

活性吸氧剂在单层 PET 薄膜上的阻氧性能研究

嵇伟明^{1,2}, 夏智杰², 张子昂², 王胜鹏², 李祖光^{1*}

(1. 浙江工业大学 化学工程学院, 杭州 310014; 2. 传化智联股份有限公司, 杭州 311215)

摘要: 目的 明确吸氧剂在阻氧薄膜中的阻氧机理和对阻氧薄膜理化性能的影响。方法 将市售的 3 种吸氧剂 (CoFresh 162、valOR 115J 和 Amosorb 4020E) 添加至 PET 基材, 制备阻氧薄膜。将阻氧薄膜浸入水中测试其吸氧量, 采用氧气透过率测试系统表征其氧气透过率, 采用雾度仪和扫描电镜 (SEM) 表征其雾度、透光率和相分离微观形貌。结果 含 3 种不同吸氧剂的阻氧薄膜均可主动有效地吸收水中溶氧, 30 d 吸氧量分别可以达到 9.83、9.80 和 8.89 cm³/g。加入吸氧剂可以大幅提升阻氧薄膜的主动阻氧性能, 但随着时间的延长, 吸氧剂的效果会逐渐降低。含 5% 吸氧剂的 3 种阻氧薄膜的雾度值分别为 5.5%、6.8% 和 20.7%, 吸氧剂的加入会降低阻氧薄膜的力学性能。结论 在吸氧剂的理化性能研究中采用基于氧气透过率测试的主动阻氧性能的概念, 用于评价吸氧剂的吸氧动力学。由评价结果可知, CoFresh 162 吸氧剂具有最优的主动吸氧性能、阻氧性能和较低的雾度值, 可用于制备单层阻氧薄膜/瓶, 适用于食品包装材料。

关键词: 吸氧剂; 阻氧薄膜; 主动阻氧性能; 包装材料

中图分类号: TB484.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)09-0086-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.010

Oxygen Blocking Performance of Single-layer PET Films Containing Active Oxygen Scavengers

Ji Weiming^{1,2}, Xia Zhijie², Zhang Ziang², Wang Shengpeng², Li Zuguang^{1*}

(1. College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Transfar Zhilian Co., Ltd., Hangzhou 311215, China)

ABSTRACT: The work aims to clarify the oxygen-blocking mechanism of oxygen scavengers in oxygen-blocking films and their influence on the physical and chemical properties of the films. Three commercially available oxygen scavengers (CoFresh 162, valOR 115J, and Amosorb 4020E) were added to PET substrates to prepare oxygen-blocking films. The oxygen absorption capacity of the films was tested by immersing them in water, and their oxygen transmission rate was characterized with an oxygen transmission rate testing system. The haze, light transmittance, and microstructure of phase separation were characterized with a haze meter and a scanning electron microscopy (SEM). The oxygen-blocking films containing the three different oxygen scavengers could actively and effectively absorb dissolved oxygen in water, with the oxygen absorption amounts reaching 9.83, 9.80, and 8.89 cm³/g after 30 days, respectively. The addition of oxygen scavengers could significantly enhance the active oxygen-blocking performance of the films, but the effect of the scavengers would gradually decrease over time. The haze values of the three oxygen-blocking films containing 5% oxygen scavengers were 5.5%, 6.8%, and 20.7%, respectively. The addition of oxygen scavengers would reduce the

mechanical properties of the films. The concept of active oxygen-blocking performance based on oxygen transmission rate testing is adopted in the study of the physical and chemical properties of oxygen scavengers to evaluate the oxygen absorption kinetics of the scavengers. The evaluation results indicate that CoFresh 162 has the best active oxygen absorption performance, oxygen-blocking performance, and the lowest haze value, and can be used to prepare single-layer oxygen-blocking films/bottles, suitable for food packaging materials.

KEY WORDS: oxygen scavenger; oxygen-blocking film; active oxygen-blocking performance; packaging material

近年来, 市场上的包装材料(以下简称包材)正从传统的金属包材、玻璃包材、纸质包材向塑料包材转变。塑料包材具有质量更轻、更易被加工、不易破碎等优点, 因此得到广泛应用^[1-3]。相较于玻璃包材和金属包材, 塑料包材中聚合物分子链之间的空隙更大, 小分子更容易迁移, 因此其阻隔性能更低^[1,4]。氧气、水分子、二氧化碳等常见的小分子对食品质量具有至关重要的影响, 尤其是食物周围的氧气浓度。为了使塑料包材适用于鲜榨果汁、牛奶、啤酒、即饮茶等对氧气极为敏感的食物, 研究人员开发多种独特的阻隔技术, 以延长这类食品的货架期^[5-8]。按照阻隔方式可分为惰性和活性阻隔技术, 其中惰性阻隔技术是指使包材在物理层面发挥减缓氧气透过的作用, 如多层包装技术和无机涂层技术^[8-10]; 活性阻隔技术是指在包材中加入可主动捕获氧气的活性组分, 从而实现阻氧和吸氧性能, 如吸氧剂技术。虽然吸氧剂技术在国际上已经商品化约 20 年, 但是国内对树脂吸氧剂的各项理化性能鲜有报道。

吸氧剂是一类吸氧树脂阻隔填料, 按比例添加到聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)基材中, 用于提升 PET 包材的阻隔性能和吸氧性能^[11-12], 市场上的吸氧剂产品均为提升 PET 饮料瓶阻氧性能而开发。通过直接向树脂基材中添加一定比例的吸氧剂的方式, 实现主动吸收包装内残留氧气和提升包材阻氧性能, 具有工艺简单、阻隔性能优异、对回收性能影响小等优点^[13-14]。铁基袋装固体吸氧包只能吸收固体食品包装中的氧气^[15-16], 如坚果包装、饼干等, 而吸氧剂能够降低液体食品内部的溶解氧浓度。吸氧剂结构中通常含有不饱和双键、活性亚甲基、羰基等活性基团, 其吸氧原理是氧气进攻吸氧剂结构中的薄弱点, 使吸氧剂被氧化生成氧化物或者过氧化物, 从而达到捕获氧气的目的^[17]。

本文选取国内市场上 3 家具有代表性的吸氧剂牌号, 分别为 CoFresh 162、valOR 115J 和 Amosorb 4020E, 将其应用于 PET 薄膜, 制备含吸氧剂的阻氧薄膜, 研究阻氧薄膜的吸氧量性能、氧气透过率性能、雾度和透光率性能等理化性能指标的变化情况。本文采用基于氧气透过率(Oxygen Transmission Rate, OTR)测试的吸氧剂主动阻氧性能评价手段, 定量区分吸氧剂中主动阻氧组分和惰性阻氧组分对阻氧薄膜整体阻氧性能的贡献。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料: 吸氧剂 CoFresh 162, 杭州碳氧力科技有限公司; 吸氧剂 valOR 115J, 宣伟(上海)涂料有限公司; 吸氧剂 Amosorb 4020E, 嘉洛斯塑料着色剂(苏州)有限公司; WK-811 聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)母粒, 万凯新材料股份有限公司。

主要仪器: XH-432-25 下挤出流延薄膜机, 广东锡华机械有限公司; C230H 氧气透过率测试系统, 济南兰光机电技术有限公司; S9 溶解氧测定仪, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; WGW 雾度仪, 上海申光仪器仪表有限公司; PHENOM-PROX 扫描电子显微镜, 复纳科学仪器(上海)有限公司; INSTRON 3365 型万能材料试验机, 英斯特朗(上海)试验设备贸易有限公司。

1.2 阻氧薄膜的制备

将 PET 母粒在 120 °C 鼓风烘箱中干燥 8~12 h, 然后将不同质量份数的吸氧剂母粒(2 或 5 份)和 100 份干燥 PET 母粒充分混合均匀, 添加到下挤出流延薄膜机中, 开始制备阻氧薄膜。以上质量份数的占比采用 2% 和 5% 来表示。通过调节下挤出流延薄膜机的相关参数, 控制薄膜厚度为(250±5) μm, 该厚度下测试所得数据最能反映阻氧薄膜的各项性能。下挤出流延薄膜机参数设置如下: 流延温度为 270~280 °C, 收卷速度为 3.2 r/min, 牵引速度为 2.7 r/min, 螺杆速度为 20.0 r/min。

1.3 性能测试方法

1.3.1 吸氧量测试

称取 6 g 阻氧薄膜浸入含有 300 g 纯净水的 310 mL 玻璃瓶, 瓶口用瓶盖旋紧, 边缘处涂覆石蜡密封, 然后将试样置于恒温恒湿间(20 °C)。按照测试时间制备多组玻璃瓶试样, 一段时间后开封, 采用 S9 溶解氧测定仪测试玻璃瓶内水中溶氧量的变化情况, 开封后的玻璃瓶试样测试后即丢弃。

纯净水在 20 °C 时饱和溶氧量约为 9 mg/L, 通过玻璃瓶内水中的残留溶氧量计算阻氧薄膜的吸氧量, 见式(1)。

$$O_x = \frac{(O_1 - O_2) \times m_w}{\rho_o \times m_{OS}} \quad (1)$$

式中： O_1 为玻璃瓶中水的初始溶氧量； O_2 为一段时间后玻璃瓶中水的残留溶氧量； m_w 为玻璃瓶中水的质量，本实验为300 g； ρ_o 为氧气的密度，取1.429 g/L； m_{OS} 为阻氧薄膜中吸氧剂的质量。

1.3.2 氧气透过率测试

将制备的(250±5) μm的阻氧薄膜用手压式圆形取样器取50 cm²的圆形装入C230H氧气透过率测试系统，设置相关实验参数开始测试，得到OTR曲线。OTR是指在实验环境下，在单位时间内、单位面积上透过塑料薄膜两平行平面的氧气总量。参数设置如下：温度为50℃，相对湿度为0%，测试压强为0.1 MPa，测试时间为100~300 h。

1.3.3 雾度和透光率测试

将阻氧薄膜剪成合适尺寸的片材样品，在完成校准的雾度仪上进行雾度和透光率测试，测试参数采用雾度仪中默认的可见光波长380~780 nm。

1.3.4 扫描电镜 (SEM) 测试

取合适尺寸的阻氧薄膜在液氮中脆断，将脆断后的薄膜浸入甲酸溶液进行刻蚀，经清洗烘干后对断面进行喷金，拍摄扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 图片，观察吸氧剂在不同阻氧薄膜断面处的相分离情况。

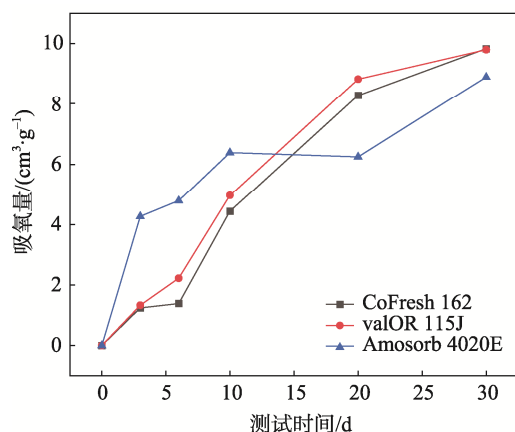
1.3.5 力学性能测试

将厚度为(250±5) μm的阻氧薄膜制成哑铃型实验样条，在万能力学试验机上进行测试。

2 结果与讨论

2.1 吸氧量测试结果

含吸氧剂的包装材料可以主动吸收水中溶解氧，不同吸氧剂含量阻氧薄膜的吸氧性能对比，见图1。



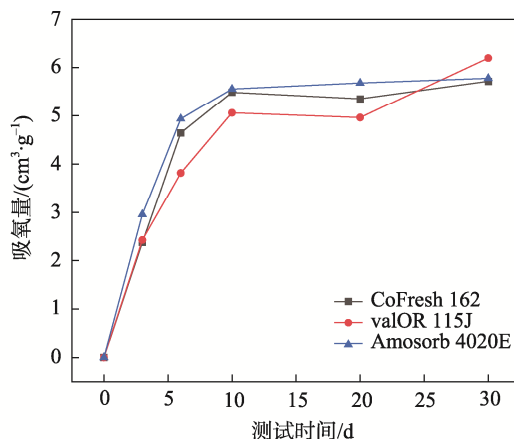
a 吸氧剂质量分数为2%时的吸氧性能

含CoFresh 162和valOR 115J的阻氧薄膜在2%和5%质量分数下均表现出相似的吸氧性能。如图1a所示，在质量分数为2%时，阻氧薄膜的吸氧量在30 d内呈现逐渐增加的趋势，在30 d时吸氧量分别达到9.83和9.80 cm³/g。由图1a可知，吸氧量曲线并未达到平台值，这说明在该实验条件下，质量分数为2%的阻氧薄膜并未达到吸氧饱和状态，还可以继续吸收水中溶氧。另外，本文所测吸氧剂的吸氧量值低于相关文献中报道的常规吸氧剂的吸氧量值^[18]。含2% Amosorb 4020E的阻氧薄膜的吸氧曲线在0~10 d表现出更高的吸氧速率，在10~30 d时表现出更低的吸氧速率，30 d时吸氧量为8.89 cm³/g。这是因为Amosorb 4020E为含不饱和双键的吸氧体系，CoFresh 162和valOR 115J则是基于MXD6尼龙的吸氧体系，不同的吸氧体系导致不同的吸氧动力学。

在图1b中，含CoFresh 162、valOR 115J和Amosorb 4020E的阻氧薄膜在10 d时达到吸氧平台，其吸氧量分别为5.49、5.06和5.56 cm³/g。此时出现的吸氧量平台并非阻氧薄膜达到吸氧饱和状态所致，这是因为10 d时300 g水中的溶氧量已经降到1.97、2.42和2.03 mg/L，水中氧分子较少，很难从水中迁移到阻氧薄膜内部并与吸氧剂发生化学反应，而图1a中在30 d时的水中溶氧量为4.2 mg/L左右。以上数据分析说明吸氧剂在水中溶氧量<2 mg/L时，难以发挥高效除氧的作用。

2.2 氧气透过率测试结果

在OTR数据分析中，采用基于OTR测试数据的主动阻氧性能来表征^[19]。含不同吸氧剂的阻氧薄膜的OTR拟合曲线见图2，可知添加5% CoFresh 162阻氧薄膜的OTR曲线中，测试初期的OTR极低，为0.127 6 cm³/(m²·24 h·0.1 MPa)；随着测试时间的延长，在250 h时OTR提升到33.929 1 cm³/(m²·24 h·0.1 MPa)。这是因为测试初期阻氧薄膜中吸氧剂的吸氧能力最强，



b 吸氧剂质量分数为5%时的吸氧性能

图1 不同牌号吸氧剂的吸氧量随时间的变化

Fig.1 Oxygen uptake of three oxygen scavengers as a function of time

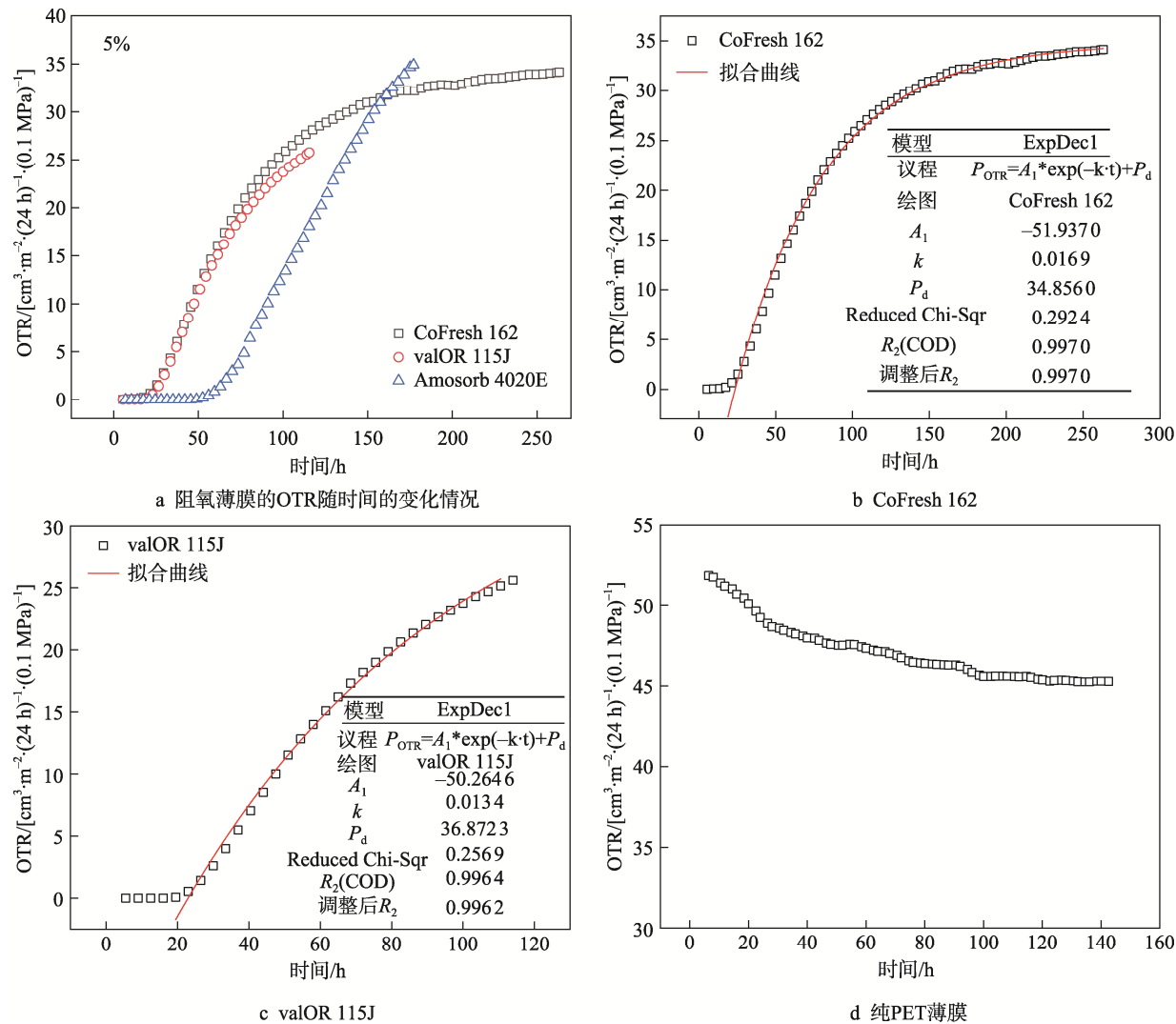


图 2 含不同吸氧剂的阻氧薄膜的 OTR 拟合曲线
Fig.2 OTR fitting curves of oxygen-blocking films containing different oxygen scavengers

几乎所有通过阻氧薄膜的氧气分子都会被其捕获, 导致极低的 OTR; 随着时间的延长, 阻氧薄膜内部的吸氧剂逐渐达到吸氧饱和状态, 导致阻氧薄膜的 OTR 逐渐提高, 阻氧薄膜的这种特性被称为主动阻氧性能。CoFresh 162 和 valOR 115J 这 2 种吸氧剂中均存在主动吸氧组分和惰性阻氧组分, Amosorb 4020E 中只存在主动吸氧组分。惰性阻氧组分无法主动捕获氧气分子, 只能起到减缓氧气透过阻氧薄膜的作用。不含吸氧剂的纯 PET 薄膜在测试初期具有较大的 OTR (图 2d), 随着时间的延长, 最终稳定在一个不变的数值, 此时纯 PET 薄膜两侧氧气的扩散和透过达到平衡, 该值即为纯 PET 薄膜的 OTR, 为 $45.2728 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ 。需要注意, 主动阻氧性能的测试存在一定误差, 因为 OTR 测试系统在测试初期还未达到稳定状态, 获得的数据具有一定波动, 但该方法依旧有很强的参考意义^[20]。根据大量 OTR 测试数据的对比, 可以认为该测试误差在可接受范围内。

含 5% CoFresh 162 的阻氧薄膜在 250 h 时的 OTR

为 $33.9291 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ 。需要注意, 250 h 为停止测试的时间, 而非主动阻氧性能消失的时间。一般吸氧剂的常温吸氧有效期在 6~12 个月, 虽然在 50 °C 下进行加速实验, 但是监控整个吸氧剂的失效过程需要很长的时间。由于吸氧剂体系提供的惰性阻氧组分 (MXD6 组分) 带来的阻氧性能, 可以预测主动阻氧性能完全消失时阻氧薄膜的 OTR 略低于纯 PET 薄膜。与纯 PET 薄膜的 OTR 曲线相比, 添加 5% CoFresh 162 吸氧剂后, 阻氧薄膜的整体 OTR 在测试初期为 $0.1279 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$, 降低 99.72%。这说明吸氧剂的加入极大地提升了薄膜的主动阻氧性能, 并且可以在高温下维持较长时间 (>250 h, 50 °C)。研究可知, 含 5% valOR 115J 的阻氧薄膜表现出与 CoFresh 162 相似的阻氧性能。

为了更好地分析 CoFresh 162 和 valOR 115J 这 2 种吸氧剂中主动吸氧组分和惰性阻氧组分对薄膜阻氧性能的影响, 采用式 (2) 拟合阻氧曲线, 结果见图 2b~c。

$$P_{\text{OTR}} = A_1 \times e^{-kt} + P_d \quad (2)$$

式中： P_{OTR} 为阻氧薄膜整体的氧气透过率； A_1 为主动吸氧反应对阻氧性能的贡献系数； t 为测试时间； k 为主动吸氧反应的反应速率； P_d 为惰性阻氧组分做出的阻氧贡献。

式(2)的前半部分表示主动吸氧组分对阻氧薄膜整体 OTR 的贡献，随着时间的延长，主动吸氧组分逐渐失效，其对阻氧性能的贡献逐渐趋于 0；后半部分表示惰性阻氧组分对阻氧性能的贡献是一个恒定值，为 $35 \sim 36 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ 。

在拟合曲线数据时舍去 0~19 h 的数据，这是因为测试初期阻氧薄膜中吸氧剂的吸氧能力最强，吸氧量大于渗入薄膜的氧气量，导致测试得到的 OTR 处于极低的平台值；19 h 后，吸氧剂的吸氧能力不足以捕获全部的渗透氧气分子，此部分氧气分子透过薄膜，被 OTR 测试系统中的氧气传感器检测到。随着时间的延长，氧气透过量逐渐增加，直至吸氧剂全部失效，此时检测的 OTR 数据可以反映阻氧薄膜的阻氧动力学。

Amosorb 4020E 的 OTR 曲线与另 2 种吸氧剂具有很大差别(图 2a)，其阻氧薄膜在 0~50 h 具有极低的 OTR，说明 Amosorb 4020E 在应用前期具有优异的阻氧性能及更强的主动吸氧能力；随着时间的延长，其阻氧薄膜会更快地失去主动阻氧能力，150 h 后其 OTR 大于含 CoFresh 162 的阻氧薄膜，说明其后期的阻氧性能劣于 CoFresh 162。该结论符合图 1 中 Amosorb 4020E 表现出来的前期快、后期慢的吸氧量性能。由于 Amosorb 4020E 的有效组分可能是含不饱和双键的聚合物，明显不同于另 2 种吸氧剂，导致其阻氧薄膜的阻氧动力学不同，因此用式(2)拟合其 OTR 曲线效果不佳。

吸氧剂的性能会随着接触氧气时间的延长而显著降低。为了验证含吸氧剂的阻氧薄膜的储存稳定性，将含有 5% CoFresh 162 的阻氧薄膜，在室温下敞开放置 0、30、60 d 后测试其阻氧性能。由图 3 可知，随着存放时间的延长，薄膜的主动阻氧性能逐渐下降，从 0 d 的 $0.1279 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ 分别降到 30 d 的 $11.0121 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ 、60 d 的 $30.5533 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ ，说明在空气中长时间敞开放置会对阻氧薄膜的主动阻氧性能产生显著的影响，使其逐渐丧失主动阻氧性能。这是由于敞开放置环境中，阻氧薄膜接触到的氧气过量，而其吸氧剂的量一定，会出现明显的主动阻氧性能下降的现象。因此，在吸氧剂及其制品生产和储存过程中，需要及时密封处理，防止吸氧剂接触空气导致失效。

2.3 雾度和透光率测试结果

CoFresh 162、valOR 115J 和 Amosorb 4020E 这 3 种吸氧剂按 5% 的质量分数添加到阻氧薄膜后，其透光率分别为 90.9%、91.0% 和 90.5%，见图 4。纯 PET

薄膜的透光率为 91.4%，说明吸氧剂的加入对薄膜的透光率几乎没有影响，但其对阻氧薄膜的雾度有很大影响。纯 PET 薄膜的雾度值为 0.8%，当加入 CoFresh 162、valOR 115J 和 Amosorb 4020E 后雾度值分别上升至 5.5%、6.8% 和 20.7%。CoFresh 162 对阻氧薄膜的雾度影响最小；valOR 115J 对阻氧薄膜的雾度略有影响；而加入 Amosorb 4020E 后阻氧薄膜的雾度明显增加，并出现肉眼可见的泛白发雾现象。雾度增加是 CoFresh 162 和 valOR 115J 中 MXD6 尼龙组分在 PET 基材中分相导致^[21]，其中黑色部分为 MXD6 相，见图 5a~b。valOR 115J 在 PET 基材中表现出更大的平均相分离尺寸，约 $0.5 \mu\text{m}$ ，导致更大的雾度值。在含 Amosorb 4020E 的 SEM 图中没有观察到明显的相分离形貌(图 5c)，这是因为其组分中不含尼龙相，有效组分可能是低含量不饱和双键的聚合物。综上所述，CoFresh 162 对阻氧薄膜雾度影响最小，Amosorb

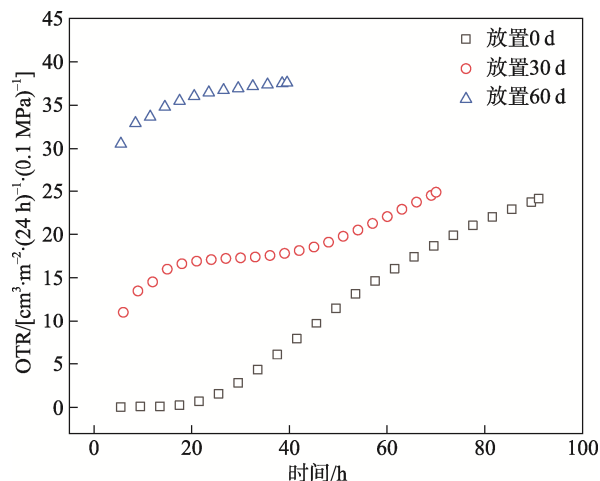


图3 阻氧薄膜在室温下敞开放置 0、30、60 d 后的阻氧性能变化

Fig.3 Changes in oxygen-blocking performance of oxygen-blocking films after exposure to air at room temperature for 0, 30, and 60 days

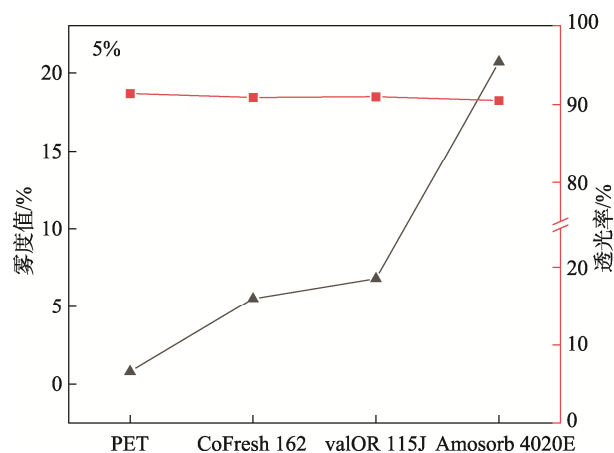


图4 不同阻氧薄膜的雾度和透光率
Fig.4 Haze and luminous transmittance of different oxygen-blocking films

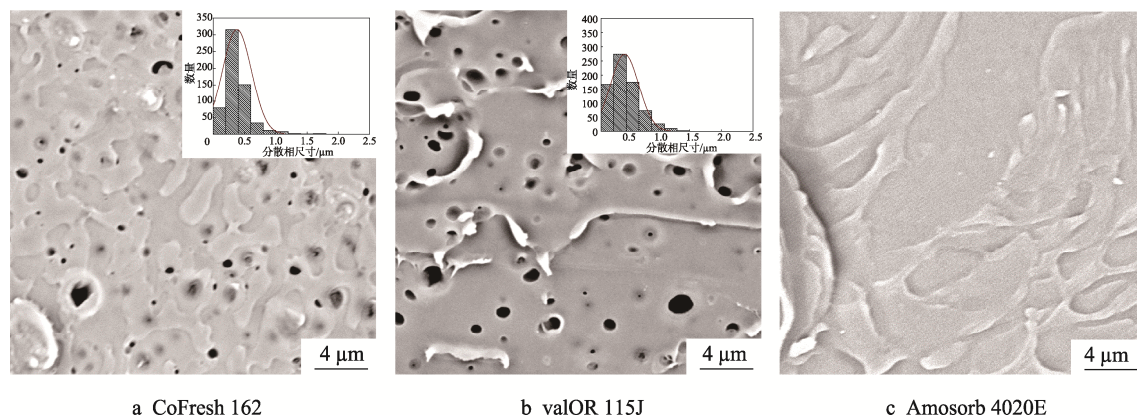


图 5 不同阻氧薄膜的 SEM 图片
Fig.5 SEM images of different oxygen-blocking films

4020E 对阻氧薄膜雾度影响最大。由于吸氧剂对薄膜雾度影响程度不同, 目前市场上的 CoFresh 162 和 valOR 115J 通常被用于透明 PET 包装, 而 Amosorb 4020E 更多被用于非透明 PET 包装。

2.4 力学性能测试结果

如图 6 所示, 在吸氧剂质量分数为 5% 时, 阻氧薄膜的拉伸强度均低于纯 PET 薄膜, 这说明吸氧剂中 MXD6 组分与 PET 的相容性较差, 两相界面的黏结力较小, 此结果与 SEM 数据一致。Amosorb 4020E 阻氧薄膜表现出最低的拉伸强度 (51.0 MPa) 和最大的断裂伸长率 (216%), 说明 Amosorb 4020E 会使阻氧薄膜更加柔韧。

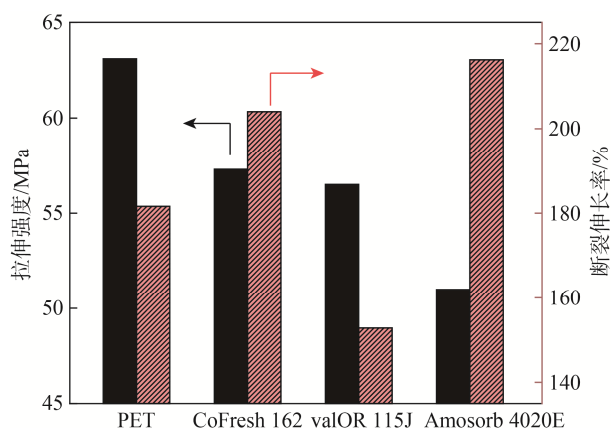


图 6 不同阻氧薄膜的拉伸强度和断裂伸长率
Fig.6 Tensile strength and elongation at break of different oxygen-blocking films

3 结语

利用市售的 3 种吸氧剂 (CoFresh 162、valOR 115J 和 Amosorb 4020E) 制备不同的 PET 阻氧薄膜, 通过对比实验, 深入研究不同牌号吸氧剂对薄膜阻氧性能的影响。CoFresh 162 和 valOR 115J 表现出相似的吸

氧量性能、阻氧性能、雾度、透光率性能和力学性能, 说明两者采用相似的阻氧体系; Amosorb 4020E 的吸氧速率前期快后期慢, 且雾度值最高, 说明其吸氧体系不同于前 2 种吸氧剂。水中溶氧量 $>2 \text{ mg/L}$ 时, 吸氧剂表现出高效的吸氧速率; 溶氧量 $<2 \text{ mg/L}$ 时, 吸氧速率明显减缓。本研究基于主动阻氧性能的概念, 通过拟合 OTR 曲线, 提出拟合方程, 定量明确和划分吸氧剂中主动吸氧组分和惰性阻氧组分对阻氧薄膜整体 OTR 的贡献。SEM 分析表明, 吸氧剂中尼龙组分会在 PET 基材中会发生微米级相分离, 导致阻氧薄膜雾度值提高, 但不会降低透光率。力学性能测试可知, 吸氧剂的加入会降低阻氧薄膜的力学性能。含 5% CoFresh 162 的阻氧薄膜 30 d 吸氧量为 $5.49 \text{ cm}^3/\text{g}$, OTR 为 $0.1279 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$, 雾度值为 5.5%, 透光率为 90.9%, 在 3 种吸氧剂中综合表现最优。

参考文献:

- [1] CICHELLO S A. Oxygen Absorbers in Food Preservation: A Review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(4): 1889-1895.
- [2] NISTICÒ R. Polyethylene Terephthalate (PET) in the Packaging Industry[J]. Polymer Testing, 2020, 90: 106707.
- [3] WANG Z C, YIN Y X, AO H P, et al. The Shelf-Life of Chestnut Rose Beverage Packaged in PEN/PET Bottles under Long Term Storage: A Comparison to Packaging in Ordinary PET Bottles[J]. Food Chemistry, 2022, 370(15): 1-11.
- [4] FANG T, DECKER E A, GODDARD J M. Controlling Lipid Oxidation of Food by Active Packaging Technologies[J]. Food & Function, 2013, 4(5): 669-680.
- [5] 苏日娜, 杨畅, 李星岩, 等. PET 瓶阻隔性能研究及对酸奶品质的影响[J]. 中国乳品工业, 2019, 47(7): 54-57.

- SU R N, YANG C, LI X Y, et al. Research of PET Barrier Performance and the Impact on Yoghurt[J]. China Dairy Industry, 2019, 47(7): 54-57.
- [6] 刘娅妮, 王飞宇, 孙鹏伟, 等. 物理活性包装对香菇贮藏品质、呼吸及能量代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 301-310.
- LIU Y N, WANG F Y, SUN P W, et al. Effects of Physical Active Packaging on Storage Quality, Respiratory and Energy Metabolism of Lentinula Edodes during Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 301-310.
- [7] HU Y S, PRATTIPATI V, MEHTA S, et al. Improving Gas Barrier of PET by Blending with Aromatic Polyamides[J]. Polymer, 2005, 46(8): 2685-2698.
- [8] 段绘叶, 李东立, 伊敏·吾热依木, 等. 吸氧型阻隔包装材料对橙汁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(3): 275-278.
- DUAN H Y, LI D L, IMIN U, et al. The Effect of Oxygen Scavenging Film Packaging Material on Quality of Orange Juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(3): 275-278.
- [9] 刘杰, 邓玉明, 陈月平. PET 啤酒瓶阻隔技术的研究进展[J]. 塑料制造, 2013(9): 61-66.
- LIU J, DENG Y M, CHEN Y P. The Research Development of PET Beer Bottles Barrier Technology[J]. Plastics Manufacture, 2013(9): 61-66.
- [10] 周恩弛, 张春红, 李丹, 等. 预制菜包装技术的研究及展望[J]. 包装工程, 2023, 44(23): 142-147.
- ZHOU E C, ZHANG C H, LI D, et al. Research and Prospect of Packaging Technology for Prepared Dishes[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(23): 142-147.
- [11] 张卉子, 张蕾. 吸氧性 PET 果汁饮料瓶的制备及性能研究[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 42-44.
- ZHANG H Z, ZHANG L. Study on Preparation and Properties of PET Juice Bottle Containing Oxygen Scavenger[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 42-44.
- [12] ZABIHZADEH K M, EBRAHIMI A, YOUSEFI M, et al. Strategies for Producing Improved Oxygen Barrier Materials Appropriate for the Food Packaging Sector[J]. Food Engineering Reviews, 2020, 12(3): 346-363.
- [13] DEY A, NEOGI S. Oxygen Scavengers for Food Packaging Applications: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 90: 26-34.
- [14] SONCHAENG U, PROMSORN J, BUMBUDSANPHAROKE N, et al. Polyesters Incorporating Gallic Acid as Oxygen Scavenger in Biodegradable Packaging[J]. Polymers (Basel), 2022, 14(23): 5296.
- [15] 万红敬, 王晓梅, 黄红军, 等. 机械球磨制备快速铁系吸氧剂[J]. 包装工程, 2010, 31(11): 67-69.
- WAN H J, WANG X M, HUANG H J, et al. Preparation of Quick Ionic Series Oxygen Absorbent by Mechanical Ball Milling Process[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(11): 67-69.
- [16] 何江, 刘林林, 金彪, 等. 脱氧剂技术原理及其在食品行业中的应用研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(8): 125-130.
- HE J, LIU L L, JIN B, et al. Research on the Technical Principles of Deoxidants and the Applications in the Food Industry[J]. Storage and Process, 2024, 24(8): 125-130.
- [17] 刘柳, 崔爱军, 何明阳, 等. 两类聚酯吸氧材料的制备及性能[J]. 化工进展, 2012, 31(2): 372-377.
- LIU L, CUI A J, HE M Y, et al. Preparation and Property of Two Kinds of Polyester Oxygen Scavenger Material[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(2): 372-377.
- [18] 张美英, 卢立新, 丘晓琳. 茶多酚- β -环糊精包合物的吸氧剂制备及表征[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 58-61.
- ZHANG M Y, LU L X, QIU X L. Preparation and Properties of Oxygen Scavenger Based on Tea Polyphenols- β -Cyclodextrin Inclusion Complex[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 58-61.
- [19] ZHANG P H, TONG Z M, YANG M J, et al. Polyethylene Terephthalate Bottles with Excellent Oxygen, Water Vapor Barrier and Mechanical Performances Prepared by Injection and Blow Molding[J]. Polymer Engineering and Science, 2024, 64(5): 2301-2311.
- [20] 郝文静, 周伟芳, 陈曦, 等. Mask 在包装材料气体阻隔性能检测中的应用研究[J]. 包装工程, 2024, 45(11): 234-239.
- HAO W J, ZHOU W F, CHEN X, et al. Application of Mask in the Gas Permeability Test of Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(11): 234-239.
- [21] 徐雯, 印雄飞, 郭太松. 阻隔技术在塑料饮料包装上的应用[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 92-97.
- XU W, YIN X F, GUO T S. Application of Barrier Technology in Plastic Beverage Packaging[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 92-97.