

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.008

矿粉种类对PBAT/PLA共混薄膜力学与延时边封性能的影响

陈业中^{1,2,3}, 陈保登², 潘凯波², 李禹函³, 张怡¹, 尹衍升¹

(1. 广州航海学院, 海洋严酷环境使役材料与运维装备广东省高校重点实验室, 广州 510725;

2. 珠海金发生物材料有限公司, 广东珠海 519050; 3. 郑州大学化学学院, 郑州市弹性密封材料重点实验室, 郑州 450001)

摘要: 采用熔融共混法制备聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯-聚乳酸和矿粉的共混物, 并探究了矿粉种类对于共混体系薄膜力学性能与延时边封性能的影响。结果表明, 随着细粒径滑石粉SDC-F7的质量分数从10%提升至20%, 共混薄膜穿刺强度下降29.3%, 滑石粉粒径提升也会使共混薄膜的穿刺强度显著下降33.3%。延时边封测试表明, SDC-F7添加质量分数为10%时, 共混薄膜15 d边封强度保持率(R_{15d})为51.4%, SDC-F7的质量分数提升至20%, R_{15d} 大幅下降至7.7%; 滑石粉粒径增加, 共混薄膜 R_{15d} 也有显著下降; 蒙脱土-硫酸钡体系薄膜力学性能和延时边封性能与SDC-F7体系相当; 添加 CaCO_3 -SA0(未活化 CaCO_3)的共混薄膜延时边封性能优异, R_{15d} 达到最高的62.9%, 而添加 CaCO_3 -SA1.5, CaCO_3 -SA3.0(分别为硬脂酸1.5%, 3.0%活化 CaCO_3)的共混薄膜 R_{15d} 分别大幅降低至12.7%和7.4%。表面微观分析发现, 粗粒径滑石粉AH-1250N6共混薄膜表面观察到大粒径的矿粉突出, 影响表面树脂的熔融黏接, 从而使边封性能下降。 CaCO_3 -SA0的共混薄膜表面碳酸钙的暴露少, CaCO_3 -SA3.0的共混薄膜表面有大量的碳酸钙析出表面。本研究对推广生物降解材料的应用有理论支撑。

关键词: 聚对苯二甲酸己二酸丁二酯; 聚乳酸; 矿粉; 力学性能; 延时边封

中图分类号: TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0056-07

Influence of mineral powder types on mechanical and delayed edge sealing properties of PBAT/PLA blend films

CHEN Yezhong^{1,2,3}, CHEN Baodeng², PAN Kaibo², LI Yuhan³, ZHANG Yi¹, YIN Yansheng¹

(1. Guangdong Key Laboratory of Materials and Equipment in Harsh Marine Environment, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China; 2. Zhuhai Kingfa biomaterial Co., Ltd., Zhuhai 519050, China; 3. College of Chemistry and Pingyuan Laboratory, Zhengzhou Key Laboratory of Elastic Sealing Materials, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract : Blends of poly (butylene adipate-co-terephthalate), polylactic acid, and mineral powders were prepared via melt blending method, and the effects of mineral powder types on the mechanical properties and delayed edge-seal performance of blend films were systematically investigated. The results demonstrate that as the mass fraction of fine-particle talc SDC-F7 increase from 10wt% to 20wt%, a 29.3% reduction in puncture strength is observed in the blend films. Additionally, the increase of talc particle size results in a significant 33.3% decrease of puncture strength. Delayed edge-seal testing reveal that when 10% SDC-F7 is incorporated, the blend film maintains 51.4% of its 15-day edge-seal strength retention rate (R_{15d}). However, increasing SDC-F7 content to 20wt% cause R_{15d} to dramatically decline to 7.7%. Similar performance degradation patterns are observed with increasing talc particle sizes. Comparatively, montmorillonite and barium sulfate systems exhibit comparable mechanical and edge-seal properties to SDC-F7 system. Notably, adding CaCO_3 -SA0(unactivated CaCO_3) modified blend film display superior delayed edge-seal performance with R_{15d} reaching 62.9%, while those containing CaCO_3 -SA1.5 and CaCO_3 -SA3.0(1.5%, 3.0% stearic acid activated CaCO_3)

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52071091, 52001081), 广州市教育局高校科研项目(2024312143)

通信作者: 张怡, 副教授/博士, 研究方向为高分子合成与改性

收稿日期: 2025-02-25

引用格式: 陈业中, 陈保登, 潘凯波, 等. 矿粉种类对PBAT/PLA共混薄膜力学与延时边封性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 56-62.

CHEN Yezhong, CHEN Baodeng, PAN Kaibo, et al. Influence of mineral powder types on mechanical and delayed edge sealing properties of PBAT/PLA blend films[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 56-62.

show substantial reductions in R_{15d} to 12.7% and 7.4%, respectively. Surface microanalysis identify large-sized mineral particle protrusions on AH-1250N6 talc-modified films, which impair surface resin fusion bonding and consequently degrade edge-seal performance. CaCO_3 -SA0 blend film exhibits minimal calcium carbonate exposure, whereas CaCO_3 -SA3.0-modified film display extensive surface precipitation of calcium carbonate particles. This research provides theoretical support for promoting biodegradable material applications.

Keywords : poly (butylene adipate-co-terephthalate) ; polylactic acid ; mineral powder ; mechanical property ; delayed edge sealing

随着我国电子商务产业的规模化发展,物流包装材料面临可持续性升级的迫切需求。数据显示,2023年全国快递业务量达1 320.7亿件,同比增幅19.4%^[1],由此产生的聚乙烯(PE)基包装废弃物因百年级降解周期引发了严峻的微塑料污染问题^[2-3]。在此背景下,兼具生物降解性与加工适应性的生物降解聚酯成为研究热点^[4-7],其中脂肪族-芳香族共聚酯-聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯(PBAT)因其与低密度聚乙烯(PE-LD)相近的熔体流动特性和韧性,已在吹膜类包装领域实现商业化应用^[8-11]。而聚乳酸(PLA)^[12-13]作为生物基刚性聚酯(弹性模量3~4 GPa),常与PBAT构建“刚-柔”协同体系,提升薄膜的挺度与易用性。矿物粉如碳酸钙、滑石粉、蒙脱土、硫酸钡等,具有来源广、成本低的特点,在生物降解型快递袋的应用中,往往会在PBAT和PLA中加入矿粉进行熔融共混,进而将PBAT/PLA/矿粉共混材料加工为快递袋制品。

快递袋通常采用吹膜、收卷、印刷、放置备用等工艺完成,5~7天再进行边封切袋。而PBAT/PLA/矿粉三元共混体系在吹膜-收卷-延时切袋工艺中普遍存在界面黏附力衰减现象,这种现象称为“延时边封失效”,严重影响生物降解材料及制品的推广^[14]。刘云虎等^[15]在PBAT当中引入纳米碳酸钙、相容剂和分散剂,提升可生物降解快递包装袋的力学性能。李双利等^[16]公开一种三层吹膜工艺,外层采用PLA/PBAT复合物,中间层为聚氨酯黏胶剂,内层为PBAT/淀粉共混物,此工艺制备的薄膜可用于边封袋制品。冒彬等^[17]公开报道了三层吹膜工艺,以PLA,PBAT或者聚丁二酸丁二酯(PBS)为原料,添加色母和乙烯-丙烯酸共聚物(EAA)类增黏剂,制备成可降解快递袋。研究人员在可生物降解快递袋边封袋领域做了一定的研究,然而依然存在不足之处。首先研究人员通常采用添加黏胶剂、增黏剂、相容剂等不可降解组分强化相容性与胶黏性,然而这些组分易产生微塑料;其次现有研究主要聚焦于

初始的力学性能,仍然无法解决产业中“延时边封失效”的应用痛点,不利于生物降解材料在边封袋快递袋中的推广。

综上所述,矿粉种类对于可生物降解共混薄膜延时边封过程中填料-基体界面演化机制的系统研究尚未见报道。针对上述技术瓶颈,笔者聚焦不同种类的矿粉,系统研究其对PBAT/PLA/矿粉共混薄膜的延时边封强度、延时边封手撕等级、撕裂强度、穿刺强度、拉伸强度的影响,并探究矿粉种类对于延时边封的影响机理,有着重要的产业化意义。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBAT:A400,工业级,珠海金发生物材料有限公司;

PLA:LX175,工业级,荷兰Total Corbion公司;

滑石粉:SDC-F7,辽宁鑫达滑石集团有限公司;

滑石粉:AH-1250N6,广西龙胜华美滑石开发有限公司;

蒙脱土:DK10,浙江丰虹新材料股份有限公司;

硫酸钡:XM-8000,广东恒美源纳米科技有限公司;

碳酸钙:未活化碳酸钙,鑫荣(连州)矿粉科技有限公司。

1.2 主要仪器和设备

双螺杆挤出机:TSE-40D,南京瑞亚高聚物装备有限公司;

吹膜机:MB-600,广东金明精机股份有限公司;

制袋机:KDZD-30,江西德新达智能机械有限公司;

熔体流动速率(MFR)测试仪:BMF-001,德国Zwick公司;

拉伸测试仪:PARAM HST-H3,济南兰光机电技术有限公司;

撕裂测试仪:PARAM SLY-S1,济南兰光机电技术有限公司;

穿刺测试仪:PARAM XLW (PC),济南兰光机电技术有限公司;

表面测试仪:NVM6,德国徕卡公司。

1.3 试样制备

将未活化的碳酸钙和指定含量的硬脂酸(SA)投入高混机中,低速 200 r/min 先预混 5 min,再 1 400 r/min 高速混合 20 min,得到活化后的碳酸钙样品,未活化的碳酸钙标识为 CaCO₃-SA0,硬脂酸 1.5% 活化的碳酸钙记为 CaCO₃-SA1.5,依次类推,不同矿粉的参数见表 1。

表 1 矿粉的参数

Tab. 1 Parameters of raw minerals

Mineral powder	Mineral powder type	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	Stearic acid content/%
Talc	SDC-F7	4.3	7.0	
Talc	AH-1250N6	9.8	12.8	
Montmorillonite	DK10	4.2	7.3	
Barium sulfate	XM-8000	3.6	8.1	
Calcium carbonate	CaCO ₃ -SA0	1.8	6.8	0
Calcium carbonate	CaCO ₃ -SA1.5	1.8	6.7	1.5
Calcium carbonate	CaCO ₃ -SA3.0	1.8	6.7	3.0

Notes: D_{50} : is defined as particle diameter at which 50% of cumulative distribution; D_{90} : is defined as particle diameter at which 90% of cumulative distribution.

笔者采用以上六种不同矿粉,PBAT 选用珠海金发生物公司的 A400,PLA 选用安徽丰原生物的 PLA LX175,锁定质量分数为 3%,制备的共混薄膜具体配比见表 2。在锁定 PBAT 和 PLA 的基础上,1[#]

表 2 共混物的配方

Tab. 2 Formulation of compounds

Raw material	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]
PBAT A400	87	82	77	82	82	82	82	82	82
PLA LX175	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SDC-F7	10	15	20						
AH-1250N6				15					
DK10					15				
XM-8000						15			
CaCO ₃ -SA0							15		
CaCO ₃ -SA1.5								15	
CaCO ₃ -SA3.0									15

配方中 SDC-F7 添加质量分数为 10%,共混物及薄膜命名为 SDCF7-10,依然类推,2[#]和 3[#]配方分别命名为 SDCF7-15 和 SDCF7-20。4[#]~9[#]配方在锁定矿粉质量分数为 15% 基础上,将矿粉种类进行替代,共混物及薄膜以矿粉牌号命名,如 AH-1250N6,依次类推。

将 PBAT,PLA、矿粉按一定比例混合均匀,采

用双螺杆挤出机挤出并造粒,挤出机温度从加料口至模头温度分别设定为 80,120,180,180,180,180,180,180,180,190 和 200 ℃。造好的粒料在 70 ℃下烘干 5 h 后备用。得到的粒料投入吹膜机中,吹膜机的温度从加料口至模头分别设定为 120,150,150,150 和 155 ℃。通过吹膜机制备(55±2) μm 厚度卷膜,并采用边封制袋机,切袋温度设定为 350 ℃,将得到的膜袋在(23±3)℃、(50%±5%)RH 环境下调节至少 12 h,用于膜袋的力学测试。将卷膜在室温条件下分别放置 3,6,9,12 和 15 d,进行边封制袋,测试延时边封强度和延时边封手撕等级。制成的膜袋样品备用,用于徕卡表面形态分析。

1.4 性能测试

薄膜的拉伸性能按 GB/T 1040.3-2006 测试,采用 Type 2 样条,测试速率 500 mm/min;

薄膜的撕裂性能按 GB/T 16578.2-2009 测试;

薄膜的穿刺性能按 GB/T 21302-2007 测试,1 mm 直径针头,测试速率 50 mm/min;

薄膜的边封强度按 GB/T 1040.3-2006 测试,样条 15 mm 宽,测试速度 300 mm/min,在每片边封膜的边封上、中、下取三处,共取两片膜,测试 6 个数据计算平均值;

MFR 按 ISO 1133.1-2022 测试,测试温度 190 ℃,砝码 2.16 kg;

徕卡膜表面测试,将薄膜用黑色记号笔涂黑一部分区域,在徕卡显微镜下,调整放大倍数,进行膜面粗糙度观察与分析;

薄膜边封手撕等级参考表 3 标准,将边封好的薄膜在(23±3)℃、(50%±5%)RH 环境下调节 12 h 以上,每个人对边封薄膜的前端与后端边封进行评级,每个人测试 3 张膜,取平均值,一共 3 人测试,3 人测试的结果再取平均值。

2 结果与讨论

2.1 矿粉种类对薄膜初始力学性能的影响

对薄膜样品进行拉伸测试,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,添加质量分数 10% 的滑石粉 SDC-F7 时,共混薄膜的纵、横向拉伸强度分别为 29.8 MPa 和 27.9 MPa,纵、横向断裂伸长率分别为 420% 和 632%。随着 SDC-F7 质量分数增至 20% 时,薄膜纵、横向拉伸强度分别下降至 23.3 MPa 和 22.8 MPa,降幅为 21.8% 和 18.3%,断裂伸长率同步下降至 332% 和 402%,表明矿粉-基体界面脱黏引发的应

表3 薄膜边封手撕等级评估

Tab. 3 Assessment of hand tear grade of film edge sealing

Grade	Standard	Typical example
0	Percentage of ripped linear segments: 90%~100%	
1	Percentage of ripped linear segments: 70%~90%	
2	Percentage of ripped linear segments: 40%~70%	
3	Percentage of ripped linear segments: 20%~40%	
4	Percentage of ripped linear segments: 0~20%	
5	Percentage of ripped linear segments: 0%	

力集中效应随矿粉含量增加而加剧。矿粉粒径的增大(AH-1250N6, $D_{50}=9.8\ \mu\text{m}$)导致薄膜力学性能显著劣化,这与大尺寸片层结构引发的裂纹扩展效应相关。蒙脱土、硫酸钡与滑石粉在微观下均为片层结构,且DK10, XM-8000与SDC-F7的粒径相近,因此薄膜的拉伸性能均无明显变化。进一步观察不同含量硬脂酸处理的碳酸钙对于共混薄膜的影响,

看出,随着SDC-F7质量分数从10%提升至20%,撕裂强度小幅下降,而粗粒径滑石粉AH-1250N6引入后,薄膜的纵、横向撕裂性能下降23.7%和18.6%;蒙脱土、硫酸钡与同粒径滑石粉体系的薄膜撕裂强度相当;在碳酸钙体系中,随着活化剂含量的增加,纵、横向撕裂强度逐步提升。从图2b可以看出,矿粉种类与含量对于薄膜穿刺性能的影响较大。随着SDC-F7的质量分数从10%提升至20%,共混薄膜穿刺强度从2.73 N下降至1.93 N,下降幅度为29.3%,这是因为滑石粉含量高时,滑石粉与树脂之间的界面缺陷点增加,在测试时更容易引发穿刺失效。滑石粉粒径的提升使得共混薄膜的穿刺强度进一步下降至1.54 N, AH-1250N6的共混薄膜相对于SDC-F7的薄膜穿刺强度下降33.3%;同样矿粉增加量下对比发现,蒙脱土、硫酸钡体系薄膜穿刺强度维持在2.3~2.4 N范围,与同粒径滑石粉体系相当;碳酸钙体系中,活化剂含量增加,薄膜穿刺强度逐步提升,未活化碳酸钙体系薄膜穿刺强度低于活化碳酸钙体系,这是因为未活化碳酸钙容易分散不良、造成粉体团聚,从而诱发薄膜穿刺强度下降。

2.2 矿粉种类对薄膜延时边封性能的影响

图3的边封界面时效行为研究揭示了矿粉特性对PBAT/PLA/矿粉复合薄膜界面稳定性的影响。当滑石粉SDC-F7质量分数为10%时,初始边封强度最高,达到18.5 MPa,放置15 d后再边封,边封强度下降至9.5 MPa,15 d边封强度保持率($R_{15\text{d}}$)为51.4%。随着滑石粉含量的增加,边封保持率逐步下降,SDC-F7添加质量分数为15%时,共混薄膜的 $R_{15\text{d}}$ 为41.5%。提升SDC-F7质量分数至20%,共混薄膜初始边封强度下降至13.0 MPa, $R_{15\text{d}}$ 大幅下降至7.7%。粗粒径滑石粉AH-1250N6使共混薄膜的 $R_{15\text{d}}$ 进一步降低至5.3%;对比发现,蒙脱土、硫酸钡体系薄膜 $R_{15\text{d}}$ 分别维持在39.8%和38.9%,与15%SDC-F7体系相当;碳酸钙体系呈现独特的延时边

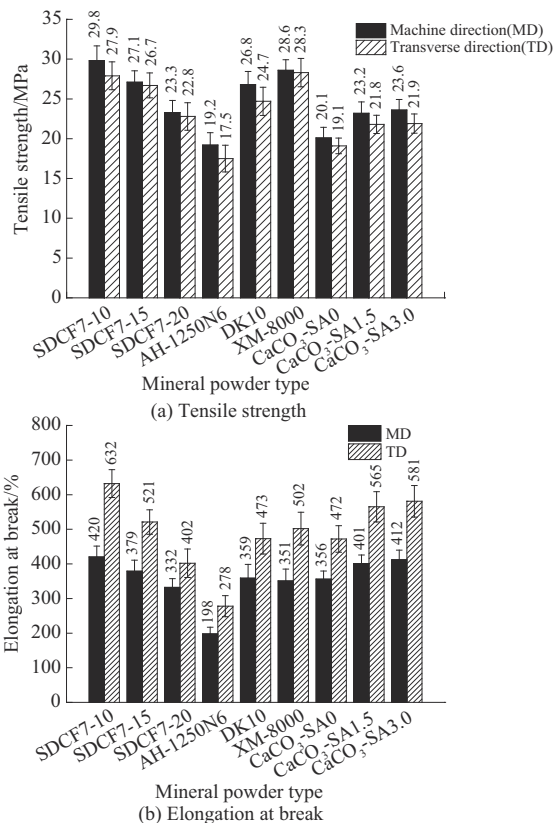


图1 PBAT/PLA薄膜的拉伸强度和断裂伸长率

Fig. 1 Tensile strength and elongation at break of PBAT/PLA films

可以看出,随着硬脂酸活化剂含量的增加,碳酸钙因为分散性提升,共混薄膜的拉伸强度与断裂伸长率均逐步上升。

撕裂强度与穿刺强度是快递袋使用过程中重要的性能指标,测试结果如图2所示。从图2a可以

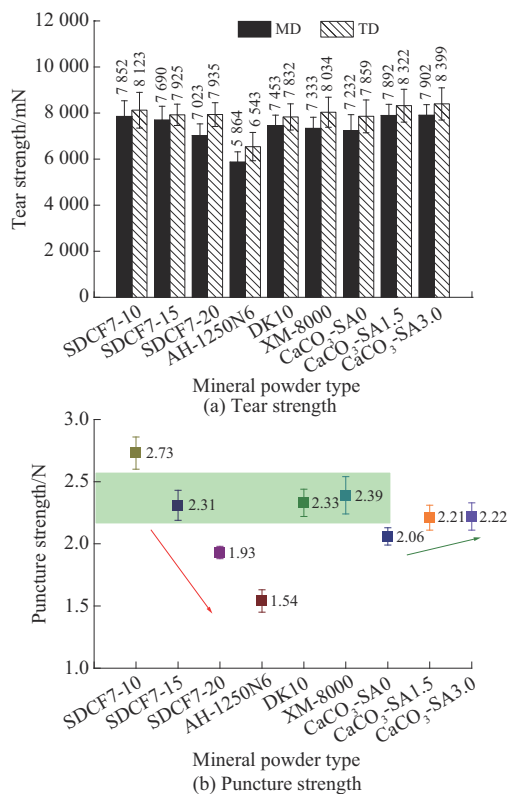


图2 PBAT/PLA 薄膜的撕裂强度和穿刺强度

Fig. 2 Tear strength and puncture strength of PBAT/PLA films

封特性,未活化的 CaCO₃-SA0 的共混薄膜延时边封性能优异, R_{15d} 达到最高的 62.9%, 而 CaCO₃-SA1.5 与 CaCO₃-SA3.0 的共混薄膜在 9 d 就已出现明显的强度衰减, R_{15d} 分别降低至 12.7% 和 7.4%。

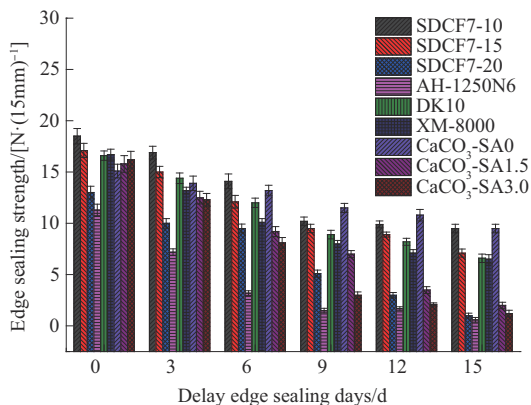


图3 PBAT/PLA 薄膜的延时边封强度

Fig. 3 Delayed edge sealing strength of PBAT/PLA films

快递袋在使用时,除了边封线处拉伸的场景,往往存在封线边封撕裂的情况,这种“撕裂”行为,边封强度测试无法准确表征。因此,进一步对延时边封的薄膜样品进行了手撕等级评估,根据表 3 的标准进行评级,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,SDC-F7-10 与 CaCO₃-SA0 的共混薄膜延时边封手撕

性能优异,15 d 的边封手撕仍表现出中等的界面韧性,测试结果分别为 2.3 级和 2.4 级,SDC-F7-15, DK10 和 XM-8000 体系分别下降至 0.8 级、1 级和 0.8 级。矿粉粒径及碳酸钙表面处理的影响尤为显著,SDC-F7-20, AH-1250N6, CaCO₃-SA1.5 和 CaCO₃-SA3.0 体系在 15 d 均已降低至 0 级,完全边封失效。

结合薄膜力学性能、延时边封强度和边封手撕等级的评估,边封专用降解材料在使用滑石粉、蒙脱土或硫酸钡方案时,建议 D_{50} 优选 $\leq 4.5 \mu\text{m}$,薄膜的放置时间是 9 d 之内;碳酸钙体系下,结合碳酸钙分散和延时边封性能,建议优选硬脂酸活化剂质量分数 $\leq 1.5\%$ 的活化体系,薄膜的放置时间 6 d 之内。优选矿粉种类为细粒径的滑石粉,如 SDC-F7,且矿粉质量分数控制在 15% 以内。

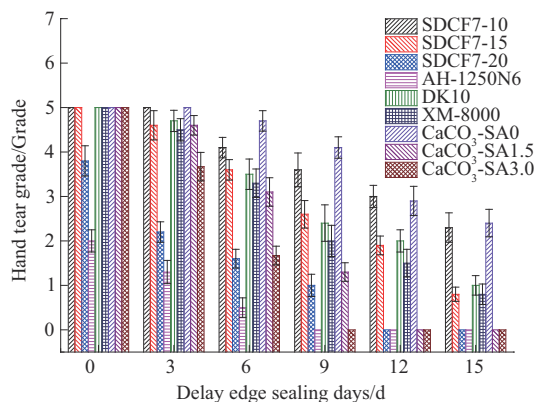


图4 PBAT/PLA 薄膜的延时边封手撕等级

Fig. 4 Delayed edge sealing hand tear grade of PBAT/PLA films

2.3 延时边封机理分析

MFR 用于评估引入不同体系,共混物流动性的差异,结果如图 5 所示。可以看出,滑石粉(SDC-F7 和 AH-1250N6)、蒙脱土(DK10)及硫酸钡(XM-8000)体系的 MFR 维持在 4.81~5.21 g/10 min 区间,无显著差异。而在碳酸钙体系中,随着活化剂硬脂酸含量的增加,共混物流动性逐步上升。这是因为一方面硬脂酸有润滑的作用,另一方面硬脂酸在活化包覆碳酸钙时会生成部分的硬脂酸钙,如硬脂酸盐应用于聚丙烯时,可以削弱分子链间的范德华力,提升聚合物链的滑移,提升材料的流动性^[16-17]。此外有研究表明,在 PLA 中引入 1% 的硬脂酸钙或硬脂酸镁,PLA 分子链更容易断裂易降解^[18]。

为了分析延时边封膜面发生的变化,进一步对薄膜放置后的表面进行了徕卡表面分析,结果如图 6 所示。可以看出,在放置 15 d 后,SDC-F7-10 共混薄膜表面的矿粉少且细,均匀分散,这主要是因为

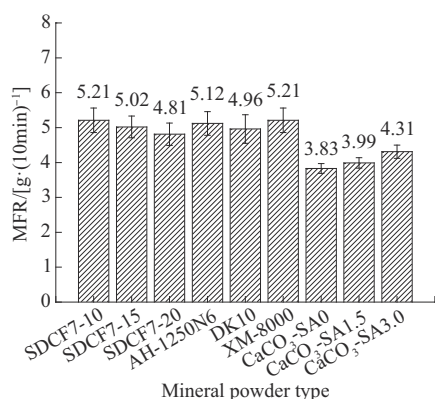


图5 PBAT/PLA共混物的MFR

Fig. 5 MFR of PBAT/PLA blends

矿粉含量低且粒径细。AH-1250N6共混薄膜表面可以观察到大粒径的矿粉突出,这些在表面突起的粉体在边封时影响表面树脂的熔融黏接,从而使边封性能下降。蒙脱土(DK10)与SDC-F7-10共混薄膜表面状态较为接近。从图6c可以看出,CaCO₃-SA0的共混薄膜表面虽然有少量的粉体团聚,但总体碳酸钙的暴露较少,而CaCO₃-SA3.0的共混薄膜表面虽然分散较为均匀,然而有大量的碳酸钙析出表面。这是因为一方面PBAT为半结晶聚酯^[19],在卷膜延时放置时会存在后结晶收缩行为,使得粉体暴露,另一方面硬脂酸及硬脂酸钙可能诱导酯键断裂,从而分子链间作用力减弱,小分子及碳酸钙易析出膜面,从而引起薄膜边封失效。

3 结论

(1)随着SDC-F7的质量分数从10%提升至20%,共混薄膜穿刺强度下降29.3%,粗粒径滑石粉使共混薄膜的穿刺强度显著下降,AH-1250N6的共混薄膜相对于SDC-F7的薄膜下降33.3%。蒙脱土、硫酸钡体系薄膜穿刺强度与同粒径滑石粉SDC-F7体系相当。

(2)随着滑石粉质量分数的增加,边封保持率逐步下降,SDC-F7添加质量分数为10%,共混薄膜 R_{15d} 为51.4%。SDC-F7提升至20%, R_{15d} 大幅下降至7.7%,AH-1250N6使共混薄膜的 R_{15d} 进一步降低至5.3%。膜表面分析发现,AH-1250N6共混薄膜表面观察到大粒径的矿粉突出,影响表面树脂的熔融黏接,从而使边封性能下降。

(3)CaCO₃-SA0的共混薄膜延时边封性能优异, R_{15d} 达到最高的62.9%,而CaCO₃-SA1.5与CaCO₃-SA3.0的共混薄膜在9d就已出现明显的强度衰减, R_{15d} 分别低至12.7%和7.4%。膜表面观察发现,

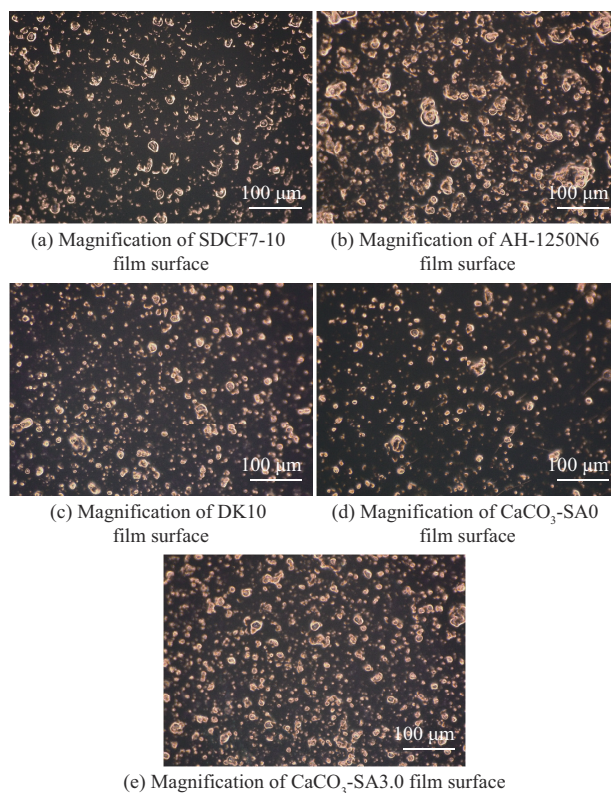
(e) Magnification of CaCO₃-SA3.0 film surface

图6 薄膜(放置第15 d)徕卡表面分析

Fig. 6 Leica surface analysis of films(after 15 days of placement)

CaCO₃-SA0的共混薄膜表面碳酸钙的暴露少,CaCO₃-SA3.0的共混薄膜表面有大量的碳酸钙析出表面。

(4)边封专用降解材料在使用滑石粉、蒙脱土或硫酸钡填充时,建议 D_{50} 优选 $\leq 4.5 \mu\text{m}$,薄膜的放置时间是9 d之内;采用碳酸钙填充时,建议优选硬脂酸活化剂质量分数 $\leq 1.5\%$ 的活化体系,薄膜的放置时间6 d之内。结合薄膜力学性能、延时边封强度和边封手撕等级,优选矿粉种类为细粒径的滑石粉,如SDC-F7,且矿粉质量分数控制在15%以内。

参考文献

- [1] 国家邮政局. 2023年邮政行业发展统计公报解读[EB/OL]. 2024-5-10. <https://www.spb.gov.cn/gjyzj/c100277/202405/2ee4137c9c4b48b08ae120477a0bdf05.shtml>. State Post Bureau. Interpretation of the 2023 postal industry development statistical bulletin[EB/OL]. 2024-5-10. <https://www.spb.gov.cn/gjyzj/c100277/202405/2ee4137c9c4b48b08ae120477a0bdf05.shtml>.
- [2] KWON D. Three ways to solve the plastics pollution crisis[J]. Nature, 2023, 616(7956):234-237.
- [3] MACLEOD M, ARP H P H, TEKMAN M B, et al. The global threat from plastic pollution[J]. Science, 2021, 373(6550):61-65.
- [4] BOZELL J J. Feedstocks for the future - biorefinery production of

- chemicals from renewable carbon[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2008, 36(8):641–647.
- [5] LARRAÑAGA A, LIZUNDIA E. A review on the thermomechanical properties and biodegradation behaviour of polyesters[J]. *European Polymer Journal*, 2019, 121. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2019.109296.
- [6] BOROVNIKOV P I, SVIRIDOV A P, ANTONOV E N, et al. Model of aliphatic polyesters hydrolysis comprising water and oligomers diffusion[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, 159:70–78.
- [7] HU H, LUAN Q Y, LI J Y, et al. High-molecular-weight and light-colored disulfide-bond-embedded polyesters: Accelerated hydrolysis triggered by redox responsiveness[J]. *Biomacromolecules*, 2023, 24(12):5 722–5 736.
- [8] CHEN W W, QI C Z, LI Y, et al. The degradation investigation of biodegradable PLA/PBAT blend: Thermal stability, mechanical properties and PALS analysis[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, 180. DOI:10.1016/j.radphyschem.2020.109239.
- [9] CANMANI P H, SOUZA A G, BARBOSA R F S, et al. Comprehensive insight into surfactant modified-PBAT physico-chemical and biodegradability properties[J]. *Chemosphere*, 2021, 269. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128708.
- [10] BOONPRASERTPOH A, PENTRAKON D, JUNKASEM J. Investigating rheological, morphological and mechanical properties of PBS/PBAT blends[J]. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 2017, 27(1):1–11.
- [11] FELIX DA S B R, GABRIELI DE S A, RANGARI V, et al. The influence of PBAT content in the nanocapsules preparation and its effect in essential oils release[J]. *Food Chemistry*, 2021, 344. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128611.
- [12] BURGOS N, ARMENTANO I, FORTUNATI E, et al. Functional properties of plasticized bio-based poly(lactic acid)-Poly(hydroxybutyrate) (PLA-PHB) films for active food packaging[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(4):770–780.
- [13] OLADAPO B I, DANIYAN I A, IKUMAPAYI O M, et al. Micro-analysis of hybrid characterization of PLA/CHA polymer scaffolds for bone regeneration[J]. *Polymer Testing*, 2020, 83. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106341.
- [14] 陈业中, 陈平绪, 叶南飏, 等. 一种可生物降解材料及其制备方法和应用: CN117343505A[P]. 2024-01-05.
- CHEN Yezhong, CHEN Pingxu, YE Nanbiao, et al. Biodegradable material as well as preparation method and application thereof: CN117343505A[P]. 2024-01-05.
- [15] 刘云虎, 黄绍文, 张波, 等. 一种PBAT纳米复合快递包装袋的研究[J]. *广州化工*, 2023, 51(1):71–73, 146.
- LIU Yunhu, HUANG Shaowen, ZHANG Bo, et al. Study on A PBAT nano composite express packaging bag[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2023, 51(1):71–73, 146.
- [16] 李双利, 张朋. 一种全生物100%全降解复合膜及其加工工艺和应用: CN201910300685.4[P]. 2025-05-20.
- LI Shuangli, ZHANG Peng. A 100% fully biodegradable composite film and its processing technology with applications: CN201910300685.4[P]. 2025-05-20.
- [17] 冒彬, 汤永彬, 刘俊峰. 一种生物降解快递包装袋及其制备工艺: CN201510928923.8[P]. 2025-05-20.
- MAO Bin, TANG Yongbin, LIU Junfeng. A biodegradable express packaging bag and its preparation process: CN201510928923.8 [P]. 2025-05-20.
- [18] 王赞. Zn(II)对聚乳酸结晶和热性能的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- WANG Zan. Impact of Zn(II) ions on crystallization and thermal properties of PLA[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [19] DE MATOS COSTA A R, CROCITTI A, DE CARVALHO L H, et al. Properties of biodegradable films based on poly(butylene succinate) (PBS) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blends[J]. *Polymers*, 2020, 12(10). DOI:10.3390/polym12102317.