

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.03.019

黄琪燕, 兰雨飞, 武淑芬, 等. 除氧功能性材料在食品保鲜领域研究进展[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(3): 190-196.

HUANG Q Y, LAN Y F, WU S F, et al. Research progress of deoxygenation functional materials in the field of food preservation[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(3): 190-196.

除氧功能性材料在食品保鲜领域研究进展

黄琪燕¹, 兰雨飞¹, 武淑芬¹✉, 杨维巧²✉, 王文娟², 段晓亮², 于尚可³

(1. 天津科技大学 食品科学与工程学院, 天津 300457;
2. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食品质营养研究所, 北京 100037;
3. 沈阳农业大学 食品学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 除氧功能性材料(除氧剂、除氧包装)具有降低包装内部氧气含量, 建立低氧微环境的作用, 对于延长食品货架期、保障食品安全具有重要的研究价值与应用潜力。基于除氧功能性材料物理特性的多样性, 依据除氧材料的除氧作用方式不同, 分类介绍了各类除氧剂、除氧薄膜及其除氧作用机理, 分析了各类除氧材料在除氧功效方面存在的差异, 比较了目前常用薄膜制备技术的优缺点, 综述了国内外在除氧功能性材料研发领域的研究进展和在食品中的应用, 总结并展望了基于除氧功能性材料在食品保鲜领域面临的挑战和发展趋势, 为及时了解新型食品功能材料的研究现状, 推动食品除氧材料的技术创新与应用提供参考。

关键词: 除氧剂; 除氧包装; 食品保鲜; 食品腐败; 研究进展

中图分类号: TS206.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)03-0190-07

网络首发时间: 2025-05-07 17:15:32

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250507.1524.002>

Research Progress of Deoxygenation Functional Materials in the Field of Food Preservation

HUANG Qi-yan¹, LAN Yu-fei¹, WU Shu-fen¹✉, YANG Wei-qiao²✉,
WANG Wen-juan², DUAN Xiao-liang¹, YU Shang-ke³

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Institute of Quality and Nutrition, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 3. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China)

Abstract: Functional deoxygenation materials (including oxygen scavengers and deoxygenation packaging) have the potential to reduce the oxygen content inside the packaging and establish a low-oxygen micro-

收稿日期: 2024-10-16; 修图日期: 2024-11-19; 录用日期: 2024-11-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项“食品除氧功能膜材料优化制备与安全性评价”(ZX2408)

Supported by: Fundamental Research Funds of the Central Research Institutes “Optimal preparation and safety evaluation of food functional deoxygenation materials” (No. ZX2408)

第一作者: 黄琪燕, 女, 1999年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品加工与安全, E-mail: 17860840170@163.com

通信作者: 武淑芬, 女, 1985年出生, 博士, 副教授, 研究方向为功能因子及其稳态化, E-mail: wushufen@tust.edu.cn

杨维巧, 女, 1988年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为食品功能性包装材料, E-mail: ywq@ags.ac.cn

environment, which is of great research value and application potential for prolonging the shelf-life of food and ensuring food safety. Based on the diversity of physical properties of functional deoxidation materials, this paper firstly introduces various types of deoxidants, deoxidation films and their deoxidation mechanisms based on the different deoxidation modes of deoxidation materials, the differences of deaeration efficiency of various deaeration materials were analyzed, compares the advantages and disadvantages of the commonly used film preparation techniques, reviews the research progress in the field of research and development of deoxidation materials at home and abroad and their applications in food, and summaries and looks forward to the challenges and development of food preservation based on deoxidation functional materials. The review provides a reference to keep abreast of the research status of new functional materials for food and to promote the technological innovation and application of deoxidation materials for food.

Key words: oxygen scavengers; deoxygenation packaging; food preservation; food spoilage; research progress

氧气是氧敏感性食品保鲜的环境危害因子, 通过参与脂质氧化、促进需氧微生物生长、酶促褐变等多种途径^[1], 不仅引起氧敏感性食品色泽、质地、风味等感官品质劣变, 食用过度氧化食品还会对消费者健康造成潜在危害。例如, 高不饱和脂肪酸食品氧化过程中产生的次级副产物 4-羟基壬烯醛、丙二醛在动物和细胞水平均证实产生毒性, 被认为是潜在的致癌物^[2], 此外, 脂质氧化中产生的过氧化自由基会诱导低密度脂蛋白氧化形成氧化型低密度脂蛋白, 与动脉粥样硬化等多种疾病的产生密切相关^[3]。因此, 采用有效技术降低加工、运输和储藏中食品包装内环境中的氧气, 对于延长食品货架期、保持食品品质、保证食品安全都具有非常重要的研发与应用意义。

真空/气调包装、添加除氧剂、除氧包装是现阶段食品包装内降低氧气含量的主要调控技术。其中, 真空或气调包装通过抽真空或充填惰性气体 (N_2 、 CO_2 以及混合气体) 等物理方式降低包装内氧气含量^[4-5], 然而, 多数膜材料的渗透性强, 外界氧气会不断渗透进入包装中, 即使抽真空包装内仍会残留 2%~5% 氧气, 这部分氧气加速氧敏感性食品氧化, 无法有效抑制氧气参与的氧化劣变。然而, 除氧剂通过与游离氧或溶解氧发生氧化反应, 消耗包装内环境残留的氧气。依据化学组成不同, 主要分为铁系、亚硫酸盐系和酶系、酚酸系除氧剂, 主要以小袋包装的形式应用在食品加工领域, 在使用中易被消费者误食或发生破

裂等风险^[6], 此外, 酶系除氧剂对相对湿度、pH、温度等环境因素敏感, 在使用过程中易造成除氧活性大幅降低等问题。除氧包装可以实现食品包装中残留氧气或外界渗透氧气的吸收功能, 具有使用方便、工艺简便、应用灵活、除氧效率高等优势, 近年来在除氧材料研发领域备受关注^[7]。然而, 现阶段开发除氧效率高、除氧效果持久、绿色安全的除氧功能材料仍面临巨大挑战。

在已报道的文献中, Dey 等^[8]综述了铁、钡、抗坏血酸、 α -生育酚、不饱和碳氢化合物等氧清除系统的除氧性能; Kirtira 等^[9]重点介绍了新型天然除氧剂和活性高阻氧包装在食品包装领域的研究进展。虽然近年来国内外对于除氧功能新材料的相关研究性成果屡见报道, 但是关于相关研究进展的综述性论文鲜少报道, 本文结合近年来除氧材料的最新报道, 详细阐述了国内外除氧材料的分类与除氧作用机理, 系统总结了除氧包装在食品中的应用进展并对其未来发展趋势做出展望, 将为及时掌握新型食品功能材料研发动态提供依据, 为新型食品除氧材料的研发提供重要思路。

1 除氧材料分类与作用机理

除氧材料作为活性包装材料之一, 具有延缓食品氧化、延长货架期等作用, 涵盖了果蔬、肉类以及乳制品保鲜等应用领域。除氧材料包括除氧剂与除氧包装, 表 1 总结了不同除氧材料的分类与作用机理。下文将依据除氧材料作用方式不同进行详细介绍。

表 1 除氧材料分类及作用机理
Table 1 Classification and mechanism of deoxygenation materials

类别	作用机理		优缺点	参考文献
除氧剂	铁系除氧剂	强还原性 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 与氧气发生氧化反应生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和水	优点：除氧效果强、除氧效率高 缺点：对相对湿度敏感、易泄露	[11-13]
	亚硫酸盐系除氧剂	亚硫酸盐（如亚硫酸钠 Na_2SO_3 ）作为强还原剂，与水中的溶解氧反应生成硫酸钠	优点：除氧速率快、成本低廉 缺点：对相对湿度高度依赖	[14-15]
	酶系除氧剂	酶作为生物催化剂，通过加速氧化反应速率，达到清除氧气浓度的目的	优点：安全环保、除氧高效 缺点：对相对湿度、温度敏感	[16-18]
	酚酸系除氧剂	强还原基团（羟基、烯二醇基）与氧气发生氧化还原反应	优点：绿色安全、取材方便 缺点：需要添加金属催化剂	[19-22]
除氧包装	除氧剂包埋复合膜	除氧因子包封在聚合物中，利用其除氧功能，消除氧气	优点：封装效率高、安全性强 缺点：除氧时效短，除氧剂不稳定	[28-30]
	除氧高分子薄膜	聚合物中的烯丙基氢键与氧分子结合形成过氧基自由基	优点：除氧效率高、效果持久 缺点：工艺复杂、机械性能差	[31-34]

2 除氧剂

除氧剂通过消耗包装内环境的氧气实现低氧的储藏条件，显著抑制氧气参与的脂质氧化、酶促褐变等反应，具有延缓食品品质劣变的调控作用。研究发现，当包装内氧气含量低于 2% 时，还能显著抑制霉菌和好氧细菌的生长，为预防微生物污染引起的食品腐败及潜在毒素危害提供调控手段^[10]。依据化学性质不同，除氧剂主要分为铁系、亚硫酸盐系除氧剂、酶系、酚酸系除氧剂。

2.1 铁系除氧剂

铁系除氧剂是目前在食品包装中应用最广泛的除氧保鲜剂之一。主要利用强还原性成分 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 在室温下与氧气发生氧化反应生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和水，从而实现消耗氧气的目的，产生低氧内环境包装的效果。铁系除氧剂具有优异的除氧能力，然而在实际应用中，铁系除氧剂对环境相对湿度要求敏感，只有在相对湿度为 75% 以上才能发挥预期的除氧效果^[11]。周芸^[12]等发现铁粉除氧剂（还原铁粉型，标称吸氧量 300 mL）处理煮制干葵瓜子具有良好的除氧保鲜效应。在 40 °C 储藏 24 d 后，添加铁粉除氧剂的葵瓜子酸价和过氧化值分别降低了 38%、32%；与对照组相比，添加铁粉除氧剂处理的预包装煮制干葵瓜子保质期可达 352 d，保质期延长近 2 倍。

除了传统的铁粉除氧剂外，纳米铁除氧剂由于其纳米粒径，为材料提供巨大的比表面积，成为热点研究对象。纳米铁除氧剂是一种利用纳米

技术制成的、粒径为纳米尺度的高效除氧材料，其独特的物理性能可显著提高清除氧气的速率。纳米除氧剂在应用中极易发生凝聚，为提高纳米除氧剂分散性，MariaA 等^[13]将纳米铁高岭土除氧剂分散在低密度聚乙烯中，并研究相对湿度对除氧效率的影响。结果显示，在 50% 相对湿度下，纳米铁高岭土除氧剂除氧效率为 37 mL O_2/g ，在 100% 相对湿度下为 43 mL O_2/g ，在 120% 相对湿度下为约 120 mL O_2/g 。

2.2 亚硫酸盐系除氧剂

亚硫酸盐系除氧剂是一种非金属无机除氧剂，主要由连二亚硫酸钠、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和活性碳组成，除氧机理主要基于其还原性质，亚硫酸盐（如亚硫酸钠 Na_2SO_3 ）作为一种强还原剂，可以与水中的溶解氧反应生成硫酸钠（ Na_2SO_4 ）。但是亚硫酸盐系除氧剂属于高湿度依赖性除氧剂，在相对湿度条件为 75% 以上才能加速亚硫酸盐系除氧剂的反应速率，实现有效除氧效果^[14]。Lee 等^[15]为防止泡菜包装中的氧气会加速泡菜的质地软化、风味逆转、营养损失和变色等品质劣变开发了一种以焦亚硫酸钠为原料的除氧剂。焦亚硫酸钠具有很强的还原性，可快速吸收包装内的氧气。常温下经 168 h 储存后，以焦亚硫酸钠除氧剂包装的泡菜顶空氧体积从 20.9% 降低至 1.33%，同时使用处理的泡菜在储存期间能很好的保持原有风味和质地。

2.3 酶系除氧剂

酶系除氧剂的除氧机理实际是由酶作为生物催化剂,加速氧化反应速率,从而达到清除或降低氧气浓度的目的。如葡萄糖氧化酶,在氧气和水的环境中,该酶催化葡萄糖形成 D-葡萄糖酸并生成过氧化氢,实现快速消耗氧气的目的。此类除氧剂广泛应用于食品保鲜、生物医学和环境保护等领域^[16]。除葡萄糖氧化酶外,常见的酶类除氧剂还有虫漆酶、草酸过氧化酶、过氧化氢酶等。Johansson 等^[17]制备了虫漆酶/木质素磺酸盐复合除氧薄膜。虫漆酶催化酚羟基单电子氧化成苯氧基自由基,同时氧被还原成水,以此降低氧气含量。实验结果显示,在 100%相对湿度放置 6 d 后,含漆酶的薄膜(2 dm²)氧气浓度从 1%降到 0.3% (由 99%N₂ 和 1%O₂ 组成的合成气体);而不含漆酶的薄膜,氧气浓度在储存期内几乎无变化。Wong 等^[18]将疏水改性葡萄糖氧化酶与醋酸乙烯混合,随后浇铸在玻璃瓶的内部,得到形貌均一的氧清除聚合物涂层,在涂层界面处检测到酶含量为 0.553 μg/cm。在封闭玻璃瓶系统中(50 vol% 顶部空间,50 vol% 柠檬酸缓冲液,pH 值 3.5),该涂层在 8 周内有效地减少了 2% 顶部空间氧气。

2.4 酚酸系除氧剂

酚酸系除氧剂具有取材天然、安全无毒的特点,是铁系除氧剂的理想替代品^[19]。酚酸系物质含有强还原基团(羟基、烯二醇基),二者在铁、钴等过渡金属化合物催化下,能与氧气发生氧化还原反应,从而消耗食品包装内部氧气。目前已报道的酚酸类除氧剂主要包括 α-生育酚、连苯三酚、抗坏血酸、没食子酸等。

抗坏血酸除氧剂的除氧效率较低,一般需要添加过渡金属,如铁、钴化合物等^[20]提高反应速率,通过氧气与过渡金属之间的非酶促反应增强酚酸类除氧剂的清除活性。Lee 等^[21]开发了一种由活性炭和抗坏血酸构成的有色除氧剂。结果显示,有色除氧剂和商业铁系除氧剂的氧清除体积分别为(117.4±3.7) mL 和(54.0±4.2) mL,有色除氧剂除氧速率比商业铁系除氧剂高约 2 倍,同时该除氧剂能改善生肉饼的保鲜性能,与对照

组相比生肉饼中的硫代巴比妥酸活性物质显著减少 1 倍,其质地储存期间没有发生改变。有研究表明,过渡金属催化剂的添加量影响除氧速率。例如,Byun 等^[22]开展了 α-生育酚和不同含量(100 mg、150 mg)氯化铁过渡金属复合系统除氧能力的研究。在过渡金属氯化铁存在下,氧分子活化成氧自由基,而 α-生育酚是一种强自由基清除剂,由其提供电子,抑制氧自由基生成,从而消耗包装内氧气。实验结果显示,含 100 mg 氯化铁复合除氧系统的初始顶空氧气含量从 20.9%降至 18.0%;当过渡金属含量增加到 150 mg 时,顶空氧含量进一步下降至 17.1%,这表明过渡金属的含量影响除氧效果。

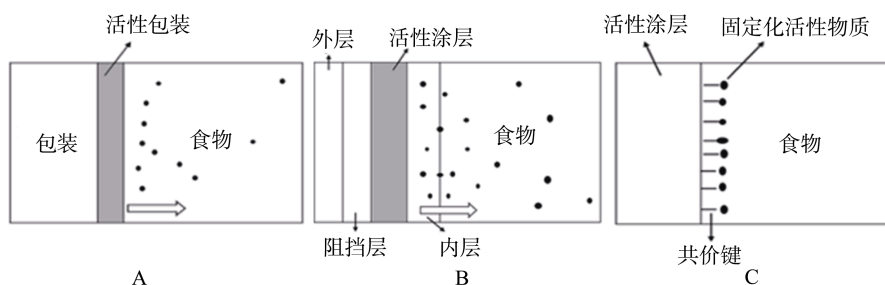
3 除氧包装

3.1 薄膜制备技术

目前薄膜制备技术主要有涂层技术^[23]、层层自组装技术^[24]、固定化技术^[25]、流延技术、溶剂浇铸技术和静电纺丝技术。涂层技术是一种将除氧剂涂在包装材料表面的技术,其目的是在包装内部形成一层保护膜,吸收包装内的氧气,减缓食品的氧化和变质过程(图 1 A)。层层自组装技术是一种简便、快速、普适的层状构筑方法,通过静电相互作用或其他分子间作用力实现不同材料的交替沉积,形成具有除氧功能的多层膜(图 1 B)。固定化技术是将除氧剂通过共价键固定的形式附着在载体上的技术,旨在提高除氧剂的稳定性、持久性和可重复使用(图 1 C)。流延技术是一种经混合、蒸发、干燥、切割等工艺之后可以得到所需成品的薄膜制备技术,具有生产速度快、产品质量稳定、材料利用率高等优点。溶剂浇铸是将聚合物基质与除氧活性物质溶解到合适溶剂中,再将混合液倒在物体表面,通过溶剂蒸发制备薄膜的技术,具有操作简便、成本低廉、适用范围广等优点。但二者制备的薄膜稳定性差,易受外界温度与湿度的影响,且除氧因子在聚合物基质中分布不均匀,除氧因子与氧气结合位点少,导致除氧效果较差。而静电纺丝是近年来在食品领域新兴的制膜方法,其制备的除氧纤维膜拥有超高的比表面积和多孔结构,使其具有高孔

隙率、低渗透阻力的特点^[26]。纺丝装置主要由高压电源、注射泵、喷丝头和导电收集板组成(图 2)。静电纺丝的基本原理是利用高压电场将聚合物溶液生成连续的纳米纤维。在静电纺丝过程中,聚合物溶液以恒定的流速从针头处挤出并形成悬滴。在高压电场下,感应电荷会分布在针尖处的

液滴表面。当感应电荷间的静电力大于液滴表面张力时,针头处的液滴被拉伸成圆锥形,形成泰勒锥结构并喷出。在喷射过程中,由于射流不稳定的快速震荡,导致溶剂不断挥发,从而迅速固化在接地的导电收集板上形成均匀的电纺纳米纤维膜^[27]。



注: A 涂层技术; B 层层自组装技术; C 固定化技术。

Note: A coating technology; B Layer upon layer self-assembly technology; C Immobilization technology.

图 1 薄膜制备技术

Fig.1 Film preparation technology

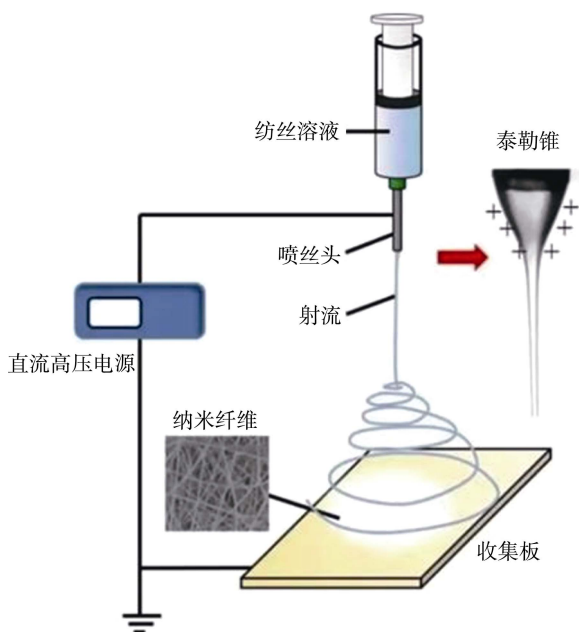


图 2 静电纺丝工艺示意图

Fig.2 Schematic diagram of electrospinning

3.2 除氧剂包埋复合除氧薄膜

除氧剂包埋复合除氧薄膜通过将除氧剂分散包封在聚合物成膜基质内,利用其除氧功能,以达到消除和抑制氧气的目的。相较于除氧剂,除氧剂包埋复合除氧薄膜具有更高的封装效率和安全性,能显著提高除氧剂稳定性和持久性^[28]。Singha 等^[29]采用熔融挤出法制备低密度聚乙烯/

没食子酸复合除氧膜并研究了该膜对去皮大蒜保鲜性能。实验结果显示,去皮大蒜在 25 °C 下储存 35 d 后,使用该复合膜包装的去皮大蒜内部氧气含量从 20.1%降低至 3.2%,同时,相较于未使用复合膜的对照组(重量损失达 20%),含没食子酸的复合膜在储藏第 35 d 后仅表现出 10%的重量损失。为增强除氧薄膜的拉伸性能与增塑作用,Promsorn 等^[30]以连苯三酚(Pyrogallol, PG)为除氧因子,线性低密度聚乙烯(Linear low density polyethylene, LLDPE)为膜材料,开展了不同温度(4、25 和 50 °C)条件下,PG/LLPDE 流延膜的除氧活性研究。实验结果显示,在 4、25、50 °C 条件下,其最大吸氧量分别为 2.2~7.3、4.6~23 和 5.0~13.1 mL O₂/g,并且随着储存温度的升高,PG/LLPDE 流延膜的最大吸氧能力呈现增强趋势,研究证实了 PG/LLPDE 流延膜可有效吸收密封包装顶部空间内残余的氧气。

3.3 除氧高分子薄膜

除氧高分子薄膜是指本身具有除氧功能的高分子成膜基材(如聚降冰片烯、聚丁二烯、聚异戊二烯等)通过流延法、浇铸法、静电纺丝等方法制备而成的一种单一或多元聚合物薄膜。聚合物结构中含高反应活性的不饱和烃,在室温下烯

丙基氢键能够与氧气分子结合形成过氧基和烷氧基自由基,通过自由基终止反应形成过氧化物和氢过氧化物,最后烷氧基自由基分解成羰基。此类薄膜不仅展现了持久的除氧功能、稳定的环境适应性,还因高分子聚合链中丰富的聚烯丙基键所具备的高效除氧效率而备受国内外研究关注。然而,常温下烯丙基键的氧化速率相对迟缓,往往需要添加催化剂加速反应的发生,常用的催化剂如环烷酸钴、新葵酸钴,但二者毒性较高,很大程度限制了其在食品领域的使用^[31]。为克服无机催化剂析出造成的潜在风险, Wang 等^[32]将 Fe(II) salen 与 1-苄基咪唑通过自组装络合反应将催化剂有效结合在材料表面,克服了催化剂析出造成的食品安全风险。结果显示,常温下除氧 30 d 后,该膜可实现 300 mL (STP 下的气)/g (膜) 的氧清除能力且不受相对湿度和环境温度的影响。同时,还比较了 1,2-PB 与 1,4-PB 除氧膜的除氧能力,利用低毒性、环境友好的 Fe(II) Salen 络合物为催化剂,提升了 1,2-PB 膜的氧气清除能力(200 mL (STP 下的气)/g (膜)),其除氧效率是先前报道的 1,4-PB 薄膜和铁系除氧剂的两倍^[33]。针对现有除氧膜材料结构导致的氧气渗透性低、除氧效率受限的问题,赵汝霞等^[34]利用静电纺丝技术制备了 1,2-聚丁二烯多孔状纤维薄膜并将其应用于核桃油抗氧化调控研究。研究结果显示,1,2-PB/Fe(II) salen 静电纺丝膜的氧气吸收速率高达 283 mL O₂/g 膜且可以持续除氧 20 d。在加速氧化条件下(63 °C, 储存 15 d),经该纤维膜处理的核桃油样品中的过氧化值和 p-茴香胺值均显著低于其他除氧材料处理组($P<0.05$)。

4 挑战与展望

近年来,以除氧因子和具有除氧功能的膜为原料,利用涂层、固定化、流延、溶剂浇铸与静电纺丝技术制备食品除氧保鲜包装材料成为热点研究对象。越来越多研究表明,将铁粉、亚硫酸盐、酶类、酚酸类和高分子聚合物等除氧材料应用在畜禽肉、乳制品和果蔬食品中,可有效抑制其微生物生长、延长食品货架期。然而,当前的除氧材料在食品除氧保鲜领域方面的应用仍面临许多挑战。

在未来研究中,可进一步探究如何提高除氧因子在加工过程中的稳定性,以确保其不同加工方式中能长效除氧。其次,需进行充分的安全性评估和毒理学研究,以确保制得的除氧材料在食品保鲜中的应用是安全的。目前的研究主要集中在实验室规模,缺乏实验成果转化和实际食品工业生产的应用,如何实现大规模生产和应用亟待解决。

总之,除氧材料具有广阔的发展和应用前景,尤其在提升食品品质和延长货架期方面显示出巨大潜力。随着研究的深入和技术的不断完善,有望开发出更多安全性高和环境友好型的除氧保鲜食品包装,为除氧材料在食品保鲜领域的应用提供参考依据。

参考文献:

- [1] HUANG X, UK D A. Lipid oxidation and its implications to meat quality and human health[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(5): 1275-128.
- [2] NÈGRE-SALVAYRE A, SALVAYRE R. Proatherogenic effects of 4-hydroxynonenal[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2018, 124: 561-561.
- [3] MUNNO M, MALLIA A, GRECO A, et al. Radical oxygen species, oxidized low-density lipoproteins, and lectin-like oxidized low-density lipoprotein receptor 1: a vicious circle in atherosclerotic process[J]. Antioxidants, 2024, 13(5): 83.
- [4] CHA H, LIANG S, SHI K, et al. Effect of modified atmosphere packaging on the quality characteristics and bacterial community succession of super-chilled chicken meat in biopreservation[J]. LWT- Food Science and Technology, 2023, 189: 115547.
- [5] MORADINEZHAD F, KHAYYAT M, RANJBARI F, et al. Vacuum packaging optimises quality and reduces postharvest losses of pomegranate fruits[J]. Journal of Horticulture and Postharvest Research, 2019, 2(1): 15-26.
- [6] POLYAKOV V, MILTZ J. Modeling of the temperature effect on oxygen absorption by iron-based oxygen scavengers[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(1): 53-56.
- [7] GUPTA P. Role of oxygen absorbers in food as packaging material, their characterization and applications[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 61(2): 242-252.
- [8] DEY A, NEOGI S. Oxygen scavengers for food packaging applications: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 90: 26-34.
- [9] GAIKWAD K, SINGH S, LEE Y. Oxygen scavenging films in food packaging[J]. Environmental Chemistry Letters, 2018, 16(2): 523-538.
- [10] AHMED W, HAQUE A, MOHIBULLAH M, et al. A review

- on active packaging for quality and safety of foods: current trends, applications, prospects and challenges[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33(1): 100913.
- [11] FENG S, LUO Z, SHAO S, et al. Effect of relative humidity and temperature on absorption kinetics of two types of oxygen scavengers for packaged food[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2013, 48(7): 1390-1395.
- [12] 周芸, 刘晓丽, 孙世琨, 等. 煮制干葵瓜子品质变化及预包装产品保质期分析[J]. *食品与生物技术学报*, 2023, 42(5): 43-49.
- ZHOU Y, LIU X L, SUN S K, et al. Analysis of quality change of boiled sunflower seeds and shelf life of pre-packaged products[J]. *Journal of Food and Biotechnology*, 2023, 42(5): 43-49.
- [13] MARIA A, LAGARON J. Oxygen scavenging polyolefin nanocomposite films containing an iron modified kaolinite of interest in active food packaging applications[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 16(1): 211-217.
- [14] VIANA BATISTA, GONCALVES WANZELLER W, et al. Food packing and its oxygen transfer models in active multilayer structures: a theoretical review[J]. *Journal of Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 16(1): 211-217.
- [15] LEE J, JEONG S, LEE H, et al. Development of a sulfite - based oxygen scavenger and its application in Kimchi packaging to prevent oxygen - mediated deterioration of Kimchi quality[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(12): 3009-3018.
- [16] ROBERTA A M. Oxygen scavenging films and coating of biopolymers for food application[J]. *Biopolymer Membranes and Films*, 2020, 15(3): 535-551.
- [17] JOHANSSON K, WINESTRAND S, JOHANSSON C, et al. Oxygen-scavenging coatings and films based on lignosulfonates and laccase[J]. *Journal of Biotechnology*, 2012, 161(1): 14-18.
- [18] WONG D E, ANDLER S M, LINCOLN C, et al. Oxygen scavenging polymer coating prepared by hydrophobic modification of glucose oxidase[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2017, 14: 489-495.
- [19] KUMAR B, RAMAKANTH D, AKHILA K, et al. Novel 3-hydroxyphenol-based moisture activated oxygen scavenger for active packaging[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 38(1): 101141.
- [20] HELAL A, AJJAOU S, MOHAMMED M, et al. Enhancing oxygen scavenging properties of erythorbic acid through tran sition metal catalysis[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 175(175): 516-523.
- [21] LEE J, CHANG Y, LEE E, et al. Ascorbic acid-based oxygen scavenger in active food packaging system for raw meatloaf[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(3): 682-688.
- [22] BYUN Y, DARBY D, COOKSEY K, et al. Development of oxygen scavenging system containing a natural free radical scavenger and a transition metal[J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(2): 615-619.
- [23] 洪志强, 刘龙. 纸代塑涂层技术在新型环保食品用脱氧剂包装材料的开发及应用[J]. *中国包装*, 2023, 43(11): 66-70.
- HONG Z Q, LIU L. Development and application of paper plastic-replacement coating technology in new environmentally friendly food deoxidizer packaging materials[J]. *Chinese Packaging*, 2023, 43(11): 66-70.
- [24] APICELLA A, SCARFATO P, DI MAIO L, et al. Transport properties of multilayer active PET films with different layers configuration[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2018, 127: 29-37.
- [25] YUSHKOVA E D, NAZAROVA E A, MATYUHINA A V, et al. Application of immobilized enzymes in food industry[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(42): 11553-11567.
- [26] MISHRA R, MISHRA P, VERMA K, et al. Electrospinning production of nanofibrous membranes[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17(2): 767-800.
- [27] 管山, 盖广清. 静电纺丝技术在各领域中的应用[J]. *化工技术与开发*, 2022, 51(12): 57-60.
- GUAN S, GAI G Q. Application of electrospinning technology in various fields[J]. *Chemical Technology and Development*, 2022, 51(12): 57-60.
- [28] PAN L, ZHANG M, LU L, et al. A polyethylene base moisture activating oxygen scavenging film co-extruded with tea polyphenols- β -cyclodextrin inclusion complex[J]. *Materials*, 2020, 13(17): 3857.
- [29] SINGH S, GAIKWAD K, LEE Y. Development and application of a pyrogallol acid-based oxygen scavenging packaging system for shelf life extension of peeled garlic[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 256(1): 108548.
- [30] PROMSORN J, HARNKARNSUJARIT N. Pyrogallol loaded thermoplastic cassava starch based films as bio-based oxygen scavengers[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 186: 115226.
- [31] JUAN-POLO A, MAESTRE P, MONEDERO PRIETO M, et al. Double-function oxygen scavenger and aromatic food packaging films based on ldpe/polybutadiene and peanut aroma[J]. *Polymers*, 2021, 13(8): 131.
- [32] WANG Y, HASEGAWA Y, SERIKAWA T, et al. Ultrahigh oxygen-scavenging norbornene copolymers bearing imidazolyl iron complexes for fabricating active and sustainable packaging films[J]. *Chemical Communications*, 2020, 56(6): 964-967.
- [33] WANG Y, SHODA M, HISAMA A, et al. Oxygen scavenging and oxygen barrier poly (1, 2-butadiene) films containing an iron-complex catalyst[J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2019, 220(19): 1900294.
- [34] 赵汝霞, 杨维巧, 王文娟, 等. 1, 2-聚丁二烯基除氧功能性超细纤维膜的制备及其在核桃油保鲜中的应用[J]. *中国粮油学报*, 2023, 1-13.
- ZHAO R X, YANG W Q, WANG W J, et al. Preparation of 1, 2-polybutadienyl deoxygenated functional microfiber membrane and its application in preservation of walnut oil[J]. *Chinese Journal of Grain and Oil*, 2023, 1-13. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。