

# 储存温度与时间对 SiO<sub>2</sub>/ 芥酸酰胺复合改性 LLDPE 薄膜爽滑开口性能的影响

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.2004

邓祖豪<sup>1</sup> 夏 霜<sup>1</sup>  
石 璞<sup>1</sup> 王芳可<sup>2</sup>  
缪星星<sup>2</sup>

1. 湖南工业大学  
包装工程学院  
湖南 株洲 412007
2. 福建远翔新材料股份有限公司  
福建 邵武 354099

**摘 要:** 针对线型低密度聚乙烯 (LLDPE) 薄膜在实际应用中因高温或长期储存导致爽滑开口性能下降的问题, 通过双螺杆挤出机制备 LLDPE/ 芥酸酰胺和 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/ 芥酸酰胺母粒, 使用吹膜工艺制备含有不同比例 LLDPE 的 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/ 芥酸酰胺薄膜, 并进一步考察了不同储存时间及温度条件对薄膜爽滑开口性能和光学性能的影响。研究表明, 芥酸酰胺可显著降低 LLDPE 薄膜的静摩擦系数 ( $\mu_s$ ) 和动摩擦系数 ( $\mu_k$ ), SiO<sub>2</sub> 与芥酸酰胺的协同效应则能有效解决单一爽滑剂在高温或长期储存下开口性能衰减的问题。当 SiO<sub>2</sub> 含量为 0.199% 时, 薄膜在 -10, 25, 50 °C 下均表现出优异的爽滑性能, 且开口性能稳定可靠。SiO<sub>2</sub> 均匀分散在 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/ 芥酸酰胺母粒和薄膜中, 并作为 LLDPE 薄膜的成核剂, 实现了 LLDPE 薄膜开口爽滑性能的长期稳定调控。

**关键词:** 线型低密度聚乙烯; 二氧化硅; 芥酸酰胺; 开口剂; 爽滑开口性能

**中图分类号:** TB333.2<sup>+</sup>3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2026)02-0026-07

**引文格式:** 邓祖豪, 夏 霜, 石 璞, 等. 储存温度与时间对 SiO<sub>2</sub>/ 芥酸酰胺复合改性 LLDPE 薄膜爽滑开口性能的影响 [J]. 包装学报, 2026, 18(2): 26-32.

## 1 研究背景

薄膜广泛应用于包装、电池、光伏、建筑和农业等领域。中国包装行业的年均产值接近 4000 亿元, 薄膜则在包装行业中占据重要地位<sup>[1]</sup>。薄膜具有轻质、柔韧、阻隔性好、环保可持续等优势, 在众多包装产品中发挥关键作用, 是现代工业必不可少的一种重要材料。然而, 薄膜由于外露分子链端的相互渗透和纠缠、分子间范德华力作用、膜间真空密合状态的形成

以及静电吸附效应<sup>[2-3]</sup>, 在实际应用中常面临高摩擦系数、易粘连等问题, 严重影响了高速包装生产线的生产效率和产品质量。添加开口爽滑剂母粒<sup>[4]</sup>可有效解决此问题, 因此开发高质量的开口爽滑剂母粒具有重要意义。

在众多开口爽滑剂中, 芥酸酰胺以其独特的分子结构, 表现出卓越的性能<sup>[5]</sup>。芥酸酰胺分子中含有长碳链和极性酰胺基团, 这种两亲性结构使其能够有效迁移到线型低密度聚乙烯 (LLDPE) 薄膜表面, 显

收稿日期: 2025-09-15

基金项目: 二氧化硅结构调控、性能研究与应用技术合作项目

作者简介: 邓祖豪, 男, 硕士生, 主要研究方向为二氧化硅开口剂制备及其在塑料薄膜中的应用,

E-mail: 1195703433@qq.com

通信作者: 石 璞, 男, 副教授, 主要从事高分子材料与新型能源材料研究, E-mail: 739603197@163.com

著降低薄膜间的摩擦系数<sup>[6-7]</sup>。但其在高温和长期储存条件下易迁移流失, 导致性能衰减<sup>[8]</sup>。此外, 迁移型爽滑剂在实际生产中常因迁移失控、环境条件变化等因素而导致薄膜发生表面“出粉”、复合强度不足、热封性能异常等质量缺陷, 严重影响薄膜外观并导致后续加工(复合、印刷等)困难<sup>[9]</sup>。

近年来, 二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )等非迁移型开口剂备受关注。通过在薄膜表面形成凸起, 薄膜间存在的空气能够减少膜间负压和接触面积, 从而达到开口和防粘连的效果<sup>[10]</sup>, 但单独使用时效果有限。将迁移型与非迁移型开口剂复合使用则有望构建协同效应, 便于制备兼具即时效果和长期稳定性的薄膜产品。国内外学者已对  $\text{SiO}_2$  开口剂展开大量研究, 例如, Shi J. Q. 等<sup>[11]</sup> 研究发现  $\text{SiO}_2$  等多孔无机粒子可以吸附外露的分子链端, 与芥酸酰胺共同改善薄膜的开口性能; Wang Y. 等<sup>[12]</sup> 研究发现  $\text{SiO}_2$  可以显著降低聚乙烯薄膜的摩擦系数, 但过量添加会增大薄膜雾度; 朱伟等<sup>[2]</sup> 研究发现 LDPE 薄膜的摩擦系数随着  $\text{SiO}_2$  开口剂含量的增加而呈现出先下降后上升的趋势; D. Gubala 等<sup>[13]</sup> 证明了芥酸酰胺的迁移行为能被  $\text{SiO}_2$  抑制, 从而提高复合体系的稳定性; S. A. Awad 等<sup>[14]</sup> 通过分子动力学模拟发现,  $\text{SiO}_2$  对芥酸酰胺迁移的抑制行为受温度影响。然而, 复合开口剂在 LLDPE 中的应用研究仍不够系统, 特别是温度和时间对开口性能的影响规律尚不明确。

由于中国幅员辽阔, 气候条件差异显著, 用于薄膜生产的开口爽滑剂母粒需同时适应南方高温高湿及北方低温干燥的环境。因此, 本研究将芥酸酰胺开口剂与  $\text{SiO}_2$  开口剂进行复合, 并研究不同温度( $-10\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ )和不同储存时间(1~15 d)对 LLDPE 薄膜爽滑和开口性能的影响, 为实际生产提供可靠的理论依据和数据支持。

## 2 实验部分

### 2.1 材料与试剂

LLDPE, DFDA-7042, 中石化上海公司; 芥酸酰胺, PMC, 美国阿克苏公司;  $\text{SiO}_2$ , K8, 福建远翔新材料股份有限公司。

### 2.2 设备及仪器

双螺杆挤出机, CTE 35 PLUS, 南京科倍隆机械有限公司; 小型吹膜机, FYZ-28, 佛山金中河机械有限公司; 摩擦系数仪, FTP-F1, 济南兰光机电技

术有限公司; 透光率/雾度测定仪, WGT-S, 济南兰光机电技术有限公司; 扫描电子显微镜(SEM), SU8600, 日本日立公司; 能谱分析仪, Xplore 30, 英国牛津仪器公司; 差示扫描量热仪(DSC), DSC 25, 美国 TA 仪器公司。

### 2.3 样品制备

#### 2.3.1 LLDPE/ 芥酸酰胺、LLDPE/ $\text{SiO}_2$ / 芥酸酰胺母粒的制备

将  $\text{SiO}_2$  置于  $105\text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中干燥 3~4 h, 以除去水分。将 LLDPE、芥酸酰胺、 $\text{SiO}_2$  分别按照 9:1:0 和 8.0:0.7:1.3 的质量比进行混合, 主机转速设定为 150 r/min, 切粒机转速设定为 300 r/min, 10 段温度设置为 175, 185, 190, 190, 190, 190, 190, 185, 190, 190  $^\circ\text{C}$ , 并使用双螺杆挤出机造粒, 得到 LLDPE/ 芥酸酰胺、LLDPE/ $\text{SiO}_2$ / 芥酸酰胺母粒。

#### 2.3.2 测试膜材的制备

使用小型吹膜机进行吹膜, 1 区至 5 区温度分别设定为 135, 135, 140, 145, 140  $^\circ\text{C}$ , 主机频率设定为 25 Hz, 收卷辊变频电机频率设定为 12 Hz。根据芥酸酰胺添加量(0.10%, 0.15%, 0.20%, 0.25%)分别称取适量 LLDPE/ $\text{SiO}_2$ / 芥酸酰胺母粒与 LLDPE 共混, 随后利用吹膜机制备得到 LLDPE/ 芥酸酰胺薄膜(分别命名为 LLDPE/ 芥-0.10%, LLDPE/ 芥-0.15%, LLDPE/ 芥-0.20%, LLDPE/ 芥-0.25%)及 LLDPE/ $\text{SiO}_2$ / 芥酸酰胺薄膜(分别命名为 LLDPE/ $\text{SiO}_2$ / 芥-0.10%, LLDPE/ $\text{SiO}_2$ / 芥-0.15%, LLDPE/ $\text{SiO}_2$ / 芥-0.20%, LLDPE/ $\text{SiO}_2$ / 芥-0.25%)。根据 LLDPE/ $\text{SiO}_2$ / 芥酸酰胺母粒中芥酸酰胺与  $\text{SiO}_2$  的比例, 膜材中  $\text{SiO}_2$  的添加量分别为 0.199%, 0.298%, 0.397%, 0.496%。将膜材放置于冷冻箱中以模拟低温环境( $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ), 放置于烘箱中以模拟高温环境( $50\text{ }^\circ\text{C}$ )。

### 2.4 性能测试与结构表征

1) 摩擦系数测定。根据 GB/T 10006—2021《塑料 薄膜和薄片 摩擦系数的测定》试验方法, 采用摩擦系数仪测量薄膜样品的动/静摩擦系数。样品大小为  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 。每种样品测试 5 次, 结果取平均值。

2) 抗粘连测试。根据 GB/T 39935—2021《塑料制品 薄膜和片材 抗粘连性的测定》中的试验方法, 在  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  的薄膜样品上加载 5.4 kg 的负荷, 以保证试样受到 7 kPa 的均匀压强, 放入烘箱中于  $(50 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$  条件下保持贴合 24 h, 结束后卸下负荷静

置 4 h, 并通过观察薄膜样品分离时是否需要外力, 来分析薄膜的粘连性。

3) 透光率/雾度测试。根据 GB/T 2410—2008《透明塑料透光率和雾度的测定》, 使用透光率/雾度测定仪检测各膜材的透光率和雾度。每种样品测试 3 次, 结果取平均值。

4) 微观结构分析。采用 SEM 观察 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺母粒和 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺薄膜的微观结构, 并使用能谱分析仪对 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺薄膜的组分进行测试。

5) 热稳定性测试。在 N<sub>2</sub> 氛围下, 设置升温速度为 10 °C/min, 将样品由 25 °C 升温至 230 °C, 保持 10 min, 消除材料热历史后, 以 10 °C/min 的速度将样品由 230 °C 降温至 25 °C, 再以 10 °C/min 的速度

升温至 230 °C。

## 3 结果与讨论

### 3.1 SEM 及能谱分析

图 1 为 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺母粒和薄膜的 SEM 及能谱分析结果。在图 1a 和图 1c 中有较多白色块状粉体且分布均匀, 说明 SiO<sub>2</sub> 均匀分散在 LLDPE 中, 无明显团聚现象。由图 1b 可见, 母粒中的 SiO<sub>2</sub> 开口剂粒径达到了亚微米级 (200~700 nm)。对图 1d 中的白色粉体 (圆圈内) 进行能谱分析可知, 白色粉体中 Si 含量为 81.6%, O 含量为 18.4%, 这进一步证明了薄膜微观表面的白色粉体为 SiO<sub>2</sub>。

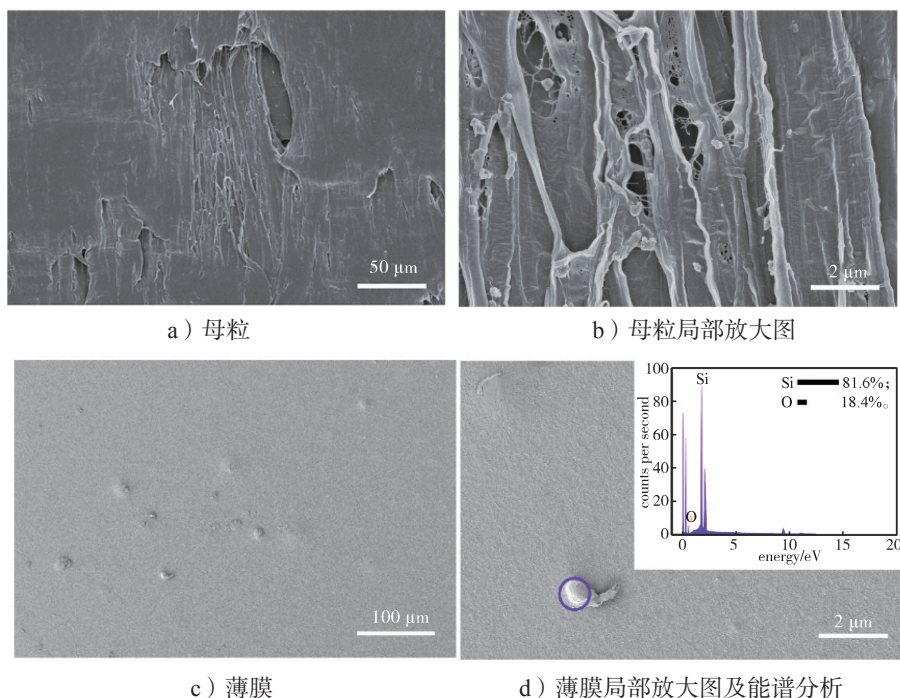


图 1 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺的 SEM 及能谱分析

Fig. 1 SEM images and EDS analysis of LLDPE/SiO<sub>2</sub>/erucamide

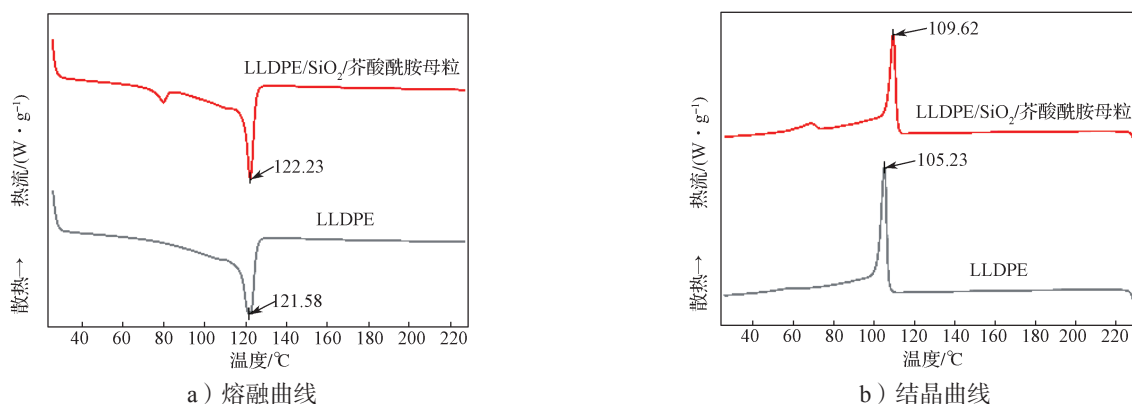
### 3.2 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺母粒的 DSC 分析

图 2 为 LLDPE、LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺母粒的 DSC 曲线。由图 2a 可知, LLDPE、LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺母粒在 122 °C 附近均出现明显的熔融吸热峰, 其熔融焓分别为 77.12 J/g 和 67.76 J/g。由于母粒中所含的 SiO<sub>2</sub> 和芥酸酰胺无法结晶, LLDPE、LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺母粒结晶度的计算结果分别为 26.32% 和 29.48%, 加入开口剂后 LLDPE 的结晶度有所上升<sup>[15]</sup>。由图 2b 可见, LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺母粒的

结晶温度更高 (109.62 °C), 说明 SiO<sub>2</sub> 起到了成核剂的作用<sup>[16-18]</sup>。

### 3.3 LLDPE 薄膜的爽滑开口性能分析

薄膜的爽滑开口性能由动/静摩擦系数 (体现爽滑和开口性) 和抗粘连测试 (体现开口性) 来评估。其中静摩擦系数 ( $\mu_s$ ) 与薄膜开口性直接相关,  $\mu_s$  数值高表明薄膜层间存在强相互作用, 需要更大外力才能使薄膜相互分离<sup>[15-16]</sup>。动摩擦系数 ( $\mu_k$ ) 则影响薄膜的加工性能,  $\mu_k$  数值过高会导致薄膜在输送过程

图2 LLDPE、LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺母粒的 DSC 曲线Fig. 2 DSC curves of LLDPE and LLDPE/SiO<sub>2</sub>/erucamide masterbatch

中的阻力增大而产生皱褶,  $\mu_k$  数值过低则可能会导致薄膜打滑从而影响包装精度。表 1~6 是不同温度下储存不同时间后薄膜样品的动 / 静摩擦系数及其开口性能。迁移类开口剂芥酸酰胺属于小分子添加剂, 温度显著影响其分子热运动, 从而影响其迁移能力和爽滑能力。而非迁移类开口剂 SiO<sub>2</sub> 属于无机材料, 温度对其没有影响。

表 1 25 °C 下储存 24 h 后薄膜的摩擦系数及其开口性

Table 1 Friction coefficient and anti-blocking property of the film stored for 24 h at 25 °C

样品	厚度 / $\mu\text{m}$	$\mu_s$	$\mu_k$	开口性
LLDPE	31.0	0.607	0.688	差, 粘连
LLDPE/芥 -0.10%	30.0	0.195	0.184	良
LLDPE/芥 -0.15%	29.7	0.126	0.067	好
LLDPE/芥 -0.20%	30.0	0.112	0.046	好
LLDPE/芥 -0.25%	31.0	0.101	0.046	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.10%	29.7	0.063	0.041	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.15%	29.8	0.062	0.038	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.20%	31.3	0.059	0.038	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.25%	30.3	0.058	0.035	好

表 1 中的测试主要是模拟工厂质检。从分析结果可知, 芥酸酰胺可以大幅度地降低 LLDPE 薄膜的动静摩擦系数。在 25 °C 下, 随着 SiO<sub>2</sub> 含量的增加, 薄膜样品的  $\mu_s$ 、 $\mu_k$  均有所降低。添加 SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺复合开口剂可显著降低动 / 静摩擦系数, 使膜材表现出良好的开口性。

由表 2 可知, 在低温环境下仅添加芥酸酰胺, 其动 / 静摩擦系数有所提升, 添加 SiO<sub>2</sub> 开口剂后的薄膜表现出更强的稳定性。和常温环境 (见表 1) 相比, SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺复合开口剂体系在低温下表现出更优越的爽滑性, 其  $\mu_s$  变化幅值小于 5%。

表 2 -10 °C 下储存 24 h 后薄膜的摩擦系数及其开口性

Table 2 Friction coefficient and anti-blocking property of the film stored for 24 h at -10 °C

样品	厚度 / $\mu\text{m}$	$\mu_s$	$\mu_k$	开口性
LLDPE	31.3	0.475	0.480	差, 粘连
LLDPE/芥 -0.10%	31.0	0.340	0.184	良
LLDPE/芥 -0.15%	29.7	0.153	0.104	好
LLDPE/芥 -0.20%	29.7	0.128	0.054	好
LLDPE/芥 -0.25%	30.0	0.097	0.034	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.10%	31.6	0.065	0.043	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.15%	31.7	0.062	0.042	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.20%	31.0	0.058	0.039	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.25%	30.7	0.056	0.035	好

表 3 50 °C 下储存 24 h 后薄膜的摩擦系数及其开口性

Table 3 Friction coefficient and anti-blocking property of the film stored for 24 h at 50 °C

样品	厚度 / $\mu\text{m}$	$\mu_s$	$\mu_k$	开口性
LLDPE	31.3	1.407	0.802	差, 粘连
LLDPE/芥 -0.10%	30.3	—	—	差, 粘连
LLDPE/芥 -0.15%	31.3	—	—	差, 粘连
LLDPE/芥 -0.20%	31.3	—	—	差, 粘连
LLDPE/芥 -0.25%	31.0	—	—	差, 粘连
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.10%	31.7	0.082	0.052	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.15%	31.7	0.072	0.040	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.20%	30.0	0.061	0.036	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> /芥 -0.25%	30.3	0.052	0.030	好

高温环境 (50 °C) 可进一步加速芥酸酰胺的迁移, 因此需探讨其对薄膜开口性的影响。由表 3 可知, 由于大量的芥酸酰胺迁移到薄膜表面, 薄膜表面极性增强且分子链之间相互缠绕<sup>[19]</sup>, 导致薄膜之间存在较强粘连, 薄膜与测量夹具接触时发生打滑。因此, 仅添加芥酸酰胺开口剂薄膜的动 / 静摩擦系数无法测

量。添加 SiO<sub>2</sub> 后开口效果良好，其  $\mu_s$  和  $\mu_k$  值虽然较常温下有所提高，但仍保持良好的开口爽滑性能，这可能是因为 SiO<sub>2</sub> 颗粒可以通过局部吸附作用，通过表面硅羟基（Si—OH）与芥酸酰胺的酰胺基（—CONH<sub>2</sub>）形成氢键吸附，在一定程度上抑制了芥酸酰胺的迁移。在市售薄膜中，芥酸酰胺和 SiO<sub>2</sub> 开口剂的添加量一般分别为 0.1%~0.2% 和 0.1%~0.3%。在此添加量下，SiO<sub>2</sub>/ 芥酸酰胺复合开口剂体系的表现依然良好。

**表 4 -10 ℃ 下储存 15 d 后薄膜的摩擦系数及其开口性**  
**Table 4 Friction coefficient and anti-blocking property of the film stored for 15 d at -10 ℃**

样品	厚度 / $\mu\text{m}$	$\mu_s$	$\mu_k$	开口性
LLDPE	31.3	0.463	0.476	差，粘连
LLDPE/ 芥 -0.10%	30.3	0.292	0.310	良
LLDPE/ 芥 -0.15%	31.3	0.134	0.085	好
LLDPE/ 芥 -0.20%	31.3	0.130	0.069	好
LLDPE/ 芥 -0.25%	31.0	0.123	0.068	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.10%	30.7	0.072	0.048	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.15%	31.3	0.061	0.046	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.20%	31.0	0.060	0.042	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.25%	30.7	0.056	0.031	好

从表 4 可以看出，LLDPE/ 芥 -0.10% 和 LLDPE/ 芥 -0.20% 薄膜在 -10 ℃ 下储存 15 d 后的摩擦系数比储存 24 h 后的低，而 LLDPE/ 芥 -0.20% 和 LLDPE/ 芥 -0.25% 薄膜的摩擦系数有所提高，这可能是因为低温下芥酸酰胺的含量不同而导致的迁移速度差异。而添加 SiO<sub>2</sub> 后开口效果良好，薄膜表面未出现“出粉”现象，说明 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/ 芥酸酰胺薄膜在低温长时间储存下的动 / 静摩擦系数可以满足使用需求。

**表 5 50 ℃ 下储存 3 d 后薄膜的摩擦系数及其开口性**  
**Table 5 Friction coefficient and anti-blocking property of the film stored for 3 d at 50 ℃**

样品	厚度 / $\mu\text{m}$	$\mu_s$	$\mu_k$	开口性
LLDPE	30.3	1.831	1.194	差，高粘连
LLDPE/ 芥 -0.10%	30.3	—	—	差，高粘连
LLDPE/ 芥 -0.15%	31.3	—	—	差，高粘连
LLDPE/ 芥 -0.20%	31.3	—	—	差，高粘连
LLDPE/ 芥 -0.25%	31.0	—	—	差，高粘连
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.10%	30.3	0.143	0.082	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.15%	31.0	0.111	0.069	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.20%	30.7	0.097	0.066	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.25%	30.3	0.094	0.064	好

由表 5 可知，仅添加芥酸酰胺开口剂的 LLDPE 薄膜在 50 ℃ 下储存 3 d 后，均呈高粘连状态；而 SiO<sub>2</sub> 复合开口剂体系表现依然好。芥酸酰胺添加量为 0.10% 和 SiO<sub>2</sub> 添加量为 0.199% 的薄膜，其动 / 静摩擦系数均小于 0.2，依然属于高爽滑，这进一步说明 SiO<sub>2</sub>/ 芥酸酰胺复合开口剂体系在长时间高温环境下具有很好的稳定性。

表 6 为模拟标准环境下薄膜的动 / 静摩擦系数变化。由表 6 可知，添加 SiO<sub>2</sub> 后，薄膜仍能在长时间储存下实现爽滑的开口性能。

**表 6 25 ℃ 下储存 15 d 后薄膜的摩擦系数及其开口性**  
**Table 6 Friction coefficient and anti-blocking property of the film stored for 15 d at 25 ℃**

样品	厚度 / $\mu\text{m}$	$\mu_s$	$\mu_k$	开口性
LLDPE	30.0	0.796	0.563	差，高粘连
LLDPE/ 芥 -0.10%	30.3	—	—	差，高粘连
LLDPE/ 芥 -0.15%	31.3	—	—	差，高粘连
LLDPE/ 芥 -0.20%	31.3	—	—	差，高粘连
LLDPE/ 芥 -0.25%	31.0	—	—	差，高粘连
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.10%	30.3	0.074	0.053	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.15%	30.7	0.073	0.053	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.20%	30.0	0.072	0.051	好
LLDPE/SiO <sub>2</sub> / 芥 -0.25%	30.3	0.071	0.050	好

综合表 1~6 可知，在芥酸酰胺含量为 0.10%、SiO<sub>2</sub> 含量为 0.199% 时，LLDPE 薄膜的摩擦性能表现为高爽滑，即  $\mu_s$  值和  $\mu_k$  值均小于 0.2；SiO<sub>2</sub>/ 芥酸酰胺复合开口剂体系由于能产生显著的协同效应，其开口性显著优于单一芥酸酰胺开口剂体系（特别是在高温和长期储存条件下），符合时温等效原理<sup>[11]</sup>。

### 3.4 透光率 / 雾度分析

透光率和雾度是薄膜使用过程中的重要指标<sup>[20]</sup>。由图 3 可知，芥酸酰胺与 SiO<sub>2</sub> 的加入对 LLDPE 薄膜的透光率几乎无影响（透光率值保持在 92.1%~93.4%），这是因为与滑石粉等传统无机开口剂相比，SiO<sub>2</sub> 的折射率（1.47）更接近 LLDPE 的（1.51）<sup>[18,21]</sup>。以 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/ 芥 -0.15% 薄膜和 LLDPE 薄膜为例，由于芥酸酰胺和 SiO<sub>2</sub> 会对光线发生折射，导致 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/ 芥 -0.15% 薄膜的雾度值更大。在 -10 ℃ 时，薄膜的雾度值接近 11%，这可能是因为水分被“冻结”，光散射现象加剧从而导致雾度值上升；在接近 0 ℃ 时，雾度值降至最低点，随后雾度值随温度的升高而明显增加，这是因为温度升高会促使芥酸

酰胺迁移到 LLDPE 薄膜表面, 增强了光的散射<sup>[22]</sup>。综上所述, 选用质量分数为 0.15% 的芥酸酰胺和 0.298% 的 SiO<sub>2</sub> 作为爽滑开口剂, 其制备的 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥-0.15% 薄膜具有最佳性能。

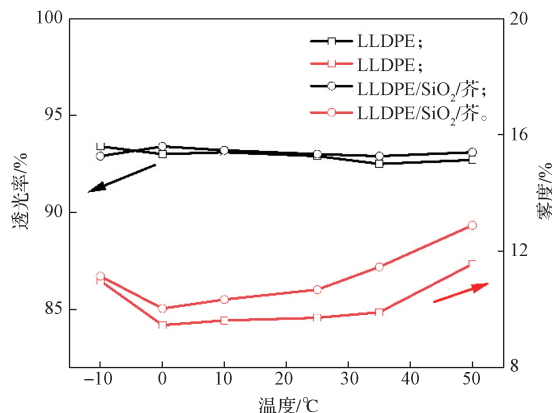


图3 储存温度对薄膜透光率/雾度的影响

Fig. 3 Effects of storage temperature on the light transmittance/cloudiness of films

## 4 结论

本研究通过双螺杆挤出机和吹膜工艺, 制备了 LLDPE/SiO<sub>2</sub>/芥酸酰胺复合薄膜, 并系统分析了 SiO<sub>2</sub> 与芥酸酰胺的协同效应对薄膜爽滑开口性能及长期稳定性的影响。实验结果表明, SiO<sub>2</sub> 可在 LLDPE 薄膜中均匀分散, 其作为成核剂进一步提高了 LLDPE 的结晶度; LLDPE 复合薄膜的爽滑开口性能显著提升, 其  $\mu_s$  和  $\mu_k$  较 LLDPE 薄膜的均降低了 90% 以上; 在所有存储温度和时间条件下, SiO<sub>2</sub> 与芥酸酰胺之间的协同效应使 LLDPE 薄膜能够满足爽滑和开口的需求; 此外, 添加 SiO<sub>2</sub> 开口剂对 LLDPE 薄膜的透光率无显著影响。这表明该复合体系在实现高效开口的同时, 也能兼顾光学性能, 在包装薄膜领域中具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 许江菱, 孟 坤, 唐茂株, 等. 2023—2024 年世界塑料工业进展 (1): 通用塑料 [J]. 塑料工业, 2025, 53(3): 10–24.
- [2] 朱 伟, 林胜奇, 吴 希, 等. 开口剂配方对聚乙烯膜料性能的影响 [J]. 广东化工, 2024, 51(9): 8–10.
- [3] MALTBY A, RUXTON P. The Use of Fatty Acid Amides as Combined Slip and Anti-Block Additives[J].

- Polymers and Polymer Composites, 1999, 7(8): 537–543.
- [4] 任晓兵. 开口爽滑剂在低密度聚乙烯薄膜中的应用 [J]. 当代化工, 2017, 46(1): 173–176.
- [5] 潘翔宇, 李雪珊, 党乐平, 等. 芥酸酰胺迁移对 PP 无纺布表面润湿性的影响 [J]. 塑料工业, 2023, 51(6): 146–152.
- [6] 仕双云. 慢迁移开口爽滑剂制备及在 PE 膜中的应用 [J]. 中国包装, 2021, 41(12): 35–41.
- [7] 王旖旎, 林勤保, 钟怀宁, 等. 低密度聚乙烯薄膜中芥酸酰胺的检测及其向食品模拟物的迁移 [J]. 中国塑料, 2018, 32(4): 118–124.
- [8] 王学军, 庄心生, 齐 辉. 薄膜爽滑剂芥酸酰胺研究进展 [J]. 塑料工业, 2022, 50(7): 1–5, 11.
- [9] 陈优霞. 二氧化硅塑料薄膜开口剂的研制 [D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [10] 聂海平, 吴 剑, 吴国岚. 爽滑剂和防粘开口剂在塑料薄膜中的应用 [J]. 塑料助剂, 2017(3): 19–22.
- [11] SHI J Q, ZHANG M, LIU J X, et al. Molecular Dynamics Simulations of Adsorption Behavior of Organic Friction Modifiers on Hydrophilic Silica Surfaces Under the Effects of Surface Coverage and Contact Pressure[J]. Tribology International, 2021, 156: 106826.
- [12] WANG Y, ZHANG L, HU Y J, et al. Comparative Study on Optical Properties and Scratch Resistance of Nanocomposite Coatings Incorporated with Flame Spray Pyrolyzed Silica Modified via In-Situ Route and Ex-Situ Route[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(3): 251–258.
- [13] GUBALA D, FOX L J, HARNIMAN R, et al. Heads or Tails: Nanostructure and Molecular Orientations in Organised Erucamide Surface Layers[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 590: 506–517.
- [14] AWAD S A, KHALAF E M. Investigation of Improvement of Properties of Polypropylene Modified by Nano Silica Composites[J]. Composites Communications, 2019, 12: 59–63.
- [15] 李志峰, 韩明哲, 周 豪, 等. 开口剂在 LLDPE 中的应用 [J]. 合成树脂及塑料, 2011, 28(3): 39–41.
- [16] SHI J Q, ZHOU Q, SUN K, et al. Understanding Adsorption Behaviors of Organic Friction Modifiers on Hydroxylated SiO<sub>2</sub> (001) Surfaces: Effects of Molecular Polarity and Temperature[J]. Langmuir, 2020, 36(29): 8543–8553.
- [17] 欧红涛, 薛 琼, 杨军红, 等. LDPE/m-nZVI 复合膜的制备及性能 [J]. 包装学报, 2024, 16(2): 24–30.
- [18] 苏羽航, 林渊智, 毛健全, 等. PE/PP/微米 SiO<sub>2</sub> 消光热封膜的研制及其性能研究 [J]. 中国塑料, 2025,

- 39(3): 41–47.
- [19] 高宏保. 聚酯膜用  $\text{SiO}_2$  开口剂的特征及评价 [J]. 合成技术及应用, 2007, 22(1): 20–23.
- [20] 张 剑, 刘 聪, 陈光岩, 等. 易开口、高透明线性低密度聚乙烯的研制与应用 [J]. 弹性体, 2010, 20(5): 60–63.
- [21] VAN ESSCHE G, AND T K, SCHMIDT A. New Highly Efficient Silica Anti-Blocking Aids for PE and PP Films[J]. Journal of Plastic Film and Sheeting, 2000, 16(2): 155–168.
- [22] 司 虎, 王树霞, 戴钧明, 等. 二氧化硅对 BOPET 光学性能影响研究 [J]. 合成技术及应用, 2020, 35(4): 1–7.
- (责任编辑: 李 涛)

## Effects of Storage Temperature and Time on the Slick Anti-Blocking Property of $\text{SiO}_2$ /Oleamide Composite Modified LLDPE Films

DENG Zuhao<sup>1</sup>, XIA Shuang<sup>1</sup>, SHI Pu<sup>1</sup>, WANG Fangke<sup>2</sup>, MIU Xingxing<sup>2</sup>

(1. School of Packaging Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Fujian Yuanxiang New Materials Co., Ltd., Shaowu Fujian 354099, China)

**Abstract:** In response to the degradation of slip and anti-blocking properties in linear low-density polyethylene (LLDPE) films under high-temperature or long-term storage conditions, LLDPE/erucamide and LLDPE/ $\text{SiO}_2$ /erucamide masterbatches were prepared via twin-screw extrusion. Films with varying proportions of  $\text{SiO}_2$  and erucamide were produced using the blown film process. The effects of different storage temperatures and durations on the slip/anti-blocking performance and optical properties of the films were systematically investigated. The results demonstrate that erucamide alone significantly reduces the static ( $\mu_s$ ) and kinetic friction coefficients ( $\mu_k$ ) of LLDPE films. Moreover, the  $\text{SiO}_2$ -erucamide composite system exhibits a notable synergistic effect, effectively mitigating the decline in anti-blocking performance under extreme temperature or prolonged storage conditions. When the  $\text{SiO}_2$  content is 0.199%, the films exhibit excellent slip performance and reliable anti-blocking property across a broad temperature range ( $-10, 25, 50\text{ }^\circ\text{C}$ ). The  $\text{SiO}_2$  particles are uniformly dispersed in both the masterbatch and the resulting films, serving as nucleating agents for LLDPE and contributing to the long-term stability of the slip and anti-blocking performance.

**Keywords:** linear low-density polyethylene; silica; erucamide; opening agent; slip and anti-blocking property