

智能包装的应用与发展趋势分析

刘辰雨, 张改梅, 宋晓利, 鲁建东, 曹玥, 石佳子

(北京印刷学院, 北京 102600)

摘要: **目的** 为促进智能包装技术发展, 进一步拓展智能包装的功能与应用领域。**方法** 总结指示器、条形码、射频识别、增强现实、传感器等智能包装技术的应用现状, 详细分析智能包装的市场需求和面临的机遇与挑战, 并提出未来的研究方向。**结论** 智能包装在传统包装的基础上结合了新的科学技术, 增加了包装的功能, 具有广阔的发展前景, 但其目前仍处于发展的初始阶段, 依然存在成本高、安全性不足、环境污染、技术应用范围不广等问题。通过分析智能包装的需求和探讨未来的研究方向, 进一步开发新技术与新型环保材料、加强信息交互, 是非常必要的。

关键词: 智能包装; 温度指示器; 射频识别技术; 增强现实; 传感器

中图分类号: TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)15-0080-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.15.013

Application and Development Trend of Intelligent Packaging

LIU Chen-yu, ZHANG Gai-mei, SONG Xiao-li, LU Jian-dong, CAO Yue, SHI Jia-zi

(Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to promote the development of intelligent packaging technology and further expand the function and application field of intelligent packaging. The application status of intelligent packaging technologies such as indicators, barcodes, radio frequency identification, augmented reality and sensors was summarized. The market demand for intelligent packaging and the opportunities and challenges were analyzed in detail, and the future research direction was proposed. Intelligent packaging combines new science and technology on the basis of traditional packaging, which increases the function of packaging, and enables the intelligent packaging to have broad development prospects. However, intelligent packaging is still at the start-up stage, and has disadvantages such as high cost, insufficient safety, environmental pollution and application limitation. It is necessary to further develop new technologies and new environmentally friendly materials and to strengthen information interaction by analyzing the needs of intelligent packaging and exploring future research directions.

KEY WORDS: intelligent packaging; temperature indicator; radio frequency identification; augmented reality; sensor

随着消费者对生活质量的需求越来越高, 传统包装已无法满足其发展的需要。活性包装的主动模式克服了传统包装难以保存新鲜食物的缺点, 而运用生物学、材料、人工智能、化学、物理和电子等多元学科

知识的智能包装技术^[1], 又增加了对环境因素“控制”、“识别”和“判断”的功能^[2]。随着信息技术、集成技术和互联网等新兴科技的发展, 智能包装也需进一步拓展应用市场, 探索新的研究方向^[3]。文中介绍智能包

收稿日期: 2019-03-24

基金项目: 北京印刷学院科技项目 (ED201804, EB201701)

作者简介: 刘辰雨 (1995—), 女, 北京印刷学院硕士生, 主攻包装材料。

通信作者: 张改梅 (1975—), 女, 北京印刷学院教授, 主要研究方向为现代包装技术、纳米无损检测等。

装的发展历史, 总结多种智能技术在包装领域的应用, 并且分析智能包装技术面临的机遇和挑战, 针对智能包装具有的成本高、安全性不足、环境污染、技术应用范围不广等问题进行了分析。

1 智能包装概述

20 世纪 50 年代, 智能结构与智能材料的概念被提出, 智能材料是集感知、驱动和信息处理为一体的体系, 具有自诊断、自感识、自适应、自修复等智能性能^[3]。而智能结构是以智能材料作为传感元件和作动原件, 并具有感知外界刺激强度的功能, 可以对外界环境条件做出响应或驱动的, 具有智能属性的一类结构^[4]。随着智能材料和智能结构的发展, 其应用范围拓展到了包装领域而产生了智能包装的概念。1992 年, 在伦敦的“智能包装”会议上, 给智能包装定义为: 在一个包装、一个产品或产品-包装的组合中, 有一集成化元件或一项固有特性, 通过此类元件或特性把符合特定要求的职能成分赋予产品包装的功能中, 或体现于产品本身的使用中^[3]。

常用的智能包装可分为功能材料型智能包装、功能结构型智能包装和信息型智能包装。功能材料型智能包装是指通过应用对环境因素具有识别和判断功能的新型智能包装材料, 改善和增加包装的功能; 功能结构型智能包装则通过增加或改进部分包装结构, 提升包装的安全性、可靠性并增加部分自动功能, 其中最典型的是自动加热和自动冷却包装; 信息型智能包装主要是指能提供产品质量及储存、运输、销售等包装信息的新型包装, 代表技术有二维码、射频识别技术等^[1]。

智能包装还可以分为药物智能包装、化妆品智能包装和食品智能包装等不同方向的应用。智能包装技术则可以分为以各种指示性标签为代表的诊断或检测技术, 以及可以传递信息的信息技术^[3]。

智能包装的分类多样, 技术广泛, 运用到多种学科知识, 并且融合新兴科技, 不断地提高和发展。

2 智能包装技术的应用现状

在过去的 20 年中, 活性包装的普及标志着包装主要模式由被动转变为主动, 其常用于保质期较短、质量受环境因素影响较大的食品产品的包装。虽然活性包装具有主动保护的功能, 但并不是严格意义上的智能包装。智能包装加入了机械、化学、电子等更多新技术, 具有一些特殊的性能。常见的智能包装技术有指示器、条形码、射频识别标签、传感器、纳米技术、电子印刷等^[5]。

2.1 指示器 (指示标签)

指示器是通过即时的视觉变化向消费者传达包装中某种物质存在与否等信息, 能够显示出 2 种或多种物质之间的反应程度, 或某一类特定物质的浓度相关的信息。智能包装的指示器基本可以概括为 3 种类型: 时间-温度指示器 (Time-temperature Indicator, TTI)、气体指示器和新鲜度指示器^[6]。

TTI 是一种可以感知和记录环境变化和产品质量变化的装置, 按照工作机理分为扩散型、聚合物型、酶型、UV 触发型、微生物型以及纳米型等^[7], 几种类型的 TTI 见图 1^[8]。

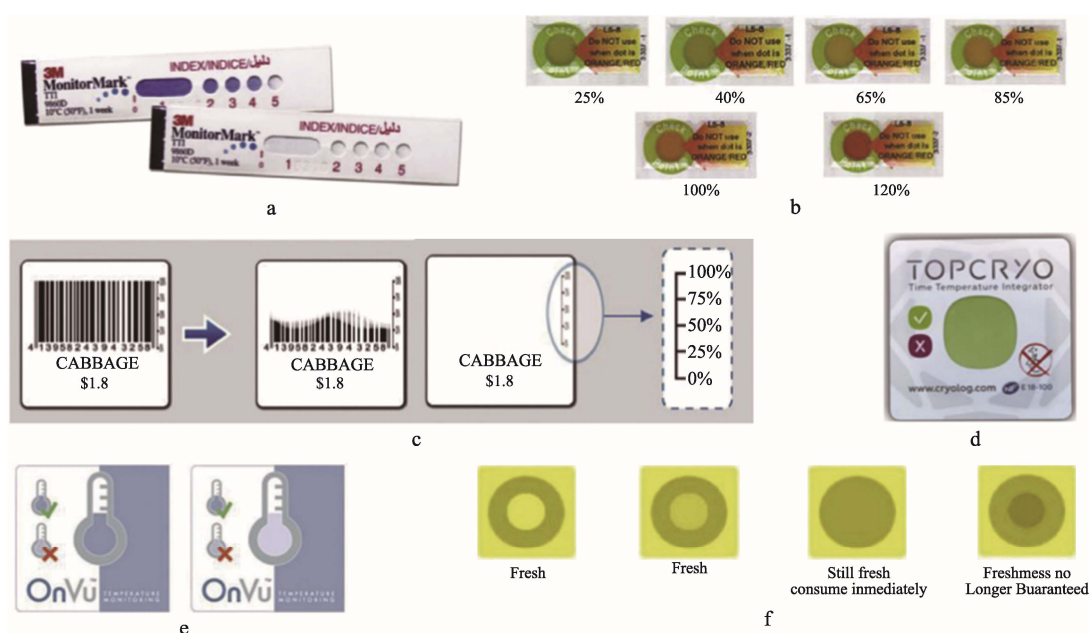


图 1 几种不同类型的 TTI
Fig.1 Several different types of TTI

Pereira 研究开发了一种以掺杂花青素的 PVA/壳聚糖聚合物为基础的时间-温度指示器,通过检测包装内食品在储存温度不合适时 pH 值的变化,来间接指示食品质量的变化^[9]; Dan Wu 等人开发了基于脲酶和尿素之间的化学反应的 TTI 系统,并建立了 TTI 颜色随时间和温度改变而发生变化的数学关系公式^[10]; Koutsoumanis 证明微生物 TTI 可以监控病原体的生长,当细菌超过限度时会自动传达给消费者^[11]。

目前常用的气体指示器能够监测的气体,包括水果及奶制品中残留的氧气和产生的二氧化碳,鱼、肉类食品产生的挥发性含氮化合物和硫化氢,果蔬食品产生的乙烯^[12]。例如 Jung 等人所制的体现泡菜新鲜度的指示器,其依据是在泡菜发酵过程中乳酸菌生长代谢产生的二氧化碳会影响 pH 变化^[13]。新鲜度指示器可以提供有关微生物生长情况,或发生化学变化的产品质量信息,例如用于海鲜的新鲜度指标,是用电导率和 pH 变化等方法来检测包装内挥发性盐基总氮(Total Volatile Basic Nitrogen, TVB-N)的含量^[8, 14]。

2.2 数据载体

数据载体设备,也称为自动识别设备,常放置在第三级包装上(多箱容器、运输箱、托盘、大型纸板包装)^[14]。这类设备中被广泛使用以及有长足发展的有条形码识别技术、射频识别技术、近场通讯技术、增强现实技术等。

条形码通过“条”、“空”及对应的数字规则排列而成,包含着产品的内部信息,可以在食品杂货行业的包装中用于追溯产品。在医院,条形码可用于确保在正确的时间给予患者正确剂量的药物,在使用和管理

之前,可以立即扫描药物条形码和患者的识别标签,并通过无线局域网(LAN)发送信息以检查其准确性。

射频识别标签(Radio Frequency Identification, RFID)通过天线架起的空间来进行电子标签和读写器之间的信息数据传输,是一种不需要直接接触即可进行传输与识别的技术。RFID 除了在停车收费、门禁管理、图书管理等场合应用之外,在包装产业中也有所应用^[15-16]。Feng 等人研究了一种全印刷无芯片射频识别传感器标签,用于近程物品识别和湿度监测^[17]; Guo 等人提出了一种基于 RFID 的智能决策支持系统架构,可以方便于在供应链中进行生产决策和操作生产物流^[18]; Zhang J 等人介绍了一种用于检测金属产品腐蚀和表征的超高频 RFID 传感器系统^[19]。RFID 技术在农产品中也具有先进的保护和监测作用^[20]。还有从 RFID 技术演变而来的近场通讯技术(Near Field Communication, NFC),可以在移动设备等智能工具间进行近距离无线通信,方便包装产品的溯源与管理^[21]。

增强现实技术(Augmented Reality, AR)是将实体信息通过电脑科技模拟仿真后再叠加于现实世界的新型技术,在包装中具有物流追溯、多维互动、个性化服务、精准营销、智能防伪等功能,还能够替代纸质的说明书,增强产品的信息维度,使包装的推广社交化,使营销手段游戏化^[22-23]。2013—2016年,可口可乐公司曾使用 AR 投放广告或应用 AR 小游戏进行营销和推广;裕同采用 AR 系统的多方式智能聚焦技术提高图片摄取的清晰度,加快了包装产品的识别速度^[22];张改梅等人开发了一种基于 AR 技术的有机番茄智能包装用 APP,扫描包装上的 logo 后,即可显现出如图 2 所示的多种 AR 效果^[23]。

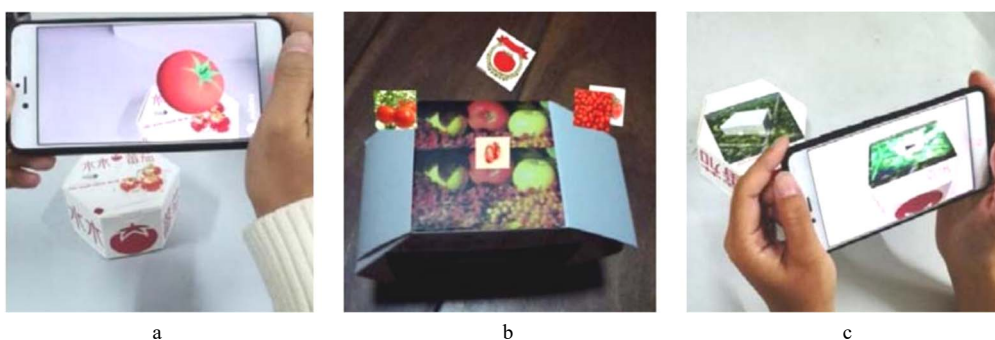


图2 智能包装 app 的 AR 效果展示
Fig.2 AR effect display of intelligent packaging app

2.3 传感器

传感器是将被测量参数转换成电参数的装置,具有探测和定位的功能,或者对能量和物质进行定量^[24]。将智能装置应用到包装中的传感器技术主要有生物传感器和气体传感器 2 种。加拿大的 Flex Alert 开发了一种商用柔性生物传感器,专门检测供应链里

包装食品中的大肠杆菌 O157、李斯特菌属、沙门氏菌属和黄曲霉毒素等毒素^[25]。Borchert 等人开发了一种光化学 CO₂ 传感器,由塑料屏蔽物中的 Pt-TFPP 染料和比色 pH 指示剂 α -萘酚酞组成,并与作为相转移剂的四辛基或十六烷基三甲基氢氧化铵结合,可以在 4℃下保持对 CO₂ 的敏感性持续近 3 周^[26]。而传感器和纳米技术进一步结合后产生的纳米传感器,性能进

一步改善,具有小尺寸、高精度的优势,产生了更为广泛的应用^[27]。

3 智能包装技术展望

3.1 智能包装的发展趋势

智能包装正在蓬勃发展,拥有动态且潜在的高增长市场。移动技术的进步和智能手机的普遍应用,将各种智能技术进一步推广。据推测,全球智能包装市场将在 2011—2021 年间翻一番,其将先以每年 8% 的速度增长,并在 2016 年达到 17 230 万美元,之后将以每年 7.7% 的速度增长,在 2021 年达到 246.5 亿美元,到 2024 年,全球智能包装市场预计将达到 267 亿美元,对电子智能包装的需求将增长到超过 14.5 亿美元^[28]。未来 10 年间各国的智能包装市场规模见图 3。预测将拥有最大规模智能包装市场的是美国,其年增长率为 7.4%,可达到 36 亿美元;第二大市场是日本,规模达到 23.6 亿美元;之后依次为澳大利亚,16.9 亿美元;德国,14 亿美元;英国,12.7 亿美元^[29]。

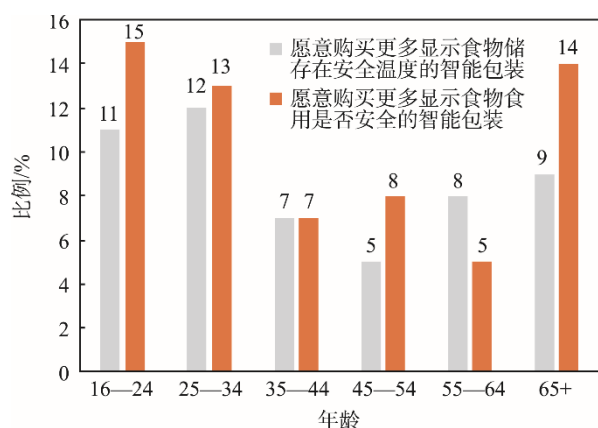


图 3 不同年龄段群体对于食品智能包装购买意愿的比例
Fig.3 Proportion of different age groups' willingness for purchasing intelligent food packaging

在我国,2016 年智能包装的市场规模为 1366.53 亿元,2017 年为 1488.09 亿元,同比增长 8.90%,见图 4。目前,智能包装领域中最大规模的市场为 RFID 技术,2017 年 RFID 市场规模已达到 752.4 亿元;到 2023 年,预测中国智能包装行业市场规模将突破 2000 亿元^[30]。

随着市场的迅速发展也出现各种新的问题,同时还有消费者对于包装功能越来越高的需求,都需要继续挖掘出更具有发展潜力的研究方向。

3.2 智能包装面临的机遇与挑战

3.2.1 保障食品及药品安全

食品安全及药品安全问题在国内外都引起了广泛关注,越来越多的消费者愿意购买可以显示质量的

智能包装所包装的产品。参考 mintel group 2018 年统计的消费者对于智能包装的需求分析,有 28% 的英国消费者在购物时会阅读标签上的保质期期限,有 24% 的人认为能够监测食品新鲜度的包装是最有用的;同时有 15% 的英国消费者愿意购买具有新鲜度指示器的包装,而此数据在 2014 年仅为 10%。调查所得英国不同年龄段群体对于智能包装购买意愿的比例见图 3,越来越多的年轻人愿意购买能够显示食物是否安全的智能包装所包装的食品。

智能包装技术拥有方便消费者选择安全可靠的食物及药品,延长食品保质期的能力,且其具有的防伪功能在如今食品市场管理体制不健全,仿冒和伪劣产品层出不穷的情况下,具有极大的优越性^[6]。除此之外,智能包装的追踪功能也逐渐受到消费者的青睐,在美国,74% 的有 2 岁以下孩子的父母,会对一款可以让他们追踪孩子的用药剂量和救治记录的 app 感兴趣 (mintel group)。

3.2.2 减少食物浪费

食物是生物的基本需求之一,非洲国家因为恶劣的气候变化,常年遭受饥饿,但是同时另外一些国家却存在大量的食物浪费情况。2018 年食物浪费率最高的国家有英国、德国、马来西亚、新加坡、芬兰、美国、澳大利亚、丹麦、加拿大、挪威,食物浪费现象最为严重的 5 个国家的人均浪费量见图 4。

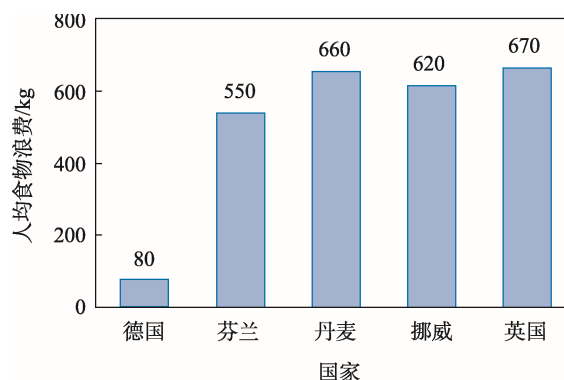


图 4 2018 年各国食物人均浪费量
Fig.4 Per capita waste of food in different countries in 2018

食物浪费会发生在食品供应链的不同环节,一旦食品进入供应链,其包装就开始在保证其安全性、新鲜度等方面发挥重要作用,因此加强包装的密封性以及研究腐坏食品的处理方式,是减少食物浪费的必要手段。

3.2.3 节约智能包装成本

智能包装越来越受到品牌商和终端用户的青睐,但其成本一直以来都是制约市场应用扩大的瓶颈,特别是对于大宗消费商品。目前智能包装得到大量应用的是那些对包装成本不敏感的领域,比如医药包装、个性化包装等^[31]。元器件的研发以及生产成本和包装

可承受的价格互相矛盾是主要问题。

3.2.4 提高智能包装技术实用性

用于包装的类似 QR 码、RFID、NFC、增强现实等技术所获得的市场越来越大。据 grand view research 统计,随着仿冒问题的增多,亚洲制造商已经开始采用 RFID 和 NFC 技术,能够使得公司追踪其发出的货物来克服仿冒问题。其中 NFC 技术预计将成为增长最快的智能包装领域,2016 年至 2024 年的复合增长率将超过 12%,但是这些技术的应用范围仍然较小,需要进一步提高其实用性。

3.2.5 开发环保包装材料

智能包装所产生的垃圾大部分是不能进行持续回收和利用的,因此智能包装的研究设计的主要挑战之一,是推进包装废料的处理和回收,并且开发保留其原有传感和通信等智能功能,但更为环保的生物可降解材料。而在食品安全领域,探索能够保持其原有的机械性能和阻隔性能的活性材料也很重要,这样可以保证包装材料在与食品直接接触时,不会有其他有害物质转移到食品中。

3.2.6 完善相关法律法规

除了历史和技术因素外,智能系统在包装行业中的应用不得不面临一些来自消费者的质疑以及法律上的缺陷。许多消费者质疑智能包装的功能性,甚至会担心还不成熟的智能技术是否会影响所包装物品的质量,比如食品智能包装中的智能器件、智能材料会不会产生对食品有害的物质。而智能包装相关的专利技术也需要法律手段去维护,拥有一套完善的标准法规对包装安全和信息安全至关重要,不仅维护消费者的利益,也是为了能够进一步普及智能包装技术^[13]。

3.3 智能包装未来的研究方向

1) 开发新型传感器。在智能包装中应用的传感器类型比较有限,且存在技术难度等问题,检测效果不能完全达到理想状态。未来需继续开发物理性能更好的柔性可伸缩物理传感器^[32],深入研究传感机制,不断开发更多的智能传感体系,以增加传感器的应用领域。

2) 开发纳米技术^[33]。纳米技术能够大大提高材料的阻隔性,加强材料的耐热性和机械性,并且使材料的表面具有很强的抗微生物与抗菌性能,还可以检测食品中微生物指标和生化指标的变化。新型纳米传感器技术加强了供应链的终端信息采集,从而大大提高供应链管理效率,降低了物流和库存成本,促进供应链的技术优化^[34]。纳米复合材料、纳米电池、纳米纤维素等也会增加智能包装的功能效果^[35]。

3) 发展柔性印刷技术和集成电子技术。柔性印刷技术为电路和传感器提供了大面积、高效率的生产能力,这些电路和传感器可共同覆盖在机械柔性基片

上,对于实现大规模的智能包装生产非常重要^[36]。研究集成技术可以将检测不同物质的指示器等元件集合在同一包装中,达到多方位保证产品质量的目的。开发在电子器件中应用的功能性油墨也具有巨大的发展前景^[37]。

4) 开发天然活性的智能包装材料^[38]。除了生物可降解包装材料的开发,未来在微生物活性包装领域的研究还应更多地集中于天然的抗菌剂、生物防腐剂和生物降解溶液等领域,更全面地保证产品质量^[39]。

5) 加强信息交互。开发互联网+、云计算、大数据等工业 4.0 时代的智能系统架构,将它们与智能包装技术相结合,实现从自动化包装到即时反馈检测的信息数据,再到追踪运输全过程,最后到个性化验货的自动化、智能化体系^[30]。为了更安全有效地将互联网新兴技术应用到智能包装领域中,就要实现深度防御策略和强大的网络安全系统,重视网络安全,提升其发展潜力^[39]。

4 结语

智能包装在传统包装的基础上增添了新时代的科技手段,不仅加强了传统包装保护、储存、方便运输等功能,还增添了很多新的智能化功能。智能指示器、传感器等提醒消费者产品质量信息,RFID、NFC 标签帮助物流监管、信息获取以及预防假冒伪劣产品,AR 技术等则增添了包装的交互性、趣味性,纳米技术、电子印刷又可以降低智能包装的成本,扩大生产规模。目前的智能包装水平还处于初级阶段,在应用过程中仍然遇到很多问题和挑战,因此也需要进一步地去发展更多的先进技术,开发新的智能材料,并且与互联网深度结合,强化法律规范,减少浪费和污染,改变商业模式,提高人们对智能包装的认识,扩大市场需求,拓展智能包装的功能及效用。

参考文献:

- [1] 崇岚,潘军辉,熊鹏文. 智能包装技术的应用现状和前景[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 159—164.
CHONG Lan, PAN Jun-hui, XIONG Peng-wen. Development and Applications of Intelligent Packaging Technology[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 159—164.
- [2] 张改梅. 智能包装技术及其应用领域[J]. 印刷技术, 2007(29): 19—22.
ZHANG Gai-mei. Intelligent Packaging Technology and Its Application Fields[J]. Printing Technology, 2007(29): 19—22.
- [3] 许文才,李东立. 智能包装技术的发展与应用[J]. 印刷工业, 2009(4): 11—14.
XU Wen-cai, LI Dong-li. Development and Application of Intelligent Packaging Technology[J]. Printing

- Industry, 2009(4): 11—14.
- [4] 张建辉. 智能结构的研究现状及其前景展望[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(21): 5886—5890.
ZHANG Jian-hui. Research Status and Prospects of Intelligent Structure[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(21): 5886—5890.
- [5] FANG Z, ZHAO Y, WARNER R D, et al. Active and Intelligent Packaging in Meat Industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 61(Complete): 60—71.
- [6] SOHAIL M, SUN D W, ZHU Z. Recent Developments in Intelligent Packaging for Enhancing Food Quality and Safety[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018(1): 1—41.
- [7] 谢勇, 刘林, 王凯丽, 等. 包装用智能标签的应用及研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(19): 121—126.
XIE Yong, LIU Lin, WANG Kai-li, et al. Application and Research Progress of the Intelligent Label for Packaging[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19): 121—126.
- [8] POYATOSRACIONERO E, ROSLIS J V, VIVANCOS J L, et al. Recent Advances on Intelligent Packaging as Tools to Reduce Food Waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 3398—3409.
- [9] PEREIRA Jr V A, DE ARRUDA I N Q, STEFANI R. Active Chitosan/PVA Films with Anthocyanins from Brassica Oleraceae (Red Cabbage) as Time-Temperature Indicators for Application in Intelligent Food Packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 180—188.
- [10] WU D, WANG Y, CHEN J, et al. Preliminary Study on Time-Temperature Indicator (TTI) System Based on Urease[J]. Food Control, 2013, 34(1): 230—234.
- [11] KOUTSOUMANIS K P, GOUGOULI M. Use of Time Temperature Integrators in Food Safety Management[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 43(2): 236—244.
- [12] 郭鹏飞, 何昊葳, 付亚波, 等. 气敏类智能包装标签技术的研究进展[J]. 包装工程, 2018, 39(11): 13—18.
GUO Peng-fei, HE Hao-wei, FU Ya-bo, et al. Research Progress of Gas Sensitive Smart Packaging Labels[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(11): 13—18.
- [13] JUNG J, LEE K, PULIGUNDLA P, et al. Chitosan-based Carbon Dioxide Indicator to Communicate the Onset of Kimchi Ripening[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 54(1): 101—106.
- [14] 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.
- [15] A Big Data Approach for Logistics Trajectory Discovery from RFID-enabled Production Data[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 165: 260—272.
- [16] PAULUS R M. Inkjet Printed Paper Based Frequency Selective Surfaces and Skin Mounted RFID Tags: the Interrelation between Silver Nanoparticle Ink, Paper Substrate and Low Temperature Sintering Technique[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 3(9): 2132—2140.
- [17] FENG Y, XIE L, CHEN Q, et al. Low-Cost Printed Chipless RFID Humidity Sensor Tag for Intelligent Packaging[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(6): 3201—3208.
- [18] GUO Z X, NGAI E W T, YANG C, et al. An RFID-based Intelligent Decision Support System Architecture for Production Monitoring and Scheduling in a Distributed Manufacturing Environment[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 159: 16—28.
- [19] ZHANG J, TIAN G Y. UHF RFID Tag Antenna-based Sensing for Corrosion Detection & Characterization Using Principal Component Analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(10): 4405—4414.
- [20] KUMARI L, NARSAIAH K, GREWAL M K, et al. Application of RFID in Agri-food Sector[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 43(2): 144—161.
- [21] 赵彬, 杨祖彬, 崔爽. 信息型智能包装标签技术的研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 77—82.
ZHAO Bin, YANG Zu-bin, CUI Shuang. Research Progress of Smart Packaging Labels of Information Type[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 77—82.
- [22] 程雁飞. 增强现实在智能包装中的应用趋势[J]. 包装工程, 2018, 39(7): 27—30.
CHENG Yan-fei. Application Trend of Augmented Reality in Intelligent Packaging[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(7): 27—30.
- [23] MAKRI S, KARAGIANNIS P, KOUKAS S, et al. Augmented Reality System for Operator Support in Human-Robot Collaborative Assembly[J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 61—64.
- [24] 张改梅, 曹玥, 王璐, 等. 基于增强现实技术有机番茄智能包装的研究及开发[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 1—5.
ZHANG Gai-mei, CAO Yue, WANG Lu, et al. Research and Development of Intelligent Packaging for the Organic Tomato Based on Augmented Reality Technology[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(21): 1—5.
- [25] 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.
- [26] BORCHERT N B, KERRY J P, PAPKOVSKY D B. A CO₂ Sensor Based on Pt-porphyrin Dye and FRET Scheme for Food Packaging Applications[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 176: 157—165.
- [27] ZHU C, YANG G, LI H, et al. Electrochemical Sensors

- and Biosensors Based on Nanomaterials and Nanostructures[J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 87(1): 230—249.
- [28] DAS R, CHANSIN G. Smart Packaging Comes to Market: Brand Enhancement with Electronics 2014—2024, IDTechEx, 2013.
- [29] GUILLERMO F, ISMAEL S, CARRASCO Raúl, et al. Intelligent Packaging Systems: Sensors and Nanosensors to Monitor Food Quality and Safety[J]. *Journal of Sensors*, 2016: 1—8.
- [30] 智能包装技术基础形成 市场规模有望突破 2000 亿 [EB/OL]. http://www.cpp114.com/news/newsShow_266595.htm.
- [31] TRUNG T Q, LEE N E. Flexible and Stretchable Physical Sensor Integrated Platforms for Wearable Human-Activity Monitoring and Personal Healthcare [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4338—4372.
- [32] DASGUPTA N, RANJAN S, MUNDEKKAD D, et al. Nanotechnology in Agro-food: from Field to Plate[J]. *Food Research International*, 2015, 69: 381—400.
- [33] ZHANG J, LIU X, NERI G, et al. Nanostructured Materials for Room-temperature Gas Sensors[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(5): 795—831.
- [34] BOWLES M, LU J. Removing the Blinders: A Literature Review on the Potential of Nanoscale Technologies for the Management of Supply Chains[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2014, 82(1): 190—198.
- [35] NECHYPORCHUK O, BELGACEM M N, BRAS J. Production of Cellulose Nanofibrils: A Review of Recent Advances[J]. *Industrial Crops and Products*, 2016, 93: 2—25.
- [36] CHEN K, GAO W, EMAMINEJAD S, et al. Printed Carbon Nanotube Electronics and Sensor Systems[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4397—4414.
- [37] SECOR E B, HERSAM M C. Emerging Carbon and Post-carbon Nanomaterial Inks for Printed Electronics[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2015, 6(4): 620—626.
- [38] WU W. Inorganic Nanomaterials for Printed Electronics: a Review[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(22): 7342—7372.
- [39] SCHAEFER Dirk, et al. Smart Packaging: Opportunities and Challenges[J]. *Procedia CIRP*, 2018(72): 1022—1027.