产品转变为一种沟通工具^[13]。

2.2 柔性印刷电子技术

柔性印刷电子技术(flexible printing electronic technology)是一种令人振奋的前沿技术,其核心在于将电子功能性油墨印制在柔性衬底上,开创了电子器件制造的全新途径。这一新兴技术所采用的油墨为智能感知材料、导电材料等,可通过喷墨印刷、丝网印刷、凹版印刷、柔性版印刷等印刷技术印制在软包装材料上^[14]。因此,柔性印刷电子技术是制造柔性电子器件如显示器、RFID 标签、传感器等的一个重要技术突破。

2.3 RFID 标签

RFID 是新一代数据存储与通信技术,具有体积小、存储空间大、读取方便、无接触等优点。许多高端白酒品牌如五粮液、茅台等采用 RFID 标签,实现了与消费者的互动、防伪、追踪和溯源等功能,是行业内应用防伪科技的先行者。RFID 标签主要被运用于物料管理和产品可追溯性场景中。企业期待能通过降低 RFID 标签的制造成本,在工业生产中实现 RFID 标签以完全取代条形码和 QR 码。相关研究^[15]显示,在塑料薄膜上通过卷对卷(R2R)印刷 RFID 标签已取得了较好的效果,并实现了超低成本,每单位仅需 0.03 元。近年来,无芯片 RFID 印刷技术也被成功研发,成本仅需 0.01 元^[16]。在未来,柔性印刷 RFID 技术将持续向着更大存储容量和更高频段方向发展。

2.4 柔性传感器

传统刚性传感器在食品包装方面无法很好地应用,主要原因在于:刚性传感器固有的特性使其难以适应任意弯曲的表面和形状可变的部件(或可移动的部件);体积大、不可弯曲、质量重,难以与食品包装有效融合;可能无法与检测包装保持持续的接触,导致数据采集结果不准确或不可靠;制造工艺极为复杂,无法进行个性化和小批量生产^[17]。

应用于柔性传感器的器件材料与衬底材料均区别于传统刚性传感器。柔性传感器的衬底材料通常使用聚酰亚胺(PI)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、纸片、纺织材料等^[14]。器件材料分为无机材料、有机材料、金属材料、碳材料等。柔性传感器在弯曲或拉伸的情况下仍能保持其性能,与传统刚性传感器相比,具有质量轻、便携、灵活性强、可拉伸、可折叠和适应性强等优势。随着材料科学的快速发展,柔性传感器可实现高灵敏

度、快速响应、低功耗和长寿命等优良性能^[18]。

柔性印刷电子技术在物联网领域具有广泛应用前景。基于柔性印刷电子技术的传感器因其多种优越性能和低成本而备受关注,这使得将“物”与“网”连接成为可能,可实现在防伪包装、追踪溯源、冷链运输监测、电子票证、人体运动监测、可穿戴电子器件、人造皮肤和生物医药等领域的广泛新应用^[19]。

3 柔性电子器件在智能食品包装中的应用

3.1 药物残留检测

抗生素和农药是治疗牲畜和作物疾病的有效物质,但食品中的药物残留也可能对人类及其他生物造成威胁^[20]。Yang等^[21]通过丝网印刷制作了一种基于 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{COFs}@\text{MIPs}$ 复合材料的便携式电化学传感器,可用于快速、准确地检测四环素。该材料可以特异性识别并吸附四环素,在水、牛奶和鸡肉实际样品的测试中表现出较高的吸附能力和灵敏度。Timsorn等^[22]采用喷墨打印技术制备了基于功能化多壁碳纳米管/PEDOT:PS导电聚合物的室温气体传感器,分别将该传感器在室温下暴露于甲醛、乙醇、甲醇、氨、二氧化氮和硫化氢等多种挥发性有机化合物和气体中,测试其传感性能。结果表明,室温下该传感器对甲醛质量浓度在 $0\sim 246\text{ mg/m}^3$ 范围内具有最高的灵敏度和选择性。其传感机理基于碳纳米管与甲醛分子之间的相互作用和电荷转移过程,将该传感器应用于检测鲢鱼样品中的甲醛,与现有的常规化学检测方法相比,该方法具有简单、快速、可在室温操作、无化学废物、低成本和无损检测等优点^[22]。

3.2 微生物检测

在加工和贮藏过程中,食品都可能受到微生物的感染,这不仅会加速食品变质,还会引起食源性疾病。因此,快速检测微生物污染在食品工业中显得至关重要。通过将敏感元件固定在传感电极上构建微生物传感器,可对成分复杂的食品中的有害微生物进行特异性识别。大肠杆菌是导致条件性腹泻的常见原因,其可以使葡萄糖发酵产酸来破坏食物^[23]。Arreguin等^[24]利用丝网印刷技术获得了基于分子印迹聚合物的热生物传感器。由于分子印迹聚合物的特异性识别功能,该传感器对牛奶中的大肠杆菌具有良好的选择性识别,可实现对大肠杆菌的实时重复性检测。

除了对微生物的直接鉴定外,通过检测微生物的代谢产物来间接对微生物进行有效检测也是当前研究的一个突破方向。黄曲霉毒素是曲霉真菌代谢产物的一类,其中黄曲霉毒素 B_1 因具有较强的致畸性、致癌性和致突变性而成为最受关注的真菌毒素^[25]。Tang等^[26]设计了一种新型电化学免疫传感器,该免疫传感器对 AFM_1 (黄曲

霉毒素 B_1 羟基化代谢产物,牛奶和奶制品中的主要污染物)具有选择性,不受玉米赤霉烯酮、赭曲霉毒素和伏马菌素 B_1 等类似物的干扰。该免疫传感器的原理是基于碳电极上的竞争反应:在阴性样品中,单克隆抗体被纳米体捕获在工作电极表面;而在阳性样品中,单克隆抗体与 AFM_1 发生反应,导致工作电极表面捕获的单克隆抗体减少, AFM_1 浓度的改变使电化学信号发生变化。该方法不仅满足环境友好的需要,还具有较高的灵敏度,可以对牛奶中的 AFM_1 进行快速、低成本的检测。由于纳米体的特异性和稳定性,该免疫传感器具有良好的线性范围($0.25\sim 5.00\text{ ng/mL}$)和较低的检出限(0.09 ng/mL),符合监管标准的要求。

3.3 食品新鲜度检测

食品在成熟和变质过程中会释放出挥发性物质。柔性传感器可以通过检测挥发性物质来确定食品的新鲜度和变质程度,如检测富含蛋白质的产品中微生物释放的组胺,肉类产品中释放的硫代谢物,蔬菜和水果在贮藏过程中释放的乙烯等。Munir等^[27]报道了一种采用聚氨酯/ LiClO_4 修饰电极的组胺传感器,通过对3种不同的胺类化合物(苯胺、尸胺、腐胺)的检测证明了该传感器的选择性;对鲭鱼产品中组胺进行检测分析,验证了该传感器的准确性。Kim等^[28]提出了一种基于甲基红的比色传感器包装标签,采用可印刷油墨在纸介质上构建,用于检测苹果成熟过程中醛的释放,以实现对外包装中苹果成熟度的实时监测。醛和氢氧化物的亲核加成反应导致碱性变化,利用甲基红显示出颜色变化,随着苹果成熟度的增加(醛释放量增加),标签由黄色变为橙色,再变为红色(图1)。这类智能包装利用传感器标签的颜色变化直接反映食品的新鲜度,有助于消费者选择食品。



图1 不同成熟度苹果上的传感器标签颜色变化^[28]

Figure 1 Color changes of sensor label on apples with different ripeness

3.4 其他特定物质检测

除了检测与食品质量密切相关的成分外,还研发了许多不同的柔性电子器件用于检测食品中的其他有机化合物。例如,一些人对食品中的特定物质过敏;过量摄入某些有益化合物可能对身体构成潜在威胁;糖尿病患者和肥胖者必须控制蔗糖的摄入等。近年来,有研究^[29-36]

报道了可用于检测食品中各种物质如咖啡因、蔗糖、辣椒素、多酚、谷氨酸盐、维生素 C(图 2)和乙醇等的柔性电子器件。

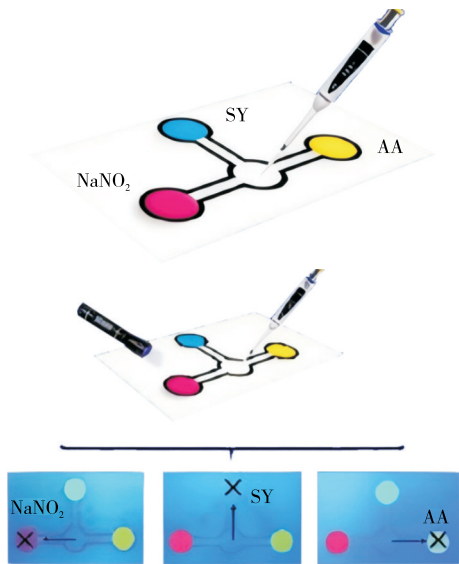


图 2 纸基微流控芯片对维生素 C(AA)、亚硝酸钠和日落黄(SY)的检测过程及结果

Figure 2 Detection process and results of vitamin C (AA), NaNO_2 , and sunset yellow (SY) by paper-based micro-fluidic chip

3.5 食品贮藏环境监测

在冷链物流中,恶劣的运输条件和贮藏不当可能会造成食品的腐败和浪费。Mahapatra 等^[37]开发了一种微孔 CuCr_2O_4 厚膜电容式湿度传感器,在室温、相对湿度 1%~98% 下实现了广泛的响应。该传感器灵敏度高,且表现出长期稳定性(至少 6 个月)。Wan 等^[38]在多孔聚四氟乙烯上制备了丝网印刷碳纳米管/银氧气传感器,气体可以直接通过多孔衬底扩散来实现快速检测。通过计时电流法评估了传感器在 2.1%~12.6% 氧气浓度下的性能,验证了其优异的灵敏度与线性,该传感器在测试中还表现出良好的重复性与稳定性。由于该传感器独特的多孔衬底,其响应时间可以低至 14 s,实现了快速氧气传感。因此,在 O_2 暴露时可以实现即时报警,如在食品包装突然破裂的快速响应方面具有较好的应用前景。

3.6 智能显窃启包装设计

Ke 等^[39]在聚对苯二甲酸乙二醇酯基板上通过丝网印刷水基银纳米线导电油墨,制备了用于智能显窃启包装的柔性传感器。该可弯曲传感器呈现出银纳米线层电阻与弯曲角度之间的相关变化,在 45° , 90° , 135° 的弯曲角度下,该传感器表现出稳定的灵敏度。此外,该传感器拥有出色的机械循环稳定性和黏附性。利用丝网印刷技术不

但能制作不同图案的传感器,还能通过设计器件结构来调控性能。这种柔性传感器能直接印在聚对苯二甲酸乙二醇酯基材包装上或黏附于包装的开合位置,达到对食品包装开启角度的监测作用(图 3)。Wang 等^[40]提出了 3 种不同的无电池、经济高效、基于 RFID 标签的方案用于显窃启包装设计。采用一个印刷开关来记录包装的情况,包装打开会导致该开关永久断开,从而激活 RFID 标签,RFID 阅读器可以接收到来自 RFID 标签的信号(图 4)。这种变化是不可逆转的,因此传感器可记忆特定的打开事件,而不需要任何额外的电子存储装置。此外,使用 RFID 标签的一个优点是 RFID 读取器能够同时感知数千个包裹。

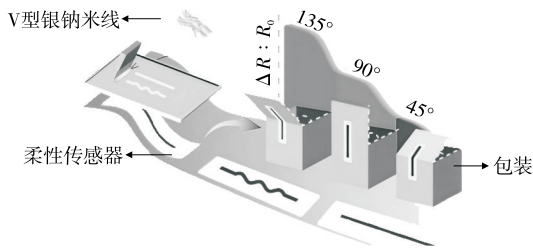


图 3 角度识别柔性传感器在智能显窃启包装中的应用原理

Figure 3 Application principle of flexible sensor for angle recognition in intelligent tamper-evident packaging

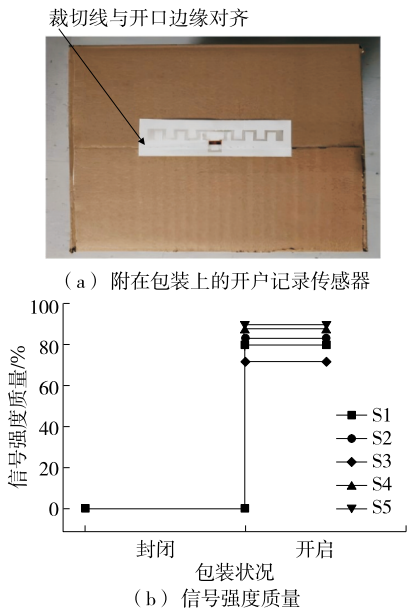


图 4 附在包装上的开启记录传感器及其信号强度质量测量

Figure 4 Opening recording sensor attached to package and its signal strength quality measurement

3.7 “传感—通信”复合功能

随着电商行业的迅速崛起,人工智能、数据分析等前沿科技与日常生活深度融合,以RFID技术为基础的智能包装已被广泛运用于身份验证系统、物流与仓储管理、新型零售管理、智能化医疗管理等领域^[41-44]。RFID技术使得消费者、生产者和产品能够互联,因此RFID标签已成为智能食品包装中最受欢迎的电子产品之一。通过将售前每个步骤中的可追溯信息(如生产信息、贸易信息、物流信息)写入RFID标签,食品信息可以即时追溯,从而保护生产者和消费者的利益,满足消费者对食品安全的心理需求,增强消费者的使用体验,并增加食品的价值(图5)^[40]。严格完成从“农场到市场”的整个食品过程的连续追溯一直是智能食品包装中印刷RFID标签的关键方向。

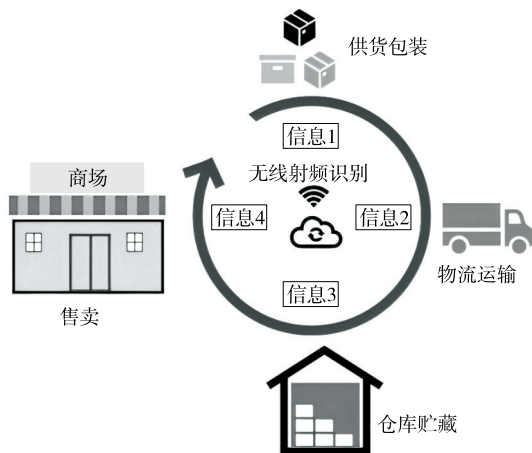


图5 RFID标签在区块链中的应用

Figure 5 RFID tag in blockchain applications

柔性传感器具有灵敏检测各种物质的能力,如果将柔性传感器集成到RFID标签中,通过合适的工艺印刷在食品包装上,可以实现“传感—通信”的复合功能。Escobedo等^[45]将应变传感器和温度传感器集成近场通信(NFC)标签,以半定量和可视化的方式检测温度和应变。开发的柔性NFC标签带有LED指示灯,若食物新鲜(即包装未充气),可以购买,LED灯会亮。若食物变质,包装开始膨胀,当智能手机读取器接近标签时,LED灯将不再亮起(图6)。此外,该系统还可以检测包装是否已被打开,实现智能显窃启功能。近场通信技术源于RFID技术与互通互联技术的融合,具备了与兼容设备在短距离内进行识别与数据交换的能力。当消费者启用内置NFC功能的手机时,只需将其与携带NFC标签的包装靠近一定距离,进行点对点感应,即可在手机上显示出食品的相关信息提示(如不利于心脏病、糖尿病、肥胖人群,以及花生过敏者等)。



图6 附在食品包装上的NFC应变传感器标签用于肉类产品的变质检测

Figure 6 NFC strain sensor tag attached to food package for meat spoilage detection

4 展望

柔性电子器件应用于智能食品包装领域中也面临着诸多挑战:新型柔性基板发展缓慢,聚合物基板价格昂贵且大部分不太环保,纤维素和纸张材料的粗糙表面与渗透性孔隙使得印刷成本较高、印刷性较差;制造柔性电子器件时应用的一些油墨包含易挥发的有机溶剂、有毒物质,从而限制了柔性电子器件在食品包装等领域的发展;接触式印刷技术虽然大多支持大规模R2R印刷,但存在油墨浪费问题;柔性电子器件产品会带来潜在的环境压力;在食品检测的具体应用中,制造商和消费者更喜欢标准化的检测设备,目前柔性电子器件的灵敏度、数据分析能力和评价标准参差不齐,难以大规模使用。

新型纳米材料可以解决柔性基板面临的许多问题。开发适用于不同柔性基板和不同印刷工艺的新型无毒、环保的导电油墨比修改基板更可行,因为导电油墨可以掺杂不同类型的物质,以提高油墨的整体性能。通过改性油墨实现电极功能化也是一个研究热点。此外,非接触式印刷技术的快速发展为柔性电子器件的制造提供了新的选择,特别是油墨直接书写和3D打印工艺。

近年来,新的基板、油墨和工艺的不断发展,进一步促进了柔性电子器件的广泛应用和商业化。为了适应食品级应用,柔性电子器件未来的研究重点是开发性能优异、环境友好且无毒的材料。与传统包装相比,应用柔性电子器件的智能包装可以适应更多的场景,但面对复杂的农业生产和不断变化的环境,缩小柔性电子器件的尺寸和厚度,提高其核心性能(如稳定性、机械性、响应性等)是实现柔性电子器件在智能食品包装领域广泛应用的关键方向。

参考文献

- [1] 中国包装联合会. 中国包装工业发展规划(2016—2020年)[EB/OL]. (2017-03-14) [2024-02-16]. <https://d. wanfangdata.>

- com. cn/periodical/ChpNaW5lclBlcmlvZGJjYWxDSEkyMDIzMDMyMRINbHNiejIwMTcwMTA0NhoOGMzOXo3Ym8%3D. China Packaging Federation. China packaging industry development plan (2016—2020)[EB/OL]. (2017-03-14) [2024-02-16]. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/ChpNaW5lclBlcmlvZGJjYWxDSEkyMDIzMDMyMRINbHNiejIwMTcwMTA0NhoOGMzOXo3Ym8%3D>.
- [2] 工业和信息化部, 商务部. 关于加快我国包装产业转型发展的指导意见[EB/OL]. (2016-12-19) [2024-03-06]. <https://m.mofcom.gov.cn/article/h/redht/201612/20161202273150.shtml>. Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Commerce. Guidance on accelerating the transformation and development of packaging industry in China[EB/OL]. (2016-12-19) [2024-03-06]. <https://m.mofcom.gov.cn/article/h/redht/201612/20161202273150.shtml>.
- [3] 付秋莹. 智能包装技术在食品行业的应用概述[J]. 印刷杂志, 2019(1): 49-53.
- FU Q Y. Intelligence packaging technologies in food industry[J]. Printing Field, 2019(1): 49-53.
- [4] GHAANI M, COZZOLINO C A, CASTELLI G, et al. An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 51: 1-11.
- [5] MÜLLER P, SCHMID M. Intelligent packaging in the food sector: a brief overview[J]. Foods, 2019, 8: 16.
- [6] KALPANA S, PRIYADARSHINI S R, LEENA M M, et al. Intelligent packaging: trends and applications in food systems[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 93: 145-157.
- [7] SOHAIL M, SUN D W, ZHU Z W. Recent developments in intelligent packaging for enhancing food quality and safety[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58: 2 650-2 662.
- [8] VANDERROOST M, RAGAERT P, DEVLIEGHERE F, et al. Intelligent food packaging: the next generation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 39(1): 47-62.
- [9] MOONEN P F, YAKIMETS I, HUSKENS J. Fabrication of transistors on flexible substrates: from mass-printing to high-resolution alternative lithography strategies[J]. Advanced Materials, 2012, 24(41): 5 526-5 541.
- [10] PREETHICHANDRA D M G, GHOLAMI M D, IZAKE E L, et al. Conducting polymer based ammonia and hydrogen sulfide chemical sensors and their suitability for detecting food spoilage[J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(4): 2200841.
- [11] FATHI P, KARMAKAR N C, BHATTACHARYA M, et al. Potential chipless RFID sensors for food packaging applications: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(17): 9 618-9 636.
- [12] RIM Y S, BAE S H, CHEN H J, et al. Recent progress in materials and devices toward printable and flexible sensors[J]. Advanced Materials, 2016, 28(22): 4 415-4 440.
- [13] POTYRAILO R A, NAGRAJ N, TANG Z X, et al. Battery-free radio frequency identification (RFID) sensors for food quality and safety[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(35): 8 535-8 543.
- [14] YUE C Z, WANG J Y, WANG Z Q, et al. Flexible printed electronics and their applications in food quality monitoring and intelligent food packaging: recent advances[J]. Food Control, 2023, 154: 109983.
- [15] JUNG M, KIM J, NOH J, et al. All-printed and roll-to-roll-printable 13.56-MHz-operated 1-bit RF tag on plastic foils[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(3): 571-580.
- [16] BEHERA S K, KARMAKAR N C. Chipless RFID printing technologies: a state of the art[J]. IEEE Microwave Magazine, 2021, 22(6): 64-81.
- [17] SHI Q F, HE T, LEE C K. More than energy harvesting—combining triboelectric nanogenerator and flexible electronics technology for enabling novel micro-/nano-systems[J]. Nano Energy, 2019, 57: 851-871.
- [18] BAO Z N, CHEN X D. Flexible and stretchable devices[J]. Advanced Materials, 2016, 28(22): 4 177-4 179.
- [19] 马艺宁, 李洁. 柔性传感器技术及其在智能包装中的应用[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 225-232.
- MA Y N, LI J. Flexible sensor technology and its application in intelligent packaging[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 225-232.
- [20] VERMA N, BHARDWAJ A. Biosensor technology for pesticides: a review[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 175: 3 093-3 119.
- [21] YANG Y K, SHI Z, WANG X M, et al. Portable and on-site electrochemical sensor based on surface molecularly imprinted magnetic covalent organic framework for the rapid detection of tetracycline in food[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133532.
- [22] TIMSORN K, WONGCHOOSUK C. Inkjet printing of room-temperature gas sensors for identification of formalin contamination in squids[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30: 4 782-4 791.
- [23] LACZKA O, BALDRICH E, MUÑOZ F X, et al. Detection of *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* using interdigitated microelectrode capacitive immunosensors: the importance of transducer geometry[J]. Analytical Chemistry, 2008, 80(19): 7 239-7 247.
- [24] ARREGUIN-CAMPOS R, FRIGOLI M, CALDARA M, et al. Functionalized screen-printed electrodes for the thermal detection of *Escherichia coli* in dairy products[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134653.
- [25] WANG X, NIESSNER R, TANG D P, et al. Nanoparticle-based immunosensors and immunoassays for aflatoxins[J]. Analytica Chimica Acta, 2016, 912: 10-23.
- [26] TANG X Q, CATANANTE G, HUANG X R, et al. Screen-printed electrochemical immunosensor based on a novel

- nanobody for analyzing aflatoxin M_1 in milk[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132598.
- [27] MUNIR M A, BADRI K H, HENG L Y, et al. The application of polyurethane- $LiClO_4$ to modify screen-printed electrodes analyzing histamine in mackerel using a voltammetric approach[J]. ACS Omega, 2022, 7(7): 5 982-5 991.
- [28] KIM Y H, YANG Y J, KIM J S, et al. Non-destructive monitoring of apple ripeness using an aldehyde sensitive colorimetric sensor[J]. Food Chemistry, 2018, 267: 149-156.
- [29] BOOPATHY G, KEERTHI M, CHEN S M, et al. Molybdenum trioxide embedded graphitic carbon nitride sheets modified electrode for caffeine sensing in green tea and coffee powder [J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 269: 124735.
- [30] BAGAL-KESTWAL D R, CHIANG B H. Platinum nanoparticle-carbon nanotubes dispersed in gum Arabic-corn flour composite-enzymes for an electrochemical sucrose sensing in commercial juice[J]. Ionics, 2019, 25: 5 551-5 564.
- [31] DENG Y F, LI Q Z, ZHOU Y H, et al. Fully inkjet printing preparation of a carbon dots multichannel microfluidic paper-based sensor and its application in food additive detection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(48): 57 084-57 091.
- [32] NUMPHUD W, CHIENHAVORN O, SIRIWATCHARAPIBOON W. Cyclic voltammetric determination of capsaicin by using electrochemically deposited tin and reduced graphene oxide on screen-printed carbon electrodes[J]. ScienceAsia, 2020, 46(5): 586-594.
- [33] MARTIN C S, MAXIMINO M D, PEREIRA M S, et al. Polyphenol detection in mate tea samples using iron tetrasulfonated phthalocyanine modified screen-printed electrode[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(22): 10 686-10 692.
- [34] TANG S K, WANG C, LIU K, et al. In vivo detection of glutamate in tomatoes by an enzyme-based electrochemical biosensor[J]. ACS Omega, 2022, 7(34): 30 535-30 542.
- [35] PIERINI G D, MACCIO S A, ROBLEDO S N, et al. Screen-printed electrochemical-based sensor for taxifolin determination in edible peanut oils[J]. Microchemical Journal, 2020, 159: 105442.
- [36] CINTI S, BASSO M, MOSCONE D, et al. A paper-based nanomodified electrochemical biosensor for ethanol detection in beers[J]. Analytica Chimica Acta, 2017, 960: 123-130.
- [37] MAHAPATRA P L, DAS S, MONDAL P P, et al. Microporous copper chromite thick film based novel and ultrasensitive capacitive humidity sensor[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 859: 157778.
- [38] WAN H, LIU X, WANG X Y, et al. Facile screen-printed carbon nanotube electrode on porous substrate with gold nanoparticle modification for rapid electrochemical gas sensing [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(6): 067514.
- [39] KE S H, GUO P W, PANG C Y, et al. Screen-printed flexible strain sensors with Ag nanowires for intelligent and tamper-evident packaging applications[J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(5): 1901097.
- [40] WANG W, SADEQI A, NEJAD H R, et al. Cost-effective wireless sensors for detection of package opening and tampering[J]. IEEE Access, 2020, 8: 117 122-117 132.
- [41] 章登科, 韩国程, 俞朝晖, 等. RFID技术及其在智能包装中的应用[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 6-11.
- ZHANG D K, HAN G C, YU Z H, et al. RFID technology and its application in intelligent packaging[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 6-11.
- [42] 姚金玲, 刘婕, 闫雪锋. 食品质量追溯中RFID多标签识别防撞算法[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 97-101.
- YAO J L, LIU J, YAN X F. Anti collision algorithm of RFID multi-tags identification in food quality traceability[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 97-101.
- [43] 刘宗妹. “区块链+射频识别技术”赋能食品溯源平台研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 102-107.
- LIU Z M. Research on "blockchain + RFID" enabling food traceability platform[J]. Food & Machinery, 2020, 36(9): 102-107.
- [44] 赵冬艳, 孙金才, 陈纪算. 新鲜度指示型包装技术在生鲜食品的应用进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(1): 1-9.
- ZHAO D Y, SUN J C, CHEN J S. Progress of freshness indicator used in fresh food packaging[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(1): 1-9.
- [45] ESCOBEDO P, BHATTACHARJEE M, NIKBAKHTNASRABADI F, et al. Flexible strain and temperature sensing NFC tag for smart food packaging applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(23): 26 406-26 414.