

气敏类智能包装标签技术的研究进展

郭鹏飞, 何昊葳, 付亚波, 许文才

(北京印刷学院 印刷包装材料与技术北京市重点实验室, 北京 102600)

摘要: **目的** 研究气体监测类智能包装标签技术的原理、特点及研究进展。**方法** 综述气敏类智能包装中泄漏指示标签、新鲜度指示标签、射频识别标签的研究现状及应用。重点阐述面向 CO₂ 气体监测和识别的智能包装的分类及其制作方法, 并对 CO₂ 传感器在气敏类智能包装中的应用进行阐述。**结论** 近年来智能包装标签技术方面取得了大量研究成果, 推动了食品保鲜包装行业的快速发展。气敏类智能包装能够有效检测和监测被包装食品的质量及安全性, 对推进包装技术的信息化与智能化起到了重要作用。CO₂ 传感器在食品新鲜度智能监测方面具有广泛应用, 也是未来食品保鲜包装技术领域的发展方向。

关键词: 智能包装; 气敏类; CO₂; 指示标签; 传感器

中图分类号: TB489; TB485.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)11-0013-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.11.003

Research Progress of Gas Sensitive Smart Packaging Labels

GUO Peng-fei, HE Hao-wei, FU Ya-bo, XU Wen-cai

(Beijing Key Lab of Printing & Packaging Materials and Technology, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to review the principle, characteristics and research progress in gas sensitive smart packaging labels. The research status and application of leakage indicator, freshness indicator and radio frequency identification labels in gas sensitive smart packaging were summarized. The classification and production method of smart packaging oriented to CO₂ gas monitoring and identification were emphatically elaborated, and the application of CO₂ sensor in gas sensitive smart packaging was elaborated. In recent years, a large number of research results in smart packaging labels have promoted the rapid development of the food preservation packaging industry. Gas sensitive smart packaging can effectively detect and monitor the quality and safety of packaged food, and played an important role in promoting the informatization and intelligentization of packaging technology. CO₂ sensor not only has a wide range of applications in food freshness smart monitoring, but also is the development direction of future food preservation packaging technology.

KEY WORDS: smart packaging; gas sensitive type; CO₂; indicator labels; sensor

随着人们生活质量的提高, 消费者对食品的新鲜度、风味稳定性和贮存期有了更高的要求, 同时希望食品包装能够监测食品内部质量变化, 并满足可追溯性要求。氧气、二氧化碳和氮气是食品气调包装中常用的 3 种气体, 水产类产品在贮藏过程中, 都伴随着硫化氢和氨类等气体或气味的释放。由此, 可通过包装上某种特定气体敏感性智能标签的颜色变化或与

传感器的信息通讯, 来有效监测被包装食品的质量、新鲜度及安全性, 防止由于食品的过期、污染、泄露、变质等原因造成的消费者不适, 以满足消费者需求, 使人们放心购买和使用产品。气敏型智能包装是一个不断发展的领域, 在保护和改善食品特性方面发挥着重要作用, 有利于完善食品安全标准体系, 有利于促进智能包装技术的进步。

收稿日期: 2017-12-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0204200); 北京市协同创新计划 (04190117019)

作者简介: 郭鹏飞 (1992—), 男, 北京印刷学院硕士生, 主攻功能包装材料与技术。

通信作者: 付亚波 (1981—), 男, 博士, 北京印刷学院副教授, 主要研究方向为功能包装材料与技术。

1 气敏型智能包装概述

智能包装指在传统包装中,采用新型的包装材料、结构或形式,以保证内装物的质量,避免流通过程中可能受到的损坏,对商品的质量和安全性进行积极干预与保障,同时记录与反馈产品质量信息及包装内部环境的情况^[1-2]。智能包装技术是集合了多元知识基础的新兴技术分支。根据研究方向不同可以将其分为功能控制型和信息型,其中功能控制型包括功能材料型和功能结构型^[3]。

信息型智能包装技术是一种以反映包装内装物及其内在品质和运输、销售过程信息为主的新型技术^[4]。气敏型智能包装属于信息型智能包装中的一种,它通过不同类型的传感器对食品包装的内环境进行检测,包括包装内部环境的温湿度变化、产品的新鲜度变化等信息,将这些信息反映在消费者可以看到的指示标签上^[5]。从而保证消费者在购买产品时,能够根据这些信息判断商品所处的状态,同时也为供应商和销售商的售后工作提供了更加便捷的途径。

在气敏型智能包装系统中有2种常用方式,用于存储或传输数据的数据支持系统(条形标签或射频识别)以及包装中的生物传感器和指示标签,这2种方式都可以检测或控制包装内部环境和产品质量^[6]。文中针对气敏型智能包装标签技术这一方面,主要阐述了泄漏指示标签、新鲜度指示标签和射频识别标签的原理及研究进展,以及CO₂敏感型智能包装传感器的制作及应用。

2 气敏型智能包装研究进展

目前常用的气敏类智能包装能够监测的气体包括水果及奶制品中残留的O₂和产生的CO₂^[7],鱼类食品产生的挥发性含氮化合物^[8-10],肉制品腐败所产生的硫化氢^[11-12],果蔬食品产生的乙烯^[13-15]。这里从以下3个方面进行论述。

2.1 泄漏指示标签

对于新鲜肉类或果蔬类食品,在包装中由于其细胞的呼吸作用,会使内部的氧气体积分数维持在2%~5%的水平、CO₂体积分数维持在20%~80%的水平,有利于食品的保存。如果包装袋发生泄漏,则会影响内部气体组分,导致氧气含量增加、CO₂含量降低,从而加快食品腐败^[16]。泄漏指示标签通过将氧气敏感型或CO₂敏感型指示标签放置于包装内部,可直接接触并监测内部气体氛围,当包装袋发生泄漏或包装完整性被破坏时,指示标签会发生颜色的改变,提醒消费者注意食品质量安全。该标签有一层无毒的、具有氧化还原作用的表面涂层,通常为亚甲基蓝染料,当氧气体积分数为0.1%或者处于无氧环境中

时,标签呈现粉色或者黄色,而与氧气接触后会逐渐变为蓝色。

Matindoust等^[17]研究了食品智能包装泄漏指示标签,通过对包装内不同种气体的跟踪检测,利用导电聚合物与金属氧化物复合材料制备得到多种气体识别传感器,能够监测食品在贮运中的质量变化,并具有体积小、效率高、响应时间短的特点。Meng等^[18]研究了监测CO₂和氧气浓度变化的纳米生物传感器,可用于实时监测农产品的新鲜度和质量,讨论了对CO₂或氧气敏感的传感器的详细信息,及其被用于农产品和食品包装中质量监控的可能性。李慧杰等^[19]以钛酸丁酯为原料,采用微波辅助水热法制备了具有较高光催化活性的锐钛矿型纳米二氧化钛,并将其作为光催化剂制备了氧气指示剂智能油墨,将这种油墨制成的氧气指示薄膜放置在空气中,遇到氧气后于30 min内可完全恢复至初始颜色。颜色恢复的速率与氧气浓度成正比,因此这种智能氧气薄膜在食品包装行业有着很大的应用前景。

2.2 新鲜度指示标签

食品新鲜度影响食品的质量以及消费者的饮食安全,也直接影响生产商与经销商的销售利润。传统食品包装中,消费者通过辨别食物颜色、气味等方法判别食品的新鲜程度,这种方法与实际情况产生的误差较大,容易引发食品安全问题。食品新鲜度主要受到包装内腐败微生物的影响^[20],以及微生物代谢反应产生的CO₂、乙醇、有机酸、氮化物、硫化物、生物胺等物质的影响^[21-22]。新鲜度指示标签能够通过颜色指示剂间接检测代谢产物,或利用生物传感器对代谢物进行直接检测^[23-24]。以标签的形式贴在包装袋或包装容器内侧,由感应器检测包装内环境的变化,并由指示器通过标签颜色的变化表现出来,见图1。

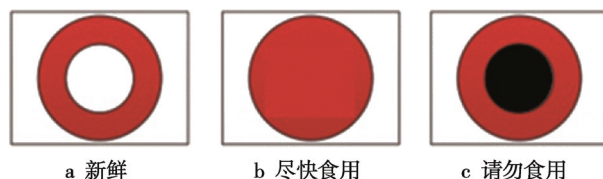


图1 新鲜度指示标签

Fig.1 Freshness indicator label

Mills等^[25]利用对pH较为敏感的荧光染料HPTS(8-羟基芘-1,3,6-三磺酸三钠盐,分子式为C₁₆H₇Na₃O₁₀S₃)与LDPE共挤,制成HPTS-LDPE薄膜,用来检测气态与溶解的CO₂含量的变化。HPTS-LDPE薄膜的发光强度(515 nm)和吸光度(475 nm)随着周围环境中CO₂含量的增大而降低,以此来检测微生物代谢产生的CO₂,具有很快的响应速度、稳定的性能,且使用期限大于6个月,能够达到较好的新鲜度指示效果。孙媛媛^[26]选用溴甲酚紫为指

示剂,制备了一种应用于冷鲜猪肉包装的新鲜度指示标签,由挥发性盐基氮表示猪肉的新鲜程度,色差与感官评定的分数表示指示标签的颜色变化。实验结果表明,所制备的新鲜度指示标签的色差变化与猪肉挥发性盐基氮变化呈线性关系;当猪肉新鲜度降低到一定程度时,指示标签由黄色变为绿色。由此可见,所制备的新鲜度指示标签可以用于指示包装猪肉的新鲜程度。王桂莲等^[27]设计了一种以红萝卜色素溶液为 pH 敏感剂的草莓新鲜度智能指示标签,当草莓从新鲜状态向变质过渡时,指示标签的颜色从紫褐色变为蓝紫色,并最终呈现为鲜桔红色。

2.3 射频识别标签

无线射频识别 (RFID) 是一种无需接触的射频信号识别技术,它由一块微型芯片和环绕在外侧的天线组成,用于存储和交换产品在生产、流通、销售等各个环节的实时信息,以实现产品信息的自动识别和可追溯性^[28]。它的工作原理是当产品上的 RFID 标签进入读写器的磁场范围时,RFID 中的微型芯片会感应到读写器的信号,并将存储在芯片内的产品信息传输到读写器中,与读写器相连的计算机读取所需数据,同时也可以将新的数据写入芯片^[29]。应用于食品包装上的 RFID 标签见图 2,它能够记录食品的生产时间、产地、运输过程等信息,同时可以与其他类型的智能标签(如 CO₂ 传感器、新鲜度指示标签)结合使用,监测更多的产品信息^[30]。

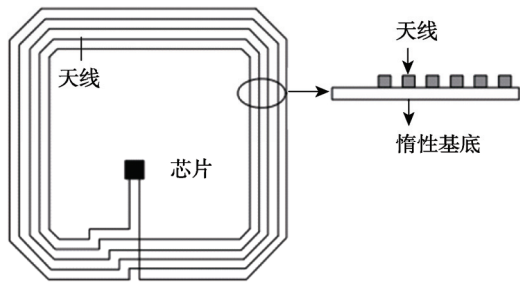


图 2 射频识别标签
Fig.2 Radio frequency identification label

Lin 等^[31]提出了一种基于 RFID 的肉类新鲜度检测系统,它由 RFID 标签、温度传感器、H₂S 传感器、读取器和服务器组成,通过将 RFID 标签与传感器结合,成功地将肉制品的新鲜度与温度、气氛等条件关联起来。结果表明,该系统能够有效监测肉制品的新鲜度,同时消费者可以通过监控系统直接获取到商品的新鲜程度等信息。赵秋艳等^[32]探讨了新型有机 RFID 标签在动物肉制品方面应用的可行性,有机 RFID 相比传统无机 RFID 具有方便易用、成本低廉、环保节能的特点,但也存在读取速度和存储容量方面的不足。有机 RFID 技术有望在动物肉制品行业代替无机 RFID,可大大降低动物肉制品溯源的成本,并

促进有机 RFID 技术在其他行业的发展。陈苑明等^[33]研究了纸基 RFID 标签天线印刷工艺的问题,基于丝网印刷技术,在纸基材上印刷导电银浆而制作出 RFID 标签天线,通过工艺参数优化得到最佳的生产方案,并制作得到满足电阻特性的 RFID 标签天线。该方案能够解决传统 RFID 成本过高、普及率较低的问题,同时在天线厚度变化不大的情况下,将电阻值减小 10 Ω 以上。

3 CO₂敏感型智能包装的制作及应用

3.1 CO₂敏感型智能包装的分类

CO₂ 敏感型智能包装通过监测包装中 CO₂ 含量的变化或 pH 值的变化,来指示内装食品所处的新鲜状态。其中用到的 CO₂ 传感器主要包括传统型和创新型,根据工作原理又将其分为光学和电化学类型,且包含不同的种类,具体的工作原理及包含的种类见表 1^[34—35]。

表 1 CO₂传感器的类型
Tab.1 Type of CO₂ sensors

原理	类型	种类
光学	传统型	非分布式红外传感器
		湿型光学 CO ₂ 传感器
	创新型	干型光学 CO ₂ 传感器
		凝胶光学 CO ₂ 传感器
		荧光 CO ₂ 传感器
电化学	传统型	Severinghaus 电极传感器
	创新型	pH 基电极传感器
		脱水酶催化 CO ₂ 传感器

3.2 CO₂气体敏感型智能包装标签的制作及应用

3.2.1 基于光学的 CO₂传感器

光学 CO₂ 传感器的介质包括干、湿这 2 种类型,由于干型光学 CO₂ 传感器的灵敏度易受环境温湿度的影响,造成结果误差较大,因此湿型光学 CO₂ 传感器的应用更为普遍。湿型光学 CO₂ 传感器的基本组分为 pH 敏感染料、水封装介质(一般为溶有染料的碳酸氢钠)和透气不透水的离子薄膜^[36]。

3.2.1.1 凝胶法光学 CO₂ 指示标签的制作

胡云峰等^[37]描述了一种凝胶型光学 CO₂ 指示薄膜的制备过程,将质量分数均为 5% 的甲基红和溴百里酚蓝按照质量比为 3 : 2 的配比制得的混合溶液作为 CO₂ 指示剂,以甲基纤维素和甘油为主要成胶材料,制备凝胶型 CO₂ 含量指示标签。具体的制备工艺流程:指示溶液→加热→加入增塑剂→搅拌→加入甲基纤维素→磁力搅拌至自然冷却→离心脱泡→倒平板(直径为 90 mm)→晾干 24 h 成膜→揭膜。实验

中通过对凝胶的变色过程与制备的指示剂进行对比,提出了制备 CO₂ 含量指示薄膜的最佳方案。研究结果表明,通过对甲基纤维素的凝胶性能及流延性能的指标测试,确定了加入适量浓度甲基纤维素的凝胶符合 CO₂ 指示薄膜制备的要求。该薄膜应用于包装膜中,能够监测并指示包装中 CO₂ 含量的变化,告知消费者食品的质量情况。

Jeon 等^[38]开发了一种基于中性红(NR)染料的溶胶-凝胶膜 pH 传感器薄膜。通过将四甲基原硅酸酯、三甲氧基甲基硅烷、乙醇、蒸馏水和 NR 粉末按照一定比例混合来制备溶胶凝胶膜,并通过浸涂法的溶胶-凝胶过程制备得到 pH 指示薄膜。实验结果表明,所制备的 pH 传感器薄膜的光学性质随着 pH 值的变化而变化,从而能够监测 pH 值为 6~9 内的变化,并具有良好的可逆性和较短的响应时间。将其应用在智能包装气敏型标签中,通过感知 pH 值的改变来检测 CO₂ 含量的变化,具有广泛的应用前景。

3.2.1.2 湿型光学 CO₂ 指示标签的制作

Pisuchpen^[39]研制了一种基于混合染料颜色变化的 CO₂ 指示标签,用来监测和指示泰国传统甜品 Thong-EK 的保质期。将染料甲基红与溴百里酚蓝在 2:1 的质量比下混合,与 Thong-EK (100 g) 一同分别放入多层铝袋、热封 PP 袋和装订 PP 袋的包装内,所有包装系统被分别贮存在 25 和 35 °C 的温度下。每天检查 CO₂ 气体含量,并进行微生物分析(TVC, 酵母,霉菌),直到保质期结束。甲基红从碱性(黄色, pH 值为 6.2)到酸性(红色, pH 值为 4.5)和溴百里酚蓝从碱性(蓝色, pH 值为 7.6)变为酸性(黄色, pH 值为 5.8)的颜色变化已知,由于标签的颜色变化与微生物产生的 CO₂ 水平相关,可以通过观察聚乙烯醇颜色指示标签中的最大总色差,来判断包装内 CO₂ 的水平。监测结果显示,随着 CO₂ 含量的增加,指示标签最初为蓝色,逐渐变成绿黄色、绿色,最后变成黄色。说明指示标签能够通过颜色变化来监测 CO₂ 的变化,间接指示微生物数量的变化以及食品的新鲜度。

Meng 等^[40]制备了一种添加考马斯亮蓝染料(BB)的不可逆型壳聚糖 CO₂ 传感器,其制备方法:首先在 1 L 0.1 mol/L 的氯化氢水溶液中加入 3 g 壳聚糖粉末,并调节 pH 值至 5.5 后搅拌 2 h,得到 3 g/L 的壳聚糖溶液。将 BB 粉末加入至 1 L 由体积分数为 10% 的乙酸,45% 的甲醇和 45% 的蒸馏水组成的溶液中,得到 3 g/L 的 BB 溶液。然后将所制备的壳聚糖/BB 溶液分别按照体积比为 10:1, 10:2 和 10:5 的比例混合后,搅拌至溶液中 BB 染料分子完全分散,并调节溶液 pH 值为 7.0,沉淀得到的壳聚糖/BB 嵌合结构分散于蒸馏水中制得 CO₂ 指示剂溶液。结果证明,该指示剂能够有效监测 CO₂ 浓度的变化,并随着 CO₂ 浓度的升

高由浅蓝色逐渐变为深蓝色。该技术应用于食品包装中,能够令消费者根据指示剂的颜色状态,判断所装食品的新鲜度与成熟度。

3.2.2 基于电化学的 CO₂ 传感器

Huang 等^[41]研发了在柔性聚酰亚胺聚合物基底上的一种基于溶胶-凝胶工艺制备氧化铟膜的 pH 值电极传感器,其制备方法为:将厚度为 7 nm 的 Cr 层沉积在一块聚酰亚胺板上,镀上厚度为 0.1 μm 的 Au 层制备得到基底;利用溶胶-凝胶法镀上厚度为 0.4 μm 的氧化铟感应膜;通过蒸发法将厚度为 7 nm 的 Cr 和厚度为 3 nm 的 Pt 层粘附在表面;沉积厚度为 30 nm 的银层,并通过在银上电镀形成氯化银(AgCl)参比电极。该电极能够感应到溶液产生的微电势变化,对应 pH 值在 1.5~12 范围内的变化,从而间接表示 CO₂ 含量的变化。通过对传感器进行灵敏度、响应速度、稳定性、可逆性和温度依赖性等性能的测试,结果表明该传感器各方面性能良好。在低成本条件下,用较为简单的工艺和器件能实现多方面的实际应用。

王帅等^[42]设计了一种面向食品质量检测的低功耗射频 pH 传感器,该传感器由 1 个 pH 电极(由氧化铟电极和氯化银参比电极组成)、电压转换频率电路和无线通信电路这 3 部分组成。通过将该射频 pH 传感器嵌入食品包装中,利用电极检测食品 pH 值改变引起的微电势变化,并通过无线射频识别技术远程监测食品质量的变化。该传感器可以应用于牛奶类和肉类等对于 O₂ 和 CO₂ 较为敏感的食品包装中,监测其质量变化的过程。

4 结语

气敏型智能包装在能提高包装技术信息化、智能化的同时,也可满足消费者对于食品安全性越来越高的要求。气体敏感类智能包装标签技术的发展为食品包装的质量和安全性提供了较为可靠的保障,具有广泛的市场和应用前景。目前高成本问题一直是智能包装发展的制约因素,限制了其推广应用。智能包装今后的发展在更加注重信息化、智能化、人性化的同时,要着力通过技术创新的手段,降低智能包装标签的成本,并找到合适的智能包装应用场景,从而提升智能包装技术在包装领域的广泛应用,推动包装产业的快速发展。

参考文献:

- [1] 廖雨瑶,陈丹青,李伟,等. 智能包装研究及应用进展[J]. 绿色包装, 2016(2): 39—46.

LIAO Yu-yao, CHEN Dan-qing, LI Wei, et al. Intelli-

- gent Packaging Research and Application Progress[J]. Green Packaging, 2016(2): 39—46.
- [2] DOBRUCKA R, CIERPISZEWSKI R. Active and Intelligent Packaging Food Research and Development-A Review[J]. Polish Journal of Food & Nutrition Sciences, 2014, 64(1): 7—15.
- [3] 夏征. 智能包装技术[J]. 包装世界, 2011(2): 4—6.
XIA Zheng. Smart Packaging Technology[J]. Packaging World, 2011(2): 4—6.
- [4] 刘东, 王建华. 信息型智能包装技术及其应用[J]. 网印工业, 2014(6): 47—51.
LIU Dong, WANG Jian-hua. Information Type Smart Packaging Technology and Its Application[J]. Screen Printing Industry, 2014(6): 47—51.
- [5] 李志浩. 信息型智能包装技术及应用实践探微[J]. 科学与技术, 2015(10): 100—101.
LI Zhi-hao. A Tentative Study about Intelligent Packaging Technology and Its Application of Information Type[J]. Theory and Research, 2015(10): 100—101.
- [6] 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.
- [7] ADAY M S, BUYUKCAN M B, CANER C. Maintaining the Quality of Strawberries by Combined Effect of Aqueous Chlorine Dioxide with Modified Atmosphere Packaging[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2013, 37(5): 568—581.
- [8] 秦娜, 宋永令, 罗永康. 鱼类贮藏保鲜技术研究进展[J]. 肉类研究, 2014(12): 28—32.
QIN Na, SONG Yong-ling, LUO Yong-kang. Fish Storage and Preservation: A Review[J]. Meat Research, 2014(12): 28—32.
- [9] 孙丽霞. 气调包装结合生物保鲜剂对冷藏大黄鱼品质及菌相的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2013.
SUN Li-xia. Effect of MAP Combined with Natural Perservative on Quality and Bacterias of Large Yellow Croaker (*Pseudosciaena Crocea*)[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2013.
- [10] KUSWANDI B, WICAKSONO Y, JAYUS, et al. Smart Packaging: Sensors for Monitoring of Food Quality and Safety[J]. Sensing & Instrumentation for Food Quality & Safety, 2011, 5(3): 137—146.
- [11] SMOLANDER M, CHAUDHRY Q. Nanotechnologies in Food Packaging[J]. Nanotechnologies in Food, 2010(1): 86—101.
- [12] 高磊, 谢晶. 生鲜鸡肉保鲜技术研究进展[J]. 食品与机械, 2014(5): 310—315.
GAO Lei, XIE Jing. Progress on Preservation Technologies for Fresh Chicken[J]. Food & Machinery, 2014(5): 310—315.
- [13] GARCIA-GARCIA I, TABOADA-RODRIGUEZ A, LOPEZ-GOMEZ A, et al. Active Packaging of Cardboard to Extend the Shelf Life of Tomatoes[J]. Food & Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 754—761.
- [14] 李梅. 一种具乙烯清除和抗菌功能的果蔬保鲜包装膜研发[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
LI Mei. The Development of Fresh-keeping Packaging Film with the Function of Ethylene Scavenging and Antimicrobial for Fruit and Vegetable[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [15] 侯玉婷, 施威, 孔令云, 等. 采后水果保鲜技术研究进展[J]. 食品工业, 2015(8): 226—231.
HOU Yu-ting, SHI Wei, KONG Ling-yun, et al. Research Advances in Preservation Technology of Post-harvest Fruits[J]. The Food Industry, 2015(8): 226—231.
- [16] 许文才, 付亚波, 李东立, 等. 食品活性包装与智能标签的研究及应用进展[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 1—10.
XU Wen-cai, FU Ya-bo, LI Dong-li, et al. Research and Application Progress of Food Active Packaging and Smart Labels[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 1—10.
- [17] MATINDOUST S, BAGHARI-NEJAD M, ABADI M H S, et al. Food Quality and Safety Monitoring Using Gas Sensor Array in Intelligent Packaging[J]. Sensor Review, 2016, 36(2): 169—183.
- [18] MENG X, KIM S, PULIGUNDLA P, et al. Carbon Dioxide and Oxygen Gas Sensors-possible Application for Monitoring Quality, Freshness, and Safety of Agricultural and Food Products with Emphasis on Importance of Analytical Signals and Their Transformation[J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2014, 57(6): 723—733.
- [19] 李慧杰, 谢思源, 詹沾, 等. 微波辅助水热法制备TiO₂及其在智能包装中的应用[J]. 包装学报, 2017, 9(2): 30—38.
LI Hui-jie, XIE Si-yuan, ZHAN Zhan, et al. Synthesis of TiO₂ by Microwave-assisted Hydrothermal Method and Its Application in Intelligent Packaging[J]. Packaging Journal, 2017, 9(2): 30—38.
- [20] 张新武, 杜小波, 徐素玲, 等. 食品中微生物危害的分析和控制[J]. 食品安全质量检测学报, 2014(10): 3295—3299.
ZHANG Xin-wu, DU Xiao-bo, XU Su-ling, et al. Analysis and Control of Microbiological Hazards in Food[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014(10): 3295—3299.
- [21] 都凤军, 孙彬, 孙炳新, 等. 活性与智能包装技术在食品工业中的研究进展[J]. 包装工程, 2014, 35(1): 135—140.
DU Feng-jun, SUN Bin, SUN Bing-xin, et al. Progresses in Active and Intelligent Food Packaging Technology[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(1): 135—140.
- [22] 朱惠绵, 胡芷琦. 包装食品新鲜度指示标签的研究[J]. 广东化工, 2014, 41(3): 43—45.
ZHU Hui-mian, HU Zhi-qi. Research of Packing Food Freshness Indicator-card[J]. Guangdong Chemical In-

- dustry, 2014, 41(3): 43—45.
- [23] SHILLINGFORD C, RUSSELL C W, BURGESS I B, et al. Bioinspired Artificial Melanosomes as Colorimetric Indicators of Oxygen Exposure[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(7): 4314.
- [24] LIAO Y H, CHOU J C. Preparation and Characteristics of Ruthenium Dioxide for pH Array Sensors with Real-time Measurement System[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2008, 128(2): 603—612.
- [25] MILLS A, YUSUFU D. Highly CO₂ Sensitive Extruded Fluorescent Plastic Indicator Film Based on HPTS[J]. *Analyst*, 2016, 141(3): 999—1008.
- [26] 孙媛媛. 猪肉包装用新鲜度指示标签研究[J]. *包装学报*, 2013, 5(3): 69—73.
SUN Yuan-yuan. Study on Freshness Indicator Used in Pork Packaging[J]. *Packaging Journal*, 2013, 5(3): 69—73.
- [27] 王桂莲, 未新玲, 杨洪洋, 等. 一种草莓新鲜度指示标签的研究与设计[J]. *科技创新导报*, 2014(33): 185—186.
WANG Gui-lian, WEI Xin-ling, YANG Hong-yang, et al. Research on a Kind of Label Indicating Strawberry Freshness[J]. *Science & Technology Innovation Herald*, 2014(33): 185—186.
- [28] 焦林, 梁王敏. RFID 包装与大数据物联网[J]. *中国包装工业*, 2014(4): 74.
JIAO Lin, LIANG Wang-min. RFID Packaging and Big Data Internet of Things[J]. *China Packaging Industry*, 2014(4): 74.
- [29] 黄玉兰. 基于物联网的 RFID 电子标签研究进展[J]. *电讯技术*, 2013, 53(4): 522—529.
HUANG Yu-lan. Research Progress of RFID Tag Based on Internet of Things[J]. *Telecommunication Engineering*, 2013, 53(4): 522—529.
- [30] FUERTES G, SOTO I, VARGAS M, et al. Nanosensors for a Monitoring System in Intelligent and Active Packaging[J]. *Journal of Sensors*, 2016(1): 1—8.
- [31] LIN S, HYUN K H, KIM J W, et al. The Design of Smart RFID System with Gas Sensor for Meat Freshness Monitoring[J]. *Advanced Science and Technology Letters*, 2013(41): 17—20.
- [32] 赵秋艳, 汪洋, 乔明武, 等. 有机 RFID 标签在动物食品溯源中的应用前景[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 154—158.
ZHAO Qiu-yan, WANG Yang, QIAO Ming-wu, et al. Application Prospects of Organic RFID Tags for Animal Food Tracing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 154—158.
- [33] 陈苑明, 何为, 龙发明, 等. 纸基 RFID 标签天线印刷工艺参数的优化试验[C]// 2010 中日电子电路秋季大会暨秋季国际 PCB 技术/信息论坛, 2010.
CHEN Yuan-ming, HE Wei, LONG Fa-ming, et al. Optimized Tests of Printing Process Parameters in Manufacturing RFID Antenna on Paper Substrate[C]// 2010 China-Japan Electronics Fall Conference & Autumn International PCB Technology/Information Forum, 2010.
- [34] 陈丹青, 廖雨瑶, 李伟, 等. 泄漏指示剂在气调包装中的应用研究[J]. *包装学报*, 2016, 8(4): 71—77.
CHEN Dan-qing, LIAO Yu-yao, LI Wei, et al. Research on Leakage Indicators Applied in MAP[J]. *Packaging Journal*, 2016, 8(4): 71—77.
- [35] DIECKMANN M, BUCHHOLZ R. Apparatus for Measuring the Partial Pressure of Gases Dissolved in Liquids: US, 6003362A[P]. 1999-12-21.
- [36] MILLS A. Optical Sensors for Carbon Dioxide and Their Applications[M]. Netherlands: Springer, 2009.
- [37] 胡云峰, 陈君然, 贺业鑫, 等. 食品包装用凝胶型二氧化碳指示标签研究[J]. *包装学报*, 2014, 6(2): 27—33.
HU Yun-feng, CHEN Jun-ran, HE Ye-xin, et al. Study on Gel-type Carbon Dioxide Indicator Label Used in Food Packaging[J]. *Packaging Journal*, 2014, 6(2): 27—33.
- [38] JEON D, YOO W J, SEO J K, et al. Fiber-optic pH Sensor Based on Sol-gel Film Immobilized with Neutral Red[J]. *Optical Review*, 2013, 20(2): 209—213.
- [39] PISUCHPEN S. Development of Color Indicator Tag for Monitoring Freshness of Intermediate-Moisture Dessert[J]. *Italian Journal of Food Science*, 2012, 24(4): 178—182.
- [40] MENG X, LEE K, KANG T Y, et al. An Irreversible Ripeness Indicator to Monitor the CO₂ Concentration in the Headspace of Packaged Kimchi During Storage[J]. *Food Science & Biotechnology*, 2015, 24(1): 91—97.
- [41] HUANG W D, CAO H, DEB S, et al. A Flexible pH Sensor Based on the Iridium Oxide Sensing Film[J]. *Sensors & Actuators a Physical*, 2011, 169(1): 1—11.
- [42] 王帅, 吕玉祥. 面向食品质量检测的低功耗射频 pH 传感器设计[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(6): 956—961.
WANG Shuai, LYU Yu-xiang. Design of a Low-power Radio Frequency pH Sensor for Food Quality Monitoring[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(6): 956—961.