李雨璐, 张元, 郭佳, 等. 聚乳酸基石墨烯复合高阻隔膜的性能及在冷鲜羊肉保鲜中的应用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 253−262. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080172
LI Yulu, ZHANG Yuan, GUO Jia, et al. Properties of High-barrier Poly (L-Lactic Acid)/Graphene Composite Film and Their Application in Chilled Mutton Preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 253−262. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080172

· 智能装备与可持续包装 ·

聚乳酸基石墨烯复合高阻隔膜的性能及在冷鲜羊肉保鲜中的应用

李雨璐[1], 张　元[1], 郭　佳[1], 吴怡锋[1], 张家涛[1], 王晓晶[3], 全　宇[3], 王　洋[3], 董同力嘎[1,2], 云雪艳[1,2,*]
(1.内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018;
2.中国-内蒙古生物高分子应用“一带一路”联合实验室, 内蒙古呼和浩特 010018;
3.兴安盟农牧科学院, 内蒙古乌兰浩特 137400)

摘　要: 冷鲜羊肉营养丰富，但在贮藏过程中易受微生物污染和脂质氧化影响，导致其感官品质劣变，货架期缩短。本研究开发了一种高阻隔性包装材料，以保障冷鲜羊肉贮藏过程中的品质。首先，采用熔融缩聚法制备氧化石墨烯（Graphene Oxide，GO）接枝的聚 (L-乳酸-co-衣康酸丁二醇酯)（GO-grafted-Poly (L-lactic-co-Butanediol Itaconate)，GO-g-PLBI）柔性材料。以 GO-g-PLBI 与 PLLA 母粒共混制备的 PGLBI 薄膜为基材，通过真空抽滤法在薄膜表面复合 GO-羧甲基纤维素（Carboxymethyl Cellulose，CMC）层，制备 PGLBI/GO-CMC 复合薄膜。探究了复合薄膜气体阻隔性能等包装特性及其在冷鲜羊肉非接触式包装中的应用潜能。结果表明，GO 的引入有效提高了 PGLBI 的亲水性，有利于与 GO-CMC 组分的复合。扫描电子显微镜、X 射线衍射表征结果表明，PGLBI/GO-CMC 薄膜内部形成了致密的“砖-泥”结构，使其氧气透过率由 PGLBI 薄膜的 41.9 $cm^3/m^2 \cdot d$ 下降至 0.5 $cm^3/m^2 \cdot d$。此外，复合薄膜对长波紫外线和中波紫外线透过率为 7.03% 和 1.45%，展现出良好的紫外线屏蔽性能。应用于冷鲜羊肉包装时，复合薄膜可抑制贮藏期间微生物的增殖、蛋白质及脂质氧化。与商用高阻隔聚酰胺/聚乙烯膜相比，该复合薄膜使冷鲜羊肉货架期延长了 5 d。

关键词: 聚 (L-乳酸), 氧化石墨烯, 层合, 阻隔性, 复合薄膜, 冷鲜羊肉, 贮藏品质
中图分类号: TS206.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0253−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080172
本文网刊:

Properties of High-barrier Poly (L-Lactic Acid)/Graphene Composite Film and Their Application in Chilled Mutton Preservation

LI Yulu[1], ZHANG Yuan[1], GUO Jia[1], WU Yifeng[1], ZHANG Jiatao[1], WANG Xiaojing[3], QUAN Yu[3], WANG Yang[3], DONG Tungalag[1,2], YUN Xueyan[1,2,*]
(1.College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
2.China-Mongolia Biomacromolecule Application "Belt and Road" Joint Laboratory, Hohhot 010018, China;
3.Xing'an League Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Ulanhot 137400, China)

Abstract: Chilled mutton was highly nutritious but prone to spoilage during storage due to microbial contamination and lipid oxidation. A high-barrier packaging film for chilled mutton was developed in this study. A flexible graphene oxide (GO)-grafted poly (L-lactic-co-butanediol itaconate) (GO-g-PLBI) was synthesized by melt polycondensation. GO-g-PLBI was blended with PLLA pellets to form PGLBI film. A high-barrier PGLBI/GO-carboxymethyl cellulose (CMC) com-

收稿日期: 2025−08−15
基金项目: 2023 年度自治区直属高校基本科研业务费项目（BR230401）; 国家自然科学基金地区科学基金项目（52163012）; 一流学科科研专项项目立项（YLXKZX-NND-017）; 冷鲜羊肉安全生产与保鲜关键技术研发与示范项目（MBDHZ2025005）; 自治区青年科技人才发展项目（创新团队）（NMGIRT2310）。
作者简介: 李雨璐（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 功能性食品包装材料, E-mail: 1095429382@qq.com。
*** 通信作者:** 云雪艳（1990−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农畜产品及副产物加工贮藏, E-mail: yun_imau@163.com。

posite film was subsequently fabricated by depositing a GO-CMC layer onto the PGLBI surface via vacuum filtration. The packaging properties of the composite film, such as gas barrier performance and its application potential in non-contact packaging of chilled mutton were investigated. Results demonstrated that incorporation of GO effectively improved the hydrophilicity of PGLBI, facilitating its composite with the GO-CMC component. Characterizations by scanning electron microscopy and X-ray diffraction confirmed that a dense "brick-and-mortar" structure was formed inside the PGLBI/GO-CMC film, which reduced its oxygen permeability from 41.9 $cm^3/m^2·d$ of the PGLBI film to 0.5 $cm^3/m^2·d$. Additionally, the composite film exhibited excellent ultraviolet shielding performance, with transmittances of 7.03% for long-wave UV and 1.45% for medium-wave UV. When applied to chilled mutton packaging, the composite film could inhibit microbial proliferation, protein degradation, and lipid oxidation during storage. Compared with the commercial high-barrier polyamide/polyethylene film, the PGLBI/GO-CMC film extended the shelf life of chilled mutton by 5 days.

Key words: poly (L-lactic acid); graphene oxide; lamination; barrier properties; composite film; chilled mutton; storage quality

羊肉富含维生素、优质蛋白质和不饱和脂肪酸等多种营养素，具有显著的食用价值[1]。冷鲜羊肉腐败的原因主要包括微生物增殖、脂肪与蛋白质氧化以及酶促反应引起的品质劣变[2]，这三类诱因均与包装内气体组成密切相关。因此，优化包装技术与材料可有效控制包装内气调环境，延缓冷鲜羊肉腐败进程，保障冷鲜羊肉品质与安全，是延长冷鲜羊肉货架期的关键。

高阻隔性包装材料因其能够长期维持包装内的低氧环境，破坏微生物生长繁殖条件，从而有效延缓肉类腐败变质进程[3]，在冷鲜肉包装领域得到广泛关注和应用。Rodrigues 等[4] 将羊肉放置于托盘中，使用乙烯-醋酸乙烯共聚物、聚偏二氯乙烯和乙烯-乙烯醇共聚多层复合高阻隔塑料膜进行包装，将羊肉贮藏期延长到 14 d。

当前食品包装材料仍主要依赖石油基聚合物，如聚对苯二甲酸乙二醇酯（Polyethylene terephthalate, PET）、聚乙烯等，这类材料不可再生且难降解，对环境造成了严重污染和负担[5]。聚 (L-乳酸)（Poly (L-lactic acid), PLLA）是一种生物可降解材料，因其优异的加工性能[6]，成为食品包装领域的研究热点。然而，PLLA 气体阻隔性较差[7]，限制了其在高阻隔食品包装中的应用。氧化石墨烯（Graphene oxide, GO）是一种新型二维纳米材料，有卓越的物理特性，如低透气性和高紫外线阻隔性。此外，GO 与生物聚合物一样具有降解性，可被某些微生物和酶降解[8]。将 GO 与 PLLA 复合，不仅可以提升复合材料的阻隔性能，还能赋予其更好的机械强度，为食品包装材料开发提供了新的可能性。Dong 等[9] 采用超声波辅助静电纺丝技术制备了 PLLA/纳米 TiO_2（TiO_2NPs）/GO 纳米纤维薄膜，TiO_2NPs 和 GO 的添加显著提高了 PLLA 纳米纤维膜的阻水性能，水蒸气渗透率（Water Vapor Permeability, WVP）为 4.47×10^{-8} $g·cm·s^{-1}·Pa^{-1}$。Zhan 等[10] 在聚 (L-乳酸-co-衣康酸丁二醇酯)（Poly（L-lactic-co-Butanediol Itaconate）, PLBI）上逐层沉积 GO 层，并以壳聚糖（Chitosan, CS）作为粘合层，制备了高阻隔 PLBI/CS/$(GO-CS)_{10}$ 薄膜，其氧气透过率（Oxygen Transmission Rate, OTR）为 1.6 $cm^3/m^2·d$，应用于冷鲜肉包装时，将货架期延长至 16 d。然而，GO 纳米片之间的强 π-π 相互作用 OTR 会引发自聚集，阻碍 GO 在 PLLA 表面形成连续网络的能力，妨碍了 GO 本身高气体阻隔潜力的充分发挥，并限制了薄膜整体气体阻隔性能的进一步提升。

基于以上现状，本研究从薄膜的阻隔性出发，先通过熔融缩聚和共混挤出的方式制备 PGLBI 薄膜，而后真空抽滤制备 GO-羧甲基纤维素（Carboxymethyl Cellulose, CMC）薄膜，将其覆于 PGLBI 薄膜上制备 PGLBI/GO-CMC 复合薄膜，应用于冷鲜羊肉的保鲜包装。依靠薄膜的低透气性维持包装内的低氧气（Oxygen, O_2）浓度，从而抑制微生物生长繁殖，维持肉品色泽和品质，提高货架期。通过对羊肉贮藏期间的色泽、pH、菌落总数（Total viable counts, TVC）、挥发性盐基氮（Total volatile salt base nitrogen, TVB-N）等进行检测，考察其对冷鲜羊肉保鲜的效果。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

GO　片径范围为 5~10 μm，深圳市穗恒科技有限公司；L-乳酸（L-Lactic acid, LA）和六亚甲基二异氰酸酯（Hexamethylene Diisocyanate, HDI）　购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司；1,4-丁二醇和衣康酸　购于美国西格玛-奥德里奇公司；REVODE161 PLLA 颗粒　购于海正生物材料股份有限公司；CMC（取代度 0.65~1.2，粘度（2%）80~140 mPa·s）　购自上海易恩化学技术有限公司；冷鲜羊里脊肉　购自呼和浩特市西苑肉联有限责任公司；所有其他使用的化学试剂均为分析纯。

HARKE-SPCA 型水接触角分析仪　北京哈克测试仪器厂；IRAffinity-1 型傅里叶红外光谱　日本岛津公司；Cary 5000 型紫外可见分光光度计　美国安捷伦公司；Xn-8750 型电子拉伸试验机　济南兰光机电技术有限公司；Regulus 8100 型扫描电子显微镜　日本日立公司；DSC-Q20 型差示扫描量热仪　美国 TA 仪器公司；Miniflex 600 型 X 射线衍射仪　日

本理学公司；8001 型透氧仪　上海澳信检测技术有限公司；Permatran-w3/61 型透湿仪　美国 MOCON 公司；CR-410 型色差计　日本柯尼卡美能达控股公司；NanoBrook 90plus PALS Zeta 电位及粒度分析仪　美国布鲁克海文仪器公司。

1.2　实验方法

1.2.1　薄膜的制备

1.2.1.1　PGLBI 母粒的制备　在张元等[11]方法基础上，调整 GO 添加量至 LA 的 0.5%（质量分数），合成 GO-g-PLBI，将该产物与 PLLA 母粒按 1∶9 质量比混合，添加原料 3%（质量分数）的 HDI 作为加工助剂，通过双螺杆造粒线熔融共混造粒，分别设置料筒 1 区、料筒 2 区、料筒 3~8 区、模头 1 区的温度为 155、165、175、175 ℃，挤出机速度为 100 r/min，喂料机速度为 1 r/min，切粒频率为 5.0 Hz。将制备的 PGLBI 母粒于 50 ℃ 下烘干 6 h 后真空封存备用。

1.2.1.2　PGLBI 薄膜的制备　将 PGLBI 母粒加入双螺杆挤出流延机中，分别设置料筒 1 区、料筒 2 区、料筒 3 区、料筒 4~9 区、快换区、熔体泵区、过渡区、模头 1~3 区温度为 140、160、180、190、210、200、200、210 ℃，挤出机速度为 95 r/min，流延辊 1.8 m/min、牵引辊的速度为 1.8 m/min，收卷辊速度为 35 m/min 制作 PGLBI 薄膜。

1.2.1.3　PGLBI/GO-CMC 的制备　配制 0.1 g/L 的 GO 悬浮液，加入相对于 GO 10%（质量分数）的 CMC，搅拌 1 h，超声 1 h，得到 GO-CMC 悬浮液，取 120 mL 该悬浮液，使用纤维素基滤膜（直径 11 cm，孔径 0.45 μm）真空抽滤，制得 GO-CMC 膜，将其置于盛有 100 mL 无水乙醇的玻璃结晶皿中浸泡，以实现滤膜与 GO-CMC 膜的分离，后将完整的 GO-CMC 膜转移至 PGLBI 薄膜表面，经真空干燥后得到 PGLBI/GO-CMC 复合薄膜[12]。在 GO 悬浮液中加入相对于 GO 质量 5%、10%、15%、20% 的 CMC，配制不同比例的 GO-CMC 悬浮液。同时制备真空抽滤同体积 GO 悬浮液的 PGLBI/GO 薄膜作为对照。

1.2.2　材料表征

1.2.2.1　Zeta 电位测定（Zeta potential，ZP）　使用 Zeta 电位及粒度分析仪测定 Zeta 电位，量取 1.5 mL GO-CMC 悬浮液样品于比色皿中进行分析测定[13]。

1.2.2.2　水接触角测试　水接触角分析仪在静态滴形模式下测量，将 PLLA、PGLBI 薄膜样品置于载玻片上，滴 5 μL 蒸馏水于样品表面，记录的数据在 25 ℃ 下通过视频捕获[12]。

1.2.2.3　傅里叶红外光谱测试（Fourier transform infrared spectroscopy，FTIR）　FTIR 分析 PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜的化学成分。样品规格为 3 cm×3 cm，光谱分辨率为 4 cm^{-1}，扫描频率为 64，扫描范围为 4000~400 cm^{-1}[14]。

1.2.2.4　紫外可见光谱测试　采用紫外可见分光光度计对 PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜进行紫外可见光谱测试。测试波长范围为 200~800 nm，将规格为 3 cm×1 cm 的样品置于石英比色皿中进行测定。此外，在自然光条件下，采集薄膜的光学图片以评估薄膜的透光率[15]。

1.2.2.5　拉伸性能测试　电子拉伸试验机测量 PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜的拉伸性能。薄膜样品规格为 7 cm×0.5 cm，测试面积为 5 mm×28 mm、拉伸速度为 10 mm/min[14]。

1.2.2.6　扫描电子显微镜测试（Scanning electron microscopy，SEM）　SEM 用于观察 PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜的表面形貌与断裂形态。将样品裁剪为 1 cm×1 cm 的方片，在表面均匀溅射一层薄金作为导电层，溅射时间为 1 min，采用 BSE 模式在 5 kV 的加速电压下测量[16]。

1.2.2.7　差示扫描量热仪测试（Differential scanning calorimetry，DSC）　称取 8 mg PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜于铝盘中密封，氮气（N_2）作为保护气，以 10 ℃/min 的加热速率从−50 ℃ 加热到 200 ℃ 进行加热扫描。在 DSC 曲线中观察玻璃化转变温度（T_g）、结晶温度（T_c）、熔融温度（T_m）、焓值（ΔH）等热学参数[17]。

1.2.2.8　X 射线衍射测试（X-ray diffraction，XRD）　PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜样品 XRD 图谱由 X 射线衍射仪用 Cu-Kα 辐射（λ=1.5418 Å）记录。样品规格为 1 cm×1 cm，扫描范围为 5°~60°，扫描速度为 2°/min[15]。

1.2.2.9　气体阻隔性能测试　PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC、聚酰胺/聚乙烯（Polyamide/Polyethylene，PA/PE）薄膜的透氧性由透氧仪测定，测试样品为直径 10 cm 的圆形薄膜，试验在 23 ℃ 下进行，O_2 和 N_2 的输出压力为 0.3 MPa。透湿仪测定水蒸气透过率（Water Vapor Transmission Rate，WVTR），测试样品为直径 5 cm 的圆形薄膜，试验在 90% 相对湿度（Relative Humidity，RH）下进行[18]。氧气渗透系数（Oxygen Permeability coefficient，OP）和水蒸气渗透率（Water Vapor Permeability，WVP）采用 Bu 等[19]的方法进行计算。

1.2.3　羊肉的包装　将新鲜羊里脊肉切割成重约 50±1 g 的肉样，后将其放入规格为 78 mm×50 mm×55 mm 的 PET 盒中，使用 PGLBI、PGLBI/GO-CMC 和 PA/PE 薄膜密封 PET 盒，其中 PA/PE 组为对照组，在 4 ℃、85% RH 条件下贮藏，隔 5 d 取样测试，以肉样完全腐败（TVC>6 lg CFU/g、TVB-N≥20 mg/100 g、pH≥6.7）作为贮藏终点。每次测试每组设置三个平行，结果取平均值。

1.2.4　羊肉品质测定

1.2.4.1　色泽　使用 CR-410 型色差计测定冷鲜肉的亮度值（L^*）、红度值（a^*）及黄度值（b^*）。

1.2.4.2 菌落总数 依据 GB 4789.2-2022《食品微生物学检验菌落总数测定》标准测定羊肉贮藏期间 TVC 变化。TVC 评估标准: 一级鲜度≤4 lg CFU/g, 4 lg CFU/g<二级鲜度≤6 lg CFU/g, 腐败肉>6 lg CFU/g。

1.2.4.3 挥发性盐基氮含量 依据 GB 5009.228-2016《食品中挥发性盐基氮的测定》中半微量定氮法测定羊肉的新鲜度, 以总 TVB-N 水平表示。TVB-N 评定标准: 一级鲜度≤15 mg/100 g, 15 mg/100 g<二级鲜度<20 mg/100 g, 腐败肉≥20 mg/100 g。

1.2.4.4 硫代巴比妥酸反应物质(Thiobarbituric acid reactive substances, TBARS) 依据 GB 5009.181-2016《食品中丙二醛的测定》中的分光光度法评估羊肉贮藏期间脂肪氧化程度, 以 TBARS 值表示。

1.2.4.5 pH 参照 GB 5009.237-2016 标准, 将 pH 计测量探头插入均质后的肉样中, 记录 pH。pH 判断标准: 5.6≤一级鲜度<6.3, 6.3<二级鲜度<6.7, 腐败肉≥6.7。

1.2.4.6 汁液流失率(Drip loss, DL) 通过称重法测试贮藏期间羊肉的 DL。肉样第 0 d 重量记为 W_1, 每次测试称取的肉样重量记为 W_2。DL 以百分比的形式表示, 计算公式如下:

$$DL(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

1.3 数据处理

每组试验均测试 3 次, 结果使用平均值±标准差表示。使用 IBM SPSS Statistics26 进行数据统计分析, 采用最小显著性差异法和邓肯法进行显著性分析, P<0.05 表示差异显著, 使用 Origin 2024 作图。

2 结果与分析

2.1 薄膜测试表征

2.1.1 Zeta 电位分析 ZP 的绝对值大小直接对应溶液分散能力。从图 1 中可以看出在 GO-5% CMC 组 ZP 值为−37.24 mV, 当 CMC 添加量增至 GO 质量的 10% 时, ZP 值为−42.76 mV, 复合体系的稳定性得到显著提升(P<0.05), 但进一步增加 CMC 用量对稳定性改善不再显著。这表明体系始终保持较高电负性, GO 与 CMC 间较强的静电排斥力, 有效减小团聚可能性, 实现均匀分散[13]。故从经济角度出发, 选择 GO-10% CMC 组用于后续试验。

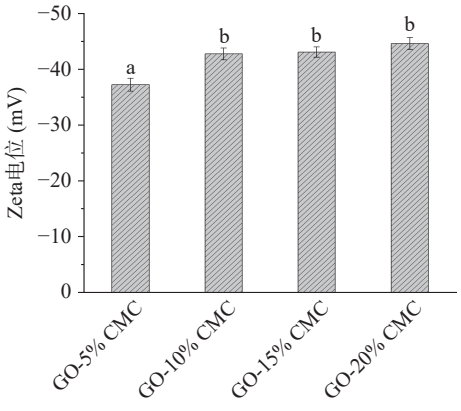


图 1 不同比例 GO-CMC 悬浮液的 ZP

Fig.1 Zeta potential of GO-CMC suspensions at different concentrations

注: 不同小写字母表示具有显著性差异, P<0.05。

2.1.2 水接触角分析 图 2 为 PLLA 和 PGLBI 的水接触角, 从图 2 中可以观察到 PLLA 的水接触角为 77.2°, 而 PGLBI 的水接触角下降到 59.5°, 这可能归因于 GO 表面亲水官能团的引入赋予复合薄膜更高的亲水性。相关研究表明, 通过提升 PLLA 的表面亲水性, 可增强其与壳聚糖的层合性能[20]。

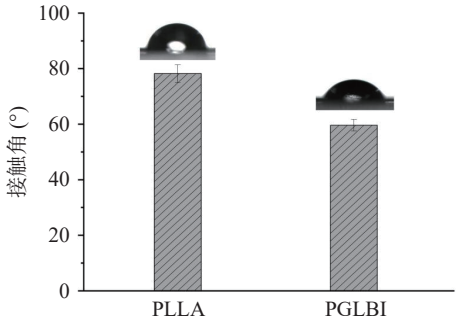


图 2 PLLA 和 PGLBI 的水接触角

Fig.2 Water contact angle of PLLA and PGLBI

2.1.3 傅里叶红外光谱分析 通过 FTIR 分析共聚物的化学结构。如图 3 所示, 所有聚合物中都可以观察到 PLLA 的典型伸缩振动模式, 包括 2995~2850 cm^{-1} 的-CH 伸缩振动、1748 cm^{-1} 的羰基(C=O)伸缩振动、1180 cm^{-1} 的 C-O-C 对称伸缩振动[21]。PGLBI/GO 和 PGLBI/GO-CMC 薄膜均在 3044~3625 和 1616 cm^{-1} 处出现明显吸收峰, 分别与 GO 的-OH 和 C=C 基团的伸缩振动有关[22]。PGLBI/GO-CMC 薄膜在 3044~3625 cm^{-1} 处的宽峰强度更高, CMC 引入了更多的羟基, 1042 cm^{-1} 处-C-O 的吸收峰强度提高, 存在 CMC 的多糖结构, 表明 GO-CMC 组分已存在于复合薄膜中, 实现了在 PGLBI基底上的复合[23]。PGLBI/GO-CMC 与 PGLBI 相比, 1748 cm^{-1} 处的吸收峰红移至 1742 cm^{-1}, 表明和 GO 和 CMC 之间产生了氢键[24]。

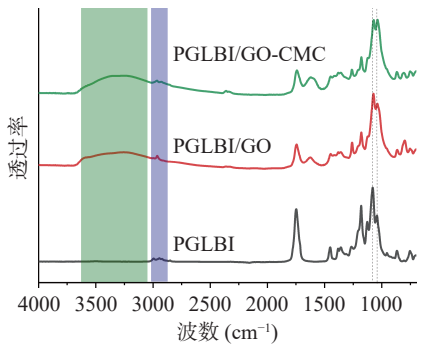


图 3 PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜的 FTIR 光谱

Fig.3 FTIR spectra of PGLBI, PGLBI/GO, PGLBI/GO-CMC films

2.1.4　紫外可见光谱分析　图 4 和表 1 评估了共聚物薄膜的透明度和紫外屏蔽性能。图 4b~图 4d 为薄膜的光学照片。如表 1，PGLBI 薄膜具有 64.7% 透明度，而 PGLBI/GO 和 PGLBI/GO-CMC 薄膜的透明度降低至 36.1% 和 34.5%，这可能是由于抽滤制得的 GO 和 GO-CMC 薄膜均是棕色，转移至 PGLBI 薄膜上导致复合薄膜透光率降低。与 PGLBI 相比，PGLBI/GO 薄膜的紫外线阻隔性能显著提升，长波紫外线（UVA）和中波紫外线（UVB）分别由 56.2% 和 48.8% 降至 6.98% 和 1.39%（表 1），这是因为 GO 纳米片的 π 共轭结构，使薄膜展示出优异的紫外线吸收能力[25]。

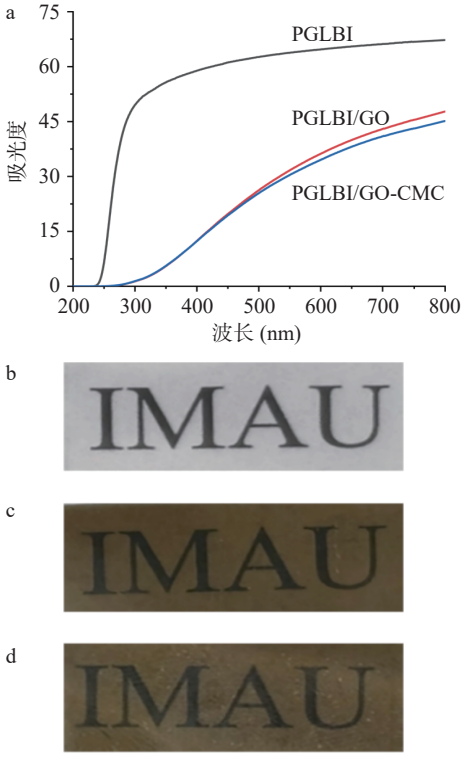


图 4　PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜的紫外可见光谱图（a）和光学照片（b~d）

Fig.4　UV-visible spectra (a) and optical photos (b~d) of PGLBI, PGLBI/GO, PGLBI/GO-CMC films

表 1　PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜紫外可见光谱透过率的定量分析（%）

Table 1　Quantitative analysis of UV-visible spectral transmittance of PGLBI, PGLBI/GO, PGLBI/GO-CMC films (%)

样品	UVB（280~320 nm）	UVA（320~400 nm）	600 nm
PGLBI	48.8	56.2	64.7
PGLBI/GO	1.39	6.98	36.1
PGLBI/GO-CMC	1.45	7.03	34.5

2.1.5　拉伸性能分析　图 5 为复合薄膜的应力-应变曲线，其拉伸强度和断裂伸长率汇总至表 2 中。由表 2 可知，三种薄膜的断裂伸长率保持在 465.1%~484.2% 之间，表明 GO 和 GO-CMC 薄膜与 PGLBI 复合后并没有影响其原有的柔韧性，但与 PLLA（断裂伸长率为 5.6%）相比有大幅提升[6]。此外，PGLBI/GO 和 PGLBI/GO-CMC 薄膜的拉伸强度分别达到 48.19 和 53.60 MPa，这种现象的发生是因为 GO 薄膜本身就具有高的拉伸强度[10]，而 PGLBI/GO-CMC 薄膜表现出更高的拉伸强度的原因可能是因为 GO-CMC 薄膜中 GO 与 CMC 之间形成的氢键网络结构，有效地传递和分担载荷[26]。

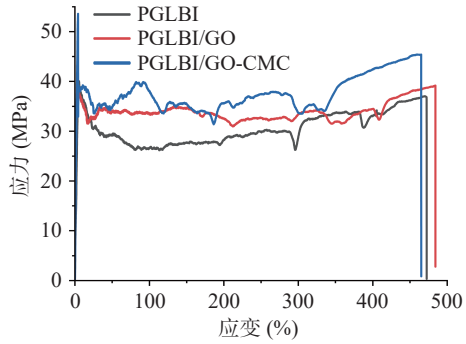


图 5　PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜的拉伸应力-应变曲线

Fig.5　Tensile stress-strain curves of PGLBI, PGLBI/GO, PGLBI/GO-CMC films

表 2　PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜的力学参数

Table 2　Mechanical parameters of PGLBI, PGLBI/GO, PGLBI/GO-CMC films

样品	断裂伸长率（%）	拉伸强度（MPa）
PGLBI	472.4±9.4^{a}	40.08±2.87^{b}
PGLBI/GO	484.2±10.2^{a}	48.19±3.50^{ab}
PGLBI/GO-CMC	465.1±7.3^{a}	53.60±5.52^{a}

注：不同小写字母表示不同薄膜间差异显著，P<0.05；表4同。

2.1.6　SEM 观察微观形貌　SEM 图用于观察复合薄膜的截面和表面微观形貌。图 6（a）、图 6（d）分别为 PGLBI/GO 和 PGLBI/GO-CMC 薄膜的截面形态，均可观察到薄膜表面层合的抽滤薄膜，且该层与 PGLBI 基材间无明显孔隙，这可能是因为抽滤薄膜与基材中的 GO 发生“π-π 堆积”作用，从而形成了良好的界面结合[27]。图 6（b）~图 6（c）和图 6（e）~图 6（f）

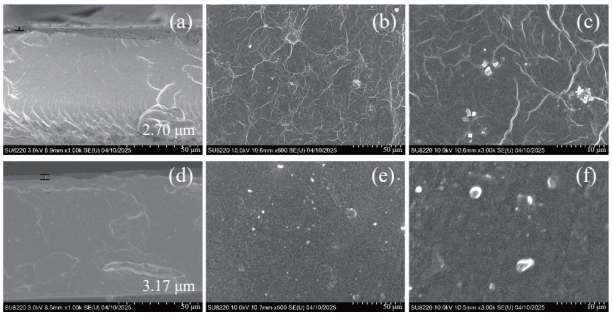


图 6　PGLBI/GO 和 PGLBI/GO-CMC 薄膜的截面、表面形貌图

Fig.6　Cross-sectional and surface morphology images of PGLBI/GO and PGLBI/GO-CMC films

注：（a）PGLBI/GO 薄膜的截面图；（b）PGLBI/GO 薄膜的表面形貌图；（c）PGLBI/GO 薄膜的表面形貌局部放大图；（d）PGLBI/GO-CMC 薄膜的截面图；（e）PGLBI/GO-CMC 薄膜的表面形貌图；（f）PGLBI/GO-CMC 薄膜的表面形貌局部放大图。

为 PGLBI/GO 薄膜和 PGLBI/GO-CMC 薄膜的表面形貌，可以观察到 PGLBI/GO 薄膜存在褶皱和缺陷，但是 PGLBI/GO-CMC 薄膜表面这些缺陷消失并出现了有序排列的“砖-泥”结构，这可能是因为 CMC 的引入产生的插层效应，使得复合薄膜的力学性能和阻隔性能得以改善[28]。

2.1.7 DSC 及 XRD 分析 图 7(a)为复合薄膜的 DSC 升温曲线，并将其热学参数汇总至表 3 中。由表 3 可知，PGLBI 复合 GO 和 GO-CMC 薄膜之后 T_g 分别升高至 53.64 ℃ 和 54.35 ℃，这表明其耐热性提高，而 T_c 出现了不同程度的下降，表明复合薄膜更易结晶。图 7(b)为复合薄膜的 XRD 图谱，可以看出 PGLBI 薄膜未出现衍射峰，表明 PGLBI 薄膜几乎没有结晶。PGLBI/GO 薄膜在 2θ=11.61°处存在的强衍射峰，表明 GO 保持了其独有的层状结构[29]。而对于 PGLBI/GO-CMC 薄膜，宽峰向高角度偏移，这是属于 CMC 的典型衍射峰[30]，其在 2θ=11.61°处的峰向低角度偏移(2θ=11.05°)且峰强度降低，这是因为 GO 片层的有序结构被破坏，CMC 分子链通过氢键插入层间，增大了 GO 的层间距，产生了“砖-泥”结构[31]，形成多级阻隔路径，对 O_2 及水分渗透阻力增加，从而提升薄膜的阻隔效果。

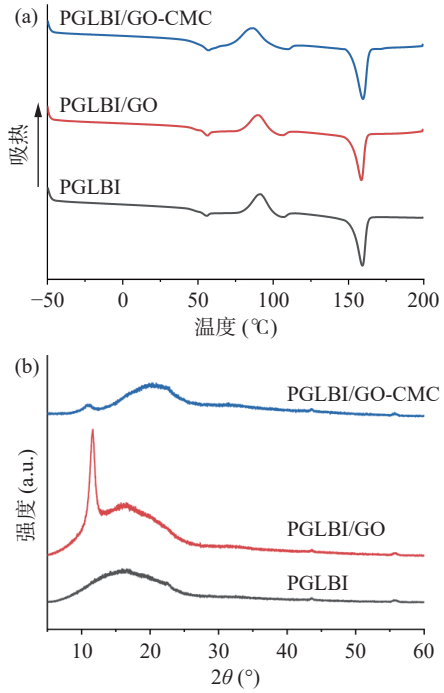


图 7 PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜的 DSC 升温曲线(a)、XRD 图谱(b)

Fig.7 DSC ramp-up curves (a) and XRD (b) patterns of PGLBI, PGLBI/GO, PGLBI/GO-CMC films

表 3 PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜的热学参数

Table 3 Thermal parameters of PGLBI, PGLBI/GO, PGLBI/GO-CMC films

样品	T_g(℃)	T_c(℃)	T_m(℃)	ΔH(J/g)	X_c(%)
PGLBI	49.27	91.50	159.18	9.62	10.3
PGLBI/GO	53.64	90.32	158.57	9.73	10.5
PGLBI/GO-CMC	54.35	86.56	159.48	8.22	8.8

2.1.8 气体阻隔性能分析 高阻隔性的材料能够有效抑制冷鲜肉中微生物的生长繁殖和脂肪氧化，从而更好地保持冷鲜肉的品质[32]。表 4 中汇总了复合薄膜的 O_2 和水蒸气阻隔性能。结果显示，与 PGLBI 薄膜相比，PGLBI/GO 和 PGLBI/GO-CMC 薄膜的 OTR 值大幅下降。其中，PGLBI/GO 薄膜 OTR 值降至 2.7 $cm^3/m^2·d$，这是因为真空抽滤法制备的 GO 薄膜保留了其致密的片层结构。而 PGLBI/GO-CMC 薄膜的 OTR 值进一步降低至 0.5 $cm^3/m^2·d$，可能是由于 CMC 的引入形成了致密的“砖-泥”结构，阻碍了 O_2 渗透。同时 PGLBI/GO 和 PGLBI/GO-CMC 薄膜的 WVP 值也有大幅降低，分别由 PGLBI 的 3.82×10^{-7} $g·m/m^2·h·Pa$ 降低至 0.55×10^{-7} 和 0.49×10^{-7} $g·m/m^2·h·Pa$，这主要是因为 GO 和 GO-CMC 薄膜的不渗透性。

2.2 冷鲜羊肉保鲜效果

2.2.1 羊肉的色泽 色泽是羊肉最直观的感官属性，通常用 L^*、a^*和 b^*值表示。图 8 为贮藏期间不同组羊肉的 L^*、a^*和 b^*值变化情况。贮藏期间，所有组羊肉的 L^*和 a^*值都迅速上升，随后逐渐下降。初期 L^*值的上升与 pH 的降低有关，pH 的下降改变了部分肌红蛋白的空间结构，使得肉品表面对光的反射能力增强[33]。随贮藏时间增加，L^*值呈降低趋势，这可能是羊肉中微生物和酶作用使得少量被氧化的高铁肌红蛋白还原成氧合肌红蛋白，从而使得 L^*值下降[34]。贮藏初期 a^*值上升的原因是包装内含有一定浓度的 O_2，羊肉中的肌红蛋白与 O_2 接触形成氧合肌红蛋白，使得 a^*值上升。随贮藏时间的延长，氧合肌红蛋白被氧化成高铁肌红蛋白[35]，a^*值逐渐降低，在贮藏第 25 d，PGLBI/GO-CMC 的 a^*值为 11.06。所有处理组中羊肉的 b^*值随贮藏时间的增加呈上升趋势。一方面，微生物和内源酶在分解蛋白质的过程中产生硫化氢，与肌红蛋白结合形成黄绿色

表 4 PGLBI、PGLBI/GO、PGLBI/GO-CMC 薄膜的 O_2 和水蒸气阻隔性能

Table 4 O_2 and water vapor barrier properties of PGLBI, PGLBI/GO, PGLBI/GO-CMC films

样品	厚度 (μm)	OTR ($cm^3/m^2·d$)	OP ($\times10^{-8}$ $cm^3·m/m^2·h·Pa$)	WVTR ($g/m^2·d$)	WVP ($\times10^{-7}$ $g·m/m^2·h·Pa$)
PGLBI	67.0±1.8^b	41.9±0.3^a	11.65±0.05^a	358.2±11.0^a	3.82±0.57^a
PGLBI/GO	70.1±1.2^{ab}	2.7±0.07^c	0.75±0.04^c	51.3±8.3^b	0.55±0.08^b
PGLBI/GO-CMC	70.5±3.4^{ab}	0.5±0.02^c	0.14±0.01^c	46.2±7.9^b	0.49±0.05^b
PA/PE	75.0±0.5^a	8.70±0.2^b	2.69±0.03^b	3.42±0.4^c	0.036±0.02^c

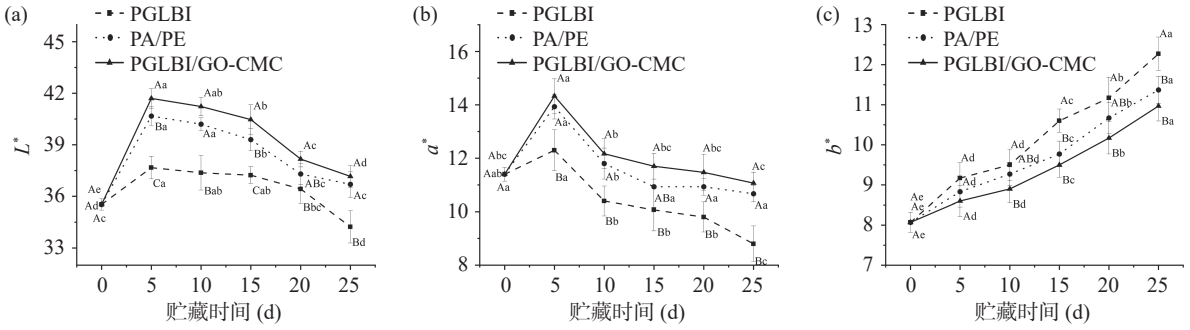


图 8　贮藏期间羊肉的 L^*、a^*和 b^*值变化

Fig.8　Variations in L^*, a^* and b^* values of mutton during storage

注：不同大写字母表示同一贮藏时间下不同处理组之间存在显著性差异（P<0.05）；不同小写字母表示同一处理组内不同贮藏时间之间存在显著性差异（P<0.05）；图 9、图 10 同。

的硫化肌红蛋白[36]；另一方面，羊肉中脂肪氧化会促进肉色向黄色转变，从而导致 b^*值升高。在贮藏第 25 d，PGLBI/GO-CMC 组羊肉的 b^*值为 10.97，均低于 PGLBI 和 PA/PE 组，且与 PGLBI 组存在显著性差异（P<0.05），表明 PGLBI/GO-CMC 复合体系能更有效抑制贮藏过程中羊肉的黄变现象。

2.2.2　羊肉的菌落总数　微生物增殖是冷鲜羊肉腐败的主要诱因。因此，监测贮藏期间 TVC 变化具有重要意义。不同包装组贮藏期间 TVC 变化趋势如图 9(a)所示。第 0 d，三种包装组的 TVC 值均为 2.51 lg CFU/g，表明羊肉初始新鲜度良好。随着贮藏时间的延长，三组的 TVC 值均以不同增长速率上升。PGLBI 组 TVC 值增长最快，在第 15 d 达到 6.40 lg CFU/g，超过腐败界限，可能是由于其 O_2 阻隔性较差，无法有效延缓微生物繁殖。PA/PE 组和 PGLBI/GO-CMC 组 TVC 值增长速率较缓，分别于第 20 d 达到 6.31 和 6.11 lg CFU/g。其中，PGLBI/GO-CMC 组的增长速率最慢。包装内低 O_2 浓度可有效抑制多数微生物的生长繁殖[37]。因此，PGLBI/GO-CMC 组良好的保鲜效果可能源于其优异的气体阻隔性（OTR 值为 0.5 $cm^3/m^2 \cdot d$），包装内实现了更低的 O_2 气氛，从而抑制了大部分微生物的代谢活动。

2.2.3　羊肉的挥发性盐基氮含量　羊肉中的蛋白质会在微生物和酶的作用下分解为含氮小分子，影响肉样的品质[38]。贮藏期间不同处理组羊肉的 TVB-N 变化情况如图 9(b)所示。由图 9(b)可知，不同包装组的 TVB-N 值均随贮藏时间的延长而逐渐上升。截至贮藏 20 d，PGLBI 和 PA/PE 组的 TVB-N 值均超过腐败阈值（20 mg/100 g），而 PGLBI/GO-CMC 组的 TVB-N 值为 18.36 mg/100 g，显著优于其他两组（P<0.05），在第 25 d 为 21.57 mg/100 g，达到腐败等级[39]。TVB-N 的变化情况与包装内的 O_2 浓度呈正相关[40]，GO-CMC 复合材料中 GO 的纳米片层结构能有效阻隔 O_2 渗透，降低包装内 O_2 浓度，从而抑制蛋白质氧化。此外，TVC 结果表明，PGLBI/GO-CMC 组在贮藏期间保持最低水平的微生物增长速率和数量，这使得蛋白质的分解速率进一步降低。

2.2.4　羊肉的脂肪氧化程度变化　羊肉的脂肪氧化程度（以硫代巴比妥酸值 TBA 表示）是评估其新鲜度的重要指标。从图 9(c)中可以看出，三种包装组的 TBA 值均随着贮藏时间的延长而逐渐增加，其中，PGLBI 组的 TBA 值增长幅度最大，这可能是由于 PGLBI 薄膜 O_2 阻隔性能较差，加速了脂肪氧化。PA/PE 组的 TBA 值增长略缓于 PGLBI 组，但仍表现出较高的氧化趋势，这可能是由于 PA/PE 薄膜阻隔性能有限（OTR 值为 8.70 $cm^3/m^2 \cdot d$），在贮藏中无法有效抑制脂肪氧化。PGLBI/GO-CMC 组的 TBA 值增长最为缓慢，显示出最优的抗氧化效果。在第 20、25 d，PGLBI/GO-CMC 组的 TBA 值显著低于其他两组，这归因于其低 OTR，有研究表明包装内低浓度的 O_2 会有效减缓肉品中脂肪的氧化酸败[37]。同时其对紫外光有良好的屏蔽作用，从而减缓了羊肉脂肪中不饱和脂肪酸的氧化速度。

2.2.5　羊肉的 pH　图 9(d)为贮藏期各处理组中羊肉 pH 的变化情况。从图 9(d)中可以看出，所有处理组在贮藏前期的 pH 均呈轻微下降趋势，这一现象可能与乳酸菌在早期阶段的产酸代谢有关[41]，而后 pH 保持稳定水平，这是因为包装内的 O_2 浓度逐渐降低，一些好氧产酸菌的代谢受到一定程度的抑制，导致羊肉的 pH 不再降低。PGLBI 组的稳定阶段相比于 PA/PE 和 PGLBI/GO-CMC 组较短，这归因于其 OTR 值较高（41.9 $cm^3/m^2 \cdot d$）。贮藏后期各包装组的 pH 呈现上升趋势，这归因于上一阶段积累的酸性物质进一步被微生物酶所消耗，加之蛋白质和脂肪的氧化程度加深[42]。第 25 d，PGLBI 和 PA/PE 组的 pH 分别达到 6.76 和 6.35，而 PGLBI/GO-CMC 组的 pH 仅为 6.15，显著低于其他两组（P<0.05）。PGLBI/GO-CMC 包装通过降低 O_2 浓度，有效抑制了 pH 的上升，从而延长了羊肉的货架期。

2.2.6　羊肉的汁液流失率　汁液流失率反映了贮藏期间羊肉的重量损失程度，主要是由水分挥发和水溶性维生素的流失所导致[43]。图 10 展示了三种不同

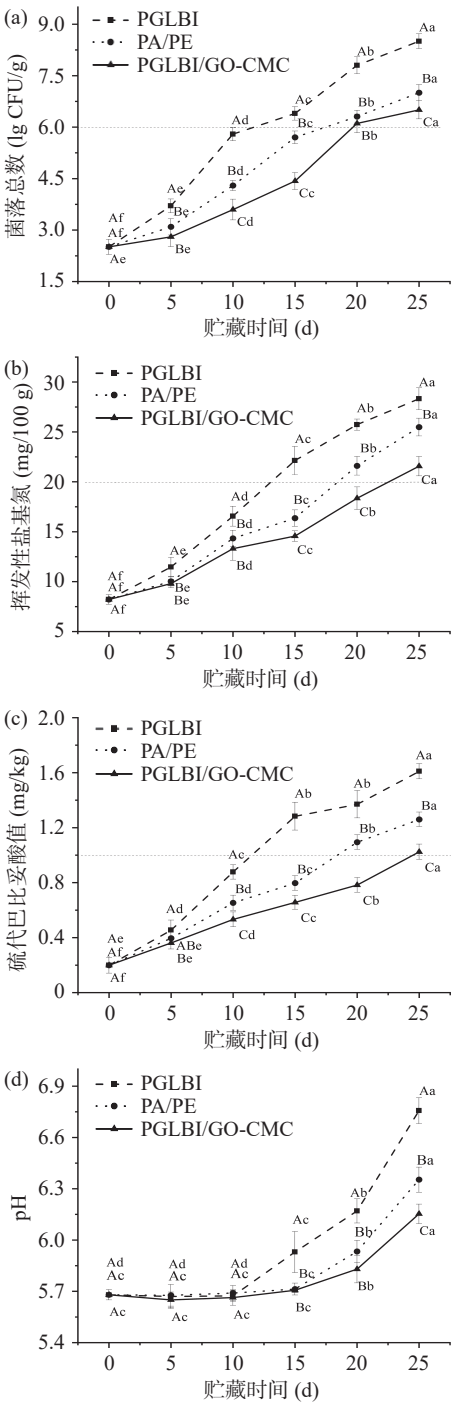


图 9 贮藏期间羊肉的菌落总数(a)、挥发性盐基氮含量(b)、硫代巴比妥酸值(c)、pH(d)变化

Fig.9 Variations in TVC (a), TVB-N (b), TBA (c), pH (d) of mutton during storage

包装材料在贮藏期间对羊肉 DL 的影响。所有包装组羊肉的 DL 在贮藏第 5 d 保持 2.24%~3.24% 之间,而后均随着贮藏时间的延长而逐渐增加。整个贮藏期间,三种包装中羊肉 DL 的增长速率依次为:PGLBI>PGLBI/GO-CMC>PA/PE。对应 WVP 分别为 3.82、0.49、0.036×10^{-7} g·m/m^2·h·Pa。包装内羊肉的 DL 变化与包装材料的 WVP 密切相关,WVP 越大羊肉的 DL 值也越大[44]。此外,贮藏过程中微生物的生长会破坏肌纤维蛋白结构,进一步降低羊肉的持水能力[19]。

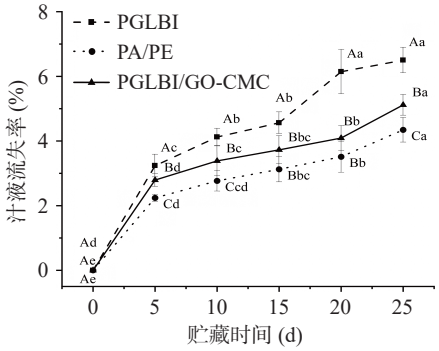


图 10 贮藏期间羊肉的汁液流失率变化

Fig.10 Variations in DL of mutton during storage

3 结论

基于冷鲜羊肉贮藏需求,本研究制备了高阻隔的柔性 PGLBI/GO-CMC 复合薄膜。复合薄膜展现出良好的紫外线屏蔽性能,其 OTR 低至 0.5 cm^3/m^2·d,展现出优异的阻隔性能。将 PGLBI/GO-CMC 薄膜应用于冷鲜羊肉包装,显著延缓了 TVB-N 和 TBA 值的上升,同时有效保持羊肉的色泽及风味,可将冷鲜羊肉的货架期延长至 20 d,为冷鲜羊肉保鲜提供了一种新的材料选择。然而,该复合薄膜的透光率较低且不易工业化生产,在今后的工作中需要进一步改善。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] ZHANG R Y, YOO M J, REALINI C E, et al. In-bag dry-vs. wet-aged lamb: Quality, consumer acceptability, oxidative stability and *in vitro* digestibility[J]. Foods, 2020, 10(1): 41.

[2] LUONG N M, COROLLER L, ZAGOREC M, et al. Spoilage of chilled fresh meat products during storage: A quantitative analysis of literature data[J]. Microorganisms, 2020, 8(8): 1198.

[3] 赵素芬. 气调包装(MAP)在冷却肉保鲜中的应用[J]. 包装与食品机械, 2007, 25(5): 53−55,58. [ZHAO S F. Application of modified atmosphere packing on chilled fresh pork[J]. Packaging and Food Machinery, 2007, 25(5): 53−55,58.]

[4] RODRIGUES I, TRINDADE M A, PALU A F, et al. Modified atmosphere packaging for lamb meat: Evaluation of gas composition in the extension of shelf life and consumer acceptance[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(9): 3547−3555.

[5] GUO C Y, GUO H G. Progress in the degradability of biodegradable film materials for packaging[J]. Membranes, 2022, 12(5): 500.

[6] HU J, LIU B, SUN T, et al. Towards ductile and high barrier poly(L-lactic acid) ultra-thin packaging film by regulating chain structures for efficient preservation of cherry tomatoes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 251: 126335.

[7] 胡健. 聚乳酸基微气氛控制膜的构建及其对冷鲜羊肉的保鲜机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024. [HU Jian. Construction of poly(L-lactic acid)-based micro-atmosphere control membrane and its preservation mechanism for chilled mutton [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.]

［8］ WANG W F, QU W L, ZHANG C X. Graphene-oxide-infused marine biopolymers: Layer-by-layer assembled nanocomposite packaging for prolonged fresh-cut apple preservation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2024, 12: 3012−3024.
［9］ DONG X R, LIIANG X, ZHOU Y T, et al. Preparation of polylactic acid/TiO_2/GO nano-fibrous films and their preservation effect on green peppers[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 177: 135−148.
［10］ ZHAN J T, DONG T, ZHANG Y, et al. Development of micro-crosslinked poly(L-lactic acid) with flexible, anti-aging, and barrier properties by *in situ* polymerization of graphene oxide[J]. Journal of Polymer Science, 2025, 63(6): 1365−1380.
［11］ 张元, 张家涛, 郭佳, 等. GO-g-PLBI 柔性复合薄膜的制备及其包装特性[J/OL]. 材料导报, (2025-05-12)［2025-10-24］. https://doi.org/10.11896/cldb.25020033. ［ZHANG Y, ZHANG J T, GUO J, et al. GO-g-PLBI flexible composite film and its packaging properties[J/OL]. Materials Reports, (2025-05-12) ［2025-10-24］. https://doi.org/10.11896/cldb.25020033.］
［12］ HUSSAIN S, SALMAN M, FAROOQ U, et al. Fabrication of carboxymethyl cellulose/graphene oxide/ZnO composite hydrogel for efficient removal of fuchsin dye from aqueous media[J]. International Journal Biological Macromolecules, 2024, 277(Pt 1): 134104.
［13］ 杨雅馨. GO/CNC 聚酰胺薄层纳米复合纳滤膜制备及性能[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022. ［YANG Y X. Preparation and performance of GO/CNC polyamide thin-film nanocomposite nanofiltration membrane[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, China, 2022.］
［14］ JIANG W, YUN X Y, GUO J S, et al. Preparation and characterization of crystalline poly(L-lactic acid)/silica nanocomposite films with high ductility and gas barrier properties[J]. Polymer Composites, 2025, 46(1): 101−115.
［15］ LIU L Z, HU Y J, DU L, et al. Tannic acid-grafted Polylactic acid films: A nonmigrating antibacterial packaging for chilled fresh meat[J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141796.
［16］ DU J H, WU Y F, GUO J S, et al. Development and application of modified poly(L-lactic acid) based film for storage of yogurt[J]. Journal of Food Science, 2025, 90(8): e70445.
［17］ ZHANG Jiatao, WANG Yu, ZHANG Yuan, et al. Preparation of PBAT/PCL films for passive modified atmosphere packaging of cherry tomatoes[J]. Packaging Technology and Science, 2025, 38(4): 309−322.
［18］ SUN Tao, LI Ying, WANG Yangyang, et al. High performance poly(L-lactic acid)-based film by one-step synthesis of poly(L-lactic acid-co-butylene itaconate-co-glycolic acid) for efficient preservation of yogurt storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 268: 131746.
［19］ BU H Y, HU Y J, DONG T. Changes in postharvest physiology, biochemistry, sensory properties and microbiological population of *Allium mongolicum* Regel regulated by adjusting the modified atmosphere inside the package during storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(1): e16128.
［20］ GARTNER H, LI Y N, ALMENAR E. Improved wettability and adhesion of polylactic acid/chitosan coating for bio-based multilayer film development[J]. Applied Surface Science, 2015, 332: 488−493.
［21］ 张家涛, 赵文波, 胡健, 等. 聚(L-乳酸-co-衣康酸丁二醇酯)/中空介孔 SiO_2 微球复合薄膜的制备及对草莓包装中微气氛的调控作用[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(8): 91−103. ［ZHANG Jiatao, ZHAO Wenbo, HU Jian, et al. Preparation of poly(L-lactic-co-butanediol itaconate)membrane functionalized by hollow mesoporous SiO_2 microsphere and its control of the micro atmosphere in strawberry packaging[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(8): 91−103.］
［22］ LUCEÑO-SÁNCHEZ J A, DÍEZ-PASCUAL A M. Grafting of polypyrrole-3-carboxylic acid to the surface of hexamethylene diisocyanate-functionalized graphene oxide[J]. Nanomaterials, 2019, 9(8): 1095.
［23］ ZHAO Y L, DU J, ZHOU H M, et al. Biodegradable intelligent film for food preservation and real-time visual detection of food freshness[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 129: 107665.
［24］ JESCHULL F, SCOTT F, TRABESINGER S. Interactions of silicon nanoparticles with carboxymethyl cellulose and carboxylic acids in negative electrodes of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2019, 431: 63−74.
［25］ XIE S Y, ZHAO J F, ZHANG B W, et al. Graphene oxide transparent hybrid film and its ultraviolet shielding property[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7(32): 17558−17564.
［26］ LAYEK R K, KUNDU A, NANDI A K. High-performance nanocomposites of sodium carboxymethylcellulose and graphene oxide[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2013, 298(11): 1166−1175. [LinkOut].
［27］ KUMAR A, BARIK B, JABLONSKI P G, et al. Functionalized and biomimicked carbon-based materials and their impact for improving surface coatings for protection and functionality: Insights and technological trends[J]. Coatings, 2022, 12(11): 1674.
［28］ HAN Zimeng, LI Dehan, YANG Huaibin, et al. Nacre-inspired nanocomposite films with enhanced mechanical and barrier properties by self-assembly of poly(lactic acid) coated *Mica* Nanosheets[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(32): 2202221.
［29］ GURUNATHAN S, HAN J W, DAYEM A A, et al. Oxidative stress-mediated antibacterial activity of graphene oxide and reduced graphene oxide in *Pseudomonas aeruginosa*[J]. International Journal of Nanomedicine, 2012, 7: 5901−5914.
［30］ BASAVARAJA C, KIM J K, THINH P X, et al. Characterization and DC electrical conductivity of the composite films containing polyaniline-carboxymethyl cellulose[J]. Polymer Composites, 2012, 33(9): 1541−1548.
［31］ 许文龙, 陈爽, 张津红, 等. 羧甲基纤维素-石墨烯复合气凝胶的制备及吸附研究[J]. 材料工程, 2020, 48(9): 77−85. ［XU Wenlong, CHEN Shuang, ZHANG Jinhong, et al. Preparation and adsorption of carboxymethyl cellulose graphene composite aerogels[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(9): 77−85.］
［32］ BARI G A K M R, KIM H. High-barrier polymeric multilayer film with organic and interactive materials[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 147: 105814.
［33］ DAI Y, LU Y N, WU W, et al. Changes in oxidation, color and texture deteriorations during refrigerated storage of ohmically and water bath-cooked pork meat[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 341−346.
［34］ HUFF-LONERGAN E, BAAS T J, MALEK M, et al. Correlations among selected pork quality traits[J]. Journal of Animal Science, 2002, 80(3): 617−627.
［35］ 张玉琴. 高阻隔抑菌性生物可降解薄膜的制备及其对冷鲜肉品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017. ［ZHANG Y Q. Preparation of antibacterial biodegradable films and effect of the filmon quality of chilled meat[D]. Hohhot: Inner Mongolia

Agricultural University, China, 2017. ］

［36］ 吴仕達, 张玉斌, 邰晶晶, 等. 不同包装材料结合乳酸钙处理对冷却藏羊肉色泽稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(10): 152−158. ［WU S D, ZHANG Y B, TAI J J, et al. Effect of different packaging materials combined with calcium lactate treatment on color stability of chilled Tibetan mutton[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(10): 152−158. ］

［37］ LORENZO J M, GÓMEZ M. Shelf life of fresh foal meat under MAP, overwrap and vacuum packaging conditions[J]. Meat Science, 2012, 92(4): 610−618.

［38］ LUONG N M, JEUGE S, COROLLER L, et al. Spoilage of fresh Turkey and pork sausages: Influence of potassium lactate and modified atmosphere packaging[J]. Food Research International, 2020, 137: 109501.

［39］ ALIZADEH-SANI M, MOHAMMADIAN E, MCCLEMENTS D J. Eco-friendly active packaging consisting of nanostructured biopolymer matrix reinforced with TiO_2 and essential oil: Application for preservation of refrigerated meat[J]. Food Chemistry, 2020, 322: 126782.

［40］ DONG T, YUN Xueyan, LI Mengting, et al. Biodegradable high oxygen barrier membrane for chilled meat packaging[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(16): 41871.

［41］ JIA L, DONG X C, WU L L, et al. A micro/nanofiber antibacterial pad with core-shell structure for cold fresh lamb preservation[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(1): e16080.

［42］ PATSIAS A, BADEKA A V, SAVVAIDIS I N, et al. Combined effect of freeze chilling and MAP on quality parameters of raw chicken fillets[J]. Food Microbiology, 2008, 25(4): 575−581.

［43］ WANG C Z, WU L L, ZHANG Y, et al. A water-absorbent mat incorporating β-cyclodextrin/eugenol inclusion complex for preservation of cold fresh mutton[J]. Food Biophysics, 2022, 17(3): 437−447.

［44］ CHEN L, ZHOU G H, ZHANG W G. Effects of high oxygen packaging on tenderness and water holding capacity of pork through protein oxidation[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(11): 2287−2297.