

# 功能包装材料的发展现状与趋势

李慧玲, 徐长妍, 蒋少华

(南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 由于包装废弃物造成的环境污染以及食品质量安全问题频发等原因, 具有基本力学性能普通包装已经满足不了消费者对包装产品的需求, 具有功能性的包装受到极大关注。包装具备的功能性不仅在于包装结构的设计, 更重要在于包装材料的选用。随着新型材料和新技术的开发, 包装具有的功能性趋向多元化, 应用市场更为广泛。综合了近几年功能包装材料的相关研究, 从包装材料的应用出发, 按照包装的功能性将功能包装材料分为4大类: 阻隔包装材料、绿色包装材料、保鲜包装材料以及智能包装材料, 并分别概述了各类包装材料的特点、应用现状以及发展趋势。最后, 综述了功能包装材料的发展现状, 指出了功能包装材料在食品领域和医疗领域广阔的应用前景, 同时提出未来功能包装材料应致力于向食品安全、绿色环保以及集成多功能化包装等方向研究。

**关键词:** 包装; 包装材料; 包装功能性; 力学性能; 食品安全

**中图分类号:** TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2019)12-1135-10

## Development Status and Tendency of Functional Packaging Materials

LI Huiling, XU Changyan, JIANG Shaohua

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Due to the environmental pollution caused by packaging waste and food safety issues, traditional packaging materials with basic mechanical properties could not satisfy the demand from consumers. Therefore, functional packaging materials have received more and more attention. The functionality of the packaging materials depend not only on the design of packaging structure, but also on the selection of packaging materials. With the development of novel materials and technology, the functionality of packaging materials tends to be diversified and broader application market is highly required. This review summarizes the research on functional packaging materials in recent years. Based on the application of packaging materials, the functional packaging materials are divided into four categories according to the functionality of the packaging materials, which are barrier packaging materials, green packaging materials, fresh-keeping packaging materials and intelligent packaging materials. And the characteristics, application status and development trend of the each type of packaging materials are summarized. Finally, the development status of functional packaging materials is reviewed and the broad application prospects of functional packaging materials in the food and medical fields are proposed. At the end, future efforts on functional packaging materials are proposed, which should be focused on the research directions of food safety, environmental protection and integrated multi-functional packaging.

**Key words:** packaging; packaging materials; packaging functionality; mechanical properties; food safety

## 1 前言

日常生活中包装无处不在, 无论是大到容器还是小

到糖果包装, 都已经渗透到生活中每个细节。包装是按照一定的工艺技术所制备的容器和辅助材料的总称, 起到在流通过程中方便储存、保护产品, 促进产品销售的作用<sup>[1, 2]</sup>。包装按材料可分为4大类, 分别是纸质包装、塑料包装、金属包装以及玻璃与陶瓷包装<sup>[3]</sup>。而在这4大类中, 应用最为广泛的依旧是塑料包装, 尤其是在如保鲜膜等食品或者药品包装中的应用<sup>[3]</sup>。为了满足消费者对食品或药品等产品的需求, 包装不仅需要具备基本的力学性能, 而且要根据产品特性具有一定的功能

收稿日期: 2019-05-16 修回日期: 2019-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51803093); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20180770)

第一作者: 李慧玲, 女, 1995年生, 硕士研究生

通讯作者: 蒋少华, 男, 1983年生, 教授, 博士生导师,

Email: shaohua.jiang@njfu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201905022

性。然而,包装具备的功能性不仅在于包装结构的设计,更重要在于包装材料的选用。目前,随着材料科学技术的发展以及新型材料在包装领域的研发和应用,包装材料也越来越趋向于功能化和多元化。新型功能材料目前研发成功的有 100 余种。与传统包装材料相比,功能包装材料具有以下特性:①不再是单独的纸质类、金属类或塑料类包装材料,而是各类传统材料和新型功能材料的有机复合;②制备工艺更趋成熟化;③将充分利用我国广阔的农林和海洋资源制备和提取新型功能包装材料;④电子信息技术将逐步应用于包装,使得包装材料更加信息化和智能化。功能包装材料有效地降低了经济成本,减少了废弃物的排放,顺应了全球绿色环保趋势;同时使包装在性能上取长补短,既提升了传统包装的基本力学性能,又使包装功能多元化、智能化和自动化<sup>[4]</sup>。

功能包装材料是根据产品特性以及所采用包装材料的特性(图 1),利用特定的技术在某些应用领域发挥高水平作用的复合包装材料<sup>[5]</sup>。目前功能包装材料发展迅速、门类众多,按照包装应用分类,可分为可溶型、可食型等食品功能型包装以及绿色包装和保鲜包装;按照包装的功能性分类,可分为热功能型、电功能型、光功能型、化学功能型、磁功能型、生物功能型、记忆功能型 7 大类。一直以来,由于包装废弃物造成的环境污染以及食品质量问题频发等原因,具有基本力学性能 of 普通包装已经满足不了消费者对包装产品的需求,具有功能性的包装受到研究者的极大关注。近年来,随着新型材料的不断研发,功能材料在包装上的应用研究也日益增多,尤其是塑料包装材料,可见功能材料在包装上的应用具有很大的发展前景。本文根据功能包装材料在国内外的研究现状,以新型材料的类型以及包装应用的视角对包装材料的功能性进行分类,并对各类功能包装材料加以总结和展望,同时提出功能包装材料未来的发展方向和应用前景。



图 1 包装材料的特性及其功能<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Characteristics and functions of packaging materials<sup>[5]</sup>

## 2 阻隔包装材料

近年来,时常发生食物因保鲜不充分而变质,或在储藏过程中受到外界环境(水蒸气、二氧化碳、微生物等)影响而腐败变质,从而严重威胁人们身体健康的现象。这些现象的发生主要是因为对产品起保护作用的包装材料选用不当。在储存或者运输过程中,包装材料应具备阻隔外部环境对包装内产品的影响,以稳定包装内部环境和延长货架寿命等的的能力。而随着人们生活质量的提高,消费者对产品的质量安全要求也越来越高,因此包装对产品的阻隔保护性也愈来愈强,这极大地促进了研究人员对阻隔包装材料的大力研发。

阻隔性包装的阻隔原理是利用包装材料分子整齐的微观排列使材料具有高结晶率,或利用包装材料分子间形成的氢键使材料具有高密度,从而达到对氧气、二氧化碳、氮气、水蒸气或微生物等外界环境的阻隔效果<sup>[6]</sup>。在 4 大类包装中,各类包装材料因具有不同的结构而阻隔效果不一致。纸质包装材料由亲水性的植物纤维分子组成且具有多孔结构,因此对水和气体的阻隔性较差。为了达到更好的阻隔效果,目前一般采用涂布或与塑料复合的工艺对纸质包装进行阻隔改性。金属包装材料由于其排列紧密的晶体结构,因而具有良好的阻气性和阻湿性。对于市场上使用普遍的塑料包装,不同的聚合物薄膜阻隔性能有一定的差异<sup>[7]</sup>,一般塑料薄膜阻隔性是由聚合物高分子结构决定。极性高分子聚合物如聚酯、聚醇酯具有良好的阻气性和透湿性;而非极性高分子聚合物如聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)等由于其对称结构而具有良好的阻湿性和透气性<sup>[8]</sup>。随着新型材料的不断研发以及加工技术的多样化,国内外学者已经研发出不同于传统包装材料的高阻隔包装材料,并在市场上投入使用。根据阻隔原理与工艺技术的不同,高阻隔包装材料可以分为 3 大类<sup>[9]</sup>:多层复合材料、表面改性或镀层材料以及无机填料增强材料。

在医药领域,医疗药品如静脉注射液、胶囊等很容易因微生物的进入或者与水蒸气等的接触而导致药品受到污染或者失效,因此药品需要保持在真空状态以达到稳定的内环境。在日常生活中人们高度关注的食品领域,为了能够在长期储藏的过程中依然使食品保持原有风味或者新鲜度,人们对食品包装的阻隔性要求也愈来愈高。与普通的阻隔包装相比,高阻隔包装具有以下特点:①对水蒸气等外界环境具有更高的阻隔性;②同一包装可协同多种阻隔性,同时还具有阻隔紫外线等功能。因此,高阻隔包装材料在医疗领域和食品领域的应用较为广泛,其中最为典型的是药品的泡罩包装以及果蔬与肉

类等食品的蒸煮袋包装。随着制备工艺与技术的成熟化,高阻隔包装材料的研究逐渐增多,尤其是多层复合材料,如杨铎冰等<sup>[10]</sup>全面系统地综述了不同塑料原料通过共挤技术形成的多层复合薄膜材料的类型、功能特点以及应用现状。多层复合薄膜材料中复合层数可多达 11 层,其中 3 层和 5 层较为普遍。对于蒸镀型薄膜材料<sup>[11, 12]</sup>,不同的氧化物或金属材料有着不同的工艺技术要求,常见的工艺技术有物理或化学气相沉积、等离子体和磁控溅射等。如 Guan 等<sup>[13]</sup>利用双频等离子体增强化学气相沉积法,将 TEOS 氧化膜沉积在直径为 100 mm,厚度为 525  $\mu\text{m}$  的硅晶片上,在不同时间间隔的高低频下沉积氧化硅薄膜,再进行退火处理,并探究沉积参数、退火温度与薄膜性能的关系,发现相比于高频,在低频下制备的薄膜阻水性更好,并且可通过控制退火温度改变沉积薄膜的拉伸应力。Subramanyam 等<sup>[14]</sup>采用直流反应磁控溅射法,在玻璃基板上沉积一层氧化锌薄膜,并探究溅射压力对该薄膜结构、电性能与光学性能的影响,结果发现当溅射压力为 0.6 Pa 时,该薄膜的电阻率、光学透过率达到最佳。而对于无机物填料增强材料,一般选用二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )、二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )、纳米蒙脱石、高岭土等纳米材料作为增强体,这些增强体不仅可以提高包装材料的力学性能,还可使其具有高阻隔、杀菌等性能<sup>[15]</sup>。目前也有很多相关的研究,如 Silva 等<sup>[16]</sup>以碳酸镁/聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为前驱体,通过热处理形成氧化镁( $\text{MgO}$ )纳米粒子,并将  $\text{MgO}$  纳米粒子作为填充剂与壳聚糖(CS)复合形成 CS 纳米薄膜,经力学性能测试发现当  $\text{MgO}$  质量分数为 5% 时,该复合薄膜的拉伸应力与弹性模量达到最佳,比纯 CS 薄膜的拉伸应力与弹性模量分别提高了 86% 和 38%,同时该复合薄膜具有良好的热稳定性、阻燃性以及紫外线阻隔性等。Yang 等<sup>[17]</sup>采用溶液共混法,将石墨烯成功应用到包装上,制备了还原石墨烯基聚乙烯醇(TRG/EVOH)纳米复合高阻隔材料。然而,由于采用蒙脱土等无机纳米填料,以及气相沉积、磁控溅射等成本较高与较为复杂的制备技术,这使得高阻隔包装材料仍存在难以降解、易造成安全隐患以及经济成本高等问题。为了解决上述问题,近几年国内外学者致力于研究新型生物质基可降解的高阻隔

包装材料。例如以纸张或塑料作为复合材料的基底,以天然高分子作为涂布材料而制备的阻隔材料,有微纤化纤维素(MFC)膜<sup>[18]</sup>、三相聚乳酸(PLA)复合薄膜<sup>[19]</sup>等。这些材料不仅具备高阻隔性而且具有可降解和抑菌的效果,是一种多功能的集成材料。然而,这些材料一方面因经济成本较高,另一方面由于具有很强的亲水性而导致阻气效果较差,所以还未在市场推广<sup>[20]</sup>。因而,在未来的高阻隔包装材料的研究中,科研工作者应继续致力于以低成本纸质为基底的高阻隔纸基复合材料的研发,同时提高工艺技术以解决其阻湿性较差的问题,从而开发出绿色环保的高阻隔包装材料,并拓宽其在市场上的应用。

### 3 绿色包装材料

早在 2010 年就有调查发现,在我国固体废弃物中,包装废弃物占固体废弃物总重量的 1/3,其中塑料包装废弃物居多,而对废弃物最普遍的处理方式是焚烧,这大大增加了环境的压力。随着国家大力提倡绿色包装以及可持续发展,绿色包装材料的研发成为了热门的关注点。绿色包装是一种无公害包装,使用的包装材料被称为环境协调材料或生态材料,主要具有以下几个特点<sup>[21, 22]</sup>: ① 材料易生产和加工,在生产加工过程中噪音低且无污染;② 材料具有环境协调性,即可回收和可循环使用;③ 材料具有良好的使用性能和功能;④ 材料来源广。目前各国对绿色包装材料的划分有不同的标准,国内主要分为可降解包装材料、可食性包装材料、纸质及陶瓷包装材料<sup>[23]</sup>。

#### 3.1 可降解包装材料

可降解包装材料主要是塑料,包括光降解塑料、生物降解塑料和光-生物降解塑料(表 1)。可降解塑料包装降解的基本原理是利用高聚物中高分子链在外界环境作用下,经过物理或化学变化分解成小分子链,最终分解成  $\text{CO}_2$  和水<sup>[24, 25]</sup>。目前,国内外对可降解塑料包装的研究无论是制备还是原理都已愈加成熟,如刘龙双等<sup>[26]</sup>介绍了聚烯烃塑料光降解机理及其影响因素、聚烯烃光降解剂和光降解的可调控性,并对聚烯烃光降解的发展趋势进行了展望。Kumar 等<sup>[27]</sup>研究了将纳米粒子与聚合物基体聚合形成可生物降解的聚酯材料,并介绍了其机理和在医疗包装上的应用。

表 1 可降解包装材料的特点及应用

Table 1 Characteristics and applications of degradable packaging materials

Types	Characteristics	Application fields	Ref.
Photodegradation	Under the light condition, depending on light intensity, incompletely degradable	Agricultural mulch	[28]
Biodegradation	Degraded by microorganisms, complete degradation	Food packaging, cosmetics, medical and electronics, etc	[29, 30]
Photo-biodegradation	Photodegradation followed by biodegradation, more idealized degradation	Many related studies but not popularized in the market	[31, 32]

光降解塑料是以石油基塑料为基材，加入光敏剂或者分解剂制备而成的<sup>[28]</sup>，因而光照强度以及外界环境都会影响塑料的分解程度及分解速度。目前市场上越来越多地将光降解包装材料应用于购物袋、垃圾袋、新型快餐盒以及农用地膜等领域。

生物降解塑料主要材料包括天然高分子材料，如淀粉、蛋白质、植物纤维等，在微生物作用下可被完全降解成 CO<sub>2</sub> 和水<sup>[29]</sup>。目前已经商品化的生物降解高分子材料有 PLA 制品、二氧化碳共聚物、淀粉基共聚物、聚羟基脂肪酸酯类化合物 (PHAs) 等，其主要应用于食品包装、餐具、化妆品、医疗与电子领域，其中 PHAs 作为一种新型的合成高分子材料被广泛应用于医疗和电子等领域<sup>[30]</sup>。

除了光降解和生物降解塑料以外，塑料的光-生物降解作为一种比较理想化的降解模式，其相应的降解材料也成为国内外学者的研究热点之一。其降解过程一般先进行光降解然后进行生物降解，该过程可以有效地弥补光降解受光照强度影响的缺陷，也可以改善生物降解塑料不易加工、生产成本高的问题，同时具有可完全降解的效果，具有很大的发展前景。如杨薇等<sup>[31]</sup>采用双螺杆挤出法，以聚氧乙烯 (PEO) 为亲水改性剂，以纳米 TiO<sub>2</sub> 为光催化助氧剂，与低密度聚乙烯 (LDPE) 复合合成光氧化-生物降解 TiO<sub>2</sub>/PEO/LDPE 纳米复合薄膜，并通过紫外线光照和密封堆肥实验分别进行光降解和生物降解实验测试。结果表明，PEO 的加入能提高纳米 TiO<sub>2</sub> 在 LDPE 基体中的亲水性，从而提高其光催化氧化活性，使得 LDPE 薄膜的光氧化降解程度明显提高，有利于其后续的生物降解。马艳霞等<sup>[32]</sup>采用熔融纺丝法制备了可光-生物双降解的 PE 纤维，该纤维与常规 PE 纤维在力学性能上相近，而在紫外线降解实验测定光降解能力以及在土壤降解实验测定生物降解能力时，在相同的降解时间内，该纤维光降解率明显高于常规 PE 纤维 (约 6.7%)，随后的生物降解率高达 27.65%。

### 3.2 可食性包装材料

可食性包装<sup>[33, 34]</sup>是以如纸质类的柔性包装材料或高分子材料为基材，添加精油、增塑剂等辅助材料合成而得到的。相比于其他的绿色包装，可食性包装选用的基材以天然高分子为主，具有对人体无害且可食用的优势，因此在食品包装领域以及药品包装领域 (如胶囊) 占据主要市场份额，尤其是在可食性塑料包装领域。根据所选用的天然高分子材料以及包装工艺的不同，可食性包装材料可分为 5 大类，即多糖类、蛋白质类、类脂类、果蔬类以及复合类<sup>[35-39]</sup>。其分类情况以及各材料特点如表 2 所示。

除了光降解和生物降解塑料以外，塑料的光-生物降解作为一种比较理想化的降解模式，其相应的降解材料也成为国内外学者的研究热点之一。其降解过程一般先进行光降解然后进行生物降解，该过程可以有效地弥补光降解受光照强度影响的缺陷，也可以改善生物降解塑料不易加工、生产成本高的问题，同时具有可完全降解的效果，具有很大的发展前景。如杨薇等<sup>[31]</sup>采用双螺杆挤出法，以聚氧乙烯 (PEO) 为亲水改性剂，以纳米 TiO<sub>2</sub> 为光催化助氧剂，与低密度聚乙烯 (LDPE) 复合合成光氧化-生物降解 TiO<sub>2</sub>/PEO/LDPE 纳米复合薄膜，并通过紫外线光照和密封堆肥实验分别进行光降解和生物降解实验测试。结果表明，PEO 的加入能提高纳米 TiO<sub>2</sub> 在 LDPE 基体中的亲水性，从而提高其光催化氧化活性，使得 LDPE 薄膜的光氧化降解程度明显提高，有利于其后续的生物降解。马艳霞等<sup>[32]</sup>采用熔融纺丝法制备了可光-生物双降解的 PE 纤维，该纤维与常规 PE 纤维在力学性能上相近，而在紫外线降解实验测定光降解能力以及在土壤降解实验测定生物降解能力时，在相同的降解时间内，该纤维光降解率明显高于常规 PE 纤维 (约 6.7%)，随后的生物降解率高达 27.65%。

在可食性包装中，原材料与添加剂的质量配比会影响包装的机械性能、力学性能以及可降解性能，合适的质量配比可以显著地提高包装的各项性能。例如孟令伟等<sup>[40]</sup>以可降解生物材料玉米磷脂双淀粉为基材，并添加甘油制备成可食性包装，经测试表明，在淀粉质量分数为 75%，甘油体积分数为 5% 时，该包装拉伸以及阻隔等性能达到最佳，同时还会具有抗菌保鲜等多种功能。Farhan 等<sup>[41]</sup>以半精制卡拉胶 (一种海藻多糖) 为基底材料，以甘油或山梨醇为添加剂，采用流延法制备可食性

化-生物降解 TiO<sub>2</sub>/PEO/LDPE 纳米复合薄膜，并通过紫外线光照和密封堆肥实验分别进行光降解和生物降解实验测试。结果表明，PEO 的加入能提高纳米 TiO<sub>2</sub> 在 LDPE 基体中的亲水性，从而提高其光催化氧化活性，使得 LDPE 薄膜的光氧化降解程度明显提高，有利于其后续的生物降解。马艳霞等<sup>[32]</sup>采用熔融纺丝法制备了可光-生物双降解的 PE 纤维，该纤维与常规 PE 纤维在力学性能上相近，而在紫外线降解实验测定光降解能力以及在土壤降解实验测定生物降解能力时，在相同的降解时间内，该纤维光降解率明显高于常规 PE 纤维 (约 6.7%)，随后的生物降解率高达 27.65%。

### 3.2 可食性包装材料

可食性包装<sup>[33, 34]</sup>是以如纸质类的柔性包装材料或高分子材料为基材，添加精油、增塑剂等辅助材料合成而得到的。相比于其他的绿色包装，可食性包装选用的基材以天然高分子为主，具有对人体无害且可食用的优势，因此在食品包装领域以及药品包装领域 (如胶囊) 占据主要市场份额，尤其是在可食性塑料包装领域。根据所选用的天然高分子材料以及包装工艺的不同，可食性包装材料可分为 5 大类，即多糖类、蛋白质类、类脂类、果蔬类以及复合类<sup>[35-39]</sup>。其分类情况以及各材料特点如表 2 所示。

表 2 可食性包装材料的分类及特点  
Table 2 Classification and characteristics of edible packaging materials

Types	Advantages	Disadvantages	Materials	Ref.
Polysaccharides	Good mechanical properties and film forming properties	Excellent water solubility and poor water resistance	Cellulose, chitosan, starch, pectin, etc	[35]
Proteins	Good gas barrier, mechanical and optical properties	Poor resistance to wet	Whey protein, soy protein, zein, etc	[36]
Lipoids	Water-resistance for its low polarity and hydrophobic groups	Brittleness and poor gas barrier	Corn phospholipid, monostearin, natural waxes, etc	[37]
Fruits and vegetables	Low cost, preservation function and anti-corrosion	Relatively poor mechanical properties	Fruits, vegetables or vegetable residues	[38]
Composites	Better mechanical properties and barrier properties	Lack of preparation technology	Two or more types of materials	[39]

薄膜，通过力学性能测试发现，当山梨醇和甘油质量分数都达到 30% 时，该薄膜的拉伸性能和热封强度达到最佳，并对氧气具有一定的阻隔性。可食性复合膜包装由于包括两种或两种以上的材料，材料之间的性能可以取长补短，例如既可以改善包装力学性能，又可以使包装功能化，因而无论是在市场上还是研究上都具有很大的发展潜力。目前可食性复合包装的研究大部分集中在复合膜上，但是由于其工艺技术不够成熟和成本较高限制其在纸膜上的发展。而以水果或蔬菜等废料为基材制备



成的可食性果蔬包装纸或纸膜(图2),由于成本低廉且来源广泛,引起了研究者们对果蔬包装纸膜的极大兴趣。例如李佩姝等<sup>[42]</sup>利用豆渣作为生物质基材,通过添加增稠剂、阻油剂等制备可食性包装纸膜,并测定不同质量比例下包装纸膜的性能。结果表明,当豆腐渣用量为2.5%(质量分数)、甘油用量为1.5%(质量分数)时,该包装纸膜柔性、阻水性以及阻油性最好。然而,目前果蔬包装薄膜或纸膜在市场上并未实现广泛应用,一方面由于原材料单一、难以找到正确的配方以及工艺技术受限,导致其在食品包装中应用范围并不广;另一方面由于可食性果蔬包装在力学性能上仍然较差,若为了具有一定机械性能而添加助剂则可能会存在食品安全隐患<sup>[38]</sup>。但是未来原料多样化、助剂量规范化、工艺技术和生产设备的改善将会有助于食品安全问题得到有效的解决。此外,可食性薄膜或包装纸具有功能多样化和绿色环保的优势,可大幅度减少经济成本、降低资源浪费,可食性薄膜或者包装纸在未来食品领域,尤其是医用领域的应用前景将非常诱人。



图2 巴西 Embrapa 仪器公司生产的由番石榴制成的可食用薄膜(左)和甜菜根泥制成的可食用薄膜(右)<sup>[38]</sup>

Fig. 2 Edible films made up of guava (left) and beetroot purees (right) produced by Embrapa Instrumentacao, Brazil<sup>[38]</sup>

## 4 保鲜包装材料

保鲜包装材料<sup>[43, 44]</sup>主要用来包装果蔬类、肉类等生鲜食品。这些生鲜食品在运输或储存过程中易受到外界环境的影响,如温度和湿度的变化等,使得包装内微生物活跃而腐蚀食品,并且影响到食品的呼吸代谢,因此为了保持这些食品的新鲜度和营养度,保鲜包装应运而生。随着新型功能材料的发展,保鲜包装材料主要分为3大类,即传统保鲜包装材料、抗菌保鲜包装材料和木质基保鲜包装材料。

### 4.1 传统保鲜包装材料

传统保鲜包装材料主要包括普通保鲜材料以及应用一定技术处理薄膜基材而达到保鲜作用的薄膜材料。

普通保鲜材料主要是以塑料薄膜为基材,添加增塑

剂、增韧剂和增强填充剂等助剂改变基材的力学性能,通过一定技术制备而成的。目前在生鲜食品保鲜上应用的普通保鲜材料有PE、聚氯乙烯(PVC)、聚二氯乙烯(PVDC)和PP等。PE具有良好的耐低温性能以及阻隔性能,在水果和蔬菜的包装应用中最为广泛;PVC具有良好的透气性能与防水性能,通常用来保鲜蔬菜,如鲜蒜、草菇、松茸等<sup>[45]</sup>;PVDC耐高温,且具有高阻隔性能,主要应用在火腿肠、冷却肉等肉类包装<sup>[46]</sup>;在生鲜食品包装上,市场上选用的PP是双向拉伸聚丙烯薄膜(BOPP)材料,其韧性更强、耐低温性更强。

其他类型传统保鲜包装主要包括气调包装保鲜膜、充气包装保鲜膜、硅窗气调保鲜膜、微孔保鲜膜等。前两者在市场上应用普遍,后两者还不是很常见。硅窗气调保鲜膜是在普通薄膜上贴上一层具有气体选择透过性的硅胶膜以达到保鲜效果,早在几年前李铁华团队已经作出了相关的研究<sup>[47]</sup>。近几年也有相关的研究,如Li等<sup>[48]</sup>研究了硅窗气调包装和普通气调包装储存绿芦笋的效果,结果表明,硅窗气调包装能够更好地抑制绿芦笋的呼吸速率、减少抗坏血酸的损失。微孔保鲜膜是利用半结晶聚合物拉伸、相分离、机械制孔等技术在薄膜上制备孔径在0.01~10  $\mu\text{m}$ 的微小气孔,使得其对果蔬包装具有更高的透水性和透气性。现阶段对微孔保鲜膜的研究主要在于对其进行改性处理以提升其性能。如俞静芬等<sup>[49]</sup>利用1-甲基环丙烯(1-MCP)处理微孔保鲜膜,使其形成1-MCP结合微孔保鲜膜,用来包装猕猴桃,与未处理的微孔保鲜膜相比,新的微孔保鲜膜可以提高猕猴桃的货架周期,显著抑制猕猴桃果实硬度的下降和有机酸的分解等,在一定程度上延缓果实的衰老。

### 4.2 抗菌保鲜包装材料

抗菌保鲜包装<sup>[50, 51]</sup>是在生产加工原料时加入抗菌剂,通过其接触食品或缓慢释放挥发等方式抑制微生物生理代谢或者破坏微生物生理结构以保鲜食品、延长食品货架周期的一种包装。抗菌保鲜包装目前在市场上主要以薄膜材料为主。按照抗菌剂耐高温程度的不同可以选择不同的加工方式,若抗菌剂耐热耐高温一般选用熔融法或注塑法,不耐高温则选择流延法或化学键合法。目前抗菌剂主要有4大类<sup>[52]</sup>,即天然抗菌剂、无机抗菌剂、有机抗菌剂和复合型抗菌剂。

天然抗菌剂是从动植物或者微生物中提纯而来的,按照来源可分为植物源、动物源及微生物源3类,均具有可降解性,是一种绿色抗菌剂。目前研究和应用较多的天然抗菌剂活性物质有植物精油、天然肽类、高分子糖类、氨基酸类以及一些天然抗菌素等。如Liu等<sup>[53]</sup>以聚乙烯醇(PVA)和CS为原料,采用溶剂流延法和电喷雾

法制备了 PVA-CS 薄膜, 研究发现当 PVA 与 CS 的质量比为 75:25 时, 与纯 PVA 膜相比, 该薄膜具有更好的力学性能以及更强的抗菌活性。这些抗菌剂不仅可以用于食品保鲜领域也可以用于医疗领域。

无机抗菌剂目前在材料上的应用非常广泛, 其具有耐热性、持久性和安全性等特性。近期 Hoseinnejad 等<sup>[54]</sup>对无机纳米颗粒或者金属纳米颗粒作为抗菌剂在包装上的应用机理以及在食品等领域的应用效果做了较为详尽的论述及展望。无机抗菌剂主要分为 3 大类: ① 银离子和锌离子等金属离子抗菌剂; ②  $\text{TiO}_2$  和氧化锌等氧化物型抗菌剂; ③ 纳米蒙脱石和纳米银等纳米抗菌剂。其中纳米抗菌剂是目前国内外学者研究的热点, 尤其是以高分子生物聚合物为基体而形成的生物纳米复合材料<sup>[55]</sup>, 由于其具有可降解、抗菌、阻隔等功能, 在可食性薄膜以及保鲜薄膜的应用上已经受到国内外学者的高度关注。Arfat 等<sup>[56]</sup>以瓜尔胶为基材, 以银铜合金纳米颗粒 (Ag-Cu NPs) 为填充剂, 采用溶液流延法制备了生物质纳米复合膜, 实验发现当填充剂 Ag-Cu NPs 质量分数为 2% 时, 该复合膜的力学性能以及抗菌性能达到最佳, 并具有绿色可降解优势。

有机抗菌剂在包装上的应用时间最为长久, 其种类很多, 按照化学结构不同可分为 20 种, 按照抗菌剂机理可分为 3 大类: ① 季铵盐和季磷脂类, 该类低分子量有机抗菌剂通过其阳离子与细胞膜中的阴离子反应, 从而破坏细胞膜的结构和组成以达到抗菌的作用; ② 杂环类, 杂环上含有的某些活性基团能够透过细胞与 DNA 中的碱基作用, 从而抑制微生物的生理代谢, 达到缓慢杀菌的效果; ③ 醛类和酚类, 该类抗菌剂能够改变细胞膜的结构, 从而渗透到细胞中, 阻止细胞内蛋白质等的合成, 导致细胞缓慢死亡。其中, 低分子量抗菌剂具有毒性大、耐热性差且易挥发等缺陷; 而高分子抗菌剂通过引入其他抗菌剂基团对分子结构进行修饰和改性, 既可以有效地抑制多种类型微生物、实现协同抗菌, 又可以增强热稳定性和提高安全性<sup>[57]</sup>。如 Noh 等<sup>[58]</sup>首先将十二烷基二甲基羟乙基氯化铵 (DDHAC) 和 1-氯十二烷对二甲乙醇胺 (DMEA) 按照 1:1 的摩尔质量比混合反应生成季铵盐 (QASs), 随后以 DCC 为脱水剂, 通过控制不同的反应温度将获得的季铵盐接枝到 PEEA 中制备接枝聚合物 (PGD)。实验发现该烷基接枝法能显著提高该聚合物的抗菌效果, 且这种抗菌效果好坏取决于反应温度, 在 135 °C 合成的聚合物对革兰氏阳性金黄色葡萄球菌和革兰氏阴性大肠杆菌的抗菌活性最高; 当温度高于 165 °C 时, 由于 DDHAC 的热分解作用, 该聚合物的分解速率加快, 导致其抗菌活性降低。

复合型抗菌剂是多种类型抗菌剂共同作用以达到取长补短的作用。相对于纯抗菌剂, 复合型抗菌剂抗菌效果明显增强, 而且能够抑制多种类型微生物繁衍, 同时毒性较小、热稳定性等都有所增强, 因而在抗菌包装材料中有所应用。如赵树强等<sup>[59]</sup>通过添加氯化缩水甘油三甲胺改善 CS 的水溶性而合成新的改性剂, 并应用于木薯蚕丝中, 测定结果表明该复合木薯蚕丝同时具有良好的热稳定性和增强的抗菌性。因此, 多种类型抗菌剂结合得到的复合抗菌剂在未来保鲜包装的应用中具有很大的发展潜力。

#### 4.3 木质基保鲜包装材料

木质基保鲜包装材料<sup>[60]</sup>是以具有木质纤维的纸类 (如牛皮纸等) 为基材, 通过在制浆过程中加入或者在纸张上涂布或浸渍保鲜剂, 释放有效保鲜成分来控制二氧化碳和氧气的含量, 实现对微生物的抑制, 从而达到保鲜的效果。按照保鲜剂的不同, 木质基保鲜包装材料可分为中草药保鲜包装材料、二氧化物保鲜包装材料、抗菌保鲜包装材料以及复合型保鲜包装材料 4 大类。中草药保鲜包装材料主要通过提取中草药里的有效成分如甘草、虎杖、大黄提取液等, 将其与包装纸复合形成复合包装材料以达到保鲜作用<sup>[61]</sup>。二氧化物保鲜包装材料中的保鲜剂主要有二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ ) 和二氧化氯 ( $\text{ClO}_2$ )。  $\text{SO}_2$  保鲜包装材料主要应用于葡萄保鲜, 通过  $\text{SO}_2$  抑制葡萄氧化酶的活性从而降低微生物的呼吸作用, 但是  $\text{SO}_2$  在包装材料中的缓慢释放速度 (程度) 无法控制这一问题仍然没有得到有效的解决办法<sup>[62]</sup>;  $\text{ClO}_2$  保鲜包装材料的保鲜机理与  $\text{SO}_2$  保鲜包装材料的保鲜机理相似, 通过缓释  $\text{ClO}_2$  以抑制产品的呼吸作用, 但是其应用范围更为广泛<sup>[63]</sup>。复合型保鲜包装材料是在制备包装材料的过程中加入不同种类的保鲜剂, 使其共同作用, 达到抑制微生物呼吸和抗菌的作用。相比于其他类型木质基保鲜包装材料, 复合型保鲜包装材料的应用更为广泛, 而且保鲜效果更为明显。

木质基保鲜包装材料充分利用了纸张基材的多孔结构, 因而具有良好的透气性, 并且纸质包装的机械性能明显好于薄膜材料, 同时具有可降解性, 因此在食品保鲜应用方面具有很大的前景, 同时也受到国内外研究者的重视。

## 5 智能包装材料

智能包装<sup>[64, 65]</sup>是在生物化学、材料学、物理学、科技信息学等多门学科领域的基础上, 通过新型包装材料的应用、包装材料结构的设计或者包装材料与互联网结合等制备而成的。目前对于智能包装的定义各不相同, 然而从商品链的角度出发, 智能包装是“沟通”和“逻辑”

的结合。“沟通”即在商品运输以及商品销售的整个生命链过程中,能够实时感应、监控、识别、反馈商品内部环境的变化,将产品信息传递给管理者以及消费者,从而使管理者可及时对产品做出调整,同时提高了消费者对产品的安全意识、拉近了消费者与产品的距离。“逻辑”,即根据产品内环境的变化,产品的包装可自动化或者智能化的进行调控并且记录整个商品链的过程。然而,随着大数据时代的到来,智能包装不再局限于活性包装或者气调包装这样的传统智能包装<sup>[66]</sup>,它可以结合多种技术原理,如印刷技术、通讯技术以及“云数据”等,增加商品的额外价值,给予消费者更深层的服务。按照工作原理,智能包装材料可分为 3 大类型:功能材料型、功能结构型以及信息型。随着材料技术的不断发展,具有功能性的新型材料也不断应用在智能包装上,以下主要介绍功能材料型智能包装材料。

### 5.1 功能材料型智能包装材料

功能材料型智能包装材料<sup>[67]</sup>涉及微生物、化学、材料科学等学科知识,添加一种或多种能够及时感应并反馈环境影响因子对产品质量影响的新型材料,可以取代传统包装材料,增加了包装设计的功能性,使消费者能够很快识别当前购买产品的质量信息。环境因子包括温度、压力、光照、湿度、气体等。目前应用于包装的新型智能材料具有一定的特殊功能,能够感应、识别并以不同的艺术表现形式展示出产品的内在特性变化,有传统活性包装材料、变色包装材料和发光包装材料等。

传统活性包装材料如氧气清除型与释放型等(图 3a),是在智能包装领域应用最早的一类包装材料。变色包装材料是在功能材料型智能包装中应用最为广泛的一类包装材料,主要是指示剂材料,如温敏、气敏、

光敏等功能材料<sup>[65, 67-70]</sup>,主要的实际应用有 O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 指示标志、新鲜度指示标志(图 3b)、时间-温度记录标志(图 3c)、物理冲击记录标志、光致变色标志等。目前有很多相关的应用研究,如 Xu 等<sup>[71]</sup>以酪氨酸酶与酪氨酸的反应为基础,制备时间-温度指示器(TTI),利用酶促使酪氨酸基由无色变为黑色的动力过程检测大菱生鱼片在配送和储藏过程中的品质变化。Ma 等<sup>[72]</sup>将姜黄素加入母胶与 PVA 的混合基质中制备了一种智能薄膜,利用姜黄素与基体之间存在的氢键相互作用,研究在氨气(NH<sub>3</sub>)环境中,不同湿度环境条件下智能包装薄膜的颜色响应。Silva-Pereira 等<sup>[73]</sup>制备了一种基于 CS、玉米淀粉和红甘蓝提取物的 pH 值监测系统薄膜,研究在不同 pH 值激活下包装鱼类的薄膜的颜色变化。而发光包装,主要结合印刷技术与包装结构设计,利用如发光油墨、发光纤维和发光涂料等功能材料实现智能化监测。如 Webb 为 Bombay Sapphire 设计的一款旅行零售包装通过电子印刷技术将电致发光油墨印刷在该酒包装上,可以实现 18 s 内完成一次图案依次变亮的过程,从而吸引消费者的注意(图 3d)<sup>[67]</sup>。2017 年, Mishra 等<sup>[74]</sup>制备了一种表面涂有智能水凝胶的长周期光纤光栅(LPFG),这种 LPFG 容易受到其周围溶液 pH 值变化的影响,因此具有 pH 响应性,其 pH 值检测范围可达 2~12。此外,还有一些新型功能材料也受到智能包装领域研究者的广泛关注,如以水凝胶作为涂层的智能凝胶材料<sup>[75]</sup>、变形记忆材料<sup>[76]</sup>等。这些材料目前在智能包装中的实际应用较少,但因其具有自修复、形状记忆等功能而具有诱人的发展前景;此外,可同时与发光材料、变色材料、活性包装材料或气调包装材料等结合,从而制备一种新型多功能化的智能包装,这也将会是一个非常具有活力的研究领域。



图 3 O<sub>2</sub>脱除剂(a),指示薄膜包装肉制品储存在 4 °C 后指示标志的指示效果示意图(b)<sup>[65]</sup>,时间-温度记录标志(c)<sup>[65]</sup>,Bombay Sapphire 旅行零售包装(d)<sup>[67]</sup>

Fig. 3 O<sub>2</sub> scavenger (a), schematic diagram of indication effect of the oxygen indicator film packaged meat product at 4 °C (b)<sup>[65]</sup>, time-temperature recording mark (c)<sup>[65]</sup>, Bombay Sapphire travel retail pack (d)<sup>[67]</sup>

## 5.2 智能包装发展前景

智能包装尤其是信息型智能包装在国内起步比较晚,包装技术以及新材料的应用也都相对落后,而且制备成本也相对比较高。同时智能包装使用的新型材料如指示剂、染色剂等是否会在食品或者药品中发生迁移,以及是否会对人体构成危害还有待进一步的研究<sup>[77]</sup>,因此对于该材料的选用以及用量都应引起重视。在现今新型材料迅猛发展和电子信息大爆炸的时代背景下,智能包装材料对于实现自动化和智能化的商品生产运输及销售“一条龙”,促进包装产业从传统制造业向工业 4.0 时代发展,实现电子和材料等跨行业的合作,以及高效、共同发展的商业链将起着至关重要的作用。更有甚者,有学者调查消费者是否愿意支付智能包装技术或纳米技术延长产品货架寿命所带来的昂贵费用,结果表明消费者愿意享受这一便利<sup>[78]</sup>。因而,智能包装在未来各个行业的使用前景将一片光明,尤其是在食品以及医疗药品等领域的应用。因此,对于智能包装的研究与发展方向可归结为以下几个方向:① 新型材料与包装原件(射频原件、传感器等)的有机集成;② 包装原件之间的互相应用,如可传感的射频识别功能标签等;③ 新型的材料技术应用在智能包装上,如碳纳米材料技术与智能技术结合形成纳米智能包装、生物技术与智能技术结合形成生物基智能技术,实现包装的可持续发展;④ 智能包装技术应用于气调或活性包装中,形成多功能的保鲜智能包装;⑤ 降低智能包装系统的成本,实现智能包装的日常应用。

## 6 结 语

随着新型材料以及新型材料制备技术的不断开发与应用,高阻隔、保鲜、抗菌、生物可降解、智能自动化等材料的开发使得包装材料功能化,并有逐渐取代传统包装材料应用于日常包装的趋势,尤其是被广泛应用的食品包装以及药品包装领域。然而,包装功能化也伴随着诸多问题:

(1) 食品安全问题。通过纳米技术所获得的纳米材料,如光降解剂和染色剂等有毒纳米物质,可能会迁移至食品中从而对人体健康造成威胁,因而生物纳米材料的研究需日益加强。

(2) 纸质材料应用受限。目前纸质包装材料的利用大多局限于物联网时代的“快递包装”,在日常包装中依旧以塑料应用居多。纸质材料来源广泛、成本较低且具有可降解性,是一种绿色可持续材料,然而在造纸过程中会有大量废水废料的排放而导致环境污染。因而,改善纸浆造纸的工艺技术以扩大纸质材料的应用范围是未来一大热点研究方向。

(3) 生物包装材料应用受限。我国地大物博,不论

是海洋还是森林等生物质资源均较为丰富,尽管生物包装材料(如大豆蛋白、多糖等)在可食性包装等相关领域研究很多,但是由于力学性能或者阻隔性能等不太理想,因而在市场上并未深入应用。因此需要研究者们不断提高工艺技术以提升其包装性能、减少成本,从而实现大规模应用。

未来包装材料的发展应当与时俱进,充分利用云数据时代带来的技术革新,实现包装的自动化和智能化;同时充分利用我国的生物资源,解决食品安全问题的同时提倡可持续发展,并致力于工艺技术的提高。因而,包装材料的未来发展方向可总结为以下几个方面:① 多功能生物材料以塑料或者纸质材料为基材制备生物包装材料,并实现其在食品或者其他领域的大规模应用;② 开发多功能智能化包装,比如生物智能包装、智能纳米包装、智能活性包装等;③ 新型工艺技术的开发,实现包装自动化生产,并且能够降低生产成本;④ 致力于食品安全研究,开发出安全、健康和环保的食品包装材料。

## 参考文献 References

- [1] 邵海燕,陈杭君,穆宏磊,等. 中国食品学报[J], 2015, 15(10): 1-10.  
GAO H Y, CHEN H J, MU H L, *et al.* Journal of Chinese Institute of Food Science & Technology[J], 2015, 15(10): 1-10.
- [2] 田丰,杜振杰,刘长军,等. 医疗卫生装备[J], 2015, 36(3): 107-109.  
TIAN F, DU Z J, LI C J, *et al.* Chinese Medical Equipment Journal[J], 2015, 36(3): 107-109.
- [3] 付露颖,王锐,张有林. 包装与食品机械[J], 2018, 36(1): 51-56.  
FU L Y, WANG R, ZHANG Y L. Packaging and Food Machinery[J], 2018, 36(1): 51-56.
- [4] 陈昌杰. 塑料包装[J], 2017, 27(6): 1-8.  
CHEN C J. Plastics Packaging[J], 2017, 27(6): 1-8.
- [5] LIU H, LI D L, XU W C, *et al.* Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging[J], 2019, 543: 597-602.
- [6] 谢超杰,王克俭. 塑料包装[J], 2018, 28(2): 8-11.  
XIE C J, WANG K J. Plastics Packaging[J], 2018, 28(2): 8-11.
- [7] 姬岩岩,王克俭. 塑料包装[J], 2018, 28(26): 38-39.  
JI Y Y, WANG K J. Plastics Packaging[J], 2018, 28(26): 38-39.
- [8] 郭康丽,张一辉,张一铭,等. 工程塑料应用[J], 2018, 46(1): 128-133.  
GUO K L, ZHANG Y H, ZHANG Y M, *et al.* Engineering Plastics Application[J], 2018, 46(1): 128-133.
- [9] 刘丹. 包装学报[J], 2014, 6(4): 24-30.  
LIU D. Packaging Journal[J], 2014, 6(4): 24-30.
- [10] 杨烁冰,杨涛. 塑料包装[J], 2018, 28(4): 20-31.  
YANG S B, YANG T. Plastics Packaging[J], 2018, 28(4): 20-31.



- [11] 潘健, 叶青松, 胡国利. 塑料包装[J], 2018, 28(2): 20-22.  
PAN J, YE Q S, HU G L. *Plastics Packaging*[J], 2018, 28(2): 20-22.
- [12] 杨涛, 杨铄冰. 塑料包装[J], 2017, 27(4): 1-7.  
YANG T, YANG S B. *Plastics Packaging*[J], 2017, 27(4): 1-7.
- [13] GUAN D, BRUCCOLERI A R, HEILMANN R K, *et al.* *Journal of Micromechanics and Microengineering*[J], 2014, 24(2): 027001.
- [14] SUBRAMANYAM T K, NAIDU B S, UTHANNA S. *Crystal Research & Technology*[J], 2015, 35(10): 1193-1202.
- [15] CABEDO L, GAMEZ-PÉREZ J. *Nanomaterials for Food Packaging* [J], 2018, 13-45.
- [16] SILVA R T D, MANTILAKA M M M G P G, RATNAYAKE S P, *et al.* *Carbohydrate Polymers*[J], 2017, 157: 739-747.
- [17] YANG J, BAI L, FENG G, *et al.* *Industrial & Engineering Chemistry Research*[J], 2013, 52(47): 16745-16754.
- [18] MERICER C, MINELLI M, ANGELIS M G D, *et al.* *Industrial Crops and Products*[J], 2016, 93: 235-243.
- [19] GARCÍA-CAMPO M, TEODOMIRO B, LUIS Q C, *et al.* *Polymer* [J], 2017, 10(1): 3-17.
- [20] MERICER C, MINELLI M, GIACINTI B M, *et al.* *Carbohydrate Polymers*[J], 2017, 174: 1201-1212.
- [21] 付宁, 赵雄燕, 姜志绘, 等. 塑料科技[J], 2016, 44(2): 88-92.  
FU N, ZHAO X Y, JIANG Z H, *et al.* *Plastics Science and Technology*[J], 2016, 44(2): 88-92.
- [22] 雷琼. 山东化工[J], 2017, 46(19): 79-80.  
LEI Q. *Shandong Chemical Industry*[J], 2017, 46(19): 79-80.
- [23] 刘北辰. 塑料包装[J], 2015, 25(6): 12-15.  
LIU B C. *Plastics Packaging*[J], 2015, 25(6): 12-15.
- [24] 刘希真, 孙运金, 仝其根, 等. 中国包装工业[J], 2014(24): 3-5.  
LIU X Z, SUN Y J, TONG Q G, *et al.* *China Packaging Industry*[J], 2014(24): 3-5.
- [25] 霍鹏. 工程塑料应用[J], 2016, 44(3): 150-153.  
HUO P. *Engineering Plastics Application*[J], 2016, 44(3): 150-153.
- [26] 刘龙双, 杨根旺, 章钦, 等. 中国塑料[J], 2018, 32(8): 1-6.  
LIU L S, YANG G W, ZHANG Q, *et al.* *China Plastics*[J], 2018, 32(8): 1-6.
- [27] KUMAR S, MAITI P. *Cheminform*[J], 2016, 6(72): 67449-67480.
- [28] YANG N, SUN Z X, FENG L S, *et al.* *Advanced Manufacturing Processes*[J], 2015, 30(2): 143-154.
- [29] MUTHURAJ R, MISRA M, MOHANTY A K. *Journal of Applied Polymer Science*[J], 2017, 135(24): 45726-45760.
- [30] 张蓉, 兰文婷, 邹倩, 等. 塑料工业[J], 2017, 45(12): 1-5.  
ZHANG R, LAN W T, ZOU Q, *et al.* *China Plastics Industry* [J], 2017, 45(12): 1-5.
- [31] 杨薇, 杨玉鹰, 蔡亦金, 等. 功能材料[J], 2016, 47(4): 105-109.  
YANG W, YANG Y Y, CAI Y J, *et al.* *Journal of Functional Materials*[J], 2016, 47(4): 105-109.
- [32] 马艳霞, 肖长发, 徐乃库, 等. 纺织学报[J], 2012, 33(11): 1-5.  
MA Y X, XIAO C F, XU N K, *et al.* *Journal of Textile Research*[J], 2012, 33(11): 1-5.
- [33] 曹龙奕, 于志彬. 包装与食品机械[J], 2015, 33(4): 50-55.  
CAO L Y, YU Z B. *Packaging and Food Machinery*[J], 2015, 33(4): 50-55.
- [34] SHIT S C, SHAH P M. *Journal of Polymers*[J], 2014(2014): 1-13.
- [35] 孙宛茹, 贾仕奎, 孙垚垚, 等. 现代化工[J], 2018, 38(6): 52-55.  
SUN W R, JIA S K, SUN Y Y, *et al.* *Modern Chemical Industry*[J], 2018, 38(6): 52-55.
- [36] 雷桥, 王易芬, 李立. 塑料包装[J], 2018, 28(1): 40-45.  
LEI Q, WANG Y F, LI L. *Plastics Packaging*[J], 2018, 28(1): 40-45.
- [37] MIGUEL A D L, AIDE S, ROMEO R, *et al.* *Food Packaging and Shelf Life*[J], 2015, 3: 70-75.
- [38] OTONI C G, AVENA-BUSTILLOS R J, AZEREDO H M C, *et al.* *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*[J], 2017, 16(5): 1151-1169.
- [39] 左贯杰, 陈复生, 张丽芬, 等. 食品工业[J], 2016, 37(11): 190-194.  
ZUO G J, CHEN F S, ZHANG L F, *et al.* *The Food Industry*[J], 2016, 37(11): 190-194.
- [40] 孟令伟, 李娟, 张东杰. 包装工程[J], 2015, 36(5): 53-55.  
MENG L W, LI J, ZHANG D J. *Packaging Engineering*[J], 2015, 36(5): 53-55.
- [41] FARHAN A, HANI N M. *Food Hydrocolloids*[J], 2017, 64: 48-58.
- [42] 李佩葵, 张美云, 常会军, 等. 陕西科技大学学报(自然科学版)[J], 2014, 32(4): 14-18.  
LI P Y, ZHANG M Y, CHANG H J, *et al.* *Journal of Shaanxi University Science and Technology (Natural Science Edition)* [J], 2014, 32(4): 14-18.
- [43] 郑秋丽, 王清, 高丽朴, 等. 食品科学[J], 2018, 39(3): 317-323.  
ZHENG Q L, WANG Q, GAO L P, *et al.* *Food Science*[J], 2018, 39(3): 317-323.
- [44] BODBODAK S, MOSHFEGHIFAR M. *Eco-Friendly Technology for Postharvest Produce Quality*[J], 2016, 4: 127-183.
- [45] SUN Y, LI W. *Journal of Food Measurement and Characterization* [J], 2017, 11(2): 592-597.
- [46] YANG Y Q, WU J J, LI C X, *et al.* *Journal of Materials, Processing and Design*[J], 2017, 166: 611-613.
- [47] 李铁华, 张慙. 中国农学通报[J], 2012, 28(22): 158-162.  
LI T H, ZHANG M. *Chinese Agricultural Science Bulletin*[J], 2012, 28(22): 158-162.
- [48] LI T, ZHANG M. *Food Science and Technology*[J], 2015, 60(2): 1046-1053.
- [49] 俞静芬, 尚海涛, 凌建刚, 等. 农产品加工[J], 2018(22): 4-5.  
YU J F, SHANG H T, LING J G, *et al.* *Farm Products Processing* [J], 2018(22): 4-5.
- [50] MALHOTRA B, KESHWANI A, KHARKWAL H. *Frontiers in Microbiology*[J], 2015, 16(1): 1151-1169.
- [51] 马超, 吴瑛. 中国酿造[J], 2016, 35(1): 5-9.

- MA C, WU Y. China Brewing[J], 2016, 35(1): 5-9.
- [52] 赵欣, 朱健健, 李梦, 等. 材料导报[J], 2016, 30(7): 68-73.  
ZHAO X, ZHU J J, LI M, *et al.* Materials Review[J], 2016, 30(7): 68-73.
- [53] LIU Y W, WANG S Y, LAN W T. International Journal of Biological Macromolecules[J], 2017, 107: 848-854.
- [54] HOSEINNEJAD M, JAFARI S M, KATOZIAN I. Critical Reviews in Microbiology[J], 2018, 44(2): 161-181.
- [55] OTHMAN S H. Agriculture and Agricultural Science Procedia[J], 2014, 2: 296-303.
- [56] ARFAT Y A, EJAZ M, JACOB H, *et al.* Carbohydrate Polymers[J], 2017, 157: 65-71.
- [57] 周川, 李义和, 蒋振华, 等. 化学研究与应用[J], 2015(6): 769-776.  
ZHOU C, LI Y H, JIANG Z H, *et al.* Chemical Research and Application[J], 2015(6): 769-776.
- [58] NOH H, YU J S, KO J S, *et al.* Bulletin of the Korean Chemical Society[J], 2017, 38(8): 890-898.
- [59] 赵树强, 宁晚娥, 林海涛, 等. 丝绸[J], 2018, 55(7): 13-20.  
ZHAO S Q, NING W E, LIN H T, *et al.* Silk[J], 2018, 55(7): 13-20.
- [60] 刘银鑫, 肖生苓, 岳金权, 等. 森林工程[J], 2014, 30(3): 140-142.  
LIU Y X, XIAO S L, YUE J Q, *et al.* Forest Engineering[J], 2014, 30(3): 140-142.
- [61] 赵冉冉, 孙彬青, 高晶晶, 等. 广州化工[J], 2017, 45(12): 5-7.  
ZHAO R R, SUN B Q, GAO J J, *et al.* Guangzhou Chemistry Industry[J], 2017, 45(12): 5-7.
- [62] 李传友, 赵丽霞, 张京开, 等. 农学学报[J], 2014, 4(5): 35-40.  
LI C Y, ZHAO L X, ZHANG J K, *et al.* JOURNAL AGRICULTURE[J], 2014, 4(5): 35-40.
- [63] 肖生苓, 刘银鑫, 李琛, 等. 食品科学[J], 2016, 37(8): 248-254.  
XIAO S L, LIU Y X, LI C, *et al.* Food Science[J], 2016, 37(8): 248-254.
- [64] BIJI K B, RAVISHANKAR C N. Journal of Food Science and Technology[J], 2015, 52(10): 6125-6135.
- [65] 廖雨瑶, 陈丹青, 李伟, 等. 绿色包装[J], 2016(2): 39-46.  
LIAO Y Y, CHEN D Q, LI W, *et al.* Green Packaging[J], 2016(2): 39-46.
- [66] JANJARASSKUL T, SUPPAKUL P. Critical Reviews in Food Science and Nutrition[J], 2018, 58(5): 808-831.
- [67] 柯胜海, 庞传远. 包装工程[J], 2018, 39(21): 15-19.  
KE S H, PANG C Y. Packaging Engineering[J], 2018, 39(21): 15-19.
- [68] MATINDOUST S, BAGHAELI-NEJAD M, ZOU Z, *et al.* Sensor Review[J], 2016, 36(2): 169-183.
- [69] WANG S D, LIU X H, YANG M, *et al.* Packaging Technology and Science[J], 2015, 28(10): 839-867.
- [70] TOMIKAWA M, OKUDA R, OHNISHI H. Journal of Photopolymer Science and Technology[J], 2015, 28(1): 73-77.
- [71] XU F, GE L, LI Z, *et al.* Journal of Ocean University of China[J], 2017, 16(5): 847-854.
- [72] MA Q Y, DU L, WANG L J. Sensors and Actuators B: Chemical[J], 2017, 244: 759-766.
- [73] SILVA-PEREIRA M C, TEIXEIRA, J A, PEREIRA-JÚNIOR V A, *et al.* LWT-Food Science and Technology[J], 2015, 61(1): 258-262.
- [74] MISHRA S K, ZOU B, CHIANG K S. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics[J], 2017, 23(2): 284-288.
- [75] JEON S J, HAUSER A W, HAYWARD R C. Accounts of Chemical Research[J], 2017, 50(2): 161-169.
- [76] 陈花玲, 罗斌, 朱子才, 等. 西安交通大学学报[J], 2018, 52(2): 1-12.  
CHEN H L, LUO B, ZHU Z C, *et al.* Journal of Xi'an Jiaotong University[J], 2018, 52(2): 1-12.
- [77] SZCZEPA ŃSKA N, KUDLAK B, NAMIE ŚNIK J. Analytica Chimica Acta[J], 2018, 1023: 1-21.
- [78] KAREN O' A M, JOSEPH P K. Food Packaging and Shelf Life[J], 2016, 9: 1-9.

(编辑 费蒙飞)